

基于CFD的离心泵关死点流动性能分析

黄思¹, 杨文娟¹, 宿向辉¹, 区国惟²

1. 华南理工大学, 广州 510640
2. 广东省佛山水泵厂有限公司, 佛山 528000

摘要 流体动力学数值计算(CFD)被广泛用于研究离心泵内部的流场和外特性预测,在设计工况下计算准确性较高,近年在流体机械领域的研究中占有重要位置。然而针对关死点工况离心泵流场的CFD模拟,现有研究都是采用极小流量作为边界条件,难以得到水泵关死点的真实流动性能。本文采用完全零流量的边界条件,以常用的IS125型管道离心水泵为例,借助于瞬态CFD流场计算技术,进行关死点及其附近工况的非定常流场数值模拟和性能预测,并得到实测结果的验证。研究结果发现,在非设计工况尤其是关死点和小流量工况下,叶轮每个通道内具有不同的流场分布和过流能力,导致水泵性能参数出现较大的脉动现象。在关死点工况下,蜗壳隔舌所承受的流动冲击最为严重,靠近蜗壳上游的叶轮通道是排水状态,而靠近蜗壳下游的叶轮通道则是吸水状态。本文提出的关死点和小流量工况下离心泵流场计算方法能较为有效的预测该工况下泵的扬程和轴功率,得到的叶轮流道过流能力大小的结论,具有一定的学术和工程价值。

关键词 离心泵关死点;非定常流场;数值模拟;性能预测

中图分类号 TH311

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.10.014

Flow Performance Analysis of Shutoff Condition in Centrifugal Pump Based on CFD Simulation

HUANG Si¹, YANG Wenjuan¹, SU Xianghui¹, OU Guowei²

1. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China
2. Foshan Pump Factory Co. Ltd., Foshan 528000, China

Abstract CFD simulations on flow field of centrifugal pumps are widely used to investigate the inner flow and predict pump performance due to its convenience and accuracy, which have already been an effective tool in fluids machinery field. However, CFD research of the shutoff is currently performed by means of the minor-flow assumption, which is different from real operating conditions and difficult to well predict pump performances at shutoff conditions. In this paper, the zero-flow boundary condition is applied to numerical simulation of unsteady flow for the IS125 centrifugal pump with the unsteady CFD techniques. The pump performances are predicted and verified by the pump performance test. The numerical result shows that there are different distributions of flow field and flow rates in the impeller channels, leading to serious fluctuations of pump performance. At the shutoff, the volute tongue suffers from the most serious flow impact among various operating conditions. It is also found that the channels of the impeller close to the upstream of volute are water-discharging, but the channels of the impeller near the downstream of volute are water-inhaling. This method enables effective investigation of the flow field and characteristics at shutoff conditions. The obtained impeller channel flow ability may have academic and engineering values.

Keywords shutoff condition of centrifugal pumps; unsteady flow field; numerical simulation; performance prediction

收稿日期:2013-12-23;修回日期:2014-01-30

作者简介:黄思,教授,研究方向为流体机械,电子邮箱:huangsi@scut.edu.cn

应用格式:黄思,杨文娟,宿向辉,等.基于CFD的离心泵关死点流动性能分析[J].科技导报,2014,32(10):80-83.

以往离心泵设计主要考虑设计点及其附近工况的水力性能,对关死点性能关注较少。当离心泵关死点扬程低于最大扬程时,性能曲线会出现驼峰,水泵在小流量工况下运行不稳定,泵和管路系统产生振动和噪声。随着社会经济的发展,国内外行业开始对离心泵关死点性能提出明确要求,通过设定关死点扬程以控制泵的性能曲线形状,使水泵能平稳运行^[1-3];通过降低关死点功率可以减少功耗、提高水泵的工作效率^[4]。因此离心泵关死点性能的研究具有重要的学术价值和工程意义。

离心泵关死点扬程和功率尚无有效的计算公式,一般只能通过试验获得。近年来,一些学者开始对关死点工况离心泵流场进行CFD模拟研究。Dyson等^[5]以泵泄漏量(设计流量的1%~5%)为边界条件,模拟计算了一台3叶片离心泵非定常流场和关死点扬程。黄萍^[6]和吴贤芳^[7]采用Dyson的方法,分别对比转速为65的离心泵关死点内流场进行了数值模拟和PIV测试研究。朱波^[8]也以设计流量的20%作为边界条件,模拟计算了IS80型低比转速离心泵关死点附近工况的流动性能。目前关死点工况离心泵内流场的CFD研究都是采用极小流量边界条件,一方面难以得到关死点水泵的真实流动性能,另一方面在实际计算中也难以定量把握极小流量这一原则。本文采用完全零流量的边界条件,以常用的单级单吸IS125型管道离心水泵为例,进行关死点及其附近工况的非定常流场数值模拟,并预测关死点扬程和功率等性能参数。

1 计算模型

1.1 计算域及网格划分

选取IS125型管道离心水泵(比转速 $n_s=65$,叶轮叶片数 $Z=6$)为研究对象。流场计算域由入口管路、叶轮、蜗壳和出口管路组成。应用Pro-E构造计算域的三维模型,导入ICEM软件中进行计算网格划分,得到如图1所示的四面体网格单元。网格单元总数为1019538,其中进口段、叶轮、蜗壳和出口段计算域的网格数分别为334500、331888、279810和73340。采用滑移网格进行非定常计算,设置入口段、泵体与叶轮的交界面为滑移界面,叶轮计算域设在旋转坐标系,其余计算域设在静止坐标系。

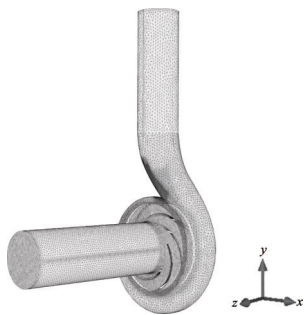


图1 计算域网格单元

Fig. 1 Grids of computational domains

1.2 泵工况及流体物性

水泵的介质是20℃清水,计算中所使用的操作工况、介质物性等参数如表1所示。其中,设计工况流量 $Q_d=54$ L/s。

表1 水泵操作工况及介质物性

Table 1 Operation conditions and fluid properties

流量 $Q/$ ($L \cdot s^{-1}$)	转速 $n/$ ($r \cdot \min^{-1}$)	密度 $\rho/$ ($kg \cdot m^{-3}$)	动力黏度 $\mu/$ ($Pa \cdot s$)
0~65	2900	998.2	1.003×10^{-3}

1.3 边界条件

与常见设置极小流量边界条件的计算方法不同,本文按照实际流量大小设置边界条件:1)进口边界条件:采用压力开口条件(Opening),压力值可按管道压力给定。2)出口边界条件:采用质量流量。对于关死点工况,流量设置为零。3)采用无滑移固壁条件,并使用标准壁面函数确定固壁附近流动。

1.4 非定常求解法

运用Ansys-CFX软件进行离心泵非定常流场计算,选取标准 $k-\epsilon$ 湍流模型,SIMPLEC算法求解压力和速度的耦合。设置时间步长 $\Delta t = T/20Z$ ($T=60/n$,为叶轮旋转一周所需的时间,其中 n 为泵转速, Z 为叶轮叶片数),以定常计算结果作为初始条件,通过设置计算残差和监测水泵扬程 H 、叶轮功率 N 的谐波稳定程度判断计算是否结束。

1.5 计算后处理

非定常流场计算后,由结果文件读出以下数据:1)计算域进出口平均静压和总压,由此计算水泵扬程 H ;2)叶轮计算域的扭矩,由此计算叶轮功率 N 和水力效率 η_h ;3)叶轮各叶片通道的出口流量 Q_b ;4)蜗壳隔舌过流截面的流量 Q_c 。

2 计算结果及分析

2.1 关死点非定常外特性

图2和图3分别给出了关死点($Q=0$)、设计点($Q=Q_d$)的扬程 H 、叶轮功率 N 随时间 t 的变化曲线。由图可见,在经历了大约 $3T$ 时间($T=0.0207$ s)后, H 、 N 随 t 开始作规则的谐波变化,即流动进入了相对稳定的阶段。在一个周期 T 内, H 、 N 均出现6次峰值,与叶轮的叶片数相对应。表2给出相对稳定后的 H 、 N 时均值、脉动幅度、相对脉动值的计算结果。由表2可见,关死点的相对脉动值 $\Delta H/H$ 、 $\Delta N/N$ 分别为10.1%和28.2%,而设计点的 $\Delta H/H$ 、 $\Delta N/N$ 值仅为6.7%和8.3%。关死点的性能参数有较大的脉动幅度,尤其是叶轮功率 N 的脉动幅度最为显著,其原因是后面将提到的叶轮各个通道的过流量不均衡所造成。

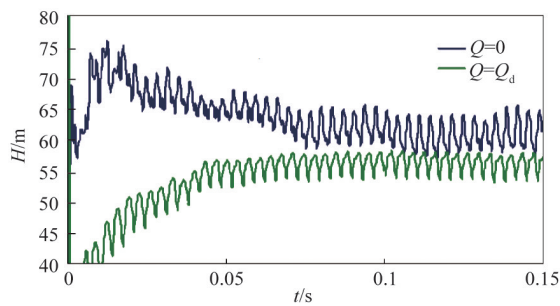


图2 水泵 H 随时间 t 的变化

Fig. 2 Variation of pump head H with time t

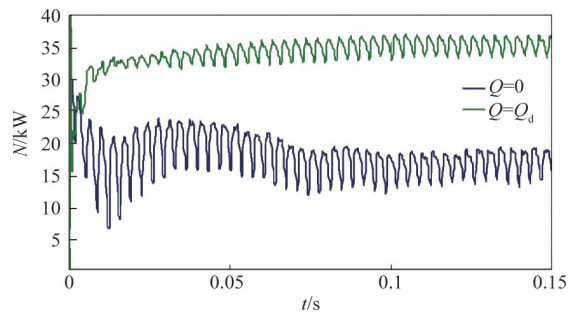


图3 水泵 N 随时间 t 的变化

Fig. 3 Variation of impeller power N with time t

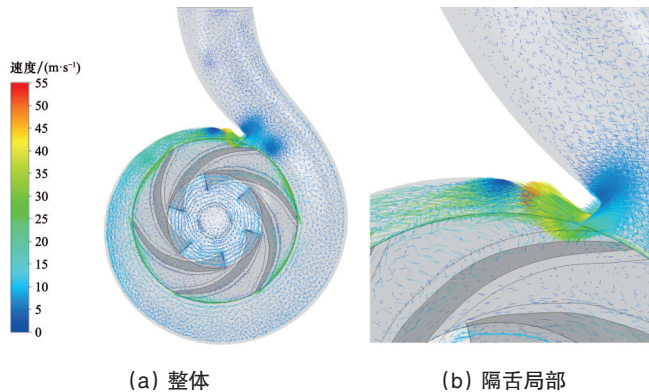
表2 水泵性能参数脉动情况

Table 2 Pulsation of pump characteristics

	时均值 H (m)	脉动幅度 ΔH (m)	相对脉动 $\Delta H/H$ (%)	时均值 N (kW)	脉动幅度 ΔN (kW)	相对脉动 $\Delta N/N$ (%)
关死点	62	6.3	10.1	17	4.8	28.2
设计点	55	3.7	6.7	35	2.9	8.3

2.2 流速场

图4给出了相对稳定时刻($t=0.15$ s)关死点工况水泵内的流速矢量图。从图可以看出,旋转叶轮的牵连运动,使得叶轮出口附近的流速较高,最大流速出现在隔舌最小的过流截面(约有40 m/s),流速方向与叶轮旋转方向一致。关死点工况叶轮总体的过流量为零,此时泵体内的主流是由叶轮带



(a) 整体

(b) 隔舌局部

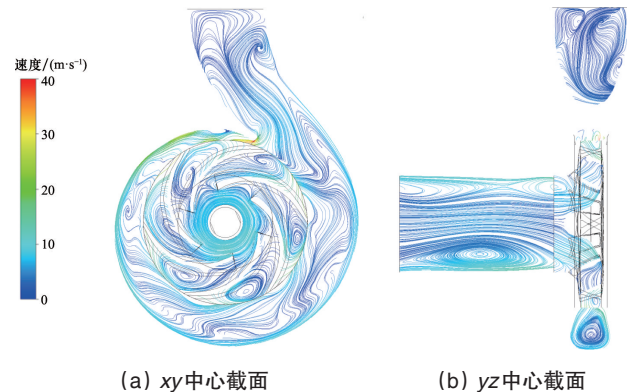
图4 关死点工况水泵内的流速矢量($t=0.15$ s)

Fig. 4 Velocity distribution inside the pump at shutoff conditions ($t=0.15$ s)

为进一步研究这一现象,图6给出各工况下叶轮各通道出口的流量值 Q_b ($t=0.15$ s)。叶轮通道按1~6顺序与蜗壳上游(隔舌)到下游(喉部)就近对应。在关死点工况,叶轮总体的过流量为零,靠近蜗壳上游的3个通道(1,2,3)是排水状态(Q_b 值为负),但靠近下游的3个通道(4,5,6)则是吸水状态(Q_b 值为正)。随着 Q 的增大,吸水的通道逐渐减少,排水的通道逐渐增多。当 $Q \approx 0.2 Q_d$ 时,所有的叶轮通道基本处于排水状态,但靠近蜗壳下游的通道 Q_b 较小,靠近蜗壳上游的通道 Q_b 较大。当 $Q \approx Q_d$ 时,所有叶轮通道的 Q_b 基本相等。与 $Q < Q_d$ 的情况相反, $Q > Q_d$ 时靠近蜗壳下游的叶轮通道 Q_b 较

动的绕蜗壳圆周方向的循环流动。

图5给出了关死点工况水泵内的流线分布。无论在 xy 或 yz 中心截面,水泵入口段、叶轮叶片通道和蜗壳内部都能看到尺度不同的旋涡,这些旋涡产生了很大的能量损耗。值得注意的是,图5(a)中叶轮6个通道内具有明显不同的流场分布,对这一现象文献[9]曾有论述。



(a) xy 中心截面

(b) yz 中心截面

图5 关死点工况水泵内的流线分布($t=0.15$ s)

Fig. 5 Streamline distribution inside the pump at shutoff conditions ($t=0.15$ s)

大,靠近蜗壳上游的叶轮通道 Q_b 较小。由此可以判断,非设计工况尤其是小流量工况下,叶轮旋转时各通道不断改变位置, Q_b 同时发生变化,流场处于不稳定状态。在水泵设计工况下,叶轮各个通道的流场相对一致, Q_b 相对均匀,工况也比较稳定。

为考察图4中蜗壳隔舌流动的变化规律,图7给出该截面过流量 Q_1 随泵流量 Q 变化的情况。由图7可见,在关死点隔舌通过的 Q_1 最大,这意味着该工况下,隔舌所承受的流动冲击最严重。随着 Q 的增加, Q_1 减少使得对隔舌的冲击逐渐减弱。

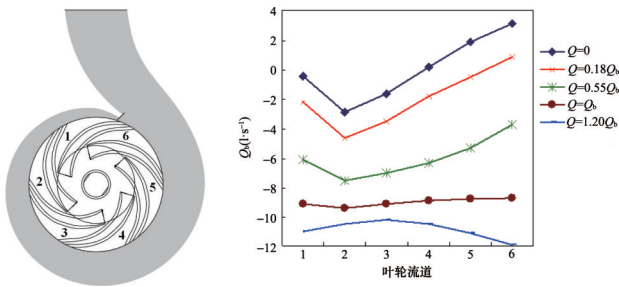


图6 叶轮各通道内的 Q_i 分布 ($t=0.15$ s)

Fig. 6 Flow rate distribution of each impeller channel ($t=0.15$ s)

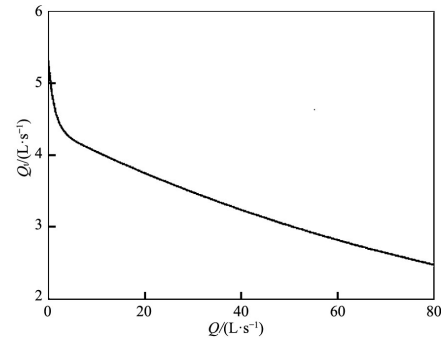


图7 蜗壳隔舌截面的 Q_i ($t=0.15$ s)

Fig. 7 Flow rate at the tongue section of volute ($t=0.15$ s)

2.3 泵性能预测与实验验证

水泵容积效率和机械效率可根据经验公式^[10]得到,由此计算出水泵的轴功率 P 和效率 η 。为检验离心泵关死点流动计算方法的有效性,图8给出按时均值计算的IS125型离心泵的 $Q-H$ 、 $Q-\eta$ 和 $Q-P$ 性能曲线,与实测结果进行对比,可以看出,在关死点和小流量工况下,扬程 H 、轴功率 P 和效率 η 计算值与试验值符合较好,满足工程精度要求,表明本研究提出的离心泵关死点的流动数值计算方法切实可行。

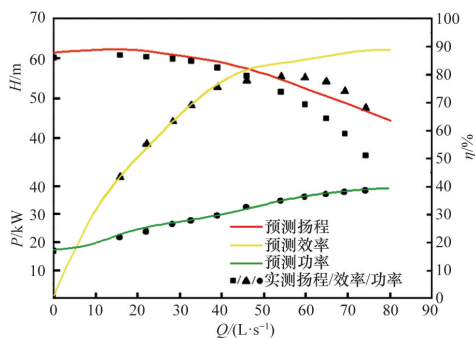


图8 IS125型离心泵的性能预测与实测结果对比

Fig. 8 Characteristic prediction and experimental verification of IS125 centrifugal pump

3 结论

1) 非设计工况尤其是关死点和小流量工况下,叶轮每个通道内具有明显不同的流场分布和过流能力,导致水泵性能的不稳定。

2) 在泵关死点工况,扬程和叶轮功率的相对脉动值分别为10%和28%左右。蜗壳隔舌通过的流速最高,所承受的流动冲击最严重。靠近蜗壳上游的叶轮通道处于排水状态,而靠近蜗壳下游的叶轮通道则处于吸水状态。随着泵流量的增大,排水的叶轮通道逐渐增多。在设计工况,叶轮各个通道的流场相对一致,流量相对均匀,工况也比较稳定。

3) 关死点和小流量工况下水泵性能参数预测值与试验值符合较好,表明本文提出的离心泵关死点流动数值计算方法切实可行。

参考文献 (References)

- [1] Felix A M, Philippe D, Peter H. CFD calculation of a mixed flow pump characteristic from shutoff to maximum flow[J]. Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(3): 798-802.
- [2] Throne E W. Head and power at closed valve[C]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Conference on Part-load Pumping Operation, Control and Behavior, London, England, September 1-2. 1988.
- [3] Stirling T E. Analysis of the design of two pumps using NEL methods [C]/Centrifugal Pumps: Hydraulic Design, I Mech E Conference Publications, London: Mechanical Engineering Publications Limited for the Institution of Mechanical Engineers, 1982: 55-73.
- [4] Kala M, Steven F, Sadrul U. Solar photovoltaic water pumping for remote locations[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008, 12(2): 472-487.
- [5] Dyson G, Teixeira J. Investigation of closed valve operation using computational fluid dynamics[C]. Proceedings of the ASME 2009 Fluids Engineering Division Summer Meeting, Vail, Colorado, USA, August 2-6, 2009.
- [6] 黄萍. 离心泵关死点内部流场数值模拟及实验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2008.
Huang Ping. Numerical simulation of flow field and experiment study in centrifugal pumps at shut-off condition[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2008.
- [7] 吴贤芳. 离心泵关死点性能的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2013.
Wu Xianfang. Research on characteristics of centrifugal pumps at shut-off condition[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2013.
- [8] 朱波. 离心泵叶轮特殊切割方法的研究与探讨[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2012.
Zhu Bo. Research and discussion unconventional methods of impeller cutting in the centrifugal pump[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2012.
- [9] 黄思, 吴玉林. 离心泵内三维流场非对称性及泵受力的数值分析[J]. 流体机械, 2006, 34(2): 30-33.
Huang Si, Wu Yulin. Analysis of flow field asymmetry and force on a centrifugal pump by a 3-D numerical simulation[J]. Fluid Machinery, 2006, 34(2): 30-33.
- [10] 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2011.
Guan Xingfan. Modern pumps theory and design[M]. Beijing, China Astronautic Publishing House, 2011.

(责任编辑 侯澄芝)