闸站枢纽进水前池三维流动计算与研究

屈磊飞，王林锁，陈松山

(扬州大学水利科学与工程学院，江苏 扬州 225009)

摘要：采用雷诺平均纳维—斯托克斯方程(RNAS)和标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型，运用 SIMPLEC 算法，对某水利枢纽进行三维湍流数值模拟计算，预测了水流流动过程中产生的回流、旋涡发生的位置及形态；通过具体方案比较，提出了前池设置底坎的整流措施，有效地消除了回流与旋涡，流态显著改善，可为工程设计提供指导。

关键词：闸站枢纽；流态；数值模拟

中图分类号：S277.1 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-6254(2005)04-0018-03

影响平原泵站、水闸水利工程枢纽布置的因素主要有工程目的、规模，水源或容泄区特点、排灌渠系布置要求及地形地质条件等。在各种布置方式中，泵站与水闸分开布置方式有良好的进水条件，但占地面积大，在人均耕地面积少的平原地区极易引起征地拆迁与移民安置等社会问题[1,2]。而闸站合建方式由于布置紧凑、占地面积少，并可节省工程投资和方便运营管理而在水利工程中已得到广泛的推广。例如泰州引江河高港枢纽、常熟望虞河水利枢纽、无锡江尖水利枢纽等，在实际工程的应用中取得了较好的经济效益与社会效益。但由于闸站合建枢纽布置与结构上的要求与限制，其泵站前池存在着相当的偏流现象，在前池形成范围较大的回流与旋涡。大量研究表明[3,4]，前池水流紊乱对水力机组的运行将产生极为不利的影响，致使水泵效率降低，严重时造成机组振动，影响机组的安全运行。本文通过三维数值模拟计算[5,6]，比较分析方案改进前后前池流场的变化，提出枢纽进水前池设置底坎的流态改善措施，有效地消除了前池中由于偏流进水引起的大尺度回流与旋涡，具有较好的整流效果。

1 三维数值计算物理模型构建

本文研究的工程[7]由一座净宽 75 m 的节制闸与一座由 3 台机组，设计流量为 60 m^3/s 的排涝泵站组成，工程平面布置如图 1。数值计算采用三维实体造型，网格剖分为结构化六面体单元，在河道长度与宽度方向取网格单元，水深方向分 20 层，池底与边壁附边界层网格，并采用贴体坐标将物理流动空间变换为计算空间。

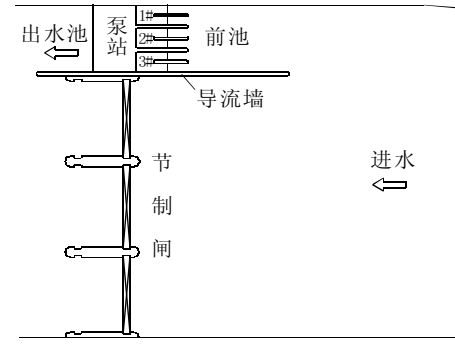


图 1 工程平面布置图

2 数学模型

2.1 控制方程

连续方程：

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j}=0 \tag{1}$$

动量方程：

$$\frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j}=-\frac{\partial p^*}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu_{eff}\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) \tag{2}$$

式中，ρ 为流体密度；$x_i(i=1,2,3)$为坐标轴；u_i为时均速度；p^* 为包含湍动能的静压力，即 $p^*=p+2\rho k/3$；μ_{eff}为有效粘性系数，等于分子粘性系数 μ 与 Boussinesq 涡团粘性系数 μ_t之和，即 $\mu_{eff}=\mu+\mu_t$。

基金项目：江苏省教育厅项目(G0209084)；江苏省重点实验室开放基金项目(KJS02035)

作者简介：屈磊飞(1980-)，男，硕士，方向流体机械及工程，quleifei1@sina.com。

万方数据

湍动能 k 和耗散率 ε 输运方程：

$$\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\rho u_j k-\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]=\rho(P_k-\varepsilon) \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\rho u_j \varepsilon-\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]=\rho\frac{\varepsilon}{k}(C_{\varepsilon 1}P_k-C_{\varepsilon 2}\varepsilon) \tag{4}$$

式中，μ_t 为涡团粘性系数，$\mu_t=\rho C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon}$；$P_k$ 是湍动能生成项，$P_k=\frac{\mu_t}{\rho}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j}$；方程中各经验系数为：$C_\mu$=0.09，$C_{\varepsilon 1}$=1.44，$C_{\varepsilon 2}$=1.92，$\sigma_k$=1.0，$\sigma_\varepsilon$=1.3。

2.2　边界条件

1）进口边界。进口断面处的流动已是充分发展的湍流，流速分布为：

$$u=\frac{1}{k}u_*\left[\ln\left(\frac{z}{\Delta}\right)+4.3\right]$$

式中，z 为进口边界面单元中心至前池底的距离；Δ 为前池底的绝对粗糙度；u_* 为池底摩擦速度，

$$u_*=\frac{kq}{h\left(\ln\frac{h}{\Delta}+2.4\right)}$$

式中，q 为进口单宽流量；h 为池内水深。

2）出口边界。采用第二类边界条件。

3）自由水面。断面流速较小，水面基本平稳，采用静水压力假定，即自由面取对称边界条件[8]。

4）固壁条件。壁面水体无滑移，近壁区采用壁面函数。设近壁面距离为 y_R，E 为粗糙系数，则近壁流速 u_R 和近壁湍动能 k 由下列函数确定：

$$u_R=\frac{1}{k}\ln\left(E\frac{u_{**}y_R}{\upsilon}\right),\ k=\frac{u_{**}^2}{C_u^{0.5}},\ u_{**}=\sqrt{\frac{\tau_\omega}{\rho}},$$

k=0.419，E=9.0

式中，u_{**} 为壁面摩阻流速；τ_ω 为壁面剪切应力[9]。

3　计算结果与分析

3.1　原方案进水池流态

原方案泵站运行时（图 2），离流道较远处上游来流基本平稳；至导流墙端部由于受节制闸影响及断面收缩，左侧水流与泵站轴线形成较大的夹角，横向流速明显加大；水流进入泵站前池后在进水池左侧形成较大的回流区，水位越低范围越大；由于回流区的存在，进水池中部及右侧形成程度不同的偏流，至左侧进水口门处偏流程度加大。这些水流特性给枢纽运行带来不利的影响，恶化枢纽进水流态，导致泵站效率的降低。

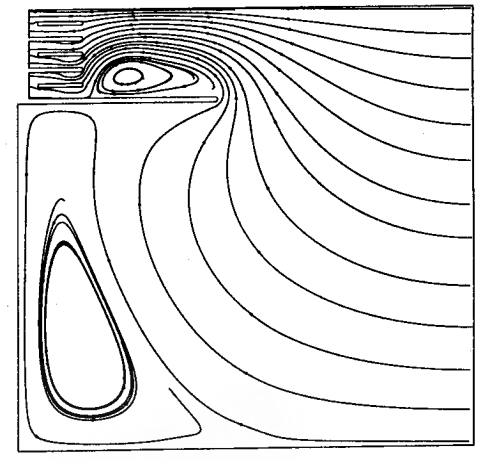


图2　原方案枢纽流线图

3.2　加设隔流墙进水池流态

导流墙的作用是提高局部水流的纵向流速分布，调整断面流量分布。计算表明（图 3），在各种水位条件下，前池增设隔流墙后，由节制闸方向流入的横向流经隔流墙后，折向流入进水池，流道左侧回流范围明显缩小，流道进口前回流亦基本消除，偏流现象较原方案有较大改善。

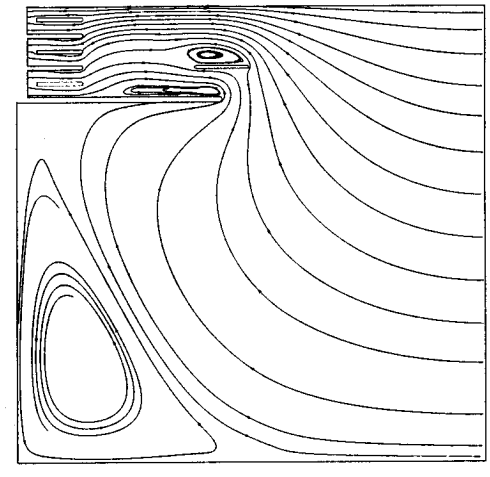


图3　设置隔流墙后枢纽流线图

3.3　加设底坎进水池流态

底坎的设置可以使水流在坎后造成旋滚，使其在一定的距离内与平面回流掺混，相互产生复杂的作用，消除回流中的旋转动量，并使坎后流态重新调整。经反复计算（图 4），底坎坎高 h_p 取 1.0 m，底坎位置以坎后漩滚长度来确定，根据文献[4]，坎后漩滚长度为：

$$l_v=6h_p+12h_p\ln\left|\frac{h_w}{h_w-h_p}\right| \tag{5}$$

万方数据

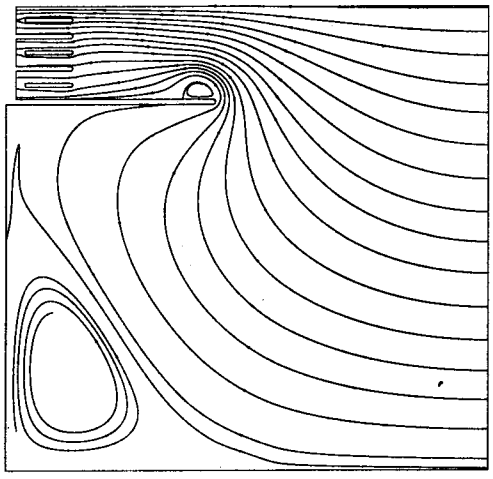


图4 设置底坎后枢纽流线图

式中,h_p为坎高,h_w为水深。通常底坎距泵站吸水池的最小距离取$(1.3\sim1.5)l_v$。计算表明,前池水流经底坎调整后,回流范围进一步减小,整个进水池内无回流,流道进口前水流平稳,无偏流存在;同时在不同的开机工况下,前池亦无明显回流产生,流态显著改善。底坎的设置将产生一定的局部水头损失,而大量的研究表明,因流态改善而提高的装置效率,将远远超过这一扬程增加而引起的损失。

4 结 论

闸站结合枢纽工程具有布置紧凑、节约工程投资、方便运营管理等优点,但若忽视工程存在的水流问题,将直接影响泵站运行效率。采用雷诺平均 N—S 方程和标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 运用 SIMPLEC 算法,合理给定边界条件,计算得到枢纽进水流场, 在分析其水流流态的基础上提出相应的流态改善措施, 其结果具有足够的准确性与实用性,为工程设计提供指导,缩短了研究周期,降低研究成本,有较大的工程实际价值。

参考文献:

[1] 严忠民,周春天,阎文立,等. 平原闸站枢纽布置与整流措施研究[J]. 河海大学学报, 2000,28(2):50~53.

[2] 邢英薇. 不对称水流的数值模拟与试验研究[J]. 人民珠江, 2002,(5):10~12.

[3] 田家山,徐辉. 给排水泵站进水流态紊乱的危害与对策[J]. 河海大学学报, 1988,21(4):11~19.

[4] 刘超,成立,汤方平. 水泵站前池三维流动计算和试验[J]. 农业机械学报, 2001,32(6):41~44.

[5] 陈松山,葛强,周正富,等. 大型泵站双向进水流道三维紊流数值模拟[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2005,26(2):102~105.

[6] 陈松山,屈磊飞,葛强,等. 泵站枢纽三维湍流模拟计算[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2005,8(2):70~73.

[7] 王林锁,严登丰,陈松山,等. 江尖水利枢纽泵站水工模型试验研究报告[R]. 扬州大学水利科学与工程学院, 2005.4.

[8] Jian Ye, McCorquodate J A. Simulation of curved open channel flows by 3D hydrodynamic model[J]. Journal of Hydraulic Engineering,ASCE,1998,124(7):687~698.

[9] 袁新明,陈华,王丽艳. 低弗氏数对冲式消力池紊流水流的数值模拟[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2004,7(2):69~73.

Numerical Simulation of 3D Flow for Forebay of Combined Sluice-Pump Station Project

QU Lei-fei, WANG Ling-suo, CHEN Song-shan

(Coll of Hydr Sci&Engin, Yangzhou Univ, Yangzhou 225009, China)

Abstract: Numerical Simulation of Three-dimensional Flow is applied on inlet passage of Zhejiang boat-yard pumping station, based on Navier-Stokes equations and the standard-Turbulent mode. From the computional results, the flow status, the various types of vortices are predicted. The measures of sills have been successfully applied on the project, and the solutions can be used to direct the design of the combined sluice-pump station project.

Key words: Sluice-Pump Station; Flow pattern; Numerical Simulation

欢迎订阅, 欢迎投稿,欢迎发布广告 邮局订阅代号:28-82

万方数据