

振动测量误差影响因素分析

陈海峰, 张少博, 刘英元

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 讨论了振动测量系统产生误差的来源, 主要分析了瞬变温度对振动传感器的影响和现有校准方式产生的误差对振动测量的影响, 提出了减小误差的方法。此方法能提高振动测量的可靠性和测量准确性。

关键词: 振动测量; 误差分析; 振动传感器

中图分类号: V433.9-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2011) 01-0061-04

Analysis of error factor in vibration measurement

CHEN Hai-feng, ZHANG Shao-bo, LIU Ying-yuan

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

Abstract: The source of the error produced by the vibration measurement system is discussed. The influence of the transient temperature on the vibration sensor and the effect of error caused by calibration mode on the vibration measurement are analyzed. A method to reduce the error, and to improve the reliability and accuracy of the vibration measurement is proposed.

Keywords: vibration measurement; error analysis; vibration sensor

0 引言

在火箭发动机地面试车过程中, 测量的参数类型众多, 动态参数振动采集分析是一个重要环节。及时、准确地掌握发动机试验时的振动现状, 分析其变化趋势和规律, 了解发动机工作过程振动对发动机本身机械结构和周围环境的影响, 就可以为发动机的工作状态、发动机机械结构以及性能的改进提供依据。

实际试车的振动为随机振动, 这种振动的特

点是: 加速度的各阶谐波分量在一定频率域上是连续分布的, 即加速度的频率谱是连续谱, 也就是说随机振动是由频率从 $0 \sim \infty$ 的所有的简谐振动的合成振动, 它包含着频率很低的谐振频率分量, 这种超低频的谐振分量有时还比较大。在测试中, 为了能够正确反映和记录随机振动, 要求惯性式传感器在低频区具有良好的幅频特性。因此在测量随机振动时, 特别是在测量冲击振动的时候, 一般选用基座压缩型压电晶体加速度传感器^[1], 该种传感器结构简单、灵敏度高、频率响应高, 但由于其预紧力是通过外壁施加上去的,

收稿日期: 2010-10-14; 修回日期: 2010-11-26

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

当外界条件(如温度、声音)变化时,就会影响到对压电晶体的预紧力,使干扰信号附加在压电晶体上,增大了测量误差。

1 振动测量原理

振动测量系统的测量原理如图 1 所示。在对实际动态信号进行采样时,如果在采样前并不知道采样的最大频率,该如何确定采样频率?若假设最大频率很大,从而确定采样频率,但是采样率太高会产生过量的离散数据,增加所需内存容量,或是在进一步进行数字谱分析时,由于谱线数有限造成频率分辨率不足。可行的做法是首先根据振动测试任务书,确定频率带宽 BW ,在满足香浓定理的条件下,此时采集系统采样频率满足^[2]:

$$f = BW \times 2.56 \quad (1)$$

然后对原始振动信号在电荷放大器上进行低通滤波限制信号带宽,并设置好动态采集装置的采样频率。然后由任务书上要求的谱线数 N ,计算出谱线分辨率:

$$\Delta f = BW / N \quad (2)$$

为了保证测量的可靠性和精度,必须对振动传感器和测量仪器进行校准。包括系统校准和传感器计量校准。系统校准指对全系统进行标定。传感器计量校准指试车前振动传感器需由计量部门进行计量检定,并提供校准证书,给出传感器的编号及灵敏度。校准中采用标准传感器作为国家级计量部门的基准与地方计量部门之间的传递,以及标准传感器的参考校准。

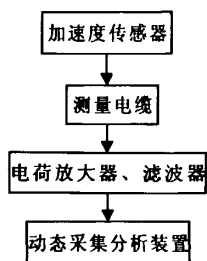


图 1 振动测量系统测量原理图

Fig. 1 Principle of vibration measurement system

2 振动测量误差分析与改进

压电晶体加速度传感器虽然具有稳定性好、使用寿命较长、过载能力强等优点,但它对传输电缆和电荷放大器的要求较高,抗干扰能力差。振动测量误差主要有以下几个影响因素。

2.1 环境温度的影响

环境温度的变化将会使压电材料的压电常数、介电常数、体电阻和弹性模数等参数发生变化^[3]。电容量随温度升高而增大,压电常数随温度升高而减小。电容量增大使传感器的电荷灵敏度增加,电压灵敏度则降低,压电常数减小,从而使传感器的低频响应变差。

瞬变温度对压电式传感器的影响也较大,瞬变温度在传感器壳体和基座等部件内产生温度梯度,由此引起的热效应力传递给压电元件,并产生热电输出;此外压电传感器的线性度也会因预紧力受瞬变温度的变化而变坏,该种现象称为压电晶体的热释电效应,即随着温度 T 的变化,压电晶体产生相应的电荷 Q 输出。热释电效应通常用单位 $g/^{\circ}C$ 来表示,即温度变化 $1^{\circ}C$ 时,传感器输出相当于多少个 g 的振动加速度信号,该数值量又被称为瞬变温度灵敏度。由热力学相关理论可知,传感器输出的热噪声功率 P 为^[4]:

$$P = kTB \quad (3)$$

式中, k 为波尔兹曼常数; T 为压电晶体表面温度; B 为热噪声输出带宽。

从式 (3) 还可以看出,传感器周围温度越高,热输出功率就越大,传感器输出的热噪声信号就越大。

为验证瞬变温度对振动传感器的影响,对试车用振动传感器做了瞬变温度试验,试验原理如图 2 所示。试验前先校出系统的斜率,并将传感器的灵敏度转化为采集设备的灵敏度系数。图中电荷放大器参数设置为上限频率 10 kHz ,下限频率 10 Hz 。试验时把室温下 $10^{\circ}C$ 左右的振动传感器放入恒温箱内,设定恒温箱为 $50^{\circ}C$,用交流和直流耦合方式同时观察振动传感器的输出波形。图 3 是经 OR36 采集到的振动传感器输出波

形, 其中上面的波形为交流耦合模式波形, 下面的波形为直流耦合波形。从图 3 可以看出, 在瞬变温度下振动传感器输出的交直流耦合信号波形轮廓具有一致性, 但直流耦合明显存在直流偏置现象。当传感器刚放进恒温箱内时, 由于传感器内晶振体感受温度变化有一个滞后过程, 其波形基本没有变化; 随着箱内的温度不断上升, 传感器的电荷量随温度升高而增大, 致使波形幅值变大。由于温度变化值与传感器的电荷输出是一个非线性关系, 故当恒温箱温度升到 50 ℃ 并稳定时, 此时电荷量基本达到最大 (如图中黑圈所示); 而后晶振体在稳定的温度场内开始稳定, 逐渐释放所积累的电荷并最终达到稳定。从图中可以看出, 传感器在没有放入温控炉前其零位噪声电压值为 15 mV, 放入炉内后由于温度的影响零位噪声电压变为 50 mV, 随着温度的上升传感器零位噪声电压值变为最大 100 mV。由此可以看出, 温度在突变 50 ℃ 时, 振动传感器的零位噪声比初始值大了 5.5 倍, 因此, 瞬变温度对现有试车在用振动传感器的零位噪声影响较大, 应引起足够重视。

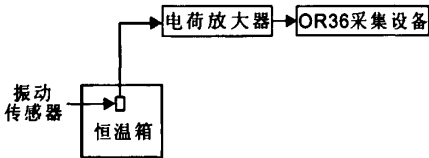


图 2 瞬变温度试验图

Fig. 2 Diagram of transient temperature testing

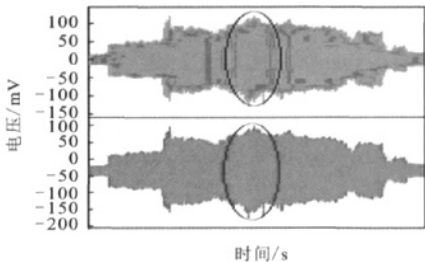


图 3 振动传感器输出波

Fig. 3 Output wave of vibration sensors

因此, 在高温环境特别是温度瞬变时进行振

动测量时, 瞬变温度引起的热输出可能会影响振动的测量精确度。特别是发动机在启动段时, 瞬间温度可达到几百摄氏度, 这可能会对振动传感器的测量会带来较大误差。为了改善由于温度瞬变所带来的测量误差, 可以采取具有剪切型结构的振动传感器, 该种传感器由于压电元件与壳体隔离, 壳体的热应力不会直接传递到压电元件上, 而基座热应力通过中心柱隔离, 温度梯度不会导致明显的热电输出。

2.2 环境湿度的影响

由于每次试完车后都要对发动机进行消防处理, 使得振动传感器被淋湿, 绝缘电阻减小、低频响应变差。为保证传感器具备良好的绝缘性能, 应选用绝缘性能好的绝缘材料, 并采取防潮密封措施, 同时每次试完车在拆卸完传感器后, 要立即放在恒温箱内进行烘烤, 使其受潮部分能够得以恢复, 以便下次使用时不会出现绝缘电阻减小的情况。

2.3 电缆噪声

电缆噪声完全是由电缆自身产生的, 普通的同轴电缆是由聚四氟乙烯材料作绝缘保护层的多股绞线组成的, 外部屏蔽套是一个多股编织的镀银金属网套。当电缆受到突然的弯曲或振动时, 电缆芯线与绝缘体, 以及金属屏蔽套之间就可能发生相对移动, 以至于相互之间形成一个空隙。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), 此静电电荷将直接与压电晶体的输出叠加并输送到放大器中, 以至于在主信号中混杂有较大的电缆噪声。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。

2.4 校准误差

目前的振动传感器采用计量室校验数据, 传感器的误差达 5%, 而由传感器、传输电缆和采集分析设备组成的动态参数测量系统总误差达 15%。造成误差大的原因是: 目前的振动传感器仅仅在购买回来后校准一次, 在两年的传感器有效期内基本不做任何针对传感器的校准工作, 这

会在一定程度上影响传感器的灵敏度,进而影响测量数据的准确性。由于目前对振动测量系统的校准采用“电校法”,该方法无法对整个系统进行标定,不能得到系统整体的校准精度,还使得测量系统噪声会对系数产生一定影响,降低了动态参数测量精度。最有效、最科学的方法是通过在前端施加振动台并按一定的量级和标准进行校准,从而实现动态参数测量系统归一化测量^[9],这样不仅可以把振动传感器、电缆、采集系统都包含进来,有效消除系统误差,提高整个动态参数测量系统的精度,还可以清楚了解每次试车后振动传感器灵敏度具体的变化情况和趋势,这为以后进行筛选传感器和进一步研究灵敏度变化对数据的影响奠定了良好基础。

3 结束语

影响振动测量系统测量精度的主要原因是:

1) 瞬变温度和环境湿度对传感器的影响。瞬变温度的变化会反映在传感器的输出信号上,使得传感器的零位噪声变大,为此在选择传感器时必须选择具有剪切型结构的振动传感器。环境湿度会降低传感器的绝缘性能,使得低频响应变差,为此在使用传感器时必须采取防潮措施,拆卸完传感器后必须放到恒温箱进行烘烤。

2) 校准方法存在问题。理论上讲,在测量频率范围内传感器的灵敏度应为常数,即输出信号与被测振动成正比,但实际上传感器只在一定幅值范围保持线性特性。这就要求每次试车前对振动传感器和整个振动测量系统进行校准。

因此,选择合适的传感器并改进现有校准方法是提高整个振动测量系统的测量精度的有效手

段。今后,在振动测量中应认真关注这些因素,以提高液体火箭发动机试验动态参数测量的精度。

参考文献:

- [1] 田裕鹏,姚恩涛,李开宁. 传感器原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [2] OPPENHEIM A V, SCHAFER R W. 离散时间信号处理 [M]. 刘树棠, 黄建国, 译. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [3] 陈晋龙, 翟宏, 李芳. 一种热噪声标准源等效输出噪声温度的计算方法 [J]. 宇航计测技术, 2009 (5): 5-8.
- [4] 强锡富. 传感器 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [5] 李琪琪, 叶斌, 陈锋, 等. 液体火箭发动机试验频率量信号的处理与仿真 [J]. 火箭推进, 2008, 34 (5): 39-42.
- [6] 马礼耀, 汤维维, 张玉清. 低温流量测量系统 [J]. 低温工程, 1983 (3): 22-24.
- [7] 赵万明. 流量转速参数信号调理技术 [J]. 火箭推进, 2008, 34 (2): 49-54.
- [8] 张令弥. 振动测试与动态分析 [M]. 南京: 航空工业出版社, 1992.
- [9] 刘习军, 贾启芬, 张文德. 工程振动与测试技术 [M]. 天津: 天津大学出版社, 2002.
- [10] 李德葆, 陆秋海. 工程振动试验分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [11] 郭霄峰. 液体火箭发动机试验 [M]. 北京: 宇航出版社, 1990.
- [12] 严普强, 乔陶鹏. 工程中的低频振动测量与其传感器 [J]. 振动、测试与诊断, 2002, 22 (4): 247-253.
- [13] 任红磊, 邵新慧. 加速度计高频振动校准中的相关问题 [J]. 宇航计测技术, 2010, 30 (4): 33-35.
- [14] 肖胜武, 靳鸿, 祖静. 加速度测试系统的校准研究 [J]. 计量与测试技术, 2009, 36 (1): 40-42.

(编辑:王建喜)