



高等学校教材

灌排工程系统分析

(第二版)

武汉水利电力大学 刘肇祯 主编



内 容 提 要

本书主要介绍系统分析的基本理论,有关常用方法及其在灌溉排水系统规划和管理中的应用,包括系统分析概论、线性规划及其应用、整数规划及其应用、非线性规划及其应用、动态规划及其应用、模拟技术以及其他有关方法的简介。本书叙述简要,理论阐述与应用实例并重,主要供农田水利工程专业本科四年级学生使用,也可供水利类专业研究生和水利工程技术人員参考。

图书在版编目(CIP)数据

灌排工程系统分析/刘肇祯主编. —2版. —北京:中国水利水电出版社, 1997.7

高等学校教材

ISBN 7-80124-488-5

I. 灌… II. 刘… III. 排灌工程-系统分析-高等学校-教材 IV. S277

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 15355 号

书 名	高等学校教材 灌排工程系统分析 (第二版)
作 者	武汉水利电力大学 刘肇祯 主编
出 版	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044)
发 行	新华书店北京发行所
经 售	全国各地新华书店
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	机械工业出版社京丰印刷厂
规 格	787×1092 毫米 16 开本 11.5 印张 267 千字
版 次	1988 年 11 月第一版 1998 年 5 月第二版 1998 年 5 月北京第四次印刷
印 数	5851—7050 册
定 价	11.40 元

目 录

第二版前言

第一版前言

第一章 系统分析概论.....	1
第一节 系统	1
第二节 系统工程学	4
第三节 系统分析方法	6
第四节 系统分析方法在灌排工程中的应用	12
第二章 线性规划及其应用.....	15
第一节 线性规划的数学模型	15
第二节 单纯形法	18
第三节 两阶段法	28
第四节 单纯形法的矩阵表示	31
第五节 线性规划的对偶	33
第六节 线性规划数学模型的建立	41
第七节 应用实例	45
习题	56
第三章 整数规划及其应用.....	59
第一节 整数规划的类型及数学模型	59
第二节 割平面法	59
第三节 分枝定界法	62
第四节 隐枚举法	65
第五节 应用实例	68
习题	71
第四章 非线性规划及其应用.....	73
第一节 非线性规划的基本数学概念	73
第二节 无约束非线性规划	77
第三节 有约束非线性规划	87
第四节 非线性规划问题的线性化	99
第五节 应用实例	105
习题	113
第五章 动态规划及其应用.....	115
第一节 动态规划的基本原理	115
第二节 动态规划的数学模型和求解方法	124

第三节 多维动态规划求解方法的改进	131
第四节 应用实例	144
习题	156
第六章 模拟技术	160
第一节 模拟技术的基本原理与模型	160
第二节 灌排系统模拟技术	162
第三节 模拟技术中的优选方法	166
第七章 其他常用系统分析方法	170
第一节 随机规划	170
第二节 大系统优化	172
第三节 多目标决策	174
第四节 模糊决策	175
参考文献	178

第一章 系统分析概论

我国正处在社会主义现代化建设的伟大实践过程中,在这一历史性时期,必须大力发展我国的社会生产力,使综合国力跃上新的台阶,为此,需要充分利用各种天然资源和社会资源,运用科学技术最新成果,使国民经济产生最好的效益。

几十年来,随着各个领域科学技术的迅猛发展,许多学科出现了相互渗透的形势。这种情况使原来关系不甚密切或互不相关的部门逐渐形成规模愈来愈大、关系愈来愈密切的系统,从而使人们的视野愈来愈广阔,并且愈来愈深刻地触及事务的本质,使用从整体的角度、相互联系相互制约的观点去观察、思考、分析和解决问题,这种情况反映到生产工作中和国民经济建设中,就成为从整体最优的概念出发,对各种有限的资源,通过科学的组织管理,使之发挥最大限度的作用。系统工程科学就是以这类问题为研究对象的新兴学科。

系统工程科学是一门具有高度综合性的学科,它是在第二次世界大战期间逐步发展起来的。当时,由于战争的驱动,在资源分配、军事设施配置、各种人员配置以及交通运输和军事工程的进度等方面进行了大量分析工作,进而明确地提出了对问题给予最优解决的概念,并产生了反映这一概念的数学方法。这就是出现系统工程学的历史背景和条件。1957年第一本《系统工程》专著问世,标志着这门科学的产生和命名。随后,在近40年的过程中,系统的概念和方法逐步运用到许多科学和技术领域,并取得了成功。目前,从自然科学到社会科学,从经济科学到工程技术,从生态科学到管理科学,都不断出现应用系统工程方法的成功范例。这一情况又有力地推动了系统的进一步发展。

系统工程在水利工程中应用,始于50年代中期,首例是用于制订流域规划的工作,以后逐步扩展到规划、设计、施工和管理诸多方面,从水力发电工程到灌溉排水工程的各个领域几乎都引进和应用了系统的方法。近些年来,运用系统工程更有效地解决实际生产问题,在国内外日益受到重视,从而使系统工程方法的应用具有更为广阔的前景。

第一节 系 统

一、系统的定义

关于系统的定义,目前有多种提法,据不完全统计,将近30多种。这些不同提法的出现虽然各有其不同的背景,以不同领域的特定内容为依据,各自反映其特殊领域的特征,但其内涵却有共同之处,在实质上都是指一个由多种元素构成的有内在联系的整体。我国著名科学家钱学森院士为系统一词下的定义是“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”。这一定义也可用于灌排工程系统包括在内,覆盖了本书所涉及的有关系统的内容。

二、系统的类别

自然界和人类社会，系统是普遍存在的。各种各样的系统有不同的存在形式和特点。当今的系统可以大致分为三个类型，即自然系统、人工系统和两者组合起来的复合系统。

1. 自然系统

自然系统中有太阳系、银河系、宇宙系和生物系统，以及微观的原子核系统等。这些自然系统的共同特点是自然形成的，与人类的生活和生产有着密切的关系，它们时时刻刻在进行着活动。有的学者把社会系统也属于自然系统的范畴。

2. 人工系统

人工系统是人类基于生存的需要而人为地建立起来的系统。它一方面要适应自然系统的内在规律，对自然系统实行干涉与改造并在这一基础上创建起来，另一方面又要把这种干涉、改造由观念形态变成可以实施的活动。人工系统具有明确的目的性，它是人类为达到不同目的而建立起来的。在人类的工农业生产和生活中存在着许多人工系统，如生产系统、水利系统、电力系统、通讯系统等。

3. 复合系统

由人工系统与自然系统组合起来的复合系统也是广泛存在的系统，它们既具有自然系统的特征，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。

人工系统大致可以归纳为三种类型。

(1) 人类对自然界存在的天然物进行改造、加工、制作、装配而产生的器具和物品，并由这些物品组成的工程系统。这类人工系统也可称为硬系统，形式多种多样，十分丰富。诸如水利系统、电力系统、教育系统、城市、医院、灌排工程、水库、电站、通讯网络、自动控制装置等，都是人类为了自身的生存和发展的需要，在自然界实物的基础上建立起来的硬系统。

(2) 人类为驾驭自然系统或操纵工程系统而建立的组织、制度、方法、程序、手续等因素构成的非实物系统，也称软系统。科技体系、教育体系、法律体系等均属此类。它是人类为了更好地建立起第一类人工系统所不可缺少的，甚至是更重要的。

(3) 由实物构成的硬系统与非实物软系统组合而成的系统，是一种软硬结合的系统，在其组成部分中，既包括人类加工、制作的器物及其构成的硬系统，还包括表现为抽象形态的概念、方法、程序等软系统。近年来，随着电子计算机技术的飞速发展，又把信息处理装置作为构成要素，从而使硬系统和软系统在更高的水平上结合起来。

实际上，大多数系统是由自然系统和人工系统组合起来的软硬结合的复合系统。因此，自然系统和人工系统处于非常密切的组合之中，本书所涉及的灌排系统就是其中之一。

三、系统的特性

系统所具有的一般特征可归纳如下。

1. 系统的集合性

系统的集合性是由于系统具有若干组成部分所致。或者说，至少由两个或两个以上的可以相互区别的要素组成的，才能称之为系统。例如，一个最简单的水利系统——水库，是由坝、泄水涵洞和溢洪道组成；渠道系统是由渠道、分水闸、节制闸和其他渠系建筑物等

相互区别的要素组成的。实际工作中，系统常是巨大的对象，这并不一定是在规模上庞大，而是由于有非常多的要素作为它的组成部分。水利系统在规模和构成的要素上，都是一种典型的系统。对于规模大而且组成要素之间相互关系复杂的系统，可以看作是由若干个子系统有机结合起来的，一个子系统又可由若干个更小的二级子系统构成。换言之，系统的集合性，是反映系统的构成要素的众多性和多样性，也反映系统结构的多层次性。

2. 系统的相关性

系统的相关性是指系统的构成要素之间具有有机的联系性。系统的各个组成部分是相互作用和相互依赖的，相关性是说明系统要素之间的这种关系。如果只有要素，尽管是多种多样的，但它们之间没有任何关系，就不能称之为系统。系统的相关性若能用数学式表达出来，就是后续章节内将要叙及的约束条件。在水利系统中，相关性是十分明显的，例如，在灌溉系统中，渠首工程与干渠这两个组成部分之间关系密切，两者的技术性活动不可分割，干渠与支渠之间的关系也类似。

3. 系统的目的性

系统的目的性是指系统都具有特定的功能，也就是说：系统都有既定的目的。人工系统都有目的性，这是非常明显的，有时不止有一个目的。创建一个人工系统，必须有明确的目的性，这是系统设计和运行的一个非常重要的问题。但是，确立一个系统的目的，并不是一件简单的工作，有时需要反复推敲、多次探讨、进行比较后才能确定。系统的目的如果能用数学式表达出来，就是目标函数或多目标函数，目标函数和多目标函数视系统的结构层次不同而定。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。为了使各层次的目标均能按既定的意图得以实现，就需要一定的手段与方法，使系统的构成要素有机地协调动作，多层次递阶系统的优化问题就是一个范例。水利系统都有既定的目的，这是不需要多加说明的。

4. 系统的整体性

系统具有整体性是因为系统的各个组成部分构成了一个有机整体。系统虽然包含众多的组成部分，但它是作为一个统一的整体而存在的。各构成要素的各自功能及其相互间的有机联系，只能是在一定的协调关系之下统一于系统的整体之中。换言之，对任何一个构成要素都不能脱离开整体去研究它的作用及其同其他要素的关系，也不能脱离开对整体的协调去研究。脱离开整体性，各构成要素的功能和要素间的作用就失去了意义。所以，系统构成要素的功能及其要素间的相互联系，要服从系统整体的目的和要求，要服从系统整体的功能，在整体功能的基础上，展开各构成要素及其相互间的活动。这些活动的总和形成了系统整体的有机行动，这就是系统功能的整体性。灌排系统的整体性是十分突出的。一个灌溉系统，作为整体，它的功能是供水灌溉，它的目标是适时适量地提供水量并保证水质，它的各组成部分如渠首、输配水渠系以及调节控制设施，都是为了完成整体的功能、达到整体的目标而工作，它们之间的协调也是在整体功能和目标之下协同工作。

5. 系统的不确定性

系统具有不确定性是因为系统中存在自然要素或不能用确定性方法描述其状态的构成要素所致。在自然系统和人工系统相结合的复合系统以及大部分人工系统中，存在着自然界天然因素或与人类活动有密切关系的构成要素，这些组成部分的活动或者由于人的认识

尚未完全掌握其准确的规律，或者由于活动本身带有一定的随机性，因而只能使用统计规律等手段反映其活动状况与进程，这样，就使系统带有不确定性。这种不确定性既反映了自然界天然因素的特性，也反映了人的活动所具备的一种属性。这种不确定性的特征为大量的系统所具备，从而使不确定性的研究成为研究系统的重要工作之一。灌排系统是具有不确定性的典型例证。灌溉系统包括水源工程，而水源的来流带有突出的不确定性；排水工程涉及降雨径流问题，而降雨也带有强烈的不确定性。灌溉水源受到污染会影响供水水质，这是灌溉系统的重要组成要素，但导致河流污染的污废物排放却带有一定的随机性，这是由于人的生产和生活活动的不确定性所致，因此，灌排系统一般都具有不确定性。

6. 系统的适应性

系统具有适应性是因为系统是存在于一定的空间之内和一定的时间上，也即存在于一定的环境之中，而系统所处的环境会随着时间的推移而变化，并且系统本身也会随着时间的进展而需要改善和发展。换句话说，系统周围的环境会出现变化，这种变化又要求系统的功能有所改变，因而就出现了系统对这些变化的适应性。一个理想的系统应该能够经常与外部环境保持最佳的适应状况，不能适应环境变化的系统是没有生命力的。系统的这一特征，有人称为系统的成长性，以表明系统的发展性能；也有人称为系统的环境适应性。灌排系统具备不可缺少的适应性。一个灌溉系统建成后，河流来水、天然降雨等自然条件逐年都在变化，灌溉系统就要具备对环境的这种变化的适应能力，而且在其运行的长期过程中各构成要素将要发生损坏、老化等变化而不能完成或不能充分完成其功能，这就需要对系统进行改善或改建。因此，一个灌溉系统应该具备这种对环境变化或自身变化的适应性。四川省都江堰灌溉工程是系统工程的典范，它能存在两千多年而持续产生效益，表明它具有极其优异的适应性。

系统的上述各种特性，归纳起来，不外乎涉及系统本身和系统所处的环境。通常是把环境对系统的作用和影响作为对系统的输入。系统根据输入进行工作，产生输出。把输入转换成输出，是系统的功能、系统的目的和系统的工作。因此，系统又可以被看作是把输入变成输出的转换机构。

认识系统的上述特性，对于应用系统工程的方法，有着重大的指导意义。

第二节 系统工程学

一、系统工程学的范畴

当人类的各种活动日益多样化，并日益达到高级程度时，人们在对其所进行的活动做出决策时，一方面要反映人类社会的复杂程度，另一方面要体现出技术高度发展而出现的先进技术，并且使此项活动产生实际的高效后果。系统工程学就是在这样的背景下产生的。

系统工程学不同于过去长期存在的各种工程学，它主要是采用了过去的工程学所没有采用过的新的方法论。构成新方法论基础的就是系统思维方法。过去的工程学主要是用构成要素的良好程度来保证整体的良好状态，而系统工程学的思维方法是利用各构成要素的巧妙联系和各子系统间的巧妙联系，保证整体的良好状态。首先断定整体的目标，然后再参照这种目标，决定各构成要素所必需的性能，这比提高每个构成要素的良好程度更能使

整个系统的水平得到提高。

系统工程学是一门新兴学科，尚处在继续发展、不断完善的过程中，人们对它的认识也不尽一致，因而对它的定义也不完全相同。

1975年《美国科学技术辞典》对系统工程学下的定义是：“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和目标，并使各组成单元之间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”。

美国切斯纳茨 (Hchesnats) 对系统工程学下的定义是：“把各种结构特殊的要素和从属功能构成的系统作为一个整体。目的在于对系统进行调整，使系统整体符合于目的，使系统内部各部分保持在最佳状态”。

尽管对系统工程学的定义不同，但各种定义中都具有以下几个共同点。

(1) 系统工程学的研究对象是系统，是由许多要素构成整体，相互之间呈现有机联系，并具有既定功能和目标的系统。

(2) 系统工程学是用系统理论创造人们需要的各种人工系统，或对已有系统进行改造使之更加完善的工程学科领域，换言之，它是一门以人工系统为工程对象的工程学科。

(3) 系统工程学在于解决系统的最优化问题。即使系统整体以及各组成部分均处于最佳的状态及组合，这是系统工程学的核心问题。

系统工程学是一门工程学，但它同其他工程学科有性质上的不同。例如，水利工程、电力工程、机械工程等工程技术学科，都有特定的物质对象，而系统工程学的对象则不限于某一专门领域，也不限于物质系统，各种自然的、人类的、生态的、社会的系统现象以及组织管理方法都是它的对象，系统工程学是一门范围十分广泛的学科。

系统工程学与各种对象的实践相结合，就形成了各种系统工程领域，如水资源系统工程、农业系统工程、环境系统工程、军事系统工程、教育系统工程、科技系统工程、社会系统工程、经营系统工程等。这些不同种类的系统工程，其不同点在于各自的具体对象不同，共同点则是都运用系统工程学的理论和方法进行各自对象的研究。

系统工程学是系统论、控制论、信息论、运筹学、电子计算机技术等学科基础上发展起来的一门边缘学科。它的任务除系统的最优规划、最优设计和最佳运行及现代化的组织管理技术之外，还包括各种系统未来技术和状态的预测。

二、系统工程学的基本原理和方法

系统工程学的基础理论是20世纪后半叶逐渐形成的，以研究系统理论为对象的系统科学。因此，系统工程学的基本原理以系统科学原理为依据。系统科学原理涉及的内容比较广泛，除了与前述有关的整体性原理、相关性原理及分解综合性原理以外，还有动态性原理、创造思维原理和反馈原理等。动态性原理是研究系统元素间的联系随时间的变化；创造思维原理是研究如何运用已有的知识去识别新的事物和解决新的问题，以及运用新的原理和方法去研究已经熟悉的事物，从而创造新的理论；反馈原理则是研究将输入经过处理后的结果（输出）再送回输入环境，从而又对输入产生影响的过程。

系统工程学以上述基本原理为依据，形成了其独特的思考 and 解决问题的方法，大致可分为以下几个子过程。

1. 问题的设定

这是一个组织过程，即有关人员在以下几个问题中取得一致认识的过程：对局部认识到的问题，经过讨论，在大致相同的方向上和近似的水平上求得基本一致，而且对能否解决该问题的评价标准达成一致的意見；同时，还要对客观存在的环境或给予的条件以及变量之间的界限取得一致看法，换言之，问题的设定就是对系统的目的和为达到这一目的可以采用哪些途径的一个认识过程。

2. 系统分析

根据设定的问题，将系统中的实物现象或人的活动等之间的复杂因果关系，用具有一定结构的形式表达出来，其中包括系统的目标、评价标准、给予的条件和各有关变量等的复杂关系。这就是系统分析的过程。在这个过程中，为了描述系统的情况，必需巧妙地运用可行的概念或语言，包括逻辑学和数学上严密的语言，以及其他自然科学、社会科学方面可行的概念或语言。特别重要的是，此时还要迅速而准确地跟踪环境变化或方案变更引起的效应。系统分析过程的核心是模型化和最优化，前者是构造反映系统情况的模型，后者是达到既定目的的最佳结果。

3. 系统设计

对系统分析得出的成果，为系统制订合理的实施方案，就是系统设计的内容。例如，针对系统的目的，决定如何分配有限的资源，决定资源的用途，而且把资源分配置于系统之中，作为有制约性的体系，从而规定了单元要素之间以及子系统之间的相互关系。换句话说，在硬件和软件两方面建立单元要素之间和子系统之间的制约性工作，就叫做系统设计。

4. 系统管理

通过系统设计，以系统内制约性体系为轴心，使它与环境间的相互作用结合在一起，使系统动作，并防止其动作结果脱离制约性体系规定进行的控制过程，就是系统管理。系统管理的前提是，为了实现上述的制约性体系，必须使系统具有跟踪标准或计划的能力，一旦发现脱离规定的标准或计划，便能立即将其差异反馈回去，使实施结果接近于标准或计划。

5. 系统更新

如果系统对计划或目标失去跟踪能力时，即环境发生了大变化，而计划或目标的实际情况都不能准确地得以判断时，都必须改变制约性体系。这时，就需要探索新的认识，寻求新的方法改变系统的内涵，这就是系统更新。

综上所述，系统工程学有其独特的基础理论和实践方法，对水利工程中的灌排系统都有指导意义。

第三节 系统分析方法

系统分析方法是系统工程的量化和定性分析方法，用来解决系统的规划、设计和管理问题，提供最优规划、最优设计、最优控制和最优组织管理。如前所述，其中心内容是建立模型和最优化问题。

系统分析方法自本世纪 40 年代问世以来，经过近 50 年的实践，无论在理论上或在实际应用上都获得了巨大的发展。它是以生产活动、科学试验、组织管理为对象，对人力、物力、财力等各种资源进行统筹调度、统筹规划的决策方法，是寻求对问题的最合理解决，制订最有效的方案。

一、系统分析问题类型

系统分析的问题大体上可分为以下几种类型。

1. 资源分配型问题

资源分配是最常遇到的问题，也是系统分析中一种常见的问题。这类问题是从各种可能分配方法中，选择出被认为最符合目的的共有资源或稀有资源的分配方法。多品种产品的生产计划、资源分部门利用等问题都相当于这种类型。在水利水电工程中，水资源在各用水部门间的最优分配、制订最优运行策略等，都是应用非常广泛的资源分配型问题。

2. 存储型问题

存储型问题是在解决物资交换问题的基础上产生和发展起来的。在交换过程中，物品、资金和信息等都要有一定的储量，但储量是否恰当，则直接关系到生产的顺利进行和资金的有效周转，关系到增产和节约问题。因此，在经济管理系统工程中，存储问题有着重要地位。

存储问题的类型很多，各种存储问题的目的都在于供应某种需要。因此，存储的最优方案就是在保证供应的条件下，使有关存储的费用最小。

水库蓄水是存储问题的一种，因而在水库规划和运行课题中常见到存储型问题。

3. 流通型问题

流通型问题是随着物资的流通和运输而产生的，这是人类生产和生活中大量遇到的问题。渠道输水、电网输电、交通运输、通讯联络等都是流通型问题的特殊形式，也可归结为网络问题的一种形式。流通型问题（或称网络问题）的实质是：从出发地有许多途径可以达到目的地，各种途径的距离、费用、运输量等均不相同并有若干限制，如何发挥这一运输网络的最大作用，或者如何规划一个网络使之最优地满足各种经济、技术条件的要求。网络问题一般包括最短路径问题，如使输水管道的铺设长度最小的问题；最大流量问题，如在通过能力一定的条件下使通过流量最大等。流通型问题或网络问题在水利水电工程中有较广泛的应用，如输水管道系统的规划，水利水电工程施工的组织管理等。

4. 排队型问题

人们在日常生活中经常遇到排队问题，生产过程中也有排队问题。排队是接受服务的一方和服务的一方相互等待而形成的问题。电话通讯系统的工作就是一种排队问题。在这种系统中，用户是服务对象，是接受系统服务的一方，电话呼唤是系统的服务，是服务的一方，用户使用电话进行呼唤就构成了等待电讯系统服务的排队问题。电子计算机内部等待处理的程序和信息，生产线上等待加工或装配的部件等，都是比较典型的排队问题。各种服务设施的窗口发生的问题是生活中出现的排队问题。在水利水电工程中，把水库看作是服务系统，把各用水部门看作是服务对象，把水库放水看作是系统的服务，这样，水库的规划和调度就可看作是排队问题。目前，这种处理方式尚处在探索阶段，运用于实际生产工作的尚少。

5. 竞争型问题

在生活和生产过程中常出现竞争问题，例如商业中的销售问题，信息处理中的预测问题等，都是对抗性竞争局势的问题。其目的在于寻求最优的对抗策略，也称对策问题。一场对抗中的每一方，为了战胜对方，必定要采取一定的策略。竞争型问题就是在场对抗中应采取何种策略为上策的问题，它更多地用于对事先未知的对象采取什么对策。有的科学工作者把水库调度看作是竞争问题，以水库用水为一方，以水库来水为另一方，用解决竞争型问题制定对策的方法研究水库最优运行方案，但尚不普遍。

6. 排序型问题

人们在生产和日常活动中常出现排序问题，即对各种活动和环节，按规定的要求和条件，排列出理想的顺序，使之达到最佳的组合，也称组合型问题。例如，在生产过程中更换设备和部件的安排，工程实施过程中各种作业顺序的确定，交往活动中访问路线的拟定等，都有一个最佳组合的问题，也即最佳排序问题。在水利水电工程中，施工进度计划的制订就是排序问题的典型实例，目前已得到广泛应用。

7. 综合型问题

在复杂的系统中常会出现多种问题并存的复杂局面，即包含上述各类型问题共同存在于一项系统工程中，形成复杂的综合型问题。

二、常用系统分析方法

为了处理上述各种类型问题，目前经常使用的系统分析方法有以下几种。

1. 线性规划 (LP)

线性规划是数学规划方法的一个分支，也是应用最为广泛的一种数学工具。它的数学理论和方法是用来解决约束条件为线性等式或不等式，目标函数为线性函数的最优化问题，即数学模型中各数学表达式均为线性函数的情况。这种方法用于解决资源分配型问题、存储问题等。在水利水电工程中，用于制订河流开发规划最优方案，解决灌溉工程、除涝工程、排水工程以及水力发电工程的最优规划问题和编制最优运行方案等，都取得了良好的成果。

2. 非线性规划 (NLP)

非线性规划也是数学规划的一个分支，其应用也很广泛。它的数学理论和方法是用来解决约束条件和目标函数中部分或全部存在非线性函数的有关问题。非线性规划方法有许多种，包括无约束条件的非线性规划、有约束条件的非线性规划、非线性规划问题的线性化方法等。非线性规划方法具有很高的效能，其应用范围很广，在水利水电工程中也有较广泛的应用。

3. 整数规划 (IP)

整数规划的数学理论和方法是在线性规划的基础上发展起来的，它的基本特点是对研究的变量有特定的要求，即变量的取值必须是整数，甚至在某些情况下变量只有两个可能的数值，即 0 或 1。全部变量为整数者，称整数规划；均为 0 或 1 变量者，称 0—1 规划；部分变量为整数，部分变量为任意非负实数者，称混合整数规划。其他特征与线性规划方法相同。这类方法在水利水电工程中用途也较广，因为许多变量所代表的对象，其性质决定它们必为整数，如施工机械、水力机械、运输工具等实物的数量只能是整数，不可能是其

他数值。排序问题、组合问题多使用整数规划方法。

4. 动态规划 (DP)

动态规划同属数学规划,这是一种多阶段决策理论和方法。它是把问题分成若干阶段,运用建立的递推关系逐阶段依次作出最优决策,并使全过程达到最优结果。鉴于它是对各个阶段确定最优决策,也称作多阶段决策过程。多阶段决策过程不仅用于把问题在时间上分成若干阶段,还可用于把问题在空间上分成若干阶段,即分成不同对象,区分不同位置等。动态规划是一种概念明确、计算思路简便的方法,因复杂程度的不同,这一方法还有常规动态规划、状态增量动态规划、离散微分动态规划等多种算法。动态规划的应用范围是同线性规划并列最为广泛的系统分析方法。在水利水电工程中,比较广泛地用于水资源最优分配、制订最优运行策略、解决流通运输等问题。

5. 二次规划

二次规划是非线性规划的一种特殊形式,它是目标函数和约束条件具有特定性质的系统分析方法,即目标函数为二次型,约束条件为线性的最优化方法。在这种情况下,决策导数是决策变量的线性函数。因此,可以根据这一特殊性质,用微分算法进行求解,从而使之有一定的应用范围。在水利水电工程中,也有应用,但受到数学模型形式的限制,并不广泛。

6. 几何规划

几何规划是系统分析方法中新发展起来的一种数学规划方法,也可以看作是非线性规划的一种特殊形式。在这种数学方法中,原则上目标函数和约束条件都应是独立变量的多项式。这种方法的特征不是首先寻求独立变量的最优解,而是寻求以最优方式将总目标值分配于目标函数的各项之中,当达到这样的最优分配时,通常只要考察几个简单的线性方程,便能计算出目标函数的最优解。如果这一最优解是合理可行的,则可进一步求出实现此最优解诸变量的最优方案。由于几何规划方法能有效地处理目标函数高度非线性化问题,所以用来求解费用最小化非线性规划问题,比其他方法更为方便,因而在系统分析中得到了比较广泛的应用。近十几年来,已在水利水电工程中有了不少应用实例。

7. 多目标决策技术

多目标决策技术也称多目标规划方法,它是解决同时存在两个或两个以上目标决策问题的方法。在复杂的系统中,常要求同时达到两个或两个以上目标。在一般情况下,这些目标大多是不可公度的,往往是相互矛盾的。这种技术的目的是在不可公度而又相互矛盾的目标之间,经过权衡、协调,求得满意的解决途径,而不是象单目标决策问题中求得最优解。多目标决策技术有权重系数法、约束法、多目标线性规划法、多目标动态规划法等。近20多年来,多目标决策技术发展迅速,应用也十分广泛,用来解决资源开发与分配问题,制订生产计划,解决经营管理问题等,有着大量的成功例证。在水利水电工程中,用于水资源规划与管理,以及其他工程技术问题,实例也非常丰富。

8. 对策论

对策论,也即博弈论,是解决竞争者应该采取何种对策的理论和方法,是解决对抗性局势问题的理论和方法。如果对抗双方可能采取的对策只有有限个,则是有限博弈;如果可能采取的对策为无限个,则是无限博弈;如果在对抗中获胜的一方和失败的一方得失恰

好相等，则为零和博弈。目前，两方对抗的博弈问题已经有了解决办法，多方博弈问题尚不能解决。对策论（博弈论）在水利水电工程中的应用尚不普遍。

9. 排队论

排队论是解决排队型问题的理论和方法。它是研究由于排队而产生的等待时间和排队长问题的理论和方法，也是改进服务系统工作过程的数学理论和方法。排队论是通过对各个服务对象的研究，揭示系统工作的规律，改进服务系统的工作能力，使之处于最优的工作状态之下。

10. 网络技术

网络技术是以由结点和与结点相连接的直线构成的网络为手段，来简便而直观地表现物流、信息流、逻辑联系和决策层次结构等的方法。网络技术的基础是网络，使用的方法有网络图表作业、线性规划方法、动态规划方法等。网络技术多用来解决最短路程、最大最小流量、最小成本流、关键路线等有关问题，是十分普遍和有效的。在水利水电工程中，多用于工程施工管理、供水管网系统规划和设计等。

11. 模拟技术

在系统分析方法中，模拟技术是用途十分广泛的有效工具。它是用电子计算机程序模仿一个系统活动过程的方法，或者说，它是以电子计算机程序为模型，在电子计算机上进行模型试验的技术。这是模型试验的一种特殊形式。进行模型试验时，以计算机的各种输入作为模型试验的输入数据，以计算机的反复运算作为不同处理的试验过程，以计算机的输出作为系统工作的各项成果，即模型试验的结果。计算机模拟过程与物理模拟过程相似，后者是在实物模型上模仿原型的活动和工作，前者是在计算机模型上模仿系统的活动和工作，给出预期成果。

计算机模拟技术的核心工作是编制模拟程序，使之最大限度地模仿系统的真实情况，而使失真程度降至最低限度。

模拟技术与前述各种系统分析方法相比较，在一般情况下，前述各种系统分析方法可以提供问题的最优解，但由于受到数学模型模式的限制，常常需要对研究的对象做出某些必要的简化或概化，从而影响模型的仿真程度；模拟技术则相反，它的优点是有可能提高仿真程度，对于比较复杂的系统，能发挥更好的作用，求得满意的成果，但是它的缺点在于不能直接提供问题的最优答案，最优解的取得尚需要辅以其他手段和方法。

因此，对于复杂系统，模拟技术有着比较广泛的应用。在水利水电工程中，流域规划、水库群的规划与调度、灌溉配水计划、排水规划等多种工作，应用计算机模拟技术，都取得了满意的成果。

在实际工作中，模拟技术常与数学规划方法结合使用，相互取长补短，互为补充，以达到更好的效果。

12. 随机方法

随机方法是以概率论为基础发展起来的系统分析方法。系统分析的对象，就其性质来说，可以分成两大类，一是确定性问题，即把问题中的量看作是具有肯定数值的；一是随机性问题，即问题中的量是不肯定的，而看作是可用概率规律描述的随机量。后一情况在许多工程技术中是广泛存在的，在水利水电工程中，尤其如此。河川径流、天然降雨、灌

溉用水、污染程度等都是随机性的量，因产生条件的变化而变化，不能用物理定律来表达，只能用概率统计规律来描述。这样就出现了反映某些量的随机性质的随机方法。

目前有许多随机方法，其中多数是渗透到前述各种方法之中。例如运用数学规划的各种理论和方法求解问题，可以是常用的确定性方法，也可以是随机性方法，视量的性质不同而定。资源分配型问题，存储型问题等，都有应用确定性方法和随机性方法两种情况。有些类型的问题着重使用随机方法求解，如排队型问题、竞争型问题，这是因为涉及的量都是随机性的；有些类型的问题着重使用确定性方法，如使用整数规划的问题等；模拟技术既可用于确定性问题，也可用于随机性问题。

在水利水电工程中，常用的随机方法有随机线性规划，包括概率规划、机遇约束规划、随机动态规划、蒙特卡洛法、随机模拟技术等。随机模拟技术主要用于水文时序系列的生成。

13. 模糊决策方法

模糊决策是以模糊数学为基础发展起来的系统分析方法，属于不确定性数学方法的范畴。如果说，概率论的理论和方法把数学的应用从确定性的必然现象扩大到随机性的偶然现象，那么，模糊数学的理论和方法则把数学的应用从确定性的精确现象扩大到不确定性的模糊现象。模糊决策方法是对具有模糊性质的问题提供决策依据的方法。

水利水电工程中，特别是灌溉排水工程中，有许多事物和概念具有模糊性质，如水情偏枯、偏丰，中等干旱年等。因此模糊决策方法就有了可用于解决某些实际问题的场所。模糊决策方法包括隶属度确定方法、模糊聚类分析、模糊数学规划等，这类方法由于产生年代不久，尚处在不断完善的发展过程中。

在上述各种系统分析方法中，灌排工程中最常使用的是各种数学规划方法、模拟技术、网络技术、随机方法等。在具体实践中，常有两种或两种方法同时使用的情况出现，以便更准确地反映问题的实际情况或多方探求预期的结果。

在解决实际问题的过程中，系统分析方法常同其他学科领域的理论和方法结合使用，如经济分析方法、自动控制技术等。

系统分析工作为了取得课题的最优成果，时常涉及到工程的经济效益，从而同经济分析有着密切联系。在建立系统目标函数和进行系统评价时，经济分析是不可缺少的，这里要使用适宜的经济指标、经济比较准则以及各种经济计算方法。

系统分析工作时常同系统的控制密不可分，因而系统分析方法常同控制论方法结合使用。控制论的研究对象是系统控制，是控制者对控制对象施加一种主动影响，目的在于保持事物状态的稳定性或促使事物由一种状态向另一种状态转换，因此这类系统必须有两个基本部分，即控制主体和控制对象。前者也称施控系统，决定着控制活动的目的并向控制对象提供条件，发出指令；后者也称受控系统，是直接实现控制活动目的的部分，其运行结果反映了系统的功能。系统控制是人工系统活动的最常见行为，在水利水电工程中最明显。因此，水利枢纽、灌排渠系的系统分析等不可避免地同它们的控制有密切关系，从而使系统分析工作与这类系统的控制活动结合起来。

应当指出，系统分析方法的内容和基础理论是很广泛的，许多分支的历史不长，并且尚不断的充实和完善之中，有着广阔的发展前景。

第四节 系统分析方法在灌排工程中的应用

系统的思想在我国古代的一些著名灌排工程中就有了光辉的体现。举世闻名的四川省都江堰工程就是卓越地体现了系统工程学思想的范例。都江堰工程利用岷江分水灌溉川西平原，它包括“鱼嘴”分水工程、“飞沙堰”分洪排沙工程、“宝瓶口”引水工程三大主体工程 和 120 个附属渠堰工程，构成一个整体，主体工程如图 1-1 所示。工程系统各组成部分的规划布局，恰到好处。外江、内江和宝瓶口的设计宽度及飞沙堰的规模也非常恰当地体现了全局的观点，既保证了川西平原的灌溉用水，又不会超量引水产生洪涝灾害，还维持了河道的长期稳定。实现这些目标完全靠一些堤堰和渠道，没有任何拦河的闸坝建筑，工程的建筑和维修完全采用当地材料，如杓槎、竹笼、石埂均用当地竹、木、卵石做成，降低了工程费用。工程系统的运行管理也根据全局和动态的观点及长远效益观点形成了一套管理经验和制度，即都江堰的“三字经”和“六字诀”。可见，系统工程的思想早已被水利技术人员所理解，使整体考虑问题、综合分析问题、方案比较、择优决策等思想，早已成为开展水利技术工作的思路，并持续地运用和发展，直到近代水利建设事业中。

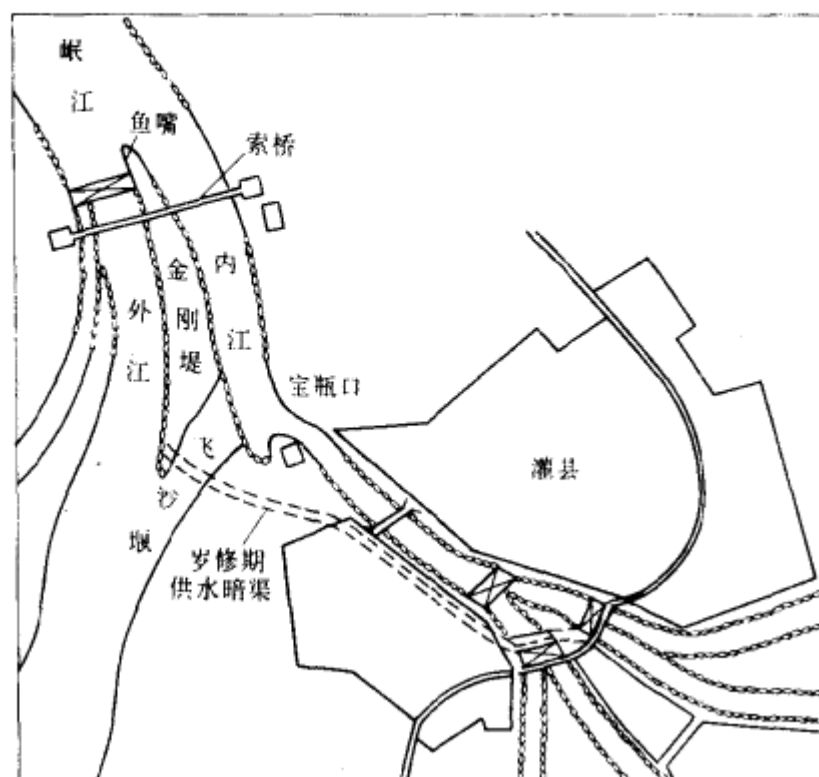


图 1-1 四川都江堰工程示意图

运用近代系统分析方法解决水利和灌排问题，则是本世纪 50 年代中期开始的。美国哥伦比亚河流域规划、埃及尼罗河阿斯旺大坝发电和灌溉规划中应用系统分析方法，可以看作是标志着这种方法在水利工程中应用的起点，以后逐步发展而扩展到比较广阔的范围。

我国着手系统分析方法在水利工程中应用是从 50 年代末期开始的，目前已在许多领域得到应用，在江河治理、灌溉排水、水力发电、航运、供水、防洪等类水利工程中，在规划、设计、施工、运行管理等各种工作中，都有成功的应用实例。

系统分析方法在灌溉排水工程中的应用已深入到了各个组成部分和各类工作中。

系统分析方法用于制订农作物灌溉制度、确定最优灌水时间和灌水量，特别是制订供水不足条件下农作物最优灌溉制度即缺水灌溉条件下灌溉制度，在 60 年代末期和 70 年代初期就已取得了良好的成果。在这一类工作中，使用了多种方法，线性规划、整数规划、非线性规划、动态规划、模拟技术、随机方法等都得到了应用。解决这类问题时，有的研究正常供水条件下的灌溉制度；有的研究不充分灌溉即缺水灌溉条件下的最优灌溉制度；有的建立了灌溉制度的确定性模型；有的建立了随机模型；有的模型适用于旱田作物；有的

模型适用于水田作物；有的模型考虑了天然降雨的自相关；有的模型考虑了供水与用水的互相关；有的模型是将线性规划同动态规划结合起来使用；有的模型是将动态规划同模拟技术结合起来使用；有的则采用递阶结构模型；有的模型用于确定农作物最优种植面积；有的模型用于确定水稻最优移栽日期等等。总之，系统分析方法在制订农作物灌溉制度的工作中，得到了多种形式的应用，是一个相当活跃的领域。

系统分析方法用于优化灌排系统田间工程的配置以及优选灌水方法，也取得了成果。对于一定的自然、气候和经济条件，如何配置田间工程，如何选择灌水技术，才能取得优化的结果，是一个涉及到使田间灌水管理达到理想境地，从而使提高农业生产率在最末一级环节上落到实处的重要问题。已有先例，运用系统分析方法，针对地形、土壤、土地平整条件、农作物种植方法及生长习性，拟订优化指标，对田间工程各个组成部分以及喷灌、地下灌溉、湿润灌溉等不同灌水方法进行分析，优选出最佳灌水技术、制订出田间工程最优配置和管理方案。

系统分析方法应用于灌溉输水与配水，近年来得到了有实用价值的发展，特别是与自动控制技术和电子计算机的应用有了良好的结合，从而提出了多种输水控制方法，产生了若干输水策略模型，实现了输水实时控制，并在最优配水策略的制订方面取得了良好成果。此外，系统分析方法还完成了水稻灌区配水模拟的研究，以及尼罗河三角洲地区配水模拟策略的制订等工作。事实证明，系统分析方法是解决灌溉用水管理问题的十分有效的工具，对于已建成的灌区使用各种数学规划方法和模拟技术，针对灌区运行具体年份的供水条件，解决供水量在不同部位之间、不同作物之间以及不同水源种类之间的最优分配，都取得了有利于提高灌溉效益的诸多成果，从而避免了用水分配的盲目性，提高灌溉水资源的合理利用程度，为农业带来更大的增产效益。

运用系统分析方法进行灌溉水源工程的规划与调度管理，是成果十分丰富的领域，对于灌溉水库和灌溉泵站的规划和管理合理化，起着重要的推动作用，特别是灌溉水库工程。在灌溉水库和泵站等水源工程的规划和运行管理工作中，数学规划和模拟技术等方法的应用十分广泛，特别是灌溉水库以及包括灌溉在内的综合利用水库。在这类工作中，除了建立确定性模型之外，随机模型的研究也相当普遍，如机遇约束模型、随机优化模型、最优控制模型等。此外，多目标规划模型、递阶结构模型、优化模拟模型等的应用也比较普遍。应用系统分析方法，确定水源工程最优规模、编制其最优运行方案，在综合利用的情况下，协调各部门的用水需求，确定各部门用水的最优组合，是一个更为有效的决策途径。

运用系统分析方法研究水土资源平衡、制定灌溉工程规划，是成果十分丰富的领域。自60年代末期以来，这方面的研究工作发展是很快的，有人用线性规划方法研究了20世纪末水资源最优分配和最优农业用水量的问题；有人用线性规划和动态规划方法解决灌区规划问题，拟定最佳作物组成，确定最优种植比例；有人用线性规划、非线性规划和动态规划方法研究地面水和地下水联合运用于灌溉的课题，包括天然补给条件下地面水和地下水联合运用，以及人工回灌条件下地面水和地下水联合运用；有人运用各种优化方法解决提灌最优规划以及自流灌溉与提灌的最优组合问题等。90年代以来，国内外学者一致并多次强调合理、有效地利用水资源的问题，特别是灌溉农业用水是水资源供水的重大对象，在水资源利用方面具有举足轻重的作用。因此，提倡节约用水、提高水资源的有效利用程度；强