



高等学校教材

水资源工程系统分析

河海大学 方乐润



高等学校教材



水资源工程系统分析

河海大学 方乐润

水利电力出版社

TV21
4.5

高等学校教材 水资源工程系统分析

水利电力出版社

高等学校教材
水资源工程系统分析
河海大学 方乐润

*

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 16开本 11.5印张 259千字
1990年6月第一版 1990年6月北京第一次印刷
印数0001—1580册
ISBN 7-120-00888-9/TV·291
定价 2.35 元

内 容 提 要

系统分析是一门新兴的技术科学，它在水资源工程的规划、设计、运行和管理中的应用日益广泛。本书是作者在河海大学校外多次讲授稿的基础上编写的。重点介绍水资源工程中现行常用的系统分析方法——最优化方法和系统模拟技术，对水资源工程中的多目标规划及径流系列的随机模拟等问题的研究现状和发展动向作了阐述，并列举了一些水资源工程中成功地应用系统分析方法的实例。

本书可作为水电类大专院校“水资源工程系统分析”课程的教材或教学参考书，也可供从事水资源开发利用的科研、工程技术和管理人员自学。

前 言

由于社会的进步和经济的发展,人类社会对水的需求愈来愈迫切,对水资源开发利用的期望愈来愈高。从要求上讲,除了满足对水量的要求外,还得考虑水量的空间分布、时间变化以及水质控制、环境保护、生态平衡等需要;从目标上讲,已从单目标、单目的(或单用途)扩大到多目标、多目的;从地域上讲,已从单一河段、单一水库的开发发展到水库群、全流域乃至跨流域的整个水资源工程系统的规划和开发治理。因此,现代水资源工程系统的规模愈来愈庞大,结构愈来愈复杂,服务面愈来愈广阔,涉及的人力、物力、财力及设备相当惊人,规划、设计、施工及运行管理工作空前复杂,系统的决策变量以及可供选择的方案甚多。显然用传统的常规方法难于完美地解决如此庞大而复杂的问题,故必须应用最新的科学技术成就。随着超高速、大容量电子计算机的出现和现代数学理论的发展,一些现代技术和新的工具已经或正在被引进水资源工程的规划、设计和运行过程中。在这些新技术、新工具中,最重要的就是“系统分析”。它能阐明水资源系统的特征,揭示其与子系统间的相互联系,并能预测各种规划、设计、运行方案的效应,以便选择一个最佳方案,达到人们预期的目的。因此系统分析方法在水资源工程中的应用愈来愈广泛。

在国内水资源开发利用中有许多规模庞大的复杂问题极需研究解决,如南水北调的东、中、西3个调水方案的合理选择,流域梯级开发的规模、顺序和调度,干旱地区地表水和地下水的联合运用,水火电系统的经济运行以及环境保护和生态平衡问题等。这些问题应该,而且必须用系统分析的方法加以解决。鉴于此,作为高等水利院校的学生以及从事水资源开发利用的广大工程技术人员,除应对当前水利工程学中新的发展和动向有所了解外,并应熟悉和掌握一些现行的水资源工程系统分析的方法。因此我校从1984年起在有关专业的高年级开设“水资源工程系统分析”公共课,随后又招收和培养“水资源系统工程”专业的硕士研究生。由于当时国内没有这方面的教材,有关的实际资料也十分少见,为满足教学的需要,作者根据多年来搜集和积累的文献资料及个人学习、工作的心得体会,编写成讲义。经过4年来校内外讲授该课程的教学实践,并听取各方面的反映和意见,现对讲义作修改、补充,并增加一些在我国水资源工程中成功地应用系统分析的实例,付印出版。本书重点在于介绍水资源工程中现行常用的系统分析方法,并阐述有关问题的研究现状和发展动向。

本书导论一章对“系统工程学”作了浅释,并阐述了水资源工程的一些基本概念:水资源工程的功能、问题和特点。该章还概述了水资源工程系统分析的内容、方法、步骤以及它的局限性,并对水资源工程经济分析中的若干问题作了简要介绍。

在水资源工程中应用的系统分析方法通常分为两大类:最优化方法和系统模拟技术。第2、3章论述了这两类方法,并对这两类方法的优缺点和适用性作了扼要评述。

水资源工程系统分析中涉及到的一个重要问题是径流系列问题。这里所谓的径流系列系指系统在其经济使用期出现的径流系列,亦即未来的工程运用期的径流系列。因为历史上实测的径流系列往往很短,不能满足水资源工程系统分析的要求,故人工合成的径流系列在水资源工程规划中得到日益广泛的应用。在过去数十年中,在研制人工径流系列的生成技术方面已作了大量的研究工作。本书专辟1章——第4章介绍一些现行的常用方法,以及当前国内外水文学界对径流系列随机生成问题的一些争论。该章还介绍了我国红水河水电梯级优化开发中径流系列随机模拟的研究成果,作为径流系列人工生成方法的应用实例。

由于人口的惊人增长以及人类生活水平的日益提高,整个人类社会对于环境、水质、福利的关注亦与日俱增。近些年来水资源工程的目标已发生了急剧的变化,环境质量、生态平衡和社会福利等问题必须在水资源工程中加以考虑。无疑,这些新目标的加入,开阔了问题的决策范围,较之于过去的工程设计前进了一大步。但多目标也带来了不少新问题,它使规划问题日趋复杂。在第5章中将对此作详尽的讨论。主要介绍多目标规划理论的要点,向量最优化的概念,以及现行的一些多目标规划方法,并列举应用实例。

本书最后一章介绍一个完整的水资源工程规划的研究实例,旨在说明如何应用各种系统分析的方法解决实际问题。

本课程是为有关专业的研究生和高年级学生开设的,因此本书对系统分析中常用的一些数学准备未作进一步阐述。此外,使用本书时,针对不同专业的需要,可适当的增删和选取有关章节的内容。

本书承南京水文水资源研究所华士乾教授审阅,并提出了不少建设性意见,作者对此致以衷心的感谢。

限于作者的学识水平和实践经验,书中可能有欠缺,乃至谬误。作者诚挚地期待有关专家、学者不吝赐教,并热切希望广大读者批评指正。

方 乐 润

1988年3月于河海大学,南京

目 录

前 言

第 1 章 导论	1
§ 1.1 水资源	1
§ 1.2 水资源工程	5
§ 1.3 系统工程浅释	8
§ 1.4 水资源工程系统分析概述	9
§ 1.5 水资源工程经济分析简介	14
第 2 章 最优化方法	23
§ 2.1 数学规划	23
§ 2.2 线性规划	24
§ 2.3 整数规划	41
§ 2.4 动态规划	61
第 3 章 系统模拟技术	79
§ 3.1 概述	79
§ 3.2 模拟模型的分类	81
§ 3.3 系统模拟的一般程序	83
§ 3.4 水资源工程系统模拟实例	84
§ 3.5 系统模拟技术小结	108
§ 3.6 搜索技术	109
第 4 章 径流系列的人工合成	113
§ 4.1 概述	113
§ 4.2 水文时间系列分析简述	113
§ 4.3 随机数的生成	118
§ 4.4 随机模型	121
§ 4.5 红水河径流系列的随机模拟	137
§ 4.6 合成水文学综述	150
第 5 章 水资源工程中的多目标规划问题	153
§ 5.1 概述	153
§ 5.2 目标的鉴别和定量	154
§ 5.3 多目标规划问题	155
§ 5.4 多目标规划方法	160
§ 5.5 多目标规划的应用实例	166
§ 5.6 小结	168
第 6 章 实例研究	169
§ 6.1 问题的提出	189

§ 6.2 模型建立的方法	170
§ 6.3 筛选模型	171
§ 6.4 模拟模型	172
§ 6.5 时序模型	173
§ 6.6 结语	174
参考文献	176

第1章 导 论

§1.1 水资源

1.1.1 水资源的重要性

水是生态系统4大要素——水、空气、土壤和阳光——之一，水资源是自然界万物赖以生存的基本物质。在组成人体的成分中，水就占有2/3。据医学研究，当一个人失水达10%时，将导致死亡，故水与生命息息相关。在整个人类历史上，水是最可宝贵的资源之一。没有水，地球上就没有生命。世界上几乎所有古代文明的策源地都是在沿河流及其冲积平原上建立和发展起来的，如美索不达米亚的底格里斯河和幼发拉底河、埃及的尼罗河、印度的印度河及我国的黄河。人类对水的需要和人类本身的存在一样历史悠久，因此从某种意义上说，整个人类的历史可用人类对水的需求来书写。

水资源具有普遍的社会性，世界各国国民经济的各部门和人民生活都离不开水。科学技术发展到今天，人类虽然已能人工合成胰岛素，化学纤维、人造血管、人工心脏和人工智能等相继出现，但从实用意义上说，却还不能人工造水，因此水资源是没有任何其它物质可替代的资源。世界各国对水资源开发利用和保护都十分重视。随着人口的增长，经济的发展以及人类物质文化生活水平的提高，人类社会对水的需求日益增长，水资源已成为制订经济发展规划的一个重要的制约因素。

水资源具有两重性。水既可兴利，又可为害。不适当的水量和不合格的水质可能酿成非常严重的灾害。例如，洪水会导致工农业设施和人民生命财产的巨大损失；水资源污染造成环境恶化、生态破坏及其它公害。发生水害的主要原因是水资源的自然属性和人类社会对水的需求之间的矛盾所引起的。

1.1.2 我国水资源的自然属性

水资源按其形态可分为固态、液态和气态；按水质可分为淡水和咸水；而按其位置可分为海洋水和陆地水，在陆地水中又分为地表水和地下水。一般讨论的水资源主要指液态的地表水和地下水。

联合国国际水文计划的最新统计资料表明：地球上水的总量为13.86亿 km^3 ，其中海洋水为13.38亿 km^3 ，占96.5%；陆地水为0.48亿 km^3 ，占3.5%。而陆地淡水(0.35亿 km^3)中的68.7%(0.24亿 km^3)又集中在南极和格陵兰的冰川和冰盖层内，这些水资源是难于利用的。因此余下的能为人类利用的陆地淡水资源为数不多，只有0.11亿 km^3 ，约占地球水资源总量的0.8%。

陆地水资源的数量一般可用降水量或径流量表示。我国的年降水量为0.6万 km^3 （年平均降水深为600mm），占全球年降水总量的5%。我国的水资源总量为0.27万 km^3 ，其

中河川径流总量为0.26万km³，占全球总量的5.5%，居世界第六位，仅次于巴西、苏联、加拿大、美国和印尼。但按人均占有量计算，我国为2513m³/人，只有世界人均占有量（10800m³/人）的1/4。若按耕地亩均占有量计算，我国为1754m³/亩，相当于世界平均数（2400m³/亩）的2/3，因此就人均和亩均占有水量而言，我国的水资源并不富裕，特别是由于受季风气候的影响，我国水资源具有地区分布和时程分配不均匀和变率很大的特点，故我国实际可利用的水量要比水资源总量少得多。

1. 我国水资源的地区分布

我国水资源的地区分布很不均匀，大致来讲，东南多、西北少，由东南向西北递减。淮河、秦岭以南地区年降水量大于800mm，年径流深大于300mm，是我国的多水地区。其中浙、闽、粤、桂的有些山区和滇、藏边境的局部地区年降水量达2000mm，台湾的高山区更高达3000~4000mm，是我国水量最多的地区。东北的长白山年降水量也大于800mm，是我国北方仅有的多水地区。我国北部和西部的内蒙、宁、青、新、甘等省区年降水量少于400mm，年径流深少于50mm，是我国的少水地区。只有祁连山、阿尔泰山、天山3个局部地区年降水量大于400mm，其它绝大部分地区少于200mm，也有终年无雨的地区。在上述多水和少水区以外的地区是过渡地带，年降水量在400~800mm之间，年径流深在50~300mm之间。

以上是地表水资源的地区分布，我国地下水资源的地区分布也是南多北少。从全国范围说，地下水的分布和地表水的分布是一致的，即地下水资源的分布也是很不利。

我国水资源的地区分布与我国土地资源的利用、人口分布是很不相称的（参见表1-1），这是我国水资源开发利用中的突出问题之一。

表 1-1 全国各大流域及地区水土资源及人口分布

流域或地区	年径流量 (亿m ³)	耕地面积 (万亩)	人 口 (万)	亩均水量 (m ³ /亩)	人均水量 (m ³ /人)	亩均水量与 全国均值之比	人均水量与全 国均值之比
珠江流域	3070	7808	7411	3932	4142	2.24	1.65
浙 闽	2001	4639	6280	4267	3186	2.43	1.27
长江流域	9793	37053	34580	2643	2832	1.51	1.13
淮河流域	530	18886	12479	281	425	0.16	0.17
黄河流域	560	19561	8167	286	685	0.16	0.27
海河流域	284	15108	8836	188	321	0.11	0.13
辽河流域	151	7054	2833	214	533	0.12	0.21
松花江流域	759	17568	4562	432	1631	0.25	0.65
西 藏	3590	344	183	10436	196174	5.95	78.06
全 国	26144	149000	104000	1754	2513	1.00	1.00

注 表中未包括台湾省的资料。

2. 我国水资源的时程分配

我国水资源的时程分配也很不均匀，无论是年内变化和年际变化都很大。由于受季风

气候的影响,我国大部分地区冬春少雨,夏秋多雨,年降水量和年径流量主要集中在汛期几个月或一两个月内。华北、东北、西北和西南地区6~9月为汛期,集中了全年降水量的70~80%;南方各省的多雨季节一般为4~7月,其降水量占全年的50~60%。对于北方干旱或半干旱地带,就局部地区来说,往往全年降水量基本集中在一、二次历时很短的暴雨过程中。例如1977年8月内蒙古乌审旗一次暴雨约10h,降水量为1400mm,相当于当地常年降水量的3.5倍。我国降水量和径流量年内分配不均,高度集中的程度远超过欧美等国。至于年际变化,一般说,南方多雨地区降水量和径流量的年际变化较小,而北方少雨地区则年际变化较大。黄、淮、海地区和内陆流域降水量和径流量的年际变化最大,年径流的变差系数达0.6~1.0,而南方只有0.2~0.3。年际变化大而年内分配又高度集中是造成黄、淮、海地区旱涝频繁的主要原因。

1.1.3 我国水资源开发利用中的主要问题

鉴于我国水资源的上述自然属性,我国水资源开发利用中的主要问题如下。

1. 水资源分布不均

水资源分布不均,水旱灾害频繁,这是我国水资源开发利用的最大弱点,也是我国国民经济发展的一个制约因素。水资源地区分布不均,造成不少地区严重缺水,影响这些地区的工农业生产和人民生活,而水资源时程分配的过分集中,造成汛期大量弃水,非汛期缺水,总水量不能充分利用。集中程度越高,弃水越多,可用水量占水资源总量的比例越小,并使水旱灾害频繁发生。据初步估算,1950~1979年这30年期间,全国粮食产量受各类自然灾害影响,每年要平均减产2000亿斤,其中90%是由于洪、涝、旱灾害所致。

2. 水土资源组合不相称

水土资源组合不相称,降水变率又大,这是我国北方缺水的主要原因。在湿润多雨的南方(长江及其以南地区),耕地仅占全国的1/3,人口占一半多,而水资源却占82%。然而长江以北地区,耕地占全国的2/3,水资源只占18%。海河、滦河和淮河流域最为突出,人口和耕地均约占全国的1/4,水量只占全国的4%,地多水少矛盾十分尖锐。

3. 供需矛盾突出

工农业需水增长很快,与水资源工程建设不相适应,这是供需矛盾突出的一个重要原因。建国30多年来,我国用水总量增长了近4倍,其中农业用水增长了3倍,工业用水增长11倍,城市生活用水增长7倍,增长速度是比较快的。尽管建国以来,兴修了各种蓄水工程,大小水库86000余座,为国民经济各部门每年提供了4620亿m³的水量(约占全国年径流量的17%),但其中大中型水库的供水只占20%,小型水库塘坝的供水占25%,河道引水却占46%,地下水占9%。因此我国水资源的调节程度不高,供水能力的保证率很低。目前全国已有154个城市发生不同程度的缺水,日缺水量已达880万t,工农业之间、地区之间、各用水部门之间的用水矛盾非常尖锐,今后随着经济建设的发展,供需矛盾将更加突出。

4. 缺乏科学管理

我国较长时间对水资源的综合利用重视不够,缺乏全面的、统一的科学管理,水资源

浪费惊人，人为地加剧了水资源的紧张。

农业用水由于土地不平整，水利工程不配套，灌溉技术落后，渠道渗漏严重，渠系的有效利用系数只有40~50%。工业用水则由于管理不善，节水措施不力，水的循环利用率也很低，平均只有30%左右。加之一些政策上的问题，如工农业用水水费标准过低，有些地区甚至无偿供水，因此我国工农业和城市用水的浪费十分惊人。

5. 水资源污染严重

随着经济的发展和人民生活水平的提高，我国水资源受到工农业生产排放的“三废”和城市生活污水、垃圾以及酸雨的污染日趋严重。水体被污染后会改变水体的正常功能，降低水的利用价值，破坏水生生物的生长和繁衍，影响人类的生活和健康，并减少可利用的水资源，增加取水费用和水处理费用，因而加剧了水资源的紧张。

据有关部门的粗略统计，目前我国淡水资源已有1/4受到污染。1983年全国每天平均从广大城乡生产和生活中排放大约3500t污水，其中工农业生产废水占78%，生活污水占22%，然而当时全国286个城市中，只有18个城市有污水处理厂（场）41座，日处理污水能力仅占城市污水排放总量的2~3%。由于极大部分排放的工农业废水未经处理，致使全国很多河流域受到严重污染。据调查，全国27条主要河流都已受污染，其中严重的有17条。以长江水系为例，共有3万多个污染源，每天排放的工业废水达1800万t，生活污水2600万t；从上游的宜宾至上海共21个江段，已有18个江段受到严重污染。由于长江流量大，污染物被稀释，平均水质尚好，但在渡口、重庆、武汉、南京和上海等日排污量达100万t以上的大城市附近，已出现明显的岸边污染带。

由于地下水 and 地表水相互补给，地表水的日益污染势必影响地下水的水质，这在地表水较少的北方干旱及半干旱地区尤其严重。加之大量施用化肥和农药，不合理的污水灌溉，加剧了地下水资源的污染。目前，我国农田氮肥的年施用量已高达255kg/公顷，分别为美、日及世界平均施用量的5.3倍、1.8倍和2.7倍。且我国的氮素利用率很低，只有27~45%，大量氮素流失，造成地下水的严重污染。

除此之外，我国水资源还受到酸雨的污染。据23个省、市、自治区的初步监测资料表明，已有20个省市出现了酸雨。特别是一些重工业城市，酸雨是造成水资源污染的重要原因之一。我国酸雨面积不但分布广，而且酸性很强，酸雨的频率越来越高。

由上述可知，我国水资源的污染问题已相当严重，在水资源开发利用中，应加强污水处理和水源保护问题的研究。

据有关部门预测，到2000年我国工农业和城镇生活用水总量达6375亿 m^3 。从总量来说，这并不算多，增长速度也并不算高。根据1978~1979年各省资料初步估算，我国实际毛用水总量约为4767亿 m^3 （包括重复利用水量）。其中地表水为4348亿 m^3 ，占91.2%；地下水为419亿 m^3 ，占8.8%。用水的组成如下：农业用水4195亿 m^3 ，占88%；工业和城市生活用水量为572亿 m^3 ，占12%。若用水年平均增长率为1.7%，到2000年时，年人均用水量为521 m^3 /人（1980年为491 m^3 /人）。这与世界各国相比也是较低的，如美国为2340 m^3 /人（1975年），苏联为930 m^3 /人（1969年），印度为600 m^3 /人（1969年）等。从我国水资源总量来说，利用量也仅占24%，因此应该说也是可以满足需求的。但正如前

述,考虑到我国目前的年供水能力较低,且我国水土资源的分布极不相称,时程变化又大,又鉴于我国水资源浪费和污染的现状,可利用的水资源量有限,故今后我国水资源开发利用的任务还是十分艰巨的。

§1.2 水资源工程

1.2.1 任务

人类社会对水的需求,在空间、时间以及数量、质量等方面是有特定要求的。而地球上水在空间上的分布是极不均匀的,各地的水情随时间而发生很大变化。随着经济的发展,人类对水体的严重污染,使得许多地区的水质不适于应用。因此自然界的水在空间、时间、数量和质量上常常与人类社会的需求存在着很大的供需矛盾。解决这一矛盾,以满足人类社会在特定地区和时间对一定水质和水量的需求,这就是水资源工程的任务。

如果水资源的分布和它的性质可用一个矩阵表示,则水资源的开发利用过程可以用数学语言表述。设自然界天然存在的水资源的特性可用 S 矩阵描述

$$S = \begin{bmatrix} L \\ T \\ Q \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

式中 L ——3维的位置向量,用以确定水资源存在的特定范围;

T ——时间向量,由水资源的定量出现在时间上的概率分布的一些统计参数组成。

如周期性径流的均值、标准差、变差系数、偏态系数以及系列相关系数等;

Q ——水质向量,它包括许多与水质有关的元素,如水中的溶解氧、生物矿物质、重金属含量、热量等。

水资源开发利用的目标是要把上述的初始(或称自然)状态矩阵 S 转换成另一个符合开发目标的期望(或称目标)状态矩阵 S^* ,该矩阵的元素向量 L^* 、 T^* 和 Q^* 分别为向量 L 、 T 和 Q 的期望值(或称目标值)。即

$$S^* = \begin{bmatrix} L^* \\ T^* \\ Q^* \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

S 和 S^* 的转换关系表示如下

$$S^* = \theta S \quad (1.3)$$

式中的转换矩阵 θ 实际上就是一个水资源工程系统,它应能合理而有效地开发、利用和控制水资源,以达到人们所预期的目标。

矩阵 S^* 和 θ 的确定,即方程(1.3)的求解和分析是现代水资源工程研究的主要课题。

从上述的讨论可清楚地看到这里所讲的水资源工程和通常所谓的水利工程并不完全是一回事。后者系指土木工程中一个专门的分支,而前者则涉及水资源系统的综合开发、利用、运行、组织管理问题。后者是前者的一部分,前者的含义较后者远为广泛、深刻,两者不可混为一谈。

1.2.2 问题

水资源系统开发利用所涉及的主要问题可归纳为以下4类。

1. 规划问题

确定水资源的开发方式、程度及其服务面。

2. 设计问题

为了最大限度地缩小在空间、时间、水量和水质方面自然供水与实际需求之间的差别，合理地确定一个水资源系统各部件（工程）的最优规模（尺寸、容量、能力等）。

3. 施工问题

决定一个水资源系统中各部件最优的施工时序和施工组织管理，以保证整个系统取得最大的效益。

4. 运行、维护及更新问题

在系统各部件的最优规模确定后，解决系统如何运行的问题，亦即确定系统的最优运行准则。

迄今，上述问题中有一些已得到满意解决，但还有不少问题有待进一步研究。

1.2.3 特点

1. 多学科性

水资源工程的范畴涉及到自然科学、社会科学和工程应用科学，因此水资源工程问题的求解势必要应用自然科学和社会科学的许多分支学科的知识。问题的多学科性是水资源工程的特点之一。下列一些传统学科形成了现代水资源工程的基础：自然科学中的数学、物理、化学、地质学、水文学、气象学；社会科学中的经济学、社会学、法学、公共管理科学；工程应用科学中的土木（特别是水利、卫生）工程、农业工程、化学工程和环境工程等。因此，在解决和分析水资源问题的过程中，需要由各方面的专家、学者以及专业技术人员组成的多学科研究组来解决。

2. 复杂性

现代水资源工程系统几乎总是有许多部件（工程）组成，有时把这些部件称为“硬件”，诸如水坝、水库、溢洪道、渠道、泵站、水电厂、船闸、堤防、污水处理设施及旅游设施等。这些工程服务于不同的用户（中央或地方政府，全民的或集体的或个人的企事业单位），并且具有多方面的目的（用途），诸如防洪、灌溉、水力发电、航运、水生物养殖、城市生活和工业用水、环境净化和旅游等。每个用户都有它自己的利益和用水要求，而且所有用户往往在用水上既有矛盾又相互依存。在一年中某些时候，用户间在用水上相互独立，而在另些时候又相互矛盾，这是因为各用户对水的需求本身在一年中各季节变化很大。因此现代水资源工程本身是一个多部件、多变量、多用户和多决策的复杂系统，问题的高度复杂性构成现代水资源工程的又一个重要特点。以系统中的综合利用水库为例，在洪水和作物生长季节，水库上游航运、旅游、水库养殖等部门，希望水库能维持较高的水位，尽量少向下游泄水。但从防洪的角度看，为确保洪水期水库的安全，应预留防洪库容。

从发电和灌溉的需要出发,也希望下泄更多的水量。这样,航运、旅游、水库养殖的需要与防洪、发电、灌溉的要求就有矛盾,而且发电与灌溉在用水的分配上也存在着矛盾。而这些矛盾只有从整个系统的观点考虑,才能很好地协调和解决。

3. 随机性和非线性

通常作为水资源系统输入的径流系列的随机性是众所周知的。系统输入的随机性给问题的求解增加了复杂性和难度。虽然随机水文学的发展为径流系列的随机生成提供了强有力的工具,但人工径流系列的随机生成在理论上和实际应用上均有不少问题有待解决。因此合适的随机模型的研究仍是水资源研究中有价值的课题。

水资源系统中存在的很多约束和函数关系都可能都是非线性的。在某些情况下,法律的和社会的约束会给问题增添极大的复杂性。水资源系统各部件间非线性函数关系的相互作用,使本来复杂的系统更为复杂。

4. 多目标性

水资源是国民经济许多部门所必需的,并直接影响整个国计民生,因此水资源的开发利用从本质上和实用上都具有多目标的特点。除传统的经济目标外,环境质量和社会福利被引进作为水资源系统分析的新目标。只有这样才能正确地反映水资源工程真正的社会价值。多目标的考虑,使规划成为一个向量最优化问题,这也是目前尚未解决的问题。

综上所述,现代水资源系统是一个极其复杂的系统,采用现行的传统方法难于解决问题。随着高速电子计算机的出现和近代数学的进展,在近几十年中,人们一直在寻求解决问题的新工具和新方法,其中最重要的就是“系统分析”。下面将对水资源工程系统分析的基本概念、方法、步骤以及有关问题作简要说明。首先对系统工程作一浅释。

§1.3 系统工程浅释

人们在处理和解决一个复杂问题时所采用的传统方法是,把注意力先集中于问题的某一特定部分,并将其与周围环境孤立起来加以研究,以取得对该部分的基本物理过程的认识,然后类同地处理问题的其它部分,直至整个问题的解决。过去用于解决水资源规划问题的方法正是这种通常称之为边际(或增量)分析的常规方法。但正如前述,现代的多用户、多目的的水资源系统是十分庞大而极其复杂的,待定的决策变量很多,规划、设计、运行方案也很多。因此用常规方法寻优显然是不合适的,有时甚至是不可能的。在此情况下,采用可靠而高效的方案比较分析技术是十分必需的。这种技术应能允许将一个问题的所有组成部分及它们与周围环境的相互作用视为一个整体(或系统)加以考虑和分析研究,这就是人们常说的用系统观点解决复杂问题的“系统分析”技术。在许多文献中,也有称之为“系统工程”、“系统方法”和“管理科学”等。尽管说法不一,但基本思想是一致的,即从整体出发,运用一系列的科学方法,寻求系统的最优化。

1.3.1 系统

系统工程以系统为研究对象。所谓系统,就是指有组织、有秩序。显然,混乱、无秩

序是它的反义词。在日常生活中,系统的概念应用十分普遍:一只电风扇,一台收录机都是一个系统;一个农场,一个工厂,一个学校也都是一个系统;一个国家的工业、农业、商业乃至整个国家,全世界都可以认为是一个系统,只是规模大小不同而已。从系统概念适用对象的广泛性和普遍性也就不难理解系统工程的高度概括性和明显的实用性。

现实的系统可大致分为两大类:

1) 自然系统——山、海、河流、矿物、动植物以及一切自然界固有的自然物的集合体。如宇宙系统、水循环系统及生物系统就是典型的自然系统。自然系统的动作虽然也都合乎某种目的(所谓“自在目的”),但没有“自为目的”。从这种意义上说,自然系统是无目的系统。

2) 人工系统——为达到人类的特定目的,人为地产生的各种部件的集合体。显然,人工系统是有目的系统。各种工程系统(如水资源工程系统)、管理系统及社会系统等都是人工系统。当然,这里的人工系统也包括由人工系统与自然系统组合而成的复合系统。

系统的分类可有各种不同的方式,这里谈的是其中的一种方式。当然也可以从另外的角度对系统进行分类,如按系统本身的物理结构和数学性质分类,可有线性系统和非线性系统;定常系统和时变系统;连续系统和离散系统等。对此,这里不再一一赘述。

“系统”一词可概括定义为:系统是由相互关联、相互制约的部件或元素构成的集合体,有一定的目的,并执行特定的功能。系统工程中所研究的系统是有目的的人工系统,而且通常指的是大规模的人工系统,这种系统的普遍特征是具有集合性、相关性、目的性、复杂性、不确定性和适应性。

1.3.2 系统工程学

“系统工程学”这个词是英文“System Engineering”的汉译名,原文是由“System”(系统)和“Engineering”(工程)两词组成。前面对系统工程学中的“系统”一词作了说明。至于“工程”一词,学工程的人是很熟悉的,如土木工程、水利工程、卫生工程、环境工程等,不过这是一般意义上的工程,即指“造物”的工作。系统工程学中的工程,其范围远远越过一般的工程,除了自然科学领域的工程外,还包括社会科学范畴的“工程”。其含义也远为广泛,多指为完成某项任务提供决策、计划、方案、方法或工作顺序,是一种广义的工程学。这里更强调人对客观规律的巧妙利用,正因为此,系统工程学被誉为“科学的科学”、“技术的技术”,也有人称其为方法学或意图学。通俗点说,系统工程的本质就是从系统的观点出发,应用近代数学的方法和电子计算机技术,研究和分析一般系统的规划、设计、组织、管理、运行和评价等问题,以把要办的事办得更好。从这种意义上说,系统工程学就是办事的科学,或称理事科学。

由于系统工程学是一门新兴的跨学科的边缘科学,它在理论上还不够完善,实践也不多。它正处于发展之中,人们对它的认识很不一致,因此迄今还没有1个公认的确切定义。但系统工程作为办事和解决问题的一种思想,自古有之,人皆有之。在我国历史上,举世闻名的都江堰水利工程是公元前250年由李冰父子主持修建的。工程的目的是利用岷江的水开发和灌溉川西平原的农田。该工程包括鱼咀分水工程、飞沙堰分洪排沙工程和宝瓶口引水工程等3大主体工程 and 130多个附属的配套渠堰设施,构成了一个完整的水资源工程系统。

各工程之间的相互关系处理得恰到好处,形成一个协调运转的工程整体。这项工程虽距今已有2000余年,但仍在发挥巨大的效益,成为我国目前最大的水利灌溉区之一。该工程的实践,用今天的观点分析是完全符合系统工程学思想的,堪称我国古代一项杰出的、完整的大型水利建设系统工程。

此外,人们在日常生活和工作中也早就应用了系统工程学最基本的思想,而且十分普遍和广泛。人们办一件事,解决一个问题,总有一定的预期目的,也总有多种多样的方法与途径,但总是力图寻找最佳的途径达到自己预期的目的,而这种最优解决问题的思想却正是系统工程最基本的精神所在。其实,人们在实践中已在不同程度上自觉或不自觉地应用了系统工程的思想,只不过没有提高到理论的高度而已。在水资源开发利用中经常涉及的统筹规划、综合利用、电力系统中水火电的配置、流域的梯级开发、防洪工程的调度、平原地区的旱涝碱的综合治理、地面水和地下水的联合运用等问题也都或多或少地运用了系统工程的概念和思想。当然,系统工程学作为一门科学,是在控制论、信息论、运筹学和管理学等近代科学新成就和现代电子计算机技术的基础上发展起来的,是一门新兴科学。它的发展历程证明了它的重要意义和强大生命力。它的发展前景广阔,应用范围日益扩大,必将在人类改造世界和改造自然的过程中起着愈来愈大的作用。

§1.4 水资源工程系统分析概述

系统工程学作为一门新兴的边缘科学还比较年轻,正处于发展之中,而系统分析在水资源工程中的应用就更迟些。它始于50年代美国的哈佛水规划(Harvard Water Program, 1955~1960)。此后,在此领域蓬勃地进行了大量的研究工作和工程实践,如哥伦比亚河流规划、巴西河流规划、旧金山海湾及三角洲的开发研究、加拿大安大略北部河流的水电开发计划、波兰维斯杜拉河水资源开发利用、埃及阿斯旺水库灌溉与发电的综合利用以及阿根廷科罗拉多河流域规划等都是应用系统分析于水资源开发利用的实例。当然,系统分析在水资源工程中的应用还正在发展,而且肯定会与日俱增的。

1.4.1 系统模型

1. 系统模型的重要性

系统模型是系统分析中的一个十分重要的手段。首先,当今的真实系统,尤其是大系统,都是十分庞大而又复杂的,对系统特性的探讨和研究必须通过系统的模型(对真实系统的某种定性和定量之写照)来阐明真实系统的特性及其变化规律。在规划系统时,需要从众多的替代方案中选择最优的开发方案;在设计系统时,要对选定的方案和系统的最优参数进行评价;在系统运行时,要确定系统的最优运行策略。由于无法得到正在规划、设计或建成的现实水资源工程系统的原型,上述的分析研究工作只能借助于系统模型。其次,鉴于现代水资源工程的多学科性,系统模型(特别是抽象的数学模型)成为来自不同学科的专家、学者和工程技术人员的语言媒介。更重要的是,利用系统模型在电子计算机上可估算所有可能的工程结构方案、各种运行和分配策略、未来入流、投资以及各种约束