

文章编号: 0253-2239(2009)01-0203-05

基于无线通信的激光超声测量系统

陈 晓

(南京信息工程大学电子与信息工程学院电子信息工程系, 江苏 南京 210044)

摘要 激光超声测量技术是一种重要和先进的非接触式超声测量技术。为了减少测量系统各构成部分间的电缆连接,将无线通信技术与激光测量技术的特点相结合,研究了一种激光超声无损测量系统,分析了该测量系统的原理及构成。系统用掺钕钇铝石榴石固体激光器在材料中激励超声波,压电换能器接收超声信号。该信号经系统级芯片 MSP430F2274 单片机放大、模数转换成数字信号,然后由单片机控制 nRF905 芯片进行信号的无线传输。接收部分的单片机采用 RS-232-C 接口标准实现与计算机的串行通信,把信号送入计算机显示记录存储和处理。结果表明该系统实现了激光超声的近程无线测量,简化了系统的结构,传输性能稳定,对周围电子仪器干扰小,显示了很好的应用前景。

关键词 测量; 超声测量系统; 无线通信; 激光超声

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092901.0203

Laser Ultrasonic Measurement System Based on Wireless Communication Technology

Chen Xiao

(Department of Electronic Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China)

Abstract The laser ultrasonic technology is one of the most important and state-of-the-art non-contact ultrasonic measurement technology. Combined wireless communication technology and laser measurement technology, a novel laser ultrasonic nondestructive measurement system is presented to reduce cables connection between units of the system. The principle and structure of the system are introduced. A Nd:YAG solid laser is used to excite ultrasound in the specimen and a piezoelectric transducer is used to detect ultrasonic signal. The signal is magnified and digitalized by a system-on-chip MSP430F2274 single chip microcomputer. Then it is transmitted wirelessly via nRF905 chip under the control of microcomputer. The signal is delivered to computer through serial communication interface between single-chip microcomputer AT89S52 on the received terminal and computer under RS-232-C serial communication interface protocol. The pulse signal is then shown, recorded, saved and processed through computer software. The designed system realizes short distance wireless measurement of laser ultrasonic. It has some advantages such as predigested system structure, reliable transmission. It shows great potential for future applications.

Key words measurement; ultrasonic measurement system; wireless communication; laser ultrasonic

1 引 言

超声波在无损检测领域有着广泛的应用。根据耦合情况,目前常用的激励方法有接触法和非接触法两大类。接触法原理简单,但需要使用专门耦合

剂接触被测试件表面,限制了它的适用范围,也很难获得高的检测速度。非接触法不用接触被检工件,具有非接触、非侵入、完全无损的特点,能够实现快速在线扫查,有着良好的应用前景^[1~3]。

收稿日期: 2008-08-28; 收到修改稿日期: 2008-10-15

基金项目: 江苏省基础研究计划(自然科学基金)(BK2007601)、江苏省“青蓝工程”和江苏省高校自然科学基金基础研究项目(06KJB510048)资助课题。

作者简介: 陈 晓(1974—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事信号和信息处理等方面的研究。

E-mail: rainofsun@netease.com

激光超声是目前国内外研究最活跃的非接触超声换能方法,具有非接触、频带宽、模式多等突出优点,已成为十分重要的无损检测和评价手段,被广泛地应用于物理、化学、微电子学、表面科学、材料科学、环境科学以及生物医学等领域。激光超声的研究主要集中在理论分析、数值模拟和实验检测三个方面^[4~13],而理论和数值模拟结果均需要实验检测的验证^[14]。

目前有线方式的激光超声测量系统远距离传输信号时容易产生衰减、畸变、群延时,且易受干扰。无线数据采集和传输技术可以减少系统间的电缆连接,具有携带方便、应用灵活等优点,在各种实时监测、野外操作和特殊的场合应用广泛。将无线通信技术与激光激励接收仪器结合起来研究了一种有效、在线、实用的无线激光超声无损测量系统。

2 工作原理及系统设计

当激光的能量聚焦照射到弹性材料表面时,部分会转移到材料本身并以热能和应力波动能的形式表现出来。通过改变激发激光的几何形状可以控制能量在材料中的分布以及对材料的影响。

激光超声就是利用高能激光脉冲与物质表面的瞬时热作用,通过热弹效应在固体表面产生应变和应力场,使粒子产生波动,进而在物体内部产生超声波。根据入射到物体表面激光能量的不同,激光脉冲在物体表面产生的这种热效应可分为热弹效应和热蚀效应两种。在较低的吸收率下,表面吸收的热

量不超过其融化温度,产生的是短时膨胀过程,与该膨胀相关的应力波绝大部分在弹性范围内,该方式称为热弹效应。在高能作用下,物体的温度升高,超过了其蒸发温度,产生烧蚀现象,使材料表面气化,形成等离子体,于是有一垂直表面的反作用力作用在表面,形成弹性波源,该方式称为热蚀效应。在热弹性区,激光产生的应力波大小与吸收光的能量成正比,对于均匀能量分布,可用一维模型描述激光束在材料表面产生的应力,其在材料表面产生的应力-应变与材料表面吸收的激光能量成正比。

当激光入射到材料上时,所产生的超声波以不同的类型传播出去,主要有纵波、横波和表面波。影响超声波传播特性的因素很多,主要有材料对激光光能量的吸收程度、材料的热传导特性、激励激光的频率、材料表面的光滑程度等。

本系统由计算机、无线通信模块、数据采集模块及激光超声激励检测子系统组成点对点的无线传输,如图 1 所示。计算机与采集终端之间采用 433 MHz 的频段作为载波频率。系统采用命令应答方式,计算机将采集数据指令下达给主收发器,从收发器对主收发器发出的地址信息进行处理。数据采集模块将激光超声激励检测子系统采集的模拟信号放大、模数转换成数字信号由单片机控制传送到无线收发模块。nRF905 芯片将接收到的数据按照一定的协议进行打包,加入字头和循环冗余校验(CRC),发送给主收发模块,最后由单片机通过 RS-232 将数据传送到计算机,由计算机记录分析和处理。

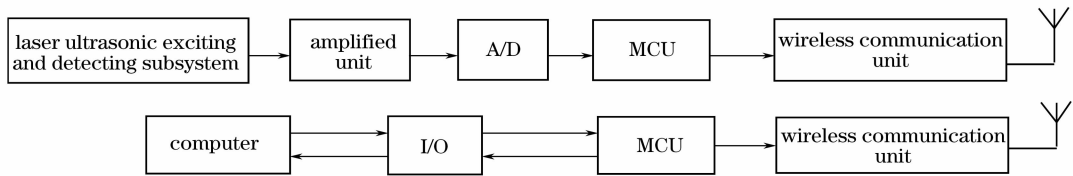


图 1 系统结构框图

Fig. 1 Scheme of the system

3 硬件设计

3.1 激光超声激励检测子系统

激光超声激励检测子系统包括超声激励和检测两部分。超声的激励和检测有多种实现方式,目前主要的激光超声激励检测方法可分成三种方式。第一种是激光激励和激光接收方式。即利用激光脉冲与试样表面瞬时作用产生超声波,用光学法接收来自被检测材料内部的超声信号。光学法检测超声又分为两大类:一类是光学非干涉法,如狭缝法、刀刃

法等;另一类为光学干涉法,主要包括外差干涉法、差分干涉法和多光束干涉法等。第二种激光激励-超声接收方式是利用激光脉冲产生超声波,通过压电超声换能器作为接收器接收检测信号。第三种方式是超声发射-激光接收方式,即利用压电超声换能器产生超声波,通过激光干涉方法接收检测信号。

光学法检测超声因使用的光学器件较多,会出现很多杂光,光路噪声大,信噪比低。利用压电超声换能器接收的检测信号比光学接收方法信噪比高。

实验采用激光发射超声换能器接收的方法,装置如图 2 所示。激光源采用调 Q 掺钕钇铝石榴石固体激光器,激光脉冲输出能量在 5~200 mJ 内连续可调,重复频率为 1~20 Hz 可调,脉冲宽度 10 ns,通过选择激光脉冲的能量,使材料表面工作在热弹性区,不会产生烧伤现象。脉冲激光器发射出的激光经柱透镜聚焦后获得较理想的线源脉冲作用在被检测的试样上。在试样的另一侧用超声换能器接收材料内产生的超声。换能器输出的信号由数据采集模块处理。为了获得强度较一致的激发信号,由激光连续发出 32 个脉冲,每个测量信号为激发的平均结果,这还可以增大信噪比,减少误差。

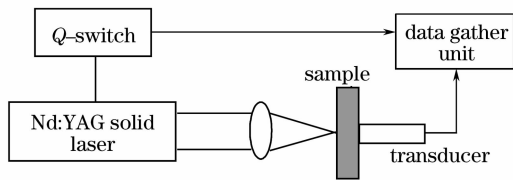


图 2 激光超声激励检测系统

Fig. 2 Laser ultrasonic measurement system

3.2 数据采集模块

数据采集模块完成超声信号的放大、模数转换并控制数据的无线发射。数据采集模块由系统级芯片单片机 MSP430F2274 完成。系统级芯片 (SoC) 技术的发展使得系统中相对独立的各功能模块可以集成到一个芯片内部。SoC 是当今超大规模集成电路的发展趋势,它是一种高度集成化的系统集成技术,SoC 从系统的整体功能及性能出发,把微处理器和计算机常用的一些数字和模拟外设等全部放置在一块芯片中,使它成为一个完整的数据采集与控制系统。与传统功能单一的单片机芯片相比,SoC 不仅增加了多种功能,而且减少了体积,提高了系统的抗电磁干扰性和可靠性。MSP430F2274 的 16 位 RISC CPU 不仅能提供所需的信号处理能力,还集成了 2 个运算放大器、12 通道的 10 位 ADC 和 1 个 SPI,是模拟信号处理电路的一部分。该芯片可以实现采集部分的信号放大、模数转换以及控制无线通信发射模块的所有功能,所以可以使数据采集信号电路部分高度集成。

3.3 无线通信模块

无线通信模块包括发射和接收模块两部分,采用相同的 nRF905 无线芯片。nRF905 是挪威 Nordic VLSI 公司推出的单片射频收发器,工作电压为 1.9~3.6 V,32 引脚 QFN 封装,只有 5 mm×5 mm 大小,工作在 433/868/915 MHz 的工业、科

学、医疗 (ISM) 频段,由一个完全集成的频率调制器、一个带解调器的接收器、一个功率放大器、一个晶体振荡器和一个调节器组成。最大传输速率可达到 100 kbit/s。通道切换时间小于 650 μs,不需外加声表滤波器,可工作在 Shockburst 模式下,使用 SPI 接口与微控制器通信,配置非常方便。nRF905 片内集成了电源管理、晶体振荡器、低噪声放大器、频率合成器、功率放大器等模块,曼彻斯特编码/解码由片内硬件完成,无需用户对数据进行曼彻斯特编码,使用非常方便。此外,其功耗非常低,以 -10 dBm 的输出功率发射时电流只有 11 mA,工作于接收模式时的电流为 12.5 mA,内建空闲模式与关机模式,易于实现节能。

天线设计是无线模块设计的关键,直接影响到传感器节点的通信质量和通信距离。nRF905 无线模块间通信采用外置全向天线,以减少反射引起的传输损耗,获得较大的输出功率和较高的接收灵敏度。理论传输距离可以达到 500 m 以上。

从无线接收模块接收到的信号由单片机传送到计算机。该单片机仅仅完成数据中继,所以选取的是 AT89S52 单片机。它是一个低功耗、高性能 CMOS 8 位单片机,片内含 8KB ISP 的可反复擦写 1000 次的 Flash 只读程序存储器和 256B 的 RAM。器件采用 ATMEL 公司的高密度、非易失性存储技术制造,具有独特应用的 16 位定时/计数器等多种功能,兼容标准 MCS-51 指令系统及 80C51 引脚结构,芯片内集成了通用 8 位中央处理器和 ISP Flash 存储单元,可为许多嵌入式控制应用系统提供高性价比的解决方案。由于 AT89S52 单片机有一个串行通信接口,而串行通信接口也是计算机的标准配置之一,所以采用串行通信接口实现 AT89S52 单片机与个人计算机间的数据通信是最简单最直接的方式。AT89S52 单片机的串行通信接口输入输出为 TTL 电压,即高电压为 3.8 V 以上,低电压为 0.3 V 左右。RS-232 信号的电平和单片机串口信号的电平不一致,使用 ICL3221 收发芯片实现串口电平转换。

4 软件设计

本系统的数据采集、无线传输控制及采样数据记录均由软件来实现。单片机主程序完成信号采集、模数转换和数据无线发送,AT89S52 完成无线数据接收和与计算机的通信。系统上电后,首先对内部特殊功能寄存器进行初始化,设定采样率、波特率、无线通道

频率、输出功率等参数。MSP430F2274 主程序如图 3。模数转换和无线通信由子程序来实现。

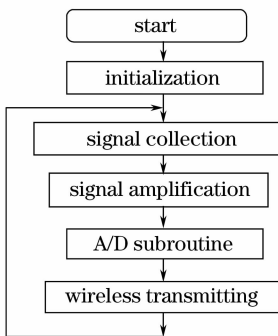


图 3 主程序流程图

Fig. 3 Flow chart of main program

在整个系统中,无线传输为主要部分。nRF905 芯片具有三大功能模块:模式控制(TX_EN, TRX_CE, PWR);SPI 接口(CSN, SCK, MOSI, MISO);状态输出接口(CD, AM, DR)。在配置模式下,主机通过 SPI 接口配置 nRF905 的工作参数,在发射/接收模式下,主机通过 SPI 接口发射和接收数据。nRF905 的 SPI 接口只有在掉电模式和 standby 模式是激活的。当 CSN 为低时, SPI 接口开始等待一条指令,任何一条新指令均由 CSN 由高到低的转换开始。上电以后单片机首先配置高频头模块,将 PWR, TXEN, TRX_CE 设为配置模式,单片机通过 SPI 将配置数据移入高频头模块。在掉电和待机模式工作后,配置内容仍然有效。配置数据只有当电源撤除后才会丢失。无线数据发送子程序流程如图 4。

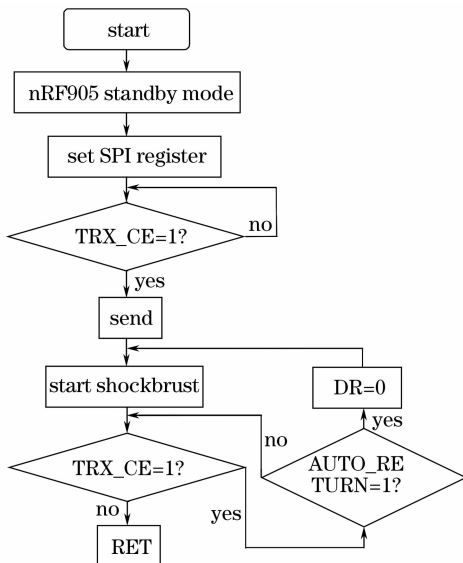


图 4 无线数据发送子程序流程图

Fig. 4 Flow chart of wireless data transmitter subprogram

无线数据接收程序与发射程序设计完全不同。由于 nRF905 的接口是 SPI 口,而 AT89S52 单片机没有标准的 SPI 口,只能通过模拟 SPI 口来实现数据的传输。而模拟 SPI 口的关键点在于模拟 SPI 的读写时序,单片机只有在正确的时序下对 nRF905 进行配置后,才能正常工作。其读写时序为:当 CSN 从高电平变为低电平时, SPI 口开始等待一条指令,当 SCK 从高电平变为低电平时,单片机往 nRF905 中写或者从中读取一位数据。当处于接收状态时, nRF905 负责载波信号的检测、地址匹配和数据包的解码和接收。CPU 在设定的时间内一直判断 nRF905 的 DR 引脚是否变为高电平,若为高则证明接收到了有效数据,可以退出接收模式,若一直没有接收到,待时间到时也退出接受模块。

RS232 串行通信程序中发送字符与接受字符均采用查询方式,发送前先读取通信或状态寄存器,查询发送保持寄存器是否为空;接收前先读取通信或状态寄存器,查询一帧数据是否收完。从机采用中断方式,即接受到地址帧后就进行串行口中断申请,中央处理器响应后,进入中断服务程序。

5 结 论

随着工业和信息技术的发展,与无线通信技术相结合的测量方法已经成为一种发展趋势在各个领域当中逐步得到应用。无线通信传输技术具有成本低、无需传输介质、不受应用环境限制、适应性好、重构性强等优点。本系统通过对高度集成的 MSP430F2234 系统级芯片和 nRF905 无线通信芯片的应用,结合激光超声激励检测子系统,提出了基于无线通信技术的激光超声测量技术,分析了该测量系统的构成及原理,给出了软件和硬件设计。该系统既保留了激光超声技术的一般优点,又克服了有线方式信号远距离传输时的缺点,可以实现激光超声的在线近程无线无损检测与评价。

参 考 文 献

- 1 Kenderian S, Djordjevic B, Green R. Point and line source laser generation of ultrasound for inspection of internal and surface flaws in rail and structural materials[J]. *Res. Nondestr. Eval.*, 2001, **13**(4): 189~200
- 2 Shi Deheng, Chen Yuke, Sun Jinfeng *et al.*. A review on laser ultrasonic technique and its applications in non-destructive testing [J]. *Laser J.*, 2004, **25**(5): 1~4
施德恒,陈玉科,孙金锋等. 激光超声技术及其在无损检测中的应用概况[J]. *激光杂志*, 2004, **25**(5): 1~4

- 3 Yashiro S, Takatsubo J, Miyauchi H *et al.*. A novel technique for visualizing ultrasonic waves in general solid media by pulsed laser scan[J]. *NDT & E International*, 2008, **41**(2): 137~144
- 4 Yuan Ling, Shi Yifei, Shen Zhonghua *et al.*. Laser-induced ultrasonic waves in steels with gradient changes of elastic property [J]. *Optics & Laser Technology*, 2008, **40**(2): 325~329
- 5 Guan Jianfei, Shen Zhonghua, Ni Xiaowu *et al.*. Numerical simulation of the ultrasonic waves generated by ring-shaped laser illumination patterns[J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, **39**(6): 1281~1287
- 6 Han Qingbang. Analysis of laser-generated viscoelastic Rayleigh wave[J]. *Acta Acustica*, 2007, **32**(4): 338~342
韩庆邦. 激光激发粘弹表面波特性分析[J]. *声学学报*, 2007, **32**(4): 338~342
- 7 Zhang Yan, Shen Zhonghua, Lu Jian *et al.*. Numerical simulation and experimental detecting of laser-generated Lamb wave[J]. *Science in China (G)*, 2008, **38**(2): 126~134
赵 艳, 沈中华, 陆 建 等. 激光在气-固界面激励泄漏 Lamb 波的数值模拟与实验检测[J]. *中国科学*, 2008, **38**(2): 126~134
- 8 He Yuejuan, Zhu Rihong, Shen Zhonghua *et al.*. Numerical simulation of laser-generated ultrasonic Lamb waves in cylindrical shell[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(12): 13~16
何跃娟, 朱日宏, 沈中华 等. 激光激发薄管中超声兰姆波的数值模拟[J]. *光电工程*, 2005, **32**(12): 13~16
- 9 Wang Jingshi, Cheng Ying, Huang Qiaojian *et al.*. Finite element analysis of laser-induced transient surface grating fields of diamond/ZnSe [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28** (s1): 138~141
王敬时, 程 营, 黄巧建 等. 金刚石/ZnSe 结构中瞬态热栅场的有限元法分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(s1): 138~141
- 10 Wang Jijun, Shen Zhonghua, Xu Baiqiang *et al.*. Analysis on precursor in laser ultrasonics in metal and non-metallic materials [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1127~1132
王纪俊, 沈中华, 许伯强 等. 金属和非金属材料中激光超声前驱小波分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8): 1127~1132
- 11 Shen Zhonghua, Xu Baiqiang, Ni Xiaojian *et al.*. Numerical simulation of pulsed laser induced ultrasound in monolayer and double layer materials [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31** (10): 1275~1280
沈中华, 许伯强, 倪晓武 等. 单层和双层材料中的脉冲激光超声数值模拟[J]. *中国激光*, 2004, **31**(10): 1275~1280
- 12 Shi Yifei, Shen Zhonghua, Ni Xiaowu *et al.*. Welding stress measurement using laser-generated Rayleigh waves in aluminum alloys[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(10): 1627~1631
石一飞, 沈中华, 倪晓武 等. 激光激发瑞波测量铝合金焊接残余应力[J]. *中国激光*, 2008, **35**(10): 1627~1631
- 13 Yuan Ling, Ren Xudong, Yan Gang *et al.*. Experimental study of laser-generated surface acoustic waves in laser Shock hardening metals[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 120~124
袁 玲, 任旭东, 严 刚 等. 激光冲击硬化层中激光声表面波的实验研究[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 120~124
- 14 Du Liting, Liu Songping, Xie Kaiwen *et al.*. Research on laser ultrasonic exciting technology[J]. *NDT*, 2005, **27**(6): 286~287
杜丽婷, 刘松平, 谢凯文 等. 激光超声激励技术研究[J]. *无损检测*, 2005, **27**(6): 286~287