



环境系统 分析教程

第二版

程声通 主编



化学工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

环境系统分析教程/程声通主编. —2 版. —北京:
化学工业出版社, 2012. 6
ISBN 978-7-122-14008-1

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 071869 号

责任编辑: 刘兴春
责任校对: 洪雅姝

装帧设计: 杨 北

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 刷: 北京市振南印刷有限责任公司
装 订: 三河市宇新装订厂
787mm×1092mm 1/16 印张 21 字数 551 千字 2012 年 9 月北京第 2 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 48.00 元

版权所有 违者必究

第二版前言

环境问题的国际化和全球化日益加剧，环境污染的成因和发展过程日益复杂，解决环境问题的手段和方法日益丰富，系统科学方法在环境领域中的应用日益广泛。这些，就是本书修订再版的背景。

2005年，《环境系统分析教程》（第一版）出版，该书总结了系统科学在环境保护领域的研究和应用成果，以循序渐进的方式编写成册，为高校环境专业广为采用，也是广大环境科学研究人员的参考书籍。经过若干年的实践，本书的读者和编者都感到有必要对原著进行修订，补充一些必要的内容，纳入一些近年的发展。在化学工业出版社的鼎力支持下，2011年5月启动修订工作，经过近10个月的努力，完成了修订稿。

在总结系统科学、环境科学发展与教学实践的基础上，修订稿对原书内容做了如下修改和更新。

(1) 为适应环境保护形势的发展，新增“城市垃圾处理系统规划”和“经济-能源-环境系统分析”两章。

(2) 为提高教学效率，将原书第二章“数学模型概述”和第三章“环境质量基本模型”合并，内容适当调整。

(3) 为加深对系统分析的理解，适当扩充一些系统分析辅助方法和技术的内容，如最优化方法、系统动力学方法、层次分析法、情景分析法等。由于这些内容各自都属于专门学问，本书只能做一些粗浅介绍。

(4) 根据环境科学的发展和教学一线的信息反馈，对水域和大气质量模型、环境质量评价等章节都补充了一些新的内容。

(5) 对本书第一版中的一些错误和疏漏也都做了订正。

系统分析方法的核心可以归纳为“结构化-模型化-最优化”，力求用科学的逻辑和方法研究问题和解决问题。系统分析的理论和方法范围非常广泛，即使经过增订，本书的内容也很有限。即便如此，作为课堂讲授，还需要针对不同的对象做出适当的删减，本书中的某些内容可能更适合作为学生扩展阅读的材料。

本书在2005年出版以后，被很多学校选作为“环境系统分析”课程的教材，一些任课教师对环境系统分析的教与学进行了探讨，对本书的修改多有裨益。

本书由下列人员编写：第一章、第三章、第八章、第九章由程声通编写；第二章由程声通、徐明德编写；第四章、第六章由徐明德编写；第五章由苏保林编写；第七章由贾海峰编写；第十章由贾海峰和郭茹编写；第十一章由曾维华和王文懿编写；第十二章由曾维华编写；王建平参与了第二章和第三章部分内容的编写。最后书稿由程声通统稿。

欢迎各位读者对本书提出批评和建议。读者的任何意见都是我们继续修改、提高质量的动力。

编者

2012年2月

第一版前言

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比较简单子系统，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，系统最优化是通过对各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的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
第一节 系统及其特征	1
第二节 系统分析	3
第三节 环境系统分析	8
第四节 系统的结构化	10
习题与思考题	27
第二章 环境质量基本模型	28
第一节 数学模型概述	28
第二节 污染物在环境介质中的运动特征	45
第三节 环境质量基本模型的推导	47
第四节 非稳定源排放的解析解	49
第五节 稳定源排放的基本模型解析解	53
第六节 污染物在均匀流场中的分布特征	56
第七节 环境质量基本模型的数值解	61
习题与思考题	65
第三章 内陆水体水质模型	66
第一节 基本水质问题	66
第二节 湖泊水库水质模型	70
第三节 一维河流水质模型	78
第四节 二维河流水质模型	85
第五节 地下水水质模型基础	88
第六节 实用水质模型介绍	98
习题与思考题	104
第四章 河口及近岸海域水质模型	106
第一节 河口及近岸海域水文特征	106
第二节 污染物在水体中的混合稀释	108
第三节 河口水质模型	113
第四节 近岸海域水质模型基础	117
第五节 实用模型介绍	120
习题与思考题	123
第五章 流域非点源模型	124
第一节 非点源污染概述	124
第二节 流域非点源的产生与特征	125
第三节 流域非点源模型	128
第四节 非点源污染控制措施	135
第五节 流域非点源模型 SWAT 应用实例	137
习题与思考题	144
第六章 大气质量模型	145
第一节 大气污染物扩散过程	145
第二节 污染源解析	146
第三节 箱式大气质量模型	148
第四节 点源扩散模型	150
第五节 线源和面源模型	154
第六节 复杂边界层的大气质量模型	161
第七节 大气质量模型中的参数估计	167
第八节 实用空气质量模型介绍	175
习题与思考题	178
第七章 环境质量评价方法与模型	180
第一节 环境质量评价概述	180
第二节 污染源评价和预测	181
第三节 环境质量评价模型	185
第四节 环境影响评价	191
第五节 环境风险评价	196
习题与思考题	206
第八章 水环境规划	208
第一节 水环境功能区与水污染控制区	208
第二节 水环境容量与污染物允许排放量	213
第三节 系统的组成与分类	220
第四节 最优规划方法	225
第五节 情景分析方法	230
第六节 水资源—水质系统规划	234
习题与思考题	234
第九章 大气环境规划	236
第一节 规划原则和依据	236
第二节 规划内容与方法	238
第三节 情景规划方法	241
第四节 比例下降规划	243
第五节 地面浓度控制规划	246
第六节 空气质量-经济-能源系统规划	247
第七节 实用污染物总量控制规划方法 (A-P 值法)	248
习题与思考题	252
第十章 城市垃圾处理系统规划	253
第一节 概 述	253
第二节 城市垃圾产生量预测	254
第三节 城市垃圾处理系统的总体布局	258
第四节 垃圾处理系统设施规划	266
第五节 城市垃圾处理系统的环境影响	

分析	276
习题与思考题	281
第十一章 能源-经济-环境系统分析 ...	282
第一节 3E 系统概述	282
第二节 3E 系统的协调性分析	284
第三节 3E 系统模拟预测模型	289
第四节 3E 系统优化决策模型	298
习题与思考题	304

第十二章 环境决策分析	305
第一节 概述	305
第二节 常用的环境决策分析技术	307
第三节 多目标环境决策分析技术	313
第四节 环境决策支持系统	320
习题与思考题	324
参考文献	326

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。

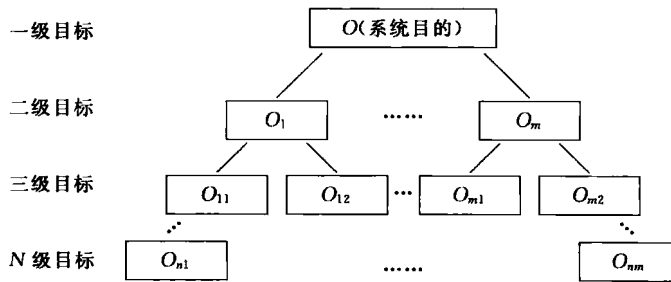


图 1-1 系统的目标体系

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。

隶属关系：表示上级子系统或元素对下级的关系。

从属关系：表示下级子系统或元素对上级的关系。

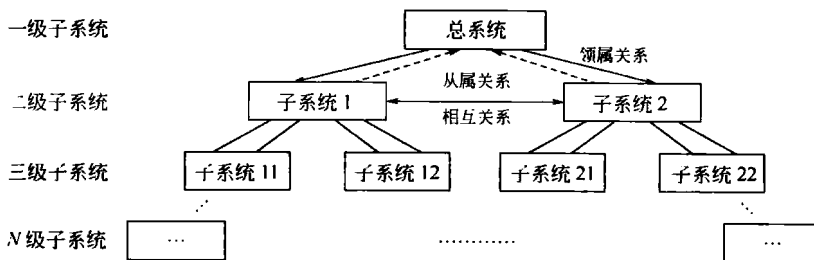


图 1-2 系统的递阶结构

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系统的反复分解、综合和协调实现的。图 1-3 表示的是系统分析的总体过程。

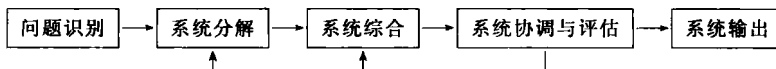


图 1-3 系统分析的总体过程

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非创立了“普通系统论”。贝塔朗非认为，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。贝塔朗非指出，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在更大的社会-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 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”方法是将大系统分解成许多子系统，如图 1-4 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

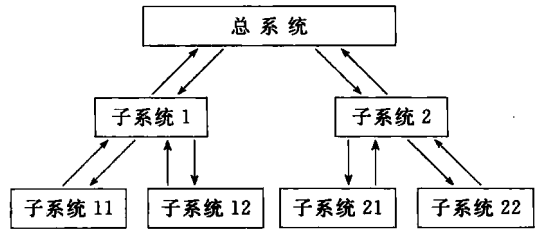


图 1-4 大系统分解

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。

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 1-5）。

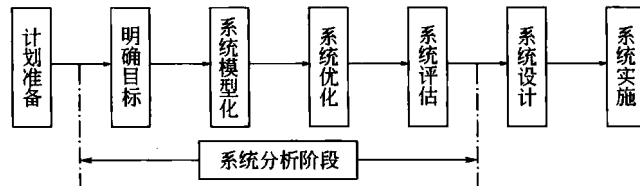


图 1-5 系统工程的程序

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的结果落实在工程措施上，以确保系统分析结果的实现。

系统实施是将系统设计的成果转变成现实的过程。在系统实施阶段，各种系统论方法被广泛应用。

在实际工程中，系统分析、系统设计和系统实施这三个阶段的内容在时间上一般是顺序执行的。只有提出一个好的系统分析方案，才能保证做出好的系统设计，继而保证最终实施的工程质量。但是从认识论的角度，这三个阶段又不是截然可分的。系统分析的成败与前人的工作以及分析者的阅历与经验直接相关，而这些经验中很多要在系统设计和系统实施的过程中取得。同时，在一项工程中，在系统设计或系统实施阶段提出反馈信息，修改或部分修改系统分析成果的事例也屡见不鲜。

第三节 环境系统分析

一、发展概况

20世纪50年代以后,随着世界各国工业化和城市化的加速,一些经济发达国家相继出现了爆炸性的公害事件。开始人们只将它们作为一般的生产事故或安全事故,但是很快人们就发现,这些事件不同于简单的中毒或工伤问题,而是在时间上和空间上都有非常广泛的综合效应,它们的解决必须调动社会各个领域的力量,协同配合才有成效。在这种形势下,美国、日本、英国等先进工业国先后建立了全国性的研究机构和管理机构,展开了全国性和区域性的污染防治规划的研究和实施。环境问题的全局性、复杂性和综合性等特点,为系统分析方法的应用提供了广阔的领域,世界上很多著名的环境污染防治工程研究和实施都应用了系统分析的方法。

1959~1962年,美国在特拉华河口的污染控制规划研究中全面应用了水环境质量模型、决策方案的多目标分析和综合决策方法,可以说是系统分析在环境保护领域应用的开端。1972年,美国人瑞奇首次以《环境系统工程》(英文)为名发表专著,阐述了环境工程过程及其与环境之间的关系;1977年,日本学者高松武一郎发表同名专著(日文),应用化工过程系统工程的研究成果阐述环境系统的规划、治理等问题。这期间出现了很多应用运筹学、决策学解决环境问题的论著和文章,极大地推动了环境系统分析的发展。

系统分析思想在我国很早就得到应用,但是对现代系统科学的理论和方法的研究开始于20世纪80年代以后。1980年,北京市东南郊环境质量评价研究中,首次应用了水质数学模拟技术,其后在全国各地开展了区域环境影响评价研究,广泛应用了数学模型和决策分析技术。1985年,清华大学出版社出版了《水污染控制系统规划》一书,运用系统分析的思想和方法,阐述了水污染控制系统的模型化和最优化问题;同年,南京大学出版社出版了《环境系统工程概论》一书,广泛讨论了系统论在环境保护领域的应用问题;1987年,轻工业出版社出版了专著《环境系统工程概论》,探讨了环境系统的建模与优化;1990年,高等教育出版社出版了《环境系统分析》,全面、系统地论述了环境系统的模型化和最优化以及环境决策的方法与过程。在过去几十年时间里,我国政府在几个五年计划中都安排了一定数量的区域性环境研究项目,它们的实施对环境系统分析在我国的实践与发展起到很大的促进作用。

二、环境系统的分类与组成

在研究人与环境这个矛盾统一体时,把由两个或两个以上的与环境及人类活动相关的要素组成的有机整体称为环境系统。按照不同的分类方法,可以得到不同类型的环境系统(表1-1)。

表 1-1 环境系统的分类

分类方法	系统名称
环境系统尺度	全球环境系统、区域环境系统、局域环境系统等
环境系统边界	流域环境系统、城市环境系统与乡村环境系统等
环境系统组成结构	人口-资源-环境系统、环境-经济系统等
环境保护对象	自然保护区系统、生态保护区系统、空气污染控制系统、水污染控制系统、都市生态(环境)系统等
环境管理功能	环境监测系统、环境执法系统、环境规划管理系统、排污申报管理系统、环境统计管理系统与排污收费管理系统等
污染源	工业污染源系统、农业污染源系统、交通污染源系统等
污染物的发生与迁移过程	污染物发生系统、污染物输送系统、污染物处理系统、接受污染物的环境系统等
产业类型	矿山环境系统、冶金环境系统、环保产业系统等

环境系统千差万别，表 1-1 与图 1-6~图 1-8 所示的只是其中一些例子。

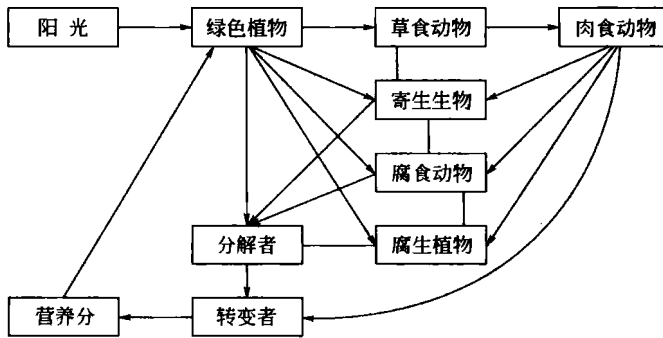


图 1-6 生态系统的组成

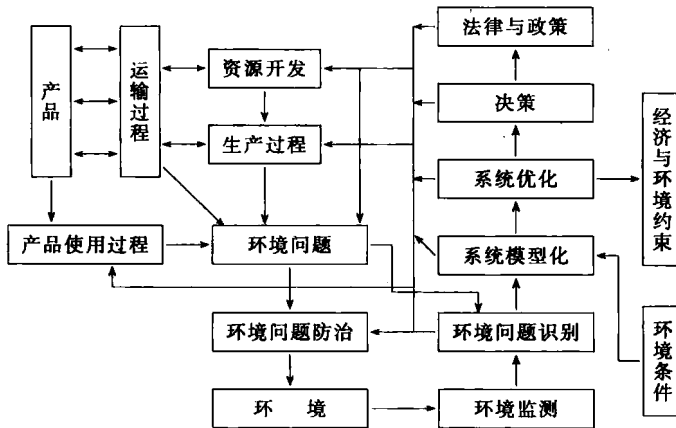


图 1-7 资源-经济-环境系统

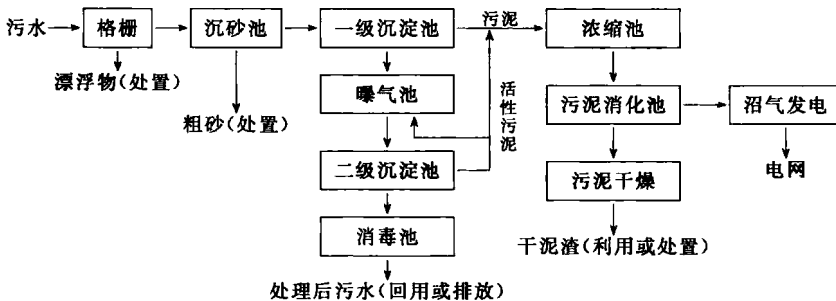


图 1-8 活性污泥法污水处理系统

三、环境系统分析的任务

当前，由于工业化和城市化带来的环境问题日益凸显，空气污染、水体污染、生态破坏威胁着人类社会的持续发展。现在的环境问题绝对不是局部性的、暂时性的，而是全局性的、持久性的。没有全社会的协调和努力，追求环境保护与经济发展的协调是不可能的，建设和谐社会的美好愿望也难以实现。

鉴于当代环境问题的特点，系统分析在解决这些问题时具有明显的优势。研究环境系统内部各组成部分之间的对立统一关系，寻求最佳的环境污染防治体系，建设健康协调的环境

生态系统；研究环境保护与经济发展之间的对立统一关系，寻求经济与环境协调发展的途径，是环境系统分析工作者所面临的两大任务。

在解决环境问题的过程中，环境系统分析工作者的最高目标是追求社会的可持续发展，追求经济效益、社会效益与环境效益的统一。最高目标的实现不会是一帆风顺的，在追求这个目标的过程中，必定会与其他目标产生矛盾，只有正确处理 and 解决这些矛盾，协调各方面的利益关系，才能一步一步地实现总目标。

四、环境系统分析的基础知识

环境系统分析的基础知识主要涵盖环境学科和系统学科两个方面。

环境学科是一门范围广泛的组合学科，所涉及的学科门类很多，与环境系统分析紧密相关的内容主要有：环境污染控制的原理与方法，环境质量评价和预测的理论与方法，环境区划与环境规划原理与方法，环境毒理学与环境标准，生态学原理，工程经济与环境经济学等。此外，环境法学、环境社会学等知识也很重要。上述这些内容有助于理解环境系统内部的功能结构、特征和变化规律，只有掌握这些知识，才能对系统进行概化，作出系统概化模型，进而建立系统数学模型。

系统学的理论基础之一——运筹学是实现环境系统最优化和辅助环境问题决策的重要手段。规划论、图论、博弈论等在环境规划和管理中起着重要作用。由于大多数环境系统的多目标、多层次和多变量特征，大系统分解协调技术具有广阔的应用前景。

作为技术手段，解析数学和计算数学、计算机应用技术 in 系统分析中占有重要地位。

环境系统分析涉及政治、经济、法学、美学、工程等领域及现代科学技术的几乎所有领域。作为环境系统分析人员，不仅要求具备环境学科、系统学科方面的基础知识，还要求有较多的社会知识和解决实际问题的能力。作为环境系统分析工作者，必须具有较高的政治素养和科学素质。一个好的系统分析人员，既是脚踏实地的工程师又是一位高瞻远瞩的战略家。

第四节 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 1-9）。

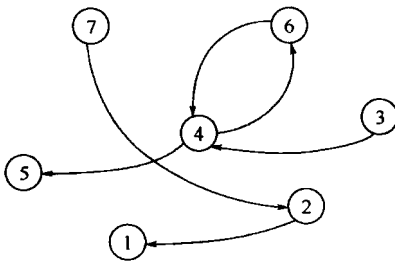


图 1-9 有向连接图

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：

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & n_i R n_j \\ 0 & n_i \bar{R} n_j \end{cases} \quad (1-6)$$

R 表示可以从 n_i 到达 n_j ， \bar{R} 表示不能从 n_i 到达 n_j

由此，与图 1-9 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:

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

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以求得系统的递阶结构。