

文章编号: 1000-8055(2002)03-0287-05

离心叶轮内三维湍流流场的LDV 测量

刘正先¹, 姜印平¹, 曹淑珍², 林 梅², 苗永森²

(1 天津大学, 天津 300072;

2 西安交通大学, 陕西 西安 710049)

摘要: 应用激光多普勒测速仪和旋转编码器实现了对后弯闭式离心叶轮内三维湍流流场的测量。较详细地描述了设计工况下回转流面上主流速度的分布特点; 绘出了径向流面上速度矢量分布图, 结果表明在旋转流场中, 流体粘性对气流方向具有不可忽视的作用; 实验测量还得到了在曲率和旋转因素的综合作用下, 流道中部和出口处产生的由强到弱的二次流涡, 涡面垂直于主流方向。

关键词: 离心叶轮; 湍流; 流动测试

中图分类号: O 357.5

文献标识码: A

LDV Measurements of Three Dimensional Turbulent Flow Field in a Centrifugal Impeller

LIU Zheng-xian¹, JIANG Yin-ping, CAO Shu-zhen²,

LIN Mei², MIAO Yong-miao²

(1. Tianjin University, Tianjin 300072, China;

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

Abstract: A Laser Doppler Velocimeter (LDV) and shaft encoder was used to measure velocities at the design flow of the shrouded centrifugal back swept impeller. Measurements of the three-dimensional velocity field were acquired at several main planes through the passage. The measurements described both the through flow velocity field along circumferential measurement planes and the velocity vector at radial planes. It was found that the high-velocity flow was held near the hub side on the suction surface of blade passage and shifted from the hub to the shroud side on the pressure surface as the fluid approached the exit. The results also provided the evidence of the development of a "wake" of low momentum fluid near the shroud at mid pitch at the exit. The velocity vector plots showed that the flow angles on the hub were very differential from those on the shroud side because of the fluid viscosity. The results indicated that the secondary flow generated in vertical direction of the main flow velocity was related to curvature and rotating of impeller. The secondary flow velocity vector plots were also presented at the middle passage and exit. The development of the secondary vortex along impeller blade passage has been clearly observed and recorded.

Key words: centrifugal impeller; turbulent flow; flow field measurement

收稿日期: 2001-06-29; 修订日期: 2001-11-15

作者简介: 刘正先(1969-), 女, 山西夏县人, 天津大学力学系应用力学教研室副教授, 博士后

1 前言

叶轮机械是广泛应用于冶金、石油、化工等工农业部门的动力机械,其运行的可靠性、经济性直接影响到国民经济的效益和发展。在运行当中,由于同时受旋转、曲率以及动静元件相互影响等因素的作用,叶轮通道内的气流流动非常复杂,而我们又确实需要对其气动性能有一个较详细的了解,以便根据流动特点改善运行条件,得到最佳流动工况,达到提高运行效率的目的。通过实验测量得到实际运行叶轮机械的流动参数,并进一步较全面地了解叶轮内部实际流场的结构和特性无疑是最准确、可靠的方法。

以往,由于测试手段的限制,使叶轮机械的测量限于固定元件。后来,随着激光技术的发展,叶轮内部旋转流场的测试成为可能。最早运用激光技术进行离心泵内流场测试的是 Fischer 和 Thom a^[1]。到60年代、70年代,利用 LDV (Laser Doppler Velocimeter) 实现了对轴流跨音速压缩机的二维速度场的测量^[2]。A dler 和 L evy^[3]于1979年利用 LDV 技术对后弯直叶片闭式叶轮出口处尾迹的位置、强弱进行了测量。较引人注目的是 Hathaway^[4] et al 于1993年对低转速半开式离心叶轮内主流及二次流进行了较为详尽的实验研究,并与数值计算做了对比。

应用 LDV 对叶轮内流动特性的测量,以往大多数研究工作仅限于二维测量,且以半开式叶轮为主。在我国,对以气体为介质的离心叶轮内三维流动的实验测量还非常少。本文利用较先进的 LDV 测速系统实现了对离心实验叶轮内三维旋转湍流流动的测量,得到了较为详细的实验数据,对各流面的测量结果进行了定量对比分析,目的在于为叶轮机械的优化理论设计和湍流流动的数值计算提供可靠实验依据。

2 实验装置

2.1 实验叶轮

实验装置是按照“激光多普勒测量系统的测量要求”及“通风机空气动力性能实验方法”GB 1236-85建立的,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,如图 1。实验离心叶轮为闭式后弯圆弧叶片,它和扩压器、蜗壳均由3~5 mm 厚度不等的有机玻璃材料加工制成。在测量过程中,入射光分别通过蜗壳前

侧板和叶轮前盘进入叶轮流道内部,由于有机玻璃透明度及表面粗糙度的原因,当叶轮旋转时,入射激光透过2层有机玻璃后,反射信号非常差。为保证激光在旋转流道具有良好的聚焦性和一定的光强,分别在蜗壳前壁和叶轮盖侧开尺寸不等的2个窗口,用厚度为3 mm、无色的光学玻璃镶嵌。被测叶轮内径 $D_0 = 200$ mm, 外径 $D_2 = 400$ mm,

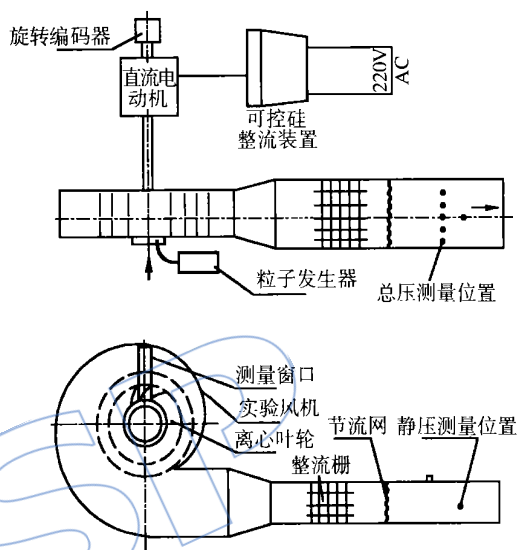


图1 实验装置示意图

Fig 1 Experimental Apparatus

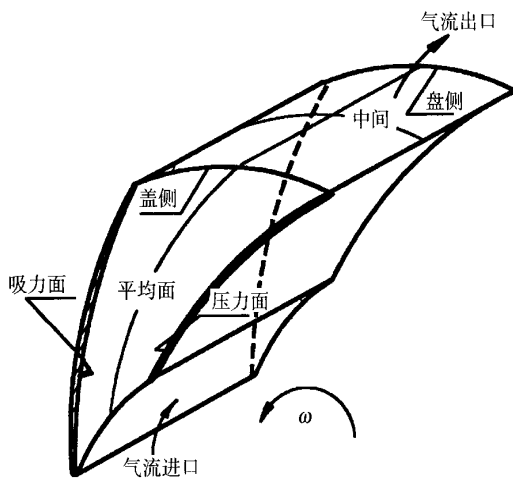


图2 叶轮流道位置图

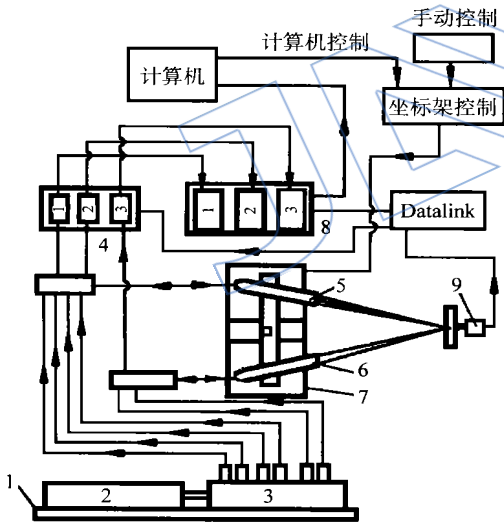
Fig 2 Impeller blade passage

叶片数 $Z = 15$, 转速 $n = 1000$ r/min, 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 $B_{2A} = 33^\circ$ 。气流从叶轮流出入扩压器中,之后进入矩形截面的螺旋型蜗壳,再经

长 $L = 2000\text{ mm}$ 的稳流段排入大气。叶轮转子一个流道内的测量点布置如下: 沿径向方向每隔 7.5 mm 取1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14个有效数据点, 测量流道如图2所示^[5]。

2.2 LDV 测量系统

本实验所用LDV 测量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。它主要包括: 激光发生器、发射及接受装置和数据采集及处理系统3大部分, 如图3。由激光器产生的1束相干光源经准直器垂直进入布喇格盒中被分为3色6束光, 同色的束单色光分别被频移 0 Hz 和 40 Hz 后, 聚焦于测量区域中。在焦点处, 示踪粒子接收入射光并向四周散射, 接收光纤接收部分的散射光并通过全反射光纤把光信号传递给光电检测器(COLORLINK), COLORLINK完成由光信号转换为电信号的任务。电信号进入信号处理器(IFA 750)中, 经过过滤、放大等处理通过计算机输出流动测量结果。



(1. 平台 2 氦离子激光器 3 分光器与光耦合器
4 Colorlink 5 二维激光探头 6 一维激光探头
7. 坐标架 8 IFA 750信号处理器 9 旋转编码器)

图3 LDV 测量系统
Fig 3 LDV measurement system

测量旋转流场时需在LDV 系统中附加旋转编码器和Datalink, 其作用是在计算机输出数据时, 由编码器提供与结果数据同步的旋转角度值, 以保证叶轮圆周位置与测量数据一一对应。

2.3 示踪粒子

LDV 测量系统不测量纯净流体的速度, 而只能测量悬浮在流体中的微粒的速度, 因此测量时必须要求被测流场内有示踪粒子, 且要求示踪粒子具有良好的跟随性, 粒径最好为 $1\text{ }\mu\text{m}$ 左右。

本实验中, 根据测量要求及实验中测量位置的不同, 分别采用甘油水溶液(浓度 $1\% \sim 2\%$)雾化粒子和烟雾2种。甘油水溶液可通过专门的雾化器喷出 $1 \sim 3\text{ }\mu\text{m}$ 的雾化粒子, 该雾化粒子采用文献[6]的计算公式, 其跟随性 $U_p/U_f \approx 0.998$ (U_p 为激光测速仪测得的粒子速度, U_f 为真正的流体速度), 而在保证 $U_p/U_f \approx 0.99$ 条件下, 粒子的跟随性对湍流测量已足够, 可见甘油水溶液的雾化粒子具有非常好的跟随性, 完全可以达到测量要求。其缺点是受雾化器的限制雾化量不是很大, 因此在实验中在距离叶轮进口较近的流场中采用该粒子, 而在距进口较远的流场中采用烟雾粒子(碳粒子)。烟雾较容易实现, 有一定浓度, 但粒子直径范围太宽($0.2 \sim 20\text{ }\mu\text{m}$), 跟随性受到影响, 针对这一缺点在测量中适当改善采集信噪比和滤波间距, 尽量使多普勒信号分布较集中。通过对比发现, 改善后采用烟雾粒子测量结果与采用甘油水溶液粒子测量结果最大误差为 0.05% , 因此可以认为, 本实验中可以排除由示踪粒子跟随性问题带来的测量误差。实验中粒子喷入位置在距离叶轮进口下方 0.5 m 处, 以保证不干扰进口气流均匀性为原则。

3 实验结果

实验中, 通风机在设计工况下运行, 测量点的三维分布数为 $14 \times 11 \times 9$, 即: 沿圆周方向、轴向和径向分别为14, 11和9个测点。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)和中间流面上的实验测量结果。

图4(a)~ (c)分别为叶轮进口、中部、出口回转流面上主流速度分布曲线。从进口流面上看, 在压力面与盖侧夹角的很小区域, 主流速度略低于盘侧相应部分, 其余区域的入口速度场则非常均匀。在中部流面以后, 压力面的低速区很快得到控制, 沿压力面的速度分布也趋于均匀化。从盘侧到盖侧, 速度由吸力面向压力面有规律地递减。到叶轮出口处, 整个流场分布均匀。作者认为在压力面哥氏力、离心力和二次流的作用, 有利于消除压力面局部低速区引起的流动恶化。从图4(c)还可看

出,在出口处盖侧附近,压力面和吸力面附近的主流速度略高于中间区域,这一现象解释为在盖侧出口处有尾流形成,并对上游气流产生影响,使该部分气流出现分离的趋势。

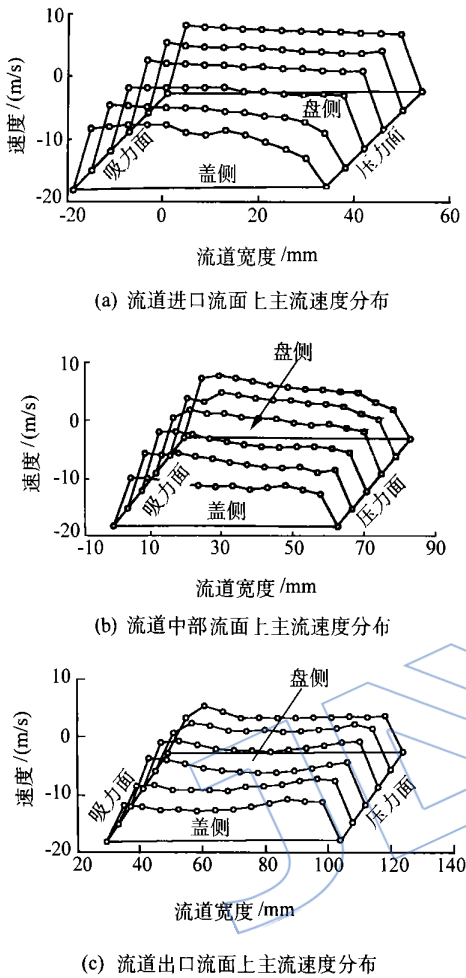


图4 回转面上主流速度分布

Fig 4 Distribution of main velocity in the circumferential planes

图5(a)~(c)为从叶轮子午方向看进口、中部和出口处主流速度的分布图。比较3个图可以看出,在压力面,从进口到出口,最大速度由盘侧移向盖侧。在图4(a)和(b)中压力面的低速区由处于盖侧转为均匀化与这种最大速度的移动是一致的。在吸力面,最大速度则一直保持在盘侧。故在图5(c)中可明显看到最大速度由吸力面——盘侧向压力面——盖侧的对角斜线形分布。

图6(a)~(c)为在盘侧、中间、盖侧径向流面的速度矢量图。3个图中,流场分布均较好,没有分离区的出现。在盖侧矢量图中,有明显的压力面速度由低升高,吸力面速度由高到低的变化,表明最

大速度由吸力面向压力面移动的过程。与盖侧气流相比,盘侧的流动方向更倾向压力面,这是流体粘性作用引起的惯性力的原因。整个中间流面的气流速度分布均匀,气流角与叶片安装角保持一致。由3个图的流动情况可得出,在设计工况下,较好的进气条件和合理的叶型可以避免叶轮内流动分离的发生,从而改善流动状况,减少流动损失,提高效率。另一方面也看出,实验所用叶轮在设计流量工况下,达到了较理想的流动效果。

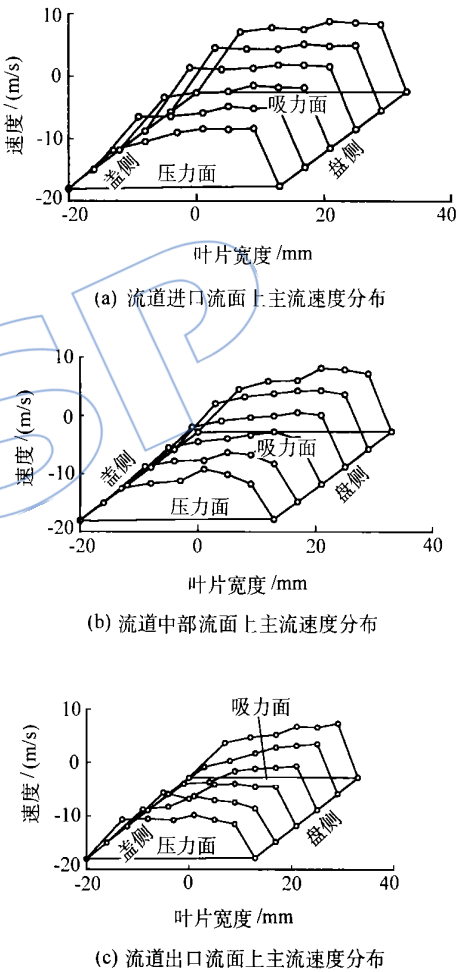
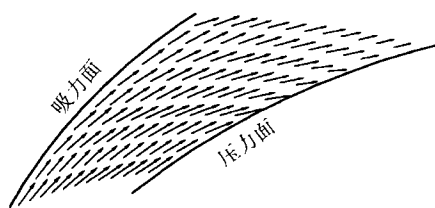


图5 子午面上主流速度分布

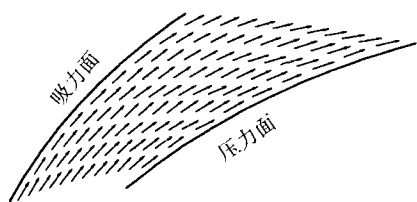
Fig 5 Distribution of main velocity in the meridional planes

图7(a)~(b)分别为流道中部及出口回转流面上二次流速度矢量图,可看到在2个流面上,均只有1个二次涡存在,图7(a)中的旋涡几乎充满整个流面,涡中心处于流面中央。图7(b)的旋涡相比之下较弱,涡中心移到前盘偏吸力面的区域内。本文实验得到的二次流旋涡为一个,其他研究者不同的实验叶轮中发现两个以至更多的二次旋

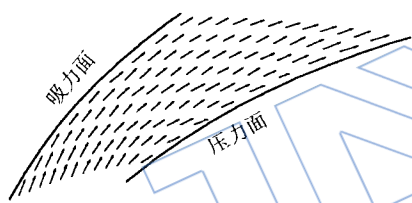
涡。叶轮内由二次流动产生旋涡的原因有多方面因素,比较一致的看法主要是曲率和旋转两大因素。也就是离心力和哥氏力对速度场的影响。



(a) 流道盘侧径向流面上速度矢量图



(b) 流道中间径向流面上速度矢量图



(c) 流道盖侧径向流面上速度矢量图

图6 径向面上速度矢量图

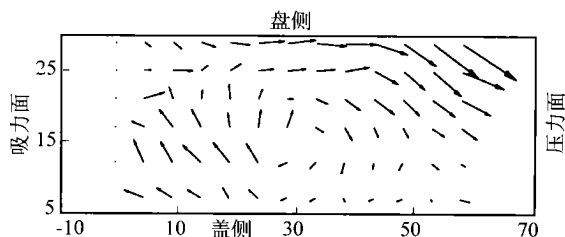
Fig 6 Velocity vector plots in the radial planes

叶轮中引起二次流的两个力——离心力和哥氏力所占比例的不同,会导致二次流涡产生的位置不同。两种力在同一叶轮中对二次流的影响随不同流域内流动情况的不同而改变,因此在复杂的流场中引起的二次流动也较复杂。

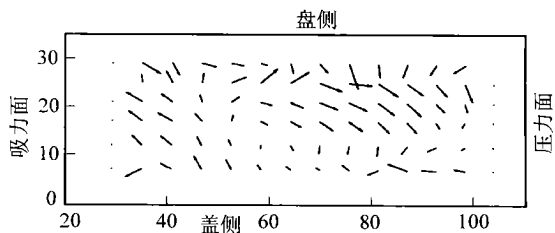
4 结 论

本文采用LDV 测量系统对设计工况下离心叶轮内的三维旋转流场进行了实验研究,得到流道内各流面上的主流速度分布及速度矢量图,发现了以下较典型的流动特点:(1) 在流道吸力面,最大速度由进口到出口均保持在盘侧附近;相反在压力面,则存在最大速度由盘侧向盖侧的移动过程。由此,在流道出口形成了最大速度的斜对角线形分布的现象。(2) 在流道出口盖侧附近,出现主流速度中间低两边高的分布,表明出口处尾流

的存在及对内部流动的影响。(3) 由速度矢量图



(a) 流道中部回转流面上二次流矢量图



(b) 流道出口回转流面上二次流矢量图

图7 回转流面上二次流矢量图

Fig 7 Secondary flow velocity vector plots in the circular flow planes

可看出,盘侧气体流动的方向明显倾向于压力面,这种现象进一步证明流体粘性的存在对流动产生了不可忽视的作用。(4) 曲率和旋转因素的综合作用,使气流在沿垂直于主流速度的方向上产生二次流动,进而诱导产生单个充满整个流面的二次涡,二次涡的强度由流道中部向出口逐渐减弱。

参考文献

- [1] Fischer K, Thoma D. Investigation of the Flow Condition in a Centrifugal Pump[J]. Trans ASME, 1932, 54: HYD-54-8
- [2] Wisler D C. Shock Wave and Flow Velocity Measurements in High Speed Fan Rotor Using the Laser Velocimeter[J]. ASME J. of Engineering for Power, Series A, 1977, 99: 558-572
- [3] Adler D, Levy Y. A Laser-Doppler Investigation of the Flow Inside a Backswept, Closed, Centrifugal Impeller[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 1979, 21: 1- 6
- [4] Hathaway M D, Chriss R M, Wood J R, et al. Experimental and Computational Investigation of the NASA Low-Speed Centrifugal Compressor Flow Field[J]. Transactions of the ASME, Journal of Turbomachinery, 1993, 115: 527- 542
- [5] 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.
- [6] 盛森芝, 沈熊, 舒玮. 流速测量技术[M]. 北京: 北京大学出版社, 1987: 165- 171.

(责任编辑 杨再荣)