

液体火箭发动机试验动应变参数测量工艺技术

陈海峰, 刘英元

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

摘要: 介绍了液体火箭发动机地面试验中动应变测量系统的测量工艺技术。分析了长电缆对应变片灵敏度的影响因素, 介绍了应变片的粘贴工艺, 分析了动应变测量系统干扰信号的来源和抗干扰的技术措施, 同时分析了温度对动应变测量系统的影响及工艺改进方法。

关键词: 动应变; 测量工艺; 关键技术

中图分类号: V434

文献标识码: B

文章编号: (2009) 06-0052-06

Dynamic strain parameter measuring technique in liquid rocket engine tests

Chen Haifeng, Liu Yingyuan

(Xi'an Aerospace Propulsion Test Technique Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: Dynamic strain measuring technique in the liquid rocket engine tests is introduced in this paper. The principle of dynamic strain measuring is introduced firstly and the influence of long cable on the sensitivity of strain sheet is analyzed. The bonding technology of strain sheet is also introduced and the interference signal of the dynamic strain measuring system is analyzed. The influence of temperature on the dynamic strain measuring system and its improving method is also analyzed in the paper.

Key words: dynamic strain; measuring technology; key technique

0 引言

液体火箭发动机地面试验是发动机研制、生

产、抽检的关键环节, 是一项复杂的系统工程。它具有高风险、高费用、试验技术难度大、费用高, 出现故障时时间短、造成的损失大、试验时间短、故障发展迅速等特点。如某一型号试车过程

收稿日期: 2009-09-04; 修回日期: 2009-10-09。

作者简介: 陈海峰 (1977—), 男, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机试验测控技术。

中, 由于发动机发生器燃料进口管支板焊缝边缘开裂, 发生器下部燃料漏出发生明火, 导致试车失败。因此, 了解发动机在试验过程中每一时刻某些重要部件的应力变化, 对深入分析发动机的工作状态是非常重要的。

液体火箭发动机动应变测量中, 通常的手段是通过粘贴应变片、接入应变仪这样的典型方法来获取数据, 但由于测点布置得比较密集, 测量距离远, 对测试仪提出了很高要求, 同时由于连接应变片的距离远, 电缆长度增加, 阻值增加, 加之从传感器端获得的又是小信号, 给动应变测量带来了一定困难。因此, 研究动应变测量工艺对测准测全动应变数据有着重要意义。

粘贴应变片是测量应变的关键环节, 粘贴质量直接决定动应变测量质量, 因此粘贴片工艺就成为动应变测量中一个重要环节。粘贴合格的应变片在加热、加压、固化后应变片的阻值, 不仅不会有明显的变化, 而且在特定的电场作用下, 长时间不会被击穿, 并且绝缘阻值在兆欧级以上。这就对贴片工艺提出了很高的要求, 为此, 对于应变片的粘贴要严格执行一系列工艺过程。

由于应变片输出的信号属于小信号范畴, 加之输送距离长, 采取有效抗干扰技术保证小信号测量的质量也就成为另一个关键环节。

1 动应变测量原理

1.1 动应变系统构成及测量原理

根据试车台的测量容量和试车任务书要求, 本文提出建立的动应变测量系统应满足下列技术指标:

- a. 测量能力: $\geq 8\text{ch}$, 且每通道相互独立;
- b. 应变放大器: 激励电压: $1\sim 10\text{VDC}$ 分档可选, 误差: $\leq \pm 0.5\%$; 电流输出 $\geq 10\text{mA}$; 增益: $100\sim 2000$ 分档可选, 误差: $\leq \pm 0.5\%$; 系统可以自动平衡, 范围: $\pm 5000\mu\epsilon$; 非线性: $\leq 0.1\%$; 共模抑制: $\geq 95\text{dB}$; 频响: $10\text{Hz}\sim 100\text{kHz}$;
- c. 记录系统: 系统可自由设置采集速率和电压耦合方式 (AD/CD), 可对磁带机放录信号或者桥路放大器输出的电压信号进行采集;

d. 采取抗干扰措施: 能够有效抑制电磁、静电、地电压和测量仪器间的干扰;

e. 数据处理: 对试车信号进行处理, 可完成时域综合值、包络线、频域平均频谱、极值谱、功率谱、RMS 图和瀑布图等形式数据报告。

由上述技术指标搭建的动应变测量系统如图 1 所示。

图 1 的测量原理为: 测点部位的材料发生形变作用于应变片, 引起应变片阻值变化, 由于电桥变换电路转化为电压量变化进入应变放大器, 信号放大、滤波后输出由磁带机和 OR36 动态采集与分析装置采集。在系统校准方式上使用模拟应变校准仪对测量系统进行校准, 采用端点法拟合应变值与测量系统输出电压值的线性方程, 用于试车数据处理。

在图 1 中桥盒到应变放大器之间是由长距离电缆连接, 桥盒在试车台上距离应变放大器较远, 六线制测量可以有效减少信号间、信号电源间的电磁干扰。为了充分发挥这个优点, 将桥盒放置在试车台前间, 并把从测量间到试车台前间测量电缆换成低噪声电缆, 采用如图 2 所示电缆接头的焊接方式。

由于应变片传感器和桥盒都在试车台上, 在接线方式上, 桥盒到应变片采用 1/4 桥三线制接法, 因为桥盒到应变片之间的电缆可以等效为两个阻值相等的电阻增加到相邻的两个桥臂上, 故采用应变仪电桥自动平衡后, 可以有效的减少因电缆电阻带来的测量误差。前端粘贴的应变片标准阻值为 120Ω , 桥盒内部内置了 2 路 120Ω 精密电阻。采用 1/4 桥连接方式, 电缆一端焊接应变片, 另一端焊接了 120Ω 精密补偿电阻保持电桥平衡。其桥盒到应变片的测量示意图如图 3 所示:

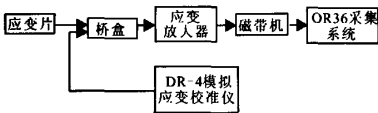


图 1 动应变测量系统框图

Fig.1 Schematic diagram of dynamic strain measuring system

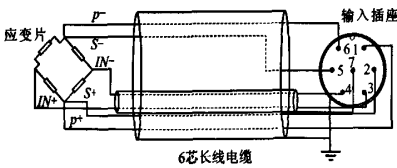


图2 桥盒与应变放大器间的连线示意图
Fig.2 Schematic diagram of electricity bridge box and strain amplifier connection

图2中：1、2两芯线为电源正；5、6两芯线为电源负；3芯线为信号输入正；4芯线为信号输入负；7芯线为信号屏蔽线；线路总屏蔽接插头、插座外壳。

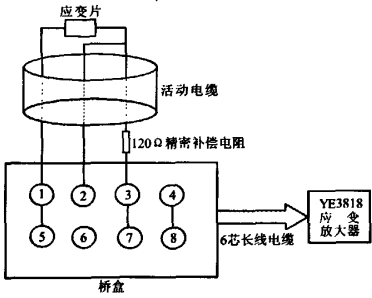


图3 桥盒与应变片传感器间的连线示意图
Fig.3 Schematic diagram of electricity bridge box and strain sheet connection

1.2 长电缆所带来的误差影响

在实际测量过程中，出于安全性考虑，应变测量仪离发动机有很大距离，这就需要很长的电缆连接应变片和应变仪，由于电缆较长，此时电缆电阻与应变片电阻相比不可忽略，否则会影响测量结果准确性。

假设连接应变片的电缆电阻为 r （设应变片的阻值为 R ），对于 $1/4$ 桥接法的应变测量电路，其实际测量的应变值为：

$$\epsilon_{\text{fact}} = \frac{1}{K_c} \frac{R}{R+2r} = \frac{1}{K_c} \frac{R}{R} \frac{R}{R+2r} = \epsilon_{\text{theory}} \frac{R}{R+2r} \quad (1)$$

由此可以看出，导线的接入降低了灵敏系数 K_c 值，其降低后的灵敏系数 K' 为：

$$K' = K_c \frac{R}{R+2r} \quad (2)$$

将上式按幂级数展开，略去二次及其以上高

次项得：

$$K' \approx K_c \left(1 - \frac{2r}{R} \right) \quad (3)$$

即所带来的灵敏度系数误差为：

$$e_r = \frac{2r}{R} \quad (4)$$

由公式（4）可以看出，当 $r \geq 0.05\%R$ 时 $e_r \geq 0.1\%$ 此时应对灵敏度系数进行修正。

2 动应变测量关键技术

2.1 应变片粘贴工艺

在应变测量过程中，对测量结果影响最大的就是应变片的粘贴工艺，包括粘贴前被测量部位的打磨，划线定位，表面清洗以及应变片的选片、绷片、贴片和贴片质量检查方法。对应变片的粘贴通常采用如下一系列严格的工艺方法，以提高应变片的粘贴质量。

（1）打磨：为了提高粘贴性能，对需要粘贴应变片的部位采用一定大小面积的砂纸先进行圆形打磨以产生多向痕迹，而后进行交叉斜线打磨以产生 45° 的交叉痕迹，再用沾有酒精的棉球擦拭干净。

（2）划线定位：为使应变片在应变区精确对齐，贴片部位用绘图笔划出定位标记，即在粘贴应变片的位置划两条十字线，使应变片上的标志在粘贴时与十字线相重合。

（3）表面清洗：在待测体上划出参考线后，再用无水乙醇或丙酮棉签反复擦洗划线表面，直到棉球上没有污迹并凉干。

（4）绷片：将应变片放在清洁的聚四氟乙烯薄膜上，用浸有少量无水乙醇的棉签轻轻擦洗应变片的两个表面，粘贴面朝上干燥备用，而后将胶带切割成一定大小的面积，并将应变片粘贴于胶带中间，而后将胶带的一段固定在应变区，调整对中后，将基底背面向上翻开，等待涂胶。

（5）贴片：用毛刷或玻璃棒蘸取适量配置好的胶粘剂，均匀而薄地刷涂在应变片粘贴面上，而后再将胶带连同应变片一并翻过来，并将胶带的另一端贴在应变区，而后采用指压法轻轻均匀

按压胶带贴于应变片的部位, 排除气泡, 用电吹风吹干。

(6) 检查: 贴片质量检查: 检查应变片的电阻是否有明显变化, 阻值范围 $120 \pm 0.05 \Omega$; 检查应变片对测量体的绝缘电阻, 绝缘电阻 $\geq 20 M\Omega$ 。

2.2 小信号抗干扰技术

应变信号在变换、传输、放大及记录过程中, 从内部或外部混入其它信号, 引入干扰从而造成测量误差。特别是当干扰频率在所测动应变信号频率范围内时, 其混入应变信号内造成假象, 严重地影响测量结果。有时干扰信号较大, 使正常的测量工作无法进行。因此, 如何有效地防止干扰, 是应变测量技术中的一个重要问题。

应变信号是通过测量电缆输入应变放大器的, 数值非常小 (电桥的输出电压通常为毫伏级), 当外界电磁场变化时会受到电磁干扰。应变放大器和记录仪使用交流市电电源供电, 容易造成 50Hz 工频干扰。另一方面, 电缆噪声完全是由电缆自身产生的, 普通的同轴电缆是由带挤压聚乙烯或聚四氟乙烯材料作绝缘保护层的多股绞线组成的, 外部屏蔽套是一个编织的多股的镀银金属网套。当电缆受到突然的弯曲或振动时, 电缆芯线与绝缘体之间, 以及绝缘体和金属屏蔽套之间就可能发生相对移动, 以致于它们两者之间形成一个空隙。当相对移动很快时, 在空隙中将因相互摩擦而产生静电感应电荷 (该电荷不会很快消失), 此静电荷将直接与压电元件的输出叠加以后馈送到放大器中, 以致于在主信号中混杂有较大的电缆噪声。同时当主电缆中的信号线和供桥电压线之间存在漏电容时, 就可能在测量导线中产生静电干扰。对应变仪造成的干扰往往是通过应变仪输入长距离电缆引入的, 也就是说应变仪输入长距离电缆附近, 有较长的与其平行的其它信号传输时, 这些传输线中的信号将耦合到应变仪输入线从而形成干扰电压。在应变测量中使用的长距离电缆一般都具有屏蔽线, 屏蔽线接地后, 在屏蔽线上的感应电流, 对应变测量信号也会形成干扰。通常由电缆电容耦合引起的干扰电压表示为:

$$U_{ni} = K j \omega C_m U_{ng} Z_i \quad (5)$$

式中, K 为干扰强度系数; j 为相位; ω 为干扰电压频率; C_m 为耦合电容; U_{ng} 为干扰电压幅值; Z_i 为受干扰电路的输入阻抗。

为了解决由于电磁干扰和静电干扰对测量信号的影响, 主要采取如下措施: 将测量导线绞扭, 这样可以减少干扰磁通的耦合面积, 并使每一绞的感应电流与下一绞的感应电流相反, 互相抵消。将电源线也绞扭, 可使干扰磁场减弱。在绞扭线的外面采用金属屏蔽套, 可以防止静电干扰, 使通过漏电容的电流从屏蔽套上旁路, 不再串入信号回路中。为减小电缆噪声, 除选用特制的低噪声电缆外 (电缆的芯线与绝缘体之间以及绝缘体与屏蔽套之间加入了石墨层, 以减小相互摩擦), 在测量过程中应将电缆固紧, 以避免相对运动。同时, 测量主电缆采用六芯双屏蔽电缆, 内部两根信号线双绞且有单独屏蔽, 电源线也采用双绞形式, 而且电缆外部进一步加金属丝网屏蔽套层, 在进行系统调试时发现其能够有效的消除电磁和静电引入的干扰。由于磁场强度与距离成反比, 电源线与测量导线的耦合电容随距离的加大而减小, 因此尽量增大测量导线与干扰源的距离, 将应变放大器放置在后端测量间, 用长距离六芯屏蔽电缆与试车台前间的桥盒连接, 有效减小电磁干扰和静电干扰。

若应变放大器接大地, 由于放置在试车台前间的桥盒接地, 两地之间有一定距离, 它们之间就有地电位差 U , 它将干扰被测信号。如果应变片粘贴不好或者应变片及引线受潮或绝缘电阻下降、应变片或导线与被测物之间将存在漏电容, 这样就等于以一定的阻抗与大地相连, 地电位差 U 也同样会干扰被测信号。针对该种情况下的信号干扰, 采取的主要措施为: 焊接完应变传感器后, 在综合测试中检查是否有输出信号, 如果有输出信号, 就表明干扰信号通过应变放大器及测量导线进入。

用标准电阻代替应变片, 如果干扰信号消除, 表明干扰就是由于应变片的漏电容引入的, 可能是应变片受潮, 绝缘电阻下降等原因而引起

的地电压干扰,此时,应检查应变片的粘贴和其周围环境状况,发现问题及时更换应变片。

由于系统包含应变放大器、记录磁带机和 OR36 采集系统,系统仪器间很容易引入直流干扰信号。直流干扰使记录曲线产生零点漂移。为了检查动应变测量系统中是否有直流干扰信号的存在,应在应变片安装完毕后等间断地、持续地记录测量结果,而后对比这些结果看数据中是否有零点漂移,若有就表明系统存在直流干扰。为此,需要调整存在直流干扰的信号通道,并在 OR36 采集仪设置时采取 DC 耦合方式可以有效的抑制直流干扰信号引入的零点漂移。

为了进一步提高动应变测量系统的抗干扰特性,消除电位差带来的不利影响,应变放大器、磁带机和 OR36 采集系统的外壳及后端供电电源地线浮空。整个应变测量系统只在前端桥盒处一点接地,有效的消除了地电位差带来的干扰。

3 动应变系统标定工艺

在进行动应变测量时,为能得到定量的数值关系,必须对采集系统进行正确的标定。标定方法可分为:静态标定和动态标定。静态标定原理:在静态装置上产生的静态应变作为标准应变和被测应变作比较。应变值的电标定,由标准电阻应变仪上的标定装置产生标准电信号,并用这种电信号来模拟标准应变信号,然后传输给采集设备进行记录;动态标定的原理:使标准试件上某点产生一个频率和被测结构动应变频率相近的简谐规律变化且幅值已知的动应变变量。将应变片粘贴在标准试件上,并与测量记录仪器连接,根据已知的动应变幅值进行标定。

在试车过程中由于活动电缆和应变片连接线焊接,无法进行应变系统标定,在综合测试前必须完成系统的标定工作。由于设备限制,无法采用动态标定,只能对系统进行静态标定。首先用 DR-4 模拟应变校准仪加载 0 位,用自动平衡调节放大器的零位,再加载 $2000\mu\epsilon$ 进行标定,得到零位电压和加载 $2000\mu\epsilon$ 的电压值,利用端点法按公式 (6) 计算系统校验斜率。

$$K_{\text{动应变}} = \frac{D_{e0}}{U_1 - U_0} \quad (6)$$

式中, $K_{\text{动应变}}$ 为动应变参数校准系数; D_{e0} 为测量时电校准对应物理量, $\mu\epsilon$; U_0 为加载 $0\mu\epsilon$ 静应变校准信号时对应的电压值, V_{rms} ; U_1 为加载标准静应变校准信号时对应的电压值, V_{rms} 。

应变片的灵敏度系数由制造厂家通过实验测定,实际应用时,根据需要选用不同灵敏系数的应变片。放大器设置的灵敏度系数为 2.0,当使用的应变片灵敏度 K_c 不等于 2.0 时应对校准系数按公式 (7) 进行修正,得到修正后的校准系数 K^* 。

$$K^* = \frac{2.0}{K_c} \times K_{\text{动应变}} \quad (7)$$

在进行应变值的电标定时,应变仪的灵敏度及衰减档位、记录设备的工作状态设置、数据采集系统的放大倍数以及导线状况连接等,都必须和测量时完全一致。

4 动应变系统目前存在的问题及改进工艺

在实际应用中,除了应变会导致应变片电阻变化外,温度变化也会导致应变片电阻变化,且温度变化是应变式传感器的主要误差来源之一。由于应变片传感器具有灵敏度高的特点,发动机表面具有很大的温差变化,故温度变化对动应变测量系统的影响不应忽略。

由于温度变化引起应变片敏感栅阻值变化而产生附加应变。其关系可用下式表示:

$$\Delta R_{\Delta t} = R_t - R_0 = R_0(1 + \alpha \Delta t) - R_0 = R_0 \alpha \Delta t \quad (8)$$

式中, R_t 表示温度为 t 时的电阻值; R_0 表示温度为 t_0 时的电阻值; Δt 表示温度变化值; $\Delta R_{\Delta t}$ 表示温度变化 Δt 时的电阻变化; α 表示敏感栅材料的电阻温度系数。

由于温度的变化 Δt , 引起敏感栅的阻值 $\Delta R_{\Delta t}$ 与应变 ϵ_t 有以下关系:

$$\epsilon_t = \frac{\Delta R_{\Delta t}}{R} / K_c = \alpha \Delta t / K_c \quad (9)$$

(下转第 61 页)

量误差增大问题, 表明系统的频响指标和稳态小推力测量的精确度得到了极大的提高, 满足了试验任务要求。

(3) 由于小推力测量的固有特点, 仍然存在影响测量精度的诸多因素, 进一步提高系统的刚性、提高固有频率等问题有待于进一步研究。

参考文献:

[1] 卞水恩, 张文声. 脉冲火箭发动机动态推力测量系统

[J]. 试验技术通讯. 1981, 1(1): 1-27.
[2] 张迎新. 火箭发动机参数测量技术[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1987.
[3] 刘伟亮, 吴建军. 机电一体化推力测量系统的研制及应用[J]. 火箭推进, 2004, 12(6): 50-54, 49.
[4] 王洪业. 传感器工程 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1997.

(编辑: 陈红霞)

(上接第 56 页)

式中, K_ϵ 表示应变片的灵敏度系数; ϵ_t 就是由于温度变化引起的附加应变。

在公式(9)中, α 的数量级一般为 $\mu\epsilon$, 而 S 的数值通常为 2.0 左右, 由此可以看出由温度变化引起的附加应变与试件应变具有相同的量级, 不可忽视。由于温度变化而引起附加应变片电阻的变化或者造成了虚假应变, 给测量试件应变带来误差。因此, 需要对动应变测量采取温度补偿。由图 3 进一步可知, 动应变测量采用的是桥路, 故在工艺方法上应采取桥路补偿法, 即: 由于在动应变测量方法上, 应变片仅仅是作为平衡电桥的一个臂测量应变的, 利用电桥的和差特性, 电桥的输出反映相邻桥臂电阻值变化相减的结果。

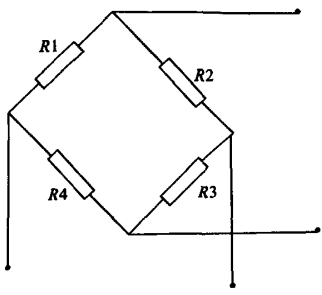


图 4 动应变系统的桥式电路

Fig.4 Schematic of dynamic strain system bridge circuit

如图 4 所示, R_1 为工作片, R_2 为补偿片工作片。 R_1 粘贴在发动机需要被测量的部位, 补偿片 R_2 自由固定在被测试部位或其附近, 使 R_2

不受力。当温度发生变化时, 工作片 R_1 和补偿片 R_2 的电阻都发生变化, 但温度变化是相同的, 即 $\Delta R_1 = \Delta R_2$, 因 R_1 、 R_2 接在相邻的桥臂上, 所以对电桥输出的影响互相抵消掉, 从而起到温度补偿作用。

5 结束语

研制的这套动应变测量系统, 在深入研究应变片粘贴工艺的基础上, 针对应变测量中的干扰源, 寻找抑制电磁干扰、静电干扰和电压干扰的措施, 有效解决了小信号测量中的干扰问题。同时, 针对现有系统温度变化对动应变测量的影响, 提出了动应变温度补偿的工艺方法。该方法应在以后的试验和工作中逐步实施, 以提高动应变测量系统准确度和可靠性。

参考文献:

[1] 张子中, 李贵军. 应力测试过程中抗干扰技术研究[J]. 石油机械, 2003, 增刊第 31 卷: 80-82.
[2] 郑秀瑶, 谢大吉. 应力应变电测技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
[3] 天津大学. 电阻应变仪测试技术[M]. 北京: 科学出版社, 1980.

(编辑: 王建喜)