

三维数值模拟在泵站侧向进水前池的应用

王芳芳^{1,2}, 吴时强¹, 肖 潇¹, 况曼曼³

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 河海大学, 江苏 南京 210098; 3. 长江科学院, 湖北 武汉 430010)

摘要: 泵站布置形式因进水方式不同通常分为正向和侧向两种进水方式,侧向进水时前池来流方向和前池中的主流方向存在夹角,此时由于弯道水流的运动特性,侧向进水前池容易产生主流脱壁、回流和漩涡等不良流态,难以形成良好的水泵进水条件,影响机组的安全运行。针对古德洛尔电厂一期侧向进水泵站前池,采用 RNG κ - ε 双方程紊流模型封闭雷诺平均的 N-S 方程,利用 SIMPLEC 算法对泵站前池及部分引水明渠水流流场进行三维数值模拟,对比分析设计方案修改前后前池水流的流速、涡量、水面线等水力参量分布特性,并以典型断面流速分布均匀度为目标函数分析整流措施前后前池内流速分布均匀度变化,验证了增加合理的整流措施可以有效改善前池流态。

关 键 词: 进水池; 流场; 紊流; 三维数值模拟; 整流措施; 流速分布; 泵站

中图分类号: TV675

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2014)02-0054-06

泵站布置形式按照进水方式不同可分为正向进水和侧向进水两种^[1]。但是,受来流条件、实际地形和其他客观因素的限制,有时不得不采用侧向进水的布置形式^[2]。侧向进水指前池来流方向和前池中的主流方向存在夹角,此时由于弯道水流的运动特性在前池中容易产生主流脱壁、回流、漩涡等不良流态,难以形成良好的水泵进水条件^[2],影响泵站机组的安全运行。

侧向进水泵站前池水流流动现象比较复杂,属于侧向取水的水力现象,侧向取水水力特性研究已经取得一定的成果。数值模拟方面,针对侧向取水现象,H. Chen 等^[3-4]采用的是二维紊流模型,不能很好地反映前池流场的三维特性;V. S. Neary 等^[5]进行了三维层流数值模拟;R. I. Issa 等^[6]首次用三维紊流模型模拟了 T 型分叉结构的两相流,用标准 κ - ε 模型封闭三维雷诺平均的 Navier-Stokes 方程,采用壁函数处理固定边界;V. S. Neary 等^[7]考虑了高低雷诺数对壁函数的影响,采用 κ - ε 紊流模型对横向取水口的内部水流进行了数值模拟;曹继文等^[8]用各向异性的雷诺应力模型封闭方程组,研究了明渠岸边横向取水口水流特性。针对正向取水口进水前池,林锦霖^[9]采用基于 VOF 方法的紊流模型对高水头小流量电站进水前池流场进行了三维模拟,刘超等^[10]分析了底坎设置对整流效果的影响。而侧向进水口水流流态要复杂得多,印超等^[11]用三维数值模拟分析弯道连接的进水前池设置底坎和导流板的整流效果,弯道与岔道有着本质的区别,同时并未考虑前池整流措施对涡量分布和水头损失的影响。

本文以古德洛尔电厂一期工程^[12]侧向进水前池和部分明渠为研究对象,利用三维紊流数值模型,分析了整流措施对水流流速和涡量的影响,提出了改善前池流态的整流措施。古德洛尔电厂一期工程采用带机力通风冷却塔的海水循环水系统,设一座循环水泵房,安装循环水泵 4 台(3 用 1 备),每台流量 3 500 m³/h;海水淡化水泵 3 台(2 用 1 备),每台流量 590 m³/h;消防水泵 1 台,水泵流量 410 m³/h。

收稿日期: 2013-09-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51379128)

作者简介: 王芳芳(1988-),男,安徽淮北人,硕士研究生,主要从事水力学及河流动力学方面的研究。

E-mail: wff08020102@163.com

1 三维紊流数学模型

1.1 基本方程

泵站进水前池水流属复杂的三维紊流流态,可采用雷诺方程描述,并利用 RNG κ - ε 双方程紊流模型封闭 Reynolds 方程,形成泵房流道三维水流数学模型控制方程。方程组包括:

$$\text{连续方程:} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\text{动量方程:} \quad \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

$$\kappa \text{ 方程:} \quad \frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\varepsilon \text{ 方程:} \quad \frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon}^* \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中: $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$; 紊流黏性系数 $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$, $C_\mu = 0.0845$; $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39$; $C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1 - \frac{\eta}{\eta_0})}{1 + \beta\eta^3}$; $C_{1\varepsilon} = 1.42$, $C_{2\varepsilon} = 1.68$; $\eta = (2E_{ij}E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\varepsilon}$; $E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$; $\eta_0 = 4.377$; $\beta = 0.012$ 。其中,下标 i, j 为坐标方向指标, $i, j = 1, 2, 3$; t 为时间; u_i 和 x_i 分别为速度分量和坐标分量; ρ 和 μ 分别为密度和分子黏性系数; p 为修正的压力。

1.2 数值方法和边界条件

控制方程采用有限体积法进行离散,采用 SIMPLEC 算法计算流场。边界条件为:(1)进口边界:泵站进口处,流速和压强条件未知,假设充分发展流动,采用自由出流边界条件;(2)出口边界:泵站出口处采用速度入口边界条件,通过给定流量定义各出口流速值;(3)边壁处理:采用壁面函数法处理;(4)自由表面:泵站流量很小,水面变化不会很大,可采用刚盖假定方法处理自由表面。

1.3 网格划分

古德洛尔电厂一期工程为侧向前池进水,原方案中未设置上部岔道(二期取水渠道),且未增设导流孔、立柱和胸墙的部分。由于一期与二、三期取水明渠共用,导致一期取水水流流态复杂化。对泵站进水流态进行数值模拟,分析泵站前池流态、流速分布、漩涡等水力特性,最终提出变直道为岔道及在前池入口增设一排整流孔和在泵站入口加设胸墙措施,分别用来减小二、三期引水对一期泵房流道前池的影响和调整横断面流速、涡量分布不均情况,修改方案见图1。

鉴于电厂泵站前池几何形状较为复杂,为满足计算精度要求,计算范围包含了部分引水明渠沟,并与前池一起进行了网格布置。前池区域由于其形态复杂采用了非结构网格布置,局部加密网格,网格单元最小尺寸为0.2 m,引水明渠和进水流道均采用结构化网格布置,网格单元最小尺寸为0.5 m,垂向分层剖分。原方案划分网格总数约为 3.7×10^5 个,修改方案网格数增加约 5.3×10^5 个,修改方案前后划分网格见图2。

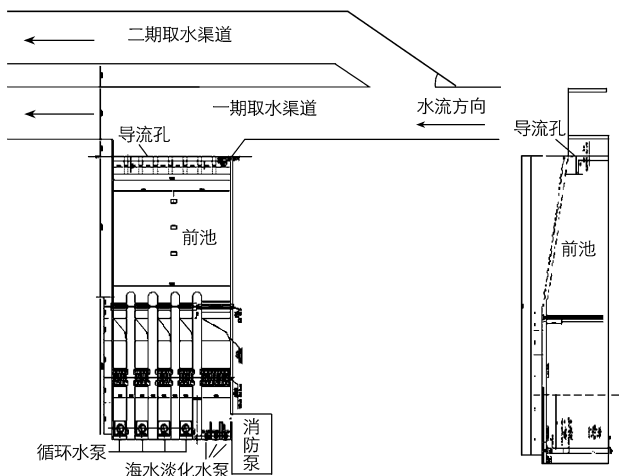


图1 古德洛尔电厂一期工程修改方案

Fig. 1 Modified phase-I program of Cuddalore pumping station

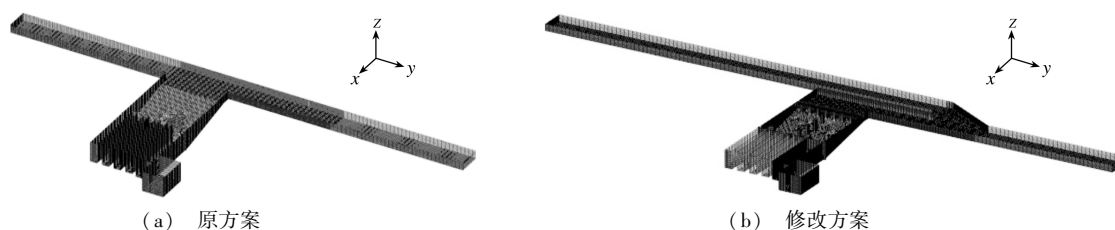


图 2 网格划分

Fig. 2 Mesh generation

2 模型验证

为了验证数学模型的可靠性,选定一、二期流量均为 $12\,090\text{ m}^3/\text{h}$ 工况,分别选取了典型断面平均流速矢量的物理模型实测结果与数学模型计算结果进行对比验证。图 3(a)标注了选取的典型控制断面位置(断面 A~D)。由图 3(b)~3(e)可见,计算结果与物模试验结果吻合良好,误差基本在 20% 以内,这表明数学模型及选用的参数是合理的,可用于模拟流道复杂水流流态。

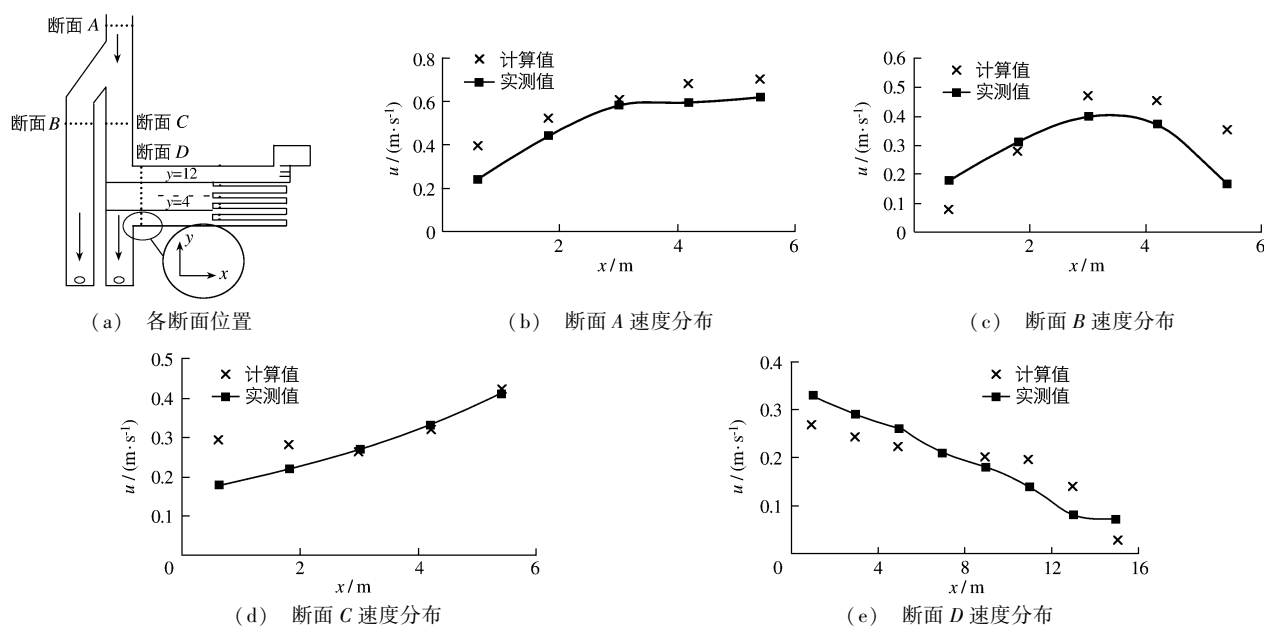


图 3 模型验证

Fig. 3 Model verification

3 前池水流特性分析

3.1 流场分析

通过比较方案修改前后进水池水流流向流速分布(图 4)可看出,原方案流速分布存在较大的偏流现象,主流靠近右岸,最大流速达到 0.3 m/s ,而左岸流速仅为 0.1 m/s 左右,中间偏右位置急剧过渡;修改后方案进水池整体流速分布比较均匀。可见,增设整流孔措施可以有效纠正泵站前池水流偏流现象,改善流速分布不均衡的不良流态。

泵站进水池水流均匀程度对整个前池流态影响较大,特别是偏流严重会在前池内产生大范围的漩涡和回流,导致水泵机组振动等。为了定量分析修改方案对流速分布均匀程度的影响,取前池典型横断面流速分布,以断面流速分布均匀度 V_u 为目标函数,进一步分析方案修改前后流态改善情况。因为前池进水口处断面流速分布均匀程度直接决定了下游泵站进口处流速分布,所以取距前池进口 6 m 处(整流孔稍下)断面

分析修改后前后断面流速分布特征,如图5所示。由图5可见,原方案流速分布在右岸局部集中较大,左岸整体流速较小,左右比例约为1:7,偏流较为严重,而修改方案断面流速分布整体均匀,有明显的波峰、波谷交替现象,这是因为导流孔间隔排列的作用,随着水流沿程调整可以更加均匀。

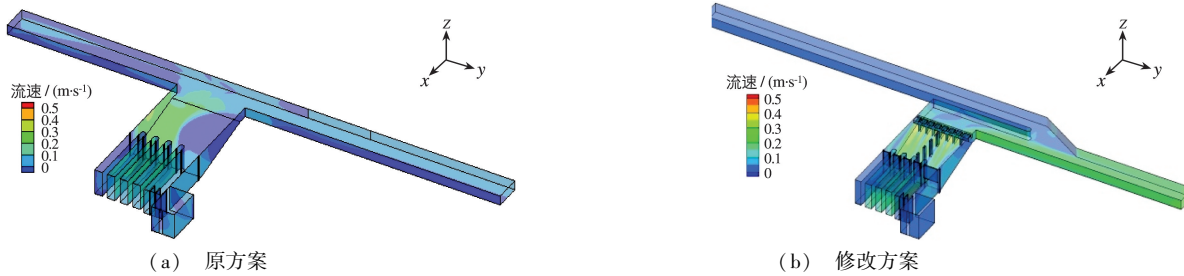


图4 三维流速等值线分布

Fig. 4 Contour of 3-D velocity distribution

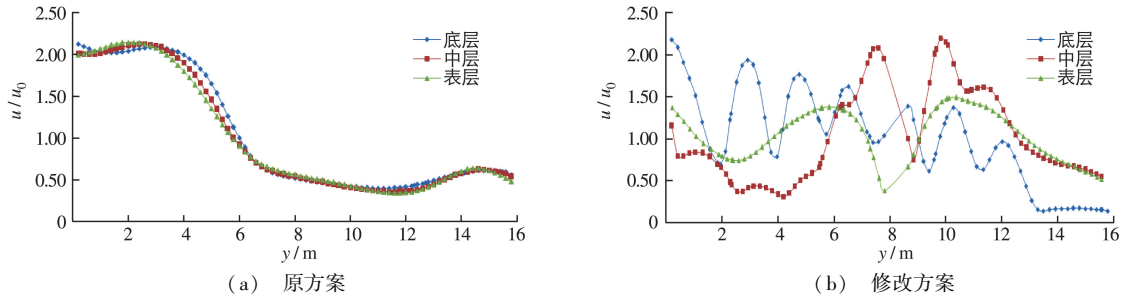


图5 典型断面流速分布

Fig. 5 Velocity distribution along the typical cross-sections

建立断面流速矢量分布均匀度 V_u 目标函数:

$$V_u = \left(1 - \frac{1}{\bar{u}} \sqrt{\sum \frac{(u_i - \bar{u})^2}{m}} \right) \times 100\% \quad (5)$$

式中: $\bar{u}$ 为进口断面的平均速度; u_i 为第 i 点流速; m 为计算点数。

计算可得,原方案典型断面的底层、中层和表层流速分布均匀度分别为 32%、31% 和 32%;修改方案的分别为 45%、46% 和 71%,较修改方案分别增加 41%、48% 和 122%。

3.2 漩涡特征分析

流速不均匀分布会引起前池内整个区域的漩涡,如果流速比较大,整体漩涡会加剧前池内水流紊乱,同时吸入杂质进入泵站入口,易造成水泵的堵塞、磨损加剧等危害,严重影响泵站安全运行。图6给出了前池涡量场分布情况。由图6(a)知,原方案水流惯性作用必然会引起前池内整个区域的大漩涡,横向流动严重,修改方案(图6(b))采用整流孔和整流墩联合使用,可看到整流后进水前池内流线分布得到很好地改善,横向流速基本消除,泵站入口水流平顺。

取进水前池典型的3个纵断面(沿水流方向)涡量分布,如图7所示。可见,原方案涡量较大处集中在底坡变化处(图7(a)),前池进口和末端底坡变化处水流涡量增大。修改方案虽然导流孔消除了前池大范围的漩涡(图7(b)),但是也增大了附近局部水流涡量,延伸至下游又明显减弱。为了保证泵站入口底部水流的流通性与均匀性,在前池末端泵站入口前增加胸墙来改善水流底部流态,比较可见,胸墙的设立有效地消除了前池末端处的涡量集中现象,保证胸墙后底部水流平顺进入泵站进口区,同时,胸墙后区域墙底水流层出现强度较小的横轴漩涡,涡体大、强度小,对入口流态影响不大。

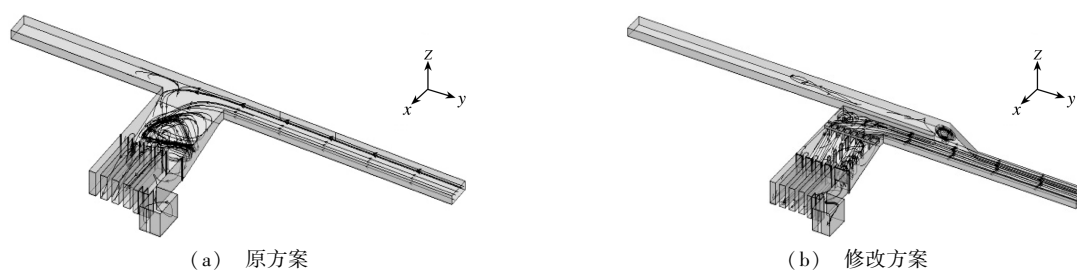
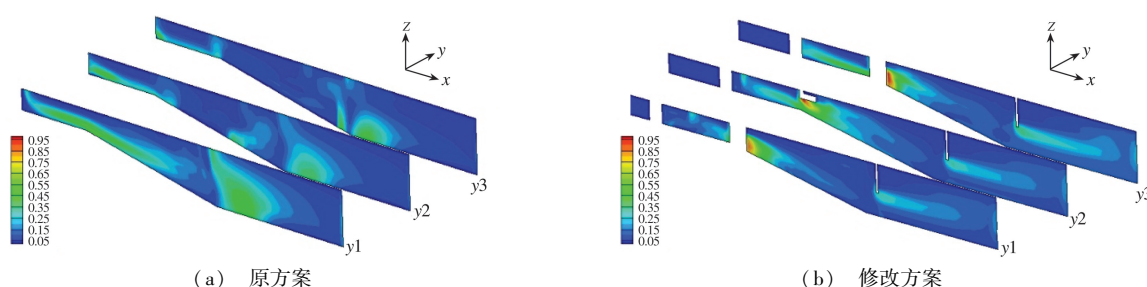


图 6 三维流线分布

Fig. 6 Distribution of 3-D streamline

图 7 前池横断面涡量分布(单位: s^{-1})Fig. 7 Velocity distribution on the typical section in the forebay (unit: s^{-1})

3.3 水头损失

分别取方案修改前后进水前池对称四等分断面 $y=4$ 和 $y=12$ (见图 3(a)) 表层压力值换算水面线高程 (见图 8), 可得出整流措施特别是整流孔对水头损失的影响, 同时对称面水面线高程还可以反映明渠进口和前池内水面分布特征。由图 8 中 $y < 0$ 区域 (即明渠内) 4 条水面线可知, 前池进口前明渠段在整流前后水面均沿程壅高, 且修改后壅高坡降较原型增大; $y > 0$ 区域 (即前池内), 整流后由于局部水头损失增大水面降低。此外, 对比对称断面水面线可以看出前池内水面基本水平。

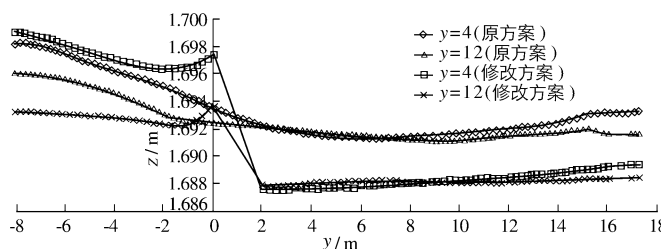


图 8 前池水面线

Fig. 8 Water surface profiles in the forebay

4 结 语

(1) 概述了泵站侧向进水前池数值模拟研究进展, 鉴于横向岔道不均匀取水前池流态复杂, 需要进行三维数值模拟研究;

(2) 基于 fluent 软件建立三维水流数值模型, 模拟研究了泵站侧向取水前池水流三维特性, 由于弯道引起的水流偏流现象严重, 前池形成大范围漩涡, 造成前池内水面波动较大, 流态恶劣, 影响下游机组运行;

(3) 以古德洛尔电厂一期工程为例, 对比了方案修改前后侧向前池进水流态的流速、涡量 and 水面线分布特点, 修改方案利用整流孔和立柱增加了前池进口段水流流速分布的均匀性, 大大消减了前池内大范围漩涡, 保证了前池水面的平稳, 泵站进口设立胸墙破坏局部漩涡、消除水面波动, 有效改善进口水流条件。

参 考 文 献:

- [1] 成立, 刘超, 周济人, 等. 泵站侧向进水流态及其改善措施机理探讨[J]. 排灌机械, 2001, 19(1): 31-34. (CHENG Li, LIU Chao, ZHOU Ji-ren, et al. Discussion on the side-direction flow of pumping station and improving of the flow pattern[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2001, 19(1): 31-34. (in Chinese))

- [2] 徐辉, 张林. 侧向进水泵站前池整流技术研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2008, 28(6): 84-88. (XU Hui, ZHANG Lin. Review of flow pattern modifying technology for pump sump with side-inlet[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(6): 84-88. (in Chinese))
- [3] CHEN H, LIAN G. The numerical computation of turbulent flow in tee-junctions[J]. Journal of Hydrodynamics, Amsterdam(Ser B), 1992(3): 19-25.
- [4] SHETTAR A S, MURTH K. A numerical study of division of flow in open channels[J]. Journal of Hydraulic Research, 1996, 34(5): 651-675.
- [5] NEARY V S, SOTIRPOULS F. Numerical investigation of laminar flows through 90-degree diversions of rectangular cross section [J]. Computers & Fluids, 1996, 25(2): 95-118.
- [6] ISSA R I, OLIVEIRA P J. Numerical prediction of phase separation in two-phase flow through T-junction[J]. Computers & Fluids, 1994, 23(2): 347-372.
- [7] NEARY V S, SOTIRPOULS F. Three dimensional numerical model of lateral-intake inflow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1999, 125(2): 126-140.
- [8] 曹继文, 陈惠泉, 贺益英. 明渠岸边横向取水口的三维数值模拟[J]. 水利学报, 2004(2): 119-125. (CAO Ji-wen, CHEN Hui-quan. HE Yi-ying. 3D numerical modeling of lateral intake flow in open channel [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(2): 119-125. (in Chinese))
- [9] 林锦霖. 水电站进水前池三维数值模拟[J]. 广西水利水电, 2009(2): 17-19. (LIN Jin-lin. 3D numerical simulation for receiving basin of hydropower station[J]. Gx Water Resources & Hydropower Engineering, 2009(2): 17-19. (in Chinese))
- [10] 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. (LIU Chao, CHENG Li, TANG Fang-ping. Numerical simulation of three-dimensional turbulent flow inside a pumping forebay[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2001, 32(6): 41-44. (in Chinese))
- [11] 印超. 泵站前池流态改善三维数值模拟研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2007. (YIN Chao. 3D numerical simulation for pumping station to improve flow pattern in the forebay[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2007. (in Chinese))
- [12] 吴时强. 古德洛尔电厂一期2×600 MW 亚临界燃煤机组循环水泵房、补充水泵房流道水流计算报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2012. (WU Shi-qiang. Report on CFD modeling of CW pump house & seawater make-up pump house[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2012. (in Chinese))

3-D numerical simulation for side-inlet forebay of a pumping station

WANG Fang-fang^{1,2}, WU Shi-qiang¹, XIAO Xiao¹, KUANG Man-man³

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: In view of different patterns of intake, pumping station arrangement is usually divided into two types of the forward and lateral intakes. When the water passes over the side-inlet forebay of the pumping station, there is an angle between the main flow direction in the side-inlet forebay and its inflowing direction. At this time some undesirable flow patterns such as the main flow direction moving off the wall, reverse current and vortex are caused by the motion characteristics of the flow along the curved section, thus it is difficult to form a good inlet condition for the pump and affect the safe operation of the pumping units. A 3-D mathematical model to simulate the water flow in both the side-inlet forebay and the inflowing channel of the first phase of Cuddalore pumping station is developed in this paper. The RNG κ - ε turbulent model is used to close the Navier-Stokes equations and the SIMPLEC algorithm method is adopted to calculate the flow field, which are finished by the Fluent 6.3.26 software. Here, two schemes (the original and the rectifying schemes) on the Cuddalore pumping station are calculated. The distribution characteristics of the hydraulic parameters including velocity, vorticity and water surface line about the two schemes have been compared, the uniformity of flow distribution in the side-inlet forebay based on the target function of the velocity distribution along the typical cross-sections is also analyzed. Finally it is more exactly understand the characteristics of water flow in the side-inlet forebay, and the analysis results show that the reasonable rectifying measures can effectively improve the flow pattern in the forebay.

Key words: side-inlet forebay; flow field; turbulent; 3-D mathematical model; rectifying measures; velocity distribution; pumping station