

# 空气加热器振动信号的测量与处理研究

章 萌, 张增利, 唐云龙

(西安航天动力试验技术研究所, 西安 710100)

**摘要:** 针对火箭发动机试验中某加热器振动信号的测量和处理问题, 首先在加热器某测点上冗余配置了两种不同型号的加速度计, 完成了其振动加速度信号的测量; 之后, 基于 MATLAB 编程方法实现了加热器振动加速度信号消除趋势项和平滑预处理, 通过对两种预处理结果的分析, 得到了最终合理的振动加速度信号; 最后, 将振动加速度信号进行了频域二次积分解析运算, 得到了其振动位移量信号; 试验结果验证了信号测量的可靠性和处理结果的有效性和准确性, 从而为加热器振动状况的分析提供了全面、可靠、准确的数据依据。

**关键词:** 空气加热器; 振动信号; 测量; 信号预处理; 振动位移

## Study on Measurement and Processing of Vibration Signal for Air Heater

Zhang Meng, Zhang Zengli, Tang Yunlong

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

**Abstract:** In order to resolve the vibration signal measurement and processing problem of the air heater in the rocket engine test, firstly, the measurement of the vibration acceleration signal was realized by using redundant configuration with two different accelerators. Secondly, the eliminating polynomial trend item and data smoothing pre-processing of the vibration acceleration signal was realized based on MATLAB programming method and then the final reasonable vibration acceleration signal was selected by analysis and comparing. At last, the vibration displacement signal was obtained by the quadratic integral analytic calculation in frequency domain. The test results verify the effectiveness and accurate of the measurement method and processing results and supply the credible, comprehensive and accurate vibration signal data for the analysis of the air heater.

**Keywords:** air heater; vibration signal; measurement; signal pre-processing; vibration displacement

## 0 引言

在火箭发动机模拟环境来流试验中, 为了能够模拟来流空气条件, 需要建立相应的来流模拟设备, 空气加热器由于可以提供相应的来流条件, 因而成为模拟环境来流试验的关键设备。目前, 国内外常见的空气加热器包括电弧加热器、蓄热加热器、激波加热器以及燃烧加热器等<sup>[1]</sup>。燃烧型空气加热器由于成本较低、启动迅速、运行时间长以及可提供高焓、高压的来流条件而得到了广泛的应用<sup>[2]</sup>。

某燃烧式空气加热器是为进行模拟临近空间高速来流环境下火箭发动机试验而专门研制的, 在试验中需要测量并处理加热器的振动信号以监测和评估其健康状况。由于该加热器属于新研制产品, 因此, 对于其振动信号的测量与处理, 面临着信号测量可靠性和准确性要求高、信号处理类型多、信号处理要求高、处理量大等问题。

为此, 本文研究了火箭发动机模拟环境来流试验空气加热器振动信号的测量与处理, 解决了振动加速度信号的可靠、准确测量、信号的预处理以及振动位移量的解析计算等问题。

## 1 研究思路

对于加热器振动信号的测量, 面临的首要问题就是传感器的选型, 如果传感器选型错误或不当, 就无法保证测量的准确

性和可靠性。由于该加热器工作时振动加速度的大小没有明确的理论参考值, 为保证测量的可靠性和准确性, 试验时在某一测点将传感器进行非相似冗余配置, 选用两种不同型号的加速度计进行振动加速度的测量。

在使用 LMS 采集系统进行振动信号测量时, 由于受到各种干扰因素的影响, 使得采集到的原始信号往往呈现出非线性、非平稳性和非光滑性等特性, 并且信号会偏离基线, 甚至偏离基线的幅度是时间的函数。偏离基线随时间变化的整个过程被称为信号的趋势项。趋势项的存在会给后续的分析带来较大的误差甚至错误。同时, 由于随机干扰信号频带宽、高频成分有时占比例大, 使得原始振动信号的时间历程曲线呈现大范围的毛刺, 需要进行平滑处理, 以削弱或消除干扰信号, 提高信噪比和曲线的光滑度。因此, 在振动信号分析前需要对采集到的原始信号进行消除趋势项和平滑预处理。此外, 加热器振动位移信号也是其振动信号分析中的一个重要的物理量。由于该试验只使用加速度计测量振动加速度信号, 因而无法直接测量振动位移信号。但是加速度信号和位移信号存在二次积分的解析关系, 因此, 可以由振动加速度信号通过二次积分运算得到振动位移信号。

由上, 本文的研究流程如图 1 所示。首先在加热器某测振块上背靠背安装两种不同型号的加速度计完成加速度信号的测量。进而基于 MATLAB 编程将实测的时域信号分别进行消除趋势项和平滑预处理, 通过分析比较选出该测点最终真实的加速度信号。最后将时域加速度信号经过傅里叶变换 (FFT) 为频域信号并在频域内进行二次积分运算, 再经过傅里叶逆变换 (IFFT) 得到了振动位移的时域信号。

收稿日期: 2014-02-06; 修回日期: 2014-03-30。

作者简介: 章 萌(1982-), 男, 山东淄博人, 工程师, 主要从事液体火箭发动机试验测控技术等方向的研究。

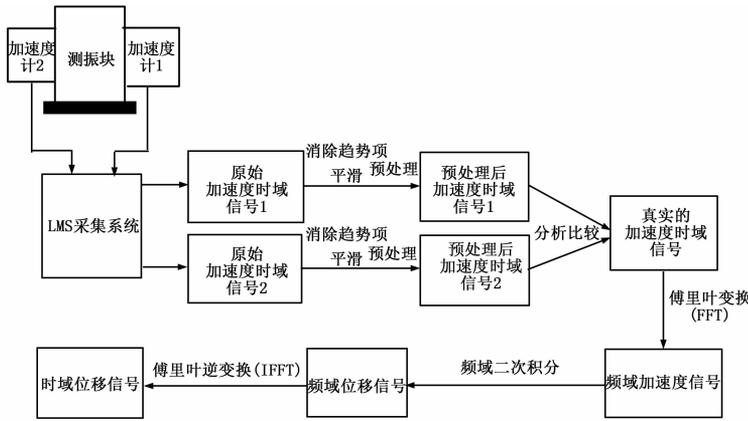


图 1 研究流程图

## 2 算法原理

### 2.1 消除趋势项算法

常用的消除趋势项的算法是多项式最小二乘法，该算法以最小二乘法为基础，把信号数据的曲线分成一段或适当的几段，分别对各段样本求其数学期望，然后将各个数学期望值用多项式拟合成趋势项曲线，减去趋势项曲线从而消除趋势项。该算法原理如下：

振动原始信号数据为  $\{x_k\} (k = 1, 2, 3, \dots, n)$ ，由于采样数据是等时间间隔的，为简化起见，令采样时间间隔  $\Delta t = 1$ ，设一个多项式函数：

$$\hat{x}_k = a_0 + a_1 k + a_2 k^2 + \dots + a_m k^m \quad (1)$$

确定函数  $\hat{x}$  的各待定系数  $a_j (j = 0, 1, \dots, m)$ ，使得函数  $\hat{x}$  与离散数据  $x_k$  的误差平方和为最小，即：

$$E = \sum_{k=1}^n (\hat{x}_k - x_k)^2 = \sum_{k=1}^n \left( \sum_{j=0}^m a_j k^j - x_k \right)^2 \quad (2)$$

满足  $E$  有极值的条件为：

$$\frac{\partial E}{\partial a_i} = 2 \sum_{k=1}^n k^i \left( \sum_{j=0}^m a_j k^j - x_k \right) = 0 \quad (i = 0, 1, \dots, m) \quad (3)$$

依次取  $E$  对  $a_i$  求偏导，可以产生一个  $m + 1$  元线性方程组：

$$\sum_{k=1}^n \sum_{j=0}^m a_j k^{j+i} - \sum_{k=1}^n x_k k^i = 0 \quad (i = 0, 1, \dots, m) \quad (4)$$

解方程组，求出  $m + 1$  个待定系数  $a_j (j = 0, 1, \dots, m)$ ，就可以得到多项式函数  $\hat{x}$ ，则消除趋势项的计算公式为：

$$y_k = x_k - \hat{x}_k \quad (k = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (5)$$

当  $m = 0$  时，趋势项为常数即信号采样数据的算术平均值；当  $m = 1$  时，趋势项为线性趋势项；当  $m \geq 2$  时为曲线趋势项。在实际振动信号数据处理中，通常取  $m = 1 \sim 3$  来对数据进行消除趋势项处理。

### 2.2 数据平滑算法

常用的数据平滑算法有直线滑动平均法、五点三次平滑法等。五点三次平滑法可以减小混入时域振动信号的高频随机噪声，因此，本研究采用该方法进行数据平滑处理。

五点三次平滑法是在等间距数值的基础上利用最小二乘法对离散数据进行三次最小二乘多项式平滑处理，其计算公式为：

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= \frac{1}{70} [69x_1 + 4(x_2 + x_4) - 6x_3 - x_5] \\ y_2 &= \frac{1}{35} [2(x_1 + x_5) + 27x_2 + 12x_3 - 8x_4] \\ &\vdots \\ y_i &= \frac{1}{35} [-3(x_{i-2} + x_{i+2}) + 12(x_{i-1} + x_{i+1}) + 17x_i] \\ &\vdots \\ y_{m-1} &= \frac{1}{35} [2(x_{m-4} + x_m) - 8x_{m-3} + 12x_{m-2} + 27x_{m-1}] \\ y_m &= \frac{1}{70} [-x_{m-4} + 4(x_{m-3} + x_{m-1}) - 6x_{m-2} + 69x_m] \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

由公式 (6) 可以看出，处理后的数据  $y_i$  只与处理前的  $x_i$  及其前后共 5 个数据有关，所以只要等采样速率等时间间隔的数据都可以用该方法来处理。

### 2.3 振动信号的频域二次积分算法

对于振动信号的积分运算，既可以在时域内完成，也可以在频域内完成。频域积分可以结合滤波进行，计算速度快，在振动试验领域应用较多。

振动加速度信号的频域二次积分运算的基本原理是：首先将振动加速度的时域信号作快速傅里叶变换 (FFT)，将信号变为频域信号，然后在频域内进行二次积分运算，得到振动位移的频域信号，最后再进行傅里叶逆变换 (IFFT) 得到振动位移的时域信号。

频域二次积分的数值计算公式为：

$$y(r) = \sum_{k=0}^{N-1} -\frac{1}{(2\pi k \Delta f)^2} H(k) X(k) e^{\frac{j2\pi k r}{N}} \quad (7)$$

$$\text{其中: } H(k) = \begin{cases} 1 & f_d \leq k\Delta f \leq f_u \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

式中， $f_d$  和  $f_u$  分别为下限和上限截止频率； $\Delta f$  为频率分辨率； $X(k)$  为离散信号数据  $\{x(r)\} (r = 0, 1, 2, \dots, N)$  的傅里叶变换； $H(k)$  为频率截断函数，该函数实际上为一个滤波器，可以滤除不感兴趣的频段的信号。

## 3 应用算例与分析

某次试验中，在加热器出口法兰测振块上，沿气流方向背靠背分别安装一个江苏联能电子技术有限公司生产的 CA-YD-128A 和 CA-YD-126 加速度计进行振动加速度的冗余测量，测振块和加速度计的安装位置如图 2 所示。使用 LMS 振动采集系统进行振动加速度信号的采集，采样速率为 51.2 kHz。



图 2 测振块和加速度计的安装位置

测量到的两组振动加速度信号的时间历程图如图 3 所示，其中：图中 0 s 代表加热器开始工作的时间。

由图 3 可以看出，由两种加速度计测得的振动加速度都非

[4] Jonathan S. Smith. The Local Mean Decomposition and Its Application to EEG Perception Data [J]. Journal of the Royal Society Interface, 2005, 2 (5): 443-454.

[5] 程军圣, 张 亢, 杨 宇, 等. 局部均值分解与经验模式分解的对比研究 [J]. 振动与冲击, 2009, 28 (5): 13-16.

[6] 张 亢, 程军圣, 杨 宇. 局部均值分解方法中乘积函数数据问题研究 [J]. 振动与冲击, 2011, 30 (9): 84-88.

[7] Huang N E, Wu Z H, Long S R, et al. On Instantaneous Frequency [J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1 (2), 177-229.

[8] Cheng J S, Yu D J, Yang Y. Energy Operator Demodulating Approach Based on EMD and Its Application in fault diagnosis [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40 (8): 115-118.

[9] 束洪春, 田鑫萃, 董俊利, 等. 利用电压相关性的 800 kV 直流输电线路区内外故障判断方法 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (4): 151-160.

[10] 林 达, 王慧芳, 何奔腾, 等. 基于波形相关性的带并联电抗器线路永久性故障判别方法 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37 (16): 80-84.

(上接第 2032 页)

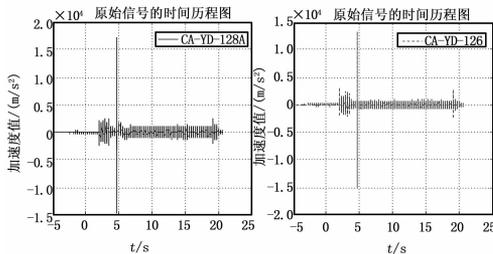


图 3 振动加速度的原始信号的时间历程图

常大, 在 4.511 s 分别达到  $17\ 190\ \text{m/s}^2$  和  $15\ 240\ \text{m/s}^2$ , CA-YD-128A 加速度计已经超量程使用, 并且由其测得的加速度信号在 4.511 s 后出现明显的趋势项。这说明原始信号中肯定含有较大的干扰信号和趋势项, 因此, 需要对其进行消除趋势项和平滑预处理。

对振动原始信号分别进行消除趋势项和 10 次五点三次平滑处理, 得到预处理后的信号的时间历程图如图 4 所示。

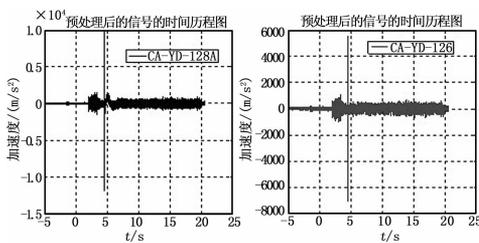


图 4 预处理后的振动加速度信号的时间历程图

由图 4 可看出, 由 CA-YD-126 加速度计测得的信号经过预处理后, 信号质量得到了很好的改善, 滤除了原始信号中较大的干扰和毛刺, 振动加速度值在一个合理的范围内, 时间历程图曲线也比较平滑, 从图中可以较好地观察振动加速度的变化趋势。由 CA-YD-128A 加速度计测得的信号经过预处理后虽然信号质量得到了一定的改善, 但从时间历程图中看出信号仍然含有一段趋势项, 趋势项出现在最高振幅之后, 表明该加速度计在超量程使用时会对测量数据的准确性产生较大影响。这说明 CA-YD-128A 加速度计作为通用振动冲击类加速度计不适合加热器振动信号的测量, 而 CA-YD-126 加速度计作为高冲击振动类加速度计则适合。因此, 经分析比较, 应当把由 CA-YD-126 加速度计测得并经预处理的振动信号作为该测点最终真实、可靠的振动加速度信号。

将该测点最终的振动加速度信号进行二次积分运算, 得到

的振动位移信号的时间历程图如图 5 所示。从图中可以看出, 经过解析计算得到的振动位移的变化趋势与振动加速度的变化趋势基本一致, 也能够较好地反映出该测点的振动趋势, 为加热器振动状况的分析提供了全面、合理的依据。

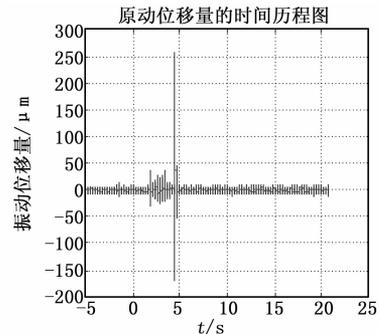


图 5 振动位移信号的时间历程图

### 4 结论

研究了某空气加热器振动信号的测量与处理。通过加速度计的非相似冗余配置、振动加速度信号的消除趋势项、五点三次平滑预处理和振动位移量的二次积分解析计算, 完善了加热器振动测量与处理的方法, 提高了加热器振动信号测量与处理的可靠性和准确性, 从而为加热器振动情况和健康状况的分析提供了较为真实、可靠的振动信号。此外, 传感器非相似冗余配置和振动位移量的解析计算还较好地体现出了硬、软件冗余的思想。因此, 本研究具有一定的理论价值和实际意义。

### 参考文献:

[1] Chang X, Chen L, Yu G, et al. Development of the facility for model scramjet testing [R]. AIAA, 2001-1857, 2001.

[2] 冯军红, 沈赤兵, 赵 芳. 液氧与气氧对空气加热器燃烧流场的影响分析 [J]. 国防科技大学学报, 2012, 34 (4): 43-48.

[3] 王 济, 胡 晓. MATLAB在振动信号处理中的应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.

[4] 孙苗钟. 基于 MATLAB的振动信号平滑处理方法 [J]. 电子测量技术, 2007, 30 (6): 55-57.

[5] 肖立波, 任建亭, 杨海峰. 振动信号预处理方法研究及其 MATLAB实现 [J]. 计算机仿真, 2010, 27 (8): 330-333, 337.

[6] 门日秀, 赵荣珍. 机械振动信号远程测试与处理技术的研究 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (6): 1055-1057.

[7] 陆伟东. 基于 MATLAB的地震模拟振动台试验的数据处理 [J]. 南京工业大学学报 (自然科学版), 2011, 33 (6): 1-4.