

现代生产安全技术丛书

用电安全技术

崔政斌 编



化学工业出版社

安全科学与工程出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

用电安全技术 / 崔政斌编. — 北京 : 化学工业出版社, 2004. 8
(现代生产安全技术丛书)
ISBN 7-5025-5563-3

I. 用… II. 崔… III. 用电管理-安全技术
IV. TM92

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 083218 号

现代生产安全技术丛书

用电安全技术

崔政斌 编

责任编辑 : 杜进祥 郭乃铎

文字编辑 : 吴开亮 丁建华

责任校对 : 陶燕华

封面设计 : 关 飞

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行
安全科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话 : (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 850mm × 1168mm 1/32 印张 16 $\frac{1}{2}$ 字数 385 千字

2004 年 10 月第 1 版 2004 年 10 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5563-3/X · 473

定 价 : 32.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

电是国民经济的重要能源，是工农业生产的原动力。随着我国全面建设小康社会步伐的加快，电的使用范围越来越广泛。与此同时，用电安全具有广泛性和综合性。虽然电的用途很广，可以为人类很好地服务，但若不了解电的基本性质和基本知识，那么在用电的过程中就会带有盲目性，就可能使设备损坏甚至造成触电等人身伤亡事故。因此，在享受电给人类带来光明、带来方便的同时，必须十分重视安全用电问题，只有了解了电的性质，才能驾驭电能，造福于人类。

编者根据用电安全的广泛性、特殊性、综合性和严重性等特点，参考了大量有关的手册、文献和资料，结合用电安全实际，编写了本书。

在编写的过程中，力求做到简明扼要，通俗易懂，讲求实用，结合实际。主要内容包括：用电安全技术概述；电气绝缘、屏护、间距安全技术；电气接地、接零安全技术；电气防火防爆安全技术；电气防雷安全技术；静电防护安全技术；带电作业安全技术；电工维修作业安全技术；电气线路作业安全技术；电气安全用具共 10 章。同时，本书考虑了不同读者的需要，既有理论，又结合实际，使各层次的读者都能阅读和应用。

本书的编写参阅了国内大量的电气安全文献资料，对这些专家学者们表示由衷的感谢。由于编者水平所限，加之时间紧迫，本书不免有错误之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2004 年 4 月

目 录

第一章 用电安全技术概述	1
第一节 用电安全技术的任务和特点	1
一、电能与用电安全	1
二、用电安全技术的基本内容	2
三、用电安全技术的特点	4
第二节 电气事故种类	5
一、触电事故	6
二、雷电事故	11
三、射频伤害	11
四、电气线路或设备事故	11
第三节 触电事故分析	12
一、电气设备安装不合理	12
二、违反安全工作规程	13
三、运行维修不及时	13
四、缺乏安全用电常识	13
五、发生触电事故的规律	13
六、电流对人体的危害	14
七、影响触电程度的因素	16
第四节 安全电压与急救措施	26
一、安全电压	26
二、急救措施	28
第二章 电气绝缘、屏护、间距安全技术	36
第一节 绝缘	36
一、绝缘材料	36

二、绝缘电阻	39
三、加强绝缘	52
第二节 屏护	53
一、屏护装置	53
二、遮栏	54
第三节 间距	55
一、变配电设备间距	55
二、线路间距	58
三、用电设备间距	68
四、检修间距	69
第三章 电气接地、接零安全技术	72
第一节 概述及一般要求	72
一、技术术语	72
二、电气设备接地和接零的作用分析	77
三、电气设备接地接零的要求	81
四、电气设备接地的范围	84
五、电力设备和电力线路接地电阻的要求	84
六、各种中性点工作制比较	90
第二节 配电系统的保护接地和保护接零形式	90
一、文字代号的含义	90
二、分类	90
三、IT 系统安全条件	92
四、保护接零 (TN 方式) 的安装要求	95
五、保护接地 (TT 和 IT 方式) 的安装要求	97
第三节 接地装置	98
一、接地体的分类	98
二、接地体的安装	102
三、高土壤电阻率 ($\rho > 5 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$) 地区的接地	

措施·····	109
四、流散电阻计算·····	111
五、接地装置运行及维护·····	123
六、接地电阻的测量·····	125
第四章 电气防火防爆安全技术 ·····	132
第一节 电气防火防爆安全技术概述 ·····	132
一、火灾与爆炸的有关概念·····	132
二、危险物品·····	134
三、危险场所·····	136
第二节 电气火灾和爆炸 ·····	145
一、引发电气火灾和爆炸的一般原因·····	145
二、防止电气火灾和爆炸的一般措施·····	147
三、电气火灾的扑灭·····	153
第三节 电气设备的防火防爆 ·····	155
一、电力变压器的防火防爆·····	155
二、电动机的防火·····	159
三、电压短路器的防火防爆·····	160
四、电力电缆的防火防爆·····	163
五、电气线路的防火措施·····	167
六、照明装置的防火措施·····	168
七、电热设备的防火措施·····	171
八、电焊的防火措施·····	172
九、蓄电池室防火防爆·····	173
第五章 电气防雷安全技术 ·····	176
第一节 雷电现象及防雷设备 ·····	176
一、雷电现象及危害·····	176
二、防雷等级的划分·····	182
三、接闪器·····	184

四、引下线 and 防雷接地装置	199
五、避雷器	203
第二节 防雷保护措施	218
一、架空电力线路的防雷保护	218
二、变电所（站）的防雷保护	222
三、高压直配电机的防雷保护	231
四、各类建筑物的防雷保护	238
五、特殊构筑物的防雷接地	242
第六章 静电防护安全技术	246
第一节 静电的产生、积聚和消散	246
一、固体静电	246
二、粉体静电	252
三、液体静电	256
四、静电的消散	264
第二节 静电引起的故障和灾害	273
一、静电引起的生产故障	273
二、静电引起的电击	277
三、静电放电引起的着火、爆炸灾害	280
四、静电安全界限	288
第三节 静电的控制与消除	290
一、防止形成危险性混合物	291
二、工艺控制	294
三、静电接地	300
四、增湿	308
五、化学防静电剂	311
六、静电消除器	314
七、防止人体带电	347
八、静电屏蔽	350

第七章 带电作业安全技术	354
第一节 一般规定及安全措施	354
一、带电作业	354
二、带电作业一般规定	355
三、带电作业一般技术措施	357
第二节 等电位作业	359
一、等电位作业基本原理及适用范围	359
二、屏蔽服及使用	360
三、等电位作业的基本方式	362
四、等电位作业安全技术措施	363
五、等电位作业安全注意事项	366
第三节 带电断、接引线	367
一、带电断、接引线的基本原则	367
二、带电断、接空载线路的规定	367
三、带电断、接其他电气设备的规定	369
第四节 带电短接设备	370
一、带电短接断路器和隔离开关	370
二、带电短接阻波器	372
第五节 带电水冲洗	372
一、带电水冲洗的一般规定	373
二、带电水冲洗的方法	380
第六节 带电爆炸压接和感应电压防护	381
一、雷管在电场中的自爆及预防措施	382
二、爆炸压接对空气绝缘的影响及安全措施	383
三、带电爆炸压接安全注意事项	384
四、感应电压防护	385
第七节 高架绝缘斗臂车带电作业	387
一、高架绝缘斗臂车	387

二、高架绝缘斗臂车带电作业安全规定·····	387
三、操作绝缘斗臂车注意事项·····	389
第八节 带电气吹清扫 ·····	389
一、带电气吹清扫用具的性能试验·····	389
二、带电气吹清扫喷嘴的基本要求·····	390
三、对带电气吹清扫用锯末辅料的要求·····	390
四、空气压缩机的检查和调试·····	391
五、带电气吹清扫操作人员安全防护·····	391
六、带电气吹清扫安全注意事项·····	391
第九节 带电检测和保护间隙 ·····	392
一、带电检测绝缘子·····	392
二、保护间隙·····	394
第十节 低压带电作业 ·····	396
一、低压设备带电作业安全规定·····	396
二、低压线路带电作业安全规定·····	397
三、低压带电作业注意事项·····	398
第八章 电工维修作业安全技术 ·····	400
第一节 电气安全作业一般措施 ·····	400
一、加强安全教育·····	400
二、执行安全工作规程·····	400
三、确保设计安装质量·····	400
四、加强运行维护工作·····	400
五、选用安全电压和合适类型电器·····	401
六、采用电气安全用具·····	401
七、宣传安全用电知识·····	401
第二节 变电所电气安全作业措施 ·····	401
一、变电所安全作业的组织措施·····	401
二、变电所安全作业的技术措施·····	406

第三节 内线安装作业安全措施	412
一、照明灯安装作业要点	412
二、隔离开关、负荷开关、高压断路器安装安全 作业要点	414
三、配电盘、开关柜就位与安装安全作业要点	414
四、电气二次接线、安装安全工作要点	415
五、电能表现场校验工作安全作业要点	416
六、验电、装设地线工作安全作业要点	417
七、电气测量工作安全作业要点	418
八、配变电站（箱式配电站）工作安全作业要点	420
九、开关设备检修安全作业要点	422
十、交流维修电工安全作业要点	425
十一、直流维修电工安全作业要点	427
十二、电动机安全作业要点	428
十三、三相异步电动机故障诊断及处理方法	429
十四、家用电器安装使用安全作业要点	435
第九章 电气线路作业安全技术	438
第一节 线路电气安全作业措施	438
一、保证线路工作安全的组织措施	438
二、线路安全作业的技术措施	442
第二节 线路施工作业	443
一、砍伐树木工作安全作业要点	443
二、杆塔基础施工安全作业要点	444
三、组立及拆除水泥杆工作安全作业要点	445
第三节 线路巡视、维护作业	447
一、线路巡视工作安全作业要点	447
二、带电杆塔上作业	448
三、停电清扫绝缘子、更换绝缘子安全作业要点	448

四、放线、紧线和撤线工作安全作业要点·····	449
五、外线测量工作安全作业要点·····	450
六、室内线路安装安全作业要点·····	451
七、电缆线路施工安全作业要点·····	453
八、在建工程与外电线路安全防护作业要点·····	456
第十章 电气安全用具 ·····	458
第一节 电气安全用具安全操作要点 ·····	458
一、电气安全用具的分类·····	458
二、电气安全用具安全操作要点·····	459
第二节 漏电保护 ·····	469
一、漏电保护装置的原理·····	470
二、漏电保护装置的分类·····	473
三、漏电保护装置的主要技术参数·····	475
四、漏电保护装置的应用·····	477
第三节 安全标志 ·····	484
一、安全标志·····	484
二、安全标志牌的使用·····	485
附录 A 发电厂第一种工作票格式 ·····	499
附录 B 发电厂第二种工作票格式 ·····	501
附录 C 电力线路第一种工作票 ·····	502
附录 D 电力线路第二种工作票 ·····	504
附录 E 发电厂倒闸操作票格式 ·····	505
附录 F 供电局倒闸操作票格式 ·····	506
参考文献 ·····	507

第一章 用电安全技术概述

电能是国民经济的重要能源，随着我国全面建设小康社会的快速发展，电几乎进入到人们生产和生活的所有领域。人们离不开电，为了安全，为了求得进一步发展，必须重视用电安全技术。用电安全技术是研究防止各种电气事故、研究使用电气的方法和解决生产中安全问题的科学。用电安全工程学是安全科学技术学科的重要组成部分，用电安全技术的使命是直接解决人们生产和生活中的安全问题，属于应用科学范畴。

本章将讨论用电安全技术的任务、特点和电气事故种类，并简要介绍用电安全技术基础知识。

第一节 用电安全技术的任务和特点

用电安全技术学科是在人们生产和生活实践中发展起来的。现代科学技术的发展带来了更先进的用电安全技术措施。以防止触电事故为例，接地、绝缘、间隔等都是传统的安全措施，直至现在这些措施也仍然是有效的、可行的。而随着自动化元件和电子元件的广泛应用，出现的漏电保护装置又为防止触电事故及其他事故提供了新的途径。另外，新技术的应用也提出了一些新的用电安全问题，如电磁场安全问题和静电安全问题等。因此，用电安全技术既有其古老的一面，又具有不断向更高水平发展的、生命力极强的特征。

一、电能与用电安全

电能是一种现代化的能源，它广泛应用于工农业生产和人民群众生活的各个方面，对促进国民经济的发展和改善人民生

活质量均起着重要的作用。一个国家的经济越发展，现代化水平越高，对电力的需求就越大。

电能作为动力，能不断提高工农业生产的机械化、自动化程度，有效地促进国民经济各部门的技术改造，大幅度地提高劳动生产率。利用电能，还可以保证产品质量的稳定性，改善劳动者的劳动条件，为劳动者提供清洁和安全的环境。电能也是提高人民生活水平和建设政治文明、精神文明的工具。现今，我国电化教育和家用电器越来越普及，特别是电脑互联网的普及，使人民的生活用电越来越多，电能的广泛应用加速了科学技术的发展，改变了科学技术的状况。

人们在用电的同时，会遇到各种各样的安全问题。电能是由一次能源转换得来的二次能源，在应用这种能源时，如果处理不当，在其传递控制、驱动等过程中将会遇到障碍，即会发生事故，严重的事故将导致生命的损失或重大经济损失。例如，电能直接作用于人体，将造成电击；电能转化为热能作用于人体，将造成烧伤或烫伤；电能离开预定的通道，将构成漏电、接地或短路，均可能造成触电或火灾等事故的发生。因此，在用电的同时，必须充分考虑安全问题。

大部分用电安全问题是在电力工业发展的过程中提出来的。但在一些非用电场所或电路正常的情况下，由于电能的释放也会造成灾害。例如，雷电、静电、电磁场危害等方面的安全工作也是不容忽视的。总之，灾害是由能量造成的，由电流的能量或静电荷的能量造成的事故属电气事故。人们在研究和利用电能的同时，必须研究防止各种电气事故的发生，使电更好地为人类的生产、生活和生存服务。

二、用电安全技术的基本内容

为了搞好用电安全工作，必须明确用电安全技术这门学科的任务和研究的对象。电气安全技术主要包括两方面的任务：

一方面是研究各种电气事故，研究各种电气事故发生的机理、原因、构成、规律、特点和防治措施；另一方面是研究用电气的方法来解决安全生产问题，也就是研究运用电气监测、电气检查和电气控制的方法来评价系统的安全性或解决生产中的安全问题。电气安全技术是一项涉及面很广的技术，不论是流电还是静电，不论是交流电还是直流电，不论是高压电还是低压电，不论是强电还是弱电，不论是工业用电还是农业用电，不论是大企业还是小企业，也不论是生产用电还是生活用电，都会遇到电气安全问题。这就是说，电气安全技术研究的对象不是单一的。另外，在一些不用电的场合也有电气安全问题，还要考虑用电气作为手段来解决其他安全问题，从而导致了电气安全技术的庞杂性和综合性，使得这门学科同很多学术领域，包括技术管理在内都有很密切的关系。

新中国成立以来，特别是改革开放以来，我国电力工业取得了很大的发展，但与某些发达国家相比还有很大的差距，我国人均用电量还不到美国的 $1/25$ 。我国的用电安全水平与电力工业水平还不相适应，同某些发达国家比起来还要更落后一些。当前，技术先进的国家每生产 30 亿度电触电死亡 1 人，而我国约生产 1 亿度电就触电死亡 1 人，安全用电水平相差数十倍。也就是说，随着我国现代化建设事业的发展，随着我国全面建设小康社会步伐的加快，电能在生产和生活中的应用一定要有一个大幅度的发展。与此同时，为了防止各类用电事故的发生，保护劳动者的安全与健康，用电安全也必须有一个与之相适应的发展。

在安全生产领域，用电安全工作是一项重要的工作。在所有工伤事故中，用电事故占有不小的比例。据有关安全生产管理部门统计，触电死亡在全国工矿企事业单位因工事故死亡人数中占第 5 ~ 6 位，约占 6% ~ 8% 左右，如果加上农村用电死

亡人数和非生产触电死亡人数，数字会更大、更惊人的。

此外，我国用电方面的标准和规范还不十分完善，有些与用电安全密切相关的问题尚未列入标准和规范中；有些问题在不同部门或不同地区的标准或规范中的提法不同；用电方面的制度也不够健全，这些情况给实际工作者带来很多困难，甚至造成混乱。因此，用电安全工作者必须做更多的工作，必须认真研究标准规程的运用和管理制度的落实。

三、用电安全技术的特点

与其他学科相比，用电安全技术具有抽象性、广泛性、综合性和严重性的特点。

1. 抽象性

由于电具有看不见、听不见、嗅不着的特性，因此比较抽象，以致用电事故往往带来某种程度的神秘性，使人一下子难以理解。例如，物体打击能使人受伤，甚至使人致命，这是很容易被理解的，但是一根很细的电线能使人电击致死，静电火花能引起爆炸之类的用电事故，与前者比较起来难理解得多。电磁辐射更具有感觉不到的特点，而且从受到伤害到发病之间有一段潜伏期，人们可能在相当长的时间内对周围严重的电磁环境没有觉察。用电伤害的这一特征无疑会增加危害的严重性。抽象的特点会加大技术上的难度，并加大安全培训教育的难度。

2. 广泛性

用电安全技术的这一特点可以从两个方面来理解。一方面是电的应用极为广泛，没有电的广泛应用，生产和生活的现代化都是不可能实现的。为了提高劳动生产率，减轻劳动强度和改善劳动条件，实现现代化和全面进入小康社会，电力作为关系着国计民生的重要产品需要有一个大的发展。但是，就电气设备而言，不得不特别注意研究防止各种电气伤害的危害。例

如，一些家用电气的使用，将会带来触电、火灾等危险；电动工具、医疗电器的广泛使用会增加触电的危险；各种高频设备的使用会带来辐射伤害的问题等。这就是说，在人们的生产和生活中，处处要用电，处处会遇到电气安全的问题。另一方面，用电安全技术是一门涉及多种科学的边缘科学，研究电气安全不仅要研究电力，而且要研究力学、生物学、医学等学科。用电安全技术不仅与电力工业密切相关，而且为石油、化工、冶金、机械和电子等行业所必需。

3. 综合性

用电安全技术是一项综合性的工作。有工程技术工作的一面，也有组织管理的一面。工程技术工作和组织管理是相辅相成的，有着十分密切的联系。在工程技术方面，用电安全技术的重要任务是完善传统的用电安全技术，研究新式的用电安全技术和自动防护技术，研究新出现的用电安全技术问题，研究电气安全检测和监测技术以及研究获得各种安全条件的电气方法等。在管理方面也需要做很多工作：应当加强各部门的协调，逐步实现系统化电气安全，引进安全系统工程的理论和方法，加强对人机工程的研究等。

4. 严重性

电力工业的高速发展必将促进安全用电工作的发展，用电事故的严重性决定了用电安全的迫切性。据安全管理部门统计，我国电气火灾约已超过火灾总数的 20%，电气火灾造成的经济损失所占比例还要更高一些。因此，电气事故的严重性必须引起用电作业人员和用电安全管理人员的高度重视。

第二节 电气事故种类

电气事故可以按照不同的方式分类。按照灾害形式，可分

为人事事故、设备事故、火灾事故、爆炸事故等；按照电路状况，可分为短路事故、断线事故、接地事故、漏电事故等。考虑到事故是由外部能量作用于人体或系统内能量传递发生故障造成的，所以能量是造成事故的基本因素。从这个角度出发，电气事故大致可分为以下几类。

一、触电事故

触电事故是由电流的能量造成的，触电是电流对人体的伤害。电流对人体的伤害可分为电击和电伤。电击是电流通过人体内部，破坏人的心脏、神经系统、肺部的正常工作造成的伤害。人身触及带电的导线、漏电设备的外壳或其他带电体，以及由于雷击或电容器放电，都可能导致电击。触及正常带电体的电击称为直接电击，触及故障带电体的电击称为间接电击。电伤是电流的热效应、化学效应及机械效应对人体外部造成的局部伤害，包括电弧烧伤、烫伤、电烙印等。绝大部分触电事故是电击造成的，通常所说的触电事故基本上是指电击而言的。按照人体触及带电体的方式和电流通过人体的途径，触电可以分为以下几种情况。

1. 直接接触触电

(1) 单相触电 人体接触电气设备的任何一相带电导体所发生的触电、称为单相触电。对于中性点直接接地的电网及中性点不接地的低压电网都能发生单相触电。如图 1-1 和图 1-2 所示。

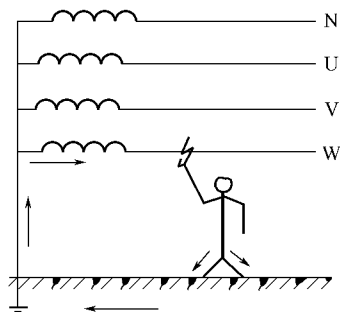


图 1-1 中性点直接接地单相触电

(2) 两相触电 人体同时接触带电的任何两相电源，不论中性点是否接地，人体受到的电压是线电压，触电后果往

往很严重。两相触电一般比单相触电事故少一些，如图 1-3 所示。

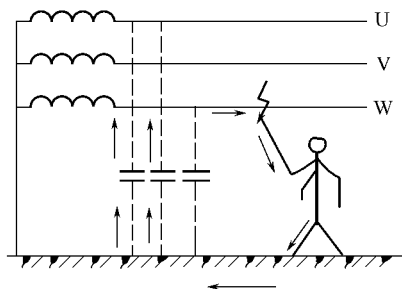


图 1-2 中性点不接地单相触电

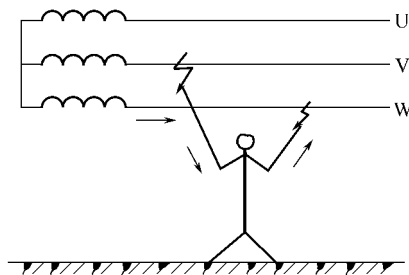


图 1-3 两相触电

2. 间接接触触电

当电气设备的绝缘在运行中发生故障而损坏时，使电气设备本来在正常工作状态下不带电的外露金属部件（外壳、构架、护罩等）呈现危险的对地电压，当人体触及这些金属部件时，就构成间接触电，亦称为接触电压触电。

在低压中性点直接接地的配电系统中，电气设备发生碰壳短路将是一种危险的故障。如果该设备没有采取接地保护，一旦人体接触外壳时，加在人体上的接触电压近似等于电源对地

电压，这种触电的危险程度相当于直接接触触电，完全有可能导致人身伤亡。

根据历年来触电伤亡事故的统计分析，在低压配电系统中，触电伤亡事故主要是间接接触所引起的。因此，防止间接触电事故是降低触电事故的重要方面。

3. 跨步电压触电

实际上跨步电压触电也是属于间接触电形式。当两脚跨在为接地电流所确定的各种电位的地面上，且其跨距为 0.8m 时，两脚间的电位差，称为跨步电压，由跨步电压造成的触电称为跨步电压触电。如图 1-4 所示。

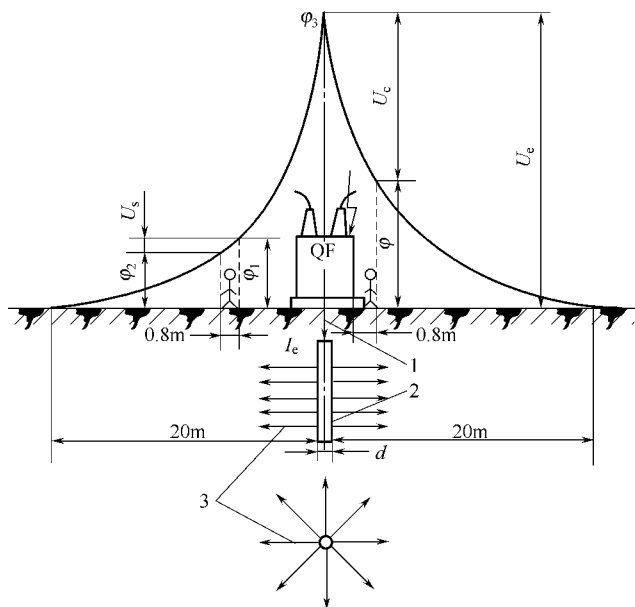


图 1-4 接地电流由单根接地体向四周流散的情况

1—接地导线；2—接地体；3—流散电流

U_e —对地电压； I_e —接地电流；QF—油断路器

在图 1-4 中，跨步电压为

$$U_s = \varphi_1 - \varphi_2$$

式中 U_s ——跨步电压，V；

φ_1 ——人左脚所站处的电位，V；

φ_2 ——人右脚所站处的电位，V。

接触电压则是指在接地电流回路上，一人同时触及的两点之间的电位差。接触电压通常以水平方向为 0.8m，垂直方向 1.8m 计算。图 1-4 中的 U_c 表示人接触到油断路器 QF 时的接触电压，等于油断路器 QF 的电位 φ_3 和脚所站地方的电位 φ 之差，即

$$U_c = \varphi_3 - \varphi$$

接地电流是指由于绝缘损坏而发生的经故障点流入地中的电流，亦称故障接地电流。在图 1-4 中。接地电流经油断路器 QF 的外壳、接地导线、钢管接地体而散流入地中。

下列情况和部位可能发生跨步电压触电。

① 带电导体特别是高压导体故障接地或接地装置流过故障电流时，流散电流在附近地面各点产生的电位差，可造成跨步电压触电。

② 正常时有较大工作电流流过的接地装置附近，流散电流在地面各点产生的电位差，可造成跨步电压触电。

③ 防雷装置遭受雷击，或高大设施、高大树木遭受雷击时，极大的流散电流在其接地装置或接地点附近地面产生的电位差，可造成跨步电压触电

跨步电压的大小受接地电流大小、人体所穿的鞋和地面特征、两脚之间的跨距、两脚的方位以及离接地点的远近等因素的影响。人的跨距一般按 0.8m 考虑。由于跨步电压受很多因素的影响，以及由于地面电位分布的复杂性，几个人在同一地带（如在同一棵大树下，或在同一故障接地点附近）遭到跨

步电压触电完全可能出现截然不同的后果。

人体受到跨步电压触电时，电流是沿着人的下身，从脚到脚与大地形成回路，使双脚发麻或抽筋并很快倒地。跌倒后由于头脚之间的距离大，使作用于人身体上的电压增高，电流相应增大，并有可能使电流通过人体内部重要器官而出现致命的危险。

4. 剩余电荷触电

电气设备的相间绝缘和对地绝缘都存在电容效应。由于电容器具有储存电荷的性能，因此在刚断开电源的停电设备上，都会保留一定量的电荷，称为剩余电荷。如此时有人触及停电设备，就可能遭受剩余电荷电击。另外，如大容量电力设备和电力电缆、并联电容器等在摇测绝缘电阻后或耐压试验后都会有剩余电荷的存在。设备容量越大、电缆线路越长，这种剩余电荷的积累电压越高。因此，在摇测绝缘电阻或耐压试验工作结束后，必须注意充分放电，以防剩余电荷电击。

5. 感应电压触电

由于带电设备的电磁感应和静电感应作用，能使附近的停电设备上感应出一定的电位，其数值的大小决定于带电设备电压的高低、停电设备与带电设备两者接近程度的平行距离、几何形状等因素。感应电压往往是在电气工作者缺乏思想准备的情况下出现的，因此，具有相当的危险性。在电力系统中，感应电压触电事故屡有发生，甚至造成伤亡事故。

6. 静电触电

静电电位可高达数万伏至数十万伏，可能发生放电，产生静电火花，引起爆炸、火灾，也能造成对人体的电击伤害。由于静电电击不是电流持续通过人体的电击，而是由于静电放电造成的瞬间冲击性电击，能量较小，通常不会造成人体心室颤动而死亡。但是其往往造成二次伤害，如高处坠落或其他机械

性伤害，因此同样具有相当的危险性。

二、雷电事故

雷电事故是指发生雷击时，由雷电放电而造成的事故。雷电放电具有电流大（可达数十千安至数百千安）、电压高（300 ~ 400kV）、陡度高（雷击冲击波的波首陡度可达 500 ~ 1000kA/ μ s）、放电时间短（30 ~ 50 μ s）、温度高（可达 20000 ）等特点，释放出来的能量可形成极大的破坏力，除可能毁坏建筑设施和设备外，还可能伤及人、畜，甚至引起火灾和爆炸，造成大规模停电等。因此，电力设施、高大建筑物、特别是有火灾和爆炸危险的建筑物和工程设施，均需考虑防雷措施。

三、射频伤害

射频伤害即电磁场伤害。射频伤害是由电磁场的能量造成的，人体在交频电磁场作用下吸收辐射能量，会受到不同程度的伤害，其症状主要是引起人的中枢神经功能失调，明显表现为神经衰弱症状。如头晕、头痛、乏力、睡眠不好等，还能引起植物神经功能失调的症状，如多汗、食欲不振、心悸等。此外，还发现部分人有脱发、视力减退、伸直手臂时手指轻微颤动、皮肤划痕异常、男性性功能减退、女性月经失调等症状，还发现心血管系统有某些异常的情况。在特高频电磁场照射下，心血管系统症状比较明显，如心动过速或过缓、血压升高或降低、心悸、心区有压迫感、心区疼痛等。

四、电气线路或设备事故

电气线路或设备故障可能发展成为事故，并可能危及人身安全。

1. 用户影响系统的事故

这类事故是指由于用电单位内部发生电气设备或线路事故，造成公用网络及其他单位停电，或引起系统波动，甚至电

网解列的重大事故。例如用户的大型起重吊装设施触及系统高压电网，造成接地或短路事故，引起系统变电站掉闸、甚至系统的电网解列；另一种是用户内部短路事故，继电保护拒动越级掉闸，造成上级变电所停电，使系统网络上的其他用户停电；再一种情况是用户出了重大短路事故，使部分地区电压大幅度下降，迫使其他用户电气开关低压电释放，使用户用电设备大量停止运转。

2. 用户全厂范围的停电事故

这类事故是指由于用户本身内部原因，造成全厂停电并影响生产事故。但下列两种情况可不属全厂停电事故。

① 双路电源供电的单位，其中一路电源因内部故障断电后，另一路电源能及时投入运行，而未影响生产的。

② 备有电源自动重合闸装置的用户，在出现内部故障全厂停电后，自动重合闸成功，恢复正常供电的。

3. 重大设备损坏事故

这类事故是指大型用户（供电容量在 10000kVA 及以上的工矿企业）的一次设备发生损坏事故，如受电主变压器以及电源侧的主断路器等电气设备的损坏，这类设备损坏时，必然导致全厂停电，经济损失很大。

第三节 触电事故分析

发生触电事故的原因很多，主要有以下几个方面。

一、电气设备安装不合理

例如室内、外配电装置的最小安全净距不够；室内配电装置各种通道的最小宽度小于规定值；架空线路的对地距离及交叉跨越的最小距离不合要求；电气设备的接地装置不符合规定；落地式变压器无围栏；电气照明装置安装不当，如相线未

接在开关上，灯头离地面太低；电动机安装不合格；导线穿墙无套管；电力线和广播线同杆架设；电杆梢径过小等。

二、违反安全工作规程

例如非电气工作人员操作和维修电气设备；带电移动或维修电气设备，带电登杆或爬上变压器台作业；在线路带电情况下，砍伐靠近线路的树木，在导线下面修建房屋、打井、堆柴；使用行灯和移动式电动工具不符合安全规定；在带电设备附近进行起重工作时，安全距离不够；在全部停电和部分停电的电气设备上工作来完成组织措施和技术措施，申请送电后又进行工作；带负荷分合隔离开关或跌开式熔断器，带临时接地线合闸隔离开关和油断路器，带电将两路电源误并列等误操作；私自乱拉乱接临时电线；低压带电作业的工作位置、活动范围、使用工具及操作方法不正确等。

三、运行维修不及时

例如架空线路被大风刮断或外力扯断。造成断线接地或电话线、广播线搭连，电杆倾倒，木杆腐朽等没有及时修复；电气设备外壳损坏，导线绝缘老化破损，致使金属导体外露等没有及时发现和修理。

四、缺乏安全用电常识

例如家用电器不按使用说明书的要求接线；私设电网防盗和用电捕鱼、捕鼠；将湿衣服晒在电线上；用活树当电杆等。

五、发生触电事故的规律

1. 农村触电事故多于城市

主要原因是农村用电条件差、设备因陋就简、技术水平低、缺乏安全用电知识。

2. 季节性明显

一年当中，春冬两季触电事故较少。夏秋两季，特别是7、8、9三个月，触电事故较多，主要原因是这个期间雷雨

多，空气湿度大，降低了电气设备的绝缘性能，并且人体多汗，皮肤电阻下降，易导电，衣着单薄，身体裸露部分较多，增加了触电的机会。

3. 单相触电事故多

据统计资料表明，单相触电事故占触电事故的 70% 以上。

4. 触电事故多发生在电气连接部位

如分支线、电缆线、灯头、插头、电线接头、熔断器、接触器等处。

5. 低压触电事故多于高压

主要原因是低压电网广、低压设备多、人们接触的机会多。有些人对低压电气设备有麻痹大意思想，设备一旦有缺陷，就易发生触电事故。据资料统计，低压设备引起的触电事故占触电事故总数的 80% 以上。

6. 与用电环境有密切的关系

在高温高湿、多粉尘及有腐蚀性气体的用电环境中，触电事故极易发生。

六、电流对人体的危害

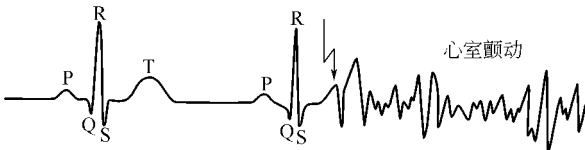
触电对人体的伤害形式，一般可分为电击和电伤两种。

1. 电击

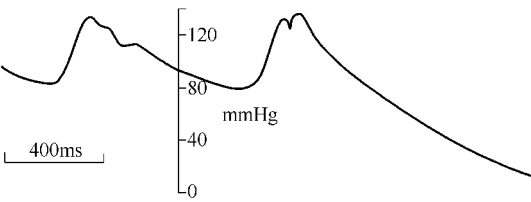
电流直接通过人体的伤害称为电击。电流通过人体内部造成人体器官的损伤，破坏人体内细胞的正常工作，主要表现为生物学效应。电流通过人体，会引起麻感、针刺感、压迫感、打击感、痉挛、疼痛、呼吸困难、血压异常、昏迷、心律不齐、窒息、心室颤动等症状。

心室颤动是小电流电击使人致命最多见和最危险的原因。发生心室颤动时，心脏每分钟颤动 1000 次以上，但幅值很小，而且没有规则，血液实际上已终止循环。发生心室颤动时的心电图如图 1-5 所示，心室颤动是在心电图上 T 波前半部发

生的。



(a) 心电图



(b) 血压图

图 1-5 心电图和血压图

1mmHg = 133.3224Pa

当人体遭受电击时，如果有电流通过心脏，可能直接作用于心肌，引起心室颤动；如果没有电流通过心脏，亦可能经中枢神经系统反射作用于心肌，引起心室颤动。

由于电流的瞬间作用而发生心室颤动时，呼吸可能持续 2 ~ 3min. 在其丧失知觉前，有时还能叫喊几声，有的还能走几步，但是，由于其心脏已进入心室颤动状态，血液已终止循环、大脑和全身迅速缺氧，病情将急剧恶化，如不及时抢救，很快将导致死亡。

2. 电伤

电流转换为其他形式的能量作用于人体的伤害称为电伤。电伤是由电流的热效应、化学效应、机械效应等对人造成的伤害。

(1) 电灼伤 灼伤是电流的热效应造成的伤害，分为电流灼伤和电弧烧伤两种情况。电流灼伤是人体与带电体接触，电流通过人体由电能转换成热能造成的伤害。电弧烧伤是由弧光放电造成的烧伤，分为直接电弧烧伤和间接电弧烧伤两种情况。直接电弧烧伤是带电体与人体之间发生电弧，有电流流过人体的烧伤；间接电弧烧伤是电弧发生在人体附近对人体的烧伤，包括熔化了了的炽热金属溅出造成的烫伤。

(2) 电烙印 人体与带电体接触的部位留下的永久性斑痕，斑痕处皮肤失去弹性，表皮坏死。

(3) 皮肤金属化 由于电流的作用使熔化和蒸发了的金属微粒，渗入人体的皮肤，使皮肤坚硬和粗糙而呈现特殊的颜色。皮肤金属化多是在弧光放电时发生和形成的，在一般情况下，此种伤害是局部性的。

(4) 机械性损伤 电流作用于人体，由于中枢神经反射和肌肉强烈收缩等作用导致的机体组织断裂、骨折等伤害。

(5) 电光眼 当发生弧光放电时，由红外线，可见光、紫外线对眼睛的伤害，电光眼表现为角膜炎或结膜炎。

七、影响触电程度的因素

1. 通过人体的电流值

通过人体的电流越大、热的生理反应和病理反应越明显，引起心室颤动所需的时间越短，致命的危险性越大。按照人体呈现的状态，可以将人体通过的电流分为三个级别。

(1) 感知电流和感知阈值 在一定概率下，通过人体引起人有任何感觉的最小电流（有效值），称为该概率下的感知电流，感知电流的最小值称为感知阈值。

感知电流的概率曲线如图 1-6 所示。概率为 50% 时，成年男性平均感知电流约为 1.1mA，成年女性约为 0.7mA。

(2) 摆脱电流和摆脱阈值 当通过人体的电流超过感知

电流时，肌肉收缩增加、刺痛感觉增强、感觉部位扩展。当电流增大到一定程度时，由于中枢神经反射和肌肉收缩、痉挛，触电人将不能自行摆脱带电体。在一定概率下，人触电后能自行摆脱带电体的最大电流，称为该概率下的摆脱电流，摆脱电流的最小值，称为摆脱阈值。

摆脱电流与人体生理特征、电极形状、电极尺寸等因素有关。

摆脱电流的概率曲线如图 1-7 所示。概率为 50% 时，成年男性的摆脱电流约为 15.5mA，成年女性约为 10.5mA；概率为 99.5% 时，成年男性约为 22.5mA，成年女性约为 15mA。

(3) 室颤电流和室颤阈值 通过人体引起心室发生纤维性颤动的最小电流称为室颤电流，室颤电流的最小值称为室颤阈值。室颤电流是短时间内使人致命的最小电流。室颤电流受电流持续时间、电流途径、电流种类、人体生理特征等因素的影响。

当电流持续时间超过心脏搏动周期时，人的室颤电流约为 50mA；当电流持续时间短于心脏搏动周期时，人的室颤电流约为数百毫安；当电流持续时间在 0.1s 以下时，如电击发生在心脏易损期，500mA 以上的电流可引起心室颤动。

对于从左手到双脚的电流途径，可按图 1-8 所示划分电流

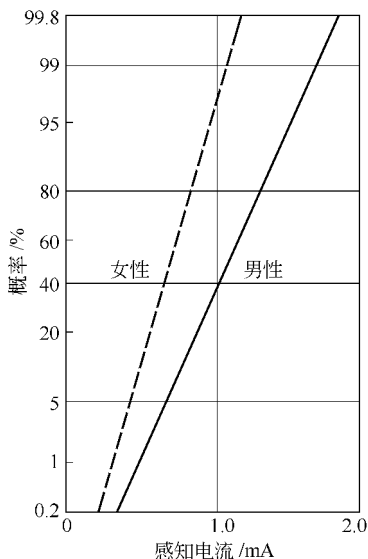


图 1-6 感知电流概率曲线

对人体作用的带域。

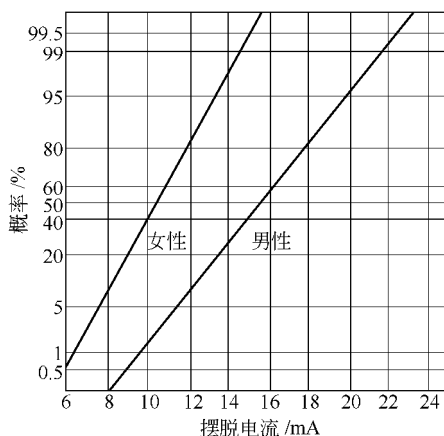


图 1-7 摆脱电流概率曲线

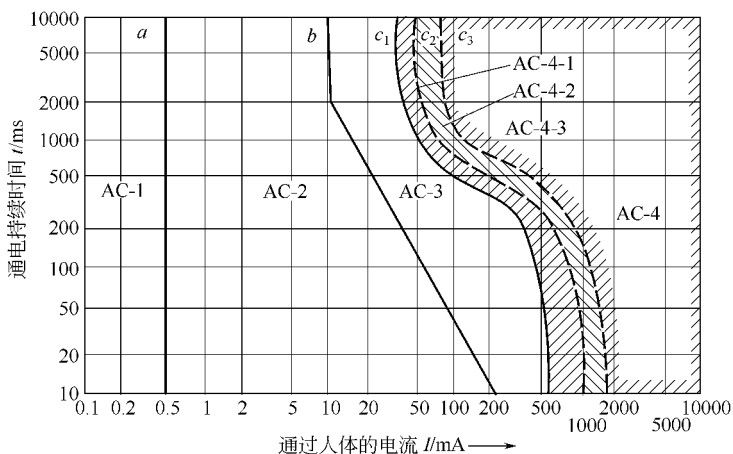


图 1-8 交流电流对人体作用的带域划分

如图 1-8 所示，a 线以左的 AC-1 区为无生理效应、没有感觉的带域。a 线与 b 线之间的 AC-2 区通常是有感觉，但没

有害的生理效应的带域。b 线与 c_1 线之间的 AC-3 区通常是没有机体损伤、不发生心室颤动，但可能引起肌肉收缩和呼吸困难，可能引起心脏组织和心脏脉冲传导障碍，还可能引起心房颤动，以及转变为心脏停止跳动等可复性病理效应的带域。 c_1 线以右的 AC-4 区里除 AC-3 区各项效应外，还有心室颤动危险的带域。 c_1 线上 500mA、100ms 点相应于心室颤动的概率为 0.14%； c_2 线相应于心室颤动的概率为 5%； c_3 线相应于心室颤动的概率为 50%。相应于 AC-4 区内的电流和时间，还可能引起呼吸中止、心脏停止跳动、严重烧伤等病理效应。图中 b 线不是摆脱阈值。 c_1 线的特征是：当电击持续时间从 10ms 增至 100ms 时，室颤电流从 500mA 降至 400mA；当电击持续时间从 1s 增至 3s 时，室颤电流从 50mA 降至 40mA；两段曲线之间另用平滑曲线连接起来。

2. 电流作用于人体的时间

电流在人体内作用的时间越长，电击危险性越大，主要原因如下。

(1) 人体电阻减小 电击持续时间越长，人体电阻由于出汗、击穿、电解而下降，电击危险性越大。

(2) 能量增加 电流持续时间越长，体内积累外界电能越多，伤害程度增高，表现为室颤电流减小。

(3) 中枢神经反射增强 电击持续时间越长，中枢神经反射越强烈，电击危险性越大。

工频电流对人体的作用见表 1-1。当发现有人触电时，应当迅速使触电者摆脱带电体。

3. 电流在人体内流通的途径

人体在电流的作用下，没有绝对安全的途径。电流通过心脏会引起心室颤动乃至心脏停止跳动而导致死亡；电流通过中枢神经及有关部位，会引起中枢神经强烈失调而导致死亡；电

流通过头部，严重损伤大脑，亦可能使人昏迷不醒而死亡；电流通过脊髓会使人截瘫；电流通过人的局部肢体亦可能引起中枢神经强烈反射而导致严重后果。

表 1-1 工频电流对人体的作用

电流 /mA	电流持续时间	生 理 效 应
0 ~ 0.5	连续通电	没有感觉
0.5 ~ 5	连续通电	开始有感觉,手指、手腕等处有麻感,没有痉挛,可以摆脱带电体
5 ~ 30	数分钟以内	痉挛,不能摆脱带电体,呼吸困难,血压升高,是可以忍受的极限
30 ~ 50	数秒 ~ 数分	心脏跳动不规则,昏迷,血压升高,强烈痉挛,时间过长即引起心室颤动
50 ~ 数百	低于心脏搏动周期	受强烈刺激,但未发生心室颤动
	超过心脏搏动周期	昏迷,心室颤动,接触部位留有电流通过的痕迹
超过数百	低于心脏搏动周期	在心脏易损期触电时,发生心室颤动,昏迷,接触部位留有电流通过的痕迹
	超过心脏搏动周期	心脏停止跳动,昏迷,可能致命的电灼伤

通过心脏的电流越多、电流路线越短的途径是电击危险性越大的途径。不能认为局部的触电是无危险的。

4. 人体本身的状况

人的健康状况和精神神态，对于触电的轻重程度也有极大的关系，患有心脏病、肺病、内分泌失常、中枢神经系统疾病及酒醉者等，其触电的危险性最大。所以，对于电气工作人员应当经常或定期进行严格的体格检查。

5. 电流种类的影响

不同种类电流对人体伤害的构成不同，危险程度也不同，但各种电流对人体都有致命危险。

(1) 直流电流的作用 在接通和断开瞬间，直流感知阈

值约为 2mA。300mA 以下的直流电流没有确定的摆脱阈值，300mA 以上的直流电流将导致不能摆脱或数秒至数分钟以后才能摆脱带电体。电流持续时间超过心脏搏动周期时，直流室颤电流为交流的数倍；电流持续时间在 200ms 以下时，直流室颤电流与交流大致相同。

(2) 100Hz 以上电流的作用 通常采用频率因数评价交频电流的危险性。频率因数是某一频率下，与工频有相应生理效应的电流阈值与工频电流阈值之比。

频率 100 ~ 1000Hz 电流的感知阈值和摆脱阈值如图 1-9 所示；频率 1 ~ 10kHz 电流的感知阈值和摆脱阈值如图 1-10 所示。频率从 10kHz 增至 100kHz 时，感知阈值约从 10mA 增至 100mA；频率 100kHz 以上，数百毫安电流将引起人的灼热感。

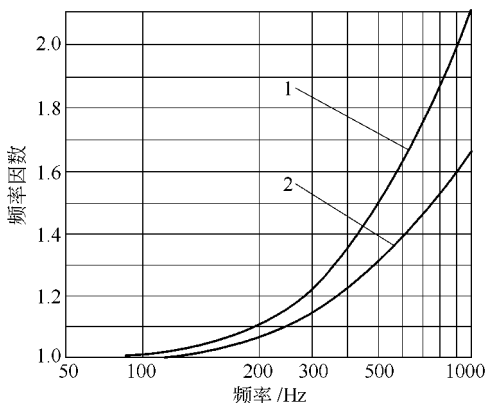


图 1-9 100 ~ 1000Hz 电流的感知阈值和摆脱阈值

1—感知阈值；2—摆脱阈值

频率 100 ~ 1000Hz，电击持续时间超过心脏搏动周期，从手至双脚的纵向电流的室颤阈值如图 1-11 所示。感知电流、摆脱电流与频率的关系曲线如图 1-12 所示。

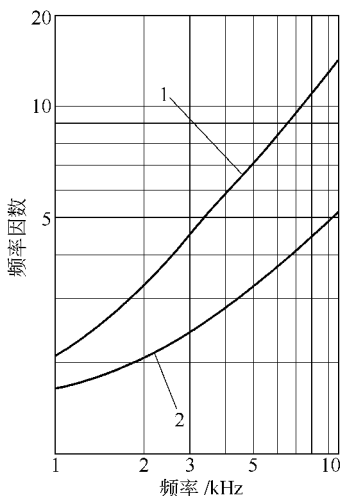


图 1-10 1 ~ 10kHz 电流的感知阈值和摆脱阈值
1—感知阈值；2—摆脱阈值

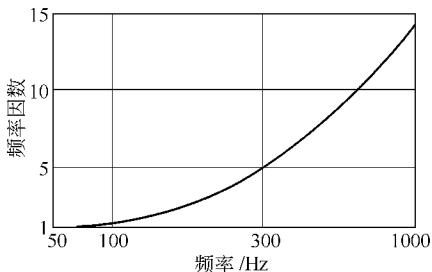


图 1-11 100 ~ 1000Hz 电流的室颤阈值

(3) 冲击电流的作用 作用时间不超过 0.1 ~ 10ms 的电流称作冲击电流，按其波形可分为方脉冲、正弦脉冲和电容放电脉冲三种。

冲击电流对人体的作用有感知阈值、疼痛阈值和室颤阈值，没有摆脱阈值。

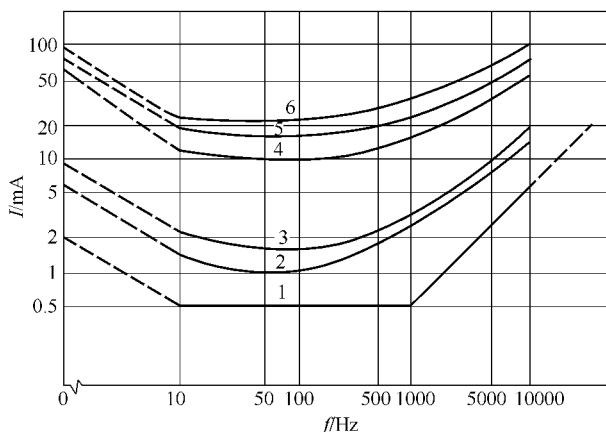


图 1-12 感知电流、摆脱电流与频率的关系曲线

- 1—感知阈值；2—感知概率为 50%；3—感知概率为 99.5%；
4—摆脱概率为 99.5%；5—摆脱概率为 50%；
6—摆脱概率为 0.5%

电容放电电流的感知阈值和疼痛阈值按图 1-13 所示确定。图中，两组斜线是电容和能量的分度线，只要知道充电电压、电量、电容、能量中的任意两个参数，即可按该图确定人的生理效应。

冲击电流的室颤阈值如图 1-14 所示。图中 c_1 以左是不发生室颤的区域； c_1 与 c_2 之间是低度（概率 5% 以下）室颤危险的区域； c_2 与 c_3 之间是中等（概率 5%）室颤危险的区域； c_3 以右是高度（概率在 50% 以上）室颤危险的区域。

6. 人体的阻抗值

人体阻抗包括皮肤阻抗和体内阻抗。皮肤阻抗在人体阻抗中占有较大的比例，人体的阻抗不是固定不变的，而与下面若干因素有关。

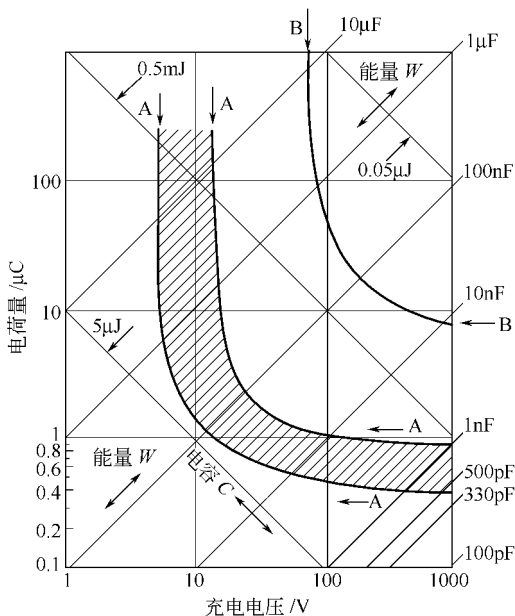


图 1-13 电容放电电流的感知阈值和疼痛阈值

A—感知阈值；B—典型的疼痛阈值

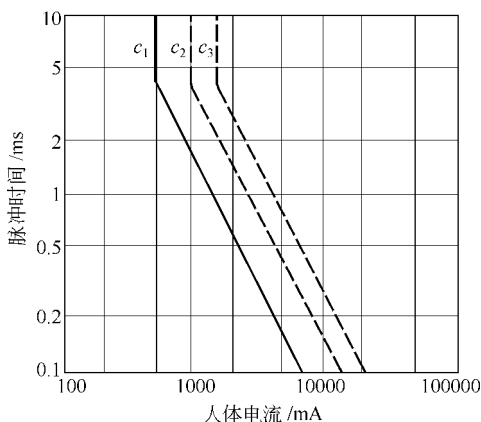


图 1-14 冲击电流的室颤阈值

(1) 皮肤状况 皮肤潮湿和出汗时，以及带有导电的化学物质和导电的金属尘埃，特别是皮肤破坏后，人体阻抗急剧下降。因此，人们不应当用潮湿的，或有汗、有沾污的手去操作电气装置。

(2) 接触电压 接触电压增加，人体阻抗明显下降。在干燥、电流途径从左手到右手、接触面积为 $50 \sim 100\text{cm}^2$ 的条件下，人体阻抗与接触电压的关系见表 1-2。

表 1-2 人体阻抗与接触电压关系 单位： Ω

接触电压 /V	概 率 百 分 数		
	5%	50%	95%
25	1750	3250	6100
50	1450	2625	4375
75	1250	2200	3500
100	1200	1875	3200
125	1125	1625	2875
220	1000	1350	2125
700	750	1100	1550
1000	700	1050	1500

(3) 电源的频率 人体阻抗与电源频率的关系如图 1-15 所示。图中，A 为接触面积。

(4) 接触面积 人体阻抗与人体接触带电体的接触面积有关，从图 1-15 中也可以看出这种关系，可以认为人体阻抗与接触面积成反比。人体与带电体接触的松紧也影响人体的阻抗。

(5) 其他因素 体内阻抗与电流途径有关；女子的人体阻抗比男子的小，儿童的比成人的小，青年的比中年人的小；遭受突然的生理刺激时，人体阻抗可能明显降低；环境温度高

或空气中的氧不足等，都可使人体阻抗下降。

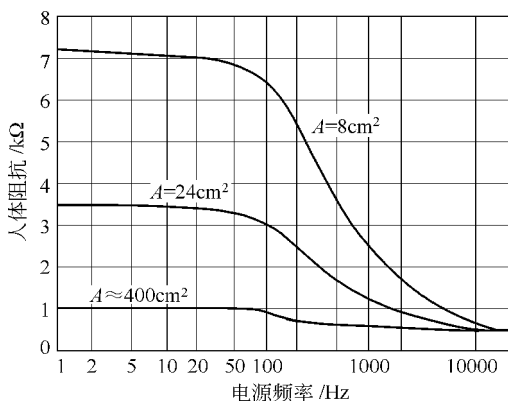


图 1-15 人体阻抗与电源频率的关系

人体电容很小，可忽略不计，因此，人体阻抗可当作纯电阻考虑。

第四节 安全电压与急救措施

一、安全电压

中华人民共和国国家标准 GB 3805—83 《安全电压》的制定是为了防止因触电而造成的人身直接伤害。当电气设备需要采用安全电压来防止触电事故时，应根据使用环境、人员和使用方式等因素选用《安全电压》所列的不同等级的安全电压额定值。国家标准将“安全电压”额定值的等级分为 42V，36V，24V，12V，6V 五个等级，并明确规定了当电气设备采用了超过 24V 的安全电压时，必须采取防直接接触带电体的保护措施。

从安全的角度来看，所谓安全电压和危险电压是不能与普

通的电压（对地电压小于 250V）或高压（对地电压大于 250V）混为一谈的。有时偶尔触及 220V 的电源，之所以没有造成伤亡事故，是因为触电者穿着绝缘性能良好的鞋和站在干燥的地板上的缘故。否则，要是站在潮湿的地上，赤手赤足触及 220V 电源，是必然会酿成严重的伤亡事故的。

通过人体的电流是不可能事先计算出来的。因此为确定安全条件，不按“安全电流”而是按“安全电压”来估算。由于不同环境条件下人体电阻相差很大，而电对人体的作用以电流大小来衡量，使得不同环境条件下的安全电压各不相同，如图 1-16 所示。

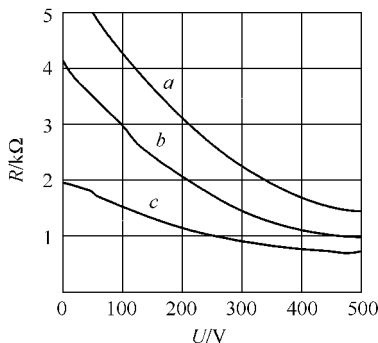


图 1-16 人体电阻与接触电压的关系
a—干燥；b—正常；c—潮湿

对于比较干燥而触电危险较大的环境，人体电阻可按 $1000 \sim 1500\Omega$ 考虑，通过人体的电流可按不引起心室颤动的最大电流 30mA 考虑，则安全电压

$$V = 30 \times 10^{-3} \times (1000 \sim 1500) = 30 \sim 45 \text{ (V)}$$

我国规定 36V 为普通安全电压值，凡危险及特别危险环境里的局部照明灯、危险环境里的手提灯、危险及特别危险环境里的携带式电动工具，均应采用 36V 安全电压。

对于潮湿而又触电危险性较大的环境，人体电阻应按 650Ω 考虑，通过人体的电流可按 30mA 考虑，则安全电压

$$V = 30 \times 10^{-3} \times 650 = 19.5 \text{ (V)}$$

我国规定为 12V。凡特别危险环境里以及在金属容器、矿井、隧道里的手提灯，均应采用 12V 安全电压。

二、急救措施

1. 人体触电后的表现

(1) 假死 所谓假死，即触电者丧失知觉、面色苍白、瞳孔放大、脉搏和呼吸停止。假死可分为三种类型：心跳停止，尚能呼吸；呼吸停止，心跳尚存，但脉搏很微弱；心跳、呼吸均停止。由于触电时心跳和呼吸是突然停止的，虽然中断了供血供氧，但人体的某些器官还存在微弱活动，有些组织的细胞新陈代谢还在进行，加之一般体内重要器官并未损伤，只要及时进行抢救，触电者极有被救活的可能。

(2) 局部电灼伤 触电者神智清醒，电灼伤常位于电流进出人体的接触处，进口处的伤口常为一个，出口处的伤口有时不止一个。电灼伤的面积有时较小，但较深，有时可深达骨骼，大多为三度灼伤，灼伤处是焦黄色或褐黑色，伤面与正常皮肤有明显的界限。

(3) 伤害较轻 触电者神智清醒，只是有些心慌、四肢发麻、全身无力、一度昏迷，但未失去知觉，出冷汗或恶心呕吐等。

2. 急救方法

(1) 急救原则 现场急救的原则是：迅速、就地、准确、坚持。

① 迅速 要动作迅速，切不可惊慌失措，要争分夺秒、千方百计地使触电者脱离电源，并将触电者移到安全的地方。

② 就地 要争取时间，在现场（安全地方）就地抢救触电者。

③ 准确 抢救的方法和施行的动作姿势要正确。

④ 坚持 急救必须坚持到底，直至医务人员判定触电者已经死亡，再无法抢救时，才能停止抢救。

(2) 脱离电源

① 脱离低压电源的方法

a. 拉开触电地点附近的电源开关。但应注意，普通的电灯开关只能断开一根导线，有时由于安装不符合标准，可能只断开零线，而不能断开电源，人身触及的导线仍然带电，不能认为已切断电源。

b. 如果距开关较远，或者断开电源有困难，可用带有绝缘柄的电工钳、或有干燥木柄的斧头、铁锹等利器将电源线切断，此时应防止带电导线断落触及其他人体。

c. 当导线搭落在触电者身上或压在身下时，可用干燥的木棒、竹竿等挑开导线，或用干燥的绝缘绳索套拉导线或触电者，使其脱离电源。

d. 如触电者由于肌肉痉挛，手指紧握导线不放松或导线缠绕在身上时，可首先用干燥的木板塞进触电者身下，使其与地绝缘，然后再采取其他办法切断电源。

e. 触电者的衣服如果是干燥的，又没有紧缠在身上，不至于使救护人直接触及触电者的身体时，救护人才可以用一只手抓住触电者的衣服，将其拉脱电源。

f. 救护人可用几层干燥的衣服将手裹住，或者站在干燥的木板、木桌椅或绝缘橡胶垫等绝缘物上，用一只手拉触电者的衣服，使其脱离电源。千万不要赤手直接去拉触电人，以防造成群伤触电事故。

② 脱离高压电源的方法

a. 立即通知有关部门停电。

b. 戴上绝缘手套，穿上绝缘鞋，使用相应电压等级的绝缘工具，拉开高压跌开式熔断器或高压断路器。

c. 抛掷裸金属软导线，使线路短路，迫使继电保护装置动作，切断电源，但应保证抛掷的导线不触及触电者和其他人。

③ 注意事项

a. 应防止触电者脱离电源后可能出现的摔伤事故。当触电者站立时，要注意触电者倒下的方向，防止摔伤，当触电者位于高处时，应采取措施防止其脱离电源后坠落摔伤。

b. 未采取任何绝缘措施，救护人不得直接接触触电者的皮肤和潮湿衣服。

c. 救护人不得使用金属和其他潮湿的物品作为救护工具。

d. 在使触电者脱离电源的过程中，救护人最好用一只手操作，以防救护人触电。

e. 夜间发生触电事故时，应解决临时照明问题，以便在切断电源后进行救护，同时应防止出现其他事故。

(3) 现场对症救治 触电者脱离电源后，应立即就近移至干燥通风的场所，再根据情况迅速进行现场救护，同时应通知医务人员到现场，并做好送往医院的准备工作。

现场救护可按以下办法进行。

① 触电者所受伤害不太严重 如触电者神智清醒，只是有些心慌、四肢发麻、全身无力，一度昏迷，但未失去知觉此时应使触电者静卧休息，不要走动，同时应严密观察。如在观察过程中，发现呼吸或心跳很不规律甚至接近停止时，应赶快进行抢救，请医生前来或送医院诊治。

② 触电者的伤害情况较严重 触电者无知觉、无呼吸，但心脏有跳动，应立即进行人工呼吸；如有呼吸，但心脏跳动停止，则应立即采用胸外心脏挤压法进行救治。

③ 触电者伤害很严重 触电者心脏和呼吸都已停止、瞳孔放大、失去知觉，这时须同时采取人工呼吸和人工胸外心脏挤压两种方法进行救治。

做人工呼吸要有耐心，尽可能坚持抢救 4h 以上，直到把人救活，或者一直抢救到确诊死亡时为止；如需送医院抢救，

在途中也不能中断急救措施。

触电急救用药应注意以下两点。

① 任何药物都不能代替人工呼吸和胸外心脏挤压抢救。人工呼吸和胸外心脏挤压是基本的急救方法，是第一位的急救方法。

② 应慎重使用肾上腺素。肾上腺素有使停止跳动的心脏恢复跳动的作用，即使出现心室颤动，也可以使细的颤动转变为粗的颤动而有利于除颤；另一方面，肾上腺素可能使衰弱的、跳动不正常的心脏变为心室颤动，并由此导致心脏停止跳动而死亡，因此对于用心电图仪观察尚有心脏跳动的触电者不得使用肾上腺素。只有在触电者已经经过人工呼吸和胸外心脏挤压的急救，用心电图仪鉴定心脏确已停止跳动，又备有心脏除颤装置的情况下，才可考虑注射肾上腺素。

(4) 口对口（鼻）人工呼吸法 该方法也叫口吹法，其操作步骤如下。

① 头部后仰 触电者脱离电源后，很快清理掉他嘴里的东西，使头尽量后仰，让鼻孔朝天，如图 1-17 所示。这样，舌头根部就不会阻塞气道；同时，解开他的领口和衣服。注意，头下不要垫枕头，否则会影响通气。

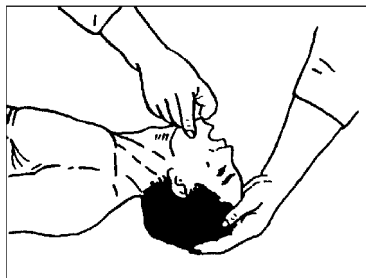


图 1-17 头部后仰

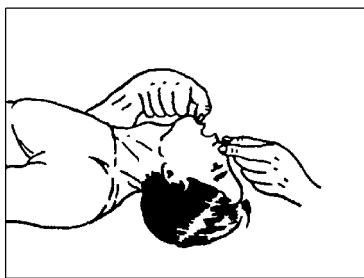


图 1-18 捏鼻掰嘴

② 捏鼻掰嘴 救护人在触电人的头部左边或右边，用一只手捏紧他的鼻孔，另一只手的拇指和食指掰开嘴巴。如图 1-18 所示；如果掰不开嘴巴，可用口对鼻的人工呼吸法，捏紧嘴巴，紧贴鼻孔吹气。

③ 贴紧吹气 深吸气后，紧贴掰开的嘴巴吹气，如图 1-19 所示，也可隔一层布吹；吹气时要使他的胸部膨胀，每 5s 吹一次，吹 2s 放松 3s；小孩肺小，只能小口吹气。

④ 放松换气 救护人换气时，放松触电人的嘴和鼻，让他自动呼气，如图 1-20 所示。

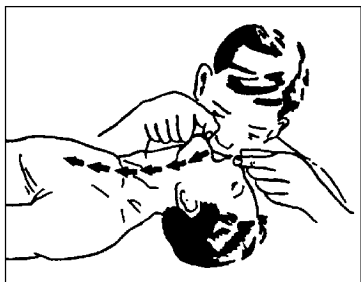


图 1-19 贴紧吹气

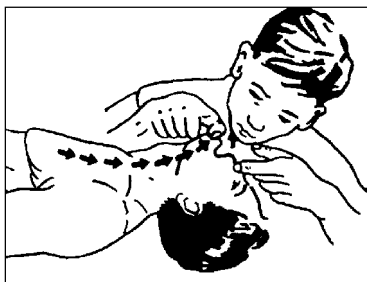


图 1-20 放松换气

(5) 胸外心脏挤压法

① 正确压点 硬将触电人衣服解开，仰卧在地上或硬板上，不可躺在软的地方，找到正确的挤压点，如图 1-21 所示。

② 叠手姿势 救护人跨腰跪在触电人的腰部，如图 1-22 所示（儿童用一只手），手掌根部放在心口窝稍高一点的地方，掌根放在胸骨下 $1/3$ 的部位。

③ 向下挤压 掌根用力向下面，即向脊背的方向挤压，压出心脏里面的血液，如图 1-23 所示。成人压陷到 3 ~ 5cm，每秒钟挤压一次，太快了效果不好；对儿童用力要轻一些，对成人太轻则不好。

④ 迅速放松 挤压后掌根很快全部放松，如图 1-24 所示，让触电人胸廓自动复原，血又充满心脏，每次放松时掌根不必完全离开胸膛。

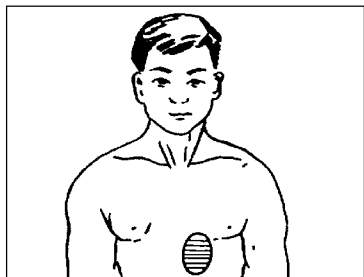


图 1-21 正确压点

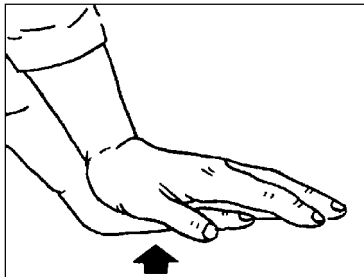


图 1-22 叠手姿势



图 1-23 向下挤压

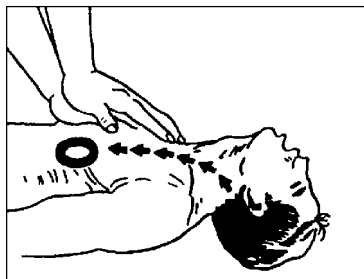


图 1-24 迅速放松

施行上述两种急救方法时，如双人抢救，每做胸外心脏挤压 5 次后由另一个吹气 1 次（5：1），反复进行；如只有一人，又需同时采用两种方法，可以轮番进行，做胸外心脏挤压 15 次以后，吹气 2 次（15：2）。

为便于记忆，上述两种方法的操作要领总结成口诀如下。

① 口对口人工呼吸法

清口捏鼻手抬颌，
深吸缓吹口对紧；

张口困难吹鼻孔，
五秒一次不放松。

② 胸外心脏挤压法

掌根下压不冲击，
突然放松手不离；
手腕略弯压一寸，
一秒一次较适宜。

施行上述两种急救方法时，还应仔细观察触电者发生的一些变化，如：

- a. 触电者的皮肤由紫变红、瞳孔由小变大，说明急救方法已见效；
- b. 当触电者嘴唇稍有开口，眼皮活动或咽喉处有咽东西的动作，应观察其呼吸和心脏跳动是否恢复；
- c. 触电者的呼吸和心脏跳动完全恢复正常时，方可中止救护；
- d. 触电者出现明显死亡综合症状，如：瞳孔放大，对光照无反映，背部四肢等部位出现红色尸斑，皮肤青灰，身体僵冷等，且经医生诊断死亡时，方可中止救护。

(6) 外伤的处理 对于触电者电伤和摔跌造成的局部外伤，在现场救护中也应作适当处理，可防止细菌侵入感染及摔跌骨折刺破皮肤、周围组织、神经和血管，避免引起损伤扩大，同时可减轻触电者的痛苦和便于转送医院。

伤口出血，以动、静脉出血的危险性为最大。动脉出血，血色鲜红且状如泉涌；静脉出血，血色暗红且持续溢出。人体总血量大致有 4000 ~ 5000ml 左右，如果出血量超过 1000ml，可能引起心脏跳动停止而死亡，因此，如触电者有出血状况要立即设法止血。

常用的外伤处理方法有：

a. 一般性的外伤表面，可用无菌生理食盐水或清洁的温开水冲洗后，再用适量的消毒纱布、防腐绷带或干净的布类包扎，经现场救护后送医院处理；

b. 压迫止血是动、静脉出血最迅速的止血法，即用手指、手掌或止血橡皮带在出血处供血端将血管压瘪在骨骼上而止血，同时，速送医院处理；

c. 如果伤口出血不严重，可用消毒纱布或干净的布类叠几层盖在伤口处压紧止血；

d. 对触电摔伤四肢骨折的触电者应首先止血、包扎，然后用木板、竹竿、木棍等物品临时将骨折肢体固定并速送医院处理。

第二章 电气绝缘、屏护、 间距安全技术

绝缘、屏护和间距都是最为常见的安全措施，是各种电气设备都必须考虑的通用安全措施。绝缘、屏护和间距的主要作用是防止人体触及或过分接近带电体造成触电事故以及防止短路、故障接地等电气事故的安全措施。本章将介绍这些安全措施。

第一节 绝 缘

绝缘是用绝缘物把带电体封闭起来。良好的绝缘是保证设备和线路正常运行的必要条件，也是防止触电事故发生的重要措施。电气设备的绝缘只有在遭到破坏时才可能被除去。

设备或线路的绝缘必须与所采用的电压相符合，必须与周围环境和运行条件相适应。

一、绝缘材料

绝缘材料一般指电阻率在 $10^9 \Omega \cdot m$ 以上的材料，可分为气体绝缘、液体绝缘和固体绝缘三种绝缘材料。

1. 气体绝缘材料

电气设备的绝缘结构应用空气或其他气体作为绝缘介质，如线路的线间绝缘、电器的电气间隙等。空气在正常状态下是良好的绝缘介质，但其击穿电压与大多数液体及固体介质相比是不高的。为了提高击穿电压使气体绝缘性能提高，其一是采用高真空，空气稀薄时带电粒子也少，空气中电子与粒子碰撞

机会也减少，据此，真空开关已广泛应用于 10kV 系统中；其二是采用高耐电强度气体，如六氟化硫（ SF_6 ），六氟化硫气体常温下不活泼、不燃、无臭味、无毒，500 时不分解，液化温度也较低，击穿电压是空气的 2.5 倍，具有良好的绝缘和灭弧性能，现已应用于 220kV 及以上电压等级的高压断路器中。

2. 液体绝缘材料

常用的液体绝缘材料有变压器油、电容器油和电缆油。变压器油的介电强度为 16 ~ 21kV/mm (20 时)，主要用于变压器及油开关的绝缘和散热；电容器油的介电强度为 20 ~ 23kV/mm (20 时)，主要用于电容器的绝缘、散热及储能；电缆油中的高压充油介电强度 $\geq 20\text{kV/mm}$ (20)，用于高压电缆，35kV 油介电强度为 14 ~ 16kV/mm (20)，用于低压电缆。

绝缘油在储存、运输和运行使用过程中必须防止污染、老化，以保证设备安全运行，延长设备的检修周期。

防止油的老化一般可采用加强散热以降低油温、用氮或薄膜使变压器油与空气隔绝、添加抗氧化剂、防止日光照射、采用热虹吸过滤器使变压器油再生等措施；除此之外，还必须经常检查充油电气设备的温升、油面高度及油的表面张力、闪点、酸值、击穿强度和介质损耗正切值等。

若油面下降，则需补充油液。补充油的主要理化指标（如凝固点、黏度、闪点等）应与设备中的原油液相同或接近，以保证两者混合后的安定度合格。未经处理的运行使用的油不能与变压器油混合使用。运行油的质量应符合国家标准的规定要求。

3. 固体绝缘材料

它是应用最广泛的绝缘材料，包括无机绝缘材料，如云

母、瓷件、石棉等；有机绝缘材料，如棉纱、纸、橡胶等；混合绝缘材料，如绝缘压塑料、绝缘薄膜、复合材料等。

固体绝缘材料的损伤主要是电击穿和热击穿。在均匀电场中，固体绝缘材料的击穿电压与绝缘物的厚度成正比。机械损伤会使绝缘物变薄而易被击穿，化学腐蚀则使绝缘物变质使厚度减少。热击穿往往是在电压作用很长时间后发生。长时间承受电压，通过电流温度升高，使绝缘材料绝缘性能下降以致击穿。几种常用固体绝缘材料的介电强度见表 2-1。

表 2-1 几种常用固体绝缘材料的介电强度

单位：kV/mm

绝缘材料名称	介电强度	绝缘材料名称	介电强度
沥青漆	55 ~ 90	云母	100 ~ 250
有机硅浸渍漆	65 ~ 100	酚醛塑料	10 ~ 16
油性漆布	35	聚苯乙烯	20 ~ 28
聚酰胺-酰亚胺浸渍漆	90 ~ 100	聚氯乙烯	> 20
聚酯薄膜	130 ~ 230	聚乙烯	18 ~ 28
聚酰亚胺薄膜	100 ~ 190	云母带	16 ~ 45
聚丙烯薄膜	> 180	云母箔	16 ~ 50
聚乙烯薄膜	> 40	云母板	15 ~ 50
聚酯薄膜绝缘纸复合箔	40	木板	4 ~ 6
粉云母纸	25 ~ 45	聚氨酯橡胶	A 型 30 ~ 35 B 型 18 ~ 20
云母玻璃	14 ~ 20	陶瓷	10 ~ 30

为保证电气设备的绝缘性能可靠，将绝缘材料按其在正常运行条件下的最高允许工作温度进行统一的耐热分级，称为绝缘材料的耐热等级。绝缘材料的耐热等级见表 2-2。

表 2-2 绝缘材料的耐热等级

耐热等级	最高允许工作温度/	相当于此等级的主要绝缘材料
Y	90	未浸渍过的棉纱、丝及纸等材料或其组合物所组成的绝缘结构 有机填料的塑料
A	105	浸渍过或浸在液体绝缘材料中的棉纱、丝及纸等材料或它们所组成的绝缘结构,如漆布、绸、管等 聚酰胺薄膜 浇注用聚酰胺树脂等
E	120	聚酯薄膜及其纤维 漆包线的绝缘漆 以纤维纸和布为底料的层压制品、环氧、聚酯和聚氨酯的树脂和胶类
B	130	以云母片和粉云母纸为基础的材料以及纸和布作衬垫的云母制品、玻璃漆布和玻璃漆管 以玻璃布为底料的层压制品 以无机物为填料的塑料
F	155	玻璃漆布、漆管 以玻璃布和石棉纤维为基础(layer)的层压制品 以无机绝缘材料为衬垫的粉云母制品 玻璃丝和石棉绝缘导线的绝缘
H	180	无机绝缘材料为衬垫的云母制品 玻璃丝导线的绝缘、玻璃漆布、漆管 以玻璃漆布和石棉纤维为基础(layer)的层压制品 以无机物为填料的塑料 聚酰亚胺薄膜的复合制品 硅橡胶制品
C	180 以上	云母、玻璃和玻璃纤维材料 电瓷、石英、玻璃云母模压制品 聚四氟乙烯、聚酰亚胺或耐高温有机硅漆包线的绝缘材料

二、绝缘电阻

绝缘电阻是最基本的绝缘性能指标，足够的绝缘电阻能把电气设备的泄漏电流限制在安全范围内，防止事故发生。

1. 绝缘电阻测量方法

测量绝缘电阻主要采用绝缘电阻表，也称兆欧表或摇表，选用绝缘电阻表的原则如下。

① 测量高压电气设备的绝缘电阻时，要选用额定电压较高的绝缘电阻表，且其测量范围不应过多地超过被测设备的绝缘电阻值，以免引起较大的误差。

② 测量低压电气设备的绝缘电阻时，应选择额定电压较低的绝缘电阻表，否则非但不能获得正确的读数，甚至可能导

致击穿，危及安全。

③ 绝缘电阻表盘面标尺读数凡是由 $1\text{M}\Omega$ 或 $2\text{M}\Omega$ 起始而不是由零开始的，不适宜测量潮湿场所的低压电气设备，因为当设备的绝缘电阻低于 $1\text{M}\Omega$ 时，得不到正确读数。

使用绝缘电阻表时应注意以下问题。

① 测量时，表应放置水平位置，被测物接“E”及“L”两钮间，以 120r/min 的转速摇动摇把，直到指针稳定时在标尺上即可读出被测物的绝缘电阻值。

② 测量对地绝缘电阻时，将“E”端接地线，“L”端接被测物；测两线间绝缘电阻时，将两线分别接于“L”与“E”端。

③ 为了防止被测物表面漏电流的影响，设有保护环端钮“G”，使用时，将被测物的中间层用裸铜线缠绕数匝后接于“G”端；如测量电缆的缆芯对缆壳的绝缘电阻，必须将电缆芯壳之间的内层绝缘物接“G”端，以消除因电缆表面漏电引起的误差。

④ 测量时被测物必须断开电源，测量完毕，被测物要充分放电。特别是高压电机、变压器、电容器及电缆等设备，放电时间要尽可能长一些，给积存的电荷充分的时间中和。

⑤ “L”和“E”短路时，不允许猛力摇动发电机，以免损坏仪表。测量绝缘电阻时，应先将“E”端接好，待摇把转速达到 120r/min 时，再将“L”端搭上被试物另一端；测量数值读出后也不能马上停止摇动，应先使“L”测试线离开被试物后再停止摇动，以防被试物电容电流对流比计测量线圈充电，损坏仪表。

⑥ 接线时要注意“L”线不要碰触接线柱周围的屏蔽

铜环，否则读数变小或为零，造成绝缘电阻数值错误判断。

⑦ 使用绝缘电阻表测量高压设备绝缘时应由两人操作，测量用导线应选用绝缘导线，测量绝缘时，必须将被测设备从各方面断开，验明无电、并确认设备上无人工作后方可进行，测量中禁止其他人接近设备。

⑧ 在有感应电压的线路上（同杆架设的双回路或单回线路与另一线路有平行段）测量绝缘时，必须将另一线路同时停电。雷电时，严禁测量线路绝缘。

⑨ 在带电设备附近测量绝缘电阻时，测量人员和绝缘电阻表安放位置必须选择适当，保持安全距离，以免绝缘电阻表引线或引线支持物触碰带电部分；移动引线时，必须注意监护，防止工作人员触电。

⑩ 使用时应小心轻放，避免剧烈振动，以防损坏宝石轴尖，影响指示。

2. 绝缘电阻指标

(1) 电力变压器绝缘电阻合格值见表 2-3。

表 2-3 电力变压器绝缘电阻合格值 单位：MΩ

额定电压 /kV		温 度 /							
		10	20	30	40	50	60	70	80
3 ~ 10	良好值	900	450	225	120	64	36	19	12
	最低值	600	300	150	80	43	24	13	8
20 ~ 35	良好值	1200	600	300	155	83	50	27	15
	最低值	800	400	200	105	55	33	18	10
60 ~ 220	良好值	2400	1200	600	315	165	100	50	30
	最低值	1600	800	400	210	110	65	35	21

(2) 旋转电机绝缘电阻要求见表 2-4。

表 2-4 旋转电机绝缘电阻要求

序号	项 目	要 求	说 明
1	容量为 6000kW 及以上同步发电机定子绕组绝缘电阻	(1) 绝缘电阻值自行规定。若在相近试验条件下,绝缘电阻值降低到历年正常值的 $1/3$ 以下时,应查明原因 (2) 各相和各分支绝缘电阻值的差值不应大于最小值的 100%	(1) 额定电压为 1000V 以上者,采用 2500V 绝缘电阻表,量程一般不低于 10000M Ω (2) 水内冷定子绕组用专用绝缘电阻表
2	容量为 6000kW 及以上同步发电机转子绕组绝缘电阻	(1) 绝缘电阻值在室温时一般不小于 0.5M Ω (2) 水内冷转子绕组绝缘电阻值在室温时不应小于 5k Ω	(1) 采用 1000V 绝缘电阻表测量;水内冷发电机用 500V 及以下绝缘电阻表或其他测量仪器 (2) 对于 300MW 以下的隐极式电机,当定子绕组已干燥完毕而转子绕组未干燥完毕,如果转子绕组的绝缘电阻值在 75 时不小于 2k Ω ,或在 20 时不小于 20k Ω ,允许投入运行 (3) 对于 300MW 及以上的隐极式电机,转子绕组的绝缘电阻值在 10 ~ 30 时不小于 0.5M Ω
3	容量为 6000kW 及以上同步发电机和励磁机的励磁回路所连接的设备(不包括发电机转子和励磁机电枢)的绝缘电阻	绝缘电阻值不应低于 0.5M Ω ,否则应查明原因并消除	(1) 小修时用 1000V 绝缘电阻表 (2) 大修时用 2500V 绝缘电阻表
4	容量为 6000kW 及以上同步发电机组和励磁机轴承的绝缘电阻	(1) 汽轮发电机组的轴承不得低于 0.5M Ω (2) 立式水轮发电机组的推力轴承每一轴瓦不得低于 100M Ω ;油槽充油并顶起转子时,不得低于 0.3M Ω (3) 所有类型的水轮发电机,凡有绝缘的导轴承,油槽充油前,每一轴瓦不得低于 100M Ω	汽轮发电机组的轴承绝缘,用 1000V 绝缘电阻表在安装好油管后进行测量
5	直流电机绕组的绝缘电阻	绝缘电阻值一般不低于 0.5M Ω	(1) 用 1000V 绝缘电阻表 (2) 对励磁机应测量电枢绕组对轴和金属绑线的绝缘电阻

序号	项 目	要 求	说 明
6	中频发电机绕组的绝缘电阻	绝缘电阻值不应低于 $0.5\text{M}\Omega$	1000V 以下的中频发电机使用 1000V 绝缘电阻表测量;1000V 及以上者使用 2500V 绝缘电阻表测量
7	交流电动机绕组的绝缘电阻	(1) 转子绕组不应低于 $0.5\text{M}\Omega$ (2) 额定电压 3000V 以下者,室温下定子绕组不应低于 $0.5\text{M}\Omega$ (3) 额定电压 3000V 及以上者,交流耐压前,定子绕组在接近运行温度时的绝缘电阻不应低于 $U_N\text{M}\Omega$ (取 U_N 的千伏数);投运前室温下(包括电缆)不应低于 $U_N\text{M}\Omega$	(1) 3kV 以下的电动机使用 1000V 绝缘电阻表;3kV 及以上者使用 2500V 绝缘电阻表 (2) 小修时定子绕组可与其所连接的电缆一起测量,转子绕组可与起动设备一起测量 (3) 有条件时可分相测量
8	同步电动机及其励磁机轴承的绝缘电阻	绝缘电阻不应低于 $0.5\text{M}\Omega$	在油管安装完毕后,用 1000V 绝缘电阻表测量

(3) 油断路器的预防性试验项目、周期和要求见表 2-5。

(4) 电流互感器的预防性试验项目、周期和要求见表 2-6。

(5) 电磁式电压互感器的预防性试验项目、周期和要求见表 2-7。

(6) 阀式避雷器的预防性试验项目、周期和要求见表 2-8。

(7) 金属氧化物避雷器的预防性试验项目、周期和要求见表 2-9。

(8) 其他电力设备的绝缘电阻要求见表 2-10。

表 2-5 油断路器的预防性试验项目、周期和要求

序号	项 目	周 期	要 求					说 明
1	绝缘电阻	1~3 年	(1)整体绝缘电阻自行规定 (2)断口和有机物制成的提升杆的绝缘电阻不应低于下表数值:					使用 2500V 绝缘电阻表
			额定电压 /kV	<24	24~40.5	72.5~252	363	
			绝缘电阻 /MΩ	300	1000	3000	5000	
2	40.5kV 及以上非 纯瓷套管和多油断 路器的 $\tan\delta$	1~3 年	(1) 20℃ 时多油断路器的非纯瓷套管的 $\tan\delta(\%)$ 应不大于下表中数值:					(1)在分闸状态下按每支套管进行测量,测量的 $\tan\delta$ 超过规定值或有显著增大时,必须落下油箱的断路器,则应将油放出,使套管下部及灭弧室露出油面,然后进行分解试验
			电压等级/kV	20~35	66~110	220~500		
			充油型	3.5	1.5	—		
			油纸电容型	1.0	1.0	0.8		
			充胶型	3.5	2.0	—		
			胶纸电容型	3.0	1.5	1.0		
			胶纸型	3.5	2.0	—		
			(2) 20℃ 时非纯瓷套管断路器的 $\tan\delta(\%)$ 值,可比上表中相应的 $\tan\delta(\%)$ 值增加下列数值:					(2) 带并联电阻断路器的整体 $\tan\delta(\%)$ 可相应增加 1
			额定电压 /kV	≥ 126	< 126	40.5 (DW1-35) (DW1-35D)		
			$\tan\delta(\%)$ 值的增加数	1	2	3		

序号	项 目	周 期	要 求	说 明
3	40.5kV 及以上少油断路器的泄漏电流	1~3 年	(1) 每一元件的试验电压如下:	252kV 及以上少油断路器提升杆(包括支持瓷套)的泄漏电流大于 $5\mu\text{A}$ 时,应引起注意
			额定电压/kV	
			40.5	
4	断路器对地、断口及相间交流耐压试验	1~3 年(12kV 及以下)必要时(72.5kV 及以上)	72.5~252	对于三相共箱式的油断路器应作相同耐压试验,其试验电压值与对地耐压值相同
			≥ 363	
			直流试验电压/kV	
5	辅助回路和控制回路交流耐压试验	1~3 年	20	试验电压为 2kV
			40	
			(2) 泄漏电流一般不大于 $10\mu\text{A}$	
6	导电回路电阻	1~3 年	断路器在分、合闸状态下分别进行,试验电压值如下: 12~40.5kV 断路器对地及相间按 DL/T 593 规定值;72.5kV 及以上者按 DL/T 593 规定值的 80%	用直流降压法测量,电流不小于 100A
			自行规定	
			试验电压为 2kV	
7	合闸接触器和分、合闸电磁铁线圈的绝缘电阻和直流电阻,辅助回路和控制回路绝缘电阻	1~3 年	(1) 绝缘电阻不应小于 $2\text{M}\Omega$ (2) 直流电阻应符合制造厂规定	采用 500V 或 1000V 绝缘电阻表

表 2-6 电流互感器的预防性试验项目、周期和要求

序号	项 目	周 期	要 求	说 明			
1	绕组及末屏的绝缘电阻	1~3 年	(1)绕组绝缘电阻与初始值及历次数据比较,不应有显著变化 (2)电容型电流互感器末屏对地绝缘电阻一般不低于1000MΩ	采用 2500V 绝缘电阻表			
2	油中溶解气体色谱分析	1~3 年 (66kV 及以上)	油中溶解气体组分含量(体积分数)超过下列任一值时应引起注意: 总烃 100×10^{-6} H_2 150×10^{-6} C_2H_2 2×10^{-6} (110kV 及以下) 1×10^{-6} (220~500kV)	(1)新投运互感器的油中不应含有 C_2H_2 (2)全密封互感器按制造厂要求(如果有)进行			
3	$\tan\delta$ 及电容量	1~3 年	(1)主绝缘 $\tan\delta(\%)$ 不应大于下表中的数值,且与历年数据比较,不应有显著变化	(1)主绝缘 $\tan\delta$ 试验电压为 10kV,末屏对地 $\tan\delta$ 试验电压为 2kV (2)油纸电容型 $\tan\delta$ 一般不进行温度换算,当 $\tan\delta$ 值与出厂值或上一次试验值比较有明显增长时,应综合分析 $\tan\delta$ 与温度、电压的关系,当 $\tan\delta$ 随温度明显变化或试验电压由 10kV 升到 $U_m/\sqrt{3}$ 时, $\tan\delta$ 增量超过 $\pm 0.3\%$, 不应继续运行 (3)固体绝缘互感器可不进行 $\tan\delta$ 测量			
			电压等级 /kV	20~35	66~110	220	330~500
			油纸电容器	—	1.0	0.8	0.7
			充油型	3.5	2.5	—	—
			胶纸电容型	3.0	2.5	—	—
			(2)电容型电流互感器主绝缘电容量与初始值或出厂值差别超出 $\pm 5\%$ 范围时应查明原因 (3)当电容型电流互感器末屏对地绝缘电阻小于 1000MΩ 时,应测量末屏对地 $\tan\delta$,其值不大于 2%				

序号	项 目	周 期	要 求	说 明
4	交流耐压 试验	(1) 1~3 年 (20kV 及以下) (2) 必要时	(1) 一次绕组按出厂值的 85% 进行。出厂值不明的按下列电压进行试验:	
			电压等级 /kV	3 6 10 15 20 35 66
			试验电压 /kV	15 21 30 38 47 72 120
			(2) 二次绕组之间及未屏对地试验电压为 2kV (3) 全部更换绕组绝缘后, 应按出厂值进行	
5	局部放电 测量	1~3 年 (20~35kV 固体绝缘互感器)	(1) 固体绝缘互感器在电压为 $1.1U_m/\sqrt{3}$ 时, 放电量不大于 100pC, 在电压为 $1.1U_m/$ 时 (必要时), 放电量不大于 500pC (2) 110kV 及以上油浸式互感器在电压为 $1.1U_m/\sqrt{3}$ 时, 放电量不大于 20pC	试验按 GB 5583 进行

表 2-7 电磁式电压互感器的预防性试验项目、周期和要求

序号	项 目	周 期	要 求	说 明																		
1	绝缘电阻	1~3 年	自行规定	一次绕组用 2500V 绝缘电阻表,二次绕组用 1000V 或 2500V 绝缘电阻表																		
2	$\tan\delta$ (20 kV 及以上)	1~3 年	(1)绕组绝缘 $\tan\delta$ (%) 不应大于下表数值: <table><tr><td>温度/°C</td><td>5</td><td>10</td><td>20</td><td>30</td><td>40</td></tr><tr><td>35kV 及以下</td><td>2.0</td><td>2.5</td><td>3.5</td><td>5.5</td><td>8.0</td></tr><tr><td>35kV 以上</td><td>1.5</td><td>2.0</td><td>2.5</td><td>4.0</td><td>5.5</td></tr></table> (2)支架绝缘 $\tan\delta$ 一般不大于 6%	温度/°C	5	10	20	30	40	35kV 及以下	2.0	2.5	3.5	5.5	8.0	35kV 以上	1.5	2.0	2.5	4.0	5.5	串级式电压互感器的 $\tan\delta$ 试验方法,建议采用末端屏蔽法,其他试验方法与要求自行规定
温度/°C	5	10	20	30	40																	
35kV 及以下	2.0	2.5	3.5	5.5	8.0																	
35kV 以上	1.5	2.0	2.5	4.0	5.5																	
3	油中溶解气体的色谱分析	1~3 年 (66kV 及以上)	油中溶解气体组分含量(体积分数)超过下列任一值时应引起注意: 总烃 100×10^{-6} H_2 150×10^{-6} C_2H_2 2×10^{-6}	(1)新投运互感器油中不应含有 C_2H_2 (2)全密封互感器按制造厂要求(如果有)进行																		
4	交流耐压试验	(1)3 年 (20kV 及以下) (2)必要时	(1)一次绕组按出厂值的 85% 进行,出厂值不明的,按下列电压进行试验: <table><tr><td>电压等级 /kV</td><td>3</td><td>6</td><td>10</td><td>15</td><td>20</td><td>35</td><td>66</td></tr><tr><td>试验电压 /kV</td><td>15</td><td>21</td><td>30</td><td>38</td><td>47</td><td>72</td><td>120</td></tr></table> (2)二次绕组之间及末屏对地试验电压为 2kV	电压等级 /kV	3	6	10	15	20	35	66	试验电压 /kV	15	21	30	38	47	72	120	(1)串级式或分级绝缘式的互感器用倍频感应耐压试验 (2)进行倍频感应耐压试验时应考虑互感器的容升电压 (3)倍频耐压试验前后,应检查有否绝缘损伤		
电压等级 /kV	3	6	10	15	20	35	66															
试验电压 /kV	15	21	30	38	47	72	120															
5	局部放电测量	(1)1~3 年 (20~35kV 固体绝缘互感器) (2)必要时	(1)固体绝缘相对地电压互感器在电压为 $1.1U_m/\sqrt{3}$ 时,放电量不大于 100pC,在电压 $1.1U_m$ 时(必要时),放电量不大于 500pC。固体绝缘相对电压互感器,在电压为 $1.1U_m$ 时,放电量不大于 100pC (2) 110kV 及以上油浸式电压互感器在电压为 $1.1U_m/\sqrt{3}$ 时,放电量不大于 20pC	试验按 GB 5583 进行																		

表 2-8 阀式避雷器的预防性试验项目、周期和要求

序号	项 目	周 期	要 求	说 明																					
1	绝缘电阻	(1)发电厂、变电所避雷器每年雷雨季前 (2)线路上避雷器 1~3 年	(1)FZ(PBC、LD)FCZ 和 FCD 型避雷器的绝缘电阻自行规定,但与前一次或同类型的测量数据进行比较,不应有显著变化 (2)FS 型避雷器绝缘电阻应不低于 2500MΩ	(1)采用 2500V 及以上绝缘电阻表 (2)FZ、FCZ 和 FCD 型主要检查并 联电阻通断和接触情况																					
2	电导电流及 串联组合元件 的非线性因数 差值	每年雷雨季 前	(1)FZ、FCZ、FCD 型避雷器的电导电流参 考值见制造厂规定值,还应与历年数据比较, 不应有显著变化 (2)同一相内串联组合元件的非线性因数 差值,不应大于 0.05;电导电流相差值(%) 不应大于 30% (3)试验电压如下: <table><tr><td>元件额定电压 /kV</td><td>3</td><td>6</td><td>10</td><td>15</td><td>20</td><td>30</td></tr><tr><td>试验电压 U_1 /kV</td><td>—</td><td>—</td><td>—</td><td>8</td><td>10</td><td>12</td></tr><tr><td>试验电压 U_2/kV</td><td>4</td><td>6</td><td>10</td><td>16</td><td>20</td><td>24</td></tr></table>	元件额定电压 /kV	3	6	10	15	20	30	试验电压 U_1 /kV	—	—	—	8	10	12	试验电压 U_2 /kV	4	6	10	16	20	24	(1)整流回路中应加滤波电容器,其 电容值一般为 0.01~0.1μF,并应在 高压侧测量电流 (2)由两个及以上元件组成的避雷 器应对每个元件进行试验 (3)非线性因数差值及电导电流相 差值计算见表注 (4)可用带电测量方法进行测量,如 对测量结果有疑问时,应根据停电测 量的结果作出判断 (5)如 FZ 型避雷器的非线性因数 差值大于 0.05,但电导电流合格,允 许作换节处理,换节后的非线性因数 差值不应大于 0.05 (6)运行中 PBC 型避雷器的电导电 流一般应在 300~400μA 范围内
元件额定电压 /kV	3	6	10	15	20	30																			
试验电压 U_1 /kV	—	—	—	8	10	12																			
试验电压 U_2 /kV	4	6	10	16	20	24																			

表 2-9 金属氧化物避雷器的预防性试验项目、周期和要求

序号	项 目	周 期	要 求	说 明
1	绝缘电阻	(1) 发电厂、变电所避雷器每年雷雨季节前 (2) 必要时	(1) 35kV 以上, 不低于 2500M Ω (2) 35kV 及以下, 不低于 1000M Ω	采用 2500V 及以上绝缘电阻表
2	直流 1mA 电压 (U_{1mA}) 及 0.75 U_{1mA} 下的泄漏电流	(1) 发电厂、变电所避雷器每年雷雨季节前 (2) 必要时	(1) 不得低于 GB 11032 规定值 (2) U_{1mA} 实测值与初始值或制造厂规定值比较, 变化不应大于 $\pm 5\%$ (3) 0.75 U_{1mA} 下的泄漏电流不应大于 50 μ A	(1) 要记录试验时的环境温度和相对湿度 (2) 测量电流的导线应使用屏蔽线 (3) 初始值系指交接试验或投产试验时的测量值
3	运行电压下的交流泄漏电流	新投运的 110kV 及以上者投运 3 个月 after 测量 1 次; 以后每半年 1 次; 运行 1 年后, 每年雷雨季节前 1 次	测量运行电压下的全电流、阻性电流或功率损耗, 测量值与初始值比较, 有明显变化时应加强监测, 当阻性电流增加 1 倍时, 应停电检查	应记录测量时的环境温度、相对湿度和运行电压。测量宜在瓷套表面干燥时进行。应注意相间干扰的影响
4	底座绝缘电阻	(1) 发电厂、变电所避雷器每年雷雨季节前 (2) 必要时	自行规定	采用 2500V 及以上绝缘电阻表
5	检查放电计数器动作情况	(1) 发电厂、变电所避雷器每年雷雨季节前 (2) 必要时	测试 3~5 次, 均应正常动作, 测试后计数器指示应调到“0”	

表 2-10 其他电力设备的绝缘电阻要求

序号	项 目	要 求			说 明
1	隔离开关有机材料支持绝缘子及提升杆的绝缘电阻	有机材料传动提升杆的绝缘电阻不得低于下表数值 (单位 MΩ)：			采用 2500V 绝缘电阻表
		试验类别	额定电压 /kV		
			< 24	24 ~ 40.5	
		大修后	1000	2500	
	运行中	300	1000		

序号	项 目	要 求	说 明
2	隔离开关二次回路绝缘电阻	绝缘电阻不低于 $2\text{M}\Omega$	采用 1000V 绝缘电阻表
3	高压开关柜辅助回路和控制回路绝缘电阻	绝缘电阻不低于 $2\text{M}\Omega$	采用 1000V 绝缘电阻表
4	镉镍屏(柜)中控制母线和动力母线的绝缘电阻	绝缘电阻不低于 $10\text{M}\Omega$	采用 1000V 绝缘电阻表,有 两组电池时轮流测量
5	主绝缘及电容型套管末屏对地绝缘电阻	(1) 主绝缘的绝缘电阻不低于 $10000\text{M}\Omega$ (2) 末屏对地的绝缘电阻不低于 $1000\text{M}\Omega$	采用 2500V 绝缘电阻表
6	发电厂和变电所的支柱绝缘子和悬式绝缘子的绝缘电阻	针式支柱绝缘子的每一元件和每片悬式绝缘子的绝缘电阻不低于 $300\text{M}\Omega$, 500kV 悬式绝缘子不低于 $500\text{M}\Omega$	采用 2500V 及以上绝缘电阻表
7	高压并联电容器、串联电容器、交流滤波电容器及对壳绝缘电阻	不低于 $2000\text{M}\Omega$	串联电容器用 1000V 绝缘电阻表,其他 2500V 绝缘电阻表
8	耦合电容器、断路器电容器极间绝缘电阻	一般不低于 $5000\text{M}\Omega$	采用 2500V 绝缘电阻表
9	串联电抗器绕组绝缘电阻	一般不低于 $1000\text{M}\Omega$ (20°C)	采用 2500V 绝缘电阻表
10	放电线圈绝缘电阻	不低于 $1000\text{M}\Omega$	一次绕组用 2500V 绝缘电阻表,二次绕组用 1000V 绝缘电阻表
11	封闭母线绝缘电阻	(1) 额定电压为 15kV 及以上全连式离相封闭母线在常温下分相绝缘电阻不小于 $50\text{M}\Omega$ (2) 6kV 共箱封闭母线在常温下分相绝缘电阻不小于 $6\text{M}\Omega$	采用 2500V 绝缘电阻表
12	二次回路绝缘电阻	(1) 直流小母线和控制盘的电压小母线,在断开所有其他并联支路时不应小于 $10\text{M}\Omega$ (2) 二次回路的每一支路和断路器、隔离开关、操作机构的电源回路不小于 $1\text{M}\Omega$,在比较潮湿的地方,允许降到 $0.5\text{M}\Omega$	采用 500V 或 1000V 绝缘电阻表

序号	项 目	要 求	说 明
13	1kV 及以下的配电装置和电力布线的绝缘电阻	(1) 配电装置每一段的绝缘电阻不小于 $0.5\text{M}\Omega$ (2) 电力布线绝缘电阻一般不小于 $0.5\text{M}\Omega$	(1) 采用 1000V 绝缘电阻表 (2) 测量电力布线的绝缘电阻时应将熔断器、用电设备、电器和仪表等断开
14	高压直流电缆绝缘电阻	大于 $1500\text{M}\Omega$	采用 2500V 绝缘电阻表
15	高压硅整流变压器高压绕组对低压绕组及对地绝缘电阻	大于 $500\text{M}\Omega$	采用 2500V 绝缘电阻表
16	高压硅整流变压器低压绕组绝缘电阻	大于 $300\text{M}\Omega$	采用 1000V 绝缘电阻表
17	高压硅整流元件及高压套管对地绝缘电阻	大于 $2000\text{M}\Omega$	采用 2500V 绝缘电阻表
18	低压电抗器绕组对地绝缘电阻	大于 $300\text{M}\Omega$	采用 500 ~ 1000V 绝缘电阻表
19	绝缘支撑及连接元件绝缘电阻	大于 $500\text{M}\Omega$	采用 2500V 绝缘电阻表

三、加强绝缘

加强绝缘也叫保护绝缘，它是在基本绝缘之外另加的绝缘，其机械强度、绝缘性能都有所加强。双重绝缘是加强绝缘的一种形式，大量应用于手持电动工具、移动式电气设备。

采用双重绝缘的电动工具，即电动机除了工作绝缘外，还附加了一层保护绝缘，以增加其使用的安全可靠。保护绝缘的部位与方式多种多样，但主要是两大部分。

1. 电枢保护绝缘

有整体轴绝缘及部分轴绝缘两种，其结构及规范见表 2-11。

表 2-11 电枢保护绝缘结构及规范

绝缘 类型	结 构 及 规 范	
	国 内	国 外
整体轴绝缘	(1) 在整个轴和铁心间垫 1 层 1 ~ 1.25mm 厚的绝缘层、绝缘材 料采用模压玻璃纤维酚醛 (2) 涂敷热固性环氧粉末 (3) 注射玻璃纤维增强尼龙	(1) 在轴上卷包绝缘 (2) 模压热固性塑料如石棉或 玻璃增强酚醛塑料 (3) 在轴上套绝缘套管后,用 树脂胶封 (4) 注射玻璃纤维增加热固性 材料
部分轴绝缘	转轴与铁心之间不加绝缘层。而是在电枢轴和主轴间采用绝缘联 轴器、接轴绝缘、绝缘主轴或塑料齿轮以及绝缘轴承座等方式。实现 部分轴绝缘	

2. 定子磁极保护绝缘

一般根据塑料的性能以及电动工具的容量大小采用在金属机壳与定子铁心间衬以塑料护套、带金属骨架的塑料外壳以及无金属骨架的全塑料外壳三种绝缘方式。采用加强绝缘的设备,特别是手持电动工具,在型号前均标有双重绝缘标志“回”。凡是加强绝缘的设备,在测试绝缘电阻时,应不低于 $7\text{M}\Omega$ 。

这里应该指出的是,使用双重绝缘的电动工具也并非绝对安全。一方面是因为绝缘层可能遭到破坏;另一方面也可能因外来因素,如加工工件划破了工具的电源线,或工具的工作头击中了被加工件内部的隐蔽的其他电源等。这类事故是极少数,但也可能发生,因此仅能说采用双重绝缘结构增加了电动工具的使用安全性。一般来说,采用双重绝缘结构的电动工具在使用时又妥善设置接地线是安全可靠的。

第二节 屏 护

一、屏护装置

电气屏护是采用屏护装置控制不安全因素,屏护装置包括

遮栏和障碍。遮栏可防止无意或有意触及带电体，障碍只能防止无意触及带电体。屏护还有防止电弧烧伤、防止短路和便于安全操作的作用。例如，防护式开关电器本身带有胶盖、铁壳等屏护装置，而开启式刀开关或其他设备则需另加屏护装置。高压设备往往很难做到全部绝缘，如果人接近至一定距离时即会发生电弧放电事故，因此不论高压设备是否有绝缘，均需加装屏护装置。

屏护不直接与带电体接触，根据不同条件可采用绝缘材料，也可采用金属材料，但是，必须满足以下要求：

- ① 所用材料应有足够的机械强度和阻燃性能，并安装牢固；
- ② 金属屏护装置应有良好的接地或接零措施；
- ③ 屏护装置上应有明显的标志，如“切勿触及，生命危险！”、“止步，高压危险！”、“当心触电！”等警告牌；
- ④ 屏护装置应与带电体保持足够的安全距离。

二、遮栏

遮栏是最常用的屏护装置，例如安装在室外地上的配电变压器，以及安装在车间或公共场所的配电装置，都要装设遮栏作为屏护。在邻近带电体的作业中，要在工作人员与带电体之间设置临时遮栏，以保证检修工作的安全，这种检修用遮栏通常采用干燥的木材或其他绝缘材料制成。

网状遮栏的网眼直径应保证指尖不能伸入（ $\phi 6.5\text{mm}$ 以下），且遮栏与带电体距离应满足最小安全距离，见表 2-12。

表 2-12 网状遮栏与带电体之间的最小安全距离

单位：m

额定电压/kV	1 及以下	10	20 ~ 35	110	220
最小安全距离	0.175	0.35	0.6	1.5	3.0

遮栏高度在户内不低于 1.2m，户外不低于 1.5m；栏条间距离不应大于 0.2m；对于低压设备，遮栏与裸导体的距离不应小于 0.8m。户外配电装置围墙高度一般不应小于 2.5m。

第三节 间 距

为了防止人体触及或接近带电体造成触电事故，为了避免车辆或其他器具碰撞或过分接近带电体，为了防止火灾、防止过电压放电和各种短路事故，以及为了方便操作，在带电体与地面之间、带电体与其他设施和设备之间、带电体与带电体之间均需保持一定的安全距离。安全距离的大小决定于电压的高低、设备的类型、安装的方式等因素。

一、变配电设备间距

1. 带电体间距

① 室内配电装置带电体与其他带电体或接地体之间的最小安全距离不应小于表 2-13 所列数值。当海拔高度超过 1000m 时，每升高 100m，A 值应增加 1%，B、C、D、E 应增加 A 值的增加值，尺寸 A、B、C、D、E 如图 2-1 所示。

表 2-13 室内配电装置的最小安全距离 单位：cm

数 设 条 件	额 定 电 压/kV								
	0.4	1~3	6	10	15	20	35	60	110 ^②
带电体至接地部分 (A ₁)	2	7.5	10	12.5	15	18	30	55	85/95
不同相带电体之间 (A ₂)	2	7.5	10	12.5	15	18	30	55	90/100
带电体至栅栏 (B ₁)	80	82.5	85	87.5	90	93	105	130	160/170
带电体至网状遮栏 (B ₂)	10	17.5	20	22.5	25	28	40	65	95/105

敷 设 条 件	额 定 电 压/kV								
	0.4	1~3	6	10	15	20	35	60	110 ^②
带电体至网状遮栏(B ₃)	5	10.5	13	15.5	18	21	33	58	88/98
无遮栏裸导体至地(楼)面(C)	230	237.5	240	242.5	245	248	260	285	315/325
无遮栏裸导体之间的水平距离(D) ^①	187.5	187.5	190	192.5	195	198	210	235	265/275
出线套管至室外通路路面(E)	375	400	400	400	400	400	400	450	500/500

① 指不同时停电检修情况。

② 110kV 数据中,前者指中性点直接接地系统,后者指中性点不接地系统。

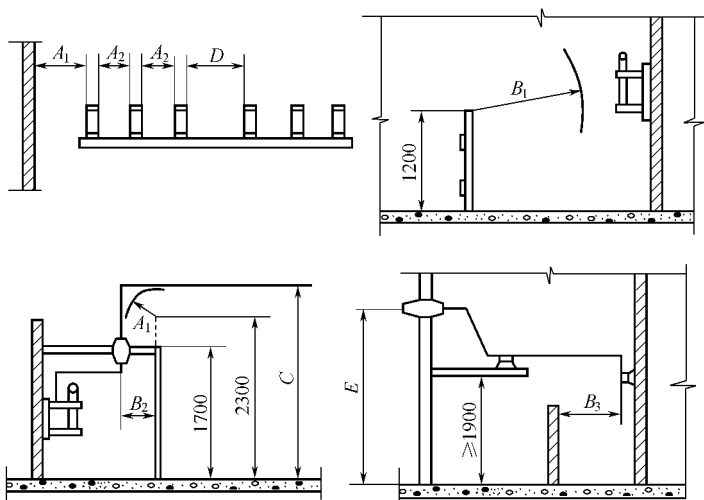


图 2-1 室内配电装置最小安全距离部位示意

② 室外配电装置带电体与其他带电体或接地体之间的最小安全距离不应小于表 2-14 所列数值。当海拔高度超过

1000m, 每升高 100m 时, A 值应增加 1%, B、C、D 应增加 A 值的增加值, 尺寸 A、B、C、D 如图 2-2 所示。

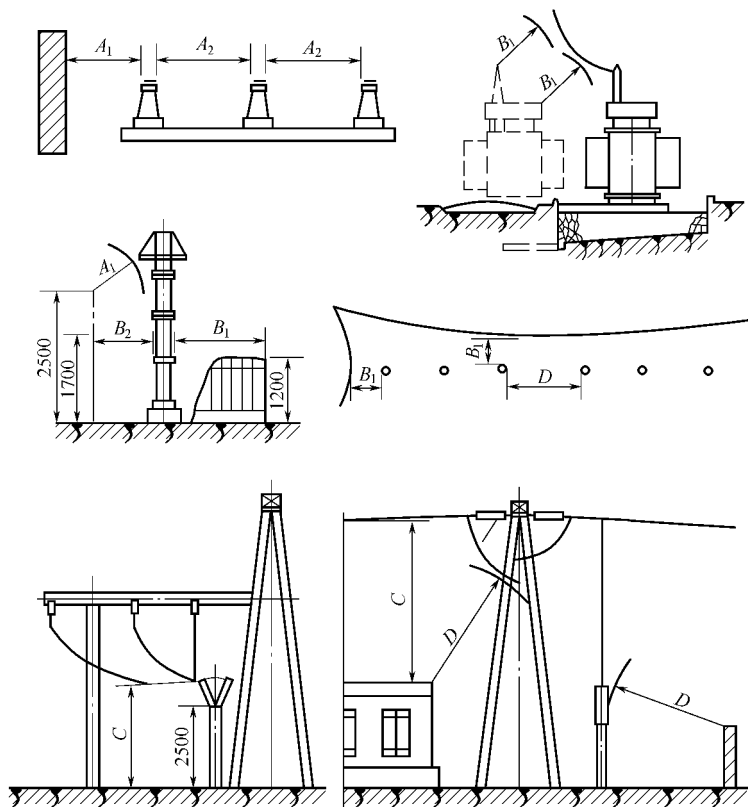


图 2-2 室外配电装置最小安全距离部位示意

2. 变压器间距

① 室内变压器外壳, 距门不应小于 1.0m, 距墙不应小于 0.8m; 35kV 及以上的变压器, 距门不应小于 2m, 距墙不应小于 1.5m; 变压器二次母线的支架, 距地面不应小于 2.3m。

② 安装在室外容量 320kVA 及以下的柱上变压器底部,

距地面不应小于 2.5m；室外变压器与周围的网状遮栏或围墙之间距离应满足变压器运输及维修的便利，有操作地方的宽度应为 1.5 ~ 2m；变压器高压跌开式熔断器对地距离不得低于 4.5m，相间距离不应小于 0.7m。

表 2-14 室外配电装置的最小安全距离 单位：cm

敷 设 条 件		额 定 电 压/kV					
		0.4	1 ~ 10	15 ~ 20	35	60	110 ^①
带电体至接地部分 (A_1)		7.5	20	30	40	65	90/100
不同相带电体之间 (A_2)		7.5	20	30	40	65	100/110
带电体至栅栏 (B_1)		82.5	95	105	115	135	165/175
带电体至网状遮栏 (B_2)		17.5	30	40	50	70	100/110
无遮栏裸导体至地面 (C)		250	270	280	290	310	340/350
不同时停电检修的 无遮栏裸导体间的	水平距离 (D)	200	220	230	240	260	290/300
	垂直距离	100	100	100	100	135	175/185

① 110kV 数据中，前者指中性点直接接地系统，后者指中性点不接地系统。

二、线路间距

1. 架空线路

① 架空线路的挡距大小是根据导线最低点对地面或建筑物垂直距离的要求（即限距）、导线允许应力与弧垂、杆塔高度和地形特点等因素确定的。一般 3.5kV 及以上送电线路的挡距通常都在 100m、200m 甚至 300m 以上，具体由设计计算确定。而对 10kV 及以下高低压架空线路的挡距一般规定如下。

高压线路：城市为 40 ~ 50m，农村为 60 ~ 100m。

低压线路：城市为 40 ~ 50m，农村为 40 ~ 60m。

高低压同杆时，挡距应满足低压线路的要求。

② 导线间距与线路的电压等级和挡距大小有关。同样的

挡距，电压越高导线间距也要求越大，而随着挡距的增大，则导线间距也应适当增大。

在一般挡距范围内，对导线间距的规定如下：10kV 架空线路的线间距离不应小于 0.6m；400V 低压架空线路线间距离不应小于 0.3m，但临近电杆的导线间距不应小于 0.5m，以保证导线对电杆有足够的安全距离。

③ 架空送电（输电）线路的线间距离导线的线间距离应符合下列要求，再结合运行经验加以确定，架空送电线路凡挡距在 1000m 以下时，其水平线间距离可按下述经验公式计算：

$$d = 0.4L_k + \frac{U_N}{110} + 0.65\sqrt{f}$$

式中 d——水平线间距离，m；

L_k ——悬垂绝缘子串长，m；

U_N ——线路额定电压，kV；

f——导线最大弛度，m。

一般情况下，对使用悬垂绝缘子串的杆塔，其水平线间距离可采用表 2-15 所列数值。

表 2-15 送电线路的线间距离规定 单位：cm

挡距/m	电 压/kV				
	35	60	110	154	220
75	150	—	—	—	—
100	175	—	—	—	—
125	200	250	300	—	—
150	200	275	325	—	—
175	225	275	325	—	—
200	250	300	350	400	—
250	275	325	350	400	—

挡距/m	电 压/kV				
	35	60	110	154	220
300	300	350	400	450	500
350	325	375	400	450	500
400	400	400	450	500	550
450	450	500	500	500	550
500	500	550	550	600	650
600	550	600	600	650	700
700	600	650	650	700	750
800	700	750	750	800	850
900	800	850	850	900	950
1000	900	950	950	1000	1050

导线垂直排列的线路，其线间距离除了考虑过电压绝缘距离外，还应考虑导线覆冰和积雪使导线下垂，以及覆冰脱落时导线跳跃的问题。一般在导线垂直排列的垂直距离可采用上述公式计算结果的 3/4 数值；使用悬垂绝缘子串的送电线路，其垂直线间距离不得小于表 2-16 规定的数值。

表 2-16 送电线路导线垂直距离 单位：cm

电压/kV	35	60	110	154	220
距离	200	225	350	450	550

在覆冰地区导线垂直排列时，上下层导线间或导线与避雷线间应有水平偏移，其大小按不同覆冰条件应保持表 2-17 中所列的数值。

多回路同塔并架线路，不同回路的不同相导线间的水平或垂直距离应不小于表 2-18 所规定的数值。

表 2-17 导线间或导线与避雷线间的水平偏移

单位：cm

电压/kV	35	60	110	154	220
设计覆冰厚度 10mm	20	35	50	70	100
设计覆冰厚度 15mm	35	50	70	110	150

表 2-18 多回路线间距离

单位：cm

电压/kV	35	60	110	154	220
距离	300	350	400	500	600

④ 架空导线的安全净距。架空导线在弛度最大时与地面和水面的距离不应小于表 2-19 所列数值；架空导线与树木的最小距离见表 2-20；架空导线与建筑物的最小距离见表 2-21；架空线路与工业设施的最小距离见表 2-22。

表 2-19 架空导线与地面或水面的最小距离 单位：m

线路经过地区	线路电压/kV		
	1 以下	1 ~ 10	35
居民区	6	6.5	7
非居民区	5	5.5	6
不能通航或浮运的河湖 (冬季水面)	5	5	—
不能通航或浮运的河湖 (50 年一遇的洪水水面)	3	3	—
交通困难地区	4	4.5	5
步行可以达到的山坡	3	4.5	5
步行不能达到的山坡、峭壁或岩石	1	1.5	3

表 2-20 架空导线与树木的最小距离

单位：m

线路电压/kV	≤1	10	35
垂直距离	1.0	1.5	4.0
水平距离	1.0	2.0	—

表 2-21 架空导线与建筑物的最小距离 单位：m

线路电压/kV	≤1	10	35
垂直距离	2.5	3.0	4.0
水平距离	1.0	1.5	3.0

表 2-22 架空线路与工业设施的最小距离 单位：m

项 目					线路电压/kV		
					≤1	10	35
铁路	标准 轨距	垂直 距离	至轨顶面		7.5	7.5	7.5
			至承力索或接触线		3.0	3.0	3.0
		水平 距离	电杆外缘至轨道中心	交叉	5.0		
				平行	杆高加 3.0		
	窄轨	垂直 距离	至轨顶面		6.0	6.0	7.5
			至承力索或接触面		3.0	3.0	3.0
		水平 距离	电杆外缘至轨道中心	交叉	5.0		
				平行	标高加 3.0		
道路	垂直距离				6.0	7.0	7.0
	水平距离 (电杆至道路边缘)				0.5	0.5	0.5
通航 河流	垂直距离	至 50 年一遇洪水位			6.0	6.0	6.0
		至最高航行水位的最高桅顶			1.0	1.5	2.0
	水平距离	边导线至河岸上缘			最高杆 (塔) 高		
弱电 线路	垂直距离				1.0	2.0	3.0
	水平距离 (两线路边导线间)				1.0	2.0	4.0
电力 线路	1kV 及以下	垂直距离			1	2	3
		水平距离 (两线路边导线间)			2.5	2.5	5.0
	10kV	垂直距离			2	2	3
		水平距离 (两线路边导线间)			2.5	2.5	5.0
	35kV	垂直距离			3	3	3
		水平距离 (两线路边导线间)			5.0	5.0	5.0

项 目			线路电压/kV		
			≤1	10	35
特殊 管道	垂直距离	电力线在上方	1.5	3.0	3.0
		电力线在下方	1.5	—	—
	水平距离 (边导线至管道)		1.5	2.0	4.0
索道	垂直距离	电力线在上方	1.5	2.0	3.0
		电力线在下方	1.5	2.0	3.0
	水平距离 (边导线至管道)		1.5	2.0	4.0

2. 接户线和进户线

接户线是从配电网到用户进线处第一个支持物的一段导线，进户线是从接户线引入室内的一段导线。

① 高压 6 ~ 10kV 接户线挡距不应大于 40m；自电杆引下时的线间距离不得小于 450mm；在引入口处的最小对地距离为 4.5m。

② 低压接户线允许的最小线间距离见表 2-23；低压接户线跨越交叉的最小距离见表 2-24。

表 2-23 低压接户线允许的最小线间距离 单位：cm

敷 设 方 式	挡 距	线间距离
自电杆上引下	25m 及以下	15
	25m 以上	20
沿墙敷设	6m 及以下	10
	6m 以上	15

③ 进户点应在接户点下方，且距离不大于 0.5m；进户点对地距离不应小于 2.7m；户外一端与接户线连接后应保持 0.2m 的弛度。

表 2-24 低压接户线跨越交叉的最小距离 单位：m

接户线跨越交叉的对象		最小距离
跨越通车的街道		6
跨越通车困难的街道、人行道		3.5
跨越住宅区		3 ^①
跨越阳台、平台、工业建筑屋顶		2.5
与通信、广播线交叉	接户线在上方时	0.6 ^②
	接户线在下方时	0.3 ^②
离开屋面		0.6
在窗户上方		0.3
在窗户或阳台栏杆下		0.8
与窗户或阳台的水平距离		0.75
与墙壁或构架的水平距离		0.05

① 住宅区跨越场地宽度在 3m 以上 8m 以下时，高度一般不应低于 4.5m。

② 如不能满足要求时，应采取隔离措施。

3. 电缆线路

① 直接埋在地下的电缆埋设深度一般不应小于 0.7m，并应埋在冻土层以下，与一般接地装置的接地之间应相距 0.25 ~ 0.5m，与工艺设备的最小距离见表 2-25。

表 2-25 直埋电缆与工艺设备的最小距离 单位：m

敷 设 条 件		最小距离		备 注
		平行	交叉	
电力电缆之间、电力电缆与控制电缆之间	10kV 及以上	0.25	0.5	(1) 交叉时，高压电缆应在低压电缆下方 (2) 电缆穿管或用隔板隔开时，平行净距可降低为 0.1m (3) 交叉点前后 1m 范围内，如电缆穿入管中或用隔板隔开，交叉净距可降低为 0.25m
	10kV 以下	0.1	0.5	
不同部门的电缆之间		0.5	0.5	
控制电缆之间		—	0.5	

敷 设 条 件		最小距离		备 注
		平行	交叉	
与热力管道(管沟)及热力设备之间		2.0	0.5	(1) 检修管道可能伤及电缆时,交叉点前后 1m 范围内应采取保护措施 (2) 交叉距离不能满足要求时,应将电缆穿入管中,则其间距可减为 0.25m
与可燃气体、易燃及可燃液体管道(管沟)之间		1.0	0.5	
与水管、压缩空气管道之间		0.5	0.5	
铁路路轨		3.0	1.0	穿管保护时,保护管应伸出路轨 2m 以外
电气化铁路路轨	交流	3.0	1.0	不能满足要求时,应采取防蚀措施
	直流	10.0	1.0	
公路		1.5	1.0	穿管保护时,保护管应伸出路边 2m 以外
道路		1.0	0.7	
电杆基础(边线)		1.0		
建筑物基础(边线)		0.6		电缆应在建筑物散水坡以外,穿管保护时,保护管应伸出散水坡以外
排水沟		1.0	0.5	

注:1. 电缆与热力管道接近时,电缆周围土壤温升不应超过 10℃,否则,应采取隔热措施。

2. 当穿管保护时,最小距离应从保护管(或其他保护物)外壁算起。

② 沿电缆沟或电缆隧道敷设的低压电缆应满足表 2-26 的要求。

表 2-26 电缆沟或电缆隧道低压电缆安装的最小距离

单位: mm

敷 设 条 件	隧道高度	电缆沟深度	
	1000	< 600	≥ 600
两边有支架,支架之间	1000	300	500
一边有支架,支架与墙壁之间	900	300	450
电力电缆支架层间	200	150	150
控制电缆支架层间	120	100	100
电力电缆与电力电缆之间	35	35	35

③ 户内电缆线路应尽量明敷，埋入地下时应当穿管。户内电缆与热力管道之间的距离不得小于 1m，否则需加隔热装置；电缆与其他管道之间的距离不得小于 0.5m，否则应采取适当防护措施；低压电缆之间的距离一般不小于 35mm；高、低压电缆之间的距离一般不小于 150mm。

4. 室内、外低压线路

① 线路水平敷设时，距地面最小允许距离：室内为 2.5m，室外为 2.7m；线路垂直敷设时，距地面最小允许距离：室内为 1.8m，室外为 2.7m。

② 室内、外绝缘导线线间最小允许距离见表 2-27。

表 2-27 室内、外绝缘导线线间最小允许距离

单位：mm

固定点间距	导线最小间隔	
	室内配线	室外配线
1.5m 以下	35	100
1.5 ~ 3m	50	100
3 ~ 6m	70	100
6m 以上	100	150

③ 室内线路与工业管道和工艺设备的最小距离见表 2-28。

表 2-28 室内线路与工业管道和工艺设备的最小距离

单位：mm

布线方式		导线穿金属管	电缆	明设绝缘导线	裸母线	吊车滑触线	配电设备
煤气管	平行	100	500	1000	1000	1500	1500
	交叉	100	300	300	500	500	—
乙炔管	平行	100	1000	1000	2000	3000	3000
	交叉	100	500	500	500	500	—

布线方式		导线穿金属管	电缆	明设绝缘导线	裸母线	吊车滑触线	配电设备
氧气管	平行	100	500	500	1000	1500	1500
	交叉	100	300	300	500	500	—
蒸汽管	平行	1000 (500)	1000 (500)	1000 (500)	1000	1000	500
	交叉	300	300	300	500	500	—
暖热水管	平行	300 (200)	500	300 (200)	1000	1000	100
	交叉	100	100	100	500	500	—
通风管	平行	—	200	200	1000	1000	100
	交叉	—	100	100	500	500	—
上、下水管	平行	—	200	200	1000	1000	100
	交叉	—	100	100	500	500	—
压缩空气管	平行	—	200	200	1000	1000	100
	交叉	—	100	100	500	500	—
工艺设备	平行	—	—	—	1500	1500	100
	交叉	—	—	—	1500	1500	—

注：1. 表内有括号的数值为线路在管道下边的数据。

2. 在达不到表中距离时，应采取下列措施。

蒸汽管——在管外包隔热层后，上下平行净距可减至 200mm，交叉距离需考虑便于维修，但管线周围温度应经常在 35℃ 以下。

暖热水管——包隔热层。

裸母线——在裸母线外加装保护网或保护罩。

3. 裸母线应敷设在管道上方。

4. 当上、下水管与电线管平行敷设、且在同一垂直面时，应将电线管敷设于水管上方。

④ 室内裸母线支架的间距一般不允许大于 3m，母线中心间距一般取 250mm。当支架必须安装于间距较大（如 6m）的柱上时，每挡中间可用一块绝缘隔板夹在母线上。裸母线至地

面、生产设备以及建筑物的最小距离见表 2-29。如果达不到最小距离要求时，可在母线外加保护网，并将支架间距减小为 2m。

表 2-29 裸母线至地面、生产设备以及建筑物的最小距离

单位：m

项 目	最小允许距离
距地面	3.5
距汽车通道的地面	6
距起重机铺板	2.2
距需要经常维护的管道	1
距生产设备	1.5
固定点间距 2m 以内时距建筑物	0.05
固定点间距 2 ~ 4m 时距建筑物	0.10
固定点间距 4 ~ 6m 时距建筑物	0.15
固定点间距 6m 以上时距建筑物	0.20

三、用电设备间距

车间低压配电箱底口距地面高度暗装时取 1.4m，明装时取 1.2m；明装电度表板底口距地面高度取 1.8m。

常用开关设备的安装高度为 1.3 ~ 1.5m，为便于操作，开关手柄与建筑物之间应保持 150mm 的距离；墙用平开关离地面高度取 1.4m；明装插座离地面高度取 1.3 ~ 1.5m，暗装的可取 0.2 ~ 0.3m。

照明灯具最低悬挂高度见表 2-30。如因生产和生活需要，必须将电灯适当放低时，灯头的最低垂直距离不应低于 1m，但应在吊灯线上加绝缘套管至离地 2m 的高度，并应采用安全灯头。若装用日光灯，则日光灯架上应加装盖板。

表 2-30 照明灯具最低悬挂高度

单位：m

光源种类	反射器类型	保护角	灯泡功率 /W	最低高度
白炽灯	搪瓷反射罩	10° ~ 30°	≤100	2.5
			150 ~ 200	3.0
			300 ~ 500	3.5
			≥500	4.0
	乳白玻璃漫射器	—	≤100	2.0
			150 ~ 200	2.5
			300 ~ 500	3.0
荧光灯	—	—	≤40	2.0
高压汞灯	搪瓷	10° ~ 30°	≤250	5.0
	铝抛光		≥400	6.0
卤钨灯	搪瓷	≥30°	500	6.0
	铝抛光		1000 ~ 2000	7.0
金属卤化物灯	搪瓷	10° ~ 30°	400	6.0
	铝抛光	> 30°	1000	14.0 ^①
高压钠灯	搪瓷	10° ~ 30°	250	6.0
	铝抛光		400	7.0

① 1000W 的金属卤化物灯有紫外线防护措施时,高度可适当降低。

四、检修间距

1. 高压作业

在高压作业中,应满足表 2-31 所列各项最小距离的要求。

2. 高处作业

凡在坠落高度基准面 2m 及以上有可能坠落的高处进行的作业均称为高处作业。在带电体附近进行高处作业时与带电体的最小安全距离必须满足表 2-32 的规定。遇特殊情况达不到

该要求时，必须采取可靠的安全技术措施，经技术总负责人批准后方可施工。

表 2-31 高压作业的最小距离

单位：m

类 别	电压等级	
	10kV	35kV
无遮栏作业，人体及其所携带工具与带电体之间 ^①	0.7	1.0
无遮栏作业用绝缘杆操作	0.4	0.6
线路作业，人体及其所携带工具与带电体之间 ^②	1.0	2.5
带电水冲洗，水型喷嘴与带电体之间	0.4	0.6
喷灯或气焊火焰与带电体之间 ^③	1.5	3.0

① 不足所列距离时，应装设临时遮栏。

② 不足所列距离时，邻近线路应当停电。

③ 火焰不应喷向带电体。

表 2-32 高处作业与带电体的最小安全距离 单位：m

项 目	带电体的电压等级 /kV					
	≤10	35	63 ~ 110	220	330	500
工器具、安装构件、导线、地线等与带电体的距离	2.0	3.5	4.0	5.0	6.0	7.0
作业人员的活动范围与带电体的距离	1.7	2.0	2.5	4.0	5.0	6.0
整体组立杆塔与带电体的距离	应大于倒杆距离（自杆塔边缘到带电体的最近侧为杆塔高）					

3. 起重作业

起重机严禁越过电力线进行作业。在临近带电体处吊装时，起重臂及吊件的任何部位与带电体（在最大偏斜时）的最小安全距离不得小于表 2-33 的规定。

表 2-33 起重机与带电体的最小安全距离 单位：m

电压等级 /kV	<1	1 ~ 10	35 ~ 63	110	220	330	500
最小安全距离	1.5	2.0	3.5	4.0	6.0	7.0	8.5

4. 架线工程

① 越线架与被跨越物的最小安全距离应符合表 2-34 的规定。

表 2-34 越线架与被跨越物的最小安全距离 单位：m

越线架部位	被 跨 越 物 名 称		
	铁 路	公 路	通信线
与架面水平距离	至路中心 3.0	至路边 0.6	0.6
与封顶杆垂直距离	至轨顶 5.5	至路面 5.5	1.0

② 各种材质越线架的立杆、大横杆及小横杆的间距不得小于表 2-35 的规定。

表 2-35 立杆、大横杆及小横杆的间距 单位：m

越线架类别	立 杆	大横杆	小横杆
钢管	2.0	1.2	1.5
木	1.5		1.0
竹	1.5		0.75

③ 越线架与带电体之间的最小安全距离在考虑施工期间的最大风偏后不得小于表 2-36 的规定。

表 2-36 越线架与带电体之间的最小安全距离

单位：m

越 线 架 部 位	被跨越电力线电压等级/kV			
	≤10	35	63 ~ 110	220
架面与导线的水平距离	1.5	1.5	2.0	2.5
无地线时,封顶网(杆)与带电体的垂直距离	1.5	1.5	2.0	2.5
有地线时,封顶网(杆)与带电体的垂直距离	0.5	0.5	1.0	1.5

第三章 电气接地、接零安全技术

第一节 概述及一般要求

在正常情况下，直接防护措施能保证人身安全，但是当电气设备绝缘发生故障而损坏时（如因温度过高绝缘发生热击穿、在强电场作用下发生电击穿、绝缘老化等都可能造成绝缘性能下降和损坏），造成电气设备严重漏电，使不带电的外露金属部件如外壳、护罩、构架等呈现出危险的接触电压，当人们触及这些金属部件时，就构成间接触电。

间接接触防护的目的是为了防止电气设备故障情况下，发生人身触电事故，也是为了防止设备事故进一步扩大。目前主要采用保护接地或保护接零以及等电位连接均压等技术措施。

保护接地和保护接零，也称接地保护和接零保护，虽然两者都是安全保护措施，但是它们实现保护作用的原理不同。简单地说，保护接地是将故障电流引入大地；保护接零是将故障电流引入系统，促使保护装置迅速动作而切断电源。

一、技术术语

1. 接地体

又称接地极，指埋入地下直接与土壤接触的金属导体和金属导体组，是接地电流流向土壤的散流件。利用地下的金属管道，建筑物的钢筋基础等作为接地体的称为自然接地体；按设计规范要求埋设的金属接地体称为人工接地体。

2. 接地线

连接电气设备接地部分与接地体的金属导线称为接地线，是接地电流由接地部位传导至大地的途径。接地线中沿建筑物

表面敷设的共用部分称为接地干线；电气设备金属外壳连接至接地干线部分称为接地支线。

3. 接地装置

接地体和接地线的组合称为接地装置。接地装置示意如图 3-1 所示。

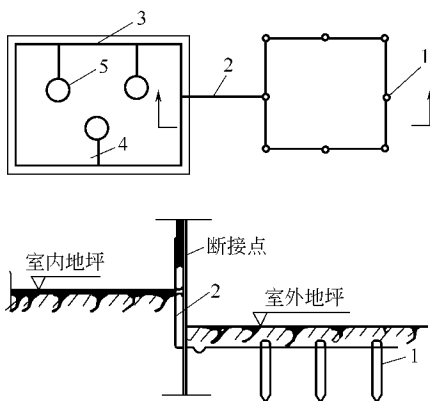


图 3-1 接地装置示意

- 1—接地体；2—接地引下线；3—接地干线；
4—接地分支线；5—被保护电气设备

4. 流散电阻和接地电阻

接地体的对地电压与经接地体流入地中的接地电流之比称为流散电阻（见图 1-4）即

$$R_e = \frac{U_e}{I_e}$$

式中 R_e ——流散电阻， Ω ；

U_e ——接地体的对地电压，V；

I_e ——接地电流，A。

严格来说，流散电阻与接地电阻是有区别的，接地电阻等于电气装置接地部分的对地电压与接地电流之比，亦即接地电

阻等于流散电阻加上接地导线本身的电阻，不过，因为接地导线本身的电阻很小，可忽略不计，所以一般认为接地电阻等于流散电阻。

5. 接地电流和接地短路电流

凡从接地点流入地下的电流称为接地电流。接地电流有正常接地电流和故障接地电流之分。正常接地电流是指正常工作时通过接地装置流入地下，借大地形成工作回路的电流；故障接地电流是指系统发生故障时出现的接地电流。

系统一相接地可能导致系统发生短路，这时的接地电流叫做接地短路电流。在高压系统中，接地短路电流可能很大，接地短路电流在 500A 及以下的，称为小接地短路电流系统；接地短路电流在 500A 以上的，称为大接地短路电流系统。

6. 工作接地

根据电力系统运行需要而进行的接地，如变压器中性点接地称为工作接地。

7. 保护接地

将电气设备正常运行情况下不带电的金属外壳和架构通过接地装置与大地连接，用来防护间接触电，因此，称作保护接地。

8. 保护接零

将电气设备正常运行情况下不带电的金属外壳和架构与配电系统的零线直接进行电气连接，用来防护间接触电，称作保护接零。

9. 重复接地

在低压三相四线制采用保护接零的系统中，为了加强接零的安全性，在零线的一处或多处通过接地装置与大地再次连接，称为重复接地，如图 3-2 所示。

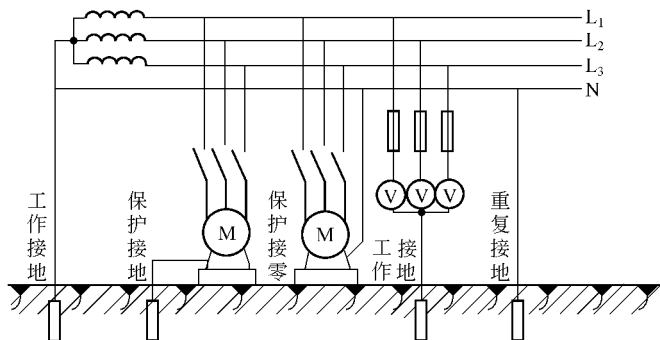


图 3-2 工作接地、保护接地、保护接零、重复接地示意

10. 对地电压和对地电压曲线

电流通过接地体向大地作半球形流散。因为半球面积与半径的二次方成正比，所以半球的面积随着远离接地体面而迅速增大，因此与半球面积对应的土壤电阻随着远离接地体面迅速减小。当离接地体 20m 处的半球面积已达 2500m^2 ，土壤电阻已小到可以忽略不计。这就是说，可以认为在离开接地体 20m 之外，电流不再产生电压降，或者说在远离接地体 20m 处，电压几乎降低为零。电气工程上通常说的“地”就是这里的地，而不是接地体周围 20m 以内的地。通常所说的对地电压，即带电体与大地之间的电位差，也就是指离接地体 20m 以外的大地而言的。简单地说，对地电压就是带电体与电位为零的大地之间的电位差。显然，对地电压等于接地电流和接地电阻的乘积。

如果接地体由多根钢管组成，则当电流自接地体流散至电位为零处的距离可能超过 20m。

从以上讨论中可以知道，当电流通过接地体流入大地时，接地体具有最高的电压。离开接地体后，电压逐渐下降，电压降落的速度也逐渐降低。如果用曲线来表示接地体及其周围各

点的对地电压，这种曲线就叫做对地电压曲线。图 3-3 所示为单一接地体的对地电压曲线。显然，随着离开接地体，土壤电阻逐渐减小，电压降落速度逐渐减缓，曲线逐渐变平，即曲线的陡度逐渐减小。

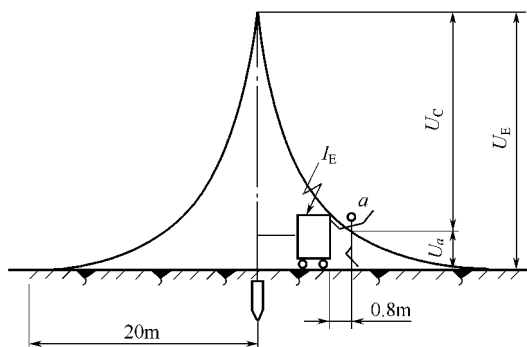


图 3-3 单一接地体的对地电压曲线及接触电压

11. 接触电动势和接触电压

接触电动势是指接地电流自接地体流散，在大地表面形成不同电位时，设备外壳与水平距离 0.8m 处之间的电位差。

接触电压是指加于人体某两点之间的电压。如图 3-3 所示。当设备漏电，电流 I_E 自接地体流入地下时，漏电设备对地电压为 U_E ，对地电压曲线呈双曲线形状。当人在 a 处触及漏电设备外壳，其接触电压为其手与脚之间的电位差。人的脚在 a 处对地电压为 U_a ，人的手由于触及漏电设备，所以人的手对地电压与漏电设备对地电压相同，即为 U_E ，这样在 a 处人所承受的接触电压 $U_C = U_E - U_a$ 。通常，按人体离开设备 0.8m 考虑，在忽略人的双脚下面土壤的流散电阻的情况下接触电压与接触电动势相等。实际上，人脚下面土壤的流散电阻总是存在，以致接触电压总是比接触电动势要低一些，也就是

比直接从对地电压曲线上取的电位差要低。

二、电气设备接地和接零的作用分析

1. 保护接地的作用

(1) 三相三线中性点不接地系统中的电气设备 若没有采取保护接地,当电气设备一相绝缘损坏漏电使金属外壳带电时,操作人员误触及漏电设备,故障电流将通过人体和线路对地绝缘阻抗构成回路,如图 3-4 (a) 所示。绝缘阻抗是绝缘电阻和分布电容的并联组合,其接地电流的大小与线路绝缘的好坏、分布电容的大小及电网对地电压的高低成正比。线路的绝缘越坏,对地分布电容越大、电压越高、触电的危险性越大。若漏电设备已采取保护接地措施时,故障电流将会通过接地体流散,流过人体的电流仅是全部接地电流中的一部分,如图 3-4 (b) 所示。

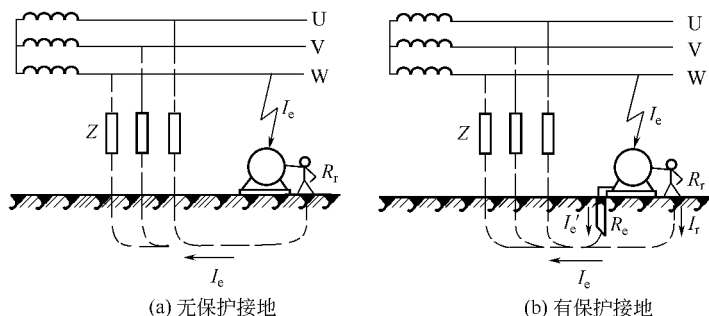


图 3-4 保护接地原理

在两条通路中,电流的分配关系可表示为

$$\frac{I_r}{I'_e} = \frac{R_e}{R_r}$$

$$I_e = I'_e + I_r$$

式中 I_r —— 流经人体的电流；
 I'_e —— 流经接地体的电流；
 R_e —— 接地电阻；
 R_r —— 人体电阻；
 I_e —— 接地电流。

从式中可以看出，接地电阻 R_e 越小，流过人体的电流 I_r 也越小。因此，只要控制接地电阻值在一定范围内，就能减轻人身触电的危险。所以，保证最小的接地电阻是很重要的，在电气设备施工和运行时期内，均应保证接地电阻不大于设计或规程所规定的接地电阻值，否则是不能充分起到保护作用的。

(2) 三相四线制中性点直接接地系统中的电气设备 如不采取保护接地或接零的措施，一旦电气设备漏电，人体误触及漏电设备外壳时，加在人体的接触电压为相电压 (220V)，接地短路电流通过人体电阻 R_r 与变压器工作接地电阻 R_N 组成串联电路，通过人体的接地电流通为

$$I_r = \frac{U}{R_r + R_N}$$

式中 I_r —— 流经人体的电流；
 U —— 漏电设备外壳对地电压 (220V)；
 R_r —— 人体电阻；
 R_N —— 变压器中性点接地电阻。

变压器中性点的工作接地电阻，一般规定在 4Ω 以下，如人体电阻取 800Ω ，则通过人体的电流为

$$I_r = \frac{U}{R_r + R_N} = \frac{220}{800 + 4} A = 0.274 A = 274 mA$$

这样大的电流通过人体足以使人致命，是非常危险的。

若漏电设备已采用保护接地时，则人体电阻和保护接地电阻并联。由于人体电阻比保护接地电阻大得多，接地短路电流绝大部分从接地电阻上通过，减轻了对人体触电伤害程度，如图 3-5 所示。现假设工作接地电阻 R_N 和保护接地电阻 R_e 都为 4Ω ，电气设备一相绝缘破坏，接地短路电流为

$$I_e = \frac{U}{R_N + \frac{R_r R_e}{R_r + R_e}} = \frac{220}{4 + \frac{800 \times 4}{800 + 4}} A = \frac{220}{4 + 3.98} A = 27.57 A$$

通过人体的电流为

$$I_r = \frac{220 - 27.57 \times 4}{800} A = 0.137 A = 137 mA$$

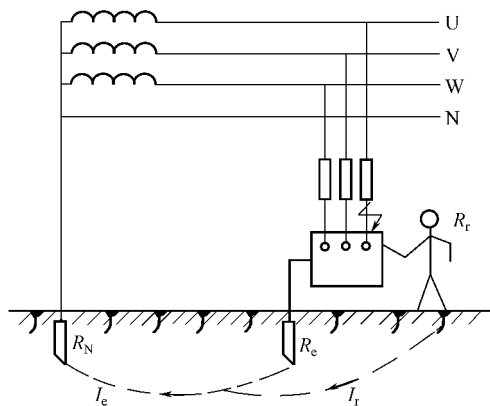


图 3-5 中性点直接接地系统采用保护接地时人体触及漏电设备外壳示意

从上述分析可知，中性点直接接地的电网采用保护接地虽比没有保护接地时触电的危险性有所减小，但通过人体的接地短路电流仍有可能使人致命，因此，在三相四线制中性点直接接地的低压配电系统中，电气设备如采用保护接地，根据国际 IEC 标准应装设漏电保护器。

2. 保护接零的作用

采用保护接零时，电气设备的金属外壳直接与低压配电系统的零线连接在一起。当其中任何一相绝缘损坏而使外壳带电时，形成相线和零线短路。由于相零回路阻抗很小，所以短路电流很大，使线路上的保护装置（如断路器、熔断器等）迅速动作，切除故障设备的电源，从而起到防止人身触电的保护作用，并减少设备损坏的机会。

3. 重复接地的作用

(1) 减轻零线断线时的触电危险 如零线没有采用重复接地时发生零线断线，而且在断线后面的某一电气设备又发生一相碰壳接地短路故障，故障电流通过触及漏电设备的人体和变压器的工作接地构成回路。因为人体电阻比工作接地电阻 R_N 大得多，所以人体几乎承受了全部相电压，造成严重的触电危险。

当零线采用了重复接地后，这时接地短路电流通过重复接地电阻 R_e 和 R_N 形成回路。在零线断线以后，电气设备外壳对地电压为 $U_e = I_e R_e$ ；在断线以前，电气设备外壳对地电压为 $U'_e = I_e R_N$ 。由于 U_e 和 U'_e 都小于相电压，所以降低了触电危险程度。

(2) 降低漏电设备外壳的对地电压 当没有采用重复接地时，一旦发生设备漏电时，设备外壳对地电压 U_e 等于单相短路电流 I_e 在零线电阻上产生的压降 U_N ，即 $U_e = U_N$ ；当采用了重复接地后，设备外壳对地电压仅为零线压降 U_N 的一部分；即

$$U_e \approx \frac{R_e}{R_N + R_e} U_N$$

式中 U_e ——设备对地电压；

R_e ——重复接地电阻；

R_N ——中性点接地电阻；

U_N ——零线上的电压降。

(3) 缩短故障持续时间 当发生碰壳接地短路时，因为重复接地在短路电流返回的途径上增加了一条并联支路，使单相短路电流增大，加速了线路保护装置的动作，缩短了故障持续时间。

(4) 改善配电线路的防雷 架空线路零线上的重复接地，对雷电流具有分流作用，因此有利于防止雷电过电压。

4. 过电压保护的作用

对于直击雷，避雷装置（包括过电压保护装置在内）促使雷云正电荷和地面感应负电荷中和，以防止雷电的产生。对于静电感应雷，感应产生的静电荷，其作用是迅速地把它导入地中，以防止静电感应过电压。对于电磁感应雷，防止感应出非常高的电动势，避免产生火花放电或局部发热，造成易燃或易爆物品燃烧爆炸的危险。

5. 防静电接地的作用

设备移动或物体在管道中流动，因摩擦产生静电，它聚集在管道、容器和储罐加工设备上，形成很多电位，对人身安全及对设备和建筑物都有危险。作静电接地后，一旦静电产生就导入地中，以消除其聚集的可能。

6. 工作接地的作用

在工作和事故情况下，保证电气设备可靠地运行，降低人体的接触电压，迅速切断故障设备。电气系统中，电力变压器中性点接地，避雷器组的引出线端接地等均等于工作接地。

7. 隔离接地的作用

把干扰源产生的电场限制在金属屏蔽的内部，使外界免受金属屏蔽内干扰源的影响。也可以把防止干扰的电器设备用金属屏蔽接地，任何外来干扰源所产生的电场不能穿进机壳内部，使屏蔽内的设备不受外界干扰源的影响。

三、电气设备接地接零的要求

1. 一般要求

① 为保证人身安全，所有的电气设备应装设接地装置，并将电气设备外壳接地和接零。

② 各种电气设备的保护接地和工作接地以及过电压保护接地，一般均可使用一个总的接地装置，其接地电阻应满足其中接地电阻要求最小值的规定。

③ 在电压为 1kV 以下的中性点直接接地的电气装置中，电气设备的外壳除另有规定外，一定要与电气设备的接地中性点有金属连接，以保证短路时能快速可靠地将故障点自动断开。

④ 电气设备的人工接地体，如管子、扁钢和圆钢等应尽可能使电气设备所在地点附近对地电压分配均匀，大接地短路电流电气设备一定要装设环形接地体，并加装均压带。

2. 共同与分开的接地接零要求

① 在同一电压而且有电气连接的系统中，所有电气设备应采用共同接地，即接地装置之间有电气连接，不允许单独接地。

② 由同一发电机组、同一变压器、或同一段母线供电的线路应采取相同的接地工作制。

③ 在同一个车间里，1kV 以上及 1kV 以下的用电设备应采取共同接地，中性点工作制不同时也应共同接地。

④ 采用统一接零有困难时，不接零的电气设备或线段应装设能自动断开故障点的漏电保护或断电保护装置。

⑤ 电气设备的工作接地与保护接地应与防雷接地分开，并保持一定的防止反击的安全距离。

3. 重复接地的要求

① 在中性点直接接地的低压线路中架空线末端、长度超过 200m 的架空线分支处和支线末端、没有分支线的每隔 1km 的直线段其零线应重复接地。

② 高低压线路共杆架设时，在共杆架设段的两端终端杆上，低压线路的零线应重复接地。此时如低压线引出支线长度超过 500m 时，在分支处零线也要重复接地。

③ 设有专用芯线作零线或利用电缆金属外皮作零线的低压电缆线路也要重复接地，其要求与架空线相同。

④ 为等化电位及减少接触电压，车间内金属结构和地下管道等应当用接地线连接起来组成环形重复接地，但整个车间还应有必要的集中重复接地装置。

⑤ 线路引入车间及大型建筑物的第一面配电装置处（进户处）应重复接地。

⑥ 采用金属配管线时，金属管与保护零线连接后做重复接地；采用塑料管配管时，另行敷设保护零线并做重复接地。

⑦ 当工作接地电阻不超过 4Ω 时，每处重复接地电阻不得超过 10Ω ；在配电变压器容量为 100kVA 及以下、变压器低压侧中性点工作接地电阻允许不超过 10Ω 的场合，每一重复接地电阻允许不超过 30Ω ，但不应少于三处。

4. 特殊设备的接地要求

① 携带式用电设备应采用设备特备的专用芯线接地，不得利用附近的零线作接地使用，零线和接地线分别单独与接地网相连接。

② 一般工业电子设备应有单独的接地体，接地电阻应不超过 10Ω ，接地体与设备距离应不大于 5m。

③ 中性点不接地系统供电的电弧炉设备，其外壳和炉壳应当接地，接地电阻不小于 4Ω ，接地线为截面不小于 16mm^2 的铜绞线；中性点接零系统供电的电弧炉设备外壳和炉壳应采取保护接零。

④ 在直流设备中，对于经常不流过直流的系统，在保护接地和接零方面的要求与交流设备相同；在直流设备特别少的

情况下，一般都采用中性点绝缘系统，此时对保护接地的要求与交流相同。

整流器的一极或中性点接地时，应采用接零系统，或装设接地短路继电器，以保证在设备外壳上发生接地时能迅速地切除故障。

为了降低大型电解槽的泄漏电流，一般不采用接地方式，而采取加强绝缘的方法。

四、电气设备接地的范围

1. 应当接地的部分

① 电机、变压器、开关设备、照明器具、移动式电气设备、电动工具的金属外壳或构架。

② 电气传动装置。

③ 电动互感器和电流互感器的二次线圈（继电保护另有要求时除外）。

④ 室内外配电装置、控制台等金属构件以及靠近带电部位的金属遮栏和金属门。

⑤ 电缆终端盒外壳、电缆金属外皮和金属支架。

⑥ 安装在配电线路杆塔上的电气设备，如避雷器、保护间隙、熔断器、电容器等金属外壳和钢筋混凝土杆塔等。

2. 不需接地的部分

① 在不良导电地面（木质、沥青等）的干燥房间内，当交流电压为 380V 及以下和直流额定电压 400V 及以下时，电气设备金属外壳不需接地。但当维护人员因某种原因同时可触及到其他电气设备中已接地的其他物体时，则应当接地。

② 在干燥地方，当交流额定电压为 36V 及以下和直流额定电压为 110V 及以下时，电气设备外壳不需接地，但遇有爆炸性危险的除外。

③ 电压为 220V 及以下的蓄电池室内的金属框架。

④ 如电气设备与机床的机座间能可靠地接地，可只将机床的机座接地。

⑤ 在已接地的金属构架上和配电装置上可以拆下的电器。

五、电力设备和电力线路接地电阻的要求

电力设备和电力线路接地电阻要求见表 3-1。

表 3-1 电力设备和电力线路接地电阻要求 单位： Ω

序号	名 称	接地装置特点	接地电阻值
1	1kV 以上 大接地电流 电力线路	仅用于该线路的接地装置	$R_e \leq \frac{2000^{④}}{I_e}$ 当 $I_e > 4000A$ ，可 取 $R_e \leq 0.5^{①}$
2	1kV 以上 小接地电流 电力线路	仅用于该线路的接地装置	$R_e \leq \frac{250}{I_e} \leq 10^{④}$
3		与 1kV 以下线路的共同接地装置	$R_e \leq \frac{250}{I_e} \leq 10^{④}$
4	1kV 以下 中性点直接 接地电力线 路	与容量在 100kVA ^② 以上的发电机或 变压器相连接的接地装置	$R_e \leq 4$
5		序号 4 的重复接地装置	$R_e \leq 10$
6		与容量在 100kVA ^② 及以下的发电机 或变压器相连接的接地装置	$R_e \leq 10$
7		序号 6 的重复接地装置	$R_e \leq 30^{③}$
8	1kV 以下 中性点不接 地电力线路	与容量在 100kVA ^② 以上的发电机或 变压器相连接的接地装置	$R_e \leq 4$
9		序号 8 的重复接地装置	$R_e \leq 10$
10		与容量在 100kVA ^② 及以下的发电机 或变压器相连接的接地装置	$R_e \leq 10$
11		序号 10 的重复接地装置	$R_e \leq 10^{③}$
12	引入线上 装有 25A 以 下的熔断器 的小容量线 路	任何供电系统的接地装置	$R_e \leq 10$

13	高低压电气设备	联合接地	$R_e \leq 4$
14	电流、电压互感器	二次线圈接地	$R_e \leq 10$
15	高压线路	保护网或保护线接地	$R_e \leq 10$
16	电弧炉	单独接地	$R_e \leq 4$
17	工业电子设备	单独接地	$R_e \leq 10$

续表

序号	名称	接地装置特点	接地电阻值
18	ρ 大于 $500 \Omega \cdot m$ 高土壤电阻率地区	1kV 以下小接地短路电流系统电力设备接地装置	$R_e \leq 20$
19		发电厂和变电所接地装置	$R_e \leq 10$
20		大接地短路电流系统发电厂和变电所装置	$R_e \leq 5$
21	无避雷线的架空线	小接地短路电流系统钢筋混凝土杆、金属杆接地装置	$R_e \leq 30$
22		低压线路钢筋混凝土杆、金属杆接地装置	$R_e \leq 30$
23		零线重复接地	$R_e \leq 10$
24		低压进户线绝缘子铁脚接地装置	$R_e \leq 30$

① 指单台或并联运行的总容量而言。

② 如采用自然接地体，即使达到接地电阻要求，还必须采用接地电阻不大于 1Ω 的人工辅助接地体。

③ 重复接地不应少于 3 处。

④ 表中 I_e 为接地装置流入地中的电流，计算方法如下：

1. 计算在中性点经消弧线圈接地的电网中电流

① 有消弧线圈时，计算电流等于消弧线圈额定电流的 125% ；

② 不接消弧线圈时，计算电流按当切断系统中最大一台消弧线圈时，在此电网中用可能发生的剩余接地短路电流来计算，但不得小于 30A。

2. 计算在中性点不接地的网络中电流
采用单项接地电容电流，可按下式计算：

$$I_e = \frac{U_I (35L_e + L_b)}{350}$$

式中 I_e ——**计算电流，A；**
 U_I ——**网络线电压，kV；**
 L_e ——**电缆线路长度，km；**
 L_b ——**架空线路长度，km。**

表 3-2 各种中性点工作制比较

特点比较	中 性 点 工 作 制				
	不接地	直接接地	经电阻接地	经电抗接地	经消弧线圈接地
单相短路电流与三相短路电流的比值	一般小于 1%, 但当线路长时, 可能稍大	最大, 可能为 100% 或更高	根据电阻数值而定, 一般为 5%~20%	根据电抗值而定, 一般为 5%~20%	最小, 几乎等于零
接地时过电压	最高	最低	较高	较高	较低
接地时, 不接地两相呈现的电压	高, 线路长时电压更高	低	比不接地稍低, 但高于相电压	比不接地稍低, 但高于相电压	在故障点大致等于相电压, 离开故障点还要高 20%~25%
发展为双重接地的可能性	大	小	中等	中等	中等
电弧接地可能性	可能	不可能	不可能	如电抗值大, 可能	不可能
单相接地时的电磁感应	如不发展为双重接地时, 感应小	最大, 由于高速断路器迅速动作, 持续时间短	中等, 电阻值大时, 感应值小	中等, 电抗值大时, 感应值小	小, 特别是当配置适当时更小, 但持续时间较长

特点比较	中性点工作制				
	不接地	直接接地	经电阻接地	经电抗接地	经消弧线圈接地
短路时对通信线的感应	小,但当双重接地或中性点偏移时产生感应,且时间较长	大,但采用高速断路器切除故障时,持续时间短	中等,当电阻值大时,感应值较小	中等,当电阻值大时,感应值较小	小,适当配置时间更小,但持续时间较长
平时对通信线路的感应	中性点偏移时,产生静电感应	小,但应考虑变压器及电量的三次谐波影响	多重接地情况下较小	多重接地情况下较小	共振时产生感应
对无线电干扰	当事故时或中性点偏移时,可能性大	小	事故时较直接接地大	事故时较直接接地大	事故时,可能性较大
单相接地的持续时间	长	最短	电阻大时,长	电抗大时,长	长
短路时切除故障的要求	如连接线路短可以消除事故;如连接线路长,则事故段必须隔离	事故段必须隔离	事故段必须隔离	事故段必须隔离	事故时,一般可以自然消弧;永久故障时,必须将事故段隔离

特点比较	中 性 点 工 作 制			
	不接地	直接接地	经电阻接地	经电抗接地
特点比较				经消弧线圈接地
事故操作情况	一般简单,双重接地时复杂	简单	简单	较大系统操作时,要变更消弧线圈分接头,较复杂
事故检查	要有特殊设备,一般比较困难	可在任何一部分检查	除非电阻很高,一般可在发生事故处检查	要用特殊设备检查
与其他不同中性点工作制系统连接的要求	只能与不接地系统或经绝缘变压器的系统相连	可与电抗接地系统相连	可与有继电保护的直接接地及电抗接地系统相接	除了接有消弧线圈及经绝缘变压器的系统外,其余不能连接
系统运行要求	由于继电器选择困难,有时要求较高	要求一般	要求一般	应按运行情况变更消弧线圈接头,要求较高
避雷器型式	中性点不接地式	中性点接地式	中性点不接地式	中性点不接地式
断路器断流容量	按三相断流容量考虑	当单相短路电流大时,按单相短路时断流容量考虑,否则按三相断流容量考虑	按三相断流容量考虑	按三相断流容量考虑

3. 计算接地短路电流

应按运行中可能发生最大接地短路电流的接线方式确定。

六、各种中性点工作制比较

电力系统各种中性点工作制比较见表 3-2。

第二节 配电系统的保护接地 和保护接零形式

一、文字代号的含义

第一个字母表示电力系统的对地关系：T——直接接地；I——所有带电部分与地绝缘或一点经阻抗接地。第二个字母表示装置的外露可导电部分的对地关系：T——外露可导电部分对地直接做电气连接，此接地点与电力系统的接地点无直接关系；N——外露可导电部分通过保护线与电力系统的接地点直接做电气连接。

在 TN 系统中，为了表示中性导体和保护导体的组合关系，有时在 TN 代号后面还附加以下字母；S——中性线和保护线是分开的；C——中性线和保护线是合一的。

二、分类

1. TN 系统

电力系统有一点直接接地，电气装置的外露可导电部分通过保护线与该接地点相连接。TN 系统分类如下。

(1) TN-S 系统 整个系统的中性线 N 与保护线 PE 是分开的，通常称之为三相五线制系统，如图 3-6 所示。

(2) TN-C 系统 整个系统的中性线 N 与保护线 PE 是合一的，即 PEN 线，通常称之为三相四线制系统，如图 3-7 所示。

(3) TN-C-S 系统 系统中有一部分线路的中性线与保护线合一，另一部分中性线与保护线是分开的供电系统，如图

3-8 所示。

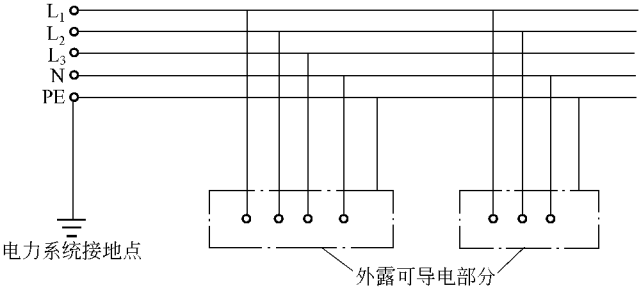


图 3-6 TN-S 系统

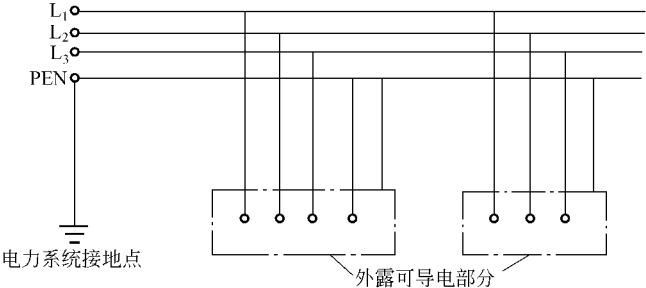


图 3-7 TN-C 系统

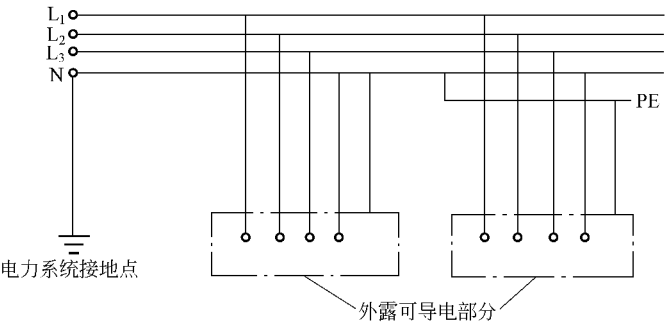


图 3-8 TN-C-S 系统

2. TT 系统

电力系统有一点直接接地，电气设备的外露可导电部分通过保护接地线 PE 接至与电力系统接地点无关的接地极，如图 3-9 所示。

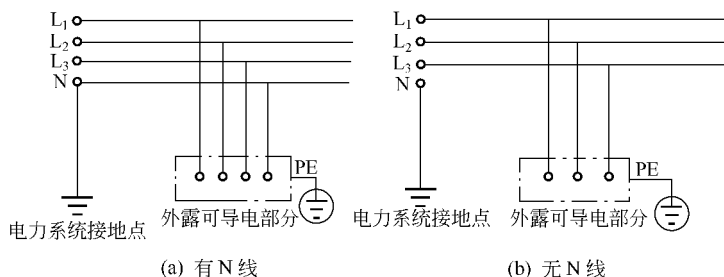


图 3-9 TT 系统

3. IT 系统

电力系统与大地间不直接连接，电气装置的外露可导电部分通过保护接地线 PE 与接地体连接，如图 3-10 所示。

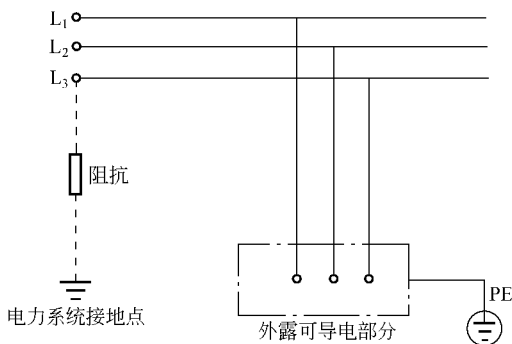


图 3-10 IT 系统

三、IT 系统安全条件

IT 系统除应满足表 3-1 接地电阻要求和接地装置的其他要求外，还应符合过电压防护、绝缘监视、等电位联结等条件。

1. 过电压防护

不接地配电网本身没有抑制过电压的功能，为了减轻过电压的危险，可将中性点经击穿熔断器接地，如图 3-11 所示。JBO 型击穿熔断器的击穿电压见表 3-3。正常情况下，击穿熔断器处在绝缘状态，配电系统不接地。当中性点上出现数百伏的电压时，击穿熔断器的空气隙击穿，中性点直接接地。中性点接地后，其对地电压为接地电流和接地电阻的乘积，降低接地电阻，可将过电压限制在一定的范围内。

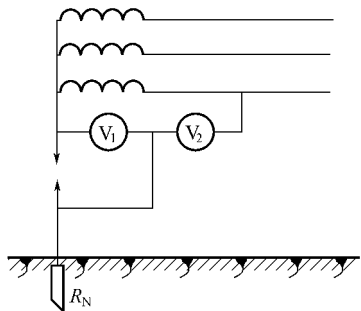


图 3-11 中性点经击穿熔断器接地

表 3-3 JBO 型击穿熔断器的击穿电压 单位：V

额定电压	220	380	500
击穿电压	351 ~ 500	501 ~ 800	801 ~ 1000

正常情况下，击穿熔断器必须保持良好绝缘状态，否则不接地配电网变成接地配电网，用电设备上的保护接地将不足以保证安全。因此，对击穿熔断器的状态应经常检查，或者如图 3-11 所示，接入两只相同的高内阻电压表进行监视。正常时，两只电压表的读数各为相电压的 $1/2$ ；击穿熔断器间隙短接后，一只电压表的读数降低至零，而另一只电压表的读数上升至相电压。

2. 绝缘监视

低压电网的绝缘监视可用三只规模相同的高内阻电压表来实现，其接线如图 3-12 (a) 所示。电网对地绝缘正常时，三

只电压表指示均为相电压；当某相故障接地时，该相电压表指示急剧降低，另两相电压表指示显著升高；即使电网没有故障接地，而是一相或两相对地绝缘严重恶化，三只电压表也会给出不同的指示。

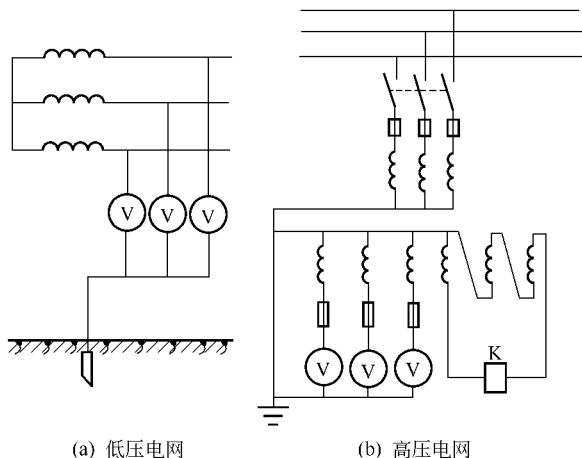


图 3-12 绝缘监视线路

高压电网的绝缘监视线路如图 3-12 (b) 所示。图中电压互感器有两组低压线圈：一组接成星形，供绝缘监视仪表和其他仪表及一般继电保护用；另一组接成开口三角形，开口处接信号继电器。对地绝缘正常时，三只电压表指示相同，三角形开口处电压为零，信号继电器不动作；当某相故障接地，或一相、两相对地绝缘严重恶化时，三只电压表给出不同指示，同时三角形开口处出现电压，信号继电器动作并发出信号。为减轻电压互感器一、二次短接的危险，互感器二次绕组必须接地；为保证绝缘监视的灵敏性，互感器一次绕组中性点和三只电压表的中性点也必须接地。

3. 等电位联结

如图 3-13 所示为等电位联结线路，如图中虚线所示将两台设备接在一起，或将其接地装置接成整体，当发生双重故障时，相间短路电流将使保护装置动作，迅速切断两台设备或其中一台的电源，以保证安全。如不能实现等电位联结，则应安装漏电保护器。

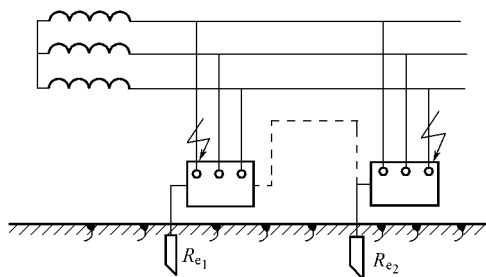


图 3-13 等电位联结线路

四、保护接零 (TN 方式) 的安装要求

保护接零适应于电压为 400/230V 低压中性点直接接地的三相四线制和三相五线制配电系统。TN-C 系统用于无爆炸危险和安全条件较好的场所；TN-S 系统用于爆炸危险性较大和安全要求较高的场所；有独立附设变电所的车间宜采用 TN-S 系统；厂区没有变电所、低压进线的车间可采用 TN-C-S 系统。

保护接零的安装要求如下。

① 当配电网中任何一点相线和零线，或电气设备带电导线和金属外壳间发生短路时，应使故障自动断开。单相短路电流应不小于故障点熔断器熔体额定电流的 4 倍，或应不小于断路器瞬时或短延时动作电流的 1.5 倍。保护零线在短路电流作用下不能熔断。

② 采用电压操作型漏电保护断路器监视零线对地电压值

时，断路器动作应使相线和零线或所有相线同时切断。采用差动电流操作型漏电保护断路器监视保护零线时，断路器的动作要求也相同。

③ 零线一般与相线取相等截面，但最小截面应满足表 3-4 中的要求。

表 3-4 零线的最小截面

单位：mm²

相 导 体		标 称 截 面								
		1.5	2.5	4	6	10	16	25	35	50
零线	多芯电缆穿管敷设时	1.5	2.5	4	6	10	16	16	25	25
	架空线户内外明敷时	—	—	4	6	10	16	25	35	50
相 导 体		标 称 截 面								
		70	95	120	150	185	240	300	400	
零线	多芯电缆穿管敷设时	35	50	70	70	95	120	150	185	
	架空线户内外明敷时	50	50	70	70	95	120	150	185	

④ 零线除应在电源处接地外，在架空线的干线和分支线的终端及沿线每 1km 处要重复接地。如终端离前一处接地不超过 50m，则可不另行重复接地。重复接地极的电阻应不大于 10Ω。

⑤ 为防止零线断线时搭落在相线上，架空线路的零线应架设在相线的下层。

⑥ 零线上不准装设断路器、刀开关或熔断器。如必须安装时，则应保证在 PEN 导体中断的同时中断相导体。

⑦ 多芯导线中由黄色和绿色相间表示的导线，在保护接零系统中，规定作为保护接零的导线。

⑧ 在同一台变压器供电的低压电网中，不允许将一部分电气设备的金属外壳采用保护接地，而将另一部分电气设备的金属外壳采用保护接零，否则当采用保护接地的设备发生漏电

时，会使整个零线上出现危险电压，威胁人身安全。

⑨ 使用单相三眼插座时，工作零插孔（N）和保护零线孔（E）不准钩连在一起使用，否则当工作零线发生断线或工作零线与相线接触时，都会使设备的外壳带电而造成人身触电事故。

五、保护接地（TT 和 IT 方式）的安装要求

① 保护接地的电阻不应大于 4Ω 。

② 在采用保护接地的系统中，采用插头自插座上接入电源至用电设备的系统，应采用带专用保护接地插脚的插头，使保护接地在电源接入前接通、电源撤除后才断开。不能采用保护接地不经插头接至用电设备的做法，因这种做法不能保证在插入电源的同时装好保护接地。

③ 保护接地干线的允许电流不应小于供电网中最大负载线路相线允许载流量的 $1/2$ 。单独用电设备，共接地线的允许电流不应小于供电分支网络相线允许载流量的 $1/3$ ，保护接地线的最小截面应符合表 3-5 的规定。

表 3-5 保护接地线的最小截面 单位： mm^2

供电相导线		标 称 截 面									
		<0.5	0.75	1	1.5	2.5	4	6	10	16	25
绝缘铜芯线作	绝缘电力电缆	0.5	0.75	1	1.5	2.5	4	6	10	16	16
保护导线	低压多芯电缆	—	—	—	1.5	2.5	4	6	10	16	16
裸铜线作保护导线		—	—	—	1.5	2.5	2	4	6	10	16
供电相导线		标称截面									
		35	50	70	95	120	150	185	240	300	400
绝缘铜芯线作	绝缘电力电缆	16	25	35	50	70	70	95	—	—	—
保护导线	低压多芯电缆	16	25	35	50	70	70	95	120	150	185
裸铜线作保护导线		16	25	35	50	50	50	50	50	50	50

④ 必须有保护中性线接地及保护接地线的措施，以防机械损伤。

⑤ 保护接地系统接入运行前及每隔一定时间后要进行检查，以检查接地情况。

第三节 接 地 装 置

一、接地体的分类

按接地体的结构可分为自然接地体和人工接地体两类；按其布置方式可分为外引式接地体和回路式接地体两种；相应的接地线亦有自然接地线和人工接地线两种。

1. 自然接地体

交流电力设备的接地装置应充分利用自然接地体，一般可利用：

① 埋设在地下的金属管道（易燃、易爆性气体、液体管道除外）、金属构件等；

② 敷于地下的而其数量不少于两根的电缆金属护套；

③ 与大地有良好接触的金属桩、柱等；

④ 混凝土构件中的钢筋基础。

交流电力设备的自然接地线、一般可利用：

① 建筑物的金属结构，例如桁架、柱子、梁及斜撑等；

② 生产用的金属结构，例如起重机轨道、配电装置的外壳、走廊、平台、电梯竖井、起重机与升降机的构架、运输皮带的钢梁、电除尘器的构架等；

③ 敷设导线用的钢管，封闭式母线的钢外壳，钢索配线的钢索；

④ 电缆的金属构架，铅构架、铅护套（通信电缆除外）；

⑤ 不流经可燃液体或气体的金属管道可用作低压设备接

地线。

敷设接地体时，应首先选用自然接地体，因为它具有以下优点。

① 自然接地体一般较长，与地的接触面积较大，流散电阻小，有时能达到采用专门接地体所不能达到的效果。

② 用电设备大多数情况下与自然接地体相连，事故电流从自然接地体流散，所以比较安全。

③ 自然接地体在地下纵横交错，作为接地体可以等化电位。

金属电缆护套流散电阻和金属水管流散电阻见表 3-6 ~ 表 3-8。

表 3-6 金属电缆护套流散电阻（当 $\rho = 1 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ 时）

单位： Ω

电压 /kV	电缆长度/m	电缆芯截面积/mm ²				
		240,185,150	120,95	70,50	35,25	16
1	<300	1.15	1.5	1.75	1.9	2.4
	300 ~ 700	1.0	1.15	1.4	1.6	1.9
	>700	0.75	0.95	1.1	1.3	1.6
6	<300	0.9	1.2	1.4	1.5	1.9
	300 ~ 700	0.8	0.9	1.1	1.2	1.5
	>700	0.6	0.75	0.85	1.0	1.2
10	<300	0.75	1.0	1.2	1.3	1.6
	300 ~ 700	0.7	0.75	0.85	1.0	1.3
	>700	0.5	0.65	0.75	0.85	1.0
35	<300	0.194	0.26	0.312	0.338	0.416
	300 ~ 700	0.181	0.194	0.221	0.20	0.338
	>700	0.13	0.169	0.194	0.221	0.26

注 1. 表中流散电阻为土壤电阻率 $\rho = 1 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ 时的数值，如 ρ 为其他数值时，应乘以表 3-8 中的修正系数 K_ρ 。

2. 当若干根截面接近的电缆敷设在同一壕沟中时，总流散电阻可按下式决定

$$R' = \frac{R}{\sqrt{n}}$$

式中 R——本表查出的数值；

n——敷设根数。

3. 在不同壕沟敷设时，可以根据上述 R'_1 、 R'_2 、……、 R'_n 进行并联。

表 3-7 金属水管流散电阻 (当 $\rho = 1 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ 时)单位: Ω/km

管 径	接 地 电 阻 值	
	长度在 1km 以下	长度超过 1km
$1 \frac{1}{2}" \sim 2"$	0.37	0.27
$2 \frac{1}{2}" \sim 3"$	0.27	0.22
4" ~ 6"	0.22	0.18

注 表中流散电阻为土壤电阻率 $\rho = 1 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ 时的数值,如 ρ 为其他数值时,应乘以表 3-8 中的修正系数 K_p 。

表 3-8 金属水管及金属电缆护套在土壤电阻率
不同于 $\rho = 1 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ 时的修正系数

土壤电阻率 $\rho/\Omega \cdot \text{cm}$	3×10^3	5×10^3	6×10^3	8×10^3	1×10^4	1.2×10^4
修正系数 K_p	0.54	0.7	0.75	0.89	1	1.12
土壤电阻率 $\rho/\Omega \cdot \text{cm}$	1.5×10^4	2×10^4	2.5×10^4	3×10^4	4×10^4	5×10^4
修正系数 K_p	1.25	1.47	1.65	1.8	2.1	2.35

2. 人工接地体

当自然接地体的流散电阻不能满足要求时,可敷设人工接地体。但是,在实际工作中往往因为利用自然接地体有很多困难。自然接地体在保证最小电阻时不太可靠,所以有时在自然接地体可用而又能满足要求的电阻情况下,也敷设人工接地体,并使人工接地体与自然接地体相接。

对于 1000V 以上接地电流的电气设备的保护接地,除了利用自然接地体以外,还必须敷设流散电阻不大于 1Ω 的人工接地体。

直流电力电路不应利用自然接地体,直流电路专用的人工接地体不应与自然接地体相连。

人工接地体一般采用钢管、角钢、圆钢、扁钢制成。在一般性土壤中可采用未经电镀的黑色钢材；在有较严重化学腐蚀性的土壤中应采用镀锌的钢材。对于避雷针的接地装置，在一般性土壤中也应采用镀锌钢材，以确保安全。

3. 外引式接地体

将接地体集中布置于电气装置区外的某一点的接地体称为外引式接地体，如图 3-1 所示。外引式接地体的主要缺点是既不可靠，也不安全。由于电位分布极不均匀，人体接触到距接地体近的电气设备时其接触电压小；接触到距接地体远的电气设备时其接触电压大；接触到离接地体 20m 以外的电气设备时的接触电压将近等于接地体的全部对地电压（见图 1-4）。

从图 3-1 中可以看出，外引式接地体与室内接地线仅通过两条干线来连接。若此两条干线发生损伤时，整个接地线就同接地体断开。但两条干线同时发生损伤的情况是较少的。

4. 回线式接地体

为避免外引式的缺点，一般的作法是敷设回路（环路）式接地体，如图 3-14 所示。回路式接地体电位分布比较均匀，从而可以减少跨步电压和接触电压。

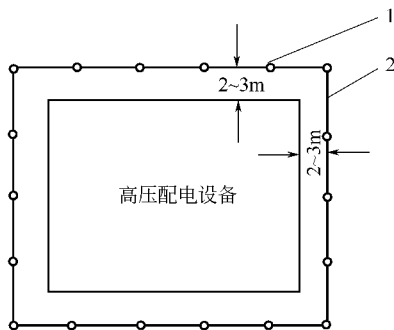


图 3-14 回路式接地体的布置

1—钢管；2—连接钢条

二、接地体的安装

1. 人工接地体的布置方式

人工接地体宜采用垂直接地体。多岩地区和土壤电阻率较高的地区，可采用水平接地体。

(1) 垂直接地体的布置 在普通沙土壤地区（土壤电阻率 $\rho \leq 3 \times 10^4 \Omega \cdot \text{m}$ ），因地电位分布衰减较快，可采用以管形接地体为主的棒带式接地装置。采用管形接地体的优点是：机械强度高，可以用机械方法打入土壤中，施工较简单；达到同样电阻值，较其他接地体经济；容易埋入地下较深处，土壤电阻率变化较小；与接地线易于连接，便于检查；用人工方法处理土壤时，易于加入盐类溶液。

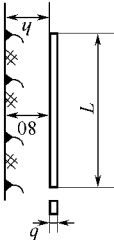
在一般情况下，镀锌钢管管径为 48 ~ 60mm，常用 50mm；长度为 2 ~ 3m，常用 2.5m。因为直径太小，机械强度小、容易弯曲、不易打入地下；但直径太大，流散电阻降低不多，例如 $\phi 125\text{mm}$ 钢管比 $\phi 50\text{mm}$ 钢管流散电阻只小约 15%。长度与流散电阻也有关系，管长小于 2.5m 时，流散电阻增加很多；但管长大于 2.5m 时，流散电阻减小值很小。为了减少外界温度、湿度变化对流散电阻的影响，管的顶部距地面应不小于 0.6m，通常取 0.6 ~ 0.8m。

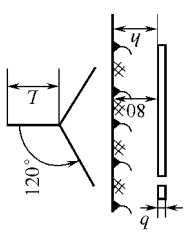
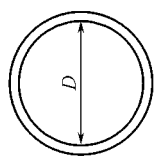
接地体的布置应根据安全、技术要求因地制宜安排，可以组成环形、放射形或单排布置。环形布置时，环上不能有开口端；为了减小接地体相互间的流散屏蔽作用，相邻垂直接地体之间的距离可取其长度的 2 倍左右。垂直接地体上端采用扁钢或圆钢连接。成排布置的接地装置，在单一小容量电气设备接地中应用较多，例如小容量配电变压器接地。

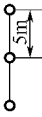
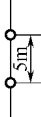
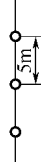
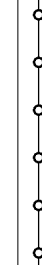
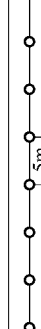
(2) 水平接地体的布置 在多岩地区和土壤电阻率较高（ $3 \times 10^4 \leq \rho \leq 5 \times 10^4 \Omega \cdot \text{m}$ ）的地区，因地电位分布衰减较慢，宜采用水平接地体为主的棒带接地装置。水平接地体通常

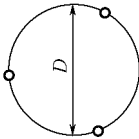
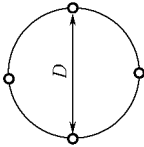
采用

表 3-9 常用人工接地装置选择

序 号	接地装置型式	埋 设 简 图	接地电阻计算公式	金属用量/m			下列土壤电阻率的接地电阻/ Ω		
				钢管 $\phi 50$	扁钢 40×4		0.5×10^4	1×10^4	2.5×10^4
1	水平敷设		$R = 0.366 \frac{\rho}{L} \lg \frac{2L^2}{bh}$ ρ——土壤电阻率, $\Omega \cdot \text{cm}$ L——扁钢长度,cm b——扁钢宽度,cm $h = 80 + \frac{1}{2}b$						
					5		11.7	23.4	58.5
					10		6.9	13.9	34.5
					15		5.1	10.2	25.5
					20		4	8	20
					25		3.4	6.7	17
					30		2.9	5.8	14.5
					35		2.5	5.1	12.5
					40		2.3	4.5	11.5
					45		2.1	4.2	10.5
					50		1.9	3.8	9.5
					60		1.6	3.3	8
					70		1.4	2.9	7
					80		1.3	2.6	6.5
					90		1.2	2.3	6
					100		1.1	2.1	5.5

序 号	接地装置型式	埋 设 简 图	接地电阻计算公式	金属用量/m	下列土壤电阻率的接地电阻/ Ω		
				钢管 $\phi 50$	扁钢 40×4	0.5×10^4	1×10^4
2	水平放射式敷设 $L=2.5\text{m}$		$R = \frac{R_b}{n\eta_f}$ 一根射线的接地电阻, Ω R_b —— n —— 射线根数 η_f —— 射线长度, cm 用系数可取 0.76~0.82	7.5	8.6	17.3	43.3
	$L=5\text{m}$			15	5	10.1	25
	$L=15\text{m}$			45	2.08	4.17	10.4
3	水平环形敷设 $D=2.5\text{m}$		$R = 0.366 \frac{\rho}{l} \lg \frac{8l^2}{\pi b h}$ l —— 周长, cm (在周长相等时, 矩形可按环形套用) (单位: cm)	7.85	8.7	17.5	43.5
	$D=4\text{m}$			12.6	6	12.1	30
	$D=6\text{m}$			18.9	4.4	8.8	22
	$D=8\text{m}$			25.1	3.5	6.9	17.5
	$D=10\text{m}$			31.4	2.9	5.8	14.5
	$D=12\text{m}$			37.6	2.5	4.9	12.5
	$D=14\text{m}$			44	2.2	4.4	11
	$D=16\text{m}$			50.2	2	3.9	10
	$D=18\text{m}$			56.5	1.8	3.5	9
	$D=20\text{m}$			62.8	1.6	3.2	8

序 号	接地装置型式	埋 设 简 图	接地电阻计算公式	金属用量/m			下列土壤电阻率的接地电阻/ Ω		
				钢管 $\phi 50$	扁钢 40×4		0.5×10^4	1×10^4	2.5×10^4
4	单根垂直 接地装置		简化公式 $R = 0.0031\rho$	2.5			15.5	31	77.5
	两根垂直 接地装置		$R = \frac{R_1 R_2}{n R_2 \eta_1 + R_1 \eta_2}$ R_1 ——单根垂直接地极的接地电阻, Ω R_2 ——连接扁钢(未考虑屏蔽)接地电阻, Ω n ——垂直接地极根数 η_1 ——垂直接地极的利用系数可取0.75~0.85 η_2 ——连接扁钢的利用系数取0.75~0.9 垂直接地极顶距地面80cm	2×2.5	5		5.4	10.8	27
	3根垂直 接地装置			3×2.5	10		3.2	6.4	16
	4根垂直 接地装置			4×2.5	15		2.6	5.3	13.2
	5根垂直 接地装置			5×2.5	20		2.2	4.4	11
	6根垂直 接地装置			6×2.5	25		1.9	3.8	9.5
	8根垂直 接地装置			8×2.5	35		1.4	2.8	7
	10根垂直 接地装置			10×2.5	45		1.13	2.26	5.6

序 号	接地装置型式	埋 设 简 图	接地电阻计算公式	金属用量/m			下列土壤电阻率的接地电阻/ Ω	
				钢管 $\phi 50$	扁钢 40×4		0.5×10^4	1×10^4
5	环形垂直 接地装置 $n=3$ 根 $D=3\text{m}$		计算公式同序号 4, 不同的是利用系数均 查环形: $n=3$ 时 $\eta_1=0.9, \eta_2=0.75$ $n=4$ 时 $\eta_1=0.85, \eta_2=0.7$	8×2.5	10	5	10	25
	环形垂直 接地装置 $n=4$ 根 $D=6\text{m}$			4×2.5	18.9	3.28	6.6	16.4
	环形垂直 接地装置 $n=4$ 根 $D=10\text{m}$			4×2.5	31.4	2.2	4.4	11

注: 1. 扁钢 40×4 和 25×4 与圆钢 $\phi 14$ 和 $\phi 12$ 的截面差别可略去不计, 只要长度相同则接地电阻近似相等。 $50 \times 50 \times 5$ 角钢和 $\phi 50$ 钢管, 只要长度相同则接地电阻也近似相等。

2. 冲击系数一般都小于 1, 实际上是测量工频电阻而不是冲击电阻, 因此, 本表不考虑二者的差别。

40 mm × 4 mm 镀锌扁钢，或直径为 12 ~ 16 mm 的镀锌圆钢组成，可呈放射形、环形或成排布置。水平接地体应埋设于冻土层以下，一般深度为 0.6 ~ 1 m，扁钢水平接地体应立面竖放，这样有利于减少流散电阻。变配电所的接地装置，应敷设以水平接地体为主的人工接地网。常用人工接地装置选择见表 3-9。

2. 接地装置的导体截面要求

应符合热稳定和场压的要求，钢质接地体和接地线的最小尺寸见表 3-10；铜、铝接地线只能用于地面以上，其最小尺寸见表 3-11。

表 3-10 钢质接地体和接地线的最小尺寸

材 料 种 类		地 上		地 下	
		室 内	室 外	交 流	直 流
圆钢直径/mm		6	8	10	12
扁钢	截面/mm ²	60	100	100	100
	厚度/mm	3	4	4	6
角钢厚度/mm		2	2.5	4	6
钢管管壁厚度/mm		2.5	2.5	3.5	4.5

表 3-11 铜、铝接地线的最小尺寸 单位：mm²

材 料 种 类	铜	铝
明设的裸导线	4	6
绝缘导线	1.5	2.5
电缆接地芯或与相线包在同一保护套内的多芯导线的接地芯	1	1.5

3. 接地体安装的其他要求

除前面讲述的一些要求外，还应注意以下问题。

① 交流电力电路同时采用自然、人工两种接地体时，应

设置分开测量接地电阻的断开点。自然接地体应不少于两根导体在不同部位与人工接地体相连接。

② 接地体埋设位置离独立避雷针接地体之间的地下距离不得小于 3m；离建筑物墙基之间的地下距离不得小于 1.5m；经过建筑物人行通道的接地体应采用帽檐式均压带做法。

③ 车间接地干线与自然接地体或人工接地体相连时，应不少于两根导体在不同地点连接。

④ 接地体所有连接处均应采用搭接焊，搭接部分的长度扁钢应不小于宽度的 2 倍，应有三个邻边施焊；圆钢应不小于直径的 6 倍，应在两侧面施焊，凡焊接处均应刷沥青油防腐。

4. 接地线安装的其他要求

除前面讲述的一些要求外，还应注意以下问题

① 金属结构件作为自然接地线时，用螺栓或铆钉紧固的接缝处应用扁钢跨接。作为接地干线的扁钢跨接线，截面应不小于 100mm^2 ，作为接地分支跨接线时，应不小于 48mm^2 。

② 利用电线管本体作为接地线时，钢管管壁厚度应不小于 1.5mm^2 ，在管接头及分线盒处都应加焊跨接线。钢管直径在 40mm 以下时，跨接线应采用直径 6mm 圆钢，钢管直径为 50mm 以上时，应采用 $25\text{mm} \times 4\text{mm}$ 的扁钢。

③ 室内接地线可以明敷设或暗敷设。明敷设时应符合下列基本要求：接地干线沿墙距地面的高度一般应不小于 0.2m；支持卡子距离墙面应不小于 10mm；卡子间距应不大于 1m，分支拐弯处应不大于 0.3m；跨越建筑物伸缩缝时，应留有适当裕度，或采用软连接；穿越建筑物处，应采取加保护管等保护措施。

接地线暗敷设时，接地干线的两端都应有明露部分。根据需要，沿干线可设置接地线端子盒，供连接及检测使用。

④ 携带式用电设备应采用多芯线中的专用保护芯线（PE

线) 接地, 此芯线严禁同时用作 N 线通过电流, 严禁利用其他用电设备的中性线接地, 中性线和保护线应分别与接地网连接。

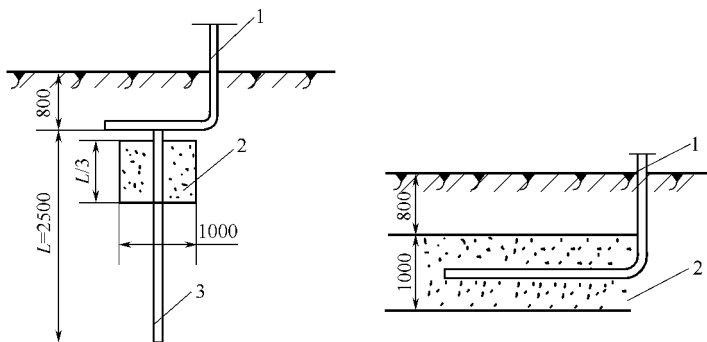
⑤ 接地线与电气设备连接时, 采用螺栓压接, 每个电气设备都应单独与接地干线相连接, 严禁在一条接地线上串接几个需要接地的设备。

三、高土壤电阻率 ($\rho > 5 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$) 地区的接地措施

由于山区的雷电流幅值比平原小一半, 山区的接地也与平原有所不同。遇到高电阻率土壤的接地, 应首先允许将接地电阻提高, 然后才作改善处理。提高的倍数为 $k = \rho / 5 \times 10^4$, 但不宜超过 10 倍。

1. 降低接地电阻的技术措施

(1) 在原接地体周围进行换土 利用电阻率较低的土壤 (如粒土、黑土) 替换接地体周围的土壤, 如图 3-15 所示 (图中尺寸单位为 mm)。



(a) 垂直接地体坑内换土

(b) 水平接地体沟内换土

图 3-15 接地体坑 (沟) 内换土示意

1—引下线 (扁钢); 2—黏土; 3—钢管

(2) 深埋接地极 当地下深处的土壤 (水) 电阻率较低

时，可增加垂直接地体长度。据经验，这种方法对于山地多岩、深岩地区降低接地电阻的效果不明显。

(3) 采取保水措施 可把接地极埋在建筑物的背阳面或

比较潮湿的地方；在埋接地极的上面栽种植物；或将污水（无腐蚀）引向埋设接地极的地方，接地极采用钢管。每隔 20cm 在钢管上钻一个直径 5mm 的小孔，使水渗入土中，如图 3-16 所示（图中尺寸单位为 mm）。

(4) 外引接地 附近有常年不冻的河流、小溪、湖泊或电阻率较低的土壤时，可采用外引接地。

(5) 对接地体周围土壤进行化学处理 在接地体周围土壤中渗入炉渣（煤粉炉渣）、废碱液、木炭、氮肥渣、电石渣、石灰、食盐等，将化学物和土混合，填入坑内夯实，如图 3-17 所示（图中尺寸单位为 mm）。

使用的化学物应为含电解质较多的物质，pH（酸解度）值在 6 ~ 10 之间，忌用强酸强碱。由于使用的化学物具有腐蚀性，且易流失，因此不宜在永久性工程中的应用，只能在不得已的情况下，作为一种临时措施。

(6) 利用长效降阻剂 在接地体周围埋置长效固化型降阻剂以改善接地体周围土壤或岩石的导电性能，使接地体通过降阻剂的分子和离子作用形成高渗透区，以便与大地紧密结合降低土壤电阻，使接地体不被氧化腐蚀，达到延年长效的目的。目前国内使用的为“富兰克林——民主”长效降阻剂。这种降阻剂在固化后本身电阻率很低（约 $5\Omega \cdot m$ ），施用后能

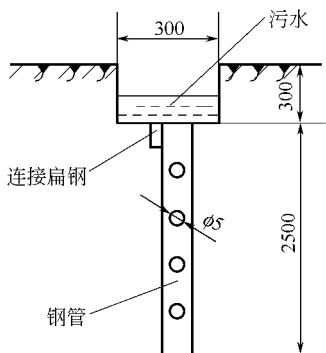


图 3-16 污水引入接地极

显著降低接地体电阻，该降阻剂基本上呈中性，因此加入接地体周围固化成型后，起到了防腐蚀作用。另外在接地体周围固化成型后，又相当于加大了接地体的截面，所以能改善接地网的均压效果。

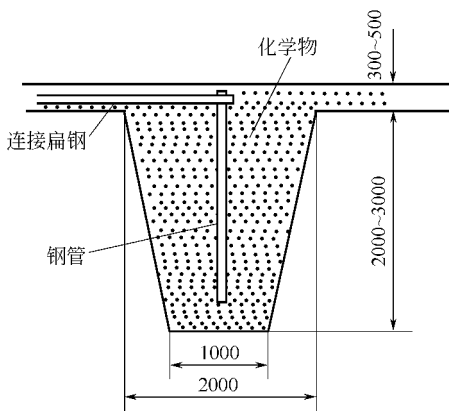


图 3-17 化学物处理

2. 山区接地装置的形式

当深埋接地极有困难时，推荐采取下列三种敷设方式。

(1) 水平放射式 射线数目不超过 4 根，每根长度不超过 20m。

(2) 环形水平敷设式 能达到等电位，减少跨步电压和接触电压的目的。

(3) 长短放射外引式 能达到降低接地电阻和削减电压的目的。

四、流散电阻计算

1. 人工接地体的流散电阻

(1) 单一接地体的流散电阻 决定流散电阻的主要因素之一是土壤电阻，土壤电阻的大小用土壤电阻率表示。影响土

壤电阻的原因很多，如土质、温度、湿度、化学成分、物理性质和季节等，因此在设计接地装置前应进行测定。为了使测得数值反映出最不利情况下的最大土壤电阻率，应将测得的数值 ρ_m 乘以土壤季节系数（见表 3-12），即

$$\rho_{\max} = \psi \rho_m$$

式中 $\rho_{\max}$ ——最大土壤电阻率；
 ψ ——土壤季节系数；
 ρ_m ——测量的土壤电阻率。

表 3-12 根据土壤性质决定的土壤季节系数

土壤性质	深度 /m	含水量最大 ψ_1	中等含水量 ψ_2	干燥,测前降雨不大 ψ_3
黏土	0.5 ~ 0.8	3	2	1.5
	0.8 ~ 3	2	1.5	1.4
陶土	0 ~ 2	2.4	1.36	1.2
砂砾盖以陶土	0 ~ 2	1.8	1.2	1.1
园地	0 ~ 2	—	1.32	1.2
黄砂	0 ~ 2	2.4	1.56	1.2
有黄砂的砂砾	0 ~ 2	1.5	1.3	1.2
泥炭	0 ~ 2	1.4	1.1	1.0
石灰石	0 ~ 2	2.5	1.51	1.2

如果一时无法取得电阻率实测数据，可按表 3-13 所列数据进行初步设计计算，但在施工后必须进行测量核算。

表 3-13 土壤的电阻率 单位：Ω · m

种类	名 称	近似值	变 动 范 围		
			较湿时 (多雨区)	较干时 (少雨区)	地下水含 盐碱时

泥土	陶黏土	10	5 ~ 20	10 ~ 100	3 ~ 10
	泥炭、沼泽地	20	10 ~ 30	50 ~ 300	3 ~ 10
	捣碎的木炭	40	—	—	—

续表

种类	名 称	近似值	变 动 范 围		
			较湿时 (多雨区)	较干时 (少雨区)	地下水含 盐碱时
泥土	黑土、园田土、陶土、白垩土	50	30 ~ 100	50 ~ 300	3 ~ 10
	黏土	60	30 ~ 100	50 ~ 300	3 ~ 10
	砂质黏土	100	30 ~ 300	80 ~ 1000	3 ~ 10
	黄土	200	10 ~ 200	250	30
	含砂黏土、砂土	300	100 ~ 1000	> 1000	30 ~ 100
	多石土壤	400	—	—	—
	上层红色风化黏土、下层红色页岩	500 (相对湿度 30%)	—	—	—
	表层土夹石、下层石子	600 (相对湿度 30%)	—	—	—
砂	砂子、砂砾	1000	250 ~ 1000	1000 ~ 2500	—
	砂层深度大于 10m, 地下水较深的草原或地面黏土深度不大于 1.5m、底层多岩石的地区	100	—	—	—
岩石	砾石、碎石	5000	—	—	—
	多岩石地带	5000	—	—	—
	花岗岩	200000	—	—	—
矿石	金属矿石	0. 01 ~ 1	—	—	—

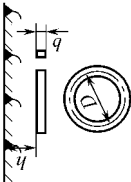
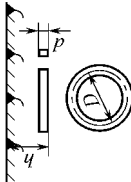
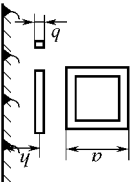
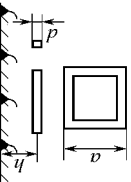
混 凝 土	在水中	40 ~ 45	—	—	—
	在湿土中	100 ~ 200	—	—	—
	在干土中	500 ~ 1300	—	—	—
	在干燥的大气中	12000 ~ 18000	—	—	—

人工接地体流散电阻的理论计算式见表 3-14，表中 ρ 为土壤电阻率。

表 3-14 人工接地体流散电阻的理论计算式

接地体 类型	埋设简图	计 算 公 式	备 注
直立管形 接地体		$R = 0.366 \frac{\rho}{l} \lg \frac{4l}{d}$	$l \gg d$
		$R = 0.366 \frac{\rho}{l} \left(\lg \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4h+l}{4h-l} \right)$	$l \gg d, 4h > l$
直立角钢 接地体		$R = 0.366 \frac{\rho}{l} \left(\lg \frac{2l}{0.708 \sqrt[4]{bh(b^2 + B^2)}} + \frac{1}{2} \lg \frac{4h+l}{4h-l} \right)$	$l \gg b \text{ 和 } B, \frac{4h}{4h} > l$

接地体 类型	埋设简图	计 算 公 式	备 注
直立槽刚 接地体		$R = 0.366 \frac{\rho}{l} \left(\lg \frac{2l}{0.29 \sqrt[9]{b^2 h_1^3 (b^2 + h_1^2)^2}} + \frac{1}{2} \lg \frac{4h + l}{4h - l} \right)$	$l \gg b$ 和 h_1 , $4h > l$
直立扁钢 接地体		$R = 0.366 \frac{\rho}{l} \left(\lg \frac{4l}{b} + \frac{1}{2} \lg \frac{4h + l}{4h - l} \right)$	$l \gg b, 4h > l$
平放圆钢 接地体		$R = 0.366 \frac{\rho}{l} \left(\lg \frac{2l}{d} + \lg \frac{\sqrt{16h^2 + l^2} + l}{4h} \right)$	l 和 $h \gg d$
平放扁钢 接地体		$R = 0.366 \frac{\rho}{l} \left(\lg \frac{4l}{b} + \lg \frac{\sqrt{16h^2 + l^2} + l}{4h} \right)$	l 和 $h \gg b$

接地体 类型	埋设简图	计 算 公 式	备 注
平放扁钢 圆环接地体		$R = 0.366 \frac{\rho}{\pi D} \lg \frac{2.54(\pi D)^2}{bh}$	$D \gg h \gg b$
平放圆钢 圆环接地体		$R = 0.366 \frac{\rho}{\pi D} \lg \frac{1.27(\pi D)^2}{dh}$	$D \gg h \gg d$
平放扁钢 方形接地体		$R = 0.366 \frac{\rho}{4a} \lg \frac{176a^2}{hb}$	$a \gg h \gg b$
平放圆钢 方形接地体		$R = 0.366 \frac{\rho}{4a} \lg \frac{88a^2}{hd}$	$a \gg h \gg d$

(2) 复合接地体的流散电阻 按单一接地体的并联计算
 复合接地体的流散电阻时，必须考虑利用系数，总流散电阻为

$$R = \frac{r}{n\eta}$$

式中 r——单一接地体的流散电阻；
 n——单一接地体数；
 η——利用系数，按表 3-15 ~ 表 3-19 选取。

表 3-15 管子成排垂直敷设时连接扁钢的利用系数

管间距离/ 管长 (d/l)	每排管子根数									
	2	3	4	5	8	10	20	30	50	65
1	0.87	0.80	0.77	0.74	0.67	0.62	0.42	0.31	0.21	0.20
2	0.92	0.88	0.89	0.86	0.79	0.75	0.56	0.46	0.36	0.34
3	0.95	0.97	0.92	0.90	0.85	0.82	0.68	0.58	0.49	0.47

表 3-16 敷设成一排的管形接地体的利用系数

管间距离/管长 (d/l)	管 子 根 数					
	2	3	5	10	15	20
1	0.84 ~ 0.87	0.76 ~ 0.80	0.67 ~ 0.72	0.56 ~ 0.62	0.51 ~ 0.56	0.47 ~ 0.50
2	0.90 ~ 0.92	0.85 ~ 0.88	0.79 ~ 0.83	0.72 ~ 0.77	0.66 ~ 0.73	0.63 ~ 0.70
3	0.93 ~ 0.95	0.90 ~ 0.92	0.85 ~ 0.88	0.79 ~ 0.83	0.76 ~ 0.80	0.74 ~ 0.79

注：该表数据未计入连接扁钢的影响。

表 3-17 环形垂直敷设的管形接地体的利用系数

管间距离/管长 (d/l)	管 子 根 数						
	4	6	10	20	40	60	100
1	0.66 ~ 0.72	0.58 ~ 0.65	0.52 ~ 0.58	0.44 ~ 0.50	0.38 ~ 0.44	0.36 ~ 0.42	0.33 ~ 0.39
2	0.76 ~ 0.80	0.71 ~ 0.75	0.66 ~ 0.71	0.61 ~ 0.66	0.55 ~ 0.61	0.52 ~ 0.58	0.46 ~ 0.55
3	0.84 ~ 0.86	0.78 ~ 0.82	0.74 ~ 0.78	0.68 ~ 0.73	0.64 ~ 0.69	0.62 ~ 0.67	0.59 ~ 0.65

注：该表数据未计入连接扁钢的影响。

表 3-18 水平敷设的扁钢接地体的利用系数 单位：m

并联敷设的扁钢条数	每条扁钢长度	相邻扁钢间距离				
		1	2.5	5.0	10.0	15.0
5	15	0.37	0.49	0.60	0.73	0.79
	25	0.35	0.45	0.55	0.66	0.73
	50	0.33	0.40	0.48	0.58	0.65
	75	0.31	0.38	0.45	0.53	0.58
	100	0.30	0.36	0.43	0.51	0.57
	200	0.25	0.32	0.37	0.44	0.50
10	15	0.25	0.37	0.49	0.64	0.72
	25	0.23	0.31	0.43	0.57	0.66
	50	0.20	0.27	0.35	0.46	0.53
	75	0.18	0.25	0.31	0.41	0.47
	100	0.17	0.23	0.28	0.37	0.44
	200	0.14	0.20	0.23	0.30	0.36
30	15	0.16	0.27	0.39	0.57	0.64
	25	0.14	0.23	0.33	0.47	0.57
	50	0.12	0.19	0.25	0.36	0.44
	75	0.11	0.15	0.22	0.31	0.38
	100	0.10	0.15	0.20	0.28	0.35
	200	0.09	0.12	0.15	0.22	0.27

注：该表数据相应于扁钢宽度为 20 ~ 40mm。

表 3-19 管子环形垂直敷设时连接扁钢的利用系数

管间距离/管长 (d/l)	管子根数						
	4	6	10	20	40	60	100
1	0.45	0.40	0.34	0.27	0.22	0.20	0.19
2	0.55	0.48	0.40	0.32	0.28	0.27	0.24
3	0.70	0.64	0.56	0.45	0.38	0.36	0.33

直线排列的 n 个垂直接地体的流散电阻可按下式计算，即

$$R = \frac{r}{n} + \frac{\rho}{2d} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \cdots + \frac{1}{n} \right)$$

式中 ρ ——土壤电阻率；

d ——相邻接地体之间的距离。

环形排列的 n 个垂直接地体的流散电阻可按下式计算，即

$$R = \frac{\rho}{2\pi nL} \left(\ln \frac{2L}{D} - 1 + \frac{2L}{d} \ln \frac{2n}{\pi} \right)$$

式中 L ——单一接地体长度；

D ——单一接地体直径。

水平接地体的流散电阻可按下式计算，即

$$R = \frac{\rho}{2\pi nL} \left(\ln \frac{L^2}{hD} + K_f \right)$$

式中 L ——水平接地体总长；

h ——水平接地体埋设深度；

D ——水平接地体直径；

K_f ——水平接地体形状系数。

水平接地体及网络接地体的形状系数分别按表 3-20 和表 3-21 选取。

表 3-20 水平接地体形状系数

形状								
K_f	0	0.378	0.48	0.867	1.68	2.14	5.27	8.81

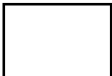
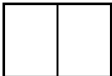
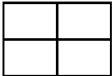
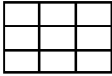
含有水平接地体和垂直接地体的复合接地体的流散电阻可按下式计算，即

$$R = \frac{\sqrt{\pi\rho}}{4\sqrt{A}} + \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{2L^2}{\pi hD \times 10^4}$$

- 式中 A——接地网面积；
L——接地体（包括垂直接地体）总长；
D——水平接地体直径；
h——水平接地体埋设深度。

经计算可知：上式中后项数值占比例很小，占总数的10%左右，从公式前项可看出，当土壤电阻率 ρ 一定时，只要将接地网占地面积A扩大即可达到所要求的接地电阻值。

表 3-21 网络接地体形状系数

网 络 结 构	网 络 边 长 比				
	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0
	1.71	1.76	1.86	2.10	2.34
	3.29	3.31	3.35	3.41	3.67
	4.95	5.16	5.44	6.00	6.52
	4.33	4.43	4.73	5.04	5.61
	8.55	8.94	9.40	10.3	11.11

(3) 简化计算式 流散电阻的理论计算式比较复杂，人工流散电阻的简化计算式见表 3-22。

(4) 等效直径 圆钢和钢管以外型钢接地体的等效直径 见表 3-23。

表 3-22 人工流散电阻的简化计算式

接 地 体 类 型		简化计算式	备 注
名 称	特 征		
单根直立接地体	长度 3m 左右	$R \approx 0.3\rho$	ρ ——土壤电阻率, $\Omega \cdot m$
单根水平接地体	长度 60m 左右	$R \approx 0.03\rho$	ρ ——土壤电阻率, $\Omega \cdot m$
n 根水平接地体	$n \leq 12$, 每根长 60m 左右	$R \approx \frac{0.062\rho}{n+1.2}$	ρ ——土壤电阻率, $\Omega \cdot m$
复合接地体	以水平接地体为主的接地网	$R \approx \frac{0.5\rho}{\sqrt{A}} \approx \frac{0.28\rho}{r}$ 或 $R \approx \frac{\sqrt{\pi\rho}}{4A} + \frac{\rho}{L} \approx \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L}$	A ——接地体面积, m^2 (公式适用于 $A \geq 100m^2$ 的接地网) r ——面积等于 A 的等效圆半径, m L ——接地体总长度, m
平放板形接地体	放在地面	$R \approx \frac{0.11\rho}{\sqrt{A}}$	A ——平板面积, m^2
	埋在地下	$R \approx \frac{0.22\rho}{\sqrt{A}}$	
直立板形接地体	埋在地下	$R \approx \frac{0.253\rho}{\sqrt{A}}$	
架空避雷线(或低压接地的零线)的综合接地体 ^①	接地杆塔数(或零线上接地处数)大于 20	$R \approx \sqrt{r r_x}$	r ——每基杆塔(或零线每个接地点)的流散电阻; r_x ——每档避雷线(或每档零线)的电阻

① 应用该公式时,按工频电流从一端引入时考虑。

表 3-23 接地体的等效直径

种 类	计 算 式	备 注
等边角钢	$d = 0.842b$	b ——角钢宽度
不等边角钢	$d = 0.708 \sqrt[4]{bB(b^2 + B^2)}$	b, B ——角钢两边宽度

槽钢	$d = 0.92 \sqrt[9]{b^2 h^3 (b^2 + h^2)^2}$	b、h——槽钢宽度和高度
扁钢	$d = 0.5b$	b——扁钢宽度

2. 自然接地体的流散电阻

(1) 电缆和管道 电缆和长度为 2km 以上管道的流散电阻按下式计算，即

$$R = K_c \sqrt{r_1 r_2} \operatorname{cth} \left(L \sqrt{\frac{r_2}{r_1}} \right)$$

式中 K_c ——电缆麻护层影响系数，取 1.2 ~ 1.8；

r_1 ——沿电缆或管道直线方向每 1cm 的流散电阻， $r_1 = 1.69\rho$ (ρ 为土壤电阻率 $\Omega \cdot \text{m}$)；

r_2 ——沿电缆或管道直线方向每 1cm 电缆外护层或管道的电阻；

L ——电缆或管道长度。

n 条同截面电缆的流散电阻按下式计算，即

$$R_n = \frac{R}{\sqrt{n}}$$

长度 2km 以下管道的流散电阻按下式计算，即

$$R = 0.366 \frac{\rho}{L} \lg \frac{L}{Dh}$$

式中 ρ ——土壤电阻率；

L ——管道长度；

D ——管道直径；

h ——埋设深度。

(2) 钢筋混凝土基础 流散电阻的简化计算式见表 3-24。

表 3-24 钢筋混凝土基础的流散电阻简化计算式

接 地 体 类 型	简化计算公式
-----------	--------

钢筋混凝土杆的自然接地体	单杆	$R \approx 0.7\Omega$
	双杆	$R \approx 0.2\Omega$
	拉线单、双杆	$R \approx 0.1\Omega$
	一个拉线盘	$R \approx 0.28\Omega$

续表

接 地 体 类 型	简化计算公式
装配式基础的自然接地体	单柱式杆塔
	门型杆塔
	V 型拉线门型杆塔
沿装配式基础周围敷设的深埋式接地体	单柱式杆塔
	门型杆塔
	V 型拉线门型杆塔
深埋式接地体与装配式基础自然接地的综合接地体	单柱式杆塔
	门型杆塔
	V 型拉线门型杆塔

五、接地装置运行及维护

接地装置是电力系统安全技术中的主要组成部分。接地装置易受自然界及外力的影响与破坏，发生接地线锈蚀中断、接地电阻变化等情况，这将影响电气设备和操作人员的安全。因此，对接地装置应该有正常的管理、维护和周期性的检查、测试和维修，以确保其安全性能。

1. 接地装置的技术管理资料

运行中的接地装置应建立下列技术管理资料。

① 接地装置接地体形状的选择与布置以及接地电阻值的计算等原始设计资料。

② 接地装置隐蔽工程竣工图纸。

③ 接地装置验收、试验以及测量接地电阻的记录。

- ④ 运行中历次测量接地电阻及检修记录。
- ⑤ 运行中检查发现的缺陷内容以及处理结果记录。
- ⑥ 土壤电阻率的测量记录。

⑦ 对于高土壤电阻率跨步电压较高的地区，在有行人经常出入的地段应有绘制电位分布曲线等技术资料。

- ⑧ 接地装置的变更、检修工作内容等记录。

变电所进行改建、扩建而需改动接地装置时，应及时更改接地装置的技术资料，使其与实际相符。

2. 新装接地装置后的验收内容

① 按设计图纸和施工规范要求检查接地线或接零线的导线规格以及导体、连接工艺。

② 检查连接部分应符合安装和规程要求。采用螺栓夹板压紧的接触面应压紧可靠，螺栓应有防松动的开口垫圈；采用焊接的应保证焊接面积；利用金属物体、钢轨、钢管等作为自然接地线时，每个连接处都应有规定截面的跨接线。

- ③ 穿过建筑物及引出地面部分都应有保护套管。

- ④ 按规范要求涂刷防腐漆。

- ⑤ 摇测接地电阻值应小于规定值。

3. 接地装置巡视检查内容

① 检查接地线与电气设备的金属外壳、接地网等连接情况是否良好，有无松动、脱落等现象。

- ② 检查接地线有无砸伤、碰断及腐蚀现象。

③ 有严重腐蚀可能时，挖开接地引下线的土层，检查地面下 50cm 以上部分接地线的腐朽程度。

④ 检查接地装置明敷设的接地线或接零线表面涂漆有无脱落。

- ⑤ 人工接地体周围不应埋放有强烈腐蚀性的物质。

- ⑥ 对移动式电气设备每次使用前，需检查接地线是否接

触良好，有无断股现象。

⑦ 对含有重酸、碱、盐或金属矿岩等化学成分土壤地带以及白灰焦渣地带的接地装置，每 5 年左右应挖开局部地面进行检查，观察接地体腐蚀情况。

⑧ 运行中的接地装置，如发现有下列情况之一时应进行维修，接地线连接处焊接有接触不良和脱焊；接地线与电力设备的连接处的螺栓有松动；接地线有机械损伤、断股或化学锈蚀；接地体被洪水冲刷露出地面；接地电阻值超过规定值时。

六、接地电阻的测量

接地电阻常用接地电阻测试仪或电压-电流表测试法进行测量。

1. 接地电阻测试仪简介

接地电阻测试仪简称接地摇表，主要用于直接测量各种接地装置的接地电阻值和土壤电阻率。

常用国产接地电阻测试仪技术数据见表 3-25。

表 3-25 常用国产接地电阻测试仪技术数据

型 号	名 称	量限/ Ω	准确度等级
ZC8	接地电阻测试仪	1/10/100	在额定值的 30% 以下 为额定值的 $\pm 1.5\%$ ，在 额定值的 30% 以上为指 示值的 $\pm 5\%$
		10/100/1000	
ZC29-1	接地电阻测试仪	10/100/1000	
ZC34A	晶体管接地电阻 测试仪	2/20/200	$\pm 2.5\%$

ZC8 型接地电阻测试仪由手摇交流发电机、电流互感器、相敏整流及测流计组成，它带有三个旋钮（E. P. C）。当以 120r/min 的转速用手摇动发电机时，便会产生 112 ~ 116Hz 的交流电，电流经互感器一次绕组、接地极、大地和探针后再回到发电机，由互感器产生的二次电流将使检流计指针偏转，同时借助调节电位器可使检流计达到平衡。在检流计电路中接入

隔直电容器，故在测试时不受土壤电解极化影响。

接地电阻测量仪的主要附件是三条测量地线和两支测量电极，一支为电压电极，一支为电流电极。接地电阻测量仪有 E、P、C 三个接线端子或 C_2 、 P_2 、 C_1 、 P_1 4 个接线端子，测量时，在离被测接地体一定的距离向地下打入电流极和电压极；将 C_2 、 P_2 端并接后或将 E 端接于被测接地体，将 P_1 端或 P 端接于电压极，将 C_1 端或 C 端接于电流极；选好倍率；以 120r/min 左右的转速不停地摇动摇把（使用 ZC8 或 ZC29-1 型接地电阻测量仪时）或接通电子交流电源（使用 ZC34A 型晶体管接地电阻测试仪时），同时调节电位器旋钮至仪表指针稳定地指在中心位置时，即可从刻度盘读数和倍率得到被测接地电阻值。

测量接地电阻的接线如图 3-18 所示。

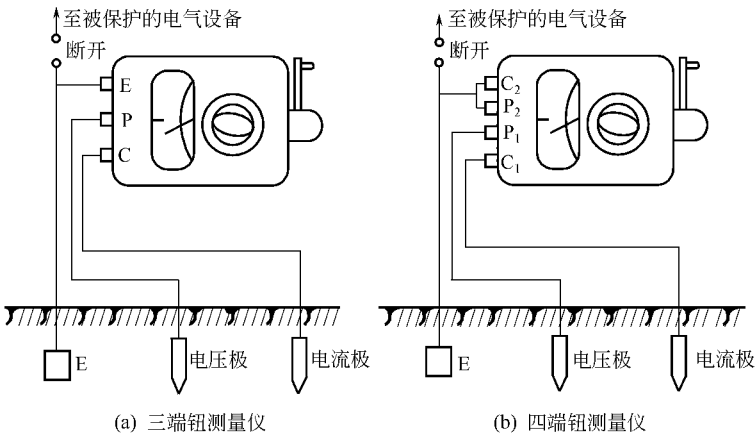


图 3-18 测量接地电阻的接线

测量土壤电阻率按图 3-19 接线，具体测量方法与测量接地电阻时相同。被测地区的平均电阻率可按下式计算，即

$$\rho = 2\pi dR$$

- 式中 ρ ——实测土壤电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$;
 d ——四支探针相互之间的距离, m ;
 R ——接地电阻测试仪的读数, Ω 。

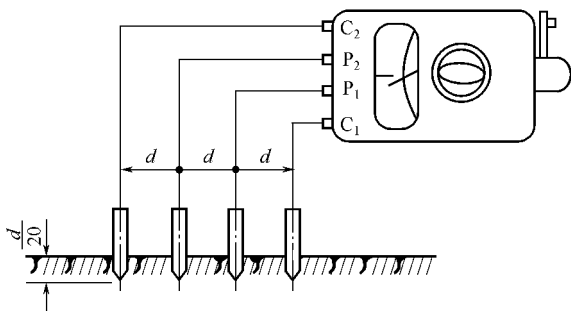


图 3-19 测量土壤电阻率的接线

2. 测量注意事项

① 测量时因为在电流极上会产生很大的电压降, 此电压降之值等于测量时的电流和电流极电阻相乘之值, 因此在电流极的 30 ~ 50m 半径的范围内, 不要有人和动物靠近, 以免发生危险或影响测量结果。

② 为减小测量误差, 应正确选择测量电极位置, 如图 3-20 所示。

接地网与电压极、电流极可直线排列 [如图 3-20 (a) 所示] 或三角排列 [如图 3-20 (b) 所示]。对于占地面积较大的网络接地体, 宜取 S_c 为接地网对角线 D 的 4 ~ 5 倍, 有困难时可减为 D 的 2 ~ 3 倍, 且对于直线排列时, 应取 $S_p \approx 0.5 \sim 0.6S_c$ 。对于占地面积不太大的复合接地体, 宜取 $S_c = 80\text{m}$, 对于单一垂直接地体或占地面积很小的复合接地体, 可取 $S_c = 40\text{m}$ 。在后两种情况下, 直线排列时电流极与电压极之间的距离

取 20m；三角排列时取 S_p 或 S_c 的 1/2。

③ 测量前应检查接地电阻测量仪及其附件是否完好，必要时做一下短路试验，以检查仪表的误差。注意不准开路摇动手把，否则将损坏接地电阻测试仪。

④ 不准带电测试接地装置的接地电阻值。

⑤ 测量电极的排列应避免与地下金属管道平行，以保证测量结果的真实性。

⑥ 下雨后和下雨时不应进行测量工作。

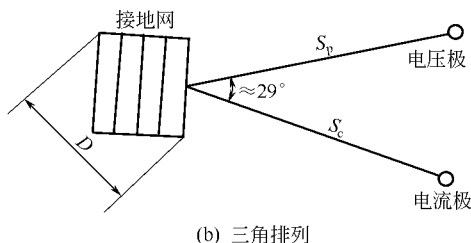
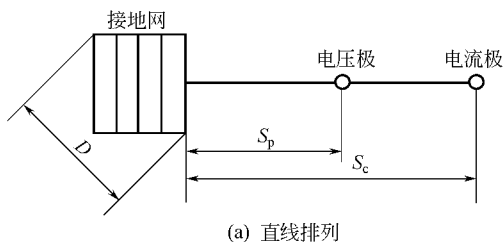


图 3-20 接地电阻测量电极位置

3. 电压表-电流表测试法

(1) 测量原理 这种测量方法比采用接地电阻测试仪的方法复杂，且需外加电源，但准确度较高，不受测量范围的限制，一般用来测量 0.1Ω 及以下的接地电阻。测量时的接线如图 3-21 所示。其中接地体 2 是用来测量被测接地体与零电位间的电压的，称为电压极；而辅助接地体 3 是用来构成被测接

地体的电流回路的，称为电流极。电流极一般用一根或 n 根钢管组成，钢管直径为 50mm，长度为 2.5 ~ 3m，每根钢管间的距离为 3 ~ 5m，并用直径为 10mm 圆钢或 25mm × 4mm 的扁钢焊接起来。电压极一般用一根长为 0.7 ~ 3m，直径为 25mm 的圆钢制成。

电流极与被测接地网边缘的距离如图 3-21 中的 a 所示，一般为被测接地网最大对角线的 4 ~ 5 倍；电压极与接地网边缘的距离，如图 3-21 中的 b 所示，为电流极与被测接地网边缘距离的 0.5 ~ 0.6 倍，即 $b = 0.5 \sim 0.6a$ 。

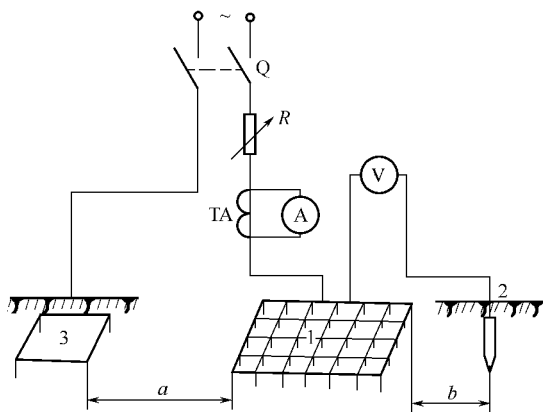


图 3-21 用电压表-电流表测量接地电阻线路示意

1—被测接地体；2—接地体（电压极）；3—辅助接地体（电流极）

为了校核所测得的电压是否正确，通常将电压极移动 3 次，移动的方向是垂直于电流极与接地网的连接方向。移动的距离是电流极与接地网距离的 5% 左右，这样当 3 次测得的数据完全相等或接近时，说明电压极的位置是正确的，那么电压表的读数就是接地网的电压降 U ，而电流表的读数就是回路电流 I ，接地网的接地电阻 R_e 为

$$R_e = \frac{U}{I} = \frac{U}{K_I I'}$$

式中 U ——接地网的电压降，V；

I ——回路电流，A；

K_I ——电流互感器的变化；

I' ——有电流互感器时电流表读数，A。

(2) 测量注意事项

① 回路电流 I 通常取接地短路电流的 $1/5$ 左右。

② 电源一般用独立的 $5 \sim 10\text{kVA}$ 的电源，电压为 $65 \sim 225\text{V}$ 。

③ 电压表应选用高内阻的，而且电压表内阻要大于被测接地网的接地电阻的 50 倍，否则要经过校正。校正公式为

$$U = U_v \left(1 + \frac{R_{pv}}{R_v} \right)$$

式中 U ——实际电压值，V；

U_v ——电压表的读数，V；

R_{pv} ——电压极接地电阻， Ω ；

R_v ——电压表内阻， Ω 。

④ 电流极的接地电阻要尽可能小，而且电流极接地电阻要小于被测接地网接地电阻的 50 倍，即

$$R_{pl} \leq 50R_e$$

式中 R_{pl} ——电流极接地电阻， Ω ；

R_e ——被测接地网的接地电阻， Ω 。

当电流极采用此电阻值时，应使测量电流不得小于 1A 。

(3) 测量方法

① 将电流极与电压极打入地中，管端露出地面约 $100 \sim 150\text{mm}$ 。如果电流极采用多根接地体，应将各接地体用扁钢焊接起来。

② 准备独立的交流电源，可用 380/220V 照明变压器或电焊变压器，该电源变压器线圈不能接地。

③ 开关 Q 合上前，要用电压表检查测量回路是否有外来电压存在，若电压表指针摆动，则应设法消除外界电压对测量结果的影响。

④ 合上开关 Q，慢慢调节可变电阻 R 使达到额定的电流，并使电压表指针指示在刻度的后半段，若电流表与电压表的量程和电源容量许可，则可将变阻器 R 短路；如变阻器短路后，电流和电压值仍达不到仪表量程的后半程，那么就增加电流极的接地体。

⑤ 待电压表与电流表的指针稳定地指示在所要求的数值上时，就应迅速地读取两表的指示值。

⑥ 重复测量 3 ~ 4 次，取其平均值作为测量的结果。

⑦ 利用上述方法再测量出电流极与电压极的接地电阻，看其是否符合要求。

第四章 电气防火防爆安全技术

第一节 电气防火防爆安全技术概述

一、火灾与爆炸的有关概念

1. 火灾

可燃物质在空气中燃烧，凡超出有效范围而形成灾害的燃烧称为火灾。

燃烧是一种发光发热的化学反应，同时具备以下三个基本条件，便产生燃烧。

(1) 可燃物质 凡能与空气中的氧或其他氧化剂起剧烈化学反应的物质都称可燃物质，如木材、纸张、钠、镁、汽油、酒精、乙炔、氢气、橡胶、煤等。

(2) 助燃物质 凡能帮助燃烧的物质称为助燃物质，如氧、氯化钾、高锰酸钾等。燃烧时，助燃物质进行燃烧化学反应。当助燃物质数量不足时，则不会发生燃烧。

(3) 着火源 着火源并不参加燃烧，但它是可燃物、助燃物进行燃烧化学反应的起始条件。凡能引起可燃物质燃烧的能源都称为着火源，如明火、高温、电火花、电弧、灼热物体等。

2. 爆炸

爆炸与燃烧是密切相关的。凡发生瞬间燃烧，物质发生剧烈的物理或化学变化，瞬间释放出大量能量，产生高温高压气体，使周围的空气发生猛烈震荡而造成巨大声音的现象称为爆炸。根据爆炸性质的不同，爆炸分为物理性爆炸、化学性爆炸和核爆炸三类。

物理性爆炸是由于液体变成气体过程中，体积膨胀，压力急剧增加，大大超过容器所能承受的极限压力时所发生的爆炸。物理性爆炸过程不产生新的物质，完全是物理变化过程。如蒸汽锅炉、蒸汽管道、压缩和液化气瓶、油箱等的爆炸。物理性爆炸一般不会直接发生火灾，但能间接引起火灾。

化学性爆炸是由于爆炸性物质本身发生了化学反应，产生大量气体和较高的温度而产生的爆炸。这种爆炸过程内含化学变化过程，参加爆炸的物质生成了新的物质。如可燃气体、可燃蒸气、粉尘与空气混合物的爆炸。由于化学性爆炸内含急剧的氧化反应，伴随发光发热，使化学性爆炸能直接引起火灾。

核爆炸是利用高纯度、高密度的核燃料（铀 235 或钚 239）在中子的轰击下产生快速链式反应，在极短时间内放出大量能量而产生的爆炸。如原子弹爆炸、核爆炸时会形成极高的温度和强烈的冲击波，造成巨大的破坏。

3. 燃点和闪点

(1) 燃点 可燃物质只有在一定温度的条件下与助燃物质接触，遇明火才能产生燃烧。使可燃物质遇明火能燃烧的最低温度称该可燃物质的燃点。不同的可燃物有不同的燃点，一般可燃物的燃点是较低的。

(2) 闪点 可燃物在有助燃物的条件下，遇明火达到或超过燃点便产生燃烧，当火源移去，燃烧仍会继续下去。可燃物质的蒸气或可燃气体与助燃剂接触时，在一定的温度条件下，遇明火并不立即发生燃烧，只发生闪烁现象，当火源移去闪烁自然停止。这种使可燃物遇明火发生闪烁而不引起燃烧的最低温度称为该可燃物的闪点，单位用“°C”表示。

显然，同一物质的闪点比燃点低。由于液体可燃物质燃烧首先要经过“闪”点，而后才是“燃”的过程，“闪”是“燃”的前奏。故衡量液体、气体可燃物着火爆炸的主要参数

是闪点，闪点愈低，形成火灾和爆炸的可能性愈大。

(3) 自燃温度 可燃物质在空气中受热温度升高而不需明火就着火燃烧的最低温度称为自燃温度，单位用“ $^{\circ}\text{C}$ ”表示。煤或煤粉的自燃是因其温度达到或超过其自燃温度。此时，碳或碳氢化合物与氧起反应而燃烧。

自燃温度高于可燃物质本身的燃点，自燃温度愈低，形成火灾和爆炸的危险性就愈大。因此，火电厂应注意煤粉的自燃，降低煤粉温度，防止煤粉自燃引起的火灾和爆炸。

4. 爆炸混合物及爆炸极限

(1) 爆炸混合物 可燃气体、可燃液体的蒸气、可燃粉尘或化学纤维一类物质，接触明火即能着火燃烧。当可燃气体、悬浮状态的粉尘和纤维这类物质与空气混合，其浓度达到一定比例范围时，便形成了气体、蒸气、粉尘或纤维的爆炸混合物。

(2) 爆炸极限 爆炸性混合物的浓度达到一定数值时，遇火源即能着火爆炸，这个浓度称为爆炸极限。可燃气体、蒸气混合物的爆炸极限，以可燃气体、蒸气混合物体积的百分比(%)表示；可燃粉尘、纤维的爆炸极限以可燃粉尘、纤维占混合物中单位体积的质量(g/m^3)表示。

爆炸极限又分爆炸上限和爆炸下限。浓度高于上限时，由于空气相对少了，供氧不足；浓度低于下限时，可燃物含量不够。故浓度低于爆炸下限或高于爆炸上限，只能着火燃烧，而不会形成爆炸。

二、危险物品

1. 危险物品

凡能与氧气发生强烈氧化反应，瞬间燃烧产生大量热和气体，并以很大压力向四周扩散，形成爆炸的物质均属危险物品。

2. 危险物品的分类

危险物品按化学性质不同，可分为以下 7 类。

(1) 爆炸物品 这类物品有强烈的爆炸性，在常温下即有缓慢的分解，形成爆炸性混合物，当受热、摩擦、冲击时就发生剧烈的氧化反应而爆炸。按爆炸混合物的物态不同又可分为：

① 可燃气体与空气形成的爆炸性混合物、氢氧混合物、其他可燃气体与氧的混合物；

② 易燃液体的蒸气与空气形成的混合物，此类混合物常称为蒸气爆炸性混合物；

③ 悬乳状可燃粉尘或纤维与空气形成的混合物，常见的爆炸物品有导火索、雷管、炸药、鞭炮等。

(2) 易燃或可燃液体 这类物品容易挥发，能引起火灾或爆炸，如汽油、煤油、液化气等。

(3) 易燃和助燃气体 这类物品受热、受冲击或遇电火花即能引起火灾和爆炸，如氢气、煤气、乙炔、氨等气体。

(4) 自燃物品 这类物品燃点低，燃烧不需明火，在一定条件下，自身产生热量而燃烧，如黄磷、硝化纤维胶片、油布、油纸等。

(5) 遇水燃烧品 这类物品遇水时分解可燃性气体，并放出热量，可引起燃烧或爆炸。如钠、碳化钙、锌粉、钙等。

(6) 易燃固体 这类物品受热、冲击或摩擦又与氧化剂接触时能引起燃烧和爆炸。如红磷、硝化纤维素、硫磺、樟脑等。

(7) 氧化剂 这类物品本身虽不能燃烧，但有很强的氧化能力，当它与可燃物品接触时，造成可燃物分解而引起燃烧和爆炸。如过氯酸钾，过氧化氢、重铬酸盐、过醋酸等。

三、危险场所

1. 爆炸火灾危险场所的分级

按形成爆炸火灾危险可能性大小将危险场所分级，其目的是有区别地选择电气设备和采取防范措施，实现生产上安全，经济上合理的目的。

我国将爆炸火灾危险场所分为三类八区。对爆炸性物质的危险场所区域等级的具体划分见表 4-1 ~ 表 4-3。

表 4-1 气体爆炸危险场所区域等级

区域等级	说 明
0 区	连续出现爆炸性气体环境,或会长期出现爆炸性气体环境的区
1 区	在正常运行时,可能出现爆炸性气体环境的区
2 区	在正常运行时,不可能出现爆炸性气体环境,即使出现也仅可能是短时存在的区

注:1. 除了封闭的空间,如密闭的容器、储油罐等内部气体空间外,很少存在 0 区。

2. 有高于爆炸上限的混合物环境,或在有空气进入时可能使其达到防爆极限的环境应划为 0 区。

表 4-2 粉尘爆炸危险场所区域等级

区域等级	说 明
10 区	爆炸性粉尘混合物环境连续出现或长期出现的区
11 区	有时会将积留下的粉尘扬起而偶然出现爆炸性粉尘混合物危险环境的区

表 4-3 火灾危险场所区域等级

区域等级	说 明
21 区	凡有闪点高于场所环境温度的可燃液体,在数量和配置上能引起火灾危险的区
22 区	凡有悬浮状、堆积状的爆炸性或可燃性粉尘,虽不可能形成爆炸性混合物,但在数量和配置上能引起火灾危险的区
23 区	具有固体状可燃物质,在数量和配置上能引起火灾危险的区

2. 危险区域的划分

(1) 危险场所判断 判断场所危险程度需考虑危险物料性质、释放源特征、通风状况等因素。

① 危险物料。除应考虑危险物料种类外，还必须考虑物料的闪点、爆炸极限、密度、引燃温度等理化性能，以及其工作温度、压力及其数量和配置。例如，闪点低、爆炸下限低都会导致危险范围扩大，密度大会导致水平范围扩大等。

② 释放源。应考虑释放源的布置和工作状态，注意其泄漏或放出危险物品的速率、泄放量和混合物的浓度，以及扩散情况和形成爆炸性混合物的范围。

释放源主要分为三级：连续释放、预计长期释放或短时连续释放的为连续级释放源；正常运行时周期性和偶然释放的为一级释放源；正常运行时不释放或只是偶然短暂释放的为二级释放源。

③ 通风。室内原则上应视为阻碍通风，即爆炸性混合物可以积聚的场所；但如安装了能使全室充分通风的强制通风设备，则不视为阻碍通风场所。室外危险源周围有障碍处亦应视为阻碍通风场所。在自然通风场所，应注意上部空间积聚密度小的危险气体的可能性。

④ 综合判断。对危险场所，首先应考虑释放源及其布置，再分析释放源的性质，划分级别，并考虑通风条件。

对于自然通风和一般机械通风的场所，连续级释放源可能导致 0 区，一级释放源可能导致 1 区，二级释放源可能导致 2 区；但是，良好的通风可能使爆炸危险场所的范围缩小或使危险等级降低，甚至降低为非爆炸危险场所；相反，若通风不良或风向不当，也可能使爆炸危险场所范围扩大或危险等级提高。

局部机械通风稀释爆炸性混合物比自然通风和一般机械通

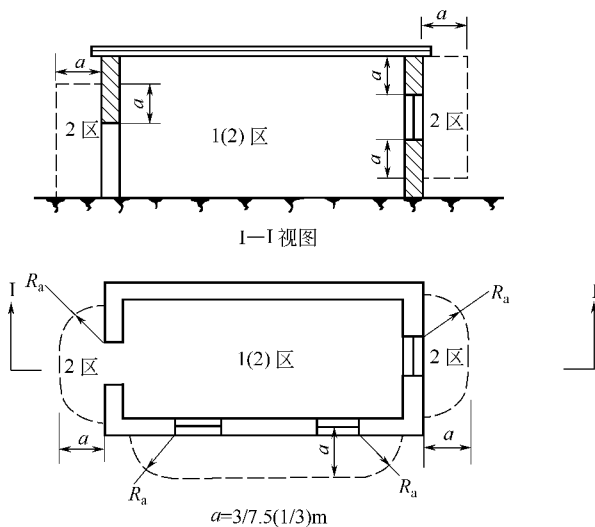


图 4-1 非开敞式厂房爆炸危险区域范围 (单位: m)

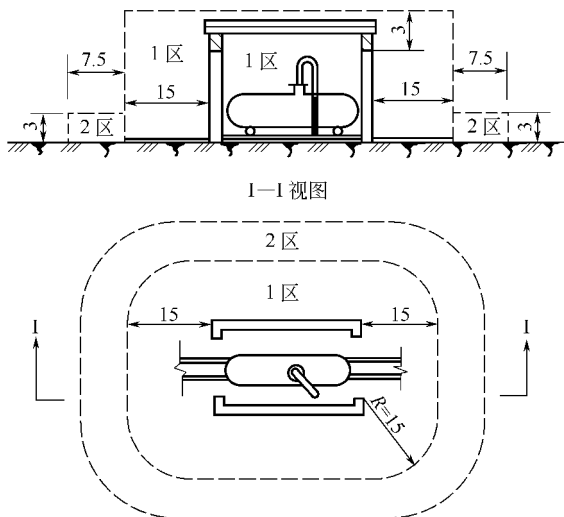


图 4-2 开敞式注送站爆炸危险区域范围 (单位: m)

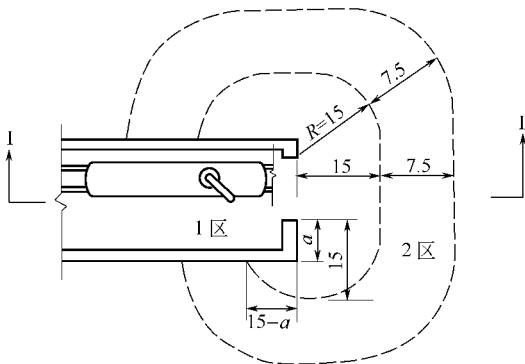
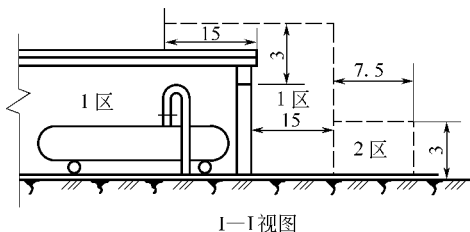


图 4-3 局部开敞式注送站爆炸危险区域范围 (单位: m)

风更为有效, 对缩小爆炸危险场所的范围, 降低危险等级更为有利。

在无通风场所, 连续级和一级释放源都可能导致 0 区, 二级释放源可能导致 1 区。

在凹坑、死角及有障碍物处, 局部地区危险等级应予提高, 危险范围也可能扩大。

(2) 危险场所范围

① 气体和蒸气爆炸危险场所的范围。对于非开敞式厂房, 爆炸危险区域的范围以厂房为单位规定。其门、窗外露天区域参照图 4-1 所示划定。图中长度以 m 为单位; 括号内为相应于

2 区厂房的数字；斜线上方为通风良好时的范围值，斜线下方为通风障碍时的范围值。开敞式注送站的爆炸危险区域范围参照图 4-2 所示划定。局部开敞式注送站的爆炸危险区域范围参照图 4-3 所示划定。露天注送站的爆炸危险区域范围参照图 4-4 所示划定，图中 r 为注送口半径。露天油罐的爆炸危险区域范围参照图 4-5 所示划定。

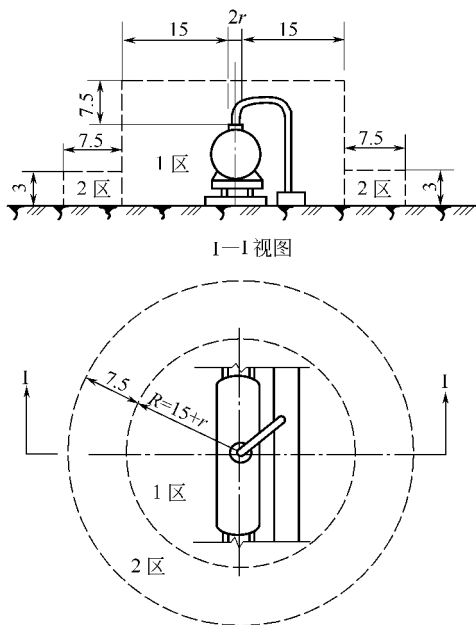


图 4-4 露天注送站爆炸危险区域范围 (单位: m)

当爆炸性气体释放大、密度大于空气时，还应考虑附加危险区域，其考虑方法如图 4-6 所示。但对于密度小于空气密度时，不必考虑附加危险区域，如图 4-7 所示。

② 粉尘和纤维爆炸危险场所的范围。对于非开敞式厂房，

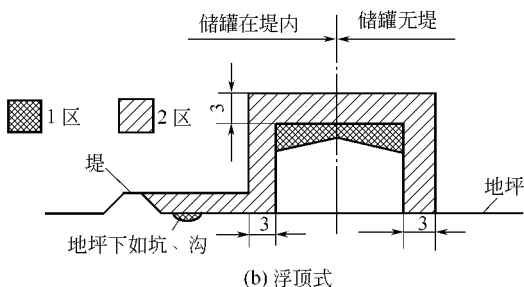
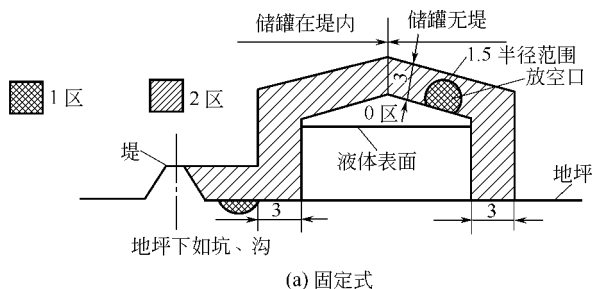


图 4-5 露天油罐爆炸危险区域范围 (单位: m)

也以厂房为单位划分爆炸危险区域范围。厂房外露天区域参照图 4-8 所示划定, 图中长度单位为 m, 括号内为厂房划分 11 区的数字。对于开敞式或半开敞式厂房, 10 区开敞面以及水平距离 7.5m (通风不良时 15m)、地面或屋面以上 3m 以内的范围划为 11 区; 11 区以外水平距离 3m、地面以上 3m 或屋面以上 1m 以内的范围也应划为 11 区。对于露天装置, 11 区的轮廓线按装置轮廓以外 3m 考虑, 轮廓线以外水平距离 15m、垂直距离 3m 以内的范围也应划为 11 区。

③ 相邻场所的划分。相邻场所如有坚固的非燃烧材料的实体隔墙, 有坚固的非燃烧材料制成的门, 而且门上有密闭措施和自动关门装置, 则可按表 4-4 考虑相邻场所的危险等级。

对于相邻的地下场所，如送风系统能保证该场所对危险场所保持正压，亦可参照表 4-4 划分危险区域。几种相邻场所危险区

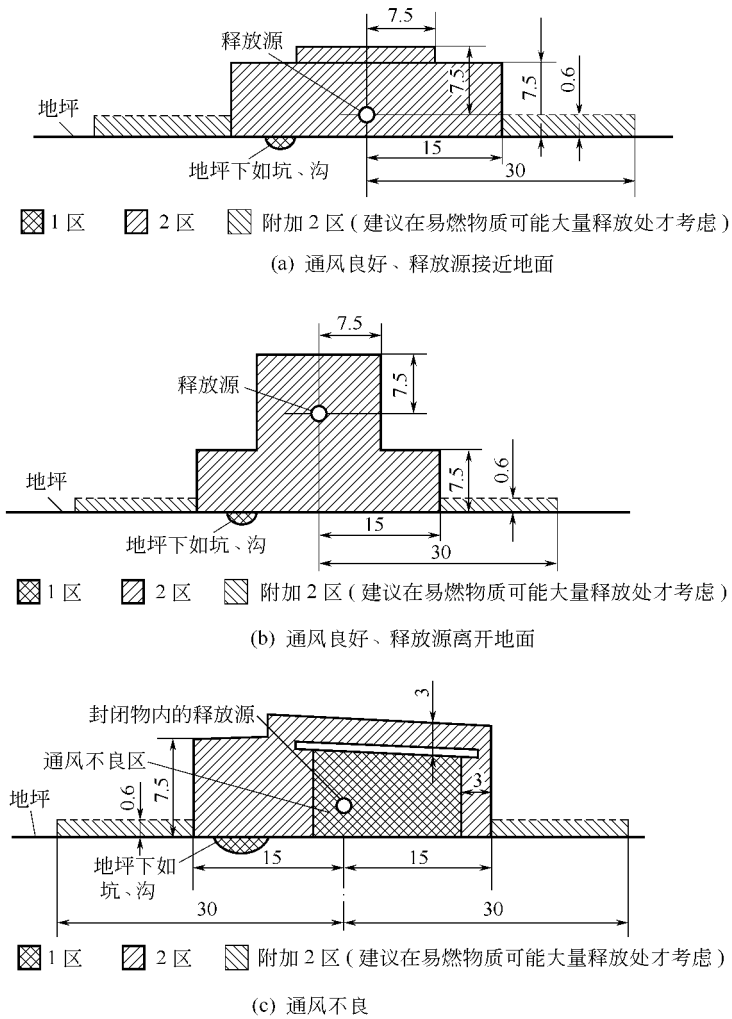
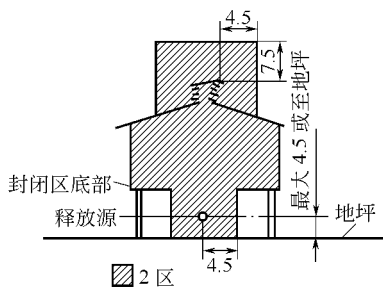
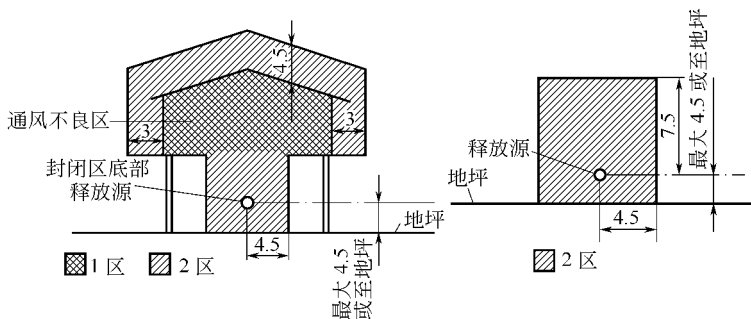


图 4-6 附加危险区域范围（单位：m）



(a) 通风良好的厂房



(b) 通风不良的厂房

(c) 通风良好的生产区

图 4-7 气体密度小于空气的爆炸危险区域范围 (单位: m)

表 4-4 相邻场所的危险等级

危险区域等级		用有门的墙隔开的相邻场所等级		备 注
		一道有门的隔墙	两道有门的隔墙 (通过走廊或套间)	
气体 或蒸气	0 区		1 区	两道隔墙门框 之间的净距不应 小于 2m
	1 区	2 区	非危险场所	
	2 区	非危险场所		
粉尘 或纤维	10 区		11 区	
	11 区	非危险场所	非危险场所	

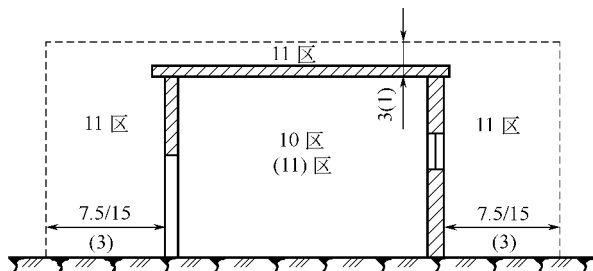
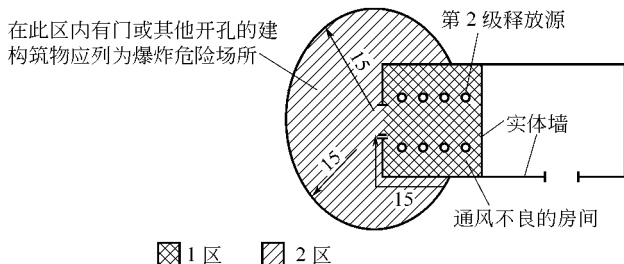
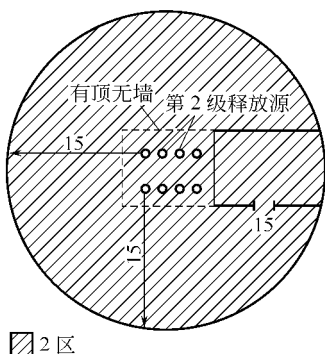


图 4-8 粉尘和纤维爆炸危险场所厂房外露天区域 (10 区、11 区) 的范围 (单位: m)

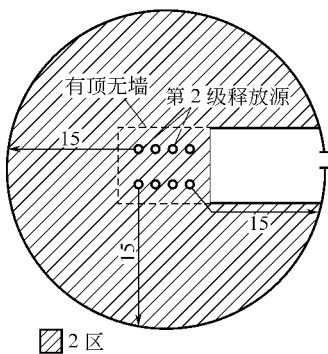
域范围如图 4-9 所示。



(a) 与通风不良的房间相邻



(b) 与释放源相邻 (门在区域内)



(c) 与释放源相邻 (门在区域外)

图 4-9 相邻场所的危险区域范围 (单位: m)

第二节 电气火灾和爆炸

一、引发电气火灾和爆炸的一般原因

引发电气火灾和爆炸要具备两个条件，即有易燃易爆的环境和引燃条件。

1. 易燃易爆环境

在发电厂、化工厂等的生产场所，广泛存在易燃易爆物质，许多地方潜伏着火灾和爆炸的可能性。

(1) 煤场 火电厂和以煤为原料的化工厂消耗大量的原煤，其煤场存放大量的原煤，特别是在夏天，环境温度很高，容易引起燃煤火灾。

(2) 输煤系统 火电厂和化工厂的输煤系统，沿途环境漏有大量原煤和堆积大量煤粉，这里容易引发煤粉火灾。

(3) 制粉系统 制粉系统，特别是煤粉仓存有大量煤粉，容易引起煤粉火灾和爆炸。

(4) 锅炉膛内有未燃尽的煤粉和可燃气体，炉膛检修时容易引起膛内爆炸。

(5) 天然气罐和输气管道 有的火电厂和化工厂要消耗天然气，天然气容易引起火灾和爆炸。

(6) 油库及用油设备 发电厂和化工厂要消耗大量的原油、工业用油，如燃烧用油，汽轮机、变压器、油断路器用油。油库及存油场所均容易引起火灾和爆炸。

(7) 制氢站及氢气系统 发电机运行需用氢气冷却，合成氨厂主要是制备氢气，制氧站源源不断向发电机供冷却用氢。氢气与氧气混合，当氧氢混合气体达到爆炸浓度时，遇明火会发生氢气爆炸。制氢站、输氢管道、发电机氢气系统都容易引起氢气爆炸。

(8) 其他 工厂大量使用电缆，电缆本身是由易燃绝缘

材料制成的，故电缆沟、电夹层和电缆隧道容易发生电缆火灾；发电厂、变电所使用烘房、烘箱、电炉，还有乙炔发生站、氧气瓶库、化学药品库，这些地方也容易引起火灾。

2. 引燃条件

电气设备和电气系统在异常和事故情况下引起电气着火源是引发火灾和爆炸的引燃条件之一，电气着火源可能是由下述原因产生的。

(1) 电气线路和电气设备过热 由于电气线路接触不良、电气线路和电气设备过载或短路、电气产品制造和检修质量不良、运行时铁芯损失过大、转动机械长期相互摩擦、电气设备通风散热条件恶化等原因都会使电气线路和电气设备整体或局部温度过高。上述原因产生的高温都会使易燃易爆物质温度升高，当易燃易爆物质达到其自燃温度时，便着火燃烧，引起电气火灾和爆炸。

(2) 电火花和电弧 电气线路和电气设备因绝缘损坏而发生短路（相间、接地）、电气线路和电气设备接头松脱、电气系统绝缘子闪络、电气系统过电压放电、运行中电机的电刷（发电机的电刷与滑环节、直流电机电刷与整流子间、交流绕线电机电刷与滑环间）、熔断器熔体熔断、断路器开合、继电器触头开闪、电焊等都会产生电火花和电弧，电火花和电弧可直接引燃易燃易爆物质或电弧使金属熔化、飞溅间接引燃易燃易爆物质。

(3) 静电放电 两个不同性质的物体相互摩擦时，使两个物体带上极性相反的静电荷。处在静电场内的金属物体，会感应静电；施加电压后的绝缘体上会残留静电。带静电荷的导体或绝缘体当具有较高电位时，会使空气间隙击穿而产生火花放电，静电放电产生的电火花可能引燃可燃易燃物品或爆炸性气体混合物。

(4) 照明器具和电热设备使用不当 照明器具和电热设备使用不当也会引起电气火灾和爆炸。

二、防止电气火灾和爆炸的一般措施

为防止电气火灾和爆炸的发生，应从以下几个方面采取措施。

1. 排除可燃易燃物质

为改善环境条件，排除可燃易爆物，应采取下列措施。

(1) 防止可燃易爆物质的泄漏 可燃易爆物质的跑、冒、滴、漏是火灾和爆炸发生的根源。为此，对存有可燃易爆物质的生产设备、容器、管道、阀门应加强密封，杜绝易燃易爆物质的泄漏，从而消除火灾和爆炸的事故隐患。

(2) 打扫环境卫生，保持良好通风 在有可燃易爆物的场所，经常打扫环境卫生，保持良好通风，不仅是美化、净化环境的需要，而且是防火防爆安全的重要措施之一。经常对泄漏可燃易爆物质的清扫、保持良好通风、清除爆炸混合物，把可燃易爆气体、蒸气、粉尘和纤维的浓度降到爆炸浓度以下，能达到有火不燃、有火不爆的效果。

2. 排除电气着火源

排除电气着火源就是消除或避免电气线路、电气设备在运行中产生电火花、电弧和高温。排除电气着火源的措施有以下几种。

(1) 排除电气线路产生着火源 在火灾和爆炸危险场所，电气线路必须满足下列规定。

① 正常情况下能形成爆炸性混合物的场所内的所有电气线路及有剧烈振动的设备接线，均采用铜芯绝缘导线或电缆。

② 各类线路导线截面应满足要求。正常情况下能形成爆炸性混合物的场所导线截面不小于 2.5mm^2 ；正常情况下不能形成，而仅在不正常情况下能形成爆炸性混合物的场所导线截面

不小于 1.5mm^2 ；正常情况下不能形成，而仅在不正常情况下能形成爆炸性混合物以下各场所导线截面不小于 4mm^2 ；所有的照明线路和正常情况下不能形成，而仅在不正常情况下能形成爆炸性混合物的场所的所有线路导线截面不小于 2.5mm^2 。

③ 在有爆炸危险的场所，移动式电气设备应采用中间无接头的橡皮软线供电。

④ 所有工作零线应与相线具有同等绝缘强度，并处于同一护套或管子中。

⑤ 所有绝缘导线或电缆的额定电压不得低于电网的额定电压，且不得低于 500V 。

⑥ 绝缘导线严禁明敷，均应穿钢管。当电缆明敷时，应采用铠装电缆。正常情况下不能形成，而仅在不正常情况下能形成爆炸性混合物的场所，及 1000V 及以下的电气线路，在有防止外界损伤的情况下允许采用非铠装电缆。

⑦ 在火灾危险场所，可采用非铠装电缆或钢管配线；在生产过程中凡不可能形成爆炸性混合物的悬浮状、堆积状可燃粉尘或可燃纤维，但能引起火灾危险的场所 500V 以下的线路可采用硬塑料管配线。当远离可燃物时，可采用绝缘导线在针式绝缘子上敷设。

(2) 合理选用电气设备 根据危险场所的级别，合理选用电气设备类型，特别是在易燃易爆的危险场所应选用防爆型电气设备，这对防止火灾和爆炸具有重要意义，在易燃易爆危险场所，应尽量不用或少用携带式电气设备。

(3) 按规范安装危险场所的电气设备 易燃易爆危险场所电气设备的安装应严格密封、连接可靠、防止局部放电（接线盒内裸露带电部分之间、裸露带电部分与金属外壳之间应保持足够的电气间隙和漏电距离）、防止局部过热（有隔热措施）。

(4) 保持电气设备与危险场所的安全距离 电气设备安装时, 应选择合理位置, 使电气设备与危险场所保持必要的安全距离。其要求如下。

① 为了防止电火花或危险温度引起火灾, 各类开关、插销、熔断器、电热器具、照明器具、电焊设备、电动机等均应根据需要, 尽量避开易燃物质。

② 室外变、配电装置与爆炸危险场所的建筑物、易燃可燃液体储气罐、液化石油气罐之间应保持必要的防火距离, 必要时应加装防火隔墙。

③ 10kV 及以下的变、配电所不应设置在有爆炸危险场所或火灾危险场所的正方或正下方。

④ 10kV 及以下架空线路, 严禁跨越火灾或爆炸危险场所。当线路与火灾爆炸危险场所接近时, 其间水平距离一般不小于杆塔高度的 1.5 倍。

(5) 保持电气设备正常运行 保持电气设备正常运行, 对于防火防爆有重要意义。为此, 应加强设备的运行管理, 防止设备过热过载运行, 对设备应定期检修、试验, 防止机械损伤和绝缘破坏造成设备短路。

(6) 电气设备可靠接地或接零 在可燃易爆危险场所, 所有电气设备金属外壳必须可靠接地或接零, 以便电气设备发生碰壳接地短路时能迅速切除着火源。接地或接零的具体要求如下。

① 在爆炸危险场所, 所有电气设备的金属外壳必须可靠接地或接零, 并与金属管道、建筑物的金属结构连接成整体, 以防止在金属导体间产生不同电位而引起放电。

② 在爆炸危险场所, 应使用专门的接地 (或零) 线, 不得利用金属管道、建筑物的金属构架、工作零线等作为专用的接地线 (或零线)。

(7) 合理应用保护装置 在火灾和爆炸危险场所，除将电气设备可靠接地（或接零）外，还应有比较完善的保护装置、监测和报警装置，以便从技术上完善防火防爆措施。其具体要求如下。

① 在火灾和爆炸危险场所，电气设备应装设短路、过载保护装置。过电流保护装置的动作电流在不影响电气设备正常工作的情况下，应尽量整定得小一些，以提高其动作的灵敏度。对于爆炸危险场所的单相线路，应安装双极开关，以便同时断开相线和零线。

② 凡突然停电有引起火灾和爆炸危险的场所，必须有双电源供电，且双电源之间应装有自动切换联锁装置，当一路电源中断，可保持供电不中断。

③ 对有通风要求的爆炸危险场所，通风装置和其他设备间有联锁装置，当设备启动时，应先启动通风装置，后投入其他设备；停止工作时，应先切除工作设备，后断开通风设备。

④ 在火灾和爆炸危险场所，应装设自动检测装置，当危险场所内爆炸性混合物接近危险浓度时，发出信号或报警，以便工作人员及时采取措施，排除危险。

⑤ 必要时装设漏电保护装置，当漏电流达到动作电流时，该装置迅速切断电源。

⑥ 在爆炸危险场所，供电系统由中性点不接地系统供电时，该供电系统应装设绝缘监视装置，当该供电系统发生单相接地时，能发出接地信号，并迅速处理。

3. 土建及消防防火防爆要求

(1) 电气用建筑采用耐火材料 如变电室、变压器室应满足耐火等级（分别为二级和一级），隔墙应用防火绝缘材料制成，门应用不可燃材料制成，且门应向外开。

(2) 充油设备间采用防火隔墙 充油设备之间应保持防

火距离，当间距不能满足时，其间应设能耐火的防火隔墙。

(3) 充油设备装设储油和排油设施 为了防止充油设备发生火灾时火势的蔓延，对充油设备设置了储油和排油设施。根据充油设备充油量的大小，这些设施有：隔离板、防爆墙围成的间隔、防爆小间、挡油墙坎、储油池等。

(4) 生产现场设置消防设备 在容易引起火灾场所或显赫处安装灭火机和消防工具。

4. 防止和消除静电火花

静电放电产生的火花是能引燃引爆着火源的，故应防止和消除静电放电，其措施如下。

(1) 控制静电的产生 摩擦和冲击会产生静电，因此，在生产中选择适当的工艺条件和操作方法，可以限制静电的产生。

① 适当选配工艺设备和工具的材料，以减少静电的产生和积累。如用导电性能好的材料作传动皮带；防止传动皮带打滑；以齿轮传动代替皮带传动以减小摩擦。

② 限制流体流速和摩擦强度以限制静电荷的产生。如为了限制烃类燃油在管道内流动时产生静电，要求其流速与管径满足下式关系

$$U^2 D \leq 0.64$$

式中 U ——燃油流速，m/s；

D ——管径，m。

③ 减小物料的冲击和分裂。实验证明，人字形管口和 45° 斜管口造成的冲击和分裂比平管口小，产生的静电也少。

④ 消除油罐或管道内的杂质，可以减少附加静电。

(2) 采取静电接地 所谓静电接地是通过接地装置将静电荷泄入大地，以消除导体上的静电。

① 静电感应导体的接地。当导体上的静电是由静电感应

引起,如果只在导体的一端接地,则只能消除接地端的静电荷,而导体另一端的静电荷不能消除,为彻底消除导体上的感应静电,导体的两端应同时接地。如输油管道的两端均应接地。

② 加工、储存、运输各类易燃易爆液体、气体、粉体的设备的接地。如运输汽油的油罐汽车,在行车过程中,汽车底盘上会产生高压静电,因此,底盘应通过金属链条将油罐与地面连通,以泄放静电荷。

③ 危险场所旋转机械的接地。如皮带轮、滚筒、电机等旋转机械,除机座接地外,其转轴通过滑环电刷接地,且采用导电性润滑油。

④ 同一场所多个带静电金属物件的接地。同一场所两个及两个以上带静电的金属物件,除分别接地外,它们之间应作金属性等电位连接,以防止相互间存在电位差而放电。

(3) 采取静电屏蔽接地 静电屏蔽接地就是用金属丝或金属网在绝缘体上缠绕若干圈后再行接地。对于绝缘体上的静电,不能用导体直接与接地体相连接构成接地,而应采用 $10^6 \sim 10^8 \Omega$ 的高电阻接地。绝缘体采用静电屏蔽接地后,其上的静电可以得到限制,防止绝缘体静电放电。

(4) 采用抗静电添加剂 抗静电添加剂是指具有良好吸湿性能和导电性能的化学药剂。如碱金属和碱土金属构成的盐类等。实验证明,在易起静电的材料中加入极微量的抗静电添加剂,可大大提高材料的静电泄放能力,消除产生静电的危险。

(5) 采用静电中和器 静电中和器(又称静电消除器)是借助静电中和器提供的电子和离子来中和物体上异号静电荷的设备。按照工作原理的不同,可分为感应式、高压式、离子流式和放射线式等类型的静电中和器。

(6) 提高空气湿度 随着工作环境相对湿度的增加,绝缘体的表面将结成一层薄薄的水膜,使绝缘体的表面电阻大为降低,从而加速静电的泄放,增湿的主要方法有:安装空调器、喷雾器或悬挂湿布等,从消除静电危害方面看,工作环境湿度在 70% 以上为好,当相对湿度低于 30% 时,可考虑增湿来消除静电积聚。

三、电气火灾的扑灭

从灭火角度来看,电气火灾有两个显著特点:一是着火的电气设备可能带电,扑灭火灾时,若不注意,可能发生触电事故;二是有些电气设备充有大量的油,如电力变压器、油断路器、电动机启动装置等,发生火灾时,可能发生喷油甚至爆炸,造成火势蔓延,扩大火灾范围。因此,扑灭电气火灾必须根据其特点,采取适当措施进行扑救。

1. 切断电源

发生电气火灾时,首先设法切断着火部分的电源,切断电源时应注意下列事项。

① 切断电源时应使用绝缘工具操作。因发生火灾后,开关设备可能受潮或被烟熏,其绝缘强度大大降低,因此拉闸时应使用可靠的绝缘工具,防止操作中发生触电事故。

② 切断电源的地点要选择得当,防止切断电源后影响灭火工作。

③ 要注意拉闸的顺序。对于高压设备,应先断开断路器,后拉开隔离开关,对于低压设备,应先断开磁力启动器,后拉开闸刀,以免引起弧光短路。

④ 当剪断低压电源导线时,剪断位置应选在电源方向的支持绝缘子附近,以免断线线头下落造成触电伤人发生接地短路;剪断非同相导线时,应在不同部位剪断,以免造成人为短路。

⑤ 如果线路带有负荷，应尽可能先切除负荷，再切断现场电源。

2. 断电灭火

在着火电气设备的电源切断后，扑灭电气火灾的注意事项如下。

① 灭火人员应尽可能站在上风侧进行灭火。

② 灭火时若发现有毒烟气（如电缆燃烧时），应戴防毒面具。

③ 若灭火过程中，灭火人员身上着火，应就地打滚或撕脱衣服，不得用灭火器直接向灭火人员身上喷射，可用湿麻袋或湿棉被覆盖在灭火人员身上。

④ 灭火过程中应防止全厂停电，以免给灭火带来困难。

⑤ 灭火过程中，应防止上部空间可燃物着火落下危害人身和设备安全，在屋顶上灭火时，要防止坠落及坠入“火海”中。

⑥ 室内着火时，切勿急于打开门窗，以防空气对流而加重火势。

3. 带电灭火

在来不及断电。或由于生产，或其他原因不允许断电的情况下，需要带电灭火。带电灭火时的注意事项如下。

① 根据火情适当选用灭火剂。由于未停电，应选用不导电的灭火剂。如喷粉灭火器使用的二氧化碳、四氯化碳、二氟一氯一溴甲烷（1211）、二氟二溴甲烷或干粉等灭火剂都是不导电的，可直接用来带电喷射灭火。泡沫灭火器使用的灭火剂有一定导电性，且对电气设备的绝缘有腐蚀作用，不宜用于带电灭火。

② 采用喷雾水枪灭火。用喷雾水枪带电灭火时，通过水柱的泄漏电流较小，比较安全。若用直流水枪灭火，通过水柱

的泄漏电会威胁人身安全。为此，直流水枪的喷嘴应接地，灭火人员应戴绝缘手套、穿绝缘鞋或均压服。

③ 灭火人员与带电体之间应保持必要的安全距离。用水灭火时，水枪喷嘴至带电体的距离为：110kV 及以下不小于 3m；220kV 及以下不小于 5m。用不导电灭火剂灭火时，喷嘴至带电体的最小距离为：10kV 不小于 0.4m；35kV 不小于 0.6m。

④ 对高空设备灭火时，人体位置与带电体之间的仰角不得超过 45° ，以防导线断路危及灭火人员人身安全。

⑤ 若有带电导线落地，应划出一定的警戒区，防止灭火人员跨步电压触电。

第三节 电气设备的防火防爆

一、电力变压器的防火防爆

1. 变压器的火灾及爆炸

电力变压器一般为油浸变压器，变压器油箱内充满变压器油，变压器油是一种闪点在 140°C 以上的可燃液体。变压器的绕组一般采用 A 级绝缘，用棉纱、棉布、天然丝、纸及其类似的有机物作绕组的绝缘材料；变压器的铁芯用木块、纸板作为支架和衬垫，这些材料都是可燃物质。因此，变压器发生火灾，爆炸的危险性很大。当变压器内部发生短路放电时，高温电弧可能使变压器油迅速分解气化，在变压器油箱中形成很高的压力。当压力超过油箱的机械强度时，即产生爆炸；或分解出来的油气混合物与变压器油-气从变压器的防爆管大量喷出，可能造成火灾。

2. 变压器发生火灾和爆炸的基本原因

(1) 绕组绝缘老化或损坏产生短路 变压器绕组的绝缘

物是棉纱、棉布、纸等，如果受到过负荷发热或受到变压器油酸化腐蚀的作用，其绝缘性能将会发生老化变质，耐受电压能力下降，甚至失去绝缘作用；变压器制造、安装、检修也可能碰坏或损坏绕组绝缘。由于变压器绕阻的绝缘老化或损坏，可能引起绕组匝间、层间短路，短路产生的电弧使绕组燃烧。同时，电弧分解变压器油产生的可燃气体与空气混合达到一定浓度，便形成爆炸混合物，遇火花便产生燃烧或爆炸。

(2) 线圈接触不良产生高温或电火花 在变压器绕阻的线圈与线圈之间、线圈端部与分接头之间、露出油面的接线头等处，如果连接不好，可能出现松动或断开而产生电火花或电弧；当分接头转换开关位置不正、接触不良时，都可能使接触电阻过大，发生局部过热而产生高温，使变压器油分解产生油气引起燃烧和爆炸。

(3) 套管损坏爆裂起火 变压器引线套管漏水、渗油或长期积满油垢而发生闪络，电容套管制造不良运行维护不当或运行年久，都使套管内的绝缘损坏、老化，产生绝缘击穿，产生高温使套管爆炸起火。

(4) 变压器油老化变质引起闪络 变压器常年处于高温状态下运行，如果油中渗入水分、氧气、铁锈、灰尘和纤维等杂质时，会使变压器油逐渐老化变质，降低绝缘性能。当变压器绕组的绝缘也损坏变质时，便形成内部的电火花闪络或击穿绝缘，造成变压器爆炸起火。

(5) 其他原因引起火灾和爆炸 变压器铁芯硅钢片之间的绝缘损坏；变压器周围堆积易燃物品出现外界火源；动物接近带电部分引起短路，以上诸因素均能引起变压器起火或爆炸。

3. 预防变压器火灾和爆炸的措施

(1) 防火（防爆）技术措施 变压器防火（防爆）的技

术措施如下。

① 预防变压器绝缘击穿。预防绝缘击穿的措施如下。

a. 安装前的绝缘检查。变压器安装之前，必须检查绝缘，核对使用条件是否符合制造厂的规定。

b. 加强变压器的密封。不论变压器运输、存放、运行，其密封均应良好。为此，结合检修、检查各部密封情况，必要时作检漏试验，防止潮气及水分进入。

c. 彻底清理变压器内杂物。变压器安装、检修时，要防止焊渣、铜丝、铁等杂物进入变压器内，并彻底消除变压器内的焊渣、钢丝、铁、油泥等杂物，用合格的变压器油彻底冲洗。

d. 防止绝缘受损。变压器检修吊罩、吊芯时，应防止绝缘受损伤，特别是内部绝缘距离较为紧凑的变压器，勿使引线、线圈和支架受伤。

② 预防铁芯多点接地及短路。为防止铁芯多点接地及短路、检查变压器时应测试下列项目。

a. 测试铁芯绝缘。通过测试，确定铁芯是否有多点接地，如有多点接地，应查明原因，消除后才能投入运行。

b. 测试穿芯螺丝绝缘。穿芯螺丝绝缘应良好，各部螺丝应紧固，防止螺丝掉下造成铁芯短路。

③ 预防套管闪络爆炸。套管应保持清洁，防止积垢闪络，检查套管引出线端子发热情况，防止因接触不良或引线开焊过热引起套管爆炸。

④ 预防引线及分接开关事故。引线绝缘应完整无损，各引线焊接良好；套管及分接开关的引线接头若发现有缺陷应及时处理；要去掉裸露引线上的毛刺和尖角，防止运行中发生放电；安装、检修分接开关时，应认真检查，分接开关应清洁，触头弹簧应良好，接触紧密，分接开关引线螺丝应紧固无断裂。

⑤ 加强油务管理和监督。对油应定期作预防性试验和色谱分析，防止变压器油劣化变质；变压器油尽可能避免与空气接触。

(2) 防火（防爆）常规措施 除了从技术角度防止变压器发生火灾和爆炸外还应做好变压器常规防火防爆工作，其措施如下。

① 加强变压器的运行监视。运行中应特别注意引线、套管、油位、油色的检查和油温、音响的监视。发现异常，要认真分析、正确处理。

② 保证变压器的保护装置可靠投入。变压器运行时，全套保护装置应能可靠投入，所配保护装置应动作准确无误，保护用直流电源应完好可靠，确保故障时，保护正确动作跳闸，防止事故扩大。

③ 保持变压器的良好通风。变压器的冷却通风装置应能可靠的投入和保持正常运行，以便保持运行温度不超过规定值。

④ 设置事故排油坑。室内、室外变压器均应设置事故排油坑，蓄油坑应保持良好状态。蓄油坑有足够厚度和符合要求的卵石层。蓄油坑的排油管道应通畅，应能迅速将油排出（如排入事故至储油池），不得将油排入电缆沟。变压器的事事故排油坑管理是常被人疏忽且不易看重的安全问题。有的单位多年不检查，卵石不清理，甚至排油道被脏物堵塞，排油坑积满了水，事故时起不到排油的作用。应提请有关人员注意排油坑的管理。

⑤ 建防火隔墙或防火防爆建筑。室外变压器周围应设围墙或栅栏，若相邻间距太小，应建防火隔墙，以防火灾蔓延；室内变压器应安装在有耐火、防爆的建筑物内，并设有防爆铁门。室内一室一台变压器，且室内应通风散热良好。

⑥ 设置消防设备。大型变压器周围应设置适当的消防设备。如水雾灭火装置和“1211”灭火器，室内可采用自动或遥控水雾灭火装置。

二、电动机的防火

1. 电动机起火原因

电动机运行中起火有下述几种原因。

① 电动机短路故障。电动机定子绕组发生相间、匝间短路或对地绝缘击穿，引起绝缘燃烧起火。

② 电动机过负荷。电动机长期过负荷运行，被拖动机械负荷过大及机械卡住使电动机停转过电流，引起定子绕组过热而起火。

③ 电源电压太低或太高。电动机启动时，若电源电压太低，则启动转矩小，使电动机启动时间长或不能启动，引起电动机定子电流增大，绕组过热而起火；运行中的电动机，若电源电压太低，电动机转矩变小而机械负荷不变，则引起定子过流，使绕组过热而起火；若电源电压大幅下降，则运行中的电动机停转而烧毁；若电源电压过高，磁路高度饱和，激磁电流急剧上升，使铁芯严重发热引起电动机起火。

④ 电动机缺相运行。电动机运行中一相断线或一相熔断器熔断，造成缺相运行（即两相运行），引起定子绕组过载发热起火。

⑤ 电动机启动时间长或短时间内连续多次启动，定子绕组温度急剧上升，引起绕组过热起火。

⑥ 电动机轴承润滑油不足或润滑油脏污，使轴承损坏卡住转子，导致定子电流增大，使定子绕组过热起火。

⑦ 电动机吸入纤维、粉尘而堵塞风道，热量不能排放，或转子与静子摩擦，引起绕组温度升高起火。

⑧ 接线端子接触电阻过大产生高温，或接头松动产生电

火花起火。

2. 电动机的防火措施

① 根据电动机的工作环境，对电动机进行防潮、防腐、防尘、防爆处理，安装时要符合防火要求。

② 电动机周围不得堆放杂物，电动机及其启动装置与可燃物之间应保持适当距离，以免引起火灾。

③ 检修后及停电超过 7 天以上的电动机，启动前应测量其绝缘电阻是否合格，以防投入运行后，因绝缘受潮发生相间短路或对地击穿而烧坏电动机。

④ 电动机启动应严格执行规定的启动次数和启动间隔时间，尽量少启动；避免频繁启动，以免使定子绕组积累过热起火。

⑤ 加强运行监视。电动机运行时，应监视电动机的电流、电压不超过允许范围；监视电动机的温度、声音、振动、轴串动正常、无焦臭味；电动机冷却系统应正常。防止上述因素不正常引起电动机运行起火。

⑥ 发现电动机缺相运行，应立即切断电源，防止电动机缺相运行过载发热起火。

⑦ 电动机一旦起火，应立即切断电源，用电气设备专用灭火器进行灭火。如二氧化碳、四氯化碳、“1211”灭火器或蒸汽灭火。一般不用干粉灭火器灭火。若使用干粉灭火器灭火时，要注意不使粉尘落入轴承内，必要时可用消防水喷射成雾状灭火，禁止将大股水注入电动机内。

三、电压短路器的防火防爆

1. 高压断路器发生爆炸起火的原因

① 断路容量不满足要求。由于设计不周，断路器的断流容量太小；由于电网的发展，系统断路容量的增大，原有断路器的断流容量不能满足要求；断路器制造质量低劣，不能满足

产品名牌参数要求。由于上述原因，当发生短路时，断路器不能切断短路电流，引起断路器爆炸起火。

② 检修质量不满足要求。如检修中随意改变分、合闸速度，随意改变断路器的燃弧距离（灭弧室至静触头间的距离），均会使断路器的断流容量降低。

③ 运行操作及维护不当。如断路器多次切断短路电流后，按规定未及时安排检修；断路器自动跳闸后，运行人员不准确的多次强送电，使断路器多次受短路电流冲击。这些均使断路器断流能力降低，并由此造成断路器爆炸起火。

④ 运行油位过高。油断路器运行油位过高，使断路器油面以上的缓冲空间减少，当油断路器开断短路电流时，由于缓冲空间减少，切断电弧产生的高压油气混合体可能冲出缓冲空间，形成断路器喷油，甚至引起火灾；另外，由于缓冲空间的减少，高压油气混合气体排入缓冲空间后，使缓冲空间的压力增高，如果此压力超过缓冲空间容器的极限强度，断路器可能发生爆炸。

⑤ 运行油位过低。油断路器运行油位过低，影响其灭弧性能。当切断电弧时，由于油位过低，冷却电弧的油道路径变短，对电弧的冷却效果差，致使断弧时间延长或电弧难于熄灭。其结果可能使弧光冲出油面进入缓冲空间，油被电弧分解出的可燃气体也进入缓冲空间与空气混合，混合气体在电弧作用下可能引起燃烧爆炸；如果油位过低，则断路器的触头可能未浸泡在油中，触头断开时未能熄灭电弧，这也会产生燃烧和爆炸。

⑥ 绝缘油不纯。油断路器的油大量游离碳化，大量老化，油内进潮、进水。由于油质不纯，使断路器内部发生闪络并导致爆炸。

⑦ 液压或气压太低。采用液压操作机构的油断路器、气

体灭弧（空气、 SF_6 ）断路器，由于操作机构的液压太低，断路器分、合闸时，会造成慢分、慢合，慢分、慢合会使触头间产生的电弧不易熄灭而引起断路器爆炸；当空气断路器、 SF_6 断路器的气体灭弧介质压力太低时，断路器的灭弧能力降低，甚至不能熄灭电弧，从而引起断路器爆炸。所以，采用液压操作机构的油断路器、气体灭弧断路器都装有液压和气体压力闭锁装置，当液压、气压过度降低时，都会将断路器闭锁在原来的位置上。

2. 断路器的防火防爆措施

① 断路容量必须满足要求。断路器的断流量应大于通断回路的短路容量，当主电网中的断路器因主电网容量的增大而使断路容量不能满足要求时，应将新建电厂接入更高一级电压的主电网。

② 严格安装前的检查。安装前对断路器应进行严格的检查，其性能指标应符合技术要求。

③ 加强运行维护与管理。断路器运行时，应做好巡视检查工作，严密监视油断路器的油色、油位、油温，必要时补、放油和取油样化验；严密监视液压操作机构的液压和气体灭弧介质的气压，监视闭锁行程开关的状况，发现异常及时处理；做好断路器正常操作和故障跳闸次数的统计，以便安排检修时间。

④ 定期检修，保证检修质量。根据断路器运行缺陷记录和正常操作次数、切断故障电流次数，定期或临时安排检修，以保证断路器正常运行。检修时应严格检修工艺，保证检修质量，对发现的缺陷一一处理。如检查触头烧伤、灭弧室烧伤及情况、油箱和套管的渗漏油、绝缘套管裂纹的处理、套管的清洁等。

⑤ 定期作绝缘试验。对断路器的绝缘油、气体介质定期

取样化验和作绝缘试验，定期对断路器本体作耐压、泄漏及操作试验，特别是雷雨季节前的预防性试验。

⑥ 做好断路器防潮、防漏、防污染工作。由前文分析可知，断路器进水、进潮是断路器爆炸的重要原因之一。因此，应加强断路器的密封，加装防雨帽，防止潮气加水分进入，断路器漏油也会导致断路器爆炸；应加强密封圈的检查，注意密封圈的老化、变形，使用合格密封圈；绝缘套管应经常保持清洁，清除灰尘和油垢，防止套管因污染放电爆炸。

四、电力电缆的防火防爆

发电厂、变电站及工矿企业都大量使用电力电缆，一旦电缆起火爆炸，将会引起严重火灾和停电事故，此外，电缆燃烧时产生大量浓烟和毒气，不仅污染环境，而且危及人的生命安全。为此，应注意电力电缆的防火。

1. 电缆爆炸起火的原理

电力电缆的绝缘层是由纸、油、麻、橡胶、塑料、沥青等各种可燃物质组成，因此，电缆具有起火爆炸的可能性。导致电缆起火爆炸的原因如下。

(1) 绝缘损坏引起短路故障 电力电缆的保护铅皮在敷设时被损坏或在运行中电缆绝缘受机械损伤，引起电缆相间或铅皮间的绝缘击穿，产生的电弧使绝缘材料及电缆外保护层材料燃烧起火。

(2) 电缆长时间过载运行 长时间的过载运行，电缆绝缘材料的运行温度超过正常发热的最高允许温度，使电缆的绝缘老化干枯。这种绝缘老化干枯的现象，通常发生在整个电缆线路上。由于电缆绝缘老化干枯，使绝缘材料失去或降低绝缘性能和机械性能，因而容易发生击穿着火燃烧，甚至沿电缆整个长度多处同时发生燃烧起火。

(3) 油浸电缆因高差发生滴、漏油 当油浸电缆敷设高

差较大时,可能发生电缆滴油现象。滴流的结果使电缆上部由于油的流失而干枯,这部分电缆的热阻增加,使纸绝缘焦化而提前击穿。另外,由于上部的油向下滴,在上部电缆头处腾出空间并产生负压力,使电缆易于吸收潮气而使端部受潮。电缆下部由于油的积聚而产生很大的静压力,促使电缆头漏油。电缆受潮及漏油都增大了发生故障起火的概率。

(4) 中间接头盒绝缘击穿 电缆接头盒的中间接头因压接不紧、焊接不牢或接头材料选择不当,运行中接头氧化、发热、流胶;在做电缆中间接头时,灌注在中间接头盒内的绝缘剂质量不符合要求,灌注绝缘剂时,盒内存有气孔及电缆盒密封不良、损坏而漏入潮气,以上因素均能引起绝缘击穿,形成短路,使电缆爆炸起火。

(5) 电缆头燃烧 由于电缆头表面受潮积污,电缆头瓷套管破裂及引出线相间距离过小,导致闪络着火,引起电缆头表层绝缘和引出线绝缘燃烧。

(6) 外界火源和热源导致电缆火灾 如油系统的火灾蔓延,油断路器爆炸火灾的蔓延,锅炉制粉系统或输煤系统煤粉自燃、高温蒸汽管道的烘烤,酸性的化学腐蚀,电焊火花及其他火种,都可使电缆产生火灾。

2. 电缆火灾的扑救方法

电缆一旦着火,应采用下列方法扑灭。

(1) 切断起火电缆电源 电缆着火燃烧,无论何种原因引起,都应立即切断电源,然后,根据电缆所经过的路径和特征,认真检查,找出电缆的故障点,同时应迅速组织人员进行扑救。

(2) 电缆沟内起火非故障电缆电源的切断 当电缆沟中的电缆起火燃烧时,如果与其同沟并排敷设的电缆有明显的着火可能性,则应将这些电缆的电源切断。电缆若是分层排列,

则首先将起火电缆上面的受热电缆电源切断，然后将与起火电缆并排的电缆电源切断，最后将起火电缆下面的电缆电源切断。

(3) 关闭电缆沟防火门或堵死电缆沟两端 当电缆沟内的电缆起火时，为了避免空气流通，以利迅速灭火，应将电缆沟的防火门关闭或将两端堵死，采用窒息的方法灭火。

(4) 做好扑灭电缆火灾时的人身防护 由于电缆起火燃烧会产生大量的浓烟和毒气，扑灭电缆火灾时，扑救人员应戴防毒面具。为了防止扑救过程中的人身触电，扑救人员还应戴橡皮手套和穿上绝缘靴，若发现高压电缆一相接地，扑救人员应遵守：室内不得进入距故障点 4m 以内，室外不得进入距故障点 8m 以内，以免跨步电压及接触电压伤人。救护受伤人员不在此限，但应采取防护措施。

(5) 扑灭电缆火灾采用的灭火器材 扑灭电缆火灾、应采用灭火器灭火，如干粉灭火器、“1211”灭火器、二氧化碳灭火器等；也可使用干砂或黄土覆盖；如果用水灭火，最好使用喷雾水枪；若火势猛烈，又不可能采用其他方式扑救，待电源切断后，可向电缆沟内灌水，用水将故障封住灭火。

(6) 扑救电缆火灾时，禁止用手直接触摸电缆钢铠和移动电缆。

3. 电缆防火措施

为了防止电缆火灾事故的发生，应采取以下预防措施。

(1) 选用满足热稳定要求的电缆 选用的电缆，在正常情况下，能满足长期额定负荷的发热要求，在短路情况下，能满足短时热稳定，避免电缆过热起火。

(2) 防止运行过负荷 电缆带负荷运行时，一般不超过额定负荷运行，若过负荷运行，应严格控制电缆的过负荷运行时间，以免过负荷发热使电缆起火。

(3) 遵守电缆敷设的有关规定。电缆敷设时应尽量远离热源，避免与蒸汽管道平行或交叉布置。若平行或交叉，应保持规定的距离，并采取隔热措施，禁止电缆全线平行敷设在热管道的上边或下边；在有些管道的隧道或沟内，一般避免敷设电缆，若需敷设，应采取隔热措施；架空敷设的电缆，尤其是塑料、橡胶电缆，应有防止热管道等热影响的隔热措施；电缆敷设时，电缆之间、电缆与热力管道及其他管道之间，电缆与道路、铁路、建筑物等之间平行或交叉的距离应满足规程的规定；此外，电缆敷设应留有波形余度，以防冬季电缆停止运行收缩产生过大拉力而损坏电缆绝缘。电缆转弯应保证最小的曲率半径，以防过度弯曲而损坏电缆绝缘；电缆隧道中应避免有接头，因电缆接头是电缆中绝缘最薄弱的地方，接头处容易发生电缆短路故障，当必须在隧道中安装中间接头时，应用耐火隔板将其与其他电缆隔开。以上电缆敷设有关规定对防止电缆过热、绝缘损伤起火均起有效作用。

(4) 定期巡视检查 对电力电缆应定期巡视检查，定期测量电缆沟中的空气温度和电缆温度，特别是应做好大容量电力电缆和电缆接头盒温度的记录。通过检查及时发现并处理缺陷。

(5) 严密封闭电缆孔、洞和设置防火门及隔墙 为了防止电缆火灾、必须将所有穿越墙壁、楼板、竖井、电缆沟而进入控制室、电缆夹层、控制柜、仪表柜、开关柜等处的电缆孔洞进行严密封闭（封闭严密、平整、美观、电缆勿受损伤）。对较长的电缆隧道及其分叉道口应设置防火隔墙及防火门。在正常情况下，电缆沟或洞上的门应关闭，这样，电缆一旦起火，可以隔离或限制燃烧范围，防止火势蔓延。

(6) 剥去非直埋电缆外表黄麻外护层 直埋电缆外表有一层浸沥青之类的黄麻保护层，对直埋地中的电缆有保护作

用。当直埋电缆进入电缆沟、隧道、竖井中时，其外表浸沥青之类的黄麻保护层应剥去，以减小火灾扩大的危险。同时，电缆沟上面的盖板应盖好，且盖板完整、坚固、电焊火渣不易掉入，以减少发生电缆火灾的可能性。

(7) 保持电缆隧道的清洁和适当通风 电缆隧道或沟道内应保持清洁，不许堆放垃圾和杂物，隧道及沟内的积水和积油应及时消除；在正常运行的情况下，电缆隧道和沟道应有适当的通风。

(8) 保持电缆隧道或沟道有良好照明 电缆隧道或沟道内的照明经常保持良好状态，并对需要上下的隧道和沟道口备有专用的梯子，此便于运行检查和电缆火灾的扑救。

(9) 防止火种进入电缆沟内 在电缆附近进行明火作业时，应采取措施防止火种进入沟内。

(10) 定期进行检修和试验 按规程规定及电缆运行实际情况，对电缆应定期进行检修和试验，以便及时处理缺陷和发现潜伏故障，保证电缆安全运行和避免电缆火灾的发生。当进入电缆隧道或沟道内进行检修、试验工作时，应遵守《电业安全工作规程》的有关规定。

五、电气线路的防火措施

1. 架空线路的防火措施

架空线路是在空中输送电能的，电杆和电线是线路中的主要部件。电杆倒折、电线断落或弧垂过大，易发生线路的短路，出现电火花、电弧。如果故障点周围或下面有可燃物，则可能引起火灾事故。因此，对架空线路有如下要求。

① 架空线路不得跨越易燃易爆物品仓库、有爆炸危险的场所、可燃助燃气体储罐和易燃材料堆场等。

② 当架空配电线路与这些有爆炸燃烧危险的设施距离较近时，必须保持不小于电杆高的 1.5 倍间距。35kV 以上的电

力架空线与储量超过 200m^3 的液化石油气单罐的水平距离不应小于 40m ，以防止发生倒杆断线事故时，导线松弛，风吹摇摆相碰而产生的电弧融熔物，落到可燃易燃物上，引起燃烧和火灾。

2. 室内布线的防火措施

① 室内布线所使用导线的耐压等级应高于线路的工作电压；其绝缘层应符合线路安装方式和敷设环境条件，截面的安全电流应大于用电过负荷电流和机械强度的需求。

② 根据使用环境选择导线的类型。一般场所可采用一般绝缘导线，特殊场所应采用特殊绝缘导线。如干燥无尘的场所可采用一般绝缘导线；潮湿场所应采用有保护层的绝缘导线；或在钢管内或塑料管内敷设普通绝缘线；在有可燃粉尘和可燃纤维较多的场所，应采用有保护层的绝缘导线；有腐蚀性气体的场所，可采用铅包线、管子线（钢管涂耐酸漆）、硬塑料管线；高温场所应采用以石棉、瓷管、云母等作为绝缘层的阻燃线；经常移动的电气设备，应采用软线或软电缆。

③ 由于三、四级耐火等级建筑物的闷顶内可燃建筑构件较多，有的还有易燃的保温材料，发生火灾时火势会迅速蔓延扩大。平时对闷顶内的线路进行维护管理不方便，所以在闷顶内布线时要用金属管保护。

④ 应尽量避免沿温度较高的管道或设备的表面敷设绝缘导线。如在这些物体的表面敷设导线时，宜采用耐热线。在用可燃材料装修的场所的电气线路，应穿金属管或阻燃塑料管，安装有困难时，可采用有金属保护层的绝缘导线。

六、照明装置的防火措施

电气照明装置是把电能转化为光能而发生的一种光源。照明灯具在工作过程中往往要产生大量的热，致使其玻璃灯泡、灯管、灯座等表面温度较高。又若灯具选用不当或发生故障时

会产生电火花、电弧；凡此种种，都会造成可燃气体，易燃蒸气和粉尘爆炸，或引起可燃物起火燃烧。另外，电气照明广泛应用于生产和生活的各个领域，人们司空见惯，往往容易忽视其防火安全，所以更增大了发生火灾的可能性。由于照明装置引起火灾的实例很多，损失惨重，所以关于照明装置防火应引起人们的足够重视。

1. 常用照明灯具的火灾危险性

(1) 白炽灯 白炽灯的表面温度较高，在散热良好的条件下工作时，灯泡的表面温度往往与其功率大小直接相关，参见表 4-5。在散热不良时，灯泡表面温度则要高得多，并且功率越大，升温的速度也越快。

表 4-5 白炽灯在散热良好时灯泡表面温度

灯泡功率 /W	灯泡表面温度 /	灯泡功率 /W	灯泡表面温度 /
40	56 ~ 63	100	170 ~ 216
60	137 ~ 180	150	148 ~ 228
75	136 ~ 194	200	154 ~ 296

灯泡距可燃物越近，则引起燃烧的时间越短。由实验可知，白炽灯烤燃可燃物的时间与温度的关系见表 4-6。另外，白炽灯耐振性较差，灯泡易破碎。破碎后，高温玻璃碎片和高温灯丝溅落于可燃物上，也会引起火灾。

表 4-6 白炽灯烤燃可燃物的时间与温度

灯泡功率 /W	可燃物	烤燃时间 /min	起火时温度 /	放置形式
100	稻草	2	360	卧式埋入
100	纸张 (乱纸)	8	333 ~ 360	卧式埋入
100	棉絮	13	360 ~ 367	垂直紧贴
200	稻草	1	360	卧式埋入

200	纸张	12	360	垂直紧贴
200	棉絮	5	367	垂直紧贴
200	松木箱	57	398	垂直紧贴

(2) 荧光灯 荧光灯的火灾危险性主要是镇流器发热烤着可燃物。正常工作时,由于铜损和铁损使其有一定的温度,如果制造粗劣、散热不良或与灯管选配不合理,以及其他附件发生故障时,都会使其温度进一步升高,超过允许值。这样会破坏线圈的绝缘强度,甚至形成匝间短路,产生高温、电弧或火花,将会使周围可燃物发生燃烧,形成火灾。

(3) 高压汞灯 正常工作时,同样功率的高压汞灯,其灯泡表面温度比白炽灯低。但通常情况下高压汞灯功率都比较大,因此发生的热量较大,温升速度快,表面温度高,如400W的高压汞灯,其表面温度约180~250℃。另外,高压汞灯镇流器的火灾危险性与荧光灯镇流器的基本相似。

(4) 卤钨灯 卤钨灯一般功率较大、温度较高。1000W卤钨灯的石英玻璃管外表面温度可达500~800℃,而其内壁温度则更高,约为1600℃左右。因此卤钨灯不仅能在短时间内烤着接触灯管外壁的可燃物,而且在长时间高温热辐射下,还能将距灯管一定距离的可燃物烤着。卤钨灯的火灾危险性比其他照明灯具更大,事实上,它在公共场所和建筑工地引起的火灾较多,必须予以足够的重视。

2. 照明灯具的防火措施

① 严格按照环境场所的火灾危险性选用照明灯具,而且照明装置应与可燃物、可燃结构之间保持一定距离,严禁用纸、布或其他可燃物遮挡灯具。

② 在正对灯泡的下面,应尽可能不存放可燃物品,灯泡距地面高度一般不应低于2m。如必须低于此高度时,应采取

必要的防护措施。

③ 卤钨灯管附近的导线应采用耐热绝缘护套（如玻璃丝、石棉、瓷珠等护套导线），而不应采用具有延燃性绝缘导线，以免灯管高温破坏绝缘引起短路。

④ 镇流器与灯管的电压和容量相匹配。镇流器安装时应注意通风散热，不准将镇流器直接固定在可燃物上，否则应用不燃的隔热材料进行隔离。

⑤ 可燃吊顶内暗装的灯具功率不宜过大，并应以白炽灯或荧光灯为主，而且灯具上方应保持一定的空间，以利散热。另外，暗装灯具及其发热附件，周围应用不燃材料（石棉板或石棉布）做好防火隔热处理，否则可燃材料上应制防火涂料。

⑥ 在室外必须选用防水型灯具，应有防溅设施，防止水滴溅到高温的灯泡表面，使灯泡炸裂。灯泡破碎后，应及时更换。

⑦ 各类照明供电设施附近必须符合电流、电压等级要求。在爆炸危险场所使用的灯具和零件，应符合《中华人民共和国爆炸危险场所电气安全规程》规定的要求。

除此之外，照明装置其他部分也存在一定的火灾危险性，故要搞好照明线路、灯座、灯具开关、挂线盒等设备的防火。

七、电热设备的防火措施

电热设备是将电能转换成热能的一种用电设备，常用的电热设备有电炉、电烘箱、电烙铁、电熨斗、电热风幕等。这些设备大都功率较大、工作温度较高，稍有不慎，就会引起火灾。

1. 电热设备的火灾原因

① 绝缘材料损坏。电热设备的温度很高，大型电炉如果绝热材料损坏，会在炉口、炉壁处出现高温，有可能引燃附近

的可燃物。

② 电热设备安置不当。如在易燃易爆场所使用开启式电热设备，电炉周围有可燃物，电炉位置安装不当，电熨斗、电烙铁等电热设备不慎放在可燃物上，都有可能引起火灾。

③ 加热温度过高。加热时间过长，操作人员没有遵守工艺要求和有关的安全操作规定，有可能引起火灾。

④ 导线过载荷。电流超过安全载流量，会使导线温度过高，有可能引燃绝缘层，甚至短路而引起火灾。

2. 电热设备的防火措施

① 电热设备附近不得堆放可燃物，使用时要有人管理，使用后、下班时或停电后必须切断电源。

② 通电后的电熨斗暂时不用时要搁放在砖块、石棉板等绝热材料上，切不可放在木板上；电熨斗切断电源后，尚有相当的余热，也不能立即放在可燃物上。

③ 使用电烘烤箱烤物件时，如物件沾有油漆及其他可燃液体，应待这些可燃液体不会滴落后再放入烘箱内。如烘烤的为可燃物件，应固定在非燃烧材料的支架上。

④ 工厂企业、机关、学校等单位应严格控制非生产、非工作需要而使用生活电炉，禁止个人违反制度私用电炉。

⑤ 在有可燃气体、蒸气和粉尘的房屋，不宜装设电热设备。

八、电焊的防火措施

① 进行焊接作业，应严格执行用火审批制度，须经本单位安全部门及有关人员同意后，方可在规定的地点和时间进行焊接。

② 焊接操作必须由经过培训并有上岗证的人员进行，并对其加强思想教育和消防专业知识的培训教育，提高警惕、重视安全。

③ 焊接操作应选择在安全地点进行，要与易燃易爆仓库、油罐、气柜、堆垛等保持一定的安全距离；尽量远离正在生产易燃易爆产品的设备、装置、容器和管道，对存在火灾、爆炸危险场所内，一般不进行电焊作业；需要检修的设备应拆卸至安全地点修理；必须在火灾、危险场所内进行电焊作业时，应严格执行防火制度。

④ 盛装过汽油、煤油、苯及其他易燃液体的桶和罐，在对其焊接之前，要认真进行处理；对积存可燃气体和蒸气的管沟、深坑、下水道内及其周围，没有消除危险之前，不能进行焊接作业；在空心间壁墙、临时简易建筑、简易仓库、有可燃建筑构件的顶棚内和可燃易燃物质堆垛附近，不宜进行焊割作业。

⑤ 焊接工具必须安全良好。电焊机和电源线的绝缘要可靠，导线要有足够的截面，并安装符合要求的熔件。电焊破损时，应及时处理更换，以防发生事故。

⑥ 电焊与气焊如在同一地点操作时，电焊的导线与气焊的管线不可敷设在一起，应保持 10m 以上的距离，以免互相影响发生危险。

⑦ 不能利用与易燃易爆生产设备有联系的金属构件作为电焊地线，如输油和输气管线等，以防止在电气通路不良的地方产生高温或电火花，引起着火或爆炸。

⑧ 当需要检修输送和储存易燃液体及可燃气体的管道设备与其他不停止运转的设备互相连通时，应将相连的管道拆除或加死堵隔绝，防止易燃液体和可燃气体窜入检修的设备和管道内，以免在点火时发生爆炸或燃烧。进行作业时应有干粉灭火器或其他简易灭火工具。最好将检修的管道拆卸到防安全地点进行焊接修理。

⑨ 焊接和切割后要特别注意对安全设施的检查，及时检

查焊接质量是否达到了技术要求。同时要清除现场上火种、关闭电源、对焊工所穿的衣服要进行检查，看是否有隐燃等。

九、蓄电池室防火防爆

酸性蓄电池充电时，其电解液会分解出大量的氢气，正常运行时也会产生一些氢气。酸性蓄电池电解液分解出的氢气与空气中的氧气混合，当氢氧混合物浓度达到爆炸极限时，一旦遇明火或火星就会发生爆炸。因此，装有铅酸蓄电池组的发电厂和变电站，应注意铅酸蓄电池的防火防爆。

由于铅酸蓄电池氢气的排出又带出一部分硫酸蒸气和飞沫，硫酸蒸气和飞沫具有很强的腐蚀性，不仅影响工作人员的身体健康，当沉积在室内的墙壁天花板、金属结构、支架、窗户及门上时，将造成腐蚀。因此铅酸蓄电池室还应采取相应的防腐蚀措施。

铅酸蓄电池室防火防爆及防腐蚀的措施如下。

(1) 加强蓄电池室的通风 为了防止蓄电池室内积存有爆炸性危险的氢气和有害的硫酸蒸气，在室内应设置足够的通风设施，使蓄电池室内氢气含量不致达到爆炸危险的程度，酸气的含量也不致对工作人员的健康产生有害的影响。通风装置应能将上述气体抽出，同时，能补充干净的空气。通风机的容量可按下列式计算

$$V = 0.07IN \quad (\text{m}^3/\text{h})$$

式中 I ——蓄电池的最大充电电流，A；

N ——蓄电池组的电池个数。

(2) 防止蓄电池室死角的有害气体未排出 由于硫酸蒸气比空气重，大部分积聚在室内靠近地面，氢气比空气轻，大都积聚在室内天花板下面，因此，抽气通风系统应能同时从室内的上部和下部抽气；蓄电池室的天花板应不透气，当天花板被楼板的大梁分成数段室挡时，在梁与梁间的空挡处易积有氢

气，因此，每挡都要有通风机，以便排除空挡上部积存的氢气。

(3) 蓄电池通风筒应独立且高出屋顶 为了防止腐蚀及爆炸，蓄电池室排出的气体应通过独立的风筒排到大气中，不应与锅炉、烟道或烟囱相连。通风筒应高出建筑屋顶 1.5m 以上，以防硫酸沉积和腐蚀屋顶。此外，通风筒还应装设防雨、防雪设备。

(4) 室内采用防爆电器 为了防止电火花引起爆炸，蓄电池室内应采用防爆电器。如电气开关、插销、插座、熔断器等均是不产生电火花的防爆电器。蓄电池室内的照明应使用防爆灯，其结构应保证在灯泡碎裂或灯具内发生电火花时，碎片和电火花只局限在外层密闭的玻璃保护罩内。照明灯线应采用铅皮线并且暗敷设。

(5) 其他措施 蓄电池室内应保持干净明亮；室内窗户使用毛玻璃或玻璃上涂上白漆，以防太阳直射引起蓄电池发热；蓄电池室的大门上及室内应挂“禁止烟火”的警告标示；室内设有水龙头及冲洗盒等。

第五章 电气防雷安全技术

第一节 雷电现象及防雷设备

一、雷电现象及危害

1. 雷电产生的原因

雷电现象比较复杂，它是由于地面湿气受热上升或空中不同冷、热气团相遇凝成水滴或冰晶形成积云，在运动时使电荷发生分离，当电荷积聚到足够数量时，就在带有不同电荷的云间或由于静电感应而产生不同电荷的云地间发生的放电现象。

雷云中可能同时存在着几个电荷聚集中心，所以经常出现多次重复性的放电现象，常见的为 2 ~ 3 次，当第一个电荷聚集中心完成放电过程后，其电位迅速下降，第二个电荷聚集中心立即向着前一个放电位置移动，瞬间重复放电。每次间隔时间从几百微秒到几百毫秒不等，但其放电电流将逐次递减。

2. 雷电种类

(1) 直击雷 带电积云接近地面与地面凸出物之间的电场强度达到空气的介电强度 ($25 \sim 30\text{kV/mm}$) 时发生的放电现象，称为直击雷。

(2) 静电感应雷 带电积云接近地面凸出物时，在其顶部感应出大量异性电荷，当带电积云与其他部位或其他积云放电后，凸出物顶部的电荷失去束缚高速传播形成高压冲击波。此冲击波由静电感应产生，具有雷电特征，称为静电感应雷。

(3) 电磁感应雷 雷电流在周围空间产生迅速变化的强磁场，在邻近的导体上感应出很高的电动势，该电动势具有雷电特征，称为电磁感应雷。

(4) 球雷 雷电放电时产生的球状发光带电气体，称为球雷，球雷可能造成多种危害。

3. 雷电参数

(1) 雷电流幅值 雷电流幅值指主放电时冲击电流的最大值，该幅值可达数十至数百千安，雷电流幅值越大，出现的概率越小。

雷电流的幅值随各国气象条件相差很大，根据实测画出的中国雷电流幅值概率曲线如图 5-1 所示，它适用于中国年平均雷暴日大于 20d/a 的一般地区。一天内只要听见雷声就称为一个雷暴日，一个小时内只要听见雷声就称为一个雷暴小时。据统计，我国大部分地区一个雷暴日约折合三个雷暴小时，雷暴日是衡量雷电活动频繁程度的依据。中国把年平均雷暴日不超过 15d/a 的地区叫少雷区，超过 40d/a 的叫多雷区。在防雷设计中，要根据雷暴日的多少因地制宜。

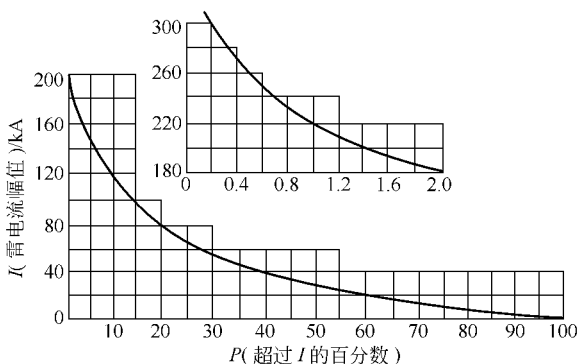


图 5-1 中国雷电流幅值的概率曲线

图 5-1 中的曲线也可用下式表示，即

$$\lg P = \frac{I}{108}$$

式中 P ——雷电流超过 I 的概率；

I ——雷电流幅值，kA。

中国年平均雷暴日在 20d/a 及以下的地区，如西北地区、内蒙古地区、东北边境地区等，因为形成雷云的高温、高湿度的条件较差，可由给定的概率按图 5-1 查出雷电流幅值后减半，也可按下式求得，即

$$\lg P = \frac{I}{54}$$

根据防雷设计的长期运行经验，对建筑物及构筑物， I 取为 150kA 的计算值，实践中证明是安全可靠的。

(2) 雷电流陡度 雷电流波形如图 5-2 所示。雷电流由零增长至最大幅值的这一部分，称为波头 (τ_f)，通常只有 1 ~ 4 μ s；电流值下降的部分，称为波尾，可长达数十微秒，这种波头的形状称为半余弦波，用数字式表达即为

$$i = \frac{1}{2} (1 - \cos \omega t)$$

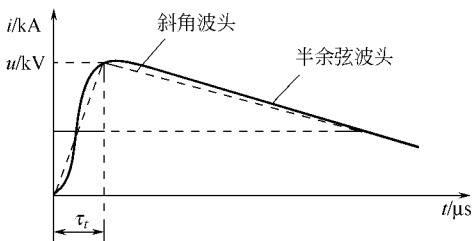


图 5-2 雷电流波形

在波头部分，电流对时间的变化率 $a = di/dt$ ，称为陡度。雷电流与雷电流陡度的关系如图 5-3 所示。陡度的数值开始时很快地增加， a 的最大值对半余弦波来说应在 $i/2$ 处，以后逐渐变小。当雷电流的幅值达到最大值时， $a = 0$ ，即雷电流的

最大值与陡度的最大值并不是同时出现的。由于 τ_t 比较固定，说明 a 与雷电流幅值之间有极为密切的关系，根据运行经验，在我国 τ_t 取 $2.6\mu s$ 。

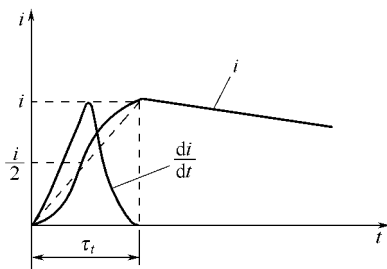


图 5-3 雷电流与雷电流陡度的关系

(3) 雷电冲击过电压 雷电冲击过电压指冲击电压的最大值。直击雷冲击过电压按下式计算，即

$$u_s = iR_s + L \frac{di}{dt}$$

式中 u_s ——直击雷冲击过电压，kV；

i ——雷电流，kA；

R_s ——防雷接地装置的冲击接地电阻， Ω ；

L ——雷电流通路的电感（如通路长度 l 以 m 为单位，则 $L = 1.3l$ ）， μH 。

雷击点距电力线路 50m 以外时，感应雷冲击过电压可按下列式计算，即

$$U_{is} = \frac{25I_m h}{d}$$

式中 U_{is} ——感应雷冲击过电压，kV；

I_m ——雷电流幅值，kA；

h ——电力线路导线平均高度，m；

d ——线路距雷击点水平距离，m。

4. 雷电的危害

(1) 危害的形式

① 直接雷击的危害。地面上的人、畜、建筑物、电气设备等直接被雷电击中，叫做直接雷击。发生直接雷击时，特大的雷电流（几十至几百千安）通过被击物，在被击物内部产生高达几万度的温度，使被击物燃烧，使架空导线熔化。

② 感应雷的危害。雷云对地放电时，在雷击点全放电的过程中，位于雷击点附近的导线上将产生感应过电压，过电压幅值一般可达几千万伏至几百万伏，它能使电力设备绝缘发生闪络或击穿，造成电力系统停电事故、电力设备的绝缘损坏，使高压电串入低压系统，威胁低压用电设备和人员的安全，还可能发生火灾和爆炸事故。

③ 雷电侵入波的危害。雷电侵入波是指落在架空线路上的雷电，沿着线路侵入到变电所（站）或配电室内，致使设备或人遭受雷击。

(2) 雷电的破坏作用 雷电放电时，它的破坏作用是综合性的，包括电磁力、热效应和机械效应引起的破坏力是相当严重的。

① 电磁力的破坏作用。主要表现为毁坏电气设备绝缘，烧断电线或劈裂电杆，还可能造成严重的触电事故。

② 热效应的破坏作用。主要表现为几万度的高温，不仅能使金属熔化，还能引燃易燃、易爆的物质，造成火灾或爆炸。

③ 机械力的破坏作用。主要表现为使被击物扭曲、变形甚至爆裂或碎片。

5. 雷电分布的一般规律

在一般情况下，雷电的出现有以下几方面的规律。

① 热而潮湿的地区比冷而干燥的地区雷暴多。

② 从纬度看雷暴的频繁程度总是由北向南增加，到赤道最高，以后又向南递减。在我国递减的顺序大致是：华南、西南、长江流域、华北、东北、西北。电力线路的雷害事故统计递减顺序是：华东、中南、东北。

③ 从地域看雷暴的频繁程度是山区大于平原、平原大于沙漠、陆地大于湖海。

据有关部门在中南、华东地区观测，落雷密度是：山区 $0.02 \text{ 次}/\text{km}^2$ 、平原 $0.01 \text{ 次}/\text{km}^2$ 。在广东观测，雷电流的幅值是：超过 200kA 的概率占 2% ，超过 40kA 的概率占 50% 。

④ 从时间看，雷暴高峰月都在七、八月份，活动时间大都在北京时间 $14 \text{ 时} \sim 22 \text{ 时}$ ，各地区雷暴的极大值和极小值系数出现在相同的年份。

6. 山区落雷的选择性

一个地区有无雷暴，是由内因（即气象）所决定的。但有了雷暴，具体选哪一处落雷，则受外界条件的影响。易落雷的条件如下。

(1) 从地质看 土壤电阻率的相对值要小，有利于电荷的很快积聚。

① 大片土壤电阻率较大时，局部电阻率小的地方容易落雷。

② 土壤电阻率突变的地方，最易受雷击，如岩石与土壤，山坡与稻田的交界面。

③ 岩石山或土壤电阻率较大的山坡，雷击点多发生在山脚，山腰次之。

④ 土山或土壤电阻率较小的山坡，雷击点多发生在山顶，山腰次之。

⑤ 地下埋有导电矿藏（金属矿、盐矿）的地区，容易落雷。

⑥ 地下水位高、矿泉、山河沟、地下水出口处容易落雷。

(2) 从地形看 要有利于雷云的形成与相遇。

① 落雷几率的分布是山的东坡、南坡多于山的北坡、西北坡，这是因为海洋潮湿空气从东南进入大陆后，经曝晒闷热遇山抬升而出现雷雨。

② 山中平地的落雷几率大于峡谷，这是因为峡谷较窄，不易曝晒和对流，缺乏形成雷电的条件。

③ 湖旁、海边落雷几率较少，但海滨如有山岳，则靠海一面山坡落雷几率较多。

④ 雷暴走廊与风向一致，风口或顺风的河谷容易落雷。

(3) 从地物看 要有利于雷云与大地建立良好的放电通道。

① 空旷地中的孤立建筑物和建筑群中的高耸建筑物易受雷击。

② 排出导电尘埃的厂房及废气管道容易落雷。

③ 屋顶为金属结构、地下埋有大量金属管道、内部存放大型金属设备的厂房易受雷击。

④ 建筑群中，个别特别潮湿的建筑，如牛马棚、冰库等易遭雷击。

⑤ 尖屋顶及高耸建筑物易受雷击，如水塔、烟囱、天窗、旗杆、消防梯等。

⑥ 屋旁大树、接收天线、山区输电线易受雷击。

当然，在分析雷击的可能性时，不能单从一个因素考虑，而要对周围环境作全面综合的分析。

二、防雷等级的划分

按照防雷要求，建筑物分为以下三类。

1. 第一类

凡制造、使用或储存炸药、火药、起爆药、火工品等大量

危险物品的建筑物遇电火花会引起爆炸，从而造成巨大破坏或人身伤亡的建筑物应划为第一类防雷建筑物，如火药制造车间、乙炔站、电石库、汽油提炼车间等。

2. 第二类

特征同第一类，但不致引起巨大破坏和人身伤亡，或只当发生生产事故时才有第一类的情况出现属第二类；具有重要政治意义的民用建筑物也属第二类。属于这一类的有以下几类。

① 国家级重点文物保护的建筑物。

② 国家级的会堂、办公楼、档案馆、大型展览馆、国际机构、大型火车站、国际港口客运站、国宾馆、大型旅游建筑、大型体育场。

③ 国家级计算中心、通信枢纽以及对国民经济有重要意义的装有大量电子设备的建筑物。

④ 制造、使用和储存爆炸危险物质，但电火花不易引起爆炸、或不致造成巨大损坏和人身伤亡的建筑物，如油漆制造车间、氧气站、易燃品库等。

⑤ 有爆炸危险的露天气罐和油罐。

⑥ 年预计雷击次数大于 0.06 次/a 的部、省级办公楼及其他重要的或人员密集的公共建筑物。

⑦ 年预计雷击次数大于 0.3 次/a 的住宅、办公楼与一般性民用建筑物。

3. 第三类

凡不属于第一类、第二类的而需要作防雷保护的一般建筑物均属第三类。

① 省级重点文物保护的建筑物和省级档案馆。

② 年预计雷击次数大于和等于 0.012 次/a、小于和等于 0.06 次/a 的部、省级办公楼及其他重要的或人员密集的公共建筑物。

③ 年预计雷击次数大于和等于 0.06 次/a、小于和等于 0.3 次/a 的住宅、办公楼等一般性民用建筑物。

④ 年预计雷击次数大于和等于 0.06 次/a 的一般性工业建筑物。

⑤ 年平均雷暴日在 15d/a 以上地区的高度在 15m 及 15m 以上的烟囱、水塔等孤立高耸的建筑物；年平均雷暴日在 15d/a 及 15d/a 以下地区的高度在 20m 及 20m 以上的烟囱、水塔等孤立高耸的建筑物。

三、接闪器

1. 简介

一套完整的防雷装置由接闪器或避雷器、引下线和接地装置组成。直接接受雷电的金属物体叫接闪器，常用的接闪器有避雷针和避雷线，避雷针主要用来保护露天变、配电设备、建筑物和构筑物，避雷线主要用来保护电力线路；避雷器是一种专门的防雷装置。

接闪器是防直击雷的有效措施，它将雷电引向自身并安全导入地中，从而保护了附近的建筑和设备免受雷击。

接闪器的保护范围可根据模拟实验及运行经验确定，由于雷电放电途径受很多因素的影响，因此要绝对保证保护物不受雷击是困难的，一般采用 0.1% 的雷击概率即可。

2. 接闪器保护范围的计算方法

对于建筑物，接闪器的保护范围按滚球法计算；对于电力装置，接闪器的保护范围按折线法计算。

(1) 滚球法 滚球法是设想一定直径的球体沿地面（或与大地接触且能承受雷击的导体）由远及近向被保护设施滚动。如该球体触及接闪器或其引下线之后才能触及被保护设施，则该球体触及接闪器保护范围之内，球面线即保护范围的轮廓线。滚球的半径按防雷级别确定：第一类防雷建筑物、滚

球半径为 30m；第二类防雷建筑物，滚球半径为 45m；第三类防雷建筑物，滚球半径为 60m。

① 单支避雷针的保护范围如图 5-4 所示确定。保护范围是一个圆锥体，先在距地面高度 h_r 上作一条地面的平行线，再以避雷针针尖 ($h \leq h_r$) 或从避雷针正下方 h_r 高度点 ($h > h_r$) 为圆心，以 h_r 为半径作圆弧与避雷针和地面相接，弧线以下即单支避雷针的保护范围。在 h_x 高度上和地面上的保护半径为

$$r_x = \sqrt{h(2h_r - h)} - \sqrt{h_x(2h_r - h)}$$

式中 r_x ——在 h_x 高度上和地面上的保护半径，m；

h ——避雷针高度，m；

h_r ——滚球半径，m；

h_x ——被保护物高度，m。

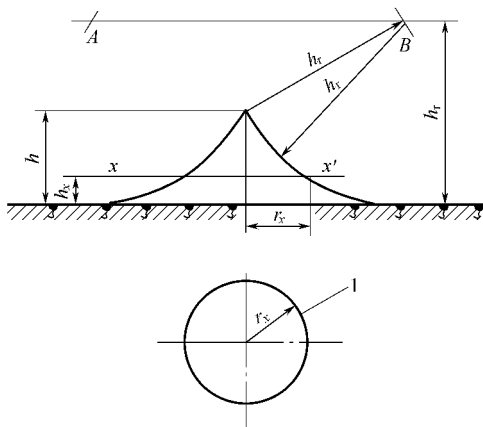


图 5-4 用滚球法计算单支避雷针的保护范围

h —避雷针高度； h_r —滚球半径； h_x —被保护物高度；

r_x —在 h_x 高度上和地面上的保护半径；1—在 xx' 平面上保护范围的截面

② 两支等高避雷针的保护范围如图 5-5 所示确定。当

$d \geq 2\sqrt{h(2h_r - h)}$ 时, 分别按两支单针计算其保护范围; 当
 $d < 2\sqrt{h(2h_r - h)}$ 时, 按以下方法计算其保护范围。

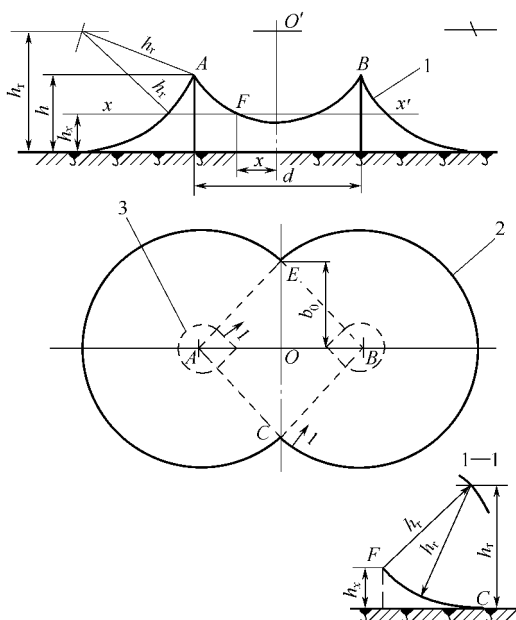


图 5-5 用滚球法计算两支等高避雷针的保护范围

1—AOB 轴线的保护范围; 2—地面上保护范围的截面;
 3— xx' 平面上保护范围的截面; d —两避雷针之间的水平距离

- ACBE 外侧保护范围按单支避雷针计算。
- A、B 连线垂直面上的保护高度线为圆心 (O') 高度

h_r 、半径 $\sqrt{(h_r - h)^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2}$ 的居中圆弧, 弧线高度为

$$h_x = h_r - \sqrt{(h_r - h)^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2} - x^2$$

式中 h_x ——弧线高度, m;

h_r ——滚球半径，m；

h ——避雷针高度，m；

d ——两避雷针之间的水平距离，m；

x ——距两针中心点的水平距离，m。

地面上每侧最小保护宽度为

$$b_0 = CO = OE = \sqrt{h(2h_r - h) - \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

• ACBE 范围内，圆弧两侧的保护范围是将弧线顶点作为假想单支避雷针针尖按滚球法确定，如图 5-5 中 1—1 剖面所示。

• h_x 高度地面平行平面上保护范围的确定：以 A、B 为圆心，以单支避雷针的保护半径 r_x 为半径作弧度与四边形 ACBE 相交，再以 C、E 为圆心，以单支避雷针的 $(r_0 - r_x)$ 为半径作弧线与上一弧线相交，四条弧线限定的范围即平面上的保护范围。

③ 两支不等高避雷针的保护范围如图 5-6 所示确定。图中 h_1 和 h_2 分别为两支避雷针高度，当 $d \geq \sqrt{h_1(2h_r - h_1)} + \sqrt{h_2(2h_r - h_2)}$ 时，分别按两支单针计算其保护范围；当 $d < \sqrt{h_1(2h_r - h_1)} + \sqrt{h_2(2h_r - h_2)}$ 时，按以下方法计算其保护范围。

• ACBE 外侧保护范围按单支避雷针计算。

• A、B 连线垂直面上的保护高度线为圆心 (O') 高度 h_r 、半径 $\sqrt{(h_r - h_1)^2 + d_1^2}$ 的居中圆弧 CE 线的位置按下式计算，即

$$d_1 = \frac{(h_r - h_2)^2 - (h_r - h_1)^2 + d^2}{2d}$$

圆弧线高度为

$$h_x = h_r - \sqrt{(h_r - h_1)^2 + d_1^2 - x^2}$$

式中 x ——距 O' 点的水平距离, m。

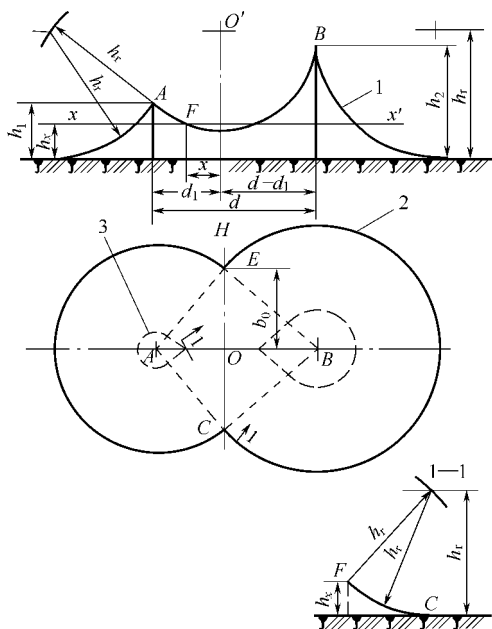


图 5-6 用滚球法计算两支不等高避雷针的保护范围

1—AOB 轴线的保护范围；2—地面上保护范围的截面；

3— xx' 平面上保护范围的截面

地面上每侧最小保护宽度为

$$b_0 = CO = OE = \sqrt{h_1 (2h_r - h_1) - d_1^2}$$

• ACBE 范围内, 圆弧两侧的保护范围是将弧线顶点作为假想单支避雷针针尖按滚球法确定, 如图 5-6 中 1—1 剖面所示。

• h_x 高度地面平行平面上保护范围按两支等高避雷针的方法确定。

④ 矩形布置的四支等高避雷针的保护范围如图 5-7 所示确定。当 $d_3 \geq 2 \sqrt{h(2h_r - h)}$ 时，分别按双支等高避雷针计算其保护范围；当 $d_3 < 2 \sqrt{h(2h_r - h)}$ 时，按以下方法计算其保护范围。

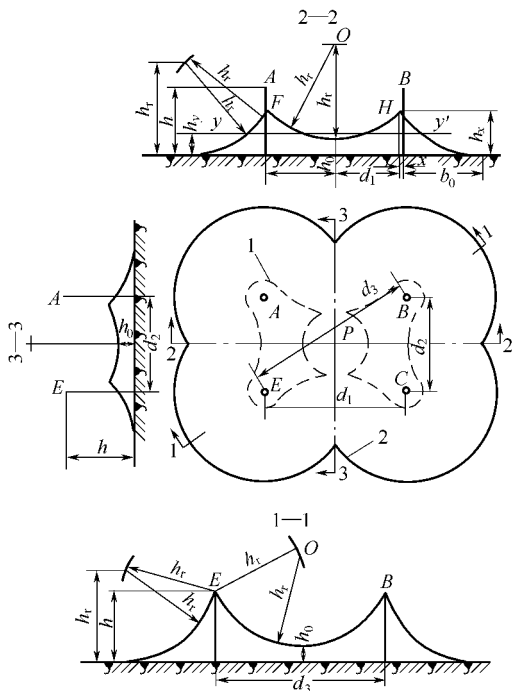


图 5-7 用滚球法计算矩形布置的四支等高避雷针的保护范围

1— yy' 平面上保护范围的截面；2—地面上保护范围的截面

• 四支针外侧保护范围按两支等高避雷针的方法确定。

• B、E 两针连线上的保护范围如图 5-7 中 1—1 剖面，其外侧保护范围按单支避雷针确定，其内侧保护范围按两针之间的圆弧确定。该圆弧是先以两针针尖为圆心，以 h_r 为半径作

弧相交于 O 点，再以 O 点为圆心，以 h_r 为半径绘制的，圆弧最低点的高度为

$$h_0 = \sqrt{h_r^2 - \left(\frac{d_3}{2}\right)^2} + h - h_r$$

• 图 5-7 中 2—2 剖面上的保护范围按以下方法确定：圆心位于中央，圆心高度为 $h_r + h_0$ ，圆弧半径为 h_r ，圆弧最低点为 h_0 ，该圆弧与 A 和 E、B 和 C 两支等高避雷针外侧保护范围的向上延长线相交于 F、H 点，弧线下面的范围即这两个断面上的保护范围。F 点和 H 点高度符合以下两式要求，即

$$(h_r - h_x)^2 = h_r^2 - (b_0 - x)^2$$

$$(h_r + h_0 - h_x)^2 = h_r^2 - \left(\frac{d_1}{2} - x\right)^2$$

⑤ 单条避雷线的保护范围如图 5-8 所示确定。避雷线的高度 h 应取最低弧垂点的高度，无法确定弧垂点时，支柱间距离 120m 以下者可取弧垂为 2m；支柱间距离 120 ~ 150m 者可取弧垂为 3m。当 $h \geq 2h_r$ 时，单支避雷线无保护范围；当 $h < 2h_r$ 时，保护范围按以下步骤确定。

• 先在距地面高度 h_r 上作一条地面的平行线，再以避雷线为圆心，以 h_r 为半径作弧线与该水平线相交 A、B 两点，再以 A、B 两点为圆心，以 h_r 为半径作圆弧相交（或相切）并与地面相切，弧线以下即单条避雷线的保护范围。

• 当 $h > h_r$ 时，保护范围最高点的高度 h_0 按下式计算，即

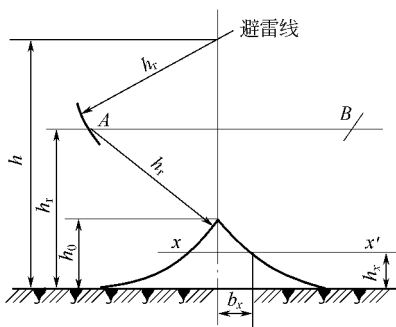
$$h_0 = 2h_r - h$$

• 在 h_x 高度上的保护宽度 b_x 按下式计算，即

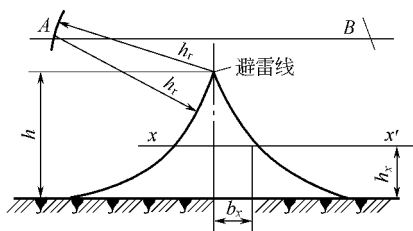
$$b_x = \sqrt{h(2h_r - h)} - \sqrt{h_r(2h_r - h_x)}$$

• 避雷线两端的保护范围按单支避雷针的方法确定。

图 5-8 用滚球法计算单条避雷线的保护范围



(a) $2h_r > h > h_r$



(b) $h \leq h_r$

⑥ 两条等高避雷线的保护范围如图 5-9 所示确定。图中 d 为两避雷针之间的水平距离。

当 $d \geq 2\sqrt{h(2h_r - h)}$ 时，分别按单条避雷线计算其保护范围；当 $h \leq h_r$ 、且 $d < 2\sqrt{h(2h_r - h)}$ 时，按以下方法计算其保护范围。

- 两线外侧保护范围按单条避雷线确定。
- 两线内侧按半径为 h_r ，连接 A、B 两点的圆弧确定，圆弧最低点高度 h_0 按下式计算，即

$$h_0 = \sqrt{h_r^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} + h - h_r$$

- 避雷线两端的保护范围按两支等高避雷针确定，如图

5-9 (a) 中 1—1 剖面，图中 h'_0 为两支等高避雷针保护范围最低点的高度； h_0 线内移距离 x 可按下式计算，即

$$x = \sqrt{h_0 (2h_r - h_0)} - \sqrt{h (2h_r - h) - \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

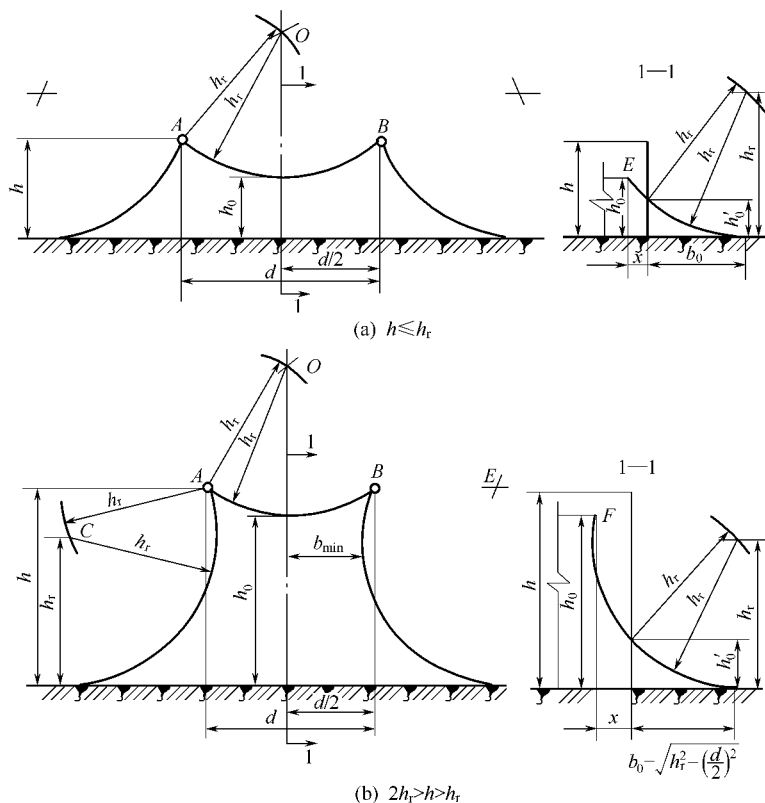


图 5-9 用滚球法计算两条等高避雷线的保护范围

当 $2h_r > h > h_r$ 、且 $d < 2 \sqrt{h (2h_r - h)}$ 时，按以下方法计算其保护范围。

• 两线外侧保护范围按圆心高度和半径均为 h_r ，经过 A 点或 B 点的圆弧确定，最小保护宽度 $b_{\min}$ 按下式计算，即

$$b_{\min} = \sqrt{h(2h_r - h)} + \frac{d}{2} - h_r$$

• 两线内侧按半径为 h_r ，连接 A、B 两点的圆弧确定，圆弧最低点高度 h_0 按下式计算，即

$$h_0 = \sqrt{h_r^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} + h - h_r$$

• 避雷线两端的保护范围按两支等高避雷针确定，如图 5-9 (b) 中 1—1 剖面，图中 h'_0 为两支等高避雷针保护范围最低点的高度， h_0 线内移距离 x 可按下式计算，即

$$x = \sqrt{h_0(2h_r - h_0)} - \sqrt{h_r^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

(2) 折线法 将接闪器的保护范围视为折线圆锥形。

① 单支避雷针的保护范围如图 5-10 所示确定。设避雷针高度为 h ，以避雷针顶点为轴向下作 45° 斜线，构成锥形保护空间的上部；从斜线上距地面 $h/2$ 处，作大于 45° 斜线与距针角 $1.5h$ 地面处相交，构成圆锥形保护空间的下半部。因此，其整体构成折线圆锥形。地面上的保护半径按下式确定，即

$$r = 1.5h$$

式中 r ——保护半径，m；

h ——避雷针高度，m。

被保护物高度为 h_x ，水平面的保护半径为 r_x 。

当 $h_x \geq h/2$ 时 $r_x = (h - h_x)p = h_e p$

当 $h_x < h/2$ 时 $r_x = (1.5h - 2h_x)p$

式中 h_x ——被保护物高度，m；

r_x ——在 h_x 高度的水平面上的保护半径，m；

p ——高度影响系数，考虑当针太高时，保护半径不成

正比增大的系数，当 $h \leq 30\text{m}$ 时， $p = 1$ ；当 $h > 30\text{m}$ 时， $p = 5.5/\sqrt{h}$ ；当 $h > 120\text{m}$ 时， $p = 0.5$ ；
 h_e ——避雷针有效高度， m_0 。

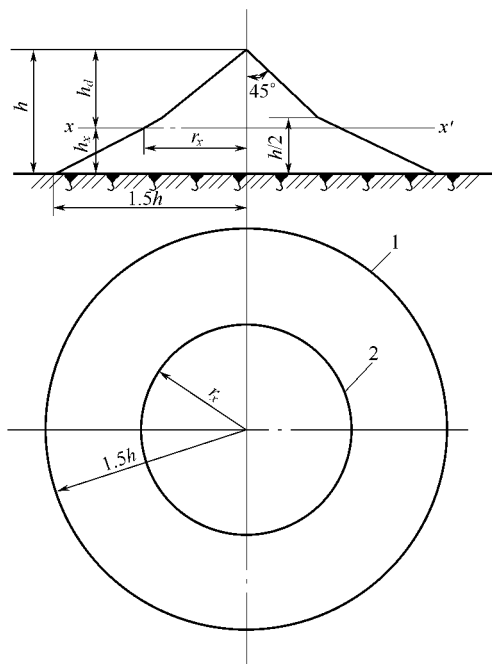


图 5-10 用折线法计算单支避雷针的保护范围

h —避雷针高度； h_x —被保护物高度；

r_x —避雷针在 h_x 高度水平面上的保护半径；

1—在地面上的保护范围；2—在 xx' 平面上的保护范围

② 两支等高避雷针的保护范围如图 5-11 所示确定。当需要保护的较大范围时，用一支高避雷针保护往往不如用两支比较低的避雷针保护有效，由于两针之间受到了良好的屏蔽作用，除受雷击的可能极少外，更便于施工且经济效果好。

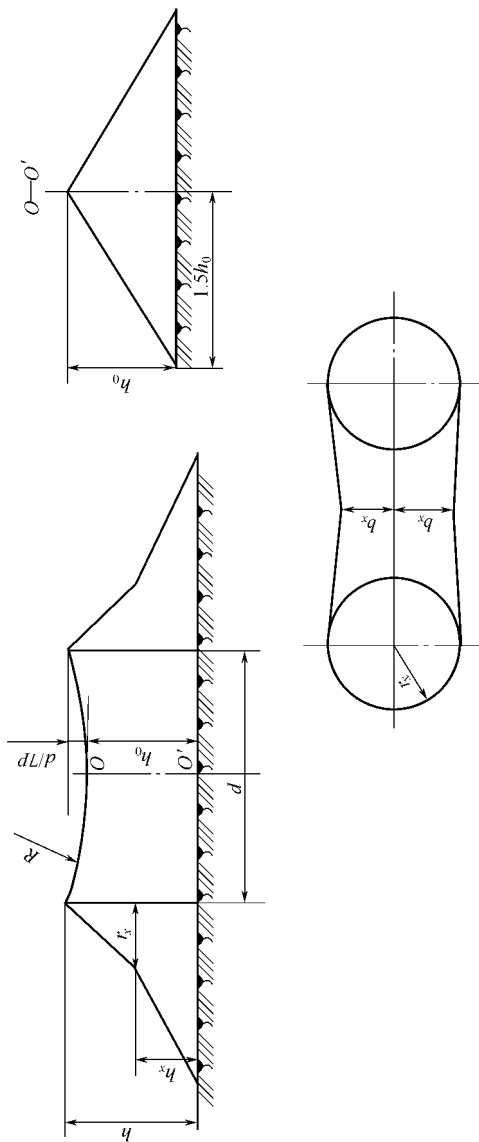


图 5-11 用折线法计算两支等高避雷针的保护范围

- 两针外侧保护范围按单支避雷针的保护范围确定。
- 两针之间的保护范围按连接两针的顶点及中点 O 的圆弧确定，并按下式计算，即

$$h_0 = h - \frac{d}{7p}$$

式中 h_0 ——两针间保护范围上部边缘最低点的高度，m；
 d ——两针间的距离，m；
 p ——高度影响系数。

- 两针在 h_x 水平面上的保护范围如图 5-11 所示，在其保护范围一侧的最小宽度为

$$b_x = 1.5 (h_0 - h_x)$$

- 当 $d = 7hp$ 时， $h_0 = 0$ ，即两针之间不能构成联合保护网，两针之间距离与针高之比 (d/h) 不宜大于 5。

以上介绍的是适用于平原的顶端保护角为 45° 的折线保护范围方法。此外，还有适用于山区的顶端保护角为 37° 的避雷针、两支不等高避雷针、三支避雷针、四支避雷针等，其保护范围及计算方法可参考有关设计手册。

③ 单条避雷线的保护范围如图 5-12 所示确定。避雷线向下作与铅垂面成 $20^\circ \sim 30^\circ$ （保护角，现取 25° ）的斜面构成保护空间的上部，在 $h/2$ 处转折，其他如图 5-12 所示。保护空间也可以用下式表达，即

$$\text{当 } h_x \geq h/2 \text{ 时 } \quad r_x = 0.47 (h - h_x) p$$

$$\text{当 } h_x < h/2 \text{ 时 } \quad r_x = (h - 1.53h_x) p$$

式中 h_x ——被保护物的高度，m；
 h ——避雷线最大弧垂点的高度，m；
 r_x ——避雷线在 h_x 水平面上的保护范围，m；
 p ——高度影响系数。

- ④ 两条等高平行避雷线的保护范围如图 5-13 所示确定。

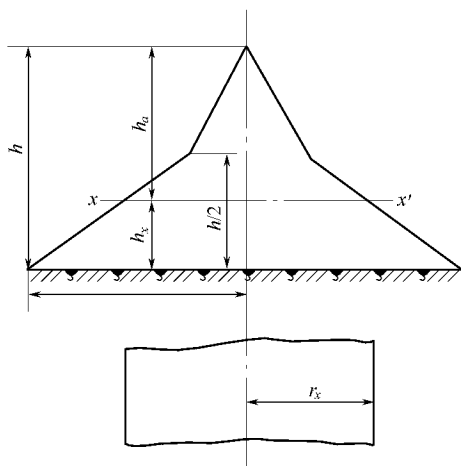


图 5-12 用折线法计算单条避雷线的保护范围

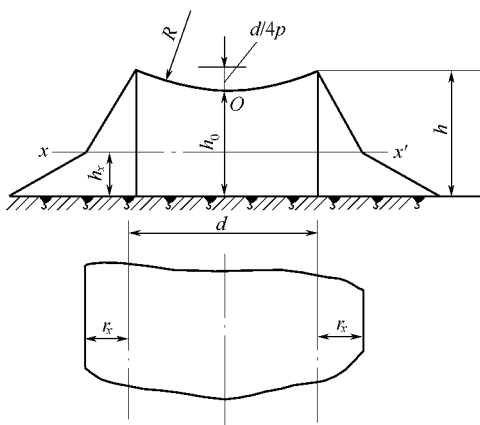


图 5-13 用折线法计算两条等高平行避雷线的保护范围

- 两条避雷线外侧保护范围按单条避雷线保护范围计算确定。
- 两条避雷线内侧保护范围由通过两避雷线顶点及保护范

围上部边缘最低点 O 的圆弧确定, O 点高度可按下式计算, 即

$$h_0 = h - \frac{d}{4p}$$

式中 h_0 ——两条避雷线间保护范围边缘最低点的高度, m;
 h ——避雷线高度, m;
 d ——两条避雷线间的距离, m;
 p ——高度影响系数。

• 两条避雷线端部保护范围可按两支等效避雷针确定, 等效避雷针的高度可近似取避雷线悬点高度的 8%。

3. 避雷带和避雷网

除避雷针、避雷线外, 避雷带、避雷网也可作为接闪器。实践证明, 雷电最容易击于建筑物的边缘及凸出部分, 所以在建筑物边缘及凸出部分上加装避雷带是一种有效而经济的防雷办法。避雷带应有良好的接地装置, 并且可以把它与建筑物的钢筋连接。对重要建、构筑物, 除这种办法外, 还应根据建筑物防雷等级在屋面上铺设 $5\text{m} \times 5\text{m}$ 或 $6\text{m} \times 4\text{m}$ 、 $10\text{m} \times 10\text{m}$ 或 $12\text{m} \times 8\text{m}$ 、 $20\text{m} \times 20\text{m}$ 或 $24\text{m} \times 16\text{m}$ 等不同规格的避雷网, 以防止烧击及降低屋内过电压。

4. 接闪器材料

接闪器所用材料应能满足机械强度、耐腐蚀和热稳定性的要求。

避雷针宜采用圆钢或钢管, 针长 1m 以下时, 圆钢直径 $\geq 12\text{mm}$, 钢管直径 $\geq 20\text{mm}$; 针长在 1 ~ 2m 时, 圆钢直径 $\geq 16\text{mm}$, 钢管直径 $\geq 25\text{mm}$; 装设在烟囱顶端时, 圆钢直径 $\geq 20\text{mm}$ 。

避雷网和避雷带, 网格 $5\text{m} \times 5\text{m}$ 或 $6\text{m} \times 4\text{m}$, $10\text{m} \times 10\text{m}$ 或 $12\text{m} \times 8\text{m}$, $20\text{m} \times 20\text{m}$ 或 $24\text{m} \times 16\text{m}$ 时, 圆钢直径 $\geq 8\text{mm}$,

扁钢厚度 4mm，截面 48mm^2 ；网格在烟囱上方，圆钢直径 $\geq 12\text{mm}$ ，扁钢厚度 4mm，截面 100mm^2 。

避雷线一般采用截面积不小于 35mm^2 的镀锌钢绞线。

用金属屋面作接闪器时，金属板之间的搭接长度不得小于 100mm；金属板下方无易燃物品时，其厚度不应小于 0.5mm；金属板下方有易燃物品时，为了防止雷击穿孔，所用铁板、铜板、铝板厚度分别不得小于 4mm、5mm、7mm；金属板不得有绝缘层。

接闪器应镀锌，焊接处应涂防腐漆，接闪器截面锈蚀 30% 以上时应予以更换。

四、引下线 and 防雷接地装置

1. 引下线

引下线是防雷装置的中间部分，为满足机械强度、耐腐蚀和热稳定的要求，引下线常用镀锌圆钢或扁钢制成。如用圆钢，直径 $\geq 8\text{mm}$ ；如用扁钢，截面 $\geq 12\text{mm} \times 4\text{mm}$ ；如用钢绞线作引下线，其截面 $\geq 25\text{mm}^2$ ；如用铜导线，其截面 $\geq 16\text{mm}^2$ 。

引下线应沿建筑物外墙敷设，并与墙体保护 15mm 的距离，各支持卡子间距为 1.5 ~ 2m，还要尽量避免弯曲，非弯曲不可时，其弯曲度应大于 90° ，引下线经最短途径接地；建筑艺术要求高者可以暗设，但截面积应加大一号；利用消防梯或其他金属构件作引下线时，各部件之间应保护电气通路。

引下线地面以上 2m 至地面以下 0.3m 的一段应加竹管或钢管保护，采用钢管时，应与引下线可靠地连接在一起，以减少通过雷电流时的电抗。

采用多条引下线时，第一类和第二类防雷建筑物至少应有两条引下线，其间距分别不得大于 12m 和 18m；第三类防雷建筑物周长超过 25m 或高度超过 40m 时，也应有两条引下线，

其间距不得大于 25m。采用多条引下线时，每条引下线距地面 0.3 ~ 1.8m 处应设断接卡，以便测量接地电阻。

引下线截面锈蚀 30% 以上者应予以更换。

2. 防雷接地装置

防雷接地装置是防雷装置的地下部分，与一般接地装置的要求大体相同，但其所用材料的最小尺寸应稍大于一般接地装置的最小尺寸。除独立避雷针外，在接地电阻满足要求的前提下，防雷接地装置可以和其他接地装置共用。

(1) 防雷接地装置材料 防雷接地装置材料采用角钢和垂直接地极时，一般多用 50mm × 50mm × 5mm 角钢；如用钢管，一般多用直径 50mm、壁厚不小于 3.5mm 的钢管；如用圆钢直径不应小于 12mm；当用扁钢作水平接地极时，其最小截面为 100mm²，厚度不宜小于 4mm。

(2) 接地电阻值 防雷接地电阻一般指冲击接地电阻。

① 防直击雷的接地电阻。独立避雷针的冲击接地电阻一般应不大于 10Ω；附设接闪器每一引下线的冲击接地电阻一般也应不大于 10Ω，但对于不太重要的第三类建筑物可放宽至 30Ω。

② 防感应雷的接地电阻。工频接地电阻应不大于 10Ω。

③ 防雷电侵入波的接地电阻。视其类别和防雷级别，冲击接地电阻应不大于 5 ~ 30Ω。

(3) 冲击换算系数 工频接地电阻与冲击接地电阻的比值称为冲击换算系数，即

$$A = \frac{R_f}{R_s}$$

式中 A——冲击换算系数；

R_f ——工频接地电阻；

R_s ——冲击接地电阻。

冲击换算系数按图 5-14 所示计算。图中接地体有效长度按下式计算，即

$$L_e = 2 \sqrt{\rho}$$

式中 L_e ——接地体有效长度，m；

ρ ——土壤电阻率， $\Omega \cdot \text{m}$ 。

对于环绕建筑物的环形接地体，当环形接地体周长的 $1/2$ 大于或等于有效长度时，取冲击换算系数 $A=1$ 。

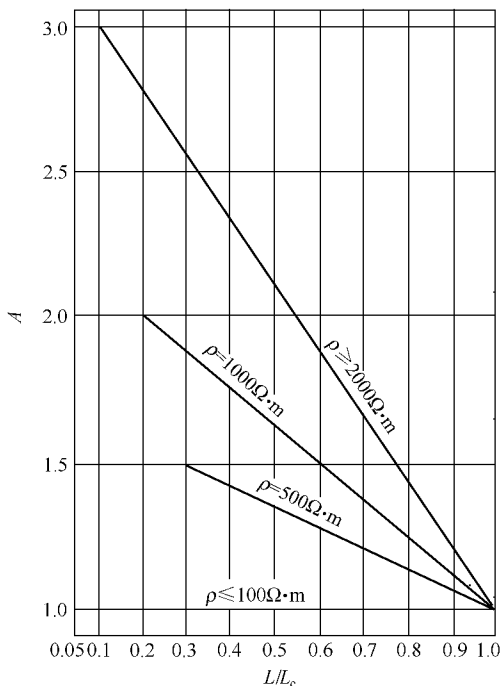


图 5-14 冲击换算系数计算图

ρ —土壤电阻率； L —接地体实际长度；

L_e —接地体有效长度； A —冲击换算系数

(4) 抑制跨步电压 为了防止跨步电压伤人，防直击雷

接地装置距建筑物和构筑物出入口和人行横道的距离应不小于3m。当小于3m时，应采取下列措施之一。

- ① 水平接地体局部深埋1m以上。
- ② 水平接地体局部包以绝缘物，如包以厚50~80mm的沥青层。
- ③ 铺设宽度超出接地体2m、厚50~80mm的沥青路面。
- ④ 埋设帽檐式或其他型式的均压条，帽檐式均压条如图5-15所示。

5-15 所示。

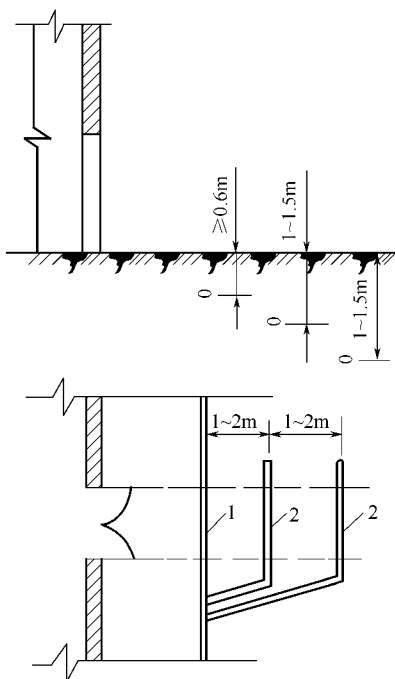


图 5-15 帽檐式均压条

1—水平接地体；2—均压条

(5) 防止“反击” 当雷电击到避雷针时，雷电流经过接

地装置通入大地，若接地电阻过大，通过雷电流时，电位将升得很高，因此，与该接地装置相连的电气设备外壳、杆塔等将有很高的对地电位。这个电位作用在设备或线路的绝缘上，可能使绝缘击穿，并使设备内的带电导线及线路产生过电压，这种接地导体由于电位升高反过来向带电导体放电的现象，叫做“反击”。为了防止“反击”，必须采取下列措施。

① 避雷针接地必须良好，接地电阻应限制在上述要求范围内，一般不宜大于 10Ω 。

② 独立避雷针与变、配电装置空间距离及地下接地装置之间的距离应符合下式要求

$$d_s \geq 0.3R_s + 0.1h$$

$$d_e \geq 0.3R_s$$

式中 d_s ——空间距离，m，不宜小于 5m；

R_s ——避雷针冲击接地电阻， Ω ；

h ——避雷针校验点的高度，m；

d_e ——地中距离，m，不宜超过 3m。

③ 35kV 以下变电所（站）的避雷针，不宜装在厂房顶上或变电所（站）母线构架及其他被保护的建筑物上，应单独装设支架，支架与被保护物之间的距离不得小于 5m。

④ 避雷针构架上不应挂设其他用途的线路，如照明线、电话线等。变、配电所（站）如需要利用独立避雷针构架装设照明灯时，导线应采用金属护套电缆，电缆金属护套应与接地装置相连接，且埋入地中的长度不应小于 10m。

五、避雷器

1. 简介

雷电击中送电线路后，行波沿导线前进，若无适当保护措施必然进入变电所（站）或其他用电设备，造成变压器、电压互感器或大型电动机绝缘损坏，避雷器就是防止行波侵入而

设置的。

最简单的保护装置如图 5-16 所示的保护间隙，当线路侵入冲击过电压时，保护间隙是被击穿，从而使被保护物的设备绝缘免受过电压的损害。保护间隙虽然简单，但当间隙被击穿后，因其熄弧能力低，必须依靠断路器才能切断续流，故只能在无避雷器而且有自动重合装置的条件下采用。

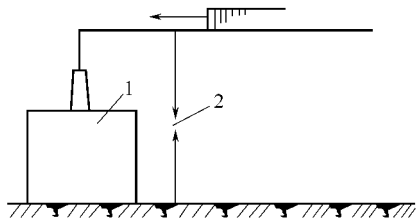


图 5-16 用保护间隙保护电气设备

1—变压器；2—保护间隙

避雷器在工频额定电压时，两极间呈绝缘状态而不导通，当发生过电压并达到动作电压时即导通而释放电荷，限制过电压幅值，保护电气设备，如图 5-17 所示。

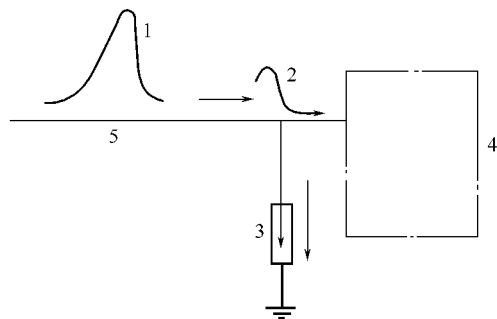


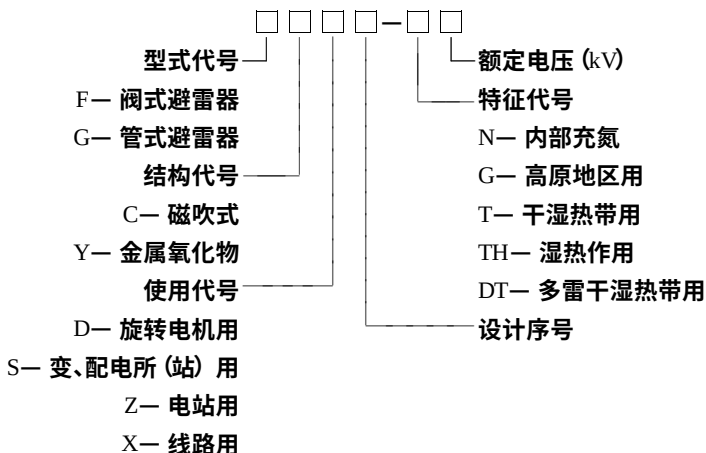
图 5-17 避雷器的防雷原理图

1—雷电冲击波；2—被限制的过电压；3—避雷器；

4—被保护电气设备；5—线路

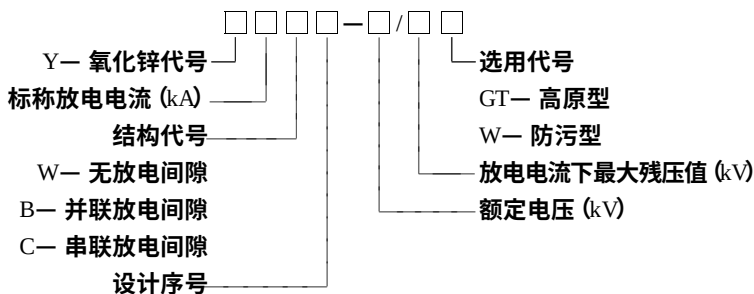
2. 避雷器的型号表示方法

阀式避雷器及管式避雷器型号表示方法如下：



例：FS2—0.22TH 为阀式避雷器，供变、配电所 (站) 用，设计序号为 2，额定电压为 0.22kV，适用于湿热带。

氧化锌避雷器型号表示方法如下：



例：Y3W—0.25/1.2 为氧化锌避雷器，标称放电电流 3kA，无放电间隙，额定电压 0.25kV，放电电流下最大残压值 1.2kV。

3. 避雷器的分类

避雷器的用途和分类见表 5-1。

表 5-1 避雷器用途和分类

类别与名称			产品系列型号	应用范围
阀式避雷器	碳化硅避雷器	低压型普通阀式避雷器	FS	用于低压网络保护交流电、电表和配电变压器低压绕组
		配电型普通阀式避雷器	FS	用于 3kV、6kV、10kV 交流配电系统保护配电变压器和电缆头
		电站型普通阀式避雷器	FZ	用于保护 3 ~ 220kV 交流系统电站设备绝缘
		保护旋转电机磁吹阀式避雷器	FCD	用于保护旋转电机绝缘
		电站型磁吹阀式避雷器	FCZ	用于保护 35 ~ 500kV 系统电站设备绝缘
		线路型磁吹阀式避雷器	FCX	用于保护 330kV 及以上交流系统线路设备绝缘
	直流阀式避雷器	直流磁吹阀式避雷器	FCL	用于保护直流系统电气设备绝缘
	金属氧化物避雷器 ^①	低压型金属氧化物避雷器	Y	与 FS 系列低压型普通阀式避雷器同
		配电型金属氧化物避雷器		与 FS 系列配电型普通阀式避雷器相同
		保护旋转电机金属氧化物避雷器		与 FCD 系列保护旋转电机磁吹阀式避雷器相同
		电站型金属氧化物避雷器		与 FZ、FCZ 系列碳化硅避雷器同
		中性点保护用金属氧化物避雷器		用于电机或变压器中性点保护
	直流金属氧化物避雷器	直流金属氧化物避雷器	YL	用于保护直流系统电气设备绝缘
管式避雷器	纤维管式避雷器		GXW	用于电站进线和线路绝缘弱点保护
	无续流管式避雷器		GSW	用于电站进线、线路绝缘弱点及 6kV、10kV 交流配电系统电气设备的保护

① 又称氧化锌避雷器。

4. 常用避雷器的主要技术数据

(1) 交流配电用阀式避雷器 主要技术数据见表 5-2。

表 5-2 交流配电用阀式避雷器主要技术数据 单位：kV

型 号	额定电压 ^① (有效值)	灭弧电压 ^② (有效值)	工频放电电压 ^③ (有效值)	冲击放电电压 ^④ (预放电时间 1.5 ~ 20μs) (峰值)	残压 ^⑤ (峰值)	
					3kA	5kA
FS—0.22	0.22	0.25	0.5 ~ 0.9	1.17	1.5	
FS2—0.22				1.7		
FS3—0.22						
FS—0.38	0.38	0.5	1.1 ~ 1.6	3.0	3.0	
FS1—0.38						
FS2—0.38						
FS3—0.38						
FS—0.5	0.5	0.5	1.15 ~ 1.65	2.7		2.6
FS2—0.5				2.6	2.5	
FS—3	3	3.8	9 ~ 11	21		17
FS2—3						
FS3—3						
FS4—3						
FS4—3G						
FS6—3						
FS7—3						
FS8—3						
FS10—3						
FS—6	6	7.6	16 ~ 19	35		30
FS2—6						
FS3—6						
FS4—6G						
FS5—6G						
FS6—6						

型 号	额定电压 ^① (有效值)	灭弧电压 ^② (有效值)	工频放电电压 ^③ (有效值)	冲击放电电压 ^④ (预放电时间 1.5 ~ 20 μ s) (峰值)	残压 ^⑤ (峰值)	
					3kA	5kA
FS7—6	6	7.6	16 ~ 19	35		30
FS8—6						
FS10—6						
FS2—10	10	12.7	26 ~ 31	50	47	50
FS3—10						
FS3—10N						
FS4—10						
FS4—10G						
FS4—10GY						
FS5—10						
FS5—10G						
FS6—10						
FS7—10						
FS8—10						
FS10—10						

① 额定电压指避雷器长期正常工作的工频电压，其值与装置地点电网的额定电压一致。

② 灭弧电压指在保证灭弧（切断工频续流）的条件下，允许加在避雷器上的最高工频电压。

③ 工频放电电压，阀式避雷器的通断能力有限，一般允许内部过电压的情况不动作，但是，内部过电压能量较大，普通的阀式避雷器在发生内部过电压时可能会引起爆炸，为此规定了这个电压数值。

④ 冲击放电电压指 1.5/40 μ s 的标准波预放电，时间为 1.5 ~ 20 μ s 的冲击放电电压。

⑤ 残压指雷电流通过避雷器时，在其两端的电压降，避雷器残压愈小，说明阀性电阻片的通流能力愈好。

(2) 常用交流电站用阀式避雷器主要技术数据见表 5-3。

(3) 电机用磁吹阀式避雷器主要技术数据见表 5-4。

表 5-3 常用交流电站用阀式避雷器主要技术数据 单位：kV

型 号	额定电压 (有效值)	灭弧电压 (有效值)	工频放电电 压 (有效值)	冲击放电 电压 (峰值)	残压 (峰值) (5kV)
FZ—3	3	3.8	9 ~ 11	20	13.5
FZ—6	6	7.6	16 ~ 19	30	27
FZ—10	10	12.7	26 ~ 31	45	45
FZ—15	15	20	41 ~ 49	73	67
FZ—20	20	25	51 ~ 61	85	81.5
FZ—30	30	35	56 ~ 67	110	81.5
FZ—35	35	41	82 ~ 98	134	134
FZ—60	60	70.5	140 ~ 173	220	—

表 5-4 电机用磁吹阀式避雷器主要技术数据 单位 kV

型 号	额定电压 (有效值)	灭弧电压 (有效值)	工频放电电 压 (有效值)	冲击放电 电压 (峰值)	残压 (峰值)	
					3kA	5kA
FCD5—2	2	2.3	4.5 ~ 5.7	6	6	6.4
FCD—3	3	3.8	7.5 ~ 9.7	9.5	9.5	10
FCD5—3						
FCD—4	4	4.6	9 ~ 11.4	12	12	12.8
FCD2—4						
FCD5—4						
FCD—6	6	7.6	15 ~ 18	19	19	20
FCD5—6						
FCD—10	10	12.7	25 ~ 30	31	31	33
FCD5—10						
FCD2—13	13	16.7	33 ~ 39	40	40	43
FCD5—13						
FCD5—15	15	19	37 ~ 44	45	45	49

(4) 交流有串联间隙配电型金属氧化物避雷器主要技术数据见表 5-5。

(5) 常用无间隙金属氧化物避雷器主要技术数据见表 5-6。

表 5-5 交流有串联间隙配电型金属氧化物避雷器主要技术数据

单位：kV

型 号	额定电压 (有效值)	工频放电电 压(有效值)	冲击放电 电压(峰值)	残压(峰值) (5kA)
Y5C—7.6/30	7.6	16	30	24
Y5C—12.7/50	12.7	26	50	45

表 5-6 常用无间隙金属氧化物避雷器主要技术数据

单位 kV

型 号	额定电压 (有效值)	系统额定电压 (有效值)	残压(峰值)		
			1.5kA	2.5 (3.0) kA	5kA
Y1.5W—0.28/1.3	0.28	0.22	1.3		
Y1.5W—0.5/2.6	0.5	0.38	2.6		
Y5W—3.8/17	3.8	3.0			17
Y2.5W—3.8/9.5	3.8	3.0		(9.5)	17
Y3W—7.6/19	7.6	6.0		(19)	17
Y5W—7.6/27	7.6	6.0			27
Y5W—12.7/45	12.7	10.0			45
Y5W—41/134	41	35.0			134

5. 避雷器的结构

(1) 管式避雷器 最简单的避雷器是管式避雷器，它的结构如图 5-18 所示。避雷器的工频续流借助于内间隙 s_1 产生电弧的高温，使产气管 1 内的产气材料变成气体，在管内形成很大压力，起到使气体从环形电极的开口喷出的纵吹作用，从

而使电弧电流过零时熄灭，因此不用切断电路。

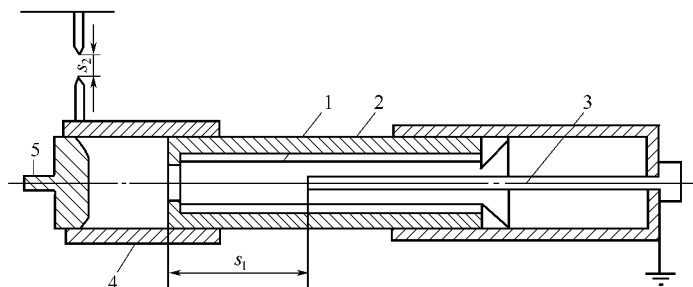


图 5-18 管式避雷器

1—产气管；2—胶木管；3—棒形电极；4—环形电极；

5—动作指示器； s_1 —内间隙； s_2 —外间隙

管式避雷器在结构方面存在以下缺点。

① 管子容易受潮，因而有可能在工作电压下发生沿面闪络，导致避雷器误动作，防止办法是在使用时串联一个称作外间隙的空气间隙 s_2 。

② 熄弧下限电流与电弧接触管壁的紧密程度有关。由于避雷器多次动作、材料气化、内径增大、管壁变薄，不能达到铭牌规定的切断数值，内径增至原值的 120% ~ 125% 时便不能再使用。

③ 熄弧能力受开断电流的影响。续流太小时，产生的气体太少，不能灭弧；续流太大时，又会使管子爆炸破裂，因此管式避雷器熄灭电弧续流的能力有一定的范围。

由于这些问题，在使用安装管式避雷器时应注意防止管腔积水，防止炽热气体形成相间短路，将无喷火端作为接地端，以使额定电压较低的管式避雷器允许外间隙水平布置等。

另外管式避雷器动作后产生截波危及变压器绝缘，变压器在冲击电压波作用下呈现的电容和连接线的电容，在避雷器放

电前充至某一电压 u_e ，当避雷器放电后，该电容与线路电感经避雷器放电。放电过程一般呈震荡性，因而作用至变压器上的电压可能达到 $2u_e$ 冲击陡波，称之为截波，危及变压器匝间，甚至相间绝缘。

为了消除震荡所引起的过电压，可在避雷器放电回路串联电阻，电阻越大，引起震荡的可能性越小。但是这样一来，雷电电流通过电阻及间隙又会产生很高的电压，叫做残压。显然，如果残压大于被保护设备的绝缘强度，就会使该设备被击穿损坏。

由于管式避雷器存在上述缺点，所以它只用来保护线路的个别绝缘弱点和发、变电所（站）的进线段。

应当指出，无续流管式避雷器比纤维管式避雷器性能好，它是利用雷电流在纤维狭缝中产生气体而吹熄冲击电弧的，此时工频短路电流可基本上不流过，所以避雷器的烧损小、寿命长，可在很大程度上代替纤维管式避雷器。

(2) 阀式避雷器 它是性能较好的一种避雷器，基本元件是装在密封瓷套中的火花间隙和非线性电阻，图 5-19 所示为 FS 型阀式避雷器结构。

非线性电阻又称阀片，它是用特殊碳化硅制成的饼状元件，其颗粒相互接触，但其接触面不大于颗粒表面的 $1/10$ 。它的电阻随着通过电流的不同而在很大范围内变化。当承受工频

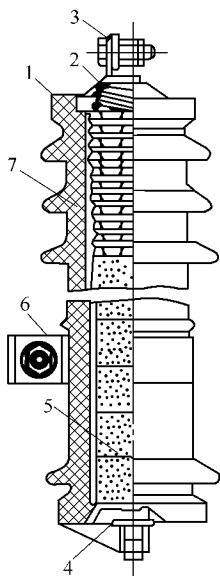


图 5-19 FS 型阀式
避雷器结构

- 1—火花间隙；2—弹簧；
3—接线端子；4—接地
端子；5—阀片；6—安
装卡子；7—磁套

电压时，它是一个高值电阻，类似关闭的阀门，使工频电流很难通过；当受到高频电压冲击时，它又变成一个低值电阻，类似阀门开启，使冲击电流很容易通过；雷电流过去后，工频电流又使阀性电阻片呈现很高的电阻，类似阀门被关闭，此时，火花间隙迅速阻断电流。

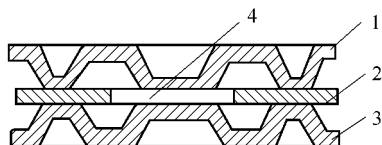


图 5-20 单个平板型火花间隙

1—上电极；2—云母片；

3—下电极；4—空气间隙

单个平板型火花间隙是由两个黄铜电极及一个云母垫圈组成，如图 5-20 所示。

普通阀式避雷器根据额定电压的不同，由数个或数十个单个的火花间隙构成。由于电极间距离小，所以电场比较均匀，从而改善了间隙的伏秒特性。

碳化硅（SiC）避雷器系列的结构特点见表 5-7。

表 5-7 碳化硅避雷器系列的结构特点

名称与型号	结构特点
配电型普通阀式避雷器 FS	仅有间隙和阀片（SiC）
电站型普通阀式避雷器 FZ	仅有间隙和阀片，但间隙带有均压电阻
电站型磁吹阀式避雷器 FCZ	仅有间隙和阀片，但间隙加磁吹灭弧元件，加强了灭弧能力
保护旋转电机磁吹阀式避雷器 FCD	仅有间隙和阀片，但部分间隙并联电容以改善伏秒特性

金属氧化物避雷器，又称氧化锌避雷器、压敏避雷器，它是以微粒状金属氧化锌晶体为基体，在其间充填氧化铍和其他掺杂物。这种非线性电阻有很好的伏安特性，工频电压下呈现极大的电阻，因此续流很小，不用间隙燃灭工频电流所产生的电弧；压敏电阻的通流容量很大，直径 20mm 的圆型电阻就可以通过 5kA 的冲击电流，所以压敏电阻体积很小。

金属氧化物避雷器与其他型式避雷器相比，具有通流容量大、残压低、对大气过电压和操作过电压都起保护作用、结构简单、可靠性高、维护简便、寿命长等优点，但其缺点是造价高。

6. 阀式避雷器的安装

安装阀式避雷器应注意以下几点。

① 安装前应对避雷器进行工频交流耐压试验、直流泄漏试验及绝缘电阻的测定，达不到标准时，不准投入运行。

② 安装前将避雷器向不同的方向轻轻摇动，内部应无松动响声。

③ 阀式避雷器的安装，应便于巡视检查，应垂直安装不得倾斜，引线要连接牢固，避雷器上接线端子不得受力。

④ 阀式避雷器的瓷套应无裂纹，密封良好。

⑤ 阀式避雷器安装位置应尽量靠近被保护设备。避雷器与 3 ~ 10kV 变压器的最大电气距离，雷雨季节经常运行的单路进线不大于 15m，双路进线不大于 23m，三路进线不大于 27m，若大于上述距离时，应在母线上设阀式避雷器；避雷器对周围物体应保持一定距离，带电部分相邻导线或金属构架的距离不得小于 0.35m，底座对地不得小于 2.5m。

⑥ 安装在变压器台上的阀式避雷器，其上端引线（即电源线）最好接在跌开式熔断器的下端，以便与变压器同时投入或同时退出运行。

⑦ 阀门避雷器上、下引线的截面都不得小于规定值，铜线不小于 16mm^2 ，铝线不小于 25mm^2 ，引线不许有接头，引下线应附杆而下，上、下引线不宜过松或过紧。

⑧ 阀门避雷器接地引下线与被保护设备的金属外壳应可靠地与接地网连接。

线路上单组阀式避雷器，其接地装置的接地电阻不大

于 5Ω 。

7. 避雷器的运行维护与故障处理

(1) 阀式避雷器的运行维护 阀式避雷器在正常运行中，应定期巡视检查、清扫和维护；在雷雨天气后及可能产生操作过电压时，应进行特殊巡视检查，保证运行可靠性。检查内容如下。

① 检查瓷套管表面有无裂纹、破损及闪络痕迹，有无严重污秽情况。

② 检查导线及接地引下线有无烧伤痕迹和断股现象。

③ 检查避雷器上、下端接合部的密封、水泥接合缝、油漆或金属密封是否良好。

④ 检查 220kV 避雷器拉线瓷瓶是否牢固。

⑤ 检查阀式避雷器内部有无异常声音，若有异常响声，包括轻微的滋滋声，应视作内部故障的先兆。

巡视中发现上述现象，应断开阀式避雷器（退出运行）进行电气试验和检查，以免发生事故。

(2) 管式避雷器的运行维护 管式避雷器运行中的巡视与检查内容如下。

① 检查管身外部有无裂纹、闪络和放电烧伤痕迹、绝缘层表面是否良好。

② 检查外间隙的电极距离有无变动。

③ 检查安装位置有无变动、开口端是否向下垂直或倾斜安装（与水平夹角不应小于 15° ）。

④ 检查排气孔上包盖的纱布是否完整。

⑤ 检查接地引下线有无烧痕、断股现象。

(3) 管式避雷器的检修

① 检查管式避雷器若有下列情况之一时应进行检修：管子漆层有裂纹、发黑和起皱纹时；发现管式避雷器有损坏时；

避雷器动作 3 次以上时；凡冬季没有拆下的管式避雷器在每年雷雨季投入运行前。

② 运行中的管式避雷器至少每 3 年拆下检修一次，检修项目如下：

- 检查管内是否有污物或昆虫堵塞，发现有小时，可抽出棒型电极，用特制的探针进行清除；

- 外部间隙的电极有放电烧伤痕迹时，应拆下检修，进行磨平或更换电极；

- 外部清扫检修后，按表 5-8 要求进行调整外间隙的距离。

表 5-8 管式避雷器外间隙的距离 单位：mm

项 目	额定电压/kV					
	3	6	10	35	110	
					中性点直接接地	中性点非直接接地
外 间 隙 最 小 数值	8	10	15	100	350	400
用于变电所 (站) 进行段首 端的管式避雷器 外间隙最大数值	—	—	—	250 ~ 300	400 ~ 500	400 ~ 500

③ 管式避雷器动作后，应测量距纤维管开口端下列距离处的内径：110kV 的为 150mm 处；20 ~ 35kV 的为 70mm 处；3 ~ 10kV 的为 30mm 处。

④ 管式避雷器有下列情况之一时，应退出运行：绝缘管的纵向裂纹大于其长度的 1/3 时；绝缘管有烧伤痕迹时；绝缘管终端堵头不牢固或漆层有严重裂纹时。

(4) 阀式避雷器的检修 检修工作应在干燥、清洁的环境下进行，元件组合须符合原设计标准和工艺要求，并需注意

以下几点。

① 属于下列情况之一的元件，应更换：严重烧伤的电极；严重受潮、膨胀金属的云母垫片；击穿、局部击穿或闪络的阀片；严重受潮的阀片；严重老化龟裂或严重变形、失去弹性的橡胶密封件；瓷套裂碎；非线性并联电阻严重老化、泄漏电流超过运行规程规定的范围。

② 阀式避雷器的电阻片应分别存放，并保持方向一致，不得将不同避雷器内的阀片混装使用。

③ 不能用普通橡胶代替能抗臭氧的氯丁橡胶，普通橡胶在臭氧作用下易老化龟裂。

④ 解体检修后的避雷器，应进行预防性试验。

(5) 阀式避雷器的故障处理 如发现阀式避雷器在运行中有异常现象和故障时，应针对具体情况进行处理。

① 发现瓷套有裂纹时，如天气正常，可将故障相避雷器退出运行，停电更换合格的避雷器。

② 在雷雨时，因避雷器瓷套裂纹而造成闪络，但未引起系统永久性接地，在可能条件下应将故障相避雷器停用。

③ 阀式避雷器在运行中突然爆炸，但尚未造成系统永久性接地或危及系统安全运行时，可在雷雨过后，拉开故障相的隔离开关，更换合格的避雷器。若已引起系统永久性接地时，禁止使用隔离开关操作来停用故障避雷器。

④ 发现由于避雷器内部有异常音响或瓷套有炸裂引起系统接地故障时，工作人员应避免靠近，此时可用断路器或采用人工接地转移的方法断开故障。

⑤ 运行中阀式避雷器接地引下线有烧熔痕迹时，可能是内部阀片损坏而引起工频续流增大，应停电使避雷器退出运行，进行电气试验。

⑥ 阀式避雷器在运行中发现瓷套有裂纹，若退出运行又

无备品更换时，应根据故障情况的严重程度进行处理；如果在此时间内不致威胁安全运行时，为了防止受潮可将拆下的阀式避雷器在其裂纹处涂漆和环氧树脂，随后安排更换合格的避雷器。

第二节 防雷保护措施

一、架空电力线路的防雷保护

由于架空线路直接暴露在旷野，而且分布很广，最易遭受雷击，使线路绝缘损坏，并产生工频短路电弧，使线路跳闸。所以对架空线路一是尽可能地在线路上减少或避免产生雷电过电压；二是产生雷电过电压后，尽可能避免线路跳闸。

确定架空线路的防雷方式时，应考虑线路的电压等级、当地原有线路的运行情况、雷电活动强弱、地形地貌的特点、土壤电阻率的高低以及负载性质和系统运行方式等条件，根据技术经济比较，因地制宜采取合理的保护措施。

1. 应当自动重合闸装置

当线路受雷击时，要完全避免相间短路是不可能的，特别是在 $3 \sim 10\text{kV}$ 线路中更是如此。运行经验表明，线路绝缘在雷击电弧熄灭后，其电气绝缘强度一般均能很快恢复，所以只要自动重合闸调整好， $60\% \sim 75\%$ 雷击跳闸能重合成功。

2. 装设避雷线

在电杆的顶部装设避雷线，用接地线将避雷线与接地装置连在一起，使雷电流经接地装置流入大地，以达到防雷目的，具体要求如下。

① 110kV 及以上线路一般应沿全线装设避雷线，架设在少雷区或运行经验证明雷电活动轻微的地区的 110kV 线路可不装设避雷线，但应采用自动重合闸装置，以减少停电次数。

60kV 线路，当负载重要且所经地区年平均雷电日在 30d/a 以上时，宜沿全线装设避雷线。35kV 及以下的线路，在进出变配电所（站）1 ~ 2km 范围内装设避雷线，并在避雷线两端的输电线上各装设一组管式避雷器，以保护变配电所（站）的电气设备。

② 装设避雷线的线路，在一般土壤电阻率区，其耐雷水平一般不低于表 5-9 所列的数值。

表 5-9 送电线路的耐雷水平 单位：kA

项 目	额定电压 /kV		
	35	60	110
一般线路的耐雷水平	40 ~ 50	60	60 ~ 75
大跨越挡中央和发、变电所（站） 进线保护段的耐雷水平	50	60	75

注：1. 较高值用于多雷区域较重要的线路。
2. 双回路或多回路杆塔的线路可改善接地或加设耦合线或适当加强绝缘，尽量达到表中的数值。

③ 装设有避雷线线路杆塔的接地装置，在雷雨季节干燥时，工频接地电阻一般不应超过表 5-10 所列的数值。

表 5-10 装有避雷线线路杆塔的接地装置工频接地电阻 单位：Ω

土壤电阻率 /Ω · m	接 地 电 阻
100 以下	10
100 ~ 500	15
500 ~ 1000	20
1000 ~ 2000	25
2000 以上	30；或敷设 6 ~ 8 根射线，或连续伸长， 接地电阻值不作规定

为减少雷击引起的多相短路和两相异地接地引起的断线事故，35kV 及 35kV 以上无避雷线小接地短路电流电网中的钢筋混凝土杆和铁塔可充分利用其自然接地作用，在土壤电阻率不超过 $100\Omega \cdot \text{m}$ 的地区，可不另作人工接地装置。

3. 装设避雷器或保护间隙

在 3 ~ 36kV 的线路上，在个别绝缘较弱的地点，如大跨越挡的高电杆、木杆木横担中夹杂的个别铁塔等均应装设管式避雷器或保护间隙，其接地电阻应符合表 5-10 中的数值。

与高压架空线连接的长度超过 50m 的电缆段，应在其两端装设阀式避雷器或管式避雷器；小于 50m 的电缆段，在其一端装设即可；当缺乏避雷器时，也可用保护间隙。

4. 加强线路绝缘

(1) 绝缘子种类选择 在 3 ~ 10kV 线路中采用瓷横担绝缘子，这种绝缘子耐雷水平要比铁横担线路高得多。当线路受雷击后，可减少发展成相间短路事故的可能性，而且雷击闪络后建立稳定的工频放电电弧可能性也大为降低；其次利用木质横担、木质电杆也能减低雷击相间闪络和建弧的机会，但因木质防腐还存在问题，同时也为了节约木材，木横担只在重雷区使用。

(2) 绝缘子每串个数 一般可按工作电压所要求的泄漏距离选定（非污秽区），即

$$m \geq \frac{1.6U_N}{d}$$

式中 m ——绝缘子每串个数；

U_N ——额定电压，kV；

d ——每个绝缘子的泄漏距离，cm。

m 值还应根据内部过电压的条件进行验算。每串绝缘子扣去 1 ~ 3 个预留零值绝缘子 (35 ~ 220kV, 直线杆扣去 1 个, 耐张杆扣去 2 个) 后, 其在操作冲击波下的 50% 湿闪电压 U_h 应符合下列要求。

$$U_h = K_1 K_{ov} U_{pm}$$

式中 U_h —— 湿闪电压, kV ;

K_1 —— 系数, 在海拔 1000m 及以下时, $K_1 = 1.15$;

K_{ov} —— 内部过电压计算倍数, 见表 5-11 ;

U_{pm} —— 设备最高运行相电压, kV。

变电所 (站) 绝缘子每串个数与线路耐张串相同。

表 5-11 内部过电压计算倍数 K_{ov} 值

验 算 内 容		K_{ov} (以 U_{pm} 为基准)
对地绝缘	35 ~ 60kV 及以下 (经消弧线圈接地或不接地)	4.0
	110 ~ 154kV (经消弧线圈接地)	3.5
	110 ~ 220kV (直接接地)	3.0
相间绝缘 3 ~ 220kV		按对地内部过电压的 1.3 ~ 1.4 倍计算

5. 加强线路交叉部分的保护

(1) 线路交叉挡两端的绝缘要求 应不低于其相邻杆塔的绝缘, 交叉点应尽量靠近上方线路的杆塔, 以便减少导线因各种原因增大弛度而缩小交叉距离的影响, 确保在长期运行中交叉距离符合要求; 为降低雷击交叉挡时交叉点上的过电压, 交叉点也尽量靠近下方线路的杆塔。

(2) 线路交叉垂直距离要求 各级电压线路相互交叉和与较低压线路通信线交叉时, 两交叉线路导线间或上方线路导线与下方线路避雷线间的垂直距离在导线温度 40℃ 时, 不得小于表 5-12 中的数值。

表 5-12 线路交叉时最小垂直距离

单位：m

类 别	额定电压 /kV				
	0.5 及以下	3 ~ 10	20 ~ 110	154 ~ 220	330
交叉挡有保护时	1	2	3	4	5
交叉挡无保护时	3	4	5	6	7

(3) 交叉挡应采取的保护措施

① 交叉挡两端的钢筋混凝土杆或铁塔不论有无避雷线都必须接地。

② 电力线路交叉挡两端为木杆或钢筋混凝土杆木横担且无避雷线时，应装设管式避雷器或保护间隙。

③ 与高压电力线路交叉的低压线路或通信线路，当交叉挡两端为木杆时，应装保护间隙。门型杆塔的保护间隙，可由横担与主柱固定处绑扎接地引下线构成；单杆针式绝缘子的保护间隙，可由距绝缘子固定部件 750mm 处绑扎接地引下线构成；通信线的保护间隙由杆顶向地面作引下线构成。

上述被交叉的杆塔、管式避雷器和保护间隙的接地电阻，一般不应超过表 5 ~ 10 所列的数值。

二、变电所（站）的防雷保护

工厂变电所（站）是工厂电力供应的枢纽，一旦遭受雷击，会造成全厂停产，影响很大。工厂还有许多其他建筑物和构筑物，有的较高，有的易燃，有的易爆，也都需要有可靠的防雷措施。防雷有两个主要方面，即对直击雷的防护和对由线路侵入的冲击波的防护。

1. 变电所（站）防直击雷的保护

(1) 保护方法 运行经验表明，按规程规定装设避雷针或避雷线对直击雷进行防护是非常可靠的。在一般情况下，对

变电所（站）内的保护，目前采用避雷针；对靠近变电所（站）的进线段保护，目前多采用避雷线（称为进线保护段）。

（2）具体要求

① 独立避雷针与被保护物设施之间应保持一定的距离。独立避雷针受到雷击时，在接闪器、引下线和接地体上都产生很高电位，如果避雷针与附近设施的距离不够，它们之间便会产生放电现象，这种情况称之为反击，为此，要求出图 5-21 中避雷针上离该设施最近的 A 点的电位 u_A 。

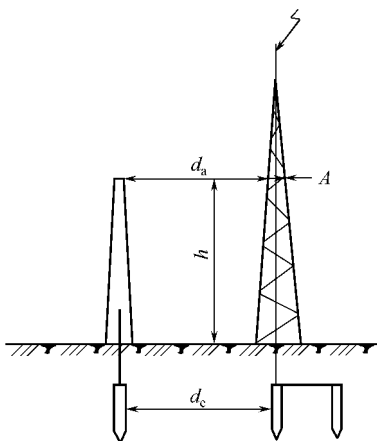


图 5-21 独立避雷针与附近设施的最小距离

$$u_A = iR_s + L \frac{di}{dt}$$

式中 R_s ——独立避雷针的冲击接地电阻， Ω ；

L ——从 A 点到地面这一段避雷针的电感， μH 。

反击可能引起电气设备绝缘损坏、金属管道烧穿、对某些建筑物甚至会造成爆炸、火灾和人身伤亡，为了防止反击，避雷针和附近金属导体间必须有一定距离，从而使绝缘介质闪络电压大于反击电压。

取电流值 i 的幅值为 $150kA$ ，波头形状为斜角波头， $\tau = 2.6\mu s$ ，于是 $di/dt = 150kA/2.6\mu s = 57.7kA/\mu s$ ，避雷针电感取 $1.3\mu H/m$ ，所以 $L = 1.3h$ （ h 是 A 点的高度），于是

$$u_A = 150R_s + 1.3h \times 57.7 = 150R_s + 75h$$

由于电位的电感分量 $L di/dt$ 只存在于斜角波的 $2.6\mu s$ 之内，而电阻分量 iR_s 却存在于雷电波的整个持续时间，约几十微秒，所以二者对空气的绝缘作用有所不同，对前者可取空气的平均耐压强度 $750kV/m$ ，后者取 $500kV/m$ ，于是可以求出不发生避雷针而被保护物反击的空气距离为

$$d_a \geq \frac{150}{500} R_s + \frac{75}{750} h$$

$$= 0.3 R_s + 0.1 h$$

在一般情况下， d_a 不应小于 $5m$ 。为了降低避雷针承受雷电流时所造成的感应过电压的影响，在条件许可时，此距离还可以适当增大。

② 独立避雷针（线）的接地装置与其他接地体之间也应保持一定的距离，以免在土中向被保护物接地体闪络。根据运行经验， $d_e \geq 0.3 R_s$ ，并且规定一般不得小于 $3m$ 。有时，由于布置上的困难，无法保证 d_e 的距离，此时可将避雷针接地装置在地下与变电所（站）接地网相连。但为了避免雷击避雷针时主接地网电位升高造成反击危险，应保证连接点到 $35kV$ 以下设备接地线入地点，沿接地体的地中距离大于 $15m$ 。

③ 避雷线与配线装置导电部分间，以及与变电所（站）电气设备和构架接地部分的空气距离 d_a 计算如下。

在一端接地、另一端绝缘的避雷线

$$d_a \geq 0.3 R_s + 0.1 (h + \Delta l)$$

式中 h ——避雷线杆柱的高度， m ；

Δl ——所考虑点到接地杆柱的距离， m 。

在两端接地的避雷线

$$d_a \geq m [0.3 R_s + 0.1 (h + \Delta l)]$$

$$m = \frac{1 + \frac{\tau R_s}{3.1(l_2 + h)}}{1 + \frac{\Delta l + h}{l_2 + h} + \frac{\tau R_s}{1.55(l_2 + h)}}$$

$$l_2 = l - \Delta l$$

$$\tau = \frac{I}{a}$$

式中 m ——分流系数；

R_s ——避雷线的冲击接地电阻， Ω ；

h ——避雷线杆柱的高度， m ；

Δl ——所考虑点到最近杆柱的距离， m ；

l_2 ——所考虑点到另一端杆柱的距离， m ；

l ——避雷线两端杆柱间的距离， m ；

I ——耐雷水平，取 $140kA$ ；

a ——雷电流平均绕度，取 $54kA/\mu s$ ；

τ ——雷电流波头长度，为 $2.6/\mu s$ 。

④ 避雷线的接地装置与变电所（站）接地网间最近的地中距离 d_e 计算如下。在一端接地、另一端绝缘的避雷线

$$d_e \geq 0.3R_s$$

在两端接地的避雷线

$$d_e \geq 0.3mR_s$$

避雷线和避雷针一样， d_a 一般不应小于 $5m$ ， d_e 不应小于 $3m$ 。

⑤ 不宜在 $35kV$ 及以下的屋内配电装置的房顶上和室外电气设备的架构上装避雷针。

⑥ 严禁在避雷针架构上架设通信、广播及电力网络，也不得装设电视天线。

⑦ 独立避雷针及其接地装置不应设在人员经常过往的处

所，它与道路的出入口等的距离不宜小于 3m，否则应采取防护措施，如在接地装置上面敷设 50 ~ 80mm 厚的沥青层。

⑧ 允许在 60kV 的配电装置构架上或屋顶上装设避雷针，但土壤电阻率大于 $500\Omega \cdot \text{m}$ 时，宜用独立避雷针保护。

对于 110kV 及以上配电装置，可将避雷针装在配电装置的构架上或屋顶上，但土壤电阻率大于 $1000\Omega \cdot \text{m}$ 时，宜用独立避雷针保护。

在构架上的避雷针，除应与接地网连接外，还应在附近加装集中接地装置，其接地部分与导电部分之间的空气距离不得小于绝缘子串的长度。由避雷针接地引下线入地点至变压器接地线的入地点，沿接地体的地中距离不应小于 15m。

在变压器的门型构架上不应安装避雷针。

⑨ 对于 110kV 及以配电装置，可将线路的避雷线引致出线门型构架上，当土壤电阻率大于 $1000\Omega \cdot \text{m}$ 时，应装设集中接地装置；对 35 ~ 60kV 配电装置，当土壤电阻率不大于 $500\Omega \cdot \text{m}$ 时，也允许将线路的避雷线引致出线门型构架上，但应装设集中接地装置。

当避雷线不能引入时，避雷线应在线路终端杆塔上终止，从线路终端杆塔至配电装置间这段线路的保护，可采用独立避雷针，也可在线路终端杆塔上安装避雷针。

⑩ 装有避雷针、线的构架上照明灯电源线及独立避雷针上的照明灯电源线，都必须采用带有金属护套的电缆，或将导线穿入金属管中，这些电缆或金属管埋在地中的长度应在 10m 以上，再与接地装置或低压配电装置相连接。

⑪ 避雷针引下线在地面以上 2m 的部分用竹管或木槽板保护。

⑫ 接地体与避雷针引下线的连接应采用焊接，在焊接部

位涂沥青防腐。

⑬ 所有防雷装置的金属件必须镀锌。

2. 配电装置防雷电侵入波的保护

(1) 保护方法 当线路上出现雷电过电压、雷电波将沿导线侵入变电所(站),从而导致设备的绝缘损坏,对雷电侵入波采取的防护措施,一般采用阀式避雷器来保护,在确定保护接线时,应充分考虑到变电所(站)供电的重要性、变压器容量大小及绝缘情况和当地的雷电活动规律。

(2) 具体要求

① 对于未沿全线架设避雷线的 $35 \sim 110\text{kV}$ 架空送电线路,应在变电所(站)的进线段 $1 \sim 2\text{km}$ 范围内用避雷线保护,进线保护段范围内的杆塔耐雷水平必须满足表 5-9 中的规定。

新建线路进线保护段上的避雷线保护角一般不超过 20° ,最大不应超过 30° 。

② $35 \sim 110\text{kV}$ 线路未沿全线架设避雷线的变电所(站)进线段的标准保护接线如图 5-22 所示。

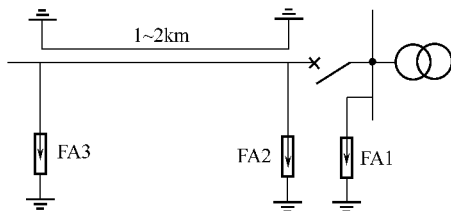


图 5-22 $35 \sim 110\text{kV}$ 线路未沿全线架设避雷线的
变电所(站)进线段的标准保护接线

在木杆或钢筋混凝土杆木横担线路进线保护段首端应装设一组管式避雷器 FA3,其工频接地电阻一般不大于 10Ω ;铁塔和钢筋混凝土杆铁横担线路以及全线以避雷线保护的线路,其进线保护段首端不需装设管式避雷器 FA3。

35 ~ 110kV 变电所（站）进出线的隔离开关或断路器在雷雨季节中可能经常断开，其线路侧带有电压时，必须在变电所（站）进口处装设一组管式避雷器 FA2，并应尽量靠近被保护设备。FA2 外间隙的整定，既能在开关断开时可靠工作以保护高压电气设备，又能在开关闭合时不误动作。由阀式避雷器 FA1 起保护作用，以免变压器的开口电容与线路电感经放电后的 FA2 形成振荡回路，危及变压器的绝缘。当 FA2 整定有困难或缺乏适当参数的管式避雷器时，可用阀式避雷器或保护间隙代替。一般在经常闭路运行的场合，不要求在入口处装设 FA2，对雷季中不经常开断的断路器用保护间隙经济上较合适。

③ 对于容量较小的工厂变电所（站），可以根据其重要性和雷暴日数采取简化的进线保护。如，对于容量为 3150 ~ 5000kVA 的变电所（站），进线保护段的长度可减少到 500 ~ 600m，但进线段首端的管式避雷器或间隙的接地电阻应不超过 5Ω ，其保护接线如图 5-23（a）所示。

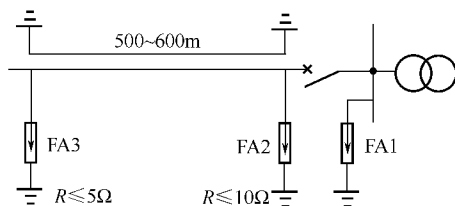
对于负荷不很重要、容量在 1000 ~ 3150kVA 的变电所（站），可采用图 5-23（b）所示的保护方式；对于 1000kVA 以下的分支变电所（站），还可按图 5-23（c）所示进行简化。应当注意的是，不论怎样简化，阀式避雷器 FA1 距变压器和电压互感器的最大电气距离不宜大于 10m。

④ 35kV 变电所（站）电缆进线防雷保护接线如图 5-24 所示，在电缆和架空线的连接处装设阀式避雷器保护，其接地必须与金属护套相连接，如图 5-24（a）所示；若为单芯电缆，一般将架空线与电缆连接处的金属护套接地，另一端的金属护套需经金属氧化物电缆护层保护器或间隙 [图 5-24（b）中的 FV] 接地，如图 5-24（b）所示。

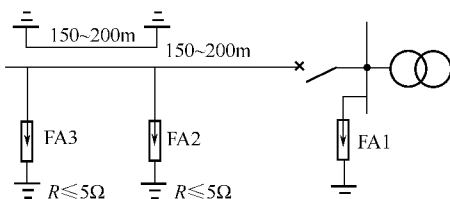
当电缆长度不超过 50m 或经验算装一组避雷器即能满足

要求时，应在电缆末端加装间隙保护。

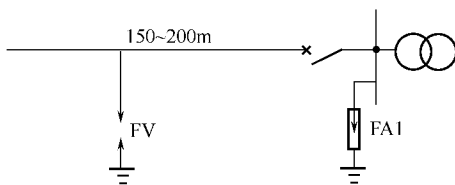
⑤ 变电所（站）的 3 ~ 10kV 配电装置，包括电力变压器，防止侵入雷电波的保护措施，应在每一路进（出）线及每



(a) 3150~5000kVA 的变电所（站）



(b) 1000~3150kVA 的变电所（站）



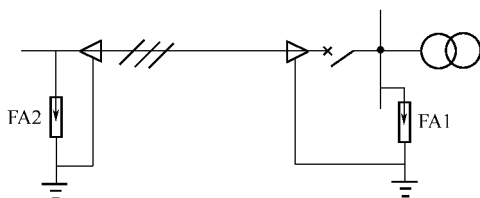
(c) <1000kVA 的分支变电所（站）

图 5-23 35kV 变电所（站）防雷保护简化接线

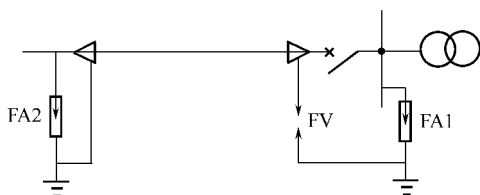
段母线上安装阀式避雷器，如图 5-25 所示。具体要求如下。

具有电缆进（出）线段的架空线路，应在架空线路与电缆终端盒连接处装设阀式避雷器并做集中接地装置，避雷器的接地线还应和电缆头（电缆）金属护套相连，电缆另一端的端盒与变电所（站）的接地网相连。这种连接法的目的是，

一旦线路落雷时，避雷器放电，雷电流经集中接地体流入大地的同时，有一部分雷电流沿电缆金属护套流入变电所（站）内接地网，这样在电缆护套产生磁场，相当于增大电缆的电感使波阻抗增大，因此，经电缆芯线侵入变电所（站）雷电流很快衰减，使波幅和陡度都有所减小，有利于保护变压器的安全。



(a) 三芯电缆



(b) 单芯电缆

图 5-24 35kV 变电所（站）电缆进线防雷保护接线

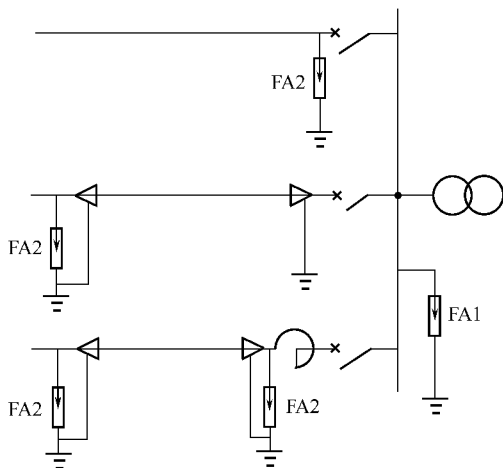
图 5-25 3 ~ 10kV 配电装置防雷保护接线

母线上的阀式避雷器应尽量靠近主变压器，如离得较远，应考虑在变压器附近加装一组阀式避雷器，母线上阀式避雷器距主变压器的电气距离不宜大于表 5-13 中的数值。

表 5-13 母线上阀式避雷器距主变压器的电气距离

单位：m

雷雨季中经常运行的出线路数	1	2	3	4 及以上
电气距离	10	15	18	20



由于电缆进（出）线端与架空线路相连接处波阻抗变化较大，从架空线路侵入电缆的进行波由于从高阻抗到低阻抗的变换，发生折射，有可能使电缆终端盒处的避雷器不动作，结果使较大幅值的雷电波直接侵入变电所（站），导致母线上避雷器流过的冲击电流过大，可能引起爆炸，因此，在木杆线路的情况下，应考虑在距电缆终端盒 200m 处，装设一组冲击放电电压为 200 ~ 300kV 的放电间隙或管式避雷器。

对于在出线上装有限流电抗器的线路，又是与电缆段相连接，考虑到电抗器的波阻抗大，为防止雷电进行波在电抗器处发生反射而引起电压升高以致损坏设备，因此，在电抗器和电缆之间还应加装一组阀式避雷器。

三、高压直配电机的防雷保护

1. 保护方法

经变压器与架空线连接的高压电机，一般不要求对它采取特殊的防雷保护措施，因为经过变压器转换的雷电波，除了极个别的情况外，不会有损坏电机绝缘的危险。但当高压电机不

经变压器而直接由架空线配电（即“直配”）时，其防雷工作就显得特别重要。高压直配电机的防雷保护方式应根据电机容量、当地雷电活动强弱和供电可靠性的要求确定。

(1) 单机容量为 6000 ~ 12000kW 的直配电机 可采用图 5-26 所示进线保护段装有电抗线圈或图 5-27 所示带有避雷线进线保护段的保护接线。

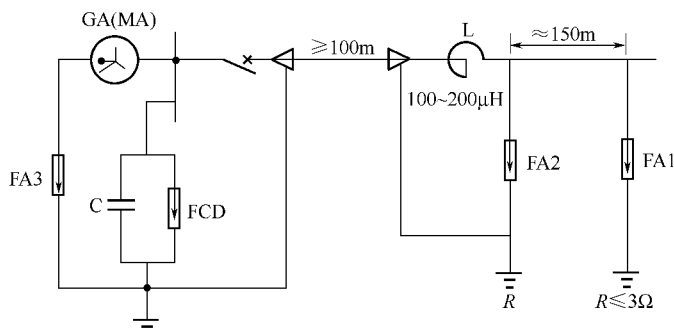


图 5-26 6000 ~ 12000kW 直配电机进线保护段装有电抗线圈的保护接线

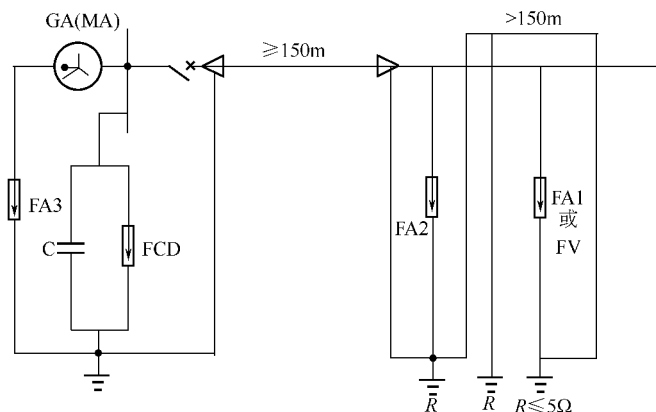


图 5-27 6000 ~ 12000kW 直配电机带有避雷线

进线保护段的保护接线

图 5-27 中所示进线保护段上所装设的阀式避雷器 FA2 的接地端应与电缆的金属护套及避雷线连接后共同接地，接地电阻不大于 5Ω ，避雷线的保护角不大于 30° 。

为充分利用电缆金属护套的分流作用，应尽量将电缆段金属护套的全长或一段直埋在土中，若受条件限制不能直埋时，可将电缆金属护套多点接地，即除两端接地外，再在两端之间作 3 ~ 5 处接地。

(2) 单机容量为 1500 ~ 6000kW（不包括 6000kW）或少雷区的直配电机 可采用图 5-28 所示进线保护段装有管式避雷器或图 5-29 所示进线保护段装有阀式避雷器的保护接线。

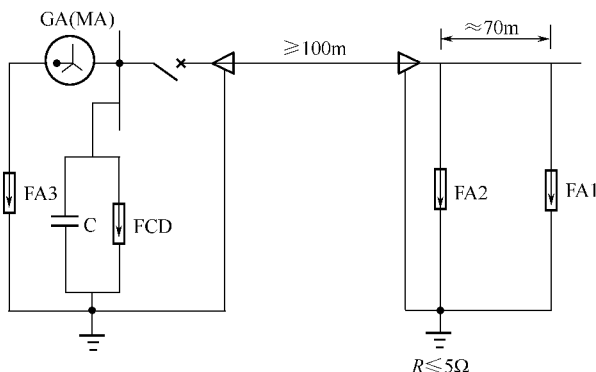


图 5-28 1500 ~ 6000kW 直配电机进线保护段
装有管式避雷器的保护接线

图 5-28 中所示管式避雷器 FA1 和 FA2 的冲击击穿电压，在释放电时间为 $2\mu\text{s}$ 时，对于额定电压为 3kV、6kV 及 10kV 者，应分别不超过 40kV、50kV 和 60kV；FA1 和 FA2 的接地

端应用导线连接，将连接导线悬挂在杆塔导线的下面，距导线不小于 2m，但不大于 3m，并与电缆首端的金属护套在装有 FA2 的杆塔处共同接地，工频接地电阻 R 不大于 5Ω 。

若电缆首端的短路电流较大，如采用图 5-28 所示的保护接线缺乏适当的管式避雷器，可采用图 5-29 所示进线保护段装有阀式避雷器的保护接线。

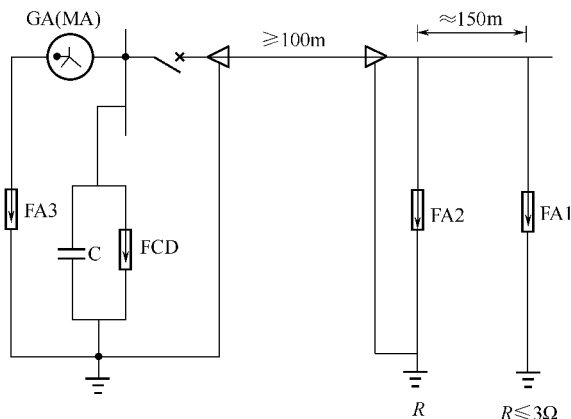


图 5-29 1500 ~ 6000kW 直配电机进线保护段装有阀式避雷器的保护接线

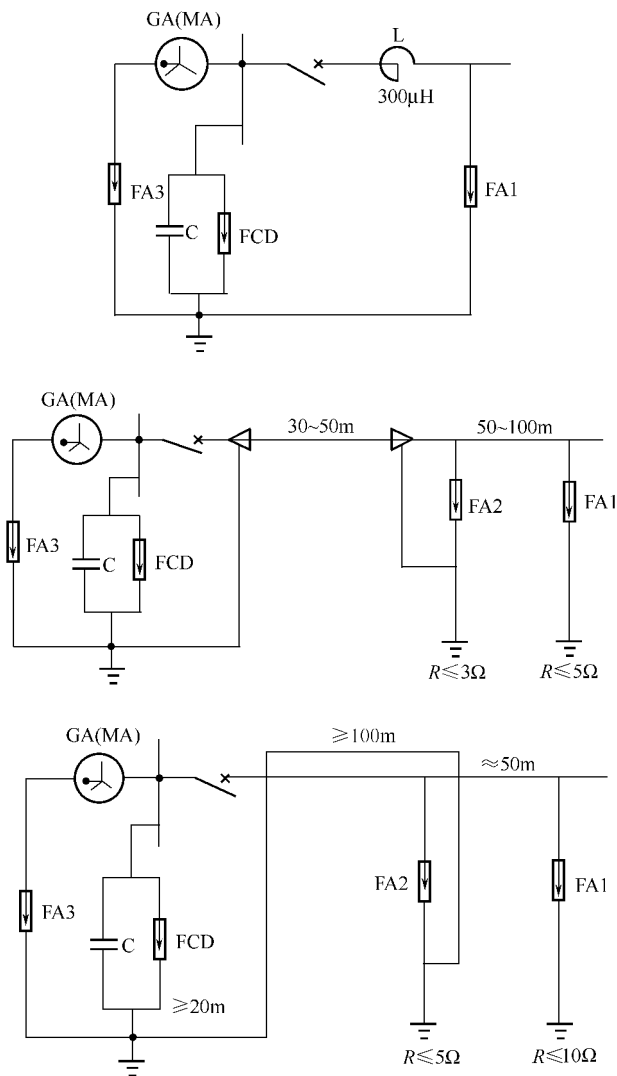
单机容量为 1500 ~ 6000kW 的直配电机，也可采用图 5-30 所示进线装有电抗线圈的保护接线。

图 5-30 1500 ~ 6000kW 直配电机进线装有电抗线圈的保护接线

(3) 单机容量为 300 ~ 1500kW 的直配电机 可采用图 5-31 所示进线有电缆段或图 5-32 所示采用避雷线保护的接线。

图 5-31 300 ~ 1500kW 直配电机进线有电缆段的保护接线

图 5-32 300 ~ 1500kW 直配电机进线



采用避雷线保护的保护接线

(4) 单机容量 300kW 及以下的直配电机 一般可采用图 5-33 所示带电缆进线段或图 5-34 所示的进线保护接线。图中的高压保护间隙 (FV) 最小值见表 5-14, 图 5-34 中所示的 FV 可装于终端杆上或由终端杆绝缘子铁脚接地。

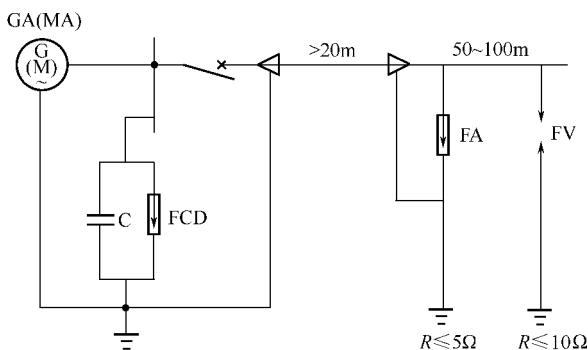


图 5-33 300kW 及以下直配电机带
电缆进线段的保护接线

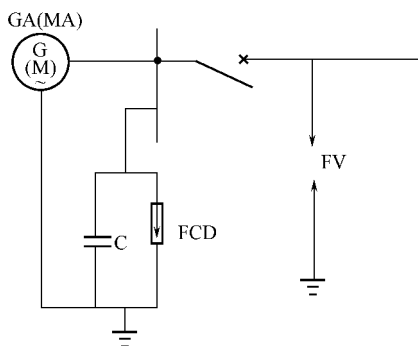


图 5-34 300kW 及以下直配电机进线保护接线

表 5-14 保护间隙的主间隙最小值 单位: mm

项 目	额定电压/kV							
	3	6	10	20	35	60	110	
							中性点直 接接地	中性点非直 接接地
间隙数值	8	15	25	100	210	400	700	750

2. 各种防雷元件的作用

(1) 进线段保护 从图 5-26 ~ 图 5-34 中可以看出，进线段保护包括架空进线上的避雷器或保护间隙和首端电缆。避雷器 FA1、FA2 或保护间隙 FV 的作用是将进线上侵入的雷电波的大部分引入大地，减轻配电所内避雷器的负担。电缆的作用如同电容器，可以降低从架空线上侵入的过电压波的陡度。当雷电波使避雷器或保护间隙击穿时，电缆首端的金属护套就通过它们与芯线发生短路，由于雷电流的等值频率很高，强烈的趋肤效应使大部分雷电流沿电缆金属护套分流并流入大地，而流过电缆芯线的雷电流较小。同时，在电缆芯线上还感应出反电动势，阻止高电位的侵入。这样，室内母线上的过电压就比较低了。另外，接地引下线应尽可能短些，以限制设备主绝缘承受的过电压幅值尽可能接近避雷器的残压。

(2) FCD 系列保护旋转电机磁吹阀式避雷器 由于采用磁吹灭弧间隙增强了灭弧能力；其火花间隙旁并联分路电阻，改善了冲击系数，降低了避雷器的冲击放电电压，使其有较好的保护特性，与 FS 系列普通阀式避雷器相比，可以使电机的绝缘水平降低一些。FCD 应尽量靠近电机安装，在一般情况下，可装在电机出线处；若一组母线上的电机不超过两台，也可装于母线上。

(3) 防雷电容器 C 该电容器两端的电压不能突变，有如下作用。

① 在雷电波起始瞬间，电容两端等于短路，然后逐步充电，这就限制了电压上升的速度，即降低雷电波的陡度，有利于保护直配电机的匝间绝缘。

② 使安装点的电位变化比较平缓，改善磁吹避雷器的冲击放电特性，降低侵入波的幅值。

③ 在无电容器的情况下，电机中性点可能出现两倍于来波幅值的电压，有了电容器后，则可降低直配电机中性点的电压，从而保护该处的绝缘。防雷电容器按三相星形联结接线，其中性点接地，应选择与电机同一额定电压的电容器。防雷电容器的数值一般每相取 $0.5 \sim 1\mu\text{F}$ ，电容器应有短路保护。

④ 保护旋转电机中性点的避雷器 FA3。若直配电机的中性点可以引出，且未直接接地时，应在中性点上装设一只阀式避雷器，可用 Y 系列中性点保护用金属氧化物避雷器，其额定电压不应低于电机最大运行相电压。

四、各类建筑物的防雷保护

1. 第一类建筑物

(1) 防直接雷措施

① 装设独立避雷针，架空避雷线或避雷网，避雷网网络尺寸不应大于 $5\text{m} \times 5\text{m}$ 或 $6\text{m} \times 4\text{m}$ ，其支柱或端部至少应设一条引下线。

② 当装设独立接闪器有困难时，可沿屋角、屋脊、屋檐和檐角等易受雷击部位敷设避雷针、避雷线、避雷网等。这时，建筑物应装设均压环，环间垂直距离不应大于 12m ，并采用环形接地体，每一引下线的冲击接地电阻不应大于 10Ω 。

③ 当建筑物高度超过 35m 时，应采取侧击雷防护措施。自 30m 起，每 6m 沿建筑物四周装设水平均压带，并与引下线连接； 30m 及 30m 以上的金属门窗、栏杆等构件与防雷装置

连接。

④ 对于排放爆炸危险气体、蒸气或粉尘的放散管、呼吸阀、排风管等，如无管帽，接闪点及接闪器的保护范围外边线应在管口上方半径 5m 的半球之外；对易燃品储罐，避雷针与呼吸阀的水平距离不应小于 3m，储量 5000m^3 以上的储罐为 5m，避雷针针尖高于呼吸阀不应小于 3m；如有管帽，接闪点及接闪器的保护范围应在表 5-15 所限定的距离之外。

表 5-15 管口外保护范围的要求

单位：m

装置内与周围空气中的压力差/kPa	排放物的密度	管帽上方的垂直高度	距管口的水平距离
<5	大于空气	1	2
5 ~ 25	大于空气	2.5	5
≤25	小于空气	2.5	5
>25	大于或小于空气	5	5

⑤ 对于无燃爆危险的排放管，管帽或管口在接闪器保护范围内即可。

(2) 防静电感应雷措施

① 建筑物内的金属设备、金属管道、金属构架、钢屋架、钢窗、电缆金属护套以及突出屋面的放散管、风管等金属物件应与防雷电感应的接地装置相连。金属屋面或屋面结构钢筋上相邻引下线之间的距离不应大于 12m（第二类建筑物不应大于 18m）。

② 非金属屋面用明装避雷网保护，并予以接地。

③ 防雷电感应接地装置可以和其他接地装置共用，防雷电感应接地干线与接地装置的连接不得少于两处。

(3) 防电磁感应雷措施

① 平行敷设的管道、构架、电缆相距不到 100mm 时，应用金属线跨接，跨接点之间的距离不应超过 30m；交叉相距不到 100mm 时，交叉处也应用金属线跨接。

② 管头接头、弯头、阀门等连接处的过渡电阻大于 0.03Ω 时, 连接处也应用金属线跨接; 对于 5 根及 5 根以上螺栓连接的法兰盘可不跨接。

2. 第二类建筑物

(1) 防直击雷措施

① 沿建筑物屋角、屋脊、屋檐和檐角等易受雷击部位装设避雷针、避雷网或避雷带, 避雷网或避雷带网格尺寸不应大于 $10\text{m} \times 10\text{m}$ 或 $12\text{m} \times 8\text{m}$ 。

② 无燃烧危险的金属放散管、呼吸阀、排风管、烟囱等可不另装接闪器, 但必须与屋面防雷装置相连, 其接地装置可以与电气设备的接地装置共用, 每一引下线的冲击接地电阻不应大于 10Ω 。

③ 对于排放爆炸危险气体、蒸气或粉尘的放散管、呼吸阀、排风管等, 应按第一类防雷建筑物考虑。

④ 当建筑物高度超过 45m 时, 应将 45m 及 45m 以上的建筑物的钢构架、混凝土钢筋、金属门窗或栏杆等构件与防雷装置连接, 作侧击雷防护。

(2) 防静电感应雷措施 与第一类建筑物相同。

(3) 防电磁感应雷措施 与第一类建筑物基本相同, 对于管道接头、弯头、阀门等连接处可不用金属线跨接。

3. 第三类建筑物

主要考虑防直击雷措施如下。

① 沿建筑物屋角、屋脊、屋檐和檐角等易受雷击部位装设避雷针、避雷网或避雷带, 避雷网或避雷带网格尺寸不应大于 $20\text{m} \times 20\text{m}$ 或 $24\text{m} \times 16\text{m}$ 。

② 屋面上的金属放散管、呼吸阀、排风管、烟囱等可不另装接闪器, 但必须与屋面防雷装置相连, 其接地装置可以与电气设备的接地装置共用, 每一引下线的冲击接地

电阻一般不应大于 30Ω ，对于重要的建筑物则不得超过 10Ω 。

③ 当建筑物高度超过 60m 时，应将 60m 及以上的建筑物钢构架、混凝土钢筋、金属门窗或栏杆等构件与防雷装置连接作侧击雷防护。

4. 防二次放电的要求

二次放电可能引起爆炸和火灾，也可能造成电击，跨接和间距是防止二次放电最常用的方式。防二次放电的间距见表 5-16。

表 5-16 防止二次放电的间距

类 别			间 距 要 求	说 明
第一类防雷建筑物	独立避雷针、架空避雷线支柱和接地装置	空气中距离	$h_x < 5R_s$ 时， $d_{a1} \geq 0.4(R_s + 0.1h_x) \geq 3m$ $h_x \geq 5R_s$ 时， $d_{a1} \geq 0.1(R_s + h_x) \geq 3m$	h_x —被保护点高度，m R_s —冲击接地电阻， Ω d_{a1} —空气中的间距，m d_{e1} —地下间距，m 各间距见图 5-35
		地下距离	$d_{e1} \geq 0.4R_s \geq 3m$	
	架空避雷线至屋面各种突出的风帽、放散管等物体之间		$(h + l/2) < 5R_s$ 时， $d_{a2} \geq 0.2R_s + 0.03(h + l/2) \geq 3m$ $(h + l/2) \geq 5R_s$ 时， $d_{a2} \geq 0.05R_s + 0.06(h + l/2) \geq 3m$	h —避雷线支柱高度，m l —避雷线水平长度，m d_{a2} —空气中的间距，m 各间距如图 5-35 所示
	架空避雷网至屋面各种突出的风帽、放散管等物体之间		$(h + l_1) < 5R_s$ 时， $d_{a2} \geq [0.4R_s + 0.06(h + l_1)]/n \geq 3m$ $(h + l_1) \geq 5R_s$ 时， $d_{a2} \geq [0.1R_s + 0.12(h + l_1)]/n \geq 3m$	l_1 —从避雷网中间最低点沿导体至最近支柱的距离，m n —具备 l_1 距离的个数

第二类防雷建筑物	空气中的距离	$l_x < 5R_s$ 时, $d_{a3} \geq 0.3K_c (R_s + 0.1l_x)$ $l_x \geq 5R_s$ 时, $d_{a3} \geq 0.075K_c (R_s + l_x)$ 相互连接时, $d_{a4} \geq 0.075K_c l_x$	l_x —计算点至地面的长度, m d_{a3} 、 d_{a4} 和 d_{e2} —空气中距离和地下间距, m K_c —分流系数
	地下距离	$d_{e2} \geq 0.3K_c R_s \geq 2m$	
第三类防雷建筑物	空气中的距离	$l_x < 5R_s$ 时, $d_{a3} \geq 0.2K_c (R_s + 0.1l_x)$ $l_x \geq 5R_s$ 时, $d_{a3} \geq 0.05K_c (R_s + l_x)$ 相互连接时, $d_{a4} \geq 0.05K_c l_x$	l_x —计算点至地面的长度, m d_{a3} 、 d_{a4} —空气中距离, m K_c —分流系数

注：对于单根引下线，取 $K_c = 1$ ；对于两根引下线和接闪器不闭合环路的多根引下线，取 $K_c = 0.66$ ；对于接闪器成闭合环路的多根引下线，取 $K_c = 0.44$ 。

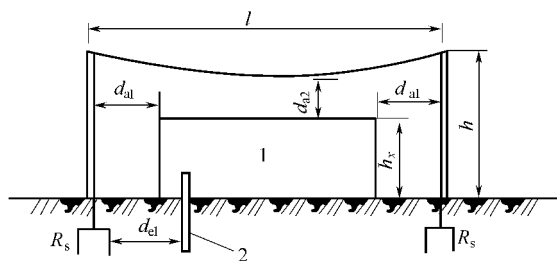


图 5-35 防雷间距

1—被保护物；2—金属管道

五、特殊构筑物的防雷接地

1. 烟囱的防雷接地

① 接地电阻不大于 30Ω 。

② 引下线：圆钢直径为 $10mm$ ；扁钢为 $4mm \times 30mm$ ；在烟囱出口下 $3m$ 范围内，圆钢直径为 $12mm$ 。当烟囱低于 $40m$ 设一根引下线；高于 $40m$ 设两根引下线和两组接地极，并可利用铁爬梯作为引下线；钢筋混凝土烟囱应把两根以上主筋与铁爬梯焊接作为引下线。

③ 按表 5-17 选择避雷针根数。

表 5-17 避雷针根数选择

烟囱尺寸		避雷针 根数	避雷针 长度/m	烟囱尺寸		避雷针 根数	避雷针 长度/m
内径/m	高度/m			内径/m	高度/m		
1	15 ~ 30	1	1.5	2	31 ~ 100	3	1.5
1	31 ~ 50	2	1.5	2.5	15 ~ 30	2	1.5
1.5	15 ~ 45	2	1.5	2.5	31 ~ 100	3	1.5
1.5	46 ~ 80	3	1.5	3	15 ~ 100	3	1.5
2	15 ~ 30	2	1.5				

2. 水塔的防雷接地

水塔防雷接地具体要求如下。

- ① 接地电阻不大于 30Ω 。
- ② 接闪器可利用水塔周围铁栅栏或作一圈避雷带，以保护水塔边缘，水塔中心高出部分只装一支 1.5m 长的避雷针。

③ 可利用铁爬梯作为引下线。

3. 油罐的防雷接地

(1) 保护目的

- ① 防止由于雷击火花引起油气爆炸，或由此造成油罐着火。
- ② 防止油罐顶盖被雷电流造成局部破坏，通常雷电流波头能熔化小于 5mm 厚的钢板。

油罐的防雷接地措施，常按储存油品的性质和油罐的不同结构形式来考虑。

(2) 防雷等级划分 油品的危险程度按它的闪点来划分，闪点为 45°C 及以下的属于易燃液体，其蒸气与空气的混合物具有爆炸危险；闪点为 45°C 以上的属于可燃液体，一般在常温下无爆炸危险，只有着火危险。凡是可燃气体都有爆炸危险。油罐防雷等级可分为三级。

- ① 闪点为 45°C 以下易燃液体的开式储罐属于一级，要求

防雷接地电阻不大于 5Ω 。

② 闪点为 45°C 以下带有呼吸阀的液体储罐、壁厚小于 5mm 的密闭金属容器和可燃气体密闭罐属于二级，要求防雷接地电阻不大于 10Ω 。

③ 闪点为 45°C 以下具有呼吸阀的可燃液体储罐和闪点为 45°C 以下，但壁厚大于 5mm 的密闭金属容器属于三级，这类储罐无爆炸性危险，要求防雷接地电阻不大于 30Ω 。

(3) 防雷接地措施

① 属于一级防雷的储罐，一般可装独立避雷针，接地电阻不大于 10Ω 。

② 属于二级防雷的储罐，可在罐顶直接安装或设独立避雷针；从节省金属材料和经济角度考虑，推荐采用在罐上安装的方式，接地电阻值不大于 10Ω ；在山区建设接地电阻值很难达到要求时，可以采用独立避雷针的方式，接地电阻值可降低一级 (30Ω)，或按具体情况考虑。

③ 属于三级防雷的储罐，一般可以不装避雷针，仅作接地即可。如对柴油等闪点在 60°C 以上的油品的储罐就可如此。在强雷地区可根据当地地面建筑物着雷情况调查，决定是否在罐顶加装避雷针。这时主要保护厚度在 5mm 以下的罐顶不受雷电流而造成局部损坏，接地电阻值不大于 30Ω 。

④ 对其他不同结构形式的油罐可按下述方法处理。

a. 浮顶油罐，由于罐内没有空隙，仅在顶盖与罐壁接触处有少量油气泄漏，顶盖随液面升降，故对一般浮顶油罐可以只作接地，不装避雷针。

b. 球形液化气储罐，壁厚一般均在 5mm 以上，可以只作接地。

c. 埋地式油罐，凡是复土在 0.5m 以上者，可不考虑防雷措施；但如有呼吸阀引出地面，则在呼吸阀处需作局部防雷

处理。

d. 钢筋混凝土油罐如装避雷针时，可利用其本身钢筋作接地引下线；如有钢筋混凝土基础，其自然接地电阻在 5Ω 以下的，可利用其本身作接地极，但需施工时密切配合。

⑤ 常见油罐避雷针安装数量见表 5-18，避雷针长度见表 5-19。

表 5-18 常见油罐避雷针安装数量			单位：个
名 称	100 ~ 700m ³	1000 ~ 3000m ³	5000m ³
避雷针	1	3	4
接地连接端子	1 ~ 2	3	4

表 5-19 常见油罐避雷针长度			单位：mm	
油罐容量 /m ³	避雷针总长度	避雷针各节长		
	l	l ₁ (φ20)	l ₂ (φ32)	l ₃ (φ50)
100	4400	1400	1500	1500
200	5000	1500	1500	2000
300	5200	1500	1700	2000
400	5500	1500	2000	2000
500	5700	1500	2000	2200
700	6200	1700	2000	2500
1000	5500	1500	2000	2000
2000	6000	1500	2000	2500
3000	6500	2000	2000	2500
5000	7000	2000	2000	3000

注：表中未考虑焊接部分长度。

第六章 静电防护安全技术

第一节 静电的产生、积聚和消散

一、固体静电

固体起电通常包括有接触起电、物理效应起电、非对称摩擦起电、电解起电、静电感应起电等起电类型。在生产工艺中，如纤维织物与辊轴的摩擦，塑料或橡胶的碾制，某些物质在挤出、过滤、粉碎、研磨过程中均可能有静电产生。而上述生产工艺中产生的静电往往能引起火灾和电击等事故。

1. 接触起电

(1) 金属之间的接触起电 两种不同材料的物体相接触，在它们之间的距离达到或小于 $25\text{\AA}$ (10^{-10}m) 时，一种物质中的电子就会传给另一种物质。失去电子的物体带正电，得到电子的物体带负电。人们通常认为两物体只有相互摩擦才能起电，其实摩擦只不过是增加了接触面及提高了接触后的分离速度，因此可以认为摩擦只是接触的一种特殊形式而已。两物体接触时，总是功函数较小的那个物体有更多的电子转移到功函数较大的物体上去，两物体接触后再分开，它们就带上了不同符号的电荷。

使一个电子逸出物质所要求外界作的功称为逸出功或功函数。应用功函数的概念可以比较形象地解释偶电层和接触电位差的现象。如图 6-1 所示为接触电位差的形成示意。两物质中电子的位能分别为 W_1 和 W_2 。显然，两金属功函数的值亦为 W_1 和 W_2 。金属中的电子位能都是负值，形成所谓位能阱。当两种物质之间的距离小于 $25\text{\AA}$ (10^{-10}m) 时，由于第二种物质

的电子位能比第一种物质中的电子位能高，因此有较多的电子从第二种物质流入到第一种物质中去，这样就形成了偶电层，使第一种物质带负电而第二种物质带正电。随着电子的继续转移，第二种物质内电子的位能逐渐降低，而第一种物质中的电子位能则逐渐升高，当达到平衡的界面上便出现了 $W_1 - W_2$ 的电子位能差。

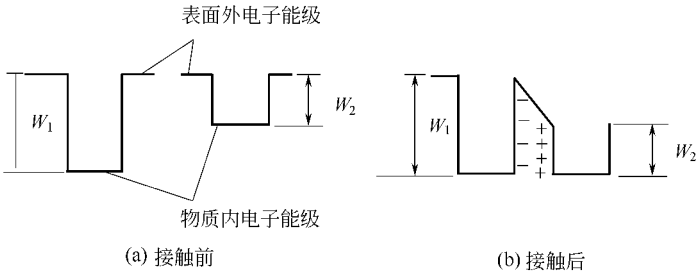


图 6-1 接触电位差的形成

应该指出，金属之间紧密接触虽然可产生偶电层，但当两金属分开时各接触点不可能做到同时分开，因而接触面两边的正负电荷将通过尚未分开的那些接触点构成的导电通道而互相中和，致使在通常情况下导体分开后仍不带电。只有绝缘状态下的金属与绝缘材料摩擦时，两者都有可能带电，如图 6-2 所示。

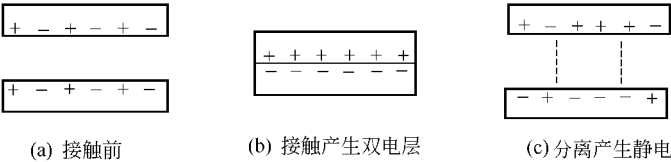


图 6-2 固体接触起电

常见的是金属与高分子物质或两种高分子绝缘物质间的相

互摩擦而起电的现象。譬如橡胶带（或其他电介质的带状材料）通过辊轴时的带电情况，如图 6-3 所示。如果橡胶带连续

通过几个辊轴，则静电量不断增加，但考虑到偶电层建立后，将对电子的继续转移起阻碍作用，会有部分电荷经泄漏和放电而消失，因此胶带上的电荷量不可能无限增加，最终会达到一个稳定的极限值。

实践证明由橡胶带、皮革或合成材料制成的传动皮

带与皮带轮或导轮间发生摩擦和接触分离时，不论皮带轮或导轮是用非金属材料制成的还是用金属材料制成的，都会在带和轮上产生等量异号的静电电荷。在橡胶、塑料、造纸、纤维等行业生产中的静电有时可高达几万伏甚至十几万伏，如不采取适当消除措施，则很容易导致电击和火灾。

(2) 金属与高分子固体间的接触起电 金属与均匀电介质接触时，也同样形成偶电层。其特点是在金属一侧电荷分布在金属表面上，其面电荷密度为 σ_{m1} ；而在电介质一侧电荷则分布在具有深度 t 的薄层内，其体电荷密度为 ρ_{m2} 。如图 6-4 所示。

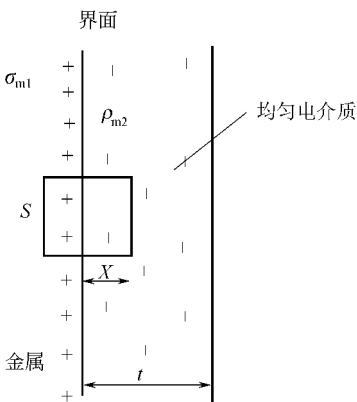


图 6-4 金属与均匀电介质的界面

2. 固体的物理效应起电

(1) 热电效应 某些晶体具有明显的热电现象。例如将石英体加热，则一端带正电，另一端带负电；在冷却时两端与加热时带电符号相反。这一带电现象称为热电效应。

(2) 压电效应 晶体受到应力作用后，内部便发生均匀的形变。然而在对称的晶体中，例如食盐之类的晶体，每一质点为对称中心，离子之间的对称排列并不因受到应变而改变。因此，仅仅由应力作用不能产生离子之间的不对称的相对位移，不能产生极化。如一非空间中的晶体，当其受到应力时伸长，但它们仍是等间距地排列着，因此一般来说，仍不能产生电偶极矩。只有在原先正负离子排列成不对称点阵时，才有可能由应力产生电偶极矩，如金刚石型的硫化锌、水晶、磷酸氢钾和钛酸钡等不对称的晶体在应力作用下可以发生极化。不对称的晶体受到应变后，离子间受到不对称的内应力，这个内应力使得离子间产生不对称的相对移动，结果产生了新的电偶极矩和面电荷，这种现象称为压电效应。

石英在 1kg 的压缩力下，其相对的两个面上能够产生百分之几伏的电位差，酒石酸钾钠晶体的此种效应更显著。目前所生产的某些压电陶瓷，在冲击压力下，可产生几万伏的脉冲静电高压，被用作静电火花源。

(3) 因材料破裂而带电 原来呈电中性的固体材料或粉体类物质因破裂会产生静电，如图 6-5 所示。另外，当有极性基的冰块破裂时也可产生静电。其带电过程是电荷因冻结而分离，冻结后假如中心部带负电，外侧带正电，则当冰层破裂时将引起电荷的分离，这时碎冰片将带上正电，如图 6-6 所示。

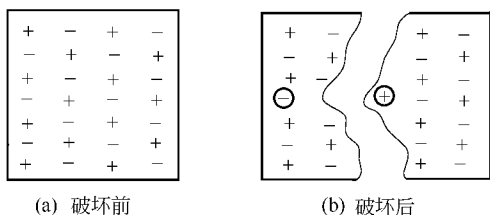


图 6-5 因破裂产生静电

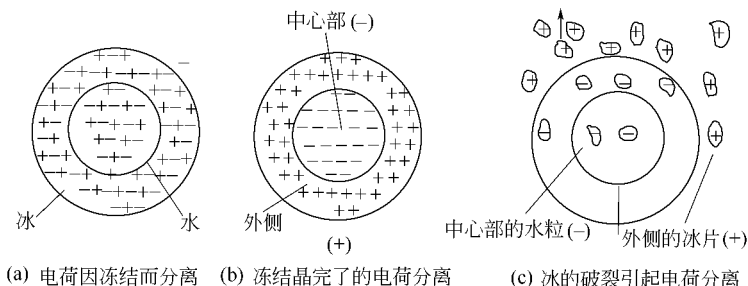


图 6-6 因冻结、破裂而产生静电

3. 非对称摩擦带电

现取两根相同物质的棒研究其起电规律。令一根静止，另一根在其上摩擦，如图 6-7 所示。这时静止的一根在较大的范围内受到摩擦，而运动的那根棒只有一个很小的面积（接触点）受到了摩擦，这样的摩擦称为非对称摩擦。用橡胶棒进行非对称摩擦，最初发现运动的棒带正电而继续进行几十次强烈摩擦后其电荷又变成负的，这是因为运动的棒在接触点温度上升产生变形的缘故。

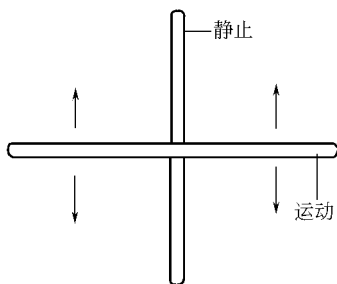


图 6-7 非对称摩擦

范围内受到摩擦，而运动的那根棒只有一个很小的面积（接触点）受到了摩擦，这样的摩擦称为非对称摩擦。用橡胶棒进行非对称摩擦，最初发现运动的棒带正电而继续进行几十次强烈摩擦后其电荷又变成负的，这是因为运动的棒在接触点温度上升产生变形的缘故。

有人认为，由于变形引起硬橡胶棒的局部破断产生出像 S^{2-} 那样容易移动的离子，又因两棒之间存在温度差和离子浓度差，离子就向对方的棒扩散。

相同材质但温度不同的两物体互相摩擦也会产生静电。例如，加热的玻璃棒与冷的玻璃棒相摩擦后会分别带上符号相反的电荷。对这一现象可以作如下解释：一方面由于两棒间存在着温度差使棒表面的带电粒子向冷的一方扩散；另一方面也由于两者的温度差产生了表面能级之差，从而导致了带电粒子的定向运动。

4. 电解起电

当把金属浸入电解质溶液中时，金属离子将向溶液扩散。随着这一过程的进行，在界面上将出现偶电层，形成电位差。

应该指出，上述的电解现象在固体与固体之间接触时也会发生。这是由于固体表面能吸附很薄的水或其他的液体形成薄膜，这就使得两相接触的固体分界面上存在这种膜，通过这种膜而发生了电解现象。实验指出，当这种液膜的厚度为 $100 \times 10^{-9} \text{m}$ 时电解现象最易发生。但应指出，由于在固体表面存在着这种液膜会大大降低固体的表面电阻率，致使这样的固体经接触再分离时，界面两侧的电荷几乎全部中和掉。

电解偶电层液膜厚度约 $(10 \sim 60) \times 10^{-10} \text{m}$ ，电位差约为 $0.01 \sim 0.1 \text{V}$ ，面电荷密度约为 0.2C/m^2 。

5. 静电感应带电

中性导体置于外电场中会发生静电感应现象，当把被感应而带电的导体的一端接地时，这端电荷将被中和掉，然后，将接地线断开，再去掉外场，这时孤立导体就带上了电，这就是所谓感应起电。

除导体外，电介质在静电场中同样也能感应起电。在外电场中，电介质要发生极化。极化后的电介质在垂直电力线方向

的两界面上将出现大小相等、符号相反的束缚电荷，这些束缚电荷也反过来影响电场。外电场取消后，电介质上的束缚电荷将逐渐消失。如果束缚电荷的某一种电荷由于某种原因消失，则电介质上另一种电荷将使电介质处于带电状态。

起电材料在外电场中达到静电平衡所需要的时间称为弛张时间。它是表征感应起电特性的重要参数。金属材料的弛张时间仅 $10^{-13} \sim 10^{-16} \text{ s}$ ；电介质的弛张时间通常在 10^{-8} s 以上，有的甚至长达数小时至数昼夜。

6. 固体静电的积聚

静电开始产生时静电量是随时间而增加的，但积聚到一定程度时，静电量不会无限地增加而是趋于某一稳定值。这是因为任何材料的绝缘电阻都不可能是无限大的，因此严格说静电的产生和静电的泄漏是同时进行的，只不过开始阶段静电的产生多于静电的泄漏，然后产生量和泄漏量逐渐达到平衡。

二、粉体静电

粉体是指由固体物质分散而成的细小颗粒。在生产过程中，例如在研磨、搅拌、筛选、过滤和料管中气力输送等工序中经常有静电产生。轻则使操作人员遭到电击，影响生产，重则引起重大爆炸事故。

1. 影响粉体静电产生的几个因素

因为粉体仍是特殊形态下的固体，所以从理论上讲，它仍遵守着前面所讲的有关固体起电的偶电层理论。但又有与固体起电不同的地方，如同样重量的固体粉碎后其表面积要增加许多倍，相应地由于同空气的接触面积增加而大大降低了它的稳定性。例如很稳定的固态聚乙烯和金属铝，其粉体不但能产生、积聚静电，还能发生剧烈的爆炸。

粉体静电的产生比较复杂，目前尚无普遍的计算公式，下面只能对能影响粉体静电产生的几个主要因素进行分析。

(1) 材质影响 以在管道中气力输送粉体为例进行研究。实验发现，粉体与管道材料相同时静电产生量很少；当管道由金属材料制成时静电产生量与金属材质种类关系不大；当管道及粉体均由绝缘材料制成时，材料性质对静电影响显著，甚至能改变静电电荷的符号。

(2) 时间影响 粉体在管道中输送或在容器中搅拌时间越长，对整体来讲，粉体颗粒与器壁之间的碰撞次数越多；对每个颗粒来讲，发生摩擦和碰撞的次数增多，其表面上带有的静电量也增多。但同时也增加了带电粒子的放电机机会，所以最终表现出来的结果是静电带电趋于平衡，即开始时随输送时间或搅拌时间的增加，静电产生量也不断增多，但经过一段时间之后，便逐渐趋于饱和。图 6-8 给出了粉体输送带电曲线。

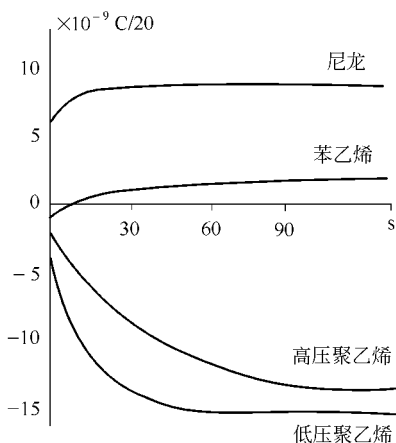


图 6-8 粉体输送带电曲线

如图 6-8 所示是尼龙、苯乙烯、高压聚乙烯和低压聚乙烯四种粉体颗粒在镀铬的管路内输送时测出的结果。多数粉体经过十秒至多数十秒其静电量便趋于稳定值而不再增加。

(3) 运动速度的影响 运动速度是指粉体输送速度或搅拌速度。速度愈高，颗粒的摩擦和碰撞愈激烈，静电产生量也愈多，而达到饱和所需要的时间却大为缩小。在气力输送工艺中，如果气流速度高达每秒数米至每秒数十米，就能很快达到静电饱和状态。

(4) 载荷量的影响 载荷量是指气力输送中每立方米气流中所含粉体的质量。由于载荷量越大，颗粒数越多，势必造成每个颗粒在管道内与管壁摩擦和碰撞的机会越少。于是，颗粒上的平均电量或单位质量粉体的电量均随载荷量的增加而减少。图 6-9 所示为将平均直径为 $65\mu\text{m}$ 的石英粉体用相对湿度为 20% 的空气气流送入长 2m、直径 10mm 的铜管时，铜管出口处每千克粉体所带的电荷量。从曲线上看出：单位质量粉体的电荷量与粉体载重量成反比。从不同曲线的相比不难看出：在粉体载荷量相同的情况下速度愈大，粉体电荷量也愈大。

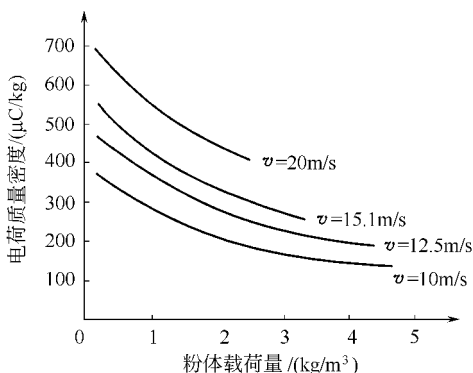


图 6-9 管道粉体静电与载荷量的关系

(5) 粉体颗粒大小的影响 虽然从单个颗粒看，大颗粒比小颗粒带电多，但从整体来看，在质量不变的条件下，粉体颗粒越小，则粉体颗粒的总表面积就越大，因此所带电荷就

越多。

除上述各因素外，粉体静电的产生还同管道、料槽和搅拌桨的形状、结构有关。例如，弯曲的管道比直管道容易产生静电；管道的狭窄部分比宽阔部分容易产生静电等。同一般固体材料一样，温度、湿度、外部电场等因素对粉体静电也都有影响。

2. 气流输送粉体的起电规律

用气流输送粉体物质，在工业中已有广泛的应用。例如，通常利用压缩空气来输送面粉、医用花粉等非易燃性粉体物质。因为这些粉体用气流在管路里被输送的过程中，粉体颗粒与管壁发生剧烈的、频繁的摩擦和碰撞，因而常产生强烈的静电。同时，在粉体输送过程中又很容易产生不同强度的放电火花，这就涉及到整个输送过程的安全性问题。为了找出粉体在气力输送过程中的起电规律，又考虑到实验的安全性，人们通常是利用惰性固体介质粉粒进行研究从而摸清其起电规律的。

粉体静电受多种因素的影响，因此其定量计算是相当复杂的。实际的计算往往要限定某些条件及利用在某些特定条件下得出的实验系数，因此这种计算就带有一定的局限性和近似性。下面给出两个计算粉体带电的经验公式。

(1) 气流输送粉体石英的起电规律 试验用的石英砂是用喷干法加工出来的平均直径为 $64\mu\text{m}$ 的球形颗粒，每千克表面积为 84m^2 ，放电时间常数 $\tau = 2 \sim 3\text{s}$ ，吹送砂粒的空气湿度为 20%，使粉体通过直径 10mm，长 2m 的钢管时，得到下列经验公式：

$$\rho = 19.5\beta^{0.74}v^{1.13}$$

式中 ρ ——每立方米气流中，石英微粒所带电量， $\mu\text{C}/\text{m}^3$ ；

β ——载荷量， kg/m^3 ；

v ——气流速度， m/s 。

经验公式中的 19.5、0.74 和 1.13 都是根据实验确定的系数。

(2) 粉体起电电流密度计算的经验公式 经一些学者研究,给出了粉体在圆形管路中气力输送时,起电电流密度(指单位时间单位面积管道上产生的静电量,且粉体和管道分别带上等值异号电荷)计算的普通公式为

$$J = \frac{0.35 K_c^{0.4} v^{0.8} K_m^{1.8} K_s K_t \sigma_m}{d \left(\lg \frac{N_R}{8} \right)^{1.8}}$$

式中 d ——粉体颗粒的直径或等效直径, m ;

N_R ——雷诺数, $N_R = \frac{Dv}{\nu}$;

ν ——气体运动黏度(即运动黏性系数),可取 $1.51 \times 10^{-5} m^2/s$;

D ——管道内径, m ;

v ——气流速度, m/s ;

K_c ——由粉体与管道材质确定的系数;

K_m ——粉体颗粒横向最大速度与气流横向最大速度的比值;

K_s ——气流纵向速度与粉体颗粒纵向速度的比值;

K_t ——粉体的体积浓度;

σ_m ——电荷密度。

三、液体静电

流体在流动、搅拌、沉降、过滤、摇晃、喷射、飞溅、冲刷、灌注等过程中都可能产生静电。这种静电常常能引起易燃液体和可燃液体的火灾和爆炸。因此,研究液体的静电是非常重要的。

1. 在液体介质中产生静电的几种形式

(1) 流动带电 液体在流动中的摩擦带电是工业生产中

颇为常见的一种静电带电形式。如汽油、航空煤油等低电导率的轻质油品在管线中输送时，又如苯通过有滤网的漏斗倒入试瓶时，甚至在用蘸有汽油的棉纱洗涤金属或衣物时都有静电发生。

(2) 喷射带电 当液体从管口喷出后在与空气接触时，它将被分散成许许多多的小液滴。较大的液滴很快地沉降，而另外一些微小的液滴停滞在空气中形成雾状的小液滴云，带有大量的电荷。例如水或甲醇在高压喷出后形成的雾状小液滴就带大量电荷而形成电荷云。

(3) 冲击带电 当液体从管口喷出后遇到器壁或挡板的阻碍时，飞溅起的小液滴同样会在空间形成电荷云。例如汽油经过顶部管口注入到储油或罐或油槽车的过程中，油柱下落时对器壁发生冲击，引起飞沫、雾滴而带电。

(4) 沉降带电 当在绝缘液体中，例如在轻质油品中含有固体颗粒杂质或水分，且这些颗粒或凝聚成的大水滴向下沉降时，也有静电产生。

2. 液体介质静电起电机理

(1) 液体与固体界面偶电层的形成 液体与固体界面处偶电层的形成是一个相当复杂的化学过程。形成偶电层的直接原因是正、负离子的转移。偶电层上的电位差通常称为电动电位或 ζ 电位。一般认为，液体在固体表面的电荷层由两部分组成：一部分是紧贴在固体表面的电荷层称为紧密层，该层厚度只相当于一个分子直径的数量级，其所带电荷与界面上固体一侧的电荷符号相反；另一部分的电荷与紧密层电荷符号相反，其厚度则为分子直径的几十倍至几百倍，称为扩散层。

如图 6-10 所示为液体在管道内流动时静电荷的分布情况。固体界面上是一层正电荷，在液体中紧密层内是负电荷，而在扩散层内也是正电荷。如图所示，正电荷随着液体流动形成液

流电流（或冲流电流）。冲流电流的大小在数值上等于单位时间内通过管道横截面的电量。在图 6-10 所示的情况下，冲流电流与液体的流动方向相同。如果管道是接地，在冲流电流流动过程中，接地的途径上也有相应的电流流过。如果管道是由绝缘材料制成或者是对地绝缘，则在管道上会积累大量的静电。

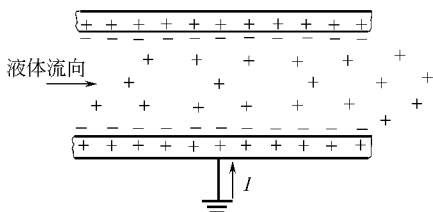


图 6-10 液体在管道内流动时静电荷的分布情况

进一步研究表明：在液体层内除按电荷分布情况可将液体层分为紧密层和扩散层外，还可根据液体层的流速分布情况将其划分为固定层及流动液层两部分，如图 6-11 所示。

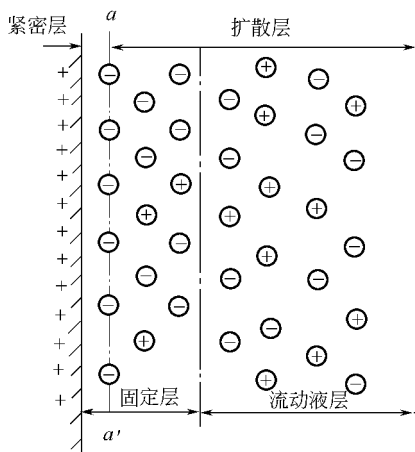


图 6-11 偶电层的模型

上述的偶电层所形成的电场方向是由固体表面指向扩散层。从固体表面至扩散层末端的电位差在化学中称为热力学电位，用 φ_i 表示

$$\varphi_i = \varepsilon + \zeta$$

式中 ε ——固定层电位；
 ζ ——流动液层电位。

偶电层电位变化曲线如图 6-12 所示。

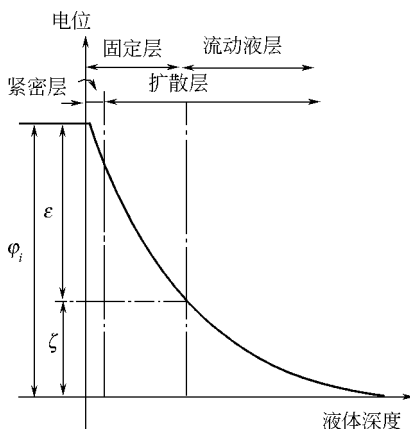


图 6-12 偶电层电位变化曲线

(2) 液体-气体界面的起电 水和其他液体在喷雾和发泡时能产生大量的静电和较高的电动电位。它的起电原理和液体在管道中流动产生的静电不完全一样。

- ① 液、气间的偶电层都位于接近气体的液体表面之下。
- ② 带电是由于从表面剥出的微小液滴而产生的，这些带电粒子产生于很薄的表面层里。
- ③ 当水滴破碎时，大小不等的水滴相比较，小水滴带负电，大水滴带正电。

④ 利用喷雾法得到半径数量级大约为微米级的小液滴，对这些小液滴进行测量后发现：同样大小的液滴带正电和带负电的数目，就平均而言是相等的，即所谓的小液滴对称带电。对小液滴的对称带电可以这样解释：最初，离子均匀地分布在液体中，如果液体分裂成无规则的小液滴而进到气体中后，就形成了具有相同数目的正、负离子。表 6-1 给出了使水溶液喷雾所得到的正、负总电荷量。

表 6-1 使水溶液喷雾所得到的正、负总电荷量

单位：相对量

蒸馏水	KCl 1×10^{-5} mol	KCl 1×10^{-4} mol	KCl 1×10^{-2} mol	KCl 1 mol
- 38	- 40	- 42	- 11	- 2
+ 38	+ 40	+ 43	+ 11	+ 2

在生产过程中，因液体喷雾造成重大事故的案例是很多的。如由于针形阀开度较小，汽油就曾因喷雾而发生过引燃事故。液体在高压下由喷嘴喷出时，静电不仅会产生在喷嘴处的固-液偶电层上，同时也会由于分裂液体而产生在汽油雾中。另外如用高压水冲洗油轮油舱时，在国外曾发生过多起油轮爆炸事故。在这些事例中，将因液体与固体快速接触、分离而产生静电外，液体在与容器壁碰撞而使其分裂、雾化过程中产生的静电也是重要原因之一。

3. 影响液体静电产生的几个因素

(1) 液体所含杂质对静电产生量的影响 实验结果表明，非常纯净的高度精炼的石油产品在管道内流动时是不容易带电的。这是因为液体之所以带电是因为在液体内存在着已离解的正、负离子，而一般的石油轻油制品的分子是无极分子，因此，这类分子一般都不能直接电离。液体中的离子主要来源于

其中所含的杂质，当这些杂质离解时就产生了正、负离子。如果在轻油中存在胶体杂质，例如水分子，它就可以吸附自由离子而成为带电质点。在生产中常见到这样的现象，当油品中含有少量水时，水在沉降过程中很容易带电，甚至能引起静电事故。由表 6-2 中可以看出，往 JP-5 燃油中加入不同量的沥青杂质会明显改变其带电状态。

表 6-2 加入沥青杂质对带电的影响

JP-5 燃 油	电导率 / (S/cm)	放电次数
无增加物	0.011×10^{-12}	4
加 0.005% 沥青	0.5×10^{-12}	130
加 0.0005% 溶于石油精的沥青	1.6×10^{-12}	131
加 0.0005% 不溶于石油精的沥青	1.2×10^{-12}	112

通过实验还发现在液体中加入杂质过多时，液体也不容易产生静电，这是由于随着杂质的增多，液体电导率较大，静电容易泄漏的缘故。

杂质除可改变液体的带电程度外，有时甚至可以改变带电的极性，如有时在往油槽车装油的过程中会发现数次静电极性的改变。

(2) 液体电阻率对静电产生量的影响 在一定范围内静电产生量随电阻率的增加而增大，但达到某一数值后，它又随着电阻率值的增加而减小，实验结果指出，电阻率为 $10^{11} \Omega \cdot m$ 的液体最容易产生静电；而电阻率小到 $10^8 \Omega \cdot m$ 的液体由于其静电泄漏较强，因此不容易积累静电；若电阻率大到超过 $10^{13} \Omega \cdot m$ 时，又由于所含离子少，所以带电也很难。由于石油制品和苯的电阻率多数在 $10^{10} \sim 10^{12} \Omega \cdot m$ 之间，故其静电危险性很大。从图 6-13 可以清楚地看出电阻率对油品带电的影响。

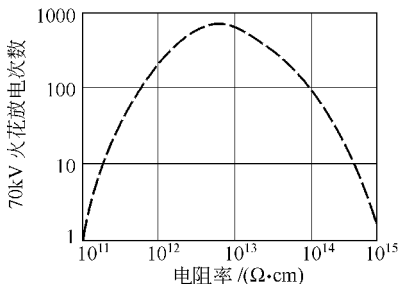


图 6-13 电阻率对油品带电的影响

如果在石油成品中加入化学药剂，则可改变其电阻率，并测得电阻率对在管道中流动的油品的冲流电流值也有明显的影响。如图 6-14 所示为在喷气燃料 JP-4 中加入药剂后测得的电阻率与冲流电流的函数关系曲线。

(3) 管道材料和管道内壁状况对液流电流的影响 管线材质对管线中流动的液体所产生的液流电流的影响是不可忽略的。实验指出，同种液体流过金、银、钯、硼酸玻璃、玻璃钢等管道时，其静电的产生量仅有微小差别，但由于上述材质的电阻率差异很大，因此对其静电的消散却有显著的影响，从而

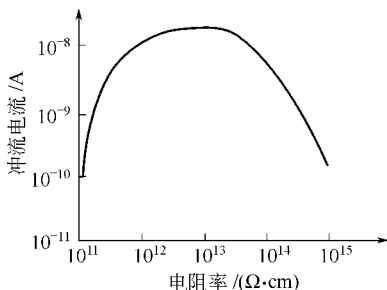


图 6-14 电阻率与冲流电流的函数关系曲线

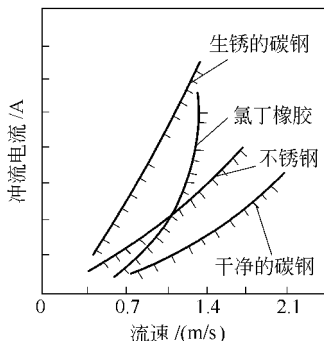


图 6-15 管线材质与电流关系

明显影响液流电流的大小。图 6-15 给出了某液体流经不同材质管道时所产生的液流电流情况。

除管道材质的影响外，管道内壁的粗糙程度对液流电流也有影响。实验结果表明，内壁越粗糙，静电产生量越大。

(4) 水分的影响 如前所述，当高阻的油品中含有水分时，水虽然不会与油品直接作用使静电增加，但是会与油品中的杂质起作用从而间接影响油品的带电量。

实验结果表明，当油品中混入水分在 1% ~ 5% 时，其静电产生量最多，静电危险性也越大。

(5) 管路几何形状及容器尺寸的影响 注油管（鹤管）管口形状对静电产生有很大影响。例如，45°斜口圆筒管头比平圆筒管头产生的静电量要少得多。这主要是因为液体流经平圆筒管头处时，同斜口管头相比，液体被分散的程度要强烈得多。

容器的尺寸对静电产生量也有影响。一般说来，在其他条件相同的情况下，大容器的液面静电电压较高。

(6) 过滤器的影响 过滤器会大大增加接触和分离的强度，更换不同的过滤器，可使液体静电的电压增加十几倍甚至近百倍，有时还可以改变静电电荷的极性。

(7) 流速和管径的影响 流速和管径对液体静电有很大影响。饱和的液流电流 I 可写成如下形式

$$I = Kv^{\alpha} D^{\beta}$$

式中 K ——决定于液体及管道性质的系数；

v ——液体流速；

D ——管道内径；

α ——流速影响系数；

β ——管径影响系数。

其中 α 、 β 之值不是常量，它是与管径大小，流体材质等

多种因素有关的量。

(8) 流体流动状态的影响 实验指出,流动的液体由层流变为湍流时,其带电量会有显著的增加。其理由是,当液体处于湍流状态时,一方面是由于增大了液体分子热运动和相互碰撞,可能产生新的空间电荷;另一方面因速度梯度的变化,使得在偶电层的扩散层处流速变大,因此会使液流中带有更多的电量。

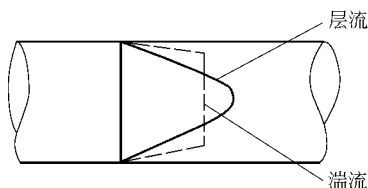


图 6-16 不同流动状态下流速的分布

层流与湍流的液体在管道内的速度分布规律有着明显的差别,如图 6-16 所示。层流时速度分布曲线呈抛物线形;湍流时管线中靠近管壁处有较大的速度梯度。

四、静电的消散

物体所带的静电,在没有其他来源供给时,其原有的静电总是要逐渐消散的。静电的消散主要是通过两种途径,即放电和泄漏。

1. 静电放电

静电放电是静电中和的主要方式,下面首先就气体放电的一般规律性进行讨论。

(1) 气体放电的物理过程 在通常状态下,空气在宇宙射线和地层放射性物质的作用下,只有少量的带电粒子存在,因此,空气是良好的绝缘体。当加有外电场时,空气中的带电粒子就沿电场方向或沿电场的反方向运动,这些带电粒子在运动过程中其动能不断增大,其动能 W 为

$$W = \frac{1}{2}mv^2 = qEd$$

式中 m ——带电粒子的质量；
 v ——带电粒子的运动速度；
 q ——带电粒子的电荷量；
 E ——外电场的电场强度；
 d ——运动距离。

各种带电粒子在电场中运动时，会发生相互碰撞。如果电子的动能超过原子的电离能，碰撞后使中性原子的外层电子克服原子的吸引力而成为自由电子，从而原来的中性原子可以同其他中性原子继续发生碰撞，结果又产生新的电子和正离子。这些电子很容易吸附在氧、水汽，特别是含有卤族元素的气体如 SF_6 等原子上形成负离子。而这些新生成的负离子与正离子相遇时又能相互中和还原为原子或分子，这种过程即为通常所说的复合。由此看来在电场作用下，空气中的带电粒子是处在不断产生及复合的过程中。如果产生速度极大地超过复合速度，则自由电子和正离子就像雪崩一样急剧地增加，即所谓的电子雪崩。当发生电子雪崩时，两极间的电流强度可增加数万倍。这种强大的电流不再是由于外面进入气体内的电子运动的结果，而是由气体本身雪崩过程中所产生的大量电子和其他带电质点运动而引起的，因此，这种放电过程通常被称为自激导电。这时空气实际上已变成导体，通常称为击穿。

实验结果表明，在均匀电场中，在气压为 1atm (101325Pa)，温度为 20°C ，两极间距离大于 0.1cm 的条件下，空气击穿电压由下式给出

$$U_i = 30d + 1.35\text{kV}$$

式中 U_i ——空气击穿电压， kV ；
 d ——电极间距离， cm 。

(2) 气体放电的伏安特性 气体放电的伏安特性曲线如图 6-17 所示。

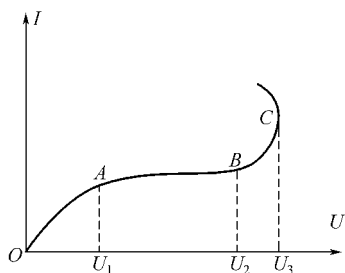


图 6-17 气体放电的
伏安特性曲线

电极间空气中电子和离子在极短时间内就已全部达到电极的缘故。当电压升高超过 U_2 时（曲线上的 B 点）电流急剧增加，这时由于碰撞电离而形成了火花放电。这时 B 点所对应的电压称为击穿电压。

（3）影响气体放电的因素

① 电极的形状和极性对击穿电压的影响。图 6-18 及图 6-19 所示为不同形状电极对击穿电压的影响。图 6-18 及图 6-19 分别给出了 30° 锥尖电极和端部为半圆形的棒状电极对平板电极的放电曲线。比较两图很容易发现，电极末端的曲率半径越小，其击穿场强越低，即越容易放电。从图中还可以看出，同样电极当棒带正电时，击穿电压较低。理由是由于当棒带正电时，由于电子比阳离子轻得多，因而其流动也比阳离子快得多，所以阳极附近因电晕产生的电子迅速向阳极移动（见图 6-20），而阳离子是以较慢的速度向外扩散，最后形成了树枝状的阳离子流，向阴极延伸，这样就等效于缩短了两极间的距离，因而使击穿容易发生。如果棒状电极带负电，尖端附近因电晕产生的电子会很快地向远离负极的方向流散；正离子却不容易很快地吸向负电极而中和，这样就可能影响电晕放电的发

当两极间电压低于某一数值 U_1 时，气体中的电流随电压的增加而增加（曲线上的 OA 段），这是由于两极间电压越高，极间场强也越强，因而单位时间里达到极面的电子和离子的数目也越多的结果。当电压升高到 U_1 和 U_2 之间时，气体中的电流基本保持不变（曲线上的 AB 段），这是由于

展，使击穿放电比较困难。

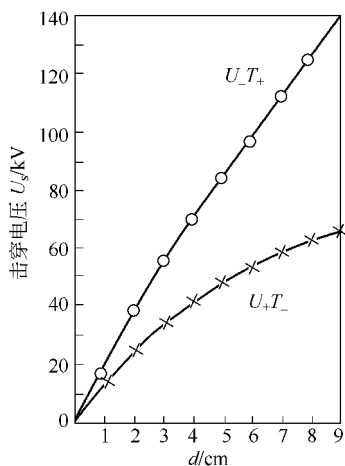


图 6-18 30°锥尖电极对平板电极的放电曲线

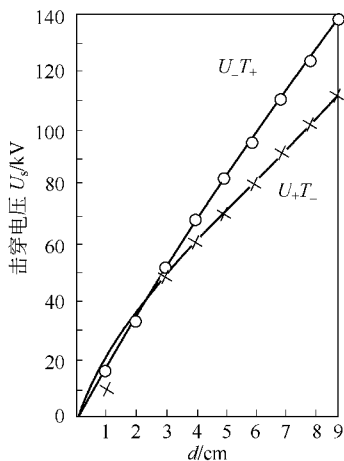


图 6-19 2mm 半圆形棒状电极对平板电极的放电曲线

图 6-18 给出了 30°锥尖电极分别带有正电和负电时对平板电极的放电曲线，从图中可明显看出，当棒状电极带负电时其击穿电压显著升高。

② 气体的状态对放电的影响。当气体的压强降低或温度升高时，由于分子密度降低，因而电子的平均自由程变大，电子动能变大，相应地使得电晕放电和击穿电压都有所降低。例如，当海拔每升高 1000m，其放电电压大约下降 10% 左右；在高压下，例如在压缩空气中，电子的平均自由程较小，因此间隙的击穿放电电压升高。

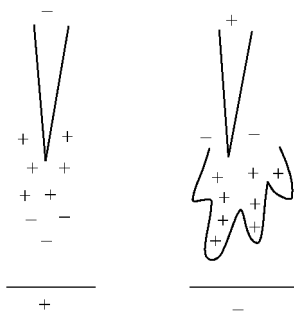


图 6-20 极性对放电的影响

实验结果指出,在低于 10 个标准大气压时,击穿电压几乎随大气压线性增加。图 6-21 给出了甲烷、乙烷、丙烷、丁烷、异丁烷、氮气这六种气体击穿电压随气压的变化而变化的曲线。

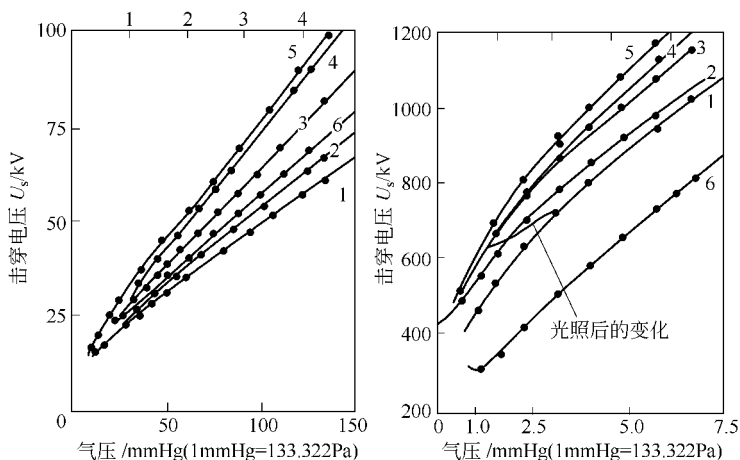


图 6-21 甲烷等气体击穿电压变化曲线

右图中丁烷的曲线因光照变成和甲烷曲线重合

1—甲烷; 2—乙烷; 3—丙烷; 4—丁烷; 5—异丁烷; 6—氮气

③ 湿度的影响。当湿度增加时,电子与水汽碰撞后,可形成不易运动的惯性较大的负离子,因而可使击穿电压升高。

④ 电压作用时间的影响。气体的击穿放电,不仅需要足够的场强,还需要一定的电压作用时间。如果外加电压持续时间很短,则放电电压就要增高。

(4) 放电的类型 静电放电实际上是电压较高、能量较小、在常温常压下的绝缘介质被击穿的过程,下面重点论述气体放电的类型。

① 均匀电场放电。静电放电可按放电电场的不同分为均

匀电场放电和非均匀电场放电两种形式，辉光放电和弧光放电是均匀电场中气体放电的典型形式。在均匀电场放电中，将重点讨论辉光放电和弧光放电。

在很低的大气压下，例如约 1mmHg ($1\text{mmHg} = 133.322\text{Pa}$) 时，能观察到气体辉光放电的现象。方法是：在一长玻璃管两端装上两个电极（见图 6-22），电极上加上几百伏特的电位差，就很容易观察到这种放电。在通过管中的电流作用下，气体在放电中能发出辉光，因此称为辉光放电。气体在管中放电可分为如下几个光区：阴极附近的弱光区——第一暗区；其次是阴电辉光区（简称阴电辉区）；再次是第二弱光区——第二暗区（法拉第暗区）；最后是强阳电辉光区（简称阳电辉区）。阳电辉区占管子的大部分。

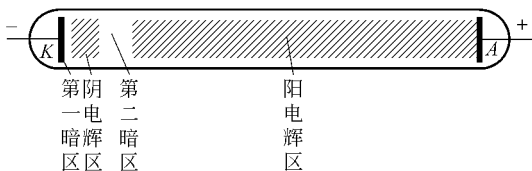


图 6-22 辉光放电

沿放电管的电位降落不是沿管均匀发生的。绝大部分电位降落发生在第一暗区——这是所谓的阴极电位降落（见图 6-23）；以后沿着整个管子的电位降落都十分微小（约为 $1 \sim 2\text{V/cm}$ ）。而且仅在阳极附近才又观察到新的电位跃变——阳极电位降落。

阴极电位降落的大小主要取决于阴极的材料和气体的性质。在电流密度小的情形下，阴电辉仅覆盖着阴极表面的一部分。在此情形下，阴极电位降落的大小与电流强度和气体的压强几乎没有关系；这时，这个阴极电位降落的值，叫做正常阴极位降。对于不同的阴极材料和不同的气体，正常阴

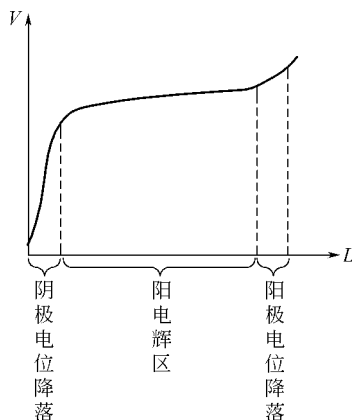


图 6-23 沿放电管的电位降落

极电位降的值详见表 6-3 所列。当电流强度增加时（例如可通过减少外电路电阻来实现），为辉光所覆盖的阴极面积也正比地增加，所以这时阴极表面的电流密度保持不变。当整个阴极全部为辉光所覆盖之后，电流继续增加时阴极电位降也随着增加。由此可见，欧姆定律完全不能应用于辉光放电。在强电流的情况下，阴极发

热，这时甚至能够观察到所谓下降的特性曲线：电极上的电位差随着通过管子的电流强度的增加而减小。为了使放电开始（点燃管子），电位管必须稍大于阴极位降。

表 6-3 正常阴极电位降

单位：V

阴极材料	气 体					
	N ₂	H ₂	He	Ne	Ar	Hg
Na	178	185	80	75	—	—
Cu	208	214	177	220	131	447
Al	179	171	141	120	100	245
Fe	215	198	153	150	131	389
Ni	197	211	158	140	131	275

综上所述，管子里所发生的具体过程如下：将足够的电位差加到电极上时，管子里产生电场，电场将使原来存在于气体中的（即使是很少量的）自由电子和离子被加速。被加速的电子在运动过程中使气体原子发生碰撞电离而产生新的离子，致使电流激烈地增大。接着阴极电位降落起着极其重要的作

用，阴极电位降落是集中在几乎与电子自由程同数量级的这一小空间里。电子在这里得到足以使其碰撞是非弹性碰撞的能量。在这同一区域里，正离子沿着指向阴极的方向被加速，这些正离子与阴极相撞时从阴极表面击出新的电子，这些新电子的出现，又大大地增强了气体的导电性。

在阴电辉区里，电子浓度与正离子浓度相同。但由于电子的迁移率较大，所以气体的导电性能几乎完全是通过电子完成的。阴电辉区中的电离浓度可以提高，例如在压强为 0.05mm 汞柱的水银蒸发中放电时，单位体积内 (1cm^3) 电子的数目能够达到 10^{13} 。因为在这时单位体积内 (1cm^3) 汞原子数为 2×10^{15} ，即约有 $1/200$ 的汞原子被电离了。

弧光放电是均匀电场下气体放电的另一典型形式。将在大气压下的两个通电电极（最常用的是碳电极）接触后立即分开，两极间即可产生弧光放电。放电时两碳极在 $30 \sim 40\text{V}$ 的电压下燃烧，电流强度可高达几十安培，两个电极在放电过程中温度可高达几千摄氏度。在大气压强下阳极温度更高，以致在阳极上形成一个凹陷的坑。经进一步研究后发现，弧光放电所必需的是，在阴极上只要有炽热的一点作为电子源即可，而阳极甚至可以是冷的。

弧光放电具有如图 6-24 所示的伏-安特性曲线，即电流增加时（减小外电阻）电极间的电位差随着减小。

② 非均匀电场放电。除上面讨论的均匀电场放电形式外，非均匀电场中气体放电也是非常重要的，静电放电通常是在非均匀电场中进行的，非均匀电场

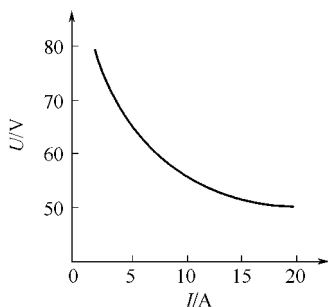


图 6-24 弧光放电的
伏-安特性曲线

中的静电放电通常包括如下三种类型。

- **电晕放电。**所谓电晕放电是属于自激放电的一种。它是在较大压强下，通常是在大气压强下发生的，这时由于两个电极（或其中一个）的表面曲率半径很小，放电间隙中的电场是很不均匀的。气体的电离和发光是在电极附近很窄的一层内发生的；在气体的其他部分导电性是由于两种符号的离子运动的结果。有时电晕放电还伴有嘶嘶声，在黑暗的条件下还可观察到淡紫色的光。

- **刷形放电。**刷形放电是火花放电的一种。其放电通道有很多分支，而不是集中在一点；放电时伴有声光。由于绝缘体束缚电荷的能力很强，其表面容易出现刷形放电。同一带电绝缘体与其他物体之间，有时可发生多次刷形放电。

- **火花放电。**这里所说的火花放电是指放电通道集中的火花放电，即电极上有明显放电集中点的火花放电。火花放电时有短促的爆裂声和明亮的闪光。在易燃易爆场所，火花放电具有很大的危险性。上述非均匀电场静电放电的三种形式如图6-25所示。

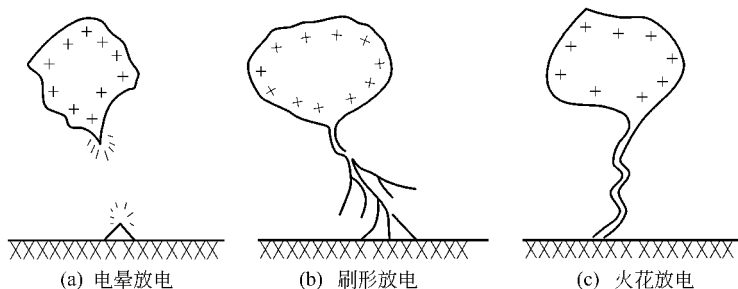


图 6-25 非均匀电场静电放电的一般形式

2. 静电泄漏

带电体的电荷除可通过放电而消散外，另一消散的方式就

是静电泄漏。

(1) 静电泄漏的规律性 绝缘体上静电的泄漏一般地说，有两条途径，一条是通过绝缘体表面，另一条则是通过绝缘体内部进行泄漏。但这两种泄漏分别取决于绝缘体的表面电阻和体积电阻。

静电通过绝缘体本身的泄漏与电容器的放电规律相似，即任一时刻绝缘体上的电量符合下面的规律

$$Q = Q_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

式中 Q_0 —— 泄漏前的电量；

τ —— 泄漏时间常数。

(2) 影响静电泄漏的因素 湿度的影响：吸湿性越大的绝缘体，对静电泄漏的影响也越大。这是由于随着湿度的增加，绝缘体表面凝结成很薄的水膜，在水膜中溶入了空气中的二氧化碳，有时还能溶入绝缘体所析出的电解质，使绝缘体表面电阻大为降低，从而加速静电的泄漏。玻璃表面容易被水润湿，其表面电阻与湿度的关系见表 6-4。石蜡、聚四氟乙烯等不易被水润湿，其静电泄漏受湿度影响较小。

表 6-4 玻璃表面电阻与湿度的关系

相对湿度 / %	电阻相对值	相对湿度 / %	电阻相对值
100	1	60	8×10^2
80	4	50	3×10^4
70	30	40	6×10^6

第二节 静电引起的故障和灾害

一、静电引起的生产故障

1. 静电力学现象引起的生产故障

(1) 静电的力学现象 物体带电后，在其周围空间有电

场。在静电力作用下，轻小物体被吸引或被排斥，如图 6-26 所示。在静电场中，这种吸引力或排斥力按库仑法则，此时带电体单位面积的作用力 F 为

$$F = \frac{1}{2} \times \frac{\sigma^2}{\varepsilon}$$

式中 σ ——带电体的表面电荷密度， C/m^2 ；

ε ——介电常数， $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ 。

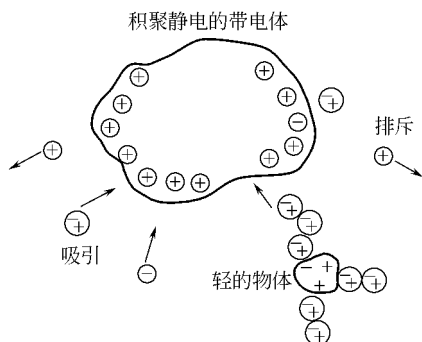


图 6-26 带电体的力学现象

按上式进行计算，静电场的作用力可达到每平方厘米数百毫克，只有磁铁的万分之一大小，因而只能对毛发、纸片、尘埃、粉体等非常轻的物体呈现静电的力学现象。例如，在气候干燥季节，脱毛线衣时毛发倒下或体毛被吸引，或者内衣贴附身体等。

(2) 力学现象引起的生产故障 静电的作用力（以下简称静电力）尽管实际上不过每平方厘米数百毫克，但是由于这种力的作用，在实际生产过程中发生了各种生产故障。

在粉体加工行业，生产过程中产生的静电会降低生产效率、影响生产质量。例如粉体筛分时，由于静电力的作用而吸附细

微的粉末，使筛目变小或堵塞；气力输送时在管道上和管子弯道处贴附粉末造成输送不良；在球磨过程中，由于钢球吸附一层粉末，不但会降低生产效率，而且这一层粉末脱落下来混进产品之中，还会降低产品质量；计量时，由于计量器具吸附粉体还会造成测量误差；粉体装袋时，由于静电斥力的作用，粉体四散飞扬。一般粒子半径约为 $100\mu\text{m}$ 以下时，容易发生生产故障。

在纺织行业及纤维加工的行业，特别是随着涤纶、腈纶、锦纶等合成纤维材料的应用，静电问题十分突出。例如，在抽丝过程中，每根丝都要从直径百分之几毫米的小孔挤出，产生静电较多，由于静电力的作用，会使丝漂动，黏合纠结等，从而降低生产效率和产品质量；在纺纱织布过程中，由于橡胶辊轴与丝、纱摩擦及其他原因产生的静电，可能导致乱纱、挂条、缠花、断头等妨碍正常生产；在织布、印染等过程中，静电力可能吸附灰尘等。一般线的半径约为 $100\mu\text{m}$ 以下时，容易发生生产故障。

2. 静电放电现象引起的生产故障

(1) 静电放电现象 物体带电后，尽管所带的静电量不多，但电位却有数千伏，甚至数万伏之多，有时竟达数十万伏，这样高的电位，一旦超过介质的击穿电场强度（场强，见表 6-5），便会出现放电现象。

静电放电即是带电体上的电荷所产生的电场强度超过其周围介质的绝缘击穿电场强度时，使带电体表面附近空间介质产生电离，因而使带电体上的电荷趋向减少或消失的现象，如图 6-27 所示。静电放电和一般的高压放电原理没有什么差异，多为单次或间歇性放电。放电时，在带电体和接地体之间有离子电流流动，并伴随有破裂声响，发出蓝白色光，辐射出电磁波，发出臭氧等。

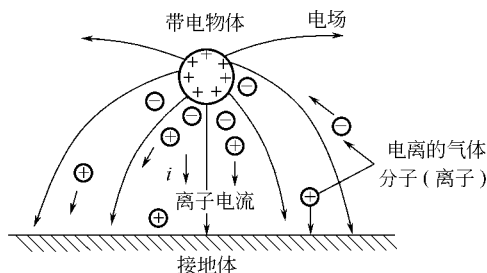


图 6-27 带电体的放电

表 6-5 各种气体、固体、液体的击穿场强 单位：kV/cm

气 体	击穿场强	固 体	击穿场强	液 体	击穿场强
空气	35.5	云母	50 ~ 150	酒精	700 ~ 800
氢气	15.5	铅玻璃	5 ~ 20	四氯化碳	1600
氧气	29.1	长石瓷器	30 ~ 35	二硫化碳	1400
氮气	38.0	电缆纸	6	丙酮	640
二氧化碳	26.2	石蜡	7 ~ 12	苯	1500
一氧化碳	45.5	橡胶	20 ~ 25	二甲苯	1500
氨	56.7	聚乙烯	18 ~ 24	硝基苯	1300
甲烷	22.3	聚氯乙烯	12 ~ 16	甲苯	1300
丙烷	37.2	电木	8 ~ 30	氯仿	1000
乙炔	75.2			变压器油	1000

注：因为是在脉冲电压下的击穿场强，所以数值较高。在任何击穿场强下都必须注意由于介质厚度引起的差异。

由表 6-5 可知，一般气体的击穿场强较固体或液体为小，所以在气体中容易产生放电。有时看起来尽管不存在气体，但是在液体或固体之间仍会有微量的气体，因此这时也容易产生放电。

靠近空气的介质表面上积聚静电荷时，在表面上便产生电场，它的强度为

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$$

式中 E ——表面电场, V/m ;

σ ——表面电荷密度, C/m^2 ;

ε_0 ——真空的介电常数 ($8.85 \times 10^{-12} F/m$)。

在一个标准大气压下, 空气中的电场约在 $35500 V/cm$ 时就击穿而放电, 由上式计算得到表面电荷密度为 $6 \times 10^{-5} C/m^2$ 以上时, 就开始静电放电。

一般空气中介质表面电荷不易移动, 而且表面电荷密度的数量级在 $10^{-5} C/m^2$ 左右, 很少超过 $10^{-5} C/m^2$, 因此, 放电电流较小。如果带电体是导体, 电荷在金属体内就容易移动, 一旦发生放电, 带电体上的电荷会瞬间放光, 放电电流大。

(2) 静电放电引起的生产故障 静电放电引起的生产故障是由于静电放电产生的声光等物理现象和电磁波的电气现象所造成的。

在电子技术行业, 当带电体发生间歇性放电, 一次放电的电荷量为 $10^{-11} \sim 10^{-9} C$, 放电能量为 $10^{-5} \sim 10^{-3} J$ 时, 能量很小, 但也能使半导体元件 MOS-IC 等损坏。而当带电体表面电荷密度为 $10^{-5} \sim 10^{-4} C/m^2$ 时, 将发生火花放电或表面放电。放电时, 在带电体和接地体之间有离子电流流动并辐射出电磁波, 会引起计算机、继电器、开关等设备中电子元件的误动作。另外静电放电产生的电磁波进入无线电通讯设备、磁带录音机等会产生杂音, 从而降低信息质量或引起信息差错。

二、静电引起的电击

电击会对人体心脏、神经等部位造成伤害。电击的严重程度决定于电流大小、通电时间和时刻、通电途径、电流种类, 以及人体特征、人体健康状况和人的精神状况等很多因素。工频电流较长时间通过人体, 数十毫安的电流即可引起人的心室颤动, 中止血液循环而使人丧命。

静电引起的电击电流不是持续通过人体的, 而是由静电放

电造成的瞬间冲击性的电击。对人体的影响一般是痛感和震颤；但有时在生产现场往往会产生指尖负伤或手指麻木等机能损伤；静电电击还会引起工作人员精神紧张使工作效率降低；静电电击可能造成手被轧在滚筒中或从高空坠落等二次灾害。

静电引起的电击，由于放电是脉冲瞬时现象，所以作为电击发生的极限，一般不以电流衡量，而是以带电电位和人体电容来衡量。静电电击有两种情况：第一是带电体向人体放电；第二是人体带电向接地导体放电。

① 带电体向人体放电。当带电体为导体时如图 6-28 所示，在此直线以下为无电击感觉区域，在直线以上的带电电位对人体发生放电，将有 $2 \times 10^{-7} \sim 3 \times 10^{-1} \text{C}$ 以上的电荷流入人体，发生电击。

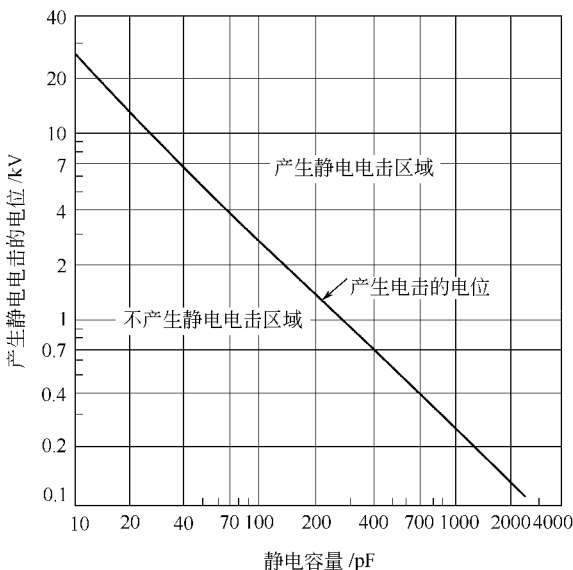


图 6-28 静电容量和产生静电电击的电位关系

带电体是绝缘体，确定发生电极的界限是很困难的。一般认为，电压 10kV，表面电荷密度为 $10^{-5}\text{C}/\text{m}^2$ 的带电绝缘体是可能引起电压的，对于带电情况很不均匀的绝缘体，对于包含有局部低电阻率区域的绝缘体，以及对于近旁有金属导体的绝缘体，也要注意防止静电电击。

② 人体带电向接地导体放电。对于静电，人体相当于导体，放电时其有关部分的电荷一次消失，即能量集中释放，引起灾害的危险性较大。当人体的放电电荷达到 $2 \times 10^{-7} \sim 3 \times 10^{-7}\text{C}$ 以上时会产生静电电击放电，表 6-6 所示为人体带电电位和静电电击程度的关系。由表可知，当人体带电电位（静电电压）为 3kV 左右时，人体即有明显的电击感觉。因此，电击灾害的发生极限定为 3kV。

表 6-6 人体带电电位与静电电击程度的关系

人体带电 电位/kV	静 电 电 击 程 度	备 注
1.0	一点没有感觉	产生微弱的放电声音 (察觉电压)
2.0	在手指的外侧有感觉但不痛	
2.5	放电的部分有针触的感觉,有点哆哆嗦嗦的感觉,但不痛	
3.0	有像刺扎那样的痛感,有针扎的感觉	
4.0	在手指上有微痛感,有针深扎的痛感	
5.0	手掌至前腕有电击的痛感	见到放电的发光 由指尖延伸出放电的 发光
6.0	在手指上有强烈的痛感,电击后手腕觉得有些沉重	
7.0	在手指和手掌上有强烈的痛感,有麻木感	
8.0	手掌至前腕有麻木感	
9.0	在手腕上有强烈的痛感,手有严重的麻木感	
10.0	全手有痛感,有电流流过的感觉	
11.0	手指上有严重的麻木感,全手有强烈的触电感	
12.0	在较强的触电下全手有被狠打的感觉	

注：人体的静电容量为 90pF。

三、静电放电引起的着火、爆炸灾害

1. 静电爆炸和火灾发生的条件

物体带电后，静电总是要泄放掉的。电荷的泄放有两个途径：一是自然逸散，二是不同形式的放电。静电放电是由电能转换成热能的过程，并有可能将可燃物点燃，成为着火或爆炸的火源。

静电放电要成为点燃的火源，必须同时具备以下几个条件：

- ① 有产生静电的来源；
- ② 静电得以积聚，其静电电压足以引起静电放电；
- ③ 静电放电的能量足够点燃可燃的混合物；
- ④ 放电必须在爆炸混合物的爆炸浓度范围内发生。

只有上述四个条件同时满足时，点燃才能发生。从消除静电危害的角度考虑，只要破坏其中的任何一个条件都可以达到防止点燃的目的。

爆炸范围：可燃性物质与氢气（空气）相混合，如果混合的比例不合适，这种混合物是不能着火和爆炸的。只有按适当的比例混合，才能使混合物着火或爆炸，这样的混合物称为爆炸混合物。形成爆炸混合物的最小混合浓度叫爆炸下限；形成爆炸混合物的最大混合浓度叫爆炸上限。低于下限（浓度）和高于上限（浓度）的混合物都不能形成爆炸混合物，在上下限（浓度）之间的浓度范围叫爆炸范围。

表 6-7 所列为某些气体或蒸气与空气混合的爆炸范围。表 6-8 所列为某些粉尘与空气混合的爆炸范围。

2. 最小点燃能量

最小点燃能量又称最小点火能量。在某些生产过程中，常因静电放电引起灾害。那么在生产工艺过程中，从安全角度出发，静电放电火花在什么情况下可以点燃可燃性混合物呢？这

表 6-7 某些气体或蒸气与空气混合的爆炸范围

气体或蒸气名称	爆炸范围 / %	气体或蒸气名称	爆炸范围 / %
乙烯	3.0 ~ 34.0	甲醇	6.0 ~ 36.5
丙烯	2.0 ~ 11.0	乙醇	3.3 ~ 19.0
1-丁烯	1.6 ~ 9.3	乙炔	2.5 ~ 80.0
顺 2-丁烯	1.75 ~ 9.7	乙醚	1.7 ~ 4.8
反 2-丁烯	1.75 ~ 9.7	乙醛	4.0 ~ 57.0
异丁烯	1.75 ~ 9.7	丙酮	2.2 ~ 13.0
1,3-丁二烯	2.00 ~ 11.5	甲苯	1.3 ~ 7.0
甲烷	5.3 ~ 13.90	苯	1.4 ~ 8.0
乙烷	3.1 ~ 15.0	汽油	1.3 ~ 6.0
丙烷	2.4 ~ 9.5	一氧化碳	12.5 ~ 74.2
正丁烷	1.86 ~ 8.41	二硫化碳	1.0 ~ 50.0
异丁烷	1.8 ~ 8.44	氢气	4.1 ~ 74.2
环己烷	1.3 ~ 8.4		

注：%为可燃气体所占体积的百分比。

表 6-8 某些粉尘与空气混合的爆炸范围

粉体名称	爆炸下限 / (g/m ³)	粉体名称	爆炸下限 / (g/m ³)
锆粉	40	乙烯树脂粉	40
镁粉	20	合成橡胶粉	30
铝粉	35	环六甲亚甲基四胺粉	15
钛粉	45	无水邻苯二甲粉	15
硅粉	160	酪粉	45
铁粉	120	水粉	40
锰粉	210	纸浆粉	60
锌粉	500	淀粉	45
虫胶粉	15	大豆粉	40
丙烯醇粉	35	小麦粉	60
苯酚粉	35	砂糖粉	19
聚乙烯粉	25	硬质橡胶粉	25
醋酸纤维粉	25	肥皂粉	45
木材粉末	40	硫磺粉	35
尿素粉	70	煤粉	35

需要解决两个问题，一是找到最小点燃能量，二是找到现场工艺条件下所能出现的最大静电放电能量，然后将两者加以比较。如果后者比前者小得多，则现场工艺对静电是安全的；若两者接近或后者比前者大则是危险的，应采取防静电措施。可见最小点燃能量是判断静电危险、保证安全生产和改进工艺的重要依据。

最小点燃能量是指在常温和常压下，将可燃性物质和空气混合，在最敏感的条件下，即各种影响因素，诸如可燃物的性质和浓度、电极的形状和火花间隙、电路参数等都处于各自的最敏感条件时，引燃所需的最低能量叫做最小点燃能量。最小点燃能量可采用电容火花放电法、接点脱离放电法、金属线熔断法等方法测量。如果发火方法不同，所得最小点燃能量往往差异很大。其中电容火花放电法将有 95% 以上的能量消耗于发火过程中，且这种方法和静电火花放电的机理基本相同，因此，采用电容火花放电法较多，其能量按下式计算

$$W = \frac{1}{2} CV^2$$

式中 W ——放电能量；
 C ——电路的静电电容；
 V ——放电时的火花电压。

在可燃气体、易燃液体中，轻油最小点燃能量为 0.2mJ、乙炔的最小点燃能量只有 0.019mJ，氢的也只有 0.019mJ，二硫化碳的只有 0.009mJ 等。工业粉尘的最小点燃能量多在 10 ~ 100mJ 之间。各种可燃性气体、蒸气和空气混合及各种可燃性气体与氧混合的最小点燃能量可分别参考表 6-9 和表 6-10。粉尘爆炸性混合物的最小点燃能量可参考表 6-11。一般发表的数据没有规定粒子的大小，而合成树脂粉尘颗粒大小与最小点燃能量之间的关系见表 6-12，减小微粒的大小或是增加细粉的百

分率，可以减少最小点燃能量。另外有许多炸药的最小点燃能量低达 0.001mJ。

表 6-9 可燃性气体、蒸气的引燃危险性（和空气混合）

物 质 名 称	闪点 /	爆炸极限体积/%		最小点燃 能量 /mJ
		下限	上限	
丙烯乙醛(丙烯醛)	< - 17.8	2.8	31	0.13
丙烯腈	- 1	3.0	17	0.16
乙炔	(气体)	1.5	100	0.019
乙醛	- 37.8	4	60	0.37
丙酮	- 19	2.5	13.0	1.15
氮杂环丙烯(氮丙环)	- 11	3.6	46	0.48
异丁烷	(气体)	1.8	8.5	0.52
异丙胺	- 37.2 ^①	2.0	10.4	2.0
异丙硫醇	—	—	—	0.53
异戊烷(2-甲基丁烷)	- 51	1.3	7.6	0.21
乙烷	(气体)	3.0	15.5	0.24
乙胺	< - 17.8	3.5	14.0	2.4
乙基-甲基-酮-(2-丁酮)	- 6.1	1.8	11.5	0.53
乙烯	(气体)	2.7	36	0.07
环氧乙烷、氧丙环	- 20 ^①	3.0	100	0.06
烯丙基氯	- 31.7	2.9	11.2	0.77
2-氯丙烷	- 32.2	2.8	10.7	1.55
氯丁烷	- 9.4	1.8	10.1	1.24
氯丙烷	< - 17.8	2.6	11.1	1.08
过氧化 ²⁻¹⁻ 丁基	18.3 ^①	—	—	0.41
甲酸甲酯	- 18.9	5.0	23	0.4
醋酸乙酯	- 4.4	2.1	11.5	1.42
醋酸乙烯	- 7.8	2.6	13.4	0.7
二异丙醚	- 27.8	1.4	21	1.14
二乙醚	- 45	1.7	48	0.19
环丙烷	(气体)	2.4	10.4	0.17
环己烷	- 20	1.2	8.3	0.22
环戊二烯	—	—	—	0.67
环戊烷	- 42.0	1.4	—	0.54
二氢吡喃	- 15.6	—	—	0.36
二甲基醚	—	2.0	27	0.29

物 质 名 称	闪 点 /	爆炸极限体积/%		最小点燃 能量 /mJ
		下限	上限	
二甲亚砷	95 ^①	2.6	28.5	0.48
2,2-二甲基丁烷 (新己烷)	- 47.8	1.2	7.0	0.25
氢	(气体)	4.0	75.6	0.019
噻吩	> - 1	—	—	0.39
四氢呋喃	- 14.4	1.5	12	0.54
四氢吡喃 (氧己环)	- 20	—	—	0.22
三乙胺	- 6.7 ^①	1.2	8.0	0.75
2,2,3-三甲基丁烷	—	1.0	—	1.0
2,2,4-三甲基戊烷 (异辛烷)	- 12.2	1.0	6.0	1.35
二硫化碳	- 30	1.0	60	0.009
新戊烷 (2,2-二甲基丙烷)	< - 7	1.3	7.5	1.57
乙烯基乙炔	(气体)	2	100	0.082
1,3-丁二烯	(气体)	1.1	12.5	0.13
丁烷	(气体)	1.5	8.5	0.25
呋喃	- 40 ^①	2.3	14.3	0.22
2-丙醇 (异丙醇)	11.7	2.0	12	0.65
丙烷	(气体)	2.1	9.5	0.25
丙烯	(气体)	2.0	11.7	0.28
氧化丙烯甲基氧丙环	- 37.2	1.9	37	0.13
丙炔 (甲基乙炔)	(气体)	1.7	—	0.11
己烷	- 21.7	1.1	7.5	0.24
庚烷	- 3.9	1.0	6.7	0.24
1-庚炔	—	—	—	0.56
苯	- 11.1	1.2	8.0	0.2
戊烷	- 49	1.4	7.8	0.22
2-戊烯	- 18	1.4	8.7	0.18
甲醛二甲醇缩乙醛 (二甲氧基甲烷、甲缩醛)	- 17.8 ^①	—	—	0.42
甲醇	11.1	5.5	36	0.14
甲烷	(气体)	5.0	15	0.28
甲基环己烷	- 3.9	1.2	—	0.27
硫化氢	(气体)	4.0	45.5	0.068

① 由开放式测定的闪点。其他是用密闭式测定。

表 6-10 各种可燃性气体的引燃危险性 (和氧混合)

物 质 名 称	闪 点 /	爆炸极限体积 / %		最小点燃 能量 / mJ
		下限	上限	
乙炔	(气体)	2.8	100	0.0002
乙烷	(气体)	3.0	66	0.0019
乙烯	(气体)	3.0	80	0.0009
二乙醚	(气体)	2.0	82	0.0012
氢	(气体)	4.0	94	0.0012
丙烷	(气体)	2.3	55	0.0021
甲烷	(气体)	5.1	61	0.0027

表 6-11 粉尘云和粉尘层的最小点燃能量

单位: mJ

物 质	粉尘云	粉尘层	物 质	粉尘云	粉尘层
紫苜蓿	320	—	铀	45	0.004
烯丙树脂	20	80	谷物	30	—
铝	10	1.6	乌洛托品	10	—
硬脂酸铝	10	40	铁	20	7
芳基磺酰肼	20	160	镁	20	0.24
阿司匹林	25	160	锰	80	3.2
硼	60	—	甲基二甲基丙烯酸酯	15	—
纤维素	60	—	坚果壳	50	—
醋酸纤维素	10	—	聚甲醛	20	—
肉桂	40	—	季戊四醇	10	—
烟煤	60	560	酚醛塑料	10	40
可可粉	100	—	苯二甲酐	15	—
玉米	30	—	沥青	20	6
软木	35	—	聚乙烯	30	—
二甲基对苯二甲酯	20	—	聚苯乙烯	15	—
二硝基甲基苯甲酰胺	15	24	米	40	—
铁锰齐	80	8	紫苜蓿种子	40	—
硬沥青	25	4	硅酮 (RR' SiO)	80	2.4
肥皂	60	3.840	尿素树脂	80	—
大豆	50	40	钒	60	8
硬脂酸	25	—	乙烯基树脂	10	—
糖	30	—	小麦粉	50	—
硫磺	15	1.6	木材粉	20	—
钍	5	0.004	锌	100	400
钛	10	0.008	锆	5	0.0004

注: 表中所列被试粉尘全部过 200 目筛, 粒径小于 $47\mu\text{m}$, 同时经处理后水分含量小于 5%。

表 6-12 合成树脂粉尘颗粒大小与最小点燃能量之间的关系

粉尘颗粒大小/ μm	最小点燃能量/mJ	粉尘颗粒大小/ μm	最小点燃能量/mJ
710 ~ 1680	> 5000	105 ~ 179	< 10
355 ~ 709	250 ~ 500	53 ~ 105	< 10
180 ~ 354	50 ~ 250	< 53	< 10

3. 静电放电的形式和引燃性

带电体产生的静电放电主要可分为在大气中产生的空间放电和沿着带电体表面产生的表面放电两大类。

(1) 空间放电 带电体产生的空间放电可分为下列三种放电形式：电晕放电、刷形放电、火花放电。

① 电晕放电。一般发生在电极相距较远，带电体或接地体表面有突出部分或棱角的地方。因为在其尖端电场强度较大，能将附近的空气局部电离，出现微弱的发光放电，并产生嘶嘶的微弱声音，一般时间是持续的，如图 6-29 所示。电晕放电能量较小，故引起灾害的概率是比较小的。但是，其正电晕放电与负电晕放电相比，正电晕放电的点燃率高。

② 刷形放电。这种类型的放电是由弱的电晕放电进一步电离，或由带电量大的绝缘体与接地导体之间的放电。它的发光形态呈树枝状，如图 6-30 所示。此种放电伴有“啪”的强

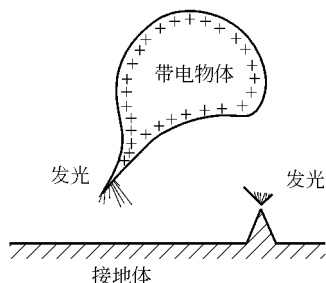


图 6-29 电晕放电

在突出部位上容易产生的电晕放电

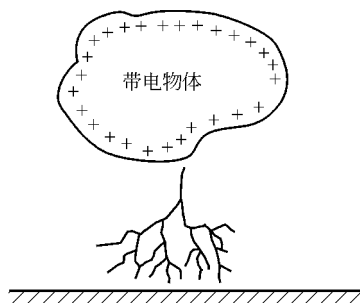


图 6-30 刷形放电

由电晕放电进展为刷形放电

烈破坏声响，一般在带电量大的绝缘体与平滑形状接地体间容易发生。它成为引火源或静电电击原因的概率比电晕放电要高。

③ 火花放电。火花放电是指在带电体和接地体的形状都比较平滑，彼此的间隔较小的情况下，在两电极间的气体被击穿，成为通路而又没有分叉的放电。放电时伴随有强烈的发光和破坏声响，如图 6-31 所示。

火花放电一般是带电体为金属等导体时，导体与接地体之间容易产生像拉成一根线一样的放电。它的放电能量大，而且是瞬间放出，因此成为引火源或静电电击的概率高。其火花放电能量是

$$W = \frac{1}{2} QV = \frac{1}{2} CV^2$$

式中 W ——放电能量；
 Q ——导体上的电荷量；
 V ——导体的电位；
 C ——导体的电容。

常用带电体的电容见表 6-13。

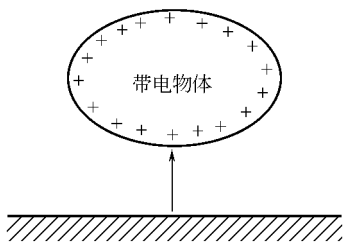


图 6-31 火花放电
在形状平滑、放电距离小时容易产生的火花放电

表 6-13 常用带电体的电容

物 体	电容 / pF
小的金属件 (匙、软管、喷嘴)	10 ~ 20
小的容器 (水桶、50L 的圆筒)	10 ~ 100
中等的容器 (250 ~ 500L)	50 ~ 300
反应容器、大型容器	100 ~ 1000
人体	100 ~ 300

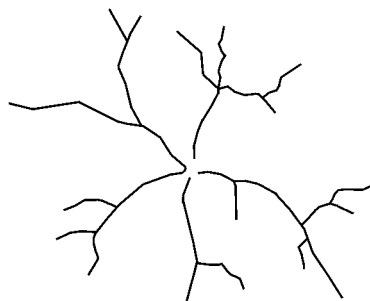


图 6-32 表面放电

在带电薄膜表面上产生的表面放电

(2) 表面放电 表面放电是指带电绝缘体接近接地体时，几乎在与带电体和接地体之间产生放电的同时，沿绝缘体表面发生的放电。它具有固定形状的发光（呈树枝状，一旦形状形成时基本不变），如图 6-32 所示。它的放电能量大，与火花放电相同，成为引火源的概率也较高。在下列条件下容易

产生表面放电：一是绝缘体带电量特别大时；二是在带电绝缘体的背面的邻近处有接地体时。

四、静电安全界限

静电产生的火灾和爆炸的安全界限是用静电放电能量来表示的。其放电能量必须比可燃性物质的最小点燃能量大。由于放电能量不易求得，所以由静电引起的爆炸和火灾的安全界限用等于最小点燃能量的放电能量来决定，或用等于最小点燃能量的带电状态（带电电位和带电量等）表示。此安全界限只是一个大致标准，因为它还受放电空间的特性和接地体的形状等其他因素影响。

1. 导体的灾害界限

带电体是导体时，如果发生放电，在一般情况下，是将所储存的静电能量几乎全部变成放电能量而放出。因而在导体上所储存的静电能量等于最小点燃能量时，则可认为是有产生爆炸和火灾的危险的，所以产生爆炸和火灾的界限可以考虑为相当于储存最小点燃能量的带电电位和带电量。

带电体是导体时，其储存的静电能量可用下式表示

$$W = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} QV = \frac{Q^2}{2C}$$

式中 C ——导体的电容；

V ——带电电位；

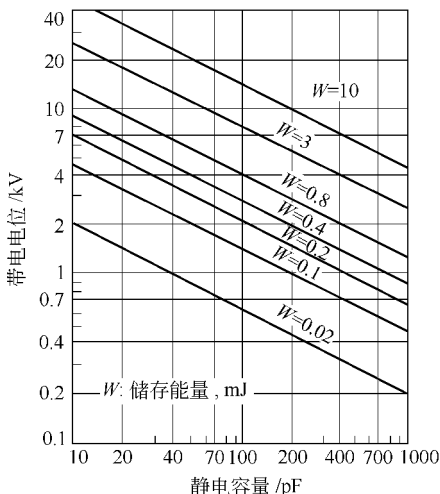
Q ——带电电荷量。

带电导体储存的能量等于放电能量即等于最小点燃能量时，如果用 $W_{\min}$ 表示混合物的最小点燃能量，则导体的危险电位和危险电量可用下式表达

$$V = \sqrt{\frac{2W_{\min}}{C}}$$

$$Q = \sqrt{2CW_{\min}}$$

按照 $W = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} QV = \frac{Q^2}{2C}$ 可以绘制成如图 6-33 所示的曲线以便应用。



2. 绝缘体的灾害界限

带电体的电导率在 10^{-8} S/m 以下或表面电阻 $10^9 \Omega$ 以上的绝缘体产生放电时，由于其上电荷不能一次全部放完，其静电场所储存的能量也不能一次集中释放，因此绝缘体的放电产生爆炸和火灾的界限，不能用带电导体的计算公式求得。要准确确定绝缘体的危险电位是很困难的，不过可以肯定，静电电位 30kV 的绝缘体在空气中放电时，放电能量可达数百微焦耳，足以引起某些爆炸性混合物发生爆炸。

应当强调指出，由于绝缘体的静电及其放电情况都比较复杂，为了鉴别绝缘体静电的危险性，必须重视现场运行经验。并特别注意下列情况：带电状态很不均匀的场合；带电量和极性容易发生变化的场合；在绝缘体中有局部的电导率高的部位，并且这种绝缘体是带电的；在带电的绝缘体里面或近旁有接地的导体。

第三节 静电的控制与消除

静电最为严重的危险是引起爆炸和火灾。根据静电作为火源引起爆炸和火灾的必要和充分的条件，防止静电灾害的要求可归纳为以下几点。

- ① 防止或减少静电的产生；
- ② 设法导走或中和产生的电荷，使它不能积聚；
- ③ 防止高电场产生的、有足够能量的静电放电；
- ④ 防止爆炸性混合气体的形成。

上述四条只要做到任何一条，都可以防止静电引起的爆炸和火灾。前三条实际上是控制静电的产生和积聚，是消除静电危害的直接措施，第四条是消除或减轻周围环境引起爆炸和火

灾的危险，是防止静电危害的间接措施。

一、防止形成危险性混合物

静电引起爆炸或火灾的条件之一是有爆炸性混合物存在。为防止静电灾害，可采取以下控制措施。

1. 以不可燃介质代替可燃介质

在许多化工生产的工艺过程中使用着有机溶剂和易燃液体。如果不影响工艺过程的正常进行，最好以不可燃介质代替可燃介质，这样做既经济又实惠，不仅防止了静电的引燃，而且杜绝了一切着火的根源。例如，汽油和煤油对洗涤设备或设备零部件上的油脂污物有着良好的去污性能。但是，汽油和煤油即使在正常温度下也容易产生蒸气，在其表面附近与空气形成爆炸性混合物，而且汽油和煤油的闪点和燃点都很低，加之两者又都比较容易产生静电，使用它们作为洗涤剂会带来很大的危险性。为此，建议采用危险性较小的三氯乙烯和四氯化碳等溶剂作为洗涤剂；但是，应当充分注意其毒性以及注意其与火焰接触时生成光气的可能性。最好采用不可燃混合溶剂进行化学脱脂，见表 6-14。油和碱相互作用形成水状乳浊液，就能清洗掉物体表面的脏物。

表 6-14 化学脱脂时使用的不可燃混合剂

组 分	混合剂内组分含量 / (g/L)						
	1	2	3	4	5	6	7
苛性钠或苛性钾	80 ~ 100	110 ~ 150	20 ~ 30	—	—	—	3 ~ 5
磷酸钠	30 ~ 40	—	70 ~ 80	30 ~ 35	80 ~ 100	20 ~ 25	2 ~ 4
碳酸钠	—	30 ~ 50	—	20 ~ 25	—	20 ~ 25	40 ~ 50
水玻璃	—	3 ~ 5	5 ~ 8	5 ~ 10	10 ~ 15	—	20 ~ 30
彼得洛夫接触剂	40 ~ 50	—	—	—	—	—	10 ~ 10
活性剂 OII-7 或 OII-10	—	5 ~ 7	5 ~ 7	3 ~ 5	—	5 ~ 7	—

注：混合剂 1、2、3 适用于黑色金属，4、5 适用于铜及其合金，6、7 适用于铝

及其合金。在温度为 70 ~ 80 下，脱脂时间为 10 ~ 15min，用压缩空气搅拌溶剂。

目前，已广泛采用电化及超声波脱脂的方法使零件和容器净化。化学脱脂时使用的溶剂成分及电化脱脂条件见表 6-15。溶剂成分及超声波脱脂的条件见表 6-16。

表 6-15 化学脱脂时使用的溶剂成分及电化脱脂条件

项 目	组分含量/ (g/L)				
	1	2	3	4	5
苛性钠或苛性钾	40 ~ 50	30 ~ 40	—	—	—
碳酸钠	60 ~ 70	20 ~ 30	—	5 ~ 10	25 ~ 30
磷酸钠	10 ~ 15	50 ~ 60	40 ~ 50	30 ~ 40	25 ~ 35
水玻璃	3 ~ 5	8 ~ 10	—	3 ~ 5	—
活性剂 OII-7 或 OII-10	—	—	—	—	1 ~ 3
脱脂的条件					
电流密度/ (A/cm ²)	5 ~ 10	3 ~ 8	3 ~ 5	3 ~ 5	5 ~ 7
溶剂温度/	70 ~ 80	70 ~ 80	70 ~ 80	70 ~ 80	70 ~ 80
脱脂时间/min	5 ~ 10	5 ~ 10	1 ~ 3	0.5 ~ 1	0.2 ~ 2

注：1 和 2 适用于黑色和有色金属，2 适用于铜及其合金，3 适用于锌及其合金，4 适用于锌、铝及铜等的合金，5 用于交流电使金属脱脂。

表 6-16 溶剂成分及超声波脱脂的条件

项 目	1	2	3
组分含量/ (g/L)			
磷酸钠	30	3	3
碳酸钠	10	—	3
活性剂 OII-7 或 OII-10	3	3	3
脱脂的条件			
溶剂温度/	55 ~ 60	55 ~ 60	40 ~ 50
脱脂时间/min	3 ~ 5	1 ~ 3	1 ~ 3

注：1 适用于黑色金属，2 适用于铝，3 适用于黄铜和青铜。

电化和超声波脱脂时，不仅不会发生燃烧和爆炸，而且提高了劳动生产率。

对于粉体、粉尘越小，粒子总面积越大，在空气中越能起

氧化反应。微粒小于 $300\mu\text{m}$ 时，火花放电能使生产中的粉尘着火。因此，用颗粒状材料（微粒大于 $300\mu\text{m}$ ）代替粉尘，这是防止静电危害的一种措施。必须指出，粒子大小决定于工艺流程的要求，不能任意改变。

2. 降低爆炸性混合物浓度

为防止爆炸混合物的形成，可以使爆炸混合物的浓度低于爆炸下限，或高于爆炸上限，因此，可以在爆炸和火灾危险场合采用通风装置或抽气装置及时排出爆炸性混合物，使混合物浓度不超过爆炸下限，防止静电火花引起爆炸或火灾。

易燃液体在其表面上由于蒸发产生的蒸气爆炸性混合物的数量是同温度密切相关的，所以，易燃液体还有一个爆炸温度极限。爆炸温度极限也有爆炸温度下限和爆炸温度上限之分。当温度在此下限和上限范围之内时，液体蒸发产生的蒸气爆炸性混合物的浓度正好在该液体的爆炸浓度极限范围之内，液体的爆炸温度下限即该液体的闪点。例如：车用汽油的爆炸温度是 $-39 \sim -8$ ，灯用煤油的是 $+40 \sim +86$ ，酒精的是 $+11 \sim +40$ ，苯的是 $-14 \sim +12$ ，甲苯的是 $+1 \sim +31$ ，乙醚的是 $-45 \sim +13$ 等。显然，把温度控制在爆炸温度极限范围之外也是一条防止静电引起爆炸和火灾的途径，但是，爆炸性混合物是按照可燃性物质的特性、使用量、使用条件以及温度、压力和湿度等环境条件而变化的，因此，控制温度的办法不能作为惟一的安全措施。

3. 减少氧化剂

这种方法的具体做法是在含有可燃气体，蒸气或粉尘的容器内充填氮、二氧化碳或其他不活泼的气体，减少气体、蒸气或粉尘爆炸性混合物中氧的含量，消除燃烧条件，防止爆炸和火灾。一般情况下，混合物中氧的含量不超过 8% 时即不会引起燃烧。

图 6-34 表明汽油的爆炸极限与其蒸气混合物中不活泼气体含量之间的关系。图中各曲线与垂直线的上、下交点即汽油在相应情况下的爆炸上限和爆炸下限。由图可知，当空气中不活泼气体含量为零时，该汽油的爆炸极限为 1.4% ~ 7.3%；随着空气中不活泼气体的含量逐渐增加，汽油的爆炸上限降低、爆炸下限升高；当不活泼气体的含量增加至某一数值时，汽油的爆炸上限与爆炸下限合为一点，这时混合物中的含氧量称为最小点燃含氧量；当不活泼气体的含量进一步增加，混合物中的含氧量低于最小点燃含氧量时，则不会引起混合物燃烧。由此可见，充填氮或二氧化碳等不活泼气体可以起到防止静电爆炸和火灾的作用。

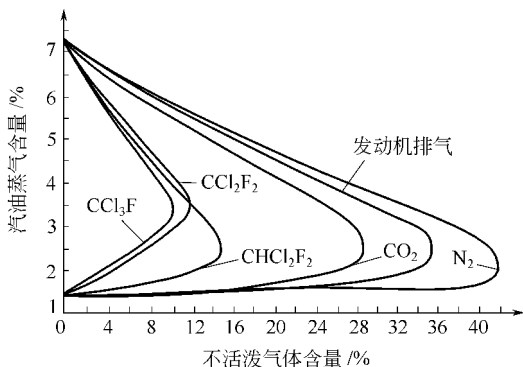


图 6-34 汽油含有不活泼气体时的爆炸极限

但是，对于镁、铝、锆、钽等粉尘爆炸性混合物，充填氮或二氧化碳是无效的。这时，可充填氩、氦等惰性气体防止爆炸和火灾。

二、工艺控制

工艺控制系指从工艺上采取相应的措施，用以限制和避免静电的产生和积聚，是消除静电危害的方法之一，应

用较广。

1. 利用静电序列的材质搭配

同一物质和两种不同物质摩擦，可能带有不同数量和极性的电荷。例如，按表 6-17 所列的情况，用钢铁和聚氯乙烯摩擦，钢铁带有正电荷；若用腈纶和钢铁摩擦，钢铁就会带负电荷。利用这种关系有两种方法可以消除静电。一种方法是适当地选择搭配容器、管道、漏斗、辊轴等的材质，就可以使物料在这个地方产生的静电到另一个地方自行消失。这种方法，在纺织、气力输送等摩擦产生静电的场所可以人为地使生产物料与不同材料制成的设备发生摩擦，并且与一种材料制成的设备摩擦时物料带正电，而与另一种材料制成的设备摩擦时物料带负电，以使得物料上的静电荷相互抵消，从而消除静电的危险。例如：氧化铝粉经过不锈钢漏斗时静电电位为负 100V，经过虫胶漏斗时静电电位为正 500V，如采用适当选配两种材料制成的组合漏斗，则静电电位可降低为零。又如，气动输送使物料经过不同材质的管道，产生相反极性的电荷，达到物料自身中和的目的。另一种办法为材料混合的方法，即适当选用材料混合比，使材料与其他物质摩擦分离时不会显现明显的静电效应。例如，含有 40% 尼龙和 60% 达科隆的混合纤维同镀铬表面摩擦时不会产生静电积聚。

表 6-17 一些物质的静电序列

(+)														(-)					
玻	腈	尼	尼	羊	绸	人	棉	纸	麻	钢	聚	硬	醋	合	聚	丙	聚	聚	聚
		龙				造					苯	橡	酸	成	酯		乙	氯	四
		纤									乙		纤	橡	纤	纶	烯	乙	氟
璃	纶	维	龙	毛		丝	纱			铁	烯	胶	维	胶	维		烯	烯	乙

采用以上两种方法时应注意选用的材料应能适应工艺上的要求，而且有一定的导电性，以防设备本身积聚危险的静电，

并应注意物料变化是否改变带电极性等。

基于上述原理，在存在摩擦而且容易产生静电的场合，生产设备宜于镶配与生产材料相同的材料。在某些情况下，还可以考虑采用位于静电序列中段的金属材料制成生产设备，以减轻静电的危害。

2. 控制流速

降低摩擦速度或流速等工作参数可限制静电的产生。例如，油品在管道中流动所产生的流动电流或电荷密度的饱和值与油品流速的二次方成正比。可见控制流速是减少静电荷产生的一个有效办法，然而这种方法与目前石油工业发展的高速装运还有矛盾。一些国家和单位进行研究的结果，是对最大流速加以限制。

实验归结出如下安全流速的公式

$$v = 0.8 \sqrt{\frac{1}{d}} \quad (\text{m/s})$$

式中 v ——平均流速， m/s ；

d ——管道直径， m 。

以此公式计算不同管径的允许最大流速见表 6-18。

表 6-18 不同管径允许最大流速

管径/mm	最大流速/(m/s)	管径/mm	最大流速/(m/s)
10	8	200	1.8
25	4.9	400	1.3
50	3.5	600	1.0
100	2.5		

由于静电的危险程度受许多因素影响，因此表 6-18 内数值不是绝对的。如果有长期运行经验证明，也可以提高速度。但是，在此同时要注意防止因高速形成喷雾的状态。此外，对乙醚输送，在管径不大于 12mm 以及对二硫化碳输送管径不大

于 24mm 时，二者的流速均不宜超过 $1 \sim 1.5\text{m/s}$ 。如果管径增加，则流速要降低。其他如脂类、酮类和醇类等流体流速允许达到 10m/s 。

粉体在管道内输送时，带电微粒流动形成的粉流电流大致与气流速度的 1.8 次方、管径的 1 次方和粉体载荷量的 1 次方成正比。欲改变工艺参数（如气流速度或载荷量），以改变生产率时，可按照与输送液体类似的方法，确定新情况下的输送参数（如管径）。应当注意，因为粉体输送产生静电的情况相当复杂，确定粉体输送的允许参数是很困难的，所以，必须根据长期运行经验，确定相应输送过程允许的参数。

在皮带传送等其他产生静电的工艺过程中，也应该根据运行经验得出某些允许的工艺参数；改变工艺过程时，应注意这些工艺参数的要求。

3. 增强静电电荷的衰减

在产生静电的任何工艺过程中，总是包含着静电的产生和逸散两个区域。在静电产生区域，主要指带电过程（分离出相反极性的电荷）；在静电逸散区域，是指电荷自介质材料上泄漏或松弛而逸散。这些现象的本质是电荷守恒定律。基于电荷守恒定律，两个区域的存在，可以采用不同的预防静电危害的措施。

在一些生产工艺过程中，静电产生和逸散区域见表 6-19，但是，由于静电起电过程比较复杂，上述划分并不是绝对的。

表 6-19 静电产生和逸散区域

过 程	发 生	逸 散
-----	-----	-----

1. 液体沿着管道流动	直线管道	接受容器
2. 液体在系统内流动	微过滤器	管道、接受容器
微过滤器-管道-接受器		
3. 气动输送颗粒材料	给料机、管道	料斗、料仓、除尘器
4. 多箱干燥器内干燥	网栅、箱子四角	箱壁中间部分
5. 薄膜材料经辊轴的传送	辊轴	收卷薄膜

由于工艺过程、工作参数或生产物料性质的改变可能改变产生静电区域和静电逸散区域的分布。

在采取预防静电的措施时，应首先查明电荷的产生和逸散区域，以便做到有的放矢。例如，在料仓、料斗、接受容器等静电逸散区域，装设导电性网栅格子、叶板等是为了增大介质同接地设备的接触面积，对于消除静电的危害是有效的。而若装设在管道内或个别带电区域，电荷相反会增多，还会增加其火花放电的危险性。有些工艺过程中，静电的产生和逸散是同时存在的，在这种情况下，就要依哪种过程占优势来确定静电的产生区域和静电的逸散区域。

液体或粉体通过管道最后输运到储槽、储罐后，物料速度为零，此时电荷为逸散过程，基于流速的降低，静电逸散过程加强的特点，目前，常在管道中加装缓冲器，这样可以大大消除物料在管道内流动时积聚的静电。

用于液体输送管道末端的缓冲器的直径和长度可按下式计算：

$$D_s = D_g \sqrt{2v}$$

$$L_s = 2.2 \times 10^{-11} \varepsilon_r \rho$$

式中 D_s ——缓冲器直径，m；
 L_s ——缓冲器长度，m；
 D_g ——输送管道直径，m；
 v ——液体流速，m/s；
 ε_r ——液体相对介电常数；

ρ ——液体电阻率。

缓冲器适用于输送电阻率为 $10^9 \sim 10^{12} \Omega \cdot m$ 的液体介质，对电阻率更高的液体，缓冲器将变得太大而不便采用。例如，对某种燃料油的输送，液体的流速 $10m/s$ ，流经容器为 $10L$ 的缓冲器后，其上 95% 的静电得到消除。可见采用缓冲器消除静电的效果是显著的。

4. 消除产生电荷的附加源

在工艺过程中，产生静电的区域（如输送管道），在目前情况下要想做到不产生静电是很困难甚至是不可能的，但是，对产生电荷的附加源，在很多场合是能预防的。

物料进入储存容器内还可能有电荷的分离而继续产生电荷，如下述几种情况。

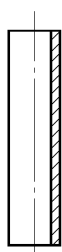
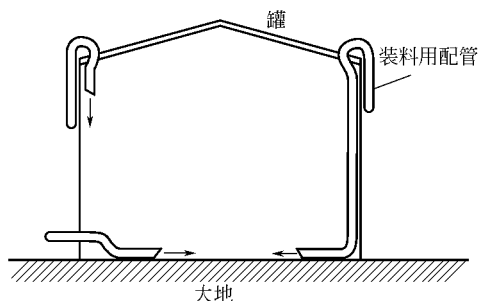
- ① 液流的喷溅；
- ② 容器底部积水受到注入流的喷溅；
- ③ 在液体或粉体内夹入空气或气泡；
- ④ 粉尘在料斗或料包内冲击；
- ⑤ 液体或粉体的混合和搅动。

为了避免液体在容器内喷溅，应从底部注油或将注油管延伸至容器底部或使液流沿器壁流入，而且其方向应有利于减轻容器底部积水或沉淀物的搅动，以减少静电的产生。图 6-35 所示为减少液体飞溅的装料方法。

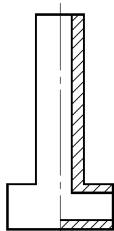
图 6-35 减少液体飞溅的装料方法

为了减轻从油罐顶部注油时的冲击，减少注油时产生的静电，改变注油管头的形状能收到一定的效果。图 6-36 所示为几种注油管头示意。经验表明：T 形、锥形、 45° 斜口形注油管头都能降低油罐内油面的电位。

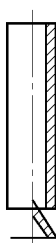
图 6-36 注油管头示意



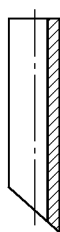
圓筒形



T形



锥形



斜口形

石油产品中含水或不同油品相混并通过压缩空气时，静电的发生量将增大。实验证明，油中含水 5%，会使起电效应增大 10 ~ 50 倍。油品通风调和是十分危险的。某厂一个 5000m³ 油罐，罐内先已装有 40t 航空煤油，之后装柴油并通风调和，在通风一分多钟便发生爆炸。因此，石油产品的生产输运要避免水、空气与油品以及不同油品的相混合，或采取相应的安全措施。

为了降低罐内油面电位，过滤器不应离注油管太近。

对于粉体的输送，应防止尘垢落入料斗；料斗应具有斜面，减少冲击；粉体内的杂质应去除掉，因为各种杂质的沉降速度不一致，会形成二次分离，产生带电尘雾，在悬浮的粒子中易造成火花放电。

此外，不允许把不接地的孤立导体置于料斗内或其他容器

内，防止因静电感应造成火花放电。

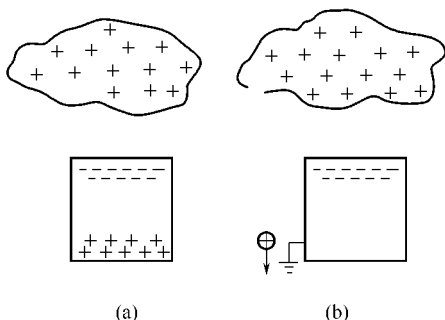
三、静电接地

1. 静电的消除和接地

在凡是讲到关于静电危害的文献中，差不多都把接地作为一种消除静电的手段。“接地”能不能解决静电问题呢？这要具体情况具体分析。

(1) 本来带有静电但与地绝缘的导体 如果把这个导体接地，那么静电荷必然向大地泄放，直到与大地等电位。在这个意义上来说，静电被消除了，解决了问题。

(2) 本来不带静电但与地绝缘的导体 如果与另一个带电体接近，它就会被感应而形成偶极状态 [参看图 6-37 (a)]，一个原来没有接地设备的油罐，被带电云层感应后，产生这种情况。此时，在油罐上将会出现两个静电潜在危险：一个是云层对油罐的电击，另一个是油罐远离电荷的对地放电。油罐若有良好的接地设备，它被带电云层感应之后，产生图 6-37 (b) 所示的情况。在图 6-37 (b) 中，远端电荷对地放电的潜在危险被消除了，但带电云层对油罐电击的可能性，并没有因为油罐有了良好接地设备而减少。所以，从这个意义上来说，接地只解决了部分静电问题。



(3) **带电高绝缘材料的接地** 把一个带有静电的高绝缘材料直接用导线接地，是不能有效地导走静电的。因为，如果可以把静电瞬时导走，它也就不是高绝缘材料了。把一个带电的高绝缘材料与金属板做大面积接触是不是能够导走接触面上的静电呢？可以先看一个静态模拟过程（见图 6-38）。

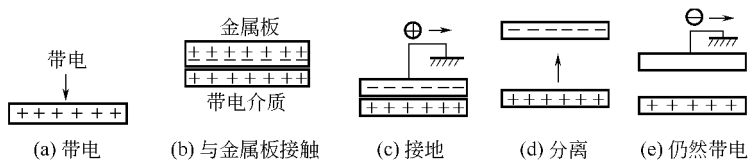


图 6-38 介质的静电带电及接地

① 用摩擦或电晕等方法使高绝缘材料表面带电，由于表面电阻率极高，所以用导线直接接地并不能导走静电荷，如图 6-38 (a) 所示。

② 用一个很平的金属板与带电体表面接触，由于固体表面从微观来看是极其凹凸不平的，所以两板真正接触的只是极少数的几个点。在真正接触的一些点上，可以建立起由材质本身固有性质决定的接触电势双电层，而没有真正接触的部分，则在金属板与原带电介质之间建立起以感应为基础的偶极层，如图 6-38 (b) 所示。

③ 如果绝缘材料本身带正电，那么当金属板接地之后，除去那些被偶极层和双电层束缚的负电荷之外，其余的电荷都被导入大地之中，此时，介质上所带电荷并没有因为与接地金属接触而导走，如图 6-38 (c) 所示。

④ 当金属板与带电介质分开时，偶极层和双电层均被

破坏，正负电荷分别保留在介质和金属的表面，如图 6-38 (d) 所示。

⑤ 如果此时金属仍然接地，则金属板所带的负电荷即被导入大地之中，而介质表面的正电荷却仍然保留，如图 6-38 (e) 所示。

从以上的静态模拟分析来看，不管是把带电介质直接接地，还是用良好接地的金属板与带电介质“大面积”接触，都解决不了带电介质上的静电消除问题。

介质薄膜运行经过金属辊轴（例如塑料橡胶胶片等生产工艺）和液体介质流经金属管道（例如燃料油的输送）这种类型的动态过程，也都是要带电的。但是把金属辊轴和金属管道良好接地，同样解决不了介质上所带的静电问题。下面可用介质薄膜运行经过金属辊轴时的带电和接地的关系为例来说明（见图 6-39）。

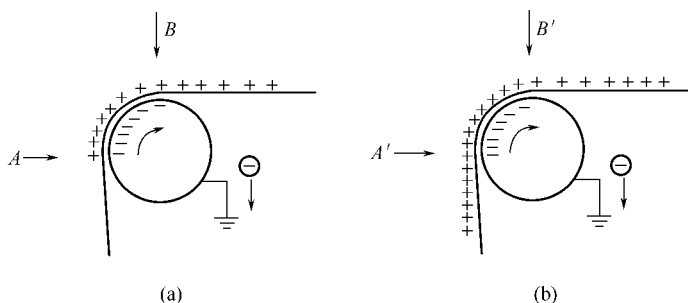


图 6-39 介质薄膜运行经过金属辊轴时的带电和接地的关系

图 6-39 (a) 所示为原来介质薄膜不带电的情况。当它运行至 A 点与辊轴相遇，两种材料一开始接触，即按照它们固有的特性和接触紧密程度，产生一定的接触电势并在从 A 到 B 的范围内建立起相应的双电层。当介质薄膜运行到离开 B 点

时与辊轴脱离，此时双电层被破坏。由于介质本身的高电阻性质，所带正电荷不能移动，而在介质表面保留下来表现为静电，辊轴上与介质带走的正电荷数量相对应的负电荷则经接地装置被导入大地之中。辊轴接地并没有解决介质薄膜本身的静电问题。

图 6-39 (b) 所示为介质薄膜本来带有静电的情况。当它运行到 A' 点时与辊轴相遇，这时，会由于介质表面和辊轴表面微观上的凹凸不平，以及介质薄膜本来带电的不均匀性，而使相遇的两个表面出现两种情况。一种情况是，一部分表面虽然经过了辊轴，但并未真正接触。此时，可以想像，原来就不带有电荷的部位，会由于感应的原因与辊轴形成偶极层并束缚一部分反向电荷，但在介质离开辊轴时，又把偶极层束缚的这部分反向电荷释放掉。所以，最后的净结果，也等于没有任何变化。另一种情况是，其余的表面在经过辊轴时，真正地接触上了。此时，原来带有电荷的部位，仍然会根据介质与辊轴固有的性质而形成和原来电荷数目一样的双电层，并且在离开 B' 点时恢复原状；那些原来不带电荷的部位，也会按照介质和辊轴的固有性质形成新的双电层，并和图 6-39 (a) 中叙述的过程一样，在离开 B' 点时带走介质上的电荷。这样，可以发现，不管介质本来带电与否，它每经过一个辊轴，电荷总数总要增加，直到饱和为止。这就是介质薄膜在运行过程中的静电积聚现象，也是越靠后面静电越严重的原因。

从以上的分析可以看出，无论使辊轴怎样良好接地，也不能把介质薄膜上的静电导走。

液体介质在管道内流动带电与管道接地的情况，与上述固态薄膜类似，也是双电层、分离、带电、积聚的过程。

2. 接地和跨接

(1) 接地 接地是将带电物体上的静电荷通过接地导线

引入大地，避免出现高电位，消除物体对地的电位差。当带电体是良导体，这是简单而有效的办法。但用接地的办法导走带电绝缘体上的静电电荷是很困难的。一切金属部分都要牢靠接地，原因是孤立导体会因接触或感应而带电，带电后放电具有瞬时性，即不论积累了多少电荷都会瞬间放光。因此孤立导体放电危险性极大，必须接地并且要接牢。

(2) 跨接 跨接是用导线将物体与物体进行电气上的连接，消除物体间的电位差。如图 6-40 所示，是接地和跨接的实例。

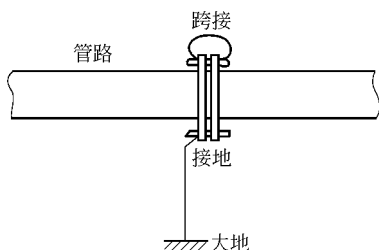


图 6-40 接地和跨接

(3) 接地电阻值 由于静电电流为微安级 (10^{-6} A)，若要求接地体造成的电

位差不超过 10V，那么接地电阻最大可以取到 $10^6 \Omega$ 。如果把电流取到 10^{-4} A，电压取到 0.1V，再考虑到土壤干燥等原因、容易造成接地电阻不稳定，会有引起灾害的危险，则接地电阻可取到 $10^2 \Omega$ 以下。因此静电的接地电阻取在 $10^2 \sim 10^6 \Omega$ 范围内是合适的。

但是，接地如果不仅在于防止静电带电，而且兼作防雷保护、电气漏电保护等，则接地电阻应按防雷等级及电器漏电保护等要求接地而共用。

(4) 接地的对象 接地并非对任何物体都适用，它仅在物体为静电导体场合有效。接地是使物体所带的静电向大地泄漏所采取的手段。在非导电场合，由于所带的静电不能向大地泄漏，故进行接地是无意义的。所谓静电导体和以通常的电气材料制成的导体不同，它是指不能产生较大电位差的物体。

具体地说，无论物体是固体还是液体，只要该物体的任何

一部分的电导率为 $1 \times 10^{-6} \text{ S/m}$ 以上, 则该物体都称为静电导体。而电导率为 $1 \times 10^{-10} \text{ S/m}$ 以下的物体, 可以断定其为静电非导体或绝缘体, 电导率在大于 $1 \times 10^{-10} \text{ S/m}$ 而小于 $1 \times 10^{-5} \text{ S/m}$ 范围内的固体和液体则可以断定为静电的亚导体。

另一方面, 从摩擦带电的过程来说, 物体的表面是很重要的, 即使就接地而言, 也应着眼于物体的表面电阻。当物体表面电阻率为 $10^9 \Omega$ 以下时, 可判断其为静电导体。表 6-20 所列物体电阻和采取接地措施后的防静电效果。

表 6-20 物体电阻和采取接地措施后的防静电效果

项 目	电阻率 / (Ω · m)					
	10 ⁸	10 ¹⁰	10 ¹²	10 ¹⁴		
电导率 / (S/m)	10 ^{- 8}	10 ^{- 10}	10 ^{- 12}	10 ^{- 14}		
表面电阻率/Ω	10 ⁹	10 ¹¹	10 ¹³	10 ¹⁵		
接地物体的带电性	无	低	一般	高	很高	
防止带电性能顺序	A	B	C	D	E	
通过接地防止带电的可能性	可能	中 间 区 域			不可能	
		产生电荷少, 能防止带电	规定静置时间, 能防止带电	规定静置时间, 能部分防止带电		
必要的防静电措施	只要作一般的接地即可		需采取接地以外的措施			
接地效果	大			小		

(5) 接地方法

① 固定设备的接地 静电接地和一般电气设备的接地相比, 不需要过高的技术。重要的是要可靠地接地, 不要疏忽。接地线应能充分承受机械的变形和机械运转引起的振动, 例如使用具有足够机械强度的 1.25mm^2 截面的突心线, 绞线等接地为宜。

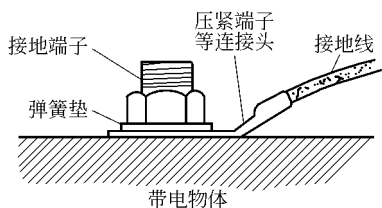


图 6-41 螺母作为接地端子的实例

来说接地线的安装最好采用锡焊，电焊如图 6-41 所示的压紧端子螺母紧固方式。安装时最需注意的是要充分加大接触面积、接触压力，将接触电阻控制在数欧姆以下。当接地的对象为非金属物时，最好采用接触面积为 20cm^2 以上的金属板，或在物体和金属板之间采用导电橡胶。

另一方面，接地线和大地的连接应尽可能采用接地棒；当不能采用接地棒时，最好采用与金属水管、蒸气管、建筑物的钢筋等相连，或与埋入地下的金属结构物直接相连等方法。

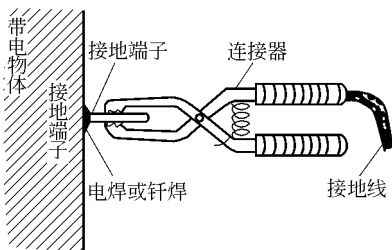
对于将装置安装在接地的固定平台或埋于地面时，只要电阻不过分大，就无须进行防静电的专门接地。

接地是防止静电带电的一种有效手段，但它不能防止、抑制静电的产生，而且采用接地方法，也不能防止绝缘体带电。因此，接地并非是防止灾害的必要及充分的条件。安装接地线后，对其需作定期检查，检查接地线有否损伤，螺栓有否松动，同时掌握接地电阻的变化。这些在安全管理上都是十分重要的。

② 移动设备的接地 移动设备、台车等不能像通常固定设备那样的接地，此时可采用结构如图 6-42 所示的连接器具进行接地。作为接地器具，除上述外，还有夹钳或电池夹子、钳式插入连接器等。

图 6-42 接地用连接器具的实例

此外，作为具体例子，例如温度计、液体取样容器等如图 6-43 所示，可使用混入铜丝、导电纤维或金属纤维的绳索进



行接地。对台车等，可用电阻率为 $10^8 \Omega \cdot \text{m}$ 以下的导电性橡胶制成的导电性滚轮进行接地。目前我国的导电性橡胶制品有：驱动皮带、软管、轧棍等，可供静电接地使用。

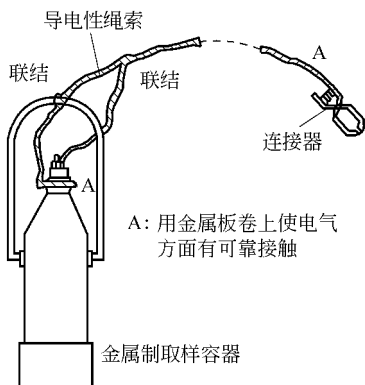


图 6-43 取样容器的接地

对移动式设备和装置等而言，平时作永久性接地的情况较少，总是频繁地进行接地和断开。所以，需要注意接地的时间、地点，因为在存在溶剂、可燃性气体等场所进行接地时，它有可能成为点火源。

③ 旋转部件的接地 一般的旋转设备，其轴承部分

所使用的润滑油通常为绝缘物，如果旋转部件不接地，就会带大量的静电。因此，对其接地应使用导电性润滑油，或使用碳刷、金属触头等。由于旋转部件静止时和旋转时的接触电阻不同，故必须测定旋转状态的泄漏电阻，需要验证其为 $10^{-6} \Omega$ 以下。而且润滑油在使用过程中的特性会变化，往往也会带电。轴承部分有发生放电的可能性。所以，对旋转设备的接地状态作定期检查是不可缺少的。

四、增湿

带电介质在自然环境中放置，所带静电荷会自行逸散。逸散的快慢（一般用半衰期来衡量）与介质的表面电阻率或体电阻率大有关系。而介质的电阻率又与环境的湿度有关。例如，醋酸纤维素（纤维）在相对湿度为 50% 时，表面电阻率为 $1.3 \times 10^{11} \Omega \cdot m$ ，而相对湿度为 65% 和 80% 时，表面电阻率分别为 $5.7 \times 10^{10} \Omega \cdot m$ 和 $1.2 \times 10^{10} \Omega \cdot m$ 。很显然对于醋酸纤维素来说，相对湿度为 80% 时的半衰期比 50% 时要快得多。

静电逸散的快慢还与带电介质是否直接接地有关。表 6-21 和图 6-44 所示是用带电介质片基在相对湿度为 75% 左右时做出的实验结果。介质片基的静电荷是用电晕的方法喷上去的。在适当的位置，测定不同时间的介质片基带电电位的相对值（见表 6-21），表中不接地是指悬空情况，接地是指用金属轮把介质片基直接接地的情况。图 6-44 中的 1 和 2 分别是上述两种情况下的放电曲线。可以看出，要使介质片基所带电荷自然衰减一半，不接地时为 200s 以上，接地时也需超过 100s。这说明只靠环境条件而不加人为的措施，即使把带电介质良好的接地，也不能达到消除静电的目的。

表 6-21 带电介质的自然放电

时间 /s	电位/V (接地)	电位/V (不接地)	时间 /s	电位/V (接地)	电位/V (不接地)
0	650	640	50	480	555
5	620	610	100	390	512
10	590	600	200	285	470
20	550	585			

所以在有静电危险的场所，在工艺条件许可时，可以安装空调设备、高湿度空气静电消除器、加湿器，也可用水蒸气或洒水等办法来提高空气的相对湿度，达到消除静电的目的。下

面着重谈一下高湿度空气静电消除器。

高湿度空气消除静电的基本原理是：用略高于介质表面温度的、近于饱和的高湿度空气吹向带电介质表面，在相互接触的一瞬间，使高湿度空气在介质表面达到露点而凝水，利用凝结水膜的低电阻率使静电导走，导走静电之后，水膜又会很快蒸发掉。

高湿度空气静电消除器装置的原理如图 6-45 所示。压缩空气从左方送入，先经过一个浸在恒温水池 1 中的预热螺旋管 2 预热至一定温度，再进入蒸发器 3，使空气在水中鼓泡，然后带着饱和水汽出来，由于水分不断蒸发，出来的饱和空气的温度略低于水池温度，再经过热螺旋管 4 加热以使空气略欠饱和，最后经喷头 5 的各个小孔喷出。水池温度一般维持在高于室温 30℃ 左右，这样温度的高湿度空气，一经与室温条件下的介质薄膜接触就会立刻在表面凝聚一层极薄的水雾膜。由于水分子的极性性质和高介电常数，以及溶解在水中的二氧化碳（这在空气中是必然存在的），故大大地降低了介质薄膜的表面电阻，在有接地的条件下，可以迅速地把静电导走。但是，对于孤立的带电介质，空气增湿以后，虽然其表面上能形成水膜，但没有泄漏静电的途径，对消除静电也是无效的；而且，在这种情况下，一旦发生放电，由于能量的释放比较集中，放电火花能量更大。

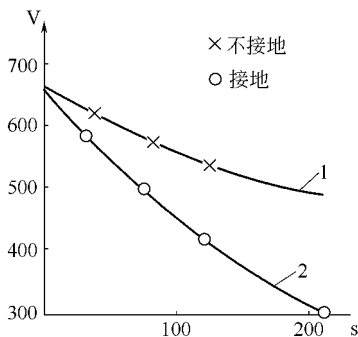
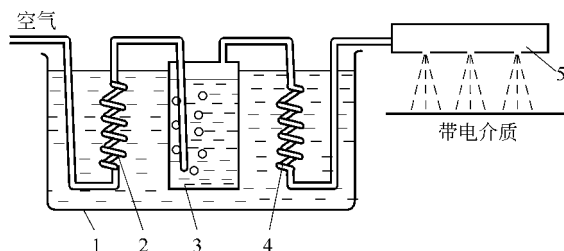


图 6-44 带电介质自然放电曲线

图 6-45 高湿度空气静电消除器装置原理

1—恒温水池；2—预热螺旋管；3—蒸发器；



4—过热螺旋管；5—喷头

增湿主要是增加静电沿介质表面的泄漏，而不是增加通过空气的泄漏。因此，对于表面容易形成水膜，即容易被水润湿的介质。如醋酸纤维素、硝酸纤维素、纤维橡胶等，增湿对消除静电是有效的；而对于介质表面不能形成水膜，即不能被水润湿的介质，如纯涤纶、聚四氟乙烯、聚氯乙烯等，由于增湿在它们表面露化而形成的水，是以不连续的小水滴的形式出现的，所以除非形成水膜的厚度是以克服表面张力的作用而形成连续相，否则消除静电的效果不大。

增湿与否需根据生产要求确定。从消除静电危害的角度考虑，保持相对湿度在 70% 时效果较好。

五、化学防静电剂

防静电剂也叫做防静电添加剂。防静电剂是化学药剂，具有较好的导电性或较强的吸湿性。因此在容易产生静电的高绝缘材料中，加入防静电剂之后能降低材料的体积电阻或表面电阻，加速静电泄漏，消除静电危险。

使用防静电剂是从根本上消除静电危险的方法，但是某种产品或某种材料的使用，是否能够加入和加入什么类型的化学防静电剂，要看最终的使用目的和物料的工艺状态，例如在纺织行业，可以使用各式各样的防静电剂；在胶片行业，防静电剂的使用就受到很大的限制，因为它要求透明度，化学稳定性

和不能使胶片粘连等，因此，具有颜色、能引起灰雾和强烈吸湿性的防静电剂都不能使用；在电气制造业，则一般不能使用化学防静电剂。

在化工行业和石油储运中使用防静电剂也要看不同的对象区别对待，成本、毒性、腐蚀性和使用场合的有效性，都是要考虑的内容。例如：许多表面活性剂都具有一定的防静电效果，但不能用于食品包装的聚乙烯薄膜生产中；橡胶生产的静电现象十分严重，但除去导电炭黑外，未见有使用化学防静电剂的报道，因为化学防静电剂的表面活性性质，往往使橡胶发生黏合不牢和起泡等现象；石油要使用化学防静电剂，必须充分考虑每年的消耗量和成本，而对于悬浮的粉状或雾状化学物质，任何防静电剂都无济于事。

在早期阶段出现的化学防静电剂，大多是无机盐和简单的表面活性剂。无机盐是靠其与水较低的平衡蒸气压，而表面活性剂是由其具有亲油亲水基团捕集空气中的一部分水分子而起作用的。总之，它们都是靠吸湿来达到减少绝缘材料的表面电阻以消除静电的。在相当长的一段时间里，化学防静电剂都是围绕着表面活性剂这种形式发展的，到目前为止，在数量上仍占主要比重。只是近十年来才发展了无机半导体，电解质高分子成膜物质及有机半导体高聚物等新型的化学防静电剂。

1. 化学防静电剂的类型和性质

(1) 无机盐类 多数是与水有合适的平衡蒸气压的易吸湿性碱金属和碱土金属的化合物。例如：硝酸钾、氯化钾、氯化钡、醋酸钾等。应该提到的是这些盐类往往是和甘油并用。

(2) 表面活性剂类 这类防静电剂又可分为离子型和非离子型两大类。

① 离子型中主要包括以下几类。

a. 阴离子型。阴离子型防静电剂的特点是制造工艺简单、

价格便宜、腐蚀性小、吸湿性强，极少量的这种物质（一般只有千分之一二或更少）就可以达到防静电的效果。有不少纺织工业中使用这种防静电剂。

b. 阳离子型。由于阳离子防静电剂溶解后是酸性，所以腐蚀性较大，用途不如阴离子广泛。但是有把季铵植酸盐用于燃料油防静电的例子。

c. 两性型。这种类型的防静电剂，最突出的特点是它的溶解性不受溶液 pH 值的限制，即使在等当点也无妨碍，只是价格较高，所以使用得较少。

② 非离子型中主要包括以下两类。

a. 聚乙二醇型。一种是以多个醚键相结合的高级醇环氧乙烷加成物；另一种是以多个醚键相结合的聚乙二醇脂肪酸酯。

b. 多元醇型。是指在像甘油、季戊四醇等多元醇分子上附有高级脂肪酸类的憎水基团等。

非离子型的防静电剂。是靠醚键或羟基作为亲水基团的，它们的防静电效果不如离子型，但由于化学稳定性好，没有腐蚀作用，而且价格便宜，所以使用的场合逐渐广泛。

(3) 无机半导体类 这类物质主要是指无机半导体盐和炭黑，它们具有很好的防静电效果，而且导电性能基本不随温度变化，化学稳定性也好，多见于胶片生产工艺中，也偶见于把导电炭黑用于橡胶的添加剂。

(4) 电解质高分子成膜物类 这类物质一般都是表面活性剂。与前面提到的表面活性剂不同之处是不需要与其他成膜物共同使用，而本身就具有不饱和基团单体。

(5) 有机半导体高聚物类 一些由 α 、 β 不饱和二元酸和羧酸乙烯酯共聚而成的高聚物，由于广泛地形成 π 键，而具有半导体的性质，用这种高聚物作为防静电剂，或者用不饱和

二元酸与苯乙烯共聚物作为防静电剂，都可以收到良好的效果。

2. 实际使用的化学防静电剂举例

(1) 用于聚酯薄膜——涤纶片基的防静电剂 烷基二苯醚磺酸钾盐（简称 DPE）是用于涤纶薄膜防静电较有成效的一种化学防静电剂。经过实验证明，在相对湿度为 65% 的环境下，使用 DPE，可使涤纶薄膜的表面电阻率从 $10^{15} \Omega \cdot \text{m}^2$ 降低到 $10^{11} \Omega \cdot \text{m}^2$ 的数量级，湿度为 60% 时，也可降到 $10^9 \Omega \cdot \text{m}^2$ 的数量级以下。这已经能够满足某些工业对涤纶薄膜防静电的要求。

(2) 用于塑料的防静电剂 一般来说，涂层型的防静电剂经过洗涤之后，防静电效果会大为降低。最理想的情况是内加型的表面活性剂，它可以掺入到合成物质之中，在表面的一层起防静电作用。在表面层被洗掉之后，由于亲油亲水平衡的原因，仍然能从内部渗至表面，而保持其防静电的效果。

(3) 用于纤维的防静电剂 用于纤维的防静电剂种类最多，绝大多数为表面活性剂。其中以阴离子和季铵盐两种类型为最好，这一点从表 6-22 可以明显地看出。表中的数据是以布样的形式在 20 和相对湿度为 65% 条件下测得的相对电阻值，表面活性剂的加入量为 0.2%。

表 6-22 各种表面活性剂的防静电效果

表 面 活 性 剂	表面电阻率 / ($\Omega \cdot \text{m}^2$)			
	涤纶	尼龙	腈纶	醋酸纤维素
空白对比（未处理）	$> 10^{10}$	7×10^{10}	$> 10^{10}$	$> 10^{10}$
脂肪醇硫酸酯钠盐	2×10^6	7×10^7	2×10^6	5×10^7
烷基磷酸酯有机盐	6×10^6	5×10^8	5×10^6	1×10^8
季铵盐型阴离子	9×10^6	8×10^7	4×10^6	8×10^7
高级酸环氧乙烷加成物	5×10^7	8×10^8	2×10^7	6×10^9

六、静电消除器

静电消除器是指将气体分子进行电离产生消除静电所必要的离子（一般为正、负离子对）的装置，其中与带电物体极性相反的离子向带电物体移动，并和带电物体的电荷进行中和，从而达到消除静电的目的。它已被广泛应用于薄膜、纸、布、粉体等行业的生产中。但是使用方法不当或失误，会使静电效果减弱甚至导致灾害的发生，所以必须掌握静电消除器的特性和使用方法。目前的静电消除器有以下几种。

- ① 自感应式静电消除器；
- ② 外接电源式静电消除器；
- ③ 放射线式静电消除器；
- ④ 组合式静电消除器。

1. 自感应式静电消除器

自感应式静电消除器是一种最简单的消静电装置，它没有外加电源，是由接地的若干支非常尖的针、电刷或细电线作消电电极和其支架等附件组成。放电针自感应静电消除器如图 6-46 所示。使用时针尖对准带电介质，放在距表面 $1 \sim 2\text{cm}$ 的地方，或者将针插入带电液体介质的内部都可以达到消除静电的目的，并且无需其他附属设备。

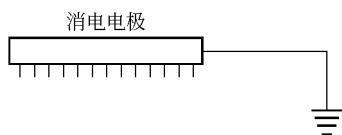
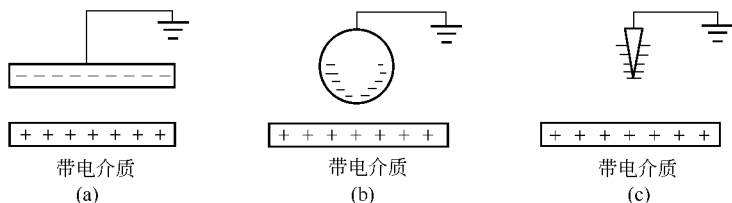


图 6-46 放电针自感应
静电消除器

(1) 消电原理 自感应式静电消除器为什么能够起消除静电的作用呢？可参考图 6-47，并做如下分析。

图 6-47 不同电极形状感应出的电场强度

图 6-47 (a) 所示为用一块与带电介质大小相同的接地金



属平板对准带正电荷的介质，此时感应出来的负电荷均匀地分布在金属板上，电荷密度与带电介质相同，形成对应的偶极层。图 6-47 (b) 表示用一个接地小球对准带电介质，感应出来的电荷密度大于金属平板的情况。若改用图 6-47 (c) 所示的以接地针尖对准带电介质，则感应出来的电荷都集中在针尖那样一个小小的面积上，因此电荷密度极大，因而显示了很高的电场强度。这个强电场，可以使针尖形成电晕而使周围的空气电离。被电离的空气离子，受带电介质与针尖之间电场力的作用，把相反符号的一种离子推向带电介质的表面。这样，带电介质表面的静电荷就被中和掉了。但是，要注意针尖周围的强电场，是由带电介质本身的电场而来的，因此，介质表面静电荷降低到一定的程度以后，这种作用就没有了。所以，使用这种装置不能完全把静电荷消除干净，总要保留一定数值的静电压。保留静电压的大小，与针的尖锐程度和针尖距带电介质的远近等因素有关。一般来说，针越尖、距离越近效果越好。

在带电介质上平行拉一根极细的金属丝，或用导电橡胶做成的锯齿形或导电纤维制成的刷形来代替整个排针，可以达到同样效果。原因是在金属丝、锯齿形尖端、导电纤维周围也可以形成电晕。

(2) 性能及影响因素 自感应式静电消除器的性能通常用两个指标来衡量。一个是电晕电流。电晕电流越大，表明单

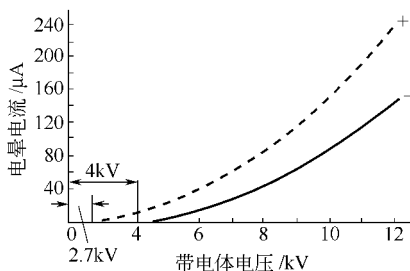
位时间内消除掉的静电荷数目越多，消除器的效果就越好。另一个是临界电压。所谓临界电压，是指能够使消除器针尖起电晕作用的最低电压。这个数值越小，最后剩余的静电压就越小，因此消除器的效果也越好。

影响上述两个指标的因素很多。例如带电体本身的静电压大小、带电体所带电荷极性、放电针之间的距离、消除器与带电体之间的安装距离、保护罩或保护杠的尺寸等等。下面分别予以讨论。

① 带电体的极性和电压的影响。在放电针上被感应出来的电晕极性与带电体的电荷极性相反。电晕的强度则取决于带电体的电压。图 6-48 所示为不同极性的带电体电压值 (kV) 对电晕电流 (μA) 和临界电压 (kV) 的影响。这个图是用以下条件作出的：消除器长度 500mm，针尖与带电体的距离 25mm，放电针的直径为 3mm 而长度为 30mm。图中虚线是带电体荷正电的情况，实线是荷负电的情况。可以看出，正电晕和负电晕的效果是不同的。在其他条件完全相同的情况下，负电晕比正电晕要强许多，但两种极性的电晕电流，都随带电体的电压的升高而加大，也就是说，消除静电的速度都随带电体电压的升高而加大。还可以看出，带电体荷正电时，电晕电流趋向于零的电压值，即临界电压值，大约是 2.7kV；而带电体荷负电时，这个数值要升高为 4kV。所以，对于所使用的这个自感应式静电消除器和装置的具体条件来说，最好的效果也只能把静电消除到 2.7kV（带电体荷正电）或 4kV（带电体荷负电）。至于几十微安或一二百微安的电晕电流，对于消除一般工业中的静电来说，已经是足够了。

图 6-48 不同极性的带电体电压值对电晕电流和临界电压的影响

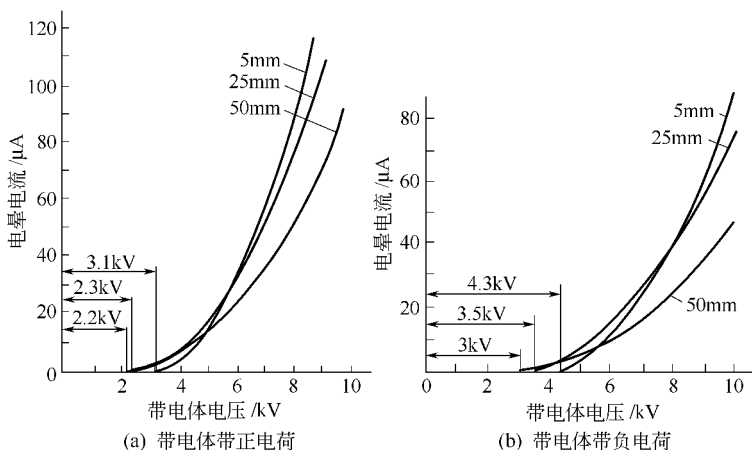
② 放电针间距离的影响。放电针间距离的大小，既影响



电晕电流也影响临界电压。减小放电针间距离（也就是加大放电针密度）相当于增加静电荷移向电极通道的数目，因此就这一点来说，会使电晕电流增加。但是，过多的放电针数目，会产生两种不利的效应，一个是放电针间的距离越小，产生电晕所需的临界电压值越高；另一个是在带电体电压较低时放电针密度过大反而会使电晕电流降低。图 6-49 (a) 和图 6-49 (b) 所示说明了这个问题。这两个图都是在消除器长度为 30mm 的相同条件下作出的。三个不同的参量是针尖距离为 5mm、25mm 和 50mm。可以看出，当带电体荷正电时，把放电针间距离从 5mm 加大到 50mm 时，可使临界电压值从 3.1kV 降为 2.2kV。带电体荷负电时，也可以从 4.3kV 降为 3kV。除此之外，还可以看到图中三条曲线的交叉，这说明带电体电压低时，放电针间的距离小，电晕电流反而低，特别是放电针间的距离小到 5mm 时更是这样。这是由于过多放电针密集在一起，相当于减小了针尖的曲率。另外，针与针之间太近，相同极性的电场互相影响，反而降低了针尖的电场强度。因此，在带电体电压较低时，电晕电流会有所降低。从这两个图中可以

图 6-49 放电针间距离的影响

看出，当带电体电压较低时，针间距离大，针数少者效果好，而当带电体电压较高时，针间距离小，针数多者效果好。放电

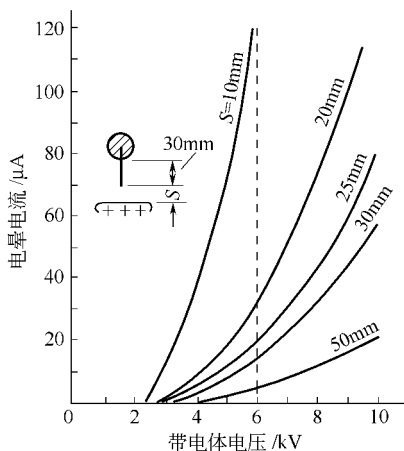


针越尖越细消电效果越好。一般直径不应超过 $0.5 \sim 1\text{mm}$ ，针尖角度不应超过 60° ，放电针可用不锈钢丝、钨丝等材料制成，针长可取 $10 \sim 50\text{mm}$ ，针间距可取 $10 \sim 30\text{mm}$ ，沿直线排列。

③ 消除器与带电体间安装距离的影响。安装自感应式静电消除器时，针尖与带电体间的距离是很重要的。安装距离远，效果差。距离近，电晕电流的效果可以成倍甚至几十倍地增长。图 6-50 反映了这一事实。这个图的基本实验条件是：消除器长度 200mm ，放电针长度 30mm ，放电针间的距离也是 30mm 。整个实验是在带电体荷正电的情况下做出的。从图中可以看到，除去发生电晕的临界电压值随安装距离加大而升高外，电晕电流值随安装距离的减小而急速增长（注意图中 6kV 处的虚线）。因此，在安装这种消除器时，应使它与带电

图 6-50 安装距离的影响

体的距离尽可能地小，以便取得较好的效果。一般放电针与带电体之间的距离原则上在 $10 \sim 50\text{mm}$ 范围内选择，最好不超



过 20mm。

④ 保护罩或保护杠材质和尺寸的影响。在制作自感应式静电消除器时，为了保证放电针不被碰坏，或者不被针尖刺伤人体，往往在装置上加有保护罩或保护杠（见图 6-51）。

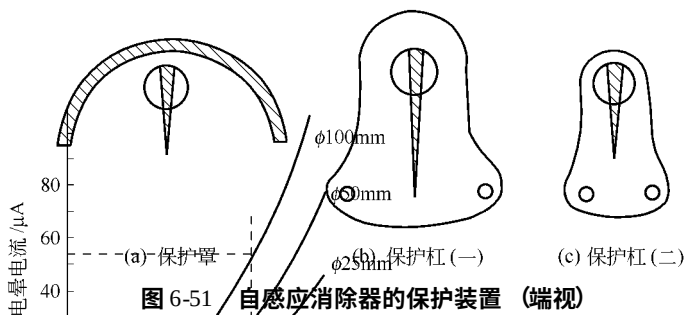


图 6-51 (a) 所示为半圆形的保护罩，图 6-51 (b) 中两个下角的圆形截面是两根保护杠。保护装置往往都是用金属材料做成，而这一点对于消除静电来说都是不利的。

图 6-52 保护装置的影响

特别是保护罩的尺寸过小或保护杠的距离过近，都会影响消除器的效果。以保护罩为例，半圆罩的直径从 100mm 减小到 25mm，其他条件相同时，电晕电流大约降到原来的四分之一，而产生电晕的临界电压，则从 2.2kV 上升到 4.1kV，如图 6-52 所示。保护杠与放电针的距离也有同样的情况，如果把针缩到里面很多，保护杠又靠得很近并且接地 [见图 6-51 (c)]，那么这样装置的消静电效果就很有限了。

作图 6-52 数据时，保护罩材质用的是新铝。有的自制的自感应排针式静电消除器，支撑架和保护杠都是用钢质的。关于材质和尺寸这一点，在制作和使用时要给予足够的注意。可采用聚氯乙烯塑料制成，其前方开孔直径或开槽宽度不宜太小。

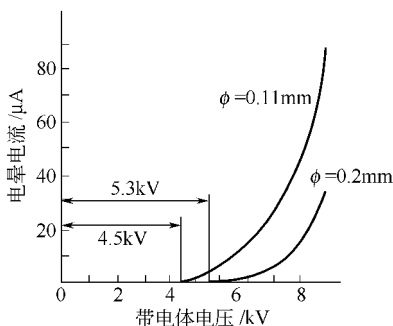
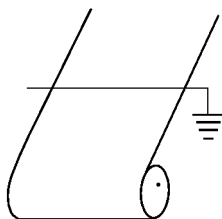
(3) 固体用自感应式静电消除器 固体用自感应式静电消除器有如下几种：放电针型、金属丝型、锯齿型、刷型等。放电针自感应式静电消除器前面已介绍过，现仅对后三种逐一加以介绍。

① 自感应金属丝型静电消除器 如图 6-53 所示。它的消静电效果随金属丝的直径增加而减小，图 6-54 所示为 0.11mm 和 0.2mm 两种不同直径金属约距带电体 20mm 时的消静电效果。可以看出，金属丝直径加大，电晕电流减小而临界电压增大，消除静电的效果变坏。当把金属丝直径加大到 0.45mm 时，只有在带电体电压达到 12kV 时，才能有觉察的电晕电流出现。

图 6-54 线径与消电性能的关系曲线

图 6-53 自感应金属丝式静电消除器

② 锯齿型静电消除器 可以用导电橡胶、导电纸或导电



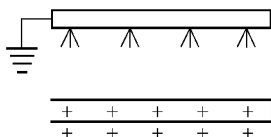
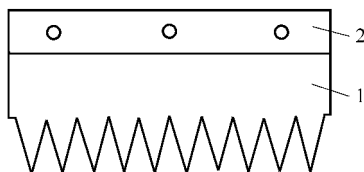
布制成，其基本结构如图 6-55 所示。导电橡胶制成的静电消除器是用天然橡胶或氯丁橡胶中配用炭黑等添加剂制成的，其电阻率多在 $10^3 \Omega \cdot \text{m}$ 以下。取厚度为 0.6mm 以下的导电橡胶片，前方削成锯齿形，后方固定在硬塑料或浸蜡木材制成的支架上，将橡胶片通过金属线接地即构成锯齿型静电消除器，锯齿愈尖消电效果愈好。

③ 刷型静电消除器 可以用导电纤维、导电布等制成，其结构如图 6-56 所示，它是用直径为 0.05mm 的导电纤维制成的。

图 6-55 锯齿型静电消除器

图 6-56 自感应刷型静电消除器

1—导电橡胶（导电纸或导电布）；2—支架



上述锯齿型静电消除器和刷型静电消除器有一个共同特点：即在消除器的前端都是柔软的，没有锐利的尖端。因此这些消除器不会刺伤人手或生产物件，不需要保护罩或保护杠。即使消除器同生产物件接触，除了增加消除器的磨损外，也不会带来其他更大危害。在带电体位置不完全固定的情况下，采用这些消除器是有利的。

(4) 油管用感应式静电消除器 油管用感应式静电消除器是 20 世纪 60 年代为解决槽车装车的静电安全问题由美国研制的，近几十年来已在许多国家获得应用。

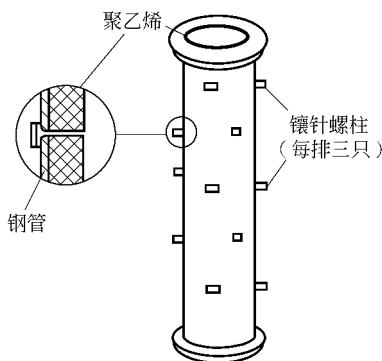


图 6-57 油管用感应式静电消除器结构示意图

① 消除器结构 如图 6-57 所示。消除器主要由三部分组成：接地钢管及法兰部分、内部绝缘管、放电针及镶针螺柱等。为了均匀地在油内产生相反的电荷，放电针沿长度方向交

错布置 4~5 排, 每排沿圆周均匀布置 3~4 根针。为了方便检查和维修, 放电针用螺栓做成可拆卸式。

放电针选用耐高温、耐磨的钨合金等金属材料制作。针体的直径约为 1~1.5mm, 其末端经处理成尖形, 长度一般突出管内壁 10mm 左右为宜。绝缘管系用高绝缘低介电常数耐油塑料如聚乙烯、聚四氟乙烯等制作。它可以做成整体的, 也可以分层衬在钢管内壁, 而其厚度和长度依据试验确定。表 6-23 所列美国石油公司 (API) 推荐的尺寸和规格。

表 6-23 API 推荐的尺寸和规格

钢管直径 /in	管长 /ft	电介质管内径 /in	塑料管壁厚 /in	最大流量 / [gal (美) /min]
8	4	4	2	600
10	6	6	2	1200
10	3	6	2	1200
20	6	12	$3\frac{1}{2}$	5000

注: 1. 1in = 0.0254m。

2. 1ft = 0.3048m。

3. 1gal (美) = 3.78541dm³。

② 消电原理 图 6-58 所示为油管用感应式静电消除器消电原理示意。当带电油品注入消除器绝缘管后, 对地电容变小, 使内部电位增高, 这样在介电管内形成一个高电压段。在放电针端部, 由于具有高电场使其因感应而堆积的电荷被拉入油中或因高场强使油品部分电离而发生中和作用, 达到消除部分电荷的效果。

图 6-58 油管用感应式静电消除器消电原理示意

③ 使用情况 下面利用图和表说明消除器不同情况下的使用效果。

a. 图 6-59 及图 6-60 所示为美国 4in (1in = 0.0254m) 4in 及 6in-6in 的消除器试验结果。

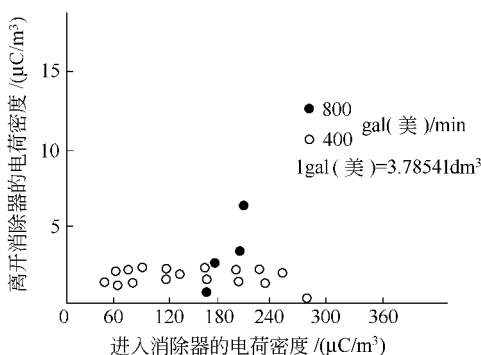
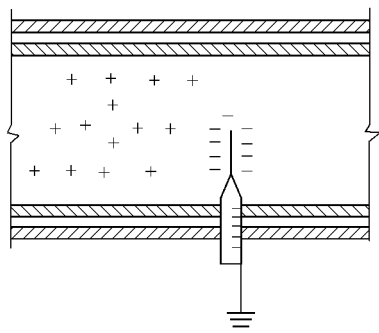


图 6-59 4in-4in 消除器试验结果

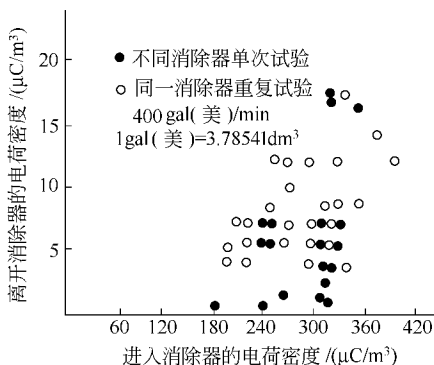
图 6-60 6in-6in 消除器试验结果

b. 表 6-24 所列为 150 个 6in-3ft (1ft = 0.3048m) 消除器在几年内试验统计的结果。它可将每立方米几百微库的电荷密度减到 $20\mu\text{C}/\text{m}^3$ 以下。

表 6-24 6in-3ft 消除器进出口电荷密度比较

单位： $\mu\text{C}/\text{m}^3$

位置	电 荷 密 度			
	平 均	标准误差	最大值	最小值



出口	166	34	258	103
进口	6.8	4	15	0

c. 表 6-25 所列为 YO₄₀₁ 加油车消除器前后管中心电压的对比。

表 6-25 YO₄₀₁ 加油车消除器前后管中心电压的对比

单位：V

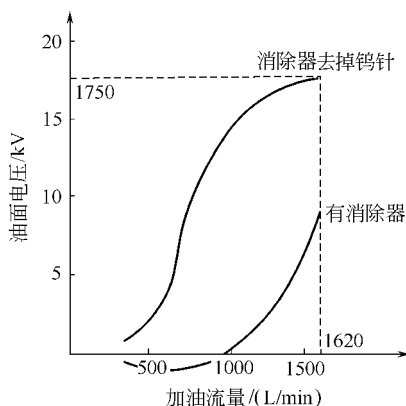
项 目	流 量 / (L/min)				
	1620	1390	1260	770	410
消除器前	4000	3500	3800	2700	3000
消除器后	0	- 50	130	- 35	- 450

④ 几点分析

a. 消电效果较好。例如 YO₄₀₁ 加油车在同一使用条件下，不装消除器时，电荷密度高达 $200 \mu\text{C}/\text{m}^3$ 以上，加装消除器后下降到 35（正极性） $\mu\text{C}/\text{m}^3$ 或 54（负极性） $\mu\text{C}/\text{m}^3$ 以下。从图 6-61 所示的曲线也可以看出油面电压下降的效果。消除器适用于实验室以及向距离过滤器较近的容器高速加油或向大容积船舶加油的场合。

图 6-61 YO₄₀₁ 加油车消除器对降低加油车油面电压的作用

b. 油流电荷密度越高消电效果越好。一般说来，对一定



的消除器其出口的电荷密度可以维持在一定的范围内。

c. 油品电荷极性不同，消电效果不同，以带负电荷时较差。

d. 管内电介质表面的状况对消电性能也有一定的影响。

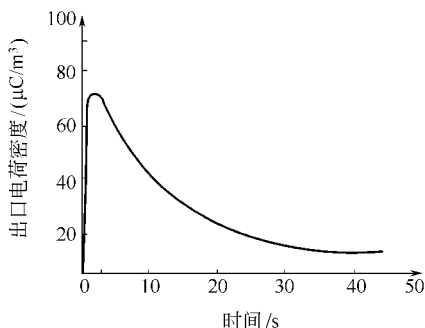
根据美国石油公司的试验分析，长期使用后的消除器在内壁会附着一层含多种微量物质的粉末，见表 6-26。

表 6-26 长期使用后消除器内壁附着的微量物质

锌镍	主要的 (>10%)
钛	次要的 (1% ~ 10%)
磷砷铜	少量的 (<1%)

e. 消电作用的过渡过程，图 6-62 所示为消除器出口电荷密度与时间变化曲线。从图中可以看出，消除器达到稳定消电状态有一个短暂的过渡过程。从通油到达稳定电荷密度的时间称为接通时间。接通时间约为 20 ~ 30s。从使用观点来看，希望这个时间越短越好。但这并不是说在接通时间内工作就不安全。因为在给油罐等加油时，其初始允许电荷密度总是要高一些。

图 6-62 消除器出口电荷密度与时间变化曲线



f. 为确保安全,对使用中的消除器应定期检查出口电荷密度。发现有较大变化时,应及时维修。

g. 消除器应保证良好接地。

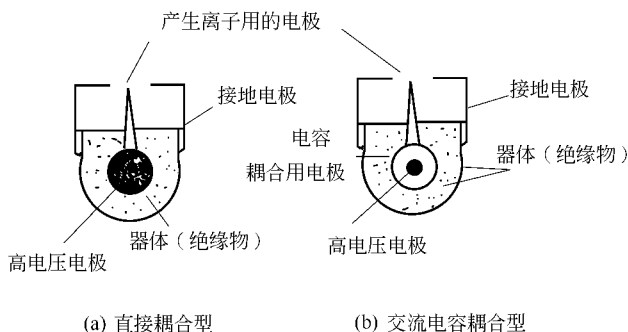
2. 外接电源式静电消除器

(1) 种类和原理 外接电源式静电消除器按照高压电源种类的不同,分为交流型静电消除器和直流型静电消除器,而交流型静电消除器又有工频和高频两种。如果按是否具有防爆性能则可分防爆型静电消除器和非防爆型静电消除器。另外,外接电源式静电消除器有的在消电电极附加有送风装置或压缩空气喷出装置,所以又可以分为送风型静电消除器和标准型静电消除器。

外接电源式静电消除器是由高压电源和消电电极组成。而消电电极与高压电源的连接有两种不同的基本形式:直接耦合型和交流电容耦合型。如图 6-63 所示。

图 6-63 消电电极的结构及其耦合形式

无论是直流还是交流,都是利用高压在针尖周围形成强电场而使空气电离的。但直流型静电消除器与交流型静电消除器消除静电的机理并不完全一样。直流型静电消除器是产生与带电体电荷相反符号的离子,直接中和带电体上的电荷;而交流



型静电消除器是在放电针尖端附近产生离子对（正、负离子），其中与带电极相反的离子向带电体移动，并与带电体上的电荷进行中和，其结果是带电体上的电荷被消除掉。

(2) 工频高压静电消除器 工频高压静电消除器高压电源通常是直接使用变压器，其结构原理如图 6-64 所示。图中 T 是升压变压器，其副边电压为数千至数十千伏。变压器副边一端接地，并接向消电电极的金属外罩。变压器副边另一端，即高压端或者通过电阻接向放电针 [见图 6-64 (a)]，或者通过电容接向放电针 [见图 6-64 (b)]，或者通过高压导线与放电针金属支架间的电容耦合，使放电针发挥产生电晕的作用 [见图 6-64 (c)]。

图 6-64 (a) 中的 R_x 和图 6-64 (b) 中的 C_x 都是限制变压器副边短路电流的。为了防止工作人员偶然触及放电针发生电极危险，变压器副边短路电流不应超过人的摆脱电流，即不应超过 5 ~ 10mA。因此对于 10kV 的副边电压，限流电阻应保持 1 ~ 2MΩ 以上。

图 6-64 工频高压静电消除器的结构原理

- 1—高压导线；2—放电针；3—放电针绝缘；
4—放电针金属接地外罩；5—放电针金属支架

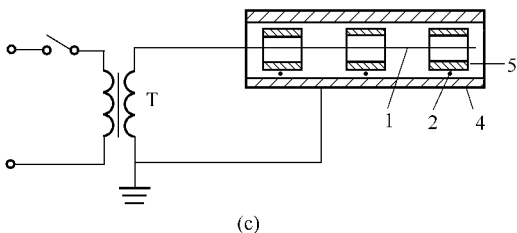
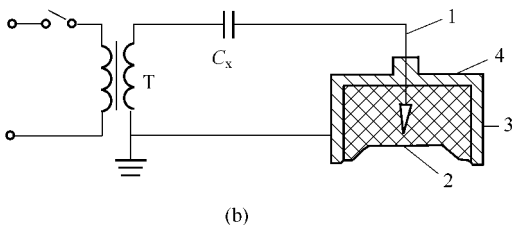
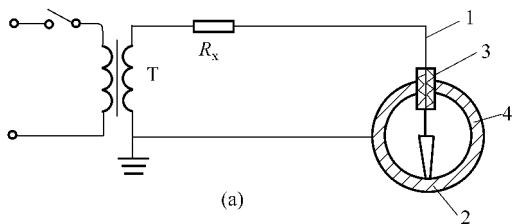


图 6-64 (c) 所示消电电极的放电针与高压电线是电容耦合，每支放电针发生短路时的短路电流不超过数十微安，这对人体是没有危险的。从火花放电的危险性来看，图 6-64 (c) 所示电容耦合静电消除器有很多优点。由于这种消电电极的放电针是互相独立的，任何一支放电针与带电体或接地体之间发生的火花放电，其火花能量总是有限的，一般没有引起火灾和爆炸的危险。而图 6-64 (a) 和图 6-64 (b) 所示为直接耦合，消电电极的各放电针是通过高压导线互相连接在一起的。因此，任何一支放电针与带电体或接地体之间的火花放电即相当

于高压导体对该带电体或接地体的放电，火花放电强烈，在周围有爆炸性混合物的场所是很危险的。不过直接耦合消电电极的结构比较简单，而且消电效果也比较好。

外接电源式静电消除器的消电电极金属接地外罩是多种多样的，如图 6-65 所示。接地外罩有管型的、槽型的，也有保护杠型的。消电电极工作时，由于电晕放电，放电针与接地外

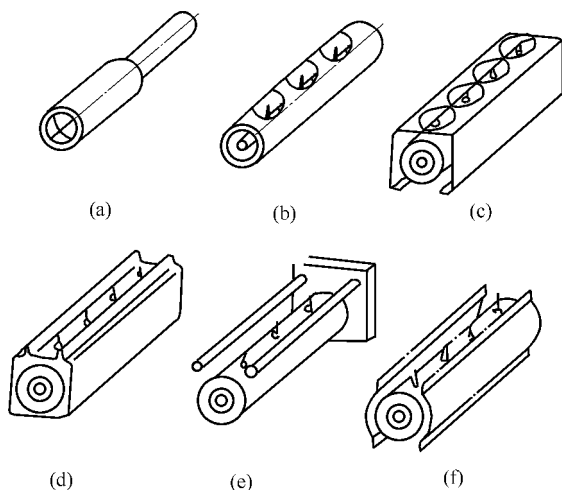


图 6-65 外接电源式静电消除器的消电电极金属接地外罩

罩开孔或开槽的边缘之间，或与接地的保护杠之间产生较多的正、负离子，借以消除带电体上的静电，还兼起保护罩的作用。放电针的前端与金属接地外罩上开孔或开槽的边缘应保持适当距离。距离太大，则其间电场强度减弱，致使电晕减弱，消电效果降低；距离太小，则保护罩的屏蔽作用增强，能达到带电体的电力线减少，也使得消电效果降低。外罩上圆孔直径或长槽宽度一般取为 10mm。为了安全，放电针不能超出接地外罩开口、开槽或保护杠平面。

放电针可采用缝纫用钢针。放电针长度宜取 $8 \sim 10\text{mm}$ 。相邻放电针之间的距离可在 $10 \sim 30\text{mm}$ 范围内选取，且当该距离与针长之比接近 1 时，有良好的消电效果。

消电电极与带电体之间相距数百毫米时即有消电作用。但一般不宜超过 250mm ，正常工作时宜取为 $25 \sim 35\text{mm}$ ，如果条件允许，还可取得小一些。

放电针的支架宜用绝缘材料制成，而不宜用金属材料制成，以免增大带电体对地分布电容，降低消电效果。

高压电源的升压变压器应当是可控的。图 6-66 所示是升压变压器一种比较简单的控制电路。图中 R_1 、 R_2 和 R_3 是分

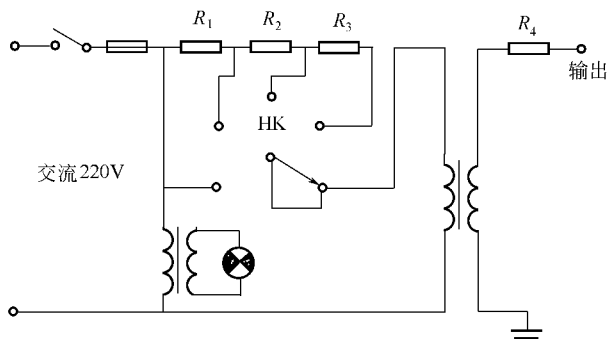


图 6-66 工频高压电源线路

压电阻，供调整输出电压用。控制转换开关 HK 有选择地接通分压电阻，可以分别得到几种输出电压，图中 R_4 是限流电阻，可使输出端发生短路或击穿时线路电流不至过大。

高压电源的输出电压也可用可控硅控制。可控硅高压电源线路如图 6-67 所示。工频交流电通过灯泡给电容器 C 充电，待可控硅 KG 导通后，电容器再通过升压变压器的一次线圈高速放电。由此可知，变压器副边输出的是脉冲电压。通过电阻 R 的调节，可以改变可控硅导通的时间，调整变压器的输出。

因为电晕电流很小，所以变压器的工作电流一般不超过 $1 \sim 2\text{mA}$ 。变压器的容量约 $5 \sim 10\text{W}$ 即可。

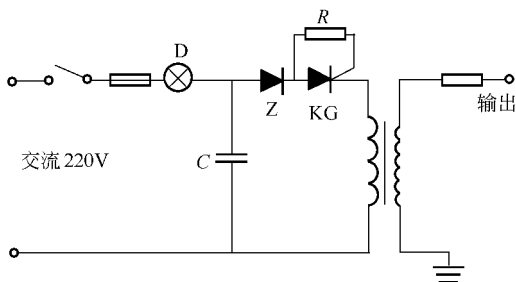


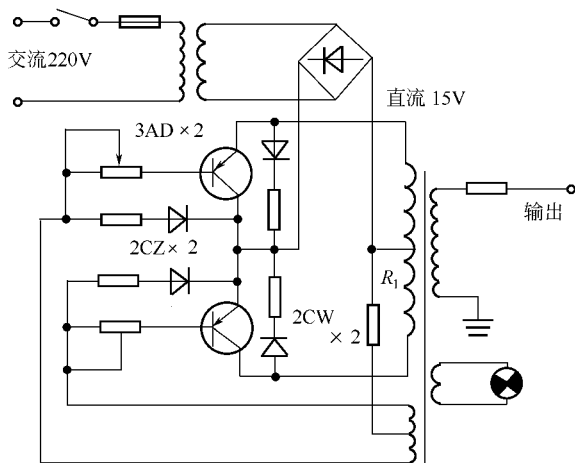
图 6-67 可控硅高压电源线路

(3) 高频高压静电消除器 高频高压静电消除器的高频高压电源是用振荡线路配合二次线圈构成的。图 6-68 所示为一种高频高压电源的线路。图中，两只三极管与变压器的一次线圈构成振荡线路。工作时，两只三极管轮流导通，变压器一次线圈中出现高频电流，二次线圈则输出高频电压。通过电阻 R_1 的调节，可以调整变压器的输出电压。这种高频高压电源的输出电压可调整为 10kV 左右。频率可调整为 3kHz 左右，输出电流约为 2mA ，输出功率约为 20W 。在人造丝帘布压延过程中，运用这种消除器可将帘布上 10kV 上下的静电电压消除至零。

图 6-68 高频高压电源线路

高频高压静电消除器由于频率很高，通过电容的耦合作用很强。所以能够比较方便地配合电容耦合型消电电极，在放电针上的短路电流很小，防爆性能较好，适用范围较广。

高频高压静电消除器的输出电压可控制在 $3 \sim 30\text{kV}$ 的范围内。频率可控制在数千至数十千赫范围内。高频高压静电消



除器的消电电极与带电体之间的距离一般为 25 ~ 35mm。

(4) 直流高压静电消除器 直流高压静电消除器的消电电极产生的是直流电晕。其电晕中基本上不含有带相反电荷的离子，基本上不存在交流高压静电消除器电晕中正、负离子复合的问题，所以具有较好的消电效果，消电电极与带电体之间的距离可以增加至150 ~ 600mm。

直流高压静电消除器原理如图 6-69 所示。这种消除器有两只消电电极即正电晕消电电极 FD_1 和负电晕消电电极 FD_2 。图中，电容器 C_1 和 C_2 配合整流器 Z_1 和 Z_2 起倍压整流作用，电阻 R_1 和 R_2 起限流作用。

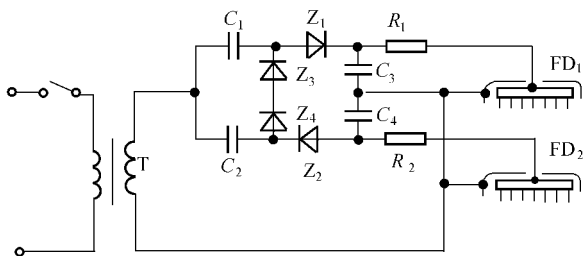
图 6-69 直流高压静电消除器原理

当带电体电荷极性发生变化时，直流高压静电消除器高压电源输出电极的极性也必须作相应的变化。否则，消除器失去消电作用。当带电体电荷大幅度减弱时，消除器的高压电源也

图 6-70 离子流静电

消除器的基本原理

应相应调整，否则，可能使



带电体带上相反极性的电荷。

由于直流高压静电消除器是直接耦合型，其短路电流较大，不宜用于有爆炸性混合物的场所。

(5) 离子流静电消除器（送风型静电消除器） 离子流静电消除器是把电离了的空气快速输送到较远的地方去消除静电的装置。

① 离子流静电消除器的基本原理。如图 6-70 所示。主要由离子流喷头、高压电源和送风系统组成。其离子流喷头是由中间有小孔的金属导引环 D、导引电阻 R（与地连接）及在导引环小孔中心的放电针 N（与直流高压电源 GY 连接）组成。其送风系统由风源、风道等组成。离子流静电消除器工作时，在高压电源作用下，放电针附近的空气发生电离，并由压缩空气以极快的气流速度把空气离子送出去，发挥消电作用。

② 离子流发生器的基本参数及其影响。一个离子流发生器能够产生多少离子，并且产生的离子中有多少可以被气流输送出去，即离子流引出总量和离子流引出效率是用如图 6-71 所示的装置来测定的。A 是一个离子流发生器。针尖电压由可调的直流电压电源 GY 来供给，通过放电针的总电晕电流 I_0 是由与其相连并接地的检流计 G_0 读出的，压缩空气从 F 处送入，由于针尖与导环间存在电场，所以不可能把由电晕产生的全部离子都吹出去，总有一部分会

经导引环 D、导引电阻 R 和检流计 G_1 而入地，这部分电子流 I_1 对于消除静电来说是无效的，被空气吹出的离子用收集筒 B 来捕获并通过检流计 G_2 而入地， G_2 给出的数值 I_2 就是单位时间内离子流引出总量，这些离子是真正能用来消除静电的有效部分，因此，一个静电消除器的离子流引出效率可以用 I_2/I_0 来表示。

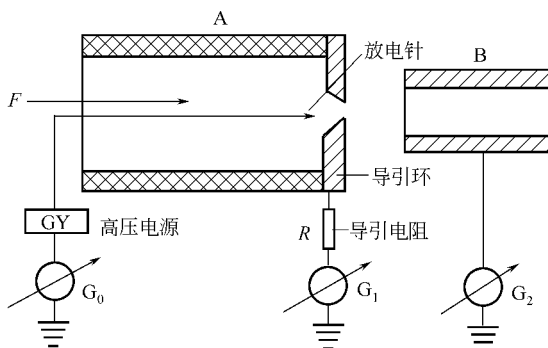


图 6-71 离子流引出总量及离子流引出效率测定装置

a. 导引电阻 R 的影响。不同大小的导引电阻 (R)，可以在放电针附近形成不同强度的电场。当针压一定时，导引电阻越小，形成的电场越强，因而电晕也越强，虽然这样可以产生较多的空气离子，但由于导引环的低电压，使得较多的离子被吸引而经 R 和 G_1 入地，离子流引出效率反而降低。增加 R 的数值，可以提高导引环的电位，这对于刚刚离开电晕区的空气离子有排斥作用，当总电晕电流一定时，R 越大，这种向外的排斥力也越大，所以可以将更多的离子引出。表 6-27 所列为一组实测的数据，实验条件是风量 $7\text{m}^3/\text{h}$ 、导引环孔径 3mm、针环距为 0，改变电阻 R 同时用电压来维持恒定的电晕电流 I_0 为 $25\mu\text{A}$ 。可以看出，单位时间内引出的离子流总量 I_2 随导引电阻 R 的增加而加大，引出效率 I_2/I_0 也随之提高。因此，用

较大的导引电阻，可以增加电晕电流的可利用部分，但是，为了同样维持 $25\mu\text{A}$ 的电晕电流所需要的电压值也相应增高，考虑到生产现场和装置本身的安全性，使用过高的电位也许是不适当的。当然导引电阻也不宜过小。否则除可引出的离子流总量 I_2 和引出效率 I_2/I_0 都会降低外，在较低的电压下就有被击穿的可能，击穿电流很大，这也同样带来了不安全因素，所以，在选择导引电阻的大小时，要根据具体情况加以权衡。

表 6-27 导引电阻 R 的影响

$R/\text{M}\Omega$	U/kV	$I_0/\mu\text{A}$	$I_1/\mu\text{A}$	$I_2/\mu\text{A}$	I_2/I_0
0	50	25	23.7	0.93	0.037
10	—	25	34.8	1.70	0.068
100	70	25	22.0	4.03	0.161
200	85	25	21.6	4.65	0.186
	20.0	25	0	15.1	0.604

b. 针环距的影响。针环距是指针尖与导引环外侧的距离 d (见图 6-72)。表 6-28 所列为在风量 $F = 2\text{m}^3/\text{h}$ ，导引电阻 $R = 200\text{M}\Omega$ ，导引环孔径 $\phi = 3\text{mm}$ ，针尖电压 $U = 7.5\text{kV}$ 的条件下得出的数据。可以看出，针环距 d 在 1mm 的范围内变化时，对于总电晕电流的影响不大，但却影响了离子流引出总量和引出效率，两者都随 d 的增加而减小，这是由于针环距 d 的大小，就是被空气吹出的离子在电场中所走路程的长短，也就是离子在这一电场中停留时间的长短，停留时间越长，离子被导引环吸收的可能性就越大。因此，随着 d 的加大，离子流引出总量和引出效率的降低是必然的。在可能的情况下，应尽量缩短针环距。但是要注意，当导引环孔径较小时，过小的针环距容易导致针环之间的火花放电，这种现象，在某些场合下是不能允许的。

图 6-72 针环距

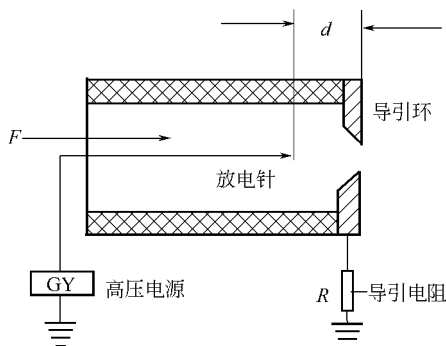


表 6-28 针环距的影响

d/mm	$I_0/\mu\text{A}$	$I_1/\mu\text{A}$	$I_2/\mu\text{A}$	I_2/I_0
0	22.0	18.0	3.73	0.170
0.25	22.5	18.5	3.63	0.160
0.50	23.0	19.0	3.16	0.137
0.75	22.0	18.5	2.64	0.120
1.00	22.0	18.5	2.55	0.116

c. 针尖电压和电晕电流的影响。在其他条件固定的条件下，针尖电压直接决定电晕电流的大小，电压提高，电晕加强，电晕电流也随之加大。表 6-29 所列为在导引电阻 $R = 200\text{M}\Omega$ ，针环距 $d = 0$ ，风量 $F = 30\text{m}^3/\text{h}$ ，孔径 $\phi = 1.5\text{mm}$ 条件下得出的数据。在电晕电流增大时，被引出的离子流也增加，但引出效率却明显降低，可以看出在离子流引出总量和引出效率之间存在着一个最佳电压值，这个最佳值与气流速度、针环距以及导引电阻的大小都有密切关系。在选取这个数值时，首先要考虑静电消除的效果，在保证效果的前提下，应选取较大效率的条件，对于消除静电来说，过大的离子流是不必要的，有时甚至是有害的。

表 6-29 针尖电压的影响

电压/kV	$I_0/\mu\text{A}$	$I_1/\mu\text{A}$	$I_2/\mu\text{A}$	I_2/I_0
2.5	5.0	3.5	0.938	0.188
5.0	12.0	9.5	1.88	0.157
7.5	22.5	18.5	3.12	0.137
10.0	28.5	24.5	3.43	0.120
12.5	40.0	33.8	4.06	0.102

d. 气流量和导引环孔径的影响。气流量和导引环孔径这两个参量反映了气流速度这一参量。气流速度等于零时，电晕区所产生的离子都将被导引环所吸收，但当有气体从小孔流出时，有一部分离子在还没有来得及被吸收之前即被吹出。气流速度越快，引出的离子流就越多，引出效率也越高。表 6-30 和表 6-31 所列是在两种不同导引环孔径和多种气流量条件下做出的结果，其他的条件为：针压 $U = 15\text{kV}$ ，针环距 $d = 0$ ，导引电阻 $R = 200\text{M}\Omega$ 。把两表数据进行比较可以看出，当气流量相同时，孔径减小，相当于气流速度的增加，所以无论是离子流引出总量还是引出效率都相应增加。同理，当孔径相同时，气流量的增加，也导致离子流引出总量和引出效率的增加。

表 6-30 $\phi = 1.5\text{mm}$ 时气流量的影响

气流量/ (m^3/h)	$I_0/\mu\text{A}$	$I_1/\mu\text{A}$	$I_2/\mu\text{A}$	I_2/I_0
2.0	59	38.0	12.8	0.207
2.5	58	37.8	12.5	0.215
3.0	58	37.5	12.8	0.221
3.5	58	37.0	13.4	0.231
4.0	58	36.5	14.1	0.243
4.5	58	35.5	14.7	0.254
5.0	58	34.5	15.9	0.275
5.5	58	34.0	17.2	0.296

表 6-31 $\phi = 3.1\text{mm}$ 时气流量的影响

气流量 / (m^3/h)	$I_0/\mu\text{A}$	$I_1/\mu\text{A}$	$I_2/\mu\text{A}$	I_2/I_0
2.0	50.5	38.5	6.55	0.130
2.5	51.0	38.0	7.33	0.143
3.0	52.0	38.0	8.74	0.168
3.5	52.5	38.0	9.20	0.175
4.0	51.5	37.0	9.35	0.181
4.5	52.0	37.0	10.0	0.192
5.0	52.5	36.0	10.6	0.202
5.5	53.0	36.0	11.2	0.212
6.0	53.0	36.0	12.5	0.236

③ 离子流发生器的设计考虑和耗电效果。影响离子流发生器性能的原因是多方面的，设计一个离子流静电消除器时也要综合地考虑，不能一味追求高的离子流引出总量和高的引出效率，更重要的是适当的离子流引出总量和安全性，当然还有制造工艺的方便。举例来说，虽然缩小导引环孔径能提高离子流引出总量和引出效率，但实际应用时，不仅不采用 1.5mm 的孔径，而且应把它放大到 4mm，同时把导引电阻选得足够大，这样做是为了避免针环之间的火花放电，特别是对于防爆场合，这一点是极其重要的。又如，针尖电压的选取要在有效与安全之间权衡，同时，还要照顾到制造工艺上的要求，实际应用时，并不选取能达到高离子流引出总量和高引出效率的十几千伏，而是在 8kV 左右为好。

一个离子流静电消除器的好坏，可以用下面的方法来衡量。把带有一定数量静电的介质薄膜在离子流喷射的正前方不同距离放置不同的时间，然后再测定介质薄膜上剩余静电的强度。单一符号的离子流，输送距离可以达到 1m 以外的远处，并对该处介质薄膜所带的静电有明显的消除作用。当使用电晕电流为 $5 \sim 10\mu\text{A}$ ，喷口处的气流速度约 100m/s 的条件时，带电介质薄膜放在 60cm 的距离处，可以在小于 1s 的时间内把相

反符号的静电荷全部消除干净。一个喷口大约能消除直径为60cm 面积内的静电荷，对于很大面积的体系，可以用多加离子流喷口的办法来解决。使用交流高压电源，也能形成电晕并产生离子流，但它的作用机理与单一符号的离子流不同，传输的距离要短得多。

还有一点必须特别指出，即消除效果与带电介质薄膜背后是否有金属或其他导体有关：背后有导体时，消除效果将大为降低，甚至可使介质薄膜带上相反符号的电荷。一些单位安装使用静电消除器后发现效果不理想，如果不是装置本身质量不好的话，那么多数情况是由于这个原因引起的。

④ 离子流静电消除器的结构和使用。离子流静电消除器的方框图和结构简图如图 6-73 所示。离子流静电消除器的工作过程可用方框图来加以说明。压缩空气径自送往离子流喷头，压力足够时，压力检测器给出信号，使时间继电器延时动作，并由时间继电器自动启动电源开关；低压电源经电源开关给高压电源供电，高压电源工作后即带动离子流喷头工作。当发生故障或压力不足时，压力检测器发出相反的信号，时间继电器释放，电源开关断开，离子流喷头停止工作。这样的工作过程保证了消除器只有在对外保持正压的情况下才能工作。

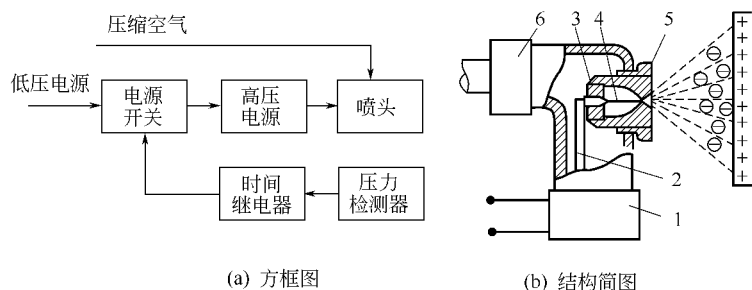


图 6-73 离子流静电消除器的方框图和结构简图

1—高压电源；2—高压导杆；3—绝缘；4—放电针；

5—导引环；6—压力检测器

离子流静电消除器使用的电源如果没有防爆要求，一般普通的低压直流稳压电源就可以使用。如果用于防爆场合，对于电源的要求就非常严格了，需采取防爆措施。

直流高压电源可以采用多级倍压整流取得直流高压，如图6-74所示，这种高压电源由6V直流电源带动振荡电路工作，产生1000Hz的高频振荡，经变压器升压至1kV左右后，再送

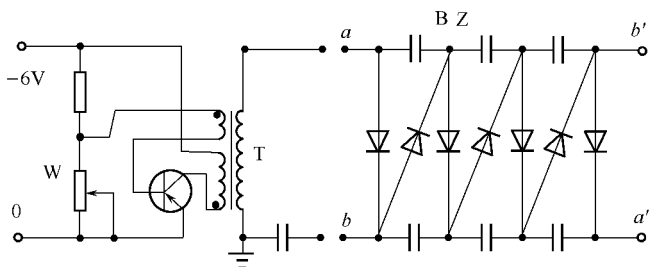


图 6-74 多级倍压整流的直流高压电源

至倍压整流器倍压并整流，最后在 b' 端（或 a' 端）得到 7 倍于变压器副边电压的正极性直流电压。如欲得到负极性的直流电压，只要将 a' 、 b' 两端与 a 、 b 两端对调即可。图中电位器 W 是供调节输出电压用的。

3. 放射线式静电消除器

放射线式静电消除器是利用放射性同位素使空气电离，产生正离子和负离子，消除生产物料上的静电。放射线式静电消除器可用于化工、橡胶、纺织、造纸、印刷等行业。

镭 (Ra)、钋 (Po)、钷 (Pu) 等元素的同位素能放射 α 射线，铊 (Tl)、锶 (Sr)、氪 (Kr) 等元素的同位素能放射 β 射线，都可用作放射线式静电消除器的放射性同位素。 α 射线的电离能力很强，1 个 α 粒子在空气中每厘米长度上一般能产生 1 万对以上的带电子子； α 射线的穿透能力不强，在空气中一般只能穿透 2.5 ~ 8.6cm，一张写字用的纸即可吸收它， β 射线的电离能力较差，一般不到 α 射线的百分之一，但它的穿透能力较强，在空气中的穿透深度以米计，需要厚 1.5mm 的铅板或厚 3mm 的铁板或厚 20mm 的木板才能将它吸收。 α 射线静电消除器应用较多。除 α 射线和 β 射线外，X 射线亦可用于消除静电。至于一般 γ 射线，由于其电离能力很弱（在空气中每厘米长度上只能产生几对带电子子），穿透能力又很强（约为 β 射线的十倍），同时 γ 射线能伤害人体，所以不用来消除静电。

放射强度和半衰期是放射性同位素的两个重要参数。放射强度是单位时间内发生衰变的原子核个数，每秒衰变 3.7×10^{10} 个原子核为 1Ci (37GBq)。半衰期是放射强度减弱一半所需要的时间。不同放射性同位素的半衰期相差很大。例如，镭的同位素的半衰期为 1600 年，而有些放射性同位素的半衰期只有百分之几秒。制作和选用放射线式静电消除器时应考虑到

同位素的这两个参数。

放射线式静电消除器的结构简单，如图 6-75 所示。放射线式静电消除器由放射源、屏蔽框和保护网等部分组成。放射源是厚 0.3 ~ 0.5mm 的片状元件，用紧固件固定在屏蔽框底部，屏蔽框应有足够的厚度，以防止射线危害。消除器前面装有保护网，以防止工作人员意外地直接接触到放射源。

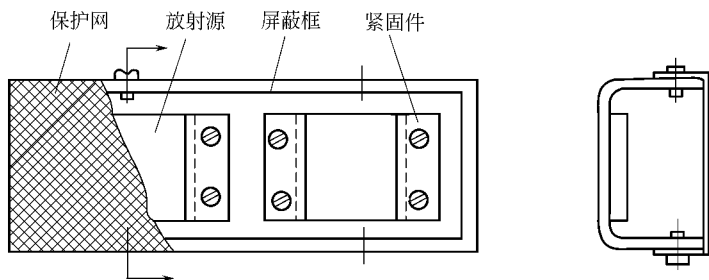


图 6-75 放射线式静电消除器

放射线式静电消除器离带电体越近，消电效能越好，一般取 10 ~ 20mm。根据工艺要求，消除器至带电体之间的距离可以适当增大。为了保证足够的消电效果，采用 α 射线者不宜超过 4 ~ 5cm，采用 β 射线者不宜超过 40 ~ 60cm。

使用放射线式静电消除器一定要控制放射线对人体的伤害和对产品的污染。在每天 8h 的工作时间中，人的最高允许照射量为 50mR。为此，放射线式静电消除器的放射性同位素元件应有铅制屏蔽装置或其他屏蔽装置，使消除器只能在其特定方向上使空气电离，发挥中和作用。放射线式静电消除器应有坚固外壳，防止机械损伤。

放射线式静电消除器结构简单，不要求外接电源，而且工作时不产生火花，适用于有火灾和爆炸危险的场所。放射线式

静电消除器的离子电流较小，当电场强度为 2kV/cm 时，若消除器长度为 1m ，则离子电流一般只有 $2 \sim 12\mu\text{A}$ ，可见其消电效果较差。

4. 组合式静电消除器

组合式静电消除器是具有感应作用和放射线作用或具有高压作用和放射作用的静电消除器，它兼有两者消电的优点，故有很好的消静电效果。

感应式静电消除器在带电体表面电位较低时不能进行工作，只有在电位高时才能发挥较高的效率。而放射线式静电消除器在电位低的情况下正常工作，但是其效率受到电离电流的限制，电离电流不随介质上电位的增大而增大。两者组合在一

起，就能弥补各自的缺点，如图 6-76 所示。这种组合式静电消除器是由放射线式和感应式两种消除器特性叠加而成，显然组合式静电消除器消除静电的效果最为显著。

5. 静电消除器的效率和选用

各种型式的静电消除器的工作效率各不相同，为了便于比较，如图 6-77 所示将各种消除器的电晕电流同带电体电压之间的关系画在一起。显然，效率最好的是直流高压静电消除器，其次是自感应式静电消除器和工频高压静电消除器，高频高压静电消除器的消电效果较差，而放射线式静电消除器的消电效果最差。

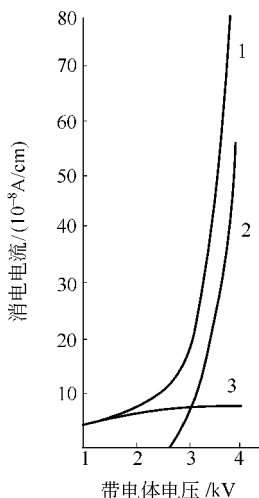


图 6-76 组合式静电消除器的消电性能

- 1—组合式静电消除器的特性；
- 2—感应式静电消除器的特性；
- 3—放射线式静电消除器的特性

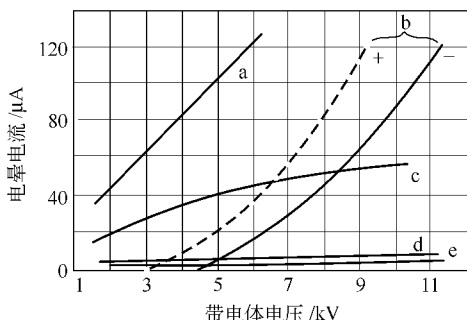


图 6-77 各种静电消除器的消电性能

- a—直流高压静电消除器；b—自感应式静电消除器；
c—工频高压静电消除器；d—高频高压静电消除器；
e—放射线式静电消除器

自感应式静电消除器适用于允许残留部分静电以及电压较高的场所；高压静电消除器适应于不残留静电的场所。放射线式静电消除器的安全使用及保护问题比较复杂，代价昂贵，而且消电效率低，一般情况不宜采用。但是其具有良好的防爆性能，可以在易燃易爆场所使用。高压式和自感应式静电消除器能否在易燃易爆场所使用，看其是否有防爆措施。

总之，要合理地、安全地选用各种形式的消除器，要考虑经济效益，而且要注意到工作场所和带电体的带电情况。

6. 静电消除器的安装

在使用静电消除器作为防静电措施时，应当在选择消除器的同时，注意其安装方法，其安装距离、位置等必须适当，如图 6-78 所示。若消除器安装不当，则往往效果减半。为此，在安装时应考虑下列问题。

① 静电消除器应尽量安装在最高电位的位置上。

② 离开静电产生源的距离最低应大于设置距离，一般为离开静电产生源 5 ~ 20cm 以上，如图 6-79 所示。

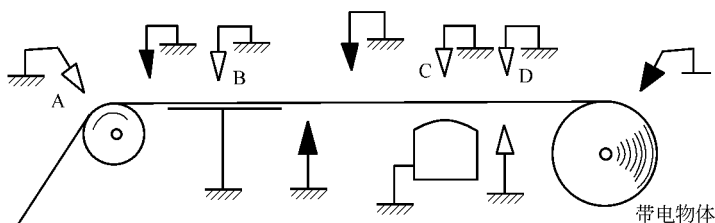


图 6-78 静电消除器设置位置的实例

A—静电产生源；B—背面接地体；

C—邻近接地体；D—其他的静电消除器；

△ 不理想的位置；▼ 理想的位置

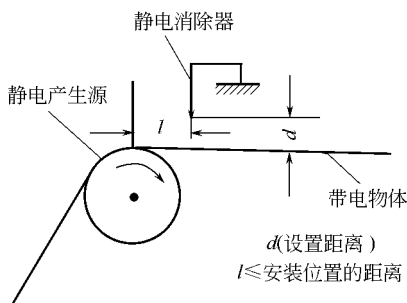


图 6-79 静电消除器的设置位置

③ 在带电体的背面不应有接地体、邻近接地体或其他的静电消除器。

④ 不应安装在易于污染静电除尘器或温度为 150℃ 以上和相对湿度为 80% 以上的环境。

⑤ 静电消除器的安装角度，应垂直于带电物体，如果安装距离小于第②条时，安装角度如图 6-80 所示，应偏向静电的产生源。

⑥ 静电消除器应固定在坚固的支撑体或不移动的机械装置上，而且必须进行可靠的接地。

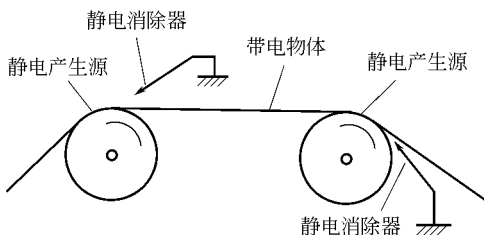


图 6-80 将静电消除器安装于靠近静电的产生源时的安装角度

七、防止人体带电

预防人体带电有两个目的：其一是预防静电电击或由此引起的高处坠落等二次事故，预防人体的“不快感和恐怖感”而导致工作效率降低；其二是防止人体静电带电的放电引起可燃性物质的爆炸和火灾。

1. 人体静电带电的种类

(1) 人体自身活动产生的静电带电

① 人体在工作中与物体相接触摩擦，产生静电而带电。如研磨、洗涤、搅拌、黏合和剥离等。

② 人体穿用衣服、帽子、手套等，由于接触摩擦使人体带上静电，如脱工作服引起人体带电就是典型的例子。

③ 人穿绝缘鞋与地面接触摩擦，鞋子带上静电，结果在人体上也带上静电。人坐在椅子上，当站立起来时工作服与椅子之间产生摩擦和剥离，工作服带电，结果人体也带上了静电。

(2) 人体的接触静电带电

① 人体与带电物体接触时，带电物体上的静电荷转向人体，人体带电。

② 悬浮的带电物体或离子等附着于人体，使人体带上静

电,如带电灰尘、雾、粉尘等。

(3) 人体的感应静电带电

① 人体与地绝缘,接近带电物体感应带电。

② 人体与地绝缘,接近高电压感应带电。

2. 防止人体带电的方法

人体带电除了上述对人体造成电击和形成对安全生产的威胁外,还能在精密仪器或电子元件生产中经常造成质量事故,还对电子设备的运行产生干扰信号或导致元件击穿损坏现象。为此,必须解决人体带电对工业生产的危害,主要方法有如下几个方面。

(1) 人体接地 工作人员不能带戒指和手镯,车间内门的把手和门栓必须接地。在特殊危险场所(一般指防爆厂房且介质的最小点燃能量很小)的操作工人,为了避免由于人体带电后对地放电所造成的危害,一般情况下操作工人应先接触设置在安全区内的金属接地棒,以消除人体电位,然后再操作。此方式的人体接地,只是将接触前在人体上的静电荷泄漏于大地,对于以后在人体上又产生的静电,则起不到防止带电的效果。如坐着工作的人员,可在手腕上佩带如图 6-81 所示的腕带,将人体接地。人体是否需要接地要根据实际情况测定

后决定。例如,某电雷管制造厂为了制造粉体起爆药而使用的特殊机械,进行混合干燥操作完毕以后机械自动停机,操作者用手取出起爆药,在未设置接地棒时,未发生过火灾爆炸事故。但后来设置了接地棒在第一次实施操作

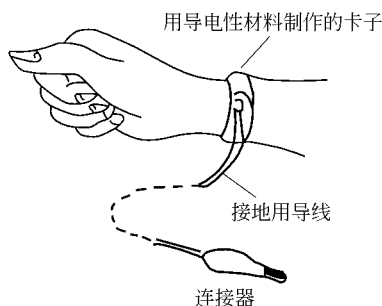


图 6-81 人体接地的腕带

时，便发生了爆炸事故。事后试验表明：在粉体起爆药混合干燥完毕时测得的起爆药的带电电压为 $+10\text{kV}$ ，工作人员不接触接地棒时人体带电为 $+9\text{kV}$ ，这时手指尖与起爆药的电位差为 1kV ，在该电位差下并未达到起爆药的火花放电能量；当人体接触接地棒，人体静电消除为 0 时， $+10\text{kV}$ 的起爆药，在手接触时（电位差为 $+10\text{kV}$ ）便对手指产生火花放电而引起爆炸。如果人体带 -9kV 静电时会怎样呢？当不摸接地棒而触及上述带电 $+10\text{kV}$ 的粉体起爆药时，人手指的电位差变为 $+19\text{kV}$ ，摸了接地棒电位差为 $+10\text{kV}$ ，则接地棒提高了安全性。所以安装接地棒必须定期测定人体及带电体的电位和极性。

(2) 穿防静电鞋 防静电鞋的电阻值应为 $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^8 \Omega$ ，目的是将人体接地，防止人体和鞋本身带电和防止人体万一触到带电的低压线而发生触电事故。

在下列场所应穿防静电鞋：危险场所及其附近；处理可燃性物质；接触带电物体或在其附近工作；静电能产生生产故障的电子部件和薄膜等岗位。穿用防静电鞋，必须考虑所穿袜子为薄尼龙袜还是导电性袜子，严禁在鞋底上粘贴绝缘胶片，并应作定期检查。

(3) 穿防静电工作服 防静电工作服不仅可以降低人体电位，同时可以避免服装带高电位所引起的灾害。防静电工作服的带电量必须小于 $7 \times 10^{-6} \text{C/m}^2$ ，每件上衣的带电量必须小于 $1 \times 10^{-6} \text{C/m}^2$ 。防静电工作服的穿用场所与防静电鞋应用的场所相同，对于手套和帽子在有些场合也应考虑用导电性的。

(4) 工作地面导电化 操作人员穿用防静电鞋，要有效地消除人体静电的先决条件是人必须站在导电性地板上。为此必须使工作地面导电化。最简单的办法是洒水，有些场所不能洒水，则必须采用导电地面，如导电橡胶板等，其泄漏电阻值

(地面与大地之间) 应根据工作环境 (场所) 不同按表 6-32 取值; 各种地面材料的一般的 (普通状态) 泄漏电阻列于表 6-33 中以供参考。

表 6-32 工作环境与工作地面的泄漏电阻

工 作 环 境	泄漏电阻/ Ω	备 注
有可能产生爆炸和火灾的危险场所	10^8 以下	手术室,可燃性气体和溶剂的储藏室,或处理这些物体的工序
有可能产生静电电击的场所	10^{16} 以下	粉体的装袋工序,纸张等的卷取工序
有可能产生生产故障等的场所	10^{11} 以下	计算机室,半导体处理场所

表 6-33 各种地面材料的一般的泄漏电阻

地面材料名称	泄漏电阻/ Ω	地面材料名称	泄漏电阻/ Ω
导电性水磨石	$10^5 \sim 10^7$	一般的涂刷地面	$10^9 \sim 10^{12}$
导电性橡胶(粘面)	$10^4 \sim 10^8$	橡胶(粘面)	$10^9 \sim 10^{13}$
石	$10^4 \sim 10^9$	木、木胶合板	$10^{10} \sim 10^{13}$
混凝土(干燥时)	$10^5 \sim 10^{10}$	沥青	$10^{11} \sim 10^{13}$
导电性聚氯乙烯	$10^7 \sim 10^{11}$	聚氯乙烯(粘面)	$10^{12} \sim 10^{15}$

(5) 危险场合严禁脱衣服 在危险场所 (一般指防爆厂房且介质的最小点燃能量较小) 工作时不准脱衣服,因为在脱衣服时,人体和衣服上产生的静电可能达到数千伏甚至上万伏的高电位,极易形成火花放电而点燃可燃性气体混合物,发生爆炸火灾事故。

八、静电屏蔽

1. 静电屏蔽的效果

静电屏蔽 (以下简称屏蔽) 是用屏蔽材料阻止带电体 (绝缘体带电) 对其附近物体的电气作用,而达到防止绝缘体带电引起的力学现象和放电现象。

静电屏蔽的目的是屏蔽带电体的静电场，一般是通过接地的金属等导体（如金属丝、金属网等）覆盖带电体的表面。

在带电体上安装屏蔽材料时，不一定全部屏蔽，可以采取部分屏蔽的方法。屏蔽之后带电体的静容量将增大，电位上升将受到抑制，其结果是带电体放电频率减小。但采用部分屏蔽，会产生如图 6-82 所示的情况；若在屏蔽材料屏蔽的带电体的另一面有接地体靠近，且带电体带电量较大时，将会发生表面放电。此种放电引起的着火爆炸的概率很高，屏蔽反而起到相反效果，因此在进行屏蔽时必须加以注意。

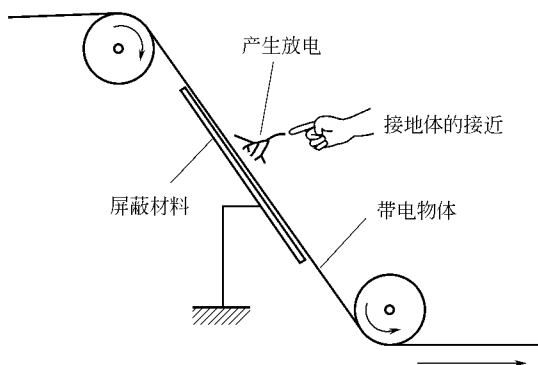


图 6-82 不理想的屏蔽例子

2. 静电屏蔽的方法

静电屏蔽原则上不需要对带电体表面全部覆盖，只要达到带电体电位不升高就可以了。屏蔽材料应使用具有足够机械强度的直径尽量小的金属线或数厘米方孔的金属网等。但屏蔽接地一定要可靠，并且以不使屏蔽材料与带电体发生静电放电为佳，为此要注意以下几点。

- ① 静电屏蔽应尽量使屏蔽材料紧密结合于带电体上。

因此最好是将屏蔽材料的各重要部位，分别固定在带电体上。

② 使用细金属线做屏蔽材料时，应将细金属线间隔数厘米紧密缠绕在带电体上，如图 6-83 所示，为软管或管等的屏蔽，是将金属线在软管的表面上进行屏蔽或使用内有金属线的软管和管子，金属线要可靠地接地，并应注意金属线中间不能断开。

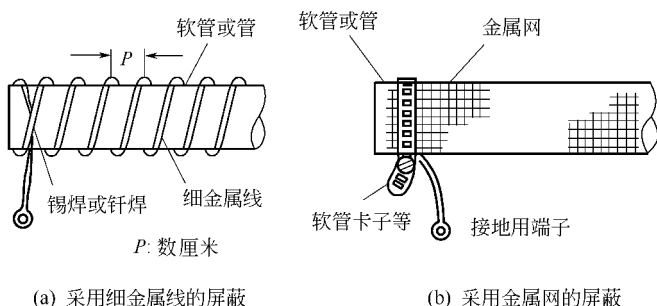
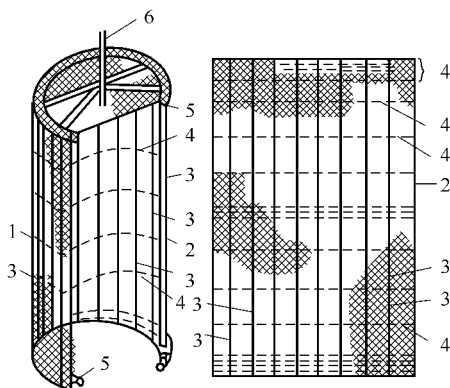


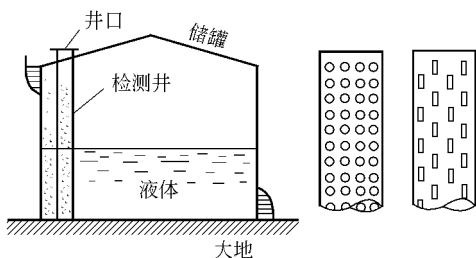
图 6-83 软管或管等的屏蔽

③ 使用金属以外的材料做屏蔽时，应在屏蔽材料的一部分上配上与其紧密结合的金属，并将此金属可靠地接地。如图 6-84 所示的布袋过滤器（简称袋滤器），应使用在布内加导电性纤维或金属线的材料，导电纤维布通过金属环进行接地。另外带电体部分屏蔽的例子如图 6-85 所示，在储油罐内取样和检测的场所，为了限制带电液体电位，可在罐内设置开孔金属圆筒检测井，检测井内孔直径为 30 cm 左右，并应可靠接地。如单纯为了限制带电液面电位上升也可以在罐内各处和罐顶盖与底面之间每隔数米设置垂直的接地金属线或导电性绳索。

图 6-84 掺入导电性纤维的袋滤器



1, 3—导电性纤维 (间隔 1~3cm) ; 2—滤布 ; 4—导电性纤维 (间隔 4~8cm) ; 5—接地金属环 ; 6—吊具 (金属时接地)



(a) 设置检测井

(b) 开孔式检测井

图 6-85 采用检测井减少液面电位

第七章 带电作业安全技术

第一节 一般规定及安全措施

一、带电作业

带电作业是指在没有停电的设备或线路上进行的工作。如在带电的电气设备或线路上，用特殊的方法（如用绝缘杆、等电位、水冲洗等操作方法）进行测试、维护、检修和个别零部件的拆掉工作。

带电作业按作业人员是否直接接触带电导体可分为直接作业和间接作业；按作业人员作业时所处的电位高低可分为等电位作业、中间电位作业和地电位作业。目前带电作业采用的主要方式有：

- ① 间接带电作业；
- ② 等电位作业；
- ③ 沿绝缘子串进入强电场作业；
- ④ 分相作业；
- ⑤ 全电缆作业。

间接带电作业也称地电位作业，是指作业人员站在地上或站在接地物体（如铁塔、杆塔横担）上，与检修设备带电部分保持规定的安全距离，利用绝缘工具对带电导体进行的作业。地电位作业时，有泄漏电流流过人体，流过人体泄漏电流的路径是：地→人→绝缘工具→带电导体。由于人体的电阻很小，绝缘工具的电阻很大，流过人体的泄漏电流主要取决于绝缘工具的绝缘电阻，故要求绝缘工具的绝缘电阻越大越好。

中间电位作业是指人体站在绝缘站台或绝缘梯上，或站在

绝缘合格的升高机具内，手持绝缘工具对带电体进行的作业。中间电位作业也属间接作业范围。这种作业的泄漏电流路径是：地→绝缘站台（梯）→人→绝缘工具→带电导体。中间电位作业时，人处于带电体与绝缘站台之间，人体对带电体、地分别存在电容。由于电容的耦合作用，人体具有一定的电位，此时，人体电位高于地电位而低于带电体电位，因此作业时作业人员应穿屏蔽服和遵守有关规定。

等电位作业就是使作业人员各部位的电位与带电体的电位始终相等的作业。等电位作业是带电作业中直接作业的方式之一，它包括等电位作业、全绝缘作业、分相接地作业等方式。等电位作业时，作业人员穿着全套屏蔽服，借助各种绝缘安全用具进入强电场进行操作。在等电位状态下，人体已与地面完全绝缘而与带电体处于相同电场之中，人体与带电体之间不存在电位差。由于作业人员身体处于屏蔽服保护下，通过人体的电流为零，因此作业人员可直接接触带电体进行工作。

二、带电作业一般规定

① 带电作业人员必须经过培训，考试合格。凡参加带电作业的人员，必须经过严格的工艺培训，并考试合格后才能参加带电作业。

② 工作票签发人和工作负责人必须经过批准。带电作业工作票签发人和工作负责人应具有带电作业实践经验，熟悉带电作业现场和作业工具，对某些不熟悉的带电作业现场，能组织现场查勘，作业判断和确定作业方法及应采取的措施。工作票签发人必须经厂领导批准，工作负责人可经工区领导人批准。

③ 带电作业必须设专人监护，监护人应由有带电作业实践经验的人员担任，监护人不得直接操作，监护的范围不得超过一个作业点，复杂的或高杆塔上的作业应增设塔上监护人。

④ 应用带电作业新项目和新工具时，必须经过科学试验和领导批准。对于比较复杂、难度较大的带电作业新项目和研制的新工具必须进行科学试验，确认安全可靠，编出操作工艺方案和安全措施，并经厂主管生产领导批准后方可使用。

⑤ 带电作业应在良好天气下进行。如遇雷、雨、雪、雾等天气，不得进行带电作业；风力大于5级时，一般不宜进行带电作业。

雷电时，直击雷和感应雷都会产生雷电过电压，该过电压可能使设备绝缘和带电作业工具遭到破坏，给作业人员人身安全带来严重危险；雨、雾天气，绝缘工具长时间在露天中会受潮，使绝缘强度明显下降；高温天气时，作业人员在杆塔、导线上工作时间过长会中暑；严寒风雪天气，导线弛度减小，应力增加，此时作业会加大导线荷载，甚至发生导线断线；当风力大于5级时，空中作业人员会出现较大的侧向受力，工作稳定度差，给作业造成困难，监护能见度差，易引起事故。

在特殊情况下，必须在恶劣天气下进行带电作业时，应组织有关人员充分讨论，采取必要可靠的安全措施，并经厂主管生产的领导批准后方可进行。

⑥ 带电作业必须经调度同意批准。带电作业工作负责人在带电作业工作开始之前，应与调度联系，得到调度的同意后方可进行，工作结束后应向调度汇报。

⑦ 带电作业时应停用重合闸。带电作业有下列情况之一者应停用重合闸，并不得强送电。

a. 中性点有效接地（直接接地）的系统中有可能引起单项接地的作业。

b. 中性点非有效接地（中性点不接地或经消弧线圈接地）的系统中有可能引起相间短路的作业。

c. 工作票签发人或工作负责人认为需要停用重合闸的

作业。

严禁约时停用或恢复重合闸。

⑧ 带电作业过程中设备突然停电不得强送电。如果在带电作业过程中设备突然停电，则作业人员仍视设备为带电设备。此时，应对工具和自身安全措施进行检查，以防出现意外过电压，工作负责人应尽快与调度联系，调度未与工作负责人取得联系前不得强送电。

以上规定适用于在海拔 1000m 及以下交流电 10 ~ 500kV 的高压架空线、发电厂和变电站电气设备上采用等电位、中间电位和地电位方式进行的带电作业及低压带电作业。

三、带电作业一般技术措施

① 保持人身与带电体间的安全距离。作业人员与带电体间的距离，应保证在电力系统中出现最大内外过电压幅值时不发生闪络放电。所以，在进行地电位带电作业时，人身与带电体间的安全距离（带电作业的最小安全距离）不得小于表 7-1 的规定。

35kV 及以下的带电设备，不能满足表 7-1 所列的最小安全距离时，必须采取可靠的绝缘隔离措施。

表 7-1 人身与带电体的安全距离

电压等级 /kV	10	35	63 (66)	110	220	330	500
距离 /m	0.4	0.6	0.7	1.0	1.8 (1.6) ①	2.6	3.6 ②

① 因受设备限制达不到 1.8m 时，经厂（局）主管生产领导（总工程师）批准，并采取必要的措施后，可采用括号内（1.6m）的数值。

② 由于 500kV 带电作业经验不多，此数据为暂定数据。

② 将高压电场场强限制到对人身无损害的程度。如果作业人员身体表面的电场强度短时不超过 220kV/m，则是安全可靠的。如果超过上述值，则应采取必要的安全技术措施，如对人体加以屏蔽。

③ 制订带电作业技术方案。带电作业应事先编写技术方案，技术方案应包括操作工艺方案和严格的操作程序，并采取可靠的安全技术措施。

④ 带电作业时，良好绝缘子数应不少于规定数。带电作业更换绝缘子或在绝缘子串上作业时，良好绝缘子片数不得少于表 7-2 的规定。

表 7-2 良好绝缘子最少片数

电压等级/kV	35	63 (66)	110	220	330	500
片数	2	3	5	9	9	23

如 110kV 架空线路，直线杆塔绝缘子一般 7 片，其中良好绝缘子不少于 5 片。在绝缘子串上带电作业或更换绝缘子时，必然要短接 1~3 片绝缘子，由此引起绝缘子串上分布电容的变化，其电压分布也随之改变，短接部位不同时，电压改变也不同，特别是绝缘子两端引起的电压变化更为悬殊。由于每片绝缘子耐压能力的限制，为保证短接后剩余绝缘子串能可靠承受最大过电压并保持有效安全距离，各电压级线路良好绝缘子片数不少于规定数。

⑤ 带电更换绝缘子时应防止导线脱落。更换直线绝缘子串或移动导线的作业，当采用单吊线装置时，应采取防止导线脱落时的后果保护措施。

更换绝缘子串或移动导线均需吊线作业，此时大多数使用吊线杆、紧线拉杆、平衡式卡线器、托瓶架等专用卡紧装置。在工作过程中，当松开线夹或摘开绝缘子串的挂环时，导线即与杆塔脱开，此时导线仅通过装置控位，若装置机械部分缺陷，导线与装置脱开，则会发生严重的飞线事故。因此，为防止导线脱开飞线事故，应采取后备保持措施，如采用两套绝缘紧线拉杆或结实的绝缘绳，预先将导线紧固在杆塔上适当位

置，以免作业时导线脱开。

⑥ 采用专用短线（或穿屏蔽服）拆、装靠近横担的第一片绝缘子。在绝缘子串未脱离导线前，拆、装靠近杆塔横担的第一片绝缘子时，必须采用专用短接线或穿屏蔽服，方可直接进行操作。

在拆、装靠近横担的第一片绝缘子时，要引起整串绝缘子电容电流回路的通断。由于绝缘子串电压呈非线性分布，通常第一片绝缘子上的等效电容相对较大。作业人员如果直接用手操作，人体虽有电阻，但仍有较大电流瞬间流过人体而产生刺激，出现动作失常而发生危险。接触靠近横担的第一片绝缘子，还有一稳定电流流过人体，电流大小由绝缘子串表面电阻、分布电容及绝缘子脏污程度决定，严重时可达数毫安，对人体造成危害。所以，在导线未脱离之前，应采用专用短接线可靠地短接第一片绝缘子放电，或穿屏蔽服转移流经人体的暂稳态电容电流。

⑦ 带电作业时，应设置围栏。在市区或人口稠密的地区进行带电作业时，带电作业工作现场应设置围栏，严禁非工作人员入内。

第二节 等电位作业

一、等电位作业基本原理及适用范围

根据电工原理，电场中的两点，如果没有电位差，则两点间不会有电流。等电位作业就是利用这个原理，使带电作业人员各部位的电位与带电体的电位始终相等，两者之间不存在电位差。因此，没有电流流过作业人员的身体，从而保证作业人员的人身安全。

由于 63（66）kV 及以上电压等级电力线路和电气设备的

相间及相与地之间的净空距离较大，所以，等电位作业一般适应于 63（66）kV 及以上电压等级的电力线路和电气设备。而 35kV 及以下线路和设备的相间、相与地（相与杆塔构架、相与设备外壳）之间的净空距离较小，加之人体着装屏蔽服后在设备上工作占有一定空间，使上述净空距离更小。所以，35kV 及以下线路和电气设备不适于等电位作业。若须在 35kV 及以下电压等级采用等电位作业，应采取可靠的绝缘隔离措施，在措施可靠的条件下才能进行等电位作业。

二、屏蔽服及使用

在实际作业中，并不能简单地按等电位原理进行作业，还必须解决许多实际问题，如人体进入强电场接近带电体时，带电体对人体放电，人体在强电场中身体各部位产生电位差等。人体虽具有电阻，但电阻值很小，与带电作业所用绝缘梯或空气的绝缘电阻相比，则微不足道，可以忽略而看成导体。当作业人员沿着绝缘梯上攀去接触带电体进行等电位作业时，随着人体与带电体的逐步接近，人体对地电位也逐渐增高，人体与带电体间的电位则逐渐减小。根据静电感应原理，人体上的电荷将重新分布，即接近高压带电体的一端呈异性电荷。当离高压带电体很近时，感应场强很大，足以使空气电离击穿，于是带电体对人体开始放电。随着人体继续接近带电体，放电将加剧，并产生蓝色弧光和“噼啪”放电声，当作业人员用手紧握带电体时，电荷中和放电结束，感应电荷完全消失。此时，人体与带电体等电位，人体电位处于稳定状态。但是，人体与地及人体与相邻相导体之间存在电容，因此仍有电容电流流过人体，但此电流很小，人体一般无感觉。

另外，当人体处在高压电场中时，虽然人体对地是绝缘的，但由于存在人体等效电容效应，使得人体各部位并未完全处于等电位状态，各部分之间电位差并不相同。当人体由地电

位沿绝缘梯（或绝缘子串）过度进入强电场时，均有较大的电位变化和电位差存在。当场强超过一定数值时，人体各部位之间将出现危险的电位差，人体表皮角质层也耐受不了强电场的作用。

为了消除在电位转移过程中的电容充放电现象，削弱高压电场对人体的影响，在高压带电体上进行带电作业时，人体必须穿屏蔽服。

屏蔽服是根据金属球置于强电场中，其内部电场为零的原理制成的，它用经纬布织均匀的柞蚕丝内包有金属丝（不锈钢或铜丝）的布料制成，它像一个特殊的金属网罩，依靠它可以使人体表面的电场强度均匀并减至最小，良好的屏蔽服屏蔽电场效率可达 99.9%，使作业时流经人体的电流几乎全部从屏蔽服上流过，实现了对人身的电流保护。在发生事故的情况下，穿着屏蔽服保护人身安全，对减轻电弧烧伤面积也有一定作用。

屏蔽服的型式应能适应在各种自然气候条件下工作时穿着使用，因而衣型有单、棉之分。成套屏蔽服包括上衣、裤子、鞋子、短袜、手套、帽子以及相应的连接线和连接头。由于具有不同的使用条件，国家带电作业标准化技术委员会规定：屏蔽服有 3 种型号。

① A 型屏蔽服。用屏蔽效率较高、载流量小（布样熔断电流在 5A 以上）的衣料制成，适合于 110 ~ 500kV 电压等级的带电作业使用。

② B 型屏蔽服。具有屏蔽效率高、衣服载流量较大的特点，适合于 35kV 以下电压等级，对地及级间距离窄小的配电线路和变电站带电作业时使用。

③ C 型屏蔽服。具有通透性好、屏蔽效率较高及载流量较大的特点，布样熔断电流不小于 30A。

正确穿着和使用屏蔽服是保证带电作业安全的首要方面，必须认真对待。屏蔽服的穿着和使用注意事项如下。

① 所有屏蔽服的类型应适合作业的线路或设备的电压等级。根据季节不同。屏蔽服内均应有棉衣、夏布衣或按规定穿的阻燃内衣，冬季应将屏蔽服穿在棉衣外面。

② 使用屏蔽服之前，应用万用表和专用电极认真测试整套屏蔽服最远端点之间的电阻值，其数值不应大于 20Ω 。同时，对屏蔽服外部应进行详细检查，看其有无钩挂、破洞及断线折损处，发现后应及时用衣料布加以修补，然后才能使用。

③ 穿着时，应注意整套屏蔽服各部分之间连接可靠、接触良好，这是防止等电位作业人员麻电的根本措施，绝对不能对任何部位的连接检查予以忽视。若屏蔽服与手套之间连接不妥的话，电位过渡时手腕易产生麻电；若不戴屏蔽帽或衣帽之间接触不良时，在电位转移过程中，作业人员未屏蔽的面部很容易产生麻电或电击。

④ 屏蔽服使用完毕，应将屏蔽服卷成圆筒形存放在专门的箱子内，不得挤压，以免造成断丝。夏天使用后洗涤汗水时不得揉搓，可放在较大体积的约 50 左右的热水中浸泡 15min，然后用足量清水漂洗晾干。

三、等电位作业的基本方式

等电位作业有如下几种基本方式。

① 立式绝缘硬梯（含人字梯、独脚梯）等电位作业。该方式多用于变电设备的带电作业。如套管加油、短接断路器、接头处理等。

② 挂梯等电位作业。该方式是将绝缘硬梯垂直悬挂在母线、杆塔横担或构架上，多用于一次变电设备解接搭头的带电作业。

③ 软梯等电位作业。该方式是将绝缘软梯挂在导线

上,用来处理输电线路的防震锤和修补导线,该方法简单方便。

④ 杆上水平梯等电位作业。该方式是将绝缘硬梯水平组装在杆塔上,作业人员进行杆塔附近的等电位作业。

⑤ 绝缘斗臂上的等电位作业。该方式是在汽车活动臂上端的专用绝缘斗中进行带电作业。作业人员站在绝缘斗中,汽车活动臂将他举送到所需高度进行作业。

⑥ 绝缘三角板等电位作业。适用于配电线路杆塔附近的等电位作业。

四、等电位作业安全技术措施

① 等电位作业人员必须在衣服外面穿合格的全套屏蔽服,且各部分应连接好,屏蔽服内还应套阻燃内衣。严禁通过屏蔽服断(接)地电流、空载线路和耦合电容器的电容电流。

由于在等电位沿绝缘梯或沿绝缘子串进入强电场的电位转移过程中会产生电容充放电,高压电场对人体各部位间会产生危险电位差,为保证人身安全,作业人员不仅应屏蔽身体,而且还必须屏蔽人的头部和四肢,所以作业人员应穿全套的屏蔽服。屏蔽服内的阻燃内衣是防止电容充放电时将人体所穿的衣服燃烧着火而设置的。

② 等电位作业人员对地距离不应小于表 7-1 的规定,对邻相导线的距离不应小于表 7-3 的规定。

表 7-3 等电位作业人员对邻相导线的最小距离

电压等级/kV	10	35	63 (66)	110	220	330	500
距离/m	0.6	0.8	0.9	1.4	2.5	3.5	5.0

③ 等电位作业人员在绝缘梯上作业或沿绝缘梯进入强电场时,其与接地体和带电体两部分间所组成的组合间隙不得小于表 7-4 的规定。

表 7-4 组合间隙最小距离

电压等级/kV	35	63 (66)	110	220	330	500
距离/m	0.7	0.8	1.2	2.1	3.1	4.0

④ 等电位作业人员沿绝缘子串进入强电场的作业，只能在 220kV 及以上电压等级的绝缘子串上进行。扣除人体短接的和零值的绝缘子片后，良好绝缘子片数不得小于表 7-2 的规定，其组合间隙不得小于表 7-4 的规定。若组合间隙不满足表 7-4 的规定，应加装保护间隙。

等电位作业人员沿绝缘子串进入强电场，一般要短接 3 片绝缘子，还应考虑可能存在的零值绝缘子，最少以 1 片计。110kV 直线杆绝缘子串共 7 片，扣除 4 片之后少于表 7-2 规定的良好绝缘子片数；而 220kV 直线杆绝缘子串为 13 片，扣除 4 片后，满足最少良好绝缘子 9 片的规定。

人体进入电场后，人体与导线和人体与接地的架构之间形成了组合间隙。用试验的方法将 9 片良好绝缘子串的工频放电电压与上述组合间隙的工频放电电压作比较，发现后者要比前者弱得多。因此，等电位沿绝缘子串进入强电场作业时的安全程度主要取决于该组合间隙的放电特性。据有关资料介绍，220kV 组合间隙两部分之和是固定值 1.35m，随人体在绝缘子串上短接的部位不同，工频放电电压特性曲线呈凹形，其最低值为 606kV，相当于 3 倍操作过电压幅值，比 1.35m 标准间隙的工频放电电压还低约 15%。可见达不到表 7-4 组合间隙最小距离 2.1m 的要求。所以，沿绝缘子串进入强电场的作业，要受限于 220kV 及以下电压等级的系统，良好绝缘子片数不仅要满足表 7-2 的规定，而且，组合间隙距离也满足表 7-4 的规定。若组合间隙距离不满足表 7-4 的规定时，还必须在作业地点附近适当的地方加装保护间隙。

⑤ 等电位作业人员在电位转移前，应得到工作负责人的许可，并系好安全带。转移电位时，人体裸露部分与带电体的距离不应小于表 7-5 的规定。

表 7-5 转移电位时人体裸露部分与带电体的最小距离

电压等级/kV	35 ~ 63 (66)	110 ~ 220	330 ~ 500
距离/m	0.2	0.3	0.4

⑥ 等电位作业人员与地面作业人员传递工具和器材时，必须使用绝缘工具进行，其有效长度应不小于表 7-6 的规定。

表 7-6 绝缘工具最小有效绝缘长度

电压等级/kV	有效绝缘长度/m	
	绝缘操作杆	绝缘承力工具、绝缘绳索
10	0.7	0.4
35	0.9	0.6
63 (66)	1.0	0.7
110	1.3	1.0
220	2.1	1.8
330	3.1	2.8
500	4.0	3.7

⑦ 沿导、地线上悬挂的软、硬梯或飞车进入强电场的作业应遵守下列规定。

a. 在连续档距的导、地线上挂梯（或飞车）时，其导、地线的截面不得小于：

钢芯铝绞线 120mm^2 ；

铜绞线 70mm^2 ；

铝绞线 50mm^2 。

b. 有下列情况之一者，应经验算合格，并经厂主管生产

领导批准后才能进行：在孤立档距的导、地线上的作业；在有断股的导、地线上的作业；在有锈蚀的地线上的作业；在其他型号导、地线上的作业；二人以上在导、地线上的作业。

要保证在导、地线上挂梯或飞车作业的安全，必须使导、地线符合规定的综合抗拉强度。而孤立档距的两杆塔处承受力与直线杆塔有很大不同，需要对整体（含杆塔）承受的侧向力进行核算。导、地线有锈蚀或断股，会使原来的有效截面减小，抗拉能力降低。《电业安全工作规程》未予指明的其他型号导、地线及载荷增加超重和一切变动的因素、非一般情况等，都必须经过验算导、地线强度并证明合格后，方可挂梯作业。

c. 在导、地线上悬挂梯子前，必须检查本档两端杆塔处导、地线的紧固情况。挂梯载荷后，地线及人体对导线的最小间距应比表 7-1 中的数值增大 0.5m，导线及人体对被跨越的电力线路、通信线路和其他建筑物的最小距离应比表 7-1 的安全距离增大 1m。

在导、地线上挂梯，由于集中载荷的作用，必须使导线的弛度增大。另外，工作中人及梯子处于运动状态，考虑安全距离时应留有正常活动范围及人体进入强电场作业会引起作业地点周围电场分布发生变化，使空气绝缘的放电分散性增大。为保证工作时的人身安全，故作上述规定。

d. 在瓷横担线上严禁挂梯作业，在转动横担的线路上挂梯前应将横担固定。

⑧ 等电位作业人员在作业中严禁用酒精、汽油等易燃品擦拭带电体及绝缘部分，防止起火。

五、等电位作业安全注意事项

等电位作业除了满足带电作业的一般规定外，还应注意下列事项。

① 所穿屏蔽服必须符合要求。屏蔽服的技术指标（屏蔽效率、衣料电阻、熔断电流、耐电火花、耐燃、耐洗涤、耐汗蚀、耐磨等）、性能指标（衣服电阻、手套、短袜及鞋子电阻、戴帽后外露面部场强、整套屏蔽服连接后最远端间的电阻、人穿屏蔽服后流过人体电流、头顶场强、衣内胸前胸后场强及温升）均应满足规定要求。

② 带电作业时未屏蔽的面部或颈部不得先接触高压带电体。当人体进行电位转移时，为防止电击，未屏蔽的面部或颈部不得先接触高压带电导体，应用已屏蔽的手先接触导体，且动作要快。

③ 带电作业时，不允许电容电流通过屏蔽服。在等电位作业断开或接通电气设备时，即使电容电流很小，也不允许电容电流通过屏蔽服。

④ 挂梯前，检查绝缘梯应完好。

第三节 带电断、接引线

一、带电断、接引线的基本原则

① 带电断、接引线必须在线路空载的条件下进行。

② 严禁带负荷断、接线路的引线。当带负荷断、接引线时，在断、接点会产生异常强烈的电弧，该电弧会灼伤人的身体，甚至引起短路故障。

二、带电断、接空载线路的规定

① 带电断、接空载线路时，必须确认线路的终端断路器或隔离开关确已断开，接入线路侧的变压器、电压互感器确已退出运行后，方可进行。

按照这种规定，线路的首端与电源相连、线路的终端及线路上均不接任何负载、线路完全处于空载状态时，才可进行带

电断、接空载线路。

② 带电断、接空载线路时，作业人员应戴护目镜，并采取消弧措施，消弧工具的断流能力应与被断、接的空载线路电压等级及电容电流相适应。如使用消弧绳，则其断、接的空载线路的长度不应大于表 7-7 的规定，且作业人员与断开点应保持 4m 以上的距离。

当线路空载时，电源虽不供负荷电流，但向线路供电容电流，线路越长，电容电流越大。当带电断、接空载线路时，在断、接点会产生电容电流电弧，电容电流弧光对人的眼睛会造成伤害，故作业人员作业时，应戴护目镜，并采取消弧措施，消弧工具应能断开相应电压等级、相应长度空载线路的电容电流。

表 7-7 使用消弧绳断、接空载线路的最大长度

电压等级/kV	10	35	63 (66)	110	220
长度/m	50	30	20	10	3

注：线路长度包括分支在内，但不包括电缆线路。

③ 在查明线路确无接地、绝缘良好、线路上无人工作且相别确定无误后，才可进行带电断、接引线。

该项规定关系到带电断、接引线时的工作安全，也关系到系统的安全运行。其理由如下。

a. 如果线路上有人工作，则带电断、接引线使线路上的工作人员极不安全。所以规程要求，要查明线路确实无人工作才带电断、接引线。

b. 如果被接引的空载线路绝缘不良或存在接地，若线路为中性点直接接地系统，则带电接引时，将会引起或发生单相接地短路、在引接点会产生很大单相短路电弧，危及作业人员的安全；若线路为中性点不接地或经消弧线圈接地系统，一相

接地后，虽可继续运行 2h，非接地相电压升高至线电压，线路绝缘受线电压作用，若在薄弱部位发生另一点接地，会形成相间短路，影响系统正常运行。如果出现电容电流很大的接地，则断接引线时使用的消弧管容量有限，可能超过其容量而爆炸。以上都给人身和设备安全带来严重威胁。

c. 带电接引线之前，必须核实线路的相别，不要把 A 相当成了 B 相或 C 相。未经定相核实相别即开始接引线，把相别搞错了，会在受端变电站操作接入电网时发生相间短路。如果直接接引两端带电设备，则会发生相间短路，造成人身及设备重大事故。

d. 带电接引线时，未接通相的导线及带电断引线时已断开相的导线，将因感应而带电，为防止电击，应采取措施后才能触及。

该项说明未接通相的导线及已断开相的导线均处于断开不带电状态，此时，因感应电压存在而不能随便触摸，必须采取措施（导线接地、或穿屏蔽服）后才能触及，否则会遭受电击。

e. 严禁同时接触未接通的或已断开的导线两个断头，以防人体串入电路。

该项说明两根导线均处于断开不带电状态，作业人员不能同时接触两根导线的断头，否则人体将串入两根导线的断头之间，使人体流过感应电流而遭受电击。

三、带电断、接其他电气设备的规定

① 带电断、接耦合电容器时，应将其信号接地、接地刀闸合上并应停用高频保护。被断开的电容器应立即对地放电。

如图 7-1 所示，在 220kV 及以上架空线路起端的一相导线上接有耦合电容器，该耦合电容用于线路的高频保护和电力载波通信。耦合电容的断接影响线路高频保护信号通道的正常工作。对于某些类型的高频保护，当断开耦合电容器时，可能引

起断路器误跳闸；当某些类型高频保护，在耦合电容器接上时，也可能发出异常冲击信号。引起保护误动而跳闸。因此，进行带电断、接耦合电容器之前，应将高频保护停用，并将信号接地，合上耦合电容器的保安接地开关。耦合电容器引线断开后，其上有残余电压，应将其对地放电至电压为零，以免残余电压对人造成触电伤害。

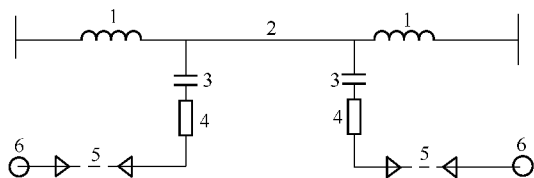


图 7-1 电力线路载波通信构成示意

1—线路阻波器；2—线路；3—耦合电容器；
4—结合设备；5—高频电路；6—载波终端设备

② 带电断、接耦合电容器（包括空载线路、避雷器等）时，应采取防止引流线摆动的措施。

对引流线采取固定措施，防止摆动，可避免因引流线摆动引起短路故障。

③ 严禁用断、接空载线路的方法使两电源解列或并列。

电路的接通或断开，电源的解列和并列，都必须使用断路器，因为断路器能灭弧。两电源并列必须经同期并列。如果采用断、接空载线路的方法使两电源解列或并列，就会引起电弧短路和非同期并列的恶性事故。

第四节 带电短接设备

一、带电短接断路器和隔离开关

用分流线短接断路器（开关）、隔离开关（P 闸）等载流

设备时，必须遵守下列规定。

① 短接前一定要核对相别。即确定三相引线中的 A 相、B 相和 C 相，然后用分流线按相别短接。防止相别搞错而发生相间短路事故。

② 组装分流线的导线处，必须清除氧化层，且夹线接触应牢固可靠。分流线用夹固定接在被短接设备一相的两端，为了减小接触电阻防止运行中接头处过热烧坏及运行可靠，分流线两端表面的氧化层应清除，两端牢固地固接在线夹内，线夹再牢固地固接在被短接设备一相的两端。

③ 35kV 及以下设备使用的绝缘分流线的绝缘水平应符合表 7-8 的规定。绝缘分流线像其他绝缘工具一样，其绝缘性能应按绝缘工具的绝缘试验标准进行试验，其耐压性能符合要求方可使用。

表 7-8 绝缘工具的试验项目及标准

额定电压 /kV	试验长度 /m	1min 工频耐压 /kV		5min 工频耐压 /kV		15 次操作冲击耐压 /kV	
		出厂及型式试验	预防性试验	出厂及型式试验	预防性试验	出厂及型式试验	预防性试验
10	0.4	100	45				
35	0.6	150	95				
63	0.7	175	175				
110	1.0	250	220				
220	1.8	450	440				
330	2.8			420	380	900	800
500	3.7			640	580	1175	1050

④ 断路器必须处于合闸位置，并取下跳闸回路熔断器（保险）、锁死跳闸机构后，方可短接。在进行带电短接时，断路器必须处于合闸位置，而且短接过程中，不许断路器跳

闸，故跳闸回路熔断器（即操作保险）应取下，而且还要将断路器的操作机构锁在合闸位、否则在短接过程中，若断路器瞬间断开，则造成带负荷短接线，在接头处会产生很大的电弧，引起短路故障和人身伤亡。

⑤ 分流线应支撑好，以防摆动造成接地短路，如用绝缘线同相绑扎或作绝缘支撑固定。

二、带电短接阻波器

带电短接阻波器应遵守以下规定。

① 阻波器被短接前，严防等电位作业人员人体短接阻波器。如图 7-1 所示，阻波器是一个无缺芯的电感绕组，电力线路运行时，负荷电流经过阻波器送至用户。为了本端能接收对侧发来的高频保护及高频通信信号，必须设置阻波器，不让高频信号通过阻波器，而只能通过耦合电容器被终端设备接收。阻波器只能通过工频电流。等电位作业时，在短接分流线未装好之前，作业人员不得碰触阻波器，避免出现阻波器全部或部分被人体短接，否则人体成为短接的导体，屏蔽服上将流过负荷电流，电流超过其耐受能力时，屏蔽服将冒火花或被烧坏，导致烧伤电击事故。故作业中，应防止人体短接阻波器。

② 短接阻波器（或开关设备）的分流线截面和两端线夹的载流容量，应满足最大负荷电流的要求。

第五节 带电水冲洗

带电水冲洗就是在高压设备正常运行的情况下，利用电阻率不低于 $1.5\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$ 的水，保持一定的水压和安全距离等条件，使用专门的泵水机械装置，对有污秽的电气设备绝缘部分进行冲洗清污的作业方法。

因绝缘子脏污而发生绝缘子闪络是电力系统中常见的一种

事故。为防止绝缘子污闪，可以在不停电的情况下用压力水冲洗绝缘子，使其经常保持清洁。

一、带电水冲洗的一般规定

① 带电水冲洗一般应在良好天气时进行。风力大于四级，气温低于零下 3℃，雨天、雪天、雾天及雷电天气不宜进行。

带电水冲洗对气候有一定要求，当风力大于四级时，冲洗的水线在脏污处飞溅较厉害，污水在瓷裙沟里不易迅速下流。特别是北方沙尘大的地方，不待瓷瓶干燥，沙尘可能又已落上，复又形成脏污。当气温低于零下 3℃ 时，水对脏物的溶解力已弱，绝缘子上脏污本身粘着易僵固化，影响冲洗效果，甚至无法工作。在雨天和落雾天气，不仅设备绝缘明显下降，易发生对地闪络，而且给冲洗用绝缘工具的安全防护也带来困难。在雷电天气，若设备上落雷或雷电波传入，或雷电感应过电压，则对设备及作业都将带来危害。

② 带电水冲洗作业前，应掌握绝缘子的脏污情况，当盐密度大于表 7-9 临界盐密度的规定时，一般不宜进行水冲洗，否则，应增大水阻率来补救。避雷器及密封不良的设备，不宜进行水冲洗。

污秽强度称盐密度，即受外部环境污染而附着在电气设备绝缘表面每单位面积上的烟灰、水泥尘埃及化工物资等污物的质量数，用以衡量绝缘的脏污程度，其单位为 mg/cm^2 。

电力生产实践及研究表明，污秽强度对污闪电压的影响比较大。绝缘子表面每单位面积上的污秽量越大，其表面的电导也越大，发生污闪的危险性也越大。带电水冲洗是清除瓷质绝缘表面污秽有效和实用的方法。作业时必须切实保证人身和设备安全，要求作业过程中出现操作过电压时，分布在水粒、水管和操作杆上的电压不致对人身构成威胁，同时测量操作人员操作握柄处的泄漏电流不超过 1mA。在这样的前提下进行水

冲洗，当绝缘子按普通型和防污型区分，且两种类型爬电比距（单位泄漏距离，即绝缘在临界闪络状态时，每千伏电压所需的泄漏距离）均为定值时，冲洗用水的电阻率必然随着绝缘子盐密度的增加而对应地增加。

临界盐密度是指当爬电比距一定，泄漏电流按规定不超过1mA，水电阻分别为不同值时所能允许的盐密度的最大值。表7-9给出了爬电比距、水电阻率和临界状态下的盐密度之间的数量关系。进行带电水冲洗作业前，应掌握绝缘子的污秽状况，从水枪出口处取水样测量水的电阻率，将结果与表7-9中数值比较。如果水电阻率达不到规定值，应设法增大所用水的电阻率，否则泄漏电流可能超过标准。

表 7-9 带电水冲洗临界盐密度（仅适用于 220kV 及以下）

项 目	发电厂及变电所支柱绝缘子爬电比距 / (mm/kV)							
	14.8 ~ 16 (普通型)				20 ~ 31 (防污型)			
水电阻率 / ($\Omega \cdot \text{cm}$)	1500	3000	10000	50000 及以上	1500	3000	10000	50000 及以上
临界盐密度 / (mg/cm^2)	0.02	0.04	0.08	0.12	0.08	0.12	0.16	0.2

项 目	线路悬式绝缘子爬电比距 / (mm/kV)							
	14.8 ~ 16 (普通型)				20 ~ 31 (防污型)			
水电阻率 / ($\Omega \cdot \text{cm}$)	1500	3000	10000	50000 及以上	1500	3000	10000	50000 及以上
临界盐密度 / (mg/cm^2)	0.05	0.07	0.12	0.15	0.12	0.15	0.2	0.22

注：1. 330kV 及 500kV 等级的临界盐密度尚不成熟，暂不列入。

2. 爬电比距指电力设备外绝缘的爬电距离与设备最高工作电压之比。

③ 带电水冲洗用水的电阻率一般不低于 $1500\Omega \cdot \text{cm}$ ，冲洗 220kV 变电设备时，水电阻率不应低于 $3000\Omega \cdot \text{cm}$ ，并应符合表 7-9 的要求。每次冲洗前都应用合格的水阻表测量水电

阻率，应在水柱出口处取水样进行测量。如用水车等容器盛水，每车水都应测量水的电阻率。

水电阻率的高低对保证作业人员的人身安全及设备安全都有很大关系。这种影响主要表现在对水柱的绝缘程度上，因而直接牵涉到水柱的工频放电电压。各种水柱长度（0.60m、1.0m、1.40m、1.80m）的工频放电电压表明，在水电阻率从较低值起始增加阶段，工频放电电压增长缓慢（见图 7-2）。所以，电阻率在低值一定范围内变化时，对工频放电电压有明显影响，故《电业安全工作规程》规定水电阻率一般不得低于 $1500\Omega \cdot \text{cm}$ ；变电设备因距离限制及重要性的提高，水电阻率不得低于 $3000\Omega \cdot \text{cm}$ 。对水冲洗用的水质必须严格掌握，要求用合格的水阻表从水枪出口处取水样，对每一车（箱）水都要先测量水电阻率。由图 7-2 可知，当水电阻率达不到要求时，可增加水柱高度、提高水柱工频放电电压，从而弥补因水电阻率降低使其工频放电电压降低的影响。

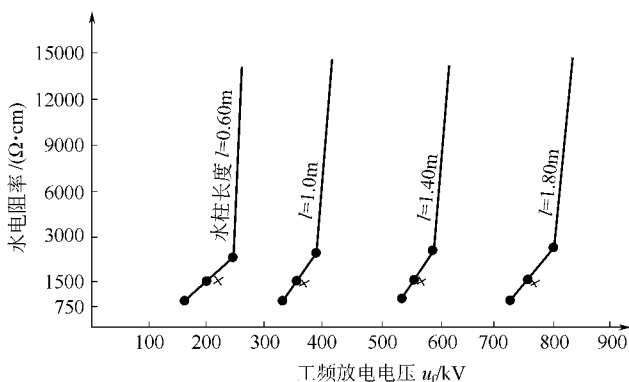


图 7-2 水电阻率与其工频放电电压的关系

④ 以水柱为主绝缘的大、中、小型水冲洗工具（喷嘴直

径为 3mm 及以下者称小水冲；直径为 4 ~ 8mm 者称中水冲；直径为 9mm 及以上者称大小冲），其水枪喷嘴与带电体之间的水柱长度不得小于表 7-10 的规定。大、中型水冲水枪喷嘴均应可靠接地。

表 7-10 水枪喷嘴与带电体之间的水柱长度

电压等级/kV	喷嘴直径/mm			
	3 及以下	4 ~ 8	9 ~ 12	13 ~ 18
63 (66) 及以下	0.8	2	4	6
110	1.2	3	5	7
220	1.8	4	6	8

带电水冲洗工具以水柱作为主要绝缘，而引水管和绝缘操作杆作为辅助绝缘。水柱是承受电压的关键，但水柱的绝缘主要取决于水柱长度，同时，水枪喷嘴直径对绝缘也有较大影响。试验和实践证明，当水电阻一定时，水柱放电电压随水柱长度的增加而增加，对于不同喷嘴直径的水枪，其水柱放电电压也随水柱长度的增加而增加，但增长速度（斜率）不同。对于喷嘴直径不大于 3mm 的小型冲洗工具，当水柱长度大于 1m 至一定范围内，放电电压与水柱长度呈线性增长；而喷嘴直径大于 3mm 的中、大型水冲洗工具，其放电电压与水柱共同增长，放电电压增长速度相比要低得多。当水柱长度、水电阻率为固定值时，水柱放电电压随喷嘴直径增大而降低，各种直径喷嘴的水柱放电电压下降的斜率各有不同。大直径者比小直径者放电电压要低，由此可见，水柱长度对放电电压确定起主要作用。

为了保证带电水冲洗作业人员的人身安全，《电业安全操作规程》规定了喷嘴与带电体之间的水柱长度，表 7-10 的数值是按照系统中可能出现的操作过电压值（该过电压值在中

性点非直接接地系统中为最高运行相电压的 4 倍；在中性点直接接地系统中为最高运行相电压的 3 倍）来确定的。在最高运行相电压状态下，满足表 7-10 中的水柱长度数值时，无论小型水冲洗工具喷嘴是否接地，流经作业人员人体的泄漏电流都不超过 1mA；而使用中、大型水冲洗工具时，即使水柱长度很长，流经人体的泄漏电流也存在大于 1mA 的情况。因此，作业人员应严格遵守安全规定，将大、中型水枪喷嘴可靠接地，要求该接地体的接地电阻不大于 10Ω 。这样不仅可以有效地分流泄漏电流入地，而且在水冲洗过程中，若水柱被工作电压击穿时，可钳制高压电场，将故障电流对地短路泄放，保证作业人员的人身安全。

⑤ 由水柱、绝缘杆、引水管（指有效绝缘部分）组成的小水冲洗工具，其结合绝缘应满足如下要求。

- a. 在工作状态下应能耐受表 7-8 规定的试验电压。
- b. 在最大工频过电压下流经操作人员人体的电流应不超过 1mA，试验时间不小于 5min。

⑥ 利用组合绝缘的小水冲工具进行冲洗时，冲洗工具严禁触及带电体。引水管的有效绝缘部分不得触及接地体。

操作杆的使用及保管均按带电作业工具的有关规定执行。因为水柱、操作杆及引水管在地面的有效绝缘部分分别为其组合绝缘的一部分，在进行水冲洗作业时，应采取相对措施，保持规定的水柱长度，严禁冲洗工具接触带电体，引水管的有效绝缘部分不能与接地体接触，以防该绝缘被短接造成全部工作电压加在水柱和引水管上，瞬间的扰动会产生电压冲击，导致绝缘闪络而发生事故。

⑦ 带电冲洗前应注意调整好水泵压强，使水柱射程远，且水流密集。当水压不足时，不得将水枪对准被冲的带电设备。冲洗用水泵应良好接地。

带电水冲洗时，水柱压强及水线状态对冲闪电压有明显影响。水柱冲到绝缘子表面的压强直接关系到污秽能否被迅速冲掉，绝缘能否迅速恢复及表面溅湿状况。因此冲洗作业前应调整水泵保持适当压强 [可选择 $(1.47 \sim 1.77) \times 10^6 \text{ Pa}$] 使水柱射程远，水流密集，水线状态集中。这样可以保证去污力强及冲洗效果好，而且提高了单位时间内的射流速度，水柱长度也相对地有所增加。此时，沿水线上电压分布趋于均匀，因而冲闪电压高。当水压降低时，水线呈分散状态，空水线周围的空气间隙上电位分散，如果水线中空气泡过大，可能出现先放电现象而导致绝缘闪络。因此，在带电水冲洗之前必须调整水压，使冲洗水柱呈最佳状态。

⑧ 带电水冲洗应注意选择合适的冲洗方法。直径较大的绝缘子宜采用双枪跟踪法或其他方法，并应防止被冲洗设备表面出现污水线。当被冲洗绝缘子未冲洗干净时，水枪切勿强行离开，以免造成闪络。

合适的带电水冲洗方法是根据客观条件和设备的运行状况决定采用的。一定电压等级的设备，相应地确定了该设备绝缘的有效长度和型号等。一定型式的带电水冲洗都要求水柱密集，冲闪电压高，绝缘溅湿面小，泄漏电流不超过 1mA 。在这一前提下，稳定的水冲压力、水线长度，冲洗所适应的范围也是一定的。选择冲洗方法时，要注意从总体上进行技术论证，慎重考虑现场活动区域和场所，根据设备脏污程度、绝缘盐密度大小、绝缘直径等因素比较确定。对于直径较大的设备绝缘采用单枪冲洗时，由于其弧形面积极大，其脏污溅湿面积相对较大，不待一个点冲洗干净，周围其他溅湿处已扯弧或冒烟，一支枪四顾不暇，脏水下流成线状也不易被控制，沿面放电闪络就可能形成。因此，在实践中一般均采用双枪跟踪的方法，两支枪同时进行冲洗，其中一支为主冲，另一支辅助配

合。这样既提高了冲洗速度，避免了污水线的出现，又解决了单枪冲洗时水枪离不开的问题。双枪跟踪冲洗方法是高电压等级大直径绝缘子冲洗的良好方法。

⑨ 带电水冲洗前要确知设备的绝缘是否良好。有零值及低值的绝缘子及其瓷质裂纹时，一般不可冲洗，冲洗将引起绝缘子表面绝缘状态和沿面闪络电位梯度的改变。由于低、零值绝缘子及瓷质有裂纹的绝缘子的绝缘性已经降低，且结构已出现变化，当水污浸湿时，强电场作用下瓷质裂纹处绝缘变化将更加显著。因此，在冲洗前应进行检测，确知设备绝缘状态是否良好。当发现绝缘子的绝缘性能降低时，应先更换后再考虑其他工作。如无可信的技术鉴定手段，则不对破损和低值绝缘子进行带电水冲洗。

⑩ 冲洗悬垂绝缘子串、瓷横担、耐张绝缘子串时，应从导线侧向横担侧依次冲洗。冲洗支柱绝缘子及绝缘瓷套时，应从上向下冲洗。

⑪ 冲洗绝缘子时应注意风向，必须先冲下风侧，后冲上风侧，对于上、下层布置的绝缘子应先冲下层，后冲上层，还要注意冲洗角度，严防临近绝缘子在溅射的水雾中发生闪络。

不同的冲洗顺序将出现不同的绝缘表面状态，对闪络电压发生影响。一种是按顺序从下向上或从导线侧向外递层洗净，冲洗溅湿面最小，不使其他脏物层被淋湿。另一种是从上向下冲洗，不待上层脏物冲洗干净就已将部分绝缘表面渗湿。如果110kV 电流互感器（L-600 型）采用带电水冲清扫，污秽等级取样鉴定为最低级 $0.039\text{mg}/\text{cm}^2$ ，冲洗顺序从上至下，结果不待第一层冲完，活水已从上至下贯穿，湿闪电压大幅度降低，瞬间整个绝缘子严重放弧闪络。与此相反，绝缘清污顺序改为从下向上的方法，污水下流到冲洗过的绝缘表面，也未发生严重放电，直至完全冲洗完毕。由此可见，带电作业冲洗必须严

格遵守上述第⑩、⑪条的规定按操作技艺顺序进行。

二、带电水冲洗的方法

带电水冲洗绝缘子时，由于水并非纯绝缘介质，绝缘子上的带电部分可以看成是带电导体通过电阻接地，这与用绝缘杆进行带电操作相似。所以，用高电阻水柱冲洗绝缘子，与用绝缘杆操作绝缘子的作用相同。不过，水冲洗的泄漏电流有两条回路：一条经由水柱、喷嘴、人体入地；另一条经绝缘子表面泄漏电阻入地。经人体入地的回路要满足对人体安全的要求，经绝缘子表面入地的回路要满足对设备安全的要求（不发生绝缘子表面闪络）。因此，通过人体的泄漏电流主要决定于水柱的电阻值。即冲洗水的电阻。水柱长度除满足前述规定外，还应满足表 7-11 的规定。

表 7-11 水柱长度与电压和喷嘴的关系 单位：m

电压等级/kV	喷嘴直径/mm						
	3 及以下	4 ~ 8		9 ~ 12		13 ~ 18	
	喷 嘴 接 地 方 式						
	接地或不接地	接地	不接地	接地	不接地	接地	不接地
35 ~ 66	0.8	2	3	4	6	6	8
110	1.2	3	4	5	6	7	9
220	1.8	4	5	6	7	8	10

水冲洗运用的喷嘴和水龙带应装在有防雨罩的专用绝缘杆上。在进行水冲洗时，人处在潮湿的环境中。为保证人身安全，若使用大水流喷嘴，喷嘴与水泵均应有可靠的接地线；若使用小水流喷嘴，喷嘴与带电体距离较小，主要靠绝缘操作杆来加强绝缘，以保证安全。因此，操作绝缘杆的绝缘有效长度应满足：

60kV 以下	1.5m	220kV	2.5m
110kV	2.0m	330kV	3.5m

另外，绝缘杆的手柄通常应接地。当采用不接地的绝缘杆时，水枪的水管接头与护环间的绝缘部分应满足以下要求：湿闪电压应大于 3 倍线电压（非接地电流系统）或 3 倍相电压（接地电流系统），持续时间 5min，泄漏电流不大于 1mA。不满足以上需求时，应在护环前接地。

绝缘子带电水冲洗的方法及注意事项如下。

① 冲洗角度。冲洗角度指水柱与所冲洗设备中心轴的夹角。冲洗角度最好保持 90° 。如果条件不允许，可保持 60° ，但角度不宜太小；冲洗耐张绝缘子串时，可采用 $30^\circ \sim 40^\circ$ 的冲洗角度。

② 冲洗绝缘子的顺序。对于垂直安装的绝缘子串，应由下往上逐片进行冲洗；对于耐张绝缘子串，则应先冲洗带电体侧的绝缘子，然后逐片后移，最后冲洗接地端（杆塔横担）的绝缘子。

③ 在同一变电站内，不宜同时冲洗不同的两相，也不得使水柱跨接两相，以防短路。

④ 在冲洗中，由于电压分布的改变，电压高的地方可能产生火花，此时可将水柱直接对准火花冲洗，以使火花熄灭。

⑤ 冲洗水柱不得冲到设备上密封不良和有缺陷的部位，也不得将水柱对着隔离开关动、静触头处冲洗，以免冲开刀闸造成事故。

⑥ 风力大、空气湿度高和阴雨天气以及水与绝缘子的温差大时，都不宜进行水冲洗作业。

第六节 带电爆炸压接和感应电压防护

带电爆炸压接指在带电的情况下采用爆炸压接的方法压接导线和接头。

一、雷管在电场中的自爆及预防措施

电雷管或火雷管发生自行起爆，除产品质量因素外，均因其能量积聚达到雷管正装药（起爆药，引爆药）发火点温度的结果。火雷管在未经外部导火索点燃即发生自行爆炸，是由于操作人员在等电位状态或绝缘梯上点火时，使带电导体与引爆系统中的雷管、导火索、拉火管及其元件与穿屏蔽服的人员、绝缘梯至空气和大地之间形成了不利的电容泄漏电流回路。另一方面，挂在导线上的绝缘梯等作业工具的等效电容在强电场之中，必然也会产生电容电流入地。因此，如果引爆系统屏蔽不够完善，使雷管中流过泄漏电流和电容电流达到一定的数值和作用时间，电流转化成足够的热能达到雷管炸药点燃温度（约 180℃）时，即可发生自行爆炸。

针对雷管自爆的原因，为防止雷管在电场中自行起爆，应采取以下严密措施。

① 带电爆炸压接应使用工业 8 号纸壳火雷管。8 号纸壳火雷管所用炸药安定性好，爆炸稳定性高，通体除金属加强帽之外，无其他金属。

② 为防止雷管在电场中自行起爆，引爆系统（包括雷管、导火索、拉火管）必须全部屏蔽。引爆系统采用锡箔纸包缠，以屏蔽电场的作用，并使得引爆系统各元件与带电体等电位。包缠锡箔时，应做到合格屏蔽，使泄漏电流不通过雷管本身。

③ 引爆方式可采用地面引爆和等电位引爆。当采用等电位引爆时，应做到引爆系统与导线连接牢固。安装引爆系统时，作业人员应始终与导线保持等电位。

④ 提前在地面上详细检查火雷管与引爆系统的连接情况及其屏蔽措施，保证各部位可靠且屏蔽合格，防止间隙产生火花。

二、爆炸压接对空气绝缘的影响及安全措施

炸药爆炸压接导线时会造成空气绝缘降低，这是由于爆炸过程中的高温高压气流使周围空气介质被电离，爆炸系统的各纸、纤维质外皮被炭化成灰尘状导电微粒以及所用炸药的参数等多方面因素综合作用产生的结果。其中，主要的因素是空气状态的改变。炸药爆炸瞬间产生数千摄氏度的高温，必然会加速空气介质中质点的运转速度，引起气体分子的热游离。同时，高压电场中的电子在受到爆炸所产生的高压冲击波和强电场作用后，也会产生碰撞游离和光游离。这些游离使得在爆压接头与邻相或与接地端之间的空气间隙中，电子崩得以形成和发展并成为正负离子混合的高电导通道区域，故而混合空气中瞬间的绝缘能力降得很低。此时，如果电子崩使游离继续向杆塔和接地端发展，就可能发生电击穿。由此可知，爆炸压接能使周围空气间隙瞬间猛然下降，造成空气击穿和断路器跳闸。为此，进行爆炸压接作业时，应遵守以下规定和措施。

① 爆炸压接时，爆炸点对地及相间的安全距离应满足表 7-12 的规定。

表 7-12 爆炸点对地及相间的安全距离

电压等级/kV	63 (66) 及以下	110	220	230	500
距离/m	2.0	2.5	3.0	3.5	5

② 如果不能满足表 7-12 的规定，可在药包外包食盐或聚氨酯泡沫塑料，以减小由于爆炸时造成的空气绝缘的降低。

因为食盐的热容量很大，在 300℃ 高温时可气化，爆炸瞬间食盐气化后可大量吸收热量，降低了爆炸点周围空气温度，破坏了光热游离的产生条件。具体使用时，根据经验，食盐用量一般为炸药量的 5 ~ 7 倍，将食盐粉用塑料袋包装并加封，操作时均匀缠在药包外面。对于聚氨酯泡沫塑料的用量，约取

0.25 ~ 0.3kg 为宜。

三、带电爆炸压接安全注意事项

爆炸压接时，不仅使爆炸点周围空气绝缘骤然下降，而且爆炸产生的冲击波可能伤害人体和瓷质绝缘。为预防设备损坏和保证作业人员的人身安全，带电爆炸压接应注意下列事项。

① 爆炸压接时，所有工作人员均应撤到离爆炸点 30m 以外且与雷管开口端反向的安全区。

为了保证作业人员顺利撤至安全区，不论采用何种引爆方式，均应对导火索做燃索试验，根据导火索燃尽时间预备足够长度，保证作业人员安全撤至 30m 以外的安全区域。这个距离是按照安全等级和最大用药量下的冲击波对人员的危害程度，通过计算和实践确定的。

为了防止雷管金属加强帽伤人，在引爆之前应确定作业人员的撤离方向，必须与雷管开口端方向相反。

② 爆炸压接时，爆炸点距绝缘子、分流线、金属承力工具之间的距离应不大于表 7-13 的规定，否则应采取保护措施。

表 7-13 爆炸点距邻近物的最小距离

邻近物	金属承力工具及分流线	绝缘子	绝缘工具
距离/m	0.4	0.6	1.0

爆炸压接时，爆炸点与设备之间必须保持表 7-13 规定的最小距离，这是针对冲击波防护而言的。由于设备绝缘和它本身都具有一定的抗弯破坏应力，且机械强度耐受力相对较高，当满足该最小距离时，设备可以不受影响。

③ 若分裂导线间距小于 0.4m，应设法加大距离或采取保护措施。加大距离或加护管护线措施，以防止造成导线和绝缘结构、工具等硬性损伤。

④ 出现哑炮时，应按《电业安全工作规程》（热力和机械

部分)》的有关规定处理。爆炸压接使用的炸药、雷管、导火索、拉火管均为易燃、易爆物品,均应按上述规程的有关规定加以管理。

爆炸压接中出现哑炮的原因可能为导火索、拉火管或雷管受潮,引爆系统连接松动,雷管失效等。由于药包和引爆系统处于强电场之中,处理哑炮时必须严格执行有关规程和专业工作制度,重点注意下述两点。

a. 必须由经过专门培训并取得带电爆炸压接工作合格证的富有爆破工作实践经验的人员操作,或由他们亲自加以指导。药包该响未响,应耐心等待 20min 以上方可处理。查处时,应预先制订方案并按步骤实施。

b. 等电位接触引爆系统前,应首先考虑电位转移而平稳过渡接触,避免产生扰动和冲击。在施行等电位处理的全过程中,应注意使引爆系统始终保持在良好的屏蔽状态。将其拆除时,应按照与装接相反的顺序进行,防止有任何一个拆离动作中产生火花。引爆系统与药包分离后,应完整地将其带至地面后加以处理。

四、感应电压防护

当作业人员在线路杆塔上脚穿绝缘鞋进行间接带电作业时,人体会感应电荷,因而人体就感应有电压,在相同情况和条件下比较,对地绝缘越好,感应的电压就越高。故感应电压是由于电荷在绝缘状态下集聚而成的。当人体处于地电位塔身之上的各处时,测试人体的感应电流均在 1mA 以下,对人体不构成威胁,若作业人员与接地的塔身绝缘(或接触不良)而偶尔接触铁塔杆架时,突然的麻电可能使作业人员失去控制而发生高空摔跤事故。当线路电压等级为 220kV 及 220kV 以上时,感应电压已经不容忽视,登杆作业人员必须采取下列安全防护措施。

① 在 220 ~ 500kV 电压等级的线路杆塔上及变电站构架上作业，必须采取防静电感应措施，如穿静电感应防护服或导电鞋等。

在杆塔上穿静电感应防护服和导电鞋后，可以保持人体与地的良好接触，将人体感应的电荷泄漏入地。

② 带电更换架空地线或架设耦合地线时，应通过放线滑车可靠接地。

架空地线是高压线路防雷的基本措施。为了提高线路的耐雷水平，防止反击，最有效的措施是降低杆塔的接地电阻。当降低杆塔的接地电阻有困难时，可在导线下面架设地线，用以增加避雷线与导线之间的耦合电容，降低绝缘子串上的电压，从而降低线路遭雷击跳闸的概率。这种提高防雷的效果是通过耦合来实现的，故将架设在导线下方的地线称之为耦合地线。

架空地线或耦合地线虽与杆塔接触良好，在进行带电作业时，某一侧或某一段在一定时间内可能与杆塔构架解开悬空，与地电位隔离而产生感应电压。带电更换架空地线或架设耦合地线时，为防止地线或耦合地线感应电压对作业人员的伤害，防止作业过程中地线或耦合地线触及带电导线而电击作业人员，作业前应通过放线滑车将地线或耦合地线可靠接地。

③ 绝缘架空地线应视为带电体。作业人员与绝缘架空地线之间的距离不应小于 0.4m。如需在绝缘架空地线上作业，应用接地线将其可靠接地或采用等电位方式进行。

绝缘架空地线是经过一个小间隙对地隔开来的避雷线。它除了可以避雷外，还可在正常运行和检修时兼做通信线。将架空地线绝缘起来是为了降低电流流过时所引起的附加损耗。当有雷电过电压出现时，小间隙击穿，不影响避雷线接地泄放雷电流。

绝缘架空地线不仅有通信信号工作电流，而且由于它对地

具有一定的绝缘，将其沿全线绝缘架设后，而产生的感应电压可达数千伏以上。因此，必须将绝缘架空地线视为带电体，带电作业时，作业人员与绝缘架空地线之间的空间距离不得小于0.4m，并采取其他预防措施。如需要在绝缘架空地线上工作时，应将绝缘地线可靠接地。当实际条件允许时，也可以采用等电位作业方式。

④ 用绝缘绳索传递大件金属物品（包括工具、材料等）时，杆塔或地面上作业人员应将金属物品接地后再接触，以防电击。

第七节 高架绝缘斗臂车带电作业

一、高架绝缘斗臂车

高架绝缘斗臂车多数用汽车发动机和底盘改装而成。它安装有液压支腿，将液压斗臂安装在可以旋转 360° 的车后活动底盘上，成为可以载人进行升降作业的专用汽车。绝缘斗臂用绝缘性能良好的材料制成，采用折叠伸缩结构，电力系统借助高架绝缘斗臂车带电作业，减轻了作业人员的劳动强度，改善了劳动条件，并且使一些因间隔距离小、用其他工具很难实施的项目作业得以实现。

二、高架绝缘斗臂车带电作业安全规定

用高架绝缘斗臂车进行带电作业时，应遵守下列安全规定。

① 使用前应认真检查，并在预定位置空斗试操作一次，确认液压传动、回转、升降、伸缩系统工作正常，操作灵活，制动装置可靠，方可使用。

② 绝缘臂的有效绝缘长度（最小长度）应大于表 7-14 的规定，并应在其下端装设泄漏电流监视装置。

表 7-14 绝缘臂的最小长度

电压等级/kV	10	35 ~ 63 (66)	110	220
长度/m	1.0	1.5	2.0	3.0

绝缘臂在荷重作业状态下处于动态过程中，绝缘臂铰接处结构容易被损伤，出现不易被发现的细微裂纹，虽然对机械强度无甚影响，但会引起耐电强度下降，其表现在带电作业时，绝缘斗臂的绝缘电阻下降，泄漏电流增加。因此，带电作业时，在绝缘臂下端装设泄漏电流监视装置是很有必要的。在实际工作中，除严格执行有关监视、检查的规定外，还应遵守表 7-14 的规定。

③ 绝缘斗臂下节的金属部分，在仰起回转过程中，对带电体的距离应按表 7-1 的规定值增加 0.5m。工作中车体应良好接地。

表 7-1 规定的人身与带电体应保持的安全距离是一个最小的静态界限，且间隙空气绝缘是稳定的。一般作业时，只要按章操作并严格监护，不会出现危险接近和失常的情况。而绝缘斗臂下节的金属部分，因外型几何尺寸与活动范围均较大，操纵控制仰起回转角难以准确掌握，存在状态失控的可能。绝缘斗体积较大，介入高压电场导体附近时，下部机车喷出的烟雾会对空气产生扰动和性能影响，使间隙的气体放电电压下降，分散性变大。因而必须综合考虑绝缘斗臂下节的金属部分对带电体的安全距离。按《电业安全工作规程》规定，该安全距离应比表 7-1 规定的最小安全距离大 0.5m。

④ 绝缘斗用于 10 ~ 35kV 带电作业时，其壁厚及层间绝缘水平应满足表 7-8 耐电压的规定。

要将强电场与接地的机械金属部分隔开，绝缘斗及斗臂绝缘应有足够的耐电强度，要求与高压带电作业的绝缘工具一

样，对斗臂和层间绝缘分别按周期进行耐压试验，试验项目及标准满足表 7-8 的规定。

三、操作绝缘斗臂车注意事项

操作绝缘斗臂车进行专业工作属于带电作业范畴，应与带电作业同样严格要求。故要求操作绝缘斗臂的人员应熟悉带电作业的有关规定、熟练掌握斗臂车的操作技术。由于操作斗臂车直接关系到高空作业人员的安全，所以操作斗臂车的人员应经专门培训，在操作过程中不得离开操作台，且斗臂车的发动机不得熄火，以便意外情况发生时能及时升降斗臂，以免造成压力不足、机械臂自然下降而引发作业事故。

第八节 带电气吹清扫

带电气吹清扫系指对未停电设备的瓷质绝缘表面，用压缩气体和干燥的锯末进行气吹清扫，清除瓷质绝缘表面的脏污，使瓷质保持清洁。

一、带电气吹清扫用具的性能试验

带电气吹清扫用具应做以下性能试验。

① 用于气吹的操作杆和出气软管，应按表 7-8 相应电压等级要求耐压试验合格。

气吹清扫所用的操作杆和出气软管，作业时要接触和接近高压设备，处于强电场之中。为了握杆人员的安全和电气设备的正常运行，必须按表 7-8 规定项目进行耐压试验，并试验合格。

② 对气吹清扫用的储气风包，出气软管及辅助罐等压力容器应作水压试验（ $108\text{N}/\text{cm}^2$ ）。

气吹清扫使用的是高压力的气流和具有一定质量的绝缘颗粒辅料（干燥锯末）。所有与该压力连通承压的部分（如储存

空气的风包、辅料罐输送软管等) 都应进行水压力试验, 完整地检验各部件的密封程度和制作材料的强度。《电业安全工作规程》规定的水压试验强度为 1.08MPa (即 $108\text{N}/\text{cm}^2$)。

二、带电气吹清扫喷嘴的基本要求

对带电气吹清扫所用喷嘴的要求是: 喷嘴宜用硬质绝缘材料制成。若用金属材料制作喷嘴, 其长度不宜超过 100mm 。喷嘴内径以 $3.5 \sim 6\text{mm}$ 为宜。

使用硬质绝缘材料制作喷嘴, 不会像金属喷嘴那样, 在介入电场中时有可能使绝缘子串上相应长度内的爬电距离被短接。特别是对于电压等级较低的设备, 如使用金属喷嘴所引起的电场分布的变化较为突出。故《电业安全工作规程》规定了金属喷嘴的最大长度, 要求不超过 100mm , 且喷嘴内径以 $3.5 \sim 6\text{mm}$ 为宜。喷嘴内径过大, 不但增加辅料用量, 造成不必要的浪费, 而且作用在电瓷表面的冲力过大还会损伤瓷釉, 而喷嘴内径过小, 出气管容易阻塞, 喷出的流体质量太少, 影响清擦效果。

三、对带电气吹清扫用锯末辅料的要求

对用作带电气吹清扫的锯末辅料的基本要求是: 锯末辅料需经 $16 \sim 30$ 目筛网筛选和干燥。装入辅料罐前, 应用 2500V 兆欧表进行测量, 其绝缘电阻应大于 $9000\text{M}\Omega$ 。

采用木锯末辅料进行气吹清扫时, 在高压气流的推动下, 锯末从地电位处向设备绝缘喷出, 与带电水冲洗相似, 也存在着绝缘能力泄漏标准的问题。所以, 在干燥过的锯末未装罐之前, 必须用 2500V 兆欧表测量其绝缘电阻, 其值不得小于 $9000\text{M}\Omega$ 。用 $16 \sim 30$ 目网筛筛去锯末中的大颗粒木屑, 以防止气冲清扫过程中堵塞软管, 而且试验证明, 采用 $16 \sim 30$ 目的木锯末清扫, 其擦扫效果也较好。为确保绝缘电阻合格, 筛选后的锯末应立即进行干燥处理, 蒸发掉锯末中的水分, 这是提

高木锯末辅助绝缘电阻值的基本手段。

四、空气压缩机的检查和调试

带电气吹清扫用的空气压缩机在清扫工作开始之前，应认真进行检查和调试，检查和调试的主要内容如下。

① 空气压缩机启动后按步骤调试，保证在作业过程中空气压缩机各部位运转正常。

② 按压力标准试验空气压缩机所装安全阀门，当超过 1.08MPa 压力强度时，安全阀门应能可靠动作，以防止机械失控或出气管、喷嘴堵塞时爆破风包和软管。

③ 使用前应检查并将风包内余水放尽，保证清扫用木锯末辅料的绝缘不致下降。

④ 调试并保持空气压缩机正常排气压力在 0.59 ~ 0.98MPa (59 ~ 98N/cm²)。

五、带电气吹清扫操作人员安全防护

带电气吹清扫操作人员在清扫时应注意下列安全防护。

① 根据被清扫设备电压等级，确定出与被清扫设备带电部分的安全距离，且应符合表 7-1 的规定。

② 操作人员应具备空气压缩机运行操作方面的知识，掌握喷嘴堵塞时进行处理的一般技能。

③ 按照防尘作业条件着装。操作人员应戴护目镜、口罩和防尘帽，穿工作服并扣紧袖口和领口。根据天气风向，操作人员应在上风侧合适位置进行操作。

六、带电气吹清扫安全注意事项

带电气吹清扫是利用干燥的锯末辅料自高压喷嘴喷射的冲量冲洗瓷质绝缘表面，适于清扫渗漏油污。为保证最佳安全清擦效果，应注意以下两点。

① 在带电气吹作业时，作业人员应注意喷嘴不得垂直电瓷表面及定点吹气，应选择合适的角度。当角度过大或接近垂

直时，不但清擦效果不佳，而且如果电瓷绝缘存在缺陷，所有冲量几乎全部作用在釉质层上，可能损坏电瓷和釉质表面层。同理，定点气吹也应该避免。

② 带电气吹清扫时，如遇喷嘴锯末阻塞，应先减压，再行清除障碍。锯末阻塞喷嘴会造成风包内储压增高，此时，若立即处理喷嘴阻塞的障碍，不仅不易消除，时间过长安全阀即会动作。而故障一旦消除后，因储压偏高，又容易出现冲击现象。因此应先减压，再处理喷嘴阻塞。

第九节 带电检测和保护间隙

带电检测就是带电检查绝缘子的绝缘状况。

在等电位作业时，作业人员沿绝缘子串进入强电场，若组合间隙不满足表 7-4 的规定时，应加装保护间隙。

一、带电检测绝缘子

使用火花间隙检测绝缘子时，应遵守下列规定。

① 检测前应对检测器进行检测，保证操作灵活、测量准确。

② 针式及少于 3 片的悬式绝缘子不得使用火花间隙检测器进行检测。

火花间隙检测器是一种带电条件下测试线路悬式绝缘子状况的简便测试器具。它是由绝缘杆和装在其顶端的叉形金属火花间隙组成的。常用的火花间隙检测器有两种，一种是固定间隙式，另一种是可调间隙式。由于良好绝缘子两端按绝缘子串电压分布规律均有数千伏的分布电压，当把金属叉形火花间隙的两端与某片绝缘子两端的金属部分接触时，良好绝缘子上的电压差使间隙击穿发生火花现象或听到“嘶嘶”放电声响。若绝缘子已击穿（零值绝缘子）或绝缘电阻很低，则绝缘子

不存在电位差或电位差很小，因而不会有火花和放电响声。由此可知，火花间隙检测法，实际是用试短接一片绝缘子的方法来判断绝缘子的绝缘性能。少于3片的绝缘子串，如果有一片已成为零值，则进行检测时将直接引起接地短路，并烧坏器具，造成设备事故。

③ 当检测35kV及以上电压等级的绝缘子串时，发现同一串中的零值绝缘子片数达到表7-15的规定，应立即停止。如果绝缘子串的总片数超过表7-15规定时，零值绝缘子片数可相应增加。

表 7-15 一串中允许零值绝缘子片数

电压等级/kV	35	63 (66)	110	220	330	500
绝缘子串总片数	3	5	7	13	19	28
零值绝缘子片数	1	2	3	5	4	6

各电压级的绝缘子串都按其安全经济设计技术条件规定有相应的片数，各电压级类型的绝缘子也都有其能够耐受的最高工作电压的限制。当运行中出现内、外过电压时，会使一串绝缘子中的某几片被击穿，剩余完好绝缘子上的电压将重新分布，有的可能已经接近它的极限耐压值，因此，为保证安全，对各电压级良好绝缘子最少片数予以规定。当测试中发现该串绝缘子零值片数已达到表7-15规定的片数时，其他完好绝缘子上的电压分布已经很高，并且未被检测的绝缘子中仍然可能还有零值绝缘子。如若继续短接测试，就可能引出绝缘子被相继击穿的事故。所以，当遇一串绝缘子中的零值绝缘子片数已达到规定界限时，应立即停止检测工作。

④ 带电检测绝缘子应在干燥天气进行。火花间隙检测器检测绝缘子是靠叉形金属间隙处空气被电离产生的火花或声响来判断的，这与绝缘子的干湿状况关系较大。如果阴雨天气湿

度大，绝缘子泄漏电流必然也较大。若此时检测绝缘子，即使火花间隙调小，由于火花和声响微弱，不易做出准确判断。阴雨天气线路发生闪络事故的机会也多。所以，带电检测绝缘子应选择晴朗干燥天气进行。

二、保护间隙

1. 保护间隙及其作用

保护间隙是针对带电作业安全的实际需要，采用不同于管型和阀型避雷器等形式的防止高压线路带电作业时，过电压造成对作业人员危险伤害的保护装置。

在 220kV 及以上系统中，由于作业人员沿绝缘子串进入强电场作业，人体与导线和人体与大地间必然形成组合间隙。该组合间隙的放电特性低于剩余完好绝缘子串的工频放电特性，远低于带电作业时相应电压等级安全距离的绝缘水平。而 220kV 及以上超高压线路设备的安全距离主要取决于内部过电压，为了防止带电作业中出现超过组合间隙放电电压的内过电压放电，采用了保护间隙，以防发生人身设备事故。其方法是在作业地点附近的设备或杆塔上与线路并联一个保护间隙，使它的放电电压低于组合间隙的放电电压，并且两间隙的伏秒特性曲线上下限合理配合，在过电压到来的任何情况下能保证保护间隙先行放电，达到带电作业安全防护的目的。

2. 保护间隙的容量要求

为了保证过电压来到时可靠先行放电，保护间隙的接地线应用多股软铜线。其截面应能满足接地短路容量的要求，在保护间隙放电的情况下，间隙放电电流不会烧断接地线。接地线的最小截面不得小于 25mm^2 。

3. 保护间隙定值的整定

采用圆弧形保护间隙，其间隙距离按表 7-16 的规定进行整定。

表 7-16 圆弧形保护间隙定值

电压等级/kV	220	330
间隙定值/m	0.7~0.8	1.0~1.1

整定圆弧形保护间隙定值时，应以保证带电作业人员人身安全并兼顾运行设备安全为原则。对保护间隙定值的整定，首先要确保作业人员的人身安全，当系统出现危险过电压时，保护间隙即能可靠动作，又必须保证系统的安全运行。加装保护间隙后，在线路工频电压作用下，线路或设备保护不误动作，即使是正确动作，也不应过多地增加线路断路器跳闸的次数。

4. 使用保护间隙的规定

使用保护间隙时，应遵守下列规定。

① 悬挂保护间隙前，应与调度联系停用重合闸。

凡是与系统相关的作业都必须与系统调度联系，并得到调度的同意，万一在作业中发生异常的情况，也可使调度预先作出安排。根据带电作业的一般规定，作业过程中突然停电不得强送电，故作业前与调度联系，停用重合闸。

② 悬挂保护间隙前，要进行全面检查。包括圆弧形间隙形状及限位、定位装置应良好；调整应灵活；间隙挂钩压紧弹簧卡子弹力合适；接线完好，其截面符合规定。将间隙按定值进行试调整，无问题后再调到该挡范围最大值处。

③ 悬挂保护间隙应先将其与接地网可靠接地，再将保护间隙挂在导线上，并使其接触良好。拆除程序相反。

悬挂保护间隙的方法与悬挂接地地线的方式相似，为保证悬挂时的人身安全，应先将保护间隙的接地端与接地网可靠连接，然后再挂导线端，并与导线接触良好。拆除顺序相反。

将保护间隙悬挂在导线上时，最好先并拢双脚立定位置，再将它挂在导线上，待作业人员即将进入绝缘子串工作时，才

将间隙调整至整定距离定位限制。

④ 保护间隙应挂在相邻杆塔的导线上，悬挂后，应派专人看守，在有人畜通过的地区，还应增设围栏。

⑤ 装拆保护间隙的人员应穿全套屏蔽服。

第十节 低压带电作业

低压系统电压在 250V 及以下。低压带电作业是指不停电的低压设备或低压线路上的工作。

对于一些可以不停电的工作，没有偶然触及带电部分的危险工作，或作业人员使用绝缘辅助安全用具直接接触带电体及在带电设备外壳上的工作，均可进行低压带电作业。虽然低压带电作业的对地电压不超过 250V，但不能理解为此电压为安全电压，实际上交流 220V 电源的触电对人身的危害是严重的，特别是低压带电作业使用很普遍，为防止低压带电作业对人身的触电伤害，作业人员应严格遵守低压带电作业有关规定和注意事项。

一、低压设备带电作业安全规定

在低压设备上带电作业，应遵守下列规定。

① 在带电的低压设备上工作，应使用有绝缘柄的工具，工作时应站在干燥的绝缘垫、绝缘站台或其他绝缘物上进行，严禁使用锉刀、金属尺和带有金属物的毛刷、毛掸等工具。使用有绝缘柄的工具，可以防止人体直接接触带电体。站在绝缘垫上工作，人体即使触及带电体，也不会造成触电伤害。低压带电作业时使用金属工具，金属工具可能引起相间短路或对地短路事故。

② 在带电的低压设备上工作时，作业人员应穿长袖工作服，并戴手套和安全帽。戴手套可以防止作业时手触及带电

体；戴安全帽可以防止作业过程中头部同时触及带电体及接地的金属盘架，造成头部接近短路或头部碰伤；穿长袖工作服可防止手臂同时触及带电和接地体引起短路和烧伤事故。

③ 在带电的低压盘上工作时，应采取防止相间短路和单相接地短路的绝缘隔离措施。在带电的低压盘上工作时，为防止人体或作业工具同时触及两相带电体或一相带电体与接地体，在作业前将相与相间或相与地（盘构架）间用绝缘板隔离，以免作业过程中引起短路事故。

④ 严禁雷、雨、雪天气及六级以上大风天气在户外带电作业，也不应在雷电天气进行室内带电作业。

雷电天气，系统容易引起雷电过电压，危及作业人员的安全，不应进行室内、外带电作业；雨雪天气、气候潮湿，不宜带电作业。

⑤ 在潮湿和潮气过大的室内，禁止带电作业；工作位置过于狭窄时，禁止带电作业。

⑥ 低压带电作业时，必须有专人监护。带电作业时由于作业场地、空间狭小，带电体之间、带电体与地之间绝缘距离小，或由于作业时的错误动作，均可能引起触电事故，因此，带电作业时，必须有专人监护；监护人应始终在工作现场，并对作业人员进行认真监护，随时纠正不正确的动作。

二、低压线路带电作业安全规定

在 400V 三相四线制的线路上带电作业时，应遵守下列规定。

① 上杆前应先分清火、地线，选好工作位置。在登杆前，应在地面上先分清火、地线。只有这样才能选好杆上的作业位置和角度。在地面辨别火、地线时，一般根据一些标志和排列方向、照明设备接线等进行辨认。初步确定火、地线后，可在登杆后用验电器或低压试电笔进行测试，必要时可用电压表进

行测量。

② 断开低压线路导线时，应先断开火线，后断开地线。搭接导线时，顺序应相反。三相四线制低压线路在正常情况下接有动力、照明及家电负荷。当带电断开低压线路时，如果先断开零线，则因各相负荷不平衡使该电源系统中性点会出现较大偏移电压，造成零线带电，断开时会产生电弧。因此，断开四根线均会带电断开。故应按《电业安全工作规程》规定，先断火线，后断地线。接通时，先接零线，后接火线。

③ 人体不得同时接触两根线头。带电作业时，若人体同时接触两根线头，则人体串入电路造成人体触电伤害。

④ 高低压同杆架设，在低压带电线路工作上时，应先检查与高压线的距离，采取防止误碰带电高压线或高压设备的措施。在低压带电导线未采取绝缘措施时（裸导线），工作人员不得穿越。

高低压同杆架设，在低压带电线路工作上时，作业人员与高压带电体的距离应不小于表 7-1 的规定，还应采取以下措施。

- a. 防止误碰，误接近高压导线的措施；
- b. 登杆后在低压线路上工作，防止低压接地短路及混线的作业措施；
- c. 工作中在低压导线（裸导线）上穿越的绝缘隔离措施。

⑤ 严禁雷、雨、雪天气及六级以上大风天气在户外低压线路上带电作业。

⑥ 低压线路带电作业，必须设专人监护，必要时杆上设专人监护。

三、低压带电作业注意事项

① 带电作业人员必须经过培训并考试合格，工作时不少于 2 人。

- ② 严禁穿背心、短裤，穿拖鞋带电作业。
- ③ 带电作业使用的工具应合格，绝缘工具应试验合格。
- ④ 低压带电作业时，人体对地必须保持可靠的绝缘。
- ⑤ 在低压配电盘上工作，必须装设防止短路事故发生的隔离措施。
- ⑥ 只能在作业人员的一侧带电，若其他还有带电部分而又无法采取安全措施者，则必须将其他侧电源切断。
- ⑦ 带电作业时，若已接触一相火线，要特别注意不要再接触其他火线或地线（或接地部分）。
- ⑧ 带电作业时间不宜过长。

第八章 电工维修作业安全技术

第一节 电气安全作业一般措施

一、加强安全教育

安全生产，人人有责。各级领导要以身作则，充分发动群众、依靠群众，搞好安全生产。人人树立“安全第一”的观点，个个都做安全教育工作，大力宣传《电力设施保护条例》，力争使供电、用电系统安全运行，彻底消灭人身触电事故。

二、执行安全工作规程

必须建立和健全规章制度，特别要贯彻执行电力行业标准《电业安全工作规程》。按 DL 408—1991《变电所安全工作规程》（发电厂和变电所电气部分）规定：有关电气工作人员对上述规程应“每年考试一次”，合格后方能参加工作；电气工作人员“因故间断电气工作连续三个月以上者，必须重新温习本规程，并经考试合格后，方能恢复工作”。

三、确保设计安装质量

供电工程的设计、安装质量，对供电系统的安全运行关系极大。设计必须遵循有关设计规范，安装必须遵循有关安装工程施工及验收规范。如果设计不合理，或者安装不合要求，将使供电、用电系统的安全运行失去保障，增加了事故的可能性。

四、加强运行维护工作

加强日常的运行维护工作和定期的检修试验工作，对于保证供电、用电设备和系统的安全运行，也具有很重要的作用，

这有助于消除隐患，防患于未然。

五、选用安全电压和合适类型电器

在容易触电的场所，特别是使用的手持电器，应选用符合安全要求的安全电压。在易燃、易爆场所，应选用防爆型、隔爆型和增安型电器。在潮湿场所，应选用防潮型电器。在多尘场所，应选用封闭型电器。

六、采用电气安全用具

从事电气工作时，应按要求使用电气安全用具。

七、宣传安全用电知识

供电人员在注意安全供电的同时，应向广大用户和群众宣传安全用电意义，普及安全用电知识。

第二节 变电所电气安全作业措施

一、变电所安全作业的组织措施

1. 工作票制度

① 在电气设备上工作，应填用工作票或按命令执行，其方式有下列三种：

- a. 填用第一种工作票；
- b. 填用第二种工作票；
- c. 口头或电话命令。

② 填用第一种工作票的工作为：

- a. 高压设备上工作需要全部停电或部分停电者；
- b. 高压室内的二次接线和照明等回路上的工作，需要将高压设备停电或做安全措施者。

③ 填用第二种工作票的工作为：

- a. 带电作业和在带电设备外壳上的工作；
- b. 控制盘和低压配电盘、配电箱、电源干线上的工作；

- c. 二次接线回路上的工作，无需将高压设备停电者；
- d. 转动中的发电机、同期调相机的励磁回路或高压电动机转子电阻回路上的工作；
- e. 非当值班人员用绝缘棒和电压互感器定相或用钳形电流表测量高压回路的电流。

④ 其他工作用口头或电话命令。口头或电话命令，必须清楚正确。值班员应将发令人、负责人及工作任务详细记入操作记录簿中，并向发令人复诵核对一遍。

⑤ 工作票要用钢笔或圆珠笔填写一式两份，应正确清楚，不得任意涂改。如有个别错、漏字需要修改时，应字迹清楚。

两份工作票中的一份必须经常保存在工作地点，由工作负责人收执；另一份由值班员收执，按职移交。值班员应将工作票号码、工作任务、许可工作时间及完工时间记入操作记录簿中。

在无人值班的设备上工作时，第二份工作票由工作许可人收执。

⑥ 一个工作负责人只能发给一张工作票。工作票上所列的工作地点，以一个电气连接部分为限。

如施工设备属于同一电压、位于同一楼层、同时停送电，且不会触及带电导体时，则允许在几个电气连接部分共用一张工作票。开工前工作票内的全部安全措施应一次做完。建筑工、油漆工等非电气人员进行工作时，工作票发给监护人。

⑦ 在几个电气连接部分上依次进行不停电的同一类型的工作，可以发给一张第二种工作票。

⑧ 若一个电气连接部分或一个配电装置全部停电，则所有不同地点的工作，可以发给一张工作票，但要详细填明主要工作内容。几个班同时进行工作时，工作票可发给一个点的负责人，在工作班成员栏内只填明各班的负责人，不必填写全部

工作人员名单。

若至预定时间，一部分工作尚未完成，仍须继续工作而不妨碍送电者，在送电前，应按照送电后现场设备带电情况，办理新的工作票，布置好安全措施后，方可继续工作。

⑨ 事故抢修工作可不用工作票，但应记入操作记录簿内，在开始工作前必须按 DL 408—1991 规程规定做好安全措施，并应指定专人负责监护。

⑩ 线路、用户检修班或基建施工单位在发电厂或变电所进行工作时，必须由所在单位（发电厂、变电所或工区）签发工作票并履行工作许可手续。

⑪ 第一种工作票应在工作前一日交给值班员。临时工作可在工作开始以前直接交给值班员。第二种工作票应在进行工作的当前预先交给值班员。

⑫ 若变电所距离工区较远或因故更换新工作票不能在工作前一日将工作票送到，工作票签发人可根据自己签好的工作票用电话全文传达给变电所值班员，传达必须清楚，值班员应根据传达做好记录，并复诵核对。若电话联系有困难，也可在进行工作的当天预先将工作票交给值班员。

⑬ 第一、二种工作票的有效时间以批准的检修期为限。第一种工作票至规定时间，工作尚未完成，应由工作负责人办理延期手续。延期手续应由工作负责人向值班负责人申请办理，主要设备检修延期要通过值长办理。工作票有破损不能继续使用时，应补填新的工作票。

⑭ 需要变更工作班中的成员时，须经工作负责人同意。需要变更工作负责人时，应由工作票签发人将变更情况记录在工作票上。若扩大工作任务，必须由工作负责人通过工作许可人，并在工作票上增填工作项目。若须变更或增设安全措施者，必须填用新的工作票，并重新履行工作许可手续。

⑮ 工作票签发人不得兼任该项工作的负责人。工作负责人可以填写工作票。工作许可人不得签写工作票。

⑯ 工作票签发人应由分场、工区（所）熟悉人员技术水平，熟悉设备情况，熟悉 DL 408—1991 规程的生产领导人，技术人员或经厂、公司主管生产领导批准的人员担任。工作票签发人员名单应书面公布。

⑰ 工作票中所列人员的安全责任如下。

a. 工作票签发人：工作必要性；工作是否安全；工作票上所填安全措施是否正确完备；所派工作负责人和工作班人员是否适当和足够，精神状况是否良好。

b. 工作负责人（监护人）：正确安全地组织工作；结合实际进行安全思想教育；督促、监护工作人员遵守 DL 408—1991 规程；负责检查工作票所载安全措施是否正确完备和值班员所做的安全措施是否符合现场实际条件；工作前对工作人员交代安全事项；工作班人员变动是否合适。

c. 工作许可人：负责审查工作票所列安全措施是否正确完备，是否符合现场条件；工作现场布置的安全措施是否完善；负责检查停电设备有无突然来电的危险；对工作票中所列内容即使发生很小疑问，也必须向工作票签发人询问清楚，必要时应要求作详细补充。

d. 值班长：负责审查工作的必要性和检查工期是否与批准期限相符以及工作票所列安全措施是否正确完善。

e. 工作班组成员：认真执行 DL 408—1991 规程和现场安全措施，互相关心施工安全，并监督 DL 408—1991 规程和现场安全措施的実施。

2. 工作许可制度

① 工作许可人（值班员）在完成施工现场的安全措施后，还有如下工作。

a. 会同工作负责人到现场再次检查所做的安全措施，以手触试，证明检修设备确无电压。

b. 对工作负责人指明带电设备的位置和注意事项。

c. 与工作负责人在工作票上分别签名。

② 工作负责人、工作许可人任何一方不得擅自变更安全措施，值班人员不得变更有关检修设备的运行接线方式。工作中如有特殊情况需要变更时，应事先取得对方的同意。

3. 工作监护制度

① 完成工作许可手续后，工作负责人（监护人）应向工作班人员交代现场安全措施、带电部位和其他注意事项。工作负责人（监护人）必须始终在工作现场，对工作班人员的安全认真监护，及时纠正违反安全的动作。

② 所有工作人员（包括工作负责人），不得单独留在高压室内和室外变电所高压设备区内。

若工作需要（如测量极性、回路导通试验等），且现场设备具体情况允许时，可以准许工作班中有实际经验的一人或几人同时在一室进行工作，但工作负责人应在事前将有关安全注意事项予以详尽的指示。

③ 工作负责人（监护人）在全部停电时，可以参加工作班工作。在部分停电时，只有在安全措施可靠，人员集中在一个工作地点，不致误碰带电设备的情况下，方能参加工作。

工作票签发人或工作负责人，应根据现场的安全条件、施工范围、工作需要等具体情况，增设专人监护和批准被监护的人数。

专职监护人不得兼做其他工作。

④ 工作期间，工作负责人若因故必须离开工作地点时，应指定能胜任的人员临时代替，离开前应将工作现场交代清楚，并告知工作班组人员。原工作负责人返回工作地点时，也

应履行同样的交接手续。

若工作负责人需要长时间离开现场，应由原工作票签发人变更新工作负责人，两工作负责人应做好必要的交接。

⑤ 值班员如发现工作人员违反安全规程或任何危及工作人员安全的情况，应向工作负责人提出改正意见，必要时可暂时停止工作，并立即报告上级。

二、变电所安全作业的技术措施

1. 技术措施项目及其实施

在全部停电或部分停电的电气设备上工作，必须完成下列措施。

- ① 停电；
- ② 验电；
- ③ 装设接地线；
- ④ 悬挂标示牌和装设遮栏。

上述措施由值班员执行。对于无经常值班人员的电气设备，由断开电源人执行，并应有监护人在场。

2. 停电

- ① 工作地点，必须停电的设备如下。

a. 检修的设备。

b. 与工作人员在进行工作中正常活动范围的距离小于表 8-1 规定的设备。

表 8-1 电气工作人员工作中正常活动范围与带电设备的安全距离

电压等级 /kV	10 及以下 (13.8)	20 ~ 35	44	60 ~ 110	154	220	330	500
安全距离 /m	0.35	0.60	0.90	1.50	2.00	3.00	4.00	5.00

c. 在 44kV 以下的设备上工作，上述安全距离虽大于表 8-1 的规定，但小于表 8-2 的规定，同时又无安全遮栏措施

的设备。

表 8-2 设备不停电时的安全距离

电压等级 /kV	10 及以下 (13.8)	20 ~ 35	44	60 ~ 110	154	220	330	500
安全距离 /m	0.70	1.00	1.20	1.50	2.00	3.00	4.00	5.00

d. 带电部分在工作人员后面或两侧无可靠安全措施的设备。

② 将检修设备停电，必须把各方面的电源完全断开（任何运用中的星形接线设备的中性点，必须视为带电设备）。禁止在只经断路器（开关）断开电源的设备上工作。必须拉开隔离开关（刀闸），使各方面至少有一个明显的断开点。与停电设备有关的变压器和电压互感器，必须从高、低压两侧断开，防止向停电检修设备反送电。

③ 断开断路器（开关）和隔离开关（刀闸）的操作能源。隔离开关（刀闸）操作把手必须锁住。

3. 验电

① 验电时，必须用电压等级合适而且合格的验电器，在检修设备进出线两侧各相分别验电。验电前，应先在有电设备上上进行试验，确认验电器良好。如果在木杆、木梯或木架构上验电，不接地线不能指示者，可在验电器上接地线，但必须经值班负责人许可。

② 高压验电必须戴绝缘手套。验电时应使用相应电压等级的专用验电器。330kV 及以上的电气设备，在没有相应电压等级的专用验电器的情况下，可使用绝缘棒代替验电器，根据绝缘棒端有无火花和放电“噼啪”声来判断有无电压。

③ 表示设备断开和允许进入间隔的信号、经常接入的电压表等，不得作为设备无电压的根据。但如果指示有电，则禁

止在该设备上工作。

4. 工作间断、转移和终结制度

① 工作间断时，工作班组人员应从工作现场撤出，所有安全措施保持不动，工作票仍由工作负责人执存。间断后继续工作，无需通过工作许可人。每日收工，应清扫工作地点，开放已封闭的通路，并将工作票交回值班员。次日复工时，应得到值班员许可，取回工作票。工作负责人必须事前重新认真检查安全措施是否符合工作票的要求后，方可工作。若无工作负责人或监护人带领，工作人员不得进入工作地点。

② 在未办理工作票终结手续之前，值班员不准将设备合闸送电。

在工作间断期间，若有紧急需要，值班员可在工作票未交回的情况下合闸送电，但应先将工作班组全体人员已经离开工作地点的确切根据通知工作负责人或电气分场负责人，在得到他们可以送电的答复后方可执行，并应采取下列措施。

a. 拆除临时遮栏、接地线和标示牌，恢复常设遮栏，悬挂“止步、高压危险！”的标示牌。

b. 必须在所有通路派专人守候，以便告诉工作班组人员“设备已经合闸送电，不得继续工作”。守候人员在工作票未交回以前不得离开守候地点。

③ 检修工作结束以前，若需将设备试加工作电压，可按下列条件进行。

a. 全体工作人员撤离工作地点。

b. 将该系统的所有工作票收回，拆除临时遮栏，接地线和标示牌，恢复常设遮栏。

c. 应在工作负责人和值班员进行全面检查无误后，由值班员进行加压试验。

工作班组若需继续工作时，应重新履行工作许可手续。

④ 在同一电气连接部分用同一工作票依次在几个工作地点转移工作时，全部安全措施由值班员在开工前一次做完，不需再办理转移手续，但工作负责人在转移工作地点时，应向工作人员交代带电范围、安全措施和注意事项。

⑤ 全部工作完毕后，工作班组应清扫、整理现场。工作负责人应先周密地检查，待全体工作人员撤离工作地点后，再向值班人员讲清所修项目、发现的问题、试验结果和存在问题等，并与值班人员共同检查设备状况，有无遗留物件，是否清洁等，然后在工作票上填明工作终结时间，经双方签名后，工作票方告终结。

⑥ 只有在同一停电系统的所有工作票结束，拆除所有接地线、临时遮栏和标示牌，恢复常设遮栏，并得到值班调度员或值班负责人的许可命令后，方可合闸送电。

⑦ 已经结束的工作票，保存三个月。

5. 装设接地线

① 当验明设备确已无电压后，应立即将检修设备接地并三相短路。这是保护工作人员在工作地点防止突然来电的可靠安全措施，同时设备断开部分的剩余电荷，亦可因接地而放尽。

② 对于可能送电至停电设备的各方面或停电设备可能产生感应电压的都要装设接地线，所装接地线与带电部分应符合安全距离的规定。

③ 检修母线时，应根据母线的长短和有无感应电压等实际情况确定地线数量。检修 10m 及以下的母线，可以只装设一组接地线。在门型架构的线路侧进行停电检修，如工作地点与所装接地线的距离小于 10m，工作地点虽在接地线外侧，也可不另装接地线。

④ 检修部分若分为几个在电气上不相连接的部分（如分

段母线以隔离开关或断路器隔开分成几段)，则各段应分别验电并接地短路。接地线与检修部分之间不得连有断路器或熔断器。降压变电所全部停电时，应将各个可能来电侧的部分接地短路，其余部分不必每段都装设接地线。

⑤ 在室内配电装置上，接地线应装在该装置导电部分的规定地点，这些地点的油漆应刮去，并划下黑色记号。

所有配电装置的适当地点，均应设有接地网的接头。接地电阻必须合格。

⑥ 装设接地线必须由两人进行。若为单人值班，只允许使用接地刀闸接地，或使用绝缘棒合接地刀闸。

⑦ 装设接地线必须先接接地端，后接导体端，且必须接触良好。拆接地线的顺序与此相反。装、拆接地线均应使用绝缘棒和戴绝缘手套。

⑧ 接地线应用多股软裸铜线，其截面应符合短路电流的要求，但不得小于 25mm^2 。接地线在每次装设以前应经过详细检查，损坏的接地线应及时修理或更换。禁止使用不符合规定的导线作接地或短路之用。

接地线必须使用专用的线夹固定在导体上。严禁用缠绕的方法进行接地或短路。

⑨ 高压回路上的工作，需要拆除全部或一部分接地线后才能进行工作者（如测量母线和电缆的绝缘电阻，检查开关触头是否同时接触），如以下工作。

- a. 拆除一相接地线；
- b. 拆除接地线，保留短路线；
- c. 将接地线全部拆除或拉开接地刀闸。

必须征得值班员的许可（根据调度员命令装设的接地线，必须征得调度员的许可）方可进行。工作完毕后立即恢复。

⑩ 每组接地线均应编号，并存放在固定地点。存放位置

亦应编号，接地线号码与存放位置号码必须一致。

① 装、拆接地线，应做好记录，交接班时应交代清楚。

6. 悬挂标示牌和装设遮栏

① 在一经合闸即可送电到工作地点的断路器（开关）和隔离开关（刀闸）的操作把手上均应悬挂“禁止合闸、有人工作！”的标示牌。

如果线路上有人工作，应在线路断路器和隔离开关操作把手上悬挂“禁止合闸、线路有人工作！”的标示牌。标示牌的悬挂和拆除应按调度员的命令执行。

② 部分停电的工作，安全距离小于表 8-2 规定距离以内的未停电设备应装设临时遮栏。临时遮栏与带电部分的距离不得小于表 8-1 中的规定数值。临时遮栏可用干燥木材、橡胶或其他坚韧绝缘材料制成；装设应牢固，并悬挂“止步，高压危险！”的标示牌。

35kV 及以下设备的临时遮栏，如因工作特殊需要，可用绝缘挡板与带电部分直接接触。但此种挡板必须具有高度的绝缘性能。

③ 在室内高压设备上工作，应在工作地点两旁间隔和对面间隔的遮栏上和禁止通行的过道上悬挂“止步，高压危险！”的标示牌。

④ 在室外地面高压设备上工作，应在工作地点四周用绳子做好围栏，围栏上悬挂适当数量的“止步，高压危险！”标示牌，标示牌必须朝向围栏里面。

⑤ 在工作地点悬挂“在此工作”的标示牌。

⑥ 在室外架构上工作，则应在工作地点邻近带电部分的横梁上，悬挂“止步，高压危险”的标示牌。此项标示牌在值班人员的监护下，由工作人员悬挂。在工作人员上下铁架和梯子上应悬挂“从此上下”的标示牌。在邻近其他可能误登

的带电构架上，应悬挂“禁止攀登，高压危险！”的标示牌。

⑦ 严禁工作人员在工作中移动或拆除遮栏，接地线和标示牌。

第三节 内线安装作业安全措施

一、照明灯安装作业要点

1. 器具检查

所有吊灯、日光灯、新型光源、诱蛾黑光灯以及开关、插座等（包括附件）都必须完整无损。

2. 照明灯安全位置选择

存在的安全隐患有：砸伤人、触电、火灾。

① 车间日常照明灯一般采用线吊式、管吊式。采用线吊式的每盏灯应有一只挂线盒（多管日光灯和特殊灯具除外），吊灯线绝缘必须良好，不得有接头，在挂线盒内和灯头内应打结，以免接线点承受灯具质量。质量大于 1kg 的灯具应采用铁链，软线应编叉在铁链内，导线不应受力；当灯具质量超过 3kg 时，必须固定在预埋的吊钩或螺丝上。采用吊管式时，螺纹连接要求牢固可靠，至少旋入 5 ~ 7 牙，吊装应用直径大于 10mm 的薄壁管或钢管制成，灯架和吊管内的导线不得有接头。

② 变、配电所内的高、低压配电盘及母线正上方不得安装灯具。

③ 安装在户外的照明灯具，其高度低于 3m 者，应于光源保护，装于户外墙壁上时可减至 2.5m，潮湿危险场所不低于 2.5m，一般生产车间、办公室、商店、住房居民用电的灯头应不低于 2m。

④ 电灯灯头过低又无安全措施的车间照明。行灯和机床

的局部照明，应采用 36V 及以下电压的电灯，它还可以用于锅炉、金属容器、构架等内部的行灯及危险场所中、不便于工作的狭窄地点、潮湿的场所（如井下作业）。

⑤ 行灯变压器应采用双绕组隔离变压器，外壳、铁芯和低压绕组应可靠接地不允许用自耦变压器或在附加电阻上抽取电压作为行灯电源。在行灯变压器一、二次回路中应装设熔断器保护，熔丝的额定电流应不大于变压器的额定电流。

⑥ 采用螺口灯头时，相线必须接在灯头的中心弹簧上，零线接在灯头螺纹上，灯泡拧好后，金属部分不应外露。

⑦ 拉线开关的离地距离不得低于 1.8m，一般为 2.2 ~ 2.8m，距门框 150 ~ 200mm。墙边扳把开关离地不得低于 1.3m，距门框 150 ~ 200mm。

⑧ 直流或交流不同电压的插座安装在同一场所时，应有明显标志以示区别，其选用的插头和插座不可互换插入。

⑨ 生产车间的单相电源应采用三眼插座，三相电源用四眼插座。

⑩ 插座容量应能满足用电负荷要求，不允许过载。当分路总熔丝额定电流小于 5A 时，插座的相线上可不装熔断丝，否则应在相线上串接熔断器保护。

⑪ 明装插座离地高度一般不低于 1.3m；暗装插座离地不应低于 0.15m；居民住宅、幼儿园、托儿所和儿童活动场所均不得低于 1.8m；明、暗装插座在车间、试验室等场所离地面高度不得低于 0.3m，特殊场所暗装插座不得低于 0.15m。

⑫ 明装的开关、插座和吊线盒均应装牢在合适的圆木或方木等绝缘板上，其间隙不得小于 5mm。

⑬ 暗装的开关及插座应装牢在开关盒内，金属壳的开关盒应接地，开关盒、出线盒应有完整的盖板。

⑭ 相邻的开关及插座应采用同一种形式，开关板的通断

位置应一致。

二、隔离开关、负荷开关、高压断路器安装安全作业要点

此项作业存在的安全隐患有：设备损坏、作业人员摔伤。

① 隔离开关点有开关及高压熔断器运到现场后所有部件附件、备件应齐全，无损伤变形及锈蚀。

② 瓷件应无裂纹及破损，设备及瓷件应安置稳定，不得倾倒损坏，触头及操作机构的金属传动部件应有防锈措施。

③ 开箱板、朝天钉要及时从施工现场清除，以防伤人。

④ 进入施工现场，施工人员必须正确佩戴安全帽，穿好工作服，登高时要系好安全带。

⑤ 吊装中由专人指挥，工作人员不得站在吊臂和重物的下面及重物移动的前方。

⑥ 钢丝绳荷重，需保证其安全系数，根据吊车吊臂角度确定荷载，不得超载使用。

⑦ 超吊作业必须得到指挥人的许可，并确保与带电体的安全距离。

三、配电盘、开关柜就位与安装安全作业要点

此项作业存在的安全隐患有：损坏设备、工作人员砸伤等。

① 配电盘、开关柜在满足安装条件时，方可进行安装，若与土建交叉作业时，应协助双方做好防护措施，以确保人身及设备安全。

② 盘、柜在安装地点拆箱后，应立即将拆箱板等物清理干净，以免妨碍交通或钉子扎脚。

③ 撬动盘、柜时，应有足够的人力，统一指挥，防止倾倒伤人或设备损坏，狭窄处防止挤伤。

④ 开关柜就位时，沟、洞要搭设人行跳板防止掉入沟内。

室内所有孔洞应有足够承受人体质量的铁板或木板盖下，以防人体踩空损伤。

⑤ 盘、柜底加垫铁时，不可将手伸入底部，防止压手。多面盘并列安装时，应防止挤手。

⑥ 重心偏移一侧的盘，在未安装固定好之前，应有防止倾倒的措施。

⑦ 在安装盘面设备时，需有人扶持，将其固定好后，方可松手。

⑧ 装在墙上的操作箱及其他较重的设备，要做好临时支撑，确认固定好后，方可拆除。

⑨ 在已装仪表的盘上开孔时，应先将精密仪器拆下，并应有防止铁屑落到其他设备及端子上的保护措施。

⑩ 盘、柜固定焊接时，应有隔热、防火措施，避免烧坏电缆及设备，要有人监护。

⑪ 进入施工现场的人员必须正确佩戴安全帽，穿好工作服，严禁穿拖鞋、高跟鞋，严禁酒后进入施工现场。

⑫ 在光线不足的工作场所应有足够的照明，主要通道应设路灯。

⑬ 电气设备起吊前应检查起重设备及其安全装置，重物吊离地面约 10cm 时应暂停起吊进行全面检查，确认良好后方可正式起吊。

四、电气二次接线、安装安全工作要点

此项工作存在的安全隐患有：接线接错、割剥导线伤人等。

① 按照施工图纸核对好电缆的型号、规格及安装单位接线位置。

② 接线位置及周围的孔洞应先堵塞，防止踏空掉人。

③ 先按顺序排好电缆，量好接线位置高度，再开始割剥

电缆。

④ 割剥电缆时要放平、垫实、线下放木板，注意防止刀锯伤手；割剥电缆时应注意不得损伤绝缘及芯线。

⑤ 严禁用手、腿托住电缆进行剥割。

⑥ 割剥下来的电缆护层、麻丝、绝缘纸、线芯应及时清理，保持现场清洁，文明施工，随时注意防火。

⑦ 在部分带电盘上工作时，必须遵守下列规定。

a. 先接不带电端，后接带电端；

b. 应穿工作服、戴绝缘手套、穿绝缘鞋、戴工作帽，严禁穿背心、短裤工作；

c. 使用的电动工具均应有绝缘手柄，电动工具必须接地；

d. 应设监护人。

⑧ 盘内工作要精力集中，防止盘架和设备碰头及刮伤脸部。

五、电能表现场校验工作安全作业要点

1. 高压电能表校验

主要安全隐患有：走错计量盘柜，误触运行设备造成人身触电；电流互感器二次开路产生高压电危及工作人员生命安全；电压回路接地或短路引起人体伤害；高处计量箱接线不慎跌落等。

① 应将检验设备与运行设备前后以明显的标志隔开（如盘后用红布帘，盘前用“在此工作”标示盘等。）

② 附近有带电盘和带电部位，必须设专人监护。

③ 不得将回路的永久接地点断开。

④ 短路电流互感器二次绕组，必须使用短路片或短路线，短路应妥善可靠。

⑤ 严禁在电流互感器与短路端子之间的回路和导线上进行任何工作。

⑥ 工作时必须有专人监护，使用绝缘工具，并站在绝缘垫上。

⑦ 在带电电压互感器二次回路工作时，应使用绝缘工具、戴绝缘手套。

⑧ 接临时负载，必须装有专用可熔断路器。

⑨ 梯子与地面的角度为 60° 左右，工作人员必须在距梯顶不少于 1m 的梯蹬上工作。

⑩ 应对梯子采取可靠防滑措施，并有人扶持。

2. 低压电能表校验

存在的主要安全隐患有：走错计量表盘，误触运行设备造成人身触电；低压短路，触电造成人体伤害。

① 应将检验设备与运行设备前后以明显的标志隔开（如盘后用红布帘，盘前用“在此工作”标示牌等）。

② 附近有带电盘和带电部位，必须设专人监护。

③ 严格执行低压计量作业程序票制度。

④ 严禁无监护人操作和作业。

⑤ 严禁电压回路短路接地，电流回路开路。

⑥ 严格执行低压作业着装，使用专用工具，戴绝缘手套、戴护目眼镜。

⑦ 需要停电工作时应可靠断开各方面电源，在刀闸把手上挂“禁止合闸，有人工作！”的标示牌。

⑧ 工作前必须验电。

六、验电、装设地线工作安全作业要点

此项工作存在的安全隐患有：高、低压感电，高空摔跌，物体打击等。

① 验电工作应由两人进行，一人验电，一人监护。

② 验电前必须辨明该设备为停电设备。

③ 验电工作要使用合格的相应电压等级的验电工具，验

电人员应戴绝缘手套。

④ 在同杆塔具有多回路高、低压线路上验电，必须先验低压后验高压、先验下层后验上层。当验明最下层确无电压后必须装设好地线后再验上层，不得碰触或穿越无电的导线。

⑤ 电缆头上必须逐相验电，放电装设地线后方可进行上层验电。装设其他设备的地线。

⑥ 装设地线工作时，先接接地端、后接导线端，拆时与此相反。上述工作人员必须使用合格的绝缘棒，人体不得碰触导线和地线。

⑦ 作业人员必须戴好安全帽。

⑧ 上杆前检查登杆工具是否良好可靠并注意防滑，攀登杆塔时要检查脚钉是否可靠。

⑨ 到达验电装设地线位置时，必须系好安全带后进行验电、装设地线工作。

⑩ 验电器、地线应用绳索传递。

七、电气测量工作安全作业要点

1. 变压器测负荷工作

存在的安全隐患有：高低压感电、高空摔跌。

① 测量工作至少应由两人进行，一人操作，一人监护。夜间作业，必须有足够的照明。

② 测量人员应了解测试仪表性能、测试方法及正确接线。

③ 安装仪表及测量时不得触及其他带电设备，并应防止相间短路。

④ 上变压器台时应从变压器低压侧攀登。地面测量时应认清低压侧。工作中应时刻注意与高压端子的距离。

⑤ 在配变电站内测量，应在低压室内进行，不得进入高压室。

⑥ 变压器台上测量工作应使用安全带。上变压器台时应检查变压器台脚钉和爬梯安装是否牢固。

⑦ 使用移动梯子应有专人扶持。

2. 高压线路测负荷工作

存在的安全隐患有：高低压感电、高空摔跌等。

① 测量工作至少应由两人进行，一人操作，一人监护。夜间作业，必须有足够的照明。

② 测量人员应了解测试仪表性能、测试方法及正确接线。

③ 登杆测量高压电流时必须使用合格的绝缘杆，绝缘杆有效长度 10kV 不小于 0.7m，工作中对高压带电部分保持安全距离：10kV，0.7m。测量人员不得穿越高低压线、电缆头、开关、刀闸等（包括路灯线）。

④ 测量工作不得穿越虽停电但未经装设地线的导线。

⑤ 登杆测量工作必须系好安全带、戴安全帽。

3. 测量接地电阻工作

主要安全隐患是：高低压感电。

① 测量接地电阻工作至少应由两人进行，一人操作，一人监护。

② 测量人员应了解测试仪表性能、测试方法及正确接线。

③ 解开或恢复接地线时，应戴绝缘手套，测量时严禁接触与地断开的接地线。

4. 测量绝缘电阻工作

主要安全隐患是：高低压感电。

① 测量工作至少应由两人进行，一人操作，一人监护。夜间作业，必须有足够的照明。

② 测量人员应了解测试仪表性能、测试方法及正确接线。

③ 测量电缆绝缘电阻工作，必须测量完一相放电后才可进行另一相测量工作。

④ 工作中对带电设备保证可靠的安全距离。

5. 导线限距交叉跨越距离的测量

存在的安全隐患是：触电、物体打击。

① 测量工作至少应由两人进行，一人操作，一人监护，监护人不得做其他工作。

② 在线路带电情况下，用抛挂绝缘绳的方法进行测量导线线距时，绝缘绳必须清洁、干燥、试验合格。抛挂绝缘绳时必须与带电体保持安全距离，并有专人监护。

③ 禁止在阴雨天进行抛挂绝缘绳的测量作业。

④ 严禁使用皮尺、线尺（夹有金属线）等测量带电线路各种距离。

⑤ 利用仪器测量时，塔尺与带电体必须保证安全距离。

⑥ 利用绝缘绳地面抛挂测量限距时，应检查重锤是否绑好。

⑦ 抛重锤时应有专人监护，防止重锤打坏设备或落下打伤工作人员。

八、配变电站（箱式配电站）工作安全作业要点

1. 停电工作

主要安全隐患有：高低压感电、高空摔跌、在吊运移动变压器过程中伤人。

① 配变电站的停电工作必须严格执行配变电站作业票。

② 作业前必须将配变电站检修设备高低压全停并在指定位置验电和装设地线后方可工作。工作中与带电体保持安全距离：10kV，0.7m。

③ 高压电缆预防性试验和更换高压开关工作必须从电源引入端停电，柱上开关（无刀闸）应设专人看守，跌开式开关摘下熔丝管。

④ 触碰电缆头前（包括联络电缆）必须先逐相放电和装

设地线。

⑤ 更换一次开关的工作必须将开关电源侧电源拉开（包括联络电缆的电源）。

⑥ 在高压室内作业使用梯子应有人扶持，站在变压器大盖上作业时应防止滑倒。

⑦ 作业人员应戴好安全帽，高处作业系好安全带。

⑧ 吊放变压器工作应设专人指挥和监护。

⑨ 吊放变压器前应先对钢丝绳套进行外观检查，无断股、烧伤、挤压等明显缺陷，确保其强度满足起重设备荷重要求（安全系数 5 ~ 6 倍）。

⑩ 吊放变压器前应对各受力点进行检查。

⑪ 拉出或送入变压器时要防止变压器移动挤、压伤人。

2. 部分停电工作

主要安全隐患是：高低压感电、电弧光伤人。

① 配变电站工作应由两人以上进行，并设专人监护。

② 更换低压开关或低压熔丝管工作时，必须拉开该开关的电源，并在该开关两侧验电，确无电压后装设好地线方可工作。

③ 低压部分停电作业应在工作盘上挂“在此工作”标示牌，并设安全围栏。

④ 开关跳闸，送电前必须查明原因，排除故障。对电缆应进行绝缘测试，严禁盲目试送开关。

⑤ 电容器检修工作前必须先逐相放电和装设地线后方可工作。

3. 巡视检查工作

主要安全隐患是：高低压感电。

① 配变电站巡视工作必须由两人进行，一人巡视，一人监护。

② 高压室内巡视，进入室内前，必须辨清高低压侧，一般不应从高压侧通过，如必须通过时应与带电部位保持安全距离：10kV，0.7m，监护人认真监护。

③ 巡视过程中，任何情况下不得触及带电设备。

④ 高压室内高压设备发生接地时，人员不得进入故障点4m以内。

⑤ 每次巡视应记录漏雨、进水、小动物等处理情况。未处理的及时上报，安排处理。

4. 配变电站绿化

主要安全隐患是：触电、短路。

① 进入现场施工人员必须戴安全帽。

② 搬运长物时，不准单人独拿、肩扛，防止误碰设备，必须两人平抬，高度不准超过头顶，施工用电时电源接头必须按变电站值班人员指定的位置接入，进行拆除时对暴露的部分应采取可靠的绝缘措施。

③ 施工时，采取防止跑水的措施，严禁向上冲水。加强监护，当水管发生破损现象，必须立即采用绑扎、更换的措施。

九、开关设备检修安全作业要点

1. 电磁机构检修

主要安全隐患是：弹簧伤人、人身触电、火灾。

① 分解前，将弹簧能量释放，做好防止弹簧突然弹出的防范措施。

② 两人抬铁芯时，互相呼应，不得将手放在合闸铁芯的底部。

③ 紧固控制回路螺丝时，必须确认无电压后方可开始工作。

④ 无油禁止快速分、合闸，必须充油后才能进行快速分、

合闸操作。在快速分、合闸前，必须进行慢分、合的操作；在慢分、合的过程中应运动缓慢、平稳、不得有卡阻、滞留现象。

⑤ 在调整、检修开关设备及传动装置时，必须有防止开关意外脱扣伤人的可靠措施，工作人员必须避开开关可动部分的动作空间。

2. 液压机构检修

主要安全隐患是：零件伤人、火灾、中毒。

① 作业人员不得面对喷口；充气前须检查确认充气管路密封良好，无损伤和缺陷。

② 拆装储压筒、电机等时作业人员应互相呼应，均匀用力；不得直接用手搬抬。

③ 用油清洗时施工现场严禁吸烟，动明火。

④ 将液压机构油压泄到零值。

⑤ 严格禁止用嘴吸液压油。

⑥ 设专人看管滤油机；低压交流电源应装有触电保安器；滤油机的外壳需可靠接地；滤油机电源开关的操作把手应绝缘良好。

⑦ 检查应断二次回路是否断开。

⑧ 工作现场油迹随时清理，防止人员滑跌。

⑨ 为防止机构箱盖失控伤人，作业时应将机构箱门拆开或采取可靠的止动措施。

⑩ 在调整、检修开关设备及传动装置时，必须有防止开关意外脱扣伤人的可靠措施，工作人员必须避开开关可动部分的动作空间。

⑪ 装储压筒完毕后，应注入一定的液压油，并不得倒放，须立放。

3. 隔离开关检修

主要安全隐患是：触电、伤人、设备损坏。

① 在高压设备上工作，必须遵守下列各项。

- a. 填用工作票或口头、电话命令；
- b. 至少应有两人在一起工作；
- c. 完成保证工作人员安全的组织措施和技术措施。

② 完成工作许可手续后，工作负责人（监护人）应向工作班组成员交代现场安全措施。带电部位和其他注意事项。工作负责人（监护人）必须始终在工作现场，对工作班组成员的安全认真监护，及时纠正违反安全的动作。

③ 严禁工作人员在工作中移动或拆除遮栏、接地线和标示牌。

④ 清擦检查时应注意工具伤及瓷件。

⑤ 需使用安全带时，安全带的一端需系在牢固的部位，其长度能起到保护作用。

⑥ 使用梯子作业，应符合《电业安全工作规程》的具体规定，梯子不得靠在支持瓷瓶上。

⑦ 隔离开关瓷柱严禁攀登。

⑧ 将操作机构闭锁。

⑨ 如需隔离开关分、合闸时，作业人员应配合好，由检查人发令。

⑩ 如需拆下水平拉杆时，需采取防止隔离开关自由分闸的措施。

⑪ 确认无电后方可开始工作。

⑫ 检查人和操作人配合好，由检查人发令。

⑬ 手脚不得放在接触触头和转动部位上。

⑭ 检查和试验时，作业人员暂停其他工作并不得触及被试设备。

4. SF₆ 开关检修

主要安全隐患是：触电、坠物伤人、人员窒息。

① 作好施工前的准备工作，包括：设备、工器具、备品、备件运抵现场。

② 应在无风沙、无风雪的天气下进行，空气相对湿度应小于 80%，并采取防尘、防潮措施。

③ SF₆ 气瓶应存放在防晒、防潮、通风良好的场所，不得靠近热源油污的地方，搬运时应轻装、轻放，严禁抛掷溜放。

④ SF₆ 气瓶不得与其他气瓶混放。

⑤ 工作班组成员进入 SF₆ 配电装置室，必须先通风 15min，并用含氧量仪检测 O₂ 含量。严禁一人进入 SF₆ 配电装置室从事检修工作。

⑥ 工作人员进入现场应戴安全帽，登高应系安全带。

⑦ 开工前工作负责人应组织全班组人员学习施工措施，检查接地线、遮栏，标示牌是否设置正确、清楚，并向工作班组成员指明工作范围及周围带电设备。检查应断二次回路是否断开。

⑧ 上下传递物件时严禁抛掷，以防砸伤设备及人员。

⑨ 在工作地点及设备区搬运工器具、材料时与带电设备保持足够的安全距离。

⑩ 起吊工作前应有专人指挥，起吊工器具应齐全合格，起吊设备时应轻吊轻放，防止损伤设备，并应认准位置，注意带电距离。

⑪ 对 SF₆ 断路器、组合电气进行充气时，其容器及管道必须干燥，工作人员必须戴手套和口罩。人员应在上风口。

⑫ 做好施工后的验收工作。

十、交流维修电工安全作业要点

主要安全隐患是：电气设备及触电事故。

① 线路上禁止带负荷接电或断电，电气设备检修、安装时，不准带电操作。遇特殊情况需要带电作业时，必须划出禁区，采取严格绝缘措施，在有经验的电工监护下进行。

② 施工现场用电线路、电气设备必须遵照有关电气安全技术规程要求安装与架设。

③ 各线路不得超过额定容量进行，不可使用超过规定容量熔丝、熔片。

④ 维修电器设备时，必须首先切断电源，取下熔断丝，挂上警示牌，经验电确认无电才能作业。通电试验外壳要接地，禁止他人靠近。

⑤ 在调试检修设备时，协同其他有关人员一起试车，严防电气、机械事故的发生。

⑥ 定期检查变压器、配电间、电动机的运转状况，并注意温度、油量、负荷变化，及时排除各种故障、隐患，要保持配电间清洁，注意防潮、防热、防尘、防火。

⑦ 高空作业必须有人监护、系安全带，使用竹木梯要牢固平稳角度适当，不准上下抛掷工具物品。

⑧ 凡裸体带（荷）电的空架配电线路，在通过各种容易发生危险的地段，应挂有危险标牌，引人注意。

⑨ 遇有异常雷雨时，特别要注意电气设备的用电安全，严防受潮漏电，必需时，应拉闸停电，确保安全。

⑩ 发生电气设备和触电事故时，首先切断电源，然后进行抢救、抢修。要熟悉触电救护知识。

⑪ 施工用电系统必须有保证灵敏可靠的两级及以上保护；施工用电与生活用电线路必须分开架设。

⑫ 人工立杆或机械立杆均要在基坑夯实后，方准拆去叉木和拖拉绳。

⑬ 杆上架线应侧向操作，并将夹紧螺柱拧紧，紧有角度的导线，应在外侧作业。调整拉线时，杆上不得有人。

⑭ 紧线用的钢丝绳，应能承受全部拉力，与导线的连接必须牢固，紧线时导线下方不得有人，单方向紧线时反方向应设有临时拉线。

⑮ 外电架空线与脚手架等最小距离必须符合要求，如达不到要求必须进行封闭，并悬挂醒目警告牌。

⑯ 施工现场配电箱要有防雨措施，门锁齐全，有色标，统一编号，开关箱要做到一机一闸一保险，箱内无杂物，开关箱、配电箱内严禁动力、照明混用。

⑰ 认真做好施工现场线路的管理，确保施工安全。

十一、直流维修电工安全作业要点

存在的安全隐患有：伤人、设备损坏、触电、中毒、爆炸等。

1. 装配汽车电器线路

装配汽车电器线路，必须正确牢固，并配置电源总开关，接通整车电流后，蓄电池接线应无火花。

2. 检查电器性能

- ① 变速箱放空挡；
- ② 注意汽车周围不许有人；
- ③ 严禁无证驾驶发动汽车。

3. 蓄电池维修

① 在检修蓄电池、配制电解液、充电时应穿工作服、绝缘鞋、硅橡皮围裙、戴耐酸橡皮手套等防护用品，防止电解液内硫酸烧伤皮肤。

② 配制电解液时，禁止用带有矿物质的水（如自来水、河水、井水等）应用蒸馏水。

③ 电解液配制时应注意顺序：先将蒸馏水倒入陶瓷缸或

玻璃缸内后，再将浓硫酸徐徐倒入缸内，边倒边用玻璃棒或铝棒搅拌均匀，直至达到所需要浓度为止。避免因操作失误而烧伤皮肤。

④ 刚配制好的电解液温度较高，不可立即灌入蓄电池内，待冷却后，方能加入。

⑤ 电解液加入后，应使蓄电池内部温度冷却到低于 35 以后，才可再按初次充电方式及普通充电方式进行充电。

⑥ 电瓶充电前，应检查蓄电池是否良好，规格容量是否相等。检查透气孔有否堵塞，如遇堵塞，应将透气孔疏通再行充电，以防充电时气体膨胀而发生操作事故。

⑦ 仔细辨认充电设备输出的极性，接在蓄电池板上的充电夹子应接触牢固，无松动。

⑧ 蓄电池间内严禁烟火、装置防爆电器。充电设备及容器，必须保持完好、整齐，现场四周环境保持宽畅清洁，空气流通，并做好交接班手续。

十二、电动机安全作业要点

1. 安装

主要安全隐患有：伤人、触电。

① 新安装的电动机，在试车前不得安装皮带。确认电动机转向正确后，方可停电安装皮带。皮带运行中应不跑偏、不打滑、不磨边，皮带周围应有安全防护设施。

② 电动机外壳必须可靠接地。

2. 使用

主要安全隐患有：摔跌、伤人、触电。

① 在不能负重的顶棚、天花板上工作时，梁与梁之间应用厚长板条搭桥，必要时系好安全带后方可进行工作。

② 工作地点应有足够照明。

③ 在墙壁上用钢针打孔工作，应戴防护眼镜，应戴绝缘

手套。

- ④ 田间、场院使用的电动机应装设剩余电流动作保护器。

3. 维修

主要安全隐患有：伤人、触电。

① 禁对运行中的电动机进行维修工作。严禁使用无风扇护罩、无靠背轮护罩及无轴端盖的电动机。

② 严禁带电移动电动机。停电移动时，应防止电源线被拉断。

十三、三相异步电动机故障诊断及处理方法

三相异步电动机故障诊断及处理方法见表 8-3。

表 8-3 三相异步电动机故障诊断及处理方法

序号	故障现象	故障诊断	处理方法
----	------	------	------

1	电动机不能启动	(1) 电源未接通 (2) 熔断器熔丝烧断 (3) 控制线路接线错误 (4) 定子或转子绕组烧断 (5) 定子绕组相间短路或接地 (6) 负载过重或机械部分被卡住 (7) 热继电器规格不符或调得太小,或过流继电器调得太小 (8) 电动机 Δ 连接误接成 Y 连接,使电动机重载下不能启动 (9) 绕线转子电动机启动误操作 (10) 定子绕组接线错误	(1) 检查电源电压、开并、线路、触头、电动机引出线头,查出后修复 (2) 先检查熔丝烧断原因并排除故障,再按电动机容量,重新安装熔丝 (3) 根据原理图,接线图核查线路是否符合图纸要求,查出错误纠正 (4) 用万用表、兆欧表或串灯法检查绕组,如属断路,应找出断开点,重新连接 (5) 检查电动机三相电流是否平衡,用兆欧表检查绕组有无接地,找出故障点修复 (6) 重新计算负载,选择容量合适的电动机或减轻负载,检查机械转动机构有无卡住现象,并排除故障 (7) 选择整定电流范围适当的热继电器,并根据电动机的额定电流,重新调整 (8) 根据电动机上铭牌重新接线 (9) 检查集电环短路装置及启动变阻器位置,启动时应分开短路装置,串接变阻器 (10) 重新判断绕组头尾端,正确接线
---	---------	---	--

续表

序号	故障现象	故障诊断	处理方法
2	电动机启动时熔丝被熔断	(1) 单相启动 (2) 熔丝截面积过小 (3) 一般绕组对地短路 (4) 负载过大或机械卡住 (5) 电源到电动机之间连接线短路 (6) 绕线转子电动机所接的启动电阻太小或被短路	(1) 检查电源线、电动机引出线、熔断器、开关、触头,找出断线或假接故障并排除 (2) 重新计算,更换熔丝 (3) 拆修电动机绕组 (4) 将负载调至额定值,并排除机械故障 (5) 检查短路点进行修复 (6) 消除短路故障或增大启动电阻

3	通电后电动机嗡嗡响不能启动	(1) 电源电压过低 (2) 电源缺相 (3) 电动机引出线头尾接错或绕组内部接反 (4) Δ 连接绕组误接成 Y 联结 (5) 定子转子绕组断路 (6) 负载过大或机械被卡住 (7) 装配太紧或润滑油脂硬 (8) 改极重绕组时, 槽配合选择不当	(1) 检查电源电压质量, 与供电部门联系解决 (2) 检查电源电压、熔断器、接触器、开关、某项断线或假接进行修复 (3) 在定子绕组中通入直流电, 检查绕组极性, 判断绕组头尾是否正确, 重新接线 (4) 将 Y 连接改为 Δ 连接 (5) 找出断路点进行修复, 检查绕组转子电刷与集中环接触状态, 检查启动电阻有无断路或电阻过大 (6) 减轻负载, 排除机械故障或更换电动机 (7) 重新装配, 更换油脂 (8) 选择合理绕组型式和节距, 适当减小转子直径, 重新计算绕组参数
4	电动机外壳带电	(1) 电源线与地线接错, 且电动机接地不好 (2) 绕组受潮, 绝缘老化 (3) 引出线与接线盒相碰接地 (4) 线圈端部顶端盒接地	(1) 纠正接地错误, 机壳应可靠地与保护地线连接 (2) 对绕组进行干燥处理, 绝缘老化的绕组应更换 (3) 包扎或更换引出线 (4) 找出接地点, 进行包扎绝缘和涂漆, 并在端盖内壁垫绝缘纸

续表

序号	故障现象	故障诊断	处理方法
5	电动机空载或负载时电流表指针来回摆动	(1) 笼型转子断条或开焊 (2) 绕线转子电动机有一相电刷接触不良 (3) 绕组转子电动机集中环断路装置接触不良 (4) 绕线式转子一相断路	(1) 检查断条或开焊处并进行修理 (2) 调整电刷压力, 改善电刷与集电环接触面 (3) 检修或更换短路装置 (4) 找出断路处, 排除故障

6	电动机启动困难, 加额定负载时转速低于额定值	(1) 电源电压过低 (2) Δ 连接绕组误接成 Y 连接 (3) 绕组头尾接错 (4) 笼型转子断条或开焊 (5) 负载过重或机械部分转动不灵活 (6) 绕线转子电动机启动变阻器接触不良 (7) 电刷与集电环接触不良 (8) 定、转子绕组部分接错或接反 (9) 绕线转子一相断路 (10) 重绕时匝数过多	(1) 用电压表或万用表检查电源电压, 且调整电压 (2) 将 Y 连接改为 Δ 连接 (3) 重新判断绕组头尾正确接线 (4) 找出断条或开焊处, 进行修理 (5) 减轻负载或更换电动机, 改进机械传动机构 (6) 检修启动变阻器的接触电阻 (7) 改善电刷与集电环的接触面积, 调整电刷压力 (8) 纠正接线错误 (9) 找出断路处, 排除故障 (10) 按正确绕组匝数重绕
7	电动机运行时振动过大	(1) 基础强度不够或地脚螺钉松动 (2) 传动带轮、靠轮、齿轮安装不合适, 配合键磨损 (3) 轴承磨损, 间隙过大 (4) 气隙不均匀 (5) 转子不平衡 (6) 铁芯变形或松动 (7) 转轴弯曲	(1) 将基础加固或加弹簧垫, 紧固螺丝 (2) 重新安装, 找正、更换配合键 (3) 检查轴承间隙, 更换轴承 (4) 重新调整气隙 (5) 清扫转子紧固螺钉, 校正动平衡 (6) 校正铁芯, 重新装配 (7) 校正转轴找直

续表

序号	故障现象	故障诊断	处理方法
7	电动机运行时振动过大	(8) 扇叶变形、不平衡 (9) 笼型转子断条、开焊 (10) 绕线转子绕组短路 (11) 定子绕组短路、断路、接地连接错误等	(8) 校正扇叶, 找动平衡 (9) 进行补焊或更换笼条 (10) 找出短路处, 排除故障 (11) 找出故障处, 排除故障

8	电动机运行时有杂音	(1) 电源电压过高或不平衡 (2) 定、转子铁芯松动 (3) 轴承间隙过大 (4) 轴承缺少润滑油 (5) 定、转子相擦 (6) 风扇碰风扇罩或风道堵塞 (7) 转子擦绝缘纸或槽楔 (8) 各相绕组电阻不平衡,局部有短路 (9) 定子绕组接错 (10) 改极重绕时,槽配合不当 (11) 重绕时每相匝数不相等 (12) 电动机单相运行	(1) 调整电压或与供电部门联系解决 (2) 检查振动原因,重心压铁芯,进行处理 (3) 检修或更换轴承 (4) 清洗轴承,增加润滑脂 (5) 正确装配,调整气隙 (6) 修理风扇罩,清理通风道 (7) 剪修绝缘纸或修理槽楔 (8) 找出短路处,进行局部修理或更换线圈 (9) 重新判断头尾,正确接线 (10) 校验定、转子槽配合 (11) 重新绕线,改正匝数 (12) 检查电源电压、熔断器、接触器、电动机接线
9	电动机轴承发热	(1) 润滑脂过多或过少 (2) 油质不好,含有杂质 (3) 轴承磨损,有杂质 (4) 油封过紧 (5) 轴承与轴的配合过紧或过松	(1) 清洗后填加润滑脂,充满轴承室容积的 $1/2 \sim 2/3$ (2) 检查油内有无杂质,更换符合要求的润滑脂 (3) 更换轴承,对含有杂质的轴承要清洗、换油 (4) 修理或更换油封 (5) 检查轴的尺寸公差,过松时用树脂黏合或低温镀铁,过紧时进行车削加工

续表

序号	故障现象	故障诊断	处理方法
----	------	------	------

9	电动机轴承发热	(6) 电动机与传动机构连接偏心或传动带过紧 (7) 轴承内盖偏心, 与轴相擦 (8) 电动机两端盖与轴承盖安装不平 (9) 轴承与端盖配合过紧或过松 (10) 主轴弯曲	(6) 校正传动机构中心线, 并调整传动带的张力 (7) 修理轴承内盖, 使与轴的间隙适合 (8) 安装时, 使端盖或轴承盖止口平整装入, 然后再施紧螺钉 (9) 过松时要镶套, 过紧时要进行车削加工 (10) 矫直弯轴
10	电动机过热或冒烟	(1) 电源电压过高或过低 (2) 电动机过载运行 (3) 电动机单相运行 (4) 频繁启动和制动及正反转 (5) 风扇损坏、风道阻塞 (6) 环境温度过高 (7) 定子绕组匝间或相间短路, 绕组接地 (8) 绕组接线错误 (9) 大修时会烧灼铁芯, 铁耗增加 (10) 定、转子铁芯相擦 (11) 笼型转子断条或绕线转子绕组接线松开 (12) 进风温度过高 (13) 重绕后绕组浸渍不良	(1) 检查电源电压, 与供电部门联系解决 (2) 检查负载情况, 减轻负载或增加电动机容量 (3) 检查电源、熔丝、接触器, 排除故障 (4) 正确操作, 减少启动次数, 和正反向转换次数, 或更换合适的电动机 (5) 清理或更换风扇, 清除风道异物 (6) 采取降温措施 (7) 找出故障点, 进行修复处理 (8) Δ 连接电动机误接成 Y, 或 Y 连接电动机误接成 Δ, 纠正接线错误 (9) 做铁芯检查试验, 检修铁芯, 排除故障 (10) 正确装配, 调整间隙 (11) 找出断条或松脱处, 重新补焊或扭紧固定螺钉 (12) 检查冷却水装置及环境温度是否正常 (13) 采用二次浸漆工艺或真空浸漆措施

序号	故障现象	故障诊断	处理方法
11	集电环发热或电刷火花太大	(1) 集电环表面不平、不圆或偏心 (2) 电刷压力不均匀或太小 (3) 电刷型号与尺寸不符 (4) 电刷研磨不好,与集电环接触不良或电刷破碎 (5) 电刷在刷握中被卡住,使电刷与集电环接触不良 (6) 电刷数目不够或截面积过小 (7) 集电环表面污垢,表面粗糙度过大引起导电不良	(1) 将集电环磨光或车光 (2) 调整刷压 (3) 采用同型号或相近型号保证尺寸一致 (4) 重新研磨电刷或更换电刷 (5) 修磨电刷,尺寸要合适,间隙符合要求 (6) 增加电刷数目或增加电刷接触面积 (7) 清理污物,用干净布蘸汽油擦净集电环表面
12	绝缘电阻低	(1) 绕组绝缘受潮 (2) 绕组绝缘粘满灰尘、油垢 (3) 绕组绝缘老化 (4) 电动机接线板损坏,引出线绝缘老化破裂	(1) 进行加热烘干处理 (2) 清理灰尘、油垢,并进行干燥,浸渍处理 (3) 可清理干燥、涂漆处理或更换绝缘 (4) 重包引线绝缘,修理或更换接线板
13	电动机空载电流不平衡并相差很大	(1) 绕组头尾接错 (2) 电源电压不平衡 (3) 绕组有匝间短路,某线圈组接反 (4) 重绕时,三相线圈匝数不一样	(1) 重新判断绕组头尾,改正接线 (2) 检查电源电压,找出原因并排除 (3) 检查绕组极性,找出短路点改正接线和排除故障 (4) 重新绕制线圈
14	电动机三相空载电流增大	(1) 电源电压过高 (2) Y 连接电动机误接成 Δ 连接 (3) 气隙不均匀或增大 (4) 电动机装配不善 (5) 大修时,铁芯过热灼损 (6) 重绕时,线圈匝数不够	(1) 检查电源电压,与供电部门联系解决 (2) 将绕组改为 Y 连接 (3) 调整气隙 (4) 检查装配情况,重新装配 (5) 检修铁芯或重新设计和绕制绕组进行补偿 (6) 增加绕组匝数

十四、家用电器安装使用安全作业要点

1. 家用电器安装

存在的安全隐患是：触电、损坏设备。

① 电源电压应与电器要求的额定电压一致，并按说明书要求安装。电源线应采用护套绝缘三芯软线，长度应适当，防止发生拖线绊人而触电。配用三孔插座和插头，保证机壳通过插头插座可靠接地，接地电阻值不得大于 4Ω ，并应经常检查接地装置，防止接地失效。

② 应尽量将电器置于干燥通风的地方，绝缘电阻应大于 $0.5M\Omega$ 。

③ 因使用条件限制而接地困难时，应采用加强人身绝缘的措施来确保安全，如站在干燥的木板上操作等。

④ 对家用电器的运转部分应检查温升，注意润滑，防止螺钉松动，检查防护罩是否装好，有无机械碰撞等。

⑤ 带有变压器的家用电器如收音机等，应通过调换电源插头的插入方向，并经测电笔对金属外壳的测试，确定金属外壳有否带电，以判定插头的插入位置是否正确。此方法不适用于不带变压器的家用电器，如电熨斗、电吹风、电冰箱、电风扇等。

2. 家用电器使用

主要安全隐患是：触电，设备损坏等。

① 自动调温电熨斗在使用前应先将调温旋钮对准所熨织物标志；熨烫中途暂不用时，应将熨斗竖起搁置，切勿放平；用好后应把旋钮复位到“关”或“冷”处，结束后，断开电源，待底板降至室温后才可放于干燥处。某些功率较大的电熨斗应配专用三孔插座、插头。

② 收录机和电视机应尽量避免在短时间内频繁开启，以免损坏机件；在雷雨时应停止使用，并拔掉电源插头和天线，

将天线与地线可靠短接，以防雷电造成危害；电视机开机后，内部电压高达几千伏，严禁将手伸进试探温度等。

③ 使用洗衣机漂洗衣物时，必须保证缸内有足够的水。取出硬纸、别针、钥匙等金属物和硬件，以免阻碍波轮正常运转而致电动机过载烧毁。不能反拧定时器。

④ 电冰箱应安放在阴凉通风的地方，附近不应有火炉、暖气等热源。与墙壁距离不得小于 10cm，以免冷凝器通风散热不好使电机负荷过大而烧坏。尽量减少开门次数和缩短开门时间，以节约电能。温度控制器所标数字并不代表某一特定的温度，数大温低，应顺时针旋动温控旋钮，不可一次调得过低，每次调整后要待温控器自动开停多次后（2h 左右）箱内温度才可稳定。箱内温度稳定后，一般每小时自动开停不应超过 4 次。应合理选择冷藏室温度，一般控制在 5 ~ 7℃，冷冻室温度应根据食物储藏的时间加以合理控制。为节电，可提前几小时把要食用的冷冻食品从冷冻室取出放入冷藏室内解冻。电冰箱供电电压过高，会影响电机和压缩机的使用寿命，过低的电压也不利于冰箱运行，故在供电电压不稳定的地区应配备功率适当的交流稳压器。箱体内外胆壳可用软布沾中性洗净剂擦净，严禁使用热开水、汽油和有机溶剂擦洗。冷凝器和压缩机应经常扫去表面灰尘，及时清理门封上的油污杂物可防止门封变形。

3. 空调器安装

主要安全隐患是：高空跌落、触电。

① 高处作业时必须使用安全带，使用梯子必须有专人扶持。

② 打眼时钻头必须上紧，电钻电源线绝缘良好，使用防漏电安全插座。

③ 捆绑室外机的绳子必须牢固可靠。

④ 固定室外机时扳手必须有绳套与手脚处相连，防止工具落下伤人。

⑤ 接电源线时要连接牢靠，管路连接要严密。

⑥ 试机时要用肥皂或洗衣粉水涂抹在管路连接处，检查是否有泄漏现象。

⑦ 按规定着装。

⑧ 工作完毕、清理现场。

第九章 电气线路作业安全技术

第一节 线路电气安全作业措施

一、保证线路工作安全的组织措施

1. 工作票制度

① 在电力线路上工作应按下列方式进行。

- a. 填用第一种工作票；
- b. 填用第二种工作票；
- c. 口头或电话命令。

② 填用第一种工作票的工作。

a. 在停电线路（或在双回线路的一回停电线路）上的工作；

b. 在全部或部分停电的配电变压器台架上或配电变压器室内的工作。所谓全部停电，是指供给该配电变压器台架或配电变压器室内的所有电源线路均已全部断开。

③ 填用第二种工作票的工作。

- a. 带电作业；
- b. 带电线路杆塔上的工作；
- c. 在运行中的配电变压器台上或配电变压器室内的工作。

④ 测量接地电阻，涂写杆塔号，悬挂警告牌，修剪树枝，检查杆根地锚、打绑桩，杆塔基础上的工作，低压带电工作和单一电源低压分支线的停电工作等，按口头或电话命令执行。

⑤ 工作票签发人可由线路工区（所）熟悉人员技术水平、熟悉设备情况、熟悉 DL 409—1991《线路安全作业规程》的主管生产领导人、技术人员或经供电局主管生产领导批准的人

员来担任。工作票签发人不得兼任该项工作的工作负责人。

⑥ 工作票所列人员的安全责任。

a. 工作票签发人：明工作必要性；工作是否安全；工作票上所填安全措施是否正确完备；所派工作负责人和工作班组人员是否适当和充足。

b. 工作负责人（监护人）：正确安全地组织工作；结合实际进行安全思想教育；工作前对工作班组成员交代安全措施和技术措施；严格执行工作票所列安全措施，必要时还应加以补充；督促、监护工作人员遵守 DL 409—1991 规程；确认工作班组人员变动是否合适。

c. 工作许可人（值班调度员、工区值班员或变电所值班员）：审查工作必要性；线路停、送电和许可工作的命令是否正确；发电厂或变电所线路的接地线等安全措施是否正确完备。

d. 工作班组成员：认真执行 DL 409—1991 和现场安全措施，互相关心施工安全，并监督 DL 409—1991 和现场安全措施的实施。

⑦ 工作票应用钢笔或圆珠笔填写一式两份、应正确清楚，不得任意涂改。如有个别错、漏字要修改时，应字迹清楚。工作票一份交工作负责人，一份留存签发人或工作许可人处。

⑧ 一个工作负责人只能发给一张工作票。第一种工作票每张只能用于一条线路或同杆架设且停送电时间相同的几条线路。第二种工作票对同一电压等级、同类型工作，可在数条线路上共用一张。

在工作期间，工作票应始终保留在工作负责人手中，工作终结后交签发人保存三个月。

⑨ 第一、二种工作票的有效时间，以批准的检修期为准。

⑩ 事故紧急处理不填工作票，但应履行许可手续，作好

安全措施。

2. 工作许可制度

① 填用第一种工作票进行工作，工作负责人必须在得到值班调度员或工区值班员的许可后，方可开始工作。

② 线路停电检修，值班调度员必须在发电厂、变电所将线路可能受电的各方面都拉闸停电，并挂好接地线后，将工作班、组数目，工作负责人的姓名，工作地点和工作任务记入记录簿内，才能发出许可工作的命令。

③ 许可开始工作的命令，必须通知到工作负责人，其方法可采用：

- a. 当面通知；
- b. 电话传达；
- c. 派人传达。

④ 对于许可开始工作的命令，在值班调度员或工区值班员不能与工作负责人用电话直接联系时，可经中间变电所用电电话传达。中间变电所值班员应将命令全文记入操作记录簿，并向工作负责人直接传达。电话传达时，上述三方必须认真记录、清楚明确，并复诵核对无误。

⑤ 严禁多时停、送电。

⑥ 填用第二种工作票的工作，不需要履行工作许可手续。

3. 工作监护制度

① 完成工作许可手续后，工作负责人（监护人）应向工作班组人员交代现场安全措施、带电部位和其他注意事项。工作负责人（监护人）必须始终在工作现场，对工作班人员的安全应认真监护，及时纠正不安全的动作。

分组工作时，每个小组应指定小组负责人（监护人）。在线路停电时进行工作，工作负责人（监护人）在班组成员确无触电危险的条件下，可以参加工作班组工作。

② 工作票签发人和工作负责人应对有触电危险、施工复杂容易发生事故的工作，增设专人监护。专责监护人不得兼任其他工作。

③ 如工作负责人必须离开工作现场时，应临时指定负责人，并设法通知全体工作人员及工作许可人。

4. 工作间断制度

① 在工作中遇雷、雨、大风或其他任何情况威胁到工作人员的安全时，工作负责人或监护人可根据情况，临时停止工作。

② 白天工作间断时，工作地点的全部接地线仍保留不动。如果工作班组需暂时离开工作地点，则必须采取安全措施和派人看守，不让人、畜接近挖好的基坑或接近未竖立稳固的杆塔以及负载的起重和牵引机械装置等。恢复工作前，应检查接地线等各项安全措施的完整性。

③ 填用数日内工作有效的第一种工作票，每日收工时如果要将工作地点所装的接地线拆除，次日重新验电装接地线恢复工作，均需得到工作许可人许可后方可进行。

如果经调度允许的连续停电、夜间不送电的线路，工作地点的接地线可以不拆除，但次日恢复工作前应派人检查。

5. 工作终结和恢复送电制度

① 完工后，工作负责人（包括小组负责人）务必检查线路检修地段的状况以及在杆塔上、导线上及瓷瓶上有无遗留的工具、材料等，通知并查明全部工作人员确由杆塔上撤下后，再命令拆除接地线。接地线拆除后，应即认为线路带电，不准任何人再登杆进行任何工作。

② 工作终结后，工作负责人应报告工作许可人，报告方法如下。

a. 从工作地点回来后，亲自报告。

b. 用电话报告并经复诵无误。电话报告又可分为直接电

话报告或经中间变电所转达两种。经中间变电所转达报告，应按照序号 2. 中第④条规定的手续办理。

③ 工作终结的报告应简明扼要，包括下列内容：工作负责人姓名；某线路上某处（说明起止杆塔号、分支线名称等）；工作已经完工；设备改动情况；工作地点所挂的接地线已全部拆除；线路上已无本班组工作人员，可以送电。

④ 工作许可人在接到所有工作负责人（包括用户）的完工报告后，并确知工作已经完毕，所有工作人员已由线路上撤离，接地线已经拆除，并与记录簿核对无误后方可下令拆除发电厂、变电所线路侧的安全措施，向线路恢复送电。

二、线路安全作业的技术措施

1. 停电

① 进行线路作业前，应做好下列停电措施。

a. 断开发电厂、变电所（包括用户）线路断路器和隔离开关；

b. 断开需要工作班组操作的线路各端断路器、隔离开关和可熔保险；

c. 断开危及该线路停电作业，且不能采取安全措施交叉跨越、平行和同杆线路的断路器和隔离开关；

d. 断开有可能返回低压电源的断路器和隔离开关。

② 应检查断开后的断路器、隔离开关是否在断开位置；断路器、隔离开关的操作机构应加锁；跌落熔断器的熔断管应摘下，并应在断路器或隔离开关操作机构上悬挂“线路有人工作，禁止合闸！”的标示牌。

2. 验电

① 在停电线路工作地段装接地线前，要先验电，验明线路确无电压。验电要用合格的相应电压等级的专用验电器。

② 线路的验电应逐相进行。检修联络用的断路器或隔离

开关时，应在其两侧验电。

对同杆塔架设的多层电力线路进行验电时，先验低压，后验高压，先验下层，后验上层。

3. 挂接地线

① 线路经过验明确定无电压后，各工作班组应立即在工作地段两端挂接地线。凡有可能送电到停电线路的分支线也要挂接地线。

若有感应电压反映在停电线路上时，应加挂接地线。同时，要注意在拆除接地线时，防止感应电触电。

② 同杆塔架设的多层电力线路挂接地线时，应先挂低压，后挂高压，先挂下层，后挂上层。

③ 挂接地线时，应先接接地端，后接导线端。接地线连接要可靠，不准缠绕。拆接地线时的程序与此相反。装、拆接地线时，工作人员应使用绝缘棒或戴绝缘手套，人体不得碰触接地线。

若杆塔无接地引下线时，可采用临时接地棒。接地棒在地面下深度不得小于 0.6m。

④ 接地线应有接地和短路导线构成的成套接地线。成套接地线必须用多股软铜线组成，其截面不得小于 25mm^2 。如利用铁塔接地时，允许每相个别接地，但铁塔与接地线连接部分应清除油漆，保证接触良好。

严禁使用其他导线作接地线和短路线。两线一地制系统的线路经验电后，装接地线的规定，由各供电局自行规定。

第二节 线路施工作业

一、砍伐树木工作安全作业要点

存在的安全隐患有：人身感电、高处坠落、砸伤、割伤、

马蜂蜇伤等。

① 砍伐靠近带电线路的树木时，工作负责人必须在工作开始前向全体人员说明电力线路有电，不得攀登杆塔。树木绳索不得接触导线。

② 树枝接触高压带电导线时，严禁用手直接去取。人和绳索应与导线保持足够的安全距离。

③ 上树砍剪树木时，不应攀抓脆弱和枯死的树枝。

④ 不应攀登已经锯过或砍过的未断树木，不应攀登较细且高的树木。

⑤ 应使用安全带，安全带要系在砍伐口的下方，防止被割、锯砍断。

⑥ 使用梯子角度要适当，并应有专人扶持或绑牢。

⑦ 为防止树木（树枝）倒落在导线上，应设法用绳索将树木拉向与导线相反方向，绳索应有足够的长度，以免拉绳人员被倒落的树木砸伤。

⑧ 砍剪的树木下面和倒落树木范围内应有专人监护，不得有人停留，防止砸伤行人。

⑨ 上树作业时，手、脚要放在适当的位置，防止被斧、锯划伤。

⑩ 上树前应检查是否有马蜂窝，如有时应采取可靠的安全措施。

二、杆塔基础施工安全作业要点

1. 挖掘基坑

存在的安全隐患有：砸伤、工器具伤人、触电、地下气体窒息。

① 在超过 1.5m 深的坑内工作时，坑边的余土要清除，抛土要注意防止土回落坑内，打伤挖坑人员。

② 在软松土质挖坑时，应有防止塌方措施，如加挡板、

撑木等。禁止由下部掏挖土层。

③ 在居民区或交通道路附近挖基坑时，应设盖板或可靠围栏，夜间挂红灯，防止行人掉进坑内。

④ 防止挖坑过程中使用的锹、镐磕手、刨脚。坑内外传递工具时不许乱扔，防止误伤人。

⑤ 采用的挡土板、撑木等强度要足够，防止造成倒塌挤伤作业人员。

⑥ 在泥水坑、流沙坑施工所用抽水的电气设备必须合格，防止漏电伤人。

⑦ 在市内或居民区内挖坑，应与有关单位取得联系，查明地下设施，防止刨坏电缆伤人。

⑧ 挖掘深坑时，可能出现地下管道漏气、沼气等伤害坑内作业人员。施工中应备有通风排气设备，并有安全可靠的抢救措施。

2. 水泥杆底、拉盘施工

存在的主要安全隐患是：砸伤。

① 下底、拉盘时，应先将坑边土清理干净，留有站人和放盘的位置。

② 下底、拉盘时坑内不得有人，将底、拉盘移至坑边，采取好控制措施后放入坑中，防止人随底、拉盘落入坑内，调整底、拉盘时应采取措施防止碰伤手脚。

③ 采用吊杆、吊车等方法下底、拉盘时，坑内不得有人。

④ 吊车在起吊转位时防止碰伤其他工作人员，吊车臂下、重物下严禁站人。

⑤ 下拉线盘时，防止拉线棒反弹，拉盘的对面不得有人停留和观看，防止拉线棒打伤人。

三、组立及拆除水泥杆工作安全作业要点

作业的项目是利用抱杆、吊车和利用旧杆立、拆水泥杆。

存在的主要安全隐患是：倒杆、砸伤等。

① 立、撤杆等重大施工项目应制定安全技术组织措施计划，并经厂、公司主管生产领导批准。

② 工作负责人在开工前必须熟悉施工现场，认真组织工作班组成员学习批准的施工安全技术组织措施计划，做到人人明白施工任务、方法、安全技术措施。

③ 立、撤杆工作要设专人统一指挥，开工前讲明施工方法及信号。工作人员应明确分工、密切配合、服从指挥，在居民区和交通道路附近进行施工应设专人看守。

④ 要使用合格的起重设备，严禁超载使用。

⑤ 使用抱杆立杆时，主牵引绳杆顶中心及抱杆顶应在一条直线上，抱杆应受力均匀，两侧拉线应拉好，不得左右倾斜。固定临时拉线时，不得固定在可能移动的物体上或其他不可靠的物体上。

⑥ 电杆起离地面后，应对各部吃力点做一次全面检查，确无问题再继续起立，起立 60° 后应减缓速度，注意各侧拉绳，特别控制好侧头部拉绳防止过牵引。

⑦ 利用旧杆起吊时，应先检查所用杆的杆根并打好临时拉线。使用合格的起重设备，严禁超载使用。

⑧ 在撤杆工作中，拆除杆上导线前应检查杆根，做好防倒杆措施，在挖杆坑前应先绑好牵引绳并使其受力。

⑨ 吊车起吊钢丝绳套应吊绑在杆的适当位置，防止电杆突然倾倒。

⑩ 吊车的吊臂下方严禁有人逗留。立杆过程中严禁有人，除指挥人及指定人员外，其他人员必须远离杆下 1.2 倍杆高的距离以外。

⑪ 立杆及修坑时，应有防止杆身滚动、倾斜的措施，如采用叉杆和拉绳控制等。

⑫ 已经立起的电杆只有在杆基回填土全部夯实后，方可撤去叉杆和拉绳，工作人员应戴安全帽。

⑬ 利用钢钎做地锚时，应检查锤把、锤头及钢钎子，打锤人应站在扶钎人的侧面，严禁站在对面，并不准戴手套；扶钎人应戴安全帽。钎头有开花现象时应更换修理。

第三节 线路巡视、维护作业

一、线路巡视工作安全作业要点

线路巡视作业存在的安全隐患较多，如：走路扎脚、狗咬、蛇咬、摔伤、马蜂蜇、高空坠落、交通事故、溺水、迷路、触电等。

① 巡视时，严禁穿凉鞋，防止扎脚。
② 进村屯可能有狗的地方先喊叫。
③ 可备用棍棒，防备狗突然窜出。
④ 巡线时带一树棍，边走边打草，打草惊蛇，避免被蛇咬伤。

⑤ 巡线时如路滑，慢慢行走，过沟、崖、墙时防止摔倒。
⑥ 发现马蜂窝不要靠近，更不能碰它。
⑦ 单人巡视时，禁止攀登电杆和铁塔。
⑧ 巡视时应遵守交通法规。
⑨ 巡视工作中不得穿过不明深浅的水域和薄冰。
⑩ 偏僻山区夜间巡视必须由两人进行。
⑪ 应有照明工具。
⑫ 暑天和大雪天巡视必要时由两人进行。
⑬ 事故巡线应始终认为线路有电，即使明知该线路已停电，亦认为线路随时有恢复送电的可能。
⑭ 发现导线断落地面或悬吊空中，应设法防止行人靠近

断线点 8m 以内，并迅速报告领导，等候处理。

⑤ 巡线时沿线路外侧行走，大风时沿上风侧行走。

二、带电杆塔上作业

铁塔及水泥杆刷油、涂标志、挂相位牌，补塔材、螺丝等；登杆塔检查绝缘子、架空地线等作业，存在的安全隐患有：高空坠落、触电。

① 攀登杆塔前应认真检查脚钉、脚扣、升降板、爬梯等是否牢固无问题后方可攀登。

② 杆塔上工作必须系好安全带，安全带必须绑在牢固物件上，转移作业位置时不得失去安全带保护。

③ 应有专人监护。

④ 杆塔上工作人员和所携带的工具、材料与带电体保持足够的安全距离：10kV 及以下 0.7m；35kV，1m。

⑤ 上下传递工器具、材料必须使用绝缘无极绳索，风力不应大于 5 级，并应有专人监护。

⑥ 杆塔上有静电感应时工作人员应穿防静电服。

⑦ 高处作业必须使用工具袋防止掉东西。

⑧ 所用的工器具、材料等必须用绳索传递，不得乱扔。杆下应防止行人逗留。

⑨ 作业人员应戴安全帽。

三、停电清扫绝缘子、更换绝缘子安全作业要点

此项工作存在的安全隐患有：误登邻近带电设备；工器具失灵、导线脱落；绝缘子串脱落；跑线二连板挤伤人等。

① 工作开始前，工作负责人要指明停电作业范围及交代邻近有电设备和线路。

② 登杆塔前，要认清停电线路名称、标塔号、核对所戴标记颜色与停电线路色标是否相同。

③ 杆塔上作业时，首先要挂好小地线。

④ 作业时由两人以上进行，做好互相监护。

⑤ 所用工器具要定期检查，使用前必须经专人检查，保证合格、配套、灵活好用。

⑥ 在交叉跨越的各种线路、公路、铁路作业时，必须采取防止落线保护措施，并应有足够强度，对被跨越的电力线，必要时可联系停电再进行作业。

⑦ 为防止绝缘子串收紧后，缺少弹簧销子和金具连接不牢发生突然脱落伤人，首先要认真检查连接情况。

⑧ 认真检查绝缘子连接情况，防止瓶串突然脱开或翻动，二连板变位挤伤人。

⑨ 瓶串收紧前，检查工器具连接情况是否牢固可靠，并打好保护套。

四、放线、紧线和撤线工作安全作业要点

放线、紧线和撤线工作存在的安全隐患有：抽伤、触电。

① 放线、紧线工作，应制定安全技术组织措施计划，并经厂、公司有关部门和领导批准。

② 放线、紧线和撤线工作均应有专人统一指挥、执行统一信号。

③ 所使用的工器具必须合格，使用前必须有专人检查，无问题方可使用。开门滑车应将门钩扣牢或用绑线绑牢，防止绳索滑脱。

④ 交叉跨越各种线路、铁路、公路、河流时，放、撤线应先取得主管部门同意，做好安全措施，如搭好可靠的跨越架，在路口设专人手持信号旗看守。

⑤ 紧线前应检查导地线有无障碍物挂住。紧线时应检查接线管或接线头以及过滑轮、横担、树枝、房屋等有无卡住现象，如有，应用绳索或木棒处理。工作人员不得跨在导线上或站在导线内角侧，防止意外跑线时被抽伤。

⑥ 紧线、撤线前应检查拉线、拉桩及杆根，如不能适用时应加设临时拉绳加固，主牵引绳与杆塔夹角不小于 60° ，滑车必须绑牢，不准直接挂在横担上。

⑦ 严禁采取突然剪断导地线的做法松线。

⑧ 紧、撤线时塔上摘、挂线人员的安全带必须绑在杆塔牢固构件上。

⑨ 放线、撤线工作中下方有被跨越的电力线路，必须搭好越线架，架子一定要搭牢，搭架工作必须有专人指挥、检查、防止搭的架子倾倒，造成人身触电和摔伤。

⑩ 放线、紧线过程中越线架始终要有专人看守、防止线被架子挂住或掉到架子外边，滑到带电线路上。

⑪ 导地线通过越线架时，必须用绝缘绳进行，严禁用人带线头或抛扔钢丝绳的办法进行。

五、外线测量工作安全作业要点

主要包括导地线弛度测量、交叉跨越测量、杆塔接地电阻测量。存在的主要安全隐患有：走路扎脚、触电、物体打击。

① 测量工作应穿胶底高腰劳保用鞋，走路时不光要看着线路，同时要观察周围的自然环境，防止被绊倒摔伤。

② 翻越障碍物时，确认下方无危险时方可跳下。

③ 电气测量工作至少应由两人进行，一人操作，一人监护。监护人不得做其他工作。

④ 在线路带电情况下，测量导线垂直距离、线距、交叉距离等工作，用抛绝缘绳的方法进行时，绝缘绳必须试验合格，上塔抛挂绝缘绳时，人身与带电体应保持安全距离，要系安全带，并有专人监护。

⑤ 绝缘绳必须保持清洁干燥，禁止在阴雨天气进行测量。

⑥ 严禁使用皮尺、线尺（夹有金属线）等器具测量带电线路各种距离。

⑦ 雷雨天严禁测量杆塔接地电阻，解开和恢复杆、塔接地引线时，应戴绝缘手套，严禁接触与地断开的接地线。

⑧ 利用仪器测量时，塔尺与带电体必须保持安全距离。

⑨ 利用绝缘绳地面抛挂测量时，应检查重锤是否绑好。

⑩ 抛重锤时应有专人监护，防止重锤打碎绝缘子或落下打伤工作人员。

六、室内线路安装安全作业要点

1. 室内线路设计

存在的主要安全隐患是：火灾、触电。

① 户内布线装置中导线的最小截面和敷设间距离要求应符合要求。选择导线截面时，除应考虑安全载流量外，还应考虑线路允许的电压损失和机械强度。

② 车间照明和电力线路应分开放置，不同电压、不同电压等级的线路应十分明显地分开敷设，以方便维修和检查。

③ 线路装置严禁利用大地作相线或零线。单相或二相三线供电时，零线与相线截面不同；三相四线供电的零线截面应符合规定。

④ 除花灯及壁灯等线路外，一般照明每一支路的最大负荷电流不应超过 15A，插座数一般不超过 15 只。用电热设备时，每一支路的最大负荷电流不应超过 30A，装接插座数一般不超过 6 只。

2. 室内线路安装

存在的主要安全隐患是：火灾、触电。

① 导线不得直接贴在木头、墙壁或其他建筑物上，导线不得裸露。

② 布线过程中，应尽量减少导线间的连接；接头应采用

压接或焊接工艺；铜、铝线间的连接应用铜铝过渡接头或铜线上镀锡，以防电化学腐蚀；所有接头与分支处应尽量使其不受大的机械拉力。

③ 管内、木槽板内的导线不得有接头和分支处，以免使用日久会接触不良引起过热以致起火，必要时可把接头做在接线盒内。

④ 所有明布线的接头应放在便于检查和检修的位置上。导线与电器端子的连接应压实、使其牢固可靠。

⑤ 导线绝缘必须良好，其接头处应加绝缘包布包扎，绝缘强度不应小于导线的原有绝缘强度。腐蚀性场所使用的导线应采用塑料绝缘线或铅包线。

3. 线路施工后的测试

主要安全隐患是：漏电。

布线完工后，通电前应测试其绝缘电阻，其值不小于下列数值：相对地， $0.22\text{M}\Omega$ ；相对相， $0.38\text{M}\Omega$ ；对于 36V 低压线路为 $0.22\text{M}\Omega$ ；潮湿、有腐蚀性蒸气和气体的场所，绝缘电阻值标准可降低一半。

4. 彩灯安装

存在的安全隐患为：触电、火灾。

① 彩灯应采用绝缘电线。干线和分支线的最小截面除满足安全电流外，不应小于 2.5mm^2 ，灯头线不应小于 1.0mm^2 。每个支路负荷电流不应超过 10A 。导线不能直接承力，导线支持物应安装牢固，彩灯应采用防水灯头。

② 供彩灯的电源，除总保护控制外，每个支路应有单独过流保护装置，并加装剩余电流动作保护器。

③ 彩灯的导线在人能接触的场所，应有“电气危险”的警告牌。

④ 彩灯对地面距离小于 2.5m 时，应采用特低电压。

七、电缆线路施工安全作业要点

1. 人力敷设电缆工作

存在的安全隐患是：人员绊伤、摔伤、传动挤伤。

- ① 电缆沟边应修有人工牵引电缆的平整通道。
- ② 电缆需要穿入过道管时，过道管应预敷牵引绳。
- ③ 电缆盘及放线架应固定在硬质平整的地面，电缆应从电缆盘上方牵引，放线轴杠两端应打好临时拉线。
- ④ 电缆盘设专人看守，电缆盘滚动时禁止用手制动。
- ⑤ 肩扛电缆的人应在电缆同一侧，合理地分配肩扛点距离，禁止把电缆放在地面上拖拉。
- ⑥ 电缆穿入保护管时，送电缆人的手与管口应保持一定距离。
- ⑦ 敷设电缆保护盖板时，运板人员与接板人员注意轻接轻放。

2. 电缆头制作

存在的安全隐患是：抬运物件时挤压；施工过程物体打击；熬胶及使用喷灯时烫伤。

- ① 抬运物件时，人员应相互配合。
- ② 制作中间接头时，接头坑边应留有通道，坑边不得放置工具、材料，传递物件注意递接递放。
- ③ 用刀或其他工具时，不准对着人体。
- ④ 熬胶工作应有专人看管，熬胶人员应戴帆布手套和鞋盖。
- ⑤ 搅拌或舀取热胶时，必须使用预先加热的工具。
- ⑥ 沟内外传递，注意轻接轻放。
- ⑦ 灌胶过程中，周围不能站人，灌胶人尽量远离灌胶点缓慢注入。
- ⑧ 使用喷灯应先检查喷灯本体是否漏气或堵塞。喷灯加油不得超过桶容积的 $3/4$ 。禁止在明火附近进行放气或加油，

点火时先将喷嘴预热。使用喷灯时，喷嘴不准对着人体及设备，打气不得超压。

⑨ 喷灯使用完毕，应立即放气，放置在安全地点，冷却后装运。

3. 电缆的运输和装卸

存在的安全隐患有：挤压砸伤人，损坏电缆盘和电缆，吊装工具、器具不完整。

① 电缆盘禁止平放运输，吊车装卸电缆时，起重工作应由一人统一指挥。

② 电缆盘挂吊钩，人员撤离后方可起吊。

③ 与工作无关人员禁止在起重区域内行走或停留。正在吊物时任何人员不准在吊车和吊物下停留或行走。

④ 重物放稳后，方可摘钩，运输过程中电缆盘必须捆绑牢固，严禁客货混装。

⑤ 卸电缆应使用吊车或将其沿着坚固的铺板渐渐滚下，与电缆盘相反方向的制动绳应满足牵引力，并固定在牢固地点，电缆盘下方禁止站人，不允许将电缆盘从车上直接推下。

⑥ 吊装电缆工作应设专人负责，明确分工，应对所用工具全面检查是否齐备，有无损伤。起吊用钢绳，必须满足安全拉力。工作人员应戴保护手套。行车途中押车人员应随时观察电缆盘稳固情况，如有异常立即停车处理。

⑦ 电缆盘沿下坡滚动时，应防止电缆盘顺势自己滚动，预防意外事故发生。

4. 电缆沟的挖掘工作

存在的安全隐患有：碰坏地下设施、伤人、有害气体中毒、交通事故。

① 挖掘电缆沟前必须与地下管道、电缆的主管部门联系，明确地下设施实际位置，做好防范措施，组织外来人员施工时

应交代清楚并加强监护。

② 挖掘过程中碰到地下物体，不得擅自破坏，要验明清楚后再进行。

③ 在电缆路径上挖掘，不得使用尖镐，要使用铁锹。挖到电缆时更应注意，防止碰坏电缆。

④ 挖掘电缆沟前，现场应做好明显标示或围栏，挖出的土堆起的斜坡不得放置工具、材料等杂物，沟边应留有通道。

⑤ 在挖掘电缆沟深超过 1.5m 时，抛土要特别注意防止土石回落。

⑥ 在松软土层挖沟应有防止塌方措施，禁止由下部挖土层。

⑦ 在居民区及交通要道附近挖沟时应设沟盖，夜间挂红灯。

⑧ 硬石、冻土层打眼时应检查锤把、锤头及钢钎子，打锤人应站在扶钎人侧面，严禁站在对面，并不得戴手套。扶钎人应戴安全帽，钎头有开花现象时应更换修理。

⑨ 在煤气管道附近挖掘时，必须由两人进行，监护人必须注意挖土人，防止煤气中毒。

在垃圾堆处挖掘时，必须由两人进行，防止沼气中毒。

⑩ 夜间工作现场应有充足的照明。

在居民区及交通道路附近挖掘电缆沟，应设临时盖板或可靠围栏，夜间挂红灯，防止行人误入和交通事故。

5. 电缆线路、隧道故障巡视检查工作

存在的安全隐患有：有毒气体伤人、触电、碰伤

① 配变电站巡视工作必须由两人进行，一人巡视，一人监护。

② 高压室内巡视，进入室内前，必须辨清高低压侧，一般不应从高压侧通过。

③ 巡视过程中，任何情况下不得触及带电设备。

④ 高压室内高压设备发生接地时，人员不得进入故障点4m以内。

⑤ 进入电缆隧道内巡视、测温应由两人以上进行，不得单独巡视电缆隧道，进入电缆隧道应带好足够的照明设备。

⑥ 进入电缆隧道应做好防备有毒气体的准备，隧道内要通风良好，必要时带上防毒面具或口罩。

⑦ 巡视时，注意力集中，防止跌倒或碰伤。

⑧ 事故巡视检查应始终认为线路有电，即使明知该线路已停电，亦应认为线路随时有恢复送电的可能。

⑨ 电缆隧道的巡视、检查维护工作，必须由两人以上来完成。

⑩ 巡视隧道时，应注意突出的支架和障碍物，防止碰伤、挂伤。

八、在建工程与外电线路安全防护作业要点

存在的安全隐患有：火灾、触电。

① 在建工程不得在高、低压线路下方施工，高低压线路下方不得搭设作业棚、建造生活设施或堆放构件、架具、材料及其他杂物等。

② 在建工程（含脚手架具）的外侧边缘与外电架空线路的边线之间必须保持安全距离，最小安全操作距离不应小于1kV以下4m；1~10kV，6m；35~110kV，8m；154~220kV，10m；330~500kV，15m。

③ 施工现场的机动车道与外电架空线路交叉时，架空线路的最低点与路面的垂直距离应不小于：1kV以下，6m；1~10kV，7m；35kV，7m。

④ 旋转臂架式起重机的任何部位或被吊物边缘与10kV以下的架空线路边线最小水平距离不得小于2m。

⑤ 在外电架空线路附近开挖沟槽时，必须防止外电架空线路的电杆倾斜、悬倒，必要时应会同有关部门采取加固措施。

⑥ 施工现场开挖非热管道沟槽的边缘与埋地外电缆沟槽边缘之间的距离不得小于 0.5m。

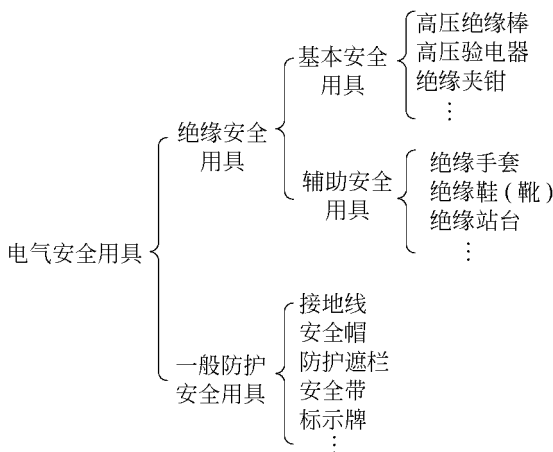
第十章 电气安全用具

电气工作人员在生产活动中经常使用各种电气工具。这些工具不仅对完成工作任务起一定的作用，而且对人身安全起重要作用。如，防止人身触电、电弧灼伤、高空摔跌等。要充分发挥电气安全用具的保护作用，则电气工作人员必须对各种电气安全用具的基本结构、性能有所了解，正确使用电气安全用具。

第一节 电气安全用具安全操作要点

一、电气安全用具的分类

电气安全用具从总体上可划分为绝缘安全用具和一般防护安全用具两大类，分类如下。



二、电气安全用具安全操作要点

1. 绝缘棒

绝缘棒如图 10-1 所示。

(1) 用途 用来闭合或断开高压隔离开关、跌落保险，也可用来安装和拆除临时接地线以及用于测量和试验工作。

(2) 安全操作要点 不用时应垂直放置，最好放在支架上，不应使其与墙壁接触，以免受潮。

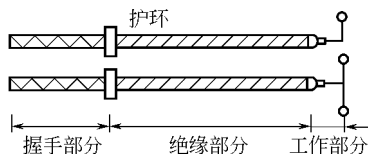


图 10-1 绝缘棒

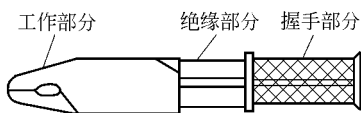


图 10-2 绝缘夹钳

2. 绝缘夹钳

绝缘夹钳如图 10-2 所示。

(1) 用途 用来安装高压熔断器或进行其他需要有夹持力的电气作业时的一种常用工具。

(2) 安全操作要点 工作时戴护目镜、绝缘手套，穿绝缘靴（鞋）或站在绝缘台（垫）上，精神集中，注意保持身体平衡，握紧绝缘夹，不使夹持物滑脱落下；潮湿天气应使用专门的防雨绝缘夹钳；不允许在绝缘夹钳上装接地线，以免接地线在空中悬荡，触碰带电部分造成接地短路或人身触电事故；使用完毕，应保存在专用的箱子里或匣子里，以免受潮和碰损。

3. 验电器（笔）

验电器（笔）的结构如图 10-3 所示。

(1) 用途 用来检查设备是否带电的一种专用安全用具。分为高压、低压两种。

(2) 安全操作要点

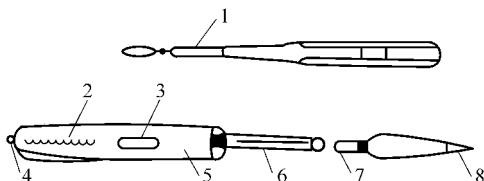


图 10-3 验电器（笔）的结构

1—绝缘套管；2—弹簧；3—小窗；4—笔尾的金属体（笔卡）；

5—笔身；6—氖管；7—电阻；8—笔尖的金属体

① 应选用电压等级相符，且经试验合格的产品。

② 验电前应先在确知带电设备上试验，以证实其完好后，方可使用。

③ 使用高压验电器时，不要直接接触设备的带电部分，而要逐渐接近，致氖灯发亮为止。

④ 使用时应注意避免因受邻近带电设备影响而使验电器氖灯发亮，引起误判断。验电器与带电设备距离应为：电压为6kV时，大于150mm；电压为10kV时，大于250mm。



图 10-4 绝缘手套

4. 绝缘手套

绝缘手套如图 10-4 所示。

(1) 用途 用于在高压电气设备上进行操作。

(2) 安全操作要点 不许作其他用。使用前，要认真检查是否破损、漏气，用

后应单独存放，妥善保管。

5. 绝缘鞋（靴）

绝缘鞋（靴）如图 10-5 所示。

(1) 用途 进行高压操作时用来与地保持绝缘。

(2) 安全操作要点 严禁作为普通鞋（靴）穿用，使用前应检查有无明显破损，用后要妥善保管，不要与石油类油脂接触。

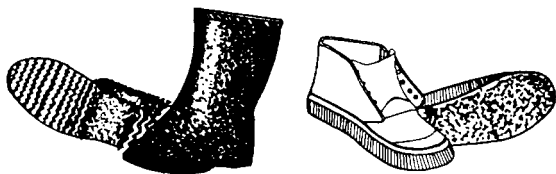


图 10-5 绝缘鞋（靴）

6. 绝缘站台

绝缘站台如图 10-6 所示。

(1) 用途 在任何电压等级的电力装置中带电工作时使用，多用于变电所和配电室，如用于室外。

(2) 安全操作要点 不应使台脚陷入泥土或台面触及地面，以免过多地降低其绝缘性能。

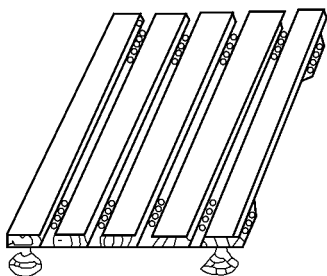


图 10-6 绝缘站台

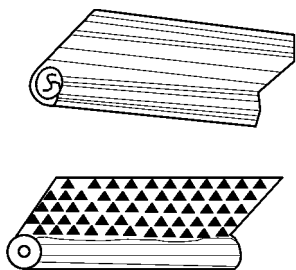


图 10-7 绝缘橡皮垫

7. 绝缘橡皮垫

绝缘橡皮垫（绝缘垫）如图 10-7 所示。

(1) 用途 带电操作时用来作为与地绝缘。

(2) 安全操作要点

① 最小尺寸不得小于 $0.8\text{m} \times 0.8\text{m}$ 。

② 在使用过程中，应保持绝缘垫干燥、清洁，注意防止与酸、碱及各种油类物质接触，以免受腐蚀后老化、龟裂或变黏，降低其绝缘性能。

③ 绝缘垫应避免阳光直射或锐利金属划刺，存放时应避免与热源（暖气等）距离太近，以免急剧老化变质，绝缘性能下降。

④ 使用过程中要经常检查绝缘毯有无裂纹、划痕等，发现问题时要立即禁止使用并及时更换。

8. 电工安全腰带

电工安全腰带（安全带）如图 10-8 所示。

(1) 用途 在电杆上、户外架构上进行高空作业时，用于预防高空坠落，保证作业人员的安全。

(2) 安全操作要点 不用时挂在通风处，不要放在高温处或挂在热力管道上，以免损坏。

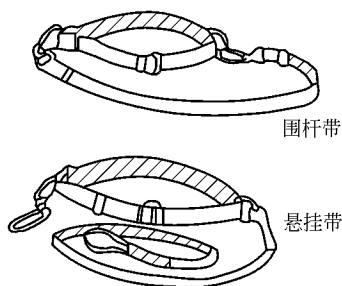


图 10-8 电工安全腰带



图 10-9 安全帽

9. 安全帽

安全帽如图 10-9 所示

(1) 用途 保护使用者头部免受外来伤害的个人防护用具。

(2) 安全操作要点

- ① 帽壳完整无裂纹或损伤，无明显变形；
- ② 帽衬组件（包括帽箍、顶衬、后箍、下额带等）齐全、牢固；
- ③ 帽舌伸出长度为 10 ~ 50mm，倾斜度在 30° ~ 60° 之间；
- ④ 永久性标志清楚。

10. 临时接地线

临时接地线如图 10-10 所示。

(1) 用途 为防止向已停电检修设备送电或产生感应电压而危及检修人员生命安全而采取的技术措施。

(2) 安全操作要点

① 挂接地线时要先将接地端接好，然后再将接地线挂在导线上，拆接地线的顺序与此相反。

② 应检查接地铜线和三根短接铜线的连接是否牢固，一般应由螺栓拧紧后，再加焊锡焊牢，以防因接触不良而熔断。

③ 装设接地线必须由两人进行，装拆接地线均应使用绝缘棒和戴绝缘手套。

11. 防护遮栏、标示牌

防护遮栏、标示牌如图 10-11 所示。

图 10-11 防护遮栏、标示牌

(1) 用途 提醒工作人员或非工作人员应注意的事项。

(2) 安全操作要点 标示牌内容正确悬挂地点无误；遮栏牢固可靠；严禁工作人员和非工作人员移动遮栏或取下标示牌。

12. 脚扣

脚扣如图 10-12 所示。

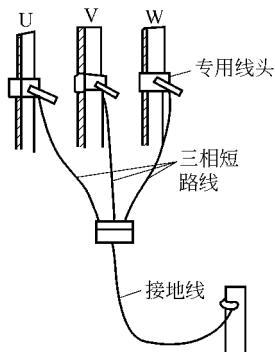


图 10-10 临时接地线

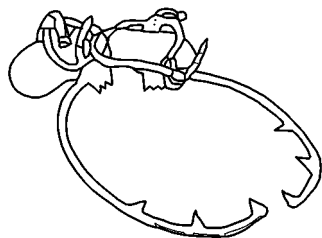
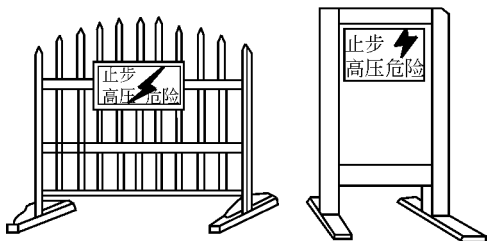


图 10-12 脚扣

(1) 用途 电用钢或合金铝材料制作的弧形弯梗、皮带扣环和脚登板等构成的轻便登杆用具。

(2) 安全操作要点

① 脚扣在使用前应作外观检查，看各部分是否有裂纹、腐蚀、断裂现象。若有，应禁止使用。

在不用时，亦应每月进行一次外观检查。

② 登杆前，应对脚扣作人体冲击试登，以检验其强度。其方法是：将脚扣系于钢筋混凝土杆上离地 0.5m 处左右，借人体重量猛力向下蹬踩。脚扣（包括脚套）无变形及任何损坏方可使用。

③ 应按电杆的规格选择脚扣，并且不得用绳子或电线代替脚扣皮带系脚。

④ 脚扣不能随意从杆上往下摔扔，作业前后应轻拿轻放，并妥善保管，存放在工具柜里，放置应整齐。



图 10-13 升降板

13. 升降板

升降板如图 10-13 所示。

(1) 用途 常用的攀登电杆用具。

(2) 安全操作要点

- ① 脚踏板木质无腐朽、劈裂及其他机械或化学损伤。
- ② 绳索无腐朽、断股或松散。
- ③ 绳索同脚踏板固定牢固。
- ④ 金属钩无损伤及变形。
- ⑤ 定期检验，有记录，未超期使用。

14. 梯子

梯子如图 10-14 所示。

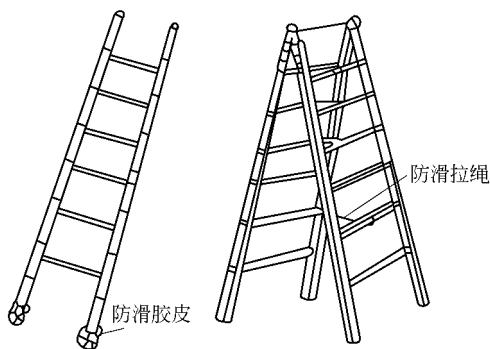


图 10-14 梯子

(1) 用途 登高作业用具。

(2) 安全操作要点

① 为了避免靠梯翻倒，其梯脚与墙之间的距离不得小于梯长的 $1/4$ 。为了避免滑落，其间距离不得大于梯长的 $1/2$ 。

② 在光滑坚硬的地面上使用梯子时，梯脚应加胶套或胶垫；在泥土地面上使用时，梯脚最好加铁尖。

③ 在梯子上作业时，梯顶一般不应低于作业人员的腰部，或作业人员应站在距梯顶不小于 1m 的横档上作业，切忌站在

梯子的最高处或上面一、二级横档上作业，以防朝后仰面摔下。

- ④ 登在人字梯上操作时，切不可采取骑马方式站立，以防人字梯两脚自动滑开时造成事故。

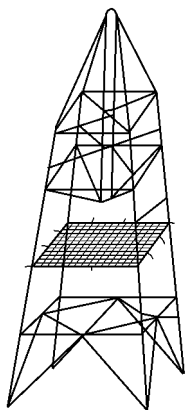


图 10-15 安全网

15. 安全网

安全网如图 10-15 所示。

(1) 用途 防止高处作业人员坠落和高处落物伤人而设置的保护设施。

(2) 安全操作要点

① 每次使用前应检查网绳是否完整无损。受力网绳是直径为 8mm 的锦纶绳，不得用其他绳索代替。

② 分解立塔时，当塔身下段已组好，即可将安全网设置在塔身内部有水平铁的位置上，距地面或塔身内断面铁的距离应不小于 3m，四角用直径 10mm 的锦纶绳牢固地绑扎在主铁和水平铁上，并拉紧，一般应按塔身断面大小设置。如果安全网不够大，也可接起来使用。

16. 护目镜

护目镜如图 10-16 所示。



图 10-16 护目镜

(1) 用途 防止眼睛受强光刺射。

(2) 安全操作要点 在砂轮机磨削金属时，工作人员应戴平光镜；焊工在进行焊割操作时，应戴专用防护墨镜，在清扫烟道、煤粉仓时也应使用护目镜。

17. 工作服

工作服如图 10-17 所示

(1) 用途 减轻对工作人员的伤害程度。

(2) 安全操作要点 工作人员的工作服不应有可能被转动的机器绞住的部分，工作时衣服和袖口必须扣好，禁止戴围巾和穿长衣服。工作服禁用尼龙、化纤或其他混纺布料制作，以防工作服遇火燃烧和加重烧伤程度。女作业人员禁止穿裙子，辫子最好剪掉，否则必须盘在帽内。穿戴合适而扣上袖口的服装和工作帽，不易被转动机械绞住伤人，偶尔触及热源体时，可减轻对皮肤烫伤程度。

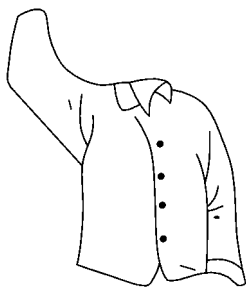


图 10-17 工作服

18. 携带型电流指示器（钳型电流表）

钳型电流表如图 10-18 所示。

(1) 用途 用以指示被测量的导线中的电流大小。

(2) 安全操作要点 使用时两手握住绝缘手柄，将铁芯张开，钳口套入被测带电体，然后将铁芯合拢，电流表便指示导体中电流读数。

应保存在干燥地点，存放在特制的箱柜或盒子中，在潮湿或下雨的天气，禁止在室外使用。

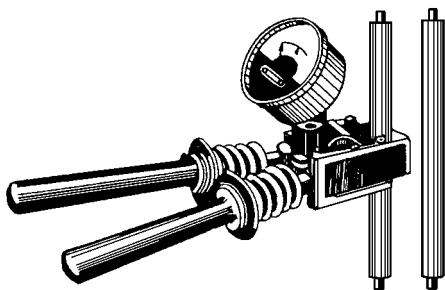


图 10-18 钳型电流表

19. 回转式高压验电器

回转式高压验电器是一种新型验电器，它利用带电导体尖端电晕放电产生的电晕风来驱动指示叶片旋转，从而检查设备或导体是否带电，也称风车式验电器。如图 10-19 所示。

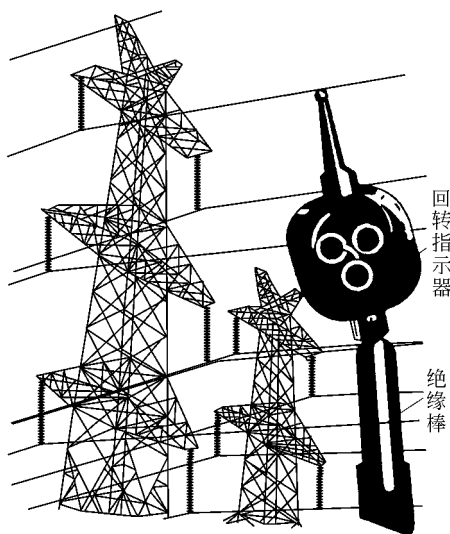


图 10-19 回转式高压验电器

(1) 用途 不论在线路、杆塔上还是在变电所内部能够正确、明显地指示电力设备有无电压，适用于 6kV 及以上的交流电压系统。

(2) 安全操作要点

① 使用前要按所测设备（线路）的电压等级选用合适型号的回转指示器和绝缘棒，并对回转指示器进行检查，证实良好方可使用。

② 把检验过的回转指示器旋在绝缘棒上固定，并用绸布将其表面擦拭干净，然后转动至所需角度，以便使用时观察

方便。

③ 根据设备（或线路）的电压等级，将绝缘棒拉伸至规定长度。绝缘棒上标有红线，红线以上部分表示内有电容元件，且属带电部分，该部分要按《电业安全工作规程》的要求与临近导体或接地体保持必要的安全距离。

④ 验电时，工作人员的手必须握在绝缘棒护环以下的部分，不准超过护环。回转指示器的金属触头应逐渐靠近被测设备（或导线），一旦指示器叶片开始正常回转，而说明该设备有电，应随即离开被测设备。叶片不能长期回转，以保证验电器的使用寿命。当电缆或电容上存在残余电荷电压时，回转指示器叶片仅短时缓慢转几圈，而自行停转，因此它可以准确鉴别设备是否停电。

⑤ 回转式高压验电器只适用于户内或户外良好天气，在雨、雪等环境下禁止使用。

⑥ 每次使用完毕，在收缩绝缘棒及取下回转指示器放入包装袋之前，应将表面尘埃擦拭干净，并存放在干燥通风的地方，以免受潮。回转指示器应妥善保管，不得强烈振动或冲击，也不准擅自调整拆装。

⑦ 为保证使用安全，验电器应每半年进行一次预防性电气试验。

第二节 漏 电 保 护

漏电保护是利用漏电保护装置来防止电气事故的一种安全技术措施。漏电保护装置又称为剩余电流保护装置或触电保安装置。漏电保护装置主要用于单相电击保护，也用于防止由漏电引起的火灾，还可用于检测和切断各种一相接地故障。漏电保护装置的功能是提供间接接触电击保护，而额定漏电动作电

流不大于 30mA 的漏电保护装置,在其他保护措施失效时,也可作为直接接触电击的补充保护。有的漏电保护装置还带有过载保护、过电压和欠电压保护、缺相保护等保护功能。

漏电保护装置主要用于 1000V 以下的低压系统,但作为检测漏电情况,也用于高压系统。

实践证明,漏电保护装置和其他电气安全技术措施配合使用,在防止电气事故方面有显著的作用。本节就漏电保护装置的原理及应用进行介绍。

一、漏电保护装置的原理

电气设备漏电时,将呈现出异常的电流和电压信号。漏电保护装置通过检测此异常电流或异常电压信号,经信号处理,促使执行机构动作,借助开关设备迅速切断电源。根据故障电流动作的漏电保护装置是电流型漏电保护装置,根据故障电压动作的是电压型漏电保护装置。早期的漏电保护装置为电压型漏电保护装置,因其存在结构复杂,受外界干扰动作稳定性差、制造成本高等缺点,已逐步被淘汰,取而代之的是电流型漏电保护装置。电流型漏电保护装置得到了迅速的发展,并占据了主导地位。目前,国内外漏电保护装置的研究生产及有关技术标准均以电流型漏电保护装置为对象。下面主要对电流型漏电保护装置进行介绍。

1. 漏电保护装置的组成

图 10-20 所示为漏电保护装置的组成框图。其构成主要有三个基本环节,即检测元件、中间环节(包括放大元件和比较元件)和执行机构。其次,还具有辅助电源和试验装置。

(1) 检测元件 它是一个漏电(零序)电流互感器,如图 10-21 所示。图中,被保护主电路的相线和主中性线穿过环形铁芯构成的互感器的一次线圈 N_1 ,均匀缠绕在环形铁芯上的

绕组构成了互感器的二次线圈 N_2 。检测元件的作用是将漏电流信号转换为电压或功率信号输出给中间环节。

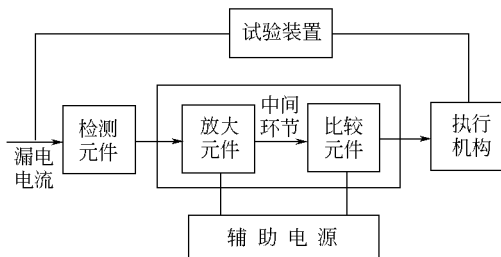


图 10-20 漏电保护装置组成框图

(2) 中间环节 该环节对来自零序电流互感器信号进行处理。中间环节通常包括放大器、比较器、脱扣器（或继电器）等，不同型式的漏电保护装置在中间环节的具体构成上型式各异。

(3) 执行机构 该机构用于接收中间环节的指令信号，实施动作，自动切断故障处的电源。执行机构多为带有分励脱扣器的自动开关或交流接触器。

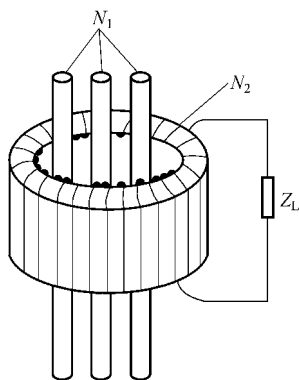


图 10-21 漏电电流互感器

(4) 辅助电源 当中间环节为电子式时，辅助电源的作用是提供电子电路工作所需的低压电源。

(5) 试验装置 这是对运行中的漏电保护装置进行定期检查时所使用的装置。通常是用一只限流电阻和检查按钮相串联的支路来模拟漏电的路径，以检验装置是否正常动作。

2. 漏电保护装置的工作原理

图 10-22 所示为某三相四线制供电系统的漏电保护装置的工作原理示意。图中 TA 为零序电流互感器，GF 为主开关，TL 为主开关的分励脱扣器线圈。下面针对此电路图，对漏电保护装置的整体工作的原理进行说明。

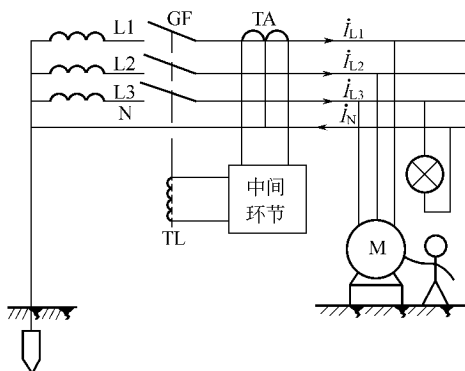


图 10-22 漏电保护装置的工作原理示意

在被保护电路工作正常、没有发生漏电或触电的情况下，由基尔霍夫定律可知，通过 TA 一次侧电流的相量和等于零，即 $\dot{I}_{L1} + \dot{I}_{L2} + \dot{I}_{L3} = 0$ 。这使得 TA 铁芯中磁通的相量和也为零。TA 二次侧不产生感应电动势。漏电保护装置不动作，系统保持正常供电。

当被保护电路发生漏电或有人触电时，三相电流的平衡遭到破坏，出现零序电流，即： $\dot{I}_{L1} + \dot{I}_{L2} + \dot{I}_{L3} = \dot{I}_N$ 。这零序电流是故障时流经人体，或流经故障接地点流入地下，或经保护导体返回电源的电流。由于漏电电流的存在，通过 TA 一次侧各相负载电流的相量和不再等于零，即产生了剩余电流。剩余电流是零序电流的一部分，这电流就导致了

TA 铁芯中的磁通相量和也不再为零，即在铁芯中出现了交变磁通。在此交变磁通作用下，TA 二次侧线圈就有感应电动势产生。此漏电信号经中间环节进行处理和比较，当达到预定值时，使主开关的分励脱扣器线圈 TL 通电，驱动主开关 GF 自动跳闸，迅速切断被保护电路的供电电源，从而实现保护。

二、漏电保护装置的分类

漏电保护装置的种类很多，可以按照不同的方式分类。

1. 按漏电保护装置中间环节的结构特点分类

(1) 电磁式漏电保护装置 其中间环节为电磁元件，有电磁脱扣器和灵敏继电器两种型式。电磁式漏电保护装置因全部采用电磁元件，使得其耐过电流和过电压冲击的能力较强；由于没有电子放大环节而无需辅助电源，当主电路缺相时仍能起漏电保护作用。但其不足之处是灵敏度不高，额定漏电动作电流一般只能设计到 $40 \sim 50\text{mA}$ ，且制造工艺复杂，价格较高。

(2) 电子式漏电保护装置 其中间环节使用了由电子元件构成的电子电路，有的是分立元件电路，也有的是集成电路。中间环节的电子电路用来对漏电信号进行放大、处理和比较。它的主要优点是灵敏度高，其额定漏电动作电流不难设计到 6mA ；动作电流整定误差小，动作准确；容易取得动作延时，动作电流和动作时间容易调节，便于实现分级保护；利用电子器件的机动性，容易设计出多功能的保护器；对各元件的要求不高，工艺制作比较简单。但其不足之处是应用元件较多，可靠性较低；电子元件承受冲击能力较弱，抗过电流和过电压的能力较差；当主电路缺相时，电子式漏电保护装置可能失去辅助电源而丧失保护功能。

2. 按结构特征分类

(1) 开关型漏电保护装置 它是一种将零序电流互感器、中间环节和主开关组合安装在同一机壳内的开关电器，通常称为漏电开关或漏电断路器。其特点是：当检测到触电、漏电后，保护器本身即可直接切断被保护主电路的供电电源。这种保护器有的还兼有短路保护及过载保护功能。

(2) 组合型漏电保护装置 它是一种由漏电继电器和主开关通过电气连接组合而成的漏电保护装置。当发生触电、漏电故障时，由漏电继电器进行信号检测、处理和比较，通过其脱扣器或继电器动作，发出报警信号；也可通过控制触点去操作主开关切断供电电源。漏电继电器本身不具备直接断开主电路的功能。

3. 按安装方式分类

(1) 固定位置安装、固定接线方式的漏电保护装置 (略)。

(2) 带有电缆的可移动使用的漏电保护装置 (略)。

4. 按级数和线数分类

按照主开关的极数和穿过零序电流互感器的线数可将漏电保护装置分为：单极二线漏电保护装置、二极漏电保护装置、二极三线漏电保护装置、三极漏电保护装置、三极四线漏电保护装置和四极漏电保护装置。其中，单极二线漏电保护装置、二极三线漏电保护装置、三极四线漏电保护装置均有一根直接穿过零序电流互感器而不能被主开关断开的中性线。

5. 按运行方式分类

(1) 不需要辅助电源的漏电保护装置 (略)。

(2) 需要辅助电源的漏电保护装置 此类中又分为辅助电源中断时可自动切断的漏电保护装置和辅助电源中断时不可

自动切断的漏电保护装置。

6. 按动作时间分类

按动作时间可将漏电保护装置分为：快速动作型漏电保护装置、延时型漏电保护装置和反时限型漏电保护装置。

7. 按动作灵敏度分类

按照动作灵敏度可将漏电保护装置分为：高灵敏度型漏电保护装置、中灵敏度型漏电保护装置和低灵敏度型漏电保护装置。

三、漏电保护装置的主要技术参数

1. 动作参数

动作参数是漏电保护装置最基本的技术参数，包括漏电动作电流和漏电动作时间。

(1) 额定漏电动作电流 ($I_{\Delta n}$) 它是指在规定的条件下，漏电保护装置必须动作的漏电动作电流值。该值反映了漏电保护装置的灵敏度。

我国标准规定电流型漏电保护装置的额定漏电动作电流值为：6mA、10mA、(15mA)、30mA、(50mA)、(75mA)、100mA、(200mA)、300mA、500mA、1000mA、3000mA、5000mA、10000mA、20000mA 共 15 个等级（带括号的值不推荐优先采用）。其中，30mA 及其 30mA 以下者属于高灵敏度，主要用于防止各种人身触电事故；30mA 以上至 1000mA 者属于中灵敏度，用于防止触电事故和漏电火灾；1000mA 以上者属低灵敏度，用于防止漏电火灾和监视一相接地事故。

(2) 额定漏电不动作电流 ($I_{\Delta n0}$) 它是指在规定的条件下，漏电保护装置必须不动作的漏电不动作电流值。为了避免误动作，漏电保护装置的额定不动作电流不得低于额定动作电流的 $1/2$ 。

(3) 漏电动作分断时间 简称漏电动作时间，是指从突

然施加漏电动作电流开始到被保护电路完全被切断为止的全部时间。为适应人身触电保护和分级保护的需要，漏电保护装置有快速型、延时型和反时限型三种。快速型适用于单级保护，用于直接接触电击防护时必须选用快速型的漏电保护装置。延时型漏电保护装置人为地设置了延时，主要用于分级保护的首端。反时限型漏电保护装置是配合人体安全电流-时间曲线而设计的，其特点是漏电电流越大，则对应的动作时间越小，呈现反时限动作特性。

快速型漏电保护装置动作时间与动作电流的乘积不应超过 $30\text{mA} \cdot \text{s}$ 。

我国标准规定漏电保护装置的动作时间见表 10-1，表中额定电流 $\geq 40\text{A}$ 的一栏适用于组合型漏电保护装置。

表 10-1 漏电保护装置的动作时间

额定动作电流 $I_{\Delta n} / \text{mA}$	额定电流 $/ \text{A}$	动作时间 / s			
		$I_{\Delta n}$	$2I_{\Delta n}$	0.5A	$5I_{\Delta n}$
≤ 30	任意值	0.2	0.1	0.04	—
> 30	任意值	0.2	0.1	—	0.04
	≥ 40	0.2	—	—	0.15

延时型漏电保护装置延时时间的优选值为： 0.2s 、 0.4s 、 0.8s 、 1s 、 1.5s 、 2s 。采用 3 级保护者，最上一级动作时间也不宜超过 1s 。

2. 其他技术参数

漏电保护装置的其他技术参数的额定值主要如下

- ① 额定频率为 50Hz 。
- ② 额定电压为 220V 或 380V 。
- ③ 额定电流 (I_n) 为 6A 、 10A 、 16A 、 20A 、 25A 、 32A 、 40A 、 50A 、 (60A) 、 63A 、 (80A) 、 100A 、 (125A) 、 160A 、

200A、250A（带括号值不推荐优先采用）。

3. 接通分断能力

漏电保护开关的额定接通分断能力应符合表 10-2 的规定。

表 10-2 漏电保护开关的额定接通分断能力

额定动作电流 $I_{\Delta n}$ /mA	接通分断电流 /A	额定动作电流 $I_{\Delta n}$ /mA	接通分断电流 /A
$I_{\Delta n} \leq 10$	≥ 300	$100 < I_{\Delta n} \leq 150$	≥ 1500
$10 < I_{\Delta n} \leq 50$	≥ 500	$150 < I_{\Delta n} \leq 200$	≥ 2000
$50 < I_{\Delta n} \leq 100$	≥ 1000	$200 < I_{\Delta n} \leq 250$	≥ 3000

四、漏电保护装置的应用

1. 漏电保护装置的选用

选用漏电保护装置应首先根据保护对象的不同要求而进行选型，既要保证在技术上有效，还应考虑经济上的合理性。不合理的选型不仅达不到保护目的，还会造成漏电保护装置的拒动作或误动作。正确合理地选用漏电保护装置，是实施漏电保护措施的关键。

(1) 动作性能参数的选择

① 防止人身触电事故。用于直接接触电击防护的漏电保护装置应选用额定动作电流为 30mA 及其以下的高灵敏度、快速型漏电保护装置。

在浴室、游泳池、隧道等场所，漏电保护装置的额定动作不宜超过 10mA。

在触电后，可能导致二次事故的场合，应选用额定动作电流为 6mA 的快速型漏电保护装置。

漏电保护装置用于间接接触电击防护时，在于通过自动切断电源，消除电气设备发生绝缘损坏时因其外露可导电部分持续带有危险电压而产生触电的危险。例如，对于固定式的电动

机设备、室外架空线路等，应选用额定动作电流为 30mA 及其以上的漏电保护装置。

② 防止火灾。对木质灰浆结构的一般住宅和规模小的建筑物，考虑其供电量小、泄漏电流小的特点，并兼顾到电击防护，可选用额定动作电流为 30mA 及其以下的漏电保护装置。

对除住宅以外的中等规模的建筑物，分支回路可选用额定动作电流为 30mA 及其以下的漏电保护装置；主干线可选用额定动作电流为 200mA 以下的漏电保护装置。

对钢筋混凝土类建筑，内装材料为木质时，可选用 200mA 以下的漏电保护装置；内装材料为不燃物时，应区别情况，可选用 200mA 到数安的漏电保护装置。

③ 防止电气设备烧毁。选择数安的电流作为额定动作电流的上限，一般不会造成电气设备的烧毁，因此，防止电气设备烧毁所考虑的主要是与防止触电事故的需要和满足电网供电可靠性问题。通常选用 100mA 到数安的漏电保护装置。

(2) 其他性能的选择 对于连接户外架空线路的电气设备，应选用冲击电压不动作型的漏电保护装置。对于不允许停转的电动机，应选用漏电报警方式，而不是漏电切断方式的漏电保护装置。对于照明线路，宜根据泄漏电流的大小和分布，采用分级保护的方式。支线上选用高灵敏度的漏电保护装置，干线上选用中灵敏度的漏电保护装置。

漏电保护装置的极线数应根据被保护电气设备的供电方式来进行选择：单相 220V 电源供电的电气设备应选用二极或单极二线式漏电保护装置；三相三线 380V 电源供电的电气设备应选用三极式漏电保护装置；三相四线 220/380V 电源供电的电气设备应选用四极或三极四线式漏电保护装置。

漏电保护装置的额定电压、额定电流、分断能力等性能指标应与线路条件相适应。漏电保护装置的类型应与供电线路、

供电方式、系统接地类型和用电设备特征相适应。

2. 漏电保护装置的安装

(1) 需要安装漏电保护装置的场所 带金属外壳的Ⅰ类设备和手持式电动工具；安装在潮湿或强腐蚀等恶劣场所的电气设备；建筑施工工地的电气施工机械设备；临时性电气设备；宾馆类的客房内的插座；触电危险性较大的民用建筑物内的插座；游泳池、喷水池或浴室类场所的水中照明设备；安装在水中的供电线路和电气设备，以及医院中直接接触人体的电气医疗设备（胸腔手术室除外）等均应安装漏电保护装置。

对于公共场所的通道照明及应急照明电源，消防用电梯及确保公共场所安全的电气设备的电源，消防设备（如火灾报警装置、消防水泵、消防通道照明等）的电源，防盗报警装置的电源，以及其他不允许突然停电的场所或电气装置的电源，若在发生漏电时上述电源被立即切断，将会造成严重事故或重大经济损失。因此，在上述情况下，应装设不切断电源的漏电报警装置。

(2) 不需要安装漏电保护装置的设备或场所 使用安全电压供电的电气设备；一般环境情况下使用的具有双重绝缘或加强绝缘的电气设备；使用隔离变压器供电的电气设备；在采用了不接地的局部等电位联结安全措施的场所中使用的电气设备，以及其他没有间接接触电击危险场所的电气设备。

(3) 漏电保护装置的安装要求 漏电保护装置的安装应符合生产厂家产品说明书的要求，应考虑供电线路、供电方式、系统接地类型和用电设备特征等因素。漏电保护装置的额定电压、额定电流、额定分断能力、极数、环境条件以及额定漏电动作电流和分断时间，在满足被保护供电线路和设备的运行要求时，还必须满足安全要求。

安装漏电保护装置之前，应检查电气线路和电气设备的泄

漏电流值和绝缘电阻值。所选用漏电保护装置的额定不动作电流应不小于电气线路和设备正常泄漏电流最大值的 2 倍。当电气线路或设备的泄漏电流大于允许值时，必须更换绝缘良好的电气线路或设备。

安装漏电保护装置不得拆除或放弃原有的安全防护措施，漏电保护装置只能作为电气安全防护系统中的附加保护措施。

漏电保护装置标有电源侧和负载侧，安装时必须加以区别，按照规定接线，不得接反。如果接反，会导致电子式漏电保护装置的脱扣线圈无法随电源切断而断电，以致长时间通电而烧毁。

安装漏电保护装置时，必须严格区分中性线和保护线。使用三极四线式和四极四线式漏电保护装置时，中性线应接入漏电保护装置。经过漏电保护装置的中性线不得作为保护线、不得重复接地或连接设备外露可导部分。

保护线不得接入漏电保护装置。

漏电保护装置安装完毕后应操作试验按钮试验 3 次，带负载分合 3 次，确认动作正常后，才能投入使用。

漏电保护装置接线方式见表 10-3。

3. 漏电保护装置的运行

(1) 漏电保护装置的运行管理 为了确保漏电保护装置的正常运行，必须加强运行管理。

① 对使用中的漏电保护装置应定期试验其可靠性。

② 为检验漏电保护装置使用中动作特性的变化，应定期对其动作特性（包括漏电动作电流值、漏电不动作电流值及动作时间）进行试验。

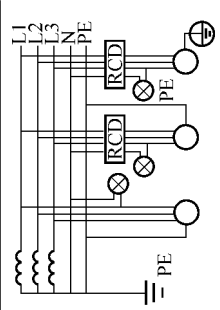
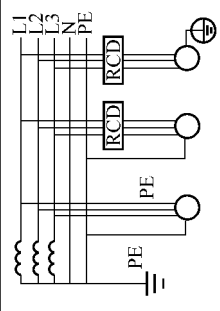
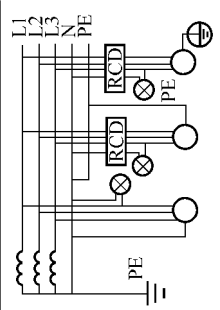
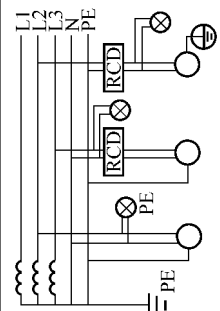
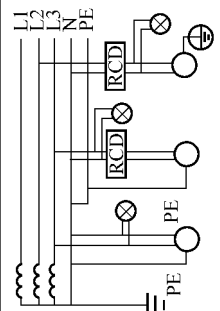
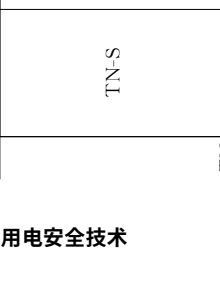
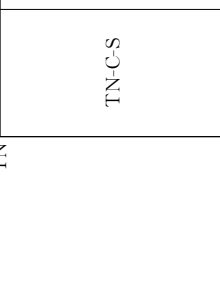
③ 运行中漏电保护器跳闸后，应认真检查其动作原因，排除故障后再合闸送电。

(2) 漏电保护装置的误动作和拒动作分析

① 误动作。它是指线路或设备未发生预期的触电或漏电时漏电保护装置产生的动作。误动作的原因主要来自两方面：一方面是由漏电保护装置本身的原因引起的；另一方面是由来自线路的原因而引起的。

表 10-3 漏电保护装置接线方式

接地型式	三 相	
	单相(单极或双极)	四线(三极或四极)
TT		
TN		

接地型式	三 相	
	三线(三极)	四线(三极或四极)
TN	单相(单极或双极)	
		
TN		
		

注: 1. L1、L2、L3 为相线; N 为中性线; PE 为保护线; PEN 为中性线和保护线合一;  为单相或三相电气设备;  为单相或三相电气设备的接地线。

2. 单相负载或三相负载在不同的接地保护系统中的接线方式图中, 左侧设备为未装有漏电保护器, 中间和右侧设备为装有漏电保护器。

3. 在 TN 系统中使用漏电保护器的电气设备, 其外露可导电部分的保护线可接在 PEN 线, 也可以接在单独接地装置上形成局部 TT 系统, 如 TN 系统接线方式图的右侧设备的接线图。

由漏电保护装置本身引起误动作的主要原因是质量问题。如装置在设计上存在缺陷、选用元件质量不良、装配质量差、屏蔽不良等，均会降低保护器的稳定性和平衡性，使可靠性下降，从而导致误动作。

由线路原因引起误动作的主要原因如下。

a. 接线错误。例如，保护装置后方的零线与其他零线连接或接地，或保护装置的后方的相线与其他支路的同相相线连接，或负载跨接在保护装置的电源侧和负载侧，则接通负载时，都可能造成保护装置的误动作。

b. 绝缘恶化。保护装置后方一相或两相对地绝缘破坏，或对地绝缘不对称，都将产生不平衡的泄漏电流，从而引发保护装置的误动作。

c. 冲击过电压。迅速分断低压感性负载时，可能产生 20 倍额定电压的冲击过电压，冲击过电压将产生较大的不平衡冲击泄漏电流，从而导致保护装置的误动作。

d. 不同步合闸。不同步合闸时，先于其他相合闸的一相可能产生足够大的泄漏电流，从而使保护装置误动作。

e. 大型设备启动。大型设备在启动时，启动的堵转电流很大。如果漏电保护装置内的零序电流互感器的平衡特性不好，则在大型设备启动的大电流作用下，零序电流互感器一次绕组的漏磁将造成保护装置的误动作。

f. 附加磁场。如果保护装置屏蔽不好，或附近装有流经大电流的导体，或装有磁性元件或较大的导磁体，均可能在零序电流互感器铁芯中产生附加磁通，因此而导致保护装置的误动作。

此外，偏离使用条件，例如环境温度、相对湿度、机械振动等超过保护装置的设计条件时，都可造成保护装置的误动作。

② 拒动作。它是指线路或设备已发生预期的触电或漏电而漏电保护装置却不产生预期的动作。拒动作较误动作少见，然而拒动作造成的危险性比误动作大。造成拒动作的主要原因如下。

a. 接线错误。错将保护线也接入漏电保护装置，从而导致拒动作。

b. 动作电流选择不当。额定动作电流选择过大或整定过大，从而造成保护装置的拒动作。

c. 线路绝缘阻抗降低或线路太长。由于部分电击电流不沿配电网工作接地或保护装置前方的绝缘阻抗而沿保护装置后方的绝缘阻抗流经零序电流互感器返回电源，从而导致保护装置的拒动作。

此外，产品质量低劣，例如零序电流互感器二次线圈断线、脱扣元件粘连等各种各样的漏电保护装置内部故障、缺陷均可造成保护装置的拒动作。

第三节 安全标志

一、安全标志

1. 定义

安全标志是由安全色、几何图形和图形符号构成的，用以表达特定的安全信息。

2. 类型

安全标志分为禁止标示、警告标示、指令标示、提示标示四类。

(1) 禁止标示 几何图形是带斜杠的圆环。

(2) 警告标示 几何图形是正三角形。

(3) 指令标示 其含义是必须要遵守的意思。几何图形

是圆形。

(4) 提示标示 含义是示意目标的方向,几何图形是长方形,按长短边的比例不同,分一般提示标示和消防设备提示标示。

3. 安全标志牌的其他要求

(1) 安全标志牌要有衬边 除警告标志边框用黄色勾边外,其余全部用白色将边框勾一窄边,即为安全标志的衬边,衬边宽度为标志边长或直径的 0.025 倍。

(2) 安全标志牌的材质 安全标志牌应采用坚固耐用的材料制作,一般不宜使用遇水变形、变质或易燃的材料。有触电危险的作业场所应使用绝缘材料。

(3) 安全标志牌表面质量 除上述要求外,标志牌应图形清楚,无长刺、孔洞和影响使用的任何疵病。

二、安全标志牌的使用

安全标志牌的使用见表 10-4。

表 10-4 安全标志牌的使用

序号	名称及图形符号	设置范围和地点
1	禁止吸烟 	有丙类火灾危险物质的场所,如:木工车间、油漆车间、沥青车间、纺织厂、印染厂等
2	禁止烟火 	有乙类火灾危险物质的场所,如:面粉厂、煤粉厂、焦化厂、施工工地等

序号	名称及图形符号	设置范围和地点
3	禁止带火种 	有甲类火灾危险物质及其他禁止带火种的各种危险场所，如：炼油厂、乙炔站、液化石油气站、煤矿井内、林区、草原等
4	禁止用水灭火 	生产、储运、使用中不准用水灭火的物质的场所，如：变压器室、乙炔站、化工药品库、各种油库等
5	禁止放易燃物 	具有明火设备或高温的作业场所，如：动火区，各种焊接、切割、锻造、浇注车间等场所
6	禁止启动 	暂停使用的设备附近，如：设备检修、更换零件等
7	禁止合闸 	设备或线路检修时，相应开关附近

序号	名称及图形符号	设置范围和地点
8	禁止转动 	检修或专人定时操作的设备附近
9	禁止触摸 	禁止触摸的设备或物体附近，如：裸露的带电体，炽热物体，具有毒性、腐蚀性物体等处
10	禁止跨越 	不宜跨越的危险地段，如：专用的运输通道、皮带运输线和其他作业流水线，作业现场的沟、坎、坑等
11	禁止攀登 	不允许攀登的危险地点，如：有坍塌危险的建筑物、构筑物、设备旁
12	禁止跳下 	不允许跳下的危险地点，如：深沟、深池、车站站台及盛装过有毒物质、易产生窒息气体的槽车、储罐、地窖等处

序号	名称及图形符号	设置范围和地点
13	禁止入内 	易造成事故或对人员有伤害的场所，如：高压设备室、各种污染源等入口处
14	禁止停留 	对人员具有直接危害的场所，如：粉碎场地、危险路口、桥口等处
15	禁止通行 	有危险的作业区，如：起重、爆破现场，道路施工工地等
16	禁止靠近 	不允许靠近的危险区域，如：高压试验区、高压线、输变电设备的附近
17	禁止乘人 	乘人易造成伤害的设施，如：室外运输吊篮、外操作载货电梯框架等

序号	名称及图形符号	设置范围和地点
18	禁止堆放 	消防器材存放处、消防通道及车间主通道等
19	禁止抛物 	抛物易伤人的地点，如：高处作业现场、深沟（坑）等
20	禁止戴手套 	戴手套易造成手部伤害的作业地点，如：旋转的机械加工设备附近
21	禁止穿化纤服装 	有静电火花会导致灾害或有炽热物质的作业场所，如：冶炼、焊接及有易燃易爆物质的场所等
22	禁止穿带钉鞋 	有静电火花会导致灾害或有触电危险的作业场所，如：有易燃易爆气体或粉尘的车间及带电作业场所

序号	名称及图形符号	设置范围和地点
23	禁止饮用 	不宜饮用水的开关处，如：循环水、工业用水、污染水等
24	注意安全 	本标准警告标志中没有规定的易造成人员伤害的场所及设备
25	当心火灾 	易发生火灾的危险场所，如：可燃性物质的生产、储运、使用等地点
26	当心爆炸 	易发生爆炸危险的场所，如易燃易爆物质的生产、储运、使用或受压容器等地点
27	当心腐蚀 	有腐蚀性物质（GB 12268 中第 8 类所规定的物质）的作业地点

序号	名称及图形符号	设置范围和地点
28	当心中毒 	剧毒品及有毒物质（GB 12268 中第 6 类第 1 项所规定的物质）的生产、储运及使用场所
29	当心感染 	易发生感染的场所，如：医院传染病区；有害生物制品的生产、储运、使用等地点
30	当心触电 	有可能发生触电危险的电器设备和线路，如：配电室、开关等
31	当心电缆 	在暴露的电缆或地面下有电缆处施工的地点
32	当心机械伤人 	易发生机械卷入、轧压、碾压、剪切等机械伤害的作业地点

序号	名称及图形符号	设置范围和地点
33	当心伤手 	易造成手部伤害的作业地点，如：玻璃制品、木制加工、机械加工车间等
34	当心扎脚 	易造成脚部伤害的作业地点，如：铸造车间、木工车间、施工工地及有尖角散料等处
35	当心吊物 	有吊装设备作业的场所，如：施工工地、港口、码头、仓库、车间等
36	当心坠落 	易发生坠落事故的作业地点，如：脚手架、高处平台、地面的深沟（池、槽）等
37	当心落物 	易发生落物危险的地点，如：高处作业、立体交叉作业的下方等

序号	名称及图形符号	设置范围和地点
38	当心坑洞 	具有坑洞易造成伤害的作业地点，如：构件的预留孔洞及各种深坑的上方等
39	当心烫伤 	具有热源易造成伤害的作业地点，如：冶炼、锻造、铸造、热处理车间等
40	当心弧光 	由于弧光造成眼部伤害的各种焊接作业场所
41	当心塌方 	有塌方危险的地段、地区，如：堤坝及土方作业的深坑、深槽等
42	当心冒顶 	具有冒顶危险的作业场所，如：矿井、隧道等

序号	名称及图形符号	设置范围和地点
43	当心瓦斯 	有瓦斯爆炸危险的作业场所，如：煤矿井下、煤气车间等
44	当心电离辐射 	能产生电离辐射危害的作业场所，如：生产、储运、使用 GB 12268 规定的第 7 类物质的作业区
45	当心裂变物质 	具有裂变物质的作业场所，如：其使用车间、储运仓库、容器等
46	当心激光 	有激光设备或激光仪器的作业场所
47	当心微波 	凡微波场强超过 GB 10436、GB 10437 规定的作业场所

序号	名称及图形符号	设置范围和地点
48	当心车辆 	厂内车、人混合行走的路段；道路的拐角处、平交路口；车辆出入较多的厂房、车库等出入口处
49	当心火车 	厂内铁路与道路平交路口；铁道进入厂内的地点
50	当心滑跌 	地面有易造成伤害的滑跌地点，如：地面有油、冰、水等物质及滑坡处
51	当心绊倒 	地面有障碍物，绊倒易造成伤害的地点
52	必须戴防护眼镜 	对眼睛有伤害的作业场所，如：机加工、各种焊接车间等

序号	名称及图形符号	设置范围和地点
53	必须戴防毒面具 	具有对人体有害的气体、气溶胶、烟尘等作业场所，如：有毒物散发的地点或处理由毒物造成的事故现场
54	必须戴防尘口罩 	具有粉尘的作业场所，如：纺织清花车间、粉状物料拌料车间以及矿山凿岩处等
55	必须戴护耳器 	噪声超过 85dB 的作业场所，如：铆接车间、织布车间、射击场、工程爆破、风动掘进等处
56	必须戴安全帽 	头部易受外力伤害的作业场所，如：矿山、建筑工地、伐木场、造船厂及起重吊装处等
57	必须戴防护帽 	易造成人体碾绕伤害或有粉尘污染头部的作业场所，如：纺织、石棉、玻璃纤维以及具有旋转设备的机加工车间等

序号	名称及图形符号	设置范围和地点
58	必须戴防护手套 	易伤害手部的作业场所，如：具有腐蚀、污染、灼烫、冰冻及触电危险的作业等地点
59	必须穿防护鞋 	易伤害脚部的作业场所，如：具有腐蚀、灼烫、触电、砸（刺）伤等危险的作业地点
60	必须系安全带 	易发生坠落危险的作业场所，如：高处建筑、修理、安装等地点
61	必须穿救生衣 	易发生溺水的作业场所，如：船舶、海上工程结构物等
62	必须穿防护服 	具有放射、微波、高温及其他需穿防护服的作业场所

序号	名称及图形符号	设置范围和地点
63	必须加锁 	剧毒品、危险品库房等地点
64	紧急出口 	便于安全疏散的紧急出口处；与方向箭头结合设在通向紧急出口的通道、楼梯口等处
65	可动火区 	经有关部门划定的可使用明火的地点
66	避险处 	铁路桥、公路桥、矿井及隧道内躲避危险的地点

注：本表据 GB 16179—1996 编写。

附录 A 发电厂第一种工作票格式

发电厂（变电所）第一种工作票 第____号

1. 工作负责人（监护人）：_____ 班组：_____
2. 工作班人员：_____ 共_____人
3. 工作内容和工作地点：_____

4. 计划工作时间：自_____年_____月_____日_____时_____分
至_____年_____月_____日_____时_____分

5. 安全措施：

下列由工作票签发人填写 下列由工作许可人（值班员）填写

应拉断路器和隔离开关，包括填写前已拉断路器和隔离开关（注明编号）	已拉断路器和隔离开关（注明编号）
应装接地线（注明确定地点）	已装接地线（注明接地线编号和装设地点）
应设遮栏、应挂标示牌	已设遮栏、已挂标示牌（注明地点）
	工作地点保留带电部分和补充安全措施
工作票签发人签名： 收到工作票时间：年 月 日 时 分 值班负责人签名：	工作许可人签名： 值班负责人签名：

（发电厂值班长签名：_____）

6. 许可开始工作时间：_____年_____月_____日_____时_____分

工作许可人签名：_____ 工作负责人签名：_____

7. 工作负责人变动：

原工作负责人_____离去，变更_____为工作负责人。

变动时间：____年____月____日____时____分

工作票签发人签名：_____

8. 工作票延期，有效期延长到：____年____月____日____时____分

工作负责人签名：_____ 值长或值班负责人签名：_____

9. 工作终结：

工作班人员已全部撤离，现场已清理完毕。

全部工作于____年____月____日____时____分结束。

工作负责人签名：_____ 工作许可人签名：_____

接地线共_____组已拆除。

值班负责人签名：_____

10. 备注：_____

附录 B 发电厂第二种工作票格式

发电厂（变电所）第二种工作票 编号：

1. 工作负责人（监护人）：_____ 班组：_____

工作班人员：_____

2. 工作任务：_____

3. 计划工作时间：自____年____月____日____时____分
至____年____月____日____时____分

4. 工作条件（停电或不停电）：_____

5. 注意事项（安全措施）：_____

工作票签发人签名：_____

6. 许可开始工作时间：____年____月____日____时____分

工作许可人（值班员）签名：_____ 工作负责人签名：_____

7. 工作结束时间：____年____月____日____时____分

工作负责人签名：_____ 工作许可人（值班员）签名：_____

8. 备注：_____

附录 C 电力线路第一种工作票

1. 工区、所（工段）名称：_____

2. 工作负责人姓名：_____

3. 工作班人员：_____共_____人

4. 停电线路名称（双回线路应注明双重称号）：_____

5. 工作地段（注明分、支路名称，线路的起止杆号）：_____

6. 工作任务：_____

7. 应采取的安全措施（包括拉开的隔离开关、断路器、应停电的范围）：_____

保留的带电线路或带电设备：_____

应挂的地线：_____

线路名称及杆号				
接地线编号				

8. 计划工作时间：自____年____月____日____时____分
至____年____月____日____时____分

9. 许可开始工作的命令：

许可的命令方式	许可人	许可工作的时间
		年 月 日 时 分

10. 工作终结的报告：

终结报告的方式	许 可 人	终结报告的时间

工作票签发人(签字)：____年 月 日

工作负责人(签字)：

备 注 栏

年 月 日

附录 D 电力线路第二种工作票

编号：

1. 工区、所（工段）名称：_____

2. 工作负责人姓名：_____

3. 工作班人员：_____共_____人

4. 工作线路或设备名称：_____

工作范围：_____

工作任务：_____

5. 计划工作时间：自____年____月____日____时____分

至____年____月____日____时____分

6. 执行本工作应采取的安全措施：_____

7. 通知调度：（工区值班员）

工作开始时间____年____月____日____时____分

工作完工时间____年____月____日____时____分

工作票签发人：

工作负责人：

附录 E 发电厂倒闸操作票格式

发电厂（变电所）倒闸操作票

编号：

操作开始时间： 年 月 日 时 分,终了时间： 日 时 分		
操作任务：		
✓	顺序	操 作 项 目
备注：		

操作人： 监护人： 值班负责人： 值班长：

附录 F 供电局倒闸操作票格式

供电局（或线路工区）倒闸操作票

编号：

操作开始时间： 年 月 日 时 分,终了时间： 日 时 分		
操作任务：		
✓	顺序	操 作 项 目
备注：		

操作人： 监护人： 工作许可人：

参 考 文 献

- 1 GB 4766—84
- 2 GB 4942. 1—85
- 3 GB 3836. 13—1997
- 4 GB 3836. 14—1997
- 5 GB 3836. 15—1997
- 6 GB 13955—92
- 7 GB 14050—93
- 8 杨有启编著. 用电安全技术. 北京: 化学工业出版社, 1996
- 9 张金钟主编. 化肥企业安全技术管理. 北京: 化学工业出版社, 1991
- 10 王玉元等主编. 安全工程师手册. 成都: 四川人民出版社, 1995
- 11 林明清主编. 工业安全生产知识手册. 北京: 电子工业出版社, 1985
- 12 崔克清主编. 安全工程大辞典. 北京: 化学工业出版社, 1995
- 13 冯肇瑞, 杨有启主编. 化工安全技术手册. 北京: 化学工业出版社, 1993
- 14 苏文成主编. 工厂供电. 北京: 机械工业出版社, 1987
- 15 张士林, 屈文莺编. 电工手册 (修订本). 第2版. 北京: 石油工业出版社, 1996
- 16 沈标正编著. 电机故障诊断技术. 北京: 机械工业出版社, 1996
- 17 郭仲礼主编. 高压电工实用技术. 北京: 机械工业出版社, 1992
- 18 郭仲礼主编. 低压电工实用技术. 北京: 机械工业出版社, 1998
- 19 周希章主编. 电气维修实用技术手册. 北京: 海洋出版社, 1998
- 20 李伏才主编. 供电企业安全生产实用手册. 北京: 中国电力出版社, 2003

- 21 王广仁主编. 电工安全作业手册. 北京：中国电力出版社，2003
- 22 潘龙德主编. 电业安全. 北京：中国电力出版社，2002
- 23 陈晓平主编. 电气安全. 北京：机械工业出版社，2004

内 容 提 要

本书是《现代生产安全技术丛书》中的一本。

本书结合企业用电安全实际，全面论述了企业安全用电的基础技术工作。全书分为：用电安全技术概述；电气绝缘、屏护、间距安全技术；电气接地、接零安全技术；电气防火防爆安全技术；电气防雷安全技术；静电防护安全技术；带电作业安全技术；电工维修作业安全技术；电气线路作业安全技术；电气安全用具 10 章。既有理论又结合实际，使各层次的读者都能阅读和应用。特别是第六章静电防护安全技术，从静电的产生、积聚和消散、静电引起的故障和灾害、静电的控制与消除几方面进行了深入的论述，较以往同类用电安全技术书籍更为详尽地指出了具体防静电措施，是本书的一大亮点。

本书内容实用、重点突出，对实际工作中有指导意义。可作为企业用电人员和广大安全工作者以及大专院校安全专业的广大教师和学生的参考书。