

圆形截面离心压缩机蜗壳内部 三维流动的测量与分析

高丽敏¹, 王 欢¹, 王尚锦², 刘 波¹

(1. 西北工业大学 动力与能源学院 翼型、叶栅空气动力学重点实验室, 陕西 西安 710072;

2. 西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

摘 要: 利用五孔探针对大尺度低速离心压缩机的圆形截面蜗壳内部三维流动进行了详细的测量, 给出了蜗壳螺旋通道部分径向测量截面的通流速度分布以及通流速度、总压、静压沿径向与圆周方向的分布图, 并与一维计算的流量进行了比较。结果表明, 各截面测量得到的流量与一维计算的趋势相同, 且随着角度的增大, 计算与实验之间的差别逐渐减小; 另外, 本试验蜗壳内的流动是复杂的三维流动, 蜗壳各径向截面的通流速度沿径向的分布与动量矩守恒规律有比较明显的差别, 总压沿圆周方向变化不明显。

关 键 词: 离心压缩机; 蜗壳; 圆形截面; 流动测量

中图分类号: TH43 文献标识码: A

引 言

蜗壳是离心压缩机不可缺少的固定元件之一, 它起着重要的导流与扩压的作用, 蜗壳内的流动状况以及它与其它部件的匹配状况都将影响压缩机的性能, 对于提高整机效率、降低噪音水平有重要作用。长期以来, 人们一直采用一维方法来设计蜗壳型线, 主要设计依据之一是蜗壳横截面上与截面垂直的分速度 C_u 沿径向的分布符合动量矩守恒定理, 即 $C_u \times r = \text{常数}$, 这与蜗壳内部的实际气体流动状况存在较大的差别。实际上, 蜗壳入口流场在轴向和周向都是不均匀的, 加之流体与蜗壳壁面之间的摩擦、压力梯度与离心力不平衡所造成的二次流及曲率对流动结构的影响, 使得蜗壳内部的流场极为复杂。因为蜗壳结构比较特殊, 且位于叶轮或扩压器之后, 给数值计算中正确确定边界条件带来困难^[1]。因此采用实验手段研究蜗壳内部流场对于设计高效率的压缩机有着很大的帮助, 同时对于设计压缩机蜗壳也会有借鉴作用^[2~7]。针对上述情况, 采用五孔探针对一大尺度低速离心压缩机蜗壳内部

流动进行了详细的测量, 并进行了初步分析和讨论。目的是力求详细深入地了解离心压缩机蜗壳内部的流动状况, 为进一步分析其流动和损失机理, 改进设计方法, 优化蜗壳结构以及进行蜗壳内部流动的数值模拟奠定基础。

1 实验装置

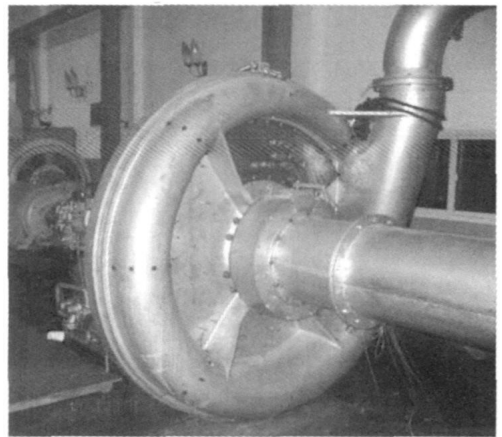


图 1 实验台实物

实验是在西安交通大学赛尔机泵研究中心的“离心式压缩机动静相干非定常流及其激振实验装置”上进行的。该实验装置为一大尺度低速离心压缩机标准中间级, 如图 1 所示。实验台的工质直接来自大气, 通过轴向进气管及导流器进入离心叶轮, 随后气体流经叶片扩压器与蜗壳, 最后通过排气管直接排入大气。其中叶片扩压器的出口直径为 1 258 mm。为了测量实验装置的气动性能, 在进气管和排气管中部均装有总压探针、温度计以及静压

孔;排气管道上安装有孔板和节流阀,调节节流阀的开度即可改变流量工况,通过孔板可以测量流量。变频调速三相异步电机通过增速箱带动离心叶轮旋转,变频调速器可以非常精确地控制叶轮转速在 0 ~ 7 800 r/min 范围内连续调节,某一确定转速下的转速波动不超过 3 r/min。

实验蜗壳采用传统一维设计方法设计,为一外圆内曲线的内蜗壳,蜗壳螺旋流道横截面是偏心的圆形截面。考虑实验装置的整体结构与本实验研究的可行性,在蜗壳圆周方向共布置 5 个径向测量平面,其位置角分别为: 135°、180°、225°、270°、315° 及 360°,其中 17° 处为蜗舌。测量截面与测点布置如表 1 和图 2 所示。测孔的轴线方向与各测量截面上的径向一致。研究使用五孔探针测量蜗壳内部流场,探针通过坐标架固定在蜗壳壁面的测孔上,调节坐标架控制探针沿测量截面的半径方向移动。从壁面附近一个统一的起点开始,沿测量截面半径方向每隔 10 mm 测量一次,从而在每个测量截面内形成间隔为 10 mm 辐射状测点网格。测量使用的五孔探针经标准校正风洞校正,每个截面的测量都进行了必要的重复,以保证测量结果可靠。

表 1 测量截面位置与测点位置

测量截面代号	圆周方向位置角/ (°)	测量截面圆心半径/ mm	测量截面半径/ mm	测量截面测孔数目
A	135	808	92	4
B	180	795	105	4
C	225	784	116	4
D	315	765	135	4
E	360	737	143	4

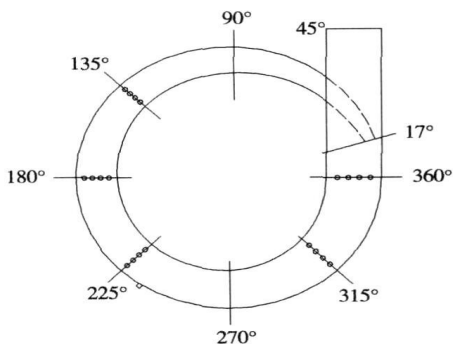


图 2 测点布置示意图

2 实验结果及分析

实验首先对整台压缩机系统在离心叶轮转速为

3 000 r/min 时进行了性能测试,图 3 为该离心压缩机级的性能曲线图。由图可见,整台压缩机的最高压比为 1.12,效率最高可达 82.1%,性能曲线较为平缓。对蜗壳内部流动实验研究选择压缩机的最高效率点进行,相应的总压比为 1.107,进口体积流量 2.66 m³/s,基于叶轮叶尖速度和叶轮出口半径的流动雷诺数为 $Re=6.6 \times 10^6$ 。

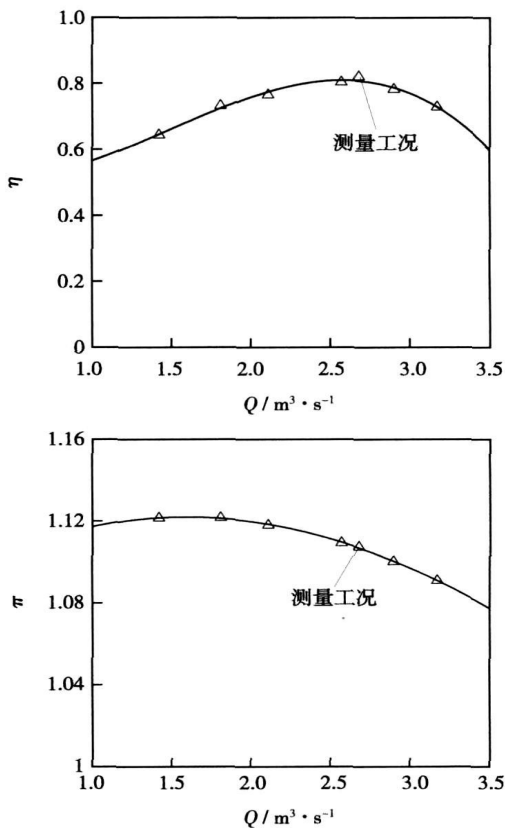


图 3 性能曲线

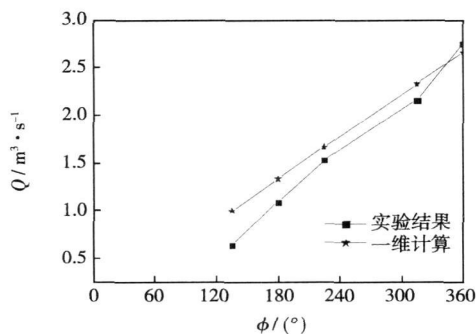


图 4 蜗壳各个截面流量分布

图 4 给出的是一维计算及实验测量得到的体积流量沿圆周的变化。由图可见,随着测量截面位置角的增大,通过测量截面的不仅有来自其前面截面

的气体, 同时还有从该位置角叶片扩压器气体不断注入, 因此实验测量与一维计算均表明通过测量截面的体积流量沿着圆周方向不断增加, 而且, 随着角度的增大, 蜗壳内的流动趋于稳定, 实验与计算之间的差别也越来越小, 这也表明本实验的结果是可信的。

本实验研究中, 测量截面为圆形的径向截面, 因此垂直于各测量截面的气流分速度 C_u 则为蜗壳内各测量截面的通流速度。为了方便分析, 对各圆形截面的几何尺寸与流动参数均进行了无量纲化处

理, 参考压力为标准大气压, 参考速度为离心叶轮轮缘速度。图 5 给出了 5 个测量截面上通流速度分布。从图可见, 各截面上通流速度无论在径向还是轴向在方向上并不均匀, 各截面上的通流速度 C_u 均在截面的圆心偏向蜗壳进口处达到了最大值, 受到蜗壳壁面的约束及附面层的影响通流速度随着距蜗壳壁面的距离减小而逐渐减小, 并不满足一维设计所假定的动量矩守恒; 比较不同位置角 Φ 处各横截面上的速度分布可看出, 各截面通流速度沿圆周方向从 $135^\circ \sim 360^\circ$ 总体上是逐渐增大的。

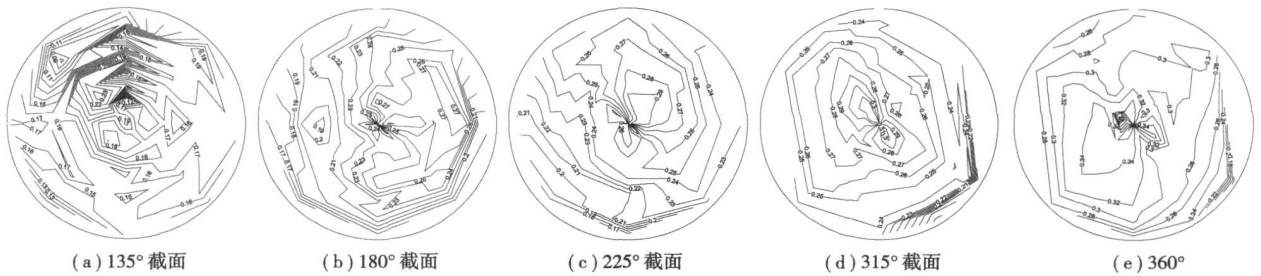


图 5 各截面上通流速度的分布

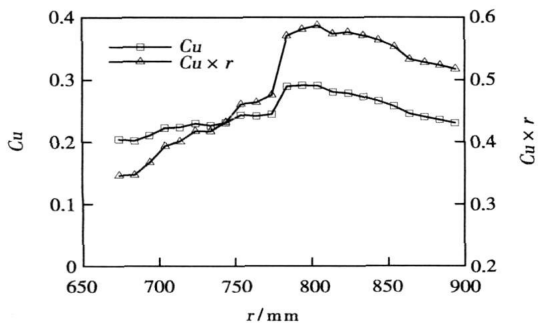


图 6 典型截面的通流速度及动量矩

图 6 为典型测量截面 (225°) 上无量纲通流速度 C_u/U_2 及无量纲动量矩 $C_u \times r/(U_2 \times R_2)$ 沿径向的分布。可以看出, 从叶片扩压器出来的气流由于失去固体壁面的约束, 其通流速度从蜗壳进口处开始逐渐增大, 在截面中心达到了最大值, 随后由于距壁面距离的减小, 通流速度又随着半径的增加而迅速减小, 但是, 通流速度的径向分布并不是以截面圆心为中心而对称分布, 蜗壳进口的通流速度小于靠近蜗壳壁面的通流速度。同时, 通流速度的分布影响了动量矩的分布, 径向测量截面上动量矩并不满足 $C_u \times r = \text{Const}$ 的一维设计假定, 与通流速度的分布类似, 蜗壳外壁面附近的动量矩大于蜗壳进口处的

动量矩。图 7 给出了 5 个径向测量截面圆心处的通流速度与动量矩沿圆周方向的变化。随着测量截面位置角的逐渐增大, 圆心处通流速度也随之缓慢增大, 但增加幅度较小, 然而截面中心位置处的动量矩依然不满足动量矩守恒的一维设计假定, 从 $135^\circ \sim 225^\circ$ 截面上, 动量矩增加较快但随后变化较为平缓。

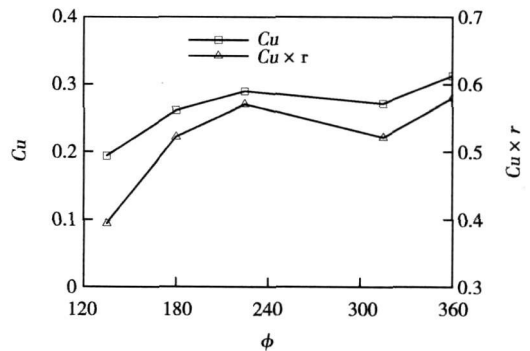


图 7 截面圆心位置处的通流速度及动量矩

图 8 为典型测量截面 (180°) 上无量纲总压及无量纲静压沿径向的分布。与通流速度沿径向的分布同样, 在某一位置角处径向截面上的静压与总压沿着径向也不是均匀分布, 由于圆形截面二次漩涡的影响, 总压与静压沿径向均呈不对称的“V”型分布, 其最小值均位于截面的圆心位置附近, 蜗壳进口附

近的总压与静压较大。图 9 给出的 5 个测量截面圆心处的无量纲总压与静压表明，测量截面圆心处的总压沿圆周方向变化不大，但由于通流速度沿圆周方向不断增加，使得圆心处的静压沿圆周方向略有降低。

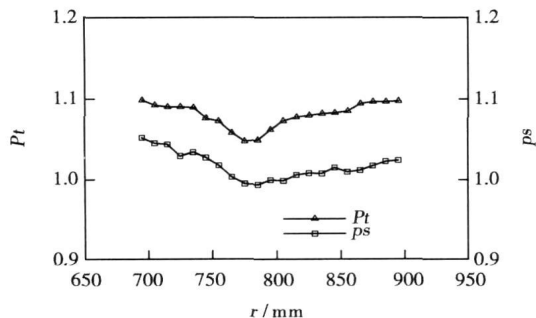


图 8 典型截面的总压与静压

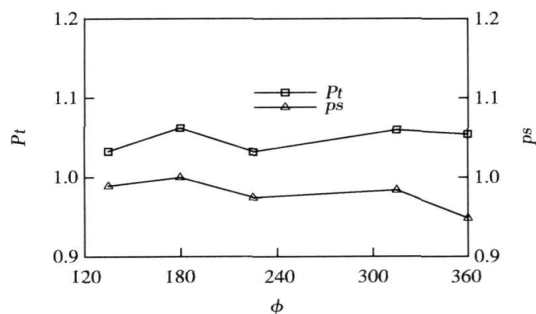


图 9 截面圆心位置处的总压与静压

3 结 论

研究采用五孔探针对一大尺度低速的离心压缩机圆形截面蜗壳内的三维流动进行了详细测量，研究表明：

- (1) 随着角度的增大，蜗壳内的流动趋于稳定，实验测量各截面流量与一维计算之间的差别也越来越小；
- (2) 蜗壳内流动是较为复杂的三维的漩涡流动，流动在各个方向上分布并不均匀；
- (3) 各径向截面内的通流速度 C_u 的分布与一维设计的动量矩守恒 $C_u \times r = \text{Const}$ 的分布规律存在明显的差别，且通流速度沿蜗壳圆周方向逐渐增大；
- (4) 本实验蜗壳内的总压沿着流动方向变化较小，但静压随着流动方向总体呈减小趋势。另外，实验测量点的布置受到实验装置结构的限制，本研究

计划进一步开展离心叶轮、叶片扩压器以及蜗壳 3 个部件为整体的数值研究工作，为改进蜗壳的设计方法，优化蜗壳结构，改善蜗壳与其它部件的匹配关系奠定基础。

参考文献：

- [1] 王企鲲, 戴 韧, 陈康民. 离心风机梯形截面蜗壳内旋涡流动的数值分析[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(1): 66—68
- [2] EIHOLM E AYDER, VAN DEN BRAEMBUSSCHE. Experimental study of the swirling flow in the volute of a centrifugal pump[J]. ASME Journal Turbomachinery, 1992, 114: 366—372
- [3] AYDER E. Experimental and theoretical analysis of the flow in a centrifugal compressor volute[J]. ASME Journal Turbomachinery, 1993, 115: 582—589
- [4] HAGELSTEIN D, VAN DEN BRAEMBUSSCHE. Experimental and numerical investigation of the flow in a centrifugal compressor volute[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2000, 122: 22—31.
- [5] 黄淑娟, 胡志伟, 苗永森. 矩形蜗壳内三维紊流场的热线测量[J]. 航空动力学报 1994, 9(3): 259—262
- [6] 龚 华 祁大同, 张义云, 等. 离心风机大宽度矩形截面蜗壳内部流动中动量矩分布的实验研究[J]. 流体机械 2004, 32(2): 1—5
- [7] QI D, ZHANG Y, WEN S, et al Measurement and analysis of three-dimensional flow in a centrifugal fan volute with large volute width and rectangular cross-section[J]. Proc Inst Mech Eng Part A: Journal of Power and Energy, 2006, 220: 133—153

(编辑 何静芳)

· 书 讯 ·

《新能源转换与控制技术》

大力开发和利用新型清洁能源，减少大气污染和温室效应，已成为衡量一个国家可持续发展的重要指标。该书将新能源转换技术、电力电子技术和控制技术有机结合在一起，围绕目前国际社会综合利用新能源的研究热点，重点介绍几类具有良好应用前景的新能源变换及控制技术。本书主要内容包括：以可再生能源为代表的新能源的分类、应用现状与发展前景，电力电子变换和控制基础知识，风能和风力发电与控制技术，太阳能和光伏发电与控制技术，天然气和燃气发电与控制技术，生物质能及发电与控制技术，水能和新型小水电应用与控制技术，海洋能及发电与控制技术，其它新能源转换与控制技术等。全书共 9 章。

本书适用于电力工程专业、电气工程及其自动化专业、自动化专业及其相关专业的本科生作为教材。对从事电能变换与控制技术的广大工程技术人员也是一本较为系统完整的参考书。

2008 年 2 月出版

超临界循环流化床锅炉技术特点比较 = **A Comparison of Technical Features of Supercritical Circulating Fluidized Bed Boilers** [刊, 汉] / ZHANG Man, BIE Ru-shan (College of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), WANG Feng-jun, JIANG Xiao-guo (Harbin Boiler Works Co. Ltd., Harbin, China, Post Code: 150046) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(3). — 271 ~ 276

To summarize the technical features of supercritical CFB (circulating fluidized bed) boilers, analyzed were the parameter selection for supercritical boilers and the reasons why CFB boilers are more suitable than pulverized coal boilers for adopting supercritical parameters. The status quo of the study on supercritical CFB boilers both at home and abroad was described in detail. An analysis and comparison of the versions of a supercritical 600 MW CFB boiler for Baima Project proposed by three domestic boiler manufacturers shows that there exists no overriding technical barrier in the design of a supercritical CFB boiler. Moreover, the supercritical CFB combustion technology will become an important clean coal-based power generation technology for coal-fired power plants in China. However, with the in-depth development of research on supercritical CFB boilers, some relevant problems still merit further study and investigation. **Key words:** circulating fluidized bed boiler, supercritical, water wall, technical feature

圆形截面离心压缩机蜗壳内部三维流动的测量与分析 = **Measurement and Analysis of Three-dimensional Flows in the Volute of a Centrifugal Compressor with a Round Section** [刊, 汉] / GAO Li-min, WANG Huan, LIU Bo (Key Laboratory on Airfoil and Cascade Aerodynamics, College of Power and Energy Source, Northwest Polytechnic University, Xi'an, China, Post Code: 710072), WANG Shang-jin (College of Energy Source and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(3). — 277 ~ 280

By utilizing a five-hole probe, measured in detail were three-dimensional flows in the volute of a large-sized low-speed centrifugal compressor with a round section. As a result, a flow velocity distribution and a distribution chart of flow speed, total and static pressure along the radial and circumferential direction in the radial measurement section of the spiral flow passage portion of the volute were given, and the flow rates thus obtained, compared with those obtained from the one-dimensional calculation. It has been found that the measured flow rates in various sections assume an identical variation tendency with those obtained from the one-dimensional calculation. In step with increasing angles, the difference between the calculation results and test ones gradually decreases. In addition, the flows in the volute under test pertain to complex three-dimensional flows, and the flow speed distribution along the radial direction in various radial sections of the volute features a comparatively conspicuous difference from the momentum conservation law. The change in total pressures along the circumferential direction is not manifest. **Key words:** centrifugal compressor, volute, round section, flow measurement

悬臂转子系统振动特性分析 = **An Analysis of the Vibration Characteristics of a Cantilever Rotor System** [刊, 汉] / AN Xue-li, ZHOU Jian-zhong, LI Chao-shun, LIU Li (College of Hydropower and Digital Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(3). — 281 ~ 285

Derived and established was a kinetic equation for cantilever rotor systems with the role of rotor blades being taken into account. Through a numerical integration of the motion differential equation, the influence of various factors on the vibration characteristics of a cantilever rotor system was analyzed. The factors include mass eccentricity, rotor blade mass and bearing spacing etc. The numerical analytic results show that with a continuous increase of the mass eccentricity of wheel disk No. 2, the radial displacement of the rotor system will exhibit an approximately linear increase. In case different values are chosen for rotor blade mass and the spacing between bearings etc., the change of the radial displacement of the rotor system becomes relatively complicated. The radial displacement value of wheel disk No. 1 may be greater than, equivalent to or less than that of wheel disk No. 2. **Key words:** overhung rotor, blade quality, mass eccentricity, radial displacement, bearing spacing

叶片的周向前弯角度对低压轴流风扇叶顶泄漏流场的影响 = **Influence of the Circumferential Forward Skew**