

测量耙对流量管面积积分法测量流量的影响

马宏伟^{1,2}, 屈冬平³, 张志宏⁴, 李金原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;

3. 中国航空工业集团有限公司 江西洪都航空工业集团有限责任公司, 南昌 330024;

4. 中国航发四川燃气涡轮研究院 高空模拟技术重点实验室, 四川 绵阳 621000)

摘 要: 对采用面积积分法测量航空发动机空气流量的流量管三维流场进行数值模拟, 分析不同雷诺数下测量耙测点径向分布、轴向位置、测量耙尺寸、总压耙及总温耙和静压测点的相对位置等对面积积分法流量测量的影响。结果表明: 高精度的测量流量的面积积分法, 理论上要求测试布局能全面准确反映整个测量截面上的流场信息, 尤其是流量管环壁附面层内应尽可能多地布置测点。但太多的测点可能使测量耙数量过多、尺寸过大, 这样会对流量管内流场产生较大干扰, 反而降低流量测量精度。在现行的等环面测点布置方案基础上, 适当减少主流区的测点, 不会改变流量测量误差, 这样能缩短测量耙的尺寸, 降低测量耙的堵塞比, 减少测量耙的气动力, 并明显降低测试成本。但需要检查等环面截短方案及流向测量截面位置在流量管全工况范围内的适用性。测量截面越接近测量耙耙体, 流量测量相对误差越大, 测量耙的长度和高度对流量测量相对误差影响较小, 测量耙宽度对流量测量误差影响较大。为减小流量管测量耙的堵塞比, 建议总压耙布置在总温耙上游, 静压和总压测量截面应布置在同一轴向位置。总温、总压测点的径向布局 and 测点数, 总温、总压测量耙及静压测量截面的轴向位置关系, 都会直接影响面积积分法测量流量的误差, 在制定测量流量方案时, 要格外重视各测量耙的测试布局。

关 键 词: 面积积分法; 流量管; 测量耙; 布置测点; 不确定度

中图分类号: V235.1

文献标志码: A

Effects of measuring rakes on airflow measurements in flow pipe by area-integrated method

MA Hongwei^{1,2}, QU Dongping³, ZHANG Zhihong⁴, LI Jinyuan²

(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;

3. Jiangxi Hongdu Aviation Industry Group Limited Liability Company,
Aviation Industry Corporation of China, Limited, Nanchang 330024, China;

4. Science and Technology on Altitude Simulation Laboratory,
Sichuan Gas Turbine Establishment,

Aero Engine Corporation of China, Mianyang Sichuan 621000, China)

收稿日期: 2022-06-17

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); 中国航发涡轮院稳定支持资助项目

作者简介: 马宏伟(1968—), 男, 教授、博士生导师, 博士, 研究领域为内流测试技术。E-mail: mahw@buaa.edu.cn

引用格式: 马宏伟, 屈冬平, 张志宏, 等. 测量耙对流量管面积积分法测量流量的影响[J]. 航空动力学报, 2022, 37(11): 2574-2586. MA Hongwei, QU Dongping, ZHANG Zhihong, et al. Effects of measuring rakes on airflow measurements in flow pipe by area-integrated method[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(11): 2574-2586.

Abstract: The three-dimensional flow field of an aeroengine flow pipe measured by area-integrated method was numerically simulated, and the effects of radial distribution, axial position, rake size, total pressure rake, total temperature rake and static pressure measurement position on the flow measurement by area-integrated method were analyzed under different Reynolds numbers. The results showed that, with the area-integrated method of high precision measurement flow, the measurement layout can completely and accurately reflect the flow field information on the whole measurement section, especially in the boundary layer of the flow pipe ring wall, and the measurement points should be arranged as much as possible. Too many measuring points may result in excessive number and oversize of measuring harrows, causing great interference to the flow field in the flow tube and reducing the flow measurement accuracy. On the basis of the equal torus measuring point layout scheme, the flow measurement error was not be changed if the measuring points in the main flow area were reduced appropriately, thus shortening the size of the measuring harrow, reducing the clogging ratio of the measuring harrow and the aerodynamic force of the measuring harrow, and significantly saving the test cost. However, it is necessary to check the applicability of the equal torus truncation scheme and the axial measurement section position in the whole working range of the flow pipe. The closer the measuring section to the rake body indicated the greater the relative error of flow measurement. The length and height of rake had little influence on the relative error of the flow measurement, but the width of the rake had great influence on the relative error of the flow measurement. In order to reduce the clogging ratio of the measuring rake of flow pipe, it is recommended that the total pressure rake should be arranged in the upstream of total temperature rake, and the measuring section of static pressure and total pressure should be arranged in the same axial position. The radial layout and number of total temperature or total pressure measuring points, the axial position of total temperature rake or total pressure rake and static pressure measuring section directly affected the error of measuring flow by area-integrated method. Special attention should be paid to the test layout of each rake when flow testing scheme was made.

Keywords: area-integrated method; flow pipe; measuring rake; arrangement of measuring point; uncertainty

空气流量是表征航空发动机整机或压气机性能的重要参数之一,要准确获取航空发动机或压气机性能,必须准确测量空气流量。目前常用流量管测量航空发动机整机或压气机部件的空气流量^[1-6]。由于缺乏大流量的流量标准装置,测量大流量的流量管很难进行全工况范围内的试验校准获得准确的流量系数,目前大流量的航空发动机整机或压气机性能试验中常采用流量管面积积分法测量空气流量^[5-6],甚至采用面积积分法标定测量用流量管获得其流量系数,即以面积积分法测得的大流量流量管的空气流量作为基准流量或标准流量,与测量用流量管测得的流量作比对,获得测量用流量管的流量系数,用来修正测量用流量管的测量值。

面积积分法是将测量截面划分成若干微元面,在各微元面上布置测点,一般采用测量耙获取总温、总压,在流量管壁面上测量静压,由此计算通过各微元面的流量,求和获得通过整个测量截面的流量。

测量耙是面积积分法测量流量的关键设备,Castner 等^[7]测量高空低雷诺数低压涡轮性能时,发现采用的总压边界层测量耙无法准确测量流场总压,造成不能准确测得流量。马宏伟等^[8]发现测量离心压气机性能的总压耙、总温耙上测点的位置会影响测得的性能数值。Wolter 等^[9]发现风扇级下游的测量耙在径向和周向方向的数量以及安装位置会对出口尾迹等流场测量造成较大影响。NASA(National Aeronautics and Space Administration)格伦研究中心^[7]发现总压边界层测量耙无法准确流场总压信息,要想准确测量流量,应使用总压横管测量耙或加长总压边界层测量耙。

庄欢等^[10]基于数值模拟发现空气流量测量截面流动不均匀是导致带外涵的核心机地面台试验和高空台试验测量结果不一致的原因。马宏伟等^[11-13]发现探针支杆会对下游的压气机流场产生一定影响,甚至改变压气机失速裕度。郭晨阳等^[13]基于数值模拟研究了不同测量耙耙体外形对进气道内气流流动的影响,不同外形测量耙的尾流有

较大不同,对进气道内流动影响有较大差异。

Hildebrandt 等^[14]分析了空气质量流量对总温、总压、静压的敏感度,指出静压和总压的测量精度对空气质量流量测量精度有较大的影响。Beale 等^[15]分析钟形流量管流量测量不确定度来源有总压、静压、总温测量误差,其中流量测量对静压测量十分敏感,且随着马赫数增大敏感性增加,而静压测量对静压孔的设置十分敏感,同时指出测量位置对流量测量不确定度有一定的影响。刘志友等^[16]分析了空气流量测量不确定度影响因素,提出了相应的减小不确定度的方法。史建邦等^[17]基于误差传播规律给出了流量的测量误差数学模型,分析了空气流量测量误差的主要来源。钟华贵^[18]基于 GUM(guide to the uncertainty in measurement)方法,给出了当标准孔板流量计测量精度较差时被校流量装置测量不确定度的评定方法。申世才等^[19]建立了某型涡扇发动机进口空气流量计算模型及其相应的误差计算模型。李冰等^[20]发现,采用压差传感器测量压力,可有效减小空气流量和附面层的测量误差,提高试验精度。劳贤豪等^[21]使用 GUM 法进行评估航空发动机台架试验中空气流量测试不确定度,确定了测试结果不确定度的大小主要受压力测量精度的影响,而流量管尺寸以及进口总温的测量精度影响较小。

可见,影响流量管面积积分法测量精度的因素有很多,尤其在高空模拟试验全包线工况复杂来流条件下,因缺乏了解测量耙对流量管内流场的影响,流量管内的测试布局缺乏足够的理论依据和指导,而国军标要求流量测量精度不低于 0.5%,这给流量管测试提出了巨大的挑战。

针对现有研究存在的不足,本文对某流量管进行三维数值模拟,通过布置虚拟测点测量空气流量,建立了流量测量的仿真方法,基于仿真方法对空气流量测试布局方案进行研究,分析不同雷诺数下测量耙测点径向分布、轴向位置、测量耙尺寸、总压耙及总温耙和静压测点的相对位置等对面积积分法流量测量的影响,提出流量管测试布局建议。

1 数值模拟试验方法

1.1 流量管几何模型

以某航空发动机整机试验装置的流量管为研究对象,流量管计算几何模型包括前室、导流盆、收敛段和流量管测量段,整个几何模型为一个回

转体,其中导流盆为双扭线型面,在流量管测量段插入测量耙进行测量,图 1 为计算几何模型。以流量管测量段进口截面中心为原点,沿流向为 X 轴正方向,基于右手定则建立空间直角坐标系。在模拟流量管内插入测量耙时,主要考虑测量耙耙体的影响,将测量耙简化为带倒圆的长方体结构。测量耙沿流量管径向插入管内,定义测量耙沿流向方向的尺寸为长,测量耙沿周向方向的尺寸为宽,沿径向方向的尺寸为高,测量耙耙体正对来流的面为测量耙耙体前缘,沿流向和前缘相对的面为测量耙耙体尾缘。图 2 为流量管内插入 1 支测量耙的结构示意图。

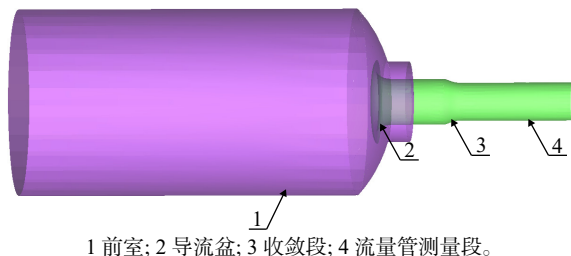


图 1 计算几何模型

Fig. 1 Computational geometry model

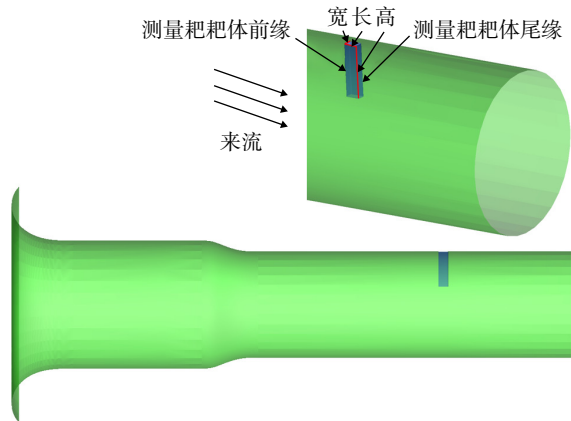


图 2 流量管段插入 1 支测量耙结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of a measuring rake inserted into the flow pipe section

1.2 计算网格和计算方法

采用 ANSYS ICEM 19.0 软件对计算几何模型手动划分六面体结构网格,为了提高网格的正交性,主要采用 O 型网格拓扑结构。

流量管内未插入测量耙时,对不同网格数量的计算模型进行计算,网格模型如图 3 所示,给定相同的边界条件,采用完全相同的计算方法,监测不同网格数量下流量管内的质量流量,图 4 为网格无关性结果,其中纵坐标为以网格无关解质

量流量无量纲化。由图可知, 网格数量达到 340 万后, 质量流量基本不发生变化。基于网格无关性验证结果, 最终确定网格数量为 374 万。流量管内插入 1 支测量耙时, 同样进行网格无关性验证, 其结果见图 5 所示, 结果表明, 网格数量达到 720 万后, 质量流量基本不发生变化。基于网格无关性验证结果, 最终确定管内插入 1 支测量耙

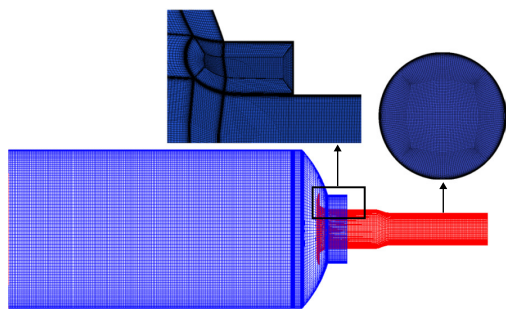


图 3 流量管计算网格模型

Fig. 3 Flow pipe computing grid model

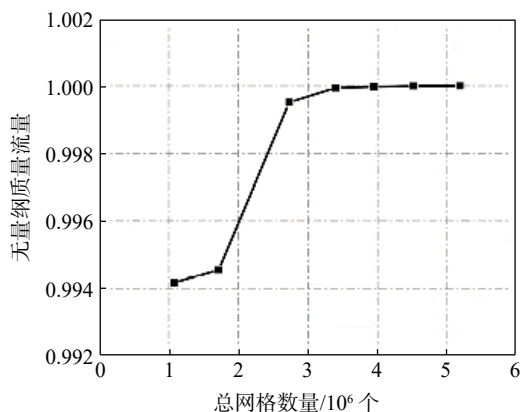


图 4 流量管内未插入测量耙时网格无关性验证

Fig. 4 Grid independence verification when no measuring harrow is inserted into flow pipe

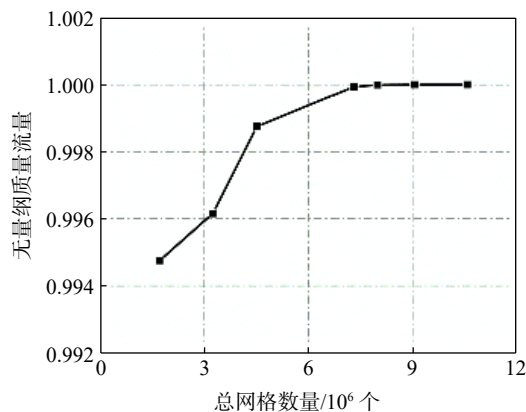


图 5 流量管内插入 1 支测量耙时网格无关性验证

Fig. 5 Grid independence verification when a measuring harrow is inserted into the flow pipe

时网格数量为 796 万。流量管内插入多支测量耙时参照插入 1 支测量耙的网格拓扑结构、网格节点设置方案进行网格划分。

本文采用 SST (shear stress transport) 湍流模型进行计算。边界条件进口给定气流总温、总压及垂直于进口截面的方向, 出口给定流量边界条件, 流量管壁面及测量耙壁面均给定光滑、绝热、无滑移边界条件。

1.3 仿真方法验证

为验证仿真方法的准确性, 基于某试验工况测量值(试验数据来自中国燃气涡轮研究院某试验台的试验结果)给定数值计算的进出口边界条件, 进口给定总温、总压, 出口给定试验测得的流量值, 采用上述仿真方法对该流量管三维流场进行计算。

图 6 对比了该工况流量管在同一流向位置某一周向位置试验和数值模拟(无测量耙)得到的总压径向分布, 横坐标 r/R 为测点所在位置处的半径和流量管段半径的比值, 其中, r 为测点所在位置处的半径, R 为流量管段的半径。纵坐标为测点处总压与进口总压的比。可见 $r/R=0.18 \sim 0.85$ 范围内, 仿真与试验测得总压相同, 随测点靠近壁面附面层, 仿真与试验测得总压稍有差异, 在最靠近壁面的 $r/R=0.99$ 处差异最大, 最大差的绝对值小于 0.008。可见, 试验值与计算值吻合良好, 本文采用的计算方法能很好反映流量管特性。

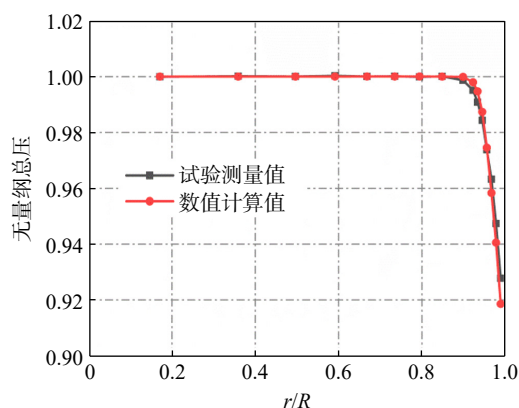


图 6 流量管数值模拟结果和试验结果对比

Fig. 6 Comparison between numerical and test results in a flow pipe

1.4 计算工况

研究测量耙测点布局对流量管雷诺数变化的适应性时, 改变进口总压、总温以改变流量管内雷诺数 Re 分别为 7.9×10^6 、 5.7×10^6 、 4.0×10^6 、 2.0×10^6 、

1.1×10^6 、 2.2×10^5 (管径为特征长度, 雷诺数改变通过改变管内流速实现), 同时控制出口流量边界条件, 实现管内雷诺数改变时马赫数 Ma 仍为 0.56。

基于 $Re=7.9 \times 10^6$ 、 $Ma=0.56$ 的工况对比流量管内有无测量耙的流量测量差异, 分析测量耙对流量管内流场的影响。为研究测量耙尺寸对流量测量的影响, 分别在流量管内插入了 6 种尺寸的测量耙, 其具体尺寸见表 1。

表 1 模拟测量耙的尺寸
Table 1 Simulating rake size mm

尺寸	长	宽	高	倒角半径
Size1	50	10	20	4
Size2	80	10	20	4
Size3	80	15	20	4
Size4	80	20	20	4
Size5	80	10	10	4
Size6	80	10	30	4

其中基于 Size1、Size2 尺寸的测量耙研究测量耙长度对流量测量的影响; 基于 Size2、Size3、Size4 尺寸的测量耙研究测量耙宽度对流量测量的影响; 基于 Size2、Size5、Size6 尺寸的测量耙研究测量耙高度对流量测量的影响。

1.5 面积积分法测量流量的计算方法

本文基于数值模拟对流量管采用面积积分法测量流量进行仿真, 将测量截面分成若干个环面, 分别在每个环面上布置虚拟测点进行虚拟测量, 即基于仿真结果, 提取流场中测点所在位置相应的测量参数。各环面测得静压、总压和总温数据后, 计算质量流量 q_{mmeaj} :

$$q_{mmeaj} = \frac{C \times \overline{p_{tj}} \times A_j \times q(M_j)}{\sqrt{T_{tj}}} \quad (1)$$

$$C = \sqrt{\frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (2)$$

$$q(M_j) = M_j \times \left[\frac{2}{k+1} \left(1 + \frac{k-1}{2} M_j^2 \right) \right]^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \quad (3)$$

$$M_j = \sqrt{\left[\left(\frac{\overline{p_{tj}}}{\overline{p_s}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \times \frac{2}{k-1}} \quad (4)$$

其中 q_{mmeaj} 为 j 环面计算得到的空气流量, $\overline{p_s}$ 为各

壁面静压测点测量值的平均值, $\overline{p_s} = \frac{1}{n_{p_s}} \sum_{i=1}^{n_{p_s}} p_{si}$, n_{p_s} 为壁面静压测点数, $\overline{p_{tj}}$ 为 j 环面各总压测点测量值的平均值, $\overline{p_{tj}} = \frac{1}{n_{p_t}} \sum_{i=1}^{n_{p_t}} p_{ti}$, n_{p_t} 为 j 环面总压测点数, $\overline{T_{tj}}$ 为 j 环面各总温测点测量值的平均值, $\overline{T_{tj}} = \frac{1}{n_{T_t}} \sum_{i=1}^{n_{T_t}} T_{ti}$, n_{T_t} 为 j 环面总温测点数, A_j 为 j 环面的面积, k 、 R 分别为比热比、气体常数, 流量管测得的流量为各环面测得的流量之和, 见公式

$$q_{mmea} = \sum_{j=1}^n q_{mmeaj} \quad (5)$$

其中 n 为划分的环面数量。

定义流量测量相对误差

$$\varepsilon_m = \frac{q_{mmea} - q_{mstd}}{q_{mstd}} \quad (6)$$

其中, ε_m 为流量测量相对误差, q_{mmea} 、 q_{mstd} 分别为质量流量测量值和质量流量真实值。 q_{mmea} 通过在流量管内布置虚拟测点计算得到, q_{mstd} 为 CFX 输出的流量管流量值, 也即为本文误差计算的基础值。

2 数值模拟试验结果分析

2.1 测点布局对流量测量的影响

在流量管内布置测点测量流量, 测试布局包括两个方面: 其一是静压、总压和总温测量截面所在的流向位置, 可用 X/D 来表征, 其中 X 表示流量管段截面沿流向距流量管段进口截面的距离, D 为流量管段的直径; 其二是静压、总压和总温测点所在的径向位置, 可以用 r/R 来表征。

本节虚拟试验测量中静压、总压和总温测点在同一流向位置, 静压通过在流量管内壁面布置 4 个静压测点测得, 4 个静压测点周向均匀分布, 总温、总压通过虚拟插入 4 支测量耙测得, 4 支测量耙周向位置和 4 个静压测点分别相同, 研究测量截面的流向位置及测量截面上总温、总压测点分布对流量管测量的影响。

图 7 为来流 $Re=7.9 \times 10^6$ 、 $Ma=0.56$ 工况下测量截面布置在不同的流向位置时, 不同的等环面测点布置方案测得流量的相对误差, 5 点等环面方案测得的流量误差最大达 1.1%, 7 点等环面方案也不能满足 0.5% 测量精度的要求。随着等环面数的增多, 即径向测点数增多, 流量测量相对误差减小, 11 点等环面且测量截面布置在 $X/D > 1.0$ 流向位置的测试方案测量误差小于 0.5%, 13

点和 15 点的等环面测试方案测量误差可减小至 0.35%, 分布几乎重合, 表明等环面测点继续增加对提高流量测量精度提高意义不大。需要注意, 测量截面布置在 $X/D=1.5\sim 2.0$ 的范围内, 流向位置对流量测量结果几乎没有影响, 而在 $X/D<1.5$ 的范围内, 测量结果可能受双扭线入口的影响。

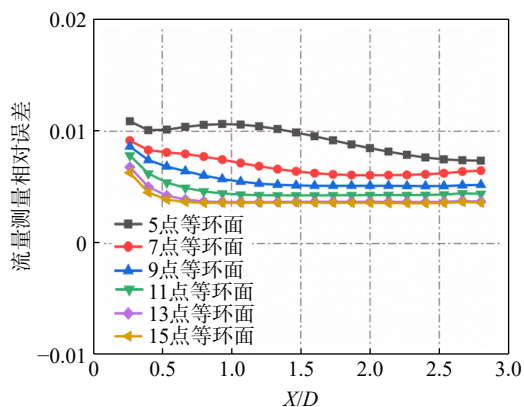


图 7 不同等环面测量方案流量测量相对误差

Fig. 7 Flow measuring errors using different measurement schemes

分析总温、总压沿径向的分布, 事实上, 流量管内的流动比较均匀, 沿周向参数变化不大, 为了能准确获取参数的径向分布, 对于每一个径向位置的参数, 由周向均匀取 106 个点的参数值平均得到。图 8、图 9 分别为 $X/D=1.47$ 的流向位置处总压、总温沿径向的分布, 横坐标为径向方向距中心点距离与流量管半径的比值, 无量纲总压比、总温比分别为当地总压、总温与截面质量平均总压、总温的比。由图可知主流区总压、总温分布较均匀, 近壁区沿径向存在较大的总压梯度和总温梯度, 且总压梯度大于总温梯度。

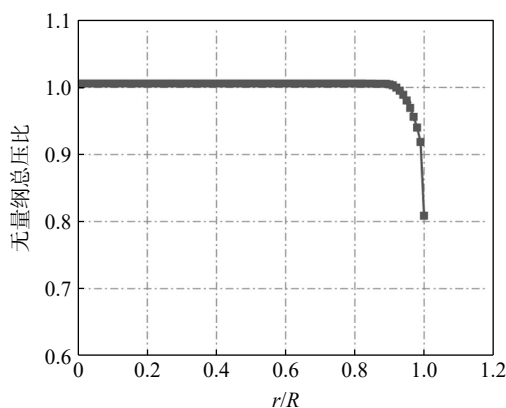


图 8 $X/D=1.47$ 轴向截面总压径向分布

Fig. 8 Radial distribution of total pressure in $X/D=1.47$ axial section

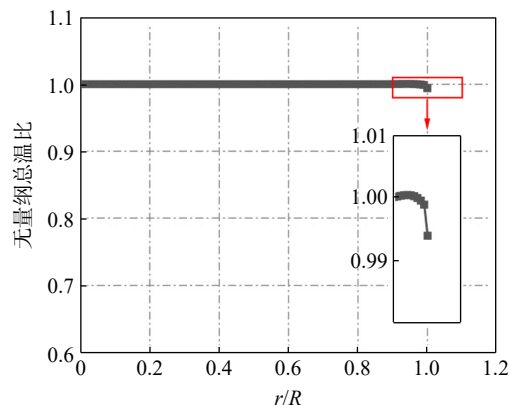


图 9 $X/D=1.47$ 轴向截面总温径向分布

Fig. 9 Radial distribution of total temperature in $X/D=1.47$ axial section

为减少对流场的干扰, 测量时应尽可能减少测点。本文研究发现, 流量管主流区的总温、总压分布较均匀, 且主流区环面总温、总压测量相对误差较小, 因此本文提出, 可减少主流区测点数量。如 15-2 点截短测点布置方案, 是在 15 点等环面测点布置方案的基础上将测量靶截短, 每个靶去掉从主流中心沿径向开始数的前 2 个测点, 每个测量靶剩 13 测点。

图 10 是来流 $Re=7.9\times 10^6$ 、 $Ma=0.56$ 工况下基于 15 点等环面的不同截短测点布置方案流量测量相对误差, 可见 15-12 点截短测点布置方案流量测量相对误差数值较小, 但随着测量截面沿流向的移动急剧减小, 甚至减小到负值。其余的截短测点布置方案流量测量相对误差几乎和 15 点等环面测点布置方案的相同。因此, 在等环面测点布置方案的基础上适当减少主流区的测点, 不会改变流量测量相对误差, 可降低测量靶的堵塞

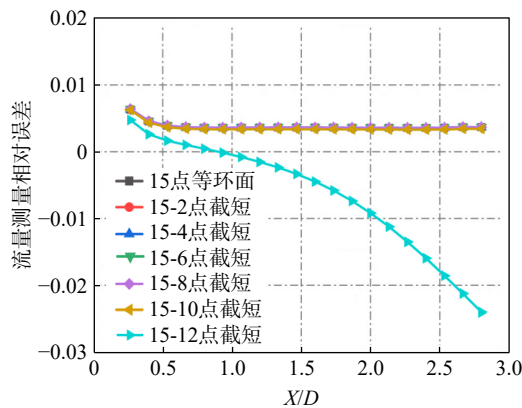


图 10 15 点等环面不同截短方案流量测量相对误差

Fig. 10 Measuring errors using 15 point truncation scheme at different Reynolds numbers

比,减少测量耙的气动力,提高测量耙的可靠性,降低测试成本。

接下来进一步说明 15-12 点截短测点布置方案流量测量误差沿流向变化的原因,图 11 为 $Re=7.9\times 10^6$ 、 $Ma=0.56$ 工况附面层厚度沿流向的变化及 15-12 点截短测点布置方案各测点所在位置,图中左轴纵坐标为附面层厚度 δ 与流量管半径 R 的比,右轴纵坐标为测点距壁面距离 $(R-r)$ 与流量管半径 R 的比,可见管内流动还未进入完全发展段,沿流向附面层厚度不断增大。随测量耙测量截面的流向位置逐渐向下游移动,离壁面最远的测点由附面层外逐渐接近附面层,最终进入附面层,相应的流量测量值相较于真实值由偏大到偏小,相对误差沿流向由正值减小到负值。也即采用截短测量方案仍是将测量截面分成若干等环面,只需保证测量耙上最远离壁面的测点位于主流区,其测得的数据即可以给主流区各环面使用。

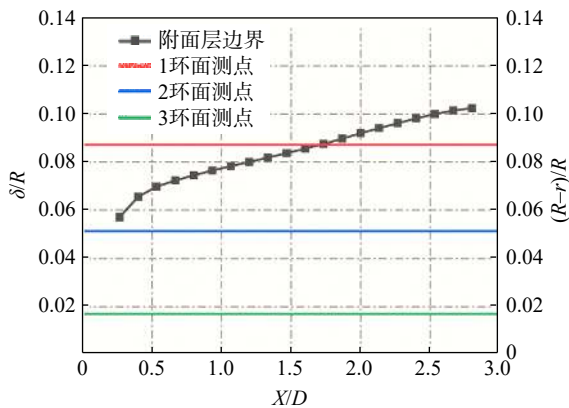


图 11 附面层边界和 15-12 点截短方案各环面测点位置

Fig.11 Boundary of boundary layer and locations of measuring points using 15-12 point truncation scheme

同样,可根据流量管具体情况,在不同的等环面测点布置方案基础上将各测量耙截短,形成满足测试要求的、不同的等环面截短测量方案。如每个测量耙上只保留近壁区 3 个测点,可形成测量耙截短后的 3 测点测量方案,图 12 对比了 $Re=7.9\times 10^6$ 、 $Ma=0.56$ 工况下测量截面布置在不同的流向位置时各截短后 3 测点布置方案的流量测量误差。可看到,测量截面布置在同一流向位置时,5-2 点截短、7-4 点截短、9-6 点截短、11-8 点截短、13-10 点截短和 15-12 点截短测点布置方案流量相对测量误差数值依次减小;在 $X/D=0.5\sim 1.25$ 范围,5-2 点截短测点布置方案流量测量相对误差最大,达 1%,15-12 点截短测点布置方案流量

测量相对误差最小,小于 0.2%;随测量截面向下游移动,5-2 点截短、7-4 点截短、9-6 点截短、11-8 点截短测点布置方案流量测量相对误差变化较小,13-10 点截短和 15-12 点截短测点布置方案流量测量相对误差数值不断减小,15-12 点截短测点布置在 $X/D>2.0$ 流向位置时流量测量相对误差绝对值超过 1%。该工况下,3 测点测量方案中最佳测点布局是 15-12 点截短方案布置在 $X/D=0.9$ 流向位置和 13-10 点截短方案布置在 $X/D=1.75$ 流向位置。

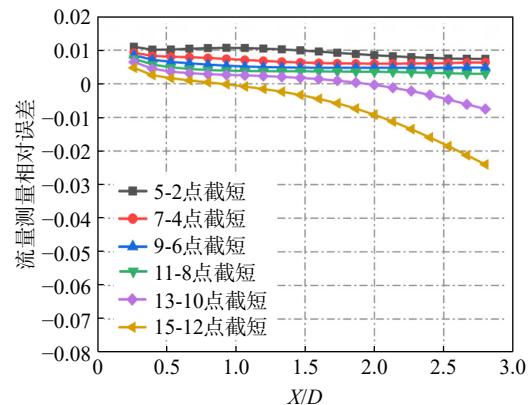


图 12 径向 3 点不同截短方案下流量测量相对误差

Fig. 12 Measuring errors using 3 point radial distribution

但需检查等环面截短方案在全工况范围内的适用性。图 13~图 15 为不同测点方案在不同雷诺数工况下流量测量相对误差。随着流量管内雷诺数降低,图 13 表明,采用 9-6 点截短测点布置方案流量测量相对误差略有增大,在本文模拟的雷诺数范围内,该方案流量测量相对误差变化不超过 0.5%,主要原因是 9-6 点截短测点布置方案离壁面最远的测点始终位于附面层外。

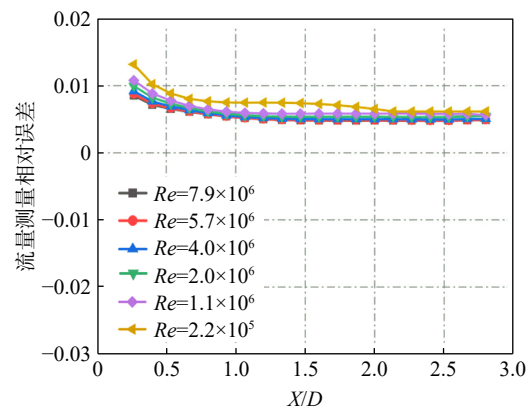


图 13 不同雷诺数下 9-6 点截短方案流量测量相对误差

Fig. 13 Measuring errors using 9-6 point truncation scheme at different Reynolds numbers

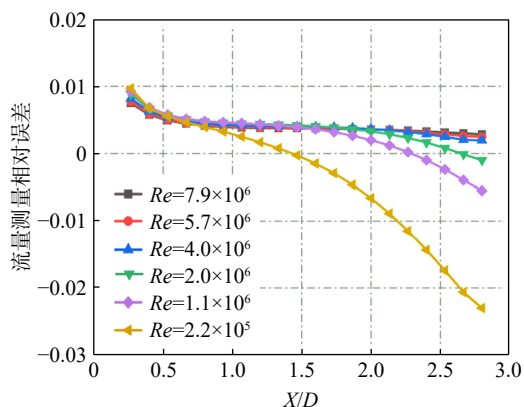


图 14 不同雷诺数下 11-8 点截短方案流量测量相对误差

Fig. 14 Measuring errors using 11-8 point truncation scheme at different Reynolds numbers

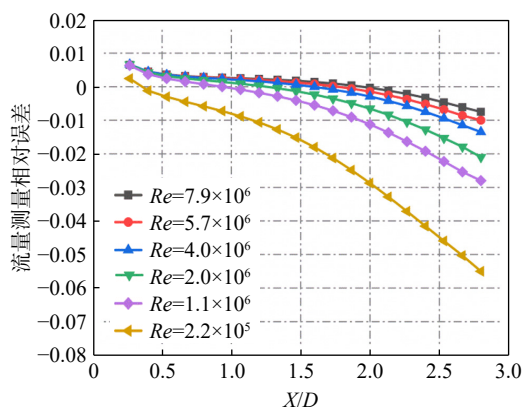


图 15 不同雷诺数下 13-10 点截短方案测量相对误差

Fig. 15 Measuring errors using 13-10 point truncation scheme at different Reynolds numbers

图 14 表明, 雷诺数越低, 采用 11-8 点截短测点布置方案流量测量相对误差沿流向下降越快, 即测量截面流向位置对流量测量相对误差的影响越大, 随着测量截面移向下游, 不同雷诺数下流量测量相对误差差异增大。11-8 点截短测点布置在方案 $X/D > 2.0$, 在 $Re = 2.2 \times 10^5$ 工况测得流量误差超过 0.6%。采用 13-10 点截短测点布置在方案 $X/D > 2.0$, 在 $Re = 2.2 \times 10^5$ 工况测得流量误差超过 3%, 如图 15 所示, 不可接受。

对比上述三种测点布置方案流量测量相对误差对雷诺数变化的敏感性, 可见 9-6 点截短测点布置方案测量误差对雷诺数的变化较不敏感。

2.2 测量耙尺寸对流量测量的影响

分析静压、总压和总温测量截面在同一流向位置, 静压通过壁面布置 4 个静压测点进行测量, 总温、总压通过插入 4 支测量耙进行测量的测量方案下, 测量耙尺寸对采用面积积分法流量测量

相对误差的影响。基于 $Re = 7.9 \times 10^6$ 、 $Ma = 0.56$ 工况, 给定与流量管内未插入测量耙时相同的边界条件, 并采用相同的计算方法, 对比流量管内有无测量耙情况下采用面积积分法时流量测量相对误差的差异。其中, 测量耙的前缘在 $X/D = 1.73$ 处。

为了研究测量耙长度对采用面积积分法测量流量相对误差的影响, 在流量管内分别插入 4 支 Size1、Size2 长度的测量耙。图 16 为 $Re = 7.9 \times 10^6$ 、 $Ma = 0.56$ 工况, 测量截面布置在测量耙体上游不同流向位置流量管内插入不同长度测量耙与未插入测量耙时采用 13-10 点截短测点布置方案流量测量相对误差对比, Size1、Size2 长度的测量耙均能满足 13-10 点截短测点布置方案测点位置布置需求。

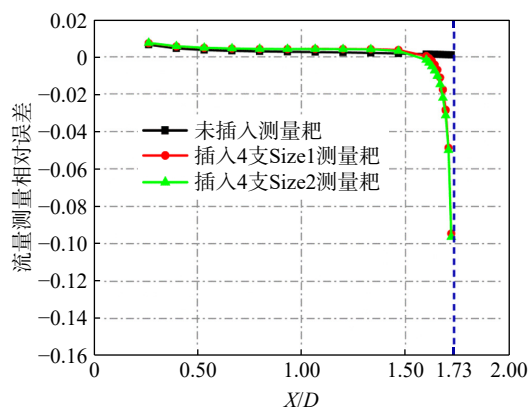


图 16 插入不同长度测量耙时 13-10 点截短方案流量测量相对误差

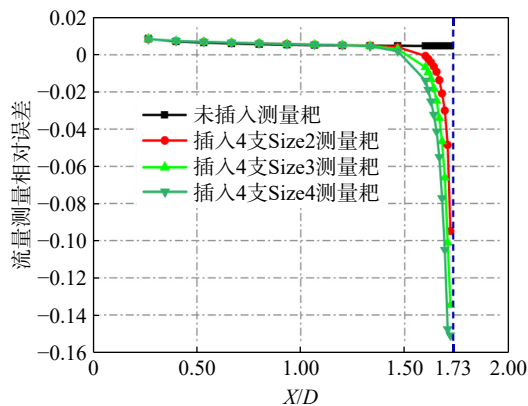
Fig. 16 Flow measurement errors with different wide rakes using 13-10 point truncation measuring scheme

可看到, 测量截面布置在 $X/D < 1.33$ 的流向位置范围内, 插入不同长度测量耙时流量测量相对误差与未插入测量耙时流量测量相对误差差异不超过 0.001; 测量截面布置在测量耙体上游 $X/D > 1.33$ 流向位置范围内, 测量耙的插入会导致流量测量相对误差数值减小; 测量截面越接近测量耙, 流量测量相对误差越小, 最佳测量截面在 $X/D = 1.55$, 与没有插入测量耙的最佳测量截面在 $X/D = 1.75$ 相比, 插入此测量耙使最佳测量截面向上游移动了 $0.2D$ 。测量截面布置在测量耙体上游 $X/D > 1.6$ 流向位置范围内, 测量耙的插入使得流量测量误差数值小于零, 且其数值沿流向急剧减小, 即误差绝对值急剧增大。

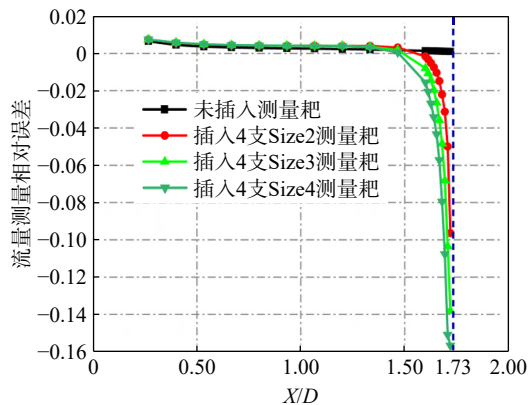
同时, 测量耙的长度对流量测量相对误差的影响较小, 在同一流向位置处布置测量截面进行

流量测量, 较长的 Size2 测量耙流量测量相对误差略大于较短的 Size1 测量耙, 两种长度的测量耙流量测量相对误差差异不超过 0.003。

为研究测量耙宽度对采用面积积分法测量流量相对误差的影响, 在流量管内分别插入 4 支 Size2、Size3、Size4 三种宽度的测量耙。图 17 为 $Re=7.9\times 10^6$ 、 $Ma=0.56$ 工况, 测量截面布置在测量耙体上游不同流向位置流量管内插入不同宽度测量耙与未插入测量耙时采用 9-6 点截短、13-10 点截短测点布置方案流量测量相对误差对比, Size2、Size3、Size4 测量耙均能满足 9-6 点截短测点布置方案测点位置布置需求。



(a) 9-6点截短测点布置方案



(b) 13-10点截短测点布置方案

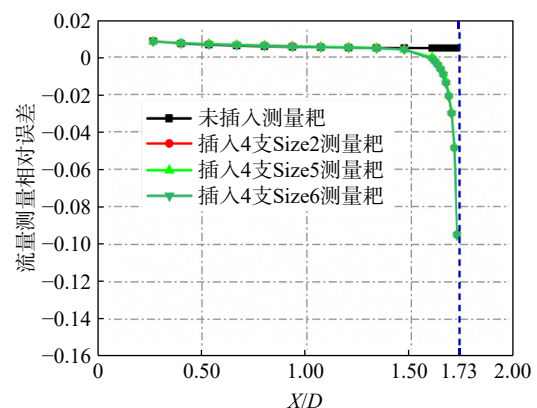
图 17 插入不同宽度的测量耙时流量测量相对误差

Fig. 17 Flow measurement errors with different wide rakes

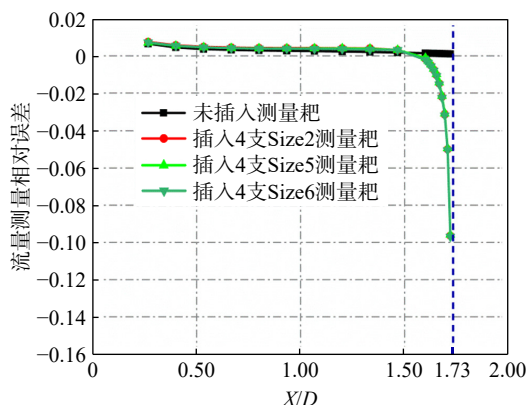
图 17(a) 表明, 测量截面布置在测量耙体上游且 $X/D > 1.33$ 流向位置范围内, 测量耙的插入会导致流量测量相对误差数值减小, 测量耙体的宽度越大, 流量测量相对误差越小; 在测量耙上游 $X/D > 1.6$ 流向位置范围内, 测量耙的插入使得流量测量误差小于零, 且沿流向急剧减小, 测量耙体宽度越大, 流量测量相对误差下降越快, 即测

量截面越接近测量耙体, 流量测量相对误差绝对值越大, 在测量耙上游同一流向位置布置测量截面时, 测量耙宽度越大, 流量测量相对误差绝对值越大。例如, 要实现流量测量相对误差绝对值小于 0.02, 对于 Size2 尺寸的测量耙, 测量截面距离测量耙体前缘距离与流量管直径的比值 X/D 应大于 0.05; 对于 Size3 尺寸的测量耙, X/D 应大于 0.09; 对于 Size4 尺寸的测量耙, X/D 应大于 0.12; 即测量耙的宽度越大, 其测点布置截面应越远离耙体。

图 17(b) 表明, 采用 13-10 点截短测点布置方案流量测量相对误差在测量耙上游随测量截面流向位置的变化规律和 9-6 点截短测点布置方案的相同。即测量截面越接近测量耙体, 流量测量相对误差绝对值越大, 在测量耙上游同一流向位置布置测量截面时, 测量耙宽度越大, 流量测量相对误差绝对值越大。对于宽度较大的测量耙, 其测点布置截面应相对远离耙体。为了研究测量耙高度对采用面积积分法测量流量相对误差的影响, 在流量管内分别插入 4 支 Size2、Size5、Size6 不同高度的测量耙。图 18 为 $Re=7.9\times 10^6$ 、 $Ma=0.56$ 工况, 测量截面布置在测量耙体上游不同流向位置, 流量管内插入不同高度测量耙与未插入测量耙时, 采用 9-6 点、13-10 点截短截短测点布置方案流量测量相对误差。Size2、Size5、Size6 尺寸的测量耙均能满足 9-6 点截短、13-10 点截短测点布置方案测点位置布置需求。可以看到, 测量耙的高度对流量测量相对误差的影响较小, 在同一流向位置处布置测量截面进行流量测量, 三种尺寸测量耙流量测量相对误差差异不超过 0.001, 可忽略不计。同样, 测量耙的插入使得最佳测量截面的位置向上游移动至 $X/D=1.55$ 附近。



(a) 9-6点截短测点布置方案



(b) 13-10点截短测点布置方案

图 18 插入不同高度的测量耙时流量测量误差

Fig. 18 Flow measurement errors with different high rakes

2.3 测量耙对流量管内流场的影响

上文分析均基于静压、总温、总压测量截面在同一流向位置,且测量耙测点同时测量总温、总压,各总温测点和总压测点重合。为了降低堵塞比,或受流量管结构限制,总温、总压梳有时无法放置在同一流向截面进行测量,这就需要明晰静压测量截面、总压测量截面及总温测量截面的相对位置关系,是否会影响流量管测量精度。

为此,本节基于 $Re=7.9 \times 10^6$ 、 $Ma=0.56$ 工况,给定相同的边界条件,并采用相同的计算方法,对比流量管内有、无测量耙情况下流量管内流场,研究静压、总温、总压测量截面的布局。流量管内插入一支矩形带倒圆测量耙,其长、宽、高分别为 250、15、20 mm,倒角半径为 4 mm,测量耙的前缘在 $X/D=1.73$ 处。

图 19、图 20 为测量耙下游流量管内不同流向位置及 XY 平面的总压、总温分布,无量纲总压为当地总压和流量管段进口质量平均总压的比,无量纲总温为当地总温和流量管段进口质量平均总温的比值,可以看到,测量耙对截面的总压、总温影响的范围较小,主要是沿 X 方向正对测量耙的小部分区域。因此,为使下游测量耙测得的数据能较准确反映测量截面的参数,当总温测量耙和总压测量耙数量相同时,下游测量耙不应沿 X 方向正对上游测量耙布置。

图 21 为流量管内有、无测量耙时质量平均静压、总压和总温沿流向的分布,静压比、总压比、总温比是流量管流向截面质量平均参数与流量管进口截面质量平均参数的比。可看到测量耙的插入会导致质量平均静压和总压在测量耙位置处骤变,而总温不变。因此,静压测量截面和总压测

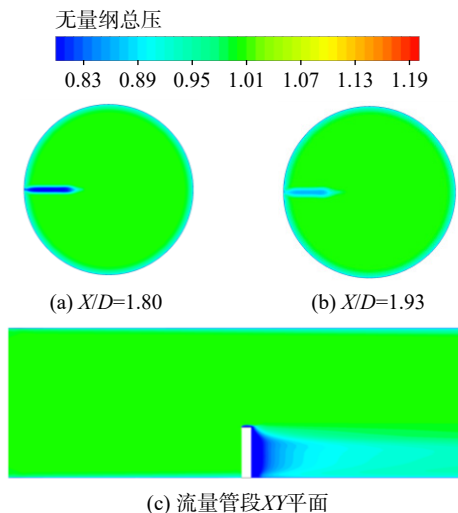


图 19 流量管段不同位置总压分布

Fig. 19 Distribution of total pressure at different sections

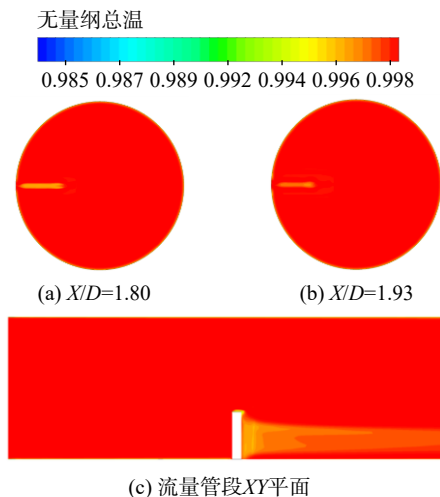
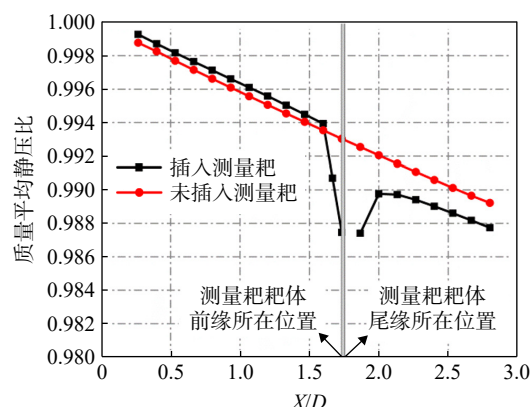


图 20 流量管段不同位置总温分布

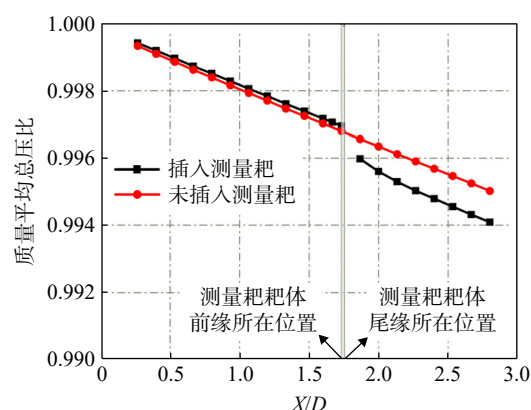
Fig. 20 Variations of total temperature at different sections

量截面之间不应有测量耙体。测量耙的测量方式为由耙体前缘向上游伸出测点,那么静压测量截面应该布置在总压测量耙体前缘的上游。

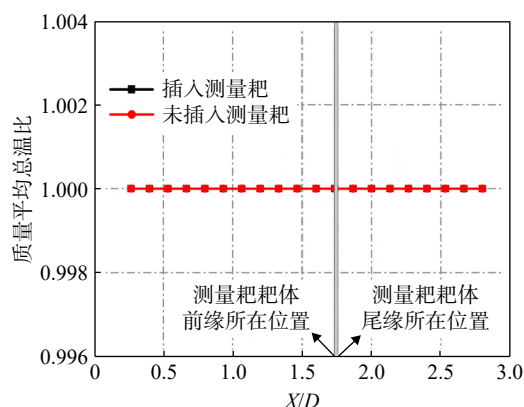
为确定总温测量截面的相对位置,本文研究了测量耙对流量管内静压不均匀度、总压不均匀度和总温不均匀度的影响。图 22 对比了插入测量耙和未插入测量耙截面静压不均匀度、总压不均匀度、总温不均匀度沿流向的分布,可看到,测量耙的插入引起测量耙耙体上游、下游截面静压不均匀程度显著增大,使测量耙上游截面主流总压不均匀减小,下游总压不均匀度增大,造成测量耙上游的截面主流总温不均匀减小,下游总温不均匀度增大。对比测量耙对下游总压不均匀度和总温不均匀度的影响程度,可看到,总温不均



(a) 质量平均静压



(b) 质量平均总压



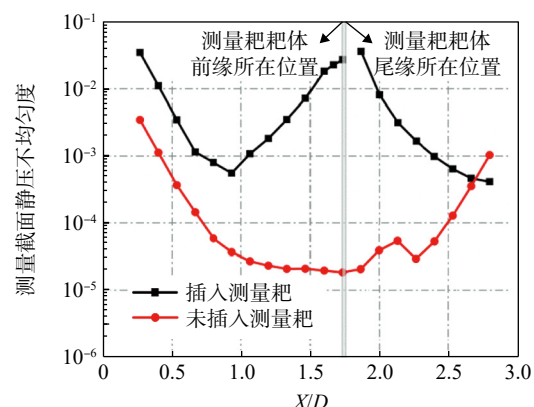
(c) 质量平均总温

图 21 有无测量耙时截面质量平均参数沿流向的变化

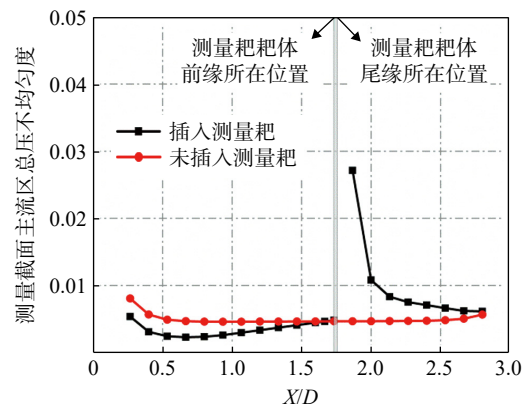
Fig. 21 Streamwise variations of mass-averaged parameters of sections with and without a rake

匀度受测量耙影响变化最小, 总温测量截面可布置在总压测量耙的下游。

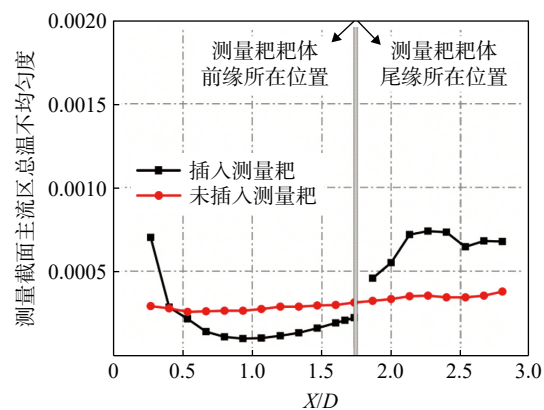
需进一步对比总温测量耙置于总压测量耙上游和总压测量耙下游时流量测量相对误差的差异。以两个典型测试布局进行对比, 采用的所有的总压测量耙、总温测量耙外形尺寸相同, 为矩形带倒圆测量耙, 其长、宽、高分别为 80、20、20 mm, 倒角半径为 4 mm。



(a) 质量平均静压



(b) 质量平均总压



(c) 质量平均总温

图 22 有无测量耙下截面参数不均匀度沿流向的变化

Fig. 22 Streamwise variations total temperature uniformity with and without a rake

测试布局方案一为在流量管内壁面布置周向均匀分布的 4 个静压测点测量静压, 在流量管内插入 4 支周向均匀分布、周向位置与 4 个静压测点相同的测量耙测量总压, 且测量耙的前缘位于 $X/D=1.47$ 的流向位置, 所有静压测点、总压测点所处的流向位置相同, 位于 $X/D=1.33$ 的流向位置, 流量管内插入 3 支周向均匀分布的测量耙用于测量总温, 测量耙前缘位于 $X/D=1.80$ 的流向位置,

总温测量截面位于 $X/D=1.67$ 的流向位置, 即总温测量耙位于总压测量耙的下游, 测试布局方案一示意图见图 23。

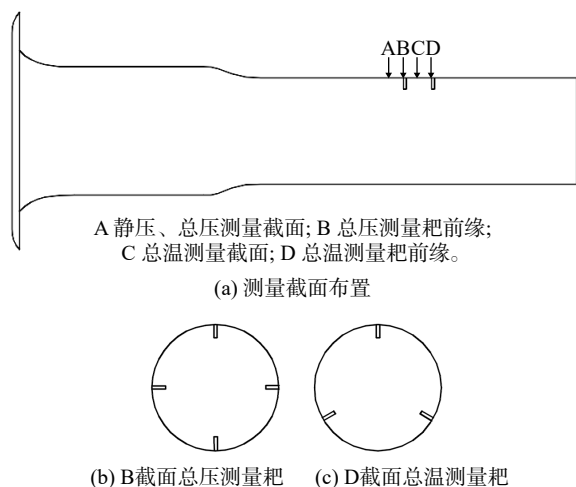


图 23 测试布局方案一

Fig. 23 Test layout plan 1

测试布局方案二为在流量管内插入 3 支周向均匀分布的测量耙用于测量总温, 测量耙的前缘位于 $X/D=1.47$ 的流向位置, 总温测量截面位于 $X/D=1.33$ 的流向位置, 流量管内壁面布置 4 个周向均匀分布的静压测点测量静压, 在流量管内插入 4 支周向均匀分布、与 4 个静压测点周向位置相同的测量耙测量总压, 总压测量耙前缘位于 $X/D=1.80$ 的流向位置, 静压、总压测量截面位置相同, 位于 $X/D=1.67$ 的流向位置, 即总温测量耙位于总压测量耙的上游, 测试布局方案二示意图见图 24。

表 2 对比了两种测量截面布置方案下, 分别

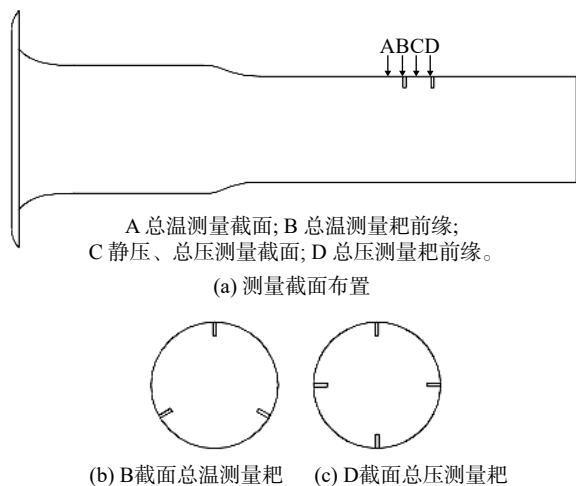


图 24 测试布局方案二

Fig. 24 Test layout plan 2

采用 9-6 点截短、11-8 点截短、13-10 点截短径向测点布置测量 $Re=7.9 \times 10^6$ 、 $Ma=0.56$ 工况下流量的相对误差。可看到, 总温测量截面位于静压、总压测量截面上游的布置方案, 其流量测量相对误差分别 -0.137 、 -0.219 、 -0.147 , 总温测量截面位于总压测量耙下游测量方案的流量测量相对误差分别 -0.023 、 -0.026 、 -0.031 , 测试方案二测量误差显著大于方案一, 测试方案二, 这是由于测试方案二其静压、总压测量截面上下游均有测量耙体, 导致其静压、总压不均匀度显著增大, 而对于测试方案一, 静压、总压测量截面位于测量耙体上游, 总温测量截面上下游均有测量耙体, 但总温不均匀度受测量耙体的影响较小。即总温测量耙布置在总压测量耙及静压测量截面上游的测试方案不可接受。

表 2 流量测量相对误差

Table 2 Measuring errors of mass flow

测点布置方案	9-6 点截短	11-8 点截短	13-10 点截短
方案一	-0.023	-0.026	-0.031
方案二	-0.137	-0.219	-0.147

可见, 测量耙测试布局, 包含总温、总压测点的径向布局和测点数, 总温、总压测量耙及静压测量截面的轴向位置关系, 都会直接影响面积积分法测量流量的误差, 在制定面积积分法测量流量方案时, 要格外重视各测量耙的测试布局。

3 结 论

1) 现行的 5 点或 7 点等环面测试方案很难满足流量管 0.5% 测量精度的要求。增加等环面数, 可减小流量测量相对误差, 继续增加等环面到 13 以上对提高流量测量精度效果不明显。

2) 高精度的测量流量的面积积分法, 理论上要求测试布局能全面准确反映整个测量截面上的流场信息, 尤其是流量管环壁附面层区流场不均匀性较大, 应尽可能多地布置测点。

3) 测量耙是面积积分法测量流量的关键设备, 太少的测点测量流量可能不够准确, 太多的测点可能使测量耙过多、尺寸过大, 会对流量管内流场产生较大干扰, 反而降低流量测量精度, 甚至影响整个试验结果。

4) 在现行的等环面测点布置方案的基础上, 建议适当减少主流区的测点, 这样不会改变流量测量相对误差, 能缩短测量耙的尺寸, 降低测量耙的堵塞比, 减少测量耙的气动力, 提高测量耙

的可靠性,能明显降低测试成本。但需要检查等环面截短方案及轴向测量截面位置在流量管全工况范围内的适用性。

5) 测量耙测量截面越接近耙体,流量测量误差越大;测量耙长度和高度对测量误差影响较小,测量耙宽度引起的流量测量误差较大;本文中的量化结论可为探针设计提供参考。

6) 为减小流量管测量耙的堵塞比,建议总压耙布置在总温耙上游,静压和总压测量截面应布置在同一轴向位置,当静压、总压测量截面和总温测量截面不重合时,静压和总压测量截面应布置在总温测量截面的上游。

7) 测量耙测试布局,包含总温、总压测点的径向布局和测点数,总温、总压测量耙及静压测量截面的轴向位置关系,都会直接影响面积积分法测量流量的误差,在制定面积积分法测量流量方案时,要格外重视各测量耙的测试布局。

参考文献:

- [1] 侯敏杰. 高空模拟试验技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2014.
- [2] 杜鹤龄. 航空发动机高空模拟[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [3] PATTERSON G, CROSS M. Ground test simulation fidelity of turbine engine airstarts[R]. Washington: 29th Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1993.
- [4] BEALE D. Experimental measurement of venturi discharge coefficient including sensitivity to geometric and flow quality variables [D]. Knoxville: University of Tennessee, 2002.
- [5] 中国航空综合技术研究所. 航空燃气涡轮发动机压气机气动性能试验方法: HB 7115-2020[S]. 北京: 航空工业出版社, 2020: 6-10.
- [6] ASME. Measurement of gas flow by bellmouth inlet flowmeters: MFC-26-2011[S]. New York: ASME International, 2018: 5-10.
- [7] CASTNER R. High altitude small engine test techniques at the NASA glenn propulsion systems lab[R]. Missouri: 22nd AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference, 2002.
- [8] MA Hongwei, ZHANG Jun. Effects of measuring positions on the measured aerodynamic performance of a centrifugal compressor[J]. Journal of Thermal Science, 2010, 19(2): 110-114.
- [9] WOLTER J D, AREND D J, HIRT S M, et al. Development of a rotating rake array for boundary-layer-ingesting fan-stage measurements[R]. Atlanta: 53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2017.
- [10] 庄欢, 郭昕, 马前容, 等. 对带外涵的某型核心机空气流量确定的数值分析与试验研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2008, 21(2): 11-14, 52.
ZHUANG Huan, GUO Xin, MA Qianrong, et al. Numerical and experimental study of the air flow determination of a core engine with by-pass duct[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2008, 21(2): 11-14, 52. (in Chinese)
- [11] MA Hongwei, LI Shaohui, WEI Wei. Effects of probe support on the flow field of a low-speed axial compressor[J]. Journal of Thermal Science, 2014, 23(2): 120-126.
- [12] MA Hongwei, LI Shaohui, WEI Wei. Effects of probe support on the stall characteristics of a low-speed axial compressor[C]// Proceedings of 12th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows. Lercici: Journal of Thermal Science, 2015: 43-49.
- [13] 郭晨阳, 田晓平. 不同类型测量耙对进气道流场影响的研究[J]. 中国科技信息, 2019(12): 48-50.
GUO Chenyang, TIAN Xiaoping. Study on the effect of different measuring harrows on inlet flow field[J]. China Science and Technology Information, 2019(12): 48-50. (in Chinese)
- [14] HILDEBRANDT P, JOHANN E. Reducing static pressure measurement errors to increase accuracy of air mass flow measurement [R]. Albuquerque: 20th AIAA Advanced Measurement and Ground Testing Technology Conference, 1998.
- [15] BEALE D, HAND T, SEBOURN C. Development of a bellmouth airflow measurement technique for turbine engine ground test facilities[R]. Salt Lake City: 37th Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2001.
- [16] 刘志友, 马前容, 师伟. 改善高空台试验中发动机性能参数不确定度的方法探讨[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2011, 24(1): 1-7.
LIU Zhiyou, MA Qianrong, SHI Wei. Methods of aero-engine performance parameter uncertainty improvement in simulated altitude test[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2011, 24(1): 1-7. (in Chinese)
- [17] 史建邦, 申世才, 高扬, 等. 航空发动机空气流量测量与计算方法研究[J]. 工程与试验, 2011, 51(4): 15-18, 41.
SHI Jianbang, SHEN Shicai, GAO Yang, et al. Research on the aero-engine airflow measurement and calculation method[J]. Engineering & Test, 2011, 51(4): 15-18, 41. (in Chinese)
- [18] 钟华贵. 一种空气流量测量装置对比标定和不确定度评定方法[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2011, 24(2): 1-4.
ZHONG Huagui. An evaluation method on calibration and measurement uncertainty of an airflow rate measuring[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2011, 24(2): 1-4. (in Chinese)
- [19] 申世才, 王小峰, 高扬, 等. 某型涡扇发动机进口空气流量测量参数敏感性分析[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(7): 1806-1808.
SHEN Shicai, WANG Xiaofeng, GAO Yang, et al. Engine airflow measurement and calculation based on rake parameters[J]. Computer Measurement & Control, 2012, 20(7): 1806-1808. (in Chinese)
- [20] 李冰, 郝晓乐, 申世才. 航空发动机进口空气流量测量方案分析[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2013, 26(4): 54-57.
LI Bing, HAO Xiaole, SHEN Shicai. Measure method of aero-engine inlet airflow[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2013, 26(4): 54-57. (in Chinese)
- [21] 劳贤豪, 朱银方. 发动机台架试验空气流量测量不确定度分析[J]. 航空精密制造技术, 2022, 58(2): 23-26.
LAO Xianhao, ZHU Yinfang. Uncertainty analysis of gas flow measurement in gas turbine rig test[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2022, 58(2): 23-26. (in Chinese)

(编辑: 张 雪)