doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.07.010

基于结构化网格的离心泵全流场数值模拟*

李晓俊 袁寿其 潘中永 袁建平 司乔瑞 (江苏大学流体机械工程技术研究中心,镇江 212013)

摘要:采用计算流体力学(CFD)方法对全流场模型下离心泵的性能进行了分析。阐述了离心泵计算区域的拓扑块 生成和结构化网格划分方法;分析了全流场模型和非全流场模型的数值模拟结果,并比较两者产生差异的原因。 证实了腔体的存在对模拟结果的影响,得到的全流场数值模拟性能预测精度优于非全流场数值模拟,其流态分布 也存在显著的差别,并获得了口环泄漏量与离心泵流量和扬程的关系。将离心泵全流场模型的模拟结果与试验值 进行了对比:设计工况点(Q_d),离心泵的扬程相对误差为0.79%,效率相对误差为0.9%,模拟结果和试验结果比 较接近;在0.2Q_d时,扬程相对误差为6.24%,效率相对误差为9.61%,极小流量点的数值模拟精度有待提高。 关键词:离心泵 全流场 泄漏流 结构化网格 数值模拟 中图分类号:TH311 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2013)07-0050-05

Numerical Simulation of Whole Flow Field for Centrifugal Pump with Structured Grid

Li Xiaojun Yuan Shouqi Pan Zhongyong Yuan Jianping Si Qiaorui (Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The performance of centrifugal pump with whole flow field was analyzed by using CFD technique. The blocking strategies and mesh generation on domains of the pump were presented. Numerical simulation of whole flow field model and simple model in CFX for the pump was then carried out and the reason of the difference between two models was compared. It was verified that the cavity indeed had effects on simulation results. The whole flow field model showed a higher accuracy than the simple model, and the flow pattern of two models were also different. The relationship between the sub-flowrates through front cavity and the overall performance of the pump was evaluated. The simulation results of whole flow field model and the measured results were compared. The relative errors of the head and efficiency were 0.79% and 0.9% at the normal flow rate Q_d , while they were 6.24% and 9.61% at 0.2 Q_d . The accuracy of numerical simulation should be improved at minimal flow point.

Key words: Centrifugal pump Whole flow field Leakage flow Structured grid Numerical analysis

引言

近年来,用于分析泵的水力性能和改进泵设计 的计算流体力学(CFD)技术已经有了广泛的应用。 CFD 技术在泵上的有效应用主要归功于具有强大 数据处理能力的高速计算机技术,该技术的主要优势在于能够在不使用经验系数的情况下比较好地预测泵性能曲线^[1]。

对 CFD 技术而言,研究其在泵上的适用性和模 拟精度是很重要的,目前的研究结果表明泵高效区

收稿日期: 2012-06-08 修回日期: 2012-07-23

^{*}国家自然科学基金重点项目(51239005)、国家自然科学基金资助项目(51009072)、江苏省研究生创新计划资助项目(CXZZ11_0564)和 江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介:李晓俊,博士生,主要从事离心泵流动不稳定性研究,E-mail: lixiaojun530@163.com

通讯作者: 袁寿其,研究员,博士生导师,主要从事流体机械及排灌机械研究, E-mail: shouqiy@ ujs. edu. cn

51

(0.7~1.2 倍设计流量)内的扬程预测值与试验值 基本吻合^[2~3];然而由于对泵的各类损失缺乏足够 的认识,在数值计算过程中,对一些损失(包括泄漏 损失、圆盘摩擦损失和机械损失)仍需要采用经验 系数进行修正,这往往导致预测的效率值与试验值 之间存在较大的偏差^[4]。

多种原因会造成损失的预测偏差,其中对原型 泵的简化被认为是数值模拟结果存在较大偏差的主 要原因^[5]:对有盖板的离心泵而言,需要关注叶轮 前后盖板与泵体之间的流动;对于没有盖板的斜流 泵和轴流泵而言,轮缘间隙的泄漏及其引起的二次 流都是需要深入研究的^[6]。随着计算方法和计算 机处理能力的提高,研究者对间隙泄漏开始重视起 来:轴流泵和斜流泵由于其流道相对简单,考虑轮缘 间隙泄漏的全流场模拟已经出现^[7];离心泵叶轮的 前后腔结构比较复杂,特别是前后口环和平衡孔的 尺寸较小,该区域的网格处理非常困难,因此对离心 泵进行全流场数值模拟的文献较少^[8-9]。

本文以单级单吸离心泵为研究对象,采用 ICEM软件,严格按照离心泵过流部件的尺寸对其 水力模型进行整体结构化网格划分。在对网格进行 无关性分析的基础上,研究离心泵包括叶轮前后腔 流动的全流场,并将泵的外特性计算值与试验结果 进行比较,验证模拟结果的可信度。

1 几何模型

计算对象是一台比转数 88.6 的离心泵,主要包括吸水室、叶轮、前后腔及蜗壳。本文采用的泵叶轮为无平衡孔的叶轮,该泵的结构图和三维水体图如图1所示,其主要几何尺寸及设计工况参数如下:吸水室进口直径 *D*_s = 65 mm,叶轮进口直径 *D*_j = 75 mm,叶轮出口直径 *D*₂ = 174 mm,蜗壳基圆直径



 $D_3 = 184 \text{ mm}$, 蜗壳出口直径 $D_d = 50 \text{ mm}_{\odot}$ 模型泵的 设计流量 $Q_d = 50 \text{ m}^3/\text{h}$, 设计扬程 $H_d = 34 \text{ m}$, 转速 $n = 2900 \text{ r/min}_{\odot}$

2 计算网格

2.1 网格划分

采用分区域网格生成方法,区域间采用交界面 技术进行连接。为减少交界面间数据插值的误差, 进行了两方面的处理:网格生成时需要保证区域两 侧的网格分布过渡一致,尽可能保证交界面两侧的 网格节点数相同或相近;尽量减少交界面的数目。 基于上述思想,对模型泵进行了计算区域和网格的 划分,本文的计算区域包括:进口延伸段、腔体(包 括吸水室、口环、前腔、后腔)、叶轮室、蜗壳和出口 延伸段。离心泵的全六面体网格如图2所示。



(a) 轴截面网格 (b) 中截面网格

采用 ICEM 生成六面体网格过程中, 拓扑块的 生成和映射是非常关键的步骤。根据几何形状, 对 创建的矩形块进行一系列的切割、拉伸、复制; 点、 线、面关联等; 最终得到与实体相似的块结构才能保 证生成高质量的六面体网格。在 ICEM 中, 创建拓 扑块有 2 种方式, 分别为"自顶向下"拓扑创建和 "自底向上"拓扑创建^[10]。本文在创建蜗壳和进出 口延伸段的拓扑块时采用"自顶向下"的方法; 叶轮 室和腔体采用"自底向上"的方法进行绘制。除腔 体外, 文中其余计算区域的网格划分方法与文 献[11]相似, 只是在近壁区域、叶片进出口和蜗壳 隔舌处略有不同。

在进行腔体的网格划分时,首先画出吸水室的 "O"型拓扑块。由图3可见,"O"型拓扑块由外围 的环绕块和内部的主块组成,在完成吸水室的拓扑 块后,将外围的环绕块拉伸并将得到的块结构与口 环关联,这样就得到了口环区的拓扑块。然后按照 腔体的几何形状继续对口环区的块结构拉伸、关联、 切割,最终得到图中所示的拓扑块结构。



图 3 腔体的拓扑块 Fig. 3 Blocksin cavity

2.2 边界层网格的处理

为保证数值模拟的精度,近壁区流动的准确捕 捉就成了模拟的关键,这也是壁面附近边界层网格 存在的原因。结构化网格的优势在于可以灵活地调 节各个节点的密度以调整边界层网格(即近壁面的 网格间隔)^[11]。在处理近壁区的网格时,可以用 *y*⁺ 值检验与壁面最近节点的位置,确保近壁区有足够 的节点数^[12]。文中 *y*⁺值表示离壁面最近的网格节 点到壁面的距离,为无量纲变量,其定义式为

$$y^{+} = \frac{\sqrt{\tau_{\omega}/\rho}\Delta d}{\nu} \tag{1}$$

式中 τ_{ω} ——壁面切应力, N/m²

ρ——流体密度,kg/m³

Δd——与壁面最近网格节点间的距离,m

ν──运动粘度,m²/s

在 CFX 软件中,对于可升级的壁面函数方程来 说,y⁺定义式为

$$y^{+} = \max(y^{*}, 11.06)$$
 (2)

式中,11.06 是对数方程和线性方程的交界点。根据该公式可以保证 y⁺值不小于这个值,则所有网格界面均在粘性亚层外侧。

进行上述处理后,经过网格无关性分析得到 表1所示的结构化网格,其中叶轮叶片表面 y⁺分布 如图4所示。

| 表 | ₹1 | 结构化 | 、网格 | 参数 |
|--------|------|---------|------|------------|
| Tab. 1 | Stru | ictural | grid | parameters |

| 参数 | 腔体 | 叶轮 | 蜗壳 |
|----------|------------|------------|---------------|
| 网格单元数 | 716 352 | 1 596 096 | 1 344 564 |
| 总体网格质量 | ≥0.33 | ≥0.73 | ≥0.61 |
| 网格角度/(°) | ≥18.9 | ≥18 | ≥18.3 |
| y * | 2.3 ~283.6 | 3.4 ~230.9 | 3. 5 ~ 128. 8 |

3 数值模拟方法

由于不同的湍流模型对近壁区网格数量要求不同,根据表 1 所示的 y⁺值范围可选择 RNG $k - \varepsilon$ 湍



Fig. 4 Distribution of y^+ on blade surface

流模型和可升级壁面函数来模拟泵内部流动。

计算域的进口采用总压入口条件,出口给定质 量流量,取值根据试验中的工况流量确定。叶轮形 成的壁面定义为旋转边界,其转速为叶轮转速;其他 壁面定义为无滑移边界。

控制方程的离散采用基于有限元的有限体积 法,对流项采用高分辨率格式,收敛精度设为10⁻⁵, 并检测扬程、效率和功率变化曲线以保证计算结果 的可信度。

4 数值模拟结果与讨论

4.1 流场计算结果及比较

图 5~8 为离心泵全流场数值模拟结果。为便 于比较,同时列出非全流场模型的计算结果,以对二 者的差异进行分析。

图 5 为设计工况下 2 种模型轴面内的速度分 布,该轴面靠近蜗壳的第 3、7 断面所在平面。



 图 5 设计工况下离心泵轴面内的速度分布云图
 Fig. 5 Velocity distribution in meridian plane of centrifugal pump under design condition

 (a) 全流场
 (b) 非全流场

由图可见,在叶轮出口区域,由于泵腔的存在, 全流场模型的速度分布无明显的规律;而非全流场 得到速度分布在靠近蜗壳的第7断面,呈三角形。 该断面的压力和速度流线分布如图6所示。由图中 可以看出,2种模型得到的蜗壳断面内均存在明显 的二次流,但非全流场计算得到的蜗壳断面的速度 分布对称性要优于全流场模型的预测结果,而实际 使用的离心泵叶轮出口区域的几何尺寸是不对称的^[13]。由于受到叶轮进口口环、前后泵腔间隙流的 影响,在蜗壳断面内,全流场模型不仅预测的速度分 布与实际更相符,而且全流场模型得到的压力值也 低于非全流场模型^[5]。



(a) 全流场 (b) 非全流场

叶轮进口区域,全流场模型得到的低速区范围 小于非全流场模型;离心泵在工作时,其前腔中靠近 叶轮出口处流体的压力大于靠近叶轮进口处流体的 压力,由于口环的存在,这种压力差会造成流体经过 口环流向叶轮进口,形成口环泄漏,该泄漏流体的流 速较高,在与进口主流掺合过程中产生漩涡,形成叶 轮进口靠近前盖板区域的局部高速区(见图 5、 图 7)。



由上述分析可知,腔体的存在对离心泵的流动 结构会产生较大的影响。对于本文采用的模型泵而 言,经过口环流入叶轮进口的泄漏流不仅干扰叶轮 进口的流态,实际进入叶轮的流量也会改变。以 0.66Q_d工况为例,图 8 为叶轮中间截面的速度云线 图,可以发现 2 种模型得到速度场的区别:采用全流 场模型时,除靠近隔舌的叶轮流道外,其余各流道速 度分布比较一致;而非全流场模型得到的各流道内 的速度分布差距较大,靠近蜗壳第 5 到第 8 断面的 叶轮流道内分离涡现象非常明显。在对全流场模型 分析时发现,采用全流场模型得到的叶轮流道内也 会出现类似于图 8b 的流动情况,只是发生的流量点 低些。



4.2 口环泄漏量

为读取不同工况下离心泵的口环泄漏量,在 CFX-POST软件中垂直于口环轴线方向作5个轴截 面,通过比较各截面的流量差异,最终确定不同流量 下口环处的泄漏量,如图9所示,图中横坐标表示各 工况点的相对流量(各工况点的实际流量与设计流 量的比值),纵坐标为各工况点的口环泄漏量与设 计流量比值。由图可见,口环泄漏量随工况点流量 的变化而变化,在设计工况点附近,口环的泄漏量约 为设计流量的6.37%。



该离心泵口环的内直径 $d_m = 81.8 \text{ mm}$,长度L = 15 mm,宽度 s = 0.4 mm(见图 10),由文献[14]的口 环泄漏量理论计算公式得出设计工况下离心泵的口 环泄漏量为 3.49 m³/h,即设计流量的 6.98%,可见,模拟得到的泄漏量与理论计算值近似。



图 10 口环间隙的结构示意图 Fig. 10 Structure profile of wear-rings

从图 9 中可以发现,在流量 0.4Q_d~1.1Q_d之间,口环泄漏量基本维持在设计流量的 6%;由于泵

在小流量工况下运行时,叶轮出口液流角的改变使 得泵体和叶轮间产生较大的冲击损失,并影响了口 环处的泄漏水平,于是当流量低于 0.4Q_d时,其泄漏 量随流量的下降迅速增加。在流量 0.2Q_d时,由于 口环泄漏量的增加,进入叶轮的实际流量约为试验 中由泵进口测得流量的 1.4 倍。本文只考虑口环处 的泄漏,对于同时存在口环和平衡孔的泵而言,其泄 漏量可能会更大^[5]。

5 试验对比

在江苏大学流体中心实验室的开式试验台上对 离心泵进行性能试验。由图 11 可知,模拟结果与试 验结果较为接近,在设计工况点,离心泵的扬程试验 值为 34.04 m,效率试验值为 74.42%;而扬程模拟



Fig. 11 Performance curves of centrifugal pump

值为 34. 31 m,效率模拟值为 73. 75%。即扬程相对 误差为 0. 79%,效率相对误差为 0. 9%。随着流量 的降低,模拟值与试验值的偏差增大,不过这种偏差 仍处于可接受的范围内,多数工况点的模拟结果与 试验值的误差未超过 5%。然而在流量 0. 2Q_d工况 时,离心泵的扬程模拟值为 37. 07 m,效率模拟值为 39. 27%;而扬程试验值为 39. 54 m,效率试验值为 35. 83%;其扬程相对误差为 6. 24%,效率相对误差为 9. 61%,极小流量点的数值模拟精度仍有待提高。

6 结论

(1)在设计工况点附近,采用结构化网格的离心泵全流场数值模拟得到的扬程和效率值与试验结果较为接近,说明本文采用数值方法的可靠性,全流场模型的模拟方法对于提高离心泵的数值模拟精度具有一定的意义。

(2)比较全流场模型和非全流场模型的数值模 拟结果,发现腔体的存在改变了进入叶轮内的流量, 并因此影响叶轮内部的流动状态。采用非全流场模 型得到的泵内部流态不能反映泵的真实流动规律。

(3) 口环的泄漏量随工况点流量的变化而变 化,对于模型泵而言,在设计工况点附近,口环的泄 漏量约为设计流量的6%;小流量工况下,叶轮和泵体 间较大的冲击损失是造成口环泄漏量增加的原因。

参考文献

- 1 潘中永,李晓俊,袁寿其,等. CFD 技术在泵上的应用进展[J]. 水泵技术,2009,185(1):1~6.
- 2 周岭,施卫东,陆伟刚,等.深井离心泵数值模拟与试验[J].农业机械学报,2011,42(3):69~73.
- Zhou Ling, Shi Weidong, Lu Weigang, et al. Numerical simulation and experiment on deep-well centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3):69 ~73. (in Chinese)
- 3 袁寿其,徐宇平,张金凤,等. 流固耦合作用对螺旋离心泵流场影响的数值分析[J]. 农业机械学报,2013,44(1):38~42,47. Yuan Shouqi, Xu Yuping, Zhang Jinfeng, et al. Numerical analysis for effect of fluid-structure interaction on flow field in screw centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(1):38~42,47. (in Chinese)
- 4 Lucius A, Brenner G. Unsteady CFD simulation of a pump in part load conditions using scale-adaptive simulation [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2010, 31(6): 1113~1118.
- 5 Benigni H, Jaberg H, Yeung H, et al. Numerical simulation of low specific speed American petroleum institute pumps in part-load operation and comparison with test rig results [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2012, 134(2): 024501.
- 6 Kaewnai S, Chamaoot M, Wongwises S. Predicting performance of radial flow impeller of centrifugal pump using CFD [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009, 23(6): 1 620 ~ 1 627.
- 7 施卫东,张华,陈斌,等.不同叶顶间隙下的轴流泵内部流场数值计算[J]. 排灌机械工程学报,2010,28(5):374~377. Shi Weidong, Zhang Hua, Chen Bin, et al. Numerical simulation of internal flow field in axial-flow pump with different blade tip clearance sizes [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(5): 374~377. (in Chinese)
- 8 曹卫东,张晓娣,高一,等. 径向回流平衡孔低比转数离心泵空化性能研究[J]. 农业机械学报,2012,43(1):37~41. Cao Weidong, Zhang Xiaodi, Gao Yi, et al. Cavitation performance of the low specific-speed centrifugal pump with radial reflux balance hole [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1): 37~41. (in Chinese)
- 9 王洋,蒋其松.两段变曲率叶型离心泵设计研究[J]. 排灌机械工程学报,2010,28(1):25~30. Wang Yang, Jiang Qisong. Research on centrifugal pump with double curvature blade [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(1): 25~30. (in Chinese)
- 10 纪兵兵,陈金瓶. ANSYS ICEM CFD 网格划分技术实例详解 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2012.

靠后盖板一侧的空泡体积分数小于靠前盖板一侧。

3 结论

(1)基于泵产品测试系统和图像采集系统,在 离心泵闭式试验台上建立了离心泵进口部分空化形态的可视化试验系统,并实现了泵性能参数和空化 形态图像的同步采集,提高了试验测试的准确性。 (2)空泡首先在模型泵叶片背面进口边附近初 生,但运行工况不同,空泡的产生位置不同;随着 NPSHa的下降,在多个叶片背面产生空泡。空泡随 着叶轮的转动,表现出强烈的非定常变化。当泵扬 程下降较大时,空泡的形态相对稳定,其分布随叶轮 转动变化不大,且靠后盖板一侧的空泡分布小于靠 前盖板一侧。

参考文献

- 1 Ding H, Visser F C, Jiang Y, et al. Demonstration and validation of a 3D CFD simulation tool predicting pump performance and cavitation for industrial applications[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2011, 133(1): 1~14.
- 2 Wu Dazhuan, Wang Leqin, Hao Zongrui, et al. Experimental study on hydrodynamic performance of a cavitating centrifugal pump during transient operation [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010, 24(2): 575 ~ 582.
- 3 苏永生,王永生,段向阳.离心泵空化试验研究[J]. 农业机械学报,2010,41(3):77~80. Su Yongsheng, Wang Yongsheng, Duan Xiangyang. Cavitation experimental research on centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3):77~80. (in Chinese)
- 4 杨敏官,孙鑫恺,高波,等.离心泵内部非定常空化流流动特征的数值分析[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2012,33(4): 408~413.

Yang Minguan, Sun Xinkai, Gao Bo, et al. Numerical analysis of unsteady cavitating flow characteristic in centrifugal pump[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2012, 33(4):408 ~413. (in Chinese)

- 5 Zhou L, Wang Z. Numerical simulation of cavitation around a hydrofoil and evaluation of a RNG k ε model [J]. Journal of Fluids Engineering, 2008, 130(1): 1 ~ 7.
- 6 王勇,刘厚林,袁寿其,等. 离心泵内部空化特性的 CFD 模拟[J]. 排灌机械工程学报,2011,29(2):99~103. Wang Yong, Liu Houlin, Yuan Shouqi, et al. CFD simulation on cavitation characteristics in centrifugal pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(2):99~103. (in Chinese)
- 7 Dular M, Bachert R, Stoffel B, et al. Experimental evaluation of numerical simulation of cavitating flow around hydrofoil [J]. European Journal of Mechanics-B/Fluids, 2005, 24(4): 522 ~ 538.
- 8 Watanabe S, Ikeda A, Nakamura I, et al. Observation of unsteady cavitating flow in flat plate cascades [C] // 25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Paper 012047, 2010.
- 9 Friedrichs J, Kosyna G. Unsteady PIV flow field analysis of a centrifugal pump impeller under rotating cavitation [C] // Fifth International Symposium on Cavitation, Cav 03 OS 6 005, 2003.
- 10 时素果,王国玉,王复峰,等.绕三维水翼云状空化现象的试验研究[J].应用力学学报,2011,28(2):105~110.
 Shi Suguo, Wang Guoyu, Wang Fufeng, et al. Experimental study on unsteady cavitation flows around three-dimensional hydrofoil
 [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2011,28(2):105~110. (in Chinese)
- 王勇,刘厚林,袁寿其,等. 离心泵非设计工况空化振动噪声的试验测试[J]. 农业工程学报,2012,28(2):35~38.
 Wang Yong, Liu Houlin, Yuan Shouqi, et al. Experimental testing on cavitation vibration and noise of centrifugal pumps under off-design conditions[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(2): 35~38. (in Chinese)
- 12 谭磊,曹树良,王玉明,等. 三维 ALE15 翼型空化流动数值模拟[J]. 农业机械学报,2012,43(9):49~52. Tan Lei, Cao Shuliang, Wang Yuming, et al. Numerical simulation of cavitation for 3-D ALE15 hydrofoil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(9):49~52. (in Chinese)

(上接第 54 页)

- 11 周水清,孔繁余,王志强,等. 基于结构化网格的低比转数离心泵性能数值模拟[J]. 农业机械学报,2011,42(7):66~69. Zhou Shuiqing, Kong Fanyu, Wang Zhiqiang, et al. Numerical simulation for low specific-speed centrifugal pump with structured grid [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(7):66~69. (in Chinese)
- 12 李晓俊,袁寿其,潘中永,等. 离心泵边界层网格的实现及应用评价[J]. 农业工程学报,2012,28(20):67~72.
 Li Xiaojun, Yuan Shouqi, Pan Zhongyong, et al. Realization and application evaluation of near-wall mesh in centrifugal pumps
 [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(20): 67~72. (in Chinese)
- 13 董亮,刘厚林,谈明高,等. 离心泵全流场与非全流场数值计算[J]. 排灌机械工程学报,2012,30(3):274~278.
 Dong Liang, Liu Houlin, Tan Minggao, et al. Numerical calculation of whole and non-whole flow field in centrifugal pumps [J].
 Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012,30(3):274~278. (in Chinese)
- 14 Gülich J F. Centrifugal pump [M]. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2008.