

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.03.021

基于新型光纤智能结构的远程监控物联网系统设计

沈令斌¹ 赵志敏¹ 俞晓磊²

(1. 南京航空航天大学理学院, 南京, 210016; 2. 江苏省标准化研究院, 南京, 210029)

摘要:针对现有光纤智能结构自诊断、自修复系统存在的问题,提出并设计了一种基于 ARM 和 GPRS 的液芯光纤智能结构的远程监控物联网系统,系统主要包括光源、液芯光纤智能结构、光电检测模块、A/D 转换模块、ARM 微控制器、GPRS 无线通信模块、Internet 和监控中心服务器。其中液芯光纤智能结构是由特制的液芯光纤埋入复合材料中构成,采用 GPRS 无线通信技术,结合以 S3C2440 为核心处理器的 ARM 嵌入式技术,同时在监控中心采用自主设计的监控可视化软件直接输出结果,具有直观可靠、控制简单等优点。本文还对液芯光纤智能复合材料结构进行承载实验研究,并采用 BP 神经网络理论对实验数据进行分析 and 载荷位置判定,研究结果表明该监控系统性能稳定且效果明显,对复合材料结构载荷位置能够作出准确判断,初步实现了复合材料结构的自诊断。

关键词:液芯光纤智能结构;远程监控;承载定位;物联网

中图分类号:TN247

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2015)03-0453-06

Design of Remote Monitoring Internet of Things System for New Optical Fiber Smart Structure

Shen Lingbin¹, Zhao Zhimin¹, Yu Xiaolei²

(1. College of Science, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. Jiangsu Institute of Standardization, Nanjing, 210029, China)

Abstract: According to the limitations of the existing self-diagnosis and self-repairing system for optical fiber smart structure, a system of remote data communication for liquid-core optical fiber smart structure based on ARM and GPRS is proposed. The system mainly consists of laser source, liquid-core optical fiber smart structure, microcontroller, GPRS communicate module, light source using for repairing, internet and monitoring center. The liquid-core fiber optic smart structure is made up of the special liquid-core fiber embedded into composites. The system uses the GPRS wireless communication technology, combining with the core processor S3C2440 ARM embedded technology. And in monitoring center, a visual surface software is designed using Microsoft VB. It has the advantages of intuitive and trustiness. Meanwhile, the experiment of loading is carried out. And the data of experiments are analyzed by BP network theory. The research results show that the monitoring system is stable, efficient and reliable and the position of loading can be located exactly. The composite self-diagnosis is realized preliminarily.

Key words: liquid-core optical fiber smart structure; remote monitoring; load location; internet of things

基金项目:国家自然科学基金(61475071)资助项目;江苏省自然科学基金青年基金(BK20141032)资助项目;中国博士后基金(2013M531346)资助项目;江苏省普通高校研究生科研创新计划(KYLX-0246)资助项目。

收稿日期:2014-01-17; **修订日期:**2014-12-17

通信作者:俞晓磊,男,高级工程师,E-mail:nuaa-2010@126.com。

智能结构是近年来新材料领域的研究热点,研究综合了电子、测试、信息、固体力学和控制技术等学科知识,它的发展非常迅速,在诸多领域受到重视并得到越来越广泛的应用。例如,采用智能结构技术来进行硬盘驱动器的振动控制从而改善伺服性能^[1],在航空领域中实现智能蒙皮、自适应机翼、振动噪声控制^[2]等。通常,将光纤技术应用于先进复合材料中,并配以相应监测与控制系统就构成了光纤智能结构^[3]。国内外对光纤智能结构状态监控的研究以及监控系统的设计已经取得了一些成果,完成了各种监控系统设计^[4-6]等。目前在智能复合材料监测系统中应用最多是光纤光栅传感器,但是光纤光栅只能作为传感元件监测复合材料的健康状态,当材料发生损伤时,不能对材料进行及时修复,针对这一问题,本文研究一种新型液芯光纤传感器^[7],埋入复合材料结构中,构成光纤传感网络。虽然液芯光纤没有被用于光通信,但是实验中却发现了液芯的一些性质,如光谱传输效率高、机械性能好、可以传输大功率光源、非线性特性、大数值孔径等优点。同时监控系统设计大部分都是基于现场工作的,在实际的应用中还存在诸多不足之处,比如郭林峰等人^[8]提出并设计了一种光纤智能结构的监控系统,采用的是实心光纤,其监控主机核心处理器采用的是 DSP 处理器,通过串口与监控中心连接,因此该系统在实际应用过程中,必须基于现场工作,对实际操作的区域有着很大的局限性;Ebrahim 等人^[6]设计了一种对大桥进行健康监控的远程监控系统,该系统通过电话线或 DSL 快速连接器连接信号调节器到因特网进行远程数据传输,从而达到远程监控的目的,DSL 连接因特网其服务频段较窄,随着传送距离的加长,其服务质量因为干扰而急剧下降。

近年来,随着通信技术发展,无线通信以其方便、快捷和廉价的优势,弥补了有线通信的不足,结合嵌入式技术开发的具有 GPRS 数据通信功能的移动数据终端,在诸如车辆位置管理、物流管理、移动售票等行业中具有无可比拟的性价比优势^[9]。事实上,嵌入式技术和 GPRS 技术在工业界受到了广泛关注,此两种技术的结合也在实际生活中广泛应用,尤其是一些远程监控系统的设计和研究,如李平江等人^[10]采用 ARM 嵌入式技术与 GPRS 设计并实现了一个无线路灯监控管理系统;李自刚等人^[11]设计并实现了一种基于 ARM 控制平台和 GPRS 数据传输技术光纤直放站监控系统。物联网被认为是继计算机、互联网之后的第三次数字技

术革命,备受国内外关注。

本文基于智能结构自诊断、自修复的这种功能要求,同时在嵌入式技术和无线通信技术快速发展的情况下,设计提出了一种液芯光纤智能复合材料结构,基于 ARM 处理器和 GPRS 的光纤智能结构的远程健康监控物联网系统,并采用该系统对液芯光纤智能结构进行承载实验,同时对实验数据进行分析 and 处理,从而实现了液芯光纤智能复合材料结构健康状态的自诊断。

1 物联网系统的结构及功能

1.1 监控系统硬件部分

本文设计的新型光纤智能结构远程监控物联网系统由光源、液芯光纤智能结构、光电检测模块、ARM 处理器、GPRS 无线通信模块、Internet 以及监控中心服务器组成,如图 1 所示。

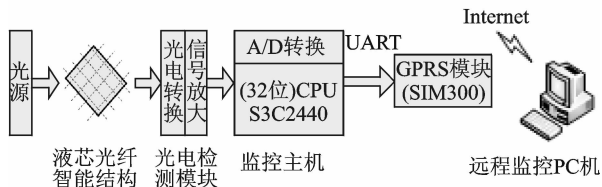


图 1 液芯光纤智能结构远程监测物联网系统结构图
Fig. 1 Remote monitoring internet of things system based on liquid-core optical fiber

其中,液芯光纤智能结构是由在航空飞行器中常用的复合材料埋入网状交叉的自制特殊液芯光纤^[7]构成。本系统的研究主要针对经过光纤的输出光强信号变化,分析智能结构的健康状态,如材料受到承载、挤压而损伤、断裂等,从而达到对复合材料健康状态进行监控的目的。光纤传感器输出的光信号必须要经过光电转换和放大处理。因此,光电检测模块包含两个部分,一部分是光电转换电路,本文采用的元件是光电二极管,另一部分是信号放大电路,电压放大型 IC 检测电路,由于光电转换模块所接收的光信号十分微弱,放大后方便后面的微处理器对该信号进一步分析和处理。

ARM 微控制器硬件构成框图如图 2 所示,其中微处理器采用的是基于 ARM 核的 S3C2440 芯片作为整个系统的核心单元,它运行于 Linux 操作系统,并且 Linux 嵌入式操作系统是通过交叉编译的方式移植到 ARM 控制器中,从而来完成数据采集的任务。SDRAM 和 Flash ROM 用来存储 Linux 操作系统程序、应用程序及相关配置参数。控制模块用来控制修复光源的开关,其他 I/O 口

可以连接其他子模块,作为现场信息数据与 CPU 通信的输入口。

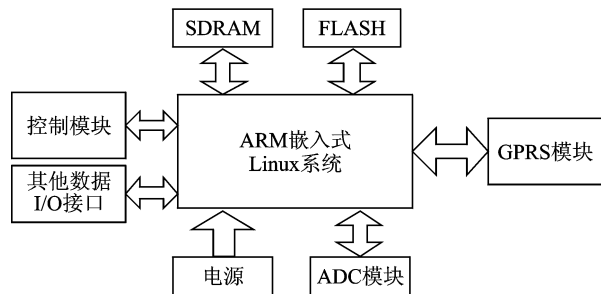


图 2 ARM 控制器硬件构成框图

Fig. 2 ARM controlled hardware structure

A/D 转换模块用于对放大后的信号进行 A/D 转换,即将模拟信号转化为计算机能够识别的数字信号。GPRS 通信模块主要负责将光纤智能结构的状态信息通过 Internet 无线传送到监控中心服务器,GPRS 模块通过串行口 COM1(RS-232)与 CPU 通信,完成无线上网功能。在 Linux 中编写 PPP 脚本拨号程序驱动 GPRS 模块连接上 Internet,再经过 TCP/IP 通道传输数据,实现无线传输。本系统 GPRS 无线通信模块采用的是三星公司产的 SIM300。

1.2 监控系统软件部分

该系统软件设计主要包括操作系统软件、应用层软件和监控中心服务器软件设计,操作系统软件包括 Bootloader, Linux 内核,根文件系统以及应用程序。Bootloader 类似于 Windows 中的 BIOS,是用来引导系统的,不过在引导系统之前还要对硬件资源进行一些初始化,如 CPU 内部寄存器初始化、内存初始化等,本文采用的是 U-Boot; Linux 内核的编译采用的是交叉编译的方式,内核配置主要是对内核的功能模块进行选择及参数选定,还包括 FLASH 配置、实时时钟配置、各种总线和接口的配置;根文件系统采用的是基于 FLASH 文件系统中的 yaffs/yaffs2 文件系统。应用层软件主要包括 GPRS 模块应用程序的设计,应用程序设计流程图设计流程图如图 3 所示。

SIM300 是一款内嵌 TCP/IP 协议栈的通信模块,通过 AT 命令控制。GPRS 模块通过串口与 ARM 芯片连接,ARM 芯片接收到光纤智能结构的信息后,经串口发送 AT 命令实现对 GPRS 模块的控制,通过 GPRS 模块与无线 GPRS 网络连接,最终实现远程数据传输功能。由于 SIM300 模块与 ARM 微处理器之间采用 RS-232 串口通信进

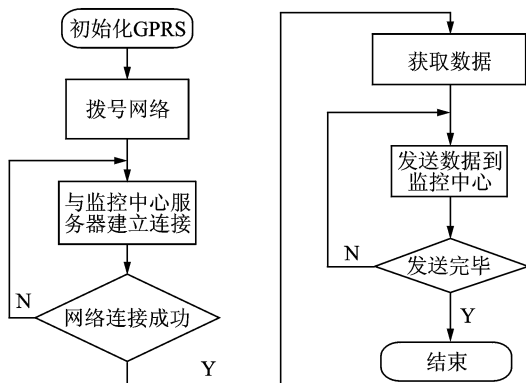


图 3 应用程序设计流程图

Fig. 3 Application design flow chart

行数据传输,因此 SIM300 模块应用程序设计是用 Linux 的系统调用对串口进行读、写等控制操作,对串口写进 AT 命令及读取返回值,从而达到对模块的控制操作。

监控中心的主要任务是实时接收来自微处理器通过 GPRS 网络无线传输过来的数据信息并对其进行分析和处理,从而监控复合材料结构的健康状态。监控中心服务器软件是采用 VB 语言编写的,在 VB 中有一个封装好的控件,通过简单的属性及方法的调用就可以实现与远程客户机建立连接,并通过传输控制协议 TCP 进行数据交换,利用 Winsock 创建了一个服务器应用程序,作为客户的数据汇入点。接收到数据后先作归一化处理,然后用事先建立并训练好的 BP 神经网络对数据进行计算,得到表示光纤智能结构变形位置的信息。

2 BP 神经网络

BP 神经网络^[12]是采用 BP 算法进行训练的一种网络结构。BP 算法包括两个方面:信号的前向传播和误差的反向传播,即计算实际输出时按从输入到输出的方向进行,而权值和阈值的修正从输出到输入的方向进行。BP 神经网络的结构如图 4 所示。

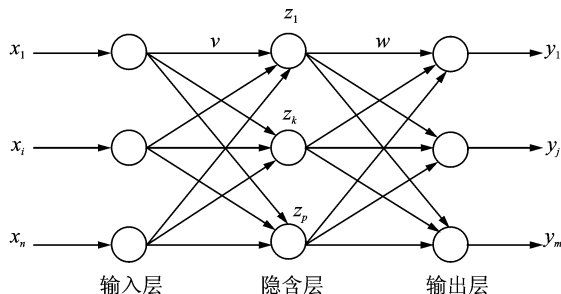


图 4 BP 神经网络结构

Fig. 4 BP neural network structure

BP 网络模型^[12]是目前应用最广泛的一种网络模型,发展的非常成熟,它实质上实现了一个从输入到输出的映射功能,理论证明三层神经网络能够以任意精度逼近任何非线性连续函数,具有较强的非线性映射能力,同时具有高度的自学习和自适应的能力,本文采用 Matlab 软件实现 BP 算法, BP 算法流程图如图 5 所示。

板耦合就构成了液芯光纤智能结构,复合材料板的面积是 5 cm×5 cm,平行光纤两两之间的距离是 1 cm,实验装置如图 6 所示。其中,嵌入式系统包括 ARM 控制器和 GPRS 无线通信模块,Fi(i=1~8)是光纤的编号,1~16 表示光纤相交形成的 16 个位置。

根据神经网络理论与该实验系统中的实际情况,建立 BP 网络模型^[13]如下:输入层为 8 个单元,分别对应于 8 根光纤输出的相对强度的归一化值,输出层为 4 个单元,表示变形位置的四位二进制代码,隐含层为 10 个单元。隐含层和输出层的激励函数均采用对数 S 型函数 $f(x)=1/(1+e^{-x})$ 。通过输入训练样本对网络进行训练,完成后采用该网络对实验数据进行处理,判断光纤智能结构的变形位置。变形位置指光纤网络相交的 16 个位置,它可以由四位的二进制编码进行区分,即用(0,0,0,0)~(1,1,1,1)分别表示 1~16 这 16 个位置。实验中,当人工神经网络的输出为(0,0,0,0)就表示位置 1 发生了变形,以此类推。变形位置与神经网络的期望输出的情况如表 1 所示。当有光纤输出值为 0 时,则表明该承载区域受到损坏,系统会自动输出控制信号对损坏区进行修复。

3.2 实验结果与分析

实验具体过程:首先,连接好实验装置,建立服务器网络连接,然后分别对实验装置(见图 6)中的 2,7,12,13 四个交叉区域进行加载实验,通过监控中心得到实测数据,并将数据绘制成曲线,横坐标表示实验加载时间,纵坐标表示在监控中心接收到的液芯光纤输出的强度值(单位为“1”),如图 7

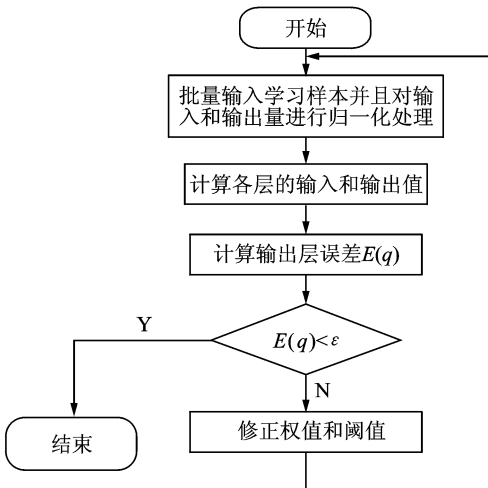


图 5 BP 算法程序流程图

Fig. 5 Procedure flow chart of BP algorithm

3 实验与分析

3.1 实验装置

实验采用本文设计的健康监控系统,以飞行器常用的玻纤增强 E-51 环氧树脂基复合材料为监控对象,采用的是 8 路液芯光纤^[7],将 8 路该种光纤以 4×4 正交埋入复合材料板表层中,与复合材料

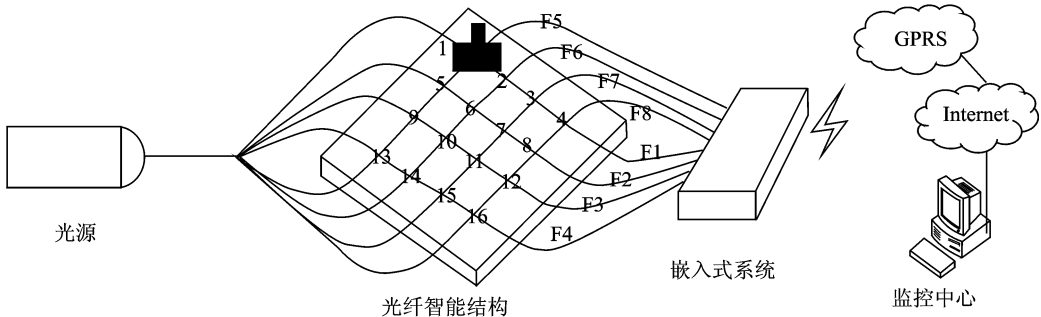


图 6 实验装置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of experimental device

表 1 变形位置与期望输出对应表格

Tab. 1 Comparison form of deformation and expected location output

变形位置	期望输出	变形位置	期望输出	变形位置	期望输出	变形位置	期望输出
1	(0,0,0,0)	5	(0,1,0,0)	9	(1,0,0,0)	13	(1,1,0,0)
2	(0,0,0,1)	6	(0,1,0,1)	10	(1,0,0,1)	14	(1,1,0,1)
3	(0,0,1,0)	7	(0,1,1,0)	11	(1,0,1,0)	15	(1,1,1,0)
4	(0,0,1,1)	8	(0,1,1,1)	12	(1,0,1,1)	16	(1,1,1,1)

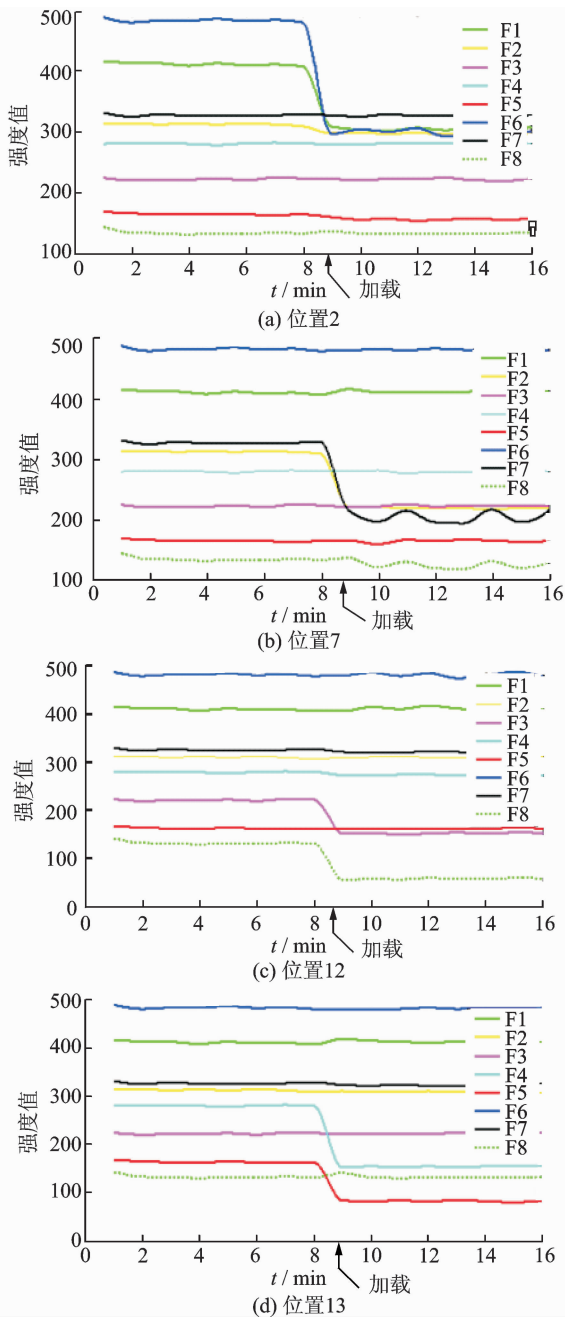


图7 承载前后光纤中输出强度值的变化

Fig. 7 Output changes of fibers before and after being loaded

所示。在监控中心经过 BP 神经网络处理后得到的承载位置与实际输出对应情况如表 2 所示。

当埋入液芯光纤传感网络的复合材料板没有受到承载时,接收到的通过各个光纤的相对强度值没有明显变化。如图 7(a)所示,当位置 2 即第 1 根和第 6 根光纤相交的位置处受到承载后,这两根光纤中采集到的相对强度值发生了明显变化,其他光纤中的相对强度值则没有明显变化,此时如表 2 中的第 1 组数据所示,监控中心 BP 网络期望输出应该是(0,0,0,1),而实际输出是(5.4×10⁻⁷,3.5×10⁻⁶,0.000 1,1.0),在一定的精度下,可以认为输出就是(0,0,0,1),对照表 1 可以判别发生变形的的位置是位置 2。如图 7(b)所示,当位置 7 即第 2 根和第 7 根光纤相交的位置处受到承载时,承载前后这两根光纤中采集到的相对强度值发生了明显变化,其他光纤中的相对强度值则没有明显变化,此时如表 2 中的第 2 组数据所示,监控中心 BP 网络期望输出应该是(0,1,1,0),而实际输出是(3.8×10⁻⁷,0.99,0.99,1.9×10⁻⁶),在一定的精度下,可以认为输出就是(0,1,1,0),对照表 1 可以判别发生变形的的位置是位置 7。同理,当位置 12 和 13 受到承载时,它们的承载位置处相交的两根光纤的相对强度值的变化分别如图 7(c,d)所示,并且它们的 BP 网络实际输出如表 2 中的第 3 和 4 组数据,将 BP 网络输出与期望输出对比,可以判定智能结构变形的的位置分别是 12 和 13。

通过对实验的研究分析表明,实验结果与实际实验加载情况完全符合,表明该系统不仅实现了对光纤智能材料结构的远程监控,还可以对结构载荷进行定位,为进一步智能复合材料的损伤自修复提供了实验基础。

表 2 实验承载位置与实际输出对应表格

Tab. 2 Comparison form of load position and predictive position

序号	承载位置	BP 网络期望输出		BP 网络实际输出			判别的变形位置
1	2	0,0,0,1	5.4×10 ⁻⁷	3.5×10 ⁻⁶	0.000 1	1.0	2
2	7	0,1,1,0	3.8×10 ⁻⁷	0.99	0.99	1.9×10 ⁻⁶	7
3	12	1,0,1,1	0.99	1.0×10 ⁻⁶	0.99	0.99	12
4	13	1,1,0,0	0.99	0.99	1.3×10 ⁻⁵	6.9×10 ⁻⁴	13

4 结束语

复合材料损伤自修复一直以来是智能监控系

统的设计难题,本文从实际应用要求出发,在传统的光纤智能结构自诊断系统的基础上,提出一种新型的液芯光纤智能结构,并设计了一种基于 ARM

和 GPRS 无线技术对液芯光纤智能结构健康状态进行远程监控的物联网自诊断系统,介绍了系统的硬软件设计方法和系统的工作原理,通过具体的载荷实验研究,可以得出以下结论:

(1)本文通过复合材料结构的承载实验研究,实验结果与实际完全符合,利用该系统能够对智能复合材料结构载荷进行定位,从而实现了液芯光纤智能结构健康状态的自诊断,这种特殊的液芯光纤智能结构,为下一步复合材料的损伤自修复打下了基础。

(2)系统采用 GPRS 无线通信技术,结合 S3C2440 为核心处理器的 ARM 嵌入式技术,具有成本低、功耗小、稳定性好等特点,克服了时间、区域等条件因素的限制。监控中心采用自主设计的监控软件,利用 BP 神经网络对数据进行处理,通过监控中心直接输出结果,具有直观、可靠、控制简单等优点。

综上,研究结果表明该监控系统软硬件工作协调,实现智能复合材料结构健康状态的自诊断,尤其是这种液芯光纤智能结构为复合材料损伤自修复的研究提供了很重要的基础,具有非常重要的理论和实际应用价值。

参考文献:

- [1] Kajiwara I, Uchiyama T, Arisaka T. Vibration control of hard disk drive with smart structure technology for improving servo performance[C]//Vlbrich H, Ginzinger L. Motion and Vibration Control. Netherlands:Springer,2009:165-176.
- [2] Sahin M, Karadal F M, Yaman Y, et al. Smart structures and their applications on active vibration control: Studies in the department of aerospace engineering, METU[J]. Journal Electroceram, 2008, 20(3/4):167-174.
- [3] 涂亚庆,刘兴长. 光纤智能结构[M].北京:高等教育出版社,2005.
Tu Yaqing, Liu Xingchang. Fiber optic smart structure[M]. Beijing:Higher Education Press, 2005.
- [4] Nishiyama M, Sasaki H, Watanabe K. A deformation sensitive pad-structure embedded with hetero-core optic fiber sensors[J]. Sensors and Actuators A, 2007,136(1):205-211.
- [5] 卢吉云,梁大开,潘晓文. 基于准分布式光纤光栅传感器的机翼盒段载荷监测[J]. 南京航空航天大学学报,2009,41(2):217-221.
Lu Jiyun, Liang Dakai, Pan Xiaowen. Load measurement of wing box based on distributed fiber bragg grating sensors[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2009,41(2):217-221.
- [6] Ebrahim M, Ashraf A, Amir A. Evaluation of fiber optic sensors for remote health monitoring of bridge structures[J]. Materials and Structures, 2009, 42(2):183-199.
- [7] 马军艳,赵志敏,郭林峰,等. 特种液芯光纤微弯性能实验研究[J]. 应用激光,2006,26(4):265-266.
Ma Junyan,Zhao Zhimin, Guo Linfeng,et al. Experimental study on microbend performance of special liquid-core optical fiber[J]. Applied Laser, 2006,26(4):265-266.
- [8] 郭林峰,赵志敏,李伟,等. 一种光纤智能结构的监控系统设计[J]. 传感器与微系统,2008,27(2):118-120.
Guo Linfeng, Zhao Zhimin, Li Wei, et al. Design of monitoring system with certain optical fiber intelligent structure[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2008,27(2):118-120.
- [9] 沈连丰,宋铁成,叶芝慧. 嵌入式系统及其开发应用[M].北京:电子工业出版社,2005.
Shen Lianfeng, Song Tiecheng, Ye Zhihui. The embedded system and its development and application [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.
- [10] 李平江,周伦彬,张宝峰. 基于 ARM 和 GPRS 的路灯远程监控系统[J]. 中国测试,2009,35(2):53-56.
Li Pingjiang, Zhou Lunbin, Zhang Baofeng. Remote monitor and control system for street lamps based on ARM and GPRS[J]. China Measurement & Test, 2009,35(2):53-56.
- [11] 李自刚,聂明新. 基于 ARM 和 GPRS 的光纤直放站监控系统的设计与实现[J]. 通信技术,2010,43(4):127-129.
Li Zigang, Nie Mingxin. Design and implementation of fiber-optic repeater monitoring system based on ARM and GPRS [J]. Communication Technology, 2010,43(4):127-129.
- [12] 朱剑英. 智能系统非经典数学方法[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2001:184-216.
Zhu Jianying. Non-classical mathematics for intelligent systems[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2001:184-216.
- [13] 张华荣,赵志敏. 基于人工神经网络的光纤智能结构变形信息的分析与处理[J]. 理化检验——物理分册,2011,47(3):137-140.
Zhang Huarong, Zhao Zhimin. Analysis and processing of deformation information of optical fiber smart structure based on artificial neural networks [J]. Parta: Phys Test, 2011,47(3):137-140.