

航空矢量喷管测试平台用六分量 盒式天平结构设计

于常安, 王 罗, 何显中, 邱荣凯, 姚程炜
(中国空气动力研究与发展中心 设备设计及测试技术研究所, 四川 绵阳 621000)

摘 要: 为了满足航空发动机推力矢量高精度测量的需求, 研制了一种结构紧凑的能够实现推力矢量彻底分解的六分量盒式天平. 该天平关键结构包括: 三维传感器、固定框和浮动框. 其中三维传感器的弹性体采用串、并联组合的结构型式. 基于有限元分析, 对传感器弹性体的设计进行了模拟, 结果显示传感器各测力元件对本分量载荷作用敏感程度均远高于其他分量, 支撑元件也较好地阻隔了各测力元件之间的相互干扰. 该结论也通过了传感器的校准验证. 六分量盒式天平整体的刚度和模态分析结果: 天平无需做弹性角修正; 1 阶固有频率为 218.8 Hz, 高于设计指标 180 Hz. 六分量盒式天平校准表明: 天平各分量精确度优于 3%, 准确度优于 5%.

关 键 词: 六分量盒式天平; 航空发动机; 推力矢量; 有限元分析; 三维传感器

中图分类号: V211.73 **文献标志码:** A

Design on structure of six-component box balance for the aero-engine vector nozzle measuring platform

YU Chang-an, WANG Luo, HE Xian-zhong,
QIU Rong-kai, YAO Cheng-wei
(Facility Design and Instrumentation Institute,
China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China)

Abstract: In order to meet the high precision measurement needs of aero-engine thrust vector, a compact six-component box balance enabling complete decomposition of thrust vector was developed. The balance was mainly composed of three parts: three-component sensors, fixed frame and floating frame. The elastic component of three-component sensor adopted the form of series-parallel combined structure. The simulation of the sensor's elastic component by using the finite element analysis methods showed each measuring component's sensitivity to its own component loading was much higher than other components, and the support components also preferably cut off the interference among measuring components. This conclusion was also verified by the sensor calibration. Through the stiffness and modal analysis of the six-component box balance, the results prove that the balance doesn't need elastic angle correction and the first order natural frequency of the balance is 218.8 Hz, which is superior to the design index 180 Hz. The six-component box balance calibration shows that the precision of the balance is lower than 3% and the accuracy is lower than 5%.

Key words: six-component box balance; aero-engine; thrust vector;
finite element analysis; three-component sensor

目前西方国家现役及在研的新型战机均把推力矢量技术作为必备关键技术之一^[1]。国外从20世纪五六十年代开始发展推力矢量技术^[2],以NASA兰利研究中心的JETF(jet exit test facility)为代表推力矢量测力试验台也随之建成,但由于该方面技术多为各国的核心技术,很难得到相关的资料,因此无法对国外矢量喷管测试技术进行有效评估。国内对矢量喷管测试技术的研究起步较晚,始于80年代后期,发展缓慢,其技术一般参照风洞天平设计。目前建成投入使用的主要有:①北京航空航天大学热动力研究所的六分量天平试验台,由7个单分量力传感器及连杆组成的台式六分量天平完成对推力矢量的测量^[3];②大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室研制的火箭发动机推力矢量测试系统,该系统的核心测量部件为4个三维压电石英力传感器构成,每个传感器输出各分量信号,将信号值带入求解公式,即可求取推力矢量各分量值^[4];③哈尔滨工程大学机电工程学院设计的多分量矢量喷管试验台,采用的是塔式天平为测量元件,测力天平共含有7个传感器及相应的连杆,共同完成3个力及3个力矩的测量^[5];④中国燃气涡轮研究院的发动机矢量喷管六分量测力系统,轴向载荷可达15 kN,同时具备高刚度和高稳定性^[6]。这些试验台的建立各有针对性,且数量少、分散广、任务繁重,没有形成涵盖全系列型号试验的试验体系,推力矢量模型型号试验受矢量测试平台制约严重,无法满足我国推力矢量技术的发展需求,制约了我国推力矢量技术的发展。因此,有必要研制一种用于评估矢量喷管性能试验的新型平台,以完成对矢量推力的精确测量。航空矢量喷管测试平台的核心部件是六分量天平,天平用于风洞试验已日趋成熟,但是在推力矢量测量试验方面尚处于摸索阶段。

1 天平选型及整体设计

推力矢量测量试验与风洞测力试验相比主要有以下不同:①刚度要求高,风洞测力试验时模型是独立的,而推力矢量测量试验必须存在引气装置,引气装置与进气管道连接,试验时会产生额外附加力与力矩,因此推力矢量测量试验用天平必须有更高的刚度;②载荷要求大,风洞测力试验时天平模型段只承载试验模型,而推力矢量测量试验模型端要承载整个喷管模拟装置,因此推力矢量测量试验用天平必须有更大的载荷;③各分量

不匹配,推力矢量测量试验时产生的滚转力矩较小,其他载荷相对较大,再加上装置自身的附加力与力矩,造成天平各分量载荷不匹配。这些给航空矢量喷管测试平台的天平选型和设计提出了挑战。

1.1 天平选型

天平在使用方式上分为内式天平和外式天平两种。矢量喷管试验时,内部有高速气流通过,没有安装内式天平的空间,因此只能采用外式天平。外式天平主要分为机械天平和盒式天平两大类,应变技术未发展成熟以前,机械天平成为早期大多矢量喷管测试平台的选择^[7-8],机械天平虽然具有稳定性好、测量精度高等优点,但是存在结构复杂、设计困难、成本高昂、传感器之间分散独立、调试安装难度大以及维护使用保养繁琐等一系列问题,随着应变天平技术近年来的不断发展,已逐步淡出历史,被应变式盒式天平所取代。盒式天平基于应变原理,属应变式天平,主要用于模型较大的低速风洞试验,能比较彻底地分解力与力矩,且刚度高,从而抗干扰能力强,测量精度高且性能稳定^[9]。盒式天平有整体式和装配式两类^[10],前者弹性体由整块弹性材料加工而成,对加工要求较高,尺寸受限严重,一般不用适于航空矢量喷管测试平台天平使用。因此,航空矢量喷管测试平台采用的是各部件可以分别加工的装配式盒式天平。使用方法是,喷管模拟装置、六分量盒式天平与天平底座自上而下串联布置,固定在水泥台上(图1),待测试喷管安装在喷管模拟装置末端,产生矢量推力,由六分量盒式天平准确测量出来。

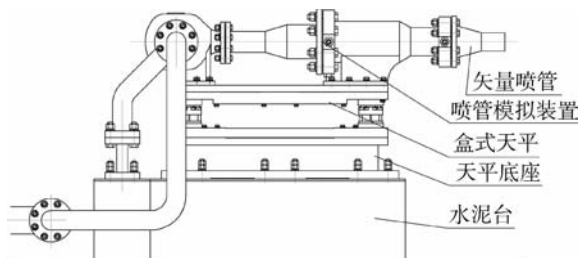


图1 航空矢量喷管测试平台示意图

Fig. 1 Scheme of the aero-engine vector nozzle measuring platform

1.2 天平整体设计

装配式六分量盒式天平由4个三维力传感器、浮动框和固定框三部分构成^[9]。航空矢量喷管测试平台工作时矢量喷管产生的矢量推力被六分量盒式天平分解为相互正交的3个方向的力和3

个方向的力矩,分别定义为:推力 F_x ,俯仰力矩 M_z ;升力 F_y ,滚转力矩 M_x ;侧向力 F_z ,偏航力矩 M_y ;力与力矩的方向符合右手法则。

图 2 给出了六分量盒式天平传感器分布及测力原理(图中以 f_{x1} 为例, f_{x1} 表示 1 号传感器 x 方向所受的力,以此类推),可以看出天平六分量的 3 个力分量,就是 4 个传感器 3 个力分量的叠加. 滚转力矩 M_x ,分配到 4 个三维传感器上主要体现在三维传感器的升力方向上,当受正方向滚转力矩时,传感器 1,2 压缩;传感器 3,4 拉伸;当受反方向滚转力矩时,传感器 1,2 压缩;传感器 3,4 拉伸. 俯仰力矩测量与滚转力矩原理相同(图 3). 偏航力矩 M_y (见图 4),作用到 4 个三维传感器上主要体现在三维传感器的推力和侧力上,当力传递到传感器上时,可以分解为 f_x 和 f_z 两个方向力,力的大小与传感器的布局(力臂 L_x 和 L_z 不同)有关.

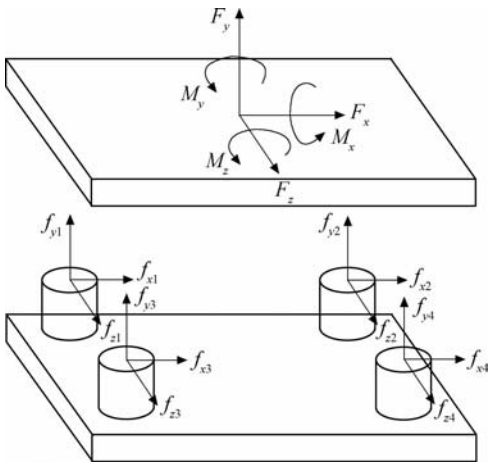


图 2 六分量盒式天平的测力原理

Fig. 2 Measuring principle of six-component box balance

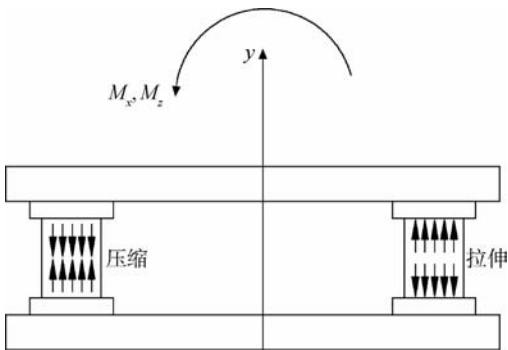


图 3 M_x 或 M_z 作用下传感器的变形

Fig. 3 Deformation of the sensor under action of M_x or M_z

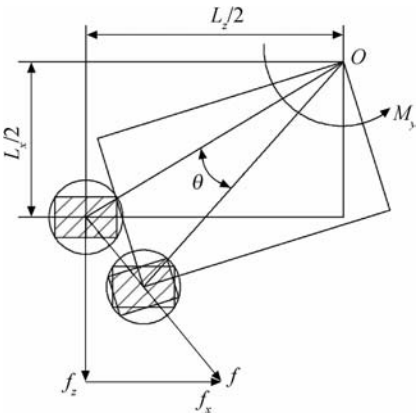


图 4 M_y 作用下传感器的变形

Fig. 4 Deformation of the sensor under action of M_y

通过优化计算,合理调整 4 个三维传感器之间的布局,将天平的载荷合理分配到 4 个三维传感器上,确定三维传感器 3 个分量力载荷大小,使三维传感器 3 个分量力载荷合理匹配的同时,最大程度降低天平各分量载荷不匹配带来的影响.

2 三维传感器设计及分析

测量精度和稳定性是应变式传感器的两个重要指标. 一方面,测量精度高,就要求传感器弹性体灵敏度高,即传感器的应变值要大;另一方面,稳定性好,就要求传感器的刚度要大,位移量小. 传感器弹性体设计时,为保证传感器具有足够应变的同时满足刚度要求,关键在于弹性体材料的选取和结构布局设计.

2.1 弹性体材料选取

应变式传感器弹性体材料必须具备较高的强度、优良的弹性性能、稳定的弹性模量随温度变化趋势、较低的线膨胀系数、较高的疲劳强度和冲击韧性以及优良的热处理工艺性能与机械加工性能^[10],以保障应变式传感器的稳定性和测量精确度.

针对传感器弹性体要求,选择马氏体时效钢(00Ni18Co8Mo5TiAl)作为弹性体材料,其物理参数为:屈服极限 $\sigma_s = 1.75 \times 10^9 \text{ N/m}^2$,强度极限 $\sigma_b = 1.86 \times 10^9 \text{ N/m}^2$,弹性模量 $E = 1.87 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$,剪切弹性模量 $G = 6.66 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$,泊松比 $\mu = 0.29$.

可见,马氏体时效钢(00Ni18Co8Mo5TiAl)可以作为三维传感器弹性体的材料使用.

2.2 三维传感器结构设计

常用的应变式传感器应变梁有悬臂梁和超静

定梁两种形式,其区别在于:在承担集中载荷时,前者的自由端同时存在移动和转动,而后的自由端的端部没有转动只有移动,即产生 S 形变形^[10],原理图如图 5 所示.与悬臂梁相比,超静定梁虽然同等载荷下产生应变值要小,但是变形量也相对较小,且不产生偏转角度,有利保证传感器刚度.因此三维传感器设计采用的应变量全部为超静定梁结构型式.

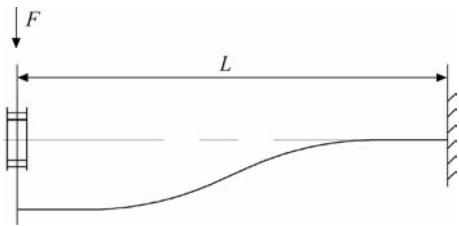


图 5 超静定梁 S 形变形

Fig. 5 Deformation of statically indeterminate beams

根据六分量盒式天平尺寸要求、总体布局以及三维传感器量程特点等因素,三维传感器弹性体采用串、并联组合的结构型式,如图 6 所示,即侧力元件和推力元件并联,之后与升力元件串联^[11].

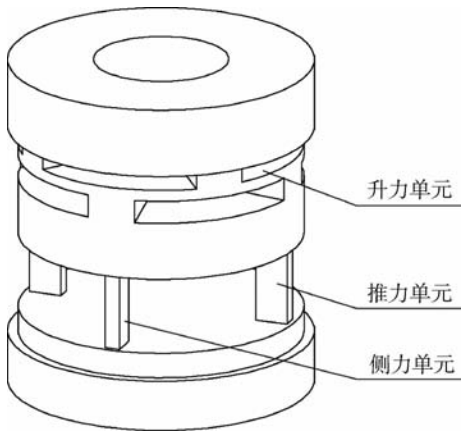


图 6 三维传感器结构示意图

Fig. 6 Three-component sensor structure

升力元件是三维传感器的轴力元件,由于径向空间限制,轴力元件设计一直是多分量传感器设计的难点和重点.该三维传感器采用环状结构作为弹性元件,弹性体呈筒状,筒壁上通过线切割加工两层扇形支柱,两层 4 个支柱结构形式相同,交叉 45°,上下分布,分别作为支撑柱和加载柱.如图 6 所示,在升力载荷作用下,支撑柱和加载柱之间的梁可以简化成 8 个超静定梁,产生 S 形变形,实现对升力载荷的测量.

侧力元件和推力元件采用组合单元形式,由

4 个柱梁并联构成.4 个柱梁两两对称分布四周,分别作为侧力和推力的测量弹性元件以及相互的支撑元件,通过应变片的粘贴位置和组桥方式的不同实现侧力和推力的分解.传感器受力时,4 个柱梁上下两端的连接面产生相对平移,柱梁产生 S 形变形,即超静定梁变形.

确定传感器结构形式后,引入经典力学计算公式,将三维传感器应变梁尺寸作为变量,并加以幅度限制,确立理想应变值为目标参数,通过协同优化计算,获得与预期应变值接近的参数.侧力测量元件和推力测量元件载荷不同,但应变值应大体相同,以保证三维传感器的整体平衡性.升力测量元件在设计时应变值选取相对较小,因为装配后的盒式天平上方还要承载喷管模拟装置.

2.3 三维传感器有限元计算

三维传感器弹性体材料、结构形式和尺寸确定后,对三维传感器弹性体进行三维建模,引入 MSC 软件对模型进行有限元分析仿真,针对三维传感器实际工作情况设定有限元分析工况,所得应变云图如图 7~图 9 所示.

应变云图反应了三维传感器在三个分量载荷作用下的应变分布,结果显示各测力元件对本分量载荷作用敏感程度均高于其他分量,推力元件和侧力元件与升力元件之间的支撑元件也较好的阻隔了彼此间相互的应变干扰,力分解情况达到预期,达到机械分解的目的.单个分量载荷作用时对其他两个分量产生的应变值可以通过应变片的组桥和天平校准公式的拟合计算予以消除.通过有限元计算还获得了应变片粘贴位置的应变值.

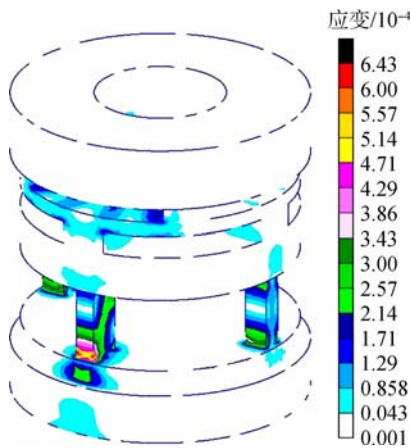


图 7 f_x 作用下应变云图

Fig. 7 Strain contours of the sensor under action of f_x

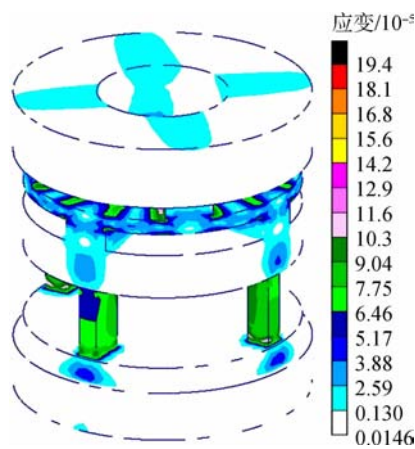


图 8 f_y 作用下应变云图

Fig. 8 Strain contours of the sensor under action of f_y

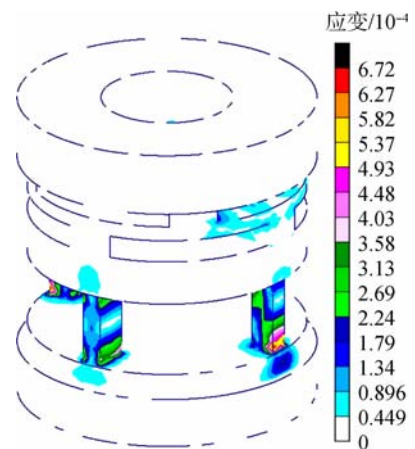


图 9 f_z 作用下应变云图

Fig. 9 Strain contours of the sensor under action of f_z

2.4 三维传感器校准结果分析

传感器弹性体加工完成,经过退火处理、应变片粘贴和组桥、灵敏度补偿、温度补偿、零点补偿以及防潮等工艺处理后,对传感器各分量进行校准(见图 10),获得实测校准电压信号与理论计算后换算的电压信号对比如表 1 所示。

分析表 1 数据可以看出,三维传感器实际测量信号值、材料力学公式计算信号值和有限元计算信号值基本一致,虽然略有差异,但是这点差异并不影响三维传感器的使用.设计达到预期要求,可以用于装配式盒式天平.弹性体所采用的串、并联的结构布局是合理的,各测量单元应变梁尺寸是正确的,三维传感器设计是成功的.另外,有限元分析可真实地模拟应变式传感器的工况,可应用于应变式传感器弹性体的结构设计或验证,同

时可以直观的显示应变片的粘贴位置,减少应变片粘贴引起的误差。

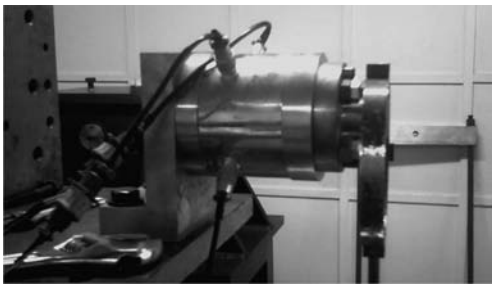


图 10 三维分量传感器校准

Fig. 10 Calibration of three-component sensor

表 1 信号值数据对比
Table 1 Signal data contrast

信号类型	推力	升力	侧力
	信号/ μV	信号/ μV	信号/ μV
传感器 1(实测信号)	8534	4376	9004
传感器 2(实测信号)	8624	4256	9054
传感器 3(实测信号)	8656	4242	8922
传感器 4(实测信号)	8596	3976	9268
平均实测信号值	8602	4212	9062
材料力学公式计算信号值	9410	4812	9500
有限元计算信号值	9000	3880	9320

3 六分量盒式天平刚度及模态分析

运用传统理论力学对天平刚度和模态进行分析时,由于天平结构复杂,需要对模型进行简化和等效处理,忽略了天平主体与测量元件、测量元件与测量元件相互之间的影响,因此只能做出评估,没办法做出较为精确的判断,导致天平元件参数的计算值与测量值存在差异.用有限元方法可以很好地解决这些问题^[12].可以较好模拟实际受力情况并予以求解。

3.1 天平刚度计算

应变式天平要完成测量,必须产生足够的应变,有应变就必然有变形,因此,应变式天平测量又称变位测量.有变形,就必然会产生测量误差.误差对天平测量的影响视变形量大小而定,解决变形产生误差的影响主要靠两种方法:一是设计是采用合理的结构形式,协调好刚度和应变的关系;二是测量出天平受力情况下的变形,做弹性角修正。

利用 MSC 软件对六分量盒式天平变形进行计算,以航空测试平台实际工作状态产生最大力与力矩作为分析工况(图 11). 数值模拟表明天平最大线位移 0.0417 mm ,其中推力 x 方向线位移为 0.0257 mm ,升力 y 方向线位移为 0.0326 mm ,侧力 z 方向线位移为 0.0268 mm ;各方向最大角位移分别为:俯仰角位移 $\alpha=0.11''$;偏航角位移 $\beta=5.6''$;滚转角位移 $\gamma=0.22''$. 从有限元分析所得数据来看,此六分量盒式天平结构合理,刚度大,变形小,无需做弹性角修正.

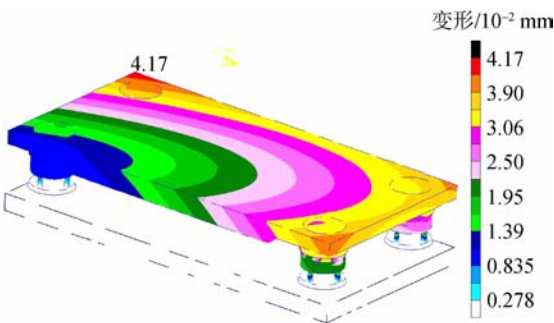


图 11 六分量盒式天平变形云图

Fig. 11 Deformation of six-component box balance

3.2 天平模态分析

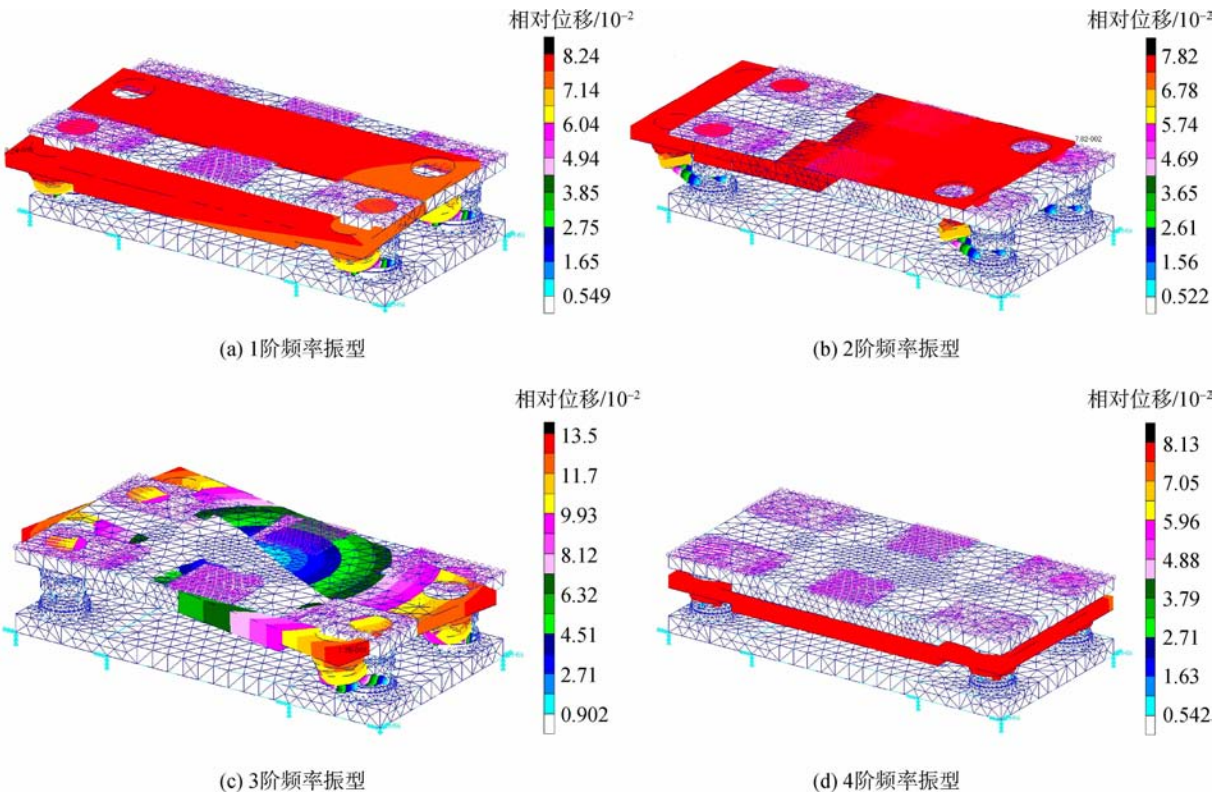
天平是一种测力传感器,它的输入量是作用

在模型上的力,可分为定常力(静态量)与非常定力(动态量)两类. 无论对定常力,还是对非定常力,天平的输出量(电量或数字量)都应该准确地反映力的变化,这主要取决于天平的静态特性与动态特性^[13-14].

航空矢量喷管测试平台在启动或停车时,常常会使模型产生强烈的振动. 如果气流振动的频率等于或接近天平系统的固有频率时,则天平系统将随着实验模型一起发生共振,因此天平系统设计时要计算其固有频率,并避开高速气流振动的频率.

为有效模拟天平工作状态,将盒式天平浮动框上表面设定为刚性,对盒式天平固定框下表面进行六个自由度的约束.

根据航空矢量喷管测试平台刚度分配条件,为保证这个平台刚度,六分量盒式天平的固有频率应不低于 180 Hz . 通过动态模拟可获得六分量盒式天平各阶模态分析结果:1 阶频率 218.8 Hz , 2 阶频率 251.48 Hz , 3 阶频率 322.01 Hz , 4 阶频率 389.86 Hz , 5 阶频率 464.19 Hz , 6 阶频率 583.31 Hz , 优于要求指标. 另外从频率分布来看,横向或纵向模态频率分布较开,未出现模态密集现象,这说明六分量盒式天平具有良好的结构动态特性. 其各阶振型及相对变形如图 12 所示.



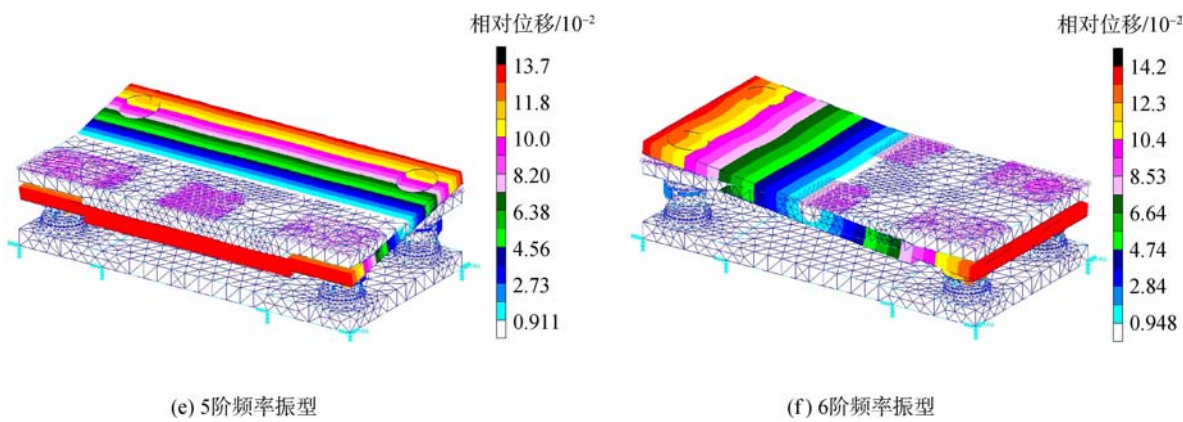


图 12 各阶频率振型

Fig. 12 Frequency mode shape

4 天平校准及结果

六分量盒式天平完成装配后,进入校准阶段,天平实物见图 13。天平静校是指利用天平校准设备,通过静态加载的方法,模拟天平在实际测力试验中的受力状态,拟合出天平输出信号与校准载荷之间的数值关系^[15-17]。该六分量盒式天平采用地轴系校准方式,校准指标如表 2 所示,天平指标优于静态校准要求的精度 3%,准度 5%。



图 13 天平图片

Fig. 13 Photo of the balance

表 2 天平的静态校准结果

Table 2 Balance static calibration result

参数	精确度 /%	准确度 /%
推力 F_x	0.21	0.42
升力 F_y	0.32	1.25
侧力 F_z	0.21	1.13
滚转力矩 M_x	1.23	3.1
偏航力矩 M_y	0.84	1.12
俯仰力矩 M_z	0.23	0.43

5 结 论

通过对装配式六分量盒式天平充分的论证计算研究,克服了矢量喷管模拟装置自重以及喷管

各分量力与力矩不匹配等设计困难,解决了平台振动对测量的不利影响。从校准结果分析来看,天平各项参数优于预期,设计是成功的,可以作为航空矢量喷管测试平台测力元件使用。

参考文献:

[1] Messina M D. Simulation model of the F/A-18 high angle-of-attack research vehicle utilized for the design of advanced control laws[R]. NASA TM-110216,1996.

[2] 赵景云,金捷. 推力矢量技术的研究与发展[J]. 燃气涡轮试验与研究,1999,12(1):51-54.
ZHAO Jingyun,JIN Jie. Development and investingation of thrust-vectoring technology[J]. Gas Turbine Experiment and Research,1999,12(1):51-54. (in Chinese)

[3] 付尧明,王强,额日其太,等. 矢量喷管六分量测力试验台的研制[J]. 流体力学实验与测量,2002,16(1):87-93.
FU Yaoming,WANG Qiang,Eriqitai, et al. Development of the six-component force-measuring balance for thrust-vectoring nozzle testing[J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics,2002,16(1):87-93. (in Chinese)

[4] 王志勇,孙宝元,张军,等. 对火箭发动机推力矢量测试系统的标定[J]. 传感器与微系统,2007,26(1):64-66.
WANG Zhiyong,SUN Baoyuan,ZHANG Jun, et al. Calibration on rocket thrust vector measuring system[J]. Transducer and Microsystem Technologies,2007,26(1):64-66. (in Chinese)

[5] 杨恩霞,刁彦飞,庞永刚. 多分力矢量喷管试验台的开发设计和研究[J]. 哈尔滨工程大学学报,2001,22(4):84-86.
YANG Enxia,DIAO Yanfei,PANG Yonggang. Spraying pipe test-bed with multi-component vectors[J]. Journal of Harbin Engineering University,2001,22(4):84-86. (in Chinese)

[6] 罗华云,侯敏杰,王月贵,等. 金属波形膨胀节在六分量天平中的试验[J]. 航空动力学报,2013,28(4):736-742.
LUO Huayun,HOU Minjie,WANG Yuegui, et al.

Experiment and researches in six-component balance for metal bellows expansion joints[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(4): 736-742. (in Chinese)

[7] 贺伟,童泽润,李宏斌. 单模块超燃发动机推力测量天平研制[J]. 航空动力学报, 2010, 25(10): 2285-2289.

HE We, TONG Zerun, LI Hongbin. Investigation of thrust balance for the single module scramjet[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(10): 2285-2289. (in Chinese)

[8] 徐铁军,李聪,刘伯均,等. 矢量喷管静推力特性风洞实验研究[J]. 流体力学实验与测量, 2003, 17(2): 49-53.

XU Tiejun, LI Cong, LIU Bojun, et al. Wind tunnel research on statics thrust characteristics of vectoring nozzle[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2003, 17(2): 49-53. (in Chinese)

[9] 于常安,李平,王罗. 三分量应变传感器弹性体结构设计[J]. 传感技术学报, 2012, 25(3): 333-337.

YU Changan, LI Ping, WANG Luo. Design of elastic component of three-component strain gauge sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(3): 333-337. (in Chinese)

[10] 贺德馨. 风洞天平[M]. 北京:国防工业出版社, 1999.

[11] 于常安,湛华海,邱荣凯,等. 一种应变式三维力传感器:中国, ZL201220737114. 0[P]. 2012-12-28.

[12] 王勖成,邵敏. 有限单元法基本原理与数值方法[M]. 北京:清华大学出版社, 1988.

[13] 《低速风洞天平手册》编写组. 低速风洞天平手册[M]. 北京:航空气动力协作攻关办公室, 1985.

[14] 《风洞应变天平手册》编写组. 风洞应变天平手册[M]. 北京:航空气动力协作攻关办公室, 1983.

[15] 罗华云,赖传兴,王月贵,等. 喷管模型试验器六分量天平校准技术[J]. 航空动力学报, 2013, 28(1): 67-76.

LUO Huayun, LAI Chuanxin, WANG Yuegui, et al. Six-component balance calibration technology for nozzle model testing facility[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(1): 67-76. (in Chinese)

[16] Quade M, Hufnagel K. The development of modern manual calibration and measuring system for internal balance[R]. NASA/CP-19990209101/PT2, 1999.

[17] 陈德江,吴东,刘伟强. 六分量烧蚀/滚转天平静校装置研制[J]. 实验流体力学, 2006, 20(2): 68-71.

CHEN Dejiang, WU Dong, LIU Weiqiang. Design of six-component ablating and rotation balance calibration system[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2006, 20(2): 68-71. (in Chinese)

(编辑:秦理曼)