

单点总压探针气动特性数值研究

高春祥¹, 查天衡², 赵义祯³, 刘高文¹

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710129; 2. 中国航发商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241;
3. 中国航发沈阳发动机研究所, 辽宁 沈阳 110015)

摘要: 为获得总压探针的气动特性, 采用数值研究的方法, 对3种常用规格的单点总压探针模型在不同流场中的模拟结果进行对比分析, 获得了探针测量结果准确度以及探针对被测流场的影响规律。研究表明: 在亚音速条件下, 可以采用单点总压探针针对不同方向总压进行测量, 进而求得该方向的速度分量; 总压探针对流场的影响只在探针下游的局部范围内, 不会对探针头部的测量值产生干扰; 总压探针的速度测量误差随气流马赫数和探针偏转角的增大而增大; 规格为2.0 mm × 0.5 mm的单点总压探针的角度特性最好, 最大测量误差为6.96% ($Ma = 0.2, \theta = 45^\circ$); 总压探针的存在会使被测流场的流动均匀性降低, 在探针支杆后5 mm的位置, 流动均匀性达到最低, 为0.993, 到探针支杆后15 mm处流动均匀性即可恢复到0.997。

关键词: 总压探针; 方向总压; 角度特性; 气流马赫数; 速度测量

中图分类号: TB934 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.11.020

[引用本文格式] 高春祥, 查天衡, 赵义祯, 等. 单点总压探针气动特性数值研究[J]. 热能动力工程, 2022, 37(11): 153-160. GAO Chun-xiang, ZHA Tian-heng, ZHAO Yi-zhen, et al. Numerical investigation on aerodynamic characteristics of single-point total pressure probe [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(11): 153-160.

Numerical Investigation on Aerodynamic Characteristics of Single-Point Total Pressure Probe

GAO Chun-xiang¹, ZHA Tian-heng², ZHAO Yi-zhen³, LIU Gao-wen¹

(1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, China, Post Code: 710129;
2. AECC Commercial Aircraft Engine Company Limited, Shanghai, China, Post Code: 200241;
3. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang, China, Post Code: 110015)

Abstract: In order to obtain the aerodynamic characteristics of the total pressure probe, the numerical research method was used in this paper to compare and analyze the simulation results of three commonly single-point total pressure probe models in different flow fields, the accuracy of the probe measurement results and the influence rule of the probe on the measured flow field were obtained. Research shows under subsonic conditions, a single-point total pressure probe can be used to measure the total pressure in different directions, and then the velocity component in each direction can be obtained. The influence of the total pressure probe on the flow field is only localized downstream of the probe and will not interfere with the measurement value at the probe head. Total pressure probe velocity measurement error increases with the increase of airflow Mach number and probe deflection angle. The single-point total pressure probe with a size of 2.0 mm × 0.5 mm has the best angle characteristics, and the maximum measurement error is

收稿日期: 2021-12-15; 修订日期: 2022-03-07

基金项目: 国家科技重大专项(2017-III-0011-0037); 中央高校基本科研业务费专项资金(3102021OQD701)

Fund-supported Project: National Science and Technology Major Projects(2017-III-0011-0037); Fundamental Research Funds for the Central Universities(3102021OQD701)

作者简介: 高春祥(1997-), 男, 黑龙江佳木斯人, 西北工业大学硕士研究生。

通讯作者: 刘高文(1974-), 男, 四川广安人, 西北工业大学教授

6.96% ($Ma = 0.2, \theta = 45^\circ$). The existence of the total pressure probe will reduce the flow uniformity of the measured flow field. At the position 5 mm behind the probe support, the flow uniformity reaches a minimum of 0.993, and at 15 mm behind the probe support, the flow uniformity can be restored to 0.997.

Key words: total pressure probe, directional total pressure, angle characteristics, airflow Mach number, velocity measurement

引 言

目前,获得航空发动机气动参数的主要手段是接触式测量,但此时探针会诱发对流场的局部干扰,使得真实流场的特性发生改变^[1-3]。Laruiet 等人^[4]在探针尖端安装一个压电传感器用于测量空气流量,但 8 mm 的大直径探头增加了流场扰动。为了减小探头尺寸,Dean 等人^[5]和 Matsunaga 等人^[6]使用五孔探针,将探头尺寸减小到 5 mm。Kang 等人^[7]为测量涡轮旋转叶片下游的不稳定流动现象,设计了 1 种用于测量叶片出口压力场的快速响应总压探针。由于总压具有方向性,Shreeve 等人^[8]通过双探头数字采样技术(DPDS)将两只皮托管结合使用,将其中一个皮托管相对于水平面向上弯曲 35°,加强探针对角度变化的敏感性,进而测得不同角度的总压值。Raghava^[9]提出了 1 种在三维流动中测量速度矢量的方法,其总压探针由 1 支总压管和 1 支康拉德探针组合,测量时只需要把探针绕纵轴转动,就可以测得流场中某一点的速度矢量。

在国内关于总压探针的研究当中,林其勋等人^[10]在狭窄通道中进行测量时发现,探针未进入附面层之前临壁效应就已经起作用。针对总压探针的这一特性,郑光华等人^[11]和王肖等人^[12]采用数值模拟的方法对总压探针的堵塞效应和临壁效应进行了研究,结果指出,堵塞效应主要和堵塞比有关,而堵塞比又与总压探针的数量和插入深度有关;总压探针的近壁距离大于 3 倍探针外径时,临壁效应造成的影响可以忽略不计。马宏伟等人^[13]通过实验研究分别从速度梯度、近壁效应和雷诺数 3 个角度寻找压力探针产生测量误差的原因。孙志强等人^[14-15]采用数值模拟和试验相结合的方法,对不同型号皮托管的测量结果进行研究,结果指出,在气流流速较低时由较小的总压孔测得的压力比较接近参

考值,而在流速较大时大多数总压孔的测量误差都比较大;皮托管检测杆直径对总压的测量影响较小,对测量误差的影响也比较小。李雨春等人^[16]提出了测量亚音速二维周期性流场的方法。针对三维流场的测量,李井洋等人^[17]提出了 1 种楔顶圆柱双孔探针测量三维流场的方法,基于四孔探针测量原理旋转探针实现 3 个角度测量,采用最小二乘拟合法对数据进行处理,获得精度较高的求解流场参数的近似函数。高强等人^[18]利用数值模拟和实验研究两种方法,针对五孔探针的不同支撑位置以及探针的形变和振动进行了研究。

综上,关于总压探针气动特性的主要研究方向为总压探针的准确度、临壁效应和堵塞效应,针对总压探针角度特性的研究比较少。在航空发动机的相关实验中,为得到流动雷诺数^[19]、旋转马赫数^[20]和旋转比^[21]等无量纲参数,需要测得不同角度的气流总压。尽管多孔气动探针的测量结果会更加准确,但探针尺寸的增大会对流场产生更大的扰动,从而改变流动特性。鉴于此,本文对单点式总压探针的角度特性展开研究,对方向总压与速度的关系进行理论推导,建立 3 种常用规格的单点总压探针模型,分析不同探针结构在不同气流马赫数流场中的测量误差及对被测流场的影响。

1 研究对象和数值方法

1.1 理论分析

当探针正对气流来流方向时,探针内测得的值为气流总压值,根据一维定常伯努利方程:

$$\frac{1}{2}(V_1^2 - V_2^2) = \frac{\kappa RT}{\kappa - 1} \left[1 - \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] \quad (1)$$

式中: V_1 —管道入口气流速度, m/s; V_2 —管道出口气流速度, m/s; p_1 —管道入口气流压力, Pa; p_2 —管道出口气流压力, Pa; R —气体常数, J/(kg · K); κ —定熵指数。

当 $V_1 \rightarrow 0$ 时,可得滞止压强和滞止温度的表达式:

$$\frac{p^*}{p} = \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} Ma^2\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad (2)$$

$$\frac{T^*}{T} = 1 + \frac{\kappa - 1}{2} Ma^2 \quad (3)$$

式中: p^* —气流总压, Pa; p —气流静压, Pa; T^* —气流总温, K; T —气流静温, K; Ma —气流马赫数。

将式(2)和式(3)代入式(1)得:

$$V_2 = \sqrt{\frac{2\kappa RT}{\kappa - 1} \left[\left(\frac{p^*}{p}\right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - 1 \right]} \quad (4)$$

由于总压具有方向性,因此当探针与气流来流方向存在一定角度时,测得值为这一方向上的总压,称之为方向总压。此时来流在该角度下的速度分量 V_θ 为:

$$V_\theta = \sqrt{\frac{2\kappa RT}{\kappa - 1} \left[\left(\frac{p_\theta^*}{p}\right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - 1 \right]} \quad (5)$$

式中: θ —探针与来流方向的夹角; p_θ^* —气流在 θ 角度的方向总压, Pa; V_θ —气流在 θ 角度下的速度, m/s。

同时,根据速度的矢量分解,在与来流速度方向偏转 θ 角度时,该方向的速度分量与来流速度的关系为:

$$V'_\theta = V \cos \theta \quad (6)$$

通过数值模拟的方法,比较单点总压探针在不同偏转角度 θ 下,通过方向总压算出的 V_θ 与该方向的理论速度 V'_θ 的误差范围。

1.2 计算模型

由于探针结构和探针种类会引起测量误差,边界层的存在也会对流场的流动结构产生影响,需要减小边界层对模拟结果的影响。由此,建立的计算域模型如图 1 所示。计算域为 $40 \text{ mm} \times 140 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ 的长方体,入口到总压探针前端的距离为 50 mm ,总压探针末端到计算域出口的距离为 100 mm ;总压探针入口处的圆心为坐标原点,探针轴线方向为 y 轴方向,探针支杆中心所在的方向为 z 轴方向,总压探针模型的外径最大为 2 mm 。探针相对于流场的堵塞比远小于 0.5% ,因此可以忽略堵塞效应造成的影响。总压探针放置在 $x-y$ 截面,这时总压探针距离壁面的距离远大于 3 倍总压探针直

径,临壁效应造成的影响可以忽略。

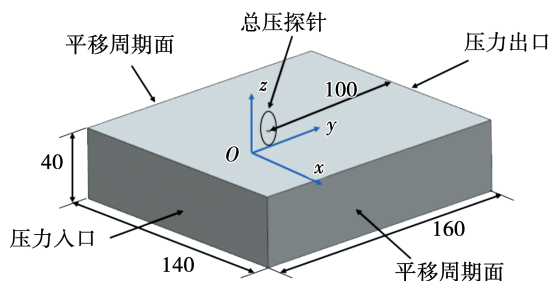


图 1 单点总压探针的计算域模型 (mm)

Fig. 1 Computational domain model of single-point total pressure probe (mm)

探针模型如图 2 所示。该探针为单点平头 L 型总压探针,通过改变总压探针的外径 (R_1) 和内径 (R_2) 尺寸,分别确定了 3 种探针规格: $R_1 \times R_2 = 2.0 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$, $2.0 \text{ mm} \times 1.0 \text{ mm}$ 和 $1.6 \text{ mm} \times 1.0 \text{ mm}$ 。

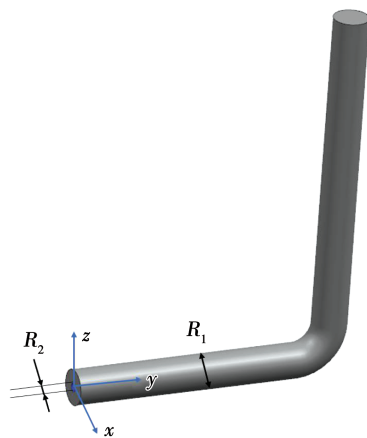


图 2 单点总压探针模型

Fig. 2 Single-point total pressure probe model

1.3 网格划分及边界条件

采用 ANSYS ICEM 划分结构化网格,对计算域壁面和探针壁面进行局部加密,以保证壁面附近的 y^+ 值在 1 左右。经网格无关性验证,当网格数量约为 350 万时,探针内的气流总压不再改变。计算域整体网格和探针局部网格划分如图 3 所示。

计算域入口设置为压力入口:给定总温、总压和速度方向;计算域出口设置为压力出口:给定静压和总温,环境温度设置为 298 K ,静压为 $101\,325 \text{ Pa}$ 。计算域左右边界设置为平移周期面,上下壁面设置

为无滑移壁面。采用 FLUENT 进行求解。对规格为 $2.0\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ 的总压探针在 $\theta = 0^\circ$ 的情况下,分别用 $k-\omega$ SST 和 $k-\varepsilon$ 两种湍流模型计算了在进口马赫数为 0.2 时的工况。采用 $k-\omega$ SST 湍流模型计算时,探针内滞止流场的压力值更接近入口给定的压力值,因此选用 $k-\omega$ SST 进行其他工况的计算。计算中设定马赫数为 0.2, 0.4, 0.6 和 0.8。根据文献[22],当气流偏转角在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 范围内变化时,雷诺数对探针标定的影响假定小到可以忽略不计。

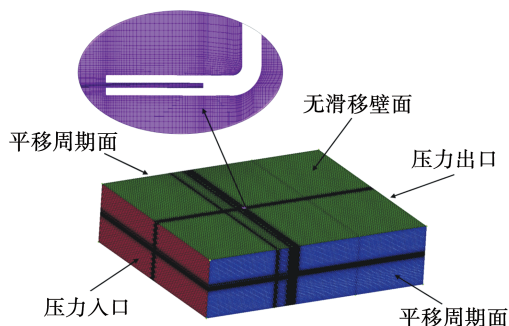


图3 计算模型网格划分

Fig. 3 Mesh generation of computing model

为验证数值计算结果的准确性,对单点总压探针($2.0\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ 型)在不同进气角度下的总压测量误差与实验结果^[11]进行对比,如图4所示。

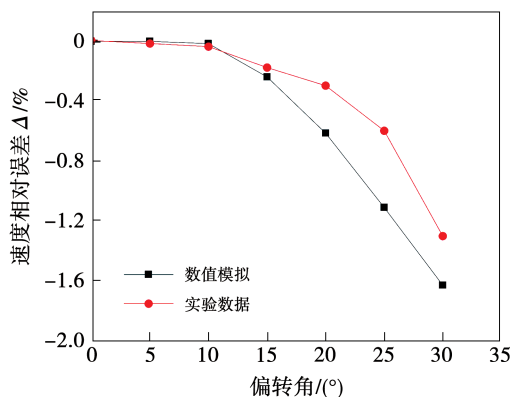


图4 结果对比

Fig. 4 Comparison of results

从图4可以看出,速度相对误差随探针偏转角度的增大而增大,数值模拟结果和实验结果在小偏转角度内基本重合,在大偏转角度内稍有分离,两者最大相差仅为 0.5%,处在可以接受的误差范

围内。

1.4 性能评价指标

根据探针测量值算出的速度与入口气流速度在该方向的速度分量的差值,与入口气流速度在该方向的速度分量的比值称为速度相对误差 Δ 。计算式为:

$$\Delta = \frac{V_{\theta} - V'_{\theta}}{V'_{\theta}} \times 100\% \quad (7)$$

式中: Δ —速度相对误差。

计算域出口总压的平均值与入口总压的平均值之比称为计算域的总压比 p_r , 计算式为:

$$p_r = \frac{p_2^*}{p_1^*} \quad (8)$$

式中: p_2^* —出口截面平均总压, Pa; p_1^* —入口截面平均总压, Pa。

基于面积加权平均速度和质量加权平均速度的流动均匀性指标^[23-24]计算式为:

$$\lambda = 1 - \frac{|V_n - V_m|}{V_m} \quad (9)$$

$$V_n = \frac{1}{A} \sum_{j=1}^k v_j |A_j| \quad (10)$$

$$V_m = \frac{\sum_{j=1}^k v_j \rho_i |v_j \cdot \rho_i|}{\sum_{j=1}^k \rho_i |v_j \cdot \rho_i|} \quad (11)$$

式中: V_n —面积加权平均速度, m/s; V_m —质量加权平均速度, m/s; A —总表面积, m^2 ; A_j —第 j 个单元面上的面积, m^2 ; v_j —第 j 个单元面上的速度矢量, m/s; ρ_i —第 j 个单元面的流体密度, kg/m^3 ; k —同流截面被划分成的单元面数。

2 结果及分析

2.1 探针对被测流场总压分布的影响

图5为 $Ma = 0.2$, 规格为 $2.0\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ 的单点探针的局部总压分布云图。对于单点总压探针,小部分气体进入探针内滞止,再经测量装置测得压力值;大部分气流沿探针流向下流。由于气流通道局部突缩,速度增大,会形成一股射流。因支杆的影响,气流流经支杆后在下游形成尾迹,距离探针支杆越近,尾迹损失越大。但由于支杆的尺寸相对于

流场很小,使得沿流程的总压损失只在有限的范围内。因支杆在探针入口的下游,支杆产生的总压损失只会影响探针的下游流场,不会对探针测得的总压值产生影响。当探针与气流成一定角度时,随探针角度增大,会使得探针相对于流场的横截面积增大,导致探针对流场的堵塞效应增大。但沿流程的总压损失也同样只会影响探针下游的局部流场,测得的数据不受到探针对流场干扰的影响。

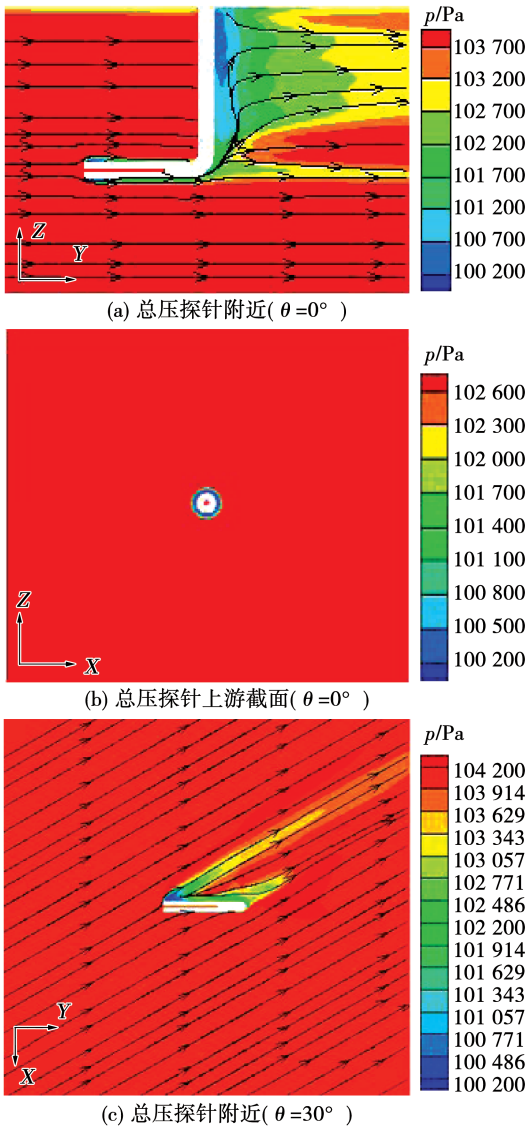


图 5 流场总压分布云图

Fig.5 Contours of total pressure distribution of flow field

2.2 马赫数对速度测量值的影响

以规格为 2.0 mm × 0.5 mm 的单点总压探针为例,分析在气流马赫数为 0.2,0.4,0.6 和 0.8 的亚音速条件下,探针偏转角对方向总压测量值的影响

规律。图 6 ~ 图 7 为速度分量以及速度测量相对误差随探针偏转角的变化。在 $\theta = 0^\circ$ 时,入口气流的马赫数越大,则探针测得的速度值 V_θ 也越大,在 $Ma = 0.8, \theta = 0^\circ$ 时,速度值 $V_\theta = 260$ m/s;在 $Ma = 0.2, \theta = 0^\circ$ 时,速度值 $V_\theta = 70$ m/s。在入口气流马赫数不变时,通过对比不同偏转角下的速度值得知,探针的偏转角度越大,由探针内的压力算出的速度值 V_θ 越小。

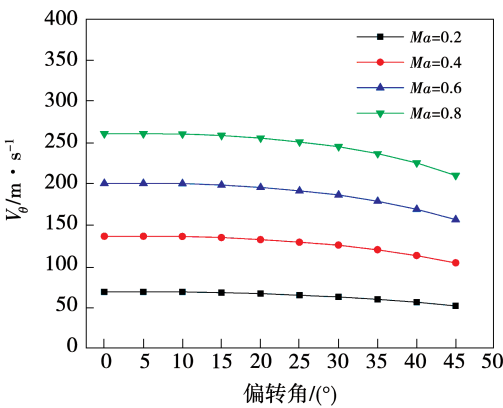


图 6 不同马赫数下探针速度测量值随偏转角的变化

Fig.6 Variation of velocity measurement value with deflection angle of the probe at different Mach numbers

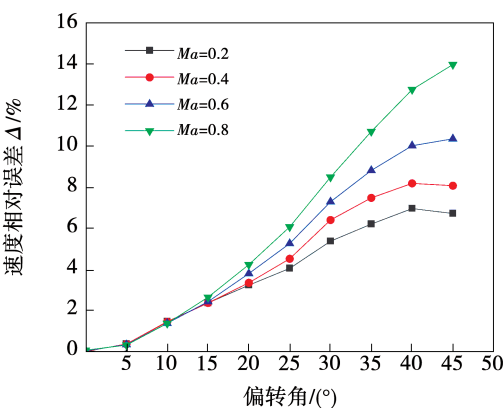


图 7 不同马赫数下探针速度测量误差随偏转角的变化

Fig.7 Variation of velocity measurement error with deflection angle of the probe at different Mach numbers

从图 7 可以得出,速度相对误差随气流马赫数和探针偏转角的增加而增大。这是由于在探针与气流存在一定的偏转角度时,探针头部对局部流场的影响加大,导致气流进入探针内受阻,最终导致误差增大。在 $Ma = 0.2$ 时,速度测量的最大相对误差为

6.96%,而在探针偏转角度小于 25°时速度测量相对误差小于 5%。在 $Ma = 0.8$ 时,速度测量的最大相对误差为 12.76%,在探针偏转角度小于 20°时速度测量相对误差小于 5%。因此可以得出,总压探针对方向总压具有一定的敏感性,可以通过方向总压探针测量速度分布。

2.3 探针几何模型对速度测量的影响

图 8 为 $Ma = 0.6$ 时单点总压探针的速度测量误差随偏转角变化。由图可知,规格为 $2.0\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ 的总压探针测量误差最小,规格为 $1.6\text{ mm} \times 1.0\text{ mm}$ 的总压探针的测量误差最大。通过对比规格为 $2.0\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ 和 $2.0\text{ mm} \times 1.0\text{ mm}$ 的探针可以看出,在探针外径相同的情况下,探针的内径越小测量误差越小;通过对比规格为 $2.0\text{ mm} \times 1.0\text{ mm}$ 和 $1.6\text{ mm} \times 1.0\text{ mm}$ 的探针可以看出,在探针内径相同的情况下,探针的外径越大测量误差越小。3 种探针的测量误差均随着探针偏转角的增加而增大,在偏转角为 45°时,测量误差最大,规格为 $2.0\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$, $2.0\text{ mm} \times 1.0\text{ mm}$, $1.6\text{ mm} \times 1.0\text{ mm}$ 总压探针的最大测量误差分别为 10.4%, 14.0% 和 16.7%。

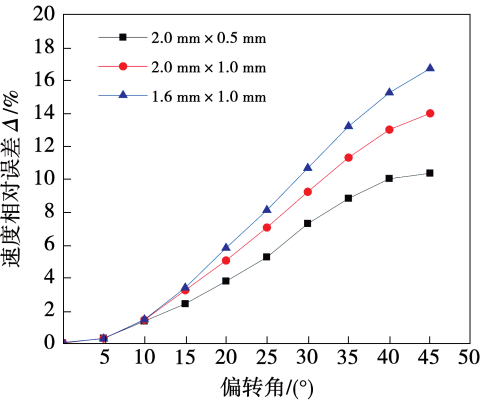


图 8 不同探针的速度测量误差随偏转角变化

Fig.8 Variation of velocity measurement error with deflection angle for different probes

2.4 气流偏转角对被测流场的影响

不同的气流马赫数下,规格为 $2.0\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ 总压探针的计算域出口总压与入口总压的比值随偏转角的变化如图 9 所示。在同一偏转角下,随气流马赫数的增大,流场内的沿程损失和摩擦

损失也会增加,从而导致总压比降低;在同一马赫数下,随偏转角增加,导致探针对气流的堵塞效应增加,从而导致总压损失增大。从图中曲线的变化程度可以看出,偏转角对气流的堵塞效应受到气流马赫数的影响。在 $Ma = 0.2 (\theta = 45^\circ)$ 时总压比为最小值 0.998 2,在 $Ma = 0.8 (\theta = 45^\circ)$ 时总压比为最小值 0.977 6。

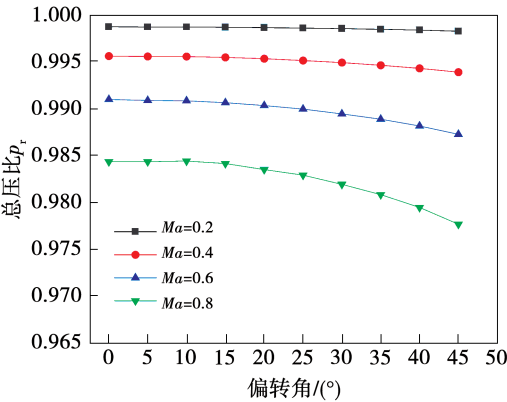


图 9 不同马赫数下总压比随偏转角的变化

Fig.9 Variation of total pressure ratio with deflection angle at different Mach numbers

总压探针的存在不仅会给原始流场造成压力损失,同时也会对流场的速度均匀性产生影响。以 $Ma = 0.6$,规格为 $2.0\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ 总压探针为例,偏转角度对流场速度均匀性的影响如图 10 所示。因气流的粘性以及气流与壁面之间产生的摩擦,会使得流场的均匀性沿流程逐渐变差,但即使在探针偏转角为 45°时,速度均匀性的最低水平也在 99% 以上。图 10 中, $y = 0\text{ mm}$ 和 $y = 15\text{ mm}$ 两个截面分别为探针入口截面和探针支杆中心所在的截面。在探针下游,距离探针支杆 5 mm 的 $y = 20\text{ mm}$ 处截面的速度均匀性最差,沿程继续发展约 10 mm 处即可恢复。波谷处的速度均匀性随偏转角的增大而降低,探针偏转角从 0°变化到 45°时,波谷处的均匀性从 99.48% 下降到了 99.21%,下降幅度为 0.27%。探针对流场速度均匀性的影响只在其支杆背部的局部范围,随着探针偏转角的增加,会导致探针的堵塞面积增大,因而在探针下游的速度均匀性变差。

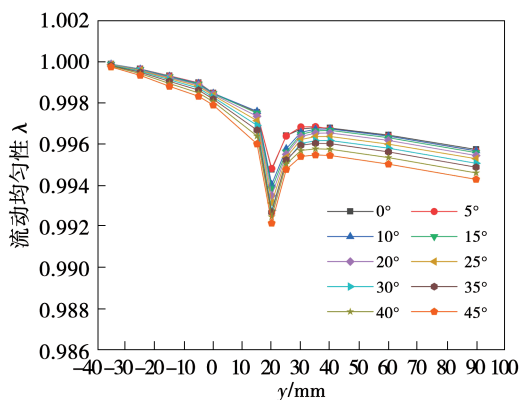


图 10 流动均匀性随偏转角变化

Fig. 10 Variation of flow uniformity with deflection angle

3 结 论

(1) 探针的存在,会对流场产生干扰,从而影响流场的流动特性,但影响范围只在探针下游的局部流场,不会对探针入口处的测量值产生影响。对同一个总压探针,总压探针的测量误差随着气流马赫数和探针偏转角的增加而增大。

(2) 在亚音速流场中,规格为 $2.0\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ 的总压探针角度特性最好,在 $Ma = 0.6$ 时速度相对误差为 10.35% ;在探针偏转角度小于 20° 时,速度测量相对误差小于 5% 。而规格为 $1.6\text{ mm} \times 1.0\text{ mm}$ 单点总压探针的角度特性最差,在 $Ma = 0.6$ 时的速度相对误差为 16.71% 。

(3) 被测流场的均匀性沿气流方向逐渐变差,在探针支杆后方 5 mm 处,均匀性最低为 99.3% ,沿程继续发展约 10 mm 处即可恢复。波谷处的速度均匀性随探针偏转角的增大而变差。对于规格为 $2.0\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ 的单点总压探针,当 $Ma = 0.6$, $\theta = 45^\circ$ 时速度均匀性最低,为 99.21% 。

因此,建议工程上采用规格为 $2.0\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ 的总压探针进行方向总压的测量。

参考文献:

[1] 王 鹏,蔡元虎,王占学,等.进气畸变对发动机压缩系统稳定性影响的数值模拟[J].流体机械,2006(8):15-19,5.
WANG Peng, CAI Yuan-hu, WANG Zhan-xue, et al. Effect of pres-

sure and temperature distortion on turbine engine stability[J]. Fluid Machinery, 2006(8):15-19,5.

- [2] 徐佳汇,孙 鹏,腾礼志,等.压气机静叶栅流场畸变试验可行性探索及流场分析[J].热能动力工程,2016,31(8):24-30,121-122.
XU Jia-hui, SUN Peng, TENG Li-zhi, et al. Feasibility research of compressor stator cascade test with distorted inlet and flow field analysis[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2016,31(8):24-30,121-122.
- [3] 曹惠玲,罗立霄,曲春刚,等.基于LS-SVM的航空发动机喘振故障诊断研究[J].热能动力工程,2013,28(1):23-27,107.
CAO Hui-ling, LUO Li-xiao, QU Chun-gang, et al. Study of the surge fault diagnosis of an aeroengine based on the LS-SVM (least square-supporting vector machine) [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2013,28(1):23-27,107.
- [4] LARUIER L R, RUYER C. Experimental method for analyzing the unsteady flow in a transonic aircraft compressor[J]. Journal of Fluid Engineering, 1972,10(5):353-354.
- [5] DEAN R, SENOO Y. Rotating wakes in vaneless diffusers[J]. Journal of Fluids Engineering, 1960,82(3):563.
- [6] MATSUNAGA S, ISHIBASHI H. Accurate measurement of non-steady three-dimensional incompressible flow by means of a combined five-hole probe [C.]//San Francisco: Proceedings of the Winter Annual Meeting, 1978:65-72.
- [7] KANG J, YANG S. Fast-response total pressure probe for turbomachinery application[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010,24(2):569-574.
- [8] SHREEVE R, NEUHOFF F. Measurements of the flow from a high-speed compressor rotor using a dual probe digital sampling (DPDS) technique[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1984,106(2):366-375.
- [9] RAGHAVA A. A probe for the measurement of the velocity field [J]. Journal of Fluid Engineering, 1979:113.
- [10] 林其勋,许都纯,刘松龄.压力探针临壁效应的试验研究[J].航空动力学报,1996(1):57-59.
LIN Qi-xun, XU Du-chun, LIU Song-ling. Experimental study on the wall-adjacent effect of pressure probes[J]. Journal of Aerospace Power, 1996(1):57-59.
- [11] 郑光华,王 肖,郭 林,等.亚声速条件下总压探针临壁效应的数值研究[J].航空工程进展,2020,11(2):256-263.
ZHENG Guang-hua, WANG Xiao, GUO Lin, et al. Numerical investigation of near wall effect of total pressure probe based on CFD under subsonic velocity[J]. Advances in Aeronautical Sci-

- ence and Engineering,2020,11(2):256-263.
- [12] 王 肖,惠呈程,吕文召,等. 亚声速条件下总压探针堵塞效应的数值研究[C]//昆明:中国航天第三专业信息网第四十届技术交流会暨第四届空天动力联合会议,2019.
- WANG Xiao,HUI Cheng-cheng,LYU Wen-zhao,et al. Numerical study on the clogging effect of total pressure probe at subsonic velocity[C]//Kunming:The 40th APTIS Technical Conference and the 4th JCAP,2019.
- [13] 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(4):22.
- MA Hong-wei,JIANG Hao-kang. Influence of velocity gradient, near-wall effect and Re number on pressure probe measurement error[J]. Journal of Aerospace Power,1995(4):22.
- [14] 孙志强,周子民,张宏建,等. 皮托管测量影响因素分析 I:检测杆与安装角的影响[J]. 传感技术学报,2007(3):690-693.
- SUN Zhi-qiang,ZHOU Jie-min,ZHANG Hong-jian,et al. On the influence factors in a pitot tube measurement I:influence of air horn and mounting angle[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators,2007(3):690-693.
- [15] 孙志强,周子民,张宏建,等. 皮托管测量影响因素分析 II:全压孔与静压孔的影响[J]. 传感技术学报,2007(4):174-181.
- SUN Zhi-qiang,ZHOU Jie-min,ZHANG Hong-jian,et al. On the influencing factors in a pitot tube measurement II:influence of total and static ports[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators,2007(4):174-181.
- [16] 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(2):164-166,196.
- LI Yu-chun,JIANG Hao-kang. A method for measuring high-subsonic two-dimensional periodic flow field with a cylindrical single-hole high-frequency pressure probe[J]. Journal of Aerospace Power,1992(2):164-166,196.
- [17] 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):2262-2268.
- LI Jing-yang,MA Hong-wei,HE Xiang. Method of measuring 3-D unsteady flow at exits of transonic compressor rotor passing using a two-hole tip-wedge pressure probe[J]. Journal of Aerospace Power,2012,27(10):2262-2268.
- [18] 高 强,田 夫,王晓放,等. 五孔探针形变与振动对透平机械复杂流场测量精度的影响[J]. 测试技术学报,2017,31(3):196-200.
- GAO Qiang,TIAN Fu,WANG Xiao-fang,et al. The influence of five hole probe deformation and vibration on the accuracy of the measurement of the complex flow field of the turbine[J]. Journal of Test and Measurement Technology,2017,31(3):196-200.
- [19] 畅 然,刘高文,余祥仙,等. 高转速转静盘腔流动换热相似性数值研究[J]. 推进技术,2022,43(4):229-238.
- CHANG Ran,LIU Gao-wen,YU Xiang-xian,et al. Numerical study on similarity of flow and heat transfer in a high-speed rotor-stator cavity[J]. Journal of Propulsion Technology,2022,43(4):229-238.
- [20] 吴 衡,刘高文,冯 青,等. 盖板式预旋系统的压比和熵增特性[J]. 推进技术,2019,40(10):2252-2261.
- WU Heng,LIU Gao-wen,FENG Qing,et al. Pressure ratio and entropy increment in a cover-plate pre-swirl system[J]. Journal of Propulsion Technology,2019,40(10):2252-2261.
- [21] 林阿强,赵义祯,王俊淞,等. 燃气涡轮发动机预旋系统温降和功耗的作用机制与理论分析[J]. 中国电机工程学报,2021(5):1-15.
- LIN A-qiang,ZHAO Yi-zhen,WANG Jun-song,et al. Mechanism and theoretical analysis of temperature drop and power consumption in a pre-swirl system of gas turbine engine[J]. Proceeding of the CSEE,2021(5):1-15.
- [22] PERRY C. Calibration and comparison of cobra probe and hot wire anemometer for flow measurements in turbomachines[J]. Machinery Energy Division,1974.
- [23] TAO Hong-ge,HUANG Xin. An alternative approach to quantifying fluid flow uniformity based on area-weighted average velocity and mass-weighted average velocity[J]. Energy and Buildings,2012(45):116-123.
- [24] 李 坦,靳世平,黄素逸,等. 流场速度分布均匀性评价指标比较与应用研究[J]. 热力发电,2013,42(11):60-63,92.
- LI Tan,JIN Shi-ping,HUANG Su-yi,et al. Evaluation indices of flow velocity distribution uniformity:comparison and application[J]. Thermal Power Generation,2013,42(11):60-63,92.

(丛 敏 编辑)