

文章编号:1000-8055(2011)02-0249-06

单斜热线探针测量压气机旋转失速流场

王洪伟, 宋志强, 王 治

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 发展了一种使用单斜热线探针测量有回流的三维复杂流场的方法, 采用旋转探针技术来实现单传感器探针的三维速度场测量, 并利用热线支杆尾迹的影响来判断流动方向. 使用该方法对一台低速轴流压气机的旋转失速流场进行了测量, 测量结果详细地显示了失速团中流动结构, 验证了该方法在复杂流场测量时简单易用、精度高, 并且可以处理有回流情况的流场, 对于叶轮机内部复杂流场测量有良好的实用性.

关 键 词: 单斜热线探针; 压气机; 流场测量; 旋转失速; 回流

中图分类号: V211.71

文献标识码: A

Measurement of rotating stall in an axial compressor using a single slanted hot-wire probe

WANG Hong-wei, SONG Zhi-qiang, WANG Zhi

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics,
School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,
Beijing 100191, China)

Abstract: A method was developed to measure reversed flow using a single slanted hot-wire probe. Probe rotating technique was used to measure three-dimensional velocities with a single-sensor probe, and the wake of the prong was used to determine the direction of the flow. The method was applied to measure the rotating stall in a low speed axial compressor. The results give a detail view of the flow structure in the rotating stall cell, demonstrating that this technique is simple and accurate in the measurement of reversed flow. It is especially applicable in the measurement of three dimensional flow field within turbomachinery.

Key words: single slanted hot-wire probe; compressor; flow field measurement; rotating stall; reversed flow

旋转单斜热线探针测量三维流场是一种成熟的技术手段^[1-4], 比较详细的描述可见李雨春等在 1989 年发表的文章^[5]和 Russ 等在 1991 年发表的文章^[6]. 单斜热线探针比多传感器探针具有更高的空间分辨率. 采用锁相技术, 单斜热线探针还可以测量叶轮机内周期性非定常流动^[7]. 然而对于存在回流的复杂流场, 目前并没有针对单斜热线探针的测量和数据处理方法. 本文发展了一种用单斜热线探针测量有回流的三维流场的方法,

测量和数据处理方法较为简单, 易于掌握. 之后用这种方法测量了一台低速轴流压气机的旋转失速流场, 得到了较详细的旋转失速流场结构, 验证了这种数据处理方法的适用性.

1 数据处理方法

一种用于单斜热线探针的数据处理方法是将气流速度矢量 $\mathbf{U}$ 分解成三个分量 U_x , U_y 和 U_z ^[8]. 测量的有效速度由 Jorgensen 公式决定

收稿日期: 2009-12-09; 修订日期: 2010-02-27

作者简介: 王洪伟(1973—), 男, 黑龙江鸡东人, 讲师, 博士, 主要从事叶轮机内真实流场的实验研究.

$$U_{\text{eff}}^2 = U_n^2 + k_t^2 U_t^2 + k_b^2 U_b^2 \quad (1)$$

这里 U_{eff} 是有效速度, U_t , U_n 和 U_b 是相对于热线的三个速度分量, 两种速度分解与热线的关系如图 1 所示.

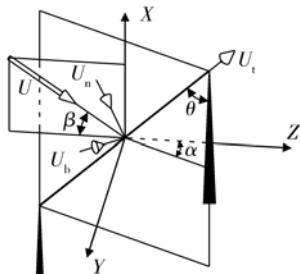


图 1 单斜热线探针坐标系

Fig. 1 Coordinate system for a single slanted hot-wire probe

理论上用三个角度下单斜热线探针(本文中亦简称探针)的输出就可得到三维速度分量, 实际中, 需要更多的偏转角并通过最小二乘拟合来提高精度.

另一种方法是将速度矢量分解为速度大小、偏转角 α 和俯仰角 β , 采用多项式拟合方式来求解, 这是一种适用于叶轮机械的方法, 详见李雨春等在 1989 年发表的文章^[5].

上述的两种方法在使用中不易掌握, 本文作者基于圆柱单孔探针的处理方法提出了一种更为简便的处理方法^[9], 在此描述如下.

图 2 为一组单斜热线探针的标定曲线, 可以看出, 在偏转角 α 为 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 范围内, 输出电压在 0° 角取得最小值. 而在不同俯仰角下, 探针输出电压随偏转角变化的规律是不同的, 利用这个特点, 可以定义俯仰角系数如下:

$$C_\beta = \frac{(U_{\text{eff}})_{-45} + (U_{\text{eff}})_{+45}}{2(U_{\text{eff}})_0} \quad (2)$$

这里 $(U_{\text{eff}})_{-45}$, $(U_{\text{eff}})_{+45}$, $(U_{\text{eff}})_0$ 分别是偏转角为 -45° , $+45^\circ$ 和 0° 时的有效速度. 此处角度 45° 并不是唯一的, 选择一个更大的角度可以提高测量精度但同时会增加测量时间, 45° 是同时考虑测量精度和测量时间的较好选择. 图 3 给出了 C_β 与 β 的关系, 这是一个单调的函数关系, 可以用来计算俯仰角. 另外, 可以得到偏转角为 0° 时 U_{eff}/U 与 β 的关系, 再由速度校准数据即可得到来流速度.

理论上当俯仰角为 0° 时, 偏转角 0° 和 180° 时探针的输出是一样的, 然而从图 2 中可以看到, 偏转角 180° 时探针的输出要小一些, 这是因为此时热线处于较长的支杆的尾迹中, 感受的速度偏小,

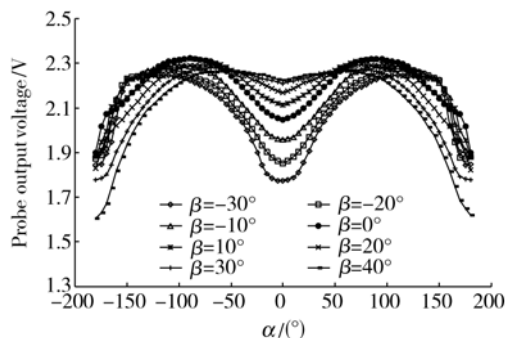


图 2 单斜热线探针标定曲线

Fig. 2 Calibration curve of a single slanted hot-wire probe

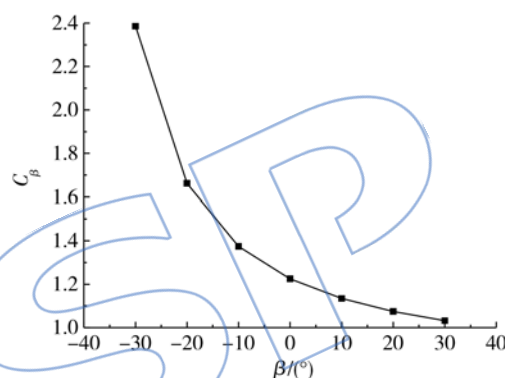


图 3 俯仰角系数 C_β 随俯仰角 β 变化曲线

Fig. 3 Pitch angle coefficient C_β versus pitch angle β

可以利用这个特点来判断流动的方向, 只需使探针旋转一周, 判断两个最小输出之间的关系即可.

为了更清楚地说明, 图 4 给出了探针偏转角分别为 0° 和 180° 时, 不同俯仰角下探针的输出. 图中实心点对应偏转角为 0° 时的输出, 空心点对应偏转角为 180° 时的输出. 可以看出, 当热线位于较长支杆后面时, 输出电压偏低. 当俯仰角小于 -20° 时, 支杆的影响并不明显, 而在俯仰角在

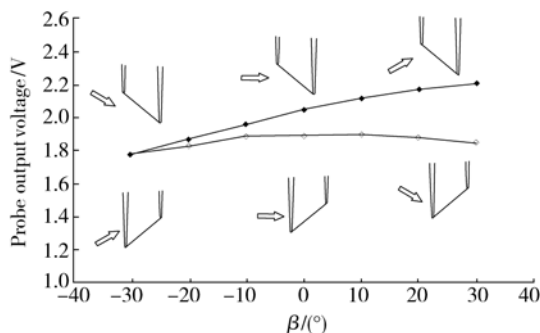


图 4 单斜热线探针输出与来流方向的关系

Fig. 4 Probe output voltage versus incoming flow direction

-20°~30°之间时支杆的影响非常明显,完全可以用于流动方向的判别.当测量中遇到俯仰角小于-20°的情况时,需要结合测点周围俯仰角在-20°~30°之间的测点来人工判断气流方向.

应用本方法时,在校准时得到如图2所示的不同俯仰角与偏转角下的探针输出,以及偏转角和俯仰角为0°时,探针输出随速度的变化.测量时,使探针旋转一周,采集多个角度下的输出,通过如下过程进行数据处理:

1) 首先通过校准得到几个关系式 $V = f_1(U)$, $\beta = f_2(C_\beta)$;

2) 将测量的电压与偏转角之间的关系进行拟合,得到最小值所处角度,判断此最小值是0°还是180°,得出偏转角 α ;

3) 计算 C_β , 并通过 $\beta = f_2(C_\beta)$ 得到俯仰角 β ;

4) 根据0°角的输出电压计算来流速度大小.

角度的校准和测量间隔是保证精度的决定因素.校准时应采用5°或更小的间隔,测量时可以采用10°的角度间隔.

2 实验方案

2.1 实验设备及实验装置

使用单斜热线探针测量了一台低速压气机的旋转失速流场,该压气机的形式和参数如图5和表1所示.

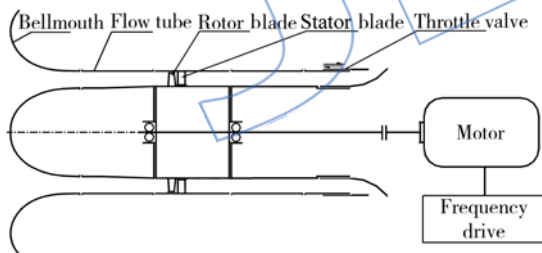


图5 低速轴流压气机试验台

Fig. 5 Low speed axial compressor test bed

表1 低速轴流压气机试验台参数

Table 1 Specification of the low speed axial compressor

参数	数值
外径/m	0.5
轮毂比	0.75
设计转速/(r/min)	2400
动叶数	60
静叶数	60
流量系数(设计点)	0.55
压升系数(设计点)	0.75

试验采用TSI公司生产的1213-20型单斜热线膜探针,探针伸缩与旋转由Rotadata公司的旋转位移机构控制,线误差小于0.01mm,角度误差小于0.1°,热线风速仪为IFA100型.压气机来流速度通过大气参数和流量管壁面压力得到,转子后安排5点总压梳测量总压,以得到转子的增压比.压力用Rosemount高精度压力变送器测量,其精度为满量程的0.025%.所有信号通过PXI总线数据采集计算机和14位高速数据采集卡采集.

采集与控制系统本身的误差足够小,因此最终的测量的准确性主要取决于新发展的数据处理方法带来的误差,通过对几套校准数据的分析,得到使用该方法带来的角度误差为1°左右,速度误差为2%左右,与相关文献中得到的误差大体相当.不过本文中测量的流场三维性和非定常性都较强,误差应该会更大一些.

2.2 实验过程

图6给出了实验压气机的特性线,包含了失速后的特性,失速流场测量在流量系数为0.35时进行.

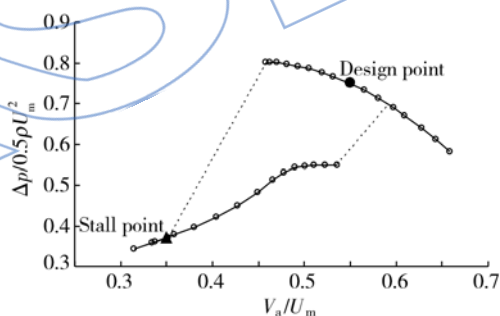


图6 实验压气机的特性线

Fig. 6 Characteristic curve of the test compressor

在转子上游1/6弦长处沿周向均匀布置4个Kulite公司生产的微型压力传感器XT-190,内嵌于机匣,通过内壁压力孔测量动态压力,以确定失速团个数和旋转速度.使用单斜热线探针分别测量转子上游和下游的详细流场信息,测量位置在转子前、后各1/6弦长处.从7%到93%叶高设置9个测量站,在每一站探针绕自身轴线从-170°旋转到180°,间隔10°,得到36个输出电压.

Das和Jiang使用失速团的压力脉动做为触发^[10],而Poensgen和Gallus没有使用触发而是通过数据处理方法解决这个问题^[11].前者可以清楚地得到失速团,但是消除了所有叶片信息,后者会带来一定的主观误差,数据处理较为复杂.本文测量中采用的是叶片锁相技术,在某个固定叶片

通过的瞬间开始数据采集, 希望能在测出失速团信息的同时不失去叶片信息. 这就要求采集数据量足够大, 以便有足够的点去找出叶片和失速团的共同起始点. 为此, 采样频率设为 120 kHz, 采样时间为 3 s, 包含 45 个失速团周期, 或者 7 200 个叶片周期, 人工判断不同径向位置数据的共同起始位置, 因此本文结果中各径向位置的失速团起始与结束位置之间的关系未必与实际相符.

3 分析和结论

3.1 失速团基本信息

失速团个数与旋转速度是旋转失速流场的两个基本特征参数, 这可以从壁面动态压力分析得出. 图 7 中左图为高频压力传感器布置位置示意图, 4 个传感器信号为同步采集, 失速团通过传感器的顺序为: A→D→C→B→A→……, 图 7 右图为低通滤波后的 4 个传感器的信号, 从中可以看出, 前一传感器信号的相位要比后一传感器快 1/4 个失速团周期, 均布的 4 个高频传感器的信号依次交替, 这说明只存在一个失速团, 并且旋转方向与转子旋转方向相同.

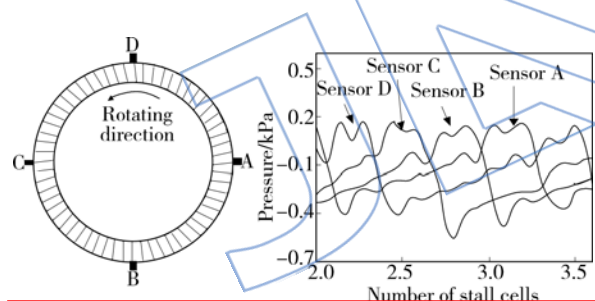


图 7 动态压力传感器布置和输出压力

Fig. 7 Dynamic pressure sensors and their outputs

图 8 为其中一支动态压力传感器的原始输出及快速傅里叶变换(FFT)结果, 可以同时看到失速团及叶片的扰动. 壁面压力在频率 15 Hz 时有较大脉动, 在 2.4 kHz 时有个较小的脉动, 2.4 kHz 与叶片通过频率相符, 15 Hz 则为失速团通过频率, 即失速团的旋转速度为 900 r/min, 是转子旋转速度的 3/8 倍. 每个失速团周期内包含的转子叶片周期为转子叶片频率与失速团频率之比, 即 $2400/15=160$ 个.

3.2 失速团内详细流动

动态压力传感器只能给出失速团大小和旋转速度的信息, 通过单斜热线探针的测量结果可以

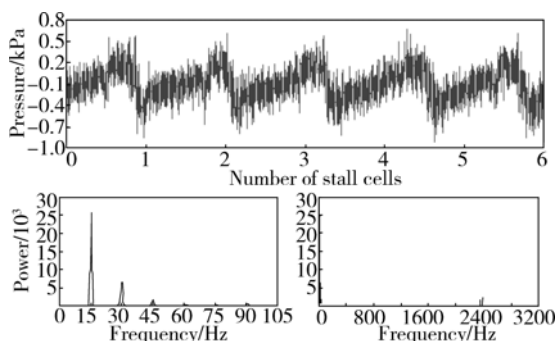


图 8 某支动态压力传感器测的输出及快速傅里叶变换

Fig. 8 Signal and FFT for one sensor

更为深入地了解失速团内部的流动结构.

图 9 为测得的转子前后轴向速度的分布, 可以清晰地看出转子失速团占据了压气机通道一圈的 1/3 左右, 失速区在尖部沿周向分布范围更大, 速度也更低, 失速团信号比叶片扰动信号强很多, 较难分辨出叶片的信息. 图 10 为气流的俯仰角, 俯仰角为正时代表流动方向指向机匣, 从图中可以看出失速团内部气流的俯仰角变化很大, 说明失速导致了强烈的径向二次流动. 其中, 转子前的气流较多地流向机匣, 而转子后的气流较多地流向轮毂.

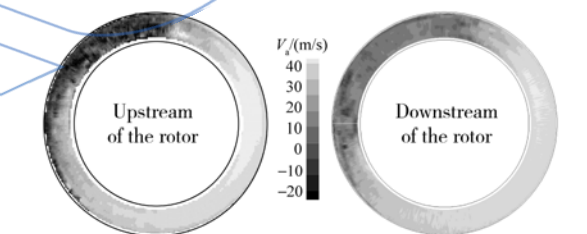


图 9 转子上游和下游轴向速度

Fig. 9 Axial flow velocity upstream and downstream of the rotor

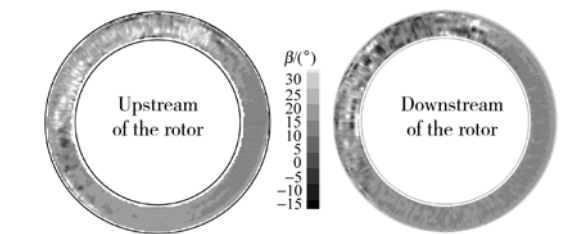


图 10 转子上游和下游气流俯仰角

Fig. 10 Pitch angle upstream and downstream of the rotor

图 11 为三个叶高位置上转子前后的速度矢量图, 图中可以更清晰地看出气流的流动状态. 在转子前, 叶尖失速团区域最大, 倒流也最严重, 叶

中和叶根区域的失速区比起叶尖区要弱,发生倒流的区域也逐渐减小.可以设想,如果压气机轮毂比较小,叶片较长,发生在叶尖的倒流可能会在某一叶高以下消失,从而发生非全叶高的失速.转子后区域,倒流明显弱于转子前,且与转子前不同的是,叶中失速区域最小,叶尖和叶根处的失速区大.转子后失速团倒流区减小主要是因为转子的做功,部分失速团内的流体经过转子后重新获得正向的速度.

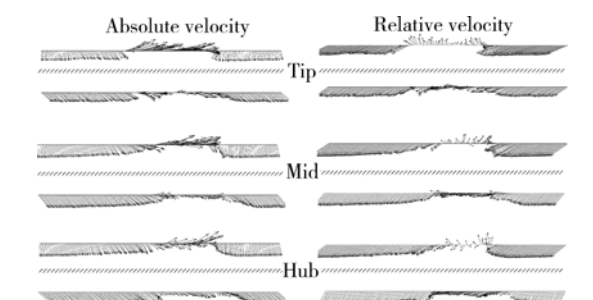


图 11 三个叶高位置转子上游、下游速度矢量
Fig. 11 Velocity vector upstream and downstream of the rotor at three spanwise stations

在转子前,失速区内气流的速度要明显大于未失速区,只是气流基本上沿周向流动.这个周向速度是从叶片获得后倒流产生的,所以失速团的静压也有所升高.在尖部需要更高的静压升来为此周向运动提供向心力,所以尖部的流动状态比根部差.沿周向失速团前部的主流区比失速团后部的主流区受到的扰动小,这里的气流基本保持轴向,而经过失速团扰动后的后部气流则获得了周向的速度.根据涡运动理论分析,可知失速团内倒流的流体应该是向转子远前方流去,然后流向与转子旋转相反的方向,形成如图 12 所示的旋涡运动.需要说明的是,旋转失速是一种复杂的三维非定常流动现象,此流动简图并不能完全代表转子前的流动,只是作者根据有限测量结果的推测.

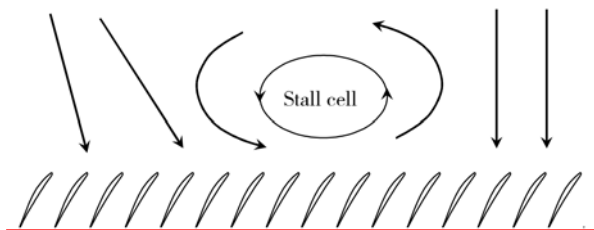


图 12 S_1 流面内失速团引起的大涡结构
Fig. 12 Sketch of the flow pattern of the stall cell in blade to blade surface

从图 10 还可以看出转子前气流流向机匣,而转子后气流流向轮毂,在子午面上也形成一个明显的旋涡运动,这是转子叶尖区倒流比叶根区严重的必然结果.参考文献[10]中 Das 和 Jiang 得到了相似的结果. Saxer-Felici 等人在 2000 年发表的文章则用数值模拟的方法得出了和图 12 相似的大旋涡结构^[12].

4 结 论

单斜热线探针具有头部尺寸小,空间分辨率高,且头部尺寸小于支杆,可达性好的优点.本文发展的方法使其可以用于有回流的三维流场测量,因此可以应用于一些空间限制大,且流动状况复杂的流场测量中.通过本文的研究,得出几点结论如下:

- 1) 单斜热线探针可以用来测量有回流的三维周期性非定常流场.
- 2) 本文发展的使用单斜热线探针测量回流的方法具有较好的实用性,并且在测量压气机旋转失速流场中得到了较好的结果.
- 3) 本文所测量的低速轴流压气机旋转失速是典型的全尺度失速,只有一个失速团,失速团旋转速度为转子旋转速度的 $3/8$,失速团约占据压气机通道的 $1/3$,并且叶尖宽于叶根.转子上游有强烈的回流,下游回流较小,失速团内流动速度和静压明显高于非失速区域.

参考文献:

- [1] Moussa Z M, Eskazi S. Directional mean flow measurements using a single inclined hot-wire[J]. Physics of Fluids, 1975, 18(3): 298-305.
- [2] De Grande C, Kool P. An improved experimental method to determine the complete Reynolds stress tensor with a single rotating slanting hot wire[J]. The Institute of Physics E: Scientific Instruments, 1981, 14(2): 196-201.
- [3] Schlienger J, Pfau A, Kalfas A I, et al. Single pressure transducer probe for 3D flow measurements[R]. Cambridge, UK: The 16th Symposium on Measuring Techniques in Transonic and Supersonic Flow in Cascades and Turbomachines, 2002.
- [4] Fitouri A, Khan M K, Bruun H H. A multiposition hot-wire technique for the study of swirling flows in vortex chambers[J]. Exp. Therm. Fluid Sci., 1995, 10(1): 142-151.
- [5] 李雨春, 蒋浩康. 单斜热线测量叶轮机内三维流动[J]. 航空动力学报, 1989, 4(2): 145-149.
LI Yuchun, JIANG Haokang. Measurement of three-dimensional unsteady flow in turbomachines using a single

- slant hot-wire[J]. Journal of Aerospace Power, 1989, 4 (2):145-149. (in Chinese)
- [6] Russ S, Simon T W. On the rotating, slanted, hot-wire technique[J]. Experiment in Fluids, 1991, 12(1):76-80.
- [7] Hsu S T, Wo A M. Near-wake measurement in a rotor/stator axial compressor using slanted hot-wire technique[J]. Experiment in Fluids, 1997, 23(5):441-444.
- [8] 田杰, 陈旭, 郝辉, 等. 旋转单斜丝热线测量叶轮机出口流场[J]. 流体机械, 2003, 31(7):25-28.
TIAN Jie, CHEN Xu, HAO Hui, et al. Measurement of flow field behind an impeller with a rotating slanted hot-wire[J]. Fluid Machinery, 2003, 31(7):25-28. (in Chinese)
- [9] Wang H, Wang Z. A simple and practical data reduction method for single-inclined hot-wire measurement[R]. Kunming, China: The First International Symposium on Jet Propulsion and Power Engineering, 2006.
- [10] Das D K, Jiang H K. An experimental study of rotating stall in a multistage axial-flow compressor[J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines Power, 1984, 106 (3):542-551.
- [11] Poensgen C A, Gallus H E. Rotating stall in a single-stage axial flow compressor[J]. Journal of Turbomachinery, 1996, 118(2):189-196.
- [12] Saxer-Felici H M, Saxer A P, Inderbitzin A, et al. Numerical and experimental study of rotating stall in an axial compressor stage[J]. AIAA Journal, 2000, 38(7):1132-1141.