

基于半无限引压管效应的动态压力 测量方法

杨 林^{1,2}, 王偲臣^{1,2}, 林 峰², 李继超², 聂超群²

(1. 中国科学院大学 物理学院, 北京 100049;

2. 中国科学院 工程热物理研究所 先进能源动力重点实验室, 北京 100190)

摘 要: 实验研究了动态压力信号在有限和半无限引压管腔中传播的幅频特性及其与引压管结构变化的规律性关联. 采用半无限引压管结构设计了头部为基尔整流罩的动态总压探针, 测量大角度来流的气流总压, 并对其动态传递函数进行标定. 对一台轴流压气机转子尾迹的测量结果显示: 动态总压探针可以测量到转子尾迹的总压流场特征, 获得叶片端区流动等大梯度总压流场. 对于采用引压管腔的动态探针设计中管径变化和弯曲造成信号能量的衰减作用, 半无限引压管效应可有效减小动态压力信号的能量衰减, 并减弱管腔的谐振效应.

关 键 词: 动态压力测量; 半无限引压管; 时间分辨率; 空间分辨率; 动态传递函数

中图分类号: V211.71

文献标志码: A

Method of dynamic pressure measurement based on semi-infinite pressure tube effect

YANG Lin^{1,2}, WANG Si-chen^{1,2}, LIN Feng²,
LI Ji-chao², NIE Chao-qun²

(1. School of Physics,

University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. Key Laboratory of Advanced Energy and Power,

Institute of Engineering Thermophysics,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The amplitude-frequency characteristic of dynamic pressure signal through the semi-infinite and finite pressure tube was investigated, also its relationship with the shape of the inner diameter of the tube. With a semi-infinite pressure tube, a time-resolved total pressure probe with a Kiel structure was designed, and used to measure large angle inflow total pressure and calibrate its dynamic transfer function. The measurement results of the axial compressor rotor wake fields show that the semi-infinite pressure dynamic probe could get large gradient total pressure field, such as rotor wake and blade end flow. For design of the dynamic probe with pressure tube, both pressure tube diameter change and bending could attenuate signal energy, while semi-infinite pressure tube can availably keep dynamic pressure signal energy and decrease resonance effect.

Key words: dynamic pressure measurement; semi-infinite pressure tube;
temporal resolution; spatial resolution; dynamic transfer function

随着燃气轮机内部流动损失和失稳机理的研究不断深入其三维湍流非定常流动本质,对实验测量手段尤其是高频响动态测试技术的要求也越来越苛刻.对叶片通过频率为 $1 \sim 10 \text{ kHz}$ 的压气机转子来说,若要测量叶片通道的流动结构,动态测量系统的频响需要达到 $10 \sim 100 \text{ kHz}$ 的水平.对轴流压气机高压级和离心压气机而言,叶片尺寸往往只有几厘米甚至几毫米,这要求探头的尺寸非常微小.总之,燃气轮机内部流动动态测量必须同时满足高时间分辨率和高空间分辨率的要求.

常用的动态测量手段有气动探针、热线、热膜、粒子成像及等离子体技术等^[1-9],其中基于动态压力传感器的气动探针技术具有测量精度高、操作稳定性高、对环境条件要求低、测量系统相对简单及价格较低等优点,是被最广泛采用的动态测量技术.

气动探针的设计实质上是机械设计和气动设计的结合^[10],难点和关键点是传感器的埋装和探头的设计.从 20 世纪 70 年代开始,国际上陆续出现各种不同形式的气动探针,以传感器埋装方式大概划分为探头平齐安装^[11]、探头嵌入安装和远端安装等,探针探头也出现了多种几何形状^[12-13].国内北京航空航天大学的蒋浩康、李雨春、李井洋、马宏伟等人^[14-17]也研制了多种形式的高频响动态压力探针,并采用单孔虚拟多孔的技术完成三维流场的动态测量.总之,探头尺寸及各测压孔之间的距离越小,探针的空间分辨率就越高.然而由于传感器尺寸的限制,在探头中往往存在容腔,这对探针的时间分辨率产生不利影响^[18-21].因此探头微小化和传感器埋装方式之间的矛盾是限制气动探针技术发展的最主要因素.

本文研究了一种半无限引压管结构在动态气动探针中的应用.采用离散脉冲信号作为输入参考信号研究此引压管结构的频响特征及其影响因素,并对气动探针的动态传递函数进行了标定.对半无限引压管动态测量方法在真实压气机环境下的动态压力测量表明,此方法可以满足燃气轮机高频响动态压力测量的时间分辨率和空间分辨率需求.

1 半无限引压管效应

与半无限引压管结构对应的是有限引压管,如图 1 所示,两者的区别是引压管的长度和传感器的安装方式.有限引压管的长度较短且传感器

安装在引压管尾部的端壁上.而半无限引压管的长度远远大于有限引压管,传感器安装在距离引压管头部有限距离的刚性管壁上,传感器感应面与刚性管内壁面平齐,而传感器下游的引压管一般采用柔性材料.本文对两者动态特性的实验研究中,选取刚性管 $L_1 = 125 \text{ mm}$,柔性管 $L_2 = 10 \text{ m}$.

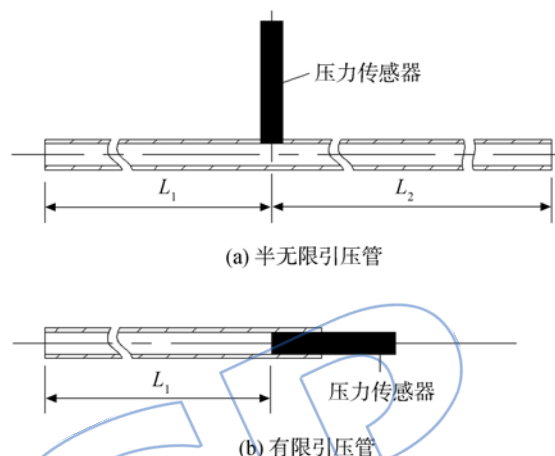


图 1 半无限引压管与有限引压管结构

Fig. 1 Structures of the semi-infinite and finite pressure tubes

动态频响特性包括幅频特性和相频特性,半无限引压管结构对动态频响特性的影响主要集中在幅频特性上.幅频特性曲线的标定方法是给有限引压管和半无限引压管头部输入相同的动态压力信号,通过动态压力传感器采集到的输出信号计算出各自的输入-输出幅值传递函数,来研究两种引压管结构的幅频即动态频响特性的差异.较为常用的动态标定输入信号有阶跃信号、白噪声信号和脉冲信号,前两者可以在频域上提供连续宽频的信号输入,进而可以对动态系统的频响特性进行全面了解,但是优质阶跃信号的产生需要借助专业激波管等难度非常高的实验装置,而白噪声信号的能量级别较低,不具备足以激励 Kulite 动态压力传感器响应的压力脉动.所以,本文采用压气机转子叶顶的脉冲压力信号作为动态标定的输入信号,此脉冲压力信号频率精度高且压力脉动能量高,能够为动态压力传感器提供激励.而且动态压力探针的工作频带主要就集中在压气机转子叶片通过频率的水平,在特定频带内进行有针对性地标定不仅可以提高动态标定的质量,还可以降低标定难度和节省实验时间.

脉冲压力信号由一台低速轴流压气机转子机匣内壁面的动态静压信号提供.将一支参考

Kulite 动态压力传感器平齐安装在转子叶顶的机匣内壁面内,用以测量动态标定的系统输入信号 x . 将图 1 所示的带有引压管的 Kulite 动态压力传感器安装在与参考压力传感器有固定相位差的相同轴向位置的转子机匣内,引压管入口与机匣内壁面平齐安装,引压管上的压力传感器测得的是被标定系统的输出信号 y . 图 2 为轴流压气机转速为 2400 r/min 下输入、输出信号的时域分布. 从信号幅值可以看出,输出信号由于引压管系统的加工作用相比输入信号发生能量衰减.

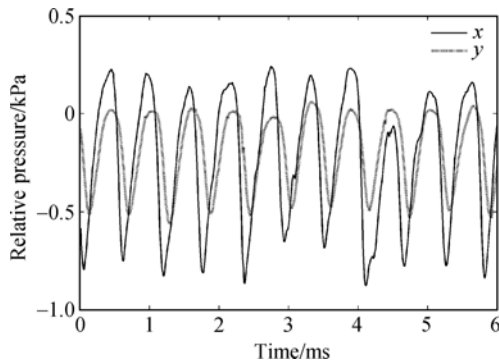


图 2 轴流压气机转速为 2400 r/min 下的输入、输出信号时域分布

Fig. 2 Input and output time domain signals with the axial compressor speed 2400 r/min

分别将输入和输出压力的时域信号转换到频域进行分析,通过式(1)和式(2)计算得到输入、输出信号的功率谱密度分布,其中 ω 为信号的频率; m, n 为变量; E 为期望值算子; R_{xx} 为输入信号的自相关函数; P_{xx} 为输入信号的功率谱密度. 图 3 所示为与图 2 中时域信号对应的功率谱密度(PSD)分布,从图 3 中可以看出,在与压气机转子叶片通过频率为 2320 Hz 对应的脉冲频率点(叶片数为 58),输出信号的功率谱密度相比输入信号有所降低,这与时域输出信号的幅值衰减是对应的.

$$P_{xx} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} R_{xx}(m) e^{-j\omega m} \quad (1)$$

$$R_{xx}(m) = E\{x_{n+m} x_n^*\} \quad (2)$$

通过改变轴流压气机转子转速,从 1700 r/min 到 2500 r/min,利用由在不同转速下转子叶片通过频率及其倍频组成的离散脉冲序列,得到动态标定所需的固定频带范围内的输入信号. 在每一个脉冲频率点进行上述输入和输出信号功率谱密度计算,进而计算引压管系统的输入-输出幅

值传递函数,对多个脉冲组分的幅值传递函数进行整合,就能得到引压管系统在固定频带范围内的幅频特性. 图 4 所示为半无限引压管和有限引压管在相同的离散脉冲压力输入信号下的幅频特性曲线. 从图中可以看出,半无限引压管的幅频特性与有限引压管有本质区别. 对有限引压管,其幅频特性曲线在某几个频率点附近出现明显的峰值,这代表有限引压管的谐振频率. 对半无限引压管,由于动态传感器下游柔性材料引压管对信号反射叠加的消除和对谐振频率向低频的推移作用,其幅频特性曲线在此频带内没有出现任何频率点的谐振效应,幅值传递函数变得十分平滑和连续,这种稳定的幅频特性曲线方便用多项式连续函数表示,而应用此传递函数对输出信号进行逆向傅里叶变换,可以保证被测时域压力信号的精度即动态压力探针的频响水平.

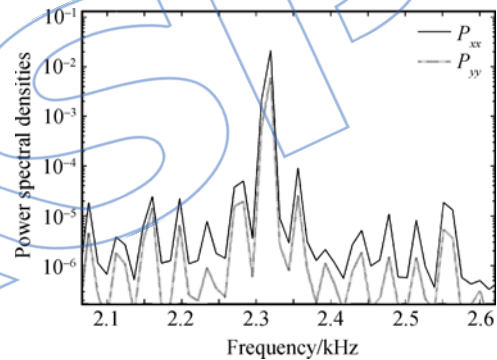


图 3 轴流压气机转速为 2400 r/min 下的输入、输出信号的功率谱密度分布

Fig. 3 Power spectral densities of the input and output signals with the axial compressor speed 2400 r/min

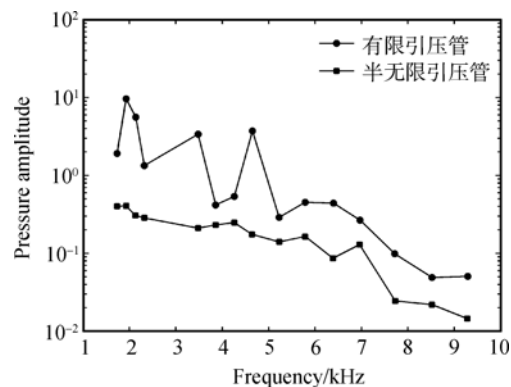


图 4 有限引压管和半无限引压管压力幅频特性曲线
Fig. 4 Pressure amplitude-frequency curves of the finite and the semi-infinite pressure tubes

2 内径变化对压力幅频特性影响

刚性管(图 1 中 L_1)的具体结构也会对动态压力信号在引压管内的传播造成影响,而且由于探头的空间分辨率要求和引压管安装空间的限制,常常需要对引压管进行结构改造,如弯曲和内径改变等.为了研究这些结构改造参数对半无限引压管动态特性的影响规律,本文设计了相应的对比实验,分别对刚性管的弯曲角度、弯曲位置、弯曲曲率和内径扩张对系统动态特性的影响规律进行了研究,动态标定的输入信号和数据处理方法与本文第 1 节所述相同.

图 5、图 6 和图 7 分别为不同弯曲角度、不同弯曲位置和不同弯曲曲率(R)下的压力幅频特性曲线.从图 5~图 7 的曲线对比可以看出,刚性管的弯曲会造成半无限引压管频响的降低.对不同弯曲角度对照组,随着刚性管弯曲角度的不断增大,引压管的幅频特性不断降低;对不同弯曲位置对照组,幅频特性降低最大的是弯曲位置距离进口 40 mm 的引压管,整个对照组没有呈现出明显的规律;对不同弯曲曲率对照组,幅频特性降低最大的是弯曲曲率半径为 10 mm 的引压管,整个对照组没有呈现明显的规律.总的来说,刚性管弯曲总会造成引压管动态频响的降低,这是由于弯曲所造成的固体壁面和屏障引起的信号能量吸收.

选取 3 种刚性管内径扩张角度的半无限引压管进行研究,刚性管内径扩张角度为 0° 、 30° 和 90° ,其余各结构相同.采用压气机转子离散压力脉冲序列作为输入信号对它们进行幅频特性的动

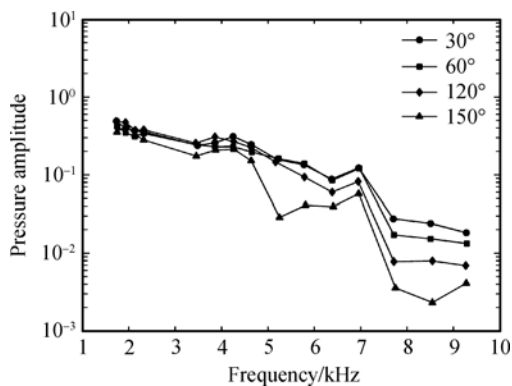


图 5 半无限引压管在不同弯曲角度下的压力幅频特性曲线

Fig. 5 Pressure amplitude-frequency curves of the semi-infinite pressure tube with different bending angles

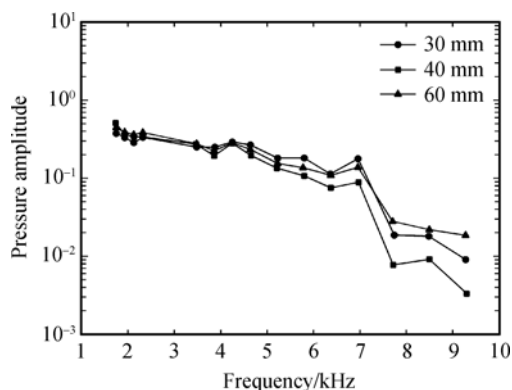


图 6 半无限引压管在不同弯曲位置下的压力幅频特性曲线

Fig. 6 Pressure amplitude-frequency curves of the semi-infinite pressure tube with different bending locations

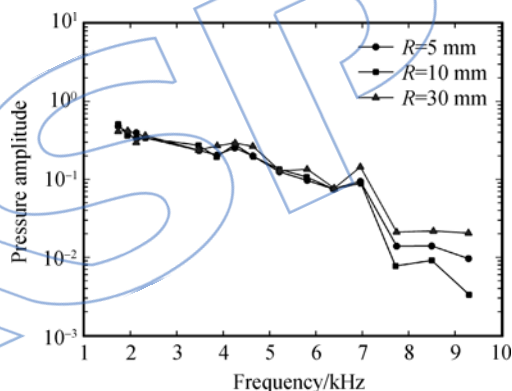


图 7 半无限引压管在不同弯曲曲率下的压力幅频特性曲线

Fig. 7 Pressure amplitude-frequency curves of the semi-infinite pressure tube with different bending curvatures

态标定,具体标定方法与本文第 1 节所述相同.图 8 所示为 3 种半无限引压管幅频特性的动态标定结果,从幅频特性曲线可以看出,刚性管内径扩张会大大增加动态信号的幅值衰减, 30° 和 90° 内径扩张角引压管的幅频特性比 0° 内径扩张角引压管降低接近一个数量级,这是由动态压力信号的波阵面扩张引起的能量衰减;而且随着内径扩张角度的增大, 90° 内径扩张引压管的衰减程度又比 30° 内径扩张引压管增大,此时在扩张点附近就不仅有波阵面扩张造成的能量衰减,还有内径急剧扩张形成的固体屏障造成的信号能量衰减.

由以上实验结果可知,半无限引压管具有平滑稳定的系统传递函数和较好的频响特性,可用于高频动态压力信号的测量.动态压力信号在不

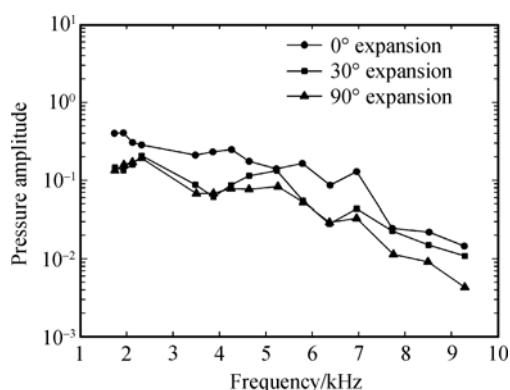


图 8 半无限引压管在不同内径扩张角度下的幅频特性曲线

Fig. 8 Pressure amplitude-frequency curves of the semi-infinite pressure tube with different divergence angles of inner diameter expansion

规则结构的刚性管中传播时,管的内径扩张和大角度弯曲会导致信号能量大幅衰减.所以在引压管设计过程中,应该在兼顾空间分辨率和探针安装空间的同时,尽可能的减小引压管内径扩张和弯曲程度;在不得不采取内径扩张的情况下,应该尽量使内径平滑过渡,避免出现大尺度的固体屏障.

3 半无限引压管动态总压探针

在对半无限引压管频响特性和刚性管结构参数对动态压力信号衰减的影响规律的研究基础上,设计了一种用于轴流压气机转子尾迹总压测量的动态总压探针(简称探针).探针的头部采用基尔整流罩,它可使单孔压力探头能够准确测量来流角度在 43° 锥角范围以内的气流总压.为了兼顾探头尺寸并尽量减少管径扩张造成的损失,刚性管内径采用平滑过渡的扩张方式,并尽最大可能减小管径扩大比例;无限柔性管采用长度为 10 m 的塑料软管;动态压力传感器依靠透明支架在刚性管的内壁面平齐安装.在探针的整个加工过程中,保证各个连接部位平齐无缝连接,避免因机械加工误差造成对信号的衰减和干扰.

探针的标定要在真实测量环境下进行,轴流压气机提供的离散脉冲信号能够提供与转子尾迹总压测量相同的环境条件,所以此动态标定能够提供最为准确的探针传递函数.图 9 所示为以脉冲信号为动态标定输入信号的输入-输出幅频(T_{yx})特性及其多项式拟合曲线,频率范围从约 1.5 kHz 到接近 10 kHz.由于刚性管的长度仅为

25 mm,被测转子尾迹压力信号的波长不足以造成太大的相位偏移,所以探针的相频特性由理论公式(3)表示,其中 $f(i)$ 为信号的频率, L 为探针刚性管长度, a 为当地声速.在对探针的测量结果进行修正时,采用图 9 所示的幅频特性和公式(3)的相频特性对输出信号在频域上进行传递函数逆运算,以求得真实的动态压力信号.

$$\theta = 2\pi f(i) \frac{L}{a} \quad (3)$$

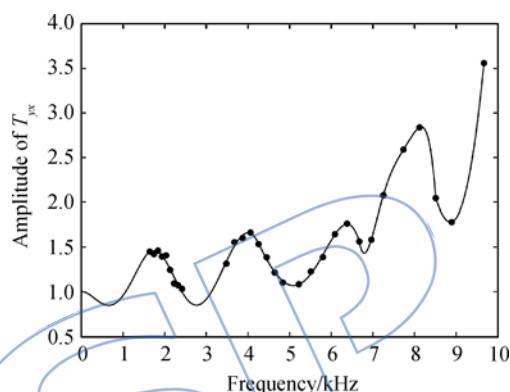


图 9 动态总压探针脉冲信号标定的压力幅频特性拟合曲线

Fig. 9 Fitting curve of the pressure amplitude-frequency characteristics of the dynamic total pressure probe with impulse input signal

为了验证探针的测量能力以及动态标定频响特性曲线的精度,用此探针对一台轴流压气机的转子尾迹流场进行了测量.此轴流压气机转子有 58 个叶片,设计转速为 2400 r/min,设计流量为 2.9 kg/s.探针在展向 38 个空间位置进行测量,在靠近叶顶的空间测点间隔 1 mm,采样频率为 100 kHz.通过动态传递函数,将采集到的总压信号先后进行正反傅里叶变换,以修正输入时域信号在半无限引压管中的衰减和变化.图 10 显示了轴流压气机在最大效率工况和近失速工况下的转子出口总压比云图.从图中可以看出,探针不仅可以清晰地测量到转子尾迹的总压流场特征,还能清楚地获得叶片端区流动如叶顶泄漏涡等大梯度总压流场,由此可见,信号能量衰减不是半无限引压管的缺陷,只要能够获得准确的动态传递函数,输入信号在经过探针引压管之后的信噪比足够大,就能够通过传递函数的修正得到准确的输入信号,而测量的频率范围则由被测信号的频率范围决定.有关流动结构与机理的分析及其与数值模拟结果的对比在本文中不做具体讨论.

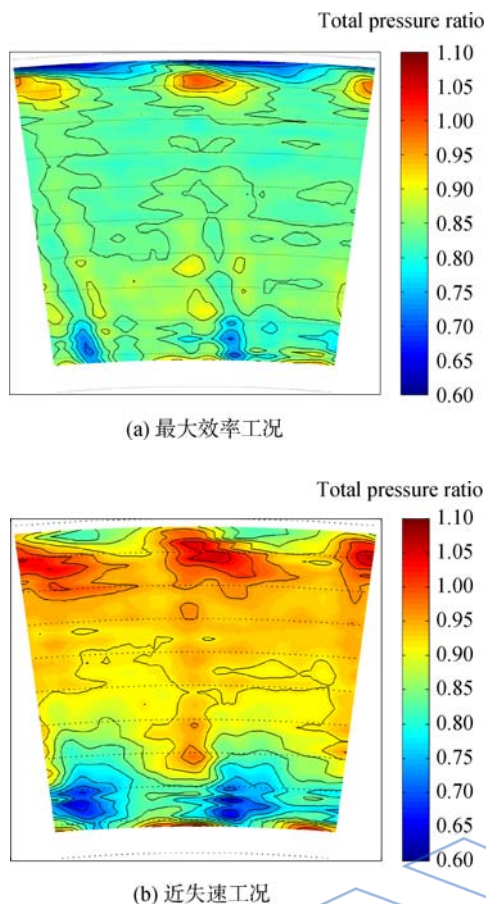


图10 轴流压气机不同工况下转子尾迹总压比云图
Fig. 10 Contours of the axial compressor rotor wake total pressure ratio

4 结 论

本文采用轴流压气机转子叶顶静压信号做为标定参考信号,实验研究了半无限引压管的幅频特性及其与内径变化之间的规律性联系,并在此基础上设计了一种用于压气机转子尾迹总压流场测量的动态压力探针.通过系统的动态标定和对一台轴流压气机转子尾迹总压流场的测量,验证了此探针的动态总压测量能力.主要结论有:

1) 半无限引压管效应可以有效减小动态压力信号的能量衰减,并能减弱引压管腔的谐振效应.

2) 动态压力信号在刚性管中传播时,管径的扩张是造成信号能量衰减得最主要因素,且管径扩张的角度越大,信号衰减得越严重;引压管的弯曲也会造成一定程度上的高频信号能量衰减.

3) 基于以上两点结论,采用半无限引压管进行动态总压探针设计,并采用离散脉冲信号作为输入进行动态传递函数的标定,通过传递函数的正反傅立叶变换和对输入时域信号的修正,能够

满足压气机转子尾迹总压流场测量的时空分辨率要求.

致谢:

感谢美国圣母大学航空与机械工程系 Scott Morris 教授对本文工作提供的指导和帮助.

参考文献:

- [1] Sieverding C H, Arts T, Denos R, et al. Measurement techniques for unsteady flows in turbomachines[J]. *Experiments in Fluids*, 2000, 28(4): 285-321.
- [2] Van Zante D E, Suder K L, Strazisar A J, et al. An improved aspirating probe for total-temperature and total-pressure measurements in compressor flows[J]. *Journal of Turbomachinery*, 1995, 117(4): 642-649.
- [3] Han B, Goldstein R J. Instantaneous energy separation in a free jet; Part II total temperature measurement[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, 46(21): 3983-3990.
- [4] Buttsworth D R, Jones T V. A fast-response total temperature probe for unsteady compressible flows[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1998, 120(4): 694-702.
- [5] Buttsworth D R, Jones T V, Chana K S. Unsteady total temperature measurements downstream of a high-pressure turbine[J]. *Journal of Turbomachinery*, 1998, 120(4): 760-767.
- [6] Buttsworth D R, Jones T V. A fast-response high spatial resolution total temperature probe using a pulsed heating technique[J]. *Journal of Turbomachinery*, 1998, 120(3): 601-607.
- [7] Estevadeordal J, Gorrell S E, Copenhaver W W. PIV study of wake-rotor interactions in a transonic compressor at various operating conditions[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2007, 23(1): 235-242.
- [8] Wernet M P, van Zante D, Strazisar T J, et al. Characterization of the tip clearance flow in an axial compressor using 3-D digital PIV[J]. *Experiments in Fluids*, 2005, 39(4): 743-753.
- [9] Matlis E H, Corket T C, Gogineni S P. AC plasma anemometer for hypersonic Mach number experiments[R]. AIAA 2006-1245, 2006.
- [10] Kupferschmied P, Köppel P, Gizzi W, et al. Time-resolved flow measurements with fast-response aerodynamic probes in turbomachines[J]. *Measurement Science and Technology*, 2000, 11(7): 1036-1054.
- [11] Epstein A H. Measurement techniques in turbomachines high frequency response measurements in turbomachines [M]. Belgium: the von Karman Institute for Fluid Dynamics, 1985.
- [12] Kerrebrock J L, Epstein A H, Tompkins W T. A miniature high frequency sphere probe[C]// *Proceedings of ASME Symposium on Measurement Methods in Rotating*

- Components of Turbomachines. New York: American Society of Mechanical Engineers, 1980:91-97.
- [13] Cook S C P. The development of a high response aerodynamic wedge probe and use on a high speed research compressor[C]//Proceedings of 9th International Symposium on Air Breathing Engines. Washington DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1989:1113-1125.
- [14] 蒋浩康,李雨春,张洪,等. 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[J]. 航空动力学报, 1992,7(1):1-8.
- JIANG Haokang, LI Yuchun, ZHANG Hong, et al. A large-scale axial flow compressor facility and dynamic measurement techniques for rotor flow study[J]. Journal of Aerospace Power, 1992,7(1):1-8. (in Chinese)
- [15] 李雨春,蒋浩康. 圆柱单孔高频压力探针测量高亚音速二维周期流场的方法[J]. 航空动力学报, 1992,7(2):164-166.
- LI Yuchun, JIANG Haokang. A method for measuring high-subsonic two-dimensional periodic flow field using a single hole high-response cylindrical pressure probe[J]. Journal of Aerospace Power, 1992,7(2):164-166. (in Chinese)
- [16] 李井洋,马宏伟,贺象. 楔顶双孔探针测量跨声多级压气机转子出口三维动态流场的方法[J]. 航空动力学报, 2012, 27(10):2261-2268.
- LI Jingyang, MA Hongwei, HE Xiang. Method of measuring 3-D unsteady flow at exits of transonic compressor rotor passages using a two-hole tip-wedge pressure probe [J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(10): 2261-2268. (in Chinese)
- [17] 马宏伟,贺象,单晓明,等. 一种测量跨声速多级压气机转子出口二维流场的方法[J]. 推进技术, 2013,34(6):34-39.
- MA Hongwei, HE Xiang, SHAN Xiaoming, et al. A method of measuring 2D flow-field at rotor exits of transonic multistage compressor[J]. Journal of Propulsion Technology, 2013,34(6):34-39. (in Chinese)
- [18] 劳力云,陈琪,张宏建,等. 引压管路对动态差压检测影响的分析[J]. 计量学报, 1999,20(4):286-291.
- LAO Liyun, CHEN Gong, ZHANG Hongjian, et al. The effect of pressure ducts on dynamic characteristics of pressure drop measuring system[J]. Acta Metrologica Sinica, 1999,20(4):286-291. (in Chinese)
- [19] 张训文,陈曦,朱琦,等. 压力传感器管腔效应问题研究[J]. 测试技术学报, 2002,16(增刊1):387-390.
- ZHANG Xunwen, CHEN Xi, ZHU Qi, et al. Study on the pipe cavity effect of pressure sensor[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2002, 16 (suppl. 1): 387-390. (in Chinese)
- [20] 柳兆荣,陈金娥,黄东群. 压力传感器频率响应的分析[J]. 力学学报, 1980,4:363-372.
- LIU Zhaorong, CHEN Jine, HUANG Dongqun. An analysis of frequency response of pressure transducer[J]. Acta Mechanica Sinica, 1980,4:363-372. (in Chinese)
- [21] 李继超,王偲臣,林峰,等. 一种容腔效应标定技术及其在高频响动态探针中的应用[J]. 航空动力学报, 2011, 26(12):2749-2756.
- LI Jichao, WANG Sichen, LIN Feng, et al. A technique to calibrate cavity effect in unsteady pressure probe with high frequency response[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(12):2749-2756. (in Chinese)