

doi:10.3969/j.issn.1006-7043.2010.02.022

## 光纤声发射源定位实验平台的研究与实现

梁艺军,刘俊锋,张巧萍,吴雷,樊晨光

(哈尔滨工程大学理学院,黑龙江哈尔滨150001)

**摘要:**为了研究固体中声发射源定位问题,开发了一套成本低廉,适用范围广,检测灵敏度高的声发射源定位实验系统.采用 Sagnac 光纤干涉仪作为点传感器构成传感阵列,给出了 Sagnac 光纤干涉仪超声检测及声源定位的原理;光纤传感器布置在矩形钢板上构成阵列,用模拟声源激励钢板上的任意位置,基于单片机的数据采集电路将四路声发射信号发送给计算机,计算机通过 VB 编写的软件平台对四路信号进行解调处理.根据四路信号的时间差得到声源的位置,并采用时差修正法提高了定位精度.结果表明,此系统利用光纤传感器实现了钢板中声发射源的定位,为材料结构健康检测与监控的研究提供了一种新的方法.

**关键词:**声源定位;光纤传感器;无损检测;声发射

**中图分类号:**TP212;TB523 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7043(2010)01-0262-06

## An experiment optical fiber platform for the location of acoustic emission sources

LIANG Yi-jun, LIU Jun-feng, ZHANG Qiao-ping, WU Lei, FAN Chen-guang

(College of Science, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** A system for locating sources of the acoustic emissions (AE) caused by strain to a structure was developed. It used an array of optical fiber sensors to identify the location of AE sources in solids. The system possesses the advantages of low-cost, a wide range of applications, and high sensitivity. The sensor array was structured of Sagnac interferometers, each using a point sensor. Principles of the optical fiber ring Sagnac interferometer used to detect ultrasonic waves and locate the source were reviewed. These optical fiber sensors were placed on segments of a steel plate to structure the sensor array. Simulated acoustic emissions were generated at various positions on the steel plate. The data acquisition circuit was based on single chip. It collected signals from four sensors and sent them to a computer. The computer processed the four signals using an algorithm written in Visual Basic language. It calculated the position of each source from time differences between the four signals, and the time difference correction method was used to increase the accuracy of location. The results showed that this system and its optical fiber sensors allowed accurate location of an acoustic emission source. It provides a new method for detection and monitoring of structural health.

**Keywords:** location of sound source; optical fiber sensor; nondestructive testing; acoustic emission

声发射(AE)是材料结构受外力或内力作用产生变形或断裂时,以某种弹性波形式释放出应变能的现象.声发射信号可以借助高灵敏度的声发射检测仪检测、分析,从而推断声发射源(如裂纹)的位置和活动度.近年来,声发射技术已被广泛应用于设

备无损检测、在线监控等场合.声发射源定位技术是声发射技术研究的核心问题之一,由于此检测技术的无损性和动态性,目前已经成为检测材料缺陷或结构完整性的重要手段<sup>[1]</sup>.

在已开发的诸多声发射检测仪中,较为先进的多通道声发射检测系统一般装备了微型计算机,具有检测、定位、分析等功能<sup>[2,4]</sup>,但价格极其昂贵.传统的声发射检测仪多采用压电陶瓷作为敏感元件,

收稿日期:2008-12-22.

基金项目:哈尔滨工程大学基础研究基金资助项目(HEUF04017).

作者简介:梁艺军(1961-),男,教授,硕士生导师, E-mail: liang\_yijun@126.com.

其检测灵敏度受到压电传感器谐振频率的限制. 光纤传感器具有检测频率范围宽、不受电磁干扰等优点,又由于光纤自身的特质(柔软性好、几何尺寸小、耐腐蚀等),亦可埋入固体材料结构内部,实现对结构健康的长时间监控<sup>[5-6]</sup>. 因此本文拟采用光纤 Sagnac 干涉仪作为声信号的敏感元件,构成传感方阵,基于 AVR 系列单片机开发数据采集系统,利用 VB 语言设计声发射信号处理软件,构建一成本低廉、检测灵敏度高、适用范围广泛的声发射源定位平台.

## 1 基本原理

### 1.1 光纤传感器检测声发射信号原理

单模光纤 Sagnac 干涉仪用于超声波检测的原理结构由图 1 给出.  $l_1$  和  $l_2$  是干涉仪的 2 个臂,起传输光信号的作用.  $l$  是一段被缠绕成圆环状的光纤,用来接收或感应超声波,  $2 \times 2$  光纤 3 dB 耦合器被用来分解和合成干涉光束. 从耦合器的一端注入的激光经过耦合器后被分成两束,一束光经  $l_1 \rightarrow l \rightarrow l_2$  传输到输出端,另一束经  $l_2 \rightarrow l \rightarrow l_1$  传输到输出端. 当超声波作用于圆环状光纤  $l$  时,在  $l$  中传输的两束光的位相被调制. 超声波对干涉仪的 2 个臂  $l_1$  和  $l_2$  的作用可以忽略不计<sup>[7-8]</sup>.

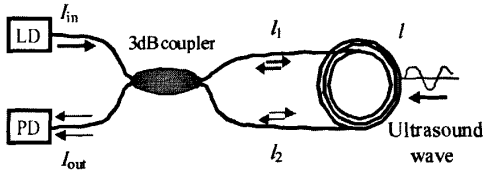


图 1 光纤 Sagnac 干涉仪原理图

Fig. 1 Schematic of the fiber optic Sagnac interferometer

到达光探测器的两束光的光波场  $E_L$  和  $E_R$  分别可表示为

$$E_L = A \exp \{ i[\omega t - \varphi_s(t - \tau_L) + \varphi_1] \}, \quad (1)$$

$$E_R = A \exp \{ i[\omega t - \varphi_s(t - \tau_L) + \varphi_2] \}. \quad (2)$$

式中:  $A$  是与注入光的振幅和耦合器的插入损耗成正比的常数;  $\omega$  是光波的频率;  $\varphi_s$  是超声波导致的传感区域两束光位相的变化;  $\tau_L$  和  $\tau_R$  分别是这两束光通过传导光纤  $l_1$  和  $l_2$  从光纤敏感区域  $l$  传播到光探测器所经历的时间;  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  分别是两束光在光纤敏感区域  $l$  的初位相,它们与传导光纤  $l_1$  和  $l_2$  的长度有关. 由式(1)和(2),输出到光探测器的光强度为

$$I_{out} \propto (E_L + E_R) \cdot (E_L + E_R)^* = 2A^2 [1 + \cos(\Delta\varphi_s + \Delta\varphi)]. \quad (3)$$

式中:  $\Delta\varphi_s = \varphi_s(t - \tau_R) - \varphi_s(t - \tau_L)$ ,  $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ .

给 PZT 加载一个正弦波电压,并认为 PZT 的振动为超声波且在钢板中线性传播. 作用在光纤  $l$  上的超声波(或振动)对  $l$  中传输的光波位相的调制可以被表示为

$$\varphi_s = \varphi_{s0} \cos(\omega_u t). \quad (4)$$

式中:  $\omega_u$  是超声波的频率;  $\varphi_{s0}$  是位相变化的幅值,与超声波的强度成正比.  $\Delta\varphi_s$  可表示为

$$\Delta\varphi_s = 2\varphi_{s0} \sin[\omega_u(t - \frac{\tau}{2})] \sin(\omega_u \frac{\tau'}{2}). \quad (5)$$

其中,  $\tau = \tau_R + \tau_L$ ,  $\tau' = \tau_R - \tau_L$ .

在实际检测中,通常只关心信号的交流部分,式(3)可以被改写为

$$I_{out} = \cos\{\gamma \sin[\omega_u(t - \frac{\tau}{2})] + \Delta\varphi\}. \quad (6)$$

其中,  $\gamma = 2\varphi_{s0} \sin(\omega_u \tau' / 2)$ .

通过 MATLAB 软件对式(6)进行了仿真,当  $\gamma$  的数值较小,而  $\Delta\varphi$  接近于  $\pi/2$  时,干涉仪处于正交状态,输出信号的基频和超声波调制信号的频率相同. 当  $\Delta\varphi$  接近于 0 或  $\pi$  时,干涉仪输出信号中除基频外,含有越来越明显的倍频分量. 由此可见,只要合理的构建干涉仪系统,使之工作在正交区间附近,即  $\Delta\varphi = \pi/2$  附近的区域,即可用于声发射信号的检测.

### 1.2 声发射源定位原理

本系统采用归一化矩形阵列定位方法,它是一种将声源位置坐标归一化的定位方法. 这种方法数学表达形式简单、对称,易于进行数据处理,在公式的推导过程中没有作任何近似假设,表达准确,并且不经过判断就可以确定唯一解<sup>[9]</sup>.

要在钢板上进行声源定位,首先将定位系统等效成一个理想的模型:激励源在钢板上所产生的声波,波速为一常数,即不受介质本身性质的影响;四路传感器的响应特性相同;声源及传感器都近似成点. 声发射源的定位是利用四路传感器接收到声源发出同一声波的时刻不同,当有传感器采集到信号后,开始计时,依次记下另外 3 个传感器所采集到信号的时间,在根据已知的速度就可计算出声源的位置.

建立几何模型如图 2 所示,取矩形的长为  $a$ ,宽为  $b$ ,1 点处的几何坐标为  $(0,0)$ ,声源的位置坐标为  $(x,y)$ .

图中传感器 1、2、3、4 为四路传感器所在的位置; $r$  为声源到 1 的距离;声源到 2 的距离与声源到 1 的距离差  $S_2 = v t_2$ ,声源到 3 的距离与声源到 1 的距离差  $S_3 = v t_3$ ,声源到 4 的距离与声源到 1 的距离差  $S_4 = v t_4$ ,其中  $v$  为声波在该介质中的传播速度, $t_2, t_3, t_4$  分别为采集信号的时间差.

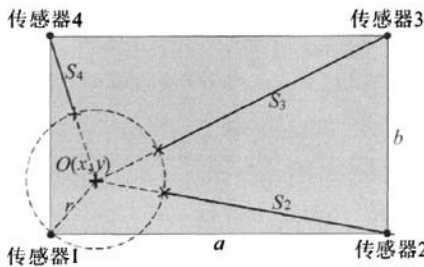


图 2 声源定位原理示意图

Fig. 2 Schematic of the principle of the acoustic source

根据图 2,当信号先到达传感器 1 时,列出方程

有

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = R^2, \\ (a - x)^2 + y^2 = (R + S_2)^2, \\ x^2 + (b - y)^2 = (R + S_4)^2, \\ (a - x)^2 + (b - y)^2 = (R + S_3)^2. \end{cases} \quad (7)$$

解得

$$\begin{cases} R = \frac{S_2^2 + S_4^2 - S_3^2}{2(S_3 - S_2 - S_4)}, \\ x = \frac{a^2 - S_2^2 - 2RS_2}{2a}, \\ y = \frac{b^2 - S_4^2 - 2RS_4}{2b}. \end{cases} \quad (8)$$

同理即可求出信号先到达传感器 2、3、4 等其他情况下的  $x, y$  坐标值.

## 2 声发射源定位系统开发

随着计算机的迅速普及和计算机控制技术的发展,计算机被广泛应用于自动化监控领域之中.而要完成一个监控过程一般都要利用集散式计算机控制系统.在这种监控系统中,下位机主要完成对现场数据采集和对设备一级的监控,上位机则要完成对整

个系统的数据采集、分析、处理、控制以及数据、图形显示、打印、人机对话等工作.而上位机与下位机大多是通过 PC 机的 RS-232 串行接口或 USB 接口实现通信.

### 2.1 上位机软件程序设计

上位机的作用是对下位机采集的数据进行分析处理,得到所要的结果,并实现对下位机的控制.本实验平台以 VB6.0 作为开发环境,主要应用 VB 自带的 MSComm 控件来实现上位机(计算机)与下位机(单片机)的串口通信<sup>[10-11]</sup>,所设计的软件界面可以对声发射源定位信号采集处理电路采集到的声发射源信号进行处理,包括绘制出每一路信号的波形,根据定位原理的计算结果显示声发射源的位置,针对各传感器初位相不同而附加时间差修正等功能.实验平台设计流程图如图 3 所示.

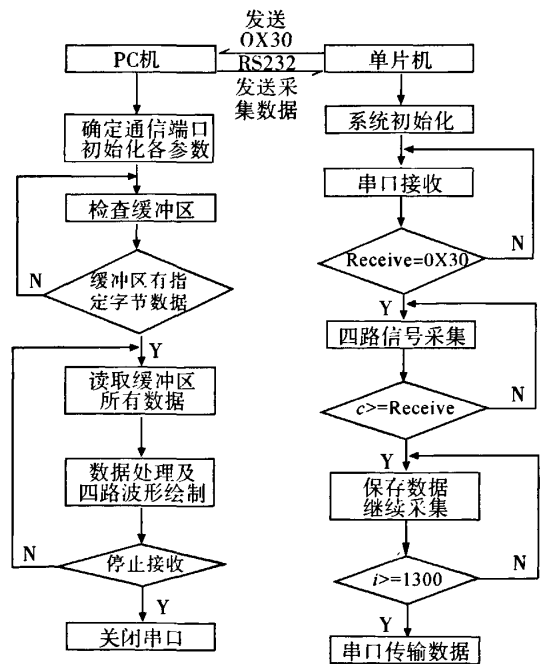


图 3 实验平台设计流程图

Fig. 3 The flowchart of the experimental platform

### 2.2 下位机硬件实现

下位机主要完成对现场数据采集和对设备的一级监控.本实验平台的下位机主要由 4 通道放大电路和数据采集电路组成.光纤 Sagnac 环形传感器输出的干涉信号要通过电信号的形式加以表现,而光电转换器的输出电压是毫伏量级,很难进行后续的

信号处理,因此要对其进行适当的放大.系统的放大电路部分主要由低通滤波器,高通滤波器,放大器组成.采用 OP07 芯片的单路放大电路如图 4 所示.数据采集电路的作用主要是将模拟电信号经过模数转换后传送给计算机,主要由模数转换器,单片机电路两部分组成.为了节约成本,采用模数转换器复用的方式实现 4 通道模数转换.由于数据采集对单片机

的速度有一定要求,选用 ATmega32,它具有比普通的微控制器高至 10 倍的数据吞吐率.通过 ATmega32 将模数转换结果采入单片机后,再通过 MAX232 对其进行电平转换,即可实现单片机与计算机的串行通信异步传输.数据采集电路图如图 5 所示<sup>[12-13]</sup>.

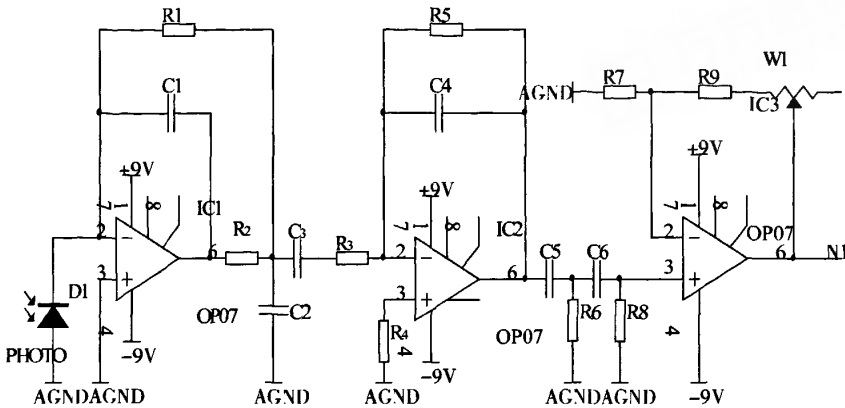


图 4 单路放大电路图

Fig.4 The circuit of the single channel amplifier

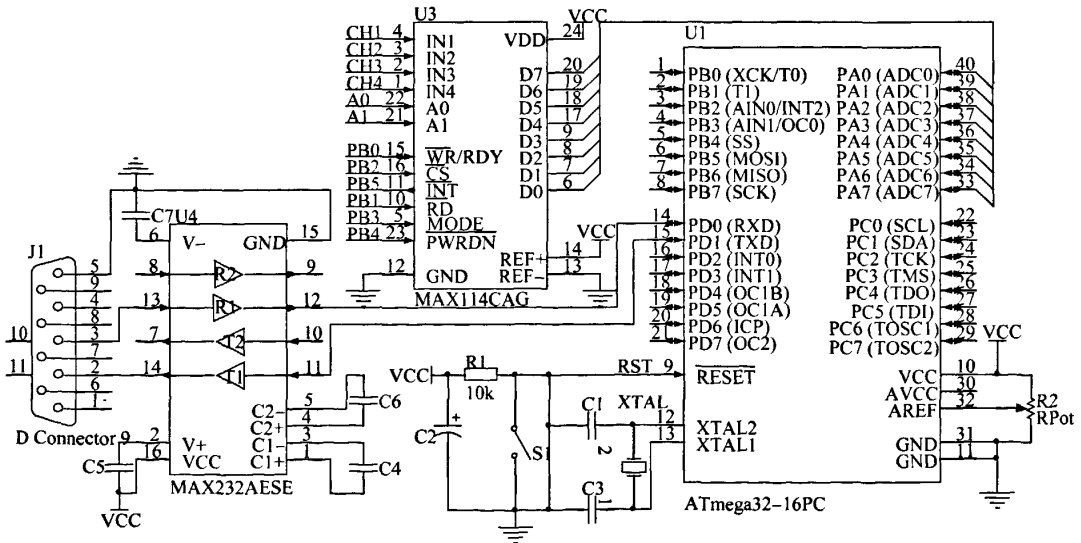


图 5 数据采集电路图

Fig.5 The circuit of the data acquisition

### 3 模拟声发射源定位实验

实验采用一种自制机械式声发射模拟源激励钢板,在钢板上排布 4 个 Sagnac 干涉式光纤传感器,并将放大器,数据采集电路与计算机相连,实验系统

如图 6 所示,钢板尺寸为 825 cm × 545 cm,图中所示交叉网格为 10 cm × 10 cm.实验过程中,首先在 4 个光纤传感器确定的矩形中心敲击,理论上 4 个传感器探头会同时接收到声发射信号,因为有初相位的存在,导致四路信号存在时间差,计算机可以通过此

次敲击信号获取当前实验条件下的时差参考修正值。

保存参考时差修正值后即可进行定位实验,进行定位实验时首先点击软件上的“开始采集”按钮,此时计算机发给下位机一个开始采集的命令,采集电路部分开始工作,然后在钢板上选择一位置进行敲击,采集电路将采集到四路传感器检测的信号,采集完成后将对采集的数据进行处理并发送给计算机,计算机接收到串口传来的数据,解调处理后即可完成波形的绘制与声发射源位置的计算。

实验过程中,均匀选取钢板上的点作为测试点.声源作用点为(150 mm,150 mm)时所采波形如图 7 所示.实验共测试钢板上随机选取 16 个点,当无时间修正值时定位结果如图 8 所示,加入时间修正值后的测试结果如图 9 所示。

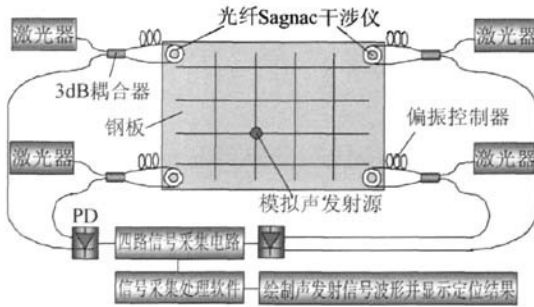


图 6 声发射源定位实验系统

Fig. 6 Experimental system of the acoustic source location

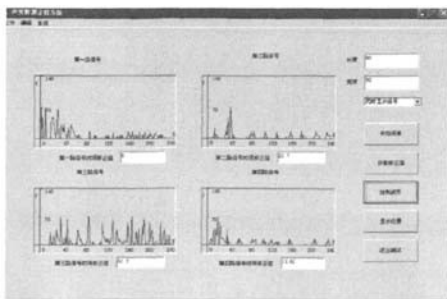


图 7 测试点(150,150)敲击波形图

Fig. 7 The waveform when knocking at test point(150,150)

实验结果表明此实验平台用于模拟声源定位是可行的,由图 8、9 可以直观的看到各位置测量结果的偏差程度,图中三角形图例表示测试点的标准位置,圆形图例表示测试位置.加入时差修正值后,测试结果精度明显提高.定位结果的横向误差范围小于 4 cm,纵向误差范围小于 5 cm,个别点在某一

个方向的定位精度较高.图中可见,钢板边缘点相对精度较中心点高,原因是中心坐标精度受时间差法影响较大。

影响声发射源定位精度的因素很多,环境的波动,光源的波动,传感器与声源的尺寸,各个传感器初相位的差异,钢板结构的各向异性,钢板中波的选取,声发射信号计算点的选取等都可以使定位结果产生偏差.实验中加入时差修正值,目的在于克服传感器间初相位的不同对定位精度的影响,实验结果表明,初相位的影响因素在一定程度上可以提高定位精度,对于其他影响因素,还有待进一步研究。

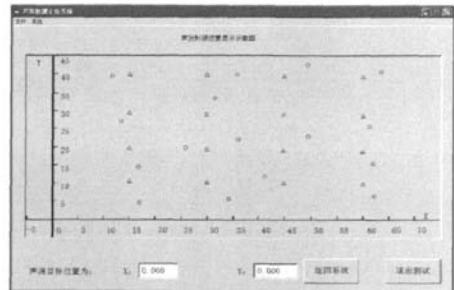


图 8 无时差修正值时测试结果

Fig. 8 Test results without time difference correction value

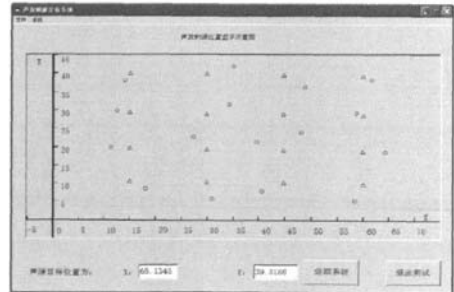


图 9 加入时差修正值时测试结果

Fig. 9 Test results with time difference correction value

### 4 结束语

本文给出了光纤 Sagnac 环形传感器检测声波及实现声源定位的原理,提出了基于光纤传感器的声发射源定位实验平台的开发与设计,给出了基于 VB6.0 的软件设计方案及基于 ATmega32 的硬件采集电路的硬件实现方案.通过模拟声源定位实验验证了以上设计思想及方案,尝试用时间值修正的方法提高定位精度.基于以上实验平台的开发,为后续的信号处理提供了良好的条件,为了进一步提高定位精度,可以对采集的信号进行小波分析,频谱变换



等信号处理手段,找到合适有效的定位算法,得到更为满意的定位结果,构建成本低廉、检测灵敏度高、适用范围广泛的声发射源定位平台,使声发射技术在材料研究、压力容器评价、飞机构件的强度监视、混凝土结构健康状态监控等方面获得广泛应用。

## 参考文献:

- [1] 藤山邦久. 声发射(AE)技术的应用[M]. 冯夏庭,译. 北京:冶金工业出版社,1996:13-83.
- [2] JOMDECHAA C, PRATEEPASEN A. Study on source location using an acoustic emission system for various corrosion types[J]. *NDT&E International*, 2007, 40: 584-593.
- [3] 沈功田, 耿荣生, 刘时风. 声发射源定位技术[J]. *无损检测*, 2002, 24(3): 114-117.  
SHENG Gongtian, GENG Rongsheng, LIU Shifeng. Acoustic emission source location[J]. *Non Destructive Testing*, 2002, 24(3): 114-117.
- [4] WATANABE K, NIWA J, IWANAMI M, YOKOTA H. Localized failure of concrete in compression identified by AE method[J]. *Construction and Building Materials*, 2004, 18(3): 189-196.
- [5] YUAN L B, ZHOU L M, JIN W. Detection of acoustic emission in structure using Sagnac-like fiber-loop interferometer[J]. *Sensors and Actuators A*, 2005, 118: 6-13.
- [6] YUAN L B, ZHOU L M, JIN W. Long-gauge length embedded fiber optic ultrasonic sensor for large-scale concrete structures[J]. *Optics & Laser Technology*, 2004, 36: 11 - 17.
- [7] 梁艺军, 徐彦德, 刘志海, 等. 环形光纤声发射传感器的相位调制特性研究[J]. *光子学报*, 2006, 35(9): 1337-1340.
- [8] 梁艺军, 刘志海, 杨军, 等. 测量微振动的光纤 Sagnac 干涉传感器[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2007, 28(1): 118-122.  
LIANG Yijun, LIU Zhihai, YANG Jun. Optic fiber Sagnac interferometric sensor for measurement of feeble vibration[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2007, 28(1): 118-122.
- [9] 龚斌, 金志浩, 齐辉, 等. 无须测量声速的声发射源定位方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2007, 28(1): 185-188.  
GONG Bin, JIN Zhihao, QI Hui, WEN Bangchun. Research on acoustic emission source locating method without measuring the sonic speed[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, 28(1): 185-188.
- [10] 李江全, 张丽. *Visual Basic 串口通信与测控应用技术实战详解*[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007: 87-181.
- [11] 玛昊. *Visual Basic 程序设计与上机指导*[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 101-196.
- [12] 马潮, 詹卫前. 耿德根. *ATmega8 原理及应用手册*[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 100-152.
- [13] 宋建国. *AVR 单片机原理与应用*[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998: 1-40.

[责任编辑:陈峰]

# 光纤声发射源定位实验平台的研究与实现

作者: 梁艺军, 刘俊锋, 张巧萍, 吴雷, 樊晨光  
作者单位: 哈尔滨工程大学理学院, 黑龙江, 哈尔滨, 150001  
刊名: 哈尔滨工程大学学报 **ISTIC EI PKU**  
英文刊名: JOURNAL OF HARBIN ENGINEERING UNIVERSITY  
年, 卷(期): 2010, 31(2)  
引用次数: 0次

## 参考文献(13条)

1. 藤山邦久. 声发射(AE)技术的应用[M]. 冯夏庭, 译. 北京:冶金工业出版社, 1996:13-83.
2. JOMDECHAA C, PRATEEPASEN A. Study on source location using an acoustic emission system for various corrosion types[J]. NDT&E International, 2007, 40:584-593.
3. 沈功田, 耿荣生, 刘时风. 声发射源定位技术[J]. 无损检测, 2002, 24(3):114-117. SHENG Gongtian, GENG Rongsheng, LIU Shifeng. Acoustic emission source location[J]. Non Destructive Testing, 2002, 24(3):114-117.
4. WATANABE K, NIWA J, IWANAMI M, YOKOTA H. Localized failure of concrete in compression identified by AE method[J]. Construction and Building Materials, 2004, 18(3):189-196.
5. YUAN L B, ZHOU L M, JIN W. Detection of acoustic emission in structure using Sagnac-like fiber-loop interferometer[J]. Sensors and Actuators A, 2005, 118:6-13.
6. YUAN L B, ZHOU L M, JIN W. Long-gauge length embedded fiber optic ultrasonic sensor for large-scale concrete structures[J]. Optics & Laser Technology, 2004, 36:11-17.
7. 梁艺军, 徐彦德, 刘志海, 等. 环形光纤声发射传感器的相位调制特性研究[J]. 光子学报, 2006, 35(9):1337-1340. LIANG Yijun, XU Yande, LIU Zhihai, YUAN Libo. Frequency response of coiled-fiber optic sensor for detection of the acoustic emission[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(9):1337-1340.
8. 梁艺军, 刘志海, 杨军, 等. 测量微振动的光纤Sagnac干涉传感器[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28(1):118-122. LIANG Yijun, LIU Zhihai, YANG Jun. Optic fiber Sagnac interferometric sensor for measurement of feeble vibration[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2007, 28(1):118-122.
9. 龚斌, 金志浩, 齐辉, 等. 无须测量声速的声发射源定位方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(1):185-188. GONG Bin, JIN Zhihao, QI Hui, WEN Bangchun. Research on acoustic emission source locating method without measuring the sonic speed[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(1):185-188.
10. 李江全, 张丽. Visual Basic串口通信与测控应用技术实战详解[M]. 北京:人民邮电出版社, 2007:87-181.
11. 玛昊. Visual Basic程序设计与上机指导[M]. 北京:清华大学出版社, 2000:101-196.
12. 马潮, 詹卫前. 耿德根. ATmega8原理及应用手册[M]. 北京:清华大学出版社, 2003:100-152.
13. 宋建国. AVR单片机原理与应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 1998:1-40.

## 相似文献(1条)

1. 期刊论文 陈德胜, 郜洪云, 肖灵, 傅汝康, 孙德兴. CHEN De-sheng, GAO Hong-yun, XIAO Ling, FU Ru-lian, SUN De-xing 基于Sagnac干涉仪的新型声源定位光纤传感器 - 光电子·激光2006, 17(4)  
利用法拉第旋转镜(FRM)把Sagnac光纤干涉仪的环形光纤臂改成单臂直线结构的新型零程差干涉仪, 克服了传统Sagnac光纤干涉仪结构上的缺点. 另外, FRM作为偏振补偿器解决了偏振诱导信号衰弱问题. 对该装置进行了理论分析, 并以管道的泄漏声为例进行了实验研究, 实验结果与理论分析相吻合, 定位误差小于1%, 表明该装置可以实现宽频声信号源的定位.

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_hebgcdxxb201002022.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_hebgcdxxb201002022.aspx)

下载时间: 2010年5月31日