

文章编号: 1004-8227(2010)03-0340-05

溪洛渡水电站叠梁门取水方式 减缓下泄低温水的优化调度

陈永柏^{1,2}, 邓云³, 梁瑞峰³

(1. 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101; 2. 中国长江三峡工程开发总公司, 湖北 宜昌 443002;
3. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610064)

摘要: 大型水库常采用叠梁门取水方式作为改善春季下泄低温水的有效手段, 但现有的叠梁门调度方式基本为全年使用, 可能加剧水库冬季下泄高温水现象, 且影响到春季的水温改善效果。提出根据下游鱼类对水温的需求时段来确定叠梁门的启用时段, 对金沙江下游的溪洛渡水电站水库水温进行了研究, 结果表明, 分时段采用叠梁门取水可有限程度地提高春季的下泄水温并避免冬季下泄水高温现象的进一步加剧。同时, 也研究了河流梯级开发对叠梁门应用的影响, 发现水库调节性能、梯级开发、人工调度等带来的下游入库水温平坦化, 以及溪洛渡水库的过渡型水温结构, 使叠梁门对水温的影响显著减弱。

关键词: 大型水库; 梯级联合运行; 低温水影响; 叠梁门取水

文献标识码: A

水电工程建设, 尤其规模巨大的高坝大库的建设, 不可避免地带来一些生态环境方面负面影响^[1-3]。巨大的水库形成以后, 原有河流的水文态势发生改变, 水体、大气之间原有的能量交换发生改变, 水库内水体温度不再是均匀分布而有可能形成分层现象, 从而表面水温较天然河道明显升高, 底层水受到的辐射则明显减少成为低温水; 同时下泄水温通常在冬季高于天然河道水温, 春夏季低于天然河道水温, 使水库具有与河流不同的水温结构。

考虑到环保的要求, 为避免下泄低温水对下游生物的影响, 使电站进水口在不同时期均可取到有利的水温, 工程措施多采用分层取水以改变取水高程, 提高春季下泄水温, 减少低温水对鱼类生长发育的不利影响。目前工程上常用的分层取水方案有高低进水口、双层进水口和叠梁门取水等方式。

高低进水口方案中, 为达到分层取水的目的, 在不同的水位下, 需采用不同的进水口开启方式, 发电量损失较大, 系统运行的灵活性较差。

双层取水口方案一般布置双层闸门, 进水口与单层进水口方案相比需要向上游或下游延伸, 发电

量基本不变, 结构布置及调度运行较复杂。

叠梁门取水方案可根据进水口结构布置的特点, 一般利用备用拦污栅槽, 采用多层叠梁门方式来达到分层取水的目的, 其取水高程灵活, 发电量略有减小, 但工程投资有一定增加。虽运行相对较复杂, 但不影响原方案的基础和边坡, 多为工程实际所采用。杜效鹄、蒋红、常理等^[4-6]对分层取水设施的设计及对水温的影响进行了研究, 郝红升等^[7]研究了取水口高程对水温的影响。

图1是一种常见的叠梁门设置形式, 沿水流方向依次布置有拦污栅、叠梁门、检修闸门、工作闸门等, 根据水温需求时段和调度等需要确定叠梁门层数和门叶高度。最大门顶高程满足叠梁门稳定所需的淹没水深和过栅流速等条件后, 叠梁门即可在该高程和进水口底板高程之间运行。叠梁门的调度, 只要水库水位满足淹没水深等要求, 目前一般采取全年运行。

1 溪洛渡水库概况

溪洛渡水电站是金沙江下游四级开发中的第三

收稿日期: 2009-03-11; 修回日期: 2009-05-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(50679094)和中国长江三峡工程开发总公司科研项目(0605058)资助。

作者简介: 陈永柏(1966~), 男, 湖北省仙桃人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事水利水电工程生态保护、鱼类生态与水生生物保护等研究。E-mail: chen_yongbo@ctgpc.com.cn

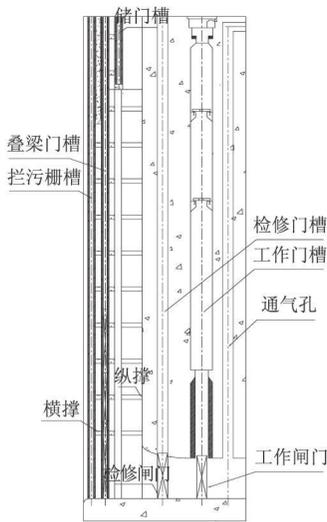


图 1 叠梁门取水工程布置示意图

Fig. 1 Layout Diagram of Stoplog Intake Works

个梯级, 上下游分别与白鹤滩电站和向家坝电站相接, 电站最大坝高 278 m, 多年平均流量 4 660 m³/s, 水库正常蓄水位为 600 m, 正常蓄水位以下库容 115.7 亿 m³, 具有不完全年调节能力。溪洛渡水电站水库的形成将改变库区和大坝下游江段的水文情势和水环境状况, 进而可能对水库下游的长江上游珍稀特有鱼类和灌溉、生产、生活用水等产生影响。因此对溪洛渡水库及其下泄水温进行预测研究, 对于工程的环境保护具有重要意义。

根据 α - β 法^[4] 初步判断, 溪洛渡正常蓄水位库容 α 值为 12.7, 水库水温类型为过渡型。表 1 列出了长江上游珍稀特有鱼类保护区部分保护对象对水温的需求, 为进一步定量研究敏感时期的温度变化, 有必要采用数学模型对水库水温进行深入研究。

表 1 长江上游珍稀特有鱼类保护区部分保护对象对水温的需求

Tab. 1 Requirement for the Water Temperature of Some Fishes in Upper Yangtze Reserve of Rare and Endemic Fishes

对象	繁殖时间	水温要求
白鲟、达氏鲟	2 月底~ 4 月底	15~ 20℃
胭脂鱼	2 月底~ 4 月底	13~ 29℃
圆口铜鱼	5 月~ 7 月	16℃以上
四大家鱼	5 月~ 7 月	18℃以上

2 数学模型

由于大型水库三维水温数值模拟对计算网格和计算稳定性要求很高, 计算工作量巨大, 因此对全库

区采用三维水温数值模拟是不经济, 也是不现实的。在一般情况下, 应用二维水温数学模型模拟水库温度场完全可以满足实际需要。由于河宽变化对水面热交换及热量的向下传递都有一定的影响, 因此假定流场及温度场在河宽方向无变化, 将基本控制方程在该方向积分, 即可得到宽度平均的立面二维水库水温预测模型^[5]:

$$\frac{\partial}{\partial x}(Bu) + \frac{\partial}{\partial z}(Bw) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(Bu) + u \frac{\partial}{\partial x}(Bu) + w \frac{\partial}{\partial z}(Bu) \\ &= \frac{\partial}{\partial x}(Bv_e \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(Bv_e \frac{\partial u}{\partial z}) - \frac{B}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \\ &+ \frac{\partial}{\partial x}(Bv_e \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(Bv_e \frac{\partial w}{\partial x}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(Bw) + u \frac{\partial}{\partial x}(Bw) + w \frac{\partial}{\partial z}(Bw) \\ &= \frac{\partial}{\partial x}(Bv_e \frac{\partial w}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(Bv_e \frac{\partial w}{\partial z}) - \frac{B}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - \beta \Delta T g \\ &+ \frac{\partial}{\partial x}(Bv_e \frac{\partial u}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial z}(Bv_e \frac{\partial w}{\partial z}) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(Bk) + u \frac{\partial}{\partial x}(Bk) + w \frac{\partial}{\partial z}(Bk) \\ &= \frac{\partial}{\partial x}(B \frac{v_e}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(B \frac{v_e}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z}) \\ &+ B(G_k + G_b - \epsilon) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(B\epsilon) + u \frac{\partial}{\partial x}(B\epsilon) + w \frac{\partial}{\partial z}(B\epsilon) \\ &= \frac{\partial}{\partial x}(B \frac{v_e}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(B \frac{v_e}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial z}) + BC_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k \\ &- BC_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $G_k = v_e [2(\frac{\partial u}{\partial x})^2 + 2(\frac{\partial w}{\partial z})^2 + (\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x})^2]$; 浮力项 G_b 反映了紊动动能与内能的转换关

系: $G_b = -\beta g \frac{v_e}{\sigma_T} \frac{\partial T}{\partial z}$; v_e 是分子粘性系数 v 与紊动涡

粘系数 v_t 之和, $v_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$; u, w 为纵向和垂向流

速; P 为压强; T 为水温; B 为河宽; ρ 为密度; k 为紊动动能; ϵ 为紊动动能耗散率; $\sigma_k, \sigma_\epsilon$ 分别为紊动动能及耗散率的普朗特数, 一般取 1.0, 1.3; $C_{1\mu}, C_{2\mu}, C_{2\epsilon}$ 分别为 0.09, 1.44, 1.92。

水温方程为:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(BT)}{\partial t} + u \frac{\partial(BT)}{\partial x} + w \frac{\partial(BT)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}(\frac{Bv_e}{\sigma_T} \frac{\partial T}{\partial x}) \\ &+ \frac{\partial}{\partial z}(\frac{Bv_e}{\sigma_T} \frac{\partial T}{\partial z}) + \frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial(B\Phi_z)}{\partial z} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: σ_T 为温度普朗特数; C_p 为水的比热; Q_s 为穿过水深 z 的太阳辐射通量。

初始流场为静止状态, 初始温度场采用入流水温全库同温。

水面采用“刚盖假定”, 即水气界面热交换是水体主要的热量来源, 水温的水面边界条件反映了水面与大气间的热交换:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial k}{\partial z} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = 0, w = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = - \frac{Q_n}{\rho C_p D_z} \quad (8)$$

式中: D_z 为热扩散系数; Q_n 为水体净吸收的热量。

库底和坝体表面采用无滑移边界条件, 且为绝热边界。假定出口断面为充分发展的湍流, 有:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} = 0, w = 0 \quad (9)$$

模型得到了雅砻江二滩电站长系列实测水温资料的验证。以 2005 年 11 月 14 日测量的二滩全库区水温分布作为计算初始水温, 以无浮力的流场分布作为初始流场。以库区附近气象站攀枝花、德昌、盐边等资料进行加权平均作为库区气象条件, 以打罗站逐日实测水温过程为入口水温边界条件, 对于二滩水温进行了预测, 并与二滩水库水温分布实测数据进行了对比分析, 尤其是坝前水温分布和下泄水体水温相关关系的分析。计算值与实测值吻合良好, 无论是表面斜温层的变化还是底部低温层都模拟得较好。6~7 月份二滩汛期有 1 个月时间的泄洪, 出现了较明显的双温跃层结构, 模型也较好模拟出双斜温层的形成和发展。因此, 该模型对于大型水库的水温预测是可靠的。

3 研究内容

拟进行单独运行与联合运行、叠梁门取水与单

层取水的对比研究, 研究工况与预测条件见表 2。单层取水时, 溪洛渡电站进水口底板高程为 518 m; 叠梁门方式取水时, 采用门叶高 12 m, 水位最高时使用四层叠梁门, 淹没水深 20 m。单独运行时的入库水温条件采用华弹和溪洛渡水文站多年平均逐月数据内插得到, 联合运行时入库水温采用上游电站(白鹤滩)的下泄水温。从表 1 可知, 溪洛渡下游保护鱼类的繁殖时间一般在 2 月底~7 月, 对冬季水温并无特殊要求, 因此拟定了 3~6 月份运行叠梁门的工况, 在其它时段不使用叠梁门, 以期避免冬季高温水现象的进一步加剧。

表 2 溪洛渡电站水库水温研究工况表

Tab. 2 Scenario of Water Temperature in Different Regulation Mode of Xiluodu Hydropower Station

工况	运行方式	取水方式	叠梁门运行时段	水温条件	水文条件
1	单独运行	单层取水	-	天然水温	典型 平水年
2	单独运行	叠梁门取水	全年运行	天然水温	
3	单独运行	叠梁门取水	3~6 月份运行	天然水温	
4	联合运行	单层取水	-	上游电站 下泄水温	
5	联合运行	叠梁门取水	全年运行	上游电站 下泄水温	
6	联合运行	叠梁门取水	3~6 月份运行	上游电站 下泄水温	

4 结果与讨论

采用有限体积法和混合格式对控制方程进行离散, 并采用 SIMPLE 算法和交错网格求解差分方程, 各工况下泄水温由库区坝前泄流孔口对应高程水温加权计算得到(见表 3)。

对于单独运行的工况 1~3, 叠梁门方案(工况 3)在 3、4 月能有限程度地改善下泄低温水的现象, 下泄水温相对于单层取水方案(工况 1)提高了 1.0℃左右, 其它月份差异较小。如果叠梁门仅在升温期 3~6 月份使用, 其下泄水温其它月份基本与单层取水相同, 在 3 月开始启用叠梁门时, 由于避免了

表 3 溪洛渡电站各工况下泄水温(℃)

Tab. 3 Discharged Water Temperature in Different Regulation Mode of Xiluodu Hydropower Station

工况	月份											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	14.6	13.6	14.0	16.6	19.7	21.5	21.5	22.4	21.3	19.9	18.4	16.4
2	15.0	13.7	14.4	17.3	19.3	21.6	21.6	22.5	21.2	20.0	18.9	17.1
3	14.6	13.6	14.9	17.5	19.7	21.7	21.5	22.3	21.2	19.9	18.4	16.4
4	17.5	16.3	15.9	16.4	17.9	20.4	21.3	21.4	21.5	20.6	19.6	18.7
5	17.4	16.5	16.2	17.0	18.0	20.3	21.4	21.7	21.5	20.7	19.7	18.6
6	17.5	16.3	16.5	17.0	18.0	20.3	21.2	21.4	21.4	20.6	19.6	18.7
坝址天然水温	12.2	13.3	15.6	18.9	21.0	22.1	22.3	22.5	20.9	19.5	16.6	13.7

前期的表层温水流失,其升温期初期的下泄水温要高于全年使用叠梁门的工况2;但由于启用叠梁门之后表层温水的逐渐流失,且水库在5~6月份采用低水位运行,部分时段不能采用叠梁门,因而在5~6月份叠梁门效果难以表现。

联合运行时,全年叠梁门方案(工况5)的年均下泄水温较坝址天然水温提高 0.9°C ,3~6月份下泄水温较建坝前平均降低约 1.5°C ,比单层取水(工况1)略高 0.2°C ,其中4~5月份降幅较大,分别为 1.9°C 和 3.0°C ;降温期11月~次年1月份下泄水温较建坝前平均升高约 4.0°C ,1月升高最多为 5.2°C 。联合运行3~6月份叠梁门方案(工况6)主要是改变叠梁门运行时段,仅在升温期的3~6月份采用叠梁门取水。该方案7月~翌年2月份的取水深度与单取水口相同,其下泄水温也与单层取水方案的下泄水温基本相同,3月份开始采用叠梁门,其下泄水温比单层取水方案(工况4)提高了 0.6°C ,3~6月份平均提高 0.3°C 。

联合运行时单层取水(工况4)与叠梁门取水(工况5、6)在降温期(9月~翌年1月份)的下泄水温并无明显差别,主要是由于来水受上游水库调节性能、梯级开发以及人工调度等的影响,使溪洛渡入库水温平坦化现象明显,年内温差只有 6.4°C ,远低于天然入流情况下的 10.0°C ,9~12月份的入流水温持续偏高,表层水温的升高使水体净收入的热通量减少,流动水层的温差和温度梯度减小,而较大的表层温差和梯度是叠梁门取得温水的必要条件。因此联合运行时叠梁门在冬季的升温效果不明显。

联合运行全年叠梁门方案的7~10月份,库区表层存在温跃层,但厚度较小,温跃层之下至叠梁门顶温差均较小,表层温跃层所贡献的温水流量对温度提升影响较小。联合运行3~6月份运行叠梁门的方案,由于冬季是否采用叠梁门对库区水温结构影响不大,其2月份的坝前垂向平均温度 16.5°C 仅比全年叠梁门方案高 0.3°C ,因而从3月份开始的叠梁门也得不到更高的下泄水温。同时,全年运行叠梁门的3月水温也比3~6月份的同时期水温更接近天然水温,已不需要采用叠梁门来升高下泄水温,实际运行时该时段是否采用叠梁门取水应根据具体水温需求确定,此处采用叠梁门仅为了与单独运行时的同时段叠梁门效果进行对比。

5 结论

本文采用宽度平均的立面二维水库水温数学模型研究了溪洛渡水电站叠梁门取水方式对水库下泄水温的影响,得到以下结论:

(1) 单独运行时,采用全年运行叠梁门方案在升温期初期能有限程度地改善下泄低温水的现象;若仅在升温期采用叠梁门,下泄水温相对于单层取水方案提升效果更为明显。

(2) 梯级联合运行时,叠梁门方案相对于单层取水方案在升温期下泄低温水的现象有所改善,但由于水流受上游梯级调节、联合运行、人工调度等因素的影响,下游的入库水温平坦化现象明显,且溪洛渡水库水温结构属过渡性,因此梯级联合运行时采用叠梁门改善水温的效果明显弱于单独运行。

(3) 单独运行时,根据下游鱼类对水温的需求时段,仅在升温期采用叠梁门的方案在秋冬季较全年运行叠梁门方案的下泄水温偏低,更接近天然水温,避免了冬季高温现象的进一步加剧;而联合运行时,受上游电站影响冬季入库水温较天然水温明显增加,水库从大气中获得的热量减少,表层温度梯度变小,水温垂向分布较均匀,全年运行与升温期运行的叠梁门方案在秋冬季的下泄水温差别不大。

综上,叠梁门可在一定程度上改善升温期的下泄低温水现象,单独运行时叠梁门调节水温的能力优于梯级联合运行,且由于仅在升温期采用叠梁门比全年采用叠梁门更有利于提高下泄水温,因此水库实际运行时可结合上游来水、库区水温观测成果和下游鱼类对水温的需求时段对叠梁门进行灵活调度。

参考文献:

- [1] 罗专溪,张远,郑丙辉,等.三峡水库蓄水初期水生态环境特征分析[J].长江流域资源与环境,2005,14(6):109~113.
- [2] 张信宝,曹植菁,艾南山.溪洛渡水电工程拦沙对三峡水库富营养化潜在影响的初步研究[J].长江流域资源与环境,2009,18(2):170~174.
- [3] 李崇明,黄真理,张晟,等.三峡水库藻类“水华”预测[J].长江流域资源与环境,2007,16(1):1~6.
- [4] 杜效鹤.沙斯塔大坝分层取水改建设计[J].水力发电,2008,34(3):17~19.
- [5] 蒋红.河道型深水库水温结构及分层取水研究[D].成都:四川大学博士论文,2007.
- [6] 常理,纵霄,张磊.光照水电站水库水温分析预测及分层

- 取水措施[J]. 水电站设计, 2007, 23(3): 30~ 32, 51.
- [7] 郝红升, 李克锋, 李 然, 等. 取水口高程对过渡型水库水温分布结构的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16(1): 21~ 25.
- [8] 张大发. 水库水温分析及估算[J]. 水文, 1984, (1): 19~ 26.
- [9] 邓 云, 李 嘉, 李克锋, 等. 水库宽度平均的立面二维水温模型研究[C] // 刘树坤主编. 中国水力学 2000. 四川: 四川大学出版社, 2000: 188~ 195.

IMPACT OF STOPLOG INTAKE WORKS ON RESERVOIR DISCHARGED WATER TEMPERATURE

CHEN Yong-bo^{1,2}, DENG Yun³, LIANG Ruifeng³

(1. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. China Yangtze Three Gorges Project Development Corp, Yichang 443002;

3. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chendu 610064)

Abstract: Stoplog intake works is often employed by large reservoir to improve discharged low temperature water in spring. However, current stoplog intake works in whole-year service may intensify the discharge of the high-temperature water in winter and even influence water temperature in spring. This paper proposed a new regulation mode for stoplog intake works according to the demanding time of downstream fish the reservoir water temperature of Xiluodu Hydropower Station of the lower Jinsha River was studied. The result showed that stoplog intake works in different period of time improved water temperature efficiently and avoided high temperature in winter. The impact of cascade development on the performance of stoplog intake works was also studied. The reservoir regulation ability, cascade combined operation and operation caused the flattening of temperature in the inflow downstream reservoir. Besides, along with the transition water temperature structure of Xiluodu hydropower station, the effect of stoplog intake works on water temperature apparently weakend.

Key words: large reservoir; cascade combined operation; impact of low temperature water; stoplog intake works