98317

高等学校教材

水资源系统分析与规划

成都科学技术大学 张永平
武汉水利电力大学 陈惠源
合编

ISBN 7-120-02219-9/TV·879
定价： 5.00 元

高等学校教材

水资源系统分析与规划

成都科学技术大学 张永平
武汉水利电力大学 陈惠源 合编

水利电力出版社

（京）新登字 115 号

高等学校教材

水资源系统分析与规划

成都科学技术大学 张永平
武汉水利电力大学 陈惠源 合编

*

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

北京市朝阳区小红门印刷厂印刷

*

787×1092 毫米 16 开本 8.5 印张 187 千字

1995 年 9 月第一版 1995 年 9 月北京第一次印刷

印数 0001—1000 册

ISBN 7-120-02219-9/TV·879

定价 5.00 元

内 容 提 要

本书为高等学校“水资源规划及利用”专业本科教材。主要内容有：水资源规划学科的发展史，有关基本概念，防洪、水力发电、给水等水资源系统分析，以及风险分析等。重点介绍了该学科的基本方法及其应用。对于从事防洪、发电、给水、灌溉、环境等综合利用规划与管理的研究及实际工作人员，也有参考价值。

前　言

《水资源系统分析与规划》是由高等学校水利水电类专业教学委员会1988年第一次全体委员会（南京，1988年6月）确定，经水利部批准的“水资源规划及利用”专业本科教材。主要内容包括：水资源规划学科的发展史，有关基本概念，防洪、水力发电、给水等水资源系统分析，以及风险分析等。重点介绍了该学科的基本方法及其应用。该课程的先修课主要包括概率论及数理统计，数学规划，水文学，以及水资源开发利用等。

本教材是在参考国内外有关文献资料的基础上，结合作者的教学经验编写出来的。作者尽量作到深入浅出，注重概念正确及方法实用，而不追求面面俱到或包罗万象。编写本教材的基本宗旨在于使学生从概念上和方法上掌握水资源系统规划的要领，从而有能力根据工作需要迅速查到相应的参考文献，并用于解决实际问题。本教材的不少部分还可以供研究生及科研、生产单位的有关技术人员学习、参考。

作者衷心希望同行专家们的批评指正，也欢迎初学者提出宝贵意见，以便更臻完善。在此要感谢本书主审人叶秉如教授及责任编辑，从书稿交出到最后审定、出版，他们花费了大量的心血。

陈惠源完成本教材第三、四、五、六共4章的编写，这些章集中了水资源系统规划主要方面的具体方法。张永平编写了其余部分并负责全书统稿。

目　　录

前　言

第一章　绪论 …… 1

第一节　水资源规划的发展史 …… 1

第二节　水资源规划的基本术语及定义 …… 2

第三节　水资源规划的一般过程 …… 3

第四节　水和水资源的区别 …… 4

第二章　水资源规划中的一些工程概念及经济概念 …… 6

第一节　规划区域 …… 6

第二节　水利设施及其计划安排 …… 6

第三节　工程项目分析的一般原则 …… 7

第四节　关于经济分析与财务分析 …… 8

第五节　与折减率有关的计算问题 …… 9

第三章　防洪系统分析及规划 …… 12

第一节　我国防洪问题概述 …… 12

第二节　防洪系统组成及其作用分析 …… 16

第三节　防洪规划中的经济分析 …… 20

第四节　防洪系统规划模型 …… 24

第四章　水电能源开发的系统分析 …… 36

第一节　概述 …… 36

第二节　水电站群联合调节方式及其动能指标计算 …… 39

第三节　水电站群参数选择 …… 49

第五章　供水问题系统分析 …… 65

第一节　概述 …… 65

第二节　我国水资源供需关系分析 …… 66

第三节　地下水资源开发利用简介 …… 71

第四节　地表水与地下水联合运用灌溉供水系统模拟模型 …… 75

第五节　多水源综合供水系统规划模型 …… 82

第六节　城市供水系统分析 …… 88

第六章　水资源系统综合规划 …… 94

第一节　水资源系统规划概述 …… 94

第二节　水资源系统规划模型简介 …… 103

第三节　多目标决策的基本原理和方法 …… 105

第四节　流域规划筛选模型 …… 110

第五节　开发程序模型 …… 117

第七章　水资源规划中的不确定性及风险分析 …… 123
第一节　概述 …… 123
第二节　关于风险分析的计算 …… 124
第三节　考虑不确定性和风险分析的必要性及存在的问题 …… 126
参考文献 …… 128

第一章 绪 论

这一章的内容主要是涉及水资源规划作为一门学科的历史发展进程，特别是把水资源系统当作一个客体，进行系统分析的历史过程。读者可从中汲取对水资源问题进行规划及对水资源系统进行系统分析的基本思想与观念。从而可以明确这一学科的研究对象与范围，也可以初步形成用系统分析方法处理水资源问题必要性与可能性的基本观念。同时这一章也要叙述这一学科当代发展的概貌，以便使读者高瞻远瞩，对未来学科发展方向获得一个初步的了解，从而逐步形成自己的独立判断，借助以下各章的学习，进一步明确在这一学科领域中自己的主攻方向，力争在建立和发展这一学科大厦的征途中有所建树。

虽然水资源问题对人类社会和生命的存在与发展至关重要，但作为一门学科的出现也才是最近 50 年来的事。随着全球性人口增长，城市与交通、国土与能源等一系列问题的尖锐化出现，水资源规划已成为或正在成为人类最关心的问题之一。如果全球有限的水资源不能充分发挥它在经济、环境及社会方而最大作用的话，水资源有可能很快成为人类生存的最大资源问题。水资源规划已经越来越显示出它在国土规划、城市规划、交通规划、农业规划及工业规划中的重要和关键地位。

第一节 水资源规划的发展史

水文学本来是一门属于地学范畴的自然科学，但人类的历史告诉我们，水文学发展的动力在于人类与自然作斗争时对知识的需要。因此，人类一旦开始干预自然水体（无论出于防灾还是兴利的目的）水文学就作为水资源开发利用的基础学科而发展起来了。从这个意义上讲，水资源规划的历史也可以包括水文学的发展过程。但是，水资源规划毕竟不属于自然科学，而是属于技术领域的问题，甚至于在很大程度上是与社会、经济、环境范畴紧密相连的一种技术决策类型的学科。它与人类对自然水体的干预密切相关。所以，在研究它的历史时，可以从人类利用自然水体开始。美国土木工程师协会（ASCE）曾在 1979 年和 1980 年 3 月号的水资源规划及利用学报分册上，用“美国水资源规划：1776—1976”为标题刊登了一系列文章，介绍了 200 年间美国在水资源规划各方面的发展过程，特别介绍了这一学科的发展史。

水资源规划的方法从比较简单发展到相对比较复杂，那是近 50 年来的事。因为大约从本世纪 30 年代或 40 年代开始，人类才比较有系统地研究了社会供水规划问题。首先对人口增长与工业发展的需水估计开始，研究地表水和地下水源；然后考虑工程措施、调水及水处理问题等等。这就必然要涉及工程设计及经验判断，作出种种概算与估计，来说明供水的社会效益。于是，水资源经济分析也必然由此应运而生，既有工程效益的估算，也有关于土地、水道及水权方面的问题需要处理。这样，使规划的面越来越大，逐步形成了综

合利用及多目标的水资源规划，这是工程项目得以兴建的必要前提。水资源规划的现代发展，已经跨越了单一工程项目的界限，而走向流域内多个工程项目的统一规划，同时满足多方面需要的问题。其中包括工程措施，也包括非工程措施的内容。

规划要求的不断增多，内容的不断复杂，必然带来计算方法上的改进，必然要从简单运算发展到使用计算机、采用系统分析方法和程序化处理的结果。不仅如此，在计算内涵上从单纯定量化计算发展到考虑非定量因素的计算。例如，渔业及野生动物，水上运动，环境美学，历史文物的价值，生态平衡要求，水质保护及改善，以及土地利用问题等等。可以说，水资源规划所涉及的社会、环境、经济、自然生物等方面无所不包，因此，现代水资源学正以高度发展的科学技术来武装自己，构成了一门崭新的学科。同时，这一学科的实际应用必然涉及各行各业专家和科技人员的共同努力。否则，实际问题的解决是不可能的。

第二节　水资源规划的基本术语及定义

水资源规划是水资源学中的一个主要内容。它与水资源工程的建筑施工或者工程项目的具体设计，以至于单项工程的规划具有不同的涵义。它也不同于实时运行中的水资源管理及调度工作，虽然在水资源规划中有时还要把管理与调度的设想或方案考虑进去。它是一个系统规划的问题，也就是把水资源所涉及的各个方面当成一个系统，按系统分析的思想方法去处理规划问题。因此，人们一谈到水资源规划，不言而喻，指的是一个相当大范围的系统分析与规划问题。其中包括各种可能的计算手段，特别是数学规划及定量优化或方案模拟分析的计算方法。当然，常常由于实际问题过于复杂，除了计算定量的问题外，有时还不得不采用经验判断或定性分析的某些处理，例如对比或比拟方法等。为了使读者对水资源规划基本原理有正确的理解，在这一节里，首先提出几个基本术语及其定义，以便在以下章节里可以简单地直接使用，而不致概念混淆。

一、工程项目

工程项目除包括工程设施（如建筑物，设备，材料等）外，还包括其他非工程措施，即对水的控制、利用，以及对水的限制（节约或减少供应等）。因此，在水资源规划的意义上讲，工程项目除具有“硬件”外，还有许多“软件”。

二、规划

规划应包括以下几方面的活动内容，即对工程项目的定义，建模及分析，以及工程项目实施过程中的设计、施工及运行方面的分析计算。规划与设计的区别在于后者指详细的工程细部研究，如对建筑物、设备或工程项目其他部件的专项研究及设计图纸。

三、参与规划工作的人员

一个大型规划常常是一个庞大的系统工程，而大型规划工作本身也是一个庞大的系统工程。因此规划工作涉及的人员，除工程师以外，还有经济师，自然资源规划人员，生态学研究人员，社会学家，以及社会科学专家。环境影响方面的估计，常常成为规划方案能否实施的主要因素。因此在水资源规划工作中，必须要有环境方面的科技人员参与，共商水资源规划方案实施的可行性，提出环境影响评价，否则规划方案是难以获得批准的。

因此，规划人员并不是指具有一种专业的人员，而是指具有多方面专业知识的人员，或者由几个方面的专业人员共同组成的队伍，包括：工程建筑，城市规划，经济学，社会学，法律学及生物学等等。因为一项成功的规划通常需要基于以上学科知识的综合运用，方可达到。

四、水资源开发利用的目的

水资源规划的最终目的是开发和运用水资源，以利于人类与社会生存。但是，水资源规划的技术方法则用以决定采用什么样的措施来满足人类社会对水的需求，促使水资源开发得当而有利于自然水体及国土资源的保护。那么满足人类社会对水的需求，也就成为水资源开发利用的目的了。

水资源开发利用的目的及其功能主要有：

1）为城市、农村、工业及热电站冷却的供水；

2）为农田灌溉的需水；

3）为了洪水控制及洪灾的防治；

4）为了水力发电；

5）为了航运；

6）为了改善水质的用水；

7）为了水上运动及娱乐；

8）为了渔业的用水；

9）为了排水、排沙，地下灌水防陷等的用水；

10）环境保护及美学要求；

11）建筑群体、历史文物、生物及地理方面的要求；

12）生态系统的要求；

13）地区经济发展（如旅游业）的要求；

14）为提高生活标准而提出的要求，等等。

总之，开发利用水资源的目的是多种多样的，因此必须考虑水资源的综合利用（Multi-purpose）问题，尽可能发挥它的多种功能而适当调整各种目的之间存在的相互矛盾，以便使各种功能的发挥各得其所。

五、水资源开发利用的目标

水资源开发利用的技术效应已如上节所述。但同时还要考虑其他非技术效应的影响，例如经济的，财务的，环境的，社会的，法律的及组织机构的影响。因此，从更广泛的意义上讲，水资源开发利用还要满足技术效应以外的多种目标。换言之，人们在考虑水资源规划时要注意到技术上的净效益，即技术经济效益的正负两方面；同时还要注意到环境质量，地区经济开发，以及其他社会效益的目标。在各种目标意义下的规划结果可能常常不同，这就需要采用某种协调去获得最后提出的规划方案——多目标规划(Multiobjective Planning)。

第三节　水资源规划的一般过程

虽然不可能有典型的水资源规划程序，但总的来说，水资源规划的程序大体上可按下

述步骤进行：

(1) 目标的建立　有关大的方针政策及必要的限制条件要首先明确。

(2) 课题识别及分析　包括资料收集，需水及供水关系的拟定，水利及土地利用的情况，以及水资源开发利用的现状及总体可能性。这一步属于基本情况的整理。

(3) 成果识别及影响评价　包括工程措施及非工程措施的成果识别，环境影响的初步评价。这一步属于原则上的判断。

(4) 方案的建立与分析比较　包括方案比较的标准及方法，各种方案工程措施及非工程措施系统的建立，环境影响的详尽评价。

(5) 成果方案的推荐　提出优先考虑的方案及实施进程。

(6) 实施　若有必要，应提出实施此方案的单位。

(7) 实际操作与运行。

最后两个步骤属于施工及管理方面的问题。

原则上，水资源规划的组织者要会同所有涉及此规划的单位参与工作，还应包括所有有权干预的政府部门及社会团体。这种参与工作的性质既要有正式的名义，也要有非正式的协作方式，以便使各种渠道获得的信息及建议有助于明确目标，有助于识别及分析问题，有助于判断成果的合理性，有助于最后提出可以被各方面接受的可行方案。

此外，还必须知道，整个规划过程常常会来回变动已经考虑过的步骤。这是因为某一方面的工作结果会促使其他方面工作的相应变动。这种效应称之为“反馈效应”，既有向前推进的反馈，也有向后推进的反馈，要视具体情况面定。甚至在方案得到最后实施或运行时，还会不断提出更新的系统规划要求。

规划的具体方法可以是十分简单的，也可以是相当复杂的。可以是完全经验式的判断，也可以是纯粹数学规划的优化计算。这取决于工程项目的性质，规划单位的正式要求，以及可能的财力、物力、规划工作人员的能力和兴趣等等。不过，原则上讲，主要应取决于工程项目的具体内容，该简则简，该繁则繁。既不可过简，也不应画蛇添足搞形式主义。

第四节　水和水资源的区别

从水文学的观点出发，地球上存在的水具有各种形态，也有各种相互关系及动态变化。但是自然界存在的水，并不是任何时候，任何情况都是可以利用的，更不是一律都可以算是“水资源”。水资源的概念十分复杂，绝不能单纯用“水量”来计算。因为水资源的功能是多方面的，而且不可公度，更何况自然界存在的水因时、因地、因环境而不断发生变化，采用时间平均或空间平均的概念去衡量水资源，去评价水资源的多少、贫富是缺乏理论根据的。有兴趣的读者可以参阅有关文献作出自己的判断。但是从全球水量平衡的角度，至少人们可以得出结论：自然水是有限的，可以被人类利用的水源更是其中的一小部分，从量的狭隘意义上来说，这是水资源“量”的极限。读者可以从图 1-1 上得到基本的认识。

图 1-1 中所示的百分数并不意味着可以利用的比例。因为许多地下水是不能动用的，或者开采是不经济的。而地表水是流动的，平均来说整个地球表面水体每年更新 30 次。总体

上讲，可以利用的淡水足以为全球人类所使用。可惜的是时间及空间的分布不尽人意；人口密度的分布与可利用水源的分布又不甚协调。人们常常集居在缺乏可利用水源的地区，是因为气候的原因或者传统文化的习惯势力所致。由于政治、社会及经济条件的制约，按水源的多少来分配人类集居的密度实际上是不可能的。农业的发展常常首先考虑的是土地资源，然后才想到缺水而提出灌溉。某些经济发达的地区经常处于低谷河滩，这就必然提出防洪减灾的问题。水资源开发利用就是要规划者想方设法找到最合理的方案与措施来满足需水、防止或减少洪涝灾害。因此，要根据“自然水”与“社会水”两方面的情况，以及工程措施与非工程措施的可能性，才可能对水资源作出正确的估计与评价。水文学或物理学意义上的“水”，并不就是水资源学中的“水资源”，这一点是明确的。所谓“社会水”是指实际存在的或人们预估要发生的社会对水的要求，这种要求可以比自然来水大，也可以比自然来水小；它是不以自然水客体为转移的，是人类主观意识上反映出来的，属于精神领域意义上的客观需要。例如，城市生活供水需求的发展变化预测，防洪除涝规模标准的考虑等等，无不与某种精神状态（也是一种客体）有关。

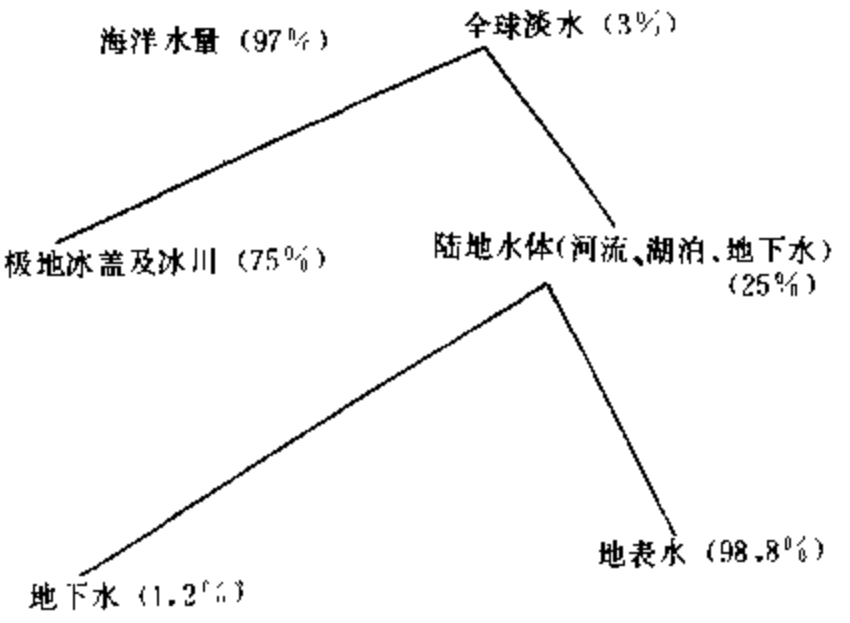

图 1-1　全球水量分布（时间平均）

第二章　水资源规划中的一些工程概念及经济概念

水资源规划离不开工程，也离不开经济。因此，在涉及具体项目的规划前，有必要明确一下有关的工程概念与经济概念，这是规划方法的基础。其中特别重要的是关于工程项目比较和经济分析的基本概念，以及经济分析与财务分析的区别，投资及年费用、利率、等效计算等等都是本章要阐明的问题。

第一节　规　划　区　域

通常人们用“流域”这个水文概念来规定所规划的区域。除了地表径流以外，地下水的流域也要框定，而且这个流域常常与地面的不相一致。从水量平衡的角度来看，也可以在一个大流域中再划分出几个小流域。当然，必要时，规划区域可以突破流域的概念而采用行政区划的原则加以框定。因为从行政区域的意义上来看，某些要求是统一的，例如下水道的设计，供水系统及水处理系统的设计都是有统一要求的，因此就有所谓“服务区”概念的产生。又如电力系统中，输电范围及输电设备常常有政府或地区的统一要求，而不受流域的限制。

总之，在进行水资源规划前，必须先明确规划所研究的地区范围。

第二节　水利设施及其计划安排

水资源规划中有关水利设施的工程特性必须在规划前加以确定。除此之外，还有环境、政治、经济、财务、社会、法律、机构等问题也需要事先明确，以便落实这些因素是否对规划产生影响。不过首先要明确的是水利工程设施问题。

（1）城市及工业用水和热电站冷却用水设备　现在与将来城市及工业用水的情况；热电站总用水量及其消耗的部分；供水的替代方案，例如，不同供水地区，工程安排的变化，可供用水的水质及水量、价格的变化，输水系统的可变方案等等。

（2）农业排灌　按灌溉可能性对农田的分类；当前灌溉的程度；不同作物的销售市场前景及数量设计；作物的需水特性，不同的水源方案；供水、灌溉及排水工程的安排及其投资、年费用等等。

（3）防洪工程　洪泛区的框定；洪水及洪灾的历史记载，当前洪灾的可能性；未来因人口及工业发展而带来的洪灾损失；现在与将来的防洪方案；闸、坝、堤防、水库等设施的考虑；治河工程及护岸工程的安排计划，以及当地有关工程措施及非工程措施的方案等。

（4）水力发电　现在与将来电力系统中电力、电量平衡的情况；电力系统中负荷组成

的变化；个别电站发展的可能性；抽水蓄能电站 的抽水及发电的关系等等。

此外，航运，水质管理，水上运动，渔业及野生动物，以及流域内历史文物的各种设施及其发展要求等，都要一一调查清楚并罗列成册。

第三节　工程项目分析的一般原则

在众多的工程项目方案中进行选择，并对其中之一进行最优化的参数（工程规模）选择，这是工程项目分析的基本目的和重要任务。一切分析的最终成果都将落实到参数优化问题。至于综合利用各用户间的投资分摊，以及同一用户不同收益单位之间的投资分摊都属此根本问题的内涵。此外，通过工程项目分析还可以作出各项子工程的投资计划，或者也可以对收益作出估算，甚至还可以估算当投资计划受阻时收益的减少。

一般财务会计上的概念与用在工程项目研究中的经济概念常常有可能是不同的。规划人员和经济分析工作人员所感兴趣的是在以下意义上来估计未来收效的，即物质数量、收益及费用；而收益与费用的价值可能以货币计算。此外，财会人员通常对过去的费用记录有兴趣，而不是估计未来。但是，由财会人员提供的信息对估计工程项目的费用是非常有用的。领导机构必须批准分析人员在以下方面所作的假定，即分析的时间界限，利率，折旧计算方法及对不同项目所受影响的考虑。具体来讲有以下几项分析。

一、方案分析

大部分分析过程要求进行方案比较，包括两个及两个以上的方案比较；决定工程项目规模大小的参数比较；某一项目的一个因素的参数比较（如在大坝高度一定情况下，发电站装机容量的比较）；以及要不要修建工程项目的比较。

二、有形价值分析

对于一般商业问题而言，方案的选择主要取决于财务上的费用、收益及其他方面的收入。而对于公共事业项目来说，财务及经济分析是两者皆备的；对于经济分析，重点在于研究真正收入的价值，不论针对有益的或有害的影响都按此计算，而不是只计算货币所反映的收益或产出。

三、费用已定时的比较

这种情况下，两个或两个以上方案都具有实际上等价的费用，问题就在于收益的比较。当有关当局预算已定时，追求的目标是单位货币的产出最大。

四、收益已定时的比较

这种情况下，两个或两个以上方案都具有实际上等价的收益，问题就归结为费用的比较。例如，排污后的水质要求已定，问题的比较就集中在费用方面，或者是用投资作比较，或者用寿命期内各期投资的折算等价年费用或现值。某些方案的费用可能直接与材料或工作量有关，例如相同材料构成的大坝，这时比较的内容可能就不必是货币形式的费用，而可以是材料的数量。

五、收益与费用可变时的比较

当方案之间都具有可变的收益与费用时，比较应按以下几种原则（之一）进行。

1）按已经规定好的利率作现值计算，即 $P(B-C)$；其中 B，C 分别是指收益与费用，因此 $(B-C)$ 表示净收益；$P(B-C)$ 指净收益的现值。

2）平均年内净收益 $(B-C)$，即在已规定利率条件下与均匀投资等价的当量；这里考虑了净收益的时间价值，并以年平均计算。

3）收益与费用的比（也称益本比）。

4）内部回收率，即收益与费用现值之比。这里也考虑了时间价值问题。

总之，这是一些可用来比较方案优劣的不同指标。可按具体情况选用。

六、在现值或年平均基础上的比较

收益及费用均按现值或年平均数量计算，如果收益与费用各年不同，那么在一定的分析时期内，比较的步骤应为：将所有收益和费用的“时间流”都变成现值进行比较；或者把现值变为全分析时期内的等价均匀年值后进行比较。

关于现值的概念，应该在水资源规划计算中作为一项基本原则性的考虑方式。当采用其他方法进行计算后，如有疑虑，则都应按此重算，便可得出肯定的结论。因为其他指标或方法，都是派生的，因此在某些特定情况下有实用意义，但理论上未必都能成立。

七、利率

通常都采用年平均利率的形式，因此带有折减率的意义。不仅可用于现值计算进行比较，而且还可以用于决定“未来价值”（即折算到未来某计算时刻的价值）。及相当的年平均价值。

八、分析时期

分析时期的长短至少要等于修建工程借款的支付时期，而不超过工程的经济寿命。假如分析时期为 100 年（对于大坝来说），而设备的分析期为 20 年（对于发电机来说），那么这就等于说设备在 100 年中更新 4 次。

九、市场价格

计算价值时，有时会直接用到市场价格，这在财务分析时是必需要考虑的。但对于经济分析来说，市场价格是真实价值的一个优良估计值。但也可以采用所谓模拟价值的办法用市场价格与真实价值之差来调整计算。这种模拟价值也称为“影子价格”或经济计算价格。

十、其他有关因素

除经济与财务分析之外，规划者还应考虑到其他因素。其中包括不确定性因素，敏感性因素，以及多目标、综合利用及各单位协作的种种因素。实际上，这些因素通常在不同程度上决定了方案的取舍。例如，基于水库防洪方案对于未来可能产生的综合利用效果将远远超过于用堤防、挡水墙及河道整治，而使水库防洪方案常处于优先考虑的地位；但是同时由水库带来的淹没及生态问题，又会使水库防洪方案处于劣势。这就有必要作具体分析。风险分析及敏感性分析是现代工程方案比较中正在兴起的分析内容，对于方案及其大小规模的取舍带来重要的决策作用。

第四节　关于经济分析与财务分析

财务分析是各种工程项目都需要进行的工作，其内容主要包括：

1）在货币要求方面，作出工程项目的投资及年费用的估计；

2）作出各年投入的费用，包括分期投资及运行费用的时间表；

3）作出国内外投资的估算，尤其要注意按外汇投入的估算；

4）作出工程投资的财务计划，其中包括资金来源及各种贷款的偿还计划；

5）作出全部费用，水费等收益及所需各种补贴的估计，按年度分列，并从施工完毕到偿还全部贷款完毕以至更长时间之内的各项投入；

6）按其他有关财务方面的要求文件进行相应的计算。

至于经济分析是属于公共事业工程项目所必须进行的工作。经济分析的目标是针对各项费用及收益的真实价值来进行的；经济上的可行性意味着经折算后的建设收益加上运行收益将超过整个工程寿命期内的费用。而诸如益本比，净收益，及内部回收率等指标都是经济可行性的反映。

关于收益的具体内容，常常会因具体工程对象的不同而有所变化。例如对于城市居民、工业及热电站供水工程来说，最低的收益度量可以是在没有此供水工程情况下采用其他替代方案解决水质或水量问题所需的费用。又如对水电站来说，收益可以是发出相同电力与电量的火电站所需的费用。而对于灌溉工程来说，收益可以是由于增加供水而扩大的农田作物收入。对防洪工程来说，收益就是由工程保护地区免遭洪灾所带来的收入。对于航运，收益则为由于通航所节省下来的商品的运输费。对于水上运动，则是由此所带来的收益及参加水上运动的人们在此投入的开销。由此可见，在计算收益时，要作具体分析。除此之外，还要考虑所谓额外增益或额外费用。例如由于防洪水库或水电站的修建，可以使下游水处理工程费用得以减少；反之，在枯水季节蓄水，上游兴修的水库会使下游水处理工程费用增加等等。总之，诸如此类的额外增益或费用在财务分析时不加考虑，但却必须包括在经济分析的内容之中。

第五节　与折减率有关的计算问题

折减率的考虑是由于货币价值时间流所引起的。在计算中应该采用什么数值作为折减率，那是另外一个值得讨论的问题。它因时、因地、因情况的不同而有所不同，显然与货币流通及金融市场的具体情况有关，需另加分析。

在这些计算中要用的符号意义如下：

i——单位时间内的利率；

n——计算时段的单位数量；

P——货币现值；

F——计算时期（n 个单位）末的未来货币价值；

A——在计算时期 n 个单位内，与 P 或 F 等价的、利率为 i 的时段末均匀支出或收入的数值。

因此，当已知 P 求 F 时

$$F = P(1+i)^n \tag{2-1}$$

当已知 F 求 P 时

$$P = F\left[\frac{1}{(1+i)^n}\right] \tag{2-2}$$

当已知 F 求 A 时

$$A = F\left[\frac{i}{(1+i)^n - 1}\right] \tag{2-3}$$

当已知 P 求 A 时

$$A = P\left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}\right] \tag{2-4}$$

【例 2-1】 若有 100 万元借 25 年，年利 7%；到 25 年期满后本利之和应为

$$\begin{aligned} F &= 100(1+0.07)^{25} \\ &= 100 \times 5.4274 \\ &= 543 \text{ 万元} \end{aligned}$$

【例 2-2】 若 30 万元的总投入按分期投入：第一年初、第三年初和第五年初分别投入 10 万元。10 年期满后，相当的未来总价值为

$$\begin{aligned} F &= F_1 + F_2 + F_3 \\ &= 10(1+0.07)^{10} + 10(1+0.07)^8 + 10(1+0.07)^6 \\ &= 10 \times 2.5937 + 10 \times 2.1436 + 10 \times 1.7716 \\ &= 65.089 \text{ 万元} \end{aligned}$$

【例 2-3】 若 25 年后要投入的总值为 100 万元，现在应为此而准备的货币总值为

$$\begin{aligned} P &= 100 \times \left[\frac{1}{(1+0.07)^{25}}\right] \\ &= 100 \times 0.1842 \\ &= 18.42 \text{ 万元} \end{aligned}$$

【例 2-4】 若年利率均为 0.07，30 万元分 3 次投入：第一年初、第四年初及第十年末分别投入 10 万元，则相当的总现值应为

$$\begin{aligned} P &= P_1 + P_2 + P_3 \\ &= 10 \times 1.0 + 10 \times 0.7513 + 10 \times 0.3855 \\ &= 21.368 \text{ 万元} \end{aligned}$$

【例 2-5】 若在 25 年内估计要投入的相当于期末的未来价值为 100 万元，在利率为 10%的情况下，相当于每年年末均匀投入的价值为

$$\begin{aligned} A &= 100 \times \left[\frac{0.1}{(1+0.1)^{25} - 1}\right] \\ &= 100 \times 0.0102 \\ &= 1.02 \text{ 万元} \end{aligned}$$

【例 2-6】 若投资现值为 10 万元，则在 7%年利率下，相当于 10 年内每年年末均匀支付为

$$A = 10 \times \left[\frac{0.07(1+0.07)^{10}}{(1+0.07)^{10} - 1}\right]$$

$$= 10 \times 0.0944$$

$$= 0.944 \text{ 万元}$$

【例 2-7】 若 10 万元/年以 7%的利率投入于每年年末，经 15 年后，其总的未来价值应为

$$F = 10 \times \left[\frac{(1 + 0.07)^{15} - 1}{0.07}\right]$$

$$= 10 \times 25.1290$$

$$= 251.29 \text{ 万元}$$

【例 2-8】 若考虑平均每年年末投入 10 万元，则在年利率为 7%的条件下，相当于 20 年的第一年年初投入的现值为

$$P = 10 \times \left[\frac{(1 + 0.07)^{20} - 1}{0.07(1 + 0.07)^{20}}\right]$$

$$= 10 \times 10.5940$$

$$= 105.94 \text{ 万元}$$

在以上 4 个公式的运用中，可以得到以下概念：

1）现值 P 与未来价值 F 之间的关系是由以 i 及 n 为自变量的函数 $(1+i)^n$ 或 $1/(1+i)^n$ 决定的；称之为“单独支付复合因素”及“单独支付现值因子”。前者也可称为增值因子，后者也可称为折减因子；前者大于 1，后者小于 1；并可分别表示为 $(F/P;i,n)$ 及 $(P/F;i,n)$（有表可查，常见于一般经济学书籍之附录）。

2）均匀支出（或收入）A 与未来价值 F 之间的关系也是由以 i 及 n 为自变量的函数 $i/[(1+i)^n-1]$ 或 $[(1+i)^n-1]/i$ 决定的，分别称为“均匀数列投入因子”及“均匀数列复合因子”；二者互为倒数。可分别表示为 $(A/F;i,n)$ 及 $(F/A;i,n)$，也有表可查。

3）均匀支出（或收入）A 与现值 P 之间的关系分别为 $[i(1+i)^n/(1+i)^n-1]$ 及 $[(1+i)^n-1/i(1+i)^n]$ 并称之为“均匀数列资金恢复因子”及“均匀数列现值因子”；二者互为倒数，并可表示为 $(A/P;i,n)$ 及 $(P/A;i,n)$，有表可查。

根据不同的问题，可以分别应用，求出应用的解答。

第三章　防洪系统分析及规划

为了防止或减轻洪水灾害，对一个特定的流域或地区采用各种工程防洪措施和非工程防洪措施，组成复合防洪体系的整体，通称之为防洪系统。防洪系统是水资源系统的一个重要的组成部分。也可以说，它是一个复杂的水资源系统的子系统。本章内容虽仅局限于防洪系统分析及规划，但是从系统观念上讲，作为一个子系统的分析还必须充分考虑到水资源系统整体与它的关联和对它的制约。

第一节　我国防洪问题概述

一、我国洪水灾害与防洪问题概况

洪水灾害是我国和世界上大多数国家常见的严重自然灾害之一。由暴雨、融雪、冰凌、山洪、泥石流、海啸、风暴潮，以及已建水利工程溃决等造成的灾害，通称洪水灾害。我国属于太平洋和印度洋季风影响的季风气候区，全年 60%～80%的降水量集中于汛期，暴雨洪水造成的灾害是我国主要的洪水灾害。

据史料记载，自公元前 206 年至 1949 年的 2155 年间，我国发生较大洪灾 1092 次，平均约二年一次。黄河以害河之最闻名于世界。在解放前 2000 多年中，黄河决口泛滥 1500 多次，重大改道 26 次，约为三年两次决口，百年一次大改道。它的水灾范围北抵天津、南达江淮的 25 万 km^2 的面积。这里列举本世纪初至 30 年代我国发生的几次重大洪灾进一步说明我国历史上出现的洪水灾害的严重性。

1933 年黄河大水，大堤溃决、漫溢 62 处，河南、河北、山东、江苏等省 67 个县受灾面积达 1.1 万多 km^2，受灾人口 364 万，死亡人数 1.8 万。长江 1931 年洪水使沿江的沙市、武汉、南京等重要城市及 5000 多万亩农田受灾，受灾人口 2855 万人，死亡 14.5 万人。海河 1939 年洪水，天津失守，冲毁铁路 160 km，5000 多万亩农田和 800 万人口受灾。珠江 1915 年大水，广州市淹水 7 天，陆地行舟，450 万亩农田和 300 万人口受灾。

中华人民共和国成立以来陆续开展了各大江河水系的流域规划，全国共建成 8.6 万多座水库，整修、新建堤防 17 万 km，开辟分滞洪区和分洪行洪道，进行河道整治，加强汛期洪水预报、防洪调度和防汛抢险等一系列措施，使我国江河防洪能力普遍有所提高，主要江河的常遇洪水目前已基本上得到控制。以害河著称的黄河已维持了 40 年大堤不决口的安澜局面。可是还必须看到，我国并未消除大洪水的威胁。据 1949 年以来 30 多年的水灾资料统计，我国年平均成灾面积达 6379 万亩。1954 年江淮洪灾损失约达 100 亿元，1963 年海河洪灾损失约 60 亿元，1981 年四川洪灾损失约 25 亿元，1985 年辽河洪灾损失约 47 亿元。这些损失的数字表明，洪水灾害仍然是我国当前不容忽视的严重自然灾害。

目前我国江河的防御洪水能力普遍较低，只有少数水系及某些江河的部分河段能抗御

50 年一遇或略大一些的洪水，许多江河实际的行洪能力只足以安全通过 10～20 年一遇的洪水。在我国有防洪要求的城市中，有 80%的城市不能抗御 50 年一遇的洪水，65%的城市的防洪能力还不足以抗御 20 年一遇的洪水。

我国人多地少。全世界人均占有耕地 4.5 亩，而我国人均占有耕地不足 1.5 亩，远低于世界人均占有耕地的平均水平。在这种不利的自然生态环境条件下，由于缺乏对水土资源的开发和利用的合理规划和严格管理，在我国不少地区出现了与河湖争地、与山林争地、与草原争地的不利局面，导致自然生态环境恶化，加剧了流域的水土流失。泥沙淤积、河道设障和湖泊围垦，降低了江河、湖泊的行洪和调蓄洪水的能力。

工程老化失修是加剧洪灾损失的隐患。目前我国已建水库中，还存在相当数量的病库、险库。我国部分堤防历史久远，有些堤段堤基堤质差，汛期险情发生频繁。只有确保工程的质量，才能发挥现有防洪工程的防洪能力。

二、防洪实践的历史回顾

河流两岸洪泛平原的肥沃土地有利于发展农业，河流可以作为水运交通的动脉，并为沿河建设的工业和城市居民提供供水、排污的良好条件。人类社会的发展与洪泛平原的开发利用息息相关。黄河流域是我国文明的发祥地，被誉为中华民族的摇篮。当代社会，许多河流的沿岸区域已发展为经济开发的腹地。例如我国 50%的人口，30%的耕地和 70%的工农业产值集中在长江、黄河、海河、淮河、珠江、松花江和辽河七大江河中下游约 100 万 km^2 的土地上。

洪泛平原的开发利用是人类社会发展的必由之路。可是从河流的自然条件看，洪泛平原本来是大洪水时河流的行洪范围，因此在洪泛平原进行的经济开发具有一定程度的洪灾风险，从事经济开发的人民不得不寻求采用某些可能的措施来防止或减轻洪水可能造成的生命和财产的损失。

黄河流域是我国开发最早的流域。下面仅从我国人民与黄河洪水作斗争的实践来考察我国的防洪史。我国古代史料中有过大禹治水传说的一些记载。相传约在公元前 21 世纪，禹的父亲鲧曾负责主持黄河治水。“鲧障洪水”反映他当时主要沿用共工氏筑土围子的传统方法，用堤埂把主要居民区及其附近的耕地保护起来。这种消极防守的办法在防洪上难见成效。在禹继承治水工作之后，成功地采用了以疏导为主的作法，疏通黄河下游九条分支河道，加大河道的行洪能力，使洪水畅流入海。

堤防体系的出现，标志着我国防洪技术的新发展。“堤防之作，近起战国，壅防百川，各以自利”的记述，说明在公元前 475 年至公元前 221 年战国时期黄河沿岸已修筑较连贯的堤防，但由于封建割据，未形成合理的防洪体系。秦统一中国之后，“决通川防，夷去险阻”，将旧有堤防改造为较统一的堤防体系，提高了河道的泄洪能力和防洪标准。

黄河是多沙河流，堤防体系虽能减少洪水漫溢成灾的频度，却加剧了河床的泥沙淤积。到西汉时（公元前 206 年），黄河已形成地上河，防洪情势日趋恶化。对防治黄河水害，当时有过一些不同的主张，如分疏说、大改道说、筑堤说、滞洪说等等。从大禹治水至 1949 年约 4000 年间，黄河河道历经重大变迁，防洪方略及其实践屡经沿革，纵观其治河史，筑堤防洪是起主导作用的工程措施，某些时期曾辅以疏导分流，分滞洪措施只是偶见局部使

用。

新中国成立后，治黄方略有了很大的变革。1955 年提出“从整体出发，上中下游统筹兼顾”的治河方针。60 年代初以前主要采用“蓄水拦沙”措施，60 年代中期改用“上拦下排”，70 年代中期形成了“上拦、下排、两岸分滞”的防洪方略，采用水土保持、干支流水库、堤防、北金堤滞洪区和东平湖分滞洪区等措施，组成了黄河的综合防洪系统。

80 年代以前，我国防洪工作主要侧重于采用工程防洪措施来提高江河的防洪标准。近年来借鉴国外防洪工作的经验教训，逐步重视和开展非工程防洪措施的研究。

美国的防洪史可追溯到 18 世纪初，到密西西比河下游新奥良（New Orleans）定居的移民者于 1718 年沿河筑堤防洪，一直到 20 世纪 30 年代以前，美国基本上沿用筑堤防洪的办法。1927 年密西西比河发生特大洪水，河堤多处溃决，造成严重洪灾损失。这次严重洪灾的教训，促使美国改变唯堤论（levees only）的防洪政策。1936 年美国国会通过的防洪法强调必须采用水库、分洪、河道整治和堤防等综合的工程防洪措施，联邦政府为此拨出巨额的工程投资。随后的实践表明，这些工程防洪措施给人们带来了虚假的安全感，导致洪泛平原过度的开发利用。工程防洪措施只能减少洪灾的频率而不可能根除洪灾，其结果洪灾损失并不是随着工程投资的增加而减小，而是持续增长。60 年代中期美国开展了对于防洪方略成败得失的研讨和审议，随后提出了防洪政策的如下变革：将着眼于洪水控制的防洪目标转向以减少洪灾损失为防洪目标；将单靠工程防洪措施的作法转向强调采用非工程防洪措施。

在我国早年治黄方略的讨论中，西汉人贾让所提出的“治河三策”中就隐含有非工程防洪措施的初步构想。建国以来，某些非工程防洪措施在我国的防洪实践已在不同程度上得到应用。淮河流域 70 年代开始重视对河道清除阻水障碍的管理；80 年代逐步加强对行蓄洪区的管理，例如在区内修建安全村台，控制人口增长，鼓励人口外迁，开展调整生产结构和防洪保险事业的试点等。此外，加强汛期雨情、水情测报，洪水预报调度和特大洪水应急措施的研究等也逐步在各流域的防洪实践中开展。但是总的看来，我国对非工程防洪措施还缺乏系统的研究和总结。目前在我国的防洪实践中，非工程防洪措施作为防洪管理的重要手段已逐步得到认识和重视。但是，从防洪规划的指导思想上讲，是否应该把减小洪灾损失作为规划目标，如何把工程措施和非工程措施作为规划方案的有机组合体系，寻求其最佳的组合方案等问题，仍然属于尚待开展研究的课题。

三、防洪规划概述

防洪系统规划是对于某一特定的地理范围（流域或地区）制定和选择防洪整体方案而进行的专业性工作。江河流域所形成的自然的地理单元是通常进行防洪规划的对象。如我国七大江河和一些单独入海的中小河流的防洪规划属于全流域的总体防洪规划。对于支流和湖泊众多的大流域而言，流域总体防洪方案主要的重点是针对沿干流分布的被保护地区的防洪安全，对于其支流流域的防洪问题必要时需专作防洪规划。此外，也可见到对流域中的某一重点河段或地区进行防洪规划。从系统观念上讲，必须将支流或地区性的防洪规划方案视之为全流域总体防洪方案的一个组成部分，或当成一个子系统。它的规划必须考虑到与总体规划的关联和协调。

流域防洪规划的任务是根据流域开发的要求，针对其防洪问题的现状，调查和研究各种可能采用的防洪措施，组成多种可供比较的防洪规划方案，进行各方案的经济效益、社会效益和环境影响的综合评价，统筹兼顾，选择最佳的防洪方案，并提出防洪方案的实施程序和防洪系统运行管理初步规则。

根据防洪实践的经验总结，可提出供防洪规划考虑的一些指导性的原则。例如防洪规划方案必须注意蓄泄兼筹，因地制宜，合理安排蓄泄关系，兼顾工程措施和非工程措施的合理组合，正确处理防洪与兴利、整体与局部、需要与可能、近期与远景、上下游、干支流、左右岸和地区之间等方面的关系。

防洪规划的内容和步骤大致为：

（1）基本资料的收集、管理和分析　防洪规划所需的基本资料包括：历史资料，如历史洪灾、河道变迁、现有防洪设施状况等；自然资料，包括地形、水文、气象、地质、土壤等；以及社会经济资料。对上述各项资料应进行整理、审查、汇编，并对其可靠性和精度作出评价。

通过对历史资料的分析明确流域内主要的洪灾区域及其洪灾损失的严重程度，了解现有防洪设施的防御洪水的能力。社会经济资料分析的重点是了解洪泛区的经济开发现状，确定对各可能受灾的对象提供防洪保护的必要性。自然资料的分析可提供布设各种防洪措施的可能性。对河道状况及可能采取的防洪措施的有关地点一般还需进行必要的勘测工作。

（2）河道现有防洪能力的分析　规划流域一般在历史上的防洪实践中已修建一些防洪工程，如堤防、分洪道、分滞洪区、水库等。应根据现有工程和河道状况，分析各河段防洪控制点的控制水位及其相应的安全泄流量。然后根据洪水频率分析及河道洪水演进计算，可确定各河段现有的防御洪水能力。

（3）防洪标准的选定　防洪标准是防洪规划的一个极其重要的依据。防洪保护对象的防洪标准，应根据防洪保护对象的重要性、洪水灾害情况及其对政治、经济的影响，结合防护对象和防洪工程的具体条件，征求有关方面的意见，综合分析，全面论证，合理选定。1977 年我国水利电力部颁发了试行的《水利水电工程水利动能设计规范》SDJ11－77 规定了可供参照选用的防洪标准如表 3-1 所示。

表 3-1　　防护对象的防洪标准

防护对象			防洪标准重现期（年）
城镇	工矿区	农田面积（万亩）	
特别重要城市	特别重要工矿区	＞500	＞100
重要城市	重要工矿区	100～500	50～100
中等城市	中等工矿区	30～100	20～50
一般城镇	一般工矿区	＜30	10～20

同一流域不同河段（或地区）往往存在不同的自然和社会经济条件，因此，防洪规划中可根据不同河段的实际情况，选定不同的防洪标准。还必须认识到防洪标准所具有的动态属性，它主要表现为不同发展阶段逐步提高防洪标准的发展趋势。它的动态性受到二方

面的因素的影响和制约。一方面是随着国民经济的发展以及洪泛平原的开发利用，洪灾损失势必随之递增；另一方面，从国家财力限制及防洪措施实施的阶段性看，不可能一时达到拟定的防洪标准，而只能是分期逐步提高防洪标准。

洪水是一种随机事件。选定的防洪标准反映所采用的防洪措施具有防御某种频率洪水的能力。必须充分认识到防洪标准所反映的防洪安全的相对性，防洪规划方案的全面实施仅能相对减小洪灾的出现频率及洪水淹没的面积，而不能根本消除洪灾，因此绝不能忽视在洪泛区进行经济开发的潜在洪灾风险。

（4）规划方案的拟定、比较与选定　在摸清流域内各主要防洪对象及其防洪要求的条件下，根据流域的自然条件可提供一些可供考虑的防洪措施，适当考虑各单项防洪措施及其不同规模的合理组合，可拟定若干可供比较的防洪方案。为减轻规划方案比较论证的工作量，可根据技术和经济的可行性的原则，结合经验判断，初步筛选出几个具有代表性，且能满足防洪基本要求的初步方案。对这些代表性方案进行技术、经济、社会、环境等方面的综合评价和论证，最后可从中选出较优的方案作为推荐方案。经过有关部门审议和上级水行政机构审批通过之后，才能作出防洪规划选定方案的最终决策。对于选定的整体防洪方案，还必须研究防洪措施分期实施的程序，并借此明确近期实施的防洪措施。

第二节　防洪系统组成及其作用分析

防洪系统中各种防洪措施合理地联合运用，往往可以更有效地达到防止或减轻洪水灾害的目的。

一、防洪措施分类

将防洪措施划分为工程防洪措施和非工程防洪措施已成为目前普遍的提法，但是这二类防洪措施的定义及界限并不是完全统一和明确的。一般认为，凡借助工程手段处置天然洪水，起防洪减灾作用的措施，通称工程防洪措施。如修水库、筑堤、河道整治、开辟分行洪工程等，可分别对洪水起蓄、滞、分、泄作用，这些均属于工程防洪措施。对于非工程防洪措施很难给出一个统一的定义，只能对它略作分类说明。其中最具有代表性的非工程防洪措施是指通过受洪水威胁地区的人、事、物的合理安排，以达到减轻洪灾损失的目的。如洪泛平原土地利用规划、抗洪防护设施、洪水保险、洪灾预警与撤离安排等均属于这类非工程防洪措施。从防洪规划的角度看，这类非工程防洪措施必须作为防洪系统的可能组成元素加以考虑。本章后面的内容所涉及的非工程防洪措施主要是这类防洪措施。

当然，非工程防洪措施还必须包括防洪管理措施，如防洪系统的洪水预报调度、防汛抢险等。显然，这类非工程防洪措施的特点是通过管理手段使工程防洪措施充分发挥其防洪作用。

水土保持是一项不可忽视的防洪措施，其主要作用是控制水土流失，以减轻由于泥沙淤积而加重洪水灾害的威胁。水土保持措施包括农业耕作、发展林木和草地及某些工程措施。目前一般把水土保持列入非工程防洪措施的范畴。一方面是由于水土保持的主要内容具有土地利用规划的性质；另一方面，水土保持中所采用的某些工程措施防洪标准低，对

防洪规划中所考虑的大洪水基本上不能起调控作用。

二、工程防洪措施防洪作用分析

堤防是古今中外最广泛采用的一种工程防洪措施。沿河筑堤束水行洪，可提高河道渲泄洪水的能力，并相应减小被保护区域发生洪水泛滥的频率。但是在看到堤防对防洪的积极作用的同时，也必须充分注意到它可能带来的消极作用。对于多沙河流而言，每当洪水泛滥，漫流于洪泛平原的水流同时将它所携带的泥沙散布于沿岸平原，可是筑堤后泥沙在河道淤积增多，造成河床抬高，恶化防洪情势。由于堤防阻隔及河道水位的提高，沿岸洪泛平原汛期渍水无法畅排。特别是在形成地上河的情况下，将影响沿岸地下水位的抬高和造成土壤盐碱化。规划中必须考虑自然条件和经济可行性的制约，合理确定堤防高度及其抗洪能力。对于超过其抗御能力的大洪水而言，将不可避免地发生洪水流量超过河道的泄洪能力而造成洪水漫堤及溃决。与未修堤的自然行洪情况相比，溃堤可能导致更大的洪灾损失。即对于超防御能力的洪水而言，堤防的防洪作用可能出现负效应。

河道整治是流域开发中的一项综合性工程措施，可以根据防洪、航运、供水等方面的要求，利用河道的演变规律，合理进行河道的局部整治。从防洪意义讲，河道整治的目的主要是为了提高河道的渲泄洪水能力、稳定河势、护滩保堤。利用天然河弯裁弯取直，可缩短河线，增加水面比降，提高河道渲泄能力，并对上游临近河段起降低其洪水位的作用。为提高河道的渲泄能力，也可以对局部河段采取扩宽或挖深河槽的措施，以扩大河道的过水断面。为稳定河势、护滩保堤而进行的河道整治一般采用治导性的工程措施。为了控导流态，可用丁坝挑流、矶头消减水势；为束窄河槽和导引水流，可沿治导线修建顺坝，辅以格堤防冲促淤；为了堵塞河道分汊，可修建锁坝；此外还有为了护岸而采用一些防护性的工程。

在规划中考虑河道整治措施时，应上下游、左右岸统筹兼顾，河槽与滩地综合治理，并且应该依据河势变化规律，因势利导，根据需要与可能合理布设整治工程。

开辟分行洪道是一项工程防洪措施。在适当地点开辟分行洪道，可将超出河道安全泄量的洪峰流量分流入海，或分流入其他河流，或是分流后绕过重点保护的堤段再回归原河流，以达到削减洪峰，降低洪水位的目的。

分蓄洪工程是分洪工程的另一种类型。它的布置型式是利用天然洼地、湖泊或沿河地势平缓的洪泛区，加修周边围堤、进洪口门和泄洪口门面形成分蓄洪区。其防洪作用表现为不仅可以分洪削峰，而且可利用分蓄洪区的容积对分流洪量起拦蓄和滞洪作用。

分蓄洪区只有在出现大洪水时才作为分蓄洪使用，因此必须研究区内土地开发利用的价值。我国人多地少，一些重要的分蓄洪区目前已出现了过度开发的现象，这将导致分洪损失的增长。因此，对分蓄洪区采取非工程防洪措施（详见后述），以减轻洪灾损失，已成为我国当前的重要研究对象。

水库是水资源开发利用的一项重要的工程措施。它能调节河川径流，有效地控制洪水和服务于各用水部门。当水库的泄洪建筑物无闸控制时，水库主要通过滞洪作用降低洪峰。有闸控制时，水库可以通过对下泄流量的控制实现更有利于下游防洪的泄流方式。

水库通过对它所控制的集水面积所产生的洪水的控制而为它下游的保护对象提供一定

程度的安全保障，因此，若坝址离防洪对象越近，水库就越能对洪水进行有效的控制。反之，若二者距离远，那么水库至防洪对象之间的区间洪水不可能由水库直接控制。防洪保护对象一般分布在河流中下游，但是往往由于地形、地质、淹没损失等等条件的限制，或是在中下游干流上没有合适的坝址，或是可建库的坝址没有足够的防洪库容，因此在规划中必须考虑采用干支流水库共同对洪水进行有效的控制。

由上述各种工程防洪措施防洪作用的分析可见，工程防洪措施具有对洪水的蓄、滞、分、泄等功能。综合的工程防洪措施的防洪效果主要表现在提高流域的抗御洪水的能力，从而产生了减小洪灾损失的两种形式：一是减小了出现洪灾的频率，由于防洪能力的提高而消除了与这种防洪标准相应的中小洪水的灾害；二是对于超防洪能力的大洪水，洪灾虽不能避免，但可以在一定程度上减轻洪灾损失。由于自然、技术、经济等条件的限制，不可能由工程防洪措施实现对洪水灾害的完全控制。即它只能减轻洪灾而不可能完全消除洪灾。

三、非工程防洪措施防洪作用分析

洪泛平原土地利用规划是一项重要的非工程防洪措施。前面已提到，工程防洪措施不可能完全消除洪灾，因此，河流中下游沿岸仍然存在一些具有潜在洪灾威胁的洪泛平原，在这些地区进行工农业开发显然属于带有洪灾风险的经济活动。洪泛平原的开发利用方式及其发展程度将直接影响着流域的洪灾损失。

洪泛平原土地利用规划的任务是合理确定分区的开发利用方式及其相应的开发程度。通常的做法是按某些频率的灾害性洪水的淹没范围、水深及地形等条件把洪泛区划分为不同类型的区域，通过经济分析，论证各区域的开发利用方式。一般说来，淹没水深过大的洪泛区不宜建设永久性建筑物，只宜适当发展农业或养殖业；淹没水深较小的区域则应考虑如何合理配合抗洪防护设施和适度开展农业及某些农副产品加工业的经济开发。

我国人多地少，对洪泛平原土地的开发利用是一种群众性的、自发的生产活动，许多流域的洪泛区已出现过度开发的局面，其结果必将导致洪灾损失严重增长，也使今后洪泛平原土地利用规划工作的开展变得十分复杂和艰巨。

抗洪防护设施是减轻洪灾损失的有效的非工程防洪措施。它为洪泛区灾民提供避水保安的场所，以避免人命伤亡和减轻财产损失。我国较常用的保安设施有安全区、躲水楼和安全台等。安全区一般是在洪泛区内选择地势较高的台地，加修围堤而形成。安全台一般是利用高地填筑高出洪水位的土台。躲水楼是一种具有抗水能力结构（如下层采用钢筋混凝土框架）的楼房，上层楼板高程高于洪水位。

从我国洪泛区的现状看，一方而是区内人口密度较大，分洪损失严重；另一方面对洪泛区的抗洪防护设施缺乏全而规划和实施。鉴于这种情况，应将加速洪泛区抗洪防护措施的规划和建设作为一项紧迫的任务来抓。

洪灾报警与撤离安排也属于一项非工程防洪措施，它对减轻洪灾损失的作用是显而易见的。洪灾报警应包括洪水预报和发布洪灾预警两个子系统。洪水预见期越长，预报精度越高，就越有利于及早地和较准确地发布洪灾预警，使灾区居民有可能提前作好撤离的安排。

洪水保险作为一项非工程防洪措施，目前已在我国试行。洪水出现的随机性规定了洪

灾损失也属于一种随机事件。年洪灾损失作为随机变量比洪量的随机变量具有更大的变差系数。例如对于只有小洪水的年份，可以不出现洪灾。而一旦发生特大洪水，则灾区居民将蒙受突发性的惨重损失，国家也不得不为此而付出巨额的救灾资金。实行洪水保险，洪泛区投保每年需支付一个不变的年保险费，一旦发生洪灾，积累的保险费可用于赔偿投保人的洪灾损失。洪水保险并不能起减小洪灾损失的作用，其作用首先表现在它把极不规则的洪灾损失的时序分布转化为均匀支付的年保险费，从而可减小突发性洪灾而造成的国家财政和灾区居民经济状况的不稳定性。其次，配合洪泛区土地利用规划，对具有不同洪灾风险的区域征收不同的洪水保险费，借此可在一定程度上促进土地利用规划的实施。从这一点看，洪水保险可通过促进洪泛区土地利用规划的实施，而对减轻洪灾损失施加间接的影响。

洪水调度是以软科学为手段，利用洪水预报信息，及时作出防洪系统各种措施联合运行方式的最佳决策。对于一场超防御能力的洪水而言，出现洪灾虽不能避免，但是实施洪水优化调度，可以充分发挥各种防洪措施的潜力，使洪灾损失大为减轻。

水土保持是防洪规划中不容忽视的防洪措施。它的主要做法是结合农、林、牧等生产活动，在流域上中游容易产生水土流失的地区采取造梯田、沿等高线耕作、植草造林等多种措施，以增加流域地表拦蓄和滞留地表径流的能力，从而起蓄水保土，减缓水土流失的作用。对于小洪水而言，水土保持措施可起到较明显的降低洪峰的作用；可是对于大洪水而言，其削峰作用明显减弱。从流域防洪规划的角度看，水土保持的防洪作用主要在于控制或减缓水土流失，减缓河道、湖泊因泥沙淤积而恶化防洪情势的趋势。对于多沙河流而言，抑止水土流失的不良趋势对改善防洪更具有极其重要的意义，应把它视之为防洪治河的治本性措施。

四、流域防洪措施的合理布局

流域防洪规划必须从流域的自然条件、社会和经济的发展情况出发，提出防洪标准的要求，从多种可满足防洪要求的防洪方案中选择最优的规划方案。一个完整的防洪方案一般是由多种工程防洪措施与多种非工程防洪措施共同组成的一个防洪系统。不同流域的自然和社会经济等方面的情况有较大差异，应从实际出发，因地制宜地研究各流域综合防洪措施的合理布局。

对于较大流域的防洪规划而言，防洪系统中各种防洪措施的布局具有如下的一些一般性的特点。例如可以在流域的上中游的某些重点地区适当开展水土保持；在中下游重点河段沿河筑堤及进行局部性的河道整治；在临近重点的防洪保护对象的上游利用适当地形布置分蓄洪区；在河流尾闾开辟分流入海或分流入其他江河的分行洪道；结合水资源的综合开发在上中游和支流修建起防洪作用的控制性水库；在具有潜在洪灾风险的洪泛平原开展土地利用规划、洪水保险、抗洪防护、洪灾报警与撤离安排等非工程防洪措施。

各流域必须根据其自身特点研究和确定其防洪系统的合理布局。黄河流域在上中游开展水土保持和修建干支流水库，下游修筑沿河大堤，左右岸分设北金堤滞洪区和东平湖分洪区，构成了上拦、下排、两岸分滞的防洪布局。淮河流域在上游开展水土保持和修建水库，中游利用湖泊洼地修建滞蓄洪工程和进行局部河段的河道整治，下游巩固河堤和开辟

入海水道，构成了含有水库、分洪工程和堤防等工程防洪措施的防洪系统。

防洪系统中的工程防洪措施具有蓄、滞、泄等综合处置洪水的功能，使防洪系统能抗御某种频率的大洪水。通常把防洪系统所能抗御的洪水频率视之为该系统所达到的防洪标准。显然，作为一个完备的防洪规划，还必须对超出防御能力的特大洪水的出路作出合理的安排。即必须分析超防洪标准洪水的行洪范围，以及合理采用非工程或工程防洪措施，力求减轻洪泛区的洪灾损失。由此可见，一个完整的流域防洪规划必须统筹考虑工程防洪措施与非工程防洪措施的合理组合。

第三节　防洪规划中的经济分析

在防洪规划中，防洪方案必须从经济、社会和环境的效果与影响等方面综合评价其优劣。经济分析是评价防洪方案的重要依据之一。防洪方案经济分析的内容主要是效益、费用分析。防洪事业不属于产业部门，不能用产品多少来反映其效益。防洪效益应表现在防洪方案实施后所减小的洪灾损失。即一个防洪方案的防洪效益等于该方案实施前后两种不同的洪灾损失的差值。因此，在防洪经济分析中将涉及洪灾损失的估算。

一、洪灾损失估算

洪水灾害所造成的经济损失包括直接损失和间接损失，此外还存在一些无法用货币表示的洪灾损失，称之为无形损失。直接洪灾损失是指由于洪水直接淹没而造成的农业损失，以及个人与公共财产的损失。间接洪灾损失包括由于洪灾而造成的生产、商业和公用事业等方面的活动受阻或中断带来的损失，灾民撤离与安置的费用，以及抗洪抢险增加的支出等等。要对间接的洪灾损失进行详细分析和精确估算是复杂和困难的，经验的做法是根据典型实例的调查结果得出间接洪灾损失占直接洪灾损失的百分数来作为间接洪灾损失估算的依据。

人命损失、疾病流行、水源污染及社会不安定等都是洪灾可能造成的不良后果，但又难以用货币形式进行表达。这些损失虽不能在经济分析中直接计入，但是在方案选定时必须对它加以认真考虑。

（一）洪灾损失的分析

对于实际发生的洪灾，可以在洪水退去之后，立即组织实地调查和进行洪灾损失的统计估算。如果对以往一段历史时期所发生过的洪灾损失都进行过调查和估算，其成果就是历史洪灾的调查资料系列。

由前述可知，进行防洪效益分析时所涉及的是现状与防洪方案实施后二种情况下的洪灾损失。考虑到流域自然条件和社会经济状况的变化发展，引用历史洪灾损失资料时必须进行合理的修正和调整。例如随着洪泛区人口的增长和经济的发展，洪灾损失将逐年递增。由于堤防的加高或其它防洪措施的实施，历史上发生过的某次洪水重现时，成灾的情况必将有较大的变化。针对这种情况，往往必须根据流域实际情况进行洪水演进计算，以核定其淹没区域和进行洪灾损失估算。在防洪规划中有时还可能提出洪水时空分布的多种可能性。实际发生的一次洪水仅反映了一种洪水的时空分布，同一频率的洪水可以出现不同典

型的时空分布，并伴随着不同的洪灾损失。若需要详细考虑这些情况，那么就必须首先进行水文分析计算，确定洪水的时空分布，然后进行洪水演进计算，确定淹没区域，据此进行洪灾损失估算。

洪灾损失中的直接洪灾损失，主要包括农、林、牧、副、渔等各类用地的损失，以及国家、集体和个人的房屋、设施、物资等财产损失。计算各项用地损失时，应注意计入受灾后的生产情况和管理费用。若洪水过后还可补种，可按原产值和补种后产值的差额，加上因补种而增加的费用，作为实际的损失值。对于个人财产和公共财产的损失，原则上只考虑损失部分的修复和补救费用。

由于洪水成灾造成工矿停产、商业停业和交通中断的损失，修复水毁工程和恢复交通与工农业生产的费用，以及防汛抢险费用等可列为间接洪灾损失，这些损失也可通过调查分析，逐项确定。要详细和精确地计算间接洪灾损失是困难和复杂的。规划中可按间接损失与直接损失的经验比值进行估算，其计算式为

$$I_i = k_i D_i \tag{3-1}$$

式中：D_i 为某部门 i 的直接洪灾损失；I_i 为某部门 i 的间接洪灾损失；k_i 为比例系数。

表 3-2 列出了根据美国陆军工程师团的材料统计分析而得出各部门或事业 k 值的参考值。

表 3-2　　间接洪灾损失与直接洪灾损失比值 k

部门或事业	居民区	商　业	工　业	公共服务业	公共设施	农　业	公　路	铁　路
k	0.15	0.31	0.45	0.10	0.34	0.10	0.25	0.23

通过对实际洪灾损失的调查分析，可得到淹没水深、淹没历时与单位面积损失的关系曲线。这些典型调查的关系曲线，可用于各种情况的洪灾损失估算。例如通过调查或水文水利计算得出一次洪水的淹没范围，然后按分区的淹没水深、淹没历时，查上述关系曲线可得到分区损失，各分区损失之和即为一次洪灾的总损失。

（二）多年平均洪灾损失的计算

多年平均洪灾损失可用年系列法或频率法推求。

如果有较完整的历史洪灾损失资料，可根据逐年洪灾损失的数据（显然其中包括非成灾年分，其洪灾损失为零），计算多年平均洪灾损失。这种方法称为年系列法。由于发生历史洪灾年分流域的自然条件和洪泛区的社会经济状况与现状和未来相比必有差异，因此应根据洪灾分析的时间背景，对历史洪灾资料进行合理的调整和修正。

洪灾损失是由洪水形成的自然灾害，它与洪水事件一样可视之为随机事件。以年洪灾损失为随机变量，对于流域中出现过的历史洪水，可根据洪水分析得出其出现频率，并调查和估算出其洪灾损失，借此可计算和点绘出年洪灾损失经验频率曲线或理论频率曲线。年洪灾损失的数学期望值即表示多年平均洪灾损失。以频率曲线的成果为基础，采用有限差计算式可求出年洪灾损失的数学期望值 D 为

$$D = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{d_i + d_{i-1}}{2} \right) (p_i - p_{i-1}) \tag{3-2}$$

式中：n 为频率坐标分格数；d_i 为对应于频率格点 i 的年洪灾损失；p_i 为格点 i 的相应频率值。

上述将年洪灾损失作为随机变量来推求多年平均洪灾损失的方法，一般称之为频率法。此法与年系列法的差别在于它不必依赖于完整的洪灾损失的年系列资料，因此得到较广泛的应用。

二、防洪效益分析

由前述可知，对于一个防洪规划方案可以分别求出方案实施前后的多年平均洪灾损失，二者之差即为该防洪方案的防洪效益。一个完整的防洪规划方案应该全面包括工程防洪措施和非工程防洪措施，为了便于分析和对比，下面将分别从工程防洪措施和非工程防洪措施二种情况出发，分析各种防洪方案的洪灾损失及其防洪效益。

（一）工程防洪措施防洪效益

图 3-1 绘出了某流域以工程防洪措施（如水库、堤防、河道整治或分洪工程等）组成三种具有不同防御能力（即防洪标准）的防洪方案的洪灾损失示意图。图中线①，②，③分别表示序号为 1，2，3 三种方案的年洪灾损失频率曲线；线④表示防洪规划方案实施前的年洪灾损失频率曲线。水平坐标 p 表示累积频率。图中 p_1、p_2、p_3 分别表示三种方案的防洪能力，p_4 表示在流域现状下河道抗御洪水的能力。从图可看出，工程防洪措施的防洪作用首先表现在减小了成灾洪水的频率，或是说提高了防洪系统的抗御洪水的能力；其次是大大地减轻了成灾洪水的洪灾损失。

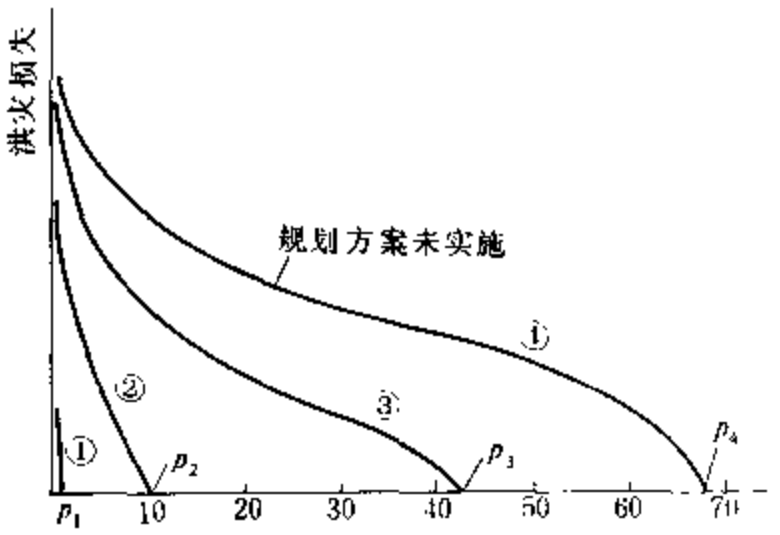

图 3-1　工程实施前、后洪灾损失示意图

根据图 3-1 年洪灾损失频率曲线的成果，可分别求出 4 种不同情况的年洪灾损失数学期望值，即多年平均洪灾损失。未实施防洪规划方案前的多年平均洪灾损失与任一防洪方案多年平均洪灾损失的差值即为该方案的防洪效益。

（二）非工程防洪措施防洪效益

这里只着眼于对具有潜在洪水威胁的洪泛区采用洪泛区土地利用规划、抗洪防护措施、洪灾预警与撤离安排等非工程防洪措施所组成的防洪方案的分析。由前述可知，洪泛区内的非工程防洪措施不具有调控洪水的能力，因此这些措施并不能改变防洪系统的防洪标准，即不能减小出现成灾洪水的出现频率。这些非工程防洪措施的防洪作用表现在减小各种成灾洪水的洪灾损失。图 3-2 绘出了非工程防洪措施组成的三种方案 1，2，3 相应的年洪灾损失频率曲线①，②，③和规划方案未实施前的年洪灾损失频率曲线④的示意图。

为便于讨论和分析，假设仅以洪泛区土地利用规划与抗洪防护二种非工程措施组成上述的三种防洪方案。方案 1，2，3 的防护标准（或称防护水平）分别为 p_1（$=1\%$），

p_2（=10%），p_3（=43%）。以任一方案为例来说明如何从规定的防护标准出发，合理考虑二种不同非工程防洪措施的组合。根据规定的防护标准可确定其相应频率（如方案1的洪水频率为 p_1）的洪水，通过洪水演进计算求出其相应的淹没范围。对淹没区的土地利用规划，可考虑在淹没范围内原则上只允许进行农业开发，居民区可分布于淹没区周边淹没水深较小的区域，但必须配合布设安全台、避水楼或安全区等抗洪防护设施。从而构成了相应于某一指定的防护水平，在洪泛区所采用土地利用规划与抗洪防护等非工程防洪措施所组成的防洪规划方案。针对这一方案可推求其年洪灾损失频率曲线。

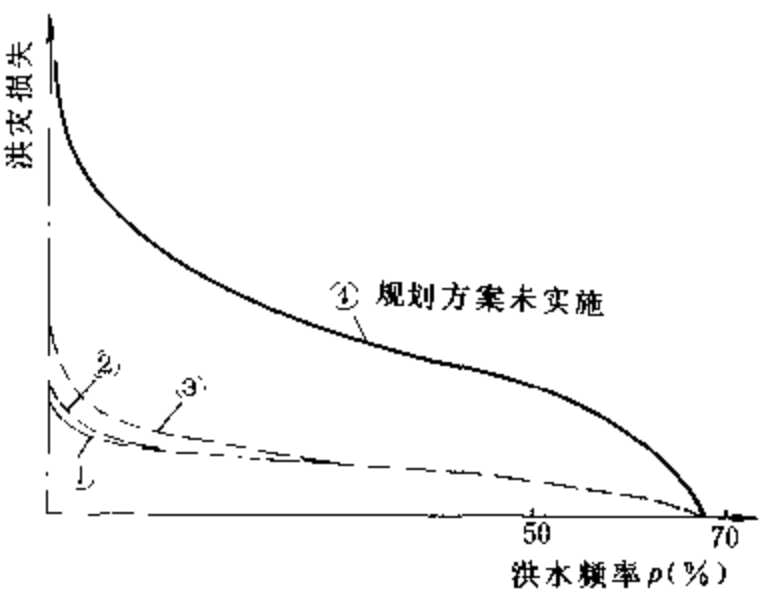

图 3-2　非工程防洪措施减灾示意图

不同方案所考虑的防护水平不同，因此相应的土地利用区划及抗洪防护措施的布置也有所不同，从而也带来不同的年洪灾损失频率曲线。

对于图 3-2 的 4 根年洪灾损失频率曲线可分别求出各自的多年平均洪灾损失。未实施规划方案前的多年平均洪灾损失与任一方案实施后的多年平均洪灾损失之差，即为该方案的防洪效益。

三、防洪规划方案经济比较

以上着重介绍防洪效益的分析计算方法。对于每一防洪方案，还必须进行基建投资和年运行费用的计算，然后可按效益费用比、净效益最大或经济内部回收率等评价方法分析各方案经济上的优劣。

记 B 为防洪方案的效益，C 为防洪方案的投资运行费用，那么防洪方案的净效益 Z 可表达为

$$Z = B - C \tag{3-3}$$

由技术经济的知识可知，上式的效益和费用项都必须按统一的基准年（如规划方案全部投入运行的第一年）、计算期及规定的贴现率，根据效益或费用的时序流程图分别折算为现值（或年金）。

通常随着国民经济的发展，洪泛区的开发利用程度也将有所增长，洪灾损失及防洪方案的防洪效益将具有某种递增的趋势，因此不能用前述防洪方案的多年平均效益为固定不变的年效益来考虑防洪方案防洪效益的流程图，而应在多年平均效益计算值的基础上，计入某种形式的逐年递增率。

对于含有综合利用效益的防洪工程（如水库）的防洪规划方案，费用项的计算应根据投资分摊的计算方法合理确定防洪方案的工程投资。

不同的防洪方案由于其防洪措施的规模和组成不同而具有不同的防御洪水的能力。可以将防洪方案所能抗御的洪水的对应频率 p 作为反映防洪方案规模大小的变量。对每一方案进行效益费用分析计算，可求出各方案的防洪效益 B 和投资运行费用 C 的现值（或年

金），按式(3-3)求净效益 Z。从各方案中选取净效益最大的方案作为经济上最佳的防洪方案。

设想式（3-3）中的各项效益、费用均可表达为防洪方案规模变量 p（即防洪能力）的函数，那么寻求净效益函数的极大值的必要条件为

$$\frac{\mathrm{d}Z}{\mathrm{d}p}=\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}p}-\frac{\mathrm{d}C}{\mathrm{d}p}=0$$

即

$$\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}p}=\frac{\mathrm{d}C}{\mathrm{d}p} \tag{3-4}$$

$\mathrm{d}B/\mathrm{d}p$、$\mathrm{d}c/\mathrm{d}p$ 分别表示边际效益和边际费用。式（3-4）表示边际效益与边际费用相等是出现净效益最大的必要条件。式（3-4）的解是防洪方案的最佳规模 p。从理论上讲，反映方案工程规模的防洪能力相应的洪水频率 p 的最优解，意味着可以通过防洪经济分析来寻求最佳的防洪标准 p。

在防洪经济分析中存在二类不同性质的课题。其一是对于给定的防洪标准寻求满足此标准的最优的防洪规划方案；其二是论证最佳的防洪标准。后一问题与前者是相关联的。上面的讨论表明，从理论上讲可以寻求后一问题的经济上的最优解。但是必须注意到，在进行寻优计算时，严格的作法必须要求每一防洪方案都应属于满足其相应防洪措施的最佳组合。即必须基于前一课题的最佳组合的解来进一步寻求第二个课题的解答。

必须指出，上述关于防洪标准论证的结果，仅能作为选择防洪标准的参考。防洪经济分析中只能计入直接的和间接的洪灾损失，而不能计及不能用货币表示的无形损失。防洪规划中往往必须同时考虑技术、经济、环境及政治等多方面因素，综合论证，合理选定防洪标准。

以上着重讨论了由工程防洪措施组成的防洪方案其经济分析的有关问题。完整的防洪规划必须考虑工程防洪措施与非工程防洪措施的组合。因此，不仅必须进行工程防洪措施防洪标准的论证，还必须同时考虑洪泛区非工程防洪措施防护水平的选择，而且二者在经济分析中是相互关联的。例如假设规划流域的防洪保护区采用非工程防洪措施和不采用非工程防洪措施二种不同的背景，对一个拟定的工程防洪措施的防洪方案进行防洪效益分析时，显然，后一背景因未采用非工程防洪措施而使工程防洪措施的防洪效益较高；而前一背景因采用的非工程防洪措施本身已起到部分的减轻洪灾损失的作用，从而使工程防洪措施所减轻的洪灾损失及其相应的防洪效益相对降低。另外，在分析一种给定的非工程防洪措施组合方案的防洪效益时，不难看出，当该流域的工程防洪措施所达到的防洪标准较高时，非工程防洪措施的防洪效益较低；反之，若工程防洪措施的防洪标准较低，非工程防洪措施的防洪效益相对增大。可见从理论上讲，应加强对工程防洪措施和非工程防洪措施的联合经济分析的研究。

第四节　防洪系统规划模型

一、概述

防洪规划的常规方法是首先拟定若干个可能的防洪措施的组合方案，然后对各方案进

行分析计算得出方案的技术经济指标，最后从中选出最佳方案。由于不可能确保拟定的方案包含有最优方案，因此常规方法选出的方案从理论上讲只是较好方案而不是最优方案。本节将介绍应用系统分析方法、建立防洪系统规划的数学模型和求解得出最优规划方案的原理和方法。

防洪系统规划涉及的主要问题包括：如何合理确定防洪任务，包括工程防洪措施的防御洪水能力，即防洪标准，以及洪泛区非工程防洪措施的防护水平；如何合理确定防洪措施的组成及其规模；制订最优的系统运行策略。

前面已经提到，完整的防洪系统是工程防洪措施和非工程防洪措施的集合，它构成了一个复杂的大系统。从国外文献看，一般的作法是把二类不同的防洪措施分别建立规划模型，至于如何进一步考虑二者之间的耦合关系还没有见到成熟的研究成果。非工程防洪措施目前在我国已被重视，如何结合我国国情进行非工程防洪措施合理规划是有待今后探索的研究课题。本节的内容只反映以工程防洪措施为主体的防洪系统建立规划模型的原理和方法。

上面提到防洪系统规划所涉及的三方面问题关系到对防洪标准、系统要素组成及其规模，以及运行方式的决策，三方面的决策是相互关联的。防洪标准的高低关系到防洪效益的大小；防洪措施的规模大小关系到工程投资费用的高低。一个指定的防洪标准必须借助于兴建各种防洪工程来实现，显然必须寻求实现这一防洪标准的一种工程防洪措施的最优组合。此外，任何一个工程防洪措施的组合方案，都必须执行某种运行方式来实现其防洪效果，显然必须力求使规划方案所执行的运行方式达到最优的运行方式。

二、防洪系统动态规划模型

这里将首先讨论已建成的防洪系统的运行问题。显然，对于已建系统面言，反映防洪标准和工程规模的有关设计参数已经确定，寻求系统的最优运行方式是建立数学模型所要解决的问题。

（一）防洪系统基本情况

以图 3-3 所示的防洪系统为对象，介绍如何针对该系统建立运行问题的数学模型。图示已建成防洪系统由水库 A、堤防及分洪区等工程防洪措施组成。根据防洪保护区堤防及河道情况可确定防洪控制站 C 的河道允许泄量。水库 A 至控制站 C 之间有区间洪水汇入，因此水库对上中游洪水进行调控时，应力求使水库下泄流量与区间流量合成和演进到 C 点时的流量不超过河道允许泄量。当判明流量将超过允许泄量时，应及时启用 B 至 C 两岸的分洪区分洪，力求避免或减轻下游防洪保护区的洪灾损失。

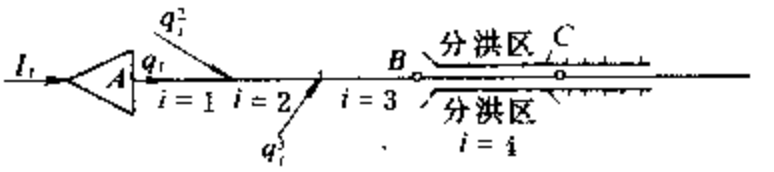

图 3-3　防洪系统示意图

（二）系统的决策变量

由上述可见，所研究的防洪系统具有水库 A 和分洪区对洪水起调控作用，因此水库的运行方式及分洪区的分流方式将组成该防洪系统的运行方式。该系统的分洪区实际上是由大小不同的 10 多个分洪民垸组成，分洪时采取扒口分流而不是设分洪闸，因此分洪区的运用方式实际表现为启用分洪民垸的顺序。实际上该流域的管理机构已根据分洪民垸的分洪

损失及其分流的有效性等不同情况的分析，制订了较合理的民垸分洪顺序。接受这种预先安排的分洪区运用规则之后，所研究的防洪系统只需将对洪水起主导控制作用水库的泄流方式作为决策变量。一场洪水中水库的泄流决策过程即是该系统所寻求的运行策略。

（三）目标函数

由防洪经济分析可知，防洪系统的净效益 Z 等于防洪效益 B 与防洪投资运行费用 C 之差，即前述公式（3-3）：$Z = B - C$。而防洪效益又等于防洪措施实施前后洪灾损失期望值（即多年平均洪灾损失）之差，据此式（3-3）可表达如下：

$$Z = D_0 - D - C \tag{3-5}$$

式中：D_0、D 分别表示防洪措施实施前后的洪灾损失的期望值。

对于运行问题而言，已建防洪系统的工程投资已确定，运行方式的变化对防洪系统运行费用的影响甚微，可以忽略。此外，防洪措施未实施以前的洪灾损失也属于与运行方式无关的常数。即在寻求防洪系统的最优运行策略时，式（3-5）中 D_0 与 C 均可视之为与运行方式无关的常数项。由此可见，在这种特定条件下，净效益最大的准则等价于洪灾损失 D 最小的最优化准则。根据上述分析，可以采用洪灾损失最小的准则来选择防洪系统的最优运行方式。

上面所研究的流域的洪灾损失包括民垸分洪损失和防洪保护区的洪灾损失。当实际发生的洪水超出水库和堤防的防御能力时，将不得不启用民垸分洪以保护下游保护区的安全；若发生特大洪水，即使启用全部民垸分洪也无法控制河道流量不超出允许泄量时，势必导致堤防漫溢、溃决，而酿成防洪保护区的严重洪灾损失。

流域上发生的一场洪水，经水库调节和河道洪水演进，可求出控制断面 C 的洪水过程线，与该断面河道允许泄量相对比，得出该洪水过程超出河道允许流量的总水量，将它定义为超载水量。这部分超载水量基本上属于上述洪灾损失的成灾水量。一旦出现超载水量，应首先及时启用民垸有计划分洪，当民垸的容积已无法容纳全部的超载水量时，不可避免地将造成防洪保护区的洪水灾害。由此可见，洪灾损失大小基本上取决于超载水量的多少，从而可以近似地用超载水量最小来代替洪灾损失最小的准则。据此可写出表达这一最优准则相应的如下目标函数：

$$\min_{\theta}\left\{W = \sum_{t=1}^{T}[y_t + y_{t+1}]\Delta t/2\right\} \tag{3-6}$$

式中：Δt 为计算时段；T 为洪水的时段总数；y_t，y_{t+1} 分别表示计算时段初、末的超载流量（即为控制断面 C 实际出现的流量与河道允许泄量之差）；W 为一场洪水的总超载水量；θ 为水库泄流的运行策略。

按动态规划法解算时，上述目标函数可借助于下列的顺时序递推关系式寻求其最优解，即

$$\begin{cases} F_1(V_1) = 0 \\ F_{t+1}(V_{t+1}) = \min\limits_{V_t}[(y_t + y_{t+1})\Delta t/2 + F_t(V_t)] \\ t = 1,2,\cdots,T;\forall\ V_{t+1} \end{cases} \tag{3-7}$$

式中：F_t 函数表示从起始时刻至时刻 t 的累计超载水量；V_t 表示 t 时刻水库蓄水量。

在上式所示的动态规划模型中，V_t 表示系统的状态，又被作为决策变量。根据水库水量平衡关系可知，在已知水库入流和指定时段末蓄水状态 V_{t+1} 的条件下，V_t 与水库泄水量存在线性关系，因此以 V_t 为决策变量等价于以水库的时段平均泄流量为决策。此外，上式中 V_1 为初始状态，计算时作为边界条件给定。

必须指出，仅采用上述超载水量最小的准则，并按其动态规划递推式（3-7）进行演算时，必将发现洪水过程的某些时段（如洪水刚刚起涨阶段）该防洪系统不存在超载水量而无法进行决策优选。对于这种情况，可以采用所需调洪库容最小为择优准则，其相应的目标函数式为

$$\min_{\theta}\{\max[V_1(\theta),V_2(\theta),\cdots,V_t(\theta),\cdots,V_{T+1}(\theta)]\} \tag{3-8}$$

式中：θ 表示运行策略。对应于某一指定的运行策略有一个水库蓄水状态的变化过程（如式中方括号内各项所示），对这些蓄水状态取最大值表示该运行策略所需的调洪库容。显然，按上述准则的要求，必需进一步从中选出所需调洪库容最小的运行策略作为最优策略。

对应于目标函数式（3-8）的动态规划递推式为

$$\begin{cases} F_1(V_1) = V_1 \\ F_{t+1}(V_{t+1}) = \min\limits_{V_t}\{\max[V_{t+1},F_t(V_t)]\} \\ t = 1,2,\cdots,T;\forall\ V_{t+1} \end{cases} \tag{3-9}$$

式中：F_t 函数表示从起始边界至时刻 t 的运行过程所需的调洪库容；其它符号含义与前述相同。

（四）约束条件

按上述动态规划递推式演算寻求的解，必须满足下列约束条件。

1. 水库水量平衡方程

任一时段 t 水库的水量平衡方程为

$$V_{t+1} = V_t + (\bar{I}_t - \bar{q}_t)\Delta t \qquad \forall\ t \tag{3-10}$$

$$\bar{I}_t = (I_t + I_{t+1})/2$$

$$\bar{q}_t = (q_t + q_{t+1})/2$$

式中：I_t、I_{t+1} 分别为 t 时段初、末的入库流量；q_t、q_{t+1} 分别为 t 时段初、末的出库流量。

2. 河道水量平衡方程

对于河段 i，可采用马斯京干方程来推求洪水过程经河槽调蓄而产生的变形，该方程为

$$O_{t+1}^i = C_1^i I_t^i + C_2^i I_{t+1}^i + C_3^i O_t^i \qquad \forall\ i,t \tag{3-11}$$

式中：I_t^i、I_{t+1}^i 表示 t 时段初、末 i 河段上断面的入流量；O_t^i、O_{t+1}^i 表示 t 时段初、末 i 河段下断面的出流量；C_1^i、C_2^i、C_3^i 为权系数，其值由实测资料推求，三者之和 $C_1^i + C_2^i + C_3^i = 1$。河段 i 的入流由干、支流入流组成，即

$$I_t^i = O_t^{i-1} + q_t^i \qquad \forall\ i,t \tag{3-12}$$

式中：q_t^i 表示 t 时段 i 河段汇入的区间流量；O_t^{i-1} 表示第 $i-1$ 河段的出流作为第 i 河段的入流。由图 3-3 所示的防洪系统可见，水库 A 至控制点 C 共分 4 个河段。河段 $i=1$ 无支流汇入，仅有水库出流作为该河段入流，故有 $I_t^1 = q_t$。对于 $i=2$，3，这二个河段均有支流汇入，

可直接按式（3-12）表达河段入流量。河段 $i=4$ 无支流汇入，但存在两岸分洪区，若分洪区分洪时，式（3-12）中 q_t^4 改为负号，表示分流量。

3. 水库泄流能力约束

水库的泄流量受到泄水建筑物泄流能力的制约，即

$$q_t \leqslant G(V_t) \tag{3-13}$$

式中：$G(V_t)$ 为水库的泄流函数，表示在水库蓄水状态为 V_t 时，泄水设备所具有的泄流能力。

4. 水库蓄水容积的约束

水库的设计给出了水库的特征水位，如设计洪水位表示正常条件下允许达到的蓄洪水位，以 V_{max} 表示该水位相应的库容，那么水库运行中的蓄水状态应满足如下约束：

$$V_t \leqslant V_{max} \tag{3-14}$$

5. 河道允许泄量约束

河道洪水演进中显然必须满足控制断面的流量不超过该断面河道允许泄量的约束，即

$$O_{t+1}^i \leqslant Q \tag{3-15}$$

式中：O_{t+1}^i 表示 i 河段下断面的出流量；Q 表示该断面的允许泄量。可以根据流域中河道过水能力的变化情况，选出若干个具有代表性的控制断面，如图 3-3 中以 B、C 为二个控制断面，其相应的河道允许泄量为 Q_B、Q_C，按式（3-15）可分别写出其约束表达式。

（五）模型解算说明

上述的动态规划模型是以防洪系统的洪水过程（包括入库洪水和区间洪水）可作确定性描述为前提建立的。

执行动态规划递推演算时，为判别面临计算时段水库运行决策的优劣，不仅要执行水库调洪计算，还必须执行河道洪水演进计算。结合这些计算，还应该判断该决策是否满足上述的各种约束条件，从面区分该决策属于可行决策还是不可行决策。例如对于 t 时段末的指定状态 V_{t+1}，采用时段决策 V_t，由水库水量平衡方程式可求出其对应的泄量决策 q_t（因时段初出流量 q_t 为已知，故可由 q_t 推求相应的 q_{t+1}）。此时可同时检查 V_t、q_{t+1} 是否满足库容约束和泄流能力约束。其次以水库出流量作为河道入流量，执行逐河段洪水演进计算。如图 3-3 所示，对应于一个水库的泄流决策，演算至河段 $i=3$ 的下断面得出相应的流量为 O_{t+1}^3，视其是否满足 $O_{t+1}^3 \leqslant Q_B$，若不满足此约束，则可判明水库的泄流决策为不可行决策。演算至河段 $i=4$ 得到其出流量 O_{t+1}^4，若 $O_{t+1}^4 > Q_c$，则需计算该决策相应的超载水量。

上面已经提到，递推演算中必须根据决策过程是否出现超载水量的不同情况，分别按式（3-7）或式（3-9）进行决策选优判断。

（六）防洪系统实时运行

上述动态规划模型采用确定性的洪水过程作为已知的输入资料，这意味着要求对入库洪水过程及水库至防洪控制点间的区间洪水过程均能作出准确的预报。尽管目前洪水预报工作的预见期及其预报精度还达不到这种要求，但可以采用适时修正的作法，使上述模型仍能较好地作出可指导防洪系统实时运行的决策。运行决策适时修正的作法是在洪水即将来临时，根据降雨信息，可适时作出洪水过程的预报，并以此为依据，利用动态规划模型

求出相应的运行策略，并借此指导面临时段的实际运行；随着预报信息的更新，必须及时执行洪水预报作业，得出洪水过程的新预报，然后执行运行决策的模型解算得到更新后的运行策略，用以指导后续时段的运行。

附带指出，对于单水库的防洪系统而言，在已知入库洪水过程和下游区间洪水过程，且无其它复杂要求的情况下，一般可采用传统方法（如防洪补偿调节法）求解。上面介绍的动态规划法主要应用于具有较复杂要求的单库防洪系统或多水库防洪系统。

三、防洪规划线性规划模型

下面以工程防洪措施组成的防洪系统为对象，介绍规划模型建模的原理和解算方法。

（一）防洪系统的基本情况

图 3-4 为假拟的防洪系统的示意图，该流域的防洪地区有支流尾闾地区及干流下游地区二个防洪保护对象，规划中拟修建干支流 3 座防洪水库对洪水进行有效的控制，各水库均采用有闸控制的泄洪设施，可按防洪补偿调节要求调整水库的泄流方式。

（二）防洪系统规划的决策分析

上述水库防洪系统规划的任务是针对流域的洪水条件（包括可能出现的各种不同频率的洪水），寻求拟建的各水库规模的最优组合。以防洪净效益最大为优选方案的准则，由式（3-5）$Z=D_0-D-C$ 可知，净效益 Z 必须由流域防洪方案实施前、后的洪灾损失期望值 D_0、D 及防洪工程的投资运行费 C 等项经济指标确定。显然，对于不同方案而言，防洪措施实施前的多年平均洪灾损失 D_0 是相同的，在方案比较中不必计入。若将防洪措施实施之后的年洪灾损失期望值 D 与防洪工程的投资运行费视之为总支出，那么防洪净效益最大的准则可以由总支出最小的准则替换。在方案比较中，考虑到各方案的年运行费差别不大，而予以忽略。即把它作为常数处理，不计入而不影响方案优选。

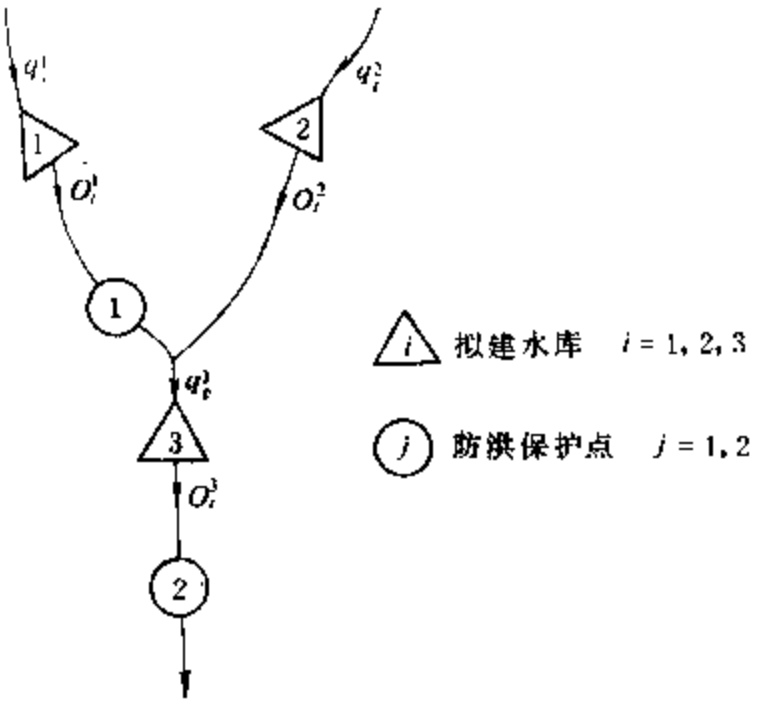

图 3-4 规划的多水库防洪系统

防洪水库的工程造价可以看成由两部分组成，一是与库容大小有关的投资费用（如大坝主体工程和库区淹没损失等）；另一部分是与泄流能力的大小有关的泄洪建筑物的造价。

按前述频率法的概念推求防洪措施实施后年洪灾损失期望值时，必须掌握具有代表性的不同重现期洪水时空分布的资料，以规划方案拟定的水库工程规模作为对流域洪水进行控制运用为条件，以上述流域洪水为防洪系统的输入，对每场洪水逐一进行调洪演算（包括水库调洪及河道洪水演进计算），求出每次洪水的洪灾损失。利用上述洪灾损失成果，可点绘年洪灾损失频率曲线，并求出年洪灾损失期望值。

每次洪水进入防洪系统经调控后流达洪水灾害保护地区时造成洪灾损失的大小与淹没水深、面积、历时以及水流速度等要素有关。建立防洪规划数学模型时，必须借助于以往的洪灾损失资料，分析和确定影响洪灾的主要因素，并建立洪灾损失与该因素的函数曲线，

这一关系曲线将作为表达目标函数的一个函数项。在下面将要介绍的模型中将近似地把洪灾损失作为防洪保护区控制断面的洪峰流量的函数。

由上面的分析可见，这里所研究的水库防洪系统规划方案的优选涉及二类决策变量，一是反映工程规模的设计变量，如水库的容积及泄洪建筑物的规模；另一类是运行变量，如水库的泄流决策，水库的泄流过程通过河道演进而与防洪控制点洪峰流量的大小相关联，从而对洪灾损失（或是说防洪效益）产生影响。评价规划方案必然会涉及防洪工程的运行策略，合理的作法必须是基于最优运行策略的运行成果来评价方案的优劣。

（三）防洪规划模型的数学表达式

1. 目标函数

基于对所研究的水库防洪系统的上述决策分析，可按防洪系统总支出最小的准则写出如下的目标函数：

$$\min\left\{Z=\sum_{i=1}^{3}\Phi_i(V_i)+\sum_{i=1}^{3}\Psi_i(C_i)+\sum_{j=1}^{2}\sum_{n}p(Q_j^n)\mu_j(Q_j^n)\right\} \tag{3-16}$$

式中：$\Phi_i(V_i)$ 表示第 i 水库提供库容 V_i 所需的工程投资费用函数；$\Psi_i(C_i)$ 表示第 i 水库提供泄洪能力 C_i 所需的泄洪建筑物的造价费用函数；$\mu_j(Q_j^n)$ 表示防洪保护点 j 发生第 n 次洪水事件时，通过该河道断面的洪峰流量为 Q_j^n 时相应的洪灾损失函数；$p(Q_j^n)$ 是指出现洪峰流量为 Q_j^n 的事件的出现概率。上式中各费用和损失项均需依据经济计算期的支出流程图，按规定的贴现率换算为基准年的现值或年值。

2. 约束条件

对目标函数式（3-16）求最优解时，必须考虑下列各种约束条件：

（1）水库水量平衡方程　取调洪计算时段长度为 Δt；$n=1, 2, \cdots, N$ 代表各种不同出现频率洪水的序号；$t_n=1, 2, \cdots, T_n$ 表示总时段数为 T_n 的第 n 次洪水的时间序号。对于某次洪水 n 的任一计算时段水库 i 的水量平衡方程为

$$(q_i^{t_n}+q_i^{t_n+1})\Delta t/2-(O_i^{t_n+1}+O_i^{t_n})\Delta t/2=S_i^{t_n+1}-S_i^{t_n} \qquad \forall\, i;t_n \tag{3-17}$$

式中：$q_i^{t_n}$、$q_i^{t_n+1}$ 为计算时段始、末的入库流量；$O_i^{t_n}$、$O_i^{t_n+1}$ 为计算时段始、末的出库流量；$S_i^{t_n}$、$S_i^{t_n+1}$ 为时段始、末水库 i 的蓄水量。

任一次洪水的入库洪水过程线作为已知资料给出，水库的下泄流 $O_i^{t_n}$（$t_n=1, 2, \cdots, T_n$）为运行决策变量，水库蓄水量 $S_i^{t_n}$，$t_n=1, 2, \cdots, T_n$ 随泄水决策而定，不必作为决策变量。

（2）库容限制　水库最大蓄水容积 V_i（$i=1, 2, 3$）是规划中待定的决策变量，但是在选定水库的运行方式时，必须使任一时刻的水库蓄水量不超出允许的最大容积，即

$$S_i^{t_n}\leqslant V_i \qquad \forall\, i;t_n \tag{3-18}$$

（3）水库泄水能力的限制　设水库 i 的泄水能力为 C_i，那么任一时段 t_n 水库 i 的下泄流量不应超过这一泄水能力的限制，即

$$O_i^{t_n}\leqslant C_i \qquad \forall\, i;t_n \tag{3-19}$$

泄水能力的大小与泄水建筑物的规模有关，它在本模型中属于待定的决策变量。

（4）河道洪水演进方程　由于天然河道的槽蓄作用，由水库下泄的流量过程，经过一

个河段的传播之后到达下游防洪地点时，必将有所变形，可采用马斯京根公式来进行河道洪水演进计算。

$$q_{i}^{t_n+1} = C_{i0} O_{i}^{t_n} + C_{i1} O_{i}^{t_n+1} + C_{i2} q_{i}^{t_n} \qquad \forall\ i, t_n \tag{3-20}$$

式中：C_{i0}、C_{i1}、C_{i2}为权重系数，且有 $C_{i0} + C_{i1} + C_{i2} = 1$；$O_{i}^{t_n}$、$O_{i}^{t_n-1}$ 表示第 i 河段在计算时段初 t_n、计算时段末 t_n+1 的入流量；$q_{i}^{t_n}$、$q_{i}^{t_n+1}$ 表示第 i 河段时段初、末的出流量。河段的划分可根据河道长度及支流汇入的具体情况而定。

（5）防洪地点河道泄量的制约　这一限制条件的表达式为

$$q_{ij}^{t_n} \leqslant Q_{j}^{n} \qquad \forall\ i, j, t_n, n \tag{3-21}$$

式中：$q_{ij}^{t_n}$表示 t_n 时刻 i 河段的防洪地点 j 出现的河道流量；Q_{j}^{n} 为第 n 次洪水防洪地点 j 允许达到的泄流量。在本模型中 Q_{j}^{n} 是决策变量，它与水库的泄流决策相关联。对于一次成灾洪水来说，从目标函数式（3-16）可见，Q_{j}^{n} 愈小，洪灾损失 μ_j（Q_{j}^{n}）也愈小。但是它可能减小的程度一方面要受到水库控制洪水能力的制约；另一方面，在一个流域有多个防洪地点的情况下，显然还必须根据流域中洪水的时空分布，合理确定 Q_{j}^{n}（$j=1, 2, \cdots$）的组合。因此，Q_{j}^{n} 必须作为待定的决策变量，在模型的整体解算中寻求其最优解。

（6）非负约束　上述模型表达式中涉及的水库的蓄水量、入流量、出流量，以及河道各断面流量都不能出现负值，即

$$S_{i}^{t_n}, q_{i}^{t_n}, O_{i}^{t_n}, q_{ij}^{t_n}, Q_{j}^{n} \geqslant 0 \qquad \forall\ i, j, t_n, n \tag{3-22}$$

（四）模型解算方法的分析

上述水库防洪系统的规划模型，要求在考虑防洪工程的使用寿命期中可能出现的各种洪水条件下，寻求满足防洪系统的投资、损失的总支出最小的最优工程组合方案。这一规划模型的特点首先表现为它必须考虑到各种可能出现的洪水，目标函数中的洪灾损失项反映了各种洪水条件下流域洪灾损失的期望值。模型的另一特点是作为模型的整体最优解，它不但可以给出反映工程规模的决策变量，也将同时给出了各种洪水相应的运行决策，即最优运行策略。

由目标函数式（3-16）可见，防洪系统的投资、损失支出与水库库容 V_i，泄洪能力 C_i，以及防洪地点出现的洪峰流量 Q_{j}^{n} 等决策变量有关。前面已经提到 Q_{j}^{n} 的大小与水库的运行决策有关，即与下泄过程 $O_{i}^{t_n}(t_n = 1, 2, \cdots, T_n)$ 相关联。由此可见，Q_{j}^{n} 与 $O_{i}^{t_n}$ 均属于运行决策变量。$O_{i}^{t_n}$ 的多时段决策过程的特点反映了防洪系统的动态属性。

上述目标函数中的投资及损失函数一般均属于非线性函数，模型的约束条件除式（3-19）外，均属于线性约束方程，式（3-19）可以更具体地表达为

$$O_i \leqslant f_i(S_{i}^{t_n}) \leqslant C_i$$

式中：$f_i(S_{i}^{t_n})$ 表示第 i 库的泄流函数，即水库的泄流能力的大小与水库蓄水量 $S_{i}^{t_n}$ 有关。泄流函数也属于非线性函数。由此可见，上述防洪规划模型属于非线性规划问题。对于目标函数及约束方程中的非线性函数，可以分别作出分段线性化的近似处理后，转化为线性规划问题（线性化处理的作法后面将略作简要说明），然后可引用线性规划的解算法（如单纯形法）求解。

上面已指出，这一模型的一个重要特点是必须同时考虑到各种可能出现的洪水条件，例

如选取 $n=1, 2, \cdots, N$ 共 N 次洪水作为代表性洪水，每次洪水各自有 $t_n=1, 2, \cdots, T_n$，即 T_n 个时段。多时段的决策特点要求对每一个时段都必须分别满足上述式（3-17）至式（3-22）的约束方程。这显然是一个比较庞大和复杂的线性规划问题。下面通过对线性规划演算过程中的一个基本可行解所涉及的本模型的计算内容和步骤来介绍模型的解算方法。

对于一个特定的基本可行解而言，可以构想将它所涉及的演算分解为对 N 次洪水的分别计算。在对各次洪水的演算中，应该把涉及工程规模的决策变量 V_i、C_i 看成是不随不同洪水及每次洪水的不同时段而变。据此可按给定设计参数 V_i、C_i 和任一指定的第 n 次洪水，用一个线性规划的子模型求出水库的最优运行策略 $O_i^n(t_n=1,2,\cdots,T_n;i=1,2,3)$，以及该洪水条件下防洪地点的最优的河道洪峰流量 $Q_j^n(j=1,2)$。对于 $n=1, 2, \cdots, N$ 的各次洪水都可按这一子模型的相同算法求出运行决策 O_i^n，Q_j^n。最后用 V_i、C_i 及 Q_j^n 的值代入目标函数式（3-14）可求出该基本可行解相应的目标函数值。

在了解上述基本可行解演算的内容和作法之后，就有可能按照线性规划的原理和算法进行模型的整体演算，并最终求出水库防洪系统的最优工程模型的组合方案。

（五）防洪系统实时运行的数学模型

在具体讨论防洪系统的实时运行问题之前，首先研究一个防洪系统在给定的洪水条件下求最优运行决策过程的问题。运行问题所研究的是防洪系统建成后的运行情况。设所给定的一次洪水已对流域洪水的时空分布作出确定性描述。可以采用洪灾损失最小作为寻求该次洪水的最优运行策略的准则，并写出如下的目标函数式：

$$\min\left\{C=\sum_{j=1}^{J}\mu_j(Q_j)\right\} \tag{3-23}$$

式中：C 为流域的洪灾损失；$\mu_j(Q_j)$ 表示防洪地点 j 洪峰流量达到 Q_j 时的洪灾损失函数值（$j=1, 2, \cdots, J$）；J 为防洪保护地点的总数。对于前述图 3-4 的流域背景而言，$J=2$。

对式（3-23）进行寻优计算时，必须满足的约束条件及其表达式基本上与式（3-17）至式（3-22）相同，主要的差别在于前面的规划模型涉及多次洪水，而这里仅涉及一次给定的洪水，因此其时序代号为 $t=1, 2, \cdots, T$．其中 T 为给定洪水的计算时段总数。实际上它仅相当于前述规划模型中一个基本可行解演算中所涉及的一次洪水的子模型的演算。

上面所提到给定洪水的确定性时空分布描述，实际上要求对一场洪水的全过程作出准确的预报，这是目前的水文气象预报水平无法达到的。从实时运行要求看，可以采用适时修正的作法来实现汛期防洪系统的运行决策。这种作法的要点是一旦流域的水情测报系统所收集的雨情信息表明流域将发生洪水时，立即根据雨情作出洪水预报，根据预报洪水的时空分布，按上述给定洪水寻求最优运行策略的模型解算方法求得最优解，并据此作出面临时段及随后的防洪系统的运行决策。当进一步收集到将产生更大的洪水的雨情时，应立即作出新的洪水预报，并再次调用上述运行决策模型进行解算，求出信息更新后的适时修正的运行策略，并借此执行面临时段及随后的运行决策。循此不断更新信息，适时修正防洪系统的运行决策，直至一次洪水过程完全消退。

若以一场洪水的确定性描述为前提，用上述运行决策模型求得的最优解可称之为理想的最优运行策略；按上述适时修正的决策方式逐步实施之后也可以得到一个实际的运行策

略。显然，后者的防洪效果比前者差些。尽管如此，这种适时修正的决策方法得出的决策，可以认为是在现有预报条件下可能达到的一种较优的运行策略。

（六）规定防洪标准的防洪规划模型

仍以前述图 3-4 所示防洪系统为背景，设除拟建 3 座防洪水库之外，在防洪地点 $j=1$，2 的二个河段将分别采取河道整治及辅以局部堤防，以提高河道的过水能力。该防洪系统规划要求在采取上述的水库、河道整治等综合防洪工程措施后，在发生指定频率 p 的大洪水时，防洪河段的最大流量不超过其允许泄量。这一规划问题实际上是在规定防洪标准下，寻求水库、河道整治等措施的工程规模的最佳组合。

注意到这里要求规划方案必须具有达到抗御规定频率洪水的防洪能力，据此可以近似地认为各方案是等效的，从而在方案比较中不必计入防洪效益（或是洪灾损失）项。对于这一规划问题的目标函数可表达为

$$\min\left\{Z=\sum_{i=1}^{3}\Phi_i(V_i)+\sum_{i=1}^{3}\Psi_i(C_i)+\sum_{j=1}^{2}f_j(Q_j)\right\} \tag{3-24}$$

式中：$\Phi_i(V_i)$、$\Psi_i(C_i)$ 的含义与前述式（3-16）相同，它们分别代表水库的投资费用函数和泄洪建筑物的投资费用函数；$f_j(Q_j)$ 代表防洪河段 j 达到允许泄量 Q_j 所需的河道整治的工程费用函数。

在规定频率洪水条件下，到达防洪地点 j 的洪峰流量 Q_j 的大小与水库的泄流决策过程有关。必须根据水库的泄流决策，通过河道演进计算，求出防洪地点的流量过程。因此，在寻求式（3-24）的最优解时，必须满足指定频率的洪水过程的逐时段的水库水量平衡方程、河道洪水演进方程、及库容、泄洪能力等方面的约束，这些约束方程的表达式基本上与前述式（3-17）至式（3-22）相同。

模型解算时同样必须首先对目标函数式(3-24)中的非线性函数项及约束条件中的水库泄流曲线进行分段线性化处理，然后按线性规划问题求出水库与河道整治工程规模的最优组合。

（七）非线性函数分段线性化处理

上面介绍的几个模型中的非线性函数（包括目标函数或约束方程）均属于可分离函数，这种函数的特点是一个包含有几个变量的非线性函数可写成几个单变量函数的总和，每一个单变量函数仅仅与一个决策变量有关。对于这种非线性的可分离函数，可以采用下面介绍的处理方法对每一个单变量函数分别进行分段线性化处理，从而可达到将非线性规划问题转化为线性规划问题的目的。

由前述可知，在防洪规划模型中具有非线性单变量函数的项目包括水库投资费用函数、泄洪建筑物投资费用函数、洪灾损失函数、水库泄流函数等。这些一元的非线性函数中有些属于凸函数，有些为凹函数。为便于说明线性化处理的方法，这里仅以前述式（3-23）的洪灾损失极小化的目标函数为对象，并设其中的洪灾损失的单变量函数 $\mu_j(Q_j)$（$j=1$，2，…，J）可能为凸函数（如图 3-5（a））或凹函数（如该图中（b））。

首先讨论凸函数求极小化问题。根据图（a）曲线变化趋势，适当地用 M 段直线近似表达。图中 a_m（$m=1$，2，…，$M+1$）代表线段分界点相应的水平坐标。对应于各线段定义

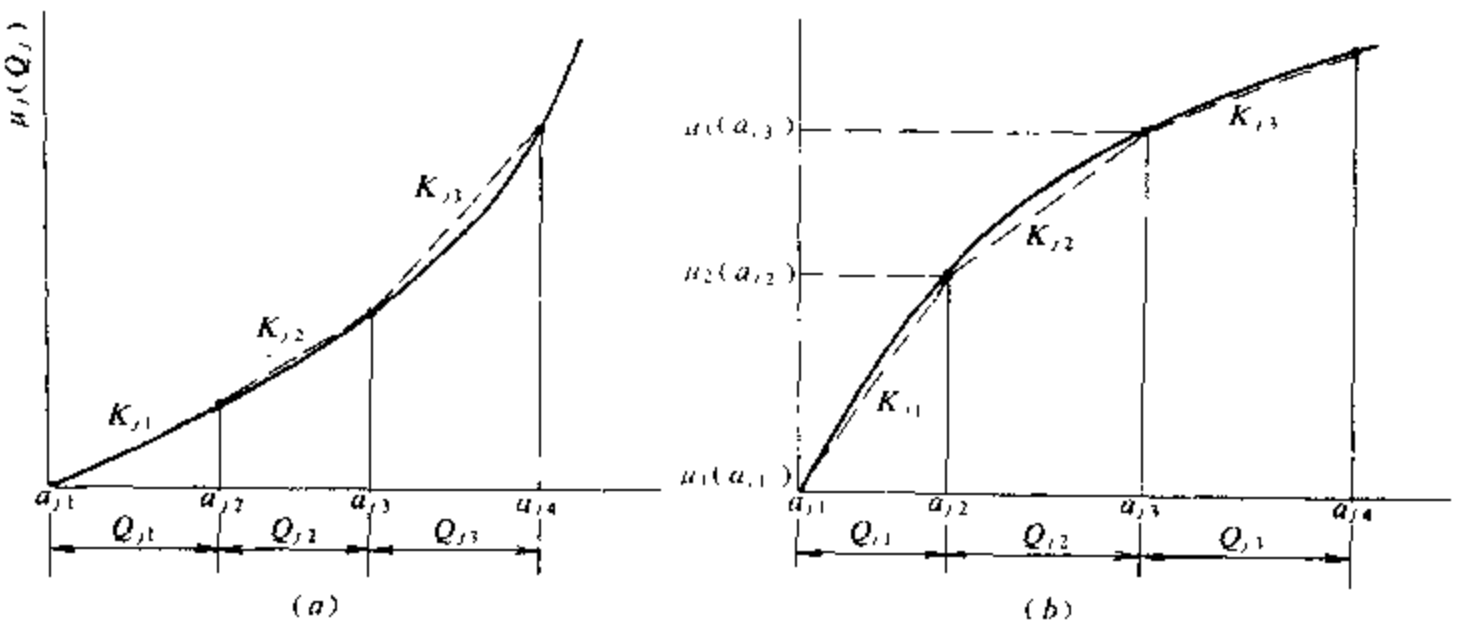

图 3-5　洪灾损失函数曲线线性近似示意图

一组辅助变量 Q_{jm}，$m=1$，2，…，M。这些辅助变量的数值应满足

$$Q_{jm} \leqslant a_{j,m+1} - a_{jm} \qquad \forall\ m \tag{3-25}$$

Q_{jm}的最小值为零；最大取值为 $a_{j,m+1}-a_{jm}$。决策变量 Q_j 可由上述辅助变量的和组合来代替，即

$$Q_j = a_{j1} + Q_{j1} + Q_{j2} + \cdots = a_{j1} + \sum_m Q_{jm} \tag{3-26}$$

图中 K_{jm}（$m=1$，2，…，M）表示各线段的斜率。由图（a）可见，辅助变量与洪灾损失的关系可作如下表达：

$$\mu_j(Q_j) = K_{j1}\,Q_{j1} + K_{j2}\,Q_{j2} + \cdots = \sum_m K_{jm}\,Q_{jm} \tag{3-27}$$

假如防洪地点 $j=1$，2，…，J 的洪灾损失函数均为凸函数，仿上述方法对各个一元凸函数作分段线性表达之后，可将前述目标函数式（3-21）表达为

$$\min\left\{C = \sum_j \sum_m K_{jm}\,Q_{jm}\right\} \tag{3-28}$$

与上述线性化处理的规定相对应，必须增加如下约束：

$$Q_j = a_{j1} + Q_{j1} + Q_{j2} + \cdots + Q_{jm} \qquad \forall\ j \tag{3-29}$$

$$Q_{jm} \leqslant a_{j,m+1} - a_{jm} \qquad \forall\ j,m \tag{3-30}$$

除了目标函数的变换之外，在约束方程中也必须对有关的决策变量用相应的辅助变量作替换。对整个模型表达式进行了上述的线性化变换处理之后，该模型即可按典型的线性规划算法（如单纯形法）进行解算。尽管线性化处理中引入一组辅助变量替换一个决策变量的作法会扩大线性规划问题的规模，目前已有成熟的线性规划程序包，借助于大型高速的计算机，可以较顺利地执行这种大规模线性规划问题的解算。线性规划的解算一般总是比非线性规划容易和有效。上面基于分段线性化处理，再引用线性规划解算的整个作法，在运筹学的教科书上称它为可分规划（separable programming）。

对于洪灾损失函数 $\mu_j(Q_j)$ 为凸函数的情形，由于该函数的一阶导数（即边际洪灾损失或称为损失增长率）随 Q_j 的增大而递增，这一特点保证了线性规划单纯形法将按损失增长率由低至高依次选入辅助变量 Q_{jm}，求出的解的特点是当 $Q_{j,m+1}$出现大于零的取值之前，

Q_{jm}必然已取其相应的数值上限，这一点确保式（3-29）的成立。

可分规划不适用于 $\mu_j(Q_j)$ 为凹函数求最小值的情况。当 $\mu_j(Q_j)$ 为凹函数时，其洪灾损失的增长率随 Q_j 的增大而递减，如图（b）所示分段线性化后在 Q_j 的高值区相应的线段的损失增长率最小。对于这种情况，线性规划单纯形算法将自动选择损失增长率小的线段为基变量，而无法执行上述的选入辅助变量的次序，这无疑使式（3-29）的规定失去其实际的物理意义。

改用混整数规划可以解算上述可分规划不能解决的问题，实行这种新的解算方法时必须借助于引入0—1变量来强制实行一种正确的优选程序，同时对决策变量引入的辅助变量的定义另作如下规定，定义辅助变量：

$$Q_{jm} \leqslant (a_{j,m+1} - a_{jm})\lambda_{jm} \qquad \forall\ m \tag{3-31}$$

式中：$a_{jm}(m = 1,2,\cdots,M+1)$ 的含义与前面规定相同，它表示线段端点的水平坐标值；λ_{jm} 为0—1变量，即

$$\lambda_{jm} = 0 \text{ 或 } 1 \qquad \forall\ m \tag{3-32}$$

然后可写出用辅助变量替换决策变量的表达式

$$Q_j = \lambda_{j1} a_{j1} + \lambda_{j2} a_{j2} + \lambda_{j3} a_{j3} + \cdots + Q_{j1} + Q_{j2} + Q_{j3} + \cdots \tag{3-33}$$

执行此式时应满足如下约束：

$$\sum_m \lambda_{jm} = 1 \tag{3-34}$$

由于 λ_{jm} 为0—1变量，式（3-34）的规定表明在执行替换式（3-33）的运算时，只有一个 λ_{jm} 可能取值为1，即该多项式中只有唯一的一个 $\lambda_{jm} a_{jm}$ 及其相对应 Q_{jm} 为非零项。由图（b）分段线性图示可以将洪灾损失函数表达为

$$\begin{aligned}\mu_j(Q_j) &= \mu_1(a_{j1})\lambda_{j1} + \mu_2(a_{j2})\lambda_{j2} + \cdots + K_{j1} Q_{j1} + K_{j2} Q_{j2} + \cdots \\ &= \sum_m \{\mu_m(a_{jm})\lambda_{jm} + K_{jm} Q_{jm}\}\end{aligned} \tag{3-35}$$

式中：K_{jm} 表示线段 m 的斜率；$\mu_m(a_{jm})$ 为线段 m 的延长线在纵坐标上的截距。当式（3-35）作为目标函数的组成函数时，显然必须相应地加上式（3-31）至式（3-34）所示的约束方程。加入0—1变量之后，模型中将同时有实型和整形变量，而属于混合整数规划问题。0—1变量 λ_{jm} 的设置，以及整数规划的解算方法，将强制模型解算时同时计入 Q_j 各种可能取值范围的优选。

第四章　水电能源开发的系统分析

第一节　概　　述

一、水能在我国能源中的地位

水能、煤炭、石油和天然气是当今公认的常规一次能源。我国水能资源的理论蕴藏量按装机容量计为 67600 万 kW，按年电量计为 59222 亿 kW·h；可开发水能资源装机容量为 37853 万 kW，年电量为 19233 亿 kW·h、我国水能资源总占有量居世界第一位。

我国常规能源的构成情况，可根据各种资源的剩余可采储量，分别折算为标准煤，以求出所占比重。煤炭的剩余可采储量只计入动力煤，统计中扣除焦煤的剩余可采储量之后的煤炭剩余可采储量近似地作为动力煤的剩余可采储量。水能为再生能源，其特点是其可采储量不因开发而减少，因此可以将可开发的水能资源作为水能的剩余可采储量的计算基数，乘 100 年的利用时间作为可与其它非再生能源对比的剩余可采储量。各种能源经统一折算后的构成比例如表 4-1 所示。

表 4-1　　我国常规能源构成情况

项　　目	煤炭（动力煤）	石　　油	天 然 气	水　　能	合　　计
探明储量	3855 亿 t	68.1 亿 t	2337 亿 m^3	59222 亿 kW·h	
剩余可采储量	1927.5 亿 t	16.26 亿 t	1784 亿 m^3	19233 亿 kW·h	
折算标准煤（亿 t）	1376.2	22.8	2.4	769.3	2170.7
比重（%）	63.4	1.1	0.1	35.4	100

由表 4-1 可见，煤炭资源是我国的主要能源，占 63.4%，水能资源居第二位，占 35.4%，二者是我国能源结构的支柱。粗略地讲，我国能源构成中，动力煤、水能分别占 2/3 和1/3 的比重，水能资源占有重要的地位。

二、我国水电开发现状

解放前，我国水电事业十分落后，旧中国遗留下来的水电装机容量只有 16.3 万 kW，年发电量只有 7.1 亿 kW·h，其中 15 万 kW 在东北，其余不到 1 万 kW 分散在四川、云南等地。

解放后，我国水电事业有了很大的发展。目前我国已建成大、中、小型水电站 8 万多座，遍布全国各地。至 1988 年，我国水电装机容量已达到 3265 万 kW，是解放前的 200 倍，年发电量是 1080 亿 kW·h，是解放前的 152 倍。1988 年水电、火电的装机容量比值为 29∶71，年发电量比值为 20∶80；可开发水能资源的利用程度仍然很低，仅为 5.6%。我国水电建设迅速发展的同时显示出开发水电的如下主要优越性。

1. 促进了电网的发展，改善了电力系统供电质量，提高了供电的经济性和可靠性

水轮发电机组的特点是起停迅速，调控灵便，机组出力可变动幅度较大，机械性能可

靠。这些特点使水电站与火电站相比，更适合于担任变动的峰部负荷和更具有对付系统突然事故的应变能力，可在电力系统中起调峰、调频和事故备用等方面的作用。由于水电站担任峰荷，火电站就可以经常地担任基部负荷，按平稳出力发电，提高火电机组效率，节省系统煤耗。水火电之间合理配合，扬长避短，可以达到提高电力系统供电质量的效果。

由上述可见，水电站的优越功能只有在一定的电力系统的背景下，或只有在一定的电力负荷和水火电的组合条件下，才能得到充分的发挥。水电建设的进展与电力系统的不断发展扩大是紧密相连、相互促进的。大型水电站的建成势必要求扩大的电力系统与之相适应。随着我国一些中、大型水电站的建成及远距离输电技术的发展，目前我国已形成了东北、华东、华中、华北、西北、西南等大型电力系统。不同河流、不同水系、不同省区的水电站联网运行有利于发挥水电站群的径流电力补偿调节作用和进一步提高电力系统供电的可靠性和经济性。

2. 促进了水资源的综合利用和地区经济的发展

水资源系统往往具有防洪、水力发电、灌溉、航运、工业和居民给水、水产养殖、改善水质和旅游等多方面的功能。水电开发是水资源综合开发的有机组成，水电站是水资源系统的组成单元，水电建设带动和促进了水资源综合开发的逐步实施。我国许多已建成的水电站水利枢纽，目前正发挥着防洪、兴利的综合利用效益。

由于水电站的建成为工农业提供了廉价的动力，带动和促进了不少地区经济的发展。如黄河上游刘家峡、盐锅峡和八盘峡的建成，促进了甘肃省有色金属冶炼、石油化工、铁合金、炭素及轻纺工业的迅速发展。随着龙羊峡水电站的建设，已安排在青海西宁建设大型炼铝基地，开发柴达木盆地丰富盐矿。云南以礼河梯级水电站的建成，带动了云南东川铜矿和昆明磷矿的建设。水电建设在推动我国边远地区的经济发展，改善我国工业的地区布局，加强我国的民族团结等方面已发挥了巨大的积极作用。

3. 实现了对一部分可再生的水能资源的开发利用，相应地减轻了矿物能源的消耗及其所带来的环境污染

煤炭、石油、天然气等矿物能源是经过漫长地质年代形成的化石燃料，其储量将随着对它的开采而日趋减少，乃至于枯竭，属于非再生资源。水能资源随水文循环周而复始地不断再生，不加以开发利用，它就不断地白白流失，早开发则多利用。从电力系统电力供需平衡看，水电的投入，可以替代火电的部分负荷而节约火电的燃料消耗，保存了部分煤炭资源的储备。

火电厂的主要燃料是煤炭。从环境保护的角度讲，煤炭是最脏的能源。煤炭开采、加工、贮运和消费的过程都会带来对环境的污染。煤炭直接燃烧时要排出烟尘、二氧化硫、氮氧化物和废热，因此火电厂是大气污染的主要污染源。火电厂烟囱排出烟尘吸附着一些致癌物，大气中的二氧化硫和氮氧化物是形成酸雨的主要物质。水电是清洁的能源，多开发水电，可以相对减少火电的煤炭燃耗而减轻大气污染。

三、我国水电建设的前景

能源是实现国民经济现代化的物质基础，能源向工农业生产提供原动力，是国民经济发展的先决条件。电力是二次能源，由各种天然能源，如煤炭、石油、天然气、水能、核

能等一次能源，可转换产生电能。

从水电建设和电力生产情况看，我国目前水能装机容量约占全国总装机容量的30%，水电的年发电量约占全国年发电量总量的20%。由前述我国常规一次能源构成可知，在可开发的常规能源中水能资源所占比重为35.4%。可见目前我国的水电开发情况与水能在我国能源结构中的地位不相称，应加速水电开发。

从世界经济发展和能源建设情况看，不论是发达国家还是发展中国家，都是优先开发水电。从可开发水能资源的开发利用程度看，世界上发达国家的开发利用率平均为40%，发展中国家平均为8%，世界各国平均为20%。其中法国、瑞士、意大利都已超过90%，挪威、原西德、日本、埃及超过60%。虽然我国占有的水能资源总量居世界第一位，可是按1988年发电量计，我国可开发水能资源的开发利用率仅达5.6%，不仅远低于发达国家，甚至还低于发展中国家的平均开发利用水平。

为了实现我国规划提出的到2000年工农业年总产值翻两番的宏伟目标，我国电力工业至少应翻两番，到2000年电力装机总量将从1980年的6578万kW增加到24000～27000万kW，年发电能由3006亿kW·h增加到12000～13000亿kW·h。设想水电保持同步增长，到2000年我国水电装机约达到8000万kW，年发电量达到2300亿kW·h，相应的水能开发利用程度仅达12%，仍然低于目前世界平均开发利用率为20%的水平。

为加速我国水电开发，必须从认识上、体制上、政策上摆正水电在我国电力建设中的地位。

1. 我国能源发展的战略必须优先开发水电

对是否应该提水电优先，认识上并不一致。从早日利用流失的可再生的水能资源看，从世界各国开发能源的经验和趋势看，优先开发水电是普遍接受的做法。从我国电力生产规划看，到2000年只要求水电、火电建设保持同步增长，水电、火电年发电量比例基本上仍维持20：80，水能开发利用程度仅达到12%。还应该看到，这一水电规划目标的实现还存在许多具体困难。因此，不管优先开发水电的提法是否合理，是否可以被接受，从我国实际情况出发，加强水电建设，争取实现2000年规划中的水电开发的任务是当务之急。

2. 加强对水电生产兼有一次能源开发和二次能源生产的优越性的认识

可以将水电和火电的生产全过程，即包括一次能源开发和转换为二次能源的情况作近似地对比。水电站及其水工枢纽的有关水工建筑物用于开发水能相当于煤矿采煤；水电站的输水设施输送水量相当于铁路运煤；水电站厂房与火电厂相似进行一次能源至二次能源的转换，产生电能。从一次、二次能源的全部生产功能看，水电站及其水工枢纽的建设等价于火电厂建设及相应所需的煤矿建设和铁路建设三个环节。因此规划方案经济比较中，替代水电站的火电厂不仅要计入电厂的基建投资和运行费用，还必须仔细计入由于火电用煤而增加的煤矿和铁路的基建投资和运行费用。同时还不能忽视煤炭生产和运输，以及火电生产对社会、生态和环境所产生的不良影响。以上分析可以帮助我们加深这样一种认识，水电是一种廉价的、清洁的能源。

3. 应从建设和管理体制上改善水电建设的地位

我国现行电力基建管理和投资分配体制，实际上是将水电与火电一样作为二次能源对

待。与开发一次能源投资相比，国家用于二次能源的电力投资比较少。对电力建设而言，若将水电与火电放在相同的地位来分配投资，由于水电集一次、二次能源于一身，必然会显得“投资大、工期长”，难免造成投资向“投资小、工期短”的火电建设倾斜。

当前我国煤炭和电的价格与价值的严重偏离，对水电建设带来了不可忽视的不利影响。煤炭价格影响着用水电替代火电的经济可行性。目前我国电价偏低，加之水电建设投资利率和电力生产税率的不合理，形成办电亏损，用电有利，不利于促进水电建设的发展。在电价结构上目前并没有按峰荷、基荷分别定价，实际上是不合理地低估了水电所创造的经济价值。

强调水电建设兼有一次、二次能源生产的性质，从管理和投资分配体制、投资利率、税率等方而应享有一次能源的待遇，加上今后的价格改革，可以预期，在深化我国经济体制改革的过程中，我国水电建设的状况将会出现较大的改观。

四、系统分析在水电开发中的应用

开发水能是水资源开发利用的一个重要组成部分。水资源系统往往具有防洪、水力发电、灌溉、航运、工业和居民给水、水产养殖、改善水质、旅游等综合利用功能。水电站是水资源系统的组成要素。水电站建成投入电网运行又使它成为电力系统的供电单元。可见，水电站乃是水资源系统和电力系统所共有的系统要素。随着我国各大区的大型电力系统的形成，在同一电力系统中联网运行的水电站往往处于不同河流，不同水系，不同省区，构成了大型电力系统与多个水资源系统之间的复杂联系。水电开发必须同时从水资源系统和电力系统统筹兼顾，全面考虑。离开了系统观念，不从宏观上研究系统要素之间在时间和空间上的相互关联，就不可能作出水能规划的合理布局。

鉴于水能规划的上述复杂性，规划实践中往往采用系统分解协调的观念来开展系统规划工作。例如在进行水资源系统规划时，把整个系统按用水部门分解为多个子系统，分别进行防洪规划、水能规划、灌溉规划等等，子系统的规划服从于系统整体的综合协调。水能规划又必须被置于电力系统规划之中作统筹考虑，必须同时兼顾水资源系统和电力系统的综合协调。大型电力系统的水能规划将涉及与多个水资源系统之间更复杂的协调关系。

水能规划中必须研究水电站群最优联合运行方式和确定与水电站规模有关的设计参数，如装机容量、正常蓄水位、死水位等的最优组合。设计参数与运行方式是水电站群规划问题中的待定决策变量。在选择水电站群的组合方案时，必须以每个方案在最优运行方式（起码是合理运行方式）下的效益指标作为评价方案优劣的依据。

本章将在“水资源开发利用”课程所介绍的水能规划常规方法的基础上，进一步介绍用系统分析的方法解决水电站群水能规划中的有关问题。

第二节　水电站群联合调节方式及其动能指标计算

一、概述

由单一水电站水能计算的内容可知，水电站的动能指标是保证出力和多年平均年发电量。后一指标主要用于表明水电站的发电效益。保证出力是指相应于设计保证率临界供水

期的平均出力。以年调节水电站为例，保证出力是设计枯水年供水期的平均出力，与它相对应可求出供水期的保证电能。根据水电站的保证出力（或保证电能），以设计水平年电力系统负荷图为背景，通过电力电量平衡分析计算，可确定水电站在系统负荷图中的工作位置及相应的水电站的最大工作容量，进而最终确定水电站的装机容量。

实际电力系统往往是多个水电站联网运行，因此显然不能按水电站单独运行，而是必须按水电站群联合运行的方式，合理确定其动能指标。与此相关联，在电力电量平衡中，我们不能仅从单一水电站的条件出发，而必须综合考虑联合运行中各水电站的特点，合理确定各水电站的负荷位置及其工作容量。本节先讨论如何合理推求水电站群的联合运行方式及其相应的动能指标，水电站群工作容量的合理分配将在下节介绍。

二、水电站群补偿调节

处于同一电力系统中的水电站群有些可能是同一河流上的梯级水电站，有的是分布在不同河流、不同水系上。处于同一河流的梯级水电站在联网运行的条件下，它们之间不仅有电力联系，而且存在径流联系及水力联系。径流联系表现在上游水电站的下泄水量是下级水电站水库入流的组成部分。水力联系主要表现在梯级水头的利用及相衔接的梯级水电站的下级水库水位对上级水电站工作水头的影响。分布在不同河流上的水电站联网后属于并联形式，只通过电力联系来体现系统关联。

如果将联网运行的水电站群看成是电力系统的子系统，即水电系统，那么联网的作用首先表现在可以把各水电站的出力过程按时序相加之后作为水电系统整体的总出力过程。由于各水电站所处流域的自然地理条件的差异，各站径流的年际变化及年内变化往往存在一定的差别。径流丰枯变化的不同步性，影响着各水电站出力变化的不同步性。水电站之间可以起到丰枯调剂的作用，这种补偿作用通称为水文补偿。可以用简单的方法进行对比，以显示水文补偿的效果。以叠加后的水电系统总出力过程为依据，可以统计出相应的水电系统的保证出力。另外将各水电站单独运行时求得的保证出力相加得到出力之和也当成水电系统的保证出力。显然前者大于后者，其差值随径流不同步性的显著性的增加而增大。由此可见，水电站群联网运行的水文补偿效益表现在提高水电系统的保证出力。

水文补偿是水电站联网运行后自然产生的补偿效益，研究水电站群的联合运行方式时，应该是在注意保持和发挥水文补偿作用的同时，充分利用水电站群中各水电站水库调节径流的能力，根据水库不同的调节性能，水电站水头高低，入库径流的大小，以及不同的综合利用要求等多方面的因素，探求联合运行的最优方式。可以将基于水文补偿，发挥水库调控功能而获得的效果当成是库容补偿。

通常把推求水电站群联合运行方式的方法称为补偿调节（或径流电力补偿调节）。补偿调节效益包含了水文补偿和库容补偿效益。在研究联合运行方式时，必须综合考虑径流不同步性和水库不同调节性能的特点。尽管从概念上讲，可以人为地区分出水文补偿和库容补偿效益，但是从所寻求的运行方式上讲，二者的作用是难以严格分开的。水电站群联合运行的补偿调节效益，往往同时表现在保证出力和多年平均年发电量的提高上。

推求水电站群联合运行方式的方法可分为常规法与优化法二类。电当量法和逐级补偿法是常见的常规方法。电当量法的特点是设想将水电站群聚合为一个等效水库，通过电当

量转换把水库群的库容归并为一个电当量库容，水电站的径流过程经电当量转换后聚合为能量输入过程，然后绘制能量差积曲线（或累积曲线），按差积曲线法的原理，可求出该等效水库的能量输出过程，即为水电系统的出力过程，据此可分析确定水电系统的保证出力。

逐级补偿法是国内更常用的常规方法。该法的要点是首先将联合运行的水电站按调节性能、水头高低、水量大小、装机容量大小及综合利用制约等方面的条件排出补偿顺序。先划分出被补偿水电站，所有径流式电站（包括无调节、日调节、周调节）均属于被补偿电站。其他有长期调节能力的水电站均作为补偿电站。补偿电站的先后补偿次序原则上可按调节性能判断，将调节性能相对差的电站（如季调节水电站）先补偿，调节性能最好（如多年调节）水电站最后进行补偿。仅按调节性能考虑补偿次序可能不合理。例如一个装机容量不大的多年调节水电站，尽管有良好的调节性能，但它所能发出的出力（或电量）相对讲，显得太小而不能起明显的补偿作用。对于存在过多的综合利用制约的水库，其补偿调节的作用必将受到限制。因此，排序时必须综合考虑上述各种因素。

逐级补偿法的水能计算的步骤是首先求出被补偿电站的出力过程。有多个被补偿电站时，则将各被补偿电站的出力过程按同时序相加得到被补偿的出力过程。然后按补偿次序进行逐级补偿计算。上述被补出力过程基本上保留了水流出力过程的丰枯变化情况。确定补偿电站的运行方式时，原则上是充分利用库容的调节能力，供水期尽量填平被补的出力过程，蓄水期在力求期末蓄满有效库容的同时，适当照顾到使补偿电站的出力过程起均化被补出力过程变化的作用。按此原则初定出补偿电站的出力过程后，按已知出力进行逐时段水能计算。若计算结果出现供水期末水库过早放空或没有放空等不合理现象，必须调整初定出力过程，重新计算，这一试算结果应最终满足水量平衡的闭合要求。经补偿计算后，求得的被补出力过程与补偿出力过程按时序叠加后，可作为新的被补的出力过程，作为另一个补偿电站进行补偿调节的基础。用上述补偿调节的相似作法，按预先定出的补偿次序，逐一进行补偿调节计算，直至完成所有补偿电站的调节计算，最终得出经逐级补偿后的水电系统的出力过程。

上述常规补偿调节的特点是没有预先提出判别运行方式优劣的准则，因此运行方式的制定带有主观任意性，这种主要凭经验判断的作法可以求出相对合理的运行方式，而不能找出最优的运行方式。

三、水电站群联合运行最优准则

规划阶段，寻求水电站群联合运行方式的最优解的目的是为了合理地确定水电站的规模。对应于选定的一种联合运行方式，相应地可以得出水电系统的保证出力及多年平均年发电量。根据水电系统的保证出力，通过电力电量平衡，可以确定水电系统的最大工作容量。由此可见，水电系统的保证出力反映了它的容量效益。显然，水电系统的多年平均发电量反映了它的期望的能量效益。

仔细分析现有的水电站群联合运行补偿调节的常规方法可以看出，这些方法的主要特点是追求提高水电系统的保证出力及其相应的容量效益。或是说，这些方法隐含着以水电系统保证出力的大小作为判断联合运行方式优劣的准则。一种合理的运行方式往往是在提高水电系统的保证出力的同时也使其多年平均发电量有所增加。

必须注意到水电站群联合运行的不同方式可以出现两种不同的运行效果，其一是保证出力增加较明显，发电量也有所增加；其二是保证出力的增加虽不及前者，但其发电量增加多于前者。这种情况表明，评价水电站群联合运行方式时，实际上还存在对于水电系统的容量效益和能量效益的兼顾和权衡。水电系统的能量效益表现在可以用水电能量替代同一电力系统中火电厂的发电量，节省煤耗，获得节能效益。

基于上述分析，可以将目前水电站群联合运行最优方式的研究中所采用的最优准则归纳为主要的二种类型。其一是以水电系统保证出力最大为准则；其二是以水电系统的综合发电效益（包括容量效益和能量效益）最佳为准则。

以保证出力最大为准则的目标函数式为

$$Z = \max_{\theta} \min_{t \in T} \{N_t, t = 1, 2, \cdots\} \tag{4-1}$$

式中：t 为时段序号；T 为计算期所有时段序号的集合；N_t 表示第 t 时段水电系统的出力；θ 表示水电站群的联合运行策略。

这一最小最大的表达式的内涵是指对于任一运行策略而言，可以从计算期水电系统的出力过程中选取其最小值。然后再由各运行策略的最小出力值的对比中挑选出其中的最大值，其相应的运行策略即为最优运行策略。目标函数的函数值 Z 即是选定的最优运行策略相应的计算期最小出力。

由保证出力的定义可知，计算期的最小出力并不是保证出力。式（4-1）作为保证出力最大的目标函数的表达式的作法主要是倚重于保证出力与最小出力之间所存在的一定的逻辑关系。这种表达的采用主要是为了避免用多时段平均的保证出力的表达而带来解算上的困难。

与水电系统综合发电效益最佳的准则相应的目标函数可作如下表达。

$$F = \max_{\theta} \sum_{t=1}^{T} u_t \tag{4-2}$$

式中：t 为时段序号；T 为计算期时段总数；θ 为联合运行策略；F 为计算期总发电效益；u_t 为水电系统 t 时段的发电效益，它可按下式计算

$$u_t = \begin{cases} C_1 D_t + C_2 (E_t - D_t) & E_t > D_t \\ C_1 E_t - \xi (D_t - E_t) & E_t \leqslant D_t \end{cases} \tag{4-3}$$

式中：E_t 为时段 t 水电系统的发电量；D_t 为 t 时段的保证电能，即

$$D_t = N_p \cdot \Delta t \tag{4-4}$$

其中：N_p 为保证出力；Δt 为时段小时数；C_1、C_2 具有电价的涵义，它们分别代表保证电能和季节性电能的单价；ξ 表示罚系数，当 $D_t > E_t$ 时，$D_t - E_t$ 表示与保证电能相比的缺电程度，它反映正常供电的破坏深度。

式（4-3）是下面所要介绍的数学模型将采用的目标函数式。为加深理解，便于应用，特进一步对它作如下的几点讨论和说明。

1）D_t 作为时段保证电能，由式（4-4）可知，它可由保证出力 N_p 推求。可是在实际计算中，一种运行方式的保证出力必须是在运行策略选定后才能够相应地确定。式（4-4）中的 N_p 值具有与保证出力相似的涵义，但并不要求其值一定是保证出力值，它在目标函数式

中实际上起着模型参数的作用，由它所推求的 D_i 在式（4-3）中实际上也反映着参数 N_p 的作用。N_p 值可以按水电站群中各电站单独运行的保证出力之和，或略大于该和值的数值范围取值。从式（4-3）看，N_p 值将把水电系统的电能划分为两个部分，超出 D_i 的电能将按较低的单价计算效益。略为提高参数值 N_p，为了体现综合发电效益的目标，数学模型解的结果将会出现高于保证电能的季节性电能部分地向保证电能转移；即提高 N_p 值的结果，求出的运行方式的保证出力值一般也略有提高。

2）如前所述 C_1、C_2 具有保证电能及季节性电能单价的涵义，由于目前我国尚未定出统一的分部电价，因此难以对这二个参数赋值。计算中可按 $C_1/C_2=2\sim4$ 的参考比值范围赋予二者的相对值。也可以借用多目标决策权重系数法的观念，把 C_1、C_2 看成不同性质的电能分别赋予不同的权重系数。C_1/C_2 的比值对运行方式解算结果的影响性质表现为随着该比值的加大，水电系统的保证出力将相对增大。

3）当水电系统的发电量不能满足保证电能的要求时，电力系统将发生正常供电的破坏。目前还很难确定这种破坏所造成的实际经济损失。正常供电破坏时加以惩罚的概念的引入，并不是企图去反映这种破坏的经济损失，罚系数 ξ 实际上是用来作为模型参数。如果一种运行方式的破坏比较严重，加上惩罚项之后，其综合发电效益将有所降低，与其它运行方式对比，它更容易被剔除。罚系数 ξ 的取值愈大，选定的运行方式的保证出力也随之增大。

四、水电站群联合运行聚合库偶法模型

（一）聚合库偶的构成及其电当量表示

这里首先以同一河流上的梯级水电站为对象，讨论聚合库偶法的原理。对于存在水力和电力联系的梯级水电系统而言，上级水库的放水决策，必须考虑到其放水量将作为下级水库入库水量的组成部分，而使梯级水库之间的运行情况相互关联，因此寻求水电梯级联合运行方式是一个复杂的多维决策问题。聚合库偶法的出发点是根据聚合分解原理，把一个多维决策问题，分解为若干个二维决策问题，以克服高维问题产生的计算上的困难。

以图 4-1 所示的 n 个梯级组成的水电系统为对象，可按如下做法有序地构成 $n-1$ 对库偶。规定按水流方向从上游至下游排列水库的序号。

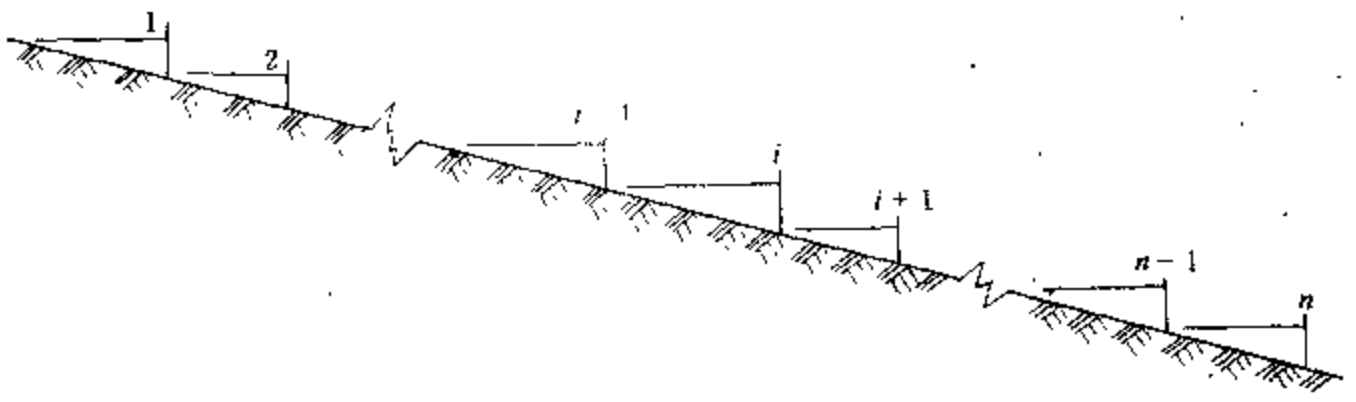

图 4-1　梯级电站水库示意图

首先以第 1 级水库为上游水库，将第 2，3，…、n 级水库聚合为一个等效水库，构成第一对梯级库偶；其次以第 2 级水库为上游水库，将第 3，4，…，n 级水库聚合为一个等效水库，构成第二对梯级库偶。同理类推，以第 i 级水库为上游水库，将 $i+1$，$i+2$，…，n 级水库聚合为一个等效水库，构成第 i 对梯级库偶。显然，第 $n-1$ 对梯级库偶，将只由

第 $n-1$ 级和第 n 级二个实际水库构成上下游梯级库偶。

上述库偶的解算涉及对聚合水库运行要素的表达。从水力发电看，由于各水电站引用水量的利用水头不同，各水库的入流、出流和蓄水量等要素的单位水量具有不等价的电能效果，必须先将这些要素转换成相应的电能当量，然后才能分别聚合为等效水库的输入、输出及蓄能状态等电当量的运行要素。

设水库 i 时段 t 的入流水量、出流水量及时段初蓄水状态分别记之为 $y(i,t)$、$q(i,t)$、$x(i,t)$；与水库 i 相对应的聚合水库的输入、输出和时段初蓄能状态分别记之为 $p(i+1,t)$、$r(i+1,t)$、$S(i+1,t)$，其电当量的计算式为

$$p(i+1,t)=\sum_{j=i+1}^{n}\sum_{l=j}^{n}h(l,t)y(j,t) \tag{4-5}$$

$$r(i+1,t)=\sum_{j=i+1}^{n}h(j,t)q(j,t) \tag{4-6}$$

$$S(i+1,t)=\sum_{j=i+1}^{n}\sum_{l=j}^{n}h(l,t)x(j,t) \tag{4-7}$$

式中：$h(l,t)=9.81\eta(l)\overline{H}(l,t)$。这里 $\eta(l)$ 表示水电站 l 的发电效率；$\overline{H}(l,t)$ 表示水电站 l 在第 t 时段的平均水头。

（二）库偶动态规划数学模型

基于上述聚合库偶的构成，可以将梯级 n 个水电站联合运行问题分解为 $n-1$ 对库偶联合运行的子问题，按自上游至下游的次序，逐一进行库偶联合运行的解算。对第一对库偶的解算求出第 1 级水电站的出力过程，第二对库偶的解算求出第 2 级水电站的出力过程。同理类推，最后对第 $n-1$ 对库偶的解算可同时求出第 $n-1$ 级和第 n 级水电站的出力过程。由此可见，不管梯级水电站由多少个组成，分解为梯级库偶之后，每个子问题的性质均属于二维多阶段决策过程，可采用动态规划寻求其最优运行策略。

以第 i 对库偶为例，介绍库偶动态规划数学模型的有关表达式。

这里采用水电系统综合发电效益作为衡量水电站群联合运行的最优准则，与此相应，式（4-2）和式（4-3）即是此模型的目标函数式。

根据动态规划原理可写出其顺时序的递推方程为

$$\begin{cases} f_1[x(i,1),S(i+1,1)]=0 \\ f_{t+1}[x(i,t+1),S(i+1,t+1)] \\ =\max\limits_{q,r}\{u_t[x(i,t),q(i,t);S(i+1,t),r(i+1,t)]+f_t[x(i,t),S(i+1,t)]\} \\ t=2,3,\cdots,T \end{cases} \tag{4-8}$$

式中：f_t 函数表示从计算期初至时刻 t 水电系统的累积发电效益函数；u_t 函数为面临时段 t 水电系统的发电效益函数，式（4-3）是该函数的具体表达式。该式中 E_t 为面临时段 t 水电系统的发电量，对于第 i 对库偶面言，此发电量可按下式计算：

$$E_t=G(i,t)+r(i+1,t)+\sum_{l=1}^{i-1}G(l,t) \tag{4-9}$$

式中：$G(i,t)$ 表示第 i 电站 t 时段的发电量；$r(i+1,t)$ 表示与第 i 级水库相对应的下游聚

合水库 t 时段的发电量；上式右端第一、二项之和表示第 i 对库偶 t 时段发电量；第三项为第 1，2，…，$i-1$ 级水电站 t 时段发电量之和。

从 E_i 的计算式可引伸出几点说明，以助于加深对聚合库偶法解算方法的了解。

1）对于第 i 对库偶来说，研究该库偶联合运行方式的对象只涉及第 i 级水库及第 $i+1$，…，$n-1$，n 级等下游梯级水库。第 i 级水库上游各级水电站的运行方式已由先行的逐对库偶的解算逐一确定，因此第 1，2，…，$i-1$ 级电站的出力过程已由先行的库偶解算中求出。

2）尽管库偶解算的任务是求其所涉及的水电站的运行方式及其相应的出力过程，但是在涉及评价库偶运行方式的优劣时，不能仅从库偶的发电情况去判断其综合效益，而应当从水电系统出发，才能合理地体现前述的目标函数。因此，在分析第 i 对库偶运行方式时，应该将已确定的水电站的出力过程作为已知的背景条件加以计入。

3）尽管通过库偶解算能同时确定上级水库 i 的运行方式和与它相应的聚合水库的运行方式，实际上仍然不能确定聚合水库所代表的第 $i+1$，$i+2$，…，n 级水库的具体运行方式。可见一对库偶的解算结果实际上只能得到一个实际水库的运行方式的解答，而不能给出所涉及的下游实际水库运行方式的解答。唯一的例外是对于第$n-1$对库偶，因为它是由第 $n-1$，n 级水库构成，梯级库偶的下级水库不是等效的聚合水库，而是实际水库，因此库偶解算的结果就可以同时给出这两个水库的运行方式的解答。

按上述动态规划递推方程式（4-8）寻求库偶联合运行的最优解时必须满足如下的约束条件。

1. 连续律约束

库偶的联合运行是一个多阶段决策过程。从库偶的 t 时段初，状态为 $[x(i,t),S(i+1,t)]$ 出发，取决策为 $[q(i,t),r(i+1,t)]$，那么库偶将转移到时段末状态 $[x(i,t+1),S(i+1,t+1)]$。根据水量平衡和能量平衡原理，可写出梯级库偶的如下状态转移方程：

$$x(i,t+1)=x(i,t)+y(i,t)+q(i-1,t)-q(i,t) \tag{4-10}$$

$$S(i+1,t+1)=S(i+1,t)+p(i+1,t)+q(i,t)\sum_{j=i+1}^{n}h(j,t)-r(i+1,t) \tag{4-11}$$

式中：$q(i-1,t)$ 是第 $i-1$ 级水库的下泄水量，从梯级水库的水量联系看，上级水库下泄水量是下级水库入流的组成部分。与此相仿，$q(i,t)$ 作为第 i 库的出流水量，考虑下游梯级水头的利用条件之后，可以换算成聚合水库 $i+1$ 的输入能量的组成部分。$q(i,t)$、$r(i+1,t)$ 为决策变量，后者即为聚合水库的输出能量，即时段发电量。$q(i,t)$ 是水库 i 的下泄水量，它包含水电站的引用水量和弃水量。由水量平衡式（4-10）可见，可以根据 $q(i,t)$，及水库的上下游水位，按水能计算求出水电站的出力和发电量 $G(i,t)$。弃水发生与否，以及弃水量的大小可以结合水库蓄水容量的限制，及水轮机的过水能力或水轮发电机组的出力限制等约束确定。例如可以将时段末水库蓄水量是否达到库容上限作为基本判断条件，如果时段末蓄水达到库容上限，且 $q(i,t)$ 已超过水轮机最大过水能力，那么该时段将发生弃水。

2. 有关运行要素上下限值约束

$$V^{\cdot}(i)\leqslant x(i,t)\leqslant V^{\cdot}(i,t)$$

$$O^{'}(i) \leqslant q(i,t) \leqslant O^{''}(i)$$

$$N^{'}(i) \leqslant N(i,t) \leqslant N^{''}(i)$$

$$S^{'}(i+1) \leqslant S(i+1,t) \leqslant S^{''}(i+1)$$

$$r^{'}(i+1) \leqslant r(i+1,t) \leqslant r^{''}(i+1)$$

式中：$V^{'}(i)$ 表示 i 库死库容；$V^{''}(i,t)$ 为 i 库防洪限制水位或正常蓄水位对应的水库蓄水容积；$O^{'}(i)$ 表示综合利用要求的最小泄量；$O^{''}(i)$ 为水电站 i 的最大过水能力；$N^{'}(i)$ 表示电站 i 的最小出力限制；$N^{''}(i)$ 表示该电站的装机容量或水头预想出力限制；$S^{'}(i+1)$、$S^{''}(i+1)$ 分别表示聚合水库蓄能的下限和上限值；$r^{'}(i+1)$、$r^{''}(i+1)$ 分别表示聚合水库输出电当量的下限和上限值。

（三）模型解算说明及示例

由式（4-5）～（4-7）可见，聚合水库运行要素计算中必须给出含有时段平均水头因素的 $h(i,t)$ 的值。可以设法确定梯级水电站运行方式的一个可行解作为初始解，相应地可给出各水库的初始运行轨迹及平均水头情况。为克服第一轮计算因初始轨迹带来的误差，可用第一轮求得的运行轨迹为初始轨迹进行下一轮计算。一般进行二至三轮计算可达到收敛。

库偶动态规划模型采用离散微分动态规划（DDDP）算法。以初始可行解的蓄水、蓄能状态的运行轨迹为基础，上下各取正负增量，形成运行廊道，在廊道中取 3 个离散状态或 5 个离散状态，然后可按上述动态规划递推方程执行寻优计算，求出的运行轨迹作为另一个初始可行解，重新构成运行廊道及动态规划解算。循此逐次迭代，直至满足规定的收敛条件为止，可得出库偶联合运行的最优解。

由上可见，聚合库偶运行要素的电当量计算和所采用的 DDDP 法都要求预先给出梯级水电站联合运行的初始可行解，显然任何一个可行解都可以作为二者共同需要的初始运行轨迹。可由已进行的任何常规方法的成果取出上述所需的初始可行解。若无现成可用成果，可按自上而下的顺序，考虑各梯级电站的自身约束条件，逐级进行水能计算，从而得出梯级水电站联合运行的一个可行解。在下述算例中初始运行轨迹就是按逐级计算的做法，每个水库的运行方式均采用简化运行策略作为运行决策的指示。

算例对象是由 3 个水电站组成的梯级。为了对比，同时进行了梯级整体的三维动态规划 DDDP 法和库偶动态规划的解算。

模型目标函数中的发电效益的表达式为

$$u_t = \begin{cases} C_1 D_t + C_2(E_t - D_t) & E_t > D_t \\ C_1 E_t - \xi(D_t - E_t) & E_t \leqslant D_t \end{cases}$$

对式中涉及的模型参数在算例中的取值情况作如下说明。算例中取罚系数 $\xi=0$，即不计入正常供电遭到破坏时的惩罚。权重系数一般采用的比值范围为 $C_2/C_1=1/4\sim1/2$，算例中将其比值范围扩大到 $C_2/C_1=1\sim1/8$。当其比值为 1 时表示不区分保证电能和季节性电能的价值，这种情况实际上是以水电系统发电量最大为目标。参数 D_t 具有保证电能的相似涵义，其作用是将水电系统的发电量划分为二种不同质的电量。由前述可知，可以由规定水电系统的出力 N_p 为参数，按 $D_t=N_p\Delta t$ 换算出各时段的 D_t 值。参考算例梯级的保证出力值的大小，参数 N_p 的取值范围为 50～90 万 kW。

另外，算例中采用了二种计算期，其一是以设计枯水年为计算期，称之为代表年；其二是以含有丰、中、枯三种年份组成的计算期，称之为代表期。

表 4-2 是该水电梯级分别用库偶动态规划法和整体动态规划法对代表年进行计算而得出的供对比的主要成果。

表 4-2　　不同模型计算结果比较

项　　目	库偶模型		整体模型	
	有参数	无参数	有参数	无参数
梯级年电量（亿 kW·h）	74.00	76.35	74.01	76.42
最小月出力（万 kW）	69.1	32.0	70.0	25.0
最大月出力（万 kW）	143.1	155.2	136.1	171.2
N_p（万 kW）	70		70	
C_2/C_1	1/4		1/4	
JB-3000 机时（min）	63	67	140	140

表 4-2 中无参数的计算方案相当于取参数中的罚系数 $\xi=0$，权重系数比值 $C_2/C_1=1/1$，在这种参数取值的前提下，参数 N_p 的作用相应消失。无参数方案实际上是以水电系统发电量最大为目标。从表中成果看，无论是库偶动规算法，还是整体动规算法，无参数方案的年发电量明显大于有参数方案。有参数方案的特点是最小出力明显大于无参数方案的最小出力。表明无参数方案存在一种只追求发电量目标而不顾及保证出力的倾向。

表中库偶模型的成果是经过两轮计算的结果，所需计算时间是两轮运算的总机时。从所需机时对比，库偶模型的解算效率显著地高于整体模型。

从提高保证出力和发电量的效果看，两种模型的成果很相近。整体动态规划的模型及算法都是比较成熟的，库偶动态规划模型的解算结果与它对比相接近，表明库偶模型是可信的。当梯级水电站的数目超过 3 个时，用 DDDP 法整体解算将出现难以克服的高维障碍，库偶动态规划模型可以较好的克服这一困难。

（四）聚合库偶法模型在大型水电系统的应用

大型水电系统多属于较复杂的混联式系统，即是兼有串、并联的水电站群。任何混联式水电系统都可当成是若干个串联和并联子系统的组合。

将聚合库偶法扩展到求解混联式水电系统最优联合运行方式时，主要的问题是要弄清楚在这种较复杂的混联形式下，如何去形成库偶；同时在聚合水库的构成中，等效水库所要代表的库群可能出现兼有并、串联形式，对此应如何正确地推求聚合水库运行要素的电当量值。一旦解决了库偶的构成及聚合水库的电当量表达，就可以采用前面详细介绍过的库偶动态规划模型，逐一执行库偶的解算。

这里以图 4-2 所示的混联式水电系统为对象，讨论如何构成库偶。针对这种混联情况，首先应注意按满足水力联系的条件，自上游至下游排序，合理排定各水库的序号，图中 11 个水库的序号就是按这种要求确定的。与这些序号相联系，可以有序地构成 $n-1$ 对库偶（这里 $n=11$）。例如第 1 对库偶应由水库 1 与其相对应的聚合水库构成，显然第 2，3，…，n 库是第 1 水库决策时必须考虑到的联合运行背景，因此必须将第 2，3，…，n 库聚合为等

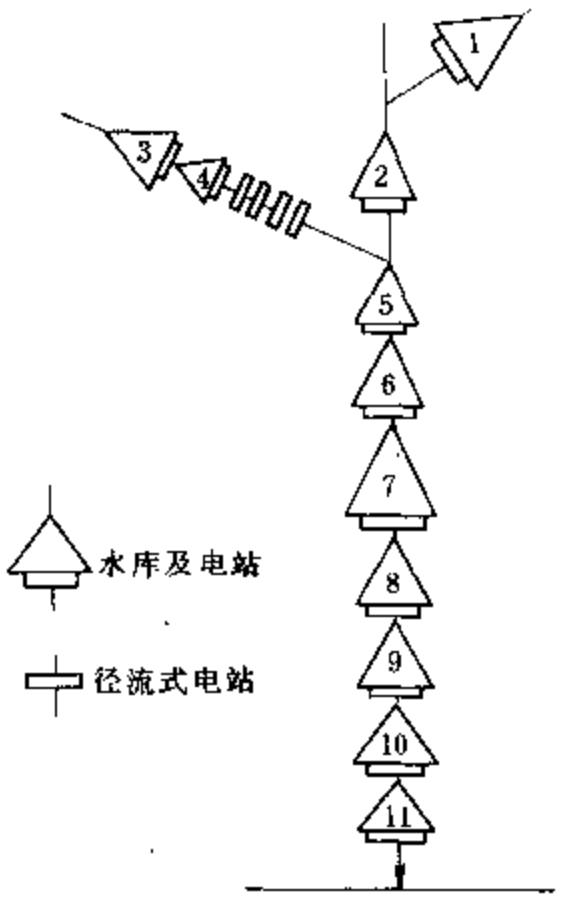

图 4-2　混联式水电系统

效水库，构成第 1 对库偶。注意到这里的等效水库所代表的第 2，3，…，n 库的水库群本身就属于混联式，因此，必须讨论这种混联式库群聚合时如何正确表达各运行要素的电当量计算式。

第 2 对库偶由第 2 库及由第 3，4，…，n 库的聚合水库构成，由图可见，此时进行聚合的水库群自身乃是串联式梯级水库。第 3 对库偶由第 3 库及由第 4，5，…，n 库的聚合水库构成，显然进行聚合的水库群也属于串联梯级。同理类推，对于第 3，4，…，$n-2$ 对库偶中的聚合水库都同样属于串联梯级。至于第 $n-1$ 对库偶，它显然是由二个实际水库，即第 $n-1$，n 库构成，而不存在库群聚合。

以上是以一个混联式库群为例，讨论聚合库偶的构成作法。联网运行的水电站库群也有属于并联式的，它们之间仅有电力联系而不存在水力联系。对于这种情况，在构成聚合库偶时，原则上讲，可以任意安排水库的序号，通常可根据各水库补偿能力的强弱，按补偿能力弱至强的排列安排水库序号。一当确定序号之后，可仿照前述做法按序号依次构成聚合库偶。由于联网运行的水电站都属于并联运行，因此被聚合的库群显然也是并联式库群。

综上可见，在进行聚合水库运行要素的电当量计算时，被聚合的库群有三种不同的形式：串联式、并联式和混联式。由于三种情况下库群水力联系条件不同，运行要素电当量计算式应有所差别。为便于对比，这里引述前面介绍过的串联式梯级聚合水库的输入 $p(i+1, t)$、输出 $r(i+1, t)$ 和时段初蓄能状态 $S(i+1, t)$ 电当量式（4-5）、式（4-6）、式（4-7）如下：

$$p(i+1,t)=\sum_{j=i+1}^{n}\sum_{l=j}^{n}h(l,t)y(j,t)$$

$$r(i+1,t)=\sum_{j=i+1}^{n}h(j,t)q(j,t)$$

$$S(i+1,t)=\sum_{j=i+1}^{n}\sum_{l=j}^{n}h(l,t)x(j,t)$$

并联式水电系统第 i 对库偶中的聚合水库的输出 $r(i+1, t)$ 的计算式与串联式相同，但其输入和时段初蓄能状态的电当量应根据无水力联系的情况作如下表达：

$$p(i+1,t)=\sum_{j=i+1}^{n}h(j,t)y(j,t) \tag{4-12}$$

$$S(i+1,t)=\sum_{j=i+1}^{n}h(j,t)x(j,t) \tag{4-13}$$

当聚合水库所代表的水库群属于混联式时，其输出 $r(i+1, t)$ 的电当量表达式仍与前述二种情况相同，而其输入和时段初蓄能状态的表达式则应视聚合水库所代表的库群的具

体分布而定。以图 4-2 所示水电系统为例，对于 $i=1$ 的水库而言，其对应的聚合水库系由第 2，3，…，11 库组成的混联式库群合成，其输入和时段初蓄能状态的电当量应表达为

$$p(i+1,t)=y(i+1,t)\Big[h(i+1,t)+\sum_{l=i+4}^{n}h(l,t)\Big]+\sum_{j=i+2}^{n}\sum_{k=j}^{n}h(k,t)y(j,t) \tag{4-14}$$

$$S(i+1,t)=x(i+1,t)\Big[h(i+1,t)+\sum_{l=i+4}^{n}h(l,t)\Big]+\sum_{j=i+2}^{n}\sum_{k=j}^{n}h(k,t)x(j,t) \tag{4-15}$$

图 4-2 所示水电系统是长江流域一条重要支流规划中水电站群联合运行的示意图，聚合库偶法曾用于寻求该水电系统的运行方式。现将计算有关的基本情况及主要成果，略作如下说明。

由图示可见，该水电系统实际上包含了 15 座水电站，支流上 6 级中的下 4 级水电站为规模较小的径流式电站，作为简化处理，将其水头合计入该支流的第 2 级电站（即图中序号为 4 的水库）而不予以编号，从而将该系统简化为 $n=11$ 座干、支流水库群，并按图示序号依次组成 10 对库偶。采用具有同期月径流系列的 28 年为计算期。模型参数中罚系数 $\xi=0$，$N_p=390$ 万 kW，$C_2/C_1=0.01$。其计算成果如表 4-3 所示。为便于对比，表中同时列出常规的逐级补偿法的计算成果。

表 4-3　　水电系统联合运行主要计算成果

项　目	年电量 E（亿 kW·h）	电量差 ΔE（亿 kW·h）	$\Delta E/E$（%）	保证出力 N（万 kW）	保证出力差 ΔN（万 kW）	$\Delta N/N$（%）
库偶法	436.78	11.8	2.8	390.02	51.84	15.3
常规法	424.98			338.18		

第三节　水电站群参数选择

一、概述

正常蓄水位、死水位和装机容量是反映水电站规模的设计参数。在单一水电站水能设计中，选择这些设计参数的惯常做法是，拟定若干个正常蓄水位方案，对于任一指定的正常蓄水位方案，合理选择其相应的死水位，然后进一步确定其装机容量，并阐明该正常蓄水位方案在三个参数组合下的动能指标及经济效益。在完成上述每个正常蓄水位方案的参数选择及动能效益计算之后，结合其它因素的考虑，综合论证，最终选定正常蓄水位。三个参数是相互关联的，只有在给定正常蓄水位和死水位的条件下，才能确定其相应的装机容量；而正常蓄水位的选择又必须在确定其相应的死水位及装机容量的情况下，才能阐明其动能效益。

对于联网运行的水电站群来说，上述三个设计参数的选择，不仅要考虑水电站自身的设计参数的相互关联，而且还要考虑到各个水电站之间的错综复杂的关系。离开了联合运行的背景，采用上述单一水电站水能设计的做法，孤立地确定各水电站的设计参数，其结果必将是不合理的。与上节寻求水电站群最优联合运行相联系，本节将介绍以系统分析为基础，确定水电站群各设计参数优化组合的模型和算法。

要对水电站群的三个参数建立一个整体的优选模型是复杂和困难的，现实的做法是根据大系统分解协调的观念，把寻求水电站群三个参数最优组合的复杂问题分解为若干个子问题。本节介绍的基本处理方法的构想是，对于拟定的一组正常蓄水位的组合，建立寻求其相应的死水位的最佳组合的数学模型；对于给出的水电站群的正常蓄水位和死水位的组合方案，建立寻求水电站群装机容量分配的数学模型；关于水电站群正常蓄水位的选择，只介绍增量分析法的概念和做法。配合上一节介绍的水电站群联合运行动能指标计算的模型，基本上形成了对水电站群设计参数选择的系统分析及解算。

二、水电站群装机容量分配

（一）水电站群装机容量分配系统分析概述

这里将要讨论的问题是在给定水电站群的正常蓄水位和死水位的前提下，如何合理确定水电站群中各个电站的装机容量。解决这个问题做法是分为二大步。首先以水电系统保证出力为依据，仿照单一水电站求最大工作容量的方法，在电力系统设计水平年负荷图上进行电力电量平衡，以确定水电系统总的最大工作容量。其次再以水电系统最大工作容量在各水电站之间进行分配。附带说明，本节所讨论的装机容量分配，实际上是最大工作容量的分配。水电站装机容量还应包括备用容量和重复容量，可接受的处理办法是在完成工作容量的分配之后，再按各水电站的自身情况，分别论证是否设置重复容量；至于各种备用容量的配置，仍可按现行水能设计的做法合理确定。

这里，有必要对水电系统保证出力的概念作进一步说明和讨论。以长系列径流资料为基础，采用上节介绍的聚合库偶模型可求得水电站群的最优联合运行方式，其结果可得出水电系统的出力过程和各水电站的出力过程。可以基于解算结果得出的水电系统的长系列出力过程，讨论应如何合理确定水电系统保证出力。按年调节的观念，可以划出供水期，计算水电系统各年供水期的平均出力，经统计求出正常供电保证率相对应的供水期平均出力即是系统保证出力。联合运行水电站有时存在径流的不同步性，从各水电站的径流资料很难划出统一的供水期。可以参照水电系统的逐年年内出力变化规律，分析确定供水期。从多年调节观念看，应该从连续枯水段（若干年）的平均出力情况来推求水电系统保证出力。问题是如何判断水电系统的枯水段。从确定水电系统的最大工作容量的角度看，与水电系统最大工作容量相应，在电力平衡图上可以定出其相应的全年保证工状，与此相应有一个年保证电量。据此可以认为，如果水电系统可能提供一个满足保证率要求的年电量不小于上述的年保证电量的需求，那么水电系统的保证工状就可以得到满足，系统正常供电就可以达到设计保证率的要求。由此可见，从跨年度调节性能看，可以取年为时段，对水电系统出力过程求出逐年平均出力，经统计求得符合设计保证率要求的平均出力，作为水电系统保证出力。

若水电系统中没有多年调节水电站，该系统的保证出力显然可按上述年调节情况进行计算。若水电系统中存在多年调节水电站，应首先分析多年调 节水电站的补偿能力。如果多年调节水电站的装机容量和发电量在水电系统中所占比重甚小，尽管该电站的水库对自身所控制的径流具有进行多年调节的能力，但是由于该电站的发电量很有限，用它不足以对水电系统的出力过程进行跨年度补偿。可见对于水电系统是否应按多年调节情况推求保证出力，不能仅仅从表面上看系统中有无多年调节水电站，即使存在多年调节水电站，也应进一步判断这些多年调节水电站是否具有对系统出力过程进行跨年度补偿的能力。

确定了水电系统的保证出力及其相应的保证电能之后，以设计水平年系统负荷图为基础，通过电力电量平衡，确定水电系统的最大工作容量。水、火电之间工作位置的划分原则上是火电担任基荷，水电承担变动部分的负荷，包括峰荷和腰荷。水电系统中的无调节水电站，应按其保证出力的值，从水电系统最大工作容量中划出，让其在基荷工作。某些水电站水库的综合利用要求，可能形成对水电站运行方式的制约，如水电站下游河道有通航要求，水电站应经常泄放维持航道水深的流量。显然应将满足这些综合利用要求的用水流量相应的容量，从水电系统的最大工作容量中划出，置于基荷工作。还有已建水电站负荷位置的划分问题，已建电站的装机容量及其相应的最大工作容量已经确定。按水电系统联合运行可求出该水电站的出力过程，又根据水电系统保证出力所出现的计算时段（几个月或全年）截取出该时段已建水电站的发电量，作为该电站的保证电能。根据该电站的最大工作容量及保证电能可以确定其负荷位置。

由上述可见，必须从求出的水电系统最大工作容量中，扣除已建水电站、无调节电站、及综合利用要求等相应的最大工作容量，除下的部分再由待建的具有调节能力的水电站进行分配。

必须认识到电力系统具有的动态属性，系统负荷的逐年增长与系统电源点的逐步投入以满足增长负荷 的需求，反映着系统的动态特点。原则上讲，必须在研究待建水电站的容量分配时，同时考虑水电站装机投入的次序，但这势必大大地增加了水电系统规划的复杂性。对于这类问题，系统分析中常采用的处理方法是把上述的复杂问题分解为二个问题。其一是以规划的远景水平年的负荷水平为对象，寻求满足这一负荷水平的电源点组合的最优方案。假设规划水电站在该年初同时投入，并计入投入后的计算期（如 50 年）进行经济分析，然后可根据优选准则评价方案的优劣。这一做法实际上可认为是把该水电系统的总体规划当成准静态问题。其二是以总体规划已确定的组成方案为依据，确定水电站的施建和装机容量投产的次序和日期，通常称它为排序问题，它反映系统中电源点投入的动态过程。排序问题将在后续的章次中另作讨论。研究排序问题之后有时可能必须对总体规划方案提出进行修正的补充研究的建议。本章所讨论的待建水电站的装机容量分配，只涉及上述准静态问题的水电系统规划方案的选定。

从上述水电系统最大工作容量的扣除分析可见，装机容量分配问题实际上只涉及扣除不参加分配的工作容量之后的剩余的水电最大工作容量在待建水电站之间的合理分配，即它只涉及有调节能力的待建水电站的工作容量的替代分析。本节将介绍的容量分配的数学模型，采用待建水电站总费用（投资与运行支出）最小作为水电装机容量最优分配的准则。

按总费用最小准则分配容量，往往导致补充千瓦投资小、运行费用低的水电站多装机，而那些补充千瓦投资大、运行费用高，但补充电量大的水电站的装机规模受到不应有的限制。即采用上述准则将导致侧重容量效益而忽视电量效益，不利于充分利用水能资源。可以从改变优化准则入手，来改善容量分配的合理性。例如可以采用净效益最大为准则，待建水电站的净效益为效益与总费用之差。总费用与前一准则的内涵完全相同。需要补充讨论的是如何计算水电站的发电效益。可根据水电站群联合运行长系列计算求出的各水电站的出力过程，分别绘制待建水电站的出力持续曲线，借此可以查询每个水电站装置任一工作容量时所对应的发电量。此外还涉及电价问题，在目前电的价格偏离其价值的情况下，可以参考影子价格的测算法，合理确定电价。

附带说明如何在分配容量模型中，合理给出每个待建水电站最大工作容量取值的限定范围。尽管水电站群中各待建电站的保证出力已不再是确定电站装机容量的主要依据，这里还是可借用它来帮助确定水电站最大工作容量的上、下限。可以假设水电站在最尖峰的负荷部位工作，按其已知的保证出力，可求出相应的最大工作容量，此值可作为该电站工作容量的上限；又设该水电站承担待建水电站负荷的最底部负荷，按其给定的保证出力，可求出相应的最大工作容量，此值可作为下限值。各待建水电站的保证出力，可以借用常规水能计算中求出的结果；也可以以联合运行计算求得的各电站的出力过程为依据，分别计算出各待建电站的保证出力。

本节将以一个假拟的算例为对象，分别介绍采用 4 种不同的数学规划技术建立数学模型及其解算结果。

（二）算例说明

设某电力系统规划中已初定 3 座待建的水电站，根据给出的设计水平年的系统负荷图，用水电系统的保证出力，通过电力电量平衡求出水电系统总的最大工作容量，扣除已建水电站、无调节水电站和综合用水要求的工作容量之后，3 座待建的水电站共同承担的工作容量为 280 万 kW。各电站容量变化范围及总费用函数 $C_i=f_i(x_i)$ 如表 4-4 所示。这里 x_i 表示第 i 电站的容量；C_i 表示第 i 电站的总费用。i 为电站的序号（即 $i=1, 2, 3$）。总费用包括土建、机电、输电线路的投资及年运行费。计算期的年运行费及各电站的投资，可按假设的同一投入时间（即计算期第一年）为基准年进行折算，以求出总费用的现值。

下面分别介绍各种模型及其解算此问题的方法。

表 4-4　　各电站容量范围及费用函数

甲水电站	装机容量 x_1（万 kW）	50	60	70	80	90	100
	总费用 C_1（亿元）	1.600	1.610	1.622	1.635	1.650	1.670
乙水电站	装机容量 x_2（万 kW）	60	70	80	90	100	110
	总费用 C_2（亿元）	1.800	1.814	1.832	1.852	1.875	1.900
丙水电站	装机容量 x_3（万 kW）	80	90	100	110	120	130
	总费用 C_3（亿元）	1.700	1.720	1.743	1.770	1.800	1.835

（三）线性规划模型

当各水电站的费用函数 $C_i=f_i(x_i)$（$i=1, 2, \cdots, m$）均为线性函数时，水电站装机容量分配问题属于线性规划问题，其数学模型的表达式如下。

目标函数

$$C = \min_{X} F(X) = \min_{x_i} \sum_{i=1}^{m} f_i(x_i) \tag{4-16}$$

约束条件

$$x_1 + x_2 + \cdots + x_m = N \tag{4-17}$$

$$N_i' \leqslant x_i \leqslant N_i'' \quad (i = 1,2,\cdots,m) \tag{4-18}$$

式中：X 是 m 维向量，$X=(x_1, x_2, \cdots, x_m)$。式（4-17）的约束表明，向量 Xm 维分量的组合中只有各分量之和等于水电系统待分配的工作容量 N，才属于可行组合。C 表示待建水电站的总费用。x_i（$i=1, 2, \cdots, m$）表示待建电站的工作容量，即装机容量分配模型中的决策变量。N_i'、N_i'' 分别表示第 i 电站待定的工作容量取值的下限和上限。

约束式（4-18）为双向不等式，解算中必须分解为 $x_i \leqslant N_i''$ 和 $x_i \geqslant N_i'$。这两个不等式约束引入松弛变量和剩余变量之后，得出等式约束。N_i' 是一个大于零的实数，因此 $x_i \geqslant N_i'$（$i=1, 2, \cdots, m$）隐含着对决策变量 x_i 的非负约束。

上述实例给出的费用函数是非线性的，为了满足线性规划中对线性目标函数的要求，根据表 4-4 给出的费用函数的离散点，按最小二乘法进行线性拟合后，得出直线方程 $y_i=a_{0i}+a_{1i}x_i$，拟合成果见表 4-5。

表 4-5　　直线拟合系数

系　数	甲水电站	乙水电站	丙水电站
	1	2	3
a_{0i}	1.52617168	1.67314211	1.47590891
a_{1i}	1.3999×10^{-5}	2.0277×10^{-5}	2.7183×10^{-5}

针对上述三个待建水电站容量分配问题，可写出如下的线性规划模型表达式：

目标函数

$$C = \min_{x_i} \sum_{i=1}^{3} (a_{0i} + a_{1i}x_i)$$

约束条件

$$x_1 + x_2 + x_3 = 280$$

$$50 \leqslant x_1 \leqslant 100$$

$$60 \leqslant x_2 \leqslant 110$$

$$80 \leqslant x_3 \leqslant 130$$

用单纯形法求解上列问题的结果见表 4-10。

（四）非线性规划模型——拉格朗日乘子法

当费用函数 $f_i(x_i)$ 是非线性时，上述问题是一个非线性规划问题，其数学模型仍可采用式（4-16）～（4-18）表示。拉格朗日乘子法被引用来解算本算例的非线性规划问题。

需要对前述双向不等式约束引入松弛变量和剩余变量的处理略加讨论。对于约束式（4-18）中 $x_i \leqslant N_i''$ 引入松弛变量 x_{m+i} 之后可表达为如下等式约束：

$$x_i + x_{m+i} = N_i' \qquad (x_{m+i} \geqslant 0, i = 1,2,\cdots,m)$$

对于 $x_i \geqslant N_i'$ 引入剩余变量 x_{2m+i} 后的等式约束为

$$x_i - x_{2m+i} = N_i' \qquad (x_{2m+i} \geqslant 0, i = 1,2,\cdots,m)$$

上述引入的松弛变量和剩余变量都应附加非负的约束。

对于上述双向不等式也可以采用松弛变量和剩余变量的平方值，相应的等式约束为

$$x_i + x_{m+i}^2 - N_i' = 0 \qquad (i = 1,2,\cdots,m) \tag{4-19}$$

$$x_i - x_{2m+i}^2 - N_i' = 0 \qquad (i = 1,2,\cdots,m) \tag{4-20}$$

即改用平方值来保证其值为非负，这时所引入的松弛变量和剩余变量都属于自由变量，不存在非负限制。

在等式约束的条件下，对上述目标函数写出如下的拉格朗日函数：

$$L(X,\lambda) = F(X) + \lambda_0\left(\sum_{i=1}^{3m} x_i - N\right) - \sum_{i=1}^{m}\lambda_i[x_i + x_{m+i}^2 - N_i'] - \sum_{i=1}^{m}\lambda_{m+i}[x_i - x_{2m+i}^2 - N_i'] \tag{4-21}$$

式中：λ_0，λ_i，…，λ_{m+i}为拉格朗日乘数。函数 L（X，λ）的极小值的必要条件为

$$\begin{cases} \dfrac{\partial L}{\partial x_i} = 0 & (i = 1,2,\cdots,m,m+1,\cdots,2m,\cdots,3m) \\ \dfrac{\partial L}{\partial \lambda_j} = 0 & (j = 1,2,\cdots,m,m+1,\cdots,2m) \\ \dfrac{\partial L}{\partial \lambda_0} = 0 \end{cases} \tag{4-22}$$

式中：含 $5m+1$ 个未知数，与方程式数目相同，可见该方程组有定解。

由于实例给出的是离散的非线性函数，其拟合的函数式为

$$c_i = \sum_{k=0}^{5} a_{ki} x_i^k \qquad (i = 1,2,3)$$

各水电站拟合方程的系数如表 4-6 所示。式中 k 为 x_i 的指数。

表 4-6

电站名	序号 i	a_{0i}	a_{1i}	a_{2i}	a_{3i}	a_{4i}	a_{5i}
甲	1	1.753588	-1.065902×10^{-8}	2.459233×10^{-4}	-2.285084×10^{-6}	7.979293×10^{-9}	1.023865×10^{-12}
乙	2	3.566308	-0.1090569	2.617085×10^{-3}	-3.084620×10^{-5}	1.810017×10^{-7}	4.210437×10^{-10}
丙	3	-3.158097	0.237142	-4.651807×10^{-3}	4.548161×10^{-5}	-2.201180×10^{-7}	4.235219×10^{-10}

对实例计算采用了简化算法，先不考虑式（4-18）的双向不等式，即先不考虑每个水电站工作容量的上、下限约束，因此不必引入一系列的松弛变量和剩余变量。在这种简化条件下，实例的拉格朗日函数为

$$L(X,\lambda) = (c_1 + c_2 + c_3) - \lambda_0(x_1 + x_2 + x_3 - 280)$$

根据求极值的必要条件写出的联解方程式为

$$\frac{\partial L}{\partial x_i} = 0 \qquad (i = 1,2,3)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_i} = 0$$

上述简化计算求得的各电站的工作容量的解，必须逐一检查其是否满足相应的上、下限的限制，如果某一电站不满足其容量限制条件，则应对它引入松弛变量或剩余变量，列出相应的约束方程，作为上述简化计算式的新添的约束方程，重新求解，再对新求出的工作容量的解作合理性检查，若所有电站的容量都满足其上、下限约束，其解可作为计算结果。否则，必须对不满足约束的电站，加上容量约束式，重复上述解算。本算例的解算结果见表 4-10。

用拉格朗日乘子法解算上述非线性规划问题，要求对目标函数及拉氏函数写出函数表达式，并要求能求出一阶偏导数。有时即使能进行求导，但其一阶导数方程有些是非线性的，这种情况将大大增加方程组联解的难度。目前对非线性规划问题，已存在多种较适用的解算方法，这些方法的功能和计算效率都明显优于拉格朗日乘子法。

（五）整数规划模型

0—1 整数规划也很适合于解算上述容量分配问题。每个电站待决策的装机容量可按其允许的上下限规定的范围划分出若干个离散值，作为供选择的决策值。对这组离散的容量值，可以从费用函数求出与之对应的一组离散的费用值。记 x_{ij}表示第 i 电站第 j 个容量值，并记 C_{ij}为与之对应的费用，另外引入与容量 x_{ij}相对应的 0—1 整数变量 y_{ij}，当 $y_{ij}=1$ 时，表明对应的容量值 x_{ij}为被选决策；当 $y_{ij}=0$，表示它所对应的容量值为非被选决策。水电站序号 $i=1, 2, \cdots, m$，m 为待分配的电站数目；$j=1, 2, \cdots, k$ 为容量离散决策值的序号，k 为离散决策值的数目。据此可写出装机容量分配问题整数规划模型的如下表达式：

目标函数

$$C = \min\{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{k} C_{ij} \cdot y_{ij}\} \tag{4-23}$$

约束条件

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{k} x_{ij} \cdot y_{ij} = N \\ \sum_{j=1}^{k} y_{ij} = 1 \qquad (i = 1,2,\cdots,m) \\ y_{ij} = 1 \text{ 或 } 0 \qquad (i = 1,2,\cdots,m;\ j = 1,2,\cdots,k) \end{cases} \tag{4-24}$$

上述$\sum y_{ij}=1$ 的约束表示每个电站只能从 k 个可供选择的决策值中选出其中的一个。

根据表 4-4 所给出的数据，可写出此模型的表达式如下。

目标函数

$$\begin{aligned} C = \min\{&(1.600y_{11} + 1.610y_{12} + \cdots + 1.670y_{16}) \\ &+ (1.800y_{21} + 1.814y_{22} + \cdots + 1.900y_{26}) \\ &+ (1.700y_{31} + 1.720y_{32} + \cdots + 1.835y_{36})\} \end{aligned}$$

约束条件

$$(50y_{11}+60y_{12}+\cdots+100y_{16})+(60y_{21}+70y_{22}+\cdots+110y_{26})$$
$$+(80y_{31}+90y_{32}+\cdots+130y_{36})=280$$
$$y_{11}+y_{12}+\cdots+y_{16}=1$$
$$y_{21}+y_{22}+\cdots+y_{26}=1$$
$$y_{31}+y_{32}+\cdots+y_{36}=1$$
$$y_{ij}=1\text{ 或 }0 \qquad (i=1,2,3;\quad j=1,2,\cdots,6)$$

对上述0—1整数规划问题，用隐枚举法求得结果为

$$y_{16}=1,\quad y_{24}=1,\quad y_{32}=1$$

其余 y_{ij} 均为零。各电站相应的容量及最小费用为

$$x_{16}=100,\quad x_{24}=90,\quad x_{32}=90\quad\text{（单位为万 kW）。}$$
$$c=1.670y_{16}+1.852y_{24}+1.720y_{32}=5.242\text{ 亿元}$$

上列算例中含有18个0—1变量，按穷举法必须计算的变量取值为 6^3 个组合，尽管隐枚举法可以省去不少计算，但是其计算还是相当费时的。

（六）动态规划模型

装机容量分配是一个静态问题，但可以将它构想为一个多阶段决策的动态问题，从而可利用动态规划法求解。

以3个水电站容量分配为例，设可分配的总容量为 N，把对甲、乙、丙电站逐一依次分配当成三个阶段的决策过程。设 S_t 表示系统状态，它代表到 t 时刻为止已分配给水电站的累计容量。取过程的起始时刻（即第一阶段的初始时刻）为 $t=0$，此时尚未作出容量分配，因此 $S_0=0$。在第一阶段对甲电站分配容量的决策为取其容量为 x_1，伴随着这一决策，系统时段末（$t=1$）将转移到状态 $S_1=S_0+x_1$。同理，第二阶段取决策 x_2（代表乙电站容量），相应的系统状态将转移到 $S_2=S_1+x_3$；第三阶段对应于决策 x_3 的阶段末的系统状态为 $S_3=S_2+x_3=N$。

对于 m 个水电站容量分配，按上述决策及系统状态转移分析，可写出如下的状态转移方程

$$S_t=S_{t-1}+x_t$$

或
$$S_{t-1}=S_t-x_t \qquad (t=1,2,\cdots,m) \tag{4-25}$$

以水电站群总费用最小为准则，对装机容量分配问题可写出其目标函数和约束条件表达式。

目标函数为

$$C=F(S_m)=\min_{x_i}\sum_{i=1}^{m}f_i(x_i) \tag{4-26}$$

约束条件

$$S_m=\sum_{i=1}^{m}x_i=N \tag{4-27}$$
$$N_i'\leqslant x_i\leqslant N_i'' \tag{4-28}$$

对上述问题，按动态规划原理，可写出顺时序计算的动态规划递推方程：

$$\begin{cases} F_0(S_0) = 0 \\ F_t(S_t) = \min\limits_{x_t}\{f_t(x_t) + F_{t-1}(S_{t-1})\} \qquad (t = 1,2,\cdots,m) \end{cases} \tag{4-29}$$

上式时间序号 t 与以前采用的水电站的序号 i 是一一对应的，如甲电站的序号 $i=1$，在动态规划递推式中，把甲电站当成第一阶段，该阶段的时段序号 $t=1$，即递推式中出现的 x_t 等价于前述 x_i。由状态转移方程（4-25）可知 $S_{t-1}=S_t-x_n$，即在顺时序递推时，根据指定的时段末状态 S_t 及面监时段决策 x_t，由状态转移方程可反求出相应的时段初状态 S_{t-1}。

下面介绍采用动态规划法对前述算例的解算过程。已知算例中供甲、乙、丙水电站分配的工作容量 $N=280$ 万 kW。表 4-4 列出了各电站在装机容量取值允许范围内费用函数的离散点的数值。这一分配问题可看成是三个阶段的决策过程。过程起始和终了端点状态为定点，其状态值分别为 $S_0=0$，$S_3=N=280$ 万 kW。必须根据本算例中各电站容量上下限值的限制，确定系统状态 S_t 的上下边界值。对本例而言，因为 $S_1=S_0+x_1=x_1$，所以甲电站容量的上下限 $N_1^{\wedge}=100$，$N_1^{\vee}=50$，即是状态 S_1 的上下边界值。又因 $S_2=S_1+x_2=x_1+x_2$，所以必须按下式考虑 S_2 的上下限，即

$$50 + 60 = \sum_{i=1}^{2} N_i^{\vee} \leqslant S_2 \leqslant \sum_{i=1}^{2} N_i^{\wedge} = 100 + 110$$

计算中采用离散状态增量 $\Delta=10$ 万 kW。三个阶段的逐一递推演算的成果分别列于表 4-7～表 4-9。表 4-8 和表 4-9 中 * 号标明该值为最优指标函数。以表 4-8 中 $S_2=160$ 为例，在若干个可供选择的决策中，当取决策 $x_2=90$ 时，相应的费用函数 $F_2(S_2)=f_2(x_2)+F_1(S_1)=3.464$，是最小费用值，据此可知该决策为最优决策。

表 4-7　　阶段 1 递推计算

S_1	x_1	S_0	$F_1(S_1)=f_1(x_1)+F_0(S_0)$	S_1	x_1	S_0	$F_1(S_1)=f_1(x_1)+F_0(S_0)$
50	50	0	1.600	80	80	0	1.635
60	60	0	1.610	90	90	0	1.650
70	70	0	1.622	100	100	0	1.670

由表 4-9 可见，最小费用为 $F_3(S_3)=5.242$ 亿元，然后可按递推关系逆时序查出其最优运行轨迹及相应的最优决策过程。表 4-9 表明，与最小费用相应的时段初状态 $S_2=190$，决策值 $x_3=90$。由表 4-8 查出在 $S_2=190$ 时的最优决策 $x_2=90$，相应的时段初状态 $S_1=100$。进而可知相应的第 1 阶段的决策应为 $x_1=100$。

为检验所取离散状态增量对成果的影响，本算例动态规划法分别按增量 $\Delta=1,3,10$ 进行解算，其最终成果列入表 4-10。

（七）计算成果分析

表 4-10 中所汇总的 4 种容量分配数学模型对同一算例的计算成果，可作如下对比分析。

1）从理论上讲，对于连续的非线性费用函数，用非线性规划法可求得问题的精确解，它不受状态或决策值的离散化而带来误差的影响。由成果看，其最小费用小于整数规划或动态规划的计算结果。但是必须考虑到由于单机容量的限制，面不得不对容量作出适当的

表 4-8　　阶段 2 递推计算

S_2	x_2	$S_1=S_2-x_2$	$F_2(S_2)=f_2(x_2)+F_1(S_1)$	S_2	x_2	$S_1=S_2-x_2$	$F_2(S_2)=f_2(x_2)+F_1(S_1)$
110	60	50	1.80+1.60=3.40*	160	90	70	1.852+1.622=3.474
120	60	60	1.80+1.61=3.41*		100	60	1.875+1.61=3.485
	70	50	1.814+1.60=3.414		110	50	1.90+1.60=3.50
130	60	70	1.80+1.622=3.422*	170	70	100	1.814+1.67=3.484
	70	60	1.814+1.61=3.424		80	90	1.832+1.65=3.482*
	80	50	1.832+1.6=3.432		90	80	1.852+1.635=3.487
140	60	80	1.80+1.635=3.435*		100	70	1.875+1.622=3.497
	70	70	1.814+1.622=3.436		110	60	1.90+1.61=3.51
	80	60	1.832+1.61=3.442	180	80	100	1.832+1.67=3.502*
	90	50	1.852+1.6=3.452		90	90	1.852+1.65=3.502*
150	60	90	1.80+1.65=3.45		100	80	1.875+1.635=3.51
	70	80	1.814+1.635=3.449*		110	70	1.90+1.622=3.522
	80	70	1.832+1.622=3.454	190	90	100	1.852+1.67=3.522*
	90	60	1.852+1.61=3.462		100	90	1.875+1.67=3.525
	100	50	1.875+1.6=3.475		110	80	1.90+1.635=3.535
160	60	100	1.80+1.67=3.47	200	100	100	1.875+1.67=3.545*
	70	90	1.814+1.65=3.464*		110	90	1.90+1.65=3.55
	80	80	1.832+1.635=3.467	210	110	100	1.90+1.67=3.57

表 4-9　　阶段 3 递推计算

S_3	x_3	$S_2=S_3-x_3$	$F_3(S_3)=f_3(x_3)+F_2(S_2)$
280	80	200	1.700+3.545=5.245
	90	190	1.720+3.522=5.242
	100	180	1.743+3.502=5.245
	110	170	1.770+3.482=5.252
	120	160	1.800+3.467=5.267
	130	150	1.835+3.449=5.284

离散处理，那么，追求连续函数形式上的精确解，可能反而是脱离实际的。

2)线性规划法要求对非线性费用函数作线性近似描述，特别是本算例采用直线回归分析得出的线性费用函数，更容易带来较大的误差。因此，虽然从成果看，线性规划解的最小费用比非线性规划解的结果小，但是仍然可以有足够的理由断定，这是由于线性化误差所造成的假象。

3）在采用相同的离散增量的前提下，整数规划法与动态规划法的解完全一致。可是从所需机时看，前者耗时为后者的 245 倍。若计入二种算法所用微机计算速度上的差别，二者倍比数还应增加（因为 JB-3000 微机计算功能略比 APPLE-Ⅱ机强）。

4）动态规划法计算成果表明，随离散增量 Δ 的减小，目标函数值（最小费用）也有所改善。当 $\Delta=1$ 万 kW 时，动态规划的解已非常接近于非线性规划的精确解。可是计算时间却随 Δ 的减小而明显增加。而且还必须看到，在此算例中 Δ 值减少后对三个电站的容量分配决策值，并没有发生显著的变化。因此从实用观点看，大中型水电站容量分配采用离散

表 4-10　　水电站容量分配计算成果

方　　法		最优容量（万 kW）	最小费用（亿元）	计算时间	机　　型
线性规划		$x_1=100$ $x_2=100$ $x_3=80$	5.235456	40 s	APPLE-Ⅱ
非线性规划		$x_1=97.1667$ $x_2=90.7667$ $x_3=92.0667$	5.241624	9 min 10 s	APPLE-Ⅱ
整数规划		$x_1=100$ $x_2=90$ $x_3=90$	5.242	81 min 40 s	JB-3000
动态规划	$\Delta=10$	$x_1=100$ $x_2=90$ $x_3=90$	5.242	20 s	APPLE-Ⅱ
	$\Delta=3$	$x_1=98$ $x_2=90$ $x_3=92$	5.241651	2 min 55 s	APPLE-Ⅱ
	$\Delta=1$	$x_1=97$ $x_2=91$ $x_3=92$	5.241627	8 min 30 s	APPLE-Ⅱ

增量 5～10 万 kW 是可行的。

综上述可见，对于水电站群容量分配问题，动态规划是值得推荐采用的方法。

三、梯级水电站水库死水位选择

以一条河流的梯级开发为对象，讨论对于一个给定的梯级水库的正常蓄水位方案，如何寻求各级水库的死水位。

梯级水库死水位选择本质上是一个静态问题。可以根据水库的空间分布的特点，把从上游至下游的逐级分布构想为多阶段过程。按水流方向取梯级水库序号 $i=1, 2, \cdots, m$。配合阶段化构想可将序号 i 时序化，对于 m 个梯级相对应的 m 个决策阶段，可用 $i=0, 1, 2, \cdots, m$ 的时序化序号来描述，即是可以用 $i-1$ 和 i 分别表示第 i 阶段的初、末时刻。

可以用水库的死水位相应的有效库容作为系统的状态。记 S_i 表示第 i 阶段末的系统状态，设水库 i 取 k 个死水位方案，相应的有效库容为 v_{ij} $(j=1, 2, \cdots, k)$，从而可以写出状态的离散集合为

$$S_i = \{v_{i1}, v_{i2}, \cdots, v_{ik}\}$$

为便于说明，设梯级水库数目 $m=3$，每个水库都取 3 个死水位方案，即 $k=3$。设多阶段过程的起始时刻的状态 $S_0=0$，按定出的死水位方案，第 1 阶段末状态 $S_1=\{v_{11}, v_{12}, v_{13}\}$，第 2 阶段末状态 $S_2=\{v_{21}, v_{22}, v_{23}\}$，第 3 阶段末 $S_3=\{v_{31}, v_{32}, v_{33}\}$。可供选择的梯级死水位的组合数为 $k^m=3^3=27$。这是一个仿似行程问题，有 27 种可选择的路线。

对于上述问题的决策变量，可以用类似于对某一阶段 i 走那条路线来表示。例如从第 i 阶段初状态 S_{i-1} 出发，取阶段末状态 $S_i=v_{ij}$ 即构成该阶段走向的决策，从而可将该阶段的决策表达为

$$d_i(S_{i-1}) = v_{ij}$$

用 D_i (S_{i-1}) 表示其对应的允许决策集合，则有

$$D_i(S_{i-1}) = \{v_{i1}, v_{i2}, \cdots, v_{ik}\}$$

随之可将该阶段的状态转移方程表达为

$$S_i = T_i[S_{i-1}, d_i(S_{i-1})]$$

以上是采用逆序解法的表达方式，对于梯级水库死水位选择所采用的顺序解法，其决策变量及状态转移方程分别表达为

$$d_i(S_i) = v_{i-1,j}$$

$$S_{i-1} = T_i[S_i, d_i(S_i)]$$

式中决策 d_i (S_i) 表示对应于指定的 i 阶段末状态 S_i 所取的第 i 阶段的决策，用第 $i-1$ 阶段末的状态值 $v_{i-1,j}$ 作为决策，是因为它的取值决定了相应的决策路线。

还必须与判断梯级死水位方案优劣的准则相联系，讨论目标函数的表达和一个阶段的决策效益。可以将某梯级水电站 i，在决策 d_i (S_i) 时可获得的保证出力 N_i 作为决策效益。对于一个选定的决策过程，可相应地得出各电站的保证出力 N_1，N_2，…，N_m。设各电站的保证出力具有可加性，那么，可将梯级死水位优选的目标函数表达为

$$NG = \max_{d_i} \sum_{i=1}^{m} N_i[S_i, d_i(S_i)] \tag{4-30}$$

式中：NG 表示梯级水电站的保证出力。为寻求满足上述最优准则的解，基于前述对此问题的多阶段决策的构想，可以采用动态规划法，按下列顺序递推方程进行解算。

$$\begin{cases} f_i(S_i) = \max\limits_{d_i}\{N_i[S_i, d_i(S_i)] + f_{i-1}(S_{i-1})\} \\ f_0(S_0) = 0, \qquad (i = 1,2,\cdots,m) \end{cases} \tag{4-31}$$

按阶段序号进行各阶段的递推演算，至最后的第 m 阶段，可得出阶段末的累加效益（即梯级保证出力）

$$f_m(S_m),\ S_m = \{v_{m1}, v_{m2}, \cdots, v_{mk}\}$$

按梯级水库保证出力极大化的要求，可得出梯级保证出力为

$$NG = \max_{S_m} f_m(S_m)$$

上述分析表明，通过 m 个阶段递推演算的结果，得出第 m 阶段末允许状态集中各种状态相对应的累积效益（梯级保证出力），借此选优得到第 m 级水库死水位的最优值及其相应的梯级保证出力。用选定的 S_m，由递推演算成果可查出其对应的最优决策 d_m^* (S_m)，及其相应的第 $m-1$ 级水库死水位 S_{m-1} 的取值，再用它逆序查找，即得出与上述优化计算结果相对应的最优决策过程，这一决策过程即为优选的梯级水库的死水位组合。

必须对上述动态规划递推演算中所涉及的径流调节和水能计算略作说明。梯级水库之间存在着水量的联系，上一级水库调节后的出库径流系列，加上上下级水库区间对应时段

的径流系列，组成下级水库的入库径流系列。因此梯级水库的调节计算，宜采用同一的计算期，以及与之相应的同期径流系列。详细计算阶段可以根据现有同期径流资料，采用长系列调节计算。方案比较阶段也可仅对代表期进行计算，由于梯级水库的调节性能不同，选定代表期时原则上应使其历时长度不小于梯级水库调节性能最好者的调节周期。

对于选定计算期及年月径流系列，按自上游到下游逐级计算，每个水库都按已知入库径流系列和给定的有效库容，采用等流量调节方式，求水电站的引用流量过程和出力过程。可以根据计算期中水库的供水段的平均出力，分析确定水电站的保证出力。

可以进一步从逐阶段递推演算过程，分析径流调节计算的情况。对于顺序动态规划计算，本问题的阶段决策变量为

$$d_i(S_i) = v_{i-1,j} \qquad (j = 1,2,\cdots,k)$$

即对于 i 阶段末某指定状态 S_i，可以将上一阶段末状态 S_{i-1}的取值 $v_{i-1,j}$作为决策值，形成阶段 i 的决策路线。实际上对应于一个决策，必有上下级水库的死水位方案相应的有效库容 $v_{i-1,j}$及 v_{ij}，来反映其决策路线。

设第 1 级水库取三个死水位方案，其相应的有效库容为 v_{11}、v_{12}、v_{13}。第 1 阶段的决策为

$$d_1(S_1) = S_0 = 0 \qquad S_1 = \{v_{11}, v_{12}, v_{13}\}$$

其中 $S_0=0$ 为第 1 阶段初假设的起始状态，其实际意义相当于虚构了第 0 级水库，其有效库容唯一地取值为零。第 1 阶段末 $S_1=\{v_{11}, v_{12}, v_{13}\}$ 三种状态均取 $d_1(S_1)=S_0=0$ 为其决策，因此对三种阶段末状态的决策的实际意义分别反映了该阶段第一级水库只需按该库的三种有效库容分别对入库径流系列进行调节计算，求出各库容相应的保证出力。

又设第 2 级水库同样有三个死水位方案。这个阶段的决策：

$$d_2(S_2) = v_{1j} \qquad (j = 1,2;3)$$

即对于 $S_2=v_{1j}$的指定值，存在三种决策路线。每条决策路线有相应的上下两级的一对有效库容组合：(v_{1j}, v_{2j})。三种决策路线的库容组合分别为 (v_{11}, v_{2j})、(v_{12}, v_{2j})、(v_{13}, v_{2j})。对任一组合的径流调节计算，都必须首先考虑上一级水库对它的入库径流调节下泄的径流系列与下级水库区间径流合成后，作为下级水库的入库径流系列。即对于指定的下级水库有效库容 v_{2j}而言，在三种不同决策下，必须分别对三种不同的入库径流系列进行调节计算，求出三种情况下的保证出力 N_2，然后按动态规划递推式（4-31）所示，根据第 1，2 阶段决策组合的累积效益（即保证出力累加）选出最好的决策。同理，对于该阶段末的其它状态也应进行相同的决策优选。

对于第 3 阶段而言，其递推演算中涉及的梯级水库径流调节情况，与第 2 阶段相似。它必须用第 2 级水库调节后下泄的径流系列来组成第 3 级水库的入库径流系列；其余做法与上述相同，不作赘述。

表 4-11 是我国南方某河流上梯级水库规划中选择死水位方案的实例。该梯级由 10 座水电站组成。各级水库的正常蓄水位作为已知值给定，各级水库死水位方案可根据水库的地形、地质、综合利用要求等条件，确定其允许变化范围，然后再在此范围内适当拟定若干个死水位方案。如第 1 级水库死水位变化范围为 710～740 m，每隔 5 m 取一个方案，共

7 个方案；第 4 级水库死水位变化范围为 320～356 m，每隔 4 m 取一个方案，共 10 个方案；第 5 级水库死水位方案为 204、208 m 和 212 m。其它各级为径流式电站，库容很小，死水位无选择余地，其死水位都只采用一个固定值。

表 4-11　　梯级水库死水位选择计算成果

电站序号 i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	合 计
正常蓄水位（m）	780	645	440	400	223	155	125	112	83	57.6	
死水位（m）	$\frac{710}{726}$	637	440	$\frac{340}{325}$	$\frac{212}{212}$	153	123	110	81	49	
调节流量（m^3/s）	$\frac{458}{455}$	$\frac{458}{455}$	$\frac{465}{460}$	$\frac{1322}{1260}$	$\frac{1400}{1350}$	$\frac{1425}{1375}$	$\frac{1440}{1390}$	$\frac{1480}{1430}$	$\frac{1500}{1450}$	$\frac{1810}{1760}$	
保证出力（万 kW）	$\frac{45.0+75.9}{116.5}$		$\frac{15.1}{14.5}$	$\frac{167.6}{150}$	$\frac{70.1}{66.5}$	$\frac{33.1}{33.9}$	$\frac{12.9}{13.4}$	$\frac{33.4}{32.6}$	$\frac{29.8}{28.6}$	$\frac{40.4}{46.7}$	$\frac{523.3}{502.7}$

梯级调节计算期采用 10 年，即从 1954 年 6 月至 1964 年 5 月。表中列出了死水位、调节流量、保证出力的计算成果，表中出现类似于分子、分母形式的数值，水平线上的值为优化计算的成果，水平线下的数字是常规法的成果。常规法只是在经验判断的基础上拟定若干个有限的死水位方案进行计算，它可以从中选出较好的方案。但是不可能确保所拟定的方案已含有最优方案，因此不能确保选到最优方案。优化法是采用本节所介绍的动态规划法。两种方法的计算结果相比，用优化方法选出的最优的梯级死水位方案的总保证出力比常规方法的总保证出力相对提高 4.1%。

四、梯级水电站正常蓄水位选择

前面分别介绍了在给定的正常蓄水位和死水位的条件下，寻求水电站群装机容量分配的最优解；以及在给定的梯级水电站水库正常蓄水位的前提下，寻求梯级水库死水位的最优组合。显然还必须进一步回答如何合理确定梯级水库的正常蓄水位。

梯级开发是充分利用河流蕴藏的水能资源的基本形式。规划初期，必须通过查勘找到地形、地质等条件适于建水库的坝址。然后针对选出的梯级水库的坝址组合，按梯级水头尽可能相互衔接的原则，可以初步考虑梯级水库正常蓄水位的整体组合方案。梯级水头衔接可以充分利用河流的天然落差。某些河段，由于建坝条件的限制而不可能达到梯级水头衔接，这种情况意味着部分天然落差未被开发利用。在尽可能满足梯级水头衔接的前提下，可以形成多种可能的梯级正常蓄水位的组合方案。例如河流最上游的第一级水库（通常称它为龙头水库）在地形、地质、淹没等条件允许下，一般应尽可能修建调节性能好的水库，该水库的正常蓄水位的多种可能的选择就形成了梯级正常蓄水位的不同组合方案。其次，在基本满足梯级水头衔接的前提下，在允许的变化范围内，可以通过适当调整梯级水库的正常蓄水位而形成不同的组合方案。此外，通常还在梯级正常蓄水位方案选择中，同时加入了对某些坝址的增减，或坝址地点的上下变动而改变了梯级正常蓄水位的方案组合。

梯级水电站水库是水资源系统的一个重要组成部分，规划中还必须考虑到综合利用水

资源的有关要求和制约。例如为满足防洪的要求，梯级中的某些水库必须设置一定的防洪库容，在防洪库容与兴利库容不能完全结合使用的条件下，防洪要求形成了对该水库正常蓄水位的制约。

梯级水库的正常蓄水位是反映水电系统规模及其相应的投资和效益的最重要的设计参数。在给定的梯级水库正常蓄水位的条件下，确定梯级水库死水位的最优组合，以及梯级水电站装机容量的最优分配，其作用是使既定的梯级水库规模充分发挥其发电效益。在评价梯级水库正常蓄水位方案的优劣时，必将涉及到各方案的效益指标。前面关于梯级死水位选择和装机容量分配的模型和算法，为梯级水电站发电效益及水电站有关的厂房和机电投资等的计算，提供了统一的计算手段。

可以采用净效益最大作为优选梯级水库正常蓄水位方案的准则，净效益可按下式计算：

$$NB = B(E) - C(V, N_y) \tag{4-32}$$

式中：$B(E)$ 为梯级水电站的年效益；E 表示梯级水电站的多年平均发电量，可经论证后采用一个电量单价，用年电量乘单价求出梯级水电站的年效益的货币指标；NB 为净效益，以年值形式表示；$C(V, N_y)$ 表示梯级水电站的年费用，包括投资和年运行费；V、N_y 分别代表梯级水电站的有效库容和装机容量的向量。

梯级水电站的投资应包括与坝高有关的水工投资和淹没损失，以及与装机容量有关的机电设备和厂房投资。运行费在方案比较阶段可按基建投资的百分率估算。作为总体开发方案的比较，暂不计入水电站建设程序的动态影响。据此，可对梯级水电站的年费用按下面的简化式计算：

$$C(v, N_y) = (\rho + h)K$$

式中：K 为水电站群基建总投资；h 为水电站群年费用占总投资的百分率；ρ 为投资标准效益系数，借它将水电站群的总投资折算为年值。

利用上述效益费用指标的计算成果，首先可以按益本比 $B(E)/C(v, N_y) \geqslant 1$ 为可行方案的条件，淘汰不可行方案，其次再按净效益最大的准则选出最优的方案。

在梯级水库个数较多的情况下，可能的组合方案的数目是相当多的，用穷举法去完成方案的分析比较是低效的。可以采用修正梯度法来优选梯级的正常蓄水位方案。

首先按前述梯级水库正常蓄水位方案组合的有关原则，拟定出一个或几个初始的可行方案，并根据坝址的具体条件适当地确定各水库正常蓄水位的允许变化范围。

以一个初始可行的梯级正常蓄水位方案为基础，从某一水库 i 开始，在固定其它水库正常蓄水位的条件下，分析水库 i 的变化对目标函数的影响。采用一个适当的正常蓄水位的增量 Δ 为步长，每增减一个 Δ，必须同时重新进行梯级最优死水位及装机容量最优分配的计算，然后才能求得其相应的动能指标，以及相应的梯级水电站的净效益 NB。若水库 i 的正常蓄水位加上一个增量 Δ 之后，经计算净效益有所增加，那么可继续再增加一个 Δ，直至其正常蓄水位的增加不能再改善梯级水电站的净效益，或是正常蓄水位已达到其允许的上限，不能再抬高为止。如果一开始时就出现抬高正常蓄水位反而使净效益有所减少，那么应改用负增量，即降低 Δ 值。改变为减少方向后，仍按上述增量分析的做法进行计算。

完成一个水库的正常蓄水位选择的上述计算后，进行第二个水库的选择正常蓄水位的

计算。这时，第二个水库的正常蓄水位是可变动的，其余的固定，已进行过选择的第一个水库，就采用新选定的正常蓄水位值。第二个水库的计算与上述第一个水库的做法完全相同。循此，逐一进行每个水库的正常蓄水位的选择，直至完成全部梯级水电站的分析为止，作为第一轮计算。

由于这是一种逐次渐近的算法，因此，还必须仿第一轮的做法，进行第二、三…轮计算，直至后一轮的正常蓄水位与前一轮的值相比，其差值已满足收敛条件的要求。

第五章　供水问题系统分析

第一节　概　　述

水是人民生活和国民经济建设中不可缺少的自然资源。水有多种用途，不同用水部门可按其用水特点分为二类。水力发电、航运、放木、渔业及环境用水是利用河道的水体或水的能量，其特点是在河道内用水，用水过程不直接产生水量消耗，其用水量可重复利用。可以把这些用户称为河道内用水部门。工业用水、城镇生活用水、灌溉、林牧业用水、农村饮用水等，必须将从河道引用的水量，输送到用水地点，其用水过程伴随着大量的水量消耗，这些属于河道外用水部门。河道外用水过程中未被消耗掉的水量，将以各种形式回流到河道，如冷却用水、工业废水和生活污水将排放到河道，灌溉回归水往往表现为灌溉渠系和田间的水量入渗而对地下水进行补给。河道外用水的回归水带有污染物质而成为河道和地下水的污染源。

本章所研究的供水问题的对象是指河道外的农业和城市用水。农业用水包括灌溉、农村生活用水及畜牧饮用水。城市供水包括居民、工业、商业、公共事业和其他社会事业的用水。

在农村和小城镇，由于人口相对较少，乡镇工业不发达，生活水平较低，常常仍然保留着就近从河流、湖泊、坑塘取水，或打井取水的古老的供水方式。人口的增长和工农业的发展，出现了人口密集的大城市和幅员广大的农业区，人民生活水平的提高引起了人均用水量的增加，为提高农业产量也要求提供足够的灌溉用水。于是就近的、分散的、水量不多的水源，如浅层取水的水井，临近的小河等，已不能满足用水的需求，必须借助于兴建水源工程和较远距离送水的输水系统来满足供水的要求。随着供水的增加，工业废水和生活污水的排放，以及灌溉回归水对水源污染问题日益严重，水质问题也已成为供水中不容忽视的问题。

当有限的地表水源不能满足人类迅速增长的需水要求时，地下水自然会或为有效的补充水源，在地表水源严重不足的干旱、半干旱地区，地下水是供水主要的、甚至是唯一的有效水源。我国有不少于 2 亿亩农田缺乏地表水源，需要用地下水灌溉；有约 7 亿亩农田，地表水源保证率不高，需要地下水补充；约有 10 亿亩以上的缺水草场，需要利用地下水灌溉和供给畜牧饮用水；全国还有 3000 万人民饮用水十分艰难，他们主要分布在山区、牧区、边境地区和少数民族地区。合理地利用地下水资源，是缓解这些地区供水不足的一个途径。

在开发利用地下水资源时，应严格控制实际开采量不超过可开采量。对地下水长期过量开采，将引起地下水位大幅度下降，甚至导致地层下陷，海水入浸，生态环境恶化。

地表水与地下水联合运用是水资源利用中已受到普遍重视的方向。干旱、半干旱地区的不少灌区的灌溉实践表明，一味单纯大量引用地表水灌溉，往往造成灌区地下水位上升，潜水蒸发量增加，土壤上层盐碱含量加速积累，而导致土壤盐碱化。合理开采地下水，可

防止地下水位过分上升，又可减少有限的地表水源的供水量。

水文地质勘探已经揭示，地下相当普遍地存在着各种蓄水构造，有的需要筑坝方能有效蓄水，有的无需修坝，只要采取引渗回灌措施便可形成地下水库。将两种不同特点的水源，地表水和地下水，通过地面水库和地下水库的联合调度，必将提高供水系统的供水效果。

综上可见，随着社会经济的发展和人口增长，要求水资源的开发利用程度不断提高，其发展过程按供水问题存在矛盾的情况可划分为三个阶段：天然可供水量大于用水要求，天然水体污染容量大于水体污染负荷量，此为初期无矛盾阶段；天然可供水量与各种用水要求大体上趋于供需平衡，天然水体污染容量与水体污染负荷基本相适应，只在局部地区的枯水期或特枯水年份出现短暂的供需矛盾，这一阶段可作为供需平衡阶段；第三阶段是供需不平衡阶段，此时天然可供水量远不足以满足用水要求，天然水体污染容量小于水体污染负荷量，供需矛盾尖锐。揭示供需矛盾，预测未来可能发生的情况，未雨绸缪，可使水资源能更好地为国民经济建设和提高人民生活水平服务，为人类生存创造更良好的环境。

第二节　我国水资源供需关系分析

一、我国水资源特点

（一）我国水资源人均占有量并不丰富

初步估算，我国水资源总量约 2.7 万亿 m^3，其中河川多年平均径流量约 2.6 万亿 m^3，折合平均径流深为 278 mm。全国地下水总补给量约 7700 亿 m^3（河川径流量与地下水二者含有河川基流、河道渗漏、灌溉渗漏等重复水量）。河川年径流量与世界各国比较，少于巴西、原苏联、加拿大、美国和印尼，居世界第六位。按人均占有径流量计算，我国人均占有径流量约 2300 m^3/人，仅为世界人均占有量的 1/4，相当于美国人均占有的 1/5，是原苏联、印尼人均占有量的 1/7，是加拿大人均占有量的 1/50。按每亩耕地平均占有径流量计，只有 1762 m^3/亩，是世界亩均占有的 76%。从人均、亩均占有径流量看，我国水资源并不丰富，因此，必须十分珍惜水资源，综合开发，合理利用，加强管理，使有限的水资源发挥更大的作用。

（二）我国水资源地区分布不均，水土资源不协调

我国水资源的地区分布很不均匀，南多北少，东多西少，相差悬殊。从表 5-1 可见，我国水资源分布与人口和耕地的分布很不协调。南方四片面积占全国面积的 36.5%，耕地占全国的 36%，人口占全国的 54.4%，但水资源总量却占 81%。其中西南诸河片水资源丰富，但多属高山峻岭，人烟稀少，耕地也很少，人均占有水资源量约为全国人均的 15 倍，亩均占有水量约为全国亩均的 12 倍。辽河、海滦河、黄河、淮河 4 个流域片的总面积占全国的 18.7%，相当于南方 4 片总面积的一半，但其水资源总量却只相当于南方 4 片水资源总量的 12%。辽、海、黄、淮 4 片多属大平原区域，耕地占全国的 45.2%，人口占全国的 38.4%。其中又以海滦河流域最为突出，该流域片人均占有水量仅有 430 m^3，为全国人均水量的 16%，亩均水量仅有 251 m^3，为全国亩均水量的 14%。

海滦河、辽河、淮河流域和黄河中下游拥有丰富的土地和矿藏资源，具有进一步发展经济的巨大潜力，从发展看，这些流域水资源供不应求的矛盾今后将会日益严重。广大内陆河地区水资源贫乏，在经济有较大发展后，水资源不足的问题也将成为突出的矛盾。解决缺水地区的水资源问题，对确保我国国民经济长期、持续发展具有重大的战略意义。为克服水资源地区分布的不平衡，远距离跨流域调水以改变地区间的水资源余缺势在必行。

表 5-1　　我国各流域片人均、亩均水资源比较

流域片名称		流域片面积占全国百分数（%）	水资源		流域片人口占全国人口百分数（%）	流域片耕地占全国耕地百分数（%）	人均水量（m^3/人）	亩均水量（m^3/亩）
			（亿总量 m^3）	占全国百分数（%）				
内陆河片		35.3	1303.9	4.6	2.1	5.8	6290	1470
北方五片	黑龙江流域片	9.5	1351.8	4.8	5.1	13.0	2630	679
	辽河流域片	3.6	576.7	2.1	4.7	6.7	1230	558
	海滦河流域片	3.3	421.1	1.5	9.8	10.9	430	251
	黄河流域片	8.3	743.6	2.6	8.2	12.7	912	382
	淮河流域片	3.5	961.0	3.4	15.7	14.9	623	421
	合计	28.2	4054.2	14.4	43.5	58.2	938	454
南方四片	长江流域片	19.0	9613.4	34.2	34.8	24.0	2760	2620
	珠江流域片	6.1	4708.1	16.8	10.9	6.8	4300	4530
	浙闽台诸河片	2.5	2591.7	9.2	7.2	3.4	3590	4920
	西南诸河片	8.9	5853.1	20.8	1.5	1.8	38400	21800
	合计	36.5	22766.3	81.0	54.4	36.0	4180	4130

（三）水资源的年际和季节变化与用水要求不相适应

我国大部分地区受季风影响明显，降水量的年际和季节变化大。我国南部地区最大年降水量一般是最小年降水量的 2～4 倍，北部地区一般是 3～6 倍。我国多数地区雨季为 4 个月左右，南方有的地区长达 6～7 个月，北方干旱地区仅有 2～3 个月。南方大部分地区连续最大的 4 个月径流量占全年径流量的 60%左右，华北平原和辽宁沿海地区可达 80%以上。从河流的年径流量的最大与最小值的比值看，长江为 2.1 倍，淮河各支流为 11～23 倍，海河南系各支流为 13～17 倍。严重的是出现连续枯水年，例如黄河在 60 年中出现过连续 11 年的少水期。

要充分利用水资源，势必要求对降水和径流在时间的剧烈变化进行径流调节，改变水资源的时程分配，以丰补缺，以满足用水的要求。

二、我国水资源开发利用现状与前景

根据对我国各省、市、自治区 1977～1979 三年水资源开发利用现状统计，全国各项水利设施三年平均总供水量 4739 亿 m^3，其中利用河川径流的供水量 4216 亿 m^3，地下水开采量 523 亿 m^3。在河川径流供水量中，大中型水库三年平均拦蓄量为 1234 亿 m^3，占河川径流供水量的 29%；塘坝、湖泊、闸蓄水量约为 1000 亿 m^3，约占河川径流供水量的 24%；其它约 1982 亿 m^3 是从河道中提引的水量，占河川径流供水量的 47%。前二项由蓄水工程蓄水的供水量合计为 2234 亿 m^3，与我国河川径流量在保证率为 50%的年径流量 24420 亿 m^3 相比，仅占约 9%，说明我国目前现有的蓄水工程对天然河川径流的调节能力仍然很低。

从实际用水量统计，上述三年全国的农业、工业、城市生活及其他（牧业、农村人畜饮用水等）各项用水的年平均总量为4433亿m^3，其中由河川径流提供的用水量为3910亿m^3，地下水开采量523亿m^3。各项用水中，农业用水量为3811亿m^3，占总用水量的85.9%；工业用水量为292亿m^3，占总用水量的6.6%；城镇生活用水量为55亿m^3，占1.2%；农村人畜用水量为140亿m^3，占3.2%；其他用水为135亿m^3，占3.1%。

按目前全国实有灌溉面积约6亿亩计，上述农业用水量折合成每亩的毛灌溉用水量为635 m^3。按同期我国工业总产值为4230亿元计，折合工业万元产值毛用水量为690 m^3。城镇非农业人口为1.54亿人，平均每人每天毛用水量为97L（包括城镇公共设施用水）。

注意到上面提到利用河川径流的供水量4216亿m^3，与实际用水由河川径流提供的用水量3910亿m^3的数值上的差别，这是由于受到复杂的地形及行政区划的约束，限制了供水能力的充分发挥。

中国是一个农业大国，农业用水比重占85.9%，从表5-2可见，其比重远高于发达国家，与墨西哥、印度等发展中国家的比重相近；与此相反，工业用水的比重却很低。

表5-2　　中国现状用水与国外比较

项目 \ 统计年份	中国	美国	加拿大	原苏联	墨西哥	意大利	日本	法国	印度	英国
	1979	1975	1968	1969	1970	1970	1965	1970	1969	1969
年总用水量(亿m^3)	4433	4676	229	2204	468	430	695	340	3237	221
年人均用水量(m^3/人)	460	2340	1070	930	920	860	694	665	600	400
工业用水占(%)	6.6	43.5	81.5	36.0	5.2	19.0	18.3	41.2	0.8	76.0
农业用水占(%)	85.9	48.6	13.5	59	88.1	69.0	72.0	42.5	95.5	0.3
生活用水占(%)	1.2	7.9	5.0	5.0	4.4	12.0	9.7	11.8	3.7	22.4
其它用水占(%)	6.3	—	—	—	2.3	—	—	4.5	—	1.3
年径流总量(亿m^3)	24420 $p=50\%$	29702	22670	43400	3900	1590	5020	2000	16780	1600
用水量占径流量(%)	18	16	1.01	5.1	13	27.1	13.4	19.4	19.1	13.8

表5-3　　中国现状城市用水量与国外比较

国家	城市	居民人数（万人）	每人每天用水量（L）
中国	全国城镇		97
中国	北京	379	192
英国	伦敦	624	263
南斯拉夫	贝尔格莱德	74	248
法国	巴黎	218	500
波兰	华沙	122	235
瑞士	苏黎世	44	443

从表5-3可见，我国目前城镇居民生活用水的人均用水量，明显低于经济较发达的国家，随着人民生活水平的提高，居民生活用水的数量必将逐步增长。

以上关于我国水资源开发利用现状分析，主要采用1989年出版《中国水利区划》一书所提供的数字。该书还对我国2000年或稍后一些时间水资源的供需情况作了预测。远景供需水量按中等干旱年（$p=75\%$）的情况进行估算。

预计 21 世纪初全国农业用水量由现状的 3811 亿 m^3 将增加到 5464 亿 m^3，平均年递增率为 1.73%。预计全国工业用水量将增加到 826 亿 m^3，平均年递增率为 5%。城镇人口按 2 亿计算，随着人民生活水平的提高，用水定额将逐步提高，预测时采用平均每人每天用水量为 190L。据此预计，21 世纪初城市生活用水总量将由现状的 55 亿 m^3 增加到 140 亿 m^3，平均年递增率 4.5%。

预计 21 世纪初中等干旱年全国农业、工业、城镇生活、牧业及其他用水（包括林业、渔业、人畜用水等）各项总需水量 7019 亿 m^3，其中农业用水为 5464 亿 m^3，占总需水量的 78%；工业用水 826 亿 m^3，占 11.7%；城市生活用水 140 亿 m^3，占 2%；牧业用水量 89 亿 m^3，占 1.2%；其它用水 500 亿 m^3，占 8.3%。

对 21 世纪初水利工程的可供水量进行估算是一项比较复杂的工作，主要是参照现有的水利规划及长远发展计划等方面资料进行分析估算。预计远景中等干旱年份河川径流的可供水量为 5761 亿 m^3，地下水可开采量约为 744 亿 m^3，合计可供水量为 6505 亿 m^3。21 世纪初我国河川径流开发利用程度将由现状的径流利用率 17%提高到 24%；地下水开采利用程度由现状的 6.8%提高到 9.7%。

考虑到由于复杂的地形条件和行政区划的制约，有一部分水量并不能用于供需调剂，预计 21 世纪初全国总缺水量约为 700～800 亿 m^3。由此可见，今后我国水资源供不应求的局面是不容忽视的，必须积极采取开源节流的措施来克服水资源的供需矛盾。

三、对我国供水问题的认识

（一）我国已出现水资源危机的苗头

从上述预测看到我国可能出现水资源供不应求的局面，实际上目前我国的一些干旱、半干旱地区的水资源不足的问题已日趋严重。例如黄河多年平均径流量为 560 亿 m^3，由于上中游用水增加和 70 年代水量偏枯，1969～1978 年 10 年 4～6 月三个月的年平均入海水量只有 35 亿 m^3，其中有 4 年低于 20 亿 m^3，在黄河下游发生断流的年数高达 7 年，最长的年断流时间达到 20 天，严重地影响着豫鲁两省农业生产和胜利油田用水。海滦河多年平均径流量为 284 亿 m^3，该流域每亩耕地平均占有径流量仅为 170 m^3。近年来海河的入海水量日趋减少，枯水年入海水量只有 10 亿 m^3 左右，天津市城市工业及生活用水十分紧张。1981 年华北少雨，被迫从黄河引水济津，突击整修输水通道，付出了高昂的代价。

水源的缺乏也阻碍了工业的发展。例如山西省是我国煤炭的主要产地，煤炭又是我国电力的主要燃料和化工的重要原料，因此山西能源重化工基地的建设是关系到我国经济建设的大局。据 1985 年统计，该省 10 个大中城市日缺水 60 万 t。为了维持城市生活用水和工业生产，多年来地下水过量超采，采补严重失调，引起水位大幅度下降和地面下沉。太原市地下水位最大深达 71 m，地面沉降大于 100 mm 的地区达 226 km^2，最大沉降达 553 mm。大同市地下水的开发也严重失调，1980 年以来，水位每年下降 2 m 以上，有些地方地下含水层已接近疏干，造成附近农村吃水困难，新建坑口电站的用水得不到保证。

以上情况表明，我国一些河流或地区的工农业用水已经比较紧张，缺水问题已成为经济建设发展的严重制约。

（二）充分开发利用水资源，提高供水能力

要达到上面提到21世纪初全国具有可供水量6615亿m^3是一个相当复杂的问题，实现这一目标不是轻而易举的。与这一规划的可供水量相适应，21世纪初河川径流供水量将由现状的4216亿m^3增加到5871亿m^3；地下水开采量将由现状的523亿m^3增加到744亿m^3。

从规划看，提高河川径流的可供水量的手段是兴建一批蓄水工程，增加引水、提水工程的建设，以及通过跨流域调水增加水源补给等。

全国现有大中小型水库8.6万多座，总库容约4000亿m^3。我国北方地区水库因为防洪、淤积等原因，水库有效库容约为总库容的1/5；而南方地区水库由于发电、航运等要求，灌溉库容一般约占总库容的1/3。但由于水库调节径流，能较好地通过改变河川径流的年内和年际变化而提高河川径流的可供水量，因此，应根据各地条件，合理规划，积极修建这类蓄水工程。当然，不能不看到今后工程建设的条件将越来越不利，一些有利的坝址已被开发，因此今后兴建蓄水工程的可行性将会受到坝址、投资、移民等条件的限制。

（三）节约用水，合理利用水资源

开源节流是解决水资源供不应求矛盾的两种相辅相成的手段。开源指提高供水能力；节流是指通过节约用水来缓和供需矛盾。

从各部门用水比重看，我国农业用水占总用水量的比重，现状为85.9%，21世纪初为78%，可见节约农业用水具有举足轻重的作用。

目前我国许多灌溉系统的水利设施年久失修，造成水源的严重浪费。例如目前灌溉渠系水利用系数普遍偏低，一般只有0.4～0.5，约有50%～60%的水是在输送到田间为农作物利用的过程中沿途渗漏损失了。如果能将渠系水利用系数提高0.1，全国农业用水量可减少约400亿m^3，节水效益相当可观。不同的灌溉方式和灌溉技术，影响着灌溉水量。例如玉米和棉花改畦灌为沟灌，每亩每次灌水可节省水量20～25m^3。采用喷灌、滴灌等灌溉技术，节约用水的潜力更大。

应加强对节约用水的宣传教育，明确水资源是有限的，明确水是一种特殊的资源和商品，来之不易，用之有限。调整水费标准，按不低于供水成本的原则定水价，用经济杠杆促进节约用水。工业用水应制定合理用水定额，降低用水单耗，提高水的重复利用率。对于超定额用水可实行累进制加价收费。

对于一些严重缺水地区，应努力探索发展节水型经济模式，建设节水型工业，调整农作物布局，适当降低水稻面积，改进灌溉方式，逐步采用先进的灌溉技术，以形成节水型农业模式。

总结我国40年来的经验，使人们更深刻地认识到水利建设和整个国民经济的发展是紧密相关的。随着工业的发展，城镇人民生活水平的提高，对水的需求愈来愈大，出现了工农业用水的矛盾，城市供水紧张等问题。

据1980年统计，全国有223个城市每天共缺水880万t，每年缺水30～40亿m^3。由于城市缺水，许多以灌溉为主的综合利用水库，如海河、滦河、辽河的官厅、密云、潘家口、大伙房、参窝、汤河等水库，不得不改变为以城市供水为主的运用方式。因此今后在考虑

水资源开发利用时，必须统一规划，统筹兼顾，在干旱缺水地区和沿海对外开放城市，应根据水资源的供需平衡关系，充分论证、合理制定适合本地区条件的工农业发展的水利建设规划。

（四）水源污染日趋严重，急需加强保护

在50年代至60年代初，我国江、河、湖、库等的水源污染并不严重，随着工农业的发展，加之在一个较长的时期内，忽视了对水质的管理和控制，到70年代至80年代，水质污染问题日趋严重，某些污染严重的地区已给工农业发展和人民健康带来了不容忽视的危害。

人类生活和生产活动中任意排放的废弃物是水污染物质的主要来源。点污染源主要是城镇工业废水和生活污水的排放；面污染源主要由于大面积的农田使用农药和化肥而形成。

据1845个城镇统计，1980年这些城镇日排放废污水量为8633.3万t，其中工业废水占82.9%，生活污水占17.1%。废污水90%以上未经任何处理就直接排放入水域。据全国2258个县（市）1976～1980年的统计，在15.01亿亩耕地和0.33亿亩草原上，每年使用农药110.49万t，平均每亩耕地使用农药0.72 kg。一般说来，使用的农药只有10%～20%附着在农作物上，其他的流失在土壤、水体和空气里。由于高残留农药的大量使用，造成了一些地区水质恶化。在1980年进行874条河流，河长合计为92114.9 km的水质评价中，有66%河段的水质达不到饮用水的标准，有11%的河段水质不符合农业灌溉的要求，有6%所含的有毒物质超过污水排放标准或受有机物污染而达到黑臭的程度。

当前，我国水源污染的范围有增无减，污染程度仍在加重，治理污染，保护水源，已成为非常紧迫的任务。

第三节　地下水资源开发利用简介

一、地表水与地下水的联合利用

据前述对1977～1979年三年全国统计成果，我国地表径流的开发利用率为17%；地下水的开采量为523亿m^3，与地下水总补给量7700亿m^3相比，其开发利用率仅为6.8%。可见我国目前地表水资源和地下水的开发程度都是比较低的。在一些缺水地区，由于地表径流不足，地下水已成为重要的补充水源。沿海对外开放城市在解决供水问题时，既要开发利用地表径流，也要合理利用当地的地下水资源。总之，一个地区或一个城市的供水规划，必须将地表径流和地下水作为可供开发利用的供水水源，合理规划。

从流域地貌看，由山区向平原过渡的地段存在山前倾斜平原区，简称为山前区。河流流出山口后，由于地形坡度减缓，流速降低，并由集中水流转变为分散水流，大量的推移质和悬移质堆积下来，形成山前的扇状或裙状的冲洪积扇，扇与扇相连而形成沿山麓分布的山前倾斜平原。山前区一般具有很厚的沉积物，构成良好的含水层。沉积物由较粗的砂砾石、砾石和卵石组成，透水性良好，给水度大，加之有山区丰富水源的补给，因此山前区一般具有丰富的地下水源。另外，沉积层由于存在不透水或弱透水的基岩衬托而形成良好的蓄水条件。

在大江河下游，往往形成主要由河流冲积层组成的冲积平原，沉积厚度较大。冲积平原中不同时期和成因形成的砂砾沉积，常联结成一个统一的巨厚的砂砾砂质含水层系，构成规模巨大，水量丰富的地下水盆地。其中常埋藏有颗粒较粗的砂层构成的古河道带。

海滦河流域有典型的山前平原区，从山前平原到东部滨海平原地下水的分布情况是，山前区地下径流条件好，为全淡水富水区；冲积平原逐渐出现咸水夹层，愈向东愈厚，至滨海平原几乎全为咸水层。山前区河川径流也较丰富，因为山区是主要产水区，加之山口往往有修建水库的条件。平原地区地下水条件相对差，又没有其它水源补给。从这种典型的水资源地区分布情况看，若能全面规划，促进山前区的工农业发展更多地利用该区的丰富的地下水，而将地表水更多地作为下游平原区的供水水源，则可使地表水和地下水两者均得到合理的利用。但是目前出现的实际情况常常是由于管理体制上或是政策上不完善，山前区的开发优先利用的是地表水，从而造成本区地下水未被利用或利用极不充分，下游缺水地区的水源又不能得到补充。

我国一些干旱、半干旱地区灌溉实践表明，合理地联合利用地表水和地下水，既有助于节省有限的地表水资源的消耗，也有利于防治灌区土壤的次生盐碱化。例如我国西北地区，素称“塞上江南”的银川灌区，历来主要靠黄河水作为灌溉水源。由于管理不善，渠系失修，加上超额引水，渠系和田间渗漏严重，抬高了地下水位，增强了潜水的蒸发，不但造成水资源的浪费，而且加重了土壤的盐碱化。

由于地下水库概念的提出，使人们可能形成对地下径流进行调控的构想。可以通过人工引水回灌的办法，把一些不被利用的多余地表径流回灌到地下水库，以扩大地下水的补给。通过这种回灌的办法，可以把地表水库与地下水库形成彼此有水量联系的水源调节系统，联合调度，达到提高供水效益的目的。

二、地下水可开采量、地下水库及人工补给地下水的方法

（一）地下水可开采量

在地下水开发利用中，必须首先了解地下水可开采量的含义。

地下水与地表水是水资源的二个部分。从水循环观念看，大气水、地表水和地下水三者在水循环运动中不断相互转化。降水落于海面或陆面。陆面降水一部分以地表水的形式汇入江河，流进海洋；一部分渗入地下，形成地下水。地下水一部分又以潜流或泉水的形式注入江河和海洋；一部分通过蒸发或植物叶面蒸腾，以水蒸气的形式回到大气之中。不同形态的水总是不断地周而复始地循环变化。由此可见，地表水与地下水同源于大气降水，地下水资源也属于可再生资源，它具有季节性和年际变化的动态属性。不过与地表水的年内和年际变化规律相比，地表径流变化较剧烈，地下径流变化较平缓。

地表水资源可通过河流水文测站的观测资料，计算出测流断面所控制流域面积的多年平均径流量，并以此表示该流域的地表水资源。

地下水通过地下含水层流动，其运动情况远比地表径流复杂，无法对它进行直接量测，因此不得不求助于若干种不同途径的估算方法。这里将借助于水量均衡法所依据的水量平衡原理，说明如何估算地下水资源，以及地下水资源与地下水可开采量二者在概念上的联系和区别。

以一个地下水均衡单元（如某一地下水流域、某一蓄水构造、或某一含水层的开采地段等）为对象，地下含水层可看成天然的地下蓄水体，地下水的补给即为含水层水体的输入，其排泄量即为输出。地下水补给量包括大气降水入渗、地表水渗漏、相邻含水层入流量、地下径流流入量、山区侧向补给、河流侧向渗漏等。排泄量包括潜水蒸发量、向相邻含水层出流量、地下径流流出量、泉水溢出量、含水层向地表水体的排出量等。

地下水补给量是一个变化过程，它输入含水层之后，含水层对地下径流将起着滞蓄作用，使其排出量的变化过程与输入过程相比有所滞后和变得更为平缓。因此，从一个具体时段（旬、月或年）看，输入量一般与输出量有差别，当输入大于输出时，含水层蓄水量及其相应的地下水位增加；反之输入小于输出，则地下水位下降。因此含水层储水量具有较明显的年内消长变化，也存在一定程度的年际变化。根据水量平衡原理，从多年平均看，天然补给的输入量与天然排泄量二者应该是相等的。

在水资源评价中，地下水资源就是指上述地下水天然补给量的多年平均值。而地下水可开采量乃是指根据合理开采条件确定的开采量，这些条件包括技术上可能，经济上合理，开采后又不致于造成水质恶化和地下水位持续下降等不良后果。显然地下水可开采量一般应小于上述的地下水资源，若前者超过后者，地下水就得不到补偿，水位也不能恢复。

（二）地下水库的概念

随着科学的发展，人类不仅在地而上修建了大量的水库，而且发现在地下也存在各种可用来大量蓄水的含水构造，如河流阶地、古河道 、古湖泊、冲积和洪积扇、平原地区岩溶发育带等。这些构造，有的需要筑地下坝才能形成有效蓄水的地下水库；有的无需修坝，只需要采取适当的引渗回灌措施，便可起地下水库的作用。后一类型的地下水库已在我国不少地区的规划或实践中得到应用。

人工回灌形成的地下水库使人们可以有计划地把丰水季节，甚至于丰水年暂时用不上的多余水量引蓄于地下，到枯水期再从地下水库中抽出来补充供水。它具有安全、经济、不占地、工程措施要求不高等优点，已受到普遍重视。

与地面水库相似，地下水库也有它的特征水位。在正常运行条件下允许达到的最高地下水位称为正常蓄水位，该水位是根据农作物高产稳产和防止土壤盐渍化的要求确定的，它与地下水矿化度、土壤质地、作物栽培技术等要素有关。提水设备吸程允许达到的最低水位称之为最低合理开采水位，或通称为死水位。这两个水位之间，由地下水库周界所围成的空间，乃是地下水库实际有效的可起调蓄地下水量的含水层，以 V_y 表示这部分含水层的体积，其有效孔隙率为 μ，那么可得出其相应有效蓄水容积为

$$V_x = \mu V_y$$

在天然条件下，地下水通过含水层流动的过程，含水层对地下径流起着自然的滞蓄作用。地下水库不仅同样具有其自然滞蓄作用，更重要的是它通过人工引水回灌和有计划地提取地下水，而对地下蓄水体的输入和输出形成人为的有意识的干预，从而使地下水库成为一种可调控系统。利用地下水库的调蓄能力的意义不仅在于可以促进对地下水资源的充分利用，而且还在于它有助于扩展对地表径流的有效利用。

对地下水库的规划设计将涉及如何通过地下径流的调节计算，合理确定其最低的合理

开采水位及其相应的开采量。

假设所研究的地下水库具备10年以上的逐月输入和输出的资料。输入资料项目主要包括天然补给量和人工补给水量；输出资料主要包括提取地下水的供水量及其他的排泄量。其他排泄量的项目又可分为蒸发损失，即潜水蒸发量，和渗漏损失（主要指通过地下渗流形式的排泄量）。按照径流调节时历法原理，以给出的输入、输出水量系列为依据，逐时段（月）进行水量平衡计算，得出地下水库蓄水量及其相应水位的逐月变化过程，相应的最低消落水位和所需的最大蓄水容积。

此外，还必须根据地下水开采设备的能力及提水的费用大小，以及含水层的构造实际可能提供蓄水的空间等条件综合论证上述最低水位作为最低开采水位的技术可能性和经济合理性。实际情况往往是由于技术和经济条件而形成对地下水开采水位的制约，使实际可供蓄水容积不能满足上述调节计算得出的最大蓄水容积。调节容积减小的结果，必将导致上述正常供水得不到保证。解决矛盾的途径一是压缩供水量；或是设法扩大人工回灌的补给量。在这种情况下，必须按已知库容 V_n 为条件，重新进行径流调节计算。

由上面对地下水库径流调节计算的简要叙述可以得到如下的认识：

1）在给定输入、输出水量资料的条件下，地下水库径流调节的原理和计算方法与地面水库径流调节相同，因此可以运用已学过的地面水库径流调节计算的知识，解决地下水库径流调节的各种问题。

2）地下水天然补给量和排泄量的各项资料，或是由与地下水有关的专业部门提供，或是参考有关的地下水书籍介绍的方法进行估算。

3）由上述地下水库径流调节及其采用的最低合理开采水位的分析可见，不仅应根据地下水的补给量，还必须结合径流调节及实际采用的最低开采水位的分析计算，才能最终求出地下水的开采量。对于只存在天然调蓄作用的含水层，也必须仿照地下水库的作法，通过径流调节计算确定最低开采水位及其相应的开采量。

（三）人工补给地下水的方法

应根据水源和当地地形、地质、水文地质等方面的具体条件，选择适当的人工补给地下水的方法。比较常用的方法有下列几类。

1. 面补法

这类方法只利用现有田面，将引来的水薄层分散，均匀下渗。它要求地面坡度平缓，表层土壤透水性强。

引洪漫灌法属于面补法。此法在洪水流经的河道上修建简易的引水工程，开挖沟渠将洪水引至回灌地段田面，使水层在较短时间内渗入地下。如果在引水渠附近有合适的洼地或坑塘，可以注入引洪，以加强对地下水的补给。

另一种面补法是格田淹灌法。如可以通过引取河水对越冬作物进行超定额灌溉，将那些要春播的休闲地筑成高埂格田，进行储水灌溉，以加强对地下水的补给。

2. 线补法

此法利用现有的或新开挖的渠、沟网系，引入各种地表水或灌溉余水，使水沿渠、沟渗入地下。也可以利用天然河道或排水渠沟，建闸拦截或引蓄地表径流，以加强对地下水

的补给。

3. 点补法

此法将水引至回灌地点，在小面积上集中强渗，使其迅速渗入含水层，并形成水丘，再逐渐向面扩展。可以利用灌区的土坑、沟壕、洼地，或在适当地点开挖坑塘进行小面积强渗回灌。如当地无天然洼地和坑塘，上层土壤透水性较差，或含水层埋藏很深时，则可有计划地打一些回灌井，井的深度以达到含水层为宜。视含水层透水性的强弱，可采用自由水头或水泵加压进行井孔回灌。

第四节　地表水与地下水联合运用灌溉供水系统模拟模型

模拟技术与数学规划都是常用的系统分析技术方法。在工程实践中往往发现，实际的水资源系统规划设计问题并不是都适合于用数学模型求解。鉴于问题的复杂性，为避免建模及解算上的困难，不得不对实际系统作简化的数学描述，过于简化的描述往往导致问题的解答不能切合实际。而力图反映实际的数学描述却将使数学模型变得过于复杂，以致于无法求解。遇到这种情况，人们往往可以求助于模拟技术来寻求问题的合理解答。

模拟技术的特点是根据所研究问题与追求的目标，系统行为与目标之间的因果关系，以及系统行为的运行过程和运行规则等条件，用数学表达式来描述系统实现其目标的行为过程及其所达到的目标效果。对于系统有目的行为过程有序的数学表达构成模拟模型。将系统行为的数学表达式编制成电算程序，用数字计算机执行演算工作，称为数字模拟技术。根据已建立的模拟模型，用计算机进行演算的过程就是对于系统行为的仿真。将系统行为看成是待定的决策变量，那么对于一组决策值，以及给定的决策约束条件，执行上述的模拟演算，可求得一个对应的目标值，它反映系统行为的效果。变动决策值，或改变决策约束之后，又必须重新执行模拟演算来求出相对应的新的目标值。

由上述可见，模拟模型的功能只探求某种系统行为所达到的相应效果，而不能像数学规划模型那样，通过模型解直接求出最优决策。系统的目标函数可以用多维空间的响应面来表示。执行一次模拟运算求出的目标函数值只是响应面上的一个点。多次不同决策的模拟运算的结果，可以得出目标函数的离散点分布，并借此逐步寻求相对优化解。

下面介绍对于一个多水源灌溉系统的规划问题建立模拟模型和进行模拟运行的方法。

对于地下水具有开采可能性的地区的灌区，原则上应该考虑地表水与地下水的联合供水规划。可是由于对这种多水源联合运用的必要性或是缺乏认识、或是执行不力，在以往的灌溉规划中出现过一些依靠单一水源的片面性，例如我国北方某些地区的灌溉实践就经历了“废井兴渠”、“废渠还井”和“井渠结合”的过程。

这里将以一个灌区扩建规划问题为对象，介绍地表水与地下水联合运用的灌区规划问题。扩建问题提出的背景是，该灌区主要是以地表水库提供水量来确定灌区规模，该区具有较丰富的地下水可供开采，据此提出地表水与地下水联合运用的灌区扩建规划。

一、灌溉系统的基本情况

灌区主要部分为山前倾斜平原，还有部分丘陵地带。上游山区有一座大型水库为此灌

区提供灌溉水源。灌区中上部的区间地表径流，以无调节取水形式向灌区提供辅助的地表水源。灌区地下含水结构的地区分布有较大差异，地面及含水层一般具有较大的侧向坡度，且为河谷切割，地下水水平运动情况较为复杂。为保证模拟模型具有足够的仿真性能，必须对灌区进行分区模拟。根据各分区内水文地质参数、土壤和种植情况基本相似的条件，结合地面渠道系统现状，将灌区划分为 19 个分区，每个分区可看成子系统。图 5-1 所示的灌溉系统网络图显示了各分区的平面分布。图中序号为 0 的子区属于岗地，缺乏适宜的地下含水层，不具备地下水开采条件。其余 18 个子区的潜水含水层均视为各子区的一个地下水库。相邻子区之间存在地下径流的相互补泄关系。

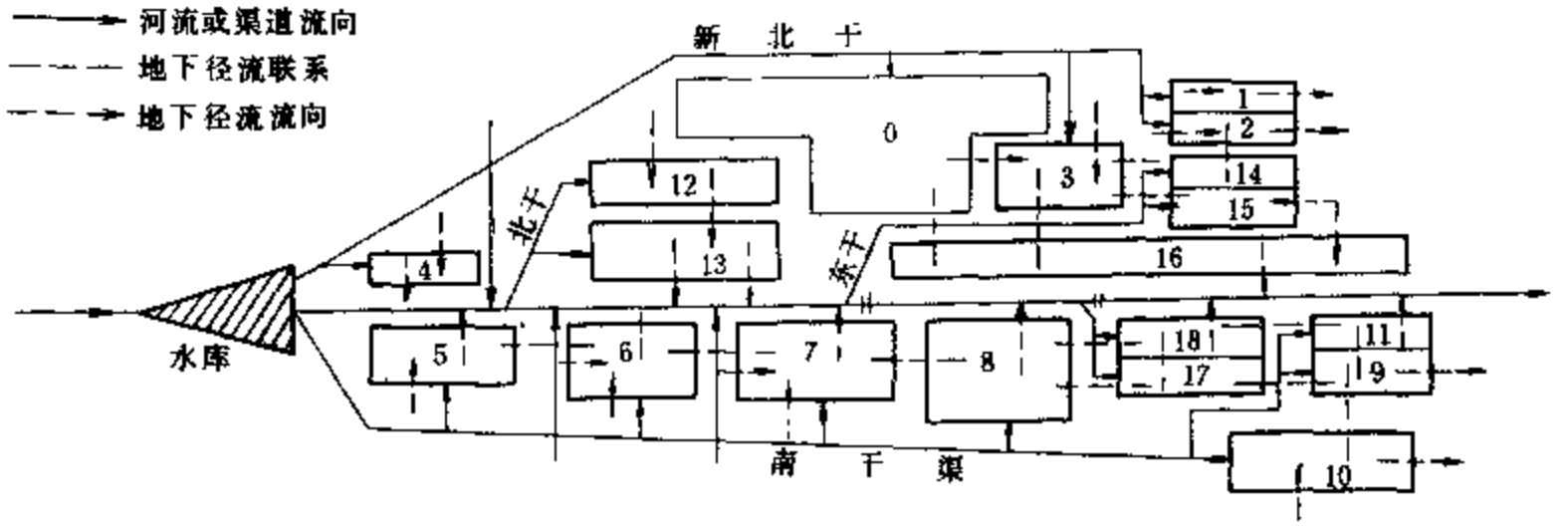

图 5-1 灌溉系统平面网络图

扩建灌区规划拟扩大的灌溉面积有二个部分。其一是向下游扩展灌区面积，由于原灌区修建后，曾经历过几次向下游扩建及调整灌溉范围的工作，下游非灌区内有些已有渠道系统，只需较少的修整即可使用。第 9、10、11 子区即属于拟向下游扩建的子区。扩展灌区的途径之二是修建新北干渠，从水库引水到灌区北部的干旱岗区，第 0，1，2，3，4 子区即为拟扩建的新北干灌区的范围。

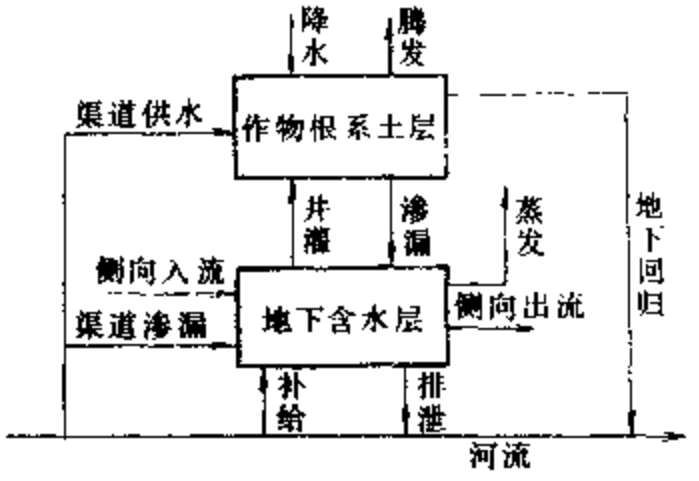

图 5-2 子区细部网络图

图 5-2 为子区细部网络图。各子区表层土壤为农作物根系活动层，即计划湿润土层，借助灌溉调节和维持其土壤水分，使其具有适宜于作物（灌区作物为小麦和玉米）生长的含水量。该层土壤的水量输入包括有效天然降水、地表灌溉水量和地下水灌溉水量；其输出水量有土壤蒸发水量、作物蒸腾水量、向深层渗漏水量。作为子区的地下水库的含水层的输入水量主要来自天然降水的补给，此外还有渠系渗漏和相邻子区含水层的侧向入流等；其输出水量包括潜流蒸发，向河流排泄和向相邻子区侧向出流等。

二、供水规则分析

对所研究的灌区采用 29 年的降雨、径流资料进行模拟运行分析。根据实测降雨资料，按水量平衡原理，分析制定作物的灌溉制度，求出各年灌溉用水量的变化过程。以地表水

和地下水为供水水源，通过地面水库与地下水库的联合调配，以达到最大的灌溉效益。

地表水主要考虑入库径流量，如果水库控制断面下游的灌区范围有明显的区间径流也应合理利用。地下水源涉及地下含水层补给水量的分析，降雨入渗是主要的天然补给，必须利用实测降雨系列，估算计算期各时段的降雨入渗补给量，同时进行其他地下水补给量的分析估算。

模拟计算的主要内容是探求应如何合理地联合利用地表水和地下水，以满足灌溉的需求。利用地面水库和地下水库的调控径流的功能，满足灌溉用水，可以有多种可供选择的调配方式。对于所研究的灌区有 19 个子区，其中 18 个子区有各自的地下含水层可作为调节地下径流的地下水库。严格讲，必须将一座地面水库和 18 个地下水库的供水量都作为决策变量，这样考虑将涉及为数众多的复杂供水决策组合，对每种组合一一进行模拟计算将带来浩繁的计算工作量。根据灌区的具体情况，为简化供水决策组合，以各子区的水文地质条件和建井情况为依据，拟定各子区地表水与地下水的供水比例，以一个子区利用地面水库供水量占该区灌溉用水量的比重作为配水比值。地下水较丰富的子区，采用较小的比值，即所利用的地面水库的供水量比重小，多利用本子区地下水；反之，地下水较贫乏的子区，采用较大比值。第 0 子区不具备地下水开采条件，只能完全靠地面水库供水以满足其灌溉要求，显然该区的配水比值为 1。

必须指出，上述配水比值原则上只适用于地面水库的供水期，蓄水期的配水规则，应具体分析，灵活掌握，原则上应优先充分利用地表水库的供水量。假如地面水库是季调节水库，每年汛期将出现较多的余水量，若不及早加大利用，必将造成水库大量弃水，在这种情况下，显然不能按上述配水比值来指导供水，而应该优先加大地表水库的供水量，甚至于达到只由地表水满足灌溉用水，而节省抽取地下水的费用。对于完全年调节或多年调节，也同样应注意在蓄水期地面水库优先供水的可能性和合理性。

在模拟计算中采用了三组配水比值作为不同的组合方案，各种组合中各子区的配水比值如表 5-4 所示。

表 5-4　　地面水库供水比重

区号 / 组合	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
高比值	1	0.7	0.7	0.7	0.2	0.65	0.7	0.5	0.75	0.75	0.75	0.75	0.6	0.6	0.65	0.75	0.75	0.7	0.78
中比值	1	0.55	0.55	0.6	0.15	0.55	0.55	0.4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.45	0.5	0.6	0.6	0.6	0.64
低比值	1	0.4	0.4	0.5	0.1	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.45	0.45	0.45	0.3	0.4	0.45	0.45	0.5	0.5

三、灌溉系统模拟模型

基于上述灌溉系统供水规则分析，可以进一步归纳出此问题的模拟计算包括：灌溉用水量的计算，地下水补给量的计算，地面水库与地下水库联合调节计算，以及目标函数值的计算（即经济计算）。对各部分计算内容用数值计算的数学表达式进行描述，即构成模拟模型的建模工作。下面逐一讨论各部分内容的有关表达式。

（一）灌溉用水量计算

本灌区为旱作区，只种植小麦和玉米，作为已建灌区，其作物组成比例采用原有比例作为给定值。必须根据旱作物的需水特性及根系活动层（即计划湿润层）的土壤水分状况，决定灌水时间及其灌水量。这一部分计算的核心是根系活动土层水分变化的模拟计算。

任一时段作物要求的灌溉水量计算式为

$$M=\begin{cases} ah(S_{max}-S) & \text{当 } S\leqslant S_{min} \\ 0 & \text{当 } S>S_{min} \end{cases} \tag{5-1}$$

式中：M 为时段灌溉水量；a 为作物种植面积；h 为计划湿润层厚度；S_{max}、S_{min}分别表示作物适宜的土壤含水量的上、下限；S 表示该计算时段末灌水条件下的时段末土壤含水量，该值可根据该土层的如下水量平衡关系式逐时段推算。

$$S=S_0+m+p-e_i-v \tag{5-2}$$

式中：S_0 为时段初土壤含水量，即上一时段计算求出的时段末土壤含水量；m 为灌溉水量。灌溉水量 m 与式（5-1）中灌溉水量 M 的换算关系为

$$m=M/a \tag{5-3}$$

p 为时段降雨量；v 为当降雨量过大时产生的深层下渗水量；e_i 为时段田间耗水量，包括作物的腾发水量和棵间田面蒸发水量；式中各项单位为 mm。由灌溉试验资料可得到作物生育期总耗水量 E 及各时段耗水量 e_i 占生育期总耗水量的比值 k_i，借此可求得时段 t 的田间耗水量为

$$e_i=k_iE \tag{5-4}$$

按上述可求出各子区的灌溉用水量 M，即为作物要求的净供水量。它可由地面水库和地下水联合供水，其中地面水库的供水量还应计入渠系的渗漏损失，即必须由地面水库承担的净供水量计入渠系损失之后，求出其相应的地面水库的毛供水量。

（二）地下含水层补给水量计算

这里考虑降雨和相邻子区的地下水补给量。降雨的地下水补给量系利用实测资料，对这一补给量与前期影响降雨量的关系进行回归分析之后得出如下计算式：

$$g=\alpha p_a^2+\beta p_a+\gamma \tag{5-5}$$

式中：g 为降雨对地下水的补给量；p_a 为降雨量与前期影响雨量之和；α、β、γ 为回归系数。

相邻子区地下水的补给量计算式为

$$u=\Delta t\sum_{i=1}^{n}(Z_i-Z)\omega_i d_i/l_i \tag{5-6}$$

式中：u 为时段内相邻子区对本子区地下水补给量之和；Z、Z_i 分别表示本子区及相邻子区 i 代表地点的地下水位标高；ω 表示与相邻子区 i 之间的导水系数；l_i 表示本区代表点与子区 i 代表点之间的距离；Δt 为计算时段长度；n 为相邻子区数目；d_i 为子区 i 相接边界长度。

（三）地面水库与地下水库联调计算

对于一个计算时段，必须首先进行灌溉用水量计算求出灌区作物所需的时段灌溉用水量。根据表 5-4 给定的一组配水比值（注意应同时考虑丰水期优先利用地表水的原则），确定为满足该时段灌溉用水量应分别由地面水库及各子区地下水库供给的供水量。然后按一

种常用的简化运行策略规定的运行规则，分别进行地面水库及地下水库的运行模拟计算。

图 5-3 为水库简化运行策略示意图。图中所示折线即是时段 t 水库调度函数曲线。D_t 表示时段 t 的水库实际供水量；M_t 表示该时段要求水库提供的灌溉供水量；S_t 表示时段初水库蓄水量；W_t 表示该时段对水库输入的径流量（对于地下水库来说，应该是含水层的补给水量）；V_n 为水库的有效库容。按简化运行策略进行水库运行的条件式如下：

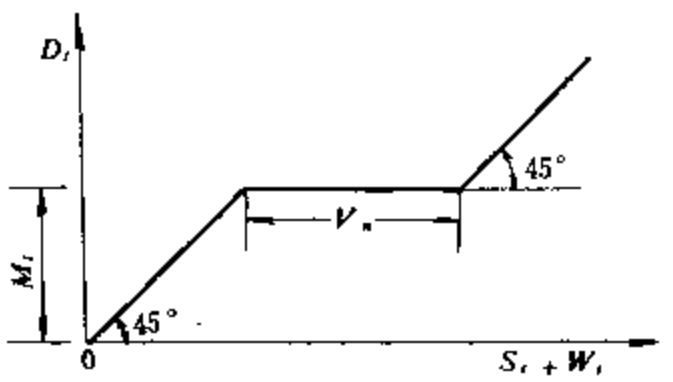

图 5-3　水库简化运行策略示意图

$$D_t=\begin{cases} S_t+W_t & \text{当 } S_t+W_t<M_t \\ M_t & \text{当 } M_t+V_n\geqslant S_t+W_t\geqslant M_t \\ S_t+W_t-V_n & \text{当 } M_t+V_n<S_t+W_t \end{cases} \qquad S_{t+1}=\begin{cases} 0 \\ S_t+W_t-M_t \\ V_n \end{cases} \tag{5-7}$$

上述条件式表明，利用简化运行策略为指导，对于已知有效库容 V_n、规定供水量 M_t，按时段初蓄量 S_t 及该时段输入水量 W_t，即可求出该时段水库的实际供水量（包括多余下泄水量）D_t 及时段末水库蓄水量 S_{t+1}。接着按相同方法进行下一时段的模拟运行计算。

简化运行策略既适用于地面水库，也同样可用于指导地下水库的模拟运行。对于地面水库而言，根据计算时段灌区所需的灌溉用水量，按上述规定的配水规则，可确定相应要求的水库供水量 M_t，执行式（5-7）可求出地面水库的实际供水量为 D_t。当 $D_t<M_t$ 表示该时段不可能由地面水库提供足够的供水量，此时或是被迫减小灌溉用水量，或是研究适当加大地下水库抽水量的可能性。当 $D_t>M_t$ 时，表明地面水库有多余的下泄水量，此时应采用优先利用地表水的原则，充分利用地表水，尽量减免地下水的抽取量。

对于有防洪任务的水库，汛期可能存在防洪限制水位的限制。对于这种情况，汛期应根据防洪限制水位和死水位定出其相应的有效库容；非汛期则可采用正常蓄水位与死水位之间的有效库容 V_n。

每个子区的地下水库应根据其正常最高地下水位（即地下水位允许的最小埋深），合理的开采水位（即最大地下水位埋深），以及地下含水层在这两个水位之间的周边、确定其相应的含水层容积及地下水库的有效库容。以计算时段地下含水层的补给水量为地下水库的输入水量，以前述配水规则确定的子区地下水供水量为规定灌溉供水量，按简化运行策略条件式（5-7）可执行逐时段的地下水库模拟运行演算。

（四）经济效益计算

以净效益最大作为评价扩建方案的最优经济准则。净效益为灌溉效益与总费用之差。灌溉效益由作物的多年平均产值表示，农产值是作物产量与单价的乘积。农产品的价格往往偏离其实际价值，因此采用的计算单价应慎重论证。在可能情况下，应进行敏感度分析，视其变动对方案选择的影响。

总费用包括农业投资、工程投资及运行费用等项目。农业投资包括种子、肥料、农药、劳力及农机费用等。工程投资包括扩大地下水开采量的建井投资，本灌区计算经综合分析

后，折合为单位抽水能力要求的建井费用；渠道系统扩建，即新北干渠扩建费，该费用以单位灌溉面积投资表示。年运行费用主要包括扩建渠道的年维修管理费，扩建机井的年维修费用，以及抽水动力消耗费等项。为简化计算，灌区中已建渠道和机井的投资和运行费当成不变费用不予计入。扩建渠道和机井的维修管理费可参照过去运行资料测算出占各项投资的百分数，分别计算其相应的运行费。

根据上述分析可见，尚需对如下项目进行具体计算。首先必须根据各年的灌溉条件，估算农作物的产量。根据本灌区灌溉产量调查资料，并参考同类作物的有关灌溉试验资料，采用如下的作物单产的计算式：

$$y = y_m\left[1 - A\left(1 - \frac{P_0 - M}{E}\right)^B\right] \tag{5-8}$$

式中：y 表示单位面积作物的实际产量；y_m 表示在充分灌溉条件下作物的单位面积的正常产量；P_0 为作物生育期的有效雨量；M 为生育期的灌溉水量；E 为作物在充分灌溉条件下生育期的田间耗水量。式中的水量项单位为 mm，产量项单位为每亩多少公斤。参数 A、B 的采用值分别为 $A=0.6753$，$B=1.286$。

根据灌区的主要作物组成，农业投资采用如下计算式：

$$C_a = C(y - 100) + C_0 \tag{5-9}$$

式中：C_a 表示单位作物面积投资（元/亩）；C 表示超过 50 kg/亩时的单位产量投资（元/亩）；y 的含义与前式相同，表示单产；C_0 为单位面积基本投资。

井灌动力费用按下式计算：

$$C_g = 0.00272C_e \cdot M_g \cdot (H + \Delta H)/\eta \tag{5-10}$$

式中：C_g 表示某时段某子区井灌动力消耗费用（万元）；C_e 为电费单价（元/kW·h）；M_g 为某时段抽取的地下水量（万 t）；H 为子区代表点地下水埋深（m）；ΔH 为子区抽水时水位降深（m）；η 为水泵及机电总效率。

四、模拟运行计算及其成果分析

（一）决策变量的组合

扩建灌区的目的是在已建地面水库供水的条件下，合理开发利用地下水源，研究联合运用地表水和地下水资源的方式，以发挥最大的灌溉效益。据此可见，扩建灌区范围，包括灌区地点和灌溉面积，以及地面水库与地下水库的联合运行方式，是所研究灌溉供水系统的决策变量。可以对扩大的灌区，包括下游扩建区和新北干渠所属的灌溉面积，分别拟定不同的扩灌面积，并采用前述拟定的水面水库与地下水库的三种配合供水规则，构成若干组的决策组合方案。例如计算中对下游扩灌区采用二种灌溉面积为 0 和 4.33 万亩二种取值，前者表示下游区不扩灌，后者表示第 9，10，11 子区为扩灌区。对子拟建新北干渠可扩灌的范围包括第 0，1，2，3，4 子区，对这些子区的不同组合取其扩灌面积分别为 0，5，8.16，13.8 万亩四种数值。根据上述二个扩灌区域的灌溉面积的不同取值，加入三种配水比值，总共可组成 $2\times4\times3=24$ 种模拟运行方案。

（二）模拟运行计算

对于上述 24 种决策方案，必须逐一地采用前面建立的模拟模型，用编制的电算程序在

电子计算机上进行模拟运行计算。计算期为29年，采用月或旬为计算时段，以计算期逐时段的地面径流和降雨资料为依据，依时序逐时段执行模拟演算。对任一决策组合方案，通过上述模拟运行演算可以输出地面水库蓄水量及供水量的逐时段变化过程；各子区田间土壤含水量、地下含水层水量、地下水供水量等要素的变化过程；各年作物产量等多项详细计算成果。这些成果对于详细考察和分析全系统的工作状况是很有助益的。下面只通过表5-5～表5-7摘录24种方案主要特征值的汇总成果供选定方案分析。

表 5-5　　水库高比值供水方案主要成果

下游扩灌面积（万亩）	新北干扩灌面积（万亩）	净效益现值（万元）	总净供水量（万 m^3）	地下水供水量（万 m^3）	水库毛供水量（万 m^3）	小麦总产（5×10^3 kg）	玉米总产（5×10^3 kg）
4.33	13.8	70737	240536	124678	311908	578988	732432
	8.16	71092	239798	124020	304701	577227	733224
	5.0	70930	233865	119759	298495	573006	731587
	0	69871	218960	111370	276093	559120	724110
0	13.8	70055	231497	115072	305126	570523	727691
	8.16	69690	220071	104519	295012	561086	720870
	5.0	69519	213099	101786	281513	557205	718936
	0	68124	193399	92172	248315	540094	708907

表 5-6　　水库中比值供水方案主要成果

下游扩灌面积（万亩）	新北干扩灌面积（万亩）	净效益现值（万元）	总净供水量（万 m^3）	地下水供水量（万 m^3）	水库毛供水量（万 m^3）	小麦总产（5×10^3 kg）	玉米总产（5×10^3 kg）
4.33	13.8	71065	247225	135077	303668	582254	235483
	8.16	71323	244417	133264	294927	579333	735069
	5.0	71212	238649	131675	282196	576177	733828
	0	69831	219609	123119	249288	559098	724165
0	13.8	69913	231503	119459	296261	568280	726142
	8.16	69887	224501	115685	280515	562928	723810
	5.0	69667	216960	114161	262433	558484	722215
	0	68144	195343	107938	215323	540451	710488

表 5-7　　水库低比值供水方案主要成果

下游扩灌面积（万亩）	新北干扩灌面积（万亩）	净效益现值（万元）	总净供水量（万 m^3）	地下水供水量（万 m^3）	水库毛供水量（万 m^3）	小麦总产（5×10^3 kg）	玉米总产（5×10^3 kg）
4.33	13.8	71353	244581	148032	291406	584434	739264
	8.16	71448	249480	146498	276333	580370	738577
	5.0	71255	242039	145835	256594	576544	736743
	0	69757	221194	142943	203822	558530	725495
0	13.8	70195	238378	134197	279105	571290	730098
	8.16	70018	229618	129974	260606	564591	726404
	5.0	69914	221633	129970	237615	563100	723678
	0	67918	192113	127321	159830	538647	708451

（三）决策组合方案分析比较

从表 5-5～表 5-7 成果可看出这样的变化趋势，随着灌溉面积扩大，作物总产量有所增长。扩灌面积较小时，产量增长率较大；当扩灌面积达到最大取值时，总产量几乎不增加，甚至略有下降。其原因主要是由于所研究的灌区从整体上看属于不充分灌溉的类型，当灌溉面积增加不太多时，扩灌面积的增产仍然超过水量不足的单产降低；若灌溉面积过份扩大，将由于缺水过多面出现大面积的较严重减产，这种情况使扩灌所得不足以弥补缺水减产之失。

从三种配水比例的成果对比可见，低配水比值方案的净效益略高于高配水比值方案，这种情况表明尽可能多利用各子区的地下水，并合理调配地表水，对于该灌区的灌溉效果是有利的。通观 24 种方案的净效益值，低配水比值中的一种方案的净效益 71448 万元为最大值，据此可推荐该方案为最佳方案。此方案所对应的扩大下游灌溉面积为 4.33 万亩，即恢复修整第 9、10、11 子区的原有灌溉渠系；以及扩建新北干灌溉系统，扩建范围为第 0、4 子区，扩灌面积 8.16 万亩。

第五节　多水源综合供水系统规划模型

一、供水系统规划背景

所研究的对象为我国北方缺水地区，该地区原为农业区，已建成一座总库容为 1.09 亿 m^3 以灌溉为主的多年调节水库，设计灌溉面积 7.74 万亩。水库下游 6km 处是县城所在地，近年来该地区发展了大型煤田和火电站的建设，城镇工业和人口发展较快。为满足工业和城镇供水已超量开采地下水，并已从已建灌溉水库引水，形成了工农业供水的矛盾。据此提出该地区的供水规划问题。规划中要求按远景 2000 年工农业的发展规模预测农业、工业和城镇生活三个用水部门的需水量。供水水源首先考虑充分利用当地地表径流；其次该地区地下水含水层有一定的水量可供开采；从现状和发展看只靠当地水源（包括地表水和地下水）不能满足用水要求，规划中考虑从邻近河流通过多级提水方式，引水进入已建水库，作为水库入库水量的补充。为简化起见，全区按统一的水文地质和气象条件，把地下含水层作为单一的地下水库来考虑它对地下径流的调蓄作用。

综上可见，所研究的对象是多水源（当地地表径流、地下水和外流域调入客水）、多用户（农业灌溉、工业用水和城镇生活用水），并由地面水库与地下水库联合调控的供水系统。它显然属于大型的复杂系统。图 5-4 为该系统的供水水源、用水部门、水库调控及经济目标分析等方面的关系的示意图。该示意图对于建立此规划问题的数学规划模型具有重要的指示作用。

二、供水系统的决策分析及数学模型

上述供水系统的特点是通过地面水库和地下水库分别对地表径流和地下水的调节，共同满足三个用水部门的需求。地面水库与地下水库的输入水量不存在直接的联系（地面径流通过入渗对地下水的补给看成是间接的水量联系），二者的联系主要表现为相互配合，共同满足用水要求。据此可见，二者的联合运行方式相当于并联水库。必须注意到调入的客水是作为水库输入水量的重要补充，可以利用水库较好的调节能力，对调入的客水进行调

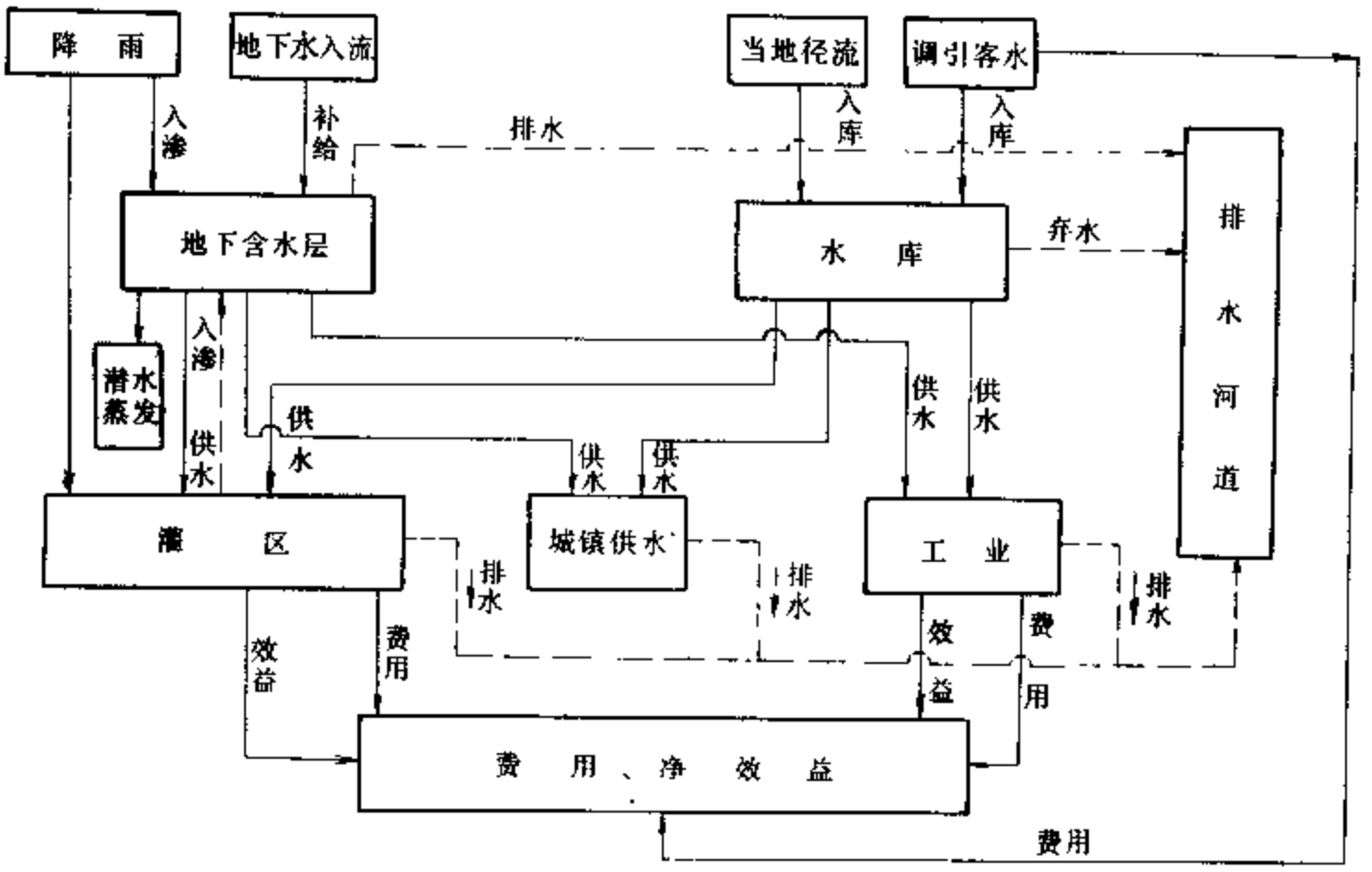

图 5-4　多水源供水系统示意图

节，这对于利用调入客水有效提高系统的供水能力是很有帮助的。由于从邻近河流提引水量属于无坝引水，引水量受到河川径流季节性变化的影响，因此为了满足一定定额的总水量，必须在丰水期适当地增加提引水量，以供系统内地面水库进行调蓄。这种适时适量提引客水的要求，实际上必须将引入客水的过程作为一个待决策的过程。

为了对上述供水系统建立数学模型，必须逐一对系统的状态变量，决策变量和状态转移方程作如下说明。

（一）状态变量

地面水库及地下水库各自的蓄水量变化构成了所研究供水系统状态的描述，因此可将系统状态变量表达为

$$\bar{S}_t = \{S_t^{(1)}, S_t^{(2)}\} \qquad (t = 1,2,\cdots,N+1)$$

其中：$\bar{S}_t$ 表示系统在 t 时段初所处的状态，它是一个二维向量，其分量 $S_t^{(1)}$、$S_t^{(2)}$ 分别表示地面水库和地下水库 t 时段初的蓄水量。N 是计算期的时段数。

（二）决策变量

由上述决策分析可知，供水系统的决策变量应包括地面水库及地下水库各自对三个用水部门的供水量以及引调客水水量，即

$$\bar{d}_t = \{d1_t^{(1)}, d2_t^{(1)}, d3_t^{(1)}, d1_t^{(2)}, d2_t^{(2)}, d3_t^{(2)}, d_t\} \quad (t = 1,2,\cdots,N+1)$$

其中：$\bar{d}_t$ 表示第 t 时段供水系统的决策向量；$d1_t^{(1)}$、$d2_t^{(1)}$、$d3_t^{(1)}$ 分别表示第 t 时段地面水库对灌溉、工业、城镇居民的供水量；$d1_t^{(2)}$、$d2_t^{(2)}$、$d3_t^{(2)}$ 分别表示农业、工业、城镇居民用水抽取的地下水水量；d_t 表示第 t 时段引调客水水量。

（三）状态转移方程

系统时段初状态为 $\bar{S}_t$，采取决策 $\bar{d}_t$，系统将转移到时段末状态 $\bar{S}_{t+1}$。由于地面水库与

地下水库属于并联运行，根据水量平衡原理，可分别写出二者的状态转移方程：

$$\begin{cases} S_{t+1}^{(1)} = S_t^{(1)} + W_t + \eta d_t - d1_t^{(1)} - d2_t^{(1)} - d3_t^{(1)} - E_t^{(1)} - f_t - W_t' \\ S_{t+1}^{(2)} = S_t^{(2)} + x_t + \alpha P_t A + \beta^{(1)} d1_t^{(1)} - (1-\beta^{(2)}) d1_t^{(2)} - d2_t^{(2)} \\ \qquad - d3_t^{(2)} - E_t^{(2)} + I_t - O_t \end{cases} \tag{5-11}$$

式中：W_t 为第 t 时段地面水库天然入库径流量；η 为调水工程的水利用系数；$E_t^{(1)}$ 为时段 t 水库蒸发损失；f_t 为第 t 时段水库渗漏损失；W_t' 为第 t 时段水库弃水量；x_t 表示第 t 时段地表水体补给地下水水量；α 为降雨入渗补给系数；P_t 为第 t 时段降雨量；A 为该区域内地下水流域总面积；$\beta^{(1)}$、$\beta^{(2)}$分别表示水库灌溉回归系数和并灌回归系数；$E_t^{(2)}$ 表示第 t 阶段地下水潜水蒸发量；I_t、O_t 分别表示第 t 时段流入含水层和排出含水层的水量。

式（5-11）中地面水库水量平衡式的弃水量 W_t' 必须通过条件式的计算来确定。首先对该水量平衡式不计入 W_t' 项，求出时段末蓄水状态值 $S_{t+1}^{(1)}$，若 $S_{t+1}^{(1)} \leqslant S_{\max}^{(1)}$，$W_t'=0$；当求出 $S_{t+1}^{(1)} > S_{\max}^{(1)}$，则取 $W_t'=S_{t+1}^{(1)}-S_{\max}^{(1)}$，并取 $S_{t+1}^{(1)}=S_{\max}^{(1)}$。这里 $S_{\max}^{(1)}$是指水库兴利蓄水允许达到的最大蓄水量。

（四）目标函数

以净效益最大为最优准则，净效益为供水效益与费用之差。应分别对灌溉、工业、城镇生活三个部门分析其供水效益。这些用水部门的供水效益可以参照我国正式颁布的《水利经济计算规范》SD139—85 的计算方法进行估算。工业、城镇生活用水的供水效益，一般以单位水量效益值（元/m^3）表示，因此可按时段供水量与单位效益的乘积来表达。灌溉效益通常是通过作物灌溉后的年增产量及作物的理论价格来估算。也可以根据实测资料来寻求作物增产年产值与年灌溉水量之间的相关关系来建立估算式。为了简化模型的解算，假设灌溉年效益与年灌溉水量的关系可以分离为时段灌溉效益与时段灌溉水量的关系。

所研究供水系统属于扩充水源为目的的供水规划，随着各用水部门用水要求的增长，原有水源工程的供水能力已不能满足用水要求，必须引调客水。规划的重点是在利用地面水库和地下水库联合运用的条件下，合理确定调水工程的规模及其引水量。据此可见，经济计算中的费用主要包括调水工程费用、地表水农灌费用、农业并灌费用、工业与城镇供水费用等项。调水工程费用包括引水渠和多级提水设施的投资，以及提水动力耗费和维修管理费等。调水工程建设费用与调水工程的输水能力大小有关，建模时调水工程的输水容量是作为方案参数在约束条件中加以反映，对于一个给定的容量参数值而言，基建投资可视之与前述决策变量没有直接关系的固定费用。与决策有关的主要是引提水量的动力耗费的可变费用。

由于地表水源工程的水库及渠系已建成，其有关费用不必在规划中计入，地表水农灌费用主要是在进一步扩大灌区时为了利用当地径流提水灌溉的燃料动力费用。该地区工矿、城镇、农业并灌等已达到超量开采地下水的程度，现有机井及其机电配套投资基本上不必有大的追加，可作为不变费用不计入目标函数，因此主要要考虑的费用是与抽水量有关的燃料动力费用。

基于上述分析和简化假设，可以把各项效益和费用逐时段地分别表达为各自有关的决策变量的函数。据此，可建立如下的目标函数表达式：

$$OBJ = \max \sum_{t=1}^{N} [B1_t + B2_t + B3_t - C_t - C1_t^{(1)} - C1_t^{(2)} - C2_t] \tag{5-12}$$

式中：$B1_t$、$B2_t$、$B3_t$ 分别表示第 t 时段灌溉、工业、生活供水效益；C_t 为调水工程第 t 时段费用；$C1_t^{(1)}$、$C1_t^{(2)}$ 分别表示地表水灌溉和井灌费用；$C2_t$ 表示工业和城镇生活用水抽取地下水的费用。

（五）约束条件

1. 作物灌溉水量约束

在不计入作物计划湿润层水分变化，即在维持其土壤水分不变的前提下，根据各时段作物田间需水量、有效降雨量及地下水补给量，按水量平衡原理可推求各时段的灌溉需水量：

$$M1_t = \max\{0, \sum_{i=1}^{I} (E_{it} - G_{it} - \sigma_i P_t) A_i\} \tag{5-13}$$

式中：I 表示灌区内作物种类数；A_i 表示第 i 种作物种植面积；E_{it}表示第 i 种作物第 t 时段田间需水量；G_{it}表示第 i 种作物第 t 时段由土壤毛细管作用上升至根系吸水层的地下水补给水量；P_t 为第 t 时段降雨量；σ_i 表示第 i 种作物降雨有效利用系数，由当地灌溉试验资料提供。

式（5-13）表示时段灌溉需水量 $M1_t \geqslant 0$，即当某时段的有效降雨和地下水补给大于作物田间耗水量时，该时段不需要灌溉，$M1=0$。

在正常供水条件下，要求地面水库与地下水的联合供水应满足灌溉需水量，即

$$\eta^{(1)} d1_t^{(1)} + \eta^{(2)} d1_t^{(2)} \geqslant M1_t \tag{5-14}$$

$\eta^{(1)}$、$\eta^{(2)}$分别表示水库灌溉及井灌水利用系数。

2. 满足工业需水要求

应根据当地国民经济发展规划，分析确定设计水平年（2000 年）工业的发展规模，以此为基础确定年内各时段的工业要求的用水量 $M2_t$。水库与地下水的供水量应满足工业需水要求，即

$$d2_t^{(1)} + d2_t^{(2)} \geqslant M2_t \tag{5-15}$$

3. 满足城镇生活需水要求

城镇生活需水量应根据对设计水平年人口预测及按相应时期人均日生活需水量水平进行测算。

$$d3_t^{(1)} + d3_t^{(2)} \geqslant M3_t \tag{5-16}$$

式中：$M3_t$ 表示第 t 时段城镇生活需水量。

4. 由水库引水的渠道输水能力约束

各时段水库总供水量不应超过其渠首工程输水能力 $u_t^{(1)}$，即

$$d1_t^{(1)} + d2_t^{(1)} + d3_t^{(1)} \leqslant u_t^{(1)} \tag{5-17}$$

5. 农业区井灌能力约束

农业区由地下水抽取的灌溉供水量不应超过农业井灌的总抽水能力 $G1_t$，即

$$d1_t^{(2)} \leqslant G1_t \tag{5-18}$$

6. 城镇区抽取地下水能力限制

根据城镇区域机井数目及机井的抽水能力可推算出时段总抽水量 $G2_t$，作为抽取地下水的能力。工业及城镇生活需水由地下水供水水量不应超过抽取地下水能力，即

$$d2_t^{(2)} + d3_t^{(3)} \leqslant G2_t \tag{5-19}$$

7. 调水工程输水能力和客水径流量限制

规划中的调水工程是由邻近天然河道提引水量，通过多级提水，向水库输送补给径流量。由河道提引水量受到其天然径流量的制约。此外，提引水量还受到调水工程的渠道输水能力及与其配套的提水设备的提水能力的限制。将这些限制条件综合表达为如下约束式：

$$d_t \leqslant \min\{u, y_t\} \tag{5-20}$$

式中：u 表示综合考虑调水渠道输水能力及其配套提水设备提水能力之后得出的调水工程输水能力；y_t 表示天然河道第 t 时段可供提引的径流量。

调水工程规模及其相应的输水能力实际上是本规划中待定的决策值，为了简化建模及其解算，在本模型中把它作为模型参数来处理。对这一参数 u 的不同取值，形成了不同的模型制约条件，并有不同的模型解。借此可以从中选出调水工程规模参数 u 的最佳方案。

8. 决策变量非负约束

本模型的决策变量，包括水库及地下水分别供给三个用水部门逐时段的供水量，以及调水工程的提引水量，都应满足非负约束，即

$$d1_t^{(1)}, d2_t^{(1)}, d3_t^{(1)}, d1_t^{(2)}, d2_t^{(2)}, d3_t^{(2)}, d_t \geqslant 0 \tag{5-21}$$

9. 水量平衡约束及库容约束

前述地面水库和地下水库的状态转移方程式(5-11)即是此模型的水量平衡约束式。与此相关联，地面水库及地下水库的蓄水量还必须服从各自的有效蓄水容积的约束：

$$\begin{cases} S_{\min}^{(1)} \leqslant S_t^{(1)} \leqslant S_{\max}^{(1)} \\ 0 \leqslant S_t^{(2)} \leqslant S_{\max}^{(2)} \end{cases} \tag{5-22}$$

式中：$S_{\min}^{(1)}$、$S_{\max}^{(1)}$分别表示地面水库的最小、最大蓄水量（$S_{\min}^{(1)}$即是地面水库的死库容，$S_{\max}^{(1)}$是兴利蓄水允许达到的最大蓄水容积，汛期是防洪限制水位相应的库容，非汛期是水库正常蓄水位相应的库容）；$S_{\max}^{(2)}$是地下水含水层的最大蓄水容积。

三、模型解算方法的研讨

规划问题涉及二类决策变量，一是反映工程规模的设计参数，如本模型约束式中调水工程输水能力 u，农业井灌设施抽水能力 $G1$，城镇机井抽水能力 $G2$，水库渠首工程输水能力，以及水库库容等等；另一类是反映供水系统联合运行方式的运行决策变量，包括各时段地面水库供给各用水部门的供水量，地下水库供给各用水部门的抽取量，以及引调客水水量等。各类供水工程规模的大小影响工程的基建投资及其维修折旧费用，并对供水效益起着制约作用。运行决策变量主要影响运行费用，如引提客水和抽取地下水的燃料动力费用。

上述模型表达式中供水工程规模设计参数明确地表现为供水工程的输水能力和抽取地下水能力的约束。对于供水系统扩建规划而言，已建工程规模已经确定，工程规模参数可以作为给定的约束，并可以认为与其有关的基建投资及维修折旧等项费用基本上不变，因

此在规划决策分析中可以不再计入，以简化解算工作。

所研究的供水系统扩建问题的主要对象是选定引调客水的工程规模，并以其输水能力 u 作为反映其规模的待定设计参数。可以将它作为决策变量，并与其他运行决策变量一起，通过模型的直接解算求得最优决策。对于这种单一的待定规模参数，这里采取另一种处理方法，即只把它作为模型参数，而不直接作为模型的决策变量。通过变动这一模型参数（即引水工程输水能力 u）及其相应的目标函数响应值的变化，来判断引水工程规模的决策。

必须指出，实际扩建问题已建工程的规模往往难免有一定的变动，如可能出现由于灌溉面积的扩大而必须考虑渠道系统的扩建或增加机井数目。如果这些变动较大，则必须根据实际情况决定如何作为设计规模参数进行决策优选。

前面所述规划模型目标函数表达式是与上述对工程规模设计参数的处理方式相联系而建立的。该目标函数的特点是直接考虑各项供水效益及各项费用与其有关的运行决策变量的相互关系，并且采取了简化假设，认为可以把这些经济项目与其运行决策的关系分别表示为逐时段的函数表达式。这种目标函数式适合于采用动态规划法逐时段递推演算，以寻求供水系统多水源联合运用的多阶段决策过程的最优运行策略。引水工程规模作为给定模型参数，将通过对引调客水水量的制约而影响供水系统的供水效益，当然也影响着调水工程的费用。

综上述可见，对于所研究供水系统扩建问题所建立的数学模型是一个具有二维状态变量和七维决策变量的多阶段决策过程，显然这是一个较复杂的大系统问题。系统的二维状态转移涉及多种转移路线的组合，而每一种状态转移又涉及 7 种不同的决策变量所构成的为数众多的决策组合。为克服这一复杂系统问题所带来的高维决策上的困难，根据大系统递阶分析原理，把上述问题分解为二个层次的决策问题，上层决策采用动态规划法求解二维状态系统的多阶决策过程。下层问题是针对一个时段中上层模型的任一状态转移寻求一组最佳的决策组合，这是一个单时段七维决策问题。对于这一问题可以建立相应的子模型。

子模型可以采用时段净效益最大为最优准则，对于时段 t，子模型的目标函数为

$$Z_t(\bar{S}_t,\bar{S}_{t+1},\bar{d}_t^*)=\max_{\bar{d}_t\in\bar{D}_t}\{B1_t+B2_t+B3_t-C_t-C1_t^{(1)}-C1_t^{(2)}-C2_t\} \quad (5\text{-}23)$$

式中：$Z_t(\cdot)$ 表示第 t 时段的净效益；$\bar{D}_t$ 为第 t 时段决策向量 $\bar{d}_t$ 的可行集合；$\bar{d}_t^*$ 表示优选得到的最优决策向量；其余各项含义与前述相同。

前述模型的约束条件式（5-14）～（5-15）即可作为子模型的约束式，这些约束式均属于线性方程。目标函数中效益函数及费用函数通常是属于非线性函数，假如这些函数均可拟合为线性函数，那么，子模型就属于线性规划模型；否则，当目标函数为非线性函数，子模型就属于非线性规划模型。

子模型的功能是对指定的时段 t 的初、末系统状态 $\bar{S}_t$、$\bar{S}_{t+1}$，通过数学规划（非线性规划或线性规划）解算，求出最优决策向量 $\bar{d}_t^*$ 及相应的最大时段净效益 $Z_t(\bar{S}_t,\bar{S}_{t+1},\bar{d}_t^*)$。

上层模型的目标函数为计算期净效益最大的相应表达式：

$$OBJ=\max\sum_{t=1}^{N}Z_t(\bar{S}_t,\bar{S}_{t+1},\bar{d}_t^*) \quad (5\text{-}24)$$

按动态规划原理可建立如下逆序逐时段递推式：

$$\begin{cases} F_N(\overline{S}_N) = Z_N(\overline{S}_N, \overline{S}_{N+1}, \overline{d}_N^*) \\ F_t(\overline{S}_t) = \max\limits_{\overline{S}_{t+1} \in \overline{SS}_{t+1}} \{Z_t(\overline{S}_t, \overline{S}_{t+1}, \overline{d}_t^*) + F_{t+1}(\overline{S}_{t+1})\} \\ (t = N-1, N-2, \cdots, 2, 1) \end{cases} \tag{5-25}$$

式中：$F_t(\overline{S}_t)$ 表示 t 时刻由系统状态 $\overline{S}_t$ 出发，至计算期末的最优运行过程的累积净效益值；$\overline{SS}_{t+1}$表示系统状态向量的可行集；$Z_t(\cdot)$ 是面临时段的净效益，它必须借助于上述子模型的解算而求得。

对于上述递推演算，必须首先给出计算期初、末的边界系统状态值 $\overline{S}_1$、$\overline{S}_{N+1}$。可以根据地面水库及地下水库的运行特点确定，例如可以取 $S_1^{(1)} = S_{N+1}^{(1)} = S_{\min}^{(1)}$；$S_1^{(2)} = S_{N+1}^{(2)} = 0$。

对于这种二维状态变量系统，为节省计算量及减少要求的计算机内存，可以采用离散增量动态规划法（DDDP 法）进行解算。这种解算法的基本做法是首先给出多阶段运行过程的初始可行解，然后以此可行解的轨迹为中心线，取适当的正负增量，构成一个二维空间廊道，并在廊道内对每一决策变量离散取 3～7 个状态值（包括初始轨迹值及廊道上下边界值）。以廊道为寻优扫描空间，按式（5-25）进行逐时段递推演算。全计算期递推演算的结果，得出初选的运行轨迹，将它作为第二轮迭代演算的初始轨迹，按上述相同的做法形成新的廊道及执行逐时段递推演算，循此进行多次迭代，直至达到运行轨迹已呈收敛，最终得出多阶段决策过程的最优解。

要求选定的计算期的长度不少于 10 年，并具有丰、平、枯水年的系列代表性，取月为计算时段。模型解的结果得出多年平均净效益，调入客水水量、水库对各用水部门供水量及各用水部门抽取地下水量的逐时段决策过程，以及水库及地下含水层的运行变化过程等。注意到模型解是在一个给定的调水工程输水能力的模型参数的制约下求得的，还必须对不同的调水工程输水能力的取值，逐一求得其相应的模型解，以供最终作出调水工程规模的决策。

第六节　城市供水系统分析

一、城市供水问题概述

城市供水作为水资源系统的一个重要组成部分，随着城市的发展，日益受到人们的重视。据统计，从 1900 年到 1975 年，全世界工业用水量增加了 20 倍，城市生活用水量增加了 12 倍，农业用水量增加了 7 倍。目前城市人口约占世界总人口的 40%，都市化的发展进程令人瞩目。

目前我国大、中、小城市已达到 300 多个，其中百万以上人口的城市 20 多个，城市人口占全国总人口 20%以上。据 1979 年对 191 个城市的调查，其中有 154 个城市不同程度缺水。由于供水不足，不得不采取限量供水，甚至于迫使部分工厂减产或停产，对城市人民生活和工业发展造成不良的影响。

应该把城市供水规划作为城市发展规划的重要组成部分，保证供水水源与城市规划保持同步增长，以满足城市用水的供需平衡。供水规划首先应着眼于当地地表径流和地下水充分合理的联合运用；在当地水源不足的情况下，应积极研究调入外流域水源的技术可能

性和经济合理性。水源规划中应重视对地下水开采量的充分分析论证，防止或制止对地下水盲目的超量开采，以免造成严重的恶果。另外还必须十分重视水质的控制和管理。应严格执行污水、废水的排放标准。对于排放污废水中有害物质含量超出排放标准的污染源，在规划中应同时作出污水处理措施的安排。考虑到对点、面污染源一时不可能完全控制，因此，供水规划中还应考虑维持输水系统的一定水量，借此起稀释作用，以满足水质标准的要求。

城市供水水源工程系统分析涉及两类彼此有关的问题。一是以现有水源工程为对象，研究如何合理发挥这些水源工程系统的整体作用，充分利用可供水源，最大限度地提供城市生活和工农业所需的用水量。例如水库与地下水联合供水的方式及用水部门之间的配水方式，就是这类问题的主要研究内容。这类问题属于现有城市供水系统的管理问题。另一类问题是规划问题，这种规划一般都具有扩展规划的性质，它必须以现有水源工程为基础，结合城市发展规划，制定能保持与城市建设及工农业发展相协调的供水水源工程系统的扩展规划。规划中应研究兴建水源工程进一步利用当地水源及从外流域引水开辟新水源的各种可能性，同时必须将拟建水源工程与原有水源工程一起作为扩展后的供水系统，通过联合供水和合理配水的分析计算，为供水系统的扩建规划方案的选择提供技术的和经济的指标。

二、城市供水系统模拟分析

（一）城市供水系统组成

城市供水系统属于一种区域性水资源系统，由 4 部分组成，各部可看成是子系统（如图 5-5 所示）。

1. 水源系统

如图 5-5 所示，可以把城市供水系统中的来水水源及对水源起调节作用的地面水库和地下含水层看成是供水水源子系统。

2. 输水系统

输水子系统包括从水源至用户取水口之间的输水河道、渠道和管道及有关建筑物（泵站、闸涵等）。

3. 用水系统

用水子系统包括水处理系统，配水管道及渠道网络，以及各用水户。水处理系统包括用水前水处理，及排放前的水处理。

4. 排水系统

包括城市生活污水排水，工业废水排水、农业灌溉回归水退水及渍涝排水等。

（二）城市供水系统模拟模型结构

与上述各子系统的组成情况相联系，城市供水系统模拟模型可看成是由若干模块的组合结构，包括降雨径流系列模块、水库调节模块、配水模块、输水模块、用水模块、地

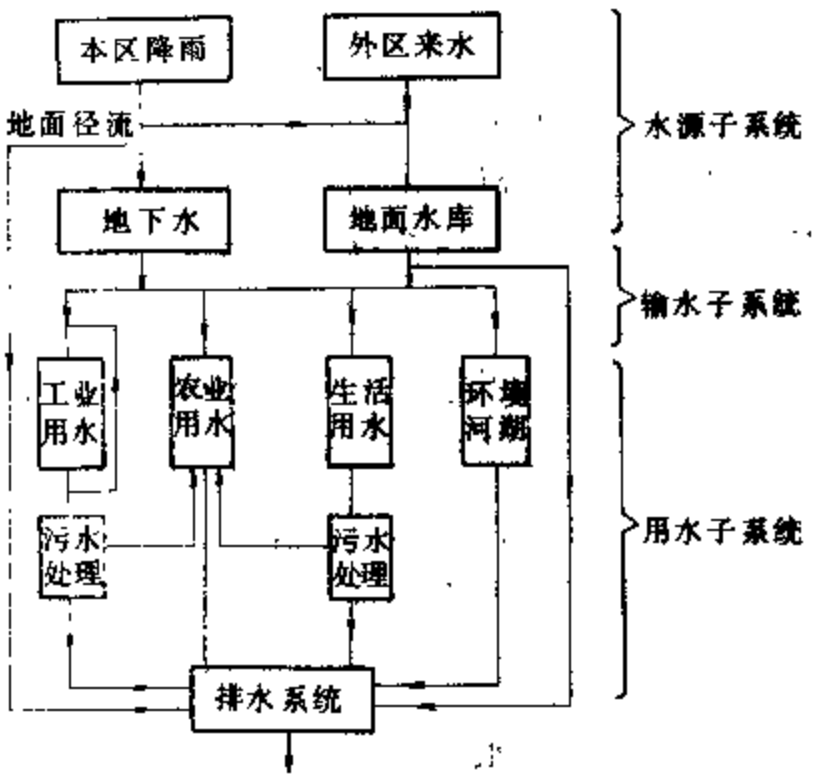

图 5-5　城市供水系统组成示意图

下水模块等。

降雨径流系列模块的功能主要是生成或延长入库径流系列及降雨量系列，需要输入实测系列的统计参数。如果具有较长的实测系列满足计算需要，则不必采用此模块。

水库调节模块的功能是在给定的各有关的水库规模参数的条件下，将采用的径流系列作为水库的水量输入，按照已制定的水库运行策略，推求水库的供水量及弃水量的变化过程。设计这一模块的关键在于如何制定水库的运行策略。例如在本章第四节中曾经介绍过水库模拟运行中常采用的简化运行策略。在多水库联合供水，甚至于进一步考虑多个地面水库与地下水库联合供水的情况下，可以结合优化调度的技术寻求更合理的联合运行策略。

配水模块的模拟功能是，按照给定的配水方案，将水源工程的供水量系列，分配成各用户的供水系列。显然配水方案的制定是此模块模拟计算的重要依据，在缺水地区，水源工程的供水量往往是供不应求，因此必须根据用户的特点及其重要程度，考虑供水分配的先后满足的合理次序。必要时，也可以通过建立优化配水模型来寻求最优的配水方案。

输水模块的功能主要是模拟水源工程向用户供水沿程输水流量的变化情况。这些变化情况包括输水于渠沿程取水及河道径流与退水汇入等。

用水模块的主要功能是根据配水方案求出的各用户的供水量，推求供水效益，并求得回归水量及污染型用户排出污水的污染物质含量，以便与输水模块相配合，计算出各渠段水质变化过程。

地下水模块主要是模拟地下含水层的输入、输出水量及地下水位的变化过程。

全系统的模拟模型建立后，可对现有供水系统及规划扩建的各种方案进行模拟计算。通过模拟计算可得出各用户的供水保证率及缺水情况。对一个方案模拟计算结果，若发现对某些用户的供水不满足要求，可对水库运行策略、配水方式等进行适当调整，以得出比较合理的结果。模型计算结果将最终提供各种规划方案的净效益值，借此可从经济指标上评价方案的优劣。

（三）模拟模型表达式

对上述水库调节、配水、输水和用水模块的模拟计算，分别作进一步的说明。

1. 水库供水规则

前述水库调节模块已提到，水库必须按制定的运行策略，通过水库运行模拟计算，求出其供水过程。以前采用过的简化运行策略是按常规的调节计算而制定的一种水库供水规则，它不是优化运行策略；而且它不能用于寻求多水库的联合运行策略。对于多个水库联合供水的系统，可以采用建立优化调度模型来寻求最优运行策略，即在模拟模型中的某一子系统模块，可以根据实际需要嵌入数学规划子模型。

这里介绍以两个水库联合供水的系统为对象，按确定优化的途径，建立动态规划模型，寻求最优联合运行策略的方法。

以净效益最大为最优准则，可以将水库联合运行的目标函数表达为

$$OBJ = \max\{\sum_{t=1}^{T} Z_t = \sum_{t}^{T}\sum_{i=1}^{m}(b_{it} \cdot d_{it} - C)\} \tag{5-26}$$

式中：Z_t 表示供水净效益；b_{it} 表示第 t 时段第 i 用户单位供水量的效益；d_{it} 为第 i 用户的需水量；m 为用水户数目；T 为计算期时段数；C 表示系统的投资及运行费的折算值。可以将

水库规模参数作为给定值；若缺水地区已出现达到地下水超量开采，可不计入扩建机井的投资。在这种情况下，费用项 C 主要考虑与地下水抽取水量有关的燃料动力耗费。

模型中必须考虑如下的主要约束条件。

(1) 水库水量平衡约束

$$S_{t+1}^{(j)} = S_t^{(j)} + Y_t^{(j)} - W_t^{(j)} - L_t^{(j)} \qquad \forall\ j \tag{5-27}$$

式中：$S_t^{(j)}$、$S_{t+1}^{(j)}$分别表示第 j 水库第 t 时段初、末的蓄水量，是系统的状态变量；$Y_t^{(j)}$ 表示第 j 水库第 t 时段的入库径流量，由径流系列给出的已知值；$W_t^{(j)}$ 为第 j 水库第 t 时段的供水量，为系统的供水决策；$L_t^{(j)}$ 为水库 j 时段 t 的损失水量。

(2) 水库蓄水容积的约束

$$S_{\min}^{(j)} \leqslant S_t^{(j)} \leqslant S_{\max}^{(j)} \qquad \forall\ j \tag{5-28}$$

式中：$S_{\min}^{(j)}$、$S_{\max}^{(j)}$分别表示水库允许达到的最小、最大蓄水量。$S_{\min}^{(j)}$为死库容，$S_{\max}^{(j)}$为非汛期、汛期正常蓄水位和防洪限制水位的相应水库容积。

(3) 需水量约束

$$D_{\min} \leqslant \sum_{j=1}^{2} W_t^{(j)} \leqslant D_{\max} \tag{5-29}$$

式中：$D_{\min}$、$D_{\max}$分别表示水库联合供水的最低、最高供水量。由用水模型求得各用户的需水量，再通过输水模型，考虑输水沿程情况（包括计入径流汇入、退水汇入、输水损失等）推求水库供水量。对于需要地下水源补偿的时段，应从需水量中扣除地下水补偿水量。

顺便指出，目标函数中各用户的需水量乃是指按用水模型求得的所需用水量为上限的决策值。

根据动态规划原理，对上述多阶段决策模型，可写出逆时序计算的递推式：

$$\begin{cases} F_T(\bar{S}_T) = Z_T(\bar{S}_T, \bar{d}_T) \\ F_t(\bar{S}_t) = \max\limits_{d_t \in \Omega_t} \{Z_t(\bar{S}_t, \bar{d}_t) + F_{t+1}(\bar{S}_{t+1}) \\ \qquad (t = T-1, T-2, \cdots, 2, 1) \end{cases} \tag{5-30}$$

式中：$Z_t(\cdot)$ 表示面临时段 t 的供水净效益函数；$F_t(\bar{S}_t)$ 表示系统由状态 $\bar{S}_t$ 出发，按最优策略运行至计算期末的累积净效益。$\bar{S}_t = \{S_t^{(1)}, S_t^{(2)}\}$ 表示系统的状态向量及其状态分量；$\bar{d}_t$ 为各用户需水量的决策向量，$\bar{d}_t = \{d_{it}; i = 1, 2, \cdots, m\}$。$\Omega_t$ 表示决策向量的可行集。

计算期始、末系统状态 $\bar{S}_1 = \{S_1^{(1)}, S_1^{(2)}\}$、$\bar{S}_{T+1} = \{S_{T+1}^{(1)}, S_{T+1}^{(2)}\}$ 作为边界条件给定。逐时段递推演算的结果得出水库联合供水的最优决策过程 $\bar{d}_t$ ($t=1, 2, \cdots, T$)。

2. 优化配水模型

对水库运行模拟求出时段供水量后，经输水子系统、用水子系统模拟后，若能满足所有用户的全部需水量，则不存在配水问题。配水问题是指供水量不能满足全系统的总需水量时，如何在各用户之间合理分配水量。

已知某时段供水量为 W_0，设系统内某些用水部门，如城市生活及电厂用水等的用水必须优先予以保证，其需水量为 W_b，其余有 N 个用水户之间应根据可供水量进行合理配水。记 b_i 为第 i 用户单位供水量的效益，分配给第 i 用户的水量为 d_i，据此可建立如下的优化配水的线性规划模型。

$$\begin{cases} \text{目标函数：} \\ \qquad OBJ = \max \sum_{i=1}^{N} b_i d_i \\ \text{约束条件：} \\ \qquad \sum_{i=1}^{N} d_i + W_b \leqslant W_0 \\ \qquad\qquad d_i \geqslant d_{i,\min} \qquad \forall\, i \end{cases} \tag{5-31}$$

式中：$d_{i,\min}$表示第 i 用户允许达到的供水量的下限，此值应按不同用户的情况酌定，某些用户可取其 $d_{i,\min}=0$。此约束式隐含了决策变量的非负约束。

3. 输水系统模拟计算式

在输水主干河渠中，除由进水闸引水外，沿程有一些用户从河渠取水，有一些用水退水或支流径流汇入河渠，此外在输送水量中沿程还有蒸发、渗漏损失。图 5-6 是输水系统示意图。图中 Q_0 表示水库放入输水河渠的水量；$x_i(i=1,2,\cdots)$表示由输水河渠引取或汇水的水量，前者 x_i 取正号，后者取负号；凡是取水或汇入水量的地点称为节点，取其序号为 1，2，…，i；Q_1，Q_2，…，Q_i 表示同序号节点下断面的河道水量；η_1，η_2，…，η_i 表示各河段的水量利用系数。根据沿程取、退水情况，可写出如下的水量平衡关系式：

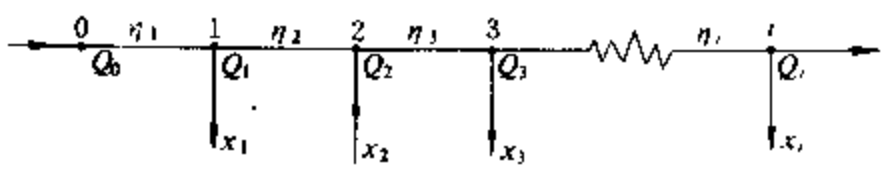

图 5-6　输水系统示意图

$$\begin{aligned} Q_0 &= \frac{Q_i + x_i}{\prod_{k=1}^{i} \eta_k} + \frac{x_{i-1}}{\prod_{k=1}^{i-1} \eta_k} + \cdots + \frac{x_2}{\prod_{k=1}^{2} \eta_k} + \frac{x_1}{\eta_1} \\ &= \frac{Q_i + x_i}{\prod_{k=1}^{i} \eta_k} + \sum_{j=1}^{i-1} \frac{x_j}{\prod_{k=1}^{j} \eta_k} \end{aligned} \tag{5-32}$$

或

$$\begin{aligned} Q_i &= Q_0 \prod_{k=1}^{i} \eta_k - \sum_{j=1}^{i-1} x_j \prod_{k=j+1}^{i} \eta_k - x_i \\ &= Q_0 \prod_{k=1}^{i} \eta_k - x_1 \prod_{k=2}^{i} \eta_k - x_2 \prod_{k=3}^{i} \eta_k - \cdots - x_{i-1}\eta_i - x_i \end{aligned} \tag{5-33}$$

河段水量利用系数可用实测资料分析确定。式（5-32）和式（5-33）可分别用于根据沿程取水、退水情况求水库供水量 Q_0，或是根据已知水库供水量 Q_0，分析沿程满足用户取水的情况。

4. 用水系统模拟

（1）工业用水模拟　如图 5-7 所示，某工厂在结点 i 由输水河渠取水，取水量为 x_i，取水后该结点下断面的输水流量为 Q_i；引水渠水量利用系数为 η_i'，工厂的耗水率为 α；η_{i+1}'表示退水渠的水量利用系数，η_i 表示结点 i 至结点 $i+1$ 的输水河段水量利用系数；x_{i+1}为由工厂排放的退水量，退水汇入输水河道的结点序号为 $i+1$；Q_{i+1}为第 $i+1$ 结点输水河道下断

面的水量。已知工厂取水量 x_i，根据上述用水情况，可求得其排放的退水量为

$$x_{i+1} = \eta_i' \eta_{i+1}' (1 - \alpha) x_i \tag{5-34}$$

同时可求出退水结点 $i+1$ 处的输水流量为

$$Q_{i+1} = \eta_i Q_i + x_{i+1} \tag{5-35}$$

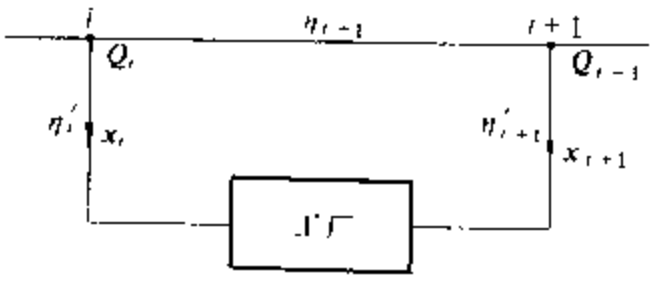

图 5-7　工业用水示意图

（2）农业用水模拟计算　农作物灌溉用水可根据灌区面积、作物组成、灌溉制度等资料进行推算。设灌区 i 有 M 条支渠，灌区种植 N 种作物，记该灌区由输水河渠引水量为 x_i。那么可按下式计算某时段（月）灌区的引用水量：

$$x_i = \sum_{k=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} F_{kj} \theta_j \xi_k \tag{5-36}$$

式中：F_{kj}表示第 k 支渠灌溉范围内第 j 种作物的种植面积；θ_j 为计算时段相应的第 j 种作物的灌水定额；ξ_k 为第 k 支渠的水量折算系数，可由该支渠的水量利用系数 η_k 计算，即 $\xi_k = 1/\eta_k$。

对于可利用地下水灌溉的灌区，应根据地表水与地下水联合运用情况，合理确定抽取的地下水水量。然后将式（5-36）计算的结果扣除地下水供水量之后，作为由输水河渠的引水量。

城市供水系统还应进行水质的模拟分析计算。对于污染型的工业用水，应结合污水处理情况计算其排放水量中污染物含量浓度，并根据各退水结点的排放情况，结合输水系统的模拟计算，求出各输水河段水质的沿程变化情况。

第六章　水资源系统综合规划

第一节　水资源系统规划概述

一、水资源开发发展概况

自古以来，人类的生活及生产活动与水资源的开发利用息息相关。社会生产力和科学技术的发展，推动着水资源开发利用规划的演化和发展。旁水而居，取水饮用，以河流为通渠，利用两岸肥沃的冲积平原发展农业，凡此种种，乃是古代人类利用水资源的基本形式。当时，由于社会生产力极低，人类只能根据河流的自然条件利用水资源，同时，对于不定期的洪患，人类只能消极逃避，而无力采用有效的抗洪措施。

筑堰引水，修堤防洪，水力提水和发展水力加工农产品作坊等等，是人类采用工程措施开发利用水资源的初期形式。这些工程措施的出现标志着人类与自然关系的重要变革，反映人类对水资源自然规律的认识发生了质的飞跃，表明人类已由简单地利用水资源的自然条件转变为对河流进行积极的治理和开发。

科学技术的发展，使拦河筑坝成为可能。水轮发电机组的出现，使水力加工发展为水力发电。以水库为调控径流措施的综合利用水利枢纽的形成，使人类对水资源的控制和利用日臻完善。社会的发展和科学的进步，促使人类的水资源工程实践由局部的、单一的工程开发，逐渐地演化和发展为整体的、综合的水资源系统的工程开发。社会化、大规模的生产活动为这一发展提供了条件，现代系统科学的进展使系统分析在水资源开发中的应用开创了光辉的前景。

水资源工程活动不断地调整和改变着人类与自然界的关系，人类从这些实践中逐步加深了对自然规律的认识。古代社会，虽然人类只进行着极初始的、简单的利用自然水资源的活动，但是人类与河流的密切依存关系决定了人们具有改造自然，兴水利、除水害的强烈愿望。在人类进入采用工程措施开发利用水资源的阶段，兴利除害就成为水资源开发的宗旨，指导着水资源工程规划。早在我国战国时期，李冰父子修建的都江堰水利工程就是一个兴利、防洪的综合利用水利枢纽。当今的水资源工程实践已发展为规模宏大、关系复杂的水资源系统工程建设，对经济发展、社会福利和自然生态环境产生了深刻的影响。人们在范围广泛的水资源工程实践中不断地加深了对水资源工程与自然、社会和经济等方面之间的错综复杂关系的认识。

本世纪 30 年代前后，我国曾提出过关于黄河、淮河、永定河等江河的一些规划报告，由于受历史条件的限制，这些规划大多未能实施。1949 年建国后，我国建立或充实了流域和地方的规划机构，广泛开展了气象与水文观测、工程地质勘探、土壤普查等基础工作。至 50 年代末，有关的流域机构和部门分别编制了七大江河流域规划和其它类型的大量水利规划，这些规划对我国的水利建设起着指导作用。70 年代后期，我国又统一部署了七大江河规划的修订工作，力求使江河规划更适应经济发展的需要，并要求不仅要提高水资源工程

的经济效益，而且应充分考虑社会、环境的目标。

二、水资源系统的特点

从系统理论的基本观点看，水资源系统具有如下主要特点。

（一）水资源系统是由自然系统和人工系统组成的复合系统

系统乃是由多个要素组合而形成的不可分割的复合整体。由自然过程形成的系统称为自然系统。例如，周而复始的水循环中，大气降水到地球表面，地表水受重力作用形成由高向低处流动的径流。地表径流汇流过程对地表的作用，逐渐形成的天然河川水系，就属于自然系统。一系列的水资源工程之间存在着水量联系或其它方式的联系而形成相互关联的人工系统。显然，水资源工程与自然水系之间存在着不可分割的关系，据此可以认为，水资源系统是由水资源工程的人工系统嵌入河川水系的自然系统而形成的复合系统。

（二）水资源系统与环境存在相互协调和适应关系

系统都存在其边界（或制约），系统边界之外事物的总体，称为系统的外部环境。

水资源系统与外部环境之间存在着物质的，能量的和信息的交换。大气降水是水资源系统的物质输入；向各部门供水是系统的物质输出。地心引力的重力作用是水能的源泉；水电站通过电网输出电能形成能量交换。国民经济发展对水资源系统开发的要求和相互影响，反映着系统与环境的信息交换。

一个自然系统的形成和发展，伴随着该系统与环境之间的相互调整和彼此适应。自然系统通常保持着对其外部环境的相对适应性。天然水系是适应大气降水及地表径流的流动规律而逐渐形成的。河流的主河槽、河滩、洪泛平原、湖泊等自然水系的地貌形态与大气环流形成的河川径流的丰枯变化关系密切。小水归槽，大水漫滩，大洪水漫溢使洪泛平原成为行洪地带，流域中的湖泊，洼地对河川径流起着自然的调蓄作用。

水资源工程的修建和运用，强烈地反映人类对自然系统的干预和控制，导致系统与环境原有的相对适应性失调。水资源工程投入运行后改变了水系的水流运动规律，系统的自适应功能将通过对水系形态的自身调整来适应新的水流规律。

充分认识水资源系统与环境的协调和适应关系的客观规律，有助于人们预测拟建水资源工程投入后系统将发生调整的趋势、对社会及生态环境可能产生的各种影响。必须权衡利弊，扬长避短，正确选定水资源系统规划方案。

（三）水资源系统具有多种开发目标（Multiobjective）和多种用途（Multipurpose）

系统乃是在一定环境下，为实现某些共同的目标，由若干相互联系、相互作用的要素所组成的集合体。

水资源开发对国计民生和生态环境有着重大的影响，因此水资源系统规划不仅要考虑它的经济效益，面且应顾及它将产生的社会的和环境的效应。社会福利和环境质量是难以用货币指标来衡量的。国民经济效益和地区经济开发的权益在规划中必须统筹兼顾，尽管二者从形式上看都可用货币指标量度，但是为了适当考虑地区性权益，往往必须加入其优先性或重要性的考虑而作为不同目标区别对待。由此可见，水资源系统具有多种不同的开发目标，包括国民经济效益、地区经济开发、社会福利、环境质量等目标。

多用途是指水资源系统所具有的防洪、发电、灌溉、城市及工业供水、航运、养殖、旅

游等多种功能。

多目标与多用途有区别，又有联系。开发目标及其相应的评价标准，是作为评判开发方案的依据。多目标开发必须以多准则的评价方法来论证水资源开发方案的优劣。水资源多用途与多目标存在一定的联系。例如，可以通过水资源系统为之服务的各有关部门所获得的水利效益，推求该系统的国民经济效益，以及地区开发效益。水电开发促进地区繁荣，增加教育和就业机会；灌溉促进农业区经济和社会的发展；防洪的工程和非工程措施减小洪泛区人民的洪灾风险。这些都反映水资源系统的功能所带来的无法完全用经济指标来表示的社会效益，反映各种用途（或功能）与社会福利目标存在着直接和间接的关联。

水资源系统的多目标规划，使我们能做到不仅从经济效益上，而且从环境的和社会效益上对水资源开发方案进行全面评价。水资源多用途的分析，有助于促进采取有效的技术途径，以达到充分地综合利用水资源和妥善地处理防洪与兴利的矛盾。

（四）水资源系统要素具有关联性

系统要素的关联性是进行系统分析的一个极其重要的观念。系统要素的关联性表现为每一个要素的性能和行为影响着系统整体的性能和行为；每一个要素的性能和行为至少与系统中的一个要素的性能和行为有关；一个系统可以分解为若干个子系统，每个子系统也具有上述系统要素所具有的关联性。

水资源系统往往是由许多要素组成的有机整体，系统要素的关联性较直观地表现为水库及其水电站等多个工程单元之间存在径流联系、水力联系及电力联系。鉴于多目标、多用途、多单元的大型水资源系统的复杂性，进行系统分析时，往往把它分解为若干个彼此耦合的子系统。例如可以按其服务对象把水资源系统的总体规划分解为防洪系统规划、灌溉系统规划、航运规划、电力系统规划等等。这些子系统存在着相互关联和彼此制约的关系，各子系统的规划决策必须服从于水资源系统总体规划目标的要求。

（五）水资源系统属于动态系统，且具有随机属性

一个具有非活动性结构的系统，可定义为静态系统。例如，一座建成的钢结构大桥，可视之为静态系统；一个水资源系统，若其水资源工程已全部建成投入运行，并且将长期维持现有的工程组成，也可看成是静态系统。这里所定义的静态系统，仅仅是一种相对的概念。一座大桥，即使不改动其结构，从微观上看，它的钢材的分子结构不可能不发生一定的变化；建成的水资源系统，即使其工程组成不变，在长期运行中，其系统将发生一些演化，如由于库区的泥沙淤积而影响到水库有效库容，堤防及其它工程的老化而降低其原有功能等。

一个具有活动性结构要素的系统，称为动态系统。水资源系统必须以满足近期及远景的需求为依据，确定总体规划方案。规划方案的实施将经历较长的时期，在这个时期中水资源系统的构成要素将随着工程的逐渐投入而变化，因此，它属于动态系统。

系统的随机属性表现为输入或输出要素，以及系统状态的非确定性。河川径流是水资源系统的输入，它属于随机要素。国民经济发展对水资源系统的需求预测带有一定的随机性；某些部门的需求本身就具有明显的随机性，如灌溉需水量随不确定的水文气象因素（降水、蒸发、气温等）而变化。系统的输入或输出的随机性，影响和决定系统状态变化的

随机性。水资源系统的随机属性带来了系统规划的复杂性和难度。

三、水资源系统规划的类别和程序

（一）规划的类别

1. 江河流域水利规划

江河流域水利规划，包括大江大河流域水利规划和中小河流域水利规划。河流是流域产水量的汇集和输送途径，以河道为主体形成的流域水系是一个自然系统。流域是水利规划最合适的地理单元。我国长江、黄河、淮河、海河、珠江、辽河、松花江等七大流域规划属于大江大河全流域性规划。这类规划牵涉到广大地区和国民经济许多部门，必须妥善处理上、中、下游，干支流和左右岸的各种开发和治理任务，关系十分复杂，一般由专设的流域管理机构，如流域水利委员会从事流域规划的编制工作。大流域水系中的一级支流、二级支流等必须根据所处地区的自然、社会和经济等条件，分别编制中小型流域的综合水利规划。支流流域规划应该是全流域规划的补充及其有机的组成部分，可以将支流流域规划看成是全流域规划的子系统规划。

2. 地区性水利规划

以行政区划或特定的经济区为范围的水资源规划属于地区性水资源系统规划，如县、市水利规划，长江中下游洞庭湖区、太湖、湖北省四湖地区规划等。以灌区为对象的农田水利规划一般属地区性规划。地区性水利规划应在大中型流域规划的基础上，紧密结合本区域的特点来进行。

3. 专业性水资源系统规划

常见的专业性水资源系统规划有防洪规划、水力发电规划、除涝规划、航运规划、城镇供水规划等等。专业性水资源系统规划是流域规划的组成部分。在一个大型的复杂的流域规划中，开展专业性水资源系统规划应看成是将一个综合利用的水资源系统分解为彼此耦合的，以单项任务为目标的多个子系统。因此，在开展专业性水资源系统规划时，必须充分考虑各个子系统之间的关联和制约，并应服从流域规划整体的指导和协调。

4. 跨流域调水规划

跨流域调水规划是指在两个或两个以上流域之间进行水资源的联合开发，调剂流域之间水量余缺的规划。这类规划有些仅涉及近距离小规模的跨流域调水工程，有些属于远距离大规模调水。我国规划中设想的南水北调是大规模调水工程，拟议中的长江水北调路线有：东线从扬州调水到天津；中线通过丹江口水利枢纽引水过黄河到北京；西线从通天河、雅砻江、大渡河引水到黄河上游。跨流域调水将改变调出、调入流域的水资源状况，并对流域的生态环境产生有利的或不利的影响。大规模调水工程浩大，需要耗费巨大的工程投资，虽然其效益显著，但鉴于问题复杂，影响深远，因此规划中应充分权衡利弊，作好可行性的合理论证。

（二）流域规划的一般程序

流域规划内容广泛，关系复杂，影响深远，任务艰巨，下面仅介绍进行此项工作的一般程序。

1. 流域自然和经济资料的收集与分析

掌握必要的基本资料是进行流域水资源系统规划的基础。所需的自然资料包括自然地理、水文气象、地形地质、土壤与植被、矿产资源、泥沙与冰情、河流水化学性质及水质污染情况等等。社会经济资料包括人口及人民生活水平、城镇规划、工农业生产、交通运输、历史洪涝旱灾情、已建水利工程现状等等。许多流域过去已作过部分规划工作，并有一些水利工程已建成投入运行，因此可以从原有规划设计中查到有关水资源普查与评估、河段或可供选择坝址的地形地质勘测报告、已建工程的规划设计及运行等方面的资料。

基于对流域水文气象资料的分析，可作出流域水资源（包括地表和地下径流）的总量及其时空分布的评估和描述。河流水能资源普查，可探明流域水能资源的蕴藏量、可开发的水能资源及其沿河段的分布情况。水量与水能资源的分析和估算为流域水资源开发利用的可能性提供了重要的依据。

通过对流域社会经济资料的分析，可作出近期和远景的各个阶段流域人口和经济开发的现状和发展的估计和预测，以此为依据作出国民经济各部门对水资源开发利用需求的估计和预测。对比流域可开发的水资源与各部门对水资源的需求，可作出流域水资源供需关系的评价。许多流域往往发现有限的水资源不能完全满足远景开发的总需求，针对这种矛盾，必须根据各用水部门的重要性及其可替代性等因素，统筹兼顾，确定各部门需求水平的合理组合。

历史洪灾资料的调查和分析，有助于确定规划中的防洪保护对象及其防洪标准。流域规划中必须分析流域内水质污染的现状及其可能的发展趋势，明确加强对水质的控制和管理的要求，防止由于水源污染而限制水资源的开发利用。

2. 确立流域规划的目标与准则

由前述水资源系统的多目标属性的分析可知，流域规划中不仅要考虑经济目标，而且还必须考虑环境质量和社会福利的目标。必须根据规划流域的实际情况，确立该流域规划应该反映的具体目标。在确立了规划目标之后，必须进一步研究目标的计量化，以便于尽可能用定量的指标来说明规划方案在实现规划目标方面的优劣程度，以此作为评价方案的准则。

流域规划的上述不同目标的计量单位往往无法统一。例如评价环境质量时，常用物理的、化学的和生物的有关指标来表达。有一些环境要素，如自然环境的美学价值，水资源工程对生态平衡的影响等等，往往难以定量表达，只能作出定性的评价。水资源工程的社会影响，如增加就业人数、库区淹没田亩数和移民人数等，可以定量统计，但是社区居民的心态因素的影响，就难以定量评价。经济目标一般可用货币单位表达，但是由于国民经济效益和地区经济开发分别反映国家和地方的不同利益，因此往往不能简单地认为二者可按相等的货币量来反映其等价的效益。例如为了扶植某些少数民族地区的经济发展，决策者必须改变单一的经济价值观，为强调地区开发的重要性可赋予它更大的权重系数。各种规划目标的不可公度性促使流域规划中必须研究多准则评价规划方案的方法。

对于经济目标而言，净效益最大是一个普遍适用的经济准则。净效益等于效益与费用之差。由技术经济知识可知，效益和费用的计算必须计人资金的时间因素，采用统一的基准年和贴现率，将各规划方案的效益和费用的货币流程折算为各自的现值或年金。

3. 规划方案的拟定和筛选

水资源系统的工程设施的全面建成需经历一个长达几十年的时期，这一时期国民经济将经历着一个逐步增长的发展过程。进行水资源系统规划时一般可首先分析确定一个远景的设计水平年，并以该远景的经济发展水平及各部门对水资源的需求作为水资源系统总体规划的依据。对于一个总体规划方案，还必须进一步考虑各单元工程分阶段实施的安排，包括各项工程投建的先后次序及其相应年份。水资源系统的工程实施计划应尽量做到保持其与国民经济的发展趋势和可能提供建设资金的条件相协调。

拟定规划方案时必须首先进行工程点（如坝址）的普查和初步筛选。根据流域的地形及其它有关资料，可初步提出一批待查的工程点。对这些工程点进行实地查勘，可查明其地形、地质、筑坝材料、施工条件、环境与社会影响等因素。基于上述查勘资料，可对各工程点作出逐一评价和初步筛选。某些坝址由于地形或地质等条件的限制，例如由于地形上不宜修高坝，库区存在溶岩漏水的不利条件，建坝后将造成重要城镇、文物古迹、交通干线或有重大经济价值的矿藏区的淹没，所控制流域面积太小等等的明显不利因素，经分析可排除其作为供选择的工程点。经初步筛选后的工程点，还可以利用经济估算和分析作进一步筛选，其作法是对工程点按单项工程进行初步分析，从中可以看出某些工程点在经济上是明显不可行的（如益本比远小于 1），从而可以从供选择的工程点中剔除。

以可供选择的工程点为基础，根据流域可供利用的水资源条件，考虑多种不同的远景需求水平（包括用水要求和防洪标准等），拟定不同的工程点及其规模的组合，可构成为数众多的流域水资源开发方案。从系统分析看，这种规划问题的决策变量包括：各部门需求水平、工程点及其规模、以及工程单元的运行方式。规划人员必须从众多的决策变量中选取一组符合开发目标要求的最优决策，以构成一个最优的流域规划方案。对于如此庞大和复杂的规划问题，目前尚不可能提供一套完整和有效的解决方法。以往在流域规划中较传统的做法是借助于规划人员对流域情况的全面和深入的了解及其丰富的实践经验，从定性的角度拟定出为数不太多的比较方案，通过对这些基本方案进行技术、经济的分析比较，并结合考虑环境评价和社会影响等方面的论证，从中初选较好方案供进一步深入论证。

随着系统分析及优化模型在水资源系统规划中的应用，近 20 年来已有不少学者对于上述的大型规划问题，采用混合整数规划技术建立水资源系统开发方案的筛选模型。这种模型可以不受到只从数目很有限的经验性方案中择优的局限，从理论上讲，它将在决策变量的所有可能组合中选优。必须指出，流域规划数学模型的研究目前仍处于探索阶段，对于流域规划涉及的极其复杂的影响因素，在建立模型时不得不作出一定的简化处理，其结果往往削弱了它的理论上的优越性。现阶段所采用的流域规划筛选模型，一般只限于作为规划方案的初步筛选。

4. 规划方案的详细分析论证

以上规划方案筛选属于规划方案的初选阶段，其任务是在众多的方案中初选出少数几个较好方案供进一步分析论证。在初选阶段，为了减少对于众多比较方案的计算工作量，通常在不影响选出较好方案的前提下，对某些计算条件加以简化。例如往往采用代表期或代表年的径流作为系统的水量输入，借此计算确定水资源系统的工程组成、工程规模及其预

期效益，而未详细考虑径流随机性的影响。又如在方案初选阶段，往往将供比较的方案作为静态系统来对待，即是以供比较方案的工程总体实施后的远景情况为背景进行各方案比较，暂不计入各方案投建过程的系统动态属性的影响。此外，在方案初选阶段，通常只着重于对供比较方案在技术上的可能性和经济上可行性的分析，而对其环境与社会影响一般只作较粗略的考虑。

在对初选方案的详细分析论证阶段，必须较详细地分析由于径流随机性而可能出现的防洪和正常供水的风险。例如对于防洪问题，不仅要考虑到有观测资料的大洪水的分析，而且要考虑到历史上发生过的特大洪水和恶劣的水文气象条件的可能组合而出现的最大可能洪水，借此可较充分地论证规划方案的防洪效益及其相应的防洪风险。对于规划方案兴利效果的详细分析，一般应采用长期的径流系列（如长期的实测径流系列或生成径流系列），对初选方案进行长系列模拟运行计算，借此反映规划方案的长期运行效益，以及各用水部门的正常供水保证率。通常模拟运行分析，必要时可以对初选方案的某些设计参数加以调整和修改。

对于初选方案的详细论证，必须较充分地考虑每一方案对环境质量和社会福利所产生的影响。环境质量和社会福利的影响评价涉及一些不能用经济尺度衡量的因素；此外，还应计及非直接的经济影响因素。对于所有必须考虑到的影响因素应逐一列出其有关的项目，并对每一方案逐一作出对这些项目的影响程度的定量或定性指标。基于对初选方案的技术经济分析，并参考这些影响指标，可对各初选方案作出较全面的综合评价，通过比较论证，最终可选出较优方案作为推荐方案。通常规划人员推荐的方案不限于一个，可以同时提出二三个具有不同特点的较好方案，供决策机构审议和决择。

对于推荐方案的组成、工程单元的实施计划，应作出合理的开发程序安排。水资源工程的逐步实施过程是一个系统扩展问题，它反映着系统的动态属性。必须以满足国民经济发展阶段对水资源逐步增长的需求，分阶段投建水资源工程。必须从多种可能的投建排序中选出最好的开发程序。

四、流域规划方法概述

流域规划是一项十分重要和复杂的工作，上述规划工作的程序只是概括性地介绍进行流域规划的一般步骤，还必须进一步讨论进行规划时可供采用的具体方法。

（一）常规方法与优化方法

流域规划的优化方法通常是指采用系统分析方法，建立流域规划的数学模型，借助于最优化技术寻求最优的流域开发方案。流域规划的另一种做法是不以系统分析和优化模型为规划手段，其特点是主要依赖于规划人员的经验较合理地拟定若干可供比较的规划方案，通过技术和经济的分析计算和论证，从中选出较好的方案，这种规划方法常称为常规方法。从国外看，西方发达的资本主义国家 20 世纪 50 年代中期系统分析和优化模型才用于水资源系统规划，此时期之前的水资源系统规划基本上属于常规方法；我国 70 年代末期以前在流域规划中主要沿用常规规划方法。

常规方法只能在有限的拟定方案中进行选择，凭借规划人员的经验而拟定的方案不可能确保包括了最优方案，因此这种方法一般只能选出较好的方案，而不是最优方案。

优化方法通过对流域规划数学模型的求解，从理论上讲，可求得最优的规划方案。但是，必须清醒地认识到，对于一个庞大而复杂的流域规划问题企图建立一个完整的、严谨的数学模型往往是很难办到的；即便能建立这种理想化的模型，由于存在多个目标和众多的决策变量，也将导致出现解算上难以逾越的维数灾的障碍。从系统分析上讲，流域规划问题一般属于大型的复杂系统，应设法引入大系统方法进行适当的降维处理，以期简化解算工作。此外，建立数学模型时对于规划目标的识别，以及目标函数和约束条件的数学表达，往往不得不采用某些简化。不适当的简化处理将导致规划模型与实际流域规划情况的偏离而影响其最优解的真实性。

尽管优化方法是目前研究工作中致力发展的方法，但是鉴于流域规划问题的复杂性，目前还不可能提供一种通用的、有效的流域规划优化模型全面取代常规方法。切乎实际的做法应该是在流域规划工作中采用常规方法的同时，积极开展优化方法的研究。80 年代初期，我国对于流域规划工作曾提出“源于常规，优于常规”，这种提法有助于在开展常规规划的基础上，通过优化方法的研究，进一步改进和完善规划方案。随着现代电子计算机的应用，机辅设计的方法已在规划设计中逐步推广，许多过去必须由人工来完成的计算工作，已逐步由计算机来完成。计算机作为水资源系统运行模拟的手段，使常规规划中可以考虑更多的比较方案，从而在一定程度上克服比较方案少的局限。水资源系统模拟分析技术的应用为常规方法与优化方法相结合提供了较有效的途径。

（二）单目标规划与多目标规划

由前述水资源系统的特点可知，流域规划往往具有多方面的目标，如经济的，环境的和社会福利的目标。从规划中考虑规划目标的不同做法看，可以将规划方法区分为单目标规划与多目标规划。

单目标规划通常将经济目标作为流域规划的目标，例如以净效益最大或其他经济指标（如益本比、内部回收率等）作为衡量规划方案优劣的标准。单目标规划是以往流域规划中长期沿用的方法，无论在常规规划，还是在优化规划中，这是一种常用的评价规划方案的基本方法。近年来，环境质量和社会福利的目标已逐渐受到重视。作为单目标规划的改进，可以以单目标规划为基础，提供几个经济上具有优越性的方案，辅以环境的和社会福利的综合评价，最终评选出不仅在经济上，面且在环境和社会福利方面也具有优越性的方案作为选定的规划方案。这种以经济效益为目标的单目标规划，辅以多种目标的综合评价是目前流域规划中较常采用的考虑多目标的一种可行的途径。

考虑多种规划目标的另一途径是将各种目标同时考虑。各种目标往往不能采用同一的度量单位，而且各目标之间往往存在彼此矛盾、相互竞争的关系，因此建立流域规划数学模型时，多目标将反映评价规划方案的多种准则，据此，必须从理论上研究和开发一种多目标规划的方法。这一规划途径与前面提到的辅以多目标综合论证的作法的不同点是，综合论证往往更多地含有一定的经验性的色彩，面多目标规划乃是近年来许多学者致力研究的一种理论上更严谨的决策方法。

必须说明，在规划目标较多（如多于二个以上）时，采用多目标规划方法进行分析是比较复杂和困难的，实际的做法往往是只选择主要的目标进行规划论证，面对其他次要目

标只作补充的综合论证；或是把次要目标作为约束条件来考虑。

（三）流域规划系列模型构模框架简介

大型复杂流域的水资源系统规划，必须考虑多个规划目标和水资源的综合利用，还必须计及水资源系统的随机因素和动态属性，对于如此复杂的问题进行系统分析时，可采用下述的构想来建立系列化模型。

在规划方案的选择阶段，若同时计入各方案的动态属性，显然将大大增加方案比较的难度和计算工作量，为克服这一困难，在系统分析中可以将规划问题分解为静态问题和动态问题。静态问题的着眼点是远景的总体开发，它将根据一个远景水平年规划方案整体实施后的水资源系统的整体经济指标和环境社会影响等因素来评价和选择流域规划的总体方案。实际上水资源系统的工程单元有一个逐步实施的过程，在这一过程中，规划区域内的综合利用要求将随着国民经济的发展而逐步提高，与此相适应，水资源工程将分阶段建设和投入运行，以满足综合利用的要求。为反映水资源系统的这种动态属性，作为上述静态问题的补充，还必须在选择规划方案中进行水资源系统开发程序的分析论证。通常的作法是用静态规划问题模型寻求最优的总体规划方案；对于推荐的数目有限的总体规划方案，分别进行开发程序的动态分析，这种分析有助于从近期与远景开发的关系上进一步阐明总体规划方案的可行性。

上述规划的静态问题将涉及远景的防洪标准、各用水部门的需水水平、水资源工程的组成、工程规模、以及运行方式等等众多的决策变量；还必须根据水资源系统的随机因素，分析规划方案的洪灾风险及正常供水的可靠性。针对水资源系统组成的不确定性和径流随机性的复杂特点，往往还必须在建模中作出一些简化处理。例如美国学者在研究阿根廷的科罗拉多河的规划问题时，对于上述静态问题采用了筛选模型和模拟模型相配合的处理办法。筛选模型的特点是采用简化的径流条件和运行方式，其任务是在众多的工程组合和综合利用的不同水平的众多规划方案中选出较好的方案。径流条件的简化是采用一个多年平均的径流条件作为水资源系统的平稳输入，忽略了径流年际变化及其相应的随机性。另外年内以季为计算时段，从而简化水资源系统运行方式的复杂性。经筛选模型选出的几个较好的规划方案，分别采用模拟模型进行长系列的模拟运行分析。对于水资源系统的规划方案通常可采用实测径流系列作为系统的输入，借此可反映径流的年内和年际变化对系统运行情况的影响。以实测径流系列为输入的长系列模拟运行分析有助于较详细地论证规划方案长期运行的期望效益，以及在一定程度上反映径流的随机性对正常供水的可靠性的影响。

综上可见，对于复杂流域规划进行系统分析的一种可供参考的作法是建立分阶段的系列模型——筛选模型、模拟模型和开发程序模型。首先利用筛选模型在水资源系统要素的众多的可能组合中筛选出若干个较好的规划方案。对于这些数目有限的被选方案，采用模拟模型分别进行较详细的模拟运行分析，在此基础上进行论证，提出推荐方案（一般不限于一个方案）。对于拟推荐的方案建立开发程序模型，确定规划方案的最优开发程序，从规划方案的实施过程的安排进一步阐明规划方案的近期与远景的关系。上述的系列模型最终将为流域规划提供推荐方案的技术、经济、环境和社会影响等方面的指标，为决策机构选定规划方案提供了较充分的依据。

第二节　水资源系统规划模型简介

图 6-1 是一个假拟的规划流域的示意图。设该流域的开发任务是灌溉和水力发电，工程方案的组成包括二座水库：B 库和 C 库、一个灌区和一座径流式电站。与此相应，规划中待定的决策变量为水库 B 的有效库容 Y，水库 C 的有效库容 Z，灌区的年用水量 I，以及水电站的年电量 E。

为了便于介绍如何建立水资源系统规划的数学模型，设上述水库只进行年调节而不考虑其多年调节；并只将全年粗分为丰水季和枯水季。图 6-1 中用箭头引导的数字是指对应河段的水量；用大括号引导的数字成表达式的上行为丰水季水量，下行为枯水季水量。不用箭号引导的大括号中的数字表示支流汇入的径流量。从图上可见，B 库上游河段丰、枯季的入库径流量分别为 $3.3\times10^9\ m^3$ 和 $1.4\times10^9\ m^3$；经 B 库调节后下泄的丰、枯季水量分别为 $(3.3-Y)\times10^9\ m^3$ 和 $(1.4+Y)\times10^9\ m^3$。同理类推，按水量平衡关系可逐一推出如图所示的各河段的水量。

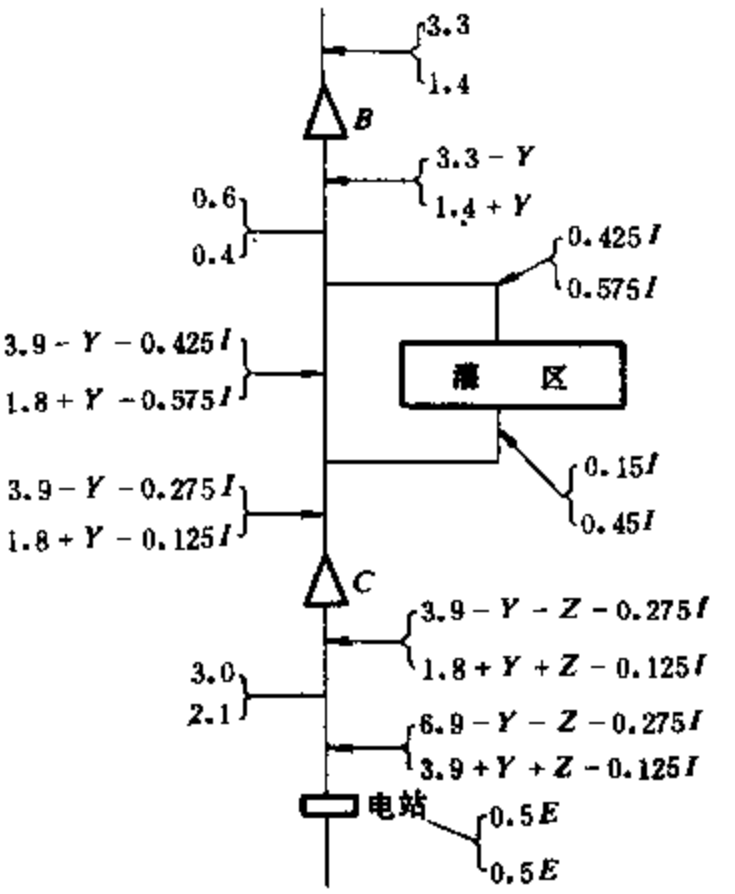

图 6-1　水资源系统示意图

灌区年灌溉用水量为 $I(10^9\ m^3)$，根据该灌区农作物的组成确定丰、枯季的灌溉用水量分别为 $0.425I$ 和 $0.575I$。灌区的灌溉回归水将汇入河道，丰、枯季的灌溉回归水量分别为 $0.15I$ 和 $0.45I$。径流电站的年电量为 E $(10^9\ kW\cdot h)$，丰、枯季电量均为 $0.5E$。

以净效益最大为准则，上述水资源系统规划的任务是寻求工程规模的最优组合，使其达到净效益最大。对于这一规划问题建立数学模型时，必须根据净效益最大的要求，写出反映该系统目标函数的表达式；其次是根据系统的特点，列出寻求工程规模组合时必须考虑的各种约束条件的表达式。

一、目标函数

$$\max NB = B_1(E) + B_2(I) - K_1(Y) - K_2(Z) - K_3(E) - K_4(I) \qquad (6\text{-}1)$$

目标函数中的各项效益费用函数可通过技术经济分析给出。其中 $K_1(Y)$、$K_2(Z)$、$K_3(E)$、$K_4(I)$ 分别表示与水库 B、水库 C、电站及灌区规模大小有关的各项工程投资。经分析给出这些投资项的表达式：

$$K_1(Y) = 43Y/(1 + 0.2Y)$$
$$K_2(Z) = 47Z/(1 + 0.3Z)$$
$$K_3(E) = 20.6E - E^2$$
$$K_4(I) = 44I + 4.5$$

上列各投资项的单位均为 10^6 元。

目标函数式中 $B_1(E)$、$B_2(I)$ 分别表示与年电量 E 和年灌溉用水量 I 的大小有关的年发电效益和年灌溉效益。必须补充说明，这二项效益均已计入各自的年运行费（扣除了设备的维修和更新费用）。

取折现率 $i=2.5\%$，工程有效使用年限为 50 年，以使用期初（即零年）为基准年，可将目标函数中的净效益 NB 及其它各项均折算为现值，其单位均为 10^6 元。为简化计算，假设各项工程投资均在使用期初投入，因此上述各投资项即为现值。其次，假设使用期中各年的发电效益、灌溉效益，以及其年运行维修费均属于等额形式。对于效益项而言，这一假设实际上是以计算年的效益作为使用期中各年的等额效益。

经分析采用年发电的毛效益为 $9.0E\times10^6$ 元，年费用为 $0.2E\times10^6$ 元，按现值因子为 28.4 进行计算可得现值 $B_1(E)=250E$。

根据灌溉效益与灌溉用水量大小不属于线性关系的特点，本例以灌溉毛边际效益为基础来推求灌溉毛效益。经分析给出灌溉毛边际效益为

$$\frac{dB'}{dI}=2.1+3.2/(1+0.2I)$$

通过如下积分计算可求得年灌溉毛效益 B' 为

$$B'(I)=\int_0^I[2.1+3.2/(1+0.2I)]dI=2.1I+36.8\lg(1+0.2I)$$

又给出灌溉年费用为 $0.5I$。从灌溉毛效益中扣除灌溉年费用之后，按现值因子计算最终可得出灌溉效益项 $B_2(I)$ 的现值表达式为

$$B_2(I)=45.4I+1045\lg(1+0.2I)$$

将上述效益、投资项的各项表达式代入目标函数式之后得出净效益的现值表达式为

$$\begin{aligned}NB=&229.4E+E^2+1.4I+1045\lg(1+0.2I)-4.5\\&-43Y/(1+0.2Y)-47Z/(1+0.3Z)\end{aligned}\tag{6-2}$$

二、约束条件

可将本例的约束条件分为三组。其一是反映工程规模的决策变量的非负约束，即

$$Y\geqslant0,\quad Z\geqslant0,\quad I\geqslant0,\quad E\geqslant0$$

第二组约束条件是必须满足各河段的水量均为非负值。从流域示意图可见，各河段水量表达式中共有 10 个表达式含有决策变量，经分析可知只有下列 4 个表达式起约束作用，即

$$3.3-Y\geqslant0\tag{6-3}$$

$$3.9-Y-0.425I\geqslant0\tag{6-4}$$

$$1.8+Y-0.575I\geqslant0\tag{6-5}$$

$$3.9-Y-Z-0.275I\geqslant0\tag{6-6}$$

上列约束式主要反映有关决策变量取值的上限约束，例如 $3.3-Y\geqslant0$ 即是要求 $Y\leqslant3.3$。未作为约束条件列出的其它 6 个有关的河段流量表达式均可由已列出的约束式得到满足。例如 $1.4+Y\geqslant0$ 可由 $Y\geqslant0$ 的非负约束满足。又如 $3.9-Y-0.275I\geqslant0$ 显然可由式（6-4）得到满足。

第三组约束是反映径流式电站的发电量约束。由示意图可见，本例要求在电站上游水库的调节下，年内丰、枯季的发电量均为 $0.5E$。对于径流式电站可设其水头不变，经分析确定该电站的综合发电系数为 0.144，据此可分别列出丰、枯季的发电量约束式为

$$0.144(6.9 - Y - Z - 0.275I) \geqslant 0.5E$$

$$0.144(3.9 + Y + Z - 0.125I) \geqslant 0.5E$$

上式整理后可进一步表达为

$$Y + Z + 0.275I + 3.47E \leqslant 6.9 \tag{6-7}$$

$$-Y - Z + 0.125I + 3.47E \leqslant 3.9 \tag{6-8}$$

三、解算说明

上面较详细地介绍了如何根据规划要求的最优化准则，结合流域的具体条件，经分析写出目标函数及其有关约束条件的表达式，这些乃是建立流域规划数学模型的工作内容。本例目标函数式（6-2）及约束条件表达式（6-3）～（6-8）即构成所研究流域规划模型的数学描述。必须根据规划模型的特点，有选择地采用有效的技术方法寻求模型的最优解。

本例目标函数的净效益与诸决策变量的关系属于非线性函数，可见该模型属于有约束的非线性规划问题。进一步分析目标函数式（6-2）可以看出，等式右端各项可分离为分别与决策变量 Y、Z、I、E 有关的 4 部分，且这 4 个分部函数均具有非线性的性质。可采用第三章介绍过的可分规划的解算方法来求得上述非线性规划问题的近似解。针对本例的特点，这种解算法必须首先对目标函数中的 4 部分分别与 Y、Z、I、E 有关的非线性函数逐一进行分段线性化的近似处理。与此相应，每个决策变量应分别采用相对应的一组辅助变量作为替换。作出分段线性化及相应的辅助变量的替换之后，可按线性规划的解算方法求得该模型的最优解。本例的具体解算方法及其结果可见于 A·Maass 等人编著的 Design of Water-Resource Systems 一书。

虽然上述流域规划实例所考虑的条件过于简化而不足以反映真实流域规划的实际复杂情况，但是借此简单流域而介绍的建立流域规划数学模型的原理和方法，不失其一般性，可为建立较复杂的流域规划模型及其解算提供基本思路。

第三节　多目标决策的基本原理和方法

一、概述

在人类社会各种活动范围，小自个人生活小事，大至国家的大政方针，都在不同程度上涉及多目标决策。如购买商品，人们的愿望是物美价廉；企业生产活动中追求高效、优质、低污染；水资源开发以追求国民经济效益、提高社会福利和改善环境质量等为目标。

多目标决策的一个重要特征是各目标性能指标的不可公度性。例如衡量经济效益常常采用货币单位，而环境质量则必须用物理量、化学量或生物指标等来表征。即使是同属于经济目标，国民经济与地区经济的价值观往往是不等价的。

多目标决策问题的基本性质是各目标之间存在彼此竞争，甚至是相互矛盾的关系。在试图调整各目标的性能指标所遇到的一个基本问题是为了获得某些目标的改善，必须牺牲

另一些目标的利益。多目标分析与决策的理论就是针对所研究问题的这种基本性质而发展起来的。

上节所介绍的流域规划模型是以国民经济净效益最大为目标，它属于单目标决策问题。对这种问题可以求出其唯一的最优解。与单目标决策不同，多目标决策问题所存在的各目标的不可公度性，以及虽可公度，但其重要性不同，导致决策问题的目标函数必须用多维的目标空间来表示。从理论上讲，寻求多目标问题的最优决策是向量最优化问题。对于这一问题，通常不可能找到一个在各目标的性能指标都比其它任何方案优越的绝对最优解。由上述多目标决策问题的基本性质可见，要想改进一个目标的性能指标，必须以牺牲另一个或另几个目标的利益为代价，因此只能求助于人们所接受的效用观念，通过权衡利弊得失，选出一个能令人满意的最佳均衡解。

二、几个有关概念的说明

（一）决策空间与目标空间

对于上述的多目标决策优化问题，可作出如下一般形式的数学描述：

$$\max\bar{Z}(\bar{x}) = \max[Z_1(\bar{x}), Z_2(\bar{x}), \cdots, Z_k(\bar{x})]$$

约束条件为

$$g_i(\bar{x}) \leqslant 0 \qquad (i = 1, 2, \cdots, m)$$

$$x_j \geqslant 0 \qquad (j = 1, 2, \cdots, n)$$

式中：x_j 表示 n 个决策变量；$\bar{x}$ 表示以 n 个决策变量为分量的决策向量；$Z_1(\bar{x}), Z_2(\bar{x}), \cdots, Z_k(\bar{x})$ 分别表示各个目标功能指标的函数值；$\bar{Z}(\bar{x})$ 为对于 k 个目标的 k 维目标函数的向量。上述决策问题的最优解必须满足决策变量的非负约束和一组约束方程 $g_i(\bar{x}) \leqslant 0$ $(i = 1, 2, \cdots, m)$。

为了便于简明地表示多目标决策问题的决策空间和目标空间的图形，设一个多目标决策问题为

$$\max\bar{Z}(\bar{x}) = \max[Z_1(x_1, x_2) = 5x_1 - 2x_2, Z_2(x_1, x_2) = -x_1 + 4x_2]$$

约束条件为

$$-x_1 + x_2 - 3 \leqslant 0$$

$$x_1 + x_2 - 8 \leqslant 0$$

$$x_1 - 6 \leqslant 0$$

$$x_2 - 4 \leqslant 0$$

$$x_1, x_2 \geqslant 0$$

这是一个线性多目标决策问题。鉴于该问题只有二个决策变量，因此可用平面图形来表示其决策空间。图 6-2 决策空间图中决策可行域为上列所有约束式相应的直线为边界而形成的凸多边形的面积。根据在各顶点处决策变量 x_1、x_2 的取值可求出其相对应的目标函数值 $Z_1(\bar{x})$、$Z_2(\bar{x})$，计算结果如表 6-1 所示。

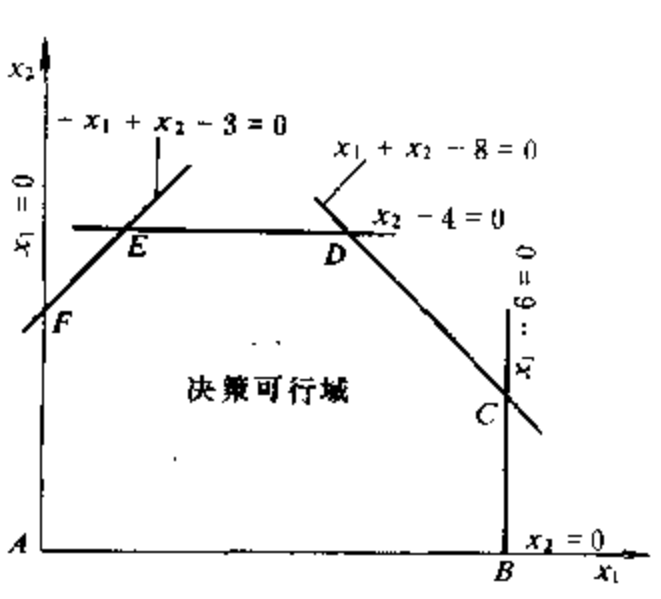

图 6-2 决策空间可行域

表 6-1　　决策变量与目标函数值

顶点	x_1	x_2	$Z_1(\bar{x})=5x_1-2x_2$	$Z_2(\bar{x})=-x_1+4x_2$	顶点	x_1	x_2	$Z_1(\bar{x})=5x_1-2x_2$	$Z_2(\bar{x})=-x_1+4x_2$
A	0	0	0	0	D	4	4	12	12
B	6	0	30	−6	E	1	4	−3	15
C	6	2	26	2	F	0	3	−6	12

图 6-3 是上述问题的目标空间的图形。图中各顶点的目标函数值 $Z_1(\bar{x})$、$Z_2(\bar{x})$ 的取值即为表 6-1 的计算结果。目标空间中由 $ABCDEF$ 多边形所包围的区域即为与决策可行域相对应的目标空间可行域。

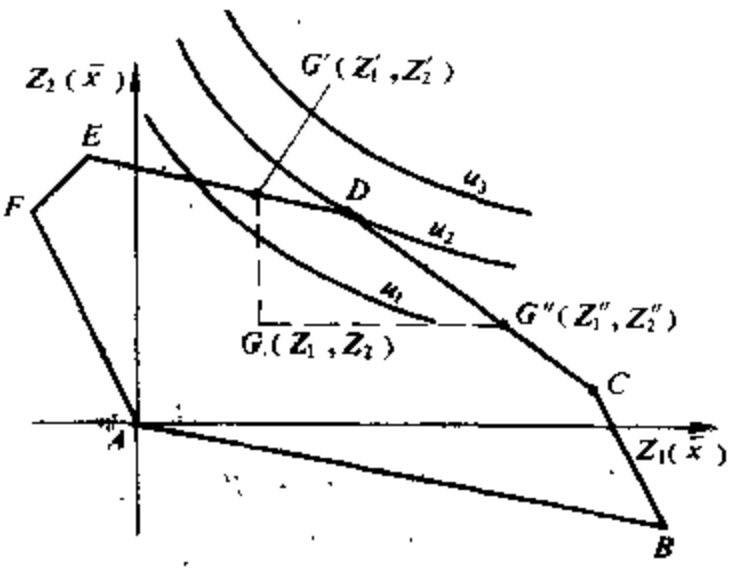

图 6-3　目标空间及其可行域

必须指出上述决策空间与目标空间的图形乃是根据该问题属于线性问题，且决策变量数 $n=2$、目标个数 $k=2$ 的特例而作出的。决策变量数 n 与目标数 k 不必一定相同。显然当决策变量或目标的数目超出 2 时，其决策空间或目标空间将必须表示为多维空间。

（二）非劣解集

非劣解（noninferior solution），或称为有效解（efficient solution），是研究多目标决策所涉及的一个重要概念。这一概念是经济学家 Pareto 1896 年提出的，因此也有人把这种解称为 Pareto 优化解。

以前述两个目标的决策问题为例，设在图 6-3 目标函数可行域内部取任一点 G，其函数值为 (Z_1, Z_2)。与 G 点相对应，显然可以在可行域边界上选取 G' (Z_1', Z_2) 及 G'' (Z_1'', Z_2'')。因为 $Z_1'>Z_1$，$Z_2>Z_2'$，从目标值极大化看，显然可以判断，G'、G'' 二点的目标值均优于 G 点，可见 G 点对应的解属于可以舍去的劣解。

进一步分析可看到在目标空间可行域边界上选取的 G'、G'' 点具有如下的性质：其一是不可能在目标空间可行域中找到一个点的目标值全面优于 G' 或 G''；其二是对比 G' 与 G'' 目标值的优劣时，二者的具体目标值互有优劣，$Z_1<Z_1''$，而 $Z_2>Z_2''$，不能对二者直接作出取舍的选择。对于这种不能作为劣解舍去的解，称为非劣解。

通过对图 6-3 目标空间的全面分析不难看出，在可行域上边界 $BCDE$ 线上所有的点相对应的解都属于非劣解。一个决策问题的所有非劣解的集合，称为该问题的非劣解集。与此相对应，在图 6-2 决策空间可行域边界 $BCDE$ 线反映该问题非劣解集在决策空间的取值。

综上可见，与单目标决策不同，多目标决策问题，一般不可能找到一个绝对最优解，而必须在找出非劣解集之后，借助于某种判断准则，权衡利弊得失，从中选出一种满意解。

（三）无差异曲线（indifference curve）

对于多目标决策问题的非劣解集，为权衡及选出一种满意解，通常借助于效用（utility）理论，通过人们判断事物的效用观念来反映人们的满意程度。无差异曲线是以等

效用观念为基础而作出的。图 6-3 中 u_1、u_2、u_3 三根曲线是对应于三种不同的效用值的无差异曲线，其中效用值的关系为 $u_1<u_2<u_3$。每根无差异曲线上的各点的目标函数的坐标值（Z_1，Z_2）反映一种决策方案目标值的组合。同一无差异曲线上各点所反映的各种组合方案在人们的观念上具有同等的满足程度，从这一意义上理解，也可将无差异曲线视之为等效用曲线。曲线上任一点的切线的斜率表示两个目标之间的边际替代率，斜率为负值表明某一目标值的增加将导致另一目标值的减小。

由上述可见，无差异曲线乃是人们的效用观念的某种数值化的表现形式。鉴于不同的个人或社会团体往往存在不同的效用观，因此对于一个多目标决策问题，往往不可能预先给出如此明显而简单的无差异曲线。尽管如此，引人无差异曲线的概念对于说明从非劣解中选出满意解的方法是很有帮助的。

（四）最佳均衡解

在求出多目标决策问题的非劣解集及给出无差异曲线的条件下，可以按效用值最大的准则，从非劣解集中找到一个满意解。从图 6-3 所示的非劣解集与无差异曲线的关系可见，无差异曲线 u_2 与非劣解集 $BCDE$ 线的切点 D 是非劣解集中达到效用值最大的一个解。这个解就是在给定的反映人们的效用观念的无差异曲线条件下的一个满意解，这种解通称为最佳均衡解（best compromise solutlon）。

三、非劣解生成技术

实际多目标决策问题往往比前面列举的实例复杂得多，对于较复杂的问题我们并不是通过问题的决策空间和目标空间的分析，直接找到非劣解集。因为决策空间或目标空间都可能是多维空间，从而带来图形表达的困难；另外，对决策可行域的全面解算必将带来本来可避免的巨大计算工作量。

对于多目标决策问题生成非劣解集所采用的基本技术途径之一是首先将向量优化问题转化为标量化问题，然后对于标量化问题可采用单目标决策问题的寻优技术求解。下面将介绍用这类技术途径生成非劣解的二种最常用的方法。

（一）权重法

对于多目标决策问题的目标函数 $\max\bar{Z}(\bar{x})=\max[Z_1(\bar{x}), Z_2(\bar{x}), \cdots, Z_p(\bar{x})]$ 中的各个目标值分别赋予权重系数 W_1，W_2，…，W_p，然后进行累加，就可将向量优化问题转化为如下式所示的标量化问题：

$$\max\sum_{k=1}^{p}W_kZ_k(\bar{x})$$

约束条件为

$$W_k\geqslant 0 \qquad (k=1,2,\cdots,p),\text{且}\sum_{k=1}^{p}W_k=1$$

$$\bar{x}\in X$$

式中：$\bar{x}$ 为决策向量；X 为决策空间可行域。设目标分量 $Z_k(\bar{x})$（$k=1$，2，…，p）均可表达为线性函数，且所有约束均属于线性约束，那么对于上述多目标决策的标量化问题，可按线性规划方法求得其最优解。这个解即是上述多目标决策问题在给定的一组权重系数条件下的一个非劣解。

以图 6-3 所示的两个目标分量的多目标决策问题为例，引入权重系数之后的标量化目标值为

$$\overline{Z}(\bar{x}) = \sum_{k=1}^{2} W_k Z_k(\bar{x}) = W_1 Z_1(\bar{x}) + W_2 Z_2(\bar{x})$$

为便于说明问题，将上述表达式改写为下列简化式

$$Z = W_1 Z_1 + W_2 Z_2 \tag{6-9}$$

设上述两个目标分量的多目标决策问题属于线性问题，在给定权重系数值的条件下，通过线性规划求解得出相应的目标值 $Z=u_2$。对函数式（6-9）可写出其全微分表达式，经整理后可得到：

$$\left.\frac{dZ_2}{dZ_1}\right|_{Z=u_2} = -\frac{W_1}{W_2} \tag{6-10}$$

上式左端表示目标值 $Z=u_2$ 条件下二个目标分量之间的边际替代率。从图 6-3 可见，dZ_2/dZ_1 的几何意义表示在 D 点处对于效用值为 u_2 的无差异曲线所作的切线的斜率，D 点是无差异曲线与非劣解集折线的相切点。由此可见，式（6-10）右端的权重系数的比值反映多目标决策问题的非劣解相对应的边际替代率。

由上述权重法通过赋予一组权重系数将目标函数标量化之后，求出一个对应的非劣解的基本作法，不难推论，通过系统地、有一定规则地调整权重系数的比值，则可相应地生成一系列的非劣解。假如调整权重系数时采用的摄动步长适当加细，则可使生成的非劣解集接近于全集。调整权重系数时应注意满足 $\sum_k W_k = 1$ 的约束。

（二）约束法

对多目标决策的向量优化问题：

$$\max \overline{Z}(\bar{x}) = \max[Z_1(\bar{x}), Z_2(\bar{x}), \cdots, Z_p(\bar{x})]$$

满足约束

$$g_i(\bar{x}) \leqslant 0 \qquad (i = 1,2,\cdots,m)$$

$$x_j \geqslant 0 \qquad (j = 1,2,\cdots,n)$$

从 p 个目标中选出具有首位重要性的目标 Z_r 作为主要目标，对于其他次要目标 Z_k，给定一个合理的水平值 L_k，并以 $Z_k(\bar{x}) \geqslant L_k$，$k \neq r$ 作为约束条件，然后可将上述多目标决策问题转化为如下的决策问题：

$$\max Z_r(\bar{x})$$

满足约束

$$\bar{x} \in X$$

$$Z_k(\bar{x}) \geqslant L_k \qquad \forall\, k \neq r$$

式中：X 为原问题的决策向量 $\bar{x}$ 的可行域。上述表达式表明多目标决策问题采用约束法解算的特点是除一个主要目标外，将其他次要目标都转化为服从于相应的水平值的约束，从而形成一个单目标的决策问题。这是向量优化问题标量化常用的另一种基本作法。

对于目标约束式的水平值 L_k 的不同取值，将相应产生约束法模型的相对应的最优解，这种解即属于多目标决策问题的非劣解。实际计算中可按下述计算步骤确定 L_k 取值范围的下界。

首先对应于上述多目标决策问题，按 p 个不同的目标分别构造 p 个单目标决策问题，

即对于所有 $k=1$，2，…，p，都需要寻求下列问题的最优解：

$$\max Z_k(\bar{x})$$

满足约束

$$\bar{x} \in X$$

对于 p 个问题逐一求出的最优决策向量分别为 $\bar{x}^k$（$k=1$，2，…，p）。

显然，对于上述的任一决策向量 $\bar{x}^k$，可以根据各目标分量的函数表达式，逐一求出在取决策 $\bar{x}^k$ 条件下各目标分量的值 $Z_i(\bar{x}^k)$（$i=1$，2，…，p）。可用表 6-2 汇总各个单目标问题的决策向量相对应的分目标值。

表 6-2　　单目标决策及其相应的目标值

决策 \ 目标	Z_1	Z_2	…	Z_k	…	Z_p
$\bar{x}^1$	$Z_1(\bar{x}^1)$	$Z_2(\bar{x}^1)$	…	$Z_k(\bar{x}^1)$	…	$Z_p(\bar{x}^1)$
$\bar{x}^2$	$Z_1(\bar{x}^2)$	$Z_2(\bar{x}^2)$	…	$Z_k(\bar{x}^2)$	…	$Z_p(\bar{x}^2)$
⋮	⋮	⋮		⋮		⋮
$\bar{x}^k$	$Z_1(\bar{x}^k)$	$Z_2(\bar{x}^k)$	…	$Z_k(\bar{x}^k)$	…	$Z_p(\bar{x}^k)$
⋮	⋮	⋮		⋮		⋮
$\bar{x}^p$	$Z_1(\bar{x}^p)$	$Z_2(\bar{x}^p)$	…	$Z_k(\bar{x}^p)$	…	$Z_p(\bar{x}^p)$

表 6-2 中每一列的数值表明各个目标值的可能取值的变动范围，可以从每一列中找到对应目标的最小值，作为该目标水平值的下界。对于所有 $k \neq r$ 的目标 Z_k，以其水平值的下界为起点，采取适当的步长及有规则的目标约束的组合，合理摄动目标约束的水平值，可求出对应的非劣解集。

第四节　流域规划筛选模型

一、概述

本章第一节提到，对于较复杂的大型水资源系统建立流域规划模型的一种可循的途径是建立分阶段的系列模型，即筛选模型、模拟模型和开发程序模型。规划中必须根据近期和远景的综合利用和开发治理的要求，搜集和分析自然和社会经济等方面的资料，并通过实地查勘，提供一批供选择的工程点。建立筛选模型的目的是为了从众多的工程组合方案中淘汰一些功能差，费用高，对流域环境和经济发展有明显不利影响的方案，初步选出若干个较优越的可行方案。初选方案反映流域总体开发的轮廓布局，方案包含了工程点的组合和工程规模。

筛选模型的特点是它面临的是一些可供选择的工程点，在方案选出之前，不能预先确定哪些工程点将是选出方案的组成要素，据此可以采用混合整数规划的方法来建模。具体作法是在模型中计入两类决策变量：第一类是连续变量，如反映有效库容、灌溉面积和水电站容量规模的决策变量，这些变量可在其限定范围内连续变化取值；第二类是 0—1 变量，这类变量用来表示工程的投入（变量取值为 1）或不投入（取值为 0）。在下面将要介绍的筛选模型中可以看到，建模时可以同时列入所有可供选择的工程点，解算的结果得到的二类变量的解答将同时反映方案的工程组合和工程规模。

对于较大流域而言，往往可供选择的工程点较多，用混合整数规划建立的筛选模型的解算工作量是十分繁重的，因此在不影响选出最有希望方案的前提下，建模时应对有关的条件作一些合理的简化。

二、筛选模型的建立及算例

（一）流域情况简介

这里选用阿根廷的科罗拉多（Rio Colorado）河的流域规划筛选模型作为介绍的对象。科罗拉多河发源于阿根廷西部的安第斯山，流经 5 个省域的干旱地区，在阿根廷东部流入大西洋，河长约 1100 km。该河属于高山融雪型河流，年内径流有明显的季节性变化，多年平均流量为 130 m^3/s，流域内人口约 5 万人。流域开发中考虑的主要用水部门是灌溉和水力发电。规划拟定的可供选择的工程点包括 8 座水库、13 座水电站、20 个灌区、两条输出外流域的输水渠和一条从外流域调水的引水渠。根据流域中水系的特点及上述可供选择的工程点的总体布局，可将该水资源系统概化为 13 个计算结点。

从上述流域规划背景可见，它属于一个大型的复杂的水资源系统规划问题，为减轻筛选模型的计算工作量，建模时首先对该系统的径流输入作如下的简化：不考虑径流复杂变化的不确定性，采用实测径流系列的历年平均的季径流量来代表该系统的平稳的年径流输入。该流域的灌溉需水集中在两季，即 9～12 月和 1～4 月，5～8 月基本上不需要灌溉用水，据此将全年分为三个计算时段，每个时段为 4 个月。下面分别按目标函数及约束表达式二方面的内容来描述筛选模型的结构。

（二）筛选模型的约束条件

1. 连续性约束

以一个水库节点为例，说明对于该节点如何表达其水量连续性约束。对于该节点的水库 i 按水量平衡关系可写出计算时段 t 的连续性方程：

$$S_{i,t+1} = S_{it} + X_{it} + F_{it} - E_{it} - D_{it}$$

式中：S_{it}表示 t 时段初水库 i 的蓄水量；X_{it}表示 t 时段水库 i 的入库径流量；F_{it}、E_{it}分别表示该节点 t 时段的调入、输出水量；D_{it}表示 t 时段水库 i 的放水量。

假如该节点上游存在序号为 $i-1$ 的水库，那么必须将水库 i 的入库径流量进一步表达为

$$X_{it} = D_{i-1,t} + \Delta W_{it}$$

式中：$D_{i-1,t}$表示上游水库在时段 t 的泄放水量；ΔW_{it}表示坝址 $i-1$ 至坝址 i 之间 t 时段的区间径流量。将此关系式代入上述的连续性方程得出：

$$S_{i,t+1} - S_{it} + E_{it} + D_{it} - F_{it} - D_{i-1,t} = \Delta W_{it} \tag{6-11}$$

此式即是由一个典型的水库节点导出的连续性方程表达式。不同节点水量输入输出条件将有差别，通过对所有节点的水量平衡关系的具体分析，不难逐一写出其对应的连续性约束方程。

2. 水库的有关约束

记 V_i 为水库 i 的库容，它是反映水库规模的决策变量。从满足径流调节所需库容的要求，显然存在如下的约束：

$$S_{it} - V_i \leqslant 0 \qquad \forall\, t \tag{6-12}$$

引入 0—1 变量 y_i 来反映水库 i 存在被选入或不选入规划方案的二种可能性，规定

$$y_i = \begin{cases} 1, \text{当水库 } i \text{ 进入组合方案} \\ 0, \text{当水库 } i \text{ 不进入组合方案} \end{cases}$$

设根据坝址的自然条件可确定水库的上限容积为 V_i^*，那么可用下式来反映水库是否进入组合方案：

$$V_i - y_i V_i^* \leqslant 0 \tag{6-13}$$

从上式可以看出，当 $y_i=0$ 时，必然有 $V_i=0$，这反映不修建水库 i 的情况；反之，若 $V_i>0$，满足式（6-13）的约束，必然要求 $y_i=1$，这反映了必须修建水库 i。将式（6-13）与式（6-12）相联系可以进一步看出，不修建水库 i 时，必然存在 $y_i=0$，$V_i=0$，及 $S_{it}=0$，这种情况反映不存在水库 i 进行径流调节时的天然河道水流条件。

3. 灌溉约束

记 L_i 为规划灌区 i 的灌溉面积，它是一个决策变量；L_i^* 为规划灌区 i 的灌溉面积的上限，它可根据灌溉的具体条件给定。据此可给出待定的灌区灌溉面积的约束条件式：

$$L_i \leqslant L_i^* \tag{6-14}$$

又记 τ_{it} 为时段 t 单位面积所需的灌溉水量。记 ε_{it} 为 t 时段从取水地点通过灌溉渠系输送水量到田间的渗透损失系数，或 $1-\varepsilon_{it}$ 表示灌溉水量利用系数。那么灌区的灌溉引水量 I_{it} 应满足如下的等式约束：

$$\tau_{it} L_i - (1 - \varepsilon_{it}) I_{it} = 0 \tag{6-15}$$

4. 水力发电约束

若以满足保证电能为基本要求，那么对水电站可写出如下的约束式：

$$P_{it} - K_i q_{it} H_{it} \leqslant 0$$

式中：P_{it} 表示 i 电站 t 时段的保证电能；K_i 是一个综合反映水轮发电机组效率及电能单位换算的综合系数；q_{it} 表示电站 i 时段 t 水轮机的引用水量；H_{it} 表示电站 i 时段 t 的平均水头。式中 P_{it}、q_{it}、H_{it} 均属待定的决策变量。式中第二项出现 q_{it} 和 H_{it} 相乘，可见此约束不等式是非线性约束。混合整数规划模型要求目标函数及约束方程均为线性方程。对于上述非线性约束可以通过如下的处理而转换为线性约束。

用一个假设的常数 q_{it}^* 代替 q_{it}，得

$$P_{it} - K_i q_{it}^* H_{it} \leqslant 0 \tag{6-16}$$

用假设的常数 H_{it}^* 代替 H_{it}，得

$$P_{it} - K_i q_{it} H_{it}^* \leqslant 0 \tag{6-17}$$

式（6-16）和式（6-17）都是线性约束。显然用这二个线性约束式取代上述非线性约束必须在模型的解出现 $q_{it}=q_{it}^*$ 和 $H_{it}=H_{it}^*$ 的条件下，上述非线性约束才得到体现。由此可见，上述非线性约束的线性替换之后，必须对模型进行迭代演算，逐步修正假设常数 q_{it}^*、H_{it}^* 的值，当模型解满足上述要求条件时即可得出最终的解答。

5. 调入和输出约束

记 F_{it}、E_{it} 分别表示地点 i 时段 t 调入流域内和输出流域外的水量；又记 F_i、E_i 分别表

示地点 i 调入和输出的渠道引水能力。各时段的调水量应满足引水能力的约束，即

$$F_{it} - F_i \leqslant 0 \tag{6-18}$$

$$E_{it} - E_i \leqslant 0 \tag{6-19}$$

若调水工程在规划中属于取舍待定的工程措施，那么可增加如下约束式来反映组合方案中对它们进行筛选的可能性。

$$F_i - F_i^* f_i \leqslant 0 \tag{6-20}$$

$$E_i - E_i^* e_i \leqslant 0 \tag{6-21}$$

式中：f_i、e_i 分别表示调入和输出的输水工程的存在状态，二者均为 0—1 变量。当该变量取值为 1 时表示该工程措施加入方案组合；取值为 0 表示该措施不加入方案组合。式中 F_i^*、E_i^* 代表按自然条件分析确定的调入、输出工程引水能力的上限。

以上以流域节点示意图为背景，说明如何根据来水及用水情况，对任何一个节点 i 必须大致考虑的约束条件及表达其相应的约束式。介绍流域规划筛选模型约束条件表达式的重点首先在于表明如何通过引入 0—1 变量来反映筛选工程措施的可能性；其次附带说明对于非线性约束作出线性转换的可供参考的作法，因为筛选模型采用的混合整数规划面临为数众多的决策方案的组合，解算工作浩繁，因此通常只用它处理线性模型。

必须指出，对于不同的节点、不同的计算时段，还必须参考上述建立约束式的类似作法分别建立其相应的约束式。此外还必须说明，上述的约束式并没有包罗所有必须考虑的约束条件，例如还应该计入决策变量的非负约束，反映水库泄流能力约束的水库水位与泄流量关系等等。

（三）目标函数

科罗拉多流域规划中主要考虑下列二类性质的经济目标：其一是国家净收益；其二是反映各省供水效益的地区性净收益。下面分别说明各项经济目标的计算表达式。

规划中取经济分析的计算期为 50 年，规划方案的效益和费用项按其计算期的流程折算为计算期第一年的现值。以下计算式的各项经济指标均用现值表示。

国家净收益 NB 可按下式计算：

$$NB = B - C$$

式中毛效益 B 可进一步展开为下式的效益项：

$$B = \sum_i \{\beta_i^l(L_i) + \sum_t [\beta_{it}^p(P_{it}) + \nu_{it}(E_{it})]\}$$

费用 C 可按下式计算：

$$C = \sum_i [\alpha_i(V_i) + \delta_i(H_i) + \phi_i(L_i) + \gamma_i^E(E_i) + \gamma_i^F(F_i)]$$

式中：β_i^l、β_{it}^p、ν_{it} 分别表示灌溉、发电、输出水量的效益函数；α_i、δ_i、ϕ_i、γ_i^E、γ_i^F 分别表示水库、电站、灌区、输出水量工程及调水工程的费用函数。各项效益函数及费用函数有关的决策变量所采用的标识符所代表的意义与前面在约束方程中所代表的含义相同。上式中 i 表示计算结点的序号，t 为计算时段的序号。

地区性经济效益按下式计算：

$$RNB_j = RB_j - RC_j$$

式中：RNB_j 表示第 j 地区的净效益。科罗拉多流域规划中经分析认为地区经济主要通过灌溉来反映。据此，可将地区毛收益 RB_j 及费用 RC_j 分别表达为

$$RB_j = \sum_i \beta_{ij}^{IR}(I_i)$$

$$RC_j = \sum_i \phi_{ij}^{R}(L_i)$$

式中：β_{ij}^{IR} 表示节点 i 地区 j 的灌溉效益函数；ϕ_{ij}^{R} 表示节点 i 地区 j 的有关灌区费用函数。

必须指出，根据混合整数规划筛选模型线性化处理的要求，对于目标函数中的各项效益和费用函数，凡属于非线性函数者，应分别进行拟线性表达。鉴于上述各项效益、费用函数均为一元函数，对于一元非线性函数通常可采用分段线性化近似表达。

在规划研究中，还采用过地区间水量分配权益来代替地区性经济效益的目标。可以将地区 j（$j=1$，2，…，p 为地区总数）的引用水量 W_j 表达为

$$W_j = \sum_t \sum_{i \in R_j} (I_{it} + E_{it})$$

式中：R_j 表示与地区 j 有关的计算节点的集合；I_{it}、E_{it} 意义与前述相同，它们分别代表灌溉引水量和输出外流域的水量。

记 $\bar{W}$ 代表各地区平均引用水量，有

$$\bar{W} = \frac{1}{p}\sum_{j=1}^{p} W_j$$

然后可以把各地区配水权益的目标作如下表达：

$$\min Z_d = \sum_{j=1}^{p} |W_j - \bar{W}| \tag{6-22}$$

式中：Z_d 等于各地区引用水量 W_j 与平均引用水量 $\bar{W}$ 的离差绝对值之和。Z_d 愈小表示各地区间的水量分配更趋于合理；或是说，各地区的用水权益得到相对合理的照顾。

（四）流域规划筛选模型的解算

以上讨论了流域规划筛选模型的目标函数和约束条件的表达式，规划中必须计及国家目标和地区性开发目标，因此是一个多目标规划问题。下面进一步介绍对于这一多目标规划向量优化问题如何用标量化优化的基本方法：权重法和约束法来寻求其非劣解集。

1. 权重法

根据对国家经济目标和各地区经济目标相对重要性的分析和判断，分别赋予不同的权重系数，从而可得到标量化优化问题的如下模型表达式

$$\max Z(\bar{x}) = \lambda_n NB(\bar{x}) + \sum_{j=1}^{p} \lambda_j [RNB_j(\bar{x})]$$

$$\lambda_n, \lambda_j \geqslant 0 \qquad (j = 1, 2, \cdots, p)$$

$$\bar{x} \in X$$

式中：NB、RNB_j 分别代表国家和地区 j 的净效益的现值；λ_n 为国家净效益的权重系数；λ_j（$j=1$，2，…，p）代表地区 j 净效益的权重系数；$\bar{x}$ 是规划模型决策向量；X 表示该模型决策向量的可行解集，该集反映规划问题的所有约束条件所形成的决策空间的可行域。

由上节介绍的多目标规划问题的非劣解集生成技术的知识可知，对于上述权重 法的规

划模型，可以通过各权重系数的摄动而得到一系列的非劣解。

在前面关于目标函数和约束条件表达式的讨论中已经提及，目标函数和约束式中所涉及的非线性函数必须通过拟线性表达，从而得出线性化的规划模型。筛选模型中含有连续型决策变量和0—1型决策变量，因此必须采用运筹学课程中介绍的混合整数规划的方法进行解算。

2. 约束法

假如以国家净效益和地区用水分配权益作为流域规划目标，并将国家净效益的水平值作为一种目标约束条件，那么可以将多目标规划向量优化问题转化为约束法的标量优化问题。

前面已经介绍过可以用式(6-22)来反映地区用水权益的目标。该表达式中的绝对值项属于非线性的性质，可以通过对该式的如下替换转化为线性表达式，即

$$\min Z_d = \sum_{j=1}^{p}(G_j + T_j)$$

$$W_j - \overline{W} = G_j - T_j \qquad (j = 1,2,\cdots,p)$$

$$G_j, T_j, W_j, \overline{W} \geqslant 0 \qquad (j = 1,2,\cdots,p)$$

在理解上式代换式时，必须首先注意到引入的替换变量G_j、T_j的取值是非负的。其次是对用水量离差值的替代式$W_j-\overline{W}=G_j-T_j$必须联系目标函数式的性质，进行G_j、T_j的取值分析。先看$W_j-\overline{W}$为正值的情形，这时必然存在$G_j>T_j$，并存在G_j、T_j的多种取值组合使$G_j-T_j=W_j-\overline{W}$。从目标函数极小化的要求看，显然符合目标要求的取值应为$T_j=0$，$G_j=W_j-\overline{W}$。同理，当$W_j-\overline{W}$为负值时的取值应为$G_j=0$，以及$W_j-\overline{W}=-T_j$。综合上述分析可见，引入的替换变量G_j、T_j的取值必有其中之一为0。

通过对目标函数式的线性表达后，可将多目标规划约束法的模型作如下表达：

$$\min Z_d^{(x)} = \sum_{j=1}^{p}(G_j + T_j)$$

$$W_j - \overline{W} = G_j - T_j$$

$$W_j, \overline{W}, G_j, T_j \geqslant 0$$

$$\overline{x} \in X$$

$$NB(\overline{x}) \geqslant Z_l$$

式中：Z_l表示国家净效益的设定水平值。约束条件$\overline{x}\in X$与权重法模型一样，表示决策向量必须服从前面讨论过的约束式(6-11)～(6-21)的约束。

约束法模型仍然是一个混合整数规划问题，通过摄动国家净效益的水平值Z_l，可求得各设定水平值相对应的非劣解。表6-3列出了上述规划问题用约束法生成的非劣解的解算成果。图6-4是根据该表成果点绘出的非劣解集的图形。非劣解的点

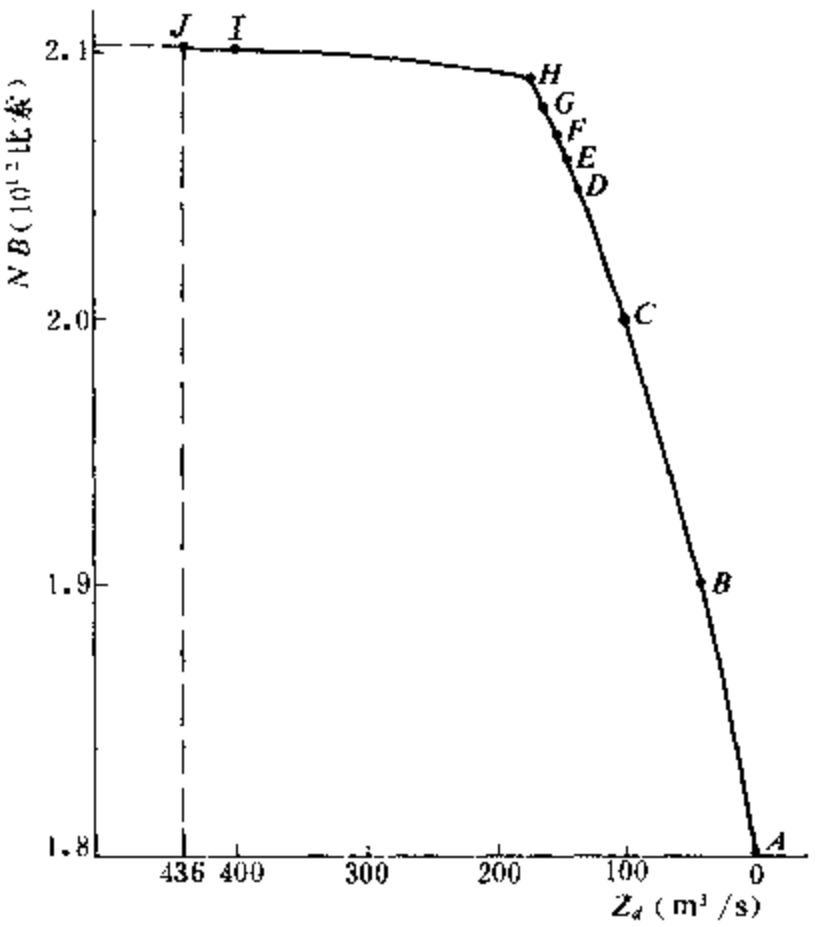

图 6-4　非劣解集简图

表 6-3　　约束法生成非劣解集的计算成果

$NB=Z_i$(10^{12}比索)	1.8	1.9	2.0	2.05	2.06	2.07	2.08	2.09	2.10	2.10005
Z_d (m^3/s)	0	41	102.1	136.6	143.6	150.6	157.7	168.0	397.7	436
非劣解点据	*A*	*B*	*C*	*D*	*E*	*F*	*G*	*H*	*I*	*J*

据 A、B、C、D、E、F、G、H、I、J 的联线也可看成是国家净效益转换曲线。该线表明为了照顾地区的用水权益（即目标函数值 Z_d 减小），必须以牺牲部分的国家净效益为代价。

由筛选模型得出的非劣解集的成果，可进一步分析和权衡各个非劣解所获得的国家净效益及地区用水权益目标值的差异和得失。从图 6-4 的非劣解集曲线的变化趋势可见，H 点左边的曲线比较平缓，表明牺牲较小的国家净效益，可换取较明显的地区用水分配目标的改善；与此相反，H 点右边曲线的趋势表明必须牺牲较大的国家净效益来换取地区用水分配目标的改善。必须根据决策者的效用观念，权衡利弊，最终选出可被接受的满意解。例如可能选择 H 点及其附近的几个非劣解作为初选方案，供规划中作进一步分析论证。

三、筛选方案的模拟分析

前面曾经提到，筛选模型是流域规划阶段性系列模型中的一个模型，它所研究的问题是水资源系统的工程点及其规模未定，以及供水、供电的对象及用水水平未定的条件下，从众多可能的组合方案中找出工程点、规模和用水水平的最优组合方案。为减轻解算筛选模型的计算量，在前面所介绍的模型中对系统的径流输入条件作了这样的简化，即采用多年平均季水量所构成平稳径流系列代替具有年内、年际变化的径流系列，并用多年平均的径流条件考察水资源系统正常运行情况下的性能指标（包括技术经济指标），据此判断规划方案的相对优劣。显然在上述正常运行条件下，正常供水、供电等方面的要求，理所当然地都必须得到满足。

鉴于水资源系统具有随机属性，在评价筛选模型初选的规划方案时，还必须根据该系统径流变化的随机性的特点，进一步考察规划方案规定的用水水平相应的风险。规划方案供水风险分析的通常作法是采用实测径流系列，对规划方案进行长系列模拟运行分析，以考查在不利的水文条件下可能出现供水、供电不足而带来的经济损失及其相应的破坏概率。

可以建立规划流域水资源系统的模拟模型，并借助于电子计算机来执行规划方案的模拟运行分析。模拟模型可作为继筛选模型之后的另一个阶段性的规划模型。模拟模型可以采用与筛选模型基本上相同的目标函数和约束条件的表达式。它与筛选模型的主要区别首先表现在筛选模型必须引入 0—1 整型变量反映未确定的工程组合，而模拟运行分析是针对初选方案，即其分析对象乃是确定的工程组合，从而不再出现 0—1 变量。二种模型的另一区别在于模拟模型必须考虑以实测径流系列为系统输入的全面运行情况，为此必须以预先制定的泄放水规则为依据来指导水资源系统的模拟运行计算。例如对于水库可以采用简化运行策略为指示；对于上下游河段分布有多个取水口的情况，还应该制定各取水口水量分配的规则等等。有关模拟计算的原理和方法，可参阅第五章第四节，这里不作赘述。

对初选方案长系列模拟运行计算的结果，可以核定多年平均的效益指标，还可以从多

年运行分析中求得正常供水、供电的保证率，对初选方案作出更全面的评价。基于这种运行分析，有时还有可能提出对初选方案进行适当的局部调整或修改的建议。在同时存在几个初选方案的情况下，模拟运行分析的结果，无疑地将有助于决策者作出最终选定方案的决择。

第五节　开发程序模型

水资源开发是一个逐步实施的过程。在这个过程中，流域内各部门的用水要求随着国民经济的发展而逐步增长；与此相适应，水资源工程必须逐步建成投入以满足日益增长的用水要求。系统组成要素随过程而发展变化的特点表明，水资源系统具有动态系统的属性。鉴于水资源系统规划的复杂性，前面提及的阶段性系列规划模型的构想，实际上是将这一动态系统的规划问题分解为二种不同性质的问题。筛选模型和模拟模型所研究的问题属于准静态问题。这类问题将规划远景的设计水平年作为经济分析的基准年，设该年初规划方案的组成工程已全面投入，并以该时刻为计算期的起点，分别计算各规划方案全面投入后的运行效益，借此论证不同规划方案的优劣。

开发程序模型是配合上述静态问题而提出的一种动态模型。对于筛选模型和模拟模型解算和论证选定的规划方案，还必须进行规划工程投建安排的分析。开发程序模型的任务在于对选定的规划方案求出工程分期投建的最优排序。以规划方案开始实施的时间为起点，以规划方案全面建成的远景为终点，所形成的水资源系统的开发过渡期是开发程序模型的分析计算期。必须根据这一时期内流域综合利用需求的逐步增长过程，寻求一种适应需求的最佳开发程序。下面通过两类最常见的开发程序模型，整数规划模型和动态规划模型，说明建立此类问题的数学模型的原理和算法。

一、整数规划法开发程序模型

由前述开发程序问题的特点可知，建立开发程序模型的目的是针对已选出的流域规划的总体方案，寻求规划中的待建工程的最优的分期修建计划。可以根据待建工程所需施工期的长短，并适当结合国民经济发展计划的阶段性，将达到远景开发水平的开发期划分为 m 个阶段，记阶段序号为 $j=1, 2, \cdots, m$。假设每一工程均可在一个阶段内建成，并且每一阶段只投入一个工程。记规划方案中待建工程项目的序号为 $i=1, 2, \cdots, n$。引入 0—1 变量 x_{ij} 以反映工程项目的修建情况，规定

$$x_{ij}=\begin{cases}1, \text{如果第 } j \text{ 阶段第 } i \text{ 项工程投入}\\ 0, \text{如果第 } j \text{ 阶段第 } i \text{ 项工程不投入}\end{cases}$$

以开发过渡期第一年为基准年，并将模型中的所有效益和费用项均折算为过渡期第一年初的现值。记 β_{ij} 表示工程 i 在第 j 阶段投入运行后在过渡期运行效益的现值；α_{ij} 表示工程 i 在第 j 阶段初建成的基建和运行费用总和的现值。

假设以可提供的建设资金作为安排工程投建次序的约束条件，以净效益最大为优选准则，将目标函数表达为

$$\max \sum_{j=1}^{m} \sum_{i=1}^{n} (\beta_{ij} - \alpha_{ij}) x_{ij} \tag{6-23}$$

必须满足的资金约束条件为

$$\sum_{j=1}^{m} \sum_{i=1}^{n} C_i x_{ij} \leqslant B_j \qquad j = 1,2,\cdots,m \tag{6-24}$$

式中：C_i 表示工程 i 的基建投资；B_j 表示至第 j 阶段之前可能筹集的总资金。鉴于每项工程只修建一次，因此必须限定

$$\sum_{j=1}^{m} x_{ij} \leqslant 1 \qquad (i = 1,2,\cdots,n) \tag{6-25}$$

上述目标函数式（6-23）和约束条件式（6-24）、式（6-25）构成流域规划开发程序模型的数学表达式。变量 x_{ij} 是待定的决策变量，由于这些变量均为 0—1 变量，因此该模型属于一种 0—1 整数规划问题。对此问题求出的解 x_{ij}（$i=1$，2，…，n；$j=1$，2，…，m）反映水资源系统规划方案的最优开发程序。

仔细分析上述模型可以看出，该模型由于工程规模已给定，对于任一工程 i，任何时段 j 的效益项 β_{ij} 都可以预先算出，并认为它们与决策无关。这实际上是只反映各项工程孤立运行的情况，而未计及联合运行条件下工程投建排序不同对工程效益的影响。例如上游水库或引水工程投入的先后，将影响着下游水库的运行效益。为克服这一缺陷，可提出如下的构想。配合上述 0—1 整数规划模型解算中对决策变量 x_{ij} 的取值组合，加入对面临工程组合条件下，计入联合运行效益的具体计算。以计入上、下游水库联合运行条件下的水量联系情况为例，下游水库的入库水量应为上游水库 i 的下泄水量与区间径流量之和。上游水库的下泄水量可根据水量平衡方程推求：

$$S_{i,t+1} = S_{it} + Q_{it} - r_{it}$$

式中：S_{it} 表示 t 时段初水库 i 的蓄水量；Q_{it} 表示水库 i 的 t 时段入库水量；r_{it} 表示水库 i 第 t 时段的下泄水量。为反映该计算时段水库 i 是否已投入运行，可增加如下的约束式：

$$S_{it} \leqslant K_i \sum_{j=1}^{j} x_{ij} \qquad \forall\, t$$

式中：K_i 表示规划中已确定的 i 库的水库容积的规模；$\sum x_{ij}$ 反映水库 i 是否投入运行，当它为 1 时表示 i 库已投入，当它为 0 时表示 i 库未修建。显然，在 i 库未修建的情况下，S_{it}、$S_{i,t+1}$ 的值必为 0，由上述水量平衡方程可以看出，此时必有 $r_{it}=Q_{it}$。这反映不存在水库 i 的运行条件。

以上模型中效益计算所涉及的水文条件，为了简化，可以沿用筛选模型的处理方法，采用多年平均的季径流量作为水资源系统的平稳径流输入。

二、动态规划法开发程序模型

这里结合一个假拟算例来说明如何用动态规划法确定流域规划方案相应的最优开发程序。该实例的规划方案由 4 项工程组成。指定工程的编号分别为 $i=1$，2，3，4。表 6-4 列出各单项工程的基建费用 C_i 及相应的供给能力 y_i。设该系统的需求随时间的变化呈线性增长。设规划开发期开始时刻 $t=0$ 的需求可由该流域原有的水资源工程设施满足，并将这一需求取为相对零值，即 $D_0=0$，从而可将开发期需求线性增长的情况表达为

表 6-4　单项工程建设费用及供给能力

工程编号 i	工程费用 C_i	供给能力 y_i
1	20	10
2	35	20
3	40	30
4	50	40

$$D_t = kt \tag{6-26}$$

式中 k 为反映需求增长率的系数，算例取 $k=4$。

以满足日益增长的需求为前提，对于上述规划方案寻求一种最优的开发程序。由于不论那一种开发程序都是以满足需求为前提，据此可以简单地认为它们具有等效益的性质，在排序方案比较中可略去毛效益项。另一个简化条件是认为各项水资源工程的运行维修费相对较小，考虑排序方案时予以忽略。据此可以用工程建设费用现值最小代替国民经济净效益最大作为优选最优开发程序的准则。

本例的开发期为 25 年，开发期末远景需求为 $D_t=4\times25=100$。表 6-4 所示规划方案 4 项工程的总供给能力为 100，即规划方案的总供给能力恰好满足远景的需求。图 6-5 表示一种开发程序的示意图。图中表示 $i=3$ 的工程为第一期投入运行的工程，根据表 6-4 可知该工程的供给能力为 $y_3=30$。按需求逐年增长情况，该工程的供给能力只能适应 $t=7.5$ 年时的需求，因此应在 $t=7.5$ 年使编号为 4 的工程投入运行。同理类推，可以逐一确定后续投产的其它二项工程的投产时间。显然，图 6-5 所示的工程排序只是多种排序方案中的一种方案，开发程序数学模型的任务是寻求一种总费用最小的优化开发程序。

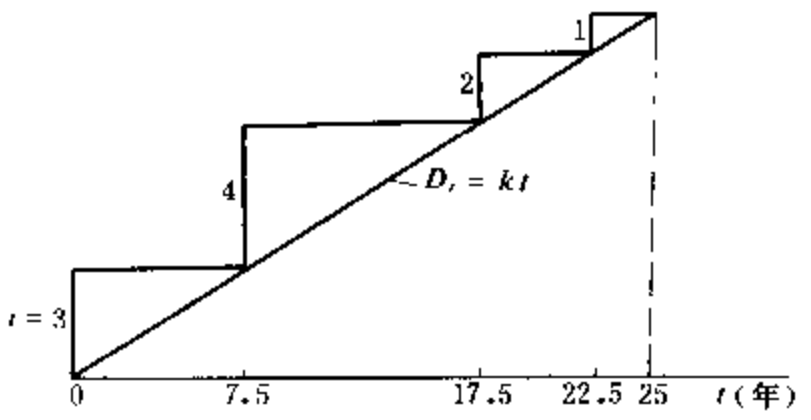

图 6-5　工程投入排序示意图

表 6-5 是对所研究实例采用动态规划法寻求最优开发程序的计算成果。借助于此算例来介绍模型的表达式及其解算方法。

本例假设规划方案的 4 项工程将逐一投入，按各项工程的供给能力满足逐年增长需求的适应情况，将整个过渡期划分为 4 个阶段，并取阶段序号为 $n=1, 2, 3, 4$。每个阶段末系统的需求等于已投产工程的总供给能力。

记 x_n 为第 n 阶段已投产的工程项目的组成，各阶段已投产工程的组成情况可按下列公式表达：

$$\begin{cases} x_1 = i, & \text{对所有 } i = 1,2,3,4 \\ x_n = x_{n-1} + i, & \text{对于所有 } i \text{ 不属于 } x_{n-1} \end{cases}$$

由表 6-5 工程组合栏可以看出各阶段的工程组成情况及上述表达式的含义。例如对于 $n=1$ 阶段，可投入 $i=1, 2, 3, 4$ 中的任一项工程，因此反映投入工程组成情况的标识符 x_1 可取工程编号 i 的任一值。对于 $n=2$ 的阶段，由表中可见，工程组成情况 x_2 含有 6 种组合。当 $x_1=1$ 时，$x_2=x_1+i$ 的表达式的含义为由工程组成 $x_1=1$ 与其它 $i\neq1$ 的任何一项工程构成的各种可能组合。x_2 的 6 种组合分别由二项不同的工程项目组成，对应于每一种组合，存在二种不同的排列。同理，当 $n=3$ 时，$x_3=x_2+i$ 具有 4 种不同的组合。例如当 x_2 由编号

表 6-5　　开发程序计算成果表

阶段序号 n	工程组合 x_n	最小费用 $f_n(x_n)$	优化排序 x_n^*	供给能力 $y(x_n)$	供给等于需求的时刻 $t(x_n)$(年)
1	1	20	1	10	2.5
	2	35	2	20	5.0
	3	40	3	30	7.5
	4	50	4	40	10.0
2	1,2	50.7	2,1	30	7.5
	1,3	53.9	3,1	40	10.0
	1,4	62.3	4,1	50	12.5
	2,3	64.3	3,2	50	12.5
	2,4	71.5	4,2	60	15.0
	3,4	74.7	3,4	70	17.5
3	1,2,3	75.2	3,2,1	60	15.0
	1,2,4	81.1	4,2,1	70	17.5
	1,3,4	83.2	3,4,1	80	20.0
	2,3,4	89.6	3,4,2	90	22.5
4	1,2,3,4	96.3	3,4,2,1	100	25.0

为 1，2 的二项工程组成时，i 可取不等于 1 或 2 的工程编号，以构成 x_3 的工程组合。

又记 $D[t(x_n)]$ 表示 $t(x_n)$ 时刻的需求，其中 $t(x_n)$ 表示当第 n 阶段工程组成为 x_n 相对应的阶段末的时刻。与此相应将式（6-26）改写为

$$D[t(x_n)] = kt(x_n)$$

k 的含义与式（6-26）相同。用上式可求出需求与 x_n 的供给能力相等的时刻：

$$t(x_n) = D[t(x_n)]/k$$

根据动态规划原理，对于上述开发程序优化问题，可写出寻优演算的逐阶段递推式：

$$\begin{cases} f_1(x_1) = C_i \qquad \forall\ x_1 \\ f_n(x_n) = \min\limits_{i \in I_n}[C_i e^{-rt(x_n - i)} + f_{n-1}(x_n - i)] \quad \forall\ x_n \\ (n = 2,3,\cdots,J) \end{cases}$$

上式中所涉及的工程组合 x_n 的表达式为

$$\begin{cases} x_1 = i, \qquad \forall\ i \\ x_n = x_{n-1} + i \text{ 或 } x_{n-1} = x_n - i, \qquad i \notin x_{n-1} \\ (n = 2,3,\cdots,J) \end{cases}$$

式中：C_i 为单项工程 i 的费用；$f_n(\cdot)$ 是第 1 阶段开始至第 n 阶段的投入工程的累计费用函数，费用项均折算为第一阶段初始时刻的现值；e 为自然对数的底；r 为利息率，或称贴现率，算例中取 $r=0.0488$。贴现因素采用如下近似式计算：

$$\frac{1}{(1+r)^{t(x_n - i)}} \approx e^{-rt(x_n - i)}$$

递推式中 J 表示过渡期的阶段总数，算例中 $J=4$；I_n 表示第 n 阶段已投入工程的组合 $x_n = x_{n-1} + i$ 的关系式中工程编号 i 取值的可行集合。

对于本算例，按上述动态规划递推式进行逐阶段递推演算的情况，可作如下简要介绍。

当 $n=1$ 时，x_1 含有 4 种单项工程的不同投入方式。按递推式 $f_1(x_1)=C_i$，可将表6-4单项工程费用 C_i 转载入表 6-5 的费用函数栏。这里设工程基建投资均在该阶段初始时刻投入，不必进行折现计算。

当 $n=2$ 时，由表 6-5 可见 x_2 有 6 种工程组合；每种组合本身都存在二种不同的投入次序的排列。例如对于由编号 1 和 2 的单项工程共同组成的 x_2 的一种组合，可区分为先 1 后 2，或先 2 后 1 二种排列。对于该组合可按下列计算寻求其相应的一种最优排列，即

$$f_2(x_2=\{1,2\})=\min\begin{cases}C_2e^{\quad\quad}+f_1(x_1=1)=50.98\\ C_1e^{\quad\quad}+f_2(x_1=2)=50.67\approx 50.7\end{cases}$$

式中：$f_1(x_1)$ 的值可取自第 1 阶段的计算成果。对于本阶段 $n=2$ 初投入的单项工程的费用 C_i（$i=1$ 或 2），必须进行折现计算转换为现值。上述计算的结果可选出二种排列中费用最小的排列为，先投入工程 2，后投入工程 1。即相应于 $x_2=\{1,2\}$ 的工程组合的最优排序为先 2 后 1，其结果载入表 6-5 的优化排序 x^* 栏。同理，对于 x_2 的其它 5 种组合均必须执行与上述相同的寻优计算，分别得出各自对应的最优排序 x_2^*，并将各种组合的费用列入表 6-5。

当 $n=3$ 时，x_3 有 4 种组合，以其中的一种组合 $x_3=\{1,2,3\}$ 为例，说明对该组合寻求其最优排列的计算情况。由于

$$x_3=x_2+i,\quad i\notin x_2$$

对于 x_2 含有的任何一种组合，通过第 2 阶段的计算都已选出其相应的最优排序 x_2^*，因此 $x_3=\{1,2,3\}$ 仅存在如下三种排序，即

$$x_3=\begin{cases}x_2=\{1,2\}+3\\ x_2=\{1,3\}+2\\ x_2=\{2,3\}+1\end{cases}$$

式中：$x_2=\{1,2\}$，$x_2=\{1,3\}$ 和 $x_2=\{2,3\}$ 的优化排序已由第 2 阶段计算得出。对于上述三种排序，可通过如下计算选优：

$$f_3(x_3=\{1,2,3\})=\min\begin{cases}C_3e^{\quad\quad}+f_2(x_2=\{1,2\})=78.44\\ C_2e^{\quad\quad}+f_2(x_2=\{1,3\})=75.39\\ C_1e^{\quad\quad}+f_2(x_2=\{2,3\})=75.17\approx 75.2\end{cases}$$

由计算结果可见，对应于 $x_3=\{1,2,3\}$ 的优化排序的工程编号的排列为 3，2，1。

同理，对于 x_3 的其它三种组合进行相同的分析计算，求出各种组合相应的优化排序和最小折现费用，其成果列入表 6-5 的对应栏。

最后，对于 $n=4$ 的阶段，显然只存在唯一的工程组合，即 $x_4=\{1,2,3,4\}$。以 x_3 的优化排序为基础，由下式

$$x_4=x_3+i,\quad i\notin x_3$$

可知，x_4 具有如下 4 种不同的排序，即

$$x_4=\begin{cases}x_3=\{1,2,3\}+4\\ x_3=\{1,2,4\}+3\\ x_3=\{1,3,4\}+2\\ x_3=\{2,3,4\}+1\end{cases}$$

通过下列计算可从这 4 种排序中选出最优排序：

$$f_4(x_4=\{1,2,3,4\})=\min\begin{cases}C_1e^{\quad}+f_3(x_3=\{1,2,3\})=99.25\\ C_3e^{-\quad}+f_3(x_3=\{1,2,4\})=98.13\\ C_2e^{-\quad}+f_3(x_3=\{1,3,4\})=96.39\\ C_1e^{-\quad}+f_3(x_3=\{2,3,4\})=96.27\approx 96.3\end{cases}$$

上述结果出现费用最小的优化排序的工程代号的排列为 3，4，2，1。至此已求出选定规划方案相应的最优开发程序，它包括组成工程项目的投入次序及投入时间。

第七章　水资源规划中的不确定性及风险分析

第一节　概　　述

本章的主要目的是论证在水资源规划中考虑不确定性及风险分析，以及其他与“概率”有关问题的必要性及可能性。同时，也将说明某些基本的考虑方法和存在的问题。

工程项目在水资源规划中常常处于一种“未来实现”的状态，也就是在规划中要用这些工程项目满足未来的（也就是不能完全肯定的）某种需要，其中包括对水资源、对土地资源的需要；而水与土地资源本身就有不确定的因素。关于不确定的考虑业已获得越来越多的重视，这是因为：①人们已经察觉到预见的结果与实际出现的结果是有差别的；②水土资源越来越变得极其珍贵，从而在使用中更要精打细算，而不是宽打窄用，于是更多的不确定因素显示出其不可忽视的意义；③在征求意见及项目审查过程中，有关不确定性方面的争论已经明显地出现了。由此可见，水资源规划工作人员应该具备必要的能力去估计不确定性及其在各方面的渗透。其中最重要的是：决定随机事件出现的概率，以及判断这种事件出现（或不出现）所带来的风险性后果。

关于什么是风险性后果的问题，以下将会具体介绍。现在先通过某些例子了解其一般意义。例如，从比较直观的意义上可以发现一个水资源工程项目包括建筑结构部分，每一部分投入的施工工作量及资金耗费不可能完全有把握地估计得丝毫不差（确定性、肯定性）。通过增加投资估算可以弥补这种不肯定性。反之，如果增加对工程基础条件、建筑材料、施工供水等各种问题的深入了解，那么为弥补这种不肯定性所带来的资金增值也有可能减少。事实上许多不确定因素在工程项目竣工前是一直存在的，何况某些不确定因素事先根本没有可能察觉，甚至是有严重后果的。再如，在收益—耗费分析中需要明确折减率，工程施工期限，以及年收益及年耗费等资料；其中还包括这些资料随时间变化的情况。水资源规划人员必须经常用他们的判断能力来确定与收益—费用分析或其他经济分析有关的数值。然而，一旦工程竣工，实际来水情况，用户要求，以及影响经济后果的其他因素都有可能与“最可能出现的”或“期望的”数值大相径庭。因此，水资源规划人员可能采用非常保守的方法，选择偏安全的数值，提出一个偏低的收益—耗费比值。要不然，水资源规划人员也可能选一组非常乐观的参数而得出偏高的收益—耗费比值。到底应选择什么参数而得出什么结果，目前最值得推荐的方法是所谓“风险分析法”。通常是把所有影响结果的有关参数或变量都表达为具有某种概率分布的随机变量。同时把结果也以某种概率的形式与之相联系，从而便于规划人员或决策人员加以合理的考虑及采用。例如，某项工程的风险分析得到以下的结果：

有 90%的概率（可能性）使 $B/C>1.0$

有 80%的概率（可能性）使 $B/C>1.5$

有 70%的概率（可能性）使 $B/C>2.5$

人们可以根据不同的出发点或考虑加以选定。对于资金不足或单独依靠一项工程获得收益者，往往不愿冒太大的风险去接受较大的收益；而对于资金雄厚且具有多项工程经营者，则有可能考虑采用风险较大、收益更优的方案。另一方面，如果始终不变地采用较小的出现概率（如一贯采用乐观主义态度，或者采用偏安全的作法），这是极不合理的，因为小概率事件的组合概率可能变得非常非常小。

第二节　关于风险分析的计算

风险分析与随机事件的概率分析有关，但在概念上与概率分析不同。这主要是因为概率分析的基础是客观上存在的随机事件概率分布律（即分布函数）。但风险分析则同时基于随机分布律及不确性因素。后者往往没有明确的分布律或根本没有分布律，甚至还可能包含主观判断的成分。有时，为了参与计算对主观成分赋以某种假设的“主观概率分布函数”。但这仅仅是为了得出一定的数学成果而作出的一种权宜之计。在水文分析计算中有所谓“水文频率计算”的课题，那是根据水文数据（实测或比拟所得）所提供的“样本资料”进行“后验概率”的分析，以便对水文量的随机分布律作出合理的估计。这种方法常用于工程计算，以求出某种“设计值”，作为建筑结构设计的基本数据。在没有提出风险分析概念以前，工程设计的基础常常就单纯依靠水文频率计算，求出一定的、符合设计标准的设计值，（如设计洪峰流量，作为堤防设计或大坝设计的依据）；其中“设计标准”（破坏概率）的确定是一个最关键的问题。

譬如，大坝的设计标准定为：以 0.1%的概率要求大坝的坝前水位不超过设计的安全水位，工程人员经过种种考虑和计算，拟定了一个“设计洪水过程线”，其中某些特征（如洪峰流量）满足设计概率 0.1%。由此而求出的水位（经过调洪演算）便成为水工建筑设计所依据的设计安全水位。但是，事实上，众多的不确定因素（计算条件的简化，资料的不足，各种随机因素的综合作用等等），使大坝的破坏概率未必就一定是设计所要求的 0.1%。那么，人们要问：使大坝发生破坏的风险率（Risk）究竟是多少？这需要通过风险分析（而不是概率分析）去回答这个问题；其中包括不同情况下的计算。

一、设计时段内的风险率

对于一个建筑物，例如大坝的施工围堰，需要有一定的设计高度。因洪水而造成的围堰前挡水位有可能超过设计高度而使围堰过水，致使围堰内被保护的施工场地遭受损失。为此，围堰的设计者需要按一定的设计标准来确定设计洪水，并在一定的风险意义上接受围堰过水的可能性及遭致的经济损失。这时，风险率的大小主要取决于两个因素：一是设计洪水的超过概率，即每一年天然洪水等于及大于设计洪水流量的概率，即

$$p = Prob(\xi \geqslant Q_p)$$

其中：Q_p 表示设计洪水流量；ξ 表示天然洪水流量（随机变量）。二是围堰运用的设计时段，或年数 n。因此，根据各年洪水流量（随机变量）独立同分布的假定，在 n 年内出现一次及一次以上洪水流量超过设计值的概率应为

$$1 - (1 - p)^n$$

这就是建筑物设计期内的风险率；若用重现期（T）表示，则设计期（n）内的风险率应为

$$Risk(Q > Q_p) = 1 \quad \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n$$

例如，设计洪水流量（Q_p）的重现期为10年，即设计概率等于 $p=1/10=0.1$，则在5年内围堰进水的可能性（风险率）$Risk=0.41$；如果设计期长达10年，风险率将增大至0.65。由此可见，围堰进水的风险率随设计期之增长而增大。设计者必需按此权衡得失，采用可接受的风险率及相应的围堰设计洪水标准。

二、以组合概率为基础的风险率计算

如果有两个以上的随机变量，各自的概率分布函数已知，而且组成另外一个最终函数的数学表达式也已知，即

$$F(x_1) = Prob(\xi_1 \leqslant x_1)$$

$$F(x_2) = Prob(\xi_2 \leqslant x_2)$$

$$\cdots$$

$$F(x_n) = Prob(\xi_n \leqslant x_n)$$

而且，已知

$$y = f(x_1, x_2, \cdots, x_n)$$

那么，对最终函数（η）的风险分布是可以通过理论上的概率组合计算或者统计实验方法（Monte Carlo 法）求出来的。人们可以根据这一成果选定可以接受的风险率及相应的设计参数 x_1，x_2，…，x_n 及其组合效应 $y=f(x_1, x_2, \cdots, x_n)$。

现以最简单的三角形分布为例，说明这种计算。假设某项工程的耗费（C）及收益（B）各具有三个特征值，即最大，最小及最有可能的 C_{max}，C_{min}，C_{mode}；B_{max}，B_{min}，B_{mode}。为表达方便，分别统称为 a，c，b，且具有图7-1所示的三角形概率密度分布函数。显然，这种分布的数学表达式为

$$f(x) = \begin{cases} \dfrac{2(x-a)}{(b-a)(c-a)}, & \text{当 } a \leqslant x \leqslant b \\ \dfrac{2(C-x)}{(c-b)(c-a)}, & \text{当 } b \leqslant x \leqslant c \\ 0 & \text{其他区间} \end{cases}$$

相应的概率分布函数的数学表达式为

$$F(x) = \int_0^x f(x)dx$$

$$= \begin{cases} \dfrac{(x-a)^2}{(b-a)(c-a)}, & \text{当 } a \leqslant x \leqslant b \\ \dfrac{b-a}{c-a} + \dfrac{(c-b)^2 + (c-x)^2}{(c-b)(c-a)}, & \text{当 } b \leqslant x \leqslant c \end{cases}$$

因此，对于收益与耗费比值（B/C）或净收益（$B-C$）就必然构成相应组合（$y=B-C$，或 $y=B/C$）的概率分布函数；在理论上是可以推求出这个风险分布函数的；如果数学推导有困难，也可以把自变量分布作为模拟模型，采用统计实验方法把最终的组合函数（B/C 或

$B-C$）及其相应的风险率求出来。这种方法当然要借助于均匀分布、随机数的产生（随机数表，或计算机上的子程序）及大量的数字计算来完成。

对于十分复杂的风险分析计算，假定原始概率分布或作简单模型化处理，可能会失之过简。这时，从头到尾都使用模拟模型的概念，进行统计实验，这是解决工程问题的通用良方。我国三峡工程重点科研“七五”攻关项目中，关于长江防洪系统防洪效益的风险分析就是采用的这种方法，把诸多不确定性因素，特别是水文不确定因素对防洪设计标准的影响一一加以考虑，最后求出设计方案下防洪效益及相应标准的风险率(及其互补数值——可靠率)，供决策部门选用。

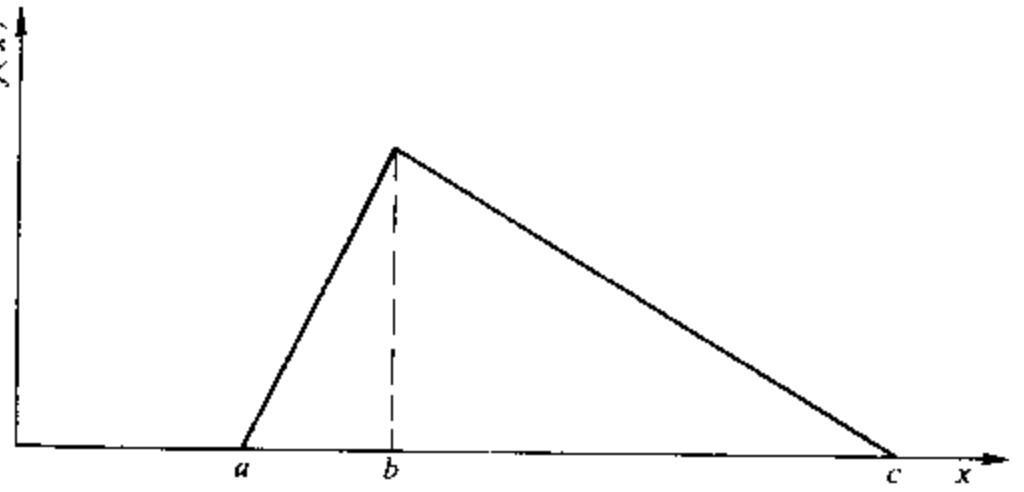

图 7-1　三角形概率密度分布

第三节　考虑不确定性和风险分析的必要性及存在的问题

不确定性是客观事物在主观认识过程中必然存在的现象。前者反映事物内部中必然存在的随机性及模糊性（关于这两个概念的定义，请读者在有关书籍中查实)；后者反映主观认识的偏差，或者是由于资料不足、不确所引起的；或者是由于感官能力的局限所致；总体效果是主观与客观的差异，不过，前者常可用一定的办法估计甚至确定其随机分布规律(如分布函数、随机过程函数等)；但后者常难以用一定的数学方法定出它的分布律。同时不论前者还是后者，用某种数学模型来概括其不确定性时，本身又带来了新的不确定因素。

由此可见，不确定性问题是无所不在的，问题是它在一个具体问题中是否举足轻重。例如日常生活上的琐事，本身的变化及人们对此估计的偏差不会有多么重大的影响，也可以顺其自然而略加调整便可化凶为吉。这时，不必大动干戈或兴师动众地去研究什么“风险率”问题，否则就可能变成一种画蛇添足的多余之赘。然而，对于牵动亿万财富或危及人民生命安全的某些重大事项，不确定的存在就必然要求工程人员或规划人员认真考虑，作出风险估计，以便作为决策之依据；否则就可能失之主观片面，因想当然而蒙受巨大损失。当然，风险分析或不确定性的定量估算，并不能防止风险的出现，但可以在追加投资与承受风险之间作出权衡与决策。这是一种科学决策的表现。因此，对于一项重大的规划或工程项目，应该充分认识各种不确定性的内涵，一一加以罗列，择其影响重大或效应敏感者加以分析及综合，这是十分必要的。

应该指出，认识到这一必要性是一回事，具体采用什么手段进行风险分析又是一回事。聪明的规划人员要看到这个现实，即目前风险分析方法甚至基本原则都不一致，因此在具体项目的工作中要更多使用独立思考的根本方针。

参 考 文 献

1 华士乾主编. 水资源系统分析指南. 北京：水利电力出版社，1988

2 水利电力部水利水电规划设计院，长江流域规划办公室 主编. 水利动能设计手册，防洪分册. 北京：水利电力出版社，1988

3 吴恒安主编. 实用水利经济学. 北京：水利电力出版社，1988

4 James J D and Lee R R. Economics of Water Resources Planning. McGraw-Hill，1971

5 Thampapillai D J and Musgrave W F. A Review of Structural and Nonstructural Measures and Alternative Decision Frameworks. Water Resources Research . 1985. 21 (4)

6 Windsor J S. A Programming Model for the Design of Multireservoir Flood Control Systems. Water Resources Research. 1975. 11 (1)

7 陈惠源等. 水电站系统径流补偿调节优化模型. 水电能源科学，1988. (2)

8 裘杏莲，陈惠源. 大型水电系统动能指标优化计算聚合库偶动态规划法. 水力发电学报，1989. (3)

9 万永华. 梯级水电站设计参数选择的数学模型 . 武汉水利电力学院学报，1986. (2)

10 万永华，汪同庆 . 水电站群装机容量的优化分配. 水电能源科学，1986. (1)

11 Turgeon A. A Decomposition Method for the Long-Term Scheduling of Reservoir in Series. Water Resources Research. 1981. 17 (6)

12 中国水利区划编写组. 中国水利区划. 北京：水利电力出版社，1989

13 水利电力部水文局. 中国水资源评价. 北京：水利电力出版社，1987

14 西北农学院，华北水利水电学院. 地下水利用. 北京：水利电力出版社，1984

15 马文正，袁宏源. 水资源系统模拟技术. 北京：水利电力出版社，1987

16 冯尚友. 多目标决策理论方法与应用. 武汉：华中理工大学出版社，1990

17 姚汝祥等译. 水资源系统规划与分析. 北京：水利电力出版社，1988

18 Maass A et al. Design of Water-Resources Systems. Harvard University Press，1962

19 Major D C and Lenton R L. Applied Water Resource Systems Planning. Prentice-Hall，1979

20 Cohon J L and Marks D H. Multiobjective Screening Models and Water Resource Investment，Water Resources Research，1973. 9 (6)

21 Goodman A S. Principles of Water Resources Planning. Prentice-Hall，1984