



马文正 袁宏源 编

水资源系统模拟技术



Xiandai keji
congshu



PDG

21646/11

内 容 提 要

本书包括模拟技术概述、确定性水资源模拟技术、随机性水资源模拟技术、模拟技术中的优选方法和实例等五节。本书首先叙述了水资源系统模拟技术的一般概念及其与数学规划方法的对比，然后介绍了水资源系统模拟的主要内容和方法，并扼要讲述了随机水文资料的生成方法和模拟方案的优选途径及技术，最后给出一个地面水与地下水联合运用模拟系统的实例，使模拟技术的内容进一步具体化。

序

水是人类生存和社会生产必不可少的物质资源。水利工作的基本任务是除水害、兴水利，开发、利用和保护水资源，为工农业生产和人们的物质、文化生活创造必要的条件。普及水利科学技术知识，让更多的人了解和掌握水利科学技术。也是两个文明建设的内容之一。为此，针对水利战线职工和社会上不同文化程度读者的需要，分层次地编写出版水利科普读物是十分必要的。

为了帮助水利科技人员的知识更新，掌握一些现代科技知识，并使水利科技成果更广泛地得到推广应用，尽快地形成生产力；为了使广大农村水利工作人员，掌握一些实用的水利基础知识，并应用于生产实际；为了总结和宣传我国水利建设的伟大成就和悠久历史，介绍水利在四化建设和人民生活等方面的重要作用，激发广大人民群众和青少年热爱祖国江河、关心水利事业，我们组织编写了七套水利科普丛书。包括：《现代科技》丛书、《水利科技成果》丛书、《水利水电施工》丛书、《小水电技术》丛书、《农村水利技术》丛书、《中国水利史》小丛书、《水与人类》丛书。这些科普丛书将由水利电力出版社陆续出版。

编写和审定这些丛书时，力求做到以思想性和科学性为前提。同时注意通俗性、适用性和趣味性。由于我们工作经验不足，书中可能存在某些不妥和错误之处，敬请广大读者给予批评指正。

中国水利学会科普工作委员会

一九八四年七月

水利科普丛书编审委员会名单

主任委员：史梦熊

副主任委员：董其林

委	员：	丁联臻	王万治	史梦熊	田 国
	李文治	酆凤山	杨启声	张宏全	张林祥
	沈坤卿	陈祖安	陈春槐	汪景琦	郑连第
	郭之章	赵珂经	茹 智	陶芳轩	谈国良
	徐曾衍	蒋元勋	曹述互	曹松润	董其林
	颜振元				

(以姓氏笔划为序)

前 言

在水利水电系统的规划、设计、施工及管理运行中，系统分析的各类方法得到了越来越广泛的应用，其中，常用的为数学规划法及模拟技术两大类。

本书主要介绍水资源系统分析中所使用的模拟技术，内容涉及数字计算机模拟模型的建立、运算及优选，并通过实例来说明运用模拟技术的全过程。这本书是在近几年教学实践及科学研究工作的基础上，针对从事基层水利工作技术人员实际需要编写的。亦可作为水利类大学本科及专科学生的参考资料。

本书由武汉水利电力学院马文正、袁宏源编写，由刘肇祜教授审稿。

由于编者水平有限，编写时间仓促，不妥之处，诚请读者批评、指正。

马文正

袁宏源

1984年12月

目 录

序

前 言

第一节 模拟技术概述	1
一、模拟技术的基本内容	1
二、模拟模型	1
三、数字模拟技术	4
四、模拟技术与数学规划的比较	5
第二节 确定性水资源模拟技术	7
一、模拟技术的组成部分	7
二、水资源系统的组成及网络图	7
三、目标函数及决策变量的确定	9
四、水资源模拟模型中的物理关系	10
五、水资源经济模型的建立	13
六、水资源模型的运行规则	17
七、基本资料的输入	19
八、模型的输出	20
九、模拟程序设计	22
十、模拟程序的运行及方案优选	24
第三节 随机性水资源模拟技术	26
一、概述	26
二、水文时间系列的统计特征	28
三、随机数的产生	30
四、独立年径流系列的生成	32
五、单变量自回归模型	37

六、多变量自回归模型	42
第四节 模拟技术中的优选方法	47
一、均匀网格法	48
二、单因子抽样法	49
三、边际分析法(双因子抽样法)	49
四、最陡梯度法	50
五、随机抽样法	53
第五节 实例——地面水与地下水联合运用系统	
模拟	56
一、水资源系统的结构特性及网络图	57
二、水资源系统模拟的数学模型	60
三、水资源系统控制运用规程	63
四、确定决策变量	67
五、输入资料的分析	68
六、模拟程序	70
七、模拟运行	71
八、模拟运行的输出	71
九、成果分析	78
参考文献	83

第一节 模拟技术概述

一、模拟技术的基本内容

模拟技术是常用水资源系统分析方法之一。它与数学规划一样，是系统工程的重要组成部分。模拟技术的基本内容包括如下几个部分：①首先针对真实水资源系统所要研究的目的，将客观系统转换为数学模型，即首先进行水资源系统的模型化，将水资源系统的内在运动规律以若干数学模型来表示，并将这些模型组成一个统一的计算机程序，也称作水资源系统的模拟模型；②利用数字计算机，对上述模拟模型进行有计划有步骤的多次模拟运行，或称模型试验；③通过一定的选优技术，分析每次模拟运行的特性，从而为水资源系统提供优化决策。

二、模拟模型

对于任何一个庞大复杂水资源系统的规划设计研究，都不可能事先做出若干个真实系统供人们进行试验选择，即使是研究现有系统的管理运用问题，也很难在真实系统上进行全面的、方案繁多的试验运行。通过水资源模型研究，往往可以用极少的人力和物力在短时间内完成对真实系统若干年以致几十年运行情况的模仿研究。模拟技术的首要任务就是按照真实系统的特征建立起研究使用的模型，即数学模型。

模拟模型既然用于对真实系统的模仿研究，它首先必须具有足够精度的真实性。建立的数学模型应源于实际，反映客观事物的本质。否则将会产生失真现象。选用已有数学模

型必须有充分的科学依据，确实能够正确反映模拟对象的内在联系和经济规律。模拟在保证一定真实性的前提下，也可以进行适当的简化。通常人们所研究的水资源系统，哪怕是最大的真实系统，都是一种相当复杂的综合体系，它包含与研究目的直接相关的各组成部分和影响因素，同时又包括更多与研究目的不相关或关系微弱的组成部分和影响因素。如果将全部组成部分和全部因素都组织在模型中，模型将会十分庞大，实际上几乎是不可能的。设计模型时必须根据研究目的和客观规律，保留主要部分和主要因素，舍弃非主要部分和因素，达到简化模型，减少模拟工作量的目的。模拟模型还应该操作容易，解算简便。

合理的数学模型还应该具有灵活可靠的控制性能，通过简单的操作程序，可获得不同的模型系统运转情况。设计模拟模型时必须考虑模型是否容易解算，在不降低精度的情况下，尽量采用标准模型，标准模型常常有成功的解算途径可供借鉴。由于实际系统的情况复杂，有时很难简单套用现有的模型，必须建立特有的模型。在新模型的运行过程中，有时会发现求解十分困难，必须暂停模拟运行，对模型进行修改简化，例如减少模型的变量数目；改变变量的性质，将连续变量改为离散变量，或将离散变量改为连续变量；改变变量间的函数关系，例如用线性关系代替非线性关系等。

在水资源系统分析中，根据水资源系统的具体情况和不同的研究目的，可以建立某种特定的模型。已经提出的水资源模型，其种类很多。根据其主要特征，可以进行以下的分类：

（一）静态及动态模型

模拟模型可以按每年的水文及经济条件变化情况分为静

态模型和动态模型。地表水模型常假定影响年径流的水文气象过程逐年不变，或者说，在实际的或预报的流量逐月或逐年随机变化时，径流的概率分布不变，叫做静态的模型。如果年径流量有很强的循环特征，或者在高度都市化以后，流域的汇流条件改变，静态假定就不成立，则应该属于动态模型。

就经济分析而论也可以分为静态模型和动态模型。对于一个给定的经济条件，譬如说，预报2000年或2020年的经济条件，可以构成一个在经济意义上是静态的地表水模型，以便确定和评价各种投资及运行策略。动态经济模型假定经济条件随时间而变，并力图提供有关设计阶段及设计程序的资料。一个相当简单的全流域动态经济模型，其规模相当庞大，即使在最新的计算机上求解也会遇到麻烦。在这种情况下，应从各未来年份的静态模型中选取一些好的抉择方案，以便减少抉择的数量及降低动态经济分析中的详细程度。

（二）确定性及随机模型

水资源模型还可按未来的流量是否为已知值进行分类。如果将来的未经调节的流量是已知值，并规定了模型的一组确定性约束条件，那么，这个模型在水文上就叫做确定性的。反之，如果只知道这个未经调节的流量的概率分布，则这个模型就叫随机模型或概率模型。

对于同一个水资源系统，随机最优化模型常常包涵有比确定型模型更多的变量及约束条件。尽管我们可以从随机模型中获得更多有用的信息，但由于变量及约束条件的增加以及计算机容量和速度的限制，使随机模型只能用于相当小的子流域规划。

（三）投资及运行模型

所讨论的最后一个模型分类，是经济学家所称呼的长期

运行模型及短期运行模型。长期运行模型包括的工程设施可以是变量，如水库及水电站的容量，游览设施，灌溉面积及作物组成等。长期运行模型研究的目的在于确定各工程项目的投资规模和总体运行策略。如果工程规模是变量，还可望得到工程规模的最优组合。短期运行分析只是检验水资源系统的运行策略。假定工程的规模及额定输出是固定的或已知的，则必须提供更为详细的模型，以便仔细分析水资源系统运行策略，对水资源系统的运用管理提供操作规则或操作控制信息等。这些投资方案在该问题中是可望得到最优值的变量。而必须确定的是每个工程的投资水平及相应总体运行的策略。

此外，短期运行分析只是检查水资源系统的运行策略变量。假定工程的规模及额定输出是固定的或已知的，这就允许提出更详细的模型来分析水资源系统的运行。这种系统可以由一些已知容积的水库所组成，其随机入流量具有自相关和互相关的特征。

三、数字模拟技术

模拟技术就其广泛的意义来说，是指在系统模型上进行试验的技术。然而，不同种类的模拟，所采用的模型和模拟手段及试验技术都有很大的差别。现在，模拟这个词使用得相当广泛，必须针对其具体场合仔细辨认。本书所要论述的模拟技术指的是数字模拟技术。数字模拟不同于实体的物理模拟，后者是根据模拟对象的实体尺寸，按一定比例进行缩小或放大，做成实体模型，在模型上进行各种试验，以期获得模拟对象的某些客观运动规律，例如水工模型、水力学模型等。数字模拟也不同于某些物理的比拟模拟，例如，用电流系统模拟水流系统的电模拟等。数字模拟是指数字计算机

模拟，即利用计算机模拟水资源系统的运行，从而得到真实水资源系统的有关性状特征。有计划地改变计算机中水资源模拟系统的参数或结构组成，多次进行模拟试验，可以选择较好的水资源系统结构，确定真实水资源系统的最优运行策略。计算机模拟活动的进行受计算机程序的支配，这种程序称为水资源系统的模拟程序，它由水资源技术人员或计算机程序设计人员编制。

模拟是对客观实际系统的模仿，模拟运动必须在模型中进行，数字模拟与其它模拟的基本不同之处在于模型不同，数字模拟要求的是数学模型，是抽象的模型，而不是实体模型，它是将真实系统的内在运动规律抽象为数学模式。例如水流在明渠中的均匀流动可以用 $Q = \omega c \sqrt{Ri}$ 的数学模式来描述，用以表示渠道流量（ Q ）与过水断面的状况（ ω 、 R 、 c ）及渠底纵向坡降（ i ）的关系。由于采用数学模型比实体模型简单，当某些水资源系统具有较好的数学模型时，常常可以使模拟活动在时期短和投资少的情况下得到成功。计算机技术的迅速发展，为计算机模拟技术的发展提供了优越的条件。专门设计的模拟计算机，以及将数字和实物模拟结合起来的混合模拟机也可以进行模拟试验，它们不属本书讨论的范围。

四、模拟技术与数学规划的比较

模拟技术和数学规划是水资源系统分析的两种不同方法，它们各具有独自的特点，适用于不同的水资源问题。有时二者也可以配合使用，取长补短，提高研究成果的精度。

模拟技术和数学规划方法都要求将客观水资源系统抽象为数学模型，然而它们对数学模型的要求是不相同的。数学规划往往要求一定形式的数学模型，否则便无法求解，例如

线性规划限制数学模型必须是线性模型，对于非线性的函数必须进行线性化的简化处理，才能适应数学规划的某些标准的解算技巧。对于庞大复杂的水资源系统，由于受社会和政治因素的影响比较大，或由于物理及经济的数学模型十分复杂，往往难以使用数学规划方法寻求优化策略。模拟技术则通常不受数学模型的限制，即使非常复杂的数学模型，也能够进行模型的模拟运行。因此，当其它系统工程方法都难以实现时，最后总可以用模拟的方法，进行某些模拟运转。

数学规划还容易受到计算机容量的限制，即使一个相当小的水资源系统，也涉及相当多的数学模型、变量和约束条件，如果再考虑到长历史的水文气象条件或其它随机因素，将会形成十分巨大的数学模型，从而可能超过计算机所允许的容量。如果适应计算机的内存容量，则必须对模型进行相当大的简化，以致于使简化引起的误差超过允许的范围。

数学规划的最大优点是可以比较迅速地得到数学上的最优解，如果模型没有大量简化，将为水资源系统提供可靠的最优策略。模拟技术很难找到数学上的最优解，一般只能求得比较好的解。由于数学规划常常能利用标准的数学模型，采用现成的解算技术，使系统的模型化和寻优工作大为简化。相反，模拟技术很难使用现有的模拟模型，程序设计的工作量比较大，模拟运转的时间也比较长。

不同的系统分析方法，各有其长处和局限性，很难找出一种适用于所有水资源问题的最好方法，重要的是根据具体条件，选择一种合适的方法，或找到几种方法配合使用的途径。一般来说，数学规划多使用于初步筛选方案，而经过筛选后的若干种方案，再进行模拟分析，做进一步的评价和改进，因此，有时也称模拟技术是最后的手段。

第二节 确定性水资源模拟技术

一、模拟技术的组成部分

利用数字计算机模拟水资源系统的实际问题，涉及众多的工程建筑及变量，往往构成相当复杂的试验研究方案。要合理作出最优决策，必须进行一系列的模拟工作，一般应包括以下几方面的内容：

1. 对系统的描述 包括制定方案，建立由各项工程及地面水和地下水流所组成的网络，规定用水和控制水的地点，以表征系统各组成部分之间的相互关系。

2. 建立系统的计算机模拟模型 根据拟定的系统方案，按照系统运行所应达到的目的，编制能代表系统“动作”的计算机程序，作为系统的计算机模拟模型。

3. 运用计算机模拟模型进行试验 在计算机上组织模型的运行，进行试验，也就是使程序运转，输入必要的的数据，输出运转的结果，得到系统在各种情况下“活动”的最终效果。

4. 分析和研究计算成果并作出决策 对计算机模拟模型的各种运行成果，使用一定的方法，进行分析和处理，从而作出最优决策。

二、水资源系统的组成及网络图

模拟模型的建立与水资源系统的组成及其相互联系关系极大。对于不同的水资源系统，其模拟模型是完全不相同

的，不能设想存在某种标准的模式及计算机程序。

为了正确无误地模拟一个研究对象，必需首先建立模拟对象的网络图，全面反映水资源系统的配置方案，以及各组成部分的相互关系。网络图由节点和联线构成，节点一般代表各工程建筑物所在位置、水流汇集点和分流点；联线代表水流通渠道，如河流、渠道、管道等输水和导水设施。由节点和联线相联结、构成网络，代表水资源系统各组成部分的相对位置及其在水流上的相互关系。下面介绍的内容只是为了更直观地理解制定模型的大体步骤，以一个简单的工程对象为例，说明建立模拟模型应考虑研究的问题。

设某一水资源系统，包括一座水库，一处灌区，现需用模拟法制定其最优规划方案和运行方案。面临的第一个任务是建立系统的网络图。

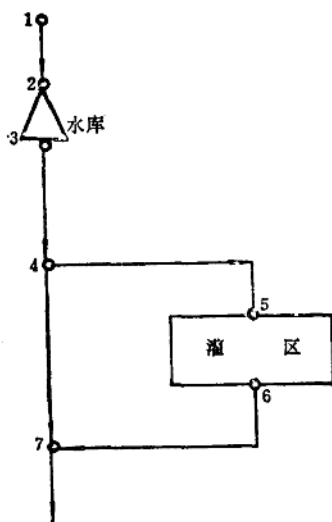


图 1 水资源网络图

图 1 所示为该水资源系统的网络图。1、2、3、4、5、6、7表示分流或汇流节点，分别代表来流处、入库处、出库处、分流建筑物处、灌区进口、灌区出口、回归水退入河道处。各联线表示河段或渠段。

为了正确建立网络图，作出了如下规定：

(1) 起始点为一节点，终端点为一节点，即起始点以上和终端点以下均无汇流和分流节点。

(2) 各节点和联线应准确无误地反映模拟对象的位置及相互关系。

(3) 对于较复杂的系统，在精度允许范围内可以容许对某些组成部分做出合并或分解，以求得简化，便于模拟。本例中节点及联线均未做简化。

三、目标函数及决策变量的确定

对于任何水资源系统，其规划设计及管理运行都应有既定的目标，常以目标函数的形式表达之。目标函数表征了各决策变量之间的物理联系或经济关系。如果目标函数以物理量的形式表现，则系统规划设计及管理运行的目的在于寻求各决策变量之间的最佳配合。所列简例的目标函数，可以是既定水库容积下的最大灌溉面积，也可以是既定灌溉面积下的最小水库容积。如果目标函数以经济量来表征，则系统运行的目标可以是最大净效益，也可以是最小建设投资及管理运行费用等。

在模拟技术中，决策变量是指一些待定的量，也就是我们希望寻找其最优结果的那些量。在水资源系统工程中，决策变量一般有三种：

1. 工程设施的规模 如水库库容的大小，水电站的规模，灌溉渠道的尺寸，上水道的尺寸，泵站的规模，分流工程、水处理工厂、堤防、通航建筑物的规模以及水库游览设施的规模等。

2. 系统产出 如提供的电能、灌溉水量、工业及民用供水、水质指标、游览机会等，也可以用需要量或额定正常量的保证程度及其年内分配来表示。

3. 运行决策参数 死库容的分配；防洪库容和兴利库容的分配；系统内蓄水、放水和行洪的规则，包括地下水和地

面水的联合运用。这些决策变量可以分为两类，即设计变量与运行变量。

对于本例，设计变量主要是指水库库容（包括死库容、兴利库容及防洪库容）及灌区的灌溉面积。如在3处建发电站，还应包括电站装机容量的确定。

所谓运行变量，是指系统在运行中表征系统运行状态的变量，如不同时期的水库蓄水量、下游泄量、灌溉用水量、发电用水量等。

四、水资源模拟模型中的物理关系

物理关系式是指系统各物理变量之间存在的既定关系的数学表达式，包括等式和不等式。它可表示为方程式的形式，也可以用表格的形式来表达。不论其形式如何，都是客观物理规律的表述，如水流连续性定律，能量守恒定律等。其他还有外加的约束条件，库容和高程关系式，库容与出流关系式，水流演进过程的有限差分方程，以及流量频率方程等。

对于本例，这类物理关系式主要是指各节点在各时段的水量平衡关系，即各节点在不同时段的水流连续性原理的具体表现。这种水量平衡关系出现在用水的情况下，也出现在洪水演进的情况下。现分别简述于后。

（一）用水情况下的物理关系式

现根据水流连续性原理，列出某时段 t 各节点的物理关系。

节点1：有来流，为 $Q_1(t)$ 。

节点2：流量为 $Q_2(t)$ 而

$$Q_2(t) = Q_1(t) - L_1(t)$$

式中 $L_1(t)$ 表示 t 时段内节点1至节点2之间的流量损失。