

DOI: 10.3969/j.issn.1004-4701.2019.06-06

# 自由溢流水库对下游防洪保护能力的一种插值估算方法

王 智<sup>1</sup>, 周 斌<sup>2</sup>

(1. 上饶市水利电力勘测设计院, 江西 上饶 334000; 2. 汕尾市水利水电规划设计院, 广东 汕尾 516600)

**摘 要:**用线性插值得到近似的入库洪水和区间洪水,再引入调洪方程的导数构造 Hermite 多项式可插值得到出库洪水过程,经地区组成可得水库下游断面的相应洪水;再根据该断面最大安全过洪能力求解出线性插值的权重参数,能快速确定满足下游安全泄洪条件下的入库和区间洪峰,从而估算自由溢流水库对下游的防洪保护能力. Hermite 插值法可达三次代数精度,洪水过程采用了两条典型过程进行线性组合,使得该估算方法精度较高,适用的洪水变化幅度较大,可指引工程设计中的后续相关计算,也可供自由溢流小型水库防洪决策参考.

**关键词:**自由溢流;水库;防洪能力;插值多项式

**中图分类号:**TV87 **文献标识码:**B **文章编号:**1004-4701(2019)06-0420-05

## 0 引 言

水库建设后会对下游产生一定的防洪保护作用,能削减下游河道的洪峰。我国建有大量的小型水库,多采用无闸控制自由溢流的泄洪方式,这些水库虽然大多控制流域面积不大,但往往也能对水库下游一定范围产生较大的防洪作用。充分发挥自由溢流水库的防洪保护能力,对于农村防洪安全具有十分重要的意义。

为分析小型水库对下游的防洪保护能力,常需用地区组成法试算各频率防洪控制断面的设计洪水,计算工作量较为浩大。也有学者通过洪水搬家公式将自由溢流水库的入库洪峰与区间洪峰关联起来,将洪水和调洪的泄水过程概化为三角形,进行了一系列的简化后得到了判断自由溢流水库下游防洪能力的简单判别公式<sup>[1]</sup>,但由于简化过多,不利于推广运用。实际上,也可以根据地区组成的部分计算成果来估算下游防洪控制断面的设计洪水,Hermite 插值法可达三次代数精度,洪水过程采用了两条典型过程进行线性组合,该估算方法精度较高,适用洪水变化幅度较大,可指引工程设计中的后续相关计算,也可供自由溢流小型防洪决

策参考。

## 1 地区组成法计算水库下游防洪能力的基本方法

洪水的地区组成是指推求设计断面受上游水库或其它工程调节影响后的设计洪水的一种简便方法。当设计断面发生设计频率的天然洪水时,计算上游工程所在断面和无工程控制区间的洪水过程线,对工程所在断面进行调洪演算得到下泄洪水过程线,再与区间洪水进行组合,推求出设计断面的洪水过程线<sup>[2]</sup>。

水库调洪通常采用下述方程逐时段计算<sup>[3]</sup>:

$$\frac{Q_{i-1}+Q_i}{2} \cdot \Delta t - \frac{q_{z_{i-1}}+q_{z_i}}{2} \cdot \Delta t = \Delta V_{z_i} - \Delta V_{z_{i-1}} \quad (1)$$

式中: $Q_{i-1}$ 、 $Q_i$ 为时段始、末的入库流量,洪水过程也可简记为  $Q(t)$ ;  $q_{z_{i-1}}$ 、 $q_{z_i}$ 为时段始、末的出库流量,出库流量过程可简记为  $q(t)$ ,因出库流量也是关于水位  $z$  的函数,还可简记为  $q(z)$ ;  $V_{z_{i-1}}$ 、 $V_{z_i}$ 为时段始、末的库容,是关于水位  $z$  的函数,可简记为  $V(t)$  或  $V(z)$ ;  $z_{i-1}$ 、 $z_i$ 为时段始、末的库水位,可简记为  $z(t)$ ;  $\Delta t$ 为计算时段,  $\Delta t = t_i - t_{i-1}$ 。

收稿日期:2019-07-29

作者简介:王 智(1985-),男,大学本科,工程师。

经调洪演算得到的出库洪水过程线，与区间洪水错时  $\Delta T$  相加即得下游河道的设计洪水，有：

$$Q_s(t) = q(t - \Delta T) + Q_q(t) \quad (2)$$

式中： $Q_q(t)$  为区间洪水过程线； $Q_s(t)$  为设计断面洪水过程线； $\Delta T$  为水库溢洪道至设计断面的洪水传播历时。

将  $Q_s(t)$  的洪峰与下游的成灾流量  $Q_z$  相比较，若  $\max[Q_s(z)] < Q_z$ ，则下游不成灾，否则成灾。

### 2 切线法估算水库下游的防洪能力

当已有一次地区组成成果时，即已知  $Q(t)$ 、 $q(t)$ 、 $V(t)$ 、 $z(t)$ 、 $Q_q(t)$ 。若入库洪水由  $Q(t)$  变化为  $(1+\xi)Q(t)$ ，则时段末水库水位绝对误差  $\varepsilon_n$  为<sup>[4,5]</sup>：

$$\varepsilon_n \approx \xi \cdot \sum_{k=1}^{i-1} \left[ \frac{\frac{\Delta t}{2} \cdot (Q_{k-1} + Q_k)}{\frac{dV_{z_k}}{dz_k} + \frac{\Delta t}{2} \cdot \frac{dq_{z_k}}{dz_k}} \cdot \prod_{i=k}^{n-1} \frac{\frac{dV_{z_i}}{dz_i} - \frac{\Delta t}{2} \cdot \frac{dq_{z_i}}{dz_i}}{\frac{dV_{z_{i+1}}}{dz_{i+1}} + \frac{\Delta t}{2} \cdot \frac{dq_{z_{i+1}}}{dz_{i+1}}} \right] \quad (3)$$

假定入库洪水和区间洪水同频率变化时有对应的增减幅度，即若某频率的入库洪水过程变化为  $(1+\xi)Q(t)$ ，则相应的区间洪水近似变化为  $(1+\xi_q)Q_q(t)$ 。相应时段末的水库泄量为  $q(t) = q(z_i + \varepsilon_i)$ ，即：

$$Q_s(t) = q(z_{i-\Delta t} + \varepsilon_{i-\Delta t}) + (1+\xi_q)Q_q(t) \quad (4)$$

根据已知的调洪成果，计算出库水位误差  $\varepsilon_i$  过程线，进而由  $q(t) = q(z_i + \varepsilon_i)$  得到出库洪水过程线，再根据 (2) 式求得  $Q_s(t)$ ，计算过程较为简单便捷，可以快速地试算出  $\max[Q_s(z)] \approx Q_z$  的  $\xi$  值。根据  $(1+\xi)Q(t)$  对应的频率量级可大致确定水库下游设计断面的防洪能力。

切线法中， $\xi$  和  $\xi_q$  的关系可根据入库洪水和区间洪水同频率变化时的对应增减幅度关系确定，当设计断面控制总流域面积不大时，坝址流域和区间为同场次暴雨，洪水相关性强，可近似取  $\xi_q = \xi$ ； $\frac{dV}{dz}$  和  $\frac{dq}{dz}$  可根据差分计算； $\varepsilon_i$  根据 (3) 式或递推法<sup>[4,5]</sup> 计算，过程并不复杂。

但切线法仅适用于已知解距离真解较近时情况，当已知解距离真解较远时，误差也可能会偏大，因此切线法运用于估算自由溢流水库下游防洪能力存在缺陷，需要在切线法的基础上进一步寻找一种精度更高的近似算法。

### 3 插值法估算水库下游的防洪能力

当已有两次地区组成成果 (如成果  $a$  和成果  $b$ ) 时，即已知  $Q^a(t)$ 、 $q^a(t)$ 、 $V^a(t)$ 、 $z^a(t)$ 、 $Q_q^a(t)$  和  $Q^b(t)$ 、 $q^b(t)$ 、 $V^b(t)$ 、 $z^b(t)$ 、 $Q_q^b(t)$ 。引入权重  $\omega$  和  $\omega_q$ ，任一频率的入库流量过程可用加权公式近似表述为  $\omega \cdot Q^a(t) + (1-\omega) \cdot Q^b(t)$ ，区间流量过程可用加权公式近似表述为  $\omega_q \cdot Q_q^a(t) + (1-\omega_q) \cdot Q_q^b(t)$ 。则 (1) 式可改写为：

$$\frac{\omega \cdot Q_{t_{i-1}}^a + (1-\omega) \cdot Q_{t_{i-1}}^b + \omega \cdot Q_{t_i}^a + (1-\omega) \cdot Q_{t_i}^b}{2} \cdot \Delta t - \frac{q_{z_{i-1}} + q_{z_i}}{2} \cdot \Delta t = \Delta V_{z_i} - \Delta V_{z_{i-1}} \quad (5)$$

对 (5) 式两边取微分，整理后有：

$$\frac{dz_i}{d\omega} = \frac{\frac{\Delta t}{2} \cdot [(Q_{t_{i-1}}^a + Q_{t_i}^a) - (Q_{t_{i-1}}^b + Q_{t_i}^b)]}{\frac{dV_{z_i}}{dz_i} + \frac{\Delta t}{2} \cdot \frac{dq_{z_i}}{dz_i}} + \frac{\frac{dV_{z_{i-1}}}{dz_{i-1}} - \frac{\Delta t}{2} \cdot \frac{dq_{z_{i-1}}}{dz_{i-1}}}{\frac{dV_{z_i}}{dz_i} + \frac{\Delta t}{2} \cdot \frac{dq_{z_i}}{dz_i}} \cdot \frac{dz_{i-1}}{d\omega} \quad (6)$$

将  $\frac{dz_i}{d\omega} = \frac{dz_i}{dq_i} \cdot \frac{dq_i}{d\omega}$  和  $\frac{dz_{i-1}}{d\omega} = \frac{dz_{i-1}}{dq_{i-1}} \cdot \frac{dq_{i-1}}{d\omega}$  代入 (6) 式，可进一步改写为：

$$\frac{dq_{z_i}}{d\omega} = \frac{\frac{\Delta t}{2} \cdot [(Q_{t_{i-1}}^a + Q_{t_i}^a) - (Q_{t_{i-1}}^b + Q_{t_i}^b)]}{\frac{dV_{z_i}}{dz_i} \cdot \frac{dz_i}{dq_i} + \frac{\Delta t}{2}} + \frac{\frac{dV_{z_{i-1}}}{dz_{i-1}} \cdot \frac{dz_{i-1}}{dq_{i-1}} - \frac{\Delta t}{2}}{\frac{dV_{z_i}}{dz_i} \cdot \frac{dz_i}{dq_i} + \frac{\Delta t}{2}} \cdot \frac{dq_{z_{i-1}}}{d\omega} \quad (7)$$

(7) 式可从时刻 0 开始逐时段依次递推 (其中  $\frac{dq_{z_0}}{d\omega} = 0$ )，递推至任意时刻  $n$  有：

$$\frac{dq_{z_n}}{d\omega} = \sum_{k=1}^n \left[ \frac{\frac{\Delta t}{2} \cdot [(Q_{t_{k-1}}^a + Q_{t_k}^a) - (Q_{t_{k-1}}^b + Q_{t_k}^b)]}{\frac{dV_{z_k}}{dz_k} \cdot \frac{dz_k}{dq_k} + \frac{\Delta t}{2}} \cdot \prod_{i=k}^{n-1} \frac{\frac{dV_{z_i}}{dz_i} \cdot \frac{dz_i}{dq_i} - \frac{\Delta t}{2}}{\frac{dV_{z_{i+1}}}{dz_{i+1}} \cdot \frac{dz_{i+1}}{dq_{i+1}} + \frac{\Delta t}{2}} \cdot \frac{dq_{z_i}}{d\omega} \right] \quad (8)$$

当  $\omega=1$  和  $\omega=0$  时，分别为成果  $a$  和成果  $b$ 。利用 (8) 式或 (7) 式递推计算，可得  $\frac{dq^a(t)}{d\omega}$  和  $\frac{dq^b(t)}{d\omega}$ ，与  $q^a(t)$



表 2 插值法计算成果摘录表( $\omega=0.5723$ )

时间/h	$q^a(t)/(m^3/s)$	$q^b(t)/(m^3/s)$	$\frac{dq^a(t)}{d\omega}$	$\frac{dq^b(t)}{d\omega}$	$q(t)/(m^3/s)$	$Q_q(t)/(m^3/s)$	$Q_s(t)/(m^3/s)$
计算式	已知	已知	(7)式	(7)式	(9)式	加权公式	(2)式
...	...	...	...	...	...	...	...
40.0	39.59	66.27	-26.88	-26.66	51.04	60.13	111.17
40.5	37.81	62.95	-25.40	-25.17	48.60	61.91	110.51
41.0	56.81	90.98	-34.08	-33.98	71.43	93.26	164.69
41.5	118.43	175.96	-57.32	-58.00	142.93	189.96	332.89
42.0	138.12	198.68	-60.64	-60.70	164.14	215.86	380.00
42.5	98.26	141.99	-43.64	-42.53	117.04	162.54	279.58
43.0	69.99	100.02	-31.64	-30.74	82.84	128.68	211.52
43.5	48.73	71.30	-22.55	-21.82	58.42	87.14	145.56
44.0	35.89	52.40	-17.21	-16.76	43.06	64.82	107.88
44.5	26.50	40.79	-13.80	-13.47	32.59	49.16	81.75
45.0	20.33	30.93	-11.10	-10.85	24.89	38.84	63.72
...	...	...	...	...	...	...	...

$\frac{dq^a(t)}{d\omega}$ 、 $\frac{dq^b(t)}{d\omega}$ 变化过程线；近似取  $\omega_q=\omega$ ，用(9)式将  $q^a(t)$ 、 $q^b(t)$ 、 $\frac{dq^a(t)}{d\omega}$ 、 $\frac{dq^b(t)}{d\omega}$  构造出三次下泄洪水过程  $q(t)$  的 Hermite 插值多项式，再采用(2)式组成防洪控制断面的设计洪水  $Q_s(t)$ 。利用电子表格的单变量求解功能，迭代解得  $\max[Q_s(t)]=380m^3/s$  条件下的  $\omega=0.5723$  ( $\alpha_0=0.6076$ 、 $\alpha_1=0.3924$ 、 $\beta_0=-0.1401$ 、 $\beta_1=0.1047$ )。相应  $\omega \cdot Q^a(t) + (1-\omega) \cdot Q^b(t) = 250.0m^3/s$ 。插值法计算成果摘录见表 2 与图 1。

### 4.3 普通地区组成法

采用广东省综合单位线法计算，20 年一遇的入库洪峰为  $250.9m^3/s$ ，故水库调节后防洪控制断面的防洪标准可提高至 20 年一遇。调洪演算 20 年一遇的出库洪水过程及地区组成，得防洪控制断面的 20 年一遇洪峰流量成果为  $380.9m^3/s$ ，详见图 2。

本算例中切线法、插值法与普通地区组成法计算的结果基本一致，出入并不甚大。切线法只需要一个重现期的成果即可使用，对已有资料要求不高，但是该方

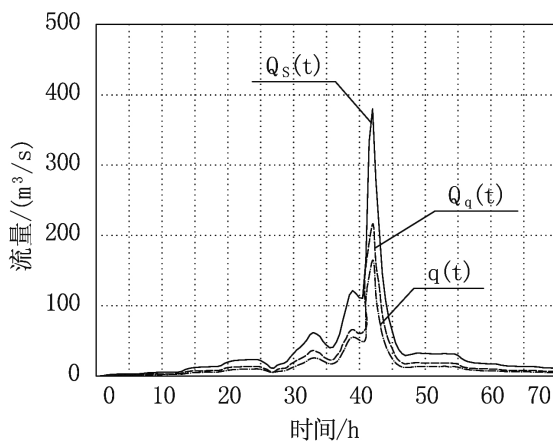


图 1 P=5%插值法成果

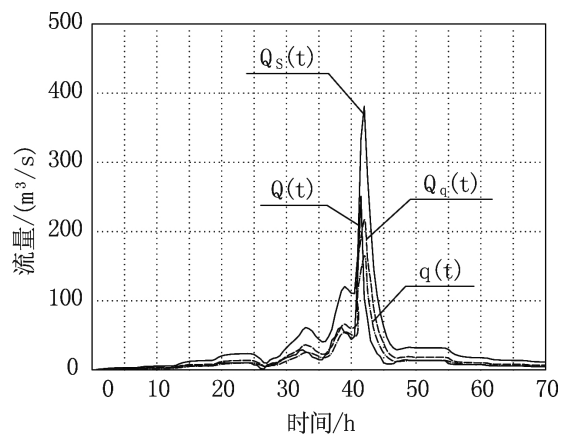


图 2 P=5%洪水地区组成成果

法只有一次代数精度,当已知解距离真解较远时,误差可能会偏大,且洪水过程采用典型过程进行缩放,其精度相对偏低。Hermite插值法可达三次代数精度,洪水过程采用了两条典型过程进行线性组合,其精度相对偏高,虽然需要至少两个重现期的成果才能使用,但水库往往已有设计、校核工况的调洪成果,应用难度并不大。因此,Hermite插值法较之切线法更为优越。

## 5 结 语

我国建有大量的小型水库,多采用自由溢流的方式泄洪。这些水库对下游有一定的防洪保护作用。分析自由溢流水库对下游防洪能力的影响,对于农村防洪安全有着十分重要的意义。小型水库通常已有设计、校核工况的调洪成果,利用现有的调洪成果,采用Hermite插值多项式构造出库洪水过程,与相应的区间洪水进行地区组成,可以粗估水库下游防洪控制断面的防洪能力。该方法既可适用流域面积较小时坝址流域与区间遭遇同场次暴雨的情况,也可适用于流域面积较大时坝址洪水与区间洪水不同频率遭遇情况;不

仅可以分析洪水流量组合关系,也可以分析频率组合关系。若提前准备 $q^a(t)$ 、 $Q_q^a(t)$ 、 $q^b(t)$ 、 $Q_q^b(t)$ 、 $\frac{dq^a(t)}{d\omega}$ 、 $\frac{dq^b(t)}{d\omega}$ 等数据,防汛时就可以结合水雨情情况适当选取权重参数 $\omega$ 、 $\omega_q$ ,实时预估水库下游防洪控制断面的洪水流量,以供防洪决策参考。

## 参考文献:

- [1] 张端虎. 自由溢流水库对下游防洪能力影响简化计算方法探讨[J]. 人民珠江, 2017(4): 78~81.
- [2] 张大发, 骆承政, 王善序, 等. 水利水电工程设计洪水计算手册[M]. 水利电力出版社, 1995年.
- [3] 叶守泽, 许静仪, 王祥三, 等. 水文水利计算[M]. 中国水利水电出版社, 1992年.
- [4] 周斌. 基于水量平衡方程的水库调洪演算基础数据误差传播规律研究[J]. 人民珠江, 2019(1): 80~85.
- [5] 周斌, 管国安. 基于水量平衡方程的水库调洪演算误差研究[J]. 人民珠江, 2017(8): 46~49.
- [6] 郑咸义, 姚仰新, 雷秀仁, 等. 应用数值分析[M]. 华南理工大学出版社, 2008年.

编辑: 张绍付

# An interpolation estimation method for the protection capacity of free overflow reservoir to downstream flood control

WANG Zhi<sup>1</sup>, ZHOU Bin<sup>2</sup>

(1. Shangrao Water Conservancy and Electric Power Survey and Design Institute of Jiangxi Province, Shangrao 334000, China; 2. Shanwei Water Conservancy and Hydropower Planning and Design Institute of Guangdong Province, Shanwei 516600, China)

**Abstract:** The approximate inflow flood and interval flood are obtained by linear interpolation, then the derivative of flood regulation equation is introduced to construct Hermite polynomial to obtain the outflow flood process, and the corresponding flood of the downstream section of the reservoir can be obtained by regional composition. Then, according to the maximum safe flood passing capacity of the section, the weight parameters of linear interpolation can be solved, which can quickly determine the inflow and interval flood peak under the condition of satisfying the downstream safety flood discharge conditions, thus estimating the flood control protection capacity of the free overflow reservoir to the downstream. Hermite interpolation method can reach cubic algebraic precision, and the flood process adopts linear combination of two typical processes, so that the estimation method has higher precision and larger applicable flood variation range, which can guide subsequent relevant calculations in engineering design, and can also be used as a reference for flood control decision-making of free overflow small reservoirs.

**Key words:** Free overflow; Reservoirs; Flood control capacity; Interpolation polynomial

翻译: 王 智