

# 相应水位法在姚江洪水辅助预报中的应用

周洪<sup>1</sup>, 赵翔<sup>2</sup>, 劳冀韵<sup>3</sup>, 夏国团<sup>4</sup>

(1. 余姚市水利局, 浙江 余姚 315400; 2. 余姚市水政监察大队, 浙江 余姚 315400;  
3. 余姚市四明湖水库管理局, 浙江 余姚 315400; 4. 余姚市水利普查办公室, 浙江 余姚 315400)

**摘要:** 为了使余姚市防洪调度决策支持系统中的洪水预报系统更加完备, 提出应用相应水位法进行辅助预报, 介绍了趋势法预报误差自回归校正方法的原理及其应用。结果表明该方法需要的基础数据较少, 操作简单, 能灵活地应对不同量级的洪水预报, 在姚江洪水预报、中小洪水资源化以及洪水脉冲生态效应等方面起到了很好的辅助作用。

**关键词:** 洪水预报; 相应水位法; 趋势法; 误差自回归

**中图分类号:** TV124; P338

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1006-7647(2013)S1-0051-02

姚江全长 107 km, 余姚市境内长 75 km。对于姚江洪水预报, 余姚市防洪调度决策支持系统(DSS)已采用实时校正的大范围河网非恒定流计算预报模型。实践表明这一浅水水动力学模型物理意义明确, 误差自回归校正方法简单实用, 效果良好, 但运用这一模型需要较多的数据和信息。如果配备一些简易的辅助性洪水预报方案, 将使 DSS 中的洪水预报系统更加完备, 能更加灵活地应对不同量级的洪水预报, 特别是常遇的中、小洪水预报<sup>[1-2]</sup>。笔者简述了相应水位法的概念、洪水波在上下游断面间的相应性, 建议应用相应水位法中的趋势预报误差自回归校正法开展洪水辅助预报。

## 1 相应水位法

### 1.1 相应水位法的概念

在天然河道洪水预报方法中, 相应水位法与流量演进法都很早就被采用, 它们既有一定的物理依据, 又操作简单, 有一定的预报效果。相应水位法作为一种经久不衰的实用方法, 充分利用洪水波传播过程中上下游断面水力要素的相应性进行预报。如能应用现代化的洪水预报理论, 并借助水情自动测报系统等当代先进技术进行必要的完善, 会成为简单、实用的洪水辅助预报工具。

### 1.2 洪水波及上下游断面水力要素

洪水波受控于质量守恒和动量守恒定律, 其连续方程和动量方程如下<sup>[2]</sup>:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\alpha V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = -g \frac{V^2}{C^2 R} \quad (2)$$

式(2)中等式左边第 2 项、第 3 项分别为速度对时间和对距离的导数, 当地加速度和迁移加速度都反映了速度的变化率, 相应表示当地断面动能的变化和迁移过程中的动能变化, 两者之和为惯性项。第 4 项为摩阻项, 为克服摩阻做功, 将机械能转化为热能。

一般情况下, 惯性项很小, 作为近似计算, 可以略去, 式(2)变为

$$\frac{\partial Z}{\partial x} = -g \frac{V^2}{C^2 R} \quad (3)$$

通过分析发现洪水波在传播过程中不断变形, 但展开量很小, 且水位展开量与流量展开量属同一量级。波速即传播流量的速度大于断面平均流速, 其比值在断面为三角形、宽浅矩形、宽浅抛物线形时分别为 1.33、1.67、1.44 (采用曼宁公式计算), 天然河道一般在 1.30 左右。只要上游流量和水位没有突变, 区间来水没有很大的扰动, 下游水位(流量)关系没有显著变化, 上游断面的水位(流量)过程的连续性以及可趋势外延预报性等会在下断面中得到一定保留, 具体的水位(流量)变化也会在下断面中表现出相应的响应。正因为如此, 使得基于相关分析的思路与方法的多种相应水位预报方法取得了

实效。在河渠非恒定流计算公式,特别是用显式特征差分格式表示的公式中,可以清楚看到某一断面与上、下游断面的水力联系。水流处于急流状态时,本断面直接由上断面控制(这是迎风处理的根据),导致很明显的相应性。在缓流状态时,本断面还同时受到上、下游两断面的影响(随着弗劳德数  $Fr$  的增大,上游断面的控制作用也随之增强),同样存在良好的相关性。

## 2 相应水位法中的有关实用方法

长期洪水预报实践中,相应水位法已衍生了多种实用方法,起到了比较好的辅助作用,如以下游水位为参数的方法、以上游断面涨率为参数的方法、现时校正法、以区间雨量为参数的方法(小支流);以支流水位为参数的方法(有较大支流汇入),此外还有考虑合成流量的方法,最简单的单站趋势外延法也归属相应水位法。

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ \vdots \\ e_r \\ \vdots \\ e_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_{r1} & \lambda_{r2} & \lambda_{r3} & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{n1} & \lambda_{n2} & \lambda_{n3} \end{bmatrix}_{n \times n} \begin{bmatrix} e_{11} \\ e_{12} \\ e_{13} \\ \vdots \\ e_{r1} \\ e_{r2} \\ e_{r3} \\ \vdots \\ e_{n1} \\ e_{n2} \\ e_{n3} \end{bmatrix}_{n \times 1} + \begin{bmatrix} W_1 \\ \vdots \\ W_r \\ \vdots \\ W_n \end{bmatrix}_{n \times 1} \quad (6)$$

式中右边第 1 个矩阵为回归系数矩阵,即模型参数矩阵;右边第 2 个矩阵为误差矩阵,即模型输入矩阵;右边第 3 个矩阵为模型噪声矩阵。

将各站预报成果汇总,可以比较各站的预报值,并视情况进行调整,以进一步提高各站的预报精度。同时充分利用一般情况下都存在的 4 个水力要素  $J_m$ 、 $V_m$ 、 $Q_m$ 、 $Z_m$  出现的先后顺序规律增大预见期。

## 4 分析讨论

### 4.1 方程阶数

文中提出的姚江洪水的趋势预报误差自回归方程采用 3 阶,采用 AIC 定阶法(准则)进行进一步的研究。自回归方程的阶数是一个系统(模型结构)的辨识(识别)问题。对上述线性系统(模型结构)的阶数  $N$  可按 AIC 定阶法分析计算确定<sup>[5]</sup>:

$$AIC(N) = -2\ln L(\hat{\theta}) + 2N \quad (7)$$

其中  $N = \dim \theta$   $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N)^T$

### 4.2 多站预报

多站预报是各单站自回归预报方程的汇总,实

## 3 趋势预报误差自回归校正法

a. 单站。对姚江洪水预报中水力计算水位与实测水位之间的误差,曾采用实时最小二乘法、自回归实时校正法、卡尔曼滤波等方法做过较为深入的分析,实践表明上述 3 种方法都适用于姚江<sup>[3]</sup>。最后采用了趋势预报误差自回归实时校正法。定义误差(残差)为趋势预报值与实测值之差,即

$$e = Z(t) - \hat{Z}(t) \quad (4)$$

误差的 3 阶自回归方程为

$$e = \lambda_1 e_1 + \lambda_2 e_2 + \lambda_3 e_3 + W \quad (5)$$

式中:  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$  为自回归系数,即模型参数;  $e_1$ 、 $e_2$ 、 $e_3$  为误差,即模型输入参数;  $W$  为模型噪声,作为白噪声处理。自回归方程可以采用多元回归法求解,也可以应用 Yule Walker 递推方法求解。

b. 多站。对各站建立的单站洪水趋势预报误差 3 阶自回归方程汇总如下<sup>[4]</sup>:

质上仍为单站预报。但多站预报基于多站汇总,有利于比较,并视情况对预报值做必要调整,从而有助于改善预报质量。考虑到现有水情自动测报系统的有利条件,如果预报方程中能引入上下游站为的一些邻站的信息,建立多元回归方程并求解,甚至对多站进行大范围联合求解,能进一步提高预报的准确度和可靠性。此时的求解,除了已经介绍的方法,还可以采用群智能等优化算法。

## 5 结语

洪水预报系统是防洪调度决策支持系统的重要组成部分。传统的相应水位法中的一些实用方法对数据信息条件要求宽松,操作简单,在余姚市洪水预报、洪水资源化以及洪水脉冲生态效应等方面起到了很好的辅助作用,在实践过程中正不断得到完善,取得了良好的效果。

(下转第 69 页)

空洞运行时,大坝上、下游水位差约为 120 m,最大泄水流量为  $1431 \text{ m}^3/\text{s}$ ,最大泄洪功率达 1680 MW。在宣泄洪水时,高能量水体跌入河道,冲击水垫及河床,产生激烈的紊动水流,形成冲坑,并淘刷两岸岸坡基脚,威胁岸坡(特别两岸覆盖层或堆积体边坡)稳定。

放空洞采用挑流消能,挑射水舌表面掺气、边界层发展,特别是水舌入水的激溅作用,导致雾化,在泄水建筑物出口下游形成雾化区。就物理过程而言,泄洪雾化实际上是一个非常复杂的水气多相流物理现象,其影响因素众多,包括泄水建筑物的体型及泄洪方式、上下游水位差、流量、入水流速与角度、下游水垫深度、下游地形、气候条件等。采用“七五”攻关专题研究提出的高水头、大流量、窄河谷的枢纽工程泄洪雾化范围估算式进行计算,成果见表 4,表中  $H$  表示坝高。

### 3.3 泄洪冲刷、雾化影响区防护

**a. 防护的必要性。**瀑布沟枢纽泄水建筑物包括溢洪道、泄洪洞和作为水库放空运用的放空洞。泄水冲刷区、雾化区位于尼日河汇口以下约 1500 m 河段,泄水建筑物泄洪时,高速水流的冲刷和雾化,对下游岸坡的稳定,坝区交通、电厂输变线路及坝址区建筑物的安全等均构成一定的威胁与影响,尤其是高水头、大流量的水电工程,其泄洪雾化的规模与危害十分惊人。泄洪在坝下形成较严重的溅水雾化现象,水舌风、暴雨、飞石将对水电站的正常运行造成严重影响。瀑布沟工程泄洪水头高,流量大,泄洪总功率达 17100 MW,且河谷狭窄,因此有必要根据冲刷、雾化的不同影响程度,采取必要的工程措施,对岸坡和建筑物进行保护。

表 4 泄洪雾化估算成果

影响范围	纵向范围	横向范围	高度
浓雾	$(2.2 \sim 3.4)H$	$(1.5 \sim 2.0)H$	$(0.8 \sim 1.4)H$
暴雨区	409 ~ 632 m	297 ~ 372 m	149 ~ 260 m
薄雾区	$(5.0 \sim 7.5)H$	$(2.5 \sim 4.0)H$	$(1.5 \sim 2.5)H$
	930 ~ 1395 m	465 ~ 744 m	279 ~ 465 m

**b. 防护原则。**①通过模型试验研究和数值分析,借鉴二滩、小湾等工程的分析计算及实测经验,优化挑流鼻坎体型,使各泄水建筑物在各种泄洪工况下的挑射水舌尽可能归槽,避免回流产生或降低回流流速。②根据上述冲刷区、雾化区的地形地质条件和建筑物分布情况,重点保护两岸边坡、右岸成昆铁路及车站、尾水洞出口、右岸改线公路等建筑物。

**c. 防护措施。**根据不同分区和不同地质条件初步拟定防护措施:①清除雾化区内的不稳定体,合理设置排水系统;②对强溅水区进行系统的混凝土

衬砌保护,对强暴雨区根据边坡地质条件采用混凝土衬砌与喷锚结合处理,对雾流降雨区根据边坡地质条件和植被状况进行有针对性的处理;③左岸古崩塌堆积体设置混凝土防冲墙,以保护其前缘基脚不被淘刷。同时对部分危岩予以清除或锚固;④采用明涵洞保护成昆铁路的安全运营,对于尼日车站将根据雾化专题研究成果确定其保护办法;⑤加强右岸改线公路路基和边坡保护;⑥清除或处理河道岸边的不稳定体、堆碴等,以防其崩塌,淤阻河道。

## 4 结 语

瀑布沟工程泄洪水头高,流量大且河谷狭窄。泄水建筑物的研究和优化设计至关重要。在介绍放空洞建筑物设计标准、研究思路和实施措施的基础上,通过对瀑布沟水电站放空洞的优化设计和研究,讨论了工程设计中的关键技术问题。水库蓄水期间,放空洞投入运行多次,运行效果良好,为电站的安全运行提供了保证。

### 参考文献:

[1] 清华大学水力学教研室. 水力学[M]. 北京:高等教育出版社,1995.  
 [2] 杨家卫,薛之龙,马麟. 小湾水电站泄洪建筑物布置优化研究[J]. 水力发电,2004,30(10):24-26.  
 (收稿日期:2013-02-20 编辑:骆超)

(上接第 52 页)

### 参考文献:

[1] 华东水利学院水文系. 水文预报[M]. 北京:中国工业出版社,1961.  
 [2] 葛守西. 现代洪水预报技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,1999.  
 [3] 华东水利学院. 中国湿润地区洪水预报方法[M]. 北京:水利水电出版社,1978.  
 [4] 刘宏才. 系统辨识与参数估计[M]. 北京:冶金工业出版社,1996.  
 [5] 阿包特 M B. 计算水力学[M]. 北京:海洋出版社,1985.  
 (收稿日期:2012-09-21 编辑:骆超)

