

文章编号: 2095-2163(2021)02-0160-04

中图分类号: O426

文献标志码: A

基于 EMD 的激光声表面波仿真分析

姚伟, 贾慈力, 顾鹏, 陈超, 杨鸽鸽

(上海工程技术大学 航空运输学院, 上海 201620)

摘要: 激光超声凭借其具有非接触、信号的信噪比高、灵敏度高、频带宽等特点, 在材料的检测方面有着独特优势。本文利用有限元软件针对激光激励声表面波过程进行了数值模拟, 得到了声表面波的传播特性; 对实际检测信号进行了 EMD 去噪, 得到了去噪后的重构信号, 将去噪后的信号同仿真信号对比。结果证明激光超声激发的声表面波主要沿着材料表层向四周发散, 其在远场区域会有小幅度的衰减, 并且经过 EMD 去噪后的信号具有和仿真信号相同的特征, 对今后激光超声的实验具有重要的参考价值。

关键词: 激光超声; 有限元; 声表面波; EMD

Simulation analysis of laser surface acoustic wave based on EMD

YAO Wei, JIA Cili, GU Peng, CHEN Chao, YANG Gege

(School of Air Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

[Abstract] Laser ultrasound has unique advantages in material detection due to its non-contact characteristics, high signal-to-noise ratio, high sensitivity, and frequency bandwidth. This paper uses finite element software to numerically simulate the laser-excited surface acoustic wave process, and obtain the propagation characteristics of the surface acoustic wave; for the actual detection signal, the EMD denoising is carried out, and the reconstructed signal after denoising is obtained. The latter signal is compared with the simulated signal. The result proves that the surface acoustic wave excited by laser ultrasound mainly diverges around the surface of the material, and it will have a small amplitude attenuation in the far field area. It is demonstrated that the signal after EMD denoising has the same characteristics as the simulation signal. The experiments of laser ultrasound will have important reference value in the future.

[Key words] laser ultrasound; finite element; surface acoustic wave; EMD

0 引言

激光超声技术是在传统无损检测技术基础上的进一步发展, 与传统的无损检测技术相比, 该技术有着自身独特的作用, 在某些特殊场合, 激光超声有着无法代替的地位。由于激光超声本身具有非接触、传播距离远等特点, 导致激光超声检测所得到的信号具有非线性、非平稳的特征, 常规的傅里叶变换、小波变换等无法表征频谱的会遇到成分分布情况、阈值难以确定等问题。这时经验模态分解由于其基函数从信号自身获得、无需考虑阈值选择, 从而适合于超声信号的去噪处理。

近几十年来, 许多学者致力于研究激光激励 Rayleigh 波检测表面破裂裂纹的特征, 并获得了丰富的研究成果^[1-3]。激光声表面波由于具有表面及近表面传播特性, 对检测材料的表面及近表面特征具有独特的优势^[4-5]。利用声表面波的色散特性, 研究不同介质下的传播声学参数, 同时又根据声表

面波传播时与材料中表面缺陷与近表面缺陷的相互作用, 实现对材料表面缺陷进行检测^[6-7]。小波变换因其具有良好的局部特性, 且表现出传统降噪方法不可比拟的优越性, 在信号去噪中获得了广泛应用^[8-9], 但是, 小波分解存在基函数选择困难、频域重叠和阈值不确定等问题, 这也必然带来一定局限性。经验模态分解 (empirical mode decomposition, EMD) 是近十年中发展起来的针对非线性非平稳信号处理的有效方法^[10], EMD 的主要优势在于基函数可以依据信号自身特征来获得, 避免了小波变换中选择基函数较为困难的问题。

本文利用有限元软件对激光超声的激励过程进行了数值模拟, 得到了材料表面的激光超声的声表面波的传播规律, 并且对实际检测的超声信号进行了 EMD 去噪分析, 将经过去噪后的信号同仿真信号进行验证, 去噪效果较好。

作者简介: 姚伟(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 无损检测及信号处理。

收稿日期: 2020-09-27

1 激光超声热弹理论及 EMD 去噪原理

1.1 激光超声热弹理论

实验采用热弹机制激发超声波形,激光脉冲辐照于材料表面(其能量低于熔融阈值),材料表面通过吸收激光辐照能量,从而导致材料局部升温,发生热不平衡,材料表面形成热膨胀,在材料表面及其附近产生的温度场不均匀,从而导致材料中产生应力、应变,激发产生瞬态位移,形成声表面波信号。对于各向同性的金属铝而言,其热弹耦合过程可表示如下:

$$k \nabla^2 T = \rho c_v \dot{T} + T_0 \beta \nabla \cdot \dot{u} - q, \quad (1)$$

$$\mu \nabla^2 u + (\lambda + \mu) \nabla (\nabla \cdot u) = \rho \ddot{u} + \beta \nabla T. \quad (2)$$

其中, k 表示热传导系数; T 表示材料模型的实际温度; T_0 表示环境温度; β 表示热弹耦合系数; u 表示材料内部不同时刻的位移向量; λ 和 μ 表示 Lamé 常数; ρ 表示材料的密度。

激光束表达式可写为:

$$Q(I_0, T, r, t) = I_0 \cdot A(T) \cdot f(r) \cdot g(t), \quad (3)$$

$$f(r) = \exp\left(-\frac{r^2}{a_0^2}\right), \quad (4)$$

$$g(t) = \frac{t}{t_0} \exp\left(-\frac{t}{t_0}\right). \quad (5)$$

其中, $A(T) = 1$ 不考虑材料对激光的反射,认为能量全部被材料吸收。

1.2 EMD 去噪原理

EMD 依据信号本身的局部自适应特点产生“基函数”,不需要预先设定基函数,其自适应性优于小波变换和短时傅里叶变换。而考虑到信号时间尺度的不同,EMD 则可将复杂的信号分解成若干个按频率由高到低排列的固有模态函数 (intrinsic mode function, IMF),因此可以将其看作是以信号极值特征尺度为度量的时空滤波过程,可以根据这个性质对检测信号进行滤波分析和降噪处理。

经验模态分解可以将复杂的信号分解成一系列具有不同时间尺度的固有模态函数,其中固有模态函数必须符合以下的 2 个条件:

- (1) 在整个取值范围内,函数的极值点与过零点的数目相等或者最多相差一个。
- (2) 在任意时刻,上包络线的局部最大值和下

包络的局部最小值的平均值为零。

最后将所有的固有模态函数相加即可对信号进行完全重构。

经验模态分解的一般步骤为:

- (1) 记录原始信号为 $X(t)$, 令 $r(t) = X(t)$ 。
 - (2) 求出 $r(t)$ 的所有局部极大值和极小值点,运用插值法得出上下包络 $u(t)$ 和 $v(t)$ 。
 - (3) 求出上下包络的均值: $m(t) = [u(t) + v(t)]/2$ 。
 - (4) 信号与包络的均值之差: $h(t) = r(t) - m(t)$ 。
 - (5) 判断 $h(t)$ 是否符合成为 IMF 的 2 个条件,若不满足,令 $r(t) = r(t) - h(t)$, 并重复步骤(2) ~ (4),直至满足成为 IMF 的条件。
 - (6) 令 $r(t) = r(t) - IMF_1(t)$, 重复步骤(2) ~ (5),得到固有模态函数序列 $IMF_{2-n}(t)$, 以及无法再分的残余项 $r(t)$, 最后整个 EMD 分解过程结束。
- 至此可得,原始信号 $X(t)$ 为 $IMF_{1-n}(t)$ 以及 $r(t)$ 的叠加,即:

$$X(t) = \sum_{i=1}^n IMF_i(t) + r(t). \quad (6)$$

2 激光声表面波的数值模拟以及 EMD 去噪结果

2.1 激光声表面波的数值模拟

利用有限元软件模拟了脉冲激光在金属铝板中激发的声表面波信号。本文采用半径为 45 mm,厚度为 4.5 mm 的铝合金材料,密度为 2 700 kg/m³,泊松比为:0.33,比热容为 3 970 J/kg · K。实验采用高频光纤脉冲激光器,脉冲能量为 1 mj,脉宽为 10 ns,光斑半径为 0.25 mm,在热弹机制下实现对材料的无损探伤。由于金属铝合金是典型的各向同性材料,可以采用轴对称模型分析激光在铝合金中的激发过程,如图 1 所示。



图 1 有限元分析模型

Fig. 1 Finite element analysis model

在有限元软件中建立轴对称分析模型,选用直接结构热耦合的四节点 quad222 单元,设置材料属性、弹簧阻尼单元,对模型划分网格,采用边长为 45 μm 的正方形划分,并对材料表层进行加密处理。对网格划分后的模型设置边界条件,左边界设置为对称边界,其余边界设置为吸收边界。模型设置完成后,添加热源函数,进行瞬态热力学分析,设置求解时间步长,开始仿真计算。

仿真计算后得到的温度场如图 2 所示。可以看出温升主要集中在脉冲激光的光斑范围内,随着距离变远,温度逐渐降低。在光斑范围内,产生热膨胀,因此材料变形,从而产生纵波、横波、表面波。

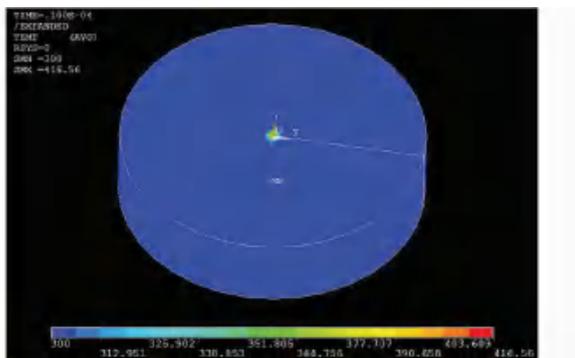


图 2 温度场仿真结果

Fig. 2 Simulation results of temperature field

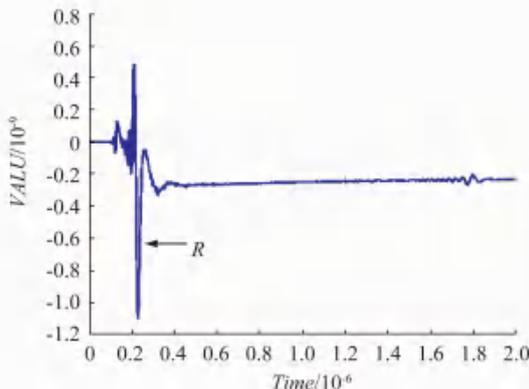
声表面波仿真位移曲线如图 3 所示。图 3 中,可以看出声表面波振幅显著,并且沿着材料表层向远处发散传播。在远场区域,随着检测距离的增加振幅会有小幅度衰减,因此在检测过程中需要事先标定好合适的检测位置,从而提高检测效率。

2.2 实际检测信号的 EMD 去噪

激光超声检测常常伴随着大量噪声,尤其是高频随机噪声以及电源噪声的存在对信号质量的降低起着显著作用,从而影响实验中对缺陷和材料等参数的检测。实验过程中利用经验模态分解可以依据信号的局部特征进行自适应分解,不需要任何辅助函数的优点对实际检测到的超声信号进行去噪处理。

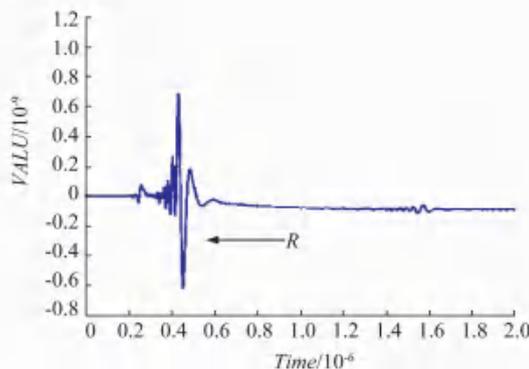
实际检测信号如图 4 所示,经过 EMD 分解后得到 11 级本征模函数,剔除前四级高频噪声,留下 $IMF_4 \sim IMF_8$ 以及残余项 $r(t)$ 的波形,如图 5 所示。对所得的本征模函数计算能量密度,绘制出能量密度分布,参见图 6。由图 6 可见,能量密度在 IMF_5

处达到最小,因此重构起点选为 IMF_6 ,从分解图中也可以看出从第 6 阶开始信号出现了明显的包络。对分解后的信号进行重构得到最终的重构信号如图 7 所示。由图 7 可以发现其较好地保存了原始信号的细节特征,可以作为激光超声信号处理的有效方法。



(a) 10 mm 的节点处

(a) 10 mm from the center of the spot



(b) 20 mm 的节点处

(b) 20 mm from the center of the spot

图 3 距光斑中心不同距离处得到的声表面波位移响应曲线

Fig. 3 The surface acoustic wave displacement response curve obtained at the node

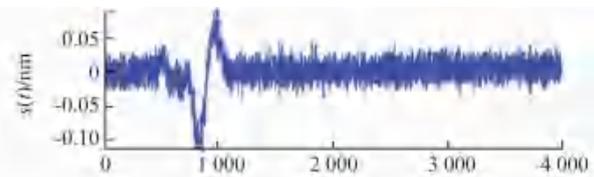


图 4 实际检测信号

Fig. 4 Actual detection signal

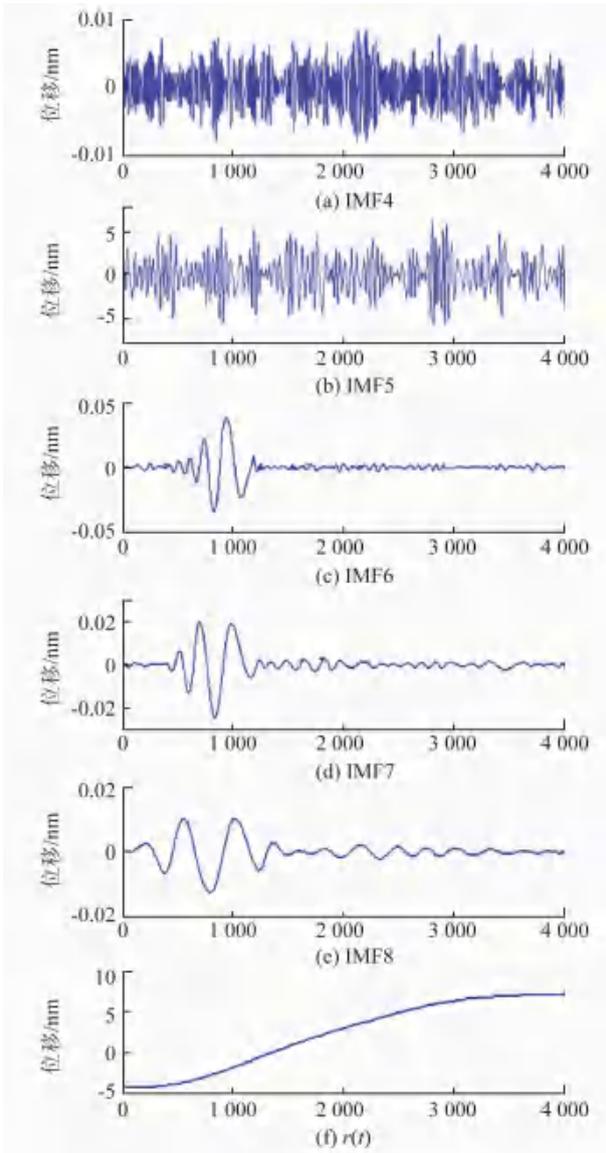


图5 检测信号的EMD分解

Fig. 5 EMD decomposition of detection signal

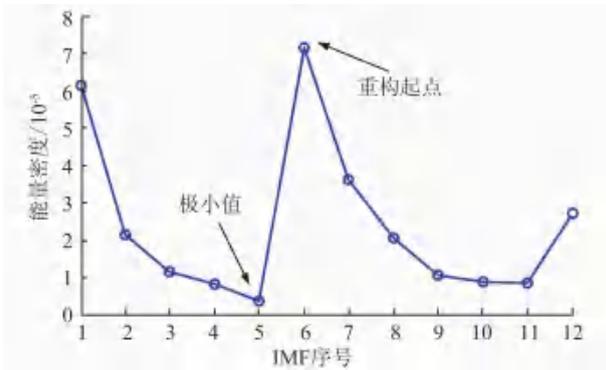


图6 能量密度分布

Fig. 6 Energy density distribution

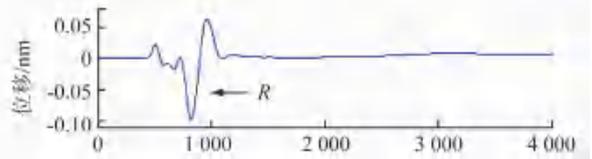


图7 重构信号

Fig. 7 Reconstructed signal

对于实际检测信号经过 EMD 去噪处理后得到的重构信号,将其同有限元软件仿真得到的信号进行比较可以发现,经过处理后的高频部分虽然有所丢失,但是具有和仿真软件得到的声表面波相同的信号特征,进一步验证了该方法对非线性声波信号的处理的适用性。

3 结束语

本文利用有限元软件,依据激光超声激发超声波的激发机理,对激光超声在铝合金材料中进行了数值模拟,得到了声表面波的位移曲线,结果显示声表面波主要沿着材料表层向四周发散,其在远场区域会有小幅度的衰减。并通过对实际检测信号的 EMD 去噪分析与有限元仿真的理论结果进行了对比,结果证明:EMD 去噪方法在实际的超声信号处理中能够较好保留信号的特征,可以作为超声信号处理的手段;有限元仿真分析可以实现对检测信号的验证,对于激光超声实验的准备与验收阶段有非常重要的参考价值。

参考文献

- [1] 曾伟,王海涛,田贵云,等. 研究激光激发的声表面波与材料近表面缺陷的振荡效应[J]. 物理学报,2015,64(13):200-205.
- [2] 马保全,周正干. 航空航天复合材料结构非接触无损检测技术的进展及发展趋势[J]. 航空学报,2014,35(7):1787-1803.
- [3] 戈浩,蔡桂喜,刘畅,等. 基于模态识别与分离的铝板激光超声检测[J]. 应用声学,2013,32(5):341-347.
- [4] 敦怡,师小红,王广龙,等. 微纳米级裂纹的非线性超声检测[J]. 光学精密工程,2011,19(1):132-137.
- [5] 高会栋,沈中华,徐晓东,等. 固体中脉冲激光激发声表面波的理论研究[J]. 应用声学,2002,21(5):19-24.
- [6] 陶程,殷安民,王煜帆,等. 激光激发表面波测量表面缺陷深度的数值研究[J]. 激光与红外,2019,49(1):42-50.
- [7] 金磊,王威,潘永东. 激光激发表面波与亚表面缺陷作用的理论研究[J]. 固体力学学报,2017,38(2):170-179.
- [8] DONOHO D L. Denoising by soft - thresholding [J]. IEEE Transactions on Information Theory,1995, 41(3):613-627.
- [9] DONOHO D L, JOHNSTONE I M. Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage[J]. Biometrika,1994, 81(3):425-455.
- [10] 高云超,桑恩方,刘百峰. 基于经验模式分解的自适应去噪算法[J]. 计算机工程与应用,2007,43(26):59-61.