

三峡电站调峰流量对航运的影响分析

吴晓黎¹, 李承军¹, 张勇传¹, 余波²

(1. 华中科技大学水电与数字化工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国长江三峡工程开发总公司, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 针对三峡—枝城河道的地形特征, 建立一维非恒定流模型. 在三峡电站预先给定的航运约束条件下, 计算电站下游的非恒定流对航运的影响并对若干调峰流量过程曲线进行分析, 找出满足航运要求的调峰曲线. 提出可调整葛洲坝的库容—水位关系, 对三峡调峰流量进行反调节, 削峰填谷, 以满足航运要求.

关键词: 航运; 非恒定流; 调峰流量; 水面比降; 表面流速; 三峡电站

中图分类号: TV122+.5

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2003)06-0007-03

三峡电站在电力系统中担任调峰任务的时候出力变化较大, 这种负荷调节变化会严重影响通航, 主要表现在以下两个方面: 电站负荷大幅度变化, 使下游河道水位陡涨陡落, 水面坡降增大, 流态恶化, 不能满足航运要求; 电站负荷调节使下游河道水位变化幅度超过通航允许值, 造成船只搁浅或停航^[1]. 因此, 从航运的安全可靠和经济性考虑, 航运部门对码头和航道一般有码头水位日变幅限制、航道水位限制、航道流速限制及航道水位的小时变率限制等要求^[2].

为满足航运要求, 在制定三峡电站和葛洲坝电站的发电计划时, 必须同时考虑发电和航运的要求; 在对水库调峰时, 需要考虑下游水位和流速的影响. 本文采用圣维南方程建立数学模型, 计算下游河道的非恒定流情况, 进而分析讨论不同调峰流量下河道水流的航运满足情况, 为水库峰值调整决策提供实例参考.

1 数学模型和计算

为实时掌握航运中若干断面的水位、流量变化情况, 须对航运区间河道中的水流进行非恒定流计算. 根据水力学的相关理论, 本文对河道的非恒定流加以描述, 一维非恒定流状态可用圣维南 (Saint Venant) 方程组来描述^[3].

连续方程 (或称水量平衡方程):

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

运动方程:

$$\frac{\partial Q(t, x)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2(t, x)}{A(z, x)} \right) + gA(z, x) \cdot \left(\frac{\partial z(t, x)}{\partial x} + \frac{Q(t, x)}{k^2} \right) = 0 \quad (2)$$

式中: t 为时间, s ; x 为流程, m ; $z(t, x)$ 为水位过程, m ; $Q(t, x)$ 为河段内流量过程, m^3/s ; $A(z, x)$ 为各水位对应的断面面积, m^2 ; B 为河宽, m ; g 为重力加速度, m/s^2 ; k 为流量模数.

式(1)和式(2)是双曲型拟线性偏微分方程组, 可采用隐式差分 Preissmann 法进行离散^[4]. Preissmann 使用四点空间偏心差分格式, 即:

$$f(x, t) = \frac{\theta}{2} (f_{j+1}^{n+1} + f_j^{n+1}) + \frac{1-\theta}{2} (f_{j+1}^n + f_j^n)$$

$$\frac{\partial f(x, t)}{\partial x} = \theta \frac{f_{j+1}^{n+1} - f_j^{n+1}}{\Delta x} + (1-\theta) \frac{f_{j+1}^n - f_j^n}{\Delta x}$$

$$\frac{\partial f(x, t)}{\partial t} = \frac{f_{j+1}^{n+1} - f_{j+1}^n + f_j^{n+1} - f_j^n}{2\Delta t}$$

将函数 $f(z, Q)$ 在 $(n+1)\Delta t$ 时间层上用 Taylor 级数展开, 可得到近似线性代数方程组

$$A_{1j} \Delta Q_j + B_{1j} \Delta z_j + C_{1j} \Delta Q_{j+1} + D_{1j} \Delta z_{j+1} = E_{1j} \quad (3)$$

$$A_{2j} \Delta Q_j + B_{2j} \Delta z_j + C_{2j} \Delta Q_{j+1} + D_{2j} \Delta z_{j+1} = E_{2j} \quad (4)$$

其中, $A_{ij}, B_{ij}, C_{ij}, D_{ij}, E_{ij} (i=1, 2)$ 均为系数.

用追赶法进行求解, 一般只需经过 2~3 次追赶迭代, 便可得到满意的结果. 必须指出, 上述方程组对未知数不封闭, 必须加上两个边界条件才能得到惟一解.

基金项目: 国家重大科技项目 (攻关) 计划子题; 三峡枢纽梯级水库联合优化调度初步方案研究 (97-312-06-1-5)

作者简介: 吴晓黎 (1980—), 女, 河南信阳人, 硕士研究生, 从事电力系统经济运行、水电站优化调度与自动化研究.

2 非恒定流的表征及条件说明

水电站调峰非恒定流系一种重力长波和往复流的复合运动,有着极为复杂的态势和演变规律.经抽象概化,水体的这种运动可以由一系列水力要素的变化来表征,从而得知这些变化对通航构成的种种不利影响^[5].三峡工程的河道断面和水文等基本资料较为丰富^[6],这为进行三峡一枝城河道的水流演进计算提供了良好的条件.

a. 三峡—葛洲坝河道断面资料和河床糙率资料.根据实际地形,将三峡一枝城河道分为 79 个河道断面,断面间距从 1 m(葛洲坝坝体)到 2 500 m 不等,并给出各个断面 20 个高程点对应的河道水面宽度,每个断面不同高程点对应不同河床糙率(本文取糙率 $n = 0.05$).

b. 上下游边界条件^[4].通常提供的边界条件有 3 种:给定水位过程 $z = z(t)$;给定流量过程 $Q = Q(t)$;给定水位-流量关系 $Q = f(z)$.

c. 水位变化.上游电站下泄流量和两坝间河段沿程水流边界变化,导致沿程水位发生相应变化^[5],而沿程水位是流量、位置 and 时间的函数,即 $H = f(Q, x, y, t)$.水位的这种变化通常用“日变幅”和“小时变率”这两个指标予以具体表征.过大的这种变化将对船只的航行、停泊等产生一定程度的不利影响,因此要求对“日变幅”和“小时变率”规定合适的限值.

d. 流速变化.流速对航运船队产生影响,对停泊船只产生冲击力,是表征河流通航水流条件的主要参数.上游高水头电站在调峰期间下泄非恒定流,使得流速的大小和方向发生周期性变化,这种变化对航行船只产生一定程度的影响,因此也应根据不同船只的情况,对流速规定适当的限值,控制电站调峰水流的流速,避免对船只的航行和停泊产生不利的影响^[5].

e. 水面比降变化.水面比降对航行船队产生阻力(称比降阻力),并对停泊船只产生影响,因此水面比降是河流通航水流条件的重要参数.由于上游高水头电站调峰而在两坝间河段形成的水流使得水面比降的大小和方向发生周期性变化,水面的这种变化对航行和停泊船只产生不利影响,因此亦应对水面比降规定适当的限值^[5].

3 仿真计算

为了给三峡调峰决策提供科学的参考,按照 1 d 的发电情况模拟了 1 组三峡流量过程(图 1),并对其产生的非恒定流情况进行计算.由于非恒定流对河道水位、流量、流速等有很大的影响,因此进行调

峰决策时需要考虑航运对流量的限制.为了保证正常通航,三峡电站下游河道必须满足一些约束条件.设三峡—葛洲坝(1~32 号断面)为河段 1,葛洲坝—枝城(33~79 号断面)为河段 2.表 1 是《三峡梯级水电联合调度技术设计规范》对河道的约束,五组条件彼此独立,正常航运必须满足其一;表 2 是《三峡梯级水电联合调度技术设计规范》对河段 1 和河段 2 的水位涨率约束.

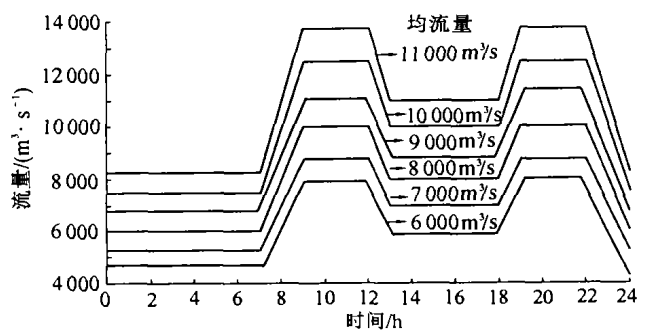


图 1 6 种流量过程线

表 1 三峡电站最大表面流速与最大水面比降的限定关系

搭配号	允许最大局部比降/%	允许最大表面流速/(m·s ⁻¹)
1	0.005	2.6
2	0.01	2.5
3	0.02	2.3
4	0.03	2.1
5	0.04	1.9

表 2 河段 1 和河段 2 的水位涨率约束

河段	约束项	允许上限
河段 1	24 h 涨率	$dz/dt \leq 4 \text{ m/d}$
河段 1	1 h 涨率	$dz/dt \leq 1 \text{ m/h}$
河段 2	1 min 涨率	$dz/dt \leq 0.2 \text{ m/min}$
河段 2	10 min 涨率	$dz/dt \leq 0.3 \text{ m/10min}$

3.1 约束条件检验

在图 1 的 6 种流量过程曲线中择一进行具体分析,根据选择结果可得到完全符合下游航运的流量过程曲线,对于不满足约束的流量过程可以给出调峰策略.这里以均流量为 $10\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的流量过程为例计算非恒定流对下游航运的影响(图 1).首先计算出三峡下游河道 79 个断面的表面流速与水面比降,并且分析判断不同限制条件下不满足约束的断面.结果表明,对每一个限制条件,35~36 断面总是不满足条件,因此 35~36 断面是最有可能不满足限制条件的断面.这里将一天 24 h 按每 15 min 一个时段分成 96 个时段进行计算.

从图 2 可见,35~36 断面中有一些局部比降超出最大允许限制值,说明调峰幅度过大,需要适当减少调峰幅度.

为了进一步分析表 2 约束条件的满足情况,首

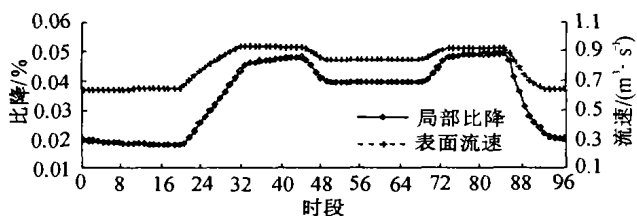


图2 35~36断面表面流速和局部比降趋势

先计算得到河段1与河段2中流速变化最大的断面,即14~15断面及69~70断面,然后通过研究这几个断面满足约束条件的情况,判断三峡—葛洲坝河段的情况.从图3可以得到三峡—葛洲坝河段的水位变幅为 $-0.4 \sim 0.4$ m/h;葛洲坝下游1个时段的变化幅度小于 0.08 m.两者均没有超出流速变率限制(表2).由此得出结论:在给定均流量为 $10000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的三峡泄流量过程情况下,全段水位涨率受调峰影响比较小,没有超出允许限值.

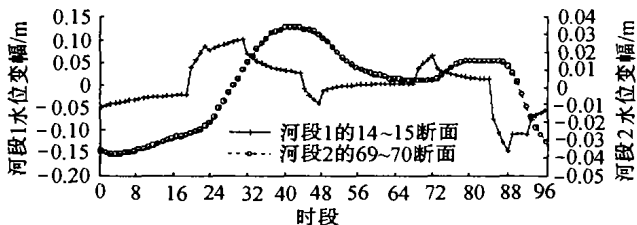


图3 最大流速断面的水位变幅

3.2 峰值调整

根据实际需要,模拟了1组趋势相同、均流量不同的流量过程曲线来比较分析不同流量过程下断面的局部比降情况.基于前述约束条件的分析,对于均流量为 $10000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的流量过程来说,有一些断面的局部比降超出允许限值,不满足航运约束条件,说明此过程的调峰幅度过大.从图4调峰曲线可见,均流量小于等于 $9000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的过程都是满足航运约束的.其局部比降在调峰过程中始终没有超过万分之四,而且是发电效益较大的一种决策,因此在图1的几种调峰流量决策中,均流量为 $9000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的流量过程曲线是满足航运且发电效益较大的流量过程.

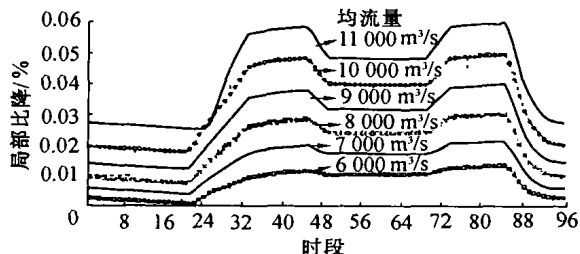


图4 6种调峰流量的局部比降比较

如果实际要求的三峡均流量是 $10000 \text{ m}^3/\text{s}$, $11000 \text{ m}^3/\text{s}$ 或者更大,均流量 $9000 \text{ m}^3/\text{s}$ 不再满足具体需要.这时可以根据均流量为 $10000 \text{ m}^3/\text{s}$,

$11000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的过程,通过调整葛洲坝的库容与水位关系达到目的.因为葛洲坝库容的调整可以在一定范围内减缓水位变幅,调整峰荷以满足航运的要求.葛洲坝库容的具体调节方案通常有很多,大致的思路都是找到不满足约束的调峰流量时段,并在相应时段内对葛洲坝进行蓄水或者放水操作,同时改变其余时段的蓄水状态,从而满足航运约束且保持总水量恒定.这里对具体算法不再罗列.

4 结 语

调查研究表明,如果不对水电站下泄的非恒定流进行有效控制,势必对航运和其他方面造成一定程度的危害.采取切实可行的调峰方案,可以将三峡—葛洲坝间的通航水流条件控制在航运允许的范围以内,不但可以增加电站出力变幅,取得巨大的调峰效益,而且可以提高航运基荷,使三峡—葛洲坝之间以及葛洲坝下游河段的通航避免受到实质性的不利影响.

本文介绍的是在大致给定调峰曲线的情况下寻求符合航运条件的调峰曲线的方案,这对于调峰来说是一种粗调方法.

在梯级联合调度中,葛洲坝对三峡进行反调节是一个有效的改善航运约束条件的方式.当需要对调峰方案进行具体调整的时候,利用葛洲坝 0.8 亿 m^3 库容对三峡调峰流量进行反调节,可以在一定程度上有效控制调峰流量的变化,通过削峰填谷的方式达到航运要求.

参考文献:

- [1] 李崇明. 三峡电站日调节对葛洲坝以上河道航运的影响[J]. 四川水利, 1994(1): 14~18.
- [2] 张勇传. 水电系统最优控制[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1993. 229~239.
- [3] 麦赫默德 K, 叶夫耶维奇 V. 明渠不恒定流(第一卷)[M]. 林秉南, 戴泽衡, 王连祥, 等译. 北京: 水利电力出版社, 1987.
- [4] 汪德耀. 计算水力学理论与应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 1989. 140~169; 271~276.
- [5] 孙尔雨, 朱庆福. 三峡电站调峰对两坝间通航的影响和改善措施[J]. 人民长江, 1999(12): 8~12.
- [6] 傅湘, 纪昌明. 三峡电站日调节非恒定流对航运的影响分析[J]. 武汉水利电力大学学报, 2000(6): 6~10.

(收稿日期: 2003-04-08 编辑: 傅伟群)

