

离心泵内部不稳定流动的 PIV 测试*

任芸¹ 吴登昊¹ 刘厚林² 蒋兰芳¹

(1. 浙江工业大学之江学院, 杭州 310024; 2. 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

摘要: 以一台比转数为 74 的离心泵为研究对象, 首先通过外特性试验发现当流量约低于 $18 \text{ m}^3/\text{h}$ 后, 泵的扬程随流量变化非常小, 然后采用 PIV 技术探索了该扬程曲线下叶轮流道内不稳定流动涡的发生、发展规律。试验结果表明: 不稳定流动在 $0.6Q_{\text{BEP}}$ 工况开始产生, 直到 $0.4Q_{\text{BEP}}$ 工况得到发展, 最后在 $0.1Q_{\text{BEP}}$ 时几乎扩展到整个叶轮流道; 叶轮旋转过程中, 靠近蜗壳隔舌处的叶轮流道内流动最不稳定, 也是最先出现分离涡的流道; 随着流量的降低, 附着于叶片工作面的分离涡逐渐增多、汇聚, 不断发展的漩涡向流道出口移动的同时, 也偏向于流道中心。

关键词: 离心泵 不稳定流动 外特性 分离涡 PIV

中图分类号: TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)02-0046-06

PIV Experiment on Flow Instabilities in Centrifugal Pump

Ren Yun¹ Wu Denghao¹ Liu Houlin² Jiang Lanfang¹

(1. Zhijiang College, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310024, China

2. Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: A centrifugal pump with specific speed of 74 was studied. Hydraulic performance test was done firstly, and the result showed that the head changed little with the flow reduced when flow was less than $18 \text{ m}^3/\text{h}$. In order to research the flow instabilities under the above $H-Q$ curve, PIV technique was adopted to discover the onset and development rule of unstable vortex within the impeller. The results showed that the flow was separated at $0.6Q_{\text{BEP}}$, developed at $0.4Q_{\text{BEP}}$ and spread almost the whole impeller passage at $0.1Q_{\text{BEP}}$. In addition, flow in the passage near the tongue was the most unstable, and the vortex was also occurred in this passage firstly by comparing with rest of passages. With the flow rate decreasing, the vortex on the pressure side was increased and converged to a large-size vortex which spread to the outlet of passage and moved to the centre area of the passage in the end.

Key words: Centrifugal pump Flow instabilities Global performance characteristics Unstable vortex PIV

引言

在离心泵内, 尤其是在叶轮内, 由于强旋转、大曲率、粘性以及逆压梯度的作用, 不可避免地影响各种边界层厚度、损失以及各种不稳定流动现象, 如脱流、漩涡、二次流、失速等; 另外, 由于动-静部件之间的相互干扰, 形成了离心泵内部流动特有的非定常性^[1-2]。这些特征的存在使得离心泵内部流动是流体动力学中最复杂的流动之一^[3-4]。因此, 反映实际物理现象的三维粘性非定常流场的研究便构成了现代离心泵的主要研究方向之一^[5]。

随着近代光学、激光技术、计算机技术、图像处理技术的发展, 基于拉格朗日质点运动研究流体运动的非接触式瞬态流场测试技术 (Particle image velocimetry, PIV) 已成为研究叶轮机械内部流动规律的先进测试手段^[6-9]。至今, 已有不少国内外学者采用 PIV 手段对离心泵内不稳定流动现象及其发展规律进行了大量的研究。

Sinha 等^[10-12]利用 PIV 和压力脉动对离心泵内部旋转失速现象的初生和发展变化规律进行了研究, 研究结果表明随着流量的减少、导叶流道内失速团的泄漏和回流的逐渐增强, 失速团由 1 个流道扩

收稿日期: 2014-03-25 修回日期: 2014-04-27

* 国家自然科学基金资助项目 (51179075)、浙江省教育厅科研资助项目 (Y201432222)、浙江工业大学自然科学基金重点资助项目 (2014XZ015) 和浙江省自然科学基金资助项目 (LQ13A020003)

作者简介: 任芸, 讲师, 主要从事离心泵内不稳定流动研究, E-mail: renyun_ry@hotmail.com

散到 2 个流道。Westra 等^[13]采用 PIV 和 CFD 方法对离心泵叶轮内的二次流现象进行了研究,结果表明二次流是导致叶片吸力面和前盖板交接处低速区形成的主要原因,“射流-尾迹”结构的强度随着流量的增加而逐渐减弱。邵春雷等^[14]通过 PIV 对离心泵内部定常和非定常流动进行测量,结果表明,压水室内速度沿轴向分布均匀,随圆周角增大而减小,在叶轮和压水室的交界处,存在清晰的速度分界线。刘厚林等^[15]采用 PIV 对双叶片离心泵内的失速现象进行测量,结果表明,叶轮内的失速现象是由于压力面的流动分离所引起的,随着流量的减小,压力面的负向轴向速度区域随着失速的发展而扩大,吸力面附近具有负向轴向速度的流体形成了叶轮进口的回流。

本文对一比转数为 74 的离心泵内不稳定流动现象进行 PIV 测量,分析离心泵内部不稳定流动的发生、发展规律,揭示不稳定流动对离心泵性能特性的影响规律,同时研究不稳定流动对叶轮流道内绝对速度的影响规律。

1 试验模型

试验泵的叶轮和蜗壳均采用有机玻璃制造,为便于可视化拍摄,各个表面均作抛光处理,同时将靠近吸水室处叶轮和蜗壳的非测试面涂黑处理以减少背景噪声的影响,叶轮叶片采用圆柱叶片。蜗壳断面为矩形,且为了减少 PIV 拍摄过程中的散射,蜗壳外部设计为方形,叶轮和蜗壳实物图如图 1 所示。其几何参数为叶轮进口直径 $D_1 = 75\text{ mm}$,出口直径 $D_2 = 198\text{ mm}$,叶轮出口宽度 $b_2 = 9\text{ mm}$,蜗壳基圆直径 $D_3 = 220\text{ mm}$,蜗壳出口直径 $D_4 = 50\text{ mm}$ 。



图 1 测试用叶轮和蜗壳
Fig.1 Testing impeller and volute

2 模型泵外特性测试

2.1 外特性试验台

在江苏大学流体机械工程技术研究中心的离心泵 PIV 试验台上对模型泵进行了外特性试验,图 2 为该模型泵的外特性试验台。试验过程中,使用变频控制柜对电动机进行无极调速,其误差小于 0.2%;泵进出管路分别安装控制阀调节流量,并采

用电磁流量计对其进行测量,其误差小于 0.2%;扬程采用压力变送器测量,其误差小于 0.1%;功率采用三相 PWM 专用测试仪测量,其误差小于 0.25%,试验中模型泵的流量、扬程和转矩等参数由江苏大学自主开发的泵参数测量仪进行采集。



图 2 模型泵外特性试验台
Fig.2 Hydraulic performance test bed for model pump

2.2 模型泵的外特性试验结果

图 3 为试验测得的模型泵的性能曲线。从图 3 可以知道,最优工况点的流量 Q_{BEP} 为 $27.72\text{ m}^3/\text{h}$,扬程 H_{BEP} 为 11.58 m ,效率 η 为 57.6%,由上述参数可算出该泵的比转数 $n_s = 74$ 。另外,泵扬程曲线略有驼峰,流量约低于 $18\text{ m}^3/\text{h}$ 后,泵的扬程随流量变化非常小,而掌握这种扬程曲线下的不稳定流动特性及其对泵运行状态的影响正是本文的研究内容。

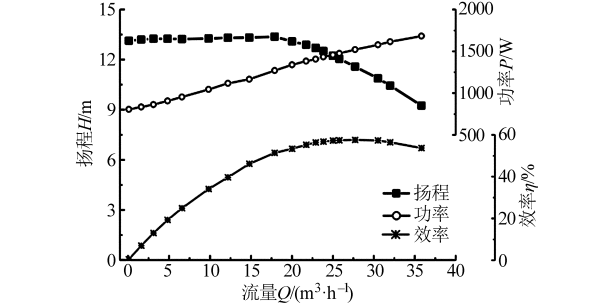


图 3 模型泵外特性结果
Fig.3 Test results for model pump

3 模型泵 PIV 测试

为了更准确地理解和把握这种不稳定流动现象,采用 PIV 系统对模型泵各流量工况下的内部流场进行测试,捕捉离心叶轮内不稳定流态的发生、发展过程,以期揭示叶轮内不稳定流动结构和泵扬程曲线之间的关系。

3.1 试验装置

本试验采用的 PIV 系统是美国 TSI 公司生产的商用 PIV 系统,如图 4 所示。它主要由示踪粒子、双脉冲激光器、跨帧 CCD 相机、时间同步控制器、锁相

同步系统和 PIV 软件平台等组成。



图 4 PIV 测试系统
Fig. 4 PIV test system

3.2 测量方案

3.2.1 测量工况

为了揭示不稳定流动的发生、发展规律以及不稳定流动的结构特征,本次试验从 $1.2Q_{BEP}$ 工况点开始,先采取每隔 $0.1Q_{BEP}$ 工况点拍摄一次的方法;然后,在发生不稳定流的工况附近进行多次拍摄,以期找到不稳定流动的发生工况。

3.2.2 测量断面

本次试验共选取叶轮流道的 3 个截面,分别为中间截面、前、后盖板附近截面。在确定前、后盖板侧的拍摄截面时,调整激光片光与前、后盖板表面贴合,并且保持片光不会打到前、后盖板轮缘上,由于激光片光的厚度约 $1 \sim 2\text{ mm}$,因此,拍摄截面与前、后盖板约保持 $0.5 \sim 1\text{ mm}$ 距离(d),拍摄截面如图 5 所示,图中截面 1、2、3 分别代表前盖板附近截面、中间截面、后盖板附近截面。

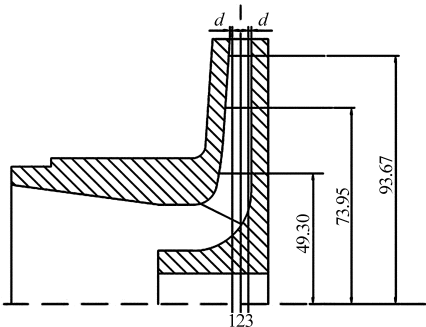


图 5 拍摄截面示意图
Fig. 5 Schematic diagram of testing section

3.2.3 测量相位

本次试验初步方案是在如图 6 所示的测量相位上进行的第 1 次拍摄,即靠近隔舌处的叶片背面出口边与第 7 断面的夹角 θ_1 为 52.13° ,隔舌与第 7 断面的夹角 θ_2 为 74.15° ,以初步揭示不稳定流的结构特征。随后,以第 1 次拍摄的测量相位为初始时刻,选择一个叶轮流道(流道 6)经过隔舌的时间作为一个周期,即 $T=60^\circ$,共 6 个时刻,分别为 $0、T/6、T/3、$

$T/2、2T/3、5T/6$ 。并将这 6 个时刻下的叶轮流场作为第 2 次拍摄方案来研究不稳定流动随叶轮的旋转在流道中的演变规律。第 2 次方案为:每个工况测量 6 个不同的相位(如图 7 所示),相位差为 10° ,这可以通过在 Insight 3G 软件中设置脉冲延迟时间来实现,在转速 1450 r/min 下叶片转过 10° 需要时间为 1.149 ms 。

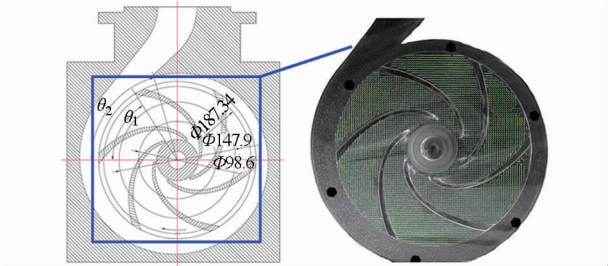


图 6 测量区域示意图
Fig. 6 Schematic diagram of testing area

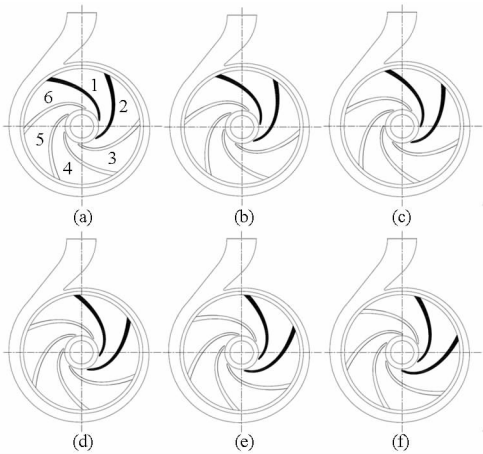


图 7 叶片相位示意图
Fig. 7 Schematic diagram of blade phase
(a) $t=0$ (b) $t=T/6$ (c) $t=T/3$
(d) $t=T/2$ (e) $t=2T/3$ (f) $t=5T/6$

3.3 测量结果

3.3.1 不稳定流动的初步探索

为了探索不稳定流动的发生工况,将流量由 $1.2Q_{BEP}$ 工况逐步减小至 $0.1Q_{BEP}$ 工况,观察流量减小的过程中叶轮内前盖板、中间截面及后盖板截面上流场变化情况,从中寻找最先出现不稳定流的工况点,并在此基础上找出用来表征不稳定流动的物理量、观察不稳定流动的运动及演变规律。限于篇幅,仅给出中间截面的流场分布。

由图 8 可以看出:

(1) 流道 1 的压力面在 $0.6Q_{BEP}$ 时首先出现分离涡,涡的位置较前盖板附近流道 1 的分离涡靠近叶轮流道出口。涡团随着流量的逐步减小,面积不断扩大,涡核也在随之远离压力面,向流道中间及叶轮出口方向移动。

(2) 流道 1 分离涡的数量和漩涡强度随流量减

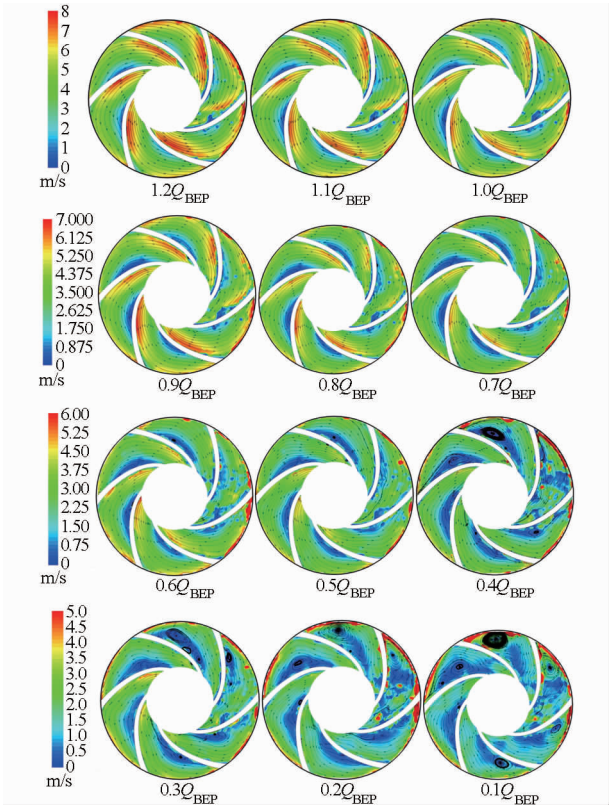


图 8 不同工况下中间截面处的相对速度分布
Fig.8 Distribution of relative velocity on middle section under different flow conditions

小是不断变化的。在 $0.4Q_{BEP}$ 时流道 1 的分离涡开始从单涡演变为 2 个转向相反的双涡,靠近叶轮进口的涡转向与叶轮旋转方向相同,而靠近叶轮出口的涡转向与叶轮旋转方向相反。流量继续减小的过程中,双涡结构又被破坏,形成了 3 涡团结构 ($0.3Q_{BEP}$),涡团的作用范围随着流量的减小也逐步扩大,多个流道内均出现分离涡。在 $0.1Q_{BEP}$ 时,多涡结构汇聚成一个大的涡团,堵塞了叶轮出口流道。

(3)不同流道的流动分离现象。图中给出的分离涡首先出现在靠近蜗壳隔舌的几个流道内,以流道 1 最明显,随着流量的减小分离涡逐渐扩展到其他流道。流道 6 也是在 $0.6Q_{BEP}$ 时流线开始紊乱,并在 $0.4Q_{BEP}$ 时压力面出现分离涡,流道内的单涡随着流量的减小演化为多涡系,并向流道出口发展。在整个流量范围内,流道 5 没有出现明显的流动分离现象,流线较其他流道顺畅,仅在 $0.2Q_{BEP}$ 时接近叶轮进口处出现了一个小的分离涡团,在 $0.1Q_{BEP}$ 时仍保持这种状态;流道 4 的分离涡始于叶轮进口 ($0.4Q_{BEP}$),随着流量的减小,分离涡附着在压力壁面处向出口移动,涡不断扩大。

为了深入探索不稳定流的初生工况,在 $0.6 \sim 0.7Q_{BEP}$ 之间,通过二分法,将这一区段的流量划分为 $0.625Q_{BEP}$ 、 $0.65Q_{BEP}$ 以及 $0.675Q_{BEP}$ 这 3 个工况点进行深入研究。

图 9 ~ 11 分别为 3 个截面内在上述 3 个工况下的相对速度分布情况。

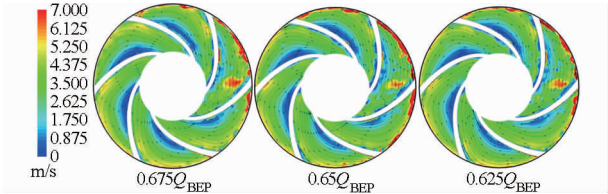


图 9 不同工况下前盖板处的相对速度分布
Fig.9 Distribution of relative velocity near shroud section under different flow conditions

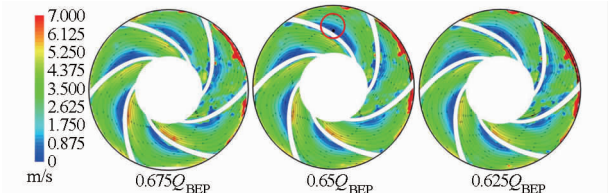


图 10 不同工况下中间截面的相对速度分布
Fig.10 Distribution of relative velocity on middle section under different flow conditions

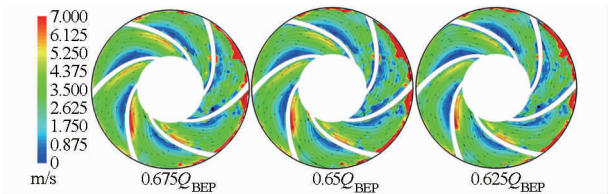


图 11 不同工况下后盖板处的相对速度分布
Fig.11 Distribution of relative velocity near hub section under different flow conditions

从图 9 ~ 11 中可以看出,在 $0.675Q_{BEP}$ 时的各截面流线较流畅,当流量减小到 $0.65Q_{BEP}$ 时,在其中间截面的压力面上出现了一个非常小的分离涡,而在其他 2 个截面并没有出现分离流动。当流量再次减小到 $0.625Q_{BEP}$ 时,该位置处的涡团已消失。在离心叶轮中,由于旋转效应,科氏力与叶轮前、后盖板的压力梯度不平衡,引起边界层向前盖板侧转移,因此,前盖板侧应该较其他截面容易出现不稳定流,而在上图中,前盖板侧的流动一直都较稳定,中间截面反倒较前盖板侧先出现流动分离,然后,在随后的相差不大的流量点下,涡团迅速消失,这说明, $0.65Q_{BEP}$ 下中间截面的极小涡团可能是由于流体的瞬间扰动造成的,因此,并不能作为不稳定流的发生点。综合上述分析, $0.6Q_{BEP}$ 工况为不稳定流的初生点。

3.3.2 不稳定流动的发展过程

为了研究不稳定流的传播过程,分别对 $0.6Q_{BEP}$ 、 $0.4Q_{BEP}$ 、 $0.2Q_{BEP}$ 以及 $0.1Q_{BEP}$ 工况下流场进行详细分析,以研究不稳定流动随着叶轮的旋转在流道中的演化过程。限于篇幅,仅给出中间截面的流场分布。

图 12 ~ 15 为叶轮流道内不同工况下不同相位的内部流动情况,各图从左至右分别表示的时刻为 0、 $T/6$ 、 $T/3$ 、 $T/2$ 、 $2T/3$ 、 $5T/6$ 。从图中可以得出:

(1) 总体上看,随着流量从 $0.6Q_{BEP}$ 降低到 $0.1Q_{BEP}$,叶轮流道内的不稳定流动结构对叶轮流道内的流体流动影响在逐步扩大。从 $0.6Q_{BEP}$ 下靠近叶片压力面进口侧的局部低速分离涡带,到 $0.4Q_{BEP}$ 下低速分离涡带逐渐从叶片压力面进口侧扩展到压力面出口侧,再到 $0.2Q_{BEP}$ 下低速分离涡带进一步扩大至占据半个叶轮流道,并最终在 $0.1Q_{BEP}$ 下低速分离涡带占据整个叶轮流道,严重阻碍了叶轮流道内流体的流动。

(2) 局部分析 $0.6Q_{BEP}$ 下不同时刻所对应的流动分布,以 1 号流道为例,其中的低速分离涡带发展规律为:在一个流道旋转 60° 周期内,从 0 时刻较大的涡带,到 $T/6$ 涡带开始变小,再到 $T/3$ 涡带逐步变小,经历 $T/2$ 和 $2T/3$,涡带进一步变小,并在 $5T/6$ 下涡带开始消失。对于 $0.4Q_{BEP}$ 到 $0.1Q_{BEP}$ 下某一流道内低速涡带的基本发展规律与 $0.6Q_{BEP}$ 类似,只是

存在尺度上的差异。

(3) 隔舌对位于其附近的叶轮流道内的流动有较大影响。在正对着隔舌的叶轮流道附近,即流道 1 和 6 内的涡带尺度大于其他流道。这说明强烈的动静干涉作用加剧了叶轮流道内的不稳定流动,特别在 $0.2Q_{BEP}$ 和 $0.1Q_{BEP}$ 下,正对隔舌的叶轮出口处具有强烈的回流,进一步加剧了分离涡带的尺度。

(4) 分离涡的运动规律。分离涡总是起始于压力面,这是由于在叶轮的旋转作用下,科氏力和周向的压力梯度不平衡,边界层外的主流会减少动能来提高压力,当某点的动能耗尽,位于固体壁面附近的流体质点的速度减小到 0 m/s ,在这种不平衡作用下发生回流,同时,将边界层内相继流出的流体挤向主流,促使边界层脱离固体壁面,形成边界层分离。分离涡刚开始在压力面附近不大的范围内移动,随着流量的减小,分离涡团不断扩大;由于粘性的作用,单涡在这个过程中有可能会被分成两个独立的涡,随后又汇聚成一个集中的大涡,并最终移向流道出口甚至溃灭。

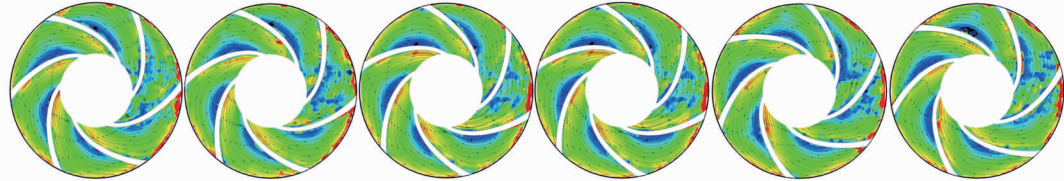


图 12 $0.6Q_{BEP}$ 下中间截面上的相对速度分布

Fig. 12 Distribution of relative velocity on middle section under $0.6Q_{BEP}$

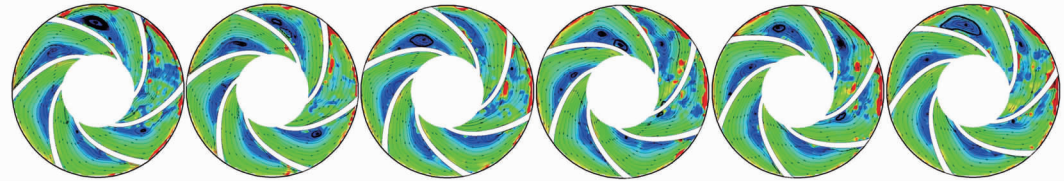


图 13 $0.4Q_{BEP}$ 下中间截面上的相对速度分布

Fig. 13 Distribution of relative velocity on middle section under $0.4Q_{BEP}$

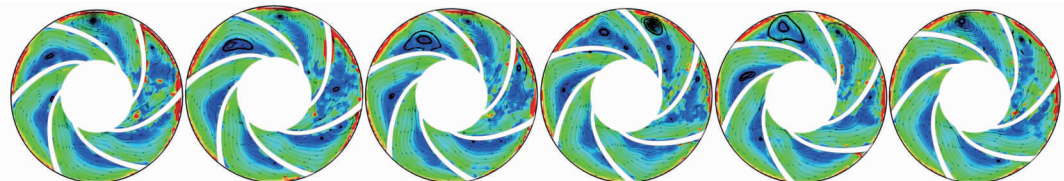


图 14 $0.2Q_{BEP}$ 下中间截面上的相对速度分布

Fig. 14 Distribution of relative velocity on middle section under $0.2Q_{BEP}$

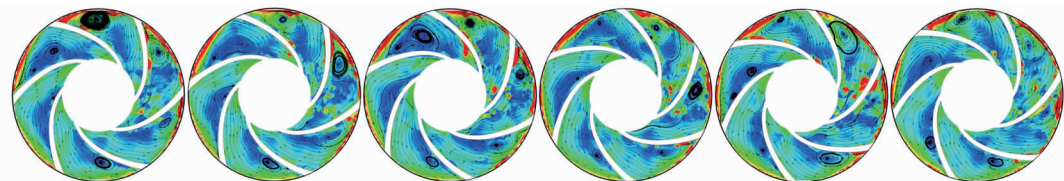


图 15 $0.1Q_{BEP}$ 下中间截面上的相对速度分布

Fig. 15 Distribution of relative velocity on middle section under $0.1Q_{BEP}$

4 结论

(1) $0.6Q_{\text{BEP}}$ 是最先出现流动分离的工况, 并经历了发展 ($0.4Q_{\text{BEP}}$) 和壮大 ($0.1Q_{\text{BEP}}$) 过程。

(2) 流道 1 的流动相对其他流道流动最不稳定, 而流道 5 的流动相对其他流道较稳定。其中, 流

道 1 中的分离涡从 0 到 $5T/6$ 时刻逐步减小。

(3) 隔舌对位于其附近的叶轮流道内的流动有较大影响。

(4) 分离涡总是起始于压力面, 并逐步扩大, 从单涡演变为多涡, 最后多涡系汇聚成一个大的涡流, 向流道出口发展, 并移向流道中心, 进而堵塞整个流道。

参 考 文 献

1 裴吉, 王文杰, 袁寿其, 等. 低比转数离心泵内部非定常流动特性数值预测[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 79–83, 88.
Pei Ji, Wang Wenjie, Yuan Shouqi, et al. Numerical prediction of inner flow unsteadiness in a low-specific speed centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 79–83, 88. (in Chinese)

2 克里斯托弗·厄尔斯·布伦南(美). 泵流体力学[M]. 潘中永, 译. 镇江: 江苏大学出版社, 2012.

3 窦华书, 蒋威, 张玉良, 等. 基于能量梯度理论的离心泵内流动不稳定研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 88–92, 103.
Dou Huashu, Jiang Wei, Zhang Yuliang, et al. Flow instability in centrifugal pump based on energy gradient theory [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 88–92, 103. (in Chinese)

4 王松林, 谭磊, 王玉川. 离心泵瞬态空化流动及压力脉动特性[J]. 振动与冲击, 2013, 32(22): 168–173.
Wang Songlin, Tan Lei, Wang Yuchuan. Characteristics of transient cavitation flow and pressure fluctuation for a centrifugal pump [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(22): 168–173. (in Chinese)

5 邹涛. 离心泵内部三维复杂流场的数值研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2007.
Zou Tao. Numerical investigation of three-dimension turbulent flow fields in a centrifugal pump [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007. (in Chinese)

6 Wernet M P. Development of digital particle imaging velocimetry for use in turbomachinery [J]. Experiments in Fluids, 2000, 28(2): 97–115.

7 袁寿其, 李亚林, 汤跃, 等. 示踪粒子在离心泵内流场跟随性的影响因素分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(20): 177–184.
Yuan Shouqi, Li Yalin, Tang Yue, et al. Analysis on factors influencing following features of tracer particles in centrifugal pumps [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(20): 177–184. (in Chinese)

8 黄远民. 离心泵内部流动 PIV 测试研究与三维数值模拟[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2011.
Huang Yuanmin. PIV measurement and numerical simulation for the flow field in a centrifugal pump [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2011. (in Chinese)

9 杨华, 汤方平, 刘超, 等. 离心泵叶轮内二维 PIV 非定常流动测量[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 56–60.
Yang Hua, Tang Fangping, Liu Chao, et al. 2-D PIV measurements of unsteady flow field inside the rotating impeller of centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 56–60. (in Chinese)

10 Sinha M, Katz J. Quantitative visualization of the flow in a centrifugal pump with diffuser vanes—I: on flow structures and turbulence [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 1999, 122(1): 97–107.

11 Sinha M, Katz J, Meneveau C. Quantitative visualization of the flow in a centrifugal pump with diffuser vanes—II: addressing passage-averaged and large eddy simulation modeling issues in turbomachinery flows [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 1999, 122(1): 108–116.

12 Sinha M, Pinarbasi A, Katz J. The flow structure during onset and developed states of rotating stall within a vaned diffuser of a centrifugal pump [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2001, 123(3): 490–499.

13 Westra R W, Broersma L, van Andel K, et al. PIV measurements and CFD computations of secondary flow in a centrifugal pump impeller [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2010, 132(6): 1–8.

14 邵春雷, 顾伯勤, 陈晔. 离心泵压水室内部定常和非定常流动 PIV 测量[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 128–133.
Shao Chunlei, Gu Boqin, Chen Ye. Measurement of steady and unsteady flow in centrifugal pumps spiral casing using PIV [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(7): 128–133. (in Chinese)

15 刘厚林, 杨东升, 谈明高, 等. 双叶片离心泵内失速现象的三维 PIV 分析[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(5): 734–739.
Liu Houlin, Yang Dongsheng, Tan Minggao, et al. 3D-PIV measurements of stall in a double-blade centrifugal pump [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2012, 46(5): 734–739. (in Chinese)