

DOI: 10.7652/xjtuxb201405017

浸没式喷水推进泵设计及装船后性能预报

曹玉良, 王永生, 靳栓宝
(海军工程大学动力工程学院, 430033, 武汉)

摘要: 为了设计浸没式喷水推进泵,以国外某喷水推进混流泵为对象建立了浸没式喷射模型,运用计算流体力学(CFD)瞬态模拟方法研究了 2 种转速时浸没式喷射对喷水推进泵水力性能的影响。研究表明,无论是低转速还是设计转速,浸没式喷射时喷水推进泵的扬程、轴功率、效率变化都小于 1%,且叶片的空化无明显变化。由此,运用三元设计方法设计了一型适用于常规尾板式喷水推进的喷水推进泵,即按常规尾板式喷水推进的“船-泵-机”匹配方法选定喷水推进泵的设计参数,按基于环量的三元方法进行喷泵的水力设计,喷泵为 6 片叶片、9 片导叶。最后,运用计算流体力学方法对实尺浸没式喷水推进器与船体的组合结构进行了数值模拟,结果表明,在设计航速时,该喷水推进泵完全浸没在水中工作的水力性能变化很小,进而得出浸没式喷水推进泵可以按照常规尾板式喷水推进泵的设计方法进行设计的结论。

关键词: 喷水推进;浸没式;喷水推进泵;三元设计;计算流体力学

中图分类号: U664.33 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)05-0096-06

Design of Submerged Waterjet Pump and Performance Prediction after Installation

CAO Yuliang, WANG Yongsheng, JIN Shuanbao
(College of Marine Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: To design submerged waterjet pump, a submerged model for a mixed-flow pump is established and the performances at different rotating speeds are analyzed with CFD transient method. The head, power and efficiency of the pump change less than 1% at either low or designed rotating speed, and the impeller cavitation almost appears constantly. A traditional waterjet pump is chosen by matching ship, waterjet and engine, and designed with three-dimensional strategy according to the velocity circulation, the impeller vanes are taken as six and the guide vanes as nine. A full-scale ship propelled by the waterjet pump is investigated, and it is found that at the designed speed, the performances of the waterjet pump working under water change slightly, so submerged waterjet pump can be designed following the traditional waterjet pump designing method.

Keywords: waterjet propulsion; submersion; waterjet pump; three-dimensional design; computational fluid dynamics

浸没式喷水推进是基于尾板式喷水推进发展起来的一种推进方式,文献[1-2]介绍了 Advanced

Waterjet 21(AWJ-21TM)浸没式喷水推进器,AWJ-21TM如图 1 所示。它是 Rolls-Royce 公司开发的

收稿日期: 2013-09-30。 作者简介: 曹玉良(1988—),男,硕士生;王永生(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51309229);国防科技“十二五”预研资助项目。

网络出版时间: 2014-02-26

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140226.1158.008.html>

完全水下喷射的喷水推进器,由喷水推进泵、进水流动和转向倒车机构组成,并安装在流线型吊舱内。AWJ-21TM 已在电船演示舰(AESD)上进行了试验评估,其研究报告表明,与常规尾板式喷水推进相比,浸没式喷水推进可进一步提高推进效率,降低推进器噪声^[1-2]。目前,国内外也有不少学者对非推进用浸没式喷射的流动状态和空化情况进行了研究^[3-5],但是很少有人开展浸没式喷水推进的研究。

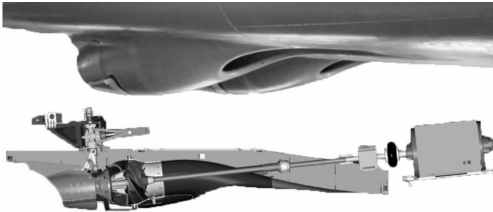


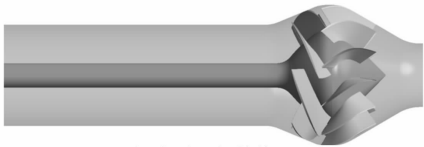
图 1 AWJ-21TM 浸没式喷水推进器

喷水推进泵是喷水推进器的核心做功部件,其性能好坏将直接影响着整个喷水推进器的性能^[6]。对于安装在尾板上的喷水推进泵,船舶航行时喷射的水流都在自由液面以上。然而,浸没式喷水推进器安装在船尾底板上,喷水推进泵浸没在水中工作,工作环境的变化将对喷水推进泵的性能造成多大的影响,浸没式喷水推进泵可否按照常规尾板式喷泵的设计方法进行设计,目前还少有文献研究。为了设计浸没式喷水推进器,本文以国外某喷水推进混流泵为基础建立了浸没式喷射模型,运用计算流体力学(CFD)方法研究了浸没式喷射对喷水推进泵水力性能的影响。文中按常规尾板式喷水推进的方法设计了一型喷水推进泵,将其安装在浸没式喷水推进器上,并对浸没在水中喷射时的水力性能进行了分析。

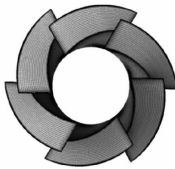
1 某混流泵水力性能数值分析

国外某喷水推进混流泵进口直径为 710 mm,6 片叶片,11 片导叶。在 CFD 模拟过程中,叶轮单通道网格数保持在 20 万左右,导叶单通道网格数保持在 10 万左右,泵内流场网格总数约 300 万,均为六面体网格,y⁺控制在 200 以下。模拟时采用剪切输运应力模型(SST 模型),进口设为总压,出口设为静压。该混流泵的几何结构及叶轮、导叶的网格如图 2 所示。

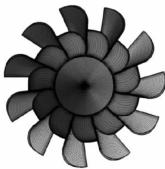
不同转速时混流泵轴功率的 CFD 计算结果如表 1 所示。由表 1 可知,各转速下混流泵轴功率的 CFD 计算值与厂家提供的值差别在 1% 以内,这间接证明了本文所用数值方法的可信性。



混流泵几何结构



叶轮网格



导叶网格

图 2 混流泵的几何结构及叶轮、导叶网格

表 1 混流泵功率的 CFD 计算值与厂家提供值对比

转速/ $r \cdot \min^{-1}$	700	800	880	900	1 000
厂家提供的功率/kW	1 129	1 693	2 252	2 404	3 309
CFD 计算的功率/kW	1 122	1 681	2 237	2 393	3 278
相对误差/%	-0.61	-0.72	-0.66	-0.43	-0.92

本文以混流泵为基础建立了浸没式喷射模型,研究了浸没式喷射对喷水推进泵(简称喷泵)水力性能的影响。喷泵在转速为 880 r/min 时的水力性能曲线如图 3 所示。

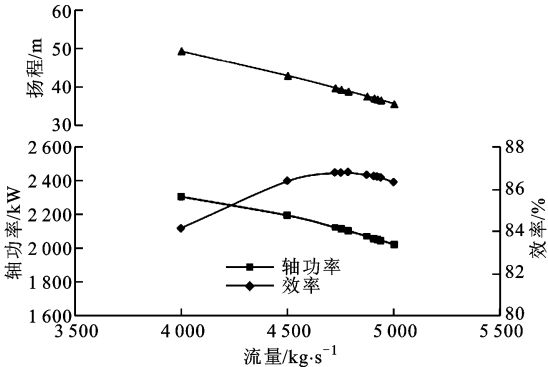


图 3 喷泵的水力性能曲线图

2 浸没式喷射对喷泵水力性能的影响

喷泵浸没在水中喷射时,进出口会受到外部水域水深静压的作用,喷射出的水流会受到外部水域黏性力和剪切力的作用。

以第 1 节中的喷泵为基础建立了浸没式喷射模型,在浸没式模型中,水域长、宽、高分别为喷泵喷口直径的 30 倍、9 倍、9 倍,喷口中心距离水面 2 m,空气中喷射模型及浸没式喷射模型对比如图 4 所示。

浸没式喷射模型中水体为静止水体,在 CFD 模拟时参考压力为标准大气压,所有区域网格均采用六面体划分,空气中喷射模型网格总数为 300 万,浸没式喷射模型网格总数为 398 万,两种模型均采用

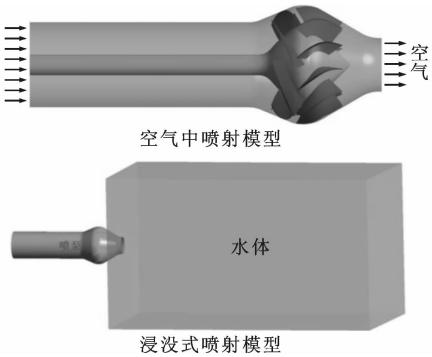


图 4 喷射模型示意图

瞬态模拟,计算总时间为 10 s,时间步长为 0.005 s。考虑重力的作用,本文采用剪切应力模型(SST 模型),水域边界设为可自由出入边界,计算域边界上压力随着水深呈线性增加。

2.1 低转速时水力性能的变化

对喷泵 400 r/min 的自吸工况进行了数值模拟,CFD 计算时叶轮转速设为 400 r/min,进口设为总压,出口设为静压,计算结果如表 2 所示。由表 2 可知,与空气中喷射相比,浸没式喷射时喷泵的流量增大了 0.85%,扬程减小了 0.54%,轴功率减小了 0.05%,效率增大了 0.25%。

表 2 400 r/min 自吸工况时喷泵的水力性能

模型	流量/kg·s ⁻¹	扬程/m	轴功率/kW	效率/%
空气中喷射	1 991	9.34	214.1	85.26
浸没式喷射	2 008	9.29	214	85.51
相对误差/%	0.85	-0.54	-0.05	0.25

浸没在静止水中的喷泵在外部水域黏性阻力和剪切力作用下,喷口喷射的水流速度会逐渐降低,水流逐渐分散。与此同时,喷射的水流带动周围的水体向前运动,射流附近的压力降低,水域中的水从外围向射流附近流动,从而形成涡流。

自吸工况时浸没式喷射的轴面流线如图 5 所示,从图中可以看出,在喷射水流的作用下,水域中形成了逆时针的涡流。

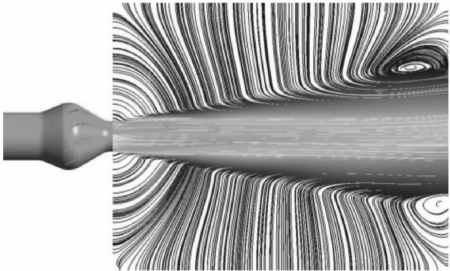


图 5 自吸工况时浸没式轴面流线图

在软件 CFX 后处理中以空化压力为标准,用灰色和黑色分别显示喷泵叶轮和导叶叶片上的压力大于和小于汽化压力的区域。空气中喷射和浸没式喷射时叶轮和导叶的叶片压力分布如图 6 所示,从图中可以看出,叶轮和导叶的叶片均为灰色,表明在 400 r/min 自吸工况时叶轮和导叶均未发生空化。

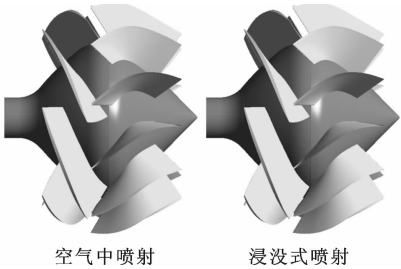


图 6 自吸工况时叶片表面压力图

2.2 设计转速时水力性能的变化

本文对浸没式喷射时喷泵在设计转速为 880 r/min 的水力性能进行了计算。空气中喷射与浸没式喷射时喷泵的轴功率对比如图 7 所示,从图中可以看出,浸没式喷射时喷泵的轴功率大于空气中喷射的轴功率,但是增幅非常小。空气中喷射与浸没式喷射时喷泵的效率对比如图 8 所示,从图 8 可以看出,浸没式喷射时喷泵的效率略高于空气中喷射时喷泵的效率。此外,从图中还可以看出,无论是功率还是效率,浸没式喷射时的变化趋势与空气中喷射时的变化趋势相同。

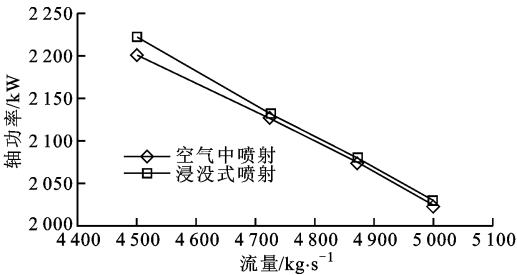


图 7 喷泵轴功率对比

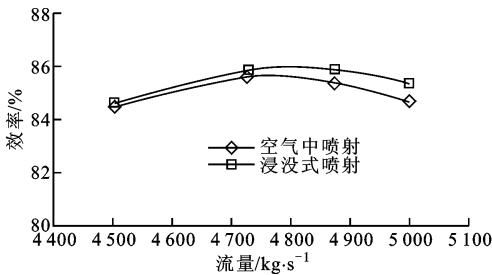


图 8 喷泵效率对比

在设计流量为 5 000 kg/s 时,浸没式喷射与空气中喷射的喷泵水力性能对比如表 3 所示。由表 3

可知,浸没式喷射时喷泵的扬程增加了 0.7%,轴功率增加了 0.32%,效率提高了 0.34%。

表 3 设计流为 5 000 kg/s 时喷泵水力性能

模型	流量/ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	扬程/m	轴功率/kW	效率/%
空气中喷射	5 000	35.60	2 023	86.34
浸没式喷射	5 000	35.85	2 029	86.68
相对误差/%	0.00	0.7	0.32	0.34

在设计流量时浸没式喷射的轴面流线如图 9 所示。与自吸工况时类似,在设计工况时随着喷泵喷射的水流向前运动,喷射水流速逐渐减小,并且在离喷口稍远处形成涡流。

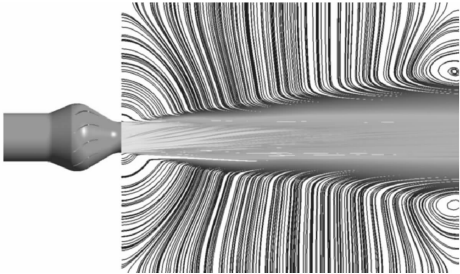


图 9 设计流量为 5 000 kg/s 时浸没式喷射的轴面流线图

以常温下喷泵的汽化压力为分界线做出的空气中喷射和浸没式喷射时叶片空化区域分布如图 10 所示,图中黑色表示发生空化的区域。从图中可以看出,空气中喷射时叶片导边顶部的部分区域发生了空化,浸没式喷射时喷泵叶片上也存在少量的空化区域且空化区域的位置和面积与空气中喷射时一致。在设计工况时,喷泵的流量、来流流速未发生变化,泵的转速也未变化,所以浸没式喷射时叶片的空化没有明显的改变。

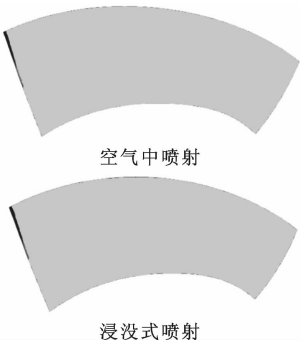


图 10 设计工况时叶片空化区域分布

3 浸没式喷泵的设计及验证

本文设计了一型适用于尾板式喷水推进器的喷泵,将其安装在以 AWJ-21TM 为原型设计的浸没

式喷水推进器上,并将该浸没式喷水推进器和船体一起进行数值模拟,对船舶在设计航速时喷泵的水力性能变化进行了分析。

3.1 喷泵的设计及性能分析

设计时按照常规尾板式喷水推进的“船-泵-机”匹配方法选定喷泵的设计参数,按照基于环量的三元方法进行喷泵的水力设计^[6],运用 CFD 方法分析喷泵的水力性能。新设计喷泵为 6 片叶片,9 片导叶,叶片和导叶的网格如图 11 所示。

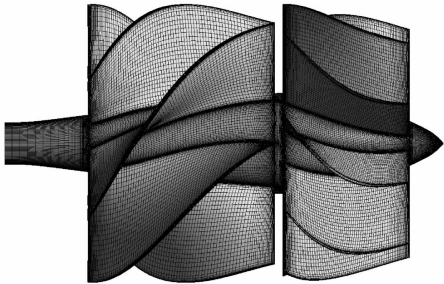


图 11 新设计喷泵的叶片和导叶网格

在 CFD 模拟时采用了 SST 湍流模型,网格均采用六面体划分,网格总数为 584 万, y^+ 保持在 200 以下。均匀来流时喷泵性能(简称敞水泵性能)的 CFD 计算结果如表 4 所示。

表 4 新设计喷泵的水力性能

转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	流量/ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	扬程/ m	轴功率/ kW	效率/ %
280	44 110	27.63	13 079	91.41
280	43 500	27.86	12 994	91.50
280	43 000	28.01	12 918	91.45
280	42 200	28.25	12 813	91.29
280	42 000	28.30	12 779	91.25
280	40 000	28.88	12 480	90.82

3.2 实尺浸没式喷水推进器与船体的组合结构 CFD 模拟

3.1 节中喷泵按照尾板式喷水推进的方法设计,而浸没式喷水推进器是完全浸没在水中工作,所以本文主要研究这种工作环境的变化对喷泵水力性能的影响。

仿照 AWJ-21TM 的形式设计了一款浸没式喷水推进器,其将喷泵与进水流道和喷口组合成一个整体。浸没式喷水推进器与船体的组合结构如图 12 所示。

计算区域入口在船艏向前延伸 1 倍船长处,出口在船尾向后延伸 3 倍船长处,侧边界取 1.4 倍船

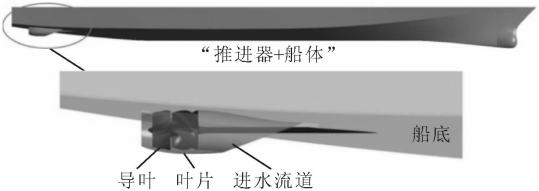


图 12 浸没式喷水推进器与船体的组合结构

长,水面以下取 0.8 倍船长,水面以上取 0.2 倍船长。因为船体对称,计算时只取一半船体进行数值计算,对应的网格仅为半个船体的情况^[7]。由于吊舱与船体紧密结合,船体与传动轴的夹角非常小,所以对船体、吊舱、进水流道和传动轴的网格采用四面体划分,壁面处均用棱柱网格进行加密,该部分的网格总数为 2 650 万,节点数为 536 万。对船体外围的水域网格采用六面体划分,喷泵的网格在前文中已经给出,这里只需将泵的网格和船体的网格通过交界面结合起来。整个流体计算域的网格总数为 3 659 万,节点总数为 1 596 万。船体表面的网格如图 13 所示,船尾吊舱及进水流道的网格如图 14 所示。

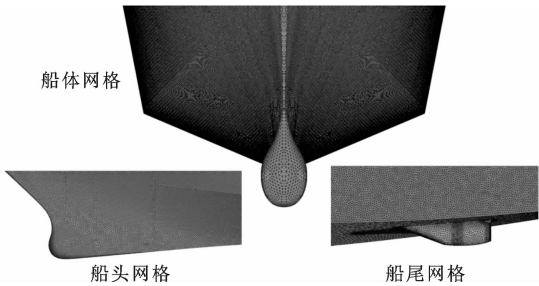


图 13 船体表面网格

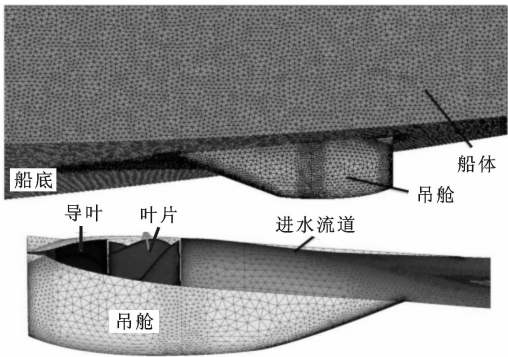


图 14 船尾及吊舱网格

采用 VOF 方法追踪自由液面,湍流模型采用 SST 模型,对流项离散选用二阶离散格式,船体纵面设为对称面,进口边界设为速度,出口边界设为静压,底面及侧面边界设为光滑壁面,边界条件及流场控制域如图 15 所示。

采用软件 CFX 进行数值计算,计算时间步长为

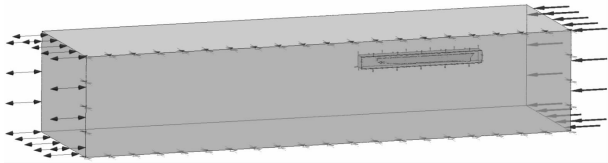


图 15 边界条件及流场控制域

0.000 5 s。计算时喷泵的初始转速为 0,稳定后将泵的转速逐渐调整为设计转速。用 CFD 方法计算了船舶在设计航速 30 kn 时喷泵的流体动力性能^[8],该航速下船体周围的兴波如图 16 所示,船尾

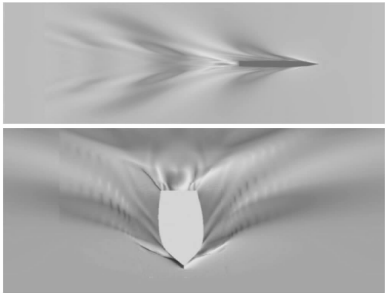


图 16 船体兴波图

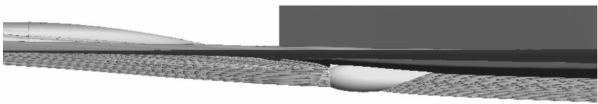


图 17 船尾流线图

流线如图 17 所示。从图 17 可以看出,喷泵浸没在自由液面以下工作,其喷出的水流也浸没在水中。在设计航速时,安装在船尾底部的浸没式喷泵(简称船后泵)的性能参数如表 5 所示。由表 5 可知,在设计航速时,船后泵的扬程、轴功率和效率均比敞水泵的小,但是船后、敞水泵二者值差别不超过 1.5%。喷泵装船后,由于受到船底边界层影响,喷泵的进流不均匀,因此效率下降。

表 5 船后泵与敞水泵水力性能参数对比

泵	转速/ $r \cdot \min^{-1}$	流量/ $m^3 \cdot s^{-1}$	扬程/ m	轴功率/ kW	效率/ %
船后	280	42.2	27.91	12 799	90.26
敞水	280	42.2	28.25	12 813	91.29
相对误差/ %	0	0.0	-1.21	-0.11	-1.12

考虑到船底的边界层和不均匀进流对喷泵水力性能的影响,可以认为采用尾板式喷泵的设计方法能够满足浸没式喷水推进的要求,即浸没式喷泵可以按照尾板式喷泵的设计方法进行设计。

4 结 论

本文采用瞬态模拟的方法分析了静止水体中喷射对水泵水力性能的影响。在低转速自吸工况下,与空气中喷射相比,浸没式喷射的喷泵流量、扬程、轴功率和效率的变化均小于0.9%。在设计转速和设计流量时,浸没式喷射的喷泵扬程、轴功率、效率变化均小于0.7%,叶片的空化也没有明显变化。

此外,本文按尾板式喷水推进的方法设计了一型喷泵,将其安装在浸没式喷水推进器上,用CFD方法对实尺浸没式喷水推进器与船体的组合结构进行了数值模拟。CFD计算结果显示,在设计航速时,喷泵完全浸没在水中工作,且船后泵的性能参数与敞水泵性能参数的相对误差均不超过1.5%。本文的研究表明,浸没式喷射对喷泵的水力性能有一定的影响,但是影响很小,浸没式喷泵可以按照尾板式喷泵的设计方法进行设计。

参考文献:

- [1] GILES W, DINHAM-PEREN T. The advanced waterjet: propulsor performance and effect on ship design [EB/OL]. [2013-01-20]. <http://www.bmtdsl.co.uk/media/5045591/BMTDSL-The-Advanced-Waterjet-Confpaper-INEC-May10.pdf>.
- [2] DINHAM-PEREN T. CFD and submerged waterjets [EB/OL]. [2013-01-20]. <http://www.bmtdsl.co.uk/media/1082411/BMTDSL-CFDandSubmergedWaterjets-NavalArchitect-Jul10-Pressclipping.pdf>.
- [3] HUTLI E A F, NEDELJKOVIC M S. Formula for upstream pressure, nozzle geometry and frequency correlation in shedding/discharging cavitation clouds determined by visualization of submerged cavitating jet [C]//15th International Conference on Fluid Mechanics. Berlin, Germany: Springer, 2009: 194-197.
- [4] QIN Z, BREMHORST K. Simulation of cavitation bubbles in a convergent-divergent nozzle water jet [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007: 1-11.
- [5] SOYAMA H, YANAUCHI Y, SATO K, et al. High-speed observation of ultrahigh-speed submerged water jets [EB/OL]. [2013-01-20]. http://www.researchgate.net/publication/256622805_High-speed_observation_of_ultrahigh-speed_submerged_water_jets.
- [6] 靳栓宝,王永生.混流式轴流泵三元设计及数值试验[J].哈尔滨工程大学学报,2012,33(10):1-3.

- JIN Shuanbao, WANG Yongsheng. Three-dimensional design of mixed-flow waterjet with CFD [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2012, 33(10): 1-3.
- [7] MILLER R, GORSKI J. Resistance predictions of high speed mono and multihull ships with and without water jet propulsors using URAN [C/OL]//26th Symposium on Naval Hydrodynamics. [2013-01-02]. http://www.taoxing.net/web_documents/miller_2006.pdf.
- [8] RISPIN P. Waterjet self-propulsion model test for application to a high-speed sealift ship [R]. Los Angeles, CA, USA: California State University, 2007.

[本刊相关文献链接]

- 李千军,刘光耀,韩伟,等.采用喷射式热泵提高火电机组给水温度的理论研究.2013,47(11):25-28.[doi:10.7652/xjtuxb201311005]
- 于立娟,王小东,张学成.轴向柱塞泵流量脉动主动控制方法及仿真研究.2013,47(11):43-47.[doi:10.7652/xjtuxb201311008]
- 张薇,彭学院,尤利超,等.余热直接利用型燃气机热泵变转速特性实验研究.2013,47(8):141-144.[doi:10.7652/xjtuxb201308024]
- 吴越,杨志刚,刘勇,等.压电振子对压电泵极限输出压力的影响.2013,47(4):64-72.[doi:10.7652/xjtuxb201304013]
- 杨小强,夏源,金磊,等.双螺杆多相混输泵输送特性的实验研究.2013,47(3):30-35.[doi:10.7652/xjtuxb201303006]
- 孙毅,李阳,姜继海.柱塞泵滑靴卡盘与球碗的受力分析及试验研究.2013,47(2):103-108.[doi:10.7652/xjtuxb201302018]
- 王秀礼,袁寿其,朱荣生,等.离心泵汽蚀过渡过程瞬态特性分析.2012,46(7):38-43.[doi:10.7652/xjtuxb201207008]
- 韩晓红,闵旭伟,李鹏,等.一种利用气泡泵效应重力辅助回路热管的实验研究.2012,46(3):9-14.[doi:10.7652/xjtuxb201203002]
- 赖芬,吴裕远,欧阳前武,等.新型部分自复叠热泵的理论研究.2012,46(3):15-20.[doi:10.7652/xjtuxb201203003]
- 杨孙圣,孔繁余,宿向辉,等.泵及泵用作透平时的数值模拟与外特性实验.2012,46(3):36-41.[doi:10.7652/xjtuxb201203007]
- 董亮,刘厚林,谈明高,等.离心泵四面体网格质量衡量准则及优化算法.2011,45(11):100-105.[doi:10.7652/xjtuxb201111019]
- 冯焱,周海东,忤婷,等.多模式定位系统接收机中的分数频率综合器.2011,45(8):85-91.[doi:10.7652/xjtuxb201108015]

(编辑 苗凌)