

火(核)电站循环水泵房前池水力模型试验研究

罗 缙¹, 林 颖²

(1. 河海大学水文水资源及环境学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 根据浙江北仑电厂二期工程循环水泵房水力模型试验, 分析电厂冷却水泵站前池中的不良流态及其解决方案, 对泵站前池内的水工布置、前池的扩散角及前池长度的设计提出了优选方案。利用该方案, 不仅可较好地解决前池内流态紊乱、流速分布不均以及底坎后部次生流的产生等问题, 同时可缩短前池长度、降低工程造价。

关键词 泵站 前池 透空底坎 立柱

中图分类号 TV732.6 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2000)05-0106-05

火(核)电厂循环水泵房进水流道的布置包括引水渠(管)、前池、进水室(进水廊道)、泵室、吸水喇叭口及进水管五个部分。但前池是泵站引水和吸水的衔接部位, 是急流变缓流的过渡段, 因此前池是泵站工程中的重要组成部分, 池中流态对泵站运行效率和机组影响甚大。不良前池水力设计可能会影响泵站的性能。在有设计规范指导下的前池水力设计, 只有借助水力模型试验才可以向设计者提供令人满意的设计依据。

本文结合浙江北仑电厂二期工程循环水泵房进水前池水力模型试验, 对火电厂冷却水泵站前池问题进行了研究。

1 模型设计^[1]

北仑电厂二期工程装机容量为 180 万 kW, 电厂的冷却水采用直流供水, 由取水口头部、引水管、前池、进水室和循环水泵房等几个部分组成。由于受场地限制, 前池长度小于 24.5 m。为了满足这一设计指标, 对前池的布置形式、前池的扩散角、前池内增设的整流措施以及尽可能缩短前池长度等进行试验研究。由于原型泵的型号未定, 但采用立式导叶混流泵已确定, 故选用 SLN-33 小型导叶混流泵作为模型泵, 单机流量 $Q_m = 20 \text{ L/s}$ 。水力模型总体布置见图 1。

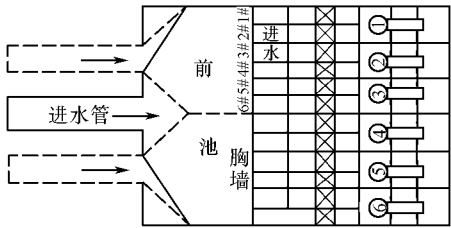


图 1 模型总体布置

Fig. 1 General layout for the model

2 相似准则

目前国内尚无泵站水力模型试验规范(或准则), 因此本试验参照美、英、法和日本等国家(或制造厂家)的有关标准、规定和试验研究报告等, 结合我国有关工程的模型试验的经验, 进行模型设计。本模型的相似准则为:

a. 模型的整体设计和流速场(一般流态)采用弗汝德(Froude)数相似条件

$$\lambda_Q = \lambda_L^{5/2} \quad \lambda_V = \lambda_L^{1/2} \quad \lambda_t = \lambda_L^{1/2}$$

模型 $\lambda_L = \lambda_H = 12$, 足以保证模型前池内水流在紊动区。各相应水力参数比尺如下:

$$\lambda_V = 3.46 \quad \lambda_Q = 500 \quad \lambda_t = 3.46$$

由于 $\lambda_n = \lambda_L^{1/6}$, 故前池和泵室均用玻璃制作。

其中: λ_V ——流速比尺; λ_Q ——流量比尺; λ_t ——时间比尺; λ_n ——糙率比尺.

b. 涡流(包括表面涡、水内涡和底部涡). 本试验采用日本机械工程师协会(1984 年版)规定的相似条件 $\lambda_V = \lambda_L^{0.2}$, $\lambda_Q = \lambda_L^{2.2}$. 欧美等国一般采用 $2Fr$ 或 $3Fr$ 模型里的高速水流条件下做试验,这将在挟气涡流方面给出一个安全可靠的界限,以防在弗汝德数模型里有些影响可能反映不出来或者反映不明显的缺陷. 实际上,若按 $\lambda_Q = \lambda_L^{2.2}$ 模拟,则与 $2Fr$ 模型流量相当.

3 前池水流试验

3.1 无整流措施的前池水流试验

无整流措施的前池水流试验按照原设计单管引水和双管引水方案进行. 管径 D 分别为 6.0 m 和 4.2 m, 出口流速 V_0 分别为 2.12 m/s 和 2.16 m/s. 试验分别在设计高水位 1.16 m(水深 9.76 m)和校核水位 -1.84 m(水深 6.76 m),前池扩散角分别为 60° 和 35° . 在这几种情况下,前池水流均处于突然扩散状态,管流出口的主流在中间,流速大,直冲胸墙中央,胸墙中部出现水位雍高现象,水流向两边扩散. 如图 2 所示,主流直冲 3 号、4 号水泵进水室口门处,甚至出现反向倒流现象. 以 4 号泵为例,其进水室口门左侧的水流为正向,流速为 1.2 m/s,口门右侧的水流为负向,流速为 0.8 m/s. 这表明,4 号泵进水室内发生顺时针方向的旋转流,同时 3 号水泵的进水室也发生类似的旋转流,不过方向正好相反. 各进水室口门竖向及横向流速分布极不均匀,1 号、2 号口门与 5 号、6 号口门横向流速方向相反流速较大,而此四口门竖向流速远较 3 号、4 号口门为小. 3 号、4 号泵流量过大,而 1 号、2 号、5 号、6 号四台泵流量明显不足. 这样的入流条件,水泵性能将受到前池流态的影响而变异,泵站效率要降低较多,同时前池两侧会产生大回流,水流紊乱. 每台机组进水室前沿均有回流和漩涡,同时前池中回流区和死水区并存,也为前池的沉积提供了条件. 试验结果表明,单管和双管前池流态基本相似,但对比的情况下双管优于单管方案,同时高水位优于低水位. 故试验着重以双管低水位为主.

3.2 改善前池流态的研究^[2]

接近进水口截面(水流进入管道之处)的理想流态应是均匀的、稳定的单相流. 均匀流就是截面上所有流体质点的速度大小、方向均相同. 稳定流就是速度的大小和方向不随时间而改变. 单相流就是不挟带空气、气泡或其它气体. 这种理想流态是很难完全实现的,但一个良好的设计方案应尽力使进水口截面处产生理想流态,特别是单相流,要绝对保证这种流态,以免产生汽蚀现象. 无整流措施前池水流试验结果表明,前池流态对泵室流态会产生直接影响,即前池流态直接影响水泵进水口理想流态的形成. 所以,改善前池流态势在必行. 改善前池流态应达到三个目的: (a) 前池的流态平稳,回流区和死水区的范围要尽力减少,且强度要减弱; (b) 各进水室口门前沿的流速平面分布要尽可能均匀; (c) 消除进水室口门处漩涡形成的条件.

改善前池流态的试验研究,笔者主要是从入流扩散角、前池设底坎和立柱三个方面进行的.

3.2.1 扩散角的研究

对于管道引水的泵站前池,国内外一般设计成梯形. 梯形边墙扩散角(引水管入流的扩散角)的经验公式为

$$\tan \alpha = \frac{0.065}{\sqrt{Fr}} + 0.107$$

式中: α ——临界扩散角; Fr ——入流的弗汝德数.

关于边墙扩散角,单管分别选用 $\alpha = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$, 双管(前池分为两个独立的单元)分别选用 $\alpha = 20^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 45^\circ$ 进行试验比较. 试验结果表明,即使边墙扩散角采用 20° ,脱流现象也不能避免,前池流态也不能满足设计要求. 按理, α 等于或小于水流的天然扩散角时,则前池内不会产生脱流现象. 但试验表明,影响前池流态的因素很多,如引水型式(明渠或暗管)、出流方式(自由出流或淹没出流)、出口流速(急流或缓流)以及前池的形状和水深等. 本试验出口流速为 2.16 m/s,属急流,具有射流的特征,同时又是淹没出流. 淹没水流的特征是底层流速大,沿底层流动,底层流为主,底层流带动上层水体,形成反向流及上层副流区.

根据梯形边墙扩散角的经验公式计算,临界扩散角 $\alpha = 15.3^\circ$,但是在这种淹没射流的出流情况下, $\alpha = 20^\circ$ ($L_{池}$ 已超出 24.5 m)时也不能满足要求. 前池是引水渠(管)和进水管的过渡段,前池要完成这一过渡的任

务,首先要具备足够长度的 $L_{池}$,而 $L_{池}$ 的长度就是根据 α 确定的.按理, α 确定以后 $L_{池}$ 也就确定了. $L_{池}$ 不能满足要求,必然要在前池内采取相应的措施,这就是我们下面要研究的问题.

3.2.2 底坎的研究

根据无整流措施前池水流试验,前池出现如图 2 所示的流场.这主要是引水管出流具有潜没射流的双重特性所造成的.潜没出流虽然是消能最经济的措施,但是以底层流为主的流态的出现,一方面说明潜没消能不足,另一方面使上层水体出现副流区.前池的长度 $L_{池}$ 受到客观条件的限制,前池自身未能完成急流到缓流的转变,因此借助整流措施来完成这一转变是必然的.实践证明,底坎和立柱是前池整流的一种有效措施.前池中出现如图 2 所示的两个对称的回流区,其实质就是由于消能不足形成脱壁流而产生的一对竖轴环流.底坎确能使引水管出流产生潜没水跃,而潜没水跃就是水下的横轴环流,这对牵制竖轴环流的发生是有效的.

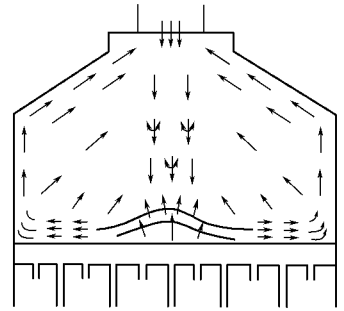


图 2 无整流措施的前池流态

Fig.2 Flow conditions in a sump in the absence of commutation

试验确定底坎在前池中的位置和高度.经多次试验和对比,最终采用

$$h_{坎} = (0.35 \sim 0.65) h \quad L_{坎} = (0.25 \sim 0.40) L_1 \quad L_2 > 4h_{坎} \quad L_1 = L_{坎} + L_2$$

式中: h ——设计水位下的前池水深; L_1 ——前池设计长度; $L_{坎}$ ——引水渠(管)出口到底坎的距离; L_2 ——底坎到进水池的距离.

合适的底坎可以控制横轴旋流的强度和范围.其原则就是坎后的横轴旋流既能破坏前池的回流,又不影响进水池口门前的流态.本方案($L_{池} = 24.5\text{ m}$)选用 $L_{坎} = 10.0\text{ m}$, $h_{坎} = 3.6\text{ m}$.试验说明,底坎作用有两个:一是坎后产生的横轴旋流,是与原先的回流相垂直的旋流,二者相互抵消了各自转动动量,造成速度降低和局部压力梯度增大,促使回流迅速闭合消失;二是引水管底部水流直冲底坎,受底坎的阻挡向两侧扩散,在前池两侧和底坎之间形成两个紊动区,在池壁的作用下越过底坎缓慢扩散.所以坎后仍有较小漩涡存在,即使后来采取立柱和底坎结合的整流措施,底坎后部产生的底层回流(次生流)并未解决.试验表明,采用透空底坎(图 3)能消除坎后次生流.

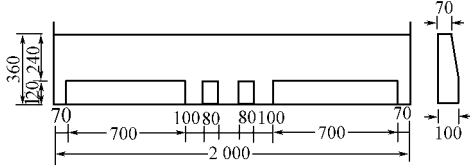


图 3 底坎与底孔布置

Fig.3 General layout for the pervious sill

特别是进水池口门前流速平面分布不均的问题.

3.2.3 立柱的研究

立柱,既是前池消能的有力措施,又能起到导流的作用.试验就圆形、半圆形、三角形、方形、菱形以及单体、双体和多体(齿形)等立柱进行优选.考虑到结构和施工的可行性和安全可靠,笔者推荐“山”字形立柱(图 4).

对比试验表明,立柱距管口距离 $L_{柱} = 5.4\text{ m}$ 、立柱高 $h_{柱} = 9.5\text{ m}$ 较好;“山”字形立柱与底坎相配合调整前池流态可获得较好的效果,即主体两侧的导流板使水流急剧扩散,流速减小,潜没出流转变为表层流,前池流态平稳,对称竖轴环流消失,平面上水流分布均匀,胸墙前水面平静没有旋涡和回流,横向流不复存在,各进水口门处于正面进水,进水流速比较均衡(表 1),各进水池中垂线处流速均匀(表 2).

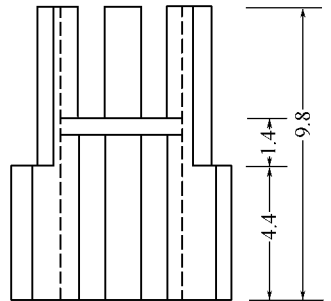
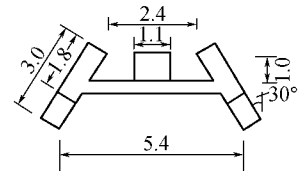


图 4 “山”字形分水导流立柱

Fig.4 Post design

表 1 各进水室口门处流速与流向

水深 m	1 号		2 号		3 号		4 号		5 号		6 号	
	流向 /(°)	流速 /(cm·s ⁻¹)	流向 /(°)	流速 /(cm·s ⁻¹)	流向 /(°)	流速 /(cm·s ⁻¹)	流向 /(°)	流速 /(cm·s ⁻¹)	流向 /(°)	流速 /(cm·s ⁻¹)	流向 /(°)	流速 /(cm·s ⁻¹)
3.6	30	28.5	20	29.3	25	31.6	20	32.7	15	32.4	15	34.9
4.8	30	22.8	- 10	28.5	15	30.2	25	28.3	25	30.6	15	35.8
6.0	15	30.8	- 10	27.3	20	25.0	15	28.6	15	29.6	15	28.7
7.2	20	31.5	20	24.1	20	27.6	- 30	17.6	- 30	19.6	- 30	19.1
8.4	- 15	28.6	20	25.6	15	28.6	- 30	25.6	- 15	26.9	- 20	26.9
9.6	- 15	25.4	15	30.8	15	43.8	0	45.4	0	44.0	- 10	36.3

这说明了各进水室进水量接近,达到了改善前池流态的三个目的(图 5).

表 2 各进水室中垂线流速

Table 2 Distribution of velocity at the perpendicular bisector of each intake chamber							cm/s
水深 /m	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号	
3.6	28.5	26.3	22.7	25.0	28.6	23.0	
4.8	26.0	26.6	27.3	29.3	29.6	25.0	
6.0	29.3	28.7	27.9	31.9	29.9	27.6	
7.2	28.9	29.8	30.2	30.9	32.2	37.1	
8.4	28.6	32.9	29.9	31.6	38.4	34.8	
9.6	39.4	37.5	34.2	29.7	22.7	23.7	

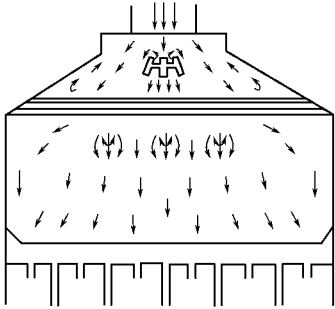


图 5 有水工措施整流后的前池流态
Fig.5 The flow conditions in a sump with commutation

4 前池长度的确定

以上曾提到,梯形边墙扩散角是确定前池长度的主要依据,而本试验受到 $L_1\leq 24.5\text{ m}$ 客观条件的限制, L_1 的确定是和分水导流立柱、透空底坎整流措施同时进行的. 经过多次对比试验后笔者认为,采取以上整流措施后,前池长度 L_1 ,单管可以从原设计 24.5 m 缩短为 18 m ,双管可以缩短为 16 m ,缩短后的前池流态均能满足以上三点要求. 根据进水流道及其布置设计准则推荐的前池长度为

$$L_{池} = 0.5(w - b)/\tan(\alpha/2)$$

式中: w ——前池底宽; b ——引水渠底宽; α ——前池扩散角($\alpha < 40^\circ$).

由上式可算得 单管引水 $L_{池} = 39.8\text{ m}$,双管引水 $L_{池} = 21.7\text{ m}$.

可见,“山”字形立柱和透空底坎相结合的整流措施,不仅对调整前池流态有利,而且对确定前池长度也有利. 缩短后的前池水头损失见表 3,前池脉动强度见表 4.

表 3 前池水头损失

Table 3 The lost head of sumps						
前池 方案	前池 长度 /m	测压管水位差 (位能损失)		动能损失		总水头损失 (原型)/m
		模型/cm	原型/m	模型/cm	原型/m	
单管	18	0.35	0.042	1.92	0.23	0.27
双管	16	0.38	0.046	1.99	0.24	0.29

表 4 前池脉动强度

Table 4 Fluctuating intensity in the sump					
前池 方案	前池 长度 /m	胸墙进水室口门前流速 /(m·s ⁻¹)			
		1 号	2 号	3 号	4 号
单管	18	0.09	0.109	0.113	0.107
双管	16	0.077	0.086	0.084	0.092

改进后的前池方案,泵室流态和涡漩的试验 $\lambda_V = \lambda_L^{0.2}$, $\lambda_Q = \lambda_L^{2.2}$,其中 $\lambda_L = 12$. 用此式计算的单泵模型流量 $Q_m = 42\text{ L/s}$,比按弗氏定律验算的 $Q_m = 20\text{ L/s}$ 约大 1 倍(相当于 $2Q_F$). 经观察和测试,泵室水面依然平稳,表面水流绕吸水管作缓慢圆周运动,但没大的漩涡,微小的表面涡时有发生,但很快消失. 这说明,改进的

前池(包括采用分水导流立柱和透空底坎整流,缩短前池长度)是成功的,能足以保证泵室取水的安全可行性.

5 结 语

采用底坎和分水导流立柱进行整流,能明显改善前池流态,胸墙前面水流分布趋于均匀,前池的表面没有回流和大的漩涡,各进水口门内的水面也是平静的.采用透空底坎和分水层流立柱相结合的整流措施,消能作用增强,次生流范围减小、强度减弱,更有利于前池水流的均匀分布,同时可缩短前池长度,降低工程造价.

参考文献：

[1] Prosser M J 著.水泵集水池及进水口的水力设计[M].黄广礼,陈延正译.南京:河海大学出版社,1994.30~60.
[2] 刘成,何耘,韦鹤平.泵站前池进水流态及泥沙淤积的试验研究[J].水泵技术,1997(3):40~44.

Hydraulic Test of Pump Sumps of Thermal (Nuclear) Power Plants

LUO Jin¹, LIN Ying²

- (1. College of Water Resources and Environment, Hohai Univ., Nanjing 210098, China ;
2. College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract Based on hydraulic physical model tests of the pump sumps of the second-stage of Beilun power plant in Zhejiang Province, the poor flow condition in the sump of the cooling water pump station is analysed and a feasible solution is proposed in this paper. The alternative to optimize the design of hydraulic arrangement, the diffusion angle and the length of the sump is given. The problems of turbulent and nonuniform stream in sump and the secondary flow in the back of the sill have been solved. The length of the sump and the cost of the engineering project have been reduced by means of the method.

Key words pump ; sump ; pervious sill ; post