



刘肇玮 编

水资源系统工程

Xiandai keji
congshu



内 容 简 介

本书以水利水电工程为应用对象,扼要介绍了系统工程的基本概念、系统分析方法的主要内容、数学规划方法的基础知识、以及系统分析方法在水利水电工程中应用的现状和简单实例,并简要介绍了它的发展前景。本书在涉及系统工程中某些数学方法的时候,避繁就简,尽量使用在代数和几何的基础上就能阐述清楚的方法,个别问题用到微积分、线性代数的内容,也是初等的。本书是为未曾接触过系统工程的同志,提供入门的引导,借以初步了解这一学科及其在水利水电工程中应用的状况。本书可供具有中专或高中以上文化程度的水利工程技术人员以及水利水电部门的干部阅读。

2R05/23

《现代科技》丛书

水资源系统工程

刘肇祎编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 3.75印张 79千字

1986年4月第一版 1986年4月北京第一次印刷

印数0001—3360册 定价0.70元

书号 15143·5920

水利科普丛书编审委员会名单

主任委员：史梦熊

副主任委员：董其林

委	员：	丁联臻	王万治	史梦熊
		田 园	李文治	邢凤山
		杨启声	张宏全	张林祥
		沈坤卿	陈祖安	陈春槐
		汪景琦	郑连第	郭之章
		赵珂经	茹 智	陶芳轩
		谈国良	徐曹衍	蒋元驹
		曹述五	曹松润	董其林
		顾振元		

(以姓氏笔划为序)

序

水是人类生存和社会生产必不可少的物质资源。水利工作的基本任务是除水害、兴水利，开发、利用和保护水资源，为工农业生产和人们的物质、文化生活创造必要的条件。普及水利科学技术知识，让更多的人了解和掌握水利科学技术，也是两个文明建设的内容之一。为此，针对水利战线职工和社会上不同文化程度读者的需要，分层次地编写出版水利科普读物是十分必要的。

为了帮助水利科技人员的知识更新，掌握一些现代科技知识，并使水利科技成果更广泛地得到推广应用，尽快地形成生产力；为了使广大农村水利工作人员，掌握一些实用的水利基础知识，并应用于生产实际；为了总结和宣传我国水利建设的伟大成就和悠久历史，介绍水利在四化建设和人民生活等方面的重要作用，激发广大人民群众和青少年热爱祖国江河、关心水利事业，我们组织编写了七套水利科普丛书。包括：《现代科技》丛书、《水利科技成果》丛书、《水利水电施工》丛书、《小水电技术》丛书、《农村水利技术》丛书、《中国水利史》小丛书、《水与人类》丛书。这些科普丛书将由水利电力出版社陆续出版。

编写和审定这些丛书时，力求做到以思想性和科学性为前提，同时注意通俗性、适用性和趣味性。由于我们工作经验不足。书中可能存在某些不妥和错误之处，敬请广大读者给予批评指正。

中国水利学会科普工作委员会

一九八四年七月

前 言

新时期的总任务要求全国各族人民在本世纪末把我国建成具有现代化农业、现代化工业、现代化国防和现代化科学技术的社会主义强国。为了顺利完成这一艰巨的历史性任务，必须把最新科学技术成就引进到各个生产领域和管理部门。

国家现代化建设的一个重大课题，就是怎样才能最充分地利用各种天然资源和人力资源。换句话说，就是怎样开发利用各种资源，才能使它提供最高的国民经济效益，也就是解决怎样实现资源利用最优化的问题。

近几十年来，科学技术的发展是很迅速的。在这个迅速发展的过程中，很多门类的科学技术出现了相互渗透的形势。这种情况目前还在继续发展。它使原来关系不甚密切或互不相关的部门产生越来越紧密的联系，这就使人们越来越多地或越来越自觉地放弃过去那种孤立地观察问题和解决问题的方法，而用辩证的观点，全局的观点，相互联系的观点去观察、思考、分析和解决问题。这种情况反映到国民经济的生产工作中，就是从整体最优的概念出发，把有限资源的利用，用科学的方法加以组织管理，使它发挥最大的作用。系统工程就是这样一种新兴科学。

系统工程是从四十年代初期逐渐发展起来的。第二次世界大战期间，由于战争需要，在资源分配、军事设施、军事人员和各种武器的配置、以及军事物资和人员的运输等方面提出了大量的问题，要求给予最优解决，并且在探索解决这

些问题的过程中产生了反映这个最优化要求的数学方法，即运筹学。五十年代后期，《系统工程》等专著开始出版。随后，在六十、七十年代，系统工程的理论和方法逐步应用到许多科学技术领域，取得越来越多的成功。目前，从自然科学到社会科学，从经济科学到工程技术，都不断出现应用系统工程的新成就。这种情况又对系统工程科学的进一步发展给予了有力的推动。

系统工程的方法已经广泛地运用到许多工程技术部门，例如宇航工程中阿波罗宇宙飞船登月计划、机械工业中产品的优化设计和生产的最优管理、城市建设工作中的最优规划、电讯工程中的最优调度、电力工程中的最优管理以及环境工程中污染的最优控制与治理方法等。

系统工程的理论和方法在水利水电工程中的应用，国外首先用于流域规划工作，国内则首先用于水库调度的研究工作。到目前为止，已有近三十年的历史。在这期间，系统工程的应用逐步深入到不同的领域。从河流综合开发到地区水利建设，从水力发电工程到灌溉排水工程，从规划到管理，从设计到施工，系统工程的理论和方法都得到了程度不同的应用。特别是近五、六年来，系统工程在我国水利水电工程上的应用受到越来越多的重视，今后将会出现蓬勃发展的新局面。

本书就是为了适应这一形势发展的需要而编写的，向未接触过系统工程科学的同志，提供入门的引导。由于水平所限，书中错漏之处一定很多，请读者及同行赐教，以便及时改正。

编 者

一九八四年于武昌

目 录

序

前 言

第一章 系统及系统工程的概念	1
一、系统的概念	1
二、系统工程的概念	6
第二章 系统分析方法的主要内容	9
一、系统分析方法的概念	9
二、系统分析方法的主要内容	10
第三章 线性规划的基础知识	18
一、线性规划的数学模型	18
二、线性规划图解法	20
三、单纯形法	23
四、单纯形表	31
五、两步法	34
第四章 非线性规划的基础知识	39
一、非线性规划的数学模型和类型	39
二、非线性规划的线性化	44
第五章 动态规划的基础知识	55
一、概述	55
二、多阶段决策过程	60
三、动态规划的数学模型	62
四、最优化原理	64
五、动态规划的递推程序	65
六、二维及多维动态规划	66

第一章 系统及系统工程的概念

一、系统的概念

系统是一个术语，是自然界和人类社会中许多事务的概括名称。当前，在自然界和人类生产和生活活动中有多种多样的系统，大到整个银河系，小到一台启闭机，都可叫做系统。按照系统的性质，有自然系统和人工系统两大类。

自然系统是指天然条件下形成的系统，例如整个宇宙、银河系、太阳系都是大的自然系统。地球上的自然系统有海洋系统、大气系统、水循环系统、河流系统、生物系统等。这些自然系统都是人们在生产和生活活动中十分熟悉的。

人工系统是人们在生产和生活活动中为了达到某种目的或满足某种需要而人为地建造起来的。在工农业生产、交通运输、能源、水利、文化教育、经营管理、医疗卫生等方面，人类已经建造了多种形式的系统。有些人工系统是人们对自然界的天然物质进行加工装配而制成的器具、物品以及由它们组成的工程设施，例如水利系统、电力系统、城市、医院、水库、电站以及启闭机械、自动控制装置等，这是大量存在的人工系统，常常是我们研究的主要对象。另外还有一些由概念、原理、原则、方法、制度、程序和手续等非物质的因素组成的系统，如科技系统、思想体系、教育制度等。这也是非常重要的人工系统，而且是建立前一种人工系统所不可缺少的。特别是把这两种类型的人工系统结合起来，即把具体的实物和抽象的方法和程序等结合起来，就为

人工系统的建造、经营和使用开辟了更为有效的途径，这在电子计算机日益普及的今天，显得更加突出。

从工程技术的角度来看，人工系统是我们更为关心和注意的对象。

对于这些种类繁多的系统，怎样在学术上给出一个概括的表述，或者说，系统的定义究竟是什么？这对正确的建立系统的概念是十分重要的。系统的定义，目前已有许多说法，但仍然没有一个公认的统一的提法。据不完全统计，现在已有三十多种提法。造成这一情况的原因是提出不同定义的学者，各有其专长、各有其从事的专业。他们提出的定义，大都受其专业特点的影响。然而，尽管说法不一，但在实质上都把系统看作是“一个由多种要素构成的整体”。

例如，有的认为系统是“有组织的或被组织化的总体”；有的认为系统是“一个复杂的统一体，它常由多种多样的部分组成，以实现某一共同的计划或服务于某一共同目标”；有的认为系统是“结合着的全体所赖以形成的诸概念、诸原理的复合体”；有的则认为系统是“一组装置，形成一个网络，用于一个共同目标”；有的还认为系统是“以规则的、相互作用又相互依存的形式结合起来的对象”；有的还把系统看作是“多个组成要素保持有机的秩序、具有同一目的的行动者”等等。我国著名科学家钱学森提出：“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”。我们认为这个定义为系统提供了一个比较完整的概念。

从系统的这个定义可以看出，作为系统，应该具备下面几个特征：

首先，系统是具有集合性的。前面的定义说到系统具有“若干组成部分”，这就是指系统的集合性。这里说的是至少有两个或两个以上可以相互区别的部分所组成的，才能叫做系统。而各组成部分叫系统的要素。例如，把水库称为系统，是因为它由坝、溢洪道、泄水建筑物等相互区别的建筑物体所组成。这种例子在水利水电工程中是很多的。实际工作中遇到的常常是大而复杂的系统，尤其是水利系统，涉及的范围大，构成的要素种类繁多。对于这种占据空间大、构成要素之间关系复杂的系统，实际上是由许多小的系统有机结合而成，这些小的系统叫做子系统，子系统又可由许多二级子系统构成。就是说，系统的集合性，可以从两种意义上来理解，一是指系统的构成要素具有多样性，另一是系统的结构具有多层次性；

其次，系统是具有相关性的。或者说，系统是具有有机联系性的。前述定义指出系统的各个组成部分是“相互作用和相互依赖的”。系统的相关性就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，就不能成为系统。相关性是系统的不可缺少的重要特征。怎样用数学表达式来描述这种相关性，是系统工程的重要的问题。这就涉及到后面将要谈到的约束条件。在水利水电工程中，系统的相关性是十分明显的，例如，灌溉系统中渠首与干渠是它的两个构成要素，但两者之间相互影响，关系十分密切。干渠与支渠之间，支渠与斗渠之间都是如此，

第三，系统是具有目的性的。定义中说系统是“具有特定功能的”，指的就是系统具有目的性。人工系统都有目的性，有时不止一个目的。建立一个人工系统，必须有明确的

目的，这是设计和运行工作的一个十分重要的问题。但是，把系统的目的搞明确，并不是一件容易的事情，有时需要反复推敲，进行比较，才能肯定下来。系统的目的性，叫做目标。在系统工程的许多数学方法中，怎样用数学表达式来描述系统的目标，是又一个重要的问题。系统目标的数学表达式叫目标函数，在有多个目标的情况下叫多目标函数。与系统的结构层次相对应，系统整体有一个大的目标，各个子系统又分别具有各自的中、小目标。为了能够按照原定要求实现系统的多层次目标，就要有一定的办法，让系统的各要素协调地动作，这就是多层系统的优化问题。任何一个水利水电系统都有既定的目的，如保证农作物需水、增加能源、使作物产量最高、使生产的电能最多等；

第四，系统是有整体性的。系统的定义指出系统的各个组成部分构成一个“有机整体”，这就是指系统的整体性。系统虽然是由许多组成部分构成，但它是作为一个统一的整体而存在的。各要素的各自功能及它们之间的有机联系，只能是按照一定的协调关系统一在这个整体之中。或者说，对任何一个要素不能脱离整体去研究，要素之间的联系和作用也不能脱离开对整体的协调去考虑。离开整体，各要素的功能和要素间的作用也就没有意义。所以系统要素及其功能、要素间的相互联系都要服从于系统整体的目的和要求，服从整体的功能。根据整体的功能，各要素进行各自的活动，然后形成系统整体的有机活动。这就是说系统在组成和功能方面都具有整体性。水利水电系统的整体性是十分突出的。例如，一座水电站，作为整体，它的功能是发电，它的各自组成部分如水轮机、发电机、各种辅助设备以及进水闸等，都是为整体的功能而工作，它们之间的协调工作也是为了达到

整体的目的。一座水电站各个组成部分随意地进行工作，这是不能想象的；

最后，系统还具有环境适应性。任何一个系统都不是凭空存在的，而是存在于一定的环境之中。因此，一个系统必然同外界环境之间产生物质的、能量的、以及信息的交换，必须能够适应外部环境的变化。一个系统能够经常与外界环境保持最佳的适宜状况，则认为是理想的系统。不能适应外部环境变化的系统是不能长期存在的。一个水利系统建成后，河流来水、天然降雨等自然条件逐年都在变化，它就要具备对这种变化的适应能力，这样，才能在许多管理运行方案中选择最优的决策方案，以达到系统的目的。我国四川省都江堰灌溉工程，从系统工程的观点来看，作为一个系统，能存在两千多年而继续发挥作用，表明它有优异的环境适应性。

指出系统具备的这些特征，对于实际工作是有重大指导意义的。

研究系统的集合性，是为了使系统的各个组成要素合理化，既没有多余的要素，也没有短缺的部分。

研究系统的相关性，是为了使系统的各组成要素之间出现合理的关系，既没有无目的的联系，也没有无实效的关系。

研究系统的目的性，是为了弄清系统有无存在的必要。这样可以避免建立系统时目的性不明确，从而减少不必要的浪费，把系统的建立工作建筑在更自觉和更有实效的基础上。

研究系统的整体性，是为了处理好整体与局部的关系、处理好在整体的前提下各局部之间的关系，使各个局部的组合合理，关系协调，能够发挥整体的功能，达到整体的

目的。

研究系统的环境适应性,是为了使系统同外界环境之间,使系统同它从属的更大的系统之间,有一个良好的适宜关系,从而使系统能够长时期发挥它的效能和作用。

这些分析研究工作,就是系统工程各种研究方法的依据和基础。

二、系统的概念

同系统这个名词一样,系统工程的含义也有许多说法,目前还没有一个公认的提法。这是由于系统工程是一门新兴学科,它的范围和研究对象尚未完全定型,还处在不断的发展中。因而,不同专业或不同经历的学者对它的认识也不一致,每个学者的认识都受到各自背景的影响,从而提出的定义也不相同,甚至对这门学科的命名也不尽相同。目前在科技文献中常见到的有系统工程、系统分析、系统方法、系统科学、管理科学等不同名称,但它们有时却是指的相同的学科领域。

关于系统工程的定义,下面仅列举几种说法加以阐明。

有的认为系统工程是“对系统进行合理的开发、设计、运用等所用到的思想、程序、组织、方法等的总称”;有的认为“系统工程是许多概念和技术的总和,这些技术是用来根据原始概念创造出系统,或者更完整地说,是用来满足原始需要的”;有的认为系统工程是“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。同时还要考虑到参与系统中人的因素与作用”，有的还认为系统工程的定义是“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”等等。还有许多其它说法。

这些对系统工程的解释，尽管有许多不同之处，但是也可以看出它们强调了一些共同点。

首先，系统工程的研究对象是系统，就是由许多要素构成整体，相互之间存在有机联系，并具有既定功能和目标的系统。

第二，系统工程是一门特殊的工程科学，它是用系统的理论创造出人们需要的各种人工系统，或对已有的系统进行改造使之更加完善，或者说它以建造和改善人工系统作为自己的学科内容。

第三，系统工程研究解决系统的最优化问题，也就是使系统整体和它的各个组成部分处在最优的状态和组合之中。这是系统工程要解决的核心问题。

此外，还应指出的是，系统工程学是系统论、控制论、信息论、运筹学、电子计算技术、以及其他有关工程学科溶合渗透而成的一门综合性管理工程技术。它的任务除了研究系统的最优规划、最优设计和最佳运行以及现代化的组织管理技术外，还包括对各个系统的未来技术和状态的预测。

系统工程是一门工程学，但是它同其它工程学科有性质上的差别。如水利工程、电力工程、机械工程等工程技术学科，都有自己的物质对象，而工程学的对象则不限于某一专门的范围，并且还不仅仅限于物质的系统。各种自然的、人类的、生态的、社会的现象、组织与管理方法等都是它的

研究对象。因此，它是一门涉及范围十分广泛的学科。系统工程以它的理论和方法，同各个具体的系统相结合，就形成了各种各样的系统工程应用的领域。例如，农业系统工程、水资源系统工程、环境系统工程、军事系统工程、教育系统工程、科研系统工程、社会系统工程、企业系统工程等。

系统工程是在许多学科的基础上发展起来的一门边缘科学。它不但涉及应用数学、自动控制理论、电子计算技术、管理科学等，而且涉及不同门类的工程技术。因此，系统工程具有多学科性。

就工作过程的步骤来说，系统工程也是涉及范围较广的学科。它应用近代数学方法和电子计算技术，对系统进行研究和分析，探讨建立某人工系统的可行性；研究和制订系统的规划，解决人工系统的总体组成和布局，研究和完成人工系统的设计，确定人工系统各组成部分的细部构造；研究和讨论系统的组织管理，使人工系统按照规定的要求进行工作；研究和讨论系统的评价，使系统的存在和活动具有科学根据等。所有这些工作都可用系统工程的方法去完成，使它们达到整体最优的要求。

第二章 系统分析方法的主要内容

一、系统分析方法的观念

从系统整体协调的观点出发，优选方案、确定措施，达到优化该系统的目的。这就是系统分析的基本方法。它是完成系统的规划、研究、设计、建造、试验和运用的科学方法。

系统分析方法一般包括五个工作步骤：其一是确立系统的目标，明确建立该系统的目的和要达到的目标；其二是收集、分析和研究各种信息和资料，拟定各种可行方案；其三是建立数学模型，用它尽量逼真地反映拟定的方案；其四是以数学模型为工具，对各个可行方案进行定量的分析，确定各方案的有关数据；最后是在分析比较的基础上，优选出最优方案，为以后的工作提供科学的依据。这些工作步骤，对于水利工程技术人员来说，是很熟悉的，因为它同水利工程方案比较的思路是类似的。但是，它们在具体方法上却有很大的差异。

系统分析方法是系统工程的定量化方法，用来解决系统的总体规划、设计和管理问题，寻求最优规划、最优设计、最优控制、最优组织管理的方案。

系统分析方法主要包括模型化和最优化两部分内容。就是把要研究的系统和它的各个要素的活动，设法用一定的数学模型表达出来，表达时应该尽力做到真实可信，也就是尽量做到具有较高的仿真程度，然后运用一定的数学方法对建

立的数学模型进行运算、求解，找到最优的答案，作为解决该系统问题的定量成果。

因此，系统分析方法的基础主要有两个方面：一是应用数学，用来建立数学模型和制定推求最优解答的方法；二是电子计算技术，用来完成大量的复杂计算和信息处理工作。

系统分析方法的主要数学理论基础是运筹学，运筹学是在本世纪四十年代开始形成的，经过四十多年的实践，无论在理论上或在实际应用上都获得了巨大的发展。它的研究对象是生产活动、科学试验、组织管理等方面对人力、物力、财力进行统筹调度、统筹规划的数学方法。这些数学方法有效地应用于系统工程，得以寻求解决问题的最合理、最有效的方案。此外，概率论和数理统计，模拟技术等也是系统分析中常用的数学方法。

二、系统分析方法的主要内容

系统分析方法的主要分支如下。

(一) 规划论 也称数学规划，是系统分析中广泛应用的数学方法。它的研究对象是对一定数量的各种资源、物品以及人力，怎样安排使用，才能使它们发挥最大的作用，产生最佳的效果；或者是，对于一个规定的任务，怎样用最少的资源、物品和人力去完成。规划论在研究和解决这些问题时，使用的数学语言是，在一组约束条件下寻求目标函数的最大值或最小值。这就是它的数学模型。规划论有许多分支，其中主要的有线性规划、非线性规划、整数规划、动态规划等。这些方法在水利水电工程中已经得到广泛的应用。

线性规划方法用来解决约束条件为线性等式或不等式、