

# 超大型城市供水泵站前池导流措施的流场及水力模型研究

王磊磊

(上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092)

**摘要:**该文针对多种约束条件下的大型泵站前池流态,通过建立紊流不可压缩流体的速度场模型及多方案的水力模型,运用有限体积法计算并分析了增设导流锥、导流墩对前池及吸水池流场的改善情况。数值模拟的计算结果表明,增加导流锥后,喇叭口下方水泵进水偏流角一般均小于 $4^\circ$ ,对改善进泵偏流效果显著;事故工况时,单侧吸水池的水泵平均流量偏差比由26.89%降低至13.26%,吸水管附近水流比较平顺、均匀。水力模型试验表明,泵站前池的八字形导流墩方案可有效地消除存在的大范围回流区和斜向流,并通过调整配水孔口的分流比加强导流作用;导流墩整流方案配水渠至前池末端最大水位落差为0.020m,满足设计方所提出的水力设计要求。

**关键词:**导流;流态;泵站;水力模型;流体力学

**中图分类号:**TU991.35

**文献标识码:**A

**文章编号:**1009-7716(2013)06-0246-04

## 0 前言

某大型供水泵站具有长距离隧道进水,泵站流量大、扬程高,供水方向多,机组台数多,运行时间长等特点。泵站受地形条件、场地面积等限制,总体布置较为局促,约束性条件较多。泵站进水管管径为5.5 m,输水规模为708万 $\text{m}^3/\text{d}$ ,水经过泵增压后沿着三个不同方向供水。泵站采用 $90^\circ$ 侧向进水方式,两侧对称布置,单侧前池3座,单座前池水设吸水池4格,每格设泵1台,共设有24台水泵,采用进水管—过渡段—配水渠—前池—进水池—泵—的布置方式。

吸水池的流态直接决定了泵站供水的安全和稳定<sup>[1]</sup>,而影响吸水池的流态主要因素有吸水条件、主要设计尺寸<sup>[2]</sup>(包括池长、池宽、后壁距、淹没水深、悬空高度等)和型式。

吸水池流态的恶化主要是由于进水偏流,以及矩形吸水池无法抑制偏流所导致<sup>[3]</sup>。本文在泵站整体配水研究的基础上<sup>[4]</sup>,针对前池的导流方案进行数值模拟及水力模型的试验研究,改善吸水池的水力性能,为大型泵站的优化设计提供理论支撑。

## 1 计算及试验条件

### 1.1 计算模型的建立

在设计工况时,分别对进水池中水泵喇叭口下方是否加导流锥进行数模计算。图1为喇叭口下方无导流锥和加导流锥的网格图。由于喇叭口下方加了导流锥,需要对网格部分加密,网格总数

会增加许多。本文对设计工况下一、四前池后面的进水池内喇叭口下方加导流锥进行数值模拟,无导流锥网格总数为252.2万,部分加导流锥后网格数为271.4万。

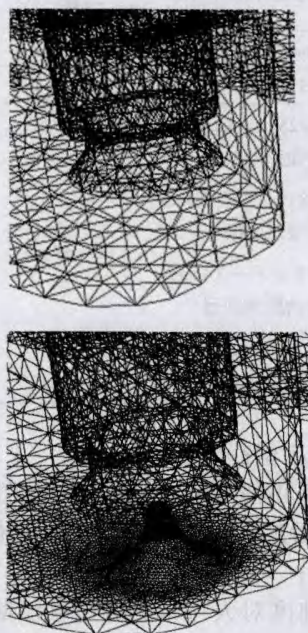


图1 喇叭口下方增设导流锥前后的计算网格图

FLUENT 6.3 中提供了多种湍流模型,其中realizable  $\kappa-\varepsilon$  模型是在 $\kappa-\varepsilon$  标准模型的基础上增加了湍流粘性公式和耗散率输运方程,因此在流动分离和二次流方面有很好的表现。本文选择realizable  $\kappa-\varepsilon$  模型进行计算,其紊流动能 $\kappa$ 和紊流动能耗散率 $\varepsilon$ 的运输方程分别为:

$$\frac{\partial \kappa}{\partial t} + U_i \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\nu_i}{\sigma_\kappa} \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} \right) + \nu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \beta g_i \frac{\nu_i}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} - \varepsilon \quad (1)$$

收稿日期:2013-04-02

基金项目:中国博士后基金(2011M500817)

上海市科学技术委员会资助课题(10DZ1200309)

作者简介:王磊磊(1981-),男,江苏徐州人,博士,工程师,研究方向:水处理技术与理论。

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\nu_i}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v\varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2)$$

其中： $C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{KU^*}{\varepsilon}}$ ,  $U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}}$ ,

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk} \bar{\omega}_k, \Omega_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk} \bar{\omega}_k,$$

$$A_s = \sqrt{6} \cos \phi, \phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6} W),$$

$$W = \frac{S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{S}, \tilde{S} = \sqrt{S_{ij} S_{ij}}, S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$$

式中： $V_i$ ——紊动粘性系数， $V_i = C_\mu \kappa^2 / \varepsilon$ ；

$G$ ——浮力产生的湍流动能；

$\tilde{\Omega}_{ij}$ ——柱坐标下的带有角速度的层流旋度；

$A_0$ ——模型常量，计算中取 4.04；

$\sigma_\kappa, \sigma_\varepsilon$ ——粘性常数，计算中常采用 1.0 和 1.3；

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$ ——模型常量，分别取值 1.44、1.92。

计算时假定清水进水的密度为 1 000.35kg/m<sup>3</sup>，动力粘度为 1.005e<sup>-3</sup>Pa·s。

### 1.2 边界条件

边界条件为：进口为速度边界条件，出口压力为敞开大气压，水面为自由界面，无剪切和滑移速度，池底和边壁为固体壁面，壁面上流速为零，使用标准壁面函数<sup>[5]</sup>。使用交错网格有限体积法(CVM)求解微分方程，压力与速度耦合方程使用SIMPLEC方法进行求解，湍动能、湍流耗散、动能均采用 QUICK 离散格式。

### 1.3 水力模型的设计

结合模型用泵的选择要求及模型水流在阻力平方区要求，选取模型线性比尺  $\lambda_L = 8$ 。根据试验要求，采用外形几何相似，流量适应模拟要求，可作调节的水泵作为试验用泵；试验中，通过安装于水泵出水管上的调节阀调节水泵流量以满足试验对流量的要求。原型进、配水建筑物为钢筋混凝土制作，若施工质量良好，其糙率为 0.013 ~ 0.014，模型进、配水建筑物过流面采用纯水泥抹面，其糙率可达 0.010 ~ 0.011，基本可满足糙率相似的要求；为便于观测水泵进水喇叭口附近的水流流态，进水池后壁及侧壁局部采用透明材料制作<sup>[6]</sup>。

## 2 数值模拟结果

利用所建立的泵站数值模型及水力模型，重点模拟计算泵站的吸水池部分部分和水泵喇叭口区域的流场特征，并进行试验观察和流速测定，改

善泵站的配水均匀性，为优化设计提供理论依据。

### 2.1 设计工况计算

之前的数值模型计算表明前池一、四后面的进水池水泵喇叭口下偏流比较严重，因此重点研究设计工况下的一、四前池后面的进水池的流场特征，并对水泵喇叭口下方加导流锥进行计算对比。模拟结果见表 1 所列。

如表 1 所列，增加了导流锥后的喇叭口下方水泵进水偏流明显减弱，除了 4-2 喇叭口下的偏流为 7° 外，偏流角一般均小于 4°，可见在喇叭口下方加了导流锥对改善进泵偏流效果显著。同时计算结果表明，水平和垂直方向的流态分布变化不大。

### 2.2 事故工况计算

事故工况时，左侧单管进流比右侧单管进流的偏流情况更严重，这已由前述作了说明。为了改善事故工况时的偏流情况，优化泵站吸水池部分的设计方案，本节对泵站左侧单管进流喇叭口下方增加导流锥进行模拟。锥形导流体由于类似于水泵喇叭口的结构特征，可以起到限制水流环绕水泵旋转的作用，漩涡和环流都不易发生，具有良好的水力条件，可获得满意的进水流态。喇叭口加导流锥三维网格见图 1 所示。泵站进水底平面流速分布及流线见图 2 所示。表 2 所列为泵站配水渠 6 座前池进口流量的统计情况及偏差比较。

由图 2 及表 2 可以看出，增设导流锥后，单侧水泵的吸水池流态得到了大大改善，最外侧吸水池吸水口平均偏流角为 6°，平均流量偏差比由 26.89% 降低至 13.26%，吸水管附近水流比较平顺、均匀、对称。

## 3 水力模型的验证试验

### 3.1 导流墩整流方案

试验对三种形式的导流墩布置方案进行了比选试验，各方案导流墩均布置在前池扩散段。

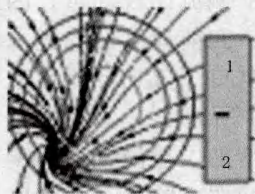
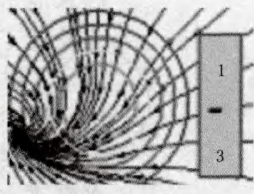
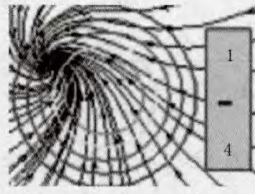
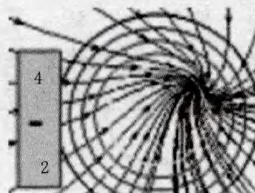
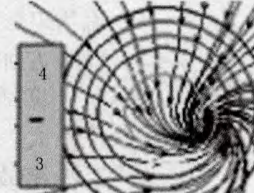
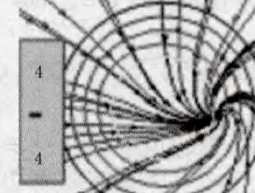
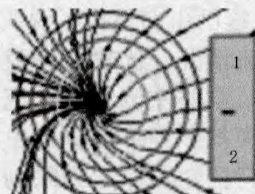
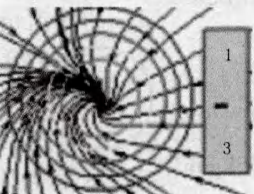
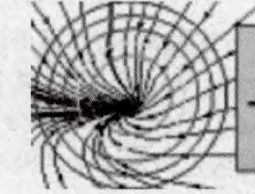
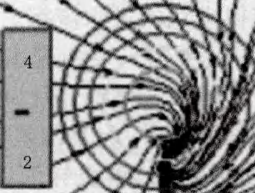
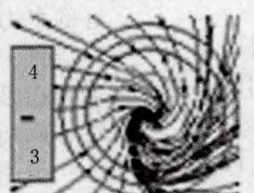
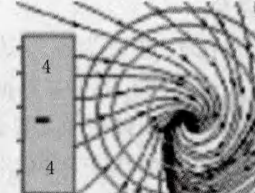
(1)垂直导流墩：导流墩平行布置，走向与配水孔口垂直，墩长均为 8.8 m，墩厚均为 0.80 m，顶高 -3.00 m，导流墩前缘为半圆弧并紧贴配水孔口，导流墩进一步将配水孔由 2 列 2 行分割成 4 列 2 行的 8 孔配水孔。

(2)分离导流墩：导流墩平行布置，走向与配水孔口垂直，墩长均为 6.8 m，墩厚均为 0.80 m，顶高 -3.00 m，导流墩前端与配水孔口间有 1.6 m 的距离。

(3)八字形导流墩：导流墩呈八字形布置，墩长均为 8.8 m，墩厚均为 0.80 m，顶高 -3.00 m，导



表1 喇叭口下方水泵进水偏流情况一览表[单位:(°)]

导流方案	喇叭口流线	偏流角度	喇叭口流线	偏流角度	喇叭口流线	偏流角度
喇叭口下方		10		14		10
无导流锥		8		8		8
喇叭口下		3		1		3
增设导流锥		7		3		1

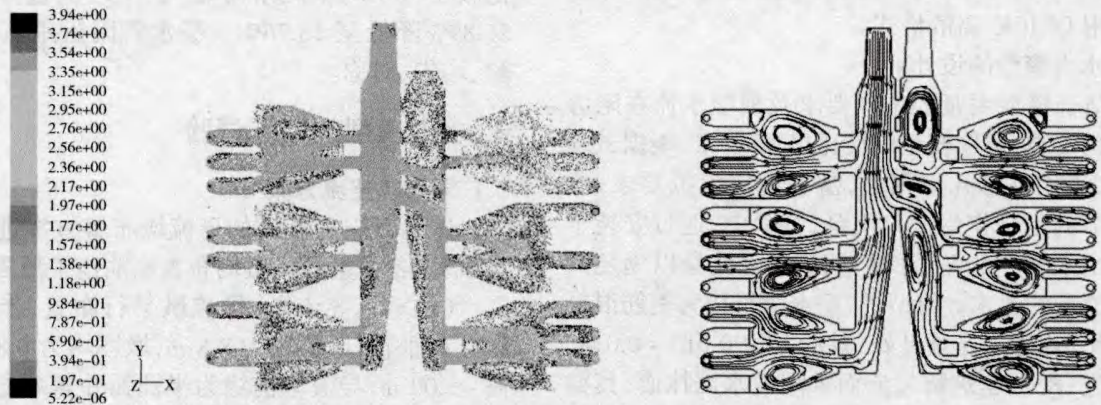


图2 泵站进水底平面流速分布及流线图示(h=2.75m断面)

流墩前缘为半圆弧并紧贴配水孔孔口,导流墩走向分别位于导流墩前缘顶点与两边机组隔墩顶点的连线上。

### 3.2 方案比选

试验表明,各导流墩方案均能在一定程度上改善前池不良流态,但是效果不一。垂直导流墩方案能有效地消除前池存在的大范围回流区,但是

导流作用不足,对前池存在的斜向流不能有效消除,前池局部区域仍存在小范围回流及斜向流。分离导流墩方案在一定程度上优化了垂直导流墩方案的不足,水流在配水孔口和导流墩之间有1.6m空间可以进行水量交换,能有效地消除前池存在的大范围回流区,但是导流作用仍显不足,主要表现在导流墩与池壁间仍存在小范围回流及斜向



表2 泵站配水渠前池进口流量统计一览表

吸水池编号	各前池进口流量	两进口流量差	两进口流量和	流量偏差比 (设导流锥)	流量偏差比 (无导流锥)
1-1	-6 102.39	4 144.29	16 349.06	25.35	23.46
1-2	-10 246.67				
2-1	-4 759.02	1 379.68	10 897.72	12.66	17.05
2-2	-6 138.70				
3-1	-5 014.27	869.45	10 898.00	7.98	14.46
3-2	-5 883.72				
4-1	-990.58	1 919.54	3 900.70	49.21	79.34
4-2	-2 910.12				
5-1	-3 536.34	-1 265.35	5 807.34	-21.79	17.25
5-2	-2 271.00				
6-1	-6 345.94	832.69	13 524.57	6.16	9.77
6-2	-7 178.63				

流。八字形导流墩方案能有效地消除前池存在的大范围回流区和斜向流,可以通过调整导流墩前缘的位置来调整配水孔口的分流比<sup>[7]</sup>,同时又可以通过调整导流墩的走向来加强导流墩的导流作用。根据多方案多工况对比试验的结果,八字形导流墩方案的整流效果最优,选定其为导流墩整流方案。

采用八字形导流墩方案后,经常运行工况下前池水位较设计运行水位高,池内流速有所减缓,各池总体流态与设计工况相近。抗咸运行工况前池水位为-6.420 m,运行水位较设计工况低,但相应引水流量亦有所减少,与设计运行工况相比,前池流速略有降低。泵站各前池流态总体上与设计运行工况相类似,进水池进口处流态良好。

### 3.3 喇叭口流态观测

经常运行工况时,水库水位 2.00 m,前池水位 -3.14 m;抗咸运行工况时,水库水位 6.20 m,前池水位 1.28 m。抗咸运行工况水泵喇叭口进水流态见图 3 所示。从泵站整体模型水泵喇叭口流态观测角度,说明泵站进水池设计参数以及水泵进水流态导流设施合理。



图3 抗咸运行工况水泵喇叭口进水流态图示

通过试验现场观测和拍照、录像资料对比分析,未发现水泵喇叭口附近有漩涡、偏流、回流等不良流态,未见喇叭口单向进水现象,水流从喇叭口四周环向进水,进水较均匀、平顺,水泵吸水条件良好。在流态观测的同时,对增设导流墩后配水渠末端至前池末端的水位落差进行了量测。配水渠至前池末端的水位落差虽有所增加,但仍满足设计方所提出的水力设计要求。导流墩整流方案配水渠至前池末端最大水位落差为 0.020 m。

## 4 结论

针对高约束性条件下的大型泵站前池流态,通过建立紊流不可压缩流体的速度场模型及多方案的水力模型,计算并分析了增设导流锥、导流墩对前池及吸水池流场的影响,为优化设计提供了依据。主要结论包括:

(1) 计算结果表明,增加导流锥后的喇叭口下方水泵进水偏流明显减弱,偏流角一般均小于 $4^\circ$ ,水平和垂直方向的流态分布变化不大,对改善进泵偏流效果显著;

(2) 事故工况时,单侧水泵的吸水池流态得到了大大改善,平均流量偏差比由 26.89%降低至 13.26%,吸水管附近水流比较平顺、均匀;

(3) 前池的八字形导流墩方案可有效消除存在的大范围回流区和斜向流,并通过调整配水孔口的分流比加强导流作用,因此整流效果较优;

(4) 导流墩整流方案配水渠至前池末端最大水位落差为 0.020 m,满足设计方所提出的水力设计要求。

### 参考文献

- [1] Matahel Ansar, Tatsuki Nakato, Ansar. Experimental study of 3D Pump-Intake Flows with and without Cross Flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127(10):825-834.
- [2] 成立,刘超,周济人,等.泵站前池底坝整流数值模拟研究[J].河海大学学报, 2001, 29 (3):31-35.
- [3] Li S, Lai Y, Weber L, et al. Validation of a 3D numerical model for water pump-intakes[J]. J. Hydr. Research, 2004, 42 ( 2 ): 282-292.
- [4] 刘文明,金仲康,郑源,等.大型供水泵站数值模拟及水力优化[J].给水排水, 2009, 35(6):54-57.
- [5] Rajendran V P, Patel V C. Measurement of vortices in model pump-intake bay by PIV [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2000, 126 (5):322-334.
- [6] 冯建刚,李杰.大型城市水源泵站前池流态及改善措施试验[J].水利水电科技进展, 2010, 30 (2):70-74.
- [7] 周龙才,刘士和,丘传忻.泵站正向进水前池流态的数值模拟[J].排灌机械, 2004, 22(1):23-27.