

特低扬程泵站水力性能研究

蒋小欣¹, 王玲玲², 郑源², 李龙², 张仁田³

(1. 苏州市水务局, 江苏 苏州 215011; 2. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098;
3. 江苏省水利勘测设计院有限公司, 江苏 扬州 225000)

摘要 采用数值计算和物理模型试验方法研究特低扬程泵站的水力性能,并以苏州市东风新平面 S 形轴伸泵为例,对其内、外特性,包括装置的水力性能、流道沿程典型断面流速分布、空化特性及进出水流道的水头损失进行分析研究。通过对数值模拟计算及物理模型试验成果的逐项对比,证明数值模拟方法在特低扬程泵装置性能研究中具有良好的应用价值,特别是在高效率附近区域,数值模拟计算成果具有良好的精度。对断面流速分布和流道水力损失等内特性的进一步分析,揭示了不同工况下泵站性能差异的原因,为进一步优化流道型线提供了依据。

关键词 低扬程泵;水力性能;数值模拟计算;物理模型试验;速度分布;空化特性

中图分类号 TV675 **文献标识码** A **文章编号** 1006-7647(2007)05-0010-04

Study on hydraulic characteristics of low lift head pumping station//JIANG Xiao-xin¹, WANG Ling-ling², ZHENG Yuan², LI Long², ZHANG Ren-tian³(1. Suzhou Water Affairs Bureau, Suzhou 215011, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Jiangsu Water Conservancy Survey and Design Institute, Yangzhou 225000, China)

Abstract : The numerical simulation method and physical model test were used for study of the hydraulic performance of the low lift head pumping station. With the S-shaped Dongfengxin horizontal axial-flow pump of Suzhou City as an example, the hydraulic performance of the device, the flow velocity distribution in typical cross-section, the cavitation characteristics, and the water head loss in inlet and outlet channels were analyzed. The comparison of the results of the above two methods shows that the numerical simulation method is effective for study of the hydraulic characteristics of the low lift head pumping device, especially, the result of numerical simulation is of high precision near the high efficiency region. The further analysis of the flow velocity distribution in cross-section and water head loss in flow channel reveals the cause of performance difference of pumping stations under different operational conditions, and the result provides a basis for further optimization of the shape of flow channels.

Key words : low lift head pump; hydraulic performance; numerical simulation; physical model test; velocity distribution; cavitation characteristic

为满足城市防洪、排涝、灌溉等应用要求,特低扬程泵站的建设需求越来越大。苏州市城市中心区防洪工程规划新建的 11 座水利枢纽中,共有 9 座泵站设计净扬程仅为 0.88 ~ 1.20 m。特低扬程泵站往往运行时间较短、运行可靠性要求较高^[1]。研究该类泵站的水力性能,选择合适的泵型和流道形式,提高防洪工程中泵站建设水平,保证泵站运行的可靠性,已成为亟待研究的课题。

各类泵型中,卧式轴流泵机组对低扬程泵站较为适用。由于卧式轴流泵研制时间较短,其基础理论、设计方法等研究成果尚不多见,性能优良的水力模型极为有限^[2]。目前已建成的此类泵站较少,具有长期成功运行经验的低扬程卧式轴流泵站更是少

之又少^[2],因此,对卧式轴流泵及泵站的基础理论和水力性能进行研究,指导低扬程泵和泵站的开发建设,具有极大的理论意义和实用价值^[1,3]。

研究确定泵和泵站性能最直接、最可靠的方法是对实型泵的外特性进行物理模型试验测量^[3]。试验工作历时长、投资大,研究工况及组次有限。与物理模型试验相比,数值模拟 CFD 技术具有快速、便捷、模拟成果丰富和信息全面的特点,随着数值模拟仿真程度的提高,运用数值模拟技术可以对水泵内特性进行非定常全三维精细模拟,对水泵内部流动结构和规律进行精细模拟,对多方案进行快速比选,因此该项技术已成为水泵研究中最重要的方法和手段^[4,5]。

本文同时采用数值模拟计算、物理模型试验方法,以苏州市东风新平面 S 形轴伸泵为例,对其内部流动特性进行研究,探索其流动结构和规律,揭示该类泵和泵站流道结构尺寸及装置形式对外特性的影响,预测泵及泵站性能。

1 工程概况

东风新泵站是苏州市城市防洪工程中的主要泵站,该泵站具有排涝和调水双向运行要求,泵站采用平面 S 形卧轴轴伸布置的结构形式,配双向叶轮(S 形叶型),机组叶轮直径 1450 mm、单机流量 $5 \text{ m}^3/\text{s}$ 、水泵转速 $225 \text{ r}/\text{min}$,电动机与水泵通过齿轮箱连接,齿轮箱速比为 4.5。全站共安装机组 3 台套。泵站水位组合与特征扬程见表 1。泵站由进水池、泵房、出水池等部分组成。进出水流道如图 1 所示。

表 1 东风新泵站特征水位与特征扬程 m

工况	设计水位		最低水位		最高水位		净扬程		
	站上	站下	站上	站下	站上	站下	设计水位	最低水位	最高水位
调水	2.81	3.50	2.51	2.90	3.30	3.50	0.34	0.00	0.99
排涝	3.10	4.29	2.80	3.30	3.80	5.20	1.19	0.00	2.40

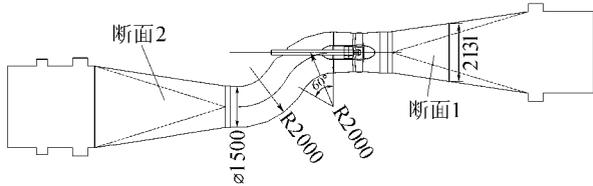


图 1 泵站流道及流速实测断面示意图

2 泵站装置水力模型

为获得泵及整体装置的水力性能,在多功能试验台上对泵装置进行水力性能、气蚀及飞逸特性试验。同时采用 CFD 模型对同尺度模型泵连同试验中的进水罐、出水箱进行数值模拟(模拟区域如图 2 所示),以使数值模拟结果与物理模型试验结果具有可比性。计算模型建立了叶片安放角为 $\pm 4^\circ$, $\pm 2^\circ$ 及 0° 共 5 个叶轮模型,叶轮为 4 片叶片,叶轮直径为 300 mm,转速为 $1087.5 \text{ r}/\text{min}$,导叶 7 片,为排涝工况时的后置导叶。

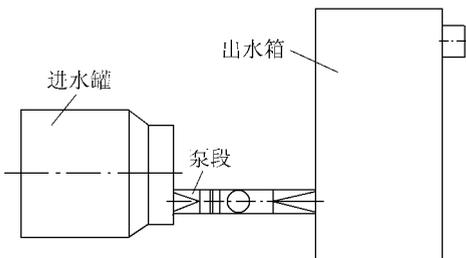


图 2 研究区域示意图

3 研究方法

3.1 物理模型试验方法

物理模型试验在河海大学水力机械多功能试验台上进行。试验的主要参数包括装置扬程 H 、流量 Q 、扭矩 M 及转速 n 。流量从大到小依次测试 15 ~ 24 点。采用等扬程方法进行模型试验研究,即保持原型、模型 nD 值相等选择试验工况。空蚀试验采用能量法,通过系统回路抽真空,逐步减少有效空蚀余量,根据效率下降 1% 确定临界空蚀余量。选择流道上若干典型断面(图 1 给出其中两个断面)采用五孔探针进行流速测试。断面 1 位于正向进水流道上,断面 2 位于正向出水流道上。

3.2 CFD 数值计算方法

数值计算的区域包括泵段、进出水流道及进水罐和出水箱,如图 2 所示。计算模型的尺度和物理模型试验的模型泵尺度完全一致。采用非结构化网格^[6]剖分计算域,对模型泵各种运行工况下的流场进行数值模拟,进而获得泵及装置的水力性能。数值模拟过程中,对模型泵各速度测点进行监测,再将监测结果与物理模型实测成果进行对比分析,据此对数值模拟及物理模型试验的适用性作出分析和评价。

4 成果及分析

4.1 装置性能

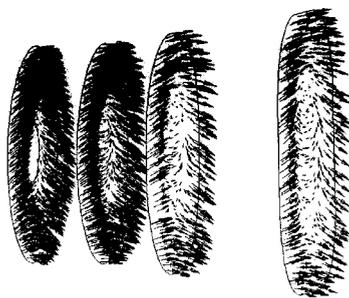
数值模拟计算中考虑了水力损失,因此预测的装置性能主要是水力性能。在模型试验实测数据中扣除了空载损耗,因此所得出的也是装置水力性能,两者具有可比性。

图 3 为数值模拟计算得出的特定工况下的流速矢量图,图 4、图 5 分别为排涝及调水工况下装置水力性能数值模拟与物理模型试验成果对比。

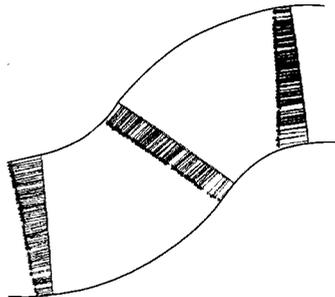
4.1.1 排涝工况

不同叶片安放角下的数值模拟计算成果与物理模型试验结果表明,两种方法预测得到的性能曲线趋势相同,数值相近。效率与流量关系曲线趋势吻合良好且随叶片角度的加大,吻合程度提高。计算结果还表明,在同一流量下,CFD 预测的效率略低于模型实测值。叶片安放角 -4° , -2° , 0° 和 $+2^\circ$ 工况时,试验实测数据与 CFD 预测数据的扬程-流量关系曲线均有交点,该交点随着叶片安放角的减小向高扬程工况点偏移。在流量大于交点流量的工况点,CFD 预测的扬程值稍低于模型实测值;在流量小于交点流量的工况点,CFD 预测的扬程值稍高于模型实测值。

根据模型试验结果,最优工况为叶片安放角在



(a)调水工况出水渠道沿程断面



(b)排涝工况弯管断面

图3 流场矢量图

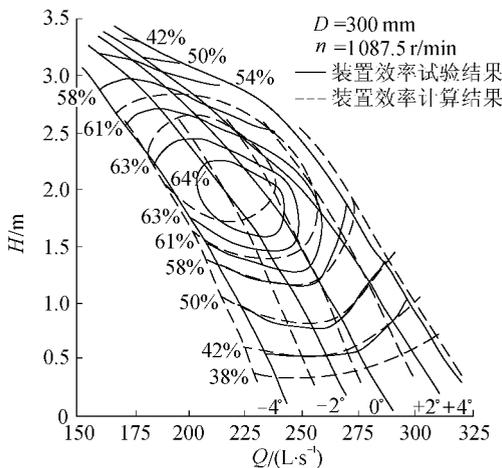


图4 排涝工况装置性能成果

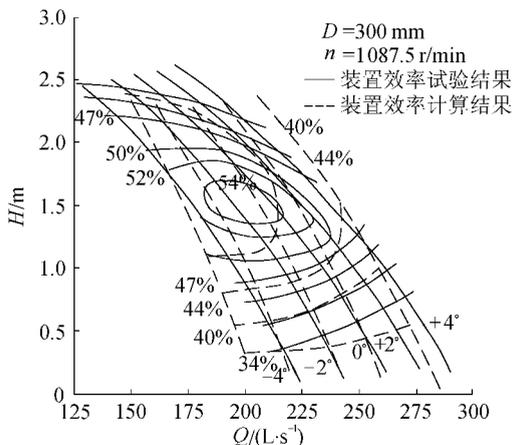


图5 调水工况装置性能成果

-2°时,模型装置最高效率为65.49%,对应的流量为221 L/s,扬程为1.846 m。从图4、图5中可以发现,模型试验实测与CFD预测的扬程-流量曲线的交点在流量为220 L/s左右,扬程约为1.8 m,此处即

为最佳工况附近、高效率区范围。该结果表明,CFD预测的结果在最优工况点附近完全满足工程应用的精度要求。

4.1.2 调水工况

不同叶片安放角下的CFD预测成果与模型试验实测数据对比曲线如图5所示。调水工况的CFD数值模拟预测性能曲线与物理模型实测性能曲线吻合的趋势与排涝工况的基本相似。与扬程-流量曲线类似,在不同叶片安放角下效率-流量关系曲线的数值模拟计算结果与物理模型试验实测结果均出现交点,且随叶片安放角度的加大,效率与流量关系曲线的数值模拟计算结果与物理模型试验实测成果吻合程度有所提高。

根据模型试验结果,最优工况为叶片安放角-2°时,模型装置最高效率为55.19%,对应的流量为195 L/s,扬程为1.52 m。从图5可以发现,模型试验实测与CFD预测的效率-流量曲线的交点在流量为185 L/s左右,扬程约为1.70 m处,与最佳工况点相比略有抬高。

4.2 流道速度分布

对试验过程中5组排涝及调水工况下装置沿程4个代表性断面的轴向速度分布,CFD计算结果与模型试验结果进行对比分析,图6、图7给出了其中2个断面的结果(断面位置见图1)。图中虚线为CFD计算结果,实线为实测结果。横坐标表示流速大小,纵坐标表示测针水深,因此图中所示曲线为速度在垂向的分布。由于排涝工况与调水工况水流流

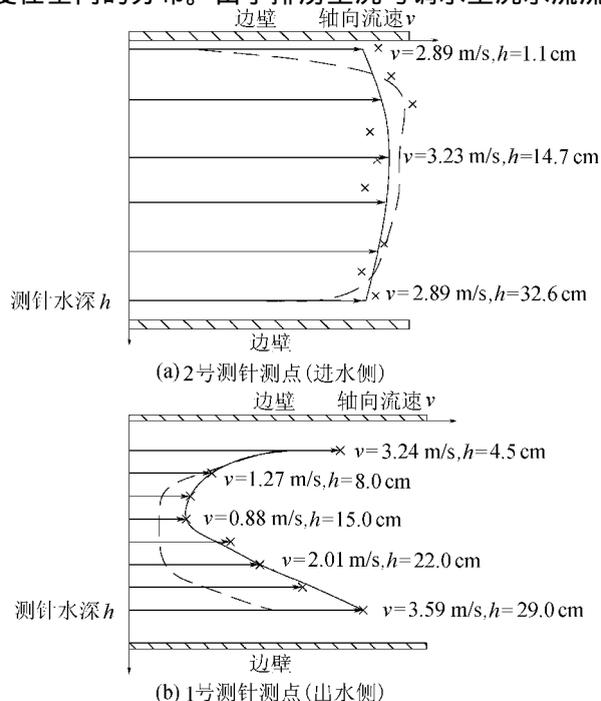


图6 调水工况典型断面轴向流速成果

(扬程0.34 m,转角0°,流量258 L/s)

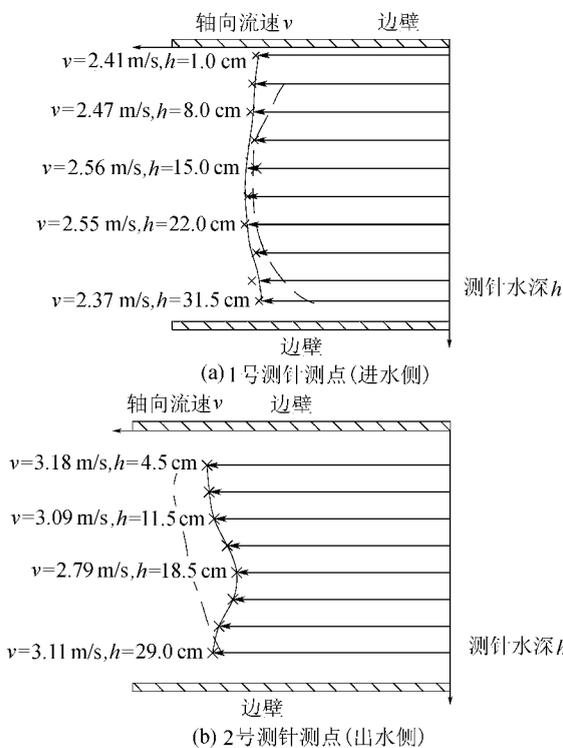


图7 排涝工况典型断面轴向流速成果
(扬程 1.20 m, 转角 0°, 流量 258 L/s)

向相反,故图中2种工况横坐标轴方向相反。

图6为调水工况进出水流道上典型断面轴向流速的数值模拟计算与物理模型试验成果对比。比较表明,调水工况运行时,断面速度分布曲线形状和趋势总体相近,进水流道各断面计算与实测速度吻合程度较好;出水流道由于水体紊动剧烈,数值模拟计算与物理模型试验成果吻合程度低于进水流道。在同一叶片安放角下,小流量工况的吻合程度好于大流量工况;在不同叶片安放角下,小角度成果优于大角度成果。

图7为排涝工况进出水流道上典型断面轴向流速的数值模拟计算及物理模型试验成果对比。比较表明,数值模拟计算和物理模型试验成果的曲线形状和趋势总体上相近,进水流道1号断面模型实测与数值计算的轴向速度分布吻合程度好于出水流道上的2号断面,这与调水工况相同。在同一叶片安放角下,小流量工况的吻合程度好于大流量工况,这一点也与调水工况相同。

4.3 流道水力损失

运用数值模拟计算和物理模型试验对不同工况的进水流道和出水流道水力损失进行研究,所取测量断面位置相同。

4.3.1 排涝工况

排涝工况下进水流道为直收缩管,若不考虑水泵转动对流道中流态的影响,其流动应符合水力学的基本规律,且与叶片角度无关,即局部水头损失为

$\Delta h_L = \xi \frac{v^2}{2g}$,沿程摩阻损失为 $\Delta h_f = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$ 。根据进水流道模型的基本尺寸与形状,局部损失包括了进口损失和收缩损失,损失系数分别为 0.25 和 0.10,流道的粗糙度 $n = 0.12$,计算得到进水流道的水头损失 $\Delta h = 3.4391 Q^2$ 。对 CFD 分析及模型实测进水流道水力损失与流量关系成果作回归分析,可以得出不同叶片安放角下实测水头损失的平均值 $\Delta h = 3.5609 Q^2$,与计算值接近。CFD 预测值 $\Delta h = 4.1587 Q^2$,大于实测值和理论计算值,且随着叶片安放角增大,进水流道损失有减小趋势。

将流道损失分析结果与能量特性曲线进行进一步对比可以发现,损失分析与性能预测的结果可以得出同样的结论,即损失小意味着效率高。

4.3.2 调水工况

对调水工况下不同叶片安放角的进水流道水头损失数值模拟计算及物理模型实测结果进行同样的分析,假定进水流道的水力损失符合水力学的基本规律,将两组研究成果在不同叶片安放角下进行进水流道水力损失与流量关系的回归分析,可以发现,与排涝工况类似,CFD 计算结果存在一定的规律,即随着叶片安放角增大,进水流道水头损失有减小趋势,计算得的平均水头损失 $\Delta h = 3.5373 Q^2$,而物理模型实测得对应的水头损失平均为 $\Delta h = 4.212 Q^2$ 。

4.4 叶片进口压降与 NPSH 关系分析

叶片发生空化的主要原因是叶片某部位压力降低,且低于汽化压力。因此,在大部分情况下叶片进口的压降与必需的 NPSH 值之间存在内在的联系。在 CFD 分析过程中,针对不同叶片安放角、不同流量工况点进行了叶片进水边最低压力分析,预测进口压降。图8为排涝工况和调水工况时预测的叶片压降与实测 NPSH 值的对比曲线,从图中可以发现,两者的对应关系较好,流量增大时压降减小,NPSH 值也减小。本文的计算结果表明效率最高点与 NPSH 最低点并不完全重合,该结论也反映在其他相关文献中^[7]。因此,借助 CFD 的压降预测分析叶轮的气蚀性能是完全可行的。

5 结 语

通过装置性能、流速分布和水力损失等成果的数值模拟及物理模型成果对比分析可以看出,利用 CFD 分析方法预测装置能量特性、分析流速分布、计算水力损失和叶片进口压降,具有良好的工程实用价值,在一定程度上可以代替或部分代替费时耗物的物理模型试验。

(下转第 89 页)

[20] 刘晓波, 黄其柏. 水轮发电机组故障诊断模糊专家系统研究[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(1): 71-73.

[21] SORSA T, HEIKKI N, KOIVO H N. Application of artificial neural networks in process fault diagnosis[J]. Automatica, 1993, 29(4): 843-849.

[22] 德吉措姆, 蔡天富, 田国良. BP 网络在水轮发电机组振动故障诊断中的应用研究[J]. 四川电力技术, 2000(4): 3-6.

[23] 余晓晖, 杜林, 陈明英, 等. 基于 BP 神经网络的水轮机调速系统故障诊断[J]. 重庆大学学报, 2001, 24(6): 71-74.

[24] 杨晓萍, 解建宝, 孙超图. 水轮发电机组振动故障诊断的神经网络方法研究[J]. 水利学报, 1998(4): 94-97.

[25] 贾嵘, 白亮, 刘峰. 基于神经网络的水轮发电机组振动故障诊断专家系统[J]. 水力发电学报, 2004, 23(6): 120-123.

[26] 熊建秋, 李祚泳, 汪嘉杨, 等. 基于 PNN 的水轮发电机组振动故障诊断[J]. 水力发电, 2005, 31(7): 55-57.

[27] 彭兵, 周建中, 付波, 等. 径向基神经网络在水轮发电机组故障诊断中的应用[J]. 水电自动化与大坝监测, 2006, 30(1): 35-38.

[28] 洪治, 李国宏, 蔡维由, 等. 基于小波包分析的水轮发电机组振动的故障诊断[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2002, 35(1): 65-68.

[29] 桂中华, 韩凤琴. 小波包——最大熵谱估计及其在水轮机故障诊断中的应用[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(2): 62-66.

[30] BUCKLEY J J, HAYASHI Y. Fuzzy neural networks: a survey[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1994, 66: 1-13.

[31] 桂中华, 韩凤琴. 小波包特征熵神经网络在尾水管故障诊断中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 99-103.

[32] 余波, 张礼达, 王辉. 水轮机故障诊断专家系统的一种模糊诊断方法[J]. 水力发电, 2004(4): 38-39.

[33] 陈喜阳, 张克危, 彭玉成. 基于多种诊断方法的水电机组故障诊断系统的研究[J]. 水力发电, 2003, 29(5): 23-26.

[34] BOAMANS R F, HEWITT J A. Expert system for machinery vibration diagnostics [C]//MUSZYNSKA A. Vibrational Diagnostics of Rotating Machinery Malfunctions. New York: ASME, 1992: 365-371.

[35] SMITH D J. Artificial intelligence—today's new design and diagnostic tool[J]. Power Engineering, 1989, 93(1): 26-30.

(收稿日期: 2006-10-10 编辑: 熊水斌)

(上接第 13 页)

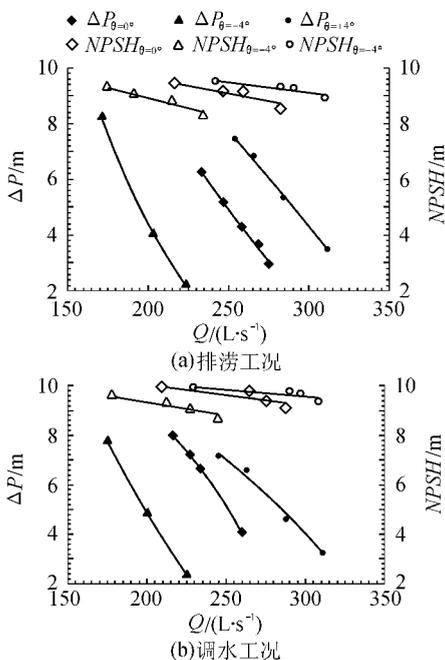


图 8 叶片进口压降 ΔP 与 $NPSH$ 的关系

研究成果表明, 泵装置外特性到内特性之间存在着一定的关联性。CFD 预测的效率与模型实测效率非常接近, 流道损失也基本相同。从对比分析的结果来看, 在一定的流量范围内, 尤其是接近最优工况点附近, 采用 CFD 方法预测装置的能量特性是可行的, 通过叶片进水边压降与 $NPSH$ 值的对比, 表明

两者存在明显的相关性。因此, 数值模拟方法能够应用于工程中进行不同的方案比选和初步的能量及空化特性的确定; 流速分布和流道的损失等内特性的进一步分析, 可以揭示不同工况下泵性能存在差异的原因, 为进一步优化流道指明了努力的方向和研究的重点^[8]。

参考文献:

[1] 刘超. 水泵及水泵站[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 2002: 187-197.

[2] 储训, 陈履. 大型泵站建设和更新改造对策[M]. 南京: 河海大学出版社, 2000: 52-56.

[3] 郑源, 张德虎, 刘益民, 等. 贯流泵装置能量特性试验研究[J]. 流体机械, 2003(2): 1-4.

[4] 蒋小欣, 李龙, 王玲玲, 等. 双向贯流泵装置特性数值研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2005, 33(1): 81-84.

[5] 蒋小欣, 王玲玲, 李龙. 数值模拟及可视化技术在旋转水力机械设计中的应用[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2006, 34(4): 409-413.

[6] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 64-97.

[7] 谢伟东, 陈卫东, 韩仕宾, 等. 秦淮新河抽水站水泵改造项目研究[J]. 江苏水利, 2000(7): 24-25.

[8] 李龙. 泵优化设计现状及发展趋势[J]. 水泵技术, 2003(2): 8-120.

(收稿日期: 2006-08-08 编辑: 高建群)