

m 913891

高等学校教材

流域水文模型



武汉水利电力学院 袁作新 主编



内 容 提 要

本书从水文数学模型发展过程出发,分章详细阐述了国内外一些有特色的、应用较广的流域水文模型,尤其重点介绍了第IV号斯坦福模型,它是从水文物理过程的逻辑推理出发而建立起来的一个概念模型,该模型对以后很多水文模型的建立都具有启发性及推动作用。

本书适用于大学本科及研究生教材,亦可供水工建筑物设计洪水、洪水预报、城市供水及防洪、农业及林区规划中的水文计算参考。

编 者 的 话

《流域水文模型》一书是为工程水文及水资源专业研究生编写的教材。全书共十一章，第一章是流域水文模型概论，第十一章是流域水文模型的优化技术和迭代运算，其它各章分别介绍一些有特色的、应用较广的流域水文模型。因此，本书除作教材外，还可供水文、水利、水电等方面的科研及工程技术人员参考使用。

本书出版前以讲义的形式印行过多次，其中研究生使用过6次，高年级本科生选修课使用过2次，并在国内一次研习班上使用过。根据使用情况，做了较大的修改和增加了几章内容，使此书的内容更充实、更精练，将更便于教学和科研及工程技术人员使用。

本书由武汉水利电力学院袁作新主编。长江流域规划办公室罗伯昆编写第四章，武汉水利电力学院胡煦华编写第八章，武汉水利电力学院郭生练编写第十一章，其它各章由袁作新编写。流域水文模型在国内研究较少，在编写过程中尽量收集了资料，但限于编者水平，不当之处在所难免。热忱欢迎水文专家，水文、水利、水电工作者和使用本书的同学们提出宝贵意见，以便再版时加以改进。

本书由水利部南京水文水资源研究所华士乾教授主审，提出了很多精辟意见，使本书得以更加完善。

在本书的编写过程中，曾参阅了许多中外科技文献，谨向这些文献的作者或译者表示感谢。

编 者

1988年5月

7A652/04

目 录

编者的话	
第一章 流域水文模型概论	1
第一节 水文模型及其分类	1
第二节 流域水文模型的应用	4
第三节 流域水文模型的研制	5
第四节 模型率定和参数优选	8
第五节 流域水文模型的检验	15
参考文献	16
第二章 包顿模型	17
第一节 模型的基本结构、参数和常见变量	17
第二节 模型的微结构	18
第三节 模型运算和参数举例	20
参考文献	20
第三章 第IV号斯坦福流域水文模型	21
第一节 第IV号斯坦福模型的基本结构和主要构想	21
第二节 第IV号斯坦福模型的微结构	23
第三节 新编第IV号斯坦福模型的改进	35
第四节 第IV号斯坦福模型的运算	37
第五节 第IV号斯坦福模型的参数	50
第六节 第IV号斯坦福模型的其它功能	55
参考文献	56
第四章 萨克拉门托流域水文模型	57
第一节 模型的基本概念和结构	57
第二节 参数初值的分析方法	67
第三节 参数优选和灵敏度分析	77
第四节 萨克模型的运算	79
第五节 讨论	81
附录 本章引用符号简要说明	84
参考文献	86
第五章 水箱模型	87
第一节 水箱模型的基本概念	87
第二节 水箱模型的基本结构及运算	88
第三节 模型的建立与参数选定	90
第四节 水箱模型中为土壤水设置的结构	94
第五节 并联水箱模型	95
第六节 日流量模型	97

参考文献	98
第六章 新安江流域水文模型系列	99
第一节 概述	99
第二节 二水源新安江模型	99
第三节 三水源新安江模型	113
第四节 四水源新安江模型	117
参考文献	119
第七章 API连续演算流域水文模型	120
第一节 API连续演算流域模型的基本结构	120
第二节 地下水流量过程线	121
第三节 降雨~径流关系	124
第四节 单位线和序贯推导	128
参考文献	128
第八章 HEC-1 模型	129
第一节 HEC-1 模型的结构	129
第二节 使用HEC-1 模型应注意的若干问题	137
第三节 模型参数的优选	138
第四节 应用HEC-1 模型的实例	140
参考文献	141
第九章 SCS模型	142
第一节 概述	142
第二节 SCS模型的产流结构	142
第三节 SCS模型的汇流结构	146
第四节 SCS模型应用举例	147
参考文献	149
第十章 系统响应模型	150
第一节 基础知识	150
第二节 总径流线性响应模型(TLR)	153
第三节 纳希型的总径流线性响应模型(TLRN)	156
第四节 线性扰动模型(LPM)	159
第五节 多输入单输出线性响应模型	162
小结	168
参考文献	169
第十一章 流域水文模型的优化技术和迭代运算	170
第一节 概述	170
第二节 单变量函数的寻优方法(一维搜索技术)	170
第三节 无约束条件下多变量函数的寻优方法	174
第四节 有约束条件下多变量函数的寻优方法	188
第五节 流域水文模型的迭代运算	193
参考文献	197

第一章 流域水文模型概论

第一节 水文模型及其分类

一、概述

自然界中的水文现象，是一种许多因素相互作用的复杂过程。这种过程的规律，多年来科学家和水文工作者一直在不断探索和研究，但迄今很多问题尚未解决，严格的规律仍有待进一步探求。在没有找到复杂水文现象（原型）令人满意的规律之前，通过建立模型近似地去模拟，有如管流运动、明渠水流、河流泥沙运动等要做模型试验以探求其规律一样，应当认为是一种合理可行的途径。

仿原型制造模型叫做“模拟”，模拟工作首先就要制做一个“模型”。对水文学问题来说，也可以认为模型是描述一种现象转换为另一种现象的工具。由流域降雨过程转换为流域出口断面的径流过程，就是其中的一个例子。这时，要制做一个降雨~径流模型，用它来模拟未来的（预报）或过去的（展延径流系列）径流资料。

过去的水文分析计算大多是针对某一个水文环节（如产流、汇流等）进行的，由于计算机的出现，从50年代中期起，开始把水文循环的整体过程作为一个完整的系统来研究，并在50年代后期提出了“流域模型”的概念，随即有SSARR模型（1958）和Stanford模型（1959）等模型出现。这些模型从定量上分析了流域出口断面流量过程线形成的全部过程，包括降水、蒸发、截留和下渗，包括地表径流、壤中流、地下径流的形成，也包括坡面调蓄和河网调蓄。

二、水文模型分类

实际上，上述SSARR模型和Stanford模型只是水文模型的一种，而水文模型则是一个广泛的名词，它大体上可按以下4个方面来分类。

（一）按模型所涉及的范围分类

（1）全球范围的水文气象模型，即大气环流加地面水文系统，主要属于气象方面的工作。

（2）一个国家或某一区域的模型，对这种模型的参数要做地理综合。

（3）一个流域的水文模型。

（4）实验流域或实验场，它们本身就是模型的原型。

（5）实验室的水文模型。

（6）单棵树的蒸散发模型。

（二）按模型所研究的对象分类

（1）径流模型，可分为地表径流模型和地下径流模型。

（2）水质模型。

（三）按模型所研究的内容分类

（1）研究水循环某子系统的模型，例如蒸散发模型、下渗模型、地下水模型等。

（2）研究流域水循环全系统的模型，即流域水文模型。

(3) 研究某地区或某流域水资源综合利用的模型, 即流域(或地区)水文模型加水利计算模型。

(四) 按模型的基本性质和建模技术分类

1. 实体模型

(1) 比例尺模型 比例尺模型和一般的水力学模型、水工模型、河流泥沙模型相类似, 是按几何和力学上的相似来考虑的。但是, 事实上, 水文相似性的问题远比水力学、水工、泥沙等模型的相似性要复杂得多。在确知长度比例尺的情况下, 水文工作者费尽心力也很难应付模型其它方面比例尺的设计, 所以早年设计研制的这种比例尺模型大都投资大, 工期长, 且成效不大。例如美国陆军工程师团设计的密西西比河中下游防洪水文模型, 花了近20年时间才完成。因此, 最近已经很少有人再作这种模型了。

(2) 单项因素试验模型 这种模型无明确的比例尺概念, 而只做单项水文现象的试验, 通过试验, 探索水文现象某一过程(如汇流过程、产流过程)的物理规律。我国铁道科学研究院西南研究所和中国科学院地理研究所都有这种模型实验室, 主要研究汇流方面的问题。陕西机械学院李长兴等则在实验室内做过黄土下渗规律的实验研究。

2. 类比模型

类比模型(Analog model)是以另一现象的物理性质类比水文现象的物理性质, 借此以便于观测或形象化。如根据渗流的达西定律与电流的欧姆定律之间的相似性进行类比的电模拟模型, 就是其中一个例子。

$$\text{达西定律为} \quad v = K \frac{\partial h}{\partial s} \quad (1-1)$$

$$\text{欧姆定律为} \quad I = \sigma \frac{\partial V}{\partial X} \quad (1-2)$$

上式中 v (流速) 与 I (电流) 相对应;

h (总水头) 与 V (电压) 相对应;

s (沿平均水流方向的距离) 与 X (导体的长度) 相对应;

K (渗流系数) 与 σ (传导系数) 相对应。

通过这样的类比关系, 在电拟模型中画出的等势线和电流线就分别相当于地下水流动的等位线和流线。

这种类比模型目前在水文学的研究中用得很少。

3. 模拟模型

前已述及, 仿原型制造模型叫作模拟(Modeling或Simulation), 模拟工作首先就要制做一个模型, 叫做建模。模拟模型详细仿制(模拟)水文现象的重要特性, 但并不仿造水文现象的本身。在目前, 水文学上的模拟模型一般都是指用数学方法进行模拟的模型, 所以模拟模型习惯上又叫数学模型。这种模型是以数学上的定量方式来表达水文原型, 并用数字电子计算机进行模拟计算。在计算机未广泛在水文学上使用以前, 是没有模拟模型的, 即没有当前所谓的数学模型。数学模型可以模拟水文现象的各种性质, 主要指必然性和偶然性, 必然性就是确定性, 偶然性就是随机性。

(1) 确定性模型 数学模型可以模拟水文现象的必然性规律, 即成因规律, 这就是确定性模型(Deterministic model)。确定性模型的建立要以水文现象的因果关系作基

础，它又可以分为以下4类。

1) 数学物理模型。数学物理模型是以数学物理方法对水文现象进行模拟的模型。这种方法要使用一些物理的、水力学的方程，必须对客观条件作很多简化。因此，这种模型目前并不能付诸实用。

2) 概念性模型。概念性模型 (Conceptual model) 是以水文现象的物理概念作基础进行模拟的，它所模拟的不完全是真的物理实体，而要对物理现象进行概化。例如，概念性模型常把流域的含气层 (又称包气带) 概化成两层，以便有效地模拟径流的形成。其中，上层代表疏松的表土层，下层代表较坚实的土层。但这两层的实际情况如何？能不能在地面以下潜水面以上把它们明确地划分出来？难以确定。诸如此类的情况很多。数学物理模型是用物理学的方法对水文现象进行简化，例如三维问题简化为一维问题；概念性模型则是用水文学方法对水文现象进行简化，例如用流域平均降雨量代替流域各点的降雨量，等等。

概念性模型可以模拟水循环的整个系统，称为整体模型；也可以模拟水循环的个别过程 (例如产流过程或汇流过程)，称为分量模型。如是对一个流域，则整体模型称为流域水文模型，这是本课程研究的主要对象，分量模型则有产流模型、汇流模型、蒸散发计算模型、土壤含水量模型等，在本教材中也都有所涉及。

此外，如果按流域各处土壤、植被、土地利用和降水等的不同，把流域分为若干部分，每一部分以一组参数表示该部分流域的各种特殊自然地理状况，并以这样的部分流域作为水文模拟的基本单元，然后通过径流演算而得全流域的总输出，则这样的流域模型称为分散模型 (Distributed model)，或称为分块模型。如果认为那些变量 (参数) 在空间上变化较小可以忽略，例如认为降落到流域上的雨量是均匀的，而把全流域作为一个空体来建立模型，则这种模型称为集总模型 (Lumped model)。虽然流域内增加分块数目对表现流域各处的不同特性将会有所改善，但增加分块数目需要增加计算机时间和经费，在建立流域水文模型时应从多方面加以权衡。由于这种考虑，分块模型的各块面积上有时只用一组相同的产流参数，分块的作用主要是可以处理流域上降雨不均匀的问题。

概念性模型还有线性和非线性之分。一个系统，如果输入是 $x_1 + x_2$ ，而跟着发生的输出则为 x_1 和 x_2 分别发生的输出之和，则这样的系统称为线性系统，其模型叫作线性模型，可应用叠加原理。单位线就是线性系统的典型例子。流域水文模型中的汇流常用线性系统 (当然也有非线性系统)，而产流则多为非线性系统，如多变量的暴雨~径流相关图等。因此，从整体的流域水文模型来说，都是非线性的。

3) 回归模型。回归模型是用回归分析的方法确定预报值 (倚变量) 与预报因子 (自变量) 之间的相关关系。从模型的性质来看，这种模型是确定性的，但方法则是数理统计学的。回归模型用于中长期径流预报的比较多，近年来也有用于短期洪水预报的。所用方法主要是一元或多元的线性回归分析方法。

4) 系统理论模型。系统理论模型又叫系统响应模型。这种模型在做流域降雨径流预报或做河道洪水演进预报时采用系统理论的方法求出一个脉冲响应函数。在推求脉冲响应函数时一般也采用回归分析方法。本书第十章所讲的总径流线性响应模型 (TLR) 和线性扰动模型 (LPM) 就都是这种模型。

(2) 统计 (随机) 模型 任何水文过程不可避免地总包含某些随机性。如果数学模型

(模拟模型)是模拟水文现象随机性的,则称为统计模型或随机模型。统计模型是模拟水文现象统计规律(随机规律)的。频率计算、回归分析(相关分析)就是统计模型的例子。径流资料的随机生成则常被称为随机水文学。

随机水文学是利用随机过程的理论和电子计算机技术来建立随机水文模型,以之模拟(生成)随机的水文时间系列,例如年径流系列、月径流系列和日径流系列。所有各种随机模型都是建立在水文现象的统计特性基础上的,没有实测的水文时间系列,就不可能建立起某断面的随机水文模型,也不可能生成更长的随机水文系列。

第二节 流域水文模型的应用

应用流域水文模型可以生成年、月、日径流系列以及流量过程线,还可以求得流域的实际蒸散发系列。因此,作为水文分析工作的一种工具,其应用范围是非常广泛的,现仅举出其最主要的几个方面。

一、水文计算

计算机在水文计算中的应用开展得最早,其效果不仅是节约了大量人力和时间,而且使许多以往不能用手工完成的复杂计算方法能够付诸实践,从而促进了许多新概念和新方法的提出和应用。

径流模拟可以生成日平均流量、月径流量和年径流量、洪峰流量及详细的洪水过程线。因此,应用流域水文模型可以展延短期河川径流系列,其效果远远优于一般常用的相关分析方法,但要求有较长的降雨或降雨及蒸发等资料,这往往也不容易获得。

二、水文预报

对河川径流预报的要求,几乎总是包含着一个紧迫的因素。流域水文模型的应用可以提高预报精度,计算机模拟为预报提供了高的速度,并可进行实时预报。在国内外,使用流域水文模型最多的就是水文预报部门。

三、估计人类活动的影响

用流域水文模型估算流域变化后的径流情况是很有效的。世界各地由于人口激增,土地利用活动的强烈程度正在不断增加,估计这些活动对环境的威胁,不论事前和事后都是人们十分关切的。城市化、农业措施、露天煤矿和砍伐森林,就是这些土地利用的例子。土地利用,可以通过适当改变模型参数将长期变化的效应模拟出来。例如,城市化可以修改不透水面积和输水系统;土地梯田化修改坡面漫流坡度和距离;植被主要是通过有效地影响蒸散发变化,虽然植被也会影响下渗、坡面漫流糙率和截留量。砍伐森林对洪水影响的模拟成果举例如图1-1。从图中可以看出,对不砍伐的模拟与实测成果十分接近。另外,砍伐50%影响不大,基本上砍光(砍伐95%)将使洪峰流量增加一倍。河道系统的变化,如果用运动波演算,通过给定适当的河槽特性也能够模拟出来。

四、模型区域化——模型参数的地区综合

模型区域化,是指为无资料流域,根据其流域的水文和自然地理特征,科学地研制出预示其模型参数的方法。例如综合单位线就是线性汇流模型的一种区域化方法。当然,要做到模型参数的区域化,就必须有足够数量的具有充分暴雨资料和径流资料的基准流域(Bench mark watershed),把每个流域的最优化参数与流域的地形、土地利用和

气候特征建立关系，以便将参数的区域化公式引用到本地区无实测资料的流域。

在公开文献中，已经有不少关于流域模型参数区域化的例子。斯坦福流域模型是在美国加利福尼亚州首创区域化的，TVA暴雨径流模型是在美国田纳西流域进行区域化的，美国水土保持局的SCS模型则是一个典型的区域化的小流域设计洪水计算模型。

五、水质控制

为了得到高质量水的适当供应，需要对水资源的质量进行控制。这种控制应当规定，上游废水挟带物经过水体混掺不应超过规定标准，即水的质量能够符合下游用水要求。水

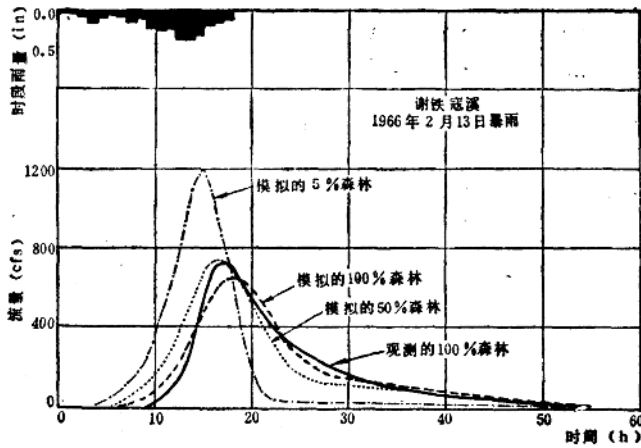


图 1-1 用TVA暴雨径流模型模拟谢铁寇溪砍伐森林的效应

质控制应当采用一个考虑周密的模拟系统，这样才能做到及时和可靠。河湖水质模拟可与径流模拟同时进行。

水质是由多种因素来衡量的，其中包括温度、溶解氧、生物化学的需氧量、溶解盐类、浮游植物和浮游动物、含沙量和细菌等。因此，水质模型必须为每一种因素提供计算规则。因为制做水质模型必须同时考虑径流模拟和众多影响水质因素的模拟，所以编制水质模型的程序是一项更为复杂的工作，而且需要掌握大量资料。

第三节 流域水文模型的研制

一、研制流域水文模型应解决的问题

流域水文模型的研制，需要解决三个问题：1) 确定模型的总体结构，包括几种水源、几层蒸发、是否考虑坡面汇流、是否考虑填洼和截留等；2) 确定模型的微结构，即确定径流形成过程中各环节（各分量）在数量上的基本结构，包括一些理论性、经验性或半经验性的方程或能向计算机中输入的方程化的图表；3) 确定模型中所应包含的参数及参数的估算方法，参数的多少和估算方法都与模型的结构密切相关。

二、模型结构的两个基本部分

流域模型的研制，主要采用依赖于实测资料的途径。任何一个模拟径流形成的流域数学模型都应当包括两个基本部分。

(1) 水量平衡部分 在总体结构中，这一部分主要处理降雨损失，即产流，它决定着径流总量的大小。例如，斯坦福模型就是用超渗产流的概念处理产流问题的；新安江模型是用蓄满产流的概念处理产流问题的；萨克拉门托模型是综合蓄满产流和超渗产流的概念处理产流问题的。此外，在各种水源中，也都有水量平衡问题。

(2) 流域调蓄部分 这部分决定着径流的时程分配，即汇流部分。它包括坡面调蓄和河网调蓄，合起来就是流域调蓄。坡面漫流、壤中流和地下水等各种水流在进入河塘以前都受到坡面的调蓄，在模型中坡面调蓄多与水量平衡部分同时处理。各种水源在进入河网后，构成河网总入流，共同遭受河网的调蓄。例如第IV号斯坦福模型，坡面漫流的坡面调蓄用非线性函数，壤中流和地下水流的坡面调蓄用线性函数，河网调蓄则采用C.O. Clark方法。

三、研制模型的基本要求

流域水文模型的研制，应尽可能满足以下三点基本要求：

- 1) 模型结构尽可能具有明确的物理意义；
- 2) 模型具有通用性或较大的灵活性，即要求模型尽可能适用于不同的气候条件和地质条件，并适用于不同大小的流域；
- 3) 模型尽可能简单和便于应用。

不难看出，以上三点既是互相制约，又是互相联系的。例如，要求模型具有明确的物理意义，就需要模型具有比较复杂的结构，这就与尽可能简单和便于应用发生矛盾。如何处理好这些矛盾，是研制模型时随时都要注意的问题。

四、研制模型的基本步骤

研制流域水文模型通常需要经历以下几个主要步骤：

- 1) 分析流域径流形成机制，提出模型中应包含的各分量，并研究如何考虑它们的时空分布，从而确定模型的总体结构；
- 2) 建立各分量的数学函数式，并建立各分量间定量关系的数学表达式，由此便可确定模型中应有哪些参数；
- 3) 确定参数的优选方法；
- 4) 绘制计算框图；
- 5) 编制模型运算的计算机程序；
- 6) 用多个流域的实测水文、气象资料对模型进行检验，并对模型的总体结构和各分量微结构进行调整，以便最后制成一个机制上合理、精度高且运算简便的实用模型。

由此可见，研制流域水文模型的过程就是对流域径流形成机制的认识逐步深化的过程，也是对用数学方法模拟径流形成的反复实践的过程。例如斯坦福第IV号模型用了8年时间，新安江模型前后共用了25年时间，至今也还在不断地改进之中。

在研制流域水文模型时，应当首先对流域的径流形成过程做科学分析，分析越深入，所研制的模型结构也就越合理。这种分析大体上可以从两方面来进行。1) 分析流域上已经积累的水文气象资料，特别是流量资料，由于它是流域下垫面条件和气候条件的综合反映，因此，对它进行深入细致的分析，往往可以得到关于流域径流形成机制的丰富知识；

2) 进行流域水文调查, 就流域的地质地貌、土壤植被、枯水径流、河系河道、湖泊水库以及其它水利工程等做尽可能详细的定性和定量的描述。这两方面是相辅相成、互相补充的, 1) 常常需要 2) 提供更充分的证据, 2) 又常常能帮助人们加深对 1) 的认识。通过这两方面的分析论证, 一般可以对流域的径流形成规律提出比较正确的看法, 进而便可提出一个比较正确的流域数学模型的基本结构。例如, 图 1-2 绘出了我国干旱地区 (图 1-2a) 和湿润地区 (图 1-2b) 两个小流域的两条流量过程线。由图可见, 面积基本相等的两个流域, 两场差别不大的降雨, 形成的流量过程却大不相同。东坑的洪水总量为驼耳巷的 5 倍, 而洪峰流量却只有它的 1/7。对于这样两个特性相差悬殊的流域, 在研制模型结构时当然应该区别对待。

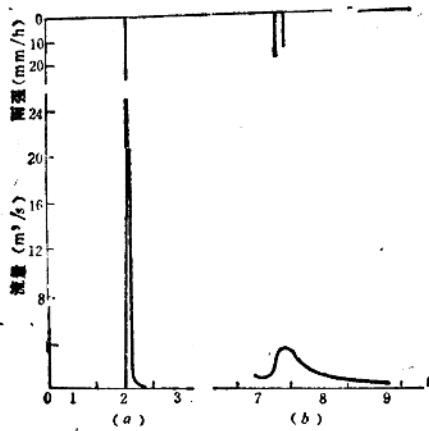


图 1-2 两种典型的流量过程线

(a) 驼耳巷; (b) 东坑

	1964年8月	1969年7月
流域名称	陕北驼耳巷	安徽东坑
自然情况	干旱黄土地区	湿润多林L'区
流域面积 (km ²)	5.74	5.65
雨量 (mm)	24.6	38.7
最大1小时雨量 (mm)	22.1	23.3
洪水总量 (mm)	7.9	38.2
洪峰流量 (m ³ /s)	26.1	3.5
主要洪水历时 (h)	3	30

五、研制和使用流域水文模型所需要的基本资料

流域水文模型的任务总是根据输入信息来推断输出的。那么, 研制和使用流域水文模型需要哪些基本输入信息, 即需要哪些基本输入资料呢?

一般说来, 应当考虑三类输入资料, 即: 1) 水文气象资料; 2) 描述径流形成过程各环节的资料; 3) 流域特征和工程情况资料。第一类资料包括降水和蒸发资料, 以此作为输入去推算输出——径流; 还包括实测流量过程, 年、月径流量等径流资料, 作为率定和检验模型之用; 广义的水文气象资料还包括水质资料——泥沙和污染物。第二类资料包括影响水文循环陆相部分水的运动与分布的资料, 例如植物截留、下渗容量及其时空

分布、壤中流退水和地下径流退水的资料等。第三类资料包括有关河流和流域的资料，例如，可以表示河流形态的流域面积、河长、干流坡度；可以表示坡面形态的坡面长度、坡度、糙率；以及可以表示水库特征的水库水位~面积~容积关系和水库调度方式等。

以上三类输入资料的比较详细的内容见图1-3。不是每个流域水文模型都应当包括所有这些输入资料，而是根据流域的径流形成的特点、具体的气候和下垫面情况以及水利工程的布置等，仅需要输入其中一部分资料。



图 1-3 流域水文模型的输入资料类型

第四节 模型率定和参数优选

一、概述

流域水文模型在模拟过程中，除了模型结构的合理性外，模型参数的优化也是很重要的，这在一定程度上决定了模型的拟合精度。

调整参数使模型拟合实测资料最好，即达到最优化，这项工作叫作“模型率定”。在模型率定过程中，一组最优化的参数也就同时定下来了，这叫作“参数优选”。一个完备的

连续运算的流域模型，在率定时应该得出：年径流量的误差应在很小的百分数以内，各月分配是合理的，流量过程线形状与实测资料吻合较好，而洪峰流量则随机地分布在实测资料的上下。

二、拟合方法

率定模型时，如何决定什么时候达到了一个最佳的拟合，这是一个需要判断的问题。一般地说，有三种方法可以获得一个最佳的拟合，现分述如下。

1. 图解显示法

图解显示法可用于比较模拟的和观测的径流序列，并用目估判断去估计拟合良度（优度）。这是一个基于个人经验的判断方法。但是必须注意，在图上按比例尺点绘这些资料时千万不能粗心大意，否则就很容易引起误会，而使判断发生错误。此法速度慢，目估判定好坏不很客观，并且也不适用于全部计算机操作。

2. 相关分析法

对许多不同的径流系列（如年、月径流系列）来说，径流估计值和观测值的相关系数，也可用以指导参数的调整工作。虽然此法是相当客观的，但它对参数调整的洞察力并不强，因为径流模拟很容易获得很高的相关系数。

3. 目标最佳拟合法

优选模型参数的最有效方法是目标最佳拟合法。此法可以建立参数优选的自动化计算机程序，在这里实测的径流值也作为输入资料。目标最佳拟合的准则常具体化为一个目标函数，并使其达到最小。通常采用的目标函数有以下4种：

(1) 误差平方和准则（最小二乘法准则） 最小二乘法的最佳拟合准则是最常用的一种拟合准则，它可以描述为使观测的径流值 \hat{Q} 与模拟的径流值 \hat{Q} 之间离差的平方和为最小。设 S 为目标函数，则

$$S = \sum_{j=1}^n (Q - \hat{Q})^2 \quad (1-3)$$

按最佳准则使上述数学表达式为最小，即

$$S = \sum_{j=1}^n (Q - \hat{Q})^2 = \min \quad (1-4)$$

式中 n ——观测资料的数目。

(2) 误差绝对值和准则 此准则的目标函数为

$$S = \sum_{j=1}^n |Q - \hat{Q}| \quad (1-5)$$

绝对值和准则的目标函数式(1-5)能够估计总量误差的大小，这对拟合良度是一种很好的判断。

(3) 确定性系数准则 我国《水文情报预报规范》规定：以流域水文模型等制定的水文预报方案的有效性的评定采用确定性系数 d_0 进行。

$$d_0 = 1 - \frac{s_0^2}{\sigma_0^2} \quad (1-6)$$

其中

$$s_0 = \sqrt{\frac{\sum (Q - \hat{Q})^2}{n}} \quad (1-7)$$

$$\sigma_q = \sqrt{\frac{\sum (Q - \bar{Q})^2}{n}} \quad (1-8)$$

式中 s_e ——预报误差的均方差;
 σ_q ——预报要素值的均方差;
 \bar{Q} ——实测值的均值;
 其它符号意义同前。

确定性系数 d_q 实质上就是回归分析中的相关指数, 它的开方就是线性或非线性的相关系数。由式(1-6)可以看出, 当模型没有误差时, $s_e = 0$, 而 $d_q = 1$; 当模型的误差大到与径流值本身对均值的误差相同时, $s_e = \sigma_q$, 而 $d_q = 0$ 。纳希(J. E. Nash)等认为 d_q 可以表示模型对于减小仅利用均值做预报的方差 σ_q^2 所显示的效率, 故称此准则为效率准则。

(4) 洪峰预报合格率准则 当按照一定标准挑选出若干次(n 次)洪峰后, 统计洪峰预报误差小于某给定百分率 δ_i (%) 的洪峰次数 m , 并计算洪峰次数 m 占全部洪峰次数 n 的百分数, 定义为洪峰预报合格率。

设洪峰预报相对误差为:

$$\delta_i = \left| \frac{\hat{Q}_i - Q_i}{Q_i} \right| \times 100\% \quad (1-9)$$

式中 Q_i 、 \hat{Q}_i ——第 i 个实测与计算洪峰值;
 δ_i ——第 i 个洪峰预报误差的相对百分数。

如果 δ_0 是规范允许的最大相对误差, 则洪峰预报合格率为:

$$p(\delta_i \leq \delta_0) = \frac{m}{n} \times 100\% \leq p(\delta_0) \quad (1-10)$$

必须指出, 不同的目标函数, 体现了人们对模拟成果的不同要求。例如, 平方和准则就突出了某些特大的误差值, 而绝对和准则则对每一个误差都给以相同的比重。因此, 在优选模型参数时, 必须根据具体情况选用一种适宜的目标函数。

三、目标最佳拟合的最优化技术

虽然为达到目标最佳拟合的最优化技术是很多的, 但重要的是, 在选用某种技术时, 必须使该种技术能与模型的结构相适应。在这一小节中, 将简单地介绍水文模拟中广泛应用的几种最优化技术, 但并不过多地涉及这些技术的细节。

如前所述, 流域水文模型主要是指概念性模型, 但在短期和长期径流预报中应用回归模型的也不少, 下面将分别叙述关于它们的最优化技术。

(一) 概念性模型的最优化技术

1. 常用的几种最优化技术

模拟径流形成全过程的概念性模型, 具有比较明确的物理概念, 但模型中参数多, 其中有很多是需要通过优选才能确定的参数。优选参数时首先要选定一种目标函数, 当目标函数选定以后, 常用的优选方法有试凑法、自动化优选法以及人与计算机联合优选三种。

(1) 用试凑法优选参数 用试凑法优选参数, 也叫人工优选法, 但后面这一个名称不太贴切, 因为此法也还是要利用计算机的。

不论模型的结构如何复杂,用试凑法(是一种逐步逼近法)率定模型并优选参数总是一种现实可行的而且是用得最多的方法。试凑法的基本原则是:设定一组参数,在计算机上运算,比较模拟值与实测值,分析对比,调整参数,或计算其目标函数,直至达到最优,参数即为所求。它可以采用如下两种操作方式。

1) 分别试凑法。此法分别对每一参数进行优选,最后可以得到最优的参数群。一个参数由事先定好的某些数值进行调整和反复模拟,并用逐步逼近法得到其最优值。此法的优点是在逐步逼近过程中可以判断模拟的径流值对各参数的敏感度,缺点是当各参数之间有相关关系时,所得参数群不见得就是最优的。

2) 参数组合法。此法是在初步估计的各参数变化范围内,组成若干个参数组合方案,用计算机输出各项径流值,并与实测径流值比较。有时需要计算出各方案的目标函数值。在此基础上,分析选择最优方案。或进一步调整参数组合,再计算,再选择。当然,这样选出的方案只能是相对最优的。然而又有哪种优选方法所率定出来的模型不是相对最优呢?

(2) 自动化优选参数——搜索技术

1) 概述。所谓自动化优选参数,就是由计算机按一定的规则自动优选,而不需要任何人工调节。这类方法可统称为搜索技术。搜索技术是搜索型最优化技术的简称,用这种方法可以系统地找到一组参数,由模型的输出给出实测径流的可能最佳还原值。具体地说,人们可先编制一个计算机程序,按实际问题给定步长和计算精度,在程序执行过程中,计算机按一定的规则进行迭代计算,直到使所求的参数群能满足目标函数准则为止。

2) 响应面。搜索技术一般用最小二乘法的目标函数。点绘目标函数值与参数值之间的对应关系,从而可以构造出响应面。具有一个或两个参数的典型响应面如图1-4所示。这个概念可以推广到具有 n 个参数的模型,其响应面为 $n+1$ 维空间,水文模型的目标函数都是凹函数,其响应面具有低谷的型式,如图1-4(a)所示。如响应面为单谷函数则只有一个最小值;如为多谷函数,则有整体最小值和局部最小值。

自动化参数优选试图求出相应于图1-4(b)中最小目标函数值 A 的参数值(x_{1A}, x_{2A})。在程序运行开始时,先给定 x_1 和 x_2 的初始值,通过计算求得该点的目标函数值。按运行规则改变 x_1 和 x_2 ,继续运算,使目标函数值逐渐减小。

图中三个点 A 、 B 和 C 的目标函数值都有可能满足给定的精度要求,但仅有 A 才是整体最小值, B 和 C 是局部最小值。从目前计算机的优选水平看,超过三个参数的优选就有一定的困难,特别是参数之间存在相关关系时,要得到整体的最优解几乎是不可能的。在概念性模型的率定中,一般需要优选许多参数,如斯坦福模型有10个参数需要优选,萨克拉门托模型有7个参数需要优选,这不仅需要大量机时,而且有时迭代过程还无法收敛。在实际工作中,搜索到的最优值常常是局部最优值,但这从技术上和费用上讲,都已经是“最佳”的参数值了。

3) 搜索方法。在响应面概念的指引下,有许多最优化的搜索方法。概括地说,大致可分为直接搜索法和间接搜索法两大类。直接搜索法采用目标函数值在响应面上的点作简单的比较,是一种比较有效的方法,但这种方法一般只能用到一个或两个参数的情况。间接搜索法又主要分为下降法(爬山法)和模式法。下降法利用响应面坡度(于当时点的位置)的附加信息来确定继续搜索的前进方向,最速下降法是基本方法,而水文模拟中用得较多

的则为罗森布洛克 (H. H. Rosenbrock) 建议的方法——旋转坐标轴法。模式法是按照事先规定的某种模式探索地前进, 这种方法的优点是操作简单, 便于记忆, 便于在计算机上实现。目前国内用得较多的步长加速法(又称Hooke—Jeeve法)就是模式法的一种。此法虽然比较复杂, 但实践证明, 效果较好。表1-1给出了流域水文模型参数优选方法研究使用情况的部分资料。

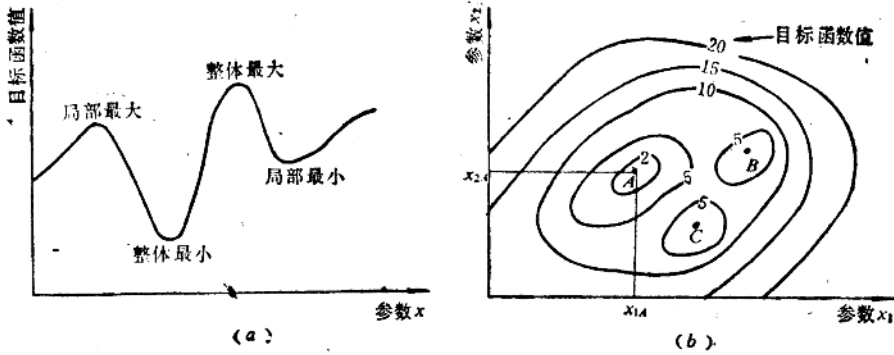


图 1-4 响应面示例

(a) 一个参数的响应面; (b) 两个参数的响应面

4) 用搜索方法优选参数时应注意的问题。由于流域水文模型常常比较复杂, 它不是一个简单的方程, 所以参数优选的问题比较困难。到目前为止, 这一问题的解决还不够理想。自动化优选, 如不加约束, 常会得出离奇的参数值, 即使加了约束, 又会遇到各式各样的困难。例如, 不同的初始参数群会得到不同的“最优”参数群; 又如非常不同的参数群常常能以同样可以接受的精度使输出与实测资料相拟合。造成这些困难的可能原因大概是:

①模型结构有缺陷。例如, 模型中有些参数不符合水文现象的物理过程, 甚至在模型中采用了理论上不正确的定量关系。

②模型中某些参数具有相关关系。这时, 必定会出现一个参数的变化可由另一个(或几个)参数的变化来补偿。例如对于两参数模型, 如果该两参数存在相关关系, 则响应面将出现一个狭长的谷, 如图1-5所示。在这种情况下, 继续搜索是困难的, 进展将十分缓慢。

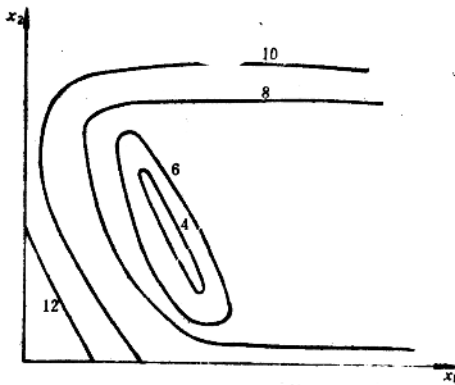


图 1-5 两参数有相关关系时的响应面