

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2017.02.04

超音速条件下基于 CFD 的压力 探针校准特性数值模拟

赵彬, 赵俭

(中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 对超音速条件下倒角型总压探针的校准特性进行了数值模拟研究, 并对影响校准特性的关键影响量进行了分析, 得到了总压系数随着位置、压力、总温、马赫数几个关键参数的变化规律。数值模拟结果和实验结果进行了对比, 二者较为接近。研究表明, 安装位置的选择对倒角总压探针总压系数影响较大, 探针的安装位置越接近风洞上游, 总压系数绝对值越小; 倒角型总压探针总压系数的绝对值随温度和压力的升高而减小, 随马赫数的升高而增大。

关键词: 超音速; 压力探针; 数值模拟; 校准特性

中图分类号: TB93

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2017)02-0015-04

Numerical Simulation of Pressure Probe Calibration Based on CFD Under Supersonic Condition

ZHAO Bin, ZHAO Jian

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: The calibration characteristics of chamfering total pressure probes were studied by numerical simulation in the supersonic condition, and the key impacts of the calibration characteristics were analyzed. The total pressure coefficient changes with position, pressure, temperature and Mach number. The numerical simulation results were compared with the experimental results. The results show that selecting the installation location has great influence on the total pressure of the chamfer total pressure probe. The absolute value of the pressure coefficient is smaller when the probe is placed nearer to the upstream of the tunnel. The absolute value of the total pressure coefficient of the chamfering total pressure probe decreases with the increasing of temperature and pressure, and increases with the increasing of a number.

Key words: supersonic speed; pressure probe; numerical simulation; calibration characteristic

0 引言

航空航天领域中, 超音速压力探针是研究超音速流场及其激波结构的重要工具。测量高速环境下气流压力时, 总压与静压均受扰动的影响, 因而增大了压力探针的校准难度。据统计, 学者们对压力探针做了大量实验工作, 例如: 何中伟^[1]详细分析了近四十年的超音速静压探针实验研究, 标定并发展了两种静压探针; 沈天荣^[2]等研究了风洞中七孔压力探针的校准方法; 马宏伟^[3]等研究了速度梯度、近壁效应和雷诺数对压力探针测量误差的影响。由于超音速条件下流

动过程中有激波和膨胀波相交、壁面反射及与附面层的相互作用等, 因此有必要对被测流场进行数值仿真工作, 以为校准试验提供理论上的指导。

本次数值模拟的研究内容是在超音速条件下对倒角型总压探针及其周围的流场进行数值仿真, 并通过改变各种可能的条件, 如安装位置、气流温度、压力、速度等, 分析确定超音速条件下压力探针总压系数的理论模型, 并与试验相互对比验证, 得到总压系数随着压力探针关键参数的变化规律。

1 研究对象

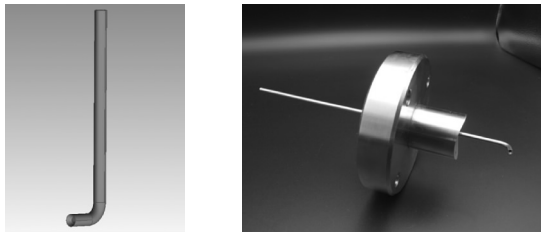
本次仿真以倒角型总压探针为研究对象。由于仿真只针对风洞内部, 所以对法兰和接头部分做了简化。在试验中, 探针尾部接着较长的软导管, 但最终导管的终端是和压力传感器相连, 气体始终是封闭的, 所

收稿日期: 2017-03-20

基金项目: 国防科工局技术基础科研项目(JSJL201420513003)

作者简介: 赵彬(1989-), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为动态温度校准。

以在本次数值模拟中将小孔的终端设置为壁面。压力探针的数值模拟模型和试验模型如图1所示。风洞由收缩段、试验段、扩张段等组成,探针安装在试验段。喷管选用固定式喷管,风洞三维模型如图2所示。



(a) 数值模拟三维模型 (b) 实验三维模型

图1 倒角总压探针三维模型

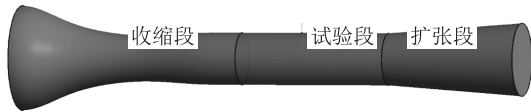


图2 数值模拟风洞三维模型

2 数值模拟方法

湍流模型选取了在工程计算中应用较多的可实现性 *Realizable k-ε* 模型,文献[4]至文献[6]均详细阐述了此模型,本文不再陈述。

2.1 边界条件设置

边界条件设置如图3所示,风洞进口给定总温、总压,风洞出口给定背温、背压。求解过程选项中选择收敛速度较快且精度较高的SIMPLEC方法,压力和速度的离散方法采用二阶迎风格式。当连续方程、动量方程、能量方程和湍流方程的残差小于 10^{-5} 、辐射残差小于 10^{-6} 时,认为计算收敛。同时,设置总静压探针内部监测点A压力来观察计算的收敛程度,当A点压力平稳后,也可以认为计算收敛。

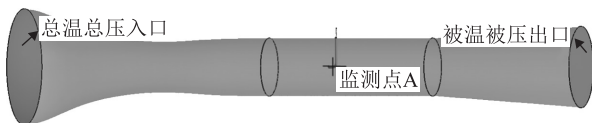


图3 边界条件设置

2.2 网格划分

在网格划分时,需要对靠近压力探针壁面附近的网格进行加密,并设置边界层。具体网格划分如图4和图5所示,采用全部非结构化网格,网格总数为400万左右。

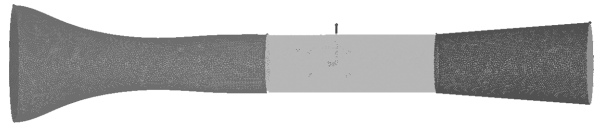


图4 试验段网格划分

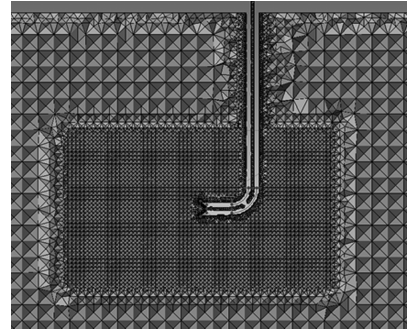


图5 压力探针周围网格加密

3 数值模拟结果与试验结果对比

工程上一般采用总压系数来描述总压探针的性能。被校总压探针周围的流体按势流处理,而被校总压探针则按细长旋成体扰流考虑。超音速总压探针校准系数为

$$C_{pt1} = \frac{p_{t1} - p_0}{0.7Ma_\infty^2 p_\infty}$$

式中: p_{t1} 为被校总压, Pa; p_0 为来流参考总压, Pa; Ma_∞ 为来流马赫数; p_∞ 为来流静压, Pa。

由于总压探针测得的是波后总压,小于波前总压,再加上总压探针的加工误差等因素,造成总压系数为负值,而且一般较大。

我所对超音速条件下总静压探针校准工作进行了深入的研究。超音速流速风洞以及试验照片如图6和图7所示。试验设备包括风洞试验段、C-DAQ数采模块、压力扫描阀以及数字式无汞气压计等,马赫数范围为1.5~2.0。

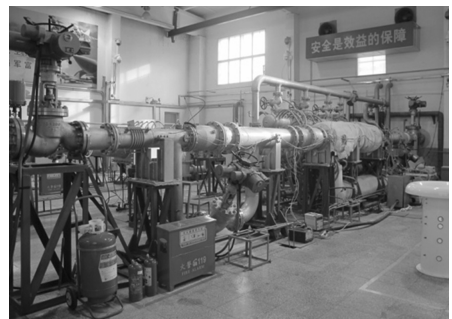


图6 超音速风洞

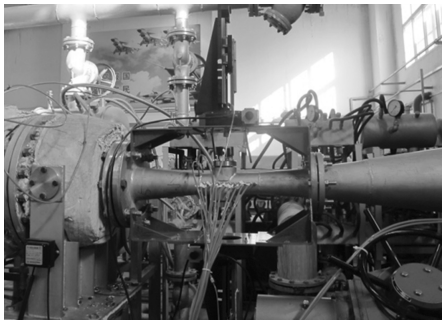


图7 压力探针校准试验

在不同马赫数下，总压探针校准系数数值模拟结果与实验结果对比如图8所示。由图中可以看出，数值模拟结果与实验结果对比较为接近。

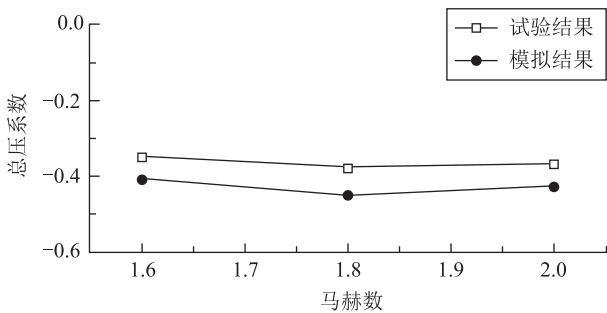


图8 总压系数数值模拟结果与实验结果对比图

4 数值模拟结果及分析

4.1 数值模拟流场及传热分析

模拟工况总压为 101325 Pa，马赫数为 1.6，来流温度为 25 °C，对称面风洞内部速度云图和压力探针周围压力云图分别如图9和图10所示。观测风洞内速度云图，流场在收缩段流速较低，由于出口的吸力作用导致试验段和扩张段流速逐渐升高；同时，压力探针的存在极大地影响了流场的均匀性；出现了很长一段的紊流区，由于探针阻碍气流产生速度滞止效应此区域气流的流速偏低。观测压力探针压力云图，在总压

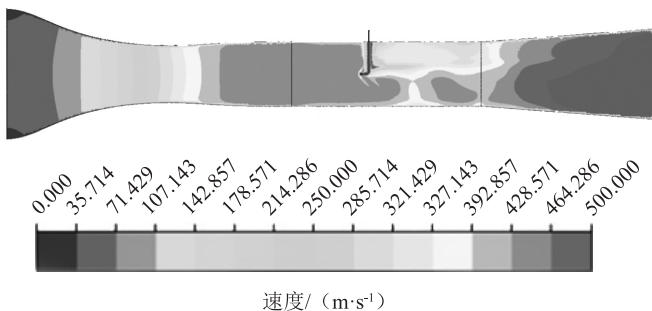
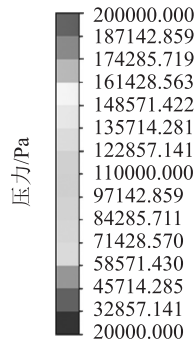
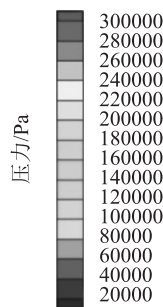


图9 风洞内速度云图

探针附近区域，静压分布基本符合圆柱绕流特性，在正对来流部分受到圆柱体滞止作用，速度降低，压力瞬间升高。圆柱过渡区，由于流体速度增大，使得压力下降，而后在尾迹区域有少量回流产生，压力分布沿对称面对称分布。



(a) 压力探针XY面压力云图



(b) 压力探针XZ面压力云图

图10 倒角总压探针压力云图

为了更进一步分析总压探针附近的流场情况，作出附近的速度流线图，如图11所示。流场在探针后部出现了少量回流，并且在探针内部出现了漩涡，造成了能量

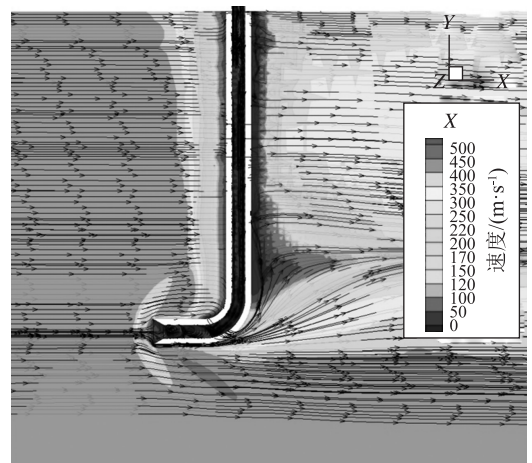


图11 总压探针附近速度云图和流线图

损失。虽然有漩涡的存在，但气体在探针内部的流动还比较均匀，且流速很低，不超过 2 m/s，只是在探针入口处有很小的速度，这是可以接受的。总体来说，倒角总压探针周围的流场比较均匀，没有大的能量损失。

4.2 超音速总压探针校准系数分析

影响总压探针总压系数的关键量有探针安装位置，来流温度、压力和速度等。针对倒角总压探针，为考察安装位置对探针总压系数的影响，设计了三种不同的试验段安装孔，其位置尺寸如表 1 和图 12 所示。数值模拟中，该三个位置共用一个倒角总压探针，其它的参数不变。数值模拟工况为总压为 0.2 MPa，马赫数为 1.6，来流温度为 25 °C。

表 1 试验段内不同位置

位置编号	试验段位置/mm	说明
a	中心基准点-30	马赫数为 1.6
b	中心基准点	
c	中心基准点+30	

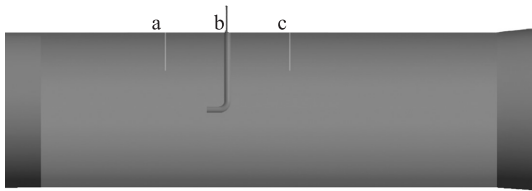


图 12 压力探针不同安装位置示意图

不同安装位置下，倒角总压探针的总压系数对比如图 13 所示。可以观测到三种安装方案在此工况下的总压系数差别较大，具体表现在随着安装位置的向后延伸，总压系数也逐渐增大，绝对值越来越小，从中心基准点 +30 mm 的 -0.46 提升到了中心基准点 -30 mm 的 -0.27，提升了约 40%。所以安装位置的选择对倒角总压探针总压系数的影响较大，具体表现在越往试验段前面安装，总压系数绝对值越小。

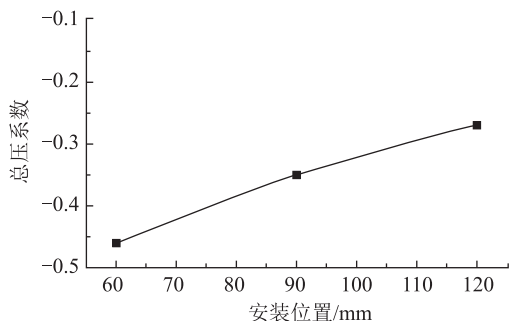
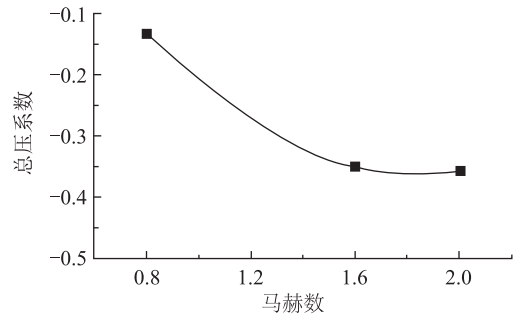
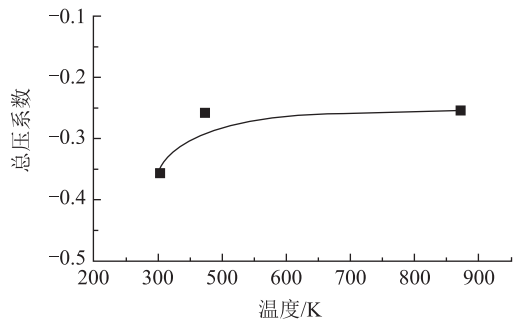


图 13 不同前后安装位置总压系数对比图

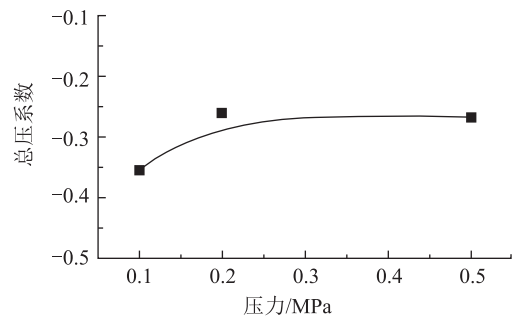
探针安装在中心基准点上，为了研究来流总温、静压以及速度对倒角压力探针总压系数的影响，设计了如下工况：在静压为 0.2 MPa，马赫数为 1.6 的条件下，来流总温分别为 300，373 和 773 K；在总温为常温 300 K，马赫数为 1.6 的条件下，来流静压分别为 0.08，0.2 和 0.5 MPa；在静压为 0.2 MPa，总温为常温 300 K 条件下，来流马赫数分别为 0.8，1.6 和 2.0。9 种工况下的压力探针总压系数对比如图 14 所示。



(a) 不同马赫数总压系数对比



(b) 不同温度总压系数对比



(c) 不同压力总压系数对比

图 14 不同工况下的压力探针总压系数对比

对于倒角总压探针，在低温低压下，总静压系数绝对值较大，而在高温高压情况下，总静压系数则越来越接近于 1。在总压为 101325 Pa，马赫数为 1.6 的条件下，总压系数由最初 300 K 下的 -0.355 提升到了 773 K 下的 -0.256，提升了 25%；在总温为常

对温度计算的要求。

4 结论

薄膜热电偶具有体积小、精度高等特点，根据不同使用温度，选取不同材质薄膜热电偶可以体现出更好的效果。通过对不同材质制作的薄膜热电偶性能的分析，得到以下结论：

1)在 950℃ 以下，NiCr/NiSi 薄膜热电偶优势较为明显，无论是稳定性，还是重复性，SeeBack 系数的线性上，都优于 N 型薄膜热电偶，在后续制作、应用中优先选择 NiCr/NiSi 薄膜热电偶。

2)K 型薄膜热电偶，使用温度上限更高，在高温环境下抗氧化能力更强，改变其膜层厚度可以使其应用在更多的环境中。

3)通过对两种薄膜热电偶稳定性、重复性的分析比较，可以认为在特定温度下可以替代常规热电偶对

静态温度进行测量。同时，其体积小特点可以在稳定流场的动态环境下、空间狭小无法用常规热电偶进行布点等特殊情况下完成常规热电偶完成不了的测温任务，例如发动机叶片表面温度的测量等。

4)在薄膜热电偶的生产、使用过程中，还需对其生产工艺进一步研究，对其使用环境、条件进一步验证。

参 考 文 献

- [1] Wrbanek J D, Gustave C. A multilayered thin film insulator for harsh environments[R]. National Aeronautics and Space Administration, 2002.
- [2] 朱亚民. NiCr_NiSi 薄膜热电偶传感器的研制及有限元模拟[J]. 仪表技术与传感器, 2008(9): 15-17.
- [3] 叶方伟. 薄膜热电偶的发展及其应用[J]. 材料导报, 1995(5): 28-32.
- [4] 黄吕权, 李付国. 薄膜热电偶的技术特性研究[J]. 中国机械工程, 1996(5): 34-36.



(上接第 18 页)

温 25 ℃，马赫数为 1.6 的条件下，总压系数由总压 101325 Pa 下的 -0.355 提升到了 0.5 MPa 下的 -0.268，提升了 24%。总体来说，总压系数的绝对值随着温度和压力的升高而减小。

在总压为 101325 Pa，总温为 25 ℃ 的条件下，总压系数由马赫数为 0.8 下的 -0.132 降低到了 2.0 下的 -0.358，压力探针总压系数在亚音速条件下绝对值更接近 1。总压系数的绝对值随着马赫数的升高而增大。

5 结论

本次研究针对倒角总压探针，在超音速条件下对其校准特性进行了数值模拟研究工作，成功摸索了一套在超音速条件下对总压探针校准的数值模拟方法，并对影响校准特性的关键影响量进行了分析，得到了总压系数随着位置、压力、总温、马赫数几个关键参数的变化规律。与实验结果做对比验证，数值模拟与实

验结果对比较为接近。研究表明：①安装位置的选择对倒角总压探针总压系数影响较大，越往试验段前面安装，总压系数绝对值越小；②倒角总压探针总压系数的绝对值随着温度和压力的升高而减小，随着马赫数的升高而增大。

参 考 文 献

- [1] 何中伟, Dr. SislianJP, DechambaultRL. 新型高超音速静压探针的设计和实验[J]. 推进技术, 1992, 13(6): 53-60.
- [2] 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.
- [3] 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): 337-342.
- [4] Shih T H, Liou W W, Shabbir A, et al. A new k-ε eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows [J]. Computers & Fluids, 1995, 24(3): 227-238.
- [5] 赵飞, 张延玲, 朱荣, 等. 超音速射流流场中湍流模型[J]. 工程科学学报, 2014(3): 366-372.
- [6] 赵彬, 赵俭. 超音速条件下 K 型温度传感器恢复特性数值模拟[J]. 计测技术, 2016, 36(5): 1-4.