

774606

61

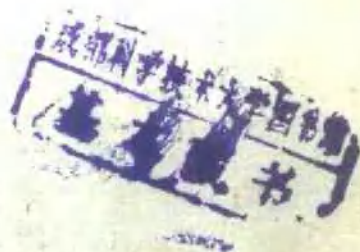
4444: 1

# 水资源系统分析

华 士 乾



SYSTEM ANALYSIS  
OF  
WATER RESOURCES



山西省水利学会  
山西省引黄办公室

44: 1

# 自序

水资源系统分析是水资源开发利用中一门新兴的学科,它涉及的领域已不限于自然科学与工程技术科学,且与社会科学和环境科学等发生了联系,成为各有关学科的高度综合的产物。水资源系统分析不仅要提出在水资源开发中对国民经济发展产生最大效益的工程安排,同时要求考虑到人类本身生存的空间有较优的环境,并尽可能避免或减轻由水带来的自然灾害(如洪水、干旱等)损失以维持社会生产和生活的持续稳定的发展,所有这些,是水资源系统分析的目的所在。水资源系统分析方法就是将系统概念和数学中的运筹学结合起来,通过对实际流域系统的模型化和最优化,求得满足各种约束条件下的目标函数的最优值。

1980年夏,我应中国科学院地理研究所名誉所长黄秉维教授之委托,陪同来访的国际水资源协会(IWRA)主席、美国伊利诺大学美籍华裔教授周文德在我国各地讲学,他一路上和我讨论了许多有关水资源系统分析的问题,介绍了他与一位数学家合作完成的“离散微分动态规划”(D、D、D、P),回国后他又赠给我大量有关水资源系统分析的书籍和论文,使我能以较少的力量进入一个新的学科知识领域,虽然他已不幸于1981年7月因心脏病突发逝世,但我始终对他的精辟见解和帮助难以忘怀。

在本次讲课中,为了考虑解决部份初次接触本课程者便于接受,也参阅了国内部份院校如武汉水利电力学院、清华大学等有关的讲义,在此一并致谢。

本讲稿共分十章,第一章是介绍水资源系统分析发展简史、基本概念、水资源系统开发的实质和问题以及模型化、最优化技术的应用原理等。第二章是介绍数学上常用的最优化技术和经典最优化方法。其中一些方法仍可结合在非线性规划及模拟模型中应用。第三、四章都是讲线性规划,之所以将整数规划单列一章是想强调其在水资源规划中特别是工程的筛选和开发程序上的重要性。第五章非线性规划因为过于繁复,在实际水资源系统中应用甚少,故只是强调了对偶问题的重要性及分段线性化方法。第六章动态规划讲得稍多,因为水资源系统的规划和运行都是序列决策过程的问题,而动态规划是最适宜于分析这类过程的方法。第七章水资源系统模拟模型是近十余年来解决复杂水资源系统分析行之有效的方法,为了解决大系统问题,又加上了第九章系统分解多级最优化的知识,以使学者能对实际流域的水资源系统规划、设计和管理、运行有所作为。第八章水资源工程经济分析是对一些过去和经济接触很少的工程师提供的,对于一个综合利用工程的目标函数一般常用可以公度的经济目标函数如净效益极大化或投资费用极小化来表示;因此,一些经济学范畴的重要概念如“时间价值”、“利率”和“贴现”、

“基准年”等是很必要的知识。第十章是介绍由于考虑来水的随机性和不重复性而用到的人工生成径流系列的方法，在这方面虽然国内外学者都还有不同的看法，且用与不用这些人工系列还可以根据实测系列长短及规划的工程所在地的气候特征慎重考虑，但作为一种方法介绍还是可以的。

我本人对水资源系统分析工作做得很少，1981年和我的同事们合作完成了水电部科技司下达的任务“长江三峡枢纽分期开发方案论证和综合经济效益分析 研究报告”。1984年接受了国家科委下达的“北京市水资源系统分析及其数学模型的研究”，目前阶段成果已通过鉴定。在这两项工作中，我只是提出了模型化和最优化的方法的初步设想以及对成果的合理性分析，而我的同事们都做了许多实实在在的贡献。

由于成稿过于仓促，错误之处在所不免，尚请读者鉴谅和指正。

华士乾

1986年2月

## 前 言

一九八五年三月，山西省水利学会、山西省引黄办公室、山西省水资源委员会办公室和山西省水文总站邀请了中国水利学会理事、中国水力发电工程学会理事、前水利电力部南京水文、水资源研究所副所长、南京大学长期聘任教授、中国科学院地理研究所兼任研究员、河海大学兼任教授华士乾教授来太原讲授“水资源系统分析”。由于系统工程是近三十多年来才迅速发展起来的新学科，而系统工程在水资源工程中的应用更晚一些，是近二十多年来新发展的领域。在国内，这方面的工作才开始不久，为了初步了解水资源系统分析的基本内容及方法，虽由于受到讲课时间的限制，本讲稿的篇幅不大，但却已涉及到系统分析的大部份领域，这对今后有志于从事水资源系统分析的同志可以起到引导作用；如能抽时间阅读所列的参考文献，尚可进一步了解一些论文及专著涉及的内容。目前，华士乾教授正负责进行北京市水资源系统分析及其数学模型的研究，过去曾较长时间做过流域水利规划实际工作，能以使本课程内容深入浅出，抓住基本思路，相信它将在推广应用水资源系统分析方法于水资源工程中起到良好的作用。

山西省水利学会

山西省引黄办公室

一九八六年二月

# 水资源系统分析目录

|            |                                      |        |
|------------|--------------------------------------|--------|
| <b>第一章</b> | <b>水资源系统分析综论</b> .....               | ( 1 )  |
| 一、         | 水资源系统分析发展简史.....                     | ( 1 )  |
| 二、         | 水资源系统分析的一般概念.....                    | ( 2 )  |
| 三、         | 水资源系统开发中的规划、设计和管理运行的实质和主要问题.....     | ( 3 )  |
| 四、         | 水资源系统分析与常规的水利规划的区别.....              | ( 6 )  |
| 五、         | 水资源系统分析的几个阶段.....                    | ( 6 )  |
| 六、         | 应用模型化和最优化技术.....                     | ( 7 )  |
| <b>第二章</b> | <b>水资源系统分析中常用的优化技术和经典最优化方法</b> ..... | ( 11 ) |
| 一、         | 引言.....                              | ( 11 ) |
| 二、         | 最优化问题数学模型的建立.....                    | ( 12 ) |
| 三、         | 0.618法.....                          | ( 13 ) |
| 四、         | 拉格朗日乘子法.....                         | ( 15 ) |
| 五、         | 最优梯度法.....                           | ( 18 ) |
| <b>第三章</b> | <b>线性规划</b> .....                    | ( 23 ) |
| 一、         | 线性规划的数学模型.....                       | ( 23 ) |
| 二、         | 线性规划的求解方法.....                       | ( 26 ) |
| 1、         | 图解法.....                             | ( 26 ) |
| 2、         | 单纯形法.....                            | ( 28 ) |
| 三、         | 线性规划的对偶问题.....                       | ( 32 ) |
| 四、         | 实际水资源问题中的约束和目标函数的选定.....             | ( 34 ) |
| <b>第四章</b> | <b>整数规划</b> .....                    | ( 40 ) |
| 一、         | 割平面法.....                            | ( 41 ) |
| 二、         | 分枝定界法.....                           | ( 43 ) |
| 三、         | 0-1型整数规划.....                        | ( 45 ) |
| <b>第五章</b> | <b>非线性规划</b> .....                   | ( 50 ) |
| 一、         | 库恩—图克定理—不等式约束的最优化理论.....             | ( 51 ) |
| 二、         | 非线性规划问题的线性化方法.....                   | ( 61 ) |
| 1、         | 变量分割法.....                           | ( 61 ) |
| 2、         | 可分规划法.....                           | ( 64 ) |

|                          |         |
|--------------------------|---------|
| 三、利用库恩——图克条件解非线性问题·····  | ( 64 )  |
| 第六章    动态规划·····         | ( 67 )  |
| 一、引言·····                | ( 67 )  |
| 二、动态规划的基本概念和若干常用的术语····· | ( 68 )  |
| 三、动态规划的基本特征·····         | ( 70 )  |
| 四、动态规划的基本函数方程及递推程序·····  | ( 75 )  |
| 五、动态规划的求解方法·····         | ( 81 )  |
| 1、离散整数算法或列表算法·····       | ( 81 )  |
| 2、逐次逼近法·····             | ( 85 )  |
| 3、增量动态规划法·····           | ( 86 )  |
| 第七章    水资源系统的模拟模型·····   | ( 92 )  |
| 一、模拟模型概述·····            | ( 92 )  |
| 二、模拟的河流节点系统和各种约束·····    | ( 93 )  |
| 三、目标函数·····              | ( 97 )  |
| 四、输入的水文系列·····           | ( 98 )  |
| 五、模拟模型的优化·····           | ( 99 )  |
| 1、系统化选样·····             | ( 99 )  |
| ( 1 ) 格点法·····           | ( 99 )  |
| ( 2 ) 单因子法·····          | ( 99 )  |
| ( 3 ) 增量分析和边际分析法·····    | ( 100 ) |
| 2、随机选样法·····             | ( 100 ) |
| 六、结语·····                | ( 100 ) |
| 第八章    水资源工程经济分析·····    | ( 102 ) |
| 一、经济分析的意义、方法和程序·····     | ( 102 ) |
| 二、工程费用和效益的经济指标·····      | ( 103 ) |
| 1、工程费用·····              | ( 103 ) |
| 2、工程效益·····              | ( 104 ) |
| 三、效益费用的生产理论与优化·····      | ( 105 ) |
| 1、投资效果的静态分析法·····        | ( 106 ) |
| 2、投资效果的动态分析法·····        | ( 107 ) |
| ( 1 ) 动态分析的基本概念·····     | ( 107 ) |
| ( 2 ) 现值法·····           | ( 108 ) |
| ( 3 ) 效益费用比值法·····       | ( 109 ) |
| 四、敏感性测试与分析·····          | ( 110 ) |
| 第九章    系统分解多级最优化·····    | ( 113 ) |
| 一、分解多级最优化的特征·····        | ( 113 ) |
| 二、一般谱系结构·····            | ( 114 ) |

|                                        |                |
|----------------------------------------|----------------|
| 三、谱系模型化.....                           | ( 115 )        |
| 四、水资源系统的重叠分解.....                      | ( 116 )        |
| 五、重叠分解的协调.....                         | ( 118 )        |
| 六、可行分解和不可行分解举例.....                    | ( 120 )        |
| <b>第十章 人工生成径流系列.....</b>               | <b>( 129 )</b> |
| 一、水文时间系列的主要特性.....                     | ( 129 )        |
| 二、水文时间序列的相依性.....                      | ( 130 )        |
| 三、随机数的生成.....                          | ( 132 )        |
| 四、随机模型.....                            | ( 135 )        |
| 1、自回归模型 $[AR(P)]$ .....                | ( 136 )        |
| 2、自回归滑动平均模型 $[ARMA(P, q)]$ .....       | ( 138 )        |
| 3、综合自回归滑动平均模型 $[ARIMA(P, d, q)]$ ..... | ( 140 )        |
| 五、结语.....                              | ( 142 )        |

# 水资源系统分析

## 第一章 水资源系统分析综论

二十世纪四十年代以来,自然科学与应用科学都获得了高速发展。新的学科不断涌现,学科之间的相互交错、相互渗透更加扩大,使自然科学、社会科学、工程技术科学与环境科学等发生了密切联系,复杂的水资源系统分析,就是各有关学科高度综合的产物。对于复杂的系统,为了实现对其进行有效的控制,我们已不能单纯依靠去弄清楚系统中某一事物的运动规律,或是停留在对系统的经验定性描述上,而是要定量地、精确地去揭示整个系统的运动规律。也就是说,分析一个水资源系统,不仅要发挥水资源在国民经济发展中的最大效益,同时要考虑人类生活的最优环境,维持社会稳定,减少自然灾害(洪水、干旱等)的损失,所有这些问题,都是系统分析必须全面考虑的。

### 一、水资源系统分析发展简史

在四十年代以后,随着电子计算机的诞生与广泛应用,带动了科学技术的发展。

在水文学和水力学领域,发展了流域水文模型、河流及洪泛平原水力学、河流及水库泥沙输送及水质模型,多目标水库群优化调度及随机水文系列生成模型等,为水资源系统分析提供了自然科学方面的新成就,同时,由于社会的生产力和人民生活水平的不断提高,对供水(包括水量和水质)的要求日益增长,而由于污水排放引起的水质污染却日趋严重,因此,对一个流域水资源系统要求(1)做到把有限的水资源在国民经济发展中发挥最大的经济效益(2)要保持甚至提高现在人类生存空间的环境质量。

(3)要尽量减少自然灾害(洪、涝、旱、淤……等)的损失,维持社会安定等,在这些客观要求的推动下,借助电子计算机高效率的信息处理和运算能力,将系统概念与数学中的运筹学结合起来,水资源系统分析这门学科也就应运而生。

1950年,在美国总统所属的水资源政策委员会报告中,最早综合论述了水资源的开发、利用和保护等问题,引起了美国各大学的兴趣。1955年哈佛大学开始制订水资源大纲,要为现代水资源工程的规划、设计和管理运用研究一种方法学,同时,已认识到水资源工程不仅涉及自然科学(如水文学、地貌学等)及工程技术科学(如水工结构学、土力学等),而且涉及社会科学(如经济学及政策策略等),因此,方法学的目的是以经济效益为目标,通过筛选和详细分析,得出最优的水资源系统工程规划、设计和管理运用的分析技术,即数学规划分析和数学模拟模型。大约在相同的时间,加利福尼亚州立大学也开始研究水资源系统的优化问题,R、E、Bellman最早提出了将动态规划应用于多目标水库群系统分析。1959年科罗拉多州立大学组织了美国西部地区水资源学术讨论会,讨论水资源的开发、利用问题,重点是研究需水量的估算及用什么途径满足需水的

不同要求等。1961年该校又开了一次学术讨论会，重点是研究水、土资源的综合利用问题。1963年再次开会，会上再次研究水资源的开发和利用，并提出了水资源保护问题；1965年会上则讨论了水资源的经济效益分析、水管理、水资源评价，水分配中的政治和行政管理问题；还有水文和工程的关系及有关科研计划等。

经过将近卅年的发展，水资源系统分析已在若干较大流域得到了应用，并取得了较好的效益；同时，水资源必须与其他自然资源进行综合规划的观点，目前已经成为各国发展国民经济必须遵循的原则。

## 二、水资源系统分析的一般概念

水资源和其他物质一样，是可以为人类提供一定数量、质量和能量的可再生的一种天然资源。但是，由于天然水资源在空间和时间上的多变性和供需之间的不协调一致，只有通过人类的开发活动，将天然水资源转化为可利用的经济水资源，才能使水为人类造福。

现代的水资源系统开发利用与过去传统的水利工作相比，无论是开发的规模及内容方面已大不相同，而且涉及的范围也已不限于自然科学与工程技术科学的范畴，而涉及到社会、政治、经济、福利等领域，也就是说不仅仅是水利开发问题，还涉及到国土经济，生态环境和旅游事业等领域，因而已成为一种十分庞大而复杂的系统问题。

所谓系统就是由若干个既可以相互区别又有相互联系和相互作用的元素所组成，且处于一定的外部环境之中，又是为实现同一目标而存在的有机体。任何系统必须有两部分组成，一是系统本身，另一是系统所处的环境或称系统界限。系统本身又由三个单元部分组成，即（1）系统输入；（2）系统运用（Operation）亦称系统转换或系统处理；（3）系统输出。任一系统在某个特定的环境下，对输入进行转换产生输出，这就是系统的功能和目的。一个大的系统总是有主系统和分（子）系统之分，而分（子）系统又是主系统的必要的组成部份。所以主系统可分解为若干子系统，而子系统也可集合为一个完整的系统。就水资源系统来说，一个流域就是一个系统，其若干支流为若干个子系统，而在子系统内修建的水库、及引水工程等则视为具有特殊功能的系统中的模块。在一定的时间内，它承受着可控制的或不可控制的降雨、入流的水量和能量的输入，作用于系统中有关联的单元，产生出相应水量、电能及其经济效益的输出，这就是系统所具有的功能。输出可以反作用于输入，这就是系统的反馈作用。例如上游水库的输出不能满足下游的需水时，即可反馈到水库运算模块，重新决策而调整输出。

如果把系统的三个单元用数学关系来表示，则

$$Z(t) = Y(t) \psi X(t) \quad (1-1)$$

上式中， $Y(t)$ 是表示系统运用（Operation）特征的数学函数； $\psi$ 为函数 $Y(t)$ 与输入函数 $X(t)$ 在某种方式中产生输出函数 $Z(t)$ 的指示符号。问题的关键是系统运用特征函数 $Y(t)$ ，如果 $Y(t)$ 能以任何数学表达式描述出来，如建立了某种数学模型，那末就可以从输入预测输出，也可以根据输出的要求反求相应的输入，例如从需水确定蓄水工程的库容等。然而，在大多数水资源系统分析中，系统运用的程序的序列决策往往是在随机的（纯随机和拟随机的）来水条件下为实现规定的输出目标进行

的寻求系统运用策略最优化的问题，今后遇到的大多数水资源系统分析问题都属于这类问题。

水资源系统分析的目标，不管是以“可利用水量”、“发电能量”或对国民经济产生的“净效益”为目标，其最终的体现都是经济来衡量的，有些不能定量的无形效益如环境质量，也可说是属于经济问题范畴。为开发水资源而产生的上、下游矛盾（地方效益分配，包括防灾、兴利、就业及社会安定等），国外有用所谓法律模型或政治模型来进行分析的方法，但其实质还是以经济为杠杆的。

水资源系统分析，也可以称之为水资源系统工程学。它的主要思想、理论和技术来自系统工程学，主要是对水资源系统的分析、综合、模拟和优化。水资源系统分析和其他系统工程一样，至今尚无统一的严格的定义。一般可以这样理解，水资源系统分析就是在一个确定的水资源系统范围内，应用多学科知识，对所有可行方案进行决策优选的一种数学手段。系统分析来源于数学方程式的系统数学分析，但并不单纯是数学处理，而是集合了若干有关学科的概念、观点和技术，综合发展起来的一门学科，它是分析研究流域水资源系统规划和决策问题的科学方法，也是帮助决策者从大量的可行方案中识别和选择最优方案的科学的方法。概括起来讲，系统分析就是系统思想和运筹学的结合。

### 三、水资源系统开发中的规划、设计和管理运行的实质和主要问题

由于天然水资源在空间和时间上的分布特性并不完全适合国民经济发展和人类生活的需要。因此，如何开发利用水资源，其工程规划、设计和管理运行的目的，实质上就是根据矩阵转换的原理，把天然的水资源矩阵转换为开发后的另一个新的水资源矩阵，也就是水资源开发利用最优的矩阵。

设以矩阵S来描述天然水资源的形成及特性，它由三个向量组成。L—位置 T—时间 Q—质量。

$$S = \begin{pmatrix} L \\ T \\ Q \end{pmatrix} \quad (1-2)$$

L 位置向量，它决定水资源空间分布的三个分量X,Y,Z,；如地表水系统，则以x、y表示其位置，可用来表示修建水库大坝及引水渠首的位置，而z表示水库、水电站的水头，需水地区的落差或抽水站的扬程等；在地下水系统x, y可代表含水层的位置及范围，z代表含水层的厚度。所以

$$L = (x_1 x_2, \dots, x_n; y_1 y_2, \dots, y_n; z_1 z_2, \dots, z_n)$$

时间向量T，由及时可利用的水量的概率分布参数组成，即径流系列i的均值 $\mu_i$ 和方差 $\sigma_i$ ，相关系数 $\rho_i$ 及流域对称系数 $\alpha_i$ 等组成。

如时段长以年计则

$$T = (\mu, \sigma, \rho, \alpha, \dots) \text{ 如为月则}$$

$$T = (\mu_1, \dots, \mu_{12}; \sigma_1^2, \dots, \sigma_{12}^2; \rho_1, \dots, \rho_{12}; \alpha_1, \dots, \alpha_{12}; \dots)$$

Q—质量向量：Q的元素有生物质量 $Q_b$ ，矿物质量 $Q_r$ ，热量质量 $Q_h$ 等，

$$\therefore Q = (Q_b, Q_r, Q_h, \dots)$$

设经过开发后的水资源矩阵为 $S^*$ ，即矩阵由 $S$ 转换成 $S^*$ ，则

$$S^* = \begin{pmatrix} L^* \\ T^* \\ Q^* \end{pmatrix} \quad (1-3)$$

上式中 $L^*$ ， $T^*$ ， $Q^*$ 都为这些元素的数学期望值， $L^*$ 是工程供水的新位置，就是工程选点的最优结果， $T^*$ 是最优的需水、供水在时间上的分配， $Q^*$ 代表供水的质量标准。这些向量有的是常数，有的是变数。时间向量 $T^*$ 通常总是变化的。矩阵的转换又通过转换矩阵 $\theta$ 来达到，即 $S^* = \theta \cdot S$  (1-4)

$S^*$ 事实上是另一个系统，用来实现对水资源的最优开发利用和控制的转换结果，通过它达到工程的最优开发目标。转换矩阵 $\theta$ 通常由两个子矩阵所组成，即

$$\theta = (\theta_1, \theta_2) \quad (1-5)$$

$\theta_1$ 是由系统内各工程结构的设计参数组成，称为硬件。

$\theta_2$ 是系统中各工程结构的运用方式所决定，称为软件。

在研究系统开发水资源时，首先必须对天然的水资源矩阵有全面的了解，因此，首先要对自然条件方面进行大量的调查和研究工作，这样必然要涉及到地理学、水文学、气象学、地质学以及海洋学等内容；另一方面，为了进行转换，尚须对社会、经济等情况进行调查。由此可知，系统分析的实质就是要找到 $\theta_1$ 及 $\theta_2$ ，从而求得达到开发目标数学期望的新矩阵 $S^*$ 。

在规划水资源系统的开发利用时，从工程观点来看，有以下三类问题有待解决：

①确定流域系统内各建筑物的最优尺寸；②开发规模的最优化，即目标输出和系统服务范围的最优化；③拟定出系统的最优运用策略。

用 $x_1, x_2, x_3$ 分别代表解决上述问题的各种方案， $B$ 为这些方案的效益，则

$$B = f(x_1, x_2, x_3) \quad (1-6)$$

水资源开发就是要在工程技术、自然、经济和其他约束条件下，求 $B$ 的最大值。但是，除了能够控制的因素 $x_i$ 之外，还有一些不能控制的因素如环境因素 $y_i$ ，因此，更全面地表示水资源工程的开发目标应是  $B = f(x_i, y_i)$  (1-7)

就已经积累的经验来看，水资源工程规划中涉及的最主要问题是：

1、水文过程，由于水资源工程是研究一种可再生的自然资源的开发和利用，因此，全面理解自然界水文循环过程是极为重要的。但是，至今可以说基本的水文物理过程尚未完全弄清，还有待进一步深入研究。由于水文现象的随机性和不重复性，随机水文学以及人工生成随机水文系列的研究对水资源工程的作用越来越重要。

2、水利工程的位置和规模的选定。为了使大坝修建在地基好的坝址上，使用在当地最好最经济的建筑材料，因此必须加强研究工程地质学、水力学和建筑材料。

3、流域内人类活动的影响。包括上游土地利用、灌溉、排水及工矿用水等的影响。

水资源工程的开发，总是与经济密切联系在一起的。一个工程的可行性主要取决于所要达到的目标，投资、利息，偿还条件和作为反映福利经济的社会价值。其主要问题如下：

1、最优化准则。可以是国民经济净效益最大，也可以是地区内就业最充分，还可以是所开发的每方水的效益最大等等，一般要由决策者来确定最优化准则。技术人员则应当好参谋。

## 2、经济效益计算。

通常效益可分为有形效益（又可分为直接的和间接的）和无形效益两类。但实际计算是比较复杂的，例如防洪效益，我们在计算长江三峡的防洪效益时，就进行了大量的调查和研究工作，求出洪水的直接和间接损失，也就是防洪的效益。又如内河航运的效益，我们在进行江水北调工程的效益时，就要区别“借水行舟”与“供水行舟”等不同情况。更困难的是如何评价无形效益问题，如旅游事业，由于缺少行情市价，估算其效益仍处于探索阶段。

3、水的分配。对于不同的用户，水资源产生的作用或价值是不同的。而地区之间的水的分配，也将对地区间的经济发展产生显著的影响。因而怎样调配水、涉及到国家、地区的国民经济发展的政策即社会、经济和政治安定等一系列问题，这些问题在系统分析中一般可以作为约束条件加以考虑。

4、水质控制和废水处理问题。需要在不同的水质控制方案的费用与低质水所造成的损失之间进行平衡，从经济上研究水质控制的要求。如果水质涉及到居民健康和环境质量时，就不能单纯从经济角度去评价水质控制方案。

在水资源工程建成后，必须重视工程的管理问题。管理与运行是有区别的，运行是指各建筑物（硬件）的操作，执行某一种运行情况；而管理则是运行时所需的组织工作及协同动作。

管理问题的主要内容涉及到：

1、河流水情预报。不同预见期的河流水情预报及其误差，对水工建筑物的适时调度和运行具有重要的意义。就目前水平而言，由确定性水文数学模型进行的短期水文预报是可以应用的，而较长时期的预报一般只是用统计预报方法。

2、防洪。由于考虑防洪问题，水库在汛期一般只能蓄到防洪限制水位，汛末如果蓄不到水，将大大降低水库的兴利效益。因此，防洪问题值得进一步研究，首先要调查收集洪灾损失资料，确定年平均洪灾损失；其次要研究洪水的时、空分配特性与洪灾损失之间的关系，从而制定出合理的防洪标准和应急措施。

3、政策问题。涉及的问题是：

（1）如何取得对水资源利用问题及其开发时机的共同认识。

（2）如何通过共同的决策过程，取得有利的接近整个系统最优的解；

（3）随着水资源的开发利用而改变了环境，如何调整相应的政策，例如库区移民安置，正常高水位的确定及临时淹没赔偿，提高移民区的土地灌溉保证率等等。

（4）流域系统各决策机构之间的协调问题。

在一般情况下，流域系统内各工程分属于各省区管理，因而其供水计划都由各省决策机构制定，而有些大型水库或水电站又由各部属管理局或大区电网局管理，城市的排水和废水处理系统又由各大城市管理；在我国地表水的开发利用由水电部统一管理，

而地下水的开发利用则由地质矿产部统一管理，因此，如何协调在同一流域系统内有关水资源管理的各种决策活动，以达到水资源开发利用的整体最优解是一个亟待解决而又一时难以奏效的问题，必须由主管水资源的部门出面做好协调工作，否则系统最优的开发方案也是达不到预期效益的。

#### 四、水资源系统分析与常规的水利规划的区别

1、思想方法不同。系统分析是以全局的整体性和复杂的协调性作为观察和处理系统问题的思想方法，也就是强调系统中各个子系统之间相互的依赖关系，而不强调各个子系统的个别性能。一个大系统可以分解为若干个子系统，在分析子系统的基础上，进行整个系统的组合产生为实现同一目标的完整的优选方案。所以局部必须服从整体，以大系统来协调子系统的方法来进行综合。

2、系统分析在解决复杂系统的问题时，在系统分析中要用到各有关分支学科的知识如应用数学、数理统计学、水文学、经济学以及水利工程技术科学的知识，更重要的是要有综合的知识，包括定量处理系统问题的数学理论，使系统理论成为量化的科学理论。

3、在系统分析中，认为只有能用数学模型（或数学表达式）表示出来的现象，才是真正被理解的现象。一个系统模型的建立，必须能反映系统特性的重要因素和适当的目标函数，并能通过数学程序实现目标的优化，起到优选方案的指示作用。在这里，运筹学方法是基础，可以说系统分析就是运筹学方法和系统思想的结合。

4、庞大而复杂的系统问题的求解，其运算工作量之大是惊人的，必须依靠电子计算机，并具有最好的计算机软件、程序包才能实现。当然，定性和综合分析以及作出决策还离不开人的参与，人机结合是系统分析中不可缺少的组成部份。

#### 五、水资源系统分析的几个阶段。

系统分析是一种科学的逻辑推理技术，大致可划分为以下几个阶段。

1、目标的选定。这是任何系统分析首先必须明确的。但是，水资源系统涉及的问题不仅是自然科学和工程技术问题，更主要的是政治和经济问题，因而必须由中央主管部门和地方政府共同协商后才能作出决策。而目标的选定对整个系统的水资源规划则具有重大的影响，为此，科学技术人员应发挥重要的咨询和参谋作用。

2、调查研究和收集资料。主要是调查和收集有关天然水资源的状况，各种目的的用水情况，社会经济发展、交通运输及建材情况等。为了满足规划设计需要，在收集资料时应特别注意以下问题：

（1）资料的不确定性。主要是指与来水有关的水文过程的随机性和由于对未来需水估计和节水技术的发展以及某些政治上决策的变化带来的不确定性。处理来水不确定性的方法目前主要是用蒙特卡罗方法进行随机的人工生成水文系列的办法，而对其他的不确定性只能参照对未来的估计作适当修正。

（2）资料的精度。用于系统规划的系统分析方法，无论它如何精确，其成果总不

能超过所用资料的精度。对各种不同类型的水资源系统，要注意研究所需资料的相对精度，才能在规划中较好地分配水资源，并根据整个规划能达到的精度作出合理的决策。所以资料的精度是与下一步选择数学模型结构密切有关的，如果资料的精度不高，选择复杂的数学模型也不可能提高精度。

3、数学模型的拟定。一般来说，可分为分析模型和模拟模型。分析模型有线性规划、非线性规划、动态规划等，模拟技术本身并不是最优化，但可求得在给定条件下的局部最优解，或整个系统的近似最优解。近年来，分析模型与模拟模型的联合应用方法，如利用动态规划以寻求水库的最优运用规则，然后利用这些规则到模拟系统中去等已成为有效的途径。

#### 4、方案成果的比较。

建立模型以后，根据各种来水系列、各种约束条件和目标函数（如水量、电能及经济净效益等），可以得到许多可行的方案组合，对各方案的目标值进行比较，同时参考无法计量的因素如移民照顾，社会就业和环境质量等因素进行综合分析和研究，获得结论。如能以满足本系统的各种问题，即算基本满意。如不满意，则可重复前述步骤进行再运算。

#### 5、检验核实。

系统分析方法所获得的结论，必须在对选定方案进行检验、核实之后，才能确定可否采用。当然，检验核实总是在一定的环境条件下进行的，因此即使在该环境条件下认为可行，但随着环境条件的变化，规划的最优方案以及运行的最优策略也必然要改变。也就是说，系统分析方法取得的成果也只能管外部环境相对稳定的一段时期是合适的，所以说我们现在做的系统分析成果只能管到一定时期，如2000年或2050年，以后能否使用，要看外部条件以及系统内各子系统的输入、输出要求的变化情况而定，有可能要修改模型。

### 六、应用模型化和最优化技术

应用模型技术和优化技术求系统中目标函数的优化方法，是帮助决策人员选择能满足系统约束条件的最佳方案的工具，数学模型是真实系统的抽象，是描述和显示真实系统的一组数学方程式。这些数学方程式是用将来揭示问题的各种状况、识别系统中各子系统及模块的物理函数关系，建立有效的量度和限制，指明收集到的有关信息等。方程式可以是代数的、微分的和其他的，视所采用的模型特性而定。在一般情况下，首先建立能精确代表物理系统的数学模型，然后采用优化技术求解这个物理数学模型，然后把这个最优解用到真实的物理系统，以实现对该系统的最优控制。

数学模型可根据其目标函数和约束条件方程的特性分为线性的和非线性的，确定性的和随机的，稳态的和动态的。线性模型是指其全部约束条件方程和目标函数都是线性的，下边介绍的线性规划（Linear Program）就是这种线性数学模型，这种方法研究最早，是系统分析中比较成熟的方法。当目标函数或部份约束方程为非线性时，就是非线性模型，要用非线性规划求解，或是采用分段线性化的方法去求近似最优解。确定

性模型是指模型中的参数是固定的，输入不变，输出也不变，因为转换（Operation）是确定性的，如水文预报中应用的流域水文模型都属此类。随机模型中则导入了不确定的因素，因而当有一个输入时，通过转换可以产生一组随机的输出。稳态模型是指时间因素不作为变量考虑的，例如在水资源系统分析中把来水（年、月）变化的多年平均值（数学期望）作为输入，每年入流的分配都是如此，就变成稳态模型。在进行工程的筛选时，一般可用这种不变入流的线性规划模型求解。如果时间因素作为变量考虑，即一般模型中含有差分或微分方程的那种模型都是动态模型，例如在水库优化调度中常用的动态规划模型。

在水资源系统分析中的数学模型一定要根据流域的特定条件制定，一般没有现成的模型可以套用。必须通过将流域系统转换成节点序列系统，提出对整个系统及各子系统的模型构思，并在运算中修改和补充。

模拟技术一般定义为重复产生系统实质的过程。在给定输入和运用的条件下，模拟模型是将变量之间的数量关系合并起来，用来描述系统运用的结果。大多数情况下模拟模型并不能寻求到最优解，但在复杂的水资源系统中，模拟方法可以很好地发挥作用，因为大系统的数学表达式太复杂而不得不简化，而模拟模型的简化少些，因而更近似于实际的水资源系统。近年来，由于分解和多层最优化理论的建立，使复杂的水资源系统分为若干“独立”的子系统，这种分解是以引进系统的新变量称耦合变量来达到的。每个子系统可以根据其系统特性及系统目标和约束条件，应用现有的优化技术来离散地、独立地求解最优，这叫做第一层的解。这个子系统是由为达到整个系统最优而控制在高一层的耦合变量所联接，称为第二层或较高层的解。取得子系统“独立”的方法是先放松第一层最优化的一个或多个必要条件而满足第二层的一些条件。分解和多层优化方法可使复杂系统简化、降低维数，模型更加逼真、各个子系统可用不同的优化技术，并通过高层控制子系统之间的相互联系，因此应用日益广泛。

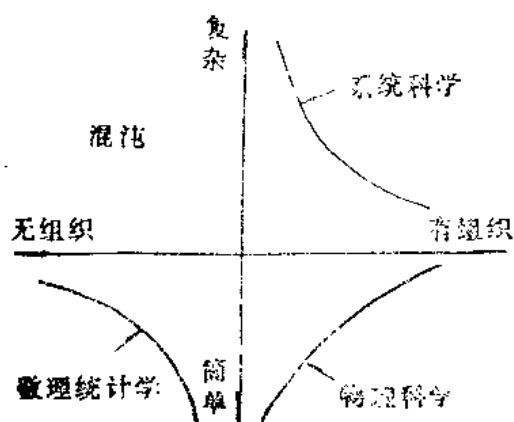


图 1—1

结语。系统科学是一门新兴的学科，也是一种新的科学研究方法和领域。从整个科学的发展过程来看，最早的研究工作是从简单的有组织的事件开始的，如物理学中的力学等；之后，研究的领域发展到了简单但是无组织事件的科学领域，因而发展了数理统计学；今天，系统科学的发展是解决复杂而又有组织的事件的，例如阿波罗登月计划的系统规划、设计，这是科学发展的新领域，其关系如图 1—1 所示。

系统科学的特点是：

1、全面性（系统性、整体性）。即把一切事物现象进行综合研究，而系统最优不一定是其中个体的最优。（当然一般是在可

行域内的非劣解。)

2、关联性。系统中的各个组成部分既是可以互相区别的，但又是相互关联的。例如水资源开发中的梯级水库规划就是相互区别而又相互关联的。

3、最优性。系统目标函数的最优化是系统研究的关键，虽然模拟技术不能求得确切的最优解，但必然会从若干非劣解的方案中应用均匀网络法、增量分析法等设法找到近似最优解。

4、多学科性。即是要用数学语言来表达各种学科的知识。

5、实用性。即系统分析方法求得的结果可以在实际的物理系统经受住检验。

在我们研究的水资源系统分析中，也同样要体现出系统科学的上述特点，才能得到预期的效果。

## 参考书目

- 1、Eckman D.P.ed. "Systems Research and Design" New York: John Wiley & Sons Inc. 1961
- 2、Peschon J.ed "Disciplines and Techniques of system control" New York: Blaisdill Publishing Co. 1965
- 3、Bawer T.A, Hufschmidt M.M. and Ready W.W. "Operating Procedures; Their Role in Design of Water Resources system by simulation Analysis" A. Masse, ed. Harvard University press, Cambridge, Massachusetts 1962
- 4、"Principals and standards for planning Water and Related land Resources Water Resources Council, Federal Register Vol 38 NO 174 Part III 1973
- 5、Nathan Buras "Scientific Allocation of water Resources" New York: American Elsevier Publishing company. Inc. 1972
- 6、"A policy for the American People", Report of the President's Water Resources Policy Commission, vol.1. General Report vol.2. Ten River's in America's Future, vol.3. Water Resources Law, U.S. Government Printing Office, Washington D.C. 1950
- 7、Hall. A.D. "A Methodology for System Engineering" Van Nostrand Princeton, New Jersey, 1962
- 8、"Water Resources Policy", Presidential Advisory Committee on Water Resources policy, U.S. Government printing office Washington D.C.

- 9、 Andrew P. Sage "Systems Engineering Methodology & Applications", The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. New York 1977
- 10、 "工程控制论" (修订版) 上、下册: 钱学森、宋健著, 科学出版社 1980年
- 11、 系统工程和管理指南, 美 S.M 辛洛斯著 王连成译 国防工业出版社 1982年
- 12、 北京市水资源系统分析及优化调度数学模型的初步设想 华士乾 北京市水利学会印 1984年 3月