

孟繁坚、杨汝均 编

环境 系统工程 导论



机械工业出版社

环境系统工程导论

孟繁坚 杨汝均 编

烃加工出版社

内 容 简 介

本书系统地阐述了环境系统工程的基本理论和方法。重点介绍了建立定量描述污染物在大气和水体中迁移、扩散和变化过程的数学模型的基本方法，以及环境污染控制系统模拟和规划的理论和方法。书中提供了一些实例，并在附录中提供了可供实用的BASIC语言程序。

本书可作为大专院校环境工程专业本科生及研究生学习环境系统工程课程的教材，也可供从事环境保护科学的科技人员及环境管理人员参考。

环境系统工程导论

孟繁坚 杨汝均 编

轻工业出版社出版

顺义曙光印刷厂排版

顺义曙光印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 32开本 10 7/8印张 297千字 印数1—5,000

1987年5月北京第1版 1987年6月北京第1次印刷

书号：15391·61 定价：2.05元

前 言

环境科学是一门涉及许多学科的边缘科学。环境保护问题与土地利用、能源利用、水资源利用、工农业生产和城镇的发展等各个方面都有着紧密的联系。另一方面,在环境系统中的各个因素之间又有着错综复杂的关系。因此,我们常常难于从很多可供选择的方案中选出一个最符合某个设想目标的方案。幸运的是,近些年以来,随着电子计算机的发展与普及,系统工程学方法正被引入各个工程领域。实践证明,为了合理、有效和经济地保护人类的环境,从系统的观点出发,把系统工程方法用于解决环境工程的规划、设计、管理和运行的问题,可以大大提高环境工程的技术经济效益和环境效益。因此,作为环境科学和系统工程学的重要分支,环境系统工程学在近年来得到了迅速的发展。

本书为环境保护方面的专业工作者提供关于学习系统工程学的方法,学习环境系统工程学的基本知识以及作为应用入门的向导。控制大气和水质污染是环境工程要解决的两个重要问题。本书在系统介绍基本概念的基础上,提供了关于建立定量描述污染物在大气中和在水中的迁移、扩散和变化过程的数学模型的基本方法,阐述了对环境系统进行数学模拟的基本知识,介绍了为选择最优方案而应用线性规划和动态规划方法所需的基础知识。除了在正文中提供一些实例外,在介绍基本方法的同时,我们还提供了一些由我们编制的可供实用的BASIC语言程序作为本书的附录之一。为了

便于读者进一步深入学习，在附录中还提供了我们在编写这本书时所参考的主要书目与文献目录。因此，本书也可作为专业工作者的一本实用参考书。

本书是我们自1979年以来在北京工业大学土建系和化学与环境工程学系所做的教学工作和科学研究工作的结晶，书中引入了国内外在环境系统工程学方面的某些新发展和我们的某些研究成果。本书的基本内容曾多次作为北京工业大学有关专业的本科生或研究生以及一些全国性讲习班的“环境系统工程”、“水环境系统数学模型”等课程的主要教学内容。因此，本书也适合于环境工程，给排水工程等专业用作开设“环境系统工程”课程的基本教材。

由于我们的水平所限，本书一定还有不少不妥和有待完善之处，真诚地欢迎各方面人士给予批评指正。

本书在编写和成书过程中曾得到刘天齐教授的多方指导和热情的支持，在此表示深切的感谢。

编者于北京工业大学

目 录

前言

第一章 绪论——系统方法概念	1
§ 1.1 系统和系统工程的概念	1
1.1.1 系统的定义和特点	1
1.1.2 系统工程学的发展与特点	2
1.1.3 系统工程学的理论基础	4
1.1.4 系统工程学的应用领域	5
§ 1.2 环境系统和环境系统工程学	7
1.2.1 环境系统 控制的方法论	7
1.2.2 环境系统 问题	9
1.2.3 环境系统工程学	15
§ 1.3 环境系统工程问题的一般工作步骤	15
1.3.1 明确问题	15
1.3.2 目标选择	16
1.3.3 系统综合	16
1.3.4 系统分析	17
1.3.5 决策	17
1.3.6 实施	18
第二章 环境系统模型识别基础	20
§ 2.1 引言	20
2.1.1 数学模型的定义和分类	20
2.1.2 建立系统模型的一般要求和步骤	23
2.1.3 数学模型的作用及应用	27

§ 2.2 环境系统现象模型推导基本原理	29
2.2.1 环境系统现象模型推导基本原理	29
2.2.2 现象模型的简化	32
2.2.3 环境系统模型的建立	46
§ 2.3 参数估计的一般方法	54
2.3.1 静态模型参数的最小二乘估计	54
2.3.2 非线性模型的参数估计	73
2.3.3 系统动态模型的参数估计	86
§ 2.4 数学模型的灵敏度分析	93
2.4.1 灵敏度分析的意义	93
2.4.2 灵敏度和灵敏度系数	94
2.4.3 灵敏度系数的求法	97
第三章 环境系统数学模型	104
§ 3.1 大气污染控制数学模型	104
3.1.1 烟流模型	105
3.1.2 烟团模型	122
3.1.3 箱式模型	126
3.1.4 原始模型	129
3.1.5 污染预测的统计模型	132
§ 3.2 天然水体水质数学模型	139
3.2.1 关于水体中一些基本现象的数学描述	140
3.2.2 一维河流水质数学模型	151
3.2.3 河口、湖泊(或水库)的水质数学模型简介	184
3.2.4 地下水水量水质数学模型简介	200
§ 3.3 常用水处理单元操作和单元过程数学模型	211
3.3.1 三种连续流反应器的基本方程	212
3.3.2 沉淀和过滤	219
3.3.3 活性污泥过程	222
3.3.4 生物膜过程	224

第四章 环境污染控制系统模拟	227
§ 4.1 系统模拟 概述	227
§ 4.2 大气污染控制系统 模拟	231
4.2.1 气象要素和污染源数据 分析	231
4.2.2 对污染物扩散模拟的 方法	245
§ 4.3 河流水质 模拟	254
4.3.1 河流水质模拟 概述	254
4.3.2 一维河流和河口的水质 模拟	256
第五章 环境污染控制系统规划	289
§ 5.1 水污染控制系统规划	289
5.1.1 水污染控制系统的结构层次与规划 要点	290
5.1.2 最优化方法在水污染控制系统规划中的 应用	303
§ 5.2 大气污 染控 制	337
5.2.1 大气污染控制概念及 方法	337
5.2.2 最优化方法在大气质量管理中的 应用	348
附录一 主要符号表	363
附录二 应用程序	367
参考文献	397

第一章 绪论——系统方法概念

近十多年来，在国内外的科技文献、书籍和教材上，已经愈来愈多地见到“系统”、“系统分析”、“系统工程”和“数学模型”等技术名词或术语。在环境保护领域里也已经出现“环境系统工程”、“水质数学模型”等新的术语。大家知道，环境科学是一门边缘科学，环境工程要解决的问题常常与一个区域（如城市地区，一个流域等等）内的工农业发展、技术经济水平、自然条件和社会条件等许多种因素有关，必须对这些因素作出全面的、合理的分析，才能作出正确的决策或对策。因此，应用系统分析方法去解决环境工程问题正日益受到重视，并愈来愈显示出系统分析方法的技术经济效益。把环境保护问题，以及环境中的各种现象抽象为数学模型是应用系统分析方法的基础工作。在学习环境系统的数学模型之前，有必要先了解一些关于系统、系统分析和系统工程的基本概念。

§1.1 系统和系统工程的概念

1.1.1 系统的定义和特点

一、系统的定义

“系统”这个词已经成为当代最流行的词汇之一。我们常常用到这样一些名词：工业系统、农业系统、教育系统、供水系统、排水系统、水处理系统和环境系统等等。随着电子

计算机的迅速发展，关于“系统”研究方面的科学技术也在飞速发展。然而，到目前为止，对于“系统”或“系统工程”等词汇的定义还是因人而异的。我们可以引用我国科学家钱学森提出的一个关于系统的定义：把极其复杂的研究对象称为“系统”，即由相互作用和互相依赖的若干组成部分结合成的具有特定功能的有机整体，而且这个“系统”本身又是它所属的一个更大系统的组成部分。

二、系统的特点

在人类社会中，“系统”往往是人为地把一些部分组合在一起以达到某种目的，如工业系统、排水系统和环境系统等等。然而地球上也还存在一些自然组合的系统如天然生态系统、天然河流系统等等。不管是人为的还是自然的系统都是由许多单元部分组成的。但整个系统的特定功能与每个单元的功能是截然不同的。例如在一个水处理系统中，每个单元构筑物都有它自己的特定功能，但是只有组成一个系统才能把某一种水质的水处理到预定的水质标准。由于系统只有作为一个整体才能发挥功能这一特点，若只取某个系统的一部分来加以研究，不可能达到很好改善这个系统的目标。概括说，系统的主要特点是：规模大，即由许多小单元组成；复杂，即单元之间的互相关系和影响极其复杂；有一个特定的功能，即系统整体能实现某种目的。

1.1.2 系统工程学的发展与特点

一、系统工程学的发展

近年来，科学技术正在以异乎寻常的速度向前发展，可以预见，在本世纪末，下世纪初，或者几十年内，由于把现在已经突破或将要突破的新技术运用于生产，运用于社会，将使社会生产力发生新的飞跃。随之而来的是需要人们处理的

问题也日益复杂，如何合理地对巨大而复杂的问题作出判断、决策、设计和运行巨大而复杂的系统就成了人们在近几十年里应逐步研究加以解决的问题。人们把通过研究解决巨大而复杂的问题所得到的经验和知识加以总结归纳，就逐步形成合理处理系统的工程学领域——系统工程学。

系统工程学的思想是人类社会发展过程中早就有的，据说我国古代都江堰的规划设计就体现了系统工程学的思想。然而，系统工程学真正成为一门科学还是近代的事。第二次世界大战中产生了运筹学，从而为从科学的角度处理大规模复杂问题提供了好方法。战后这种方法被用于经营上和事务管理上，并取得迅速发展。1957年，有人把寻找和利用系统的特性的方法称为“系统工程学”（1957年，H·Goode和R·Machol）以来，在各个领域有很多人作了系统方面的研究。尽管“系统工程学”的理论体系还不完善，也还没有形成真正统一的工程学体系，但还是取得了相当大的实用效果。

二、系统工程学的定义和特点

迄今为止，人们仍是笼统地使用“系统工程学”这个词。关于“系统工程学”，其定义比“系统”的定义还要含糊不清。一般认为，系统工程学是对系统进行合理规划、研究、设计和运行管理的思想、步骤、组织和技巧等的总称。从这个定义出发，系统工程学可以分为广义的和狭义两种。广义的系统工程学是以思想和步骤等为主的哲理性的科学，而狭义的系统工程学是指对研究的问题进行系统分析、模拟（或仿真）和优化的科学。目前各类工程系统都正在形成各自的系统工程学，如环境系统工程、机械系统工程和管理系统工程等等。

系统工程学的主要特点是：一般从选择目标开始以求得

到一个最优的或准优的综合系统，它不仅涉及工程技术本身，而且还涉及经济、社会、心理等领域，它总是对一个集合体加以整体研究，大多数情况下要靠电子计算机来完成。

1.1.3 系统工程学的理论基础

一、系统工程学的共同理论基础

一般认为系统工程学的共同的理论基础是在近代得到迅速发展的控制论、运筹学和计算科学这三个新兴学科。

控制论是系统工程学中进行系统分析的主要理论基础，“控制”系指：运用影响去指挥、支配、调节或约束一个系统。而控制论是关于控制系统的分析与综合、控制程序与方法的总称。应用控制论的方法可以把所研究的控制系统问题模型化，对其加以综合。各种范畴的规划设计、管理和运行，往往都可作为控制问题来处理。环境的规划、设计、管理和运行同样也可以作为控制系统问题来处理。

运筹学以事物的活动规律（可总称为“事理”）为研究对象，随着研究事物的不同，它有不同的分支，排队论、博弈论和各种数学规划方法都属于运筹学的分支。排队论研究的活动的特征是拥挤现象，这种现象可以归结于这样的模型，即顾客逐一来到服务台前，希望得到接待。如果服务台前已有顾客，则需排队等待。显然，这种现象比比皆是。排队的长度，等待的时间，服务台的忙闲情况就是排队论所探讨的内容。博弈论所研究的是依赖于策略的竞争性活动。下棋、各种竞赛和竞争活动就是这一类活动。例如孙臆为田忌所出的与齐威王驰射赌胜的策略“……以君之下驷，当彼上驷，而取君之上驷，与彼之中驷角，取君之中驷，与彼之下驷角，君虽一败，必有二胜”。就是一种博弈论的策略选择结

果。博弈论也有称为对策论的。种种数学规划方法是人们在研究生产组织和计划中逐步产生的一些数学方法。各种各样的配方、运输、物资分配和厂址选择等问题都可以利用一种数学规划方法如线性规划、非线性规划等方法使这种种配置问题按照某种目标取得最优。总之，利用运筹学的各个分支理论可以寻找最优或准优的系统，作出决策、规划、设计和运行管理方案等，也即通常所说的“选优”和“优化”。

计算科学是系统工程学中利用电子计算机解决复杂问题的基础，无论利用控制论还是利用各种运筹学分支理论，常常要遇到复杂和大量的计算，如线性规划问题没有计算机就不能付诸广泛使用。另一方面，对于控制论和运筹学来说，计算机不仅仅是一个计算工具，而且是一种实验设备。例如，在计算机上对系统进行模拟就是一种行之有效的方法。

二、系统工程学分支的理论基础

对于某一特定工程领域的系统工程学分支来说，有其特殊的理论基础。如化工系统工程以化学工程学为基础。又如为了建立一个水处理过程系统模型必须具有物理、化学、水力学和微生物学等方面的理论基础。总之，要想在某一工程领域里应用系统工程方法，不仅要掌握前述的共同理论基础，还必须掌握与该类工程学有关的知识，也即对工程学的知识面要较宽。

1.1.4 系统工程学的应用领域

虽然目前还没有统一的系统工程学体系，但系统工程学在今天已几乎应用于人类社会活动的各个领域，表1—1列出了当前的一些应用方面。

表1-1 应用系统工程学的方面

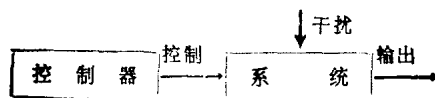
工业系统	生产过程系统	最优设计、最优控制、过程模拟、分级控制、自动启动……
	网络系统	交通、电力、给水、排水、安全回路、分配网络、情报网络……
	其它	机场管理、宇宙开发、建筑、区域供冷暖气、工业用机器人……
管理系统	经营	经营管理、经营模型
	计划	计划、规划、预算系统、调度……
	信息管理	信息检索、生产、研究、销售、库存管理系统……
服务系统	预约服务	铁路、飞机座位、旅馆预约……
	银行证券业务	联机自动化……
	邮局	自动分检……
社会系统	经济	经济模型、流通机构、资源分配……
	国土	地区开发、城市规划、环境保护……
	教育	教育组织、教育机构……
	国防	半自动化地面防空系统……
人体系统	生理、病理	分析、模拟……
	脑、神经、心理	思维模型、神经细胞模型、人工智能、对策模拟……
	医疗	自动诊断、医院自动化……
	人工器官与肢体	假手、假脚、人造内脏
自然系统	气象	天气预报、防洪措施
	地震、火山	防灾系统……
	农业、林业	规划、生态学、自动化
	河流、海洋、土地	水库水量调节、水资源利用、土地资源利用、地下水资源利用、海洋开发……

§1.2 环境系统和环境系统工程学

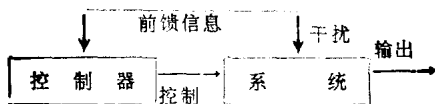
1.2.1 环境系统控制的方法论

众所周知,随着人类社会的发展,环境问题愈来愈需要我们加以认真对待。同时,随着对环境污染的认识日益深入,人们逐渐认识到环境问题不是简单的治理大气污染和水质污染,而是一个复杂系统问题。从污染的发生源开始,通过大气和水等介质的传播、扩散和变化,最后到影响人类、动植物而造成危害等整个过程进行系统的分析研究。只有对环境问题的各个环节加以定量化并以此为基础找出最优的总体控制规划、设计和运行管理方案,才能有利于在发展生产、实现四个现代化的同时妥善地解决环境问题。通常所说的环境系统控制一般还是使用经典的控制论的观点。图1-1就是对于经典控制方法论的一个示意说明。图1-1(a)是最简单的控制方式,称作开环控制方式。在开环控制方式中,控制对策的决定与外界的干扰和输出的状态无关,如果控制的目的是减少外界干扰对输出的影响,这种控制方式是不够用的。如果把污染源排放污染物作为一种对环境系统的干扰,把环境质量作为环境系统的输出,则很明显,在对环境质量与排污都不了解的情况下,采取的任何环境保护措施都是盲目的。

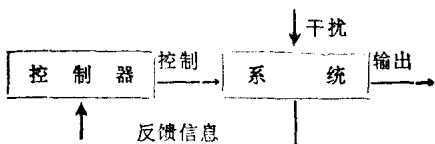
第二种控制的方式如图1-1(b)所示,称为前馈控制方式。它与开环控制方式的区别在于它考虑了干扰的影响后才作出控制的决定。在环境保护中,当污染源的排放状况可监测(或可预测)并且对环境质量的影响也已知时,依据污染源的排放状况而对系统作出一些控制决定就是一种前馈控制方式。图1-1(c)是当前最流行的反馈控制方式,它是



(a) 开环控制方式



(b) 前馈控制方式



(c) 反馈控制方式

图1-1 经典控制方式示意图

依据输出的状态来作出控制决定。与前馈控制方式相比，这种控制方式有三个基本优点：第一，因为是直接测定输出的状态，可以消除任何种类的干扰的影响；第二，不需要建立干扰源的模型；第三，控制灵活。通过制订环境质量标准来实

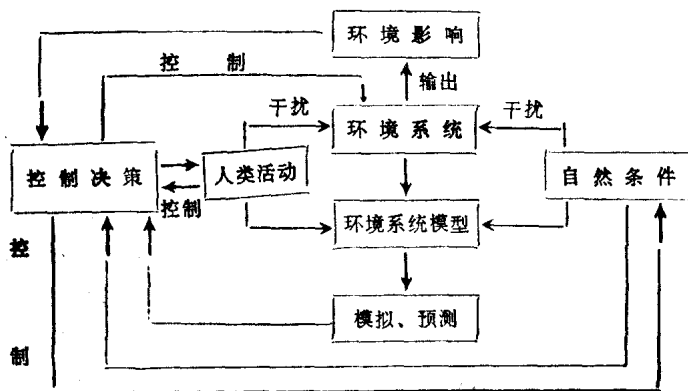


图1-2 环境控制方法论

现对环境质量的控制就是一种反馈控制。我们运用这些经典控制论观点可以画出如图1-2所示的那种环境控制方法论。

1.2.2 环境系统问题

从上述关于系统的定义出发，我们可以举出以下一些环境系统的例子来加深对环境系统问题的一般认识。

一、大环境系统问题

如果我们从整个地球的角度来看环境问题，可以图1-3那样的框图来表示人类的活动与地球上的自然环境之间的相互关系。图中每一个方框都表示一个子系统，带有箭头的连线

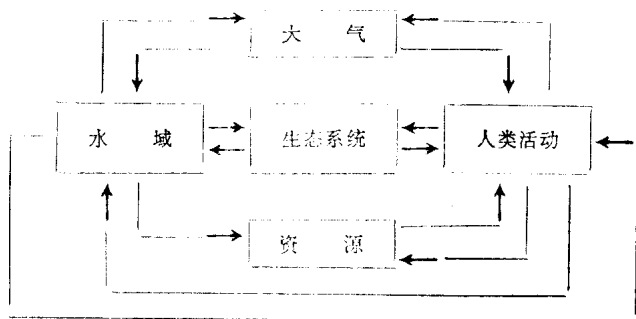


图1-3 大环境系统示意图

表示各个子系统之间的相互关系。我们分别看一下水域、大气和生态系统与人类活动的关系。

1. 水域

水域是一个与人类活动直接有关系的子系统。我们知道，地球上目前可利用的水资源是有限的，人类的活动正通过取走清洁的水和排出被污染了的水使有限的水资源（特别是淡水资源）日趋紧张。同时人类的活动使大气受到污染而形成酸雨，间接危害天然水体的水质。除了直接影响人类的生产和生活外，水质的恶化也正在逐渐地改变一些地区的生态平