

文章编号: 1000-8055(2004)04-0449-06

非设计工况下离心叶轮内湍流场的 LDV 测量

刘正先¹, 王 永¹, 曹淑珍², 谷传纲², 苗永森²

(1 天津大学 力学系, 天津 300072;

2 西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 利用激光多普勒测速仪(LDV)对后弯闭式离心叶轮内部气流在非设计工况下的流动进行了实验测量。对比描述了大于和小于设计流量时叶轮流道回转流面上主流速度的分布特点, 径向流面上的速度矢量图更清晰地说明了不同进口条件导致流道内气流流动产生分离的位置、强度以及发展的差异。二次流矢量图表明流量的改变影响了离心力和哥氏力在流动中的作用, 导致在垂直于主流方向引起截然不同的二次涡旋流动。

关键词: 航空、航天推进系统; 离心叶轮; 非设计工况; 湍流; LDV 测量

中图分类号: O 357. 5

文献标识码: A

LDV Measurements of Turbulent Flow Field in a Centrifugal Impeller at Off-Design Flow

LIU Zheng-xian¹, WANG Yong¹, CAO Shu-zhen²,

GU Chuan-gang², MIAO Yong-miao²

(1. Department of mechanics, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2 Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: An experimental investigation of the shrouded centrifugal back swept impeller flow field has been conducted at off-design flow using Laser Doppler Velocimeter (LDV) and shaft encoder. Measurements of the three-dimensional velocity field at flow rates greater and smaller than design value were acquired. The measurements describe both the throughflow and secondary velocity field along several main planes through the passage. The velocity vector profile clearly documents the different positions, intensity and development of the separation flow when changing the inlet flow rates. The secondary velocity vector plots show that the migration of the secondary vortex across the main flow was influenced by flow rates which made the centrifugal and Coriolis force changing.

Key words: aerospace propulsion system; centrifugal impeller; off-design flow;
turbulent flow field; LDV measurement

离心叶轮在运行当中, 由于同时受进口条件、旋转、曲率及动静元件相互影响等多种因素的综

合作用, 使气流流动非常复杂。按照设计原则, 我们希望整机尽量在设计工况下运行, 以减少因流

收稿日期: 2003- 08- 28; 修订日期: 2003- 11- 14

作者简介: 刘正先(1969-), 女, 山西夏县人, 天津大学力学系副教授, 博士, 主要从事湍流的实验与数值研究

动恶化带来的各种损失, 保证最佳运行效率。但不可避免地有偏离设计工况的情况发生, 使叶轮的进口流量增大或减小, 进气条件的改变使叶轮内部的流动恶化, 不仅流动、摩擦等损失迅速增大, 同时还使叶片应力更集中。叶轮机械运行当中出现的阻塞和喘振现象, 就是进气条件变化引起的严重后果。

作者曾对设计工况下的离心叶轮内部三维湍流流动进行了详细的实验测量和分析^[1], 总结了该工况下气流流动的特点。本文将进一步对非设计工况下的气流流动进行深入测量, 希望通过大、小流量的实验结果比较, 确定气流在非设计工况下特有的流动性质、分离流发生和发展的过程及对主流的影响程度、二次流涡旋的运动, 为正确而全面理解叶轮内部的流动机理提供可靠的实验数据, 并以此为参考在实际运行中采取有效的控制方法, 减小或避免流动恶化引起的损害。

1 实验测量

1.1 实验叶轮

实验装置按照“激光多普勒测量系统的测量要求”及“通风机空气动力性能试验方法”GB 1236 - 85 建立。主要由离心叶轮及静子元件、稳流段、直流电动机和可控硅整流柜等组成^[2], 如图 1。

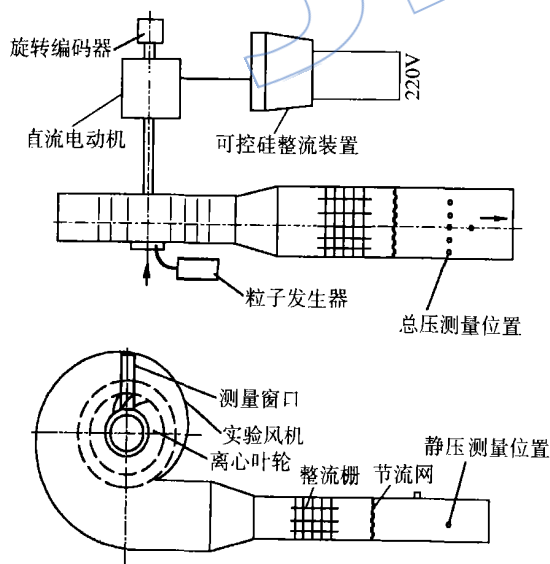


图 1 实验装置示意图

Fig 1 Experimental apparatus

实验离心叶轮为闭式后弯圆弧叶片。被测叶轮内径 $D_0 = 200$ mm, 外径 $D_2 = 400$ mm, 叶片数 $Z = 15$, 轮盘宽度 $b_1 = b_2 = 33$ mm, $D_1/D_2 = 0.56$,

进口安装角 $B_{1A} = 27^\circ$, 出口安装角 $B_{2A} = 33^\circ$ 。气流从叶轮流出来进入扩压器中, 之后进入矩形截面的螺线型蜗壳, 再经稳流段排入大气。叶轮转子一个流道内的测量点布置为: 沿径向方向每隔 7.5 mm 取一个测量面, 轴向 33 mm 宽度内非均匀取 9 个测量面, 圆周方向每次扫描取 15 个数据点, 测量流道如图 2 所示。

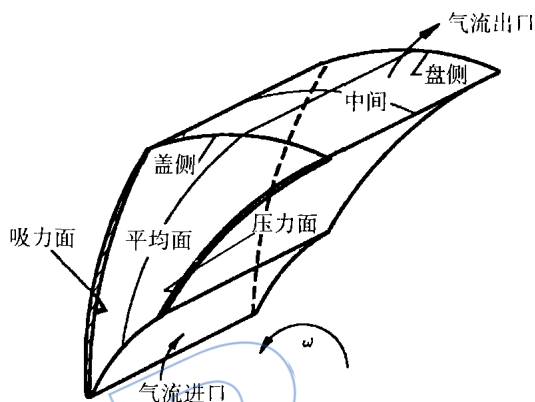


图 2 叶轮流道位置

Fig 2 Impeller blade passage

1.2 LDV 测量系统

实验采用 LDV 系统和旋转编码器对叶轮内部的旋转气流流动进行测量。该系统是一种利用激光多普勒效应来测量液体或固体运动速度的反射式测速仪器, 测量旋转流场时需在 LDV 系统中附加旋转编码器和数据连接器 (Datalink), 以保证叶轮旋转位置与结果数据一一对应。实验中分别选用甘油水溶液 (浓度 1%~2%) 雾化粒子和烟雾作为示踪粒子。测量中通过改善采集信噪比和滤波间距等方法, 排除由两种粒子跟随性问题带来的测量误差^[1,3]。

对相同转速下大于和小于设计工况的两种流量进行测量 (大流量为 $0.32 \text{ m}^3/\text{s}$, 小流量为 $0.15 \text{ m}^3/\text{s}$), 叶轮转速为 $n = 1000 \text{ r/min}$ 。大气压力 97800 Pa, 大气温度 18.4°C 。

2 实验结果

为便于讨论, 本文只列出叶轮流道进口、中部、出口, 以及流道盘侧 (距离轮盘 2 mm)、盖侧 (距离轮盖 1 mm) 和中间流面的测量结果。

2.1 大流量工况测量结果

图 3(a) 为流道进口回转流面上主流速度分布曲线。可看到, 在吸力面, 速度分布从盘侧到盖

侧的均匀性一直保持到距压力面 30% 处。接近压力面时, 主流速度首先增大, 然后突然急速降低, 在压力面——盘侧的局部区域甚至为零, 造成压力面的速度梯度较大, 流场非均匀程度剧烈。盘侧的速度剧烈变化随着向盖侧发展而减缓。可见, 在非设计工况下, 流量增大的影响主要体现在流道压力面附近区域, 并使该区域在进口处即体现明显的非均匀特征, 吸力面则不易受其影响。

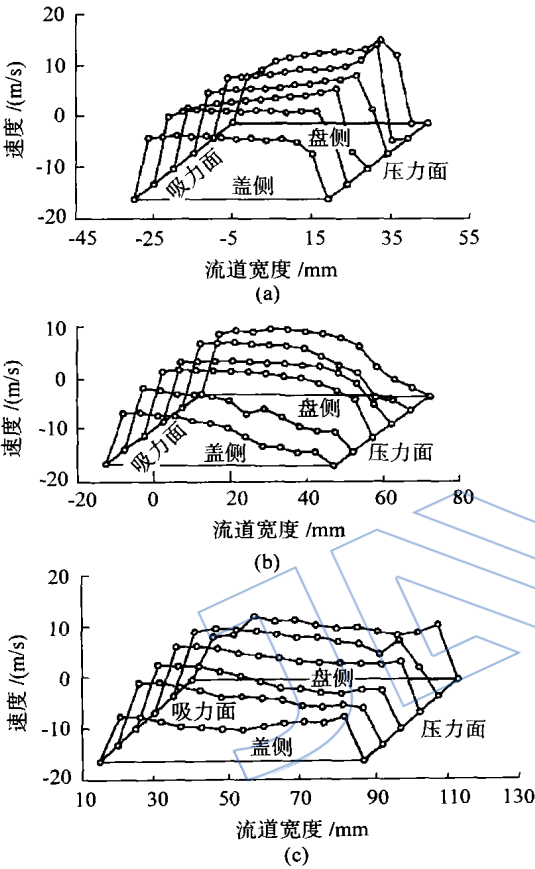


图 3 大流量回转流面主流速度分布

Fig 3 Main velocity in the circumferential planes at greater flow rate

由图 3(b) 流道中部速度分布可看到, 随着气流向流道内部的发展, 吸力面速度进一步提高且均匀。压力面的速度梯度变小, 速度值呈缓坡分布, 速度变化区间向平均面扩大, 盘、盖两侧偏压力面速度明显较低。

在图 3(c) 叶轮出口处, 压力面的速度逐渐增大, 吸力面速度则逐步减小, 流场趋于均匀化。最小速度由压力面向平均面移动, 这种现象最先在盖侧发生且最明显, 然后向中间延伸。盘侧的压力、吸力面速度趋于一致。可以认为, 当气流接近叶轮出口时, 盘侧速度比较稳定, 而盖侧中间的低

速区可能与叶轮出口尾流在盖侧活动有关, 它使该区的气流趋于分离。

图 4(a)~4(c) 分别为从子午方向看流道进口、中部和出口流面上主流速度的分布。在进口的吸力面, 盘侧速度略低于盖侧, 而在压力面, 则相反。到中部流面后, 整体表现为盘侧高于盖侧, 并注意到在压力面的盖侧有一低速角区。接近出口时, 主流速度继续保持盘侧大于盖侧, 在盖侧, 低速区明显移到了中间。

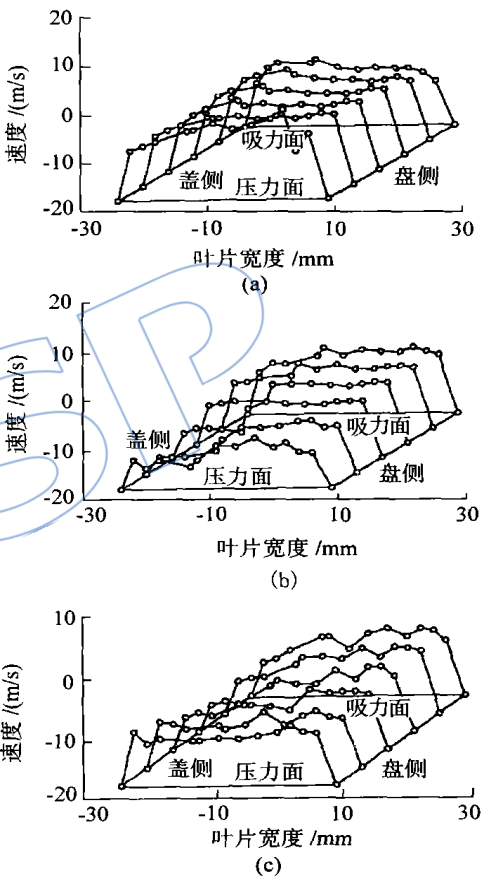


图 4 大流量回转流面主流速度分布

Fig 4 Main velocity in the meridional planes at greater flow rate

图 5(a)~5(c) 分别为流道盘侧、中间和盖侧径向面上速度矢量图。在三个图的进口处, 除压力面附近局部区域外, 其余 85% 的地方有较均匀的进口速度场。在盘侧(图 5(a)), 压力面附近的流速由于在进口处即局部恶化, 导致在后面的流动中引起整个气流角与叶片安装角不能很好地保持一致, 一直到接近流道出口才有所好转。近压力面的速度恶化对盘侧其余流场没有产生影响。在中间面(图 5(b)), 压力面进口处的大梯度速度在随后的流动中引起整个气流流动方向向吸力面倾

斜,并在距进口较近的压力面上形成分离区,该分离在流道中部得到抑制,使气流向压力面流动,速度回升。图 5(c)的流动与图 5(b)相似,但压力面与进口角区的分离程度和对整个流场的影响都不如图 5(b)强烈。值得注意的是,中部和盖侧的气流流动角度明显大于叶片安装角,而盘侧气流方向与叶片安装角度基本一致,其原因作者认为是流体粘性对流动产生了不可忽视的作用。

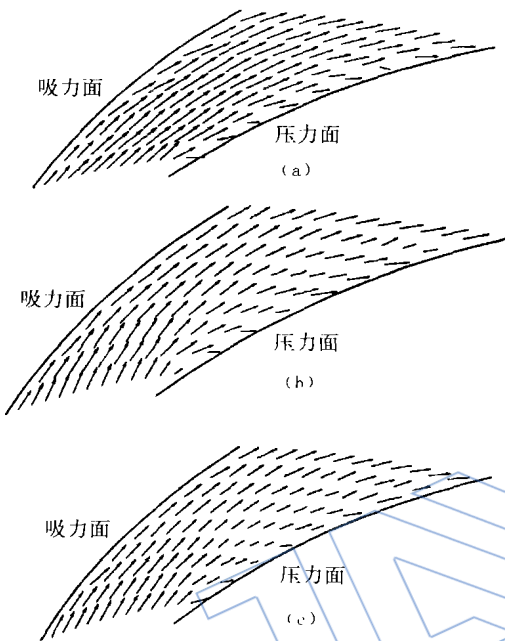


图 5 径向面上速度矢量图
Fig 5 Velocity vector in the radial planes at greater flow rate

图 6 为流道中部回转面上二次流速度矢量图。由于实际流量大于设计流量,在压力面流动恶化,产生分离,从而使大部分的气流流向吸力面,从图中可以看到左半区强烈的向吸力面的气流流动。在压力面,分离区的影响以及压力面本身的性质都决定了压力面附近流场处于低能区,从而导致周围较高能量的气流向压力面流动,故在图中右半区形成明显的与左半区相反的二次流动。由此可以推测,在大流量工况下,垂直于主流方向的二次流动非常复杂,与设计流量工况相比不再是单个充满流道的涡旋,而有可能是多个二次涡共存。

2.2 小流量工况测量结果

图 7(a)~ 7(c)为流道进口、中部和出口回转流面上主流速度分布曲线。从进口图可看到,当流量小于设计工况,即攻角大于零时,首先在吸力面

靠近盘侧流动恶化并使盘侧压力面的速度降低,盖侧流动的均匀性则不受影响。到中部,整个吸力面因进口影响而形成明显的低速区。接近出口时,由于离心叶轮内轴向旋涡具有提高吸力面速度,降低压力面速度的作用,因此除盘侧部分区域外,整个流场趋于均匀化。

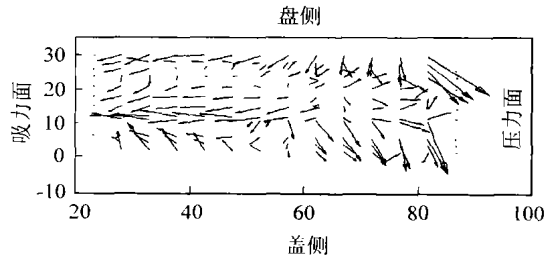


图 6 流道中部二次流矢量图
Fig 6 Secondary velocity vectors in middle part at greater flow rate

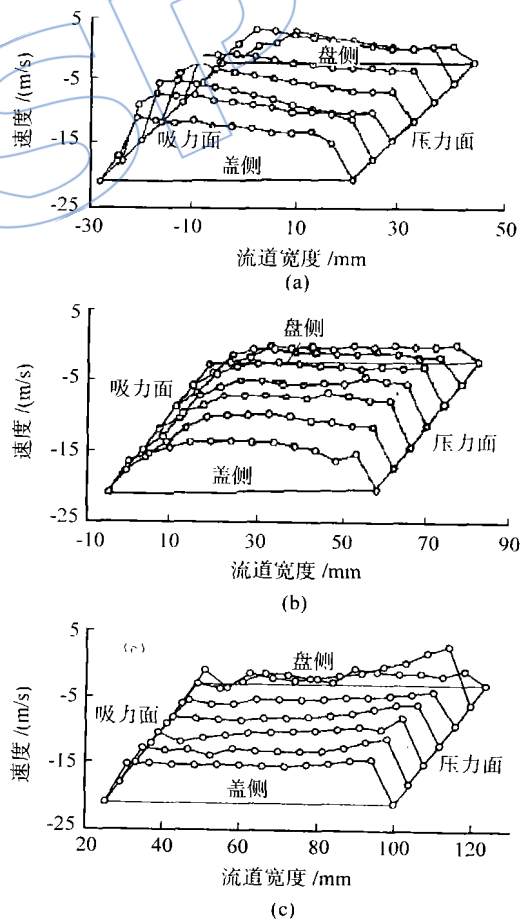


图 7 小流量回转流面主流速度分布
Fig 7 Main velocity in the circumferential planes at smaller flow rate

图 8(a)~ 8(c)为从子午方向看流道进口、中

部和出口处主流速度曲线图。在进口处, 盘侧偏吸力面的速度分布不均匀, 有较大的速度突降。在中部, 速度整体由盖侧向盘侧递减。到出口处, 盘侧速度增大, 低速区由压力面的 30% (距盖侧) 向吸力面的中间部分分布, 整个流场呈盘、盖两侧速度高中间低的斜谷状分布。Moore^[4]和Howard^[5]分别在水泵叶轮和径向叶轮内部流动测量时也发现了流道中的这种速度峡谷分布现象。

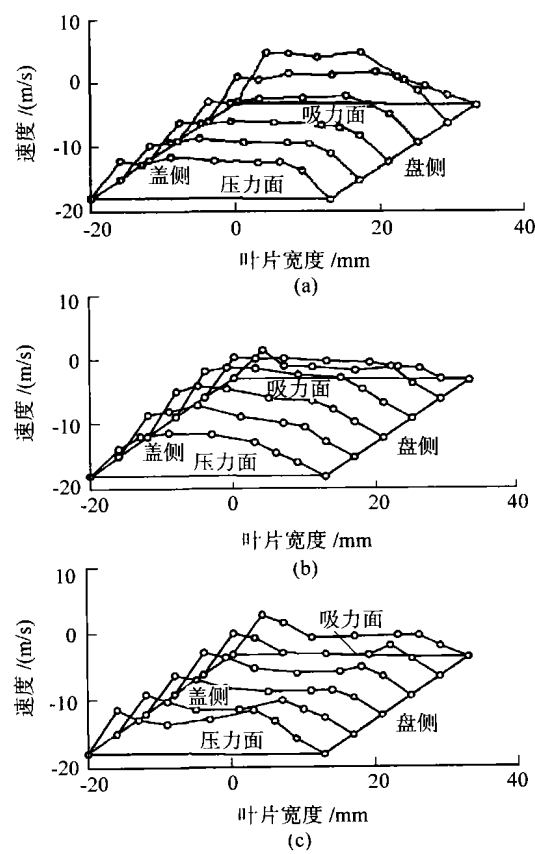


图 8 小流量回流面主流速度分布

Fig 8 Main velocity in the meridional planes at smaller flow rate

图 9(a)~ 9(c) 为盘侧、中间和盖侧径向流面的速度矢量图。在盘侧, 吸力面进口速度局部恶化, 进而在流道中部诱导产生明显的流动分离, 并一直影响到出口。在中间面, 进口速度分布较好, 没有明显的流动恶化, 但在中部以后, 可观察到盘侧分离流影响的痕迹。在盖侧, 进口气流相对较均匀。吸力面流动较盘侧有很大改善, 无分离迹象。但气流方向不稳定, 有摆动。三图中压力面的流动情况均很好, 无论从盘侧到盖侧, 还是从进口到出口, 均具有良好的方向性和均匀性, 不受吸力面流动恶化的影响。

图 10(a)~ 10(b) 分别为流道中部和出口回流面上的二次流矢量图。图 10(a) 中明显可看到一个充满流道的顺时针方向的二次流涡, 涡中心处于流面中央。二次涡旋在向出口发展过程中,

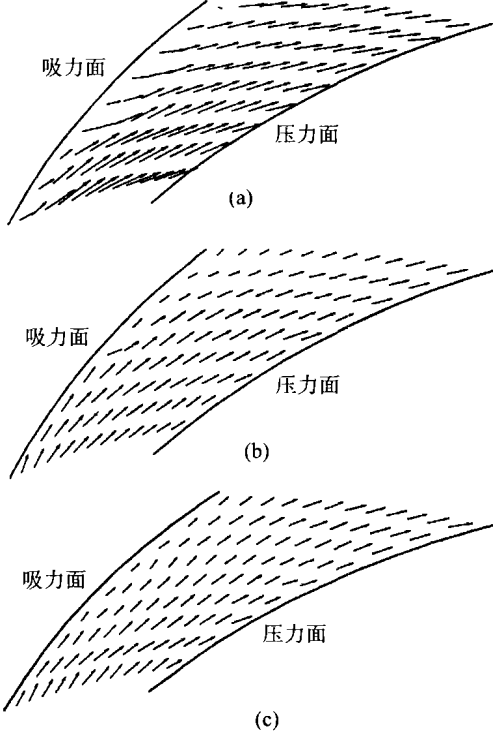


图 9 小流量径向面速度矢量图

Fig 9 Velocity vector in the radial planes at smaller flow rate

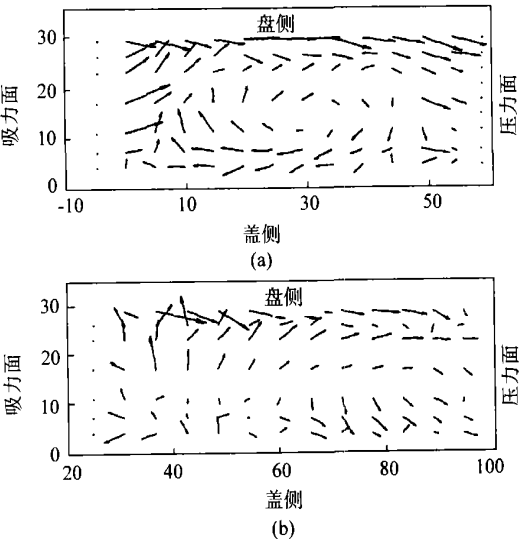


图 10 小流量二次流矢量图

Fig 10 Secondary velocity vectors at smaller flow rate

强度逐步减弱, 涡中心向吸力面偏盖侧移动。小流量和设计流量下的二次流较为相似, 两者在流动过程中都是保持一个涡旋, 并沿流向逐渐减弱, 只在涡强度上略有差别, 而大流量下的二次流情况显然不如前两者那么清晰, 有可能存在的多个涡使二次流动格外复杂。

3 结果与讨论

综上所述, 虽然都在非设计工况下运行, 但大、小两种流量下的气流流动有显著差别。主要体现在:

(1) 大流量的进口气流角大于叶片安装角, 气流在压力面局部区域流动恶化。小流量的进口气流角小于叶片安装角, 气流流动首先在吸力面恶化。

(2) 大流量进口气流的恶化在压力面引起流动分离, 但很快被抑制。小流量的气流恶化使吸力面从进口就引起分离流动, 分离区在流道内进一步扩大并延伸到出口, 整个吸力面附近的气流因进口条件的影响而失去稳定性。由此得出, 分离在压力面被抑制而在吸力面被放大。其中原因作者分析是: 离心叶轮在运行中, 压力面属高压低能区, 吸力面属低压高能区^[6]。当压力面局部产生分离时, 周围的高能流体因平衡需要很快流向该区以增加其动能, 从而抑制了分离的扩大; 当吸力面局部流动分离时, 因属于高能流体, 故周围较低能量流体在补充进来时本身就较困难, 况且同时还要消耗部分能量用于更低能量流体的需要, 其结果必然是分离加剧。

(3) 在流道出口, 大流量呈盘侧大于盖侧的速度分布, 盖侧中部有一低速区; 小流量则呈盘、盖两侧速度大中间速度小的峡谷状分布。

(4) 大流量下的二次流动远比小流量复杂, 存在多个不清晰的二次涡; 小流量则具有很好的规律性, 为单个充满流道的顺时针方向的旋涡, 强度沿流向逐渐衰退。由此看出, 对同一流道, 流量的增大或减小不仅使流动状态不同, 而且使二次流动也产生巨大差别。其中原因, 目前被认为主要是曲率和旋转两大因素, 即离心力和哥氏力对速度场的影响。两个力在流动中所占比例不同, 导致

二次流涡发生的形态和位置不同。在曲率和叶轮转速固定时, 两力的变化更多依赖于流域内的流动工况。

4 今后的研究工作

大、小流量下的二次流情况截然不同, 二次流由一个单方向的涡向大小、强弱不同的多个涡发展。进一步的研究重点是二次流涡随流量的增大逐步由一个向多个演变的过程规律, 以便有效控制二次流涡, 改善流动状态。

非设计工况下因进口气流的非均匀性使叶轮的内部流场比设计工况更复杂, 最明显是流动分离的出现。可推测, 随着流量的进一步减小, 吸力面的分离区将向压力面扩延, 直至占据整个流道。分离发生的位置和强度直接影响到出口主流速度的分布, 进而对气流进入下游元件产生不容忽视的作用。因此对增大和减小流量后的流动做较全面的测量, 得出速度的大小和方向、流动分离以及二次流涡等的变化规律十分必要。

参考文献

- [1] 刘正先, 姜印平, 曹淑珍, 等. 离心叶轮内三维湍流流场的 LDV 测量[J]. 航空动力学报, 2002, 17(3): 287- 291.
LU Zheng-xian, JIANG Yin-ping, CAO Shu-zhen. LDV Measurements of Three Dimensional Turbulent Flow Field in a Centrifugal Impeller [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2002, 17(3): 287- 291.
- [2] 刘正先. 旋转离心叶轮内三维湍流流场的实验与数值研究[D]. 西安: 西安交通大学, 1997.
- [3] 盛森芝, 沈熊, 舒玮. 流速测量技术[M]. 北京: 北京大学出版社, 1987.
- [4] Moore J. A Wake and an Eddy in a Rotating Radial-Flow Passage Part 1: Experimental Pump [J]. *Journal of Engineering for Power*, 1973, 95: 205- 212.
- [5] Howard J H G, Kitmer C W. Measured Passage Velocities in a Radial Impeller with Shrouded and Unshrouded Configurations [J]. *ASME Journal of Engineering for Power*, 1975, 97: 207- 213.
- [6] Hathaway M D, Chriss R M, Wood J R. Experimental and Computational Investigation of the NASA Low-Speed Centrifugal Compressor Flow Field [J]. *J. of Turbomachinery*, 1993, 115: 527- 542.