

研究转子内流动的大尺寸轴流压气机 实验装置和动态测量技术

北京航空航天大学 蒋浩康** 李雨春 张洪 熊璋 徐力平 陈矛章

【摘要】 本文在评述国外同类技术的基础上,介绍近年研制成的,以研究转子内流动为主要对象的低速大尺寸轴流压气机实验装置和动态测量技术,包括实验台、旋转四坐标全电动探针位移机构、并行多通道高速数据采集器、高频压力探针及一整套高频压力探针、热丝和激光多普勒动态测量技术,列举了典型的转子内和转子进、出口复杂流场测量结果。

一、前言

对压气机内真实流动缺乏足够的认识,是分析和设计高性能压气机的主要障碍。压气机内流动的复杂性表现为各种三维旋涡、湍流和非定常流动。认识这些流动的基本物理机制的主要途径是试验研究。低速大尺寸压气机试验和测量系统则是最主要的试验手段之一。美国的 Penn. St. Univ.、UTRC 和 GE 等单位的这种装置在叶轮机内真实流动结构研究方面作出了很大贡献^[1~3]。其中 GE 公司做的核心压气机出口级的模拟试验和筛选研究,证明针对实际流动修改端部叶片形状和速度三角形,在降低端部损失上有很大潜力,为发展 E³ 高压压气机起了很大的作用。这类装置的一个共同特点是都设有功能水平不同的旋转探针位移机构,用以在不同程度上直接测量转子相对流场。叶轮机内部的流动,本质上是动态的,用高频响的测量手段(如高频压力探针、叶面高频压力传感器、热丝以及多普勒激光测速仪等)比用常规稳态测量手段能更好的获取流动特性。在固定坐标系上测量旋转坐标系中的流动需用高频测量方法,而无论在固定坐标系中,还是在旋转坐标系中,研究湍流和非定常流更要依靠高频测量。这是叶轮机流动测量技术的发展趋势^[4]。

出于压气机内流动机理研究和高压压气机后级模拟研究的需要,我们近年建成一套比较完善的低速大尺寸轴流压气机试验和测量系统。其特点之一是自行研制了一套旋转四坐标全电动探针位移机构。特点之二是研制和开发了包括高频压力探针、热丝技术、激光多普勒技术和并行多通道高速数据采集器在内的完整的叶轮机气流动态测量系统及技术。本文的目的是对这个试验装置和动态测量技术的特点作一个简要介绍,并列举一些典型的测量结果。

二、实验台

图1是实验台总体示意图。实验段气流通道外径1m,内径0.6m。空气由外径1.8m的双纽线进气口,经一小段平直段后被试验压气机吸入。目前的试验压气机有两套,一套是包括

导叶、转子和静子三排叶片的单级压气机,另一套是单转子压气机。转子叶片的叶片数、安装角、叶尖间隙均可改变。图 2 表示了单转子压气机的特性。试验压气机用位于进气锥前的 40kw 直流电动机通过万向轴传动。微调供电的硅整流器可控制转速偏摆在 $\pm 0.5 \text{ r/min}$ 以内。装于电机另一轴端的轴编码器发出的每转 600 个信号通过频率计精确指示转速。典型工作转速为 1200 r/min 。

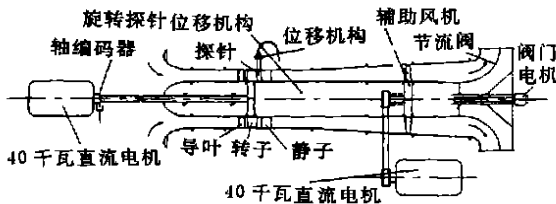


图 1 试验台简图

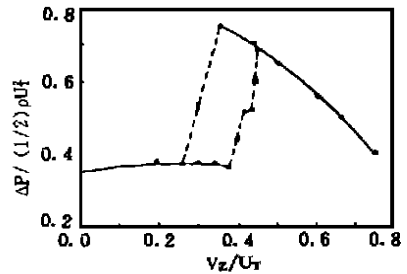


图 2 单转子压气机特性

目前的电机功率对于做大轮毂比的高压压气机后级模拟研究的四级相同级试验也是够用的。为了留有足够的余地,也为了测量效率,已完成一个改型设计,并已购置了 75kw 直流电动机和扭矩仪。改型后的电机和扭矩仪将包容在进气锥内,以改善进气流场。

把动力电机放在试验压气机前面是因为转子后面放置了一套旋转探针位移机构。除旋转探针位移机构外,三个两坐标(自转调零和径向位移)手动探针位移机构可固定在测量机匣上轴向和周向总共 48 个不同位置。测量机匣上还开有两个激光测速窗口。气流通道的后段设有一个直径 1.2m 的轴流高压风机,用另一套 40kw 直流电动机从侧面通过皮带传动。风机的作用是必要时用以抽气,以扩大试验压气机的流量范围,还可以把试验台扩展到试验环形压气机和涡轮叶栅。通过压气机的空气流量用位于尾部的由双向直流电机减速器传动的直径 1.8m 的圆锥阀调节,调节精确可靠,可以调到全部关死。排气室与进气室由墙隔开,以免排气被重新吸入。

三、旋转四坐标全电动探针位移机构

旋转探针位移机构的功能在于在转子旋转系中移动和转动气动探针和热丝探针,以直接测量转子出口、转子叶片通道内的相对流场。有旋转探针位移机构的压气机试验设备的单位有美国 Penn. St Univ., UTRC 和 GE, 德国的 Aachen Univ., 法国的 ONERA 等^[1,3,4]。其中 UTRC 的机构自动化程度最高,实现了探针切向移动、径向移动和自转调零三个坐标的电动控制,但没有轴向移动,探针未进入转子叶片通道内,只用来测量转子出口相对流场。Penn. St Univ. 的 PSU-1 旋转探针位移机构是国外唯一实现了转子叶片通道内探针直接测量的机构,但只有切向移动一个坐标是电动控制。Aachen Univ. 和 ONERA 的机构各有径向移动、切向移动和切向移动、自转调零两个自动控制功能,GE 的机构只有切向移动一个功能。这些机构都不很完善,用来测量转子出口流场均有一定的局限性。

本机构实现了径向移动、切向移动、轴向移动和自转调零四个坐标的全电动控制。图 3 是机构的工作原理图。位于机构中心的转轴(图上标称基础轴)轴腔内的步进电机 R, 通过齿轮、蜗杆蜗轮和径向滚珠丝杠,传动装夹着探针的小车部件作径向移动,行程 112mm。同样位于转轴轴腔内的另一个步进电机 N, 则通过齿轮、蜗杆蜗轮、花键轴和钢带轮传动探针作自转

调零动作, 行程 $\pm 175^\circ$ 。切向移动是由固定在静止系中的步进电机 T, 通过差动行星轮系, 使传动机构的转轴相对于与叶轮固连在一起的套轴 (图上标称差动轴) 作相对切摆而实现的, 行程 60° 。轴向移动则是由固定在静止系中的步进电机 A, 通过蜗杆蜗轮、滚珠螺母传动轴向丝杠, 轴向丝杠端头通过双向止推轴承实现在静止坐标系里拖动旋转坐标系作轴向位移, 行程 500mm。图示的径向丝杠上另一头的配重是用来平衡探针小车作径向移动时离心力的变化。

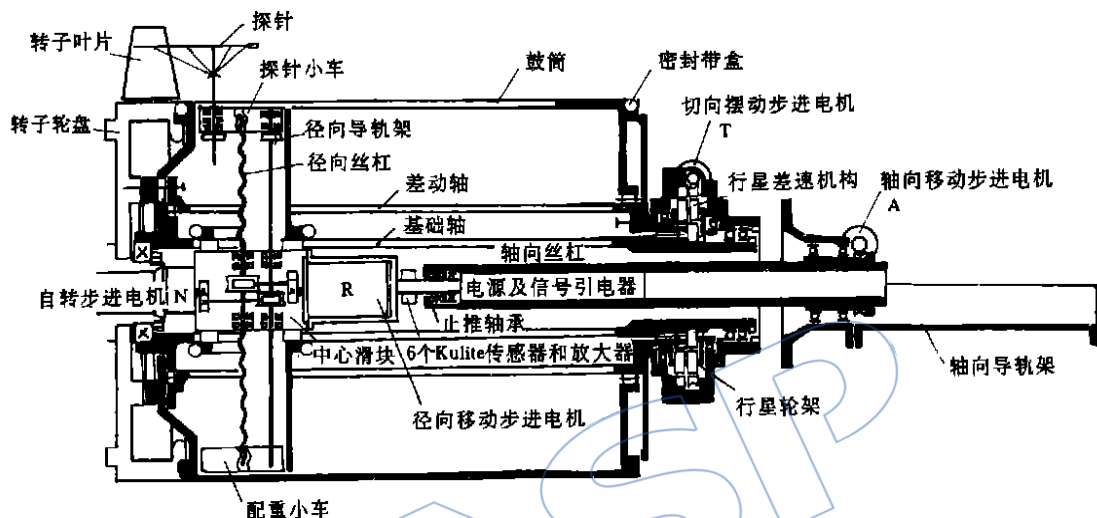


图3 旋转四坐标全电动位移机构工作原理图

鼓筒两头边缘上的密封带盒, 则是为探针作轴向位移时鼓筒上的槽沟始终被贴平而收放密封钢带的。为做到测控的高精度, 四个坐标的位移均采用光栅测量。径向、切向 ($R = 250\text{mm}$ 处) 和轴向位移精度 0.01mm , 自转调零精度 0.1° 。这套机构被设计成可以与转子脱开, 与静止系统联接, 起固定四坐标探针位移机构的作用, 带动高频压力探针或热丝测量转子出口周期性相对流场, 或带动各种探针测量静叶通道内流场。

轴向丝杠内腔中设置了 54 路滑环引电器。部分用以传输旋转系内两个步进电机 (径向和自转调零) 的电源、三个光栅 (径向、自转调零和切向) 的电源和信号, 另一部分则用以传输来自探针或叶面压力信号。在旋转机构转轴内中心部位, 安有六个 Kulite 微型高频压力传感器 XCW-093-5D, 用以把来自旋转气动探针或转子叶片表面测压孔所感受的气动压力转换为电压信号。为了提高信噪比, 在经引电器引出之前, 每个信号各自经过放大器放大 100 倍。若探针不是气动探针而是热丝, 则信号不必放大, 直接经引电器引出。旋转探针位移机构的四个坐标可分别由各自的步进电机—光栅测控柜控制, 也可由微机直接统一控制。该机构在转速 1200r/min 下机械运行, 各坐标位移、信号传输、计算机控制、光栅测量稳定可靠。

用作者研制的“T”形前弯五孔锥形探针测量了一个单转子压气机转子叶片通道后段的流场和尾迹, 图 4 列举出若干典型测量结果。这些数据揭示的转子叶片通道后段流场与用高频探针测得的转子出口流场 (见文献 [5、6]), 能很好地关联。由图可见, 在近失速状态下, 叶尖槽道后段近叶背处有相当大的径向速度, 这里流向脱轨角小, 流量通过能力弱, 总压损失大。叶尖槽道中部, 是一个高损失和高阻滞区, 这里的复杂流动结构, 影响着压气机的效率和失速, 是许多学者致力的课题, 我们的工作为弄清这里的流动及其控制方法将作出贡献。

比起国外的旋转探针位移机构来, 本机构功能最全、自动化程度最高、行程最大、精度

最高, 可用以带动探针精确测量包括转子和静子叶片通道在内的稳态和动态三维全流场。

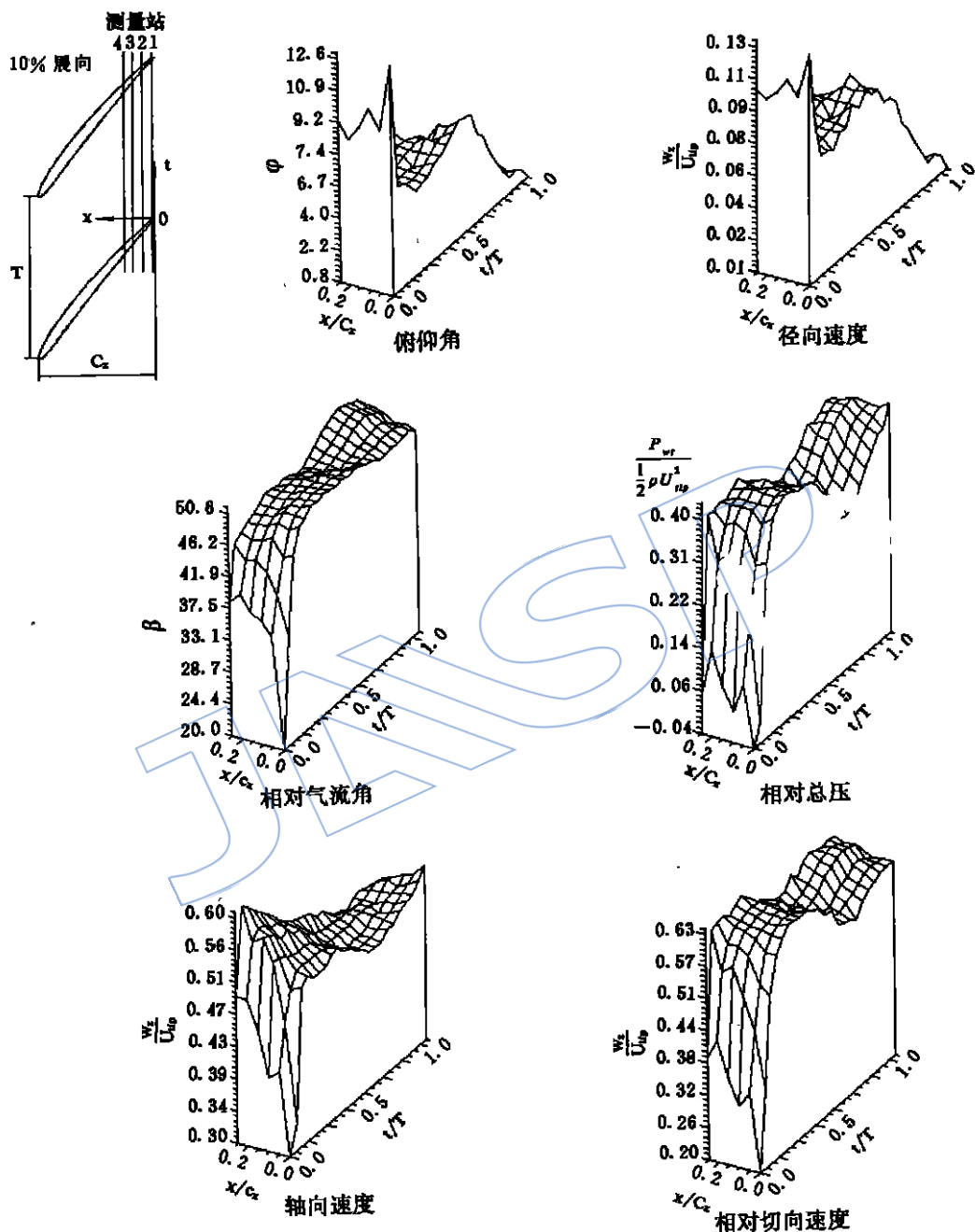


图 4 近失速状态转子叶尖槽后段参数分布

四、平行多通道高速数据采集处理系统

国外不少压气机试验设备的动态数据采集长期沿用磁带记录后再分析处理的方法。我们于 86 年自行研制成一套平行多通道高速数字数据采集处理系统 BHD 200, 其性能指标和功能至今与国外商业化的同类产品相比仍属较高者。新近我们为其开发了新的软件, 采用了美国

最新版本窗口系统, 改善了效果, 提高了功能。

叶轮机内气流动态参数的测量, 要求数据采集系统有多通道、并行(无相差)、高速(叶片频率的数十倍甚至更高)和大数据量的功能。图 5 是整个气流动态测量系统的结构框图。热丝经 TSI IFA 100 热丝风速仪来的信号, 或 Kulite 传感器经 PRESTON 8300AU 放大器放大后的信号, 被 386/DOS 微机通过专用接口控制数据采集器 BHD 200 作采集、A/D 变换, 并用 DMA 方式接收进计算机。BHD 200 有平行 16 通道模拟量输入通道, 有 16 个高速采样保持器 S/H, 但模数转换器 ADC 只有 8 个, 其转换时间 $4.5\mu\text{s}$, 分辨率 12 位。少于 8 个通道同时工作时, 每通道最高采集速率为 $100\text{KC}/\text{s}$ 。

对于叶轮机内周期性信号的采集, 同步锁相技术是必要的, 以实现信号无相差地多次被

采集, 经采样平均消除噪音和随机脉动量, 并保证分时测量的数据在转子周向位置上一一对应, 总起来说, 叫同步锁相采样平均技术。采样触发信号来自轴编码器的每周一个信号。

本系统在 $1200\text{r}/\text{min}$ 下用固定高频探针作转子出口相对流场测量时, 常用采样速率为 $100\text{KC}/\text{s}$, 每周每个信号采集量 1024 个, 采集周期数 60~100 周。经采样平均处理后, 每一个径向位置有三个多转子叶片通道出口参数被采集, 在一个栅距范围内采集多达 300 个周向站的参数, 足以分辨流动结构的细节。在沈阳航空发动机研究所 A 205 压气机试验台试用表明, 这套采集系统就其性能指标说, 也可以满足高速的型号压气机试验测量的要求。

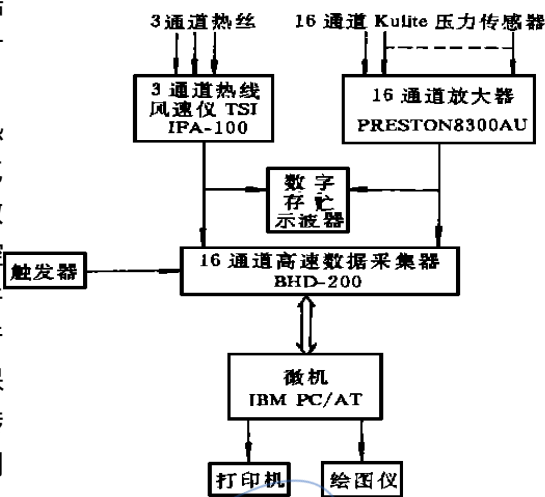


图 5 气流动态测量系统框图

五、三种高频压力探针

热丝技术和激光测速技术以它们的空间分辨率高, 少干扰甚至不干扰流场, 可以测量湍流脉动量等优点而被叶轮机不稳定流动研究广泛应用。但它们只能测量流速, 一般测不出压力, 热丝又极易断损, 激光测速技术则复杂、费事和昂贵。内嵌高频压力传感器的组合气动探针, 尽管其有一定的尺度, 不大适合于测量湍流脉动量, 但能同时测量气流动态压力、流速和方向, 还具有常规气动压力探针的坚固耐用、使用方便的优点。美国麻省理工学院 MIT、海军研究生院 NPS、法国宇航院 ONERA、德国 Stuttgart 大学等都成功地研制和使用过这类探针。这些探针各具优缺点。MIT 的 Kerrebrock^[7]的五膜片球形压力探针频响极高, 但因膜片贴于球表面, 容易受损, 尺度也大了些; NPS 的 Shreeve^[8]的 DPDS 技术虽则探针尺寸小, 但两个设于不同周向位置的单孔压力探针的组合将引入流场周向不均匀误差; Stuttgart Univ. 的 Bubeck^[9]和 Heneke 的楔形四孔压力探针比较小巧, 但有传感器精度低和测量气流角度的范围窄的缺点。国外这几家技术还有两个共同的局限性: 一是一般只能测出动态流动的相对变化量, 绝对量是由相对变化量叠加上具有相同外形和尺寸的稳态气动探针的测量值得到的, 精度不很高; 另一是测量对象都限于单级压气机。

本文作者近年研制了三种高频压力探针, 是针对单、多级压气机叶片排间测量周期性三

维和二维参数的绝对量而设计的。最先研制成功的是双斜孔高频压力探针, 详见文献 [4]。最近又有圆锥四孔高频压力探针和圆柱单孔高频压力探针的成功。这三种探针的头部结构示于图 6。双斜孔针和圆锥四孔针的头部几何是经过多方案的吹风试验筛选定的。这两种探针在偏角和仰角各 $\pm 25^\circ$ 度范围内具有较高的角度灵敏度, 而总压系数和静压系数则对偏角和仰角不甚敏感。精度高而尺寸又小的 Kulite XCQ-062 型微型高频压力传感器藏进探针头部, 硅膜片尽可能地贴近感受孔口。这样, 既可使传感器不易受损, 又使探针有尽可能高的频响。计算和标定表明, 三种探针的频响均达 20~30 KHz。

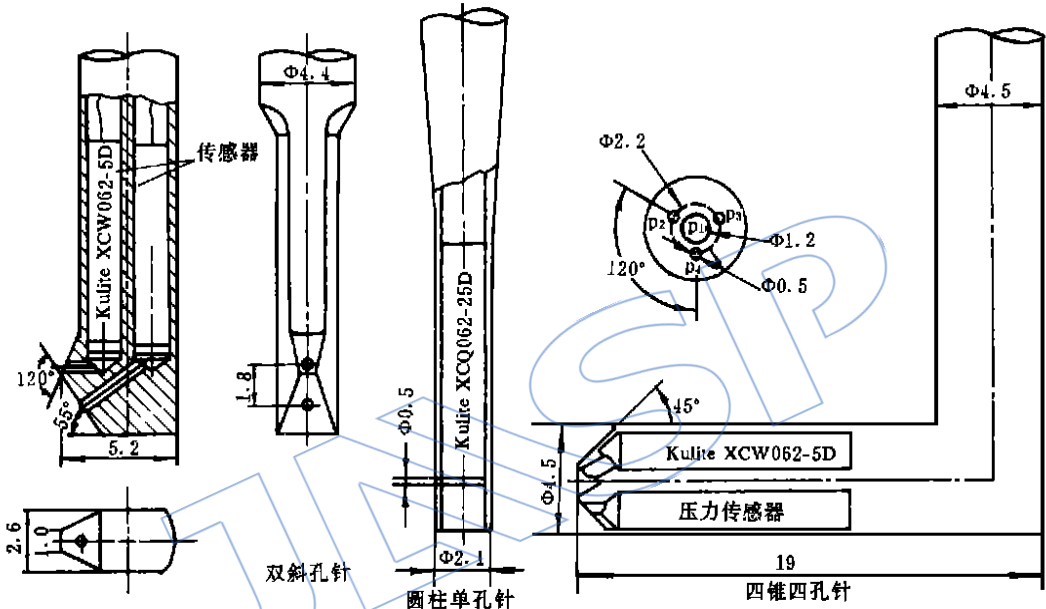


图 6 高频压力探针头部结构

对于准稳态的周期性流场, 可以由分时取得的信息组合推算出二维参数或三维参数。圆柱单孔探针由位移机构设置若干偏角方位进行测量, 用最小二乘法拟合, 可以获得二维流场。双斜孔探针由位移机构设置若干偏角方位进行测量, 同样用最小二乘法拟合, 则可以获得三维流场。由于传感器少, 探针头部尺寸可以做得很小, 上面两种探针的迎面尺寸分别只有 2.1mm 和 2.6mm, 后者其实还可以做得更小一些的。圆锥四孔针的尺寸相对地大一些, 4.5mm, 但优点是可以直接实现三维瞬态测量, 测量简单省时。

数据处理过程中, 引入了感受孔空间错位修正和根据模拟试验得到的规律作近壁影响修正及流场梯度影响修正, 并采取有效措施严格控制和测量传感器零点漂移和灵敏度漂移, 后者对于气流参数绝对量的直接测量是有决定性的。

借助高速数据采集系统, 并采用同步锁相采样平均技术, 用双斜孔探针详细测量了单级压气机转子出口和进口、设计和近失速两个流量状态下的三维流动结构。又用圆锥四孔探针测量了单转子出口和进口流场。还在沈阳航空发动机研究所 A 205 压气机试验器上中法合作单级压气机试验和某型三级风扇试验中, 用圆柱单孔探针和双斜孔探针测量了设计状态转子出口流场, 典型测量结果见文献 [5、10]。作为补充, 图 7、8 列举了用双斜孔针测出的压气机级近失速状态转子进口相对气流角 β 和静压的分布和转子出口相对速度矢量和总压分析。

图 7 显示转子进口流场同样具有强烈周期性; 图 8 显示近失速状态下转子出口流向的垂直面里存在一个比设计状态下强得多的逆转向旋转。比起设计状态来, 尾迹、尖部旋涡区和根部分离区都明显地扩大了。

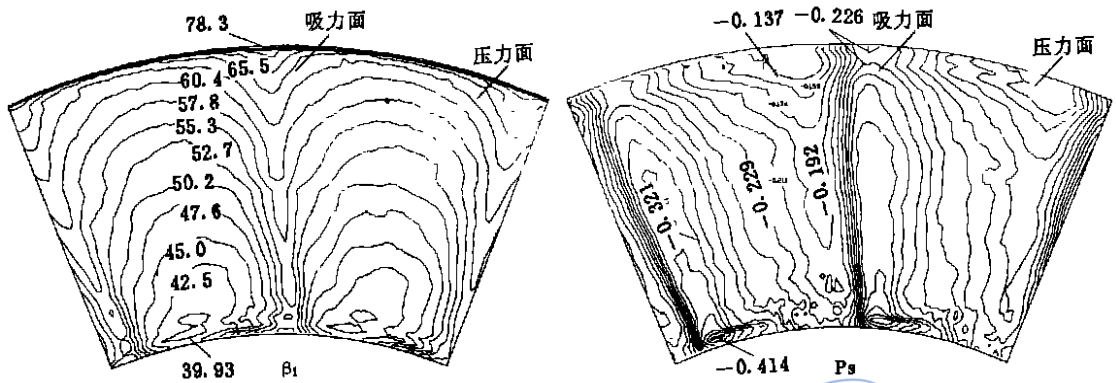


图 7 压气机级近失速状态转子进口相对气流角 β_1 和静压分布

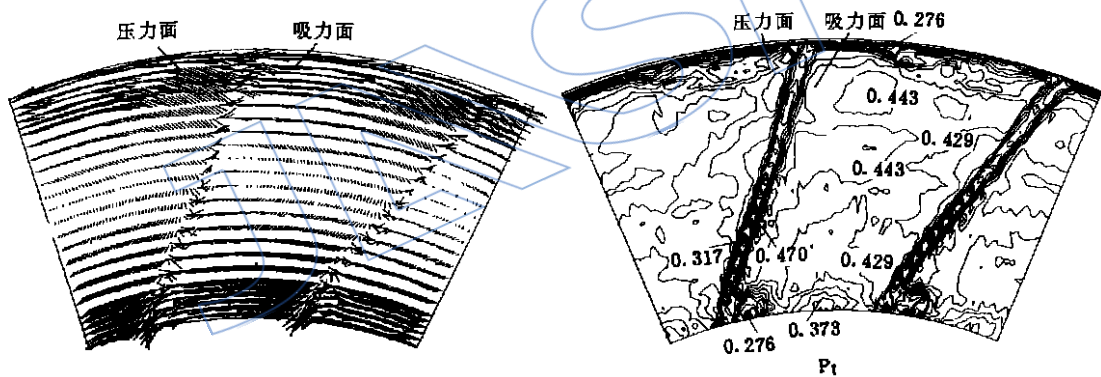


图 8 压气机级近失速状态转子出口相对速度矢量和总压分布

比起国外的高频压力探针来, 作者研制的几种探针不仅比较全面地做到了频响高、尺寸小、测量精度高和测量气流角度范围宽, 而且实现了单、多级压气机转子后流场绝对量的直接测量, 从而发展了高频压力探针测量技术。

六、热丝、多普勒激光测速、高频温度探针、低速可变温度校准风洞

本文作者改进了单斜热丝测量和处理计算方法, 提高了测量精度, 并扩展了可测气流角度范围, 从而推进了单斜热丝在叶轮机内复杂流场测量中的应用, 详见文献 [6]。方法的要点在于用 3- 4 阶经验关系式代替二阶关系式, 测量时则偏转探针多至七个角度方位, 用最小二乘法联立求解非线性方程组。用改进了的方法, 借助高速数据采集系统, 并用同步锁相采样平均技术, 同样详细地测量了单级压气机转子出口三维速度场, 显示其对速度矢量场测量

更具有高分辨率。还改进了双斜热丝测量三维平均 湍流场技术。该方法的特点是根据热丝的方向特性确定方向系数 k 和 h , 无需测量时在每一测点处先测出气流偏角, 然后再在偏角方位上进行测量。用改进了的方法测出了一个压气机叶栅通道内的三维平均 湍流场, 显示这个方法简便而有效, 详见文献 [11]。

叶轮机转子内流场的三维激光测量, 是另一项重要而又复杂的技术。这项工作的完成, 为即将引进的新三维系统发挥作用作了很好的技术准备, 详见文献 [12]。

压气机内动态温度的测量, 最大难点在高频响, 国外已有成功应用的技术是不同过热比的热丝。我们近期研究了用薄膜热电阻制成的高频温度探针的性能, 显示了这一作者认为更为实用的技术的良好前景。

为形成完整的体系, 还自行研制成一套流场均匀 湍流度低的低速可变温度射流式校准风洞, 口径 70mm, 最高射流速度 77m/s, 最高温升 70 $^{\circ}\text{C}$, 用以校准高频压力探针和热丝的气动特性, 并研究温度、近壁、流场梯度的影响。

致谢 本研究自始至终得到航空发动机总公司科研处和航科院测控处的鼓励和支持。试验器本体的结构设计和加工是由 410 厂设计处承担的。606 所为高频压力探针及其测量系统和软件推广应用到高速压气机试验提供了理想的条件。

参 考 文 献

- [1] Lakshminarayana, B., "An Axial Flow Research Compressor Facility Designed for Measurement in Rotor Passages," *ASME Journal of Engineering for Power*, Vol. 103, April 1981.
- [2] Dring, R. P., Joslyn, H. D. and Hardin, L. W., "An Investigation of Axial Compressor Rotor Aerodynamics," *ASME Journal of Engineering for Power*, Vol. 104, Jan. 1982.
- [3] Wisler, D. C., "Core Compressor Exit Stage Study Vol. 2: Data and Performance Report for the Baseline Configuration," NASA CR 159498, Nov. 1980.
- [4] Lakshminarayana, B., "Techniques for Aerodynamic and Turbulence Measurements in Turbomachinery Rotors," *ASME Journal of Engineering for Power*, Vol. 103, April 1981.
- [5] Jiang, H. K., Li, Y. C. and Xu, L., "A Two-Inclined-Hole High Frequency Pressure Probe for Measurements of Three-Dimensional Periodic Flow Field in Turbomachines," *Proceedings of the International Conference on Fluid Dynamic Measurement and Its Applications*, Oct. 1989, Beijing.
- [6] Li, Y. C., Jiang, H. K. and Xu, L., "Measurement of Three-Dimensional Unsteady Flow in Turbomachines Using a Single Slant Hot-wire," *Proceedings of the International Conference on Fluid Dynamic Measurement and Its Applications*, Oct. 1989, Beijing.
- [7] Kerrebrock, J. L., Epstein, A. H. and Thompkins, W. T., "A Miniature High Frequency Sphere Probe," *ASME Journal of Engineering for Power*, Vol. 103, April 1981.
- [8] Shreeve, R. P. and Neuhoof, F., "Measurements of the Flow from a High-Speed Compressor Rotor using a Dual Probe Digital Sampling (DPDS) Technique," *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 106, April 1984.
- [9] Bubeck, H. and Watcher, J., "Development and Application of a high Frequency Wedge Probe," *ASME 87-GT-216*.
- [10] 蒋浩康、李雨春、赵全春、徐祺祥, "高速多级风扇转子后流场测量", *航空动力学报*, 第 7 卷, 待发表。
- [11] 陈芳、蒋浩康, "双斜丝测量三维平均 紊流流场方法的改进", *航空动力学报*, 第 4 卷, 第 2 期, 1989, 4.
- [12] 王晓宇、徐力平、程元中、朱岩, "叶轮机转子内流场的三维激光测量", *航空动力学报*, 第 7 卷, 第 1 期, 1992, 1.

A LARGE-SCALE AXIAL FLOW COMPRESSOR FACILITY AND DYNAMIC MEASUREMENT TECHNIQUES FOR ROTOR FLOW STUDY

Jiàng Haokang, Li Yuchun, Zhang Hong, Xiong Zhang, Xu Lipin, Cheng Maozhang
(Beijing University of Aeronautics and Astronautics)

ABSTRACT A large-scale axial flow compressor research facility designed for relative flow measurements is presented. With the test section outer diameter of one meter and hub/tip ratio of 0.6, the facility has a unique rotating-probe traversing mechanism downstream the rotor blade row and inside the hub, which is capable of traversing five-hole pressure probe, hot wire and other probes across the rotor blade passage. The precise null, tangential, radial and axial motions of the probes are entirely electrical and controlled by an online 386 microcomputer. The data transmission system which transmits signals from rotating frame to stationary frame of reference consists of rotating Kulite pressure transducers and a multi-channel slip ring. In stationary reference frame, where the velocity and pressure at the rotor exit are unsteady with both periodic and random components, high-response probes fixed on stationary probe traverse mechanisms are used for rotor exit flow measurements. Two high-frequency pressure probes (a two-inclined-hole probe and a four-hole conic probe) have been developed and two hot-wire techniques (a single-slant hot-wire and a two inclined hot-wire sensor) have been improved. A self-made computer controlled 16-channel parallel data acquisition and processing system with the maximum sampling frequency of 100KHz per channel, accompanied with a phase-locked ensemble averaging technique, is used for acquiring the data measured by high-response probes. Typical data on the three-dimensional flow structure at the rotor exit and inlet with fine resolution by various probes are presented.

Cai Ruixian Cai Ruixian

3D LDA MEASUREMENT IN AN AXIAL FAN ROTOR

Wang Xiaoyu, Xu Liping

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics)

Chen Yuanzhong, Zhu Yan

(Greatwall Precision Instrument Research Institute)

ABSTRACT A stacked three-dimensional Laser Doppler Anemometer (LDA) system has been developed on the basis of a one-dimensional and a two-dimensional LDA systems. This system was successfully used in the measurement of the rotational flow field inside a small axial fan rotor. The measurements reveal rich and complex flow structures near the blade tip region, in particular fine helical vortex structures are obtained, which prove the system a useful tool in turbomachinery flow measurement.