

管道对进气道动态总压测量影响修正方法

徐彬彬, 王 学, 巫朝君, 朱任宇, 曾维平, 唐建平

(中国空气动力研究与发展中心 低速空气动力研究所, 四川 绵阳 621000)

摘 要: 进气道实验需要测量进气道出口截面的动态总压, 当动态压力传感器与测点之间存在管道时, 动态总压测量值与真值之间存在较大误差, 进而会影响进气道出口截面湍流度的测量精度。通过在中国空气动力研究与发展中心涡轮动力模拟器校准箱的实验, 系统地研究了管道对动态总压和湍流度测量的影响。实验结果表明: 管道对动态总压和湍流度测量的影响非常严重, 动态总压脉动量频域值可被放大 10 倍以上, 湍流度可以放大 2.8 倍以上。基于修正耗散模型, 通过实验结果对修正耗散模型进行了标定, 并提出了动态总压管道影响修正方法, 修正方法能够有效减小管道所引起的测量误差。

关 键 词: 风洞实验; 动态总压; 湍流度; 管道影响; 修正方法

中图分类号: V211.74

文献标志码: A

Correction method for the effect of tube on the measurements of fluctuation total pressures in inlet

XU Binbin, WANG Xue, WU Chaojun, ZHU Renyu, ZENG Weiping, TANG Jianping

(Low Speed Aerodynamics Institute,

China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China)

Abstract: The fluctuation total pressures in aerodynamic interface plane need be measured in inlet experiments. The tube between the pulsating pressure sensor and the measurement point may lead to larger error between the measurement value and the truth value, and also generate larger effect on the measurement of the turbulence. The experiments in Turbine Power Simulation calibration tank of China Aerodynamics Research and Development Center were performed to research the effect of tube on the measurement of fluctuation total pressure and the turbulence. Experiment results showed that the effect of tube seriously affected the measurement of the fluctuating total pressure and the turbulence. The value of fluctuating total pressure in frequency can be magnified more than 10 times and that of turbulence can be magnified more than 2.8 times. A correction method based on the improved dissipation model was proposed and calibrated, which can effectively reduce the measuring error brought by the tube.

Keywords: wind tunnel experiments; fluctuation total pressure; turbulence; effect of tube; correction method

飞行器进气道性能优劣直接关系到发动机能否正常工作以及工作效率。进气道风洞实验是获得飞行器进气道性能参数的重要手段^[1]。其中进

气道出口(aerodynamic interface plane, AIP)截面湍流度是进气道性能的重要参数之一, 其由 AIP 截面上的动态总压计算得到。在中国空气动力研究

收稿日期: 2021-08-31

基金项目: 中国空气动力研究与发展中心风雷青年创新基金(PJD20190236)

作者简介: 徐彬彬(1988—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事风洞实验技术、辐射流体力学、气动弹性等方面研究。E-mail: xubb2010@163.com

通信作者: 王学(1981—), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为气动弹性。E-mail: 15082194955@qq.com

引用格式: 徐彬彬, 王学, 巫朝君, 等. 管道对进气道动态总压测量影响修正方法[J]. 航空动力学报, 2022, 37(12): 2719-2728. XU Binbin, WANG Xue, WU Chaojun, et al. Correction method for the effect of tube on the measurements of fluctuation total pressures in inlet[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(12): 2719-2728.

与发展中心(CARDC)FL-13 风洞一次进气道实验中,湍流度测量值偏大。经分析发现用于安装传感器的靶管过于细长,传感器无法安装到靶管顶端,其传感器感受面与测点之间存在一段管道,导致动态压力的测量值误差较大,进而导致所测湍流度值偏大。在 FL-14 风洞的进气道实验中,初步研究了管道对动态总压和湍流度的影响,在一定管道尺寸下,湍流度可被放大 3 倍以上^[2]。由此可见,管道对进气道湍流度测量的影响非常严重。因此有必要对管道影响下的动态总压和湍流度测量精准度进行系统的评估和修正。

管道对动态静压的测量影响在国内外都有一定的研究基础。Bergh 和 Tijdeman 提出了管道系统频响函数的理论公式^[3](频响函数是管道输出端动态压力和输入端动态压力在频域上的比值, frequency response function, FRF); Irwin 通过限制器改善了测压管路系统的频响函数^[4]; Tijdeman 和 Bergh 通过风洞实验发现输入端流速对管道效应有一定影响^[5]。Gumley 在风工程测压实验中,提出了管道效应修正方法^[6-7]; Holmes 等利用 Bergh-Tijdeman 理论对测压管道系统进行了优化^[8-10]; Gerstoft 将电路模拟理论运用于风洞管路测压系统,取代了对流体动力方程直接求解的方法^[11]。Yoshida 等通过实验发现管道弯曲、弯曲位置以及弯曲截面面积对管道效应的影响较小^[12-13]。国内苏而皇、蔡亦钢分别对管道动态分析进行了研究,基于电路传输理论提出了矩阵传递关系来表达管路输入与输出端的压力及流量关系^[14-15]。谢壮宁等对动态风压测压管路系统的动态特性进行了分析,并开发了相关分析程序^[16-17];周昶毅等基于耗散模型对单通道测压管路系统进行了优化^[18];马文勇等使用耗散模型以及实验方法对测压管路信号的畸变及修正进行了研究^[19];王学等通过实验手段发现导压管长度、内径对管道效应影响较大,而钢、铜、聚氯乙烯(PVC)等材质以及弯曲度等因素对管道效应的影响较小,并基于实验结果提出了低速风洞实验中管道效应的修正方法^[20]。国内外在理论上和实验上都对动态静压测量时的管道影响进行了研究,也给出了理论修正方法和实验修正方法。但理论修正方法繁琐且精度不高,而实验修正方法只能得到固定管道尺寸和来流速度下的频响函数。而对于不同速度、不同尺寸的管道影响并未给出理想的修正方法;而且国内外

对管道效应的研究主要集中在模型表面动态静压的测量,而对进气道内动态总压测量的影响研究较少。静压测量时,气流方向与测点法向垂直;而总压测量时,气流方向与测点法向一致,管道对动态静压测量与对动态总压测量的影响规律可能不一致,因此需要对动态总压测量时管道影响规律进行研究。

本文在 CARDC 的涡轮动力模拟器(TPS)校准箱开展实验,系统地研究了不同管道尺寸以及不同来流速度条件下,管道对进气道内动态总压和湍流度测量的影响;实验结合理论对修正耗散模型^[21]进行了标定,提出了管道影响下的动态压力和湍流度修正方法,并在 TPS 校准箱上使用斜切模拟进气道进行了实验验证。

1 TPS 校准箱实验

1.1 实验模型

实验模型为铝制圆柱形测量段,测量段长 190 mm,内径 130 mm,外径 150 mm,如图 1(a)所示。在进气道后侧的测量段内布置 8 个测量靶,每个靶上有 5 个稳态总压探头和 1 个动态总压测量探头,共 40 个稳态总压测点和 8 个动态总压测点 $P_{t1} \sim P_{t8}$,如图 1(b)所示;稳态测点使用外径为 1 mm 的钢管,动态测点使用外径 2.0 mm 的铜管;测量截面的阻塞度小于 1%,测量靶靶身处阻塞度小于 8%。另外,在测量截面内壁上布置 8 个静压测点 $P_{s1} \sim P_{s8}$ 。测量段上游直接连通大气,并未加装喇叭口进行整流。通过测量截面的总压与静压可以计算测量段内总压分布、马赫数分布以及流量。测量靶上的动态总压测点用于研究管道对动态总压测量的影响。通过改变动态压力传感器在管道内的安装位置以及改变管道内径来改变动态压力传感器前方管道的长度、内径;通过调节测

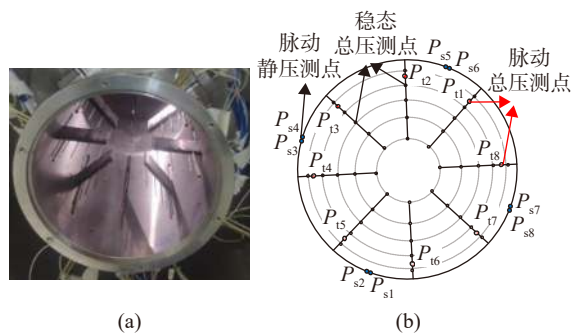


图 1 实验模型和测点图

Fig. 1 Picture for experiment model and measuring points

量段后方抽吸压力来改变测量段内空气流速, 以此研究不同管道长度、内径以及不同风速下管道效应对湍流度测量的影响。

测量截面上的 40 个稳态压力测点按等面积分布, 动态压力测点布置在测量段内径 90% 处。稳态总压测点通过钢管和 PVC 软管接入 PSI 公司生产的 8400 电子扫描阀系统进行测量。稳态压力测量时采集时间 3 s, 采集频率为 100 Hz, 采集后的数据作平均处理。动态总压测点通过安装在靶管内的动态压力传感器测量, 编号分别为 $P_{t1} \sim P_{t8}$ 。实验所使用的动态压力传感器型号为 kulite 公司的 XCQ-62, 量程为 172 500 Pa。实验时采集时间为 3 s, 采集频率为 9 600 Hz。

1.2 实验设备

TPS 校准箱是 CARDC 自主研发的动力模拟器校准实验装置^[22-24], 主要由校准箱体、高压供气系统、天平及空气桥系统、低压文式管系统、真空系统、测量和监视系统等子系统构成, 校准箱示意图和实物图见图 2。本次实验只测量模型内部测量截面上的稳态压力和动态压力, 因此不需要使用高压供气与天平及空气桥等系统。低压文氏管系统由一系列不同大小的低压文氏管组成, 通过控制低压文氏管的开合状态, 可以精确控制进入模型测量段内的空气流量, 流量控制精度为 0.003 kg/s。

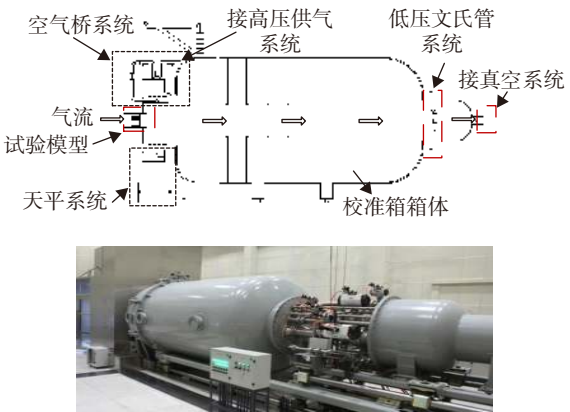


图 2 TPS 校准箱示意图和实物图
Fig. 2 Schematic diagram and real picture of TPS calibration tank

TPS 校准箱具有流量的精确控制与测量能力, 通过精确控制模型测量截面的流量, 使多次实验时, 同一模型的同一测量点位置流场一致。实验内容如表 1 所示, 其中 l_0 和 d 分别表示测量管道长度和内径。实验分为对照组 (Test A) 和实验组 (Test B); Test A 动态压力传感器前方管道长度为 0 mm, 其动态总压测量结果作为对比基准。Test B 动态压力传感器前方有一长为 l_0 , 内径为 d 的管道。两组实验的流量一致, 动态总压待测点流场一致, 唯一不同的是动态压力传感器与待测点之间管道的尺寸。

表 1 实验内容表
Table 1 Contents of experiment

项目	管道尺寸	P_{t1}	P_{t2}	P_{t3}	P_{t4}	P_{t5}	P_{t6}	P_{t7}	P_{t8}
Test B	l_0/mm	40	30	20	10	5	0	24	0
	d/mm	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8

1.3 实验方法

实验前, 将测量截面上的总压测量管按一定顺序与测压软管连接, 检查管路的通气性、气密性, 并与电子压力扫描阀连接; 随后在动态总压测量靶管内安装动态压力传感器。Test A 实验时, 动态压力传感器安装在靶管顶端; Test B 实验时, 动态压力传感器安装在靶管内部, 使传感器感受面与靶管顶端有一定尺寸管道。Test A 和 Test B 动态压力传感器安装示意图如图 3 所示。实验时, 通过 TPS 校准箱文氏管系统控制通过测量截面的流量, 测量截面的平均马赫数在 0~0.72 之间。

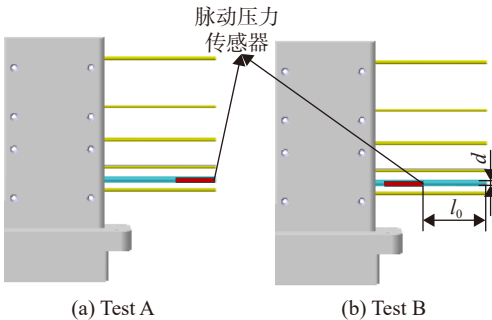


图 3 Test A 与 Test B 实验传感器安装示意图
Fig. 3 Schematic diagram of installation site of sensor for Test A and Test B

2 实验结果

2.1 流场重复性

图4给出了多次实验测量截面所得到的流量 q_m 与马赫数 Ma 对比。Test A表示无管道实验编号, Test B1、Test B2表示带管道多次重复性实验的编号。其中流量与马赫数由测量截面40个总压点与8个静压点计算得到;从图中可以看出,在测量截面平均马赫数 $0\sim 0.72$ 范围内,Test B1与Test B2流量最大误差小于 0.01 kg/s ,测量截面平均马赫数最大误差小于 0.003 。图5给出了马赫数为 0.72 时的总压恢复系数分布图,图中, x 和 y 分别为测量截面的坐标, r_c 为测量截面半径,总压恢复系数 $\sigma = p_0/p_{0\infty}$,其中 p_0 为测量截面总压, $p_{0\infty}$ 为TPS校准箱进气口总压。从图中可以看出,Test A与Test B的总压恢复系数分布一致。以上结果说明多次实验时,测量段内的稳态流场一致。

对照组(Test A)与实验组(Test B)在动态总

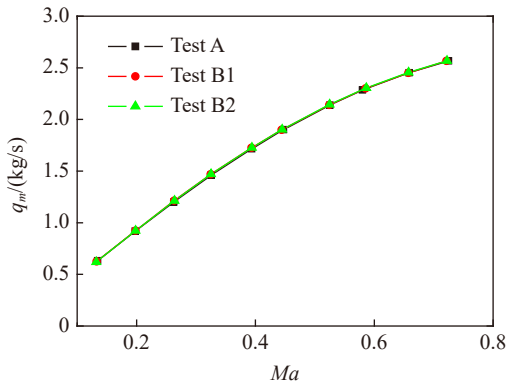


图4 测量截面流量与马赫数的重复性

Fig. 4 Repeatability of Mach number and rate of flow in the measurement plane

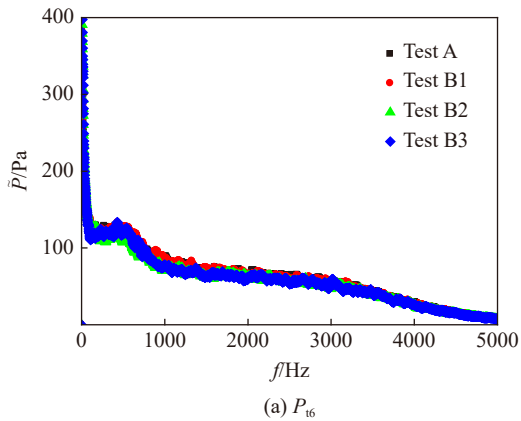


图6 脉动压力频域值的重复性 ($Ma=0.72$)

Fig. 6 Repeatability of fluctuating pressure in frequency ($Ma=0.72$)

压测点 P_{16} 与 P_{18} 的管道长度都为 0 mm ,图6给出了马赫数为 0.72 时,对照组Test A和三组实验组Test B1、Test B2和Test B3的测点 P_{16} 、与 P_{18} 处的

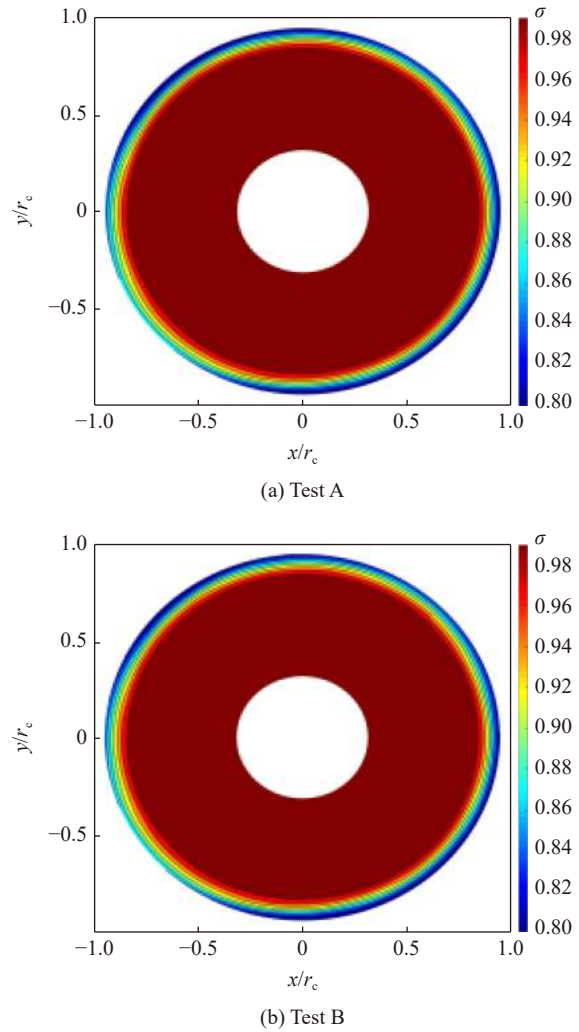
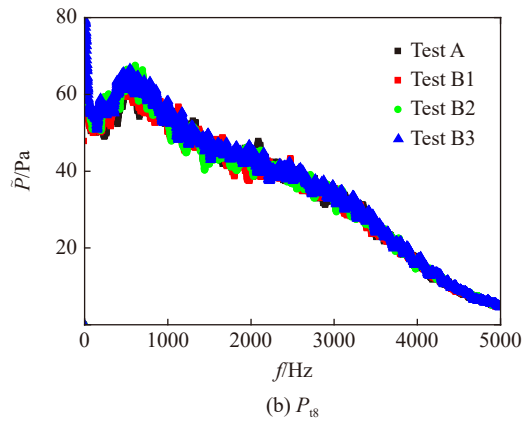


图5 $Ma=0.72$ 时的总压恢复系数分布重复性

Fig. 5 Repeatability of total pressure recovery coefficient at $Ma=0.72$



脉动压力频域图, 图中 $\bar{p}$ 表示脉动压力的脉动量, f 表示脉动压力频率。由图可知, 对于同一测点在相同流量下的多次实验, 其动态总压频域值一致性良好。说明 TPS 校准箱能够通过流量的精确控制, 使同一模型产生一致的稳态流场与动态流场。

上述测试结果表明, 相同流量条件下, 测量截面的流场重复性良好, 可以采用上述实验方法开展管道对动态总压测量的影响研究。

2.2 管道对动态总压测量的影响

频率响应函数(FRF)可以表征管道对动态总压测量的影响, FRF 为带管道时动态压力脉动量频域值与无管道时动态压力脉动量频域值之比:

$$F(f) = \frac{\tilde{P}_B(f)}{\tilde{P}_A(f)} \quad (1)$$

式中 F 表示频响函数, $\tilde{P}_B$ 与 $\tilde{P}_A$ 分别表示相同流场下, 在同一频率 f 时, 有管道与无管道时动态压力传感器测量得到的动态压力脉动量。频响函数反映了管道对动态压力测量的影响程度, 大于 1 时管道效应使动态压力脉动量放大, 小于 1 时则缩小。

图 7 给出了测量截面平均马赫数为 0.32 时, 管道内径为 1.8 mm, 管道取不同长度时的频响函数 F 。从图中可以看出, 在 0~4 800 Hz 范围内, 管道长度小于 40 mm 时, 频响函数基本上大于 1, 说明管道对动态压力脉动量有放大作用。在管道长度小于 40 mm 大于 21 mm 时, 频响函数在 0~4 800 Hz 范围内存在一个峰值, 峰值最大值约等于 8, 而且管道越长, 频响函数峰值所对应的频率越小。进气道实验中, 测量动态总压的动态压力传感器安装在靶管内, 靶管长度一般小于 50 mm, 靶管内径在 1~2 mm 之间。动态压力在以上尺

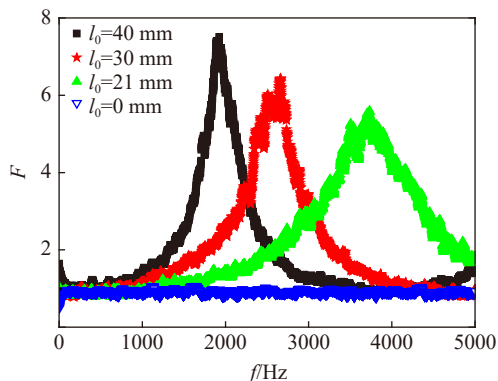


图 7 不同长度下管道的 FRF ($Ma=0.32$, $d=1.8$ mm)

Fig. 7 FRF of tube at different length ($Ma=0.32$, $d=1.8$ mm)

寸的管道内进行传播时, 动态压力与管道内部流体发生共振是导致压力脉动量增大的主要原因。管道内流体固有频率与管道长度成反比, 因此管道越长, 共振频率越小, 所以频响函数峰值对应的频率越小。

图 8 给出了 $Ma=0.72$, 管道长度为 40 mm 时, 不同管道内径下的频响函数 F , 从图中可以看出, 管道长度不变时, 峰值所对应的频率基本上不变。在管道内径 1.2 mm 到 2.0 mm 范围内, 频响函数峰值大小随管径的减小而减小。动态压力在一定频率范围内与管道内流体发生共振, 导致脉动量幅值增大, 由于流体的黏性作用以及热传导作用, 动态压力传播过程中会存在一定的耗散作用, 其脉动量幅值不会无限增大。管道内径越小, 耗散作用越明显, 因此频响函数的峰值随着管径的减少而明显地减小。

图 9 给出了管道内径为 1.8 mm, 管道长度为 40 mm 时, 测量截面内不同马赫数下的频响函数。由图可见, 在马赫数小于 0.72 时, 不同马赫数下

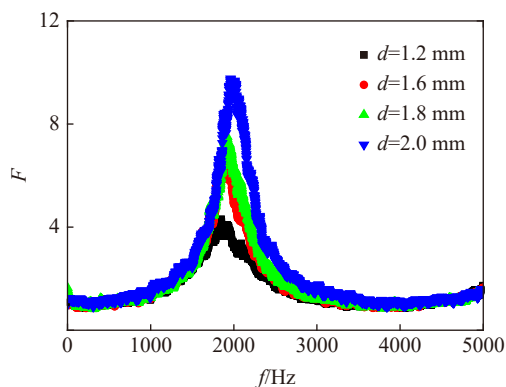


图 8 不同管道内径下的 FRF ($Ma=0.72$, $l_0=40$ mm)

Fig. 8 FRF of tube at different inner diameter
($Ma=0.72$, $l_0=40$ mm)

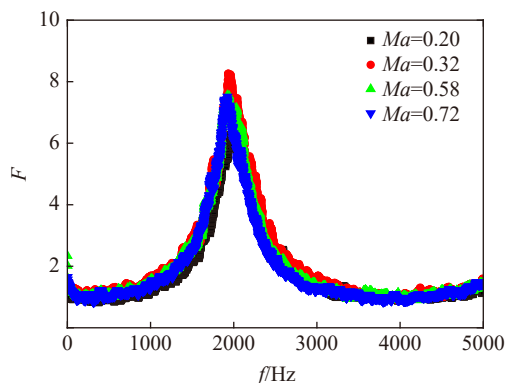


图 9 不同 Ma 下管道的 FRF ($l_0=40$ mm, $d=1.8$ mm)

Fig. 9 FRF of tube at different Ma
($l_0=40$ mm, $d=1.8$ mm)

的频响函数基本一致, 频响函数峰值随着马赫数的变化不明显, 峰值所对应的频率随马赫数的变化也不明显。实验结果说明: 在来流马赫数小于 0.72 范围内, 来流速度对动态总压测量影响不明显, 不同来流速度下的管道效应的影响规律一致。来流速度对管道效应的影响主要体现为不同流速时管道入口处微观流动的不同, 而在总压测量中, 来流方向与测点法向平行, 不同来流速度下管道入口处微观流动无太大差异。因此, 在马赫数小于 0.72 范围内, 测点不同来流速度对管道效应影响规律是一致的。

2.3 管道对湍流度测量的影响

进气道出口截面的面平均湍流度由各动态总压测点的湍流度平均得到, 而各测点的湍流度可以定义为

$$T_u = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [p_n(t) - \bar{p}_N]^2} / \bar{p}_N \quad (2)$$

式中 T_u 为测点湍流度, $p_n(t)$ 为随时间变化的动态压力, 进气道实验中, $p_n(t)$ 由动态压力传感器测量得到; N 为动态压力信号采集点数, $\bar{p}_N = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N p_n(t)$ 为时均压力。从式(2)可以看出, 进气道出口截面湍流度的定义与空气动力学中“湍流度”定义有一定差别, 进气道湍流度本质上是动态总压的方均根值比上动态总压时均值。动态总压的脉动量越大, 湍流度也越大。因此动态总压能否精确测量, 将直接影响到湍流度的精确度。

表 2 给出了不同来流马赫数时, 通过不同管道尺寸测量得到的湍流度值与无管道测量值的对比结果。由表可见, 带管道测量值比无管道测量值要大, 湍流度可被放大到 2.8 倍, 说明管道对湍流度测量的影响比较严重。因此进气道实验中, 如果动态压力传感器不能安装到进气道出口测量截面上, 则测量得到的湍流度与真实值存在较大误差, 需要进行修正。

表 2 无管道与有管道湍流度对比

Table 2 Comparison of turbulence with tube and without tube

马赫数	d/mm	l_0/mm	无管道 T_{uA}	带管道 T_{uB}	T_{uB}/T_{uA}
0.32	1.8	40	0.004	0.011	2.8
0.72	1.8	40	0.005	0.012	2.4
0.32	1.6	40	0.004	0.008	2.0
0.72	1.6	40	0.005	0.011	2.2
0.32	1.2	40	0.004	0.006	1.5
0.72	1.2	40	0.005	0.009	1.8
0.32	1.8	30	0.013	0.030	2.2
0.72	1.8	30	0.033	0.071	2.2
0.32	1.6	30	0.013	0.031	2.4
0.72	1.6	30	0.033	0.069	2.1
0.32	1.2	30	0.013	0.028	2.1
0.72	1.2	25	0.033	0.060	1.8
0.32	1.8	25	0.015	0.033	2.2
0.72	1.8	25	0.039	0.076	2.0
0.32	1.6	25	0.015	0.031	2.1
0.72	1.6	25	0.039	0.078	2.0

3 管道效应修正方法

通过管道内流动力学修正耗散模型^[21]可以得到管道输入端和输出端动态压力频域值的关系式

$$F(\omega) = \frac{\tilde{P}_B(\omega)}{\tilde{P}_A(\omega)} = \text{ch } \Gamma(\omega) + \frac{aV_0\rho_0}{\pi r_0^2} \cdot \frac{\text{sh } \Gamma(\omega)}{Z_0} \quad (3)$$

其中 $\tilde{P}_B(\omega)$ 表示带管道时测量得到的动态压力频域值, $\tilde{P}_A(\omega)$ 表示无管道时的动态压力频域值, ch 与 sh 为余弦与正弦指数函数, $\omega = 2\pi f$ 为圆频率, V_0 为测点来流风速, $r_0 = d/2$ 为管道内半径, ρ 为管道内流体密度, a 为待标定常数。式(3)中 $\Gamma(\omega) = l_0 \sqrt{Y(\omega) \cdot Z(\omega)}$, $Z_0(\omega) = \sqrt{Z(\omega)/Y(\omega)}$ 。 $Z(\omega)$ 与 $Y(\omega)$ 可以表示为

$$Y(\omega) = \omega \frac{\pi r_0^2}{p_0 \gamma} \left[1 + 2(\gamma - 1) \frac{J_1\left(ir_0 \sqrt{\frac{Pr\omega}{\nu}}\right)}{ir_0 \sqrt{\frac{Pr\omega}{\nu}} J_0\left(ir_0 \sqrt{\frac{Pr\omega}{\nu}}\right)} \right] \quad (4)$$

$$Z(\omega) = \frac{\rho_0 \omega}{\pi r_0^2} \left[1 - \frac{2J_1\left(ir_0 \sqrt{\frac{\omega}{\nu}}\right)}{ir_0 \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} J_0\left(ir_0 \sqrt{\frac{\omega}{\nu}}\right)} \right]^{-1}$$

式中 p_0 为管道内平均压力, 计算频响函数时取动态总压时均值 $\bar{P}_N$ 。 γ 为流体介质的比热比, Pr 为普朗特常数, ν 为运动黏性系数, J_0 和 J_1 分别表示 0 阶和 1 阶贝塞尔函数, i 为虚数符号。经过 TPS 校准箱实验结果标定, 式(1)可以表示为

$$\frac{\bar{P}_B(\omega)}{\bar{P}_A(\omega)} = \text{ch } \Gamma(\omega) + \frac{35\rho_0}{\pi r_0^2} \cdot \frac{\text{sh } \Gamma(\omega)}{Z_0} \quad (5)$$

风洞实验中, 在不可避免地使用管道间接测量动态总压时, 可以通过上述修正耗散模型对管道效应进行修正, 以减少管道效应带来的测量误差。具体的管道效应修正步骤如下:

1) 把动态压力传感器固定在管道内, 并测量动态压力传感器感受端面前方管道长度和内径;

2) 在风洞实验时按照正常动态压力测量流程采集并保存动态压力电信号数据;

3) 按照动态压力传感器的换算公式将电信号数据转换为动态压力时域值 $p_B(t)$;

4) 时域值 $p_B(t)$ 减去时域值均值得到动态压力的脉动量 $\tilde{P}_B(t)$, 再通过傅里叶变换把脉动量时域值 $\tilde{P}_B(t)$ 转化为频域值 $\tilde{P}_B(f)$;

5) 使用式(5)计算得到测点处的动态压力脉动量的频域值 $\tilde{P}_A^*(f)$;

6) 对 $\tilde{P}_A^*(f)$ 进行傅里叶逆变换, 得到修正后测点 A 处动态压力脉动量的时域值 $\tilde{P}_A^*(t)$;

7) 把修正后的脉动量时域值加上修正前动态压力时域均值 $\bar{p}_B(t)$ 得到修正后的动态压力时域值 $P_A^*(t)$ 。

通过以上步骤对动态压力值进行修正后, 可以通过修正后的动态压力时域值计算湍流度 (T_u^*) 等进气道风洞实验所需要的参数值。

4 修正方法验证

4.1 验证实验

为了验证修正方法的有效性, 在 TPS 校准箱上开展了验证实验。验证模型在测量段基础上加装了一个斜切模拟进气道, 模型如图 10 所示。加装斜切进气道后, 测量段内测点的流场发生变化, 由此验证所提出的修正方法在不同流场下都适用。与标定实验一致, 在相同抽吸流量下, 在相同测点处测量不带管道 Test A 以及带管道 Test B 后的动态总压, 带管道结果使用所提出的修正方法进行修正。对比带管道修正结果与不带管道实验结

果, 以验证修正方法的有效性。

图 11 给出了测量截面平均马赫数为 0.47 时的总压恢复系数云图, Test A 和 Test B 实验的总



图 10 验证实验模型图

Fig. 10 Picture of model in confirmation experiments

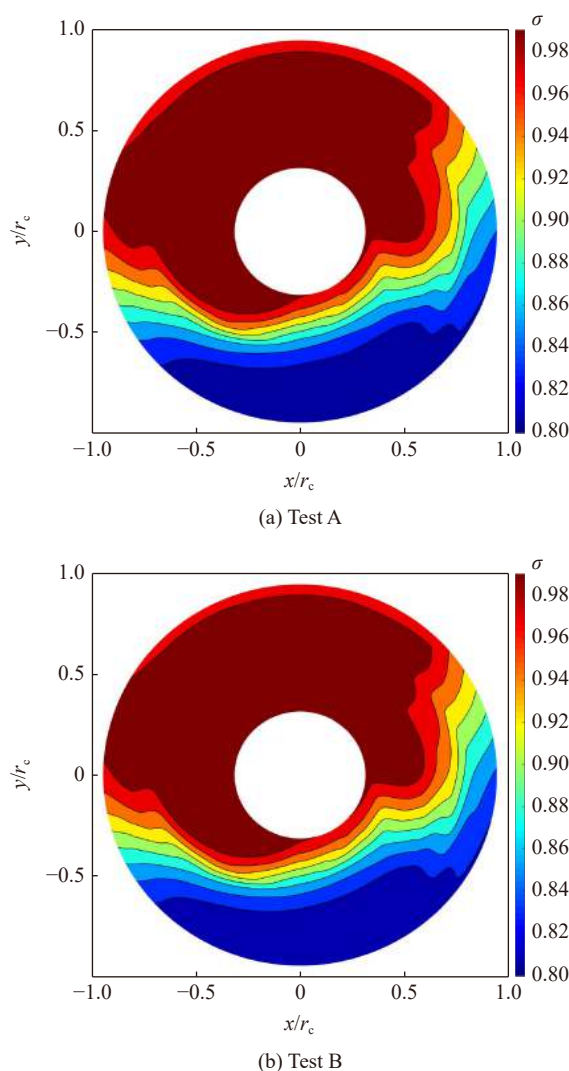


图 11 验证实验 $Ma=0.47$ 时总压恢复系数 σ 分布重复性

Fig. 11 Repeatability of total pressure recovery coefficient σ of measurement section at $Ma=0.47$ for verification experiments

压恢复系数云图基本一致,说明两者流场重复性较好。另外,由图可见,在进气道出口截面下方存在明显的低压区。由于斜切进气道上沿较长下沿较短,下沿离测量截面近,气流在唇口下沿分离导致测量截面下部区域处于低压区。与图5相比,加入斜切进气道后测量截面的流场发生了明显变化。因此以此模拟真实进气道内流场不均匀时管道对动态总压测量带来的影响。

4.2 动态总压验证结果

图12给出了不同流速下,管长 $l_0=40$ mm,直径 $d=1.2$ mm时,有管道、无管道、有管道修正后

的脉动量频域值。有管道与无管道测量所得到的脉动量频域值 $\bar{P}$ 在频率600~3 000 Hz内差异明显,在 $Ma=0.72$ 、 $f=1\ 874$ Hz处,有管道 $\bar{P}$ 值约为76.8 Pa,无管道时为14.7 Pa,修正后为14.1 Pa,说明管道对动态总压测量的影响较严重,而修正后的脉动量误差由422%降到4%,误差最大可减少98%。另外,有管道测量结果经过修正后,与无管道结果一致性较好,说明标定后的修正耗散模型能够对管道效应所引起的动态总压频域值进行精确修正。

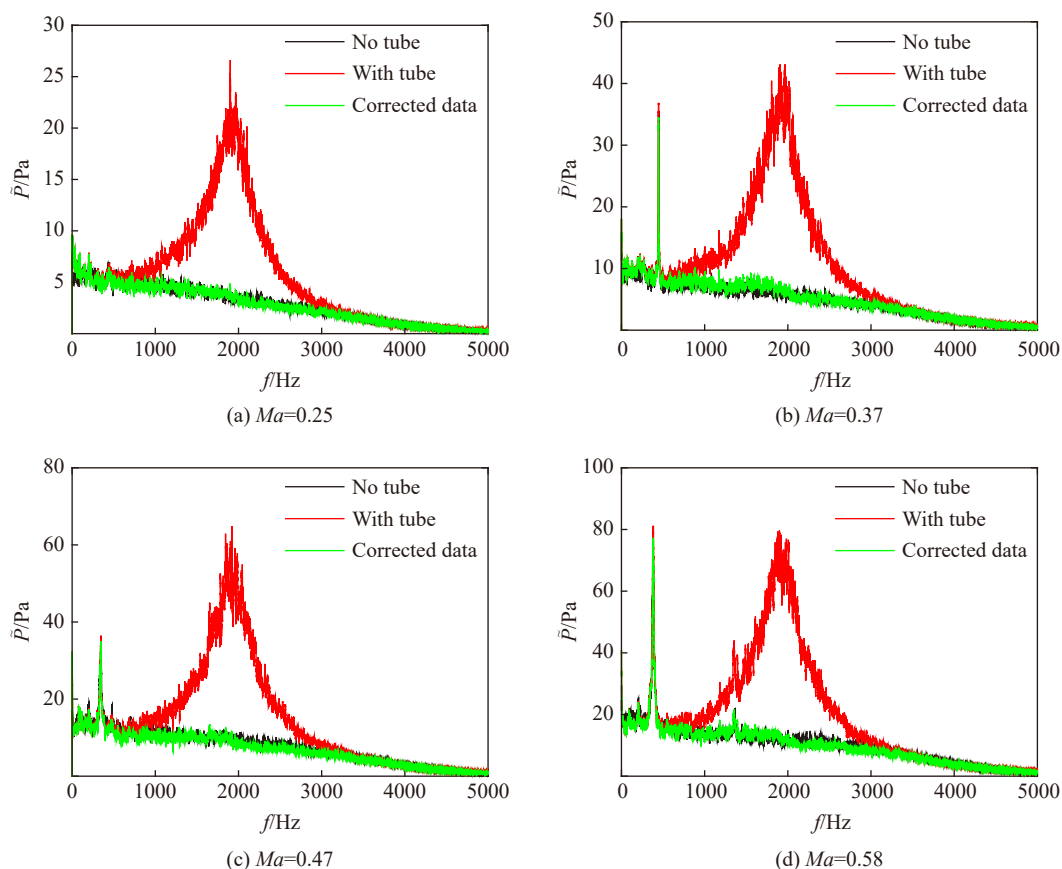


图12 动态总压频域修正效果

Fig. 12 Correction effectivity for the frequency domain values of pulsating total pressure

4.3 湍流度验证结果

表3给出了不同流速下,有管道、无管道以及有管道修正后测点的湍流度值。由表3可见,不同管道尺寸以及不同来流速度下,带管道测量所得到的湍流度值与无管道差别较大。经过本文所提出的修正方法进行修正后,带管道测量结果与无管道测量结果差别较小。其中,在 $Ma=0.58$ 、

管道尺寸 $d=1.8$ mm、 $l_0=40$ mm时,带管道测量时湍流度的误差为137%,经过修正后降低到3%,修正后的湍流度误差最大可减少97%。从表3可以看出,带管道测量的湍流度值经过修正后误差最大值不超过0.001,小于进气道实验国军标重复性要求的0.005,说明实验标定后的修正耗散模型能对管道效应导致的湍流度误差进行精确修正。

表 3 无管道和有管道修正后湍流度值

Table 3 Turbulence with tube effect and the corrected turbulence

马赫数	d/mm	l_0/mm	无管道 T_{uA}	有管道 T_{uB}	修正值 T_u^*	T_{uB}/T_{uA}	$T_u^*-T_{uA}$
0.47	1.2	40	0.011 9	0.026 1	0.011 2	2.19	-0.000 7
0.58	1.2	40	0.016 6	0.036 0	0.016 3	2.17	-0.000 3
0.58	1.8	40	0.016 6	0.039 4	0.017 1	2.37	0.000 5
0.58	1.6	40	0.016 6	0.036 0	0.016 3	2.17	-0.000 3
0.58	1.2	40	0.016 6	0.029 6	0.015 7	1.78	-0.000 9
0.58	1.6	30	0.020 1	0.048 9	0.019 3	2.43	-0.000 7

5 结 论

通过在 TPS 校准箱开展的对比实验, 系统研究了管道效应对动态总压和湍流度测量的影响规律, 并提出了管道效应对动态总压测量修正方法。研究结果表明:

1) 管道对动态总压和湍流度测量的影响较大; 在一定管道尺寸下, 动态总压频域值可放大 8 倍以上, 湍流度可被放大 2.8 倍以上。风洞实验中应尽量避免使用管道间接测量动态总压。

2) 本文所提出的管道效应修正方法, 在管道长度 10~40 mm、内径 1.2~1.8 mm、测点马赫数 0~0.72 范围内能够对动态总压测量时的管道影响进行有效修正。

3) 动态总压结果经过修正后, 动态总压频域值误差和湍流度误差可以大幅度减少。在不可避免使用管道测量动态总压时, 使用本文所提出的修正方法对湍流度进行修正, 可以有效减少管道效应带来的测量误差。

参考文献:

- [1] 李周复. 风洞特种实验技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2010: 23-37.
- [2] 徐彬彬, 巫朝君, 王学. 管道效应对进气道湍流度测量的影响研究[J]. 实验流体力学, 2020, 34(6): 52-58.
XU Binbin, WU Chaojun, WANG Xue. Research on the effect of tubing on turbulence in inlet wind tunnel test[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2020, 34(6): 52-58. (in Chinese)
- [3] BERGH H, TIJDEMAN H. Theoretical and experimental results for the dynamic response of pressure measuring systems[R]. Amsterdam: National Aero and Astronautic Research Institute, 1965.
- [4] IRWIN H P, COOPER K R, GIRARD R. Correction of distortion effects caused by tubing systems in measurements of fluctuating pressures[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1979(5): 93-107.
- [5] TIJDEMAN H. and BERGH H. The influence of the main flow on the transfer function of tube-transducer systems used for unsteady pressure measurements[R]. NLR-MP-72023-U, 1972.
- [6] GUMLEY S J. Tubing systems for pneumatic averaging of fluctuating pressures[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1983(12): 189-228.
- [7] GUMLEY S J. A detailed design method for pneumatic tubing systems[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1983(13): 441-452.
- [8] HOLMES J D, LEWIS R E. Optimization of dynamic pressure measurement systems: I single point measurements[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1987(25): 249-273.
- [9] HOLMES J D, LEWIS R E. Optimization of dynamic pressure measurement systems: II parallel tube manifold systems[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1987(25): 275-290.
- [10] HOLMES J D. Effect of frequency response on peak pressure measurements[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1984(17): 1-9.
- [11] GERSTOFT P. A new tubing system for the measurement of fluctuating pressure[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1984, 25(3): 335-354.
- [12] YOSHIDA A, KONDO K, SUZUKI M. Fluctuating wind pressure measured with tubing system[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 42: 987-998.
- [13] YOSHIDA A, TAMURA Y, KURITA T. Effects of bends in a tubing system for pressure measurement[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001(89): 1701-1716.
- [14] 苏尔皇. 管道动态分析及液流数值计算方法[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1985: 56-61.
- [15] 蔡亦钢. 流体传输管道动力学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1990: 16-43.
- [16] 谢壮宁, 倪振华, 石碧青. 动态风压测压管路系统的动态特性分析[J]. 应用力学学报, 2002, 19(1): 5-9.
XIE Zhuangning, NI Zhenhua, SHI Biqing. Dynamic characteristics of tubing systems for fluctuating wind pressure measurements [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2002, 19(1): 5-9. (in Chinese)
- [17] 谢壮宁, 顾明, 倪振华. 复杂测压管路系统动态特性的通用分析程序[J]. 同济大学学报, 2003, 31(6): 702-708.
XIE Zhuangning, GU Ming, NI Zhenghua. Optimal design for simultaneous wind pressure measurements[J]. Journal of Tongji University, 2003, 31(6): 702-708. (in Chinese)
- [18] 周珣毅, 顾明. 单通道测压管路系统的优化设计[J]. 同济大学学报, 2003, 31(7): 798-802.
ZHOU Xuanyi, GU Ming. Optimization of dynamic pressure measurement of single channel tubing systems[J]. Journal of Tongji University, 2003, 31(7): 798-802. (in Chinese)
- [19] 马文勇, 刘庆宽, 刘小兵, 等. 风洞试验中测压管路信号畸变及修正研究[J]. 实验流体力学, 2013, 27(4): 71-76.
MA Wenyong, LIU Qingkuan, LIU Xiaobing, et al. Study on cor-

- rection and distortion effects caused by tubing systems of pressure measurements in wind tunnel[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2013, 27(4): 71-76. (in Chinese)
- [20] WANG Xue, WANG Xunnian, REN Xiaobo, et al. Effect of tube system and data correction for fluctuation pressure test in wind tunnel[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2018, 31(4): 698-710.
- [21] 徐彬彬, 王学, 巫朝君, 等. 管道内流动力学修正耗散模型[J]. *航空动力学报*, 2021, 36(1): 78-87.
- XU Binbin, WANG Xue, WU Chaojun, et al. Improved dissipative model of hydrodynamic in tube[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2021, 36(1): 78-87. (in Chinese)
- [22] 章荣平, 王勋年, 黄勇. 低速风洞全模TPS试验空气桥的设计与优化[J]. *实验流体力学*, 2012, 26(6): 48-52.
- ZHANG Rongping, WANG Xunnian, HUANG Yong. Design and optimization of the air bridge for low speed full-span TPS test[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2012, 26(6): 48-52. (in Chinese)
- [23] 章荣平, 王勋年, 黄勇. 发动机动力模拟风洞试验中的空气桥技术[J]. *航空动力学报*, 2015, 30(4): 910-915.
- ZHANG Rongping, WANG Xunnian, HUANG Yong. Air bridge technology for engine power simulation test in wind tunnel[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015, 30(4): 910-915. (in Chinese)
- [24] 胡卜元, 巫朝君, 吴福章, 等. 基于校准箱的低速风洞一体式喷流试验技术[J]. *航空动力学报*, 2021, 36(6): 1137-1144.
- HU Buyuan, WU Chaojun, WU Fuzhang, et al. Integrated jet-effects testing technique based on calibration tank in low-speed wind tunnel[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2021, 36(6): 1137-1144. (in Chinese)

(编辑: 张 雪)