

压电单晶材料常数测量超声共振谱分析仪研究

苗鑫,陈子云,董超慧,李世阳,韩韬

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院,上海 200240)

摘要: 日益增长的新材料表征需求成为驱动超声共振谱分析仪发展的动力,而小尺寸、试样形状非规则等一系列个性化需求使得现有的超声共振谱分析仪已无法满足要求。该文借助实验室已有的通用超声测量仪器 RAM-5000/SNAP, 搭配相应的压电换能器, 实现试样激发和共振谱数据采集, 基于 LabVIEW 和 MATLAB 开发了界面友好的仪器操作界面、实现了 Ritec 仪器自动控制。此外, 该文提出了一种将粒子群和模拟退火算法相结合的高性能优化算法, 用于实现各向异性材料常数逆运算的求解。利用商用有限元软件 COMSOL 和 Matlab 接口程序, 完成试样本征频率的正向计算和模式自动分析, 可扩展到不规则、任意形状样本材料常数的测量。仪器的主要性能指标包括扫频范围为 10 kHz~33 MHz, 扫频分辨率为 50 Hz。另外, 由于 Ritec 测量仪器兼具线性和非线性声学测量功能, 故本仪器可以自然地扩展成为非线性超声共振谱分析仪。最后, 测量了各向异性材料硅酸镓的弹性和压电材料常数, 测量结果准确, 验证了研制仪器的性能。

关键词: 材料常数; 基于粒子群的模拟退火算法; 模式自动分析; 超声共振谱分析仪

中图分类号: TN384; TM23; TH89

文献标识码: A

DOI: 10.11977/j.issn.1004-2474.2018.04.024

Study on Resonant Ultrasound Spectroscopy for Measurement of Piezoelectric Single Crystals Material Constant

MIAO Xin, CHEN Ziyun, DONG Chaohui, LI Shiyang, HAN Tao

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The growing demand for new material characterization has become the driving force behind the development of resonant ultrasound spectroscopy (RUS), while a series of personalized requirements, such as small size and irregular shape, make the existing RUS unable to meet the requirements. This paper realizes the sample excitation and the data acquisition of resonance spectrum by using the conventional universal ultrasonic measuring instrument RAM-5000/SNAP equipped with the corresponding transducer, and a friendly-interface instrument based on LabVIEW and MATLAB has been developed, which realizes the automatic control of the instruments. In addition, a high performance optimization algorithm combining particle swarm optimization with simulated annealing algorithm (PSO-SA) is proposed to solve the inverse operation of anisotropic material constant. We have accomplished the positive calculation of the sample eigenfrequency and automatic mode analysis with the commercial finite element software COMSOL and Matlab interface program, which can be extended to the measurement of the sample material constants of irregular, arbitrary shape. The sweep range of the instrument is 10 kHz~33 MHz. The sweep resolution is 50 Hz. Since the Ritec measuring instrument has both linear and non-linear acoustics measurements, it can naturally be expanded into a nonlinear RUS. The elastic constants and piezoelectric constants of anisotropic material of $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ (LGS) have been measured. The measurement results are accurate, which verifies the performance of the developed instrument.

Key words: material constant; PSO-SA; modal automatic analysis; resonant ultrasound spectroscopy

0 引言

材料的弹性常数是评价材料的制备工艺和力学等性能的重要表征。准确的弹性常数测量对器件的

性能仿真和优化设计具有重要的意义^[1]。各种材料弹性常数测定方法主要有脉冲回波法、激光检测技术^[2-5]及 IEEE 标准规定的谐振法^[6]等。与这些方

收稿日期:2017-09-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11474203, 11774230);国家重点研发计划资助项目(2016YFB0402700)

作者简介:苗鑫(1992-),男,内蒙古包头人,硕士生,主要从事超声共振谱仪器的研究。通信作者:韩韬(1973-),男,山东人,教授,博士生导师,主要从事基于微声技术的传感与执行技术、现代检查理论与方法和抗恶劣环境的自动测控仪器的研究。E-mail: than@situ.edu.cn.

法相比,超声共振谱(RUS)法仅用单一试样可测量材料的所有常数,避免了复杂的多种试样制备和因多种试样工艺不一致而造成材料常数不一致,极大地方便了测量。自20世纪70年代开始,该方法被用于测量各向同性体材料的弹性模量,后逐渐拓展到凝聚态物理、新材料和核工程等领域中各向异性体材料的弹性常数测量^[7-9]。

目前,日本 InsightKK 公司生产的超声共振谱仪 IDMS-N200 只能测量出材料的超声共振谱图,并不能直接测得材料的弹性常数。美国 Dynamic Resonance System 的 Magnaflux Quasar 超声共振谱仪器是一种可用于测量材料弹性常数和相关材料性能的集成系统,但该仪器可扫描的频率范围仅有 9 MHz,限制了其在小尺寸试样的应用。更严重的是,现有的商用化 RUS 仪器在利用共振谱反演材料常数时,仅提供 Levenberg-Marquardt (LM) 算法^[10],该寻优算法实际采用的是梯度下降法。反演各向异性材料常数时,逆运算中需要拟合的材料常数个数可多达 21 个,要求材料常数的初始值必须与其真实值相近,否则算法易陷入局部极小值。

近年来,日益增长的新型各向异性材料常数测量表征需求的驱动下,对 RUS 分析仪提出了更高的要求:

1) 新研制/制备的各向异性材料具有尺寸较小、各部分不均匀等特点,为确保小尺寸试样可以被表征,需要 RUS 分析仪器具有很高的激励频率。因此,最高激励频率成为决定仪器可测量材料最小尺寸的关键指标。

2) 迫切要求 RUS 分析仪在正向求解日益复杂结构或任意不规则形状的试样本征频率时,具备不失一般性的方法,如采用有限元法代替通常的仅适用于规则形状试样计算的算法。

3) 针对有限元等通用本征模态分析法计算时间较长的问题,RUS 分析仪中的寻优算法迫切需要全局优化,但迭代次数少的高性能算法。因此,很多研究机构均在自行研制高性能的 RUS 分析仪。

为快速搭建一台高性能 RUS 仪器,本文借助于实验室已有的通用超声测量仪器 RAM-5000/SNAP,搭配相应的换能器,实现试样激发和共振谱数据采集,并基于 LabVIEW 和 MATLAB 开发了界面友好的仪器操作界面和 Ritec 仪器自动控制,利用商用有限元软件 COMSOL 和 MATLAB 接口程序,实现了试样本征频率的正向计算、模态自动分析。此外,本文研发了一种基于粒子群结合模拟退火的高性能优化算法,实现各向异性材料常数逆运算的求解。由于 Ritec 测量仪器兼具线性和非线性

声学测量功能,因此,本仪器可以自然地扩展成为非线性超声共振谱分析仪。在实验部分,我们测量了各向异性材料的典型代表——硅酸镓镧(LGS)压电单晶的弹性和压电材料常数,验证了研制仪器的性能。

1 超声共振谱分析仪设计

1.1 RUS 法测量材料常数的基本原理

一个弹性体试样在自由边界条件下本身具有若干本征固有模态,这些固有模态与弹性体的形状、密度、弹性常数等因素有关。当试样的形状、密度已知的情况下,将待测试样体对角线的 2 个顶角用 2 个换能器轻轻夹住。利用一个换能器不断更换激励频率扫频,利用另外一个换能器接收振动。当激发频率与特定形状试样的本征模态一致时,接收换能器就可以接收到一个幅度较大的振动。利用扫频测量出的一系列试样本征频率与猜测的材料常数计算所得的共振频率进行拟合,不断迭代调整材料常数,使尽可能多的频率完全匹配,从而反推出试样的全部材料常数。

1.2 仪器总体设计

基于上述原理,超声共振谱分析仪的总体结构框图如图 1 所示。通过提取测量的共振谱中的本征频率与仿真计算的本征频率相比,计算差值,不断迭代改变弹性系数的初始值,直到本征频率差值小于要求值。

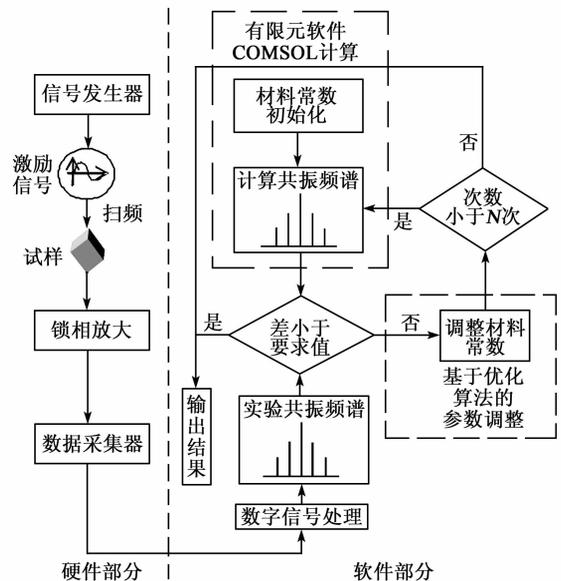


图1 仪器的总体结构框图

1.2.1 硬件部分

仪器信号激励、检测硬件原理框图如图 2 所示。采用带宽为 33 MHz 的信号发生器用于激励超声换能器。对接收信号首先进行前置锁相放大后,再利

用接收装置进一步可调增益放大,然后用16位A/D采样板卡进行数据采集。内置程控增益放大器放大倍数在20~100 dB可调。衰减器用于调节输出电压。输入信号的放大倍数和输出功率均自动可调,目的是保证探测试样的本征模式幅度的动态范围。

硬件部分主要包括发射/接收超声换能器、信号发生器、高灵敏度信号接收和数据采集部分。后面3部分功能由Ritec RAM-5000一体化完成,选择该仪器的主要原因在于其具有以下特点:

1) 扫频范围为10 kHz~33 MHz,适用于仅有数百微米尺寸材料常数的测量。

2) 扫频分辨率低至50 Hz,有利于提高超声共振谱的频率检测精度,确保对低频率敏感度材料常数(如压电材料常数)的准确测量。

3) 接收部分采用正交解调,整机接收灵敏度可达-120 dBm。

4) 仪器具有发射/接收双通道,且收/发功能自由切换。因此,当采用2个换能器顶角夹持试样时(见图2),可以有“上激下收”和“下激上收”两种组合方式,两种方式可灵活调换,即上面的换能器作为激励,下面的换能器作为接收(也可以下面的换能器作为激励,上面的换能器作为接收)。通过这两种组合方式可测量出更多可分辨的共振峰。

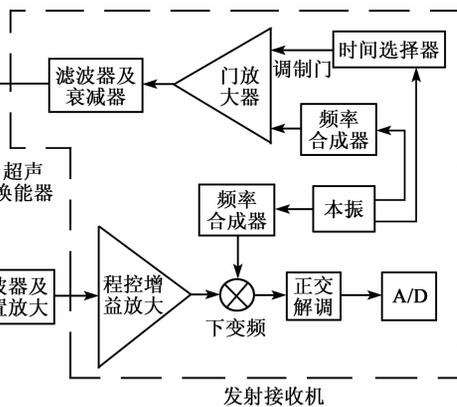


图2 信号激励、检测硬件原理框图

1.2.2 换能器选取原则

超声共振谱分析仪使用的换能器对发射声压、带宽要求不同于无损检测。为了防止换能器的谐振频率对待测试样谐振频率产生影响,换能器中心频率应远离待测试样的谐振频率,且有较高的接收灵敏度。为适用于在仅有数百微米尺寸材料常数的测量,选用换能器的中心频率尽可能高且换能器的直径应尽可能小。激励换能器和接收换能器采用顶角夹持方式而不是面对面方式,减少换能器之间的空气耦合。选择采用两种振动模态的换能器(纵波、剪切波),对接收的共振峰可以进行初步的划分,方便

正确的模态识别。

1.2.3 试样夹持方式

如图3所示,采用2个换能器夹持试样体对角线。一条水平导轨,通过固定孔固定在防震台上。3个滑块通过滑动槽装配在导轨上,内部装有滚珠,可左、右滑动。3个滑块上分别固定3个铝块,其中铝块3两端固定,不可滑动;铝块1左侧固定;铝块2不固定,可左、右滑动。铝块1、2之间用弹簧连接,在试样振动时,铝块2可根据振幅大小有微小滑动,防止了应力过大而损坏换能器,也方便放置试样。在铝块2、3上分别固定夹持装置,为保证良好的同轴度及防止两换能器间互相干扰,选用一块“上”字形塑料材料,上部开直径为 $\varnothing 9.5$ mm的圆形孔(换能器直径为 $\varnothing 9$ mm),孔的上部与上表面间垂直切开,装配螺丝,拧紧螺丝后可夹紧换能器。根据换能器直径调节夹紧力,防止夹持过紧,夹坏换能器晶片。此外,换能器的晶片(头部)部位要露出,否则换能器的振动会受夹具谐振的影响,因此,将夹具上部开孔处削薄,使换能器的头部探出。此夹持装置具有以下2个优势:

1) 两换能器间具有很高的同轴度。如果同轴度不高,试样需要更大的预紧力才能被夹紧,而预紧力会影响试样的振动模态及谐振频率。

2) 可以测量不同大小的试样。根据试样大小,调整铝块1的位置,从而测量不同大小的试样。

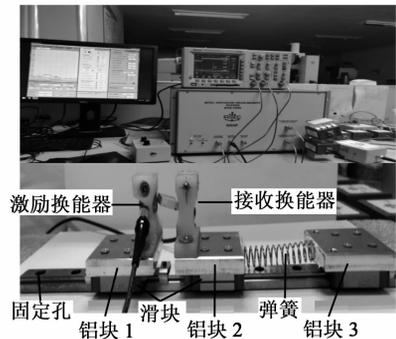


图3 基于超声共振谱方法的测试样机

1.3 软件部分

仪器的软件部分主要包括基于Labview的RAM-5000/SNAP自动扫频和数据采集、数字信号处理部分、基于有限元软件COMSOL的试样谐振频率正向计算,以及基于粒子群的模拟退火算法被测材料常数自动调整等4部分。数字信号处理部分包括对换能器激励信号的加窗处理及对换能器接收信号做频谱分析时频谱插值处理等,通过这些数字信号处理方法,可以提高频率分辨率。利用COMSOL软件提供的Matlab接口,可自动修改有限元软件中的材料常数值,并将计算获得的试样共振谱

结果导出,以便对共振谱的峰值进行模态自动分析。

材料常数求解流程图如 4 所示。软件的控制流程:

- 1) 输入材料常数的初始范围及优化算法中参数的初始值。
- 2) 基于优化算法的优化结果产生一组材料常数初始值,利用有限元软件计算这组材料常数下的共振谱图。
- 3) 将实验测量的共振谱图与计算的共振谱进行匹配,对比计算其差值。
- 4) 比较差值与前一组材料常数计算的差值,若小于则保留当前产生的这组材料常数值,否则将其舍弃,返回 2) 重新计算。

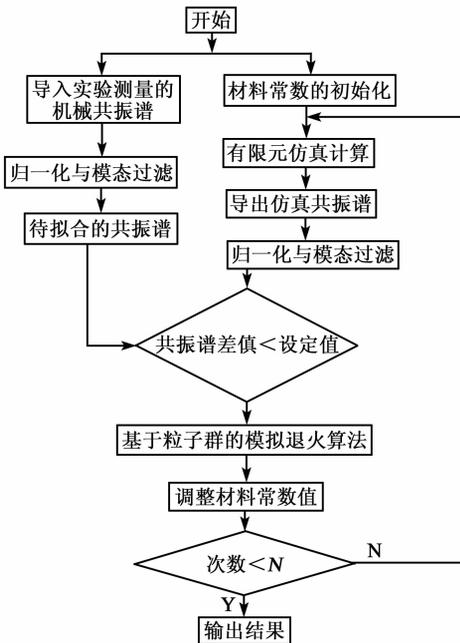


图 4 材料常数求解流程图

仿真分析发现,实验测量的共振谱中峰值较低的谐振峰更易受到换能器夹持试样预紧力的影响。所以,首先需要滤除测量及仿真计算获得的共振谱中幅值较低的谐振模态;在进行共振谱图匹配对比时,对实验测量的共振谱和仿真计算的共振谱进行等间隔取峰。将第一个距离相近的峰值作为同一本征模态下峰值,然后依次比较其他峰值,该匹配策略可以减小峰之间的干扰,有助于在同一本征模态下进行识别对比。

用 RUS 仪器测得超声共振谱后,需要根据测得的共振谱图进行逆运算求解弹性常数。我们需要用最优化算法对测得的谐振频率和计算的本征频率进行共振谱图匹配,不断调整估计的弹性常数值,使得计算频率与测量频率差值的平方和最小:

$$F(x) = \sum_{i=1}^m \omega_i [f_i^{(\text{means})}(x) - f_i^{(\text{calc})}(x)]^2 \quad (1)$$

式中: $f_i^{(\text{means})}(x)$ 为测量频率; $f_i^{(\text{calc})}(x)$ 为计算频率; ω_i 为测量频率可信度的权重值,取值范围 0~1,除在基本模态(最低频率时)外,通常设为 1。

在反演各向异性材料常数时,逆运算中需要拟合的材料常数个数可达 39 个(21 个弹性常数、18 个压电常数),粒子群算法易陷入局部极小值。本文提出的基于粒子群的模拟退火算法,是将粒子群算法中的定向寻优^[11-12]与模拟退火算法中 Metropolis 接受准则^[13-14]相结合,将模拟退火算法中按照马尔科夫原则产生新解的过程替换成按照粒子群算法中的速度与位置公式产生新解的过程。通过这种替换,减少了优化次数,保留模拟退火算法中 Metropolis 接受准则使得该算法在寻优参数较多的情况下也可以实现全局寻优。

基于粒子群的模拟退火算法的流程图如图 5 所示。

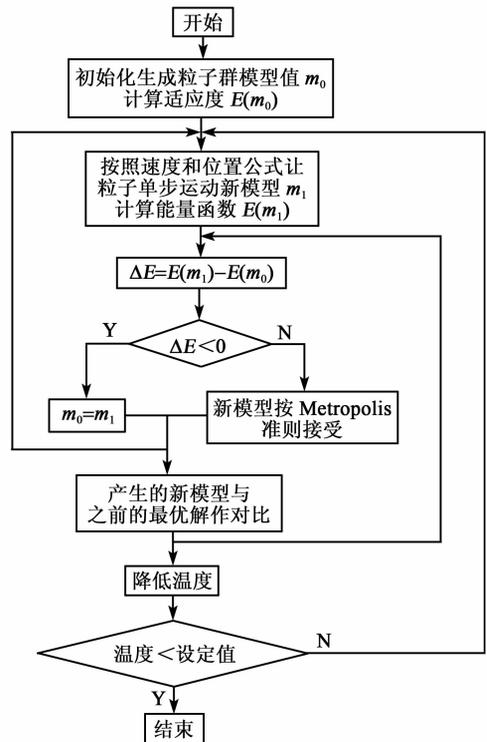


图 5 基于粒子群的模拟退火算法流程图

具体计算步骤如下:

步骤 1:初始化温度参数及一个维数大小为 10 的粒子群,计算每个粒子的适应度值。

步骤 2:按照速度和位置公式更新下一个粒子参数值。

$$v_{id} = v_{(i-1)d} + k_1 \times rand_1(\cdot) \times (p_{id} - x_{id}) +$$

$$k_2 \times rand_2(\cdot) \times (p_{gd} - x_{id}) \quad (2)$$

$$x_{id} = x_{(i-1)d} + v_{id} \quad (3)$$

式中： $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$ 为粒子的位置； $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$ 为粒子的速度； $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id})$ 为粒子的适应值； $P_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gd})$ 为粒子的最优值； k_1, k_2 是粒子群算法中自定义的 2 个正常数，称为加速因子，一般取 $k_1 = k_2$ ； $rand_1$ 和 $rand_2$ 是分布在 $[0, 1]$ 范围内的各自独立的随机数。由于粒子群算法有方向的产生新解，所以迭代次数较少。

步骤 3: 计算每个新粒子的适应度值，与上一次的适应度值作差值，若新的适应度值小于原来的适应度值，则跳入 Metropolis 准则判断是否接收新的值，否则将新的适应度替代原来的值；Metropolis 接受准则以一定的概率接受某个新解，即

$$p = e^{-\Delta E/T} \quad (4)$$

式中： ΔE 为能量差； T 为温度。

步骤 4: 降低温度，重复步骤 2 计算，直到迭代温度小于设定值。

在测量一组新材料常数时，只要给出一组初值，即使这些初值与真实值的误差会达到 200%。这时识别材料真实的本征模态位移图很难，采用本征模态图匹配求解材料常数很难实现。本文利用共振谱

图匹配反解材料常数可在一个区间内实现，不需要较多弹性常数的先验知识，当对材料常数未知时只是寻优区间较大算法迭代次数会增加，同样可以准确地求解未知材料材料常数。

2 实验验证

为了验证研制仪器的性能，我们测量 LGS 压电单晶材料的弹性和压电材料常数。

2.1 LGS 材料常数敏感度分析

为了确保弹性常数所有各向异性分量的可测量性，我们提出敏感度系数 $\frac{\partial f}{\partial c_{ij}}$ 的概念。弹性常数的差值 Δc_{ij} 影响本征频率的差值 Δf ，敏感度系数的计算^[15]：

$$\Delta c_{ij} = \frac{1}{\frac{\partial f}{\partial c_{ij}}} \Delta f \quad (5)$$

由式(5)可知， $\frac{\partial f}{\partial c_{ij}}$ 越大，弹性常数越敏感，弹性常数越易测量。

基于有限元软件 COMSOL 仿真分析了 $8 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 的 LGS 晶体弹性常数的敏感度系数，结果如图 6 所示。由图可见，LGS 弹性常数的

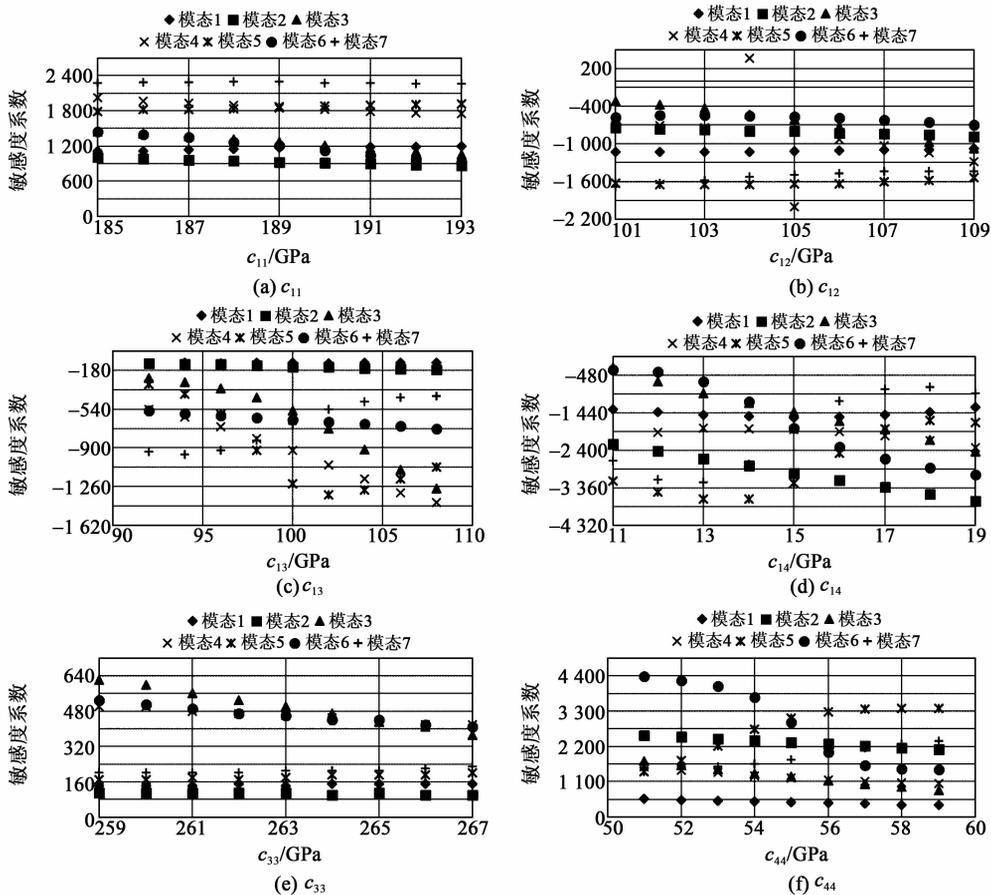


图 6 弹性常数的敏感度系数

敏感度系数中 c_{33} 相对较小,故在用 RUS 方法测 LGS 的弹性常数时需要优先考虑 c_{33} 。

另外,我们仿真分析了 $12\text{ mm} \times 12\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 正方体 LGS 晶体的 c_{33} 的敏感度系数,仿真结果发现,正方体 LGS 晶体的 c_{33} 的敏感度系数最大为 420。由图 6 可看出,长方体 LGS 晶体的 c_{33} 的敏感度系数最大为 620,大于正方体试样 c_{33} 的敏感度系数,故在制备待测试样时选用长方体试样。

2.2 实验测量

实际使用中,LGS 试样的三维尺寸分别为 12.00 mm 、 8.04 mm 、 3.96 mm ,质量密度 ρ 为 5.743 kg/m^3 。

在常温下对试样进行多次测量。对于各向异性材料 LGS 的材料常数较多(6 个独立的弹性常数和 2 个压电常数),需要测量的共振谱更精确。本文基于 LabVIEW 实现了 Ritec 仪器自动控制,使得 Ritec 仪器可以自动扫频,并将接收到的数据通过数字信号处理再做频域分析,最后将每一个频率对应的幅值自动保存下来,对试样进行多次测量,测量结果有较好的重复性。图 7 为 LGS 试样的共振谱测量结果。

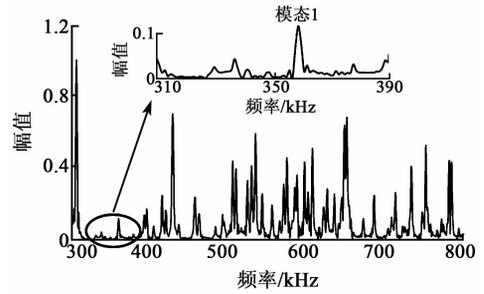


图 7 实验测量的超声共振谱

通过设定峰值的最小幅度和峰值之间的最小间隔,从而对其进行模态自动分析和模态过滤,峰值识别和模态选择结果如图 8 所示。利用搭建的高性能 RUS 仪器编写的 MATLAB 控制界面和基于粒子群的模拟退火算法对 LGS 晶体的材料常数进行求解,求解结果如表 1 所示。表中文献列出的是在相

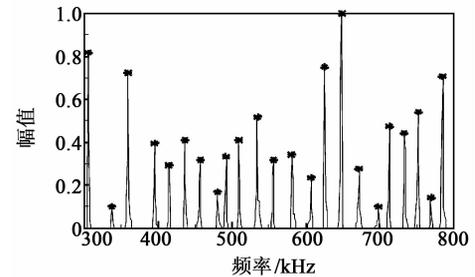


图 8 实验测量共振谱模态过滤图

表 1 试样的测量结果

参数	文献[12]	文献[16]	文献[17]	均值	SA	PSO	PSO-SA
$e_{11}/(\text{C} \cdot \text{m}^{-2})$	-0.45	-0.43	-0.44	-0.44	-0.45	-0.44	-0.44
$e_{14}/(\text{C} \cdot \text{m}^{-2})$	0.08	0.11	0.07	0.09	0.095	0.10	0.088
c_{11}/GPa	190.90	189.30	188.90	189.70	190.60	190.10	189.50
c_{12}/GPa	106.30	105.00	104.60	105.30	107.00	102.70	105.70
c_{13}/GPa	104.20	95.28	96.80	98.760	97.50	105.60	100.50
c_{14}/GPa	15.20	14.90	14.30	14.80	12.90	15.60	14.60
c_{33}/GPa	261.90	262.40	262.20	262.20	263.20	258.60	262.10
c_{44}/GPa	52.40	53.80	53.90	53.40	53.50	58.30	53.10
c_{66}/GPa	43.20	42.20	42.20	42.50	41.80	43.70	42.90

同密度和介电常数下测量的压电系数(e_{ij})和弹性常数(c_{ij})值,其中, $c_{66} = \frac{(c_{11} - c_{12})}{2}$ 。

由表 1 可知,本仪器测量的 LGS 材料常数值在已发表值的范围内。根据表 1 的求解结果,可计算出 3 种算法求解 LGS 材料常数相比与文献[12,16-17]中测量材料常数平均值的相对偏差,如图 9 所示。图中,纵轴表示测量相对偏差为 $(|c_{ij}^{(\text{calc})} - c_{ij}^{(\text{means})}| / c_{ij}^{(\text{means})}) \times 100\%$ 。由图可知,求解 LGS 压电常数的相对偏差为 2.3%,弹性常数的相对偏差 $< 2\%$ 。本文提

出的基于粒子群的模拟退火算法求解 LGS 材料常数各向异性分量的相对偏差波动性小于其他两种算法。

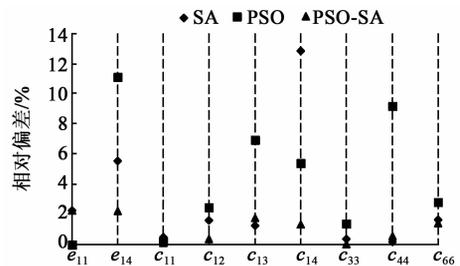


图 9 材料常数相对偏差对比图

3 结束语

本文借助于实验室已有的通用超声测量仪器 RAM-5000/SNAP, 搭配相应的换能器, 实现试样激发和共振谱数据采集, 并基于 LabVIEW 和 MATLAB 开发了界面友好的仪器操作界面和 Ritec 仪器自动控制。利用商用有限元软件 COMSOL 和 Matlab 接口程序, 实现了试样本征频率的正向计算、模态自动分析。此外, 本文研发了一种基于粒子群结合模拟退火的高性能优化算法, 实现各向异性材料常数逆运算的求解。由于 Ritec 测量仪器兼具线性和非线性声学测量功能, 因此, 本仪器可以自然地扩展成为非线性超声共振谱分析仪。在实验部分, 我们测量了各向异性材料的典型代表 LGS 压电单晶的弹性和压电材料常数, 测量结果准确, 验证了研制仪器的性能。

参考文献:

- [1] ZU H, WU H, WANG Q M, et al. Characterization of elastic constants of $\text{Ca}_3\text{TaGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ at high temperatures by antenna transmission acoustic resonance[C]// Taipei: 2015 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), 2015: 1-4.
- [2] ROSSIGNOL C, PERRIN B, BONELLO B, et al. Elastic properties of ultrathin permalloy/alumina multilayer films using picosecond ultrasonics and Brillouin light scattering[J]. *Physical Review B*, 2004, 70(9): 094102
- [3] OGI H. Thin-film elastic constants and their temperature behaviors studied by picosecond ultrasound spectroscopy[C]//Chiba, Japan; 2015 Sixth International Symposium on Acoustic Wave Devices for Future Mobile Communication Systems, 2015: 46-50.
- [4] ICHIHASHI H, YANAGITANI T, SUZUKI M. Effect of Sc concentration on shear wave velocities in ScAlN films measured by micro-Brillouin scattering technique[C]//Chicago, Illinois USA; 2014 IEEE International Ultrasonics Symposium, 2014: 2521-2524.
- [5] SCHNEIDER D, WITKE T, SCHWAZ T, et al. Testing ultra-thin films by laser-acoustics[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2000, 126(2): 136-141.
- [6] KONNO A, KADOTA M, KUSHIBIKI J, et al. Determination of full material constants of ScAlN thin film from bulk and leaky lamb waves in MEMS-based samples[C]//Chicago, Illinois USA; 2014 IEEE International Ultrasonics Symposium, 2014: 273-276.
- [7] SHEKHTER A, RAMSHAW B J, LIANG R, et al. Bounding the pseudogap with a line of phase transitions in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+\delta}$ [J]. *Nature*, 2013, 498 (7452): 75-77.
- [8] LI G, GLADDEN J R. High temperature resonant ultrasound spectroscopy: A review [J]. *International Journal of Spectroscopy*, 2010: 1-13.
- [9] OHNO I, HARADA K, YOSHITOMI C. Temperature variation of elastic constants of quartz across the $\alpha\beta$ transition [J]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 2006, 33(1): 1-9.
- [10] WILAMOWSKI B M, IPLIKCI S, KAYNAK O, et al. An algorithm for fast convergence in training neural networks[J]. *Neural Networks*, 2001: 1778-1782.
- [11] 冯奇峰, 李言. 改进粒子群优化算法在工程优化问题中的应用研究[J]. *仪器仪表学报*, 2005, 26(9): 984-987. FENG Q F, LI Y, Research on the application of IPSO in engineering optimization problem[J]. *Chinese Journal of Science Instrument*, 2005, 26(9): 984-987.
- [12] KAMINSKII A A, SILVESTROVA I M, SARKISOV S E, et al. Investigation of trigonal $(\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x)_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ crystals spectral laser and electromechanical properties[J]. *Physica Status Solidi A*, 1983, 80(2): 607-620.
- [13] 杨先辉, 张秋华, 孙圣和, 等. 一种基于模拟退火算法的光纤光栅参数重构方法[J]. *仪器仪表学报*, 2004, 25 (Suppl. 1): 767-768. YANG X H, ZHANG Q H, SHUN S H, et al. A method for reconstruction FBG based on a simulated annealing algorithm[J]. *Chinese Journal of Science Instrument*, 2005, 25 (Suppl. 1): 767-768.
- [14] 王凌. 智能优化算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [15] OHNO I. Free vibration of a rectangular parallelepiped crystal and its application to determination of elastic constants of orthorhombic crystals [J]. *Journal of Physics of the Earth*, 1976, 24(4): 355-379.
- [16] SAKHAROV S, SENUSHENCOV P, MEDVEDEV A, et al. New data on temperature stability and acoustical losses of langasite crystals [C]//San Francisco, CA; Proceedings of the 1995 IEEE International Frequency Control Symposium (49th Annual Symposium), 1995.
- [17] ILYAEV A B, UMAROV B S, SHABANOVA L A, et al. Temperature dependence of electromechanical properties of LGS crystals[J]. *Physica Status Solidi*, 1986, 98(2): 109-114.