

中隔墩对大型泵站进水流道水力性能的影响

梁金栋, 陆林广, 徐磊

(扬州大学水利科学与工程学院, 江苏扬州 225009)

摘要: 运用数值计算和模型试验相结合的方法, 研究了在进水流道进口水流方向偏斜时, 中隔墩对进水流道水力损失及流道出口断面的水流均匀度、水流入泵平均角度的影响, 并对影响机理进行了初步分析。研究表明: 在进水流道中设置中隔墩对进水流道的流态影响较小, 设计流量时的流道水力损失增加约 0.005 m; 当前池存在横向流速时, 中隔墩对改善进水流道内的流态是有利的; 进水流道水力损失的增加主要是由于隔墩的存在减小了过流面积, 使得水流流速增加所引起的。数值计算和模型试验的结果基本一致。

关键词: 数值计算; 模型试验; 中隔墩; 进水流道; 水力性能

中图分类号: S277.9; TV136.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)06-0102-04

Influence of Middle Division Pier on the Hydraulic Performance for Inlet Conduit of a Large scale Pumping Station

LIANG Jindong, LU Lirong, XU Lei

(College of Hydraulic Science & Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: The combination method of numerical calculation and model test was applied to investigate the effects of middle division pier on the hydraulic loss and flow uniformity and average flow entrance angle at the outlet conduit when the inflow direction was oblique at the elbow inlet conduit. The influence mechanism was analyzed preliminarily. The research results indicated that (1) the influence of the middle division pier on the flow pattern at the elbow inlet conduit is insignificant with an increasing of hydraulic loss of about 0.005 m under the design discharge; (2) when transverse velocity exists in the forebay, the middle division pier is beneficial to improve the flow pattern at the inlet conduit; and (3) the increasing of hydraulic loss at the inlet conduit is mainly due to the increasing of flow velocity caused by the reduction of flow area. The results obtained from the numerical simulation method were consistent with those determined by the model test method.

Key words: numerical calculation; model test; middle division pier; inlet conduit; hydraulic performance

大型泵站进水流道的作用是使水流从前池进入水泵叶轮室的过程中能够平稳地转向和加速, 从而满足水泵叶轮室进口的要求, 所以进水流道里的流态会对水泵的工作产生影响。

大型泵站的进水流道一般设有中隔墩^[1,2], 但是中隔墩对泵站进水流道水力性能的影响, 过去并没有引起足够的重视。中隔墩的设置除了会增加流道施工的难度外, 在多大程度上会影响进水流道的水力性能, 对此问题目前还缺乏明确的认识。

为了减少在泵站进水流道设计中对中隔墩认识的盲目性, 本文利用某低扬程泵站的有关设计参数(设计扬程为 4.70 m, 单泵设计流量为 25 m³/s, 初步设计阶段确定的水泵

叶轮直径为 2.65 m), 采用三维湍流数值计算与流道模型试验相结合的方法, 研究中隔墩对低扬程立式泵装置中常采用的肘形进水流道水力性能的影响。

1 进水流道三维流动数值计算

大型泵站进水流道内部三维湍流流动数值模拟的控制方程, 包括连续性方程、动量方程以及 k-ε 模型中的 k 方程和 ε 方程^[3,4]。

1.1 数值计算模型的网格划分

应用 Gambit 软件完成进水流道三维湍流流动数值模拟区域的建模和网格划分工作。肘形进水流道进水池、进水流道、出水管等 3 个部分的网格疏密不等, 网格总数约为 250

收稿日期: 2013-08-06 修回日期: 2013-09-04 网络出版时间: 2013-10-10
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20131010.1029.031.html>
基金项目: 江苏省重点实验室开放基金(057387003K12022)
作者简介: 梁金栋(1972-), 男, 江苏姜堰人, 讲师, 博士, 主要从事泵站工程理论及应用研究。E-mail: jdliaog@yzu.edu.cn

000。图 1 为肘形进水流道流场计算区域的网格图。

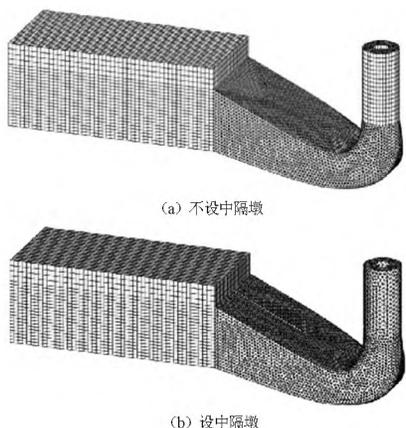


图 1 肘形进水流道流场计算区域的网格图

Fig. 1 Model grids of the simulation area at the elbow inlet conduit

1.2 数值计算的边界条件

(1) 进口边界。进水流道优化设计计算流场的进口设置在进水池中距流道进口足够远处,在这里,可认为来流速度在整个断面上均匀分布。计算流量为已知条件,故而流场进口边界采用速度进口边界条件^[5]。进水流道进口的轴向流速,根据设计流量及流道进口断面尺寸计算为 0.659 m/s。

(2) 出口边界。已有研究^[6]结果表明:在轴流泵正常运行工况范围内,水泵叶轮室进口前的水流基本上保持轴向流入叶轮室,没有可观察到的“预旋”流动。因此,对进水流道进行三维流场数值分析计算研究时无需考虑所谓“预旋”的影响。为了准确地应用自由出流边界条件,本研究将进水流场从进水流道出口断面沿水流方向等直径延长,将计算流场的出口断面设置在距该断面 2 倍出口断面直径处。在这里,可应用自由出流边界条件^[7-8]。

(3) 固壁边界。在所计算的进水流场中,包含前池底壁、进水流道边壁及水泵叶轮室进口前的导流帽边壁等固壁,其边界条件按固壁定律处理。固壁边界条件的处理对所有固壁处的节点应用了无滑移条件,而对紧靠固壁处节点的湍流特性,则应用了所谓对数式固壁函数处理之,以减少固壁区域的节点数^[9-10]。

(4) 自由水面。进水池的表面为自由水面,若忽略水面风所引起的切应力及与大气层的热交换,则自由面对速度和湍动能均可视为对称平面处理^[11-12]。

应用 FLUENT 软件进行进水流道三维湍流流场的数值模拟,迭代计算残差的收敛标准设置为 10^{-7} 。

1.3 中隔墩对进水流道水力性能影响的数值计算结果

(1) 中隔墩对进水流道流态影响的数值计算结果。对肘形进水流道进行了三维流场数值模拟,图 2(a)和图 2(b)分别为不设中隔墩和设置中隔墩两种条件下的肘形进水流道表面流场计算结果。

由图 2(a)可见:在流道的直线段内,流态平顺,流速逐渐增大;进入流道弯曲段后,水流迅速转向和加速,使得流道内侧流速明显大于外侧的流速;由于水流在作 90°转向的同时,

伴随着急剧的侧向收缩,故此处并未产生脱流;在流道圆锥段内,由于惯性力的强烈作用,较大的水流速度开始出现在流道外侧壁附近,经过圆锥段的短距离调整,在接近流道出口处,水流流向趋于垂直于出口断面,水流流速大小趋向于均匀分布。

由图 2(b)可见:在进水流道设置中隔墩后,流道前半段被分隔成两部分。整个流道内水流流态平顺,流速均匀,速度分布云图与不设中隔墩时的基本相同。

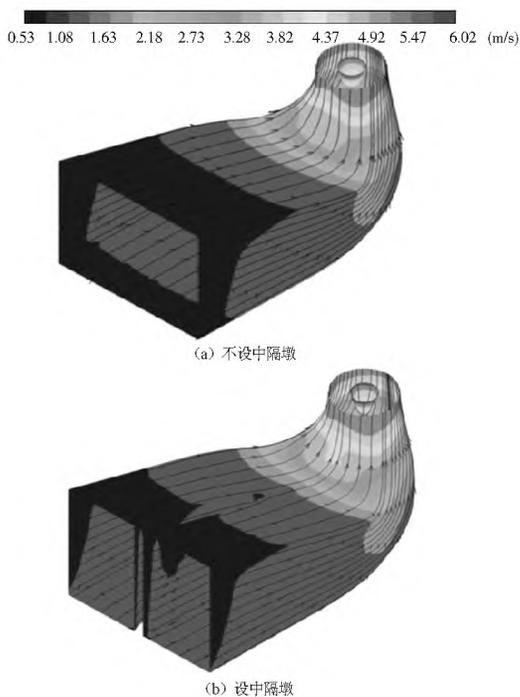


图 2 肘形进水流道流线和流速云图

Fig. 2 Flow pattern and flow velocity nephogram at the elbow inlet conduit

(2) 中隔墩对进水流道水力损失影响的数值计算结果。肘形进水流道在设计流量时的水力损失数值 $h_{v,c}$ 计算结果列于表 1,可见在进水流道内设中隔墩会使进水流道设计流量时的水力损失增加 0.005 m。

表 1 设计流量时肘形进水流道的水力损失计算值

Table 1 Calculated hydraulic loss at the elbow inlet conduit under design discharge

条件	水力损失 $h_{v,c}/m$
设中隔墩	0.108
不设中隔墩	0.113

(3) 进水偏斜时中隔墩对进水流道水力损失及出口流态的影响。由于泵站侧向进水、闸站并列布置、前池或进水池设计不当、机组不对称运行等原因,水流在前池内也会产生偏斜现象,产生横向流速。带有横向流速的水流进入进水池后会影响到水泵的进水水流条件。为了研究进水流道进口水流方向偏斜时中隔墩对进水流道内流态的影响,应用三维湍流数值计算的方法比较了不同水流偏角 α (图 3) 时中隔墩对肘形进水流道的水力损失、出口断面的水流均匀度、出口断面水流入泵平均角度^[13-14]的影响,其结果列于表 2。

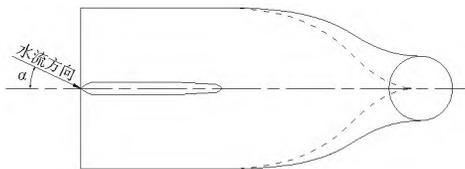


图 3 肘形进水流道水流入口角

Fig. 3 Flow entrance angle at the elbow inlet conduit

表 2 不同水流入口角时肘形进水流道水力损失的数值计算结果

Table 2 Numerical calculation results of hydraulic loss at the elbow inlet conduit under different flow entrance angles

偏斜角度	设中隔墩			不设中隔墩		
	0°	15°	30°	0°	15°	30°
流道水力损失/m	0.113	0.136	0.155	0.108	0.127	0.145
出口断面的水流均匀度(%)	98.3	97.8	97.2	98.2	96.8	95.9
出口断面水流入泵平均角度(°)	88.5	87.7	87.1	88.2	87.0	86.2

计算结果表明:肘形进水流道不设中隔墩、进口水流方向偏斜时,流道水力损失随偏斜角度增大而增大,流道出口断面的水流均匀度、流道出口断面水流平均入泵角度随角度增大而减小,即流道出口水流条件(水流入泵条件)随角度增大而变差;进水流道设置中隔墩后,随水流偏斜角度的变化,流道水力损失、流道出口断面的水流均匀度、流道出口断面水流平均入泵角度的变化趋势与不设中隔墩时相同。相较于没有中隔墩时的情况,进水流道水力损失增大了,但流道出口断面的水流均匀度、出口断面水流平均入泵角度也增大了。也就是说,当进水流道进口水流方向偏斜时,中隔墩对改善进水流道出口水流条件(水流入泵条件)是有利的。

2 进水流道模型试验

2.1 进水流道模型试验装置

为了验证进水流道三维流动数值计算的结果,本文采用文献[15]的试验装置进行进水流道模型试验。图 4 为进水流道模型试验的装置示意图。

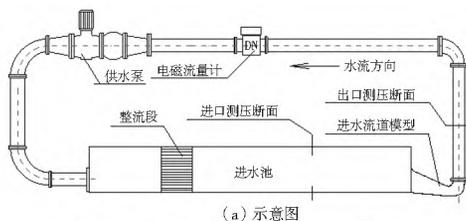


图 4 进水流道模型试验装置

Fig. 4 Model test equipment of the inlet conduit

进水流道模型试验装置为一立式循环系统。该系统由一台 200 mm 口径的管道泵供水,供水能力满足试验流量范

围的要求,通过调节管道泵的转速改变试验流量,采用电磁流量计测量流量。兼顾减小比尺效应和减少试验费用这两个方面的要求,模型进水流道的出口内径定为 120 mm。进水流道模型与原型保持几何相似,进水流道模型和进水池采用透明有机玻璃制作,以便观察和摄录流态。进水流场进口侧的测压断面设在进水池内,与进水流道进口有一定距离,以保证测压断面为渐变流断面;进水流道的出口与等直径的直圆管相接,进水流场出口侧的测压断面设在距进水流道出口断面 2 倍圆管直径处,以保证出口测压断面为渐变流断面。

2.2 进水流道流态观察结果

在透明流道模型试验中,借助于流道边壁粘贴的红线可以清楚地观测到进水流道内的流态。

肘形进水流道不设中隔墩时,直线段内红线平稳地紧贴在流道边壁上,晃动幅度极小;在流道弯曲段内,受水速转向和加速的影响,红线随之转向,仍紧贴流道边壁与流道型线相切;在圆锥段内,红线方向与圆锥段母线基本平行。

在进水流道设置中隔墩后,流道前半段被分隔成两部分。流道边壁的红线状态与不设中隔墩时基本相同,不同之处在于中隔墩尾部上半部红线方向向下倾斜,位置愈上倾斜角度愈大。

综上所述,模型试验所观察到的流态与数值计算的结果基本相同。

2.3 进水流道水力损失测试结果

设计流量时,肘形进水流道水力损失模型试验的结果列于表 3, $h_{v,m}$ 为水力损失模型试验结果。设中隔墩时的水力损失较不设中隔墩时增加了 0.006 m,与数值计算结果基本一致。

表 3 进水流道水力损失数值计算与模型试验结果的比较

Table 3 Comparison of the hydraulic loss at the inlet conduit obtained from the numerical calculation and model test

条件	$h_{v,c}/m$	$h_{v,m}/m$
设中隔墩	0.113	0.099
不设中隔墩	0.108	0.093

3 中隔墩对进水流道水力损失影响机理的初步分析

为了研究中隔墩对进水流道水力损失的影响机理,采用数值计算的方法研究了不同厚度中隔墩时进水流道的水力损失 $h_{v,c}$ 。其中隔墩厚度为零的方案是指进水流道在该处被一个没有厚度的平面分成两部分,从过流面积的角度看,该方案与无隔墩方案是完全一样的。不同厚度中隔墩对进水流道水力损失的影响数值计算结果见表 4。

流道水力损失主要决定于流态与流速。没有中隔墩与中隔墩为 0 时的进水流道水力损失几乎相同,说明对于该肘形水流道而言,中隔墩的存在对于流道内的流态影响几乎没有。从肘形进水流道分层剖面流场图比较可以看出(图 5),随着中隔墩厚度从 0 增加到 0.01 m 再增加到 0.025 6 m(模型),流道水力损失相应增大,这种增大主要是由过流面积减小、水流流速增加而引起的。

表4 中隔墩厚度对肘形进水流道水力损失的影响数值计算结果

Table 4 Numerical calculation results of the effects of thickness of middle division pier on the hydraulic loss at the elbow inlet conduit

隔墩厚度	肘形进水流道水力损失 $h_v, /m$		
	总损失	有隔墩段	无隔墩段
无隔墩	0.108	0.042	0.066
0	0.109	0.042	0.067
0.01	0.113	0.047	0.066
0.025 6	0.119	0.052	0.067

0.53 1.08 1.63 2.18 2.73 3.28 3.82 4.37 4.92 5.47 6.02 (m/s)

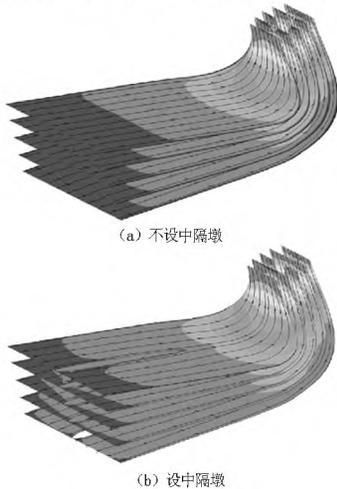


图5 肘形进水流道分层剖面流场

Fig. 5 Flow patterns of different horizontal sections at the elbow inlet conduit

4 结论

(1) 在前池不存在横向流速时,在进水流道中设置中隔墩对进水流道的流态影响较小,设计流量时的流道水力损失增加约0.005 m。

(2) 当前池存在横向流速时,中隔墩对改善进水流道出口流态(即水泵入流条件)是有利的。

(3) 中隔墩对进水流道内的水流流态影响不大,进水流道水力损失的增加主要是由于隔墩的存在减小了过流面积,使得水流流速增加所引起的。

参考文献(References):

[1] 谢伟东,汤正军,陆林广,等.江都三站进水流道优化数值计算及模型试验研究[J].南水北调与水利科技,2005,3(3):38-41. (XIE Wei dong, TANG Zheng jun, LU Lir guang, et al. Study on Optimization by both Numerical Calculation & Model Test for the Inlet Elbow of Jiangdu No. 3 Pumping Station[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2005, 3(3): 38-41. (in Chinese))

[2] 刘军,邓东升,马志华,等.宝应泵站流道优化计算与模型试验研究[J].南水北调与水利科技,2005,3(2):22-25. (LIU Jun, DENG Dong sheng, MA Zhi hua, et al. Optimization by Numerical Calculation & Model Test for Inlet & Outlet Conduit of Baoying

Pumping Station[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2005, 3(2): 22-25. (in Chinese))

[3] 马福喜,王金瑞.三维水流数值模拟[J].水利学报,1996,(8):39-44. (MA Fu xi, WANG Jin rui. 3 D Flow Numerical Simulation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, (8): 39-44. (in Chinese))

[4] 金忠青.N-S方程的数值解及紊流模型[M].南京:河海大学出版社,1988:11-16. (JIN Zhong-qing. N-S Equation and Numerical Solution of Turbulent Flow Model[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1988: 11-16. (in Chinese))

[5] Lakehal, D., Theodoridis. G. S., Rodi. W. Three Dimensional Flow and Heat Transfer Calculations of Film Cooling at the Leading Edge of a Symmetrical Turbine Blade Model[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2001, (22): 113-122.

[6] 陈伟.轴流泵叶轮及泵站进水设计对叶轮室进口流态的影响[D].扬州:扬州大学,2011. (CHEN Wei. Influences of Axial flow Pump Impeller and Pumping Station Intake Design on the Flow Pattern at the Inlet of the Impeller Chamber[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2011. (in Chinese))

[7] Blazek J. Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications(Second Edition)[M]. Oxford: Elsevier Ltd., 2005: 271-302.

[8] Muggii. F. A., Eisele. K., Casey. M. V. Flow Analysis in a Pump Diffuser-Part 2: Validation and Limitations of CFD for Diffuser Flows[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, (12): 978-984.

[9] Muggli. F. A., Holbein. P. CFD Calculation of a Mixed Flow Pump Characteristic From Shutoff to Maximum Flow [J]. Journal of Fluids Engineering, 2002, (9): 798-802.

[10] Constantinescu. G. S., Patel. V. C. Numerical Model for Simulation of Pump Intake Flow and Vortices [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, (2): 123-134.

[11] Rodi W. Turbulence Models and Their Application in Hydraulics Experimental and Mathematical Fluid Dynamics [M]. Delft: IAHR Section on Fundamentals of Division 0, 1980: 44-46.

[12] 王福军.计算流体动力学分析-CFD软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004:150-156. (WANG Fu jun. Analysis of Computational Fluid Dynamics Principles and Applications of the CFD Software [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 7-9, 120-126.)

[13] 陆林广,张仁田.泵站进水流道优化水力设计[M].北京:中国水利水电出版社,1997:8-10. (LU Lir guang, ZHANG Ren tian. Optimum Hydraulic Design for Inlet Conduit of Pumping Station [M]. Beijing: China Water Power Press, 1997: 8-10. (in Chinese))

[14] 陆林广,周济人.泵站进水流道三维紊流数值模拟及水力优化设计[J].水利学报,1995,(12):67-75. (LU Lir guang, ZHOU Ji ren. Numerical Analogue of 3D Turbulence Flow and Hydraulic Optimum Design for the Intake Conduit of a Pumping Station [J]. Journal of Hydraulic, 1995, (12): 67-75. (in Chinese))

[15] 陆林广,祝婕,冷豫,等.泵站进水流道模型水力损失的测试[J].排灌机械,2005,23(4):14-17. (LU Lir guang, ZHU Jie, LENG Yu, et al. Measurement for Hydraulic Loss of Inlet Conduit of Pumping Station [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2005, 23(4): 14-17. (in Chinese))