

文章编号: 1007-3124(2003)01-0068-05

脉冲风洞中新型自由天平探索

郭大华, 高冰, 林贞彬

(中科院力学所 LHD 实验室, 北京 100080)

摘要:为解决常规天平在高焓高超声速脉冲风洞中测得信号无法识别、无法提取的问题,提出了一种全新的自由型天平,并设计了两种不同方案(分自由度自由型三分力天平和整体自由型三分力天平)。实验表明这种加速度测力是可行的,并能很好地解决传统天平遇到的问题。

关键词:高焓;高超声速风洞;气动力测量;频响特性;自由型天平;氢氧爆轰风洞

中图分类号:TK312 **文献标识码:**A

The exploration of a new kind of free-released balance in impulsive wind tunnels

GUO Da-hua, GAO Bing, LIN Zhen-bin

(LHD Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: In order to solve the problem of signal identification of a conventional balance in highenthalpic and hypersonic wind tunnels, in this paper it is put forward a new free-released balance and designed two different models (three component-separately free released balance; three component-wholly free released balance). The test shows that this kind of balance is successful and solves the problem of conventional balance very well.

Key words: high enthalpic; hypersonic wind tunnels; aerodynamic measurement; character of frequency-response; free-released balance; hydrogen-oxygen detonation wind tunnels

0 引言

研究高超声速飞行器的气动力特性,必须考虑真实气体效应的影响。气体在高温时的振动激发、离解、电离和化学反应等现象不仅使气体的物理特性发生变化,而且影响到高超声速飞行器的流场和气动特性。

常规风洞无法模拟高温气体流动,因此需建立高焓和高雷诺数的激波风洞,但高焓值的建立是以时间极短为代价的,这对天平测力提出了极大的挑战。传统的天平在气流持续时间为十几毫秒,甚至更长时间内,可以达到很高的线性度和精度,但一到高焓风洞中,则变得均不适用,信号的波动变得十分厉害,即使

对数据进行后续处理,也没法利用。

国际上也遇到了类似的问题,他们普遍认为这可能是因为由支撑系统的振动和内部应力波的干扰造成的。为了解决这个问题,也采取了一些办法:一是干脆去掉支撑,天平杆用双线悬挂起来,并把天平杆做得很长,以消除应力波,但这种方案反演计算十分复杂,而且结果也并不理想,况且如何推广使用于升力与俯仰力矩还是个问题;另外一种是在气流到达之前,用爆炸的方法使模型、天平及其支杆一并脱离支撑系统,处于瞬时的自由状态,但这种方案的爆炸控制以及排除爆炸对测量的干扰均构成了一个明显的难题。

笔者从一个全新的角度重新设计了天平,巧妙地避开了支撑系统的振动和内部应力波的干扰,并得到

收稿日期: 2002-05-14

作者简介: 郭大华(1954-),男,北京市人,高级工程师。研究方向:真实气体效应对气动力、气动热影响的实验研究。

了比较好的结果。

1 天平的总体设计

1.1 天平的特点

支撑系统不向模型提供水平面各方向上的后坐力；

模型及加速度计等构成的组合体相对于支撑系统在被测的水平面方向上是自由的；

用一组加速度计测量组合体在水平面上不同方向上的加速度，获得三个气动力分量。

1.2 天平的设计方案

自由型天平结构上大体可以分为气动模型、定位件、连接件、承力支杆和支撑系统等几个主要部分

支撑系统与模型之间用滚珠支撑，减少摩擦且对模型不构成水平面的约束

考虑到风洞气流的对称性，攻角变化安排在水平方向

模型的初始姿态用微弱磁场力控制

1.3 测量原理

原理图如图 1

设天平整体有轴向加速度 $a_{轴}$ ；前法向加速度 $a_{法}$ ；角加速度 ϵ ；

三个加速度计测得数值分别为：前法向 a_1 ；后法向 a_2 ；轴向 a_3 ；

L_1 、 L_2 分别为前、后法向加速度计到旋转中心距离(其中加速度向右为正，角加速度顺时针为正)。

则由运动定律有：

$$a_1 = L_1 + a_{轴}$$

$$a_2 = a_{法} - L_2 \epsilon$$

$$a_3 = a_{轴}$$

可得：天平角加速度： $\epsilon = (a_1 - a_2) / (L_1 + L_2)$

转动力矩： $J = I$ (I 为转动惯量)

法向加速度： $a_{法} = (a_1 L_2 + a_2 L_1) / (L_1 + L_2)$

法向力： $F_{法} = M a_{法}$

轴向加速度： $a_{轴} = a_3$

轴向力： $F_{轴} = M a_{轴}$

气动中心到旋转中心的距离：

$$L_{CP} = (I) / (M a_{法})$$
 (I 为转动惯量)

天平尖端到气动中心距离： $L_{CP} = L_{CO} - \Delta$

线加速度的数值分别由各加速度计的输出电压和灵敏度获得：

$$a_1 = V_1 / S_1, \quad a_2 = V_2 / S_2, \quad a_3 = V_3 / S_3$$

其中 S_1, S_2, S_3 是对应加速度计的灵敏度， V_1, V_2, V_3 是对应加速度的输出电压。

1.4 自由型天平的结构

共设计了两种工作方式的天平：分自由度自由型和整体自由型。采用了简单的 10 半角尖锥模型。

分自由度自由型天平结构

分自由度自由型天平的三个自由度用三副各自不同的活动件分开，使模型可以在水平面做旋转、轴向和法向的小行程运动。

整体自由型天平结构

整体自由型的三分量天平只使用一副活动件，模型整体可以在水平面内的三个自由度方向上自由活动。

1.5 风洞实验中的技术措施

模型姿态的控制

自由型天平的模型是自由活动的，需要使它保持预先选定的姿态，我们采用微弱的磁场相互作用来达到这一目的。磁场作用力既要大到在气流到达之前

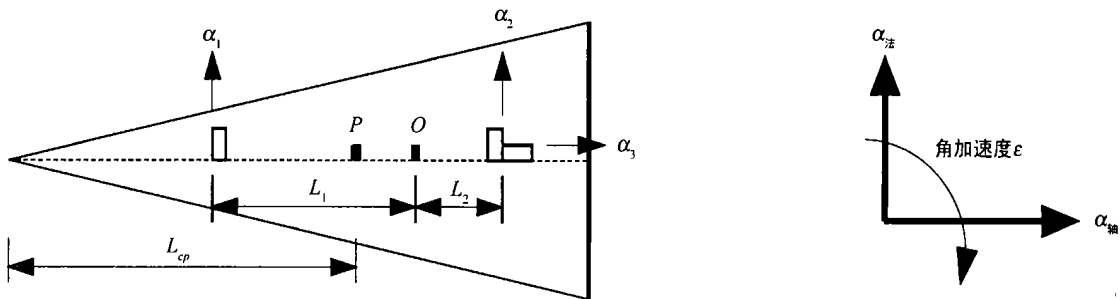


图 1 天平测力原理图 (P-压心 O-旋转中心)

Fig.1 Principle graphic of balance

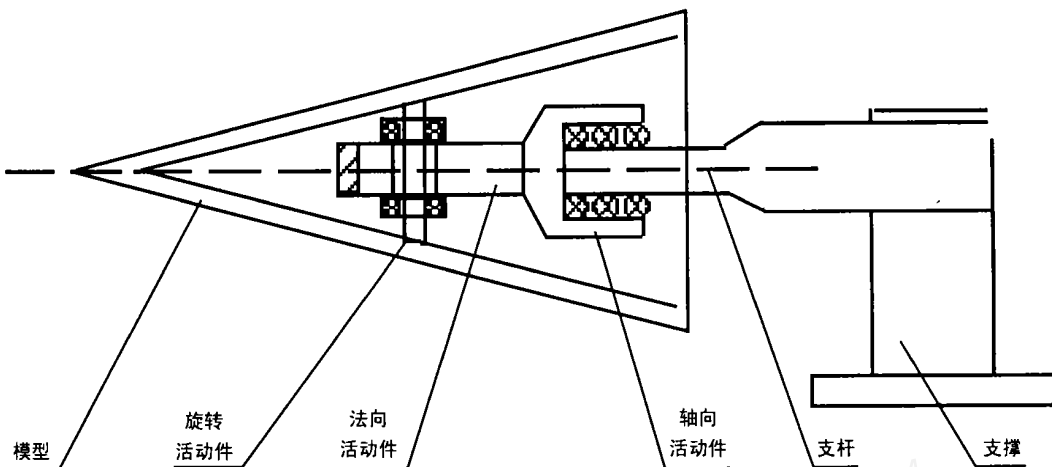


图2 分自由度自由型三分力天平结构(带模型)示意图

Fig.2 Sketch of three component-free released balance (with model)

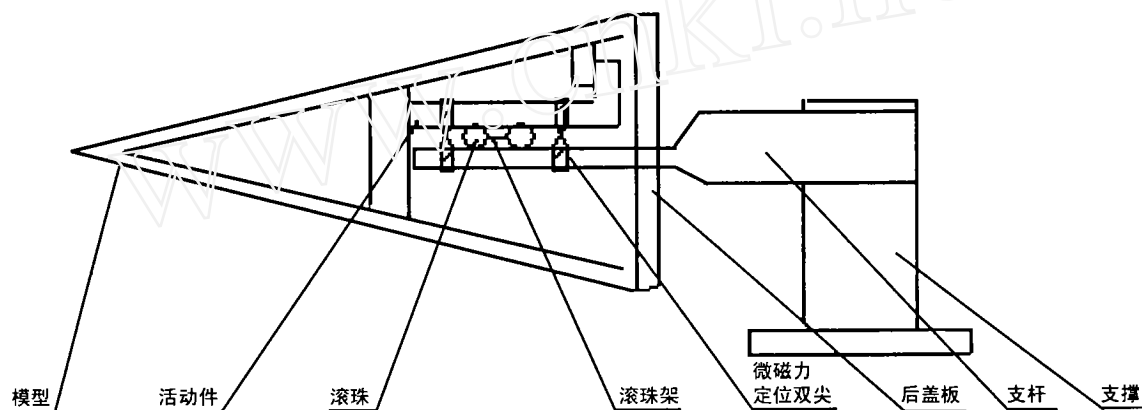


图3 整体自由型三分力(双支撑)示意图

Fig.3 Sketch of three component-wholly free released balance (with double supports)

保持住确定的姿态,又要与被测的气动力和力矩相比可以忽略不计。

摩擦力误差的控制

摩擦力与摩擦力矩是测量误差的直接来源。所以在设计方案中活动件之间主要采用滚动摩擦。滚动摩擦系数大致为 0.3%,如果天平设计中注意到负载传递的正确性,摩擦力误差可以控制在载荷的 1% 以下。

力的隔离

在自由型天平上,被测的不同气动力分量的隔离以天平本身的设计结构和加速度计的不同安装来保证。

2 初步实验

为了定性地观测自由型天平在高焓风洞中的表现是否优于常规天平,初步在 JF-1 氢氧爆轰风洞中做了一轮实验,发现曲线波动还是比较大,而且在初始时刻出现了过冲,这对于分析数据是十分不利的。经过长时间的探讨,最后认定可能是由于高焓脉冲风洞极短时间的冲击激发了天平的高次谐波部分,导致天平本身的振动过大。

为了解决这个问题,就必须消振。作者对天平结构、材料作了一些改进,比如加大壁厚,内部涂上一层阻尼胶,气动模型与内部定位件用螺钉紧固,加大连接螺纹孔径等措施,得到了相应的频响特性曲线。

由图 4 可见,改进型天平在减少天平本身的振动,提高谐振频率方面有了大幅度的提高。

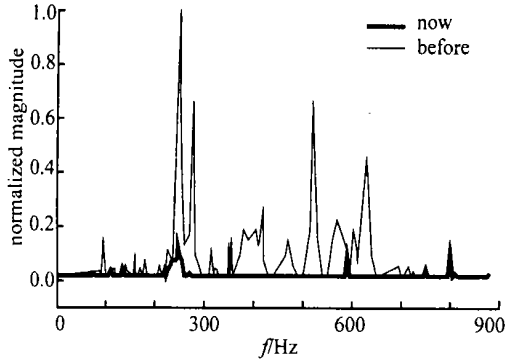


图 4(a) 新天平与旧天平频响特性的比较(前法向加速度计响应比较)

Fig.4(a) Comparison between new balance and old balance in character of frequency-response (front vertical acceleration)

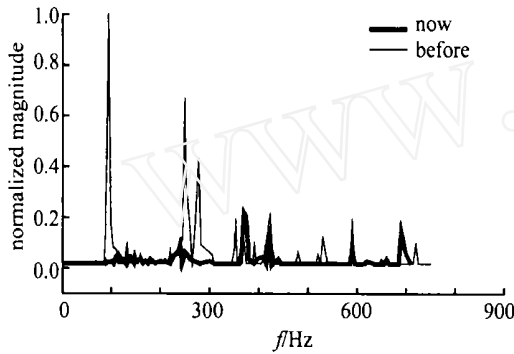


图 4(b) 新天平与旧天平频响特性的比较(后法向加速度计响应比较)

Fig.4(b) Comparison between new balance and old balance in character of frequency-response (back vertical acceleration)

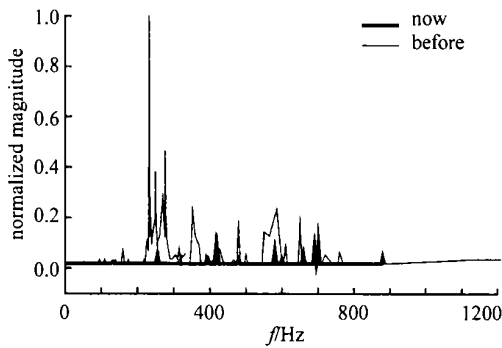


图 4(c) 新天平与旧天平频响特性的比较(轴向加速度计响应比较)

Fig.4(c) Comparison between new balance and old balance in character of frequency-response (axile acceleration)

3 风洞实验及其初步结果

为了考察自由型天平技术方案的可行性,我们首先在 JF-4B 高超声速脉冲型炮风洞中做了第一代整体自由型天平实验(双支撑)(改进前)。天平为 10 半锥角,总长 357mm,攻角为 6°。风洞的驱动段和被驱动段长度均为 10m,内径为 0.1m。驱动气体和被驱动气体都是氮气,且用活塞隔开,驱动气体由高超声速喷管加速后由直径为 0.5m 的喷管出口流入实验段。实验是在两种状态下进行的:

$$(1) M = 7.8, P_0 = 17.16\text{MPa},$$

$$Q = 0.084\text{MPa}, Re = 3.5 \times 10^7/\text{m}$$

$$(2) M = 9.9, P_0 = 19.00\text{MPa},$$

$$Q = 0.290\text{MPa}, Re = 1.0 \times 10^7/\text{m}$$

得到的结果与文献[6]的比较见表 1。

表 1 6 攻角时 10 尖锥模型新天平炮风洞实验结果

Table 1 Test results of 10° sharp cone with 6° angle of attack

(a) M = 9.9		
气动力系数	文献值	本次实验
C_A	0.09-0.11	0.09
C_N	0.19-0.21	0.20
X_{CP}	0.68-0.70	0.70
(b) M = 7.8		
气动力系数	文献值	本次实验
C_A	0.08-0.14	0.12
C_N	0.20-0.22	0.20
X_{CP}	0.68-0.70	0.70

加速度计经数据采集系统获得的典型信号波形见图 5。

4 结 论

为了克服传统的激波风洞天平测力技术遇到的困难,作者探索了自由型天平的原理和实施方案,考虑到新的方案实施过程中会遇到的若干技术关键问题,提出了具体的解决办法,并进一步在不同类型风洞(炮风洞和高焓风洞)、不同运行状态开展实际测量。实验结果说明了自由型测力方案在技术上是可行的。作者相信,随着今后进一步开展更加细致的研究,自由型天平能够作为适用的技术在今后短时间风洞的气动力测量中发挥作用。

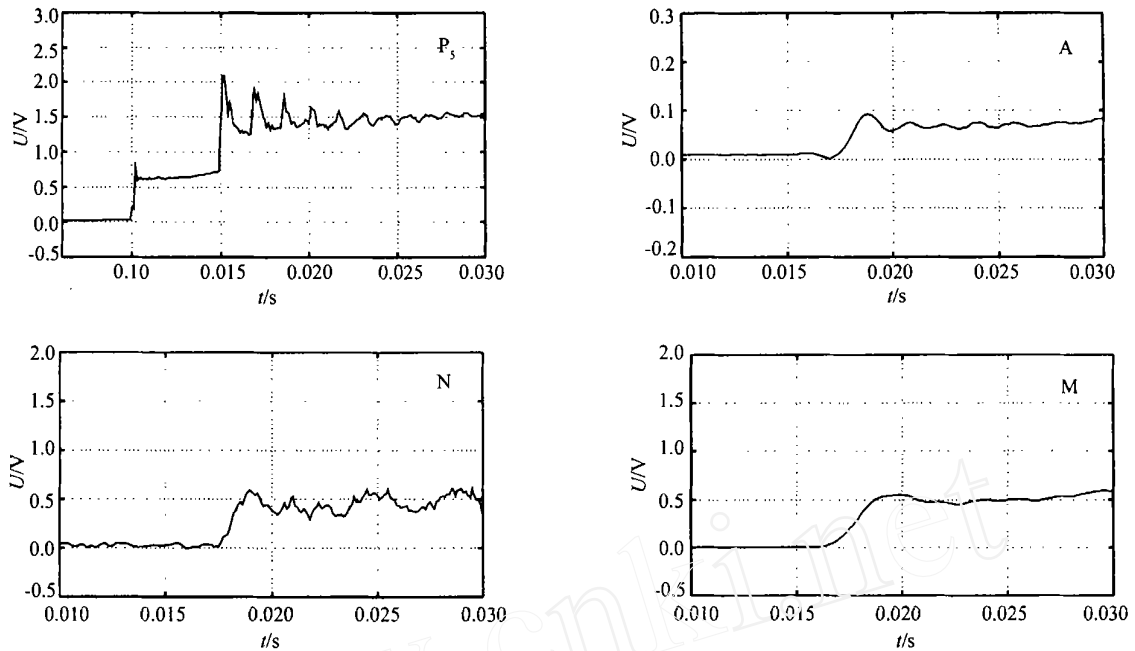


图5 自由型天平在炮风洞中实验的典型曲线

Fig.5 Typical curves of free-released balance in gun wind tunnel

参考文献:

- [1] J. T. 布罗特著. 机械振动与冲击测量. 北京:国防工业出版社,1975.
- [2] 黄永强,陈树勋主编. 机械振动理论. 北京:机械工业出版社,1996.
- [3] John ,D. Anderson ,Jr. HYPERSONIC AND HIGH TEMPERATURE GAS DYNAMICS. US:Mc Graw- Hill Book Company.
- [4] 林贞彬等. 爆轰驱动激波风洞自由流的测量和诊断. 863项目报告,1998.
- [5] 黄志澄著. 高超音速飞行器空气动力学. 北京:国防工业出版社,年代.
- [6] 杨耀栋,王复,郭大华. 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. 北京,中国科学院力学研究所,1986.