



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

环境系统工程

主编 王丽萍 何士龙

HUANJING XITONG GONGCHENG



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press



环境系统工程

第10卷 第1期 2018年1月

环境系统工程编辑部



环境系统工程编辑部

环境系统工程编辑部

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

环境系统工程

主 审	张承中	
主 编	王丽萍	何士龙
参 编	雷灵琰	杨 帆
	李 燕	王立章

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书以环境系统数学模型、环境系统规划和环境问题的科学决策等原理及方法为重点内容较全面地阐述了环境系统工程的基本理论和方法。本书主要内容包括环境系统工程的基本理论和方法、环境系统模型化技术、环境系统规划、水环境系统模型、水污染系统控制规划、大气环境质量模型与控制规划等,也涉及环境系统思想与方法的现实应用——环境风险评价与管理、环境决策、工业生态系统工程等。

本书既有理论和方法的论述,又有应用实例,可作为高等院校环境科学与工程、城市规划、市政工程、资源管理以及其他相关专业本科生、研究生的教材或教学参考书,也可供从事环境规划、评价和管理以及市政、水利等有关部门的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

环境系统工程/王丽萍,何士龙主编. —徐州:中国矿业大学出版社,2010.11

ISBN 978 - 7 - 5646 - 0659 - 6

I. ①环… II. ①王…②何… III. ①环境工程:系统工程—高等学校—教材 IV. ①X192

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 073779 号

书 名 环境系统工程

主 编 王丽萍 何士龙

责任编辑 褚建萍 周 红

责任校对 孙 景

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 18 字数 449 千字

版次印次 2010 年 11 月第 1 版 2010 年 11 月第 1 次印刷

定 价 28.50 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



前言

面对全球性污染和生态破坏对人类生存和发展构成的现实威胁,保护环境和实现可持续发展,已成为全世界紧迫和艰巨的任务。长期以来,近代科学对客观世界进行分割式的研究,取得了巨大的成就,但同时也造成了人们对客观世界认识的局限性和片面性,以致在实践中出现了很多问题。随着环境科学研究的深入发展,对环境问题的认识也在不断的深化。对于环境管理涉及的复杂的巨系统,定性方法和定量方法必须结合,不能仅靠定量方法去解决问题,其中系统的思想和理论特别重要。大量的环境保护工作实践也使人们认识到,要有效地解决环境问题,必须对人类与环境系统的关系有整体性的把握,必须统筹兼顾,深谋远虑地处理好人类与环境系统的关系。因此,“环境系统工程”这门学科应运而生。环境系统工程是系统工程的新分支学科,是环境专业人才解决复杂环境问题的一项重要工具。

环境系统工程从系统的观点出发,将区域环境系统看成是一个大系统,对该系统整体进行研究,采取定量的或定性定量相结合的方法,建立环境系统数学模型,进行最优化计算,从经济、技术与社会各方面来对环境系统作优化分析和评价,立求决策科学。

本教材以环境系统数学模型、环境系统规划和环境问题的科学决策等原理及方法为重点内容,比较全面地阐述了环境系统工程的基本理论和方法;同时涉及环境系统思想与方法的现实应用如环境风险评价与管理、环境决策、工业生态工程等。本书作为教材凸现系统完整性、结构分章合理、拓展学科前沿、增强实用性、完善课程体系等特色,对培养学生环境工程系统思维,用系统观点分析环境问题,解决综合性和区域性及突发事故性环境质量预测与环境信息管理、环境决策与战略研究具有重要意义。本书既有理论和方法的论述,又有应用实例,可作为高等院校环境科学与工程、城市规划、市政工程、资源管理以及其他相关专业本科生、研究生的教材或教学参考书,也可供从事环境规划、评价和管理以及市政、水利等有关部门的科技人员参考。

本书编写分工如下:第一、六、十章由王丽萍编写,第二章由杨帆、何士龙编写,第三、七章由何士龙编写,第四章由李燕编写,第五章由王立章编写,第八章由雷灵琰编写,第九章由杨帆、雷灵琰编写。全书由王丽萍统一定稿,由西安建筑科技大学张承中教授主审。

由于编者水平有限,书中疏漏错误在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2010年3月



目 录

第一章 环境系统工程概述	1
第一节 系统及其特征	1
第二节 系统工程方法论	5
第三节 环境系统工程	10
第二章 环境系统模型概述	16
第一节 数学模型的定义和分类	16
第二节 环境系统模型的建立过程与方法	18
第三节 环境数学模型参数的估值方法	23
第四节 模型的验证和误差分析	29
第五节 灵敏度分析	31
第三章 环境质量基本模型	35
第一节 污染物在环境介质中的运动特征	35
第二节 基本模型的推导	37
第三节 环境质量基本模型的数值解	48
第四章 水环境系统模型	53
第一节 污染物在河流中的迁移转化过程	53
第二节 河流水质模型	59
第三节 河口水质模型	76
第四节 海水水质模型	81
第五节 湖泊和水库的水质模型	82
第六节 地下水水质模型	98
第五章 水污染控制系统规划	107
第一节 水污染控制系统规划的组成和分类	107
第二节 水环境容量与允许排放量的计算	109
第三节 水污染控制系统的费用分析	116



第四节	污水输送系统的规划·····	119
第五节	其他系统的最优规划·····	125
第六节	水资源—水质系统规划·····	132
第六章	大气环境系统模拟及规划·····	134
第一节	大气污染扩散特征分析·····	134
第二节	源强预测与有效源高估算·····	143
第三节	大气扩散模型概述·····	146
第四节	高架连续点源扩散模型·····	149
第五节	线源和面源排放模型·····	155
第六节	复杂条件下的大气质量模型·····	160
第七节	大气环境系统规划·····	166
第七章	环境决策分析·····	179
第一节	概述·····	179
第二节	常用的环境决策分析方法·····	181
第三节	多目标环境决策分析·····	186
第八章	多介质环境数学模型·····	198
第九章	环境污染事故的突发性预测·····	228
第一节	突发性环境污染事故及其预测·····	228
第二节	系统简化及其划分·····	231
第三节	风险识别·····	231
第四节	风险事故源项分析·····	243
第十章	工业生态系统工程·····	255
第一节	工业生态学原理·····	255
第二节	工业生态系统的模拟与分析·····	260
第三节	工业生态系统建模方法·····	267
第四节	工业生态系统的集成及调控·····	272
第五节	工业生态系统的构建·····	275
参考文献	·····	280



环境系统工程概述

第一节 系统及其特征

一、系统的概念

系统这一概念源于人类的长期实践,随着人类社会生产实践的发展而发展起来的。在处理具体工程问题和认识实际事物时,常提出系统这一名词,例如灌溉系统、河流系统、教育系统,但自 20 世纪 40 年代贝塔朗菲(Ludwig von Bertalanffy)提出一般系统论以后,特别是 20 世纪五六十年代应用系统工程解决复杂问题取得重大成功以后,系统思想与系统方法才广泛地渗透到各学科领域。随着系统概念在实际应用中进一步明确化和具体化,人们才认识到系统是一切事物存在的方式之一,所有事物都可以用系统的观点进行考察,用系统的方法进行描述。

尽管系统是人们对具体事物进行某种程度抽象得到的,但不同性质、结构和功能的系统之间存在着某些共性的东西。研究系统之间的共性规律,运用系统思想和方法解决问题,对于研究、创建、运行和管理具体的系统以及提高系统的功能具有重要意义。于是,系统科学、系统工程及方法就应运而生了。系统方法特别适合解决复杂大系统中的一些问题,尤其是涉及社会—经济—环境的复合系统。因此,自 20 世纪 70 年代以来,系统工程方法几乎被推广应用到人类社会经济和社会活动的所有方面。

系统是由两个或两个以上相互独立又相互制约并执行特定功能的元素组成的有机整体。系统的元素(组成部分)可以是一个子系统,每一个子系统又可以由若干个子系统组成。同样,每一个系统又可以是比它大的系统的一个子系统。我国著名科学家钱学森对系统的定义是:“把极其复杂的研究对象称为系统,即由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合成具有特定功能的有机整体,而且这个系统本身又是它所从属的一个更大系统的组成部分”。

从系统的定义可以归纳出系统的要点:一个系统由两个或两个以上的元素组成;系统元素之间相互独立又相互作用和制约;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,这些特性和行为并不是原来组成部分或任何一个子系统所具有的。换句话说,一个系统是由许多要素所构成的整体,但从系统功能来看,它又是一个不可分割的整体,如果硬要把一个系统分割开来,那么它将失去原来的性质。



二、系统的分类

在自然界和人类社会中,系统概念应用的广泛性决定了系统的多样性。从不同的角度出发,可将系统分成不同的类别。

(一) 自然系统与人工系统

按照系统的起源,可以将系统分为自然系统、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,如太阳系、银河系、宇宙系、生物系、生态系统、矿藏系统、海洋系统,以及微观的原子核系统等。为达到人类需求的目的而人为地建立起来的系统称为人工系统,如生产、交通、水利、电力、教育、经营、医疗等系统;由人将零星部件装置成工具、仪器、设备,以及由它们组成的工程技术系统;由一定的制度、组织、程序、手续等组成的管理系统和社会系统;根据人对自然现象、社会现象的科学认识而建立的科学体系和技术体系。

实际上,大多数系统是由自然系统与人工系统组合起来的复合系统。它们既有自然系统的特征,又具备人工系统的特性,如交通管制系统、航空导航系统、广播系统等人机系统。一方面,由自然系统和人工系统组合起来的复合系统,要适应自然系统的内在规律;另一方面它又是根据自然系统的内在规律而创造出来的。环境保护工作中的环境污染监测系统和环境污染控制系统等,均属于复合系统。

(二) 实体系统与概念系统

在研究与社会现象有关的一些问题时,理解实体系统和概念系统是很有用的。凡是以矿物、生物、机械和人群等实体为过程要素所组成的系统称之为实体系统。本质上讲,实体系统的特性是由实体执行的特定过程决定的,如污水处理系统的特性是由各单元构筑物净化污水过程组成的,它依赖于各个单元执行的工艺过程。凡是由概念、原理、原则、规划、政策、制度、方法、程序等概念性的非物质实体所构成的系统称之为概念系统,如军事指挥系统、环境管理系统、社会系统等。实体系统与概念系统在大多数情况下是结合的,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。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,也包括计算机系统、通讯设备系统等实体系统。

(三) 开放系统和封闭系统

开放系统是指与环境之间存在物质、能量和信息交换的系统。这些系统通过系统内部各类子系统的不断调整来适应环境变化,使其在一定阶段保持稳定状态,并谋求发展。而封闭系统则不存在物质、能量和信息的交换,由系统的界限将环境与系统隔开,因而它是一种呈封闭状态的系统。封闭系统存在的前提条件是,其系统内部的要素及其相互关系存在某种均衡关系,对这种关系的认识是了解封闭系统最基本的步骤。

实际系统一般都属于开放系统。因开放系统与环境有密切的关系,研究这类系统不仅要研究系统本身的结构和状态,而且要研究系统所处的外部环境,剖析环境因素对系统的影响方式和影响程度,以及环境随机变化的因素。系统面对的环境可能是平稳的,也可能是动态的;环境对系统的影响可能是确定的,也可能是随机的、不确定性的。开放系统必须具有适应环境变化的功能,否则无法继续生存。

有一些开放系统和环境没有清晰的边界,这种系统往往是按照所关心的问题从千丝万缕、互相联系的事物中相对孤立出一部分事物作为研究对象。处理这类系统,要力求组成系



统时尽可能排除主观因素的影响。

(四) 动态系统和稳态系统

按系统状态的时间过程特征,可将系统分为动态系统和稳态系统。系统的特征随时间变化的系统称之为动态系统,反之则称之为稳态系统。绝对的稳态系统是不存在的,状态随时间变化缓慢,或者在某一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。

在解决实际问题时,复合系统、动态系统和开放系统都是较难处理的系统,需要综合分类。环境保护系统就是属于这样复杂的系统。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。

三、系统的特征

(一) 目的性

人工系统和复合系统都是“自为”系统,是为追求一定的目的建立的。复杂系统的目的都不止一个,并与系统的结构层次相对应。系统作为总体具有一个总目标,各子系统也可分别具有各自的层次性目标,因此需要一个指标体系来描述系统的目标。为了实现系统的目的,使各层次的目标均能按既定的意图得以实现,系统必须具有控制、调节和管理的功能。管理的过程也就是系统的有序化过程,使它进入与系统目的相适应的状态。

系统追求自身的目的,而系统目的又可以分解为多层次的目标,实现全部的系统目标,就等于实现了系统目的。如果以 G 表示系统目的,以 g_i 表示系统目标,则

$$G = \{g_i \mid g_i \in G, i = 1, 2, \dots, p\} \quad (1-1)$$

(二) 集合性

集合的概念是指把具有某种属性的一些对象看成一个整体,从而形成一个集合。集合里的各个对象叫做集合的要素(子集)。系统是由两个或两个以上可以互相区分的要素(或子系统)组成的。实际工作中,系统常常是巨大而复杂的,这并不一定是在规模上庞大,而是由于非常多的要素作为它的组成部分,从而产生复杂的动作、程序和状态。一个系统常常是由若干子系统有机地结合起来的,子系统又由更小的系统构成,形成一个多层次的结构。

一个系统是由多个子系统和系统元素组成的,它们之间的关系可以表示为

$$X = \{x_i \mid x_i \in X, i = 1, 2, \dots, n \quad n \geq 2\} \quad (1-2)$$

式中, X 表示系统, x 表示子系统或系统元素。

(三) 相关性

组成系统的各部分要素之间及系统与环境之间相互联系、相互制约和相互作用,就是系统的相关性。如果只有一些要素,尽管是多种多样的,若它们之间没有任何联系,就不能称之为系统。相关性说明这些联系之间的特定关系以及这些关系之间的演变规律。

系统中的各个子系统以及系统元素之间存在着联系,这些联系是反映系统特征和保证实现系统目标的主要内容,体现了各个子系统或系统元素之间的相互联系和相互制约。

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

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。



(四) 阶层性

系统作为一个相互作用的诸要素的总体,可以分解为一系列的子系统,并存在一定的层次结构,这就是系统空间结构的特定形式。在系统层次结构中表述了在不同层次子系统存在着动态的信息流和物资流,其构成了系统的运动特性,为深入研究系统层次之间的控制和调节功能提供了条件。

子系统或者系统元素在系统中是按照一定的层次排列的,如图 1-1 所示。由于子系统或系统元素的位置差别,它们之间形成如下 3 种关系。

- ① 领属关系:表示上级子系统或元素对下级的关系;
- ② 从属关系:表示下级子系统或元素对上级的关系;
- ③ 相互关系:表示同级子系统或元素之间的关系。

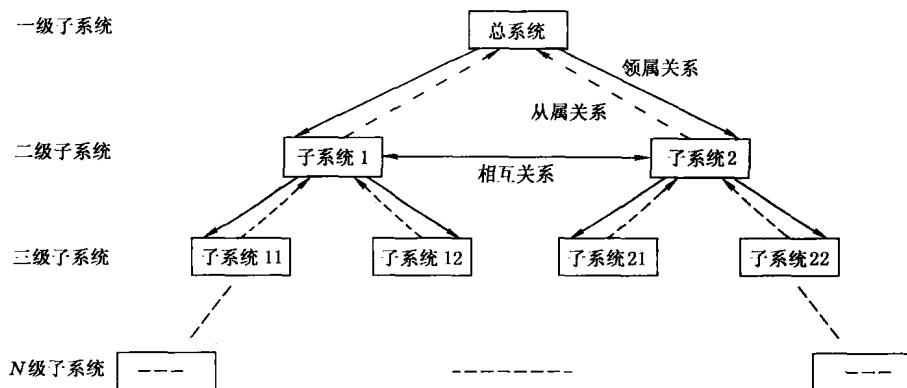


图 1-1 系统的递结构

(五) 整体性

系统是由两个或两个以上可以互相区分的要素,按照作为系统应具有的综合整体性而构成的。系统整体性表明,具有独立功能的系统要素以及要素间的相互关系(关联性、阶层性)是根据逻辑统一性的要求,协调存在于整体之中。任何一个要素不能离开整体去研究,要素间的联系和作用也不能脱离整体协调去考虑。系统不是各个要素的简单集合,否则它就不会具有作为整体的特定功能。脱离开整体性,各构成要素的机能及要素间的作用就失去了原有的意义,研究任何事物的单独部分不能够得出有关整体的结论。系统的构成要素和要素的机能、要素间的相互联系要服从系统整体的目的和功能,在整体功能的基础上进行各要素及其相互之间的活动,这种活动的总和形成了系统整体的有机行为。因此,在一个系统整体中,即使每个要素并非都很完善,但它们也可以综合协调成为具有良好功能的系统;反之,即使每个要素都是良好的,但作为整体不具备某种良好的功能,也就不能称之为完善的系统。

整体涌现性是一种规模效应和组分之间的相干效应(结构效应),因而具有非加合性,即对于系统而言,1+1 往往大于 2。优化设计和改造系统,目的就是为了提高系统的整体功能。系统的整体性体现了一个系统作为一个整体实现系统目标的特征。系统中的所有子系统和系统元素都按照一定的结合方式,追求系统目标的最优。结合效应可由下式体现:

$$E^* = \text{Max}_{p \rightarrow G} p(X, R, C) \quad (1-4)$$



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。

(六) 不确定性和环境适应性

系统具有不确定性,是因为系统中存在某些不能用确定性方法描述其状态的构成要素。这些组成部分的活动或者由于人的认识未完全掌握其准确的规律,或者由于活动本身具有一定的随机性,因而只能使用统计规律等手段反映其活动状态与进程,这就使系统具有不确定性。任何系统都不能孤立存在,而是存在于一定的物质环境之中,它必然地与外界环境发生物质的、能量的和信息的交换,以适应外界环境的变化,这就构成系统的环境适应性。同时外界环境的变化必然会引起系统内部各要素之间的变化。不能适应环境变化的系统则是没有生命力的,而能够经常与外部环境保持最佳适应状态的系统,才是理想的系统。

系统兼多样性和统一性两个特点。系统是一切事物的存在方式之一,因而可以用系统的观点来考察和描述事物。也就是说,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。简单地说,系统思想与方法的核心是把所研究的对象看做一个有机的整体(系统),并从整体的角度去考察、分析与处理事物。系统思想是指事物的整体性观念、相互联系的观念、演化和发展的观念等,这些都来源于人类的社会实践。这些思想方法,一旦获得了数学表达形式和计算工具,就从一种哲学思维发展成为专门的学科——系统科学和系统工程学。

第二节 系统工程方法论

一、系统工程

系统工程是一门新兴学科,目前还缺乏一个公认的定义。在科学技术的体系结构中,系统工程属于工程技术。国内外不同领域的学者,从各自的背景和不同的观点出发,对系统工程有不同的认识,提出了不同的定义,这为我们认识“系统工程”提供了线索和参考。

1975年《美国科学技术辞典》对系统工程给出的定义是:“研究许多密切联系的单元所组成的复杂系统的设计的科学。在设计时,应有明确的预定功能及目标,并使各组成单元之间以及各单元与系统整体之间有机联系,配合协调,从而使系统整体能够达到最佳目标。同时还要考虑系统中人的因素与作用。”

钱学森提出“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,是一门组织管理的技术”。

美国切斯纳(H. Chestnut)提出“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组成,这些功能部分之间存在着相互关系,但每个系统都是完整的整体,每一个系统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)的方法,并使各组成部分能够最大限度地互相适应”。

日本工业标准(JIS)规定,“系统工程是为了更好地达到系统目标,对系统的组成要素、组织结构、信息流动和控制机制等进行分析与设计的技术”。

日本学者三浦武雄指出,系统工程与其他工程学不同之处在于它不仅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。系统工程的目的是研究系统,而系统不仅涉及工程学领域,还涉及社会、经济和政治等领域,为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以外,还需要一种技术从横向把它们组织起来,这种横向技术就是系统工程,也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。

系统工程是以研究大规模复杂系统为对象的一门交叉学科,根据系统总体协调的需要,把自然科学和社会科学中的某些理论、方法、思想、策略和手段等有机联系起来,将人们的生产、科研或经济活动有效组织起来,运用定量与定性分析相结合的方法和计算机等技术工具,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。对系统的构成要素、组织结构、信息交换和反馈控制等功能进行分析、设计、制造和服务从而达到最优设计、最优控制和最优管理的目的,以便最充分地发挥人力、物力、财力的潜力,通过各种管理技术,使局部和整体之间的关系协调配合,以实现系统的综合最优化。从这些特点来看,系统工程不同于其他技术,它既是一门综合性的整体技术,又是一门定性定量相结合的技术,是从整体上研究和解决问题的科学方法。

从上述几个有代表性的提法中,可以看出系统工程具有如下特点:

① 全局性(又称整体性)。系统工程总是从全局整体出发,统筹兼顾,而不是从某一个局部或指标出发来思考和解决问题的。

② 关联性。系统工程研究问题都是全面深入地考虑系统各部分之间和各因素之间的相互联系和相互制约的情况,并且要用明确的方式(如方程式)表达出来。

③ 最优性。系统工程所研究的问题都是最优化问题,如果是多目标决策问题,则要寻求满意解。

④ 综合性。系统工程研究问题总是要求尽可能全面,要考虑经济、技术、政治和环境等多方面的因素,要应用基础数学、运筹学、经济学和各种有关专业知识,需要各方面的专家参加协作等。

⑤ 定量性。系统工程是定量的科学。应用系统工程研究问题,都要进行定量分析,即使有的难于直接或明确定量,也得设法借助其他办法加以定量,如模糊决策、灰色系统和专家评估就属于这类办法。

⑥ 实践性。系统工程非常强调实践,如果离开了具体系统的决策实践,也就谈不上系统工程。当然强调实践,丝毫不排斥对系统工程基本理论的深入探索。

二、系统工程方法论

(一) 系统工程的程序

系统工程和系统分析的定义严格来说是不同的,前者是处理系统的工程技术,也就是组织管理“系统”的规划、研究、设计、制造、试验和使用的科学技术,而后者则是应用于前者的数学理论和优选方法。系统分析也区别于运筹学。运筹学只对能定量或计算的问题进行择优,而系统分析还可以对包括某些不能定量或难于计算的因素的系统进行优化决策。但从

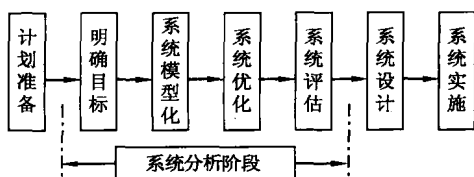


图 1-2 系统工程的程序

方法学范畴来看,系统分析和系统工程又属于相同的概念,它们都是力图全面地、发展地和互相联系地分析研究问题。

从一个系统工程的具体实施过程来看可将其分为四个部分,其中系统分析是系统工程的核心部分,如图 1-2 所示。

完整的系统工程是在系统分析的基础上

进行系统设计并加以工程实施的。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,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。

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。但从认识的角度,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,而这些经验中很多需要在系统设计和系统实施的过程中取得,同时,就某项实际工程而言,根据系统设计或系统实施阶段提出的反馈信息,成功修改或部分修改系统分析的实例也屡见不鲜。

(二) 硬系统方法论概述

任何一门科学或技术都有自己的一系列方法,系统工程也不例外。系统工程一直非常重视方法和方法论的研究,其中以霍尔(Hall,1969)为代表的硬系统方法论影响最广。他提出的系统工程的三维结构是比较完善的方法,特点是强调明确目标,认为对任何现实问题都必须而且可能弄清其需求。其核心内容是最优化,即现实问题都可以归结为工程问题,可以应用定量方法求得最优的系统方案。该方法的程序和步骤如图 1-3 所示。

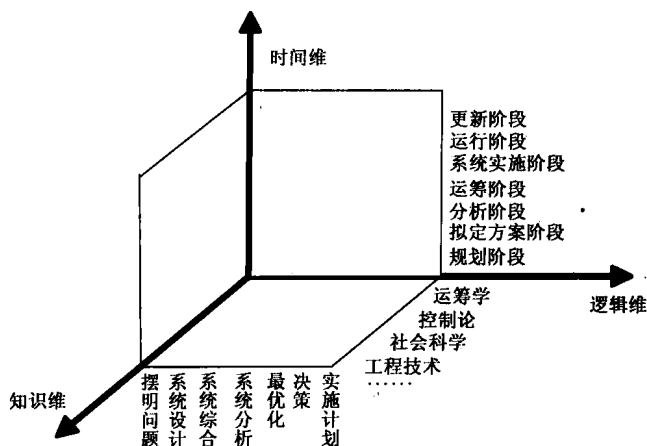


图 1-3 霍尔的系统工程方法论三维结构图

(三) 系统分析的工作步骤

一般而言,系统分析大体按以下步骤进行,如图 1-4 所示。

1. 明确问题的范围和性质

首先,问题是在一定的外部环境作用和系统内部发展的需要中产生的,它不可避免地带有一定的本质属性和存在范围,只有明确了问题的性质和范围后,系统分析才有可靠的起点。其次,根据问题的范围和性质,决定问题涉及的系统、系统的组成元素和元素间的相互联系以及它们和环境间的关系,从而将问题的界限进一步划清。其中,根据具体条件确定研究系统的内部结构和周围环境的联系是特别重要的。

2. 设立目标

系统分析是针对所提出的具体目标而展开的,由于实现系统功能的目的是靠多方面因

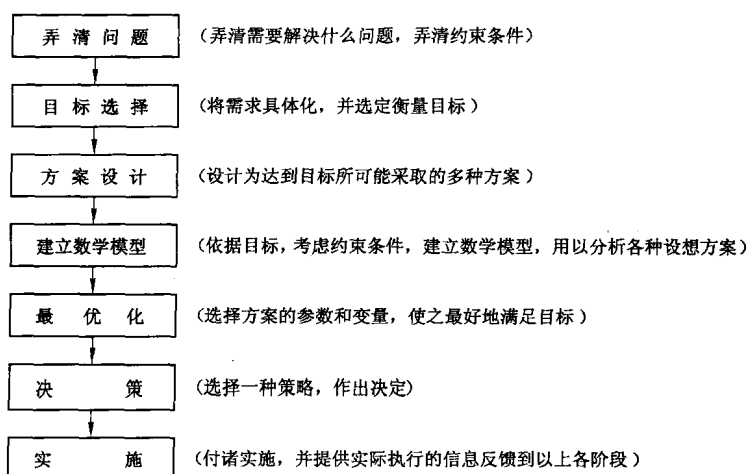


图 1-4 霍尔系统工程方法论的程序和步骤

素来保证的,因此系统目标也必然有若干个。在多目标条件下,要考虑各项目标之间的协调,防止发生抵触或顾此失彼,以及可能产生的互有矛盾。在明确目标的过程中,还须注意目标的整体性、可行性和经济性。

3. 收集资料,提出方案

资料是系统分析的基础和依据。根据研究的系统结构和选择的系统目标,以及对系统分析的其他要求,调查和测试系统及环境的有关数据资料,包括历史资料和当前的状态数据。资料 and 数据的获取通常通过调查、试验、观察、统计以及引用外国资料等方式。有时说明某一问题的资料很多,但未必都有用,因此,选择和鉴别资料是收集资料时必须注意的问题,避免过多冗余数据浪费时间和精力。收集资料特别重视调查数据的来源和质量,必须注意可靠性,说明重要目标的资料必须经过反复核对和推敲。资料必须是说明系统目标的,对照目标整理资料,找出影响目标的诸因素,然后提出达到目标条件的替代方案。所拟定的替代方案应具备创造性、先进性和多样性的特色。创造性是指方案在解决问题上应有创新精神,新颖独到,有别一般;先进性是指方案应采纳当前国内外最新科技成果,符合世界发展趋势,具有前瞻性;多样性是指所提方案应从事物的多个侧面提出解决问题的思路,使用多种方法计算模拟方案,避免落入主观、直觉的误区。

4. 建立数学分析模型

该过程包括建立系统的结构模型和优化模型。人们通过长期努力已经对许多典型环境系统建立了各种用于系统分析的模型。依据表达方式和方法不同,这些模型可分为图式模型、仿真模型、数学模型和实体模型。系统分析人员应找出说明系统功能的主要因素及其相互关系,即系统的输入、输出和转换关系,系统的目标和约束等,根据具体情况选择或修改现有的模型。通过模型的建立,确认影响系统功能和目标的主要因素及其影响程度,确认这些因素的相关程度、总目标的达成途径及其约束条件等,使模型能够满足现实系统分析任务和精度的要求。当没有合适的系统模型时,需要自己通过试验研究建立模型。

5. 综合分析评价

综合分析评价也称为决策阶段。一般通过系统分析可以得到不止一个可行方案,需



要从这些方案中寻找出最佳或较佳方案,这就需要评价标准。制定系统评价标准是决策的基础性工作。由于环境保护领域研究的多数是社会—经济—环境复合系统,目前用得最多的评价标准是环境经济学或环境生态经济学推荐的确定评价标准的方法,同时综合考虑设计系统的其他性能,如系统的功能、系统运行的可靠性、系统的可维护性、系统的实现难度和需要的时间等。利用已建立的各种模型对替代方案可能产生的结果进行计算和测定,比如费用指标,应考虑投入的劳动力、设备、资金和动力等,不同方案的输入、输出不同,得到的指标也不同,当分析模型比较复杂、计算工作量较大时,应充分利用计算机的多种功能和优势。

在上述分析基础上,再考虑各种无法量化的定性因素,对比系统目标需要达到的程度,用标准来衡量,即进行综合分析评价。评价结果应能推荐一个或几个可行方案,或列出各方案的优先顺序,供决策者参考。运用系统的结构模型和最优化模型,分析系统的各种可行方案,最终通过系统比较确定最优或较优方案,并撰写系统分析报告。

6. 系统设计与实施

系统设计是在系统分析提出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,以确保系统结果的实现。

硬系统方法的特点:抽象简化对象现实系统,以便进行状态描述;建立数学模型并在此基础上形成方案,进行方案优化和选择;强调数学模型的基础作用,要求尽可能精确并追求最优化和效率;无法考虑人的因素,主要基于还原论思想使之适于“硬问题”。

(四)“软科学”系统工程方法论

进入 20 世纪 70 年代以来,系统工程开始大量应用于社会经济系统和社会发展问题,所涉及的社会因素相当复杂,很多因素很难用定量方法进行研究。一些学者发现霍尔方法论对解决各种战术问题或组织管理大型工程问题(建立硬系统)有效,而对于以建立和管理“软件系统”为目的的社会科学、管理科学等软科学领域则不适用。

以切克兰德(Checkland, 1972)为代表的一些学者开始在霍尔三维结构基础上提出统一规划法。切克兰德提出“软科学”系统工程方法论,其核心不是最优化,而是比较或者学习,从模型和现状的比较中来学习改善现状的途径。比较意味着要组织讨论并达到共识,这样就能够更好地反映人的因素和社会经济系统的特点,不拘泥于定量分析。20 世纪 80 年代末,我国著名学者钱学森和其他系统工程研究者进一步提出了处理复杂巨系统的综合集成方法,1992 年又提出从定性到定量的综合集成研讨式体系。

一些学者把仅靠传统的运筹学和系统工程等、用常规数学模型就能优化解决硬问题的方法称为硬系统方法;把注重人的因素,考虑人的世界观、价值观以便处理包括人在内的软问题的方法称为软系统方法。而二者的结合称为广义系统方法,见图 1-5。

“软科学”系统工程方法论的主要内容如图 1-6 所示。

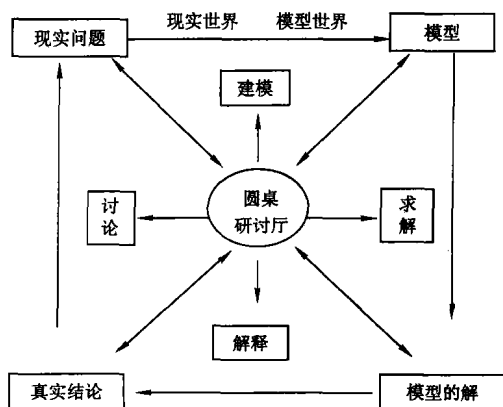


图 1-5 广义系统方法论

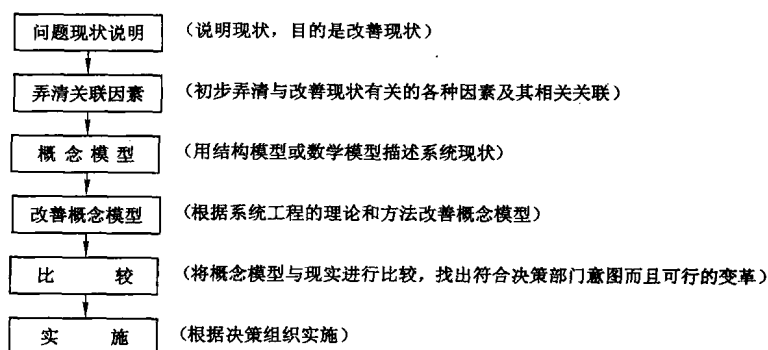


图 1-6 “软科学”系统工程方法论的主要内容

“软科学”系统方法的特点:问题处理过程分为现实世界行为和系统思考行为;注重人的因素,强调人的世界观和价值观;引入自学系统思维模型——概念模型;强调共识、沟通和适用方法;没有一定算法,可操作性差,主观性较强。广义系统方法的特点:还原思维和系统思维相结合,以系统思维为主;知识综合集成;兼有软硬系统方法的优点。

第三节 环境系统工程

一、环境系统的定义及其分类

人类生存的环境是一个大系统,这个大系统称为环境系统。它是由一定时空范围内的物理系统(岩石、土壤、大气圈、水圈)、生态系统(生物与非生物成分组成的循环动态系统)和社会系统等三个大子系统组成的。由于组成环境系统的三大子系统之间或内部不断地发生信息、物质和能量的交换,因而,环境系统是一个具有多层次结构、多输入、多输出、多目标、多变量和随机性的巨大复杂的系统。每个大子系统又是由众多次级子系统组成的。环境系统是一个非常庞大而开放的复杂巨系统,随着理论与实践的发展,环境系统变得越来越复杂。从系统分析的观点出发,环境系统的复杂性以及伴随着复杂性而存在的模糊性,主要表现在系统的组成,系统的指标、目标和约束,系统的决策者等几个方面。

事实上,人们在认识环境质量演变规律,寻找环境质量调控方法,建立环境污染控制系统、生态环境保护系统和环境管理系统时,一般把与所研究的环境问题有关的事物或元素组织起来,把所形成的有机整体称为环境系统。环境问题一般都比较复杂,具有跨领域、多层次、多因素的特点,不仅涉及自然科学和工程技术研究的内容,还涉及社会科学和各类生态学研究的内容,这使得环境系统也十分复杂。

目前,人们研究比较多的和比较成熟的是各类环境污染控制系统,包括对污染发生源的控制系统和污染物处理系统的研究,对环境—社会—经济复合系统、环境生态系统的研究还不普遍。环境监测和环境管理可以认为是污染控制的手段,从这个意义上讲,这两个系统也是环境污染控制系统的子系统。表 1-1 列出了与环境污染控制有关的环境系统。