



环境系统 分析教程



程声通 主编



化学工业出版社
环境·能源出版中心



环境系统 分析教程

程声通 主编



化学工业出版社

环境·能源出版中心

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

环境系统分析教程/程声通主编. —北京: 化学工业出版社, 2006. 2
ISBN 7-5025-7823-4

I. 环… II. 程… III. 环境系统-系统分析-教材
IV. X21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 126822 号

环境系统分析教程

程声通 主编

责任编辑: 刘兴春

文字编辑: 刘莉珺 管景岩

责任校对: 周梦华

封面设计: 胡艳玮

*

化学工业出版社 出版发行
环境·能源出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

[http:// www. cip. com. cn](http://www.cip.com.cn)

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 16 字数 431 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7823-4

定 价: 29.80 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

环境系统分析以模型化为手段描述环境系统的特征，模拟和揭示环境系统的发展与变化规律及其与经济系统之间相互依存、相互制约的关系，并通过最优化与科学决策方法对环境系统的结构与运行、对环境-经济的协调发展做出最佳的选择。

环境系统分析的理论基础是系统科学。系统科学认为，世间万物都是由大大小小的系统组成的，系统与系统之间存在着千丝万缕的联系，正是这种联系引导和制约事物的发展、变化。环境系统就是这样一个复杂的大系统。认识环境系统的方法就是按照环境系统自身的规律将其分解成若干个相对简单的子系统，研究子系统的特点和规律，研究它们之间的联系，然后对子系统进行综合，找出所有子系统应有的位置和作用，使复杂的原系统具备决策者所期望的功能与目标。这个过程就是系统分析的方法学，也是本书始终努力贯彻的思路。

环境系统分析的最大特征是追求环境系统的最优化，系统最优化是通过组成系统的各个子系统的协调进行的。每个子系统都有自己的目标，在协调过程中，这些子系统都会本能地力图实现自身的最佳性能和最佳目标。系统论告诉我们，每一个子系统达到最优并不等于总系统的最优，系统分析的最高准则是总目标的最优。对于环境系统分析，人与环境的和谐相处、环境-经济的协调发展是最高的追求目标，也是本书写作的宗旨。

环境系统的复杂性怎么形容都不过分，特别是当环境问题与经济、社会问题发生纠葛时。环境系统分析所涉及的内容非常多，本书汇集了环境系统模型化、最优化和科学决策最基本的内容，共十一章。第一章至第三章属于总论篇，讲述环境系统分析的共同性问题；第四章至第八章是模型篇，主要内容是环境系统的模型化；第九章至第十一章是规划决策篇，讲述环境系统的最优化与科学决策问题。环境系统分析是一门综合性很强的学科，需要多学科的知识支持。环境系统分析的学科基础包括数学、运筹学、环境科学与环境工程学等。

本书内容丰富，通过选用其中的不同章节，可以适用于环境科学与工程专业本科与研究生教学要求，也可以作为参与环境质量评价、规划、管理等技术人员的技术参考书。

本书由下列人员编写：程声通编写第一章至第四章、第九章、第十章；徐明德编写第五章、第七章；苏保林编写第六章；贾海峰编写第八章；曾维华编写第十一章；王建平参与了第二章与第四章部分内容的写作。最后，全书由程声通统稿。

由于本学科涉及知识面广，又处在不断发展之中，内容的选编组织和写作一定会有不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者
2005年7月

目 录

第一章 环境系统分析概论	1	第二节 流域非点源的产生与特征	112
第一节 系统及其特征	1	第三节 流域非点源模型	114
第二节 系统的结构化	3	第四节 非点源污染控制措施	120
第三节 系统分析	7	第五节 流域非点源模型 SWAT 应用实例	122
第四节 环境系统分析	12	习题与思考题	129
习题与思考题	14	第七章 大气质量模型	130
第二章 数学模型概述	15	第一节 大气污染物扩散过程	130
第一节 定义与分类	15	第二节 污染源解析	131
第二节 数学模型的建立	16	第三节 箱式大气质量模型	133
第三节 参数估计方法	19	第四节 点源扩散模型	135
第四节 模型的检验与误差分析	25	第五节 线源和面源模型	139
第五节 模型灵敏度分析	27	第六节 复杂边界层的大气质量模型	146
第六节 模型的不确定性分析	30	第七节 大气质量模型中的参数估计	153
习题与思考题	32	第八节 实用空气质量模型介绍	161
第三章 环境质量基本模型	34	习题与思考题	163
第一节 污染物在环境介质中的运动特征 ..	34	第八章 环境质量评价方法与模型	164
第二节 基本模型的推导	36	第一节 环境质量评价概述	164
第三节 非稳定源排放的解析解	38	第二节 污染源评价和预测	164
第四节 稳定源排放的基本模型解析解 ..	42	第三节 环境质量评价模型	169
第五节 污染物在均匀流场中的分布特征 ..	45	第四节 环境风险评价	175
第六节 环境质量基本模型的数值解	50	习题与思考题	183
习题与思考题	54	第九章 水环境规划	185
第四章 内陆水体水质模型	55	第一节 规划的原则与依据	185
第一节 基本水质问题	55	第二节 系统的组成与分类	192
第二节 湖泊水库水质模型	59	第三节 最优规划方法	197
第三节 一维河流水质模型	67	第四节 情景分析方法	202
第四节 二维河流水质模型	74	第五节 水资源—水质系统规划	206
第五节 地下水水质模型基础	77	习题与思考题	207
第六节 实用水质模型介绍	87	第十章 大气环境规划	209
习题与思考题	92	第一节 规划原则和依据	209
第五章 河口及近岸海域水质模型	93	第二节 规划内容与方法	211
第一节 河口及近岸海域水文特征	93	第三节 情景规划方法	214
第二节 污染物在水体中的混合稀释	95	第四节 比例下降规划	216
第三节 河口水质模型	100	第五节 地面浓度控制规划	219
第四节 近岸海域水质模型基础	104	第六节 空气质量-经济-能源系统规划	220
第五节 实用模型介绍	107	第七节 实用污染物总量控制规划方法 (A-P 值法)	222
习题与思考题	109	习题与思考题	225
第六章 流域非点源模型	111		
第一节 非点源污染概述	111		

第十一章 环境决策分析 227
第一节 概述 227
第二节 环境费用效益分析 229
第三节 常用的环境决策分析技术 232

第四节 多目标环境决策分析技术 235
第五节 环境决策支持系统 242
习题与思考题 248
参考文献 249

第一章 环境系统分析概论

第一节 系统及其特征

一、系统的定义与分类

1. 定义

系统的概念来源于人类长期的社会实践。上古时期的治水策略，由“堵”发展到“疏”，就是系统思想发展的结果；战国时期的“田忌赛马”也是军事上应用系统思想的生动体现。但是由于受到科学技术发展水平的限制，一直没有得到应有的重视，系统思想始终没有发展成一个独立的学科和成熟的技术。直到 20 世纪 50 年代，美国才开始把系统思想明确化、具体化，并在工程技术系统的研究和管理中得到广泛应用，70 年代以后又进一步被推广到人类社会经济活动的几乎所有领域。

系统的概念最初产生于实际的工程问题和具体事物，例如人们很早就研究了灌溉系统、电力系统、人体呼吸系统、消化系统等。随着社会的发展与科学技术的进步，人们发现这些千差万别的系统之间存在着共性。抽象、概括并研究这些共性，对于研制、运行和管理具体的系统具有重要意义。于是有关系统、系统分析的研究就应运而生了。

系统是由两个或两个以上相互独立又相互制约、执行特定功能的元素组成的有机整体。系统元素又可称为子系统，而每个子系统又包含若干个更小的子系统；同样，每一个系统又是一个比它更大的系统的子系统。

从系统的定义可以归纳出系统的要点：①一个系统包含两个或两个以上的元素；②系统元素之间相互独立又相互制约；③各个元素组成一个整体，执行特定的功能。

组成系统的诸要素的集合具有一定的特性，或表现为一定的行为，这些特性和行为不是它的任何一个子系统都能具有的。一个系统不是由组成它的子系统简单叠加而成，而是按照一定规律的有机综合。

2. 分类

现实世界中的系统各种各样，为了便于研究，可以按照一定的规则将它们分类。

按系统的成因，可以分为自然系统、人工系统和复合系统。存在于自然界、不受人类活动干预的系统称为自然系统；由人工建造、独立于自然界、执行某一特定功能的系统属于人工系统；复合系统是由人工系统和自然系统综合而成的系统。环境保护系统基本上属于复合系统。

按状态的时间过程特征，可以分为动态系统和稳态系统。状态随着时间变化的系统称为动态系统，反之则称为稳态系统。从绝对意义上说，稳态系统是不存在的，人们往往将那些状态随时间的变化缓慢，或者在一个时间周期内的平均状态基本稳定的系统称为稳态系统。环境保护系统基本上属于动态系统。

按系统与周围环境的关系，可以分为开放系统和封闭系统。开放系统与其周围的环境存在物质、能量和信息的交换，而封闭系统则不存在这种交换。实际系统一般都属于开放系统，但是某些系统与外界的联系是可以识别和固化的，这些联系可以被看成系统的输入和输出，系统内部的变化在这时可以看成是相对孤立的。环境保护系统一般都属于开放系统。

同一个系统可以按照不同的方法分类，从而同一个系统可以属于不同的类别。例如环境污染控制系统既是复合系统，也是动态系统和开放系统。

在解决实际问题时，复合系统、动态系统和开放系统都是比较难以处理的复杂系统，环境保护系统就属于这种复杂的系统。在处理复杂系统时，有两种方法可以选择：采用复杂的技术，力图真实地反映系统的复杂性；或者对系统进行某种程度的简化，采用比较简便的方法反映系统的主要特征。

二、系统的特性

不同的元素组合成一个系统，这个系统具有不同于组成它的每一个元素的特征，主要表现为以下几方面。

1. 目的性

人工系统和复合系统都是“自为”系统，系统是为追求一定的目的建立的，复杂系统往往是一个多目的系统。而系统目的可以分解为多层次的目标，构成一个目标体系（图 1-1）。实现全部的系统目标，就等于实现了系统目的。

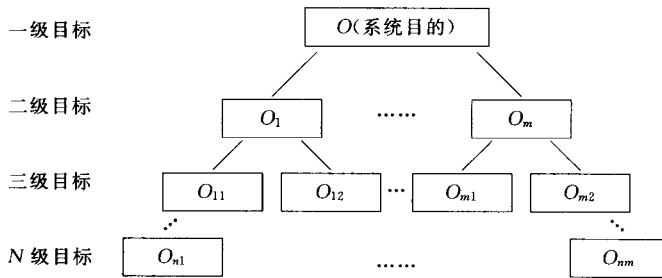


图 1-1 系统的目标体系

如果以 G 表示系统目的，以 g_i 表示系统目标，则：

$$G = \{g_i | g_i \in G; i = 1, 2, \dots, p\} \tag{1-1}$$

2. 集合性

一个系统由多个子系统或系统元素组成，如果以 X 表示系统，以 x_i 表示子系统或系统元素，它们之间的关系可以表示为：

$$X = \{x_i | x_i \in X; i = 1, 2, \dots, n; n \geq 2\} \tag{1-2}$$

3. 阶层性

子系统或者系统元素在系统中是按照一定的层次结构排列的，组成一定的递阶结构（图 1-2），每一个子系统或系统元素的位置是按照系统的功能确定的。由于子系统或系统元素在系统中的作用差别，使它们之间形成如下 3 种关系。

领属关系：表示上级子系统或元素对下级的关系。

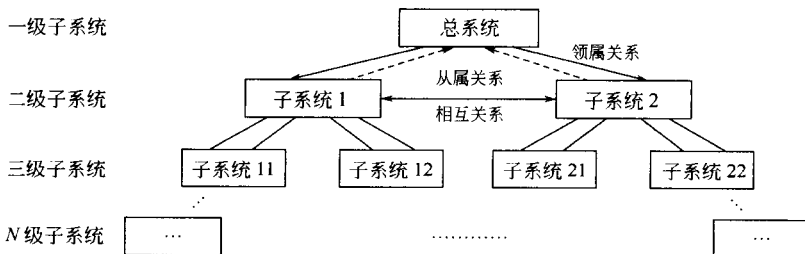


图 1-2 系统的递阶结构

从属关系：表示下级子系统或元素对上级的关系。

相互关系：表示同级子系统或元素之间的关系。

位于同一层次或不同层次的子系统或元素之间存在着物质、能量和信息的交换。

4. 相关性

系统中的各个子系统或元素之间存在着联系和相互作用，没有联系和相互作用的元素不会存在于一个系统之中，每一个元素的变化都会对其他元素产生影响。这些联系和作用有的相互促进，有的相互制约，有的相互拮抗。子系统的相关性可以表达为：

$$S = \{x|R\} \quad (1-3)$$

式中， S 表示系统的总体关系； R 表示子系统或系统元素之间的关系。系统的总体关系是各个子系统或系统元素之间关系的集合。

5. 整体性

系统的整体性体现了一个系统作为一个有机整体的特征。组成系统的各个元素虽然各自具有不同的特性，但它们都是根据逻辑统一性的要求而构成一个总体的，因此，即使每一个元素都不很完善，但也可能组合出一个具有良好功能的系统。反之，即使每一个元素都具有良好的性能，如果它的整体结合性很差，就不可能构成一个性能优良的总系统。

系统整体性要求系统中的所有子系统或系统元素要服从一定的结合方式，追求系统目标的最优：

$$E^* = \max_{P \rightarrow G} P(X, R, C) \quad (1-4)$$

式中， E^* 表示系统结合函数； P 表示整体结合效果函数； X 表示子系统或系统元素集合； R 表示关系集合； C 表示系统阶层集合； G 表示系统的整体性约束。

6. 环境适应性

系统目标的实现不仅取决于系统的整体结构，还取决于它的外部条件。系统只有在满足环境约束的条件下，才能取得满意的效果。不能适应外部环境变化的系统，是没有生命力的系统。

$$E^{**} = \max_{\substack{P \rightarrow G \\ P \rightarrow O}} P(X, R, C) \quad (1-5)$$

该式表明，系统目标的实现受到系统结构自身和系统所处环境的双重约束， O 表示系统的环境约束。

第二节 系统的结构化

一个系统是由多个元素或子系统组成的，它们在系统中的排列与位置绝非杂乱无章，而是按照一定的结构秩序有序分布。结构模型解析是确定复杂系统中大量元素之间相互联系的技术，通过各种元素之间的因果关系、大小关系和隶属关系的识别，构建复杂系统的分解和多级递阶结构形式。结构模型解析法 (interpretive structural modelling, ISM) 得到广泛应用，通过有向图和相邻矩阵的有关运算，可以得到可达性矩阵，然后对可达性矩阵进行分解，得到复杂系统条理分明的多级递阶结构形式。

一、有向连接图、相邻矩阵和可达性矩阵

1. 有向连接图

如果一个系统由若干个子系统（或元素）构成，每个子系统之间的关系由带有箭头的边表示，这个系统的图形就构成了有向连接图（图 1-3）。

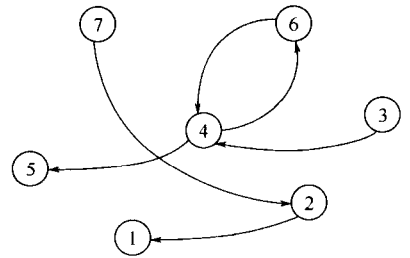


图 1-3 有向连接图

2. 相邻矩阵

用以表示有向连接图中各个元素之间连接状态的矩阵称为相邻矩阵 (A)。相邻矩阵的元素 a_{ij} 可以定义如下:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & n_i R n_j \quad R \text{ 表示可以从 } n_i \text{ 到达 } n_j \\ 0 & n_i \bar{R} n_j \quad \bar{R} \text{ 表示不能从 } n_i \text{ 到达 } n_j \end{cases} \quad (1-6)$$

由此, 与图 1-3 对应的相邻矩阵为:

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1-7)$$

3. 可达性矩阵

可达性矩阵 (M) 是用矩阵形式来反映有向连接图各元素间通过一定路径可以到达的程度。可达性矩阵可以用相邻矩阵加上单位矩阵 (I) 经过一定运算后获得。令:

$$A_1 = A + I = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1-8)$$

在式 (1-8) 中, 如果 $a_{ij} = 1$, 说明从节点 i 到节点 j 存在一条直接到达的路径。但是 A_1 还不是可达性矩阵, 尚未表达出所有可能的路径, 需要运用布尔代数法则继续运算。令:

$$(A_1)^2 = (A + I)^2 = A^2 + A + I = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + I = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = A_2 \end{matrix} \quad (1-9)$$

矩阵 A_2 不同于矩阵 A_1 , 节点之间的路径可以多至两条。可以依次计算 $A_3, A_4, \dots, A_{r-1}, A_r$, 直至 $A_{r-1} = A_r$, 此时可得可达性矩阵 A_{r-1} 。在本算例中, $A_1 \neq A_2 = A_3$, 可知本算例的可达性矩阵 $M = A_2 = (A_1 + I)^2$ 。即

$$M = [m_{ij}] = A_2 = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1-10)$$

从可达性矩阵 M 可以发现, 所有节点达到的线路, 包括直接到达和间接到达。例如从节点 3 可到达节点 4、5 和 6。与相邻矩阵比较可知, 从节点 3 出发, 可以直接到达节点 4, 间接到达节点 5 和 6。

可达性矩阵反映了系统各元素之间的联系, 通过对可达性矩阵的区域分解和级间分解可以求得系统的递阶结构。

二、区域分解

根据元素之间的关系, 将元素分解成不同的区域, 不同区域之间的元素是没有关系的。在上述可达性矩阵中, 将元素分成可达性集合 $R(n_i)$ 和先行集合 $A(n_j)$, 其定义为:

$$R(n_i) = \{n_j \in N \mid m_{ij} = 1\} \tag{1-11}$$

$$A(n_j) = \{n_i \in N \mid m_{ij} = 1\} \tag{1-12}$$

又定义共同集合 T (见表 1-1) 为:

$$T = \{n_i \in N \mid R(n_i) \cap A(n_j)\} \tag{1-13}$$

表 1-1 可达性集合、先行集合和共同集合

i	$R(n_i)$	$A(n_j)$	$R(n_i) \cap A(n_j)$	i	$R(n_i)$	$A(n_j)$	$R(n_i) \cap A(n_j)$
1	1	1,2,7	1	5	5	3,4,5,6	5
2	1,2	2,7	2	6	4,5,6	3,4,6	4,6
3	3,4,5,6	3	3	7	1,2,7	7	7
4	4,5,6	3,4,6	4,6				

如果有两个属于共同集合的两个元素 T_u 、 T_v 存在如下关系: $R(T_u) \cap R(T_v) \neq \Phi$, 则元素 T_u 、 T_v 属于同一区域, 否则属于不同区域。

式中, Φ 为空集合, 即不存在任何元素的集合。

经过上述运算可以对可达性矩阵进行区域分解。在上述的可达性矩阵中, 3、4、5、6 之间存在联系, 1、2、7 之间存在联系, 这两组元素之间彼此没有联系, 可以将它们集中在分块对角化矩阵中, 形成对角化的可达性矩阵:

$$M = \begin{matrix} & \begin{matrix} 3 & 4 & 5 & 6 & 1 & 2 & 7 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & & & \\ 0 & 1 & 1 & 1 & & & \\ 0 & 0 & 1 & 0 & & & \\ 0 & 1 & 1 & 1 & & & \end{bmatrix} & \begin{matrix} \\ \\ \\ \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 7 \end{matrix} & \begin{bmatrix} & & & & 1 & 0 & 0 \\ & & & & 1 & 1 & 0 \\ & & & & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} & \begin{matrix} \\ \\ \\ \end{matrix} \end{matrix} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 5 & 4 & 6 & 3 & 1 & 2 & 7 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} & \begin{bmatrix} P_1 & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \end{bmatrix} & \begin{matrix} \\ \\ \\ \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 7 \end{matrix} & \begin{bmatrix} & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \end{bmatrix} & \begin{matrix} \\ \\ \\ \end{matrix} \end{matrix} \tag{1-14}$$

上述区域分解的结果可以记作:

$$\Pi_1(N) = P_1, P_2, \dots, P_m \tag{1-15}$$

式中, m 为分解后的区域数目。上述例中, $m=2$ 。

三、级间分解

级间分解是对同一区域内的元素进行分级分解, 也就是对各个元素排序。级间分解方法如下。

设 $L_0 = \Phi$, $j=1$, P 为某区域, 按以下两个步骤反复运算:

$$(1) \quad L_j = \{n_i \in P - L_0 - L_1 - \dots - L_{j-1} \mid R_{j-1}(n_i) \cap A_{j-1}(n_i)\} \tag{1-16}$$

式中,

$$R_{j-1}(n_i) = \{n_j \in P - L_0 - L_1 - \dots - L_{j-1} \mid m_{ij} = 1\} \quad (1-17)$$

$$A_{j-1}(n_i) = \{n_j \in P - L_0 - L_1 - \dots - L_{j-1} \mid m_{ij} = 1\} \quad (1-18)$$

(2) 当 $\{P - L_0 - L_1 - \dots - L_j\} = 0$, 则分解完毕; 反之, 则令 $j = j + 1$ 返回步骤 (1), 最后结果可以写成:

$$(P) = L_1, L_2, \dots, L_l$$

式中, l 表示级数。

对本例中可达性矩阵 M 第一区域 P_1 进行分级, 得如表 1-2 所列数据。

表 1-2 第一级分解

i	$R(n_i)$	$A(n_i)$	$R(n_i) \cap A(n_i)$	i	$R(n_i)$	$A(n_i)$	$R(n_i) \cap A(n_i)$
3	3,4,5,6	3	3	5	5	3,4,5,6	5
4	4,5,6	3,4,6	4,6	6	4,5,6	3,4,6	4,6

由表 1-2 可知,

$$L_1 = \{n_i \in P_1 - L_0 \mid R(n_i) \cap A(n_i) = R(n_i)\} = \{n_5 \in (n_3, n_4, n_5, n_6) - 0 \mid R(n_5) \cap A(n_5)\} \\ = \{R(n_5)\} = \{n_5\}$$

$$\{P_1 - L_0 - L_1\} = \{(n_3, n_4, n_5, n_6) - 0 - n_5\} = \{n_3, n_4, n_6\} \neq 0$$

因此需要继续分级分解, 得到表 1-3、表 1-4 的结果。

表 1-3 第二级分解

i	$R(n_i)$	$A(n_i)$	$R(n_i) \cap A(n_i)$
3	3,4,6	3	3
4	4,6	3,4,6	4,6
6	4,6	3,4,6	4,6

表 1-4 第三级分解

i	$R(n_i)$	$A(n_i)$	$R(n_i) \cap A(n_i)$
3	3	3	3

从表 1-2 可知, 第一区域 P_1 的第一级为 n_5 ; 从表 1-3 可知, 第一区域 P_1 的第二级为 n_4 和 n_6 ; 从表 1-4 可知, 第一区域 P_1 的第三级为 n_3 。

同样对第二区域分级处理后可得第一级为 n_1 , 第二级为 n_2 , 第三级为 n_7 。用公式表示为:

$$\Pi(P_1) = L_1^1, L_2^1, L_3^1 = \{n_5\}, \{n_4, n_6\}, \{n_3\}$$

$$\Pi(P_2) = L_1^2, L_2^2, L_3^2 = \{n_1\}, \{n_2\}, \{n_7\}$$

通过级间分解, 可达性矩阵可以按照级别重新排列, 得:

$$M = \begin{matrix} & \begin{matrix} 5 & 4 & 6 & 3 & 1 & 2 & 7 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 5 \\ 4 \\ 6 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & & & \\ 1 & 1 & 1 & 0 & & & \\ 1 & 1 & 1 & 0 & & & \\ 1 & 1 & 1 & 1 & & & \end{bmatrix} & \begin{matrix} \\ \\ \\ \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 7 \end{matrix} & \begin{bmatrix} & & & & 1 & 0 & 0 \\ & & & & 1 & 1 & 0 \\ & & & & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} & \begin{matrix} \\ \\ \\ \end{matrix} \end{matrix} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 5 & 4 & 6 & 3 & 1 & 2 & 7 \end{matrix} \\ \begin{matrix} \\ \\ \\ \end{matrix} & \begin{bmatrix} & & & & & & \\ & P_1 & & & & & \\ & & & & & 0 & \\ & & & & & & \end{bmatrix} & \begin{matrix} \\ \\ \\ \end{matrix} \\ \begin{matrix} \\ \\ \\ \end{matrix} & \begin{bmatrix} & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \end{bmatrix} & \begin{matrix} \\ \\ \\ \end{matrix} \end{matrix} \quad (1-19)$$

从式 (1-19) 可以看出, $\{n_4\}$ 和 $\{n_6\}$ 的相应行与列的元素完全一样, 可以将两者当作一个元素看待, 可以从其中削减一个元素 (例如 n_6) 的相应行和列, 得到新的可达性矩阵 M' , 称为缩减矩阵:

$$M' = \begin{matrix} & \begin{matrix} 5 & 4 & 3 & 1 & 2 & 7 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 5 \\ 4 \\ 3 \\ 1 \\ 2 \\ 7 \end{matrix} & \begin{array}{|ccc|ccc|} \hline & & & & & & \\ \hline & & & & & & \\ \hline & & & & & & \\ \hline & & & & & & \\ \hline & & & & & & \\ \hline & & & & & & \\ \hline \end{array} \end{matrix} \quad (1-20)$$

四、系统结构模型

所谓求解结构模型, 就是建立系统的多级递阶结构矩阵 A' , 根据结构矩阵可以绘制系统多级递阶结构图。求解结构矩阵的步骤如下。

(1) 从缩减矩阵 M' 中减去单位矩阵 I 得到新的矩阵 M'' :

$$M'' = M' - I = \begin{matrix} & \begin{matrix} 5 & 4 & 3 & 1 & 2 & 7 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 5 \\ 4 \\ 3 \\ 1 \\ 2 \\ 7 \end{matrix} & \begin{array}{|ccc|ccc|} \hline & & & & & & \\ \hline & & & & & & \\ \hline & & & & & & \\ \hline & & & & & & \\ \hline & & & & & & \\ \hline & & & & & & \\ \hline \end{array} \end{matrix} \quad (1-21)$$

(2) 在 M'' 中寻找系统元素第一级和第二级之间的关系, 例如, $m''_{45} = 1$, 说明存在 $n_4 \rightarrow n_5$ 的关系; 然后再找出第二级与第三级元素之间的关系, 例如 $m''_{34} = 1$, 说明存在 $n_3 \rightarrow n_4$ 的关系。同样, 在区域 P_2 中, 有 $m''_{21} = 1$ 和 $m''_{72} = 1$ 。于是可以将矩阵元素 $m''_{45} = 1$ 、 $m''_{34} = 1$ 、 $m''_{21} = 1$ 、 $m''_{72} = 1$ 作为矩阵元素得到结构矩阵:

$$A' = \begin{matrix} & \begin{matrix} 5 & 4 & 3 & 1 & 2 & 7 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 5 \\ 4 \\ 3 \\ 1 \\ 2 \\ 7 \end{matrix} & \begin{array}{|ccc|ccc|} \hline & & & & & & \\ \hline & & & & & & \\ \hline & & & & & & \\ \hline & & & & & & \\ \hline & & & & & & \\ \hline & & & & & & \\ \hline \end{array} \end{matrix}$$

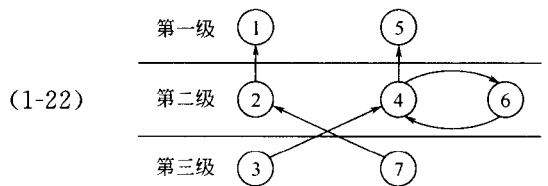


图 1-4 多级递阶结构图

根据前面的分析, 系统的递阶结构模型可以表示为图 1-4。

第三节 系统分析

一、基本概念

系统分析的研究对象是复杂的大系统。大系统的特征是在系统中存在着许多相互矛盾的和不确定的因素, 如果没有一套行之有效的辅助决策分析方法, 就难以找到设计、运行和管理大系统的方案。人们从长期的工程实践中认识到, 要实现系统的优化设计和优化运行, 就需要对系统进行全面、互相关联的和动态的分析, 也就是系统分析。

系统分析可以被理解为一个对研究对象进行有目的、有步骤的探索过程，通过分解与综合的反复协调，寻求满足系统目标最佳的方案。

系统分析的最大特点是追求总体目标的最优。为了追求总体目标最优，有时有必要放弃局部目标或子系统目标的最优。一个系统的总体目标最优是通过对系统的反复分解、综合和协调实现的。图 1-5 表示的是系统分析的总体过程。

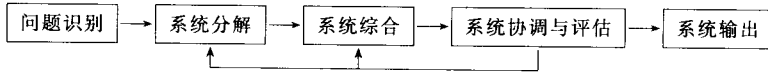


图 1-5 系统分析的总体过程

与传统的工程学科方法不同，系统分析过程除了需要研究系统中各要素的具体性质和特征，解决各元素的具体问题外，还着重研究和解决各个元素之间的有机联系，使得系统中各个元素的关系融洽、协调，力求实现系统总目标最优。

系统分析的对象主要是大系统。大系统的物质流、能量流和信息流的量都很大，关系很复杂，数学模型的建立和求解工作量也很大，利用计算机辅助系统分析是现代系统分析的主要特征之一。

二、系统分析的发展

系统分析是用于解决复杂问题的理论和方法，是对复杂问题进行全面的、互相联系的和发展的研究，系统分析的目标是追求系统的整体最优。

作为一门学科，系统分析开创于 20 世纪 40~50 年代。但是系统分析思想和方法的运用可以追溯到久远的古代，在朴素的系统思想指导下，人类曾经做出巨大的成绩。建于战国时期（公元前 250 年左右）的都江堰灌溉、防洪系统，就是运用系统分析思想的杰作。都江堰由“鱼嘴”、“飞沙堰”、“宝瓶口”等工程组成。“鱼嘴”司职岷江的分洪，确保灌溉系统的安全；“飞沙堰”用于控制水位，保证灌溉；“宝瓶口”则用于灌溉系统的引水和流量控制。“鱼嘴”、“飞沙堰”、“宝瓶口”和下游的干、支、毛渠这些子系统组成了庞大的都江堰灌溉系统，它们分工协作、巧妙配合，千百年来灌溉了万顷良田，养育了富饶的成都平原，发挥了极高的效益。它的规划、设计和施工，以及一整套管理程序，按照今天系统科学的观点分析，仍然不愧是人类发展史上一项伟大的工程。

20 世纪 30 年代，英国科学家在研究军事战略过程中逐步发展起来的“运筹学”可以说是现代系统分析学科的发端。军力的部署、战略物资的储运，借助运筹学可以达到最佳状态，发挥最佳效益。联军在二次大战期间曾经利用系统分析方法，完成了后勤战略物资和防空系统的最佳配置方案，并在此基础上促进了系统科学的发展。

20 世纪 40 年代初，美国电话电信公司（贝尔）正式启用“系统工程”一词，系统科学在规划、设计、生产和管理领域得到飞速的发展。1947 年，奥地利生物学家贝塔朗菲创立了“普通系统论”。贝塔朗菲认为，把孤立的各组成部分的活动方式简单相加，不能说明高一级的活动性质和活动方式。如果了解各组成部分之间存在的全部联系，那么高一级的活动就能够由各组成部分推导出来。为了认识事物的整体性，不仅要了解它的组成部分，更要了解它们之间的关系。而传统学科只重分解，忽视综合；重视研究孤立事物的特征，轻视各个具体事物之间的联系，影响了对事物整体性的认识。贝塔朗菲指出，普通系统论属于逻辑学和数学领域，它的任务是确立适用于各种系统的一般原则，不能局限在技术范畴，也不能当作一种数学理论看待。普通系统论的研究领域十分广阔，几乎包括一切与系统有关的学科，如管理学、运筹学、信息论、控制论、哲学、行为科学、经济学、工程学等，

给各门学科带来新的研究动力和新的方法，沟通了自然科学与社会科学、技术科学与人文科学之间的联系，促进了现代科学技术的发展。

计算机技术的发展又促进了系统科学的扩张。系统科学的应用已经远远超出传统的工程观念，进入到解决各种复杂的社会-技术系统和社会-经济系统的优化规划、优化设计、优化控制和优化管理阶段。

系统分析的主要对象是复杂的大系统。系统科学发展起来的大系统分解协调方法和技术为复杂大系统问题的解决提供了基础。

三、系统分析的特征

系统分析是一个方法学上的概念，其方法体系的基础是运用各种数学方法、计算机技术和控制学理论来实现系统的模型化和最优化。系统分析的基本特点如下。

1. 研究方法上的整体化

整体化的重要表现是将研究对象和研究过程都看作一个整体。实际生活中，任何一个系统都是由若干个子系统组成的，每个子系统都有自己的目标和标准。在系统分析过程中，这些子系统更重要的是被视为一个整体，每一个子系统都需要服从总系统的目标。每一个子系统的技术都要求首先从实现整个系统技术协调的观点来考虑，对研究过程中子系统与子系统之间或子系统与总系统之间的矛盾，都要从总体协调的需求来选择方案。简而言之，“追求总体最优”是系统分析的最高境界。

对于环境保护系统来说，这种整体性显得尤为重要，环境系统是一个开放性的大系统，环境系统的规划、设计和运行与社会系统、经济系统密切相关，环境保护的成败得失只有一个更大的社会-经济-环境系统中才能进行有效的评价。建设一个经济-环境协调的社会是我们的最高追求，环境目标是建设和谐社会的重要内容。

2. 技术应用上的综合化

系统科学致力于综合运用各种学科和技术领域所获得的成果，它们之间的相互配合可以使系统达到整体优化。一个复杂的大系统都是一个综合的技术体系，各个学科技术的综合运用是必不可少的，这是第一层意思；为了解决大系统的优化问题，必须能够熟练掌握和灵活运用各种技术。这里所指的技术不仅包括系统分析的模型化、最优化和大系统分解协调技术，还包括解决各种工程问题的具体技术。一个系统分析人员必须具备对各种技术驾轻就熟的能力。

时代的发展导致问题的复杂性和综合性程度越来越高，为了解决一个大系统问题，不仅需要具备工程学科的知识，往往还需要经济学和社会学知识。

3. 管理上的科学化

一个复杂的大规模工程往往存在两个并行的过程，一个是工程技术过程，一个是对工程技术的控制过程。后一个过程包括规划、组织、进度控制、方案分析、比较和决策等，统称为管理。只有先进的、科学的管理，才能充分发挥技术的效能。

四、系统分析的步骤

系统分析过程除了要求解决研究对象的具体技术问题之外，着重研究和揭示各个要素之间的有机联系，协调系统中各个要素之间的关系，以达到系统总目标最优的目的。这个过程一般包含下述步骤。

1. 明确问题

主要明确研究对象的范围（包括空间和时间范围）和性质以及它们与周围环境之间的关系。为了明确问题，需要阅读和熟悉有关研究对象的资料，有必要对现场进行考察。根据具

体条件，实事求是地反映系统的内部结构及其与外界的联系是特别重要的。

2. 设立目标

一般来说，目标就是决策者希望达到的理想境界。一个研究对象有一个总的目标，这个目标可能是单一的目标，也可能是多个目标。一个目标往往又可以分解成若干个分目标，与系统的结构模型相对应，总目标和分目标一起构成系统的目标体系。

3. 收集资料

包括收集必要的历史资料和现场实际调查资料。有两个方面的资料需要着重准备：一是为了建立系统模型所需要的系统自身的资料；二是对系统的运行产生约束的系统外部环境资料。资料来源一般有两个方面：从历史或当前的文献档案中摘取收集所需要的材料；根据实际需要进行必要的补充调查、监测和试验。

4. 建立模型

利用数学模型对环境状态或决策方案进行模拟，存优舍劣，是系统分析的主要特征。在系统分析过程中，通常要用到两类模型：对环境系统进行模拟的模拟模型，对环境保护系统进行决策分析的决策模型。在第一类模型中，主要有描述水体水质变化过程的各种水质模型，描述空气质量变化的空气质量模型，以及描述环境治理过程的各种模型；在第二类模型中，有各种优化模型和决策模型。

5. 制定系统评估标准

评估标准是针对指标体系中的评价指标确定的。某些指标可以建立客观的标准，如环境质量指标等；而另外一些项目则缺少客观的标准，如经济指标和社会发展指标。对已经制定了标准的指标，通常可以直接采用，而对于那些缺乏标准的指标，则往往需要在研究过程中建立评估准则。

6. 综合分析

综合分析的核心是建立解决问题的方案和替代方案，对方案的性能特征以及环境经济效益进行全面分析、比较，确定优选的推荐方案是综合分析的主要任务。系统分析通常围绕系统模型进行。经典的系统分析方法是最优化技术，对于复杂的环境保护问题，多目标规划或多目标决策分析技术最为常用。在综合分析时，下述策略常常被采用：①若所能支付的费用已经确定，则选择在此费用下效益最大的方案；②若效益标准已定，则选择实现既定效益所需费用最低的方案；③若费用和效益都没有既定目标，可以选择效益费用比最大的方案；④对于多目标问题，要通过对各个目标的协调分析决定方案的优劣。

除了上述一些取舍策略以外，对一个多目标问题还有很多具体问题需要考虑，例如系统的可靠性问题、系统的可维护性问题、系统实现的时限问题等等，这些都需要根据具体研究对象进行具体设定和研究。

五、系统模型化

系统模型化就是用数学符号来表达研究对象的各个部分及其联系，表达系统的功能、价值及各个价值之间的关系。在系统分析中对模型有如下要求。

(1) 现实性 现实性是指模型能够以一定的精度和准确性反映系统的实际情况。

(2) 简洁性 在现实性的基础上，尽量使模型简单明了，以节省模型建立和求解的时间与费用，并且易于推广应用。

(3) 适应性 模型对于外部条件的变化应该具有一定的应变能力，可以根据应用环境进行调节。

上面这些要求在很多情况下可能是相互矛盾的。例如为了提高现实性，模型的结构可能

很复杂，它的求解就很困难，适应性就差。在选择和建立模型的时候经常需要根据实际条件在各种因素之间进行协调，那些结构上相对比较简单、精度上能够满足需求的模型经常成为首选模型。

六、系统最优化

系统最优化是系统综合最重要的方法和手段之一。系统最优化通常通过最优化模型实现。最优化方法很多，要根据问题的性质和条件选用。对于过于复杂的系统需要简化，例如，一个非线性系统可以通过线性化，利用线性方法来求解。通过突出主要因素、忽略次要因素，或改变模型的形式，使最优化方法的应用成为可能。

线性规划、动态规划、非线性规划、网络与图论等最优化技术在环境规划、污染控制过程仿真等领域得到广泛应用。

七、大系统的分解协调

所谓大系统，是指规模庞大、结构复杂的各种工程或非工程系统。大系统所关心的目标不是单个的指标。由于系统复杂，大系统一般都是多目标问题，而且约束条件繁多，直接求解存在很多困难。

解决大系统问题的“巧妙”方法是將大系统分解成许多子系统，如图 1-6 所示，子系统与上一级父系统之间保持联系。由于分解以后的子系统大大简化，求解低层次的子系统相对较为简单。但是子系统的解是否符合总系统的要求，需要通过不断调整上下级系统之间的联系，使得子系统的求解不仅达到最优，且符合上级父系统的要求；同时子系统与子系统之间的关系通过父系统进行协调，这个过程需要反复多次。这就是大系统分解协调方法，这种方法被广泛应用于大系统的管理和控制。

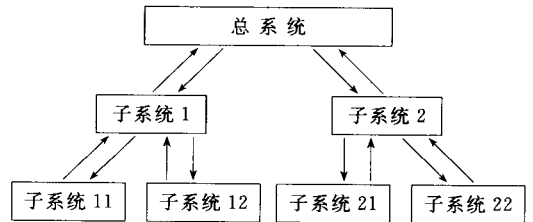


图 1-6 大系统分解

这就是大系统分解协调方法，这种方法被广泛应用于大系统的管理和控制。

八、系统分析与系统工程

“系统工程”一词是 20 世纪 50 年代提出来的，它是合理开发、设计和运行一个系统而采用的思想和方法的总称。从方法学范畴，系统分析和系统工程属于相同的概念，它们都是力图全面地、发展地和互相联系地分析研究问题。

如果把一事物或一项工程从构思到实施完成的整个过程称为系统工程的话，系统分析可以被看作系统工程的一部分（图 1-7）。

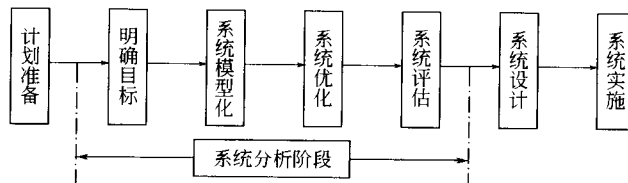


图 1-7 系统工程的程序

一事物或一项工程项目可以分成计划准备、系统分析、系统设计和系统实施等几个阶段。系统分析是其中的一个主要组成部分。系统分析是针对研究问题的整体，进行全面的、互相联系的和发展的研究，以期找到解决问题的最佳方案或替代方案，并预测这些方案实施后可能产生的后果。

系统设计是在系统分析提出推荐方案的基础上进行的，它运用各种工程方法将系统分析