

文章编号:1000-8055(2013)04-0736-07

金属波形膨胀节在六分量天平中的试验

罗华云, 侯敏杰, 王月贵, 叶 巍, 刘志刚

(中国航空工业集团公司 中国燃气涡轮研究院, 四川 江油 621703)

摘 要: 为了探索弹性波纹管与内流式六分量天平的关联特性,在深入分析测力天平机理的基础上,采用测力台架与固定引气管路驻点式膨胀节软弹性连接方案.在载荷按刚度分配原则下,对膨胀节连接前、后天平输出信号的变化及天平控制体加压产生的附加力进行了对比分析,开展了膨胀节刚度、有效面积与测力平台的匹配性研究.试验结果表明:驻点式膨胀节的拉伸安装效果显著,为减少天平基准驻点漂移,提高测力系统的气动稳定性,有效面积的一致性一定要好,特别是整体横向刚度尽量小.

关 键 词: 弹性波纹管; 测力天平; 驻点; 软弹性连接; 有效面积; 拉伸安装; 横向刚度

中图分类号: V211.72

文献标志码: A

Experiments on metal bellows expansion joints in six-component balance

LUO Hua-yun, HOU Min-jie, WANG Yue-gui, YE Wei, LIU Zhi-gang

(China Gas Turbine Establishment,

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

Abstract: The force test platform was coupled flexibly with the fixed air pipeline with stagnation points based on the mechanism of force balance, and analysed deeply in order to explore the relationship of elastic bellows and internal flow six-component force-measuring balance in nozzle test facility. The changes of balance output signal connecting expansion joints and added force of balance control body by pressure were compared under the principle of load distributed by stiffness, and this was investigated to match the expansion joint stiffness and effective area with the force test platform. The test results indicate that the effect of elongate fixing of expansion joints with stagnation point is evident, the coherence of effective area of expansion joints must be very good, and the whole lateral stiffness must be smaller especially in order to reduce the excursion of benchmark stagnation point of balance and increase the aerodynamic stability of the force measurement system.

Key words: elastic bellows; force balance; stagnation point; flexible connection; effective area; elongate fixing; lateral stiffness

在管路系统中,常采用金属波纹管膨胀节补偿或吸收管道的机械位移、热变形,虽然膨胀节是管系中的薄弱构件,但因结构紧凑、流阻小、零泄漏、安装应力低等优点被广泛应用于工程设备中.一般来说,膨胀节在满足耐压强度、稳定性和疲劳

寿命的前提下,补偿量越大、刚度值越小越好^[1-2].

六分量测力天平属于大型贵重的间接测量仪器,载荷跨度大,要求天平具有较高的灵敏度,为了降低非线性干扰、机械干扰,天平本体必须具有足够大的刚度^[3-4],天平上面的通气管路相当于风

收稿日期:2012-04-27

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130417.1353.201304.736_003.html

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.

洞试验的模型或校准设备的加载头,不能与其前端的硬支撑管路固接^[5-6],推荐采用阻力值及变化量尽量小的软弹性连接^[7],但引气膨胀节的相关研究资料甚少.本文从尾喷管模型试验器中单分量天平、四分量天平及六分量天平与固定引起管路连接方式的对比、性能分析,说明了测力台架与固定引气管路以驻点式膨胀节柔性连接的重要性.通过六分量天平两次改造中驻点膨胀节主要设计参数的变化、密封方式的改善、测力系统的对比考核试验,验证了双 O 型圈密封结构的优越性,为降低气动干扰及天平基准驻点的漂移,膨胀节的整体刚度特别是整体横向刚度及允差应尽量小,有效面积的一致性,以提高测力系统在交变载荷下的气动稳定性,并对膨胀节的选型、结构布局提出了有益的建议,该研究方法具有较好的工程实用价值.

1 测力天平特性

该试验研究中的喷管模型试验器是一座连续式直流风洞,主要在常温供气条件下,进行发动机排气部件的内流特性试验研究,热态特性试验研究也是必须的,但热态性能试验约占整个喷管试验研究工作的 10%.为适应排气装置矢量技术研发需求,把具有独立传感器的四分量机械天平改建为相对位置固定,刚度大,受力后变形小的装配式盒式六分量应变天平.实践表明:无论采用非接触或接触式引气管道,均会对测力天平产生附加的力和力矩,连接件刚度与天平本体刚度存在较强的耦合关系.

1.1 原测力天平

原测力天平在喷管性能试验时,测力台架与固定进气管路都采用套筒式箍齿连接,由于周向存在一定的间隙,接触刚度为零,不会影响台架的自由度.

由于前端供气主管路只并联两台 BK-1 单管燃烧室作加热器,试验的最高温度 1 000 K.单分量天平采用轴向进气,流量管处的进气冲量、漏气直接影响到天平的测力,特别是低落压比时,喷管实际推力较小,而附加推力值却较大,造成试验结果误差较大.

四分量机械天平将轴向进气改为两侧对称径向进气,采用金属软管和箍齿两种连接方案对漏气量、间隙压差引起附加的力和力矩进行修正,但矢量喷管的数据处理方法还有待进一步完善;增

加一缩尺的加力燃烧室,通过两级热流加热器,试验的最高温度可达 1 850 K,但在高温试验时易发生测力台架顶死现象.虽然金属软管解决了漏气问题,但金属软管刚度大,波纹管与外层网套存在接触摩擦,导致试验重复性较差、弹性滞后严重.

1.2 六分量天平

六分量天平完全沿用四分量天平的气动布局,在推力 F_x 、升力 F_y 、侧向力 F_z 及俯仰力矩 M_x 基础上,增加滚转力矩 M_y 和偏航力矩 M_z ,为了消除漏气影响,集气室与固定引气管路通过非约束型波纹膨胀节柔性连接.除天平本体外,按试验任务需求,六分量天平共进行了两次大的改造,第 1 次在保留原有设备主进气管路及两级直接加热器的基础上,把四分量天平改为六分量天平;第 2 次取消一级加热器,燃油加热器取代加力燃烧室,规定原固定大支架、天平固定基座位置不变动的情况下,对主进气管路、来流管路及整个天平控制体进行重新设计、计算.由于受固定大支架间距的限制,集气室两侧膨胀节的安装长度从第 1 次改造(以下简称 DN100) 350 mm 缩短到第 2 次改造(以下简称 DN200) 275 mm,主要设计参数的变化情况如表 1.图 1 表示 DN200 测力台架结构原理图,规定重力加速度的负方向为 y 向.

表 1 主要设计参数的变化
Table 1 Change of main design parameters

	DN100	DN200
引气管规格/mm	$\phi 121 \times 5$	$\phi 219 \times 6$
设计压力/MPa	1.6	2
直接加热器	加力燃烧室	燃油加热器
集气室内径/mm	$\phi 400$	$\phi 500$
转接段内径/mm	$\phi 130$	$\phi 260$

1.2.1 天平本体刚度

天平本体是六分量天平的核心,主要由固定框、浮动框和相互关联的 4 个高精度三维力传感器组成,共计 12 个输出信号.应变天平中最难测量的是轴向力载荷分量,必须解决好测力台架的软弹性连接及刚度耦合问题,为此把天平本体视为一个大弹性体,通过计量标定,其 x 向弹性刚度达 627.2 kN/mm,从力传感器布局、力的机械分解,可知 z 向跨距较大刚度稍小,而 y 向刚度最大.

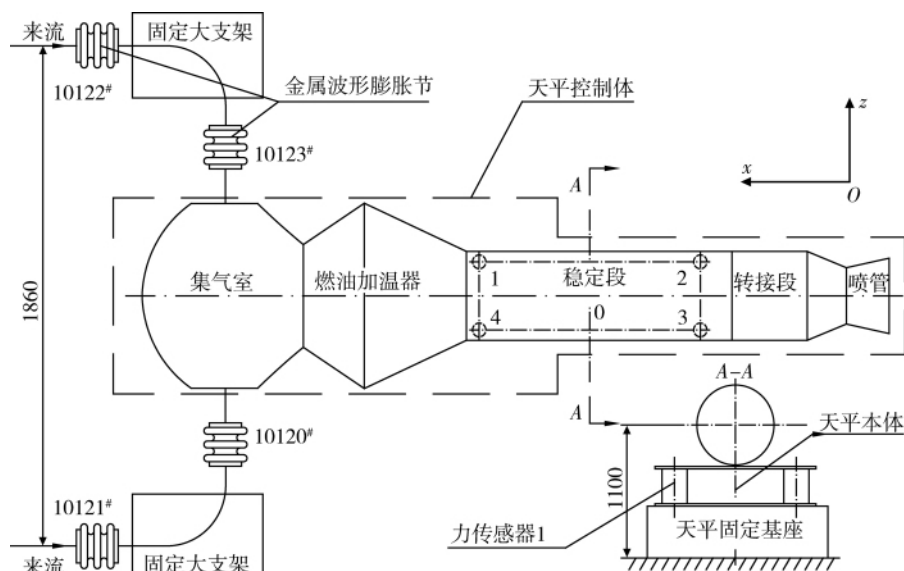


图 1 测力台架结构原理图 (单位:mm)

Fig. 1 Sketch of force test platform (unit:mm)

1.2.2 膨胀节法兰密封特点

第 1 次新建时, 法兰式膨胀节采用定位环槽与单 O 形圈结构形式, 密封圈选耐 200 °C 的氟橡胶, 造成部件间配合精度高, 给天平安装、调试带来诸多不便。集气室、膨胀节等焊接件必然存在加工偏差、焊接变形等, 为降低加工成本, 改用金属调整垫片与双 O 形圈相结合的密封结构, 膨胀节的法兰一端用平调整垫片, 另一端用斜调整垫片, 其示意图如图 2, 实践证明能降低制造及安装难度。

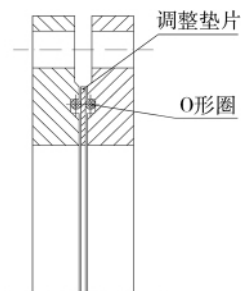


图 2 法兰密封示意图

Fig. 2 Sketch of flange seal

2 膨胀节安装与特性

两侧来流管路 DN200 按预热温度 450 K、工作压力 2 MPa 设计, 而 C 类金属波形膨胀节中能同时吸收轴向与横向组合位移的只有单式轴向型、复式自由型及弯管压力平衡型 3 种膨胀节^[8]。受安装长度限制及测力台架对自由度的要求, 只能选用最简单的单式轴向型膨胀节与台架柔性连

接, 再考虑加工及安装过程的不确定性引起的层间间隙、摩擦接触, 选用了两层无加强 U 形膨胀节^[9]。

2.1 驻点式安装

根据测力天平布局特点, 悬空的集气室下不能设置支座, 靠两个规格型号相同的膨胀节在集气室处形成一个力的相对平衡点即驻点^[10], 而驻点与天平的标定状态密切相关, 保持天平性能试验与校准时基准驻点的一致是相当重要的, 直接关系到试验质量和提供可靠试验数据的问题。

膨胀节在压力作用下将产生沿轴向很大的内压推力, 大小等于波纹管的有效面积与内压之积, 与刚度反力一样会直接作用到相关设备或支架上。驻点式安装对两侧波纹管的对称性、同轴度有着严格规定, 要求整体轴向刚度、有效面积相同, 对测力天平来说, 在压力、温度载荷作用下要求两侧进气管路压差小, 膨胀节的刚度、有效面积变化一致, 且变化量尽量小, 以减少天平基准驻点漂移^[11], 提高天平的线性度和重复精度。

2.2 系统中刚度与力的耦合特性

按照刚度耦合的原则: 作用在元件上的载荷按刚度所占的比例分配^[12-13], 天平控制体采用高强度紧固件刚性连接, 可以把膨胀节刚度与天平本体刚度的耦合作为测力台架软弹性连接的分析依据。为减少对控制体的非线性干扰、机械干扰, 降低气动产生的附加力, 所选膨胀节刚度越低, 同等条件下承受的力就小, 对测力平台的干扰就弱, 即使波纹管变形后存在残余变形, 对天平输出信号的影响也不会大, 从而提高测力系统的气动稳

定性。

2.3 膨胀节刚度特性

在无压力载荷的情况下,串、并联膨胀节的总刚度与工业弹簧的串、并联相似^[14]。单式U形波纹管整体横向弹性刚度 K_y 与整体轴向弹性刚度 K_x 有如下关系:

$$K_y = \frac{1.5D^2}{(L \pm x/2)^2} \times K_x$$

式中 L 为波纹管的有效长度, D 为波纹管平均直径, x 为波纹管轴向压缩或拉伸位移,拉伸取“+”,压缩取“-”。

当膨胀节轴向位移较少,作用力与变形成线性关系,在额定位移时,往往已进入塑性区,力与变形呈现非线性关系,引起严重的弹性迟滞和弹性后效。一般膨胀节加载初期为直线,卸载时为直线^[15],在位移的起始阶段,波纹管拉伸或压缩引起的残余变形小、弹性滞后不明显。

3 弹性膨胀节与天平试验

天平静校、动校结果^[16]表明:天平的测量值是力传感器各分量共同作用的结果,天平控制体的固连、膨胀节刚度及有效面积变化的一致性具有举足轻重的作用。保护敏感的天平设备是选择膨胀节的前提,测力天平必须避免受力不当受损,正确进行支架设计和受力计算就显得尤其重要。

3.1 膨胀节设计参数与检测

按试验设备管网设计要求,管路流速可达40 m/s,为减少流体对波纹管内表面冲刷、降低压损、保证介质流动平稳,要求单式轴向型膨胀节设置导流筒,其周向间隙合适、均匀。

第1次改建,初期由于简易支架刚度不足,加压时拉伸位移太大,导致膨胀节受损破坏^[17]。改固定大支架后,定制了两套弹性波纹管16TBK125×10G-F-350,由0.8 mm单层00Cr17Ni14Mo2(SUS316L)不锈钢制成,其中 $K_x = 362$ N/mm, $K_y = 333$ N/mm, K_y 只有天平本体刚度的0.05%,在1.5 MPa的内压下,会产生17.5 kN以上的内压推力。

第2次改建,把天平控制体工作压力从1.6 MPa提高到2 MPa,对固定大支架进行了加固处理。定制4套高敏感精密级弹性膨胀节2.2TN200×8-F-265,由两层1 mm厚0Cr18Ni9(SUS304)不锈钢液压成形,要求其回复性好、轴向及横向整体刚度小、有效面积相同、波高一致,

确保法兰轴线与波纹管轴线同轴度小于 $\phi 1$ mm,两端面对波纹管轴线垂直度不大于1 mm。采用自锁性好的细牙螺纹运输拉杆作调长器,兼顾卸载时膨胀节的线性特性,避免膨胀节拉压交变发生刚度的阶跃,在安装膨胀节时拉伸2 mm,试验表明拉伸法不会出现刚度的突变,具有很好的实用效果。

常用金属材料膨胀节在温度、位移发生变化时刚度不是一个恒定值,一般厂家只提供波纹管的理论刚度,因此在高要求场合,应实测膨胀节的总体刚度。考虑刚度的不稳定性、焊接变形、残余应力等,定制的弹性膨胀节实测前进行了多次整形处理。在自然时效后,利用M1级20 kg标准砝码、0.02级300 mm高度尺在0级计量检验平台上实测膨胀节的载荷-位移特性,按实测的制造长度,挑选10120[#]与10123[#]配对,相对刚度允差只有1.7%, K_y 占天平本体刚度的0.19%,另两个膨胀节在自然长度下安装在固定大支架前端,起减振、吸收流体温度变化引起的热应力的作用,主要性能参数见表2。

表2 膨胀节主要性能参数
Table 2 Main performance parameter of expansion joints

编号	总长/ mm	层 数	波 数	平均直径 D /mm	实测 K_x / (N/mm)	计算 K_y / (N/mm)
10120 [#]	265.2				317.6	1206.2
10121 [#]	263.1	2	8	253	310.7	1180.0
10122 [#]	269.5				306.5	1164.8
10123 [#]	265.8				323.0	1211.4

在内压为1.5 MPa下,弹性波纹管的一端将产生75.4 kN以上推力,若两侧波纹管平均直径差1%,在集气室处至少有1.5 kN推力差,而两侧管路的位移量即使差2 mm,对集气室的弹性反力差也不到11 N。一般情况下,随着管内压力增大,波纹管有效面积变小、刚度变大,但内压推力比弹性力大得多,可见在受压情况下,驻点式膨胀节有效面积变动的关联性对测力天平的重要性。两次改建可知膨胀节的横向整体刚度与其长细比(即长度与直径之比)密切相关。

3.2 膨胀节对天平自然零点的影响

高精度线性稳压电源的供桥电压由hp HEW-LETT34401A监测,在测力台架与两侧固

定大支架连接前、后,六分量天平自然零点变动情况如表 3,这与驻点膨胀节刚度差引起的弹性反力对天平控制体的受力分析情况一致.在无压力和温度载荷作用下,膨胀节连接前、后 y 向总输出变化只有 0.1%,说明了两侧膨胀节与天平控制体的校准中心具有良好的共面性,而 x 向、 z 向

总输出变化达 -14.3% 、 -26.1% ,这主要是由膨胀节的整体刚度差异、拉伸及安装不一致引起的.柔性连接解决了漏气问题,却打破了力传递机构原有的平衡状态,传感器发生重新分配,只有配对膨胀节的刚度值及相对允差越小,对 x 向、 z 向的影响才会越弱.

表 3 膨胀节对天平零点的影响

Table 3 Effects of expansion joints on balance zero points

膨胀节		传感器 1	传感器 2	传感器 3	传感器 4	合计
连接前	$U_x/\mu V$	4429	-726	1669	-1937	3432
	$U_y/\mu V$	-12533	2591	846	-8977	-18073
	$U_z/\mu V$	-190	1449	-5653	659	-3735
连接后	$U_x/\mu V$	4493	1810	-125	-3236	2942
	$U_y/\mu V$	-10084	596	-2688	-5917	-18093
	$U_z/\mu V$	-2626	3186	-1525	-1796	-2761

3.3 膨胀节的考核试验

测力系统在加工、安装时难免会出现细微偏差.一般管路在常温下安装,当管道投入运行后,管内介质温度高于环境温度,就会产生热伸长、热应力,为避免管内温度和压力发生急剧变化,试验时要求阀门的开关速度不能太快.

3.3.1 试验的温度变化

需要防止两相流动的直排大气喷管试验要求 $9 \times 100 \text{ m}^3$ 储气罐群与机组共同供气.空气通过两级压缩机加压,温升将超过 160°C ,只有通过冷却、除水后才允许进入储气罐,通常供气温度比周围环境温度高出 10°C .在供气压力循环试验中,气体通过压缩、膨胀,温度会发生 9°C 左右的变化,喷管进口总温随进口总压的变化规律如图 3.

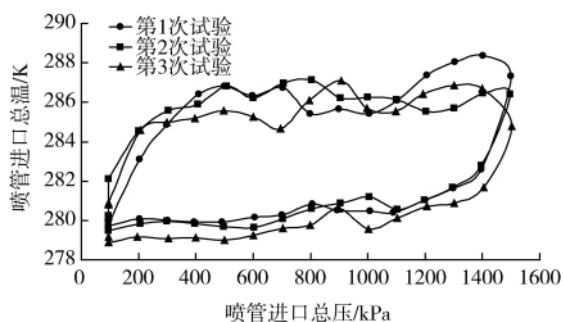


图 3 喷管进口总温与进口总压变化规律

Fig. 3 Change rule of nozzle inlet's total temperature and pressure

膨胀节刚度与金属材料的弹性模量直接相关,随着工作温度的升高,弹性模量下降,整体弹性刚度减少,但一般金属材料在常温范围内变动 10°C ,弹性模量变化低于 0.3% .试验时天平的载荷跨度大、位移发生交替变化,膨胀节工作在交变应力状态,只有膨胀节刚度及变化小,才会降低对测力天平的耦合力.

3.3.2 稳压加载荷试验

把转接段及喷管置换成校准专用的俯仰力矩加载头后,在膨胀节 10121#, 10122# 处用法兰盖密封天平控制体,然后高压氮气向控制体缓慢充气,在无温度及振动载荷时考核一定静压载荷下测力天平加卸载重复性及回零情况,同时借助百分表检验固定大支架的强度、刚度是否满足规定以及控制体的气密性.

DN200 天平控制体的内压分别稳定在 0.5, 1.0, 1.5 MPa 后,首先对测力系统清零,消除初始附加载荷的影响,再用标准砝码进行等阶梯加载与卸载,各重复 4 次,合成结果见图 4 所示,与天平静态校准结果一样,只是测量推力比理论加载值有所偏小,在不修正附加推力的情况下,最大相对误差也只有 -0.785% ,可见不同的内压作用下,其线性度、重复性都很好,天平侧向力在 $-14.7 \sim 15.5 \text{ N}$ 内变动,干扰量很小,证明在不同稳定压力下,驻点式膨胀节有效面积及变化趋势的一致性较好,驻点保持相对稳定.气密性检查表明金属调整垫片与双 O 形密封圈配合密封效

果相当好,固定大支架的强度、刚度满足设计要求。

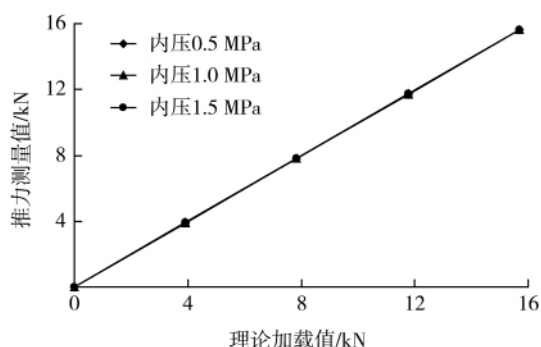


图4 稳压加载荷校准试验

Fig. 4 Calibration test with stable pressure and variable load

3.3.3 无载荷变压力试验

搭接 10121[#], 10122[#] 膨胀节与供气管路, 气源站供气以考核真实工况下天平的输出随压力、温度波动及管路振动的情况。

测量推力 F_x 与控制体内压的变化关系见图 5, 可见 F_x 的绝对值随天平控制体内压的增大而增大, 但有比较好的重复性, 且与天平动校时附加推力变化量一致。对 DN100 来说, 常温试验时流体温度发生 10 °C 的变化, 对测力系统影响并不大; 而 DN200 在加压上行程和卸压下行程时天平存在较大的滞后现象, 可见双层波纹管的摩擦接触与加载路径有关, 考虑到性能试验的实际工况, 选用加压上行程。在 1.5 MPa 下, DN200 比 DN100 测力台架所产生的附加推力大 3.85 倍, 与天平控制体从 DN100 改为 DN200, 在推力方向上膨胀节整体横向刚度增加 $(1206.2+1211.4)/(333+333)=3.63$ 倍, 在两侧来流压力差、压力及温度波动和振动的共同作用下, 波纹管的整体

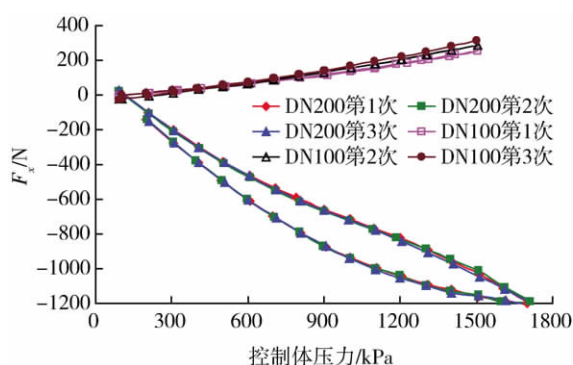


图5 F_x 与控制体压力的关系

Fig. 5 Relation between F_x and control body pressure

横向刚度与附加推力有着较强关联性, 刚度越小, 对测力天平的干扰、引起的滞后也越小, 即非线性差值可通过降低膨胀节整体横向刚度减小。

测量侧向力 F_z 与控制体内压的变化关系见图 6, 理论上从 DN100 变到 DN200 膨胀节所产生的内压推力会增大 4 倍, 但在 1.5 MPa 压力下, DN200 比 DN100 所产生的附加侧向力只大 1.5 倍, 附加的侧向力总值并不大, 也有比较好的重复性, 但 DN200 在 1300 kPa 内压时, 滞后效应明显, 这与恶劣工况下双层波纹管间的摩擦力较大有关。

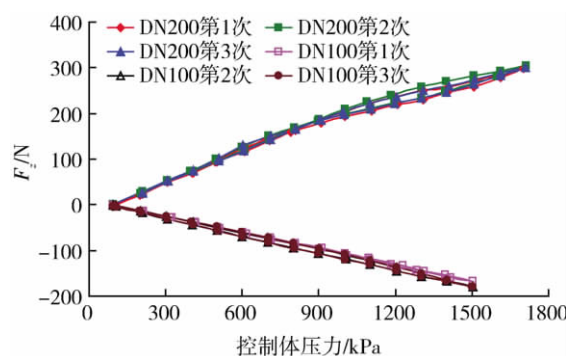


图6 F_z 与控制体压力的变化关系

Fig. 6 Relation between F_z and control body pressure

从图 5、图 6 可见: 大刚度的天平本体在交变载荷工作时, 连接测力台架与固定进气管路的弹性波纹管的选择就显得相当重要, 首先要考虑膨胀节的刚度、有效面积, 但已不能忽略波纹管的层间接触和干涉。为了提高测力系统气动稳定性, 应增加膨胀节的长细比、降低刚度, 在刚度确定的情况下, 应优先选择单层波纹管, 否则, 对多层波纹管必须尽量减少层间间隙。

4 结 论

六分量测力天平属于非常复杂的间接测量仪器, 是天平/模型/支撑系统的整体刚度与柔性连接件的统一体。通过固连金属膨胀节、氮气及气源加压加载试验分析, 在确保集气室两侧膨胀节一致性的条件下, 柔性件刚度必须与天平本体刚度协调一致, 尽量减少驻点的漂移, 降低产生附加的力和力矩, 使天平的测量值更接近于真实值, 得出如下结论:

1) 测力台架与固定引气管路柔性连接, 必然出现焊接, 而膨胀节的加工、安装存在偏差, 选用金属调整垫片加双 O 型圈的密封结构, 实践证明在密封性及天平的安装、调试方面具有明显的优

越性。

2) 集气室两侧膨胀节采用驻点、拉伸安装是极为有效的方案。轴向弹性力、内压推力可以相互抵消,削弱了对膨胀节整体轴向刚度的要求,但配对的刚度允差应尽量小、有效面积一致,以减少驻点的漂移。为准确掌握膨胀节的载荷-位移特性,实测挑选是必要的。

3) 考虑到力的相互抵消、叠加,载荷按刚度分配原则,金属膨胀节的整体横向刚度对测力系统的影响效果明显,最好不超过天平本体刚度的0.05%,而且膨胀节刚度越低,随温度变化的量值就越小,天平的稳定性就越强。

4) 通过对同一测力天平两次改造所选驻点式膨胀节的对比分析,为了提高测力系统的气动稳定性,增加膨胀节长细比,对提高其柔度作用显著。在结构布局上应先确定膨胀节的安装长度,再考虑两侧固定支架的间距问题。

参考文献:

- [1] 杨玲,谢守勇,杨明金,等.膨胀节波纹管优化设计[J].农业机械学报,2006,37(9):153-156.
YANG Ling, XIE Shouyong, YANG Mingjin, et al. Research on optimization design of expansion joint bellows[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(9): 153-156. (in Chinese)
- [2] 张兵,王心丰.用非线性有限元分析波纹管的稳定性[J].压力容器,2001,18(1):40-44.
ZHANG Bing, WANG Xinfeng. Stability of bellows analysis with nonlinear finite element method[J]. Pressure Vessel Technology, 2001, 18(1): 40-44. (in Chinese)
- [3] 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 Wei, 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)
- [4] 姚裕,张召明.整体式盒式应变天平有限元设计研究[J].南京航空航天大学学报,2010,42(1):58-61.
YAO Yu, ZHANG Zhaoming. Finite element design on integrated box balance[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 42(1): 58-61. (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 multicomponent vectors[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2001, 22(4): 84-86. (in Chinese)
- [6] 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].流体力学试验与测量,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)
- [7] 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.
- [8] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 12777—2008 金属波纹管膨胀节通用技术条件[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [9] 周林,贺小华.层间间隙对多层U形膨胀节结构性能影响的探讨[J].压力容器,2011,28(7):24-28.
ZHOU Lin, HE Xiaohua. Discussion on influence of layer gap to performance of multi-layer U-shape expansion joint[J]. Pressure Vessel, 2011, 28(7): 24-28. (in Chinese)
- [10] 王世军.无固定支座直埋供热管道设计计算[J].区域供热,2008(5):60-65.
WANG Shijun. Design and calculation of direct buried heating pipeline without fixed seat[J]. District Heating, 2008(5): 60-65. (in Chinese)
- [11] 宋盛华.直埋热力管道驻点漂移问题的分析[J].区域供热,2009(2):43-46.
SONG Shenghua. Analyse of stagnation point excursion in direct buried heating pipeline[J]. District Heating, 2009(2): 43-46. (in Chinese)
- [12] 贺德馨.风洞天平[M].北京:国防工业出版社,2001.
- [13] 王国鼎,杨爱平,高荣雄,等.根据墩台抗推刚度分配梁式桥的水平力[J].中南公路工程,2003,28(4):1-3.
WANG Guoding, YANG Aiping, GAO Rongxiong, et al. Distribution of horizontal forces in accordance with anti-push rigidity of girder bridge piers and abutments[J]. Central South Highway Engineering, 2003, 28(4): 1-3. (in Chinese)
- [14] 孙即红.波纹膨胀节在工程中的应用[J].山西电力技术,2001,96(1):24-25.
SUN Jihong. The use of the corrugated expansion pipe in engineering[J]. Shanxi Electric Power, 2001, 96(1): 24-25. (in Chinese)
- [15] 李永生,李建国.波形膨胀节实用技术[M].北京:化学工业出版社,2000.
- [16] 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)
- [17] 徐兰柱,张玉红.管道压力试验时对膨胀节的临时约束及其强度校核[J].天津冶金,2010(5):42-43.
XU Lanzhu, ZHANG Yuhong. Temporary restraint and strength calibration on expansion joint at pipeline pressure test[J]. Tianjin Metallurgy, 2010(5): 42-43. (in Chinese)