

文章编号: 1000-8055(2000) 0342-05

离心压气机转子内近端壁区三维紊流流场

马宏伟¹, 蒋浩康¹, 徐月亭², 杨 健³, 薛 琳³

2. 北京航空航天大学 404 教研室, 北京 100083;
2. 北京大学 力学系, 北京 100871;
3. 北方交通大学 力学所, 北京 100081

摘要: 用三维激光多普勒测速系统测量研究了一个离心压气机转子近端壁区三维紊流流场。结果表明, 整个叶片通道内叶背角区存在角涡及其伴随涡, 叶盆角区存在前缘马蹄涡的叶盆分支, 它们的发展、演化较大地影响着附近区域的流动, 是造成了所在区域流动阻塞和气流脉动的主要因素。前缘马蹄涡叶背分支沿下游逐渐向叶盆方向发展, 与端壁附面层和主流的进一步掺混, 并在约 1/2 叶片通道处的叶盆角区与前缘马蹄涡的叶盆分支发生交混, 在下游造成一定强度的流动阻塞和紊流脉动带。测量区域内, 轴向、切向紊流强度分布规律相近, 3 个方向的紊流强度, 切向水平最高, 径向水平最低。

关键词: 离心压气机; 转子; 端壁区; 测量; 三维紊流流场

中图分类号: V 231. 3 文献标识码: A

1 引 言

目前国内外许多学者通过测量或数值实验对离心压气机内流动进行了大量的研究, 获得了一些很有意义的结果^[1~5]。但由于离心压气机内流系极其复杂, 目前对其流动还缺乏足够的认识。为进一步揭示离心压气机内, 尤其是端壁区的旋涡流动结构, 作者利用三维激光多普勒测速系统对一离心压气机转子近端壁区的三维流场进行了仔细测量。

2 实验设备、测量手段及测量安排

图 1 是实验离心压气机, 叶轮盘盖和机匣端盖均改用光学玻璃, 作为激光入射窗口, 叶轮外径 180 mm, 内径 90 mm, 叶高 20 mm, 转速 1500 r/min。流场测量采用美国 TSI 公司 90-6 型三维光纤激光多普勒测速系统, 示踪粒子是由烟雾器产生的水雾, 由橡皮管引入压气机进口上游。

转子内的测量沿径向共设 7 站, 分别为 $r/R = 0.556, 0.611, 0.667, 0.722, 0.778, 0.833$ 和

0.867, $R = 90$ mm, r 为当地半径; 沿叶高共设 10

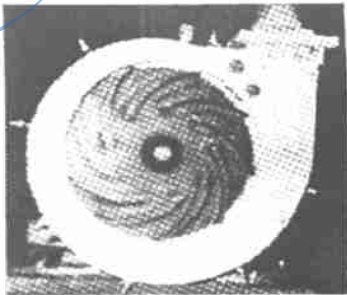


图 1 实验离心压气机

站, 分别为 $h/H = 0.25, 0.20, 0.15, 0.125, 0.10, 0.0875, 0.075, 0.0625, 0.05$ 和 0.0375 , h 为测点与叶轮盘盖内壁的距离, H 为叶高。

3 测量结果及分析

图 2 和图 3 分别为各径向测量截面上的二次相对速度矢量(W_{sec})和二次涡量($\nabla \times \mathbf{V}$)分布。

$$W_{sec} = \sqrt{W_n^2 + W_z^2}$$
$$W_n = W_r \cos \beta_0 + W_s \sin \beta_0$$

收稿日期: 2000- 01- 12; 修订日期: 2000- 03- 29

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(1999022305)

作者简介: 马宏伟(1968-), 男, 北京航空航天大学 404 教研室副教授, 博士

式中: W_t , W_r 和 W_z 分别为相对切向、径向和轴向速度, β_0 为相对气流角的周向平均值。 $\text{VOT} = \frac{\left(\frac{\partial W_t}{\partial z} - \frac{1}{r} \frac{\partial W_z}{\partial \theta}\right) \cos \beta_0 + \left(\frac{\partial W_r}{\partial z} - \frac{\partial W_z}{\partial r}\right) \sin \beta_0}{2\omega}$

其中: r 为半径, θ 为柱坐标系下的周向转角, z 为轴向位移, ω 为转子角速度。

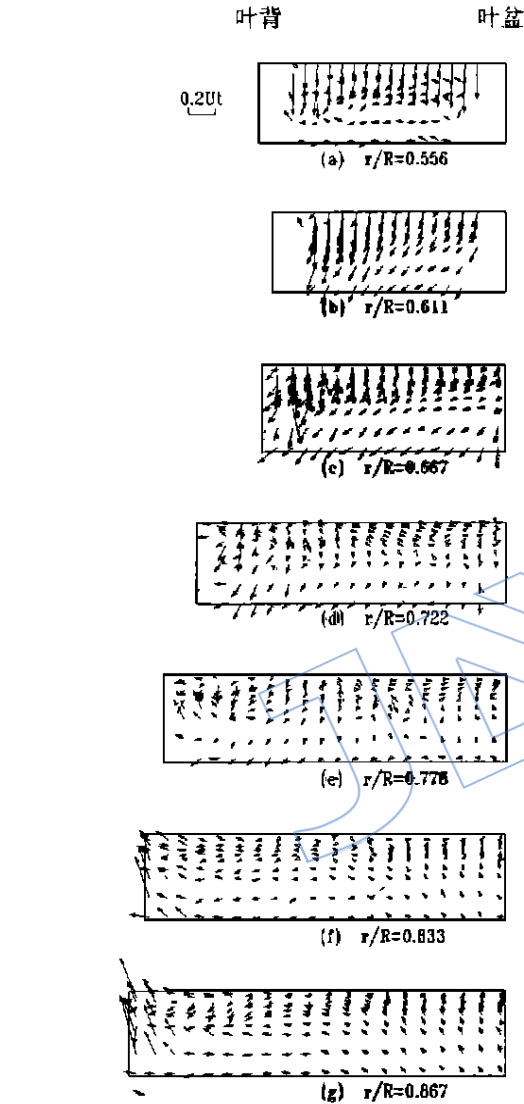


图 2 径向测量截面上二次相对速度矢量
(横坐标为栅距, 纵坐标为叶高, 图上上面为盘盖壁面)

图 3 表明, 在 (a) 截面叶背和端壁角区存在绝对值很高的负涡量 (-4.44), 在矢量场上对应着一逆时针方向的旋涡, 它应该是叶片前缘马蹄涡的叶背分支。叶背侧马蹄涡在下游逐渐向叶盆方向作周向移动, 强度逐渐减弱, $(a) -4.44 \rightarrow (b) -3.67 \rightarrow (c) -3.12 \rightarrow (d) -2.29 \rightarrow (e) -2.06 \rightarrow (f) -1.47 \rightarrow (g) -1.34$, 但影响面积逐步扩大, 同时涡核位置由叶背迅速向叶盆方向移动, 在

(c) 截面涡核距叶背约 $1/3$ 栅距, 至 (e) $r/R = 0.778$ 截面, 涡核已移至叶盆附近。马蹄涡的这种周向迁移不仅引起了与盘盖内侧端壁附面层的掺混, 还造成了叶盆侧马蹄涡和叶背侧马蹄涡在叶片通道下游叶盆角区的掺混, (f) 和 (g) 截面叶盆附近涡量的迅速扩散又与之有关。这在一定程度上佐证了文献 [4] 提出的二次流模型。

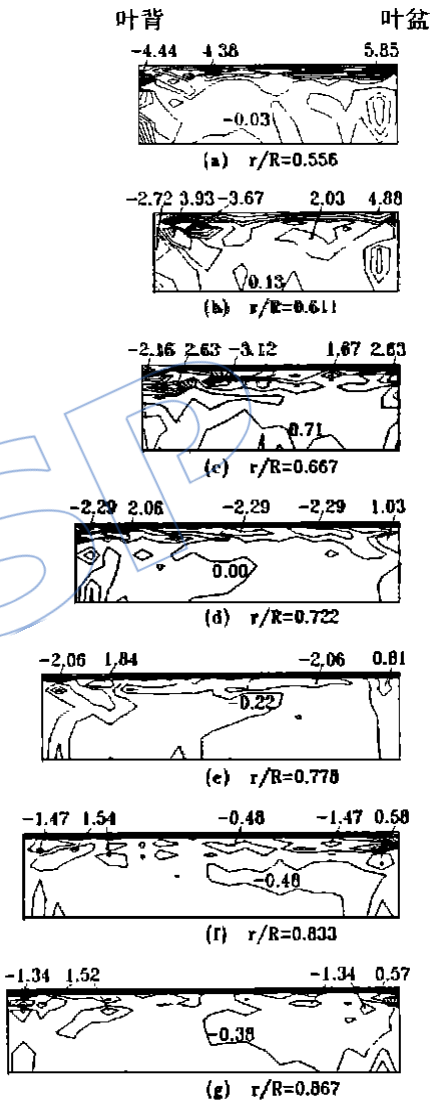


图 3 径向测量截面上二次涡量分布
(横坐标为栅距, 纵坐标为叶高, 图上上面为盘盖壁面)

叶背侧马蹄涡向叶盆方向移动后, 叶背角区仍然存在较高的负涡量, 在矢量场上呈现较明显的逆时针方向旋涡, 称之为叶背角涡。叶背角涡在下游依然沿叶背角区发展, 强度逐渐减弱, 但影响面积似乎并不明显扩大, 角涡的这一扩散特点在图 4 的流场显示中得到证实。

图 4 是测量完成后盘盖的照片, 可以发现沿

叶背侧角区存在明显的水雾带, 上游水雾带宽, 下游窄, 水雾是由所在区域的流动阻塞造成气流中的水雾凝结形成的, 这个可谓流场显示的结果证明了角涡的存在及发展情况。



图 4 流场显示

图 3 还表明叶背角涡附近还存在明显的正涡量区, 可能是由角涡诱导的伴随涡, 在图 2 矢量场

上也隐约可见, 其强度沿流向逐渐减弱, (b) 3. 93 → (c) 2. 63 → (d) 2. 06 → (e) 1. 84 → (f) 1. 54 → (g) 1. 52, 核心位置也逐渐向叶盆方向缓慢移动, 其影响面积在下游有较大的扩展。

叶盆角区存在较强的正涡量, 应该与此区域存在的叶盆侧马蹄涡有关, 该涡量在上游很强(5. 85), 但在下游耗散很快, (a) 5. 85 → (b) 4. 88 → (c) 2. 63 → (d) 1. 03 → (e) 0. 81 → (f) 0. 58。由于叶盆侧存在一定的激光测量“盲区”, 没能捕捉到完整的叶盆侧马蹄涡流动画面。

从图 2 看到, (a) 截面近端壁几乎从叶背至叶盆均有很强的由近端壁(盘盖) 指向中间叶高的速度矢量, 这应归结为轴向进气的影响。在(b) 截面此影响逐渐减弱, 表现为顺转向的大范围的通道涡。在下游的测量截面矢量场上, 大范围的通道涡表现均较明显。

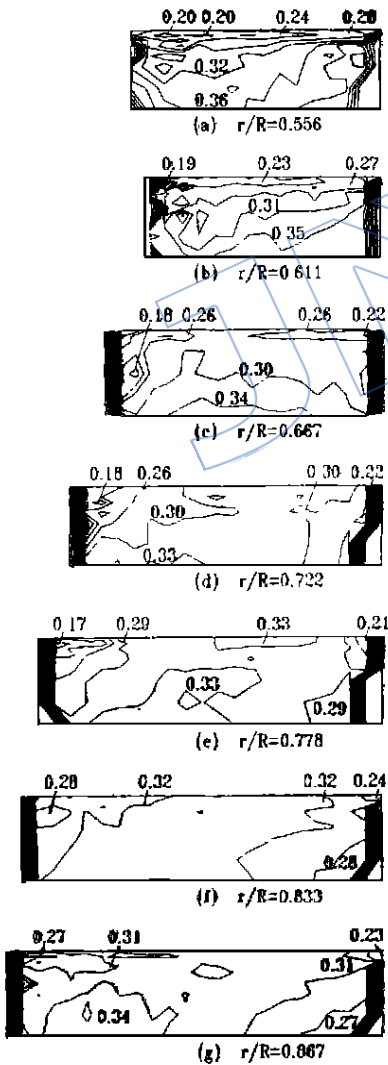


图 5 径向测量截面上流向速度分布

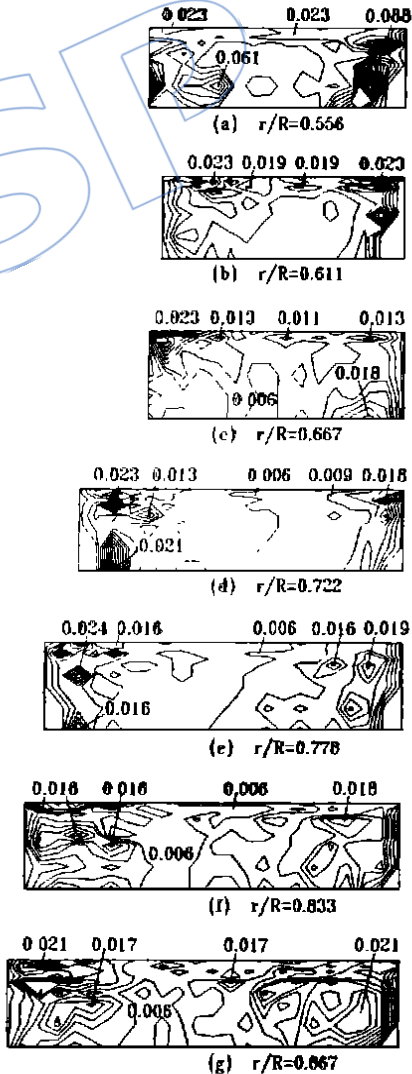


图 6 径向测量截面上紊流动能分布

图 5 和图 6 分别是各径向测量截面上的流向速度和紊流动能分布。流向速度定义为流向速度被叶尖速度无因次量化, 紊流动能定义为 3 个方向的紊流强度的平方和。图 5 表明各测量截面上叶背角区流向速度较低, 在前 1/3 通道内主要归因于叶背马蹄涡、角涡及其伴随涡的存在, 在后 2/3 通道内则主要是受角涡及其伴随涡的影响。由(e)截面到(f)截面, 叶背角区流通能力有一个明显的改善, 在图 3 涡量场上, 涡量由- 2. 06→- 1. 47, 显然与角涡的迅速耗散有关。

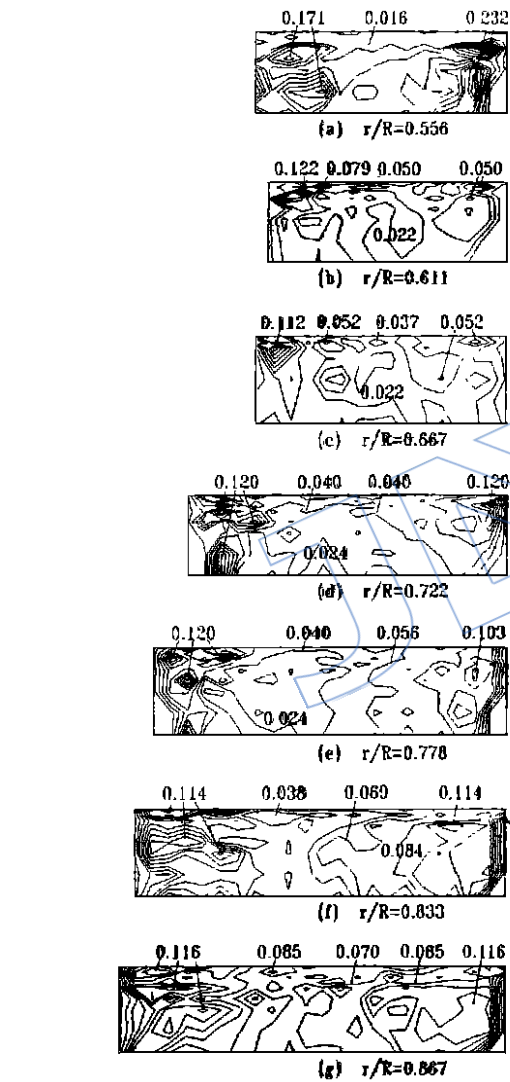


图 7 径向测量截面上切向紊流强度分布

叶背侧马蹄涡的周向迁移也造成了附近区域流动一定程度的阻塞。图 5(a)至(d)各截面近端壁通道中部均存在一个相对高阻滞区, 其中心由(a)→(d)截面逐渐由叶背移至叶盆附近。这正与叶背侧马蹄涡的周向迁移相一致。图 5 还显示(c)至(e)各截面叶盆角区流向速度也较低, 这应与叶

盆侧马蹄涡的影响有关。(f)和(g)截面叶盆角区流向速度则为各自测量截面上的最低值, 分别为 0. 24 和 0. 23, 是由叶盆侧马蹄涡与周向迁移来的叶背侧马蹄涡在叶盆角区交混造成的。

图 6 表明各测量截面叶背角区均具有较高的紊流动能, 证明该区域不是“死水区”, 而存在非定常性很强的旋涡流动。在前 1/3 通道内有叶背马蹄涡的贡献, 后 2/3 通道内的紊流脉动则是叶背角涡及其伴随涡引起的。(e)→(f)截面叶背角区高紊流区迅速扩大对应着叶背角涡伴随涡的扩散。

还可以发现, 在叶片通道内端壁区存在一个次高紊流带, 它随流向由叶背逐渐向叶盆方向移动, 这与叶背侧马蹄涡的周向迁移相呼应。

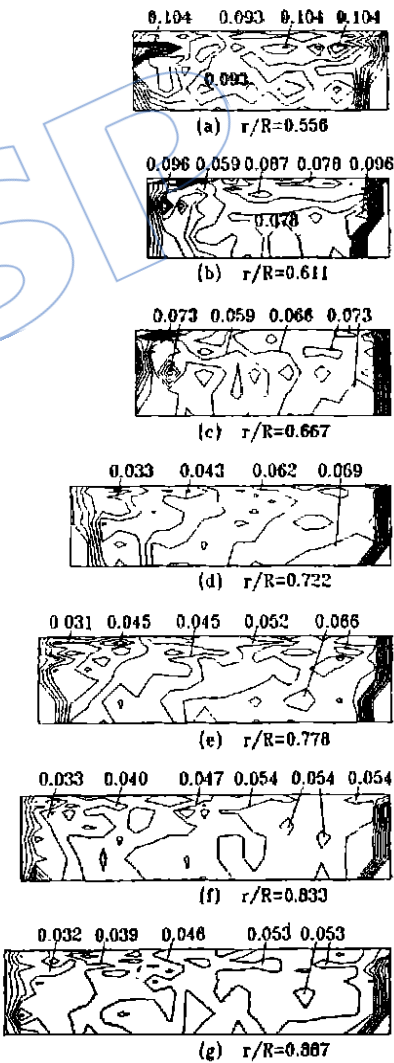


图 8 径向测量截面上径向紊流强度分布

叶盆角区, 特别是前 1/3 通道内具有很高的紊流动能, 主要是受叶盆马蹄涡的影响。(e)→(f)

截面叶盆角区高紊流区的扩大则与叶盆侧马蹄涡和周向迁移来的叶背侧马蹄涡的掺混有关。

图 7 和图 8 分别为切向和径向紊流强度分布。轴向紊流强度与切向紊流强度分布规律基本一致, 并和图 6 的紊流动能分布相似, 主要是由叶背角涡、伴随涡、叶背侧马蹄涡及其周向迁移、叶盆侧马蹄涡以及前缘马蹄涡的两分支在叶盆角区的交混决定的。在叶片后半通道内, 由叶背至叶盆径向紊流强度逐渐增高。

在测量区域内, 3 个方向的紊流强度, 切向分量最高, 径向分量最低, 表明了离心叶轮端壁区内流动的切向脉动水平最高, 径向脉动较小。

4 结 论

叶片通道内叶背角区存在角涡及其伴随涡, 叶盆角区存在前缘马蹄涡的叶盆分支, 它们的发展、演化较大地影响着附近区域的流动, 是造成了所在区域流动阻塞和气流脉动的主要因素。前缘马蹄涡叶背分支沿下游逐渐向叶盆方向发展, 与端壁附面层和主流的进一步掺混, 并在约 $1/2$ 叶片通道处的叶盆角区与前缘马蹄涡的叶盆分支发

生交混, 也造成有一定强度的流动阻塞和紊流脉动带。测量区域内, 轴向、切向紊流强度分布规律相近, 3 个方向的紊流强度, 切向水平最高, 径向水平最低。

参考文献:

- [1] Krain H, Hoffman W. Verification of an Impeller Design by Laser Measurements and 3-D Viscous Calculation [R]. ASME Paper 89- GT- 159, 1989
- [2] Hathaway H D, et al. Experimental and Computational Investigation of the NASA Low-Speed Centrifugal Compressor Flow Field[R]. ASME Paper 92- GT- 213, 1992
- [3] 赵晓路. 离心压气机叶轮弯曲母线造型及叶片弯曲减少二次流损失机理初步探讨[J]. 工程热物理报, 1997, 18(4): 417- 422
- [4] 陈乃兴, 黄伟光. 无叶扩压器离心式压气机内旋涡运动的数值模拟[J]. 工程热物理学报, 1999, 20(2): 155- 160
- [5] 刘正先等. 离心叶轮内三维湍流流场的实验研究[J]. 工程热物理学报, 1999, 20(5): 558- 562

(责任编辑 杨再荣)

Three-Dimensional Turbulent Flow of the Endwall Region inside a Centrifugal Compressor Impeller

M A Hong-wei¹, JIANG Hao-kang¹, XU Yue-ting² YANG Jian³, XU E Lin³

1. 4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;
2. Department of Mechanics, Peking University 100871, China
3. Institute of Mechanics, North Jiaotong University 100081, China

Abstract: Three-dimensional turbulent flow of the endwall region inside a centrifugal compressor impeller was studied using a Laser Doppler Velocimetry. The flow was surveyed across the entire passage at seven radial locations (leading edge to trailing edge) and ten axial locations. Data obtained include three-dimensional mean and turbulent characteristics. The measurement results indicated that a corner vortex existed along the suction surface near the endwall, leading to obvious flow blockage and turbulence. The suction-side horse-shoe vortex of the blade leading edge developed towards the pressure surface with the flow downstream, resulting in the flow mixing between the endwall boundary layer and the main flow. Interaction of the two sides of the horse-shoe vortex occurred at the corner of the pressure surface at about half chord, causing more flow blockage and turbulence. The variations of axial, tangential and radial turbulence intensities were similar, and the tangential turbulence intensity was the highest of the three components.

Key words: centrifugal compressor; rotors; endwall region; measurements;

three-dimensional turbulent flow