

# 提高振动测量系统可靠性方法研究

张少博, 陈海峰, 徐峰

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

**摘要:** 针对振动测量系统薄弱环节, 从传感器、测量电缆两方面着手, 分析了导致传感器灵敏度变化的原因。建立了测量电缆数学模型, 提出了可靠性检测相关方法。试车验证了该方法的有效性。

**关键词:** 振动测量系统; 可靠性检测; 检测方法

**中图分类号:** V434-34    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-9374 (2013) 01-0084-05

## Methods to improve reliability of vibration measurement system

ZHANG Shao-bo, CHEN Hai-feng, XU Feng

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

**Abstract:** The causes of sensibility change of vibration sensors are analyzed in this paper in the aspects of sensors and measuring cables, which are the possible weak links of vibration measurement system. The mathematical model of measuring cables was established. The method relative to the reliability checkout was proposed. The effectiveness of the vibration measurement system was verified in the rocket engine tests.

**Keywords:** vibration measurement system; reliability detection; checkout method

## 0 引言

液体火箭发动机试车的主要目的是验证火箭发动机设计的可行性、工艺结构的可靠性以及考核检验方法的协调性, 对发动机和组合件的性能及固有质量做出有效评价<sup>[1]</sup>。液体火箭发动机试车过程测量参数种类繁多, 动态参数数据采集及处理是整个试车参数测量中的重要组成部分。及

时、准确地掌握发动机试验时振动状态, 分析其变化趋势和规律, 了解发动机振动对发动机本身机械结构和周围环境的影响, 可以为发动机的工作状态评估、发动机机械结构的改进以及发动机本身的性能提供科学系统的监测数据。

影响振动测量系统可靠性的因素很多, 从振动测量系统组成来看, 主要包括振动传感器、测量电缆噪声、测量电缆性能、接插件以及采集系统。这些因素中的接插件, 通过定期打开进行检

收稿日期: 2012-03-23; 修回日期: 2012-05-16

作者简介: 张少博 (1983—), 男, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机试验测量技术

查其可靠性相对比较高, 采集系统由于采用集成化模块其性能和可靠性是以上因素中最高的, 而传感器和测量电缆自身隐含因素较多, 目前现有的规程和方法无法涵盖这些隐含因素, 需要进一步研究新的方法和检测工艺, 研究测量电缆和传感器的可靠性, 进一步提高振动测量系统整体的可靠性。

## 1 振动测量系统

振动测量系统的组成框图如图 1 所示。

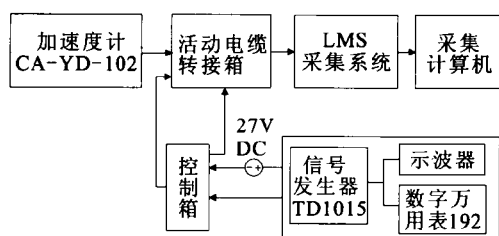


图 1 振动测量系统组成框图

Fig. 1 Block diagram for composition of vibration measurement system

图 1 中, 发动机测点部位振动冲击作用于加速度传感器, 经活动电缆转接箱, 信号传输至 LMS 采集系统进行采集和处理。使用继电器完成信号切换, 通过信号发生器 TD1015 施加正弦波校准信号, 并采用示波器和数据万用表监视信号输出, 最后由采集系统进行数据处理。

## 2 振动测量系统的薄弱环节

对组成振动测量系统的各个环节进行分析, 影响振动测量系统可靠性的薄弱环节主要体现在振动传感器、测量电缆、接插件以及采集系统性能等方面。

### 2.1 振动传感器

目前振动测量系统在用传感器均为压电式传感器, 存在的主要问题有: ①发动机某些部位在试车中冲击幅值较大, 致使在该部位使用的传感器易损坏; ②试车后试车台消防水进入 M5 直径的传感器进口细孔中, 容易发生毛吸现象, 造成

传感器内部电容发生变化等故障; ③传感器使用过程中反复装、卸, 使得传感器外部壳体发生变形或产生凹坑, 易造成传感器损坏。

这些因素的存在都有可能導致传感器灵敏度的变化。振动测量传感器每次使用后都应进行校验, 以确定传感器灵敏度是否发生变化。但现有传感器仅在试车准备过程中发现其噪声偏大或到 1 年校验期满后, 才对其进行重新校验, 造成了传感器测量精度的降低和振动测量系统可靠性的下降。

### 2.2 测量电缆

测量电缆对振动信号的传输、采集、检测以及校验都起重要作用。测量电缆自身仅由单根导线和外围屏蔽层构成, 其延伸距离较长时易受温度和湿度的影响, 对外界电磁干扰信号较敏感, 经过长时间使用后其性能有可能有较大的下降, 难以保证振动信号的有效获得和振动系统整体的可靠性。

### 2.3 接插件和采集系统

在影响振动测量系统薄弱环节中, 接插件通过定期检查更换可确保其较高的可靠性, 采集系统采用集成化模块, 其性能和可靠性是以上因素中最高的, 此外可靠性还与产品的成熟度、工作环境等有关。

## 3 振动测量系统可靠性检测方法

通过分析振动测量系统的薄弱环节, 传感器和测量电缆对系统可靠性影响很大, 且自身可靠性较低, 目前现有的规程和方法尚难以完全弥补, 为此需要进一步研究新的方法和检测工艺, 以提高振动测量系统整体的可靠性。

### 3.1 振动传感器可靠性检测方法

#### 3.1.1 振动传感器电容变化的影响

当压电式传感器的压电元件受外力作用时, 会在压电元件一定方向的两个表面(电极面)上产生电荷: 在一个表面上聚集正电荷, 在另一个表面上聚集等量的负电荷。因此, 可以把压电式传感器看作是一个静电荷发生器, 将其等效为一个电荷源与一个电容相并联的电荷等效电路, 或

等效为一个电压源和一个串联电容表示的电压等效电路如图 2 所示。

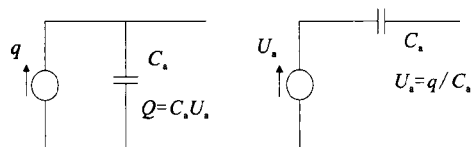


图 2 压电传感器等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagrams of piezoelectric sensor

根据图 2 所示, 将其灵敏度定义为输出电量 (电荷或电压) 与所承受的振动 (或冲击) 加速度的比值。与电压放大器配套使用时需给出压电加速度传感器的电压灵敏度, 与电荷放大器配套使用时需给出电荷灵敏度:

$$\begin{cases} K_Q = \frac{Q}{a} \\ K_u = \frac{u_{sc}}{a} = \frac{Q/C_a}{a} = \frac{K_Q}{C_a} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $K_Q$  和  $K_u$  分别为压电传感器的电荷灵敏度和电压灵敏度;  $Q$  为加速度传感器输出电荷;  $u_{sc}$  为加速度传感器输出电压;  $a$  为振动或冲击加速度;  $C_a$  为加速度传感器电容。

为了进一步分析振动传感器内部电容和其灵敏度的关系, 对试车准备过程中传感器零位噪声偏大的 4 只振动传感器进行验证试验。测量 4 只传感器电容记为  $C_1$ , 四只传感器初始校验时电容记为  $C$ , 传感器零位噪声为  $Z$ , 测量值见表 1 所示。

表 1 传感器零位噪声异常电容数值对比

Tab. 1 Comparison of capacitance values of sensor abnormal noise

传感器编号	零位噪声 $Z/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	初始电容 $C/\text{pF}$	测量电容 $C_1/\text{pF}$
10543	1 200	1 084	2 365
54498	5 300	1 076	6 830
75888	700	1 094	2 300(非稳定值)
54496	180	1 079	1 242

通过表 1 数值对比并结合公式 (1), 可以发现, 传感器灵敏度与内部电容值有着密切关系, 即:

$$C_a = \frac{K_Q}{K_u} \quad (2)$$

倘若  $C_a$  有变化, 就表明传感器灵敏度发生了

变化。假设  $C_a$  允许变化范围为 5%, 对一个电容值为 1 000 pF 的振动传感器, 其电容值的变化在 50 pF 之内, 就可以认定其传感器灵敏度保持稳定, 超过这个范围传感器就需要重新校验。

采用 LCR 表测量传感器电容值, 按表 2 格式记录。

表 2 传感器电容测量表

Tab. 2 Capacitance list of sensors

传感器编号	零位噪声 $Z/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	初始电容 $C_0/\text{pF}$	测量平均电容 $C/\text{pF}$	第 1 次试车 后电容 $C_1/\text{pF}$	第 2 次试车 后电容 $C_2/\text{pF}$	.....	第 $N$ 次试 车后电容 $C_N/\text{pF}$
10493	8	1 080	1 083				
10544	12	1 078	1 083				
10523	11	1 117	1 127				
10527	10	1 085	1 093				
10529	9	1 086	1 093				

### 3.1.2 传感器可靠性检测方法

通过分析传感器电容变化引起灵敏度变化的原因, 对现有传感器检测方法进行改进。目前选择试车传感器时, 先查看传感器使用档案记录, 优先选择无异常输出的传感器, 并进行敲击波形检查, 若波形正常, 则表明此传感器可用。由此选择的传感器在连接活动电缆安装在测振块上时, 经常出现个别传感器输出零位噪声偏大, 如表 1 所示, 其值在  $100 \text{ m/s}^2$  左右或为更大值, 由于传感器已接入系统, 不易进行故障定位, 影响了安装效率, 同时对传感器测振块进行反复装卸会影响其粘性, 干扰了安装进度。

为确认传感器状态, 提高测点安装过程的可靠性, 采取了以下措施: 1) 观察传感器电容值变化; 2) 检查零位噪声范围; 3) 两次敲击确认。

以某次热试车为例, 安装 29 路振动传感器检查出 4 只振动传感器存在零位漂移或噪声较大现象, 及时更换传感器, 提高了安装效率, 时间花费约 3 h。而采用原方法, 安装 29 路传感器时间可能约为 5 h 或更长。通过此改进方法可有效检测传感器可靠性, 缩短安装检查时间, 提高工作效率。

## 3.2 测量电缆可靠性检测方法

### 3.2.1 测量电缆数学模型

为了研究电缆内部各组成参数对电缆性能的影响, 引用如图 3 所示的电缆数学模型。假设电缆的组成材质为均匀分布,  $L$ ,  $C$ ,  $R$  和  $G$  分别为单位长度的单相电感、电容、电线电阻、电线对地漏电阻 (绝缘电阻)。

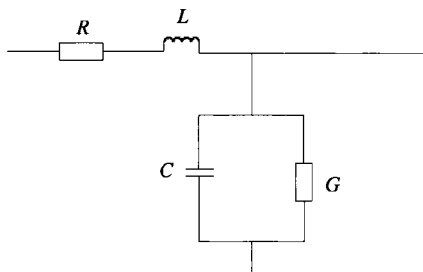


图 3 电缆数学模型

Fig. 3 Mathematical model of measuring cables

图 3 中  $R$  代表电缆材料的欧姆损耗, 电缆上各电阻  $R$  上的压降是串联连接的;  $L$  是磁感应电动势阻止电流变化而产生的自感;  $C$  是模拟导线与屏蔽层之间的电容效应。

根据振动测量规程要求, 测量电缆的选择指标有两个: 电缆阻值和电缆绝缘值。通过测量电缆阻值是否在规定范围来判断电缆是否短路、开路, 并通过测量每一路绝缘电阻值判断电缆绝缘性能。但影响电缆噪声的因素很多, 仅依靠上述两个并不能判断电缆性能的好坏。表 3 是某次未接传感器时测量电缆的绝缘电阻和噪声情况, 可以看出绝缘性能好的未必噪声就大。

表 3 绝缘电阻测量值

Tab. 3 Measured values of insulation resistance

通道号	绝缘电阻/ $\text{M}\Omega$	噪声值/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$
3	200	70
5	300	49
26	400	160
27	7	60

### 3.2.2 测量电缆可靠性检测方法

在电缆数学模型中, 电缆电阻和绝缘电阻仅是该模型的一部分。在实际测量中, 由于电缆电感的存在, 会在电缆中形成寄生电容, 该电容值的大小会在绝缘电阻测量和发动机起动和关机冲击较大时影响电缆中的噪声值, 同时电缆分布电容值的存在会影响实际得到的振动时与波形数值的大小, 具体计算分析如下。

为了保证测量系统的可靠性和精度, 必须对振动传感器和测量仪器进行校准, 包括工作校准和系统校准, 前者由专业计量机构完成, 系统校准通过加载已知标准信号, 得到传感器和测量系统输出记录值与已知信号值对比, 确定参数校准系数。系统校准原理图如图 4 所示。

图 4 中, 继电器激励源加载 27 V 激励电压使前台转接柜中的继电器处于常开状态, 测量系统处于系统校准状态。振动校准信号为正弦波, 常规振动校准信号频率为 1 000 Hz, 8 V; 低频振动校准信号频率为 80 Hz, 1.2 V。

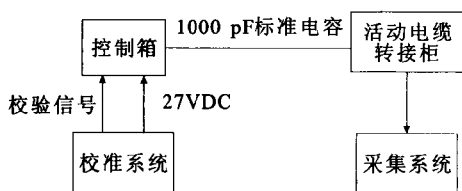


图4 系统校准原理图

Fig. 4 Principle diagram of system calibration

为了深入研究测量电缆分布电容对校准系统的影响,将其校准系统电原理图表示成图5所示的模型,图中测量系统加标准信号源 $U$ ,控制箱前端串联1 000 pF电容 $C$ ,设信号源电缆和采集系统电缆之间电容为 $C_1$ 。依据上述分析可建立以下振动系统校准数学模型,即:

$$q = (C + C_1) \times U \quad (3)$$

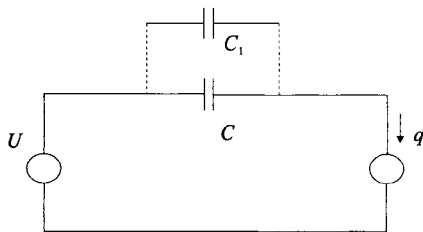


图5 校准系统数学模型

Fig. 5 Mathematical model of calibration system

图5中,加常规标准信号1 kHz, 8V,由公式(3), $C=1\ 000\ \text{pF}$ ,测得 $q=12\ 000\ \text{pC}$ ,求得 $C_1=500\ \text{pF}$ ;加低频标准信号80 Hz, 1.2V,将 $C$ ,  $C_1$ 带入求值,得输出 $q_1=1\ 800\ \text{C}$ ,通过对采集系统信号波形值进行记录,求得 $q_1$ 为1 790 C,与计算结果相符,验证了此模型的正确性。

为了完善测量电缆选择指标并优化电缆性能,提出了选择测量电缆指标性能:静态原则和动态原则。静态原则考虑其电阻值和绝缘值,动态原则主要涉及电缆电容值。动态原则主要考虑电缆电容值,电缆电容值包括电缆寄生电容和分布电容。通常情况下电缆寄生电容很小,可忽略不计,但对有些性能较差的电缆其寄生电容很大,导致在对电缆检查绝缘时对寄生电容充电,

该电缆接入采集系统后其零位噪声值偏大。

由于电缆寄生电容的存在,在试车过程中由于振动而产生的电荷一部分被寄生电容所有,导致实际测得的电荷量偏小,影响了振动测量数据的精度,因此对此类电缆必须将其剔除。

体现振动测量电缆性能好坏的一个主要指标就是电缆噪声,该噪声值的大小一方面反映了电缆数学模型中电缆电阻和绝缘电阻的性能,另一方面也体现了电缆自身电感和分布电容的影响。为此,在试车准备过程中,应对振动测量电缆的静态性能和动态性能指标进行综合考虑,优先选择电阻值适当、绝缘值大、噪声小、电缆电容值小的测量电缆,以此提高振动测量系统的精度和可靠性。

## 4 结论

通过梳理振动测量系统的薄弱环节,理论证明传感器电容变化引起灵敏度变化,并对测量电缆和校准系统建立了数学模型,在此基础上提出可靠性检测相关方法,并在试车中得到了验证。此方法可有效提高振动测量系统的可靠性,为试车提供强有力的技术保障。

### 参考文献:

- [1] 郭霄峰. 液体火箭发动机试验[M]. 北京: 宇航出版社, 1990.
- [2] 强锡富. 传感器[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [3] 陈海峰. 振动测量误差影响因素分析[J]. 火箭推进, 2011, 37(1): 62-64.
- [4] 任红磊, 邵新慧. 加速度计高频振动校准中的相关问题[J]. 振动、测试与诊断, 2002, 22(4): 250-253.
- [5] 徐峰. 发动机热试车数据测量误差分析及处理方法[J]. 火箭推进, 2012, 38(4): 72-75.
- [6] 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.
- [7] 张令弥. 振动测试与动态分析[M]. 南京: 航空工业出版社, 1992.
- [8] 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.

(编辑: 王建喜)