

声学法测棒材体积模量的自动识别算法

任洁 江剑

(南京理工大学机械工程学院 南京 210094)

摘要:提出了利用超声波法测量材料体积模量的自动识别目标点算法。针对不同棒状材料,使用超声波纵波直探头测量直达纵波时间和变形横波产生的延时纵波到达的时间计算超声波在该种材料中的横波声速和纵波声速,并得到其体积模量。在分析不同材质和尺寸对于特征点位置影响的基础上,设计了自动搜索算法替代手动闸门截取波形寻找特征点,从而简化了超声波测量体积模量的步骤。对于长径比在 5 :1 左右的钢和铝等金属试件测量不确定度在 1% 以下,相同尺寸的有机玻璃和尼龙等非金属试件不确定度在 3% 以下。

关键词:体积模量;超声波;变型横波;自动识别

中图分类号: TP2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520

Automatic recognition algorithm for ultrasonic measurement of rod-shaped materials' bulk modulus

Ren Jie Jiang Jian

(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: An automatic recognition algorithm of testing bulk modulus by making use of variant transverse wave is proposed. Use two straight beam probes to measure the direct longitudinal wave's arriving time as well as the delay wave's arriving time caused by variant transverse wave for rod-shaped test-pieces of different materials. According to this two parameters, longitudinal and shear wave velocities and bulk modulus can be calculated of the materials. Design an automatic recognition algorithm to find the target points instead of using lock gates after analysis the influence of different material properties and dimensions. The results show that the uncertainty is less than 1% when test-pieces are metal materials such as steel and aluminum whose length-diameter ratio is about 5, and the uncertainty is less than 3% of non-metal test-pieces like plexiglass and nylon the same size.

Keywords: bulk modulus; ultrasonic; variant transverse wave; automatic recognition

1 引言

体积模量是分析材料力学性能的一个重要指标。体积模量和弹性模量以及泊松比之间存在确定的代数关系。不论是金属材料、复合材料或者是液体材料,体积模量的测量有利于确定材料在外力作用下的弹性性能,对航空航天、仪器仪表等领域中的传感、连接和缓冲等结构件材料选择有重要作用^[1]。

目前材料模量的测量方法主要有共振法、超声波法和压入法。声学法相较于其他两种方法具有测量方法简单,适用范围广等特点^[2]。国内外学者对于声学法检测材料

弹性模量提出了多种测量方法。其基本原理是根据材料密度,表征声波在材料介质中传播的速度,以及声速和体积模量之间关系来反演出材料体积模量值^[3-4]。因为测量纵波声速比较方便而且精确度较高,但测量横波声速对设备的要求较高且过程复杂,所以一般在测量弹性模量(包括体积模量)时,经常省略横波声速对于模量计算的影响,从而产生误差^[5]。本文在声学法测体积模量时,考虑了纵波声速和横波声速对计算的影响,并且设计了一种自动识别波形算法,降低了测量的专业性,减少了波形误判产生的测量误差。

2 体积模量测量方法和试件尺寸选择

材料的体积模量根据横波声速和纵波声速进行计算。体积模量的计算公式为

$$K = \rho \left(v_l^2 - \frac{4v_s^2}{3} \right) \quad (1)$$

式中： K 表示体积模量， ρ 表示密度， v_l 表示纵波声速， v_s 表示横波声速。试件密度根据其外部尺寸和质量进行测量。本文采用精度为 0.01 g 的电子天平测量试件的质量，采用精度为 1 μ m 的光栅测高仪测量试件长度和直径等尺寸。

对于固体细棒工件，使用纵波直探头进行测试时，会在直达底波后出现一个与该波相隔时间一定的延时波。文献[6-7]中提到，将纵波直探头放置在工件一面的上端面，直探头产生的掠入射波会在工件侧壁产生以临界角传播的变型横波，该横波会在试件的另一面侧壁反射出纵

波。这个纵波就是延时波。根据式(2)、(3)和测得的直达波和延时波的时间以及工件尺寸可以计算体积模量。

$$v_l = \frac{L}{T} \quad (2)$$

$$v_s = \frac{v_l}{\sqrt{1 + \left(\frac{v_l \tau}{D} \right)^2}} \quad (3)$$

式中： L 表示试件长度， D 表示试件直径， T 表示直达波传播时间， τ 表示延时波相对于直达波延迟时间。

本文所选的测量方法如图 1 所示。探头 A 为发射探头，放置在被测试件的一个端面，探头 B 为接收探头，放置在另一个端面的相对位置。探头 B 会接收到纵波直达波和由变形横波临界角入射产生的爬行纵波(下文称为延时波)。延时波相对于直达波的延时声程为：

$$\Delta = d \left(\frac{1}{\cos \alpha} \cdot \frac{v_l}{v_s} - \tan \alpha \right) \quad (4)$$

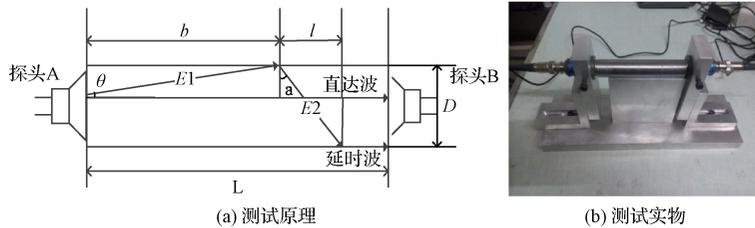


图 1 测试方法示意

为了达到简化测量方法且精确测量试件纵波声速和横波声速的目的，在选取探头和试件尺寸时必须满足以下条件：1) 试件的长度需要足够长，使得探头 A 产生的纵波能够进行两次反射和衍射产生沿下侧壁传播的纵波，即在直达波后产生一个延时波；2) 工件的横截面大小与探头相当，使得探头 B 既能接收到探头 A 发射的直达波又能接收到变形横波在试件下端面反射产生的延时波。

如本文所选的探头直径为 14 mm，假设探头的晶片声场指向角为 θ ，变形横波入射角为 α 。图 1 中表示波的传播路径中的长度关系如下式所示。其中 λ 表示探头的波长， d 表示探头的晶片直径。

$$\theta = \sin^{-1} \left(1.22 \frac{\lambda}{d} \right) \quad (5)$$

$$b = \frac{d}{2 \tan \theta} \quad (6)$$

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{v_s}{v_l} \quad (7)$$

$$l = D \cdot \tan \alpha \quad (8)$$

根据测试方法示意可得根据变型横波衍射产生的纵波测量横波声速的基本条件是对于试件长径比要求为 $L > b + l$ 。如选取的试件直径为 20 mm，根据式(4)~(7)可以计算得到 2A12 铝，45 号钢，不锈钢 304，有机玻璃，尼龙 6-6，聚四氟乙烯等 6 种材料在测量过程中所需的 b 和 l 的长度如表 1 所示。

表 1 材料尺寸选择参数表

材料	纵波声速 (m/s)	横波声速 (m/s)	探头频率 /MHz	D /mm	b /mm	l /mm	$b+l$ /mm
2A12 铝	6 130	3 070	5	20	65.14	11.57	76.71
不锈钢 304	5 640	3 070	5	20	70.87	12.98	83.85
有机玻璃	2 680	1 398	2.5	20	73.23	12.66	85.89
尼龙 6-6	2 600	1 100	2.5	20	76.92	9.34	86.26

根据表 1 可得，材料的纵波声速在 6 000 m/s 左右可采用频率为 5 MHz 的探头进行测量，纵波声速在 3 000 m/s 左右可采用 2.5 MHz 的探头，纵波声速在 1 500 m/s 左右可采用 1.25 MHz 的探头。当选取的试件

直径为 20 mm 时，选取试件的长度为 100 mm 基本上即可满足不同材料的测量要求。

超声波在试件中传播的折、反射率以不锈钢为例：其纵波声速为 5 640 m/s，横波声速为 3 070 m/s，选择探头

频率为 5 MHz,则晶片声场指向角为 6°。根据不锈钢的声速可计算得纵波入射角为 84°,纵波反射率为 0.5,横波反射率为 0.5,横波反射角为 32.79°。则变型横波的入射角为 32.79°,纵波反射角纵波反射率为 1.99^[8]。声波在试件中不断进行反射、波形转换、反射之后由探头 B 接收到多个回波。

3 交叉积分识别目标峰值点算法

目前超声探伤和超声检测仪一般需要技术人员手动寻找目标点,这使得操作人员必须具有一定的技术基础而且容易产生误判。在本文所描述的测体积模量方法中只要确定了材料的尺寸并采用合适频率的探头测量则可设计算法自动识别目标点。采用如图 1 方式测量时,采集到的第一个包络波为直达波,第二个波为延时波,第三个波为纵波二次反射产生的延时波。本文设计了一个寻找超声波目标点的算法,旨在自动寻找直达波和延时波波峰所在的时间点,并计算体积模量。

在超声检测中,超声波本身的不可定量性和噪声干扰等因素会造成接收到的超声波波形曲线上除了有效信息之外,还包含了许多毛刺和杂波,造成了超声波难以进行自动波形识别^[9]。但目标波峰相对于噪声干扰有以下两个特点:1)目标波峰具有一定波高,一般情况下是高于环境噪声产生的不规则波动^[10];2)脉冲噪声产生的波高具有满幅性即幅度很大,在峰值高度上不容易与目标波峰区分。但是同时脉冲干扰噪声具有单峰性,包含有效信息的目标波形是一个包络波,而脉冲噪声是孤立的单峰^[11]。

基于以上超声波特点本文设计了一个自动识别目标波形的算法,首先将经过包络和滤波等处理的波形按照一定的宽度进行交叉积分,一次采样点数共为 $(n+2) \lceil \frac{\omega}{2} \rceil$,取宽度为 ω ,即将积分域划分为 $0 \dots \omega-1, \lceil \frac{\omega}{2} \rceil \dots \lceil \frac{3\omega}{2} \rceil-1, \omega \dots 2\omega-1, \dots, k \lceil \frac{\omega}{2} \rceil \dots \lceil \frac{(k+2)\omega}{2} \rceil-1$ 其中 $(k=1,2 \dots$

$n; \lceil \cdot \rceil$ 表示向下取整)^[12]。在这 $k \lceil \frac{\omega}{2} \rceil + 1$ 个积分值中选取极大值,这些极大值所在的积分域中包含目标点。这样既可以保证不丢失有效数据点,又可以将单峰的脉冲噪声点剔除。接着在这些积分值极大点位置所在的积分域中求得最大点为直达波位置。因为根据超声波传播理论可得在一次底波的幅度最大,但是多个反射波叠加后的包络幅值可能比一次底波幅值大。所以在设计算法时采用了回溯法寻找一次底波,即在求得包络波峰最大值后向前寻找波峰符合设定值的峰值点。并且由于不同材料的纵波入射变型横波反射率以及横波入射纵波反射率不同,一些复合材料的延时波波峰相较于直达波波峰较小,放大增益后导致直达波波峰“削顶”。在这种情况下如果采用前述的算法计算直达波时间则将对纵波声速和横波声速都产生较大的误差。所以在考虑这一问题后,在程序中增加了检测上升沿突变和下降沿突变的环节,即在软件测量界面中增加了上升沿、下降沿和上升下降中间点作为直达时间计算的选项。选择合适的测量模式即可得到直达波时间。

最后计算延时波时间,将式(7)代入式(4)可得延时波相对于直达波的延时时间为:

$$\Delta_t \approx D \sqrt{\frac{1}{v_s^2} - \frac{1}{v_l^2}} \quad (9)$$

根据式(2)可得延时时间和直达时间之比为:

$$\frac{\Delta_t}{T} \approx \frac{D}{L} \sqrt{\frac{v_l^2}{v_s^2} - 1} \quad (10)$$

由 Viktorov 公式以及相应的物理近似可得纵波声速和横波声速的理论值之比约等于 1.847^[13],当试件的直径和长度之比等于 5,则延时时间和直达时间之比约为 0.311。在前述的计算步骤中可得直达时间,则求得各个积分极大值积分域中的最大值位置的时间与直达时间的比最接近于 1.311 的位置即为延时波时间。根据所求的直达波、延时波时间和前文所述公式即可计算体积模量。程序流程如图 2 所示。

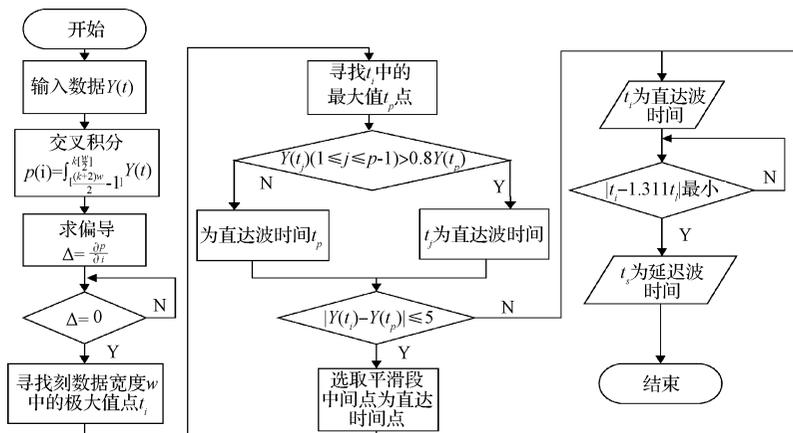


图 2 自动识别算法流程

4 体积模量测试结果

根据前文所得结论,选取了4种长度为100 mm,直径为20 mm的棒状标准试件:铝2A12,不锈钢304,尼龙66和有机玻璃进行体积模量的测量。

在声学法测体积模量的过程中,影响体积模量测量准确度的关键是声速测量准确度。当下普遍使用的测量材料纵波声速和横波声速的方法是采用纵波直探头和横波斜探头分别进行纵波声速和横波声速的测量。在测得两个声速后根据式(1)计算得到该材料的体积模量,测量结果如表2所示。

表2 纵波探头与横波探头测得体积模量

材料	纵波声速 (m/s)	横波声速 (m/s)	体积模量 /GPa
铝 2A12	6 130	3 070	69.5
不锈钢 304	5 640	3 070	152.0
尼龙 66	2 620	1 100	5.7
有机玻璃	2 680	1 398	5.4

本文采用的测量方式只需要纵波直探头,图1中的探头B所接收到的波形经过滤波、检波、放大等处理之后,通过自动识别算法直接标记出直达波时间和延时波时间显示在软件界面上,其中横坐标是时间,单位为 μs ,红色点标记的是直达波时间对应波峰位置(如图3所示),蓝色点标记的是延时波时间对应波峰位置。并且材料的纵波声速,横波声速和体积模量直接在界面上显示。不锈钢304的测量结果界面如图3所示。软件保留了手动闸门法测体积模量,方便进行对比实验。

本文对4种材料分别采用自动识别算法测体积模量和手动闸门法测体积模量进行了5组实验,实验结果如图4所示。两种方法5次测量得到的体积模量平均值,不确定度,重复性如表3所示。

由以上实验结果可知,3种方式测得的体积模量基本一致,说明根据本文所描述基于变型横波测量材料的纵波声速和横波声速从而反演出体积模量的方法与使用专用探头测得结果具有良好的一致性。该测试方法所需要的传感器只有纵波直探头,降低了测量成本,配合自动识别波形算法,所测得的声速与采用专用探头测纵波声速和横波声速误差小于1%。

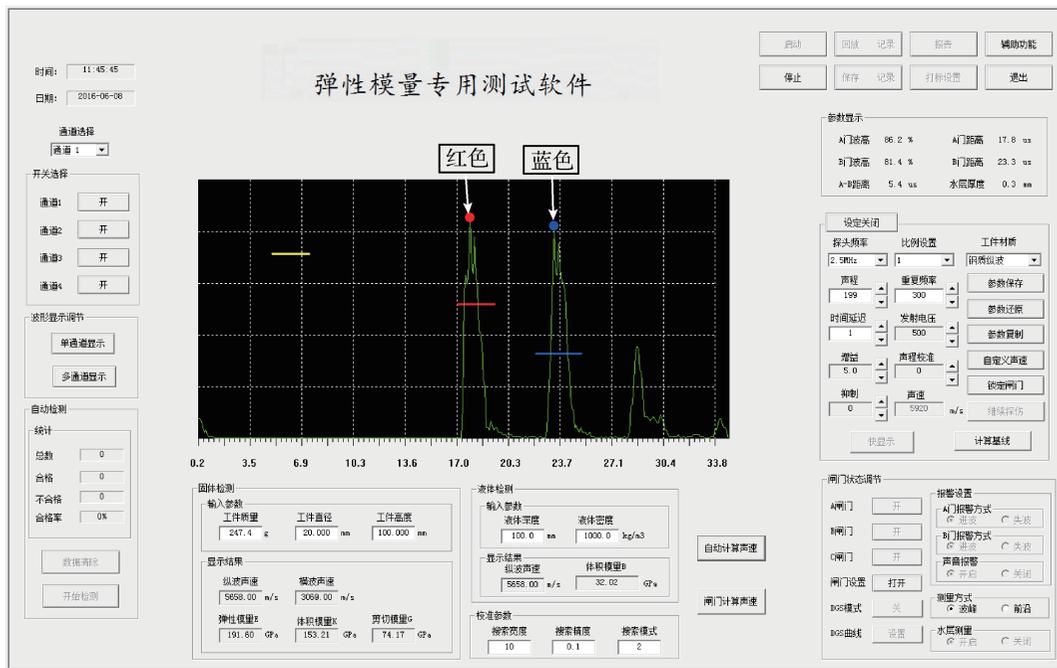


图3 测试软件界面

表3 不同材料两种测量方式测试结果表

材料	闸门截取 体积模量/GPa	重复性 1 (%)	不确定度 1 (%)	自动算法 体积模量/GPa	重复性 2 (%)	不确定度 2 (%)
铝 2A12	70.65	0.83	1.65	70.16	0.04	0.95
不锈钢 304	153.27	0.05	0.84	153.21	0.04	0.79
尼龙 66	5.98	2.36	4.91	5.87	0.65	2.98
有机玻璃	5.53	3.67	2.41	5.55	1.69	2.78

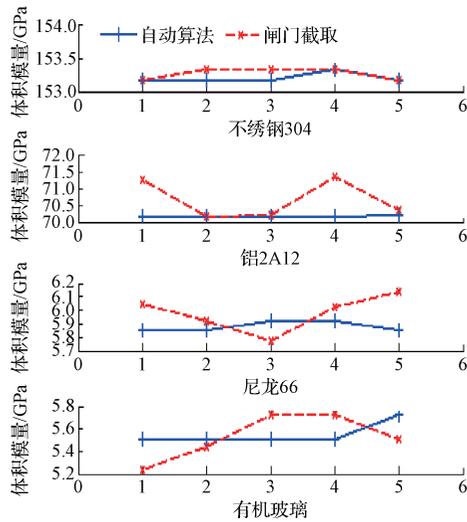


图4 4种材料5次测量结果对比

由表3所示的分析数据可得相对于采用手动闸门截取的方法进行测量,自动识别算法在一定程度上降低了测量的不确定度,并使得多次测量的重复性变好。两种测量方式对于不锈钢304的测量结果影响不大,是因为超声波在不锈钢材质中的传播性能良好,测得回波波峰平滑,尖峰较少。但是对于有机玻璃等非金属材料,其直达波和延时波的峰值相差较大,可能会导致直达波峰“削顶”或者是延时波“消失”,这时采用手动截取波形的方法可能导致波到达时刻判断出现偏差,或者由于主观影响使得重复测量结果复现性差。并且由于简化了测量步骤使得采用自动识别算法进行测量时,单次测量时间远远小于采用手动闸门截取的方法。软件自动识别波形可避免测试员测量过程中产生的波形误判,减小由其引入的测量不确定度。表3中的非金属材料体积模量测量误差比金属材料大,可能是超声波在非金属材料中传播性能较差引起的,可调节发射探头的发射能量,或者选用探头晶片尺寸更小使得超声波的发射能量更加集中,则测量结果更加准确。

5 结论

在选择试件形状,以及材料的横波反射率和纵波反射率合适的情况下,本文所提出的超声波法测体积模量的自动识别波形算法可适用于不同材料产生的多种波形。当棒状试件长径比为5时,选择合适频率的超声波直探头即可得到测量所需的直达波和延时波,利用所设计的自动识别算法即可得到该材料的体积模量。测得结果可使钢和铝等金属的体积模量测量不确定度在1%以内,有机玻璃和尼龙等非金属材料体积模量测量不确定度在3%以内。

参考文献

[1] AKKAYA A V. Effect of bulk modulus on performance of a hydrostatic transmission control system [J]. Sadhana, 2006, 31(31):543-556.

[2] DU F, CHEN J, ZHOU H. The measuring of elastic modulus based on ultrasonic [C]. 2011 Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), 2011:848-850.

[3] LIN P H, CHEN Y Y, YU S T J. Density-velocity equations with bulk modulus for computational hydroacoustics [J]. Theoretical & Computational Fluid Dynamics, 2014, 28(1):51-63.

[4] AKL W, BAZ A. Active acoustic metamaterial with simultaneously programmable density and bulk modulus [J]. Journal of Vibration & Acoustics, 2013, 135(3):373-384.

[5] 刘晓明,岳婷婷,简福斌,等.基于DSP的木材弹性模量无损检测系统的设计与实现[J].电子技术应用,2010(11):45-47.

[6] 陆铭慧,杨奕,陈以方,等.声学法测量复合绝缘子弹性常数[J].材料工程,2005(11):46-49.

[7] KO R T, CHEN M Y, HOPPE W C, et al. Ultrasonic measurements of velocity for modulus assessment of a material using a delay line approach [C]. American Institute of Physics Conference Series. American Institute of Physics Conference Series, 2013, 1511(3):1446-1453.

[8] 胡宏伟,彭凌兴,李雄兵,等.多层构件水浸超声自动检测中的水声距优化方法[J].仪器仪表学报,2014,35(5):1149-1154.

[9] 汪伟,徐科军,方敏,等.一种气体超声波流量计信号处理方法研究[J].电子测量与仪器学报,2015,29(9):1365-1373.

[10] WANG Z, WANG Z, YU Y T, et al. Research on the underwater echo characteristics by hollow coaxial cylinder-cone assembled elastic shell [J]. Instrumentation, 2015, 2(2):41-46.

[11] 许桢英,罗来齐,王匀,等.基于PCA的管道缺陷导波信号特征优化方法[J].电子测量技术,2016,39(4):160-163.

[12] 黄延凯,贺旭东,陈怀海.计算结构动力响应的样条插值高斯精细积分法[J].国外电子测量技术,2016,35(2):49-54.

[13] 魏勤,卫婷,董师润,等.超声波法测量金属材料的杨氏模量和剪切模量[J].江苏科技大学学报:自然科学版,2012,26(1):27-30.

作者简介

任洁,1992年出生,2014年于南京理工大学获得学士学位,现为南京理工大学硕士研究生在读,主要研究方向为测试计量技术。
E-mail: littleprecious@163.com