循环水泵房侧向进水流道水力优化设计及模型试验

赵建钧1,程 璐1,冯春平2

(1. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029; 2. 铜山华润电力有限公司彭城发电厂, 江苏 徐州 221142)

摘要:论述了侧向进水条件下流道水流的水力特性及常用研究方法,并以彭城电厂循环水系统为例,采用物理模型试验与数值模拟相结合的手段,优化设计泵房侧向进水流道.文章重点针对原设计方案下冷却塔集水池出口及回水明沟内的不利流态,采用多种整流措施,有效改善了回水明沟内水流流态及吸水室内流速分布的不均匀性,优化后的推荐方案能够满足循泵安全稳定运行的要求,研究成果也为其它类似的大中型循环水泵工程提供了参考.

关键词:循环水泵;流道;旋涡;水力优化设计;模型试验

中图分类号: TV131 文献标识码: A 文章编号: 1009-640X(2009)01-0047-06

循环水泵(以下简称循泵)的性能及可靠性很大程度受进水流道设计的影响.稳定的水泵运行工况要求吸水喇叭口的进水断面水流均匀^[1].流道内如发生空气吸入涡或水中涡带,水泵会发生振动和噪声,进一步发展,则会造成水泵性能下降,甚至无法运行.

徐州彭城发电厂三期工程 2×1000 MW 超临界燃煤机组 2 台机组合用 1 座循环水泵房(以下简称循泵房),循泵房对称布置于两冷却塔之间,从冷却塔集水池至循泵房之间回水明沟在平面转向 90°,循环水回水沟宽度由出口的25 m渐变至中央水泵房的 18 m,沟底深度由-2.0 m 渐变至-6.0 m. 该进水流道沿程宽度、深度变化大,水流条件复杂,是典型的侧向进水式泵房流道. 水流出冷却塔集水池后直冲回水沟弯段凹进一侧,在弯道后、泵房前极易形成大范围的回流,以及垂直于泵房进口的不稳定横流,对水泵安全运行构成威胁.

1 侧向进水流道水力特性及研究现状

侧向进水的流动即水流的弯道流动,1876年,汤姆逊在试验中发现了弯道螺旋流,并对弯道环流的形成和机理给出了物理描述和解释,引起了人们的关注. 曲线运动中的水流质点除受重力作用外,还受到离心惯性力的作用,在纵向、径向和竖向都具有流速,其运动特性主要表现在水面横比降、横向环流、附加切应力和局部阻力、流速重分布等现象. 弯道水流是三维流动,在沿水深方向上,面流与底流的向心加速度不一致,横向环流增强了层间动量交换;流速的重新分布使得水面变化非常复杂,出现菱形交叉的冲击波,在受到边墙转向的阻碍作用下,还会造成水面的局部壅高;此外,由于凹岸和凸岸水面负比降的存在,水流会脱离边壁产生分离流动. 分离流、螺旋流、流速重分布等都将导致弯道水流的水头损失.

目前,描述横向流速沿垂线分布的公式主要有波达波夫公式和罗索夫斯基公式^[2]. 在理论分析的基础上,通过野外观测、试验研究、数值分析等手段,弯道水流的研究已经取得丰硕成果. 其中数值分析以其花费

收稿日期: 2008-04-28

少、周期短、可以直接对原型进行计算等优势越来越受到重视,然而由于弯道水流运动的三维特性,描述动力特征的非线性方程组还不能求解出精确解,现存的弯道三维数学模型也仅为准三维模型.因此,在解决枢纽布置,河、航道整治,取排水口选址等大型工程的复杂实际问题时,仅靠常规的理论分析和数学模拟方法不足以取得令人满意的结果,还需采用更直接有效的物理模型试验,精确地模拟研究弯道水流的复杂三维动力特性.

为保证本期工程泵房流道具有良好的进水流态,本文将主要采用物理模型试验方法,通过选取合适的模型比尺及相似准则建立侧向进水流道物理模型,直接测量和观测流场分布情况及漩涡、回流等水流现象;同时建立流道二维数学模型,一方面对物理模型成果加以验证,另一方面在数学模型上初步甄选出流道优化设计方案,通过物理模型的详细论证,最终确定合适有效的整流措施,最优化泵房进水条件,防止脱流、漩涡等不利流态的发生.

2 循泵房流道物理模型设计

2.1 模型比尺及范围

根据研究目的和要求,泵房流道模型设计为比尺 *L*,=10 的正态模型. 另外,由于循泵房完全对称布置,模型仅对单侧进行模拟. 模型主体由有机玻璃建造,范围包括冷却塔集水池的一部分、回水明沟、循泵房等部分. 模型平面布置示意图、泵房剖面图,回水沟及泵房内水力要素测点布置见图 1 和图 2.

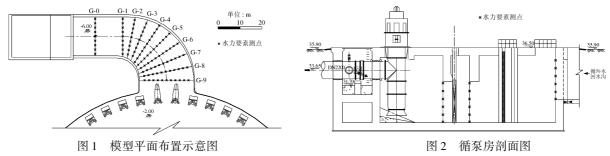


Fig. 1 Layout of the model for CW pump house

Fig. 2 Longitudinal section of CW pump house

2.2 相似准则

根据模型试验相似原理,要保证不同尺度的两个流体运动的完全相似几乎是不可能的^[3]. 一般情况下, 泵房进水流道模型试验是在几何相似的前提下依据 F, 相似准则设计和运行, 有条件地放松对雷诺数相似条件的要求. 但涡流的运动受流体粘滞力影响较大, 忽略 R_e 相似条件会造成涡流模拟的失真. 为保证工程安全,对涡流流态判断,通常采取加大模型流量 $1.5 \sim 3.0$ 倍的方法进行观察, 来保证涡流模拟的安全裕度. 本项试验综合国内外文献, 主要考虑:①水流相似中的重力相似(F, 相似): $(F_r)_r = \left(\frac{u}{\sqrt{gh}}\right)_r = 1$ 和阻力相似: λ_n

 $=\lambda_L^{1/6}$;② 涡流校核,模型中涡流的模拟,参考日本 TSJ 涡轮机协会标准(2005 年版) 规定:表面涡模拟条件: $\lambda_v = \lambda_L^{0.2}$, $\lambda_Q = \lambda_L^{2.2}$; 水内涡模拟条件: $\lambda_v = \lambda_L^0$, $\lambda_Q = \lambda_L^{2.0}$.

2.3 测控设备

模型流量采用标准矩形薄壁量水堰测量和控制,误差范围 < 1%;水位采用自动跟踪式水位计结合 1/50 mm游标测针及平水槽进行测控;涡流(表面涡、水内涡和底部涡)的观察,采用国外通用的旋涡分级标准.在描述弯道水流流态时,为同时获取 3 个方向的流速分量,流速的测量除了采用由南京水利科学研究院研制的 OA 型旋桨式光纤流速传感器外,还采用了 ADV 三维超声波流速仪(误差范围 < 1%);对流态的描述及其稳定性的观测,不仅采用了传统的丝线法和着色液法,还采用了 PIV 激光示踪粒子测速系统,测量结果精确描述了弯道紊流状态.

3 试验成果及分析

本文选取设计低水位下一机三泵并联运行工况(总流量最大、明渠流速最大)作为原布置方案与优化设计方案的比选工况.

3.1 原布置方案流态分析

3.1.1 回水明沟与循泵房连接段流速分布 在比选工况中,模型上测量得到原布置方案下回水沟内流速分

布见图 3. 可见,冷却塔集水池出口处水流受两侧塔柱及喇叭口的双重影响,水流侧向收缩严重,中间两塔柱之间流速较大,水头损失也较大;低水位工况下,在出口处形成水跃,引起下游水流较强波动;在回水明沟弯道处有明显的游移漩涡;弯道及下游出现外侧高、内侧低的水面横向落差,内外侧最大水位差达 0. 18 m;水流冲击外侧边墙形成涌浪,又在边墙的返射下转向对岸,在下游侧形成不稳定的扭曲水面,在循泵房进口前的横向回流极不稳定,回流区范围随机性较强,这种不稳定的水流条件又进一步导致循泵房吸水室内各泵流道吸水室内水位的周期性震荡,震荡幅度超过 0.5 m.

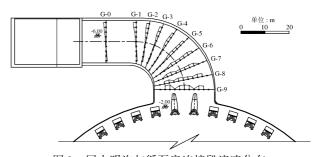


图 3 回水明沟与循泵房连接段流速分布

Fig. 3 Velocity distribution between backwater ditch and the pump house

此外,吸水室内还存在较弱的环绕泵体的管外环流,吸水喇叭口周边八点丝线摆动较强烈,水流稳定性较差.加大模型流量进行流态观察,有间歇性的吸气水内涡发生.因此,应在循泵吸水喇叭口下方加设导流消涡设施.

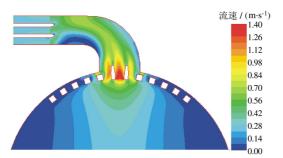
3.2 数学模型验证

采用自行开发的河道二维计算软件建立数学模型,对弯道部分(回水明沟至循泵房连接段)的物模试验结果进行验证. 软件采用的水力模型为二维平均水深的有限元模型,基于二维瞬时流的圣维南方程. 模型总节点数为 18 549 个,模型计算离散化网格单元共 35 209 个.模型边界条件分为两种类型:水边界条件和岸边界条件.水边界条件,即计算水域的上、下游边界条件,模型中出流侧是流量边界条件,入流侧是水位边界条件;岸边界条件即水陆相接处的边界条件,模型中即为回水沟边壁,按固壁边界处理. 初始条件为:流速 u、v 初始值为零;水位初始值根据上、下游水位值线性插值而得.

模型计算结果见图 4. 在平面上,冷却塔集水池出口水流基本在弯道中部下游开始向外侧偏转,在弯道末端,主流完全偏向外侧,内侧则基本为回流区,在循泵房进口孔口处横向流速较大. 对于这种明显的不良流态,需要采取适当整流措施来改善水流条件.

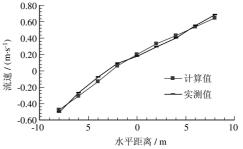
比较模型试验测得的及计算的流场分布图,可以看出两种模拟方法所得弯道处流速分布情况基本一致, 计算值与实测值吻合较好.图 5 为回水明沟变坡段末端断面上物模与数模中测点流速比较,计算值与实测值 之间最大偏差约 9%,能够满足精度要求.

从验证结果看,虽然二维模型不能完全反映弯道水流的三维特性,但是数学模型计算结果与物理模型测量结果吻合较好,二维模型可以在优化方案的初步甄选中使用.此外,数模中不能反映的水流流态特征可以在物理模型上进行观测,弥补了二维计算的缺陷.



回水明沟与循泵房连接段流态

Fig. 4 Flow regime between backwater ditch and pump house



回水明沟变坡段末端断面流速分布

Velocity distribution at base of backwater ditch slope

3.3 优化设计方案

对原设计方案下水流流态的改善,主要考虑两方面 的措施:一是对冷却塔集水池出口边界条件的调整,包 括:(1)将集水池出口附近两侧方形塔柱修改为圆形,以 避免塔柱边界不连续造成的绕塔柱脱流:(2)将回水沟进 口喇叭口半径由 1.0 m 调整为 3.0 m,避免进口喇叭口曲 率过大而造成的边界脱流和侧收缩、水头损失较大. 二是 调整弯道水流,在回水沟弯段设连续导流墙,消除弯道水 流导致的大范围回流以及弯道内外侧水位差所造成的水 面扭曲等不利流态.

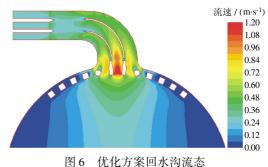
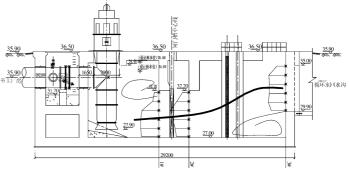


Fig. 6 Flow regime of backwater ditch in optimized program

3.3.1 回水明沟与循泵房连接段流速分布 重建优化设计方案下的弯道数学模型对优化方案进行甄选,计 算得到回水沟及冷却塔集水池内的流速分布情 况见图 6. 可见,对冷却塔集水池出口边界的调整 措施有效地改善了出口流态;回水沟弯段内设置 324 的连续导流墙,截断了回流通道,明显改善了沟 内流态,消除了较大范围内的回流,回水沟直段

3.3.2 吸水室内流速分布 优化设计方案下, 泵房内流道沿程流速分层垂向分布情况见图 7. 表 1列出了原方案与优化设计方案下1#泵中心线上 游 1.5D 断面吸水喇叭口悬空高度处流速分布情 况;优化前后吸水室内喇叭口附近流速见表 2.

流速分布得到较大改善,稳定了吸水室内水流.



优化方案下流道沿程流速分层垂向分布示意图 Vertical velocity distribution along inake channel in optimized program

循泵中心线上游 1.5D 断面吸水喇叭口悬空高度处流速分布

Tab. 1 Velocity distribution at hanging height of bell mouth at upstream section 1.5D of the pump centerline

项 目 -		水平位置/ m						
		-2	-1	0	1	2	- 平均	
原方案	流速(m/s)	0.33	0.28	0.24	0.29	0.34	0.30	
	横向偏差(%)	12	-4	-20	-3	15	-	
优化	流速(m/s)	0.30	0.31	0.34	0.35	0.31	0.32	
方案	横向偏差(%)	-7	-4	5	10	-4	_	

Tab. 2 Velocity distribution of eight points around the edge of bell mouth											
	测点编号	1 7	1	2	3	4	5	6	7	8	平均
原方案 -	前缘径向	流速(m/s)	1.17	1.07	1.05	0.97	1.29	1.55	1.58	1.31	1.25
		偏差(%)	-6	-14	-16	-22	3	24	27	5	-
	喉部轴向	流速(m/s)	6.83	6.88	6.82	6.64	6.82	6.88	6.88	6.99	6.84
		偏差(%)	-0.1	0.5	-0.3	-2.9	-0.3	0.5	0.5	2.2	-
	前缘径向	流速(m/s)	1.35	1.30	1.31	1.19	1.37	1.44	1.63	1.53	1.39
优 化	刑 绿 任 円	偏差(%)	-3	-6	-5	-14	-2	4	17	10	-
方 案	喉部轴向	流速(m/s)	6.79	6.83	6.76	6.69	6.79	6.85	6.88	6.96	6.82
	마마네지	偏差(%)	-0.4	0.2	-0.8	-1.9	-0.4	0.4	0.8	2.1	-

表 2 循泵吸水喇叭口周围流速分布

可见,采取整流措施后,由于泵房进口水流的均匀性得到较大改善,流道内各断面流速分布的均匀性也有显著改善,各流道进口孔后流速分布的最大横向偏差 17%,垂线平均流速的最大偏差小于 10%;受滤网后第 1 道胸墙的作用,主流向下偏移,在第 2 道胸墙的作用下,主流进一步下移,在循泵附近主流贴近底部.

在优化方案布置条件下,1#循泵中心线上游 1.5D 断面吸水喇叭口悬空高度处流速分布横向偏差由 20%降低至 10%,均匀性改善明显;吸水喇叭口前缘流速分布对称性也有所改善,最大径向偏差 17%.采取整流措施后的泵房流道进水条件能够满足循泵稳定运行的要求.

3.3.3 流 态 优化方案各工况下,集水池出口至循泵房回水明沟内水流基本平顺,在设计低水位下,冷却塔集水池出口水流处有一定的侧收缩,纵向跌落明显,但循泵房吸水室内水流较为平稳,低于设计低水位时,回水沟内波动增大.从闸孔后至吸水室间内水流较为平稳,未观察到明显的脱流和高速水流、自由跌落流体及水面波动,试验中未发现大于二级的表面涡和水内涡,循泵吸水喇叭口八点丝线较稳定,没有强烈摆动现象.按照涡流校核标准,加大流量观察吸水室内漩涡,未发现大于二级的表面涡和水内涡.

4 结 语

- (1)本工程为典型的侧向进水式泵房流道,进水流态复杂,原设计方案难以满足循泵稳定运行要求;优化方案通过修改冷却塔集水池出口处塔柱外形、回水沟喇叭口直径及在回水沟转弯段设置弧形连续导流墙等措施,有效调整回水沟内水流流态及流速分布,消除了循泵房进口前大范围的回流、偏流以及不稳定水流导致的吸水室内水位和流速的周期性震荡,使得循泵房前回水沟直段水流流速分布较为均匀,循泵房各流道进口孔口处流速分布在横向上和垂向上也较为均匀、对称,水流流态良好,优化后的进水水流条件能够满足循泵稳定运行要求.优化方案中多种整流措施结合使用,取得良好的效果,可以为其它类似工程提供参考;
- (2) 文中将数值模拟作为物理模型试验的辅助工具,与物理模型结合使用于进水流道优化水力设计,可以提高效率,节省大量的时间和试验成本.两种模型相互验证,确保了试验及计算结果准确可靠,为工程安全运行提供可靠保障.

参考文献:

- [1] 西北电力设计院. 电力工程水务设计手册[M]. 北京:中国电力出版社, 2005: 331-332. (Northwest Electric Power Design Institute. Hydraulic Design Manual for Power Engineering[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005: 331-332. (in Chinese))
- [2] 吴持恭. 水力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 276-277. (WU Chi-gong. Hydraulics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 276-277. (in Chinese))
- [3] 南京水利科学研究院. 水工模型试验(第二版)[M]. 北京: 水利水电出版社, 1985: 12-15. (Nanjing Hydraulic

- Research Institute. Hydraulic Model Tests (Second Edition) [M]. Beijing: China Water-Hydroelectricity Press, 1985: 12-15. (in Chinese))
- [4] 赵建钧. 上海外高桥电厂三期工程(2×1000MW 机组)循环水泵房流道物理模型试验研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2006. (ZHAO Jian-jun. Intake channel model test research report of CW pump house of phase-Ⅲ project (1000MW×2 Units) in Shanghai Waigaoqiao Electric Power Plant[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2006. (in Chinese))
- [5] 赵建钧,程 璐. 越南广宁电厂循环水泵房流道物理模型试验研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2006. (ZHAO Jian-jun, CHENG Lu. Physical model test research report of CW pump intake in Guangning Thermal Power Plant[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2006. (in Chinese))
- [6] 赵建钧,程 璐. 华电芜湖发电厂—期工程(2×660MW 机组)循环水泵房流道物理模型试验研究报告[R]. 南京: 南京 水利科学研究院, 2006. (ZHAO Jian-jun, CHENG Lu. Intake channel model test research report of CW pump house of phase-I project (600MW×2Units) in Wuhu Electric Power Plant[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2006. (in Chinese))
- [7] ターボ機械協会基準. ポソプ吸入水槽の模型試驗方法[M]. 日本: 日本工業出版株式会社, 2005. (Japanese Mechanical Engineer Association. Pump House Intake Channel Test Standard[M]. Japan: Japan Industry Press, 2005. (in Japanese))
- [8] Hydraulic Institute. American National Standard for Pump Intake Design[M]. America: Balkema Publishers, 1998.

Optimum hydraulic design and model test for side-intake channel of circulating water pump house

ZHAO Jian-jun¹, CHENG Lu¹, FENG Chun-ping²

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Pengcheng Gas-Fired Power Plant, Huarun Power Co., Ltd., Xuzhou 221142, China)

Abstract: In this paper, the hydraulic characteristics of the side-intake channel and the usual methods for researching it have been discussed firstly. In the instance of CW pump house of Pengcheng Gas-Fired Power Plant, the optimum hydraulic design for the side-intake channel has been made by use of physical model tests and numerical calculations. The study emphases include: the bad flow regime in the collecting basin of cooling tower and the backwater surface ditch under the original design scheme; the rectifying measures for improving the fluid state and making the velocity distribution symmetrical; and so on. In the optimized design scheme, the stable operation of the CW pump has been ensured, and the products of the research can be used as the references for other similar projects of large or medium sized CW pump houses.

Key words: CW pump; intake channel; vortex; optimum hydraulic design; model test