



高等学校规划教材

水资源系统分析

SHUIZIZIYUAN XITONG FENXI

董增川 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高等学校规划教材

水资源系统分析

董增川 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书比较系统地介绍了水资源系统分析的主要内容,包括水资源系统和水资源系统分析的基本概念,建立水资源系统模型的一般方法,水资源系统分析中常用的最优化技术与模拟技术,以及风险型决策、不确定型决策、多目标决策和大系统优化的主要方法。本书重点放在实际系统的模型化方面,以便在水资源规划与管理中理解和运用系统分析技术。

本书可作为高等学校水文水资源、水利工程等专业大学本科生或研究生的课程教材或教学参考书,也可供从事水资源系统规划、设计和管理的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水资源系统分析/董增川主编. —北京:中国水利水电出版社, 2008

高等学校规划教材

ISBN 978-7-5084-5371-2

I. 水… II. 董… III. 水资源—系统分析—高等学校—教材 IV. TV211

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 031291 号

书 名	高等学校规划教材 水资源系统分析
作 者	董增川 主编
出版发行	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: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 13.5 印张 320 千字
版 次	2008 年 7 月第 1 版 2008 年 7 月第 1 次印刷
印 数	0001—4100 册
定 价	26.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

人类利用水的历史，犹如人类自身历史那样悠久，世界上几乎所有古代文明的发祥地都是沿河流及其冲积平原上建立和发展起来的。现代社会的稳定和发展更与水资源息息相关。在需水时间、需水地点、要求的数量和质量方面，水资源极大地影响了人类的自然生存环境和一切社会经济活动。

水在自然界是以循环运动的方式存在的，在时间和空间上的分布是极不均匀的。人们为了达到种种利用水的目的，常在某些环节改变和控制水文循环，由此产生了五花八门的水资源工程，从古代供给人们饮用水的原始蓄水池，到现代多功能、多建筑物的水资源工程，人类开发利用水资源的目标已越来越多、规模亦越来越大。在这漫长的历史过程中，巍然矗立两块里程碑：一个是 19 世纪末期兴起的现代水利工程学；另一个是 20 世纪 50 年代系统分析理论的引入。系统分析理论的引入，大大提高了人类开发利用水资源的科学性，它具体研究复杂水资源系统的特点及其他的优化规划与管理；从系统的观点出发，以电子计算机为工具，利用现代科学技术理论来研究水资源的合理开发利用问题。

水资源系统分析是一门边缘学科，它处于自然科学与社会科学、基础科学与应用科学的交界面上。作为其直接基础的有工程学、水力学、水文学、经济学、管理学和社会学等，作为其分析工具的有最优化理论、决策理论、模拟技术、应用数学、系统论和控制论等。显然，它包含的内容，涉及的学科范围是非常广泛的，从这个意义上讲，水资源系统分析工作者应该是一个多面手。

本书将力图通过一些实际例子来阐明水资源系统分析的主要内容，重点放在实际系统模型化方面。本书第一章概括介绍水资源系统分析的步骤等；第二章介绍系统分析的核心——数学模型的概念和建立数学模型的一般方法；第三章主要介绍系统分析中常用的最优化技术，包括线性规划、整数规划、非线性规划、动态规划，侧重于实际问题的模型化方面，并对各种最优化方法的适用性作了简略介绍；第四章介绍模拟技术的初步概念，以及模拟方法在水资源系统分析中的应用；由于现实世界中的大多数决策问题都是不确定

的，而且常不只有一个目标，从而在第五章、第六章分别介绍非确定型决策、风险型决策以及多目标决策，列举了一些比较常用的方法；第七章简要介绍大系统优化的基本概念与典型方法。如果具备最优化方法、矩阵论、数理统计、水利经济等学科的基础知识，阅读本书时将会带来很大便利，因此读者可参看有关的文献，学习有关知识。

感谢裘庆芴副教授在百忙之中，抽出时间对本书进行了详细的审阅，提出不少宝贵意见。感谢叶秉如教授、鲁子林教授、许静仪副教授、陈乐湘副教授的大力支持与帮助，并在此向我的同事钟平安、陈元芳、陆宝宏等同志表示诚挚的谢意，在与他们的日常讨论中，对本书的完成起了很大作用。本书得到河海大海“211工程”建设项目资助，特此感谢。

由于编者水平有限，书中不足之处，欢迎读者批评指正。

作 者

2008年4月

目 录

前 言

第一章 概述	1
第一节 水资源系统.....	1
第二节 水资源系统规划与管理.....	3
第三节 水资源系统分析.....	6
第二章 数学模型	11
第一节 引言	11
第二节 数学模型概念	12
第三节 建立数学模型的一般方法	17
第四节 数学模型的求解分析	18
第三章 最优化技术	20
第一节 最优化概述	20
第二节 线性规划	24
第三节 整数规划	42
第四节 非线性规划	57
第五节 动态规划	80
第四章 数字模拟技术	112
第一节 概述.....	112
第二节 模拟方法.....	116
第三节 随机时间序列模拟简介.....	118
第四节 决策问题的模拟.....	119
第五章 非确定型和风险型决策	129
第一节 概述.....	129
第二节 非确定型决策问题分析.....	131
第三节 统计型决策问题.....	133
第四节 有预报信息的贝叶斯决策过程.....	138
第五节 信息的价值分析.....	145
第六节 灵敏度分析.....	146

第六章 多目标决策	148
第一节 多目标决策问题的基本概念.....	148
第二节 多目标决策的有关理论.....	154
第三节 有限个方案的多目标决策问题.....	165
第四节 无限个方案的多目标决策问题.....	170
第七章 大系统优化理论	185
第一节 概述.....	185
第二节 分解协调方法.....	192
第三节 水资源大系统优化.....	199
参考文献	208

第一章 概 述

第一节 水资源系统

一、什么是水资源系统

世界上水的总量是很大的。据现有资料估计为 13.86 亿 km^3 。但如果因此就认为地球上的可用水量极其丰富，那么这种印象是错误的。事实上，便于取用的河水、湖泊水及浅层地下水等淡水资源仅占地球水储量的 0.2%，而且分布极不均匀。通常人们把逐年可以恢复和更新的淡水量称为水资源，大气降水是它的补给源。

水在自然界中，是以循环运动的形式存在的，这个过程称为水文循环。在太阳能的作用下，地球上的水不断被蒸发成蒸汽，进入大气层遇冷凝结成水滴或冰晶，在重力作用下，以降水形式落到地面，然后一部分渗入深层地下，大部分流经河流汇入海洋，又不断地被蒸发，周而复始。

人们为了种种用水目的，通常在某一环节或某些环节上打开了水文循环。例如，从古代起，人们就已经引用地面径流用于灌溉、家用或者航运。文明社会初期就利用了地下水。人们利用水文循环某些方面的种种尝试，产生了五花八门的水资源工程，这些工程设施中，最简单的莫过于原始的蓄水池供人们消费和饮用。最复杂的水资源工程设施是那些多目标、多建筑物的综合工程，它们可以用来调节径流、补给地下水含水层，进行水力发电和高工业化以及现代化地区防洪，满足广大人民娱乐休养的需要以及可以用来实现其他目标。在这两种极端情况，原始的蓄水池和错综复杂的多目标工程之间，有多种多样可能的开发和利用水资源的途径。

几乎可以肯定地说，人类在利用水的一开始，就产生了专门管理水的机构。起初可能是一个人，几个人，到后来逐渐发展成一支专门管理水资源的队伍。也许他们开始时的任务，不过是储蓄一定时期内所需的饮用水，到现在则面临复杂得多的任务：如何调配在时间和空间上分布极不均匀的水资源，来满足人们生活发展的需要，他们不仅是调配水的数量，而且要控制水的质量。不仅要研究如何更好地利用水资源，而且要探索如何更好地防治洪水受害，防止水体污染。目前，许多世界性的学术组织和政府组织正在卓有成效的工作着，提出了一系列向地球水世界联合进军的国际合作计划。

虽然人类利用水的历史，犹如人类历史那样悠久。然而人类对水资源的开发利用进行科学的研究，则是相当近的事。大体上说，从 18 世纪末谢才导出明渠水力学公式开始，到 20 世纪 50 年代逐步发展了水利科学的近代理论，这一时期所提出的分析问题和解决问题的方法，通常被称为传统办法。从系统的观点出发，研究水资源的开发利用问题，可追溯到 1950 年，当时，美国水资源委员会的报告中，最早综述了水资源的开发利用和保护



等问题，引起美国各大学的兴趣。1955年，哈佛大学开始制订水资源大纲，研究现代水资源工程的特点及其在规划、设计和管理运行中的方法论，其后在全世界有许多高等院校和科研机构，都在进行这方面的研究，几乎每个国家或地区都能找到这样的科研活动中心。

综上所述，所谓水资源系统，就是指由水资源（包括河流水、湖泊水及浅层地下水等），水资源载体（如河流、湖泊、土壤、岩石、植被等），水资源工程（如地面水库、水电站、堤坝、运河、渠道等），水资源管理机构（如流域水利委员会等），水资源开发利用理论与方法（如传统方法、系统分析方法等）所组成的系统。一般把水资源、水资源载体、水资源工程、水资源管理机构称为水资源系统的硬件。把水资源开发利用的理论与方法称为它的软件。应该指出，一个水资源系统开发得是否合理，主要看它的软件开发程度，也就是说，主要是看它在规划、设计和运行中所采用的依据是否比较科学。

二、水资源系统特点

系统是由一组相互作用、相互依赖的对象组成的一个整体，它本身又处于一定的环境之中，水资源系统也是如此。因此，在研究水资源系统的一个具体实例时，首先要确定它的边界，也就是确定水资源系统的研究范围。

一般来说，水资源系统的边界是根据地理位置来确定的，例如研究某一水资源工程时，通常取一个河段作系统；研究某一流域时，其外部边界就是地面分水岭；研究某一区域的水资源开发利用时，通常把该区域的行政分界作为水资源系统的边界。

任何系统都不免与边界外部有物质、能量和信息的交换。如果交换的量很小而可以忽略时，这个系统可视为封闭系统；否则就是开放系统。水资源系统一般是作为开放系统来研究的。与它直接作用的外部环境主要有自然环境系统和社会需求系统。水资源系统是两者之间的桥梁，在开发利用水资源时，不仅是要最大程度地满足人类生活和发展对水资源的需要，而且要尽最大努力保护好人类所拥有的有限资源和人类赖以生存的自然生态环境。

系统与外部环境的交换，主要是通过系统的输入和输出来实现的，水资源系统的输入、输出更具有比较复杂的特点。首先水资源系统输入的复杂性主要表现在供应资源的地表水、地下水有着难以确知的变化。虽然水文工作者在确定性水文预报、概率或随机水文预测方面已作了大量工作，但就目前来说，对水文规律的认识仍很难满足社会发展的需要。另外水资源系统输入的复杂性还表现在关于需水量预测方面，以及一些有关的经济、社会因素的变化。例如要完善一个给城市供水的水资源系统，那就需要知道今后一段时期内用水量的变化情况、扩建水资源系统所需原材料价格的变动情况以及社会上对此事反映如何等。

水资源系统的输出，也就是水资源系统所具有的功能。水资源的开发利用，涉及国计民生和生态环境的广阔领域。从经济角度来看，它的兴利作用有发电、灌溉、航运等，分别以给社会提供具有一定保证率的电力、水量、水深等来表示；它的除害作用有防洪排涝等，主要以减少淹没、浸没范围，保护人民生活 and 财产，提供安稳的生活环境来体现。从社会环境角度来看，它能改善区域环境质量，增加国家或地区的经济收入，提高人们的生活水平。还应该注意的，水资源系统在发挥其效益的同时，有可能对自然环境产生破坏



作用。例如，对水资源的一些不恰当的开发，造成生态环境的破坏、水体的污染、人为的水量短缺等，这些都是应该尽量避免的。

水资源系统的复杂性还表现在水资源系统本身的结构上，这主要反映在以下 4 个方面：

(1) 水资源组成的层次性。作为水资源系统物质基础的水资源本身存在于系统内的大小湖泊、支流、干流甚至河网、浅层地下水库之中，这些水资源的载体本身是有层次的，是相对稳定的，开发利用水资源时首先要了解的正是它们的结构以及水流在它们之中的运动规律。

(2) 工程布设的层次性。对于水资源规划来说，工程布设的层次性是指，什么时间、什么地点，建立多大规模的水资源工程，这不仅是考虑到人们的需要，充分利用水资源，还要考虑人力、物力、财力的限制，分期分批地开发水资源。对于水资源管理来说，主要是指根据人们的需求，在时间和空间上，利用水资源工程，对径流逐级分配。

(3) 管理机构的层次性。一个大的水资源管理机构，通常包含几个下属子机构。它们之间具有上下级的关系，上级机构通常是兼顾全局的决策、协调机关，下级机构一般任务是收集资料、执行决策。另外，一个管理机构本身有一个决策小组，它包括的成员通常代表着一定地区的人们的利益，如在区际、国际河流上进行规划时，就存在这样的问题。

(4) 研究分析方法的层次性。这主要反映在不同时期，根据所能掌握的科学文化水平，相应有不同的分析研究方法；以及在开发一个区域的水资源时，根据各阶段精度方面的要求不同，可以采用精度程度各不相同的一些方法，以简化问题的处理，抓住问题的重点。

三、水资源系统分类

水资源系统有各种分类方法，如果根据研究方法的不同，至少有如下两种分法：

(1) 根据水资源系统的复杂性，可把水资源系统分为大规模的、中等规模的及小规模。对于中小规模的水资源系统，采用一般的系统分析方法即可解决问题；对于大规模的水资源系统，只有采用近 30 年来逐渐发展起来的大系统理论和方法才能获得较好的解决。

(2) 根据水资源系统的主要开发目标是一个还是几个，可把水资源系统分为单目标的和多目标的。单目标水资源系统，在其优化时一般采用单目标优化技术，在某种意义上可以说其解是唯一的。多目标水资源系统的研究，则要利用多目标决策分析方法来解决。

随着人类生活和生产发展的需要，提出的大规模、多目标水资源系统越来越多。而科学技术的迅猛发展，又为解决这些新问题提出了崭新的解决途径。

第二节 水资源系统规划与管理

一、水资源系统规划与管理的内容

由于自然界可利用的水资源往往在时间、地点和质量方面与人类的需求相矛盾，从而需要修建若干水资源工程。这样就产生了以下三个基本问题：

(1) 水资源系统所服务范围应该取多大？

(2) 为了尽可能地减少天然来水与需求之间的矛盾，应该在什么时间，什么地点，修



建多大规模的水资源工程群？

(3) 水资源系统一旦建成后，应该怎样运用，以最大的可能达到一系列既定目标？

这三个方面的基本问题，正是水资源规划与管理所要研究的基本内容，在此需要特别指出的是三者之间并不是必须相互独立，而且事实上它们是密切相关的，把它们独立开来反而是有些人为了。之所以这样做，主要是为了能在不同阶段研究各自的主要矛盾，最后达到问题的圆满解决。

二、水资源系统的开发步骤

对于一个流域水资源系统，从规划开始到投入运行，一般可分为以下五个阶段：

(1) 问题剖析。针对所提出的问题，进行比较全面的分析，确定流域开发的目标。开发目标一般是由有关政府机构的决策者与具体从事水资源系统设计的分析人员协同制订的。

(2) 调查研究。这个阶段包括对流域的野外勘察工作以及水文、地质、经济、社会及需求等基本资料的收集，以使对问题的研究具有应有的广度与深度。

(3) 可行性研究。如果上一阶段的成果得到认可，那么就可开始对具体的工程问题、需求范围作进一步的详细研究，创造性地拟定出能够满足目标的各种开发方案和一切程序。每个方案必须作到尽可能详细的程度，得以评价所设计系统的功能、费用和质量等，然后把这些评价进行比较，以选出最佳的开发方案和程序。

(4) 开发设计。当决策机关已决定修建某一工程时，就可开始进行各种建筑物的详细设计和起草投标说明书。

(5) 日常管理。对已建成的水资源系统编制运行策略和进行必须的经常性观测，以最大可能地发挥系统的各种功能。

通过(1)、(2)两个阶段，可基本上确定水资源系统的服务范围，通过(3)、(4)两个阶段，基本上回答了何时何地建立何等规模的水资源工程问题。通过第(5)阶段，建立了水资源系统的运行策略。大体上来说，对水资源系统的开发应该存在这样的逻辑次序。但在实际处理问题时，它们有时甚至也应该是交叉进行的，只有这样做才能充分考虑水资源系统设计的复杂性，最终建立一个比较完善的水资源系统。

三、水资源系统规划与管理的研究基础

水资源的开发，几乎总能推动地区的经济增长和全面发展。甚至可以这样说，什么时候拟定地区发展规划，水资源系统也就在什么时候起着核心作用。而地区其他自然资源要以它为核心来开发。反过来说，在进行水资源的开发时，就必须考虑到其他自然资源的综合利用。这样，在对水资源开发利用时，人们可以发现至少它与下列学科之间具有紧密的联系。

1. 水文学

水资源开发利用问题分析和计算的基础是应用水文学。应用水文学的主要任务是对水资源系统所能提供的水量在数量上和质量上进行估算。在现有水文资料的基础上，应用水文学可以计算出给定概率下的河川径流量，可以人工生成一定长度的随机水文序列。这对水资源规划与管理都是必不可少的前期要做的工作。

2. 地质学

地质学对水库及其他水资源工程在选址方面具有关键作用。它在地下水存贮量及可开



采量计算方面,以及水库建成后是否会引起下游河岸大滑坡和发生诱发地震等一系列地质问题上也具有十分重要的意义。

3. 河流动力学

河流动力学在研究水资源工程建成后,河流的上下游河道会发生哪些演变方面,以及水资源工程本身会有何种程度的冲淤方面是必不可少的。

4. 计算水力学

计算水力学主要提供一些过水建筑物、输水渠道的过水能力计算方法,以及在研究平原河网地区的规划与管理时提供进行水流运行规律计算的方法。

5. 环境工程学

环境工程学主要论述居民用水与工业用水供水的水质问题,废水处理、净化和再利用问题,热量转化问题,野生动植物变化问题等。

6. 经济学

经济学论述的是工程的投资、年运行费用及所能产生的效益,评估工程的经济合理性。

7. 社会学

有关工农业发展速度,人口增长、迁移和就业等方面的现状和预测等知识,都涉及到社会科学。

8. 管理学

水资源工程的规划、设计、施工和运行,往往受到某些约束条件的限制。无论是一个具体工程的管理局,还是一个流域的水利委员会,它们的组织形式和管理方式都会对水资源系统的效益产生很大的影响。

9. 法律

缺乏法律色彩的水资源工程几乎是不存在的,在许多场合下,水资源在开发目标、所受限制,以及各种用户和各个地区之间的分配方面都要遵守现有的法律条款。

综上所述,水资源系统规划与管理所涉及的学科是非常多的,它最突出的特点是要把自然科学和社会科学的几个方面结合起来去分析和去解决某一地区的水资源开发和利用问题。由此可见,水资源工程师应是个多面手,至少他应是某一学科的能手。

四、水资源系统规划与管理的研究方法

水资源系统规划与管理的研究有两大类,这就是所谓的常规方法和系统分析方法。常规方法基本上是指在20世纪50年代以前所形成的方法,也就是目前“水利计算”的主要内容。水资源系统分析方法是在20世纪50年代以后逐步发展和形成的,它的主要思想是用系统的观点来研究水资源的开发利用问题,也正是本书所要介绍的主要内容。

在下一节,将简要介绍水资源系统分析方法的概况,使读者有一个粗略的认识,至于水资源系统分析的具体内容将在以后各章逐一介绍。当然应该指出,要在一本书中把水资源系统分析的有关内容及发展趋势全部包括是不可能的,事实也是没有必要的,本书的目的是把水资源系统分析的主要思想和主要应用介绍给读者,真正掌握水资源系统分析的技术,则要靠在实践中多加应用。



第三节 水资源系统分析

一、什么是水资源系统分析

要弄清什么是水资源系统分析,首先要明白什么是系统分析。所谓系统分析是一门从全面整体的观点出发,利用现代科学理论和方法以及电子计算机技术去设计系统的科学。在设计一个系统时,必须明确系统要达到的目标,分析系统各组成要素之间的关系,最终使所设计的系统达到整体上的最优,这就是系统分析的主要任务。

系统分析的起源可归究于第二次世界大战中处理军事问题的需要。因为当时出现了运筹学,这就为解决大规模军事行动中所出现的问题提供了可能,接着近代科学的一些新成就,如管理学、控制论、信息论等的出现以及后来电子计算机的问世,都为系统分析的发展创造了条件。目前,系统分析广泛地应用在国防事业、宇宙开发事业,区域经济发展规划、交通管理、资源利用、生态保护、人口预测、农业生产等领域。可以看出,系统分析是一门高度综合性学科,它的应用范围又是如此广泛,从而各行各业的科学工作者对系统分析的内容有不同的理解和侧重,这正表明系统分析作为一门年轻的学科还在不断的发展之中,还有待于进一步完善。

水资源系统分析是系统分析在水资源系统规划和管理中的应用和发展,它的主要任务是从全面整体的观点出发,利用当代科学的最新成就和电子计算机技术,对水资源系统的规划和管理问题进行分析和研究,最终设计出一个整体最优的水资源系统。它的研究手段是建立系统的模型,并利用优化或模拟的技术进行分析和计算,最终给决策者提供几个整体来看是较优的水资源系统设计方案。水资源分析的研究手段是它的理论组成,如何利用这些理论来研究它要完成的任务构成了水资源系统分析的应用组成,这两部分作为一个整体就是水资源系统分析的主要内容。

二、水资源系统分析的理论组成

水资源系统分析的理论组成与一般系统分析是一致的,它是许多学科的综合产物,下面作一简要介绍。

1. 系统目标

系统分析的第一步就是要明确系统的目标,即系统开发要达到的目的。目标的选定是最基本的,目标选择得恰当与否在很大程度上决定了系统设计能否成功。目标可分为两类:定量的和非定量的。定量目标是可用一定的数值精确度量并能以某种单位表示的,如水力发电的收益。非定量目标只能从顺序上或定性的意义上来度量,如水质的改善与提高。若多个目标可转换成同一单位来度量和描述,则称它们为可公度目标。反之,为不可公度目标。例如水电开发是以能源单位表示,而农产品则以粮食产量表示,两者即为不可公度目标。

目标的确是很重要的,但分析工作者很难听到决策者用清晰周密的语言表达他们的目标。另一方面,即使决策者在开始分析阶段就能明确地提出目标,也不能不加分析地引用。分析工作者应该协同决策者一起分析目标的层次,选择适当的目标。

水资源系统开发的总目标有两个方面:



1) 增加国家或地区收入。

2) 改进环境质量。

这两个基本目标有以下几个方面的解释：

1) 获得经济效益。

2) 调整地区收入。

3) 促进充分就业。

4) 推动和支持经济增长。

5) 保护自然资源和改善环境质量。

6) 取得某种无形目标，如巩固国防、社会稳定等。

7) 达到其他目的。

在对总目标进行划分后所形成的子目标中，一般认为经济效益是远较其他目标直观和容易处理的，因此也最容易为人们所接受。迄今为止在大多数水资源系统的设计中都采用了经济效益作为目标，这种在进行水资源系统规划和管理时，仅考虑一个主要目标而忽略其他目标的做法，通常称为水资源系统分析的传统方法。

随着科学技术的进步以及社会发展的需要，从综合利用水资源的观点出发，目前在水资源系统的规划与管理中已很少只考虑单一目标，这种情况的出现，导致了水资源系统多目标规划方法的产生，它是水资源系统现代分析方法的一个重要组成部分。

2. 系统模型

所谓模型，是把实体系统通过适当的概括和抽象，用某种形式来表达实体系统本质属性的简洁模仿品。模型是研究系统的重要工具。这是因为真实系统一般都是十分庞大和复杂的，对系统的探讨和研究显然都不可能与起初系统直接打交道，必须通过系统的模型阐明真实系统的客观规律。

(1) 分类。模型基本上可分为两大类：

1) 抽象模型。在认识实体系统的基础上进行高度的概括和抽象，用一组符号来表示系统的行为，这样得到的模型一般称为抽象模型。

2) 具体模型。把实体系统按照一定的原则变换成另一个便于试验的实体结构，一般称这样得到的模型为具体模型。

(2) 组成。水资源系统分析中所采用的模型，大多数是抽象的数学模型。它有三个基本组成部分：

1) 参数。参数是描述系统固有特性的数值，它独立于模型且不受系统设计者的直接影响和控制。例如灌溉效率、水轮机效率、明渠阻力系数以及不能满足目标及一些限制条件所致的损失系数等。参数的取值常需对模型进行多次调试来确定。

2) 变量。变量是用来描写模型的，水资源系统分析中变量有四类：输入变量、输出变量、状态变量、决策变量。在模型中它们以种种符号来表示，仅仅在运算时它们才呈现出各种数值。

输入变量是指不受系统设计者控制的系统外部的输入，例如历史实测的或人工生成的径流系列，系统内的降水、蒸发、气温等。

输出变量是指系统对外界的贡献，例如水库的溢流量、泄水量、水电站的发电量及系



统的净收益等。状态变量是用来度量在系统运行过程中系统各组成部件所处的状态及其变化,例如水库的蓄水量、水电站的发电水头等。

决策变量有时也称为设计变量或设计参数,是由系统分析人员协同决策者共同设置,用来控制系统行为的变量。例如水库的库容、电站的装机容量、灌区的面积等,都是水资源系统分析中常见的决策变量。系统中所有决策变量取值的集合称为一个决策或策略。当一个决策不破坏和不违反系统的所有限制条件时,则称它为可行决策,否则即是不可行决策。系统设计的主要任务就是选择决策变量的取值,以使系统的整体目标达到最优。

3) 关系式。关系式用来表示系统各组成部件之间相互制约和相互依存的联系。水资源系统分析中有三种基本的关系式:约束、运行规则、性能指标。

在系统分析的约束中,决策变量的取值很少是不受限制的,通常它们必须满足一定水利的、财务的、法律的及其他的约束。水流的连续性是最常见的水力约束。技术约束是根据技术上的可能性对系统组成部件如水库、泵站、管道及电站等容量和规模的限制。水利约束是在开发利用水资源时对系统必须达到的兴利除害作用所规定的最低限度。财务约束通常是指开发自然资源时资金的限制,法律约束是指法律上对水资源开发利用时所作的一些规定,如水质标准。

从数学的观点来看,系统约束将系统的各组成部件之间的相互联系以及决策变量的允许值连接在一起,融为一体,定义了水资源系统。

运行规则。运行规则是主系统设计者拟定和控制的。例如为协调综合利用水库兴利与除害的矛盾,满足灌溉、发电、航运、娱乐及防洪的需要所拟定的水库运行程序等。

性能指标。性能指标是用来表示系统目标或功能的数学关系式,利用它可对系统的不同设计方案进行评价。由此可见,性能指标在系统分析中所起的作用是巨大的,然而如何明确地定义性能指标通常是一项很困难的工作,它要求分析人员与决策者应协同考虑和制订。

以上介绍了水资源系统数学模型的基本组成,那么水资源系统数学模型的具体表达形式是什么?下面就来回答这个问题。

(3) 表达形式。根据研究问题所采用的方法不同,水资源系统的数学模型可分为两种:优化模型和模拟模型。所谓优化模型就是要从所有可行决策中挑选出一个或几个使系统性能指标达到最优的那种模型,在优化模型中系统的性能指标常称为目标函数。所谓模拟模型就是通过设定一系列系统决定,经过系统变换,来分析系统功能变化情况的那种模型,在模拟模型中系统性能指标常称为功能函数。

由于优化模型可以直接得到最优决策,从而水资源工程师应尽可能地采用优化模型作为决策的工具,然而在许多场合下,由于水资源系统本身规模的庞大和复杂性的增加,虽然可以建立起优化模型,但常难以求得解答,此时模拟模型将成为一个强有力的工具。

在建立系统的数学模型时,必须注意以下两个方面的问题,即一方面是模型不能太详细,一个过分详细的模型将导致不必要的复杂性,增加分析计算的难度,并由于需要的资料太多,而难以保证数据的质量,往往会产生一些不可靠的结果。另一方面数学模型也不能过分简单,很难相信一个粗糙的模型能产生合乎于实际的成果。如何进行合理的折中,需要系统分析者有丰富的经验和渊博的知识。



3. 优化技术

优化技术是研究如何在一切可能方案中寻找最优方案的科学。它的研究方法是首先将问题概化成抽象的数学模型，然后用合适的方法去求得解答。

一个最优模型通常由三部分组成：变量、目标函数和约束条件。可用一般形式来表达：

$$\begin{aligned} & \text{最优化 } f(x) \\ & \text{约束于 } g_i(x) \leq 0, i = 1, \dots, m \\ & x \in R^n \end{aligned} \quad (1-1)$$

根据变量及关系式的含义不同，求解优化问题的方法也就不同，目前广泛用于水资源系统分析的优化方法至少有以下几种：

- (1) 线性规划。
- (2) 混合整数规划。
- (3) 非线性规划。
- (4) 动态规划。
- (5) 随机决策分析。
- (6) 多目标决策分析。
- (7) 大系统优化。
- (8) 其他。

关于这些优化方法的具体内容，已在众多的文献上作了介绍，至少在文献 [1, 4, 5] 中有比较完整的叙述。

4. 模拟技术

模拟是一种问答的技术，它所解决的问题是“如果这么做，将会发生什么”，系统模拟的主要步骤如下：

(1) 建立模拟模型。主要包括定义系统的变量，建立反映系统结构和行为的关系式，确定系统的功能函数。

(2) 编制系统的各种可能设计方案。这一步主要是对系统的决策变量设置一系列允许值或者是对系统的运行提出一系列的规则，并把它作为模拟分析的输入。应该指出的是，这里的输入与边界对系统的输入是根本不同的。这种输入是由系统设计者拟定的，而外界对系统的输入则是客观存在的，与模型是独立的，并且不受系统分析人员的影响。

(3) 运行模型。将各种可能的设计方案输入计算机，重复地运行模拟，得出不同方案下所相应的系统特征，如系统状态，系统输出等。

(4) 运行结果的分析评价。对模型的运行结果进行分析和评价，一方面加深对系统行为的认识，另一方面可选择出一个近似的最优设计方案。

在水资源系统分析中，利用模拟技术的目的有两个：一个是能加深对复杂系统行为的认识，另一个是能对复杂系统的设计提供一个较优的解答。这就要求不仅要建立一个从本质上能反映原始系统的数学模型，而且要使所设置的系统可能的设计方案具有较大的覆盖面，如何才能做到后一点呢？目前在水资源系统分析中至少有如下几种方法已得到应用：

- (1) 系统抽样法。
- (2) 随机抽样法。



(3) 其他方法。

关于模拟技术的详细讨论可在文献 [6, 7] 中找到。

三、水资源系统分析的应用组成

利用水资源系统分析的理论来研究在水资源系统规划和管理中所遇到的问题,形成了水资源系统分析的应用组成。这方面的实际例子是不胜枚举的,下面仅指出它的应用范围。

- (1) 防洪系统。
- (2) 除涝系统。
- (3) 城市排水系统。
- (4) 灌溉系统。
- (5) 水利发电系统。
- (6) 城市供水系统。
- (7) 水质控制系统。
- (8) 流域水资源系统。
- (9) 区域水资源系统。
- (10) 其他方面。

四、水资源系统分析的步骤

上面介绍了水资源系统分析的组成,在利用系统分析解决实际水资源规划和管理问题时,步骤如下:

(1) 问题剖析,就是要弄清问题的提出者、决策者和他们的目的,弄清水资源情况、人力、物力、财力、时间等因素的限制,以及进行资料的广泛收集。

(2) 目标的选定,就是要选择系统开发的目标,所选定的目标必须是可以定量或定性度量的,必须在一定时期内都是合理的,必须在一定范围内都是适用的。

(3) 数学模型的建立,就是要对系统本质的东西进行概括和抽象,模型可以是优化的,也可以是模拟的,根据问题的性质来选用。

(4) 数学模型的运算,如果是优化模型,则要利用优化方法来求解。如果是模拟模型,则要用模拟方法来分析,最终给出近似最优的一个或几个方案。

(5) 成果的分析评价,决策者根据自己的经验和意愿,对系统分析的成果进行认真的分析和评价,从总体上权衡利弊得失,进行决策。

(6) 计划实施,按照决策进行有序的具体实施。

以上是系统分析的逻辑过程,但并不是严格的,在分析过程中尚须不断反馈。