

惠州抽水蓄能电站上库进出水口水力学模型试验

张从联 朱红华 钟伟强 黄智敏 钟勇明

(广东省水利水电科学研究院 广东 广州 510610)

摘要 通过物理模型试验,测试了发电和抽水两种工况下惠州抽水蓄能电站上库进出水口的流速分布、各通道流量分配、进出水口水头损失及入流漩涡等水力参数,并对库盆流态进行了观测。试验结果表明,惠州抽水蓄能电站上库进出水口及引水隧洞的体型布置是基本合理的,可供其他类似工程初步设计时参考。

关键词 抽水蓄能电站 侧式进出水口 流速分布 水头损失 漩涡

中图分类号 TV131 **文献标识码** A **文章编号** 1006-7647(2004)06-0013-04

抽水蓄能电站进出水口具有双向水流的水力特性(入流和出流运行工况,分别称为进水口和出水口)。由于库水位变化频繁、变幅较大,电站运行工况转换频繁,导致进出水口的水力特性比较复杂,入流时有可能产生有害的吸气漩涡,出流时出水口各通道的流速分布和流量分配不均匀。同时,进出水口水头损失的大小直接关系到电站的经济效益。因此,抽水蓄能电站进出水口的水力设计应满足:①入流避免产生有害的吸气漩涡;②进出水流均匀、平顺,各通道流量分配均匀合理;③水头损失尽可能最小;④库盆流态良好。

1 工程概况

惠州抽水蓄能电站位于广东省惠州市博罗县城郊,是广东省规划设计中的第二个大型抽水蓄能电站。电站一、二期工程进出水口布置均采用一管四机、紧凑并列布置形式,进出水口为岸坡式,扩散段为 4 通道的渐缩段进水口(或渐扩段出水口,见图 1)。孔口面积为 13.0m×7.5m(高×宽),闸门井为埋藏式竖井。电站一、二期工程装机容量为 2 400 MW,共装机 8 台,每台 300 MW。上库正常蓄水位 762.0m,死水位 740.0 m,引水隧洞洞径 8.5 m,单机发电引用

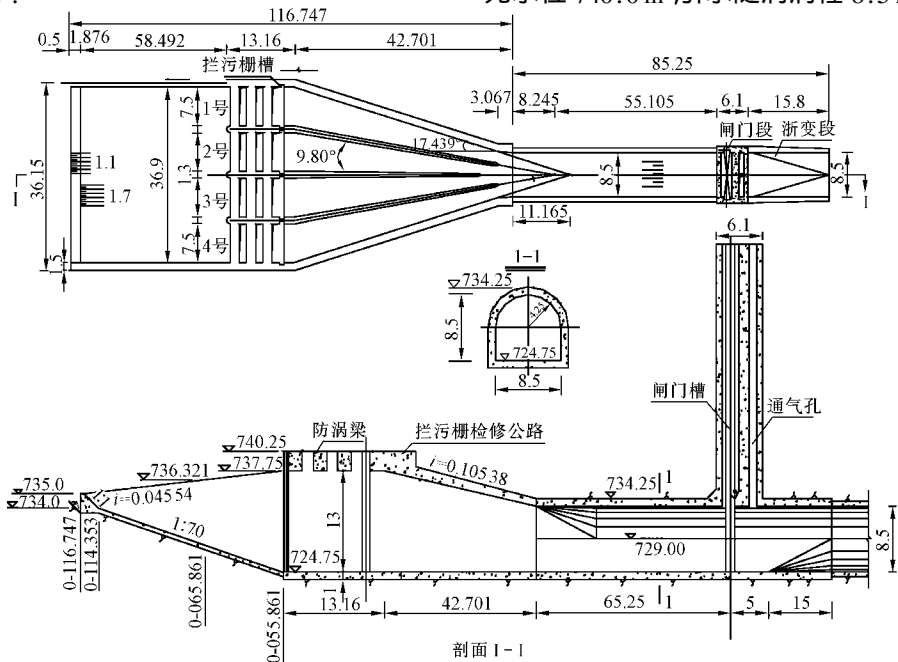


图 1 进出水口体型示意图(单位:m)

作者简介 张从联(1973—),女,河北无极人,工程师,硕士,从事水力学及河流动力学研究。

流量 $70.04\text{ m}^3/\text{s}$, 抽水引用流量 $56.54\text{ m}^3/\text{s}$, 进出水口中心线高程为 729.0 m . 因布置需要, 上库一期工程引水隧洞与进出水口闸门槽段平面连接呈 2.26° 的夹角, 二期工程呈 4.11° 的夹角, 并且一、二期工程引水隧洞在桩号 $0+110.718$ 后设置了两个对称的立面弯道, 布置简图见图 2.

2 模型设计与制作

2.1 模型设计

抽水蓄能电站进出水口入流要防止吸气漩涡的产生, 出流要求各通道水流均匀扩散, 流速分布和流量分配均匀, 因此, 模型设计应满足漩涡模型相似与流速分布相似.

目前漩涡模型的试验方法及相似率尚无统一的观点, 这主要因为漩涡形成的因素有很多, 主要原因有进水口淹没深度和入流流速、环流强度和进水口边界条件等. 其中还涉及到水流黏滞力和表面张力等因素, 原型中因雷诺数 Re 和韦伯数 We 都足够大, 黏滞力和表面张力对环流与漩涡产生所起的阻滞作用可略去不计. 在模型中, 受模型缩尺的影响, 黏滞力和表面张力对环流与漩涡的作用相对较大, 因而在模型设计时, 应尽量使 Re 和 We 超过一定的临界值, 使黏滞力和表面张力的影响处于次要的位置, 以避免缩尺影响.

目前通用的临界 Re 和 We 为: ①模型 $Re > 3 \times 10^4$ 时可作为水平取水口不受黏滞力影响的界限, 按弗劳德数 Fr 设计的模型可以获得相似^[1]; ②模型 $We \geq 120$ 时, 表面张力可以忽略不计^[2].

为消除模型缩尺因素的影响, 目前通用的方法是: ①水工建筑物漩涡模型仍以弗劳德准则设计; ②加大模型 Re 和 We , 使其超过临界值, 常用的方法是加大模型流量 $2 \sim 3$ 倍, 以消除黏滞力的影响. Hecker^[3]通过分析 Bear Swamp 抽水蓄能电站原、模型资料指出, 对于 $1:50$ 的按重力相似模拟的模型, 流量增加 $2.0 \sim 2.5$ 倍将能很好地模拟原型漩涡, 他

还认为模拟漩涡除了应满足以上条件外, 几何边界也必须模拟, 而且应该包括足够大的范围.

综上所述, 本模型选择按弗劳德准则设计的正态模型, 结合模型管道选材及试验场地情况, 选用几何比尺 $L_r = 1:50$. 根据试验条件, 进水口设计流量增加 2.0 倍以模拟原型漩涡, 此时 Re 与 We 均满足相应临界值的要求(见表 1).

表 1 进水口 Re 和 We

项 目	雷诺数 Re	韦伯数 We
原 型 流 量	9.24×10^6	901.6
模型设计流量	2.68×10^4	37.38
模型 2.0 倍设计流量	5.36×10^4	149.53
模型建议临界值	$\geq 3 \times 10^4$	≥ 120

2.2 模型制作

为保证模型进出水口在发电和抽水工况运行时库盆的水位涨落与原型较为相似, 模型库盆截取范围约占整个库盆面积的一半, 占地约为 350 m^2 , 模型高度为 3.0 m . 模型进出水口出流(抽水工况)由试验室内引水系统向模型供水, 入流(发电工况)则通过模型库盆的自然落差来实现. 模型的流量控制和量测系统由电磁流量计、电动调节阀、转换器和微机自动控制系统组成, 该系统既可以模拟发电工况又可以模拟抽水工况, 并在库水位变动情况下保持施放的流量恒定. 模型流速由多通道流速自动同步采集系统测量, 该系统由光电流速传感器和微机组成.

引水隧洞的模拟长度约为 60 倍相应隧洞的直径. 引水隧洞的模型管道采用有机玻璃管制作, 经率定其边壁糙率 $n_m \approx 0.008$, 与要求的模型糙率接近.

3 试验成果及分析

3.1 进出水口流速分布和各通道流量分配

在拦污栅槽处布置测流断面, 每个通道(通道号由左至右为 $1 \sim 4$ 号排列)分左、中、右 3 条测线, 每测线划分为 7 个水层(水层面由低至高为 $1 \sim 7$ 排列)测点, 每组次 168 个测点.

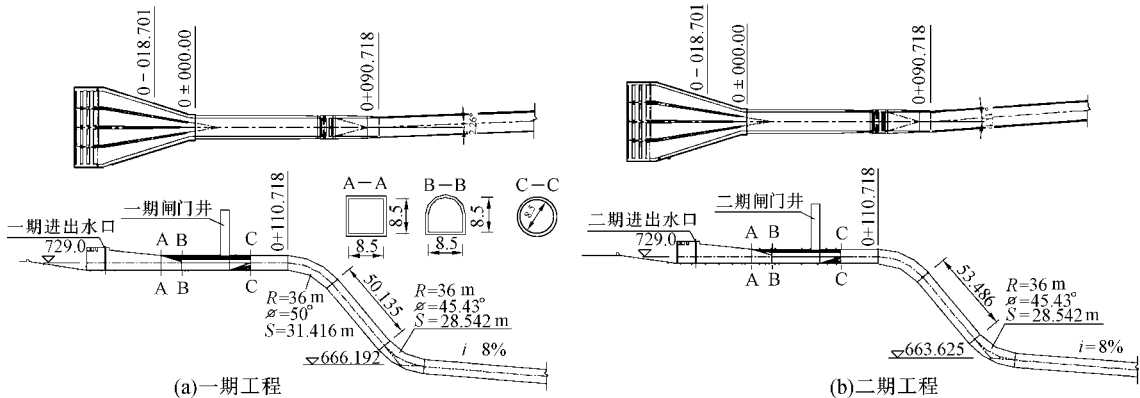


图 2 进出水口及引水隧洞布置简图(单位: m)

3.1.1 进水口入流(发电)工况

发电入流工况时进水口各通道垂线平均流速分布见图 3(死水位 $Z = 740.0\text{ m}$). 试验成果表明: ①各通道进口流速分布较均匀, 各测点流速均在 1.0 m/s 以下. 从水平向流速分布来看, 两侧通道(1 号、4 号)流速略大, 中间 2 号、3 号通道流速略小; 从通道垂向流速分布来看, 各水层流速分布较均匀, 底部水层流速值稍大于顶部水层流速值. 总体来讲, 各通道平均流速在 $0.642 \sim 0.804\text{ m/s}$ 之间, 流速分布不均匀系数小于 1.5, 满足规范的要求. ②各通道流量分配也较均匀, 进水口入流时中孔与边孔的流量分配比例约为 $0.23:0.27$, 各通道流量分配与分流墩头部的位置以及各通道的最小过流面积比有关(中孔与边孔的最小过流面积之比为 $0.225:0.275$).

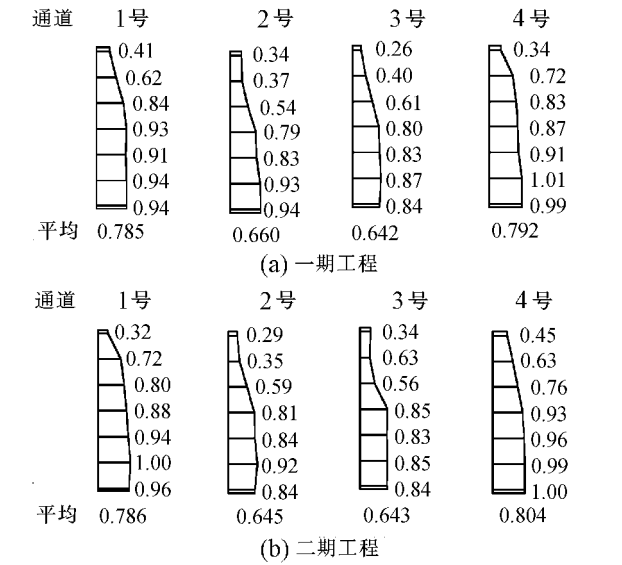


图 3 进水口各通道垂线平均流速分布(单位: m/s)

3.1.2 出水口出流(抽水)工况

抽水出流工况时出水口各通道垂线平均流速分布见图 4($Z = 740.0\text{ m}$). 由实测资料分析可知: ①出水口中间 2 号、3 号通道的底部出流流速稍大, 最大测点流速约为 1.68 m/s ; 一、二期出水口出口顶部出现负向流速, 负向流速值约为 $0.18 \sim 0.22\text{ m/s}$, 主要出现在中间两通道的第 6、第 7 层水面. 总体来讲, 各通道平均流速在 $0.542 \sim 0.623\text{ m/s}$ 之间, 与国内其他抽水蓄能电站出水口流速分布差别不大. ②各通道流量分配比较均匀, 出水口出流时中孔流量略大于边孔流量, 流量分配比例约为 $0.27:0.23$. 根据文献[4]的经验, 在垂直面内设置弯道时, 如弯道距离出水口较近, 则出水口顶部会出现高流速区分布, 对拦污栅的稳定不利, 因此一般要求连接进出水口的隧洞应有 $(30 \sim 40)D$ (D 为隧洞直径)的直段. 文献[5]中下库出水口前设置了立面弯道, 弯道离出水口距离 $L < 4D$, 试验中就出现了主流集

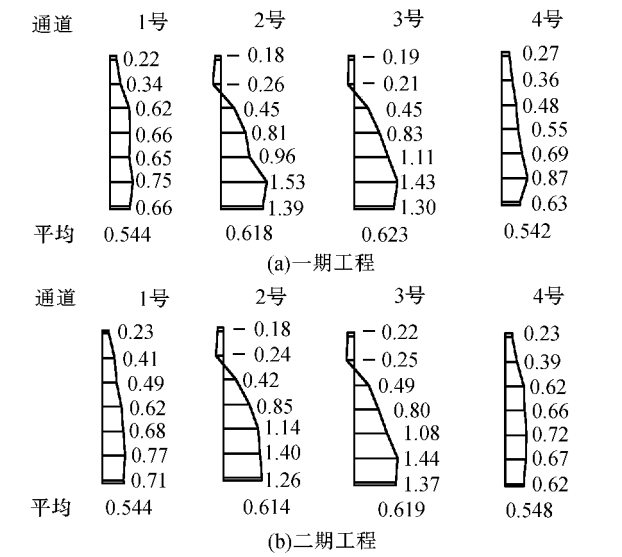


图 4 出水口各通道垂线平均流速分布(单位: m/s) 中在通道上部的情况. 本项目一、二期在引水隧洞中均布置了立面弯道, 且距离出水口较近 ($L \approx 13D$), 但模型试验中没有出现出水口顶部流速过大的情况, 而是主流集中在底中部出流, 流速分布比较理想, 究其原因, 主要是本设计中设置了 2 个对称的立面弯道, 从而大部分消除了 1 个弯道带来的偏流影响.

3.2 进出水口水头损失系数

进出水口段的水头损失主要是指局部阻力损失, 其大小是衡量进出水口水力设计和水流条件优劣的重要指标.

惠州抽水蓄能电站上库进出水口段主要由扩散段、拦污栅、方变城门洞段、闸门井段、城门洞变圆段等组成, 总长 141.111 m . 为了较准确地测量进出水口段的水头损失, 在城门洞变圆段末端安装互为 90° 的 4 个测压管进行压强的量测比较, 并进行多组次的观测, 取其平均值进行研究.

进出水口的水头损失及水头损失系数计算公式如下:

$$h_{j1} = H_0 - H_i - \frac{\alpha v_i^2}{2g} + \frac{\alpha v_0^2}{2g} \quad (1)$$

$$h_{j2} = H_i - H_0 + \frac{\alpha v_i^2}{2g} - \frac{\alpha v_0^2}{2g} \quad (2)$$

$$\varphi = \frac{h_{j1}}{\alpha v_i^2 (2g)}, \quad \frac{h_{j2}}{\alpha v_i^2 (2g)} \quad (3)$$

式中: h_{j1} 为发电工况进水口进流损失, m; h_{j2} 为抽水工况出水口出流损失, m; H_0 为库水位, m; H_i 为量测断面测压管水位, m; v_0 为进出水口库盆行近流速, m/s; α 为断面流速分布系数; φ 为水头损失系数. 计算结果为: 发电入流工况 $\varphi = 0.34$, 抽水出流工况 $\varphi = 0.39$.

表 2 是我国近年修建的几座抽水蓄能电站上库

进出口水头损失系数.由表 2 可见,惠州抽水蓄能电站上库进出口水头损失系数是合理的.

表 2 几座抽水蓄能电站上库进出口水头损失系数

电 站	进出水口型式	水头损失系数 φ	
		入流	出流
惠州抽水蓄能电站	侧式	0.34	0.39
广州抽水蓄能电站	侧式	0.19	0.39
天荒坪抽水蓄能电站	侧式	0.25	0.33
荒沟抽水蓄能电站	侧式	0.27	0.54
琅琊山抽水蓄能电站	侧式	0.33	0.58

3.3 入流漩涡

为避免产生有害漩涡,惠州抽水蓄能电站进水口上方设计了 3 根高 2.5 m、宽 1.8 m 的防涡梁(见图 1).为了判别进水口是否产生有害漩涡,前人做了大量的研究工作,Pennino 等^[6]总结了 13 个侧式、井式进水口的模型试验,认为进水口的弗劳德数 Fr 小于 0.23,则不易出现吸气漩涡.

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gs_m}} < 0.23$$

式中: v 为进口处的平均流速; g 为重力加速度; s_m 为进口中心线以上的最小淹没深度.

惠州抽水蓄能电站在死水位运行时,上库进水口 $Fr \approx 0.069 < 0.23$,经分析,产生有害漩涡的可能性不大.模型试验重点观测了进水口在不同特征水位入流时水面漩涡的发生与发展情况.为避免模型缩尺效应可能带来的水流黏滞力和表面张力不相似,进水口施放了 2.0 倍设计流量进行观察.试验观测到在不同工况下(一、二期进水口联合运行或单独运行),库水位自正常蓄水位降至死水位的过程中,进水口防涡梁水面会有不同程度的环流存在,环流中心水面出现明显凹陷,环流强度偶尔加强形成漏斗状漩涡,但未形成吸气串通现象.因此,可以认为在正常蓄水位至死水位的整个运行区间内,进水口按设计流量入流运行,出现明显有害的吸气串通漩涡的可能性较小.

3.4 库盆流态与引水渠流速分布

试验观测到一、二期进出水口联合或单独运行时,受地形影响,库盆内与进出水口附近会产生 4 个环流区,实测环流流速 $v \approx 0.25 \sim 0.45 \text{ m/s}$,环流可能会带来一些库盆的泥沙输移和淤积,但不会造成库盆严重冲刷问题,对库盆的安全运行影响较小.

当电站 8 台机组在死水位联合运行时,拦沙坎顶部流速值最大达到 1.27 m/s,进出水口前池前沿部分区域的渠底流速值较大(可达 0.99 m/s),为确保进出水口的安全运行,可在进出水口前池前沿的引水渠区域采取适当的衬砌保护措施.

4 结 语

惠州抽水蓄能电站上库进出水口流速分布与各通道流量分配较均匀,进出水口水头损失系数合理;进水口在各种工况下,不会产生明显有害吸气串通漩涡,说明上库进出水口及引水隧洞的体型布置是基本合理的.

参考文献:

[1] Amphet B A, Anwar J H O, James A W. Similarity of Free-Vortex at Horizontal Intake[J]. Journal of Hydraulic Research, 1978, 16(2): 95 ~ 105.

[2] Akalank K J, Ramachandra J G, Kittur G R R. Vortex formation at vertical pipe intake[J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1978, 104(HY10): 1429 ~ 1445.

[3] Hecker G E. Model-prototype comparison of free surface vortices [J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1981, 107(HY10): 1243 ~ 1259.

[4] 福原华一. 抽水蓄能电站进水口、泄水口的水力设计[J]. 上海水利水电技术, 1988(1): 32 ~ 43.

[5] 张伯纳. 天荒坪抽水蓄能电站水力学模型试验研究[J]. 华东水电技术, 2000(2): 90 ~ 99.

[6] 陆佑楣, 潘家铮. 抽水蓄能电站[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992. 381 ~ 384.

(收稿日期 2004-01-07 编辑 骆超)

· 简讯 · 土耳其坝高 200 m 以上的双曲拱坝

土耳其是世界上修建高双曲拱坝最多的国家之一,目前已有 3 座坝高在 200 m 以上的双曲拱坝,其中 1 座已经完工,另外 2 座正在建设中.①伯克坝,位于杰伊汉河上,在锡尔坝和阿斯拉塔坝之间,坝高 201 m,坝顶长 270 m,厚 4.6 m,坝底厚 29.9 m,宽高比为 0.148,坝身体积 73.5 万 m³,库容 4.27 亿 m³.泄洪设施有 4 个表孔溢洪道和右岸的 2 条泄洪隧洞,可分别下泄 2000 m³/s 和 2750 m³/s 流量.地下厂房内安装有 3 台单机容量为 17 万 kW 的机组,总容量 51 万 kW.该工程于 1992 年开工建设,2000 年首台机组投入运行,2001 年工程全部完工.②埃尔梅内克坝,位于格拉苏河的支流埃尔梅内克河上,距土耳其首都安卡拉约 350 km,坝高 210 m,坝底厚 25 m,宽高比为 0.119,坝身体积 27 万 m³,库容 45.8 亿 m³.泄洪设施为左右岸各 1 条泄洪隧洞和坝身底孔,可泄流量 1000 m³/s.左岸厂房内安装有 2 台 15 万 kW 机组,共 30 万 kW.该工程已于 2002 年 7 月开工,计划 2007 年建成.③德里内尔坝,位于土耳其东北部乔鲁赫河上,坝高 253 m,坝顶长 720 m,坝底厚 28 m,宽高比 0.11,坝身体积 350 万 m³,库容 19 亿 m³.泄洪设施有 8 孔溢洪道和 2 条泄洪隧洞,可分别泄洪 7000 m³/s 和 2250 m³/s.地下厂房内装设 4 台 16.75 万 kW 机组,共 67 万 kW.该工程已于 1998 年开工,2001 年完成导流洞,2002 年建成上下游围堰,2004 年开始浇筑大坝,目前整个进度比原计划有所推迟.

(吴 高供稿)