

文章编号:1000-8055(2014)09-2024-07

doi:10.13224/j.cnki.jasp.2014.09.002

盒式六分量应变天平热态试验气动结构特性

罗华云, 侯敏杰, 王月贵, 顾 杨

(中国航空工业集团公司 中国燃气涡轮研究院

航空发动机高空模拟航空科技重点实验室, 四川 江油 621703)

摘 要: 为了探索盒式六分量应变天平热态试验时三维力传感器输出信号异常的现象, 从四分量机械单台式天平与盒式六分量应变天平的气动布局、主体结构及热态试验方面展开了对比分析, 受结构及安装制约, 盒式六分量应变天平无法消除或补偿高温热流在稳定段上产生的热应力。为保留喷管模型试验器最具特色的高温试验功能, 利用对称布置方案, 调换燃油加热器至稳定段出口。热态试验证明: 在增强天平的平衡性、减少天平机械连接、简化燃油加热器安装和调试的情况下, 天平的推力测量值从异常的负值恢复正常, 解决天平输出信号异常问题, 满足天平热态试验性能要求。

关 键 词: 热应力; 盒式六分量应变天平; 气动布局; 热态试验; 对称布置; 推力测量值

中图分类号: V211.73

文献标志码: A

Aerodynamic structural characteristic of box six-component strain-gauge balance in heat state test

LUO Hua-yun, HOU Min-jie, WANG Yue-gui, GU Yang

(Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Altitude Simulation,
China Gas Turbine Establishment,

Aviation Industry Corporation of China, Jiangyou Sichuan 621703, China)

Abstract: In order to explore the abnormal phenomena of output signals of three dimensional force sensor in heat state test of box six-component strain-gauge balance, the balance frame, aerodynamic layout and heat state test were analysed for the four-component mechanical single desktop balance and box six-component strain-gauge balance, while the heat stress in stability segment of box six-component strain-gauge balance produced by high temperature flow by restriction of framework and installation was not eliminated or compensated at all. The fuel heater was moved to the exit of stability segment by symmetrical arrangement frame in order to preserve the best special function of heat state test in nozzle model test facility. The heat state test validates that thrust measure value of balance is resumed normally from abnormal negative value, and the problem of abnormal balance output signals is solved by reducing balance mechanical joint, increasing equilibrium of balance and predigesting installation and test of fuel heater, showing that it satisfies the balance heat state test performance requirement.

Key words: heat stress; box six-component strain-gauge balance; aerodynamic layout; heat state test; symmetrical arrangement; thrust measure value

热态下测力天平必须考虑设备、试验件冷却问题, 以保证测力、测压系统工作的稳定性和重复

性。国外对内流式多分力试验台的研究报道和资料很少, 而国内往往只对六分量天平的校准装置、

收稿日期: 2013-06-04

作者简介: 罗华云(1968—), 男, 四川都江堰人, 高级工程师, 硕士, 主要从事设备结构、调试与试验技术研究。

静态标定考核验证,很少涉及天平的动态性能,相关资料鲜有涉及天平的高温热态试验或修正方法^[1-5].在20世纪90年代初期,中国燃气涡轮研究院与北京大学力学系联合研制了四分量机械单台式天平(下文统称四分量测力天平),开展了多种类型喷管模型内流特性研究,特别是引射喷管热态对比试验.结果表明试验段的热膨胀在可控范围内,对天平控制体的热变形处理方式是切实可行的,试验台的研制是成功的^[6-9].

测力天平性能的优劣、工作状态稳定与否,直接关系到试验质量和是否能提供可靠试验数据的问题.为了解决装配式盒式六分量应变天平(下文统称六分量测力天平)热态试验时信号的异常输出,可通过缩减天平浮动框与控制体的刚性支撑长度、降低对控制体的刚性约束或直接避开高温热流等措施实现.本文在比较喷管模型试验器原有四分量测力天平、六分量测力天平气动布局与主体结构特性的基础上,分析了在热态下,控制体所产生的热应力、热变形对测力天平的影响,提出了避开热流的集中对称布置方案.热态试验证明:

调换燃油加热器至稳定段出口,可减少六分量测力天平的机械连接及热负荷影响、降低部件间相互干扰,同时使天平在自然状态下的受力更加均衡、合理,对其他多分量天平的热态测量难题的解决提供有益的借鉴.

1 测力天平气动特性

1.1 四分量测力天平气动特性

为了研究引射喷管、多功能二元推力转向喷管内流特性,完善试验设备的功能、扩大试验研究范围、提高试验数据质量,将轴向进气的单分量天平改建为径向对称进气带自锁功能的四分量测力天平,主流管路采用篦齿与集气室连接,次流管路由于管径较小,采用橡胶软管($\phi 57 \times 3.5 \text{ mm}$)与次流管路搭接.为模拟航空发动机的真实排气状态,采用两级直接加温方式,在主流稳压箱前并联两台BK-1单管燃烧室作一级加温器,集气室后采用斯贝MK202缩尺加力燃烧室作二级加温器,整个喷管模型试验器示意图如图1,图中DN表示公称通径,单位为mm.

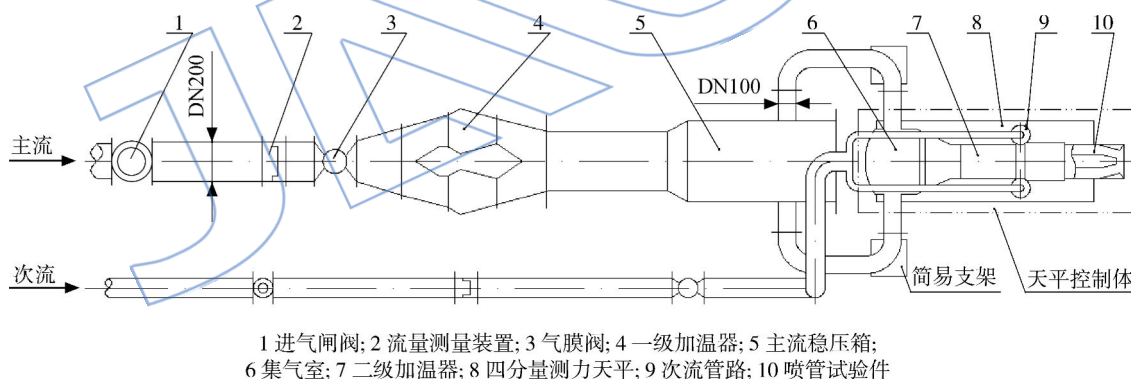


图1 喷管模型试验器简图

Fig. 1 Schematic of nozzle model test facility

四分量测力天平在载荷作用下变形较大,由于没能彻底解决天平控制体与进气管路连接问题,最终采用金属软管和篦齿两种连接方式对比标定,以便在喷管性能试验中对篦齿连接处漏气、间隙压差引起的附加力和附加力矩进行修正.金属软管解决了漏气难题,却存在刚度大、波纹管与外层网套的接触摩擦,导致试验重复性较差、弹性滞后严重^[10].所谓篦齿就是允许漏气的套筒式结构,依试验件类型调整集气室入口与两侧固定进气管路出口的周向间隙,天平控制体与进气管路接触刚度为零,不影响控制体自由度,而且前端进气管路的热变形、振动不会干扰到天平控制体.

1.2 六分量测力天平气动特性

六分量测力天平完全沿用四分量测力天平的气动布局,为简化管系,把两侧简易支架改为固定大支架,进气管路上增加高精密弹性膨胀节消除来流温度变化引起的热变形,膨胀节对称布置在集气室两侧,以解决密封、软弹性连接问题,减少对力传递机构的影响^[11].测力天平控制体共进行了两次大的改造,第1次保留原设备的进气管路、加温系统,把四分量测力天平直接改为六分量测力天平,由于不具备热态试验条件,只进行了多种喷管的冷吹风特性试验.第2次把进气管路改为 $\phi 325 \times 8 \text{ mm}$,两侧来流管路扩到 $\phi 219 \times 6 \text{ mm}$,去

掉一级加温器,为避免震荡燃烧,采用燃油加温器作为主燃烧室^[12],重新设计天平控制体,其质量、容积大大增加,测力台架结构示意图见图 2。可见集气室、燃油加温器等重要件都偏向六分量测力天平进气侧,导致天平控制体重心与天平本体中

心严重偏离,出现头重脚轻,整个测力系统的平衡性、抗振动能力都不是很高,必然对试验工况要求苛刻,而且拆装燃油加温器后必须对测力系统进行重新调试,工作强度大、周期长,已不再适宜作为燃油加温器的调试平台。

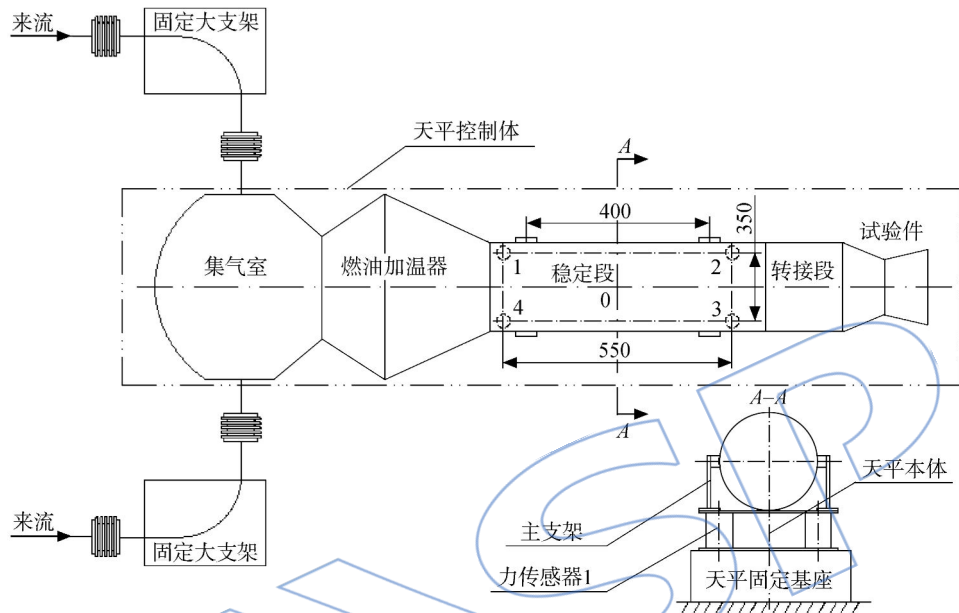


图 2 测力台架结构示意图(单位:mm)

Fig. 2 Schematic of force test platform(unit:mm)

两次改造后六分量测力天平的静校和动校加载重复性、加载误差都满足设计指标,而测力量程几乎没有变化,天平控制体的质量在受限范围内完全可以作为零载输出值予以扣除^[13-14]。图 3、图 4 表示第 2 次改造后某型二元喷管性能试验及喷管总推力系数随落压比(NPR)的变化曲线,喷管总推力系数随落压比变化与理论计算值相吻合,表明在工况较好的冷态下该六分量测力天平的气动结构能满足试验要求^[15]。

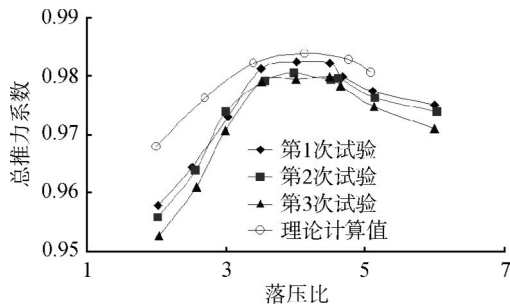


图 4 喷管总推力系数随落压比变化曲线

Fig. 4 Curve of total thrust coefficient with NPR of nozzle



图 3 二元喷管性能试验

Fig. 3 Performance test of two-dimensional nozzle

2 测力天平结构特点及热态试验

测力天平属于贵重精密的间接计量仪器,必须确保固连在测力天平动架上控制体的自由度,尽量减少热应力的产生,否则会影响天平的测量精度,甚至损坏设备和试验件。热态试验是对喷管模型试验器设备的结构匹配性、加温器性能及热态测量技术的综合考核。

2.1 四分量测力天平主体结构及热态试验

2.1.1 四分量测力天平主体结构特点

四分量测力天平主要由力分解机构、传力系

统和测量系统3部分组成,采用三支杆形式,即1个主支杆、2个副支杆,主支杆与试验段中轴线的交点为力和力矩分解中心.主支架装在力平台上,借助滚动轴承与二级燃油加温器上的双层燃烧段中部 $\phi 50\text{ mm}$ 主支杆(30CrMnSiA)连接,作为整个试验段和试验模型的主承力构件,而力矩杠杆采用 90° 交叉的X形摇臂支座与力平台搭接,辅助支撑的副支杆分别与燃油加温器的转接段和主/次流管路铰接,调节天平控制体的平衡状态、受力情况.可见力平台与天平控制体的刚性接触面积小、所选材质膨胀系数低.

图5所示的喷管模型试验器上热态试验件是按缩尺设计的圆筒形引射喷管,为保证热态对比试验时喷管不烧蚀,双层结构的主喷管和引射套筒利用橡胶软管强制水冷.试验台通过专门设计允许热膨胀的副支杆接头,在一定程度上可消除热膨胀的影响,满足热态试验需要;不足之处是四分量测力天平机械连接较多,相互干扰不可避免.

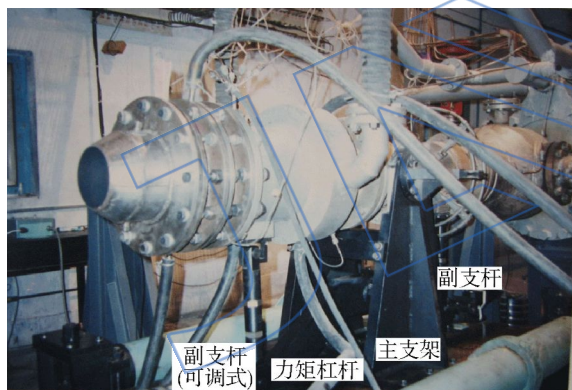


图5 喷管模型试验器上热态试验件

Fig. 5 Heat state test component of nozzle model test facility

2.1.2 四分量测力天平热态试验

热态试验时,采用一级加温可提高二级加温器的燃油雾化效果,但一级加温温度最好不超过 400 K ,以保证测力、测压系统工作正常,同时较低的一级加温器出口温度对二级加温器起冷却作用.为避免试验段有大的热膨胀、消除二级加温器点火时的冲击载荷、降低燃烧脉动,必须采用低压、低流量的软点火方式.通过两级加温器加热空气,较真实地模拟了航空发动机喷管的燃气排放.

集气室与两侧进气管路采用金属软管柔性连接,热态试验时采用允许热膨胀的副支杆接头,主支杆距力平台超过 600 mm ,试验时喷流对环境气

流的引射作用保证了天平具有良好的散热条件.在喷管落压比为 $2\sim 6$ 、进口总温为 1550 K 时,天平零点变化为 $40\text{ }\mu\text{V}$,试验段热膨胀最大为 1.41 mm , 30 min 内力平台的温升不超过 2.5 K ,而且在 1850 K 最高试验温度下整个系统工作稳定可靠,因此,热态试验可以不考虑力平台温升.热态试验时,由于冷却水系统和金属软管热膨胀对测力天平的干扰,造成了天平的测力精度比冷态有所降低,并存在个别数据点跳动,通过对测试数据滤波及必要的修正后能满足热态试验性能要求.

对采用篦齿连接喷管热态试验,在高落压比下,当热流温度过高时常发生天平顶死现象.随着对四分量测力天平研究的不断深入,探索出了只利用二级加温器进行喷管热态试验的点火操作规律,并进行了热态喷管及新型C/C复合材料的耐烧蚀试验.

2.2 六分量测力天平结构特点及热态试验

天平本体是六分量测力天平的核心部件,主要由固定框、浮动框和4个强关联的高精度三维力传感器组成,浮动框通过4个主支架支撑集气室、燃油加温器、稳定段、转接段和喷管试验件等天平控制体.受天平本体自身结构固连方式限制,在首次调试燃油加温器时,为确保六分量测力天平安全,采用托架隔离天平控制体与天平本体.托架支撑可用于日常天平的保养、维护,减缓天平本体长期受天平控制体质量引起的蠕变影响.

2.2.1 稳定段结构特点

图2的结构布局决定了热态试验时稳定段必处于流体的高温、高压区,不可避免受到恶劣工况影响.双层稳定段两端的法兰带集水环,在内层的外表面开槽,外层设计两处带集水功能的热补偿段,保证夹层内水流畅通,降低设备的工作温度.稳定段的结构示意图见图6,固定在天平浮动框上的4个主支架通过支撑耳座与稳定段固连,天平本体距稳定段中心 350 mm ,减少了对天平本体的热传导、热辐射.

在喷管冷态试验时,受供气气源冷却、干燥等条件限制,通常供气温度比周围环境温度高 10 K 左右.由于稳定段夹层内空气热导率低、通过水管接头向外散热,常温试验时稳定段外壳温升不超过 2 K .六分量测力天平的动校及某型二元喷管性能试验表明, 10 K 左右的流体温差对天平测量的准确性几乎没有影响^[10].可见双层稳定段内的开槽结构可以降低流体温度对六分量测力天平的

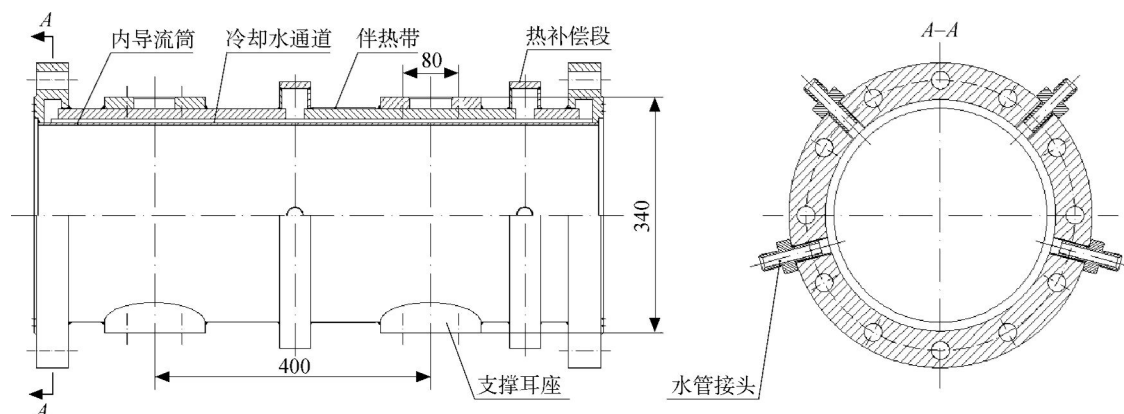


图 6 稳定段的结构示意图(单位:mm)

Fig. 6 Schematic of stability segment(unit:mm)

影响,提高六分量测力天平的精准度。

2.2.2 六分量测力天平热态试验

为了防止天平被烧蚀,热态试验时稳定段通低压冷却水热防护。实践证明:在喷管进口温度为 1100 K 时,天平浮动框温升不超过 2 K,可见强制冷却能有效地降低设备温升、增大稳定段刚度、提高稳定段耐压及耐温能力,但加大了稳定段内温度场梯度,增加了连接水管的干扰。燃油加热器进口与双侧进气管路相距太近,气流 90°转向后流场均匀性较差,导致燃油加热器出口温度梯度较大。

第 1 次热态试验,主推力 F_x 方向上传感器 1、传感器 4 与静校加载的输出相反,虽然传感器 2、传感器 3 输出与静校相同,但输出信号值明显偏小;第 2 次热态试验,燃油加热器前机匣温升不超过 16 K、后机匣温升超过 105 K,传感器输出与第 1 次相同;在后机匣上增加夹层水套后进行第 3 次热态试验,后机匣温升不超过 2 K,但稳定段外壳温升超过 23 K,左、右两侧出现较大温差,传感器输出与前 2 次类同,在燃油加热器质量增加、强制水冷情况下,传感器输出值仍异常,结果并无明显改善,验证了燃油加热器后机匣热变形不

是六分量测力天平输出信号异常的主要因素;第 4 次热态试验无气源供气,在稳定段后端采用单层电伴热带局部加热,从常温到 350 K,天平的推力测量值从 0 kN 渐变到 -0.21 kN。

4 次热态试验都发生天平输出信号异常、降温后信号都能恢复正常,真正的原因发生在稳定段上。虽然外壳的热补偿段可以吸收热变形,但稳定段内层在高温下伸长,受稳定段内温度场不均匀性及固连的 4 个支撑耳座接触面较大、间距较宽的影响,必然引起浮动框上支撑架产生热变形、热应力,改变推力作用点,可见对热变形敏感的盒式六分量测力天平受自身结构限制,根本无法消除或补偿高温热流在稳定段上产生的热应力。

对喷管第 3 次热态试验做对比和定性分析,暂不考虑六分量测力天平前、后平衡性,保留集气室、燃油加热器及稳定段等重要件,把燃油加热器调换到稳定段出口,天平控制体结构示意图如图 7。热态试验对比(图 8)表示六分量测力天平调换前的标模动校试验及调换前、后,进口总温在 833~1187 K 时轴对称非矢量收-扩喷管热态试验与四分量测力天平收敛喷管热态试验推力测量值与喷管落压比的对比试验曲线^[16]。

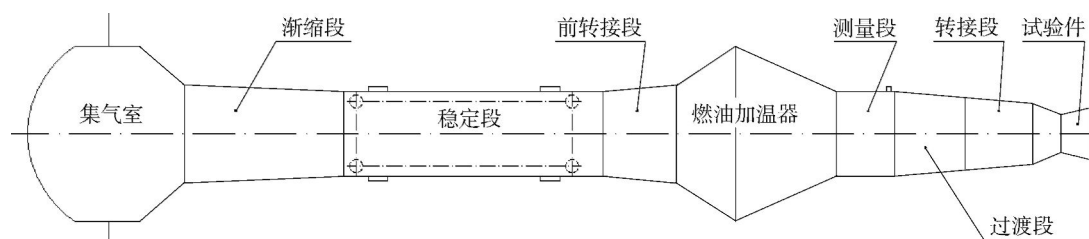


图 7 天平控制体结构示意图

Fig. 7 Schematic of balance control body

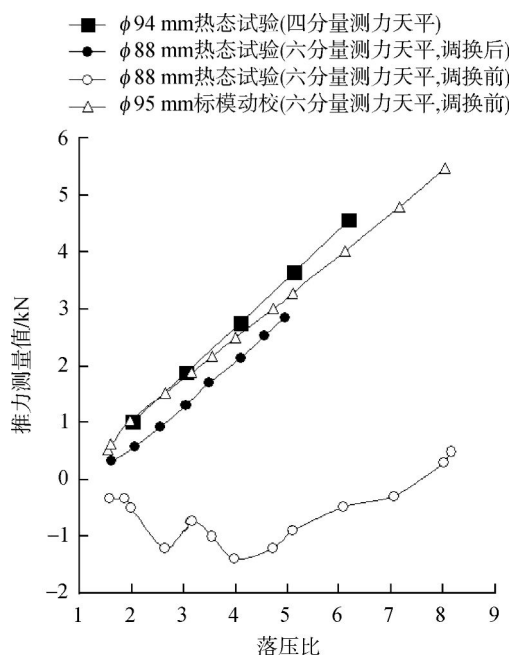


图8 热态试验对比

Fig. 8 Comparison of heat state test

从图8可以得出,调换前的第3次热态试验六分量测力天平推力测量值出现反常、无规律性,数据波动明显,原因在于稳定段上产生的热应力,受六分量测力天平自身固连方式的限制,当稳定段进气温度较高,所产生的热应力通过水冷根本无法消除.燃油加热器调换到稳定段后,可有效降低燃油加热器与天平本体之间的热耦合,不会产生较大的结构应力,六分量测力天平推力测量值与标模动校、四分量测力天平热态试验的测量推力值相似,很好解决了天平输出信号异常的问题.通过结构上优化,去除前转接段、过渡段,改善测力台架稳定性、提高设备的整合度,可确保试验数据的有效性,六分量测力天平完全可以满足喷管模型热态试验要求.

3 结论与建议

六分量测力天平把三维高精度传感器作为连接件和测量元件,受天平本体与天平控制体固连方式制约,必然导致测力天平对热膨胀、热应力敏感.在不改变天平本体结构的情况下,只有处理好燃油加热器与天平本体之间的热耦合关系,才能从根本上解决六分量天平热态试验难题.

在确保高温段自由伸缩、不产生热应力的基础上,采用紧凑型结构,燃油加热器前机匣直延后与稳定段对接,试验件只需测量段和转接段,从而减少悬臂长度、提高设备抗振能力,使天平的整体受力更加合理、匹配性更好.热态试验证明了调换

燃油加热器到稳定段出口对测力天平的影响很小,支撑托架对今后天平的维护具有积极的意义,为该类天平的进一步研究提供了必要的试验基础.得出如下主要结论:

1) 由于集气室、燃油加热器分居天平两侧,考虑到各型喷管试验件及其测量段、转接段情况下,通过等量互换设计,可以使天平控制体的重心与天平本体中心在固定框上的投影相重合,减少合力作用点随试验件偏角和试验件长度变化,保证与天平校准时的一致性,也使六分量测力天平的自然受力状态更加均衡、合理.

2) 利用集气室的配重特性,在集气室厚度、长度不受太多约束的情况下,完全可以采用整体铸件结构形式,避免焊接件出现的时效变形、对称性差、加工偏差大等问题.

3) 开槽式双层稳定段结构可以降低流体温度对测力天平的影响,提高测力天平的精准度.

4) 燃油加热器位于天平本体之后,可避免高温热流在稳定段上产生热应力,减少天平本体的隔热防护或冷却设施,降低附加力、附加力矩及变化量,保证六分量测力天平在263~333 K的规定范围内工作,提高天平抗干扰能力.

5) 高压压缩空气经过双层稳定段后再进入燃油加热器,将大大提高燃油加热器进口流场的品质,提高燃烧效率.燃油加热器出口不受约束,可以最大限度减少热负荷对六分量测力天平造成的不利影响,而且保护性拆卸燃油加热器后将不需要重新调试天平,简化了燃油加热器的安装和调试,可作为今后燃油加热器的调试平台.但在探索燃油加热器点火操作规律前,必须把天平控制体与天平本体相隔离,以防止天平受损破坏.

参考文献:

- [1] 姚裕,吴洪涛,张召明. 并联天平静态标定研究[J]. 南京理工大学学报, 2007, 31(2): 229-232.
YAO Yu, WU Hongtao, ZHANG Zhaoming. Investigation on static calibration for parallel balance[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2007, 31(2): 229-232. (in Chinese)
- [2] 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 multicomponent vectors[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2001, 22(4): 84-86. (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 Qing, 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] 姚裕, 吴洪涛. 大膨胀比喷管试验台的六分量天平研究[J]. 南京理工大学学报, 2011, 35(4): 547-551.
- YAO Yu, WU Hongtao. Six-component force balance for big expansion ratio nozzle test-bed[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2011, 35(4): 547-551. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 金捷, 赵景芸, 张明恒, 等. 轴对称矢量喷管内流特性的模型试验[J]. 推进技术, 2005, 26(2): 144-146.
- JIN Jie, ZHAO Jingyun, ZHANG Mingheng, et al. Experimental investigation of static internal performance for an axisymmetric vectoring thrust nozzle[J]. Journal of Propulsion Technology, 2005, 26(2): 144-146. (in Chinese)
- [7] 金捷, 赵景芸, 张明恒, 等. 轴对称矢量喷管壁面静压分布的试验研究[J]. 航空动力学报, 2000, 15(3): 314-316.
- JIN Jie, ZHAO Jingyun, ZHANG Mingheng, et al. Experimental investigation on AVEN wall static pressure distributions[J]. Journal of Aerospace Power, 2000, 15(3): 314-316. (in Chinese)
- [8] 金捷, 雷金春, 廖华琳, 等. 激波诱导轴对称气动矢量喷管壁面静压分布的试验[J]. 航空动力学报, 2007, 22(10): 1700-1703.
- JIN Jie, LEI Jinchun, LIAO Hualin, et al. Experimental investigation of wall static pressure distributions of shock induced axisymmetric fluidic vectoring nozzle[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(10): 1700-1703. (in Chinese)
- [9] 刘志刚, 刘娅. 气动矢量喷管测力技术研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2004, 17(1): 33-36.
- LIU Zhigang, LIU Ya. An investigation of fore measurement for pneumatic vectoring exhaust nozzle[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2004, 17(1): 33-36. (in Chinese)
- [10] 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. Experiments and researches in six-component balance for metal bellows expansion joints[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(4): 736-742. (in Chinese)
- [11] 徐秉铨, 王国栋, 吴久诚, 等. 发动机装配与试车[M]. 北京: 航空工业出版社, 1996.
- [12] 金如山. 航空燃气轮机燃烧室[M]. 北京: 宇航出版社, 1986.
- [13] 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): 67-73.
- LUO Huayun, LAI Chuanxing, WANG Yuegui, et al. Six-component balance calibration technology for nozzle model testing facility[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(1): 67-73. (in Chinese)
- [14] 贺德馨. 风洞天平[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [15] 谢文忠, 郭荣伟. 二元保形非对称膨胀喷管流场特性[J]. 航空动力学报, 2011, 26(1): 141-147.
- XIE Wenzhong, GUO Rongwei. Flowfield characteristics of a two-dimensional integrated asymmetry-expansion nozzle[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(1): 141-147. (in Chinese)
- [16] 廉筱纯, 吴虎. 航空发动机原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2008.