



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



iCourse · 教材

国家精品资源共享课教材

系统工程 简明教程

(第四版)

汪应洛 主编

高等教育出版社



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



iCourse·教材

国家精品资源共享课教材

系统工程 简明教程

(第四版)

汪应洛 主编

高等教育出版社·北京

内容简介

本书是“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材,也是国家精品资源共享课教材。本书从时代背景及相关特征入手,重点介绍现代工程的系统观和系统工程的概念及内容,并结合工程及其管理实践中的问题,介绍系统分析原理、系统模型化方法、系统评价方法、决策分析方法等系统工程基本分析方法。本书的第三、四、五、六、七、八章分别针对有代表性的社会系统、工程(项目)系统、物流系统、人一机—环境系统、信息系统、质量管理体系,介绍系统工程原理、方法的应用及有关进展。

本书可作为管理学、工学等相关学科专业学位研究生和本科生的教学用书,也可作为各级各类管理人员、专业人员的培训教材和自学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

系统工程简明教程 / 汪应洛主编. -- 4版. -- 北京:
高等教育出版社, 2017.3

iCourse·教材

ISBN 978-7-04-046726-0

I. ①系… II. ①汪… III. ①系统工程—高等学校—
教材 IV. ①N945

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第275738号

Xitong Gongcheng Jianming Jiaocheng

策划编辑	杨世杰	责任编辑	杨世杰	封面设计	李卫青	版式设计	李卫青
插图绘制	杜晓丹	责任校对	李大鹏	责任印制	朱学忠		

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印 刷 北京鑫海金澳胶印有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 26.75
字 数 440千字
购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>
<http://www.hepmall.com>
<http://www.hepmall.cn>
版 次 1992年5月第1版
2017年3月第4版
印 次 2017年3月第1次印刷
定 价 42.80元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 46726-00

本书是《系统工程简明教程(第三版)》(2009年)的修订版。

系统工程学科经过半个多世纪的发展,已经逐渐被人们所认识和了解,研究和应用水平得到较大提高,应用和开发领域不断拓展。但作为一门开放式的交叉学科和集成技术,该学科具有很强的环境依赖性和实践性。国内外社会、经济、科技、教育的变革与发展,我国推进中国特色社会主义各项事业全面发展,以及提高自主创新能力和科学管理水平等使命与实践,呼唤着系统工程理论、方法及其应用的创新与发展,也呼唤着系统思想与系统化方法的进一步普及。

现代社会已逐步进入系统化时代,系统思维、工程实践及管理素养显得越来越重要。经过多年的教学实践,随着高校人才培养模式及教学内容和方式的改革,我们感到掌握系统思想、系统化方法及其应用,对许多相关专业的学生都是必要的。这也是编写本书最重要的背景及目的之一。

本书共分八章。

第一章从时代背景及相关特征入手,重点介绍现代工程的系统观和系统工程的概念及内容,作为全书的绪论;第二章结合工程及其管理实践中的问题,介绍系统分析原理、系统模型化及系统动力学方法、系统评价方法、决策分析方法等系统工程基本分析方法。以上两章构成系统工程的基础、原理及基本方法部分。

第三、四、五、六、七、八章分别针对有代表性的社会系统、工程(项目)系统、物流系统、人一机—环境系统、信息系统、质量管理体系,介绍系统工程原理、方法的应用及有关进展。在社会系统工程中,结合社会系统特质及新的发展理念等,介绍战略研究、政策分析及应急管理系统相关内容;在工程系统工程中,结合工程项目管理实际,介绍系统规划与设计原理、运行管理优化方法及系统评价的应用;在物流系统工程中,重点结合绿色物流(绿色供应链、再制造中的物流、城市绿色交通物流)管理这一新的问题,介绍系统工程中的分析、优化、仿真等原理和方法;在人—机—环境系统工程中,着重介绍工作系统规划设计、分析评价的原理与方法;在信息系统工程中,着重介绍信息系统和信息系统工程的基本问题和新一代“智慧”信息系统工程;在质量管理体系中,着重介绍新的质量观和质量管理的系统化方法。以上六章构成基于现实复杂系统问题的系统工程原理、方法应用部分,读者可根据专业背景及实际需要选读、选用。

参加本书编写的有:西安交通大学管理学院汪应洛院士(主编)、袁治平教授、吴锋教授、苏秦教授、刘树林教授、王能民教授、姜锦虎教授、刘跃文副教授,西安交通大学公共政策与管理学院郭雪松教授、武警后勤学院胡信布教授、西北大学公共管理学院许振宇博士、西安理工大学经济与管理学院侯琳娜讲师等也参加了部分编写工作。

本书主要作为高等学校管理学、工学等相关学科专业学位研究生和本科生的教学用书,也可作为各级各类管理人员、专业人员的培训教材和自学参考书。

限于编者的水平,加之参编人员和涉及内容较多,又力图在修订中反映一些新的发展及内容,因而不妥、欠成熟和错漏之处在所难免,需要修正和完善的地方一定不少。恳请相关专家及广大读者批评指正,并积极提出建设性意见。

西安交通大学 汪应洛

2016年9月

1	第一章 绪论	
1	第一节 时代背景及相关特征	
1	一、全球化	
1	二、动态市场带来挑战和机会	
1	三、社会加速信息化	
2	四、技术与管理紧密结合、深度融合	
2	五、创新已成为时代的最强音	
2	六、科学发展引起普遍关注	
2	七、企业发展面临系统问题	
3	八、社会（经济）组织活动工程化、项目化	
3	第二节 现代工程的系统观	
3	一、工程系统与系统论	
7	二、工程的系统性	
11	三、工程的新系统观	
14	第三节 系统工程的概念及内容	
14	一、系统工程的概念	
15	二、系统的对象	
19	三、系统工程的内容	
28	主要参考文献	
29	第二章 系统工程基本分析方法	
29	第一节 系统工程方法论引例	
29	一、引例 1：柔性制造系统规划问题	
31	二、引例 2：S 机电设备制造公司运营效率诊断	
33	第二节 系统分析原理	
35	一、阐明问题	
37	二、谋划备选方案	
42	三、建模与预计后果	
43	四、预测未来环境	
43	五、评比备选方案	
43	六、系统工程报告	
44	第三节 系统模型化及系统动力学	

44	一、系统结构模型化技术
53	二、状态空间模型
61	三、系统动力学方法
73	第四节 系统评价方法
73	一、系统评价要素
76	二、系统评价工具——关联矩阵
77	三、逐对比较法
80	四、古林法
83	五、层次分析(AHP)法
90	六、模糊综合评价法
94	第五节 决策分析方法
94	一、决策的概念
94	二、决策问题的基本模型和常见类型
95	三、几类基本决策问题的分析
102	四、冲突分析
112	第六节 分析实例
112	一、某特区S机场选址
118	二、油藏管理系统工程分析方法
124	主要参考文献

125 第三章 社会系统工程

125 第一节 概述

- 125 一、概念
- 129 二、内容
- 131 三、方法

137 第二节 社会发展战略及“四个全面”战略布局

- 137 一、社会发展战略
- 139 二、社会经济发展目标
- 141 三、“四个全面”战略布局

144 第三节 基于新发展理念的政策分析

- 144 一、五大发展理念
- 145 二、创新管理的系统化方法
- 153 三、系统动力学在可持续发展政策分析中的应用

156 第四节 应急管理系统工程

- 156 一、概述

159	二、应急管理系统构成要素	294
164	三、应急管理系统化方法	295
172	四、应用实例	296
179	主要参考文献	298

181 第四章 工程系统工程

181	第一节 概述	298
181	一、工程系统工程的内涵	298
183	二、工程系统的寿命周期	299
186	第二节 工程系统规划与设计	
186	一、工程系统规划	
188	二、工程系统设计	300
191	第三节 工程系统运行管理	300
191	一、工程系统运行管理概述	300
200	二、工程系统的进度管理	302
207	三、工程系统的成本管理	306
214	第四节 工程系统的系统评价	306
214	一、工程系统评价概述	306
215	二、工程系统的经济评价	308
219	三、工程系统的环境影响评价	308
222	四、工程系统的社会影响评价	309
224	第五节 工程系统工程实例——南水北调工程	309
224	一、工程概况	310
225	二、工程论证和规划	310
225	三、管理体制和组织机构	311
226	四、工程进度管理	
228	五、工程费用管理	
229	六、工程质量管理	312
229	七、工程评价	312
233	主要参考文献	313

235 第五章 物流系统工程

235	第一节 物流与物流系统	313
235	一、物流	313

246	二、物流系统	
253	第二节 物流系统工程的概念与内容	
253	一、物流系统工程概念	
253	二、物流系统工程的工作方法	
254	三、物流系统工程的工作内容	
256	第三节 物流系统工程应用举例	
256	一、绿色供应链管理	
265	二、考虑库存能力约束的再制造批量决策	
276	三、绿色物流与西部城市交通发展战略	
282	主要参考文献	
285	第六章 人一机—环境系统工程	
285	第一节 概述	
285	一、研究范畴	
286	二、地位及主要特征	
288	三、应用前景	
290	第二节 人一机—环境系统规划设计	
290	一、系统规划设计思路和流程	
294	二、系统功能和目标规划	
298	三、人一机—环境系统设计	
306	第三节 人一机—环境系统分析评价方法	
306	一、定性方法	
313	二、定量方法	
319	三、定性定量相结合的评价方法	
326	主要参考文献	
327	第七章 信息系统工程	
328	第一节 信息系统	
328	一、信息的概念与特性	
329	二、信息系统的概念	
330	三、信息系统的分类	
335	四、信息技术 / 系统的发展趋势	
338	第二节 信息系统工程	
338	一、信息系统工程概念	

339	二、信息系统工程研究方法
340	三、信息技术基础设施
340	四、信息系统工程阶段
350	第三节 新一代“智慧”的信息系统工程
351	一、企业信息系统工程的发展
355	二、业务处理信息系统发展的关键技术
360	三、决策支持类信息系统发展的关键技术
366	四、“智慧”的信息系统工程发展路线
368	主要参考文献

369 第八章 质量管理系统工程

369	第一节 质量管理系统化背景
369	一、现代质量观
371	二、制造和服务系统的质量
378	三、现代质量管理面临的环境
382	第二节 质量管理的系统化方法
382	一、质量管理原理
385	二、ISO 9000 质量管理体系
390	三、卓越质量模型
392	四、6 σ 管理法
401	第三节 应用实例
401	一、企业 QEOHS 整合型管理体系建立与实施
407	二、TQM 与企业绩效的系统动力学分析
412	主要参考文献

分为三种类型：简要报告、主体报告与技术报告。

简要报告是供决策者使用的报告。由于决策者通常比较忙，并且这些人多数并非专业人员，所以，提交给这些人的报告要尽可能简略，通常使阅读者能在 10~30 分钟内了解报告主要内容、主要观点或结论，同时，要尽量避免用生僻的学术语言和难懂的数学模型等。甚至在排版时都要考虑到方便决策者阅读，使用大号的字体。否则，投入大量精力所获得的研究结果可能被束之高阁，甚至被扔进纸篓。

主体报告是供项目管理人员或委托人阅读的报告。该报告需要用非技术语言进行整体描述，报告要尽可能详尽，介绍问题的分析过程以及主要结果获得的依据。需要注意的是这些人对问题有足够的认识，但他们通常并非技术专家，所以需要避免在主体报告中涉及很多的数学模型。

技术报告通常是给专家看的报告。技术报告需要对问题的来源、相关研究的进展、问题解决的逻辑技术路线、推导过程等细节用技术语言表达出来，要让专家根据数学模型能够有效判断所获得结论的合理性与正确性，必要时需提供程序清单，使用说明以及其他相关附录资料供专家阅读、评价。博士、硕士学位论文通常属于这类报告。

另外，上述三种报告通常还有一个合理的写作顺序，即先写技术报告，再写主体报告，最后写简要报告。

第三节 系统模型化及系统动力学

一、系统结构模型化技术

（一）系统结构模型化基础

1. 结构分析的概念和意义

任何系统都是由两个以上有机联系、相互作用的要素组成的，是具有特定功能与结构的整体。包括现代企业在内的大规模复杂系统具有要素及其层次众多、结构复杂和社会性突出等特点。在研究和解决这类系统问题时，往往要通过建立系统的结构模型（该过程可称之为结构模型化），进行系统的结构分析，以求得对问题全面和本质的认识。

结构模型化过程注重表现系统要素之间相互作用的性质，是系统认识、

准确把握复杂问题并对问题建立数学模型、进行定量分析的基础。阶层性是大规模复杂系统的基本特性,在结构模型化过程中,对递阶结构的研究是一项重要工作。

结构分析是一个实现系统结构模型化并加以解释的过程。其具体内容包括:对系统目的—功能的认识;系统构成要素的选取;对要素间的联系及其层次关系的分析;系统整体结构的确定及其解释。系统结构模型化是结构分析的基本内容。

结构分析是系统分析的重要内容,是系统优化分析、设计与管理的基础。尤其是在分析与解决社会经济系统问题时,对系统结构的正确认识与描述更具有数学模型和定量分析所无法替代的作用。

2. 系统结构的基本表达方式

系统的要素及其关系形成系统的特定结构。在通常情况下,可采用集合、有向图和矩阵等三种相互对应的方式来表达系统的某种结构。

(1) 系统结构的集合表达。设系统由 n ($n \geq 2$) 个要素 ($S_1, S_2, \dots, S_n$) 所组成,其集合为 S , 则有

$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$$

系统的诸多要素有机地联系在一起,并且一般都是以两个要素之间的二元关系为基础的。所谓二元关系,是根据系统的性质和研究的目的所约定的一种需要讨论的、存在于系统中的两个要素 (S_i, S_j) 之间的关系 R_{ij} (简记为 R)。通常有影响关系、因果关系、包含关系、隶属关系以及各种可以比较的关系(如大小、先后、轻重、优劣等)。二元关系是结构分析中所要讨论的系统构成要素间的基本关系,一般有以下三种情形:① S_i 与 S_j 间有某种二元关系 R , 即 $S_i R S_j$; ② S_i 与 S_j 间无某种二元关系 R , 即 $S_i \bar{R} S_j$; ③ S_i 与 S_j 间的某种二元关系 R 不明, 即 $S_i \tilde{R} S_j$ 。

在通常情况下,二元关系具有传递性,即若 $S_i R S_j, S_j R S_k$, 则有 $S_i R S_k$ (S_i, S_j, S_k 为系统的任意构成要素)。传递性二元关系反映两个要素的间接联系,可记作 R^t (t 为传递次数), 如将 $S_i R S_k$ 记作 $S_i R^2 S_k$ 。

有时,对系统的任意构成要素 S_i 和 S_j 来说,既有 $S_i R S_j$, 又有 $S_j R S_i$, 这种相互关联的二元关系叫强连接关系。具有强连接关系的各要素之间存在替换性。

以系统要素集合 S 及二元关系的概念为基础,为便于表达所有要素间的关联方式,我们把系统构成要素中满足某种二元关系 R 的要素 S_i, S_j 的要素

对 (S_i, S_j) 的集合, 称为 S 上的二元关系集合, 记作 R_b , 即有

$$R_b = \{(S_i, S_j) | S_i, S_j \in S, S_i R S_j, i, j = 1, 2, \dots, n\}$$

且在一般情况下, (S_i, S_j) 和 (S_j, S_i) 表示不同的要素对。

这样, “要素 S_i 和 S_j 之间是否具有某种二元关系 R ”, 也就等价于 “要素对 (S_i, S_j) 是否属于 S 上的二元关系集合 R_b ”。

至此, 我们就可以用系统的构成要素集合 S 和在 S 上确定的某种二元关系集合 R_b 来共同表示系统的某种基本结构。

例 2-1 某系统由七个要素 $(S_1, S_2, \dots, S_7)$ 组成。经过两两判断认为: S_2 影响 S_1 、 S_3 影响 S_4 、 S_4 影响 S_5 、 S_7 影响 S_2 、 S_4 和 S_6 相互影响。这样, 该系统的基本结构可用要素集合 S 和二元关系集合 R_b 来表达, 其中:

$$S = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7\}$$

$$R_b = \{(S_2, S_1), (S_3, S_4), (S_4, S_5), (S_7, S_2), (S_4, S_6), (S_6, S_4)\}$$

(2) 系统结构的有向图表达。有向图 (D) 是由节点和连接各节点的有向弧 (箭线) 组成的, 可用来表达系统的结构。具体方法是: 用节点表示系统的各构成要素, 用有向弧表示要素之间的二元关系。从节点 $i (S_i)$ 到 $j (S_j)$ 的最小 (少) 的有向弧数称为 D 中节点间的通路长度 (路长), 也即要素 S_i 与 S_j 间二元关系的传递次数。在有向图中, 从某节点出发, 沿着有向弧通过其他某些节点各一次可回到该节点时, 形成回路。呈强连接关系的要素节点间具有双向回路。

例 2-1 给出的系统要素及其二元关系的有向图如图 2-6 所示。其中 S_3 到 S_5 、 S_3 到 S_6 和 S_7 到 S_1 的路长均为 2。另外, S_4 和 S_6 间具有强连接关系, S_4 和 S_6 相互到达, 在其间形成双向回路。

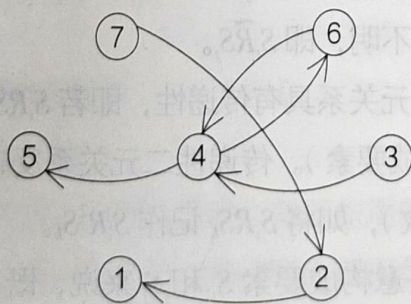


图 2-6 例 2-1 的有向图

(3) 系统结构的矩阵表达。

① 邻接矩阵。邻接矩阵 (A) 是表示系统要素间基本二元关系或直接联

系情况的方阵。若 $A = (a_{ij})_{n \times n}$, 则其定义式为

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, S_i R S_j \text{ 或 } (S_i, S_j) \in R_b \text{ (} S_i \text{ 对 } S_j \text{ 有某种二元关系)} \\ 0, S_i \bar{R} S_j \text{ 或 } (S_i, S_j) \notin R_b \text{ (} S_i \text{ 对 } S_j \text{ 没有某种二元关系)} \end{cases}$$

有了表达系统结构的集合 (S, R_b) 或有向图 (D) , 就可以很容易地将 A 写出, 反之亦然。与例 2-1 和图 2-6 对应的邻接矩阵如下

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} S_1 & S_2 & S_3 & S_4 & S_5 & S_6 & S_7 \end{matrix} \\ \begin{matrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ S_7 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

很明显, A 中“1”的个数与例 2-1 中 R_b 所包含的要素对数目和图 2-6 中有向弧的条数相等, 均为 6。

在邻接矩阵中, 若有一列 (如第 j 列) 元素全为 0, 则 S_j 是系统的输入要素, 如上述矩阵中的 S_3 和 S_7 ; 若有一行 (如第 i 行) 元素全为 0, 则 S_i 是系统的输出要素, 如上述矩阵中的 S_1 和 S_5 。

② 可达矩阵。若在要素 S_i 和 S_j 间存在着某种传递性二元关系, 或在有向图上存在着由节点 i 至 j 的有向通路时, 则称 S_i 是可以到达 S_j 的, 或者说 S_j 是 S_i 可以到达的。所谓可达矩阵 (M), 就是表示系统要素之间任意次传递性二元关系或有向图上两个节点之间通过任意长的路径可以到达情况的方阵。若 $M = (m_{ij})_{n \times n}$, 且在无回路条件下的最大路长或传递次数为 r , 即有 $0 \leq t \leq r$, 则可达矩阵的定义式为

$$m_{ij} = \begin{cases} 1, S_i R^t S_j \text{ (存在着 } i \text{ 至 } j \text{ 的路长最大为 } r \text{ 的通路)} \\ 0, S_i \bar{R}^t S_j \text{ (不存在 } i \text{ 至 } j \text{ 的通路)} \end{cases}$$

当 $t=1$ 时, 表示基本的二元关系, M 即为 A ; 当 $t=0$ 时, 表示 S_i 自身到达, 或 $S_i R S_i$, 也称反射性二元关系; 当 $t \geq 2$ 时, 表示传递性二元关系。

矩阵 A 和 M 的元素均为“1”或“0”, 是 $n \times n$ 阶 0—1 矩阵, 且符合布尔代数的运算规则, 即 $0+0=0$, $0+1=1$, $1+0=1$, $1+1=1$, $0 \times 0=0$, $0 \times 1=0$, $1 \times 0=0$, $1 \times 1=1$ 。通过对邻接矩阵 A 的运算, 可求出系统要素

的可达矩阵 M , 其计算公式为

$$M = (A + I)^r \quad (2.1)$$

其中 I 为与 A 同阶次的单位矩阵 (即其主对角线元素全为“1”, 其余元素全为“0”), 反映要素自身到达; 最大传递次数 (路长) r 根据下式确定

$$(A + I) \neq (A + I)^2 \neq (A + I)^3 \neq \cdots \neq (A + I)^{r-1} \neq (A + I)^r \\ = (A + I)^{r+1} = \cdots = (A + I)^n \quad (2.2)$$

以与例 2-1 和图 2-6 对应的邻接矩阵为例有

$$A + I = \begin{matrix} & S_1 & S_2 & S_3 & S_4 & S_5 & S_6 & S_7 \\ \begin{matrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ S_7 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

其中, 主对角线上的“1”表示诸要素通过零步 (自身的) 到达的情况 (单位矩阵 I), 其余的“1”表示要素间通过一步 (直接) 到达的情况 (邻接矩阵 A)。

$$(A + I)^2 = A^2 + A + I = \begin{matrix} & S_1 & S_2 & S_3 & S_4 & S_5 & S_6 & S_7 \\ \begin{matrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ S_7 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & \textcircled{1} & \textcircled{1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \textcircled{1} & 1 & 0 \\ \textcircled{1} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

其中带圆圈的“1”表示要素间通过两步 (间接) 到达的情况 (矩阵 A^2)。按照前述布尔代数的运算规则, 在原式 $(A + I)^2$ 的展开中利用了 $A + A = A$ 的关系。

进一步计算发现: $(A + I)^3 = (A + I)^2$ 。由式 (2.2) 即有 $r = 2$ 。

这样, 根据式 (2.1), 与例 2-1 和图 2-6 对应的可达矩阵为

$$M = (A + I)^2 = \begin{matrix} & S_1 & S_2 & S_3 & S_4 & S_5 & S_6 & S_7 \\ \begin{matrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ S_7 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

③ 其他矩阵。在邻接矩阵和可达矩阵的基础上, 还有其他表达系统结构并有助于实现系统结构模型化的矩阵形式, 如缩减矩阵、骨架矩阵等。

1) 缩减矩阵。根据强连接要素的可替换性, 在已有的可达矩阵 M 中, 将具有强连接关系的一组要素看作一个要素, 保留其中的某个代表要素, 删除掉其余要素及其在 M 中的行和列, 即得到该可达矩阵 M 的缩减矩阵 M' 。如例 2-1 的可达矩阵的缩减矩阵为

$$M' = \begin{matrix} & S_1 & S_2 & S_3 & S_4 & S_5 & S_7 \\ \begin{matrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_7 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

2) 骨架矩阵。对于给定系统, A 的可达矩阵 M 是唯一的, 但实现某一可达矩阵 M 的邻接矩阵 A 可以具有多个。我们把实现某一可达矩阵 M 、具有最小二元关系个数 (“1” 元素最少) 的邻接矩阵叫做 M 的最小实现二元关系矩阵, 或称之为骨架矩阵, 记作 A' 。

系统结构的三种基本表达方式相互对应, 各有特色: 用集合来表达系统结构概念清楚, 在各种表达方式中处于基础地位; 有向图形式较为直观, 易于理解; 矩阵形式便于通过逻辑运算, 用数学方法对系统结构进行分析处理。以它们为基础和工具, 通过采用各种技术, 可实现复杂系统结构的模型化。

3. 常用系统结构模型化技术

系统结构模型化技术是以各种创造性技术为基础的系统整体结构的决定

技术。它们通过探寻系统构成要素、定义要素间关联的意义、给出要素间以二元关系为基础的具体关系，并且将其整理成图、矩阵等较为直观、易于理解和便于处理的形式，逐步建立起复杂系统的结构模型。常用的系统结构模型化技术有：关联树法、解释结构模型化技术、系统动力学结构模型化技术等，其中解释结构模型化（ISM）技术是最基本和最具特色的系统结构模型化技术。

ISM 技术是美国 J. N. 沃菲尔德教授于 1973 年作为分析复杂的社会经济系统结构问题的一种方法而开发的。其基本思想是：通过各种创造性技术，提取问题的构成要素，利用有向图、矩阵等工具和计算机技术，对要素及其相互关系等信息进行处理，最后用文字加以解释说明，明确问题的层次和整体结构，提高对问题的认识和理解程度。该技术由于具有不需高深的数学知识、模型直观且有启发性、可吸收各种有关人员参加等特点，因而广泛适用于认识和处理各类社会经济系统的问题。ISM 的基本工作原理如图 2-7 所示。

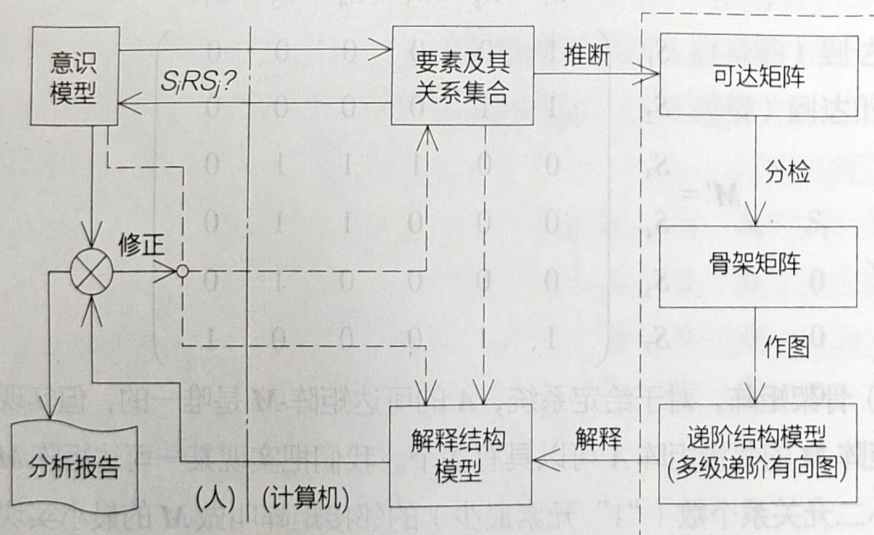


图 2-7 ISM 工作原理图

由图 2-7 可知，实施 ISM 技术，首先是提出问题，组建 ISM 实施小组。接着采用集体创造性技术，搜集和初步整理问题的构成要素，并设定某种必须考虑的二元关系（如因果关系），经小组成员及与其他有关人员的讨论，形成对问题初步认识的意识（构思）模型。在此基础上，实现意识模型的具体化、规范化、系统化和结构模型化，即进一步明确定义各要素，通过人一机对话，判断各要素之间的二元关系情况（即 $S_iRS_j?$ ），形成某种形式

的“信息库”。根据要素间关系的传递性，通过对邻接矩阵的计算或逻辑推断，得到可达矩阵。将可达矩阵进行分解、缩约和简化处理，得到反映系统递阶结构的骨架矩阵，据此绘制要素间的多级递阶有向图，形成递阶结构模型。通过对要素的解释说明，建立起反映系统问题某种二元关系的解释结构模型。最后，将解释结构模型与人们已有的意识模型进行比较，如不符合，一方面可对有关要素及其二元关系和解释结构模型的建立进行修正；更重要的是，人们通过对解释结构模型的研究和学习，可对原有的意识模型有所启发并进行修正。经过反馈、比较、修正、学习，最终得到一个令人满意，具有启发性和指导意义的结构分析结果。

通过对可达矩阵的处理，建立系统问题的递阶结构模型，这是 ISM 技术的核心内容。根据问题规模和分析条件，可在掌握基本原理及其规范方法的基础上，采用多种手段、选择不同的方法来完成此项工作。

（二）建立递阶结构模型的实用方法

按照规范方法所显示的递阶结构模型化基本原理，在系统结构并不十分复杂的情况下，建模工作可采用较为简便的方法来完成。其主要过程如下：

1. 判定二元关系，建立可达矩阵及其缩减矩阵

在问题设定之后，首先由分析小组或分析人员个人寻找与问题有某种关系的要素，经集中后，根据要素个数绘制如图 2-8 所示的方格图，并在每行右端依次注上各要素的名称。在此基础上，通过两两比较，直观地确定各要素之间的二元关系，并在两要素交汇处的方格内用符号 V、A 和 X 加以标识。其中，V 表示方格图中的行（或上位）要素直接影响到列（或下位）要素，A 表示列要素对行要素有直接影响，X 表示行列两要素相互影响（称之为强连接关系）。进而根据要素间二元关系的传递性，逻辑推断出要素间

(A)					A	S_1
A						S_2
	(V)	(V)	V			S_3
	X	V				S_4
	(A)					S_5
						S_6
						S_7

图 2-8 判定要素间关系用方格图

各次递推的二元关系，并用加括号的标识符表示。最后，再加入反映自身到达关系的单位矩阵，建立起系统要素的可达矩阵。

作为方法举例，现根据例 2-1 给出的系统结构分析问题，绘制出帮助建立可达矩阵的方格图，如图 2-8 所示。

根据图 2-8，并加入单位矩阵，可写出如下可达矩阵（其中将 S_i 简记为 i ）

$$M = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

2. 对可达矩阵的缩减矩阵进行层次化处理

根据要素级位划分的思想，在具有强连接关系的要素（ S_4 与 S_6 ）中去除 S_6 （即去除可达矩阵中“6”所对应的行和列），可得到缩减（可达）矩阵 M' 。在 M' 中按每行“1”元素的多少，由少到多顺次排列，调整 M' 的行和列，得到 $M'(L)$ 。最后在 $M'(L)$ 中，从左上角到右下角，依次分解出最大阶数的单位矩阵，并加注方框。每个方框表示一个层次。

对例 2-1 可达矩阵的缩减矩阵进行层次化处理的结果为

$$M'(L) = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 5 & 2 & 4 & 7 & 3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 5 \\ 2 \\ 4 \\ 7 \\ 3 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

可见，该例中的要素分为三个层次： S_1 和 S_5 属第一层次， S_2 、 S_4 及 S_6 属第二层次， S_7 、 S_3 为第三层次。

3. 根据 $M'(L)$ 绘制多级递阶有向图

首先把所有要素按已有层次排列，然后按照 $M'(L)$ 中两方框（单位矩阵）交汇处的“1”元素，画出表征不同层次要素间直接联系的有向弧，形

成多级递阶有向图。

如根据例 2-1 中第二层到第一层间的 S_2RS_1 、 S_4RS_5 和第三层到第二层间的 S_7RS_2 、 S_3RS_4 ，并在 S_4 上同级补充进被缩约的 S_6 ，即可绘制出多级递阶有向图，如图 2-9 所示。

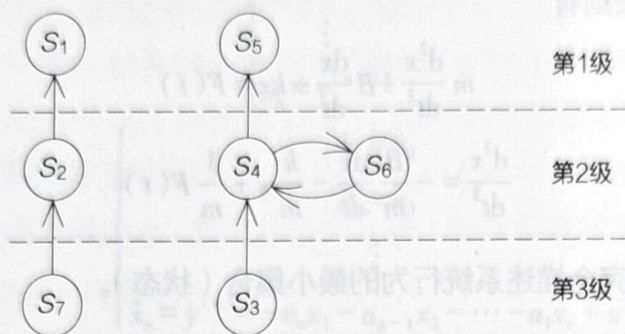


图 2-9 多级递阶有向图

最后，可根据各要素的实际意义，将多级递阶有向图直接转化为解释结构模型。

这种建立阶结构模型的方法以规范方法为基础，简便、实用，有助于人们实现对多要素问题认识与分析的层次化、条理化和系统化。

二、状态空间模型

研究动态系统的行为，有两种既有联系又有区别的方法：输入—输出法和状态变量法。输入—输出法又称端部法，它只研究系统的端部特性，而不研究系统的内部结构。系统的特性用传递函数来表示。状态变量法在 20 世纪 60 年代才得到推广使用。它仍然是处理系统的输入和输出间的关系的。但是在这些关系中，还附加另一组变量，即状态变量。在物理系统中，典型的变量有：位置（与势能有关）、速度（与动能有关）、电容上的电压（与它们存储的电能有关系）、电感上的电流（与它们存储的磁能有关系）、温度（与热能有关）。状态变量法可用于线性的或非线性的、时变的或时不变的以及多输入或多输出的系统，并且更适合仿真和使用计算机，故得到广泛应用。

（一）系统的状态和状态变量

（1）状态。状态是指为完全描述 $t \geq t_0$ 时系统行为所需变量的最小集合，该集合构成状态空间。完全描述的条件包括：① 已知系统 $t \geq t_0$ 时的输

国家精品资源共享课教材
(管理科学与工程类专业)

管理运筹学(第四版)	韩伯棠
工程施工组织与管理	曹吉鸣
工程项目管理	丁士昭
生产计划与控制	江志斌
管理信息学(第二版)	杨善林
建筑工程计量与计价	李 杰
决策理论与方法	陶长琪 盛积良
数据库系统原理及应用	万常选
管理信息系统分析与设计	蔡淑琴
信息系统分析与设计(第二版)	陈 禹
项目管理	戚安邦
运筹学	杜 纲
基础工业工程	刘洪伟
工程计价学	尹贻林
系统工程原理	陈英武
企业资源计划	邵丽萍
► 系统工程简明教程(第四版)	汪应洛
管理信息系统	冯玉强
质量管理	尤建新

ISBN 978-7-04-046726-0



9 787040 467260 >

定价 42.80 元