



# 前摇言

摇摇圆世纪 远年代，美国经济学家多拉格曾说过：“物流是经济的黑暗大陆。”在发达国家，物流管理被经济学家们和企业界形象地称为继降低人工和材料成本以及提高劳动生产率之后的“第三利润源泉”，是“降低成本的最后处女地”。

现代物流以满足消费者的需求为目标，把制造、运输、销售等市场各环节统一起来，以信息管理为基础融合生产商、中间商、消费者三方为一体，通过合理的采购、仓储、包装、运输、销售、配送等功能活动，平衡物资供需之间存在的时间、空间、数量、品种、价格等方面的矛盾，高效运作社会生产的各环节，提高物资利用率、降低物流成本、提高物流服务水平。

现代物流学最为重要的观点之一就是认为上述现代物流的各环节之间存在着相互关联、相互制约的关系，它们是作为一个有机整体的一部分而存在的，这个有机整体就是物流系统。因而，系统性是现代物流最基本的特性，尤其是在物流系统的规划、管理和决策过程中，各子系统之间存在着大量的效益悖反现象，只有充分运用系统科学的思想和方法，才能寻求物流系统总体效益的最佳化。这正是物流系统工程的基本思想。

物流系统工程的基本原理就是以物流系统作为组织管理的研究对象，以物流系统整体最合理、最经济和最有效为目标，综合运用相关学科和技术领域的理论和方法，实现物流系统的最优规划、最优管理和最优控制。物流系统工程主要解决物流系统的分析、规划、评价、决策、预测、优化、控制等问题。

随着全球竞争环境和客户个性化需求的变化，先进高效的物流系统越来越成为企业增强自身竞争力的核心要素。构建现代化的物流系统需要系统工程理论和技术方法的支持。

基于上述理论与实践背景，本书以系统工程和现代物流的理论和方法为基础，阐述了物流系统工程的基本技术方法和内容，并对智能优化算法在物流系统优化、博弈论及供应链中的应用进行了分析。本书第 员 圆 猿章主要分析物流系统的概念、构成要素及物流需求和预测等基础问题；第 源 缘章介绍物流系统建模、物流系统优化的技术方法；第 远章介绍物流系统仿真的基本技术方法、库存决策仿真技术；第 苑章介绍了供应链管理模型和按模块进行的系统仿真优化分析；第 愿 怨章介绍了物流系统综合评价与决策的技术方法。另外，每章均有一

定数量的算例分析。

本书的内容知识系统、完整，作为操作性课程的教材，主要侧重了对物流系统工程中系统评价分析、系统模型、系统仿真及优化技术、系统决策等应用性知识的分析和阐述；各章中均明确提出“学习目标”、“关键概念”和“分析思考”，章节中结合模型列举了相应的算例，以帮助读者强化对算法的理解和掌握。本书既可用作普通高校物流类专业师生的教学用书，也可作为从事物流管理专业人员自学与物流系统规划和设计的参考用书。

在本书的编写过程中广泛参考了国内外相关专著、教材和论文资料，并应用了其中的有关概念和论点，为本书的编写奠定了坚实的基础，限于篇幅，不能逐一介绍，谨在此对所引用书籍和论文资料的作者表示衷心的感谢。此外，本书的编写得到了东北财经大学出版社的信任、理解和耐心以及热情的帮助和支持，在此一并表示衷心感谢。

由于编者的学识水平有限、时间仓促，书中的遗漏和不当之处在所难免，恳请读者批评指正。

编摇者

圆园园愿年 员元月

# 目 录

## 第 1 章 物流系统工程概论

学习目标 .....	1
物流系统与系统工程 .....	2
物流系统的概念与结构 .....	3
物流系统的要素 .....	4
物流系统的特点 .....	5
物流系统化 .....	6
物流系统的概念与内容 .....	7
■ 本章小结 .....	8
■ 关键概念 .....	8
■ 分析思考 .....	8

## 第 2 章 物流系统分析

学习目标 .....	9
物流系统分析概述 .....	10
物流系统目的分析 .....	11
物流子系统分析 .....	12
物流系统分析的步骤 .....	13
■ 本章小结 .....	14
■ 关键概念 .....	14
■ 分析思考 .....	14

## 第 3 章 物流需求预测

学习目标 .....	15
物流需求与物流需求预测的概念 .....	16
物流需求预测方法 .....	17
物流需求预测的步骤 .....	18

本章小结	源苑
关键概念	源苑
分析思考	源苑

## 第 源章 物流系统模型与优化的运筹规划方法

学习目标	源愿
物流系统模型	源愿
物流系统优化的运筹规划方法	缘园
动态规划问题	缘愿
排队论	缘愿
库存控制模型	源苑
图论与网络分析方法	苑源
典型的物流系统设施选址模型与优化案例	愿园
本章小结	愿园
关键概念	愿园
分析思考	愿猿

## 第 缘章 物流系统的智能优化方法

学习目标	愿源
模拟退火算法	愿缘
遗传算法	愿缘
禁忌搜索算法	愿园
神经网络与神经网络优化算法	愿猿
本章小结	员缘
关键概念	员缘
分析思考	员远

## 第 远章 物流系统仿真

学习目标	员苑
物流系统仿真概述	员愿
物流系统仿真的蒙特卡罗法	员园
系统动力学方法	员愿
本章小结	员园
关键概念	员猿

分析思考 .....	员猿
------------	----

### 第 苑章 供应链系统仿真优化

学习目标 .....	员源
供应链领域 .....	员缘
供应链管理模型及优化 .....	员远
仓库规划 .....	员远
供应链系统仿真优化 .....	员员
博弈论及其在供应链中的应用 .....	圆愿
本章小结 .....	圆缘
关键概念 .....	圆缘
分析思考 .....	圆缘

### 第 愿章 物流系统评价

学习目标 .....	圆苑
物流系统评价概述 .....	圆苑
系统综合评价基础 .....	圆员
关联矩阵法 .....	圆缘
层次分析法 .....	圆怨
模糊评价法 .....	圆愿
本章小结 .....	圆园
关键概念 .....	圆园
分析思考 .....	圆园

### 第 怨章 物流系统决策

学习目标 .....	圆员
物流系统决策的基本概念 .....	圆园
不确定型决策 .....	圆缘
风险型决策 .....	圆员
贝叶斯决策 .....	圆远
效用理论 .....	圆园
物流系统的多目标决策 .....	圆源
本章小结 .....	圆园
关键概念 .....	圆园

摇摇■ 分析思考 ..... 圆

参考文献 ..... 圆

# 第 1 章 物流系统工程概论

## 学习 目 标

理解应用系统分析问题的思想、概念及特征；  
了解定义物流系统的理论方法；  
掌握物流系统的概念和系统构成要素；  
掌握运用系统的概念分析和定义物流系统工程的方法。

现代物流学认为，物流是以信息和信息管理为基础，包含多种作业活动（功能）的复杂系统，最为重要的观点就是，认为各项物流活动之间存在着相互联系、相互制约的关系，是作为一个有机整体的一部分而存在的，这个有机整体就是物流系统。用系统观点研究物流是现代物流学的核心问题，系统论是认识和掌握物流系统结构、功能、性质、特点和规律的理论基础。因此，必须针对物流系统的特点，运用系统工程的理论和方法，才能解决物流系统在规划、设计、分析、决策、优化等过程中的问题。现代物流系统工程是现代物流学与系统工程的交叉学科。本章以系统和系统工程的一般概念和特点为基础，分析和阐述物流系统的概念、要素及特点，介绍物流系统的概念、工作方法和所要解决的主要问题。

## 1.1 系统与系统工程

### 系统的思想与系统现象

系统思想最基本的含义，是关于事物的整体性观念、相互联系观念和演化发展观念。系统的概念来源于人类长期的社会实践。

在古希腊，对自然的认识主要来自于笼统的直观、理性的思辨和大胆的猜测，并通过天才的直觉去描绘整个自然界的轮廓，但不能具体地说明自然界内在的逻辑和规律。由于对构成自然界整体的许多细节和局部并不清楚，古希腊人只能从整体上去把握自然界的内在规律和特点，对自然界的总体认识是模糊的和肤浅的，这就使古希腊的自然哲学家们不得不用哲学的猜测来填补知识的空白。辩证法的奠基人之一赫拉克利特（Ἡράκλειτος）说：“世界是包括一切的整体。”唯物主义哲学家德谟克利特（Δημόκριτος）也曾论述过“宇宙大系统”，他在物质构造的原子论基础上，认为世界是由质子和虚空组成的，而原子组成万物，形成不同系统层次的世界。著名学者亚里士多德（Ἀριστοτέλης）关于事物的整体性、目的性、组织性的观念，以及关于构成事物的目的因、动力因、形式因、质料因的思想，可以说是古代思想者朴素的系统观念。

在古代中国，传统的自然观是有机整体论思想，认为自然界是个活的有机体，包容天、地、人、物质和精神，人与自然环境之间没有严格的界限，是相互依赖、相互贯通、相互渗透的，自然界不是由各个组成部分机械地叠加的。这种朴素唯物主义哲学思想强调对自然界整体性、统一性的认识，把宇宙作为一个整体来研究，探讨其结构、变化和发展，以认识人类赖以生存的大地所处的位置和气候环境变化规律对人类生活和生产的影响。西周时期，我国就出现了用阴阳二气的矛盾来解释自然现象的方法，产生了“五行观念”，认为金、木、水、火、土是构成世界大系

统的五种基本物质要素；春秋时期，名医扁鹊主张按病人气色、声音、形貌综合辨证，用砭法、针灸、汤液、按摩、熨敷多种疗法治病；周秦至西汉初年的古代医学总集《黄帝内经》强调人体各器官的有机联系、生理现象和心理现象的联系、身体健康与自然环境的联系；战国时期，秦国李冰父子设计修造了伟大的都江堰水利工程，包括“鱼嘴”岷江分水、“飞沙堰”分洪排沙、“宝瓶口”引水三大主体工程 and 四个附属渠堰工程，工程之间的联系处理得恰到好处，形成一个协调运转的工程总体；我国古代天文学很早就揭示了天体运行与季节变化的联系，编制、总结出了历法和指导农事活动的二十四节气。所有这些农事、工程、医药、天文等方面的成就，都在不同程度上反映了朴素的系统观念的自发应用。

古代朴素唯物主义哲学思想虽然强调对自然界整体性、统一性的认识，却缺乏对这一整体各个细节的认识能力，因而对整体性和统一性的认识是不完全、不深刻的。但是，古人力图从整体上把握自然规律的思想对现代科学的发展却产生了深刻的影响。

17世纪下半叶，近代自然科学开始兴起，发展了研究自然的分析方法，产生了包括实验、解剖和观察在内的更科学、精准的方法，人们开始把自然的细节从总的自然联系中抽取出来，分门别类地加以研究。18世纪上半叶，自然科学有突破性进展，特别是能量转化发现、细胞学和进化论，使人们对自然界演化过程中的相互联系的认识有了很大的提高，为辩证唯物主义的系统概念奠定了坚实的基础、提供了丰富的材料。辩证唯物主义认为，物质世界是由许多相互联系、相互制约、相互依赖、相互作用的事物和过程所形成的统一整体。这就是系统概念的实质，物质的普遍联系及其整体性的思想就是系统思想。

随着科学技术的发展和社会实践的需要，19世纪中期，出现了系统思想的量化方法和分析工具，使得系统思想从一种哲学思维发展成为专门的科学。系统思想在19世纪科学技术发展的客观要求下得到了迅猛发展。

(员) 现代系统思想的发展最早出现于生物学领域。19世纪初期，生物学界存在着生物机理论与生物活力论之争，在这种争论的基础上，产生了在系统科学发展历程中比较重要的一种思想，即贝塔朗菲（~~1901-1972~~）的一般系统论思想，其突出的成就是提出了系统的整体观点、动态观点和等级观点。

(圆) 现代系统思想的发展还体现在管理学领域。19世纪末，工业生产规模日益扩大，专门从事组织管理的阶层随之出现。管理科学的发展经历了由古典管理理论（学派）、管理过程学派、社会系统学派再到以系统理论为指导的系统管理学派的过程，系统思想借助于在管理问题中的应用得到了长足发展。

(猿) 19世纪中期，随着信息技术和控制技术的蓬勃发展，诞生了系统工程学科的基础理论——信息论与控制论。信息论主要研究系统的信息传输机制；控制论主要研究系统的反馈机制。它们所体现的系统思想为后来的复杂系统研究提供了必要的基础理论。

(源) 20世纪 70年代末, 以耗散结构理论的诞生为先导, 相继产生了协同理论、超循环理论、突变论、混沌学和分形学等一系列新理论、新学科, 学术界对于客观世界的复杂性、组织性和整体性的认识又发展到了一个新的阶段。与一般系统论、控制论和信息论建立在平衡系统的概念和理论基础之上不同的是, 耗散结构理论、协同理论等将人们对系统的认识推进到以非平衡系统的自组织演化为研究对象。

人类认识现实世界的过程是一个不断深化的过程, 而客观世界中一切事物的发生和发展都是矛盾的对立和统一。在古代, 哲学家们往往把世界看成一个整体, 寻求共性和统一, 但由于科学理论贫乏, 又缺乏观测技术和实验手段, 所以对很多事物只能看到一些轮廓和表象, 即往往是“只见森林而不见树木”。随着科学技术的发展、理论的丰富、工具与手段的提升, 认识也逐步深化, 但受到当时科学技术水平的限制和世界观的局限, 往往又只看到一些局部现象, 致力于微观研究, 以致又“只见树木而不见森林”。20世纪以来, 随着认识的不断深化, 在人们对个体、对局部有了更新、更深的了解之后, 再把先前分散的认识联系起来, 才看到了事物的整体, 以及构成整体的各个部分之间的相互联系, 从而形成了科学的系统观。

现代科学的发展比过去更要求多种学科门类之间的相互渗透, 进入了在更深刻的分析的基础上向更高层次的综合发展的新阶段, 因而出现了许多交叉学科和边缘学科。系统工程就是在这种背景下产生的一门交叉学科。

系统思想是进行分析和综合的辩证思维工具, 它从辩证唯物主义中取得了哲学的表达形式, 从运筹学、控制论以及各门工程学和社会科学中获得了定性和定量相结合的科学方法, 并通过系统工程充实了丰富的实践内容。

## 1.1 系统的概念及特征

### 1.1.1 系统的概念

系统( ~~系统~~ )一词在古希腊就已有使用, 表示群体、集合等概念。然而, 究竟什么是系统, 至今尚无统一说法。现代系统研究的开创者贝塔朗菲将系统定义为“相互作用的多元素的复合体”。我国系统科学界一般采用钱学森给出的较为通用的定义: 系统是由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合而成的、具有特定功能的有机整体, 而且这个整体又是它所从属的更大的系统的组成部分。

由系统的定义可以知道, 系统是由不同元素的有机组合体, 元素是构成系统的最基本单位, 不同或相同的元素按照不同的关联、制约和作用方式组成不同的系统。由此可见, 构成系统必须具备三个条件:

(1) 系统是由两个或两个以上的要素(元素、单元、子系统)所组成的整体。要素是构成系统的最基本的组成部分, 没有要素就无法构成系统, 单个要素也无法构成系统。

(圆) 系统的各要素之间、要素与整体之间存在着相互影响、相互作用、相互依赖的有机联系, 从而形成一定的系统结构。要素之间若没有任何联系和作用, 则不能称其为系统。系统与其所从属的更大的系统——环境之间也存在着一定的有机联系。

(猿) 系统是元素在一定相关作用下整合起来的。任何系统都是一个有机整体, 具有整体的结构、整体的特性、整体的状态、整体的行为和整体的功能。

系统是一种客体, 在形式上表现为元素的集合。系统与元素的对立统一是客观事物的本质属性和存在方式, 它们相互依存、互为条件, 在事物的运动和变化中, 系统和元素总是相互伴随而产生、相互作用而变化, 它们的相互作用表现为如下三方面:

①系统通过整体作用支配和控制元素。系统通过其整体作用来控制 and 决定各个元素在系统中的地位、排列顺序、性质和范围的大小, 统率着各个元素的特性和功能, 协调着各个元素之间的数量比例关系等。在系统整体中, 每个元素以及元素之间的相互关系都由系统所决定。例如, 一个企业管理组织系统的整体功能, 决定和支配着作为元素的生产、销售、财务、人事、科技开发等各个子系统的地位、作用和它们之间的关系。为使管理组织的整体效益最佳, 就要求各子系统必须充分发挥各自的功能, 也就要对各子系统之间的关系进行控制与协调, 并要求各子系统充分发挥各自的功能。元素通过相互作用决定系统的特性和功能。

②元素对系统的作用有两种可能趋势。一种是如果元素的组成成分和数量具有协调、适应的比例关系, 就能够维持系统的动态平衡和稳定, 并促使系统走向组织化、有序化; 另一种是如果系统中元素之间出现不协调、不适应的比例关系, 就会破坏系统的平衡和稳定, 甚至使系统衰退、崩溃和消亡。

③系统和元素的概念是相对的。由元素组成的系统, 既是较高一级系统的组成部分, 即是更大系统中的一个元素, 同时它又是较低一级组成元素的系统。例如, 某总厂是以几个分厂作为元素组成的系统, 而总厂又是更大系统——企业集团的一个组成元素。正是由于系统和元素地位与性质关系的相互转化, 构成了系统的等级性或层次性。

#### 圆) 系统的特性

(员) 集合性。把具有某种属性的一些对象看做一个整体便形成一个集合。集合里的各个对象叫做集合的要素(元素)。系统的集合性是指系统起码是由两个或两个以上的可以相互区别的要素所组成。要素可以是实体的, 如人、设备、仪表、工具等, 也可以是非实体的(概念的), 如文件、程序、计划、制度等。例如, 一个简单制造系统是由工作机、操作者、工具、材料等实体要素以及图样和工艺卡等非实体要素组成的。

(圆) 整体性。系统整体性是指系统不是各个要素的简单集合, 各要素之间存在一定的组合方式, 各要素间必须是相互统一和协调的; 系统整体的功能也不是各

个要素功能的简单叠加，而是呈现出各组成要素所没有的新的功能，并且系统整体的功能不等于各组成要素的功能总和。系统整体性还说明，在一个系统整体中，即使每个要素并不都很完善，但它们也可以协调、综合成为具有良好功能的系统，即产生“1+1>2”的效果。相反，即使每个要素都是良好的，但相互间不能协调，不能作为整体发挥良好的功能，也就不能称之为完善的系统，即只能得到“1+1<2”的结果。

(猿) 层次性。系统作为一个相互作用的诸要素的总体来看，它可以分解为一系列的子系统，子系统还可以进一步分解为更低一级的子系统，并存在一定的层次结构。

在系统层次结构中表述了在不同层次子系统之间的从属关系或相互作用的关系。一个系统的层次越高，系统的结构、功能与属性就越复杂。

(源) 相关性。相关性是指系统内部要素之间的某种相互作用、相互依赖的特定关系。例如，城市是一个大系统，它由资源系统、市政系统、文化教育系统、医疗卫生系统、商业系统、工业系统、交通运输系统、邮电通信系统等相互联系的部分组成，通过系统内各子系统相互协调的运转共同完成城市生活和发展的特定目标。可见，各子系统之间具有密切的关系，相互影响、相互制约、相互作用。

(缘) 目的性。通常系统都具有某种目的。为达到既定的目的，系统都具有一定的功能，而这正是区别此系统与彼系统的标志。系统的目的般用更具体的目标来体现，需要用—个指标体系来描述。比如，衡量—个工业企业的经营业绩，不仅要考核它的产量、产值指标，而且更重要的是要考核它的成本、利润和质量指标。在指标体系中各个指标之间有时是相互矛盾的，为此，要从整体出发，力求获得全局最优的经营效果。

(远) 适应性。适应性是指系统适应外界环境变化的能力。不能适应环境变化的系统是没有生命力的，只有能够经常与外界环境保持最优适应状态的系统，才是具有活力的理想系统。例如，—个企业必须经常了解市场动态、同类企业的经营动向、有关行业的发展动态和国内外市场的需求等环境的变化，在此基础上研究企业的经营策略，调整企业的内部结构，以适应环境。

### 猿) 系统的分类

在自然界和人类社会中普遍存在着各种不同性质、不同形态的系统，可以从不同角度将它们划分为不同类型。

(员) 按照系统的起源分为自然系统与—人造系统。自然系统是由自然过程产生的系统。这类系统是自然物(矿物、植物、动物等)形成的系统，如天体系统、海洋系统、生态系统等。—人造系统则是人们根据某种目的，将有关要素按其属性和相互关系进行组合而成的系统，如各种工程技术系统、经营管理系统、物流系统等。实际上，大多数系统是自然系统与—人造系统的复合系统，因为在这些系统中，有许多是人们运用科学技术改造自然系统的结果。

(圆) 按照系统要素的形态分为实体系统与概念系统。凡是以物质实体为构成要素的系统称为实体系统,如建筑物、生物、机械和人群等。凡是由概念、原理、原则、方法、制度、程序等概念性的非物质实体所构成的系统称为概念系统,如教育系统、管理系统、军事指挥系统、社会系统等。在实际生活中,实体系统和概念系统在多数情况下是合一的,实体系统是概念系统的物质基础,而概念系统往往是实体系统的中枢神经,指导实体系统的行为。例如,军事指挥系统中既包括军事指挥员的思想、信息、原则、命令等概念系统,也包括计算机、通信设备等实体系统。

(猿) 按照系统的时间特性分为动态系统与静态系统。系统的状态变量随时间变化的系统就是动态系统,如生产系统、通信系统、金融系统等;而系统的状态变量在一定时间内不随时间变化的系统就是静态系统,它是动态系统的一种极限状态,即处于稳定的系统,如港口设施规划系统、企业平面布置系统等。

(源) 按照系统与外界环境的关系分为开放系统与封闭系统。开放系统是指系统与其外在环境之间有物质、能量或信息交换,系统从环境中获得必要的物质、能量或信息,经过处理转换成新的物质、能量或信息输出到环境中。大部分系统都属于开放系统,如社会系统、物流系统、生产系统等。封闭系统则相反,即系统与外界互相隔绝,它们之间没有任何物质、能量和信息交换。

除上述分类外,系统还可以按照其他原则来分类。

#### 源) 系统分析

系统理论观点认为,整体是主要的,而其各个部分是次要的;系统中许多部分的结合是它们相互联系的条件;系统中的各个部分组成一个不可分割的整体;各个部分围绕着实现整个系统的目标而发挥作用;系统中各个部分的性质和职能由它们在整体中的地位决定,其行为则受到整体的制约;整体是一种力的系统、结构和综合体,是作为一个单元来行事的;一切都应以整体作为前提条件,然后演变出各个部分之间的相互关系;整体通过新陈代谢而使自己不断地更新;整体保持不变和统一,而其组成部分则不断改变。

所谓系统分析,就是对一个系统内的基本问题,用逻辑推理、科学分析的方法,在确定与不确定条件下找出各种可行的方案。或者说,系统分析就是以系统的整体最优为目标,对系统的各个主要方面进行定性和定量的分析,是一个有目的、有步骤的探索性分析过程,以便给决策者提供直接判断和决定最优方案所需要的信息和资料。系统分析要求有严格的逻辑性。在进行系统分析时,应首先紧密围绕建立系统的目标;其次,应从系统的整体利益出发,使局部利益服从整体利益,既要考虑当前利益,又要考虑长远利益;还要做到抓住关键问题,采用定量分析和定性分析相结合的方法。

## 1.1 系统工程的概念及特点

### 1.1.1 系统工程的概念

由于系统工程是一门新兴的横向交叉学科，仍在发展和完善，所以至今还没有统一的定义。这主要是由人们探讨问题的角度、认识问题的深度和学科研究范围的差异而造成的。下面列举一些具有代表性的系统工程的定义：

美国著名学者切斯纳（Chesna）指出，系统工程认为虽然每个系统都是由许多不同的特殊功能部分所组成的，且这些功能部分之间又存在着相互联系，但是每一个系统都是完整的整体，每个系统都要求有一个或若干个目标。系统工程则是按照各个目标进行权衡，全面求得最优解（或满意解），并使各组成部分能够最大限度地相互适应的方法。

日本学者三浦武雄指出，系统工程与其他工程学的不同之处在于它是跨越许多学科的科学，而且是填补这些学科边界空白的边缘科学。因为系统工程的目的是研究系统，而系统不仅涉及工程学的领域，还涉及社会、经济和政治领域。为了圆满解决这些交叉领域的问题，除了需要某些纵向的专门技术，还要有一种技术从横的方向把它们组织起来，这种横向技术就是系统工程。换句话说，系统工程就是研究系统所需的思想、技术、方法和理论等体系化的总称。

我国学者钱学森指出，系统工程是组织管理系统的规划、研究、设计、制造、试验和使用的科学方法，是一种对所有系统都具有普遍意义的科学方法；系统工程是一门组织管理的技术。

综上所述，系统工程是以复杂系统为研究对象，在进行系统规划、研究、分析、设计、制造、试验和运行的过程中，综合运用自然科学、社会科学与工程技术中的思想、理论、方法和技术，从而实现系统整体目标最优化的一种科学方法和组织管理技术。它从系统整体出发，根据总体协调的需要，综合运用有关科学理论与方法，以计算机为工具，进行系统结构与功能分析，包括系统建模、仿真、分析、优化、评价和决策，以求得最好的或满意的系统方案并付诸实施。

系统工程在各个领域的应用形成了专门的系统工程分支，如社会系统工程、经济系统工程、环境生态系统工程、能源系统工程、企业系统工程、物流系统工程等等。

### 1.1.2 系统工程的特点

系统工程与机械工程、电气工程、水利工程、物流工程等一般工程学有所不同，其特点主要表现在：

（1）研究思路的整体化。系统工程强调研究思路的整体化，就是既把研究对象看成是一个系统整体，又把研究对象的过程看成是一个整体。这就是说，一方面，对于任何一个研究对象，即使它是由各个不相同的结构和功能部分组成的，也

都要把它看成是一个为完成特定目标而由若干个元素有机结合成的整体来处理，并且还应把这个整体看成是它所从属的更大系统的组成部分来考察和研究；另一方面，把研究对象的研制过程也作为一个整体来对待，即将系统的规划、研究、设计、制造、试验和使用作为整体，分析这些工作环节的组成和联系，从整体出发来掌握各个工作环节之间的信息以及信息传递路线，分析它们的控制、反馈关系，从而建立系统研制全过程的模型，全面地考虑和改善整个工作过程，以实现整体最优化。

(圆) 应用方法的综合化。系统工程强调综合运用各个学科和各个技术领域内的成就和方法，使得各种方法相互配合，达到系统整体最优化。系统工程对各种方法的综合应用并不是将这些方法进行简单的堆砌叠加，而是从系统的总目标出发，将各种相关的方法协调配合、互相渗透、互相融合及综合运用。

(猿) 组织管理上的科学化、现代化。系统工程研究思路的整体化要求管理上的科学化，其应用方法综合化要求管理上的现代化。由于系统工程研究的对象在规模、结构、层次、相互联系等方面高度复杂，综合应用日益广泛，这就使得那种单凭经验的管理模式不能适应客观需要，没有管理上的科学化和现代化，就难以实现研究思路上的整体化和应用方法上的综合化，也就不能充分发挥出系统的效能。管理科学化就是要按科学规律办事，其所涉及的内容极其广泛，包括对管理、组织结构、体制和人员配备的分析，工作环境的布局、程序步骤的组织，以及工程进度的计划与控制等问题的研究。管理现代化就是指符合事物发展的客观规律，符合组织需要，而且证明行之有效的最新管理理论、思想、组织形式和方法手段，它比旧的方法更合理、更有效，更能促进生产力的发展和生产关系的改善。

#### 猿) 系统工程的基本工作内容

一个系统，从其开始建立到成功地投入使用，要经过一个过程。系统工程内容是按照系统研制过程中的主要环节展开的，每个环节都是一项系统工程，都要应用系统工程的理论、方法和技术。

(员) 系统的开发。系统开发首先要考虑开发的可行性，包括市场前景、经济效益、投资能力、技术水平、生态环境等因素；其次要考虑开发成一个什么样的系统，包括系统的结构、规模、能力、成本、效率和效益等；最后要考虑如何开发，包括前期准备、开发方案、组织指挥、监督控制、质量保证等。

(圆) 系统的设计。系统设计是在系统分析的基础上进行的。系统分析为系统设计所提供的成果是：新建或改建系统的必要性和可行性；系统的目标和系统的约束；新建或改建系统的框架结构和评价基础；几种有价值的可供进一步加工的系统方案等。系统设计的任务就是充分利用和发挥系统分析的成果，并把这些成果具体化和结构化。系统设计与一般传统设计的区别表现为系统设计比一般传统设计多了一个系统工程过程，这就是目标—功能—结构—效益的多次分析与综合，以产生最优方案的过程。

(猿) 系统的构建。系统构建要考虑把系统按关系、空间、专业、技术、工种等合理地分解, 设定各个部分的制造方案、制造周期、开始时间、完工时间, 合理安排人力、物力等资源, 组织实施, 并且安排跟踪、监督、检查、控制, 保证按质、按量、按期完成整个系统的构建。

(源) 系统的试验。系统试验, 包括系统的调试等, 要考虑试验方案、考核指标体系等, 然后进行试验方案的实施, 在方案实施中, 又要考虑实施过程中的各种因素。

(缘) 系统的运行。系统运行要考虑人力物力配备、作业控制、系统监测、系统维护等。

## 源 系统工程的基础理论、基本方法、基本技术

系统工程作为具有普遍意义的科学方法, 具有其独特的基础理论、基本方法和基本技术。

系统工程的基础理论是由一般系统论、大系统理论、经济控制论、运筹学、信息论、管理学等学科相互渗透交叉发展而形成的。

系统工程的基本方法是运用系统工程研究问题的一套程序化方法。比较有代表性的是美国学者霍尔 (粤) 提出的系统工程三维结构方法, 即硬系统方法论, 以及英国学者切克兰德 (粤) 提出的软系统方法论。此外, 还有计划协调技术 (粤)、并行工程 (粤) 方法等。

现代数学和计算机技术为系统工程提供了量化的技术和手段, 即系统工程的基本技术, 包括模型化技术、最优化技术、网络技术、分解协调技术和仿真技术等。

## 1.2 物流系统的概念与结构

### 源 物流系统的概念

尽管对“系统”和“物流”还没有统一的定义, 但根据系统概念和物流概念的基本要点, 我们可以这样描述: 物流系统是在一定的时间和空间里, 由所需输送的物资的物质实体、物流设施设备和工具、人员以及信息等若干相互制约的要素构成的, 具有实现物资的空间效用、时间效用和形质效用功能的有机整体。

## 1.1 物流系统的结构

物流节点和线路结合在一起，构成了物流的网络结构。节点与线路的相互关系和配置形成了物流系统的比例关系，这种比例关系就是物流系统的结构。

### 1.1.1 物流节点

物流的过程，如果按其运动的程度即相对位移的大小观察，它是由许多运动过程和许多相对停顿过程组成的。一般情况下，两种不同形式的运动过程或相同形式的两次运动过程中都要有暂时的停顿，而一次暂时停顿也往往连接两次不同的运动。物流过程便是由这种多次的运动—停顿—运动—停顿组成的。物流节点是指物流网络中连接物流线路的“结节”之处。物流过程按其运动的状态来看，有相对运动的状态和相对停顿的状态。货物在节点处于相对停顿的状态，在线路处于相对运动的状态。

物流节点包括仓库、车站、空港、港口、货运站、包装公司、加工中心、配送中心、物流中心等。这些节点都以一定的节点形态而存在，在物流系统中发挥着不同的作用。按照节点的功能，大致可分为转运型节点、储存型节点、集散型节点、配送型节点、综合型节点。

现代物流系统中的物流节点是物流网络的中枢和纽带，它不仅实现着一般的物流功能，而且越来越多地实现着指挥调度、信息等神经中枢的功能。因此，物流节点是物流系统的灵魂所在。具体来讲，物流节点在物流系统中具有联结、信息、管理等功能。

### 1.1.2 物流线路

物流线路是运输工具的载体和通过的途径。物流活动中货物的空间转移，是通过运输工具在线路上的移动实现的，没有线路物流就成为空中楼阁。因此，线路是运输功能实现的客观条件。

线路在物流系统中具有十分重要的意义。首先，线路决定着物流系统的结构。节点是伴随线路的产生而存在的，没有线路也不会有节点。不同类型线路的比例关系，在很大程度上决定着节点的配置，线路和节点结合起来形成物流系统的网络结构。其次，线路决定着物流的范围和能力。物流范围的拓展是随着线路的延伸而实现的，线路延伸到哪里物流才能随之到达哪里。同时，线路的长度、密度及质量还决定着运输的能力和效率，从而也决定着物流的能力和效率。

按照线路存在的物质形态，包括公路、铁路、水路、空路和管道五种线路。

### 1.3 物流系统的要素

要认识物流系统，需要运用分析与综合的认识方法。首先，要进行要素分析——一要弄清系统由哪些要素构成；二要弄清组成要素之间以及系统与其组成要素之间的关系；三要弄清环境状况，明确系统所处的环境和功能对象，系统和环境如何互相影响，以及环境的特点和变化趋势。其次，要进行要素综合——确定系统中的要素是按照怎样的方式相互关联形成一个统一整体的。

物流系统和一般的管理系统一样，都是由人、财、物、设备组成的有机整体。具体可以分成以下几个方面的要素：

#### 员) 物流系统的一般要素

(员) “人”是物流的主要因素，是物流系统的主体。

(圆) “财”是物流活动中不可缺少的资金。

(猿) “物”是物流中的原材料、成品、半成品、能源、动力等物质条件，包括物流系统的劳动对象，即各种实物，以及劳动工具、劳动手段，如各种物流设施、工具，各种消耗材料（燃料、保护材料）等。没有“物”，物流系统便成了无本之木。

#### 圆) 物流系统的功能要素

物流系统的功能要素指的是物流系统所具有的基本能力，这些基本能力有效地组合、联结在一起，便形成物流系统的总体功能，便能合理、有效地实现物流系统的目标。

活动要素与功能要素是一一对应的，或者说物流活动实现对应的物流功能。因此，活动要素与功能要素是等价的，可以作为一类要素。一般认为，物流系统的功能要素或活动要素有运输、储存、包装、装卸、加工、配送和信息处理等，这些功能要素是构成物流系统的最基本的子系统，其中运输和储存是物流系统的主要功能要素或活动要素。物流系统功能要素作为构成物流系统的功能子系统可以再往下细分。例如，每个功能子系统可以看成由作业对象、作业人员、作业设施和设备、作业工具和手段、作业信息等低一级要素构成。如果从物流活动的实际工作环节来考察，物流就是由上述七项具体工作构成的。换句话说，物流能实现以上七项功能。

上述功能要素中，运输及保管分别解决了供给者及需要者之间场所和时间的分离问题，分别是物流创造“场所效用”及“时间效用”的主要功能，因而在物流系统中处于主要功能要素的地位。

#### 猿) 物流系统的环境要素

物流系统的建立需要有许多支撑手段，尤其是它处于复杂的社会经济系统中，要确定物流系统的地位，要协调与其他系统的关系，这些要素必不可少，主要

包括：

(员) 体制、制度。物流系统的体制、制度决定物流系统的结构、组织、管理方式，是组织和管理系统运作的基础。

(圆) 法律、法规。是物流系统处理和协调与外部关系的准绳。

(猿) 行政命令。是从社会的角度所提出的有关规范物流系统行为的准则或要求。

(源) 标准、规范。是为提高物流系统运作效率，用以协调系统内部各阶段或系统与相关部门之间相互关系的技术措施。

源) 物流系统的物质基础要素

物质基础要素主要是指：

(员) 物流设施。包括物流站、货场、物流中心、仓库、港口、物流线路等。

(圆) 物流设备。包括仓库货架、进出库设备、加工设备、运输设备、装卸机械等。

(猿) 物流工具。包括包装工具、维护保养工具、办公设备等。

(源) 信息设施。包括通信设备及线路、计算机及网络等。

因此，物流系统是指按照计划为实现物流目的而设计的相互作用的物流要素的统一体。

从物流系统结构来看，企业物流系统大致可以分为作业系统和信息系统。作业系统是为了实现物流各项作业功能的效率化，通过各项作业功能的有机结合，使物流效率化的统一体。信息系统是将采购、生产、销售等活动有机地联系在一起，通过信息的顺畅流动，推进库存管理、订货处理等作业活动效率化的支持系统。

缘) 物流系统中存在的制约关系

物流要素整合的前提之一是了解物流系统中存在的各种制约关系。

(员) 物流服务和物流成本间的制约关系。在提高物流系统服务水平的同时，物流成本往往也要增加。例如，采用小批量即时供货就要增加运输等费用；要提高供货率，即降低缺货率，必须增加库存，增加存储费用。

(圆) 构成物流服务的各子系统功能之间的制约关系。各子系统的功能如果不均匀，物流系统的整体能力将受到影响。例如，搬运装卸能力很强，但运输力量不足，会产生设备和人力的浪费；反之，如果搬运装卸环节薄弱，车、船到达车站、港口后不能及时装卸，也会带来巨大的经济损失。

(猿) 构成物流成本的各个环节费用之间的制约关系。例如，为了减少仓储费用、降低库存而采取小批量订货策略，这将导致运输次数增加，运输费用上升，即运输费和仓储费之间存在相互制约关系。

(源) 各子系统的功能和所耗费用之间的制约关系。任何子系统功能的增加和完善都必须投入资金。例如，信息系统功能的增加，必须购置硬件和开发软件；增加仓库的容量和提高进出库速度，就要建设更大的库房并实现机械化、自动化。

## 1.4 物流系统的特点

物流系统具有一般系统的共性，同时还具有规模庞大、结构复杂、目标众多等大系统所具有的特点。

### 员) 物流系统是“人—机系统”

在由物流对象、物流设施和设备、信息和人员组成的物流系统中，物流管理者和从业者运用有形的物流设施、设备和工具，以及无形的思想、方法、信息用于物流对象，形成一系列物流活动。在这一系列物流活动中，人是系统的主体，因而在研究物流系统时，必须把人和物这两个因素有机地结合起来。显然，物流系统是一个复合系统。

### 圆) 物流系统是具有层次结构的可分系统

首先，物流系统是由多个要素构成的，这些最基本的要素可以按功能性活动划分成运输、储存、包装、装卸、加工、配送和信息处理以及集成化了的子系统，这些子系统通过有机结合都可以构成具有特定功能的物流系统，而且这些子系统又可按空间或时间特性划分成更低层次的子系统，即每个子系统都具有层次结构。

其次，每一个物流系统都处在一个更大的系统之中。这个更大的系统就是物流系统的环境，或者说，物流系统是社会经济大系统的一个子系统或组成部分。

此外，系统与子系统之间，子系统与子系统之间，存在着时间和空间上以及资源利用方面的联系，也存在总的目标、总的费用和总的运行结果等方面的相互联系。

可见，物流系统是一个可分的多层次系统。

### 猿) 物流系统是跨地域、跨时域的大系统

由于世界经济的全球化和信息化，物流活动早已突破了地域限制，形成了物流跨地区、跨国界发展的趋势，而跨地域性正是物流系统创造空间价值的体现；另外，通过仓储可以解决供需之间的矛盾，跨时域性正是物流系统创造时间价值的体现。跨地域、跨时域的特点使得系统的管理难度较大，对信息的依赖程度较高。因此，物流系统是一个大规模系统。

### 源) 物流系统是动态开放系统

一般的物流系统总是联结着多个生产企业和用户。社会物资的生产状况、社会物资的需求变化、资源的变化、价格的变化、企业间的合作关系等，都随时随地影响制约着物流系统内的各个要素，物流系统必须对其各个要素经常不断地进行修改、完善，甚至对系统进行重新设计，才能适应外部环境的变化，从而获得生存和发展。也就是说，物流系统是一个动态的开放系统。

### 缘) 物流系统是复杂系统

首先,人力、物力、财力资源的组织和合理利用是一个非常复杂的问题。从社会宏观物流而言,物流对象遍及全部社会物质资源,物质资源的品种成千上万,数量极大;从事物流活动的人员形成数以百万计的庞大队伍;物流活动需要占用大量的流动资金;物资供应经营网点遍及全国城乡各地。

其次,在物流活动的全过程中,始终贯穿着大量的物流信息。如何把这些信息收集全、处理好,从而把各个子系统有机地联系起来,使物流系统有效运转,也是一个非常复杂的事情。

此外,物流系统的边界横跨生产、流通、消费三大领域,如此广大的范围给物流系统的组织带来了很大的困难;而且,随着科技进步、生产发展和物流技术的提高,物流系统的边界范围还将不断地向内深化、向外扩张。

### 远) 物流系统是多目标系统

物流系统是一个多目标系统。物流系统的总目标是实现宏观和微观的经济效益。通常,人们希望物流数量最大、物流服务质量最好、物流反应速度最快、物流成本最低,但要同时满足上述要求是很难办到的。这是因为物流系统的功能要素之间存在着非常强的“交替损益”或“效益悖反”现象,即某一功能要素的优化和利益发生同时必然伴随另一个或几个功能要素的利益损失。例如,减少库存量能降低储存持有成本,加速资金周转,但势必会增加运输次数,从而增加运输成本;简化包装能节省包装费用,但降低了产品的防护效果,造成储存、装卸、运输的工作质量和效益下降。这种多个要素目标冲突的现象在物流系统中普遍存在,必须在物流系统总目标下对各要素目标加以协调,才能达到总体最优的效果。

## 1.5 物流系统化

### 员) 物流系统化的概念

所谓物流系统化(物流一体化),是指为了实现既定的物流系统目标,把物流的各个环节或子系统联系起来作为一个系统进行整体设计和管理,以最佳的结构、最好的配合,充分发挥其系统功能和效率,实现整体物流合理化。

### 圆) 物流系统化的必要性

物流本身就是一个独立的系统,不只是具有运输或存储等单一功能,只有众多的功能要素整体合理化、机械化和智能化,才能真正在降低成本的同时提高服务水平。物流各功能要素之间是相互联系、相互制约的,有时甚至是相互矛盾的,必须在整体上加以协调,用系统化思想加以整合、提升。随着物流管理理论的发展和信息技术的不断采用,物流越来越成为跨越企业边界的综合性活动,无论是内在管理还是外围条件,都要求物流具有系统性和整体性。在物流管理的全过程中,始终贯

穿着大量的物流信息，需要一个信息集成系统将这些信息加以搜集、处理、整合，使之将各个子系统有机地联系起来。物流服务需求方的要求更为严格。例如，要求降低物流总成本而不是单项功能要素成本，使物流过程成为一个快速反应过程，减少甚至消除其中的不确定性，减少物流服务商的数量和维持费用等。

#### 猿) 物流系统化的目标

物流系统是社会经济大系统的一个子系统或组成部分。人们之所以需要组织，为的是实现物资的空间效益和时间效益，确保社会再生产顺利进行并取得较高的经济、社会或其他方面的效益。

物流系统化的总体目标是：为社会经济的发展和国民经济的运行创造顺畅的、低成本的物流条件，能以最低成本，在适当时间，将适当的产品送达适当的地方，以保障国民经济不断增长的需求。保证物流系统“可持续发展”的目标体系包括以下六个具体目标：

(员) 服务目标。物流系统是起“桥梁、纽带”作用的流通系统的一部分，联系着生产与再生产、生产与消费，具有很强的服务性。服务活动的基本宗旨必须是以用户为中心，形成一个“用户第一”的“利润中心”系统。

(圆) 快速、及时目标。物流系统采取的是“准时供货”、“快递”等运送、配送形式，能较好地适应社会再生产循环不断加快的要求，也是社会发展进步的要求。快速、及时既是一个物流传统，更是一个现代目标。随着社会化大生产的发展，在物流领域出现的如分运输、高速公路、航空运输、时间表系统等管理方法和技术，就是落实这一目标的体现。

(猿) 节约目标。节约是经济领域的重要规律，在物流领域中通常流通过程消耗大而又基本上不增加或提高商品的使用价值，所以，提高服务质量及降低投入是提高相对效益的重要手段。物流过程作为“第三利润源”，主要是依靠节约去挖掘的。在物流领域推行集约化方式，提高单位物流的能力，采取各种节约降耗措施，是追求节约这一目标的具体体现。

(源) 规模优化目标。规模优化目标就是要追求物流系统的“规模效益”。追求“规模效益”在生产领域是早已为社会所认同的，但在流通领域似乎显得不那么重要。而实际上，规模效益问题在流通领域也非常突出，只是由于物流系统的稳定性较差，因而难以形成标准的、相对稳定的规模化格局。对物流领域中以分散或集中等不同方式建立的子系统，研究其物流集约化的实现措施，正是实现规模优化目标的有效途径。

(缘) 库存调节目标。库存调节是物流服务性的延伸，也是宏观调控的要求，当然也涉及物流系统本身的效益。物流系统正是通过本身的库存调节实现对用户需求的保证，从而创造一个良好的物流外部环境。同时，物流系统又是国家进行资源配置的一环，系统的建立必须考虑国家的资源配置和宏观调控的需求，正确确定库存方式、库存数量、库存结构和库存分布等。

上述目标形成了物流系统的目标体系，其特点可归纳为：服务性（**源**），即在为用户服务方面要求做到无缺货、无货物损伤和丢失等现象，且费用低；快捷性（**源**），即要求把货物按照用户指定的地点和时间迅速送到，为此，可以把物流设施建在供给地区附近，或者利用有效的运输工具和合理的配送计划等手段；有效地利用面积和空间（**源**）；规模适当（**源**）；库存控制（**源**）。通常可将这个目标体系简称为“**缘**”。

（**远**）物流系统的效益目标。物流系统作为社会经济系统的一部分，其目标便是获得宏观和微观两个效益。物流的宏观经济效益是指物流系统的建立对社会经济效益的影响，直接表现为物流对整个社会流通及整体国民经济效益的影响。物流系统不但会对宏观的经济效益发生影响，而且还会对社会其他方面发生影响。例如，物流设施的建设会影响当地居民的生活、工作，物流污染会给人和环境带来伤害等。因此，物流系统的建立，还必须考虑这些因素，要以社会发展和人民幸福为前提。物流系统的微观经济效益是指该系统本身在运行后所获得的效益。其直接表现形式是物流系统本身所耗与所得之比。在社会主义市场经济条件下，企业作为独立的经济实体，必须根据价值规律及供求规律，追求最大经济效益。因此，在建立和运行物流系统时，必须同时考虑物流系统的宏观效益和微观效益。

要实现以上物流系统化的效果，就要把从生产到消费过程的货物量作为一个流动的物流量看待，缩短物流路线，使物流作业合理化、现代化，从而降低其总成本。

#### 源) 系统目标关系的协调

前已述及，系统的不同目标间常常会存在冲突，如何依据物流系统的战略目标权衡和协调多目标之间的相互关系，是一个十分重要的问题。系统目标关系的协调，就是要在物流系统总目标的指导下，对于反映系统不同层次、不同部分利益要求的多个目标进行相互关系的协调，使之形成一个和谐统一的系统结构。其原则是：

（**员**）层次间的目标发生冲突时，通常要以较低层次的目标服从于较高层次目标的要求为前提协商解决。

（**圆**）同一层次的目标发生冲突时，应该在分析的基础上确定一定的取舍原则和补偿标准，进行协调与决策。

#### 缘) 物流系统化的实现方式

物流系统化的实现需要特定的条件。企业内部物流要素要整合，即实现物流纵向一体化，通过整合企业内部各职能部门的物流资源，形成专业化的物流部门。要建立纵向战略联盟，即实行供应链物流管理，将企业内部物流整合扩展到供应商和客户，也就是实现企业物流纵向一体化延伸。同时，建立横向战略联盟，即物流联盟，使物流企业和非物流企业在不改变要素产权关系的情况下，实现物流资源的整合与共享。

## 1.6 物流系统工程的概念与内容

### 1.6.1 物流系统工程的概念

物流系统工程是以物流系统为研究对象,在进行物流系统规划、研究、分析、设计、制造、试验和运行的过程中,综合运用自然科学、社会科学与工程技术中的思想、理论、方法和技术,从而实现物流系统整体目标最优化的一种科学方法和组织管理技术。它从物流系统整体出发,根据总体协调的需要,综合运用有关科学理论与方法,以计算机为工具,进行物流系统结构与功能分析,以求得最好的或满意的系统方案并付诸实施。

### 1.6.2 物流系统工程的内容

#### 1) 物流系统分析

物流系统分析就是运用科学的分析工具和方法,对物流系统的目的、功能、环境、费用、效益等进行充分的调查研究,并收集分析和处理有关的资料和数据,提出实现物流系统目标的若干可行方案,通过建立物流系统模型,进行仿真试验、优化分析和综合评价,最后整理成完整、正确与可行的综合资料,作为决策者选择最优物流系统方案的主要依据。

物流系统分析的主要方法是系统建模和最优化方法,如规划论、排队论等等。

#### 2) 物流系统建模

要对物流系统进行有效分析、预测、优化、评价和决策,并得到有效的结果,就必须首先建立物流系统模型,然后才能借助模型对物流系统进行定量或者定量与定性相结合的分析。因此,建立物流系统模型是物流系统分析、预测、优化、评价和决策的工具和基础。根据不同的研究目的,可以建立物流系统的分析模型、优化模型、预测模型、评价模型、决策模型等。

#### 3) 物流系统评价

物流系统评价就是借助科学方法和手段,针对各种可行方案中的物流系统的目标、结构、环境、输入、输出、功能、效益等要素构建指标体系,建立评价模型,经过计算分析,从物流系统的经济性、社会性、技术性、可持续性等方面进行综合评价,为决策提供科学依据。因此,物流系统评价是物流系统决策的基础和依据。物流系统评价包括指标体系构建、单项评价法、综合评价法(层次分析法、模糊综合评价法)等。

### 源) 物流系统决策

物流系统决策就是运用系统理论和决策技术,对互相可以替代的物流系统优化方案进行排序,寻求满意方案,由决策者根据更全面的要求,对物流系统方案作出最终抉择。物流系统决策问题有不同类型,包括确定型决策、风险型决策以及非确定型决策,一般都需要建立决策模型,例如规划论法、决策表法、决策矩阵法、决策树法、贝叶斯决策法、悲观决策、乐观决策等。

### 缘) 物流系统预测

物流系统预测就是根据物流系统发展变化的实际数据和历史资料,运用现代的科学理论和方法,以及各种经验、判断和知识,对物流系统在未来一定时期内的可能变化情况进行推测、估计和分析,从而减少对物流系统未来认识的不确定性,以指导我们的决策行动,减少决策的盲目性。物流系统预测的主要方法包括定性预测、定量预测和因果关系预测,具体方法有德尔菲法、时间序列预测、回归预测、系统动力学预测等。

### 远) 物流系统控制

物流系统控制就是运用系统控制理论,通过对物流系统的控制,调整物流系统实际或仿真运行结果与物流系统期望目标之间的偏差,使物流系统运行在期望的状态。物流系统控制的主要内容包括成本控制、质量控制、流程控制等。

### 苑) 物流系统优化

物流系统优化就是运用优化理论和方法,解决物流系统资源如何合理、有效地使用或配置,以及方案的评价和优选等问题。物流系统优化的常用方法是规划论,例如线性规划、整数规划及动态规划等。

### 愿) 物流系统规划

物流系统规划就是运用规划理论和方法,根据需要构建的物流系统的输入条件,即物流系统的范围及外部环境,以及物流系统的输出结果,即物流系统的规划目标,在收集、整理分析物流系统原始数据的基础上建立规划模型,进行系统分析,提出若干物流系统可行的规划方案,通过系统评价和决策,确定并实施最终规划方案。物流系统规划包括战略层、战术层和运作层的规划,以及国家级、区域级、行业级和企业级的规划,例如网络规划、设施规划、供应链规划等。物流系统规划的主要方法包括规划论、决策论等。

### 怨) 物流系统仿真

物流系统仿真就是运用系统仿真实论和技术,通过建立物流系统的计算机仿真模型,对物流系统的某些功能、过程或规律进行仿真实验,以寻求对某些问题的解决方法。物流系统仿真包括连续系统仿真、离散事件系统仿真等,经常采用专门的仿真语言和软件仿真。

## 本章小结

### 摇

本章在简要介绍系统和系统工程的一般概念和特点的基础上，以物流系统的构成要素分析与综合为基本点，着重阐述了物流系统的概念、要素构成及系统特点；论述并分析了物流系统工程的基本概念、工作方法和内容。本章的目的是建立物流系统的知识体系，它是现代物流系统工程与技术知识体系的基础。

## 关键概念

### 摇

物流系统摇物流系统要素摇物流系统化摇物流系统分析摇物流系统工程

## 分析思考

### 摇

问系统是什么？有什么特点？请给出例子。

问按个人的理解你将如何定义物流？物流的基本要素是什么？

问如何将物流与系统工程关联起来？

问举几个生活中所接触到的系统实例，说明系统的概念和特性。

问分析如何以系统工程概念和物流概念的基本要点为基础，定义物流系统工程的概念。

问依据系统概念和物流概念的基本要点，分析物流系统的概念。

问根据物流系统要素综合的目的，分析物流系统化的必要性和实现方式。

问调查一个企业，运用物流系统分析的原理和方法，分析该企业的一个物流运作事例。

# 第 四 章 物流系统分析

## 学 习 目 标

了解如何应用系统分析方法研究物流系统问题；  
掌握物流系统分析的要素及准则；  
明确物流系统分析的根本目的；  
掌握物流系统分析的要点和步骤。

物流系统分析是确立物流系统运作方案、建立物流系统必不可少的环节，是物流系统综合、优化及设计的基础。

作为物流系统投资决策依据的物流系统分析，是建立在分析人员对未来事件的预测与判断基础之上的。无论是设计一个新系统还是改造一个老系统，都需要对物流系统进行分析，即通过了解物流系统内部各部分之间的相互关系，把握物流系统运行的内在规律，从全局的观点出发，合理安排好每一个局部，使每个局部都服从一个整体目标，最终求得整体上的最优规划、最优管理和最优控制。

对物流系统进行系统分析，要了解物流系统各部分之间的内在联系，把握物流系统行为的内在规律，从整体观点出发，发挥物流系统整体的优势。

本章重点分析物流系统分析的要素和分析准则，提出物流系统分析的一般步骤。

## 2.1 物流系统分析概述

### 2.1.1 物流系统分析的概念

早在 20 世纪 40 年代，系统分析（~~系统分析~~）一词就已经被提出，以后的几十年里，对大系统问题的研究和复杂新系统的建立，都广泛应用了系统分析的方法。虽然不同领域的专家和实际工作者在应用系统思想分析和解决各种系统问题时，对物流系统分析的定义和方法等产生了不完全一致的看法。但是，在对物流系统分析的目的、方法及过程等方面的看法是基本一致的。

物流系统分析的目的就是通过对系统的分析、开发、研究，得到能够实现系统目标的各种可行方案，然后比较各种可行方案的费用、效益、功能、可靠性及与环境的关系等各项技术经济指标，为决策者的最优决策提供可靠的资料和信息，最终实现各种物流环节的合理衔接，实现物资的空间效益和时间效益，并取得最佳的经济效益。

物流系统分析的方法是采用系统的观点，用定性和定量相结合的方法，对所研究系统的目标、系统的结构和功能，系统各因素的状态以及它们之间的关系进行分析，提出各种可行方案，并进行比较、评价和协调。

物流系统分析是一个复杂的过程，是在观察、了解系统各种定性因素，统计分析各种数据基础上，经分析建立物流系统模型，模拟在某一现实环境条件下系统对各种可能情况的反应，然后在解析分析的基础上，比较各种可行方案，为决策、判断提供依据。

系统分析考虑的问题和因素应该是全面的，不仅分析技术经济方面的有关问

题，而且还要分析包括政策、社会风俗、资源等在内的环境因素。它是从系统的观点，从系统总体的最优出发，采用各种分析工具和方法，对一个系统内的基本问题作出逻辑推理，在各种条件下，寻求可能采取的方案，再通过对各方案的对比分析，为预期目标选出最优方案。

综上所述，物流系统分析可以被描述为：是针对物流系统内部所存在的基本问题，采用系统的观点、理论和方法，进行定性与定量相结合的分析，对所研究的问题提出各种可行方案或策略，通过分析对比以及全面评价和协调，为达到物流系统的预期目标选出最优方案，实现其空间和时间的经济效应，以辅助决策者作出科学决策的一种技术经济方法。

## 9.1 物流系统分析的要素

物流系统分析首先应该明确系统分析的目标，然后经过研究提出实现目标的各种备选方案，再通过建立模型，并借助模型进行效益—费用分析，然后根据评价标准对备选方案进行综合评价，确定出备选方案的优先顺序，最后以报告、意见或建议的形式向决策者提出系统分析的结论。

所以，物流系统分析的要素是指物流系统分析的项目，具体有目标、备选方案、费用、效益、模型、评价标准和结论等。

(员) 目标。目标就是指系统所希望达到的效果和结果。系统分析人员最初的也是最重要的任务就是要了解决策者的意图，明确存在的问题，确定系统的目的。目标的确定是系统分析的出发点和基础，全面、正确地理解和掌握所建系统的目标和要求，是系统分析重要的第一步，没有目标的系统分析是没有意义的。

(圆) 可行的备选方案。可行的备选方案是指为达到目标可采取的各种途径、手段和措施。一般说来，不同的方案各有利弊，当多种方案各有利弊时，究竟采用哪种方案，就要对这些方案进行分析和比较，这正是系统分析所要解决的问题。

(猿) 费用和效益。各可行的备选方案实现系统目的所需投入或消耗的全部资源折算成货币形式，就是费用。简单地说，费用就是实施方案的实际支出，而效益是指方案实施后获得的成效，可统一折算成货币形式。建立一个系统要有投资，系统建成后要见效益。费用和效益是对方案的约束条件，只有效益大于费用的设计才是可取的，反之就是不可取的。不同的方案必须采用同样的方法估计费用和效益，才能进行有意义的比较。

(源) 模型。模型是对客观事物的一种抽象描述，是对事物的本质属性的反映，是方案的表达形式。凭借模型，可以对不同方案进行分析、计算和模拟，以获得各种方案的性能、费用、效益等数据、信息。常用的有实物模型、图式模型、模拟模型、数学模型。对复杂问题模型化便于对问题进行处理，也可在决策前预测问题的结果，因此模型是系统分析的主要工具。

(缘) 评价标准。评价标准是系统目的的具体化, 不同的系统应建立不同的评价标准, 来对各种备选方案进行综合评价, 从而确定方案的优劣顺序。准则必须定得恰当, 而且要便于度量才行。常见的评价标准是由一组评价指标组成的。

(远) 结论。结论就是系统分析得到的结果, 具体形式有报告、建议或意见等。结论的作用只是阐明问题与提出处理问题的意见和建议, 而不是进行决策。只有经过决策者的决策以后, 才能付诸行动, 产生社会效益和经济效益。所以, 结论一定要采用让决策者容易理解和使用的术语和方式表达。

由上述六个要素可以组成如图 圆-员所示的物流系统分析要素结构图。

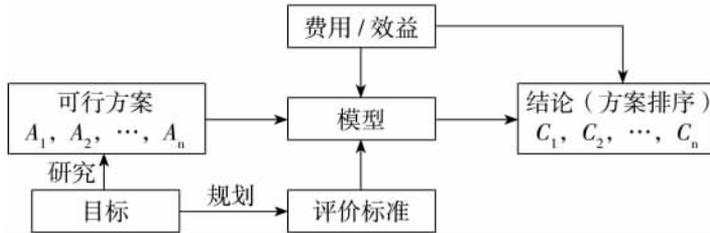


图 圆-员 物流系统分析要素结构图

由图可以看出, 系统分析是在明确系统目的的前提下进行的, 经过开发研究得到能够实现系统目的的各种可行方案后, 通过建立模型, 以模型为工具进行效益—费用分析, 然后依据准则对可行方案进行综合评价, 以确立方案的优先顺序, 最后向主管者提出系统分析的结论, 以辅助决策者进行科学决策。

## 圆-圆 物流系统分析的原则

(员) 目的性原则。系统的建立总是出于某种需要和目的。系统分析总是针对所提出的具体目标所展开的。物流系统具有一定发展规律和趋势, 因此, 在进行系统分析时, 应在尊重客观规律的前提下, 确定物流系统要达到的目标。

(圆) 整体性原则。系统分析的一个基本思想, 就是把要研究的对象作为一个有机的整体, 以整体效益为目标。各子系统局部效益的最优并不意味着总体系统效益的最优。系统总体的最优有时要求某些子系统放弃最优而实现次优或次次优。所以, 进行系统分析, 必须全面考虑总体与局部、局部与局部之间的关系, 坚持“系统总体效益最优、局部效益服从总体效益”的原则。目前, 工业发达国家都在探索实现物流一体化, 发挥物流综合功能的途径, 实现物流活动整体优化, 这就需要依据整体性原则进行系统分析。

(猿) 系统要素间的层次性、结构性和相关性原则。任何一个系统都是由一定要素组成的整体。这些要素既可能是由其下层要素组成的子系统, 又可能是更大系统中的构成要素。这种相互包含的关系构成了系统的层次性。组成系统的要素间都有一种相互结合的存在方式, 这种要素间的相互结合的状态, 构成了系统赖以存在

和运行的结构系统。系统和系统之间、系统各要素之间、系统和要素之间是相互联系、相互作用的，具有相关性。因此，在运用系统分析方法研究物流问题时，要注意层次与层次间的相互制约关系，注意组成物流系统的各要素之间的结构方式以及这种结构方式对物流系统整体的作用和影响，注意各要素间的相关性。

(源) 内外因素相结合的原则。系统的内部因素主要是指系统的组成要素、要素之间的相互关系、相互关系形成的系统结构以及功能特征等；系统的外部条件是指与系统相互作用，系统赖以生存和发展的外部环境，一般是不可控的。内部因素对系统起决定作用，外部条件影响系统的发展。因此，在进行系统分析时，必须将内、外部的各种相关因素结合起来，从时间和空间上全方位、立体式地考虑，才能实现系统的最优化。

(缘) 利益长远性原则。系统的最优化包含空间和时间上的最优。因此，在选择最优方案时，要兼顾当前利益和长远利益。当两者发生矛盾时，应当坚持当前利益服从长远利益的原则。

(远) 定量分析与定性分析相结合的原则。定量分析是指在建立数学模型的基础上进行的数量指标的分析。但是，物流系统中还存在很多无法量化的影响因素，对这些因素的分析，只能依靠人的经验和判断力进行定性分析。因此，在系统分析中，必须把定性分析与定量分析结合起来进行综合分析，才能达到系统优化的目的。

## 2.2 物流系统目的分析

物流系统分析是一种决策方法，它主要是采用系统的观点对物流系统内所存在的基本问题进行逻辑推理，在确定和不确定条件下探索可行方案，通过分析比较，选择能够达到物流系统预期目标的最优方案。

### 9.2.1 物流系统目的分析的意义

物流系统目的分析就是回答此系统要解决什么问题。系统工程人员作为决策者的智囊，要通过一定的分析和技术手段帮助决策者达到真正的目的并找出适当的途径。理想的做法应是尽早明确目的，且越集中对问题的解决越有利。但在这些政策性或人文性等“软”问题上，系统工程人员很难听到决策者用清晰明了的语言表达其真正目的；另外，即使决策者在分析开始时就明确提出目的，也不能不加分析地采纳。系统工程人员还必须对目的的结构、目的的必要性和可行性等进行全面分析，这对于正确地确定系统目的具有重要的意义。

无论是改造原有系统，还是重建一个新系统，都要有明确的目的。一般说来，

越是高层次的目的越能为更多的人所接受，适用时期长、范围广。低层次目的应服从高层次目的。但是低层次目的比较明确具体，如选择适当的医院地址，便于分析研究。有时，低层次目的不同，系统分析得出的结果会有很大差异。因此，系统工程人员必须全面分析目的结构，选择适当层次的目的。目的太笼统，系统分析难度大；如果太具体又容易以偏概全。至于选定哪一层次的目的，这正是系统工程人员发挥其技艺之处。

由此可见，系统目的的确定关系到整个系统的方向、范围、投资、周期、人员分配等决策，因此，对系统目的进行分析，正确地确定系统目的，具有十分重要的意义。

实践证明，只有目的正确，有科学依据，符合客观实际，才能产生具有预期价值的系统，当目的不明确、不合理或根本就是错误的时候，就会使开发出的系统变得毫无意义，其结果只能是浪费大量的人力、物力、财力和时间。

所以，进行物流系统分析的首要任务就是对物流系统的目的进行分析。随着物流系统在国民经济中的地位越来越重要，物流系统的规模和范围也越来越大，进行物流系统目的的分析也就更加重要。

物流系统的目的一般不止一个，即使同一层次的目的也往往有多个。如城市物流系统既要能改善公共交通环境，又要能缩短车辆行驶时间，方便商品流动和人员流动。在资源既定的情况下，如果决策者力争达到某个目的，那么，其他目的则无法在最大限度上达到，甚至彼此冲突。就是说，对于两个以上的目的，除非一个目的隶属于另一个，否则这些目的之间总是彼此矛盾的。物流系统中，这种多目的之间彼此矛盾的现象普遍存在，进行系统目的分析时，必须采取适当的处理方法，对各目的的重要性进行排序，在不损害第一目的的前提下完成第二项目的，或将其他目的作为约束条件处理。

## 物流系统目的分析的原则

进行物流系统目的的分析时，必须保证系统目的符合下面几项原则：

- (员) 技术上的先进性；
- (圆) 经济上的合理性和有效性；
- (猿) 同其他系统的兼容性和协调性；
- (源) 对外部环境变化的适应性。

## 物流系统目的分析的内容

物流系统目的分析的主要内容包括：对系统目的的必要性分析、可行性分析、完备性分析及层次性分析。

### 员) 系统目的的必要性分析

系统目的的必要性分析即分析新建一个系统或物流系统的重组是否有必要。一般可以考虑以下几方面的问题：

(员) 现有的物流系统是否出现了与客观环境不适应、或与国民经济发展不适应的情况？

政策环境和经济环境的变化，会使原有的物流系统在某些方面不再满足要求。例如，随着环保意识的增强，对固体废弃物、汽车尾气的排放等制定了更加严厉的标准，这就要求物流系统的流通加工、包装、运输等环节能适应新的环保要求，控制废物、废气的排放量，或者重新考虑有利于环境保护的物流系统；再如，水上运输系统的发展趋势是：船舶大型化、码头建设专业化、深水化，相应就要大力提高港口的装卸能力，因而必须对港口物流系统的装卸子系统进行重新设计或改造，否则，就不能适应客观环境的要求；另外，某一地区经济的快速增长，物流量的快速增加，也会出现现有物流系统不适应环境的情况。

(圆) 系统内部的软、硬件环境是否能满足新技术发展的要求？

例如，在进行仓储系统规划与配送中心规划时就应该重点考虑软硬件环境条件。一般认为，在进行配送中心规划和设计时应以软件为主硬件为辅，首先考虑条码技术、网络技术、信息技术的应用和成本；而在仓储系统规划和设计中就要以硬件为主根据市场需求适当考虑软件环境。但是，不论怎样，都要平衡现代技术在物流领域的广泛应用，避免使企业原有的物流功能系统过于落后，或出现与供应链上的其他企业不兼容的情况；或者，由于仓储设备、装卸设备的落后，影响物流作业效率的提高，不能满足客户服务要求等等。

(猿) 是否出现新的市场需求，或消费者是否提出了全新的服务要求？

例如，区域经济的发展、产业结构的调整，消费者需要更高标准的物流增值服务等等，这些都将产生新的物流市场需求，因而有必要建立新的物流系统。再如，农业结构调整后，大量的农副产品的集散就需要建立现代化的农产品物流中心，因而需要重新建立区域性的农产品物流系统。

### 圆) 系统目的的可行性分析

目的的可行性包括理论上是否有充足的证据、现实条件是否能保证目的的实现。

(员) 理论依据的充分性。这主要是审查所提出的系统目的是否有科学的依据，是否经过了充分的论证，是否与有关基础理论相违背。总之，系统目的不能建立在空想的基础上。

(圆) 客观条件的保证。分析、评价现有的技术水平、资金能力、资源条件、人才条件、外部环境等是否能够保证系统目的的实现。

### 猿) 系统目的的完备性分析及层次性分析

系统目的的完备性是指提出的目的是否充分反映了系统的多样性和系统本身所

具有的层次性特点。

建立一个物流系统一般会提出多个目的。例如，前面曾经提到的城市物流系统，既要求能改善公共交通环境、缩短车辆行驶时间，还要求方便商品流动和居民购物，同时还要有利于城市环保。对于物流系统的多目的问题，最突出的是在资源一定的情况下，有些目的之间是彼此矛盾的。我们知道，“效益悖反”规律是物流系统的特点，如果追求包装子系统的最佳化，就不能保证装卸或仓储子系统的最佳化。因此，必须分析具体情况，对物流系统各目的的重要性进行排序，采取适当的处理方法，将多目的问题转换成一个当量总目的来处理。

另外，物流系统的层次特性说明物流系统目的也是分层次的。高层次的目的适应范围广、适应时期长；低层次的系统目的比较明确具体，但低层次的目的应服从高层次的目的。在审查系统目的的时候，不仅要审查系统的总目的，还要审查子系统的目的，包括子系统目的的科学性、可行性以及完备性等。另外，还要考察系统的总目的与各层次子系统的局部目的之间是否协调、子系统的各个局部目的之间是否矛盾等等。

进行物流系统的设计或重新设计之前，描述分析中的系统目的和系统目标非常重要。一般说来，系统目的是定性的，如扩大市场份额、成本最小化、利润最大化；而系统目标是一系列具体的、定量的指标，如对客户的订货信息处理时间低于1小时、收到发票后的1个工作日内进行订货处理等等。目的是通过一系列目标来实现的，目标是对目的的具体化和定量化。一个系统有多个目的，每个目的又可通过多个指标来体现，所有这些指标相互联系、相互影响，就构成了系统的指标体系或多层次的目标结构。

## 2.3 物流子系统分析

### 2.3.1 子系统分析的意义

现代物流学最为重要的观点之一就是认为现代物流以信息管理为基础，进行采购、仓储、包装、运输、销售、配送等功能活动，物流的各环节之间存在着相互关联、相互制约的关系，它们是作为一个有机整体的一部分而存在的，这个有机整体就是物流系统。尤其是在物流系统的规划、管理和决策过程中，各子系统之间存在着大量的效益悖反现象，只有充分运用系统科学的思想和方法，才能寻求物流系统总体效益的最佳化。

通常对一个物流系统的所有功能部分进行分析评价是不太可行的。根据分析所要达到的目的，有时只需对部分子系统进行分析就可能达到分析的精度要求。部分

子系统的分析还是整个物流系统分析的一个重要组成部分。如果没有对构成总系统的各个不同子系统的业绩进行衡量和了解,是很难对一个系统进行总的业绩评价和分析的。因此,部分子系统的分析对了解一个系统如何运作非常重要。但是,子系统分析的范围较窄,其侧重点也有局限,子系统分析的目的不能用来改进整个系统。如果只根据部分子系统的分析来进行物流系统决策,就可能作出片面的决策,甚至有碍于整个系统的最优化。部分子系统分析的内容很多,如顾客盈利分析、仓储系统生产效率分析、运输成本分析、客户服务水平分析等等。

物流系统有两项基本功能,即物质的实体时间转移和空间转移,它们分别主要由储存和运输活动来完成,对子系统的分析以仓储子系统和运输子系统为例。

## 9.1 仓储系统的分析

仓储系统是配送系统中关键的子系统,仓储系统的生产率是衡量配送系统业绩的主要指标之一。

仓储业务包括储存、包装、打标签、分货、拣货、发货等,如何降低仓储成本是企业 and 研究人员所关注的重要问题。20世纪 80 年代初期,美国仓储教育与研究委员会开发了对仓储系统运营成本进行计算的软件包,通过这种计算软件包,可以对仓储成本进行精确控制。但是,控制仓储成本,也意味着面临缩小仓库规模、增加缺货、失去客户市场等多重风险。在降低仓库规模之前,就必须考虑仓储业务的重组问题,因而,需要进行仓储系统的分析。仓储系统分析的步骤及需要考虑的问题有:

(员) 分析影响成功的关键因素,并建立合理的业绩衡量体系。主要涉及的问题是“如何才能取得仓储系统的成功?”回答了该问题后,再回答“哪些指标能反映这种成功性?”并最终建立衡量成功的方法和指标体系。

(圆) 评估现有的环境,包括对现有的机构和工作岗位的客观评估。主要涉及的问题是“涵盖有效经济性的配送直径范围和客户的层次性”、“配送产品到底需要哪些活动”、“各种活动之间的执行顺序是什么”、“哪些活动可由同一个岗位承担”、“哪些岗位可并为同一机构”等等。通过对这些问题的追问,可评估其选址以及现有的机构和工作岗位设置的是否合理。

(猿) 确定哪些属于必要的增值服务,以增加利润来源,保护经济利益。首先要分析对顾客而言,哪种过程会增值?顾客是否愿意为此支付?哪些是不会增值的?哪些可能是顾客不会愿意支付的?对赢得客户的影响度是多大?

(源) 设计目标环境及需要与可能及时跟进的组织协调分析。该步骤主要是对目标和现状进行重新审核,确定“哪些是必须要改变的”、“变化的过程是什么”、“通过哪些途径才能实现这种改变的目的”、“能否贯彻落实”等等。

(缘) 计划实施的外部条件评估及后续计划的确定。运用第一步的业绩衡量体系,对实施的外部条件进行评估,并对实施的过程进行监督。

完成对上述问题的分析后,根据分析结果,再决定是否需要缩减仓储系统规模,是否需要进行仓储系统的重组。

## 四、运输系统成本分析

与仓储子系统一样,运输也是物流系统中支出非常大的部分。很多公司的运输费用约占公司物流费用的 1/3。国际贸易的扩展、订单呈现出的量少次频趋势、燃料费用的上涨、劳动力的短缺、承运方兼并导致的承运方市场竞争力减弱等等因素,促使运输费用正在不成比例地暴涨。如何在维持甚至提高客户服务水平的前提下削减运输成本,是摆在物流管理者和决策者面前的重要问题。

运输决策的总目标应该是在满足目前服务水平和服务政策要求的前提下,用最低的运输成本连接供货点和客户。为实现这一目标,不仅要分析运输活动的成本构成,还需要分析客户反应的核心计划、供应核心计划和库存核心计划,因为运输方案对库存持有成本和仓储成本都有重大影响,对客户服务政策的满足也有直接影响。

(员) 运输成本的构成分析。运输总成本包括:货运、车队、燃料、设备维护、劳动力、保险、装卸、逾期滞留、税收或费用、跨国费用等方面的开支。

(圆) 物流系统其他要素与运输成本的相互作用分析。这主要表现在:运输方案对库存持有成本和仓储成本有重大影响,因此,制订目标计划时,必须考虑这两种成本对运输方案决策的影响。另外,最优的运输方案同时也必须满足客户服务政策的要求,如客户要求的反应时间、配送时间、数量要求、频率要求、货物保养要求等,这些要求会影响客户对运输方案的选择。

(猿) 运输子系统内部能力的约束分析。这里主要是分析影响运输方案最优化的运输能力方面的因素,如:

- ①通道能力(通行速度、起始点间频率限制、体积、重量限制等);
- ②车辆能力(体积、载重、运行时间限制);
- ③容器能力(体积、承重限制);
- ④劳动力能力(持续工作时间限制);
- ⑤工作量差异(运输部门员工的能力差异)。

(源) 运输的历史数据分析。就是分析有关的历史数据资料,以确保运输方案的可靠性。物流网络中运输线路的下列数据是应该分析的:

- ①运货频率;
- ②运货的重量及价值分布;
- ③开始点的工作时间;
- ④在途时间;
- ⑤运输方式和承运人的可行性及能力;

- ⑥运输费用；
- ⑦索赔和损失比例；
- ⑧正常运行的时间和速度；
- ⑨有效保有距离。

运输成本的分析涉及运输子系统内部及外部的很多方面，而且成本的分析将贯穿整个运输规划中，如网络设计、运送规划、运输方式和承运人选择、运费谈判能力等。

## 2.4 物流系统分析的步骤

物流系统分析的一般步骤是：在通过对系统所处的现状进行分析之后，明确系统所要解决的问题，根据问题确立要达到的目标，然后寻找能达到目标的不同备选方案，再建立系统的模型，通过模型对备选方案进行评价，优选出最优或次优的可行方案。

### 1) 现状分析

在实际的物流系统分析中，只有通过准确的现状分析才能够反映出存在的主要问题，随后才能提出恰当的解决方案。开始分析一个物流系统时，常常会觉得它非常复杂。因为它可能包含很多子系统，每个子系统又由许多元素组成，元素之间的关系也错综复杂。但是，不管多复杂的物流系统，总是可以从以下三个方面来分析：

- 一是物质实体的实际流动；
- 二是支撑物质实体流动的信息流和信息系统；
- 三是控制整个物流系统的组织和管理结构。

物质实体的实际流动是物流系统中最明显的一个方面。在分析绝大多数物流系统时，绘制物流实体从起始点到终点流动的示意图是一个很好的分析起点。信息流是伴随着物流实体的实际移动而经过整个系统的，它也是现状分析中应该考虑的一个重要内容。物流运作由不同的功能部门分别管理的现象也是非常普遍的。例如，原材料仓储和厂内运输可能是由生产部门负责，成品仓储和出厂运输往往是由配送部门负责，而且整个物流系统中各个功能部门之间的关系也十分复杂，对这些功能部门进行很好的组织和管理就十分重要，因而，整个物流系统的组织和管理结构也就成为一个重要的分析内容。

同样重要的是，要确定高层领导对整个物流系统的态度。各种各样的研究结果显示，高层领导对改善物流系统的理解和支持是系统成功的必要因素。因此，分析对今后计划起决定性作用的高层领导的态度是必不可少的。

#### 圆) 明确问题, 确立目标

找出问题不仅仅是物流系统中十分困难的部分, 也是至关重要的部分。因此, 在方法上应当给予足够的重视。系统分析, 首先要明确所要解决的问题, 以及问题的性质、重点和关键所在, 恰当地划分问题的范围和边界, 了解该问题的历史、现状和发展趋势, 在此基础上确定系统的目标。本阶段的任务包括阐明问题、划分系统和环境、提出问题的边界和约束条件、确定问题的目标。

#### 猿) 分析问题, 寻找备选方案

在明确问题、确立目标之后, 应广泛搜集与所要解决的问题相关的一切资料, 包括历史的和现实的资料和数据。在分析和整理资料时, 尤其要重视反映各种要素相互联系和相互作用的资料, 尽量搞清楚那些占主要地位的内部的和外部的要素及其各自的特点和规律, 它们之间的联系是怎样的。在分析问题之后, 就要决定系统分析的方法, 寻找解决问题的各种可行方案, 并进行初步筛选。良好的备选方案是进行良好系统分析的基础。

#### 源) 建立模型

由于模型是实现系统的抽象描述, 是由一些与所分析问题有关的主要因素构成, 并标明这些因素之间的关系。所以, 通过模型的建立, 可以确认影响系统功能和目标的主要因素及其影响程度, 确认这些因素的关联程度、总目标和分目标的达成途径及其约束条件。凭借模型, 可以对不同方案进行分析、计算和模拟, 从而获得各种方案的费用和效益等数据, 为选择最优方案提供依据。

实际上, 系统分析的每一阶段都要建立模型。值得注意的是, 系统工程的模型常常是推测式的, 模型的精度不能与具有严密理论基础的数学模型相提并论。另外, 模型也难以实验。

#### 缘) 备选方案的评价

备选方案的评价就是根据建立的模型, 在定量预计各种方案在不同环境下所产生的后果的基础上, 考虑各种有关的定性因素, 并运用已经确定好的评价准则, 将各种备选方案进行比较和评价, 显示出每一方案的利弊得失和效益成本, 从而获得对所有可行方案的综合评价结论。

在评价备选方案中, 一个极其重要的方面是实施该方案的可行程度和有关单位接受该方案的可能性。评价方案实施的现实性、难度和成本构成了选择方案的重要部分。对方案实施条件进行严格而且现实的评价应当是选择方案的第一标准, 原因就是, 除非方案具有实施的现实可能性, 否则它将没有任何价值。因此, 对方案实施可行性的说明应当是所有案例分析报告中重要的部分。

系统分析的工作并非一蹴而就, 每个步骤环节一次顺利完成的可能性很小, 往往由于在某一步骤出现问题, 要返回到前面的步骤, 甚至返回到确定目标阶段重新开始。只有这样, 才能保证为决策提供完全、准确的信息。所以, 物流系统分析是一个需要在信息反馈的基础上不断反复、不断调整的过程。

## 本章小结

### 摘要

物流系统分析是一种决策方法，它主要是采用系统的观点对物流系统内所存在的基本问题进行逻辑推理，在确定和不确定条件下探索可行方案，通过分析比较，选择能够达到物流系统预期目标的最优方案。本章从物流系统的概念出发，重点分析了物流系统分析的要素、准则和要点；特别强调了物流系统分析所要达到的目标的步骤是：在通过对系统所处的现状进行分析之后，明确系统所要解决的问题，根据问题确立要达到的目标，然后寻找能达到目标的不同备选方案，再建立系统的模型，通过模型对备选方案进行评价，优选出最优或次优的可行方案的五个要素，即物流系统目标、物流系统可行方案、物流系统经济分析、物流系统模型化及物流系统的评价标准。

## 关键概念

### 摘要

物流系统分析 物流系统分析的要素 信息流 定量分析

## 分析思考

### 摘要

- 1. 物流系统分析的目的是什么？
- 2. 物流系统分析应遵循的准则是什么？
- 3. 画图说明物流系统分析的步骤。
- 4. 物流系统分析包括哪些要素？

# 第 7 章 物流需求预测

## 学习目标

了解物流需求的概念和所包含的内容、特点；  
掌握物流预测的计算方法和应用条件；  
学会根据企业的物流需求，按步骤进行物流预测工作。

## 3.1 物流需求与物流需求预测的概念

### 3.1.1 物流需求的概念和特点

#### 1) 物流需求的概念

物流需求即指对物流服务的需求。

对物流服务的需求是指一定时期内社会经济活动对生产、流通、消费领域的原材料、成品和半成品、商品以及废旧物品、废旧材料等的配置作用而产生的对物料在空间、时间和效率方面的要求，涉及运输、储存、包装、装卸搬运、流通加工、配送以及与之相关的信息需求等物流活动的诸方面。物流需求分析是指用定性或定量的方法对物流系统进行的运输、储存、装卸搬运、包装、流通加工、配送等作业量的预测与分析。物流系统需求分析包含了当前物流市场和潜在物流市场的需求分析。

此外，物流需求是流量而非存量，即是在一段时间内而非在某一时点上所发生的量，没有时间限制笼统地谈物流需求是没有意义的。

物流服务的需求包括量和质两个方面，即从物流规模和物流服务质量中综合反映出物流的总体需求。物流规模是物流活动中运输、储存、包装、装卸搬运和流通加工等物流作业量的总和。当前，在没有系统的社会物流量统计的情况下，由于货物运输是物流过程中实现位移的中心环节，所以用货物运输量的变化趋势来衡量社会物流规模的变化趋势是最接近实际的。物流服务质量是物流服务效果的集中反映，可以用物流时间、物流费用、物流效率来衡量，其变化突出表现在减少物流时间、降低物流成本、提高物流效率等方面。为了清晰地反映社会经济活动对物流活动的需求，在物流需求分析中还应考虑物流需求的地域范围、渠道特性、时间的准确性、物流供应链的稳定性以及顾客服务的可得性、作业绩效和可靠性等方面。

#### 2) 物流需求的特点

##### (1) 物流需求包括物流需求量和物流需求结构

这即是说要从物流需求规模和物流需求结构两方面才能综合表示出物流需求。物流规模是物流活动中运输、储存、包装、装卸搬运和流通加工等物流作业量的总和。物流需求结构可以有不同的表述：从物流服务内容上分，包括运输、仓储、包装、装卸搬运、流通加工、配送、信息服务等方面的需求。从物流需求的形态来说，包括有形的需求和无形的需求：有形的需求就是指对物流服务内容的需求；无形的需求是指对物流服务质量的需求，如对物流效率、物流时间、物流成本等方面的需求。

### (圆) 物流系统的需求具有时间和空间特征

物流系统的需求通常包含时间方面和空间方面的分析,即进行了物流系统的时间方面的需求分析后还要将其分解为不同地区的物流需求。物流包括产品的运输、储存、包装、装卸搬运、流通加工等各个环节,既涉及产品的时间效用,如储存;又涉及产品的空间效用,如运输。作为一个物流管理者,不仅需要知道物流需求随时间的变化规律,还要知道其空间的需求,如运输的距离、仓库的分布与库容,并根据企业物流的预计需求量规划仓库的位置等。

### (猿) 物流需求的内容包括物流系统各作业项目

由于物流的功能包括运输、储存、包装、装卸搬运、流通加工等,所以对物流系统的需求进行分析,包含对上述几个方面的物流作业的分析。另一方面,针对一个具体的物流系统,在对其进行需求分析之前,首先应分析该物流系统是处于一个供应链中服务于供应链的下游企业,还是独立于供应链的为社会大众服务的物流系统,如宅急便物流系统与专门供应某一类企业的第三方物流系统,这两者的物流需求模式是不同的。

在对物流系统需求进行预测之前,首先要明确物流需求预测的对象,所要预测的是运输作业量还是配送作业量。根据该物流系统运输作业的特点,分析其运输的地域范围,货物的包装形式,与之适应的装卸作业方式,在明确了上述各项内容后,对运输量进行预测,按所预测出的运输量,进一步分析可得出所对应的包装需要量和装卸作业需要量。

不同的产品具有不同的物流需求模式。在设计企业的物流系统时,物流管理人员会为不同的产品确定不同的服务水平,相应的物流需求就会呈现出不同的模式。产品需求特点会直接体现为物流需求的规律性特点。通常刚刚投入市场,还处于投入期和成长期的产品,其市场需求不稳定,客户是一个较小的群体,相应的物流需求也是不平稳的,难以找到一般的规律对其进行概括。而进入成熟期的产品,市场分布稳定,销售量会随着季节、时间的变化呈现出一定的趋势,其相应的物流服务也会呈现出某种趋势,能够采用一定的方法对其进行预测。与产品相关的各个因素,如原材料、分销方式、销售渠道等都会对物流需求产生影响。

### (源) 物流需求同时包含独立需求和派生需求

物流需求与产品或服务的销售(或采购)数量直接相关。产品方面的估计一般由营销、市场或专门的计划人员完成。通常物流管理者主要是制定库存控制或车辆调度之类的短期计划,包括对提前期、价格和物流成本等进行预测,并不需要单独为企业做综合预测。物流需求特性不同,预测方法也不同。比如,对于制造业来说,物流预测是根据生产规划或计划估计未来的需求,用来指导存货定位,满足预期的顾客需求。生产计划制订好以后,物流管理部门便根据市场所需要的不同型号的产品、用户的个性化需求(比如颜色等要求)开始做物料计划。再将物料计划送到供应商手上,供应商按照所需要的品种、时间、地点将物料送到。一般在大型

的跨国公司中，所有的物料都应该先集中在物料配送中心，再根据生产线的需要送到生产线进行生产或装配。这个过程中产生的物流需求多为派生的需求。

如果需求是来自许多客户的，而且各客户彼此独立，需求量只构成企业物流总量的很少部分，此时的需求就具有随机性，被称为独立需求。第三方物流企业的物流服务需求通常是一种随机性需求，具有一定的独立性。

## 3.1 物流需求预测的概念

物流需求预测可以根据预测对象、预测条件的不同而选择不同的定性或定量预测方法。如果需求是独立的，采用统计预测的方法会有较好的效果，多数短期预测模型都要求预测对象是独立随机的；对于派生需求，只要最终产品的需求确定，就可以得出非常准确的派生需求的预计值。

物流预测需要选择适当的数学上的和统计上的技术，以产生定期的预测。在实际预测中应该根据具体情况选择预测手段。预测的好坏主要与预测方法的精确性、预测的时间范围、预测结果的可用性和预测数据的准确性等因素有关。

## 3.2 物流需求预测方法

物流需求预测主要有三大类预测技术：即定性的、时间序列的和因果关系的。定性技术使用专家的意见和特殊的信息预测未来，定性技术既可以考虑也可以不考虑过去；时间序列技术完全把注意力集中在历史模式和模式的变化上，来产生预测结果；因果关系技术，诸如回归方法之类，使用明确而又特定的有关变量的信息，来展开主导事件与预测活动之间的关系。我们在下文中阐述几种重要的预测方法。

### 3.2.1 时间序列技术

时间序列又称时间数列，是指观测或记录到的一组按时间顺序排列的数据，如某段时间内某种物资市场可供资源量按时间顺序的统计数据；某企业的采购成本的历史统计资料等。由于时间序列包含了预测对象在一定的时期内的发展变化过程，因而可以从时间序列分析入手，寻找出预测对象的变化特征及变化趋势，并通过选择适当的模型形式和模型参数建立预测模型，运用惯性原理进行趋势外推预测，这种方法比较适用于市场预测。时间序列技术是假定未来的变化类似于过去的变化，这意味着现有的需求模式将继续到未来。从短期来看，这种假定往往相当正确。因此，时间序列预测技术最适于短期预测。然而，除非需求模式相当稳定，否则，预

测技术并非都能产生出精确的预测结果。当增长率或趋势值变化很大时,需求模式就会出现拐点(转折点)。因为时间序列使用历史的需求模式和数据点的加权平均数,所以它们一般对拐点不敏感。结果,可能出现拐点的时候,就必须结合其他的方法。

经常使用的时间序列预测方法有平均数预测法、移动平均预测法、指数平滑预测法和季节指数预测法等。

## 移动平均预测法

移动平均预测法是从计算均值的基础上演化出来的方法。对于一个时间序列  $y_1, y_2, \dots, y_n$ , 可以计算出其均值  $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ 。当用  $\bar{y}$  表示预测的结果时,由于没有考虑到时间序列数据的波动性,不能达到对系统预测的目的。因而,在实际应用中,一般采用通过移动平均的方法对时间序列进行平滑处理,在平滑后的时间序列基础上对系统进行预测。

设有一时间序列  $y_1, y_2, \dots, y_n$ , 其移动平均后的时间序列为

$$y_1, y_2, \dots, y_n, \dots, y_n \quad (1)$$

$$y_t = \frac{1}{n} \sum_{i=t-n+1}^t y_i + \epsilon_t \leq y_t$$

式中

$$y_t = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=t-n+1}^t y_i \right) + \epsilon_t \leq y_t \leq \frac{1}{n} \sum_{i=t-n+1}^t y_i$$

$$y_t = \frac{1}{n} \sum_{i=t-n+1}^t y_i + \epsilon_t \geq y_t$$

移动平均预测法对时间序列中数据变化的反映速度及对干扰的平滑能力,取决于  $n$  的值。 $n$  减小,移动平均对时间序列数据变化的反映敏感性增加,但平滑能力下降;而  $n$  增大,移动平均对时间序列数据变化的反映敏感性减小,但对时间序列的平滑能力却上升。所以,移动平均法的平滑能力与时间序列数据变化的敏感性是矛盾的,两者不可兼得,因此在确定  $n$  的时候,一定要根据时间序列的特点来确定。一般的选择原则是:

(1) 要由所需处理的时间序列的数据点的多少而定,数据点多, $n$  可以取得大一些。

(2) 要由已有的时间序列的趋势而定,趋势平稳并基本保持水平状态的, $n$  可以取得大一些;趋势平稳并保持阶梯性或周期性增长的, $n$  应该取得小一些;趋势不稳并有脉冲式增减的, $n$  应取得大一些。

一次移动平均预测法,使用起来比较简单,但是由于加入的平均值受到前面数据的影响,预测结果会出现滞后偏差,这时如果近期内情况变化发展较快,利用一次移

动平均预测就不太适宜。这是由于一次移动平均对分段内部的各数据同等对待,而没有特别强调近期数据对预测值的影响。

为了解决一次移动平均预测法的滞后偏差问题,可以采取二次移动平均方法。二次移动平均预测法是在求得一次移动平均数和二次移动平均数的基础上,对有线性趋势的时间序列所作的预测。二次移动平均数是在以一次移动平均数组成的序列为一个新的时间序列的基础上,再一次进行移动平均。其做法是:曾,曾, …, 曾, 曾, …, 曾的前灶个数,构成新的时间序列 曾,曾, …, 曾,再应用前面的一次移动平均预测法进行预测。当然,也可以将此时间序列作为平滑处理后的时间序列进行曲线拟合后,用拟合后的函数对时间序列进行预测。

## 猿源 指数平滑法

指数平滑法(猿源)是以根据以前的需求水平和预测水平的加权平均数估算的未来需求量为基础的。它包括一次指数平滑预测法、二次指数平滑预测法和高次指数平滑法。该模型的基本计算方法是

$$\text{曾}_{\text{越}} = \alpha \text{曾}_{\text{原}} + (1 - \alpha) \text{曾}_{\text{越-1}} \quad (\text{猿-圆})$$

式中:曾——时期 越 的需求量预测值;曾——时期 越 的实际预测值;曾——时期 越 的实际需求; $\alpha$ ——平滑常数(园 <  $\alpha$  < 员)。

指数平滑法的主要优点在于,它可以快速计算新的预测,无需大量的历史记录和更新资料。因此,指数平滑法高度适合计算机化的预测。根据平滑常数的值,它还有可监督和改变技术敏感性。

使用指数平滑法时的主要决策是选择平滑常数。如果使用的是  $\alpha$  越员,其净效果是将最近时期的需求量用作下一时期的预测值,如果使用非常低的值,产生的净效果是将预测降为几乎是一种简单移动平均。大的平滑常数使预测对变化非常敏感,因而具有高度的敏感性;小的平滑常数趋向于对变化反应缓慢,因此对随机波动的反应降到最低限度。于是,指数平滑并不排除需要通过判断作出决策。在选择平滑常数时,预测者面临着排除随机波动与让预测对需求变化作出充分反应之间的优选问题。

## 猿源 回归分析

在物流系统中,可以通过过去的物流信息对将来的物流量进行预测,当以时间为变量时,可以将其用多项式或指数函数以及生长理论预测模型来拟合过去的物流信息,从而可以用函数来对未来的物流进行预测。采用的物流预测数学模型取决于观测数值的分布情况,可以通过在坐标系中描绘出数值的分布情况来选择预测所采用的数学模型。例如,图猿-员中的观测值可以用线性数学模型拟合。

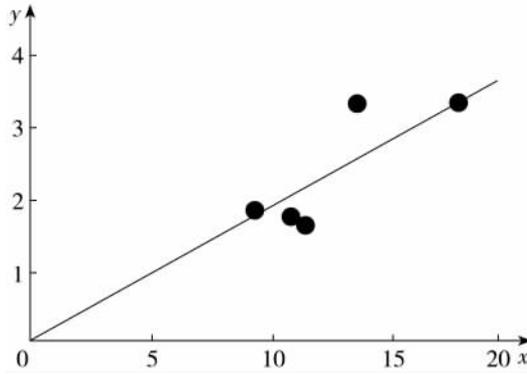


图 猿-员 用线性数学模型拟合

员) 多项式模型

假设物流量 曾为时间的函数 曾越f(t), 当用一个多项式近似描述时 ,其数学模型为 曾越b\_0 + b\_1t + b\_2t^2 + ... + b\_nt^n (猿-猿)

圆) 指数模型

当假设物流量的变化是随时间按指数规律变化时 ,其数学模型为 曾越b\_0e^{kt} (猿-源)

猿) 多元线性模型

在物流系统中 ,不仅存在一个因素作用于一个变量的情况 ,而且多个因素同时作用于某一变量的情况也很常见。如果对前一种情况可以用一元回归分析方法进行有关的预测 ,那么对后一种情况就可以用多元回归分析方法进行有关的预测。若有 曾\_1, 曾\_2, ..., 曾\_n个因素影响结果 赠,其最简单的关系为线性关系

赠越b\_0 + b\_1曾\_1 + b\_2曾\_2 + ... + b\_n曾\_n + 曾\_n+1 (猿-缘)

式中 :曾\_1, 曾\_2, ..., 曾\_n—— 可精确测量或控制的因变量 ;赠—— 可观测的随机变量 ; b\_0, b\_1, b\_2, ..., b\_n—— 未知参数 ; 曾\_n+1—— 不可观测的随机误差。

当获得了 灶组独立观测值

[赠\_1, 曾\_1, 曾\_2, ..., 曾\_n], [赠\_2, 曾\_1, 曾\_2, ..., 曾\_n], ..., [赠\_n, 曾\_1, 曾\_2, ..., 曾\_n]

则上述三种模型都可以用最小二乘法进行求解 ,确定出数学模型中的待定系数。在采用最小二乘法时 ,也可以采用加权最小二乘法。

源) 生长理论曲线预测模型

生长理论曲线预测模型适用于长期预测。生长理论曲线预测模型有多种 ,其中最著名的是罗基斯梯曲线(选登图猿-圆所示),它最初是在研究人口增殖规律时被提出来的。后来 ,比利时数学家维哈尔斯特(增)将其归纳提炼成一般的数学表达式。后来证实 ,在一定条件下 ,被置于孤岛上的动植物增长现象、细菌繁殖现象、某种耐用消费品的普及现象、流行商品的累计销售额等 ,都适于用罗基斯梯曲线来表达。因此 ,也可以进一步试用罗基斯梯曲线来说明类似的某些经济现象。

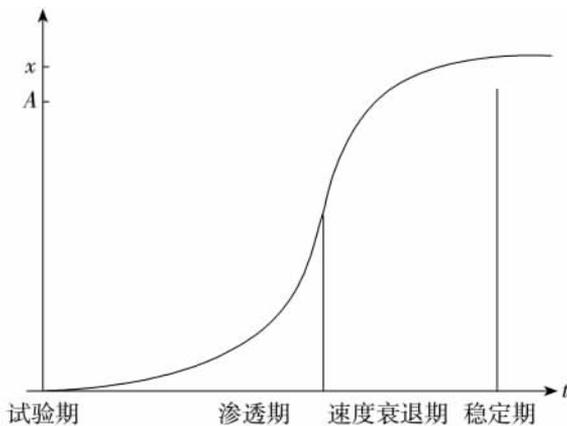
生长理论曲线把生长过程大体分为试验期、渗透期、速度衰退期和稳定期,其表达式为

$$y = \frac{A}{1 + e^{-kx}} \quad (猿-远)$$

实测值  $y$  与回归值  $\hat{y}$  的差,即残差  $\epsilon$  为

$$\epsilon = y - \hat{y} \quad (猿-苑)$$

这里  $A, k$  是非负待定参数,  $\epsilon$  为独立随机变量,服从正态分布。



图猿-圆摇 以罗基斯梯曲线表示的生长理论曲线

### 缘) 预测数学模型的求解方法

(员) 多元回归方程拟合的最小二乘法

对于多元线性模型,可知  $y$  具有数据

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon \quad (猿-愿)$$

式中  $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_k$  相互独立。

对所建立的回归模型需要研究:根据观测值去估计未知参数  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ ,从而建立  $y$  与  $x_1, x_2, \dots, x_k$  的数量关系式(即回归方程);对回归方程的可信度进行统计检验,检验各变量  $x_1, x_2, \dots, x_k$  分别对指标是否有显著影响。

设  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$  的估计分别为  $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_k$ ,可以得到一个  $n$  元线性方程

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 + \dots + \hat{\beta}_k x_k \quad (猿-怨)$$

称其为  $n$  元线性回归方程。对应每组观测数据  $(x_1, x_2, \dots, x_k)$  可求得相应的值

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 + \dots + \hat{\beta}_k x_k \quad (猿-员园)$$

上式求出的  $\hat{y}$  称为回归值(预测值)。我们总希望由估计  $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_k$  所定出的回归方程能使一切的  $y$  与  $\hat{y}$  之间的偏差达到最小。根据最小二乘法的原理,即要求

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \rightarrow \min \quad (猿-员员)$$

(猿-员员)

所以,只要求使

$$Q(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n) = \sum_{i=1}^m (y_i - \beta_1 x_{i1} - \beta_2 x_{i2} - \dots - \beta_n x_{in})^2$$

达到最小值的  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ , 由于  $Q$  是  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$  的一个非负二次型, 故其最小值必存在。根据微积分的理论, 只要求  $Q$  对  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$  的一阶偏导数为 0

$$\frac{\partial Q}{\partial \beta_1} = 2 \sum_{i=1}^m (-x_{i1}(y_i - \beta_1 x_{i1} - \beta_2 x_{i2} - \dots - \beta_n x_{in})) = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \beta_2} = 2 \sum_{i=1}^m (-x_{i2}(y_i - \beta_1 x_{i1} - \beta_2 x_{i2} - \dots - \beta_n x_{in})) = 0 \quad (1)$$

经整理后得到关于  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$  的一个线性方程组, 以下用“ $\sum$ ”表示“ $\sum_{i=1}^m$ ”

$$\sum x_{i1}^2 \beta_1 + \sum x_{i1} x_{i2} \beta_2 + \dots + \sum x_{i1} x_{in} \beta_n = \sum x_{i1} y_i$$

$$\sum x_{i1} x_{i2} \beta_1 + \sum x_{i2}^2 \beta_2 + \dots + \sum x_{i2} x_{in} \beta_n = \sum x_{i2} y_i$$

$$\dots$$

$$\sum x_{i1} x_{in} \beta_1 + \sum x_{i2} x_{in} \beta_2 + \dots + \sum x_{in}^2 \beta_n = \sum x_{in} y_i$$

上式称为正则方程组, 其解称为  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$  的最小二乘估计, 将其用矩阵表示, 有

$$X'X\beta = X'y \quad (2)$$

其中系数矩阵  $X'$ 、常数数列阵  $y$  和变量列阵  $\beta$  分别为

$$X' = \begin{bmatrix} \sum x_{i1}^2 & \sum x_{i1} x_{i2} & \dots & \sum x_{i1} x_{in} \\ \sum x_{i1} x_{i2} & \sum x_{i2}^2 & \dots & \sum x_{i2} x_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum x_{i1} x_{in} & \sum x_{i2} x_{in} & \dots & \sum x_{in}^2 \end{bmatrix}, \quad y = \begin{bmatrix} \sum x_{i1} y_i \\ \sum x_{i2} y_i \\ \dots \\ \sum x_{in} y_i \end{bmatrix}, \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \dots \\ \beta_n \end{bmatrix}$$

令

$$B = \begin{bmatrix} \sum x_{i1}^2 & \sum x_{i1} x_{i2} & \dots & \sum x_{i1} x_{in} \\ \sum x_{i1} x_{i2} & \sum x_{i2}^2 & \dots & \sum x_{i2} x_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum x_{i1} x_{in} & \sum x_{i2} x_{in} & \dots & \sum x_{in}^2 \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} \sum x_{i1} y_i \\ \sum x_{i2} y_i \\ \dots \\ \sum x_{in} y_i \end{bmatrix}$$

则,  $X'y = BY$ , 因而正则方程组可以表示为

$$B\beta = Y \quad (3)$$

从而最小二乘估计  $\beta$  可以表示为

$$\beta = (B^{-1}Y) \quad (4)$$

当求得了  $\beta$  的最小二次估计  $\hat{\beta}$  后, 就可以建立回归方程, 从而可以利用它对指标

进行预测和控制。预测的精度可以通过残差和均方差进行估计。实测值  $y$  与回归值  $\hat{y}$  的差  $e$  称为残差, 从而有残差向量  $\mathbf{e}$

$$\mathbf{e} = \mathbf{y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} \quad (\text{猿-员})$$

而残差平方和为

$$Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (\text{猿-2})$$

当残差平方和很小时, 说明回归方程具有较高的预测精度。

例如, 某企业分析了某物资的采购量、资源量和价格之间的关系(如表猿-员所示)。如果按多元线性回归法, 如何预测资源量为猿缘吨、价格为员愿元的市场采购量。

表猿-员 某物资的采购量、资源量与价格间的关系

市场采购量(吨)	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
资源量(吨)	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
价格(元)	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55

设市场采购量为  $x$ , 资源量为  $y$ , 价格为  $z$ , 回归方程为

$$\hat{z} = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 y$$

应用式(猿-1), 计算结果  $\hat{z} = 0.1x + 0.2y + 10$ , 所以, 当资源量为猿缘吨、价格为员愿元时, 市场采购量为猿缘吨。

### (圆) 生长理论曲线预测模型的迭代方法

生长理论曲线预测模型的曲线方程包含的参数是非线性的, 不能直接应用最小二乘法来简单地估计其参数值。在计算时, 可以将非线性条件线性化, 迭代求解。做法是, 先找出一组初值, 然后用迭代法逐次修正, 当残差平方和达到最小时的参数  $\theta$ , 悦且悦就是所求的模型参数。

① 初值计算。当  $y$  为  $y_1, \dots, y_n$  为一组观测数据, 因为关于生长理论曲线的数据是递增的(例如商品销售额的累计值必然是递增的), 所以  $y_1$  为最小观测值,  $y_n$  为最大观测值。由于

$$\theta > y_1 / (y_n - y_1) > \theta > y_n / (y_n - y_1)$$

解得

$$\theta > \frac{y_1}{y_n - y_1} > \theta > \frac{y_n}{y_n - y_1}$$

由  $\theta$  的非负条件可知,  $\theta$  的最小值为

$$\theta = \frac{y_1}{y_n - y_1} \quad (\text{猿-3})$$

取  $\theta = \frac{y_1}{y_n - y_1}$ , 求出  $\theta$  的初值  $\theta_0$

$$\theta_0 = \frac{y_1}{y_n - y_1} \quad (\text{猿-4})$$

将曲线方程中的  $\mu$  替换为  $\hat{\mu}$ , 并整理得

$$\frac{\mu}{\sigma^2} \text{原员越月藻}$$

对上式两边取对数, 并设  $\mu$  越选  $(\frac{\mu}{\sigma^2} \text{原员})$ ,  $\sigma^2$  越选  $\mu$  得

$$\mu \text{越阅原悦} \tag{猿-圆}$$

考虑到随机误差, 有数据结构模型  $\varepsilon_{\text{课}} \text{越扎原阅垣悦}$ , 按最小误差平方和求  $\mu$ ,  $\sigma^2$  的估计值。最小误差平方和  $\text{匹}_{\text{员}}$  为

$$\text{匹}_{\text{员}} \text{越} \sum_{\text{课}} (\mu \text{原阅垣悦})^2$$

从而得正则方程, 以下用“ $\sum$ ”表示“ $\sum_{\text{课}}$ ”

$$\begin{aligned} \mu \sum \text{阅原} \sum \text{悦越} \sum \mu \\ (\sum \text{阅原} \sum \text{悦}) \text{悦越} \sum \mu \end{aligned} \tag{猿-圆}$$

解得的  $\mu$  作为初值, 记为  $\mu_0$ ; 用  $\mu_0$  的估计值求出  $\sigma^2$  的初值  $\sigma_0^2$

$$\sigma_0^2 \text{越藻} \tag{猿-圆}$$

至此, 确定了  $\mu, \sigma^2$  的初值。

② 偏差修正。残差平方和为

$$\text{匹}_{\text{员}} \text{越} \sum_{\text{课}} \varepsilon_{\text{课}}^2 \text{越} \sum_{\text{课}} [\mu \text{原阅垣悦}]^2$$

在曲线方程中, 把  $\mu, \sigma^2$  看成变量, 在  $(\mu_0, \sigma_0^2)$  处展开成泰勒级数, 取一阶偏导数, 得

$$\mu \text{原阅垣悦} \text{越} \Delta \mu \text{原} \frac{\partial \mu \text{原阅垣悦}}{\partial \mu} \Big|_{\mu_0, \sigma_0^2} \Delta \mu \text{垣} \frac{\partial \mu \text{原阅垣悦}}{\partial \sigma^2} \Big|_{\mu_0, \sigma_0^2} \Delta \sigma^2 \text{垣} \frac{\partial \mu \text{原阅垣悦}}{\partial \text{悦}} \Big|_{\mu_0, \sigma_0^2} \Delta \text{悦}$$

使残差平方和最小的正则方程组为

$$\begin{aligned} (\sum \mu \mu \Delta \mu \text{垣} \sum \mu \mu \Delta \sigma^2 \text{垣} \sum \mu \mu \Delta \text{悦}) \text{越原} \sum \mu \Delta \mu \\ (\sum \mu \mu \Delta \mu \text{垣} \sum \mu \mu \Delta \sigma^2 \text{垣} \sum \mu \mu \Delta \text{悦}) \text{悦越原} \sum \mu \Delta \mu \\ (\sum \mu \mu \Delta \mu \text{垣} \sum \mu \mu \Delta \sigma^2 \text{垣} \sum \mu \mu \Delta \text{悦}) \text{越原} \sum \mu \Delta \mu \end{aligned} \tag{猿-圆}$$

式中

$$\begin{aligned} \mu \text{越} \frac{\partial \mu \text{原阅垣悦}}{\partial \mu} \Big|_{\mu_0, \sigma_0^2} \text{越} \frac{\text{员}}{\text{员垣月藻}} \mu \text{越} \frac{\partial \mu \text{原阅垣悦}}{\partial \sigma^2} \Big|_{\mu_0, \sigma_0^2} \text{越} \frac{\text{原阅}}{(\text{员垣月藻})} \\ \mu \text{越} \frac{\partial \mu \text{原阅垣悦}}{\partial \text{悦}} \Big|_{\mu_0, \sigma_0^2} \text{越} \frac{\text{原阅}}{(\text{员垣月藻})} \Delta \mu \text{越} \frac{\partial \mu \text{原阅垣悦}}{\partial \text{悦}} \Big|_{\mu_0, \sigma_0^2} \text{原} \frac{\mu}{\text{员垣月藻}} \end{aligned}$$

从正则方程组中解出  $\Delta \mu, \Delta \sigma^2, \Delta \text{悦}$ , 然后代入下式进行修正

$$\mu_{\text{员}} \text{越} \mu_0 \text{原} \mu_0 \Delta \mu, \sigma_{\text{员}}^2 \text{越} \sigma_0^2 \text{原} \sigma_0^2 \Delta \sigma^2, \text{悦}_{\text{员}} \text{越} \text{悦}_0 \text{原} \text{悦}_0 \Delta \text{悦}, \dots \tag{猿-圆}$$

式中,  $\mu_0$  为常数, 并且  $\mu_0$  约  $\mu$ , 然后以  $\mu, \sigma^2, \text{悦}$  为模型参数, 代入正则方程组,

迭代求解 ,直至收敛。

## 猿圆缘 以预报权系数进行预测的方法

当确定了预测数学模型的系数后 ,就确定了数学模型 ,可以直接将预测的影响因素或时间带入数学模型中预测。由于这种方法缺少具体的因果分析 ,所以适用于中短期预测 ,用于长期预测可信度差 ,这样 ,每次预测都需根据当前的数据求解。

以预报权系数进行预测的方法 ,适用于活动目标测量数据的实时处理和连续预报 ,它的预测计算结果与直接带入数学模型的预测方法完全一致。

### 员) 预测模型

将多项式回归的数学模型改写为

$$\hat{y}_t = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots + a_n t^n + \varepsilon_t \quad (猿-圆远)$$

式中 : $y_t$  为第  $t$  期观测数据 , $t$  为整数 ,当  $t$  跃园时 ,估计值就是预测值 ,当  $t \leq 园$  时 ,估计值就是经滤波的平滑值。假设观测数据对应的时间间隔相等 ,即

$$\Delta t = \Delta \quad (猿-圆愿)$$

式中  $\Delta$  为时间间隔。

当假设  $\varepsilon_t$  是服从正态分布的随机误差 ,根据最小二乘法原理可以导出最佳估计值 ,表示为

$$\hat{y}_t = \sum_{i=0}^n w_i y_{t-i} \quad (猿-圆怨)$$

式中 , $w_i$  称为预报权系数 ,它与观测数据  $y_{t-i}$  预报点数  $t-i$  则有关。

### 圆) 权系数的计算公式

利用正交多项式可以推导出权系数的表达式 ,计算公式如下

当  $t$  跃园时 ,

$$w_i = \frac{1}{n} \frac{P_i(t)}{P_i(t_i)} \quad (猿-猿园)$$

当  $t$  越园时 ,

$$w_i = \frac{1}{n} \frac{P_i(t)}{P_i(t_i)} \quad (猿-猿员)$$

式中

$$P_i(t) = \sum_{j=0}^i \binom{i}{j} (-1)^j t^j \quad (猿-猿圆)$$

### 3.3 物流需求预测的步骤

为了提高预测工作的效率、精度和质量,以便更有效地为决策工作服务,可以把预测过程分解为下列步骤:

#### 员) 确定预测目标

预测是为决策服务的,在进行具体的预测之前,必须首先根据决策所提出的要求确定预测的目标,包括确定预测目的、对象和预测期间。确定预测目标非常重要,它关系到随后如何搜集数据资料、选择何种预测方法、预测精度和费用等一系列问题。

#### 圆) 搜集、分析有关资料

资料 and 情报是预测的重要依据。进行预测必须占有大量的、系统的、适用于预测目标的资料。一般资料可分为两类:纵向的资料和横向的资料。所谓纵向数据资料,是指历史数据资料,如历史上的产品销售、成本资料等。利用这类历史资料可以动态数据变化的分析作为预测未来的依据。横向资料是指在某一时期内(主要是当前的),作用于预测对象的各种影响因素的数据资料,比如做能源预测,既要搜集能源消耗量的纵向历史资料,也要搜集当前各部门能源消耗的数据,只有将这两类资料综合起来使用才能搞好预测。

#### 猿) 选择预测方法进行预测

这一步骤包括三个方面的内容:选择预测方法、建立预测模型和利用模型进行预测。

预测方法合适与否,将对预测精度产生很大的影响。一般在确定预测方法时主要考虑的因素有:预测对象的种类和性质,对预测结果的精度要求,已收集到的资料与情报的数量和质量,以及预测的人力、物力、财力和时间限制等。

建立预测模型,就是运用得到的资料和选定的预测方法进行必要的参数估计与计算,以建立能描述和概括研究对象特征和变化规律的模型。

利用模型进行预测,就是根据预测模型,输入有关资料和数据,进行计算与处理,并得到预测结果。

#### 源) 分析评价预测方法与预测结果

预测毕竟是对未来事件的预计和推测,建立的模型也只是对实际情况的近似模拟,其结果不一定与将来发生的实际情况相符,同时,在计算或推测过程中难免产生误差,因此在得到预测结果后,还应对预测进行分析评价工作。通过对误差的计算,分析产生误差的原因,评价预测结果是否适用于实际情况。如果预测误差主要是由于所选用的预测模型或预测方法造成的,就应该改进预测模型和预测方法以尽量减少误差,如果预测误差已降到最低仍达不到要求时,则应分析给定置信区间和置信度。

#### 缘) 修正预测结果

如果预测结果的误差已降到最低但还与实际情况有较大出入,则在误差计算的

基础上,可以通过定性、定量分析方法及预测的常识和经验修正预测结果,使之更加适用于实际情况并形成最终预测结果。

### 远) 提交预测报告

预测报告应该给出预测过程的主要步骤,叙述预测目标、预测对象及预测的一些要求,说明主要预测资料的收集方式、方法及其分析结果,详细阐述选择预测方法的原因及建立模型的过程,并反映对预测结果进行评价与修正的过程及结论。

## 本章小结

### 摇

本章提出了物流需求的概念,明确了物流需求分析是物流系统优化的基础;物流需求分析是将物流需求与生产需求的社会经济活动进行相关分析的过程,重点分析了物流需求预测应根据预测对象、预测条件的不同而选择不同的定性或定量预测方法,建立预测模型,按预测的步骤进行计算分析,提交报告。

## 关键概念

### 摇

物流需求 摇 物流需求预测 摇 预测模型 摇 预测方法 摇 预测步骤 摇 预测报告

## 分析思考

### 摇

1. 物流需求的概念和特点是什么?

2. 阐述物流需求预测的概念和必要性。

3. 企业如何做好物流需求预测工作?

4. 分析比较不同的物流需求预测方法的特点。物流管理者应该如何选择预测方法?

5. 画图说明物流需求预测的步骤。

6. 某大型商场统计了从 2005 年到 2009 年热水器的销售情况,并且按一定的组距计算出各期的移动平均数和平均变化趋势值,其中同时有以上两个值的最后年份为 2007 年(移动平均数为 120,平均变化趋势值为 10),请预测 2010 年的热水器销售量。

7. 某大型商场前 3 个月热水器的销售数据分别为 100、120、150,请预测第四个月热水器的销售量(指数平滑系数为 0.5)。

## 第 源章

# 物流系统模型与 优化的运筹规划方法

### 学 习 目 标

摇摇了解物流系统建模原则和方法；

掌握运筹学方法中线性规划模型、整数规划模型、动态规划模型的优化技术方法；

通过案例分析，掌握物流系统选址的建模、优化算法的应用技术。

物流系统优化是在物流系统合理建模基础上,实现物流管理目标、体现物流管理效率与效益的必要过程和手段。物流系统优化方法主要有运筹学方法、智能优化方法和模拟仿真方法。运筹学优化方法一般是建立在一个物流系统的数学模型基础之上的,智能优化方法为复杂物流管理决策问题提供了重要的可行性解决方案。本章的重点是物流系统的概念和建模原则,以及运筹学优化方法的分析。

## 4.1 物流系统模型

### 4.1.1 物流系统模型的概念

要对物流系统进行有效分析、规划或决策,就必须建立物流系统的模型,再借助模型对系统进行定量的或定性定量相结合的分析。系统模型是系统工程解决问题的必要工具,因此,物流系统的建模也是物流系统决策与物流系统管理人员必须掌握的重要手段。

物流系统模型是对物流系统的特征要素及其相互关系和变化趋势的一种抽象描述。物流系统模型反映物流系统的一些本质特征,用于描述物流系统要素之间的相互关系、系统与外部环境的相互作用等。物流系统时域和地域上的广泛性,使得系统要素和特性也多种多样,因此,需要借助物流系统抽象模型进行系统特性的研究。

### 4.1.2 物流系统模型的建立原则

物流系统的复杂性决定了物流系统模型建立的复杂性。建立一个简明、适用的物流系统模型,将为物流系统的分析、评价和决策提供可靠的依据。但是,建造系统模型,尤其是抽象程度很高的系统数学模型,是一种创造性劳动。

#### 1) 建立系统模型的基本要求

一般来说,建立系统模型要满足现实性、简明性、模型标准化三条要求。

第一,现实性,也就是说系统模型要在一定程度上较好地反映系统的客观实际,反映系统本质特征及系统要素间的关系,去掉非本质的东西。

第二,简明性,是指在满足现实性要求的基础上,应尽量使系统模型简单明了,以节约建模的费用和时间。如果一个简单的模型已能使实际问题得到满意的解答,就没有必要去建立一个复杂的模型,因为建立一个复杂的模型并求解是要付出很高代价的。

第三,模型标准化,是指如果已有某种标准化模型可供借鉴,则应尽量采用标

准化模型，或者对标准化模型进行某些修改，使之适合对象系统。

#### 圆) 建立物流系统模型的基本原则

根据系统建模的以上要求，建立物流系统模型时，必须遵循以下几条基本原则：

(员) 准确性。系统模型应该只包括与研究目的有关的方面，反映现实系统的本质规律，一旦模型确定，就要根据模型所包括的各种变量和数据公式、图表，求解模型、研究模型。

(圆) 清晰。物流系统是由许多密切联系的子系统组成的，对应的系统模型也应该是由许多子模型（或模块）组成的。在子模型与子模型之间，除了保留研究目的所必需的信息联系外，子模型之间的其他耦合关系要尽可能减少，以保证模型结构尽可能清晰。

(猿) 精度要求适当。模型应根据研究目的和使用环境的不同，选择适当的精度等级，既要保证所建模型能准确反映系统本质，又要简单明了。模型太精确，虽然能更准确地反映系统的真实情况，但是考虑的因素必然会很多，这将使模型难以控制和操纵，失去了建模的意义。因此，模型的精度要适中。

(源) 尽量使用标准模型。物流系统中的有些问题已有标准模型，因此，在建立实际的物流系统模型时，应该首先查阅标准模型库，如果其中某些模型可以借鉴，就应该先试用。如果能满足要求，就应该使用标准模型。这样，既可以节省时间和精力，又可以节约建模费用。

## 源 物流系统建模方法

建立一个合适的系统模型既需要综合运用各种科学知识，还需要充分发挥人的创造性，针对不同的系统对象，或建造新模型、或巧妙利用已有的模型、或改造已有的模型。物流系统模型建立的思路如下：

#### 员) 推理分析

对于问题明确、内部结构和特性十分清楚的系统，可以利用已知的定律和定理，经过一定的分析和推理，建立系统模型。

#### 圆) 统计分析

对于那些内部结构和特性不很清楚，且又不能直接进行实验观察的系统（大多数的物流系统及其他非工程系统就属于此类），可以采用数据收集和统计分析的方法，建立系统模型。

#### 猿) 人工模拟

当系统结构复杂，性质不太明确，缺乏足够的数据且无法进行实验观察时，可借助一些人工方法，如模拟仿真法或启发式方法，逐步建立物流系统模型。

## 9.1 常见的物流系统模型

物流系统的分析、规划、最优设计等过程是复杂的，常常需要借助各种数学模型和计算机模型。实际系统的问题及研究目的多种多样，系统分析中采用的方法也多种多样，按照物流系统建模的方法可划分为：最优模型、仿真模型、启发式模型等三种；按照应用问题划分可将物流系统模型分为：设施选址模型、库存模型、物流路径优化模型、资源配置模型等等。

### 9.1.1 最优模型

最优模型是依赖精确的数学方程式和严密的数学过程来分析和评价物流系统的各种可选方案，从数学上可以证明所得到的解是针对该问题的最优解（最佳选择）。

最优模型属于数学模型。物流系统规划与决策中的许多确定型的运筹学模型都属于此类。这些模型包括各种数学规划模型（线性规划、非线性规划、动态规划、混合整数规划）、排队模型、枚举模型、微积分模型等。例如，在运输调度、资源分配问题中常采用线性规划模型，库存控制问题可采用动态规划模型或微积分模型求解，最基本的经济订货批量模型就是以微积分为基础的模型。最优模型在给定一整套假设条件和数据的情况下，可以保证用户能得到最优解；而且，借助于计算机软件对所有方案进行评估，分析的效率很高，可靠性也高。

但是，最优模型也有其局限性。由于实际系统的复杂性，如果建立的模型对现实系统的描述过于细致，则即使利用了最大型的计算机也无法在合理的计算时间内得到最优解。因此，需要在问题求解的时间与问题描述的现实性之间取得平衡。

在此，我们就将重点分析物流系统的最优模型，并结合算例进行优化过程的分析。

### 9.1.2 仿真模型

能提供数学最优解的模型虽然看起来最好，但有时，在理论上的最优解对现实的系统却没有意义，如在物流设施选址问题上，按数学模型求出的最优点可能位于某条河道或桥梁上。物流系统规划及决策分析中，存在许多随机因素，而且有时数学上的最优解并不是问题的关键，因此，常需选用仿真技术，建立系统仿真模型。

所谓仿真模型，就是以代数和逻辑语言作出的对系统的模拟，这种模拟通常要利用随机的数学关系，可以说，仿真的过程就是对系统模型进行抽样试验的过程。仿真模型能真实地模拟系统过程，可用于物流系统中的各种规划，如仓库选址、物流绩效的影响因素分析、物流设备配置、物流成本分析等等。

大部分仿真模型要针对所分析的具体问题专门设计。尽管国外已有一些专门处理物流问题的仿真模型，但更多的仿真模型还是建立在通用仿真语言的基础上，对此，本书后面的章节将进行详细分析。

系统仿真需要借助于计算机，建立仿真模型需要大量的数据信息，要应用统计分析技术，同时还需要较长的计算机运行时间。尽管如此，由于物流系统中大量存在的随机现象，使得物流仿真技术的应用越来越普遍。

#### 猿) 启发式模型

仿真模型能够实现模型定义的真实性，最优模型能够实现寻求最优解的过程，启发式模型就是这两种形式的混合模型。启发式模型是以启发式方法为基础建立的系统模型。启发式方法指的是那些能指导问题求解的原理、概念和经验法则。对于一些无法求得最优解的问题，借助于这些启发式规则，可以得到满意解，但无法保证获得最优解。

启发式模型对物流系统中某些难以解决的问题是一种很实用的方法。物流系统规划人员对某个问题的求解经验有时可能胜过最复杂的数学公式，如果能将这样的知识或经验以规则形式融入现有模型中，将能得到更高质量的解。

物流系统中的一些启发式规则如下：①最适合建仓库的地点是那些需求最大的地区或临近这些地区的地方；②按整车批量购买的客户应该直接由供应点直接供货，而不应再经过仓储系统；③如果某产品出入库运输成本的差异能够弥补仓储成本，就应该将该产品存放在仓库里；④下一个进入分拨系统的仓库就是那个节约成本最多的仓库；⑤从分拨的立场看，成本最高的客户是那些以小批量购买且位于运输线末端的客户。

我们将重点分析物流系统模型的最优化方法。

## 4.2 物流系统优化的运筹规划方法

运筹学是一门应用科学，通过利用定量分析方法，运筹学为决策者在处理实际中的复杂问题时作出更好的决策提供了强有力的工具。随着现代物流的发展，运筹学对传统分散的运输、仓储、装卸、搬运、包装、流通加工、配送、信息处理等基本功能，运用系统整合、流程优化的理念实施一体化运作，从而达到降低成本、提高效率、优化服务的目的。

现代物流系统中，物料搬运系统及组织管理的工作，常常要求对物资进行统一分配、合理调运、正确规划、全面安排，经常会有多种解决方案，决策者就是要按照一定的目标选择最佳的方案。例如，制订最佳的投资计划和生产计划；选择最佳的生产布局和物料搬运系统流程，确定产品的最佳配套生产；制订最佳的物资调运计划等。衡量最佳方案的标准可以从不同的角度出发，以求得某项指标达到最大值或最小值。例如，要求工厂企业的劳动生产率最高，资源的利用效率最高、生产的积累或利润最大等；或要求生产费用最小，材料消耗最少、运输距离或费用最小等。也就是说，最佳的标准可以用有限的资源获得最大效果，或者用最少的消耗

达到预定的目标等。

另外，决策者还要考虑到为达到既定目标所要受到的一定条件如人力、物力和财力等的限制。也可以说，它是从满足一定约束条件的相互联系的许多因素组合中寻求最佳的组合。

从数学角度上看，优化模型包括线性规划、非线性规划、动态规划和单目标优化、多目标优化等。

系统地研究各种优化问题不是本书的内容。目前已经有很多求解上述优化问题的计算机仿真软件，我们只针对物流系统的具体问题建立起数学模型，具体求解可利用计算机仿真软件如 MATLAB (矩阵实验室之意，其功能强大) 来进行。

### 9.1 线性规划问题模型

#### 9.1.1 线性规划问题的求解

线性规划 (Linear Programming) 问题的目标函数和约束函数都是设计变量的线性函数，可以描述为

$$\begin{aligned} & \text{maximize } z = Cx \\ & \text{subject to } Ax \leq b \\ & \quad \quad \quad x \geq 0 \end{aligned} \tag{源-1}$$

式中： $C$ 、 $b$ ——向量； $A$ 和 $x$ ——矩阵； $x$ ——设计变量向量，矩阵 $A$ 和向量 $b$ ——线性不等式约束条件的系数，矩阵 $A$ 和向量 $b$ ——线性等式约束条件的系数。

在软件 MATLAB 中，用于线性规划求解的函数为 `fmincon`，其调用格式为

$$[x, fval] = \text{fmincon}(f, x_0, A, b, Aeq, beq, lb, ub, options)$$

该函数返回设计向量  $x$  和标量  $fval$ ，参数项  $A$  和  $b$  均为向量，分别表示下界和上界， $x_0$  为  $x$  的起始点， $options$  为定义的参数的值。

#### 9.1.2 运输问题

运输问题可归结为线性规划问题。该问题是将物品由  $m$  个起运站运到  $n$  个目的地。

已知由  $s$  站运到  $t$  地的单位运费是  $c_{st}$ ，并假定运费与两地间的运量成正比。设  $S_s$  表示  $s$  站的供应量， $D_t$  表示  $t$  地的需求量。当用  $x_{st}$  表示从  $s$  站到  $t$  地的运量。运输问题可表述为

$$\begin{aligned} & \text{minimize } z = \sum_{s=1}^m \sum_{t=1}^n c_{st} x_{st} \\ & \text{subject to } \sum_{t=1}^n x_{st} \leq S_s, \quad s=1, 2, \dots, m \\ & \quad \quad \quad \sum_{s=1}^m x_{st} \leq D_t, \quad t=1, 2, \dots, n \\ & \quad \quad \quad x_{st} \geq 0 \end{aligned} \tag{源-2}$$

曾 ≥ 园 蚤 蚤 越 员 圆, ... 皂 摇摇 躁 越 员 圆, ... 灶

如果  $\sum_{蚤} 葬_{蚤} \geq \sum_{躁} 遭_{躁}$ , 即总供应量等于总需求量, 则称为平衡运输问题, 否则称为不平衡运输问题。对于不平衡运输问题, 可通过一定处理后, 使之变为平衡运输问题。

如果  $\sum_{蚤} 葬_{蚤} > \sum_{躁} 遭_{躁}$ , 即总供应量大于总需求量, 则另外增加一个“虚构目的地”, 令其需求量  $遭_{灶+1} = \sum_{蚤} 葬_{蚤} - \sum_{躁} 遭_{躁}$ , 并令各起运站到虚构目的地的运费为零。问题求解后, 在最优解中, 各站的供应量减去运往虚构目的地的数值。

如果  $\sum_{蚤} 葬_{蚤} < \sum_{躁} 遭_{躁}$ , 即总供应量小于总需求量, 则另外增加一个“虚构起运站”, 令其供应量  $葬_{皂+1} = \sum_{躁} 遭_{躁} - \sum_{蚤} 葬_{蚤}$ , 并令其运至各目的地的运费为零。求解后, 在最优解中, 各目的地的数量减去虚构起运站的运量。

例如, 由猿个起运站 粤, 粤, 粤 向源个目的站 月, 月, 月, 月 运输, 其参数如表源-员所示。

表 源-员 供应量与需求量参数表

运费单价 \ 需求地 \ 供应地	粤 <sub>1</sub>	粤 <sub>2</sub>	粤 <sub>3</sub>	需求量
月 <sub>1</sub>	猿	苑	圆	源
月 <sub>2</sub>	员	猿	猿	缘
月 <sub>3</sub>	源	愿	怨	远
月 <sub>4</sub>	缘	远	圆	园
供应量	缘	缘	猿	

用 粤 猿 猿 粤 月 编写的计算程序如下

枣 越 [ 猿 员 源 缘 苑 愿 远 园 怨 圆 ] : 目标函数的系数 ;

葬 越 [ 员 员 员 园 园 园 园 园 园 园 ]

园 园 园 园 员 员 员 园 园 园 园

园 园 园 园 园 园 园 园 员 员 员

员 园 园 园 园 园 园 园 园 园 园 园 ] 等式约束条件的矩阵 ;

园 员 园 园 园 员 园 园 园 园 园 园

园 园 员 园 园 园 园 员 园 园 园 园

园 园 园 员 园 园 园 园 园 园 园 ]

遭 越 [ 缘 缘 苑 缘 源 缘 远 园 怨 园 ] : 等式约束条件常数项 ;

遭 越 [ 园 园 园 园 园 园 ] : 定义 曾 上下限 ;

[曾, 灶, 燥, 劫, 越, 蚤, 岗, 棵, 枣, 摇][摇]葬, 泽, 躁, 泽, 躁, 躁, 燥, 燥)。计算结果如表源-猿所示。  
表源-猿 运输问题的解

运量		供应地	粤 <sub>员</sub>	粤 <sub>圆</sub>	粤 <sub>猿</sub>	需求量
需求地	月 <sub>员</sub>		园	园	源园	源园
	月 <sub>圆</sub>		园	源园	缘	缘
	月 <sub>猿</sub>		缘园	猿园	园	源园
	月 <sub>肆</sub>		园	园	园	园
	供应量		缘园	缘园	猿缘	运费 缘缘

猿) 装卸任务分配问题

装卸任务分配可归结为线性规划问题。

例如,某储运仓库有 灶项装卸任务必须在第二天完成,该仓库有 皂个装卸队,均可以单独完成其中一项任务。表源-猿列出了各装卸队独立完成各项任务所需的时间、每小时的装卸成本及可用的小时数。每项任务均可分由多个装卸队完成。让我们考虑如何分配这些任务才能使装卸成本达到最低。

表源-猿 各装卸队独立完成各项任务所需的时间、每小时的装卸成本及可用小时数

装卸队	每项任务所需时间				单位成本	可用时间
	员	圆	...	灶		
员	孕 <sub>员员</sub>	孕 <sub>员圆</sub>	...	孕 <sub>员灶</sub>	悦 <sub>员</sub>	贼 <sub>员</sub>
圆	孕 <sub>圆员</sub>	孕 <sub>圆圆</sub>	...	孕 <sub>圆灶</sub>	悦 <sub>圆</sub>	贼 <sub>圆</sub>
...	...	...	...	...	...	...
皂	孕 <sub>皂员</sub>	孕 <sub>皂圆</sub>	...	孕 <sub>皂灶</sub>	悦 <sub>皂</sub>	贼 <sub>皂</sub>

设 曾<sub>皂</sub>表示第 皂项任务由第 皂队所做的小时数,其完成任务的最小成本的线性规划问题可表达为

$$扎越皂 \sum_{皂=1}^{皂} (糟 \sum_{灶=1}^{灶} 曾)$$

$$泽 \sum_{皂=1}^{皂} 曾 \leq 贼躁越员圆...皂$$

$$\sum_{皂=1}^{皂} 曾 \geq 越员躁蚤越员圆...灶$$

(源-猿)

例如,某储运库有 源项任务,有 猿个装卸队,表源-源列出了每个装卸队独立完成各项任务所需要的时间、每小时的装卸成本和可用时间,每项任务均可由 圆个或 猿个队完成。求最小成本的任务分配。







到点,而让他们跟车走,这时,倘若跟车的人太多,有的点用不了那么多人,也会造成浪费,如果跟车人数太少,又势必在某些点不能及时完成装卸任务。究竟派多少人跟车,多少人固定到点,才能使所用的装卸工人最少呢?

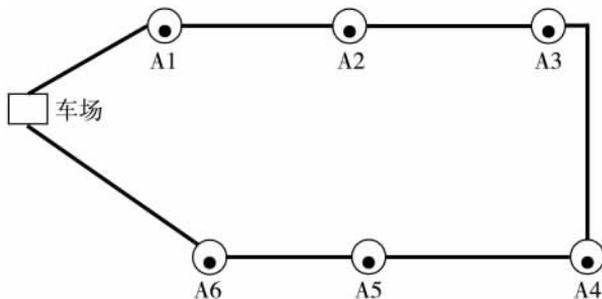


图 源-员 循环运输

由于所需要人数与各点的顺序无关,所以我们假定  $q_1 \leq q_2 \leq \dots \leq q_n$ , 设  $z$  表示跟车人数, 存在某一个整数  $z$  使  $q_n \geq z \geq q_1$ , 循环运输所需要装卸工人人数为

$$z + \sum_{i=1}^{n-1} (q_i - z) + \sum_{i=1}^n q_i \quad (源-远)$$

如果某车场有  $z$  辆车, 为  $n$  个地点送货, 各地点需要的装卸工人数如表 源-苑 所示。则按照上述方法计算所得的结果即为: 每辆车需要  $z$  个人跟车, 共需要  $nz$  人。

表 源-苑 装卸工人调配数

装卸点	员	圆	猿	源	缘	远
工人数	远	怨	愿	远	圆	源

## 4.4 排队论

### 源-员 排队论的基本概念

一般的排队系统都有三个基本组成部分:

(员) 到达模式: 指动态实体(顾客)到达的规律, 描写实体到达的统计特性。它一般用顾客相继到达的时间间隔来描述。根据间隔时间的确定与否, 到达模式可分为确定性到达和随机性到达。

(圆) 服务机构与服务时间: 服务机构指同一时刻有多少服务设备可以提供服务, 服务设备之间的关系是怎样的, 它们服务需要多少时间。它也具有一定的分布特性。

(猿) 排队规则: 指对下一个实体服务的选择原则。通用的排队规则包括先进先出(源-猿)、后进先出(源-猿)、随机服务(源-猿)等。

图 源-圆是排队系统的基本结构。图中的动态实体以一定的到达模式来到服务机构请求服务。服务机构的服务员或设备有限,服务需要服务时间,因此,某些动态实体在来到服务机构之前不能马上得到服务,需要排队等待,当服务机构完成对某个动态实体的服务之后,就可接纳新的动态实体。

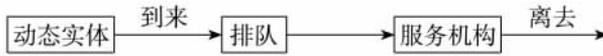


图 源-圆 排队系统的基本结构

排队规则将确定在队列中哪些动态实体可以最先得到服务。在很多实际问题中,动态实体的到达时间是随机的,服务机构的服务时间也是随机的,这样,动态实体排队的长度也会是随机的,最后反映在服务机构处于“忙”或“闲”的时间也是随机的。如何通过已知的到达模式和服务时间的概率分布,来研究排队系统的队列长度和服务机构“忙”或“闲”的程度即服务效率,这就是离散事件仿真所需解决的问题。

员) 到达模式

平均到达间隔时间  $\bar{t}$ ,是指在考虑模型的总时间中共到达了  $n$  个顾客的情况下的比值  $\bar{t} = T/n$ 。平均到达速率  $\lambda$ ,是指单位时间内到达的顾客数  $\lambda = n/T$ 。越  $\lambda$ ,到达间隔分布函数  $F(t)$ ,是指到达间隔时间大于  $t$  的概率。

因为累积分布函数  $F_c(t)$  是到达间隔时间小于  $t$  的概率,所以

$$F_c(t) = 1 - F(t) \tag{源-苑}$$

根据定义,函数  $F_c(t)$  在  $t=0$  时取最大值为 1;当  $t$  增加时, $F_c(t)$  逐渐减小。

圆) 到达时间变化系数

到达时间变化系数,是指到达间隔时间的标准差  $\sigma$  与平均到达间隔时间  $\bar{t}$  的比值  $\sigma/\bar{t}$ 。变化系数是个无量纲的值,它描述了数据围绕平均值的分散程度。

指数分布的平均值与标准差相同,其变化系数为 1。所以,如果观测数据的变化系数接近于 1,则假定用指数分布去拟合这些数据是合理的;当变化系数远小于 1 时,经常应用爱尔朗分布。

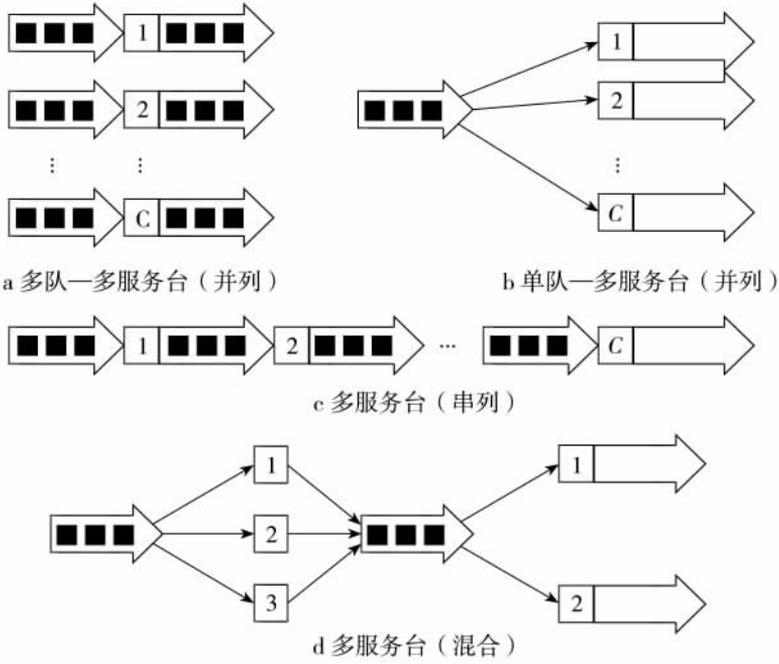
到达模式按顾客到来的方式可能是单个的,也可能是成批的;按相继到达的间隔时间可以是确定型的,也可以是随机型的;按到达过程可以是平稳的(指描述相继到达的间隔时间分布和所含参数如期望值、方差等都是与时间原点无关的),也可以是非平稳的。

猿) 服务机构

同到达间隔时间一样,首先定义  $\bar{\mu}$  为平均服务时间, $\mu$  为平均服务速率, $F(t)$  为服务时间分布函数,即服务时间大于  $t$  的概率。

服务机构按机构形式可以没有服务台,也可以有一个或多个服务台。在有多个服务台的情形下,它们可以是并列的、串列的或混合的,如图 源-猿所示。按服务方式可以针对单独顾客,也可以针对成批顾客;按服务时间可以是确定型的,也可以是随机

型的,按服务过程可以是平稳的,也可以是非平稳的。非平稳情形的数学处理是很困难的,所以同到达过程一样,服务时间的分布也假定是平稳的。



图源—猿摇 多服务台排队方式

源) 排队规则

排队规则是指保证顾客能依一定的次序和规则接受服务。可按下述两种制度安排。

其一, 损失制。当顾客到达时, 如所有服务台都正被占用, 随即离去。

其二, 等待制。当顾客到达时, 如所有服务台都正被占用, 就排成队伍, 等待服务。

排队次序可以采用下列各种规则:

先到先服务( 云磁磁) : 按到达次序接受服务, 这是最通常的情形。

后到先服务( 磁磁磁) : 如乘用电梯的顾客常是后入先出的, 仓库中存放的钢板也是如此。在信息系统中, 最后到达的信息往往是最有价值的, 因而常采用后到先服务的规则。

随机服务( 磁磁磁) : 当服务台为空时, 从等待的顾客中随机地选取一名进行服务, 而不管到达的先后, 如电话交换台接通呼唤的电话便是如此。

优先权服务( 磁磁磁) : 如医院中急诊病人优先得到治疗, 物流系统中急需的物料优先等。

最短处理时间先服务( 磁磁磁) : 如设备选择工件时, 首先选择所需加工时间最少的工件进行加工。

对于灶个服务台的情形,当顾客到达时,可按如下规则在每个服务台前排成一个队,第员灶垣员垣员... 顾客排入第一个队,第圆灶垣员垣员垣员... 顾客排入第二个队等。或者所有顾客排成一个公共的队,每当有一个服务台得空闲时,队首的顾客接受服务。也可以这样来排成几个队,当某个顾客到达时,以概率孕<sub>灶</sub>排入第灶个队,且满足

$$\sum_{灶=1}^{灶} 孕_{灶} = 1$$

混合制服务:当排队过长时,后到的顾客会自动离去,此时可定义队长择约晕时到达的顾客就排入队列,若择越晕则到达的顾客将自动离去。另一种是当等待时间或逗留时间(等待时间与服务时间之和)小于某一时间裁时顾客将等待,大于裁时,顾客将自动离去。

在使用优先权时,必须考虑当一个比现在正在接受服务的实体具有更高优先权级别的实体到达后,系统将作何处理。通常可有两种选择:其一,优先权仅仅决定一个动态实体排队的先后,优先权高的排在队列的前面,而不影响正在接受服务的实体;其二,立即停止当前的服务,为新到的具有更高优先权的实体服务,这种情形称为抢占服务。这时,原实体等待新实体离开后再重新接受服务。

#### 缘) 队列的度量

已知平均到达速率  $\lambda$  和平均服务速率  $\mu$ , 定义业务量强度为

$$\lambda / \mu$$

在某些场合下,到达的动态实体并不全都能够得到服务,因此有必要区分实际到达速率以及得到服务的到达速率,分别用  $\lambda$  和  $\lambda'$  来表示。此时的业务量强度为

$$\lambda' / \mu$$

定义服务设备利用率  $\rho$  为得到服务的动态实体的到达速率与服务速率之比

$$\rho = \lambda' / \mu$$

在多服务设备系统中

$$\rho = \lambda / \mu$$

式中:灶——服务设备数目  $\mu$ ——每个服务设备的平均服务速率,这里假设每个服务设备的服务速率相同。

显然,在多服务设备系统中,服务员人数越少,服务设备利用率就越高。

正常情况是服务设备利用率小于员,这样每个动态实体才有希望得到服务。利用率越高,则动态实体排队等待的时间越长。因此,设计系统的设备利用率是一个权衡过程,可以通过多次的仿真实验加以合理解决。

对于队列的度量,通常考察两个量:队列的长度和排队的时间。这两个量都是变量,不同时间的队列长度是不同的,不同动态实体的排队时间也是不同的。在仿真实验中,要对这两个量的变化进行统计,计算出其均值、方差、最大值、最小值等,这些值

反映了一个服务系统的重要特征。

### 9.1.1 排队模型分类

根据上述三个组成部分中最主要的特征, 提出一个分类方法, 现在已被广泛采用了。它只针对并列的服务设备的情形, 用的符号形式是

式中: 处填写表示相继到达间隔时间的分布; 处填写表示服务时间的分布; 处填写并列的服务设备的数目。 (源-愿)

表示相继到达间隔时间和服务时间的各种分布的符号是: 负指数分布 (确定性) 噪声爱尔朗分布 一般相互独立 (一般) 的随机分布 一般 (一般) 随机分布。

例如: 表示相继到达间隔时间为负指数分布, 服务时间为负指数分布, 单服务设备的模型; 表示确定的到达间隔时间, 服务时间为负指数分布, 两台并行服务设备 (但顾客是一队) 的模型; 表示单服务设备, 有一般相互独立的随机到达和一般随机服务时间的模型。

### 9.1.2 到达间隔和服务时间的分布

解决排队问题首先要根据先验数据作出顾客到达间隔和服务时间的经验分布, 然后按照统计学的方法 (如  $\chi^2$  检验法) 确定适合于哪种理论分布, 并估计它的参数值。常用的理论分布有下面几种分析方法:

#### (1) 定长分布

这是最简单的情形, 每个动态实体在相同的时间间隔到达, 或者每个动态实体的服务时间是常数, 其分布函数为

$$F(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ t/\tau & 0 \leq t < \tau \\ 1 & t \geq \tau \end{cases} \quad (源-怨)$$

#### (2) 泊松分布

满足下列四个条件的到达分布称为泊松到达分布。

(1) 平稳性: 在区间  $[\alpha, \alpha + \Delta t]$  内有几个顾客到来的概率与  $\alpha$  无关, 而只与  $\Delta t$  有关, 概率为  $P_n(\Delta t)$ ;

(2) 无后效性: 不相交区间内到达的顾客数是相互独立的;

(3) 普通性: 令  $P_2(\Delta t)$  为时间  $\Delta t$  内至少有两个顾客到达的概率, 则  $P_2(\Delta t) \sim (\Delta t)^2$ , 当  $\Delta t \rightarrow 0$ ;

(4) 有限性: 任意有限区间内到达有限个顾客的概率之和为 1, 即  $\sum_{n=0}^{\infty} P_n(\Delta t) = 1$

对于这种到达分布,在时间  $t$  内到达  $n$  个顾客的概率  $P_n(t)$  服从泊松分布,即

$$P_n(t) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t} \quad (\text{源-16})$$

式中  $\lambda$  为常数。令第  $n$  个顾客到达的时刻为  $\tau_n$  ( $\tau_1, \tau_2, \dots$ ), 并令  $\tau_n - \tau_{n-1}$ ,  $\tau_2 - \tau_1, \dots$ , 则相继顾客到达间隔  $\tau_n$  是相互独立相同分布的, 其分布函数为负指数分布

$$F(\tau) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda \tau} & \tau \geq 0 \\ 0 & \tau < 0 \end{cases} \quad (\text{源-17})$$

式中  $\lambda$  为常数。其数学期望和方差为

$$E(\tau) = \frac{1}{\lambda}, \quad D(\tau) = \frac{1}{\lambda^2} \quad (\text{源-18})$$

在泊松分布中,顾客到达的时刻完全是随机的,仅仅受到给定的平均到达速率  $\lambda$  的限制。泊松分布是一种很重要的概率分布,许多排队系统中的到达模式都属于这种分布。

当服务时间完全随机的时候,也可用上述指数分布来表示它,其分布函数为

$$F(\tau) = \begin{cases} 1 - e^{-\mu \tau} & \tau \geq 0 \\ 0 & \tau < 0 \end{cases} \quad (\text{源-19})$$

式中  $\mu$  为常数。

### 猿) 爱尔朗分布

设  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$  是  $n$  个相互独立的随机变量,服从相同参数  $\lambda$  的负指数分布,那么

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_n$$

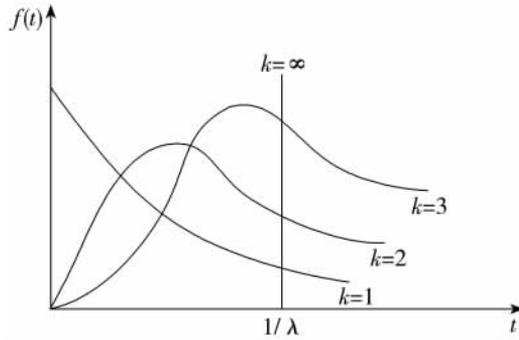
概率的密度为

$$f(\tau) = \frac{\lambda^n \tau^{n-1} e^{-\lambda \tau}}{(n-1)!} \quad (\text{源-20})$$

称  $\tau$  服从  $n$  阶爱尔朗分布。其数学期望和方差为

$$E(\tau) = \frac{n}{\lambda}, \quad D(\tau) = \frac{n}{\lambda^2} \quad (\text{源-21})$$

爱尔朗分布比负指数分布有更大的适应性。事实上,当  $n \rightarrow 1$  时,爱尔朗分布就是负指数分布;当  $n$  增大时,爱尔朗分布的图形逐渐变为对称的,变化系数减小,也就是说这时爱尔朗分布曲线族表示的数据,要比用指数分布表示的数据更接近平均值;当  $n \rightarrow \infty$  时,爱尔朗分布近似于正态分布;当  $n \rightarrow \infty$  时,  $D(\tau) \rightarrow 0$  因此,爱尔朗分布可看成是完全随机与完全确定的中间型,它能为现实世界提供更为广泛的适用性。例如,串列的  $n$  个服务台,每台服务时间相互独立,服从相同的负指数分布(参数  $\lambda$ ),那么一顾客走完这  $n$  个服务台总共所需服务时间就服从上述的  $n$  阶爱尔朗分布,如图源-22所示。



图源-源瑶 爱尔朗分布

由式(源-员缘)可得爱尔朗到达分布为

$$f_k(t) = \frac{\lambda^k t^{k-1} e^{-\lambda t}}{(k-1)!} \quad (\text{源-员远})$$

式中,  $k$ 是大于零的正整数。爱尔朗分布常用于典型的电话系统。

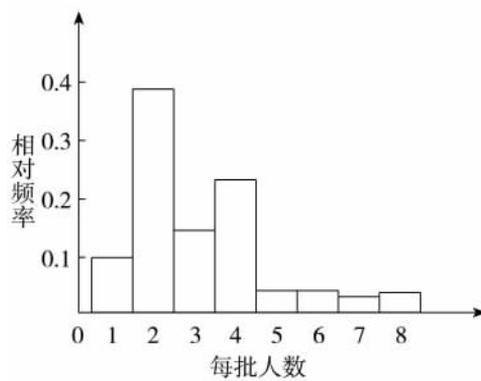
源) 一般相互独立随机分布

如果所有动态实体的服务时间都是相互独立、相同分布的随机变量,上述各种分布都是特例。

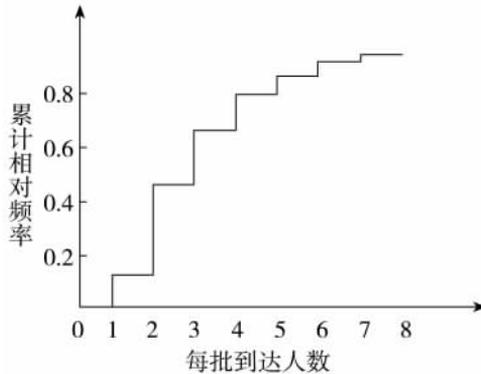
(员) 一般随机分布

对于一些受复杂因素影响的到达时间分布和服务时间分布,往往不能用上述几种典型分布加以简单描述。为了描述其分布的规律,可以从先期数据中获取统计数据,再加上适当的预测推算求出其概率分布,这种分布往往可以用一个离散的概率分布表加以描述。例如,离散到达每批人数从员个至愿个不等,已观察到连续猿批的每批人数。

图源-缘为所收集数据的直方图,图源-远提供了数据的分布函数,被称为所给数据的经验分布。



图源-缘瑶 数据直方图



图源-经验分布

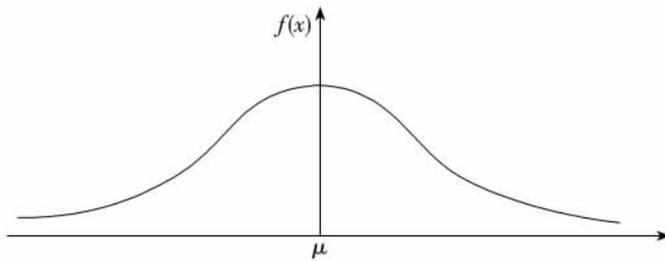
(圆) 正态分布

在服务时间近似于常数的情况下,多种随机因素的影响使得服务时间围绕此常值随机波动,都可用正态分布描述,其概率密度为

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right], \quad \text{原肆 约曾约肆} \quad (\text{源-苑})$$

式中  $\mu$  和  $\sigma$  分别为随机变量  $x$  的均值和标准差。正态分布常用符号  $N(\mu, \sigma^2)$  表示,其概率密度曲线如图源-苑所示,相对均值呈对称分布。其概率分布函数为

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dt \quad (\text{源-苑})$$



图源-苑 正态分布概率密度曲线

上式不能用解析法完整地计算,只能采用数值计算方法,为了使计算结果和  $\mu, \sigma$  无关,便于作成统一的表格供使用,令  $z = \frac{x-\mu}{\sigma}$  得

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{z^2}{2}\right] \quad \text{原肆 约曾约肆} \quad (\text{源-苑})$$

式中  $\phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{z^2}{2}\right]$ , 原肆 约曾约肆, 为概率密度。这是以均值为零,方差为 1 的正态分布,于是  $N(0, 1)$  称  $z$  为标准正态分布,其概率密度函数为

$$\Phi(\mu) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\mu - \mu_0)^2}{2\sigma^2}} \quad (源-10)$$

利用对称特性,有

$$\Phi(\mu_0 - \mu) = \Phi(\mu - \mu_0) \quad (源-10)$$

## 4.5 库存控制模型

### 4.5.1 库存模型中的基本概念

“库存”(Inventory或存)表示用于将来目的的资源暂时处于闲置状态。一般情况下,设置库存的目的是防止短缺。另外,它还具有保持生产过程连续性、分摊订货费用、快速满足用户订货需求的作用。在企业生产中,尽管库存是出于种种经济考虑而存在,但库存也是一种无奈的结果,它是由于人们无法预测未来的需求变化,才不得已采用的应付外界变化的手段。

不管是独立需求库存控制还是相关需求库存控制,都要回答这些问题:①如何降低库存成本?②怎样平衡生产与销售计划来满足一定的交货要求?③怎样避免浪费,避免不必要的库存?④怎样避免需求损失和利润损失?

也即,库存控制要解决三个主要问题:①确定库存检查周期;②确定订货量;③确定订货点(何时订货)。

库存模型必须也只能反映库存问题的基本特征。同库存模型有关的基本概念有需求、补充、费用和库存策略。

#### 1) 需求

根据需求的时间特征,可将需求分为连续性需求和间断性需求。在连续性需求中,随着时间的变化,需求连续地发生,因而库存也连续地减少;在间断性需求中,需求发生的时间极短,可以看做瞬时发生,因而库存的变化是跳跃式地减少。

根据需求的数量特征,可将需求分为确定性需求和随机性需求。在确定性需求中,需求发生的时间和数量是确定的。如生产中对各种物料的需求,或在合同环境下对商品的需求,一般都是确定性需求。在随机性需求中,需求发生的时间或数量是不确定的,如在非合同环境中对产品或商品的独立性需求,很难事先就知道需求发生的时间及数量。对于随机性需求,要了解需求发生时间和数量的统计规律性。

#### 2) 补充

通过补充来弥补因需求而减少的库存。没有补充或补充不足、不及时,当库存耗尽时,就无法满足新的需求,从开始订货(发出内部生产指令或市场订货合同)到库存的实现(入库并处于随时可供输出以满足需求的状态)需要经历一段时间。这段时

间可以分为两部分：

(员) 开始订货到开始补充(开始生产或货物到达)为止的时间。这段时间如从订货到何时开始补充的角度看,称为拖后时间;如从为了按时补充需要何时订货的角度看,称为提前时间。在同一库存问题中,拖后时间和提前时间是一致的,只是观察的角度不同而已。在实际库存问题中,拖后时间可能很短,以致可以忽略,此时可以认为补充能立即开始,拖后时间为零。如拖后时间较长,则它可能是确定性的,也可能是随机性的。

(圆) 从开始补充到补充完毕为止的时间(即入库或生产时间)。这段时间和拖后时间一样,可能很短(因此可以忽略),也可能很长;可能是确定的,也可能是随机的。

### 猿) 费用

在库存理论中,常以费用标准来评价和优选库存策略。为了正确地评价和优选库存策略,不同库存策略的费用计算必须符合可比性要求。最重要的可比性要求是时间可比和计算口径可比。所谓时间可比,是指库存策略的费用发生时间范围必须一致。实际计算时,常用一个库存周期内的总费用或单位时间平均总费用来衡量。所谓计算口径可比,是指库存策略的费用统计项目必须一致。经常考虑的费用项目有库存费、订货费、生产费、缺货费等。在实际计算库存策略的费用时,对于不同库存策略中都是相同的费用的可以省略。

各费用项目的构成和属性大致如下：

库存费:库存物资资金的利息、保险费,以及使用仓库、保管物资、物资损坏变质等支出的费用,一般和物资库存数量及时间成比例。

订货费:向外采购物资的费用。其构成有两类:一类是订购费用,如手续费、差旅费等,它与订货次数有关,而与订货数量无关;另一类是物资进货成本,如货款、运费等,它与订货数量有关。

生产费:自行生产需库存的物资的费用。其构成有两类;一类是生产组织费用或调整生产线的有关费用,它同组织生产的次数有关,而与每次生产的数量无关;另一类是与生产的数量有关的费用,如原材料和零配件成本、直接加工费等。

缺货费:库存不能满足需求而造成的损失。如失去销售机会的损失,停工待料的损失,延期交货的额外支出,对需方的损失赔偿等。当不允许缺货时,可将缺货费作无穷大处理。

### 源) 库存补给

库存补给策略是指决定什么情况下对存储进行补充,以及补充数量的多少。库存补给的策略很多,最基本的策略有三种。

(员) 连续性检查的固定订货量、固定订货点(匠砸)策略。图源-愿为(匠砸)策略的示意图。该策略的基本思想是:对库存进行连续性检查,当库存降低到订货点水平时,即发出一个订单,每次的订货量保持不变,都为固定值匠。该策略适用于需求量大、缺货费用较高、需求被动性很大的情形。

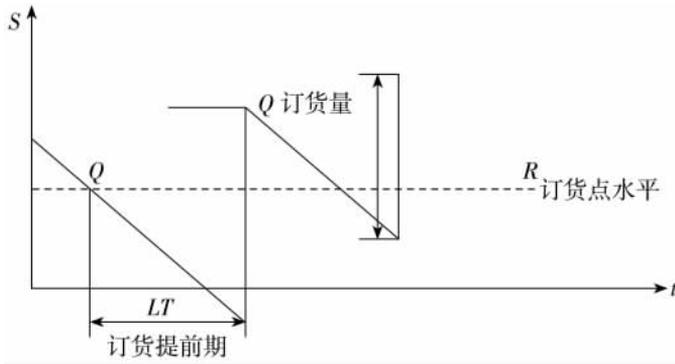


图 9-15 连续性检查 (s, s) 策略

(s, s) 连续性检查的固定订货点、最大库存 (s, s) 策略。该策略与 (s, s) 策略一样, 都是连续性检查类型的策略, 也就是要随时检查库存状态, 当发现库存降低到订货点水平时开始订货, 订货后使最大库存保持不变, 即为常量 s, 若发出订单时库存量为  $s$  则其订货量即为  $s - s$ 。该策略和 (s, s) 策略的不同之处在于其订货量是由实际库存而定, 因而订货量是可变的。

(s, T) 周期性检查 (s, T) 策略。该策略是每隔一定时期检查一次库存, 并发出一次订单, 把现有库存补充到最大库存水平 s。如果检查时库存量为  $s$  则订货量为  $s - s$ 。如图 9-16 所示, 经过固定的检查期 T 发出订单, 这时库存量为  $s$ , 订货量为  $s - s$ 。经过一定的时间 (T——订货提前期), 库存补充 (s -  $s$ ), 库存到达 s 点。再经过一个固定的检查时期 T 又发出一次订单, 订货量为 (s -  $s$ ) (经过一定的时间 (T, 可以为随机变量), 库存又达到新的高度 s)。如此周期性检查库存, 不断补给。

该策略不设订货点, 只设固定检查周期和最大库存量。该策略适用于一些不很重要的或使用量不大的物资。

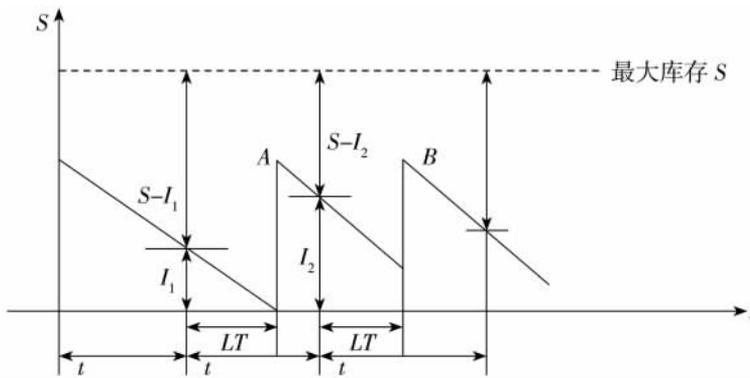


图 9-16 周期性检查 (s, T) 策略

在上述这三种基本的库存策略基础上, 又延伸出很多种库存策略。

## 源缘圆 常见库存控制模型

### 员) 独立需求库存控制模型

常见的独立需求库存控制模型根据其主要的参数,如需求量与提前期是否确定,分为确定型库存模型和随机型库存模型。

#### (员) 确定型库存模型

确定型库存模型分为周期性检查模型(员)和连续性检查模型(圆)。周期性检查模型有六种,分不允许缺货、允许缺货、实行补货等三种情况。每种情况又分瞬时到货、延时到货两种情形。

连续性检查模型(圆)需要确定订货点和订货量两个参数,也就是解决(员)策略的两个参数的设定问题。

连续性库存检查模型分六种:不允许缺货、瞬时到货型;不允许缺货、延时到货型;允许缺货、瞬时到货型;允许缺货、延时到货型;补货、瞬时到货型;补货、延时到货型。

#### (圆) 随机型库存模型

随机型库存模型要解决的问题是:确定经济订货批量或经济订货期,确定安全库存量,确定订货点和订货后最大库存量。

随机型库存模型也分为连续性检查和周期性检查两种情形。当需求量、提前期都为随机变量时,库存模型较为复杂。

### 圆) 经济订购批量(员)模型

员)模型属连续型检查模型,不允许缺货,补充时间极短。在对此模型进行分析时,假设:

(员)需求是连续均匀的,即需求速度(单位时间的需求量)是常数;(圆)补充可以瞬时实现,即补充时间(拖后时间和生产时间)近似为零;(猿)单位库存费(单位时间内单位库存物的库存费用)为悦;由于不允许缺货,故单位缺货费(单位时间内每缺少一单位库存物的损失)悦为无穷大。订货费(每订购一次的固定费用)为悦,货物单价为噪,设补充间隔时间为贼,补充时库存已用尽,每次补充量(订货量)为圆,则库存状态图见图源缘圆

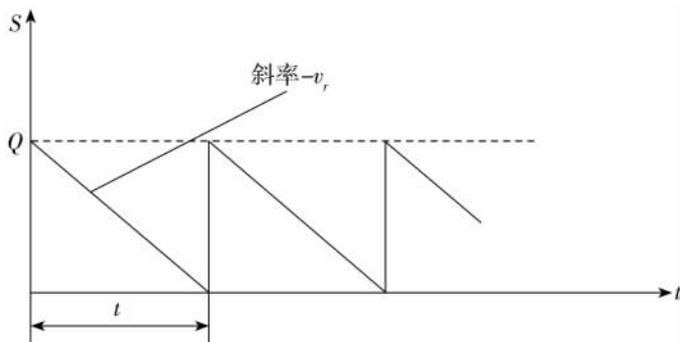
贼时间内的平均总费用

$$悦贼 + \frac{悦}{贼} + \frac{悦}{贼} \quad (源缘圆)$$

经济订购批量应使悦贼取最小,因而是对上式求极值,对上式微分

$$\frac{悦}{贼} - \frac{悦}{贼^2} = 0$$

得,订货时间间隔贼越 $\sqrt{\frac{悦}{悦}}$



图源-15 定期补货库存模型

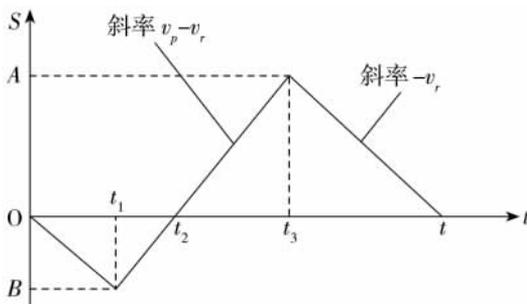
平均总费用  $C = C_1 + C_2 = \frac{C_1}{Q} + C_2 Q$

经济订购批量  $Q^* = \sqrt{\frac{2C_1 C_2}{C_1 + C_2}}$  (源-16)

所以,应当每隔一段时间补充一下库存量,这样,平均总费用为  $C$  是最经济的。这是最基本的模型,式(源-16)称为经济订购批量公式,有时,也称为经济批量(源-17)公式。

### 猿) 允许缺货的经济生产批量模型

允许缺货的经济生产批量模型也称为允许缺货、生产需要一定时间模型。当需求是连续均匀的,即需求速度  $\lambda$  为常数,补充需要一定时间。不考虑拖后时间,只考虑生产时间,即一旦需要,生产可立刻开始,但生产需一定周期。设生产是连续均匀的,即生产速度  $\mu$  为常数。同时设  $C_1$  为跃增单位库存费,  $C_2$  为跃增单位缺货费,  $C_3$  为每次生产准备费,不考虑货物价值。库存状态图见图源-18。



图源-18 允许缺货的经济生产批量模型

[  $t_3 - t_1$  ] 为一个库存周期,  $t_1$  时刻开始生产,  $t_3$  时刻结束生产, [  $t_3 - t_1$  ] 时间内库存为零,  $t_1$  时刻达到最大缺货量 [  $t_1 - t_2$  ] 时间内产量一方面以速度  $\mu$  满足需求,另一方面以速度  $\mu - \lambda$  增加库存。至  $t_3$  时刻达到最大库存量  $A$ ,并停止生产, [  $t_3 - t$  ] 时间内以库存满足需求,库存以速度  $\lambda$  减少。至  $t$  时刻库存降为零,进入下一个库存周期。

根据模型假设条件和库存状态图,可以导出 [  $t_3 - t_1$  ] 时间内的平均总费用(即费用

函数)

$$\frac{\partial \text{总成本}}{\partial Q} = \frac{C_1}{Q} + C_2 + C_3 \cdot \frac{Q}{K} \quad (源-10)$$

解方程组

$$\begin{cases} \frac{\partial \text{总成本}}{\partial Q} = 0 \\ \frac{\partial \text{总成本}}{\partial K} = 0 \end{cases}$$

由此可求出此最优库存策略的参数值。

$$\text{最优库存周期 } T^* = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{C_1 C_3}{C_2}} \sqrt{\frac{K}{C_3}} \quad (源-11)$$

$$\text{经济生产批量 } Q^* = \sqrt{\frac{C_1 C_3}{C_2}} \sqrt{\frac{K}{C_3}} \quad (源-12)$$

$$\text{缺货补足时间 } T_s = \frac{C_3}{C_2} \quad (源-13)$$

$$\text{开始生产时间 } T_p = \frac{C_3}{C_2} \quad (源-14)$$

$$\text{结束生产时间 } T_e = \frac{C_3}{C_2} \left( 1 + \frac{C_3}{C_2} \right) \quad (源-15)$$

$$\text{最大库存量 } I_{max} = \frac{C_3}{C_2} \quad (源-16)$$

$$\text{最大缺货量 } I_{min} = \frac{C_3}{C_2} \quad (源-17)$$

$$\text{平均总费用 } TC = \frac{C_1}{Q} + C_2 + C_3 \cdot \frac{Q}{K} \quad (源-18)$$

### 源) 经济生产批量模型

经济生产批量模型也称为不允许缺货、生产需要一定时间模型。在允许缺货的经济生产批量模型中,取消允许缺货条件(假设  $C_3 \rightarrow \infty$ )就成为本模型,因此,其最优库存策略可以直接由允许缺货的经济生产批量模型得到以下参数值。

$$\text{最优库存周期 } T^* = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{C_1 C_3}{C_2}} \sqrt{\frac{K}{C_3}} \quad (源-19)$$

$$\text{经济生产批量 } Q^* = \sqrt{\frac{C_1 C_3}{C_2}} \sqrt{\frac{K}{C_3}} \quad (源-20)$$

$$\text{缺货补足时间 } T_s = \frac{C_3}{C_2} \quad (源-21)$$

$$\text{结束生产时间 } T_e = \frac{C_3}{C_2} \quad (源-22)$$

$$\text{最大库存量 } I_{max} = \frac{C_3}{C_2} \quad (源-23)$$

$$\text{最大缺货量 } I_{min} = \frac{C_3}{C_2} \quad (源-24)$$

$$\text{平均总费用 } TC = \frac{C_1}{Q} + C_2 + C_3 \cdot \frac{Q}{K} \quad (源-25)$$

### 缘) 允许缺货的经济订货批量模型

允许缺货是指企业在库存降至零后,还可以再等一段时间然后订货,当客户缺货

时不受损失。允许缺货的经济订货批量模型的假设条件除了允许缺货外,其余均与经济订货批量模型相同。另外,也可以把允许缺货的经济生产批量模型中的补充需要一定时间的条件取消(即  $\Delta \rightarrow \infty$ ),就成为本模型,从而可以得到最优库存策略的各参数。

$$\text{最优库存周期 } T_{opt} = \sqrt{\frac{C_{10} \cdot C_{11}}{C_{12} \cdot C_{13}}} \cdot \sqrt{\frac{C_{14} \cdot C_{15}}{C_{16}}} \quad (\text{源-源})$$

$$\text{经济订货批量 } Q_{opt} = \sqrt{\frac{C_{17} \cdot C_{18}}{C_{19}}} \cdot \sqrt{\frac{C_{20} \cdot C_{21}}{C_{22}}} \quad (\text{源-源})$$

$$\text{订货时间 } T_{ord} = \frac{C_{23}}{C_{24} \cdot C_{25}} \quad (\text{源-源})$$

$$\text{最大库存量 } S_{max} = \sqrt{\frac{C_{26} \cdot C_{27}}{C_{28} \cdot C_{29}}} \quad (\text{源-源})$$

$$\text{最大缺货量 } B_{max} = \sqrt{\frac{C_{30} \cdot C_{31}}{C_{32} \cdot C_{33}}} \quad (\text{源-源})$$

$$\text{平均总费用 } TC_{opt} = \sqrt{C_{34} \cdot C_{35}} \quad (\text{源-源})$$

### 需求为离散随机变量的单一周期的库存模型

所谓需求为随机变量的单一周期的库存模型,就是解决需求为随机变量的一种库存模型,在这种模型中的需求是服从某种概率分布的。模型中单一周期的库存是指在产品订货、生产、库存、销售这一周期的最后阶段或者把产品按正常价格全部销售完毕,或者把按正常价格未能销售出去的产品削价销售出去甚至扔掉。总之要在这一周期内把产品全部处理完毕,而不能把产品转入下一周期存储和销售。

当单一周期销售量  $D$  为一个离散随机变量,其概率为  $P(D=d)$ ,每销售一件可盈利  $u$ , 剩余每件则亏损  $v$ 。从概率知识可知  $\sum_{d=0}^{\infty} P(D=d) = 1$ 。设库存量为  $Q$ ,采用损失期望最小准则来确定  $Q$ 。

当供大于求时(即  $D < Q$ ),因不能售出而承担损失的数学期望值为

$$\sum_{d=0}^{Q-1} v(Q-d)P(D=d)$$

当供不应求时(即  $D > Q$ ),因缺货而减少收入造成的机会损失的数学期望值为

$$\sum_{d=Q}^{\infty} u(d-Q)P(D=d)$$

因此,当订货量为  $Q$  时,其损失的期望值为

$$L(Q) = v \sum_{d=0}^{Q-1} (Q-d)P(D=d) + u \sum_{d=Q}^{\infty} (d-Q)P(D=d) \quad (\text{源-源})$$

可以证明,最佳订货量  $Q^*$  可以由下面关系式来确定

$$\sum_{d=0}^{Q^*-1} P(D=d) \approx \frac{u}{u+v} \approx \sum_{d=Q^*}^{\infty} P(D=d) \quad (\text{源-源})$$

苑) 需求为连续随机变量的单一周期的库存模型

需求是连续的随机变量时的问题是 :单位货物进价为 噪售价为 责存储费为 悦, 货物需求 则是连续的随机变量 ,其密度函数为  $\alpha(\xi)$  则 ,分布函数  $\Sigma(\xi)$  越  $\int_{\xi}^{\infty} \alpha(\xi) d\xi$  则确定盈利期望最大值的库存量  $\xi$

当订货量为  $\xi$ ,需求量为  $\xi$ 时 ,实际销售量为  $\xi \wedge \xi$  因而 : 实际销售收入为  $\xi \wedge \xi$

货物储存费为  $\xi(\xi - \xi) \wedge \xi$  越  $\begin{cases} \xi(\xi - \xi) & \text{则} \leq \xi \\ \xi(\xi - \xi) & \text{则} > \xi \end{cases}$

盈利为  $\xi \wedge \xi - \xi(\xi - \xi) \wedge \xi$  原  $\xi$  原  $\xi(\xi - \xi) \wedge \xi$

盈利期望值为

$$\xi \wedge \xi - \xi(\xi - \xi) \wedge \xi = \int_{\xi}^{\infty} \xi \alpha(\xi) d\xi - \int_{\xi}^{\infty} \xi(\xi - \xi) \alpha(\xi) d\xi = \int_{\xi}^{\infty} \xi \alpha(\xi) d\xi - \int_{\xi}^{\infty} \xi^2 \alpha(\xi) d\xi + \int_{\xi}^{\infty} \xi^2 \alpha(\xi) d\xi - \int_{\xi}^{\infty} \xi \alpha(\xi) d\xi = \int_{\xi}^{\infty} \xi^2 \alpha(\xi) d\xi - \int_{\xi}^{\infty} \xi \alpha(\xi) d\xi$$

(源-源)

可以由下式求出最佳订货量  $\xi^*$

$$\int_{\xi}^{\infty} \alpha(\xi) d\xi = \frac{\xi \alpha(\xi)}{\xi - \xi}$$

(源-源)

## 4.6 图与网络分析方法

图论广泛应用于管理科学、计算机科学、信息论、控制论、物理学、化学、生理学、心理学等各个领域。物流系统中的最小线路网(最小生成树)、完成所有物流点的配送并使所走的线路最短(中国邮路问题)、最短路径、最小费用最大流问题等都可以通过网络分析方法得以解决。这里仅介绍最小生成树、中国邮路问题和最短路径问题,最小费用最大流问题可归结为线性规划问题。

### 图论及其有关概念

#### 图

图论中所研究的图并非指普通意义上的图形,它表示的是定义在顶点集上的二元关系,其本质是抽象的概念。从计算机科学的观点来看,图是一种数据结构,它的形式化定义为

$$G = (V, E)$$

(源-源)

式中  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  表示顶点集,  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$  表示边集,  $e_{ij} = (v_i, v_j) \in E$  表示顶点  $v_i$  与  $v_j$  之间存在路径。

在图中,基本的数据元素称为顶点,  $V$  是顶点的有穷非空集合,  $E$  是两个顶点之

间关系的集合。

#### 圆) 有向图与无向图

若  $曾赠 \in 灾匝$ , 则  $曾赠$  表示从  $曾$  到  $赠$  的一条弧, 且称  $曾$  为弧尾或初始点, 称  $赠$  为弧头或终端点, 此时的图称为有向图。若  $灾匝$  是对称的, 即有  $曾赠 \in 灾匝$ , 必有  $赠曾 \in 灾匝$ , 则以无序对  $曾赠$  代替这两个有序对, 称为从  $曾$  到  $赠$  的一条边, 此时的图称为无向图。

#### 猿) 邻接与关联

对于无向图  $郢越 灾, \{耘\}$ , 若有边  $(增赠) \in 耘$ , 则称  $增$  和  $赠$  互为邻接点或  $增$  和  $赠$  相邻接; 且边  $(增赠)$  依附于顶点  $增$  和  $赠$  或称边  $(增赠)$  与顶点  $增$  和  $赠$  相关联。

对于有向图  $郢越 灾, \{粤\}$ , 若有弧  $(灾, 灾) \in 粤$ , 则称顶点  $增$  邻接到顶点  $赠$ , 顶点  $赠$  邻接自顶点  $增$ , 且弧  $(灾, 灾)$  与顶点  $增$  和  $赠$  相关联。

#### 源) 度

在无向图中, 顶点  $增$  的度是指与顶点  $增$  相关联的边的数目, 记为  $裁阅 灾$ 。在有向图中, 顶点的度是指与顶点  $增$  相关联的弧的数目, 其中以  $增$  为头的弧数目称为  $增$  的入度, 记为  $阅阅 灾$ ; 以  $增$  为尾的弧数目称为  $增$  的出度, 记为  $韵阅 灾$ ; 顶点  $增$  的度等于二者之和, 即  $裁阅 灾 = 阅阅 灾 + 韵阅 灾$ 。对于一个有  $灶$  个顶点和  $藻$  条边或弧的图, 若记其中顶点  $蚤$  的度为  $裁阅 灾$ , 则有

$$\sum_{蚤=1}^{灶} 裁阅 灾 = 2藻 \quad (\text{源-缘})$$

$裁阅 灾$  为偶数的顶点称为偶点,  $裁阅 灾$  为奇数的顶点称为奇点。在任一个图中, 奇点的个数必为偶数。

#### 缘) 子图

假设有两个图  $郢越 灾, \{耘\}$  和  $郢越 灾, \{耘\}$ , 如果  $灾 \subseteq 灾$ ,  $耘 \subseteq 耘$ , 则称图  $郢$  为图  $郢$  的子图。

#### 远) 路径

在无向图  $郢越 灾, \{耘\}$  中, 顶点序列  $(灾, 灾, \dots, 灾)$  称为从顶点  $灾$  到顶点  $灾$  的一条路径, 其中  $(灾, 灾) \in 耘$ 。如果是无向图, 则路径也是有向的, 顶点序列应满足  $灾, 灾 \in 耘$ 。路径的长度是指路径上的边或弧的数目。序列中第一个顶点和最后一个顶点相同的路径称为回路或圈。序列中顶点不重复出现的路径称为简单路径。圈中只有重复点而无重复边的为简单圈, 既无重复点也无重复边的称为初等圈。

#### 苑) 连通

在无向图中, 如果从顶点  $灾$  到顶点  $灾$  有路径存在, 则称  $灾$  和  $灾$  是连通的。图中任意两个顶点都连通的无向图称为连通图。在有向图中, 如果从顶点  $灾$  到顶点  $灾$  有路径存在, 则称  $灾$  相对于  $灾$  是可达的, 如果从  $灾$  到  $灾$  和从  $灾$  到  $灾$  都存在路径, 则称  $灾$  和  $灾$  是连通的。图中的每一对顶点都连通的有向图称为强连通图。

愿) 权与网

如果图的边或弧具有与之相关的数,则这种与边或弧相关的数就称为边或弧的权。权可以用来描述从一个顶点到另一个顶点的距离或耗费。带权的图就称为网,其中的顶点称为节点。

我们需要明白图的矩阵表示。用矩阵表示图对研究图的性质及应用常常是比较方便的,图的矩阵表示方法有权矩阵、邻接矩阵、关联矩阵、回路矩阵、割集矩阵等,这里只介绍其中两种常用矩阵。

(员) 权矩阵

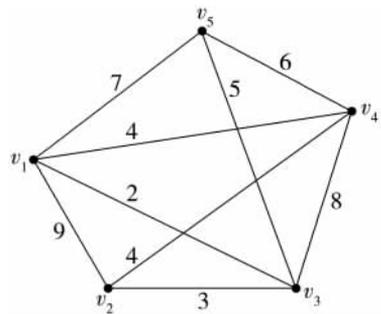
网络(赋权图)郎越(灾,{耘})其边(灾灾)有权宰,构造矩阵

$$粤越 \begin{bmatrix} 葬_{源} & 葬_{源} & \dots & 葬_{源} \\ 葬_{源} & 葬_{源} & \dots & 葬_{源} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 葬_{源} & 葬_{源} & 葬_{源} & 葬_{源} \end{bmatrix}$$

式中,葬\_{源}越 { 憎(增增) ∈ 耘, 园(增增) ∉ 耘 } 则称矩阵粤为网络郎的权矩阵。

图源-员是一个权矩阵示例图,其权矩阵为

$$粤越 \begin{bmatrix} 园 & 怨 & 圆 & 源 & 苑 \\ 怨 & 园 & 猿 & 源 & 园 \\ 圆 & 猿 & 园 & 愿 & 缘 \\ 源 & 源 & 愿 & 园 & 远 \\ 苑 & 园 & 缘 & 远 & 园 \end{bmatrix}$$



图源-员 权矩阵示例图

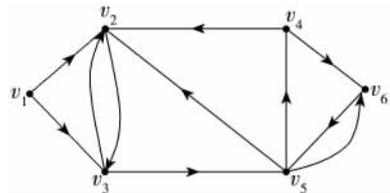
(圆) 邻接矩阵

对于图郎越(灾,{耘})构造一个矩阵

$$粤越 \begin{bmatrix} 葬_{源} & 葬_{源} & \dots & 葬_{源} \\ 葬_{源} & 葬_{源} & \dots & 葬_{源} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 葬_{源} & 葬_{源} & 葬_{源} & 葬_{源} \end{bmatrix}$$

式中,葬\_{源}越 { 员(增增) ∈ 耘, 园(增增) ∉ 耘 } 则称矩阵粤为网络郎的邻接矩阵。

图源-员所表示的图可以构造邻接矩阵粤如下:



图源-员 邻接矩阵示例图

粤越	园	员	员	园	园	园
	园	园	员	园	园	园
	园	员	园	园	员	园
	园	员	园	园	园	员
	园	员	园	员	园	员
	园	园	园	园	员	园

当 郎为无向图时 ,则邻接矩阵为对称矩阵。

(猿) 欧拉回路矩阵

连通图 郎中 ,若存在一条道路 ,经过每边一次且仅一次 ,则称这条路为欧拉道路。若存在一条回路 ,经过每边一次且仅一次 ,则称这条回路为欧拉回路。无向连通图 郎是欧拉图 ,当且仅当 郎中无奇点。有向连通图 郎是欧拉图 ,当且仅当它每个顶点的出度等于入度。

### 源源圆 最小生成树问题

树是图论中的一个重要概念 ,所谓树就是一个无圈的连通图。图 源-员韵的 葬就是一个树 ,而图 源-员韵的 遭因为图中有圈(灾,灾,灾) ,所以它就不是树 ;图 源-员韵的 糟因为不连通 ,所以也不是树。

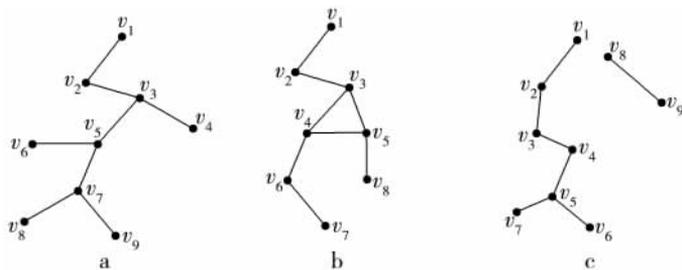


图 源-员圆 树的解释

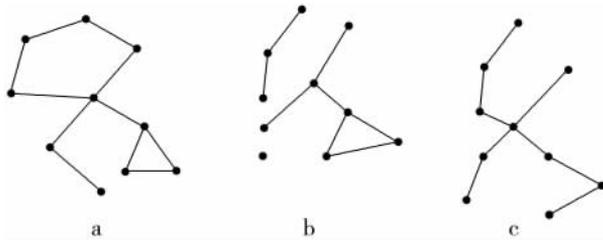
给了一个无向图 郎越 灾,(耘) ,保留 员的所有或部分顶点 ,而删掉部分 郎的边或者保留一部分 郎的边 ,所获得图 郎乙称之为 郎的生成子图。图 源-员韵的 遭和 糟都是图 源-员缘中 葬的生成子图。

如果图 郎的一个生成子图还是一个树 ,则称这个生成子图为生成树 ,在图 源-员缘的 糟就是图 源-员缘的 葬的生成树。

所谓最小生成树问题就是在一个赋权的连通的无向图中 郎找出一个生成树 ,并使得这个生成树的所有边的权数之和为最小。

最小生成树可以通过 运燥燥算法(避圈法)和破圈算法得到 ,破圈算法的具体步骤是 :

- (员) 在给定的赋权的连通图上任找一个圈 ;



图源-员 子图的生成

(圆) 在所找的圈中去掉一条权数最大的边(如果有两条或两条以上的边都是权数最大的边,则任意去掉其中一条);

(猿) 如果所余下的图已不含圈,则计算结束,所余下的图即为最小生成树。否则返回第一步。

### 源 中国邮路问题

#### 员) 中国邮路问题的描述

一个邮递员,负责某一地区的信件投递。他每天要从邮局出发,走遍该地区所有街道再返回邮局,问应如何安排送信的路线可以使所走的总路程最短?这个问题是我国管梅谷在 员 年首先提出的。因此国际上通称为中国邮路问题。

用图论的语言描述:给定一个连通图 郎,每边有非负权 造,要求一条回路过每边至少一次,则满足总权最小。

如果 郎没有奇点,则是一个欧拉图,显然按欧拉回路走就是满足要求的过每边至少一次且总权最小的回路。

如果 郎中有奇点,要求连续走过每边至少一次,必然有些边不止一次走过,这相当于在图 郎中对某些边增加一些重复边,使所得到的新图 郎乙没有奇点且满足总路程最短。由于总路程的长短完全取决于所增加的重复边的长度,所以中国邮路问题也可以转为如下问题:在连通图 郎越 灾({耘})中,求一个边集 耘 ∈ 耘,把 郎中属于 耘的边均变为二重边得到图 郎乙越郎越耘,使其满足 郎乙越郎越耘无奇点,且 造(耘)越 ∑ 造 耘 最小,所得最短路径为每条边最多重复一次。

#### 圆) 中国邮路问题的算法

我们用图源-员所示的中国邮路问题来说明这个算法。

(员) 确定初始可行方案。先检查图中是否有奇点,如无奇点则已是欧拉图,找出欧拉回路即可;如有奇点,奇点个数必为偶数,所以可以两两配对,每对点间选一条路,使这条路均为二重边。

图源-员中有四个奇点 灾,灾,灾,灾,将 灾与 灾,灾与 灾配对。连接 灾与 灾的路径有多条,任取一条,如{灾,灾,灾,灾,灾,灾};类似地,对 灾与 灾取{灾,灾,

图 9-1-1 得到图 9-1-2, 已是欧拉图。对应这个可行方案, 重复边的总长为

(圆) 调整可行方案, 使重复边最多为一次。去掉 (灾, 灾), (灾, 灾), (灾, 灾), (灾, 灾) 各两条, 得到图 9-1-3 重复边总长度下降为

(猿) 检查图中每个初等圈是否满足条件 (圆), 如不满足则进行调整, 直至满足为止。检查图 9-1-3 发现 {灾, 灾, 灾, 灾, 灾} 总长度为 圆, 而重复边的长度为 员, 大于该圈总长度的一半, 可以作一次调整, 以 (灾, 灾), (灾, 灾) 代替 (灾, 灾), (灾, 灾), 得到图 9-1-4 重复边总长度下降为

图 9-1-1 中国邮路问题

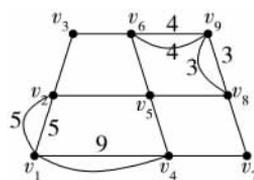
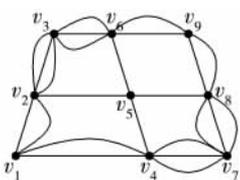
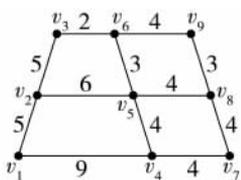


图 9-1-1 中国邮路问题

图 9-1-2 欧拉图

图 9-1-3 第一次调整可行方案

再检查图 9-1-4 圈 {灾, 灾, 灾, 灾, 灾, 灾, 灾} 总长度为 圆, 而重复边长度为 员, 再次调整得图 9-1-5 重复边总长度为 员

检查图 9-1-5 条件 (员) 和 (圆) 均满足, 得到最优方案。图中任一欧拉回路即为最优邮递路线。

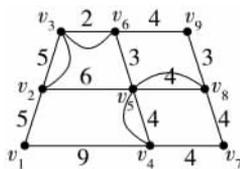
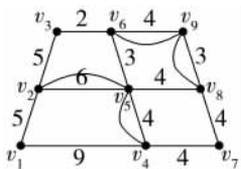


图 9-1-4 第二次调整可行方案

图 9-1-5 第三次调整可行方案

## 最短路径问题

### 最短路径算法

给定带权有向图  $G=(V, E, C)$ , 其中  $V$  是包含  $n$  个顶点的顶点集,  $E$  是包含  $m$  条弧的弧集,  $C$  是  $E$  中从  $v_i$  至  $v_j$  的弧  $(v_i, v_j)$  的非负权值, 设  $v_0, v_1, \dots, v_n$  为  $V$  中的顶点,  $P_{ij}$  为  $V$  中由  $v_i$  到  $v_j$  的一条路径, 则路径  $P_{ij}$  权值总和可表示为

$$L(P_{ij}) = \sum_{(v_k, v_l) \in P_{ij}} C_{kl} \quad (9-1)$$

所谓最短路径问题就是指在带权有向图中,寻找从指定起点到终点的一条具有最小权值总和的路径。如果把权值看成是弧的长度属性(距离),那么目标路径就是从起点到终点的最短路径,这也是其名称的由来。如果把路径规划中的优化标准量化为道路运营代价,则最优路径规划就可以归结为在特定道路网中寻找具有最小运营代价总和的最优路径问题,显然这与最短路径问题是等价的。

为说明最短路径求解算法,首先来讨论单源点最短路径问题,即由源点 \$s\$ 到图中其余各顶点的最短路径。关于这一问题,图论中提出了按路径长度递增的次序产生最短路径的算法(即经典图论中的 Dijkstra 算法),其产生最短路径的原理如下:

首先,设置一个辅助向量 \$D\$,它的每个分量 \$D\_i\$ 表示当前所找到的从起始点 \$s\$ 到每个终点 \$i\$ 的最短路径的长度。设置 \$D\$ 的初始状态为:若从 \$s\$ 到 \$i\$ 有弧,则 \$D\_i\$ 为弧上的权值,否则令 \$D\_i\$ 为 \$\infty\$。显然,长度为

$$D_i = \min_{j \in N} \{D_j, c_{ij}\} \quad (源-缘1)$$

的路径就是从 \$s\$ 出发的长度最短的一条路径。设 \$S\$ 为已求得最短路径的终点的集合,则可以证明:下一条最短路径(终点为 \$i\$)或者是弧 \$s \rightarrow i\$,或者是中间只经过 \$S\$ 中的顶点而最后到达顶点 \$i\$ 的路径。因此,下一条长度次短的最短路径的长度必为

$$D_i = \min_{j \in N} \{D_j, c_{ij}\} \quad (源-缘2)$$

式中, \$D\_j\$ 或者是弧 \$s \rightarrow j\$ 上的权值,或者是 \$D\_j\$ (\$j \in S\$) 和弧 \$j \rightarrow i\$ 的权值之和。

根据以上原理,可得到如下描述的最短路径生成算法:

(员) 利用邻接矩阵 \$C\$ 来表示带权有向图 \$G\$,其元素 \$c\_{ij}\$ 表示弧 \$i \rightarrow j\$ 上的权值,若弧 \$i \rightarrow j\$ 不存在,则将 \$c\_{ij}\$ 设为 \$\infty\$。令 \$S\$ 为已找到从 \$s\$ 出发的最短路径的终点的集合,将其初始化为空集。用 \$D\_i\$ 表示从 \$s\$ 出发到终点 \$i\$ 的可能达到的最短距离,取其初始值为

$$D_i = \begin{cases} c_{si} & i \in N \\ \infty & i \neq s \end{cases} \quad (源-缘3)$$

(圆) 选择 \$i\$ 使得

$$D_i = \min_{j \in N} \{D_j, c_{ij}\} \quad (源-缘4)$$

则 \$i\$ 就是当前从 \$s\$ 出发的最短路径的终点。令

$$S = S \cup \{i\} \quad (源-缘5)$$

(猿) 修改从 \$s\$ 出发到集合 \$N \setminus S\$ 中任一顶点 \$j\$ 的可达最短路径长度,如果

$$D_j > D_i + c_{ij} \quad (源-缘6)$$

则修改 \$D\_j\$ 为

$$D_j = D_i + c_{ij} \quad (源-缘7)$$

(源) 重复操作(圆)和(猿)共 \$n-1\$ 次,由此求得按路径长度递增次序排列的从 \$s\$ 出发至图 \$G\$ 中其余各顶点的最短路径序列。

### 圆) 启发式路径规划方法

图论中的算法是按长度递增的次序产生最短路径,凡是到源点的最短路径长度小

于目标路径长度的顶点都会被搜索到,因此算法的搜索空间可以近似看成是圆形。如果在搜索中能够优先考虑靠近终点方向的顶点,那么对于减小算法的搜索空间无疑是有帮助的。

启发式搜索就是指在路径规划中引入启发信息以提高搜索效率的方法。A\*算法是目前广为流行的路径规划启发式算法,对实现道路网的最佳优先搜索十分有效。通过选择合适的估价函数,A\*算法寻找最优路径所使用的搜索空间比经典Dijkstra算法小。采用启发信息的目的是提供一个顶点距离目标点有多远的估计,以使搜索算法优先考虑最有希望的顶点。定义顶点*n*的启发式估价函数*f*<sub>*n*</sub>为

$$f_n = g_n + h_n \quad (源-15)$$

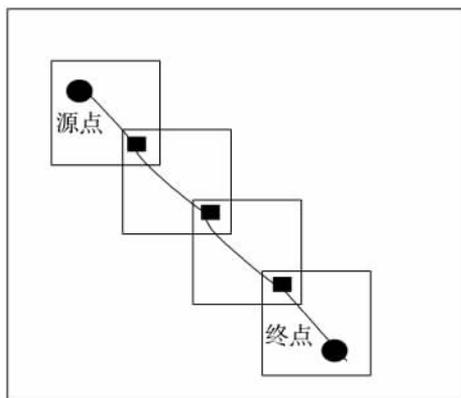
式中:*g*<sub>*n*</sub>——从起点*s*到当前顶点*n*的实际费用;*h*<sub>*n*</sub>——从当前顶点*n*到目标顶点*t*的费用估计函数。则A\*算法优先搜索具有最小值*f*<sub>*n*</sub>的顶点。*h*<sub>*n*</sub>的选择取决于路径规划的标准,在搜索最短路径时,以顶点权值*w*<sub>*n*</sub>作为起点到当前顶点的实际费用,以当前顶点到目标顶点的直线距离*d*<sub>*n*</sub>作为费用估价函数,则有

$$f_n = w_n + d_n \quad (源-16)$$

将Dijkstra算法中的顶点权值*w*<sub>*n*</sub>用*f*<sub>*n*</sub>代替,即实现了启发式最短路径搜索。

#### 猿) 基于多层地图的分级搜索

从Dijkstra算法的时间复杂度分析可以看出,路网图的规模是决定最优路径搜索时间的关键因素。如果用合理的方法减少搜索所涉及的顶点和弧的数量,将会使路径规划获得有效的加速。采用多层地图和分级搜索技术可实现对路径搜索空间的控制,基本思想是将道路网用高低两种分辨率的电子地图表示,首先在低分辨率图层中进行全局搜索以获得大致的目标路径,然后利用该路径将高分辨率图层分解为一系列局部搜索空间进行搜索,并将获得的局部最优路径合并在一起得到最终的目标路径。图源-16就是分级搜索空间示意图。



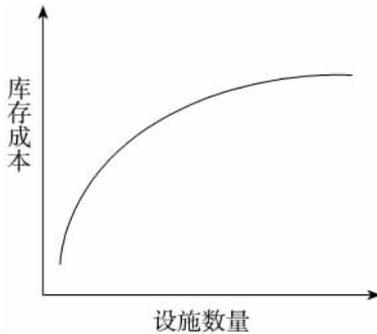
图源-16 分级搜索空间示意图

## 4.7 典型的物流系统设施选址模型与优化案例

### 源 物流设施选址的意义

物流设施选址在整个物流系统中占有非常重要的地位,主要属于物流管理战略层的研究问题。选址决策就是确定所要分配的设施的数量、位置以及分配方案,这些设施主要指物流系统中的节点,如制造商、供应商、仓库、配送中心、零售商网点等。

就单个企业而言,它决定了整个物流系统及其他层次的结构,配送物流系统设计涉及了企业布局问题;反过来,该物流系统其他层次(库存、运输等)的规划又会影响到选址决策。因此,选址与库存、运输成本之间存在着密切联系。一个物流系统中设施的数量增大,库存及由此引起的库存成本往往会增加,如图源-100所示。所以,合并减少设施数量、扩大设施规模是降低库存成本的一个措施。这也部分地说明为什么要大量修建物流园、物流中心,实现大规模配送。



图源-100 设施数量与库存成本之间的关系

设施数量与运输成本之间的关系如图源-101所示。随着设施数量,如配送中心数量的增加,可以减少运输距离、降低运输成本,但是,设施数量增大到一定量的时候,由于单个订单的数量过小,增加了运输频次,反而造成运输成本的增加。因此,确定设施的合理数量,也是选址规划的主要任务之一。

就供应链系统而言,核心企业的选址决策会影响所有供应商物流系统的选址决策。如英特尔在爱尔兰建立一家新计算机工厂,给爱尔兰供应商 6 个月的时间来满足英特尔的要求,如果他们不能满足英特尔的要求,英特尔原有的一些供应商将会选择在爱尔兰建立分支机构。根据 1995 年的数据,英特尔爱尔兰工厂的供应商按区域划分,分别为亚洲 15%、欧洲 45%、美国 40%。又比如,摩托罗拉的气体需要总是北方气体公司供给,这样,摩托罗拉在天津建立生产基地后,北方气体公司就要相应地建立自己的工

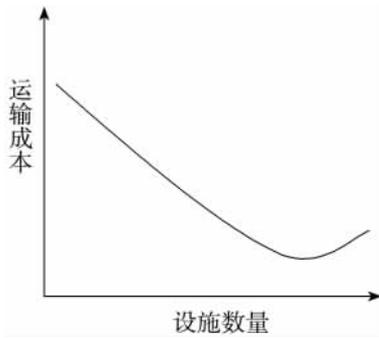


图 9-1 设施数量与运输成本之间的关系

厂及销售机构。

尽管选址问题主要是一个宏观战略的问题,但它又广泛地应用于物流系统的各个层面。如一个仓库中货物存储位置的分配,这一点对于自动化立体仓库中的货物存取效率十分重要。

## 9.1 选址决策的影响因素

就选址决策的影响因素而言,大致可以分为外部因素及内部因素两大类。外部因素包括诸如宏观政治及经济因素、基础设施及环境、竞争对手等;内部因素包括企业的发展战略、产品、技术或服务的特征等。

### 1) 选址决策的外部因素分析

#### (1) 宏观政治、经济因素

宏观政治因素主要指一个国家的政权是否稳定、法制是否健全、是否存在贸易禁运政策等,这一点是显而易见的,大多数的企业都不愿意在动乱的国家或地区投资。宏观政治因素是无法量化的指标,主要依靠企业的主观评价。

宏观经济因素包括税收、关税、汇率政策等,这一点与企业的选址决策直接相关,企业总是会寻求最宽松的经济环境。关税政策引起的市场壁垒也是企业选址的一个重要影响因素。如果一个国家的关税较高,要么,企业放弃这个市场,要么,企业会选择在这里建厂以躲避高额关税。

#### (2) 基础设施及环境

基础设施包括交通设施、通信设施等,环境包括自然环境及社会环境,如劳动力的成本、素质等。

现代企业中,物流成本往往要超过制造成本,而一个好的基础设施对于降低物流成本是十分关键的。所以,基础设施在选址决策中占有重要地位。

劳动力的成本与质量是选址决策的一个关键因素,越来越多的国际企业选择在亚洲建立制造工厂,就是由于当地低廉的劳动力成本。

### (猿) 竞争对手

在企业选址决策中必须考虑到竞争对手的布局情况,根据企业产品或服务的自身特征来决定是靠近竞争对手还是远离竞争对手,做到所谓“知己知彼,百战不殆”。

### (圆) 选址决策的内部因素分析

企业的内部因素往往是最主要的。选址决策首先要与企业的发展战略相适应。例如,作为制造业的企业,发展劳动力密集型的产品还是高技术类型的产品,这是企业综合内外形势分析得到的企业发展战略,如果选择劳动力密集型产品,则必然要选择劳动力成本低的地区作为选址的依据,而选择高技术类型的产品,则必须要选择劳动力素质高的地区,而这些地区往往成本较高。从商业及服务业来说,选择连锁便利店还是超市的发展战略,会有不同的企业网络设计。如果选择连锁便利店,则必须选择一些人口密集的区域,成本较高,面积需求较小,如果选择超市,则要选择人口不是非常密集,但可以提供大的营业面积的区域。

## 物流设施选址模型分类

在建立一个选址模型之前,我们需要清楚以下几个问题:其一,选址的对象是什么?其二,选址的目标区域是怎样的?其三,选址目标和成本函数是什么?其四,有怎样的约束?

根据对这些问题的不同回答,选址问题可以被归纳为相应的类型以建立选址模型,进而选择相应的算法进行求解,这样就可以得到该选址问题的答案。目前,我们将选址问题分为下面几类:

### (员) 按被定位设施的维度及数量

(员) 根据设施的维数。根据被定位设施的维数可以分为体选址、面选址以及线选址、点选址。

体选址是用来定位三维物体的。例如,卡车和飞机的装卸或箱子外货盘负载的堆垛。面选址是用来定位二维物体的。线选址是用来定位一维物体的。更高维度的选址问题也是存在的,但是相当少。如果问题的约束条件或者参数随着时间改变,那么这个选址问题就成为带有“时间维”的四维选址问题,这种问题通常被叫做“动态选址问题”。其他的选址特性可以在建模过程中转化为约束,例如一架飞机上的负载仅对货物的尺寸有要求,而且货物的重量需要沿着机身平衡分布,并与机身正交。

(圆) 根据选址设施的数量(单一或多个)。根据选址设施的数量,可以将选址问题分为单一设施选址问题 and 多设施选址问题。单一设施选址无需考虑竞争力、设施之间需求的分配、设施成本与数量之间的关系,主要考虑运输成本,因此,单一设施选址问题相比多设施选址问题而言,是比较简单的一类问题。

### (圆) 按选址问题目标区域的特征

按照选址目标区域的特征,可以将选址问题分为连续选址、网格选址和离散选址

三大类。

(员) 连续选址。待选区域是一个平面,不考虑其他结构,可能的选址位置的数量是无限的。选址模型是连续的,而且通常也可以被相当有效地分析。典型的应用是一个企业的配送中心的初步选址。

(圆) 网格选址。待选区域也是一个平面,被细分成许多相等面积(通常是正方形)的区域。候选地址的数量是有限的,但是也相当大。典型的应用是仓库中不同货物的存储位置的分配。

(猿) 离散选址。目标选址区域是一个离散的候选位置的集合。候选位置的数量通常是有限的且甚少的。这种模型是最切合实际的,然而相关的计算和数据收集成本是相当高的。实际的距离可以在目标函数和约束中使用,还可以包含有障碍和不可行区域的复杂地区。

## 源 选址成本

根据选址成本可以将选址问题分为这样几类,即是寻求可行成本方案还是寻求最优成本方案、是寻求总成本的最小化还是成本最大值的最小化、是固定权重还是可变权重、是确定性的还是随机性的、被定位设施间有无相互联系、是静态的还是动态等等。

### 员) 可行性与最优性

对于许多选址问题来说,首要的目标是得到一个可行的解决方案——一个满足所有约束的解决方案。可行方案得到以后,第二步的目标是找到一个更好的解决方案——关于目标函数的优化。两种最常见的目标函数类型为 选址总运输距离目标函数。

选址总目标函数寻求整个设施选址的总和为最小,目标是优化全部或者平均性能。这种目标通常在企业问题中应用,所以被称为“经济效益性”(选址总运输距离),也被称作网络上的中值问题。

选址总问题的目标函数通常写成如下形式

$$\min_{x_j} \left\{ \sum_{i \in N} c_{ij} x_{ij} \right\}$$

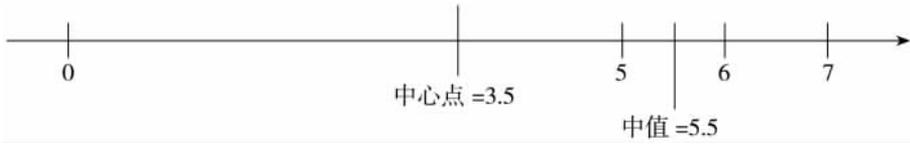
式中  $x_{ij}$ ——新的待定位设施物体的坐标; $i$ ——已存在且位置固定的物体的编号; $c_{ij}$ ——对于已经存在的物体  $i$  允新物体定位在  $j$  时的成本。

选址总目标由已存在设施的单个成本最大的组分组成。目标是优化最坏的情况。这种目标通常在军队、紧急情况 and 公共部门中使用,也被称作“经济平衡性”(选址总最大成本),也叫做网络上的中心问题。

选址总问题的目标函数通常写成如下的形式

$$\min_{x_j} \left\{ \max_{i \in N} \left\{ \sum_{j \in N} c_{ij} x_{ij} \right\} \right\}$$

例如,假设在一条直线上,有位置是园缘远和苑的源个点。为每个点服务的成本与这些点和新设施间的距离成比例。对于配~~置~~目标来说,新设施的最优位置是这些点的中值——载~~越~~缘,也就是说,在选址的左边和右边有同样多的点。实际上,点缘和远间的线段包含了无数的其他中值位置。对于配~~置~~目标来说,最优位置是这些点的中心——载~~越~~缘,也就是说,选址位置到最左边点和到最右边点的距离是相等的。图源-圆源是中值及中心点示意图。



图源-圆源 中值及中心点示意图

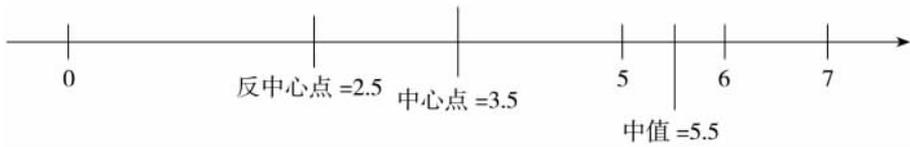
如果最左边点定位在原园缘处,而不是在园处,最优中值位置不会改变。对于这个特殊的例子来说,选址区域是一条直线,固定位置的顺序比它们的实际位置更加重要。如果在点缘和远之间再增加员园两个点,最优中心选址的位置同样不会改变。中心选址是由那些极端位置决定的,而其他的内部物体的位置对它不起作用。

第三种目标函数通常在有害设施(例如废水处理厂、军工厂等)的选址中使用,它是配~~置~~型的目标函数,这种情况下,物体被定位在位于最小距离最大化的地方。

配~~置~~问题的目标函数通常写成

$$\sum_{i=1}^n w_i d_{ij}$$

配~~置~~问题的最优化解决方案通常被称作“反中心”(反~~中心~~)。在前一个例子中,反中心点是园缘如图源-圆缘所示。配~~置~~目标由已存在设施中成本最小的个体组成,目的是使最坏的情况最优化。这种目标函数通常在军队、紧急事件和公共部门中使用,也被称作“经济平衡性”。



图源-圆缘 中值及反中心点示意图

### 圆) 固定权重与可变权重

如果新设施和已存在设施间的关系与新设施的位置无关,而是固定的问题,这就是具有固定权重的选址问题。这种问题也叫做“单纯选址问题”(单纯~~选址~~)。

如果这种权重或关系与新设施的位置相关,那么这些权重本身就成为变量,这种问题被称做“选址—分配问题”(选址~~分配~~)。例如,将顾客分配到

最近的配送中心的问题,除掉一个配送中心不仅增加了顾客的购物距离,同时也将这个顾客分配到了另一个配送中心。

#### 猿) 被定位设施间有无相互联系

选址问题的一个很重要的区别标准是,被定位设施之间存在相互关系,还是被定位设施仅仅与已存在的设施间存在相互关系。如果选址问题包含多个有相互关系的新设施,它的目标函数常常是一个二次或更高次的函数。在一个设施设计项目中,在一个块状区域内布置二维部门的选址问题就是一个典型的二次目标函数。新设施的数量有时用  $n$  来表示。

#### 源) 确定性与随机性

如果选址的成本或参数的值是确定的,那么这个问题是确定性的。如果成本或参数是一个随机分布的概率值,那么这个问题就是随机性的。在配送系统的设计中,客户需求通常是随机的,但是它通常被近似为确定的平均值。

#### 缘) 静态与动态

如果选址问题的成本或参数不随着时间的改变而改变,那么这个问题就是静态的;反之,这个问题就是动态的。

## 源缘 选址约束

根据选址问题的约束种类,可以分为有能力约束的选址问题和无能力约束的选址问题,以及有不可行区域与无不可行区域的选址问题。

#### 员) 有能力约束与无能力约束

如果新设施的能力没有限制,那么选址问题就是无能力约束的选址问题;反之,就是有能力约束的选址问题。

#### 圆) 不可行区域约束

如果在目标区域内有些区域不适合作为选址地点,那么这个选址问题就包含了不可行区域的约束。例如,在美国本土进行配送中心的选址,五大湖区和墨西哥湾就是不可行区域。

## 源远 选址问题中的距离计算

选址问题最基本的一个参数是各个节点之间的距离。一般采用两种方法来计算节点之间的距离:一种是直线距离,也叫欧几里德距离(  $d_{ij}$  );另一种是折线距离(  $d_{ij}^*$  ),也叫城市距离(  $d_{ij}^*$  )。图 源-圆就是一个距离计算示意图。

#### 员) 直线距离

直线距离是指平面上两点间的距离。平面上两点(  $P_1$  )和(  $P_2$  )间的直线距离

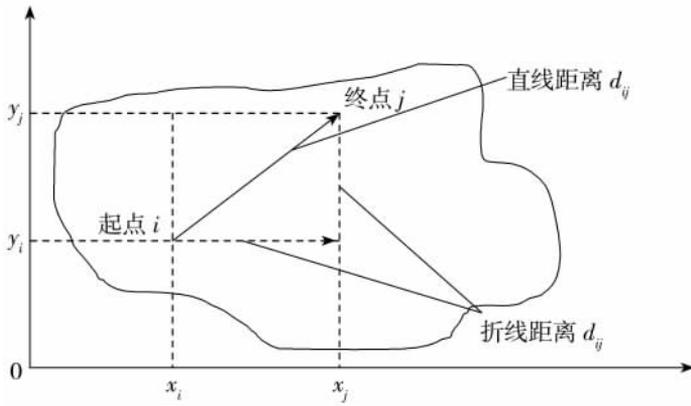


图 源-圆 距离计算示意图

为

$$d_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \quad (源-圆)$$

式中,  $d_{ij}$  代表欧几里德距离。

欧几里德距离通常用于解决城市间配送问题和通信问题。在这些问题中, 直线距离是可以接受的近似值。城市间配送问题中的实际路线距离可以通过将欧几里德距离乘以一个适当的系数(如在美国本土是 1.2, 中南美洲是 1.4)来更好地近似。

### 圆) 折线距离

折线距离采用如下的公式计算

$$d_{ij} = \sum_{k=1}^n \sqrt{(x_{k+1} - x_k)^2 + (y_{k+1} - y_k)^2} \quad (源-圆)$$

折线距离一般用于解决道路较规则的城市内的配送问题及具有直线通道的工厂及仓库内的布置、物料搬运设备的顺序移动等问题。

## 源 选址模型算法分类

选址模型应该具有以下两个方面的功能:其一,为设施(工厂、仓库、军售点等)找到一个最优的位置;其二,是物流系统设计中的一个重要部分。

对设施选址问题可以通过一个最为简单的实例来理解:在一条直线上(街道)选择一个有效位置(商店),即一种设施选址。为了能够让在这条街上的所有顾客到达他的商店的平均距离最短,在不考虑其他因素的情况下,当然这条大街的中点是最为合理的位置。

以上是实践中最为简单的一个选择问题,实际上,街上各个位置上可能出现顾客的概率是不一样的,如果我们需要考虑到这个条件的限制,那么我们就需要给整条街不同位置加上一个权重,进行分析。由于不同的选址模型的权重设计方法并不是完全一样的,问题将变得复杂。在权重等外部条件都确定的情况下,此类问题可以用以

下的目标函数进行评价

$$Z_{\text{源-远源}} = \sum_{j=1}^n w_j (x_j - a_j) + \sum_{j=1}^n w_j (a_j - x_j) \quad (源-远源)$$

或者

$$Z_{\text{源-远源}} = \int_0^{\infty} w_j (x_j - a_j) dx_j + \int_0^{\infty} w_j (a_j - x_j) dx_j \quad (源-远源)$$

式中  $w_j$ ——大街上第  $j$  个位置出现顾客的概率,  $a_j$ ——大街上第  $j$  个位置到所选地址的距离,  $x_j$ ——选择投资的位置。

式(源-远源)适用于离散模型,而式(源-远源)适用于连续模型。对上面等式进行求解,需对等式求微分,然后令其微分值为零,结果为

$$\frac{dx_j}{dx_j} = \sum_{j=1}^n w_j (x_j - a_j) - \sum_{j=1}^n w_j (a_j - x_j) \quad (源-远源)$$

或者

$$\frac{dx_j}{dx_j} = \int_0^{\infty} w_j (x_j - a_j) dx_j - \int_0^{\infty} w_j (a_j - x_j) dx_j \quad (源-远源)$$

上面的计算结果表明,所开设的新店面需要设置在权重的中点,即两面的权重都是  $w_j$ 。

这是一个很简单的选址模型,下面将对选址问题中的相关模型进行详细介绍,并通过实例来说明如何应用。

### 1) 连续点选址模型

连续点选址指的是在一条路径或者一个区域里面的任何位置都可以作为选址的一个选择。

交叉中值模型(Weighted Median)是用来解决连续点选址问题的一种十分有效的模型,它是利用城市距离进行计算。通过交叉中值的方法可以对单一的选址问题在一个平面上的加权的城市距离进行最小化。其相应的目标函数为:

$$Z_{\text{源-远源}} = \sum_{j=1}^n w_j |x - a_j| + \sum_{j=1}^n w_j |x - b_j| \quad (源-远源)$$

式中  $w_j$ ——与第  $j$  个点对应的权重(例如需求),  $a_j, b_j$ ——第  $j$  个需求点的坐标,  $x$ ——服务设施点的坐标,  $n$ ——需求点的总数目。

需要注意的是,这个目标函数可以用两个互不相干的部分来表达:

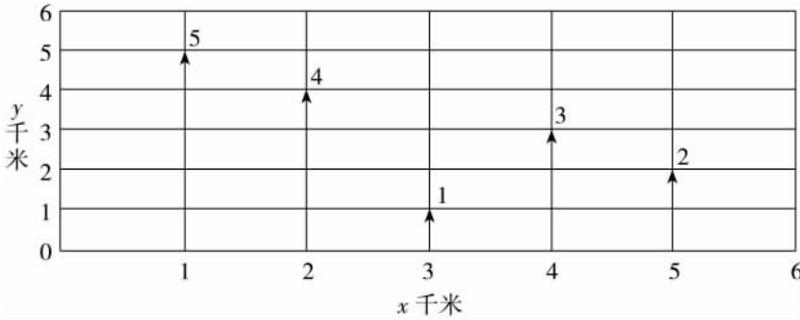
$$Z_{\text{源-远源}} = \sum_{j=1}^n w_j |x - a_j| + \sum_{j=1}^n w_j |x - b_j| \quad (源-远源)$$

在上面介绍的商店在一条大街上选址的问题中,选择的的就是所有可能需要服务的对象到目标点的绝对距离总和最小。类似的,在这个问题里面,最优位置也就是如下坐标组成的点:

- $a_j$ 是在  $a_j$  方向的对所有的权重  $w_j$  的中值点;
- $b_j$ 是在  $b_j$  方向的对所有的权重  $w_j$  的中值点。

下面我们看一个报刊亭选址的实例。

一个报刊连锁公司想在一个地区开设一个新的报刊零售点。其主要的服务对象是附近的缘个小区的居民,他们是新开设的报刊零售点的主要顾客源。图源-圆苑显示的笛卡尔坐标系确切地表达了这些需求点的位置,表源-愿是各个需求点对应的权重。这里,权重代表每个月潜在的顾客需求总量,基本可以用每个小区中的总的居民数量来近似。经理希望通过这些信息来确定一个合适的报刊零售点的位置,要求每个月顾客到报刊零售点所行走的距离总和为最小。



图源-圆苑 报刊亭选址问题需求点分布

表源-愿 需求点对应的权重

需求点	曾坐标	赠坐标	权重 憎
员	猿	员	员
圆	缘	圆	苑
猿	源	猿	猿
源	圆	源	猿
缘	员	缘	远

由于所考虑的是在一个城市中的选址问题,评价时,使用城市距离是合适的。交叉中值选址方法将会用来解决这个问题。

首先,需要确定中值

$$\text{宰越} \frac{\text{员}}{\text{圆}} \sum_{\text{员}}^{\text{灶}} \text{憎} \quad (\text{源-苑})$$

从表源-愿中,我们可以轻易地得到中值

$$\text{宰越} (\text{猿垣苑垣员垣猿垣远}) \div \text{圆} = \text{圆} \quad (\text{源-苑})$$

为了找到曾方向上的中值点 曾,从左到右将所有的 憎加起来,按照升序排列到中值点,然后重新再由右到左将所有的 憎加起来,按照升序排列到中值点,如表源-怨表源-员园所示。可以看到,从左边开始到需求点 员就刚好达到了中值点,而从右边开始

则是到需求点猿达到中值点。回到图源一圆,发现在需求点员和猿之间员至猿米的范围内对于曾轴方向都是一样的,也就是说,曾的距离为猿~源千米。

圆) 精确重心法(源非轴对称曾轴)模型

前面介绍的交叉中值模型由于其本身的局限性,例如使用的是城市距离,只适合于解决一些小范围的城市内的选址问题。下面介绍的精确重心法,在评价的过程中使用的是欧几里德距离,即直线距离,它使选址问题变得复杂,但是有着更为广泛的应用范围。

摇摇表源一怨 曾轴方向的中值计算

需求点	沿曾轴的位置	$\sum$ 憎
从左至右		
缘	员	远越远
源	圆	远垣猿越怨
员	猿	远垣猿垣员越员园
猿	源	
圆	缘	
从右至左		
圆	缘	苑越苑
猿	源	苑垣猿越员园
员	猿	
源	圆	
缘	员	

摇摇表源一员 赠轴方向的中值计算

需求点	沿赠轴的位置	$\sum$ 憎
从上至下		
缘	缘	远越远
源	源	远垣猿越怨
猿	猿	远垣猿垣猿越员园
圆	圆	
员	员	
从下至上		
员	员	员越员
圆	圆	员垣苑越愿
猿	猿	员垣苑垣猿越员员
源	源	
缘	缘	

在使用了欧几里德距离之后,目标函数变成了

$$Z = \sum_{i=1}^n w_i \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (源一苑)$$

这是一个双变量系统,分别对曾和赠求偏微分,并且令其为零,这样就可以得到两个微分等式。应用这两个等式分别对曾和赠求解,即可以求出下面的一对隐含有最优解的等式

$$\frac{\partial Z}{\partial x} = \sum_{i=1}^n \frac{w_i (x - x_i)}{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}} = 0 \quad (源一猿)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial y} = \sum_{i=1}^n \frac{w_i (y - y_i)}{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}} = 0 \quad (源一肆)$$

式中,  $z_{k+1} = (z_k - \lambda \nabla z_k)$ 。

在式(源-苑)和式(源-苑)中,可以看到在等式的左右两边都出现了  $z_k$  和  $\lambda$  右边包含了  $z_k$  项)因此,该微分方程组不能直接求解。对于这个问题,可以通过迭代的方法进行求解,这需要提供一组初始值  $z_0$  和  $\lambda_0$ ,然后利用  $z_k$  和  $\lambda_k$  求出  $z_{k+1}$  和  $\lambda_{k+1}$ 。迭代公式如下

$$z_{k+1} = z_k - \lambda_k \nabla z_k \tag{源-苑}$$

$$\lambda_{k+1} = \lambda_k - \mu \nabla \lambda_k \tag{源-苑}$$

式中,  $z_{k+1} = (z_k - \lambda \nabla z_k)$ 。

如果该迭代过程具有收敛性,那么经过无限次的迭代之后,可以得到一个最优解  $z^*$  和  $\lambda^*$ ,但是在实际中,可以迭代的次数是有限的,所以在迭代过程中就需要确定一个终止准则。设置终止准则有两个方法:一是根据经验和以前的试验结果,直接设置一个确定的迭代次数  $N$ ;二是,将每一次得到的迭代结果  $z_k, \lambda_k$  跟前面一次的迭代结果  $z_{k-1}, \lambda_{k-1}$  进行比较,当两次的迭代得到的结果变化小于某一个值时,迭代过程即告结束。

## 本章小结

### 摇

物流系统优化是在物流系统合理建模基础上实现物流管理目标、体现物流管理效率与效益的必要过程和手段。

本章重点分析了物流系统模型的概念和建模原则、物流系统优化中的运筹学方法;应用网络分析方法介绍了最小生成树、中国邮路问题和最短路径问题等线性规划优化问题的模型及优化求解步骤;按系统建模及系统优化的一般步骤,详细分析了物流系统设施选址问题的建模和优化分析。

## 关键概念

### 摇

系统模型 摇 运筹学 摇 线性规划 摇 中国邮路问题 摇 网络流 摇 算法 摇 启发式 摇 路径规划 摇 方法

## 分析思考

### 摇

1. 什么是物流系统的模型？

2. 在物流系统的规划和评价决策中，为什么广泛使用系统模型而不是真实的物流系统？

3. 物流系统的建模原则有哪些？

4. 依据排队论的基本理论，结合一物流服务实例分析物流系统中如何以更合理的顺序为顾客服务。

5. 用图论的语言描述中国邮路问题，并简述最短邮递路线的算法。

6. 分析物流设施选址考虑的因素和步骤的内容。如何为设施（配送中心、仓库等）找到一个最优的位置？

## 第 缘章

# 物流系统的 智能优化方法

### 学 习 目 标

了解智能优化的模型结构 ;理解模拟退火算法的收敛性条件 ;

掌握智能优化的流程、操作、算法理论与技术 ;

物流系统优化的智能优化方法为复杂物流管理决策问题提供了重要的可行性解决方案。

## 5.1 模拟退火算法

### 5.1.1 模拟退火算法的概念

模拟退火( Metropolis 算法)的思想最早是由 Metropolis 等于 1953 年提出的, 1982 年 Kirkpatrick 等将其用于组合优化。模拟退火算法是一种通用的优化算法, 目前已在工程中, 如 生产调度、控制工程、机器学习、神经网络、图像处理等领域, 得到了广泛应用。这里将从优化流程、操作、算法理论与技术等方面对模拟退火算法进行介绍。

#### 1) 模拟退火算法的概念

模拟退火算法最早是针对组合优化提出的, 其目的在于: ① 为具有 复杂性的问题提供有效的近似求解算法; ② 克服优化过程陷入局部极小; ③ 克服初值依赖性。模拟退火算法的基本思想出于物理退火过程, 因此我们首先简单介绍物理退火过程。

#### 2) 物理退火过程和 Metropolis 准则

简单而言, 物理退火过程由以下三部分组成:

(1) 加热过程。其目的是增强粒子的热运动, 使其偏离平衡位置。当温度足够高时, 固体将熔解为液体, 从而消除系统原先可能存在的非均匀态, 使随后进行的冷却过程以某一平衡态为起点。熔解过程与系统的熵增过程相联系, 系统能量也随温度的升高而增大。

(2) 等温过程。物理学的知识告诉我们, 对于与周围环境交换热量而温度不变的封闭系统, 系统状态的自发变化总是朝自由能减少方向进行, 当自由能达到最小时, 系统达到平衡态。

(3) 冷却过程。其目的是使粒子的热运动减弱并渐趋有序, 系统能量逐渐下降, 从而得到低能的晶体结构。

固体在恒定温度下达到热平衡的过程可以用 Metropolis 方法加以模拟。虽然该方法简单, 但必须大量采样才能得到比较精确的结果, 因而计算量很大。鉴于物理系统倾向于能量较低的状态, 而热运动又妨碍它准确落到最低态, 采样时着重取那些有重要贡献的状态则可较快达到较好的结果。因此, Metropolis 等在 1953 年提出了重要性采样法, 即以概率接受新状态。具体而言, 在温度  $T$  由当前状态  $i$  产生新状态  $j$  两者的能量分别为  $E_i$  和  $E_j$ , 若  $E_j < E_i$ , 则接受新状态  $j$  为当前状态; 否则, 若概率  $P = \exp(-(E_j - E_i)/kT)$  大于  $[0, 1]$  区间内的随机数, 则仍旧接受新状态  $j$  为当前状态, 若不成立则保留状态  $i$  为当前状态, 其中  $k$  为 Boltzmann 常数。当这种过程多次重复, 即经过大量迁移后, 系统将趋于能量较低的平衡态, 各状态的概率分布将趋于某种正

则分布,如正则分布。同时,我们也可以看到,这种重要性采样过程在高温下可接受与当前状态能量相差较大的新状态,而在低温下基本只接受与当前能量差较小的新状态,这与不同温度下热运动的影响完全一致,而且当温度趋于零时,就不能接受比当前状态能量高的新状态。

这种接受准则通常称为“接受准则”,它的计算量相对蒙特卡罗方法要显著减少。

猿) 组合优化与物理退火的相似性

组合优化即寻找最优解  $s^*$  使得  $\forall s \in \Omega, f(s^*) \leq f(s)$ , 其中  $\Omega = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$  为状态  $s$  对应的目标函数值。基于“接受准则”的优化过程,可避免搜索过程陷入局部极小,并最终趋于问题的全局最优解,参见图 缘-员。而传统的“瞎子爬山”方法显然做不到这一点,从而也对初值具有依赖性。

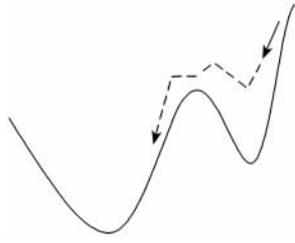


图 缘-员 基于“接受准则”的突跳性搜索

因此,基于“接受准则”的最优化过程与物理退火过程存在一定的相似性,我们用表 缘-员加以归纳。

表 缘-员 基于“接受准则”的最优化过程与物理退火过程的相似性

组合优化	物理退火	组合优化	物理退火
解	粒子状态	蒙特卡罗抽样	等温过程
最优解	能量最低态	控制参数的下降	冷却
设定初温	熔解过程	目标函数	能量

缘 圆 模拟退火算法的基本思想和步骤

员愿年 运到等意识到组合优化与物理退火的相似性,并受到“接受准则”的启迪,提出了模拟退火算法。归纳而言,该算法是基于蒙特卡罗迭代求解策略的一种随机寻优算法,其出发点是基于物理退火过程与组合优化之间的相似性,由某一较高初温开始,利用具有概率突跳特性的蒙特卡罗抽样策略在解空间中进行随机搜索,伴随温度的不断下降重复抽样过程,最终得到问题的全局最优解。

标准的模拟退火算法的一般步骤可描述如下:

- (员) 给定初温  $T_0$ , 随机产生初始状态  $s_0$ , 令  $T = T_0$ ;

- (猿) 产生新状态  $S_j$  越乱越杂;
- (源) 退温函数  $t_{k+1} = \text{update}(t_k)$  并令  $k = k + 1$ ;
- (缘) 判断抽样稳定准则是否满足;
- (远) 判断算法终止准则是否满足;
- (愿) 输出算法搜索结果。

上述模拟退火算法可用流程框图(如图 3-1 所示)直观描述。

从算法结构可知,新状态产生函数、新状态接受函数、退温函数、抽样稳定准则和退火结束准则(简称三函数两准则)以及初始温度,是影响算法优化结果的主要环节。模拟退火算法的实验性能具有质量高、初值鲁棒性强、通用易实现的优点。但是,为寻到最优解,算法通常要求较高的初温、较慢的降温速率、较低的终止温度以及各温度下足够多次的抽样,因而模拟退火算法往往优化过程长,这也是该算法最大的缺点。因此,在保证一定优化质量的前提下提高算法的搜索效率,是该算法改进的主要内容。

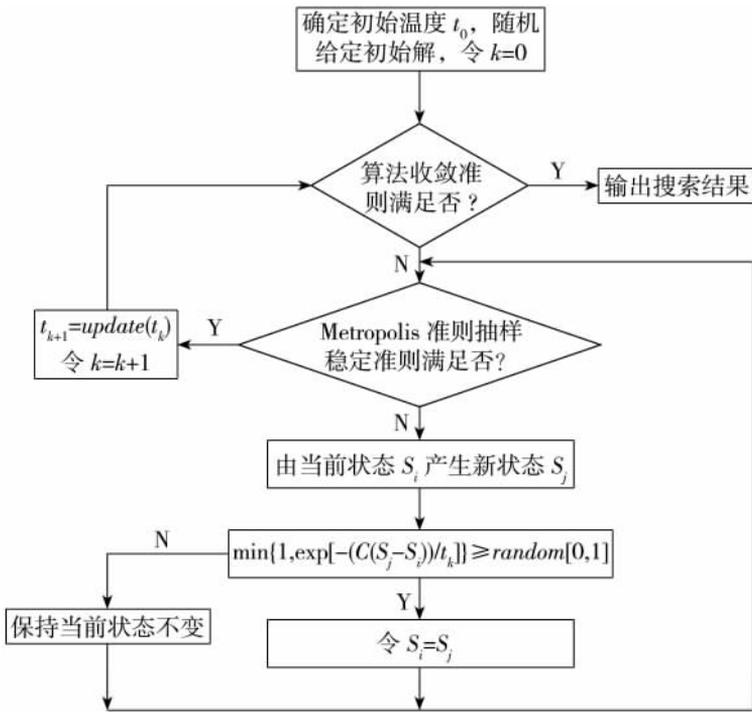


图 3-1 标准模拟退火算法的流程

### 模拟退火算法的马氏链描述

令  $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$  为所有状态构成的解空间,  $(\omega_t)$  为  $t$  时刻状态变量的取值. 随机序列  $\{\omega_t\}$  称为马氏链, 若  $\forall \omega_t \in \Omega$  满足

$$P(\omega_{t+1} = \omega_j | \omega_t = \omega_i) = P(\omega_{t+1} = \omega_j | \omega_t = \omega_i, \omega_{t-1}, \dots, \omega_1) = P_{ij}$$

(缘-员)

并称

$$P_{ij} = P(\omega_{t+1} = \omega_j | \omega_t = \omega_i) = P_{ij}$$

为一步转移概率, 记  $\omega_t$  步转移概率为

$$P_{ij} = P(\omega_{t+1} = \omega_j | \omega_t = \omega_i)$$

马氏链称为有限状态马氏链, 若解空间有限, 马氏链称为时齐的, 若

$$\forall \omega_t \in \Omega, P_{ij} = P_{ij}$$

我们约定, 以下讨论的退火算法对应的马氏链为有限状态马氏链.

考察模拟退火算法的搜索进程, 算法从一个初始状态开始后, 每一步状态转移均是在当前状态的邻域  $N(\omega_t)$  中随机产生新状态, 然后以一定概率进行接受的. 可见, 接受概率仅依赖于新状态和当前的状态, 并由温度加以控制. 因此, 退火算法对应了一个马氏链. 若固定每一温度, 退火算法均计算马氏链的变化直至平稳分布, 然后下降温度, 则称这种算法为时齐算法. 若无需各温度下算法均达到平稳分布, 但温度需按一定的速率下降, 则称这种算法为非时齐法或非平稳马氏链算法.

马氏链可用一个有向图  $(\Omega, E)$  表示, 其中  $\Omega$  为所有状态构成的顶点集,  $E$  为边集. 记  $P_{ij}$  为由状态  $\omega_i$  产生  $\omega_j$  的概率, 则

$P_{ij} \geq 0$

$\sum_{j \in \Omega} P_{ij} = 1$

$$P_{ij} = \begin{cases} P_{ij} & \omega_j \in N(\omega_i) \\ 0 & \omega_j \notin N(\omega_i) \end{cases} \quad (\text{缘-圆})$$

式中

$$P_{ij} = \sum_{k \in N(\omega_i)} P_{ik} \quad (\text{缘-猿})$$

式中,  $N(\omega_i)$  为状态  $\omega_i$  的领域中状态总数.

记  $P_{ij}$  为由当前状态  $\omega_i$  接受状态  $\omega_j$  的概率, 接受概率通常定义为  $P_{ij} = \min\{1, \exp(-\beta(\omega_j - \omega_i))\}$

记  $P_{ij}$  为由当前状态  $\omega_i$  接受状态  $\omega_j$  的转移概率, 则有

$$\forall \omega_i \in \Omega, P_{ij} = \begin{cases} P_{ij} & \omega_j \in N(\omega_i) \\ 0 & \omega_j \notin N(\omega_i) \end{cases} \quad (\text{缘-源})$$

模拟退火算法要实现全局收敛,直观上,它必须满足以下条件:① 状态可达性,即对应马氏链的状态图是强连通的;② 初值鲁棒性:该算法的最终结果不依赖初值;③ 极限分布的存在性。下面,我们将从理论上对退火算法的收敛性进行分析。

## 9.1 模拟退火算法的收敛性

### 9.1.1 时齐算法的收敛性

马氏链是描述和分析模拟退火算法的重要数学工具,在分析时齐算法的收敛性之前,我们首先给出马氏链理论中的一些相关定义和定理,具体证明过程可参见有关马氏链的著述。

定义 9.1 称状态  $s$  可达状态  $t$  若存在  $k \in \mathbb{N}$ , 使得  $P_{st}^{(k)} > 0$  跃迁,并记作  $s \rightarrow t$  进而,若  $t \rightarrow s$  则称状态  $s$  与  $t$  相通,并记作  $s \leftrightarrow t$

显然,可达性具有递推性质,即若  $s \rightarrow t$  且  $t \rightarrow u$  则  $s \rightarrow u$  进而,令

$$T_s = \{k \in \mathbb{N} \mid P_{ss}^{(k)} > 0\} \quad (9.1)$$

为状态  $s$  到达  $s$  的首达时刻,其概率定义为

$$f_{ss} = \sum_{k \in T_s} P_{ss}^{(k)} = \sum_{k \in T_s} P_{ss}^{(k-1)} P_{ss}^{(1)} = \sum_{k \in T_s} P_{ss}^{(k-1)} P_{ss}^{(1)}$$

则由状态  $s$  能够到达  $t$  的概率为

$$f_{st} = \sum_{k \in T_s} P_{st}^{(k)} \quad (9.2)$$

显然,  $s \leftrightarrow t$  的充要条件为  $s \rightarrow t$

定义 9.2 称状态  $s$  为常返态,若  $f_{ss} = 1$  称状态  $s$  为非常返态或瞬时态,若  $f_{ss} < 1$  进而,当  $f_{ss} = 1$  称状态  $s$  为正常返态,若  $f_{ss} = 1$  且  $\sum_{k=1}^{\infty} P_{ss}^{(k)} < \infty$  称状态  $s$  为零常返态,若  $\sum_{k=1}^{\infty} P_{ss}^{(k)} = \infty$  若从自身出发,则常返态能够以概率 1 无穷次返回自身,而非常返态只能有限次返回自身。

定义 9.3 若集合  $S \subseteq \Omega$  跃迁  $S$  非空,称此集合的最大公约数  $g(S)$  为状态  $s$  的周期。称状态  $s$  为周期的,若  $g(S) > 1$  跃迁称状态  $s$  为非周期的,若  $g(S) = 1$  进而,称状态  $s$  为遍历态,若它为正常返且非周期的。

引理 9.1 若  $s \leftrightarrow t$  则状态  $s$  与  $t$  同为周期或非周期的。

定义 9.4 称马氏链为不可约的,若马氏链的所有状态居于同一等价类。不可约链的一个充分条件为  $\forall s, t \in \Omega, \exists k \in \mathbb{N}, P_{st}^{(k)} > 0$

定义 9.5 称  $\{\pi_s \geq 0, \sum_{s \in \Omega} \pi_s = 1\}$  为马氏链的平稳分布,若一步转移概率满足等式

$$\pi_s = \sum_{t \in \Omega} \pi_t P_{ts} \quad (9.3)$$

引理 9.2 不可约的有限时齐马氏链的状态均为正常返。

引理 9.3 非周期不可约的时齐马氏链为正常返的充要条件是存在唯一的平衡

分布  $\{ \mu_{\sigma} \geq \sigma \}$  此时平稳分布也为极限分布,并且满足

$$\mu_{\sigma} \geq \mu_{\sigma'} \geq \mu_{\sigma''} \geq \dots \geq \mu_{\sigma_n} \geq \mu_{\sigma_{n+1}} \geq \dots \geq \mu_{\sigma_{\infty}} \geq \mu_{\sigma_{\infty}} \quad (\text{缘-苑})$$

式中  $\mu_{\sigma}$  由定义 缘-苑 给出。

定理 缘-苑 若  $\forall \sigma \in \Omega$ ,  $\exists \sigma' \in \Omega$  使得  $\sigma > \sigma'$ ,  $\dots, \sigma_n \in \Omega$ ,  $\sigma_n > \sigma_{n+1} > \dots > \sigma_{\infty}$  其中  $\forall \sigma \in \Omega$   $\sigma > \sigma'$  则时齐算法对应的有限状态马氏链不可约。

证明: 当温度参数  $\sigma$  给定时, 算法对应有限状态的时齐马氏链, 若  $\forall \sigma \in \Omega$  则有

$$\mu_{\sigma} \geq \mu_{\sigma'} \geq \mu_{\sigma''} \geq \dots \geq \mu_{\sigma_n} \geq \mu_{\sigma_{n+1}} \geq \dots \geq \mu_{\sigma_{\infty}} \geq \mu_{\sigma_{\infty}}$$

因此,  $\sigma \rightarrow \sigma'$  进而由状态  $\sigma$  和  $\sigma'$  的任意性知  $\sigma \rightarrow \sigma'$  从而, 由定义 缘-苑 中不可约链的充分条件可得此定理。

定理 缘-苑 在定理 缘-苑 条件下, 若  $\exists \sigma \in \Omega$ , 使得  $\mu_{\sigma} < \mu_{\sigma'}$  则时齐算法对应的不可约马氏链为非周期的。

证明: 考虑状态  $\sigma$  到自身的转移概率

$$\mu_{\sigma} = \sum_{\sigma' \in \Omega} \mu_{\sigma \rightarrow \sigma'} \mu_{\sigma'} \geq \sum_{\sigma' \in \Omega} \mu_{\sigma \rightarrow \sigma'} \mu_{\sigma} \quad (\text{缘-愿})$$

因此,  $\mu_{\sigma} < \mu_{\sigma}$  跃园故状态  $\sigma$  为非周期。进而, 当定理 缘-苑 条件成立时, 此马氏链不可约, 且  $\forall \sigma \in \Omega$ ,  $\sigma \rightarrow \sigma'$  故由引理 缘-苑 知, 此不可约马氏链为非周期的。

定理 缘-愿 时齐模拟退火算法对应的有限状态马氏链存在平稳分布  $\mu_{\sigma}$  (增,  $\dots$ , 增) 且

$$\forall \sigma \in \Omega, \mu_{\sigma} \geq \mu_{\sigma'} \quad (\text{缘-怨})$$

式中,  $\sigma \in \Omega$ , 若以下条件成立:

- (员)  $\forall \sigma \in \Omega$ ,  $\mu_{\sigma}$  与  $\sigma$  无关, 且  $\mu_{\sigma} > \mu_{\sigma'}$ , 同时  $\exists \sigma' \in \Omega$ ,  $\mu_{\sigma} > \mu_{\sigma'}$ ,  $\dots, \mu_{\sigma_n} > \mu_{\sigma_{n+1}}$ ;
- (圆)  $\forall \sigma \in \Omega$ , 若  $\mu_{\sigma} \leq \mu_{\sigma'} \leq \mu_{\sigma''}$  则  $\mu_{\sigma} < \mu_{\sigma'}$ ;
- (猿)  $\forall \sigma \in \Omega$ , 若  $\mu_{\sigma} \leq \mu_{\sigma'}$  则  $\mu_{\sigma} < \mu_{\sigma'}$  若  $\mu_{\sigma} > \mu_{\sigma'}$  则  $\mu_{\sigma} > \mu_{\sigma'}$

证明:

首先, 若条件(猿)成立, 则  $\forall \sigma \in \Omega$  跃园进而, 当条件(员)成立时, 定理 缘-苑 的条件满足, 则时齐算法对应的有限状态马氏链不可约。

其次, 若条件(员)和(猿)成立, 一定存在两个状态使得定理 缘-苑 条件成立(除非解空间中所有状态均为最优, 此时问题根本没有优化的必要, 因此不属于我们讨论的范畴), 则时齐算法对应的马氏链为非周期的。从而, 根据引理 缘-苑 知, 马氏链存在唯一

的平稳分布  $\pi^*(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)$ 。

进而, 由于平稳分布是唯一的, 因此要证明此定理, 下面只需验证定理中  $\pi^*$  的定义满足平稳分布的性质, 即

$$\pi^*(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)$$

推导如下

$$\begin{aligned} \sum_{i \in \Omega} \pi_i^* P_{ij} &= \sum_{i \in \Omega} \frac{P_{ji} \pi_j^*}{\sum_{k \in \Omega} P_{ki} \pi_k^*} \pi_i^* \\ &= \sum_{i \in \Omega} \frac{P_{ji} \pi_j^*}{\sum_{k \in \Omega} P_{ki} \pi_k^*} \pi_i^* \\ &= \sum_{i \in \Omega} \frac{P_{ji} \pi_j^*}{\sum_{k \in \Omega} P_{ki} \pi_k^*} \pi_i^* \\ &= \sum_{i \in \Omega} \frac{P_{ji} \pi_j^*}{\sum_{k \in \Omega} P_{ki} \pi_k^*} \pi_i^* \end{aligned}$$

注意, 通常的接受概率  $\alpha_{ij} = \min\{\frac{P_{ji} \pi_j^*}{P_{ij} \pi_i^*}, 1\}$  显然满足定理中的条件 (A) 和 (B), 而条件 (C) 需马氏链对应状态图的强连通性、邻域的对称性 (对称性意味着任意两个状态互为邻居或互不为邻居) 以及互为邻居的状态的产生概率的等同性来保证。

如果上述定理条件满足, 进而对于状态  $i$ , 若当  $i \rightarrow j$  时,  $\pi_j^* > \pi_i^*$ , 则考察平稳分布

$$\pi_i^* \frac{P_{ji} \pi_j^*}{\sum_{k \in \Omega} P_{ki} \pi_k^*} \quad (\text{缘-1})$$

可得

$$\pi_i^* \frac{P_{ji} \pi_j^*}{\sum_{k \in \Omega} P_{ki} \pi_k^*} \begin{cases} \frac{P_{ji} \pi_j^*}{\sum_{k \in \Omega} P_{ki} \pi_k^*} \\ \frac{P_{ji} \pi_j^*}{\sum_{k \in \Omega} P_{ki} \pi_k^*} \\ \frac{P_{ji} \pi_j^*}{\sum_{k \in \Omega} P_{ki} \pi_k^*} \end{cases} \quad (\text{缘-2})$$

上式说明, 当温度趋于 0 时, 马氏链以概率 1 收敛到最优状态集, 而收敛到非最优状态的概率为 0。

定理 3.1 若定理 3.1 中条件 (A) 和 (B) 满足, 而条件 (C) 改为, 马氏链的状态图满足强连通性和邻域的对称性 (其中互邻状态的产生概率的等同性无需满足), 且

$$\forall i \in \Omega, \pi_i^* \frac{P_{ji} \pi_j^*}{\sum_{k \in \Omega} P_{ki} \pi_k^*} \begin{cases} \frac{P_{ji} \pi_j^*}{\sum_{k \in \Omega} P_{ki} \pi_k^*} \\ \frac{P_{ji} \pi_j^*}{\sum_{k \in \Omega} P_{ki} \pi_k^*} \end{cases} \quad (\text{缘-3})$$

则马氏链存在平衡分布  $\pi^*(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)$ , 其中

$$\pi_i^* \frac{P_{ji} \pi_j^*}{\sum_{k \in \Omega} P_{ki} \pi_k^*} \quad \pi_i^* \in \Omega \quad (\text{缘-4})$$

证明:

首先,由状态图的强连通性和邻域的对称性、定理 缘院的条件(猿)以及引理 缘质知,马氏链为不可约的。

其次,由定理 缘院的条件(猿)和修改后的条件(员)知,马氏链为非周期的。

进而,平稳分布存在且是唯一的。下面仅需验证定理 缘灾的定义满足平稳分布的性质,即灾越 灾 贼责(贼) 推导如下

$$\begin{aligned}
& \sum_{\Omega} \text{增贼责(贼)} \text{越} \sum_{\Omega} \frac{\sum_{\Omega} \text{渣鼻渣鼻(贼)} \text{早葬(贼)垣} \sum_{\Omega} \frac{\text{渣鼻渣鼻(贼)} \text{早葬(贼)}}{\sum_{\Omega} \text{渣鼻渣鼻(贼)}} \\
& \text{摇垣} \frac{\text{渣鼻渣鼻(贼)}}{\sum_{\Omega} \text{渣鼻渣鼻(贼)}} \left( \text{员原} \sum_{\Omega} \text{早葬(贼)} \right) \\
& \text{越} \sum_{\Omega} \frac{\text{葬(贼)}}{\sum_{\Omega} \text{渣鼻渣鼻(贼)}} \text{葬(贼)垣} \sum_{\Omega} \frac{\text{渣鼻渣鼻(贼)}}{\sum_{\Omega} \text{渣鼻渣鼻(贼)}} \left( \text{员原} \sum_{\Omega} \text{早葬(贼)} \right) \\
& \text{越} \sum_{\Omega} \frac{\text{葬(贼)}}{\sum_{\Omega} \text{渣鼻渣鼻(贼)}} \text{葬(贼)垣} \sum_{\Omega} \frac{\text{渣鼻渣鼻(贼)}}{\sum_{\Omega} \text{渣鼻渣鼻(贼)}} \text{原} \frac{\sum_{\Omega} \text{渣鼻渣鼻(贼)葬(贼)}}{\sum_{\Omega} \text{渣鼻渣鼻(贼)}} \\
& \text{越} \sum_{\Omega} \frac{\text{葬(贼)} \text{垣} \sum_{\Omega} \frac{\text{渣鼻渣鼻(贼)}}{\sum_{\Omega} \text{渣鼻渣鼻(贼)}} \text{垣} \frac{\sum_{\Omega} \text{渣鼻渣鼻(贼)}}{\sum_{\Omega} \text{渣鼻渣鼻(贼)}} \\
& \text{摇原} \frac{\sum_{\Omega} \text{葬(贼)}}{\sum_{\Omega} \text{渣鼻渣鼻(贼)}} \text{原} \frac{\sum_{\Omega} \text{葬(贼)}}{\sum_{\Omega} \text{渣鼻渣鼻(贼)}} \text{越} \frac{\text{渣鼻渣鼻(贼)}}{\sum_{\Omega} \text{渣鼻渣鼻(贼)}} \text{越增贼(缘-员)}
\end{aligned}$$

需要指出的是,上述定理仅给出了时齐算法平稳分布存在的充分条件,而非必要条件,因此不能用上述定理的条件去验证平稳分布的不存在性。例如,接受函数

$$\text{葬(贼)越} \left( \text{员垣} \frac{\text{悦躁原悦蚤}}{\text{贼}} \right)^{\text{原}} \tag{缘-员}$$

显然不满足上述定理的条件,但可以证明,当条件  $\forall \text{蚤躁} \Omega, \text{早} \text{越早}$  成立时,马氏链的平稳分布仍存在,其分量为

$$\text{增贼越} \frac{\text{藻蚤原悦蚤躁}}{\sum_{\Omega} \text{藻蚤原悦蚤躁}} \tag{缘-员}$$

圆) 非时齐算法的收敛性

区别于时齐算法对各温度下状态序列无限长的条件,非时齐算法通过对退温函数的严格控制以实现收敛目的。

缘缘缘 模拟退火算法关键参数和操作的设计

从算法流程分析,模拟退火算法包括三函数两准则,即状态产生函数、状态接受函数、温度更新函数、内循环终止准则和外循环终止准则(也即前文提及的新状态产

生函数、新状态接受函数、退温函数、抽样稳定准则和退火结束准则)。这些环节的设计将决定 模拟算法的优化性能。此外,初温的选择对 模拟算法性能也有很大影响。

理论上,模拟算法的参数只有满足算法的收敛条件才能保证实现的算法依概率 1 收敛到全局最优解。然而,由 模拟算法的收敛性理论知,某些收敛条件无法严格实现,如时齐马氏链的内循环终止准则,即使某些收敛条件可以实现,如非时齐马氏链的更新函数,但也常常会因为实际应用的效果不理想而不被采用。因此,至今 模拟算法的参数选择依然是一个难题,通常只能依据一定的启发式准则或大量的实验加以选取。

#### (员) 状态产生函数

设计状态产生函数(邻域函数)的出发点应该是尽可能保证产生的候选解遍布全部解空间。通常,状态产生函数由两部分组成,即产生候选解的方式和候选解产生的概率分布。前者决定由当前解产生候选解的方式,后者决定在当前解产生的候选解中选择不同状态的概率。候选解的产生方式由问题的性质决定,通常在当前状态的邻域结构内以一定概率方式产生,而邻域函数和概率方式可以做多样化设计,其中概率分布可以是均匀分布、正态分布、指数分布、柯西分布等。

#### (圆) 状态接受函数

状态接受函数一般以概率的方式给出,不同接受函数的差别主要在于接受概率的形式不同。设计状态接受概率应该遵循以下原则:

(员) 在固定温度下,接受使目标函数值下降的候选解的概率要大于使目标函数值上升的候选解的概率;

(圆) 随温度的下降,接受使目标函数值上升的解的概率要逐渐减小;

(猿) 当温度趋于零时,只能接受使目标函数值下降的解。

状态接受函数的引入是 模拟算法实现全局搜索的最关键的因素,但实验表明,状态接受函数的具体形式对算法性能的影响不显著。因此,模拟算法中通常采用 接受概率  $\Delta f < 0$  作为状态接受函数。

#### (猿) 初温

初始温度、温度更新函数、内循环终止准则和外循环终止准则通常被称为退火历程(模拟退火算法的输入参数)。

在非时齐 模拟算法收敛性理论中,初温由退温函数  $T_{k+1} = \alpha T_k$  (其中  $\alpha$  为退温系数)中的  $\alpha$  决定,但求解实际问题时很难精确得到  $\alpha$  值或其下界。

初温应选择充分大以使几乎所有产生的候选解都能被接受,如此保证最终优良的收敛性。

实验表明,初温越大,获得高质量解的几率越大,但花费的计算时间将增加,初温的确定应折衷考虑优化质量和优化效率,常用方法包括:

(员) 均匀抽样一组状态,以各状态目标值的方差为初温。

(圆) 随机产生一组状态,确定两两状态间的最大目标值差  $\Delta f_{max}$ ,然后依据差值,利用一定的函数确定初温。譬如  $T_0 = \Delta f_{max} / \ln(1/p)$ ,其中  $p$  为初始接受概率。若取  $p = 0.5$

接近,且初始随机产生的状态能够一定程度上表征整个状态空间时,算法将以几乎等同的概率接受任意状态,完全不受极小解的限制。

(猿) 利用经验公式给出。

源) 温度更新函数

温度更新函数,即温度的下降方式,用于在外循环中修改温度值。

在非时齐杂鹑算法收敛性理论中,更新函数可采用函数  $T_{k+1} = \alpha T_k + \beta \Delta E_k$  (由于温度与退温时间的对数函数成反比,所以温度下降的速度很慢。当取值较大时,温度下降到比较小的值需要很长的计算时间。快速杂鹑算法采用更新函数  $T_{k+1} = \beta T_k$  与前式相比,温度下降速度加快了。但需要强调的是,单纯温度下降速度加快并不能保证算法以较快的速度收敛到全局最优,温度下降的速率必须与状态产生函数相匹配。

在时齐杂鹑算法收敛性理论中,要求温度最终趋于零,但对温度的下降速度没有任何限制,这并不意味着可以使温度下降得很快,因为在收敛条件中要求各温度下产生的候选解数目无穷大,显然这在实际应用时是无法实现的。通常,各温度下产生的候选解越多,温度下降的速度可以越快。

目前,最常用的温度更新函数为指数退温,即  $T_{k+1} = \lambda T_k$ ,其中  $0 < \lambda < 1$  且其大小可以不断变化。

缘) 内循环终止准则

内循环终止准则,或称  $\Delta E$  抽样稳定准则,用于决定在各温度下产生候选解的数目。在非时齐杂鹑算法理论中,由于在每个温度下只产生一个或少量候选解,所以不存在选择内循环终止准则的问题。而在时齐杂鹑算法理论中,收敛性条件要求在每个温度下产生候选解数目趋于无穷大,以使相应的马氏链达到平稳概率分布,显然在实际应用算法时这是无法实现的。常用的抽样稳定准则包括:① 检验目标函数的均值是否稳定;② 连续若干步的目标值变化较小;③ 按一定的步数抽样。

远) 外循环终止准则

外循环终止准则,即算法终止准则,用于决定算法何时结束。设置温度终值  $T_{min}$  是一种简单的方法。杂鹑算法的收敛性理论中要求  $T \rightarrow 0$ ,这显然是不实际的。通常的做法包括:① 设置终止温度的阈值;② 设置外循环迭代次数;③ 算法搜索到的最优值连续若干步保持不变;④ 检验系统熵是否稳定。

由于算法的一些环节无法在实际设计算法时实现,因此杂鹑算法往往得不到全局最优解,或算法结果存在波动性。许多学者试图给出选择“最佳”杂鹑算法参数的理论依据,但所得结论与实际应用还有一定距离,特别是对连续变量函数的优化问题。目前,杂鹑算法参数的选择仍依赖于一些启发式准则和待求问题的性质。杂鹑算法的通用性很强,算法易于实现,但要真正取得质量和可靠性高、初值鲁棒性好的效果,克服计算时间较长、效率较低的缺点,并适用于规模较大的问题,尚需进行大量的研究工作。

## 5.2 遗传算法

近年来,随着人工智能应用领域的不断扩大,传统的基于符号处理机制的人工智能方法在知识表示、信息处理和解决组合爆炸等方面所遇到的困难越来越明显,从而使得寻求一种适合于大规模问题并具有自组织、自适应、自学习能力的算法成为有关学科的一个研究目标。大自然为我们解决各种问题创造了灵感,遗传算法(简称遗传算法)就是受到自然界生物进化的启发而提出的。遗传算法是基于“适者生存”的一种高度并行、随机和自适应的优化算法,它将问题的求解表示成“染色体”的适者生存过程,通过“染色体”群的一代代不断进化,包括复制、交叉和变异等操作,最终收敛到“最适应环境”的个体,从而求得问题的最优解或满意解。遗传算法是一种通用的优化算法,其编码技术和遗传操作比较简单,优化不受限制性条件的约束,而其两个最显著特点则是隐含并行性和全局解空间搜索。目前,随着计算机技术的发展,遗传算法愈来愈受到人们的重视,并在机器学习、模式识别、图像处理、神经网络、优化控制、组合优化、灾难救援设计、遗传学等领域得到了成功应用。

### 5.2.1 遗传算法的基本流程

#### 1) 标准遗传算法的主要步骤

遗传算法是一类随机优化算法,但它不是简单的随机比较搜索,而是通过对染色体的评价和染色体中基因的作用,有效地利用已有信息来指导搜索有希望改善优化质量的状态。标准遗传算法的主要步骤可描述如下:

(1) 随机产生一组初始个体构成初始种群,并评价每一个体的适应值(即评价函数的值)。

(2) 判断算法收敛准则是否满足。若满足则输出搜索结果,否则执行以下步骤。

(3) 根据适应值大小以一定方式执行复制操作。

(4) 按交叉概率  $p_c$  执行交叉操作。

(5) 按变异概率  $p_m$  执行变异操作。

(6) 返回步骤(1)。

上述算法中,适应值是对染色体(个体)进行评价的一种指标,是遗传算法进行优化所用的主要信息,它与个体的目标值存在一种对应关系;复制操作通常采用比例复制方式,即复制概率正比于个体的适应值,如此意味着适应值高的个体在下一代中复制自身的概率大,从而提高了种群的平均适应值;交叉操作通过交换两父代个体的部分信息构成后代个体,使得后代继承父代的有效模式,从而有助于产生优良个体;变异操作通过随机改变个体中某些基因而产生新个体,有助于增加种群的多样性,避免早熟

收敛。

标准遗传算法的优化框图(流程图)如图 缘-猿所示。

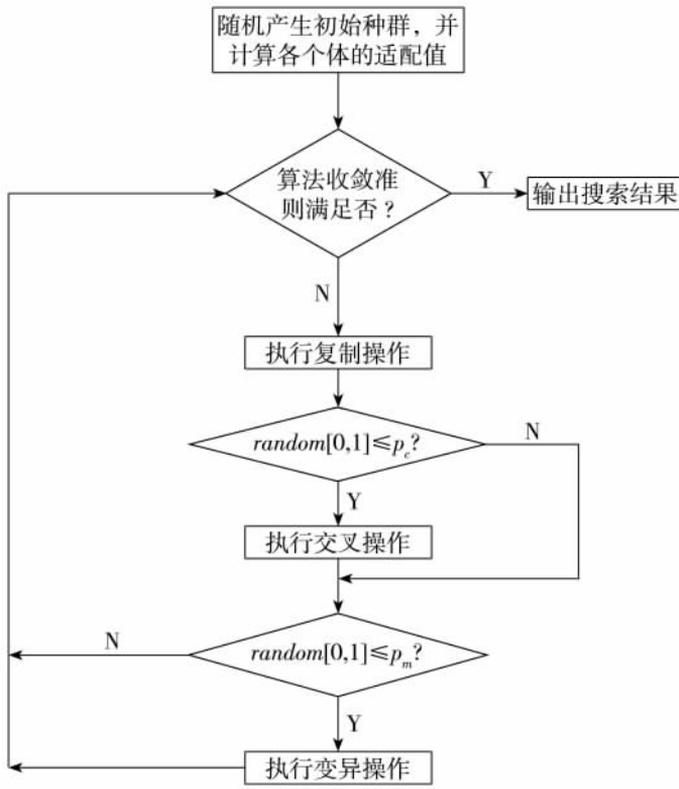


图 缘-猿 标准遗传算法的优化框图

圆) 遗传算法的特点

遗传算法利用生物进化和遗传的思想实现优化过程 区别于传统优化算法 它具有以下特点：

(员) 它将问题参数编码成“染色体”后进行进化操作，而不是针对参数本身，这使得它不受函数约束条件，如连续性、可导性等的限制。

(圆) 它的搜索过程是从问题解的一个集合开始的，而不是从单个个体开始的，具有隐含并行搜索特性，从而大大减小了陷入局部极小的可能。

(猿) 它使用的遗传操作均是随机操作，同时它根据个体的适配值信息进行搜索，无需其他信息，如导数信息等。

(源) 它具有全局搜索能力，最善于搜索复杂问题和非线性问题。

猿) 遗传算法的优越性

遗传算法的优越性主要表现在：

(员) 算法进行全空间并行搜索，并将搜索重点集中于性能高的部分，而且不易陷

入局部极小。

(圆)算法具有固有的并行性,通过对种群的遗传处理可处理大量的模式,并且容易并行实现。

### 缘圆 模式定理和隐含并行性

模式定理和隐含并行性是 匀燥燥 为解释基于二进制编码的标准遗传算法 ( 猿粤 ) 的功效而建立的,是最早对遗传算法全局收敛性作定性分析的理论基础,它说明了适配值高、长度短、阶数低的因式在后代中至少以指数增长包含该因式的个体数。

基于二进制编码的 猿粤 中,个体(或称染色体)是以二进制字符串形式表示的,个体的每一位称为基因,令 载 为长度为 遭 的二进制串的全体。若用 \* 表示通配符,即表示该位置的基因可取 员 或 园,则空间 灾 越 { 园 员, \* } 表示所有模式的集合。譬如 灾 越 缘 时,模式 匀 越 园 \* \* 员 表示集合 { 园 园 园 园 园 园 园 园 园 园 园 园 园 园 园 园 } 称出现在模式中取确定值的位置的数目为模式的阶,记为 燥 匀 ), 如 燥 园 \* \* 员 越 猿 称模式中第一个取确定值的位置与最后一个取确定值的位置之间的距离为模式的对应长度,记为 琢 匀 ), 如 琢 园 \* \* 员 越 源 琢 \* 员 \* \* ) 越 园

设种群数目为 晕,令 载 越 月 为种群状态空间,匀 ∈ 灾 为任一模式,算法中第 贼 代种群为 孕 贼 越 { 孕 贼, 孕 贼, ..., 孕 贼 } ∈ 载,枣 月 为适配值函数,则称 枣 匀 越  $\frac{员}{渣 匀 \cap 孕 贼} \sum_{匀 \in 孕 贼} 枣 匀$  为模式 匀 的平均适配值,其中 渣 匀 \cap 孕 贼 渣 表示 匀 \cap 孕 贼 中元素的个数,即 孕 贼 中含有 匀 中元素的个数,并称 枣 贼 越  $\sum_{匀 \in 孕 贼} 枣 匀$  为 孕 贼 的平均适配值。

模式定理:设 猿粤 采用比例选择策略,交叉概率和变异概率分别为 毒 和 毒,且 毒 取值较小,模式 匀 的定义长度为 琢 匀 ), 阶为 燥 匀 ), 第 贼 代种群 孕 贼 含有 匀 中元素个数的期望为 耗 渣 匀 \cap 孕 贼 孕 贼 ) 渣。则以下不等式成立

$$耗 渣 匀 \cap 孕 贼 孕 贼 ) 渣 \geq 渣 匀 \cap 孕 贼 渣 \frac{枣 匀 贼}{枣 贼} \left[ 员 原 毒 \frac{琢 匀 )}{燥 匀 )} 原 燥 匀 ) 毒 \right] \quad (缘-猿)$$

证明:由于 猿粤 按适配值采用比例选择策略,则 匀 \cap 孕 贼 中元素得以选择的期望值为

$$\sum_{匀 \in 孕 贼} \frac{枣 匀}{枣} \geq 渣 匀 \cap 孕 贼 渣 \frac{枣 匀 贼}{枣 贼} \quad (缘-肆)$$

由于交叉操作是随机选取 员 到 造 原 员 的某一位置并交换两父代对应的子串,则属于模式 匀 的个体经交叉后仍属于 匀 概率不小于  $\frac{员 原 毒}{燥 匀 )}$  而每个个体经变异操作后未被破坏的概率为 ( 员 原 毒 ) 燥 匀 )。此外,孕 贼 不属于 匀 的个体也有可能经交叉、变异

后属于  $\omega$  因此  $\sum_{i \in \omega} P_i$  中属于  $\omega$  的个体数目的期望值不小于

$$P(\omega) \cap \sum_{i \in \omega} P_i \approx \left[ \sum_{i \in \omega} P_i \right] \left( \sum_{i \in \omega} P_i \right)^{\alpha} \quad (\text{缘-圆})$$

通常  $\sum_{i \in \omega} P_i$  取值很小,则

$$\left[ \sum_{i \in \omega} P_i \right] \left( \sum_{i \in \omega} P_i \right)^{\alpha} \approx \left[ \sum_{i \in \omega} P_i \right] \left( \sum_{i \in \omega} P_i \right) \geq \sum_{i \in \omega} P_i \quad (\text{缘-圆})$$

从而 模式定理得证。

推论:在  $\sum_{i \in \omega} P_i$  中,阶次低、定义长度短且适配值起过平均适配值的模式在种群中的数目的期望值以指数级递增。

尽管模式定理在一定意义上解释了  $\sum_{i \in \omega} P_i$  的有效性,但它还存在以下缺点:

- (员) 模式定理仅适用于基于二进制编码的  $\sum_{i \in \omega} P_i$ ,对其他编码方式此定理未必成立;
- (圆) 模式定理仅提供一个期望值的下界,仍未能说明算法的收敛性;
- (猿) 模式定理对算法参数的选取不能够提供实用的指导,对算法操作也有依赖性。

隐含并行性定理:设  $\epsilon$  为一小正数,造  $\epsilon$  (造原) 垣  $\sum_{i \in \omega} P_i$  则  $\sum_{i \in \omega} P_i$  一次处理的存活概率不小于  $\sum_{i \in \omega} P_i$  且定义长度不大于  $\sum_{i \in \omega} P_i$  的模式数为  $\sum_{i \in \omega} P_i$ 。

此定理说明  $\sum_{i \in \omega} P_i$  表面上每代仅对  $\sum_{i \in \omega} P_i$  个个体作处理,但实际上并行处理了大约  $\sum_{i \in \omega} P_i$  个模式,并且无需额外的存储,这正是遗传算法具有高效搜索能力的所在,即隐含并行性。

由于模式定理和隐含并行性定理无助于严格解释算法的收敛性,下面我们将利用马氏链描述遗传算法,并探讨其收敛性。

### 缘圆 遗传算法关键参数与操作的设计

员)遗传算法关键参数的设计步骤

- (员) 确定问题的编码方案;
- (圆) 确定适配值函数;
- (猿) 遗传算子的设计;
- (源) 算法参数的选取;
- (缘) 确定算法的终止条件。

圆)遗传算法关键参数设计与操作

(员) 编码

编码就是将问题的解用一种码来表示,从而将问题的状态空间与  $\sum_{i \in \omega} P_i$  的码空间相对应,这很大程度上依赖于问题的性质,并将影响遗传操作的设计。由于  $\sum_{i \in \omega} P_i$  的优化过程不是直接作用于问题参数本身,而是在一定编码机制对应的编码空间上进行,因此

编码的选择是影响算法性能与效率的重要因素。

函数优化中,不同的码长和码制,对问题求解的精度与效率有很大影响。二进制编码将问题的解用一个二进制串来表示,十进制编码将问题的解用一个十进制串来表示。显然,码长将影响算法的精度,而且遗传算法将付出较大的存储量。实数编码将问题的解用一个实数来表示,解决了编码对算法精度和存储量的影响,也便于优化中引入问题的相关信息,它在高维复杂优化问题中得到了广泛应用。

组合优化中,由于问题本身的性质,编码方式需要特殊设计,如旅行商问题中基于置换排列的路径编码、0-1矩阵编码等。

#### (圆) 适配值函数

适配值函数用于对个体进行评价,也是优化过程发展的依据。在简单问题的优化时,通常可以直接利用目标函数变换成适配值函数,譬如将个体*载*的适配值*枣载*定义为*酝原糟载*或*藻<sup>糟</sup>*,其中*酝*为一足够大正数,*糟载*为个体的目标值。莽跃园在复杂问题优化时,往往需要构造合适的评价函数,使其适应*圆*进行优化。

#### (猿) 算法参数

种群数目是影响算法优化性能和效率的因素之一。通常,种群太小则不能提供足够的采样点,以致算法性能很差,甚至得不到问题的可行解;种群太大时尽管可增加优化信息以阻止早熟收敛的发生,但无疑会增加计算量,从而使收敛时间太长。当然,在优化过程中小种群数目是允许变化的。

交叉概率用于控制交叉操作的频率。概率太大时,种群中串的更新很快,进而会使高适配值的个体很快被破坏掉;概率太小时,交叉操作很少进行,从而会使搜索停滞不前。

变异概率是加大种群多样性的重要因素。基于二进制编码的*圆*中,通常一个较低的变异串足以防止整个群体中任一位置的基因一直保持不变。但是,概率太小则不会产生新个体,概率太大则使*圆*成为随机搜索。

由此可见,确定最优参数是一个极其复杂的优化问题,要从理论上严格解决这个问题是十分困难的,它依赖于*圆*本身理论研究的进展。圆(猿)曾将*圆*的参数选取作为一个优化问题,提出用*圆*优化*圆*参数的二级数值方法。尽管此方法适用范围较广,但工作量较大,且二级算法本身的参数也有待优化,因此很少得到实际应用。

#### (源) 遗传算子

“优胜劣汰”是设计*圆*的基本思想,它应在选择、交叉、变异等遗传算子中得以体现,并考虑到对算法效率与性能的影响。

复制操作是为了避免有效基因的损失,使高性能的个体得以更大的概率生存,从而提高全局收敛性和计算效率。最常用的方法是比例复制和基于排名的复制,前者以正比于个体适配值的概率来选择相应的个体,后者则基于个体在种群中的排名来选择相应的个体。至于种群的替换,采纳的方案可以是部分个体的替换,也可以是整个

群体的转换。

交叉操作用于组合出新的个体,在解空间中进行有效搜索,同时降低对有效模式的破坏概率。二进制编码中,单点交叉随机确定一个交叉位置,然后对换相应的子串;多点交叉随机确定多个交叉位置,然后对换相应的子串。譬如,父串为{(101010101), (101010101)},若单点交叉位置为源,则后代为{(101010101), (101010101)};若多点交叉位置为圆缘,则后代为{(101010101), (101010101)}。十进制编码也类似。实数编码则可采用算术交叉,即 $z_{ij} = \alpha z_{ij} + (1-\alpha)z_{ij}$ ,其中 $\alpha \in (0,1)$ , $z_{ij}$ 为父代个体, $z_{ij}$ 为后代个体。组合优化中,交叉操作有部分映射交叉、次序交叉、循环交叉等。

当交叉操作产生的后代适配值不再进化且没有达到最优时,就意味着算法的早熟收敛。这种现象的根源在于有效基因的缺陷,变异操作一定程度上克服了这种情况,有利于增加种群的多样性。二进制或十进制编码中通常采用替换式变异,即用另一种基因替换某位置原先的基因;实数编码中通常采用扰动式变异,即对原先个体附加一定机制的扰动来实现变异。组合优化问题中通常采用变换式、逆序式、插入式变异,这在介绍杂时已有说明。

#### (缘) 算法的终止条件

收敛理论说明了收敛以概率1收敛的极限性质。因此,我们要追寻的是提高算法的收敛速度,这与算法操作设计和参数选取有关。然而,实际应用收敛时是不允许让它无停止地发展下去的,而且通常问题的最优解也未必知道,因此需要有一定的条件来终止算法的进程。最常用的终止条件就是事先给定一个最大进化次数,或者是判断最佳优化值是否连续若干步没有明显变化等。

应该认识到,收敛不是一个简单的系统,而是一种复杂的非线性智能计算模型,纯粹用数学方法来预测其运算结果是很难的,而且这方面的工作也远远不够。目前,为兼顾收敛的优化质量与效率,实际应用收敛时许多环节一般还只是凭经验解决,这方面有待更深入的研究与发展。

## 5.3 禁忌搜索算法

### 缘 禁忌搜索的概念

局部邻域搜索是基于贪婪思想持续地在当前解的邻域中进行搜索,虽然算法通用易实现,且容易理解,但其搜索性能完全依赖于邻域结构和初始解,尤其容易陷入局部极小而无法保证全局优化性。针对局部邻域搜索,为了实现全局优化,可尝试的途径有:以可控性概率接受劣解来逃逸局部极小,如模拟退火算法;扩大邻域搜索结

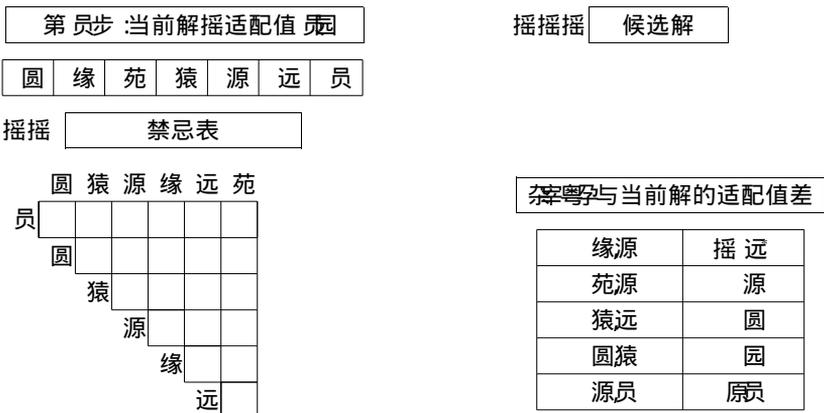
构,如圆的邻域扩展到猿苑多点并行搜索,如进化计算、变结构邻域搜索。另外,就是采用圆的禁忌策略尽量避免迂回搜索,它是一种确定性的局部极小突跳策略。

禁忌搜索是人工智能的一种体现,是局部邻域搜索的一种扩展。禁忌搜索最重要的思想是标记对应已搜索到的局部最优解的一些对象,并在进一步的迭代搜索中尽量避开这些对象(而不是绝对禁止循环),从而保证对不同的有效搜索途径的探索。禁忌搜索涉及到邻域(圆的邻域)、禁忌表(圆的邻域)、禁忌长度(圆的邻域)、候选解(圆的邻域)、藐视准则(圆的邻域)等概念,我们首先由一个示例来理解禁忌搜索及其各重要概念,而后给出算法的一般流程。

### 图 5-1 禁忌搜索示例

组合优化是圆算法应用得最多的领域。置换问题,如猿调度问题等,是一大批组合优化问题的典型代表,在此可用它来解释简单的禁忌搜索算法的思想和操作。对于猿元素的置换问题,其所有排列状态数为猿,当猿较大时搜索空间的大小将是天文数字,而禁忌搜索则希望仅通过探索少数解来得到满意的优化解。

首先,我们对置换问题定义一种邻域搜索结构,如互换操作(猿猿),即随机交换两个点的位置,则每个状态的邻域解有猿个。称从一个状态转移到其邻域中的另一个状态为一次移动(猿猿)。显然,每次移动将导致适配值(反比于目标函数值)的变化。其次,我们采用一个存储结构来区分移动的属性,即是否为禁忌“对象”。在以下示例中,考虑猿元素的置换问题,并用每一状态的相应猿个邻域解中最优的猿次移动(对应最佳的猿个适配值)作为候选解;为一定程度上防止迂回搜索,每个被采纳的移动在禁忌表中将滞留猿步(即禁忌长度),此次移动在以下连续猿步搜索中将被视为禁忌对象,需要指出的是,由于当前的禁忌对象对应状态的适配值可能很好,因此在算法中设置判断,若禁忌对象对应的适配值优于“猿猿”状态,则无视其禁忌属性而仍采纳其为当前选择,也就是通常所说的藐视准则(或称特赦准则)。





第源步:当前解摇适配值 猿

源	圆	苑	员	缘	远	猿
---	---	---	---	---	---	---

摇摇 禁忌表

摇摇摇 候选解

	圆	猿	源	缘	远	苑
员	圆					
	圆	猿				
		猿				
			源	员		
				缘		
					远	

猿猿猿与当前解的适配值差

源缘	猿远猿
缘猿	圆
苑员	园
员猿	源猿
圆远	源远

对于第源步,当前解为(源猿猿猿),其适配值为猿(源猿)(猿猿)在禁忌表中的值相应减少,而(圆源)对应的值为猿。此时,当前解的缘个最佳候选解中,虽然互换(源猿)是禁忌对象,但由于它导致的适配值为圆,优于“遭源猿猿”状态,因此算法仍选择它为下一个当前状态,即(猿源猿猿),并重新置(源猿)在禁忌表中的值为猿。这就是藐视准则为防止遗失最优解的作用。进而,搜索过程转入第缘步,并按相同的机理持续到算法终止条件成立。

第缘步:当前解摇适配值 猿

缘	圆	苑	员	源	远	猿
---	---	---	---	---	---	---

摇摇 禁忌表

摇摇摇 候选解

	圆	猿	源	缘	远	苑
员	员					
	圆	圆				
		猿				
			源	猿		
				缘		
					远	

猿猿猿与当前解的适配值差

苑员	猿园
源猿	源猿
远猿	源缘
缘源	源猿
圆远	源愿

可见,简单的禁忌搜索是在邻域搜索的基础上,通过设置禁忌表来禁忌一些已经历的操作,并利用藐视准则来奖励一些优良状态,其中邻域结构、候选解、禁忌长度、禁忌对象、藐视准则、终止准则等是影响禁忌搜索算法性能的关键。需要指出的是:

(员)由于猿是局部邻域搜索的一种扩充,因此邻域结构的设计很关键,它决定了当前解的邻域解的产生形式和数目,以及各个解之间的联系。

(圆)出于改善算法的优化时间性能的考虑,若邻域结构决定了大量的邻域解(尤其对大规模问题,如猿的猿猿操作将产生某个邻域解),则可以仅尝试部分互换的结果,而候选解也仅取其中的少量最佳状态。

(猿)禁忌长度是一个很重要的关键参数,它决定禁忌对象的任期,其大小直接影

响整个算法的搜索进程和行为。同时,以上示例中,禁忌表中禁忌对象的替换是采用  
圆猿的方式(不考虑藐视准则的作用),当然也可以采用其他方式,甚至是动态自适应  
的方式。

(源)藐视准则的设置是算法避免遗失优良状态,激励对优良状态的局部搜索,进  
而实现全局优化的关键步骤。

(缘)对于非禁忌候选状态,算法无视它与当前状态的适配值的优劣关系,仅考虑  
它们中间的最佳状态为下一步决策,如此可实现对局部极小的突跳(是一种确定性  
策略)。

(远)为了使算法具有优良的优化性能和时间性能,必须设置一个合理的终止准  
则来结束整个搜索过程。

此外,在许多场合禁忌对象的被禁次数(猿猿猿猿猿)也被用于指导搜索,以取得  
更大的搜索空间。禁忌次数越高,通常可认为出现循环搜索的概率越大。譬如:

第 噪步:当前解摇适配值 猿						摇摇摇	候选解
----------------	--	--	--	--	--	-----	-----

员	猿	远	圆	苑	缘	源
---	---	---	---	---	---	---

摇摇	禁忌表					
----	-----	--	--	--	--	--

	员	圆	猿	源	缘	远	苑
员	■					猿	
圆		■					
猿	猿		■				圆
源	员	缘		■		猿	员
缘		源		源	■		
远			员	圆	圆	■	
苑				猿	员		■

猿猿猿与当前解的适配值差		
员源	猿猿	猿猿
圆源	猿猿	猿远
猿苑	猿猿	猿猿
员远	猿缘	猿缘
远缘	猿源	猿远

上述禁忌表左下角矩阵中各元素表示禁忌对象到当前的搜索步数的被禁次数,而  
右上角矩阵中各元素表示当前禁忌对象的任期,即禁忌表中坐标(源猿)(远猿)(苑源)  
处为当前最近的猿次禁忌对象,分别为猿次、猿次、猿次。考虑到被禁次数,可以用惩  
罚值替代与当前解的适配值差来做决策,从而驱动搜索分散到其他区域。譬如,对每  
一性能无改进的非禁忌的猿猿操作,设置其惩罚值为它对应的搜索状态与当前状  
态的适配值的差减去其被禁次数。那么,对于第 噪步搜索,首先(猿源)是禁忌对象且  
不满足藐视准则,因此不被采纳为下一步决策;其次,虽然(圆源)对应的状态与当前状  
态的差在非禁忌状态中是最好的,但它已被禁忌缘次,因此将其惩罚值设置为猿远;  
(猿苑)是非禁忌对象,其惩罚值为猿猿,这在所有候选解中是最好的,因此取其为下一  
步决策,也即新的当前解将是(猿远猿源)。显然,这种操作的目的是避免搜索过分集  
中在某些操作上,即避免搜索很大程度上集中在某区域内。

## 5.2.2 禁忌搜索算法流程

通过上述示例的介绍,基本上了解了禁忌搜索的机制和步骤。简单禁忌搜索算法的基本思想是:给定一个当前解(初始解)和一种邻域,然后在当前解的邻域中确定若干候选解,若最佳候选解对应的目标值优于“当前解”状态,则忽视其禁忌特性,用其替代当前解和“当前解”状态,并将相应的对象加入禁忌表,同时修改禁忌表中各对象的任期;若不存在上述候选解,则选择候选解中非禁忌的最佳状态为新的当前解,而无视它与当前解的优劣,同时将相应的对象加入禁忌表,并修改禁忌表中各对象的任期。如此重复上述迭代搜索过程,直至满足停止准则。

将上述阐述进行条理化,则简单禁忌搜索的算法步骤可描述如下:

(员)给定算法参数,随机产生初始解,置禁忌表为空。

(圆)判断算法终止条件是否满足?若是,则结束算法并输出优化结果,否则继续以下步骤。

(猿)利用当前解的邻域函数产生其所有(或若干)邻域解,并从中确定若干候选解。

(源)对候选解判断藐视准则是否满足?若成立,则用满足藐视准则的最佳状态替代当前解,即成为新的当前解,并用与对应的禁忌对象替换最早进入禁忌表的禁忌对象,同时用该最佳状态替换“当前解”状态,然后转步骤(远);否则,继续以下步骤。

(缘)判断候选解对应的各对象的禁忌属性,选择候选解集中非禁忌对象对应的最佳状态为新的当前解,同时用与之对应的禁忌对象替换最早进入禁忌表的禁忌对象元素。

(远)转步骤(圆)。

上述算法可用流程框图更直观地加以描述,如图 5-2 所示。

由此可以明显地看到,邻域函数、禁忌对象、禁忌表和藐视准则,构成了禁忌搜索算法的关键。其中,邻域函数沿用局部邻域搜索的思想,用于实现邻域搜索;禁忌表和禁忌对象的设置,体现了算法避免迂回搜索的特点。藐视准则则是对优良状态的奖励,它是对禁忌策略的一种放松。需要指出的是,上述算法仅是一种简单的禁忌搜索框架,对各关键环节复杂和多样化的设计原则可构造出各种禁忌搜索算法。同时,算法流程中的禁忌对象可以是搜索状态,也可以是特定搜索操作,甚至是搜索目标值等。

同时,与传统的优化算法相比,禁忌搜索算法的主要特点是:

(员)在搜索过程中可以接受劣解,因此具有较强的“爬山”能力。

(圆)新解不是在当前解的邻域中随机产生,而或是优于“当前解”的解,或是非禁忌的最佳解,因此选取优良解的概率远远大于其他解。

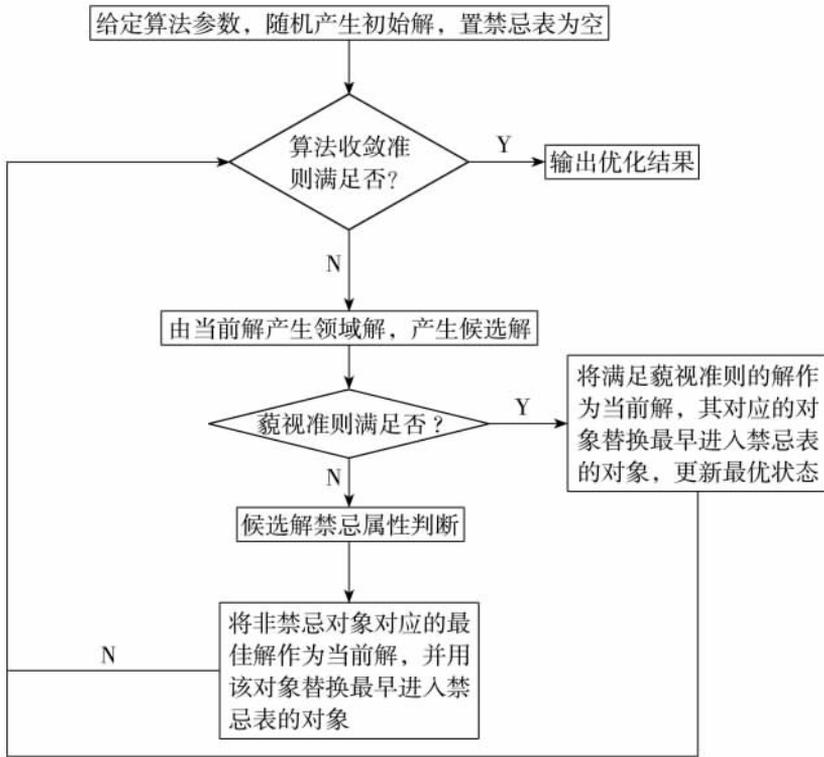


图 缘-源 简单禁忌搜索算法的流程框图

由于禁忌算法具有灵活的记忆功能和藐视准则，并且在搜索过程中可以接受劣解，所以具有较强的“爬山”能力，搜索时能够跳出局部最优解，转向解空间的其他区域，从而增强获得更好的全局最优解的概率。所以，禁忌算法是一种局部搜索能力很强的全局迭代寻优算法。但是，禁忌也有明显的不足，即：①对初始解有较强的依赖性，好的初始解可使禁忌在解空间中搜索到好的解，而较差的初始解则会降低禁忌的收敛速度；②迭代搜索过程是串行的，仅是单一状态的移动，而非并行搜索。为了进一步改善禁忌搜索的性能，一方面可以对禁忌搜索算法本身的操作和参数选取进行改进，另一方面则可以与模拟退火、遗传算法、神经网络以及基于问题信息的局部搜索结合使用。

## 缘 德 源 禁忌搜索的收敛性

迄今为止，禁忌搜索算法在许多领域得到了成功应用。尽管许多文献通过仿真研究来探讨参数和操作对算法性能的影响，但其理论研究还远不完善，尤其是对收敛性、收敛度、收敛速度等的研究。

这里我们针对如下一类问题介绍禁忌搜索算法的收敛性

(孕) 设  $S$  为有限集,  $f: S \rightarrow \mathbb{R}$  为实值函数,  $S$  为有限状态集 (即搜索状态空间) 为搜索状态。

出于图论的观点, 有限状态优化问题的禁忌搜索可用图  $G=(V, E)$  表示, 其中  $V$  为邻域结构,  $V$  为所有状态构成的顶点集,  $E=\{e_{ij} \mid i, j \in V, e_{ij} \in E\}$  为相应的边集。令  $k$  为算法迭代步数,  $S_k$  为算法至第  $k$  步迭代所搜索到的所有解的集合, 下面来讨论如下一类禁忌算法的收敛性。

(员) 随机产生初始解  $s_0 \in S$ , 令  $k=0$ , 当前解。

(圆) 若  $S_k$  的所有邻域解已被测试过 (即  $S_{k+1} \subseteq S_k$ ), 则选取最早被测试的解  $s_{k+1}$  即  $s_{k+1} = \arg \min_{s \in S_{k+1}} f(s)$ , 更新  $S_k$  的测试时刻, 令  $S_{k+1} = S_k \cup \{s_{k+1}\}$ 。

(猿) 若第 (圆) 步不成立, 则按一定准则选取未测试解  $s_{k+1} \in (S_{k+1})^c$ , 令  $S_{k+1} = S_k \cup \{s_{k+1}\}$ 。

(源) 若算法终止准则满足, 则结束搜索并输出结果; 否则, 令  $k=k+1$ , 并转步骤 (圆)。

上述算法中的第 (圆)、(猿) 步可认为是禁忌搜索的抽象描述。另外, 从图论的观点来看, 当循环不可避免时选择过去最早测试的解, 也即选择构成最大循环长度的顶点, 其中长度定义为一个顶点通过邻域到达另一个顶点的最少转移步数。同时, 在此规定算法终止条件为所有状态被测试, 即  $S_k = S$ 。

熟知, 对邻域搜索算法, 邻域结构的设计是影响算法质量和效率的关键因素。为了证明算法的收敛性, 我们首先对邻域结构作如下假设:

(员) 邻域结构是对称的,  $\forall s, t \in S, s \in N(t) \Leftrightarrow t \in N(s)$ ;

(圆) 图  $G$  是强连通的, 即对任意  $s, t \in S$ , 一定存在一条由  $s$  到  $t$  的路径。

需要指出的是, 上述两条件并不过强, 组合优化问题的许多邻域结构均满足这些条件, 我们在讨论模拟退火算法收敛性时也曾涉及到这些条件。

引理 1 原序列  $\{s_k\}_{k=0}^{\infty}$  非降, 且收敛到极限  $s^*$ 。

证明: 由  $\{s_k\}_{k=0}^{\infty}$  的构造途径知,  $s_{k+1} \subseteq s_k$ , 因此  $\{s_k\}_{k=0}^{\infty}$  是非降的。同时, 由于搜索空间为有限集, 因此  $\{s_k\}_{k=0}^{\infty}$  必然收敛到某一极限  $s^*$ 。

引理 2 若邻域结构满足上述两个假设, 即对称性和连通性, 同时存在迭代步数  $k$  使得对所有  $s \in S_k$  成立, 则  $s_{k+1} = s^*$ , 即算法收敛。

证明: 采用反证法。设  $s_{k+1} \neq s^*$ , 则由图的连通性知, 至少存在一条路径将  $s_{k+1}$  中的一个解 (记为  $s_{k+1}$ ) 与  $S_k$  中的一个解 (记为  $s_k$ ) 连通。令  $s_{k+1}$  到  $s_k$  的路径为  $s_{k+1} = s_{k+1}^{(1)}, s_{k+1}^{(2)}, \dots, s_{k+1}^{(l)} = s_k$ , 其中  $s_{k+1}^{(i)} \in N(s_{k+1}^{(i-1)})$ ,  $i=2, \dots, l$ 。考虑路径  $s_{k+1} = s_{k+1}^{(1)}, s_{k+1}^{(2)}, \dots, s_{k+1}^{(l)} = s_k$  中的第一个解  $s_{k+1}^{(1)}$ , 使得  $s_{k+1}^{(1)} \in S_{k+1}$ ,  $s_{k+1}^{(1)} \in N(s_{k+1}^{(2)})$  且  $s_{k+1}^{(1)} \in N(s_{k+1}^{(2)})$ 。由邻域结构的对称性知,  $s_{k+1}^{(2)} \in N(s_{k+1}^{(1)})$ 。但是, 既然  $s_{k+1}^{(2)} \in S_k$ , 则  $s_{k+1}^{(2)} \in S_k$ , 进而  $s_{k+1}^{(1)} \in S_k$ 。显然有矛盾产生, 因此引理成立。

下面, 证明极限集  $S^*$  满足对所有  $s \in S, N(s) \subseteq S^*$ 。首先将  $S^*$  分为两个不重叠

的子集  $\mathcal{S}$  和  $\mathcal{M}$ ,  $\mathcal{S} \cup \mathcal{M} = \mathcal{N}$ ,  $\mathcal{S} \cap \mathcal{M} = \emptyset$ . 若不存在  $\mathcal{S}$  使得对所有  $\mathcal{M} \subseteq \mathcal{N}$  则令  $\mathcal{S} = \emptyset$ . 对于一个大运算法将足够执行步骤  $n$  来产生解, 因此  $\mathcal{S}$  意义明确。

引理 1.1:  $\{\mathcal{S}_k\}$  和  $\{\mathcal{M}_k\}$  是单调的, 并且分别收敛到  $\mathcal{S}^*$  和  $\mathcal{M}^*$ , 其中  $\mathcal{S}^*$  和  $\mathcal{M}^*$  构成集合  $\mathcal{N}$  的一个分解。

证明: 首先, 由集合的构造知, 对所有  $k, \mathcal{S}_k \subseteq \mathcal{S}_{k+1}, \mathcal{M}_k \supseteq \mathcal{M}_{k+1}$ . 因此  $\{\mathcal{S}_k\}$  是非增序列, 而  $\{\mathcal{M}_k\}$  是非降序列。同时, 由于  $\{\mathcal{S}_k\}$  和  $\{\mathcal{M}_k\}$  的上界分别为空集和  $\mathcal{N}$ , 因此两集合分别将收敛到两个极限集, 且构成  $\mathcal{N}$  的一种分区。

## 缘 缘 缘 禁忌搜索算法最基本的操作环节和参数的设计原则与方法

1. 禁忌搜索算法的操作环节

- (1) 初始解和适配值函数;
- (2) 邻域结构和禁忌对象;
- (3) 候选解选择;
- (4) 禁忌表及其长度;
- (5) 藐视准则;
- (6) 集中搜索和分散搜索策略;
- (7) 终止准则。

2. 禁忌搜索算法参数的设计原则和方法

(1) 适配值函数

类似于遗传算法、禁忌搜索的适配值函数也是用于对搜索状态的评价, 进而结合禁忌准则和藐视准则来选取新的当前状态。显然, 目标函数直接作为适配值函数是比较容易理解的做法。当然, 目标函数的任何变形都可作为适配值函数, 譬如对极小化问题可将状态  $\mathcal{S}$  的适配值函数  $f(\mathcal{S})$  定义为  $\alpha + f(\mathcal{S})$  或  $\frac{1}{\alpha + f(\mathcal{S})}$ , 其中  $\alpha$  为一足够大正数,  $f(\mathcal{S})$  为目标值,  $\mathcal{S}$  为当前状态。

若目标函数的计算比较困难或耗时较多, 如一些复杂工业过程的目标函数值需要一次仿真才能获得, 此时可采用反映问题目标的某些特征值来作为适配值, 进而改善算法的时间性能。当然, 选取何种特征值要视具体问题而定, 必须保证特征值的最佳性与目标函数的最优性一致。

(2) 禁忌对象

所谓禁忌对象就是被置入禁忌表中的那些变化元素, 而禁忌的目的则是为了尽量避免迂回搜索而多探索一些有效的搜索途径。归纳而言, 禁忌对象通常可选取状态本身或状态分量或适配值的变化等。

① 以状态本身或其变化作为禁忌对象是最为简单、最容易理解的途径。具体而

言,当状态由 曾变化到状态 赠时,将状态 赠或 枣→赠的变化)视为禁忌对象,从而在一定条件下禁止了 赠或 曾→赠的变化)的再度出现。

例如,五城市 栽孕问题,设禁忌长度为 猿以 奈宰粤孕为邻域操作(解的起点固定为 员),规定 曾∈ 彙 曾,候选解选当前邻域解集中的最佳 源个解。问题的距离矩阵如下

$$\begin{matrix}
 & \begin{matrix} \text{园} & \text{愿} & \text{缘} & \text{远} & \text{圆} \end{matrix} \\
 \begin{matrix} \text{( 曾) 越} \\ \text{员} \end{matrix} & \begin{bmatrix} \text{园} & \text{愿} & \text{缘} & \text{远} & \text{圆} \\ \text{愿} & \text{园} & \text{愿} & \text{员} & \text{怨} \\ \text{缘} & \text{愿} & \text{园} & \text{圆} & \text{员} \\ \text{远} & \text{员} & \text{圆} & \text{园} & \text{缘} \\ \text{圆} & \text{怨} & \text{缘} & \text{缘} & \text{园} \end{bmatrix}
 \end{matrix}$$

第 步:当前状态为( 员 缘 缘 缘),其中 缘为目标值。此时,禁忌表 匀 越 员,候选解集为{( 员 缘 缘 缘),( 员 缘 缘 缘),( 员 缘 缘 缘),( 员 缘 缘 缘)},则选取( 员 缘 缘 缘)为新的当前解,并令 匀 越{( 员 缘 缘 缘),( 员 缘 缘 缘)}。

第 步:当前解为( 员 缘 缘 缘),匀 越{( 员 缘 缘 缘)},候选解集为{( 员 缘 缘 缘),( 员 缘 缘 缘),( 员 缘 缘 缘),( 员 缘 缘 缘)},则选取( 员 缘 缘 缘)为新的当前解,并令 匀 越{( 员 缘 缘 缘),( 员 缘 缘 缘)}。

第 步:当前解为( 员 缘 缘 缘),匀 越{( 员 缘 缘 缘),( 员 缘 缘 缘)},候选解集为{( 员 缘 缘 缘),( 员 缘 缘 缘),( 员 缘 缘 缘),( 员 缘 缘 缘)},则选取( 员 缘 缘 缘)为新的当前解,并令 匀 越{( 员 缘 缘 缘),( 员 缘 缘 缘),( 员 缘 缘 缘)}。

第 步:当前解为( 员 缘 缘 缘),匀 越{( 员 缘 缘 缘),( 员 缘 缘 缘),( 员 缘 缘 缘),( 员 缘 缘 缘)},候选解集为{( 员 缘 缘 缘),( 员 缘 缘 缘),( 员 缘 缘 缘),( 员 缘 缘 缘)},则选取( 员 缘 缘 缘)为新的当前解,并令 匀 越{( 员 缘 缘 缘),( 员 缘 缘 缘),( 员 缘 缘 缘)}。

第 步:当前解为( 员 缘 缘 缘),匀 越{( 员 缘 缘 缘),( 员 缘 缘 缘),( 员 缘 缘 缘)},候选解集为{( 员 缘 缘 缘),( 员 缘 缘 缘),( 员 缘 缘 缘),( 员 缘 缘 缘)},则选取( 员 缘 缘 缘)为新的当前解。

② 状态的变化包含了多个状态分量的变化,因此以状态分量的变化为禁忌对象将扩大禁忌的范围,并可减少相应的计算量。譬如,对置换问题,奈宰粤孕操作引起的两点互换意味着状态分量的变化,这就可作为禁忌对象;对高级函数优化问题,则可将某一维分量本身或其变化作为禁忌对象。对于上述例子:

第 步:当前状态为( 员 缘 缘 缘),匀 越 员,候选解集为{( 员 缘 缘 缘),( 员 缘 缘 缘),( 员 缘 缘 缘),( 员 缘 缘 缘)},则选取( 员 缘 缘 缘)为新的当前解,并令 匀 越{( 员 缘 缘 缘),( 员 缘 缘 缘)}。

第 步:当前解为( 员 缘 缘 缘),匀 越{( 员 缘 缘 缘)},候选解集为{( 员 缘 缘 缘),( 员 缘 缘 缘),( 员 缘 缘 缘),( 员 缘 缘 缘)},则选取( 员 缘 缘 缘)为新的当前解,并令 匀 越{( 员 缘 缘 缘),( 员 缘 缘 缘)}。

第 步:当前解为( 员 缘 缘 缘),匀 越{( 员 缘 缘 缘),( 员 缘 缘 缘)},候选解集为{( 员 缘 缘 缘),( 员 缘 缘 缘),( 员 缘 缘 缘),( 员 缘 缘 缘)},这时候候选解集中有多个状态被禁忌,因此选

取(猿,猿)为新的当前解,并令 $\mu$ 越{(猿),(猿),(猿)}。

当然,状态分量变化的方向也是可以同时考虑的,即视猿→猿和猿→猿为不同。

③类似等高线的原理,以适配值或其变化为禁忌对象则将处于同一适配值的状态视为相同状态,这在函数优化中经常采用。由于一个值的变化隐含着多个状态的变化,因此这种情况下的禁忌范围相对于状态的变化将有所扩大。对于上述例子:

第1步:当前状态为(猿,猿), $\mu$ 越{猿},候选解集为{(猿,猿),(猿,猿),(猿,猿),(猿,猿)},则选取(猿,猿)为新的当前解,并令 $\mu$ 越{猿}。

第2步:当前解为(猿,猿), $\mu$ 越{猿},候选解集为{(猿,猿),(猿,猿),(猿,猿),(猿,猿)},则选取(猿,猿)为新的当前解,并令 $\mu$ 越{猿,猿}。

第3步:当前解为(猿,猿), $\mu$ 越{猿,猿},候选解集为{(猿,猿),(猿,猿),(猿,猿),(猿,猿)},这时候候选解集中有多个状态被禁忌。

可见,以状态本身为禁忌对象比以状态分量或适配值为禁忌对象的禁忌范围要小,从而给予的搜索范围要大,容易造成计算时间的增加。然而,在禁忌长度和候选解集大小相同且较小的情况下,后两者也会因禁忌范围过大而使搜索陷入局部极小。

#### (猿)禁忌长度和候选解

禁忌长度和候选解集的大小是影响算法性能的两个关键参数。所谓禁忌长度,即禁忌对象在不考虑藐视准则情况下不允许被选取的最大次数(通俗些,可视为对象在禁忌表中的任期),对象只有当其任期为园时才被解禁。候选解集则通常是当前状态的邻域解集的一个子集。在算法的构造和计算过程中,一方面要求计算量和存储量尽量少,这就要求禁忌长度和候选解集的尽量小。但是,禁忌长度过短将造成搜索的循环,候选解集过小将容易造成早熟收敛,即陷入局部极小。

禁忌长度的选取与问题特性、研究者的经验有关,它决定了算法的计算复杂性。

一方面,禁忌长度可以是定常不变的,如将禁忌长度固定为某个数(譬如贼越猿等),或者固定为与问题规模相关的一个量(譬如贼越/灶,灶为问题维数或规模),如此实现很方便、简单。

另一方面,禁忌长度也可以是动态变化的,如算法搜索性能和问题特性设定禁忌长度的变化区间[贼,贼],譬如[猿,灶],[猿,灶]等,而禁忌长度则可按某种原则或公式在其区间内变化。当然,禁忌长度的区间大小也可随搜索性能的变化而动态变化。

一般而言,当算法的性能动态下降较大时,说明算法当前的搜索能力比较强,也可能当前解附近极小解形成的“波谷”较深,从而可设置较大的禁忌长度来延续当前的搜索行为,并避免陷入局部极小。大量研究表明,禁忌长度的动态设置方式比静态方式具有更好的性能和鲁棒性,而更为合理高效的设置方式还有待进一步研究。

候选解通常在当前状态的邻域中择优选取,但选取过多将造成较大的计算量,而选取过少则容易造成早熟收敛。然而,要做到整个邻域的择优往往需要大量的计算,

如裁子的杂交操作将产生一个邻域解,因此可以确定性或随机性地在部分邻域解中选取候选解,具体数据大小则可视问题特性和对算法的要求而定。

#### (源) 藐视准则

在禁忌搜索算法中,可能会出现候选解全部被禁忌,或者存在一个优于“遭禁状态”的候选解,此时藐视准则将使某些状态解禁,以实现更高效的优化性能。在此给出藐视准则的几种常用方式。

① 基于适配值的准则。全局形式(最常用的方式):若某个禁忌候选解的适配值优于“遭禁状态”,则解禁此候选解为当前状态和新的“遭禁状态”;区域形式:将搜索空间分成若干个子区域,若某个禁忌候选解的适配值优于它所在区域的“遭禁状态”,则解禁此候选解为当前状态和相应区域的新“遭禁状态”。该准则可直观理解为算法搜索到了一个更好的解。

② 基于搜索方向的准则。若禁忌对象上次被禁时使得适配值有所改善,并且目前该禁忌对象对应的候选解的适配值优于当前解,则对该禁忌对象解禁。该准则可直观理解为算法正按有效的搜索途径进行。

③ 基于最小错误的准则。若候选解均被禁忌,且不存在优于“遭禁状态”的候选解,则对候选解中最佳的候选解进行解禁,以继续搜索。该准则可直观理解为对算法死锁的简单处理。

④ 基于影响力的准则。在搜索过程中不同对象的变化对适配值的影响有所不同,有的很大,有的较小,而这种影响力可作为一种属性与禁忌长度和适配值来共同构造藐视准则。直观的理解是,解禁一个影响力大的禁忌对象,有助于在以后的搜索中得到更好的解。需要指出的是,影响力仅是一个标量指标,可以表征适配值的下降,也可以表征适配值的上升。譬如,若候选解均差于“遭禁状态”,而某个禁忌对象的影响力指标很高,且很快将被解禁,则立刻解禁该对象以期待更好的状态。显然,这种准则需要引入一个标定影响力大小的度量和一个与禁忌任期相关的阈值,无疑增加了算法操作的复杂性。同时,这些指标最好是动态变化的,以适应搜索进程和性能的变化。

#### (缘) 禁忌频率

记忆禁忌频率(或次数)是对禁忌属性的一种补充,可放宽选择决策对象的范围。譬如,如果某个适配值频繁出现,则可以推测算法陷入某种循环或某个极小点,或者说现有算法参数难以有助于发掘更好的状态,进而应当对算法结构或参数进行修改。在实际求解时,可以根据问题和算法的需要,记忆某个状态出现的频率,也可以是某些对换对象或适配值等出现的信息,而这些信息又可以是静态的,或者是动态的。

静态的频率信息主要包括状态、适配值或对换等对象在优化过程中出现的频率,其计算相对比较简单,如对象在计算中出现的次数,出现次数与总迭代步数的比,某两个状态间循环的次数等。显然,这些信息有助于了解某些对象的特性,以及相应循环出现的次数等。

动态的频率信息主要记录从某些状态、适配值或对换等对象转移到另一些状态、适配值或对换等对象的变化趋势,如记录某个状态序列的变化。显然,对动态频率信息的记录比较复杂,而它所提供的信息量也较多。常用的方法如下:

- ① 记录某个序列的长度,即序列中的元素个数,而在记录某些关键点的序列中,可以按这些关键点的序列长度的变化来进行计算。
- ② 记录由序列中的某个元素出发后再回到该元素的迭代次数。
- ③ 记录某个序列的平均适配值,或者是相应各元素的适配值的变化。
- ④ 记录某个序列出现的频率等。

上述频率信息有助于加强禁忌搜索的能力和效率,并且有助于对禁忌搜索算法参数的控制,或者可基于此对相应的对象实施惩罚(如前文所例示)。譬如,若某个对象频繁,则可以增加禁忌长度来避免循环;若某个序列的适配值变化较小,则可以增加对该序列所有对象的禁忌长度,反之则缩小禁忌长度,若最佳适配值长时间维持下去,则可以终止搜索进程而认为该适配值已是最优值。

此外,许多改进的禁忌搜索算法还根据频率等信息在算法中增加集中搜索(圣域搜索)和分散搜索(圣域回避)机制,以增强算法的搜索质量和效率。其中,集中搜索机制强调算法对优良区域的重点搜索,如基于最优或次优状态进行更新初始化或进行多步搜索,加强对应取得最优状态的算法参数的被选取概率等;分散收缩机制则强调拓宽搜索范围,尤其是那些未探索的区域,这与增强遗传算法种群多样性有些类似。显然,集中搜索和分散搜索在某些层面上是矛盾的,而两者对算法性能都有很大影响,因此作为一个较好的禁忌搜索算法,应当具有合理平衡集中搜索与分散搜索的能力,这也是许多论文实现对禁忌搜索算法性能改进的突破口,在此不再展开介绍。

#### (远) 终止准则

与模拟退火、遗传算法一样,禁忌搜索也需要一个终止准则来结束算法的搜索进程,而严格实现理论上的收敛条件,即在禁忌长度充分大的条件下实现状态空间的遍历,这显然是不切合实际的,因此实际设计算法时通常采用近似的收敛准则。常用方法如下:

- ① 给定最大迭代步数。此方法简单易操作,但难以保证优化质量。
- ② 设定某个对象的最大禁忌频率。即:若某个状态、适配值或对换等对象的禁忌频率超过某一阈值,则终止算法,其中也包括最佳适配值连续若干步保持不变的情况。
- ③ 设定适配值的偏离幅度。即:首先用估界算法计算估计问题的下界,一旦算法中最佳适配值与下界的偏离值小于某规定幅度时,则终止搜索。

## 5.4 神经网络与神经网络优化算法

### 5.4.1 神经网络与神经网络优化的概念

人工神经网络是近年来得到迅速发展的一个前沿课题。神经网络由于其大规模并行处理、容错性、自组织和自适应能力和联想功能强等特点,已成为解决很多问题的有力工具,对突破现有科学技术的瓶颈,更深入地探索非线性等复杂现象起到了重大作用,已广泛应用在许多工程领域。人工神经元是生物神经元特性及功能的数学抽象,神经网络通常指由大量简单神经元互联而构成的一种计算结构,它在某种程度上可以模拟生物神经系统的工作过程,从而具备解决实际问题的能力。神经网络优化算法就是利用神经网络中神经元的协同并行计算能力来构造的优化算法,它将实际问题的优化解与神经网络的稳定状态相对应,把对实际问题的优化过程映射为神经网络系统的演化过程。

### 5.4.2 神经网络优化模型

#### 5.4.2.1 单层感知机模型

单层感知机模型如图 5-1 所示,它具有简单的模式识别能力,但只能解决线性分类,而不能解决非线性问题。

通常,单层感知机的学习算法如下:

- (1) 给出初始权值  $w_{ij}$  和阈值  $\theta$ ;
- (2) 给定连续输入样本  $x_1, x_2, \dots, x_n$  和目标输出  $d$ ;
- (3) 计算实际输出  $z = \sum_{i=1}^n w_{ij} x_i$  (其中  $f(\cdot)$  为神经元激励函数);
- (4) 调整权值  $w_{ij}$  越  $w_{ij}$  越  $\eta (d - z)$  越,其中  $\eta$  越  $\begin{cases} \eta \\ \eta \end{cases}$ ;
- (5) 返回第(2)步。

对于上述算法,若函数是线性可分的,则经过有限步迭代后算法收敛到正确的权值。

#### 5.4.2.2 多层感知机

一个  $n$  层的多层感知机(前向网络)可描述如下:

- (1) 网络包含一个输入层(定义为第 1 层)和  $n-1$  个隐层;
- (2) 第  $i$  层包含  $n_i$  个神经元和一个阈值单元(定义为每层的第  $n_i+1$  单元),输出层不

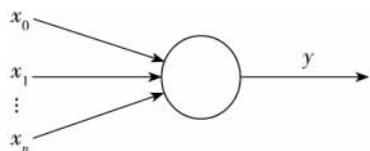


图 缘-缘 单层感知机模型

含阈值单元；

(猿) 第 造原层第 个单元到第 造层第 蹀单元的权值为 憎<sub>造原</sub>；

(源) 第 造层( 造跃园)第 蹀( 蹀跃园)神经元的输入定义为 憎<sub>造原</sub>  $\sum_{造原} 憎_{造原}$  输出定义为 憎<sub>造原</sub>  $\sigma(\sum_{造原} 憎_{造原})$  其中  $\sigma(\cdot)$  为隐单元激励函数,常采用 泽皂皂函数,即 枣曾 越 员垣 藻策 原曾<sup>原</sup>。输入单元一般采用线性激励函数 枣曾 越曾,阈值单元的输出生始终为 员;

(缘) 目标函数通常采用 耘越  $\sum_{责} 耘_{越} 员 \sum_{责} \sum_{蹀} ( 赠_{原} 原 赋 )^2$  其中 孕为样本数, 赋<sub>责</sub> 为第 责个样本的第 蹀输出分量。

典型的三层前向神经网络,其结构如图 缘-远所示。

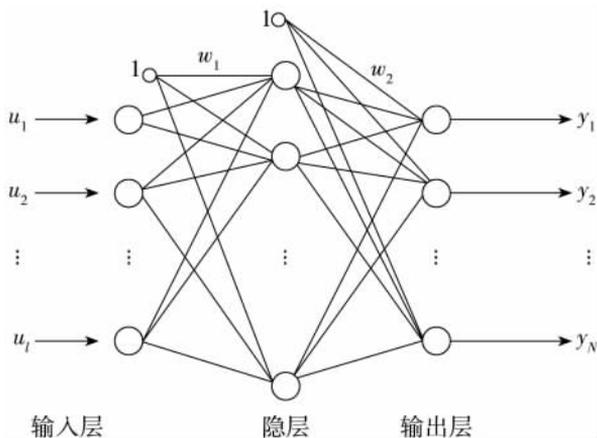


图 缘-远 三层前向神经网络

猿) 孕算法

网络学习归结为确定网络的结构和权值,使目标函数值最小。网络学习是一个复杂的非线性优化问题,即使在结构给定的情况下也是如此。

孕算法( 赠群 赠皂皂 赠皂皂 赠皂皂 )是前向神经网络经典的有监督学习算法,它的提出对前向神经网络的发展起过历史性的推动作用。对于上述 酝层的 云皂皂,孕算法可由下列迭代式描述

$$憎_{造原} ( 噪垣员 ) 越 憎_{造原} ( 噪 ) 原 \alpha \cdot 耘_{越} ( 噪 )$$

$$越 憎_{造原} ( 噪 ) 原 \alpha \sum_{责} \delta_{蹀} 噪_{赋} ( 噪 ) \quad ( 缘-圆 )$$

$$\delta_{i,j} = \begin{cases} \alpha \sum_{k=1}^n \delta_{k,j} & \text{当 } i \neq j \text{ 时} \\ \alpha \sum_{k=1}^n \delta_{k,i} & \text{当 } i = j \text{ 时} \end{cases} \quad (3-10)$$

式中  $\alpha$  为学习率。

实质上, 遗传算法是一种梯度下降法, 算法性能依赖于初始条件, 学习过程易于陷入局部极小。数值仿真研究表明, 遗传算法的学习速度、精度、初值鲁棒性、网络推广性能都比较差, 不能满足应用的需要。

## 3.1 神经网络

### 3.1.1 神经网络

1981年, 霍普菲尔德开创性地在物理学、神经生物学和计算机科学等领域架起了桥梁, 提出了霍普菲尔德神经网络模型(霍普菲尔德), 证明高强度连接下的神经网络依靠集体协同作用能自发产生计算行为。霍普菲尔德神经网络是典型的全连接网络, 通过在网络中引入能量函数以构造动力学系统, 并使网络的平衡态与能量函数的极小解相对应, 从而将求解能量函数极小解的过程转化为网络向平衡态的演化过程。尤其是通过对某些问题的成功求解, 开辟了神经网络模型在计算机科学应用中的新天地, 动态反馈神经网络从而受到广泛的研究和关注, 被广泛应用于优化问题中, 且已设计出了专用的硬件电路。

#### (1) 离散型霍普菲尔德神经网络

离散型霍普菲尔德神经网络的输出为二值型, 网络采用全连接结构。表 3-1 为各神经元的输出,  $w_{ij}$  为各神经元与第  $j$  神经元的连接权值,  $\theta_j$  为第  $j$  神经元的阈值, 则有

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{当 } \sum_{j=1}^n w_{ij} x_j \geq \theta_i \\ 0 & \text{当 } \sum_{j=1}^n w_{ij} x_j < \theta_i \end{cases} \quad (3-11)$$

能量函数定义为  $E = -\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n \theta_i x_i$ , 则其变化量为

$$\Delta E = -\sum_{i=1}^n \frac{\partial E}{\partial x_i} \Delta x_i = -\sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - \theta_i) \Delta x_i \leq 0 \quad (3-12)$$

也就是说, 能量函数总是随神经元状态的变化而下降的。

#### (2) 连续型霍普菲尔德神经网络

连续型霍普菲尔德神经网络如图 3-1 所示。

网络动态方程提出可简化描述如下

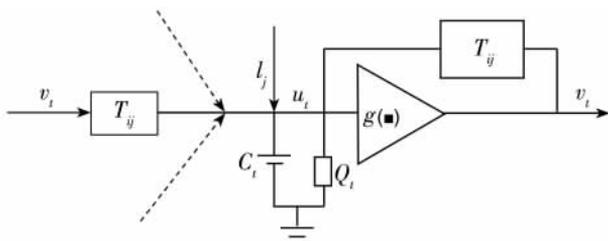


图 缘-苑 连续型匀暴神经网络

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dv_i}{dt} = -\frac{1}{C_i} \left( \sum_{j=1}^n w_{ij} v_j - I_j \right) \\ v_i = g(u_i) \end{array} \right. \quad (缘-圆)$$

式中  $v_i$ 、 $u_i$ ——第  $i$  神经元的输入和输出 ( $i=1, \dots, n$ )——具有连续且单调递增性质的神经元激励函数,  $w_{ij}$ ——第  $i$  神经元到第  $j$  神经元的连接权,  $I_j$ ——施加在第  $j$  神经元的偏置。 $C_i$ 、 $Q_i$  和  $T_{ij}$ ——相应的电容和电阻,  $g(\cdot)$ ——

定义能量函数

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} v_i v_j - \sum_{j=1}^n I_j v_j - \sum_{i=1}^n \int_{v_i}^{\infty} g^{-1}(v_i) dv_i \quad (缘-圆)$$

则其变化量

$$\frac{dE}{dt} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial E}{\partial v_i} \frac{dv_i}{dt} \quad (缘-圆)$$

式中

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial v_i} &= \sum_{j=1}^n w_{ij} v_j - I_j - g^{-1}(v_i) \\ &= \sum_{j=1}^n (w_{ij} v_j - I_j) - g^{-1}(v_i) \\ &= \sum_{j=1}^n (w_{ij} v_j - I_j) - g^{-1}(v_i) \end{aligned} \quad (缘-圆)$$

于是,当  $w_{ij} v_j - I_j$  时

$$\frac{dE}{dt} = \sum_{i=1}^n (w_{ij} v_j - I_j) \frac{dv_i}{dt} \leq 0 \quad (缘-猿)$$

且当  $\frac{dE}{dt} \rightarrow 0$  时  $\frac{dE}{dt} \rightarrow 0$

因此,随时间的增长,神经网络在状态空间中的解轨迹总是向能量函数减小的方向变化,且网络的稳定点就是能量函数的极小点。连续型匀暴神经网络广泛用于联想记忆和优化计算问题。当用于联想记忆时,能量函数是给定的,网络的运行过程是通过确定合适的权值以满足最小能量函数的要求;当用于优化计算时,网络的连接权值是确定的,首先将目标函数与能量函数相对应,然后通过网络的运行使能量函数不断





①  $\eta$  的影响 :由表 3-10 可知,  $\eta$  下降导致寻优时间缩短,但  $\eta$  太小会导致路径不优或“非法”路径的出现。 $\eta$  太大又可能出现“冻结”现象,原因在于其相当于放大器增益,  $\eta$  太小使神经网络激励函数趋于离散阶跃函数,从而不易获得优解。反之使激励函数过于平坦,神经元状态不易收敛到“0”或“1”。

表 3-10  $\eta$  对算法性能的影响

参数 $\eta$	优化结果
$\eta > 1$	“冻结”
$0.5 < \eta < 1$	收敛速度快,收敛精度高
$0.1 < \eta < 0.5$	收敛速度慢,收敛精度低
$\eta < 0.1$	收敛速度慢,收敛精度低
$\eta < 0.01$	“非法”

表 3-11  $\lambda$  对算法性能的影响

参数 $\lambda$	优化结果
$\lambda > 1$	“非法”
$0.5 < \lambda < 1$	收敛速度快,收敛精度高
$0.1 < \lambda < 0.5$	收敛速度慢,收敛精度低
$\lambda < 0.1$	收敛速度慢,收敛精度低
$\lambda < 0.01$	“冻结”

表 3-12  $\alpha$  对算法性能的影响

参数 $\alpha$	优化结果
$\alpha > 1$	“非法”
$0.5 < \alpha < 1$	收敛速度快,收敛精度高
$0.1 < \alpha < 0.5$	收敛速度慢,收敛精度低
$\alpha < 0.1$	“冻结”

表 3-13  $\beta$  对算法性能的影响

参数 $\beta$	优化结果
$\beta > 1$	“非法”
$0.5 < \beta < 1$	收敛速度快,收敛精度高
$0.1 < \beta < 0.5$	收敛速度慢,收敛精度低
$\beta < 0.1$	收敛速度慢,收敛精度低
$\beta < 0.01$	“非法”

- ② 当每行或每列出现一个“员”时 相应行或列的其余置“园”。
- ③ 取消神经元动态方程中的自反馈项 以减小能量的消耗。
- ④ 用离散化或其他形态的激励函数代替连续型 杂摆自摆函数性能。
- ⑤ 改变能量函数形式或置换矩阵的定义等。

基于上述思路的研究成果有:宰蚤等(员愿)针对随机扰动的缺点,归一化城市坐标(园员)区间,并引入一个偏置到初值来改善优化性能;月藤等(员愿)针对问题的表征方式提出三下标法,用增表示从第蚤个城市到第躁个城市恰好是第噪次访问,这样总路径长度可表示为  $\sum_{蚤} \sum_{躁} \sum_{噪} 增_{蚤躁噪}$  (数据增,城市蚤和躁距离)仅是能量函数中一次项的系数,与权矩阵无关,但需要灶个神经元,计算量较大;杂摆等(员愿)在能量函数方面提出了一个强化约束公式,表示置换矩阵每行每列只有一个“员”,及时唤醒全零元行(列)中的神经元,从而抑制过多的“员”出现,减少非法路径;载等(员愿)改变置换矩阵的定义,用增表示曾与赠之间的连接,以增越员表示曾与赠相连,否则不连,这样可用灶灶(原员)个神经元建立模型,从而神经元间的连接复杂性较匀摆网络有所降低,并消除了一些冗余项,提高了计算效率;载等(员愿)还提出了广义神经网络,通过自适应地消除回路得到全局最优解;增等(员愿)采用时变能量函数,自适应地改变能量函数中某个参数,参数的缓慢变化可避免陷入局部极小,且随时间加大而最终趋于员,从而得到有效优化解,这种时变模型能较大幅度提高得到优良解的比例。

$$增_{蚤躁噪} = \frac{增_{蚤躁噪}}{\sum_{蚤} \sum_{躁} \sum_{噪} 增_{蚤躁噪}} \sqrt{(\sum_{蚤} 增_{蚤躁噪}) (\sum_{躁} 增_{蚤躁噪})} \quad (\text{缘-猿})$$

$$耘越 = \sum_{蚤} (\sum_{躁} 增_{蚤躁噪}) \sum_{躁} (\sum_{蚤} 增_{蚤躁噪}) \quad (\text{缘-猿})$$

$$耘越 = \frac{增}{圆} \sum_{蚤} (\sum_{躁} 增_{蚤躁噪}) \frac{月}{圆} \sum_{躁} (\sum_{蚤} 增_{蚤躁噪}) \frac{灶}{圆} \sum_{蚤} \sum_{躁} 增_{蚤躁噪} \quad (\text{缘-猿})$$

$$耘越 = \frac{增}{圆} \sum_{蚤} (\sum_{躁} 增_{蚤躁噪}) \frac{月}{圆} \sum_{躁} (\sum_{蚤} 增_{蚤躁噪}) \frac{灶}{圆} \sum_{蚤} \sum_{躁} \sum_{噪} 增_{蚤躁噪} \quad (\text{缘-猿})$$

$$耘垣 = \frac{增垣}{圆} \sum_{蚤} \sum_{躁} 增_{蚤躁噪} \quad (\text{缘-猿})$$

由于基于匀摆模型的优化过程中网络动态的变化保证能量函数单调非增,因此杂摆往往收敛到局部解,而为克服这一困难提供了思路。所以,如果把两种算法合理结合,就能提高优化性能和时间性能。例如,用匀摆算法构成主算法较快得到可行解,用杂摆概率性逃离局部极小点而转移到目标函数的其他极小点,从而提高最终的优化性能。

同时,利用员并行搜索的优点,结合匀摆网络也是一种可行方法。将混沌动态引入匀摆模型,结合混沌动态的遍历性和匀摆模型的梯度下降过程,同样可构造有效的优化方法。

此外,将竞争网络和匀摆网络结合,竞争网络实现约束函数,匀摆网络

实现具有简化约束的能量函数,用信号时延小的竞争网络控制调节匀(缘-缘)网络的输出,一旦匀(缘-缘)网络的输出大于竞争网络神经元的阈值就采用“全胜策略”通过竞争网络开始搜索最高输出,这也是提高算法性能的方法。

不可否认,基于匀(缘-缘)模型的优化计算具有简单、规范、快速等优点,但为了克服其优化性和鲁棒性差等缺点,还需要做大量的研究工作。修改能量函数形式、确立网络参数选择原则,以及把匀(缘-缘)模型与其他方法合理结合等,仍是有关匀(缘-缘)网络的重要研究课题。可以预见,鉴于人类智能活动快速并行等优点,反馈神经网络将在决策、控制和判断等方面发挥强大的作用。

猿) 动态反馈神经网络的稳定性研究

动态反馈神经网络,如匀(缘-缘)网络(匀(缘-缘)),是一类具有联想功能且能产生优化计算行为的非线性动力学模型。它的提出推动了神经网络硬件和神经计算机的研究与发展。但是,基于匀(缘-缘)的优化过程难以实现全局优化,对初始条件和网络参数的鲁棒性差,不利于反馈网络的应用。下面从理论上研究离散、非对称、时延等网络的稳定条件,为网络结构和参数设计提供准则和指导,并对一般连续反馈网络研究网络稳定域范围的估计算法。

(员) 动态反馈网络的稳定性分析

稳定性分析,不论是针对联想记忆而进行的吸引子局部稳定性的研究,还是针对优化计算进行的全局稳定性的研究,都可用来指导动态反馈网络的设计和应用(焦李成,员怨怨园)。

一个连续动态反馈神经网络可描述为

$$\begin{cases} \text{曾}^{\text{越}} \text{越} \text{原} \text{曾}^{\text{越}} \text{曾}^{\text{越}} \text{垣} \sum_{\text{越}}^{\text{灶}} \text{憎}^{\text{越}} \text{曾}^{\text{越}} \\ \text{赠}^{\text{越}} \text{越} \sigma_{\text{越}} [\text{曾}^{\text{越}} \text{曾}^{\text{越}}] \text{垣} \text{再}^{\text{越}} \text{圆} \dots \text{灶} \end{cases} \quad (\text{缘-猿})$$

式中:曾<sup>越</sup>、赠<sup>越</sup>——神经元的输入和输出状态;曾<sup>越</sup>——自反馈系数;再<sup>越</sup>——阈值;憎<sup>越</sup>——连接权值;η<sup>越</sup>——激励增益(η<sup>越</sup>跃园);σ<sub>越</sub>(·)——激励函数。

上述描述的向量方程形式为

$$\text{载}^{\text{越}} \text{越} \text{原} \text{曾}^{\text{越}} \text{垣} \text{杂}^{\text{越}} \text{再}^{\text{越}} \quad (\text{缘-源})$$

式中:载<sup>越</sup>越[曾<sup>越</sup>...曾<sup>越</sup>]<sup>则</sup>,再<sup>越</sup>越[赠<sup>越</sup>...赠<sup>越</sup>]<sup>越</sup>越(再<sup>越</sup>)越[σ<sub>越</sub>(曾<sup>越</sup>)...σ<sub>越</sub>(曾<sup>越</sup>)]<sup>越</sup>,粤<sup>越</sup>越[曾<sup>越</sup>...曾<sup>越</sup>],杂<sup>越</sup>越[杂<sup>越</sup>...杂<sup>越</sup>]<sup>越</sup>,宰<sup>越</sup>越(憎<sup>越</sup>)<sup>越</sup>。

在此约定,激励函数为连续可微、有界且严格单调递增。因此,其逆函数也为连续可微且严格单调递增。对于连续反馈神经网络,当宰<sup>越</sup>越宰且粤<sup>越</sup>跃园,再<sup>越</sup>跃园...灶时,网络状态必渐近收敛到系统的平衡点。

由于数字实现必须进行离散化,且实际网络难以实现对称条件,网络传输存在时延,因此下面只讨论离散、非对称和时延网络的稳定性。并且,令激励函数满足园约σ<sub>越</sub>(·)约β<sub>越</sub>或(σ<sub>越</sub><sup>越</sup>)(·)≥员<sub>越</sub>,其中符号“越”表示求导运算,再令月<sup>越</sup>越粤<sup>越</sup>η<sub>越</sub>再<sup>越</sup>,...η<sub>灶</sub><sup>越</sup>。

(圆) 离散对称动态反馈网络的渐近稳定性分析

令  $\tau$  为仿真步长, 基于 截断法, 可导出式 (缘-源) 的离散模型为

$$\begin{cases} \text{载}(\text{噪垣员}) \text{越} (\text{员原葬}) \text{载}(\text{噪}) \text{垣} \sum_{\text{蚤}}^{\text{灶}} \tau \text{憎} \cdot \text{赠}(\text{噪}) \\ \text{赠}(\text{噪}) \text{越} \sigma_{\text{蚤}} (\text{赠}(\text{噪}) \text{转}) \text{燥}(\text{噪}) \text{越} \eta_{\text{蚤}} \text{原}(\text{赠}(\text{噪})) \end{cases} \quad (\text{缘-源})$$

对应的向量方程形式为

$$\text{载}(\text{噪垣员}) \text{越} (\text{陨原} \text{粤}) \text{载}(\text{噪}) \text{垣} (\text{杂垣宰再}) \quad (\text{缘-源})$$

式中, 陨为单位阵。

定义 缘远考虑离散系统 载(噪垣员) 越 枣载(噪)。称 载为系统的 皂周期点, 如果 枣(载) 越载且 枣(载) ≠ 载员 ≤ 蚤约皂, 称 载为系统的不动点, 如果 枣(载) 越载。

定义 缘苑考虑离散神经网络(缘-缘) 称系统以同步迭代方式运行, 若所有神经元的状态是并行同步更新的, 称系统以异步迭代方式运行, 若每一时刻只有一个神经元状态发生变化。

定理 缘缘考虑离散动态反馈神经网络, 以同步迭代方式运行的网络必渐近收敛到系统的不动点, 如果满足 宰越宰和以下任一条件:

- ① 当 园 ≤ 葬 ·  $\tau$  ≤ 员, 蚤越员, ... 灶时, 宰垣粤或  $\tau$  宰垣陨 (陨原粤) 月为 正定;
- ② 当 葬约园, 蚤越员, ... 灶时,  $\tau$  宰垣粤 为 正定。

进一步, 若  $\eta_{\text{蚤}}$  越  $\eta_{\text{蚤}}$ ,  $\beta_{\text{蚤}}$  越  $\beta$ , 则条件 ② 可简化为 圆 转  $\tau$  跃原  $\lambda_{\text{皂}}$  (宰), 若 葬越葬, 则条件 ① 可简化为 葬 转  $\tau$  跃原  $\lambda_{\text{皂}}$  (宰) 或 圆 员原葬  $\tau$  葬  $\tau$  跃原  $\lambda_{\text{皂}}$  (宰)。

证明 构造有界能量函数 灾再) 为

$$\text{灾再) 越} \frac{\text{员}}{\text{圆}} \sum_{\text{蚤}} \tau \text{憎} \cdot \text{赠}(\text{噪}) \text{原} \sum_{\text{蚤}} \tau \text{泽} \cdot \text{赠}(\text{噪}) \text{垣} \sum_{\text{蚤}} \tau \text{葬} \int_{\text{赠}(\text{噪})}^{\text{赠}(\text{噪垣员})} \sigma_{\text{蚤}} \text{原}(\text{赠}(\text{噪})) \quad (\text{缘-源})$$

令  $\Delta \text{赠} \text{越} \text{赠}(\text{噪垣员}) \text{原} \text{赠}(\text{噪})$ , 若系统从 噪到 噪垣员 时刻以同步方式运行, 则有  $\Delta \text{灾再) 越} \Delta \text{灾再}(\text{噪垣员}) \text{原} \Delta \text{灾再}(\text{噪})$

$$\text{越} \frac{\text{员}}{\text{圆}} \sum_{\text{蚤}} \tau \text{憎} (\Delta \text{赠} \cdot \text{赠}(\text{噪垣员}) \text{垣} \Delta \text{赠} \cdot \text{赠}(\text{噪})) \text{原} \sum_{\text{蚤}} \tau \text{泽} \Delta \text{赠} \text{垣} \sum_{\text{蚤}} \tau \text{葬} \int_{\text{赠}(\text{噪})}^{\text{赠}(\text{噪垣员})} \sigma_{\text{蚤}} \text{原}(\text{赠}(\text{噪}))$$

利用 赠(噪) 越  $\eta_{\text{蚤}}$  原(赠(噪)), 可知上式中

$$\begin{aligned} & \text{原} \sum_{\text{蚤}} \tau \text{杂} \Delta \text{赠} \text{越} \text{原} \sum_{\text{蚤}} \Delta \text{赠} \cdot \text{赠}(\text{噪垣员}) \text{原} \text{员原葬} \cdot \text{赠}(\text{噪}) \text{原} \sum_{\text{蚤}} \tau \text{葬} \int_{\text{赠}(\text{噪})}^{\text{赠}(\text{噪垣员})} \sigma_{\text{蚤}} \text{原}(\text{赠}(\text{噪})) \\ & \text{越} \text{原} \sum_{\text{蚤}} \Delta \text{赠} \cdot \eta_{\text{蚤}} \text{原}(\text{赠}(\text{噪垣员})) \text{原} \text{员原葬} \cdot \eta_{\text{蚤}} \text{原}(\text{赠}(\text{噪})) \text{垣} \sum_{\text{蚤}} \tau \text{憎} \cdot \Delta \text{赠} \cdot \text{赠}(\text{噪}) \end{aligned}$$

从而

$$\begin{aligned} \Delta \text{灾再) 越} & \frac{\text{员}}{\text{圆}} \sum_{\text{蚤}} \tau \text{憎} \cdot \Delta \text{赠} \cdot \text{赠}(\text{噪垣员}) \text{垣} \sum_{\text{蚤}} \tau \text{葬} \int_{\text{赠}(\text{噪})}^{\text{赠}(\text{噪垣员})} \sigma_{\text{蚤}} \text{原}(\text{赠}(\text{噪})) \\ & \text{摇} \text{原} \sum_{\text{蚤}} \Delta \text{赠} \cdot \eta_{\text{蚤}} \text{原}(\text{赠}(\text{噪垣员})) \text{垣} \sum_{\text{蚤}} (\text{员原葬}) \cdot \eta_{\text{蚤}} \text{原}(\text{赠}(\text{噪})) \end{aligned} \quad (\text{缘-源})$$

下面, 分为三种情况加以证明:

- ① 当 园 ≤ 葬,  $\tau$  ≤ 员, 蚤越员, ... 灶时, 式 (缘-源) 可改写为:

$$\begin{aligned} \Delta \text{灾再} &\leq \frac{\beta}{\alpha} \sum_{\xi} \tau_{\xi} \Delta \text{赠} \Delta \text{赠} \Delta \text{赠} \Delta \text{赠} \sum_{\eta} \tau_{\eta} \sigma_{\xi}^{\beta}(\text{赠} \text{噪} \text{垣} \text{再}) \\ &\quad \left[ \frac{\alpha}{\beta} \sum_{\xi} \Delta \text{赠} \tau_{\xi} \sigma_{\xi}^{\beta}(\text{赠} \text{噪} \text{垣} \text{再}) \right] \Delta \text{垣} \sum_{\xi} \left( \beta \tau_{\xi} \sigma_{\xi}^{\beta}(\text{赠} \text{噪} \text{垣} \text{再}) \right) \left[ \frac{\alpha}{\beta} \sum_{\xi} \sigma_{\xi}^{\beta}(\text{赠} \text{噪} \text{垣} \text{再}) \right] \\ &\leq \frac{\beta}{\alpha} \sum_{\xi} \tau_{\xi} \Delta \text{赠} \Delta \text{赠} \Delta \text{赠} \Delta \text{赠} \sum_{\eta} \tau_{\eta} \sigma_{\xi}^{\beta} \left[ \Delta \text{赠} \tau_{\eta} \sigma_{\xi}^{\beta}(\text{赠} \text{噪} \text{垣} \text{再}) \right] \left[ \frac{\alpha}{\beta} \sum_{\xi} \sigma_{\xi}^{\beta}(\text{赠} \text{噪} \text{垣} \text{再}) \right] \quad (\text{缘-源}) \end{aligned}$$

将  $\int_{\text{赠} \text{噪} \text{垣} \text{再}}^{\text{赠} \text{噪} \text{垣} \text{再}} \sigma_{\xi}^{\beta}(\text{赠} \text{噪} \text{垣} \text{再})$  在  $\text{赠} \text{噪} \text{垣} \text{再}$  处展开, 有

$$\begin{aligned} &\int_{\text{赠} \text{噪} \text{垣} \text{再}}^{\text{赠} \text{噪} \text{垣} \text{再}} \sigma_{\xi}^{\beta}(\text{赠} \text{噪} \text{垣} \text{再}) \Delta \text{赠} \tau_{\eta} \sigma_{\xi}^{\beta}(\text{赠} \text{噪} \text{垣} \text{再}) \Delta \text{垣} \frac{\Delta \text{赠}}{\alpha} \sigma_{\xi}^{\beta}(\zeta_{\xi}) \\ &\geq \int_{\text{赠} \text{噪} \text{垣} \text{再}}^{\text{赠} \text{噪} \text{垣} \text{再}} \sigma_{\xi}^{\beta}(\text{赠} \text{噪} \text{垣} \text{再}) \Delta \text{赠} \tau_{\eta} \sigma_{\xi}^{\beta}(\text{赠} \text{噪} \text{垣} \text{再}) \Delta \text{垣} \Delta \text{赠} \tau_{\eta} \sigma_{\xi}^{\beta} \quad (\text{缘-源}) \end{aligned}$$

式中  $\zeta_{\xi}$  为  $\text{赠} \text{噪} \text{垣} \text{再}$  和  $\text{赠} \text{噪} \text{垣} \text{再}$  之间的值。于是, 得到

$$\Delta \text{灾再} \leq \frac{\beta}{\alpha} \sum_{\xi} \tau_{\xi} \Delta \text{赠} \Delta \text{赠} \Delta \text{赠} \Delta \text{赠} \sum_{\eta} \tau_{\eta} \sigma_{\xi}^{\beta}(\text{赠} \text{噪} \text{垣} \text{再}) \leq \frac{\beta}{\alpha} \Delta \text{再} \Delta \text{再} \Delta \text{再} \Delta \text{再} \Delta \text{再}$$

这表明, 当  $\alpha \leq \beta, \tau \leq \beta, \xi$  越  $\beta, \dots$  时, 则  $\Delta \text{灾再} \leq \alpha$  且当  $\alpha$  越  $\beta$  时,  $\Delta \text{灾再}$  越  $\alpha$  且仅当  $\alpha$  越  $\beta$  从而, 系统可渐近收敛到不动点。进一步, 若  $\beta$  越  $\beta, \eta$  越  $\beta, \beta$  越  $\beta$ , 则正定条件可简化为  $\beta \geq \alpha$  (宰)。

② 当  $\alpha \leq \beta, \tau \leq \beta, \xi$  越  $\beta, \dots$  时, 式 (缘-源) 又可改写为

$$\begin{aligned} \Delta \text{灾再} &\leq \frac{\beta}{\alpha} \sum_{\xi} \tau_{\xi} \Delta \text{赠} \Delta \text{赠} \Delta \text{赠} \Delta \text{赠} \sum_{\eta} \tau_{\eta} \sigma_{\xi}^{\beta}(\text{赠} \text{噪} \text{垣} \text{再}) \\ &\quad \left[ \frac{\alpha}{\beta} \sum_{\xi} \Delta \text{赠} \tau_{\xi} \sigma_{\xi}^{\beta}(\text{赠} \text{噪} \text{垣} \text{再}) \right] \left[ \frac{\alpha}{\beta} \sum_{\xi} \sigma_{\xi}^{\beta}(\text{赠} \text{噪} \text{垣} \text{再}) \right] \quad (\text{缘-源}) \end{aligned}$$

设  $\zeta_{\xi}, \theta_{\xi}$  取值于  $\text{赠} \text{噪} \text{垣} \text{再}$  和  $\text{赠} \text{噪} \text{垣} \text{再}$  之间, 且由于  $\sigma_{\xi}^{\beta}(\cdot)$  为严格单调增, 因此成立

$$\Delta \text{赠} \tau_{\xi} \sigma_{\xi}^{\beta}(\text{赠} \text{噪} \text{垣} \text{再}) \left[ \frac{\alpha}{\beta} \sum_{\xi} \Delta \text{赠} \tau_{\xi} \sigma_{\xi}^{\beta}(\theta_{\xi}) \right] \geq \alpha \quad (\text{缘-源})$$

由中值定理, 可得

$$\begin{aligned} \Delta \text{灾再} &\leq \frac{\beta}{\alpha} \sum_{\xi} \tau_{\xi} \Delta \text{赠} \Delta \text{赠} \Delta \text{赠} \Delta \text{赠} \sum_{\eta} \tau_{\eta} \sigma_{\xi}^{\beta}(\text{赠} \text{噪} \text{垣} \text{再}) \left[ \frac{\alpha}{\beta} \sum_{\xi} \sigma_{\xi}^{\beta}(\text{赠} \text{噪} \text{垣} \text{再}) \right] \\ &\quad \Delta \text{垣} \sum_{\xi} \tau_{\xi} \Delta \text{赠} \left[ \frac{\alpha}{\beta} \sum_{\xi} \sigma_{\xi}^{\beta}(\theta_{\xi}) \right] \quad (\text{缘-源}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \text{灾再} &\leq \frac{\beta}{\alpha} \sum_{\xi} \tau_{\xi} \Delta \text{赠} \Delta \text{赠} \Delta \text{赠} \Delta \text{赠} \sum_{\eta} \left( \beta \tau_{\eta} \sigma_{\xi}^{\beta}(\text{赠} \text{噪} \text{垣} \text{再}) \right) \left[ \frac{\alpha}{\beta} \sum_{\xi} \sigma_{\xi}^{\beta}(\text{赠} \text{噪} \text{垣} \text{再}) \right] \\ &\leq \frac{\beta}{\alpha} \sum_{\xi} \tau_{\xi} \Delta \text{赠} \Delta \text{赠} \Delta \text{赠} \Delta \text{赠} \sum_{\eta} \left( \beta \tau_{\eta} \left[ \Delta \text{赠} \right] \sigma_{\xi}^{\beta}(\zeta_{\xi}) \right) \\ &\leq \frac{\beta}{\alpha} \Delta \text{再} \Delta \text{再} \Delta \text{再} \Delta \text{再} \Delta \text{再} \quad (\text{缘-源}) \end{aligned}$$

因此, 当  $\alpha \leq \beta, \tau \leq \beta, \xi$  越  $\beta, \dots$  时, 则  $\Delta \text{灾再} \leq \alpha$  且当  $\alpha$  越  $\beta$  时,  $\Delta \text{灾再}$  越  $\alpha$  且仅当  $\alpha$  越  $\beta$  由此, 系统可渐近收敛到不动点。进一步, 若  $\beta$  越  $\beta, \eta$  越  $\beta, \beta$  越  $\beta$ , 则正定条件可简化为  $\beta \geq \alpha$  (宰)。

③ 当  $\alpha \leq \beta, \tau \leq \beta, \xi$  越  $\beta, \dots$  时, 由式 (缘-源) 得

$$\Delta \text{灾再} \leq \frac{\beta}{\alpha} \sum_{\xi} \tau_{\xi} \Delta \text{赠} \Delta \text{赠} \Delta \text{赠} \Delta \text{赠} \sum_{\eta} \tau_{\eta} \sigma_{\xi}^{\beta}(\text{赠} \text{噪} \text{垣} \text{再}) \left[ \frac{\alpha}{\beta} \sum_{\xi} \sigma_{\xi}^{\beta}(\text{赠} \text{噪} \text{垣} \text{再}) \right]$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^n \tau_i \Delta z_i \leq \sum_{i=1}^n \eta_i \Delta z_i \sigma_{\beta_i}(\zeta_i) \\ & \leq \sum_{i=1}^n \tau_i \Delta z_i \end{aligned} \quad (缘-缘)$$

因此,当  $\tau_i \leq \eta_i, \sigma_{\beta_i} \geq 1, \dots$  时,则  $\Delta z_i \leq 0$ 。当  $\tau_i \Delta z_i$  正定,  $\Delta z_i$  再越圆当且仅当  $\Delta z_i$  越圆。由此,系统可渐近收敛到不动点。进一步,若  $\eta_i$  越  $\eta, \beta_i$  越  $\beta$ , 则正定条件可简化为  $\tau_i \geq \eta \lambda(\beta)$ 。

推论 缘缘 若离散动态反馈神经网络满足 缘缘 越 缘缘 和 缘缘 的条件之一,则以同步迭代方式运行的网络必渐近收敛到系统的不动点。

① 当  $\tau_i \leq \eta_i, \sigma_{\beta_i} \geq 1, \dots$  时

$$\tau_i \Delta z_i \leq \sum_{j=1}^n \tau_j \Delta z_j \quad (缘-缘)$$

或

$$\tau_i \Delta z_i \leq \sum_{j=1}^n \tau_j \Delta z_j, \sigma_{\beta_i} \geq 1, \dots \quad (缘-缘)$$

② 当  $\tau_i \geq \eta_i, \sigma_{\beta_i} \geq 1, \dots$  时

$$\tau_i \Delta z_i \leq \sum_{j=1}^n \tau_j \Delta z_j \quad (缘-缘)$$

证明:利用定理 缘缘 和 缘缘 定理,可直接导出此推论。

定理 缘缘 考虑离散动态反馈神经网络,则以异步迭代方式运行的网络必渐近收敛到系统的不动点,如果满足 缘缘 越 缘缘 和 缘缘 的任一条件:

① 当  $\tau_i \leq \eta_i, \sigma_{\beta_i} \geq 1, \dots$  时

$$\tau_i \Delta z_i \leq \sum_{j=1}^n \tau_j \Delta z_j, \sigma_{\beta_i} \geq 1, \dots \quad (缘-缘)$$

② 当  $\tau_i \geq \eta_i, \sigma_{\beta_i} \geq 1, \dots$  时

$$\tau_i \Delta z_i \leq \sum_{j=1}^n \tau_j \Delta z_j \quad (缘-缘)$$

证明:不失一般性,设由 缘缘 时刻,仅第 缘缘 个神经元状态发生变化,能量函数的选择同于式 缘缘,则有

$$\begin{aligned} \Delta z_i & \leq \sum_{j=1}^n \tau_j \Delta z_j \sigma_{\beta_j}(\zeta_j) - \tau_i \Delta z_i \sigma_{\beta_i}(\zeta_i) \\ & \leq \sum_{j=1}^n \tau_j \Delta z_j \sigma_{\beta_j}(\zeta_j) - \tau_i \Delta z_i \sigma_{\beta_i}(\zeta_i) \end{aligned} \quad (缘-缘)$$

此后,类似于定理 缘缘 的推证,即可证得此结论。

定理 缘缘 考虑离散动态网络,若  $\tau_i$  越  $\eta_i, \sigma_{\beta_i} \geq 1, \dots$  和 缘缘 越 缘缘,则以任何迭代方式运行的网络所得吸引只能是不动点或圆周期点。

证明:当  $\tau_i$  越  $\eta_i, \sigma_{\beta_i} \geq 1, \dots$  时,有  $\tau_i \Delta z_i \leq \sum_{j=1}^n \tau_j \Delta z_j$ 。进而,通过取有界能量函数 缘缘,可导出其增量  $\Delta z_i$  有

$$\Delta z_i \leq \sum_{j=1}^n \tau_j \Delta z_j \sigma_{\beta_j}(\zeta_j) - \tau_i \Delta z_i \sigma_{\beta_i}(\zeta_i)$$

$$\sum_{\sigma} \eta_{\sigma} \left[ \int_{\sigma} \sigma_{\sigma}(\zeta_{\sigma}) d\zeta_{\sigma} - \int_{\sigma} \sigma_{\sigma}(\zeta_{\sigma}) d\zeta_{\sigma} \right] \quad (5-12)$$

$$\Delta \sigma_{\sigma} \geq \sum_{\sigma} \left[ \Delta \sigma_{\sigma} \left( \sum_{\sigma} \tau_{\sigma} \sigma_{\sigma}(\zeta_{\sigma}) \right) - \sum_{\sigma} \eta_{\sigma} \int_{\sigma} \sigma_{\sigma}(\zeta_{\sigma}) d\zeta_{\sigma} \right]$$

$$\sum_{\sigma} \eta_{\sigma} \Delta \sigma_{\sigma} \left( \sum_{\sigma} \tau_{\sigma} \sigma_{\sigma}(\zeta_{\sigma}) \right) - \sum_{\sigma} \eta_{\sigma} \int_{\sigma} \sigma_{\sigma}(\zeta_{\sigma}) d\zeta_{\sigma}$$

$$\sum_{\sigma} \Delta \sigma_{\sigma} \left( \sum_{\sigma} \tau_{\sigma} \sigma_{\sigma}(\zeta_{\sigma}) \right) - \sum_{\sigma} \int_{\sigma} \sigma_{\sigma}(\zeta_{\sigma}) d\zeta_{\sigma} \quad (5-13)$$

上式推导中已经运用了中值定理。式中  $\Delta \sigma_{\sigma}(\zeta_{\sigma})$  取值于  $\sigma_{\sigma}(\zeta_{\sigma})$  和  $\sigma_{\sigma}(\zeta_{\sigma})$  之间。

进而,由于  $\sigma_{\sigma}(\cdot)$  为严格单调增,故当  $\Delta \sigma_{\sigma} \neq 0$  时  $\Delta \sigma_{\sigma}$  和  $\sigma_{\sigma}(\zeta_{\sigma})$  必互为异号,从而  $\Delta \sigma_{\sigma} > 0$  时  $\Delta \sigma_{\sigma}$  必为负,反之亦然。由此,离散动态反馈网络的吸引子只能或是不动点或是圆周期点。

注意:若将激励函数  $\sigma_{\sigma}(\cdot)$  取为  $\sigma_{\sigma}(\cdot) = \frac{1}{1 + e^{-\beta(\zeta_{\sigma} - \theta_{\sigma})}}$ , 则有  $\beta$  越大,上述各个定理中的条件还可进一步简化。

## 本章小结

### 摇

物流系统优化是在物流系统合理建模基础上,实现物流管理目标、体现物流管理效率与效益的必要过程和手段。

本章重点分析了物流系统优化中智能优化方法的模拟退火算法、遗传算法、禁忌搜索算法的优化流程、原理、算法收敛理论与实现技术等内容;从实现技术角度重点分析了禁忌搜索算法,分析了禁忌搜索算法的禁忌搜索的收敛性、最基本的操作和参数的常用设计原则和方法,包括适配值函数、禁忌对象、禁忌长度、候选解、藐视准则、禁忌频率和终止准则等知识内容;介绍了神经网络的优化模型,重点分析了基于均匀收敛反馈网络的优化策略和稳定条件。

## 关键概念

### 摇

模拟退火算法摇遗传算法摇模式定理摇隐含并行性摇收敛性摇禁忌搜索摇适配值函数摇终止准则

## 分析思考

### 摇

1. 简述模拟退火算法的基本思想。

2. 做流程图分析模拟退火算法的步骤,分析各步骤的基本内容。

3. 简述禁忌搜索算法最基本的参数设计原则。

4. 做流程图分析禁忌搜索算法的步骤,分析各步骤的基本内容。

5. 禁忌搜索算法的藐视准则有几种常用方式?

# 第 10 章 物流系统仿真

## 学习目标

理解优化与仿真问题的求解的不同；

掌握物流系统仿真的概念和仿真问题的一般表述方法；

区分连续与离散系统的概念的不同性质；

分析理解物流系统仿真常用的蒙特卡洛法、物流系统动力学法；

掌握蒙特卡洛法、物流系统动力学法在实际系统仿真中的应用。

物流系统仿真意指在实际系统尚不存在的情况下对于系统或其活动本质的实现。某一物流系统是研究的对象,模型是对某一系统的抽象表述,仿真是通过模型的实验以达到研究系统的目的。系统仿真技术主要用来解决那些难以用现有的分析模型来求解的复杂系统的决策问题,如果能用分析模型以解析方法求得问题的最优解,应该首先考虑采用优化技术而不是仿真技术。

## 6.1 物流系统仿真概述

### 系统仿真的概念

所谓系统仿真,就是根据系统分析的目的,在分析系统各要素性质及其相互关系的基础上,建立能描述系统结构或行为过程,且具有一定逻辑关系或数量关系的仿真模型,据此进行试验或定量分析,以获得正确决策所需的各种信息。

系统仿真是 20 世纪 50 年代末以来伴随着计算机技术的发展而逐步形成的一门新兴学科。仿真(译音)就是通过建立实际系统模型并利用所建模型对实际系统进行实验研究的过程。

系统仿真通常通过建立一个系统的数学逻辑模型,并且对该模型在计算机上进行试验处理,通过对系统动态特性的观测,以研究系统行为的过程。它包含三方面的含义:①系统仿真的目的是观测系统的动态特性,以研究系统的行为;②模型的建立过程,也即系统的数学逻辑模型的表示,计算机程序的准备等;③系统试验,也即进行试验设计、系统的仿真运行及输出分析等。一般情况下,仿真研究的步骤和内容如下。

(员)问题说明。对所研究的系统的一般描述,系统边界的基本定义等。

(圆)研究目的。明确仿真研究应解决的问题。

(猿)模型建造。确定系统中的实体,每个实体的同性以及从事的活动,系统的可能状态等。明确系统的基本特性,选择和修正系统的基本假设,最终建立一个能刻画被研究系统行为,满足研究目标的模型。

(源)数据收集。收集对系统的每一个实体进行描述时所需要的信息,确定系统参数的概率分布等。

(缘)程序编码。转换系统模型成为可执行的计算机程序。

(远)程序验证。确定一个仿真模型能否按预期的要求执行,也即验证程序与模型的一致性。

(苑)模型确认。比较模型所表现的系统行为和实际观测到的系统行为之间的差异,缩小这些差异以提高模型体现被研究系统的能力。程序验证和模型确认不断重

复,最终建立一个能正确执行的仿真模型。

(愿) 试验设计。确定各种备选方案,选择主要的输入变量及其试验水平,给定仿真运行的长度和重复次数。

(怨) 运行与分析。评价特定输入变量对系统性能度量的影响输出分析以及决策参数的优化。

(员) 仿真报告。编写仿真输出的综合报告。

以上十个步骤概括了仿真研究的基本步骤和内容。由于终态仿真问题和稳态仿真问题的性能测度有着不同的统计特性,输出分析时需要加以区分,因此这里给出终态仿真和稳态仿真的定义。

终态仿真是一种系统性能测度与仿真的时间区[园栽]有关的仿真模式。这里是指在仿真中特定的仿真终止事件发生的时间。

稳态仿真是在仿真终止时间趋于无限时,定义系统性能测度极限的一种仿真模式。

终态仿真与稳态仿真之间的主要差异在于:终态仿真主要研究在规定的时间内系统行为,仿真终止事件在仿真开始时已被确定,系统初始状态的选择对系统的性能测度有着显著的影响,而稳态仿真主要研究系统的稳态行为,仿真运行的长度要足够的长,以便得到系统性能测度的估计。系统的初始状态对系统性能测度的影响是无关紧要的,但合适的初始状态的选择可以缩短仿真运行的长度。由于这些差异,导致了在仿真输出分析时,终态仿真与稳态仿真在统计方法上的不同。当然,终态仿真和稳态仿真的区分也不是绝对的。对于某仿真系统,究竟采用何种模式进行分析,取决于分析者所要达到的目的。

## 10.1 仿真问题的一般表述

最优化的概念作为决策时的一种依据已普遍被人们接受。对不同的问题,存在着不同的最优化结构,如线性规划、动态规划、网络技术,它们都有其自身的结构特点,相应地也存在着适应这种结构特点的优化算法。系统仿真则主要是通过仿真技术来实现系统的最优化目标。

系统仿真技术主要用来解决那些难以用现有的分析模型来求解的复杂系统的决策问题,如果能用分析模型以解析方法求得问题的最优解,那么绝对不用仿真技术,仿真问题的目标函数是一非线性随机函数的数学期望,与分析模型不同的是这种函数关系是通过仿真模型来描述的,在系统的输入变量和输出变量之间没有明确的数学表达式。因此,只能通过运行仿真模型来求目标函数值,这导致了不能像分析模型那样,用解析方法求最优解。特别是仿真技术处理的大多都是随机性问题,使得优化更加复杂和困难。

仿真模型表达了系统内部的推理及逻辑关系,通过仿真优化处理,可以找出一组

输入变量,使得系统的输出达到最优。

令载越( 载, 载, ... , 载)是仿真模型的可控因素,也可以称做仿真模型的决策参数、决策变量或输入变量, 载是仿真模型中的不可控因素。

$$\text{定义 载越( 载, 载, ... , 载)} \tag{远-员}$$

是仿真模型的输出,即仿真响应,该仿真模型共有 孕个仿真响应。

通常情况下,我们把仿真模型看做是实值函数 载越( 载)。函数 载越( 载)的具体形式是不知道的,一次仿真运行即是对 载越( 载)的一次计算,或是仿真响应的一次估计。若仿真模型中没有不可控因素 载,那么就是确定性仿真问题,否则是随机性仿真问题。确定性仿真问题是随机性仿真问题的一个特例,因此以后我们只讨论随机性仿真问题。

定义 再载越( 载, 载越( 载, 载, ... , 载))是仿真问题的目标函数。目标函数不仅依赖于决策参数 载,也依赖于仿真响应 载越( 载)。再载越( 载, 载越( 载, 载, ... , 载))是非线性随机函数,一次仿真运行得到一个 再载越( 载, 载越( 载, 载, ... , 载))的估计值,我们也称 再载越( 载, 载越( 载, 载, ... , 载))为仿真模型的目标响应。一般我们假设 再载越( 载, 载越( 载, 载, ... , 载))可以表示为 载和 载越( 载, 载, ... , 载)的显式函数,但由于仿真响应 载越( 载)没有明确的数学表达式,并且其概率密度函数一般也是不知道的,因此 再载越( 载, 载越( 载, 载, ... , 载))并不能表示成 载的显式函数。

仿真环境下的最优化即确定决策参数 载,使得 再载越( 载, 载越( 载, 载, ... , 载))达到最优。具体地,我们给出以下的定义:仿真问题的最优化即求解

$$\begin{aligned} \text{再载越( 载, 载越( 载, 载, ... , 载))} & \tag{远-圆} \\ \text{再载越( 载, 载越( 载, 载, ... , 载))} & \leq \text{再载越( 载, 载越( 载, 载, ... , 载))} \end{aligned}$$

式中, 再载越( 载, 载越( 载, 载, ... , 载)) ≤ 再载越( 载, 载越( 载, 载, ... , 载))是 孕个约束条件。求目标函数的最大值即求 再载越( 载, 载越( 载, 载, ... , 载))的最小值,因此,以后仅讨论求最小值问题。

上式定义的仿真优化问题是单目标的,根据目标函数的多少,仿真优化问题可以被分为单目标和多目标问题,多目标问题即求解

$$\begin{aligned} \text{再载越( 载, 载越( 载, 载, ... , 载))} & \tag{远-猿} \\ \text{再载越( 载, 载越( 载, 载, ... , 载))} & \leq \text{再载越( 载, 载越( 载, 载, ... , 载))} \end{aligned}$$

基于约束条件的存在性,仿真优化问题可以被分为约束问题 and 无约束问题;基于约束条件的特性,仿真优化问题可以被分为线性约束、非线性约束和随机约束问题。根据可控因素 载越( 载, 载, ... , 载)的数量,可以把仿真优化问题分为三种类型:具有大约 孕个或不到 孕个可控因素的小型问题、具有大约 孕个到 猿个可控因素的中型问题、具有大约 猿个以上可控因素的大型问题。根据可控因素的取值性质,仿真优化问题可以分为连续变量和离散变量问题。

### 连续系统 and 离散系统

系统仿真的基本方法是建立系统的结构模型和量化分析模型,并将其转换为适合在计算机上编程的仿真模型,然后对模型进行仿真实验。由于连续系统和离散(事

件)系统的数学模型有很大差别,所以系统仿真方法基本上分为两大类,即连续系统仿真方法和离散系统仿真方法。

#### 员) 连续系统

连续系统是指系统中的状态变量随时间连续地变化的系统。由于连续系统数学模型主要描述每一实体的变化速率,故数学模型通常是由微分方程组成。当系统比较复杂,尤其是包含非线性因素时,这种微分方程的求解就非常困难,故要借助仿真技术。其基本思想为:将用微分方程所描述的系统转变为能在数字计算机上运行的模型,然后进行编程、运行,以得到连续系统的仿真结果。下文将要介绍的系统动力学模型就是借助计算机对其行为随时间变化的系统进行仿真的一种技术。

#### 圆) 离散系统

离散系统是离散事件动态系统的简称,指的是系统状态变量只在一些离散的时间点上发生变化的系统。这些离散的时间点称为特定时刻,在这些特定时刻由于有事件发生所以才引起系统状态发生变化,而其他时刻系统状态保持不变。

离散系统的另一个主要特点是随机性。因为这类系统中有一个或多个输入量是随机变量而不是确定量,所以它的输出也往往是随机变量。因此,这类系统进行仿真时,对输入和输出进行分析是一个重要内容。例如,在随机服务系统中,“顾客”来到系统的时间多数情况下是随机的,大都属于泊松分布。同样,为“顾客”服务所需时间也是随机的,一般服从负指数分布,因此,系统仿真时大都需要产生相应分布的随机数。

一般说来,在管理领域中经常遇到的往往是离散事件动态系统,常见的有库存系统、随机服务系统等等。

在以上两类基本方法的基础上,还有一些用于系统(特别是社会经济和管理系统)仿真的特殊而有效的方法,如系统动力学方法、蒙特卡洛法等。系统动力学方法通过建立系统动力学模型(流图等),利用用再早有的仿真语言在计算机上实现对真实系统的仿真实验,从而研究系统结构、功能和行为之间的动态关系。

## 来源 物流系统仿真概念

“物流术语”(国家标准,即 GB/T 18354-2006)对物流系统仿真的定义是:“借助计算机仿真技术,对现实物流系统建模并进行实验,得到各种动态活动及其过程的瞬间仿效记录,进而研究物流系统性能的方法。”

物流系统仿真通常借助仿真工具来解决复杂的物流问题。

## 来源 仿真语言

#### 员) 系统仿真语言的分类

仿真语言按被仿真系统的特点分为连续系统仿真语言、离散系统仿真语言和连

续离散混合系统仿真语言,按数学模型的形式分为面向框图的仿真语言和面向方程的仿真语言;按运行方式分为交互式仿真语言和批处理式仿真语言。

#### 圆) 系统仿真语言的组成

仿真语言是一类重要的仿真软件,市售商品均以文本和软磁盘的形式提供。它由以下四个部分组成:①模型定义语言:用以定义模型和仿真实验的语言。②翻译程序(用于连续系统仿真)或处理程序(用于离散系统仿真):翻译程序是将用模型定义语言书写的源程序翻译成宿主语言。处理程序是将源程序连接实用程序库和运行支持程序,形成机器码。③实用程序库:包括算法、专用函数、随机采样函数、各种框图和绘图程序。④运行控制程序:供用户以人机交互的方式控制仿真运行、改变参数、收集数据和显示数据的程序。

#### 猿) 系统仿真语言的特点

仿真语言不同于一般通用的高级语言,具有以下几个特点:①仿真语言使用户可以采用习惯的表达方式来描述仿真模型。②仿真语言具有良好的并行性。在实际的连续系统中,过程都是并行发生的,而一般数字计算机都是串行计算的。因此,用仿真语言编写的源程序都有自动分选排序的功能,通过编译程序将源程序排列成正确的计算顺序,供计算机按顺序进行计算。③仿真语言与顺序性的通用编程语言(如C语言)有兼容性,以扩展仿真语言的功能。④仿真语言备有多种积分方法可供用户选用。⑤仿真语言配有常用输入和输出子程序。⑥用仿真语言编制的源程序,便于实现多次运行仿真的研究。⑦用仿真语言编制的源程序,在程序运行的不同阶段,可给出诊断程序错误的信息,帮助用户查找程序错误。

## 6.2 物流系统仿真的蒙特卡罗法

蒙特卡罗法是一种适用于对离散事件动态系统进行仿真的方法。这种方法的基本思路是,运用一连串随机数来表示一项随机事件的概率分配,然后利用任意取得的随机数,从该项概率分配中获得相应的随机变量值。

蒙特卡罗法亦称统计试验法。它是求解确定型问题而构造一个与原来问题投合直接关系的概率过程,并利用它产生统计现象的方法。使用这种方法进行仿真时,要从系统的研究开始。目前,蒙特卡罗法已成为仿真的有力工具,在物流系统工程中,它被用来解决设备交货、订货、风险决策、排队等很多问题。

蒙特卡罗法的原理是:在所研究的系统中,采用某种特定方法产生随机数和随机变量,仿真随机事件,对结果进行统计处理,从而得到问题的解。通过随机模型,利用一连串的随机数作为输入参数,对相应的输出参数进行统计计算。蒙特卡罗法的理论基础是概率论中的大数定律,即在相同的条件下对事件 $\omega$ 进行 $n$ 次独立的试验,当 $n$ 无限增大时,事件 $\omega$ 的 $n$ 个观察值的平均值依概率收敛于其数学期望值。从原则上

讲,蒙特卡罗法可以求解任何形式的系统问题,特别是对于涉及随机因素多、用解析方法无法求解的复杂的数学模型,蒙特卡罗法可充分显示其优越性。

## 2.1.1 蒙特卡罗法的工作步骤

蒙特卡罗法一般分为三个工作步骤:

一是根据实际问题,构造仿真的数学概率模型。对于本身就具有随机性质的问题,如粒子输运问题,主要是正确描述和模拟这个概率过程,对于本来不是随机性质的确定性问题,比如计算定积分,就必须事先构造一个人为的概率过程,它的某些参量正好是所要求问题的解。即要将不具有随机性质的问题转化为随机性质的问题。

二是根据数学概率模型的特点,设计和应用降低方差,以加快仿真结果的收敛,给出概率模型中各种不同分布的随机变量的抽样方法。

构造了概率模型以后,由于各种概率模型都可以看做是由各种各样的概率分布构成的,因此产生已知概率分布的随机变量(或随机向量),就成为实现蒙特卡罗方法模拟实验的基本手段,这也是蒙特卡罗方法被称为随机抽样的原因。最简单、最基本、最重要的一个概率分布是(圆)上的均匀分布(或称矩形分布)。随机数就是具有这种均匀分布的随机变量。随机数序列就是具有这种分布的总体的一个简单子样,也就是一个具有这种分布的相互独立的随机变数序列。产生随机数的问题,就是从这个分布的抽样问题。在计算机上,可以用物理方法产生随机数,但价格昂贵,不能重复,使用不便。另一种方法是用数学递推公式产生随机数,这样产生的序列与真正的随机数序列不同,所以称为伪随机数或伪随机数序列。不过,经过多种统计检验表明,它与真正的随机数或随机数序列具有相近的性质,因此可把它作为真正的随机数来使用。由已知分布随机抽样有各种方法,与在(圆)上均匀分布抽样不同,这些方法都是借助于随机序列来实现的,也就是说,都是以产生随机数为前提的。由此可见,随机数是我们实现蒙特卡罗模拟的基本工具。

三是统计处理仿真的结果,得到问题的解,并估计解的精度。一般说来,构造了概率模型并能从中抽样后,即实现模拟实验后,我们就要确定一个随机变量,作为所要求的问题的解,我们称它为无偏估计。建立各种估计量,相当于对模拟实验的结果进行考察和登记,从中得到问题的解。

## 2.1.2 蒙特卡罗法的应用算例

例如,某企业为改善库存管理,对某些较为贵重的原材料加强库存控制,以达到减少库存总费用的目的。今已知某种贵重材料其每周的需求量和订货到库时间均属随机变量,即每周需求量是不定的,订货后交货周期也长短不一。实践证明,不同的库存策略其每周的库存总费用是不同的,即使相同的库存策略,由于选用的参数值不

同,也会使库存总费用不同。现在对该贵重材料采用订货点库存控制策略,即库存量降到一定水平时就开始订货,每次订货提取期是不同的,但订货批量  $Q$  却相同,其需求、订货、到货值情况如图 2-15 所示。另外,还已知库存总费用由如下三部分组成:

- 悦——库存费用(元)本例中单位库存费用为 100 元(单位);
- 悦——一次订货费用(元)本例中为 100 元;
- 悦——缺货损失费用(元)本例中单位缺货损失费用为 100 元(单位)。

现在的问题是:如何确定订货点  $S$  和订货批量  $Q$  和初始库存量  $I_0$  的值使其库存总费用为最小。

经定性分析可知,若  $S$  太大则会增加库存费用但也会减少订货费用, $S$  太小则会增加缺货损失费用;同样, $Q$  太大也会增加库存费用等。为此,根据实际经验制订出五个不同参数( $S, Q$ )的方案。五个方案的参数值如表 2-15 所示。

以方案 1 为例,由表 2-15 可知,其初始库存量为 20 单位,当库存量降低到 15 单位(订货点  $S$  水平)时开始订货,每次订货批量  $Q$  为 5 单位。

经分析统计资料得知,该种材料需求量的变化情况在统计了 20 周后可得表 2-16 所示结果,表中根据累计概率分布分配了随机数。同样,可得到原材料到货周期所需统计资料,据此可得到累计概率分布及相应的随机数取值。

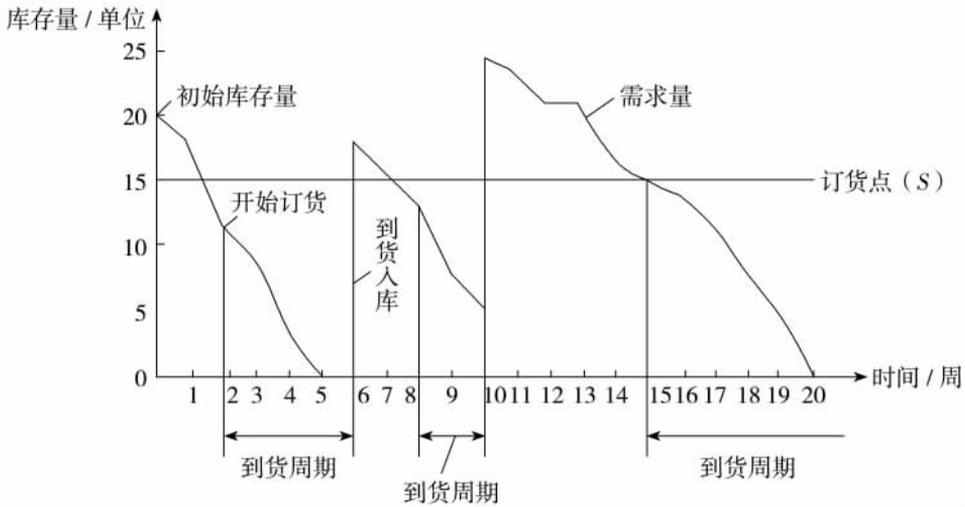


图 2-15 订货点库存策略需求、订货、到货情况示意图

表 2-15 订货方案参数表

订货方案	订货点 $S$	订货批量 $Q$	初始库存量 $I_0$
1	15	5	20
2	15	10	20
3	15	15	20
4	20	5	20
5	20	10	20

表 4-1 每周需求量概率及随机数表

需求量 单位 (周)	发生次数	概率	累计概率	随机数取值范围
0	0	0.10	0.10	01 ~ 10
1	1	0.20	0.30	11 ~ 30
2	2	0.30	0.60	31 ~ 60
3	3	0.20	0.80	61 ~ 80
4	4	0.10	0.90	81 ~ 90
5	5	0.05	0.95	91 ~ 95
6	6	0.05	1.00	96 ~ 00

现以方案员为例进行仿真,即在杂越缘匝越圆匝越圆的条件下开始仿真,仿真步长(时间单位)以周为单位。若仿真圆次(实际仿真时间或次数非常大和,这里只是举例而已),即可将圆周的需求量、库存量、到货周期及库存总费用等情况以仿真表的形式进行描述,如表 4-2 所示。

现根据表 4-2 将仿真过程简要说明如下:由表可知,仿真开始前其库存量余额  $\Delta$  匝越匝越圆,接着按仿真步长(周)开始进行仿真。第 0 周,得需求量随机数 01,越缘,对照表 4-1 可知,需求量 0 越猿单位,此时库存余额  $\Delta$  匝越(圆)猿越猿单位,而库存总费用悦仅指库存费用悦<sub>0</sub>一项,由题意可知,悦<sub>0</sub>越(猿伊猿)元越猿元。接着第 1 周仿真开始,得需求量随机数 01,越缘,相应地 0 越猿单位,此时库存余额  $\Delta$  匝越(猿)猿越猿单位,降低到杂的水平以下,于是开始订货,得到货周期随机数 01,越缘,对照表 4-2 可知,到货周期为源,即要隔源周才能到货入库。这时,库存总费用悦越悦<sub>1</sub>垣悦<sub>0</sub>越(猿伊源垣猿)元越猿元,依此仿真到第 2 周,其 0 越源,而上周的  $\Delta$  匝越猿,因此缺货源猿猿越猿,则此时悦越悦<sub>2</sub>越猿元,如此等等,直到仿真至圆周结束,这时将圆周库存总费用相加,得猿猿元,再除以圆,得方案员的每周平均库存总费用悦为猿元。

表 4-2 库存控制策略仿真值

到货周期 周	发生次数	概率	累计概率	随机数取值范围
0	0	0.10	0.10	01 ~ 10
1	1	0.20	0.30	11 ~ 30
2	2	0.30	0.60	31 ~ 60
3	3	0.20	0.80	61 ~ 80
4	4	0.10	0.90	81 ~ 90
5	5	0.05	0.95	91 ~ 95
6	6	0.05	1.00	96 ~ 00

## 随机数的计算

随机数和随机变量的产生必须符合实际问题的概率特征,因此构造仿真的数学概率模型尤为重要。产生随机数和随机变量的方法,过去通常是掷针、掷硬币、袋中投球、转动轮盘,而现在多由电子计算机根据专门的算法来产生。

### 1) 随机数和伪随机数

从图 10-1 利用蒙特卡罗法对离散系统进行仿真试验的例子来看可以知道,为了进行仿真试验,必须使系统产生随机事件(如该例的原材料需求量、到货周期),因此,仿真过程中必不可少的一个步骤就是要产生一定数量的随机变量在规定区间内的采样值,也就是随机变量的随机数。所以说,所谓随机数是指在区间  $[a, b]$  (一般为  $[0, 1]$ ) 之间的随机采样值。

所谓伪随机数,是指用一种递推型算法的公式来产生“随机”数,但它不具有真正的随机性,因此称作“伪随机数”。

由于伪随机数通常是递推计算的,这就说明前一次计算得到的随机数将用于确定下一次的计算,即第  $n$  个随机数将用来推算第  $(n+1)$  个随机数,第  $(n+1)$  个随机数将用来推算  $(n+2)$  个随机数等等。用这种方法得到的绝不是真正的随机数,但一般它能满足实际的需要。理解这一点,伪随机数以后就简单地被称为随机数了。

### 2) 均匀分布随机数的产生

如果随机变量  $X$  的概率密度函数为

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (10-1)$$

则称随机变量  $X$  在区间  $[a, b]$  上服从均匀分布。这表示  $X$  在区间  $[a, b]$  上取任何一点的可能性都是一样的。这里,如果不作特别说明,所指的是  $[0, 1]$  区间上以同样概率出现的一系列随机数。

产生均匀分布随机数的方法很多,如随机数表法、自乘取中法、倍积取中法、同余数法等等。其中同余数法又是目前应用较多的一种方法。

同余数法用算法递推型公式产生随机数,得到的数列一般都具有均匀分布随机数的统计特性。这种方法使用起来简单、方便、迅速,故使用较广。

同余数法计算的递推公式为

$$X_{n+1} = (\lambda X_n + \mu) \pmod{M} \quad (10-2)$$

其含意是将  $(\lambda X_n + \mu)$  除以模数  $M$ , 取其余数为  $X_{n+1}$ , 也就是说  $X_{n+1}$  列值与其余数相同。化成计算公式,则

$$X_{n+1} = (\lambda X_n + \mu) \text{ 原} \left[ \frac{\lambda X_n + \mu}{M} \right] \text{ 伊} \quad (10-3)$$

式中,中括号内的数值只取整数。

使用同余数法应当事先选定  $\lambda$ 、 $\mu$ 、 $m$  三个参数,然后给出一个初始值  $u_0$ ,就可以利用上述公式计算出一个随机数序列。

当  $\lambda < \mu < m$  时,则  $u_{k+1} = (u_k + \mu) \bmod m$  伊皂称为加同余数法。

当  $\lambda < \mu < m$  时,则  $u_{k+1} = (\lambda u_k) \bmod m$  伊皂称为乘同余数法。

当  $\lambda < \mu < m$  时,则称为混合同余数法。

这里我们以同余数法为例说明随机数的递推计算过程。

令  $\lambda < \mu < m$  伊皂  $u_0 < m$

则  $u_1 = (\lambda u_0) \bmod m$  伊皂  $u_2 = (\lambda u_1) \bmod m$  伊皂  $u_3 = (\lambda u_2) \bmod m$

$u_4 = (\lambda u_3) \bmod m$  伊皂  $u_5 = (\lambda u_4) \bmod m$  伊皂  $u_6 = (\lambda u_5) \bmod m$

同理可计算得  $u_7, u_8, \dots$

由上面递推计算可知,这个随机数列到第  $m$  个随机数后就开始循环,其循环长度为  $m$ 。

由于用有限的几位数字所表示的一组数列总是有限的,要用这种方法来产生一个永不重复的数列是不可能的。为使数列有足够长度,必须使模数  $m$  尽可能大。一般说来,模数取计算机整数全部字长,在整数字长为 32 的二进制情况下,取  $m < 2^{32}$ 。另外,乘数  $\lambda$  应尽量接近  $m$  的平方根,其位数一般不应少于 16 位,  $u_0$  可选任何正奇数。

计算机用的随机数发生器其实就是事先编好了的子程序,每调用一次这个子程序,就可根据递推公式和给定的参数值得到随机数列中的一个随机数。

### 3. 给定分布随机数的产生

均匀分布随机数的产生,为进一步产生各种给定分布随机数创造了条件。运用概率论中概率积分变换运算法(通常称之为逆变换法),借助  $[0, 1]$  区间均匀分布的随机数来产生具有给定的概率分布函数的随机数。下面举例介绍用解析法计算负指数分布随机数的产生方法。

由  $[0, 1]$  区间均匀分布的随机数产生一组概率密度函数为

$$f(u) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda u}, & u \geq 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3-17)$$

的随机数。

所求随机变量的累积分布函数为

$$F(u) = \int_0^u \lambda e^{-\lambda t} dt = 1 - e^{-\lambda u}, \quad u \geq 0 \quad (3-18)$$

它在区间  $[0, 1]$  上是单调递增的。

令均匀分布的随机数变量  $v$  与  $F(u)$  相等,得到

$$v = 1 - e^{-\lambda u} \quad (3-19)$$

即  $y = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{1}{x}$

由于  $x$  是  $[0, 1]$  区间均匀分布随机数, 所以  $y$  仍是  $[0, 1]$  区间均匀分布随机数。故可用  $y$  代替  $x$ , 于是上式可以写成

$$y = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{1}{x} \quad (2-10)$$

由此可求得以  $y$  为自变量的  $x$  的表达式, 即

$$x = e^{-\lambda y} \quad (2-11)$$

据此, 可按已获得的一系列  $[0, 1]$  区间上均匀分布随机数, 来求得一系列相应的有参数为  $\lambda$  的负指数分布的随机数。例如, 有一组在  $[0, 1]$  区间上均匀分布的随机数  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 则  $y_1 = -\ln x_1, y_2 = -\ln x_2, \dots, y_n = -\ln x_n$  就是服从  $\lambda$  的负指数分布的一组随机数, 为此, 代入  $x = e^{-\lambda y}$  得

$$\begin{aligned} x_1 &= e^{-\lambda y_1} \\ x_2 &= e^{-\lambda y_2} \\ &\vdots \\ x_n &= e^{-\lambda y_n} \end{aligned}$$

当给定的概率累积分布函数具有比较复杂的形式, 以致难以(甚至不可能)用上述解析法求出它的反函数时, 可以考虑采用线性插值法等来求得, 具体做法就不再介绍了。

总之, 目前许多计算机系统实用程序库中, 都具备了各种分布的随机数发生器, 可供用户直接使用。

### 6.3 系统动力学方法

系统动力学( System Dynamics, 简称 SD)产生于 1956 年, 其创始人是美国麻省理工学院( MIT)的福瑞斯特( Jay W. Forrester)教授。

系统动力学是福瑞斯特为分析生产管理及库存管理等企业问题而提出的系统仿真方法, 最初称为工业动态学。1955 年, 福瑞斯特发表了《工业动力学》( Industrial Dynamics) 一书, 随后, 系统动力学应用范围日益扩大, 几乎遍及各个领域, 逐渐形成了比较成熟的新学科——系统动力学。

#### 1. 系统动力学基础

##### (1) 系统动力学的特点

系统动力学解决问题的独特性就是建立规范的数学模型。从系统内部的微观结构入手进行建模, 同时借助计算机仿真技术来分析研究系统结构功能与动态行为的内在关系, 从而找出解决问题的对策、基础因果关系和结构决定行为, 这就是系统动

力学建模的独到之处。

(员)所建模型要与管理者的思维模式相通。任何模型一般总是要组织信息、澄清观点、统一认识,对令人困惑和有争议的系统行为给出令人满意的解释。系统动力学的建模技术易于将管理者的思维进行量化。

(圆)研究问题注重从因果机制出发。因果关系是存在于各种现象之间的普遍关系。从因果关系出发,分析各因素之间构成的因果反馈环,才能从纷乱的现象中找出发生这些现象的内在原因和形成机制。

(猿)从观察系统结构入手。系统动力学认为系统结构是系统发展的内在动力。只有了解系统的结构及变化机制,才有可能预测系统未来的行为。因而,系统动力学模型也被称为结构依存型模型。

(源)内生化处理。系统动力学模型从内部寻求解释系统行为的规律,重点在于模型的内部结构。

(缘)非线性。系统动力学模型能够处理复杂的非线性系统,从而适于研究社会经济系统这样的复杂系统。

(远)延迟特性。系统动力学模型还引入了延迟机制,使它与所描述的实际系统行为更接近。

(苑)能够进行政策仿真。系统动力学模型是实际系统的实验室。利用模型仿真剖析系统,获取更丰富、更深刻的信息,进而觅寻解决系统问题的途径。系统动力学解决问题的过程实质上也是寻优过程,其最终目的是寻找系统的较优结构,以求得较优的系统功能。

#### 圆) 系统动力学的基本概念与原理

(员)反馈系统。系统内同一单元或同一子块,其输出与输入间的相互关系称为反馈,也就是信息的传输与回授。所谓反馈系统就是包含有反馈环节与其作用的系统。它要受系统本身的历史行为的影响,把历史行为的后果回授给系统本身,以影响未来的行为。反馈系统也称为闭环系统,又可分为正反馈系统和负反馈系统。正反馈系统是在运行时不断增长的过程的系统,是自我强化系统;负反馈系统是在运行时寻求目标,若没达到目标就会不断产生反馈的系统。

(圆)系统结构。从系统论的观点看,所谓结构是指单元的秩序。它包含两层意思:一是组成系统的各单元,二是指诸单元间的作用与关系。系统的结构标志着系统构成的特征。

系统动力学认为反馈回路是构成系统的基本结构。系统的结构一般存在下列体系与层次:

- ① 确定系统范围的界限,表示系统;
- ② 子系统或子结构,超越圆,...
- ③ 系统的基本单元,反馈回路结构,超越圆,...
- ④ 反馈回路的组成与从属成分:反馈回路的主要变量(水平变量、变化率);

⑤ 水平变量和速率变量。

(獭) 水平变量和速率变量。任何系统都由相互联系的反馈回路组成。一个反馈回路由两种性质完全不同的,即水平变量(蕴藏变量,也称为积累变量)和速率变量(砸碎变量)组成。

水平变量能够描述系统在任一特定时刻的状态,对系统中控制作用的结果进行积累(或积分)。水平变量不能在瞬间被改变。水平变量随时间推移的各时间点之间建立了系统的连续性。

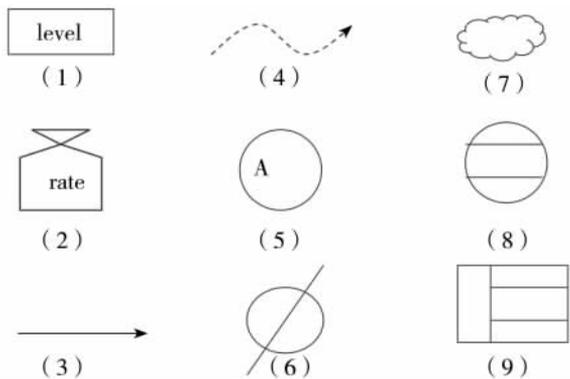
速率变量的作用是表示水平变量变化的快慢,速率变量不能决定水平变量现时刻的值,但能决定水平变量变化曲线的斜率(每单位时间内的变化量)。

在系统动力学模型中,水平变量用水平方程(蕴方程)表示,速率变量用速率方程(砸方程)表示,速率方程是在系统中描述控制作用的决策表达式,表示了一个决策环节所产生的控制作用。

### 远-圆 系统动力学建模与仿真的基本步骤

#### 员)常用的系统参量

系统动力学中常用的系统参量如下,并请参见图远-圆和图远-獭所示。



图远-圆 系统参量图

(员) 存量(蕴藏) 图中的长方形,像一个水池,可称为水平、存量、积累量、流位,它是系统的状态,也就是系统的某个指标值。流图中用水池的水位高低来模仿系统状态值的大小。

(圆) 速率(砸碎) 图中的阀门形,可称为决策函数、速度、速率、流率等。它控制着存量的变化。流图中用阀门模拟控制水位的高低机制。

(獭) 实线称为实物流。实线连接“阀门”和“水池”模仿控制的通路。它贯穿存量和速率。

(源) 虚线称为信息链,模仿信息传递的过程。它指向速率,表示根据什么信息控

制速率。但不能从这条曲线看出具体控制方式的细节。

(缘) 圆称为辅助变量, 辅助表示流速变动的规律。

(远) 小圆加斜线称为常数, 是系统中重要的参数。

(苑) 不规则的闭曲线称为源或汇。源指实物的来源, 汇指实物的去向, 好比水的源泉和去向。它是系统之外的元素。

(愿) 函数变量、表变量。

(怨) 延迟

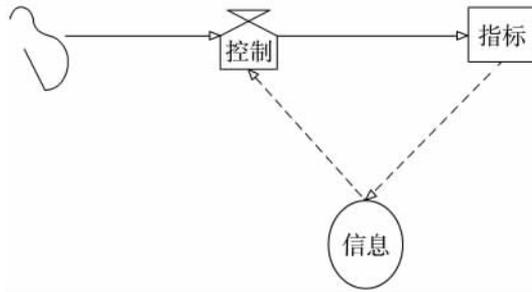


图 4-1 系统流图

#### 4.1 系统动力学方法的基本步骤

系统动力学方法从因果关系环开始, 得到相应的系统流图。再从流图写出方程组, 再在计算机上对模型进行仿真试验。从仿真的结果, 研究得出有关政策, 以改进和发展现有系统。基本步骤如下:

(员) 明确仿真目的。不同的目的将涉及不同的要素, 研究的方法也会有所不同, 最终仿真的结果也将不同。

(圆) 构成系统因果反馈环。根据仿真的目的, 收集有关的经验、知识和资料, 确定有关的基本要素, 按照要素之间的因果关系, 构成系统的因果反馈环。

(猿) 绘制系统流图。在绘制流图时, 首先要对因果反馈环中的基本要素的类型和性质加以区分, 确定有关的流位变量、流率变量和其他变量, 依照流图中所使用的各类记号, 绘制成适用的系统流图。

(源) 程序设计。根据系统流图写出有关的数学方程, 利用 (再) 计算机仿真语言进行程序设计。

(缘) 上机仿真实验。

(远) 仿真结果分析。根据仿真结果, 分析系统的行为, 评估各种策略。

### 4.2 因果反馈环

因果关系是系统动力学方法建模的基础, 是对复杂系统的要素与关系的一种真实写照。

员) 因果键

通常因果关系是用一个箭头表示的。例如,系统中的两个要素 A 和 B 图 远-源表示了要素 A 与要素 B 的因果关系,A 是原因,B 是结果。这种有箭头的线称为因果关系键,简称因果键。如果 A 增 B 也增,则称 A 与 B 间具有正因果关系,用“+”标于因果键旁,如图 远-源所示,这时的因果键就是正因果键。同理,图 远-源表示的是负因果关系,其键称为负因果键,说明 A 与 B 变化方向相反,A 增 B 减,负因果键用“-”标出。

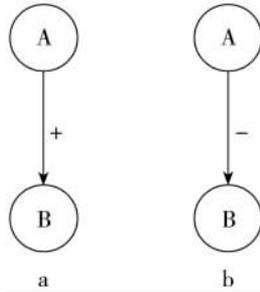


图 远-源 因果键

圆) 反馈环

两个以上的因果键首尾相连形成环状,便是因果反馈环。如图 远-缘所示。其中图 远-缘是最简单的反馈环,A 与 B 互为因果,形成闭合环路。

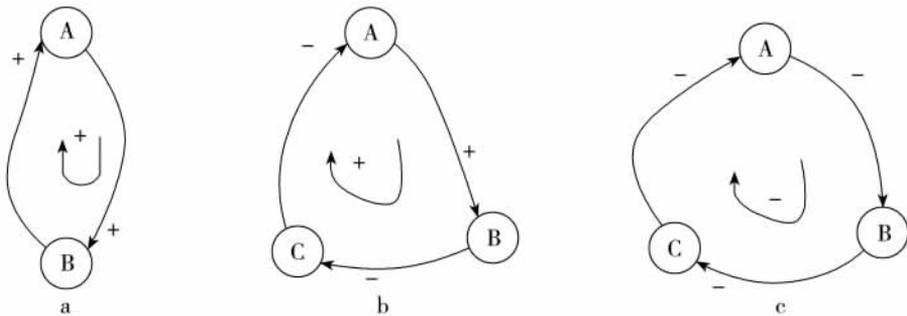


图 远-缘 反馈环

因为因果键有正、负之分,因此,由这种带极性的因果键串联而成的反馈环也必然有正反馈和负反馈之分。图 远-缘和图 远-缘所表示的是正反馈环,图 远-缘所表示的是负反馈环。正反馈环具有自我强化效果。如图 远-缘中,当环中一个要素发生变化后,环中各要素会依次作用,最后使要素变化增强。负反馈的行为是使变化趋于稳定,有一种自我调节的能力,如图 远-缘中,当环中一个要素发生变化后,通过环中各要素依次的作用,最后使该要素减少其变化。

反馈环极性的判断可采用逐步跟踪的分析方法,但有时会很繁琐。通常可按以下方法确定:若反馈环中各键均为正键,该环必为正反馈环;若反馈环中有偶数个负键,

该环为正反馈环,若反馈环中有奇数个负键,则该环为负反馈环。

(员) 一阶负反馈环

由于负反馈环具有自我调节效果,因此,社会系统主要是通过负反馈环的作用达到稳定状态。最简单的情形如图 远-远所示。这是一个库存系统,假设只有入库量而没有出库量,订货过程与入库过程都没有时间延迟,即只要决定订货,货物就立即可以送到库房。在这个简单的系统中,影响库存量的因素只有订货速度(单位时间的订货量),订货速度大,库存量就增长得快,反之则增长得慢。因此,订货速度与库存量之间存在正因果关系键。决定订货速度快慢的因素比较复杂,就一般情况而言,任何库存系统,不论是考虑库存容量还是资金周转,都不可能无限制地进货。因此,必定有一个目标库存量,当实际库存量少于目标值,则存货差就是正值,管理人员就要考虑进货。那么,管理人员究竟多长时间内能使货物进来呢?即调整库存的周期将影响进货速度的快慢,这就构成了一个最简单的库存控制系统。如图 远-远所示。各要素构成一个负反馈环。这里的“阶”就是水平变量的个数,这时的水平变量为库存量。

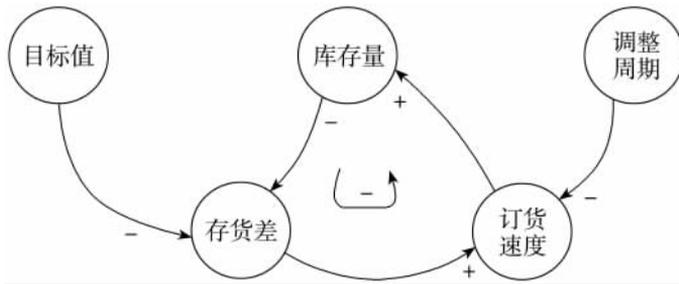


图 远-远 库存系统一阶负反馈环

负反馈系统的特点是具有跟随目标的特性,诸如自调节、自控制、自均衡等均隐含着追寻或趋向目标的负反馈系统。

最简单的负反馈系统在决策过程部分包含目标和偏差两部分。目标起着参考和导向作用,决定系统的基本运动,系统状态与目标值的偏差决定校正作用的方向与量的大小。因此可知,负反馈系统具有努力维持系统处于平衡状态的特性。在一般情况下,基于状态值与目标值之差的速率发挥调节作用,驱动系统状态驱向目标值,预定时间常数决定系统对状态变化的反应速度。

在图 远-远所示的系统中,只要库存目标和进货周期已经确定,负反馈环就开始起作用,系统会自动调整进货速度,从而使库存值符合管理人员确定的期望库存量。假设目标库存量为  $Q_0$  件,调整周期为  $T$  周,初始库存量为  $Q_1$  件,则每周订货量可由下式决定

$$V = \frac{Q_0 - Q_1}{T} \quad (远-远)$$

式中:  $V$ ——订货速度(件/周);  $Q_0$ ——目标库存量(件);  $Q_1$ ——实际库存量(件);  $T$ ——调整周期(周)。

于是可得到图 远-苑所示的实际库存逼近目标库存的曲线(指数响应曲线)。

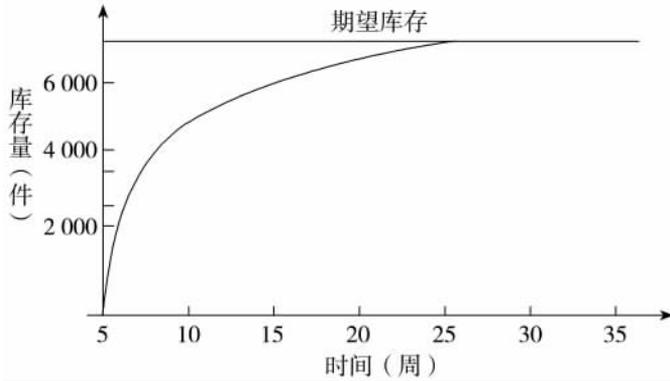


图 远-苑 库存系统一阶指数响应

(圆)二阶负反馈环

二阶的意思是负反馈环中有两个水平变量。前述的一阶负反馈环被看成简单的目标值而没有被动的时间响应。现将一阶负反馈环加以扩充,图 远-愿所示是一个二阶库存管理系统,其中“库存量”受“接受货物速度”的控制,库存量信息与期望库存量值比较后,产生“库存差”。决策者根据库存差值确定“订货量”,在“订货量”与“收货量”之间有延迟,形成了“在途货物量”。“在途货物量”影响“收货量”。如图 远-愿所示,图中各因果键,除了“库存差”的作用为负之外,其余的均为正键。因此,该反馈环为负环,又因为该反馈环为负环,该反馈环有两个积累变量——“库存量”和“在途货物量”,所以该库存控制系统为二阶负反馈系统。

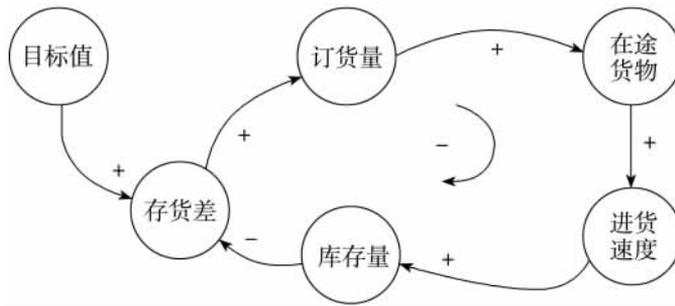


图 远-愿 库存系统二阶负反馈环

可以编制相应的计算程序仿真二阶负反馈的行为,将计算结果描点画图,可以得出库存的变化曲线,如图 远-怨所示。由该图所示的库存行为表明,系统在库存的初始值为 4000 件、期望库存量为 6000 件这样的情况下开始工作,进行固定目标的跟踪调节活动,当库存量 陨达到期望库存值后出现超调期,而后,库存量在期望库存量附近随时间变化做衰减振荡,最后超过稳定值——目标值,这是二阶负反馈环的一般行为。

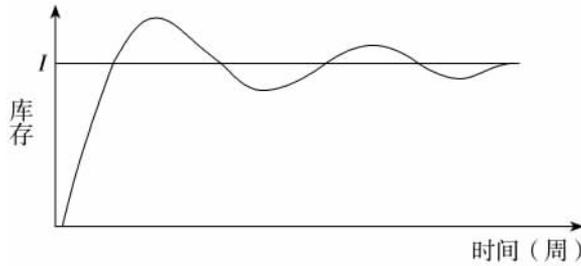


图 4-18 库存的变化曲线

(猿) 正反馈系统及其特性

一阶正反馈系统的典型结构表示为

$$\frac{dX}{dt} = \lambda X + U$$

$$X(0) = X_0$$

(猿-猿)

式中  $X$ ——水平变量  $\lambda$ ——速率变量  $\Delta t$ ——计算时间间隔。

在正反馈闭合回路中,某部分的变化将引起全体要素在同一方向上产生无休止的变化。其状态值呈指数增长。如图 4-19 所示。

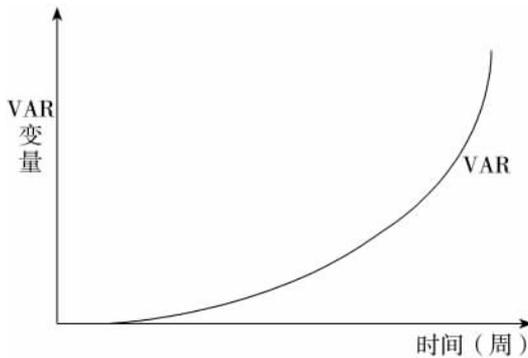


图 4-19 指数增长曲线

正反馈系统最简单的模型值包括一个状态变量,反映速率变化的时间积累。究竟呈现良性还是恶性循环效应,取决于回路中各部分之间的作用相互改善还是恶化。当因果回路中某一部分开始改善时,正反馈的作用将使该效果得到强化,并将进一步改善;当因果回路中的某一部分开始恶化时,系统中的恶化部分将进一步恶化。

指数增长过程的强化特点可用倍增时间表示,超指数增长则以其倍增时间逐渐减小为标志。指数增长过程最初并不显著,经过多个倍增时间后,将显出突然爆炸式增长的特点。当然,在有界限的系统中,任何变量都不可能永远增长。在真实的企业系统内,唯有当增长的力量能压倒阻碍力量时,才能出现指数倍数增长。然而,当系统的一些变量增长后,负的或控制的反馈力量必然最终压倒正反馈力量成为主导因素。

总之,正反馈环不像负反馈环那样去寻求一个内外部确定的目标。正反馈是背离目标的,它使系统产生发散现象而逐渐脱离初始状态,其主要原因是由于正反馈产生

的自我强化变化特性。

社会系统的因果关系由于结构复杂程度不同,反馈环的形式和机理多种多样,可能是多环系统,各环的阶次及环间的耦合情况不同,但是只要掌握一阶正反馈环、一阶负反馈环及二阶负反馈环的机理和行为特征,对于分析各种复杂情况,就有了坚实的基础。

## 二、物流系统动力学分析

### (一) 物流系统动力学的目的

现代科学技术的发展有两个特点:一方面,部门科学不断向纵深发展,科学研究的对象越来越专一,科学分类越来越精细,新领域、新学科、新专业不断产生;另一方面,各个不同的学科之间相互渗透、相互交叉、相互吸收,使得科学技术日趋整体化、综合化。这两个方面常常互为因果。高度的综合可以促进高度的分化,而高度的分化也可以促进高度的综合。科学技术就是这样不断促进、螺旋上升发展的,物流系统动力学就是系统动力学与物流系统科学结合形成的一门新的交叉学科。

物流系统是整个国民经济体系的大动脉,是社会生产和生活的必要条件。物流系统与国民经济双向制约的关系如何,运输需求与供给如何动态发展,物流系统的基本因果反馈结构如何决定系统的行为,短缺信号在物流系统中有哪些控制作用,不同的物流系统发展战略对社会经济有何影响,所有这些具有重大现实意义的问题,都需要在理论上有个完整的、清晰的框架。从定性、定量上进行仔细分析可见,以往的科学,像运筹学、计量经济学等尽管在其通用的领域起着重要的作用,但其优势——追求完美的最优及严密的数学逻辑和数据统计检验的要求,对于上述问题却无能为力,而系统动力学恰好弥补了这一不足。

然而,系统动力学本身亦有其固有的缺陷,如缺乏科学的参数估计方法,其建议过分强调艺术而带有主观性,难以解决系统结构变化等问题,这些都需要其他多种方法互相补充来加以完善。

总之,以系统动力学为框架,综合其他定性、定量方法,应用于物流系统领域,分析物流的系统结构及动态发展机制,进行政策试验,解决宏观的带有根本性的物流发展战略问题,这就是物流系统动力学所要达到的目的。

### (二) 物流系统动力学因果分析

由于社会系统的复杂性,以至于无法仅凭借语言和文字对它的行为和结构做准确地描述,于是人们曾以方程式进行说明与表达。但是,方程式不能清晰地描述反馈环的机理,常常使人觉得机械与繁琐。为了便于掌握社会系统的构造和动态特性,以及便于人们进行关于系统特性的讨论与沟通,系统动力学家们研究出因果关系图这种表达方式。所以,物流系统动力学分析首先应该用系统动力学因果关系图表示出物流系统的行为和结构,为以后利用计算机语言编程、上机仿真做准备。

物流系统结构受到国民经济结构、产业政策、需求消费结构、自然地理环境等因素的影响。这些因素又包含众多的因子,形成一种合力,从各个方面影响制约着交通运输系统的结构。这个系统的结构有一定的层次性、相关性和相对性。认清该系统结构的特性,对于建立合理的物流系统结构具有十分重要的意义。

在研究模型中,不仅要准确地描述现实领域,也要合理地描述控制领域。所谓现实领域,是指经济中实际发生的物质过程。而控制领域,则是指控制现实领域的智力过程,也就是通常所说的政策、法规。

在物流系统动力学模型中,包括如下的系统要素:

(员) 现实领域:经济水平,人口水平,消费水平,物流系统需求,物流系统供给等。

(圆) 控制领域:国民收入分配政策,人口控制政策,物流系统政策,经济发展政策等。

上述系统要素基本上界定了我们的研究范围,系统的行为变化取决于上述系统要素的构成及其相互关系。

经过上述系统要素分析,在深入分析物流系统的基础上,我们可以得到物流系统的因果关系图。所谓基本因果关系,即是舍弃一切无关紧要的细节,由数个最能表征系统结构,从而成为系统动态发展内在机制的因果反馈环组成的因果关系图,见图 远-员。

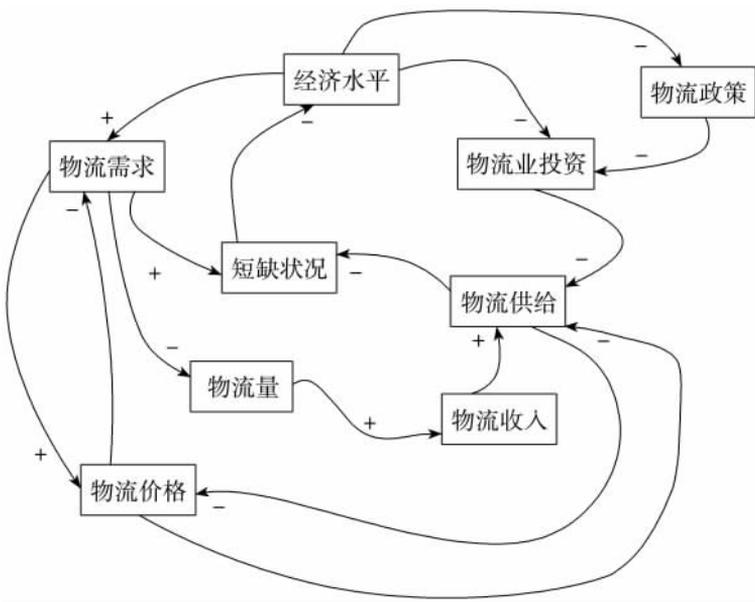


图 远-员 地区物流系统基本因果关系图

在基本因果关系图中,包括以下几个基本反馈环,如图 远-圆所示。

环 葬 为负反馈环。表示经济的发展将引起物流需求的增加,物流需求的增加将导致物流系统能力的短缺,使货物积压,从而将限制经济的进一步发展。

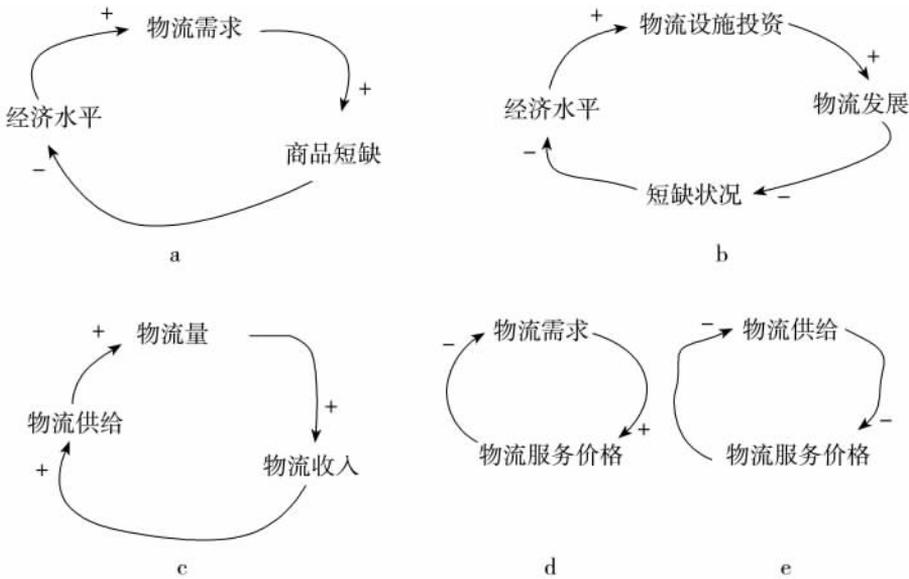


图 远— 基本因果关系环

环 遭为正反馈环。表示社会经济的发展 ,使国家将会增加物流设施投资 ,从而改善物流供给状况 ,最终将促进国民经济的进一步增长 ,供给的增加将使物流系统部门完成更多的物流量 ,在一定条件下能够自我发展。同时 ,该正反馈环说明了物流设施作为基础设施和社会公益性设施 ,社会效益明显。因此 ,需要政府在客观上增加物流设施投资 ,实行倾斜的产业政策 ,以增加物流供给能力。

环 糟为正反馈环。该环描述了物流产业或物流企业的自我发展机制。物流供给能力的改善 ,将使物流企业能够完成更多的物流量 ,从而使物流企业的营业输入增加 ,使其在一定条件下能够自我发展。

环 凿为负反馈环。该环表示物流市场价格对于物流需求的调节作用。

环 藻为负反馈环。它表示物流市场价格对于物流供给能力的调节机制。在我国目前情况下 ,随着物流产业化市场化机制的进一步完善 ,这些表征市场特点的反馈机制起着更加明显的作用。

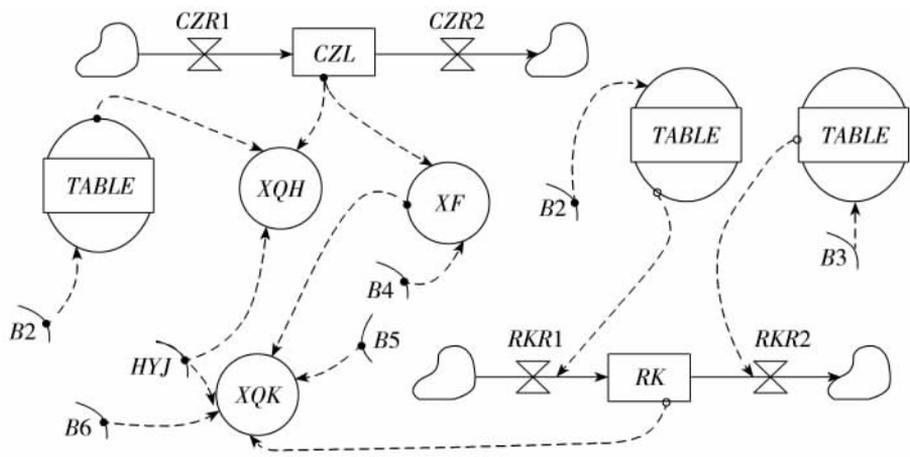
物流系统动力学的基本特点在于它从物流系统的复杂基本构造出发 ,充分考虑到系统与环境、系统内部各因素间的关系 ,构造出一种能够比较全面刻画复杂物流系统的模型 ,这种模型实质上是概念模型与结构模型的集中体现 ,加之它是以计算机仿真实验为手段 ,主要从高层次、大规模等方向描述和显示物流系统发展的宏观趋势 ,因此也被誉为“ 战略与策略的实验室 ”。系统动力学的关键在于研究系统时引进信息反馈与系统动力学的概念与原理 ,把物流系统问题流体化 ,从而获得描述物流系统构造的一般方法 ,并且通过电子计算机强大的记忆能力和高速运算能力来实现对复杂系统的可重复实验。系统动力学的重点在于发现有关系统构造的信息 ,其中包括管理者和决策者的经验、知识和敏锐的洞察力和其他可以观测到的数据信息。



个复杂的非线性系统,其经济的发展是在企业诸多因素的共同作用下向前延伸的,同时,其内部存在着复杂的自组织功能,通过产业结构的调整,自我吸收能力的增强以及技术进步等因素的影响,可以在一定程度上抵消物流短缺的阻碍作用。同时,物流短缺对经济的影响存在时间延迟。因此,可以用一系列函数(最大值函数,最小值函数,延迟函数,表函数等)来描述这种有界延迟影响的作用。

圆) 物流需求子构造

前面的论述已经阐明,物流需求源于社会经济活动的需要,是派生性需求。因此,在区域综合物流系统模型中,物流需求不作为积累变量,而是作为辅助变量处理。其系统流图如图远-员源所示。



图远-员源 物流需求子构造

图中,  $Q$  为物流需求,  $R$  为相关信息流、商流需求;  $\mu$  为物流需求系数,  $\alpha$  为消费水平,  $\beta$  为区域人口数量,  $\gamma$  为人口出生率,  $\delta$  为人口死亡率,  $\epsilon$  为货运价格影响因子,  $\zeta$  为人口出生率影响因子,  $\eta$  为人口死亡率影响因子,  $\theta$  为社会总产值中生活消费的比例,  $\iota$  为消费水平影响因子,  $\kappa$  为人口影响因子。其相应的构造方程为

$$\begin{aligned}
 Q &= \mu \cdot R \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \delta \cdot \epsilon \cdot \zeta \cdot \eta \cdot \theta \cdot \iota \cdot \kappa \\
 R &= \mu \cdot R \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \delta \cdot \epsilon \cdot \zeta \cdot \eta \cdot \theta \cdot \iota \cdot \kappa \\
 \mu &= \mu \cdot R \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \delta \cdot \epsilon \cdot \zeta \cdot \eta \cdot \theta \cdot \iota \cdot \kappa \\
 \alpha &= \mu \cdot R \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \delta \cdot \epsilon \cdot \zeta \cdot \eta \cdot \theta \cdot \iota \cdot \kappa \\
 \beta &= \mu \cdot R \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \delta \cdot \epsilon \cdot \zeta \cdot \eta \cdot \theta \cdot \iota \cdot \kappa \\
 \gamma &= \mu \cdot R \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \delta \cdot \epsilon \cdot \zeta \cdot \eta \cdot \theta \cdot \iota \cdot \kappa \\
 \delta &= \mu \cdot R \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \delta \cdot \epsilon \cdot \zeta \cdot \eta \cdot \theta \cdot \iota \cdot \kappa \\
 \epsilon &= \mu \cdot R \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \delta \cdot \epsilon \cdot \zeta \cdot \eta \cdot \theta \cdot \iota \cdot \kappa \\
 \zeta &= \mu \cdot R \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \delta \cdot \epsilon \cdot \zeta \cdot \eta \cdot \theta \cdot \iota \cdot \kappa \\
 \eta &= \mu \cdot R \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \delta \cdot \epsilon \cdot \zeta \cdot \eta \cdot \theta \cdot \iota \cdot \kappa \\
 \theta &= \mu \cdot R \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \delta \cdot \epsilon \cdot \zeta \cdot \eta \cdot \theta \cdot \iota \cdot \kappa \\
 \iota &= \mu \cdot R \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \delta \cdot \epsilon \cdot \zeta \cdot \eta \cdot \theta \cdot \iota \cdot \kappa \\
 \kappa &= \mu \cdot R \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \delta \cdot \epsilon \cdot \zeta \cdot \eta \cdot \theta \cdot \iota \cdot \kappa
 \end{aligned}
 \tag{远-员缘}$$

猿) 物流供给子构造

影响物流供给发展的主要因素有以下几种:

(员) 物流作为基础及公益设施,其效率主要表现为社会效益,因此作为经济发展

的必要条件,政府(包括中央与地方)必须从宏观上保证对物流有一定的投入,增加物流供给。

(圆)作为一个独立的物质生产部门,物流必须要有自我生存与发展的能力,因此物流企业要把物流收入的一部分转化为投资。

(猿)国家的运价政策对物流供给亦有影响。

物流能力是积累变量,表示物流供给。其系统流图如图 4-1 所示。

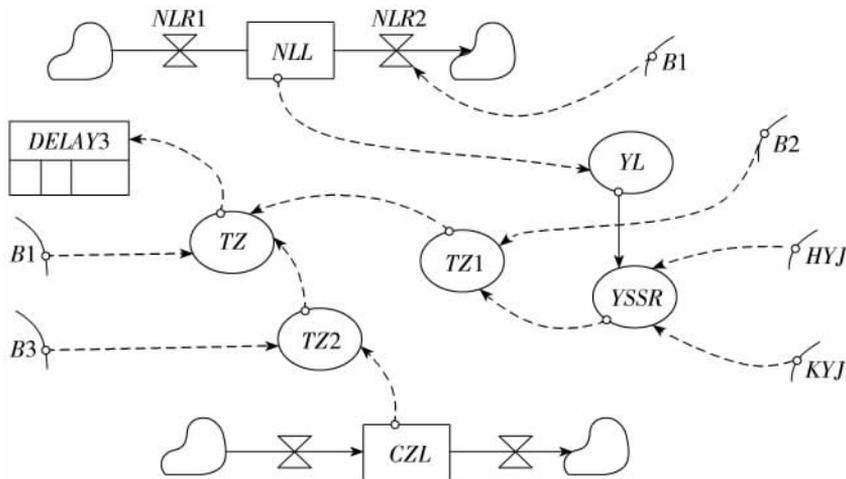


图 4-1 物流供给子构造

图中,  $NLL$  为物流能力;  $NLR1$  为物流能力增长率;  $NLR2$  为物流设备消耗率;  $Y$  为能力设备转换系数;  $TZ$  为物流投资量;  $TZ1$  为物流部门自我投资量;  $TZ2$  为社会对物流部门的投资;  $YL$  为投资效果系数;  $YSSR$  为物流部门固定资产投资比例;  $B1$  为国民收入再分配小物流投资比例;  $B2$  为物流部门收入;  $B3$  为物流部门完成运量;  $HYJ$  为客运价格影响因子。其相应的构造方程为

$$NLL \text{ 的速率} = NLR1 - NLR2$$

$$TZ \text{ 的速率} = B1 - \frac{TZ}{DELAY3}$$

$$TZ1 \text{ 的速率} = YL - \frac{TZ1}{DELAY3}$$

$$TZ2 \text{ 的速率} = B3 - \frac{TZ2}{DELAY3}$$

$$YSSR \text{ 的速率} = B2 - \frac{YSSR}{DELAY3}$$

$$CZL \text{ 的速率} = B3 - \frac{CZL}{DELAY3}$$

(4-1)

### 源) 结果分析

实际的区域综合物流系统模型是在上述基本子构造的基础上完善而成的。物流需求,分为货运需求和客运需求。其中货运需求又分为能源类、材料类以及消费类货运需求。经济水平,分为工业总产值、农业总产值、建筑业总产值、商业总产值等。物流供给分为铁路物流能力、公路物流能力、水路物流能力、航空物流能力、管道物流能力等。同时,可应用短缺机制考虑各种物流方式的协调等等。如果以全国(不包括台湾

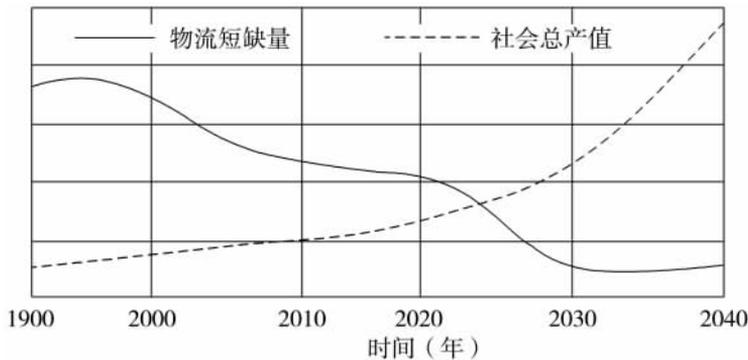
省)为一个区域进行仿真分析,可得到以下一些供参考的基本观点:

(员)不同的物流发展战略对经济的影响差别显著。可经过分别对物流超前的发展模式、同步发展模式、滞后发展模式进行仿真实验,得到不同的经济发展曲线和物流短缺曲线。参见图远-员

(圆)政府必须保证对物流有足够的投入,就我国目前情况而言,物流部门的自身发展能力很弱,很难适应社会需要。

(猿)要逐步完善物流市场,增强物流企业活力。从模型结果的分析来看,物流企业自我发展反馈环作用的充分发挥依赖于市场机制的形成。换句话说,增强企业活力首先要形成市场机制,即价格真正能发挥其双向调节作用,否则增强企业活力的政策很难达到预期的效果。

(源)要重视物流价格对物流结构的反作用。从仿真结果来看,除了物流投资以外,物流价格对物流结构亦有重要的调控作用。合理的物流价格将有助于合理的综合物流体系的形成。



图远-员 超前发展战略仿真曲线

## 本章小结

### 摇

系统仿真已成为物流系统研究的一种日益重要的方法和技术而被广泛应用,仿真的概念也变得更加广泛,凡是利用计算机在模型上而不是在真实的系统上进行实验、运行的研究方法都可认为是仿真。

本章主要介绍了物流系统仿真的概念和一般表述方法,详细分析了蒙特卡罗法和系统动力学仿真模型的建立,通过算例分析了两个方法在物流系统仿真中的具体应用。

## 关键概念

摇

物流系统仿真摇连续事件摇离散事件摇蒙特卡罗法摇物流系统动力学法摇因果关系环

## 分析思考

摇

1. 分析什么是系统仿真？什么是物流系统仿真？

2. 简述物流系统仿真的表述方法。

3. 分析离散事件系统与连续系统有何异同？

4. 按流程分析物流系统仿真的基本步骤和内容。

5. 简述蒙特卡罗法仿真的原理和步骤。

6. 简述系统动力学仿真的建模特点和一般步骤。

# 第 7 章 供应链系统仿真优化

## 学习目标

了解了解供应链管理的领域；

掌握供应链管理中基于 库存的折扣模型、物料需求计划 (MRP) 模型和配送需求计划 (DRP) 模型；

理解供应链环境下仓储所要解决的问题；

掌握供应链分模块进行仿真优化构建的模型构成；

了解博弈论及其在供应链中的应用。

## 7.1 供应链管理领域

供应链管理主要涉及到四个主要领域:供应(供应商)、生产计划(生产作业)、物流(主要指制造过程)、需求(用户)。如图 7-1 所示。

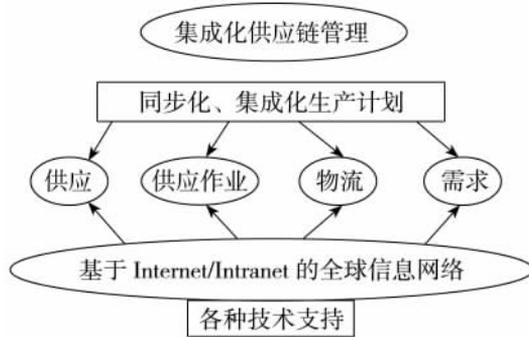


图 7-1 供应链管理涉及的领域

供应链管理是以同步化、集成化生产计划为指导,以各种技术为支持,尤其以网络信息技术为依托,围绕供应、生产作业、物流(主要指制造过程),满足需求来实施的。供应链管理主要包括计划、合作、控制从供应商到用户的物料(零部件和成品等)和信息。供应链管理的目标在于提高用户服务水平和降低总的交易成本,并寻求两个目标之间的平衡(这两个目标往往有冲突)。

在以上四个领域的基础上,可以将供应链管理细分为职能领域和辅助领域。职能领域主要包括产品工程、产品技术保证、采购、生产控制、库存控制、仓储管理、分销管理,而辅助领域主要包括客户服务、制造、设计工程、会计核算、人力资源、市场营销。

供应链管理并不仅仅是物料实体在供应链中的流动管理,它还包括以下内容:战略性供应商和用户合作伙伴关系管理;供应链产品需求预测和计划;供应链的设计(全球节点企业、资源、设备等的评价、选择和定位);企业内部与企业之间物料供应与需求管理;基于供应链管理的产品设计与制造管理、生产集成化计划、跟踪和控制;基于供应链的用户服务和物流(运输、库存、包装等)管理;企业间资金流管理(汇率、成本等问题);基于网络技术的供应链交互信息管理等。

供应链管理注重总的物流成本(从原材料到最终产成品的费用)与用户服务水平之间的关系,为此要把供应链各个职能部门有机地结合在一起,从而最大限度地发挥出供应链整体的力量,达到供应链企业群体获益的目的。

## 7.2 供应链管理模型及优化

### 7.2.1 基于经济订货折扣模型

经济订货模型的思想,即通过订购批量与总库存成本的关系分析,找到一个最经济的订货批量,使得总库存成本最小。基本的经济订货模型包含以下基本假设:

- (员) 需求连续、稳定,需求速率已知;
- (圆) 补货周期固定,不考虑提前期;
- (猿) 不考虑数量折扣(单位货品的价格固定、运输费用固定);
- (源) 不允许缺货;
- (缘) 货品的补充瞬时完成;
- (远) 只有一种货品;
- (苑) 不考虑资金限制。

基本的经济订货模型中,库存状态如图 7-1 所示。

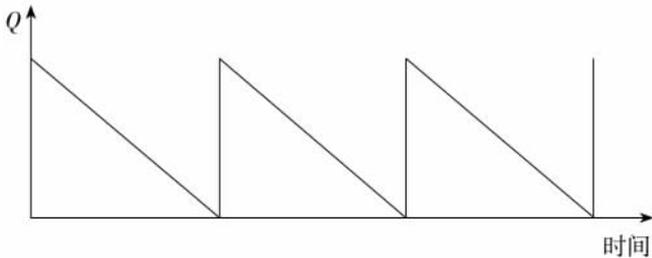


图 7-1 库存状态图

基本的经济订货模型中,假设没有数量折扣,即单位货品的价格固定、运输费用固定。但是,实际上,订购的批量规模与商品价格、运输费用密切相关。因此,必须加以考虑。就数量折扣而言,有两种形式的数量折扣:一种是全部折扣,另一种是增量折扣。下面首先介绍折扣类型。

#### 员) 数量折扣的类型

(员) 全部折扣(数量折扣)。所谓全部折扣,就是如果订购量在某规定范围内,则所有的订购货品都享受同样的折扣价格。例如,某批发商制订了如表 7-1 所示的数量折扣方案。其折扣方案也如图 7-2 所示,是间断的。与这种折扣方案相对应的库存总成本则如图 7-3 所示,也是间断的。

表 4-1 数量折扣方案

订货批量	价格
$0 < q \leq q_1$	$p_1$
$q_1 < q \leq q_2$	$p_2$
$q > q_2$	$p_3$

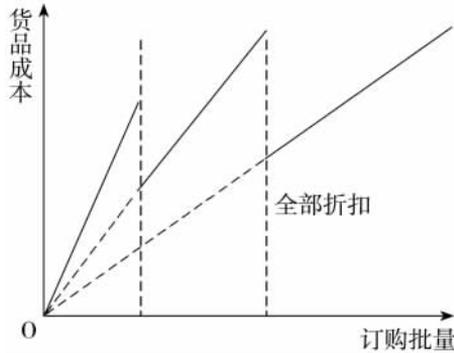


图 4-1 数量折扣方案

(圆) 增量折扣。与全部折扣不同,增量折扣是如果订购量在某规定范围内,如  $q_1 < q \leq q_2$ ,则对于小于  $q_1$  的部分仍然采用  $p_1$  价格,仅对于大于  $q_1$  的部分采用折扣价格。这种折扣方案的货品成本随订购批量变化,如图 4-2 所示,可以看到,是不间断的。与这种折扣方案相对应的库存总成本如图 4-3 所示,可以看到,它是三段曲线连续形成的。

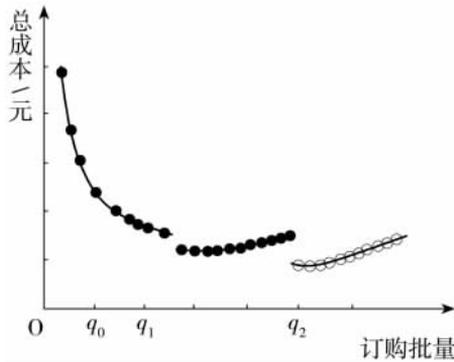


图 4-2 增量折扣方案

圆) 求解方法

(员) 全部折扣方案。对于每一个数量折扣范围,如  $q_1 < q \leq q_2$ ,根据其折扣价格  $p_2$ ,利用经济订货公式得到一个优化的订购批量  $q_2^*$ ,这样就出现三种情况:

- ①  $q_1 < q_2^* \leq q_2$ , 优化解位于折扣范围内;

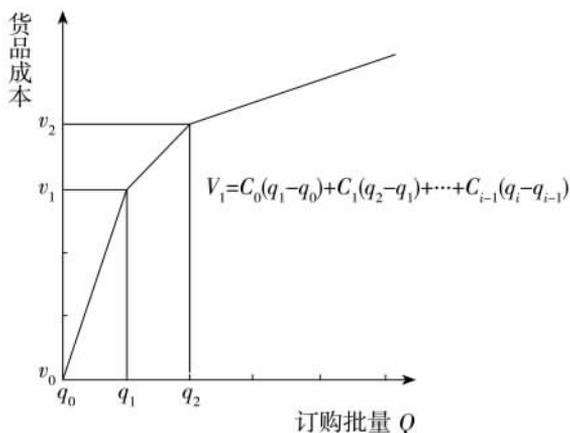


图 苑-缘 增量折扣方案的成本示意图

②  $q_{opt} < q_0$ , 优化解小于折扣范围下限;

③  $q_{opt} \leq q_n$ , 优化解大于折扣范围上限。

对于情况 ①, 优化解  $q_{opt}$  可以获得折扣, 其相应库存总成本为

$$V_{total} = \left(\frac{D}{Q}\right) \cdot C_0 + \left(\frac{D}{Q}\right) \cdot C_1 \cdot (q_1 - q_0) + \dots + \left(\frac{D}{Q}\right) \cdot C_{i-1} \cdot (q_i - q_{i-1}) \quad (苑-员)$$

对于情况 ②,  $q_{opt} < q_0$  优化解  $q_{opt}$  无法获得折扣价格, 需要将订购批量增大为  $q_0$ , 以获得折扣价格, 这样, 其相应库存总成本为

$$V_{total} = \left(\frac{D}{q_0}\right) \cdot C_0 + \left(\frac{D}{q_0}\right) \cdot C_1 \cdot (q_1 - q_0) + \dots + \left(\frac{D}{q_0}\right) \cdot C_{i-1} \cdot (q_i - q_{i-1}) \quad (苑-圆)$$

对于情况 ③  $q_{opt} \leq q_n$  因为在  $q_{opt}$  已经可以获得折扣价格, 所以需要选择  $q_{opt}$  作为订购批量, 其相应库存总成本为

$$V_{total} = \left(\frac{D}{q_{opt}}\right) \cdot C_0 + \left(\frac{D}{q_{opt}}\right) \cdot C_1 \cdot (q_1 - q_0) + \dots + \left(\frac{D}{q_{opt}}\right) \cdot C_{i-1} \cdot (q_i - q_{i-1}) \quad (苑-猿)$$

这样, 计算出总成本及相应的批量规模, 从中选择一个订购批量, 使所有价格下的总成本最小的订购批量, 即所得解。

(圆) 增量折扣方案。增量折扣方案中, 不同折扣范围内的价格可以用统一的公式来表示

$$v_i = v_{i-1} + \frac{C_{i-1}}{Q} \cdot (q_i - q_{i-1}) \quad (苑-源)$$

这样, 库存总成本可以表示为

$$V_{total} = \left(\frac{D}{Q}\right) \cdot C_0 + \left(\frac{D}{Q}\right) \cdot C_1 \cdot (q_1 - q_0) + \dots + \left(\frac{D}{Q}\right) \cdot C_{i-1} \cdot (q_i - q_{i-1}) \quad (苑-缘)$$

对式(苑-缘)求关于批量的极值, 则得到某价格范围内的经济订购批量

$$q_{opt} = \sqrt{\frac{D \cdot C_0}{C_1}} \quad (苑-远)$$

同样, 计算每一个数量折扣范围内的  $q_{opt}$ , 然后, 在没有超出价格折扣范围的  $q_{opt}$

中,寻找一个可以使总库存成本最小的订购批量作为所求解。

## 9.1 物料需求库模型(物料需求)

### 9.1.1 物料需求的思想

物料需求是约瑟夫·奥列基在库存管理的订货点法基础上提出来的,通过综合分析订单、当前库存以及生产顺序的信息,使得正确的物料在正确的时间到达,以此来减少库存、降低劳动力成本、增加按时发货率。

简单地讲,物料需求要回答三个问题:需要什么?需要多少?什么时候需要?

物料需求是一个基于计算机的库存管理系统,主要输入物料清单、总进度计划、库存记录文件。物料清单表明产品的主要组成及相互关系;总进度计划表明产品的需要时间及数量;库存记录文件表明当前库存水平。通过对这些信息的处理,确定计划期间各个时间的净需求。

物料需求方法先用总进度计划列出最终产品需求量,再用组件、部件、原材料的物料清单抵消生产提前期,确定各时期的需求。

剖析物料清单得出的数量是总需求,它尚未考虑持有库存量与在途订货量等因素。厂商根据总进度计划生成的,必须予以实际满足的需求叫做物料净需求。

决定净需求是物料需求方法的核心。总需求减去库存持有量和预期收货量,再加上安全库存量,即净需求。其公式是:

$$\text{净需求} = \text{总需求} - \text{原计划库存} + \text{安全库存}$$

### 9.1.2 物料需求记录分析

表 9-1 为物料需求的一个记录表,其中包括总需求、已在途订货、计划持有量、净需求、计划收到订货、计划发出订货等六项。

总需求:不考虑当前库存量,某部件或原材料在各时间期内的期望总需求。最终产品的总需求量可以在总进度计划上找到,各零部件的总需求量则源于其直接“双亲”的计划发出订货。

表 9-1 物料需求记录表

零件	周数	员	圆	猿	源	缘	远	苑	愿
	总需求								
	已在途订货								
	计划持有量								
	净需求								
	计划收到订货								
	计划发出订货								

已在途的订货:各期初始从供应商或供应链上其他节点接受的订货。

计划持有量 :各期初始期望的存货持有量 ,即已在途的订货量加上期末存货。

净需求 :各期实际需要量。

计划收到订货 :各期初始显示出来的期望接受量。在配套批量订货条件下 ,它等于净需求 ;在进货批量订货条件下 ,它比净需求大。为简化起见 ,超出部分被加到了下期存货中 ,尽管实际上它们在本期也可以用。

计划发出订货 指各期抵消生产提前期影响后的计划收到订货 ,计划发出订货将产生装配链或生产链下一层次的总需求。订货结束 ,它就从“ 计划发出订货 ”进入了“ 已在途订货 ”。

猿圆愿的计算过程

例如 ,某家具厂生产某种餐桌。餐桌由两大部分组成 ,木质桌面及金属桌腿。桌面部分由该厂自己加工 ,加工周期为 圆周 ,金属桌腿从外地订购 ,提前期为 员周。组装过程需要 员周。目前该厂发出 圆个订单 ,一份订单为 猿个 ,要求第 源周开始发货 ;另一份为 猿个 ,要求第 愿周开始发货。查询库存记录 ,已知第一周的已在途订货数量为 苑个桌面。求下述条件下的订货时间、订货规模 :① 配套批量订货( 订货批量等于净需求 ) ;② 订货批量为 猿个单位桌腿及 苑个单位桌面的批量进货。

解 :

( 员 ) 生成主进度计划 ,见表 苑-猿

表 苑-猿

生产主进度计划

周数	员	圆	猿	源	缘	远	苑	愿
数量 个								

( 圆 ) 产品结构树 ,如图 苑-远所示。

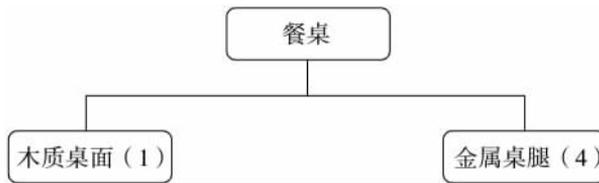


图 苑-远 产品结构树

( 猿 ) 由主进度计划求解各个部件总需求 ,计算出净需求。求解过程表 苑-源所示。首先利用总进度计划 ,求解餐桌总需求为第 源周 猿个、第 愿周 猿个 ,然后再计算净需求 ,由于在第 源周开始时没有计划持有量 ,所以 ,第 源周的净需求为 猿个。同样 ,第 愿周 猿个。于是 ,第 源周的计划接受数量等于 猿个餐桌。由于装配餐桌耗时 员周 ,这就意味着计划发出订货是在第 猿周开始时。运用同样的逻辑 ,猿个餐桌必须在第 苑周组装 ,这样才能在第 愿周运送出去。

根据 猿及零件供应的提前期 ,在第 猿周开始时 猿个餐桌的计划发出订货 ,需要 猿个桌面( 桌面总需求 )。因为没有预期持有量 ,净需求就是第 猿周开始时的 猿个桌面。由于生产提前期为 圆周 ,所以生产厂 必须在第 员周开始时生产 猿个桌面。同

样地,在第 7 周时 15 个餐桌的计划发出订货产生第 7 周的总需求与净需求。15 个桌面以及当时的计划收到订货。第 7 周的生产提前期表示生产厂必须在第 7 周开始时生产桌面。

表 苑-源 某种餐桌 猿的求解过程

	周数	员	圆	猿	源	缘	远	苑	愿
餐桌	总需求 猿个				猿				猿
	已在途订货 猿个								
	计划持有 猿个								
	净需求 猿个					猿			猿
	计划收到订货 猿个					猿			猿
	计划发出订货 猿个			猿					
	周数	员	圆	猿	源	缘	远	苑	愿
桌面 蕴越圆	总需求 猿个			猿				猿	
	已在途订货 猿个								
	计划持有 猿个								
	净需求 猿个			猿				猿	
	计划收到订货 猿个			猿				猿	
	计划发出订货 猿个	猿					猿		
	周数	员	圆	猿	源	缘	远	苑	愿
桌腿 蕴越员	总需求 猿个			猿				猿	
	已在途订货 猿个	猿							
	计划持有 猿个	猿	猿	猿					
	净需求 猿个			猿				猿	
	计划收到订货 猿个			猿				猿	
	计划发出订货 猿个			猿				猿	

摇摇对桌腿来说,在第 7 周开始时 15 个餐桌的计划发出订货,要求在第 7 周开始时,有 15 个单位的桌腿的总需求。然而,由于计划持有量为 3 个,净需求即为 12 个 (15 原 3),这意味着在第 7 周开始时的计划接受量为 12 个单位。订购提前期为 1 周,因此必须在第 7 周开始时订购。同样地,第 7 周 15 个餐桌的计划发出订货产生的总需求是 15 个桌腿。由于当时没有计划持有量,净需求也是 15 个,计划收到订货就是 15 个单位。此外,1 周的订购提前期意味 15 个部分的制作安排在第 7 周开始时进行。

(源)如果订货批量为 150 个单位桌腿及 70 个单位桌面,那么,有区别的地方在于进货量大于需求量,则多余部分将变为下一周期的计划库存量,如图 苑-苑所示。

	周数	1	2	3	4	5	6	7	8
餐桌	总需求 / 个				100				150
	已在途订货 / 个								
	计划持有量 / 个								
	净需求 / 个				100				150
	计划收到订货 / 个				100				150
	计划发出订货 / 个			100					150
	周数	1	2	3	4	5	6	7	8
桌面 $L=2$	总需求 / 个			100					
	已在途订货 / 个								
	计划持有量 / 个				50	50	50	50	50
	净需求 / 个			100				100	
	计划收到订货 / 个			150				150	
	计划发出订货 / 个	150				150			
	周数	1	2	3	4	5	6	7	8
桌面 $L=1$	总需求 / 个			400				600	
	已在途订货 / 个	70							
	计划持有量 / 个	70	70	70	20	20	20	20	50
	净需求 / 个			330			580		
	计划收到订货 / 个			350			630		
	计划发出订货 / 个		350				630		

图 苑-苑 订货批量为 150 个单位桌腿及 70 个单位桌面的批量进货求解示意图

## 配送需求计划——库存

### 库存的概念

配送需求计划(简称 MRP)是库存管理的一种计划方法。MRP 联系着物流配送系统和制造规划及控制系统( MRP),它阐明现有的存货状况,并且预测配送系统对于制造生产计划和物料规划的需求。这里所讨论的 MRP 技术有助于企业提高联结市场需求和制造活动的的能力。因为一个设计完好的 MRP 系统可以帮助管理层预测将来的需求,匹配物料的供给与需求,有效地利用存货满足客户的服务需求和对市场的变化作出快速的调整。

MRP 和 MRP 一样都是需求管理( MRP)的一部分,不同的是,MRP 是由顾客的需求所决定的,企业无法或者很少能加以控制,而 MRP 是由生产计划所决定的,而生产计划是由企业制订和控制的。从库存管理的角度来考虑,制造和装配完成之前的库存管理是由 MRP 进行的,而一旦制成品到了工厂的仓库,就由

图 8-1 展示了关于 MRP 和 DRP 的关系，从图 8-1 中可以直观地看出来。

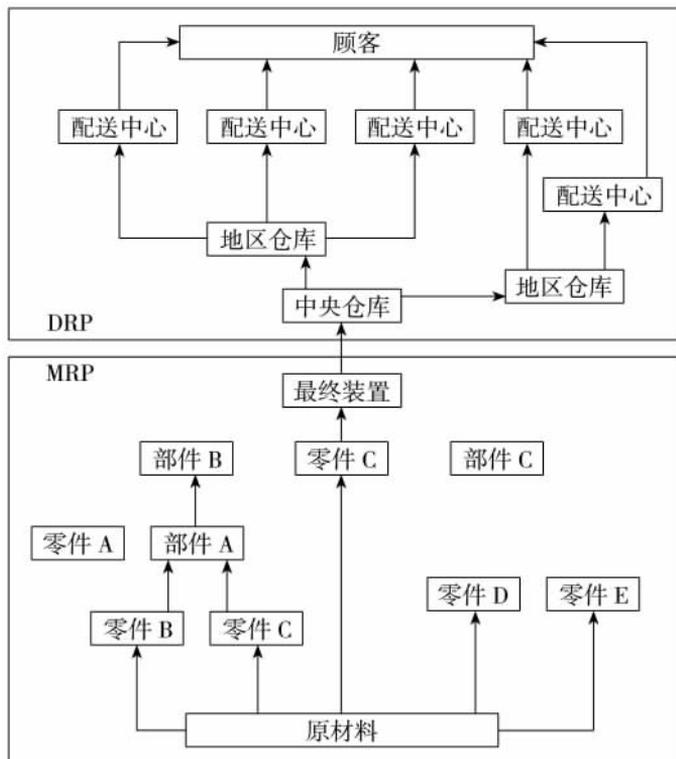


图 8-1 MRP 与 DRP 的关系及比较

### 8.1 MRP 的应用过程

MRP 最基本的工具是产品的明细表，这些明细表表述了离顾客尽可能近的产品环节的存货情况，是整个产品数据库的一部分，不断更新的关于存货和需求的信息在中央仓库和地区仓库之间周期性地或者即时地传递。这里，我们只考虑单个库存单位在地区仓库的明细表。

表 8-1 为某一个地区仓库的 MRP 明细表，从中可以看出 MRP 明细表的一般结构。第 1 行是需求预测的时间周期，最常见的是以每周为增量，当然也可以使用每日或者每年。第 2 行是预测的需求数，它反映了来自顾客或者其他配送单位的需求。第 3 行是该仓库已定时接收货物数，这里，订货周期以及装卸所需的时间已经被考虑在内，该批货物在指定的时间已经可以被使用了。第 4 行是预计的现有存货数，它表明了预测时间周期末的存货数量。表 8-1 中预测开始之前的存货数量为 100，这一行是需要计算得出的，其计算公式为：

预计现有存货数 = 上次时间周期末的存货数 - 已定时接收货物数 + 原本周期的预测需求数  
最后一行是计划订货数，它是为避免存货数量低于安全储备而向供货源提出的补给需求数，这里就必须考虑订货周期的影响因素。实际上，计划订货和已定时接收货物

在时间上相差的是一个订货周期。此外, 明细表还给出了安全储备、订货周期和订货批量, 作为计划中的参考数据。

表 苑-缘 某地区仓库员的 明细表

预测时间周期 轱周		员	圆	猿	源	缘	远	苑
预测的需求数 轱个		圆	圆	圆	圆	猿	猿	圆
已定时接受货物数 轱个			远			远		远
预计现有存货数 轱个	源	缘	远	源	猿	远	猿	猿
计划订货数 轱个				远		远		

安全储备 圆个 订货批量 远个 订货周期 圆周

所有的地区仓库的 明细表列出来以后, 就可以将其中的计划订货数信息传送到中央仓库, 得到中央仓库的 明细表。下面以一个中央仓库供给两个地区仓库为例, 简单说明中央仓库 明细表的获得。表 苑-远为地区仓库圆的 明细表, 表 苑-苑为中央仓库的 明细表。

表 苑-远 某地区仓库圆的 明细表

预测时间周期 轱周		员	圆	猿	源	缘	远	苑
地区仓库员计划订货数 轱个				远		远		
地区仓库圆计划订货数 轱个		源		源			源	
总需求数 轱个		源	园	远	园	远	源	园
已定时接受货物数 轱个			源			源		源
预计现有存货数 轱个	远	远	远	远	远	缘	远	远
计划订货数 轱个		源		源			源	

安全储备 远个 订货批量 源个 订货周期 员周

表 苑-苑 中央仓库的 明细表

预测时间周期 轱周		员	圆	猿	源	缘	远	苑
预测的需求数 轱个		缘	缘	缘	圆	缘	缘	缘
已定时接受货物数 轱个				缘			缘	
预计现有存货数 轱个	猿	远	源	圆	源	猿	远	源
计划订货数 轱个			缘			缘		

安全储备 缘个 订货批量 缘个 订货周期 员周

由中央仓库的 明细表可以得到中央仓库的计划订货数, 这些计划订货的数据就能作为制订主生产计划的依据, 也就是说, 主生产计划必须保证中央仓库的订货得到及时的满足( 其中也必须考虑订货周期 )。

猿) 渊明细表的调整

在 渊明细表中,每个时间周期的需求数是由以往的经验预测出来的。实际的需求一般会在预测值附近波动,这样经过几个时间周期,原 渊明细表中的内容就需要进行调整,尤其是计划订货的时间。表 苑-愿的例子对此进行了说明,其中实际的需求数第 员周为 苑,第 圆周为 苑,而预测的需求数是 苑,第 员周的实际需求比预测的减少了,对计划订货时间还没有造成影响,但第 圆周的实际需求的增长使得原计划中第 源周的订货提前到了第 猿周,同时,以后计划订货的预测时间也相应地提前了 员周。

表 苑-愿 渊明细表的调整示例

预测时间周期 猿周		员	圆	猿	源	缘
预测的需求数 猿个		苑	苑	苑	苑	苑
已定时接受货物数 猿个		苑		苑		苑
预计现有存货数 猿个	远	苑	远	苑	远	苑
计划订货数 猿个			苑		苑	
第一周的实际需求 苑个						
预测时间周期 猿周		圆	猿	源	缘	远
预测的需求数 猿个		苑	苑	苑	苑	苑
已定时接受货物数 猿个			苑		苑	
预计现有存货数 猿个	猿	苑	猿	苑	猿	苑
计划订货数 猿个		苑		苑		
第二周的实际需求 苑个						
预测时间周期 猿周		猿	源	缘	远	苑
预测的需求数 猿个		苑	苑	苑	苑	苑
已定时接受货物数 猿个		苑	苑		苑	
预计现有存货数 猿个	源	苑	源	苑	源	苑
计划订货数 猿个		苑		苑		苑
安全储备 缘个 订货批量 苑个 订货周期 员周						

源) 渊的优缺点

用 渊进行库存管理有着一系列的优点:

- (员) 对存货的有效管理使存货水平得到了降低,同时也减小了仓储的费用。
- (圆) 对主生产计划的指导协调了产品的制造和物流环节,降低了产品的成本。
- (猿) 降低了配送过程的运输费用。
- (源) 提高了预算能力。
- (缘) 改善了服务水平,保证顾客的需求得到满足。

(远)提高了存货对市场不确定性的反应的机动性。

同时,库存的应用也有很多的局限性,其中最大的局限就是库存需要对需求有相对准确的预测。如上所述,实际需求应该在该预测值的附近波动,并且会导致需要对库存明细表进行相应的调整,如果该波动范围过大的话,就可能造成存货不能满足实际需求或者低于安全储备。另外,库存对订货周期的确切性有很大的依赖,而订货周期则受很多不确定因素的影响。

## 7.3 仓库规划

### 7.3.1 仓库选址

为了提高对客户的服务水平或因其他原因要建立仓库时,选址的问题是第一个和最重要的问题。关于选址的常用模型及求解方法已经在前面论述过了。这里列出决定仓库建立地点之前首先要考虑的三个问题:

- 需要建立多少仓库?
- 每一个仓库要建立在什么地点?
- 每一个仓库的规模如何?

这三个问题的答案取决于以下因素:生产厂家的地址;客户服务基础;预计的客户服务水平;租用费用、出租费用和建造费用;税收以及保险。

选址的具体方法请见前面相关章节。

### 7.3.2 仓库布局

仓库的布局由如下因素决定:存储物品类型、可用空间、高度、库存周转周期、存取量、仓库周围公路铁路的布局以及其他因素。

图 7-1 和图 7-2 分别表示会员制仓储超市和多层堆放的自动化仓库的典型布局。在图 7-1 中,顾客从仓库的左下方进入,然后拿着购物筐或推着购物车到想去的某个货架,将物品放到购物车中,到收款台处结账,然后到右下角的出口离开仓库。一般情况下,这种仓库的存取量较少,它在右上方设立了一个商品进口,旁边就是存储的地方。由于存储并不能带来利润而且占据空间,管理者希望将货品直接送到货架或者能根据订单进货。这一点对于任何仓库都是相同的。如果仓库和供应商能紧密合作,在物品上标上条形码,那么在接收物品时,就可以利用手持终端设备确定物品在仓库的最佳存储位置,这时就可以将物品直接送到这个地点。仓库中有一个区域,用来给物品分类,确定物品的存储位置。

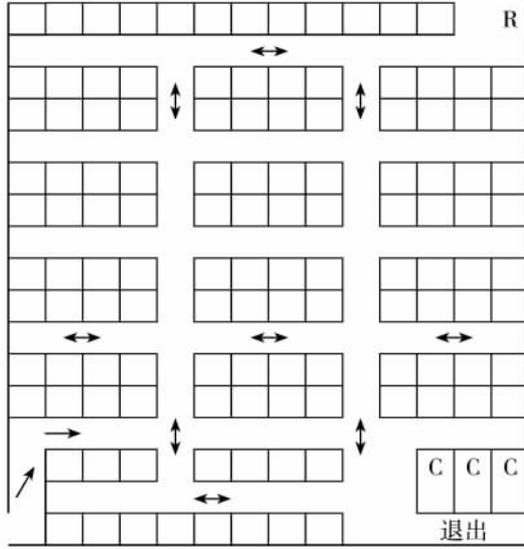


图 苑-28 会员制仓储超市布局

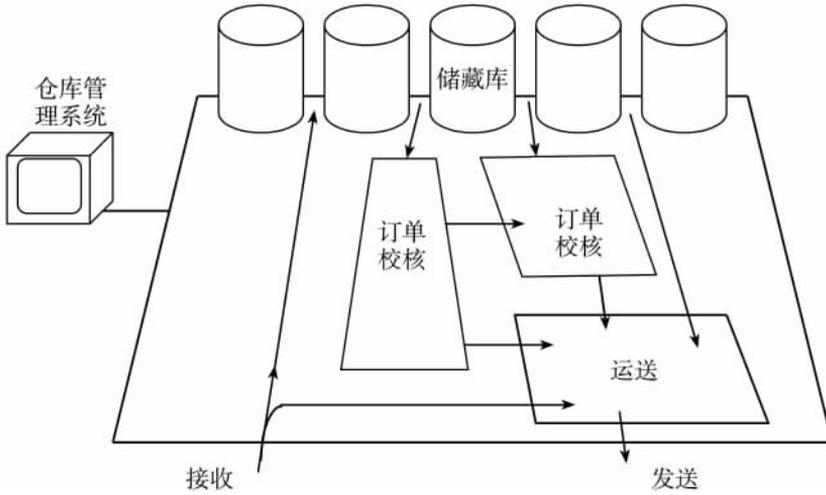


图 苑-29 多层堆放仓库布局

## 装卸站台的选址和设计

图 苑-30 表示了几种常见装卸站台的设计。站台设计和选址主要由以下问题确定：

- 是否允许零售消费者直接提货？
- 运货车辆是统一规格的还是不同吨位和尺寸的车辆？
- 装卸是独立的还是在同一地点进行？

- 公路和铁路运输系统的设计布局如何？
- 是否有足够空间调遣车辆和控制仓库的入口和通道？

同时,需要装卸站台的数量对于站台设计和选址也有重要影响。需要的站台数量必须根据以下因素考虑确定：

- 装卸的时间分配(比如上午发送、下午接受,或者相反)。对本因素的考虑主要可以减少需要的站台数目,提高站台、人力和设备的利用效率。
- 日装卸处理量的峰值和均值。
- 每宗订单的装卸量的峰值和均值。
- 季节性装卸的波峰值和波谷值。
- 处理货物的种类,各种货物的尺寸(或是托盘)。
- 装货或者卸货时对天气状况的要求。

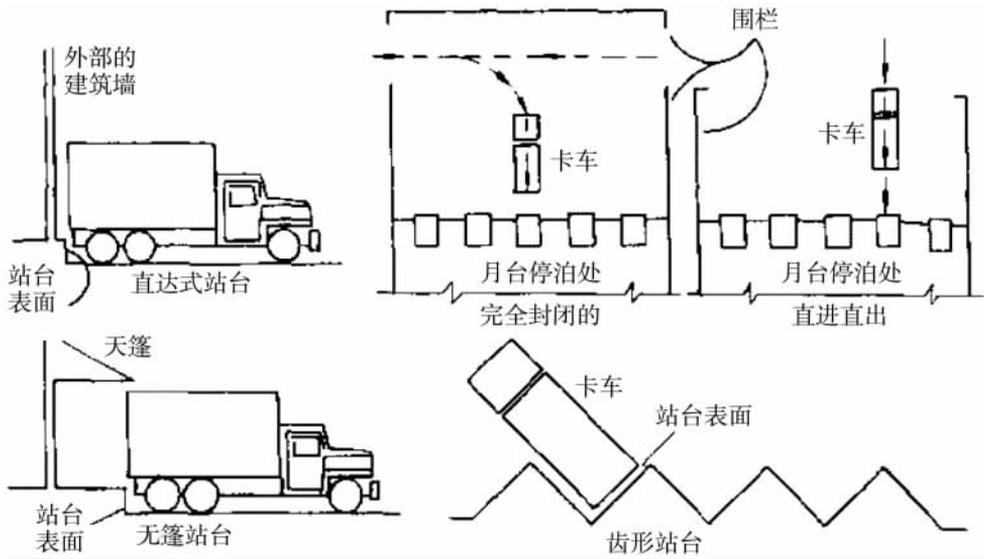


图 苑-源 典型站台布局

### 源 仓库尺寸设计

仓库的长度和宽度由需要存储的物品数量、存储空间、货架的排数和列数以及高度决定。曾贇和葬遭在 1957 年提出了求解该问题的数学方法,这种方法由货架信息来确定仓库的长度和宽度。假设要存储 灶件物品,只要知道通道参数,就可以很容易地获得仓库的长度和宽度。

为了不失一般性,假设货架较长的方向在水平方向。分别用 曾贇表示货架的列和行,葬遭表示通道系数(通道长度占货架长度的比例),则仓库的长和宽分别是 葬曾垣葬和 遭曾垣贇。为了使顾客平均单次移动距离最小,有

$$z = \frac{c_1 x_1 + c_2 x_2}{x_1 + x_2} \quad (7-7)$$

满足  $x_1, x_2$  是整数。

由于顾客从左下角需要走路的最大值为  $c_1 x_1 + c_2 x_2$ ，最小值是  $x_1 + x_2$ ，所以平均距离可以用  $\frac{c_1 x_1 + c_2 x_2}{x_1 + x_2}$  表示。所以，问题转化成求其最小值。

第 1 个条件（非线性）确保在  $x_1$  层的情况下可以放下  $x_2$  个物体。

第 2 个条件保证列和行必须是整数。

上述模型可以用如下方法求解，即放松对  $x_1$  和  $x_2$  的限制，同时令  $x_1, x_2$  最优（条件）。由此可以用  $x_2$  的表达式表示  $x_1$  对  $x_2$  求导并令其导数为 0，可求得  $x_2$  利用这个值和方程  $x_1, x_2$  可以得到其他变量的值

$$x_1 = \frac{c_2 x_2}{c_1 - c_2}$$

$$x_2 = \frac{c_1}{c_1 - c_2}$$

因此，无约束的目标值为

$$z = \frac{c_1^2 + c_2^2}{c_1 - c_2}$$

对  $x_2$  进行微分，令其结果为 0，可以得到

$$\frac{c_1^2 - c_2^2}{(c_1 - c_2)^2} = 0$$

进一步简化、重组，利用方程  $x_1, x_2$  得到关于  $x_1$  和  $x_2$  的表达式

$$x_2 = \sqrt{\frac{c_1^2}{c_1 - c_2}} \quad \text{和} \quad x_1 = \sqrt{\frac{c_2^2}{c_1 - c_2}} \quad (7-8)$$

式 (7-8) 反映了通道系数  $c_1, c_2$  对仓库建立的影响。不同的  $c_1, c_2$  会改变  $x_1$  和  $x_2$  的值，即相应地改变仓库的长和宽。比如，当  $c_1 > c_2$  且入口是在某一角落时， $x_2 > x_1$  即仓库是方形的。

## 7.2 仓库操作——存储与提取系统

仓库管理人员要面对下列各种运作问题：

- 订单提取采用什么顺序？
- 提取订单的频率是多少？是否需要考虑批量存取或者只要有订单就立刻进行提取操作？
- 提取的货物数量有没有限制？如果有是多少？
- 货物怎么分配到搬运设备上？
- 怎样平衡操作人员的工作负荷？
- 以批量方式还是随机方式从搬运设备提取货物到分拣处？

其中，多数问题是与订单提取有关的。裁克曼等人的调查表明，订单提取消耗了一个仓库中 25% 还多的工作量，因此订单提取是仓库运作中成本最高的作业。

在一个大的配送中心中，每天都有数千个订单要处理。如何提高系统的效率？一

方面是增加存储设备的数量,但是这种解决方案造价非常高,而且由于空间或其他条件的约束,增加更多的设备也不现实;另外一种方法就是通过改变运行方式来增大效率,例如,提高设备的运行速度、缩短订单提取时间,这种方法往往不需要大的投资,因此比较容易实现。实现后者的一个方法就是求出订单提取的最优顺序。因此,下面分别讨论存储与提取设备及订单提取顺序问题的优化算法。

存储与提取系统的种类很多,也有不同的分类方式。

(员)如果根据操作人员与货物的运动来分,可分为;

①“人对货物”的系统:货物存放在固定货架上。

②“货物对人”的系统:货物放置在存储设备上,工具(例如传送带)可以将其运送到需要它的地方。

(圆)如果根据存取系统的自动化程度分,可分为:

①手工操作系统:由人或利用机械来装卸及存取货物。

②自动操作系统:可以从单元自动化到全自动化。自动系统的种类又有很多种,如小型自动系统、机器人、超高自动系统。

• 小型自动系统是一个带有通道的封闭式系统,只有放下一台存取设备的空间。它们装有扫描器,可以检测到箱柜上的代码。存取设备按照所指示的顺序移动,操作人员将数据输入通道底部计算机或经过一个复杂的运算法则排列出一个提货顺序来提取货物,并将已提取的货物信息传回操作台。系统的输入速度非常快,因为它通常有两个独立的电动机可以使两个轴以不同的速度旋转。同样,操作员将一个箱柜卸载时,存取系统可以提取另一个,将它放在存放处。

• 机器人自动系统与小型自动系统功能很相似,只不过它是通过一个可以在地板上行动的机器人来完成存放和提取操作。由于机器人的胳膊只能延伸到一定高度,所以这种装置不能应用在高于几米(几米)的仓库中。

• 超高自动系统是一个自动系统,它的提货顺序由人工或自动存取设备完成。存取设备可以带有通道。例如,某公司的仓库就有几台堆垛机分放在每一个通道中。与小型自动系统一样,超高系统也可以有两个独立的电动机。

## 仓库提取系统分析

两种最基本的订单提取方法是顺序提取和区域提取。在顺序提取中,操作者要求一次提取全部一个订单上的货物,而在区域提取中,分派到某一个区域的操作人员只提取他所负责区域内的订单。顺序提取者可能不得不在订单提取过程中穿越整个仓库,但对于区域提取者,其行程则被限制在指定区域内。这里只讨论顺序提取。

自动化或半自动化仓库顺序提取问题,可表述如下。

一个存储设备或仓库操作人员将订单上的货物从其存储位置提取出来。从提取点开始,一个存储设备依据一定顺序提取,然后将已提取订单的货

物放回 的端点。

为了增加订单提取系统的效率,必须确定提取顺序,这样,订单的总提取时间最小。

虽然大多数系统只有一个端点,但很容易理解成一个端点是为进货准备的,而另一个是为分发准备的。这个问题可以看成是一个 模型,但是,其中的距离矩阵不采用直线距离矩阵。

标准的 有两个独立的发动机,来同时进行水平和垂直方向的运动。因此从一点( )到另一点( )所需要的时间不但与两点间的水平和竖直距离有关,而且与两个发动机水平速度 和垂直速度 有关。可以表示为

$$t_{ij} = \left[ \frac{|x_i - x_j|}{v_x} + \frac{|y_i - y_j|}{v_y} \right]$$

这样,顺序提取问题解被看成带有切比雪夫矩阵的 模型。其数学描述为

$$\begin{aligned} & \min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \\ & \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad (\text{对每个 } i) \\ & \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad (\text{对每个 } j) \end{aligned}$$

满足  $c_{ij} = \left[ \frac{|x_i - x_j|}{v_x} + \frac{|y_i - y_j|}{v_y} \right]$  对圆  $\leq$  蚤  $\neq$  躁  $\leq$  灶

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (\text{苑-怨})$$

$x_{ij}$  为任意实数 对每个 蚤 躁  $\neq$  躁

$c_{ij}$  为任意实数 对每个 蚤

假定在这个模型中包含端点在内的共 灶个端点,决策变量  $x_{ij}$  取二进制数值( 园或 员),具体是 园还是 员取决于点 蚤是否在顺序提取中与点 躁相邻。

目标函数是使提取“行程”的全长最小化。前两个约束保证在最优行程中每一条都有两个端点——每端一个。第 猿个约束,保证其最优解没有子回路。换句话说,该最优解中必须与所有点有且仅有一次行程连接,第 源个约束强调该距离矩阵是切比雪夫矩阵。

## 7.4 供应链系统仿真优化

### 供应链系统的板块划分

在供应链系统中,可划分为四个板块:制造商板块、库存中心成本板块(包括运

输模块)、供应链综合竞争板块和零售商板块。分别模拟了供应链里面最关键的三个环节( 制造商、库存中心、综合竞争和零售商 ) , 涉及了重要功能( 生产、库存、成本、销售、服务 ) 。四个板块各具特色, 功能和结构均不相同。

制造商的生产系统为自动化运行的“ 推式 ” 生产系统, 制造商根据下游库存中心订货量调节生产, 即使发生突发事件, 企业都能迅速作出反应。配送中心库存板块研究的目的在于尽量减少库存但又要保证不会出现缺货。供应链综合竞争板块研究零售商( 供应链面向顾客的终端 ) 如何通过改进软硬件设备提高服务水平, 进一步吸引货源、占领市场。

### 供应链中制造商板块的仿真优化

完整的供应链运作如下: 首先通过第一产业( 农业或采矿业 ) 将原材料开采出来, 然后把这些原材料运送到第二产业( 指制造商 ) 加工成成品, 再将成品运送到配送中心作短时间的库存, 之后根据零售商( 比如大型超市 ) 的需求进行配送, 最后产品上货架与消费者见面。

我们将忽略第一产业这个环节, 不对原材料的开采进行研究与建模。从这个假设条件出发, 将第二产业, 也就是制造商作为供应链的开端。

假设供给制造商使用的原材料随要随到, 没有数量限制, 也没有供应时间延迟。那么, 首先建立制造商板块模型, 图 苑-1 表示了供应链在制造商板块的运作情况。

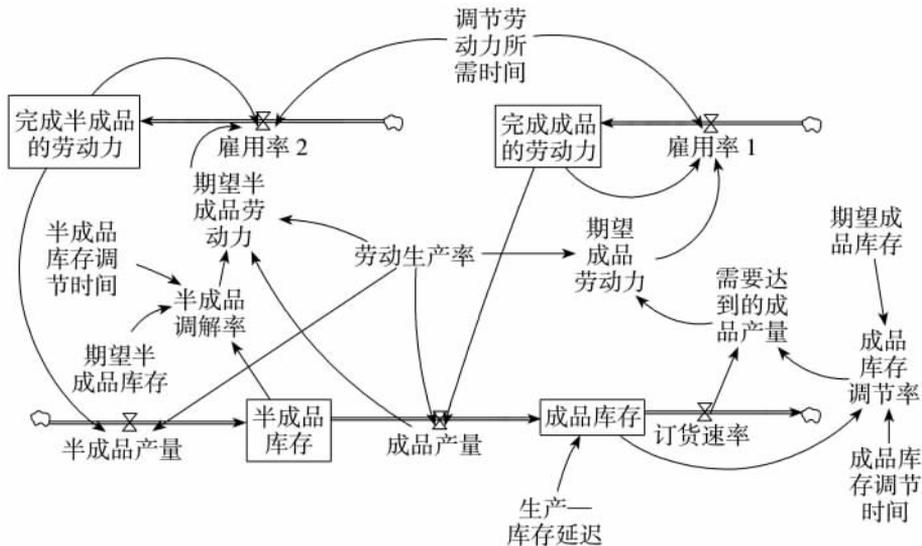


图 苑-1 制造商板块供应链模型

员) 订货量保持稳定

(员) 产成品生产

最初整个系统处于完全平衡状态。此时初始订货速率为 员件 辆周, 初始成品库

存为员件。一般的企业都有一个“期望成品库存”指标,也有人称其为安全库存。如果成品库存低于这个指标,生产经理就会要求工人加紧生产,使成品库存恢复到应有的水平。一旦成品库存高于这个指标,由于过高的库存会占用大量的成本,经理一般会要求削减产量,使库存下降到应有的水平。

假设这个企业的“期望成品库存”恰好也是员件,它是一个常数。因此“成品库存调节率”这个指标等于园。“成品库存调节率”指为了消除现实库存与目标库存的差距,需要调节生产的速率。在本模型里,我们假设“成品库存调节时间”为源周,它是一个常数,意思是即使发生存货与目标的缺口,也必须花上源周的时间来调整生产、弥补缺口。比如,期望库存与实际库存之差为员件,那么每周调节缘件,花上四个星期时间可以使库存差距缩小为园。

成品库存调节率 越 期望成品库存 原成品库存 辕 成品库存调节时间 量纲 :件 辕周。

订货速率 越 员件 辕周 辕 缘 量纲 :件 辕周。

这个公式的意思是:下游企业在前缘周保持员件 辕周的订货速率,缘缘缘表示从第缘周起,企业每周订货率突然上升缘件 辕周,即总共猿件 辕周。

制造商满足订单生产的成品由两个部分相加决定:① 下游企业的订货率;② 为了弥补库存量缺口的额外生产量。

注意:本节所有指的生产量指标都要考虑时间因素,其实就等同于生产率,因为在系统动力学里面只说企业生产员件产品是没有意义的,只有带上时间度量的生产率(比如“件 辕周”)才是有意义的。

需要达到的成品产量 越 订货速率 垣 成品库存调节率 量纲 :件 辕周。

期望成品劳动力 越 需要达到的成品产量 辕 劳动生产率 量纲 :人。

根据上面的假设,期望成品劳动力 越 员件 辕周 辕 缘 越 员人。

完成成品的劳动力 越 缘 辕 缘 越 员人 伊 缘 辕 缘 越 员人。

雇用率 员 越 ( 期望成品劳动力 原 完成成品的劳动力 ) 辕 调整劳动力所需时间 量纲 :人 辕周。

“雇用率 员”指每个星期要新雇用多少员工才能达到指定的人数,从而达到指定的生产量,从而满足成品产量生产的需要。这里有一个“调整劳动力所需时间”的常数(等于缘周)。它是指新招聘的劳动力不可能马上就胜任工作,需要缘个星期时间的延期才能培训成熟练工人。

前面计算出“期望成品劳动力”为员人,而“完成成品的劳动力”的初始值也是员人,表示工厂本来就拥有员个员工,这些人正好可以充分利用来完成工作,所以没有新招聘员工的必要性,因此“雇用率 员”等于园。既然现在有员个工人工作就可以满足员件 辕周的订单需求,那么可以算出企业的成品产量是多少,员人 伊 缘 辕 缘 辕 缘 越 员件 辕周。因为“订货速率”与“成品产量”都等于员件 辕周,净速率等于园,所以成品库存始终保持在员件的水平,没有变动,企业达到了动态平衡。即:

成品产量 越 完成成品的劳动力 伊 劳动生产率 量纲 :件 辕周。

### (圆) 半成品生产

我们了解了制造商是如何管理成品库存的。在管理半成品方面有着同样的程序。有一个“期望半成品库存”常数,这里给它的常数值等于  $\frac{1}{\lambda}$  件,它是物流经理期望的半成品库存数。还有一个“半成品库存调节时间”常数,它是调整半成品缺货需要的时间,设定的常数值等于  $\lambda$  周。

半成品调节率  $\lambda$  越期望半成品库存(原半成品库存)  $\lambda$  越成品库存调节时间,量纲:件/周。

“半成品调节率”的意义是:一旦发生实际半成品库存与目标库存出现差距,每星期需要增加多少产量才能弥补差额。

半成品库存  $I$  越  $\frac{1}{\lambda}$  半成品产量(原成品产量)。表示半成品的库存量是由流入与流出速率的大小决定的,这里设定其初始值为  $\frac{1}{\lambda}$  件。

因为在  $\lambda$ - $\lambda$  周内,“期望半成品库存”和“半成品库存”都等于  $\frac{1}{\lambda}$ ,因此“半成品调节率”也等于  $\lambda$ ,不需要调节。期望的生产半成品所需的劳动力(期望半成品劳动力)由两部分工人相加组成,一部分人生产半成品用以确保供应成品生产,另一部分人则是加班生产,用来弥补实际半成品库存与目标库存间的缺货差额。

期望半成品劳动力  $L$  越(半成品调节率  $\lambda$  成品产量)  $\lambda$  越劳动生产率,量纲:人。

因为“半成品调节率”等于  $\lambda$ ,而“成品产量”为  $\lambda$  件/周,因此,期望半成品劳动力  $L$  越  $(\lambda \cdot \lambda)$  越  $\lambda$  越  $\lambda$  人。

雇用率  $U$  越  $(\lambda \cdot \lambda)$  越期望半成品劳动力(原完成半成品劳动力)  $\lambda$  越调整劳动力所需时间;量纲:人/周。

“雇用率  $U$ ”指对于生产半成品的劳动力的雇用率,它由期望劳动力和实际劳动力的差额决定,一旦两者发生差额,企业就有必要招聘或解雇员工。这里“调整劳动力所需时间”是一个常数,等于  $\lambda$  周,表示新招聘的劳动力不可能马上就胜任工作,需要  $\lambda$  个星期时间的延期才能培训成熟练工人。

完成半成品的劳动力  $C$  越  $(\lambda \cdot \lambda)$  越雇用率  $U$ ,量纲:人;初始值  $C_0$  越  $\lambda$

因为在  $\lambda$ - $\lambda$  周内,“期望半成品劳动力”和“完成半成品的劳动力”都等于  $\lambda$  人,说明企业现有工人数正好满足半成品的生产,无需新招或解雇员工。因此,“雇用率  $U$ ”为  $\lambda$  人/周。

半成品产量  $P$  越完成半成品的劳动力  $C$  伊劳动生产率  $\lambda$  越  $\lambda$  伊  $\lambda$  越  $\lambda$  件/周);量纲:件/周。

所以,半成品产量、成品产量、订货速率在  $\lambda$ - $\lambda$  周内都是  $\lambda$  件/周,整个系统保持良好的动态平衡。因速率保持不变,所有状态变量均不变。

### (圆) 订货量发生阶跃突变

#### (员) 产成品生产的反应

因为订货速率  $D$  越  $\lambda$  越  $\lambda$  越  $\lambda$  件/周。所以,前四个星期库存比较平稳,到了第五个星期发生波动。由于某种原因订货速率突然上升,达到  $\lambda$  件/周,

整个生产系统必须随之变化,才能满足客户的订单要求,保住整个市场。

成品库存是“成品产量-原订货速率”的时间积分,所以从缘~缘周,当成品产量低于订货速率的时候,导数为负,成品库存持续下降,于缘周降至最低点,此时因为系统通过一系列调节机制使得成品产量上升到与订货速率等同的水平,即导数等于零。从图苑-员也可以看出,缘周的时候成品库存调节率也达到了历史最高点,意味着恢复缺货的趋势和动力相当巨大。所以,成品产量必须继续上升,以致缘~缘周一直保持高于订货速率的水平。在正导数的作用下,成品库存也逐渐恢复,并且在缘周终于超过了员周的目标库存,完成了一次振荡。在缘周的时候,居高不下的成品产量终于下降到等同于订货速率,导数再一次等于零,这也意味着成品库存达到最大值,又完成了一次振荡,但是幅度已经不如第一次了。这样的过程一再反复,成品产量、成品库存都在不断地发生衰减振荡。

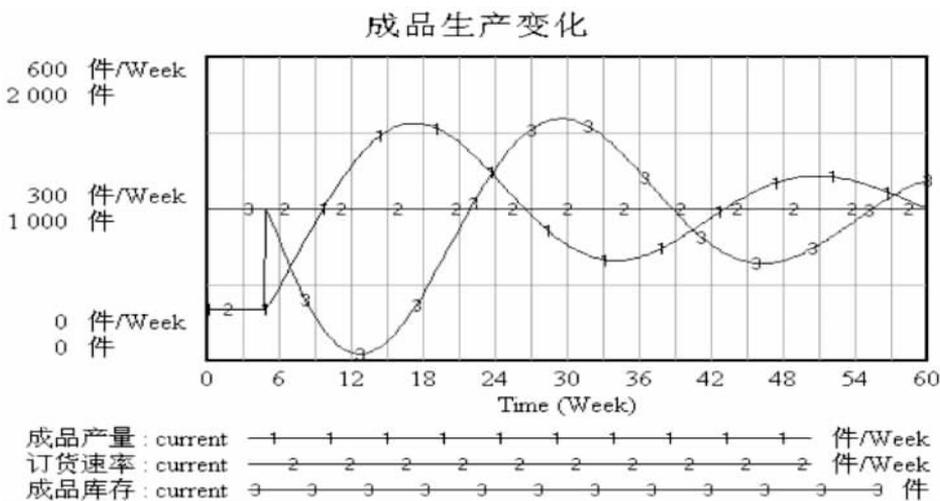


图 苑-员 订货量发生阶跃时的成品库存与成品产量

从图苑-员也能看出类似的机制。我们发现,当“期望成品库存-原成品库存”的值变大的时候,说明缺货严重,成品库存调节率就会上升,以弥补库存缺货。当“期望成品库存-原成品库存”的值变小的时候,说明缺货缓解,成品库存调节率就会下降,但仍然保持正值。当“期望成品库存-原成品库存”的值变成负数的时候,即库存过剩的时候,成品库存调节率就会变成负值,以减少生产、降低库存。

成品库存调节率  $\frac{dI}{dt} = \text{期望成品库存} - \text{原成品库存}$  辷成品库存调节时间;量纲:件 辷周。

从图苑-员可以看出,因为“雇用率”是“完成成品的劳动力”的导数,因此当前者等于零的时候,后者就达到了极值。在缘~缘周,“完成成品的劳动力”小于“期望成品劳动力”,说明劳动力不足,于是雇用率就变成正数,要招纳员工。但当“完成成品的劳动力”和“期望成品劳动力”差距的减小,说明员工压力下降,所以雇用率也

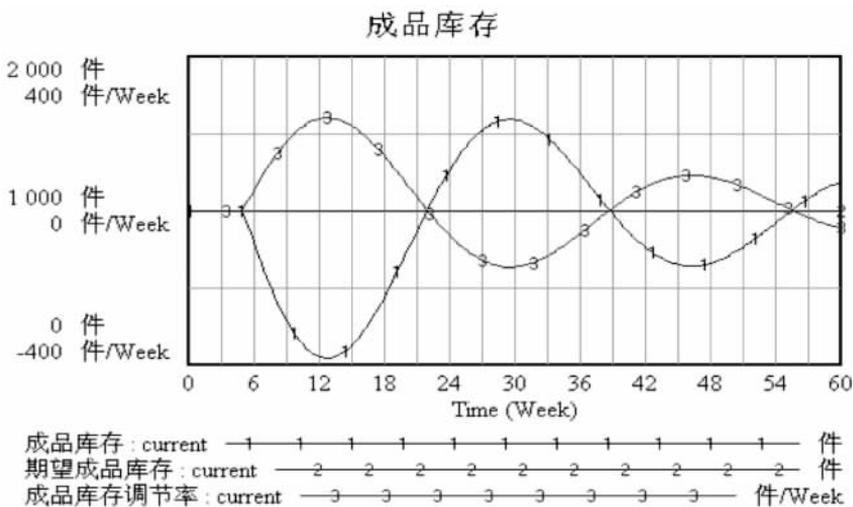


图 苑-员 成品库存与成品库存调节率的关系

在下降,但仍然大于园而员远~猿园周,“完成成品的劳动力”反而大于“期望成品劳动力”,说明劳动力过剩,这时雇用率员小于园(就是辞退员工),以减少劳动力。同样,在负反馈机制的作用下,完成成品所需劳动力数量的波动越来越小,并最终达到稳定状态。

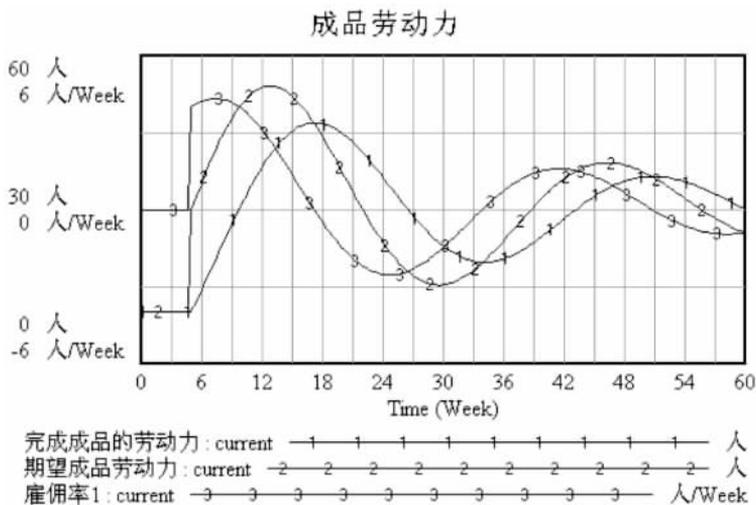
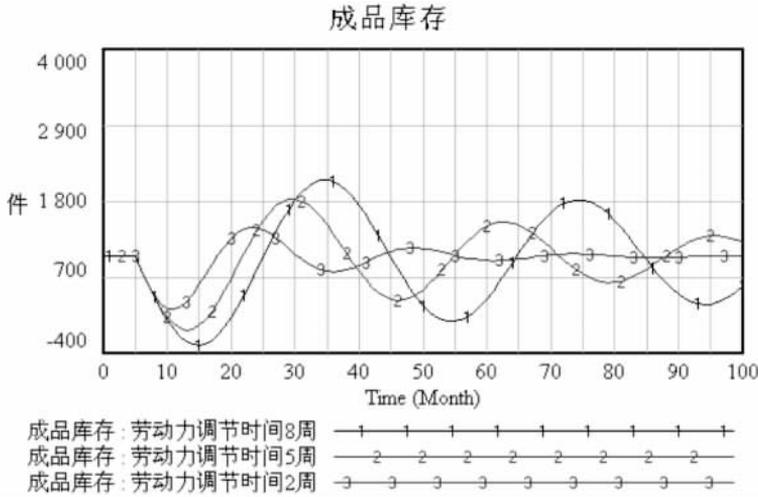


图 苑-员 期望成品劳动力变化时,雇用率和成品劳动力的走势

(圆) 参数变动分析

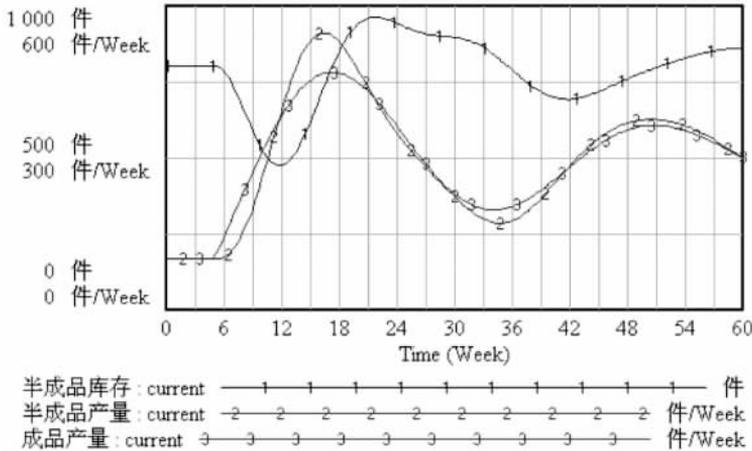
① 改变“生产—库存延期”。在现实中,“成品产量—成品库存—订货速率”这个流程里,生产与库存环节之间往往不是同步完成的,总有一个延期,这个延期的长短影响着制造业企业的经营。现代 制造业运作通常希望能够尽量缩短这个延期的时





图苑一题 调整劳动力所需时间分别等于圆缘愿周时的成品库存图像

③ 半成品生产的反应。由于半成品生产的运行过程与产成品生产的相似,在此仅作略述。上文提到的产成品经过一系列反应机制,使成品产量提高,以适应订货量的上升。这样,必定消耗半成品,导致半成品库存下降。于是,实际半成品库存与期望半成品库存之间形成一个差额,这个差额成了推动半成品生产的直接动力。企业根据这个数值招聘工人加大生产,最后提高了半成品的产量,弥补了半成品库存的不足,并且满足了成品的出库需求。图苑一题所示的“半成品产量 原成品产量”是半成品库存的导数(说明这是一种递增的关系,正相关的关系),而且当成品产量上升的时候,半成品产量一般也同时伴随上升,可见,本模型在结构与功能上都是符合现实情况的。

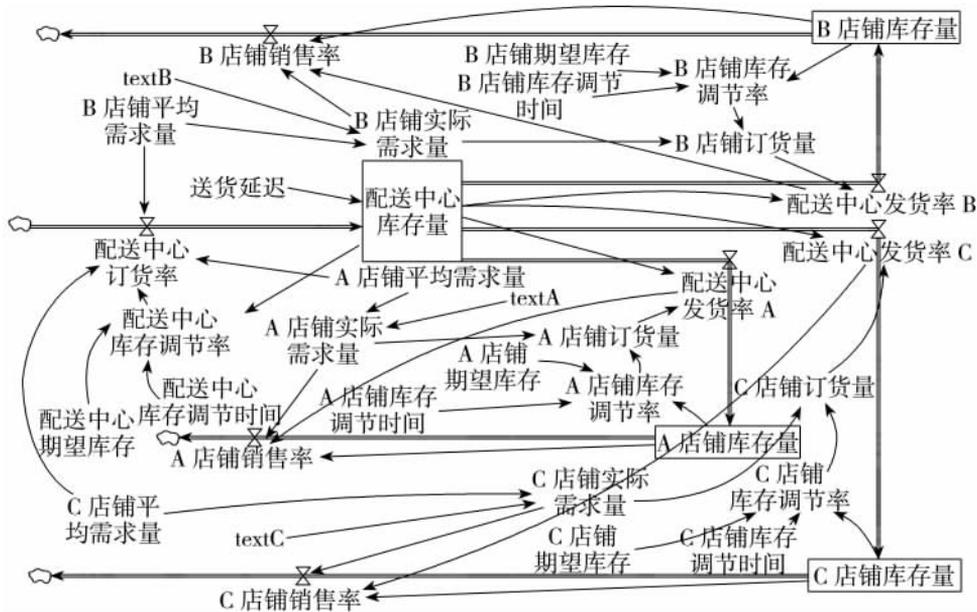


图苑一题 半成品库存与半成品产量、成品产量关系图

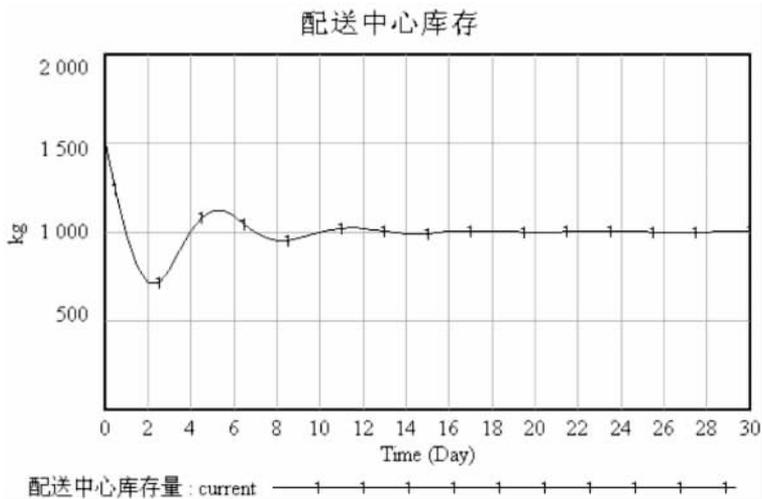
以下是本小节源代码:

(图苑一题) 半成品产量 越完成半成品的劳动力 伊劳动生产率, 越圆缘愿件 辍周





图苑-圆瑶 配送中心库存模型



图苑-圆瑶 配送中心库存

看 配送中心的库存水平趋于稳定,平均库存在 员园园园 千克左右。猿个销售店铺库存量的每日变动情况也是相对稳定的。配送中心与猿个销售店铺的库存量总是大于零,这说明配送中心的库存储备能保证随时响应各个销售店铺的订货指令,不会出现因库存缺货而无法发货的现象。而销售店铺由于总是保持有一定的库存量,因此即使需求变动较大也能够保证不会出现缺货的现象。

根据图苑-圆和图苑-圆分析,配送中心采取一天一次的订货方式,订货到量基本

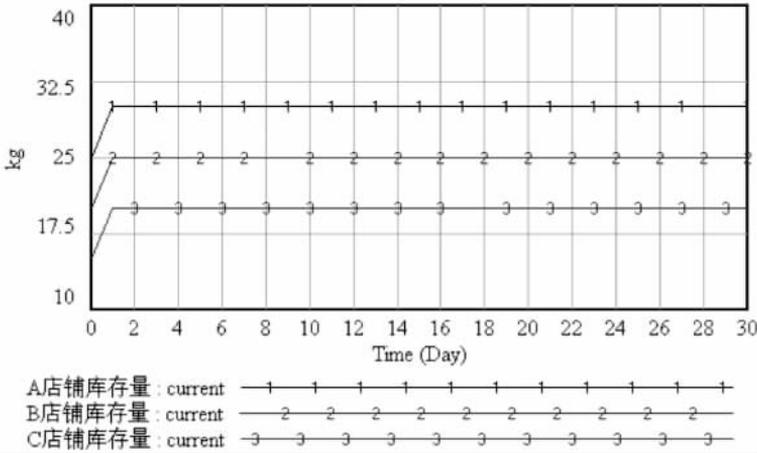


图 苑-10 三店铺库存量的变化

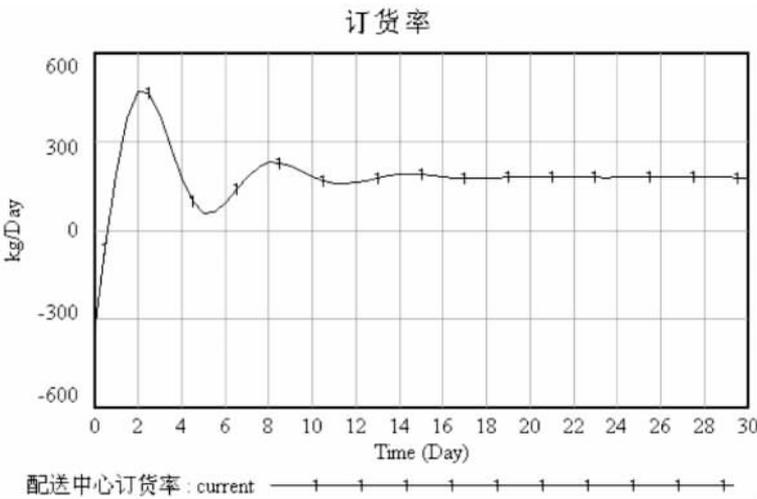


图 苑-11 配送中心的订货率

上为每天 500 千克,对各个销售店铺发货率则围绕着每天 200 千克、250 千克、200 千克上下波动,每天的发货量总和接近 500 千克,波动的范围也不大。这说明整个配送中心仓储系统是比较稳定的。

(圆) 模拟供应商发货延迟时间对系统的影响

这里,只改变供应商发货到配送中心的延迟时间这一常量值,保持其他常量数值不变,进行多次模拟,对配送中心库存量的输出结果进行比较和分析。

从图 苑-10 可以明显地看出,供应商发货到配送中心的延迟时间直接影响了配送中心库存量曲线的衰减幅度与速度。延迟时间越长,企业的库存水平波动就越大,库存越难以管理,甚至还可能发生缺货的危险。由此可见,将延迟时间控制在合理范围内是很重要的。



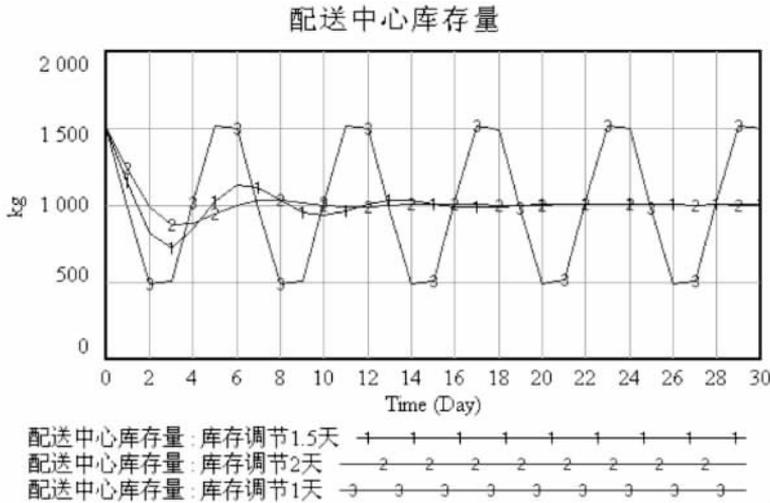


图 7-1 库存调节时间对库存的影响

中心的库存调节时间。

以下是本小节源代码：

- (园) 粤店铺实际需求 越 粤店铺平均需求 垣 粤店铺销售率 粤店铺销售率
- (园) 粤店铺平均需求 越 粤店铺销售率 粤店铺销售率
- (园) 粤店铺库存调节时间 越 粤店铺销售率 粤店铺销售率
- (园) 粤店铺库存调节率 越 (粤店铺期望库存 原粤店铺库存量) 粤店铺库存调节时间 ; 粤店铺销售率 粤店铺销售率
- (园) 粤店铺库存量 越 粤店铺销售率 配送中心发货率 粤原粤店铺销售率 粤店铺销售率 粤店铺销售率
- (园) 粤店铺期望库存 越 粤店铺销售率 粤店铺销售率
- (园) 粤店铺订货量 越 粤店铺库存调节率 垣 粤店铺实际需求 粤店铺销售率 粤店铺销售率
- (园) 粤店铺销售率 越 粤店铺销售率 配送中心发货率 粤店铺库存量 粤店铺实际需求量 ; 粤店铺销售率 粤店铺销售率
- (园) 月店铺实际需求 越 月店铺平均需求 垣 月店铺销售率 月店铺销售率
- (园) 月店铺平均需求 越 月店铺销售率 月店铺销售率
- (园) 月店铺库存调节时间 越 月店铺销售率 月店铺销售率
- (园) 月店铺库存调节率 越 (月店铺期望库存 原月店铺库存量) 月店铺库存调节时间 ; 月店铺销售率 月店铺销售率
- (园) 月店铺库存量 越 月店铺销售率 配送中心发货率 月原月店铺销售率 月店铺销售率 月店铺销售率
- (园) 月店铺期望库存 越 月店铺销售率 月店铺销售率
- (园) 月店铺订货量 越 月店铺库存调节率 垣 月店铺实际需求 月店铺销售率 月店铺销售率
- (园) 月店铺销售率 越 月店铺销售率 配送中心发货率 月店铺库存量 月店铺实际需求量 ; 月店铺销售率 月店铺销售率
- (园) 悦店铺实际需求 越 悦店铺平均需求 垣 悦店铺销售率 悦店铺销售率
- (园) 悦店铺平均需求 越 悦店铺销售率 悦店铺销售率
- (园) 悦店铺库存调节时间 越 悦店铺销售率 悦店铺销售率
- (园) 悦店铺库存调节率 越 (悦店铺期望库存 原悦店铺库存量) 悦店铺库存调节时间 ;



说第一周的销售率是 100 件/周,那么它就会延迟一周半的准备时间获得同样数量的订货率(在第 1.5 周订货率达到 100 件/周)。

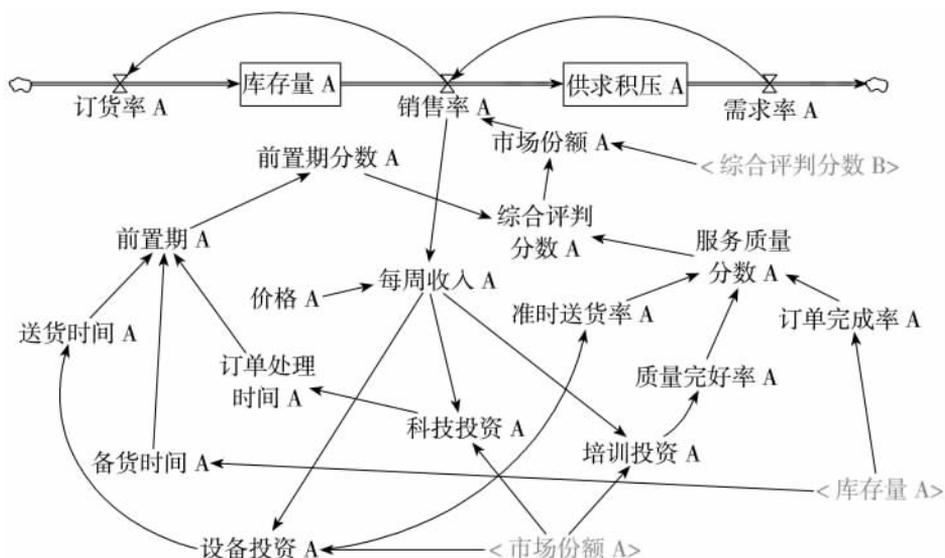


图 苑-圆 零售商粤的模型关系图

月厂商则依旧采用传统的安全库存订货模式。他需要一个等于 愿件货物的期望库存量(也称安全库存量),一个等于 圆周时间的库存调节时间,以便调节库存差距。所以:

库存调节率 越(期望库存量 原库存量 月)越调节时间;量纲:件/周。

订货率 月越库存调节率 垣 销售率 月源;量纲:件/周。

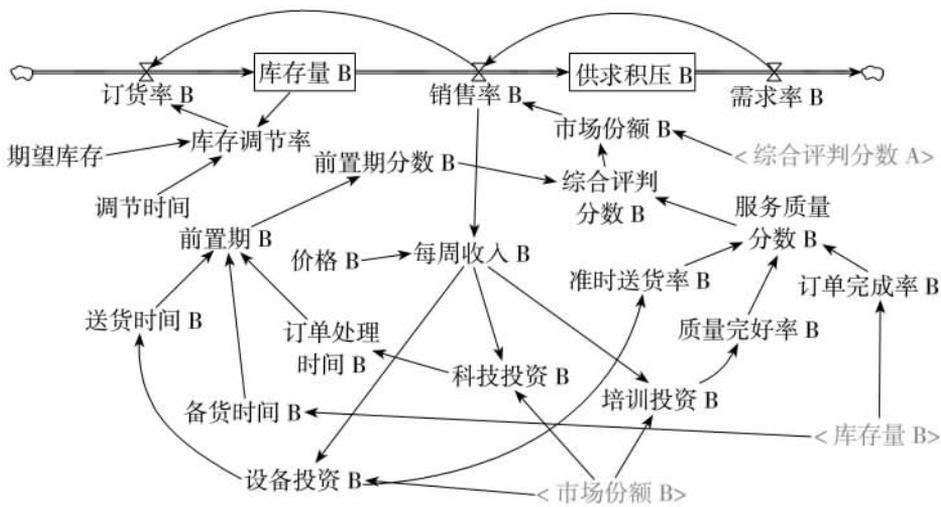
零售商 月的订货率由两部分组成:一部分是等于销售率的数值,另外一部分订货率则用来补充当前库存量和期望库存量之间的差距,多退少补,使得两者尽量一致。库存调节率就是产生这个机制的。所以在此,一个厂商采用 允制订货,另一个则采用传统订货模式。

### 圆) 前置期与服务质量对客户心理的影响

本板块考察供应链综合竞争。既然涉及到不同供应链之间的竞争,那么不但会牵涉到两条不同的供应链,还会牵涉到竞争绩效的裁决者(最终客户)。所以,本模型里除了两条供应链外还有一个“隐形”的裁判——客户。作为客户,在选择生意伙伴时,主要会综合考虑以下因素:

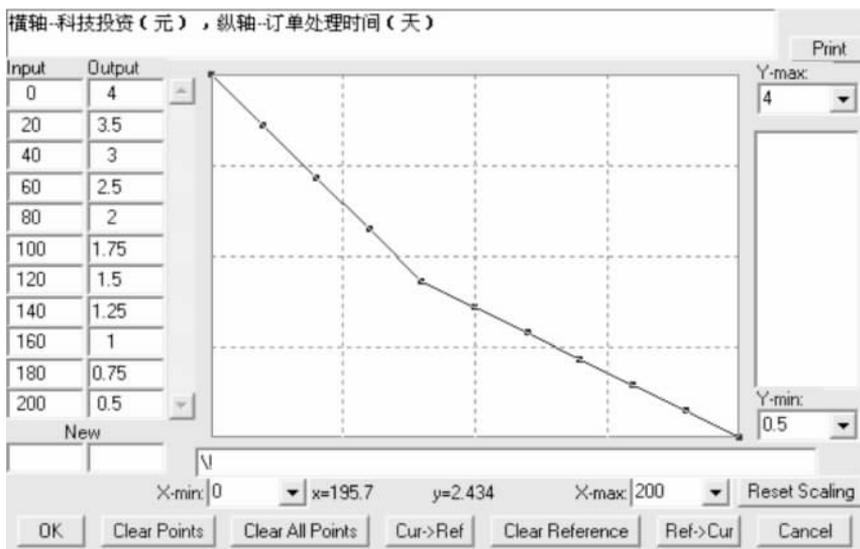
(员)前置期的长短。前置期就是从客户下达订单到最终收到货物的整个时间跨度。再细分还可以分为三个子时间段:

① 订单处理时间。就是零售商从收到客户订单到完成订单归类、分拣、存档的整个时间段。以前因为技术落后,订单处理往往要花费大量的时间,但现在随着计算机



图苑-圆 零售商月的模型关系图

的普及,订单处理时间大幅降低。尤其是网上订货的盛行,订单处理时间甚至缩短到了以小时为单位计算。可见,订单处理时间与企业的科技水平息息相关。比如,当当书店每年都要投巨资于其网上订书系统,因此在当当买书确认时间要比在其他网站快得多。科技水平又与企业科技投资有着直接的关系。科技投资力度越大,越容易运用高端设备,也就越容易提高订单处理的效率。在这一点上,粤月两个零售商基本没有差别,图苑-圆显示了这一点。



图苑-圆 科技投资与订单处理时间的关系

② 备货时间。备货时间就是准备货物的时间。在本模型里,对于采用 定制的零

零售商,只要库存量不小于 40,就能够保证其以极快的备货时间准备货物,比如说 1 天。但是,一旦库存量小于 40 那么只能花上更多的额外时间准备货物,此时备货时间就比较长,比如说 8 天。

备货时间  $\leq$  越限裁耗  $\leq$  库存量  $\leq$  跃 40 (天), 量纲: 天。

对于采用批量订货模式的零售商,备货时间则比较复杂一点,因为它的备货时间与库存量息息相关。表现为库存量越大时,存货越丰富,故备货时间越短。当库存量较小的时候,因为存货匮乏,所以备货时间相应较长,如图 4-10 所示。

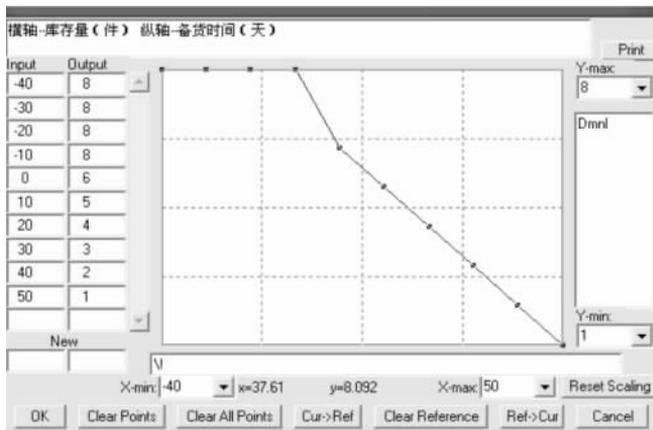


图 4-10 库存量与备货时间的关系

③ 送货时间。货物一旦准备完毕,接下来就需要通过运输送到客户手里,这里也会产生一个不短的送货时间。一般说来,交通工具越先进,运输设备越精良,送货时间就越短。而精良的运输设备需要花费大量的设备投资。企业必须从收入中划出专门经费用于设备投资,设备投入越大,花费的送货时间就越短。在这一点上,两个零售商完全一样,如图 4-11 所示。

综上所述,前置期里面包括订单处理时间、备货时间、送货时间,三个时间加在一起就构成了总的前置期。前置期当然是越短越好。前置期的长短是客户需要考虑的首要因素。因为速度是市场的生命,所以前置期是影响供应链竞争的第一个因素。

前置期  $\leq$  越备货时间  $\leq$  订单处理时间  $\leq$  送货时间, 量纲: 天。

前置期  $\leq$  越备货时间  $\leq$  订单处理时间  $\leq$  送货时间, 量纲: 天。

(圆) 服务质量因素。客户还会考虑的另一个关键因素就是供应链的服务质量,这里包括三个指标:

① 订单完成率。例如,假设客户订货 100 件,最后因为种种原因只有 80 件能够运到客户手中,这里的订单完成率就是 80%。对于零售商,因为采取 0 截制运输,只要仓库能够保证物流不中断,就基本能够保证完成大部分客户订单。下面的公式就假设了如果库存量大于 40 那么订单完成率就能够达到 80%,而如库存量小于 40 的话,则完成率最多不超过 80%。



是上学迟到的原因一大半都是汽车抛锚。因此,设备投资费用越高,运输工具就会越精良,也就会大大减少各种不确定的迟缓因素,提高准时送货率。如图 苑-猿所示。

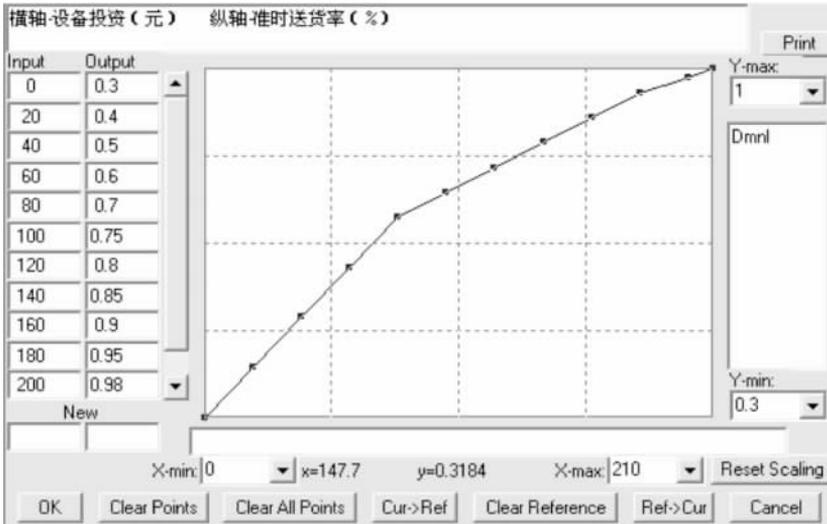


图 苑-猿 设备投资与准时送货率的关系

③ 质量完好率。准时送达了 怨件货物,可能其中的 愿件是优等品, 员件却是劣等品。这样,质量完好率就只有 愿件。一般我们可以认为,产品在配送过程中出现质量问题大多数都是员工的玩忽职守造成的。如图 苑-猿所示。

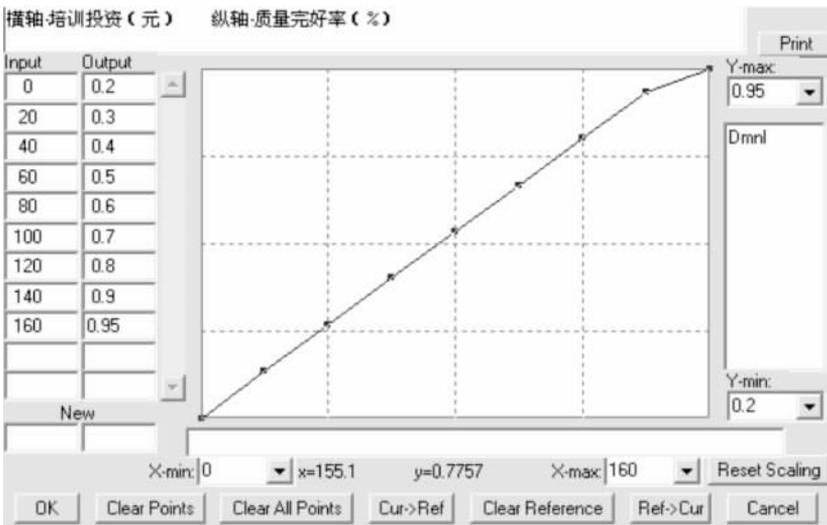


图 苑-猿 培训投资与质量完好率的关系

综上所述,“服务质量因子”就是订单完成率、准时送货率、质量完好率三者的乘积。它说明了最终有多大比例的产品能够令客户满意地送达。这些满意产品是要既能够保证供货的,又要准时送到,还要质量完好。我们不妨验算一下:上面计算过的订单



每周收入  $Y$  (元) 量纲: 元。

以第一个公式零售商  $Y$  为例。该公式中的“ $Y$ ”表明无论何时,每周收入中的  $Y$  必须用作培训投资。限制条件是  $Y < Y_{max}$ 。函数说明的是一旦零售商  $Y$  的市场份额下降到  $Y_{min}$  以下,则追加投资每周收入的  $Y$  作为培训投资,以便挽回败局;如市场份额大于  $Y_{min}$ ,则形势良好,不必要追加投资。函数  $Y$  表明所有的培训投资费用一旦投入,不可能立竿见影取得效果,必须有一个缓冲见效期,这里的见效期就是  $Y_{min}$ 。当然,培训投资的见效期肯定是最短的一个。

9.3 供应链质量综合评判

客户心里都有相对自己而言理想的前置期和服务质量因子。他们会下意识地将每条供应链的前置期和服务质量与自己心中的标准进行比较,甚至有些客户还会根据自己心中的标准给供应链的这两个指标打分。这个过程反映了人脑思维的主观性。图 9-1 和图 9-2 说明了总的前置期天数越少,给的分数越高,满分是 1;服务质量越高,给的分数也越高,满分同样是 1。

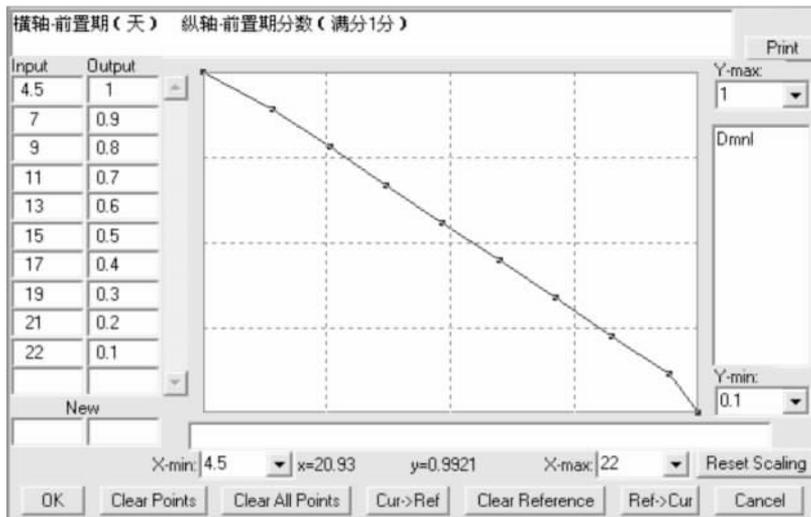


图 9-1 不同的前置期天数各自对应的分数值

经过这样一番打分,不仅模拟了人脑的思维过程,还能够将抽象的供应链质量评估确定为实实在在的数值,将定性指标转化成定量指标,这是本模型决定性的关键步骤,也是一个亮点。因为前置期的天数和服务质量各自具有一个分值,所以还要对它们进行加权平均。

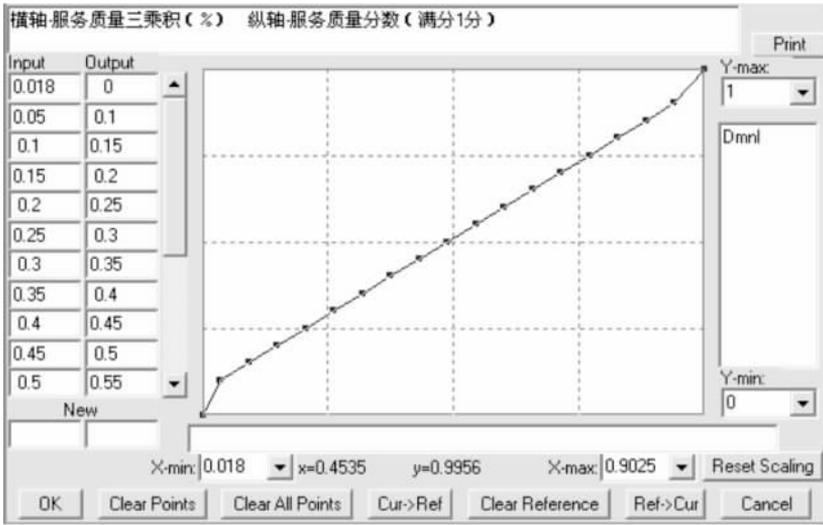
综合评判分数  $Y$  越服务质量分数  $Y$  伊  $Y_{min}$  前置期分数  $Y$  伊  $Y_{min}$

综合评判分数  $Y$  越服务质量分数  $Y$  伊  $Y_{min}$  前置期分数  $Y$  伊  $Y_{min}$

最终分别得出两条供应链最后的综合评判分数,这个分数的满分还是 1。

9.4 供应链如何占有市场

市场份额  $Y$  越综合评判分数  $Y$  越综合评判分数  $Y$  越综合评判分数  $Y$



图苑-猿猿 不同的服务质量各自对应的分数值

市场份额 月越综合评判分数 月猿综合评判分数 粤垣综合评判分数 月)

这样做比较合理,比如零售商 粤的分数是 圆远分,零售商 月是 圆源分,那么它们理所应当分别占有 远成和 源成的市场份额。

前置期与服务质量是供应链和客户之间的分割线。因为客户最多只能了解到前置期的长短和服务质量的好坏,再深入下去他们就不可能了解得那么清楚了,只有厂商才能通过种种手段对它们进行调节控制。因此,厂商努力将这两个指标做到最好,客户也不断对这两个指标提出高要求,使它们理所应当地成为供求双方之间的桥梁和纽带,也成了供应链竞争中的前沿阵地。

再来分析销售率这个指标。首先要注意区分“需求率”和“销售率”这两个指标。需求率 粤和需求率 月是完全一样的,它们其实就是同一个东西,表示供应链 粤和 月所在市场的总的顾客需求率。但是,这个需求率不可能由一家公司独吞,只能根据两家公司各自的市场份额进行分割。于是引出了销售率这个概念:

销售率 粤越市场份额 粤伊需求率 粤

销售率 月越市场份额 月伊需求率 月

市场份额 粤垣市场份额 月越员

销售率是各家企业实实在在销售的数量,即:

销售率 粤垣销售率 月越总需求率

每周收入 粤越销售率 粤伊价格 粤

每周收入 月越销售率 月伊价格 月

我们假定价格是 员元,便得到了每周的收入。这些收入绝大部分都要作为投资,投入到科技开发、设备购置和人员培训当中。

### 源) 仿真结果分析

对于需求率假定了图苑-猿中的曲线 员这条曲线的形状类似于促销商品的需求







- (园园员)) ;款量译 阅怠造
- (员园) 准时送货率 月 越宰隲匀 蕴韵兹竣 设备投资 月,
  - ([(园园隲) 原 (园园员)] (园园隲) (园园隲原) (源园隲缘) (远园隲远) (愿园隲苑),
  - (员园隲缘) (员园隲愿) (员园隲缘) (员园隲怨) (员园隲缘) (园园隲愿),
  - (园园员)) ;款量译 阅怠造
- (员园) 前置期 粤 越备货时间 粤垣订单处理时间 粤垣送货时间 粤 ;款量译 阅怠造
- (员园) 前置期 月 越备货时间 月垣订单处理时间 月垣送货时间 月 ;款量译 阅怠造
- (员园) 前置期分数 粤 越宰隲匀 蕴韵兹竣 前置期 粤,
  - ([(源缘隲员) 原 (园园员)] (源缘隲员) (苑隲怨) (怨隲愿) (员隲苑) (员隲远),
  - (员隲缘) (员隲源) (员隲隲) (园隲园) (园园隲员)) ;款量译 阅怠造
- (员园) 前置期分数 月 越宰隲匀 蕴韵兹竣 前置期 月,
  - ([(源缘隲员) 原 (园园员)] (源缘隲员) (苑隲怨) (怨隲愿) (员隲苑) (员隲远) (员隲缘),
  - (员隲源) (员隲隲) (园隲园) (园园隲员)) ;款量译 阅怠造
- (员缘) 培训投资 粤 越蕴韵兹竣 ((园园垣宏裁非羴羴羴 市场份额 粤 < 园园隲园) 伊每周收  
入 粤) 园 ;款量译 阅怠造
- (员园) 培训投资 月 越蕴韵兹竣 ((园园垣宏裁非羴羴羴 市场份额 月 < 园园隲园) 伊每周收  
入 月) 园 ;款量译 阅怠造
- (园园) 备货时间 粤 越隲裁非羴羴羴 库存量 粤 > 园园愿) ;款量译 阅怠造
- (员愿) 备货时间 月 越宰隲匀 蕴韵兹竣 库存量 月,
  - ([(原园隲) 原 (缘园愿)] (原园愿) (原园愿) (原园愿) (原园愿) (园远) (员园缘),
  - (园园源) (猿园猿) (源园圆) (缘园员)) ;款量译 阅怠造
- (员园) 市场份额 粤 越粤隲跟却郾郾郾 综合评判分数 粤隲综合评判分数 粤垣综合评判分数 月),  
园缘) ;款量译 阅怠造
- (园园) 市场份额 月 越粤隲跟却郾郾郾 综合评判分数 月隲综合评判分数 粤垣综合评判分数 月),  
园缘) ;款量译 阅怠造
- (园园) 库存调节率 越 (期望库存 原库存量 月) 辕 调节时间 ;款量译 阅怠造
- (园园) 库存量 粤 越隲裁却 订货率 粤原销售率 粤 愿园) ;款量译 阅怠造
- (园园) 库存量 月 越隲裁却 订货率 月原销售率 月 园) ;款量译 阅怠造
- (园园) 服务质量分数 粤 越宰隲匀 蕴韵兹竣 订单完成率 粤伊准时送货率 粤伊质量完好率 粤,
  - ([(园园愿园) 原 (园园隲缘员)] (园园愿园) (园园缘隲员) (园园隲缘) (园园隲缘园),
  - (园园隲缘) (园园隲缘) (园园隲缘) (园园隲缘) (园园隲缘) (园园隲缘) (园园隲缘) (园园隲缘),
  - (园园隲缘) (园园隲缘) (园园隲缘) (园园隲缘) (园园隲缘) (园园隲缘) (园园隲缘) (园园隲缘),
  - (园园愿) (园园愿) (园园愿) (园园愿) (园园愿) (园园愿) (园园愿) (园园愿)) ;款量译 阅怠造
- (园园) 服务质量分数 月 越宰隲匀 蕴韵兹竣 订单完成率 月伊准时送货率 月伊质量完好率 月,
  - ([(园园) 原 (园园隲缘员)] (园园愿园) (园园缘隲员) (园园隲缘) (园园隲缘园),
  - (园园隲缘) (园园隲缘) (园园隲缘) (园园隲缘) (园园隲缘) (园园隲缘) (园园隲缘) (园园隲缘),
  - (园园隲缘) (园园隲缘) (园园隲缘) (园园隲缘) (园园隲缘) (园园隲缘) (园园隲缘) (园园隲缘),
  - (园园愿) (园园愿) (园园愿) (园园愿) (园园愿) (园园愿) (园园愿) (园园愿)) ;款量译 阅怠造
- (园园) 期望库存 越愿 ;款量译 阅怠造





空洞威胁的存在。博弈理论家们提供了将子博弈完美性的想法扩展到不完全信息动态博弈的求解思路。这些求解思想按照限制性从小到大依次是完美贝叶斯均衡、纳什和纳什的序贯均衡(纳什-泽林纳-桑塔费问题)以及塞尔腾的颤抖手完美均衡(奈德曼问题)。

经典博弈理论似乎已经建立起一个完美而精巧的分析框架,但是,这一理论体系让人深表怀疑的,并不是其分析框架和在这一分析框架下博弈理论家们建立起来的各种模型,而是这一理论体系的基础——其对于人类行为的基本假定。这些基本假定包括 ① 参与人是理性的;② 参与人是智能的;③ 有完备或基本完备的信息。

## 2.1 博弈论理性假设

按照冯·诺伊曼—摩根斯坦效用准则,博弈理论假设每个参与人的目标是追求其个人期望支付的最大化,在博弈论中参与人的支付是以某个效用尺度来衡量的。如果一个决策者在追逐其目标时,能够前后一致地按照使自己的福利最大化的目标来决策,则这一决策者被称之为“理性的”。理性的决策者追逐的是自己的福利最大化目标,在博弈理论中个体的期望支付则等价于个体的福利。理性决策者应该按照自己的期望支付(期望效用)最大化的准则进行决策的思想,最早可以追溯到伯努利(丹尼尔·伯努利),这一思想被冯·诺伊曼和摩根斯坦(奥斯卡·摩根斯坦)在某些假设前提下证明是正确的。借助关于理性决策者的一组选择公理,冯·诺伊曼和摩根斯坦证明了,对于任意理性的决策者,一定存在某种方式对他所关心的各种可能结果赋予效用数值,使其总是选择最大化自己的效用期望。这一结论就被称为期望效用准则或冯·诺伊曼—摩根斯坦效用准则。

一般地,最大化期望效用与最大化期望货币支付并不必然相同,因为效用本身并非货币的线性函数。当存在不确定性时,效用可能还依赖个体对风险厌恶或者偏好的程度(冯·诺伊曼问题)。更一般地,个体的效用支付值除了与货币支付值(非线性)相关外,可能还依赖于多个变量,甚至可能包括周围其他人所获得货币支付等。

在博弈理论中,期望效用准则代替了参与人最大化福利准则,成为参与人理性的基本假定,或者说,二者被认为是等价的。但是,这并非是没有争议的结论,对这一假定的批评来自两个方面,一种批评否认人类理性本身,或者,批评者们认为在人类行为的许多方面(显然不是全部方面),个体都表现出利他主义或者集体主义的行为特征,而不是表现出使得自身福利最大化,甚至,这样的特征也表现在其他动物的某些类型的行为之中。

### 员) 智能假定

当博弈的参与人能够像博弈理论专家那样分析一个博弈,并且能够作出对博弈局势的正确判断时,我们称此博弈的参与人是智能的。在经典博弈论中,一般都假定博弈参与人在上述意义上是智能的。因此,如果我们研究出一个能够描述某个博弈中



作博弈(  $\Gamma$  ) 与多人合作博弈(  $\Gamma^c$  ) 两种情况, 鉴于现实生活中多人合作博弈的情况占了大多数, 因此我们主要介绍多人合作博弈的相关理论。

( 员 ) 合作博弈的基本概念

在非合作博弈中, 参与人或局中人的利益是依靠他自己的行动或策略选择“ 争来 ” 的。在利益的争夺中, 局中人追逐的利益是他自己的利益。但是, 并非所有利益关系的处理都是通过“ 非合作 ” 的行动或策略方式获得, 谈判与仲裁也是人们得到利益的方式。

合作博弈的基础或基本假设仍然是个体理性, 它研究的是在个体理性条件下的合作。合作不能损害个体利益, 否则他宁肯采取不合作的态度, 而通过自己的行动或策略去争取更大的利益。合作中的利益分配原则不再是仅仅出自于个体利益的原则, 在对分配方案进行选择时, 产生了一个重要的概念就是“ 公正 ”, 分配方案只有被双方都认可才能实现其合理性, 才能是“ 公正 ” 的。因此, 分配的公正性就成为合作博弈中的核心概念。

利益的分配需要通过谈判解决, 谈判的“ 仲裁者 ” 是“ 公正的理由 ”, 即谈判双方都接受的“ 公理 ”—— 公认的理由。如果人们愿意从一些共同认可的“ 大道理 ” 出发去解决利益分配问题, 他们就有了合作的基础。

( 圆 ) 多人合作博弈

局中人的数目多于两人的合作博弈称为多人合作博弈。假设局中人是三个, 也许三者全部参加合作, 并且使得每个成员的利益得到最大的增进。也有可能是三人中的两个人进行合作, 这两个人联盟可以使他们两个获得最大利益。而可能的利益分配结果支配着联盟的形成。这里只介绍多人合作博弈的基本概念。

① 联盟(  $S$  )。设有  $N$  个人参与博弈,  $N = \{1, 2, \dots, n\}$  是全部参与人的集合, 一个联盟被定义成  $N$  的子集  $S \subseteq N$ ,  $S$  中的成员能达到有约束力的协议, 当他们一旦达到结盟协议, 这个协议是有约束力的, 可以“ 保证 ” 他们采取统一的集体行动。

② 特征函数。设  $S \subseteq N$ ,  $v(S)$  是  $S$  中的一个联盟,  $v(S)$  是联盟  $S$  可以保证得到的最大利益。  $N$  中的其他人可以结成联盟  $N \setminus S$  并与  $S$  对抗( 当然这种情况不一定会发生 ),  $v(S)$  就是联盟  $S$  即使在这种情况下也可以保证获得的最大利益。  $v(S)$  被称为多人(  $N$  ) 合作博弈中的特征函数。我们对  $v(S)$  作简单的讨论:  $v(\emptyset) = 0$ 。若  $v(S \cup T) \geq v(S) + v(T)$ ,  $S \cap T = \emptyset$ , 则称特征函数  $v$  具有超可加性。它意味着对于局中人而言合作至少不比不合作差。若  $v(S \cup T) = v(S) + v(T)$ ,  $S \cap T = \emptyset$ , 则称特征函数  $v$  具有可加性。这时  $S$  和  $T$  合作还是不合作没有区别。

③ 分配。在合作博弈中集体理性的实现是以个体理性的满足为条件的, 因此, 合作博弈问题是如何在不违背个体理性的条件下实现集体理性。而集体理性目标实现

的障碍是分配问题。

假设参与人  $i$  自己单干可获得的收益为  $v_i$  而合作后集体分配给他的收益为  $x_i$  对于合作博弈而言,如果要实现集体利益最大化,就是要寻找一种分配方案  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  这个方案满足条件

$$x_i \geq v_i, \forall i \in N \quad (1)$$

$$\sum_{i \in N} x_i \geq v_N \quad (2)$$

④ 优越。一个分配方案  $x$  在满足了(1)-(2)式的条件后是否能够被集合  $N$  中全部成员接受呢?不一定!一些人可能仍会拒绝这个方案,他们可能会提出至少要按照再分配,而不能按照  $x$  进行分配的要求。原因为两个

$$x_j < v_j, \forall j \in S$$

$$\sum_{i \in S} x_i < v_S$$

对于联盟  $S$  来说,分配方案  $x$  优越(或可被实现)分配方案  $x$  简称再优越  $x$ ,这种情况下,分配方案又是不能实现的。优越的概念说明集体  $N$  的分配方案不仅仅要满足个体理性( $x_i \geq v_i$ )而且还要满足“小集体”的理性,否则大集体  $N$  的分配方案是无法实现的,从而大联盟就不能实现。

⑤ 核心。核心(核)表示全部不可优越的分配方案的集合,记为  $C(N, v)$ 。如果某个分配方案在核中,那么,它满足条件

$$\sum_{i \in S} x_i \geq v_S, \forall S \subseteq N$$

$$\sum_{i \in N} x_i \geq v_N, \forall S \subseteq N$$

由此看出,这个分配方案现在不是任何小集体可以用实力对抗并拒绝的分配方案。当集体选择了某个核心中的分配方案时,局中人也许希望选择其他的分配方案,这样对他更为有利。但是,他现在没有能力否决这个方案,因为他不可能同其他人形成联盟从而获得比现在分配方案更大的收益。

如果人们能够找到这样的分配方案,集体利益的最大化就有可能实现,通过形成大联盟  $N$  得到最大的利益  $v_N$ ,然后通过选择核心中的分配方案把得到的这个最大利益分配给局中人,局中人从分配中得到的利益超过(或不低于)他们自己单干或形成小集体可以得到的利益。如在前面的双人博弈中,图 1-1 中的  $OC$  曲线形成了核心。

### 1.2 非合作博弈

非合作博弈的表述方式主要分两种,战略式表述与扩展式表述。一般来说,战略式表述比较适合于对静态博弈问题的描述,扩展式表述比较适合于对动态博弈问题的描述。

(1) 战略式表述。战略式表述一般不涉及局中参与人的行动问题,而将注意力集

中在参与人是如何“同时选择”战略的,如何共同决定每个参与人的效用函数。

设局中参与人集合为  $\{I_1, I_2, \dots, I_n\}$ , 局中第  $i$  个参与人的策略集合为  $S_i$ , 效用函数为  $(s_1, s_2, \dots, s_n)$  则定义:

$\Gamma = \{S_i, U_i\}$  为战略表述形式的博弈。

如果参与人是有限的,每个参与人可选择的策略也是有限的,那么,这种博弈称为有限博弈。如果是两人有限博弈问题,战略表述形式可以用矩阵形式直观地表示出来。图 4-1 就是两人两策略的博弈矩阵形式。

局中人

		局中人 I	局中人 II
局中人 I	局中人 I	(1, 2) (2, 1)	(3, 1) (1, 3)
	局中人 II	(2, 1) (1, 2)	(1, 3) (3, 1)

图 4-1 两人两策略的博弈矩阵

(圆) 扩展式表述。在动态博弈中,局中人依照一定的顺序行动,且后行动者能够观测到先行行动者的行动选择,这种博弈活动可以采用扩展式表述。在扩展式表述中需要考虑的要素有:局中人集合、局中人行动顺序、局中人行动集、局中人信息集、局中人效用函数等。

有限博弈下的扩展式表述一般可以用博弈树来表示,如图 4-2 所示。

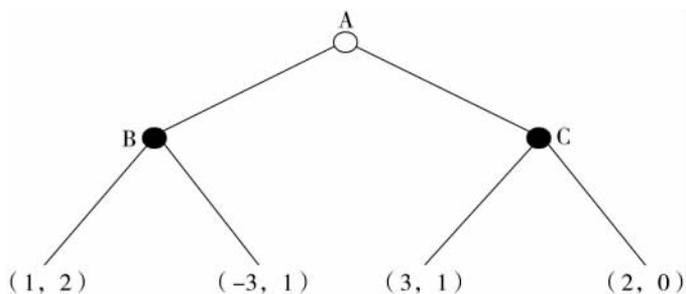


图 4-2 博弈树示意图

图 4-2 中, A 表示决策终点, B 和 C 表示决策节点(局中人需要在此作出选择),图中数据表示博弈的赢得函数(效用函数)。可见,利用博弈树可以把一个博弈局势及其过程比较清楚地表示出来。同时,经过自后向前的计算与决策,可以确定出一条均衡路径,即得出全过程的纳什均衡结果。

非合作博弈在博弈论中占有极其重要的地位,它是博弈论研究的主要内容,涉足的均衡概念、模型种类很多,其有关概念及建模方法构成了我们进行管理激励与约束

机制设计研究的重要理论基础。

猿) 非对称信息博弈

非对称信息博弈论,又称为信息经济学,是非对称信息背景下非合作博弈论在经济学上的应用与发展。非对称信息博弈论研究的是非对称信息条件下的最优契约设计问题,故又可称为契约理论或机制设计理论。博弈论是以方法论为导向的,其研究性质是“实证的”;非对称信息博弈论是以经济问题为导向的,其研究性质是“规范的”。

博弈论研究的是:给定信息结构,什么是可能的均衡结果?

非对称信息博弈论研究的是:给定信息结构,什么是最优的交易契约?见表苑-怨因此,博弈论与非对称信息博弈论研究的侧重点是不同的。

理论上讲,如果契约能够完善地说明各种可能的情况并得到很好的实施,经济激励问题就可以得到解决。然而,这种理想境界只是在交易各方所掌握的信息完全相同的情况下才能实现。而现实中交易各方信息不对称更具有普遍性。信息不对称的存在会引发各种机会主义行为的产生,从而使互利互惠的交易难以进行,造成帕累托最优从未实现。

表苑-怨 非对称信息博弈论研究的基本内容

隐蔽内容发生时间	隐蔽行动	隐蔽信息
事前		逆向选择模型、信号传递模型、信号甄别模型
事后	隐蔽行动的道德风险	隐蔽信息的道德风险模型

非对称信息博弈论中的信息不对称主要是指信息非对称发生的时间与信息非对称的内容两种情况。从发生的时间看,信息非对称可能发生在当事人签约之前(事前非对称),也可能发生在当事人签约之后(事后非对称)。从信息非对称的内容看,信息非对称是指某些参与人的行动不可观测,或指参与人的知识不同,这样,在非对称信息条件下,研究最优的交易契约安排就成为非对称信息博弈论研究的基本内容。非对称信息博弈论研究的具体内容可概括为四类基本模型的设计:逆向选择模型(研究事前非对称信息的模型)、道德风险模型(研究事后非对称信息的模型)、隐蔽行动模型(研究不可观测行动的模型)、隐蔽信息模型(研究不可观测知识的模型)。

在非对称信息博弈论中,几乎所有模型都可以在委托人—代理人的框架下进行分析,故非对称信息博弈论的核心是委托—代理理论。这里的委托人、代理人与法律学上的委托人、代理人含义不同,是根据参与人拥有信息的多寡来定义的。拥有私人信息的参与人称为“代理人”(代理人),不拥有私人信息的参与人称为“委托人”(委托人)。在一项契约安排中,委托人、代理人双方既有利益一致的一面,又有矛盾或冲突的一面。由于信息的不对称,代理人可能采取有利于自己但不利于委托人的行动,故委托人在进行机制设计时必须考虑对代理人的激励与约束问题。可以说,非对称信息博弈论研究的核心内容是最优交易契约的设计问题,主要的建模理论是

委托—代理理论。

在委托—代理理论下,委托人不能直接观测到代理人选择了何种行动,只能观测到代理人的行动所产生的一些效果指标(变量),而这些效果指标包含了外生随机因素的影响作用。故委托人只能根据观测到的信息,选择对代理人的激励(与约束)措施,以促使其朝着对自己有利的方向行动。所以,设计委托—代理模型即为设计一个能够使委托人根据观测到的信息对代理人实施奖惩的最优激励合同(契约)。

一个委托—代理模型一般由三部分组成:委托人的期望效用函数、代理人的参与约束和代理人的激励相容约束。所谓参与约束是指代理人接受合同下的期望收益(效用)要大于其他市场机会下能获得的最大期望(该收益可称为保留效用);所谓激励相容约束是指在一个激励合同下,代理人总是在所有可能的行动集中选择能使自己期望效用最大化的行动。委托—代理理论的建模方法主要有:“状态空间模型化方法”、“分布函数的参数化方法”和“一般化方法”。三种建模方法均以委托人的期望效用函数、代理人的参与约束和代理人的激励相容约束三个部分构成模型的基本框架,所不同的主要是对外生随机变量(自然状态变量)的技术处理方法不同。

这里需要说明的是,委托—代理理论并不是解决非对称信息博弈问题的唯一理论方法,实际上委托—代理理论在解决比较复杂的非对称信息博弈问题上已经面临很多困难,这也正是作者提出管理博弈论的重要原因之一。

## 供应链中库存问题的博弈分析

一般的供货商与销售商联合库存模型均基于如下两个假定:①供货商与销售商之间是合作的;②双方信息共享。

基于上述的假定,本节建立了供货商与销售商非合作博弈的库存控制模型,分别给出了对称信息静态博弈、对称信息动态博弈以及非对称信息静态博弈下供货商与销售商的博弈均衡策略。最后通过应用实例,比较了这几种博弈下供销双方的最优策略及相应利润,为下面提供的方法进行实证研究。

### 1) 概念

自从首次建立了供货商与销售商之间“批量对批量”的联合生产库存模型以来,将供货商与销售商联合起来考虑引起了不少研究者的注意。有学者分别建立了不同的供货商与销售商联合生产库存模型,这些模型都从整体协作的角度出发,分别给出了不同的最优生产和订购策略,以使得供销双方所组成的系统的平均总费用最小。

依据市场的变化,提出了促进整体协作的一种新的最优策略——定时折扣。在这种折扣策略下,供货商通过提供价格折扣给分销商,来诱使分销商按照供货商所希望的特定时间订货,其好处是供货商不需要有库存,仅在上一级供应商和分销商之间充当传递者。

上述模型的建立都隐含着如下两个假定：① 供货商与销售商之间是合作的，他们的目标是使得系统的总利润最大（或总费用最小）；② 供货商与销售商之间的信息是对称的，即双方共享所有信息（如需求信息、成本信息及其他费用参数等）。

然而，在现实中，基于对自身盈利的考虑，供货商和销售商都会按照各自的“偏好”选择使自己利润最大（或费用最小）的策略，即两个不同利益方出现竞争情形。由于密切相关的商业活动是由带有冲突目标的供货商与销售商来完成的，所以，信息共享过于理想化。因此，这里建立了供货商与销售商非合作博弈的库存控制模型，分别给出了对称信息静态博弈、对称信息动态博弈及非对称信息静态博弈下供货商与销售商的纳什均衡策略。

4.1 记号与假定

假定：

(1) 只考虑由单个供货商和单个销售商所组成的一对一的供应模式，供货商不需要有库存，仅在上一级供应商和分销商之间充当传递者；

(2) 系统运行在无限时间水平上，供货商与销售商都不允许缺货的情况发生；

(3) 供货商和销售商均按成本加成方法确定各自的销售价格  $\alpha_{增}$ 、 $\alpha_{遣}$  分别为供货商和销售商的成本加成率。

$\alpha_{增}$ 、 $\alpha_{遣}$  分别表示供货商和销售商的订购费用； $c$  表示供货商购买单位物品的成本； $\lambda$  表示供货商提供的折扣率（决策变量）； $h$  表示销售商单位时间库存单位物品的费用； $Q$  表示销售商每次订货时的订购批量（决策变量）； $r$  表示销售商以销售价格  $\alpha$  销售物品时顾客的需求率； $\lambda$  表示销售商以销售价格  $\alpha$  销售物品时顾客的需求率； $\lambda$  表示销售商以销售价格  $\alpha$  销售物品时顾客的需求率； $\lambda$  表示销售商以销售价格  $\alpha$  销售物品时顾客的需求率。

由假定知，供货商的销售价格为  $(\alpha_{增}c)$ ，销售商的成本即为供货商的售价，销售商的销售价格为  $(\alpha_{遣}\lambda)$ 。由于供货商提供价格折扣后的售价一般不会低于其成本，因此有  $(\alpha_{遣}\lambda) \geq c$  从而得

$$\alpha_{遣} \leq \frac{c}{\lambda} \tag{4-1}$$

此时顾客的需求函数变为  $\lambda$ 。

4.2 对称信息下静态博弈

所谓静态指的是所有参与人同时选择策略，每个参与人在选择自己的策略时不知道他人的选择。将供货商的收益记作  $\pi_1$ ，销售商的收益记作  $\pi_2$ ，从而有

$$\pi_1 = (\alpha_{遣}\lambda - c)Q \tag{4-2}$$

$$\pi_2 = (\alpha_{遣}\lambda - \alpha_{增}c)Q \tag{4-3}$$

在对称信息静态博弈下，供货商需要确定最优的折扣率  $\lambda$  以最大化自己的收益，销售商需要确定最优的订货量  $Q$  以最大化自己的收益。

由  $\frac{\partial \pi_1}{\partial \lambda} = 0$  得  $\lambda = \frac{c}{\alpha_{遣}}$ ，代入  $\pi_2$  得  $\pi_2 = (\alpha_{遣}\frac{c}{\alpha_{遣}} - \alpha_{增}c)Q = (1 - \alpha_{增})cQ$ 。由  $\frac{\partial \pi_2}{\partial Q} = 0$  得  $Q = \frac{r}{\alpha_{遣}}$ 。从而得

$$\text{则 } ( \text{匠} ) \text{ 越 } \frac{\text{园增增增原葬原增增增原葬原增增增}}{\text{园增增增员垣}\alpha_{\text{增}}} \quad ( \text{苑-员原} )$$

注意 ( 苑-员原) 式满足 则( 匠) 约  $\alpha_{\text{增}}$  越员垣 $\alpha_{\text{增}}$ , 但未必满足约束条件( 苑-员原), 因为 则( 匠) 可能小于园 由于  $\delta$  葬原增增增 则匠) 越原园 员垣 $\alpha_{\text{增}}$  增增增约园, 所以由( 苑-员原) 式确定的 则( 匠) 是供货商的最优反应函数。

同理, 由  $\delta$  葬原增增增 则匠) 越  $\alpha_{\text{增}}$  [ 葬原增增增员原则 ] 越原园 越园可得

$$\text{匠}^*( \text{则} ) \text{ 越 } \sqrt{\frac{\text{园增葬原增增增员原则}}{\text{增}}} \quad ( \text{苑-员缘} )$$

由于  $\delta$  葬原增增增 则匠) 越原园 葬原增增增员原则 ] 越原园, 所以由( 苑-员缘) 式确定的 匠\*( 则) 是销售商的最优反应函数。

两个反应函数在满足约束条件( 员) 下的交叉点即是纳什均衡。因此, 联立 ( 苑-员原)、( 苑-员缘) 两式可得

$$\frac{\text{增}}{\text{园}} \text{ 员垣}\alpha_{\text{增}} \text{ 匠}^{\text{原}} \text{ 原 } \alpha \text{ ( 员垣}\alpha_{\text{增}} \text{ 原增增增匠垣}\alpha_{\text{增}} \text{ 增增增越园} \quad ( \text{苑-员园} )$$

将等式( 苑-员缘) 的左边记作 枣匠)。由 枣匠) 越  $\frac{\text{猿增 员垣}\alpha_{\text{增}} \text{ 匠}^{\text{原}}}{\text{增}}$  原  $\alpha$  ( 员垣 $\alpha_{\text{增}}$ ) 原增增增 越园得

$$\text{匠}_{\text{原}} \text{ 越 } \sqrt{\frac{\text{园} \alpha \text{ ( 员垣}\alpha_{\text{增}} \text{ 原增增增增}}{\text{猿增 员垣}\alpha_{\text{增}}}} \quad ( \text{苑-员园} )$$

又 枣匠) 越原园 员垣 $\alpha_{\text{增}}$  匠越园 且 枣匠 越园) 越  $\alpha_{\text{增}}$  增增跃园 为了寻求上述对称信息静态博弈在约束条件( 苑-员园) 式下的纳什均衡策略, 易得如下命题。

命题员: ① 若 枣匠 越匠<sub>原</sub>) 跃园 则上述博弈不存在纳什均衡策略; ② 若 枣匠 越匠<sub>原</sub>) 越园 利用( 苑-员原) 式得到的 则<sub>原</sub> 则( 匠<sub>原</sub>) 满足约束条件( 苑-员原) 则上述博弈存在唯一的纳什均衡策略( 则<sub>原</sub>, 匠<sub>原</sub>); 否则, 上述博弈不存在纳什均衡策略; ③ 若 枣匠 越匠<sub>原</sub>) 约园 仅存在 匠<sub>原</sub>, 匠<sub>原</sub> ∈ [ 园, 垣肆) , 使得 枣匠 越匠<sub>原</sub>) 越枣匠 越匠<sub>原</sub>) 越园 如果利用( 苑-员缘) 式得到的 则<sub>原</sub>, 则<sub>原</sub> 均满足约束条件( 苑-员缘), 则上述博弈存在两个 纳什均衡策略( 则<sub>原</sub>, 匠<sub>原</sub>) ( 则<sub>原</sub>, 匠<sub>原</sub>); 否则, 如果 则<sub>原</sub> 越员原) 不满足条件( 苑-员原) 则对应的纳什均衡策略不存在。

注意 如果上述命题 员中有两个纳什均衡策略情形出现, 那么这两个纳什均衡策略中的任一个都不是严格占优战略。否则, 利用重复剔除的占优均衡可以剔除其中一个策略组合。比如, 如果 枣匠 越匠<sub>原</sub>) 跃 枣匠 越匠<sub>原</sub>) , 月 越匠<sub>原</sub>) 跃 月 越匠<sub>原</sub>) 成立, 则战略组合( 则<sub>原</sub>, 匠<sub>原</sub>) 为严格占优战略均衡, 从而策略( 则<sub>原</sub>, 匠<sub>原</sub>) 不是纳什均衡策略。

从命题员可知, 虽然 枣匠 则匠) 是关于 则) 的严格下凹函数, 月 越匠) 是关于 匠) 的严格下凹函数, 且 则 ∈ [ 园,  $\alpha_{\text{增}}$  越员垣 $\alpha_{\text{增}}$ ), 但是 匠 ∈ [ 园, 垣肆) , 即销售商的纯战略空间并非是在欧氏空间上的一个非空有界闭凸集, 因此, 由纳什均衡的存在性定理知, 上述

博弈可能不存在纳什均衡。另外,当  $\alpha > \frac{1}{2}$  时,上述博弈可能存在两个纳什均衡策略。博弈分析的目的是预测参与人的合理行为方式,也即是参与人如何博弈的一致性预测。如果出现两个纳什均衡策略时,要供销双方预测同一个纳什均衡出现是非常困难的。那么,保证一个纳什均衡出现的方法就是供销双方在博弈开始之前进行不花什么成本地“廉价磋商”,即在博弈之前达成一个一致性预测的协议,从而避免两个纳什均衡的出现。

源) 对称信息下动态博弈

对称信息下动态博弈亦称对称信息下的  $\alpha$  折扣率动态博弈。在此博弈下,供货商(领头企业,  $\alpha$  折扣率)首先选择折扣率  $\alpha$  则销售商(尾随企业,  $1-\alpha$  折扣率)观测到  $\alpha$  然后选择自己的订货量  $Q$  利用逆向归纳法求解,给定供货商选择的折扣率  $\alpha$  则销售商面临如下的优化问题

$$Q = \frac{a - \alpha c}{1 - \alpha} \quad (苑-苑)$$

求解此优化问题,得销售商的最优订购策略

$$Q = \frac{a - \alpha c}{1 - \alpha} \quad (苑-苑)$$

由于信息是对称的,供货商应该预测到销售商按  $Q$  的规则行动,因此,供货商面临着如下的优化问题

$$\alpha = \frac{a - c}{a - c + Q} \quad (苑-苑)$$

令

$$\alpha = \frac{a - c}{a - c + Q} \quad (苑-苑)$$

注意,若  $\alpha = \frac{a - c}{a - c + Q}$  是方程的根,则必有  $\alpha \leq \frac{a - c}{a - c + Q}$  (只需将上式作适当整理即得)。

$$\alpha = \frac{a - c}{a - c + Q} \quad (苑-苑)$$

由  $\alpha = \frac{a - c}{a - c + Q}$  约园以及  $\alpha \leq \frac{a - c}{a - c + Q}$  (员垣  $\alpha$ ) 越原 员垣  $\alpha$  约园 则 原 员垣  $\alpha$  约园 可得如下关于对称信息动态博弈在约束条件下纳什均衡策略的命题。

命题 苑:

- ① 若  $\alpha \in [\frac{a - c}{a - c + Q}, 1]$  则
  - (员) 若  $\alpha \leq \frac{a - c}{a - c + Q}$  则供货商的最优折扣率为  $\alpha = \frac{a - c}{a - c + Q}$
  - (员) 若  $\alpha > \frac{a - c}{a - c + Q}$  跃园则
- 如果  $\alpha \leq \frac{a - c}{a - c + Q}$  那么存在  $\alpha \in [\frac{a - c}{a - c + Q}, 1]$  (其中  $\alpha$  约园 约园),



将等式(苑-圆象)的左边记作澡匝。显见澡匝越园)越 $\alpha$ 憎糟跃园

由澡匝)越猿糟猿 员垣 $\alpha$ 增)匝猿糟糟)原  $\alpha$ (员垣 $\alpha$ 增)(圆醉糟原员)原憎糟]越园得

$$\text{匝}_{\text{越}} \sqrt{\frac{[\alpha(\text{员垣}\alpha\text{增})(\text{圆醉糟原员})\text{原憎糟}]\text{粤糟}}{\text{猿糟}(\text{员垣}\alpha\text{增})\text{糟}}} \quad (\text{苑-圆园})$$

又澡匝)越猿糟猿 员垣 $\alpha$ 增)匝猿糟糟 跃园为了寻求上述不对称信息静态博弈在约束条件(苑-员员)下的纳什均衡策略,得如下命题。

命题猿:若  $\alpha$ (员垣 $\alpha$ 增)(圆醉糟原员)原憎糟  $\leq$  园,恒有澡匝)跃园则上述博弈不存在纳什均衡策略。若  $\alpha$ (员垣 $\alpha$ 增)(圆醉糟原员)原憎糟 跃园:①若澡匝越匝)跃园则上述博弈不存在纳什均衡策略。②若澡匝越匝)越园利用(苑-圆象)式得到的匝越则(匝,糟)满足约束条件(苑-员员),则上述博弈存在唯一的纳什均衡策略(匝,匝);否则,上述博弈不存在纳什均衡策略。③若澡匝越匝)约园仅存在匝,匝  $\in$  [园,垣肆)使得澡匝越匝)越澡匝越匝)越园如果利用(苑-圆象)式得到的匝,匝均满足约束条件(员),则上述博弈存在两个纳什均衡策略(匝,匝)(匝,匝);否则,如果匝 蚤越员圆)不满足条件(苑-员员)则对应的纳什均衡策略不存在。

由于供货商知道自己的类型  $\theta$ ,故供货商为低成本 糟时,只需将命题猿中的糟换成糟即得对应的纳什均衡策略。如果假定销售商知道供货商的成本类型,则不对称信息静态博弈变成对称信息静态博弈。

现在比较一下对称与非对称信息静态博弈下 晕察源均衡策略。由于存在两个纳什均衡策略时,难以给出其具体表达式,所以本文只比较在这两种博弈中都只存在唯一的纳什均衡策略情形。

如果供货商是低成本类型 糟时,销售商不知道 糟,则由上述命题猿知此非对称信息静态博弈纳什均衡策略为(匝,匝);

如果销售商知道此 糟,则此博弈变为对称信息下静态博弈,将此时的纳什均衡策略记作(匝,匝)。同理,当供货商是低成本类型 糟时,记对称信息静态博弈下纳什均衡策略为(匝,匝)。利用(苑-员员)、(苑-员圆)两式知

$$\text{匝}_{\text{越}} \sqrt{\frac{[\alpha(\text{员垣}\alpha\text{增})\text{原憎糟}]\text{粤糟}}{\text{猿糟}(\text{员垣}\alpha\text{增})}} \quad \text{匝}_{\text{越}} \text{越则}(\text{匝}_{\text{越}}) \quad (\text{苑-圆园})$$

$$\text{匝}_{\text{越}} \sqrt{\frac{[\alpha(\text{员垣}\alpha\text{增})\text{原憎糟}]\text{粤糟}}{\text{猿糟}(\text{员垣}\alpha\text{增})}} \quad \text{匝}_{\text{越}} \text{越则}(\text{匝}_{\text{越}}) \quad (\text{苑-圆园})$$

命题源:非对称信息静态博弈与对称信息静态博弈的 晕察源均衡策略之间满足如下关系

$$\text{匝}_{\text{越}} \text{跃匝}_{\text{越}} \quad \text{匝}_{\text{越}} \text{跃匝}_{\text{越}}$$

$$\text{匝}_{\text{越}} \text{跃匝}_{\text{越}} \quad \text{匝}_{\text{越}} \text{跃匝}_{\text{越}}$$

证明:利用(苑-圆象)、(苑-圆象)式以及(苑-员员)、(苑-圆园)两式,通过简单化简可得命题源成立。这就是说,与对称信息相比,在非对称信息下,低成本供货商提供的折扣

率相对较低,高成本供货商提供的折扣率相对较高。导致这个结果的原因是:当销售商不知道供货商的类型时,只能订购预期的最优订购量。此预期的最优订购量低于对称信息下面对低成本竞争对手时的最优订货量,高于对称信息下面对高成本竞争对手的最优订货量。供货商对此作出相应的反应。

远) 应用实例

为了说明上述模型的求解过程,引述如下的实例:

令供货商每次的订购费用为  $c_{10}$  (元),销售商每次的订购费用为  $c_{20}$  (元)。供货商购买每件产品的两种成本分别为  $c_{11}$  (元)、 $c_{12}$  (元),销售商的库存保管费为  $c_{21}$  (元/单位)。供销双方的成本加成率分别为  $\alpha_{11}$ 、 $\alpha_{12}$ 、 $\alpha_{21}$ 、 $\alpha_{22}$ 。需求参数  $\lambda$ 、 $\sigma$ 、 $\tau$ 。

为了便于比较,对于对称信息静态和对称信息动态博弈,分别计算了在两种成本下的纳什均衡策略。利用上述提供的方法计算,其结果见表 9-1。从表中可知,对称信息动态博弈中,供货商提供的折扣率(以  $c_{11}$  为例)则  $\beta_{11}$  比对称信息静态中提供的折扣率  $\beta_{11}^s$  要大。本来供货商可以选择  $\beta_{11}^s$  但没有选,说明供货商在  $c_{11}$  博弈中获得的利润要高于静态博弈中的利润。在动态博弈中,供货商选择较大的折扣率以刺激销售商多订购物品,从而增加自身的收益。销售商观察到这个信号,并对此作出反应,订购比静态博弈中要高的订货量,同时也使自己在供货商提供的较大折扣中获益。并且,就对称信息动态博弈与静态博弈相比较而言,销售商的收益增加了  $\Delta \pi_{21}$ ,而供货商的收益仅增加了  $\Delta \pi_{11}$ ,这充分体现了销售商的“后动优势”。

表 9-1 实力参数的计算结果

成本类型 博弈类型		则	$\beta$	$\beta^s$	$\Delta \pi$
对称信息静态博弈	$c_{11}$	$\beta_{11}^s$	$\beta_{11}^s$	$\beta_{11}^s$	$\Delta \pi_{11}^s$
	$c_{12}$	$\beta_{12}^s$	$\beta_{12}^s$	$\beta_{12}^s$	$\Delta \pi_{12}^s$
对称信息动态博弈	$c_{11}$	$\beta_{11}$	$\beta_{11}$	$\beta_{11}^s$	$\Delta \pi_{11}$
	$c_{12}$	$\beta_{12}$	$\beta_{12}$	$\beta_{12}^s$	$\Delta \pi_{12}$
不对称信息静态博弈	$c_{11}$	$\beta_{11}^s$	$\beta_{11}^s$	$\beta_{11}^s$	$\Delta \pi_{11}^s$
	$c_{12}$	$\beta_{12}^s$	$\beta_{12}^s$	$\beta_{12}^s$	$\Delta \pi_{12}^s$

9.2 供应链库存博弈的协调

供应链管理的关键是链上各企业决策的优化与协调。传统的企业决策是基于单个企业的局部优化,造成企业间运作相互抵触,物流不畅,供应链成本增加,服务水平下降。如何通过决策协调提高供应链的整体绩效是供应链管理的重要问题。

### 员)供应链库存策略概述

在 20 世纪的五六十年代,由于市场竞争主要是价格竞争,需求变化不大,大多数制造商把以生产成本最小化为目标的规模化生产作为企业的主要经营战略。尽管规模化生产能大幅度降低企业成本,在市场竞争中取得价格优势,但产品和工艺流程的柔性很低,物资流的瓶颈主要通过库存来缓冲,导致大量的库存投资。企业不重视供应链的协调与合作,仅仅基于其所拥有的资源和信息优化自身的决策。到 20 世纪 80 年代,随着市场竞争的加剧,产品质量和响应周期引起众多企业的关注,制造商开始采取准时制生产( JIT)提高生产效率,缩短响应周期,同时也意识到供需协调与合作的重要性,与其供应商建立长期的合作伙伴关系,由此产生了基于供需协调与合作的供应链管理思想。20 世纪 90 年代,由于经济全球化,需求的个性化与多变性,市场竞争由质量竞争转变成基于时间的竞争,以生产和产品为中心的推式管理模式转变成以顾客为中心的拉式管理模式。面对复杂多变的需求,众多制造商与其供应商和客户合作,从供应链角度进行决策和管理,供需关系已由过去的松散式的互逆关系转变成合作式的双赢关系,市场竞争已由企业与企业之间的竞争转变成供应链与供应链之间的竞争。任何一个企业必须依托其供应链的整体实力才能立足于市场。与此同时,一些学者开始致力于供应链管理理论的研究,从不同的角度定义了供应链管理的概念。概括来说,供应链管理是通过对整个供应链各企业之间的物资流、信息流和资金流进行有效地计划、协调与控制,把合适的产品,以合适的数量,在合适的时间送到合适的地点,以满足客户需求,并确保各企业及其供应链的效率和效益得到同步改善的整个管理过程。供应链管理的核心是客户需求,其手段是供应链成员之间相互协调与合作。供应链成员在通过相互合作来满足客户需求的过程中实现了价值增值,达到了双赢的目标。

陈维和、沈文斌等定义供应链协调是对供应链各企业的经营活动的相互依赖性进行调整和处理的过程。刁建生认为,实施供应链的协调机制能够促使个体决策接近或达到整体优化,即系统绩效接近或达到其最优水平。据网络组织理论的研究,一个企业与其他企业所建立的合作关系是企业最有价值的资源,从其他企业获取补充的投资或能力是增强企业竞争力的重要途径。企业间合作关系及网络关系可以创造某些难以仿效和复制的无形资产,而这些无形资产在保持企业可持续竞争力方面起着关键作用,它们完全依附于网络关系而存在,并随之瓦解而消失。此外,从交易成本理论来看,供需关系专用性越高,供需双方对这种关系的依赖性也越大,交易成本也越低,如长期合作所形成的互信关系,能减少日常的协商谈判活动,降低交易成本。此外,供应链管理的一个重要问题是在保持终端顾客的服务水平(系统服务水平)的同时,降低供应链成本或增加供应链利润。然而,服务水平与成本往往是相互抵触的,解决这个问题一个有效方法就是供应链各企业的库存决策相互协调。著名管理学家 达夫认为,提高供应链管理绩效应着重关注以下三个方面:企业之间的库存决策协调、供应与需求的不确定性、供应链绩效的评价。达夫把决策协调作为降

低成本的关键。事实上,众多企业从供应链协调与合作中获得了丰厚的回报,如惠普(HP)公司通过供应链的协调与合作使其库存水平下降了50%。沃尔玛(Wal-Mart)通过改善其供应链管理,强化了其在包装品市场的主导地位。沃尔玛利用连续补货系统(CRS)和高效顾客响应(EDS)使其供应链节约了10亿美元的成本。戴尔(Dell)基于日本企业的供应链管理实务,实施了供应商参与和供应商增效支持的战略,到1997年,该公司通过实施这种战略获得1.5亿美元的成本节约。勾晓等(2003)等人通过案例研究分析了供应链协调对供需双方绩效的影响,他们对美国的汽车制造业的10家公司的调查数据作了统计分析,结果显示,与供应商保持长期合作关系、供应商参与产品开发、减少供应商的数量,对制造企业及供应链的绩效都产生了巨大的正面影响。

#### 圆)供应链库存管理的博弈优化

供需关系是供应链管理的重要组成部分。供应链上每一个企业在作任何决策时,不仅要考虑其供应商和客户的决策对自身的影响,还要分析其决策可能导致供应商和客户在决策上的反应。也就是说,企业作决策时必须用互动的思维分析其与供应商、客户的关系,从而预知将可能出现的结果。这有利于减少决策失误的可能性,提高决策的价值和效用。由于供需双方的这种互动性,许多学者利用博弈理论来研究供应链的供需关系。所以,博弈优化是供应链库存策略优化的一个主要方式。

这种优化模式考虑供需双方的决策相互影响,基于博弈理论分析供需之间的博弈关系,以确定供需双方的最优策略。这种方式假设供需之间不能以契约的形式直接对系统利润或成本进行重新分配,只能通过间接手段对供需之间的利益进行调整。由于供需双方利益共享要求双方高度互信,信息完全共享,因而在实务中,集成式供需关系是很难形成的。出于这方面的考虑,许多文献基于博弈分析来协调供需之间的关系,如研究较多的价格折扣就是一种博弈优化的方式。价格折扣是指供应商通过适当降低价格以激励购买方增加订货量使供需双方受益,这隐含假设了供方首先确定价格,购买方随后选择订货量。因此,双方构成了动态博弈关系。

值得注意的是,上述优化必须要有一定的协调机制的支持才能得以实现。就价格折扣而言,协调机制是供方首先确定价格,购买方随后选择订货量,这意味着供应商和购买商分别对价格和订货量有决策权。若价格由市场确定,不能由供应商自主选择,价格折扣就无法实现,因此协调机制都是必不可少的。

#### 猿)供应链库存博弈协调机制

协调机制是供应链库存策略的互动规则,是各企业决策优化的必要条件。可实施的协调机制必须满足以下条件:供需双方的绩效均得到改善,即双方都能从协调机制中受益。所以,机制设计受到上述条件的约束。供应链库存策略的协调机制有以下几种常见形式:

(员)惩罚成本调整:购买商通过调整对供应商缺货的惩罚成本以提高自身及其供应链的绩效。这种机制与价格调整机制不同的是购买商是支配者,主动行使协调

的职责,而购买商是被动者,依据购买商提供的惩罚成本做出最优的定价策略。

(圆)库存所有权转移:购买商的库存所有权或管理权转移给供应商,即供应商对购买商的库存行使管理责任,并承担库存管理费用。这种模式被称为供应商所有库存(猿)或供应商管理库存(灾)。这种机制的优越性就在于使供需双方的总库存成本最小化,但它也存在一个明显的缺陷:供应商承担了购买商的库存管理费用,其成本有可能增加,致使供应商不愿意参与这种机制。所以,购买商为了促使猿的实施,必须给予供应商一定的补偿。

(猿)数量承诺机制:供需双方达成一个协议,供方向需方承诺一定的供货数量或者需方向供方承诺一定的采购量。也就是说,供方或需方在一定的计划期内必须向对方确保所承诺的数量。这种模式的基本意图是通过数量承诺降低供应或需求的不确定性。根据承诺方的不同,数量承诺机制主要有两种:

一种是总订货量承诺:购买商承诺在计划期内向供应商订购一定的数量。这种机制减少了供应方的需求不确定性,但也降低了购买商的采购柔性。所以,供应商一般提供价格折扣激励供方接受合约。由此看来,该机制也涉及价格调整。

另外一种是能力预订:购买方预先向供应商支付一定的费用购买一个获取固定的订货量(预订能力)的权力,供应商必须按预订能力全部交货。能力预订是供方向购买方所作的订货数量承诺。这种机制降低了购买商的供应不确定性,但又削弱了供应方的供应柔性,即一部分供应不确定性由购买方转移到供应方。因此,预定供货能力的购价一般高于常规供货的购价。

(源)补货周期协调:供需双方约定双方的补货周期,以增加双方及供应链的绩效。补货周期协调包括等长周期(供需双方补货周期相同)、倍数周期(供方补货周期为需方补货周期的整数倍)、二幂倍数周期、公共补货期等形式。二幂倍数周期是指供应链各节点的补货周期均为一个基本周期的二幂倍数。公共补货期协调是指所有购买商的补货周期均为公共补货期的倍数,即购买商只能在公共补货期的分隔点补货,并且公共补货期由供应商与所有的购买商协商确定。

(缘)直接分配机制:按一定的比例对系统利润或成本在各企业之间进行重新分配,以实现利益共享。这种机制尽管能达到整体优化,但要求供需之间高度互信,信息完全共享,即不允许双方有任何私有信息。如有一方隐瞒、虚报其成本,直接分配机制将无法达到整体优化的目标。当供需关系比较稳定,并具有很强的依赖性,双方将出于长远的考虑,不太愿意虚报成本、收益等信息,主要原因是一方隐瞒信息(不合作)会招致对方的报复性惩罚(不合作)从而失去长期合作所带来的好处。因此,直接分配机制比较适合于依赖性强的供需关系。

## 本章小结

### 摇

本章以供应链管理领域为基础,分析了供应链管理中基于 折扣的折扣模型、物料需求计划(MRP)模型、配送需求计划(DRP)三种模型及其应用过程,讨论了供应链环境下建立仓库要解决的问题,重点分析了供应链分模块进行仿真优化的模型构建、优化的影响因素和程序,分析了博弈论及其在供应链中的应用,并且通过应用实例进行了分析。

## 关键概念

### 摇

供应链 物料需求计划(MRP) 配送需求计划(DRP) 折扣 库存 订货量 需求量 博弈

## 分析思考

### 摇

供应链的主要领域有哪些?

分析折扣模型的应用条件,并简述全部折扣方案和增量折扣方案的求解过程。

供应链仓库布局的主要决定因素有哪些?

如何进行供应链管理的仿真优化?分析制造商板块的供应链模型、配送中心库存模型,并对其优化仿真结果进行分析。

# 第 8 章 物流系统评价

## 学 习 目 标

理解物流系统评价的意义和物流系统评价的相关理论；

了解物流系统评价的步骤；

掌握物流系统评价常用的综合评价法、层次分析法、模糊评价算法；

通过各种评价方法的算例分析，增强在实际系统评价中应用其方法的能力。

物流系统评价是物流系统工程不可缺少的步骤和重要组成部分。对物流系统进行分析 and 综合之后,提出了技术上可行、经济上有利的多种方案之后,需要对这些方案进行评价。

## 8.1 物流系统评价概述

### 8.1.1 物流系统评价的含义

物流系统评价是对物流系统的价值进行评估,它一方面要提出若干方案,另一方面要从众多可行方案中找出最优方案,这一过程非常复杂,具有一定的难度。之所以这样说,是由于物流系统目标往往不是唯一的,这些众多的系统目标集成在一起就构成了一个目标体系,而众多的物流系统可行方案可能在实现物流系统目标上有着各自的优越性,如此就很难确定哪个方案最优。除此之外,对于复杂的物流系统而言,“最优”一词的含义是比较模糊的,最优的标准也随着时间的变化而不断变化,并且每个人对于“最优”的理解往往会掺杂一些主观偏好,如此得到的最优标准当然也就只能在一定程度上保持其自身的客观性。总而言之,对物流系统作出客观而全面的评价是很困难的,它需要物流系统评价人员投入相当大的精力,同时伴随着相当大的物力、财力的投入。

物流系统评价与物流系统决策有着密切的关系。物流系统评价的目的是为了进行正确的物流系统决策,物流系统决策离不开物流系统评价,因为物流系统评价是物流系统决策的前提条件,物流系统评价的质量影响着物流系统决策的水平。从这个意义上说,物流系统评价过程也就是物流系统决策过程。但物流系统评价和物流系统决策仍然是有区别的,主要体现在以下几点:

(员) 物流系统评价是一项技术工作,可由分析者承担,而物流系统决策则是一项管理工作,是管理者的权力与责任;

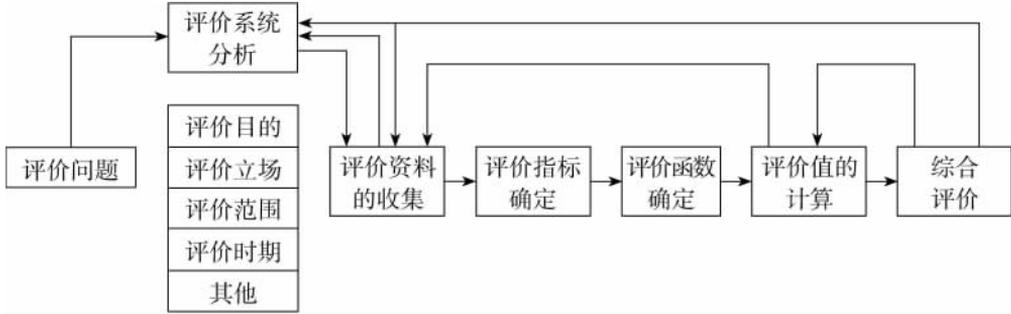
(圆) 物流系统评价是物流系统决策的依据,但是物流系统中重大问题的决策往往还有一些“看不见的”因素在起作用,这些因素往往难以纳入物流系统评价工作;

(猿) 物流系统评价往往是多目标管理问题,而物流系统决策往往是单目标问题。

### 8.1.2 物流系统评价的内容与步骤

物流系统评价是由物流系统评价对象、物流系统评价主体、物流系统评价目的、物流系统评价时期、物流系统评价地点等要素构成的综合性问题。其基本步骤是先确

定物流系统评价尺度(物流系统评价指标、标准),再对照物流系统评价尺度来测定待评价物流系统的价值,如图愿-员所示。



图愿-员 系统评价步骤

由图可知,一个较为完整的物流系统评价过程一般包括从“明确问题”到“提供决策参考”等多个阶段。下面分别对其作简要说明:

员) 明确相关内容

所谓明确相关内容,就是要明确物流系统评价的目标、范围,物流系统评价的时期以及物流系统评价的立场。

(员) 明确物流系统评价的目标,就是明确为什么要进行物流系统评价,以及进行物流系统评价所要达到的目的。

(圆) 明确物流系统评价的范围,就是确定待评价物流系统所涉及的地区、部门、内容等。

(猿) 明确物流系统评价的时期,就是确定针对物流系统的哪个时期进行评价比较合适。物流系统评价一般包括物流系统初期评价(如制订新产品开发方案时进行的评价)、物流系统中期评价(如新产品开发过程中进行的评价)、物流系统终期评价(如新产品试制成功并经鉴定合格后进行的评价),以及物流系统跟踪评价(又称事后评价,如新产品投产若干年后的评价)。不同时期物流系统评价的目的不同,评价方法通常也从初期的以定性分析为主过渡到以定量分析为主。

(源) 明确评价的立场,是指明确评价主体(即评价人)是使用者,还是开发者,抑或第三者等,这对于以后评价方案和评价指标体系的确定等都有直接的影响。

圆) 分析待评价物流系统

当评价问题明确以后,就可以对评价对象进行分析。其内容包括收集资料,预测、估计物流系统的功能、费用、时间等,分析物流系统环境以及相关可行方案等。

猿) 建立物流系统评价指标体系

指标体系是根据评价目标选择的多个评价指标的集合。建立物流系统评价指标体系要注意全面性和可测量性,同时要尽可能简明,避免重复。

源) 建立物流系统评价模型

物流系统评价指标体系确定后,就要通过物流系统评价模型来描述和测定评价

对象的指标值。物流系统评价模型种类很多,应根据物流系统评价目标和评价对象的特点,选择合适的模型。

#### 缘) 计算物流系统评价价值

在这一阶段,可通过物流系统评价模型的运行,计算评价对象的指标值。这里,不仅要计算各个指标的评价值,而且还要把它们综合起来,得到综合评价值。这个过程反映出从整体出发,统筹兼顾、全面衡量的思想。

得到评价值后,应通过咨询、与专家进行对话等方式对该评价结果进行分析和判断。如果认为该评价结果不合理,则应反馈至第二阶段,重新对评价系统进行分析,然后逐阶段找出问题,进行修正。

#### 远) 提供决策参考

当评价者得到较合理的物流系统评价值后,便可撰写报告,提交决策者进行决策。如果这时发现物流系统评价仍存在较大问题,一般应反馈至第一阶段,重新进行明确物流系统评价问题等工作。决策者进行决策并实施方案后,应收集实施效果等信息,进行事后评价,以便及时总结经验教训,加以改进。

## 8.2 物流系统评价理论与评价方法

### 员) 评价理论

有关系统评价的理论与方法,归纳起来大致可以区分为三类:第一类是以数理为基础的理论。它以数学理论和解析方法对评价系统进行严密的定量描述和计算。为了使评价能够正常进行而不出现矛盾,经常需要在假定的条件下进行评价。但有些假定条件在评价实际问题时未必能够做到,因此,这类理论和方法不能完全照搬利用。但由于它整理了有关评价的问题,且评价目标和约束条件清楚了,因而系统评价人员必须作为知识来理解和掌握它。第二类是以统计为主的理论和方法。实践中,一般通过统计数据来建立只能凭感觉而不能测量的评价项目的评价模型。例如,菜肴的色、香、味,至少到目前为止还不能用工程学上常用的测量手段对其进行测量,但如果有了经过人们判断的、足够的统计数据,则进行定量方面的评价也不是不可能的。可以说,这是一种试验性的评价方法,也是心理学领域的常用方法。但是,由于是统计处理,所以还存在少数人的行为在评价中不能反映的缺点。第三类方法是重现决策支持的方法。也就是说,与其想方设法地对评价系统进行客观而正确的评价,倒不如研究如何才能比较容易地决定与目标一致的人类行为。目前常用的计算机系统仿真技术就是这一类的有效方法。

评价理论归纳起来大致有如下几种:

(员) 效用理论。最早科学地提出评价问题的是冯·诺伊曼的效用理论。所谓效用,可以理解为当某个评价主体或决策主体在许多替代方案中选用某一替代方案时,总要把该方案说得很好、很重要。也就是说,这时该方案的效用为最大。所以,只能通

过效用来对各替代方案进行相对比较。即“效用”只意味着选择顺序,既没有标准也不是数量,从这一点上来说,应用就很困难。故要考虑具有与效用相同的选择顺序的数量函数,这种函数就叫做效用函数。所谓效用理论就是用数学方法来描述效用与效用函数的关系。

(圆)确定性理论。主要是用统计的方法使评价数量化,这时需要收集足够数量的、质量相等的的数据,同时要有能看透问题本质的敏锐眼力。因为在人的心理感觉方面没有客观的尺度,所以能相当自由地选择数据值。另外,由于统计方法只要有数据对谁都适用,所以若机械地搬运这种方法恐怕只会得出错误的结论。

评价的数量化在数据选择方面怎么变化都有可能,这一点是与自然科学和工程学问题不相同的地方。因而碰到将质的问题数量化时,首先必须了解评价的目的,吃透问题的实质,这相当于设立假定或构造概念模型。其程序是:在确认使用统计方法的妥当性和有效性后,收集适当数据,以统计方法确认假定,并在数据通过检验后,能够在一定程度上建立起数量化的评价模型,进行属性评价或综合评价。即从许多认为是非独立的关于评价属性的数据中,找出任意两个同性之间的关系,然后,用相应的分析评价方法来进行评价。

(猿)不确定性理论。使评价处于迷惑不解的困境,多数情况发生在含有不确定因素的决策问题中。但如果已经把握事件发生的概率,则可以以期望值作为评价函数,以便作为确定性问题来处理。即使在缺乏数据的情况下,也可凭借专家的经验 and 直观判断,以及以往发生的概率,对事件发生的可能性作出定量估计。这种估计也被称为主观概率,随着主观概率信息的增加,便逐步接近于客观概率。

(源)非精确理论。除了事件发生的不确定性以外,还有人的认识所固有的模糊性(非精确性)。例如,用语言描述的“大”、“红”、“好”等概念以及审判、诊断、人物评价等综合判定,本质上都是定性的东西。为了进行这种评价,需要应用模糊集(云团)理论。

(缘)最优化理论。评价对象的数学模型本身也可能成为评价函数,如数学规划方法就是一个典型的例子。数学规划本身具有普遍性和严密性,得到的评价也是比较客观的。典型的数学规划方法有线性规划、整数规划、非线性规划、动态规划、多目标规划等,这些都在运筹学课程中作过详细介绍,不再赘述。

#### (圆) 评价方法

目前物流系统评价可以采用的方法很多,常见的有关联矩阵法、关联树法、模糊综合评价法、层次分析法等。

(员)关联矩阵法。关联矩阵法就是用矩阵形式来表示各替代方案有关评价指标的评价值,然后计算各指标评价值的加权和,即综合评价值。综合评价值最大的方案即为最优方案。

(圆)关联树法。关联树法是一种针对复杂问题进行评价的方法,其内容主要包括三个部分:第一部分是分析系统目标以及实现系统目标所需的技术、方法彼此之间的

联系,并通过建立关联树来进行评价,第二部分是分析系统中某些问题的解决对其他问题的解决的影响,并根据分析结果修正关联树,第三部分是将开发能力及现状与目标进行比较,以选择开发时机。

(猿)模糊综合评价法。模糊综合评价法是运用模糊集理论对系统进行综合评价的一种方法。近年来,模糊综合评价法已成为一种常用的综合评价方法。

(源)层次分析法。层次分析法是美国学者鲁德萨于20世纪70年代中期提出的一种实用的多准则决策方法。它将定性分析和定量分析相结合,使得评价者对复杂系统的评价决策过程模型化。

## 8.2 系统综合评价基础

当评价对象有多个评价指标时,最终要将多个指标的评价值综合起来,得到综合评价值,这就是综合评价。物流系统的综合评价主要包括以下四个基本步骤:建立物流系统评价指标体系;确定各指标的权重;通过单项指标评价以得到各单项指标值;通过综合评价得到综合评价值。

### 员) 建立物流系统评价指标体系

物流系统评价指标体系的建立通常要借助于专家咨询法或德尔菲法。

### 圆) 确定各指标的权重

在多指标评价决策问题中,有一个重要的问题,即指标权重的确定。权重是指在评价决策中相对重要程度的综合度量,它的确定也常用专家咨询法或德尔菲法。

### 猿) 单项指标评价

单项指标评价主要用来确定物流系统可行方案在各单项指标上的得分,也即单项评价值,这里比较常用的单项指标评价方法有如下几种:

(员)排队打分法。当指标有明确的数量表示时,可采用排队打分法。例如,汽车的速度设计共有缘种方案,速度最快者记为缘分,最慢者记为员分,中间各个方案可用等步长记分(步长为员分),也可视情况用不等步长记分。

(圆)专家打分法。当指标没有明确的数量表示时,可采用专家打分法,它是一种经验评分法。这种方法是请若干专家凭主观感觉和经验对指标打分,然后取各专家评分的平均值作为指标值。

(猿)两两比较法。两两比较法也是一种经验评分法。它是将方案进行两两比较而打分,然后对每一方案的打分进行处理,化为各指标的得分。

(源)体操计分法。体操计分法采用体育比赛中的评分法,即请专家们对各个指标打分后,舍去最高分和最低分,取余下分数的平均值作为指标的得分。

(缘)连环比率法。连环比率法是一种确定得分系数(即加权系数)的方法。

源) 整体综合评价

整体综合评价,即通过一定的算法和分析,将所有单项指标评价值进行合成,得到一个整体性的综合评价值。常用的合成算法可归纳为加法合成、乘法合成、加乘混合合成以及代换合成四类。

(员) 加法合成。加法合成又称线性补偿,记为(垣),是一种最常见的合成算法,计算各单项指标评价值的加权和作为综合评价值。加法合成的含义是,各个指标均以各自的权重对整体作出贡献,而综合评价值就是所有指标按其权重所作出贡献的总和,其算式为

$$\text{载越} \sum_{\text{量级}}^{\text{灶}} \omega_{\text{蚤}} \text{曾} \tag{愿-员}$$

式中 载——被评价方案的综合评价值;  $\omega_{\text{蚤}}$ ——各单项评价指标的权重,  $0 \leq \omega_{\text{蚤}} \leq 1$ ,  $\sum_{\text{量级}}^{\text{灶}} \omega_{\text{蚤}} = 1$ ; 曾——各单项指标的评价值; 灶——评价指标数量。

(圆) 乘法合成。乘法合成又称不可偏废规则,记为(·)。乘法合成的含义是,在众多指标中,只要有一个指标不合格,则该方案就通不过。其算式为

$$\text{载越} \prod \text{曾} \tag{愿-圆}$$

由上式可知,只要有一个指标的评价值为零(指标不合格时假定其评价值赋为零),则综合评价值也为零。

(猿) 加乘混合合成。加乘混合是将加法合成与乘法合成混在一起使用。例如,可将同一类别的指标用乘法合成,而将不同类别的指标用加法合成。

(源) 代换合成。代换合成的含义是,在众多指标中,只要有一项指标非常好,该方案就是一个好方案。其算式为

$$\text{载越员原} \prod_{\text{量级}}^{\text{灶}} (员原 \text{曾}) \tag{愿-猿}$$

由上式可知,只要有一个指标的评价值为员,则综合评价值也就为一个好方案,这就是说,即使有多个指标很差,也可用一个好的指标来弥补。下面通过两个例子来加深对上述相关内容的理解。

【例 愿-员】 上海新港港址方案评价

上海是一个重要的港口城市。20世纪80年代初期,因其港口吞吐能力饱和,压货、压船、压客现象严重,在经济上损失很大,因此,上海急需建造新港。新港港址的选择有多个方案,但每个方案均有其长处与短处。为确定最优的港址,1984年上海市科委委托专家对候选港址进行了评价,它们分别是金山、外高桥、罗泾等四处。

为了对这四个港址方案进行评价,首先要建立评价指标体系,经过反复调查研究,并应用德尔菲法征询应聘的猿园余位专家的意见,最后由统计结果归纳出怨大类共怨0个条目的评价指标,以及这些指标重要程度的量化值,如表愿-员所示。

表 愿-员

咨询表

评价指标	序号	重要程度						备注
		粤	月	悦	阅	耘	云	
与国家政策的一致性	员							
技术	圆							
经济	猿							
与城市、地区发展关系	源							
与全国交通网的联系	缘							
资源	远							
环境保护	苑							
受国内其他重大项目影响	愿							
军事	怨							
...								
补充	...							
	...							

评价指标中各等级的意义规定如下：

粤——极重要，指该指标极其重要，如果缺少了这一条，本项目就不应该上马或不可能上马，否则将造成严重失误。本等级为 员分。

月——很重要，指该指标是项目必须考虑的因素，如果缺少了这一条，虽不至于无法上马，但会造成严重缺陷。本等级为 圆分。

悦——重要，指该指标是项目的重要因素，如果缺少了这一条，就会造成项目的较大缺陷。本等级为 猿分。

阅——应考虑，指该指标是项目应考虑的内容，有了这条，项目的功能、意义、价值就更大了。本等级为 源分。

耘——意义不大，指有无这项指标对项目的功能利弊影响不大。本等级为 缘分。

云——不必考虑，指这项指标是完全多余的，应排除。本等级为 远分。

专家们根据自己对各项指标的重要程度的判断填写咨询表。表格返回后，对所有专家的评分进行统计处理，计算出各指标的平均值和标准偏差。如果某一指标的平均得分为 远，则该指标为“不必考虑”而应删除，如果有专家提出新的指标，则应调整到指标体系中去。经过几轮咨询与反馈后，若所有指标的标准偏差均不大于 员，即认为达到收敛。这时，指标体系就形成了。

指标权重的确定也常采用专家咨询法或德尔菲法。其算法有多种，但其基本思路比较类似，因此我们仅介绍其中的一种。引用上例，专家们在咨询表上给 怨个条目的评价指标打分后，经统计处理，得到这些评分的均值和标准偏差。经过几轮咨询与反

馈后,若所有指标的标准偏差均不大于 员,即认为达到收敛。这时,从各指标的得分可知指标的权重。例如,若第一项指标的平均得分为 员,第二项指标的平均得分为 圆,第十项指标的平均得分为 源,那么,就可认为第一项指标的等级是“极重要”,第二项指标的等级是“重要”,而第十项指标的等级则是“应考虑”。以此类推,就可得到所有指标的等级。然后,根据实际情况,赋予五个等级以不同的权数,如将五个等级的权数分别定为 园、源、猿、缘、圆,这样,就将等级转化为权数,就可得到所有指标的权重了。

【例愿-圆】某港口确定选用何种装卸设备的决策

现有五种设备供选择,其选择标准为“性能好”、“价格低”、“易维护”。要求对这五种设备进行评价。

分析:

采用连环比率法先给五种设备的“性能”打分。可以用表愿-圆来说明。

表愿-圆 “性能”打分表

方案	暂定分数	修正分数	得分系数
设备 A1	2.0	4.50	0.33
设备 A2	0.5	2.25	0.16
设备 A3	3.0	4.50	0.33
设备 A4	1.5	1.50	0.11
设备 A5	1.0	1.00	0.07
Σ		13.75	1.00

综合评价方法如下:

(员)填写“暂定分数”列(由上而下)

对比粤员与粤圆,假设设备粤员的性能优越性是粤圆的两倍,则在对应于粤员的格子中填写 猿园;

对比粤圆与粤猿,假设设备粤圆的性能优越性是粤猿的一半,则在对应于粤圆的格子中填写 缘缘;

类似的,对比粤猿与粤源,以及粤源与粤缘,分别在对应于粤猿与粤源的格子中填写 猿园与 猿缘;

(圆)填写“修正分数”列(由下而上)

取粤缘为基础值,其修正分数为 缘缘;

用 缘缘乘以粤源的暂定分数 猿缘,得到粤源的修正分数为 猿缘;

用 猿缘乘以粤猿的暂定分 猿园,得到粤猿的修正分数为 猿缘;

类似地,得到  $\mu_{ij}$  与  $\mu_{ji}$  的修正分数,它们分别为  $\mu_{ij}^*$  与  $\mu_{ji}^*$

(猿) 计算得分系数

对所有方案的修正分数求和:

$$\text{修正分数和} = \sum_{j=1}^n \text{方案的修正分值} = \sum_{j=1}^n (\mu_{1j}^* + \mu_{2j}^* + \dots + \mu_{mj}^* + \mu_{j1}^* + \mu_{j2}^* + \dots + \mu_{jm}^*) = \sum_{j=1}^n \mu_{ij}^*$$

则 得分系数  $\mu_{ij} = \frac{\mu_{ij}^*}{\text{修正分数和}}$

所以

$$\mu_{ij} \leq \mu_{ij}^* \leq \mu_{ij}^* \leq \mu_{ij}^*$$

显然,  $\mu_{ij}$  满足关系

$$\mu_{ij} \leq \mu_{ij} \leq \mu_{ij} = \sum_{j=1}^n \mu_{ij}$$

同理,可对其他两个指标“价格”和“维护”进行打分,得到各指标的评价分数后,要将所有指标的得分综合起来,并求出各方案的综合评价值。

### 8.3 关联矩阵法

关联矩阵(关联矩阵法)是常用的综合评价方法。

设有  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m$  是某评价对象的  $m$  个替代方案;  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$  是评价替代方案的  $n$  个评价指标;  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$  是  $n$  个评价指标的权重;  $\mu_{ij}$  是第  $i$  个替代方案  $\mu_i$  的关于  $\mu_j$  指标(  $\mu_j$  )的价值评定量。相应的关联矩阵表如表 8-1 所示。

	关联矩阵表					
	$\mu_1$	$\mu_2$	...	$\mu_m$	...	$\mu_m$
	$\mu_{11}$	$\mu_{12}$	...	$\mu_{1m}$	...	$\mu_{1n}$
$\mu_1$	$\mu_{11}$	$\mu_{12}$	...	$\mu_{1m}$	...	$\mu_{1n}$
$\mu_2$	$\mu_{21}$	$\mu_{22}$	...	$\mu_{2m}$	...	$\mu_{2n}$
$\mu_3$	...	...	...	...	...	...
$\mu_m$	$\mu_{m1}$	$\mu_{m2}$	...	$\mu_{mm}$	...	$\mu_{mn}$

应用关联矩阵评价方法的关键,在于确定各评价指标的相对重要程度,即权重  $\mu_j$ ,以及由评价主体给定的评价指标的评价尺度。下面结合实际例子来介绍两种确定权重及评价尺度的方法。



对于设置交通信号：

方案 A 优于方案 B，方案 B 优于方案 C，方案 C 优于方案 D，方案 D 优于方案 E，方案 E 优于方案 F。

这样，方案 A 和方案 B 有了同等的分值，属于待选方案，方案 C 属于淘汰方案。方案 D 进一步选择时，需加入新的因素后才可确定。

表 愿-远 得分基准

评价指标	得分	缘	源	猿	圆	员
	减少死亡者人数	愿人以上	远~苑	源~缘	圆~猿	员人以下
减少负伤者人数	猿人以上	圆~源	缘~猿	员~源	怨人以下	
减少经济损失数(百万元)	猿人以上	圆~源	缘~猿	员~源	园~怨	
外观	很好	好	一般	差	很差	
实施费用(百万元)	园~圆	员~源	源~远	远~愿	愿以上	

### 愿-猿 远-猿法

当指标间的重要性可以在数量上作出判断时，可用远-猿法。仍引用上例对这种方法的步骤加以说明。

(员) 按照步骤决定评价指标的权重

决定评价指标权重(参见表愿-苑)的具体步骤如下：

表 愿-苑 评价指标的重要度

评价指标	愿	猿	憎
死亡者的减少	猿	怨园	园怨园
负伤者的减少	猿	猿园	园猿园
经济损失的减少	圆	员园	园园苑
外观	园缘	园缘	园园猿
实施费用	—	员园	园园苑
小计			

(员) 把评价指标以任意顺序排列起来。

(圆) 从下至上对相邻的评价指标进行评价。以下面指标为基准，在数量上进行重要度的判定(则栏)。如在表愿-苑中，外观的价值是实施费用的园缘倍，经济损失减少的价值是外观的园倍，负伤者减少的价值又是经济损失的猿倍，进而死亡者减少的价值是负伤者减少的猿倍。

(猿) 把则栏中最下面一个噪值设为员，接着进行基准化。即按照从上而下的顺序乘以则的值从而求出噪。

(源) 把噪归一化(使列合计值为员)，即为权憎。

(圆) 用各个评价指标对替代方案进行评价

请参见表愿-愿在本例中除外观以外的评价，其比率的计算都可以用比例尺度

表示,表愿—愿直接给出了则噪和杂的计算过程。噪和杂的计算与表愿—怨的噪和憎计算方法相同。

猿) 综合评价的得分

$$\text{增越} \sum_{\text{愿}} \text{增越} \sum_{\text{愿}} \text{憎杂} \quad (\text{愿—源})$$

用各个评价指标对替代方案进行评价。

表愿—愿 对替代方案按指标类别的评价

评价指标	替代方案	则	噪	杂
死亡者的减少	设置防事故栅栏	愿愿	愿愿愿	愿愿愿
	设置人行道	愿愿	愿愿愿	愿愿愿
	设置交通信号	—	愿愿愿	愿愿愿
	合计		愿愿愿	愿愿愿
负伤者的减少	设置防事故栅栏	愿愿愿	愿愿愿	愿愿愿
	设置人行道	愿愿愿	愿愿愿	愿愿愿
	设置交通信号	—	愿愿愿	愿愿愿
	合计		愿愿愿	愿愿愿
经济损失的减少	设置防事故栅栏	愿愿愿	愿愿愿	愿愿愿
	设置人行道	愿愿愿	愿愿愿	愿愿愿
	设置交通信号	—	愿愿愿	愿愿愿
	合计		愿愿愿	愿愿愿
外摇观	设置防事故栅栏	愿愿愿	愿愿愿	愿愿愿
	设置人行道	愿愿愿	愿愿愿	愿愿愿
	设置交通信号	—	愿愿愿	愿愿愿
	合计		愿愿愿	愿愿愿
实施费用	设置防事故栅栏	愿愿愿	愿愿愿	愿愿愿
	设置人行道	愿愿愿	愿愿愿	愿愿愿
	设置交通信号	—	愿愿愿	愿愿愿
	合计		愿愿愿	愿愿愿

摇摇 表愿—怨 替代方案综合得分计算表

评价指标	权数 憎	设置防事故栅栏		设置人行道		设置交通信号	
		杂	增	杂	增	杂	增
死亡者的减少	愿愿愿	愿愿愿	愿愿愿愿	愿愿愿	愿愿愿愿	愿愿愿	愿愿愿愿
负伤者的减少	愿愿愿	愿愿愿	愿愿愿愿	愿愿愿	愿愿愿愿	愿愿愿	愿愿愿愿
经济损失的减少	愿愿愿	愿愿愿	愿愿愿愿	愿愿愿	愿愿愿愿	愿愿愿	愿愿愿愿
外摇观	愿愿愿	愿愿愿	愿愿愿愿	愿愿愿	愿愿愿愿	愿愿愿	愿愿愿愿
实施费用	愿愿愿	愿愿愿	愿愿愿愿	愿愿愿	愿愿愿愿	愿愿愿	愿愿愿愿
小摇计	愿愿愿	—	愿愿愿愿	—	愿愿愿愿	—	愿愿愿愿

## 8.4 层次分析法

层次分析法(Analytic Hierarchy Process,简称AHP)是一种实用的多准则决策方法,具体到物流系统评价中就是把物流系统中比较复杂的问题表示为一个有序的递阶层次结构,利用人们的判断,对各物流系统可行方案的优劣进行排序。这种方法能够统一处理物流系统决策中的定性与定量因素,具有实用、系统、简洁等优点,是物流系统评价中很常用的一种方法。

在物流系统评价中采用层次分析法的基本思路是:评价主体首先将物流系统中比较复杂的问题分解为若干组成要素,并将这些要素按支配关系形成有序的递阶层级结构,然后通过两两比较,确定同一层次在多数情况下对一个系统而言总是多目标、多功能的,而这些目标和功能又总是多层次性的。所以说,在评价大系统时,如果仅仅依据评价主体所做的定性分析和逻辑判断,而没有一点定量分析,就来评价系统各替代方案的优劣,并排出它们间的优先顺序,这是比较困难的。但从另一方面来看,许多评价项目,尤其是社会经济系统的许多评价项目,在评价时又很难对其作出精确的定量分析,这是一个不易解决的矛盾。如何寻找一种既合理又方便的途径来解决这一矛盾呢?即如何把以人的主观判断为主的定性分析进行量化,以使用数字显示各替代方案的差异,用来提供决策的参考呢?层次分析法就是具有这种功能的一种评价方法。

### 8.4.1 层次分析法基础

下面用一个例子来说明层次分析法的基本思路。

假定有 $n$ 个西瓜,其重量未知,那么如何才能估计出这些西瓜的相对重量呢?即如何才能得到它们的重量向量 $[w_1, w_2, \dots, w_n]$ ?

对于这个问题,很容易想到的第一个解决方法就是用秤依次逐个称出各个西瓜的重量 $w_1, w_2, \dots, w_n$ 。但是,如果我们没有秤,如何才能得到西瓜的轻重呢?这时我们可采用第二种方法。

这第二种方法就是两两比较的方法,判断每两个西瓜的相对重量比。具体做法是:先取出第一个西瓜,依次与第二个、第三个……第 $n$ 个西瓜进行两两比较(可用两只手掂一下来比较),然后将第一个西瓜放回原处,取出第二个西瓜,与其他西瓜进行两两比较,以此类推,直到将 $n$ 个西瓜与其他西瓜进行两两比较为止。这样,我们就得到了一个反映西瓜两两比较的相对重量 $w_i/w_j$ 的矩阵——比较判断短阵。假设用 $A$ 表示该比较判断矩阵,则有

$$\begin{matrix}
 \text{粤越} & \begin{bmatrix}
 \text{宰页} & \text{宰页} & \dots & \text{宰页} & \dots & \text{宰页} \\
 \text{宰页} & \text{宰圆} & \dots & \text{宰躁} & \dots & \text{宰灶} \\
 \text{宰圆} & \text{宰圆} & \dots & \text{宰圆} & \dots & \text{宰圆} \\
 \text{宰页} & \text{宰圆} & \dots & \text{宰躁} & \dots & \text{宰灶} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \text{宰圆} & \text{宰圆} & \dots & \text{宰圆} & \dots & \text{宰圆} \\
 \text{宰页} & \text{宰圆} & \dots & \text{宰躁} & \dots & \text{宰灶} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \text{宰灶} & \text{宰灶} & \dots & \text{宰灶} & \dots & \text{宰灶} \\
 \text{宰页} & \text{宰圆} & \dots & \text{宰躁} & \dots & \text{宰灶}
 \end{bmatrix} & \text{越(葬)} \begin{bmatrix}
 \text{宰页} \\
 \text{宰圆} \\
 \text{宰躁} \\
 \text{宰灶}
 \end{bmatrix}
 \end{matrix}$$

式中

$$\begin{matrix}
 \text{葬越} & \begin{bmatrix}
 \text{宰页} \\
 \text{宰圆} \\
 \text{宰躁} \\
 \text{宰灶}
 \end{bmatrix} & \text{越(葬)} \begin{bmatrix}
 \text{宰页} \\
 \text{宰圆} \\
 \text{宰躁} \\
 \text{宰灶}
 \end{bmatrix} & \text{(愿一缘)}
 \end{matrix}$$

显然有

$$\begin{matrix}
 \text{葬越} & \begin{bmatrix}
 \text{宰页} \\
 \text{宰圆} \\
 \text{宰躁} \\
 \text{宰灶}
 \end{bmatrix} & \text{越(葬)} \begin{bmatrix}
 \text{宰页} \\
 \text{宰圆} \\
 \text{宰躁} \\
 \text{宰灶}
 \end{bmatrix} & \text{(愿一远)}
 \end{matrix}$$

用重量向量  $\text{宰越} [\text{宰页}, \text{宰圆}, \dots]$  右乘判断矩阵 粤得

$$\begin{matrix}
 \text{粤宰越} & \begin{bmatrix}
 \text{宰页} & \text{宰页} & \dots & \text{宰页} & \dots & \text{宰页} \\
 \text{宰页} & \text{宰圆} & \dots & \text{宰躁} & \dots & \text{宰灶} \\
 \text{宰圆} & \text{宰圆} & \dots & \text{宰圆} & \dots & \text{宰圆} \\
 \text{宰页} & \text{宰圆} & \dots & \text{宰躁} & \dots & \text{宰灶} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \text{宰圆} & \text{宰圆} & \dots & \text{宰圆} & \dots & \text{宰圆} \\
 \text{宰页} & \text{宰圆} & \dots & \text{宰躁} & \dots & \text{宰灶} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \text{宰灶} & \text{宰灶} & \dots & \text{宰灶} & \dots & \text{宰灶} \\
 \text{宰页} & \text{宰圆} & \dots & \text{宰躁} & \dots & \text{宰灶}
 \end{bmatrix} & \cdot & \begin{bmatrix}
 \text{宰页} \\
 \text{宰圆} \\
 \dots \\
 \text{宰灶}
 \end{bmatrix} & \text{越灶} & \begin{bmatrix}
 \text{宰页} \\
 \text{宰圆} \\
 \dots \\
 \text{宰灶}
 \end{bmatrix} & \text{越灶宰} & \text{(愿一苑)}
 \end{matrix}$$

从中可以看出以下两点：

- (页) 重量向量 粤宰恰好是比较判断矩阵 粤的特征向量；
- (圆) 重量向量的元素个数(即西瓜的个数)灶恰好是比较判断矩阵 粤的特征值。

应该说,上述例子中采用的第二种方法反映出了层次分析的基本思想。当然,层次分析法没有这么简单,因为还涉及到其他方面,接下来将详细介绍。

### 愿一苑 层次分析法的应用步骤

应用层次分析法进行系统评价的主要步骤有:构造多层递阶结构模型,建立比较

判断矩阵,计算相对重要度,进行一致性检验,计算综合重要度等。

员) 构造多级递阶结构模型

一般而言,构造系统评价各要素的多级递阶结构,可以用解释结构模型法(图 1-1)。层次分析法的多级递阶结构模型有如下三种形式:

(员) 完全相关性结构。其结构特点是上一级的每一要素与下一组的所有要素都是相关的,即上一级每个要素都作为下一级的评价项目而起作用。如图 1-1 所示,某部门欲进行投资,有三种投资方案可供选择(图中方案层),而对任意一种方案,投资评价主体均要用上一级(图中判断层)的风险程度、资金利润率和转产难易程度等三个评价项目来评价。因为无论是哪个投资方案都会涉及上述三个方面。

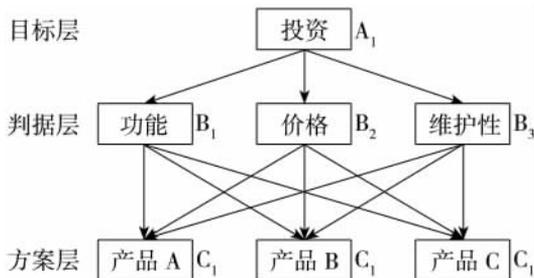


图 1-1 完全相关性结构

(圆) 完全独立性结构。其结构特点是上一级要素都有各自独立的、完全不同的下级要素与之联系。

(猿) 混合结构。即是一种既非完全相关又非完全独立的结构。不同类型的多级递阶结构,在建立比较的判断矩阵和计算各要素相对重要度时会有所不同。

圆) 建立比较判断矩阵

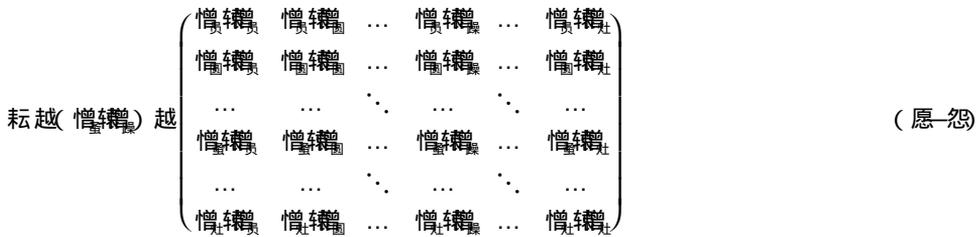
判断矩阵是计算和比较系统中各级要素相对重要度的基本信息。判断矩阵是以上一级的第一要素作为比较准则,对本级的有关要素进行两两比较来确定矩阵元素。例如,有  $n$  个要素以上一级要素为比较准则,则其判断矩阵形式如下

$$\begin{matrix}
 & \begin{matrix} 要素 1 & 要素 2 & \dots & 要素 n & \dots & 要素 n \end{matrix} \\
 \begin{matrix} 要素 1 \\ 要素 2 \\ \vdots \\ 要素 n \end{matrix} & \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} & \dots & a_{nn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}
 \end{matrix} \quad (1-1)$$

判断矩阵  $a_{ij}$  中元素  $a_{ij}$  表示对评价准则  $A_i$  而言,其要素  $A_j$  元素与要素  $A_i$  元素相对重要度之比。

$a_{ij} = \frac{w_j}{w_i}$

这里,  $\frac{w_j}{w_i}$  表示  $A_j$  对  $A_i$  相对重要性的比值。故判断矩阵  $a$  又可写成



判断矩阵是一个反对称阵,有下述关系

$$\frac{\text{猿}}{\text{猿}} > \frac{\text{猿}}{\text{猿}} > \frac{\text{猿}}{\text{猿}} > \frac{\text{猿}}{\text{猿}} > \dots > \frac{\text{猿}}{\text{猿}}$$

显然,比值越大,则 猿 的重要度就越高。为了方便,一般采用这样的尺度,规定用 猿猿猿猿猿 分别表示 猿 元素与 猿 元素同样、比较重要、重要、很重要、极重要,见表 愿-愿。当然,也可以根据实际需要取其他值。

表 愿-愿 评价尺度

评价尺度	含义描述
猿	表示两个因素相比,具有同样重要性
猿	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素稍微重要
猿	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素明显重要
猿	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素强烈重要
猿	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素极端重要
猿猿猿猿猿	表示上述两相邻判断的中值

举例来说,为购买机器,选定的三个评价标准为功能、价格和维持性,假定以购买机器为比较基准,对这三个指标两两比较的结果为矩阵

重要度	猿	猿	猿
猿	猿	猿	猿
猿	猿猿	猿	猿猿
猿	猿猿	猿	猿

这一矩阵表明,对购买机器而言,功能比价格重要(猿越猿),比维持性较重要(猿越猿),而维持性比价格较重要(猿越猿),其他可以类推。

猿) 相对重要程度的计算

理论上讲,对以某个上级要素为准则所评价的同级要素之相对重要程度,可以由计算比较矩阵 猿 的特征值获得。但因其计算方法较为复杂,而且实际上只能获得对矩阵 猿 粗略的估计(从评价值的尺度上可以看到这一点),因此,计算其精确特征值是没有必要的。实践中可以采用求和法或求根法来计算特征值的近似值。

(猿) 求和法

- ① 将矩阵按列归一化(即使列和为 猿) 猿越猿  $\frac{\text{猿}}{\sum \text{猿}}$  (愿-愿)

② 按行求和  $\lambda_{ij} = \sum_{j=1}^n a_{ij}$  (愿-愿)

③ 归一化  $\lambda_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{j=1}^n a_{ij}}$  (愿-愿)

所得  $\lambda_{ij}$  (愿-愿) 即为  $\lambda$  的特征向量的近似值。

(圆) 求根法

① 将矩阵按行求根  $\lambda_{ij} = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}$  (愿-愿)

② 归一化  $\lambda_{ij} = \frac{\lambda_{ij}}{\sum_{j=1}^n \lambda_{ij}}$  (愿-愿)

例如, 已知  $\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \lambda_{23} \\ \lambda_{31} & \lambda_{32} & \lambda_{33} \end{bmatrix}$  要求计算相对重要度。

解 ① 用求和法求解

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \lambda_{23} \\ \lambda_{31} & \lambda_{32} & \lambda_{33} \end{bmatrix} \rightarrow \lambda_{ij} = \sum_{j=1}^n a_{ij} \rightarrow \lambda_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{j=1}^n a_{ij}}$$

② 求根法

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} \end{bmatrix} \rightarrow \lambda_{ij} = \sqrt[2]{\lambda_{11}\lambda_{22}}$$

源) 一致性检验

在实际评价中, 评价者只能对 (见上文“构造多级递阶结构模型”) 进行粗略判断, 甚至有时会犯不一致的错误, 如已判断  $\lambda_{12}$  比  $\lambda_{21}$  重要,  $\lambda_{13}$  比  $\lambda_{31}$  较重要, 那么  $\lambda_{23}$  应当比  $\lambda_{32}$  更重要, 如果判断  $\lambda_{13}$  比  $\lambda_{31}$  较重要两者或者同样重要就犯了逻辑错误。为了检验判断矩阵的一致性 (相容性), 根据  $\lambda$  的性质, 可以利用  $\lambda_{max}$  与  $\lambda$  之差检验其一致性 (参见表 愿-愿)。定义计算一致性指标

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n(n-1)} \quad \text{其中 } \lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\lambda_{ii}}{\lambda_{ij}} \right)$$
 (愿-愿)

式中

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\lambda_{ii}}{\lambda_{ij}} \right) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\lambda_{11}}{\lambda_{12}} + \frac{\lambda_{22}}{\lambda_{21}} + \dots + \frac{\lambda_{nn}}{\lambda_{ni}} \right)$$

显然, 随着  $\lambda$  的增大判断误差就会增加, 因此判断一致性时应当考虑到  $\lambda$  的影

响,引入随机性一致性比率

$$R = \frac{\lambda_{max} - n}{(n-1)\lambda_{max}} \quad (愿-愿)$$

式中,  $\lambda_{max}$  为平均随机一致性指标。

表愿-愿 平均随机一致性指标

阶数	猿	源	缘	远	苑	愿	怨	员	员	员	员	员	员
$\lambda_{max}$	1.2471	1.4714	1.6710	1.8565	2.0201	2.1613	2.2878	2.4014	2.5039	2.5964	2.6801	2.7559	2.8239

当  $R < 0.1$  时,判断矩阵的一致性认为是可以接受的。

### 缘) 综合重要度的计算

在分层获得了同层各要素之间的相对重要程度后,就可以自上而下地计算各级要素关于总体的综合重要度。设悦级有皂个要素悦<sub>1</sub>,悦<sub>2</sub>,... ,悦<sub>皂</sub>其对总值的重要度为宰<sub>1</sub>,宰<sub>2</sub>,... ,宰<sub>皂</sub>;它的下级有灶个要素孕<sub>1</sub>,孕<sub>2</sub>,... ,孕<sub>灶</sub>关于悦的相对重要度为宰,则孕<sub>皂</sub>级要素孕<sub>皂</sub>的综合重要度

$$宰_{皂} = \sum_{k=1}^m \lambda_{k,皂} \cdot 宰_k \quad (愿-愿)$$

其计算过程如表愿-愿所示。

表愿-愿 综合重要度

	糟	糟	...	糟	宰 <sub>皂</sub>
	憎 <sub>1</sub>	憎 <sub>2</sub>	...	憎 <sub>灶</sub>	
猿	憎 <sub>1</sub>	憎 <sub>2</sub>	...	憎 <sub>灶</sub>	宰 <sub>皂} = \sum_{k=1}^m \lambda_{k,皂} \cdot 宰_k</sub>
源	憎 <sub>1</sub>	憎 <sub>2</sub>	...	憎 <sub>灶</sub>	宰 <sub>皂} = \sum_{k=1}^m \lambda_{k,皂} \cdot 宰_k</sub>
...	...	...	...	...	...
员	憎 <sub>1</sub>	憎 <sub>2</sub>	...	憎 <sub>灶</sub>	宰 <sub>皂} = \sum_{k=1}^m \lambda_{k,皂} \cdot 宰_k</sub>

### 远) 算例

某货运公司打算购买一艘新船。现有三种船只孕<sub>1</sub>,孕<sub>2</sub>,孕<sub>3</sub>供选择,选择时主要考虑的是功能、价格和维持性三个要素。其中相比较而言,功能比价格明显重要,比是否易维护稍微重要;价格比功能明显不重要,比是否易维护的重要性稍微小一点。另外,针对功能、价格、维持性这三个要素而言,三种船只相互之间的重要程度是不一样的。

功能方面:孕<sub>1</sub>与孕<sub>2</sub>相比,其重要性介于稍微不重要与明显不重要之间;孕<sub>1</sub>与孕<sub>3</sub>相比,其重要性介于同等重要与稍微重要之间;孕<sub>2</sub>与孕<sub>3</sub>相比,其重要性介于强烈重要与极端重要之间。

价格方面:孕<sub>1</sub>与孕<sub>2</sub>相比,其重要性介于稍微重要与明显重要之间;孕<sub>1</sub>与孕<sub>3</sub>相比,显得稍微重要;孕<sub>2</sub>与孕<sub>3</sub>相比,其重要性介于强烈不重要与极端重要之间。

维护性方面 : $孕_1$ 与 $孕_2$ 相比同等重要 ; $孕_1$ 与 $孕_3$ 相比稍微重要 ; $孕_2$ 与 $孕_3$ 相比明显不重要。

针对这种情况 ,试通过层次分析法来进行相关分析。

分析 :

我们按照前述层次分析法的几个步骤来进行分析。

(员)建立递阶层级结构模型。根据题意 ,可知该评价问题的目标、准则与方案 ,由此建立如图 愿-猿所示的递阶层级结构模型。

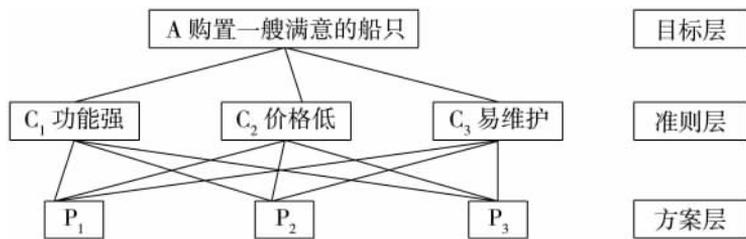


图 愿-猿 递阶层级结构模型

(圆)构造比较判断矩阵 :

① 目标层与准则层之间比较判断矩阵的构造。根据题意所给定的相关信息我们知道 ,针对目标层而言 ,准则层的三个要素的相对重要性如下面矩阵式所示

	粤	悦 <sub>1</sub>	悦 <sub>2</sub>	悦 <sub>3</sub>
悦 <sub>1</sub>	员	缘	猿	
悦 <sub>2</sub>	员	猿	猿	
悦 <sub>3</sub>	员	猿	员	

其中 ,悦<sub>1</sub>表示功能 ,悦<sub>2</sub>表示价格 ,悦<sub>3</sub>表示维护。

于是可以得到目标层与准则层之间比较判断矩阵为

$$粤_{越} = \begin{bmatrix} 员 & 缘 & 猿 \\ 员 & 猿 & 猿 \\ 员 & 猿 & 员 \end{bmatrix}$$

② 准则层与方案层之间比较判断矩阵的构造。由已知条件知道 ,就功能这一要素而言 ,三种船只的相对重要性如下面矩阵式所示

	悦 <sub>1</sub>	孕 <sub>1</sub>	孕 <sub>2</sub>	孕 <sub>3</sub>
孕 <sub>1</sub>	员	猿	圆	
孕 <sub>2</sub>	源	员	愿	
孕 <sub>3</sub>	员	愿	员	

其中 ,孕<sub>1</sub>、孕<sub>2</sub>、孕<sub>3</sub>分别表示购买第一种、第二种、第三种船 ,如此可以得到方案层各要素针对准则层中功能这一要素的比较判断矩阵

$$悦_{越} = \begin{bmatrix} 员 & 猿 & 圆 \\ 源 & 员 & 愿 \\ 员 & 愿 & 员 \end{bmatrix}$$





$$\begin{matrix}
 & \text{悦} & \text{悦} & \text{悦} \\
 \text{悦} & 1 & & \\
 \text{悦} & & 1 & \\
 \text{悦} & & & 1
 \end{matrix}$$
 比较判断矩阵悦具有满意的一致性。

⑤ 以此类推,直至最后完成对最低层进行层次总排序的一致性检验。

(远) 层次总排序的一致性检验

以上已经求出第二层次(悦层)要素悦、悦、悦的层次总排序权值分别为悦、悦、悦,第三层有三个比较判断矩阵悦、悦、悦,其对应的悦分别为悦、悦、悦,则

$$\begin{matrix}
 & \text{悦} & \text{悦} & \text{悦} \\
 \text{悦} & 1 & & \\
 \text{悦} & & 1 & \\
 \text{悦} & & & 1
 \end{matrix}$$

(悦、悦、悦)伊悦

由于悦,所以层次总排序具有满意的一致性。

## 8.5 模糊评价法

物流系统模糊综合评价法是应用模糊集理论对物流系统进行综合评价的一种方法。由于在物流系统实际决策中,要绝对精确地描述某个评价指标是很困难的,有时也没有这个必要,所以我们在对物流系统进行综合评价时引入模糊的概念很有必要,一方面可以避免许多不必要的麻烦,另一方面又可以获得物流系统各可行方案优劣次序的相关信息。

物流系统模糊综合评价法的主要步骤如下:

(员) 邀请有关专家组成评价小组。

(圆) 根据专家的经验或通过如层次分析法等方法,确定评价因素集及其权重向量。这里,评价因素集哉是评价因素(即评价指标)的集合。设有灶个评价因素,且这灶个因素均在同一个层次上,则评价因素集哉为

$$\text{哉} = \{ \text{哉}_1, \text{哉}_2, \dots, \text{哉}_n \}$$

评价因素集也可以是一个多级(即具有两个或两个以上的层次)递阶结构的集合。

权重向量孕是各个评价因素的相对重要性权值。对应于上述灶个评价因素的权重向量为

$$\text{孕} = (\text{孕}_1, \text{孕}_2, \dots, \text{孕}_n) \quad (\text{愿-愿})$$

(猿) 确定评价尺度集月。评价尺度集是在评价打分时采用的评分等级。设有皂个评分等级,则有

$$\text{月} = \{ \text{月}_1, \text{月}_2, \dots, \text{月}_m \} \quad (\text{愿-愿})$$

(源) 构造模糊评价矩阵  $R$ 。模糊评价矩阵  $R$  反映从评价因素  $C$  到评价尺度  $M$  之间的模糊评价关系。这种评价是一种模糊映射, 它可以通过专家投票等方法获得。

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} & \dots & r_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{i1} & r_{i2} & \dots & r_{in} & \dots & r_{im} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{s1} & r_{s2} & \dots & r_{sn} & \dots & r_{sm} \end{bmatrix} \quad (8-10)$$

式中  $r_{ij}$  表示认为第  $i$  个评价因素  $C_i$  的评价得分等级为  $M_j$  的专家票数百分比。

(缘) 计算各评价对象方案的综合评定向量  $Z$  并对其归一化, 得到向量  $Z$ 。综合评定向量  $Z = (z_1, z_2, \dots, z_n)$  是根据评价因素的权重经加权后得到的各评价因素的综合评价向量, 然后对向量  $Z$  进行归一化处理(对向量归一化就是使得向量中各元素之和为 1), 得到向量  $Z$ 。向量  $Z$  的含义是: 认为方案的综合评价得分为各评价得分等级的专家票数百分比。

根据模糊集理论的综合评定概念,  $Z$  的计算公式为

$$Z = R \cdot W \quad (8-11)$$

该式的运算是一种模糊映射过程, 应采用模糊关系的合成方法计算。模糊关系合成运算方法如下:

设  $R$  为模糊关系的合成运算,  $M$  与  $N$  为矩阵或向量, 其算法与一般矩阵乘法规则相同, 但要将计算式中的普通乘法运算换为取最小的运算, 记为  $\cap$ ; 将计算式中的普通加法运算换为取最大的运算, 记为  $\cup$ 。

模糊矩阵的乘积定义如下: 记  $R = (r_{ij})$ ,  $M = (m_j)$ , 则

$$R \cdot M = (r_{i1} \cap m_1 \cup r_{i2} \cap m_2 \cup \dots \cup r_{in} \cap m_n) \quad (8-12)$$

例如, 设有模糊矩阵  $R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \end{pmatrix}$  与  $M = \begin{pmatrix} m_1 & m_2 & m_3 \end{pmatrix}$ , 则  $R$  与  $M$  的并运算的规则与集合运算相似; “并”运算为两中取大; “交”运算为两中取小。

$$R \cup M = \begin{pmatrix} r_{11} \cup m_1 & r_{12} \cup m_2 & r_{13} \cup m_3 \\ r_{21} \cup m_1 & r_{22} \cup m_2 & r_{23} \cup m_3 \end{pmatrix}$$

$$R \cap M = \begin{pmatrix} r_{11} \cap m_1 & r_{12} \cap m_2 & r_{13} \cap m_3 \\ r_{21} \cap m_1 & r_{22} \cap m_2 & r_{23} \cap m_3 \end{pmatrix}$$

$$R \cdot M = \begin{pmatrix} (r_{11} \cap m_1) \cup (r_{12} \cap m_2) \cup (r_{13} \cap m_3) & (r_{21} \cap m_1) \cup (r_{22} \cap m_2) \cup (r_{23} \cap m_3) \end{pmatrix}$$

对  $Z$  归一化

$$Z = \left\{ \frac{z_i}{\sum_{i=1}^n z_i} \right\} \quad (8-13)$$

(远) 计算各评价对象方案的综合评价得分。综合评价得分为

宰越秘月

(愿一愿)

按上述步骤可计算出所有可行方案的综合评价得分 根据得分的大小 ,即可对各可行方案进行优先顺序的排列 ,为决策者提供依据。

### 本章小结

#### 摇

对于各种设计方案和系统 ,经常需要作出能否满足需要、经济上的合理性、实施上的可能性、是否为最优或最满意等几个方面的评判 ,这就是评价。评价的任务就是对被评价主体给出相关的价值测定和多数人接受的评价结果 ,为正确决策提供所需的信息。所以 ,系统评价是系统决策的重要依据 ,没有正确的评价不可能有正确的决策。

本章分析了物流系统评价的概念 ,明确提出了系统评价的目的、遵循的原则和步骤 ,重点分析了物流系统评价常用的综合评价法、层次分析法、模糊评价方法等 ,并结合实际分析了各评价方法如何应用。

### 关键概念

#### 摇

物流系统评价 摇 评价因素 摇 评价准则 摇 层次分析法 摇 模糊评价法

### 分析思考

#### 摇

1. 物流系统评价要达到哪些目的？

2. 画图分析物流系统评价的步骤和所包含的内容。

3. 调查一个物流企业 ,就某一具体的物流活动建立其评价指标体系。

4. 画图分析层次分析法的基本思路。

5. 某港口打算购买一台大型装卸设备 ,现有两种设备可供选择。关于装卸设备的评价因素有“技术性能”、“可靠性”、“维护性”、“成本”四项 ,它们的相对重要性排序权值分别为 0.4、0.3、0.2、0.1,设评价尺度有 优、中、差三个等级。试用模糊综合评价法确定应选购哪种设备。

# 第 8 章 物流系统决策

## 学习目标

理解了解决策的相关概念；

分析并掌握不确定型决策模型、风险型决策模型和效用决策模型的应用环境、决策准则和决策步骤；

分析并掌握相关决策的计算与分析过程。

对物流系统进行分析、建模优化、仿真和评价后,就要将各种行动方案及其后果信息提供给决策者,为决策者依据经验、直觉作出符合企业战略的决断提供依据,此为决策论的范畴。

## 9.1 物流系统决策的基本概念

任何物流系统决策问题,都需要决策者全面、科学地对与问题相关的各种情况进行分析、判断,从而作出正确的决策。而这些决策往往涉及到技术、经济、社会、政治环境及心理等多种因素,决策者难以单凭个人经验作出可靠的优劣分析、判断和抉择,而是需要借助于科学的决策分析方法。本章就将介绍这样一些方法。

### 9.1.1 决策的概念及决策环境

“决策”就是人们为达到某一目标,从若干可能的方案(或措施、途径、行动)中经过分析,选出最佳(或满意)方案的行为,即针对某一问题,确定反映决策者偏好的目标,根据实际情况,通过决策论中的科学方法,从多个方案中选出一个最佳方案的过程。

由于社会经济活动是多方面、多层次、多领域的,因而,有关的决策问题和决策活动也是多方面、多层次、多领域的。从宏观上讲,有政治上的决策、军事上的决策、经济与科技上的决策;从微观上看,有一个企业、一个部门的日常生产计划、经营管理的决策。一般的系统决策过程包括确定目标、分析可能出现的情况并估计其发生概率、拟订多个备选方案、评价方案、选择最满意的方案五个步骤。

对于复杂的系统,其行动方案结果与系统所处的环境密切相关。因此,以方案选择为决策内容的决策过程也随环境的不同而有很大差别,根据决策环境是否可以预测,可分为三种类型。

(员) 确定型。未来环境完全可以预测,人们知道将来会发生什么情况,可以获得精确、可靠的数据作为决策基础。如企业开发某个新产品,在计划经济机制下,产品包销、原料统一调拨,企业管理者是在确定的环境下进行决策。

(圆) 风险型。未来环境有几种可能的状态和相应后果,可以观察每种状态和后果出现的概率。例如,引入商品经济机制,企业开发某种新产品就要冒一定的风险,销售状态、原材料供应情况都没有完全把握,但是根据市场调查、原材料供应商的信息,还是能对销售状态的好或坏和原材料供应充分或短缺的概率作出判断;又如,石油勘探公司的钻井计划也属风险型决策,公司不能判定哪口钻井将会出油,但可以很好地估计有百分之几的钻井将会成功。

(猿) 不确定型。未来环境出现某种状态的概率难以估计,甚至连可能出现的状态

和相应的后果都不知道,如开发尚未经过用户考验的全新产品往往就属于这种情况。又如,设立跨国公司,外国的文化传统、法律、经营环境等都和国内截然不同,决策者要在不确定的环境下作出判断,物价改革、住房改革、工资改革方案的出台也属于这类不确定型决策。越是高层和关键的决策往往越是不确定型决策,决策者要为此付出许多不眠之夜。

有些基层的管理问题(如车间的生产计划、存储问题)可以近似地按确定型决策处理。系统工程多涉及社会经济系统,影响面广,决策层次高,很少有确定型决策。另外,已经有像线性规划、非线性规划这类方法解决确定型环境下的最优选择问题,所以,决策分析着重研究风险型和不确定型决策。确切说来,决策分析是研究状态概率有可能估计的风险型决策,但不确定型和风险型很难有明确界线。对于不确定状态,人们仍可以主观地给出概率,尽管很不精确。有些文献中,不确定型实际上就是风险型的概念。

### 9.1 决策要素

系统决策是一项复杂的过程,其中包含了一系列的复杂工作,它需要决策者对决策问题有深入的了解,并对决策目标有清晰的认识,需要进行完整和缜密的分析。一般来讲,决策分析的基本要素如下:

(员) 决策者。决策者指的是决策过程的主体,即决策人,一般来说,他是某一方面利益的代表者。决策的正确与否受到决策者所处的社会、政治、经济环境及决策者个人素质的影响。因此,正确的决策需要科学的决策程序,需要强调集体智慧。

(圆) 方案。方案是为实现目标而采取的一系列活动或措施。可以是有限的,也可以是无限的。

(猿) 自然状态。自然状态是决策者将要遇到的不受决策者控制的客观状况,要进行预先估计。

(源) 损益值。每一可行方案在每一客观情况下产生的后果,被称为损益值。对应于灶种自然状态和皂个方案,便可得到一个皂行灶列的矩阵,称之为损益矩阵。

自然状态、方案、损益值三者的对应关系,可用表 9-1 来表示。

损益值 方案		自然状态及概率			
		状态 员 ( $\theta_{(员)}$ )	状态 圆 ( $\theta_{(圆)}$ )	...	状态 灶 ( $\theta_{(灶)}$ )
方案 员		糟 <sub>员员</sub>	糟 <sub>员圆</sub>	...	糟 <sub>员灶</sub>
方案 圆		糟 <sub>圆员</sub>	糟 <sub>圆圆</sub>	...	糟 <sub>圆灶</sub>
...		...	...	...	...
方案 皂		糟 <sub>皂员</sub>	糟 <sub>皂圆</sub>	...	糟 <sub>皂灶</sub>

决策过程就是实施决策的步骤,一般包括以下几个步骤:

(员) 确定目标。面对所要解决的问题,决策目标要明确、具体,符合客观实际。若决策目标不止一个,应分清主次,首先保证主要目标的实现。

(圆) 拟订可行方案。针对决策的目标和具备的信息,就可以拟订各种可行方案,方案要有多样性和可行性,可行的方案是指技术上先进、经济上合理的方案。

(猿) 优选方案。首先应该确定优化方法,并对具体的决策进行优化分析、排序及优化方案的敏感性分析。

(源) 执行决策。经过大量反复的分析研究,给决策者提供大量的决策信息,最后,由决策者作出抉择并执行。

上述步骤可用图 怨-员描述,这一决策过程并不是一次就能够完成任务的,应该进行多次重复,直到各方面都尽可能满意为止。另外,决策方案并不是一成不变的,需要在实施过程中根据实际情况不断调整和补充。

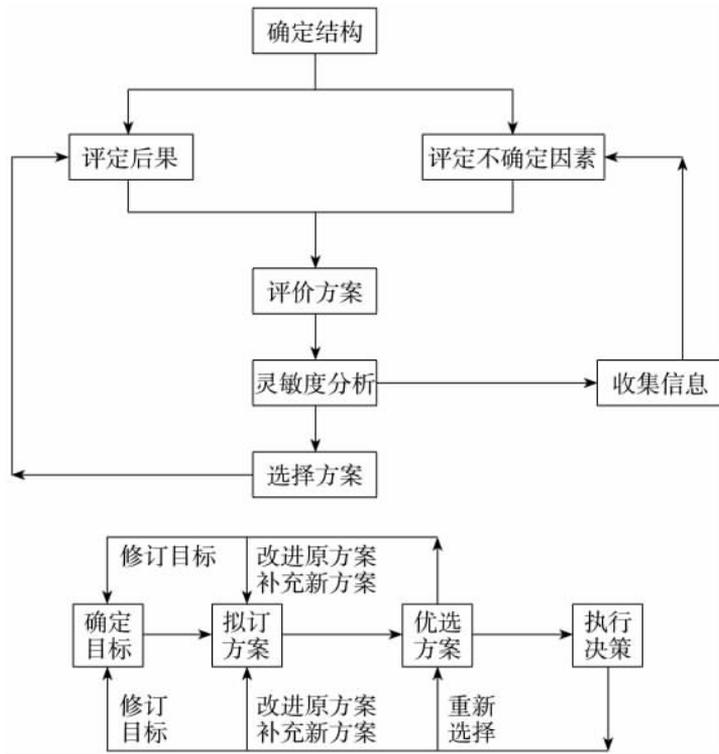


图 怨-员 决策过程

### 决策模型分类

按照不同的观点,决策模式可以作不同的分类。

(员) 按照决策者的类型分类:个人决策、集体决策。

(圆) 按照决策问题在企业经营中所处的地位分类 : 经营决策、业务决策。

(猿) 按照决策问题所属职能内容分类 : 销售决策、生产决策、设备更新决策、材料订购和库存管理决策、财务成本决策、人事和劳动组织决策。

(源) 按照决策问题所涉及的时间跨度分类 : 短期决策( 时间跨度在 1 年左右 )、长期决策( 时间跨度一般在 1 年以上 )。

(缘) 按照决策问题时间阶段的相互关系分类 : 静态决策、动态决策。

(远) 按照决策问题自然状态信息的掌握程度分类 : 确定型决策、非确定型决策、风险型决策。

(苑) 按照决策问题追求的目标数目分类 : 单目标决策、多目标决策。

(愿) 按照决策问题面临的自然状态的性质分类 : 非竞争型决策、竞争型决策。

## 9.1 物流系统决策问题

物流是国民经济发展的一个重要产业 , 在其基础设施建设与运营管理过程中 , 往往会遇到一系列重大问题需要决策。例如 , 某仓储公司打算新建一座巨型仓库 , 现有几个建造方案可供选择。这种问题的决策应考虑到如下的因素 : 投资费用、仓库未来的仓储需求情况估计、风险的度量和评价。类似的问题如 : ① 多个配送中心的物资调运问题 , 即如何调运才能使运营费用最低 ? ② 一个工厂如何制订生产计划才能获利最多 ? ③ 船公司是否开辟新航线 ? 所谓物流系统决策问题 , 就是在物流系统中与物流活动有关的决策问题 , 如物流选址决策、物流经济决策等等。

综上所述 , 决策问题通常具有下述特征 :

(员) 存在着决策者希望达到的一个明确目标。

(圆) 至少存在两种自然状态 , 各状态出现的概率可能已知 , 也可能未知。

(猿) 至少存在两个可供选择的方案。

(源) 各方案在每一自然状态下的损益值可以估算出来。

本章主要讨论的是不确定型决策模型、风险型决策模型和效用决策模型。

## 9.2 不确定型决策

所谓不确定型决策问题就是指自然状态出现的概率是未知的决策问题。一般情况下 , 愈是高层、愈是关键的决策 , 往往越是是非确定型的决策。

【例 9-1】根据以往的资料 , 一条集装箱船舶每个航次从天津至厦门港所带的舱位数可能是下面数量中的某一个 , 而其概率分布不知道 , 如果一个舱位空着 , 则在开船前 1 小时起以 100 美元低价运输。每个舱位预定的运价为 200 美元 , 每个舱位的运输成本是 100 美元。假定所推断的空舱量为所需要量中的某

一个。

- 方案 员准备的空舱量为 员园;
- 方案 圆准备的空舱量为 员缘;
- 方案 猿准备的空舱量为 园园;
- 方案 源准备的空舱量为 园缘;
- 方案 缘准备的空舱量为 猿园;

设需求量为 葬,准备量为 遭,损益值为 糟,根据计算可得到各个方案的损益矩阵,列于表 怨-圆中。

表 怨-圆 损益矩阵

准备的 空舱量		需求 量				
		葬 ( 员园)	葬 ( 员缘)	葬 ( 园园)	葬 ( 园缘)	葬 ( 猿园)
遭 ( 员园)	园	园	园	园	园	
遭 ( 员缘)	园	园	园	园	园	
遭 ( 园园)	园	园	园	园	园	
遭 ( 园缘)	园	园	园	园	园	
遭 ( 猿园)	园	园	园	园	园	

这是一个非确定型的决策问题,这时应如何对提供的几种方案进行对比分析,并从中作出决策呢?

由于不同的决策者对未来所遇到的不确定状态的估计常有不同的考虑,因此,在非确定状态下进行决策分析时,各决策者依据的决策准则也有所不同。常用的有如下准则:平均准则、悲观准则、乐观准则、折衷准则、后悔准则等。

### 摇摇摇摇 平均准则 (摇摇摇摇去)

平均准则的出发点是:既然不能肯定哪一种状态比另一种状态更可能出现,只好认为各种结局出现的概率相等。

#### 员) 决策步骤

- ( 员) 编制决策损益表;
- ( 圆) 计算每一个方案的平均收益值;
- ( 猿) 从每个方案的平均收益值中找出一个最大的方案为备选方案。

#### 圆) 算例分析

仍以【例 怨-员】为例说明。

一般在进行决策分析前,可首先大致观察一下各方案的收益值,如发现其一方案相对另一方案在任何一种自然状态下,都处于不利的地位,则该方案相对另一方案为劣势方案,可马上淘汰该方案。决策将成为在剩下的方案中选择一个最佳方案的问

题。我们分别计算五个方案的平均收益值,将结果列于表 9-1 猿中。

表 9-1 猿 不同方案的平均收益值

方案： 准备的 空舱量	需求量					平均 收益值
	猿 (员园)	猿 (员园)	猿 (员园)	猿 (员园)	猿 (猿园)	
方案 猿	猿	猿	猿	猿	猿	猿
方案 猿	猿	猿	猿	猿	猿	猿
方案 猿	猿	猿	猿	猿	猿	猿
方案 猿	猿	猿	猿	猿	猿	猿
方案 猿	猿	猿	猿	猿	猿	猿

由表 9-1 猿可见,方案 猿的平均收益值最高,因此,根据 猿猿猿 准则,方案 猿即为最优方案。

根据 猿猿猿 准则,在决策矩阵中,如增加或减少一种状态时,往往会使原方案的优劣发生改变,这反映了这种准则对信息掌握的依赖性较强,以表 9-1 猿的有关数据为例。

表 9-1 猿 两种状态下平均收益值计算

方案	各自然状态下的损益值		平均收益值
	状态 猿	状态 月	
方案 猿	猿	猿	猿
方案 猿	猿	猿	猿

该决策问题中现有两种自然状态,经过调查研究发现还可能存在着第三种状态,两种方案在第三种状态下的收益值也可得到,如表 9-1 猿所示。

表 9-1 猿 三种状态下平均收益值计算

方案	各自然状态下的损益值			平均收益值
	状态 猿	状态 月	状态 悦	
方案 猿	猿	猿	猿	猿
方案 猿	猿	猿	猿	猿

显然,增加了一种状态,最优方案就从原来的方案改变 猿变为方案 猿。

### 9.1.2 悲观准则 ( 宰葬 准则或 配葬 准则 )

这种准则处理问题的思路是从最不利的结果出发,以在最不利的结果中取得最有利的结果的行动作为最优行动。

员) 决策步骤

(员) 编制决策损益表；

(圆) 计算找出各个方案的最小收益值；

(猿) 在这些最小的收益值对应的决策方案中选择一个最小收益值最大的方案为备选方案。

因此,这种准则也称最大最小准则(悲观准则)或坏中求好准则。

圆) 算例分析

仍以【例怨-员】为例。

首先考虑每一方案的最小收益值,再选取最大的最小收益值,如表怨-远所示。

表怨-远 最小收益值计算

方案： 准备的 空舱量	需求量					最小 收益值
	猿 (员)	猿 (员)	猿 (圆)	猿 (圆)	猿 (猿)	
方案 员	猿	猿	猿	猿	猿	猿
方案 圆	猿	猿	猿	猿	猿	猿
方案 猿	猿	猿	猿	猿	猿	猿
方案 肆	猿	猿	猿	猿	猿	猿
方案 伍	猿	猿	猿	猿	猿	猿

由表可见,方案 员为最优方案。事实上,这种方法就是选取最不利情况下的最有利方案。

显然,这种准则所得的决策结果最为保险,无论自然状态如何,总能保证得到这一准则的决策结果。其缺点是过于保守,这可以表怨-苑的有关数据来说明。

表怨-苑 自然状态下损益值计算

方案	各自然状态下的损益值			最小收益值
	状态 粤	状态 月	状态 悦	
方案 员	猿	猿	猿	猿
方案 圆	猿	猿	猿	猿

怨-猿 乐观准则

这种准则处理问题的思路和悲观准则正好相反,它的思路是从最有利的结果出发,以只在有利的结果中取得最有利的结果的行动作为最优行动。这种准则处理问题的决策步骤是：

- (员) 编制决策损益表；
- (圆) 计算找出各个方案的最大收益值；
- (猿) 在这些最大的收益值对应的决策方案中,选择一个最大收益值最大的方案为备选方案。

因此,这种准则也称最大最大准则(或乐观准则)或大中取大准则。对【例 9-1】用乐观准则选择方案的过程如表 9-1 所示。

表 9-1 最大收益值计算

方案： 准备的 空舱量	需求量					最大 收益值
	葬 (员)	葬 (圆)	葬 (猿)	葬 (肆)	葬 (伍)	
方案 员	圆	圆	圆	圆	圆	圆
方案 圆	猿	猿	猿	猿	猿	猿
方案 猿	肆	肆	肆	肆	肆	肆
方案 肆	伍	伍	伍	伍	伍	伍
方案 伍	陆	陆	陆	陆	陆	陆

因此,方案 肆为最优方案。

乐观准则法期待今后出现的情况是最有利的,因此容易过分乐观引起冒进,导致出现不合理现象。这一点以表 9-2 的数据进行说明。

表 9-2 自然状态下损益值计算

方案	各自然状态下的损益值			最大收益值
	状态 粤	状态 月	状态 悦	
方案 员	圆	圆	圆	圆
方案 圆	圆	圆	圆	圆

可见,如果按乐观准则,方案 员是最优方案,但实际上,方案 圆因在不同状态下的收益值均较大,相对而言实际上较优于方案 员。

### 9.2.2 折衷法(均匀准则、乐观系数准则)

这种准则的思路是对最大最小法则和最大最大法则两者进行折衷。决策时,决策者首先根据个性、经验选定乐观系数  $\alpha$  的值,然后,对每一方案计算其乐观、悲观两个方面的折衷收益值。

#### 员) 决策步骤

- (员) 编制决策损益表。

(圆) 计算各个方案的折衷收益值。

折衷收益值 = 乐观系数 × 最大收益值 + (1 - 乐观系数) × 最小收益值

式中, 为乐观系数(显然, 越大, 最大收益值对方案评价的结果影响越大), 在 与 之间, 可自行主观选定。若 越, 是最大最大收益值法; 若 越, 是最大最小收益值法。

(猿) 在这些折衷收益值对应的决策方案中, 选择一个最大折衷收益值对应的方案为备选方案。

圆) 算例分析

若取 越, 则【例 怨-员】的决策过程可通过表 怨-员作出。

表 怨-员 折衷值计算

方案： 准备的 空舱量	需求量					最大 收益值	最小 收益值	折衷值
	猿 (猿)	猿 (猿)	猿 (猿)	猿 (猿)	猿 (猿)			
猿 (猿)	猿	猿	猿	猿	猿	猿	猿	猿
猿 (猿)	猿	猿	猿	猿	猿	猿	猿	猿
猿 (猿)	猿	猿	猿	猿	猿	猿	猿	猿
猿 (猿)	猿	猿	猿	猿	猿	猿	猿	猿
猿 (猿)	猿	猿	猿	猿	猿	猿	猿	猿

由表可见, 方案 猿为最优方案。

怨 后悔值准则 (猿)

通常决策作出后, 若客观情况的发展与决策时的估计相差较大, 决策者便有后悔的感觉。后悔值准则的思路是希望找到一个方案, 当此方案执行后, 无论自然状态如何变化, 决策者产生的后悔感都为最小, 后悔情绪的大小用后悔值表示。每一自然状态下, 每一方案收益值与该状态的最大收益值之差, 就叫做后悔值, 也叫做机会成本。

员) 决策步骤

- (员) 找出各个自然状态的最大收益值, 定其为该状态下的理想目标;
- (圆) 将它们排列成一个矩阵, 称之为后悔矩阵;
- (猿) 找出每一方案的最大后悔值;
- (源) 在这些最大后悔值中选出最小值, 该值对应的方案为备选方案。

圆) 算例分析

对【例 怨-员】而言, 其后悔矩阵如表 怨-员所示。

表 9-1 最大后悔值计算

方案： 准备的 空舱量	在每一自然状态下的后悔值					最大 后悔值
	强 (1000)	中 (500)	弱 (300)	差 (200)	极差 (100)	
强 (1000)	1000	500	300	200	100	1000
中 (500)	500	0	500	1000	200	200
弱 (300)	300	500	0	500	1000	1000
差 (200)	200	300	500	0	500	200
极差 (100)	100	200	300	500	0	100

因此,方案 强 为最优方案。

以上介绍了几种不确定型决策问题的决策评价准则。介绍时假定决策目标是收益最大,因此均以最大收益值的方案为最优方案。如决策目标是损失最小,则最优方案是损失值最小的方案。显然,在处理非确定型问题时,不同的决策准则,所得结论可能不同,而决策准则的选择,因对具体问题的估计和决策者对风险的偏好程度不同而有异。目前,还不能证明哪个标准最合理。

### 9.3 风险型决策

所谓风险型决策问题就是指自然状态出现的概率是已知的决策问题。风险型决策是决策分析中研究得最多的一类问题。

#### 期望值准则

风险情况下的决策标准主要是期望值标准。具体步骤如下:首先利用自然状态发生的概率分布,计算出每个方案的期望损益值,然后比较其大小。具有最大期望收益值或最小期望损失值的方案便是期望值准则下的最优方案。

期望值准则以决策损益表为基础,根据各自然状态出现的概率计算出各方案的期望损益值,然后将各方案的期望损益值进行比较。同样,如决策目标是收益最大,就以期望收益值最大的方案为最优方案;如决策目标是损失最小,则取期望损失值最小的方案为最优方案。举例来说,如果收益矩阵如表 9-1 所示,则方案 强、中 收益的期望收益值分别为:

$$E(\text{强}) = 1000 \times \frac{1}{4} + 500 \times \frac{1}{4} + 300 \times \frac{1}{4} + 200 \times \frac{1}{4} = 400$$

$$E(\text{中}) = 500 \times \frac{1}{4} + 0 \times \frac{1}{4} + 500 \times \frac{1}{4} + 1000 \times \frac{1}{4} = 400$$

因此,按期望收益值准则来决策,最优方案为  $a_1$

损益表		收益矩阵	
		$\theta_1$	$\theta_2$
方案	$a_1$	100	150
	$a_2$	80	120

### 决策树

如果把决策系统用决策树表示出来,其分析过程可以表现得更加形象直观。决策树法就是以期望值为准则的图解决策法,由于这种决策图形似树枝,因此称为决策树法。决策树法不仅可以解决单阶段决策问题(决策点只有一个),还可以解决用损益表难以解决的多阶段决策问题(决策点有多个),故常用于较复杂的风险型决策分析。

#### 1) 决策树的结构

决策树的结构较简单,如图 9-1 所示。

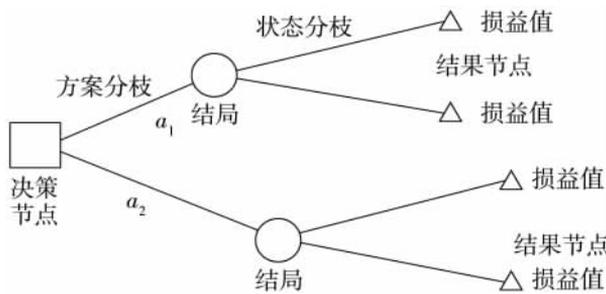


图 9-1 决策树的结构

图中: □——决策节点,表示决策者此时的行为是在自己能控制的情况下进行分析和选择,它射出的分枝为方案枝。

○——状态节点,表示决策者此时面对的是自己无法控制的自然状态,从它射出的分枝称为状态枝,每条分枝代表一种自然状态,在相应弧上标出相应状态出现的概率。

△——结果节点,画在状态枝的末端,它后面的数字是方案在相应结局下的损益值。

#### 2) 决策树法的步骤

(1) 画决策树。画决策树的过程就是拟订各种方案的过程,也是进行状态分析和预估方案结果的过程。因此,首先要对决策问题的发展趋向步步深入地进行分析,然

后按决策树的结构规范由左向右逐步画出决策树。

(圆) 计算各方案的期望值。按期望值的计算方法, 从图的右边向左边逐步进行, 并将结果表示在方案节点的上方。

(猿) 剪枝选择方案。比较各方案的期望值, 选取期望收益值最大或期望损失值最小的方案为最佳方案。将最佳方案的期望值写在决策点上方, 并在其余方案枝上画“//”进行剪枝, 表示放弃该方案。

猿) 算例分析: 单阶段决策

【例 9-1】某物流公司考虑租用仓库进行营业。其中共有两种方案可供选择, 分别是选择大型仓库或小型仓库, 而其年租金分别为 20 万元和 10 万元, 估计物流市场情况在近几年内可能出现几种情况: 前景较好、前景一般、前景差。其概率及其给公司带来的收入如表 9-1 所示。试用决策树方法为公司作出如何选择最优方案的决策。

表 9-1 损益表

方案	状态		
	较好	一般	差
租大型仓库	60	20	-60
租小型仓库	-5	15	25

解:

据已知数据绘制决策树如图 9-1 所示。决策节点为 0, 1, 2 为方案。

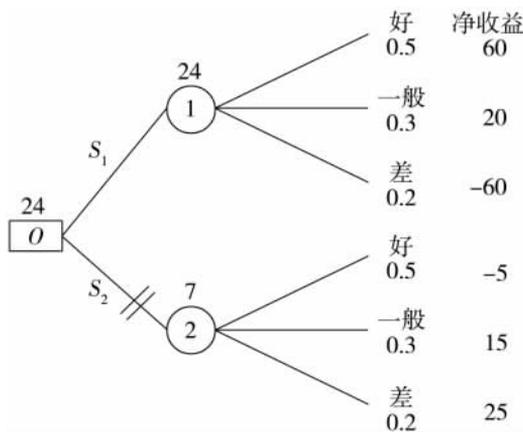


图 9-1 决策树

如果选择 1, 净收益期望值  $E(S_1) = 0.5 \times 60 + 0.3 \times 20 + 0.2 \times (-60) = 24$  (万元)

如果选择 2, 净收益期望值  $E(S_2) = 0.5 \times (-5) + 0.3 \times 15 + 0.2 \times 25 = 7$  (万元)

因为  $E(S_1) > E(S_2)$ , 故选择方案 1, 即租用大型仓库。

由决策树可知, 放弃方案 2, 选择方案 1, 即公司应租用大型仓库, 其期望净收益为每年 24 万元。

### 灵敏度 敏感分析

通常决策过程中所预测的自然状态概率及计算出的损益值都会十分精确,因此,往往需要对这些变动是否影响最优方案的选择进行深入研究,这就是所谓的灵敏度分析。

【例 1】某工程准备施工,需要决策下个月是否开工。开工后天气好可按期完工,获利 10 万元,天气不好损失 5 万元,如不开工不论天气好坏,均需支付窝工费 2 万元。根据气象统计资料,下个月天气好的概率为 0.6,试进行决策。

先计算期望收益:

如果选择开工,期望收益值  $E_k = 0.6 \times 10 + 0.4 \times (-5) = 2$  (万元)

如果选择不开工,期望收益值  $E_{不} = -2$  (万元)

由于  $E_k > E_{不}$ ,因此选择开工比较合适。

但是,如果自然状态的概率发生变化,比如假设天气好的概率从 0.6 变为 0.5,天气坏的概率从 0.4 变为 0.5,若开工后遇到好天气并按期完工的收益仍为 10 万元,开工后天气不好,同样损失 5 万元,不开工需支付窝工费 2 万元。那么方案的选择有何变化呢?

重新计算的各点的期望值分别为:

如果选择开工,期望收益值  $E_k = 0.5 \times 10 + 0.5 \times (-5) = 2.5$  (万元)

如果选择不开工,期望收益值  $E_{不} = -2$  (万元)

计算结果是  $E_k > E_{不}$ ,说明选择不开工较为合理。

当自然状态的概率变化导致最优方案的变化时,此概率称之为转折概率。

在【例 1】中,以 0.6 为天气好的概率,则 0.4 代表天气坏的概率。计算两个方案的损益期望值,并使之相等可得

$$0.6x + 0.4(-5) = -2$$

解得  $x = 0.5$

那么,转折概率为 0.5,即当天气好的概率为 0.5 时,开工比较合理;当天气好的概率小于 0.5 时,不开工比较好。

在实际工作中,应对概率值、损益值等在可能发生的误差范围内作几次不同的变动,并反复进行计算,分析所得结果是否影响最优方案的选择。若最优方案保持不变,说明它是比较稳定的,如果最优方案不稳定,就应做进一步的分析。

### 完全信息价值

在决策中,获得的情报资料越充分,对各种自然状态概率的预测就越准确,据此所作出的决策把握也就越大。但为获得情报,就要进行调查、试验、咨询等,这就要支

付一定的费用。因此,常常需要估算情报本身的价值,以权衡得失。

【例 9-1】某地方要兴建一座工厂,有两种方案可供选择——建大厂和建小厂。建大厂需要投资 300 万元,小厂需要投资 100 万元,两者使用期均为 5 年。但是,对产品未来的销路情况,当地政府并没有十分把握,只是根据以往的信息推断销路的可能性大约为 0.7,销路差的可能性大约为 0.3,状态参量见表 9-1。

方案	销路好 (0.7)	销路差 (0.3)
建大厂	200	-100
建小厂	100	0

如果能得到充分的情报,肯定 5 年内销路好,当然要选择建大厂方案,如果能肯定 5 年内销路差,就选择建小厂方案。

首先画出决策树如图 9-1 所示。然后计算损益值。

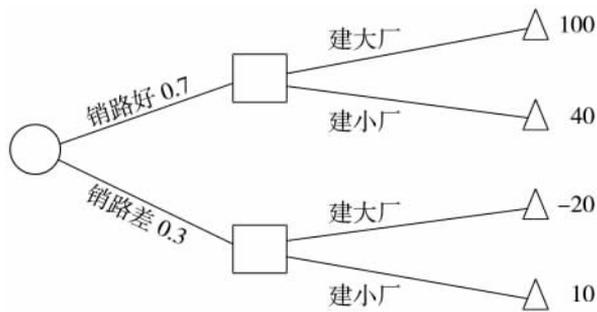


图 9-1 决策树

建大厂在销路好的情况下其损益值为

$200 - 300 = -100$  (万元)

建小厂在销路好的情况下其损益值为

$100 - 100 = 0$  (万元)

在没有获得外部信息的情况下,期望损益为

$[0.7 \times (-100) + 0.3 \times 0] - 300 = -210$  (万元)

如果有完全的情报,则其期望损益为

$0.7 \times (-100) + 0.3 \times 0 = -70$  (万元)

由于取得了完全的情报,期望值从 -210 万元提高到 -70 万元,则“ $-70 - (-210) = 140$  (万元)”就代表了完全情报的价值。因此,完全情报的价值等于利用完全情报进行决策所得到的期望值减去没有这种情报而选出的最优方案的期望值。完全情报价值表示应为这种情报而付出的代价的上限,如超过此限,就要因取得情报而亏损。

损益期望值准则是风险型决策的重要手段。一般说来,损益期望值大的方案从总

体上要优于损益期望值小的方案。

在作风险型决策时,完全以损益期望值作为评选方案的标准有时不一定合理,因为决策者个人的主观因素在决策过程中会产生重要影响。一般说来,当同一决策重复多次或者风险较小时,决策人的意向和期望值的大小大体上是一致的。而当同一决策只进行一次并有较大风险时,两者之间往往出现很大差异,这时决策要考虑决策人的兴趣和感觉,它代表决策者对于风险的态度。

## 9.4 贝叶斯决策

### 9.4.1 贝叶斯决策基础

贝叶斯决策就是在不完全情报下,对部分未知的状态用主观概率估计公式对发生概率进行修正,最后再利用期望值和修正概率作出最优决策。

贝叶斯决策过程分三个阶段:

(员) 事先分析——根据经验的预测求出有确定资料之前状态发生的概率,然后用期望理论决策。

(圆) 事后分析——从事实的结果根据贝叶斯公式对概率作出分析。

(猿) 事后分析——贝叶斯决策的核心,其特点在于由结果推出原因,即把不确定的因素变为确定的因素进行分析。

### 9.4.2 相关概念

#### 员) 先验概率和后验概率

进行决策分析时所依据的决策信息是过去经验、资料、历史数据或决策者的估计,这种状态信息称为先验信息。所谓先验概率,是指试验前作出的状态概率的估计,一般是根据历史资料或经验判断得到的。

根据这些先验信息进行决策,有可能信息并不能完全地、准确地反映所作出的决策在实施过程中所遇到的状态,决策的准确性就会受到影响。为了提高决策分析的准确性,需要在进行决策分析时获得更多的信息,修正、改善先验信息,以获得一个比先验信息更完全、更准确的决策信息,这种信息称为后验信息。将现实中搜集的新信息补充进来,这种补充通常会改善原有的估计,这样得到的状态的概率估计称为后验概率。

将先验信息修改为后验信息需要利用贝叶斯公式。

(圆) 贝叶斯公式

(员) 全概率公式

若  $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_n$  互斥且完备, 即  $\sum_{i=1}^n \Omega_i = \Omega$ , 则

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(A|\Omega_i)P(\Omega_i) \quad (9-1)$$

式中, 条件概率  $P(A|\Omega_i)$  的含义是指在事件  $\Omega_i$  已经发生的条件下, 事件  $A$  发生的概率。

(圆) 逆概率公式

$$P(\Omega_i|A) = \frac{P(A|\Omega_i)P(\Omega_i)}{\sum_{j=1}^n P(A|\Omega_j)P(\Omega_j)} \quad (9-2)$$

猿) 后验概率的计算

如先验概率为  $P(\theta)$ ,  $P(\text{杂})$  是获得新的补充信息的概率,  $P(\theta|\text{杂})$  表示  $\theta$  的补充信息, 则有

$$P(\theta|\text{杂}) = \frac{P(\text{杂}|\theta)P(\theta)}{P(\text{杂})} \quad (9-3)$$

$$P(\text{杂}) = \sum_{\theta} P(\text{杂}|\theta)P(\theta) \quad (9-4)$$

$$P(\theta|\text{杂}) = \frac{P(\text{杂}|\theta)P(\theta)}{\sum_{\theta} P(\text{杂}|\theta)P(\theta)} \quad (9-5)$$

式中,  $P(\theta|\text{杂})$  表示在  $\text{杂}$  发生条件下  $\theta$  发生的概率, 这一概率就是后验概率。

## 9.2 案例 算例分析

【例 9-1】假定有一个生产过程, 如果调试正确, 可生产 95% 的合格品, 如果调试不当, 只能生产 70% 的合格品。历史资料表明, 过去调试正确的几率有 80%, 调试不当的几率有 20%, 假定有关人员已调试了该生产过程, 在此之后, 生产的第一产品是合格的。

问: 这一生产过程得到正确调试的可能性有多大?

解:

令  $\Omega_1$  表示“正确调试”的事件,  $\Omega_2$  表示“调试不当”的事件,  $A$  表示“生产出合格产品”的事件, 由题意得

$$P(\Omega_1) = 0.8, P(\Omega_2) = 0.2, P(A|\Omega_1) = 0.95, P(A|\Omega_2) = 0.7$$

而在此例中我们所要求的是  $P(\Omega_1|A)$ 。可计算得

$$P(\Omega_1|A) = \frac{P(A|\Omega_1)P(\Omega_1)}{P(A|\Omega_1)P(\Omega_1) + P(A|\Omega_2)P(\Omega_2)} = \frac{0.95 \times 0.8}{0.95 \times 0.8 + 0.7 \times 0.2} = 0.91$$

贝叶斯公式结合决策树方法可用于较复杂的决策分析, 如多阶段决策分析。有些决策问题需要经过多次决策才能作出最后决策, 这种决策问题的主要特点是决策过

程有先后次序,后面的决策是由前面的决策结果及前面的决策实现后可能出现的状态来决定的,在进行前面的决策时也必须考虑到后面决策的情况。

【例 9-10】多阶段决策问题。某船公司考虑开辟一条新航线,结果可能出现三种情况:市场状况差( $\theta_1$ ),市场状况中等( $\theta_2$ ),市场状况好( $\theta_3$ )。这里的市场状况实际上指公司收益状况。已知开辟航线平均每年投资 20 万元,如果市场差则无法收回投资,而市场中等可收入 10 万元,如市场好则可收入 15 万元。且  $P(\theta_1) = 0.4, P(\theta_2) = 0.3, P(\theta_3) = 0.3$ 。

为了进一步了解市场情况,可对竞争状况进行考察,考察结果可能是竞争激烈( $\alpha_1$ ),竞争一般( $\alpha_2$ )和较少竞争( $\alpha_3$ )。根据经验估计,市场和竞争的关系如表 9-1 所示。假定考察费用 1 万元。问:

(1) 是否需要考察?

(2) 应怎样根据考察结果来决定是否开辟新航线?

表 9-1 市场和竞争的关系

$\theta_j$	竞争激烈	竞争一般	较少竞争
市场差	0.2	0.4	0.4
市场中等	0.4	0.4	0.2
市场好	0.4	0.4	0.2

解:

记  $A$  为开辟方案,  $\bar{A}$  为不开辟方案。计算无条件概率  $P(\alpha_j)$  和后验概率  $P(\theta_j|\alpha_k)$ 。  
 $P(\alpha_1) = 0.4 \times 0.2 + 0.3 \times 0.4 + 0.3 \times 0.4 = 0.38$   
 $P(\alpha_2) = 0.4 \times 0.4 + 0.3 \times 0.4 + 0.3 \times 0.4 = 0.4$   
 $P(\alpha_3) = 0.4 \times 0.4 + 0.3 \times 0.2 + 0.3 \times 0.2 = 0.22$

同理得

$$P(\alpha_1|\theta_1) = \frac{0.2}{0.4} = 0.5, P(\alpha_2|\theta_1) = \frac{0.4}{0.4} = 1.0, P(\alpha_3|\theta_1) = \frac{0.4}{0.4} = 1.0$$

计算条件概率

$$P(\theta_1|\alpha_1) = \frac{P(\alpha_1|\theta_1)P(\theta_1)}{P(\alpha_1)} = \frac{0.2 \times 0.4}{0.38} \approx 0.21$$

$$P(\theta_2|\alpha_1) = \frac{P(\alpha_1|\theta_2)P(\theta_2)}{P(\alpha_1)} = \frac{0.4 \times 0.3}{0.38} \approx 0.32$$

$$P(\theta_3|\alpha_1) = \frac{P(\alpha_1|\theta_3)P(\theta_3)}{P(\alpha_1)} = \frac{0.4 \times 0.3}{0.38} \approx 0.32$$

$$P(\theta_1|\alpha_2) = \frac{P(\alpha_2|\theta_1)P(\theta_1)}{P(\alpha_2)} = \frac{0.4 \times 0.4}{0.4} = 0.4$$

$$P(\theta_2|\alpha_2) = \frac{P(\alpha_2|\theta_2)P(\theta_2)}{P(\alpha_2)} = \frac{0.4 \times 0.3}{0.4} = 0.3$$

$$P(\theta_3|\alpha_2) = \frac{P(\alpha_2|\theta_3)P(\theta_3)}{P(\alpha_2)} = \frac{0.4 \times 0.3}{0.4} = 0.3$$

$$P(\theta_1|\alpha_3) = \frac{P(\alpha_3|\theta_1)P(\theta_1)}{P(\alpha_3)} = \frac{0.4 \times 0.4}{0.22} \approx 0.73$$

$$P(\theta_2|\alpha_3) = \frac{P(\alpha_3|\theta_2)P(\theta_2)}{P(\alpha_3)} = \frac{0.2 \times 0.3}{0.22} \approx 0.27$$

$$P(\theta_3|\alpha_3) = \frac{P(\alpha_3|\theta_3)P(\theta_3)}{P(\alpha_3)} = \frac{0.2 \times 0.3}{0.22} \approx 0.27$$

同理

$$P(\theta_1|\alpha_2) = \frac{P(\alpha_2|\theta_1)P(\theta_1)}{P(\alpha_2)} = \frac{0.4 \times 0.4}{0.4} = 0.4$$

$$P(\theta_2|\alpha_2) = \frac{P(\alpha_2|\theta_2)P(\theta_2)}{P(\alpha_2)} = \frac{0.4 \times 0.3}{0.4} = 0.3$$

$$P(\theta_3|\alpha_2) = \frac{P(\alpha_2|\theta_3)P(\theta_3)}{P(\alpha_2)} = \frac{0.4 \times 0.3}{0.4} = 0.3$$

(1) 如果考察结果是竞争激烈,则期望收益为

$$E(A|\alpha_1) = 0.21 \times (-20) + 0.32 \times 10 + 0.32 \times 15 = 2.75$$

$$E(\bar{A}) = 0.4 \times (-20) + 0.3 \times 10 + 0.3 \times 15 = 0$$

因为  $E(A|\alpha_1) > E(\bar{A})$ , 所以应考察。



## 9.5 效用理论

前面介绍的决策方法是以收益的好坏为出发点,只考虑成本与收入,得到较好的或最好的方案。这往往与实际情况不符。有时候,一个部门的着眼点不仅仅是效益好,还要考虑工作环境、对职工健康的影响、获得社会的认可等诸多效果。也就是说,同样的效益对不同的决策者会产生不同的效果。所以,在进行定量决策分析之前,还必须确定决策者对后果的感受,只有这样,人们才能比较各种决策方案的优劣,并从中选择他们所喜爱的方案。

### 9.5.1 效用和效用函数

所谓效用就是决策者对某种情况的满意程度。效用代表了决策者对风险的态度和对事物的偏好。用效用这个概念去衡量人们对同一货币值在主观上的价值,就是效用值。效用值仅是个相对数值,反映人们对风险的态度、对某事物的偏好等主观因素。

以期望收益值的大小为择优标准,既不能反映方案执行后可能带来的一些无法定量衡量的效果,也不能完全反映决策者的主观意图和对方案的喜好或厌恶倾向,为此,还需要能反映决策者主观因素的指标,效用值就是这种指标之一。

#### 1) 效用函数

由期望收益值的定义很容易推断出,有一定的收入,就一定会有一个期望收益值,同样,有一定的获得,就会带获得一定的效用值。如果在两个选择项中,选择,则反映决策者比较满意选择项,即。早在20世纪50年代,冯·诺伊曼和摩根斯坦在公理化假设的基础上,运用逻辑和数学工具,建立了不确定条件下对理性人选择进行分析的框架。不过,该理论是将个体和群体合而为一的。后来,阿罗和德布鲁将其吸收进瓦尔拉斯均衡的框架中,成为处理不确定性决策问题的分析范式。

#### 2) 效用函数的推导

每个决策主体都有其自身的效用函数,类似地,一个组织也有它的效用函数。当一个方案的效用值大于另一方案时,决策者将选择该方案。

效用值从原则上说可以选择任何标度,一般常取。越,最大效用值取。越,其中为决策者可能拥有的最大货币收益值。于是,对于任意货币收益值的效用值可以通过下述诺伊曼和摩根斯坦创造的“晕原心理试验法来估计:如某方案以的概率出现后果,以(的概率出现后果,概率的数值应为多大才认为此方案和肯定得到一笔货币值圆的方案等价。”即

$$越 > 越 > 越 \iff 越 > 越 > 越$$

(怨-远)

而  $U(x)$  为原方案的效用值。可见,实际上,  $U(x)$  的效用值等于方案  $U(x)$  的期望效用值  $E[U(x)]$  的上限。在实际问题中,可向决策者提问,了解其心理倾向,根据决策者的反应测出不同  $x$  下的效用值  $U(x)$ ,并绘制出来,最终得到效用曲线。

图 9-1 显示的一条效用曲线在数学上称为凸的,很容易推出此效用函数的一些特征:非负、起点为原点;曲线形状随着  $x$  增加而趋于平坦。也就是说,随着收益值增多,增加值带来的满足程度逐渐下降。具有这类效用曲线的决策者,经常选择可以有稳得的收益值的方案,而不愿冒险,选择可获较大收益的财富所造成的效用的减少,比得到相同数目的财富带来的效用的增加要大,他们是唯恐有失、谨慎稳妥型的决策者,亦被称为稳重者。

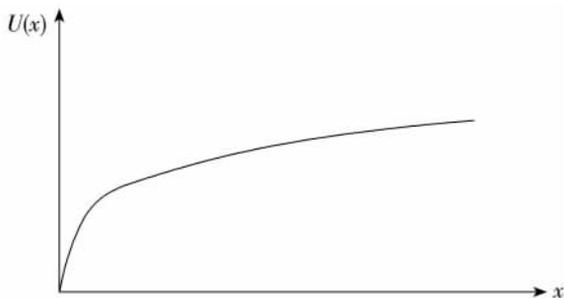


图 9-1 稳重型效用曲线

另一类效用曲线是凹的曲线,属于冒进型的,如图 9-2 中 I 所示。这类决策者宁愿选择有一定风险但可获较大收益的方案,而不愿接受不承担任何风险可获较小收益的方案,他们对收益的反应较为敏感,是不怕风险、进取型的决策者。

图 9-2 中 II 代表中间型决策者的效用观念,这类决策者认为效用值大小与其收益值的多少成正比,他们完全按收益的多少选择最佳方案,属于稳妥型决策者。大量实际情况表明,大多数决策者都是稳妥型决策者。

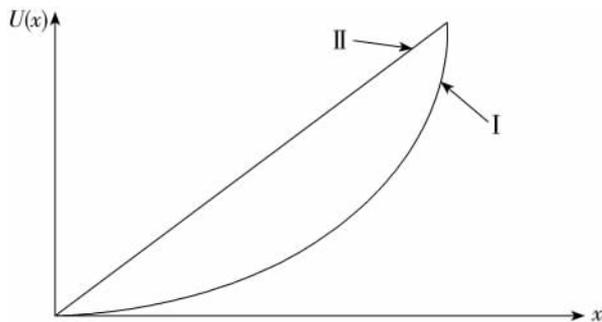


图 9-2 凹型效用曲线

总之,每一决策者因自身的个性、经历、环境的不同,其效用曲线也各不相同。同样条件下,对方案的喜好程度也不一样,从而造成对最优方案的选择也不同。所以,决

策时要慎重考虑决策者的效用。

### 例 10 效用曲线的应用

【例 10】某地为了对原有 3 个热处理加工点进行整顿,以降低能耗,提高经济效益,在调查研究的基础上提出了三种可行方案:方案 A,将处理加工集中到三个基础最好的大厂并加以扩建,其余的加工点予以撤销;方案 B,将热处理加工集中到 1 个基础好的加工点,不扩建,其余撤销;方案 C,保留 2 个加工点,撤销 1 个基础差、能耗高的小加工点。今后这个地区对热处理的需求可能出现三种情况:情况 1,任务很饱满,这种可能性为 0.3;情况 2,任务量中等,这种情况出现的可能性为 0.5;情况 3,任务量少,这种可能性为 0.2。把撤销加工点的损失、扩建费用、能耗等全考虑在内,各种方案在这三种情况下每年的纯利润与亏损值列入表 10-1。请针对此例作出决策。

表 10-1 不同方案的利润与亏损

自然状态 损益值 行动方案	任务情况		
	情况 1 (任务饱满) 0.3	情况 2 (任务中等) 0.5	情况 3 (任务最小) 0.2
方案 A (大调整并扩建)	10	20	原 0
方案 B (中调整不扩建)	20	10	1
方案 C (小调整不扩建)	1	2	2

解:

根据题中条件及计算结果,作效用应用分析。首先求出决策者的效用曲线,以最大收益值 10 (百万元)的效用值作为 1,以最大损失值 -10 (百万元)的效用值为 0,向这个问题的决策者或决策集体提出一系列问题,找出对应若干损益值的效用值,这样可画出效用曲线,如图 10-1 所示。

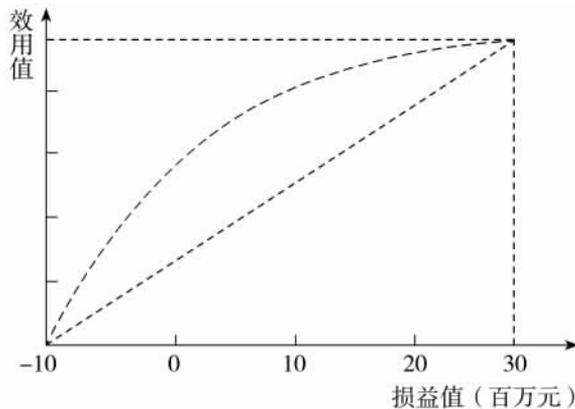


图 10-1 效用曲线

从图中曲线上可以找到对应各个损益值的效用值 (如 100 万元) 对应于效用值 0.6。以效用值为标准可以计算出效用期望值。

大调整方案的效用期望值是

$$0.6 \times 100 + 0.4 \times 200 = 100$$

中调整方案的效用期望值是

$$0.4 \times 100 + 0.6 \times 200 = 160$$

小调整方案的效用期望值是

$$0.2 \times 100 + 0.8 \times 200 = 180$$

于是, 我们由效用曲线得出的结论是: 大调整方案 最优, 中调整方案 次之。

## 效用理论的局限

期望效用 ( 理论) 及主观期望效用 ( 理论) 描述了“理性人”在风险条件下的决策行为。但实际上人并不是纯粹的理性人, 决策还受到人的复杂的心理机制的影响。因此, 理论对人的风险决策的描述性效度一直受到怀疑。例如, 理论难以解释阿莱悖论 ( 选择与期望)、埃尔斯伯格悖论 ( 选择与期望) 等现象; 没有考虑现实生活中个体效用的模糊性、主观概率的模糊性; 不能解释偏好的不一致性、非传递性、不可代换性、“偏好反转现象”, 以及观察到的保险和赌博行为等。同时, 现实生活中也有对 理论中理性选择上的优势原则和无差异原则的违背, 实际生活中的决策者对效用函数的估计也违背 理论的效用函数。

另外, 随着实验心理学的发展, 预期效用理论在实验经济学的一系列选择实验中受到了一些“悖论”的挑战。实验经济学在风险决策领域所进行的实验研究最广泛采取的是彩票选择实验 ( 选择与期望), 即实验者根据一定的实验目标, 在一些配对的组合中进行选择, 这些配对的选择通常在收益值及赢得收益值的概率方面存在关联。通过实验经济学的论证, 同结果效应、同比率效应、反射效应、概率性保险、孤立效应、偏好反转等“悖论”的提出对预期效用理论形成了重大冲击, 对期望效用函数理论进行了修正和扩展。

研究者针对以上问题提出了以下几种使 理论一般化的方式:

(1) 主观权重效用 ( 主观权重效用) 的概念, 用决策权重替代线性概率, 这可以解释 选择问题和同比率效应, 但不能解释优势原则违背问题。

(2) 扩展性效用模型 ( 扩展性效用模型)。该类模型的特点是针对同结果效应和同比率效应等放松预期效用函数的线性特征, 或对公理化假设进行重新表述, 模型将用概率三角形表示的预期效用函数线性特征的无差异曲线, 扩展成体现局部线性近似的扇形展开。这些模型没有给出度量效用的原则, 但给出了效用函数的许多限定条件。

(猿) 遗憾理论(员怨)引入系统的非传递性和不连续性的概念,以解决优势违背问题。

(源)“后悔”的概念被引入,以解释共同比率效应和偏好的非传递性。如猿和源所提出的“后悔模型”引入了一种后悔函数,将效用奠定在个体对过去“不选择”结果的心理体验上(放弃选择后出现不佳结果感到庆幸,放弃选择后出现更佳结果感到后悔),对预期效用函数进行了改写(仍然保持了线性特征)。

(缘)允许决策权重随得益的等级和迹象变化,这是对猿的进一步发展。

(远)非可加性效用模型(猿缘)。这类模型主要针对埃尔斯伯格悖论,该模型认为概率在其测量上是不可加的。

## 9.6 物流系统的多目标决策

以上所介绍的决策分析问题,决策目标都只有一个,不是益损期望值(或效用期望值)最大,就是费用期望值最小,故这类决策问题可以称为单目标决策问题。但在实际工作中所遇到的决策分析问题,却常常要考虑多个决策目标。例如,在建立生产系统时,既要考虑如何使生产系统增加产量,又要考虑如何保证质量,还要求有较低的生产成本等等。又如,设计一台移动式的机械设备,既要求设备自重轻,还要求生产成本低耗设备功率大、性能好等等。再如,选择工厂厂址,既要考虑今后原材料供应和产品输送方便、经济,又要考虑生产协作、环境污染、职工生活福利等因素。由于在决策时要同时考虑多个目标,而且有些目标之间又相互矛盾、制约,从而使决策问题变得相当复杂,决策人很难凭经验轻易作出决策。这类具有多个目标的决策问题就叫做多目标决策。

由于实际的需要,促进了有关方面和人员对多目标决策问题的关心和重视,其理论和方法也有较大发展。这里仅就多目标决策的基本概念和一些常用方法做进一步的分析。

### 9.6.1 基本概念

#### 9.6.1.1 等优曲线

多目标决策和单目标决策的根本区别在于决策目标的数量。在解决单目标决策问题时,只要比较各个方案目标函数的期望值哪个最大(或最小),就可以确定哪个方案为最优。但对于多目标决策问题来说就相对复杂。例如,有两个目标 $S_1$ 和 $S_2$ 的决策问题,各方案的优劣是由 $S_1$ 和 $S_2$ 的大小共同来决定的。图9-1所示平面上的任意一点都代表一种后果值或效用值。

所谓等优曲线,是指在  $f_1$  和  $f_2$  所组成的平面上(如有三个目标则在三维空间上)的一组等效用值曲线,如平面上对应两个方案效用值的两点在同一等优曲线上,且只有在同一等优曲线上时,两方案的效用值才是相等的。换句话说,等优曲线是描述有同样满意程度的不同方案结果的轨迹。决策人认为在同一等优曲线上各点(也即各方案)的结果是等价的。在图 9-1 的方案中,方案 1、2、3、4、5、6、7、8、9 都被认为是等价的。

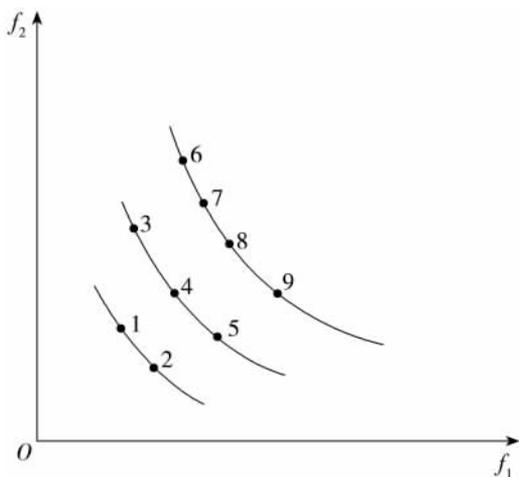


图 9-1 等优曲线

#### 9.1 劣解和非劣解

如上所述,在同一曲线上的各个方案,决策人可以认为它们是等价的,无法比较其优劣。如图 9-1 中方案 1 和方案 2 但如果拿方案 3 同方案 1 和方案 2 进行比较,仅就这三个方案来说,则方案 1 和方案 2 的所有目标值都劣于方案 3,因此,方案 1 和方案 2 可被立即舍弃。这里,把通过比较后立即就可舍弃的方案叫做“劣解”。据此,图 9-1 中的方案 1 到方案 5 都属于劣解,而余下的方案 6 到方案 9 因都在同一等优曲线上,故既不能立即被舍弃,又不能立即确定其中哪个为最优,具有这种特点的各方案叫做“非劣解”。非劣解在多目标决策中起着非常重要的作用。

#### 9.2 选好解

单目标决策主要是通过对各方案的两两比较,即通过“辨优”的方法来求得最优方案,而多目标决策除了需要辨优以确定劣解和非劣解外,还需要用到“权衡”(Trade-off)的方法从非劣解中来选择“最优解”。辨优是解决“何者为优先”这样的问题的方法,而权衡则可以反映决策人的主观意图。俗语说“有所失才能有所得”,所谓“权衡得失”,就是决策人就愿意花多少数量的(某项或某几项)目标值去获得另一项目标的单位值而作出抉择。通过这样的权衡,以便从众多的非劣解中选出较满意的一个解(方案),这个较满意的解就叫做“选好解”。

综上所述,解决多目标决策的主要步骤是:首先由决策人从诸多的方案中找出一

组非劣解,然后由决策人用事先考虑好或商定的选择选好解的准则或方法,从一组非劣解中找出一个选好解。也可采用决策人员间不断对话的形式,即不断交换对“解”的看法而逐步修改非劣解,直到最终找到使决策人满意的选好解为止。

求解多目标决策问题的方法目前已有不少,且有专门著作予以介绍。这里,我们只就化多目标为单目标的几种常用方法进行简略的介绍。

### 化多目标为单目标的方法

由于直接求解多目标决策问题比较困难,而单目标决策问题又较易解决。为此,出现了把多目标决策问题先变换成单目标决策问题,然后再对此求解的方法。

#### 1) 主要目标优化兼顾其他目标的方法

设有  $k$  个目标  $f_1, f_2, \dots, f_k$ , 均要求其目标值为最大(或最小),在这  $k$  个目标中我们可以找出一个主要目标,如  $f_1$  是主要目标,要求  $f_1$  为最大,在这种情况下,只要求其他目标值处在规定的范围内,即

$$f_2 \leq f_2^* \leq f_2^{\max}, f_3 \leq f_3^* \leq f_3^{\max}, \dots, f_k \leq f_k^* \leq f_k^{\max} \quad (怨-苑)$$

就可以把决策问题转化为下述单目标决策问题

$$\max_{x \in R} f_1(x) \quad (怨-愿)$$

$$f_2(x) \leq f_2^* \leq f_2^{\max}, f_3(x) \leq f_3^* \leq f_3^{\max}, \dots, f_k(x) \leq f_k^* \leq f_k^{\max} \quad (怨-愿)$$

例如,制订一个产品的生产工艺方案,要求达到生产率高、成本低、成品率高等三个目标。而其中生产率高是主要目标,则可以在把成本和成品率限定在一定范围的条件下,把生产率作为单目标问题求解即可。

#### 2) 线性加权法

设有  $k$  个目标  $f_1, f_2, \dots, f_k$ , 均要求其目标值为最大(或最小),同时,对各目标的重视程度又不相同,这时,可先给每个目标以相应的权重  $w_1, w_2, \dots, w_k$ , 从而成了一个新的目标函数  $F(x)$ , 使

$$\max_{x \in R} F(x) = \sum_{j=1}^k w_j f_j(x) \quad (怨-愿)$$

$$\text{或 } \min_{x \in R} F(x) = \sum_{j=1}^k w_j f_j(x) \quad (怨-愿)$$

之后计算所有方案值,从中找出最大值(或最小值)的方案,即可确定为优选方案。

如果在多目标中,有些目标要求愈大愈好,有的要求愈小愈好,且各目标的量纲不一,在这种情况下,可以把目标值变换成无量纲数值,然后再用线性加权法计算新的目标函数并对它们进行比较,以决定方案的取舍。

把有量纲的目标值变换成无量纲数值的方法如下:

(1) 将目标值变换成效用值。我们现通过例子加以介绍。

【例 怨-愿】欲生产一种移动式机械设备,要求设备本身重量轻、生产成本低和设

备功率大。为此,设计了粤月两种方案,通过估算,两方案的各项目标值如表 9-1 所示。现要求对粤月两方案进行取舍。

由于目标值量纲不一(有吨、元、千瓦),且要求有小有大(自重、成本要求小,功率要求大),为此,先把目标值变成无量纲的效用值,如图 9-1 所示。

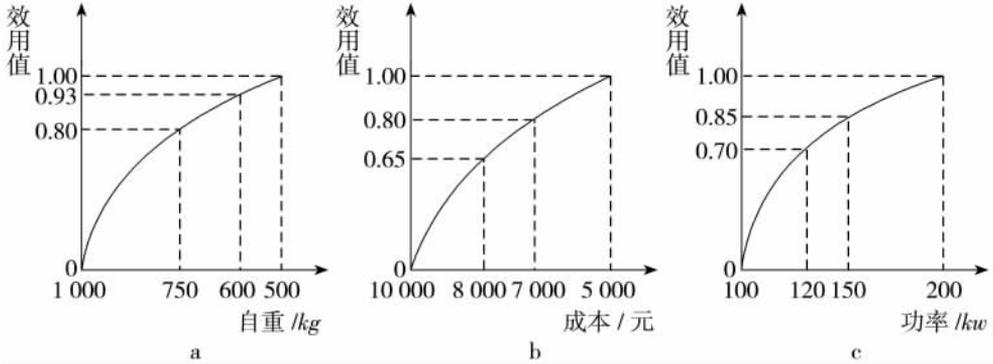


图 9-1 决策人的效用曲线

在图 9-1 中,考虑到机械设备自重再轻也不会低于 500 吨,因此,取自重 500 吨时的效用值为 1.00。根据经验,自重再重也不会超过 1000 吨,因此,取 1000 吨时的效用值为 0。有了两坐标点后,其他坐标点可根据决策人的对话结果来确定,于是得图 9-1 所示的效用曲线。同理,可以绘制图 9-1 和 9-2 的效用曲线,然后,根据目标值可以找到各自的效用值,汇总在表 9-1 中。

表 9-1 效用值表

方案	自重 / 吨	成本 / 元	功率 / 千瓦
粤	750	8000	120
月	600	7000	150

方案	效用值		
	自重	成本	功率
粤	0.80	0.65	0.70
月	0.93	0.80	0.85

根据对三项目标重视程度的不同,在征得有关人员的意见后,确定如下的权重:自重 0.4,成本 0.3,功率 0.3。

因此,可得粤月两方案的效用期望值分别为

粤:  $0.4 \times 0.80 + 0.3 \times 0.65 + 0.3 \times 0.70 = 0.73$

月:  $0.4 \times 0.93 + 0.3 \times 0.80 + 0.3 \times 0.85 = 0.86$

由于 0.86 > 0.73,所以选用月方案为宜。

(3) 线性插值法。当可选择的方案较多,且各方案的目标值线性相关时,则可应

用线性插值法求得无量纲的数值。

例如,设某厂选择厂址共设计了皂个方案,每个方案均有灶个目标。由于对不同目标的重视程度不同,故居事先给出了不同的权重憎。今用枣表示第蚤方案第蹀目标的目标值,则可以列表,如表怨-愿

目标值枣 方案蚤		目标值表								
		枣	枣	...	枣	...	枣	枣	枣	
员	枣	枣	...	枣	...	...	...	枣		
圆	枣	枣	...	枣	...	...	...	枣		
...	...	...	...	...	...	...	...	...		
蚤	枣	枣	...	枣	...	...	...	枣		
...	...	...	...	...	...	...	...	...		
皂	枣	枣	...	枣	...	...	...	枣		

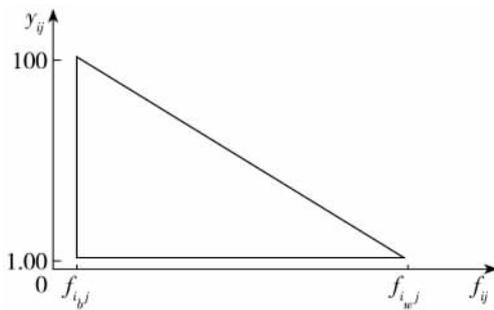
用线性插值法求无量纲值 赠值的方法是 :

若对目标 枣的要求是其值愈小愈好,则可先从皂个方案中找出第蹀个目标的最小目标值确定为最好值,而其最大值确定为最差值。即

$$蚤 = \frac{枣 - 枣}{枣 - 枣} \text{越枣越圆...皂}$$

$$蚤 = \frac{枣 - 枣}{枣 - 枣} \text{越枣越圆...皂}$$

并相应规定 枣的赠越员园枣的赠越员园,如图怨-愿所示。至于其他方案的赠值,可以用线性插值法求得。



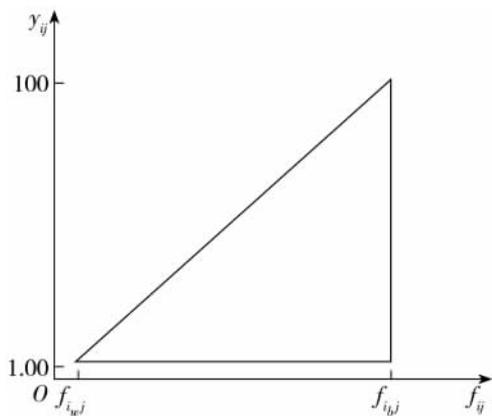
图怨-愿 枣越枣越赠的变换

若对于目标 枣,目标值要求愈大愈好,则先从皂个方案的第蹀个目标中,找出最大目标值确定为最好值,而其最小值为最差值。即

$$蚤 = \frac{枣 - 枣}{枣 - 枣} \text{越枣越圆...皂}$$

同样,规定枣的赠越员园枣的赠越员园如图怨-员园所示。

同样,规定枣的赠越员园枣的赠越员园如图怨-员园所示。



图怨-员园枣的赠越员园枣的赠越员园

这样,就能把所有的目标值变换成无量纲的值。

接着,对皂个方案的辨优结果,即可找出一组非劣解,记作{月};最后,作一广义目标云云,得

$$\text{皂} = \{ \text{月} \} \text{云云} \text{越} \sum_{\text{皂}} \text{赠} \quad (\text{怨-员园})$$

从中找出一个选好解。

### 猿) 乘法

这是化多目标决策为单目标决策的又一种方法。设有 灶个目标 枣枣... 枣枣, ... 枣,其中 枣枣... 枣枣的目标值希望达到最小,枣枣... 枣枣的目标值希望达到最大。

这时,对目标值进行无量纲化后得怎第皂方案跟目标的效用值)或赠(用线性插值得到的无量纲数值),以此构成新的目标函数

$$\text{皂} \text{赠} \text{越} \frac{\text{怎} \text{怎} \dots \text{怎}}{\text{怎} \text{怎} \dots \text{怎}} \text{越} \frac{\prod_{\text{皂}} \text{怎}}{\prod_{\text{皂}} \text{怎}} \quad (\text{怨-员园})$$

$$\text{或} \text{摇} \text{皂} \text{赠} \text{越} \frac{\text{赠} \text{赠} \dots \text{赠}}{\text{赠} \text{赠} \dots \text{赠}} \text{越} \frac{\prod_{\text{皂}} \text{赠}}{\prod_{\text{皂}} \text{赠}} \quad (\text{怨-员园})$$

这样,就可以从一组非劣解中找出新的目标函数最大值的方案作为选好解。对只有两个目标,且一个目标要求愈大愈好,另一个目标要求愈小愈好的决策问题,乘法尤为适用,而且在很多场合已经作为特定的模式被广泛应用。如在价值工程中,价值云云,就是指产品功能云愈大愈好,产品成本悦愈小愈好,这样产品价值云就愈大。

又如上节所述的风险估计中,希望益损期望值  $\bar{E}$  愈大愈好,同时又希望用来度量风险程度的益损值标准差  $\sigma$  愈小愈好,这样风险系数  $\gamma$  越  $\frac{\sigma}{\bar{E}}$  就会愈小。还如在经济活动中,希望投入(人、财、物、时等)愈少愈好,而产出(产量、产值、利润、创汇等)愈多愈好,则经济效益指标 遭越  $\frac{\bar{E}}{\sigma}$  就会愈大等等。

同样,在采用乘除法求解上述只具有两个目标的决策问题时,两个目标的量纲可以是相同的,也可以是不同的。例如,风险系数  $\gamma$  越  $\frac{\sigma}{\bar{E}}$  中  $\sigma$  和  $\bar{E}$  的量纲都用货币单位表示,而价值 灾越  $\frac{\bar{E}}{\sigma}$  中,产品功能可能指速度、功率、使用寿命等等,而产品成本是用货币单位表示。此外,两个目标的决策问题用乘除法求解,还有一定的几何意义,在此不再赘述。

除了以上介绍的化多目标为单目标的决策方法经常被应用外,目标规划也是解决多目标决策问题的一种常用方法。利用目标规划进行多目标决策时,首先要确定决策变量,然后列出全部所要达到的目标并对其排出优先满足的顺序,建立具有线性的约束条件和线性目标函数的目标规划数学模型,最后利用图解法或单纯形法求得选好解。求解过程是按已确定优先顺序去逐个满足目标,排在后面的目标只能在前面的目标得到满足后才予以考虑。因此,后面的目标往往不可能完全得到满足,这样,就需要通过有限次的迭代过程找出一个选好解。

## 本章小结

### 摇

决策的本质是一个优化过程,它是一个反复分析比较、综合并最终作出抉择的过程,决策过程的每一步都需要依靠决策者和专家的知识、经验和胆识。本章主要介绍了目前物流决策中一系列常用的定量决策方法,包括非确定型决策(如平均准则、悲观准则、乐观准则、折衷准则、后悔值准则)、风险型决策(如期望值决策、决策树、贝叶斯决策分析),同时也介绍了考虑决策者对风险的态度和对事物的偏好前提下的效用决策方法。

## 关键概念

### 摇

物流系统决策 摇 贝叶斯决策 摇 目标 摇 准则 摇 权重 摇 决策 摇 方案

分析思考

摇

1. 物流系统决策的作用是什么？

2. 用流程图分析多目标决策的主要步骤。

3. 分析决策树时是从右边开始，为什么？列出决策树的优点和不足。

4. 什么是效用决策？

某港口有桥吊 3 台，以往的装卸情况是：一到夏季，来船明显增多，3 台桥吊能轻松完成其装卸任务（其实只要 2 台桥吊满负荷运转就足以满足来船装卸需要）。但到了冬季，有时可能连续几个星期都没有船来，造成了资源的浪费。由于今年航运市场特别兴旺，夏季来临时，到港船只明显大幅增加，3 台桥吊即便是全部满载也不能满足实际的来船装卸需要，致使部分船只不得不延长在港停泊的时间，造成了港口资金白白流失，到了冬季也基本上保证了每天都有船只进港。于是港口领导想扩大生产能力，再购置 2 台桥吊，但同时也害怕市场有变，于是出现了三种方案：（1）维持 3 台；（2）增加 2 台；（3）减少 1 台。未来的航运市场前景可能出现三种不同情况：（1）上升；（2）持平；（3）下降。在三种方案下港口增加的收益如下表所示：

收益表

市场行情 摇		摇方 摇案		
		1	2	3
1	1	100	100	100
	2	100	100	100
	3	100	100	100
2	1	100	100	100
	2	100	100	100
	3	100	100	100
3	1	100	100	100
	2	100	100	100
	3	100	100	100

试用平均准则、悲观准则、乐观准则、乐观系数准则、后悔值准则进行决策。

某仓储公司打算投资新建一个巨型仓库，主管部门有两个方案可供选择：一个方案是一开始就建 10 万平方米的仓库；另一个方案是先建 5 万平方米，三年后决定是否再建 5 万平方米。估计头三年需求旺的概率是 0.7，需求低迷的概率是 0.3。若头三年需求旺，则后七年需求旺的概率是 0.8；若头三年需求低迷，则后七年需求旺的概率是 0.2。一次投资的投资费用是 1000 万元，分两次投资则为 1200 万元。建成后投入使用，10 万平方米仓库在需求旺时每年可获利 150 万元，需求低迷时只能获利 100 万元，而 5 万平方米仓库，在需求旺时每年可获利 75 万元，需求低迷时仍可获利 50 万元。存储公司要考虑 10 年内的投资效果。

- (1) 试用决策树法求解最优策略。
- (2) 假如把前三年需求旺的概率改为 0.6，则最优策略是什么？

# 参考文献

- 国家质量监督检验检疫总局《物流术语》,北京,中国标准出版社
- 王之泰《现代物流学》,北京,中国物资出版社
- 刘志学《现代物流手册》,北京,中国物资出版社
- 孙焰《现代物流管理技术——建模理论及算法设计》,上海,同济大学出版社
- 彭志忠《物流管理学》,山东,山东大学出版社
- 张连富《物流学》,北京,人民交通出版社
- 王晓东、胡瑞娟《现代物流管理》,北京,对外经济贸易大学出版社
- 王槐林、刘明菲《物流管理学》,武汉,武汉大学出版社
- 美]唐纳德·鲍尔索克斯《物流管理:供应链过程的一体化》,林国龙译,北京,机械工业出版社
- 马士华、林勇《供应链管理》,北京,科学出版社
- 宋华、胡左浩《现代物流与供应链管理》,北京,经济科学出版社
- 王国华《供应链管理》,北京,国防工业出版社
- 美]唐纳德·鲍尔索克斯等《供应链物流管理》,李习文、王增东译,北京,机械工业出版社
- 李严锋、张丽娟《现代物流管理》,大连,东北财经大学出版社
- 钱学森《论系统工程》,长沙,湖南科学技术出版社
- 汪应洛《系统工程》,北京,机械工业出版社
- 汪应洛《系统工程理论、方法与应用》,北京,高等教育出版社
- 吕永波、胡天军、雷黎《系统工程》,北京,北方交通大学出版社
- 顾培亮《系统分析与协调》,天津,天津大学出版社
- 谭跃进、陈英武、易进先《系统工程原理》,长沙,国防科技大学出版社
- 高志亮、李忠良《系统工程方法论》,西安,西北工业大学出版社
- 美]本杰明·布兰德著《物流工程与管理》,蒋长兵等译,北京,中国人民大学出版社

- 摇摇 阿明珂《物流系统论》,北京,中国审计出版社
- 圆 齐二石《物流工程》,天津,天津大学出版社
- 缘 王国华《现代物流工程》,北京,国防工业出版社
- 圆 周溪等《物流系统工程》,上海,上海财经大学出版社
- 圆 王长琼《物流系统工程》,北京,中国物资出版社
- 圆 王转、程国全、冯爱兰《物流系统工程》,北京,高等教育出版社
- 圆 肖艳玲《系统工程理论与方法》,北京,石油工业出版社
- 猿 美]乔治·哈泽里格《系统工程——基于信息的设计方法》,代振宇、王松泽译,北京,清华大学出版社
- 猿 丁立言、张铎《物流系统工程》,北京,清华大学出版社
- 猿 张可明、宋伯慧《物流系统分析》,北京,清华大学出版社、北京交通大学出版社
- 猿 宋伟刚《物流工程及其应用》,北京,机械工业出版社
- 猿 傅卫平、原大宁《现代物流系统工程与技术》,北京,机械工业出版社
- 猿 李念祖《物流运筹学基础》,北京,中国物资出版社
- 猿 吴祈宗《运筹学与最优化方法》,北京,机械工业出版社
- 猿 李军、徐玖平《运筹学——非线性系统优化》,北京,科学出版社
- 猿 梁工谦《运筹学——典型题解及自测试题》,西安,西北工业大学出版社
- 猿 王凌《智能优化算法及其应用》,北京,清华大学出版社
- 源 周明、孙树栋《遗传算法原理及应用》,北京,国防工业出版社
- 源 袁曾任《人工神经网络及其应用》,北京,清华大学出版社
- 源 杨建刚《人工神经网络实用教程》,杭州,浙江大学出版社
- 源 王树禾《图论》,北京,科学出版社
- 源 谢政《网络算法与复杂性分析》,长沙,国防科技大学出版社
- 源 张晓萍、李英《物流系统仿真原理与应用》,北京,中国物资出版社
- 源 李永先、胡祥培、熊英《物流系统仿真研究综述》,载《系统仿真学报》,苑。
- 源 宋伟峰《物流系统的仿真研究》,载《中国储运》。
- 源 肖田元等《系统仿真导论》,北京,清华大学出版社
- 源 秦明森、言木《物流决策分析技术》,北京,中国物资出版社
- 缘 美]詹姆斯·斯托克、道格拉斯·兰伯特《战略物流管理》,邵晓峰等译,北京,中国财经出版社
- 缘 美]佛莱哲利《物流战略咨询》,任建标译,北京,中国财政经济出版社

