DOI: 10.13382/j.jemi.B2003746

六分量大阻力复合式结构天平研制与应用

马 涛 王树民 潘华烨 谢 斌
(中国空气动力研究与发展中心 绵阳 621000)

摘 要:着陆巡视器和探月返回舱等短钝体风洞试验模型具有更大的阻力测量范围和更短的长度尺寸,为了提高该类模型在风洞试验中的测量精度,研制了一种新型复合式结构大阻力六分量应变天平。与传统串联式结构天平相比,复合式结构天平结构紧凑而阻力承载能力更强,能够完全安装于模型内部从而减少温度对天平测量精准度的影响;数值模拟结果表明,复合式结构天平的平均应变、灵敏度、强度等能够满足风洞试验要求;复合式结构天平静态校准综合校准准度优于 0.21%,满足国军标相关技术指标。

关键词:着陆巡视器;风洞;应变天平;六分量;大阻力
中图分类号:TN06;V211.4 **文献标识码**:A **国家标准学科分类代码**:590.50

Development of a six-component large axial force strain gauge balance based on complex structure

Ma Tao Wang Shumin Pan Huaye Xie Bin
(China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: To improve the measurement accuracy in wind tunnel experiments for short blunt model which has larger axial force and shorter model length such as landing patrol device and lunar return cabin. A six-component large axial force strain gauge balance based on complex structure was developed. The complex structure balance was compact design and has larger axial force capacity compare with the conventional series structure balance, meanwhile, the complex structure balance could be installed in the model lumen completely to reduce the influence of temperature. The results of numerical simulation indicate that the mean strain, sensitivity and strength of complex structure balance meet the measurement requirements of the wind tunnel experiments. Calibration data show that the accuracy of the complex structure balance is less than 2.1%, which satisfied the technical index of National Military Standard.

Keywords: landing patrol device; wind tunnel; strain gauge balance; six-component; large axial force

0 引 言

随着我国航天事业的发展,着陆巡视器、探月返回舱等飞行器逐步成为重要的研究方向。此类飞行器在飞行过程中要经历亚、跨声速至高超声速的全流域飞行,飞行环境复杂多变,其气动性能的优劣直接关系到任务的成败。另一方面,为了利用气动阻力减速,此类飞行器多采用短钝体气动外形,其气动特性与常见的大升阻比、细长体飞行器存在明显差别。因此,必须通过长期的风洞测力试验对此类飞行器的气动特性进行系统研究[1-3]。

风洞天平作为风洞试验的核心测力装置,是风洞测力试验的前提,对风洞测力试验的精准度有重要影响。风洞天平通过机械分解和电气分解的方式将模型感受到的气动力分解为 3 个方向的力(法向力 Y、轴向力 X、侧向力 Z)和 3 个方向的力矩(俯仰力矩 M_z、滚转力矩 M_x、偏航力矩 M_y),通过应变计组成的惠斯通电桥将力/力矩引起的天平元件应变转换为电信号进行测量。现有的高速风洞试验天平以串联式结构为主,天平整体呈杆状,天平与模型通常采用锥连接,楔子拉紧,阻力测量元件设置在天平设计中心,单独测量阻力;组合测量元件对称设置在天平设计中心的前后,用于测量阻力外的其他各分量。串联式结构在常规外形模型风洞试验中具有良好的测量效果。

收稿日期:2020-12-04 Received Date: 2020-12-04

20 世纪 90 年代初,在返回舱风洞试验中,天平通常也采用串联式结构。但由于试验模型具有钝头、长度短的特点,无法将串联式结构天平的主体完全设置在模型内腔中,环境温度对天平测量精准度影响显著,天平温度效应严重。此外,由于模型升阻比小(接近 0.1),模型感受到的阻力通常较大,必须通过增大串联式结构天平的直径以增加天平对阻力的承载能力,这通常以更严重的模型尾部外形破坏为代价。克服这些问题的方法主要有两种:一种方法是利用附加的天平保护罩对暴露在流场中的天平元件进行防护,这种方法对模型底部外形破坏更为严重,且防护效果有限;另一种方法是缩短天平长度,通过压缩天平前锥及过渡段的长度使天平能够勉强设置在模型内腔中,这种方法虽然减小了天平温度效应,但对天平前锥及过渡段的过度压缩会造成天平在试验中稳定性差的问题[4-5]。

2002 年,在中国空气动力研究与发展中心超高速所激波风洞中进行的某飞船返回舱测力试验,采用了"5+1"组合式六分量梁式微应变压电天平测量方案,即五分量主天平和单分量滚转力矩天平相结合,实现对飞船返回舱的六分量测量,得到了较为满意的结果[6]。这种测量方案需要两台天平组合测量,对模型的空间尺寸及加工精度要求较高,数据处理程序相对复杂,难以通用。

Lagutin 等提出了一种应用于飞船返回舱气动力测量的六分量环式应变天平设计方案,它由一个复合式结构的组合测量元件(测量 Y、Z、M_x、M_z 和 M_y)和一个阻力测量元件(测量 X)串联而成。在该方案中,为缩短阻力测量元件长度,"×"字形设置 4 个测量梁,对天平切削严重,对天平强度和刚度影响较大。此外两种测量元件串联对天平长度的缩减效果并不十分显著,仍然需要进行额外的天平防护。

由于着陆巡视器、探月返回舱等模型的结构特点,传统串联式天平无法进一步缩短长度以完全安装在模型内腔中,带来了天平温度效应严重、对模型底部外形破坏大等影响天平气动力测量精准度的问题。复合式结构在增大天平承载力的同时能够减小天平长度,应用在此类试验中有一定的优势,但目前的复合式结构对天平长度的缩短效果有限,通用性不强。

为解决上述问题,中国空气动力研究与发展中心高速所依托某着陆巡视器气动力测量试验,基于串联式结构和复合式结构分别设计了两台六分量大阻力应变天平,对比了两种结构天平的有限元分析结果和静态校准结果。其中复合式结构天平通过一个复合式测量元件同时测量六个分量,在显著缩短天平长度、提高天平阻力测量能力的同时各分量测量灵敏度均能满足试验要求,为同类试验的天平设计提供了新的思路。

1　试验条件

某着陆巡视器气动力测量试验在 FL-24 风洞进行,试验最大马赫数 $Ma_{MAX}=3.0$。试验模型为一简化的翼身组合体模型,采用 30CrMnSiA 材料制成。模型长度 113.35 mm,尾部直径 28.26 mm。大致外形如图 1 所示。

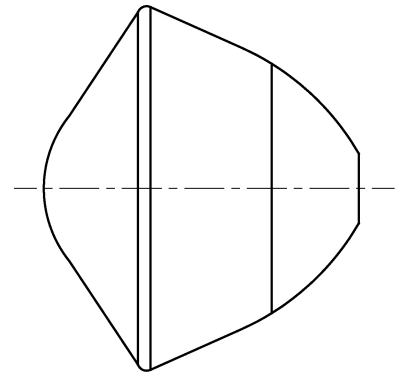


图 1　着陆巡视器外形

Fig. 1　Schematic drawing of Lander Model

根据数值计算结果以及天平与模型的安装位置,同时考虑到可能的最大误差,确定了天平的设计载荷如表 1 所示。设计载荷是天平测量的最大量程,超量程使用通常是被禁止的。该天平设计载荷能够满足目前大部分同类模型试验的测量要求,其升阻比为 0.12,在着陆巡视器、探月返回舱等模型试验中具有一定代表性。

表 1　天平设计载荷

Table 1　Balance design loads

Y	M_z	X	M_x	Z	M_y
300 N	10 N·m	2 600 N	2 N·m	80 N	2.5 N·m

2　串联式天平设计及存在的问题

根据上述试验条件,基于串联式天平结构设计天平,天平材料选用高强度马氏体时效钢 00Ni18Co8Mo5TiAl(F141),主要性能如下:热膨胀系数 10.8×10^{-6}/℃(20 ℃~200 ℃),密度为 8×10^3 kg/m^3,强度极限为 1 862 N/mm^2,屈服极限为 1 754 N/mm^2,弹性模量为 187 250 N/mm^2,剪切模量为 72 000 N/mm^2,泊松比为 0.3。

串联式结构天平与模型的相对位置如图 2 所示。为缩短天平长度,天平与模型采用法兰连接,天平全长 101 mm,前后组合梁处的天平直径与支杆直径相同,为 Φ23 mm,为增大阻力承载能力,阻力测量元件处的天平直径增大为 Φ28 mm。在不压缩过渡段的前提下,天平无法完全安装在模型内腔中,需要额外的隔热防护,模型

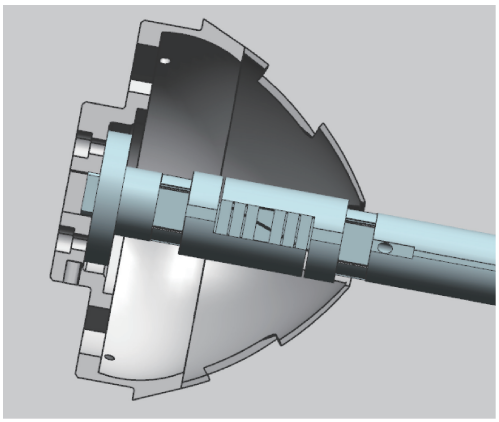


图2　串联式结构天平与模型装配图

Fig. 2　Assembly drawing of the series structure balance and model

尾部破坏的最大直径为 Φ34 mm[7-8]。

此外,天平设计载荷匹配性差,特别是偏航力矩,其数值只有阻力的0.1%。串联式结构天平中阻力对其他分量的干扰将不容忽视[9-10]。

3　复合式结构天平设计

针对串联式结构天平存在的问题,结合模型特征和试验条件,提出一种六分量复合式结构天平设计方案。确定总体方案后,根据经验和理论计算方法初步确定测量梁的数量、位置、尺寸,然后利用本单位融合UG、ANSYS等软件搭建的天平优化设计平台完成优化设计工作[11]。复合式结构天平材料同样选用高强度马氏体时效钢00Ni18Co8Mo5TiAl(F141),复合式结构天平与模型的相对位置如图3所示。天平由一个复合式测量元件同时测量6个分量,元件总长48 mm,最大外径Φ40 mm,布置于模型内腔中。天平与模型之间采用法兰连接,天平与支杆之间采用锥连接,支杆最大外径Φ23 mm,模型尾部破坏的最大直径为Φ28 mm。

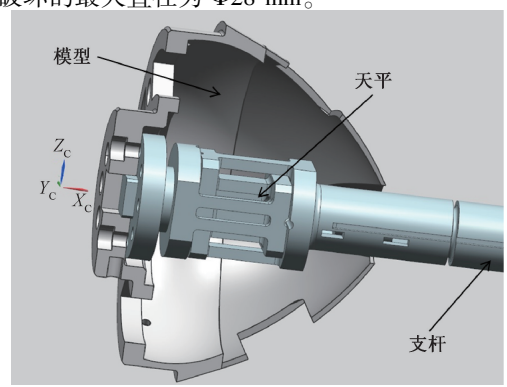


图3　复合式结构天平与模型装配图

Fig. 3　Assembly drawing of the complex structure balance and model

复合式测量元件由10个测量梁和4个刚性支撑梁构成。法向力方向由2个置于外侧的测量梁(用于测量Y、M_y)和2个刚性支撑梁构成回路,侧向力方向由4个置于外侧的测量梁(用于测量M_x、Z、M_z)和2个刚性支撑梁构成回路,两个回路相互嵌套,通过4个置于内侧的测量梁(用于测量X)连接。复合式测量元件外形如图4所示,柱梁组合截面如图5所示。

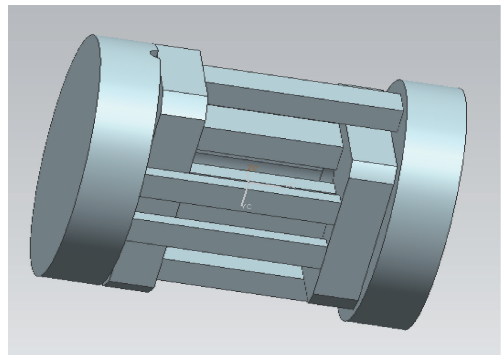


图4　复合式结构天平元件示意图

Fig. 4　Measurement element of the complex structure balance

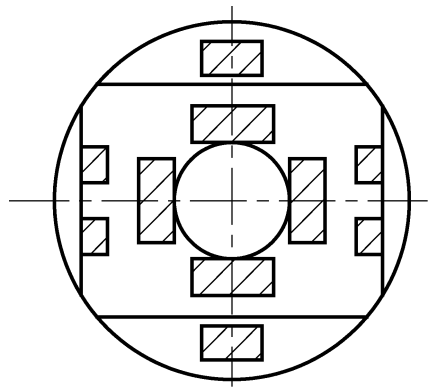


图5　复合式结构天平柱梁组合截面

Fig. 5　Sectional drawing of the complex structure balance

应变计的粘贴位置及组桥方法如图6所示。为方便加工和安装,将模型分为3段加工,并将后段切分为左右两个部分。安装时,待天平与模型中段连接后,再将模型后段的两个部分连接在一起,并固定到中段上。

4　天平有限元分析结果

利用有限元软件对两种结构的天平进行应变分析和强度、刚度校核。串联式结构天平应变分析结果如表2所示。其中平均应变是指施加设计载荷时应变计粘贴位置处的应变平均值。灵敏度是指单位桥压下各分量电桥的输出。复合式结构天平应变分析结果如表3所示,复合式结构天平各分量应变云图如图7所示。从表2和3

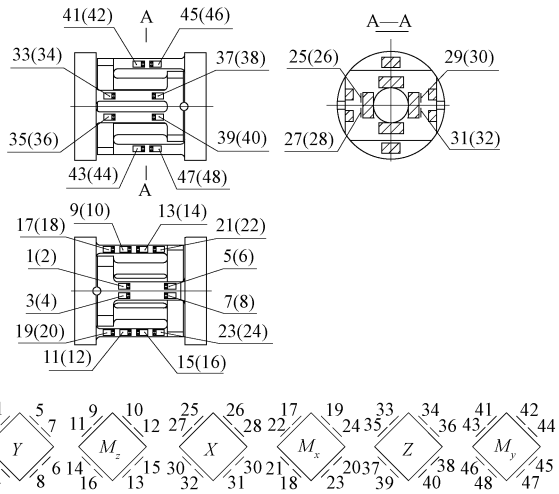


图 6　复合式结构天平应变计粘贴接线

Fig. 6　Strain gauge glue of the complex structure balance

可以看出,两种结构的天平各分量平均应变、灵敏度合理,均能满足测量要求。复合式结构天平的轴向力灵敏度更小,说明具有更大的阻力承载能力。

表 2　串联式结构天平各分量设计应变及灵敏度

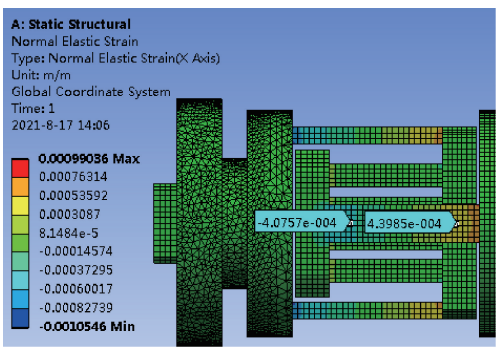
Table 2　Design strain and sensitivity of the series structure balance

	Y	M_z	X	M_x	Z	M_y
平均应变/($\times10^{-6}$)	270	260	250	140	160	170
灵敏度/($mV\cdot V^{-1}$)	0.55	0.52	0.50	0.28	0.32	0.34

表 3　复合式结构天平各分量设计应变及灵敏度

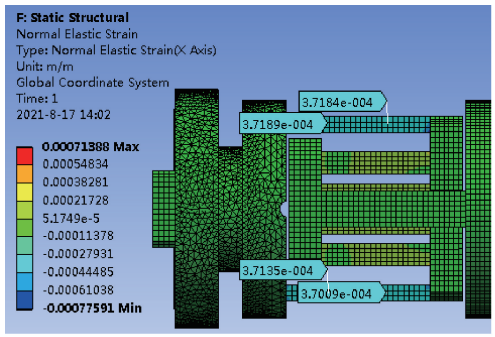
Table 3　Design strain and sensitivity of the complex structure balance

	Y	M_z	X	M_x	Z	M_y
平均应变/($\times10^{-6}$)	420	370	200	170	160	210
灵敏度/($mV\cdot V^{-1}$)	0.84	0.74	0.40	0.34	0.32	0.42



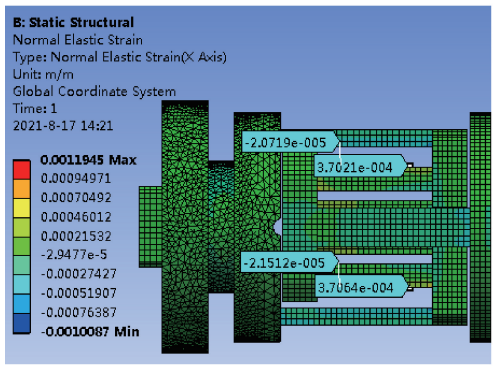
(a) Y应变分布

(a) Strain distribution of Y



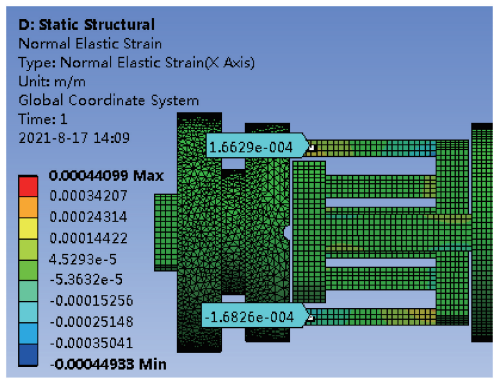
(b) M_z应变分布

(b) Strain distribution of M_z



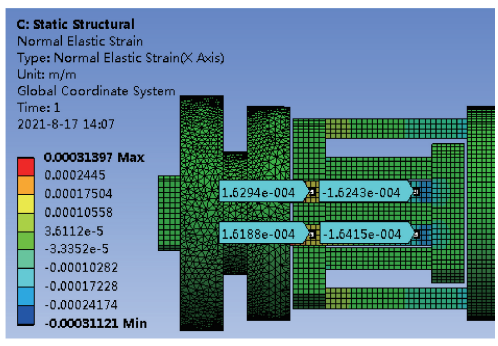
(c) X应变分布

(c) Strain distribution of X



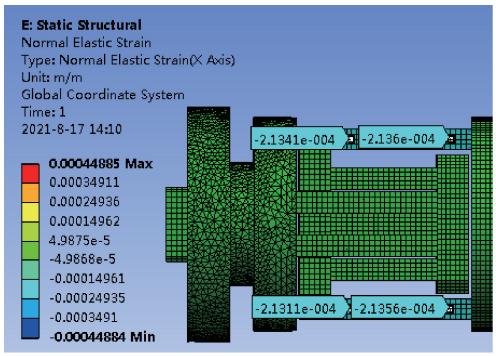
(d) M_x应变分布

(d) Strain distribution of M_x



(e) Z应变分布

(e) Strain distribution of Z



(f) M_y应变分布
(f) Strain distribution of M_y

图 7　复合式结构天平各分量应变云图

Fig. 7　Distribution of the strain of the complex structure balance

强度校核采用范·米塞斯(Von-Mises)准则,材料屈服极限为 1 862 MPa,材料安全系数取 2,冲击因子取 2,则许用应力为 465 MPa。

复合式结构天平强度校核结果如图 8 所示,天平最大应力出现在侧力测量梁根部,为 463 MPa。串联式结构天平最大应力为 412 MPa。两种结构天平最大应力均小于许用应力,满足试验要求。

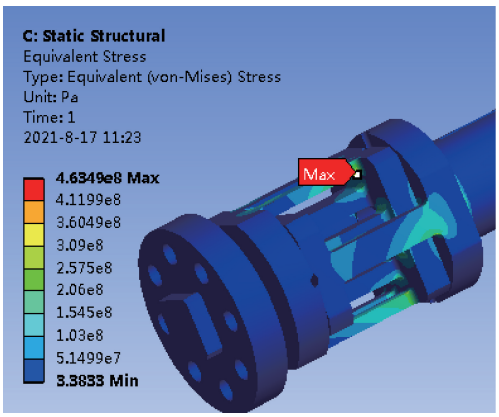


图 8　复合式结构天平强度校核结果

Fig. 8　Strength checking results of the complex structure balance

复合式结构天平刚度分析结果如图 9 所示,设计载荷综合作用下,天平头部最大位移 0.22 mm。相同情况下,串联式结构天平头部最大位移为 0.18 mm。两种结构天平刚度接近,均满足试验要求。

5　天平静态校准

天平及测力装置的校准分为动态校准和静态校准两类[12-16]。在本文试验中,仅关注静态校准。静态校准按照加载矩阵的不同可以分为单元校准方法和多元校准方法两种,为了方便对比,串联式结构天平和复合式结构天平均采用单元校准方法进行[17-19]。天平静态校准在本单位的 BCL10000 准体轴系校准架上完成。串联式结构天平静态校准结果如表 4 所示。复合式结构天平静态校准结果如表 5 所示。

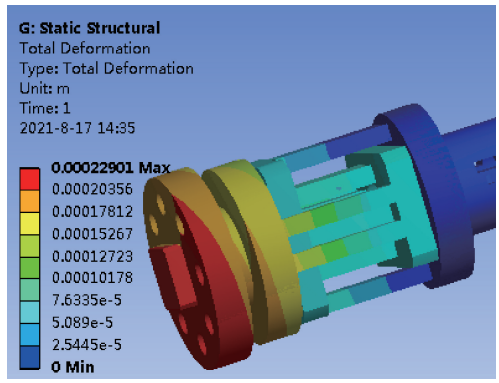


图 9　复合式结构天平刚度分析结果

Fig. 9　Stiffness analysis results of the complex structure balance

表 4　串联式结构天平静态校准结果

Table 4　Static calibration results of the series structure balance

项目	Y	M_z	X	M_x	Z	M_y
理论输出/mV	6.6	6.2	5.0	2.8	3.9	4.0
实际输出/mV	6.9	6.8	4.4	2.8	3.9	4.5
综合校准精度/%	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
综合校准准度/%	0.08	0.17	0.09	0.09	0.12	0.29

表 5　复合式结构天平静态校准结果

Table 5　Static calibration results of the complex structure balance

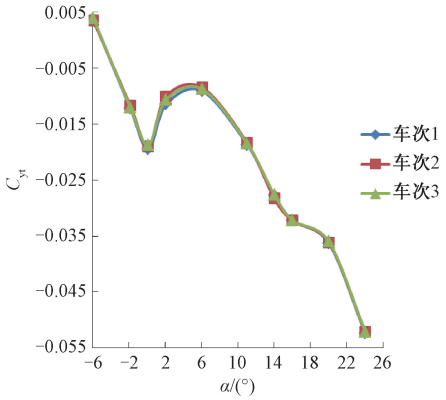
项目	Y	M_z	X	M_x	Z	M_y
理论输出/mV	8.4	7.4	4.0	3.0	3.1	4.3
实际输出/mV	8.5	8.2	4.6	3.8	3.6	4.4
综合校准精度/%	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
综合校准准度/%	0.02	0.08	0.09	0.06	0.06	0.21

其中,理论输出是指按照有限元应变分析结果计算得到的各分量输出值,实际输出是在校准过程中,施加天平设计载荷时的电桥输出与零载输出的差值。从静态校准结果可以看出,两种结构天平静态校准结果与有限元分析结果基本吻合,天平各元的输出较为理想,均能满足国军标合格指标[20]。复合式结构天平阻力分量综合校准准度与串联式结构天平的结果相近,其他各分量的综合校准准度普遍优于串联式结构天平。

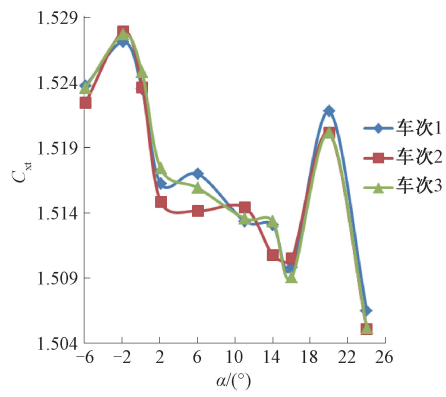
6　风洞试验

某着陆巡视器风洞测力试验于 2018 年 2 月完成,采

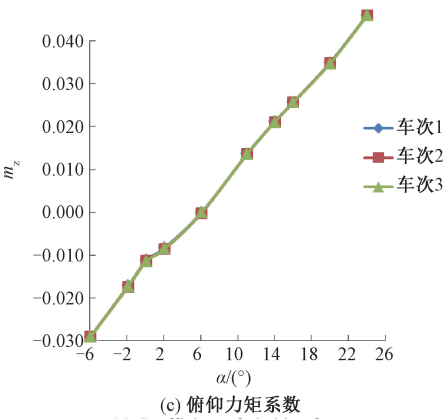
用复合式结构天平，试验过程中天平性能稳定，测量数据合理，重复性较好。图 10 为模型反装、迎角为−6°～24°、马赫数 $Ma=1.5$ 时 3 次重复性试验得到的法向力系数、轴向力系数和俯仰力矩系数曲线，其中法向力系数 3 次重复性试验的最大差量为 0.002 1，轴向力系数为 0.002 8，俯仰力矩系数为 0.000 4，达到了试验要求。图 11 所示为安装配平翼状态下模型法向力系数和轴向力系数随马赫数（$Ma=0.6\sim3.0$）变化的规律。



(a) 法向力系数
(a) Coefficient of normal force



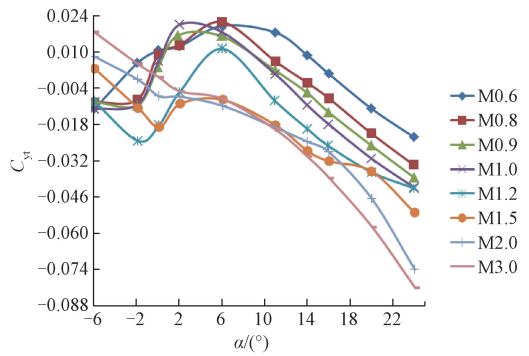
(b) 轴向力系数
(b) Coefficient of axial force



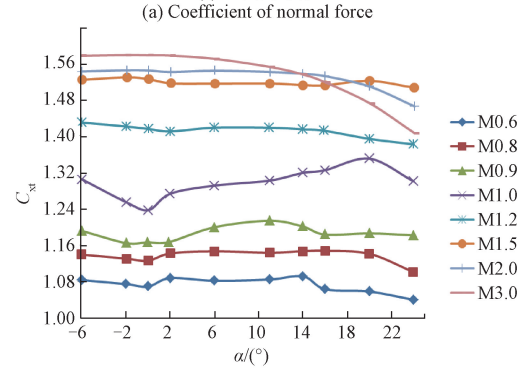
(c) 俯仰力矩系数
(c) Coefficient of pitching force

图 10　天平重复性试验结果

Fig. 10　Repeatability results of the experiment



(a) 法向力系数
(a) Coefficient of normal force



(b) 轴向力系数
(b) Coefficient of axial force

图 11　随马赫数变化规律

Fig. 11　Change with the Mach number

7　结　论

复合式结构天平利用两个相互嵌套的由支撑梁和测量梁组成的回路实现对风洞试验模型 6 个气动载荷分量的测量，在提高阻力承载能力的同时，具有长度小、直径大、结构紧凑的特点，与着落巡视器、探月返回舱等短钝体风洞试验模型外形特征、气动特性吻合。与传统串联式结构天平相比，复合式结构天平静态校准准度更优，而且能够完全安装在模型内部，从而减小因为隔热防护对模型底部外形的破坏。风洞试验结果表明，复合式结构天平性能稳定，测量数据合理，重复性较好，具有较好的应用前景。下一步将会结合具体的风洞试验需求逐步形成系列化的天平序列，覆盖现有短钝体模型风洞试验的整个测量范围，提高快速满足试验要求开展风洞试验的能力。此外，在天平能够完全安装在模型内部的条件下，如何更方便有效的提高天平隔热防护能力，减小天平温度效应，也是需要关注的问题。

参考文献

[1] 胡静，宋玉辉，陈农，等. 返回舱动稳定特性风洞试验的影响参数[J]. 航天返回与遥感，2013，34(5)：14-19.

HU J，SONG Y H，CHEN N，et al. Study of key

parameters for dynamic stability of reentry capsule[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2013, 34(5): 14-19.

[2] 石泳. 载人飞船钝头体返回舱减速着陆组合方式对比[J]. 航天返回与遥感,2016,37(6): 20-27.
SHI Y. Combination of deceleration and landing modes for return capsule with blunt body of manned spacecraft [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2016, 37(6): 20-27.

[3] 杨肖峰. 唐伟,桂业伟. CSTS 返回舱气动布局研究[J]. 空气动力学学报,2014,32(4):493-498.
YANG X F, TANG W, GUI Y W. Aerodynamics configuration study for CSTS reentry capsule[J]. ATCA Aerodynamic Sinica, 2014, 32(4):493-498.

[4] 王惠伦,解亚军. 风洞天平装配应力分析[J]. 航空工程进展,2014,5(3):364-368.
WANG H L, XIE Y J. Analysis of assembly stress of wind tunnel balance [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2014, 5(3): 364-368.

[5] 张丹,胡胜海,王洪光. 铰矩天平固定方式及预紧力矩对其测量影响的研究[J]. 宇航计测技术,2013,33(6): 46-49.
ZHANG D, HU SH H, WANG H G. Research on influence of fixed model and retightening moment on the hinge moment balance measures [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2013, 33(6): 46-49.

[6] 唐志共,许晓斌,杨彦广. 飞高超声速风洞气动力试验技术进展[J]. 航空学报,2015,36(1):86-97.
TANG ZH G, XU X B, YANG Y G. Research progress on hypersonic wind tunnel aerodynamic testing techniques [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(1): 86-97.

[7] 史玉杰,陈竹,田正波. 横Ⅱ型梁在风洞应变天平阻力结构上的应用[J]实验流体力学,2012,26(4):83-86.
SHI Y J, CHEN ZH, TIAN ZH B. The application of thwart Ⅱ beam to axial force structure of wind tunnel strain gauge balance[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2012, 26(4): 83-86.

[8] 王超,田正波,张凡. T 型梁结构应变天平正对称与反对称布局对比分析[J]. 电子测量技术,2019,42(15): 161-166.
WANG CH, TIAN ZH B, ZHANG F. Contrastive analysis of strain gauge balance with symmetrical and antisymmetrical T-beams [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(15): 161-166.

[9] 熊琳,宫建,王金印,等. 小直径杆式应变天平轴向力元件设计问题的探讨[J]. 实验流体力学,2013,27(5):75-78.
XIONG L, GONG J, WANG J Y, et al. Discussion about axial force element design of bending-beam strain-gauge balance with small diameter [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2013, 27(5): 75-78.

[10] 冷菊丽. 小杆径大载荷风洞天平研制[J]. 辽东学院学报,2017,24(1):46-49.
LENG J L. Design of a wind tunnel balance with small diameter and heavy load[J]. Journal of Eastern Liaoning University, 2017, 24(1): 46-49.

[11] GUANGWEI X. Automatic strain gauge balance design optimization approach and implementation based on integration of software. measurement Science Review, 2020(1):22-34.

[12] 王延年,向秋丽. 基于改进粒子群优化算法的六自由度机器人轨迹优化算法[J]. 国外电子测量技术,2019,39 (1) :49-53.
WANG Y N, XIANG Q L. Trajectory of 6-DOF robot based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 39(1): 49-53.

[13] 张孝军,程银宝. 自适应蒙特卡洛法评定量块校准测量不确定度[J]. 电子测量技术,2020,43(20) :84-88.
ZHANG X J, CHEN Y B. Measurement uncertainty evaluation of gauge calibration using adaptive Monte Carlo method[J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(20): 84-88.

[14] 田正波,杨家军. 一种新的风洞试验支撑机构横向弹性角校准方法[J]. 兵器装备工程学报,2017,38(8): 32-35.
TIAN ZH B, YANG J J. Study on a new method of sideelastic angle calibration for wind tunnel model support[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017, 38 (8): 32-35.

[15] 闫文吉,陈红亮,陈洪敏,等. 硅压阻式压力传感器测量误差在线补偿方法研究[J]. 仪器仪表学报,2020,41(6) :59-65.
YAN W J, CHEN H L, CHEN H M, et al. Research on on-line compensation method for the measurement error of silicon piezoresistive pressure sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(6): 69-65.

[16] 苗磊,贺中,赵忠良,等. 某飞行器大攻角通气测力试验装置研制与应用[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(2):150-157.
MIAO L, HE ZH, ZHAO ZH L, et al. Development and application of air input and force measurement test device undue the condition of high angles of attack for air craft[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation,

2020, 34(2): 150-157.

[17] RAYMOND B. An experimental comparison of different load tables for balance calibration [R]. AIAA 2010-4544.

[18] WAHID Z, NADIR N. Improvement of one factor at a time through design of experiments[J]. World Applied Sciences Journal, 2013, DOI: 10.5829/idosi. wasj. 2013. 21. mae. 99919.

[19] ULBRICH N. Assessment of New Load Schedules for the Machine Calibration of a Force Balance [R]. AIAA 2015-2023.

[20] 中华人民共和国国家军用标准. GJB2244A-2011 风洞应变天平规范[S]. GJB2244A-2011 Standard of wend tunnel strain gauge balance[S].

作者简介

马涛, 2012 年于国防科技大学获得学士学位, 2014 年于国防科技大学获得硕士学位, 现为中国空气动力研究与发展中心工程师, 主要研究方向为风洞应变天平研制与应用。

E-mail: cardcma@163.com

Ma Tao received B. Sc. degree from National University of Defense Technology in 2012, M. Sc. degree from National University of Defense Technology in 2014. Now he is an engineer in China Aerodynamics Research and Development Centre. His main research interests include wind tunnel strain gauge balance research and application.