



数据加载失败，请稍后重试！

高等学校教材

水资源系统优化规划和调度

叶秉如 主编

中国水利水电出版社

内 容 提 要

本书介绍了水资源(工程)系统优化规划和调度的理论、方法和一些应用实例。从水资源开发利用及其策略思想的近代发展以及水资源系统分析出发,介绍了最优化技术和多目标规划的最新发展及相关的新理论、新成果。阐述了防洪、水力发电和供水等各类水利系统——水库群优化规划、调度的理论和实用的多种方法。最后介绍了大系统分解协调技术和在大中型水资源系统优化课题中的应用。

本书内容充实,叙述深入浅出,既适用于水资源规划管理和相关专业研究生的专业学习和参考,也可供从事水资源规划和管理广大工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水资源系统优化规划和调度/叶秉如主编. —北京:中国水利水电出版社, 2001.7

高等学校教材

ISBN 7-5084-0508-0

I. 水… II. 叶… III. ①水资源-资源利用-规划-高等学校-教材 ②水资源-资源利用-调度-高等学校-教材 IV. TV213.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第03834号

普通高等教育“九五”国家教委重点教材

书 作 出 版	名 者 版	高等学校教材 水资源系统优化规划和调度 叶秉如 主编 中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sale@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (发行部)
发 行 经 售	行 售	新华书店北京发行所 全国各地新华书店
排 印 规 版 印 定	版 刷 格 次 数 价	中国水利水电出版社微机排版中心 水利电力出版社印刷厂 787×1092毫米 16开本 19.5印张 456千字 2001年5月第一版 2001年5月北京第一次印刷 0001—1100册 24.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

本书系教育部“九五”普通高等教育国家级重点教材。

水资源的开发利用、兴利防灾是社会发 展、安定富足的重要环节。近几十年来，随着江河流域治理和大中型水利设施建设的不断发展，对水资源（工程）系统如何更好地规划和调度管理的问题也就越来越重要。国内有关院校因之先后开设了这一方面的研究生课程。本教材就是为适应这一方面的需要，在河海大学多年来开课讲授的基础上，经过进一步的增删、修改和发展更新编写的。

作为研究生教材，本书主要用于水资源规划管理专业方面的学习和参考；也可作为相关专业，如水资源经济、水能利用和水利管理等专业的教学或参考用书；还可供从事水资源规划、管理的广大工程技术人员参考。

本书由河海大学叶秉如主编，许静仪、董增川参加了部分内容的编写工作和讨论。全书由武汉水利电力大学郭元裕教授主审。郭教授在百忙之中，不辞辛劳，审阅全书，提出许多宝贵意见，对此表示深切的感谢。对为本书的出版曾殷切关注和大力帮助，并付出了辛勤劳动的有关同志，同致感谢之忱。

编 者

1999.12.28

目 录

前 言

第一章 绪论	1
第一节 水资源开发利用及其策略思想的近代发展和水资源系统分析问题的提出	1
第二节 系统工程(系统分析)的基本概念和主要内容	3
第三节 水资源系统的特点和分析途径——系统分析方法具体应用	10

第一篇 最 优 化 技 术

第二章 最优化技术简介——基础部分	21
第一节 有关名词和术语及其概念	21
第二节 微积分方法——古典最优化方法	23
第三节 梯度法及梯度寻查技术——无(有)约束时的最小化寻查技术	28
第四节 线性规划及其求解的几种思路和方法	33
一、线性规划问题总述及近期发展,二、线性规划单纯形解法的要点和比较,三、线性规划问题的对偶	
第五节 分解筛选法解线性规划的概念方法及多重解求解	43
一、分解筛选法的思路、要点简述和示例,二、分解筛选法的应用条件及实用的运算技术和规则,三、分解筛选法的理论基础和几何数理概念简述——兼谈成果验证和求对偶解,四、线性规划问题的多重解(Multivalued solution)及其寻求	
第六节 非线性规划问题简介及二次规划之求解	63
一、有关的一般概念,二、二次规划(QP)求解的分解筛选法要点简介,三、用分解筛选法解二次规划问题之典型算例,四、筛选法的解题步骤、有关概念和简略论证	
第七节 动态规划方法及其发展	75
一、动态规划(DP)的特性,有关名词概念和优化原则,二、动态规划公式的矩阵表述,可分函数问题及其他重要概念,三、多维动态规划的求解技术及一些改进方法,四、总结和评述	
第八节 模拟技术(Simulation)和取样方法	87
第九节 大系统规划问题——进一步的发展及研究途径和课题	96
第十节 水利系统模型实例	98
第三章 最优化技术简介二——扩展部分及随机模型	104
第一节 非线性规划问题一些实用求解方法	104
一、用线性规划逐次逼近非线性规划的方法——泰勒级数展开法,二、线性逼近法,(折线逼近法)三、罚函数法,四、几何规划	
第二节 整数规划和混合整数规划	125
一、问题和求解方法总述,二、简单例子的求解,三、割(切、削)平面法,四、分	

枝估界法 (或称搜寻树法), 五、分块法思路及整数规划法的推广应用	
第三节 参数灵敏性分析和参数规划	134
第四节 随机模型——随机系统的模型化和最优化	139
一、随机模型分类和有关概念, 二、概率模型——概率规划,	
三、机遇约束模型, 四、随机动态规划简述	
第二篇 水资源系统优化规划和调度	
第四章 多目标规划的理论、方法及应用	158
第一节 多目标规划问题和概念总述	158
第二节 多目标规划求解方法分类、非劣解集的生成方法和交换比的计算	161
一、分类, 二、非劣解集的一般生成方法——多目标线性规划问题及应用, 三、多目	
标二次规划非劣解集的理论生成及应用	
第三节 多目标规划求解的其他方法——评述和应用	179
一、权重法, 二、约束法, 三、目标规划法, 四、替换价值交换法 (SWT 法) 简介,	
五、多目标动态规划 (MODP) 法简介	
第五章 防洪库群规划和调度	198
第一节 水库防洪的任务和最优准则	198
第二节 单库防洪优化调度的数学规划方法	199
第三节 防洪调度其他有关问题	201
第四节 防洪库群的优化调度	203
第五节 梯级水电站防洪库容分配	209
第六节 整体防洪规划方案的比较和优选	211
第六章 水电站和供水库群的优化规划和调度	217
第一节 研究单库和库群调度 (规划) 的意义和模型分类	217
第二节 单库优化规划和调度的确定性模型	219
第三节 单库优化规划和调度的随机模型	228
第四节 水电站库群的优化规划和调度	238
第五节 水资源分配规划	251
一、动态规划的空间优化法, 二、多元函数法求水资源最优分配	
第六节 水电站库群的参数优选	258
一、概述, 二、梯级水电站水库死水位的选择, 三、梯级水电站群主要参数的联合优选	
第七章 大中型多单元水利系统的优化规划和系统分解技术	272
第一节 总述	272
第二节 大中型水利系统的优化规划 (实例简介)	272
第三节 系统分解协调技术 (一)——线性特型系统之直接解法	280
第四节 系统分解协调技术 (二)——一般分解模型之迭代解法及应用	292
一、概念和方法之要点, 二、应用实例——综合利用水电站库群优化运行的分解模	
型, 三、应用实例二——除涝排水系统参数优选的分解模型	
参考文献及参考资料	300

第一章 绪 论

第一节 水资源开发利用及其策略思想的近代发展 和水资源系统分析问题的提出

水资源是除土地以外的一切资源中与人类的生产生活关系最为密切的自然资源。人类对于水资源的开发利用,从公元前 3000 年埃及人在尼罗河首设水尺观察水位涨落,并筑堤开渠开始,到 19 世纪末 20 世纪初近代意义的大坝水库在世界许多河流上纷纷筑造为止,经历了极为漫长的发展岁月。这一历经数千年的漫长发展过程,主要是联系着水利工程学(包括水文学、水力学、水利事业学和水工建筑学等)在科学理论、方法、技术、工艺等方面的逐渐发展进步而随之不断发展的。而水利工程学的兴起、发展到 20 世纪 20~30 年代,可以说已经完成了其学科各分支的理论体系和工程实践技术等许多方面的发展基础。这可以以 1919~1937 年间一系列有关的教材、专著的问世为表征。^①而工程实践方面,则可以美国田纳西流域开发治理(TVA)的众多水利工程的兴建为代表。在这一时期及其前,水资源开发利用及其策略思想的主要特点是:①水资源(水利)枢纽工程大多限于单一水库的规划和运行为主;②功能上则以单用途单目标开发为较多,如单纯的防洪滞洪水库,或航运渠化闸坝、灌溉引水或发电为目的的水库、堰坝等。而在此时期之末,由于生产需要的发展及高坝技术和高压输电技术的进展,水库综合利用的思想已开始萌芽。

近代水资源开发利用策略思想的第一个重要的发展,就是综合利用思想的发展、落实和整体观点的兴起。水资源本质上具有多功能、多用途的特性,因此一库多用、一水多效的综合利用的策略思想迅速推广、扩大。同时,由于人口和工农业生产的迅猛发展,水资源需求量也愈来愈大,很多地区开始显得不足,而“水环境问题”也愈来愈突出。因此,用整体的、综合的方法研究水资源的开发利用成为必然。而大的快速存贮、新的(第三代)电子计算机的出现又使整体途径成为可能,并出现了新的“水资源”这一总的术语。近代水资源这一名词含有从多学科的途径及现代的要求(如包括环境、水质等),来对水的需要进行设计、运行和预报这样一种概念。目前水资源利用的趋向,愈来愈向多单元、多目标发展,规模范围日益增大。水资源又不能无限制满足需求,有很多矛盾要协调,因此需整体地、综合地考虑。谈到现代意义的水资源管理,它已牵涉到社会和环境问题,故已不是作为纯粹工程性质的所谓技术科学的一部分(如土建工程),而是在一定程度上已从工程技术的水平过渡和提高到了环境规划的水平。我国南水北调工程的规划牵涉到很多方面,就是一个很好的例证。因此现代意义的所谓水资源的开发、利用或所谓水利系统的规划、设计和管理运用,其内容、意义、目标都比以往水利开发之仅局限于水利水电工程范围者要更为广泛。

^① 代表性专著如: Mead (1919) 的水文学; Barrow (1926) 的水力发电工程; Bakhmeteff (1932) 的明渠水力学和 Schoklitsch et al. (1937) 的水工结构。

上面所述近代水资源开发利用策略思想的第一个重要的发展——综合、整体的观点、策略，演化和引发了下列三个重要原则。

- (1) 综合利用和多目标优化、矛盾决策的思想原则和求解技术。
- (2) 系统的概念和流域库群系统整体优化的原则和方法。
- (3) 大型系统统一下的分层和分解协调优化技术。

水资源的综合利用，自然地带来了如何处理在规划和管理的优化决策中多个目标或多个优化准则的问题，而且这些目标可能是各色各样，多半是不可公度（如发电量和灌溉的农作物产量间），甚至有些是不能定量而只能定性。这就引发了把运筹学中新发展起来的多目标规划的理论和方法引入和应用于水资源系统的规划和管理工作中。这也就是第一个重要原则的体现。

流域或地区范围的水资源问题，往往是一个大的、复杂的系统。例如流域的干支流的梯级库群、兴利除害的各种水利水电开发管理目标、地面地下水各种水源的联合共用等。为了使这样的大系统能易于优化求解，利用大系统的分层和分解协调技术常常是非常有利和必要的。这就是前面所说的第三条原则。

一个流域或地区水资源开发利用的整体性的概念和特性，所引发的上述第二个重要原则——即水资源系统的概念和观点是尤为重要的。也像其他许多领域一样，导致了最新发展起来的系统工程和系统分析方法逐渐在水资源领域得到应用和不断发展。

把系统分析的方法引入水资源系统的规划、调度及自动化控制的实施，这一点的必要性是由于当出现了广大流域范围一群水利实施和梯级库群后，它们在水文、水利、电力上相互联系的复杂性导致了应用运筹学的近代最优化技术。而随后大型水利系统的形成，以及需要同时考虑水质、土地资源、环境质量等问题愈来愈重要，使规划水利系统时不仅要着眼工程和水利经济效益，还要考虑对社会和环境的影响，并在决策时充分顾及或协调各方面的合理要求和意见，因而出现了应用系统分析的方法来研究水资源课题的新方向。

系统工程所以引入水利系统规划，及系统分析的概念所以在晚近强调指出，这是生产和社会发展的现实所带来的。

在现代社会中各种生产活动、科学研究以及国防和公用事业的组织，都牵涉到这些产品或事业目标有关的各项因素，如何统筹规划，合理调配组织以使在花费尽可能少的人力物力的情况下，完成这些生产、研究和组织的任务。由于某一产品、成果、或事业目标有关的各项因素往往互相联系和互相制约，这就组成了一个所谓“系统”。因而这一合理，甚至最优的统筹规划和调配组织，也就称为系统工程或系统分析的内容。

系统分析原是二次大战时为解决新武器研制而发展起来的，但近半世纪来它已迅速推广应用到很多领域的生产规划和组织管理中，并成为一种组织管理“各种类型的系统”的规划、研制和使用管理的具有普遍意义的科学方法。在水利资源领域内，由于前面所述水资源利用的日益扩展和复杂化，应用系统分析的必要性已日益明显。它对更全面深入地进行水资源利用的分析研究，及对提高水利系统规划、管理的水平和效益的作用，也日益为人们所认识。关于系统分析的概念和在水资源中的具体应用将分别在本章以后两节详细说明。

应该说，从整体和综合的观点来开发利用水资源，不仅已是目前水利工作者所普遍拥

有的共识，而且在不少场合还有进一步发展的趋势，即扩大到：①从水、土、农、林等多资源的开发及环境规划的角度来研究库群和水资源系统的优化规划和管理；或者是②把一个地区（或流域）的水资源系统的开发利用规划结合和纳入地区总的经济发展规划之中，既带动地区经济的发展，又受区域经济、地理特点的约束和界定。当然这种具有方向性和发展潜力更大的系统范围，其面对的问题极为复杂，但其求解技术也还不外是前面已提到过的那些方面的原则。

实际上，除上述之外，从最近二十几年水资源及其他自然资源领域出现的一些新情况、新问题，联系策略思想来看，一种更广泛深刻的、人类社会和经济发展的新发展战略已开始孕育和蕴酿。这就是水资源开发利用策略思想近代的第二个重大发展——水资源利用的可持续发展问题。

所谓“可持续发展”，英文名“Sustainable Development”，其一般性概念的由来是由于近三四十年来世界人口的不断膨胀及社会生产力的极大提高，造成不少自然资源的过度开发消耗和污染物质的大量排放，从而导致全球性的资源短缺、环境污染和生态破坏的严峻形势不断加剧，对社会经济的持续发展和人类自身的生存环境构成不断加重的障碍，而于80年代初开始提出的一个重大问题和新的发展观念。它是指：为了满足人类社会的发展和提高人们生活水平的需要而追求经济发展时，不能光以国民经济生产总值的增长为主要目标，以工业化为基本内容，忽视资源的合理开发利用，及牺牲环境作为代价的这种传统的经济发展模式。而是要寻求一种人与自然和谐相处，协调发展的新模式，使保护自然、资源和生态环境与发展经济、满足人类的需要和改善人类生活质量的要求有机地结合起来。

由上可见，可持续发展的新发展思想和战略乃是前面提到的“整体——综合——优化”思想的进一步发展和提高。它研究的系统显然更大更复杂，牵涉的学科领域也远为广泛。不过基本的研究手段和技术也并非有很大的不同，目前这方面的研究也还处于起始形成阶段。

关于可持续发展，特别是：水资源可持续利用和水利（水资源）系统的可持续发展问题，将于本章之末作一些简要的补充、介绍。

第二节 系统工程（系统分析）的基本概念和主要内容

前节所述，随着近代科学技术的迅速发展，20世纪40年代以来，生产斗争和科学实验的很多活动，其规模都愈来愈大，常常扩及多种行业与领域，复杂程度愈来愈高。以新技术新武器的研制工作为例，美国当年研制原子弹的曼哈顿计划参加的工程技术和管理等人员就有15000人。阿波罗载人登月计划参加者更达4.2万人。规模如此巨大的社会劳动，如果没有一种先进的科学规划和组织工作，很难设想这样的庞大计划能够顺利进行。实际上它们就是在“系统工程”的有效组织下完成的。

一、系统工程学的概念

系统工程学是一门进行科学的组织管理的技术，主要用来解决计划规划、组织管理等问题。进行规划和组织管理的对象或问题，可分为下列两类：一类是以特定的大型计划、任务为主的组织管理和实施，例如大型科研项目（包括新技术、新产品、新武器）的研制、大

型联合企业的生产管理、大型民用和国防施工的规划和组织等。它的特点是从纵的方向进行各种协调，要求人力、财力、物力的合理利用，以最合理、最经济、最有效地完成计划任务为目的。概括地说，也就是：“在给定任务下，如何统筹安排，才能以最小的资源或投资，去完成这项任务”。

另一类是资源及设备系统大范围的规划、设计或运用管理为主。如流域水土资源开发利用的规划和管理以及工农业发展、交通运输和城市建设规划等。其特点是以某些特定的自然资源、工程设施或设备的合理利用为主，以达到在经济上和社会环境的影响上综合地最有利、最完善为目的。概括言之，也就是：“在给定数量的人力和物力资源的条件下，如何操作系统使之完成最大量的任务，或创造的物质财富最大，不利影响最小”。

这两类问题，常常在一定程度上交叉渗透、互相关联，有时甚至难以明确区分。而基本精神也都有一个从整体出发来求一个最优、最合理的规划设计方案。这也就是系统工程学的基本指导思想所在。

在初步阐述了系统工程学的概念以后，可进一步剖析系统工程这一名词的涵义和来由。它实际上是“系统”和“工程”两个概念的复合。

所谓一个系统，可定义为一组对象（目的物），它们以物理上和经济上规则地相互依赖、相互作用的关系和在完成特定功能上相互制约、相互影响的关系，构成为一个统一的有机整体。例如人们现在常把极其复杂的研制或规划的对象称为“系统”。它们就是由相互作用和互相依赖的若干组成部分（包括科研或生产单元、设备单元、人力、物力或资源状况等），结合成的具有独特功能的有机整体。例如为原子弹研制所包括的科研生产、试验单位及所需的人力、财力、物力的总体，就是一个特定的研制“系统”。如下节所述流域或水利开发所包括的各种水源、各水利工程单元和服务对象，也构成另一种“系统”——即水利（水资源）系统。

这里所指“工程”不外乎是规划、研究、设计、制造试验、组织完成等。它与通常的所谓机械工程、土木水利工程的“工程”的含义已略有不同。后者是研究一般的生产机器或建筑物的一切有关的技艺，即生产“硬件”的一切有关技艺，即包括规划设计、制造和施工。而系统工程中的“工程”则仅侧重于“软件”方面，即为生产“硬件”所需的一些决策计划、方案规划等。

综合上面两种概念，“系统工程”就是组织管理某种“系统”的一些规划、研究、设计和使用的科学方法，是一种对所有系统都适用的具有普遍意义的方法。

系统工程的确切定义，目前还难有一种公认的完整提法，往往着眼点不同，各家的提法亦不同。为便于理解，可举出下列较为全面的一种解说。

“系统工程可定义为一种选定方案的艺术和科学。即从大量包含有相应的工程内容的可行方案中选择某一组活动方案，它能在符合政治、经济、资源、社会和其他自然科学要求的各种约束条件下，最好地满足（或完成）需要决策的全部目标”。所谓是一种艺术，是因为一方面在解决此问题时，由于常牵涉到不少的矛盾和错综复杂的关系，往往一个方案从某些因素看是最优，而从另一些因素看又不理想，故常无绝对最优，而只能综合权衡从“各方面看”比较最好，这就需要一种“决策艺术”；从另一方面不少因素并不是能定量甚至能定性的问题。例如环境质量问题、水污染影响问题等。因此不能用纯科学的方法来解，

必须从判断、衡量、比较，或凭工程经验和直观的全面权衡以及最终的方针、政策和领导决策来定。它是一种科学则是因系统工程所用的方法，很大部分或尽可能地要求能用近代科学技术，如运筹学、控制论、信息论等。正是从这一角度系统工程常常也称为系统分析。但是系统分析这一名词的直接起源，是来自于对一组（英文为 System，可译为系统）方程的数学分析，即求解的方法主要是把代表系统的方程组（System）进行数值分析的方法。至于系统工程和系统分析两词，可以视为等同。如果严格区分则可认为：“系统分析是系统工程的基础，是对系统特性要求作出定量评价的重要组成部分，故是系统工程的基础。而系统工程又是系统分析理论的具体运用”。附带提一下，不少著作中还把系统工程与运筹学等同起来视为同一事物，关于这点后面将专作评述。

系统工程或系统分析的另外一些定义可举例如下：

“系统分析可定义为一种分析研究，它帮助决策人员在几个可行方案中去确证和选择一个优先的活动过程”。这一定义与前面所提的并无本质不同，不过概念和重点更为鲜明，但也更为笼统。

除了上面介绍的含义和概念以外，关于系统工程学的主要内容可以理解为：

“从全面的整体的概念出发，根据一些拟定的最优准则，运用运筹学、信息论、控制论、电子计算机以及其他一些先进的应用数学来研究和分析某项大型的、复杂的系统。把描述系统组成分量或系统状态的那些变量，它的确定（定义）、相互关系和要完成的功能目标，以各种数学方程或限制条件来表达，并组成一个定量的能进行计算的数学模型，然后再放到计算机上进行运算求解，从而得出一种或几种选择方案，以供最后决策之用”。

二、系统组成和系统的边界、范围

前面在介绍一个“系统”的概念中，我们提到它是由一组相互作用和依赖的对象所构成的一个整体。由于实际上不可能罗列并孤立所有互相作用的对象或物体，故常把主要的相互作用的因素称为系统的组成。而不包括的那些相互作用的对象看作为“环境”对“系统”的作用，并以向系统输入和自系统输出的形式来考虑处理。此概念可以从下列图示中看出（见图 1-1）。图 1-1 代表一个最简单的系统，主要有三个组成部分。系统接受输入，经过系统的操作产生输出。因此系统分析的概念就是将系统输入与系统输出联系起来，而纽带是发挥系统特定功能的系统的操作运用（或系统的运用策略，控制决策等）。不同的系统组成的不同的决策，产生不同的输出。在动态系统中此输出还可能影响输入即形成反馈。图中输入之中，其作用可以是受控制的、半控制的以及非控制的（例如随机输入）。输出之中，可以包括期望的（如效益）、不期望的（如洪灾、淹没等副作用）以及中性的。系统运行过程中对一些控制决策或输入须作出决策，以达到某种期望的目标。

由上可见，在系统工程中，首先碰到的问题，就是要决定某一特定对象应作为系统的一部分，还是作为环境的一部分。即要决定系统的“边界”或“范围”，从而能确定何者是规划的内容，何者是环境的各种“输入”。然后工程师的工作是去规划安排

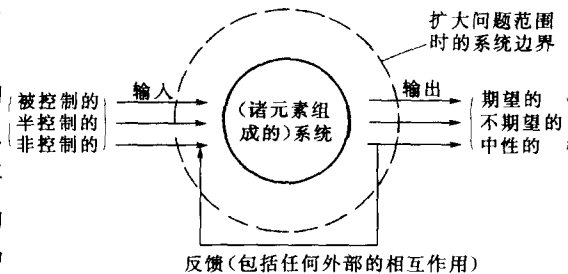


图 1-1 基本的系统模型

系统内部的结构，修改可控制或半可控的输入，以使所期望的输出最大化和不希望的输出最小化。

系统边界的确定并不完全决定于物理系统本身，而是很大程度上系于系统分析者的选择。系统分析者根据某些假定沿系统切出一块脱离体，然后把系统边界上所有的相互作用，作为外源来决定的参数而固定下来。当外源来决定的参数改变时，此脱离体的计算亦须重新考虑和验算。

系统边界的勾绘要包括那些对作出一系列决策有相当关连的元素。例如规划给水系统时，如果需求函数已知，但价格政策不在规划者控制范围内，则可将需求作为未控制的因素。但如果规划者可以设定价格，则此时需求至少可作为对系统是部分可控制的。图 1-1 所示最简单的系统模型样式中就标出了输入的几种类型。

系统的边界随着从投资建造前的规划设计到以后的运行，其范围常显著地缩小。在投资前的规划研究中考虑的相互影响因素常较多，较少的变量作为外源（外定）因素来处理。而在设计和运行阶段，某些元素要作更详细的分析，政治等因素就可视为固定量。

系统工程的含义和作用，由于难于以几句话来明确定出，故只能从以后各节中从各种角度来阐述以求进一步的理解。

三、系统分析与运筹学

系统工程或系统分析有时人们不确切地也叫做运筹学。运筹学是从研究专门的运筹决策这一概念而来。对于前述第一种决定对象问题，即研究如何运用和筹划人力、物力来完成某项任务的问题，由于它也常包含分析系统（即一组）方程的内容，因此在大多数应用中人们常把这两个名词看作同义词。而实际上两者既是近似的，又有区别，严格说来不是一回事。

系统工程学与运筹学的相似处在于它们都是处理一个复杂系统的规划问题，而且一般都是去寻求最优的或拟最优的解决方案。这里所谓“复杂问题”从数学上看就是描述问题的数学模型中包括的设计变量（指规划时）或决策变量（运行时）数目较多，各变量的限制条件（或称约束条件）也较多。举例来说，对于一多目标水库群规划的确定性系统模型^①来说，如果撇开环境质量影响等问题，单纯从水利的角度来看，其设计变量就包括各库的正常高水位或库容大小，各库分担的对各部门的用水用电要求（包括防洪）的数量等。变量总数就常数以十计，而各变量的各种限制要求其数量也往往较多。

系统工程学与运筹学的不同之处在于下列一点。如果所要求解的工程问题，能够化为一组数学表达式，那么就不需要创造系统工程学，而是在许多场合用数值分析的方法就可解决，其中包括具有广泛应用范围和灵活性的运筹学方法。但是很多“系统”问题，包括水资源开发问题中，除了能够定量和用数学关系表达的一些变量和关系式外，还尚有不少社会和政治的因素，必须加以适当考虑。另外也还有一些因素，如水质影响等。目前还缺乏令人满意的衡量其影响的综合定量指标。当没有现实方法来指定这些因素的数值时，这些因素对系统的整个影响的大小的估算，不得不通过把它们作为约束条件处理来达到，或者如最近几年开始发展的，用所谓多目标规划——向量最优化等方法来求解。

① 确定性模型是指系统和其输入中或目标函数和约束条件中都不包含随机性变化的因素（详后）。

四、系统分析的特点

系统分析和运筹学都是一种综合方法，起源于第二次世界大战同盟军为了解决复杂的后勤问题而产生的。它有下列一些特点：

(1) 性质上是多学科的综合性。用系统分析方法求解问题时常需利用几个学科之间的专业人员的组成力量。在分析时也常需要一综合各学科的观点和技术，包括数理统计、应用数学、政治经济学、社会学、生物学、物理学和工程学等。

(2) 方向上是整体观念和协调精神相结合。系统分析不仅在于利用数学模型来求解问题，它的特点之一是把系统的问题看作一个整体，并特别着重系统各元素间的相互关系，而不仅是注意各元素的性质或特性，因此特别需要各学科间专业人员的协作。而对于应用系统分析的各专业人员如工程师、经济学家、生物学家而言，最好是利用数学模型而不是用言语的叙述说理方式来解决。

对于庞大而复杂的系统，为求整体的最合理或最优方案，常首先得把系统分解为有相对独立性的若干分系统。在分析各组成因素和分系统的基础上，再进行整个系统的综合，并产生一个完整系列的比较方案。在研究每个分系统的技术要求时，都首先从实现整个系统的技术协调的观点来考虑。这个总体概念和各分系统间技术协调的概念是系统的两个重要属性。

(3) 方法上是运用模型。构造模型是系统工程的一个重要方法。模型提供了更直观的问题的描述，并有助于迅速考察比较方案。在建立模型的过程中数学形式提供了在专家（专业）组间有帮助的语言桥梁，故数学模型是系统分析的有力工具。它提供了问题的目标定义，计算程序间的联系及对变量或项作最后决策的重要依据。

在系统分析的过程中模型并非一成不变或一次构成，而常常需要作一系列的试验计算和修改工作。因此，计算机在系统分析中的作用，就不仅是一种计算工具，而是一种实验设备和手段，用以使问题的求解不仅停留在定性上，而是向定量方向深化。

系统工程是从整体出发，设计一个最好的方案，来组织和安排人力、物力、财力和设备，以达到最经济最有效地完成任务（或开发利用资源）为目的的一种科学方法。因此亦有人称它为“科学的科学”，“工程的工程”。

五、系统分析的一般步骤

系统分析事实上是一种在一定程度上定型化了的科学方法，以使思考能沿着一定的渠道有指导地来通过界于所要求达到的目标（其数学表达式为目标函数）和所设计的系统性能间的各种错综复杂的道路。最后能得出一个完整系列的比较方案。这些比较方案可按照一定的准则进行排列，这样每一方案的效益和/或效益增值就可清楚地看出，以供最后的选择。上述系统分析的整个过程一般又可划分为下列五个工作步骤：

(1) 目标的陈述。在设计新系统和进行系统的功能分析中，最困难的一个环节很可能是如何确定所要达到的目标并确切地表达出来。例如一个水利系统的多目标开发从经济上、政治上、社会和环境等方面来看要达到怎样的目的或目标要求，这些目的如何以目标函数和约束条件的形式来表达，这就牵涉到最优准则的选择和定性定量的描述问题。关于此点将于第三节水利系统中一并说明。

(2) 探索性研究。这一步根据问题的专门性质而异。在资源开发工程中它可能是一种

踏勘性工作，搜集野外资料以评判总水量满足各目标需要的情况。对另一类系统则可能是研究和搜集必要的原始资料和基本情况，以保证问题的研究能有适当的范围和广度。

(3) 可行性研究。如果前一步研究的结果，证明资料情况已值得（或已足可进行）作下一步研究，就可开始对所需的特定工程问题，或地域作进一步的详细研究。这时要充分设想可以满足所要求目标的各种可能的系统方案。对每一种方案需作足够详尽的拟订，以使能由这些方案估算系统的效能、费用、质量等，然后把这些估算结果，按一定的准则进行排列比较，以便选出最优的系统方案。最后是把这一步可行性的研究结果提出正式报告，报告中应提出下列三个之一的结论：①所提的问题可以由所研究的特定系统来解决；②在能作出成熟的结论前，还需对某些方案补充野外和/或实验室的工作；③在现有的经济或技术条件下此工程的开发不必进一步考虑。

(4) 开发规划。这一步仅在决定了此工程将进行并明确任务和基建投资后开始。此时需要进行各组成分量的详细设计。

(5) 对现行工程系统的性能作进一步的监察检验控制，以便不断改善其运行方式，并总结经验使未来的类似系统更好地设计。

六、系统分析的核心内容和基本途径

从前几节所述，可以看出系统分析包含以下两个主要技术环节。

1. 模型化

这是用系统的观点，通过建立数学模型来研究某生产问题。

2. 最优化

这是通过直接的（即解析的）或间接的（即通过模拟的）、定量的或定性的种种优化技术，来对此生产问题的模型求出解答，或作出决策。

为了建模和优化，在系统分析中，对于一些大的和复杂的系统还常常应用所谓系统的分解和分层、分级技术。这主要是为了使模型的建立比较容易或更为直观逼真，以及使优化的求解比较方便和可行。这些将于后第三节补充说明。

就模型化这一环节言，根据模型的构造方法和如何对效果（包括效能、费用、质量等）进行估算的方式的不同，可以把系统分析途径分为两大类。

一种是解析途径。此途径首先要建立反映系统中各种物理和经济关系的数学模型——主要是写出目标函数和约束条件方程。为了建立目标函数，需要首先确定最优目标（例如经济效益最大，或电能最多等），然后找出与最优目标直接有关的物理（设计或决策）变量。这些变量和目标之间的物理的或经济的最终联系，其数学表达式就是目标函数方程。为了建立约束条件方程，就需了解各物理变量允许变化的幅度、范围和相互制约关系。其数学表达式就是约束条件方程。有了这二者然后用数学分析技术（包括运筹学）求目标函数的最优解析解，或数值结果。这种求解途径的特点是：模型虽是针对系统来建立的，但不是直接模拟系统本身的各环节（如下模拟途径那样）。而解答则是确定的唯一的最优解（多目标问题除外）。

另一种途径是通过模拟模型并求解。模拟是对系统及其功能的直接模拟。不过它只是重演系统的主要特性，而不（详尽无遗地）重现系统本身，然后在缩短的时间内加以研究。它可以是物理模型或数学模型，或两者的混合型。对于数学模拟途径言，模拟技术的第一

步,是将原型系统的输入资料,系统本身的物理功能及输出目标表达为计算机化的算式。以水利系统为例,输入一般包括水文资料、经济活动(例如需求)及结构尺寸。物理功能主要包括输入与输出间的关系(联系)。模拟技术不仅是对原型系统的直接模型化,而且也包括寻找最优解,这就是第二步或第三步对模型的验证、修改。它不是通过数值解析直接求得最优解,而是通过各种系统组成方案(包括各种输入方案)求出其结果然后比较之,以选定最优的方案。因此它是一种经验性的解题途径。一般也可通过试误法边试边改来进行。模拟法的缺点是:由于变量、参数和函数的组合,其方案很多,往往难以一一枚举,故要得最后成果,用比较或用试误法不一定得到全局最优解,而可能只是局部极值。不过通过一些办法如取样技术等可以近似最优。模拟法的优点是:对于一个复杂系统,当难以充分地用数学模型来概括和描述,包括不能写出单一产品目标函数者,及难于求解析解(或数值解)者,总是可以用计算机来模拟此种系统,并按各种输入方案计算其结果。最后通过比较求得一定程度的“最优解”。因此这种计算机模拟曾被称为系统分析的最后“依靠的手段。”

系统分析中第一种途径所用的数学方法和技术,涉及古典的和近代数学的许多方面。比较常用的有如下一些应用数学分支。

在最优化技术方面,有数学规划(包括线性和非线性规划、动态规划、线性整数规划、几何规划、参数规划等)、控制论、存储论、变分、拉格朗日分析法、最优寻查理论等)。在随机输入和随机模型方面有:多变量分析、回归理论(包括逐步回归等)、主变量法、因子分析、取样理论、排队论、信息论等。这些数学方法的运用,根据系统的特性而定。一些主要数学方法的应用将在第二三章中专作介绍。

系统分析是一种最优规划、最优决策技术。因此常用的名词和术语,除了与所应用的数学分支有关外,很多是与决策有关的。如:决策变量、策略、可行策略、策略空间、状态变量、系统参数、目标和目标函数等等。关于这些名词术语的含义这里不专作说明,将在以后有关部分特别是下节和第二章中结合实际应用来说明。

系统工程学目前仍处于发展阶段,理论和方法都还不够完善。在提出问题和确定目标即把问题具体化、数学化或模型化的阶段,还需经验和假设,算出的各方案也只能作为决策的参考,最后还需由个人或集体根据实践经验进行判定,特别是涉及政治及政策问题时,单凭数学模型和模拟,以及计算机的运算,就很难正确概括,甚至会造成谬误。系统分析实际上不是一个作出决策的手段,而是帮助主管人员去作出决策的手段。因此应该正确认识系统工程学的科学性和局限性。但是由于系统工程学是适应科学地处理日益复杂的近代生产,科研问题的需要而产生的,它具有相当的潜力和广阔前途,因此,目前在国内外发展颇快。它在水资源和水利系统中的应用亦日益增多,是一种需要十分重视和积极推进的领域。

系统工程学是一门新兴的学科,它的发展历史不过三十余年。但目前已广泛应用于工业、农业、交通运输、国防施工、武器装备的研制生产及工业企业组织管理等各种领域,并取得了显著效果。由于它所涉及问题的广泛性、复杂性和学科本身的不断进展,因此确切理解系统工程的概念内容、方法、体系和理论原则,还有待进一步深化。下面拟通过在水资源和水利工程中的应用来进一步阐述,以更好理解此项技术的精神实质、其优越性和局

限性所在。

第三节 水资源系统的特点和分析途径——系统分析方法具体应用

用系统的概念和系统分析的方法来求解水资源开发中的问题——包括水利系统的规划、设计和管理问题是第二次世界大战后开始的，至今已有半个世纪了。随着工农业生产、交通运输事业等的不断发展，水资源紧张情况和环境问题的日益突出，很多地区对水资源的综合利用和综合管理的要求也愈来愈迫切、愈来愈广泛复杂。从性质上讲，已经从单纯的对水量水能的要求发展到对水质的控制要求（物理的和生化的），从防灾兴利、发展到防灾兴利。从地域范围讲已从一个河段，一条河流，扩大到整个河流域甚至跨流域的开发治理。从服务部门讲，已经从传统的农业灌溉、电力、给水、航运，扩大到环境、社会经济和社会福利方面。因此典型的水资源的开发管理问题，往往涉及到广大的地区范围内众多的河流、土地上多个工程、多个开发目标、多种约束、多种影响构成的完整系统如何合理开发和管理的问题。显然它是一个相当复杂的问题。因此必然需要一种相适应的有广泛性的新途径来分析和求解。水利系统中起主要作用的因素是各部门的需水需电、来水、水库等水利设施、管理运行规程和水文情报资料搜集提供的办法。所有这五个方面需要进行相互协调，并将它们或以显式表达或以隐式蕴含在所求解问题的数学表达中。考虑到上述各种关系的错综复杂，因此用过去传统的方法，例如少数几个要素增量的方案比较法，就难以胜任，而必须寻找新的求解途径。

可以认为在近 50 年来，在水资源领域中，最重要的进展是采用“系统工程学”来分析此领域的问题。无论是水资源开发的规划，即水利系统的规划设计，或水利系统的运行管理，都可以应用系统分析这一方法。而前节所述的系统分析的概念和主要内容，亦完全适用。不过根据水利系统这一特定对象，也有一些与其他系统所不同的一些特点，简述如下。

水资源规划问题，按其活动影响的范围、空间、时间和目标特性而有很大变化。所谓问题的范围乃指所及的流域范围是为单一流域或多个流域，所考虑的目标是单目标或多目标开发等等。从时间上看可以是设计前的研究性规划或已决定兴建时的建设规划，或建成后的运行管理规划。这些都影响系统规划的方向重点、专业的组成人员及所用的数学模型。

用系统分析来考虑水资源规划问题时，不同类型的问题或不同的研究阶段常要求改动系统的边界（即系统包括的范围），从而影响输入元素和其相互关系。从水资源系统的自然性质来说，目前一般考虑的系统主要是水和直接相关的土地资源系统，另一方面，过去水文分析大多仅着眼水量，但近来更注意到除水和泥沙以外尚有很多化学物、生物。这些影响环境水质的因素已日益重要，需去预报、预测和管理控制。因此已有尝试把水质的规划管理问题纳入整个系统模型中去。

一、模型问题——模型的建立和验证分析

在水利系统规划中，重要问题是建立模型。当把确定了的水利系统的各元素和输入资料、输出目标、其相互关系通过一定的简化和某些假定后，用数学公式来描述表达时，就成为此水利系统的数学模型。然后才能对此数学模型进行分析，寻求最优的方案。用系统分析时，为了模型的描述有一必要的精度，必须对引入了简化假定的模型，在进行运算之

前先作验证。即用连续改正法（边试边改来检验所作的一些假定）。水资源分析的一个重要环节，是要找出和应用某一或某一组特定的数学模型，它能具有最好的仿真性，这是模型设计者需要权衡的。

首要的是要检验模型的有效性。它能否以足够的精度预测比较方案和系统因素变化对目标函数值的影响，以便藉此作出成熟的决策。例如，如果有些因素对各比较方案的作用都差不多，就不必包括到模型中。其次，须通过试算，把模型预测的结果与实际会发生的情况进行对比，必要时修改模型。此项试验，如可以并可能，就用历史资料。经一系列检验修正模型后，然后对输入参数给以不同的值并进行模型解算。这是为了作参数灵敏性分析，以论证哪些输入参数对模型的解有显著影响，对这些参数就要作更精细的估计。利用这些改进了的参数值对模型作新的计算求解，根据这些解来研究选择最好的规划方案。

在研究建立模型时，还应注意避免两种极端的倾向，即或使模型过于详尽，使求解不必要地复杂化，或使模型的一些假定如此粗略，以致使分析的成果失去实用性、可靠性。

二、模型分类

水利系统模型可以从不同的角度来进行分类。首先，从模型的基本性质言，可以分为三种：图像蓝图式（如建筑模型图）、相似模型模拟（电模拟或水力模拟）及抽象符号的数学模型。现在已日益趋向于用数学模型，特别是系统分析中更只此。因为它比之用语言描述，有下列优点：数学模型能更清楚、更精确地描述系统，又能揭示和定量化重要的元素和这些元素间的相互关系，它能利用计算机求解，即它通过操作数学的技术提供了在系统的描述和计算机求解之间的一种桥梁。此外，数学模型也能清楚地指示对分析此系统还需要补充哪些有关的资料。

模型的分类，也可从模型的各种特征区分为：

- （1）解析（最优化）模型和模拟模型——按所用的方法分。
- （2）静态和动态模型——按时间因素是否作为变量考虑来分。
- （3）确定性的和随机的模型——按未来水文情况是已知或作为未知随机因素。
- （4）投资（规划设计）模型和运行模型——按考虑远期总的经济效益，或短期的眼前经济利益来解。
- （5）其他，如线性和非线性模型等等。

如果把模型和模型技术结合来看，亦可分为解析的最优化模型和技术、概率模型和技术、统计技术、模拟模型和寻查、取样技术四种。分述如下。

（1）解析的最优化模型和技术。它主要用作确定性的系统模型。多半用解析函数形式来描述系统变量间的定量关系和其相互作用。求解技术包括古典的微积分、拉格朗日乘子、数学规划和控制论等。其中数学规划技术已广泛应用于水资源规划问题。

（2）概率模型和技术。它主要用于随机系统模型。用概率理论描述随机系统元素及相互作用关系。这里包括一切随机过程的描述性技术。其中主要方法是排队论和存贮论，它研究服务与存贮容量的关系。许多水库问题是存贮问题，这些方法在水资源规划中已有相当应用。

（3）统计技术。它包括多变量分析、因子分析技术、统计推断和统计决策理论等。它着重于通过统计分析选定系统应包括的适当的元素、资料组和描述系统的函数等，以便能