

水电站尾水壅水堰堰体水下施工关键技术

陈野鹰¹, 扈晓雯², 彭 凯¹, 江金章²

(1. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 2. 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 针对闽江水口水电站尾水位因河流下切和坝下无序采砂降低约 4.4 m, 已严重威胁发电机组正常运行与电网供电安全这一情况, 为治理该水电站尾水位病害, 提出尾水壅水堰治理措施, 并对其有效性进行了模型试验验证。为了实现在不停机的条件下完成尾水雍水堰工程的水下施工作业, 提出了半圆柱壳体水下缓流施工平台技术、缆索吊装、水平牵引就位施工新方法, 以及翻转刚性托板、就位钢丝笼施工新工艺等施工关键技术。

关键词: 尾水壅水堰; 水下施工; 施工平台; 缓流作业区; 水口水电站

中图分类号: TV74 **文献标识码:** B **文章编号:** 1006-7647(2011)02-0053-04

Key technology for underwater construction of tail water weirs of hydropower stations//CHEN Ye-ying¹, HU Xiao-wen², PENG Kai¹, JIANG Jin-zhang²(1. School of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. East China Investigation and Design Institute, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The tail water level of Shuikou Hydropower Station on Minjiang River has been lowered about 4.4 m because of river-downcutting and unordered sand-excavating, resulting in severe threat to the running of the electronic generators and the power supply safety of electric network. In order to deal with the tail water level, the relevant measures for the tail water weir were put forward, and their validity was verified by use of model tests. In order to complete the underwater construction of the tail water weir under running conditions of the electronic generators, several key construction techniques were proposed, including semi-cylindrical shell sluggish flow underwater construction platform, new construction method with cable lifting and horizontal trailing as well as new process with upset rigid brace and path wire basket.

Key words: tail water weir; underwater construction; construction platform; sluggish flow operation area; Shuikou Hydropower Station

水库清水下泄容易引发坝下河床下切、河水位降低, 导致水电站尾水位下降, 影响发电机组的平稳、安全运行^[1-4]。如果电站具有调压室的长尾水隧洞, 可通过理论计算或模型试验求解尾水洞水击与调压室涌波^[5-7], 能在设计中采取恰当的工程措施消除其对尾水位的影响。

福建闽江水口水电站属坝后式水电站, 当河床下切后, 已导致电站尾水位比设计值低约 4.4 m、小流量时机组运行不平稳、振动严重等现象, 而且这种现象仍在继续恶化, 严重威胁水轮机组的安全运行。为了保障水电站发电机组正常运行及福建省的供电安全, 必须恢复正常的电站尾水位高程。为此, 在理论分析和模型试验研究的基础上, 提出了尾水壅水堰工程治理措施, 该尾水病害治理技术工程规模小、投资省、见效快, 同时不存在淹没移民与破坏环境的问题, 是理想的水电站尾水位病害治理措施^[8]。水

口水电站尾水壅水堰长约 200 m、堰体高度为 11.5 m、顶高程为 4.00 m、最小底高程为 -7.50 m, 尾水渠最低水位为 3.4 m, 壅水堰位于水口水电站厂房尾水渠下游, 其右侧与电站隔流墙尾部衔接, 左侧接左岸边坡, 边坡基岩裸露, 呈弱~微风化, 坡度约 73°, 为水口水电站尾水渠开挖边坡(图 1)。

壅水堰采用柔性结构, 用钢丝笼及石碴堆砌形式, 堰型选择施工简单的梯形断面。堰顶宽为 4.0 m、采用 1.5 m × 1.5 m × 4.0 m 的钢丝笼(充填土工布 C25 混凝土包、砌块质量为 22.5 t)保护; 堰体上游迎水坡面坡度为 1:1.0, 采用 1.0 m × 1.0 m × 2.0 m 的钢丝笼(充填土工布 C15 混凝土包、砌块质量为 5.0 t)保护; 下游溢流坡面坡度为 1:1.5, 采用 1.0 m × 1.0 m × 3.0 m 钢丝笼(充填土工布 C25 混凝土包、砌块质量为 7.5 t)抗冲; 堰体内部则采用 1.0 m × 1.0 m × 3.0 m 的钢丝笼(充填土工布 C15 混凝土包、砌块质量为 7.5 t)砌筑;

堰脚采用质量约 20t 的混凝土四面体保护 (见图 1 图中数字表示砌筑混凝土块的规格型号)。

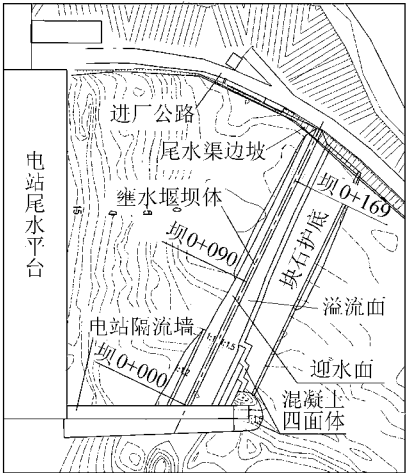


图 1 尾水雍水堰平面布置(单位:m)

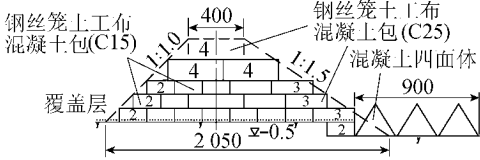


图 2 堰体断面(尺寸单位:cm,高程单位:m)

根据壅水堰设计及水下施工要求,壅水堰工程分 5 期建设,其中第 1 期主要施工右侧高程为 -1.50 m 以下深槽基础部分,随之施工堰体高程为 -1.50 ~ 0.50 m 之间的部分、桩号 0 + 000 m ~ 0 + 090 m 段的高程为 0.50 ~ 5.00 m 之间的部分、0 + 090 m ~ 0 + 169 m 段的高程为 0.50 ~ 5.00 m 之间的部分,最后一期施工 0 + 169 m 至堰左端的缺口段、高程为 0.50 ~ 5.00 m 之间的部分(图 1)。

由于坝下水流湍急,尾水雍水堰堰体位于水下,因此尾水雍水堰堰体的施工实施和质量控制难度大,本文对水口水电站尾水雍水堰堰体水下施工中的关键技术开展研究。

1 壅水堰堰体施工水流条件试验研究

为了掌握堰体施工作业面的水流条件和分段施工时的合理堰体缺口宽度等参数,工程实施前需要进行施工阶段物理模型试验。针对浮船与缆索吊装机具的特性,水下堰体砌筑相应采取分段与分层施工 2 种施工工艺。采用堰体分段施工时,最后一期即第 5 期施工时,堰体缺口宽度小、流速大,是堰体施工的难点。因此,试验首先选择了 30 m 37 m 47 m 及 57 m 宽的堰体缺口,观测电站下泄流量 $Q = 510\text{ m}^3/\text{s}$ 与 $Q = 1020\text{ m}^3/\text{s}$ 时的缺口最大流速,其值分别为 5.46 m/s, 4.83 m/s, 4.54 m/s, 4.72 m/s 和 6.34 m/s, 5.53 m/s, 4.92 m/s, 5.33 m/s, 根据试验结

果选择缺口宽度为 37 m。由于进入施工第 5 期即缺口段合拢期后尾水渠宽度由 207 m 缩至 37 m,断面最大收缩率达 82.12%,过水断面积锐减,受此影响,水流流速加快、流态紊乱、跌水加剧,是施工的困难阶段。因此,水流条件试验重点观测这一阶段不同钢丝笼混凝土砌筑高度与缺口流速的变化(表 1)^[9]。试验结果表明,当电站下泄流量为 $308\text{ m}^3/\text{s}$ 或 $510\text{ m}^3/\text{s}$ 时,水流全部由缺口通过,流速随过流水深减小而提高;当下泄流量增至 $1020\text{ m}^3/\text{s}$ 时,已建壅水堰段亦开始溢流,随着缺口砌筑高程的增加,通过已建段壅水堰顶的溢流量也增大,缺口段流速则逐渐减小,与小流量时的变化规律相反。如果采用分层砌筑法施工,尾水渠内过水宽度保持不变,过流面积变化连续,无论电站下泄流量为 $308\text{ m}^3/\text{s}$ 或 $1020\text{ m}^3/\text{s}$,通过堰顶的流速均随着砌筑高程的增加而缓慢递增(表 1)。而且通过堰顶的水流分散,流速分布均匀、流态平稳、流速值较小,水下作业条件优于分段砌筑法施工。

表 1 不同砌筑高程时的堰顶流速 m/s

砌筑 高程/m	分段砌筑法施工			分层砌筑法施工		
	$Q = 308$ m^3/s	$Q = 510$ m^3/s	$Q = 1020$ m^3/s	$Q = 308$ m^3/s	$Q = 510$ m^3/s	$Q = 1020$ m^3/s
0.5	2.78	2.36	5.34			
1.5	3.63	3.74	5.32	1.63	1.97	2.41
2.5	3.72	4.30	4.98	2.09	2.46	3.08
3.5	3.82	4.54	4.92	2.36	2.79	3.49

试验结果表明,由于流速均大于 1.5 m/s,在此水流条件下,潜水员根本无法正常从事水下施工作业。因此,施工时需要电站不分时段停机配合或研究适应高流速环境中的水下施工技术,以便改善水下施工条件,确保施工人员安全与工程质量。

2 壅水堰堰体水下施工关键技术

2.1 浮船吊运施工技术

为了浮船吊运作业需要,上游选用 2 根边缆和 1 根头缆、下游选用 2 根边缆对平板驳船实施锚固与定位(图 3)。

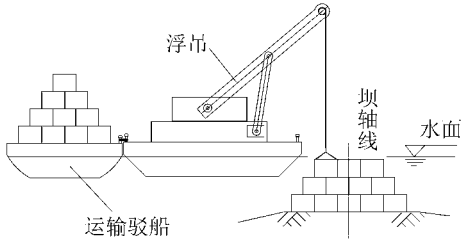


图 3 运输驳船与浮吊船停靠方式

浮船吊运施工过程是先用车将钢丝笼从预制场运至码头,然后再用驳船将其运至施工现场,最后由浮吊将钢丝笼起吊、摆放就位。为了保证壅水堰

堰体形状与几何尺寸,在钢丝笼下水前要求潜水员先对摆放钢丝笼的部位进行整平,吊运钢丝笼沉入水大致到达施工部位后,仍由潜水员按照基准线确定的位置在水下指挥浮吊进行就位、摆放,完成后再指挥水上人员实施脱钩,进行下块钢丝笼的砌筑施工^[10]。采用浮船吊运、摆放钢丝笼的施工方法不受位置的限制,能停靠在尾水渠内任何需要的位置,满足施工不同堰体宽度的需要。但是,由于起吊设备设置在驳船上,吊装作业稳定性差,受水面波动和电站机组运行变化的影响,驳船移动、定位困难,吊装就位耗时,施工周期长,施工进度难以保证,当施工工期较短时此方法不宜采用。

2.2 缆索吊运施工技术

缆索吊运施工是用缆索吊替换浮吊完成钢丝笼调运、摆放施工作业。缆索吊架可分别设置在水电站尾水壅水堰轴线左端的岸边和右端导流墙上,缆索吊机的起吊能力可由需要起吊的最大荷重确定(25 t),为了配合钢丝笼的吊装就位,在电站尾水平台上架设1台能沿壅水堰横向调节钢丝笼位置的卷扬机。由于缆索吊机既能竖向起吊又能沿壅水堰轴线方向做水平移动,因此,钢丝笼在预制场被预制完成后,可由汽车直接运至缆索吊机下,然后采用缆索吊将钢丝笼沿壅水堰轴线方向运至砌筑位置,再用尾水平台上的卷扬机调节横向位置,使其能按设计要求精确就位(图4)。

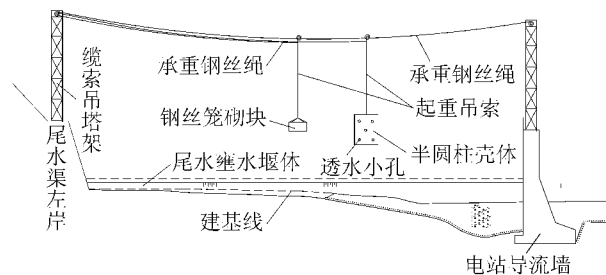


图4 缆索吊构造与施工吊装示意图

采用缆索吊运钢丝笼就位过程中仍然需要潜水员在水下配合,潜水员的工作内容与施工方法同前,此处不再赘述。与浮船吊运作业相比,采用本方法施工不需要船舶与繁杂的水下锚固作业,也可用汽车直接将钢丝笼运至施工现场,消除了麻烦的水陆运输交换,节省了施工时间,减少了运输环节,同时不必为施工修建临时码头,而且架设缆索吊机可在施工准备阶段一次性完成,调运施工的作业也不受风浪与水电站机组运行调度的影响。由于钢丝笼的横向位移是通过吊索倾斜来实现的,其移动距离受到一定限制。

2.3 钢丝笼水下砌筑技术

钢丝笼吊运就位后,由于采用水下自然堆码方

式砌筑堰体,堰体的抗渗能力是通过钢丝笼间的挤压密实来实现的,因此,砌筑时如何使钢丝笼紧密摆放是保证堰体渗透性能的关键。鉴于钢丝笼自身刚度较小的实际情况,为保证钢丝笼的几何尺寸,减小施工过程中钢丝笼的形变,从土工布装填混凝土开始直至调运入水就位为止的全过程,均将钢丝笼置于刚性平板上,当调运钢丝笼入水后,在横向将其准确就位,在纵向则临时放置在距离已建钢丝笼1倍宽度的位置上,然后卸掉刚性平板内侧吊绳,提升外侧吊绳,让钢丝笼翻转就位(图5)。在翻转过程中借助惯性与自重作用,使钢丝笼网兜挤压紧密排列,缩小钢丝笼间间隙,增强堰体的抗渗性能,达到设计要求。

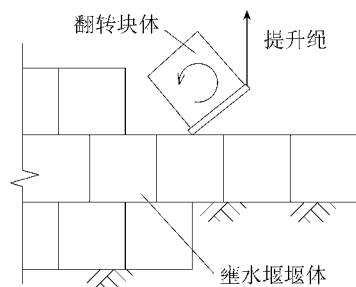


图5 钢丝笼吊装翻转就位示意图

3 水下缓流施工平台技术

在尾水壅水堰施工过程中,无论是整治基底、清除松散堆积物,还是抛填块石基础、砌筑填充土工布混凝土或级配砂砾石钢丝笼等都需要潜水员在水下配合作业,根据潜水员水下作业实践和施工经验,要求潜水员水下作业场流速控制在1.50 m/s以内,否则将影响水下潜水员的正常施工作业。但是,模型试验结果显示,水电站发电机组无论采取何种运行方式,各施工阶段的平均流速远大于1.50 m/s,尾水渠内的水力条件根本无法满足潜水员水下正常施工作业的要求。为了创建潜水员水下作业场缓流区,结合水口水电站尾水壅水堰钢丝笼的结构尺寸和砌筑方式,采用直径为2.0~3.0 m的半圆柱壳体,壳体顶部用缆绳吊挂竖直悬于水中,半圆柱凸面朝上游采用定位绳挂在水电站尾水平台的卷扬机上,通过升降吊绳左右移动卷扬机和伸缩定位绳长度来调整壳体位置,再用两侧锚索稳定壳体,以适应施工作业要求(图6)。

迎面水流受到圆柱阻碍后绕壳体表面流向下流,在圆柱壳体内形成流场速度较小的缓流区,缓流区内实测流速普遍小于0.50 m/s,潜水员完全能站在壳体内完成构件水下定位指挥、堆码钢丝笼等水下辅助施工作业。为弱化由于壳体边界流速差在壳

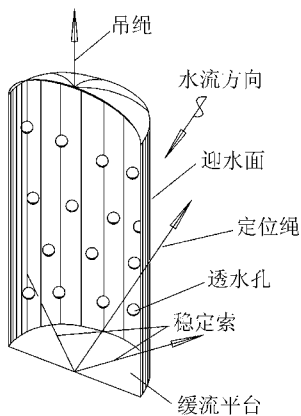


图6 圆柱壳体施工示意图

体内产生的涡流,改善钢丝笼施工作业面附近的流态,圆柱壳体上设置透水小孔,让部分迎面水流通过小孔直接流入圆柱壳体内的漩涡场,阻碍涡流旋转,平稳流态,达到优化潜水员水下施工环境的目的。

4 水口水电站尾水壅水堰工程施工

水口水电站尾水壅水堰通过采用浮船的吊运方法施工已于2010年3月建成,建成后尾水渠水位得到一定改善,水电站发电机组的振动现象得到了明显缓解。由于施工过程中是采用传统的浮船吊索起吊堰体钢丝笼砌块与砌筑就位的施工方法,没有采取特别措施为潜水员制造适合水下作业的水流环境,受水流影响,潜水员根本无法在水下正常作业,吊索无法吊装钢丝笼砌块准确就位,更无法实现整齐密实摆放,钢丝笼块体间渗水量大,堰体抗渗性能差,尾水壅水堰工程实施后,电站下泄流量 $Q=308\text{ m}^3/\text{s}$ 时的尾水位实测值 $h=4.95\text{ m}$,比设计值小 0.36 m ,尾水堰壅水高度不能满足设计要求。因此宜整修加固尾水壅水堰体,提高其抗渗能力,使其壅水高度达到设计要求。如果加固施工时水口水电站仍不完全停机,则需采用半圆柱壳体水下作业技术,为潜水员水下作业制造一个适宜施工的缓流环境。

5 结 语

实施水口水电站尾水壅水堰施工时,钢丝笼的调运就位、水下的准确摆放、钢丝笼间的密实砌筑是保证壅水堰施工进度、工程质量和发挥壅水作用的关键。

由于尾水壅水堰施工时电站不能停机,因此尾水渠内流速较大,若仍采用传统的浮吊和潜水员水下作业的方法施工,既不能将钢丝笼砌块准确吊装就位,同时也很难使砌筑块体的密实度满足抗渗要求。如果采用缆索吊运钢丝笼和半圆柱壳体水下缓流施工平台的作业方法,既能避免浮吊在施工中的

移动定位,简化钢丝笼的运输方式、消除调运过程受水面波浪的影响,又能使潜水员水下施工作业不受尾水渠流速的限制,适应发电机组各种运行调度方式,可确保水下作业人员的安全。堰体砌筑中采用翻转、挤压就位的施工方法,既可减小钢丝笼的形变,保证钢丝笼的准确就位,按设计要求实现堰体的几何尺寸,同时由于钢丝笼就位时的翻转惯性挤压和自重作用,能减小钢丝笼间的间隙,密实壅水堰体,增强抗渗能力,提高壅水堰的壅水能力。

通过模型试验观察,证明笔者提出的半圆柱壳体水下缓流平台施工技术能够实现潜水员在高流速环境的水下施工,可以解决高流速场中水下施工的技术难题。

参考文献:

- [1] 林家洋. 浅谈尾水位降低对机组运行安全性的影响[J]. 福建电力与电工, 2008, 28(4): 41-43.
- [2] 陈国栋. 水口水电厂尾水位下降对机组的影响及其对策[J]. 福建电力与电工, 2002, 22(4): 1-3.
- [3] 胡永华, 周冰凌. 浅析沙坪水电站尾水位降低对发电机组出力的影响及相应的工程处理措施[J]. 江西水利科技, 2004, 30(增刊): 61-63, 66.
- [4] 李进平, 杨建东. 水电站尾水位波动对机组稳定运行的影响[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2004, 37(5): 28-32.
- [5] 陆学华, 孔维厅, 熊江华, 等. 三板溪水电站尾水岔管混凝土施工[J]. 云南水力发电, 2009, 25(2): 39-41.
- [6] 齐光恒, 字继权, 谢新志. 构皮滩水电站尾水隧洞洞群开挖支护技术[J]. 水利水电施工, 2009(2): 48-53.
- [7] 胡胜根, 王志强, 马进潮. 平班水电站尾水管里衬安装[J]. 人民长江, 2004, 35(6): 41-42, 53.
- [8] 陈野鹰, 扈晓雯, 彭凯. 水口水电站尾水位下降治理技术及壅水堰设计[J]. 水电能源科学, 2010, 28(8): 113-114, 154.
- [9] 重庆交通大学. 闽江水口水电站厂房尾水壅水堰工程整体水工模型试验研究报告[R]. 重庆: 重庆交通大学, 2008.
- [10] 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院. 水口水电站尾水壅水堰工程施工组织设计[R]. 杭州: 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 2009.

(收稿日期: 2010-07-12 编辑: 方字形)

