

·测试、试验与仿真·

小波变换在石英摆片刚度特性测量中的应用

毕雪梅¹, 郝本功²

(1.国家知识产权局专利局审查协作天津中心,天津 300304;2.中国电子科技集团公司光电研究院,天津 300308)

摘要:刚度是判断石英摆片质量的关键指标,而石英摆片的振动特性是体现其刚度的重要参数。针对激光三角法石英摆片刚度测量中,对信号进行精确频率估计之前需将信号不同成分分离的问题,采用小波变换为分析工具,实现自振信号和扭振信号的分离。实验结果证明,在石英摆片刚度特性测量中,该方法是一种有效的分析工具。

关键词:石英摆片;小波变换;信号分离

中图分类号:TN247

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2018)-03-0065-05

Application of Wavelet Transform in Rigidity Characteristic Measurement of Quartz Reed

BI Xue-mei¹, HAO Ben-gong²

(1. State Intellectual Property Office of Patent Examination Cooperation Tianjin Center, Tianjin 300304, China;

2. Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300308, China)

Abstract: Rigidity is a key index to the quality of quartz reed, and the vibration characteristic of the quartz reed is a key parameter reflecting its rigidity. For the different component separation problem of signal before executing precise frequency estimation in rigidity measurement of quartz reed with laser triangulation, the wavelet transform is used as a profiling tool to implement the separation of free vibration signal and reverse vibration signal. Experimental results show that it is an effective method in the rigidity measurement of quartz reed.

Key words: quartz reed; wavelet transform; signal separation

在航空、航天飞行器以及舰船的惯性导航系统中,石英加速度计扮演着重要角色,而石英加速度计的性能主要取决于其核心器件—石英摆片的加工质量。刚度一直被用作衡量石英摆片加工质量的重要指标,而且刚度的测量通常通过测量石英摆片的振动特性来获得。

激光三角法是一种高精度非接触式的测量方法,在石英摆片振动特性测量中应用广泛^[1-2]。该方法通过采集石英摆片振动信号、分析振动特性并采用谱估计算法精确估计频谱信息,测得石英摆片的刚度特性。谱估计算法,如参数化或非参数化估计算法,对单频信号的估计性能优异,而石英摆片的振动特性包含自由振动与扭转振动两种频率,而且自由振动频率信号幅度较大,扭转振动频率信号幅

度极小^[3]。为完成两种频率的精确估计,首先需要将两种频率分量分离。滤波方式在不同频率信号分离中较为常用,但滤波方式存在滤波器设计较复杂,其参数设置对信号分离效果影响较大的问题,尤其是对幅度极小的扭转振动信号,滤波器的设计要求更高。

为解决以上问题,采用一种具有多分辨率分析能力的信号分析方法—小波变换作为分析工具,实现对自由振动信号与扭转振动信号的分离,并通过实验对该方法进行分析和验证。

1 石英摆片刚度特性测量模型

激光三角法测量石英摆片刚度特性的原理如

收稿日期:2018-05-08

作者简介:毕雪梅(1987-),女,河北南官人,硕士,研究方向为光电信号处理。

图1所示,其中夹具用于夹持石英摆片;瞬态激励源用于产生瞬态激励,使石英摆片产生振动;激光三角光传感器用于采集石英摆片的振动信号。

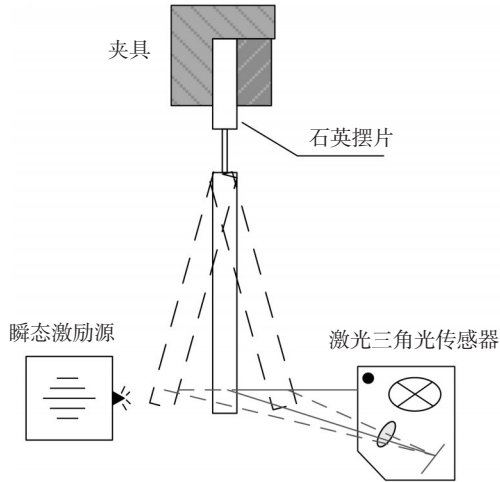


图1 激光三角法测量原理

石英摆片振动频率与其刚度系数的关系为

$$K = 4\pi^2 f^2 I \quad (1)$$

式中, f 为石英摆片的振动频率; K 为石英摆片的刚度系数; I 为石英摆片摆动部分绕振动中心点的转动惯量。

由此可知,利用频率估计算法,分析激光三角光传感器所采集的振动信号,测得振动信号的频率,即可获得石英摆片的刚度值。

2 石英摆片振动信号模型

石英摆片振动信号可看做两个频率分量的衰减振荡信号的叠加,如图2所示。

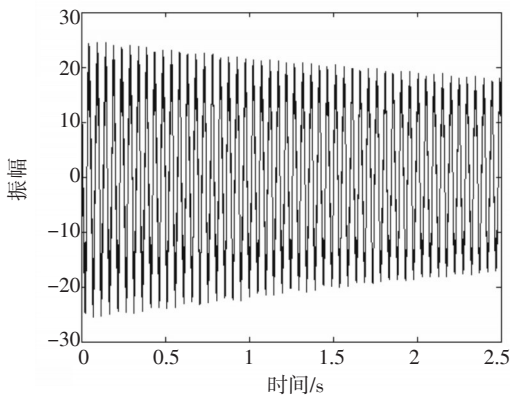


图2 石英摆片振动信号

信号模型可由下式表示

$$s(t) = e^{-\lambda t} (a_0 \cos(2\pi f_0 t + \phi_0) + a_1 \cos(2\pi f_1 t + \phi_1)) \quad 0 \leq t \leq T \quad (2)$$

式中, $e^{-\lambda t}$ 为衰减因子,两个余弦项分别表示自振信号和扭振信号。

3 小波变换的应用分析

小波变换是一种具有多分辨率分析能力的时频分析方法,它的时频窗在低频时自动变宽变低,高频时自动变窄变高,这种由粗及精对信号的逐级分析称为多分辨率分析。多分辨率分析引入了离散间隔和尺度上小波变换的快速算法,即 Mallat 算法,其原理如下。

对原始的数字信号序列进行多分辨率分析

$$a_{j+1}(n) = \sum_k h(k-2n)a_j(k) \quad (3)$$

$$d_{j+1}(n) = \sum_k g(k-2n)a_j(k) \quad (4)$$

$$a_L(n) = 2^{L/2} \sum_k f(kT_s) \sin c((n-k)T_s) \quad (5)$$

其中, $h(\cdot)$ 和 $g(\cdot)$ 分别为所选定的小波基以及尺度函数所生成的低通及高通滤波器。当选定小波基之后, $h(\cdot)$ 和 $g(\cdot)$ 也就确定下来。 $a_j(n)$ 称为离散逼近信号,它描述了信号的低频部分的信息, $d_j(n)$ 称为离散细节信号,它描述了信号的高频成分的信息^[4]。

也就是说小波的多分辨率算法实际上也是一个数字滤波过程^[5]。式(4)和式(5)是基于基2抽取的,如果分解之后基2抽取的信号不能完全反映原始信号的特性,为得到完整的分解信息,可以采用逐点计算的方法^[6]。

其重构公式为

$$a_j(n) = \sum_k h(n-2k)a_{j+1}(k) + \sum_k g(n-2k)d_{j+1}(k) \quad (6)$$

小波的多分辨率分析将信号按一定的尺度进行划分,不同频率的信号被划分到不同的频段中,然后对各子频段进行重构,从而得到各个不同的频率成分^[7]。

根据待分析信号的特点,首先确定小波类型及分解层数,再通过分析各个重建子波形的频率成分,最终确定出自振信号和扭振信号存在于子频段的位置,完成自振信号和扭振信号的分离。

4 实验分析与验证

构建如图1所示的实验装置,采集得到石英摆片振动信号如图2所示。利用小波分离其中的自由振动信号与扭转振动信号。

使用小波变换分析信号,首先要确定小波函数,即小波基。小波变换的基同傅里叶分析不同,不是唯一存在的,所有满足小波条件的函数都可以作为小波基,选取合适的小波基对信号分析至关重要。选择小波基一般从支集长度、对称性、消失矩阶数和正则性等几个方面考虑。大部分应用选择支集长度为5~9的小波,因为支集太长会产生边界问题,支集太短消失矩太低不利于能量的集中。对称性用于避免处理中产生相移,正则性好的信号重构过程比较平滑。考虑到文中重点是要分离出幅度较小的扭振信号,所以采用消失矩阶数较高,有利于信号能量集中的Coiflets小波作为小波基。

在选好小波基后,就要确定需要小波分解的层数,所需的分解层数与基波频率 f_b 及采样频率 f_s 的值都有关系。在实际应用中,可以采用以下公式计算出较为合理的频带划分数目 q

$$q = \log_2\left(\frac{f_s}{2\sqrt{2}f_b}\right) + \frac{1}{2} \quad (7)$$

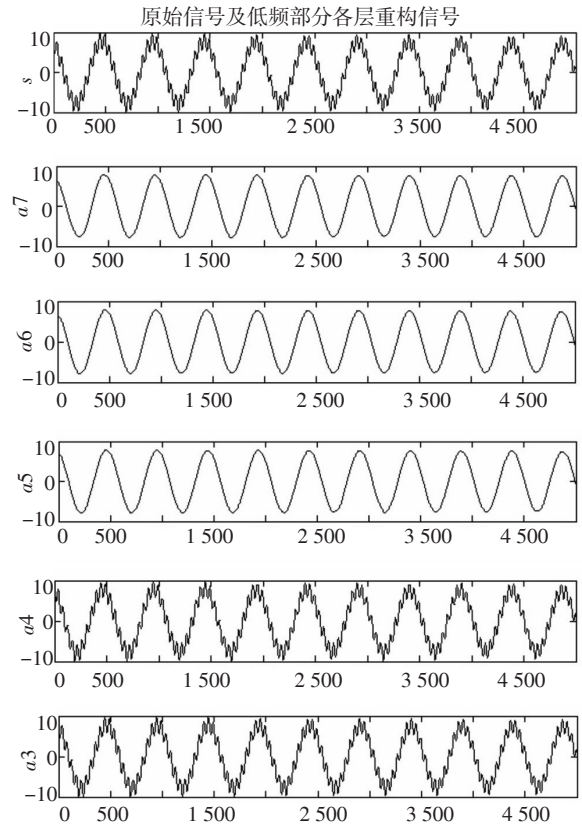
对于文中研究的信号,采样频率 $f_s=10$ kHz, $f_b \approx 14$ Hz,根据公式(7)可以计算出子频带划分数目 $q \approx 8$,所以要对信号进行7层多分辨分析,则每层低频分量 a 与高频分量 d 对应的频率范围见表1。

表1 各层 a 与 d 对应的频率范围

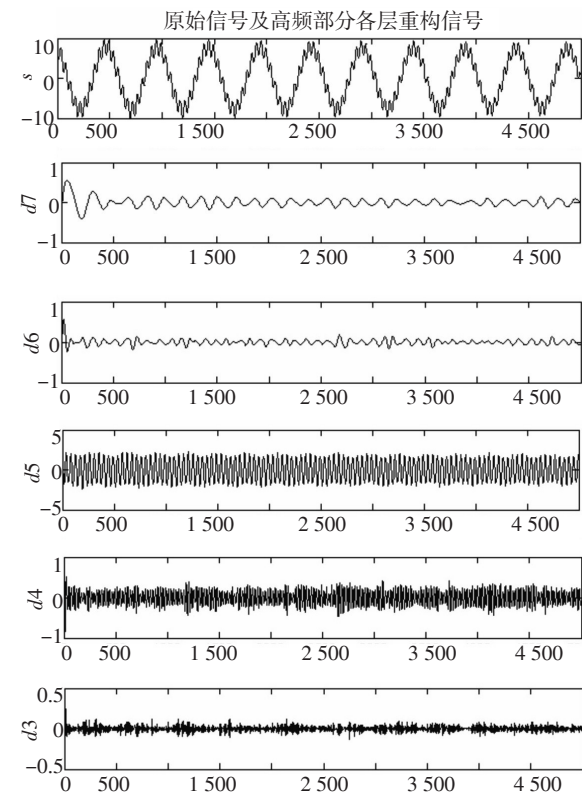
分层	分量	
	a /Hz	d /Hz
1	0~2 500	2 500~5 000
2	0~1 250	1 250~2 500
3	0~625	625~1 250
4	0~312.5	312.5~625
5	0~156.25	156.25~312.5
6	0~78.125	78.125~156.25
7	0~39.062 5	39.062 5~78.125

使用以上参数对信号作小波分析,结果如图3~4所示。图3为原始信号及各层分解后重构信号波形,图中由上至下分别为原始信号和、第7层($a7/d7$)到第3层($a3/d3$)各部分重构波形,图4为图3中

对应信号的频谱图。

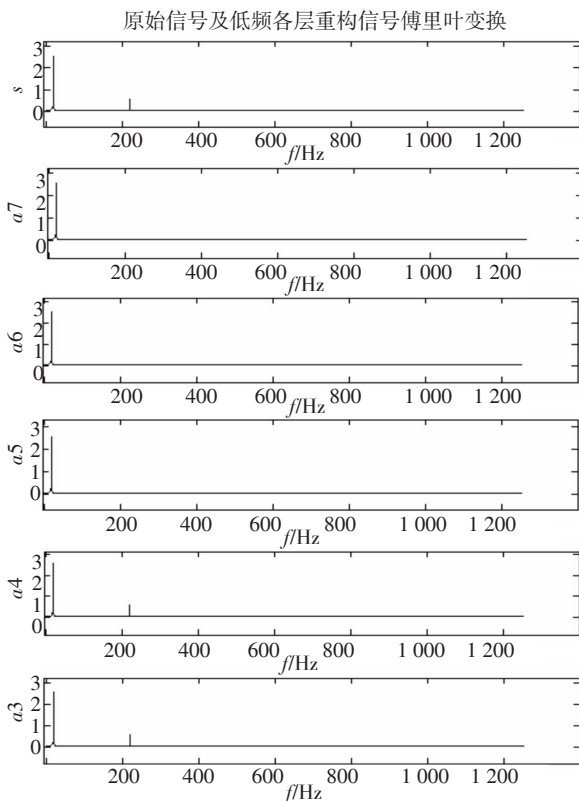


(a)原始信号及低频部分各层重构信号

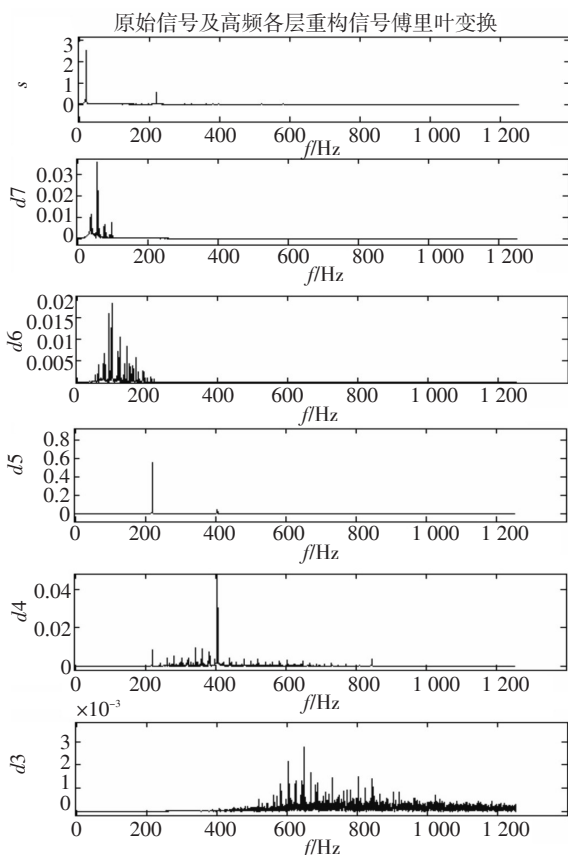


(b)原始信号及高频部分各层重构信号

图3 原始信号及重构信号波形图



(a)原始信号及低频部分各层重构信号频谱



(b)原始信号及高频部分各层重构信号频谱图

图4 原始信号及各层重构信号频谱图

由前述模型分析可知,石英摆片的振动信号包含自振信号和扭振信号两种频率成分,自振信号幅度大、频率低、扭振信号幅度小且频率高。从图3中可以看出,图中低频部分第5层开始出现一个低频高强度信号,高频部分在第5层出现一个高频低强度信号,这两个信号分别为自振信号和扭振信号,可以看到两个信号在第5层中被成功的分离。

进一步的,可以观察到,自振信号出现在第5层到第7层,扭振信号只出现在第5层,这说明两种信号所处的频率范围分别为0~39.062 5 Hz和156.25~312.5 Hz。

为更直观的观察信号分离后信号频谱的变化,图4给出了图3中对应信号的频谱图。从图4中可清晰观察到,低频部分第3~4层中同时包含自振信号与扭振信号两种频谱成分,从第5层开始到第7层只含有自振信号一种频谱成分,高频部分只在第5层出现了扭振信号一种频谱成分,而且从频谱中可粗略得出自振信号的频率为14 Hz左右,扭振信号频率为218 Hz左右。

通过以上分析可知,利用小波变换成功的将自振信号与扭振信号分离,小波变换是一种非常有效的石英摆片振动信号分离工具。

5 结论

分析了激光三角法石英摆片测量中振动信号的特点,根据信号模型,使用具有多分辨率分析能力的小波变化为分析工具,实现大强度、低频率自振信号与小强度、高频率扭振信号的分离,实验结果表明了该方法的有效性。

参考文献

- [1] 邹丽敏,杨文国,金文良,等. 基于激光三角法的挠性器件动态摆频测试系统[J]. 光电子·激光, 2003, 14(12): 1315-1318.
- [2] 马洪文,谭久斌,杨文国,等. 薄片式挠弹性器件漫反射激光三角法频率测量[J]. 光电子·激光, 2004, 15(7): 849-852.
- [3] 袁峰,施平,蒋祖军,等. 石英摆片综合参数测试系统[J]. 哈尔滨科学技术大学学报, 1994, 18(3): 26-28.
- [4] 周林,夏雪,万蕴杰,等. 基于小波变换的谐波测量方法综述[J]. 电工技术学报, 2006, 21(9): 67-74.
- [5] 汪安民,王殊. 基于小波变换的高分辨率信号频谱分析

方法[J]. 计量技术, 2004, 12: 3-5.

- [6] 严居斌, 刘晓川, 张斌. 基于DSP的小波算法的实现[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2002, 34(2): 92-95.
- [7] 潘朝洪, 张昱, 金心宇, 等. 加窗傅里叶和小波变换在电能质量分析中的综合应用[J]. 江南大学学报: 自然科学版, 2007, 6(4): 403-408.

- [8] 张月, 王睿. 光电探测器脉冲相关噪声增强效应研究[J]. 光电技术应用, 2018, 33(1): 24-29.
- [9] 万安军, 李佳洛, 赵勋杰. 锡膏检测(SPI)中摄像机走位算法设计[J]. 光电技术应用, 2018, 33(2): 32-34.
- [10] 潘丽姣, 金伟健. 应用MapReduce的多维小波变换模型[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2016, 35(1): 98-100.

(上接第61页)

2.5 生成效果

以飞机穿云为例, 仿真生成3~5 μm 红外场景序列图像, 图10(1)中飞机被云层遮挡, 观测不到的机身, 但随着飞机的飞行, 机身逐渐清晰。

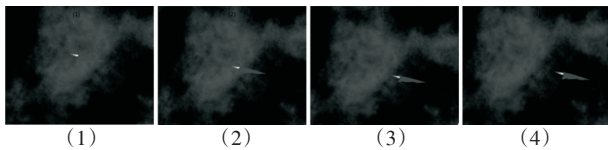


图10 3~5 μm 飞机穿云生成图像结果

从图像中可以看出, 生成结果有较高的真实性。

使用图层化的计算机红外场景生成方法, 将组成场景的要素分层计算, 可以使计算清晰明确, 进而简化整个红外场景的计算复杂度。同时这种生成方法生成红外场景层次分明, 具有较高的真实度。

3 结束语

红外场景仿真是视景仿真技术领域中的重要研究内容之一, 利用计算机仿真生成三维红外场景, 可以对三维场景中的各个组成部分进行位置或状态的调整, 具有很大的灵活性和广泛的应用前景。

文中研究成果可以应用于红外成像半实物仿真系统的建设。将生成的红外场景图像传送给电

阻阵列或可变形反射镜阵列(DMD)的控制器中, 控制器将接收到的红外图像转换成电信号, 驱动电阻阵列或DMD发出红外热图像, 产生的红外热图像经光学系统的匹配后提供给各种真实的红外成像系统使用, 用于图像处理算法验证与改进及现有设备的性能测试及提高等。

参考文献

- [1] R D小哈德逊(美). 红外系统原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1975: 10-100.
- [2] 王乘, 李利军, 周均清, 等. Vega实时三维视景仿真技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005.
- [3] 姚连兴, 仇维礼, 王福恒. 目标和环境的光学特性[M]. 北京: 中国宇航出版社, 1995.
- [4] 周茂树, 何启予, 金国祥, 等. 飞航导弹红外导引头[M]. 北京: 中国宇航出版社, 1995.
- [5] 李世祥. 光电对抗技术[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2000.
- [6] 吴家铸, 党岗, 刘华峰, 等. 视景仿真技术及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001.
- [7] 东瑞, 董国才, 沈猛. 红外成像导引头半实物仿真系统研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(8): 2027-2029.
- [8] 花文波, 杨东升. 天空背景红外图像仿真[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(3): 568-572.
- [9] 彭伟, 李攀. 基于GPU的动态天空场景仿真[J]. 计算机工程与设计, 2012, 33(5): 1938-1942.
- [10] 李建勋, 童中翔, 王超哲, 等. 飞机目标红外特性计算与图像仿真[J]. 兵工学报, 2012, 33(11): 1310-1318.