

速度梯度、近壁效应和 Re 数 对压力探针测量误差的影响

北京航空航天大学 马宏伟* 蒋浩康

【摘要】 通过模拟实验研究,分析了速度梯度、近壁效应和 Re 数对几种叶轮机流场测量用压力探针测量误差的影响。实验结果表明,横向梯度能引起偏转角测量误差;纵向梯度能引起俯仰角测量误差;梯度使气流方向测量值向负梯度方向偏转。圆柱探针和锥形多孔探针相比,气流方向测量误差对速度梯度更敏感,纵向梯度对俯仰角测量值的影响尤其大。速度梯度一般使静压测量值偏小,使总压测量值偏高。纵向速度梯度对圆柱探针的静压测量值的影响规律例外,正速度梯度引起大的静压正误差,负速度梯度引起大的静压负误差。圆柱探针比锥形多孔探针近壁效应严重。近壁引起测出的气流方向偏离壁面。近壁一般使静压测量值偏小,但圆柱探针头部近叶轮机匣时静压值反而偏高。近壁对总压测量影响不大。速度梯度和近壁对测量误差的影响还与来流方向有关。低 Re 数使静压测量值偏大,几何形状不同的探针 Re 数的影响范围不同。

主题词: 压力探针 速度梯度 测量误差 效应 近壁场

分类号: O 357. 43

1 引言

压力探针,包括稳态气动压力探针和高频压力探针,以其结构简单、使用方便、结实耐用等优点,被广泛地应用于叶轮机内二维、三维流场测量。文献[1, 2]发展了圆柱单孔高频压力探针及其测量周期性二维流场的方法,并成功地应用于多级高速压气机转子出口流场的测量。为测量三维周期性流场,文献[1, 2]作者随后发展了楔顶圆柱高频压力探针和圆锥四孔高频压力探针,同样得到成功应用。到目前为止,对测量误差进行的研究不多,只有一些零星报导。被测流场的 Re 数、 Ma 数、紊流度等与校准流场的差异,被测流场的速度梯度、压力梯度、探针的近壁效应和阻塞效应等因素,都会影响探针的测量精度。在叶轮机内流条件下,这些影响比外流条件下的更突出。文献[2]从不同 Ma 数下圆柱单孔压力探针的校准数据总结出该探针的压缩性修正方法。文献[3]研究了 Re 数的变化($2000 < Re < 7000$)对棱柱五孔探针静压系数的影响,发现能引起5.5%动压头的静压测量误差和2.8%的速度测量误差。文献[4]研究过横向总压梯度对圆柱单孔总压探针测量的影响,发现梯度使总压测量值偏大,由于作者只用其测量气流总压,误差分析仅限于总压。文献[5]在壁面附面层内,研究了速度梯度对球头五孔探针俯仰角测量的影响,发现探针接近壁面时俯仰角的测量值偏离壁面方向达 5° ;它没有研究速度梯度对其它气动参数测量的影响,而且该文的研究条件实际上存在速度梯度和近壁两种影响。文献[3]分析了近壁对棱柱五孔针静压系数的影响,认为会引起静压测量误差,没有提及近壁对气

流角测量的影响。文献[6]研究了近壁对楔形四孔针测量的影响,发现近壁使俯仰角测量值偏离壁面近 10° ,没有研究近壁引起的静压测量误差。

本文通过模拟实验,分析了速度梯度、近壁效应和 Re 数对两种多孔压力探针(锥形五孔压力探针和锥形四孔压力探针),两种圆柱探针(圆柱单孔针和楔顶圆柱双孔针)测量误差的影响,以期得到比前人

更全面、更深入一些的认识,并为测量误差修正提供依据。四种压力探针坐标系定义见图 1。其中圆柱探针圆柱面上感受孔距顶部 1.2 倍探针直径。

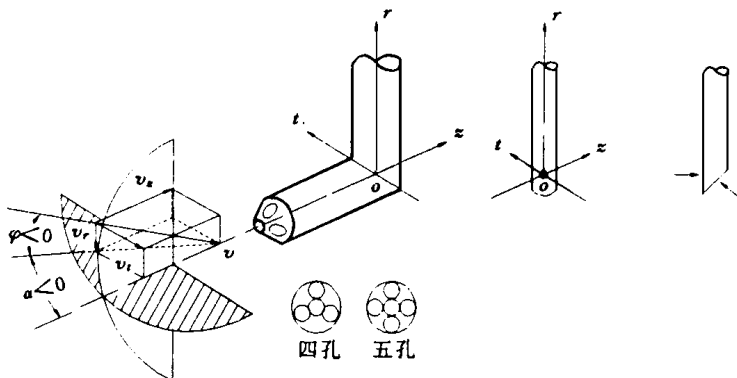


图 1 探针坐标系定义

2 速度梯度的影响及修正

为研究速度梯度对压力探针测量的影响,制作了图 2 所示的多孔板,固定在校准风洞的喷嘴上,可在出口截面上获得稳定而规则变化的速度梯度场。横向速度梯度系数定义为 $(d/v) \cdot (dv/dt)$,其中 d 为探头直径, t 为探针横向位移。纵向速度梯度系数定义为 $(d/v) \cdot (dv/dr)$,其中 r 为探针纵向位移。

图 3(图中 $\square$ 纵向速度梯度, $\triangle$ 横向速度梯度)是在模拟实验流场内,当 $\alpha = 0^\circ$, $\varphi \neq 0$ 时,横向、纵向速度梯度分别引起的锥形五孔探针测量误差。俯仰角、偏转角、静压和总压测量误差分别定义成 $\Delta\varphi = \varphi_{\text{测}} - \varphi_{\text{真}}$, $\Delta\alpha = \alpha_{\text{测}} - \alpha_{\text{真}}$, $\Delta p_s = (p_{s\text{测}} - p_{s\text{真}})/0.5\rho v_{\text{真}}^2$, $\Delta p_t = (p_{t\text{测}} - p_{t\text{真}})/0.5\rho v_{\text{真}}^2$ 。

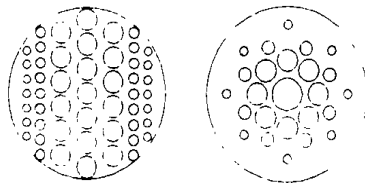


图 2 多孔板

实验结果表明,横向速度梯度会引起偏转角测量误差,但

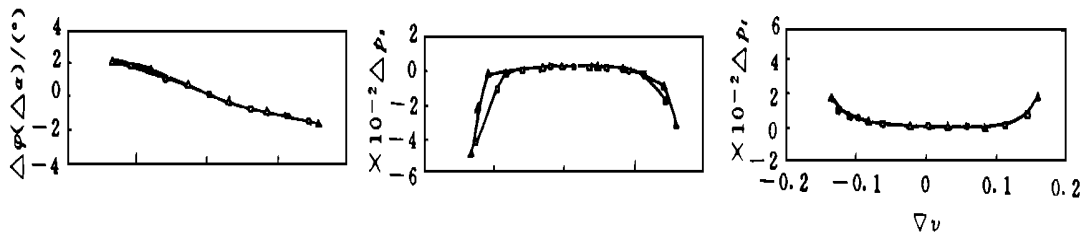


图 3 速度梯度引起的五孔针测量误差

不影响俯仰角的测量;纵向速度梯度能引起俯仰角测量误差,但不影响偏转角测量。速度梯度使方向角测量值向负梯度方向偏转。方向角测量误差与速度梯度近似成负线性关系。速度梯度在 ± 0.1 以内对静压和总压测量影响不大。较大的速度梯度使静压测量值偏小,总压测量值偏高,从而使速度测量值偏大。

探针是在均匀流场中校准的,由于多孔压力探针的感受孔空间位置不同,各孔在梯度流场

中感受到的是速度不同的流线的压力,这是引起气流方向角的测量误差的原因之一。在梯度流场内,探针的存在使流线向速度低的一侧偏移,使测得的气流方向角进一步向负梯度方向偏转,同时使测得的总压值偏高。速度梯度使静压测量值偏小,可以通过简单的绕流计算证实。

图4(图中 $\square$ - 10° ; $\triangle$ 0° ; $\diamond$ 10°)是锥形四孔针测量误差与横向速度梯度的关系。模拟流场的梯度很大,用以模拟探针在强剪切流下的工作。锥形四孔针头部几何在横向是对称的。模拟实验在来流方向 $\alpha = -10^\circ$; 0° 和 10° ; $\varphi \neq 0$ 三种情形下进行。与锥形五孔探针的实验结果相同,横向梯度不影响俯仰角测量,在这三种来流情况下,偏转角测量误差与梯度都成近似负线性关系,而且比例系数很接近。同样,速度梯度使静压测量值偏小,总压测量值偏大。但在来流方向不同时,同一速度梯度引起的测量误差有明显的差异。当 $\alpha = -10^\circ$; $\varphi \neq 0$ 时,负的速度梯度引起的静压、总压及速度测量误差较大,正的相同值的梯度引起的测量误差较小。当 $\alpha = 10^\circ$; $\varphi \neq 0$ 时,规律相反。可见速度梯度引起的测量误差,不仅与当地的速度梯度有关,还与来流方向有关。

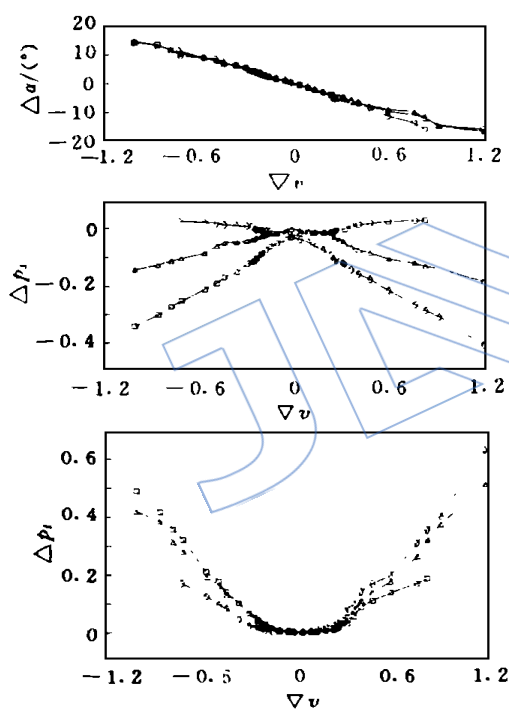


图4 横向速度梯度引起的四孔针测量误差

图5是当 $\alpha = 0^\circ$; $\varphi \neq 0$ 时横向速度梯度(图中实线)和纵向速度梯度(图中虚线)引起的圆柱单孔针(图中 $\square$ 表示的)和楔顶圆柱双孔针(图中 $\triangle$ 表示的)测量误差。实验结果表明,与锥形多孔针相同,

横向速度梯度会引起圆柱探针测量偏转角的误差,纵向速度梯度能引起双孔针测量俯仰角的误差。速度梯度同样使方向角测量值向负梯度方向偏转。方向角测量误差与速度梯度也同样近似成负线性关系。不同的是,圆柱形探针方向角测量误差对流场梯度要比多孔针更敏感,纵

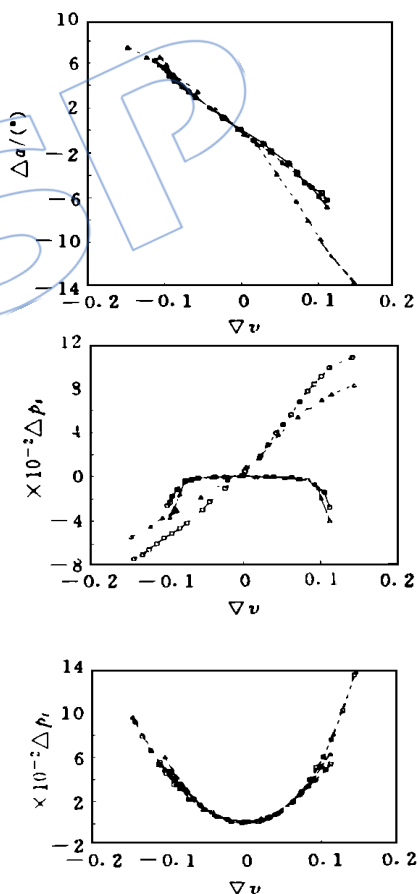


图5 速度梯度引起的圆柱形探针测量误差

向梯度对俯仰角测量误差影响尤其大。速度梯度同样使圆柱探针总压测量值偏高,较大的横向速度梯度同样使圆柱探针静压测量值偏小,不过影响程度大些。值得注意的是,纵向速度梯度对圆柱形探针静压测量的影响比横向梯度的影响大得多,而且影响规律也不同。正的梯度引起静压正误差;负的梯度引起大的负误差。速度梯度对圆柱形探针测量误差影响大,反映圆柱探针对流场的干扰大。至于正负纵向梯度引起圆柱探针静压误差正负不同,则与探针头部几何在纵向不对称有关,这种探针头部绕流的三维性很强。

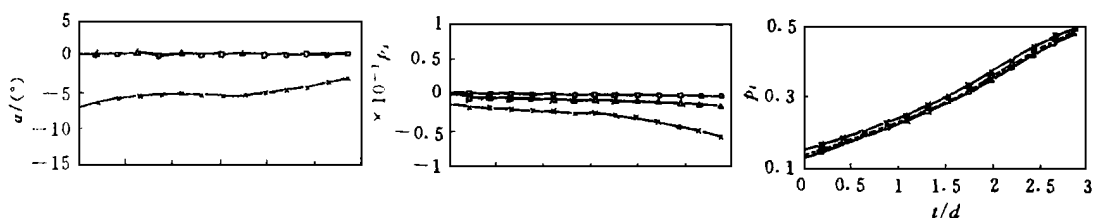


图6 对某梯度流场测量进行的修正

被测流场的速度梯度是未知的,可以通过反复修正求得流场参数的真实值。图6是利用锥形四孔针梯度模拟实验结果(图中×修正前,△修正后,□真实值),对某梯度流场测量结果进行的修正,横坐标是探针相对位移 t 与探头直径 d 的比,不同的 t/d 对应着不同的梯度。修正后各参数值接近真实值。

3 近壁效应的影响

近壁效应模拟实验中,用平行于风洞射流放置的薄板模拟壁面,前缘磨成刃口,以减小绕流和附面层的影响。图7(图中□第2孔近壁,△第3孔近壁,◇第4孔近壁,×第5孔近壁)是模拟锥形五孔针在叶轮机转子叶片通道内测量,靠近叶片吸力面(第2孔靠近壁面)、叶片压力面(第3孔靠近壁面)、轮毂(第4孔靠近壁面)和机匣(第5孔靠近壁面),当 $\alpha = 0^\circ$ 时探针的测量误差。横坐标 x/d , x 为探头中心线与壁面之间的距离。

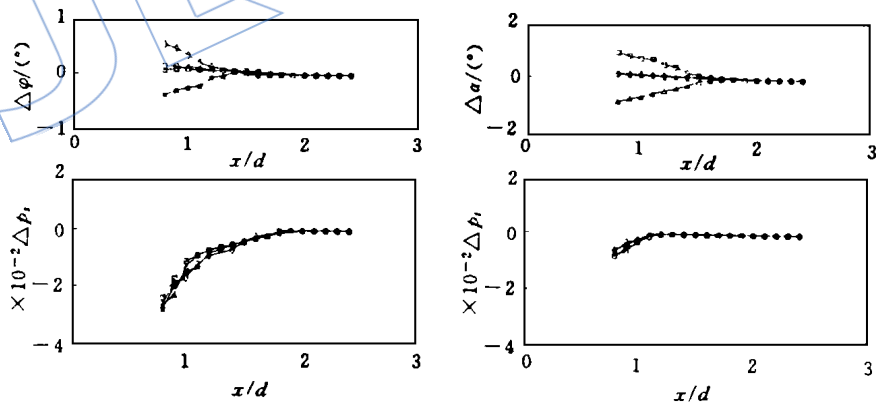


图7 近壁效应引起的五孔针测量误差

实验结果表明,近壁区测得的气流方向不与壁面齐平,而是略微偏离壁面,近端壁会引起不大的俯仰角测量误差,近叶片表面会引起不大的偏转角测量误差。在 $x/d = 0.8$ 处,气流角误差为 1° 。近壁效应使静压测量值偏小,误差可达3%动压头。近壁效应对总压测量影响不大,

实验结果表明,近壁区测得的气流方向不与壁面齐平,而是略微偏离壁面,近端壁会引起不大的俯仰角测量误差,近叶片表面会引起不大的偏转角测量误差。在 $x/d = 0.8$ 处,气流角误差为 1° 。近壁效应使静压测量值偏小,误差可达3%动压头。近壁效应对总压测量影响不大,

误差小于 1% 动压头。当 $x/d > 2.0$ 时, 可忽略近壁效应对探针测量的影响。

为认清误差产生的物理本质, 本文作者还在水槽内做了氢气泡流动显示实验。当探针近壁面测量时, 由于探针的阻滞, 探针头部前方气流在壁面法向上偏离壁面, 在横向则加速。前者造成气流角测量误差, 后者造成静压测量误差。

近壁效应使静压测量值偏小的结论只在探针头部几何在壁面法线方向上对称的情况才是正确的。作者对探针头部几何在纵向不对称的锥形四孔针同样做了模拟实验。结果表明, 其第

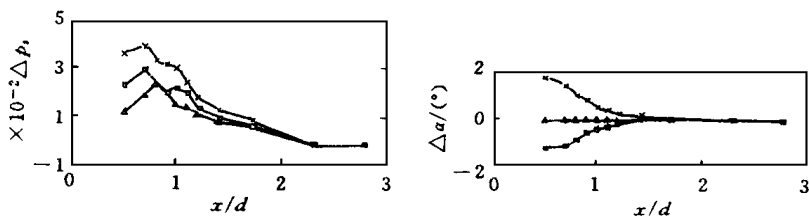


图 8 近壁效应引起的四孔针测量误差(第 2、3 孔近壁)

4 孔近壁时, 静压测量值偏小; 第 2、3 孔近壁时相反, 静压测量值偏大, 其原因是显然的。图 8 表示的是锥形四孔针第 2、3 孔近壁时的情况(图中 $\square$ - 10° , $\triangle$ 0° , $\star$ 10°)。它表现了不同来流方向下, 锥形四孔针的静压测量误差大小有差异, 还反映了不同来流方向下, 近壁会引起气流偏转角测量误差。

图 9(a) 和 (b) 分别是模拟圆柱单孔针和楔顶圆柱双孔针从叶轮机机匣插入, 当来流 $\alpha = 0^\circ$, $\varphi = 0^\circ$; 近轮毂和近机匣时的测量误差(图中 $\square$ 近轮毂, $\triangle$ 近机匣)。横坐标 x/d , x 为探针压力感受孔与壁面之间的距离。请注意反映圆柱形探针的图 9(a) 和 (b) 的坐标比反映多孔针的图 7 和图 8 的坐标大了一倍。

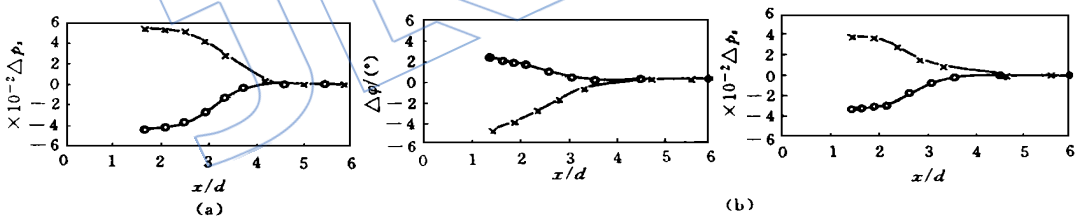


图 9 对某梯度流场测量进行的修正(a)圆柱单孔针(b)圆柱楔顶双孔针

实验结果表明, 圆柱形探针比锥形多孔针测量误差对近壁更敏感。圆柱形探针近轮毂测得的静压值偏低, 圆柱单孔针误差可达 4% 动压头。但近机匣测得的静压值却偏高, 圆柱单孔针最大误差达 5% 动压头。近壁效应对总压测量同样影响不大, 误差小于 1% 动压头。双孔针近壁区测得的气流方向不与壁面齐平, 与多孔压力探针相同, 也是偏离壁面。在 $x/d = 1.5$ 处, 近轮毂和近机匣俯仰角测量误差分别为 2.5° 和 5° 。当 $x/d > 3-3.5$ 时, 可忽略近壁效应的影响。

4 Re 数的影响

图 10(a) 是在 $\alpha = 0^\circ$, $\varphi = 0^\circ$ 下两种锥形多孔压力探针测量误差随雷诺数的变化。

低 Re 数使静压测量值偏大。 $Re = 4500$ 时, 锥形五孔针和锥形四孔针静压测量误差分别为 1% 和 2% 动压头。几何形状不同的探针 Re 数的影响范围不同。锥形五孔针当 $Re > 6000$ 后, Re 数影响可以忽略, 锥形四孔针则当 $Re > 8000$ 后, Re 数影响可以忽略。

图 10(b) 是在 $\alpha = 0^\circ$, $\varphi = 0^\circ$ 下圆柱形压力探针测量误差随雷诺数的变化。低 Re 数使静压

测量值同样偏大。 $Re=2500$ 时, 圆柱单孔针和楔顶圆柱双孔针静压测量误差分别为 1% 和 2% 动压头。对于顶部几

何形状不同的探针, Re 数的影响范围也不同。

圆柱单孔针当 $Re >$

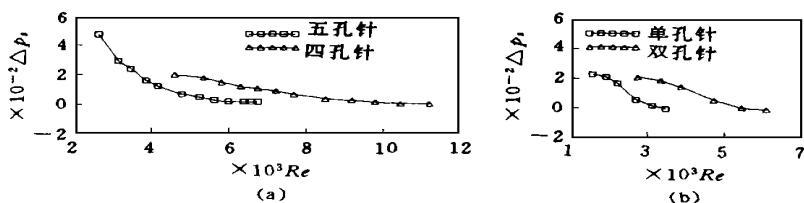


图 10 Re 数引起的测量误差 (a) 锥形多孔针 (b) 圆柱形探针

3500 后, Re 数影响可以忽略, 楔顶圆柱双孔针则当 $Re > 5500$ 后, Re 数影响可以忽略。

5 结 论

横向梯度能引起偏转角测量误差, 纵向梯度能引起俯仰角测量误差, 梯度使气流方向测量值向负梯度方向偏转。圆柱探针和锥形多孔探针相比, 气流方向测量误差对速度梯度更敏感, 纵向梯度对俯仰角测量值的影响尤其大。速度梯度一般使静压测量值偏小, 使总压测量值偏高。纵向速度梯度对圆柱探针的静压测量值的影响规律例外, 正速度梯度引起大的静压正误差, 负速度梯度引起大的静压负误差。

圆柱探针比锥形多孔探针近壁效应严重。近壁引起测出的气流方向偏离壁面。近壁一般使静压测量值偏小, 但圆柱探针头部近叶轮机匣时静压值反而偏高。近壁对总压测量影响不大。锥形多孔探针头部中心距离壁面超过 2 倍探头直径, 圆柱探针压力感受孔距离壁面超过 3 - 3.5 倍探针直径时, 近壁的影响可以忽略。

速度梯度和近壁对测量误差的影响还与来流方向有关。

低 Re 数使静压测量值偏大, 几何形状不同的探针 Re 数的影响范围不同。

参 考 文 献

- 1 蒋浩康等. 高速多级风扇转子后流场测量. 航空动力学报, 1992, 7(1)
- 2 李雨春, 蒋浩康. 圆柱单孔高频压力探针测量高速二维周期性流场的方法. 航空动力学报, 1992, 7(1)
- 3 Treasten A L, Yoncum A M. The Calibration and Application of Five-Hole Probe. ISA Transactions, 1979, 18(3)
- 4 Livesey J L. The Behavior of Transverse Cylindrical and Forward Facing Total Pressure Probes in Transverse Total Pressure Gradients. J. Aeronaut. Sci., 23, 1956: 949- 995
- 5 Heneka A, Bubeck H. Measuring Errors of Pneumatic Multi-Hole Probes. AIAA 11th Fluid and Plasma Dynamics Conference, Seattle, Washington, July 10- 12, 1978
- 6 Bubeck H, Wachter J. Development and Application of a High Frequency Wedge Probe. ASME Paper 87- GT- 216

(责任编辑 魏星禄)