

基于虚拟仪器技术开发的超声弹性 模量测量系统

周世圆 肖定国 徐春广 冯红亮

(北京理工大学机械与车辆工程学院 北京 100081)

2003 年 3 月 7 日收到

摘要 本文利用脉冲回波法,通过声速测量材料弹性模量,基于虚拟仪器技术发挥软件算法的优势提高测量精度。通过研制超声脉冲收发卡,编制弹性模量测量系统软件,开发了超声弹性模量测量系统。

关键词 弹性模量, 声速, 虚拟仪器, 互相关

Ultrasonic elastic modulus measurement system based on virtual instrument technology

ZHOU Shi-Yuan XIAO Ding-Guo XUE Chun-Guang
FENG Hong-Liang

(School of Mechanical and Automobile Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract A system with improved accuracy for measuring Young's and shear moduli from sound velocities is studied. The system is developed with the use of the virtual instrument technique. It is composed of an industrial pc, an ultrasonic pulser/receiver board and a dedicating software.

Key words Elastic modulus, Sound velocity, Virtual instrument, Cross correlation

1 引言

弹性是固体材料的基本性能之一,弹性常数测量方法有静态扭转拉伸法、动态共振测量法及波速测量法^[1]。超声波属于机械振动,它特别适用于材料物理性能的检测^[2]。媒质的声速与弹性模量之间的关系简单直接,已有精确的理论公式,通过超声声速测量固体材料的杨氏模量和剪切模量是最简单可靠的方法。

虚拟仪器是在通用计算机上配以软件和

(或)硬件以实现普通仪器的功能。硬件完成信号的输入输出,软件完成数据的分析处理并加以存储、显示和输出。由于软件的优势,可以采用多种算法进行信号处理和分析计算以提高测量精度,方便地对测量仪器进行维护、扩展和升级。随着微电子技术及信号处理算法的发展,虚拟仪器不仅推动了传统测控系统的改造,也影响着新型测控系统的构造方式。

本文按照虚拟仪器技术采用工业控制计算机,内置超声脉冲收发卡和高速数据采集卡,

编制超声弹性模量测量系统软件,开发了超声弹性模量测量仪,并结合自制的磁致伸缩式超声换能器,构建了基于虚拟仪器技术的超声弹性模量测量系统。经过实际测量验证该测量系统可实现杨氏模量和切变模量的通用测量,较现有方法测量精度高、操作简单方便,且扩展性好。

2 测量原理

根据固体中的弹性波理论,细杆中纵波的传播速度为

$$C_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

式中, C_l , 纵波的传播速度, m/s; E , 杨氏模量, Pa; ρ , 密度, kg/m^3 。细杆中的扭转波传播速度为

$$C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho R_n}}$$

式中, C_s , 扭转波的传播速度, m/s; G , 杨氏模量, Pa; R_n , 扭转形状因子, 无量纲, 对圆截面的杆, $R_n \equiv 1$ 。由此, 已知圆形截面细杆的材料密度, 通过超声波速测量可测定弹性模量中的杨氏模量 $E = \rho \cdot C_l^2$, 切变模量 $G = \rho \cdot C_s^2$ 。

由于测量迅速, 易于实现连续自动实时测量, 脉冲回波法成为目前应用最为广泛的一种超声声时测量方法, 在测定试件长度 l 的基础上, 测量试样前后表面两回波脉冲间的传播时间 t , 即可得到试样材料中超声波的传播速度 $c = 2l/t$ 。

3 系统组成

基于虚拟仪器技术开发的磁致伸缩式超声弹性模量测量系统如图 1 所示, 该测量系统由磁致伸缩式超声收发换能器、超声弹性模量虚拟测量仪及被测材料试样三部分组成。超声弹性模量虚拟测量仪主要包括超声脉冲激发接收卡、高速数据采集卡、弹性模量测量系统软件

和工业控制计算机。为引用无限长圆形截面细杆中声速与材料弹性模量的关系, 被测材料试样长径比应大于 40。

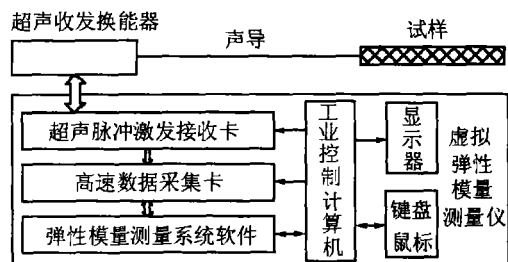


图 1 弹性模量测量系统组成

为达到测量目的, 超声脉冲激发接收卡产生电脉冲, 由超声收发换能器转换为超声纵波脉冲或扭转波脉冲, 超声脉冲沿换能器声导传播, 在试样前后表面形成的两反射回波脉冲由同一换能器转换为电脉冲, 超声脉冲收发卡将该电脉冲调理到数据采集卡要求的范围内, 由弹性模量测量系统软件对数据采集卡采集到的信号进行分析计算, 得到被测材料的弹性模量实测值并显示输出或保存。

3.1 磁致伸缩式超声收发换能器

超声收发换能器主要由电磁感应线圈、纵向磁棒、磁致伸缩敏感元件和声导组成, 完成激发、接收超声纵波和扭转波的任务。电磁感应线圈可进行电磁能的互相转换, 磁致伸缩敏感元件为铁磁材料合金, 可进行磁场能和应变能的互相转换。感应线圈在电脉冲的作用下产生的脉冲纵向磁场和由磁棒产生的与其平行的纵向恒定磁场, 或由于极化在敏感元件中保持与其正交的横向磁场, 在敏感元件中激发应力波脉冲, 即超声纵波或扭转波脉冲。超声纵波或扭转波脉冲沿声导传播, 在被测试样的前后表面反射形成的两个回波脉冲, 在敏感端引起磁场的变化, 该磁场变化再由感应线圈接收, 转换为电脉冲, 输出到超声脉冲激发接收卡。

3.2 超声弹性模量虚拟测量仪

采用高速数据采集卡 (100MHz) 和有效的算法, 基于虚拟仪器技术开发超声弹性模量测

量系统可以使超声脉冲传播时间的测量分辨率达到纳秒级,使整个系统的测量精度提高到1%以内。而且除了可以分析计算得到弹性模量数值外,还可存储、回放超声脉冲传播过程,同时由于虚拟测量仪可方便地扩展和升级,这样就为进一步提高仪器性能奠定了良好基础。

3.2.1 超声脉冲激发接收卡

超声脉冲收发卡向超声收发换能器提供具有一定强度、脉冲宽度和周期的电脉冲,并对换能器输出的回波脉冲进行信号调理,得到具有一定强度、信噪比较高的信号,使其满足高速数据采集卡的电压输入要求,主要由激发、接收和电源三部分电路组成,如图2。

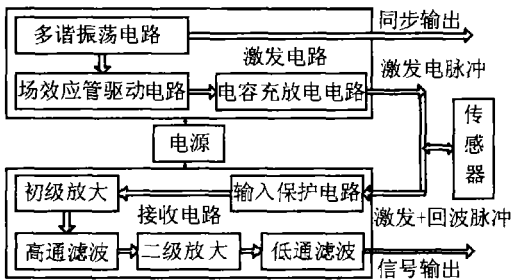


图2 超声脉冲激发接收卡

激发电路包括多谐振荡电路、场效应管驱动电路和电容充放电电路。驱动电路采用三极管对管场效应管驱动可以提高峰值电流、开关速度和容性负载的能力,采用电容瞬间放电产生高压脉冲可以降低损耗。该超声脉冲收发卡的激发电脉冲宽度500ns到5μs可调,峰值电压80V,上升时间低于50ns。

接收电路包括输入保护电路、放大电路和滤波电路。激发电脉冲和回波电脉冲共用同一信号线,为此采用稳压二极管对管钳制输入脉冲峰值电压,保护运算放大器,又可使回波电脉冲通过。根据回波电脉冲的大小,选用两极放大电路,增益在20~40dB可调,输出信号可达2.5V,强度满足后续电路的要求。利用通用仪器实测超声脉冲收发换能器的超声纵波中心频率为90kHz,扭转波中心频率为65kHz左右,由

此为保持信号带宽和高信噪比,滤波电路的截止频率设为2kHz和500kHz。

3.2.2 弹性模量测量系统软件

弹性模量测量系统软件主要包括弹性模量测量、数字示波器和系统管理三个功能模块,如图3所示。图4为超声弹性模量测量系统软件的人机界面。弹性模量测量系统软件是针对所选用的高速数据采集卡编制的。本系统采用的是RVO4100系列ISA总线,双通道100MHz数据采集卡,采样频率1k~100MHz可调,并提供适用于Win95/98的二次开发DLL库。在此基础上,数字示波器功能模块实现了双通道台式数字示波器的基本功能,可以以不同的采样频率、存储深度、触发模式进行单次、实时采样/显示波形,并可方便地读取时间与电压值。弹性模量测量功能模块在设置了试样长度与材料密度后,可以以不同的声时计算方法和弹性模量计算算法计算试样的杨氏弹性模量和剪切弹

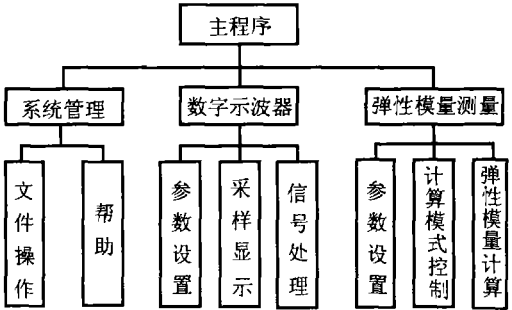


图3 弹性模量测量系统软件框图

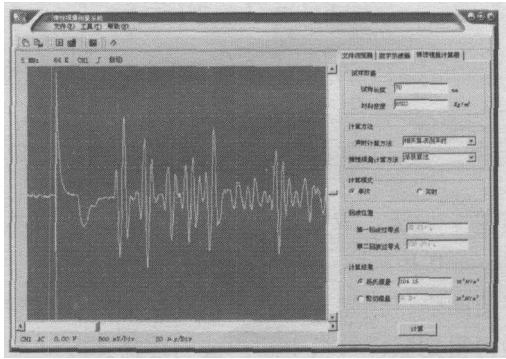


图4 超声弹性模量虚拟测量仪人机界面

性模量。系统管理主要包括文件操作, 浏览器和帮助系统。

使用虚拟仪器技术可以通过采用各种软件算法提高系统的测量精度。为了提高系统测量精度, 分析计算时首先对截取的高频采样信号中含试样前后表面两回波脉冲的一段进行五次三点平滑滤波、零点漂移去除、包络提取和三次样条插值, 然后采用相关算法计算声时。

设激发脉冲信号 $p_0 = A\xi(t)$, A 为脉冲峰值。则试样前后表面回波脉冲分别为:

$$p_1 = aAe^{-2\alpha_1 l_1} \xi\left(t - \frac{2l_1}{c_1}\right)$$

$$p_2 = -bcAe^{-2(\alpha_1 l_1 + \alpha_2 l_2)} \xi\left(t - \frac{2l_1}{c_1} - \frac{2l_2}{c_2}\right)$$

$$= -\frac{bc}{a}e^{-2\alpha_2 l_2} p_1\left(t - \frac{2l_2}{c_2}\right),$$

其中, a 为声导到试样的反射系数, b 为声导到试样的透射系数, c 为试样到声导的透射系数, α_1 为声导的声衰减系数, α_2 为被测材料试样的声衰减系数, c_1 为声导的声速, c_2 为试样的声速, 均为常数, l_1 为声导长度, l_2 为试样长度, 试样后表面的反射系数取 -1 。设噪声信号为 $n(t)$, 试样前表面回波脉冲信号与试样前后表面回波脉冲信号的互相关函数:

$$R_{p_1(p_1+p_2)} = E\{p_1(t)[p_1(t-\tau) + p_2(t-\tau) + n(t-\tau)]\}$$

$$= R_{p_1 p_1} + R_{p_1 p_2} + E[p_1(t)n(t)]$$

$$= E[p_1(t)p_1(t-\tau)] - \frac{bc}{a}e^{-2\alpha_2 l_2} \cdot E\left[p_1(t)p_1\left(t - \frac{2l_2}{c_2} - \tau\right)\right]$$

$$= R_{p_1 p_1} - \frac{bc}{a}e^{-2\alpha_2 l_2} R_{p_1 p_1}\left(\tau + \frac{2l_2}{c_2}\right)$$

如图 5 所示, $R_{p_1(p_1+p_2)}$ 的两个峰值分别出现在 $\tau = 0$ 和 $\tau = -2l_2/c_2$ 处。计算 $R_{p_1(p_1+p_2)}$ 两峰值间隔得到超声脉冲在试样中的传播时间 t , 即可得到试样材料中超声波的传播速度 c 及杨氏模量 E 或切变模量 G 。

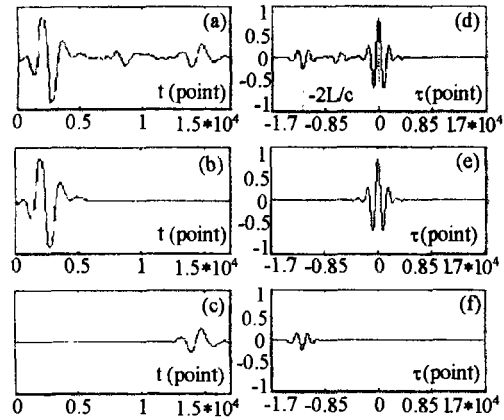


图 5 相关计算结果

- (a) 试样前后表面回波脉冲 (b) 试样前表面回波脉冲
(c) 试样后表面回波脉冲 (d) $R_{p_1(p_1+p_2)}$ (e) $R_{p_1 p_1}$
(f) $R_{p_1 p_2} = -\frac{bc}{a}e^{-2\alpha_2 l_2} R_{p_1 p_1}\left(\tau + \frac{2l_2}{c_2}\right)$

4 实验验证

实验中对低碳钢和黄铜的杨氏模量和切变模量进行了测量, 并和利用通用超声脉冲收发仪和数字示波器读声时的测量方法进行了比较。为避免反射脉冲重叠, 选取试样长度 120mm, 直径 3mm。游标卡尺测量长度, 具有 5 位有效数字; 直径选用千分尺测量, 具有 4 位有效数字; 质量测量选用精度为 5mg 的电子天平, 有效数字达 4 位。因此密度具有 4 位有效数字, 计算过程中, 保留 5 位数字。通用仪器测量时, 选用 PR5055 型超声脉冲收发仪和 TDS210 型示波器, 该示波器时间轴读数精度可达 0.1ns, 但只能在一屏内读数, 纵波传播时间读数精度可达 0.1μs, 由于扭转波速较慢, 读数精度仅能达到 μs 级, 但纵波和扭转波的声时读数均可保证 3 位有效数字。虚拟测量仪数据采集卡的采样频率为 100MHz, 采样间隔为 10ns。由于在进行相关计算前, 对采样信号进行五次三点平滑、零点漂移去除、包络提取和两次三次样条插值等一系列处理, 因此相关计算结果的 ns 位具有一定可信度。为保留精度,

表 1 弹性模量测量值

材料	测量方法	杨氏模量 E^*			切变模量 G^*		
		声时 μs	纵波声速 m/s	杨氏模量 $E^* \text{ GPa}$	声时 μs	扭转波声速 m/s	切变模量 $G^* \text{ GPa}$
低碳钢	本文系统	46.625	5147.5	207.9	76.901	3120.9	76.42
	通用仪器	46.7	5139	207	76.7	3130	76.8
	手册值 [3]		6100	216		3300	84
黄铜	本文系统	68.777	3489.5	103.5	119.547	2007.6	34.27
	通用仪器	68.9	3483	103	120	2000	34.0
	手册值 [4]		4700	105		2110	38

* 为保留精度, 计算过程中间量多保留 1 位有效数字

计算过程中声时保留到 ns 位。实验测量计算结果如表 1 所示。

由弹性模量的计算公式:

$$E = \rho \cdot C_l^2 = \rho \left(\frac{2L}{t} \right)^2$$

$$G = \rho \cdot C_s^2 = \rho \left(\frac{2L}{t} \right)^2$$

和密度计算公式: $\rho = 4m/\pi d^2 l$, 可知杨氏模量 E 和切变模量 G 的测量不确定度均为

$$\Delta = \frac{\Delta m}{m} + 2 \frac{\Delta d}{d} + 3 \frac{\Delta L}{L} + 2 \frac{\Delta t}{t}$$

实验中, 质量的测量不确定度达 0.2%, 直径测量不确定度小于 0.04%, 长度测量不确定度小于 0.02%。通过对采样信号进行处理和采用相关算法精确测时, 分辨力可达到 5 个计时脉冲。这时, 对低碳钢和黄铜纵波声时的不确定度分别小于 0.13% 和 0.1%, 扭转波的声速不确定度也都保证在 0.1% 以下, 因此系统的测量不确定度将优于 1%。

实验结果表明, 本系统通过采用软件算法进行数字信号处理校正信号畸变, 运用相关算法避免主观判断脉冲的真实到达时间所引起的误差, 提高了脉冲传播时间的测量精度, 系统的测时分辩率达到 ns 级, 使得杨氏模量和切变模量的测量值精度较通用仪器读时测量法有所提高。

5 结论

超声法测量弹性模量是通过测定被测材料的纵波或扭转波声速得到材料的杨氏模量或切变模量, 相对于传统的通过弯曲、扭转角度和共振频率进行测量可以获得较高精度的弹性模量测量值。在试样长度已知的条件下, 如何准确测得纵波或扭转波在试样中的传播时间是获得高精度弹性模量测量值的关键。本文基于虚拟仪器技术开发超声弹性模量测量系统可以充分利用优秀的信号处理算法对测量数据进行预处理优化和分析计算, 得到更为精确的杨氏模量和切变模量测量值。同时采用虚拟仪器技术也有利于系统的维护, 扩展和升级, 比如同是声速测量法, 本系统可方便地增加厚度、粘度测量功能, 使得本测量系统具备更为广阔的应用领域。

参 考 文 献

- 1 李昕, 蒋瑞兴, 陈洪荪. 弹性与非弹性的测量和应用. 北京: 冶金工业出版社, 1999. 21~125.
- 2 美国无损检测学会. 美国无损检测手册 (超声卷). 北京: 世界图书出版公司, 1996, 23.
- 3 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础. 南京: 南京大学出版社, 2001, 273.
- 4 马大猷, 沈峰编. 声学手册. 北京: 科学出版社, 1983. 157~160.