

运输系统工程

YUN SHU XI TONG GONG CHENG

喻漢南 王家勝 卢 伟 编

大连海运学院出版社

运 输 系 统 工 程

喻漠南 王家骅 卢 韦 编

何显慈 主审



大连海运学院出版社

B 612504

内 容 提 要

本书是根据交通运输发展的实际需要,在编者多年从事教学和科研的基础上,将系统工程的思想、观点和方法应用于运输系统的管理,着重介绍运输系统工程的基本理论和实际应用。

全书共分十章,内容主要包括运输系统的分析、系统的综合平衡、系统的预测、系统的计划与控制、系统的决策与对策、系统模拟、交通运输优化以及运输生产管理系统等。

本书是交通运输管理工程专业的统编教材,也可供交通运输企、事业的管理和技术人员阅读参考。

运 输 系 统 工 程

喻漠南 王家骅 卢 韦 编

大连海运学院出版社出版(大连凌水桥)

大连海运学院出版社发行 大连海运学院出版社印刷厂印刷

责任编辑:陈景杰

责任校对:黎为

封面设计:王艳

开本:787×1092 1/16 印张:19 字数:468千字

1989年1月第1版

1989年1月印刷 印数:0001—2000

ISBN 7-5632-0048-7/U·1

定价:3.80元

前 言

本书是为了适应交通运输管理现代化的需要，经交通部管理专业协作组第二次会议决定，委托武汉水运工程学院、大连海运学院、重庆交通学院、长沙交通学院四所院校担任《系统工程》课程的教师共同编写的。

本书吸取了上述四个院校多年来《系统工程》课程的教学经验和科研成果，将系统工程的思想、观点、方法应用于水路运输、公路运输、综合运输及城市公共交通等方面，强调理论联系实际，并把重点放在应用上。

本书主要是为交通运输管理专业本科生及其他有关专业的学生编写的。它是在学生学完《管理数学》、《运筹学》等课程后学习的。由于课程内容浅显易懂，有一定的实用价值，因而，它也可以作为交通运输企、事业的管理工作者及有关技术人员的参考书。

从当前国内外已经出版的《系统工程》书籍来看，大部分都是以自动化系统为主，兼顾管理，重点放在系统优化、系统设计和系统的可靠性上。这对于从事管理工作的同志以及大专院校管理系、科的学生来说，在结合专业方面是显然不够的。因此，本书特以交通运输系统为主，对系统的总体及系统的主要组成部分进行研究。因而，它是符合专业要求的，也是比较适用的。

为了充分地利用现代计算技术，本书根据四所院校教学和科研的实践，另编有系统工程的程序软件，供读者参考、使用。

参加本书编写工作的有：武汉水运工程学院喻漠南同志（编写1，2，5，7章）；大连海运学院王家骅同志（编写3，4两章）；重庆交通学院卢韦同志（编写6，8两章），长沙交通学院马川生同志（编写9，10两章）。全书由喻漠南、王家骅统稿。本教材的主审是长沙交通学院的何显慈同志。武汉水运工程学院的吴立杨、黄勇平同志，大连海运学院的李宝森同志，参加了本书的定稿讨论工作。在本书的编写过程中，上海海运学院的宋德弛和刘巧生同志，给予了大力的帮助，特此表示谢意。

由于编者从事《系统工程》教学与科研的时间均不长，本身水平有限，加之把系统工程应用于交通运输领域，还是一个新的课题。因而，错漏之处，在所难免，希望读者不吝指正。

目 录

绪 论	(1)
第一章 系统分析	(5)
第一节 系统分析的内容	(5)
第二节 系统分析的方法	(7)
第三节 系统模型的建立	(18)
第二章 系统的综合平衡	(20)
第一节 综合平衡及其理论基础	(20)
第二节 系统的综合平衡技术	(21)
第三节 投入产出模型在企业管理中的应用	(33)
第三章 系统的计划与控制	(37)
第一节 预测技术	(37)
第二节 运输生产经营计划的制定与优化技术	(80)
第三节 系统的日程控制计划——网络计划的应用	(85)
第四章 系统的决策与对策	(94)
第一节 决策理论的产生和发展	(94)
第二节 管理决策程序	(95)
第三节 决策科学的研究内容	(96)
第四节 决策分析方法	(97)
第五节 综合决策方法	(114)
第六节 系统对策	(127)
第五章 系统模拟	(136)
第一节 报童问题与醉汉问题	(136)
第二节 蒙特卡罗法	(138)
第三节 模拟法在运输企业中的应用	(142)
第四节 如何考虑模拟事件的发展因素问题	(145)
第六章 运输生产管理系统	(153)
第一节 合理的货流组织	(153)
第二节 运输生产任务的合理分配	(170)

第三节	船、车载重量的合理利用	(199)
第四节	零担货车运行站点的合理排序	(207)
第五节	合理的运输生产布局	(210)
第七章	设备管理系统	(224)
第一节	设备管理系统的基本概念	(224)
第二节	设备投资	(224)
第三节	设备维修	(227)
第四节	设备更新	(235)
第五节	设备配置	(239)
第八章	库存管理系统	(248)
第一节	库存管理系统的基本概念	(248)
第二节	订货方式	(249)
第三节	经济批量	(250)
第九章	交通宏观决策研究的系统工程方法	(257)
第一节	交通宏观决策研究的过程系统	(257)
第二节	交通宏观决策系统的系统分析	(259)
第三节	物流O—D流生成,预测模型及数据调查方法	(265)
第四节	O—D流配模型	(270)
第五节	修正O—D流的方法	(277)
第十章	系统工程在城市公共交通系统中的应用	(280)
第一节	系统总体设计	(280)
第二节	系统调查与背景资料分析	(286)
第三节	模拟方法简介	(288)

绪 论

一、系统工程的概念

自从1957年美国学者顾德(H·H·Goode)和他的同事麦科尔(R·E·Machoi)写了一本名为《系统工程》的书籍以来,特别是美国阿波罗登月计划的成功,系统工程在世界上逐渐得到了广泛的应用。虽然,系统工程作为一门科学还十分年轻,它还处于发展阶段,学科领域还需进一步完善。但是,它在政治、军事、经济和科学技术等方面所起的作用却是十分惊人的。目前,人们对于系统工程这门学科已越来越感兴趣。那么,系统工程究竟是一门什么样的科学呢?为了说明这个问题,我们先从“系统”谈起,然后再说明什么是“工程”以及把“系统”和“工程”联系在一起又包含着什么意义。

1. 什么叫“系统”

系统是由许多元素的有机集合体。系统这个概念,早就存在于人们的思维中,它实际上是一个哲学概念。它把世界上的一切事物都看成是相互制约和相互联系的由许多元素组成的有机集合体。系统这种思想在中国古代的农事、医学、天文和工程方面都有具体的反映。例如,宋代科学家沈括在他所著的《梦溪笔谈》中介绍的“丁谓修宫”;战国时期秦国李冰父子在四川修建的都江堰以及中医的“配伍模型”等,都具有十分突出的系统特色。

系统,大体上可分为自然系统,人工系统和经过人工改造的自然系统三种。所谓自然系统,就是宇宙间自然形成的系统,如太阳系及人体的生理系统等;所谓人工系统,就是根据人们的意志所组成的系统。如国家的体制,企业的组成以及各种管理系统等;所谓经过人工改造的自然系统,就是为了给人类造福,对某些自然状况根据人们的意志进行了改造的系统。如水利资源的综合开发以及各种自然资源的有效利用等。系统工程的研究对象,主要是人工系统和经过人工改造的自然系统。因为这两种系统是人类可以控制并可要求它们去完成某一任务或达到某一目的。

系统的组成非常复杂,它有总系统(或称系统)和子系统之分。对于一个系统应该怎样去称呼它呢?这要依我们所研究的对象而定。如果我们所研究的对象是一个装卸公司,那么,这个装卸公司就是一个系统。它所属的码头、库场和科室就是子系统;但如我们所研究的对象是这个装卸公司的上级单位,那么这个装卸公司就变为这个上级单位——也就是它的总系统中的一个子系统了。因而,系统的区分是具有相对性的。

2. 什么叫“工程”

工程这个名词,18世纪出现在欧洲。它当时的含意是指制造兵器和服务于军事的工作。随后,工程这个词逐渐被机械和土建等具有技术性的实体工作所专用。例如,机械工程、水利工程、航空工程、筑港工程、土建工程等。其含意已变得非常狭窄了。根据《辞海》的注释,工程除指以上的具体项目外,它还具有这样的含意,即工程是“将自然科学的原理应用到工农业生产部门中去而形成的各学科的总称。这些学科是应用数学、物理学、化学等基础科学的原理,结合在生产实践中所积累的技术经验而发展出来的,其目的在于利用和改造自然来为人类服务”。基于这一注释,对于工程的含意,我们就可以从广义上对它有

所了解了。

3. 什么叫做系统工程

系统工程当然包括以上“系统”和“工程”两方面的内容。但是，它不是这两种内容的简单组合，而是赋予它以现代科学的含义。可以认为：系统工程是利用现代科学，特别是现代数学的理论和办法，通过由各种元素组合起来的有机集合体，去最佳的完成社会活动和社会生产实践中需要解决的某种特定任务。它的理论基础是运筹学，它的运算工具是电子计算机。

系统工程虽然也是一门工程学。但是，它与造船工程或道路工程等具体工程学科，在性质上有一定区别。国外有的学者曾指出：系统工程与其他工程学科不同之点在于它是跨越许多学科的科学。它填补了这些学科在横向联系方面的边界空白。系统工程的目的是研制系统和运用系统。而系统不仅涉及到工程学的领域，还涉及到社会、经济和政治等领域。为了充分发挥这些学科的综合作用，除了要加深其纵向技术外，还需利用一种横向优化技术把它们从横的方面最佳地组织起来，发挥其整体作用，而这种横向的优化技术，就是系统工程。

二、系统工程的特征

系统工程具有以下特征：

1. 集合性 系统必须是多个元素的有机集合体，非集合的散在的元素不能组成一个系统。作为系统中的各元素必须在物质上、概念上、工作上或逻辑关系上有着共同的属性。

2. 关联性 若干元素集合在一起，只能算是一个“群”。如要成为一个系统，集合中的各元素必须是相互联系，相互制约，为完成系统的总目标而有机地结合在一起。

3. 整体性 系统工程学的目的，是要通过对系统内部的各元素的巧妙的组合，使系统发挥其最大功能。因而，系统的整体效用，必然大大地高于各元素或各子系统的单独效用的总和。

4. 最优性 采用系统工程的方法所解决的问题必须是最优的。从经济意义上讲，就是要以最小的消耗去取得最大的效益。但考虑到世界各种因素的复杂性和人们的心理状态，有时候为使系统决策，得到顺利地推行，也可在最优性的基础上，根据“满意性”与“情意性”的要求，作适当调整。

5. 综合性 复杂的系统涉及面广，不但有技术因素，还有经济因素及社会因素。因此，无论是建立系统的数学模型或者是作出系统决策，均必须对与本系统有关的各方面的因素进行综合考虑。那种把系统工程单纯归结为优化计算的说法是不够全面的。

6. 适应性 世间的事物是不断地发展变化的，为了使系统能够在各种不同环境的条件下，发挥它的最佳作用，必须使系统的组成或系统决策，对环境具有极强的适应性。作为系统的决策人，应当经常研究环境变化的趋势，调整系统的内部结构，并针对这些变化采取有效对策。

三、系统工程发展简史

尽管系统的思想和方法早在古代就得到许多应用和不断发展。但系统学形成一门现代科学，还是20世纪40年代的事。

在第二次世界大战期间，作为系统工程的重要理论基础——运筹学和系统工程本身都得到了很大的发展。

第一个近代的系统工程是四十年代初期美国制定并执行的“曼哈顿工程”计划。这个

计划的负责人是美国加州理工大学的理论物理学教授奥本海默，他从1942年6月开始，组织了两万五千多名科技工作者，加上十二万名生产人员花了三年零两个月的时间，很快地把一个在理论上还处于萌芽阶段的研究变为现实。日本投降前夕，造出了三颗原子弹，一颗投在沙漠里进行了试验，其他两颗分别投在日本的广岛和长崎。在研究原子弹的过程中，奥本海默提出了许多有益的组织方法，给以后的计划协调技术打下了初步基础。

在第二次世界大战中，英美是同盟国，美国为了支援英国对德作战，必须由船运送很多物资到英国去。但船舶要经过大西洋，德国潜艇就等在那儿，见到美国的船舶就攻击。所以，第一年下来，美国损失很大，运输船舶几乎沉掉了三分之二。为了解决这个问题，美国曾经找了一批专家进行研究。开始提出的几个方案，都没有什么效果。船舶照样被击沉。后来专家们综合地考虑了这样几个问题：

1. 如何捕索德国潜艇的问题 根据德国潜艇的活动规律，利用概率的理论，算出什么时候潜艇大概在什么地方，然后派飞机去把它炸掉——这就是我们后来称之为“搜索论”的方法；

2. 投弹的最优深度的问题 过去是10英尺，根据专家们计算，25英尺对潜艇的杀伤效果最大。确定了这个数据后，炸沉潜艇的数目，很快增加了；

3. 护航的重点主要是救人 因培养人用的时间多，代价大，船沉了要想尽一切办法救人。

采取了这些措施后，很快地扭转了运输船舶挨炸的局面。但这时，美国的运输船舶也剩得不多了，他们的造船工业虽在日以继夜地工作，也很难满足需要。当时造船的速度很慢，一条船需要四个月才能下水。为了尽快补充新船，根据专家们的建议，他们学习了制造汽车的经验，采取专业化生产和统一装配的办法，在全国组织了若干条生产线，分工生产船舶的各部件，然后统一装配。这样一来，船台周期立即由四个月缩短为两个月，以后又缩短为一个月，再过一段时间，就变为一天一条船了。美国罗斯福总统给这种船起了个名字，叫“自由轮”。这是系统工程运用于造船的最典型的事例。

1950年前后，美国的兰德公司采用系统分析的方法对军事作战行动进行了系统的研究，为系统工程的广泛应用奠定了基础。

50年代后期，计算机科学与计算机技术的发展，对系统工程的发展起到巨大的推进作用。现在，电子计算机不仅是它的计算工具，而且还是它的实验设备。

1958年，美国海军运用系统工程的方法——“计划协调技术”（PERT），使北极星导弹核潜艇的建造比计划提前两年完成。

60年代，系统工程在科技领域，军事领域以及教育领域得到广泛发展。1965年兰开斯特大学首先成立了系统工程系。以后其它院校也陆续地设立了相应的专业 and 系。

70年代，阿波罗载人登月计划的成功，是应用系统工程的方法解决复杂问题而得到成功的最佳事例。该计划花了11年时间，耗资244亿美元，组织了两万多家企业（包括许多外国企业）、120所大学和科研机关，动员了42万人，使人类登月的梦想终于实现了。

1972年10月，苏、美、日、法、西德等17国在奥地利维也纳成立了国际应用系统工程研究所。当时该所的负责人是美国人，研究人员80余人，该所成立时的研究课题为：能源、产业系统、城市、小资源、医疗、环境及生态等六个方面。

在我国，中国科学院力学研究所于1956年成立了运筹学教研组，1960年这个研究组与数

学研究所运筹学研究组合并，组成运筹学研究室，由数学研究所领导。60年代初期华罗庚教授推广“优选法”和“统筹法”，取得了显著成就。1979年10月成立了中国系统工程学会，1980年2月正式建立了中国科学院系统科学研究所。随后，一些大专院校陆续设立了系统工程教研室或研究室，有的院校并已招收系统工程专业本科生和研究生。而在国防、农业和企业管理方面，系统工程的方法也逐步得到应用。并已取得可喜的成果。

四、运输系统工程的研究对象

系统工程是研究社会的各种资源和工程技术的合理使用的科学。由于研究的领域不同，它可分为：工程系统工程、军事系统工程、社会系统工程和经济系统工程等。运输系统工程主要是从微观经济的需要出发，利用系统工程的思想、观点和方法研究运输企业的经营管理问题，以及与此有关的某些宏观问题。

运输系统工程的研究对象，是运输企业这个系统在整个运输过程中需要解决的各项关键性问题。根据系统论的要求，在进行系统工程的第一步，必须对系统有一个全面而科学的认识，然后才能根据系统的现有条件、系统内外部环境的变化以及系统在运行过程中所发生的问题，进行计划、组织与控制，并在此基础上深入研究各个主要子系统的最优决策。因而，具体地说，运输系统工程的研究对象包括：系统分析；系统的综合平衡；系统的计划与控制；系统的决策与对策；系统模拟；运输生产管理系统；设备管理系统；存量管理系统和交通运输宏观规划的决策支持系统以及城市公共交通的系统工程方法等。

运输系统工程主要是立足于运输企业，利用系统工程的思想、观点、方法来研究企业在其运转过程中所发生的一系列重要问题。它的目的是借助于现代管理方法，改善运输企业的经营管理和提高运输企业的经济效益。因此，它是一门有针对性的实用科学。

从学科属性看，运输系统工程是一门专业基础学科，它的理论基础是运筹学，它的运算工具是电子计算机。但是，对于某些不太复杂的问题，即使没有电子计算机也可进行。根据国外的经验，在方程不超过100个，结点不超过200个的网络模型中，运用一般的计算器也可解决问题。

关于系统工程与运筹学的关系，虽然有着各种不同的说法，有的人甚至认为系统工程就是运筹学。我们认为，系统工程是运筹学发展到一定阶段的必然产物。运筹学在第二次世界大战期间虽然起过很重要的作用。但是，它的着眼点一般只限于一件事，一个问题，而不是从系统的观点或总体的观点去综合地考虑问题。运筹学发展到现在已经成为现代数学的一个分支，而系统工程则变为一门实用科学。系统工程起源于运筹学，运筹学的继续发展，给系统工程提供了深厚的理论基础。这正象以数学为基础的其他技术科学一样，它们起源于数学，但在实用方面却超越了数学。

运输系统工程不能代替专业学科。它所解决的主要问题是企业经营管理的系统方法论问题，它立足于企业，运用系统工程的思想、观点和方法为专业学科打基础，不涉及对专业问题的细微分析。而专业学科则不同，它必须把有关专业的主要问题讲深讲透。当然，在讲授专业学科时，也要运用系统的观点和系统工程的方法，但这时，它只是根据专业的需要，把这些观点和方法引向更深入、更实际。它应结合专业的特征建模，它应把在运输系统工程中所介绍的一般方法，按专业的特征加以改造或具体化，而不是一般方法的重复阐述。

第一章 系 统 分 析

第一节 系统分析的内容

系统分析就是对系统内部的基本问题和系统外部的影响，用系统的思想、观点和方法进行分析，在确定或不确定的条件下，通过分析对比，按照目标要求寻找企业内部的潜力或选出最优方案。系统分析是一种辅助决策工具，通过对情况的全面分析与评价和对可能采取的方案进行选优，为决策提供可靠的依据。

系统分析可分为对现有系统的分析和对新开发系统的分析两方面的内容。

一、对现有系统的分析

对现有系统的分析主要是对现存系统作进一步认识。作为企业管理人员，为使本系统能够更好地适应国民经济发展的需要，必须对系统内部和系统外部的各有关方面进行分析。只有在充分了解各方面的现状和趋势以后，才能作出有效的决策。

对系统外部的分析主要是：根据国内外的政治经济形势，研究本系统在国民经济中的现时地位；当前国家对本系统的政策以及与本系统经营活动有关的各方面的现状，如运输（或产品）市场和原材料市场的需求情况，同行业的生产、技术水平、协作单位的生产情况等。

对系统内部的分析，主要包括下列内容：

1. 计划安排

分析系统内的各种计划是否符合国家指令，是否从内涵挖潜出发，是否经过优化，生产各环节经过计划平衡后是否能均衡发展等。

2. 生产组织

分析生产布局是否合理，生产流程是否最优，生产质量管理体系是否健全，生产任务的安排是否发挥了人和机械的最大潜力等。

3. 设备利用

分析现有设备的水平，各项设备的利用率，设备的维修制度是否健全，设备发生故障的趋向以及有否因某种设备不足而影响整个生产进度的情况等。

4. 原材料供应

分析原材料的平均使用水平、保管制度、损耗率、存量定额、短缺情况以及每年支出的采购费与保管费等。

5. 劳动力状况

分析各类劳动力的技术熟练程度、劳动力的需求情况以及劳动者的思想状况等。

6. 成本核算及财务收支

分析企业的资产负债情况，各级领导人对财务收支的关心程度，成本核算制度是否健全，非生产性支出的比重和内容，各类产品的成本和利润，以及降低成本的途径等。

二、对新开发系统的分析

新开发系统的分析主要包括：新系统的投资方向，工程规模，厂址（或港址）选择，生产环节的布局，工程系统设计，工艺系统方案，设备配置以及生产过程的组织、设计等。

在进行新开发系统的分析时，必然注意以下原则。

（一）外部条件与内部条件相结合

影响系统正常运行的不仅有内部条件，还有外部条件。例如，企业的经营管理系统不仅受企业内部的各种因素（如生产类型、生产环节、物流和信息流）的制约，而且它还受外部环境（如社会经济动向、市场状况等）的影响。所以，在进行新开发系统的分析时，应综合分析系统内部各种有关条件，实现总体方案的最优化。

（二）当前利益与长远利益相结合

选择最优方案时，不但要从当前的利益出发，而且还要考虑到将来的利益。如果采用的方案对当前和将来都有利，这当然是很理想的。但往往出现的情况是对当前不利对长远有利，或者是对当前有利对长远不利。遇到这样的情况，就要利用系统分析的方法，把当前利益与长远利益结合起来考虑。

（三）局部效益与整体效益相结合

系统是由许多子系统组成的。如果各子系统的经济效益都很好，是否整个系统的经济效益也很好呢？事实并非完全如此。在大多数情况下，有些子系统的经济效益很好，但从全局看，并不好。反之，如果某一子系统的经济效益不算很好，但从全局看是好的，则这种方案是可取的。系统工程的目的就是要求整体效益最优，局部效益服从整体效益。

（四）定量分析与定性分析相结合

定量分析是指用数量指标进行分析。定性分析是指根据事物的特性所作的分析。系统分析不仅要采用定量分析，而且也要采用定性分析。只有通过“定性——定量——定性”的分析过程，才能全面掌握系统各方面的性质，建立起探讨定量关系的数学模型。定性和定量二者相辅相成，互相补充。

新开发系统的分析结果，可归入到“系统开发的可行性研究报告”中。

对新开发系统的分析，可参照以下各点进行：

1. 新开发系统的任务；
2. 新开发系统的背景和历史；
3. 市场的需求情况和新开发系统的生产能力；
4. 原材料和投入；
5. 新系统的位置和周围的经济地理条件；
6. 新系统的设计及可靠性分析；
7. 新系统的构成和管理费用；
8. 人力的需求情况与培训计划；
9. 新系统建设的时间安排；
10. 对新系统的经济评价（包括本身的经济效益与社会经济效益）。

第二节 系统分析的方法

系统分析的方法很多,概括起来不外乎统计分析法、结构分析法、优化分析法和综合评价法等。

统计分析法主要是应用统计学中的相关分析法、分散分析法及主成份分析法等,对系统中各有关元素的相互关系、分散比及主要成份进行分析,弄清各元素在系统中的地位、特征。由于这些方法在有关的数理统计学教科书中,均可找到,为了节省篇幅,本书不再赘述。

优化分析法主要是运用运筹学中的各种优化方法,对系统中的现存问题进行分析、对比,找出其中的改进点,用以改善现有系统的各种生产经营活动,从而达到不断提高经济效益的目的。其具体方法,因在运筹学中已有专门论述,本书也不作特别介绍。

本书着重介绍结构分析法和综合评价法中的部分内容,供读者在进行系统分析时参考。

一、结构分析法

结构分析法主要是利用集合论中的关系矩阵来分析、研究系统的总体结构。它可以通过关系矩阵的演算,将定性分析中不易确定的潜在关系寻找出来。结构分析法可用于分析能源问题、城市问题、环境问题以及某项建设或某一经济政策所产生的社会经济影响问题。因此,它在系统分析中,占有很重要的地位。

结构分析法的基本理论是这样的:

设某系统由 n 个元素组成,即集合 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 。且集合 S 由二值关系 R 予以定义。所谓二值关系,就是在相关二元素间是否存在有因果关系、从属关系、先行后续关系和目的手段关系等。如果有,其关系等于 1; 如果没有,其关系等于 0。现设行元素为 s_i , 列元素为 s_j , 则:

二值间有关系时用 $s_i R s_j = 1$ 表示 (1-1)

二值间无关系时用 $s_i R s_j = 0$ 表示 (1-2)

在式 (1-1) 和式 (1-2) 中, R 的前项为行的元素, R 的后项为列的元素。

如果元素的个数为 4, 则 4 个元素的 s_i 和 s_j 的关系, 可用下列邻接矩阵 M 表示

$$M = \begin{matrix} & \begin{matrix} s_1 & s_2 & s_3 & s_4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (1-3)$$

有了这个 M 矩阵, 我们即可据此分析 s_i 和 s_j 之间的关系是有向性的还是无向性的。例如, $s_1 R s_3 = 0$, $s_3 R s_1 = 1$, 即 $s_1 \rightarrow s_3$ 是无向性的, $s_3 \rightarrow s_1$, 是有向性的。如果以从属关系来推断, 则 s_1 不从属于 s_3 , 而 s_3 却从属于 s_1 。但在 s_1 和 s_2 的关系上, 式 (1-3) 表示的是 $s_1 R s_2 = 1$, $s_2 R s_1 = 1$, 即 s_1 和 s_2 之间是相互从属的。由此, 我们可以联想到二值关系的传递律, 即

$$s_i R s_j = 1 \text{ 且 } s_j R s_k = 1 \implies s_i R s_k = 1 \quad (1-4)$$

这说明 s_i 从属于 s_j , 且 s_j 从属于 s_k , 所以 s_i 也应从属于 s_k 。现讨论式 (1-3) 中的

s_1, s_2 和 s_4 三元素之间的关系: $s_1 R s_2 = 1, s_2 R s_4 = 1$, 按二值关系的传递律, s_1 和 s_4 之间的关系也应等于 1, 但实际上却等于 0。这说明矩阵 M 中所表示的只是各个元素之间的直接关系, 而未能表示其间接关系。为了使矩阵 M 既能反映各元素之间的直接关系, 又能反映其间接关系, 我们设对角线上的 $s_i R s_i$ 全部等于 1, 即用 MUI (M 为邻接矩阵, I 为单位矩阵) 使成 M' 矩阵, 求 M' 矩阵的 $n+1$ 次方, 即可得出能反映总体结构关系的可达矩阵 T

$$M'^{n+1} = T \quad (1-5)$$

现以式 (1-3) 为例, 具体演算如下:

$$(MUI) \text{ 即 } M' = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} U \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$M'^2 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1^* \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1^* & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

注: 打“*”号的是原 M' 矩阵没有的, 它是反映元素之间的间接关系的。

$$M'^3 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1^* \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1^* & 1 & 1^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$M'^4 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1^* \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1^* & 1 & 1^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = M'^3$$

由于 M'^4 的计算结果与 M'^3 的计算结果相同, 说明再计算下去已无意义, 因此 M'^3 就是可以反映总体结构关系的可达矩阵 T 。

求出了 T 矩阵以后, 下一步的工作, 就是调整元素的顺序, 以便查明各元素的层次及某些元素是否存在循环。

为了查明各元素的层次及某些元素是否存在循环, 需将 T 矩阵组成两个集合。一是 $R(s_i)$ 集合, 包含由 (s_i) 可能到达的一切有关系的元素的集合; 一是 $A(s_i)$ 集合, 包含一切有关系的元素可以到达 s_i 的集合。如果以从属关系来说, $R(s_i)$ 就是 s_i 所从属的一切元素的集合。 $A(s_i)$ 就是一切从属于 s_i 的元素的集合。 $R(s_i)$ 为 (s_i) 的母集合, $A(s_i)$ 为 s_i 的子集合。

现设 $R(s_i) \cap A(s_i)$ 为 $R(s_i)$ 和 $A(s_i)$ 的交集, 则系统的最上位集合应是

$$R(s_i) \cap A(s_i) = R(s_i) \quad (1-6)$$

例如, 在上例中, $R(s_i)$, $A(s_i)$ 及 $R(s_i) \cap A(s_i)$ 的集合如表 1-1 所示。

表 1-1 中, $R(s_i) \cap A(s_i) = R(s_i)$ 的只有 s_i 为 4 的情况, 即元素 4 是本系统的最上位的元素集合。去掉 4 进行同样计算, 得表 1-2。在表 1-2 中, $R(s_i) \cap A(s_i) = R(s_i)$ 的有 s_i 为 1 和 2 的情况, 选此 1 和 2 为本系统的第二位的元素集合, 剩下的只有元素 3

表 1—1 $R(s_i)$, $A(s_i)$ 及 $R(s_i)A(s_i)$ 的集合

s_i	$R(s_i)$	$A(s_i)$	$R(s_i)A(s_i)$
1	1, 2, 4	1, 2, 3	1, 2
2	1, 2, 4	1, 2, 3	1, 2
3	1, 2, 3, 4	3	3
4	4	1, 2, 3, 4	4

表 1—2 计算结果

s_i	$R(s_i)$	$A(s_i)$	$R(s_i)A(s_i)$
1	1, 2	1, 2, 3	1, 2
2	1, 2	1, 2, 3	1, 2
3	1, 2, 3	3	3

了。因此, 元素 3 成为本系统的最下位的元素集合。

根据以上寻找的结果, 原来的集合 $S = \{s_1, s_2, s_3, s_4\}$ 被分割为 $S = \{s_4, s_2, s_1, s_3\}$, 其可达矩阵 T 的各元素的新的排列次序, 将如式 (1—7) 的第二个矩阵:

$$T = \begin{matrix} & \begin{matrix} s_1 & s_2 & s_3 & s_4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} = \begin{matrix} & \begin{matrix} s_4 & s_2 & s_1 & s_3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} s_4 \\ s_2 \\ s_1 \\ s_3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1-7)$$

式 (1—7) 第二个矩阵中用虚线圈起来的部分, 是一个子系统, 它的元素均为 1, 这证明有循环存在。

如果令 $c_1 = \{s_4\}$, $c_2 = \{s_2, s_1\}$, $c_3 = \{s_3\}$, 则可达矩阵 T 还可改写为

$$T = \begin{matrix} & \begin{matrix} c_1 & c_2 & c_3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1-8)$$

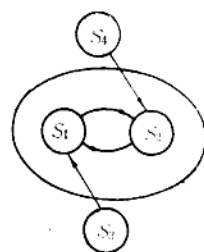


图 1—1 分层有向图

即 T 矩阵对角线以上的元素均为 0。

将以上结果绘成分层有向图, 如图 1—1 所示。

下面举一个稍微复杂的例子进行演算。

某经济区, 根据经济发展的需要, 拟于某地建立一个新的港口。在提出这个设想时, 为了分析港口建成后对该经济区的社会经济影响, 特委托某科研所对此问题作初步研究。

该科研所在接到此任务后, 立即对与该港建设有关的直接的或间接的经济项目进行了分析, 认为式 (1—9) 中所列出的 2~5 项是与该港的建设直接有关的, 其他则是间接有关的。它们的具体结构是:

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
某港建设	(1)	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
劳动力需要	(2)	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
关联产业的发展	(3)	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
税收增加	(4)	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
公害及灾害发生的可能性	(5)	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
公害及灾害对策	(6)	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
就业机会的扩大	(7)	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
所得增加	(8)	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
人口外流的制止	(9)	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
地区购置力的增加	(10)	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
繁荣景象的发生	(11)	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
公共投资的增大	(12)	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
生活及产业基础的整备	(13)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
商业及其他产业活动的活跃化	(14)	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1

(1-9)

从(1-9)式可以看出,新港口的建设肯定会引起劳动力的需要、其他关联产业的发展、税收的增加和公害及可能发生的灾害等。因而,第一列向量中的1~5分量的影响值均为1。而就业机会的扩大,所得的增加、人口外流的制止以及地区购置力的增加等,则是间接产生的。例如,就业机会的扩大与劳动力的需要及关联产业的发展有关系,所得的增加与就业机会的扩大有关系等。

经过以上分析,确认了各元素之间的关系后,我们即可根据式(1-5)求可达矩阵 T 。本例的可达矩阵如式(1-10)所示:

$$T = \begin{matrix} & \begin{matrix} (1) & (2) & (3) & (4) & (5) & (6) & (7) & (8) & (9) & (10) & (11) & (12) & (13) & (14) \end{matrix} \\ \begin{matrix} (1) \\ (2) \\ (3) \\ (4) \\ (5) \\ (6) \\ (7) \\ (8) \\ (9) \\ (10) \\ (11) \\ (12) \\ (13) \\ (14) \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (1-10)$$

求出了可达矩阵以后, 下一步的工作就是按前述式 (1—6), 找出最上位的元素集合, 第二位的元素集合, 第三位的元素集合, …以至最下位的元素集合, 本例初始的 $R(s_i)$, $A(s_i)$ 及 $R(s_i)A(s_i)$ 如表 1—3。

表 1—3 计算结果

s_i	$R(s_i)$	$A(s_i)$	$R(s_i)A(s_i)$
1	1	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 4, 12, 13, 14	1
2	1, 2	2, 7, 8, 9, 10, 11, 4, 12, 13, 14	2
3	1, 3	3, 7, 8, 9, 10, 11, 4, 12, 13, 14	3
4	1, 2, 3, 7, 8, 9, 10, 4, 12, 13, 14	4, 12, 13, 14	4, 12, 13, 14
5	1, 5	5, 6	5
6	1, 5, 6	6	6
7	1, 2, 3, 7	7, 8, 9, 10, 11, 4, 12, 13, 14	7
8	1, 2, 3, 7, 8	8, 10, 4, 12, 13, 14	8
9	1, 2, 3, 7, 9	9, 10, 11, 4, 12, 13, 14	9
10	1, 2, 3, 7, 8, 9, 10	10, 4, 12, 13, 14	10
11	1, 2, 3, 7, 9, 11	11	11
12	1, 2, 3, 7, 8, 9, 10, 4, 12, 13, 14	4, 12, 13, 14	4, 12, 13, 14
13	1, 2, 3, 7, 8, 9, 10, 4, 12, 13, 14	4, 12, 13, 14	4, 12, 13, 14
14	1, 2, 3, 7, 8, 9, 10, 4, 12, 13, 14	4, 12, 13, 14	4, 12, 13, 14

从表 1—3 中可以看出, 最上位的元素集合是 1, 然后去掉最上位的元素 1, 继续寻找 $R(s_i)A(s_i) = R(s_i)$ 的元素, 得出本矩阵的排列顺序为

1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 4, 12, 13, 14

按此顺序排列的矩阵见式 (1—11):

$$T = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 4 & 12 & 13 & 14 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 4 \\ 12 \\ 13 \\ 14 \end{matrix} & \left(\begin{array}{cccccccccccccccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{array} \right) \end{matrix} \quad (1-11)$$