

经验模态分解火箭发动机多界面粘结检测特征信号提取技术

马媛¹ 陈友兴¹ 李鹏² 王召巴¹ 金永¹

(1 中北大学信息与通信工程学院, 太原 030051)

(2 西安近代化学研究所, 西安 710065)

文 摘 针对固体火箭发动机在存放期间粘结界面的易出现脱粘的情况,采用超声纵波对其一二界面粘结质量进行检测,得到的二界面脱粘缺陷回波信号通常混叠了一界面多次反射透射的信号,无法与一界面粘结信号区分。为了区分不同界面回波信号,选用EMD(经验模态分解)对回波信号分解,并根据相关性系数得到信号主导作用模态分量,提取其检测信号幅度特征,得到界面粘结情况,再根据时间确定粘结位置是一界面还是二界面。结果表明:通过EMD对超声回波信号的特征提取可以实现固体火箭发动机界面最小直径为4 mm的脱粘缺陷检测,同时有效地降低分析计算的数据量,为固体火箭发动机粘结检测提供一定基础。

关键词 信号处理,火箭发动机,粘结质量,EMD特征提取

中图分类号:TB559

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2021.01.015

Characteristic Signal Extraction Technology for Multi-interface Bonding Detection of Rocket Motor Based on Empirical Mode Decomposition

MA Yuan¹ CHEN Youxing¹ LI Peng² WANG Zhaoba¹ JIN Yong¹

(1 School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051)

(2 Xi'an Institute of Modern Chemistry, Xi'an 710065)

Abstract Since the solid rocket motor interface bonding is prone to debonding during its storage, ultrasonic longitudinal wave is used to detect the bonding quality of the first and second interfaces, the second interface debonding defect signals are usually mixed with multiple reflection and transmission signals of the first interface, resulting in that it cannot be distinguished from the bonding signal of the interface. To distinguish the echo signals of different interfaces, EMD (Empirical Mode Decomposition) is first used to decompose the echo signal and get the dominant modal component of the signal according to the correlation coefficient, then the interface bonding situation is obtained by extracting amplitude characteristics of the detected signal, finally, whether the bonding position is the first interface or the second interface can be determined according to the time. The results show that the features of ultrasonic echo signals extracted by EMD can realize the detection of debonding defects with a minimum diameter of 4mm in the solid rocket motor interface, besides, EMD can reduce the data quantity of analysis and calculation effectively, providing a certain basis for solid rocket motor bonding detection.

Key words Signal processing, Rocket motor, Bonding quality, EMD feature extraction

0 引言

固体火箭发动机由钢壳体、绝热层和推进剂粘结而成^[1-3]。粘结过程中,不同材料的性能也完全不同,加之在存放期间,周围环境温度等的变化,使得粘结不再牢靠甚至粘结界面的出现脱粘,进而导致火箭发动机

的燃烧面积发生变化,影响飞行轨迹,甚至发生爆炸^[4-7]。因此对火箭发动机粘结质量的检测变得尤为重要。

超声检测因其操作简单,成本低等优势被广泛应用于火箭发动机的粘结质量检测。由于其绝热层材料成分复杂,超声信号的衰减很大,超声波在壳体

收稿日期:2020-10-11

基金项目:山西省自然科学基金(201801D12115)

第一作者简介:马媛,1995出生,硕士研究生,研究方向超声检测及信号处理技术。E-mail:2553902009@qq.com

通信作者:陈友兴,1979出生,教授,主要从事自动检测技术、信号与信息处理、成像与重建技术等方面的研究工作。E-mail:cyszbdx@163.com

中的多次反射会造成二界面回波被淹没在壳体反射波中,增加多界面粘结质量超声检测难度,因此需要对超声回波信号进行信号处理。

国内不少学者针对粘结强度超声检测表征困难的现象^[8],利用等效模型推导超声波检测多层粘结结构的反射透射表达式,为粘结强度的无损检测提供理论依据;还有专家针对固体火箭发动机粘结结构回波信号混叠严重的现象^[9],提出对回波信号进行小波变换,提取各个频段的能量作为特征,为分析界面的粘结缺陷提供依据。前者只是研究钢、铅金属粘结结构,并没有研究绝热层等复合材料的粘结强度对超声检测影响,后者需要分析多个不同频带能量进行对比,分析数据量大。

本文利用超声纵波检测火箭发动机多界面粘结质量,获取回波信号,二界面粘结回波信号混叠严重,一二界面回波特征难分辨,进行经验模态分解(EMD)信号处理,主要特征分量突出信号回波幅值特征,大大减少分析数据量,同时根据时间得到粘结位置信息,实现多界面粘结质量检测。

1 超声纵波检测发动机多界面粘结质量

1.1 纵波检测原理

纵波检测根据回波能量判断界面粘结与否,采用直探头进行检测,在传播过程当中没有任何波形转换和角度的变化,界面的反射率和透射率只和材料有关。钢板声阻抗 $4.5 \times 10^7 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$, 空气为 $4 \times 10^2 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$,当界面脱粘,即超声波在空气当中传播,反射率接近1且为负,也就是超声波几乎全反射,方向则与入射方向正好相反,而透射率几乎为0,如图1所示。

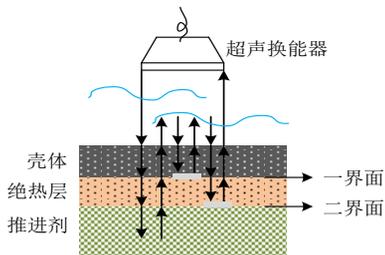


图1 纵波检测发动机界面粘结原理图

Fig. 1 The schematic diagram of the motor interface bonding detection by longitudinal wave

界面发生脱粘,不再有透射回波,反射回波能量明显高于粘结良好,因此根据接收反射回波能量可以判断各界面粘结质量。

1.2 超声检测多界面粘结实验

粘结的试件与真实火箭发动机材料厚度一致。其中钢壳体厚5 mm,绝热层1.6 mm,推进剂2 mm,一界面粘结层预埋直径为4 mm、5 mm的脱粘缺陷,二界面粘结层预埋直径为4 mm、6 mm的脱粘缺陷。

为了减小了耦合剂带来的超声换能器始波与回波混叠,采用水浸法对试件进行纵波检测,合适的水距使得超声换能器始波与信号回波分离。选用直径为10 mm,频率为2.5 MHz的水浸式超声换能器,超声采集卡连接PC端,50 MHz采样并显示检测结果。

选取超声换能器垂直入射至试件检测,典型A-Scan信号如图2所示。

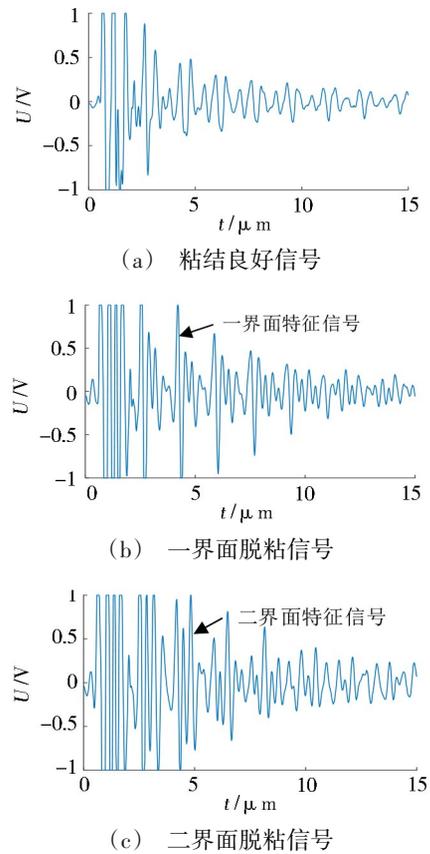


图2 界面粘结质量检测回波信号
Fig. 2 The echo signal of interface bonding quality detection

分析信号回波得知:超声换能器发射的窄脉冲进入火箭发动机以后回波出现重叠,幅值不再完全同步,根据纵波检测原理,当粘结界面出现脱粘时,没有透射信号进入下一层,相对于粘结良好时信号回波的能量高即信号幅值大,图中4.22 μs 处,一界面脱粘信号相对粘结良好界面信号回波幅值区分度为41.2%,可以根据信号幅度区分粘结状态,实现对任意直径预埋缺陷的检测;在4.86 μs 处,二界面脱粘信号相对粘结良好界面信号回波幅值区分度为49.1%,实现对预埋缺陷的检测,但经火箭发动机绝热层后的二界面脱粘信号衰减严重,界面反射信号混迭在壳体多次反射回波信号当中,无法与一界面脱粘信号区分,需进一步处理,以便于脱粘界面回波信号的识别。

2 基于EMD的超声回波信号分析

2.1 EMD分解及相关性原理

EMD作为新型自适应信号时频处理方法,非常适合超声检测回波信号——非线性非平稳信号的处理。通过EMD对超声信号进行分解处理,得到超声回波信号的有限本征模态函数(IMF),各分量具有原始回波信号不同时间尺度的特征信号,相对于原始回波信号更加平稳,之后对EMD后的每个IMF分量进行希尔伯特变换得到该分量的频谱图^[10-12]。

EMD算法的步骤包括:

(1)求回波信号 $x(t)$ 的所有极值点;

(2)用三次样条插值对极大值和极小值拟合得到上、下包络线,求上下包络线的均值 $m(t)$;

(3)残余信号 $r(t)$ 由信号 $x(t)$ 减去 $m(t)$ 得到,将 $r(t)$ 作为信号,重复以上过程,直到其满足IMF的条件,记为 $IMF_1(t)$ 。

重复以上步骤,直到 $r_n(t)$ 为单调函数,原始信号为:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n IMF_i(t) + r_n(t) \quad (1)$$

传统EMD处理方法在得到IMF分量之后采用多个含有主要信息的IMF分量重构信号,不同于传统EMD的处理方法,本文将采用相关性分析对各IMF分量进行处理,并选取相关系数最大的IMF分量重构特征信号。

选用相关系数的方法对IMF分量的相关性进行分析,即对多个有相关联系的IMF分量进行分析。IMF分量之间的相关程度统计指标便是相关系数,其取值区间在 $[-1, 1]$ 。 -1 表示两个变量完全负相关, 1 表示两个变量完全线性相关。

2.2 基于EMD的超声回波信号处理

对回波信号进行EMD处理,将信号分成8个IMF分量之和,如图3所示。观察各分量可以看出,信号的能量主要集中在各分量 $1\sim 5\mu s$ 的时间,对所有IMF分量进行相关性分析,结果如图4所示。采用相关系数最高的IMF分量代替原始信号,减少无用信号的信息量,有效进行特征提取,区分界面粘结与否。

对各阶IMF分量与原始信号的相关性分析,可以看出IMF7,8分量与回波信号负相关,回波信号主要特征信息集中与前三个IMF分量,选取与原始信号相关系数最大的IMF2分量替代原始信号进行界面粘结质量判断,结果如图5所示。

经EMD处理之后的超声回波信号有用信息占比明显提升,不再有信号溢出及回波混叠,信号能量对比更加明显,在 $0.92\mu s$ 处,一界面脱粘信号相对粘结良好界面信号回波幅值区分度为36.69%,在 $2.66\mu s$ 处,二界面脱粘信号相对粘结良好界面信号回波幅值区分度为49.34%。 5 mm 钢板超声波到达界面时间约为 0.92

μs ,同理可知绝热层超声检测时间约为 $1.74\mu s$ 即可以根据材料的厚度及超声传播速度计算界面回波的位置,再根据回波能量判断界面粘结质量,实现了对火箭发动机多界面粘结质量的检测。

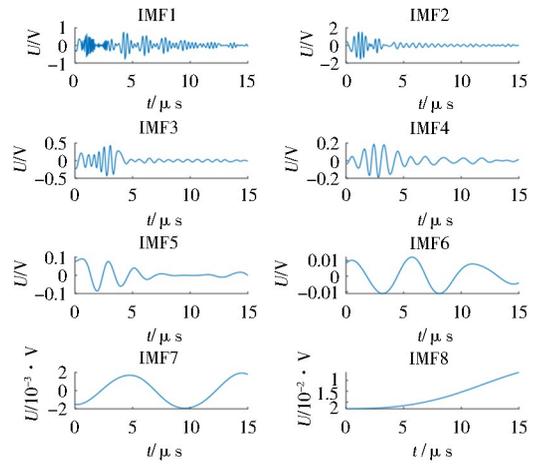


图3 原始信号EMD分解示意图

Fig. 3 The EMD decomposition diagram of the original signal

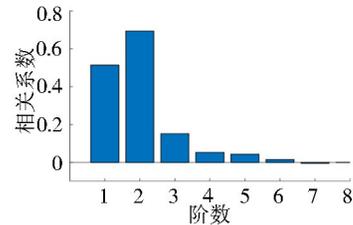
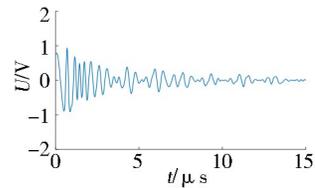
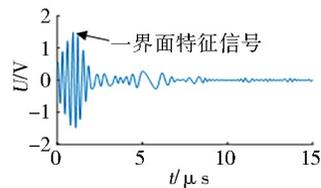


图4 各IMF分量与原始信号相关图

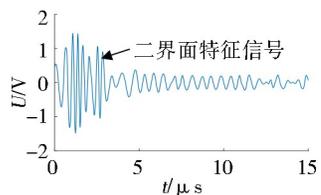
Fig. 4 The correlation diagram of each IMF component and the original signal



(a) 粘结良好信号



(b) 一界面脱粘信号



(c) 二界面脱粘信号

图5 EMD处理后超声回波信号

Fig. 5 The ultrasonic echo signal processed by EMD

通过对比处理前后的C-Scan图像(图6)可以发现经EMD回波信号特征提取后噪声明显降低,回波信号能量对比更加明显,由于黏结剂的影响,脱粘缺陷处边缘不是十分光滑,但仍可以看出二界面脱粘区域位置及大小;EMD处理后的二界面特征信号C-Scan图像,脱粘区域轮廓更加直观,大小更接近实际脱粘缺陷,与之前相比脱粘区域位置与大小检测效果有了很大提升,有效完成了火箭发动机多界面粘结质量的信号特征提取。

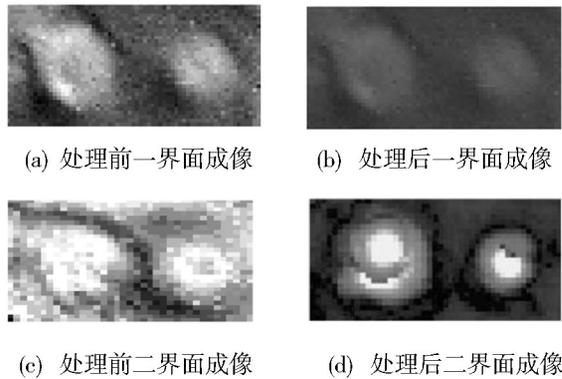


图6 脱粘界面EMD处理前后C-Scan对比图

Fig. 6 The C-Scan comparison images of the debonding interface before and after EMD processing

3 结论

采用超声纵波检测固体火箭发动机一、二界面粘结质量,二界面检测信号混叠严重无法与一界面信号区分,对二界面粘结回波进行EMD信号分解,采用相关性系数选取最佳的IMF分量,突出二界面粘结信号幅值特征,由各回波信号能量即幅值判断粘结与否,再根据时间判断是哪一界面脱粘,实现了超声对一、二界面最小直径为4 mm的脱粘缺陷识别,同时减少了分析计算的数据量,为固体火箭发动机的粘结检测提供了一定的参考价值。

参考文献

[1] 张晓军,常新龙,陈顺祥,等. 固体火箭发动机粘结界面湿热老化与寿命评估[J]. 固体火箭技术,2013,36(1):27-31.
ZHANG Xiaojun, CHANG Xinlong, CHEN Shunxiang, et al. Heat and heat aging and life evaluation of solid rocket motor bonding interface[J]. Solid Rocket Technology, 2013, 36(1): 27-31.

[2] YILMAZ Okan, KURAN Bayindir, OZGEN Gokhan O. reliability assessment of solid-propellant rocket motors under storage and transportation loads [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2017, 54(6): 1356-1366.

[3] 张波,董可海,张春龙,等. 固体火箭发动机界面实时监测系统设计与试验[J]. 固体火箭技术,2016,39(6):759-764,774.
ZHANG Bo, DONG Kehai, ZHANG Chunlong, et al. Design and test of real-time monitoring system for solid rocket motor interface [J]. Solid Rocket Technology, 2016, 39(6): 759-764, 774.

[4] 徐丹丹,闫大庆. 国外固体火箭发动机技术新动向[J]. 中国航天,2017(5):18-21.

XU Dandan, YAN Daqing. New trends in foreign solid rocket motor technology[J]. China Aerospace, 2017(5): 18-21.

[5] JIA Weidong, ZHOU Jian, LIU Yabing, et al. Research on the safety of long term storage solid rocket motor with debonded layer [J]. Tactical Missile Technology, 2013(5): 101-106.

[6] WANG Xingguo, WU Wenlin, HUANG Zhicheng, et al. Research on the transmission characteristics of air-coupled ultrasound in double-layered bonded structures [J]. Materials, 2018, 11(2): 310.

[7] 张守诚,屈文忠,肖黎. 固体发动机界面结构试件脱粘健康监测研究[J]. 固体火箭技术,2017,40(3):319-324.

ZHANG Shoucheng, QU Wenzhong, XIAO Li. Research on health monitoring of debonding of solid motor interface structure specimens[J]. Solid Rocket Technology, 2017, 40(3): 319-324.

[8] 孙凯华,李建文,孙朝阳,等. 钢-铅粘结结构的粘结强度对超声波反射与透射特性的影响[J]. 应用声学, 2019, 38(1): 93-104.

SUN Kaihua, LI Jianwen, SUN Chaoyang, et al. The influence of the bonding strength of the steel-lead bonding structure on the reflection and transmission characteristics of ultrasonic bulk waves [J]. Applied Acoustics, 2019, 38(1): 93-104.

[9] 敦怡,师小红,徐章遂. 基于小波变换的固体火箭发动机深层界面超声回波信号分析[J]. 固体火箭技术, 2007, 30(1): 80-86.

DUN Yi, SHI Xiaohong, XU Zhangsui. Analysis of Ultrasonic Echo Signal of Deep Interface of Solid Rocket Motor Based on Wavelet Transform [J]. Solid Rocket Technology, 2007, 30(1): 80-86.

[10] 穆峰,常发亮,蒋沁宇. 基于改进EMD算法的信号滤波[J]. 山东大学学报(工学版),2015,45(3):35-42.

MU Feng, CHANG Faliang, JIANG Qinyu. Signal filtering based on improved EMD algorithm [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science Edition), 2015, 45(3): 35-42.

[11] 张樯,周西峰,王瑾,等. 基于改进的EMD超声信号降噪方法研究[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版),2016,36(2):49-55.

ZHANG Xiao, ZHOU Xifeng, WANG Jin, et al. Research on the method of noise reduction based on improved EMD ultrasonic signal [J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2016, 36(2): 49-55.

[12] 吕敬祥,刘国强. 磁声电无损检测及改进的EMD消噪方法[J]. 电工技术学报,2018,33(17):3935-3942.

LYU Jingxiang, LIU Guoqiang. Magnetic-acoustic-electric non-destructive testing and improved EMD de-noising method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(17): 3935-3942.