



高等学校教材

农村水利水电经济运行

郑州工学院 蒋水心 主编

07.9



高等学校教材

农村水利水电经济运行

郑州工学院 蒋水心 主编

XAH61/14



3 0109 6104 7

水利电力出版社



C253865

(京)新登字 115 号

内 容 提 要

本书是按照水利部《1990~1995 高等学校水利水电类专业本科、研究生教材选题和编审出版规划》的要求而编写的选修课教材。全书共五章。其内容包括基础知识,单一水库灌溉工程的经济运行;水库群灌溉工程及灌溉系统的经济运行;农村水电站水库长期经济运行的确定型动态规划模型;水电站厂内经济运行及农村水电系统的经济运行。

本书适用于水资源规划及利用、农田水利和水电站动力设备等专业,也可供农田水利、水电站工程规划设计及运行管理人员学习参考。

高等学校教材
农村水利水电经济运行
郑州工学院 蒋水心 主编

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,各地新华书店经销
北京市朝阳区小红门印刷厂印刷

787×1092 毫米 16 开本 7.5 印张 166 千字
1995 年 5 月第一版 1995 年 5 月北京第一次印刷
印数 001—820 册

ISBN 7-120-02145-1/TV·833
定价 4.40 元



前 言

建国 40 多年来,特别是改革开放 10 多年,我国农村水利水电事业有了很大发展。中小型灌溉工程、农村水电站和农村电气化县的建设已遍布全国。在促进农村地区的工农业生产发展、提高群众物质和文化生活水平以及保护、改善生态环境等方面都发挥了巨大作用。由于农村水利水电事业面广、量大,且大部分均在基层,工程的运行管理水平相对落后,效益尚未得到充分发挥。近年来,在我国大型水利水电工程的规划设计和运行管理中,优化经济运行的研究和实践已经取得了很大进步。实践证明,水利水电工程采用优化运行或经济运行,可以较程度的提高经济效益,是一种投入少、效益高的先进管理技术。本书旨在运用系统工程最优化技术及国内外研究成果,重点论述以中小型灌区和农村水电站为主体的农村水利水电工程的经济运行问题。书中的不少内容是我们近年来经实践证明可行或已为有关规程所采用的研究成果。本书由郑州工学院蒋水心同志任主编并编写第一章;吴泽宁同志编写第二、三章;徐光先同志编写第四、五章。清华大学施熙灿教授为主审。由于编写者水平有限,一定有缺点和不足之处,恳请读者批评指正。

编 者

1994. 6.

目 录

前 言

第一章 基础知识	1
第一节 河川及水库的特性	1
第二节 水文预报	4
第三节 各用水部门的需水特性和要求	15
第四节 电力系统及电力电量平衡	18
第五节 最优化技术简介	20
第六节 农村水利水电工程的经济评价	22
第二章 单一水库灌溉工程的经济运行	34
第一节 灌溉工程经济运行的基本知识	34
第二节 单一水库灌溉工程经济运行的线性规划模型	37
第三节 线性规划模型实例分析	44
第三章 库群灌溉工程及灌溉系统的经济运行	53
第一节 库群灌溉工程经济运行的线性规划模型	53
第二节 灌溉系统经济运行的非线性规划模型	57
第三节 灌溉系统经济运行的非线性规划模型应用实例	61
第四章 农村水电站长期经济运行的确定型动态规划模型	72
第一节 水电站经济运行概述	72
第二节 水电站长期经济运行的确定型动态规划模型	75
第三节 水电站长期经济运行的增量动态规划法	81
第四节 单库发电随机优化调度简介	84
第五章 水电站厂内经济运行及农村水电系统经济运行	86
第一节 按等微增率原则实现厂内经济运行	86
第二节 水电站厂内经济运行的动态规划模型	95
第三节 农村水电系统的经济运行	103
参考文献	114

第一章 基础知识

第一节 河川及水库的特性

一、河川的水文气象特性

河川的水文气象特性通常包括自然地理特点、气候气象特性和水情特性等三部分内容。河川的自然地理特点主要是指河道的长度、比降、流域的地形、地质、形状、面积及产流特点。气候气象特性一般包括河川流域的降水量、蒸发量、气温和湿度等内容。而水情特性则包括河流的水位、流量、含沙量等。水电站及灌区所在河川流域的水文气象特性,是进行水电站及灌区经济运行的基本依据。在各种经济运行的计算中,要综合分析并应用这些水文气象特性,以取得水利水电工程的最大效益。常用的河川水文气象特性资料有以下几种:

- (1) 历年实测水位资料。如丰水期的各种洪水水位,枯水期的各种低水位,灌溉最低水位及水库的各种特征水位。
- (2) 历年的实测流量及特征流量资料。如日平均流量,月平均流量,洪峰流量及洪水过程,年径流量及枯水流量等。
- (3) 降水量及暴雨特征。如日降水量,月降水量,暴雨降水量过程,最大一小时、最大一日、最大三日、最大七日降水量等。
- (4) 水面蒸发、陆面蒸发及库区、库岸、渠边渗漏量等。
- (5) 泥沙方面的有关资料。如河流的含沙量、输沙率及输沙量等。

在农村水电站水库及灌区经济运行的有关计算中,一般都是用过去的水文气象特性来估算未来的情况,这就要求河流必须尽可能有长系列的水文气象资料,以使其具有较好的代表性。流域内的人为措施如水利化、田园化和绿化带等都对流域内的水文气象特性产生影响。在引用原有点测资料进行计算时,必须进行认真分析,必要时可根据流域实际情况,对原有资料进行修正。

为了编制合理的农村水电及灌溉水库经济运行方案,必须掌握水利水电工程所在河流过去和未来的径流变化规律,也即河川的来水规律。所谓来水,是指水利水电工程所在河流断面以上流域内流过该断面的河川径流量;来水规律则是指在不同时间或频率下,流过水利水电枢纽所在河流断面的径流特性。河川的径流特性一般可用:流量 Q (m^3/s)、径流量 W (m^3)、径流深 Y (mm)、径流时历特性和频率特性曲线等来表示。

二、水库特性

1. 水库的面积特性

水库的面积特性反映了水库的地形特性。它是用水库水面积和水库水位二者间的关系曲线 $F=f(z)$ 来表示的。水库的面积特性曲线及其绘制方法见图 1-1 所示。水库面积特性

曲线的绘制是在库区 1/1000~1/10000 的地形图上,用面积仪计算面积或蒙上透明方格纸数方格的方法,按比例将坝轴线与各条不同等高线范围的面积计算出来,然后即可点绘水库水位与水库面积的关系曲线。水库的面积特性曲线用于计算水库的容积和估算水库的蒸发损失。

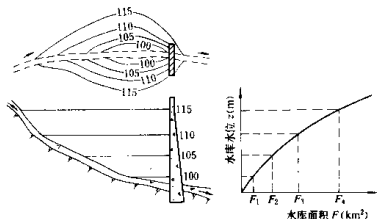


图 1-1 水库面积特性曲线及其绘制方法

2. 水库的容积特性

水库的容积特性是指水库的容积,随水库上游水位的变化而变化的一种特性曲线。它是通过水库面积特性曲线求得的。由库区地形图,从最低等高线所包的水面积,乘以相邻水面间的高度即为该两水库水面间的水库容积,由下向上逐层计算并累计之,即得不同水库水面高程及相应高程以下的水库容积,据此即可绘制水库水位与容积的特性曲线如图 1-2 所示。其表示式为 $V = f(z)$ 。水库容积特性曲线是进行水库水量调节计算和经济运行调度控制的主要基础资料,亦可据以计算水库的渗漏水量损失。按水库水面是水平面的假定所求得的水库特性曲线,称为静水特性曲线。考

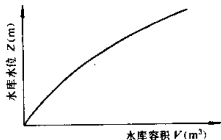


图 1-2 水库容积特性曲线

虑水库水面受回水影响所求得的水库特性曲线,称动水特性曲线。一般中小型水利水电工程可按静水水平面考虑。

3. 水库的特征水位与相应库容

水库容积的大小是决定水库调节径流能力和工程规模的重要参数,亦是水库经济运行的主要控制约束条件。合理确定水库的特征水位及相应库容是水库规划设计的一项主要任务。图 1-3 标出了长期调节水库具有专门含义的各种特征水位及其相应库容。

水库的死水位是指水库在正常运用情况下允许水库消落的最低蓄水位,该水位以下的库容即为死库容 V_d 。水库在正常运用情况下为满足设计兴利要求,在设计枯水年或枯水期开始时应蓄到的水库水位,称为正常蓄水位。该水位与死水位之间的库容为兴利库容 V_{st} 。水库在汛期允许兴利蓄水的上限水位,称为防洪限制水位。为保护下游城镇、农田、工矿企业等,水库控制下泄流量面拦蓄洪水,这时在坝前达到的最高水位,称为防洪高水位。该

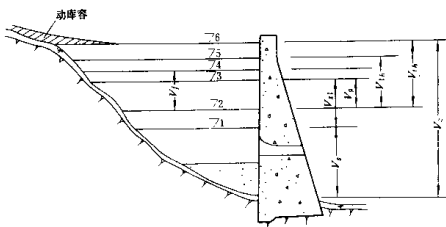


图 1-3 水库特征水位及其相应库容示意图

1—死水位 Z_d ; 2—防洪限制水位 Z_{fz} ; 3—正常蓄水位 Z_{sh} ; 4—防洪高水位 Z_{fh} ;
5—设计洪水水位 Z_{ds} ; 6—校核洪水水位 Z_{ch}

水位与防洪限制水位间的库容,称为防洪库容 V_f 。当防洪限制水位处于正常蓄水位以下时,防洪库容与兴利库容将有部分库容相互结合,称为共用库容 V_s 。遇大坝设计或校核洪水时,水库坝前达到的最高水位称为设计或校核洪水水位。该两水位与防洪限制水位之间的库容分别称拦洪库容 V_{sh} 和调洪库容 V_{sh} 。校核洪水水位以下的静库容即为水库的总库容 V_s 。而死水位以上的静库容则称有效库容。

4. 表示水库特性的参数

(1) 水库调节系数 α 水库调节后下泄的流量即调节流量与水库所在河流多年平均流量的比值,称为水库调节系数。其大小可表示通过水库调节后使枯水期流量提高的程度,该值变化范围为 $0 < \alpha < 1.0$ 。

(2) 库容系数 β 水库兴利库容与水库所在河流多年平均年径流量的比值,称为库容系数。库容系数的大小表示水库对径流调节的能力及程度大小。系数越大则调节性能越好。

(3) 水量利用系数 η 经水库调节后河流多年平均被利用水量与水库所在河流多年平均年径流量的比值,称为水量利用系数。

三、水库的水量损失及水量平衡

1. 水库的水量损失

水库的水量损失包括蒸发损失、渗漏损失和结冰损失。水库的蒸发损失是指水库建成后,由于回水区水面与陆面蒸发量不同而造成的蒸发损失,其计算公式为

$$\Delta W_e = 1000(h_e - h_i)(F - f) \quad (1-1)$$

式中 ΔW_e ——水库蒸发损失, m^3 ;

h_e ——库区水面蒸发深度, mm , 可根据当地气象站资料或经验公式来计算;

h_i ——库区陆面蒸发深度, mm , 可从当地陆面蒸发量等值线图查得,或从坝址以上流域而积内多年平均降水深与多年平均年径流深之差求得;

F 、 f ——水库水面面积及库区原有水面面积, km^2 。

水库的渗漏损失主要是指库床、库岸以及坝基的渗漏。由于水库渗漏水量与很多因素

有关,一般难以精确计算。对中小型水库工程,可采用简便的方法予以估算。根据库区不同水文地质条件,取水蓄水量(库容)的某一百分数作为水库的渗漏水量。

结冰损失是指在冬季严寒地区,水库岸边水面结冰所造成的水量损失。结冰损失实质上是径流的一种时程再分配,对中小型水库工程一般可不予计算。

2. 水库的水量平衡

水库的水量平衡是指某一时段内入库水量与出库水量之差等于该时段内水库蓄水量的变化值。水库水量平衡的表达式为

$$W_r - W_c = \pm \Delta V \quad (1-2)$$

$$\text{其中} \quad W_c = W_y + W_q + W_l \quad (1-3)$$

$$W_l = \Delta W_z + \Delta W_d + \Delta W_b \quad (1-4)$$

式中 W_r ——时段入库水量, m^3 ;

W_c ——时段出库水量, m^3 ;

$\pm \Delta V$ ——时段水库蓄水量的变化值, m^3 , “+”表示蓄水量增加, “-”表示蓄水量减少;

W_y ——时段各部门用水量, m^3 ;

W_q ——时段水库弃水量, m^3 ;

W_l ——时段水库水量损失值, m^3 , 包括蒸发损失 ΔW_z 、渗漏损失 ΔW_d 和结冰损失 ΔW_b 。

水库的水量平衡原理是进行水库调节计算和指导水库经济运行的一个最基本方程式。

第二节 水 文 预 报

水文预报是利用过去水情、雨情及其他水文气象要素等观测资料,统计分析河流水文变化的规律,编制预报方案,根据当时已出现的水文气象要素以预估未来水文要素的一种科学方法。水文预报在保证工农业生产、充分利用水利资源、发挥水利水电工程的最大效用以及保障国家和人民生命财产等方面都有重大作用。例如,在防汛抗旱斗争中,可根据预报水情及雨情,事先做好防止重大水旱灾害的各种措施,以减轻灾害;在水库管理运用中,根据水情及雨情的预报,编制合理的调度方案,既保证水库工程的安全,又可充分利用库容和水量,最大限度地满足各兴利部门的要求,取得尽可能多的综合利用效益等。

最需要的水文预报是径流预报,这包括洪水预报、枯水预报和年径流预报。按预报期的长短,可分为短期预报和中长期预报。短期预报的预见期一般为数小时至数天,主要根据已出现的水文气象要素如暴雨量、上游河段的流量等以预报洪水及其过程,预报精度较高。中长期预报,预报期较长,从数天至数月甚至几年,一般要根据气象及天气形势等因素进行分析预测,预报精度较低。

一、短期洪水预报

短期洪水预报包括河段洪水预报和降雨径流预报。河段洪水预报是以河段为基本单元,以河槽洪水波运动的理论为基础的河段汇流理论和预报方法。洪水波是沿着河道由上向下

传播的。在河段上游某站测得水位与流量以后,就可预报河段下游某站的水位与流量。这种预报方法的预见期就是洪水波在该河段间的传播时间。河段洪水预报的方法有:相应水位(流量)法和流量演算法等。直接利用流域内的降雨资料预报洪水称为降雨径流预报。这种预报方法是以达到地面后的降雨量作为预报的基础。预见期比较长,精度亦较高,故在短期洪水预报中用得较多。降雨径流预报主要包括两大部分。一是流域内一次降雨过程产生的径流量;二是相应流域出流断面所形成的洪水流量过程线。前者是径流量预报称为产流,后者是洪水过程预报称为汇流。

1. 相应水位(流量)法

本法利用河段上、下游断面已有的实测水位(流量)过程线的资料,建立上、下游水位(流量)间的经验相关关系及水位(流量)与传播时间的经验相关关系,这些相关关系一般用相关图表示。当已知上游站的水位(流量)后,即可据此预测下游站的水位(流量)及洪水传播时间。

2. 合成流量法

河流河段中若有支流汇入时,下游站的洪水是由上游干、支流洪水复合而成的。假定由上游各站(包括干、支流)传播到下游出口站的流量是相互独立的,即干、支流间洪水波彼此互不干扰,符合线性叠加原理,则上游站和下游站的相应流量关系式为

$$Q_{x,t} = f\left(\sum_{i=1}^n Q_{i,t-\tau_i}\right) \quad (1-5)$$

式中 $Q_{x,t}$ —— t 时刻下游站流量, m^3/s ;

$Q_{i,t-\tau_i}$ ——上游第 i 站在 $t-\tau_i$ 时刻的流量, m^3/s ;

n ——上游干、支流站数,且 $i=1, 2, \dots, n$;

τ_i ——上游第 i 站至下游站的洪水传播时间, h 。

上述相应流量关系式,一般可用经验相关图来表示。即在考虑干、支流各站的传播时间后,将各上游站的相应流量叠加起来,使合成后的流量能同时到达下游站,然后建立此合成流量与下游站相应流量的关系曲线,如图 1-4。图中表示我国东南某省一条主要江河,上游有三条干、支流汇合而成,分别设站 1、2、3 及 4。已经测得各站的若干洪水流量资料及上游各站至下游(第 4 站)站的洪水传播时间 τ_1 、 τ_2 及 τ_3 。则以时刻 t 的下游站流量 $Q_{4,t}$ 与上游各站相应流量的合成值 $\sum_{i=1}^3 Q_{i,t-\tau_i} = Q_{1,t-\tau_1} + Q_{2,t-\tau_2} + Q_{3,t-\tau_3}$, 即可绘制

出图中的相关线。应用时,若已知相应时刻上游各站的流量即可查图以预报下游站的流量。合成流量法的预见期,决定于上游各站中最短的传播时间。但通常上游各站中以干流站的流量

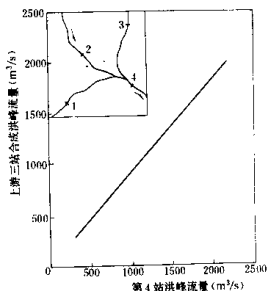


图 1-4 合成流量法预报图

为最大,故常以干流的传播时间作为方案的预见期。可以根据已有资料建立上游干流站的流量与传播时间的关系曲线,以备查用。

3. 流量演算法

河槽洪水波运动是一种渐变不稳定流,直接解算要求资料多,且工作量也大。在水文分析计算中,习惯用流量演算法求解,即以河段水量平衡方程式代替连续方程,用槽蓄函数代替动力方程。当无区间入流时,流量演算法的基本公式为

$$\frac{1}{2}(Q_{S,1} + Q_{S,2})\Delta t - \frac{1}{2}(Q_{r,1} + Q_{r,2})\Delta t = S_2 - S_1 \quad (1-6)$$

$$S = f(Q) \quad (1-7)$$

式中 $Q_{S,1}$ 、 $Q_{S,2}$ ——时段始、末上断面的入流量, m^3/s ;

$Q_{r,1}$ 、 $Q_{r,2}$ ——时段始、末下断面的出流量, m^3/s ;

S_1 、 S_2 ——时段始、末河段槽蓄量, m^3 。

若河段内有区间入流时,则水量平衡方程式(1-6)的左边,应增加 $\frac{1}{2}(q_1 + q_2) \cdot \Delta t$ 项,其中, q_1 及 q_2 为时段始、末的区间入流量。式(1-7)为槽蓄函数,表示河段内河槽蓄水量与流量的关系函数。可用曲线图形或方程式表示。目前,一般都应用马斯京根槽蓄曲线方程。当已知入流过程 $Q_S(t)$ 、区间入流 $q(t)$ 及槽蓄函数 $S=f(Q)$ 后,若已知初始条件 $Q_{r,1}$ 及 S_1 ,联立求解二方程(1-6)和(1-7),可求得逐时段的出流量,即 $Q_r(t)$ 。应该指出,利用本法,预报时段末的下断面出流量 $Q_{r,2}$ 时,必须已知时段末上断面入流量 $Q_{S,2}$,而两者是同时出现的。因此,从预报的角度看,流量演算法是没有预见期的,故不能单独使用该方法进行河段洪水预报。一般应先用其他方法预报出上断面的入流量 $Q_{S,2}$ 或其过程 $Q_S(t)$,再用流量演算法推求下断面的出流过程 $Q_r(t)$ 。几种方法相结合进行预报。

4. 降雨径流相关法

降雨径流相关法是根据流域平均降雨量、相应的径流量以及影响它们的主要因素间建立相关关系的一种预报方法。建立降雨径流相关图需要有足够多的实测数据,才能反映不同降雨情况时流域产流特性的综合经验关系。因此,除应注意对作出的相关图进行合理性检查外,主要应加强对流域的降雨径流成因分析和流域预报模型的研究。降雨径流预报中第一步是通过产流分析,由降雨量预报净雨量即径流量;第二步是通过汇流分析,由净雨过程推求流域出口断面的洪水流量过程。具体方法可参阅有关水文书籍。

降雨径流预报的预见期是流域的汇流历时 τ 。见图 1-5。但在预报作业时,当 t_0 时刻发布预报时,其所依据的降雨量 P 常包括两部分:一部分是 t_0 时刻以前实测的降雨量;另一部分是 t_0 以后 Δt 时段内预报的降雨量。利用产流及汇流原理,分析计算出 t_0 至 $t_0 + \Delta t + \tau$ 时段内预报的洪水过程线,见图 1-5 中下部虚线所示。由于 t_0 以后的降雨量是预报值,会有一定误差,且预报方案本身亦会产生误差,两者都会影响预报的精度。在分析计算并作预报时,应根据逐时段的实测降雨量对原预报过程进行逐时修正。

降雨径流预报法不仅适用于预报流域的洪水过程,而且常可与其他预报方法相配合,组成一套完整的预报方案。例如,在马斯京根流量演算法中,由于该方法本身没有预见期,可先应用降雨径流预报法,预报出上断面的入流过程 $Q_S(t)$ 。又如,对区间入流比重较大的

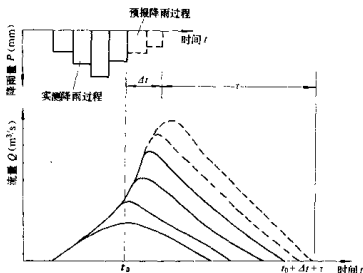


图 1-5 降雨径流预报示意图

河段，用降雨径流预报法先预报区间的入流过程 $q(t)$ 。再如，在多支流河段应用合成流量预报法时，为了不缩短预见期，可对传播时间短的上游站，用降雨径流预报法预报该站的流量，再以此流量参加合成流量的计算。

二、枯水预报

枯水季节，流域降水量较少，蒸发损失也比较小且稳定。枯季径流的主要来源是流域蓄水量的补给，流量过程呈现稳定的消退规律，这是枯季径流的主要特点。现有枯水预报方法均以此为基础。一般流域的枯季径流来自地下潜水带和岩层间含水带。这时期河槽水位常低于两岸地下水位，两岸潜水逐渐向河槽补给。流域内河网、湖泊、洼地是地面上主要蓄水地区，洪水期滞留的水量，其中一部分将在洪水过后逐渐流出，但持续时间不长，总水量相对也不大，只有在枯水期的初期阶段，河道内流量是由这部分水量补给的。但枯水期大部分时期的流量，将仍由地下蓄水量补给。不同自然地理及水文地质条件下，枯季径流地下水补给情况互有差异，其补给的消退规律也不相同。因此，在制定枯季径流预报方案时，必须深入研究分析补给条件及有关因素，这样才能更好掌握其消退规律，提高预报精度。

1. 退水曲线法

退水曲线是在分析流域出口断面流量退水过程线及其变动规律的基础上制作出来的，如图 1-6 所示。对于具有自由水面的地下潜水，可以假定地下蓄水量 S 与出流量 Q 间存在线性关系，即可以表示为

$$S = KQ \quad (1-8)$$

式中， K 相当于地下水的汇流时间。

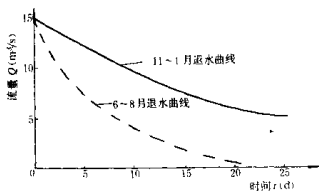


图 1-6 退水曲线图

当枯水期地下水无入渗补给与蒸发损失时:

$$\begin{aligned} \text{因} \quad \frac{dS}{dt} &= -Q \\ \text{故} \quad dS &= -Q dt \\ \frac{dQ}{Q} &= -\frac{1}{K} dt \\ \text{则} \quad Q_t &= Q_0 e^{-\beta t} \end{aligned} \quad (1-9)$$

此即为地下水退水流量过程的表达式。

式中 Q_t ——退水开始后 t 时刻的地下水出流量, m^3/s ;

Q_0 ——退水开始时刻 (t_0) 的地下水出流量, m^3/s ;

β ——退水系数, 且 $\beta=1/K$, $1/\text{s}$;

e ——自然对数的底。

对于有实测资料的流域, 可以根据无雨期间的退水流量资料, 点绘出相应的若干条退水曲线, 将各条退水曲线在水平方向上移动, 使其下端互相重合、连接, 取其下包线, 将由地面蓄水量消退所形成的出流量退去, 即得退水曲线 (见图 1-6)。图中考虑了不同季节的影响。应用时, 只要已知退水开始时刻 t_0 及相应流量 Q_0 , 由图或公式 (1-9) 即可预估 t_0 以后不同时刻 t 的枯水期流量。

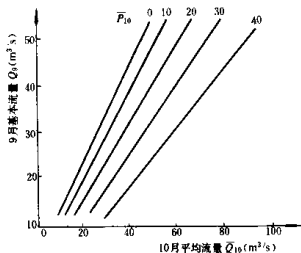


图 1-7 前后期径流量相关图

2. 前后期径流相关法

本法利用已知的前期径流和后期径流资料, 建立二者间的相关关系, 据此当已知前期径流时, 即可预估后期径流。实质上这是退水曲线法的另一种形式。时段长度可取一旬、一个月或整个枯水季。若在预报期内有降雨或其他因素对枯水期径流有较大影响时, 则应引入适当参数再作相关分析, 见图 1-7。图示北方某河 9 月份基本流量 (扣除地面径流后的基流) 与 10 月份平均流量的相关关系。考虑到预报期内 (即 10 月) 有较大的降雨对枯水径流有影响

影响, 故取 10 月份流域平均降雨量 $\overline{P}_{10}$ 作为参数, 建立流域 9 月基流与 10 月平均流量相关图 $Q_9 \sim \overline{P}_{10} \sim \overline{Q}_{10}$ 。在选取已有资料绘制相关图时, 应考虑汇流时间的影响。如预报值为 10 月径流量, 流域汇流时间为 3 天, 则应取 9 月 28 日至 10 月 28 日期间的降水量作参数。应用相关图进行预报时, 前期径流为已知值, 而参数降雨量则应先采用其他方法进行预估, 然后才能查报后期径流量。北方有冰情的河流, 考虑到冰情对枯季径流的影响, 可取气温作为参数, 建立相关关系。

三、中长期预报简介

国民经济各部门不仅要求准确的短期预报, 为防洪、抗旱及水利水电工程经济运行服

务,而且要求预见期更长的中长期预报,以适应国民经济长远发展的需要。例如,为了满足水库防洪、兴利的合理调度和经济控制运行,常要求提供预见期为几个月甚至1~2年的长期水文预报。目前长期预报的方法虽多,但归纳起来,大体可分为以下几类:一类是分析水文要素自身随时间变化的统计规律,然后利用这种规律进行预报,如趋势法、周期分析法、时间序列分析法等;一类是考虑到引起水文要素长期变化因素的复杂性,从分析预报对象的因素着手,从中挑选出若干预报因子,然后用多元回归分析法建立预报模型进行预报。还有一类主要是从天气形势、大气环流等地球物理因素等方面分析降雨与这些因素的关系机制,建立预报模式。这类方法涉及天气、气象等诸多因素,难度大、精度较差,实际应用尚在探索中。以下仅对几种简易方法作些介绍。

(一) 一次移动平均法

移动平均法实际上是一种不断移动分段平均的方法。对于一个具有时间序列的数据系列,一般常用其多年平均值来表示它的数值特征。但简单的算术平均值只反映这些变量的平均水平,反映不出数据变化的大小及变幅。若用数据点绘的图形来描述,则可以反映系列变化的波动及其发展,但因数据上下波动,无法定量地描述其特征及变化趋势。为此,在简单平均值和点绘自然数据描述之间找出一种改进方法,即分段平均法。按时间周期,次第将变量 Y_t 分成都含有 n 个周期(例,5个周期)的段,再取各段的平均值。例,今有15年年径流量资料,当 $n=5$ 周期时,可分为3段,即第1~5年为第一段,第6~10年为第二段,第11~15年为第三段,再求各段的平均值,用这三个平均值来反映这个系列的数量特征,这比单纯用15年的一个平均值更确切。但分段平均法的缺点是使数据点大为减少,上例原有15个点据经分段后只有三个平均值点据,且呈阶梯状,不能反映变量连续变化过程。如果分段不按截然分开的段进行,而是按数据点的顺序,逐点推移,则情况就大有改进了。仍以上15年数据点为例,仍取 $n=5$,即取每5年为一平均值,按点序向后连续移动,分别是第1~5, 2~6, 3~7, …… , 11~15年等,共有11个分段及相应各段平均值,数据点较多,且连续性后移变动,这就是移动平均法。应用这种方法进行预测称为平滑预测技术。

1. 移动平均值的计算

对于具有时间序列的数据系列,如降雨量、径流量等,可以用平滑预测技术进行预测。平滑之意就是使原来按原始数据点绘出的不规则折线大致平滑化,以便分析事件的发展变化,对其作出数量预测。平滑预测技术分有不同的阶次,如一次、二次、三次等。当数据不具有某种持续增长或下降趋势,而是围绕某一平均线上随机波动时,采用一次平滑预测模型。水文数据系列大都符合这一要求。平滑预测技术又分为移动平均法和指数平均法。此处仅对一次移动平均法进行介绍。

设已知第 t 期的数据为 x_t , 且

$$t=1, 2, 3, \dots, T$$

$$x = x_1, x_2, x_3, \dots, x_T$$

则第 t 期的一次移动平均值为

$$M_t^{(1)} = \frac{1}{n} (x_t + x_{t-1} + x_{t-2} + \cdots + x_{t-n+1}) \quad (1-10)$$

式中 上角标 (1) —— 表示一次移动值, 若只计算一次移动, 亦可删去;

下角标 t —— 周期次数;

n —— 计算移动平均值时所取数据 x_t 的项数, 称为跨越周期数或分段数据点数。

上式可进一步变为

$$\begin{aligned} M_t &= \frac{1}{n} (x_t + x_{t-1} + x_{t-2} + \cdots + x_{t-n+1}) \\ &= \frac{1}{n} (x_{t-1} + x_{t-2} + \cdots + x_{t-n+1} + x_{t-n}) + \frac{1}{n} (x_t - x_{t-n}) \\ &= M_{t-1} + \frac{1}{n} (x_t - x_{t-n}) \end{aligned} \quad (1-11)$$

由式 (1-11) 知, 若已知前一周期的移动平均值 M_{t-1} , 则只要计算出 $\frac{1}{n} (x_t - x_{t-n})$ 项, 就可求得后一周期的移动平均值 M_t 。这是一个迭代计算过程。在第 t 期时, 若要进行第 $(t+T)$ 期的预测, 可将第 t 期的计算值 M_t , 直接作为第 $(t+T)$ 期的预测值 Y_{t+T} , 即 $Y_{t+T} = M_t$ 。

2. 应用移动平均法的预测步骤

(1) 将已知实际时间序列数据点绘在图上, 判别是否属于持续增长或下降趋势的... 若不属于这种系列, 则用本法预测, 否则应选用其他方法, 如二次移动平均法等。

(2) 选定合适的跨越周期数 n 。 n 值越大则对随机数列的“抹平”作用就越强, 而对新数据的反应就越不灵敏; n 值越小则反之。在实际应用中, 可在一定范围内选取几个 n 值进行计算比较, 最后选定一个合适值。若原资料数据点的基本图形经常改变, 应选较小的 n 值。

(3) 按公式 (1-11) 计算一次移动平均值 M_t 。

(4) 按预测要求的 T , 得预测值 $Y_{t+T} = M_t$ 。若选 $T=1$ 时, 则可由 Y_t 预测 $Y_{t+1} = M_t$ 。

3. 预测计算的实际应用

示例 (1) 已知某河历年年径流量如表 1-1 所示, 试进行预测分析。

表 1-1 历年年径流量及预测计算表 (10³m³)

年 序 t (1)	年径流量 Y_t (2)	$n=3$		$n=5$	
		M_t (3)	Y_{t+1} (4)	M_t (5)	Y_{t+1} (6)
1980	2000				
1981	1350				
1982	1950	1767			
1983	1975	1758	1767		
1984	3100	2342	1758	2075	
1985	1750	2275	2342	2025	2075
1986	1550	2133	2275	2065	2025
1987	1300	1533	2143	1935	2065
1988	2200	1683	1533	1980	1935
1989	2770	2090	1683	1915	1980
1990	2350	2440	2090	2034	1915

解算过程:

1) 已知周期 $t=1\sim 11$ 。

2) 先选跨越周期数 $n=3$, 则从第 3 个周期即 1982 年开始有一次移动平均值, 各 M_t 的计算式如下:

$$M_{t=3} = \frac{1}{3}(2000 + 1350 + 1950) = 1767 \times 10^4 \text{ m}^3$$

$$M_{t=4} = \frac{1}{3}(1350 + 1950 + 1775) = 1758 \times 10^4 \text{ m}^3$$

$$= 1767 + \frac{1}{3}(1775 - 2000) = 1758 \times 10^4 \text{ m}^3$$

.....

若取 $T=1$, 即由第 $t=3$ 年预测第 $(t+T)=4$ 年的年径流量为 $Y_{t+1}=Y_4=M_{t=3}=1767 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

3) 再选 $n=5$ 作为比较。此时从第 5 周期即 1984 年开始有一次移动平均值, 各 M_t 的计算式为:

$$M_{t=5} = \frac{1}{5}(2000 + 1350 + 1950 + 1775 + 3100) = 2075 \times 10^4 \text{ m}^3$$

$$M_{t=6} = 2075 + \frac{1}{5}(1750 - 2000) = 2025 \times 10^4 \text{ m}^3$$

.....

仍取 $T=1$, 则预测 $Y_{t+1}=Y_7=M_{t=6}=2025 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

将表 1-1 中 (3)、(5) 两列绘成图 1-8, 再与原年径流量 ($n=1$) 相比较, 可知 n 取值越大, 则预测值连线越平滑。本预测方法对预报今后一定时期内年径流大体发展趋势较好, 但对近期几年内的预测值精度不高。

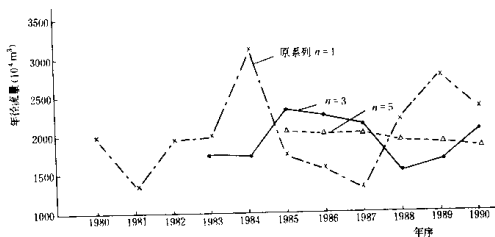


图 1-8 一次移动平均法预测图

示例(2) 已知某农村水电站 1952~1987 年共 36 年的年径流资料如表 1-2。经一次移动平均法计算 (取 $n=3, 6$), 其各年预测值的联线如图 1-9 所示, (计算过程从略)。由图

知, 1970~1987 年的 17 年间, 年径流量呈周期性变化, 继 1985、1986 年及 1987 年之后, 1988、1989 年的年径流量仍为偏枯年的可能性较大, 而 1990 年后可望回升。

表 1-2 水电站年径流量 (10⁸m³)

年 份	径流量	年 份	径流量	年 份	径流量	年 份	径流量
1952	127.6	1962	123.8	1972	98.7	1982	82.3
1953	147.4	1963	106.2	1973	115.8	1983	204.3
1954	243.1	1964	115.3	1974	168.2	1984	170.3
1955	116.1	1965	113.8	1975	124.8	1985	82.99
1956	146.9	1966	100.4	1976	71.6	1986	84.61
1957	167.9	1967	82.5	1977	132.8	1987	104.11
1958	108.6	1968	108.0	1978	46.68		
1959	110.38	1969	102.2	1979	81.2		
1960	134.4	1970	111.3	1980	135.0		
1961	91.1	1971	114.4	1981	138.5		

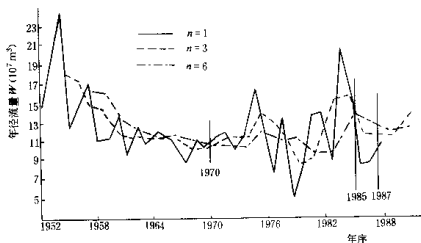


图 1-9 移动平均序列图

(二) 多元线性回归分析法

1. 预报因子的挑选

预报因子的挑选是长期预报的关键。挑选因子首先应该根据形成径流的特点, 进行物理成因上的考察分析。例如, 对雨洪而言, 降雨量是决定水量丰枯的主要因素, 而降雨量又决定于前期天气的大气环流形势。特别是一个地区发生异常旱涝现象, 往往是由于大气环流持续发生了异常, 而大气环流连续异常, 在时间和空间上都有一个发生和发展的过程。因此, 用前期环流特征作为预报的依据无疑是很意义的。考虑到天气环流长期维持和发展的能量来源, 可以将太阳活动 (一般用太阳黑子数代表) 和海洋状况 (如海水表面温度) 等作为预报因子。当然, 由于影响水文要素长期变化因素的复杂性以及目前科学水平的限制, 许多因子与预报对象之间的内在联系尚未被全部揭露。应力求在成因分析的基础上挑选出一些最主要的因子, 使长期预报建立在可靠的物理成因基础上。其次, 还需对预