

在高超声速脉冲风洞中使用的六分量天平测力系统和 10° 尖锥模型的气动力测量

杨耀栋 王复 郭大华

(中国科学院力学研究所)

摘要 在中国科学院力学研究所的 JF-4B 高超声速脉冲风洞中, 对于半锥角为 10° 的尖锥模型进行了来流马赫数为 7.8 和 9.9 的吹风实验, 在不同的 α 角和 β 角下使用六分量的压电天平进行了气动力测量。用以鉴定六分量测力系统的可靠性, 并检验了新的试验段和 α 角与 β 角分别单独可变的模型支架对模型测力实验是否有干扰。实验结果与文献给的结果进行比较表明: 六分量压电天平测力系统给出的实验数据是比较可靠的。

关键词 风洞实验, 压电天平, 测量。

一、前言

脉冲型风洞在保证试验段来流气体不液化的前提下, 适当降低焓值, 可提高来流雷诺数。这个优点使它作为产生高雷诺数和高马赫数气流的设备, 受到极大的重视, 在国内外许多实验室中被广泛地用于高超声速空气动力学的实验研究。

自从 1979 年在力学所的脉冲风洞中, 开始使用具有惯性补偿的三分量压电天平进行模型气动力测量工作以来, 近些年由于集成电路的普及, 特别是引进了先进的数据采集和处理系统之后, 不仅数据处理方便快捷, 而且使得测力数据无论在精度还是在准度方面都有了较大提高。在此基础上, 完成了许多模型的实验任务。

为了适应新一代航天飞行器的实验研究的需要, 我们又发展研制了新的六分量测力天平系统。为了动校该天平测力系统和检验与六分量测力天平配套而新加工

装配的模型支架系统(该系统的 α 角和 β 角分别单独可调)。在 JF-4B 高超声速脉冲风洞中, 对 10° 尖锥模型在 $M_\infty = 7.8$ 和 9.9 时进行了测力实验。实验结果表明: 六分量压电测力天平及惯性补偿技术的使用是成功的, 气动力信号波形与前室总压的跟随性比较一致。实验数据与文献给的结果比较表明具有较好的一致性。

二、风洞和模型支架

实验是在 JF-4B 高超声速脉冲风洞中进行的, 图 1 给出了该风洞的示意图。风洞包括驱动段、被驱动段、喷管, 试验段以及真空罐几部分。它既可作为激波风洞运行也可作为炮风洞运行。根据不同的运行情况, 被驱动段的长度可以调整。图中所示的长度是作为炮风洞运行时的长度。马赫数 7.8 和 9.9 的来流由同一型面喷管通过改变喷管喉道尺寸来实现。实验气流通过出口直径为 500 毫米的喷管射流

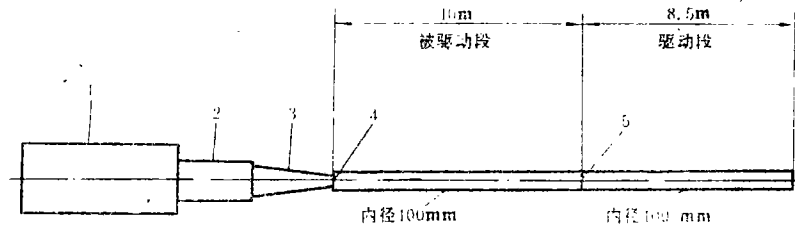


图 1 JF-4B 脉冲型风洞示意图

1—真空罐 2—实验段 3—喷管 4—二道膜 5—一道膜

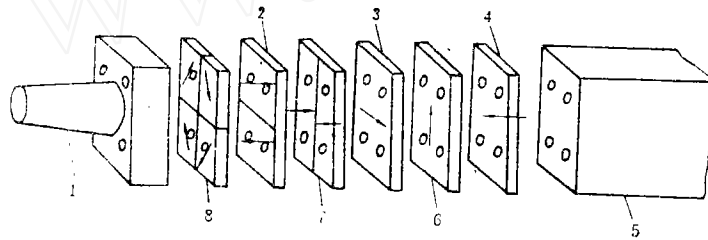


图 2 六分量压电天平结构示意图

1—安装模型的锥 2—俯仰力矩元件 3—侧向力元件 4—轴向力元件 5—天平尾杆
6—法向力元件 7—偏航力矩元件 8—滚转力矩元件

进入直径为 1.2 米的试验段。试验段后面接有长为 6.4 米直径为 2.2 米的真空罐。

模型的攻角机构座在一块可前后移动的平台(便于将模型移至窗口的合适位置处),攻角机构在此平台上可变 β 角,这就保证了 α 角和 β 角分别单独可调,平台固定在与风洞通过橡胶筒隔离的基础上。这个模型支架系统对于风洞的隔振性能是相当好的,将喷管喉道封住后运行风洞,这时天平六个分量的输出均为零,这就表明由于破膜引起的风洞振动没有传到模型支架上来。

本实验的来流马赫数为 7.8 和 9.9 的主要气流参数如表 1 所示;

表 1

M_∞	$Re_\infty (m^{-1})$	$P_0 (Pa)$
7.8	3.5×10^7	17.162×10^6
9.9	1×10^7	18.633×10^6

三、测力天平、仪器和模型

使用的测力天平是一种无挠性元件的六分量压电天平。图 2 给出了该天平的结构示意图。由图可以看到,轴向力元件用的是一块极化矢量与天平杆轴线一致的正向压缩型的锆钛酸铅压电陶瓷片;法向力和侧向力元件使用的是极化矢量分别指向法向和侧向的剪切型陶瓷片;滚转力矩元件

由四片极化矢量沿天平轴的滚转的切线方向的剪切型压电陶瓷片组成；俯仰力矩和偏航力矩元件则是一种极化矢量对称相反的正向压缩型压电陶瓷片。本天平力的分解是靠压电陶瓷元件在不同的极化条件下，对力的方向有特定的敏感性实现的。各测力元件之间通常是用不具有压电效应的陶瓷片隔离开。为了保证各分量力之间的干扰减到最小，在天平测力元件外形和组装形式上采取了一些措施：

1. 所有的测力元件都采用正方形的锆钛酸铅压电陶瓷片。这样，容易控制极化方向，同时安装测力元件时也更容易找准基准面，使它对力的方向有特定的敏感性这一特点，从机械加工和安装的角度能得到保证。

2. 压电元件的压电效应，主要靠压电元件本身的电容表现出来。力之间的干扰，除了极化矢量的方向不准以外，主要是由于各测力元件之间的绝缘隔离的陶瓷的电容与测力元件本身的电容之比决定的。为此，我们选用介电常数为3000左右的PZT-5压电材料作为测力元件，而隔离的绝缘片则选用介电常数小于10的高频陶瓷材料制作。除此以外，在天平测力元件的安排上，尽可能少用或者不用绝缘隔离片。

采用上述措施后，就基本上清除了由

表2

力的分量	$3\sigma/F$
N 法向力	0.0080
m 俯仰力矩	0.0215
y 侧向力	0.0113
n 偏航力矩	0.0160
l 滚转力矩	0.0200
A 轴向力	0.0070

于极化矢量方向误差和隔离陶瓷的电容量引入的各分量力之间的干扰。对天平各分量7次重复加载求得的最大 3σ 值与相应载荷 F 之比如表2。

静校后的天平装上模型，并在模型腔内的天平合适位置处安装惯性补偿用的加速度计，然后将装好模型的天平固定在电磁振动台上进行惯性补偿工作，补偿在300 Hz以下整个频带内反复进行，直至各分量力的输出信号在振动的情况下均接近于零时为止。

整个测量系统的线路方框图示于图3。由图可以看到测力元件和加速度计的输

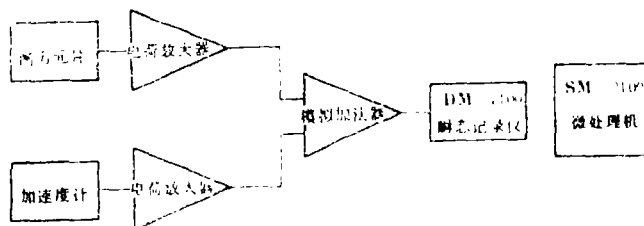


图3 天平测力系统方框图

加法器的输出信号(已消除了寄生惯性力信号的“干净”的气动力信号)送入DM-7100瞬态记录器，然后由SM-2100微处理器给出一次运行的各分量的气动力数据。

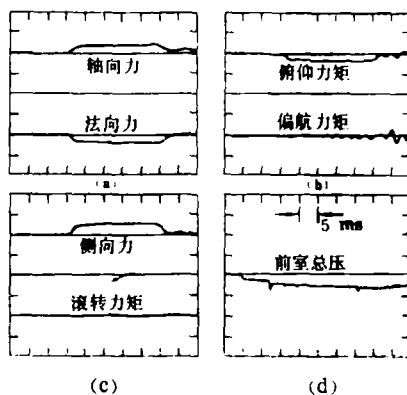


图4 惯性补偿后的测力波形($\alpha = 4^\circ$, $\beta = 4^\circ$)

图4和图5给出了风洞运行过程中记录下来的测力波形,由图可以清楚地看到经惯性补偿之后,测力波形对前室总压有极好的跟随性,而未经补偿的测力波形中明显地有因振动而产生的惯性力信号存在。对比上述两个图,可以看到惯性补偿的效果是明显的。

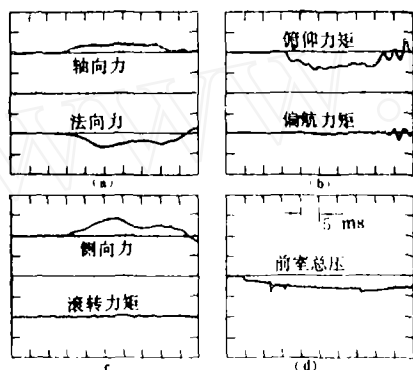


图5 未经惯性补偿的测力波形($\alpha = 1^\circ, \beta = 1^\circ$)

目前一时还找不到一个在高超声速时可提供六个分量气动力数据的模型作为校验六分量天平的标准模型。高超声速测力精度和准确度会议规定的标准模型,都是轴对称的模型,这些模型所给的结果也都是在攻角平面内的三分量的实验数据。最后选用 10° 尖锥模型作为标准模型在风洞中进行了吹风实验。 10° 尖锥在 $M = 10$ 时有文献提供的实验结果作为比较。另外尖锥模型的轴向力系数比钝锥要小得多,这样就容易检验支架系统对模型绕流的干扰情形,因为支架干扰在轴向力上表现得比其它的力更明显。名义尺寸半锥角为 10° 的尖锥模型,加工后实测尺寸为:模型半顶角 9.9° ,模型底部直径99.5毫米,由于模型顶点不可能做到理想的尖,因此模型全长为284毫米,模型是分前后两段加工的壁厚为1毫米左右的超硬铝薄壳体,

两段之间通过螺纹联接,联接处的台阶和缝隙均小于0.02毫米。

四、实验结果与讨论

对于每一个马赫数都分别进行变 α 角和变 β 角的测力实验,当变 α 角时将 β 角置于 0° ,而变 β 角时则将 α 角置于 0° 。这样做的目的是为了比较在铅直平面内和水平面内的测力系统是否一致,另外也为了与已有的 10° 尖锥的三分量结果进行比

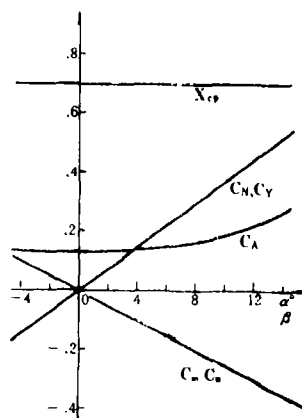


图6 $M_\infty = 7.3$ 时 10° 尖锥模型气动力系数曲线

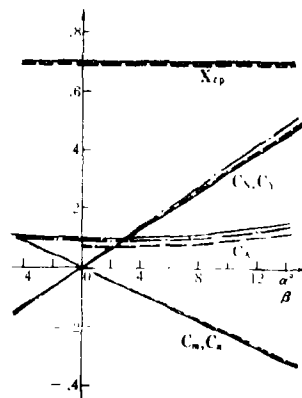


图7 $M_\infty = 9.9$ 时 10° 尖锥模型气动力系数曲线
——本实验 ---文献1文献2

较。图6和图7给出了 $M_\infty = 7.8$ 和9.9

薄膜式铂电阻温度传感器

袁国光

(航空部三〇四所)

摘要 本文介绍一种在70年代发展起来的薄膜式铂电阻温度传感器。它是采用高频溅射将铂薄膜粘附在基底表面,经光刻、焊接、调阻、上保护层后进行温度特性标定,制成了尺寸小、精度高、反应快,可在表面温度测量、瞬态温度变化及热流测量的新型测试元件。

关键词 铂—应用,薄膜—溅射,温度测量,传感器。

一、前言

电阻式的温度传感器不外乎线绕式的实验结果。图7上同时有文献[1]给的钝度比为0.054的 10° 尖锥的数值解的结果。同一图上还有文献[2]给的一个 10° 尖锥的实验结果。由图6和图7可以看到铅垂平面内的测量结果与水平平面内的测量结果随 α 角(β 角)的变化规律完全一致。法向力系数和俯仰力矩系数与文献上给的结果也基本上是一致的。轴向力系数的差别是由于文献[1]给的是无粘流的数值解,而与文献[2]的不一致则可能是由于两种来流的雷诺数不一致引起的。本实验给出的压心位置较理论值大约向后不到百分之一。

实验中曾发现由于模型支架的干扰,使得测力波形发生畸变,测力波形畸变的同时模型底部压力升高。其原因是由于模型支架前的激波后的高压通过天平杆周围的模型尾流传到模型底部引起的。将模型支架钝头前缘修改为尖劈状,则测力波形就恢复到(如图4所示)与前室总压的跟随

(如铂、铜、镍、钢、铈铁等)电阻温度计,热敏电阻式温度计,厚膜式及薄膜式(铂、金、银)电阻温度传感器。它们各有性相一致了,相应的模型底压也降下来了。为保证测力数据的可靠,实验中一直对模型底部压力进行监测。

五、结论

通过 $M=7.8$ 和 9.9 两种来流马赫数下对 10° 尖锥模型的六分量气动力的测量,鉴定了用于脉冲型风洞中的六分量天平测量系统,它能够给出比较可靠的测量结果。同时也验证了新设计加工的试验段以及 α 角和 β 角分别单独可调的模型支架系统完全能够胜任六分量的模型测力实验工作。

参 考 文 献

- [1] 《七袖流气动手册》,第六册,航空部十四所编
- [2] Pope, A. and Gein, K.L., *High-Speed Wind Tunnel Testing* (1965).