

环境系统工程概论

中国矿业大学
环境工程教研室
顾 强
2000.4.14

前 言

用定量化或半定量化的方法处理大型复杂系统问题，无论是系统的组织和建立，还是系统的经营管理，都可以看成是系统工程实践。对小规模生产或污染控制来说，系统的概念并不重要，而现代化生产和相关产业活动是一种大规模的社会活动，它所涉及的内容和规模，科研和设计，组织和管理等，以及它所要达到的目标，都发生了根本的变化。为了经济有效地对管理或控制众多事物，系统工程科学形成了并得到广泛的应用。环境保护涉及的往往是一个更大、更复杂的自然-人工复合系统，系统工程在环境保护领域中同样有广阔的应用前景。环境系统工程是运用系统工程的理论与方法处理与环境环境保护有关的问题，是一门系统工程的新分支学科。

虽然环境系统工程仅有 40 多年的发展历史，但作为定量预测环境影响和环境质量变化，分析环境问题发生原因，寻找控制系统内环境污染和解决其它环境问题的途径、进行环境系统规划的一个有效工具，她既能在高层次上为环境保护和经济发展的协调提供技术支持，又能在各个层次上为环境规划，环境管理，环境评价和环境污染控制和生态环境优化设计服务，因而受到人们的普遍重视。

环境系统工程是一门实践性很强的环境科学和工程分支学科，她的形成有着深刻的实践背景。五六十年代，一些工业发达国家相继出现了环境公害事件，引起了人类社会的广泛关注。然而，污染源的个别治理并没有取得希望的效果。人们逐渐认识到环境问题的全局性，复杂性和综合性，甚至全球性等特点，这些问题的解决只有依靠全社会，甚至全人类的力量才能有效解决。在这种认识指导下，许多国家成立了全国性的环境管理和研究机构，联合国也成立了环境保护组织机构，展开了综合性和区域性的环境污染防治和生态环境保护研究和实践，环境保护进入了环境系统管理和污染综合整治的新阶段。社会对环境保护的广泛需要不仅呼唤新学科的诞生，而且提供了新学科迅速成长和发展的土壤与环境。70 年代初，环境系统工程学科形成并且成为发展最为迅速的环境科学与工程分支学科之一。

环境系统工程的迅速发展得益于系统科学和系统工程学科提供的系统思想，系统理论和系统方法，得益于计算机技术的飞速发展，得益于环境领域其它学科，包括环境化学，环境地学，环境生态学，环境工程学，特别是对环境各要素质量及其变化规律和调控规律认识的长足进步。作为一门综合性学科，包含甚至引用了许多其它学科的理论和方法，这是可以理解的。但作为一门独立的分支学科，她有自己的特定的研究对象，研究任务和研究方法，并基本上形成了自己的理论和方法学框架，而且随着她的不断成熟，必将进一步完善自己的理论和方法学体系。

我国在七十年代末期已开始引进并研究环境系统分析技术，并广泛用于环境质量评价，环境污染控制规划，和环境污染总量控制规划等领域。开创本学科的经典著作，如 1972 年美国瑞奇教授的环境系统工程，1977 年日本学者高松武一郎的同名著作都被译成中文。1985 年，清华大学出版社出版了水污染控制系统规划，南京大学出版社出版了环境系统工程概论，1987 年北京

工业大学出版了环境系统工程导论，1990年清华大学推出了环境系统分析教材。我国环境工作者对环境系统工程方法已不陌生，实际上，我国环境科学和工程领域的专家们在环境系统工程作出了自己的贡献，不仅使国外学者研究开发的环境系统数学模型和环境系统最优化模型在我国得到成功的应用，还成功地开发出我们自己的环境模型。实际上，这些方法已广泛用于定量化或半定量化的系统环境管理的各个方面，全面推行环境污染总量控制使环境系统工程成为环境保护工作者必须具备的基本技能，已开发的各级环境管理信息系统和定量环境管理软件包对她的应用提供了极大的方便。

总之，环境系统分析不仅成为环境科学一个重要的发展前沿，也成为环境科学与工程类专业学生必修的一门重要课程。我们于1991年开设这门课程，深感教材建设对搞好本课程教学的重要性，尽管水平有限，但仍大胆尝试编写这本教材。全书共分七章，前三章介绍环境系统分析的基本概念，以及简介建立和求解环境数学模型的方法，有选择地介绍一些基本的最优化方法。第四章和第五章分别介绍河流、湖泊和水库二个环境要素环境系统分析方法，包括环境系统模型化技术和环境系统模拟技术，第六章介绍水环境污染控制系统最优化方法，第七章介绍环境问题的决策方法。

由于授课学时的限制，我们没有把大气、土壤和地下水、生态等环境要素的系统分析方法包括进本讲义、也没有介绍在设计和运行城市固体废弃物处理处置系统涉及到的环境系统工程内容，以及水和气污染物处理有关的过程系统工程的内容包括进本讲义。虽然在这些领域，环境系统工程的方法也得到广泛的应用，比如对土壤和地下水复合环境系统的管理和保护，环境系统数学模型和最优化模型应用得十分广泛，生态环境建模是目前环境系统工程的前沿领域之一，有十分丰富的研究成果，但和水环境系统工程比较，相对复杂且有一些领域仍不太成熟，所以只能忍痛割爱了。但是，环境系统工程解决问题的思路和方法是基本相同的，只是涉及的环境子系统不同，用到的环境科学环境工程知识不同而已。如果掌握了这些知识，我想读者完全可以举一反三，很容易理解新领域的环境系统工程知识。

作为一本面向本科生的教材，只能论述环境系统工程最基本的内容和方法，而且主要在污染物在环境介质中的迁移转化规律和环境污染系统控制方面，对生态环境系统、社会-经济-环境复合系统涉及不多。在解决环境保护实际问题时所应用的环境系统工程方法真是千变万化，飞速发展的环境系统工程理论和广泛的实践每天都提供着新鲜的素材，所以，在使用本教材时不必拘于本教材给出的内容和实例，尽可能结合实际情况和实际需要讲授。

由于作者受知识面和业务水平的限制，加之时间限制，错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。在编写本教材时，引用了大量其它教材和专著的内容和许多学者的研究成果，在此一并表示谢意。

环境系统工程概论目录

第一章 绪论处	(1)
第二章 环境系统数学模型及其建立方法	(10)
第一节 环境数学模型概述	(10)
第二节 环境数学模型的建模方法(灰箱模型)	(16)
第三节 环境数学模型(灰箱模型)的解析解和参数估值	(24)
第四节 环境数学模型的建模方法(输入输出模型)	(44)
第五节 其它建模方法,模型的验证和误差分析	(71)
第三章 环境系统最优化和最优化技术基础	(85)
第一节 环境系统最优化问题及其数学模型	(85)
第二节 线形规划问题和单纯形法	(94)
第三节 其它规划方法和最优化模型的灵敏度分析	(108)
第四章 河流环境系统模型和模型化方法	(126)
第一节 河流环境系统和系统中的基本环境问题	(126)
第二节 河流的氧平衡模型和污染物稀释扩散模型	(136)
第三节 河流综合水质模型和重金属模型	(151)
第四节 简单的河口水质模型	(160)
第五节 河流设计条件和河流水质参数	(166)
第五章 湖泊和水库环境系统模型和模型化方法	(187)
第一节 湖泊和水库环境系统和系统中主要环境问题	(187)
第二节 浅湖泊和水库的水质模型	(198)
第三节 深水湖泊和水库的温度模型和水质模拟	(209)
第四节 深水排放混合区分析模型	(220)
第六章 水环境系统规划和系统最优化模型应用	(230)
第一节 水环境系统规划和系统最优化	(230)
第二节 城市水环境污染控制系统规划和系统最优化方法	(241)
第七章 环境问题的决策分析	(259)
第一节 环境决策的一般概念	(259)
第二节 常用的决策分析工具	(263)

第一章 绪论

一、系统及其特性

1、系统

(1) 系统的定义

系统这一概念源于人类的长期实践，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，如灌溉系统、河流系统、人体呼吸系统、消化系统等等，但只有到了20世纪40年代，才开始在科学技术领域发挥作用。首先是美国的工程师把这一概念应用于工程设计领域，随着系统概念在实际应用中进一步明确化和具体化，应用领域逐步遍及工程技术系统的研究和管理各领域，到了20世纪70年代几乎被推广到人类社会经济活动的各个方面。

尽管系统是人们对具体事物进行某种程度抽象得到的，但人们在推广应用系统这一概念时发现，不同性质、结构和功能的系统之间存在着某些共性的东西。研究系统之间和运用系统思想和方法解决问题的共性规律，对于研究、创建、运行和管理具体的系统，提高系统的功能具有重要意义。于是，系统科学和理论，系统工程及方法就应运而生了。

根据专家们的意见，系统是相互作用而又相互依赖的若干个组成部分合成的、具有特定功能的有机整体。系统的元素（组成部分）可以是一个子系统，而且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。

注意，由若干个部分组成的系统一定要有一些特定功能，或表现为特定行为。这些特性并不是原来组成部分所具有的。例如机械零件组成了机器，就具有了一些零件不具备的功能。但是，系统是众元素按一定规律组成的有机整体，而不是简单的叠加，只有这样系统作为整体才能具备某些功能。

(2) 系统的分类

系统概念应用的广泛性决定了系统的多样性，对不同类型的系统分别在不同的学科领域进行研究，对于从属于同一学科研究对象的不同系统，研究方法也有区别。环境系统工程研究的系统是一类人工制造的系统或经过人工改造的自然系统，或能够被人类认识并进行一定程度控制的系统。这类系统较大并且结构复杂，内部有多重子系统、多种影响因素、多个层次，但内部组织协调而有序，体现出系统具有某种总体功能或行为特性。

对于这类系统也需要进一步分类。系统分类可以采取不同的方法：按照系统成因分类可以分为自然系统、人工系统和复合系统；按照系统状态的时间过程特征分类可以分成动态系统和稳态系统；按照系统和周围环境关系分类可以分为开放系统和封闭系统；按照系统的参数的分布特征可以分为集中参数系统和分散（或分布）参数系统。

一个系统根据一种分类方法，归属于一种类型系统，用不同方法分类，又归属于几类系统，如一个具体的大气污染控制系统是一个复合系统，可以

是动态系统或稳态系统，可以是开放系统，可以是集中参数系统或分布参数系统。不同类型的系统中的问题需要采用不同的方法去解决，如稳态系统模型中的变量就往往没有时间，动态系统则比稳态系统复杂得多。有时为了方便解题，也可以用一种类型系统近似代替另一种类型。例如，大气污染控制系统，污染源排放量总是随时间发生变化，气象参数和大气层扩散能力更是随时间不断变化，但往往认为在一定时间内变化微小，可以看作是稳态系统。

2、系统的特性

D. White 等主编的“Environmental Systems. An Introductory Text”一书中指出，系统一般都具有以下特性：

- 1) 所有系统都具有某种结构或组织；
- 2) 所有系统在不同程度上都是现实世界的归纳、抽象和理想化；
- 3) 所有系统都具有某种特定的功能；
- 4) 无论在功能上或结构上，系统内的所有元素彼此都互相联系；
- 5) 所谓系统功能，是指某些物质的流动和转化；
- 6) 系统功能的发挥需要某种驱动力或某种能量；
- 7) 所以系统表现出一定程度的整体性或综合性。

程声通等编的“环境系统分析”一书中，提出系统一般具有整体性、相关性、目的性、阶层性和环境适应性。前二个性质可以在 White 提出的 7 个特性中找到。系统的目的性，是指所有人工系统和复合系统的设立都具有一定的目的，为了达到这些目的系统都需要具有相应的功能。对于环境系统，往往是多目的性的，一个目的可以用 1 个或多个具体的目标来表示，当所有的目标都得到满足时，系统就达到规定的目的。系统的阶层性，是指复杂大系统内部往往都具有某种层次结构，一个系统包括若干个 1 级子系统，每个 1 级子系统又可以包含若干个 2 级子系统，在系统和子系统，各子系统之间存在物质、能量和信息的交换。系统的层次结构是实现系统递阶控制和目标管理的基础。环境适应性表现为系统对环境的适应和环境对系统的约束，没有环境适应能力的系统是没有生命力的系统。

二、环境系统和环境污染控制系统

1、环境系统及其分类

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，形成的有机整体就称为环境系统。

我们知道，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。表 1 列出了环境系统的不同分类。

我们根据研究问题的目的决定环境系统的分类方法，多数人采用按环境管理体系中位置的分类方法进行分类，不同分类方法也可以交叉，按环境保护对象划分的环境系统实际上是污染控制系统的子系统。

表 1 环境系统的分类

分类方法	系统实例
按污染物的发生和迁移过程分类	污染物发生（污染源）系统、污染物输送系统、污染物处理系统、污染物受体系统等。
按在环境管理体系中位置分类	自然（生态环境）保护系统、环境管理系统、环境监测系统、污染控制系统环境计划管理系统等。
按环境保护对象分类	河流水系污染控制系统、湖泊（水库）污染控制系统、大气污染控制系统、城市垃圾系统、有害固体废弃物污染控制系统、海洋污染控制系统、城市环境污染控制系统、道路交通污染控制系统等。

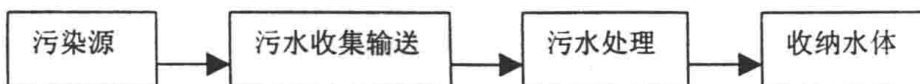
2、环境污染控制系统

环境系统工程研究的主要还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、以及污染源和污染处理设施的合理功能和布局。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。

我国的污染控制已经全面地从浓度控制转向总量控制，就是把控制的重点从各个排污口转向整个环境系统，包括控制污染源、保护敏感受体环境和考虑污染物的输送过程和污染源最优分配。对污染源的控制，也从排污口转向生产全过程，从单独的企业被动控制污染转向社会经济系统的发展战略转变。通过环境容量的计算和合理分配更有效地保护敏感受体环境。对污染物输送规律的研究和对污染源控制的最优化是制定污染物总量控制规划的基础。可以说，环境保护的主要任务之一是建立和运行一个最佳的环境污染控制系统。

环境系统工程或环境系统分析研究的污染控制系统一般是自然系统和人工系统结合在一起的复合系统，在这样的系统中系统分析的方法能够发挥最大效用，因为系统内的不确定因素较多，但又有人工可以控制的变量，通过系统模型化和最优化可以使建立的系统利用较低的投资和运行成本达到较好的效果。目前研究的最多的是地面水污染控制系统、大气污染控制系统、地下水污染控制系统，陆地或水生态系统、地球生态系统等。

污染控制系统有类似的结构，例如水系统一般由以下四个子系统组成：



污染源子系统包括工业污染源、农业污染源和生活污染源等，有点源、

面源和线源等不同形态，不同类型和不同形态污染源产污规律和向水体排放规律不同，如深水污水释放器可以使污水和周围水尽快混合，减少混合区的范围。这个子系统和工农业生产子系统、城市系统紧密联系在一起，搞清污染排放规律，推行清洁生产技术，在污染源间合理分配削减量、以及源的布局优化是污染源控制的主要内容。

污水收集和输送子系统包括污水管线和提升泵站，把污染源和处理厂联系起来，它的费用占整个水污染控制系统费用的主要部分，如何通过优化处理厂位置减少运输费用和总费用，是水污染控制系统研究的重要内容。

污水处理系统是水污染控制系统的核心子系统，污水处理厂可以有不同的规模和工艺、采用不同设备和不同运行参数，是水污染控制系统最主要的决策变量。

水体是污水的最终出路。目前我国还执行水环境分功能保护的原则，在研究水环境污染控制系统时，要正确划分水环境功能区，确定各功能区的环境质量目标，这些水质标准也决定了污染控制系统应该具有的净化能力。

在一定管理区域内水污染控制系统范围一般都比较宽，往往需要把系统划分成水污染控制单元才能够进行实际管理。因为环境目标管理要求把污染源（控制对象）和受保护对象（容纳水体）在一定设计条件下定量地联系起来。水污染控制单元就是由污染源和水域两部分组成，水域按不同使用功能划分，污染源为排入该水域的所有污染源的集合。通过对这些系统和单元的研究可以科学地确定水污染物总量控制指标。

大气污染控制系统的污染物输送过程发生在大气边界层中，输送规律要复杂得多。有时，系统中污染途径多而复杂隐蔽，污染控制系统的组成和范围需要通过相当深入的研究才能搞清。例如，地下（饮用）水污染控制系统组成就比较复杂，完整的系统包括含水单元（含水层）、与该含水层有补给关系的临近含水层、该含水层的补给区土层（土壤层、犁底层、下包气带）、补给区植物（农业）系统、补给区灌溉系统、抽水井及水净化系统，以及该含水层的污染源和污染途径。搞清楚上述所有该系统的组成部分和子系统，以及它们之间的联系，才算搞清系统的结构和组成。

从长远来说，生态环境保护的任务越来越重，生态环境保护系统将是环境系统工程研究的另一个重点领域，不仅包括局地生态环境，还包括区域和全球生态环境，研究的系统将更复杂。

三、系统工程和环境系统工程

1、系统工程和系统分析

为了解决系统中的共性问题，人们在 50 年代创建了系统科学理论和系统工程方法。一般认为，系统工程是为了合理开发、设计和运行一个系统而采用的思想、程序和方法的总称。系统分析是系统工程的主要组成部分，是对被研究的系统（对象）进行有目的、有步骤的探索和研究过程，它运用科学的方法和工具确定一个系统应具有的功能和相应的环境条件，以便确定实现系统目标的最佳方案。最优化是系统工程的核心，提出系统实现目标的最佳

方案，为科学决策提供依据是系统工程的主要任务。作为研究问题和解决问题的思想方法，系统工程和系统分析具有相似的意义。

为了用系统工程的方法解决一个具体问题，即从构思到完成一般需要经过若干个基本步骤，每一个步骤有自己特定的内容并进一步分解成若干步工作，这对于任何一个系统工程分支都是一样的。图 1 表示的就是系统工程的基本工作程序。

我们在图中可以看出，每一个具体项目的系统工程活动过程都分成 4 个阶段：计划准备、系统分析、系统设计和系统实施，其中系统分析和系统设计是系统工程的核心环节。

系统分析是对研究对象进行有目的、有步骤的探索和研究过程，它应用科学的方法和工具确定一个系统应有的功能和相应的环境条件。系统设计是在系统分析提出最佳方案基础上进行的，它运用各种工程方法和管理方法将系统分析的结果落实到工程措施和管理措施上，以保证系统分析的结果得以实现。系统实施是系统工程的最后一个阶段，将系统设计的成果转变为现实的过程。

2、系统分析的基本方法和步骤

系统分析的研究对象是复杂的大系统，这种大系统的一个重要特征是系统内存在着许多矛盾因素和不确定因素。对这样的大系统必须有一套行之有效的辅助决策方法。人们从长期的工程实践中认识到，要进行系统的最优化，要对系统的重大问题进行科学决策，必须进行系统分析。

系统分析的过程和传统工程学科方法不同，它除了要研究系统中各要素的性质，解决系统要素的具体问题外，还要求研究和揭示各个要素之间的有机联系，使得各要素之间达到协调，实现系统总目标最优。

系统分析的基本过程是对系统的分解和综合。所谓系统分解，是研究和描述组成系统的各个要素的特征，掌握各要素的变化规律。当系统比较大，比较复杂时，需要将系统分割成一些小的系统，包括把系统的目标分解成更小系统的目标，把复杂的系统模型分解成小系统的比较简单的模型。所谓综合就是研究各个要素间的联系和并按一定目标把系统中的单元有机地组合起来，达到系统总目标的最优。系统分解和综合都要用到数学模型和用计算机处理大量环境信息，这二者是系统分析的主要工具。

系统分析是针对研究对象进行有目的的探索过程，其基本工作内容是：

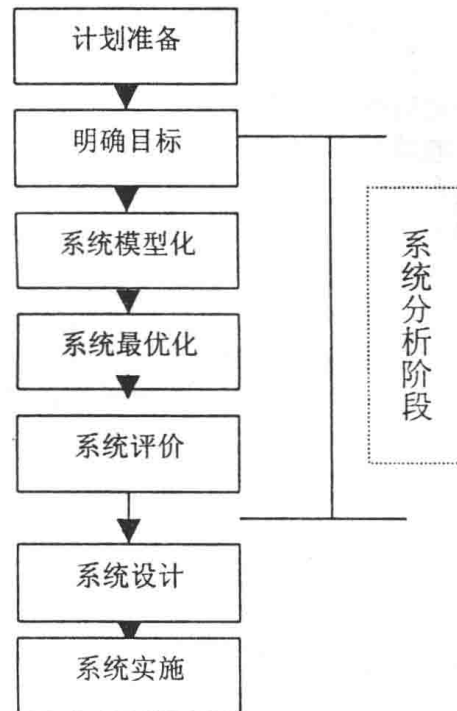


图 1 系统工程的工作程序

确定系统的功能和目标；调查系统的环境约束；调查系统的资源条件；研究系统的要素并对其模型化；实现系统的最优化及为系统的设计和和实施提供最佳方案。

对每一个具体的项目，系统分析采用的方法和步骤可以不同，研究者要根据具体情况确定和选择。一般而言，系统分析大体按以下步骤进行。

1) **明确问题的范围和性质** 根据问题的范围和性质决定问题涉及的系统，及系统的组成元素和元素间的相互联系，他们和环境间的关系。根据具体条件确定研究的系统内部结构和周围环境的联系是特别重要的。

2) **设立目标** 目标是决策者希望实现的系统理想状态。系统的目标要通过大量的调查和分析进行确定，系统的目标往往不止1个，而是多个目标的集合，目标之间还可能互有矛盾。只有明确了目标才可能进行下一步的工作和最终进行系统的决策。

3) **收集资料** 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它要求，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。资料和数据获取可以通过调查、实验、观察、统计等方式有计划地进行，避免过多冗余数据浪费时间和精力。要特别重视调查数据的来源和质量，因为系统分析工作的质量在很大程度上取决于数据的质量。

4) **选择或建立模型** 包括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，我们的任务往往是根据具体情况选择或修改现有的模型，使其能够满足系统分析任务和精度的要求。当没有合适的系统模型可供选用时，需要自己通过试验研究建立模型。

5) **确定系统方案的评价标准** 一般通过系统分析可以得到不止1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。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。也要综合考虑设计系统的其它性能，如系统的功能、系统运行的可靠性、可维护性、系统的实现难度和需要的时间等。

6) **综合分析** 运用系统的结构模型和最优化模型，分析系统各种可行方案，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。

3、系统的模型化和最优化

数学模型是系统进行分析的基础和主要工具，所以系统的模型化是系统分析的前提。系统模型化指用数学关系式表示系统各个部分及其联系，表达系统的特性或功能，系统的价值或各种价值之间的联系。在环境系统分析中，用得最多的是环境系统质量模型，主要反映污染物在各种环境介质中的迁移转化规律，随着生态环境保护日益受到人们的重视，生态环境模型应用也容易广泛。系统分析中对使用的数学模型有如下要求：

- 1) 现实性 在要求精度范围内能够反映系统的实际情况；
- 2) 简捷性 在满足使用对精度要求的前提下尽可能使模型简单明了，节省时间和建模费用，便于应用；
- 3) 适应性 模型对外部条件的变化有一定的适应能力。

上述要求往往不能同时满足，需要我们在各项要求之间寻求某种平衡。

系统最优化是系统综合的重要方法，一般通过最优化方法和模型实现。最优化方法很多，要根据问题的性质选用适当的方法。目前通用的最优化方法，如线性规划、动态规划、整数规划、非线性最优化方法、网络和图论等在系统分析中都得到广泛的应用。需要注意，一般环境保护涉及的系统都十分复杂，需要进行适当的简化才能够方便而有效地运用这些最优化方法。

4、环境系统工程

1) 定义

环境系统工程是系统工程众多分支中的一个新分支学科，是系统工程在环境保护中的具体应用。它可以定义为：对人类生存环境有关的环境-生态-经济复合系统进行合理规划、设计和运行管理的思想、组织、程序和方法的总称。

可以说，没有环境系统工程及其方法学的支持，就没有实际意义上的现代化区域和城市环境管理和区域污染综合防治。现代化的环境管理主要体现在科学化、定量化、系统化和最优化，离开环境系统工程这一有力工具是无法实现的。

2) 发展历程

20 世纪 40-50 年代，环境公害首先在工业发达国家开始肆虐，各国开始进行环境污染治理，但在污染排放口进行的治理工作并没有取得满意的效果，因为头痛医头，脚痛医脚的做法使得环境保护工作十分被动。人们逐渐认识到环境问题的全局性、复杂性和综合性，认识到环境问题的解决只有在一定的空间和时间范围内综合考虑，通过动员区域内社会各方面的力量，协调配合，才可能有成效。美国、英国和日本等西方工业发达国家先后建立全国性的环境保护管理和科研结构，进行区域环境污染综合治理实践活动，这为环境系统工程的产生和发展提供了条件。环境系统工程诞生之后，又对环境保护工作起到很大的促进作用。事实上，世界上许多著名的环境污染防治工程的研究和设计都采用了环境系统工程的方法，如伦敦河污染的治理，里海污染防治，美国和加拿大之间的酸雨防治，北美五大湖污染治理等工程。

历年发表的环境系统工程专著反映了该学科迅速成长的历程：1972 年美国环境工程教授学会发表“环境工程的数学模式化”被认为是该学科正式形成的标志；1972 年美国 Rich 教授发表专著“环境系统工程”，这是环境系统工程学科第 1 部专著；1977 年日本教授高武松一郎和美国教授 Ling 共同发表专著“环境系统工程”，概括了日本利用环境系统工程解决日本严重环境公害的经验；1978 年美、英、澳、加等国家 20 余位教授合著“水污染控制数学模型”；随后环境系统工程的专著不断出现。

从 1981 年起，每年召开一次环境系统工程学术研讨会，标志着环境系统工程终于成为一门独立的、迅速发展与环境科学与工程分支学科。说它是一门独立的分支学科，有以下两个理由：

- ◆ **环境系统工程有自己的研究对象、研究方法、和研究领域** 环境系统工程有特定的研究对象-环境系统，特别是环境污染控制系统；有系统且具特色的研究方法-系统工程的方法，包括系统化、模型化、最优化和决策科学化；有相对固定的知识框架-30余年环境系统工程丰富的研究成果许多都固化为本学科的基本知识内容，这些内容是科学的、经过实践检验的，并且是系统的，尽管还在不断发展和扩展；环境系统工程也具有相对固定的研究领域。
- ◆ **社会对环境系统工程有强烈的需要** 环境问题的复杂性、综合性、区域性和全局性，为环境系统工程提供了广阔的用武之地，环境规划、环境管理、环境评价和区域环境污染综合防治都需要系统工程这一有力工具。以往环境重大决策失误造成的社会损失和生态损失难以计数，环境科学决策成为环境保护工作中最重要的环节，受到人们的广泛重视，对环境科学决策工具-环境工程的需要是迫切的。

3) 环境系统工程的基本任务和研究的重点领域

根据目前我国环境保护工作的实际需要，环境系统工程的基本任务是研究环境系统内部各组成成分之间的对立统一关系，通过合理控制污染源和建立合理的污染控制与管理方法，寻求区域最佳的污染防治体系和环境管理体系，为各类环境决策提供科学依据。

保护环境是国家、社会、公众和企业的共同要求，但环境问题的解决又受到社会、经济、技术、生态及环境条件的制约，使这一多目标、多层次、充满矛盾的大系统在控制和管理上更加复杂化，传统的思维方式和决策方法已经无能为力，只有用严密的系统化方法和数学方法，以及电子计算机来实现决策科学化，作到以环境科学理论、生态规律和社会经济规律为依据，通过优化污染防治系统和环境管理系统，控制社会-经济-环境复合系统沿最优轨迹发展。环境系统工程完成上述基本任务的基本方法是系统化、模型化和最优化，通过调节和协调系统内各组成成分之间关系，实现经济效益、社会效益和环境效益的统一。

环境系统工程目前研究的重要领域有：

- ◇ 区域、流域和城市地面水污染控制系统的组建和管理；
- ◇ 区域或城市地下水资源保护与管理系统的组建与管理；
- ◇ 区域和城市大气污染控制系统的组建和管理；
- ◇ 城市和区域固体废弃物处理和处置系统的建立和管理；
- ◇ 城市和区域水资源、土地资源和其他环境资源的系统管理；
- ◇ 环境污染预测和预报；
- ◇ 环境质量评价和环境影响评价；
- ◇ 各类环境规划，包括生态环境规划、污染物总量控制规划的制定；
- ◇ 环境工程设施优化设计和优化运行；
- ◇ 环境保护有关的方针、政策的制定。

4) 学科理论框架和方法学框架

环境系统工程学科的理论框架已经基本确定，但其内涵仍在不断发展，

环境系统工程中使用的具体方法则变化更快，不同的研究项目类型和不同的研究者常常使用不完全相同的方法。由于环境系统工程内容丰富而繁杂，有关这方面的专著往往内容不尽一致，反映专门学科正在成长之中。

环境系统工程的理论主要来源于系统科学与工程和环境科学与工程两大学科。系统科学与工程学科内的系统论、控制论和信息论是环境系统工程中系统思想的主要来源，数理统计方法、运筹学和最优化技术是环境系统工程中模型化和最优化的主要工具。为了分析环境系统的结构与特性，环境化学、环境生态学、环境地学、环境水文学、污染气象学的知识十分重要。在评价建立的环境污染控制系统性能时，环境经济学的方法得到广泛的应用。环境预测方法和环境评价方法，以及环境污染控制工程原理和技术在环境系统模拟和系统最优化过程中发挥巨大作用。

第二章 环境系统数学模型及其建立方法

在应用环境系统工程理论和技术解决环境问题的过程中，数学模型、实物模型和模拟模型都起到相当大的作用，尤其是环境系统数学模型，是用系统工程方法解决环境问题的主要工具和基本手段。

第一节 环境数学模型概述

一、数学模型的定义

根据研究对象系统或研究对象过程所观察到的现象、及实践经验或理论分析，通过简化和理想化归纳成一套反映系统内或过程中某些变量数量关系的数学公式和具体算法，用来描述对象的运动（变化）规律，这套公式和算法称为系统数学模型。如果这个对象是环境系统或环境过程，则称为环境系统或环境过程的数学模型。我们对环境系统已经作了解释，环境过程可以从以下实例去理解：污染物扩散过程；环境决策过程；湖泊富营养化过程等。

数学模型也是一类模型，和实物模型等其它模型相同，是经过理想化和简化了的原件的复制品。人们制作模型，目的是为了用简化后形成的模型来展示原型的某些性质，或通过对模型上的试验研究来掌握原型的某些性质，简化的基础是模型与实际系统的等效性。这里需要强调，构造模型的目的性，模型只是为了特定目的而将原形的某一部分信息简化、浓缩而构造的原形替代物。一个原形为了不同的目的可以有許多不同的模型，同一个研究目的也可以用不同类型的模型达到。例如，在展览会上的城市模型要求逼真，而放到环境风洞中的城市试验模型要求能够反映城市大气污染相同的规律，为相同研究目的建立的数学模型则要求在污染物释放和在大气中扩散在数量规律上真实反映该城市特性，毫不涉及城市的真实外貌。所以，模型的基本特征由研究目的和模型类型决定的。

模型的应用人们早已熟悉。人们通过城市模型，工厂配管模型等实物模型了解未来城市风貌和未来工厂管路布置情况，军事指挥员通过沙盘模型进行战役模拟。地图和工程图也是一种模型，用来展示区域地理和地形信息，设计的工厂设备布置和设备结构情况。可以说，环境系统数学模型的基本特征是对社会-经济-环境系统中物理、化学、生物和经济活动过程特性的概括和合理的简化。

实际使用的环境系统模型有实物模型、结构模型、符号模型，和数学模型（功能模型和评价模型）。

实物模型又分直观模型和物理模型。前者是供展览用的实物模型，主要要求外观逼真。后者是科技工作者为特定研究目的根据相似原理建立的模型，如用于环境风洞中的地形模型、环境水力学实验室中的河流模型等。

结构模型用来表示系统各单元与物流之间的关系，在建立系统功能模型之前作为表述系统特性的定性模型，又称概念模型，系统的图示法等。地图

解释符号模型: ISM (手)
邻接矩阵. 可达矩阵. 先行集及后继集. 系统→模型. 线性回归

是一种典型的符号模型, 其它的符号模型如电路图, 化学方程式, 控制室的模拟盘等。

数学模型中的功能模型用于定量地描述系统的特性, 是由系统的变量和参数构成的一个(组)数学方程式。它是研究系统静态和动态特性, 以及进行最优化设计和最优化控制的最常用工具。系统的评价模型一般包括系统的经济因素, 它描述系统的功能、成本、可靠性和时间等因素之间的关系。在进行系统最优化规划设计或控制时, 一般将评价结果作为系统的目标函数, 追求它的最大或最小。也可以将它归入约束条件中。最优化模型, 实际上就是评价模型和约束条件的结合。

和其它模型相比, 数学模型有许多独特的优点, 成为许多学科科学研究、现象模拟和预测、工程规划设计、行业人员培训和优化经营管理的重要工具。

二、数学模型的特点

数学模型的最大特点是它的抽象性和对真实世界的理想化和简化, 它要比其它模型更抽象、更简化、更反映事物本质。它带来以下好处:

- ◇ 用数学模型进行对原型的展示和模拟研究, 不需要过多的专用设备和用材料制作模型, 仅需要一台计算机, 比较容易实现, 而且不受外界恶劣条件影响, 可以加快模拟研究的进度;
- ◇ 在实物模型上或原型上进行某些条件的模拟试验研究是不允许的或是不可能做到的, 如往河流里投放大量污染物模拟高污染情况或大气中瞬间释放污染物等, 这些特殊或极限情况在数学模型中可以很容易做到, 不受某些实物模型或原型研究常受的制约, 而且在数学模型模拟中不存在放大效应;
- ◇ 在环境科学与工程领域, 常常需要对大范围环境系统进行研究, 如流域、区域、全球环境, 这对物理模型几乎是不可能的, 数学模型可以作到。如世界发展模型就成功地对不同经济发展模式下全球环境的变化进行了模拟, 得到了很有用的结果;
- ◇ 利用计算机和多媒体技术, 数学模型也可以把模拟结果表现的十分逼真, 如利用数学模型和计算机技术对汽车、飞机驾驶员的训练, 模拟企业运营都非常成功。

数学模型的高度抽象和简化也给自己的应用带来了一定程度的制约: 一是抽象或简化可能或往往不完全正确, 在描述系统的某些特征时有可能忽略了关键因素, 造成模型失真; 二是由于系统本身的复杂性, 数学模型仅能够对系统进行粗略的近似, 模型本身存在着固有误差, 如果不切实际地要求提高精度, 会使得模型变得十分复杂, 计算困难或根本无法获得可靠的解答。因此, 数学模型不是万能的, 在许多方面需要原型和实物模型的帮助。对于相对简单的系统, 利用原型或实物模型观察, 帮助建立数学模型, 获得数学模型的参数。对于十分复杂的系统或系统现象, 主要用实物模型技术, 数学

模型成为实物模型或原型研究的有力帮手。例如，对化工工艺或设备的开发，目前主要还是采用中间试验、逐级放大的方法，但借助数学模型可以大大减少中间试验的级数，降低开发成本。

三、环境系统数学模型的分类

我们这里主要讲环境系统数学模型（功能模型），它可以根据不同的方法进行分类。不同的数学模型其建模方法和应用有相当大的区别。

根据建模时人们对系统规律掌握的程度分类，数学模型可以分成白箱模型、灰箱模型和黑箱模型三种。白箱模型又称机理模型，由于人们对系统行为规律已经完全掌握，在这些被掌握的规律基础上建立起来的模型就是白箱模型。这些模型在规律相同的系统中使用应该是畅通无阻。

黑箱模型又称经验模型或输入输出模型，和白箱模型相反，人们对系统的运行规律一点也没有掌握，仅根据观察知道系统一定输入条件下的输出。建立模型时不追究系统运行内在机理，仅根据输入输出数据，这种模型往往是针对一个具体系统或一种具体状态的，在其它系统或状态下使用是有条件的。

灰箱模型称半机理模型，居于白箱和黑箱之间。在建立这种模型时人们对系统的运行规律还没有完全掌握，一些因素间数量上的关系只能用一个或多个经验系数来表示，这些经验系数的确定要靠对原型或实物模型上的观察或实验来获得。在工程实践中，由于系统现象的复杂性，完全的机理模型是很少的，黑箱模型的应用范围又受到很大限制，需要针对具体系统进行大量实验或观察，然后再建立模型，目前应用较多的是灰箱模型。

按照变量与时间的关系，数学模型可以分为动态模型和稳态模型。稳态模型中各变量不随时间变化，应用相对简单，但在实际的环境系统中并不存在。为了简化环境问题，我们常常通过分析稳态模型来了解动态系统中一些典型情况的状态，如我们用短时间内平均风速和风场估计烟囱排放污染物在大气中的扩散情况；用潮周、高潮和低潮平均来了解河口区域污染物迁移转化情况。稳态模型在环境系统工程中应用十分广泛。

按照模型中变量之间的关系，数学模型可以分成线性模型和非线性模型，线性模型中变量之间都是线性关系，相对解题简单；按照白箱和灰箱模型中参数的性质分成集中参数、分散参数或分布参数模型，参数不随时空变化称为集中参数模型，随时间和空间离散取值的称分散参数模型，连续变化取值的称分布参数模型，集中参数模型相对简单。

根据模型中变量变化规律，可以把数学模型分成确定性模型和随机性模型，前者变量之间存在确定的对应关系（一一对应或一多对应），而后者变量之间存在的是相关关系，即在大量试验条件下，随机变量之间存在数量关系，个别实验则是完全随机的。目前使用的大多数环境数学模型都是确定性模型，随机模型要复杂的多。

根据模型的用途，环境数学模型可以有多种分类方法。比如分为模拟模型和管理模型，模拟模型广泛用于环境质量变化的模拟、预测和评价上，管理模型则用于环境规划和环境管理决策上。又如环境数学模型可以分成大气扩散模型、河流水质模型、湖泊富营养化模型、地下水弥散模型等。由于数学模型用于不同的模拟和预测，精度要求不同，环境数学模型又可以分成规划级模型和预报级模型，前者的时空分辨率低于后者，但能够满足环境规划的需要，后者用于环境质量预报，要求精度最高。

针对不同的任务和系统复杂程度，建立和运行相应的环境数学模型，因此，我们有必要了解所有类型的环境数学模型，包括它们的建立方法和使用方法。

四、环境系统模型的应用

评价模型主要用于系统的最优化设计和最优化控制，环境系统数学（功能）模型则是环境系统模拟和环境系统最优化的主要工具。

所谓模拟，是利用模型对系统的某一方面的逼近，是对系统这方面性能的一种研究过程。当我们对某环境系统的一种输入条件下的性能（输出）没有把握，而用原形去研究这种状态或变化过程又有困难时，往往用模型代替系统去逼近这种状态，研究或暴露系统在这种状态下的性能。

环境系统模拟在许多方面都有实际应用。如在一个环境污染控制系统或污染物处理厂设计建设前，可以利用环境系统模拟对不同方案建立的系统性能进行模拟预测，以便从中挑选最好的方案。在污染物处理工艺或设备开发中间阶段，可以用数学模拟技术和实物模拟技术相结合进行中间试验，解决工艺和设备放大问题。用模拟试验结果进行系统或处理厂设计，可以减少风险。对现有污染控制宏观或微观系统进行模拟研究，可以方便地寻找出最优操作参数，找出薄弱环节，提出科学的改进方案，或者用模型而不是原形进行人员的操作（包括特殊情况）培训。

实物模型和数学模型都被用在系统模拟中，但数学模型模拟优点更多一些：（1）和实物模型模拟比较，数学模拟更节约，对有危险性或操作条件苛刻的系统该项优点更突出；（2）采用数学模型模拟放大，理论上讲可以减少中间试验次数，降低成本；（3）采用数学模型模拟，对所有自变量的改变都很方便，在实物模型模拟时一些输入变量不容易改变，计量困难或误差过大等，不利于得到最优解；（4）利用数学模型模拟，可以方便地进行系统的灵敏度分析可靠性分析和研究系统的动态特性。当然，数学模型的应用也有不少限制，对复杂现象常常显得无能为力，还需要用实物模型和原形进行研究。

五、环境系统数学模型的一般建模方法

1、环境系统数学模型的基本结构

如果我们关心的是环境系统的某一个状态变量 Y （例如某污染物浓度或