

叶轮机械中三维周期性非定常流场测量

北京航空航天大学 郭恩民* 李志刚 陆亚钧 周 盛

【摘要】 本文改进了三维非定常速度场的单斜丝测量技术, 发展了三维非定常压力场的试验—数值确定方法。采用上述测量方法, 借助于位移结构、高速数据采集系统和锁相采样平均技术, 成功地测出了叶轮机械转子出口三维周期性非定常流场。

主题词: 叶轮机械 流场 测量

分类号: V211.15

1 前 言

对三维非定常速度场的测量已发展了热线、LDA、PIV 等多项技术, 其中热线技术因具有测量精度较高、测试系统简单、使用维护费用低等优点而得到了广泛使用。采用热线技术测量三维速度场时, 可采用三丝探头或单斜丝探头, 单斜丝探头因具有对流场干扰较小、空间分辨率较高、维护费用低的特点, 在试验研究中受到了更多重视。单斜丝测量技术的测量精度和范围, 取决于能否有效地反映单斜丝对气流速度大小和方向的感受性。本文根据对单斜丝热线风速仪输出特性曲线的分析, 提出了改进的经验关系式以反映单斜丝对气流速度大小和方向的感受性, 发展了三维非定常速度场的测量方法。三维非定常压力场一般采用高频压力探针进行测量, 但探针的制造和使用较复杂、维护费用较高, 且对流场有干扰作用。本文提出了根据三维速度场和机匣壁面静压分布对叶轮机械流道内压力场进行试验—数值确定的方法。利用上述测量技术, 成功地对叶轮机械转子出口三维周期性非定常速度场、压力场进行了联合测量。

2 三维速度场的单斜丝测量方法

2.1 单斜丝对气流速度大小和方向的感受性

单斜丝技术测量三维速度场利用了热丝对于气流速度大小和方向的感受性, 如图 1 所示, 当气流不垂直于热丝时, 单斜丝热线风速仪的输出电压取决于热丝感受到的与流速大小和方向有关的有效致冷速度 V_{eff} 。单斜丝技术测量三维速度场的精度取决于能否在较大的速度和角度范围内准确有效地反映 V_{eff} 与气流速度大小和方向的关系。文献[1, 2]提出了几种经验关系式对单斜丝热线风速仪校准曲线进行拟合, 在不同程度上反映了单斜丝对气流速度大小和方向的感受性, 但通过比较发现, 上述经验关系式或者拟合精度不高, 或者要取到较高的阶数、并在不同的角度范围分段拟合才能达到满意的测量精度。为了提高数据处理的计算效率和测量精度, 本文根据对单斜丝热线风速仪典型校准曲线(见图 2)进行的特性分析, 提出了改进的

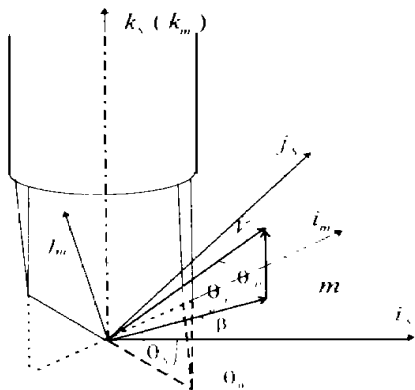


图1 单斜丝坐标示意图

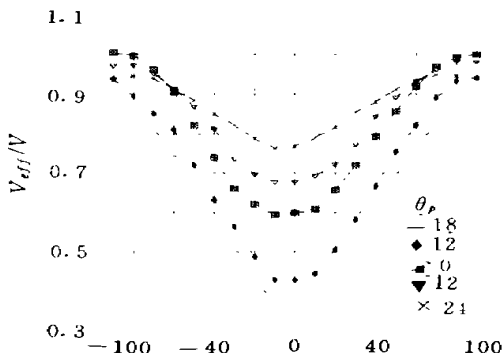


图2 单斜丝典型校准曲线

经验关系式:

$$V_{eff}/V = A^0 + A^1 \cos \theta_p + A^2 \sin \theta_p \quad (1a)$$

$$A^i = a_1^i + a_2^i \theta_p + a_3^i \theta_p^2 + a_4^i V + a_5^i \theta_p^3 + a_6^i \theta_p^2 + a_7^i V^2 + a_8^i \theta_p \theta_p + a_9^i \theta_p V + a_{10}^i \theta_p V + \dots \quad (1b)$$

(1b) 式中的系数 a_j^i 通过对单斜丝热线风速仪的校准数据进行最小二乘拟合得到。计算表明, 在相当大的角度范围内, (1b) 式只要取到 2 阶即可获得很好的拟合精度, 较好地反映了单斜丝的速度和方向感受性, 提高了计算效率和测量精度。

2.2 单斜丝测量三维速度场方法

单斜丝的校准: 使热线垂直于校准风洞喷射流, 改变射流速度大小, 获得热线风速仪标定输出电压与标定有效致冷速度的关系 ($E_c \sim V_c$)。调整探针俯仰角 θ 和偏航角 θ_p , 记录输出电压随实际射流速度的变化关系, 并根据 ($E_c \sim V_c$) 关系插值得到有效致冷速度 V_{eff} 。由此得到反映单斜丝对气流速度大小和方向感受性的校准数据。

三维速度场测量: 在测试系统的参照坐标系 (i_s, j_s, k_s) 上, 使探头绕自身轴线 k_m (k_m 与 k_s 重合) 旋转, 测量同一流场在不同的探针方向角 m 下热线风速仪输出电压并插值得到相应的有效致冷速度。从理论上讲, 只要旋转三个方向角, 即可根据单斜丝对于气流速度大小和方向的感受性求解出三维速度矢量 $\vec{V}$ (以 V, β, θ 表示)。但因为必须采用最小二乘法拟合出流场参数, 为了提高拟合精度, 一般选择在 5~7 个探针方向角位置进行测量。因此得到一组数据:

$$y_i = V_{eff,i}/V = f(V, \beta - m_i, \theta_p) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

当用 (1) 式对各组实验数据进行拟合时, 构成了一个非线性最小二乘问题, 即确定使目标函数 $Q = \sum_{i=1}^n [y_i - f(V, \beta - m_i, \theta_p; \vec{a})]^2$ (式中 $\vec{a}$ 为 (1) 式中的系数集, 由校准实验确定) 最小的解 (V, β, θ_p)。本文采用非线性最优化 L-M 算法^[3]进行数据处理, 发展了用于三维速度场的测量方法。采用单斜丝校准数据对上述测量方法进行了校核, 计算出来的速度误差在 1 m/s 以内, 角度误差在 1° 以内, 证明了本文发展的方法的有效性和精确性。

温度修正: 为了消除环境温度变化对热线风速仪工作特性的影响, 采用温度修正公式^[4] $E_r = E[(T_s - T_r)/(T_s - T)]^{1/2}$ (式中 T_s 为热丝工作温度), 将环境温度 T 下测得的热线风速仪输出电压 E 转化为修正温度 (选择 15 为修正温度) 下的修正电压, 然后进行数据处理。

3 三维压力场的试验—数值确定方法

N-S 方程在圆柱坐标系下的径向分量表达式为:

$$\rho \left(\frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{u_\theta^2}{r} + u_x \frac{\partial u_r}{\partial x} \right) = F_r - \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (u_r, r)}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial x^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} \right] \quad (3)$$

由方程(3)可知,若已知流场的三维速度场分布和在某一径向截面的静压分布,即可确定流场的径向压力梯度进而通过数值方法求解出三维压力场分布。

对于轴流轮机出口低速流场的测量,本文作如下假设:(1)忽略气体体积力和粘性;(2)流场不可压;(3)径向速度沿轴向变化梯度为零。在上述假设下,本文提出了一种简单有效的试验—数值方法用于确定三维压力场,步骤如下:首先,测量环境大气压和环境温度,由气体状态方程确定不可压流场的气流密度;其次,通过安装在机匣壁面上的动态压力传感器,测量出流道外径的周向静压分布;采用热线或其他流场测量技术测量出三维速度场分布;最后,采用数值方法求解方程(3),确定三维压力场分布。

4 叶轮机转子出口三维速度场的测量

实验是在北航轴流风机实验台(见图3)上进行的,转子测试段流道外径 450 mm,轮毂比 0.49,设计流量 $3.28 \text{ m}^3/\text{s}$,设计转速 2900 r/min,叶片数 7,前后整流器叶片数 3。转子后速度场采用 TSI1050 型单斜丝热线风速仪进行测量,机匣壁面静压采用 Kullite XCQ-093-25D 型动态压力传感器进行测量,热线探针与压力传感器安装在同一轴向位置进行同步测量。压力传感器输出信号经 PRESTON 8300AU 放大器进行放大和滤波后,与经过主机滤波后的热线风速仪输出信号同时由高速数据采集系统(由 EISA2000 数据采集板和 IBM PC/AT 微计算机组成)采集。在静止坐标系下,叶轮机转子出口为三维周期性非定常流场,为了减小随机误差并确定流场测量信号的周向相位,采用了锁相采样平均技术,将转子轮盘作为光电盘,当转子转至某一特定周向位置,嵌入在静止轴上的光电传感器发出触发信号,数据采集系统由程序控制以固定的采样周期进行连续锁相采样,采样点约分布在 4 个叶片槽道;每一测试状态需重复采样 50~150 周,进行平均处理后的数据作为实测结果。利用固定在机匣上的二维位移机构,可使热线探针在不同方向角和径向位置上进行三维速度场测量。所有测试系统的信号均可通过示波器进行监视。

图 4 为采用本文发展的方法测量的轴流风机转子出口流场(50%~100%叶高)。从速度分布可清晰看出因叶片尾迹产生的气流速度亏损现象及因二次流产生的强烈三维效应,从压力

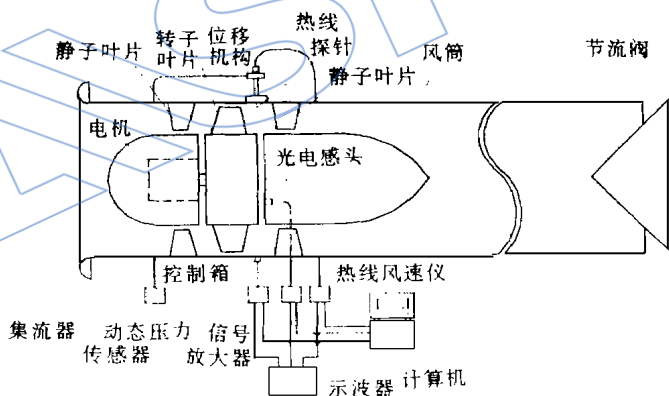


图3 轴流风机试验台和动态测量系统示意图

图 4 为采用本文发展的方法测量的轴流风机转子出口流场(50%~100%叶高)。从速度分布可清晰看出因叶片尾迹产生的气流速度亏损现象及因二次流产生的强烈三维效应,从压力



图 4 轴流风机转子出口压力、速度分布

分布可清晰看出压力沿叶片槽道的周期性变化规律及由叶尖间隙涡、通道涡产生的低压区。

5 结 论

(1) 本文改进的三维非定常速度场单斜丝测量技术具有测量精度和计算效率高、适用范围广的特点, 提出的试验-数值确定方法能简单有效地对三维非定常压力场进行测量; (2) 单斜丝测量技术要求所测量的非定常速度场具有很好的周期性和可重复性, 为了消除随机误差、提高测量精度, 必须采用锁相平均技术; (3) 试验-数值确定方法测量三维非定常压力场的精度主要取决于三维非定常速度场的测量精度, 应尽量采用对流场无干扰的非接触式测量技术。

参 考 文 献

- 1 Schmidt D P, Okiishi T H. Multistage Axial- Flow Turbomachine Wake Production, Transport, and Interaction. AIAA Journal, Aug. 1977, pp. 1138- 1145
- 2 李雨村, 蒋浩康. 单斜热丝测量叶轮机内三维流动. 航空动力学报, 1989, 4(2): 145- 149
- 3 邓乃杨等. 无约束最优化计算方法. 北京: 科学出版社, 1991
- 4 盛森芝等. 热线风速计概述. 北京大学出版社, 1987

(责任编辑 杨再荣)

THREE- DIMENSIONAL BLADING AND ITS INFLUENCE ON BLADE AERODYNAMIC LOADING

Zou Zhengping, Zhao Lingde, Chen Maozhang, Xu Liping

(4th Dept. *Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing* 100083)

ABSTRACT

The effects of turbomachinery blade bow and sweep on aerodynamic loading distribution of the blade are investigated. A general definition of sweep angle is given in the case of turbomachinery. By means of linearized small perturbation theory, the effects of each factor are analyzed respectively, then a numerical simulation for three- dimensional viscous flow is used to verify and elaborate the analytical results. It is shown that the blade bow, twist and leading edge sweep are effective in adjusting the loading distribution on the blade surface. It is possible to make rational and effective use of the three dimensional blading to adjust the loading distributions both spanwise and chordwise, it thus provides a set of means for blading optimization.

Key Words Turbomachine Blades Three dimensional flow

MEASURING TECHNIQUE OF THREE- DIMENSIONAL PERIODIC UNSTEADY FLOWFIELD IN TURBOMACHINERY

Guo Enmin, Li Zhigang, Lu Yajun, Zhou Sheng

(4th Dept. *Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing* 100083)

ABSTRACT

Measuring technique of three- dimensional periodic unsteady flow- field in turbomachinery, including velocity and pressure fields has been developed. A more effective empirical correlation is proposed to express the sensitivity of single slant hot- wire anemometer output to flow velocity, sensor yaw angle and pitch angle. An improved single slant hot- wire three- dimensional unsteady velocity measuring technique is provided, by which the three- dimensional velocity can be measured with very high accuracy and efficiency within a wide range of the flow angle and velocity. Based on measured three- dimensional velocity field and two- dimensional pressure field, measured by pressure transducer fixed on the casing of turbomachinery, a simple experimental- numerical method has been developed to measure the three- dimensional pressure field. With the help of two- dimensional traverse mechanism, high speed data acquisition system and phase- locked sampling and ensemble averaging technique, the three- dimensional periodic unsteady flowfields at the exit of an axial fan have been successfully measured, and its structure has been revealed.

Key Words Turbomachines Flowfields Measurements

A MULTIGRID COMPUTATION OF INCOMPRESSIBLE FLOW IN COMPLEX GEOMETRIES

Hou Lingyun and Yan Chuanjun

(7th Dept. *Northwestern Polytechnical University, Xi'an* 710072)

ABSTRACT

A procedure using a Full Approximate Scheme (FAS) multigrid is