

一种拓宽五孔压力探针测量范围的方法

郭君德^{1,2}, 马宏伟^{1,2}, 范聪聪^{1,2}, 俞迪^{1,2}

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;

2. 北京航空航天大学 航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 为了拓宽五孔压力探针的角度测量范围, 首先在低速风洞中进行探针校准, 应用拓宽方法处理校准数据, 对比不同校准系数定义下探针校准曲线特性及差异, 并确定五孔压力探针在低速流动中的测量范围。在此基础上, 通过亚声速风洞开展不同马赫数下的适用性研究, 评估该拓宽方法在可压缩流动中的应用效果。最后在风洞中进行实际测量, 分析该拓宽方法的误差水平。结果表明: 采用的校准系数定义可以使校准曲线在较宽的角度范围内都具有良好的单调性和较高的计算精度; 在低速情况下, 五孔压力探针在偏转角 $\pm 70^\circ$ 、俯仰角 $\pm 50^\circ$ 的测量范围内均适用; 在亚声速情况下, 可压缩流动对俯仰角的负向测量范围影响较大, 但偏转角的测量范围仍可达到接近 $\pm 70^\circ$ 。误差分析结果表明, 应用该拓宽方法测量的误差水平整体较低。该拓宽五孔压力探针测量范围的方法在一些气流角变化较大的叶轮机械测试中具有很好的应用前景。

关 键 词: 复杂流场测试; 压力测量; 五孔压力探针; 校准方法; 宽气流角

中图分类号: V211.7

文献标志码: A

A method for extending measurement range of five-hole pressure probe

GUO Junde^{1,2}, MA Hongwei^{1,2}, FAN Congcong^{1,2}, YUN Di^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics,
Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to extend the measurement range of five-hole pressure probe (FHPP), the probe was calibrated firstly in a low-speed wind tunnel. The extending method was applied to process the calibration data, the differences of the probe calibration curves defined by different calibration coefficients were compared, and the measurement range of the FHPP in low-speed flow was determined. On this basis, the applicability study at different Mach numbers was carried out in a subsonic wind tunnel to evaluate the application effect of the extending method in compressible flow. Finally, actual measurement was carried out in the wind tunnel to analyze the error level of the extending method. The results showed that: the calibration curve had a wider monotonic range and higher calculation accuracy after using this calibration coefficient definition. At low speed, the FHPP was applicable within the measurement range of yaw angle $\pm 70^\circ$ and pitch angle $\pm 50^\circ$. At subsonic speed, the compressible flow had a great influence on the negative measurement range of the pitch angle, but the measurement range of the yaw angle can still reach close to $\pm 70^\circ$. The error analysis results also showed that the error level measured by the extending method was generally lower. This method for extending the angular measurement range of FHPP has a good

收稿日期: 2022-05-01

基金项目: 国家自然科学基金(51776011); 国家科技重大专项(2017-V-0016-0068); 国防科技重点实验室基金(2021-JCJQ-LB-062-0204)

作者简介: 郭君德(1996—), 男, 博士生, 主要从事叶轮机械流场测试研究。

通信作者: 马宏伟(1968—), 男, 教授、博士生导师, 博士, 研究领域为内流实验与测试技术。E-mail: mahw@buaa.edu.cn

引用格式: 郭君德, 马宏伟, 范聪聪, 等. 一种拓宽五孔压力探针测量范围的方法[J]. 航空动力学报, 2022, 37(11): 2659-2667. GUO Junde, MA Hongwei, FAN Congcong, et al. A method for extending measurement range of five-hole pressure probe[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(11): 2659-2667.

application prospect in some turbomachinery internal flow tests with a large angle variation range.

Keywords: complex flow field test; pressure measurement; five-hole pressure probe; calibration method; wide airflow angle

在目前叶轮机内部的复杂流场测试中,多孔探针测试技术是一种最常用的流场参数测量方法,与激光多普勒测速、粒子图像测速、热线等现代非接触式测量方法相比,气动探针不仅价格低廉、易于实现,而且稳定可靠,所以备受人们青睐^[1]。五孔压力探针由于其尺寸小、精度高,且能测量三维流场的气动参数,所以在复杂流动环境下的测试中应用广泛,如进气道总压畸变测试^[2]、压气机级间测试^[3-4]、涡轮叶顶间隙研究^[5-6]、捕捉叶片尾迹脱落涡^[7]等。

数十年来,关于五孔压力探针开展了很多的测试研究。Tamigniaux 等^[8]对五孔压力探针的近壁效应进行了实验研究,并提供了关于壁面影响大小的数据。文献^[9-11]通过数值和实验校准等手段研究了雷诺数变化对探头特性的影响,量化了不同雷诺数状态下的测试误差,研究发现雷诺数对俯仰角产生的误差较大,偏转角、总压和静压误差趋于稳定,且可以忽略不计。Town 等^[12]开展了五孔压力探针在压力梯度环境中对测量影响的研究,并对测量值进行适当修正。另外,五孔压力探针头部结构和尺寸对测量也有很大影响,Sitaram 等^[13]研究了五孔压力探针头部不同倒角大小的影响,研究表明 30° 倒角的五孔探头工作范围大,而 50° 倒角的五孔探头灵敏度最好。Hall 等^[14]以开源的牛津探针结构为基础,比较了不同材料、不同尺寸探头对校准结果的影响。

国内学者也进行了很多五孔压力探针相关的研究。马宏伟等^[15]开展了速度梯度、近壁效应和雷诺数对五孔压力探针测量误差影响的研究。不同的探针数据处理方法,也会给测试精度带来很大的影响。文献^[16-20]针对五孔压力探针的不同数据处理方法进行了研究,对样条插值、最小二乘法拟合等方法进行了优化,并提出了三维非线性插值、拉丁超立方抽样及人工神经网络等新的标定方法,不仅减少了五孔压力探针在使用前的标定工作量,还具有更高的精度和可靠性。

上述国内外关于五孔压力探针的研究主要是从测试误差、探针结构和数据处理方法等方面展开的。然而在一些复杂流道的测试中,气流具有强三维性,角度变化范围较大,常用的五孔压力

探针测量角度在 $\pm 30^\circ$ 左右^[12],甚至更小^[21],难以满足在这些复杂内流环境中的测量需求。目前的公开文献中很少有对拓宽五孔压力探针测量范围方面的研究,五孔压力探针测量角度的限制主要是由于气流在探针头部的扰流特性所引起的,当气流角度增大到一定程度后,校准系数的分母会趋于零,造成校准系数在大角度下出现发散。虽然 Pisasale 等^[22-23]通过在分母加入一个与五个孔压力相关的无量纲系数来避免校准系数发散,但这样会带来新的插值误差,造成额外的误差传递,影响测量精度。

目前,工程上在大角度流动环境中的测量主要有两种方法。一种方法是借助位移机构旋转或移动探针来测量气流角度变化大的流场结构^[10],然而在一些体积较小、结构紧凑的实验器上难以加装位移机构,而且移动探针在不同位置进行采集会使测试时间成倍增长,同时也引入很多不必要的测试误差。另一种方法是增加探头上孔的数量,如七孔探针等^[24-25]。但七孔探针的数据处理过程复杂,校准时需要针对小角度和大角度情况选取两种不同的坐标系,并经过坐标变换才能得到相应的角度。而且随着孔数量的增加意味着探针支杆直径和探头尺寸相应变大,因此会对被测流场产生更严重的干扰^[26],难以满足在狭小空间开展高精度、高分辨率的测试需求。

针对五孔压力探针在一些强三维性复杂流道测试中所面临的问题,本文以自行研制的一种五孔压力探针为研究对象,探索一种适用于拓宽五孔压力探针测量范围的方法。

1 五孔压力探针及其校准

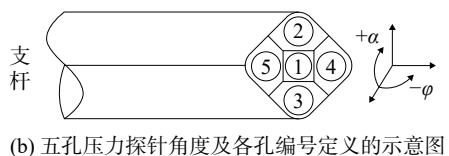
1.1 探针结构

本文中所使用的五孔压力探针如图 1(a)所示,头部采用棱台设计,外径尺寸为 2.4 mm,探针支杆直径为 6 mm,探针总长度为 600 mm,探针末端装有确定零位的定位块。

图 1(b)为五孔压力探针角度及各孔编号定义,五孔压力探针绕支杆轴线旋转的角度定义为偏转角,在竖直平面内旋转的角度定义为俯仰角。图中 α 代表偏转角, ϕ 代表俯仰角;各孔按照探针



(a) 五孔压力探针头部实物图



(b) 五孔压力探针角度及各孔编号定义的示意图

图 1 五孔压力探针结构与定义

Fig. 1 Five-hole pressure probe structure and definition

头部朝上的方位命名,与编号的对应关系如下:1 为中孔,2 为左孔,3 为右孔,4 为上孔,5 为下孔。

来流在正对中孔轴线时偏转角和俯仰角均为 0° 。探针左孔对准来流时,偏转角为 $-\alpha$; 探针右孔对准来流时,偏转角为 $+\alpha$; 探针上孔对准来流时,俯仰角为 $+\phi$; 探针下孔对准来流时,俯仰角为 $-\phi$ 。

1.2 探针校准装置

在北京航空航天大学内流测试技术实验室搭建了一套低速开式风洞校准装置,对五孔压力探针开展更宽气流角范围的校准。该风洞出口直径为 100 mm,可产生最高为 23 m/s 的恒定速度,也可以根据需要对速度进行调节。

在风洞下游 1 倍直径处安装探针位移机构,该位移机构可以带动探针围绕探针头部中心实现大角度的偏转和俯仰运动,并通过 TCP(transmission control protocol)通信协议实现精确控制,旋转角度精度为 0.1° ; 风洞来流总压及探针压力测量使用差压型压力扫描阀进行采集,精度为 0.5% 。计算机数据采集程序采用 Labview 软件平台编制,能实现采集、处理、显示实验工况、探针姿态、测量参数,满足探针气动校准要求。

1.3 探针校准方案

为了探究本次拓宽后的五孔压力探针实际所能测量的最大角度范围,先对五孔压力探针校准尽可能多的角度,再从中优选有效的角度范围。设定偏转角的校准范围为 $\pm 90^\circ$,俯仰角由于受到校准装置空间干涉限制,最大校准范围为 $\pm 50^\circ$,角度校准间隔均为 5° ,共计 777 个校准站位。

位移机构夹持探针后,对探针的俯仰角和偏转角进行零位校正,并采集当地的零点数据。本次校准设定来流速度为 23 m/s。待风洞来流稳定后开始校准,在每站稳定时间为 10 s,之后压力扫描阀采集 1 000 组压力值。

2 五孔压力探针数据处理方法

2.1 传统数据处理方法

五孔压力探针校准系数包括偏转角系数、俯仰角系数、总压系数和静压系数,传统的五孔压力探针各校准系数的定义如下:

$$\begin{cases} p_p = (p_2 + p_3 + p_4 + p_5)/4 \\ C_{py} = (p_2 - p_3)/(p_1 - p_p) \\ C_{pp} = (p_5 - p_4)/(p_1 - p_p) \\ C_{pt} = (p_1 - p_t)/(p_1 - p_p) \\ C_{ps} = (p_s - p_p)/(p_1 - p_p) \end{cases} \quad (1)$$

式中 C_{py} 为偏转角系数, C_{pp} 为俯仰角系数, C_{pt} 为总压系数, C_{ps} 为静压系数,校准风洞的来流总压和静压分别为 p_t 和 p_s 。 p_1 、 p_2 、 p_3 、 p_4 和 p_5 分别对应五孔压力探针中孔、左孔、右孔、上孔和下孔测得的压力值。 p_p 为左孔、右孔、上孔和下孔测得的压力值的平均值。

本文先按照五孔压力探针传统的数据处理方法对探针的校准数据进行处理,得到如图 2 所示的校准曲线,可以看出使用传统的方法该探针的有效角度测量范围均不超过 $\pm 30^\circ$ 。

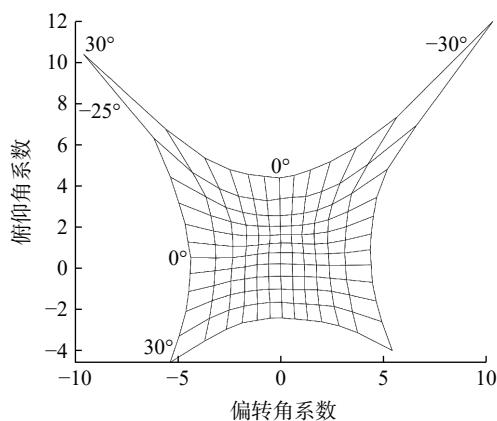


图 2 五孔压力探针传统方法校准结果

Fig. 2 Five-hole pressure probe calibration results using traditional method

2.2 拓宽探针测量范围的数据处理方法

2.2.1 流动分区

由探针头部扰流特性可知,在较大角度来流时,探针迎风孔感受到的压力值最大,而远离来流方向的孔在这种情况下会发生流动分离,造成该孔附近的压力失稳。如果可以将不同来流角度根据流动特点进行划分,避免将分离孔的压力值参与到各个校准系数的计算中,则可以有效地拓宽五孔压力探针的测量范围。

针对传统的五孔压力探针数据处理方法存在测量角度受限的问题,本文基于分区思想^[25],根据探针最大压力孔划分不同的来流区域。图 3 所示是在低速风洞中校准的各站位最大压力孔分布,可以看出,在校准的角度范围内流动自然地分成 5 个区:中区、左区、右区、上区和下区。

在图 3 基础上,把每个校准角度下最大压力孔对应的压力值绘制成压力云图,如图 4 所示。该图一方面可以反映不同角度下五个感压孔与来流的正对情况,另一方面还可以反映探针各孔的加工情况。可以看出本探针上孔的加工位置与中孔相距较远,而且孔径也比其他 4 个孔略大,这一结果也与图 1(a)的探针头部实物相吻合。从图 4 的结果中还可以发现,在俯仰角为 50° 时,上孔还未完全正对来流,所以理论上俯仰角的正向测量范围还可以更大。

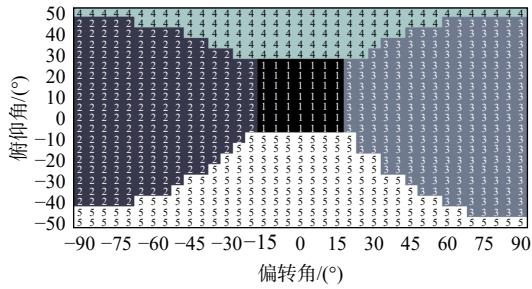


图 3 低速流动情况下的区域划分

Fig. 3 Division of zones under low-speed flow

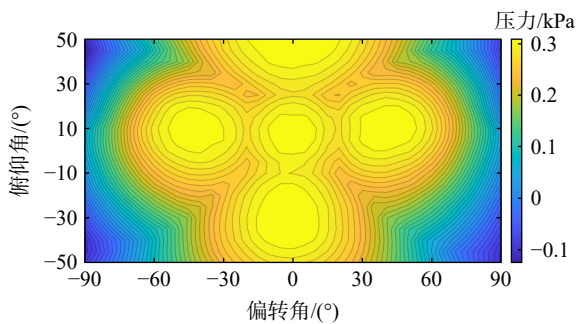


图 4 不同角度下最大压力分布

Fig. 4 Maximum pressure distribution at different angles

2.2.2 大角度流动下校准系数定义

根据图 3 的分区结果,对每个区的校准系数单独定义,在中区的角度范围内,校准系数定义与传统的五孔压力探针定义方法相同,如式(1)所示;在周围 4 个区的大角度流动情况中,选取与迎风方向相近的 4 个孔的压力值来计算校准系数。

大角度流动下各区校准系数的定义如下:

1) 左区

$$\begin{cases} p_p = (p_4 + p_5)/2 \\ C_{py} = (p_2 - p_1)/(p_2 - p_p) \\ C_{pp} = (p_5 - p_4)/(p_2 - p_p) \\ C_{pt} = (p_2 - p_1)(p_2 - p_p) \\ C_{ps} = (p_5 - p_p)/(p_2 - p_p) \end{cases} \quad (2)$$

2) 右区

$$\begin{cases} p_p = (p_4 + p_5)/2 \\ C_{py} = (p_3 - p_1)/(p_3 - p_p) \\ C_{pp} = (p_5 - p_4)/(p_3 - p_p) \\ C_{pt} = (p_3 - p_1)(p_3 - p_p) \\ C_{ps} = (p_5 - p_p)/(p_3 - p_p) \end{cases} \quad (3)$$

3) 上区

$$\begin{cases} p_p = (p_2 + p_3)/2 \\ C_{py} = (p_2 - p_3)/(p_4 - p_p) \\ C_{pp} = (p_4 - p_1)/(p_4 - p_p) \\ C_{pt} = (p_4 - p_1)(p_4 - p_p) \\ C_{ps} = (p_5 - p_p)/(p_4 - p_p) \end{cases} \quad (4)$$

4) 下区

$$\begin{cases} p_p = (p_2 + p_3)/2 \\ C_{py} = (p_2 - p_3)/(p_5 - p_p) \\ C_{pp} = (p_5 - p_1)/(p_5 - p_p) \\ C_{pt} = (p_5 - p_1)(p_5 - p_p) \\ C_{ps} = (p_5 - p_p)/(p_5 - p_p) \end{cases} \quad (5)$$

2.2.3 不同校准系数定义比较

为了验证对周围 4 个区采用以上校准系数定义的合理性,将本文式(2)~式(5)的定义与另外 3 种校准系数定义进行对比。表 1 所列的是左区的 3 种不同定义。

在左区流动中, p_2 代表的物理意义可以理解 为总压, p_p 代表的为静压,所以校准系数分母所表示的含义为探针所感受到的动压头。表 1 中对照方法 1 和 2 与本文所采用定义的区别是把周围 3 个孔(中孔、上孔和下孔)的平均值作为等效静压 p_p ; 对照方法 1 和 2 的不同之处在于,在偏转角系数的分子上,分别采用左孔与中孔的差、左孔与上下两孔平均值的差来表征对气流角的敏感性;在总压系数定义式的分子上,分别采用来流总压与左孔的差、来流总压与静压的差来表征总压系数与气流角的关系。此外,还对比了采用传统的五孔压力探针定义在该角度范围的校准曲线。

图 5 和图 6 是左区俯仰角为 0° 时不同偏转角

表 1 左孔迎风下不同校准系数定义
Table 1 Definition of different calibration coefficients in the left zone

方法	p_p	C_{py}	C_{pt}
对照方法 1	$(p_1 + p_4 + p_5)/3$	$(p_2 - p_1)/(p_2 - p_p)$	$(p_2 - p_t)/(p_2 - p_p)$
对照方法 2	$(p_1 + p_4 + p_5)/3$	$[(p_4 + p_5)/2 - p_2]/(p_2 - p_p)$	$(p_s - p_t)/(p_2 - p_p)$
传统方法	$(p_2 + p_3 + p_4 + p_5)/4$	$(p_2 - p_3)/(p_1 - p_p)$	$(p_1 - p_t)/(p_1 - p_p)$

系数和总压系数定义对比结果。从图 5 可以看出, 本文采用的校准系数定义与传统的定义相比具有明显的优势, 使用传统的定义在超过 -40° 时校准系数会失去单调性, 而本文采用的偏转角系数定义在 -70° 范围内都具有单调性。结合图 4 的最大压力分布可以看出, 偏转角在 $\pm 70^\circ$ 位置附近, 最大压力孔的压力值已经接近零, 这意味着在该范围之外, 来流将完全超出 5 个孔的覆盖范围, 探针测到的压力也不再对角度变化敏感。此外, 在左区流动中, 另外两种对照方法的偏转角系数定义的单调区间也都不超过 -70° , 但本文采用的定义计算出的偏转角系数极差为 1.14, 高于对照方法 1 和 2 的极差, 在探针使用时, 通过偏转角系数插值计算偏转角时会有更高的精度。

分析图 6 的总压系数比较结果可知, 本文采用的总压系数定义略优于对照方法 1, 但差别不

大。对照方法 2 的曲率变化较大, 在探针使用时, 会使插值结果产生较大的误差, 同时其分子为总压与静压的差, 两个量均为计算得出的值, 经过误差传递后会使精度进一步降低。

在其他各区对比以上几种不同定义方法后发现, 本文所采用的校准系数定义可以使偏转角系数在 $\pm 70^\circ$ 、俯仰角系数在 $\pm 50^\circ$ 范围内都具有较好的单调性。与传统五孔压力探针校准系数定义相比, 本文采用的校准系数定义具有更宽的角度测量范围; 与对照的两种校准系数定义方法相比, 本文采用的定义还具有更高的计算精度。

2.3 五孔压力探针校准结果分析

2.3.1 角度系数校准结果分析

按照上述的五孔压力探针拓宽方法处理校准数据后, 可得到各区的校准结果。图 7 所示为中区的偏转角系数和俯仰角系数拟合曲面结果, 从图中可以看出, 在中区范围内, 角度系数与角度呈现单调且线性的关系, 校准结果具有较高的精度。周围 4 区的角度系数拟合曲面结果如图 8 所示, 在各区域内, 拟合曲面都呈现较好的单调性。与中区相比, 在测量范围的极限位置附近, 拟合曲面曲率变化相对较大。在探针实际应用时, 首先根据最大压力孔确定所在的分区, 找到对应的校准系数定义公式, 计算出偏转角系数和俯仰角系数, 然后再对该区的校准曲面进行插值, 得到气流实际的偏转角和俯仰角。此外, 图 7 和图 8 中显示的校准曲面仅为各区范围内的部分, 实际数据过程中可以根据不同的定义获得覆盖边界范围内的完整校准曲面, 如果测量数据落在不同区域的交界处, 需要先比较各孔的压力大小, 确定所属的分区, 然后对该区定义下的完整校准曲面进行插值即可得到相应的气流参数。

2.3.2 压力系数校准结果分析

图 9 为总压系数与静压系数的校准结果拟合曲面。从图中可以看出, 在测量范围的上下限和各区边界附近, 总压系数和静压系数与来流角度

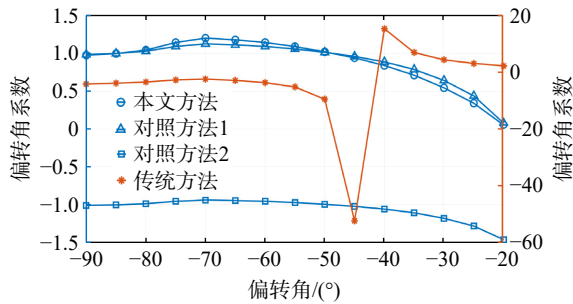


图 5 不同偏转角系数定义比较
Fig. 5 Comparison of definitions of different yaw angle coefficients

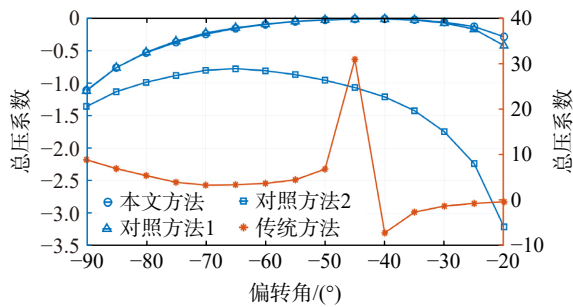


图 6 不同总压系数定义比较
Fig. 6 Comparison of definitions of different total pressure coefficients

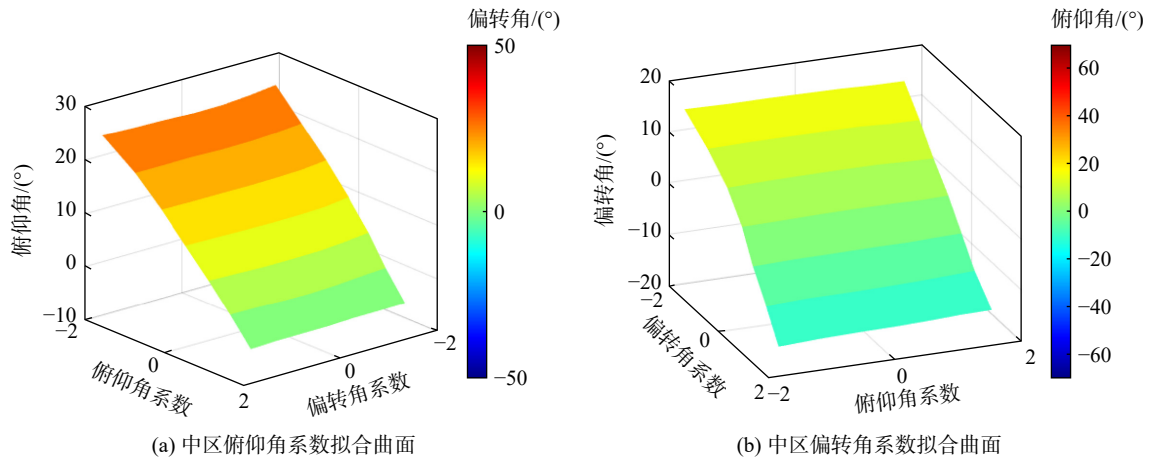


图 7 中区角度系数校准结果拟合曲面

Fig. 7 Fitting surface of calibration result of angle coefficients in mid-zone

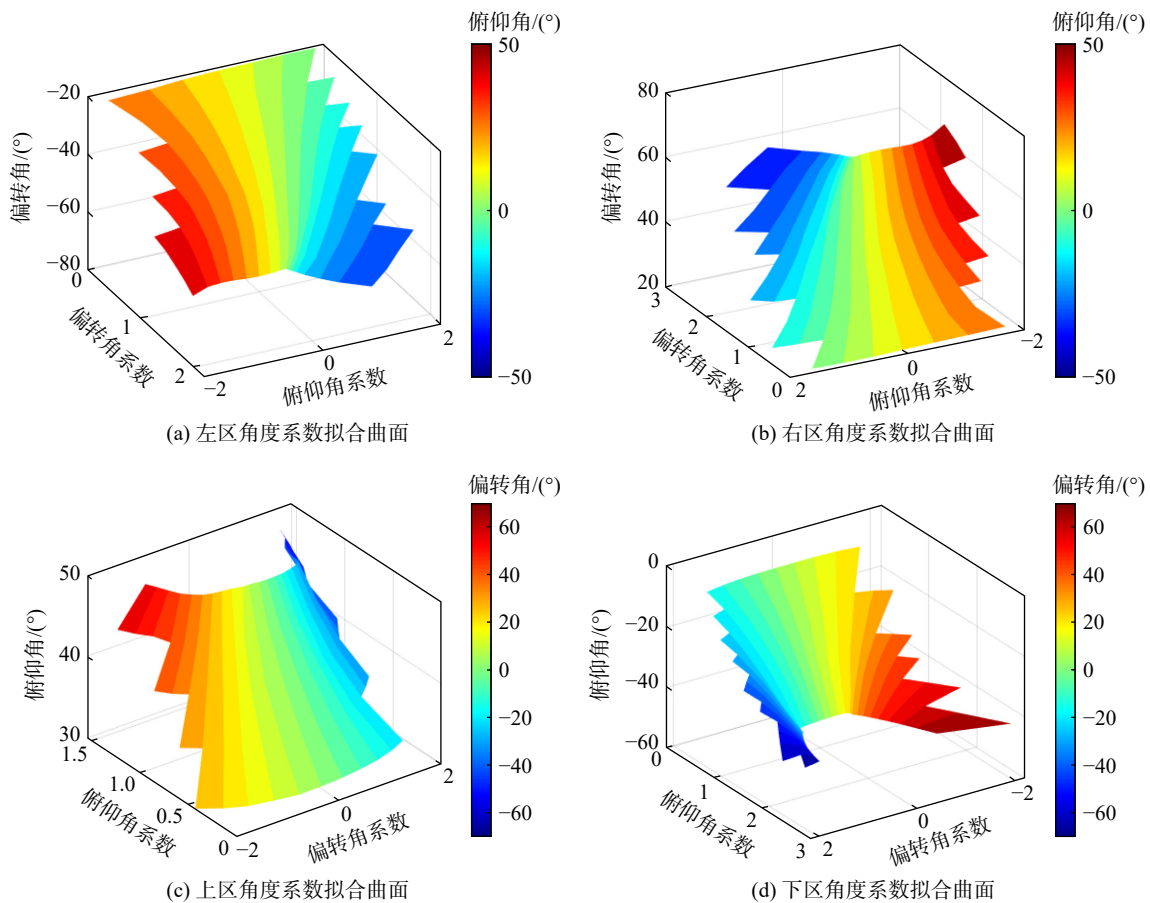


图 8 周围 4 区角度系数校准结果拟合曲面

Fig. 8 Fitting surface of calibration result of angle coefficients in surrounding zones

都有良好的对应关系。在探针实际测量时,首先对角度系数插值得到偏转角和俯仰角,之后通过对图 9 的压力系数拟合曲面进行插值,得到相应的总压系数和静压系数,最后按照各区压力系数的定义反算出气流实际的总压和静压值。需要注意的是,总压系数校准结果中,俯仰角为 -50° 时,偏转角在 -70° 和 70° 附近的总压系数校准曲面

出现明显变化,而在正向俯仰角的相同位置却没有出现这样的情况。根据图 4 中获取的探针头部最大压力分布可知,在俯仰角为 -50° 时,气流已经偏离下孔中心位置,这也使得在该角度下的校准结果偏差变大;而在 50° 俯仰角时,气流还没有到达正对上孔的位置,所以偏差较小,这主要与探针的结构设计、加工精度以及探头与支杆之间

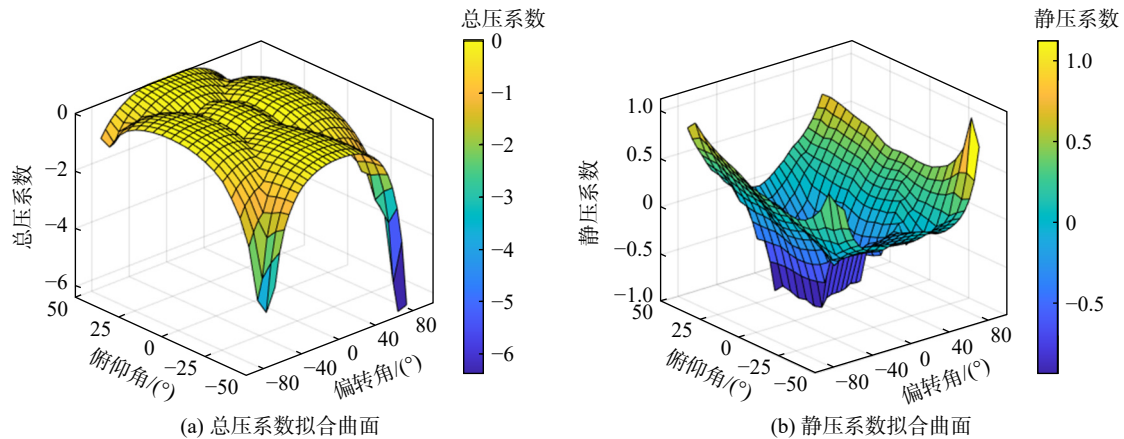


图 9 压力系数校准结果拟合曲面

Fig. 9 Fitting surface of calibration result of pressure coefficients

的距离有关。

通过以上对校准结果的分析进一步表明,各区的偏转角系数和俯仰角系数都具有良好的单调性,且静压系数也有一定的对称性。总压系数在俯仰角负向极限角度附近的校准特性相对较差,不过总体上达到了预期的效果。

3 可压缩流动中的适用性

以上拓宽五孔压力探针测量范围的方法研究是在低速情况下进行的,但在实际的叶轮机测试中,来流速度较高,需要考虑压缩性的影响。为此,在本实验室的亚声速校准风洞中开展不同马赫数下的适用性研究。该风洞采用闭式布局,由上游的离心风机提供连续气源,可实现马赫数为 0.1~0.9 自由调节,实验段直径为 260 mm。该校准风洞与低速开式风洞使用同样的一套位移机构和数据采集系统。

本次校准的马赫数为 0.3 和 0.5 两个工况,偏转角校准范围为 $\pm 70^\circ$,俯仰角受限于风洞的空间位置,最大为 $\pm 30^\circ$ 。由于俯仰角的变化范围相对较小,如果还按照图 3 所示的 5 区划分,则上、下两区的涵盖范围太小,不利于插值计算。针对这种情况,可选择性地划分流动区域,不再对上、下进行分区,只采用中、左和右孔最大值将校准范围划分为图 10 所示的 3 个区。

利用本文的拓宽方法对不同马赫数下的校准数据进行处理,获得可压缩流动中探针的有效测量范围,俯仰角为 $-15^\circ \sim 30^\circ$,偏转角为 $-65^\circ \sim 70^\circ$ 。与低速情况下相比,在可压缩流动中,校准结果存在一定的不对称性,在大角度下的校准结果受到一定影响。其中俯仰角的影响相对较大,但是在大多数的叶轮机测试中,气流的俯仰角变化

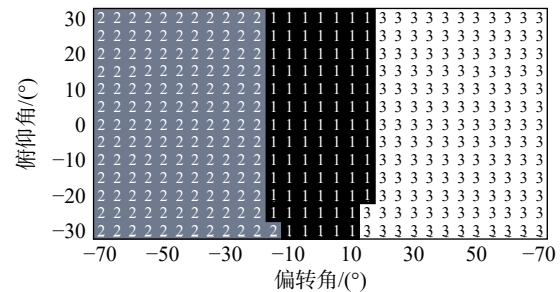


图 10 高速流动情况下的区域划分

Fig. 10 Division of zones under high-speed flow

较小,基本都在该有效范围内;偏转角测量范围仍然可以达到接近 $\pm 70^\circ$ 。

图 11 所示的是马赫数为 0.3 和 0.5 的左区校准曲线,可以看出不同马赫数下校准曲线会存在一定的差异。在小角度区域,不同马赫数之间的差异较为明显,但是在在大角度区域的差异相对较小,这也表明该方法在可压缩流动中也可以获得较好的适用效果。

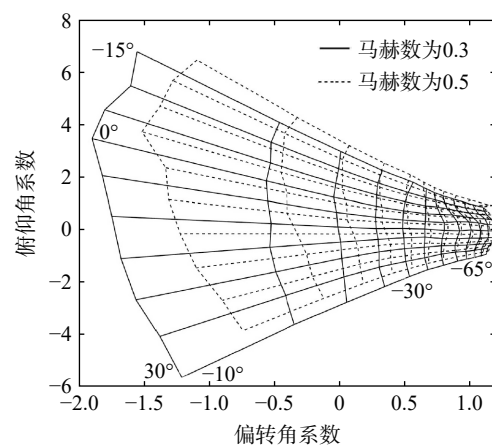


图 11 不同马赫数下的校准曲线

Fig. 11 Calibration curves at different Mach numbers

4 误差分析

为检验这种拓宽五孔压力探针测量范围方法的有效性,同时评估该方法的误差水平,在亚声速风洞中开展验证测量。在不同马赫数工况下,从各区选取部分校准点以外的角度位置进行实际测量。

将各站位采集的测量数据按照本文的这种拓宽方法进行数据处理,得到相应的测量结果,比较测量结果与实际值之间的绝对误差。部分典型位置处的误差结果如表 2 所示。表中的区域编号对应感压孔的编号,偏转角、俯仰角和马赫数为风洞的实际来流参数, σ_α 、 σ_φ 和 σ_{Ma} 为应用本拓宽方法后得出的偏转角、俯仰角和马赫数的绝对误差。

表 2 五孔压力探针拓宽方法测量误差

Table 2 Measurement error of five-hole pressure probe extending method

实验序号	区域编号	偏转角 $\alpha/(\circ)$	俯仰角 $\varphi/(\circ)$	马赫数 Ma	$\sigma_\alpha/(\circ)$	$\sigma_\varphi/(\circ)$	σ_{Ma}
1	1	-8	27	0.297	0.03	-0.21	-0.001
2	1	18	3	0.299	-0.10	-0.27	0.001
3	2	-48	27	0.298	0.18	-0.55	-0.001
4	3	68	3	0.298	0.88	-0.27	0.003
5	1	-17	3	0.48	0.36	-0.89	0.003
6	2	-57	18	0.468	0.11	-0.07	-0.001
7	1	18	26	0.47	0.43	-0.09	-0.001
8	3	48	3	0.481	0.21	0.40	-0.002

从表 2 中可以看出,使用本拓宽方法在有效范围内都可以得到相应的气动参数,而且误差水平整体较低。即使是在偏转角和俯仰角的极限位置附近,如第 4 和第 6 组数据,角度误差也都在 1° 以内。此外,在各区之间的交界位置,如第 2、5、7 组数据,误差也没有明显地增加。

对比不同马赫数下的测量数据可以发现,马赫数对误差水平的影响基本可以忽略,而绝对误差主要是在对校准数据进行插值时带来的。在马赫数为 0.3 和 0.5 时,马赫数偏差也均保持在较低水平。由于本文的重点是验证该五孔压力探针的拓宽方法,所以对插值误差不展开详细的讨论。

5 结 论

本文针对五孔压力探针在具有强三维性的叶轮机械测试中所面临的问题,提出一种拓宽五孔压力探针测量范围的方法,通过分析在低速和亚声速风洞中应用该方法得到的校准结果,并评估该方法的误差水平,得到如下结论:

1) 本文采用的分区方法可以根据实际应用时的校准范围和测量范围进行选择划分,所采用的校准系数定义也可以保证校准曲线在较宽的角度范围内都具有良好的单调性和较高的计算精度。

2) 在低速情况下,本方法可以将五孔压力探

针的偏转角测量范围拓宽到 $\pm 70^\circ$,由于受到风洞空间位置影响,本文中俯仰角只校准到 $\pm 50^\circ$,但理论上俯仰角正向测量范围还可以达到更宽。

3) 在亚声速情况下,可压缩流动对俯仰角的负向测量范围影响较大,俯仰角的有效测量范围为 $-15^\circ \sim 30^\circ$,偏转角的有效测量范围仍可以达到接近 $\pm 70^\circ$,因此该方法在可压缩流动中也可以获得较好的适用效果。

4) 从误差分析结果可以看出,本文发展的这种拓宽五孔压力探针测量范围的方法测量的误差水平整体较低,角度误差不超过 1° ,可以为一些气流角变化大的流场测试提供一种有效的测量手段。

参考文献:

- [1] REDINIOTIS O, EDU R. Recent developments in multi-hole-probe (MHP) technology[R]. Gramado, Brazil: 20th International Congress of Mechanical Engineering, 2009.
- [2] 徐诸霖,高荣钊,达兴亚.基于五孔探针的大S弯进气道总压畸变测量与评估[J].实验流体力学,2018,32(4): 78-86.
XU Zhulin, GAO Rongzhao, DA Xingya. Assessment and measurement of total pressure distortion based on five-hole-probe for S-shaped inlet[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2018, 32(4): 78-86. (in Chinese)
- [3] GILARRANZ J L, RANZ A J, KOPKO J A, et al. On the use of five-hole probes in the testing of Industrial centrifugal compressors [J]. Journal of Turbomachinery, 2005, 127(1): 91-106.
- [4] 罗钊,胡骏,严伟,等.压气机静子通道内的流场测量[J].航空动力学报,2013,28(11): 2510-2516.

- LUO Ju, HU Jun, YAN Wei, et al. Measurement of flow field in compressor stator passages[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2013, 28(11): 2510-2516. (in Chinese)
- [5] SITARAM N. Experimental investigation of tip clearance effects on flow field in an annular turbine rotor cascade[J]. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 2002, 9(12): 424-431.
- [6] MA Hongwei, ZHANG Jun, ZHANG Jinghui. Experimental study of effects of grooved tip clearances on the flow field in a compressor cascade passage[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2012, 134(5): 051012.1-051012.12.
- [7] RAJ R, GANESAN V. Experimental study of recirculating flows induced by vane swirler[J]. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 2009, 16(1): 14-22.
- [8] TAMIGNIAUX T L, OATES G C. Effect of a nearby solid surface on a five-hole pressure probe[J]. *AIAA Journal*, 1986, 24(2): 335-337.
- [9] DOMINY R G, HODSON H P. An investigation of factors influencing the calibration of 5-hole probes for 3-D flow measurements[J]. *Journal of Turbomachinery*, 1992, 115(3): 315-319.
- [10] SCHAFFER C, SPECK K, GUMMER V. Numerical calibration and investigation of the influence of Reynolds number on measurements with five-hole probes in compressible flows[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2022, 144(9): 091010.1-091010.10.
- [11] PASSMANN M, WIESCHE S, POVEY T, et al. Effect of Reynolds number on five-hole probe performance: experimental study of the open-access Oxford probe[R]. *Journal of Turbomachinery*, 2021, 143(9): 091003.1-091003.9.
- [12] TOWN J, AKTURK A, CAMCI C. Total pressure correction of a sub-miniature five-hole probe in areas of pressure gradients[R]. Copenhagen, Denmark: ASME Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition, 2012.
- [13] SITARAM N, SRIKANTH K. Effect of chamfer angle on the calibration curves of five hole probes[J]. *International Journal of Rotating Machinery*, 2014, 2014: 704315.1-704315.11.
- [14] HALL B F, POVEY T. The Oxford probe: an open access five-hole probe for aerodynamic measurements[J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(3): 035004.1-035004.12.
- [15] 马宏伟, 蒋浩康. 速度梯度、近壁效应和Re数对压力探针测量误差的影响[J]. *航空动力学报*, 1995, 10(4): 22-27.
- MA Hongwei, JIANG Haokang. Effects of velocity gradient, wall-proximity and Reynolds number on measuring errors of pressure probes[J]. *Journal of Aerospace Power*, 1995, 10(4): 22-27. (in Chinese)
- [16] 岳国强, 韩万金, 芦文才, 等. 五孔探针实验数据处理的线性插值法[J]. *热能动力工程*, 2004, 19(5): 526-529.
- YUE Guoqiang, HAN Wanjin, LU Wencai, et al. Linear interpolation method for experimental data processing of five-hole probes[J]. *Journal of Engineering for Thermal, Energy and Power*, 2004, 19(5): 526-529. (in Chinese)
- [17] 廖安文, 孔祥林. 基于改进最小二乘法的五孔探针数据处理方法[J]. *东方汽轮机*, 2015(1): 11-15.
- LIAO Anwen, KONG Xianglin. Data processing methods of improved least square method for five-hole probe[J]. *Dongfang Turbine*, 2015(1): 11-15. (in Chinese)
- [18] 史远鹏, 王佳璐, 陆华伟, 等. 亚声速条件下五孔探针非线性插值计算方法研究[J]. *风机技术*, 2020, 62(4): 36-45.
- SHI Yuanpeng, WANG Jialu, LU Weihua, et al. Investigation of nonlinear interpolation calculation method of five-hole probe under subsonic velocity[J]. *Chinese Journal of Turbomachinery*, 2020, 62(4): 36-45. (in Chinese)
- [19] 田维康, 金志光, 柯玉祥, 等. 基于拉丁超立方抽样的五孔探针标定方法[J]. *航空动力学报*, 2021, 36(5): 1052-1059.
- TIAN Weikang, JIN Zhiguang, KE Yuxiang. Five-hole probe calibration method based on Latin hypercube sampling[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2021, 36(5): 1052-1059. (in Chinese)
- [20] 王洪伟, 陈小龙. 五孔探针的神经网络处理方法[J]. *航空动力学报*, 2010, 25(2): 417-423.
- WANG Hongwei, CHEN Xiaolong. Five-hole probe and its neural network algorithm[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2010, 25(2): 417-423. (in Chinese)
- [21] 张晓东, 姜正礼, 赵旺东. 五孔探针在涡轮导向器出口流场测量中的应用[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2010, 23(4): 44-48.
- ZHANG Xiaodong, JIANG Zhengli, ZHAO Wangdong. Application of five-hole probe in measurement of turbine nozzle outlet flowfield[J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2010, 23(4): 44-48. (in Chinese)
- [22] PISASALE A J, AHMED N A. Theoretical calibration for highly three-dimensional low-speed flows of a five-hole probe[J]. *Measurement Science and Technology*, 2002, 13(7): 1100-1107.
- [23] PISASALE A J, AHMED N A. A novel method for extending the calibration range of five-hole probe for highly three-dimensional flows[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2002, 13(1): 23-30.
- [24] 吴吉昌, 李成勤, 朱俊强. 七孔探针及其在叶栅二次流动测量中的应用[J]. *航空动力学报*, 2011, 26(8): 1879-1886.
- WU Jichang, LI Chengqin, ZHU Junqiang. Seven-hole probe and its application in the secondary flow for a high-load compressor cascade[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2011, 26(8): 1879-1886. (in Chinese)
- [25] 沈天荣, 刘海涌, 刘松龄, 等. 风洞七孔压力探针的校准技术[J]. *风机技术*, 2006(4): 15-19.
- SHEN Tianrong, LIU Haiyong, LIU Songling, et al. Calibration technology of seven-hole pressure probe for wind tunnel[J]. *Chinese Journal of Turbomachinery*, 2006(4): 15-19. (in Chinese)
- [26] 马宏伟, 项乐. 探针支杆对压气机转子性能及流场影响的数值模拟研究[J]. *推进技术*, 2016, 37(12): 2288-2295.
- MA Hongwei, XIANG Le. Numerical investigation of effects of probe support on performance and flow field of compressor rotor[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(12): 2288-2295. (in Chinese)

(编辑: 秦理曼)