



HUAN JING
XITONG
GONG CHENG
FANGFA

环境

● 汤兵勇 姜海涛 任 建

柴政洪 韩志刚 编著

● 中国环境科学出版社

系统工程方法

环境系统工程方法

汤兵勇 姜海涛 任 健 编著
柴政洪 韩志刚

中国环境科学出版社

1 9 9 0

(京) 新登字089号

内 容 简 介

本书较系统地论述了环境系统工程的基本理论与方法,从一般原理入手,进而分章介绍了实用的环境系统工程技术,即:环境系统建模、环境系统仿真、环境系统分析与环境系统优化(主要包括系统预测、决策、控制与规划);并配有应用实例,介绍了具体做法。本书内容丰富,在理论方法叙述时力求深入浅出,通俗易懂。对于必备的环境数学基础知识,在书后的附录中有简要介绍,可供读者选读。

本书可作为从事环境保护、市政建设、资源开发与规划等专业工作的科研人员、工程技术人员和管理干部的工具书,也可作为高等院校环境工程、环境监测、给排水工程、水利工程及其他有关专业的教材或教学参考书。

环境系统工程方法

汤兵勇 姜海涛 任 健 编著
柴政洪 韩志刚
责任编辑 李静华

中国环境科学出版社出版

北京崇文区岗子街8号

三河县宏达印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行 各地新华书店经售

1990年10月 第 一 版 开本 850×1168 1/32

1992年4月 第二次印刷 印张 8 7/8

印数2701-5700 字数 235千字

ISBN 7-80010 681-0/X·368

定价: 5.50 元

前 言

人类的生存依赖于所生活的环境，人类社会的发展必须发展经济。经济的发展将对环境的质量产生一定的影响，环境保护又往往对某些经济系统的发展提出一定的限制，所以保护环境质量与发展经济是人类社会发展中遇到的处在统一体中的一对不可避免的矛盾。工业发达国家在实现现代化过程中，几乎都出现了严重的环境污染与破坏。为此他们都付出了巨大的经济和社会代价。我们必须吸取这一深刻的历史教训。

从人类历史的经验教训中可以看出环境污染的形成及其控制都不是孤立的，它们实际上是在当代技术经济条件下，人类活动与生态平衡、经济发展与环境质量、污染物排放与环境容量、生产工艺与污染治理、废物回收与处理、人工处理与自然净化、以及各种处理过程之间等等一系列关系的综合协调和失调问题。如果避开这些相互关联因素所组成的环境问题的整体，而只是局部地、片面地去考虑问题或头痛医头、脚痛医脚地去处理问题，往往会是无济于事，甚至适得其反。然而，系统工程的理论与方法是解决这一系列环境问题的有效方法。特别是20世纪60年代后期，环境污染的控制进入新的综合防治阶段，提出了许多综合性很强的问题，过去所使用过的比较狭隘孤立的、以定性判断为主的方法已经不能适应这种要求了，更为迫切地需要提供一种能够定量描述环境系统及其各个组成部分、从而能把该系统从技术经济和环境效果上求得整体最优化的方法。这样，已经发展起来的系统工程理论与方法比较迅速地在环境保护工作中得到应用。仅仅十几年的时间，环境系统工程的研究发展非常迅速，在水污染控制和大气污染控制方面取得了较为显著的效果。例如，国际上著名的河流如美国的特拉华河、威拉米特河、福克斯河，英国的

泰晤士河和特伦特河，加拿大的圣约翰河，联邦德国的乃卡河，法国的圣诺曼提河等，在其污染控制的规划和治理过程中，都运用了系统工程方法，研究和应用了水质的数学模型来模拟、评价和预测污染的现状以及各种治理方案，并运用优化的方法寻求最佳的治河方案。这种系统分析的结果不仅具有重要的经济价值，并且还管理和规划提供了比较系统又很重要的信息，以便在此基础上作出比较切合实际的决策。我国这些年来在这方面也有了应用成果，均取得了良好的效果。

从环境系统的组成及其结构可以看出，环境系统是一个庞大复杂的有机综合体，它具有多级递阶结构的，多输入、多变量的，在时间、空间和数量上都具有随机性和不确定性的以及多目标的特点。同时，它也是动态的、开放的系统，不仅涉及到自然科学，还涉及到组织、管理、教育、经济、法律、政治等广泛的上层领域，包含着深刻的社会性。

环境系统工程具有全局性、关联性、最优性、综合性和实践性等几个特征，它基本属于环境科学的应用科学范畴。同时，它又是社会学、法学、经济学、工程技术、医学等的统一体，其内容大体可概括为：以环境质量的变化规律、污染物对人体和生态的影响、环境自净能力以及有关环境工程技术原理为依据，运用系统工程的理论和方法，研究如何利用合理建立的环境污染控制系统数学模型来分析各种污染控制过程可调因素（或各种可替换的方案）对环境目标或费用、能耗等的影响，提供尽可能完整的资料，以便作为决策者规划、设计、管理环境问题以及预测评价环境影响和合理制订环境目标的依据。

本书从实际应用出发，较系统地论述了环境系统工程的基本理论与方法，介绍了实用的环境系统工程技术，即：环境系统建模、环境系统仿真、环境系统分析与环境系统优化（主要包括系统预测、控制、决策与规划），并配有应用实例。本书内容丰富，在理论方法叙述时力求深入浅出，通俗易懂。为使广大实际工作者便于阅读和应用，着重于讲清方法及其思路，略去了几乎

所有的理论证明和技术细节，读者欲知其详可参阅有关参考文献。对于必备的环境数学基础知识，在书后的附录中有简要介绍，可供读者选读。

对在我们的工作中给予大力支持、协助、指导的系统工程与环境科学界的各位专家、学者及科技工作者表示衷心的感谢。由于我们的水平有限，书中不当之处，还望同行们批评指正，以便进一步完善提高。

编 著 者

1989年3月

目 录

前言	(i)
第一章 环境系统工程概述	(1)
§ 1.1 系统工程简介	(1)
§ 1.2 环境系统、环境要素及环境结构	(5)
§ 1.3 环境系统工程	(15)
第二章 环境系统模型辨识	(18)
§ 2.1 系统模型辨识简介	(18)
§ 2.2 环境系统的数学模型	(21)
§ 2.3 确定模型结构的简单方法	(33)
§ 2.4 常用的系统参数估计的方法	(43)
§ 2.5 应用实例——水质模型的辨识和参数估计	(55)
第三章 环境系统仿真	(64)
§ 3.1 系统仿真的基本概念	(64)
§ 3.2 系统仿真一般步骤	(67)
§ 3.3 应用实例——河流水质仿真	(70)
第四章 环境系统分析	(85)
§ 4.1 系统分析概述	(85)
§ 4.2 环境系统可行性研究分析	(90)
§ 4.3 水体环境质量评价分析	(95)
§ 4.4 模糊综合评判方法及其在环境系统中的应用	(99)
第五章 环境系统预测	(112)
§ 5.1 系统预测的一般原理	(112)
§ 5.2 环境系统定性预测方法	(115)

§ 5.3	环境系统定量预测方法	(120)
§ 5.4	多层递阶预测方法	(132)
第六章	环境系统控制	(151)
§ 6.1	系统控制论概述	(151)
§ 6.2	最大值原理及应用	(154)
§ 6.3	动态规划及应用	(158)
§ 6.4	大系统理论及应用	(169)
第七章	环境系统决策	(184)
§ 7.1	系统决策概述	(184)
§ 7.2	单目标风险型决策	(188)
§ 7.3	单目标非确定型决策	(198)
§ 7.4	多目标决策方法	(203)
第八章	环境系统规划	(213)
§ 8.1	区域环境规划概述	(213)
§ 8.2	线性规划简介	(222)
§ 8.3	多目标规划简介	(234)
§ 8.4	变系数数学规划简介	(243)
附录: 环境数学基础知识		(249)
I	线性代数基础知识	(249)
II	微积分基础知识	(258)
III	概率统计基础知识	(264)
主要参考文献		(273)
后记		(274)

第一章 环境系统工程概述

现代科学技术发展正突飞猛进。从科学的角度看，有两种趋势是很明显的：一种是学科越分越细，新的学科分支越来越多；另一种是综合趋势，交叉学科不断产生。过去看来不太相关的学科，今天却相互交叉走向一体化的方向。这后一趋势更引人注目，其中自然科学与社会科学的交叉正吸引着广大科学技术工作者。所有这些发展都标志着人类对自然界、社会和人类自身的认识越来越深化、越来越自觉，这是人类不断进步和走向文明的标志。

系统科学就是这样一门正在形成和发展的新兴科学技术，它由三个层次构成：①直接改造客观世界的工程技术——系统工程；②为系统工程直接提供理论基础的技术科学——运筹学、控制论、信息论；③研究系统结构、演化、协同和控制一般规律的基础科学——系统学（目前正在筹建）。

本章拟对系统工程的一般概念和基本原理，环境系统与环境系统工程作一简单介绍。

§ 1.1 系统工程简介

一、系统的一般概念

1. 系统的定义

国内外关于系统有几十种定义，各有各的说法，很不一致。大体上有两种情况：

① 描述性方法

所谓系统是指由互相关联、互相制约、互相作用的一些部分

组成的具有某种功能的总体。

这样定义系统具有概括性和抽象性。一个系统具有什么组成部分，它们是如何关联、制约、作用的，具有什么功能，只有对具体实际系统才能具体化，如太阳系是一个系统，人体是一个系统，一个工厂企业是一个系统，一个国家也是一个系统。

② 数学公理化叙述方法

设 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 为任意集合，则 $R \subset X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$ 就是在 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 上定义的关系，它们为一个集合。再设 $\Omega = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ ，即设 Ω 为所论系统 S 的对象 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 所组成的单元全集，则系统 S 可以表示为：

$$S = \{\Omega, R\}$$

2. 系统的有关概念

① 系统结构

互相关联、互相制约、互相作用的组成部分叫作系统结构。组成部分本身也可能是一个系统，叫作原系统的子系统。而原系统又可能是更大系统的组成部分，这就是系统概念的相对性。

② 系统环境与边界

一个系统的以外部分叫作系统环境；系统和系统环境的分界叫作系统边界。我们研究具体系统时，必须明确系统的边界。

③ 系统输出与输入

系统对其环境的作用叫做系统输出；环境对系统的作用叫作系统的输入。

上述的这些概念可参见如下示意图（图1.1）：

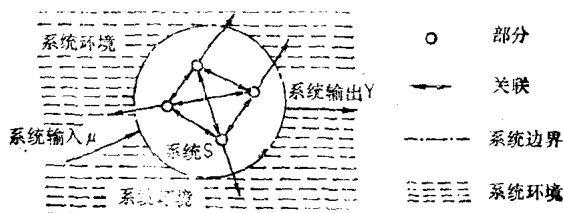


图1.1 系统构成示意图

④ 系统功能

系统结构和环境决定了系统功能；系统功能是通过系统输入-输出关系表现出来的。

具有相同组成部分的系统可具有不同的系统功能，因为它们之间的关联、制约、作用关系不同。例如固态的冰、液态的水、汽态的水蒸汽，虽然都是氢二氧一所组成，但它们的宏观性质却不大相同。尤其值得指出的是，它们都具有其组成部分氢和氧所没有的性质。

改变系统组成部分或者改变相互关联、制约、作用关系可以改变系统功能，特别是使系统具有我们所希望的功能。

⑤ 系统状态与行为

系统每个时刻所处的情况叫作系统状态；系统状态随时间的变化叫作系统行为。

系统组成部分相互关联、制约和作用，是通过物质、能量和信息形式实现的，任何一个具体系统都是物质的，占有一定空间并随时间发展而变化。

二、系统工程的一般概念

1. 系统工程的定义

到目前为止，国内外对系统工程的定义与说法也是各不相同。但总的说来，一般都认为：

系统工程是一门综合性的组织管理技术，是以复杂的系统为研究对象并有目的地对其进行规划、研究、设计、管理与改进，以期达到总体最优的效果。

系统工程技术是定量技术，概括起来有以下几个方面：（1）系统建模；（2）系统仿真；（3）系统分析；（4）系统优化（详细内容我们以后几章将分别介绍）。这项技术不同于其它技术的最明显特点，在于它是软技术。国内目前关于软科学研究的提法，实际上就是系统工程在系统决策上的应用。

2. 系统工程的实质

为了进一步阐明系统工程的实质，我们将传统工程与它对比。所谓传统工程是指电子计算机出现和应用之前的工程技术的总称。用一个公式示意如下：

$$\text{传统工程} = \text{常识} + \text{专业工程知识}$$

此处所讲的常识是指逻辑思维与一般的基本科学定律；专业工程知识是指某一领域内所需的特有的规律和方法。

系统工程并不排斥和抛弃传统工程中的一些行之有效的思想和方法，但它却是在传统工程的基础上发展起来的一种全新的技术，亦用公式示意如下：

$$\text{系统工程} = \text{传统工程} + \text{系统观点} + \text{数学方法} + \text{计算机技术}$$

文献[5]形象地用一个构架来解释系统工程，这一构架沿着独立而相互关联的三个维组成，这三个维就是：系统概念及其应用，方法和技术，自然科学和社会科学（见图1.2）。

其中：第一维是自觉地和科学地应用系统的概念来解决工程问题，

它要求通过研究系统变量的特征、相互关系和相互作用来进行分析，以便了解系统的过程和动力，弄清楚系统与它在其中运行的那个更大的环境之间的关系，并考虑上述活动的结果来选择、设计和发展及运用问题的一个解；第二维是系统工程所用的方法和技术，包含独立而相互联系的两个成分：①以数学为基础的方法和技术，②计算机科学与技术；第三维是全部科学知识，包括自然科学和社会科学，基础科学和应用科学，它们组成被研究系统（研究对象与应用领域）的科学基础。于是，一个系统工程应用领域就是三个维上面的一些坐标的交点。例如，保健系统

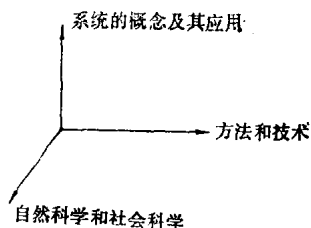


图1.2 系统工程——一个构架

工程是三个维上这样三个坐标的交点；第一维上是与这领域有关的系统概念及其应用，第二维上是系统分析、运筹学、统计分析和应用计算机科学，第三维上是医学科学、社会学、人口统计学、经济学等。这样，系统工程的应用范围就包括许多不同的领域。

由此可见，系统工程是把较庞大而复杂的、并且包含许多未知因素的问题作为对象，综合地、合理地、有效地运用当代最先进的科学技术手段解决问题的一门组织管理技术，它以各种科学技术和方法为基础，从而形成一个有普遍意义的综合性很强的应用技术体系。

3. 系统工程的特点

一般地，系统工程技术有以下一些特点：

(1) 多学科交叉性研究和应用，在研究系统目的要求和运动机制时，要有决策部门的管理专家、系统工程专家和有关专业专家参加。

(2) 定性研究和定量研究相结合，二者相辅相成。

(3) 决策部门和研究部门相结合。

目前，在我国正在进行的体制改革过程中，逐步由过去以经验决策为主转移到以科学决策为主的情况下，系统工程的广泛应用更具有特殊重要意义。

§ 1.2 环境系统、环境要素及环境结构

一、环境系统

环境系统，系地球表面包括非生物的和生物的各种环境因素及其相互关系的总和。非生物因素有温度、光、电离辐射、水、大气、土壤、岩石以及其他如重力、压力、声音和火等；生物因素是指各种有机体，它们彼此作用，并同非生物环境密切联系

着。环境系统是一个不可分割的整体，但通常总是把地球环境系统分为大气圈、水圈、岩石圈(或土壤岩石圈)和生物圈。而各种物质的相互渗透、相互依赖和相互作用，在这些圈层的交界面上表现尤为显著。

在地球环境系统中，各种物质之间，由于成分和自由能的差异，在太阳能和地壳内部放射能的作用下，进行永恒的能量流动和物质交换。各种生命元素如氧、碳、氮、硫、磷、钙、镁、钾等在地表环境中不断循环，并保持恒定的浓度。环境系统是一个开放系统，但能量的收入和支出保持平衡，因而地球表面温度恒定。环境系统在长期演化过程中逐渐建立起自我调节系统，以维持环境系统的相对稳定性。这些都是生命发展和繁衍必不可少的条件。由于各种环境因素彼此相互依赖，其中任何一个因素发生变化便会影响整个系统的平衡，推动它的发展，建立新的平衡。

环境系统的范围可以是全球的，也可以是局部性的，例如一个海岛或者一个城市都可以是一个单独的系统。全球系统是由许多亚系统交织而成，如大气—海洋系统、大气—海洋—岩石系统、大气—生物系统、土壤—植物系统等等。局部同整体有不可分割的关系。区域性变化积累起来，会影响全球。例如热带森林因为滥加采伐，面积日益缩小，将影响全球气候。

环境系统概念的提出，其意义是把人类环境作为一个统一的整体看待，避免人为地把环境分割为互不相关的支离破碎的各个组成部分。环境系统的内在本质在于各种环境因素之间的相互关系和相互作用过程。揭示这种本质，对于研究和解决当前许多环境问题有重大的意义。

环境系统和生态系统两个概念的区别是：前者着眼于环境整体，而后者侧重于生物彼此之间以及生物与环境之间的相互关系。

1. 环境系统的稳定性

环境系统是具有一定调节能力的系统，对来自外界比较小的

冲击能够进行补偿和缓冲，从而维持环境系统的稳定性。

环境系统的稳定性在很多情况下取决于环境因素与外界进行物质交换和能量流动的容量。容量愈大，调节能力也愈大，环境系统也愈稳定；反之，就不稳定。在地球环境系统中，海洋、土壤和植被是最巨大的调节系统，对于维护环境系统的稳定有巨大作用。海洋的巨大热容量，调节着地表的温度，使之不致发生剧烈变化。海洋又是二氧化碳(CO_2)的巨大储存库。海水中 CO_2 与大气中 CO_2 进行交换，处于动态平衡，因此海洋能使大气中的 CO_2 的浓度保持稳定，从而保持地表层热量的稳定。土壤是陆地表面的疏松多孔体，又是一个胶体系统，对于植物所需的水分和养分有强大的吸收和释放能力。地表土一旦丧失，土地肥力就急剧下降。植被通过根系和残落物层吸收水分和叶子的蒸腾作用，调节地面水分和热量，使气候稳定。在生态系统中，构成群落的生物种类愈是多样化，食物链和食物网愈复杂，生态系统也就愈稳定。由此可见，任意缩小水面，滥事垦植，毁坏植被，消灭野生生物或任意引进新种，就会破坏环境中的稳定因素，降低环境抗御自然灾害的能力。

环境中也存在着某些不稳定因素，对于外来的影响比较敏感。在一定的条件下，某个关键性因子发生小的变化，可能触发内在的反馈机制，引起一系列链式反应，对整个环境系统造成无法挽救的严重后果。例如，极地海冰就被认为是一个不稳定因素，因为它有巨大的反照率，吸收阳光的能力比陆地和海洋小得多，对温度变化很敏感。如果温度稍微降低(特别是夏天)，海冰面积便会向赤道方向扩展。海冰面积的扩大，又将反射更多的阳光，使地球接受的热量减少。如果地球进一步降温，海冰面积就继续扩展，直到赤道为止。

至今为止，人类还未完全了解环境系统中许多错综复杂的机制，还未能建立精确的模式来揭示环境因素间的微妙平衡关系。人类仍然自觉与不自觉地不断破坏环境系统的平衡。例如人们在使用氯氟烃(通称氟里昂)时，没有想到它会破坏大气臭氧层的稳

定，这个问题直到70年代中期才引起注意。

2. 人类和环境系统

远古时代，原始人作为环境系统中的一个组成部分，对环境的影响并不比其他动物大。但是随着劳动工具的改进，特别是火的发现和利用，人类开始对环境产生重大影响。在人类历史上，由于人类不合理地利用自然而引起无情报复的例子是不胜枚举的。随着技术的进步，人类对环境的影响愈加深刻，如以下几个方面：

(1)天然生态系统的逐渐消失，代之以人为的农业生态系统。少数几种作物代替多样化植被。野生动物大量灭绝，生态系统简化。人类愈来愈借助化肥和农药来维持农业生态系统的稳定，给生态系统带来严重后果。

(2)城市的增多和扩大，工业交通的发展，使农业用地面积逐渐缩小，环境污染问题日趋严重。

(3)土地利用不合理，加剧了土壤侵蚀，土壤肥力下降。全世界沙漠化土地面积在不断扩大，随着热带雨林面积的减少，全球气候将起重大变化。

(4)矿物燃料的燃烧和森林的减少，使大气层中 CO_2 含量正在增长，将产生难以预料的气候变化。

(5)人类对地壳内部金属矿产的开采、利用和弃置，最终将造成这些金属元素在地表环境中浓度的增高。这些金属元素有不少对有机体是有毒害的，如汞、镉、铅等。它们通过食物链危害生态系统。

这些改变，其中多数是不可逆的，如野生动物的灭绝和地表重金属元素浓度的增加；有的则需要较长时间才能复原，如植被和土壤。

从环境系统演化历史来看，旧平衡的破坏，新平衡的建立是历史发展的正常规律，环境系统始终处于动态平衡之中。人类为谋求生存和发展，就会不断改造自然，打破原有的平衡，并企

图建立新的平衡。但人类在改造自然的过程中，常常由于盲目或受到科学技术水平的限制，未能收到预期的效果，甚至得到相反的结果。一种设计往往对此地有利，而对另一地方有害；或者是短期有利，长期不利。例如英国、德国，利用高烟囱扩散工业废气二氧化硫(SO_2)，结果 SO_2 飘送到斯堪的纳维亚半岛，并与雨水结合形成酸雨，严重危害当地生态系统。当前人类还未弄清楚自然界各种复杂因素之间的相互关系，因此对于一些巨大的改变自然的工程，如水库的建造，河流的改道，大面积的垦荒，工业和交通建设等等，都要谨慎从事，考虑到各种可能发生的后果，作出环境影响评价。

合理利用和改造人类环境，防止不良后果，要做好环境系统的研究。研究的重点是：

(1) 存在于各环境因素之间，各圈层之间，有机界与无机界之间的相互作用，能量的流动，物质的交换、转化和循环。

(2) 环境系统中的平衡关系，反馈机制，自我调节能力，环境容量。环境系统的稳定性和敏感性。

(3) 人为活动对环境的影响。

这些研究，涉及许多学科领域，是环境科学的中心任务之一。

二、环境要素

构成人类环境整体的各个独立的、性质不同的而又服从整体演化规律的基本物质组分，即称为环境要素，也称为环境基质。

1. 环境要素的组成

环境要素包括水、大气、生物、阳光、岩石和土壤等(有的学者认为，环境要素不包括阳光)。它分为自然环境要素和社会环境要素，但通常是指自然环境要素。

环境要素组成环境的结构单元，环境的结构单元又组成环境