排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2016 年 7 月 July 2016 | 第 34 卷 第 7 期 Vol. 34 No. 7

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.15.0175

大型双向流道泵装置优化匹配与试验研究

黄良勇[1]，吴忠[1]，张啸[1]，李彦军[2]
（1.江苏省太湖治理工程建设管理局，江苏 无锡 214000；2.江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心，江苏 镇江 212013）


黄良勇

摘要：研究了一种双向流道立式泵装置，综合考虑了进水流道出口流速分布均匀度和进水流道水力损失2个目标函数，应用CFD技术对双向进水流道喇叭口悬空高度进行了多方案的优化比选，当悬空高等于0.57D（D为水泵叶轮直径）时进水流道水力损失增加较小，且流道出口流速分布均匀度最好.通过对出水流道喇叭管出口高度的多方案计算比较，得到双向出水流道扩散喇叭管出口高度对流道水力性能的影响规律：当出水流道扩散喇叭管的高度较高时，流速较大，流道水力损失较大；随着扩散喇叭管高度的逐渐降低，出水流道水力损失逐渐减小；当喇叭管的高度降低到一定程度，水力扩散损失占据主导作用，随着喇叭管高度的进一步降低，其水力扩散损失越来越大；当喇叭管出口至流道顶板高度等于0.48D时，对应的出水喇叭管高度为最优.将优化匹配的双向进出水流道配置优选的水泵模型，进行泵装置模型试验，在低扬程3.26 m时，装置效率可达71.2%，可为同类型泵装置的优化设计提供参考.

关键词：水力机械；泵装置；双向流道；三维流动；模型试验
中图分类号：S277.9；TV136　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2016)07-0602-06

黄良勇，吴忠，张啸，等. 大型双向流道泵装置优化匹配与试验研究[J]. 排灌机械工程学报,2016,34(7):602-607.

HUANG Liangyong, WU Zhong, ZHANG Xiao, et al. Hydrodynamic optimization of large pump installation with two-way channel and experiment[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME), 2016,34(7):602-607. (in Chinese)

Hydrodynamic optimization of large pump installation with two-way channel and experiment

HUANG Liangyong[1], *WU Zhong*[1], *ZHANG Xiao*[1], *LI Yanjun*[2]
(1. Taihu Treatment Project Construction Administration Bureau, Jiangsu Province, Wuxi, Jiangsu 214000, China; 2. National Research Center of Pumps, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: Large vertical pump installations with two-way channel have been widely used in reversible pumping stations. However, the optimal design theory and method for the two-way channel remain imperfect, causing a low hydraulic efficiency in such an installation. Consequently, a vertical pump installation with two-way channel is studied. By considering the velocity uniformity at the outlet of entry channel and the hydraulic loss across the channel as two objective functions, the open height of the channel is optimized using CFD technique by comparing multiple design cases. It is shown that when the open height is equal to 0.57D the hydraulic loss increases less and the outlet velocity uniformity is also the best. The effects of discharge channel height on hydraulic performance of the discharge channel are identified. A bigger discharge channel height can result in a higher discharge velocity and a more significant hydraulic loss. The hydraulic loss across the discharge channel decreases gradually

收稿日期：2015-08-08；**网络出版时间**：2016-07-01
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20160701.1332.028.html
基金项目：“十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAD20B01)；国家自然科学基金资助项目(51109096)
作者简介：黄良勇(1964—)，男，江苏扬中人，高级工程师，博士(huangly1964@126.com)，主要从事水利工程建设与管理研究.
李彦军(1976—)，男，江苏赣榆人，副研究员，博士(通信作者，lyj782900@ujs.edu.cn)，主要从事泵及泵站工程研究.

with reducing discharge channel height. However, once the height is below a certain value, the diffusion hydraulic loss in the channel becomes dominant, causing an increasing hydraulic loss. This suggests that there is an optimal discharge channel height at which the minimum hydraulic loss is achievable. This height is 0.48D. An optimum selected pump is installed in a pumping installation with the optimized two-way channel, then a hydraulic performance test on the installation is carried out, showing 71.2% hydraulic efficiency at 3.26 m low net head. This two-way channel provides a reference for installation optimization of the same sort of pumps in the future.

Key words: hydraulic machinery; pump device; two-way reversible channel; three dimensional flow; model test

在沿江滨湖地区的泵站往往需要承担引水灌溉和排水的双重功能，目前实现双向引排结合的泵站结构型式有 5 种方案：① 泵站单向抽水，通过水闸调节控制；② 采用可调头安装的水泵；③ 单向叶片安装角度改变 180°，水泵反向旋转；④ 采用“S”形叶片双向水泵；⑤ 泵站采用单向水泵、双向流道. 方案① 有工程投资大、占地面积多的缺点. 方案② 通过泵段部分拆下调头，改变运行方向实现双向运行. 该结构型式运行操作和管理难度较大，目前仅停留在试验阶段，尚无成功运行的先例. 方案③ 泵型是双向泵，采用叶片 180°调转，正反向运行，该结构型式存在着叶片调节困难、反向效率低的缺点. 方案④ 是方案③ 结构型式的改进，用“S”翼型叶片取代原单向翼型叶片，兼顾正反向运行，叶片不再需要正反向调整，但该方案的正反向效率均不高. 方案⑤ 通过双向流道进出口闸门的控制实现双向引排，泵实际是单向使用.

由于双向流道方案具有工程投资小、结构形式简单、施工安装检修方便等优点，得到了广泛的应用. 但由于双向流道泵装置的优化设计理论和匹配方法仍不够成熟，目前国内部分已建双向流道泵站或因流道型线设计不合理，造成泵振动、汽蚀[1]，因此需要进一步进行研究.

随着双向流道泵装置得到越来越多的应用[2-3]，科研工作者对该方面的研究也越来越广泛：提出了新型曲线扩散出水结构[4-5]；通过模型试验和运用 CFD 技术分析和验证了增设进水导流锥后进水流道及泵装置水力性能的改善，提高了泵装置效率，消除了水下旋涡[5-7]. 目前对双向流道泵装置的研究主要集中在出水流道的扩散型线和进水导流锥的增设方面[8-10]，而在双向流道泵装置的整体性优化匹配方面研究较少.

文中根据太湖治理工程江边枢纽大型双向流道泵站的设计参数，对双向流道以及水泵模型进行整体性优化匹配和试验研究，以提升泵装置效率和水力稳定性.

1　工程概况

江边枢纽工程双向引排泵站设计流量为 90 m^3/s，排涝工况设计净扬程为 3.03 m，引水工况设计净扬程为 1.55 m. 双向泵站采用 3 台立式轴流泵机组配开敞式进、出水流道，轴流泵叶轮直径 D = 3.15 m，转速 n = 125 r/min. 图 1 为双向流道泵装置型线.

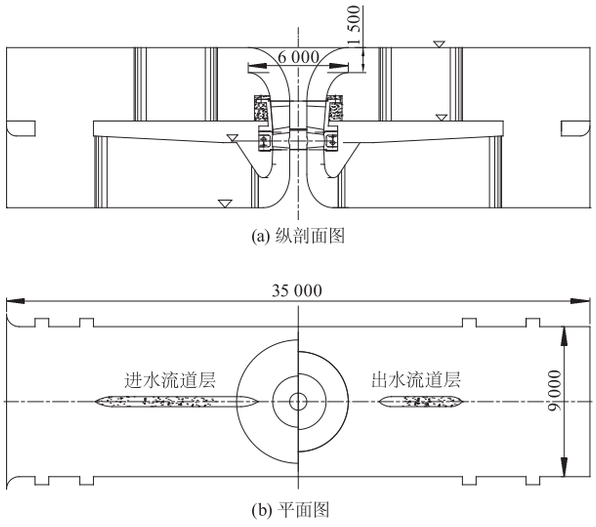


图 1　双向流道泵装置型线图

Fig 1　Cross-sectional view of pump installation with two-way channel

2　双向进水流道优化匹配

导水锥是双向进水流道重要的组成部分，已有的研究表明，导水锥可以有效消除喇叭口下方的附底旋涡. 但导水锥应与喇叭管型线进行配合设计，才能充分提高双向进水流道的水力性能. 当喇叭管

的悬空高度过大时，水流并不是从四周进入喇叭口，而是从前面一个方向进入喇叭口就可满足流量要求. 这时的导水锥不仅不能起到导水的作用，反而起到阻水的作用，恶化流态. 当喇叭管的悬空高度过小时，又会增大水流进入喇叭管的流速，从而水力损失增加，导致装置效率降低. 因此，在其他控制尺寸已定的情况下，喇叭管的悬空高度应有一个最优匹配尺寸.

文中应用计算流体动力学 CFD 软件进行数值模拟，对双向进水流道喇叭管的悬空高度 h 进行方案比选. 比选方案：① $h=0.7D$；② $h=0.63D$；③ $h=0.57D$；④ $h=0.51D$；⑤ $h=0.44D$；⑥ $h=0.38D$，如图 2 所示.

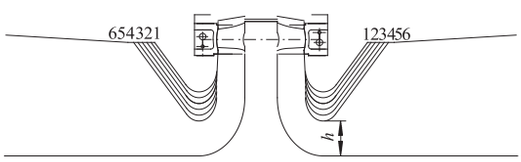


图 2 双向进水流道喇叭管悬空高度优化

Fig 2 Various design cases of open height of entry channel

双向流道内部三维紊流模拟控制方程包括连续性方程和雷诺时均 N－S 方程，利用标准 $k-\varepsilon$ 模型使动量方程闭合，并采用 SIMPLEC 算法[11-12]. 计算流场的进口设置在进水池中，按速度进口条件给定. 流场的出口设置在离流道出口有相当距离的等径圆管上，出口压力、速度和 k，ε 均按出口截面的法线方向梯度为 0 设置. 流道边壁采用标准固壁定律处理. 忽略进水池自由水面因风引起的切应力及与大气热交换等因素，其速度和紊动能均按对称边界条件处理[13].

进水流道水力性能的优劣主要以进水流道出口流速分布均匀度 α 和水力损失 Δh 进行评价[13]. 双向进水流道通过 CFD 计算模拟后，得到各方案的性能指标变化趋势如图 3 所示.

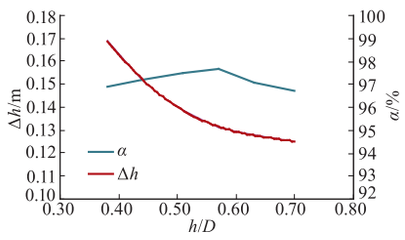
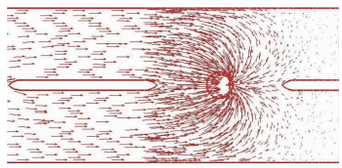


图 3 双向进水流道 CFD 计算结果

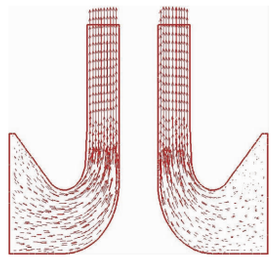
Fig 3 CFD computational results in entry channel

由图 3 可以看出：随着悬空高度的逐渐减小，喇叭口下方流速逐渐增大，导致进水流道的水力损失逐渐增大；随着悬空高度的逐渐减小，喇叭口下方水流的自由度降低，使水流可以从喇叭口四周均匀进入，因此使出口的流速分布均匀度逐步增大；随着喇叭管悬空高度的进一步减小，喇叭口下方的水流流速增大，使水流直接冲击导水锥，造成水流一定的紊乱，出口流速分布均匀度下降.

喇叭管的悬空高 h 大于 $0.57D$ 时，不同悬空高度方案对水力损失影响不够明显. 随着悬空高度的降低，水力损失略有增加，流速分布均匀度逐渐增大. 当悬空高度 h 小于 $0.57D$ 时，随着悬空高度的降低，水力损失增加较明显，流速分布均匀度又开始减小. 因此，综合进水流道水力损失和出口流速分布均匀度 2 项指标，认为悬空高度 h 等于 $0.57D$ 时进水流道的水力性能最优. 图 4 为 $h=0.57D$ 时进水流道在设计流量时内部流速分布情况.



(a) 水平截面



(b) 纵截面

图 4 双向进水流道流场分布

Fig 4 Flow vector field in entry channel

3 双向出水流道优化匹配

在低扬程泵站中，出水流道的水力损失对整个装置效率具有重要的影响. 对于双向出水流道，其主要的水力损失产生在扩散喇叭管和导水锥之间水流的扩散损失以及扩散管出口损失[14]. 扩散喇叭管的出口直径主要根据出水流道的宽度确定. 在喇叭管出口直径确定后，喇叭管内部水流的扩散程度主要跟喇叭管出口至流道顶部的高度 H 有关.

出水流道的优化匹配主要针对扩散喇叭管出口至流道顶部的高度 H 进行，比选方案：① $H=0.29D$；② $H=0.35D$；③ $H=0.41D$；④ $H=0.48D$；⑤ $H=0.54D$；⑥ $H=0.60D$，如图 5 所示.

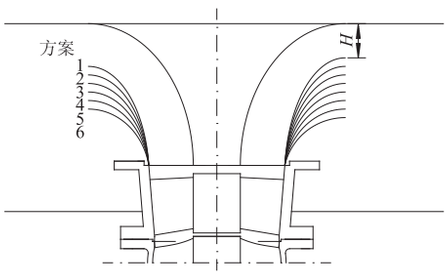


图 5　双向出水流道比选方案
Fig 5　Various design cases of discharge channel

通过 CFD 计算模拟，各方案的性能指标变化趋势如图 6 所示，可以看出：当出水流道扩散喇叭管的高度较大，即 H 较小时，扩散喇叭管出口流速较大，对水力损失影响较大，出水流道的总水力损失较大；随着扩散喇叭管高度的降低，喇叭管出口流速降低，出水流道水力损失减小；当扩散喇叭管的高度降低到一定程度，扩散喇叭管内的水力扩散损失占据主导作用，随着扩散喇叭管高度的进一步降低，其喇叭管内的水力扩散损失越来越大，即出水流道的水力损失也越大. 因此当 $H=0.48D$，对应的出水喇叭管高度为最优.

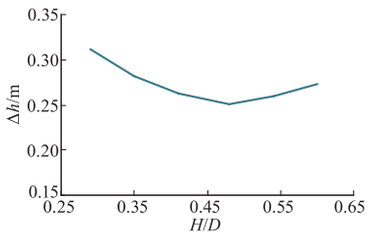


图 6　双向出水流道 CFD 计算结果
Fig 6　CFD results in discharge channel

4　泵装置全流道模拟

对模型泵装置进行三维全流道 CFD 数值计算，以预测进、出水流道与泵的匹配及泵装置的整体特性，为泵装置的优化设计和模型选择提供参考. 选用水力模型 TJ04 - ZL - 07 与进出水流道进行匹配，图 7 为模型泵装置整体三维造型. 为了降低数值模拟的计算量，对双向进出水流道的封闭端只取用了一部分计算水体，但泵装置的流场分布和性能预测基本不构成影响.

对上述双向流道模型泵装置进行三维全流道 CFD 数值仿真计算[14-16]，预测泵装置的水力性能. 图 8 为双向流道模型泵装置的三维流线图.

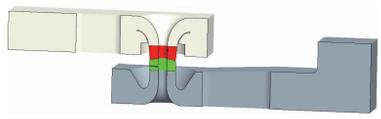


图 7　泵装置三维造型
Fig. 7　3D fluid domains of pump installation

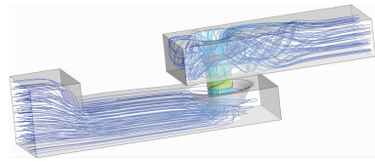


图 8　泵装置三维流线
Fig. 8　Streamlines in pump installation

叶片角为 0°下，预测了流量 Q 分别为 270，300，330，360 L/s 时模型泵装置的性能曲线，并与模型试验曲线相比较，两者吻合性较好，如图 9 所示.

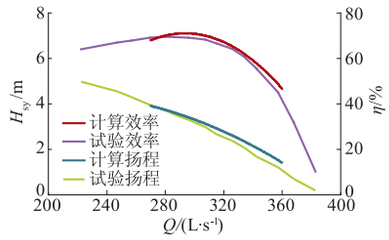


图 9　泵装置性能预测曲线
Fig. 9　Predicted performance curve of pump installation

5　泵装置模型试验

将优化后的双向进出水流道，配置 TJ04 - ZL - 07 水力模型，进行模型泵装置的动力特性和汽蚀特性试验，以验证双向进出水流道的水力优化效果和泵装置的整体性能.

5.1　模型泵装置设计

泵装置模型试验按照《水泵模型及装置模型验收试验规程》(SL140—2006)进行设计. 模型泵叶轮直径 $D_m=300$ mm，根据等扬程条件 $nD=$ cons 确定模型泵转速. 原型泵装置转速为 $n_p=125$ r/min，叶轮直径 $D_p=3.15$ m，则模型泵装置转速 $n_m=1\,312.5$ r/min.

根据相似原理模拟进、出水流道，模型流道以钢板焊接制作，加表面涂层，满足几何相似、糙率相似要求. 模型试验在江苏大学高精度水泵装置模型试验台上进行，试验台泵装置效率测试综合精度高于 0.32%.

5.2　模型泵装置试验结果

通过模型试验，得到了模型泵装置 5 个叶片角度(-6°，-4°，-2°，0°，+2°)的效率特性和汽蚀特

性,其综合性能曲线如图10所示,图11为经过等效率换算后的原型泵装置综合性能曲线.

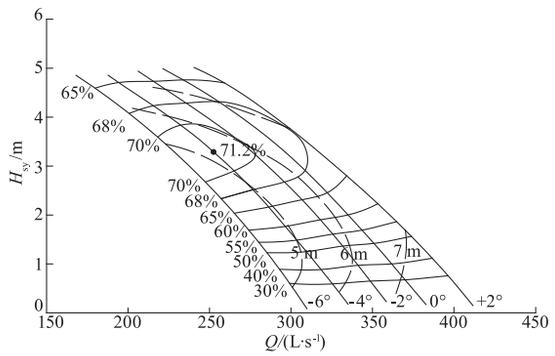


图10 模型泵装置综合性能曲线

Fig. 10 Comprehensive performance curve of model pump

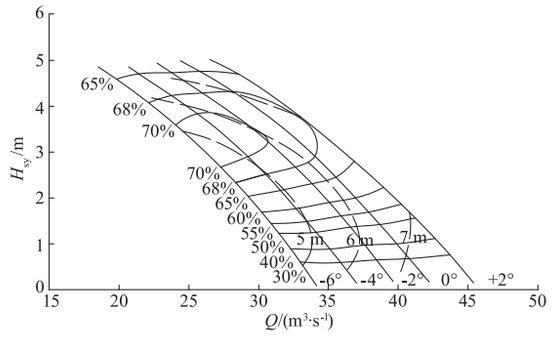


图11 原型泵装置综合性能曲线

Fig. 11 Comprehensive performance curve of prototype pump

由模型试验结果可知:在排涝设计工况时,叶片角为-2°下,装置扬程 $H_{sy}=3.23$ m,流量 $Q=30.64$ m^3/s,装置效率 $\eta_{sy}=70.39\%$;在引水设计工况时,叶片角为-6°下,装置扬程 $H_{sy}=1.75$ m,流量 $Q=30.11$ m^3/s,装置效率 $\eta_{sy}=60.77\%$;泵装置临界汽蚀余量在高扬程比在低扬程下运行时稍高,但在所有运行扬程范围之内,临界汽蚀余量最大不超过7 m,可满足最低淹没深度要求.泵装置能量特性和汽蚀特性均可以满足该泵站的设计要求,性能良好.

6 结 论

1)应用CFD技术对大型泵站双向进水流道的喇叭管口悬空高度进行了优化匹配研究,认为双向进水流道喇叭管口悬空高度对进水流道的水力性能具有重要的影响作用,应综合考虑水力损失和出口流速分布均匀度2个性能指标进行分析.

2)应用CFD技术对大型泵站双向出水流道的扩散喇叭管高度进行优化匹配研究,研究结果说明在扩散喇叭管口直径一定的情况下,扩散喇叭管的高度对双向出水流道的水力性能起到关键的作用.应综合考虑扩散喇叭管出口的动能损失与内部的扩散损失之间的平衡,进行最优化匹配,使出水流道的总水力损失最小.

3)将优化后的双向进出水流道匹配高效水泵模型,进行泵装置模型试验.在流量 $Q=27.9$ m^3/s,装置扬程 $H_{sy}=3.26$ m时,装置效率 $\eta_{sy}=71.2\%$,其性能指标在同类型泵装置中达到较高水平,可为双向流道泵站的新建和更新改造提供参考.

参考文献(References)

[1] 周君亮. 低扬程泵装置原、模型和防止"有害"汽蚀参数换算[J]. 排灌机械工程学报, 2015, 33(3): 185-195.
ZHOU Junliang. Conversion of performance for model pump to actual pump and prevention of harmful cavitation[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2015, 33(3): 185-195. (in Chinese)

[2] ZHU Jinmu, ZENG Fanchun. Experimental study on two-way flow passages in pumping system[J]. Journal of mechanical science and technology, 2008, 22(10): 1966-1970.

[3] LIU Chao, JIN Yan, ZHOU Jiren, et al. Numerical simulation and experimental study of a two-floor structure pumping system[C]//Proceedings of the ASME Power Conference, 2010: 777-784.

[4] 朱劲木, 何忠人, 刘德祥, 等. 大型轴流泵站双向出水流道设计及模型试验验证[J]. 武汉大学学报(工学版), 2005, 38(4): 13-16.
ZHU Jinmu, HE Zhongren, LIU Dexiang, et al. Design of two way outflow passage for large axial-flow pump station and model experimental verification[J]. Engineering journal of Wuhan University, 2005, 38(4): 13-16. (in Chinese)

[5] 刘超,金燕,周济人,等. 箱型双向流道轴流泵装置内部流动的数值模拟和试验研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30(4): 192-197.
LIU Chao, JIN Yan, ZHOU Jiren, et al. Study of internal flow in cube-type bidirection passages of axial-flow pump system by numerical simulation and experiment[J]. Journal of hydroelectric engineering, 2011, 30(4): 192-197. (in Chinese)

[6] 陈松山, 葛强, 周正富, 等. 大型泵站双向进水流道三维紊流数值模拟[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2005, 26(2): 102-105.
CHEN Songshan, GE Qiang, ZHOU Zhengfu, et al.

Numerical simulation of three-dimensional turbulent flow for reversible intake passage in large pumping stations [J]. Journal of Jiangsu University(natural science edition), 2005, 26(2): 102 – 105. (in Chinese)

[7] TANG Xuelin, WANG Fujun, LI Yanjun, et al. Numerical investigation of vortex flows and vortex suppression schemes in a large pumping-station sump[J]. Journal of mechanical engineering science, 2011, 225(6): 1459 – 1480.

[8] AHMAD Z, JAIN B, KUMAR S, et al. Rational design of a pump-sump and its model testing[J]. Journal of pipeline systems engineering and practice, 2010, 2(2): 53 – 63.

[9] TOKYAY T E, CONSTANTINESCU S G, ASCE M. Validation of a large-eddy simulation model to simulate flow in pump intakes of realistic geometry[J]. Journal of hydraulic engineering, 2006, 132(12): 1303 – 1315.

[10] 杨敏官，孟宇，李忠，等. 轴流泵叶轮导水锥型式设计及其流道水力特性模拟[J]. 农业工程学报，2015，31(11)：81 – 88.
YANG Minguan, MENG Yu, LI Zhong, et al. Design of axial-flow impeller guide cone and simulation on hydraulic performance of its passage[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(11): 81 – 88. (in Chinese)

[11] BI Shude, ZHANG Yonggang, HAN Ning, et al. Numerical simulation on the flow field of inlet structure of Dongsong pumping station[J]. Advances in water resources and hydraulic engineering, 2009: 1731 – 1736.

[12] BI Shude, LIU Meiqing, XU Maosen, et al. Analysis on the flow field of inlet structure of Xingshipo pumping station by CFD method[C]//Proceedings of the International Symposium on Fluid Machinery and Fluid Engineering, 2014.

[13] 施伟，李彦军，邓东升，等. 肘形进水流道优化设计与数值计算[J]. 流体机械，2009，37(12)：19 – 22.
SHI Wei, LI Yanjun, DENG Dongsheng, et al. Optimum hydraulic design and numerical simulation for elbow inlet passage [J]. Fluid machinery, 2009, 37(12): 19 – 22. (in Chinese)

[14] 陶然，肖若富，杨魏，等. 可逆式水泵水轮机泵工况的驼峰特性[J]. 排灌机械工程学报，2014，32(11)：927 – 930.
TAO Ran, XIAO Ruofu, YANG Wei, et al. Hump characteristic of reversible pump turbine in pump mode[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2014, 32(11): 927 – 930. (in Chinese)

[15] QIAN Zhongdong, WANG Yan, HUAI Wenxin, et al. Numerical simulation of water flow in axial flow pump with adjustable guide vanes[J]. Journal of mechanical science and technology, 2010, 24(4): 971 – 976.

[16] WANG Zhengwei, PENG Guangjie, ZHOU Lingjiu, et al. Hydraulic performance of a large slanted axial-flow pump[J]. Engineering computations, 2010, 27(2): 243 – 256.

（责任编辑　陈建华）

本刊在江苏省期刊出版质量综合评估中取得佳绩

近日，江苏省新闻出版广电局对 2016 年江苏省科技类学术期刊出版质量综合评估结果进行了公示，本刊综合得分为 85.64 分，在工业机械与化工类位居第 2 位，在 222 种参评科技类学术期刊中位居第 14 位。

2015 年 8 月，本刊编辑部按照江苏省新闻出版广电局《关于组织开展江苏省科技类学术期刊出版质量综合评估工作的通知》的精神，对照《报纸期刊出版质量综合评估办法(试行)》、《全国报纸期刊出版质量综合评估指标体系(试行)》、《江苏省科技类学术期刊出版质量综合评估指标体系(试行)》的标准要求，完成了期刊出版单位自评工作，填报自评表，撰写自评报告，并准备相关证明材料，经期刊主管主办单位审核后，及时将评估材料报送省新闻出版广电局。经江苏省报刊出版质量综合评估领导小组组织评估专家组对全省的科技类学术期刊进行了综合评估、评估意见反馈与复核、评估领导小组审定，本刊荣获佳绩。此次评估按照学报综合类、医药卫生类、电子信息与自动化类、工业机械与化工类、地矿与天文类、水资源与环境科学类、农林生物与食品加工类、交通与建筑类、科技信息与教辅类等 9 个类别进行。　（编辑部）