

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.09.007

复合叶轮改善双吸式离心泵空化性能研究*

肖若富 王娜 杨魏 姚志峰 王福军

(中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 针对双吸式离心泵在大流量工况下容易遭到汽蚀破坏, 运行可靠性差的问题, 采用长短叶片复合叶轮对双吸泵的空化性能进行改善研究。选用 SST $k-\omega$ 湍流模型及 Rayleigh-Plesset 空化模型, 对常规叶轮和复合叶轮双吸泵进行了全流道三维定常数值计算, 并与试验结果进行了对比, 对叶轮内部流场进行了分析。研究表明, 长短叶片复合叶轮能够显著改善双吸泵的空化性能, 降低必需空化余量, 减小空化区的范围, 改善叶片表面压力分布及叶轮内部流动状况, 在大流量工况下改善效果更为明显。

关键词: 双吸式离心泵 复合叶轮 空化 计算流体力学

中图分类号: TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)09-0035-05

Improvement of Cavitation Characteristics of Double Suction Centrifugal Pump with Compound Impeller

Xiao Ruofu Wang Na Yang Wei Yao Zhifeng Wang Fujun

(College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In the large flow conditions, the double suction centrifugal pump is susceptible to cavitation damage and has bad operation reliability. Aiming at the problem, a compound impeller with long and short blades was used to improve the cavitation characteristics. By using the shear stress transport (SST) $k-\omega$ turbulence model and Rayleigh-Plesset cavitation model, numerical simulation of the double suction centrifugal pump with a conventional impeller and a compound impeller were carried out respectively. The simulation results in the form of characteristic curves were compared with the experimental data, and the internal flow field was analyzed. The result showed that in the large flow conditions, critical net positive suction of the pump with a compound impeller was reduced. Also, the compound impeller can reduce the vapour distribution, change the pressure distribution and improve the dropping flow and backflow. Moreover, the better effect would be achieved under large flow condition.

Key words: Double suction centrifugal pump Compound impeller Cavitation Computational fluid dynamics

引言

双吸式离心泵以其流量大、扬程高的特点广泛应用于农业灌溉工程、城市给排水、跨流域调水等领域, 是一种十分重要的水力机械^[1]。但长期运行在大流量工况下, 双吸泵机组容易出现运行效率较低, 易遭受汽蚀破坏, 运行可靠性差等问题^[2-3]。采用

长短叶片复合叶轮设计是改善离心泵空化性能的有效途径之一。

目前, 国外许多学者都对复合叶轮改善离心泵的空化性能做了研究^[4-5], 国内学者也对长短叶片以及长、中、短叶片的复合叶轮做了研究, 并对叶片数对离心泵内部流场及空化性能的影响做了深入分析^[6-10]。但是, 这些研究大多集中在低比转数离心

收稿日期: 2013-01-31 修回日期: 2013-03-04

* 国家自然科学基金重点资助项目(51139007)和“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAD08B03)

作者简介: 肖若富, 副教授, 主要从事水力机械优化设计及流固耦合研究, E-mail: xrf@cau.edu.cn

泵上,对对比转数双吸离心泵,尤其是大流量下泵空化性能的影响研究还比较少,因此,对复合叶轮改善对比转数双吸泵的空化性能进行深入研究,具有十分重要的工程价值。

本文采用数值模拟和试验研究相结合的方法,对对比转数双吸离心泵进行空化性能的预测及改善研究,采用长短叶片复合叶轮设计,希望提高对比转数双吸泵在大流量工况下的空化性能,并通过试验对比分析,验证研究结果的准确性,以期在实际工程应用提供一定的理论依据。

1 计算模型

1.1 模型基本参数

采用的几何模型主要由 200S-42 型单级双吸离心泵改进得到,并在常规叶轮设计参数的基础上,对叶片进行重新设计,得到带长短叶片的复合叶轮。模型的主要参数为:额定转速 $n = 2\,900\text{ r/min}$,常规叶轮叶片数 $z = 6$,复合叶轮进口叶片数 $z_1 = 4$,出口叶片数 $z_2 = 8$;常规叶轮及复合叶轮的主要几何参数如表 1 所示。

表 1 常规叶轮和复合叶轮主要几何参数

Tab.1 Main geometric parameters of impellers

叶轮方案	进口直径/mm	出口直径/mm	出口安放角/(°)	出口宽度/mm	包角/(°)
常规叶轮	125	206	28	40	110
复合叶轮	125	206	25	40	135

在天津水力勘测设计院水泵试验台上对模型进行了空化性能测试。常规叶轮模型和复合叶轮模型分别如图 1、2 所示。

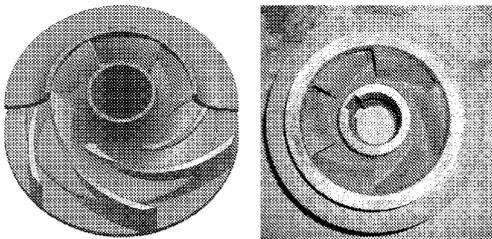


图 1 常规叶轮结构图与实物图

Fig.1 3D entity diagram of a conventional impeller

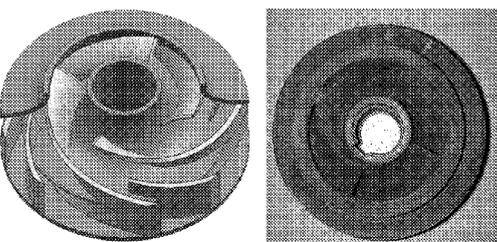


图 2 复合叶轮结构图与实物图

Fig.2 3D entity diagram of a compound impeller

1.2 计算域及网格划分

计算域包括进口延伸段、吸水室、叶轮、蜗壳、出口延伸段 5 部分。网格划分采用四面体非结构网格,并对叶片及蜗壳隔舌处进行了局部网格加密。

为了减小网格数对计算结果的影响,对设计点无空化工况进行网格无关性检查,如表 2 所示。

表 2 常规叶轮泵不同网格数下性能对比

Tab.2 Hydraulic performance of double suction centrifugal pump with conventional impeller under different grid numbers

方案	网格数	迭代步数	计算时间/h	扬程 H/m	轴功率 P/kW	效率 $\eta/\%$
1	6.68×10^5	938	4.47	48.6	42.0	83.37
2	1.000×10^6	858	6.55	48.5	41.7	83.56
3	1.448×10^6	746	8.08	48.1	41.4	83.79
4	1.534×10^6	780	8.20	48.1	41.4	83.77
5	1.804×10^6	816	8.57	48.2	41.5	83.75

通过数据对比,发现当网格数大于 1.448×10^6 时,泵的扬程、功率、效率的波动均稳定在 0.2% 以内,故本文计算中常规叶轮双吸泵网格单元总数确定为 1.448×10^6 。同理,复合叶轮双吸泵的网格单元总数最终确定为 1.453×10^6 。图 3 为双吸离心泵计算区域及网格划分图。

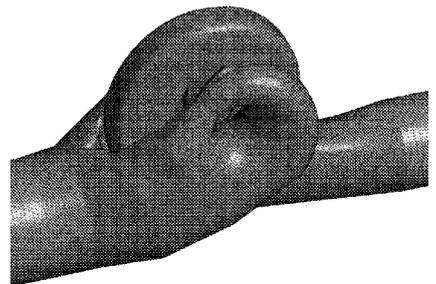


图 3 计算区域及其网格划分图

Fig.3 Computational grid for flow field

2 计算结果及分析

2.1 计算方法及边界条件

选用 SST $k-\omega$ 湍流模型^[11]和 Rayleigh-Plesset 空化模型^[12-13],分别对小流量 ($0.7Q_{\text{opt}}$)、额定流量 (Q_{opt})、大流量 ($1.3Q_{\text{opt}}$) 3 种不同工况下的双吸泵进行全流道三维定常计算,进口条件设置为总压进口,给定不同压力值,出口设置为质量流量出口,壁面边界采用无滑移边界条件。

计算时,以无空化流动的计算收敛结果作为初始值,添加空化模型,在出口质量流量一定的情况下,通过不断降低进口总压,模拟双吸泵内部的空化流动。

2.2 计算结果对比分析

通过空化数值计算,分别绘制出3种不同流量工况下常规叶轮和复合叶轮双吸泵汽蚀余量NPSH与扬程比 H'/H 的关系曲线,其中 H' 表示不同进口总压下计算所得泵的扬程, H 表示未发生空化时计算所得泵的扬程,如图4所示,以扬程下降3%时的装置汽蚀余量作为泵的临界汽蚀余量^[14]。

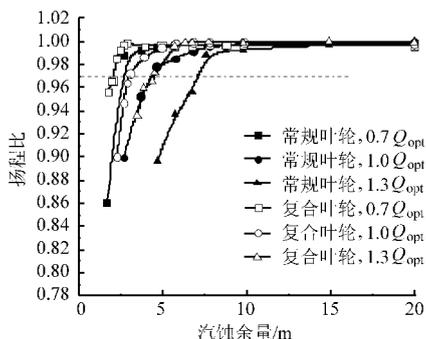


图4 数值计算双吸泵空化特性曲线

Fig. 4 Cavitation characteristics curves of double suction centrifugal pump under different conditions

从图中对比可以看出:双吸泵进口压力较大时,泵扬程基本不变,随着进口压力的降低,在临界空化压力点附近扬程出现突然下降;随着流量的增加,扬程随进口压力的降低出现波动越来越大,临界空化压力点逐渐提前,临界汽蚀余量逐渐变大。相同流量下,与常规叶轮相比,复合叶轮明显推迟了临界空化压力点的产生,泵临界汽蚀余量明显减小;随着流量的增大,复合叶轮扬程随进口压力的降低变化也较常规叶轮平稳,表明复合叶轮内流体流动更为稳定。

将不同工况下常规叶轮和复合叶轮计算临界汽蚀余量进行对比,如表3所示。随着流量增大,复合叶轮和常规叶轮临界汽蚀余量之差逐渐增大,复合叶轮对双吸泵空化性能的改善越来越明显;设计流量下,长短叶片复合叶轮相对常规叶轮双吸泵计算临界汽蚀余量降低了30.2%,大流量工况下,计算汽蚀余量降低了36.6%,表明本文所设计的长短叶片复合叶轮能够显著改善双吸泵的空化性能。

表3 不同工况计算临界汽蚀余量对比

Tab. 3 Comparison of critical net positive suction of pump with different impellers under different conditions

流量	临界汽蚀余量/m		两叶轮汽蚀余量差/m
	常规叶轮	复合叶轮	
$0.7Q_{opt}$	2.5	2.0	0.5
$1.0Q_{opt}$	4.3	3.0	1.3
$1.3Q_{opt}$	7.1	4.5	2.6

2.3 计算与试验结果对比分析

将计算所得双吸泵的临界汽蚀余量与空化试验

结果进行对比,如图5所示,计算所得临界汽蚀余量小于试验值,产生这种现象的原因一方面可能是现有空化计算模型还不够成熟,不能精确描述泵的空化流动^[15],另一方面,可能是计算模型与试验泵表面粗糙度不同,对临界汽蚀余量产生了一定影响。但从总体来看,计算值与试验值变化趋势一致,说明本文所采用的数值计算方法能够较为有效地预测双吸泵的空化性能。另外,无论对比试验值还是计算值,复合叶轮双吸泵的临界汽蚀余量比常规叶轮都明显减小,这也进一步说明了长短叶片复合叶轮能够显著改善双吸泵的空化性能。

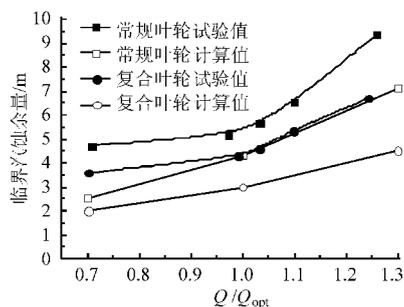


图5 数值计算与试验研究两叶轮的临界汽蚀余量曲线

Fig. 5 Comparison of critical net positive suction curves of pump with different impellers between simulation and experiment

2.4 叶轮内部空化流场分析

2.4.1 速度场对比分析

图6、图7分别表示设计流量工况和大流量工况下临界空化压力点附近常规叶轮和复合叶轮内0.5倍叶高处截面流线分布图。其中, Q_{opt} 是额定流量, P_{in} 是进口总压。

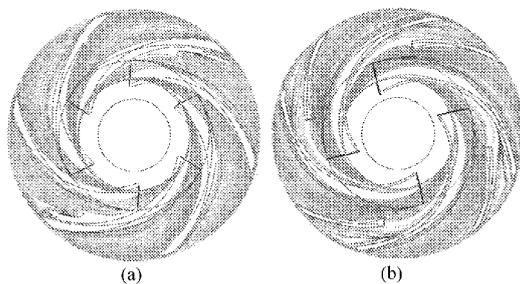


图6 $1.0Q_{opt}$ 、 $P_{in} = 4$ m 工况下叶轮截面流线分布

Fig. 6 Streamlines on middle stream surface of impeller under condition of $1.0Q_{opt}$, $P_{in} = 4$ m

(a) 常规叶轮 (b) 复合叶轮

由图6可以看出:设计工况下常规叶轮发生空化后,叶轮流道内靠近叶片背面附近出现较大面积的回流,出口附近出现脱流,使得流体在该区域堆积,不易排出,造成能量损失;复合叶轮由于短叶片对该区域的流体做功,提高了该区域流体的能量,改善了叶片背面的回流区,促进叶片背面较厚边界层内流体的排出,提高了该区域流道内与叶轮出口液

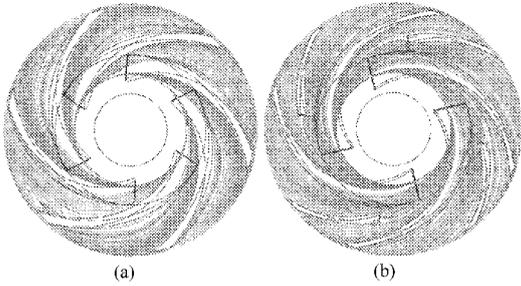


图7 $1.3Q_{opt}, P_{tin} = 5\text{ m}$ 工况下叶轮截面流线分布

Fig. 7 Streamlines on middle stream surface of impeller under condition of $1.3Q_{opt}, P_{tin} = 5\text{ m}$

(a) 常规叶轮 (b) 复合叶轮

流的过流能力,改善了泵的空化性能。

大流量工况下,常规叶轮流道内的回流区向叶轮出口推移,出口脱流区逐渐扩展;复合叶轮由于短叶片的布置,对叶轮流道内流动改善更加显著,流动更加稳定,叶轮内的回流及脱流情况基本消除,泵的空化性能明显提高。

2.4.2 叶片表面压力对比分析

图8表示设计工况下,复合叶轮和常规叶轮中间截面叶片表面压力系数沿叶片表面分布情况,其中, C_p 表示叶片表面压力系数, S 表示翼型中线相对长度(0表示叶片进口边,1表示叶片出口边)。图中每条型线均由压力面和吸力面上的流线组成,两条流线的压差表示叶片的载荷分布情况。从图中可以看出,复合叶轮和常规叶轮叶片表面压力变化趋势相似,最小压力均出现在叶片进口吸力面附近,即最容易发生汽蚀的部位;复合叶轮由于短叶片的存在,使长叶片的叶片载荷减小,相比常规叶轮,其进口附近低压区范围缩小;出口处,复合叶轮长叶片的压力值明显大于普通叶轮叶片。可见,复合叶轮能够有效改善叶轮内部压力分布,提高泵的空化性能。

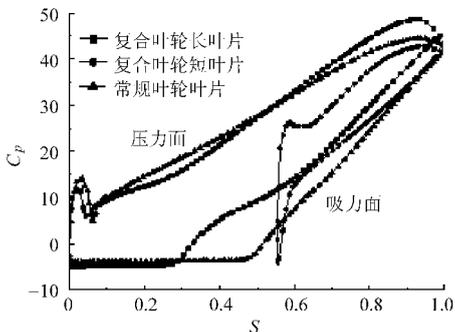


图8 复合叶轮和常规叶轮叶片表面压力分布

Fig. 8 Distribution of pressure on surface of blades under rated operating condition

2.4.3 气体体积分布对比分析

图9和图10分别表示设计工况和大流量工况下,相同进口压力下,叶轮内空化体积分数为0.1的空泡区域分布。

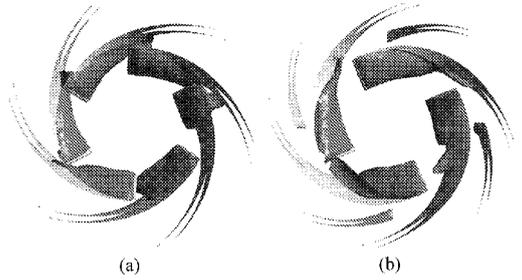


图9 $1.0Q_{opt}, P_{tin} = 4\text{ m}$ 工况下叶轮内气体分布

Fig. 9 Vapour distribution in impeller under the condition of $1.0Q_{opt}, P_{tin} = 4\text{ m}$

(a) 常规叶轮 (b) 复合叶轮

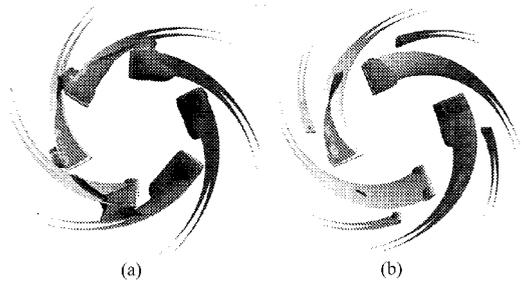


图10 $1.3Q_{opt}, P_{tin} = 5\text{ m}$ 工况下叶轮内气体分布

Fig. 10 Vapour distribution in impeller under condition of $1.3Q_{opt}, P_{tin} = 5\text{ m}$

(a) 常规叶轮 (b) 复合叶轮

如图9所示,设计工况下,水泵进口总压为4 m时,常规叶轮内空泡区沿叶片背面扩展并逐渐发展到叶片工作面,造成叶轮进口处流道严重堵塞,引起叶轮内流动分离,使叶轮内能量损失增大,此时水泵基本已经达到临界空化点附近;而复合叶轮内空泡区主要集中在长叶片的背面区域,比之常规叶轮,空泡区明显减少。

由图10可以看出,大流量工况下,水泵进口总压为5 m时,常规叶轮内空泡区已经向流道内扩展,流道堵塞严重,泵水力性能急剧下降,水泵处于临界空化点附近;复合叶轮短叶片背面仅有少量空泡产生,空泡贴着叶片背面,叶轮内空泡区域显著减少,远未达到临界空化点。图9和图10对比表明,长短叶片复合叶轮能够显著改善双吸泵在大流量工况下的空化性能。

另外,从图9和图10中还可以看出,叶轮内空泡区域呈不对称分布,这主要是由于叶轮和蜗壳之间的耦合作用,使得叶轮叶片表面压力分布不均匀造成的^[16]。

3 结论

(1) 通过对比两种不同叶轮双吸泵数值模拟与试验研究的空化性能,发现数值模拟得到的泵临界汽蚀余量与试验值存在一定的偏差,但二者临界空

化余量曲线的整体趋势是一致的,说明本文所采用的数值计算方法能够较为有效地预测双吸泵的空化性能。

(2) 对比两种不同叶轮的临界汽蚀余量,表明长短叶片复合叶轮能够明显降低双吸泵的临界汽蚀

余量,显著改善双吸泵在大流量下的空化性能。

(3) 通过分析两种不同叶轮双吸泵内部空化速度场、压力场和气体体积分布,表明长短叶片复合叶轮能够改善常规叶片中的流道堵塞问题,减少流动的分离,改善叶片载荷分布,提高泵的空化性能。

参 考 文 献

- 1 杨亚威. 隔舌对双吸离心泵性能影响及其改型设计研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2012.
Yang Yawei. Double suction pump cut-water to influence on the performance of the retrofit design and research[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology,2012. (in Chinese)
- 2 刘厚林, 刘东喜, 王勇, 等. 三种空化模型在离心泵空化流计算中的应用评价[J]. 农业工程学报,2012,28(16):54~59.
Liu Houlin, Liu Dongxi, Wang Yong, et al. Applicative evaluation of three cavitating modes on cavitating flow calculation in centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012,28(16):54~59. (in Chinese)
- 3 李红, 袁建平, 汤跃, 等. 双吸离心泵性能提高及其试验研究[J]. 农业机械学报,2005,36(12):77~80.
Li Hong, Yuan Jianping, Tang Yue, et al. Experimental study on improving performance of double suction pump [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2005,36(12):77~80. (in Chinese)
- 4 Хлопенков П. 关于离心泵的结构优化问题[J]. 庄长融, 译. 排灌机械,1988,6(6):13~17.
- 5 Thai Q, Lee C. The cavitation behavior with short length blades in centrifugal pump[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010,24(10):2007~2016.
- 6 徐洁, 谷传纲. 长短叶片离心泵叶轮内部流动的数值计算[J]. 化工学报,2004,55(4):541~544.
Xu Jie, Gu Chuan'gang. Numerical calculation of flow field in centrifugal impeller with splitter blades[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2004,55(4):541~544. (in Chinese)
- 7 袁寿其, 何有世, 袁建平, 等. 带分流叶片的离心泵叶轮内部流场的 PIV 测量与数值模拟[J]. 机械工程学报,2006,42(5):60~63.
Yuan Shouqi, He Youshi, Yuan Jianping, et al. PIV measurements and numerical simulations of flow in centrifugal pump impellers with splitting vanes[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006,42(5):60~63. (in Chinese)
- 8 阎殿甲. 提高超低转速部分流离心泵汽蚀性能的试验研究[J]. 导弹与航天运载技术,2001(6):53~60.
Yan Dianjia. Experiment study on the cavitation performance of the ultra-low specific speed centrifugal pump with patial[J]. Flow Missiles and Space Vehicles, 2001(6):53~60. (in Chinese)
- 9 崔宝玲, 朱祖超, 陈鹰, 等. 长中短叶片离心叶轮内部流动的数值模拟[J]. 推进技术,2006,27(3):243~247.
Cui Baoling, Zhu Zuchao, Chen Ying, et al. Numerical simulation of inner flow field in centrifugal impeller with long, middle and short blades[J]. Journal of Propulsion Technology, 2006,27(3):243~247. (in Chinese)
- 10 齐学义, 倪永燕. 复合式离心泵叶轮短叶片偏置设计分析[J]. 甘肃工业大学学报,2003,29(4):60~63.
Qi Xueyi, Ni Yongyan. Analysis of impeller design of compound centrifugal pumps with off set short blades [J]. Journal of Gansu University of Technology, 2003,29(4):60~63. (in Chinese)
- 11 肖若富, 吕腾飞, 王福军. 双蜗壳式双吸泵隔板结构对叶轮径向力的影响[J]. 农业机械学报,2011,42(9):85~88.
Xiao Ruofu, Lü Tengfei, Wang Fujun. Influence of rib structure in double-volute centrifugal pumps on the impeller radial force [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(9):85~88. (in Chinese)
- 12 李晓俊, 袁寿其, 潘中永, 等. 诱导轮离心泵空化条件下扬程下降分析[J]. 农业机械学报,2011,42(9):89~93.
Li Xiaojun, Yuan Shouqi, Pan Zhongyong, et al. Analysis of cavitation head drop in centrifugal pump with inducer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(9):89~93. (in Chinese)
- 13 Bak ir F, Rey R, Gerber A G, et al. Numerical and experimental investigations of the cavitating behavior of an inducer[J]. International Journal of Rotating Machinery, 2004,10(1):15~25.
- 14 Hydraulic Institute. Hydranlic institute standards for centrifugal, rotary & reciprocating pumps[M]. 14th ed. Parsippany, NJ: Hyraulic Instite, 1983.
- 15 黄思, 管俊. 基于空化模型的多级离心泵汽蚀性能分析[J]. 流体机械,2011,39(1):29~31.
Huang Si, Guan Jun. Analysis on cavitation performance in multi-stage centrifugal pump based on cavitation model[J]. Fluid Machinery, 2011,39(1):29~31. (in Chinese)
- 16 Jeanty F, Andrade J D, Asuaje M, et al. Numerical simulation of cavitation phenomena in a centrifugal pump [C]. Proceedings of the ASME 2009 Fluids Engineering Division Summer Meeting, 2009: 331~338.