

单斜热丝测量叶轮机内三维流动

北京航空航天大学 李雨春 蒋浩康

摘 要

本文改进了单斜热丝测量三维流动的计算处理方法,其特点是精度高、气流角度测量范围宽。测量中,置斜热丝于三个以上角度位置,借助高速数据采集系统和锁相采样平均技术,进行采样处理,再用本文发展的程序,计算三维速度平均量。用这种方法,成功地测出了轴流压气机转子出口周期性三维流场。对校准风洞流场的测量核实表明,速度测量误差不超过1%,角度测量误差不超过1°。

一、前 言

热丝技术被广泛使用,特别适合于紊流流动测量的技术。在三维流场测量中照理应该用三丝探头进行测量,但由于三丝探头有三根热丝和六根支杆,所占体积比较大,很难分辨小尺度空间的强剪切流。此外,探头对流场干扰大、校准复杂、维修费用高。这就促使人们探索用单斜热丝测量三维流场。用单斜热丝测量时,热丝支杆绕自身轴转至若干角度位置,以代替空间分布的三根丝。单斜丝的有效空间体积小得多,最小可到1mm左右。正是由于空间分辨率高,对流场干扰小,使用简便等优点,单斜丝测量方法受到许多研究人员的重视。有些作者^[1,2]已经把单斜丝用于测量三维流场和紊流雷诺应力,但由于测量精度不高,气流角度测量范围太窄,在叶轮机流场测量的应用受到了限制。

本文改进了单斜丝测量三维速度方法,提高了测量精度,并扩大了气流倾角的测量范围,成功地用以测量了转子出口周期性三维流场。这篇文章完成了三维速度平均量的测量。

二、实验设备和测量系统

图1是设备和测试系统的示意图。试验段气流通道直径1m,轮毂比0.6,设计流量22kg/s,转速1200r/min,转子叶片数17,叶片弦长200mm。

试验采用TSI 1213-20型单斜热

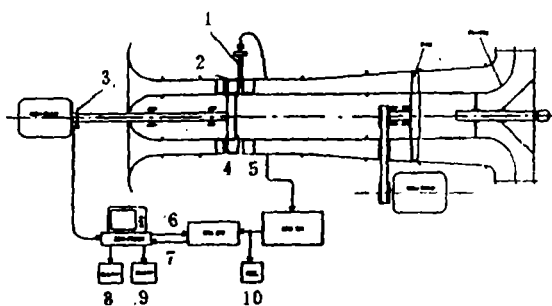


图1 大尺寸低速压气机试验台及动态测量系统示意图(1. 位移机构
2. 热丝探针 3. 光电盘 4. 转子叶片 5. 静子叶片 6. 控制信号
7. 数据流 8. 打印机 9. 绘图机 10. 示波器)

丝探针, 经 TSI1FA100 智能化热线风速仪, 由 TSI1FA200 数据采集器及 IBM-PCAT 微计算机组成的高速数据采集系统采集, 同时用 DSS6521 型记忆示波器进行监视。在压气机轴上安有光电盘, 为锁相采样提供外触发信号。

探针支杆安装在固定于压气机机匣上的两座标位移机构上。热丝的校准试验是在 TSI1125 校准风洞上进行的。

三、校准方法和测量方法

1、热丝的方向敏感性 用单斜热丝测量三维流场是基于热丝的方向敏感性。所谓方向敏感性是指热线风速仪的输出电压不仅取决于气流速度的大小, 而且与气流和热丝之间的夹角 θ 有关。当气流非垂直于热丝时, 称热丝上所感受的冷却速度为有效速度 U_{eff} 。有效速度与气流速度和方向之间简单但粗糙的关系式为余弦定律:

$$U_{eff} = U \cos \theta \quad (1)$$

一些作者^[3,4]在 (1) 式的基础上, 提出了各种改进形式。虽然这些关系式广泛用于三丝和双丝测量, 但由于只在 θ 较小的情况 (角度见图 2) 下才有足够的精度, 不适合 θ 变化相对较大的单斜丝测量。文献 [5] 提出了如下的经验关系式:

$$U_{eff} = b_0 + b_1\theta + b_2\theta^2 + b_3U + b_4\theta^2 + b_5\theta^3 + b_6U^2 + b_7\theta^2U + b_8\theta^2U + b_9\theta^2U \quad (2)$$

$$\cos \theta = \cos \lambda \cdot \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 - \sin \lambda \cdot \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \quad (3)$$

到目前为止, 多数文献均采用这一经验关系式。但对于气流与热丝夹角 θ 较大的情况, (2) 式这样的二次方程尚不能很好地描述热丝特性。而在叶轮机转子出口, 气流速度的大小及方向均变化很大, 尤其是在叶片端部。也由于 (2) 式只包含二次项, 对于各种不同特性的热丝或热膜 (尤其是重新焊过的丝), 用 (2) 式拟合曲线时往往有较大的偏差。为此, 本文提出如下的经验关系式:

$$U_{eff}/U = A_0 + A_1 \cos \theta + B_1 \sin \theta + A_2 \cos 2\theta + B_2 \sin 2\theta + \dots \quad (4)$$

$$A_i = a_{i0} + a_{i1}\theta + a_{i2}U + a_{i3}\theta^2 + a_{i4}U^2 + a_{i5}\theta^2U + a_{i6}\theta^2U + a_{i7}\theta^2U^2 + a_{i8}\theta^3 \quad (5)$$

$$B_i = b_{i0} + b_{i1}\theta + b_{i2}U + b_{i3}\theta^2 + b_{i4}U^2 + b_{i5}\theta^2U + b_{i6}\theta^2U + b_{i7}\theta^2U^2 + b_{i8}\theta^3 \quad (6)$$

式中三角函数的阶数可根据具体情况适当选定, 一般取 3—4 阶即可。(4) (5) (6) 式中的系数 a_i 和 b_i 用最小二乘法拟合校准数据来确定。

曾对几种热丝和热膜, 在较大的角度范围内, 用 (4) 式进行曲线拟合, 都能较好地反应热丝特性。

2、单斜热丝的校准 校准时, 先将热丝垂直置于校准风洞射流, 改变气流速度大小, 得出速度与输出

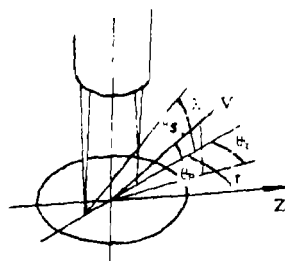


图2 单斜热丝坐标系示意图

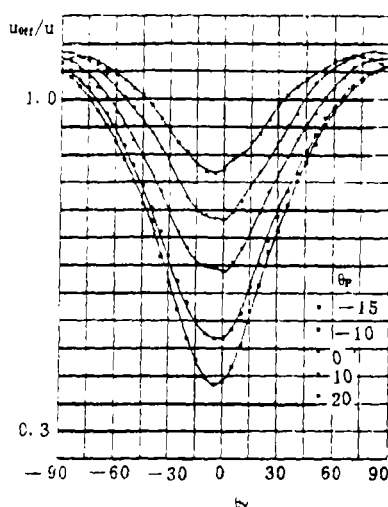


图3 单斜热丝典型校准曲线

电压的关系,拟合出线化系数 K, A, B, C, D 。然后固定一个气流速度,改变偏角 θ_y 和仰角 θ_z ,得到热丝在该速度下的校准曲线,如图3所示。

由于热丝的方向敏感性对于 $\theta_z=0^\circ$ 并不对称,于是将校准角度分为二组: $-90^\circ \leq \theta_z \leq 0^\circ$ 和 $0^\circ \leq \theta_z \leq 90^\circ$, 分别对这两组数用最小二乘法拟合出(4)式中的系数。本文在如下的气流速度和角度范围进行了校准:

$$\theta_y: -90^\circ - 90^\circ \quad \text{间隔 } 5^\circ$$

$$\theta_z: -15^\circ, -10^\circ, 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$$

$$U: 57.3 \text{ m/s}, 44.4 \text{ m/s}, 25.6 \text{ m/s}$$

曾用 $\theta_z=0^\circ$ 时, $U=51.3 \text{ m/s}$ 和 36.6 m/s 的电压值对校准曲线进行过检验,速度的计算误差小于1%,这说明经过线化的有效速度 U_{eff} 随气流速度的变化基本呈线性变化,一般在三个速度下进行 θ_y 和 θ_z 的校准即可满足要求。

在校准温度与试验温度不同时,本文采用经验公式对输出电压进行修正:

$$E_{\text{修}} = E(E_{0C}/E_{0R})$$

其中 E_{0C} 为校准时零风速电压, E_{0R} 为工作时零风速电压。

3、测量方法 在试验中,为了得到三维速度值,热丝至少应放置三个角度位置。当热丝探头顺气流方向放置时,也就是端流情况,气流方向包含在丝旋转所形成的锥角内。如只考虑时间平均的三维流场,单斜丝完全相当于一枝三丝探头,因而可采用文献^[1]介绍的三丝计算方法,当然也可采用本文介绍的方法。对于压气机转子出口轴向隙流场的测量,很难实现顺流安放探针。本文采用探头轴线与气流方向垂直的方案,即所谓横流安放。

当热丝绕自身轴线旋转时,仅气流对探针的偏角 θ 随转动而改变,气流对探针的仰角 θ_z 保持不变,由(4)式即:

$$U_{eff}/U = f(\theta_i + \Delta\theta, \theta_z, U), \quad i = 1, 2, \dots, n (n \geq 3) \quad (7)$$

当探针旋转 n 个角度,(7)式就构成了 n 个非线性方程组。按理说,方程组(7)只有三个未知量 θ, θ_z, U , 只需旋转探针至三个位置进行测量,便可求解。但由于校准曲线是用最小二乘法拟合出来的,若只用三个方程求出满足(7)的解误差较大,尤其当气流仰角 θ_z 的变化范围比较大时,误差会更大。有效的解决方法就是增加探针的测量角向位置,并用最小二乘法联立求解非线性方程组(7)。本文在试验中旋转探针至七个位置。曾用任一 θ_z 和 U 下的校准数据验算气流速度和角度,计算的速度误差均小于1%,角度误差均小于1°。

在叶轮机转子出口,从静止坐标测量运动坐标中的流场,气流相对于探针呈叶片周期性变化。为了保证探针各个角度位置下采集的数据在转子周向位置上一一对应,必须采用锁相采样技术。又为了消除随机干扰,还必须采用采样平均技术。总起来叫锁相采样平均技术^[2]。转子每转到某个固定的周向位置,由轴上安装的光电盘发出一个触发信号,触发 JF4200 连续采集 n 个数据。这样重复采样 m 周,并对各对应点的数据进行采样平均,即:

$$\bar{E}_j = \sum_{i=1}^m E_{ij} / m \quad j = 1, 2, \dots, n$$

平均后的每个数据对应于叶片槽道出口一确定周向位置,不同数据对应着不同周向位置。

四、试验结果

本文在转子出口平均半径 $r=100 \text{ mm}$ 处进行了测量。JF4200 的采集速率为2万次/秒,每周

采100个点样,这100个点样分布于大约1.7个叶片槽道,在热丝的每个角度位置,共采64周取平均。测量结果见图4、图5和图7。图4中下标 z 、 t 、 r 分别表示轴向、周向、径向, u 表示叶片旋转速度。图5中 α 和 β 分别表示静止坐标和旋转坐标中的气流偏角, θ 则表示仰角。见图6速度三角形所示。图7是转子出口实际速度向量图。

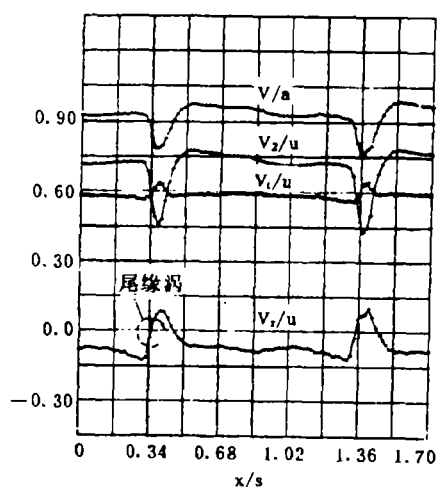


图4 转子出口气流速度分布

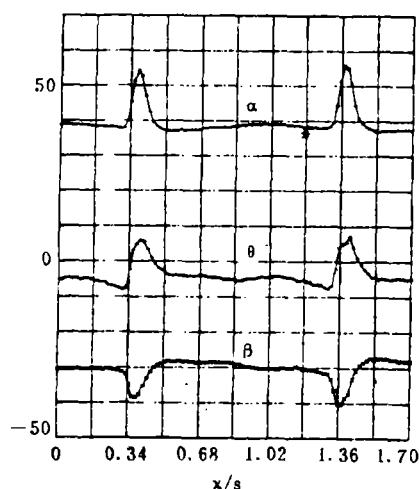


图5 转子出口气流角度分布

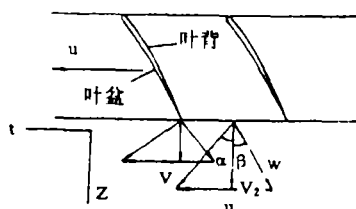


图6 转子出口气流速度三角形

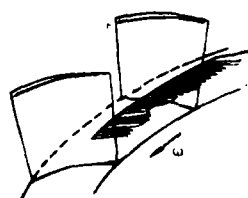


图7 转子出口气流速度向量图

从图中除明显地看到叶片尾迹处气流速度亏损外,还看到尾迹两边速度分布不对称。气流速度在靠近叶背处比靠近叶盆处大,显然压力分布相反,近叶背处低,近叶盆处高,导致气流局部转折,由叶盆转向叶背,表现为尾迹区相对气流角 β 值比主流区的大,落后角也就大。更引人注目的是尾迹附近叶盆区和叶背区相反方向的径向速度形成尾缘涡。主流区的速度值和气流角与设计值很好地相符,二者的对比见表1。整个速度分布规律与文献^[4]测量结果一致。

	V/u	V_z/u	V_r/u	α	β
设计值	0.914	0.703	0.584	39.69	30.61
测量值	0.925	0.71	0.585	39.71	30.5

五、结 论

1. 对压气机转子出口三维流场的测量结果表明, 本文所提出的单斜热丝测量和计算叶轮机内三维速度平均量的方法是切实可行的, 精度高, 角度测量范围宽。这说明对于叶轮机内复杂流场的测量, 单斜热丝也能达到与三丝同样的精度。

2. 在静止坐标系测量转子出口的周期性相对流场, 必须采用高速数据采集系统, 并用锁相平均采样技术。

3. 既使在平均半径处, 气流也存在明显的三维流动。二维测量结果定会有较大误差。

参 考 文 献

- [1] Lakshminarayana, B., "Techniques for Aerodynamics and Turbulence Measurements in Turbomachinery Rotors", Trans. of ASME, J. of Eng. for Power, Vol. 103, April 1981.
- [2] Hinch, D. V and Fleeter, S., "Hot-wire Anemometry Measurements of Three-dimensional Mean Velocities in the Purdue Annular Cascade Facility", NASA ME-TSPC-TR-81-10
- [3] Jorgensen, F. E., "Directional Sensitivity of Wire and Fiber-film Probes", Probes, Probes, DISA Info. NO. 9.
- [4] Champagne, F. H. "Turbulence Measurements with Inclined Hot-Wires, Part I. Heat Transfer Experiments With Inclined Hot-Wires", J. of Fluid Mechanics, Vol. 28, part 1, 1967.
- [5] Schmidt, D. P. and Okiishi, T. H., "Multistage Axial-flow Turbomachine wake Production, Transport and Interaction", AIAA J. 15 1138-1145.
- [6] 井上雅弘, "End-wall Flow in Turbomachine", 在清华大学燃机实验室讲学讲稿, 1986. 9.

INVESTIGATION ON UNSTEADY FLOW FIELD AND ENDWALL BOUNDARY LAYER IN AXIAL FLOW COMPRESSOR WITH HOT-WIRE ANEMOMETER

Lin Qixun, Guo Ningfang, Li Yaping, Xiao Ningfang

(*Northwestern Polytechnical University*)

ABSTRACT The measurement method of rotating stall is presented. The time difference between two signals and its frequency are determined correctly on the basis of the cross correlation and spectrum analysis. Then, the number of rotating stall regime, its spread velocity and its form are obtained. The methods of the two-dimensional unsteady flow measurement are described. The velocity distribution of the unsteady flow, for example a rotating stall cell, is obtained. A rotating probe wire method is applied to measuring the two-dimensional boundary layer. The results measured behind a single rotor and a stator are shown in the paper. The contamination from dirt, the influence of air flow temperature and the boundary layer flow field disturbance caused by probe hole had been considered.

MEASUREMENT OF THREE-DIMENSIONAL FLOW IN TURBOMACHINERY WITH A SINGLE SLANTED HOT-WIRE

Li Yuchun and Jiang Haokang

(*Beijing University of Aeronautics and Astronautics*)

ABSTRACT An improvement to measuring three-dimensional mean flow field in turbomachinery with a single slanted hot-wire is presented. The method features high accuracy and broad angular measuring range. In order to obtain the three-dimensional flow field, the single slanted wire sets in several positions around the probe axis. The data are sampled with the help of a high speed data acquisition system and the phase-locked ensemble average technique. Then, the three-dimensional mean flow field is calculated by means of a data processing program developed by the authors. A periodic three-dimensional flow field at the exit of an axial-flow compressor rotor successfully measured. A proof calculation against the calibration data shows that the errors in velocity measurement are less than one percent of the mean velocity and the errors in the flow direction are less than one degree.

MEASUREMENT OF THREE-DIMENSIONAL MEAN AND TURBULENT FLOW FIELD WITH A DOUBLE SLANTED HOT-WIRE PROBE

Chen Fan and Jiang Haokang

(*Beijing University of Aeronautics and Astronautics*)

ABSTRACT A method to improve the measurement of three-dimensional mean and turbulent flow field with a double slanted hot-wire probe is presented. A prominent feature of the method is that the coefficients of direction k and h are determined according to the directional characteristics of