

激光脉冲法背温信号中噪声信号的滤除方法

辛春锁 何小瓦 杨 阳

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

文 摘 针对激光脉冲法背温信号中存在的噪声干扰,通过频谱分析确定了噪声信号的频率范围,设计了相应的 FIR 数字滤波器,并对滤波后存在的残留噪声进行了递推平滑滤波。滤波前后的数据对比表明,该方法能有效滤波背温信号中的噪声。

关键词 FIR 滤波器,激光脉冲法,滤波,背温信号

Method of Signal Noise Filter in Rear Surface Temperature Curves With Laser Pulse Method

Xin Chunsuo He Xiaowa Yang Yang

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology ,Beijing 100076)

Abstract With respect to the noise interference in rear surface temperature curves with laser pulse method, frequency range of noisy signal was ascertained through frequency analysis method, a corresponding FIR filter is designed to reduce the noise interference in rear surface temperature curves, and a recursive smoothing filter was used to reduce residual noise. The compared results before and after filtering show the method is effective to reduce the noise interference in rear surface temperature curves with laser pulse method.

Key words FIR filter, Laser pulse method, Filter, Rear surface temperature curves

0 引言

对激光脉冲法测量系统来说,如何消除背温信号中的噪声干扰是一个关键的技术问题。虽然有些研究人员在模拟信号放大器的基础上设计了高速低通滤波器,并在电子器件的整体布局、测量设备壳体材料的选择及结构设计等方面做了多种抗干扰措施,但直流电源、真空泵和脉冲激光器等大功率用电设备仍可通过电磁耦合等途径对背温信号测量装置进行噪声干扰,因此如何滤除测试数据中的噪声信号仍是一个亟待解决的问题。与模拟滤波器相比,数字滤波器在体积、质量、精度、稳定性、可靠性、存储功能、灵活性以及性价比等方面都具有明显的优势。数字滤波器除利用硬件电路实现之外还可借助计算机以软件编程方式实现。正因为这些特点,数字滤波器才在信号处理和信号传输等领域得到日益广泛的应用。本文在对背温信号做频谱分析的基础上,设计了一个低通 FIR 数字滤波器,并用递推平滑滤波的方法对滤波后的数据进行平滑处理。

1 信号频谱分析

信号分析的一个最基本的方法是把频率作为信

号的自变量,在频域里进行信号的频谱分析。对于激光脉冲法中试样背面的温升信号来说,它随时间变化归一化后的函数表达式为^[1-2]:

$$V(t) = \frac{T(t)}{T_{\max}} = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp\left(-n^2 \frac{t}{t_0}\right) \quad (1)$$

式中, $T(t)$ 是试样后表面($x=L$)在 t 时刻的温度; T_{\max} 是试样后表面的最大温升; $t_0 = (L/\pi)^2 \alpha^{-1}$,是一个热脉冲通过试样全长所需的时间,称为特征时间; L 是试样的厚度; α 是热扩散率。

由于常数项不随时间变化,因此可将式改写为:

$$V'(t) = V(t) - 1 = 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp\left(-n^2 \frac{t}{t_0}\right) \quad (2)$$

由于闪光法实验过程都是在 $t=0$ 时刻开始,因此在 $(0, +\infty)$ 范围内对(2)式进行傅里叶变换,可得 $V'(t)$ 函数的频域计算表达式:

$$H(\omega) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{1}{n^2/t_0 + j\omega} \quad (3)$$

由于被测试样的特征时间与频率响应成反比,而

特征时间与被测试样的厚度成正比、与热扩散率成反比,因此根据(3)式可计算出被测试样的最大频响特性曲线,图1所示为SRM 8424标样的频响特性曲线,不同标样的最大频响特性曲线如表1所示,试样厚度和热扩散率参数采用的是NIST推荐值,此时的热扩散率有最大值。

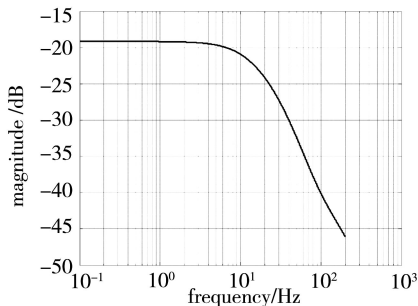
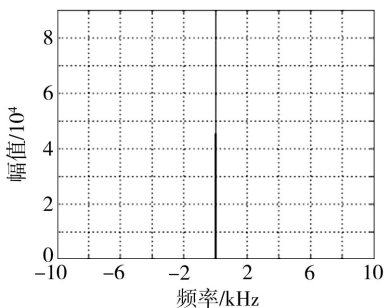


图1 SRM 8424的频响特性曲线

Fig.1 Frequency-magnitude curve of SRM 8424



(a) 整体频谱分析

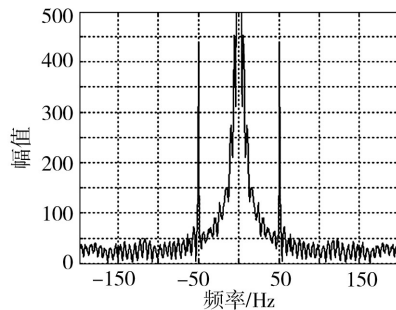
表1 标样的最大截止频率¹⁾

Tab.1 Maximum over frequency of standard specimen

试样	α /mm ² s ⁻¹	T /K	L /mm	t_0 /s	M_0 /dB	f_0 /Hz
SRM 8424	16.9	973	3.34	0.067	-22.15	14.1
Stainless Steel SRM 1461	5.46	1123	2.50	0.116	-14.39	8.08
Pyrocream 9606	1.02	973	1.32	0.174	-13.89	5.36

注1): M_0 为截止幅值; f_0 为截止频率。

实际测试信号的频谱响应曲线可通过离散傅里叶变化得到。从图2中可以看出,信号中的干扰源主要集中在50 Hz这一频率范围,结合前面的分析,就可以确定需要使用的是一个低通滤波器,它的上限截止频率应小于50 Hz。



(b) 局部放大效果图

图2 实际数据的频谱分析曲线

Fig.2 Frequency-magnitude curves of measured data

2 FIR 低通数字滤波器的设计

从实现的网络结构或者从单位脉冲响应的角度来说,数字滤波器可以分为无限脉冲响应(IIR)滤波器和有限脉冲响应(FIR)滤波器。IIR 滤波器具有存储单元少、运算次数少、高效经济等优点,可以用较少的阶数获得较高的选择特性。而 FIR 数字滤波器很容易获得严格的线性相位特性,避免被处理的信号产生相位失真。另外,它不会发生“阻塞”现象,可以避免强信号淹没弱信号,适于处理强弱信号相差悬殊的情况。由于背温信号曲线不仅要反映温度的变化趋势,而且对时间的要求非常高,否则会产生系统误差,影响最后测量结果的准确性,因此本文选用具有严格线性相移的 FIR 滤波器。

目前,设计 FIR 数字滤波器的方法有窗口法、模块法、频率抽样法等。本文采用窗口法设计有限冲激响应数字滤波器^[1,3]。

进行滤波器设计时通常都给定阻带衰减、带内波动和过度带宽或冲击响应宽度 N 等频域技术指标,设计任务的实质是寻找 $h(n)$,使所得的 $H(j\omega) =$

$$\sum_{n=0}^{N-1} h(n) \exp(-j\omega n) \text{ 无限逼近于滤波器的频率响应}$$

函数 $H_D(j\omega)$ 。

对 $H_D(j\omega)$ 做傅里叶反变换的计算公式为:

$$h_d(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} H_D(j\omega) \exp(j\omega n) d\omega \quad (4)$$

若 $H_D(j\omega)$ 具有简单的特性,可以用解析法求解(4)式的积分,否则可先用快速傅里叶变换法求 $h_d(n)$ 的数值解,然后选择适当的窗口序列 $w(n)$,截取 $h_d(n)$ 而得到 $h(n)$,即 $h(n) = h_d(n) \times w(n)$,并使 $H(j\omega)$ 去逼近 $H_D(j\omega)$ 。一般情况下, $h_d(n)$ 为无限长非因果序列,为了得到对称的有限长序列 $h(n)$,需将 $h_d(n)$ 右移 $\alpha = (N-1)/2$ 后再截取得 $h(n)$ 。

对于适应性强的凯塞窗设计 FIR 数字滤波器,它的函数表达式为:

$$w(n) = \frac{I_0(\beta \sqrt{1 - [2n/(N-1) - 1]^2})}{I_0(\beta)}, 0 \leq n \leq N-1 \quad (5)$$

式中, β 是控制窗函数形状的参数,通常情况下 β 越大, $w(n)$ 窗越窄,频谱的旁瓣越小,但主瓣也相应加宽。 β 值变化时对凯塞窗各参数的影响如表2所示。 β 的典型值为 $4 \leq \beta \leq 9$ 。 $I_0(x)$ 是第一类修正零阶贝塞尔函数,可用级数表示为:

$$I_0(X) = 1 + \sum_{K=1}^{\infty} \left[\frac{(X/2)^2}{K!} \right]^2 \quad (6)$$

表 2 凯塞窗 β 参数的影响

Tab.2 Influence of Kaiser function β parameter

β	最大旁瓣电平/dB	阻带最小衰减/dB	主瓣宽度归一化系数
2.120	-18.68	-30	1.50
3.384	-24.30	-40	2.23
4.538	-34.31	-50	2.93
5.658	-41.70	-60	3.62
6.764	-49.17	-70	4.32
7.865	-57.07	-80	5.00
8.960	-65.65	-90	5.70
10.056	-74.60	-100	6.40

3 数据平滑滤波

由于经过处理的信号依然有一些噪声,因此需要对数据进行平滑处理,实际上就是再次对数据进行滤波。常用的数字平滑方法有限幅滤波、中值滤波、算数平均滤波、一阶滞后滤波、滑动平均滤波等方法。由于滑动平均滤波对周期性干扰有良好的抑制作用,平滑度高,适用于高频振荡的系统,因此采用了递推滑动平均的滤波方法^[4-5]。

若将滤波队列长度 l 设定为一个噪声干扰周期为 r 的采样点数,具体计算公式为:

$$l = f \times r + 1 \quad (7)$$

式中, f 为采样周期,加 1 是使得到的滤波队列长度为奇数,便于计算滤波后采样点对应的的时间。

根据滑动平均滤波法的定义,滤波后的平均值计算公式为

$$x'_n = \frac{x_n + x_{n+1} + \dots + x_{n+l}}{l}, n = 1, 2, \dots, m - l + 1 \quad (8)$$

式中, m 是采样点总数; n 是滤波队列起点的序号。

显然,经过一次滤波后,数据总数减少了 $(l-1)$ 个,但由于每次滤波平均值对应的的时间等于滤波队列中点的时间,因此滤波后数据点之间的时间间隔并没有改变。滤波后的平均值与原始数据的时间对应关系为:

$$t = t(x'_n) - t(x_n) = \frac{l-1}{2} \times \frac{1}{f} \quad (9)$$

只要根据(9)式将滤波后数据的时间坐标向后平移 t 时刻,则队列前后的数据分别减少了 $(l-1)/2$ 个,但由于每次实验都要采集几万个数据,因此去除一些没有实际意义的数据并不会对整个实验数据的正确性以及后续处理的可行性产生影响。数字滤波后得到的曲线与原始数据的对比如图 3 所示。从图

3 中可以看出,滤波前的数据存在一定频率的干扰,并且这个干扰是在各时间段都存在的,经滤波后的数据曲线就变得平滑了,与原始曲线的一致性较好,并且没有出现相位差,这说明这种滤波方法是正确有效的。

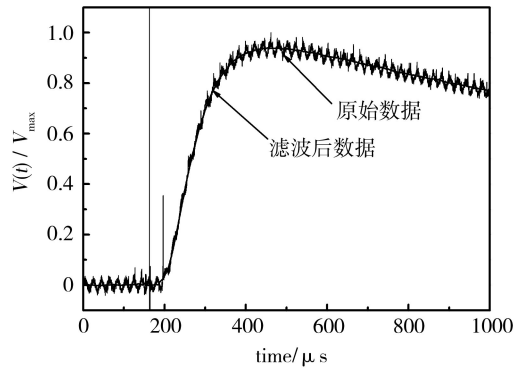


图 3 滤波前后的背温信号曲线

Fig. 3 Rear surface temperature curves before and after filtering

4 结论

通过对激光脉冲法中背温信号的频谱分析,确定了测试信号中的干扰噪声主要集中在 50 Hz 谱段,设计了基于凯塞窗的 FIR 低通数字滤波器,采用递推滑动平均的滤波方法对滤波后的残留噪声进行了滤除。滤波前后的数据对比表明,滤波后的数据曲线平滑度很高,整个曲线没有失真,达到了预期的目的。但背温信号中激光器触发瞬间产生的高频干扰是判断测量试验开始与否的重要依据,采用低通滤波器对这一有用信号也产生的一定影响,因此如果采用能够滤除 50 Hz 至激光器高频干扰这一频段的带阻滤波器进行滤波,必然会进一步提高激光脉冲法的测量精度,这是今后须开展的主要工作。

参考文献

- [1] Lutovac M D, Tošić D V, Evans B L, 著,朱义胜,董辉,等译. 信号处理滤波器设计——基于 Matlab 和 Mathematica 的设计方法[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 301-349
- [2] Araki N, Baba T, Ohta H, et al. Thermal diffusivity measurements of refractory metals as candidate reference materials by the laser flash method[J]. Int. J. Thermophys., 2005, 26 (6): 1873 - 1881
- [3] Proakis J G, Manolakis D G, 著. 方艳梅, 刘永清, 等译. 数字信号处理. 第四版[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 488-492
- [4] 赵明. 激光脉冲法热扩散率测试系统研制[D]. 北京航空航天大学, 2005: 40-41
- [5] Baba T, Ono A. Improvement of the laser flash method to reduce uncertainty in thermal diffusivity measurements [J]. Meas. Sci. Technol., 2001, 12: 2046-2057

(编辑 李洪泉)