

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.04.010

基于变马赫数的五孔探针三维插值方法

陆华伟¹, 路子平¹, 平梓昕¹, 郭爽²

(1. 大连海事大学船舶与海洋工程学院, 大连, 116026; 2. 大连理工大学能源与动力学院, 大连, 116024)

摘要: 探讨了五孔探针气动数据的插值方法, 为提高插值精度, 开发了基于传统线性插值法的三维线性插值法。该方法把同一探针在不同马赫数下的校准图形成三维数据库, 将实验数据通过三维图进行插值。并使用改进前后的两种插值方法分别对校准风洞测得的数据进行整理, 对比结果证明: 在实验工况连续变化的情况下, 三维线性插值法在插值精度上要优于传统线性插值法。特别是在来流马赫数变化较大时, 该方法可以改善单一校准文件处理造成的数据精度问题, 可用于自动化流场采集系统, 为流场高速高精度采集奠定基础。

关键词: 亚声速流场; 五孔探针; 三维插值法; 标定实验; 流场测试

中图分类号: TK313 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2020)04-0598-08

Interpolation Method of Five-Hole Probe Based on Variable Mach Number

LU Huawei¹, LU Ziping¹, PING Zixin¹, GUO Shuang²

(1. Naval Architecture and Ocean Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian, 116026, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, 116024, China)

Abstract: In order to improve the interpolation accuracy, the five-hole probe aerodynamic data interpolation method is discussed and a three-dimensional linear interpolation method based on traditional linear interpolation method is developed. The calibration graph of the same probe under different Mach numbers is formed into a three-dimensional database in this method, and the experimental data are interpolated through one three-dimensional graph. The two interpolation methods before and after the improvement are used to deal with the experimental data of a calibration wind tunnel respectively. The comparison results show that the three-dimensional linear interpolation method is superior to the traditional one on the interpolation precision under the condition of continuous changes in the experimental condition, especially when the incoming Mach number changes sharply. This method can improve the data accuracy compared with that using a single calibration file, and can be used in automatic flow field measurement system featured with high-speed and high-precision data acquisition.

Key words: subsonic flow field; five-hole probe; three-dimensional interpolation method; calibration experiment; flow field measurement

测量流场的方法主要有气动探针^[1]、激光多普勒测速仪(Laser Doppler velocimetry, LDV)^[2]、粒子图像测速仪(Particle image velocimetry, PIV)^[3]和热线风速仪等^[4]。LDV通过激光探头得到示踪

粒子的多普勒信号,再根据示踪粒子的多普勒频率与速度之间的关系计算出速度,但是设备昂贵,且在工程上的应用受到限制,主要应用于实验室;PIV具有无接触、可同时测多点和瞬态的特点,能

基金项目: 国家自然科学基金(51676023;51506022)资助项目;中央高校基本科研业务费专项资金(DUT19LK10)资助项目。

收稿日期: 2019-12-17; **修订日期:** 2020-01-10

通信作者: 陆华伟,男,教授,博士生导师, E-mail:hwlu66@dlmu.edu.cn。

引用格式: 陆华伟,路子平,平梓昕,等. 基于变马赫数的五孔探针三维插值方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(4):598-605. LU Huawei, LU Ziping, PING Zixin, et al. Interpolation method of five-hole probe based on variable Mach number[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(4):598-605.

同时记录大量的速度分布信息,提供丰富的空间参数和流场特性。缺点是跟踪粒子发生器和激光发生器不符合测量大型空间流动场的标准,而且设备费用昂贵。热线风速仪测得并非是一个点上的流场数据,而是一个平面内的平均值;气动探针是测量流场的最传统办法,可以准确测得流场数据,具有结构紧凑和测量角度精度高等优点,其在实验室和工程上受到了广泛的应用^[5]。气动探针分为三孔探针、五孔探针和七孔探针等。其中三孔探针用于测量二维流场中的气流参数^[6];五孔探针的最大可测气流角为±40°,用于测量三维流场中的气流参数^[7];七孔探针的最大可测气流角为±80°,但制造精度较高,校正数据点多,工作量大^[8]。由于栅后是三维流场,且±40°的最大可测气流角可以满足测量需求,所以本文研究的对象是五孔探针。

使用五孔探针测量流场有 3 种方法:(1)对向测量法;(2)半对向测量法;(3)非对向测量法。对向测量法比较直观,但是需要较多时间寻找 1,3 孔,4,5 孔的压力平衡;半对向测量法只需要寻找一对压力孔的压力平衡,所需数据处理量较少;非对向测量法在测量流场参数时根据 5 个压力孔的值,对照该探针的校准数据,可以插值计算出测量点的俯仰角、偏航角、总压和静压,这种方法的使用最为普遍,但是数据处理量较大,需要较为准确的插值方法^[9]。由于每支探针的头部 5 孔并不严格对称,这就导致了每支探针的气动特性都不相同,所以每支探针在使用前都要经过标定。

三孔探针在使用传统的插值方法处理数据时,其最大可测气流角为±18°^[10],为了拓展三孔探针的应用范围,陈武等进行了在大来流角度下使用三孔探针测试的研究,将三孔探针的适应来流角度的范围扩大到±50°左右^[11]。五孔探针最初应用于风洞实验中的流场测量。它的起源可以追溯到 20 世纪 70 年代的“Pressure-probe methods for determining wind speed and flow direction”^[12]。在国内,陈浮等提出了五孔探针的线性插值法,并解决了校准曲线存在奇异点的问题^[13]。除线性插值外,亦可使用最小二乘法或多项式对曲线进行拟合^[14-17]。然而使用最小二乘法拟合特性较差的标定曲线时,将对某些校准点的参数进行较大的改动使曲线失真严重。在使用五孔探针采集流场参数时,插值方法的选择对实验结果有较大的影响^[18]。本文对线性插值法的误差进行了理论研究,并在此基础上提出了可以缩小误差的三维线性插值法。

1 探针插值原理

1.1 五孔探针结构及标定方法

五孔探针按照头部形状不同可以分为圆锥形和球形等,圆锥形探针的头部角度多为 60°,本文的

研究以圆锥形头部为例。如图 1 所示,五孔探针多被设计为“L”形,即探针头部与探针杆的夹角为 90°。这样设计便于针夹具的摆放,气流不会被夹具干扰,且在改变探针角度时,头部测点的位置不会改变。由于探针属于介入性测量,过大的头部尺寸会干扰流场,过小的孔径又容易使探针被流场里的灰尘堵塞,国内的探针多将头部设计成外径 3~4 mm,内径 1 mm^[14]。

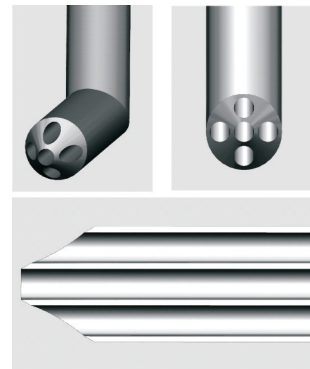


图 1 五孔探针结构

Fig.1 Structure of five-hole probe

首先定义以下系数^[19]

$$K_\alpha = \frac{P_4 - P_5}{P_2 - \bar{P}} \quad (1)$$

$$K_\beta = \frac{P_3 - P_1}{P_2 - \bar{P}} \quad (2)$$

$$C_{P_t} = \frac{P_2 - P_1}{P_2 - \bar{P}} \quad (3)$$

$$C_{P_s} = \frac{\bar{P} - P_s}{P_2 - \bar{P}} \quad (4)$$

$$\bar{P} = \frac{P_1 + P_3 + P_4 + P_5}{4} \quad (5)$$

式中: K_α 为 α 方向校准系数; K_β 为 β 方向校准系数; α 与 β 分别为偏航角与俯仰角; C_{P_t} 为总压系数; C_{P_s} 为静压系数; $P_1 \sim P_5$ 为 1~5 孔的压力值; P_t 为总压; P_s 为静压; \bar{P} 为孔 1、孔 3、孔 4 和孔 5 压力平均值^[18]。探针头部的 5 个感压孔会分别采集到不同的压力。已知来流角度、总压和静压,利用这 5 个压力值,通过式(1)~(5)可以计算出对应来流角度下的 $K_\alpha, K_\beta, C_{P_t}, C_{P_s}$ 。标定文件将各校准参数与 α, β 建立起关系,以校准曲线的形式呈现出来,在校准曲线中进行插值得出流场参数。五孔编号与来流角度定义如图 2 所示。

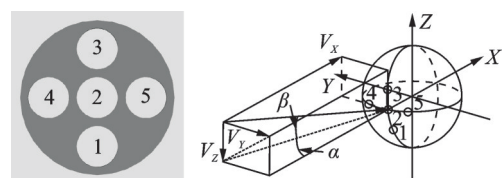


图 2 五孔编号与来流角度定义

Fig.2 Definition of five-hole number and angle

1.2 线性插值法

线性插值过程如图3所示。文献[13]详细地介绍了线性插值法的插值过程:测量流场时,先由5个感压孔的压力值计算 K_α, K_β ;在校准曲线中找到点 (K_α, K_β) 的位置,计算出点 (K_α, K_β) 与该四边形各边之间的距离,用线性插值法插值得到测点气流角 α, β ;根据 α, β 的值,由总压标定曲线和静压标定曲线得到测点的 C_{P_t} 和 C_{P_s} 值。最后根据相应的计算公式得到总压、静压和测点的速度矢量。若探针校准曲线规则,样条插值的误差接近线性插值。对于校准曲线较差的探针,线性插值可以保证插值的精度,而不改变探头的特性曲线,适用范围更广泛^[18]。

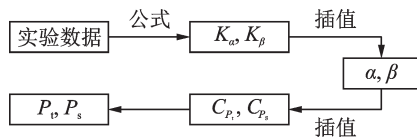


图3 线性插值过程

Fig.3 Flow diagram of linear interpolation

在实际的流场测量中,探针前的来流速度并不恒定,不同测量点上来流速度的不同,会导致插值结果偏离真实值,结果的偏差随来流速度偏差的变大而变大。对于不同的流场,探针需要在对应的来流速度下进行标定,这增大了标定工作量。为解决这个问题本文提出了三维线性插值法。

1.3 三维线性插值法

该方法将每个校准系数曲线以马赫数为Z轴排列,将来流角度相同的校准点依次连接,如图4所示, Ma_n 为通过迭代计算获得的实际马赫数,该方法的具体插值流程如图5所示。

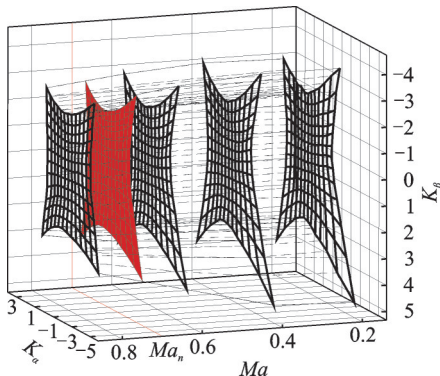


图4 三维校准图

Fig.4 Map of three-dimensional calibration

使用该插值方法时,方向校准系数 K_α 与 K_β 由式(1)–(2)计算得出,1.2节详细给出了线性插值法的步骤,使用校准图最右端的校准曲线对初始值 Ma_0 赋值,判断框内的阈值 V 作为循环终止条件可以进行适当的调整。

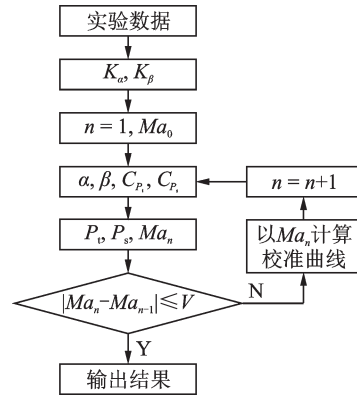


图5 三维插值流程图

Fig.5 Flow diagram of three-dimensional interpolation

在处理一组数据时,首先使用校准图最右端的校准曲线进行线性插值,记录计算的马赫数 Ma_1 。若 $|Ma_1 - Ma_0| \leq V$,则本次结果作为最终结果输出;若 $|Ma_1 - Ma_0| > V$,则插值计算。当 $n \geq 2$ 时,将第 $n-1$ 次的计算结果 Ma_{n-1} 作为第 n 次循环的校准马赫数,并在校准图上计算出1组如图6所示的校准曲线。使用该校准曲线对初始数据进行线性插值,其结果马赫数记为 Ma_n 。若 $|Ma_n - Ma_{n-1}| \leq V$,则本次结果作为最终结果输出;若 $|Ma_n - Ma_{n-1}| > V$,则须重复上述过程直至结果收敛。

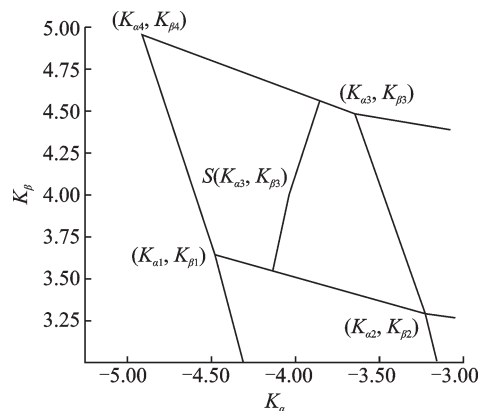


图6 插值单元格

Fig.6 Interpolation cell

通过此方法插值得校准曲线上偏航角与俯仰角的计算公式如下所示,以 β 角为例。

$$k_{12} = \frac{K_{\beta 1} - K_{\beta 2}}{K_{\alpha 1} - K_{\alpha 1}} \quad k_{34} = \frac{K_{\beta 3} - K_{\beta 4}}{K_{\alpha 3} - K_{\alpha 4}}$$

$$d_{12} = \frac{|k_{12} K_\alpha - K_\beta + K_{\beta 1} - k_{12} K_{\alpha 1}|}{\sqrt{1 + (k_{12})^2}}$$

$$d_{34} = \frac{|k_{34} K_\alpha - K_\beta + K_{\beta 3} - k_{34} K_{\alpha 3}|}{\sqrt{1 + (k_{34})^2}}$$

$$\beta = \frac{d_{12}}{d_{12} + d_{34}} (\beta_3 - \beta_2) + \beta_2 \tag{6}$$

该方法与线性插值法的计算区别只在校准曲线的不同上,其插值精度与所提供不同马赫数下的校准曲线数量密切相关,校准曲线排列越密,则计算得到的校准曲线越接近于真实曲线,插值精度越高。此方法适用于大部分工程测量技术领域,插值精度高于以往的线性插值法。为了验证三维线性插值算法的可行性,本文进行了实验验证。

本方法易于理解,迭代的方法方便应用于编程。本文使用 Visual Basic 对该算法进行了编程。本文编写的程序可用于文献[9]讨论的自动测试系统对数据进行实时采集。使用三维线性插值法,只需将探针进行几种来流速度下的标定,就可以较准确地进行大多数来流速度下的流场测量。

2 结果与讨论

2.1 标定实验

实验在大连海事大学标定风洞进行。标定探针的来流马赫数分别为 0.2, 0.4, 0.6, 0.8。改变放风阀开度可以调节标定风洞出口马赫数,调节旁路阀开度可以微调出口马赫数。通过自动测试系统对步进电机发送指令,可以实现对坐标架的精确控制。在每个来流马赫数下,探针扫过的角度为 $\pm 30^\circ$, 角度间隔为 5° , 采集点为 169 个, 采取的角度分别为 $\alpha = \pm 30^\circ, \pm 25^\circ, \pm 20^\circ, \pm 15^\circ, \pm 10^\circ, \pm 5^\circ, 0^\circ$; $\beta = \pm 30^\circ, \pm 25^\circ, \pm 20^\circ, \pm 15^\circ, \pm 10^\circ, \pm 5^\circ, 0^\circ$ 。先将 β 角转至最小值, α 角由小至大逐一扫过, 然后将 β 角增大 5° , α 角重复上述步骤, 直至 13×13 个点的数据全部采集完毕。根据所采集到的数据, 计算若干来流角度下的 4 个校准系数。将校准系数绘制成对应的探针特性曲线, 如图 7 所示。理论上标定

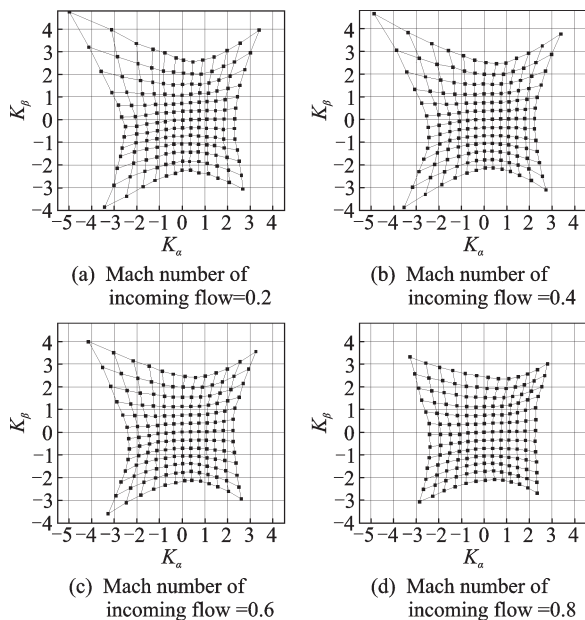


图 7 校准系数曲线

Fig.7 Curves of calibration coefficient

马赫数间隔越小,插值结果越准确,但由于时间、设备和人员等成本的限制,本次标定在 0.2~0.8 上等间距选择了 4 个马赫数。

据图 7 可知, α, β 转过角度区间在 -30° 至 30° 以内时, 探针特性曲线比较规则, 在 -20° 至 20° 以内, 特性曲线的形状趋近于正方形, 这说明探针加工质量较好。本次实验使用同一支五孔探针、总压探针与若干压力传感器、热电偶在来流马赫数依次为 0.3, 0.5, 0.7 时对若干角度下五孔压力、来流总压、来流静压、来流总温、大气压力以及大气温度等进行了采集, 将这 3 组数据作为真值, 便于检验两种插值方法的误差。

2.2 误差对比

在来流马赫数为 0.3, 0.5, 0.7 的情况下, 分别使用两种插值方法计算流场参数。由于实验对每个采集点的来流角度、来流总压和来流静压都做了记录, 可将其作为真实值与插值计算结果进行比较, 便于计算误差。将每组计算结果分别与真实值进行对比, 计算相对误差, 并整理成图 8 所示的云图, 以来流马赫数等于 0.5 时的总压误差为例。

图 8 显示了所有角度上总压的相对误差, 颜色由蓝到红表示误差越来越大。通过比较, 由于图 8

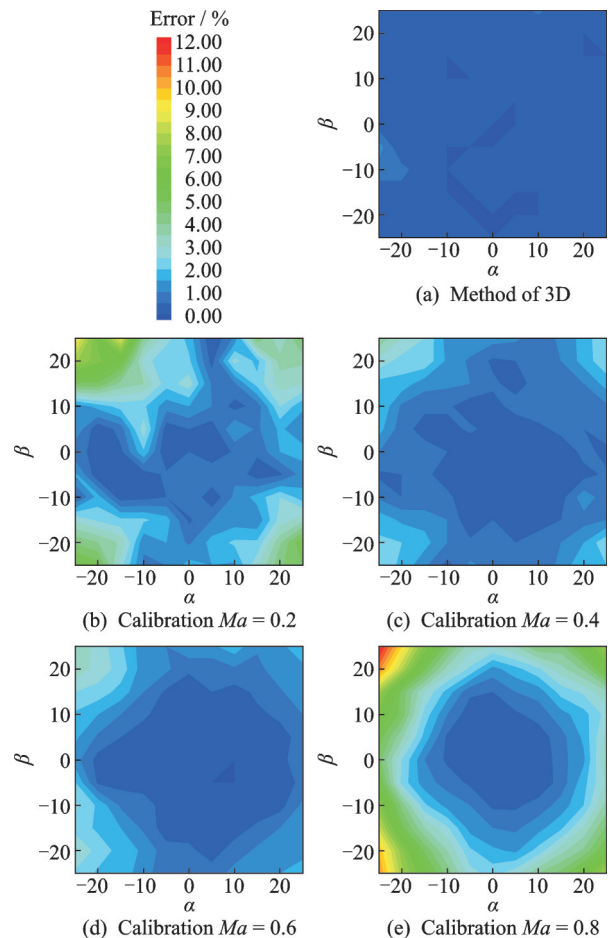


图 8 总压误差云图

Fig.8 Error nephogram of total pressure

(c)和(d)两个结果的标定数据马赫数靠近来流马赫数0.5,故相对误差偏小;由于图8(b)和(e)两个结果的标定数据马赫数远离来流马赫数0.5,故相对误差比图8(c)和(d)更大。使用三维插值计算的结果误差最小,在大部分转角下都可以保持误差在0.8%以内,采用线性插值法计算的结果误差较大,在大气流转角下的误差更大。

将总压、马赫数和角度误差进行整理,绘制成如图9所示的柱状图。

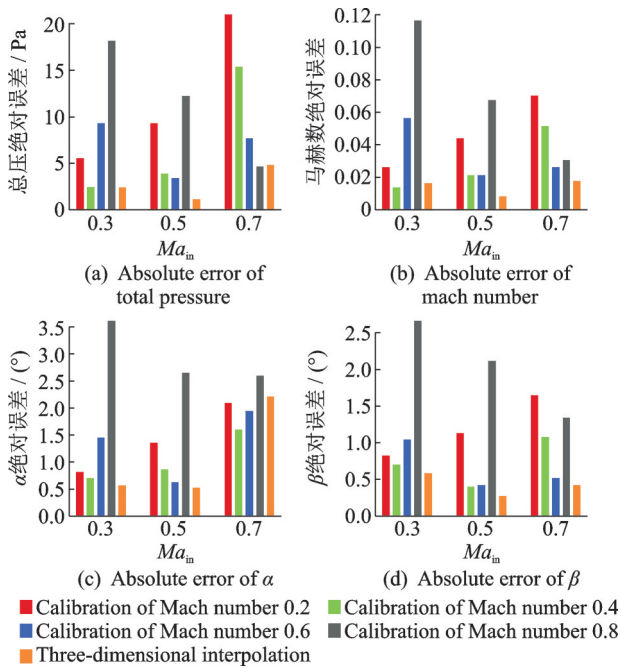


图9 偏差柱状图

Fig.9 Deviation histogram

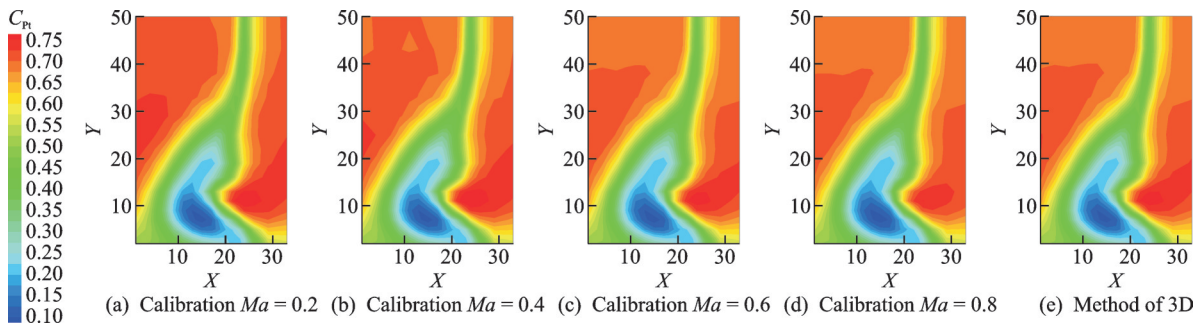


图10 总压系数比较

Fig.10 Comparisons of total pressure coefficient

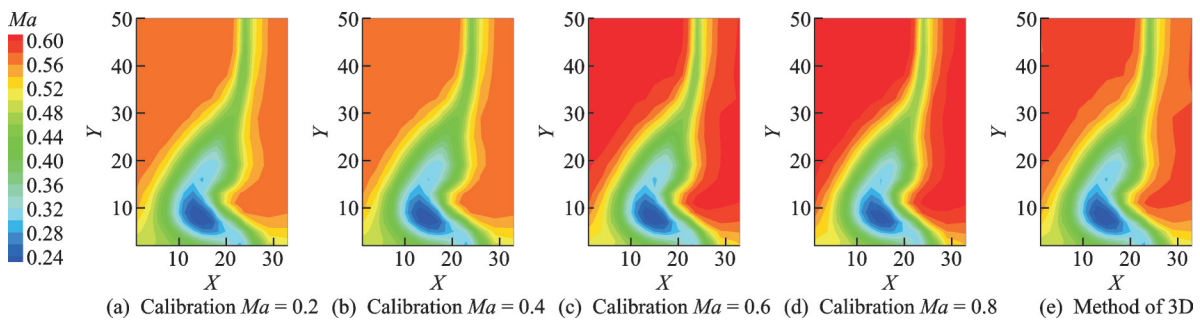


图11 马赫数比较

Fig.11 Comparison of mach number

图9中各项参数的误差均由校准风洞所采集到的数据作为真值计算得到。结果显示,当校准曲线的马赫数与来流马赫数接近时,误差较小,随着两者差距变大,误差也越来越大,原因是两个马赫数不完全相等。在若干来流情况下对探针逐一进行校准的成本高,而使用三维线性插值法可以在减小误差的同时保持低成本。

2.3 流场测试结果

本文分别使用两种插值方法对某次压气机叶栅出口流场的出口总压、马赫数、气流 α 角和气流 β 角进行处理。图10—13中,(a—d)分别为用标定 $Ma=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ 处理的结果云图,图10—13(e)为用三维插值处理的结果云图,所使用的标定马赫数与前者相同。图14为4组结果的节距平均对比。

图10为出口流场总压系数对比。由于出口流场主流区马赫数介于0.4与0.6之间,因此主流区的各项参数介于采用0.4和0.6马赫数校准曲线计算所得结果之间(图10(b)和(c))。2.2节中已证明三维插值可提高计算精度,结合图14(a)可以发现,总压误差较大的区域主要集中在10~20 mm叶高(即对应相对叶高 $\bar{h}=0.1\sim 0.2$ 区域)。产生误差的原因是由标定马赫数与测点马赫数不一致所导致,而总压测量误差则会进一步影响测点马赫数的计算。图11是出口马赫数对比,云图显示采用三维插值方法计算获得的主流区的马赫数(图11(e))介于采用0.4和0.6校准曲线计算获得的结果

之间(图 11(b)和(c)), 同样根据图 14(b)的误差分析可知, 角区与主流区中均存在误差, 且沿叶高方向误差逐渐增大。线性插值法的误差主要体现在主流区中, 这是由于马赫数是简介测量值, 其误差受总压、静压等参数误差叠加影响, 所以它与总压的误差区域存在相似性。图 12 与图 13 是出口流场气流角对比, 三维插值结果同样居于 0.4 与 0.6

马赫数线性插值方法所得结果之间。结合图 14(c)和(d)可知, 误差主要体现在 β 方向上, 且沿叶高方向, 误差始终存在。产生误差的原因也是由标定数据的马赫数与测点马赫数不一致而导致。需要指出的是, 出口气流角的测量误差会影响下一级叶栅入口冲角的判断, 因此亦有可能进一步对基于实验结果的冲角-叶型损失关联分析造成影响^[20]。

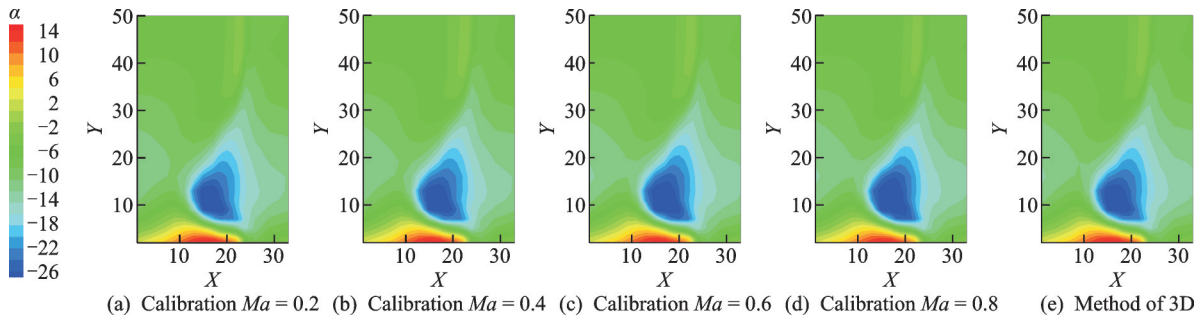


图 12 出口流场 α 角比较

Fig.12 Angular α comparison of outlet flow field

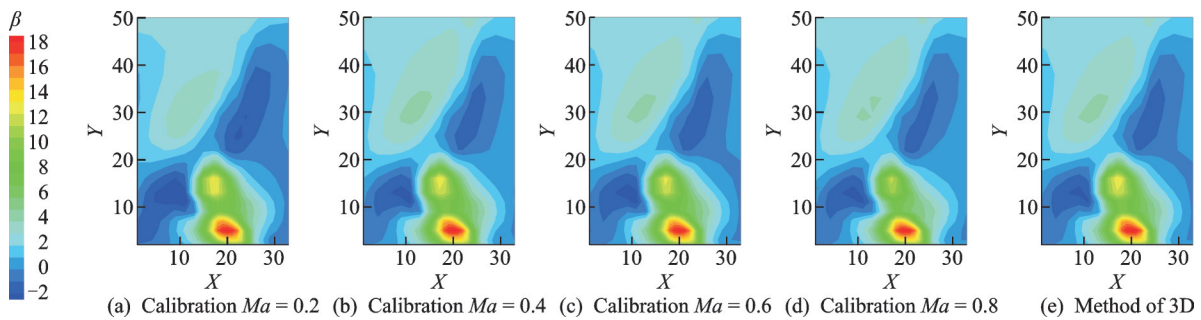


图 13 出口流场 β 角比较

Fig.13 Angular β comparison of outlet flow field

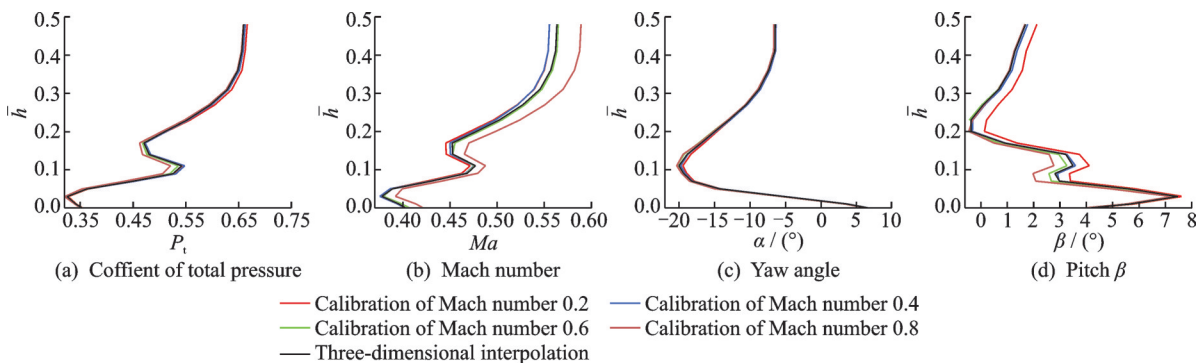


图 14 节距平均比较

Fig.14 Comparison of average pitch

上述参数的插值误差过大会影响实验结果的合理性。使用三维插值法可以提高插值精度, 确保实验结果的合理性。

3 结 论

本文通过理论分析和实验验证的方法, 对五孔探针三维线性插值方法的适用性和插值精度进行了研究, 得到以下结论:

(1) 本文所采用的三维线性插值方法, 在原有的二维插值基础上增加马赫数维度, 通过理论分析和实验验证, 表明该方法较常规的二维插值方法更为可靠。

(2) 通过标定风洞测试验证, 三维插值方法与二维插值方法相比在不同马赫数下具有更小的综合误差, 当被测截面实际马赫数变化较大时可以提高实验结果的精度。

(3)线性插值法的误差随着测点马赫数与标定数据马赫数差距的增大而增大,使用三维插值,只需对探针进行一次若干来流马赫数下的标定,即可对实验数据进行更准确的插值计算。对于不同的来流情况,不需对探针重新标定,可节约人力、物力与时间成本。

参考文献:

- [1] 王涛,李飞行.五孔探针结构和校准[J].现代机械,2012,4:19-22.
WANG Tao, LI Feixing. Construction and calibration of five-hole probe[J]. Modern Machinery, 2012, 4: 19-22.
- [2] 沈熊.激光多普勒测速技术及应用[M].北京:清华大学出版社,2004.
SHEN Xiong. Laser Doppler velocimetry technology and its application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [3] 王彦植,陈方,刘洪,等.高速流动PIV示踪粒子跟随响应特性实验研究[J].实验流体力学,2018,32(3):94-99.
WANG Yanzhi, CHEN Fang, LIU Hong, et al. Experimental investigation on response characteristics of PIV tracer particles in high speed flow[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2018, 32(3): 94-99.
- [4] 李敏毅,甘妙昌,马思龙.热线风速仪测量原理简介[C]//压力计量服务和测试技术研讨会.北京:中国计量测试学会,2003:209-214.
LI Minyi, GAN Miaochang, MA Silong. Brief introduction of measurement principle of hot wire anemometer [C]//Proceedings of Symposium on Pressure Measurement Services and Testing Technology. Beijing: China Society of Metrology and Testing, 2003: 209-214.
- [5] 李少泽.气动探针在飞行测控中的应用[D].南京:南京航空航天大学,2016.
LI Shaoze. The application of seven-hole probe in the flight test[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [6] 高倩.三孔探针测量预旋器出口流场的试验研究[C]//第六届中国航空学会青年科技论坛文集(下册).北京:中国航空学会,2014:5.
GAO Qian. Experimental investigation on the three-hole probe to the pre-swirl flow [C]//Proceedings of Collected Works of the Sixth China Aviation Society Youth Science and Technology Forum (Volume 2). Beijing: China Aviation Society, 2014: 5.
- [7] 沈文治.测量大流动角七孔锥形探针的测量原理及校正方法[J].流体工程,1989(2):5-12,65.
SHEN Wenzhi. Measurement principle and correction method of seven-hole conical probe for measuring large flow angle[J]. Fluid Engineering, 1989(2): 5-12,65.
- [8] 白亚磊,明晓,丁涛.七孔探针可压缩流场测量研究[J].实验力学,2010,25(6):667-672.
BAI Yalei, MING Xiao, DING Tao. Compressible flow field measurement with seven-hole probe[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, 25(6): 667-672.
- [9] 钟兢军,宋彦萍,芦文才,等.五孔探针非对向测量法在风洞自动测试系统的应用[J].哈尔滨工业大学学报,1997,29(3):61-64.
ZHONG Jingjun, SONG Yanping, LU Wencai, et al. Application of five-hole probe non-directional measurement in wind tunnel automatic test system[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1997, 29(3): 61-64.
- [10] 王蕾.七孔探针风洞实验技术研究[D].南京:南京理工大学,2010.
WANG Lei. Research on wind tunnel test technology of seven hole probe[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2010.
- [11] 陈武,侯安平,郑新前,等.在大分离区内使用三孔探针测试的探索[J].流体力学实验与测量,2003(3):84-87,92.
CHEN Wu, HOU Anping, ZHENG Xinqian, et al. Exploration of using three hole probe to test in large separation area[J]. Hydrodynamics Experiment and Measurement, 2003(3): 84-87,92.
- [12] BRYER D W, PANKHURST R C. Pressure-probe methods for determining wind speed and flow direction [M]. London: Her Majesty's Stationary Office, 1971.
- [13] 陈浮,宋彦萍,陆华伟.非对向法和混合编程在叶栅流场测量中的应用[J].哈尔滨工业大学学报,2003,35(12):1426-1428.
CHEN Fu, SONG Yanping, LU Huawei. Application of non-counter mode method and mixed language programming in measurement of cascade flow field[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 35(12): 1426-1428.
- [14] 姜健,屈霖云,赵海刚.五孔探针的设计制造及标定方法研究[J].工程与试验,2014,54(1):59-63.
JIANG Jian, QU Linyun, ZHAO Haigang. Study on development and calibration method for five-hole probe [J]. Engineering and Test, 2014, 54(1): 59-63.
- [15] 李志强,李正强.适用复杂流场五孔探针的研制与校准[J].黑龙江科技信息,2008(5):46-47.
LI Zhiqiang, LI Zhengqiang. Development and calibration of five-hole probe for complex flow field[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2008

- (5): 46-47.
- [16] 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 Steam Turbine, 2015(1): 11-15.
- [17] 林峰,张元,彭成一. 五孔探针的标定技术[J]. 航空动力学报, 1990(3): 236-238, 285.
LIN Feng, ZHANG Yuan, PENG Chengyi. Calibration technology of five-hole probe[J]. Journal of Aerospace Power, 1990(3): 236-238, 285.
- [18] 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): 527-529.
YUE Guoqiang, HAN Wanjin, LU Wencai, et al. Linear interpolation method for data processing of five-hole probe experiment[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2004, 19(5): 527-529.
- [19] TREASTER A L, YOCUM A M. The calibration and application of five hole probes[J]. ISA Transaction, 1979, 18(3): 23-24, 64.
- [20] 张红莲,康磊,李海宾,等. 某涡轮静叶环形叶栅气动性能的试验研究[J]. 热能动力工程, 2019, 34(6): 37-46.
ZHANG Honglian, KANG Lei, LI Haibin, et al. Experiment study on aerodynamic performance of a turbine stator annular cascade[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(6): 37-46.

(编辑:刘彦东)