

基于 CFD 的泵装置性能预测方法比较*

张仁田¹ 岳修斌² 朱红耕¹ 姚林碧³

(1. 扬州大学水利科学与工程学院, 扬州 225009; 2. 南水北调东线江苏水源有限责任公司, 南京 210029;
3. 江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 扬州 225009)

【摘要】 以某混流泵装置为例, 采用 CFD 技术分别进行包括进出水流道和水泵在内的水泵装置全流道数值模拟的性能预测和由不带泵进出水流道数值模拟得到的流道效率与泵效率乘积的泵装置性能预测, 并与模型装置试验结果进行比较。结果表明, 根据水泵装置全流道数值模拟方法进行的装置性能与模型试验结果误差较小; 以流道效率与泵效率乘积的方法预测装置效率的误差较大, 仅在最优工况点附近与模型试验泵装置效率近似相等, 引起较大误差的主要原因是基本理论存在不合理性。因此, 建议以进水流道、出水流道和水泵作为整体进行内流数值模拟和装置性能预测, 并在考虑泵对流动影响的情况下进行流道的水力设计优化。

关键词: 泵装置 性能预测 计算流体动力学

中图分类号: TH312; TH313 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)03-0085-06

Comparison on Performance Prediction Methodologies of Low-head Pump Systems Based on CFD

Zhang Rentian¹ Yue Xiubin² Zhu Honggeng¹ Yao Linbi³

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China
2. Jiangsu Water Supply Co., Ltd. for S-to-N Water Diversion Project, Nanjing 210029, China
3. Jiangsu Surveying & Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Yangzhou 225009, China)

Abstract

A mixed-flow pumping system was selected as the study case based on CFD technologies. Two difference methodologies of flow field analysis and performance prediction were conducted. One method was that the system efficiency was the production of pump efficiency with passage efficiency obtained by separate numerical simulation of suction box and discharge passage without pump. The other one was based on the simulation of whole pumping system including the suction box, discharge passage and pump. The predicted results from the two different methodologies were compared with model system test results, which showed that the predicted errors were different. The error of pumping system efficiency was smaller when the numerical simulation of whole pumping system was adopted, while the error was much greater when the system efficiency was predicted by the production of passage efficiency with pump efficiency, approximately equal only near the best efficiency point. The larger errors in predicting pumping system efficiency for the first method were mainly caused by unreasonable theoretic foundation. Therefore, it is suggested that the suction box, discharge passage and pump should be taken as a whole in numerical simulation and performance prediction and the effect of pump should be considered in the optimal hydraulic design of suction box and discharge passage.

Key words Pumping system, Performance prediction, CFD

收稿日期: 2010-05-31 修回日期: 2010-06-08

* “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAB04A03)和国家自然科学基金资助项目(60974099)

作者简介: 张仁田, 教授, 博士, 主要从事泵及泵站工程设计研究, E-mail: r_zhang@yzu.edu.cn

通讯作者: 朱红耕, 教授, 博士, 主要从事泵及泵站工程研究, E-mail: hgzh@163.com

引言

CFD 技术的飞速发展改变了过去多年来一直依赖于水力学理论简化计算和通过模型试验测试确定低扬程泵装置性能的传统方法,通过对泵及其装置内部流场的分析,进而直接进行泵装置在不同工况下的性能预测,构建内特性与外特性之间的联系,为水力优化设计提供了便利,大大节省了资源、时间和费用,因而在工程中得到较为广泛的应用。目前常用的方法主要有两类:一类是计算域无泵仅对进、出水流动进行流场分析,计算其水力损失^[1-2],通过流道效率和泵效率的乘积预测装置效率^[3],这种方法相对简单,只需要知道流道尺寸和泵效率特性即可;另一类方法是将进水流道、出水流动和泵作为整体进行流场分析和装置性能预测,较前一类方法而言,由于涉及到旋转叶轮与静止导叶体之间相互流动耦合以及动静交界面的处理,其模拟计算要复杂得多,而且必须有相应泵(包括导叶体)的木模图,从而在一定程度上限制了该方法的应用,近年来该方法在卧式机组中应用较多^[4-6],并尝试对非稳定工况的性能进行模拟^[7],近期在立式机组中也有应用^[8]。不同的研究成果均认为具有较高的精度,能够满足工程应用的要求,究竟何种方法更与实际情况接近,本文以某混流泵泵站为例,采用上述两类方法在内部流场分析的基础上进行性能预测,并与模型试验结果比较,分析不同方法的特点,为低扬程泵装置性能预测提供参考建议。

1 基本原理

1.1 基于 CFD 的研究方法

无论是单独研究无泵的进水流道、出水流动中水流运动现象,还是对整个泵装置进行研究,都是依据质量守恒、动量定律和能量守恒等基本原理解,建立水流运动数学模型。由于低扬程水泵装置及其流道中的水流速度很低,水的粘度和密度变化不大,可近似认为水的密度不可压缩,因而可采用时均、不可压、粘性、恒定流动的 Navier-Stokes 方程,描述内部流动三维流场,并可以采用 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型闭合动量方程组^[6-8]。有关模型构建、边界条件处理及网格剖分等在文献^[9-10]中已详细说明。

1.2 根据流道损失和泵效率预测性能的基本理论

该方法的基本理论是进水流道的出口为水泵进口提供了符合设计条件的流态,而且水泵的后导叶体出口水流均匀,无剩余环量,即水泵与流道之间的损失(流态)不相互影响,可以分别独立考虑^[3,11],则有

$$H_{\text{pump}} = H_{\text{sys}} + \Delta H \quad (1)$$

$$\eta_{\text{pass}} = \frac{H_{\text{sys}}}{H_{\text{sys}} + \Delta H} = \frac{H_{\text{sys}}}{H_{\text{pump}}} \quad (2)$$

$$\eta_{\text{sys}} = \eta_{\text{pump}} \eta_{\text{pass}} \quad (3)$$

式中 H_{pump} ——泵扬程 η_{pass} ——流道效率
 H_{sys} ——装置扬程(泵站净扬程)
 η_{sys} ——装置效率 η_{pump} ——泵效率

因此根据不同工况点装置扬程对应的流量要求,通过 CFD 分析得到不同流量下的流道损失 ΔH ,即可计算流道效率,再根据式(3)预测相应流量下的装置效率 η_{sys} 。

1.3 以泵装置整体研究预测性能的基本理论

该研究方法基于进水、出水流动与水泵之间存在相互作用与相互影响的理论,将泵装置中进水流道、水泵、出水流动作为一个不可分割的整体进行研究。由于泵装置中进水池与水泵之间通过进水流道连接,在离心惯性力的作用下,速度分布既不均匀,也不是沿着轴向,有偏流角,并不满足水泵设计中要求的轴向、无旋、压力均匀分布条件^[9]。泵装置绝大多数时间是在非设计工况下运行,导叶出口流速和压力分布不均匀,存在横向流速和剩余环量,因此水泵后导叶出口流场必定会对出水流动的水力特性产生影响^[10]。

根据不同流量下的数值模拟结果,由泵装置进口、出口断面的总压差计算泵装置扬程 H_{sys} ,由水泵转速和作用在叶轮上的水力矩计算水泵的轴功率,再由流量、扬程和轴功率直接得到装置效率 η_{sys} ,即水力装置效率,与模型装置试验中扣除空载损耗后的水力装置效率相一致。

2 某混流泵装置性能预测结果

2.1 研究对象

研究对象是南水北调东线工程中兴建的第一座大型混流泵泵站,设计扬程和平均扬程分别为 7.6 m 和 6.4 m,单泵设计流量为 33.4 m³/s。该站采用了全调节导叶式混流泵、配肘形进水流道和虹吸式出水流动的设计方案(图 1),模型泵性能及模型泵装置试验结果如图 2 所示^[12]。

2.2 无泵时流道损失计算与装置性能预测

在进行流道内部流场数值模拟的同时,可根据各计算断面上的流速分布和压力分布,通过积分求得相应断面上压力和流速的质量加权平均值,然后依据 Bernoulli 方程,计算出任意 2 个过流断面之间水力损失的大小,即

$$\Delta h_{i-j} = \left(z_i + \frac{p_i}{\rho g} + \frac{v_i^2}{2g} \right) - \left(z_j + \frac{p_j}{\rho g} + \frac{v_j^2}{2g} \right) \quad (4)$$

式中 Δh_{i-j} ——任意 2 个过流断面之间的水力损失, m

i, j ——过流断面编号

$(z_i + \frac{P_i}{\rho g})$ 、 $(z_j + \frac{P_j}{\rho g})$ —— i 断面和 j 断面的质量加权平均测压管水头, m

$\frac{v_i^2}{2g}$ 、 $\frac{v_j^2}{2g}$ —— i 断面和 j 断面的面积加权平均速度水头, m

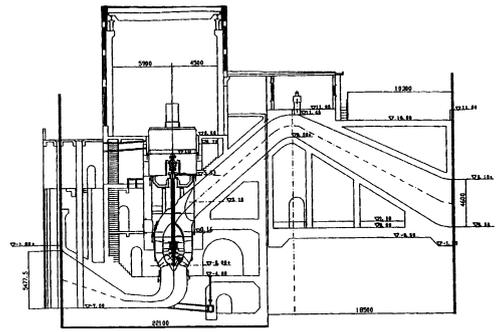


图 1 某混流泵站剖面图

Fig. 1 Section drawing of a mixed-flow pumping station

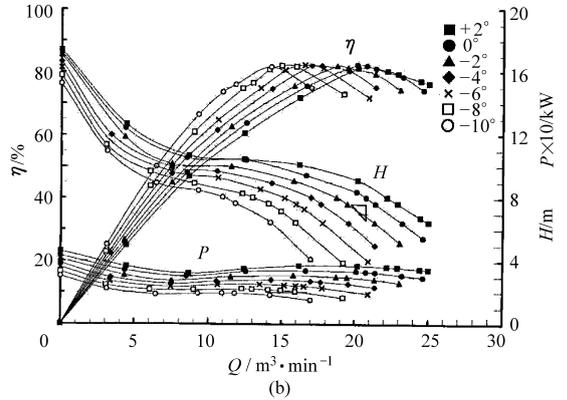
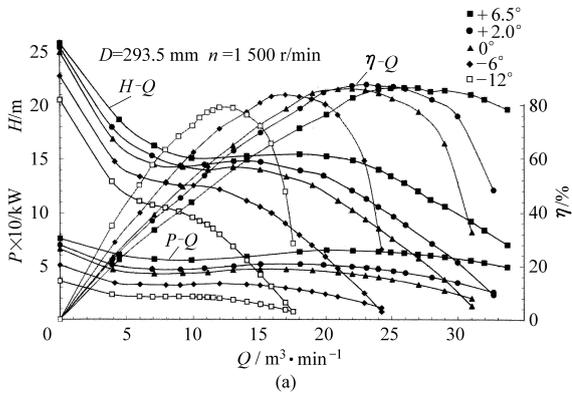


图 2 模型试验综合特性曲线

Fig. 2 Comprehensive performance curves of model tests

(a) 模型泵 (b) 模型泵装置

对图 3 所示的进水流道和出水流道采用商业软件 Fluent 分别进行内部流场数值模拟, 计算的水力损失如图 4 所示, 流道试验的测试结果表明计算的水力损失与测试值完全吻合^[11]。根据不同流量的计算结果可以发现, 进、出水流道的水力损失基本符合 $\Delta H = kQ^2$ 规律, 进水、出水流道的损失系数分别是 3.15 和 2.39, 因此流道总损失可表示为 $\Delta H = 5.54Q^2$ 。为便于比较, 按照模型装置试验的 $Q - H_{sys}$

特性, 并根据上述式(1)~(3)和泵的 $Q - \eta_{pump}$ 特性, 得到泵装置 $Q - \eta_{sys}$ 的关系, 如图 5 所示。

2.3 全装置模拟的性能预测

采用 Fluent 中的前处理器 Gambit 和大型三维工业造型软件 Pro/E, 实现计算域三维实体造型和网格剖分, 采用结构化与非结构化网格相结合的网格剖分方式, 以适应泵站进出水流道、水泵叶轮与导叶体等复杂形体的外形变化。

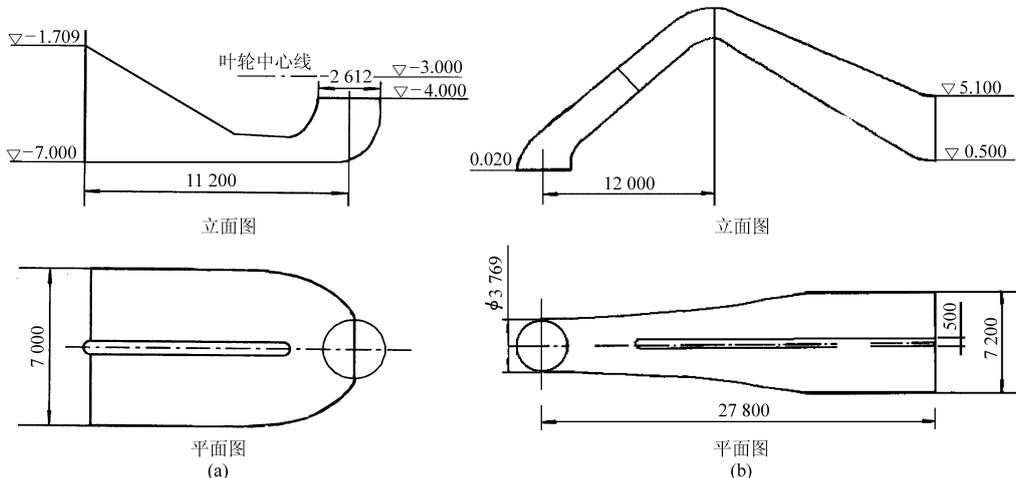


图 3 进水流道和出水流道单线图

Fig. 3 Dimensions of suction box and discharge passage

(a) 进水流道 (b) 出水流道

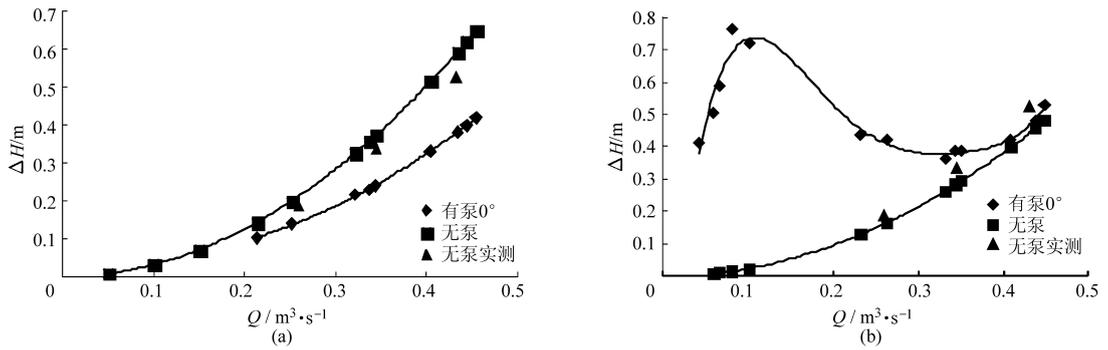


图4 进水和出水流道水力损失

Fig. 4 Hydraulic losses of suction box and discharge passage

(a) 进水流道 (b) 出水流道

为解决水泵叶片与导叶之间旋转流场和非旋转流场之间的相互干扰问题(RSI),把整个计算域分为两个子域,采用多重参考坐标系(MRF),实现两个计算子域之间流场的耦合计算。叶片安放角为 0° 时的装置性能预测结果如图5所示。装置的实体造型如图6所示。

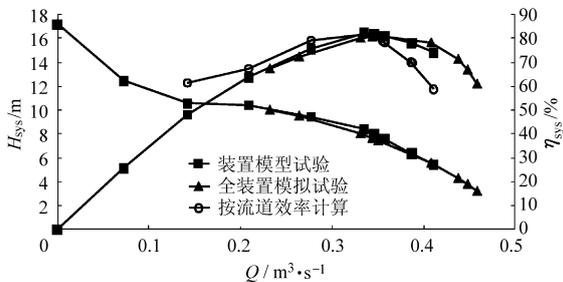


图5 不同方法预测的泵装置性能与试验结果对比

Fig. 5 System performances comparison between different prediction methods and model tests

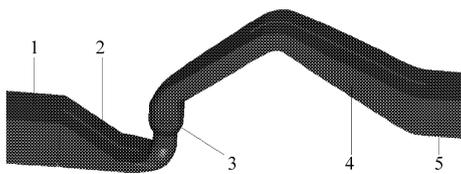


图6 混流泵装置实体造型图

Fig. 6 3-D calculation domain of a mixed-flow pump system

1. 前池 2. 进水流道 3. 水泵叶轮及后导叶体 4. 出水流道
5. 出水池

3 两种方法预测结果对比与分析

3.1 预测结果对比

以不同方法预测装置性能与模型试验结果的对比如图5所示。从图5可以发现,除了最优工况点附近三者较为接近外,采用流道效率与泵效率乘积方法得到的装置效率与模型试验结果存在较大的差异,随着流量的增加,误差越明显;采用全装置数值模拟方法得到的装置性能更接近模型试验结果。不同流量下的装置效率对比如表1所示。

表1 不同工况下的装置效率对比

Tab. 1 Comparison of system efficiencies in various operational conditions

工况	流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$		
	0.277	0.346	0.415
流道效率与泵效率乘积方法	79.13	80.27	57.72
全装置模拟方法	73.42	81.28	76.88
模型试验结果	75.51	81.99	73.77

3.2 预测结果误差原因分析

(1) 基本假设的不合理性

按照水泵与流道之间的损失不相互影响的假设,可由装置扬程下流量确定流道损失 ΔH 后得到泵扬程 $H_{\text{pump}} = H_{\text{sys}} + \Delta H$,因此导致装置中泵的 $Q-H_{\text{pump}}$ 关系仅与流道损失有关,而与所采用的泵自身特性无关,即装置特性决定泵特性,这显然是不合理的,与实际情况也不相符。

在流道效率与泵效率乘积方法中, ΔH 为装置的进水和出水流道损失之和,由式(1)可得到

$$\Delta H = H_{\text{pump}} - H_{\text{sys}} \quad (5)$$

在同一流量下,根据式(2)和式(3)中的效率关系还可以得到

$$\Delta H = H_{\text{sys}} \left(\frac{\eta_{\text{pump}}}{\eta_{\text{sys}}} - 1 \right) \quad (6)$$

或

$$\Delta H = H_{\text{pump}} \frac{N_{\text{sys}}}{N_{\text{pump}}} - H_{\text{sys}} \quad (7)$$

式中 N_{sys} ——装置特性下的轴功率

N_{pump} ——泵特性下的轴功率

当 $\frac{N_{\text{sys}}}{N_{\text{pump}}} = 1$ 时,式(7)可简化为式(5),但实际

情况两项轴功率并不相等,因此从基本假设得出关于流道损失确定方法本身就是相互矛盾的结果。

(2) 两种方法内部流场的差异性

图7为设计流量 $Q = 0.346 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,在有泵与无泵两种情况下,进水流道弯曲段纵剖面速度分布

的比较,有泵与无泵情况下进水流道内部流动存在显著差异。在水泵装置中,由于水泵叶轮的旋转和水的粘性作用,进水流道出口断面上的流速分布发生了一定的变化,流态也与单独进行的无泵进水流道数值计算时的单向出流假设不同。

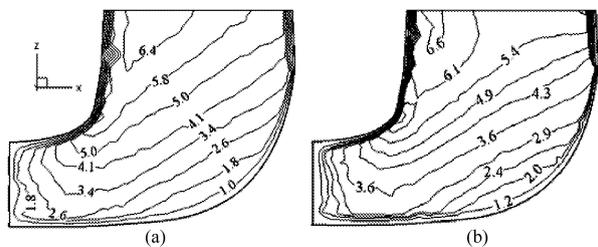


图 7 进水流道弯曲段速度分布图

Fig.7 Velocity distribution of elbow segment in suction box

(a) 无泵 (b) 有泵

同一流量有泵与无泵两种情况下,该肘形进水流道出口断面的轴向流速分布对比如图 8 所示,有

泵运行时,进水流道出口断面的流速分布特性有所改善,流道出口断面轴向流速分布均匀度提高,加权平均入泵水流偏流角减小,有利于装置效率的提高。设计流量下进水流道出口断面流速特征比较如表 2 所示。

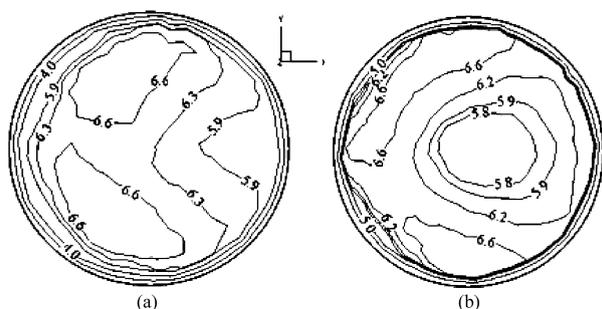


图 8 进水流道出口断面轴向速度分布图

Fig.8 Axial velocity distribution of outlet section in suction box

(a) 无泵 (b) 有泵

表 2 进水流道出口断面流态的比较 ($Q = 0.346 \text{ m}^3/\text{s}$)

Tab.2 Comparison between flow fields of outlet section in suction box ($Q = 0.346 \text{ m}^3/\text{s}$)

流动特性	最大流速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	最小流速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	均匀度/%	最大偏流角/ $(^\circ)$	最小偏流角/ $(^\circ)$	平均偏流角/ $(^\circ)$
无泵	6.92	4.54	92.80	10.74	1.57	5.43
有泵	6.97	5.20	93.87	8.29	1.00	4.51

数值计算结果表明,与均匀、轴向和无旋的无泵运行的理想进水条件相比,有泵运行的虹吸式出水流道,进口流速分布非常紊乱,明显存在切向流速,即使在设计流量工况下,进口水流也不是轴向、均匀和无

旋的。水泵装置扬程越高,导叶出口水流的剩余环量也越大,速度分布的均匀性也越差。表 3 为设计流量下驼峰断面和出口断面流速分布对比结果,驼峰断面均匀度下降 13.68%,出口断面下降 15.81%。

表 3 虹吸式出水流道关键断面流速分布特性比较 ($Q = 0.346 \text{ m}^3/\text{s}$)

Tab.3 Comparison between velocity distributions of main sections in siphon discharge passage ($Q = 0.346 \text{ m}^3/\text{s}$)

关键断面	无泵				有泵			
	最大流速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	最小流速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	平均流速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	均匀度/%	最大流速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	最小流速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	平均流速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	均匀度/%
驼峰断面	4.72	0.08	2.59	69.10	5.05	0.04	2.59	55.42
出口断面	2.21	-0.16	1.03	53.38	2.89	-0.05	1.03	37.57

(3) 两种方法流道损失比较

因对比分析的需要,在全装置模拟中也可以采用式(4)计算进水、出水流道的水力损失。由于流道内流速和压力分布不同,尤其是出水流道中存在剩余环量的影响,两种情况的流道损失明显不同,不同流量下计算的损失值如图 4 所示。在进水流道中,由于泵的存在,均匀度有所改善,因此有泵的水力损失小于无泵的水力损失,但仍基本符合 $\Delta H = kQ^2$ 规律;而对出水流道,有泵时的水力损失随流量的变化规律极其复杂,不再符合 $\Delta H = kQ^2$ 规律,仅在最优工况点附近两者接近,不同型式的出水流道

均存在这种现象^[13]。造成这种水力现象的主要原因是由水泵叶轮的旋转造成的,导叶体出口剩余环量和切向流速的存在,引起了流道内部流场和水力特性的变化。

4 结论

(1) 采用 CFD 方法分别模拟低扬程泵站的进水流道、出水流道的流场,预测流道水力损失且有较高的精度;采用 CFD 方法模拟全装置流场并预测装置性能是可行的,并与模型泵装置试验结果吻合。

(2) 采用流道效率与泵效率的乘积预测装置效

率仅在设计工况点附近近似相等,其主要原因是基本假设存在不合理性,流道与泵之间存在相互影响,这种影响既有正面的,也有负面的,即实际上水泵装置流道中的水力损失不再符合水力学中有压管道流动的基本定律。

(3)为较准确可靠地预测泵装置的性能,应采用全装置,即包括进水流道、水泵、出水流道的整体

进行CFD数值模拟;采用不考虑泵的进水流动和出水流动水力损失预测装置性能存在较大的误差,除了在设计初期估算设计工况点性能外,不宜采用。

(4)在进行低扬程泵装置水力优化设计时,建议在水泵装置全流道数值模拟的基础上考虑泵对进水流道和出水流道的影响,进行进、出水流道水力优化设计,否则可能会导致不正确的优化结果。

参 考 文 献

- 1 陆林广,徐磊,梁金栋,等. 泵站进水流道三维流动及水力损失数值模拟[J]. 排灌机械, 2008, 26(5):55~58.
Lu Linguang, Xu Lei, Liang Jindong, et al. Numerical simulation of 3D turbulent flow and hydraulic loss of inlet conduit for pumping station [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2008, 26 (5): 55 ~ 58. (in Chinese)
- 2 陆林广,刘军,梁金栋,等. 大型泵站出水流道三维流动及水力损失数值计算[J]. 排灌机械, 2008, 26(3): 51~54.
- 3 邓东升,刘军,王亦斌. 低扬程泵装置选型设计一些问题的思考[J]. 南水北调与水利科技, 2008, 6(4):42~45.
Deng Dongsheng, Liu Jun, Wang Yibin. The selection and design for low head pump system [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008, 6 (4): 42 ~ 45. (in Chinese)
- 4 李龙,王泽. 轴伸式贯流泵装置全流场三维湍流数值模拟[J]. 机械工程学报, 2007, 43(10):62~66.
Li Long, Wang Ze. Numerical simulation of 3D viscous flow in tubular pumping station on dual-directional operation [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43 (10): 62 ~ 66. (in Chinese)
- 5 施法佳,陈红勋,张计光. 双向竖井贯流式水泵装置内部湍流流动分析[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(7): 598~600.
Shi Fajia, Chen Hongxun, Zhang Jiguang. Analysis on interior turbulent flow within bidirectional tubular pump arrangement with SILO [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27 (7): 598 ~ 600. (in Chinese)
- 6 陆林广,陈坚,梁金栋,等. 灯泡贯流泵装置的优化水力设计[J]. 水利学报, 2008, 39(3):355~360.
Lu Linguang, Chen Jian, Liang Jindong, et al. Optimal hydraulic bulb tubular pump system [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39 (3): 355 ~ 360. (in Chinese)
- 7 彭光杰,王正伟,罗永要,等. 大型斜轴伸泵站近零扬程流场仿真[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2007, 47(11): 2006~2009.
Peng Guangjie, Wang Zhengwei, Luo Yongyao, et al. Simulations of near-zero head flow in a large slanted axial flow pumping station [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2007, 47(11): 2006 ~ 2009. (in Chinese)
- 8 成立,刘超,汤方平,等. 基于 RNG 紊流模型的立式轴流泵站三维流道数值模拟及性能预测[J]. 机械工程学报, 2009, 45(3):252~257.
Cheng Li, Liu Chao, Tang Fangping, et al. 3D numerical simulation and performance predication of vertical axial flow pumping station by RNG turbulent model [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(3): 252 ~ 257. (in Chinese)
- 9 朱红耕,袁寿其,刘厚林,等. 进水流道对立式混流泵装置能量特性的影响[J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2007, 28(1):46~50.
Zhu Honggeng, Yuan Shouqi, Liu Houlin, et al. Influence of suction box on energy characteristics of vertical mixed-flow pumping systems [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2007, 28(1): 46 ~ 50. (in Chinese)
- 10 朱红耕. 非设计工况下虹吸式出水流道内流数值分析[J]. 水力发电学报, 2006, 25(6):140~144, 148.
Zhu Honggeng. Numerical analysis on internal flow of siphon discharge passages under off-design conditions [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006, 25(6): 140 ~ 144, 148. (in Chinese)
- 11 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.
- 12 张仁田,陆永泉. 宝应泵站水泵装置模型验收试验[J]. 水泵技术, 2005(3):1~6.
- 13 朱红耕,张仁田,刘军,等. 水泵转速变化对进出水流道水力损失的影响[J]. 农业机械学报, 2009, 40(6):76~80.
Zhu Honggeng, Zhang Rentian, Liu Jun, et al. Inference of rotational speed of pumps on hydraulic losses in suction and discharge passages [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40 (6): 76 ~ 80. (in Chinese)