



CSTAM 2012-B03-0211
激波风洞高超声速摩擦阻力测量天平研制

吕治国，李国君，赵荣娟，姜华，王刚

西安交通大学能动学院

中国空气动力研究与发展中心超高速空气动力研究所

第七届全国流体力学学术会议

2012年11月12—14日 广西·桂林

激波风洞高超声速摩擦阻力测量天平研制

吕治国^{*†}, 李国君^{*}, 赵荣娟^{*}, 姜华^{*}, 王刚^{*}

^{*}(西安交通大学能动学院, 陕西西安 710049)

[†](中国空气动力研究与发展中心超高速空气动力学研究所, 四川绵阳 621000)

摘要 本文介绍了激波风洞摩擦阻力测量的压电型摩阻天平研究情况。在研究中, 分别采用了剪切型以及悬臂梁型的压电型摩阻天平, 并通过比较研究以及为了适应不同测量表面和便于天平校准, 提高天平的校准和风洞试验测量结果精度, 确定摩阻天平采用测量表面可以更换的悬臂梁结构形式。同时, 针对悬臂梁结构形式的压电式摩阻天平, 分别对几种可以更换形式的摩阻天平进行了系统研究, 并采用平行于摩阻天平测量表面的力校准, 校准结果表明: 研制的压电式摩阻天平灵敏度相对较高、静态重复性好, 并可以分辨出 1mN 量级的力, 为微量的摩擦阻力测量提供了技术基础。使用研制并优化的压电式摩阻天平在激波风洞上进行了试验, 流场马赫数为 5.78, 雷诺数为 $3.09 \times 10^7/m$, 模型为平板模型。风洞试验结果表明: 摩阻天平能够测出的平板模型表面摩擦阻力系数, 测量出的摩阻系数与模型表面热流具有较强的相关性, 该测量结果与理论计算结果在量级上符合较好。采用测量表面可以更换的摩阻天平, 不仅便于天平的校准、适应不同的测量表面、对于提高天平的频响、提高摩阻天平的高温测量性能也是有利的。

关键词 激波风洞, 压电天平, 摩擦阻力, 校准

引言

表面摩擦阻力极大地限制了高超声速飞行器的性能。相关的试验研究表明^[1], 对使用吸气式发动机的高超声速飞行器来说, 摩阻可以超过到其总阻力的 50%, 在乘波飞行器等高升力体飞行器中也有类似的比例。对飞行器研制而言, 摩擦阻力测量的重要性主要体现在如下几个方面: 一是摩阻测量对飞行器气动布局设计及外形设计十分重要, 可以用于降低飞行器摩擦阻力, 使飞行器在航程一定的情况下节省燃料, 便于搭载更多的有效载荷, 或者在燃料一定的前提下, 增加飞行器的航程。二是鉴于飞行器研制的难度, 摩擦阻力特性的研究的趋势是采用地面模拟与 CFD 计算相结合, 本研究结果可以为 CFD 计算提供实验依据和校核模型。三是摩阻测量可以用于发动机内流道研究中, 在发动机模型的优化设计中, 其燃烧室推力的利用效率与燃烧室的摩擦阻力大小关系甚为密切。一方面可用于评价发动机的效率, 另一方面也可以指导优化发动机内流道结构设计。因此, 飞行器模型表面摩擦阻力测量是空气动力

学研究的重要基础项目之一, 对飞行器布局研究和减阻以及结构及部件优化等都具有较高的应用价值。

在过去几年里, 在 CARDIC 激波风洞上开展了摩擦阻力测量技术方面的研究。在研究中, 采用直接测量的方式, 使用压电陶瓷作为摩阻天平测量的敏感元件。研究中采用的摩阻天平具有不同的结构形式, 包括: 剪切型摩阻天平、测量面与悬臂梁一体的摩阻天平、测量面与悬臂梁分体的摩阻天平。其中对测量面与悬臂梁分体的摩阻天平, 还分别对悬臂梁进行了方形截面和矩形截面变化研究, 本文介绍了激波风洞摩阻天平的研究情况, 并给出了初步的研究结果。

1 摩阻天平设计

在研究初期, 我们分别设计了剪切型和测量面与悬臂梁一体的压电型摩阻天平, 这两种摩阻天平的照片如图 1 所示, 对于剪切型的摩阻天平, 测量面的尺寸为 10mm×10mm, 在摩阻天平的制作过程中发现, 这种形式摩阻天平的测量表面与敏感元件(剪切型压电陶瓷片)以

及敏感元件与本体之间的相对定位、测量信号线的引出均比较困难。设计的悬臂梁与测量表面一体的摩阻天平结构尺寸为：敏感元件（正压型压电陶瓷片）10mm×15mm，测量表面10mm×10mm，这种形式的摩阻天平克服了剪切型摩阻天平制作方面的缺点。但在校准和风洞试验的使用过程中发现，这两种摩阻天平的调整安装均相当不方便，需要对结构进一步优化改善。

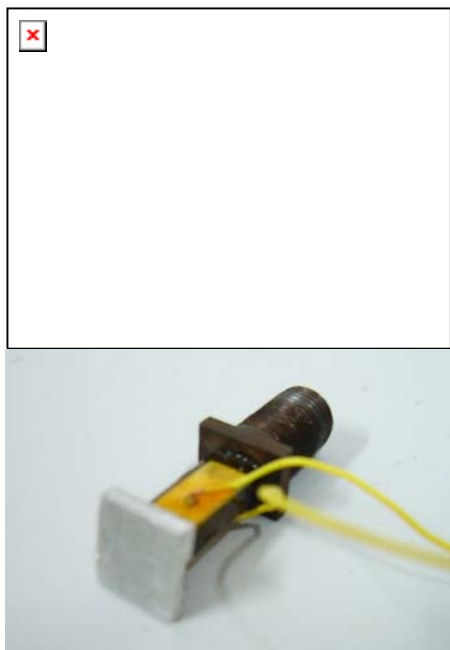


图1 压电摩阻天平照片

由于剪切型摩阻天平的灵敏度较低，在验证性风洞试验中无法得到有效的测试结果，在后期的研究中只进行了悬臂梁型摩阻天平的研究。为了克服前期研制的摩阻天平的不足，同时兼顾摩阻天平的校准以及风洞试验中更换不同形状的测量表面，在摩阻天平设计时采用测

量表面与悬臂梁分体设计的方案。为了便于摩阻天平在风洞试验时的安装调节，同时考虑对摩阻天平保护的需要，设计了一体化的调节保护套。在这个阶段中，分别研制了正方形和矩形截面悬臂梁的摩阻天平。正方形截面梁的摩阻天平具备测量两个方向的摩擦阻力的能力，矩形截面梁摩阻天平具有单分量摩阻测量能力。校准结果表明：正方形截面梁摩阻天平的频响相对较高但灵敏度相对较低，其灵敏度方面不能满足风洞测量的需要，尽管矩形截面梁摩阻天平在频响、测量分量数方面不如正方形截面梁的摩阻天平，但灵敏度相对较高，可以满足激波风洞试验测量要求。

2 有限元分析结果

在摩阻天平设计的初期，使用 ANSYS 软件，对摩阻天平的模态性能进行了有限元分析。模态分析主要用于确定天平的振动特性，即固有频率和振型。由于激波风洞的有效试验时间只有几个到十几个毫秒，要求天平具有较高的频响。模态分析有助于分析摩阻天平的响应能否达到使用要求。模态分析分别计算了正方形截面梁以及不同厚度和不同连接方式的矩形截面梁的摩阻天平的固有频率，计算结果如表 1 所示。从表中可以看出，正方形截面梁的摩阻天平的固有频率最高，当采用矩形截面梁时，摩阻天平的固有频率随着力敏梁厚度的增加而增大。在试验中测量了矩形梁 4mm 天平的一阶振动频率，测量结果为 2662.4Hz，与计算结果符合较好。由计算也可以看出，虽然连接方式不同，但当力敏梁的厚度相同时，其一阶振动频率相当。

表 1 摩阻天平前三阶模态计算结果表

阶数	方梁	单位: Hz			
		矩形梁3mm	矩形梁4mm	矩形梁5mm	嵌入式 4mm
1	5561.4	1761.0	2699.8	3277.2	2863.1
2	5691.9	4690.4	6296.3	6114.3	6500.8
3	8883.4	5222.1	8124.7	7925.4	9085.6

3 摩阻天平校准

由于摩阻天平的测量载荷较小，其校准也需要在小载荷的条件下进行。在校准中，需要

解决以下几个方面的技术问题：一是微小校准载荷的施加方法；二是微小载荷校准的数据处理，以及摩阻天平 and 微小载荷的空间位置关系的确定；三是摩阻天平在风洞试验的测量过程中，始终受到测量处流场环境压强的作用，对

摩阻测量而言，这个压强的作用就是摩阻天平测量的干扰，所以摩阻天平校准必须将干扰量扣除。只有解决好上述问题，摩阻天平校准的可信度才能满足风洞试验要求。

一体式摩阻天平的校准是将摩阻天平横向安装固定，在测量头上粘接细丝线，然后通过细丝线垂直悬挂小质量砝码，以实现微小校准载荷的准确加载。对于分体式摩阻天平的校准，采用特别设计的加载头代替天平测量块，将摩阻天平横向安装固定，通过在加载头上用细丝线准确悬挂砝码来实现对摩阻天平的校准加载。校准施加的载荷范围为 0.01g~50.00g。表 2 给出了几种典型摩阻天平的校准结果，从中可以看出，剪切型摩阻天平的灵敏度最低，校准的重复性误差最大，除剪切型摩阻天平外，天平校准的重复性误差均小于 1%。对矩形截面梁的摩阻天平，虽然测量块与天平本体的连接方式不同，但当力敏梁的厚度相同时，其灵敏度也相当。

表 2 系列压电摩阻天平校准结果对比

天平	灵敏度(V/N)	重复性误差
弯曲一体型	2.95	0.62%
剪切型	0.4	1.58%
弯曲分体型 (4mm)	3.89	0.75%
弯曲分体型 (5mm)	1.99	0.31%
弯曲分体改进型 (4mm)	4.08	0.32%

4 风洞试验

摩擦阻力测量试验在 0.6m 激波风洞上进行。该风洞是由内径为 80mm，高压段、低压段长度分别为 7.5m 和 12.5m 的激波管和相应的喷管、试验段、真空箱组成，其型面喷管出口直径为 0.6m，试验段的横截面是直径为 1m 的圆截面。风洞试验气体为氮气或者空气，驱动气体采用氢气或者氢气和氮气的混合气体。风洞通过更换喉道来获得不同的来流马赫数，通过调节高低压段的压力和充气比例来获得不同的雷诺数，以实现不同的模拟环境。目前该风洞所能模拟的马赫数范围是 6~12，攻角可变化范围为 -30°~30°，试验的有效时间为 2~13ms。

试验模型为带尖前缘的平板模型，通过更换不同的模型上表面盖板改变摩阻测点距平板模型前缘的距离。本次试验共进行了三个测点的摩阻测量，分别距离模型前缘 160mm, 274mm 和 388mm。试验流场条件为： $M_\infty=5.78$ ， $Re_\infty/L=3.09 \times 10^7/m$ 。试验模型名义攻角为 0°。

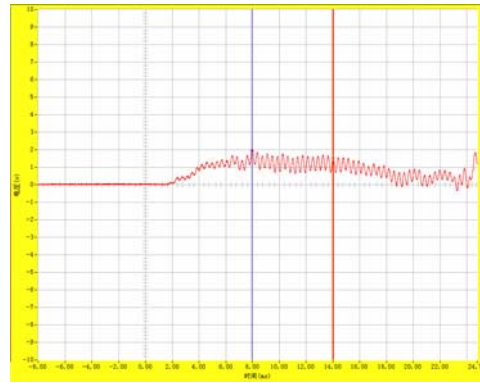


图 2 摩阻天平输出曲线

图 2 给出了风洞试验时摩阻天平的输出曲线，从图中可以看出，在风洞的有效试验时间内，摩阻天平具有较大的输出。图 3 给出了摩阻测量风洞试验与理论计算结果的比较，理论结果采用文献^[6]给出的湍流附面层模型计算给出，从图可以看出：马赫数 6 条件下，0° 攻角时平板模型表面的摩阻系数前面两个测点与理论值符合较好，第三个测点值明显偏高。对于第三测量点，初步分析是在风洞试验测量后期，频繁拆装摩阻天平导致摩阻天平的测量头高出模型测量平面所致。

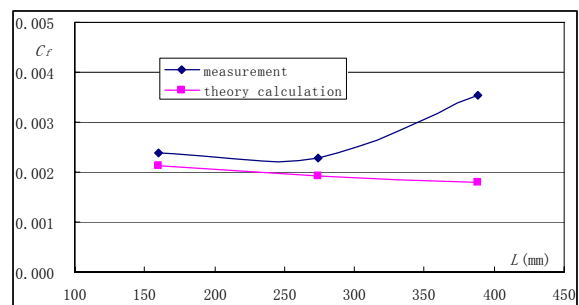


图 3 摩阻测量结果与理论计算结果对比

5 结论

通过本次激波风洞摩阻测量技术研究，可以得到如下初步结论：

- a. 静态校准装置可以校准出摩阻天平的静态特性如灵敏度和重复性等指标参数；

b. 压电式摩阻天平可以测量出平板模型表面的摩擦阻力, 模型表面摩阻系数随距模型前缘的距离而改变, 其变化趋势合理, 量级正确;

c. 采用测量表面可以更换的摩阻天平结构, 便于摩阻天平校准与风洞试验的转换以及安装调节, 可在一定程度上降低测量结果的不确定度水平。

6 下一步工作展望

研制的压电式摩阻天平虽然可以测量出平板模型表面的摩擦阻力, 但摩阻天平的设计、校准以及安装误差对摩阻天平的总体性能影响还较大。下一步工作中应从如下几个方面努力:

- a. 提高天平的频响, 改善其动态性能;
- b. 设计专用的加载装置, 降低测量结果的不确定度;
- c. 优化装配结构, 降低装配过程对摩阻测量试验结果的影响;
- d. 加强理论基础研究。

致谢

本项研究是在激波风洞试验室全体参试人员的共同努力下完成, 在此对他们表示衷心的感谢。

参考文献

- 1 T. B. Silvester and R. G. Morgan, Skin-friction measurements and flow establishment within a long duct at superorbital speeds. *AIAA Journal*, Vol. 46, No. 2 February 2008
- 2 Taira Tsuru, Sadatake Tomioka, Kenji Kudo, Atsuo Murakami, Kanenori Kato, Skin-friction measurements in supersonic combustion flows of a scramjet combustor, *AIAA 2008-4578*
- 3 J. C. Admas, Numerical calculation of sharp flat plate transitional and turbulent skin friction, *AIAA Journal*, Vol. 10, No. 6, 1972
- 4 P. Reddeppa, G. Jagadeesh. Measurement of Direct Skin Friction in Hypersonic Shock Tunnels. *AIAA 2005-1412*
- 5 D. B. Spalding and S. W. Chi, skin friction exerted by a compressible fluid stream on a flat plate, *AIAA Journal*, Vol. 1, No. 9, 1963
- 6 陈懋章. 粘性流体力学基础. 研究生教学用书. 北京: 高等教育出版社, 2002
- 7 C. P. Goynes, A. Paull and R. J. Stalker, A skin friction gauge for impulsive flows, *AIAA 95-3152*
- 8 R. Bowersox, J. Schetz, skin friction gauges for high enthalpy impulsive flows, *AIAA 93-5079*

THE DEVELOPMENT OF PIEZOELECTRIC SKIN FRICTION BALANCE FOR SHOCK TUNNEL

Lv Zhi-guo^{1,2} Li Guo-jun¹ Zhao Rong-juan² Jiang Hua² Wang Gang²

(1 School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China)

(2 Hypervelocity Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang, 621000, China)

Abstract This paper introduces the development of piezoelectric skin friction balance for shock tunnel. The piezoelectric skin friction balances of shear style and cantilever style are developed respectively. In order to suit the different model surface, the skin friction balances were designed with an exchangeable sensor head. We calibrated all the balances in horizontal and vertical orientation. The calibration results showed that the skin friction balances have high sensitivity and good repeatability, and the minimum calibration load is about 1mN. The skin friction of flat plate was measured with flow Mach number of 5.78 and Reynolds number of $3.09 \times 10^7/m$ in shock tunnel. The test results showed that the local skin friction coefficient could be measured by the developed skin friction balance. This kind of skin friction balance is easy to calibrate, suitable for different surface, beneficial to improving the natural frequency, and stable in high temperature flow environment.

Key words shock tunnel, piezoelectric balance, skin friction, calibration