

火箭发动机装药包覆层厚度信号处理技术研究

韦江利 路宏年 张吉堂

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院,北京 100083)

文 摘 用超声测量火箭发动机装药包覆层厚度时,当包覆层较薄时检测回波信号会出现时域混叠。基于时域混叠信号的特点,提出了一种时间延迟估计的新方法。该方法用维纳解卷积消除了检测始波对时间延迟估计的影响,并对剩余信号进行了三次能量倒谱分析,准确直观地估计出了信号延迟时间。该方法已在开发的超声探伤系统中得到了验证。实验结果表明,该方法能准确估计出时域混叠信号的延迟时间,提高了火箭发动机装药包覆层厚度的测量精度。

关键词 火箭发动机,包覆层,维纳解卷积,三次能量倒谱

Signal Processing Research for Rocket Motor Cladding Thickness

Wei Jiangli Lu Hongnian Zhang Jitang

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

Abstract When the cladding thickness of rocket motor is measured with ultrasonics, the test echoes of the thin cladding will overlap in the time field. Based on the characters of overlapped echoes, a new method for time delay estimation is presented. This method firstly removes the effect of reference signal on time delay estimation, then the triple cepstrum of remain signal is made, finally estimates the time delay of signals accurately. This method has been proved in the ultrasonic cladding testing system developed in our research center. Experimental results show the method can estimate the delay time of the overlapped signals accurately. It improves the measurement precision of rocket motor cladding.

Key words Rocket motor, Cladding, Wiener deconvolution, Triple cepstrum

0 引言

固体火箭发动机装药包覆层厚度测量在发动机特征分析和质量控制中具有非常重要的地位。在用板波诱发纵波技术测量固体火箭发动机装药包覆层厚度时,当包覆层较薄时检测多回波信号会发生混叠,无法准确从相邻回波的延迟时间中计算出包覆层厚度。本文提出一种可准确直观估计出时域混叠信号时间延迟的方法。

1 板波诱发纵波包覆层测厚原理

超声板波在板(壳体)中传播时,既有横波又有纵波。板中的质点基于这两种振动的合成,在其平衡位置附近作椭圆形运动,波动前进方向与板平行。若板的一侧附有其他材料,板波在向前传播时,其中的横波会将部分声波透射到周围介质中去。 A_0 (非对称型波)、 S_0 (对称型波)型板波中的横波分量的能量集中在板的上下表面处。该特点可使壳体中传

收稿日期:2005-07-28;修回日期:2005-08-30

作者简介:韦江利,1982年出生,硕士,主要从事超声无损检测方面的研究工作

播的板波最大限度地将能量投射入包覆层中,即投射率最大,以增大包覆层中回波幅值^[1]。

如图 1所示,将超声发射探头与接受探头耦合于固体火箭发动机壳体的外表面,探头入射角 α_i 满足

$$\sin \alpha_i = \frac{c}{c_p} \quad (1)$$

式中, c 为耦合液中纵波入射速度, c_p 为 A_0S_0 型板波的相速度。

将在壳体中产生相速度为 c_p 的 A_0S_0 型板波,称为板波 I。由于壳体下方粘有包覆层,板波 I在向前传播时,横波成分将部分声波以纵波的形式透射入包覆层中,该纵波称为板波诱发波。壳体中的板波透射入包覆层时入射角 β 应满足

$$\sin \beta = \frac{c}{c_p} \quad (2)$$

式中, c 为包覆层中纵波声速。

诱发纵波被包覆层底面反射后,一部分声波再次进入壳体中,形成与板波 I模式相同的板波,称为板波 II。板波 I和板波 II的时差 t_0 与包覆层厚度 d 对应,只要测得板波 I和板波 II到达接受探头的时间差,就可以求出包覆层的厚度^[2]。

板波诱发纵波法包覆层厚度 d 为:

$$d = A t_0 \quad (3)$$

式中, A 为与包覆层材料和探头入射角有关的常数^[1], t_0 为板波 I和板波 II的时间差。

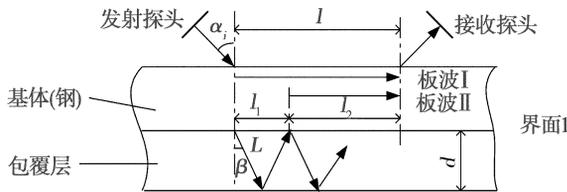


图 1 板波诱发纵波包覆层测厚原理

Fig 1 Principle of cladding thickness measurement by ultrasonic lamb wave inducing wave technology

2 能量倒谱时间延迟估计方法

用板波诱发纵波技术测量固体火箭发动机装药包覆层厚度时,回波信号一般是由第一回波和第二回波组成的,第二回波是第一回波经衰减、延迟得到的,两回波间时间差与包覆层厚度相对应^[3]。若检测信号为 $x(t)$,系统噪声为 $n(t)$,则

$$x(t) = r(t) + r(t - t_0) + n(t) \quad (4)$$

式中, r 为第二回波与第一回波相比衰减系数; t_0 为

第二回波与第一回波相比延迟时间; $r(t)$ 为包覆层厚度足够大不再有第二回波时,经 N 次测量得到的检测始波的估计,即

$$r(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(t) \quad (5)$$

假定有傅里叶变换对 $r(t) \leftrightarrow R(f)$,根据傅里叶变换的线性和时移性质,式(4)的傅里叶变换为

$$X(f) = R(f) (1 + e^{-j2\pi f t_0} + N(f)/R(f)) \quad (6)$$

设:

$$D(f) = X(f)/R(f) \quad (7)$$

为了避免 $R(f)$ 较小时对 $D(f)$ 造成意想不到的影响,采用频域维纳解卷积^[4]求 $D(f)$,同时抑制系统噪声 $N(f)$,即

$$D(f) = X(f)^* \cdot \frac{R^*(f)}{|R(f)|^2 + A^2} \cdot \frac{1}{1 + e^{-j2\pi f t_0}} \quad (8)$$

式中, A 为维纳滤波器发散因子,当 $R(f)$ 较小时可防止滤波器发散,其选择受信噪比的影响^[5],这里取 $A = 0.01 (|R(f)|^2)_{\max}$,用 $S_d(f)$ 表示 $D(f)$ 对数能量谱,则

$$S_d(f) = \lg |D(f)|^2 = \lg \left[\frac{1}{1 + e^{-j2\pi f t_0}} \right]^2 + \lg \left[\frac{1}{|R(f)|^2 + A^2} \right]^2 = \lg(1 + e^{-j2\pi f t_0}) + \lg \left(\frac{2 \cos(2\pi f t_0)}{1 + e^{-j2\pi f t_0}} \right) \quad (9)$$

对于正常检测系统,有 $\frac{2 \cos(2\pi f t_0)}{1 + e^{-j2\pi f t_0}} \ll 1$,则

$$S_d(f) = \lg(1 + e^{-j2\pi f t_0}) + \frac{2 \cos(2\pi f t_0)}{\ln 10 (1 + e^{-j2\pi f t_0})} + q(f) \quad (10)$$

式中, $q(f)$ 为高阶序列,令 $c = \lg(1 + e^{-j2\pi f t_0})$, $c = \frac{2}{\ln 10 (1 + e^{-j2\pi f t_0})}$,忽略 $q(f)$,式(10)式可变为:

$$S_d(f) = c + c \cos 2\pi f t_0 \quad (11)$$

式(11)的逆傅里叶变换(只考虑时间正半轴)为:

$$d(t) = F^{-1}(S_d(f)) = c_1(t) + \frac{c_2(t - t_0)}{2} \quad (12)$$

在式(12)中 $c_1(t)$ 与第一回波的延迟时间(0s)相对应, $(t - t_0)$ 和第二回波的延迟时间相对应(延迟第一回波的时间),而通常 $d(t)$ 的能量较小,易被噪声污染,为了提高 $d(t)$ 的能量又能保持脉冲幅值的极性(正负),选用 $d(t)$ 的三次方(信号的三次能量倒谱^[6])来估计时间延迟,即

$$d^3(t) = c_1^3(t) + \frac{c_2^3(t - t_0)}{8} \quad (13)$$

本文的时间轴均以采样点为单位,采样点(个数)与时间的换算公式为

$$t_0 = H/f_m \quad (14)$$

式中, H 为第二个脉冲所在的采样点, f_m 为采样频率。

3 能量倒谱求时间延迟的应用

由于能量倒谱法涉及快速傅里叶正逆变换、对数能量谱等复杂的数学运算,本文选用 MATLAB 为计算软件。MATLAB 软件具有强大的科学计算功能,其信号处理工具箱含有许多有用的信号处理库函数,如 `fft`、`ifft` 等,用户只须调用这些库函数就可以实现复杂的信号处理运算。

(1) 实验 1

试件参数:壳体厚度 1.6 mm,包覆层厚度 0.6 mm,壳体和包覆层黏合。

检测条件:聚焦探头,探头中心频率 2.5 MHz,探头直径 17 mm,接受角度 27°,入射角度 28°,探头距离 8.36 mm,采样频率 63 MHz。

第一回波和第二回波在时域上发生混叠,如图 2 所示,无法直接得到第二回波的延迟时间,作出该信号的三次能量倒谱如图 3 所示。

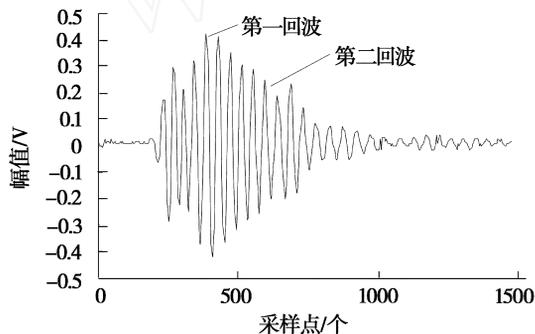


图 2 包覆层厚度为 0.6 mm 检测多回波信号

Fig 2 Tested echoes of 0.6 mm cladding

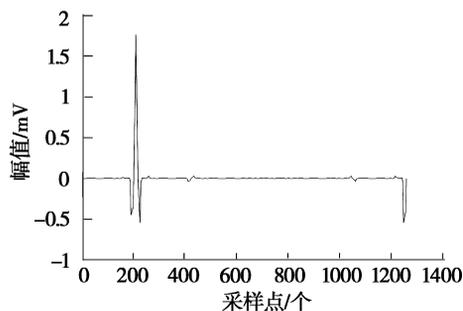


图 3 包覆层厚度为 0.6 mm 检测多回波信号的三次能量倒谱

Fig 3 Triple cepstrum of 0.6 mm cladding test echoes

从图 3 可明显看出第二回波的延迟时间为

$$t_0 = \frac{206(\text{采样点})}{63} = 3.270 \mu\text{s} \quad (15)$$

(2) 实验 2

试件参数:壳体厚度 1.6 mm,包覆层厚度 0.7 mm,壳体和包覆层黏合。

检测条件:聚焦探头,探头中心频率 2.5 MHz,探头直径 17 mm,接受角度 22°,入射角度 28°,探头距离 8.36 mm,采样频率 63 MHz。

实验采集信号如图 4 所示,用三次能量倒谱求时间延迟的方法对该信号进行分析,作出其能量三次倒谱如图 5 所示,从图 5 明显看出第二回波的延迟时间为:

$$t_0 = \frac{143(\text{采样点})}{63} = 2.270 \mu\text{s} \quad (16)$$

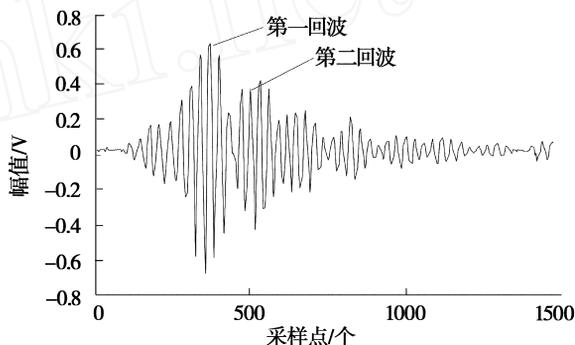


图 4 包覆层厚度为 0.7 mm 检测多回波信号

Fig 4 Tested echoes of 0.7 mm cladding

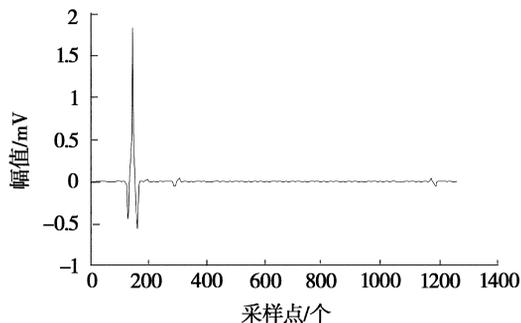


图 5 包覆层厚度为 0.7 mm 检测多回波信号的三次能量倒谱

Fig 5 Triple cepstrum of 0.7 mm cladding test echoes

实验 1 和实验 2 是两个典型信号的处理过程,三次能量倒谱法已应用到了本研究中心开发的“包覆超声探伤系统”中,表 1 是运用该方法得到的延迟时间求出的包覆层厚度与实际厚度的对照表。

表 1 火箭发动机装药包覆层实际检测厚度及误差

Tab 1 Inspection thickness and error of rocket motor chadding

实际厚度 /mm	检测厚度 /mm	检测误差 /%
0.70	0.709	1.29
0.90	0.904	0.44
1.34	1.332	0.60
1.63	1.629	0.06
2.07	1.968	4.93

从上述分析和实验结果可看出,当检测回波混叠或者信噪比较低时,三次能量倒谱法仍能准确求出相邻两回波间的延迟时间。

三次能量倒谱法涉及的计算量较大,加上 MATLAB 软件在计算速度方面的欠缺,单独运用该方法还无法实时处理大量数据。然而,在工程实际中并非所有的信号都是时域混叠信号,大部分信号采用简单的去噪预处理,即可通过在时域求回波峰值间的位置差来估计时间延迟^[7],因此,三次能量倒谱法只需要对少数时域混叠信号进行时间延迟估计。

4 结论

基于时域混叠信号的特点,提出了一种时间延迟估计的新方法。该方法用维纳解卷积消除了检测始波对时间延迟估计的影响,并对剩余信号进行了三次能量倒谱分析,准确直观地估计出了信号延迟

时间。该方法已在开发的超声探伤系统中得到了验证。实验结果表明,该方法能准确估计出时域混叠信号的延迟时间,提高了火箭发动机装药包覆层厚度的测量精度。

参考文献

- 1 王召巴,路宏年. 固体火箭发动机包覆层厚度超声测量新技术. 兵工学报, 1999; 20(1): 87~89
- 2 王红. 固体火箭发动机包覆层厚度检测的研究与开发. 北京航空航天大学硕士论文, 2001: 21~24
- 3 张吉堂. 金属-橡胶多界面粘结质量超声成像诊断研究. 北京航空航天大学博士论文, 2004: 75~76
- 4 Hayward G, Lewis J. Comparison of deconvolution techniques for resolution enhancement of ultrasonic data. Ultrasonics, 1998; 27: 155~164
- 5 Steven P N, Paul L S, Michael A E. Flaw signature estimation in ultrasonic nondestructive evaluation using the wiener filter with limited prior information. IEEE Transactions on Ultrasonics, 1993
- 6 Lu X M, Red J M, Soetanto K et al. Cepstrum technique for multilayer structure characterization. IEEE Ultrasonics Symposium, 1990
- 7 张吉堂,朱博丽. 粘接质量超声图像诊断中消除白点噪声研究. 无损探伤, 2002; (5): 40~42

(编辑 吴坚)

欢迎订阅 2007年《硅酸盐学报》

《硅酸盐学报》是中国硅酸盐学会主办的有关无机非金属材料领域的综合性学术期刊。1957年创刊,国内外公开发行。《硅酸盐学报》为 E1 核心期刊, CA, SA, P 收录期刊。

《硅酸盐学报》的任务是报道水泥、玻璃、陶瓷、耐火材料、人工晶体及非金属矿等各专业在科研、教学、生产、设计方面具有创新性的研究成果,以促进国内外学术交流,为我国四个现代化建设服务。读者对象主要是有关专业工作者及大专院校师生。

《硅酸盐学报》具有正式广告经营许可证。证号为:京海工商广字 0583号。承办上述专业有关的国内外广告、发布外商来华广告,包括:单位介绍和新研究成果、新材料、新产品、新工艺介绍、科技简讯等。《硅酸盐学报》竭诚为各界服务。

《硅酸盐学报》为月刊,国际标准大 16开,单价 25元,全年 12期共 300元。邮发代号 2-695。全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系。

地址:北京百万庄中国硅酸盐学会,《硅酸盐学报》编辑室 邮编:100831

电话:(010)88376444,68352977 传真:68352977,68342016

E-mail: jccs@ceram.soc.com http://www.ceram.soc.com