

大型梯级调水工程优化设计泵装置数值仿真

冯卫民, 宋立, 肖光宇

(武汉大学 动力与机械学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 采用雷诺平均纳维-斯托克斯方程(RANS)和标准 $k-\varepsilon$ 双方程模型, 运用求解压力耦合方程的半隐式 SIMPLEC 算法对南水北调东线一期工程台儿庄泵站内部流场进行全流道三维数值模拟. 揭示了其内部流动机理和规律, 并在此基础上对泵装置流道匹配进行优化设计和性能预测, 进而通过泵装置模型试验对数值模拟结果进行了验证. 分析计算和试验结果表明: 经过优化后的泵装置进水流道匹配合理, 进水流道流态均匀, 泵装置效率高, 是台儿庄泵站较为理想的流道组合形式, 也间接验证了数值模拟的可行性.

关键词: 泵装置; 南水北调; 优化设计; 性能预测; 数值模拟

中图分类号: TV131 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-6254(2008)03-0042-04

Numerical simulation on pump set model for optimum design of large-scale cascade water delivery project

FENG Wei-min, SONG Li, XIAO Guang-yu

(School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: The Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equation is applied for simulation of 3D-flow field in the project of Tai'erzhuang pumping station, the eastern line first-stage project of the South-to-North Water Transfer Project. The standard $k-\varepsilon$ model and SIMPLEC algorithm are adopted in the calculation. The optimum design of pump set inlet and outlet of flow passage is carried out, and the macroscopic performance is predicted. The numerical results agree well with the experimental data. The results of numerical simulation and model experiment indicate that the optimal scheme of numerical simulation is reasonable on inlet and outlet flow passage, the flow pattern in the inlet and outlet passage is uniform and smooth, and the efficiency of pump set is high, which is suitable for Tai'erzhuang Pumping Station.

Key words: pump set; the South-to-North Water Transfer Project; optimum design; performance prediction; numerical simulation

泵站优化设计在以泵装置为核心的大型跨流域梯级调水系统工程中是一个非常重要的研究课题. 在过去的十多年时间里, 叶轮机械及装置内三维粘性紊流数值模拟计算得到了快速发展, 数值模拟对

设计有很强的理解、仿真和可视能力, 并能够快速调整设计参数, 给出相应结果^[1], 所以数模计算优化设计手段在泵站工程应用中, 显现出极大优越性.

台儿庄泵站工程为南水北调东线一期工程的第

收稿日期: 2008-04-16

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAB04A05)

作者简介: 冯卫民(1958—), 男, 安徽阜阳人, 教授(wmfeng@whu.edu.cn), 主要从事流体机械及工程、流体输送及过渡过程控制理论及应用的研究.

宋立(1986—), 男, 湖北宜昌人, 硕士研究生(songlikaka@163.com), 主要从事流体机械及工程、流体输送及过渡过程控制理论及应用的研究.

7级泵站,主要任务是从骆马湖或中运河抽水通过韩庄运河向北输送,以实现南水北调东线工程的梯级调水目标.台儿庄泵站工程设计流量 $125\text{ m}^3/\text{s}$,年平均运行 $4\,652\text{ h}$,选用 $3000\text{ZLQ}32-5.2$ 型立式轴流泵5台套(其中备机1台套),水泵叶轮直径 $3\,000\text{ mm}$,单泵设计流量 $31.25\text{ m}^3/\text{s}$,机组配套功率为 $2\,400\text{ kW}$,泵站总装机容量 $12\,000\text{ kW}$.常年连续运行对泵装置效率的要求较高,而优化进、出水流道的水力设计是提高水泵装置效率的关键技术之一.

台儿庄泵站是按传统手段进行设计的.传统设计主要依据工程经验,采用基于一维流动理论的设计方法,即流道内各过水断面平均流速均匀变化^[2].这种方法在工程设计中虽使用方便,但是未考虑流道各断面的流速分布对装置水力性能的影响.为确保台儿庄泵站高效经济、安全可靠运行,本研究采用三维紊流全流道数值模拟方法,对台儿庄泵站进、出水流道匹配的设计方案进行优化,最终由带透明流道的泵装置模型试验进行验证和性能预测.

1 三维流动数值模拟的数学模型

本研究采用PHOENICS软件对台儿庄泵站模型进行全流道三维流动的数值模拟.

1.1 控制方程

泵站进出水流道中的实际流动是湍流.在定常条件下,采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型时,描述泵站进出水流道内的定常不可压缩流动的方程包括连续性方程、动量方程和 $k-\varepsilon$ 模型中的 k 方程和 ε 方程,对此已有很多文献作了介绍^[3],在此不再赘述.

1.2 边界条件

进口边界设在距流道进口 2.0 m 的前池进水断面处,在这里,可认为来流速度在水平方向上均匀分布、在铅直方向为对数式分布.进水流场的出口设置在水泵叶轮室进口.

进水流道边壁、前池底部等处均为固壁,其边界条件按固壁定律处理.固壁边界条件的处理中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,则应用对数式固壁函数处理,以减少近固壁区域的节点数^[3].

出水流道计算流场的进口设置在水泵后导叶出口断面.计算流场的出口设置在距流道出口 2.0 m 的出水池内,这里的边界条件近似按静水压力分布给出.出水流道边壁及出水池底部均为固体壁面,其

边界条件的处理与进水流道固壁的处理相同.

2 进水流道的优化

由于进水流道对泵装置的性能具有不可忽视的影响,本研究对该泵站的原设计方案进行了数值模拟,并提出了优化方案.优化的目标是:水流应平顺均匀收缩,在水泵进口处流速均匀分布,水流与叶轮室进口断面夹角近似为 90° ,水力损失小^[4].

2.1 两个进水流道方案几何形状的比较

图1a为进水流道原设计方案的流道单线图.进水流道长 11 m ,底面坡角为 6° ,顶角为 24° ,流道中间设置 0.6 m 厚的隔墩.图1b为进水流道优化方案的流道单线图.进水流道长 11.15 m ,底面无坡角,流道中间设置 0.6 m 厚的隔墩.肘形进水流道一般由直线段、弯曲段和锥段组成.渐变段的作用是将水流从前池平顺地引入弯段.水流在弯曲段内作不小于 90° 的转向,锥段的作用则是对水流作进一步的整流和收缩,为水泵叶轮室进口提供良好的流态.优化方案切平底部的主要目的是为了减少开挖量,节约投资.

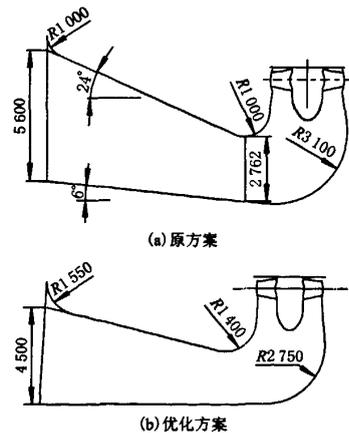


图1 两个方案进水流道示意图
Fig. 1 Schematic diagram of two suction boxes

2.2 两个方案进水流态的比较

应用CFD技术分别对两个方案进水流道内的流动进行三维紊流数值模拟.由流场计算结果可知:在原方案中,水流在开始阶段流态较为平顺,水流进入圆锥段后,由于惯性的作用,在肘弯处存在明显的高流速区,后虽经圆锥段的短距离调整,但调整距离偏小,在接近流道出口处,水流均匀性远未能达到理想状态,与水泵配套时,则会影响水泵的入流条件.

在优化方案进水流道中,流态平顺,流速逐渐增大,进入弯曲段水流迅速改变方向,但加速仍较为均匀,在圆锥段内,由于惯性力的强烈作用,在流道外侧壁面出现较大流速,经圆锥段的短距离调整,在接近出口处,水流趋于均匀分布和垂直于出口断面。

比较两方案的计算结果,可以发现:①原方案在肘弯处存在局部的高流速区,而优化方案在肘弯处的流速有所减小;②优化方案的水泵进口断面处的流速、压力分布较原方案的均匀,水流入泵的角度更接近 90° ;③从施工上讲,优化方案切平底部降低了进水流道的高度,可很大程度减小开挖量,在节约成本方面优化方案更有优势。

故在下一步的泵装置全流道数值模拟中,进水流道都将采用该优化方案,只是采用不同形式的出水流道。

表1 两个方案进水流道目标函数的比较

Tab.1 Objective function comparison of two suction boxes

设计方案	平均流速/ (m/s)	均匀度/ %	水流入泵平均角度/ ($^\circ$)
原方案	4.92	92.06	87.3
优化方案	4.69	95.80	88.6

3 水泵装置的优化

在泵装置的优化过程中,进水流道均采用前述优化方案.对出水流道的设计,原方案采用如图2a所示的长出水流道,出水流道长17 m,流道出口宽7.0 m,高4.5 m。

流场计算结果表明,本方案的进水流道中没有明显的不良流态;出水流道中由于扩散作用,存在着偏流和回流.一般来讲,扩散引起的附壁微涡是难免的,而且一般很难消除.因此,从工程角度来讲,所设计的进、出水流道是可行的,对出水流道中的偏流不需要采取防护措施.由于受施工地形限制,并为降低工程造价,要求在原方案基础上缩短进水流道长度和高度.重新设计的出水流道方案为13 m的短出水流道,流道出口宽6.0 m,高4.5 m(没有降低流道高度).进、出水流道单线图如图2b所示.流场计算结果表明,本方案的进水流道中没有明显的不良流态。

进一步数值模拟表明不能再降低流道高度,因为降低出水流道高度后流道出口的主流流速增加,并直接冲击出水池,引起出水池中较大的回流和冲刷.造成这种结果的原因是出水流道的平面扩散角已经超过临界扩散角^[5-7],而其主流集中在平面中

部,故平面尺寸虽增大,出口主流流速并未减小;而高度的变化却引起主流流速增加.对于台儿庄泵站这样的装机容量大、年均运行时间长的大型调水泵站,泵站效率稍有下降就会大大增加泵站的运行费用.因此,如若进一步降低出水流道高度,就会大大降低泵站效益,不具可行性.综上,优化方案最终选择流道长13 m,出口宽6.0 m,高4.5 m的出水流道方案。

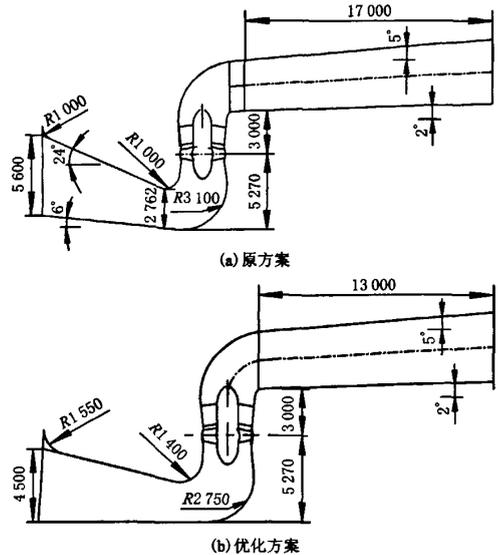


图2 泵装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of pump set model

4 进水流道模型试验结果

根据《水泵模型验收试验规程》(SL 140—97)、《离心泵、混流泵、轴流泵和旋涡泵试验方法》(GB 3216—89)的要求,对带透明进、出水流道的泵装置进行模型试验.进、出水流道的模型是根据优化方案加工制作而成.试验中观察到进、出水流道内基本流态与数值模拟的结果一致,经换算后的原型泵装置特性曲线如图3所示.从测试精度来看,设计工况下测试参数流量 Q 、净扬程 H 、功率 P 、泵装置效率 η 等精度均高于GB 3216—89 B级的要求,测试成果准确可靠.从装置特性曲线上可以查出在水流入泵入泵角度为 0° 时运行, $H=6.0$ m时, $\eta=77.0\%$.试验结果表明:匹配经过优选的进、出水流道后,泵装置效率高,是台儿庄泵站较为理想的流道组合形式,也间接验证了数值模拟的可行性。

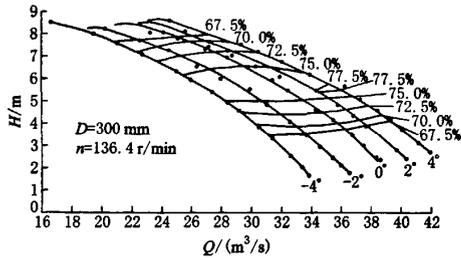


图3 原型泵装置特性曲线

Fig.3 Combined characteristics of prototype pump set model

5 结论

CFD 仿真和模型试验的研究结果表明:

1) 本研究所采用的数学模型, 边界条件(在流场进口设置在距流道进出口足够远处的前提下, 在进水断面处认为来流速度在水平方向上均匀分布, 在铅直方向为对数式分布, 出口按静水压力分布给出)以及流场计算、性能预测的结果是正确的, 泵装置数值模拟优化设计的方法是切实有效的。

2) 相对于单一的流道数值模拟优化设计, 全流道 CFD 仿真的方法更为切实合理、科学有效。

参考文献 (References)

- [1] Constantinescu G S, Patel V C. A numerical model for simulation of pump-intake flow and vortices [J]. *Hydrocarbon Engineering, ASCE*, 1998, 124(2): 123 - 134.
- [2] 陆林广. 泵站进水流道设计理论的新进展 [J]. 河海大学学报, 2001, 29(1): 40 - 45.

LU Lin-guang. Progress in design theory for suction boxes of pumping stations [J]. *Journal of Hehai University*, 2001, 29(1): 40 - 45. (in Chinese)

- [3] 陆林广, 伍杰, 陈阿萍, 等. 立式轴流泵装置的三维湍流流动数值模拟 [J]. 排灌机械, 2007, 25(1): 29 - 32.
- LU Lin-guang, WU Jie, CHEN A-ping, et al. Numerical simulation of 3D turbulent flow in a vertical axial-flow pump system [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2007, 25(1): 29 - 32. (in Chinese)
- [4] Guo Zenglin, Hirano T, Kirk R G. Application of CFD analysis for rotating machinery-Part I: Hydrodynamic, hydrostatic bearings and squeeze film damper [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2005, 127: 445 - 451.
- [5] 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)
- [6] Edward W, Mizan R. Use of computation fluid dynamic modeling to evaluate pump intake performance and develop design modifications [C] // *World Environmental and Water Resources Congress*. Hong Kong: University of Science and Technology Press, 2006.
- [7] Rajendran V P, Constantinescu G S, Patel V C. Experimental validation of a numerical model of flow in pump-take bays [J]. *Hydrocarbon Engineering, ASCE*, 1999, 125(11): 1119 - 1126.

(责任编辑 赵 鸥)