

电子计算机 在洪水预报 水库调度中的 应用

华东水利学院

富春江水电厂

上海计算技术研究所

华东电管局电网总调度所



水利电力出版社

电子计算机 在洪水预报水库调度中的 应用

华东水利学院
富春江水电厂
上海计算技术研究所
华东电管局电网总调度所

水利电力出版社

电子计算机在洪水预报水库调度中的应用

华东水利学院 富春江水电厂

上海计算技术研究所 华东电管局电网总调度所

*

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

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 7.75印张 169千字

1983年11月第一版 1983年11月北京第一次印刷

印数 0001—5630册 定价 0.82元

书号 15143·5290

000000

内 容 提 要

本书是根据近几年研究的洪水预报水库调度方案并参照有关资料编写而成。经过三十多次洪水检验，这个方案取得了明显的效果。全书共分四章及两个附录，第一章为产流量计算，第二章为汇流计算，第三章为水库调度，第四章为水电站洪水预报调度方案，附录I为水库不稳定流问题，附录II为几个算法。书中所列程序是以ALGOL-60算法语言编写。

可供水电站及水库的水库调度、水文等方面的技术人员使用，也可供大专院校有关专业师生参考。

前 言

为了更好地发挥已建水电站的效益，从1972年起，华东水利学院、富春江水电厂、上海计算技术研究所和华东电管局电网总调度所等单位共同协作，研究如何使用电子计算机进行水电站洪水预报水库调度。经过四单位的共同努力，逐步形成了一个完整的洪水预报水库调度方案。方案和程序编成后，为便于实施，复旦大学参加了程序移植工作。近几年通过三十余次洪水检验，根据预报采取洪前预泄和拦蓄洪尾等有效措施，进行合理调度，取得了防洪的主动权，做到了安全渡汛、少淹农田、经济多发。实践表明，以电子计算机代替人工手算，优点是明显的。它既可加快速度，争取调度时间，改善汛期紧张繁忙局面；又可提高预报精度，提高水电站运行水平。1979年6月原电力工业部为此召开了现场鉴定会，普遍认为方案比较合理，实际使用效果较好。

为了总结交流经验，原电力工业部要求参加协作的四单位，将电子计算机在洪水预报水库调度中的应用编写成书。本书系根据近年来的工作小结并参照有关资料编写而成。

全书共分四章和两个附录。前三章是洪水预报水库调度的基本原理、方法及部分计算过程。第四章介绍一个水电站的洪水预报调度方案，附录I是关于水库不稳定流问题，附录II是几个算法。

本书由鲁子林、盛昇国、郭万荣、吴竹亭编写。张勇传、吴恒安、伍宏中、张云霄以及西津水电厂曾审阅初稿并

提了许多宝贵意见。全书修改后，经叶秉如教授最后审定。

由于时间紧迫，水平所限，谬误之处一定难免，恳请读者批评指正。

编 者

目 录

前言	
概述	1
第一章 产流量计算	4
第一节 产流量计算方法	4
第二节 流域蒸散发量计算	18
第三节 参数优选	24
第四节 产流量计算过程	32
第二章 汇流计算	40
第一节 坡地汇流	40
第二节 河槽汇流	52
第三节 参数优选和地区综合	61
第四节 流量过程预报	85
第三章 水库调度	88
第一节 综合利用分析	88
第二节 动态规划方法	92
第三节 洪水调度	98
第四节 电力调度	104
第五节 预报误差处理	121
第六节 水库调度计算过程	124
第四章 水电站洪水预报调度方案	135
第一节 概况	135
第二节 方案简介	139
第三节 算例	162
第四节 程序	180
附录 I 水库不稳定流问题	207
附录 II 几个算法	226

概 述

江河的水情变化，不但关系到人民的生产和生活，有时甚至会威胁人民的生命财产安全。因此，水情预报是一项非常重要的工作，其中洪水预报更为重要。解放以来，全国各地兴建了大量水利、水电工程，大小水库星罗棋布。如何加强现有工程的管理，进一步发挥它们的作用，是一项十分重要的任务。本书主要是通过一个流域面积较大，调节性能较低的水电站，介绍使用电子计算机进行短期洪水预报和水库调度计算方面的问题。

短期洪水预报的显著特点是准确和及时。只有准确的预报，才能拟定正确的分洪、蓄洪方案，采取恰当的防汛抢险措施；才能合理调度运用水利资源；只有及时发布预报，才能在洪水到来之前，有时间进行合理调配，达到防洪、兴利的目的。因此，准确和及时两方面的要求对洪水预报来说都很重要。然而，在使用电子计算机之前，这两个方面是有矛盾的。因为由降雨到形成河流某断面的流量是一种复杂的变化过程，要准确预报，通常要采用比较严密的计算方法，而采用这样的方法，就要化费比较多的时间，所以过去为了及时发布预报，不得不采用一些简化方法，从而降低了预报精度。如果使用电子计算机进行预报，这方面的矛盾就会明显改善。由于电子计算机计算速度快，因而可以尽量考虑各种水文气象要素在时间上和空间上分布的不均匀性，可以采用比较严密的计算方法，计算中所用参数也可由电子计算机根

据实测资料进行优选。所以使用电子计算机作洪水预报，可以提高预报精度。此外，还有发布预报及时，操作简单，不易出错的优点。

用电子计算机进行洪水预报可从以下五个方面考虑：

1. 分块

为了考虑降雨、蒸发等水文气象要素在空间上分布的不同以及各地区地形、土壤、植被、蓄水量的差异，可将整个流域划分为面积较小的许多单元面积，单元面积应当尽可能小一些，单元面积之间不要相差太大。实际划分时要视流域站网分布情况、资料条件及作业预报的要求而定。一般讲，各单元面积参数要分别由本单元资料优选。

划分单元面积，需注意以下三点：

（1）考虑流域汇流规律，要尽量按照流域自然分水线和等流时线位置划分；

（2）各单元面积上的代表性雨量站要具备可靠的报讯条件；

（3）为使雨量具有代表性，报讯雨量站应尽可能位于各单元面积中心。

2. 分时段

在径流形成过程中，许多因素都是随着时间变化的，有些（如降雨、径流）变化还相当剧烈。计算时段取得太长，势必均化，反映不出固有规律。为了反映实际情况，时段要力求取得短些，但是由于观测资料的限制，不可能分得很短。具体如何划分，应视资料条件而定。

3. 分阶段

对一个流域而言，从降雨到形成出口断面流量过程，一般需经过扣除损失、流域汇流、河槽汇流等三个阶段。

4.分水源

径流大体可划分为地面径流和地下径流两部分。由于这两部分径流的汇流特性有显著差异，为了提高预报精度，要分开计算。

5.分层

流域蒸散发量不仅与流域蓄水量的大小有关，而且受蓄水量的垂直分布的影响。所以，流域蒸散发量最好分层计算；径流量也可考虑流域蓄水量的垂直分布的影响，同样采用分层计算方法。

关于水库调度，本书将研究洪水期短期调度。在统一考虑各需水部门的综合要求的情况下，着重解决防洪和发电的矛盾。在发电方面，尽量利用洪水预报进行洪前发电预泄，洪峰过后，及时拦蓄洪尾增发电能。在防洪方面，根据库区和水电站下游对防洪的要求，在确保大坝安全的前提下，充分发挥水库的调蓄作用，按洪水大小分级控制，尽量减少上下游洪水灾害。水库调度计算采用动态规划方法。

计算程序一律用ALGOL-60算法语言编写。

第一章 产流量计算

第一节 产流量计算方法

一、径流形成过程

降雨初期，一部分雨水被植物枝叶拦截，超过植物截留能力的降水才落到地面，一部分雨水直接落到地面。落到地面的雨水首先渗入土壤，补充土壤的缺水量。随着降雨量的增加，渗入土壤的水量不断增加，土壤含水量也随之增大，入渗能力则逐渐减少。当降雨强度小于下渗强度时，降雨全部渗入土中，不产生径流；当降雨强度超过土壤入渗能力后，地面开始积水，产生径流，地面水层沿坡地表面流动经沟洼注入河道，这部分水量称为地面径流。渗入地下的雨水，一部分沿着坡地土壤表层的水平方向流动进入河槽称为表层流。一部分下渗到地下潜水面，以潜水补给的形式进入河槽，这部分水量称为潜流。还有一部分补给深层地下水，作为基流流进河槽。进入土壤的其余部分雨水，不形成径流，暂时积蓄在土壤中将逐渐消耗于蒸发。

由上述可知，在流域出口断面测到的径流量总是小于相应的流域降雨量。通常把形成径流的那部分降雨量称为净雨量或产流量。不形成径流的那部分，即降雨量与净雨量之差值称为损失。全部损失包括雨期蒸发、植物截留、填洼、补充土壤缺水量和流入地下水水库等几个方面。

洪水预报计算首先是通过扣损确定产流量。

二、两种计算方法

实践经验表明，我国湿润和干旱地区降雨量与径流量之间的关系存在明显的差异，目前关于计算产流量的方法主要分为蓄满产流和超渗产流两种。

1. 蓄满产流

我国淮河流域及其以南地区、东北的东部，雨量充沛，水资源丰富，土壤湿润，地下水位较高，包气带较薄，地表土层疏松，植被良好，土壤下渗能力较大，包气带比较容易达到田间持水量。降雨在包气带未达到田间持水量之前（除直接降落到水面外），一般不产流；当包气带达到田间持水量（即蓄满）之后，入渗水量以重力下渗方式渗到地下水表面，形成地下径流。超渗部分形成地表径流。也就是说，蓄满之前降雨先补充土壤缺水量，蓄满之后，降雨全部形成径流。降雨强度对径流量影响不明显。用公式表示可写成：

$$P - Z - R = S - S_0 \quad (1-1)$$

式中 P —— 降雨量；

Z —— 雨期蒸发量；

R —— 径流量；

S —— 包气带最大蓄水量；

S_0 —— 降雨开始时包气带蓄水量。

2. 超渗产流

我国西北、华北干旱和半干旱地区，雨量稀少，地下水埋藏较深，地表植被较差，土质比较密实，土层厚，缺水量大，通常降雨只能下渗到一定深度，不大可能使包气带达到田间持水量，也不可能使重力水渗透到地下水表面产生地下径流。这类地区，土壤透水性差，降雨渗入表层土壤后，入渗率就随之下降，使后续降雨比较容易超过入渗率而产生超渗

现象，形成地表径流，并且降雨强度对产流量的大小起着决定性影响，这种产流方式称为超渗产流。其水量平衡方程式可写成：

$$P - Z - R = S_i - S_0 \quad (1-2)$$

式中 S_i ——雨末包气带蓄水量，因为达不到田间持水量，所以是一个变数；

$S_i - S_0$ ——表示本次降雨的下渗水量，它决定于实际下渗过程。

因此，超渗产流不能象蓄满产流那样只用一个水量平衡方程求解，必须先分析每次降雨的实际下渗过程，然后再计算产流量。

目前，关于产流方式争论较多，有的认为蓄满和超渗是两种平行的方式，有的认为蓄满产流只不过是超渗产流的一种特例。我们体会这两种产流方式实际上是不能截然分开的。以蓄满产流为主的地区，在长期干旱之后，强度较大的短历时暴雨会产生超渗产流，同样在干旱地区的局部范围内也会出现蓄满产流的现象。就是在同一个大流域上，由于降雨分布不均匀，不同地点也会有不同的产流方式，此外在同一次降雨过程中，也会出现开始是超渗产流后期变成蓄满产流的现象。总之，对于径流形成的某些规律，现在认识还不够深入，许多问题尚待通过试验研究去进一步揭示并加以解决。在洪水预报中目前还只能根据流域自然地理特征，水文气象观测资料，宏观地分析确定该地区以何种产流方式为主，然后通过实测资料验证，看预报精度是否满足要求。蓄满产流计算方法比较简单，具有一定优点，在南方湿润地区，使用它一般都能达到较好的精度。

鉴于我们使用电子计算机进行洪水预报是在湿润地区，

因此，只介绍蓄满产流计算方面的有关内容。

三、降雨径流相关图法

1. 经验降雨径流关系

雨洪地区，径流量主要与降雨量有关。对于某一具体流域，由各站降雨资料可求得各次降雨总量。根据流域出口断面流量资料可推求出相应的径流量。通过降雨径流相关分析，单纯这两个因素之间的关系通常并不密切。但是，加上一个反映流域蓄水量的指标，关系就有明显的改善。图 1-1 是基于蓄满产流方式的经验降雨径流关系。

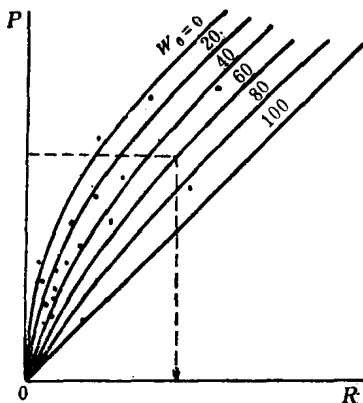


图 1-1 降雨径流相关图
 P —一次降雨量； R —一次径流量；
 W_0 —降雨开始时流域蓄水量

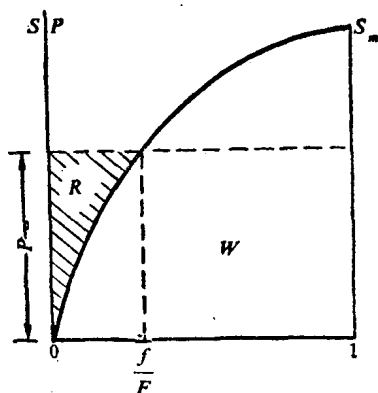


图 1-2 流域蓄水容量曲线

上述相关图可以直接根据实测资料点绘，也可通过流域蓄水容量曲线确定。

2. 流域蓄水容量曲线

为了用数学模型概括经验降雨径流关系，这里引入了流域蓄水容量曲线（如图 1-2 所示）。从统计观点来说该曲线

可理解为将闭合流域内各点包气带蓄水容量 S ，不考虑地理分布和相互影响，按数值大小排列而成。由于它无法通过直接观测资料绘制，因此可根据实测资料选配不同线型。例如：浙江地区采用抛物线形式，辽宁地区采用指数形式。

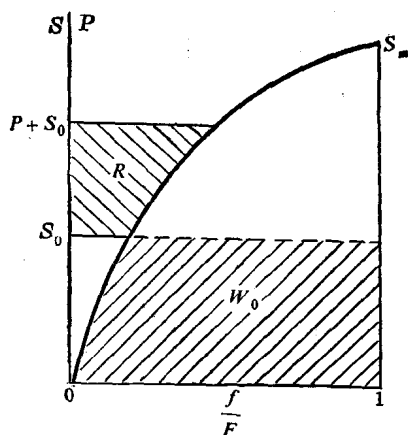


图 1-3 P, W_0, R 关系示意图

蓄满产流的水量平衡公式（1-1）是对流域上一点写出的。对一个流域而言，各处的 S 未必相同，要进行流域水量平衡计算，只根据点的公式还不够，尚须通过流域蓄水容量曲线。现以起点在原点的 B 次抛物线（图1-3）为例，阐明按照流域蓄水曲线计算产

流量的方法。其方程式为：

$$\frac{f}{F} = 1 - \left(1 - \frac{S}{S_m}\right)^B \quad (1-3)$$

式中 B ——抛物线方次，反映流域蓄水量的不均匀性；

S_m ——流域各点包气带蓄水量的最大值；

f ——流域的部分面积；

F ——流域的总面积；

$\frac{f}{F}$ ——各 S 对应的相对面积。

根据流域蓄水曲线形式，前期流域蓄水量：

$$W_0 = \int_0^{S_0} \left(1 - \frac{f}{F} \right) dS \quad (1-4)$$

将(1-3)式代入上式积分可得各参数之间的关系:

$$W_0 = \frac{S_m}{B+1} \left[1 - \left(1 - \frac{S_0}{S_m} \right)^{B+1} \right] \quad (1-5)$$

当流域蓄满时, 则 $S_0 = S_m$, $W_0 = W_m$, 于是有:

$$S_m = (1+B)W_m \quad (1-6)$$

式中 W_m ——流域平均包气带最大蓄水量。

由以上两式可得:

$$S_0 = S_m \left[1 - \left(1 - \frac{W_0}{W_m} \right)^{\frac{1}{B+1}} \right] \quad (1-7)$$

径流量 R 可按下式计算:

$$R = \int_{S_0}^{P+S_0} \frac{f}{F} dS \quad (1-8)$$

将(1-3)式代入上式积分, 即得蓄满产流条件下的产流量计算式: 当 $S_0 + P < S_m$ 时:

$$R = P + W_0 - W_m + W_m \left(1 - \frac{P+S_0}{S_m} \right)^{B+1} \quad (1-9)$$

当 $S_0 + P \geq S_m$ 时:

$$R = P + W_0 - W_m \quad (1-10)$$

上述公式中的 P 都是指扣除雨期蒸发的降雨量。

由此表明, 流域蓄水曲线作为一种数学物理模型概括经验降雨径流关系是可行的。一条蓄水曲线(有一组参数 W_m 或 S_m 和 B), 对应一张降雨径流相关图。

3. 降雨径流相关图计算

经验降雨径流相关图是由实测资料点绘的一种纯经验的关系。而通过流域蓄水曲线推出的数学公式，只决定于 W_m 和 B 两个参数。因此，对于这种 W_m ， B 可由电子计算机算好各种相关图，以便于不能直接用计算机做预报的单位使用。求相关图的程序框图如图1-4所示。图中 i 为循环变量， W_1 、 W_2 和 B_1 、 B_2 为 W_m 和 B 的取值范围， ΔW 、 ΔB 为步长。

电算输出的成果之一，见表1-1降雨径流关系表所列，表中所列最后一个加括号的数字为蓄满点，将表1-1中数据点绘成曲线，即为降雨径流相关图（图1-5）。

流域蓄水容量曲线对不同地区可以采用不同形式。如辽宁省东部的一些流域采用上端不封闭的指数曲线方程式如下：

$$\frac{f}{F} = 1 - e^{-aP} \quad (1-11)$$

式中 a —— 流域参数。

其余符号意义与前述方法相同。由（1-11）式可得参数之间的关系如下：

$$W_0 = \int_0^{s_0} \left(1 - \frac{f}{F}\right) dP = \frac{1}{a} (1 - e^{-as_0}) \quad (1-12)$$

$$R = \int_{s_0}^{s_0+P} (1 - e^{-aP}) dP = P - \left(\frac{1}{a} - W_0\right) (1 - e^{-aP}) \quad (1-13)$$

若 $P = \infty$ ， $W_0 = 0$ 则：

$$\left. \begin{aligned} R &= P - \frac{1}{a} \\ W_m &= \frac{1}{a} \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$