

泵站出水池-无压隧洞过渡段体型优化研究

王月华¹, 王斌¹, 吴德忠², 韩晓维¹, 张鸿清¹, 王自明¹

(1. 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020; 2. 余姚市水利局, 浙江 余姚 315400)

摘要: 泵站出水池到无压隧洞过渡段体型对隧洞的过流能力、沿程水面线及局部水头损失影响显著。针对某泵站工程过渡段的水流特性问题, 采用比尺为 1:25 物理模型对该过渡段进行了优化研究, 延长了过渡段长度, 增加了边墙扭曲段。研究发现: 模型改进后, 过流能力增加, 水流平稳; 局部水头系数从原设计的 0.057~0.111 减小至 0.051~0.111; 中心线水面线的纵向变化幅度减小。通过各项指标表明, 优化后的过渡段比原设计方案显现出更为优良的特性, 提出的优化设计方法可为其他类似工程提供借鉴经验。

关键词: 泵站出水池; 无压隧洞; 过渡段; 体型优化; 模型试验

中图分类号: TV651.3; TV131.61

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)04-0138-05

Optimization of transition section shape from outlet sump of pumping station to free-flow tunnel

WANG Yuehua¹, WANG Bin¹, WU Dezhong², HAN Xiaowei¹, ZHANG Hongqing¹, WANG Ziming¹

(1. Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, China;

2. Yuyao Water Resources Bureau, Yuyao 315400, China)

Abstract: The influence of transition section shape from outlet sump of pumping station to free-flow tunnel on current capacity, surface line and local head loss is significant. Aiming at solving the problem that the flow characteristic of a pump station is complex, the transition section was lengthened and warped surface wall was optimized by a test model with a geometric scale of 1/25 in accord with. The results show more smooth streamlines and an increase in flow capacity in the modified transition, along with a reduction from 0.051~0.074 to 0.051~0.074 in local head loss and a reduction in ranges of central longitudinal water surface profiles. The hydraulic characteristics indicators show that the transition section after optimization performs a better characteristics compared with that of the original design scheme. The optimal design of the project can provide a reference for other similar projects.

Key words: outlet sump of pumping station; free-flow tunnel; transition section; shape optimization; model test

1 研究背景

无论是电站尾水系统还是泵站出水系统, 对于尾水水位变化不大的水利枢纽, 一种较为经济的设计方案是采用无压隧洞。无压隧洞顶拱不承受内水压力, 多采用圆拱直墙式断面, 当地质条件较差时, 可采用马蹄形或圆形断面。为保证洞内呈明流状态, 当洞内为低流速恒定流且通气条件良好时, 水面以上空间不宜小于隧洞断面面积的 15%, 且净空高度一般不小于 0.4 m。为了节省开挖量, 在隧洞开

挖距离较长时, 几台机组往往共用一条隧洞, 因此需要一个过渡汇流池。过渡段的几何形状和局部水头损失密切相关, 如何增加隧洞泄流能力及减少汇流池的水头损失是优化工程设计的重要内容。目前对泵站出水池布置形式的研究较少, 主要集中在泵站前池及明渠布置型式研究^[1-5]。谢省宗等^[6]、王雷等^[7]对南水北调工程惠南庄泵站前池布置方案进行了数值模拟和试验研究; 黄金伟等^[8]对引黄泵站前池水流特性进行了三维数值模拟; 谭乔木等^[9]通过模型试验对明渠收缩段内的水深变化规律进行观

收稿日期: 2018-01-24; 修回日期: 2018-03-07

基金项目: 浙江省科技计划项目(2017F30013); 浙江省水利科技计划项目(RC1603)

作者简介: 王月华(1986-), 男, 浙江湖州人, 硕士, 工程师, 研究方向: 水工水力学。

测,总结了收缩角、底坡和流量对水深和水面波动的影响规律;翟渊军^[10]结合南水北调中线工程,通过模型试验提出了渐变段直线扭曲段水面扩散角和收缩角的最优选择;戴梅等^[11]通过模型试验对渡槽的进出口连接型式进行了优化,得出直线扭曲面渐变段的水头损失系数小于反弯扭曲面渐变段的系数;李蘅等^[12]结合水电工程导流隧洞,研究了陡坡隧洞的泄流能力与隧洞进口型式的关系,得出曲线进口能有效提高隧洞的泄流能力;吴永妍等^[13]通过模型试验研究了梯形明渠到马蹄形隧洞进口过渡段的水面衔接特点和局部水头损失规律;郭红民等^[14]采用 FLUENT 软件对水电站岸边泄洪洞的泄流能力、水面线等水力特性进行了计算研究;王晓玲等^[15]对引额济乌一期工程尾部调节水库泄水洞泄洪的流态和水面线进行了数值模拟计算,得出长距离无压引水隧洞进口处易出现水流扰动,沿程水面线呈现先上升后下降的趋势。

本文以某泵站工程为例,对泵站出水池到无压隧洞过渡段的水流特性开展模型试验,分析了过流能力、水面线及局部水头损失,提出了改进措施。并对前后模型试验结果进行对比,分析了过渡段型式对水流特性的影响。

2 模型设计

试验模型按重力相似准则和紊流粗糙区摩阻力相似准则设计,采用正态模型。几何比尺为 $\lambda_l = 25$,则糙率比尺 $\lambda_n = \lambda_l^{1/6} = 1.71$ 。泵站及隧洞均采用有机玻璃制作,糙率为 0.009,原型糙率 0.011 ~ 0.017,按照相似比尺计算出原型糙率为 0.016,因此采用有机玻璃模拟能满足糙率相似要求。模型包括水库、进水池、泵房、出水池及排水隧洞等建筑物,模型长度约 20 m,宽度 2 ~ 10 m。试验进口流量采用电磁流量计控制,出口采用三角形薄壁堰对流量进行校核。采用水位测针测试上下游水位,采用 DJ800 水位波动仪测试水面波动。

原方案:泵站平面布置图如图 1 所示。泵站出水池长 23.5 m(均为原型尺寸,下同),反坡渐变段长 26.5 m,无压隧洞长 100m,隧洞后设置出口段及三角堰。泵站排涝流量 120 m³/s,由 4 台泵组成,泵站出水池与下游无压隧洞连接。其中水平过渡段底宽 38.6 m,渠高 15 m;反坡过渡段底宽由 38.6 m 逐渐过渡到 6.6 m;城门洞隧洞底宽 6.6m,侧墙高 4.7 m,顶拱圆心角 180°。特征断面如图 2 所示。

优化方案:由于原方案过渡段过短,沿程水面坡

降较大,为使过渡段水流更平顺,减小水面紊动,避免过多能量损失,提高隧洞过流能力,需对过渡段进行改进。优化方案平面布置图如图 3 所示。其中过渡段两处折角收缩段均改为圆弧面,隧洞进口位置向下游移动 10 m。

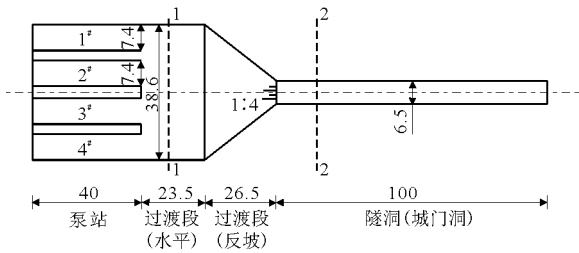
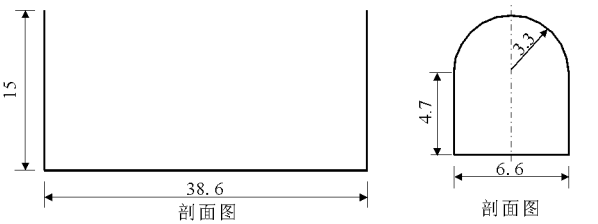


图 1 原方案平面布置图(单位:m)



(a) 水平过渡段断面图 (b) 城门洞断面图

图 2 特征断面示意图(单位:m)

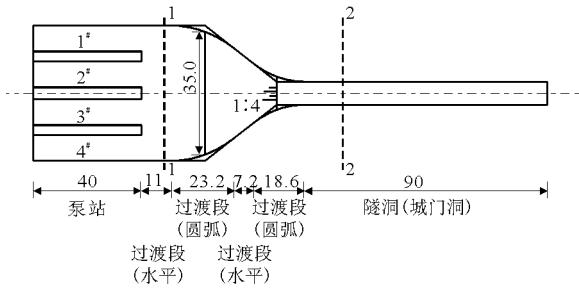


图 3 优化方案平面布置图(单位:m)

表 1 模型试验工况

工况	1#泵 (左)	2#泵	3#泵	4#泵 (右)	流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	备注
1		开			30	自由出流
2	开	开	开		90	自由出流
3	开	开	开	开	120	设计水位(7.53m)

3 成果分析

3.1 过流能力

试验观测了隧洞自由出流的过流能力。由于此时隧洞的过流能力不受洞长的影响,进口水流为宽顶堰流,流量系数按照常规堰流公式计算:

$$Q = m\sigma_s B \sqrt{2g} H_0^{1.5} \quad (1)$$

式中: Q 为流量, m^3/s ; m 为流量系数; σ_s 为淹没系数(由于下游水位不影响隧洞出流, σ_s 取 1.0); B 为过水宽度, 即隧洞底宽 6.6 m; Z_1 为泵站出水池水位, m; H_0 为计入行进流速水头的总水头, m, $H_0 = Z_1 - 0.7 + v^2/2g$ 。

(1) 经拟合, 原方案流量与上游水位的试验关系式为:

$$Q = 10.731H_0^{1.4919} \quad (2)$$

相关系数: $R^2 = 0.999$, 范围: $2.64 \text{ m} \leq H_0 \leq 5.83 \text{ m}$ 。

水位流量关系曲线见图 4。通过公式估算, 流量系数约为 0.363。当 1 台机组运行时, 隧洞进口水位为 2.69 m; 当 2 台机组运行时, 隧洞进口水位为 3.87 m; 当 3 台机组运行时, 隧洞进口水位为 4.86 m; 当 4 台机组运行时, 隧洞进口水位为 5.74 m, 此时隧洞通过最大输水流量, 上游水位比设计限制水位 7.53 m 低 1.79 m, 说明原设计方案过流能力满足设计要求。

(2) 经拟合, 优化方案流量与上游水位的试验关系式为:

$$Q = 10.745H_0^{1.5076} \quad (3)$$

相关系数: $R^2 = 0.999$, 范围: $2.62 \text{ m} \leq H_0 \leq 5.74 \text{ m}$ 。

水位流量关系曲线见图 4。通过公式估算, 流量系数约为 0.371。当 1 台机组运行时, 隧洞进口水位为 2.68 m, 比原设计减小 0.01 m; 当 2 台机组运行时, 隧洞进口水位为 3.83 m, 比原设计减小 0.04 m; 当 3 台机组运行时, 隧洞进口水位为 4.80 m, 比原设计减小 0.06 m; 当 4 台机组运行时, 隧洞进口水位为 5.66 m, 这时隧洞通过最大输水流量, 上游水位比设计限制水位 7.53 m 低 1.87 m, 说明优化方案过流能力满足设计要求, 比原方案有增加。

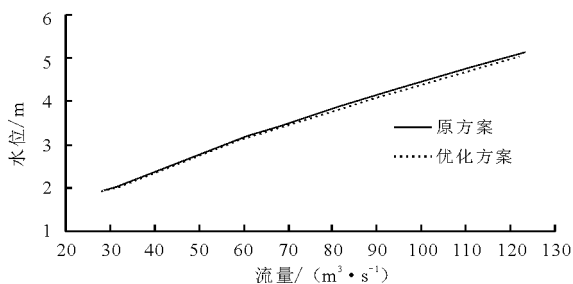


图4 隧洞自由出流水位-流量关系

3.2 水面线

优化方案中心线水面沿程变化规律与原方案相

似, 在隧洞进口上游, 水面变化平缓, 受出水池和隧洞进口断面收缩的影响, 隧洞进口前水面有小幅壅高, 约 0.07 m。优化方案水面起伏有大幅减轻, 尤其是隧洞进口段, 没有明显水面局部跌落现象, 隧洞进口附近洞顶富余增加, 隧洞内水面波动减弱。

(1) 2[#]机组单独运行时, 由于 2[#]机组的出口基本正向对隧洞进口, 水流受出水池和隧洞进口的影响相对较小。原方案和优化方案沿程水位落差分别约为 0.33、0.31 m。(2) 1[#]、2[#]、3[#]三机组联合运行时, 原方案和优化方案沿程水位落差分别约为 1.28 和 0.78 m。(3) 4 机组同时运行(设计工况)时, 原方案和优化方案沿程水位落差分别约为 0.48 和 0.36 m。优化方案洞顶净空高度为 1.37 m, 满足设计要求。

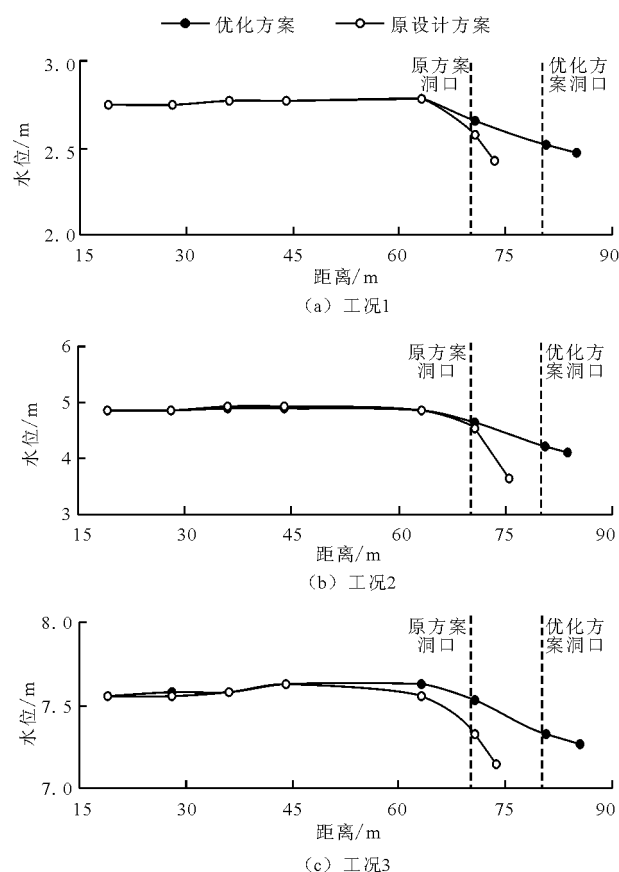


图5 中心线水面线纵向变化对比图

3.3 局部水头损失

局部水头损失是由于几何边界条件改变而引起的水流能量损失。出水池及隧洞进口的几何形状和局部水头损失密切相关。局部损失系数为局部水头损失与隧洞速度水头的比值, 水头损失 ΔH_{ij} 及水头损失系数 ξ_{ij} 的计算公式为:

$$\Delta H_{ij} = \left(z_i + \frac{p_i}{\rho g} + \frac{v_i^2}{2g} \right) - \left(z_j + \frac{p_j}{\rho g} + \frac{v_j^2}{2g} \right) \quad (4)$$

$$\xi_{ij} = \frac{\Delta H_{ij}}{v_j^2/2g} \tag{5}$$

式中： v_i 为泵站断面平均流速，m/s； v_j 为隧洞断面平均流速，m/s； ξ_{ij} 为 i,j 断面之间的局部水头损失系数。

对于出水池及隧洞进口,4 个泵站出水口的水流汇流后在一条隧洞流出,泵站断面在单位时间内输入的水流能量应等于隧洞断面加上其间水流的能量损失(忽略沿程水头损失)。测量断面见图 6,局部水头损失汇总见表 2。

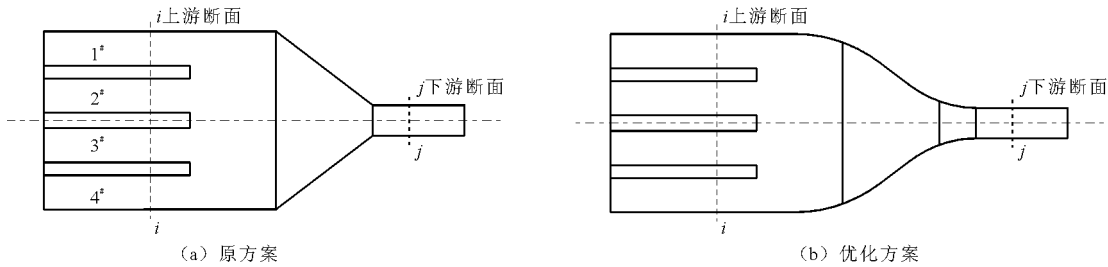


图 6 局部水头损失测量断面

表 2 局部水头损失统计

工况	机组流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)				平均水头损失 H/m		平均水头损失系数	
	1#	2#	3#	4#	原设计方案	优化方案	原设计方案	优化方案
1		30			0.038	0.023	0.111	0.065
2	30	30	30		0.051	0.044	0.057	0.051
3	30	30	30	30	0.034	0.029	0.086	0.074

由表 2 可知,优化方案的局部水头损失及水头损失系数均小于原设计方案。具体如下:

(1)2#单机组运行时,优化方案平均水头损失为 0.023 m,平均水头损失系数为 0.065。水头损失比原设计方案减小 0.015 m。(2)1#、2#、3#三机组运行时,优化方案平均水头损失为 0.044 m,平均水头损失系数为 0.051。水头损失比原设计方案减小 0.007 m。(3)1#、2#、3#、4#四机组运行时,优化方案平均水头损失为 0.029 m,平均水头损失系数为 0.074。水头损失比原设计方案减小 0.005 m。

3.4 水面波高

为进一步了解优化方案的水流特性,试验对 3 组工况进行了水面波动观测,为边墙高程设计提供数据参考,观测断面及位置见图 7。

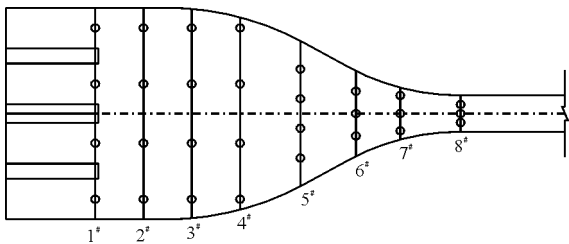


图 7 水面波高观测断面及位置

试验表明,各工况出水池及隧洞进口位置水面平稳,波动不大。平均波高、1/3 大波波高和 1/10

大波波高能直观反映水面波动大小。其中 1/3 大波波高是指将某一时段连续测得的所有波高按大小排列,取总个数中的 1/3 个大波波高的平均值;1/10 大波波高取波高最大的 1/10 个波,计算其平均波高。波高特征值详见表 3,由表 3 可知:(1)泵站出口断面(1#)波高值最大,各工况平均波高为 6~9 cm,1/3 波高值为 9~14 cm,1/10 波高值为 11~17 cm。(2)2#单泵运行时,水面波动相对较小,其他工况水面波动比较接近。

表 3 各断面波高特征表

		cm		
测量断面	类别	工况 1	工况 2	工况 3
1#	平均	6	9	9
	1/3 大波	9	14	13
	1/10 大波	11	17	15
2#	平均	3	6	7
	1/3 大波	5	8	10
	1/10 大波	5	10	12
3#	平均	3	7	6
	1/3 大波	5	11	9
	1/10 大波	6	14	11
4#	平均	4	7	7
	1/3 大波	6	10	10
	1/10 大波	7	12	13
	平均	3	6	5

续表 3

测量断面	类别	工况 1	工况 2	工况 3
5 [#]	1/3 大波	4	9	7
	1/10 大波	6	12	9
	平均	3	5	4
6 [#]	1/3 大波	5	8	6
	1/10 大波	5	10	8
	平均	5	5	3
7 [#]	1/3 大波	7	7	5
	1/10 大波	8	10	6
	平均	4	6	5
8 [#]	1/3 大波	5	9	7
	1/10 大波	7	11	10

4 结 论

本文以某泵站工程为背景,通过物理模型试验分析了该工程泵站原方案和优化方案的过流能力、水面线和局部水头损失等,优化方案得到工程设计和施工的采用。结论如下:

(1)原方案和优化方案过流能力均满足设计要求,优化方案富余更大。原方案过渡段水位比设计限制水位 7.53 m 低 1.79 m,优化方案过渡段水位比设计限制水位 7.53 m 低 1.87 m。

(2)优化方案水面起伏有大幅减轻,尤其是隧洞进口段,隧洞进口附近洞顶富余增加,隧洞内水面波动减弱。其中设计工况时,优化方案洞顶净空高度为 1.37 m,满足设计要求。

(3)通过优化过渡段边墙体型,各工况优化方案局部水头损失均小于原方案,减小幅度的 0.005 ~ 0.015 m。

(4)优化方案各工况过渡段水面平稳,波动不大。2[#]单泵运行时,水面波动相对较小;其他工况水面波动比较接近,平均波高为 3 ~ 9 cm,1/3 波高值

为 5 ~ 14 cm,1/10 波高值为 6 ~ 17 cm。

参考文献:

- [1] 宋月清,林 仁. 水泵启动过程中泵站前池水位降落值的分析[J]. 水利学报,1999(5):71-76.
- [2] 高传昌,刘新阳,石礼文,等. 泵站前池与进水池整流方案数值模拟[J]. 水力发电学报,2011,30(2):54-59.
- [3] 史力生,潘军宁. 滨海核电站取水渠长周期波动现象及其消减[J]. 水利学报,2009,40(2):201-207+213.
- [4] 王英奎,江春波,陈正兵. 泄洪洞模型进口立轴漩涡试验研究[J]. 水力发电学报,2010,29(2):21-25.
- [5] 王均星,项志超,冯 艳. 清远抽蓄电站竖井泄洪洞进口试验研究[J]. 中国农村水利水电,2009(6):154-157.
- [6] 谢省宗,王 雷,冯宾春,等. 惠南庄泵站前池流道模型试验研究[J]. 南水北调与水利科技,2005,3(4):4-7.
- [7] 王 雷,史文彪,杨开林,等. 南水北调中线惠南庄泵站进水前池布置方案的分析研究[J]. 南水北调与水利科技,2008,6(1):185-193.
- [8] 黄金伟,朱丕春,姚辉勇,等. 引黄泵站前池进水池整流措施[J]. 南水北调与水利科技,2014,12(2):146-149+153.
- [9] 谭乔木,张法星,薛顺民,等. 明渠收缩段水深变化规律模型试验[J]. 中国农村水利水电,2014(4):140-143.
- [10] 翟渊军. 南水北调中线工程总干渠渠道渐变段局部水头损失计算方法研究[J]. 灌溉排水学报,2007,26(S1):20-22.
- [11] 戴 梅,陈新桥. 南水北调中线工程槐河(二)渡槽水力特性试验研究[J]. 南水北调与水利科技,2008,6(1):194-196+199.
- [12] 李 蘅,李学海,杜泽金. 陡坡隧洞不同进口形式的水力特性分析[J]. 长江科学院院报,2014,31(1):38-41.
- [13] 吴永妍,刘昭伟,陈永灿,等. 梯形明渠-马蹄形隧洞过渡段流动形态与局部水头损失研究[J]. 水力发电学报,2016,35(1):46-55.
- [14] 郭红民,李 江,覃 闪,等. 潘口水电站泄洪洞三维数值模拟[J]. 水电能源科学,2014,32(4):88-91.
- [15] 王晓玲,段琦琦,佟大威,等. 长距离无压引水隧洞水气两相流数值模拟[J]. 水利学报,2009,40(5):596-602.