

# 机敏水泥基传感元件信号的无线采集传输系统

林祯杉<sup>1</sup>, 王春圆<sup>1</sup>, 金鑫<sup>1</sup>, 喻言<sup>2</sup>, 韩宝国<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090; 2. 大连理工大学 微电子研究所, 大连 116024)

**摘要:**为实现用于混凝土结构应力(受力)/应变(变形)监测的机敏水泥基传感元件传感信号的无线采集传输,介绍了机敏水泥基传感元件的概念及其传感原理,并基于机敏水泥基传感元件传感信号的特点和模块化的设计思路,提出了信号的无线采集传输系统设计方法。重点分析了该无线采集传输系统的工作原理,给出了系统的硬件电路和软件设计流程图,并介绍了各硬件单元及其集成方法。结果表明:所提出的机敏水泥基传感元件信号的无线采集传输系统,具有电路简单、易于实现,采集传输可靠性高,价格低廉,安装方便,简单实用等特点,适合在混凝土结构健康监测中推广应用。

**关键词:**机敏水泥基传感元件;传感信号;模块化;无线采集传输

**中图分类号:**TB381;TM93;TG115.28

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-6656(2009)02-0111-04

## Wireless Acquisition and Transmission System of Sensing Signals of Smart Cement-Based Sensors

LIN Zhen-Shan<sup>1</sup>, WANG Chun-Yuan<sup>1</sup>, JIN Xin<sup>1</sup>, YU Yan<sup>2</sup>, HAN Bao-Guo<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

2. Institute of Microelectronics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** In order to realize wireless acquisition and transmission of the sensing signals of the smart cement-based sensors for stress/strain monitoring of concrete structures, the conception and the sensing principle of smart cement-based sensors were introduced, and the design method was presented based on the characters of the signals of smart cement-based sensors and the modularized program. The operating principle of the wireless acquisition and transmission system was especially analyzed, and the hardware circuit and the software program chart were presented, then every hardware element and the integration method were discussed in detail. The results showed that the presented wireless acquisition and transmission system of the sensing signals of smart cement-based sensors had such advantages as simple circuit easy to realize, high reliability, low cost, convenient setting and good practicability, and it was suitable for application in health monitoring of concrete structures.

**Keywords:** Smart cement-based sensors; Sensing signals; Modularization; Wireless acquisition and transmission

随着科学技术和社会需求的不断发展,工程结构日趋大型化和复杂化。由于混凝土材料可靠性低、离散性大,加之恶劣的使用环境对混凝土材料及

工程结构的破坏作用,使混凝土工程结构的安全性、可靠性和耐久性问题更为突出。因此必须对一些重大、重要混凝土工程结构在建造和服役过程中的性能和安全状况采用合理的安全监测措施<sup>[1-4]</sup>。

在混凝土结构监测中应用最为广泛的是电测传感元件(如电阻应变计、振弦式传感器)以及光纤传感元件,但耐久性和相容性差是它们在工程应用中的共性问题<sup>[5,6]</sup>。而具有应力/应变自感知性能的机敏水泥基材料的出现,可克服上述传感元件的缺

收稿日期:2008-03-31

**基金项目:**国家大学生创新性实验计划资助项目;中国博士后科学基金资助项目(20060390803);教育部博士点基金新教师资助项目(20070213080);大连理工大学青年教师培养基金资助项目

**作者简介:**林祯杉(1987—),男,本科生,从事智能土木工程材料与传感器研究。

点。所谓机敏水泥基复合材料是在普通的水泥基材料中均匀地掺进适当的功能组分,在力场的作用下,复合材料的微观结构发生变化,导电通路受到影响,会导致其体积电阻发生有规律的改变,从而具有感知特性,即机敏性(包括压阻性和拉阻性)。自1989年Chung教授首次提出碳纤维水泥基复合材料的机敏性以来,国内外的学者从材料的组成、制备工艺和测试方法等角度对机敏水泥基材料进行了深入系统的研究,而且对其工程应用形式进行了一些探索,例如用于车辆称重、交通测速、混凝土中钢筋锈蚀的监测以及混凝土梁、柱的受力、变形监测等<sup>[7-12]</sup>。但对于用其制成(或构成)的传感元件的传感信号无线采集传输方法的研究还未见报道。传统的传感信号采集传输,主要采用的是“有线”方式来实现,尽管这种方式采集传输信号准确、抗干扰性好,但其布线量大、采集精度受布线长度的影响、安装和维护费用高、可靠性差,甚至在一些结构中无法布线。随着传感技术和无线通信技术的发展,无线采集传输技术脱颖而出,为上述问题的解决提供了途径<sup>[13,14]</sup>。

在此笔者结合机敏水泥基传感元件传感信号的特点和模块化的设计思路,提出机敏水泥基传感元件的信号无线采集传输系统的设计方法,力争实现采集传输以及集成电路小型化、高可靠性和低成本。

## 1 机敏水泥基传感元件及其传感机理

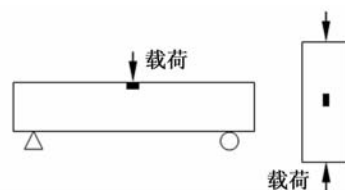
传感元件可采用如图1的嵌入式(制成小型传感元件相当于“传感”骨料)、层合式(传感层和结构层构成)或结构-感知一体式来感知结构的应力和应变及损伤程度。与传统的电阻应变片相比,其具有较高的灵敏因数(可高达700,而常用的电阻应变片的灵敏因数仅为2)、良好的相容性和耐久性(由于其组成材料和混凝土结构同质同源或本身即为结构材料)。

以图2所示嵌入式机敏水泥基传感元件<sup>[11]</sup>为例,说明其传感机理。图3是该传感元件的压应力/应变( $\sigma/\epsilon$ )和电阻率 $\Delta\rho$ 变化率之间的关系。由图3可见,两者之间存在着良好的对应关系。通过标定可得 $\Delta\rho/\rho=\alpha\sigma$ 和 $\Delta\rho/\rho=k\epsilon$ ( $\alpha$ 和 $k$ 为常数),将其埋入混凝土结构中即可通过其电阻率(或电阻)的变化实时、在线地监测混凝土结构局部压应力/应变。

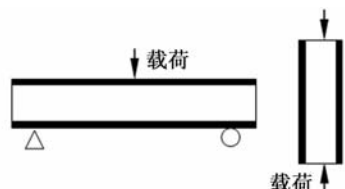
## 2 无线采集传输系统的设计

### 2.1 方案设计

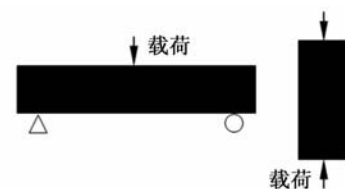
图4为该传感元件传感信号无线采集传输系统



(a) 嵌入式



(b) 层合式



(c) 结构-感知一体式

图1 机敏水泥基传感元件及其应用形式

的模块化设计方案。由图4可知,无线采集传输系统的工作过程为:

(1) 对于常用的电阻应变片,由于灵敏度较小,传感信号是弱信号,需要放大后进行采集传输。而机敏水泥基传感元件灵敏度较高,其应变

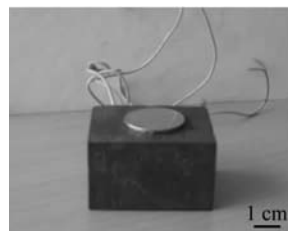


图2 嵌入式机敏水泥基传感元件

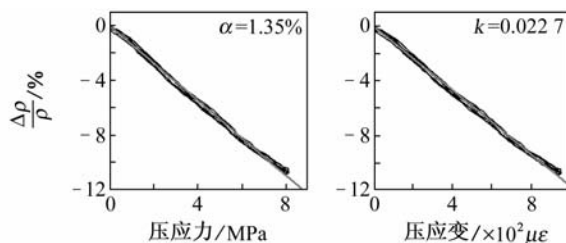


图3 机敏水泥基传感元件的电阻率变化率与压应力/应变关系

灵敏因数为227,比常用应变片高两个数量级,传感信号转换为电压信号后无需放大,便可直接采集传输;另外,传感信号可能会受到外界环境噪声信号的干扰,因此,传感信号应通过变换电路模块进行去噪,并最终电压信号的形式传输给下一模块。

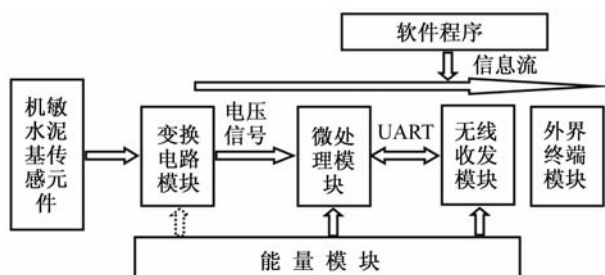


图4 无线采集传输系统的工作过程

(2) 转换电路将由变换电路模块传输出的模拟电压信号传输到微处理模块,进行转换、存储和滤波等预处理后以数字信号输出。

(3) 微处理模块将提取的特征信号传输给无线收发模块,无线收发模块负责与外界终端模块的无线通信。

(4) 能量模块为上述部分或所有模块内部以及模块之间信息流动提供能量。

(5) 信息流最后传输到外界终端模块,进行后续处理。

(6) 信息流由相应的软件来管理。

(7) 对上述各模块进行总集成,便可实现机敏水泥基应力/应变传感元件传感信号的无线采集传输与处理。

## 2.2 典型电路

### 2.2.1 变换电路

图5是变换电路的原理图。根据图5,结合机敏水泥基传感元件的电极布置形式和测试方法,可以采用桥式或差动式电路,实现解耦去噪,并输出电压信号<sup>[16]</sup>。

### 2.2.2 采集传输电路

采集电路可采用微处理器结合外带A/D转换芯片电路或者采用内嵌A/D转换单元的微处理器实现。考虑到造价和实际应用的要求,采用了Atmel公司Atmega8,该芯片内部集成了较大容量

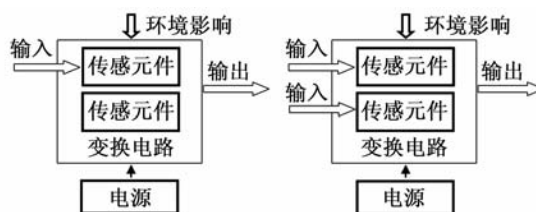


图5 变换电路原理示意图

的存储器和丰富的硬件接口电路,具备 AVR 高档单片机 MEGA 系列的全部性能,并且采用了小引脚封装,价格与低档单片机相当。采集电路如图6,利用 Atmega8 芯片自带的 A/D 转换通道,附加由  $R_{04}$ ,  $R_{05}$ ,  $C_{04}$  和  $C_{05}$  组成的 A/D 采集辅助电路,就可以采集变换电路的输出电压信号;利用该芯片自身处理功能,可实现信号的预处理;同时,利用微处理器的 UART 通信口与现有的无线收发模块<sup>[14]</sup>进行数据交换,就可实现无线数据传输。

## 3 试验验证

### 3.1 静态试验

根据上述无线采集传输系统的设计方案,研制出了一套无线采集传输系统,并应用其进行了嵌入式机敏水泥基传感元件在静态下的电压信号测试。测试结果见图7,所测机敏水泥基传感元件的初值电压为1V,无线采集传输系统的分辨率可以达到2.5mV。

### 3.2 加载试验

应用所研制的无线采集传输系统对嵌入式机敏水泥基传感元件进行加载测试,加载步长为0.25MPa,每个采集点测试100个数据,测试结果如图8所示。

## 4 结论

根据上述原理和方案构成的机敏水泥基传感元

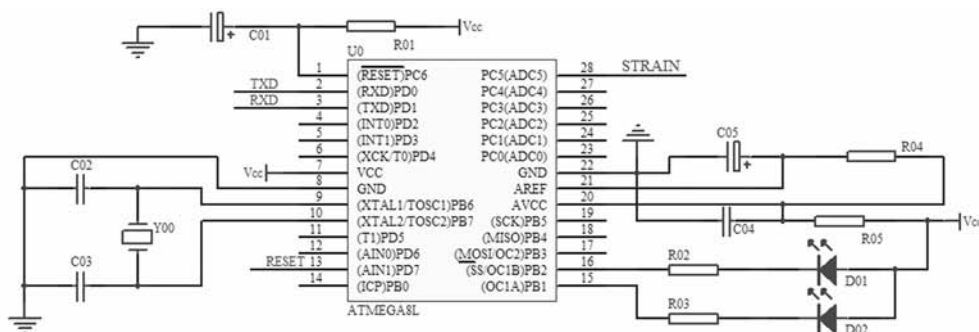


图6 微处理单元电路原理图

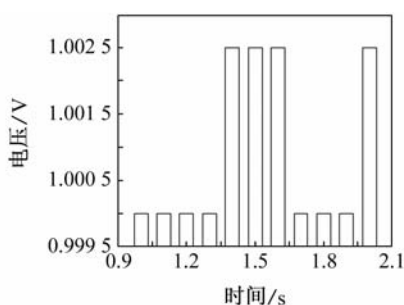


图7 无线采集传输系统测试的机敏水泥基传感元件1~2 s间的初值

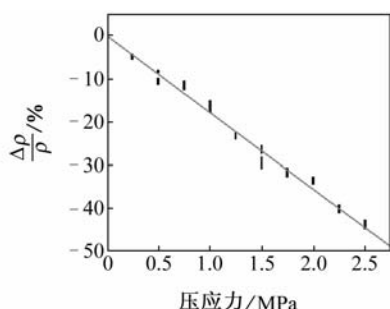


图8 测试结果

件传感信号的无线采集传输系统,能够实现传感信号的滤波、采集预处理以及无线传输,并具有如下特点而具有广阔的应用前景。

(1) 电路简单,易于实现。由于采用模块化的设计方法,整体电路清晰简单,各模块相对独立性强,且容易实现。

(2) 可靠性高。无线应变传感器及其系统采用先进的低功耗电子器件集成,电路可靠,且减少了布线长度对信号传输的影响,采集传输信号精度高。

(3) 价格低廉。与传统“有线”采集系统相比,节省了布线,从而节省了安装成本和维护成本。

(4) 安装方便,简单实用。所研制的无线采集传输系统体积小,且无需布设传输导线,便于现场安装。

机敏水泥基传感元件由于具有灵敏度高、耐久性和相容性好等特点,为混凝土结构应力(受力)/应变(变形)监测提供了一条崭新的途径,而无线采集传输系统对于机敏水泥基传感元件的信号采集传输提供了一种新的选择方式,而且能够克服现有采集方法在经济及技术方面的一些不足,在混凝土结构监测领域具有重要的实际意义和应用前景。

#### 参考文献:

[1] Pierre-Claude Aitcin. Cements of yesterday and today

Concrete of tomorrow[J]. Cement and Concrete Research, 2000, (30): 1349—1359.

[2] Glisic B, Simon N. Monitoring of concrete at very early age using stiff SOFO sensor[J]. Cement and Concrete Research, 2000, (22): 115—119.

[3] Timothy Johnson J, Rebecca Brown L, Douglas Adams E, et al. Distributed structural health monitoring with a smart sensor array[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2004, (18): 555—572.

[4] Fei Luo, Jingyuan Liu, Naibing Ma, et al. A fiber optic microbend sensor for distributed sensing application in the structural strain monitoring[J]. Sensors and Actuators, 1999, (75): 41—44.

[5] Li H, Zhong Sh Sh, Huang W. The study of long time testing with electric—resistance strain gauge [J]. Transaction of Chong Qing Architecture University, 1998, 20(4): 21—26.

[6] Meizbacher C I, Kersey A D, Friebele E J. Fiber optic sensors in concrete structures; a review[J]. Smart Materials and Structures, 1996, 5(2): 196—208.

[7] D D L Chung. Cement-matrix Composites for Smart Structures[J]. Smart Material and Structure, 2000, 9 (3): 389—401.

[8] Mao Qizhao, Zhao Binyuan, Sheng Darong, et al. Resistance changement of comporession sensible cement specimen under different stresses[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 1996, 11(3): 41—45.

[9] Zeng-Qiang Shi, Chung D D L. Carbon fiber-reinforced concrete for traffic monitoring and weighing in motion[J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29: 435—439.

[10] Sihai Wen, Chung D D L. Carbon fiber-reinforced cement as a strain-sensing coating[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31: 665—667.

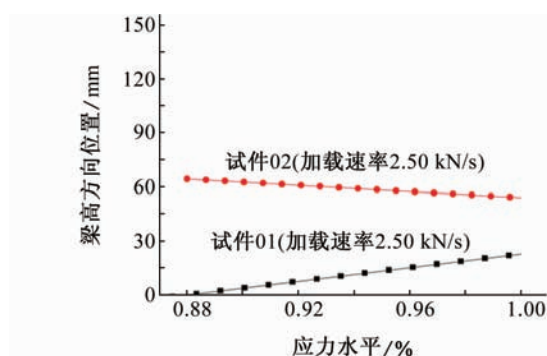
[11] Baoguo HAN, Xinchun GUAN, Jinping OU. Electrode design, measuring method and data acquisition system of carbon fiber cement paste piezoresistive sensors[J]. Sensors and Actuators: A physical, 2007, 135(2): 360—369.

[12] Xiao H G, Li H. Strain sensing property of carbon black filled cement-based composites[A]. Proceedings of The 2nd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure [C]. Shenzhen: 2005: 527—530.

[13] Lynch J P. Decentralization of wireless monitoring and control technologies for smart civil structures [D]. USA: Stanford University, 2002.

(下转第 119 页)



图9 声发射事件 $z$ 坐标随应力水平的变化趋势

### 3 结论

笔者通过对不同加载速率下混凝土弯拉试验过程中所采集到的声发射信号进行分析,描述了不同应变率下混凝土内部的损伤过程,得到以下结论:

(1) 验证了弯拉荷载作用下混凝土声发射的应变率效应:随着应变率的提高,声发射撞击累计计数减少并且撞击率增加,也就是说,混凝土弯拉变形的声发射响应是一个依赖于时间的过程。这一过程的物理机理可以解释为:在应变率较低时,微裂缝的发展可以有更长的时间,故表现出声发射撞击累计计数比高应变率时多。

(2) 加载速率越高,声发射开始集中出现的时机越晚,表明在高加载速率下,混凝土内微裂缝的发展没有足够的时间,一些本应当在低应变率下的低应力水平时就能够诱发的微裂缝将来不及发展。

(3) 声发射撞击率随着应变率的提高而提高,意味着声发射撞击率和混凝土试件变形及其损伤速率之间存在着明显的联系,同时,加载速率也会对声发射模式产生显著影响。

(4) 加载速率越高,声发射撞击的平均强度越高,表明在快速加载时,混凝土微裂缝在发展过程中所释放出的平均能量有所提高。

(5) 从三维和线性声发射源定位结果均可以看

出,加载速率越高,声发射事件空间分布范围越广,表明混凝土微裂缝的分布区域越宽。

### 参考文献:

- [1] 腾山邦久. 声发射(AE)技术的应用[M]. 冯夏庭,译. 北京:冶金工业出版社,1997.
- [2] 祖小涛,吴继红,刘民治. 几种高聚物拉伸过程中的声发射现象[J]. 高等学校化学学报,1996,17(6):987.
- [3] Barbara Schechinger, Thomas Vogel. Acoustic emission for monitoring a reinforced concrete beam subject to four-point-bending[J]. Construction and Building Materials,2007,(21):483-490.
- [4] Rossi P, Toutlemonde F. Effect of loading rate on the tensile behaviour of concrete: description of the physical mechanisms[J]. Materials and Structures,1996,(29):116-118.
- [5] Rotem A. Effect of strain rate on acoustic emission from fibre composites[J]. Composites,1978,9(1):33-36.
- [6] 邹银辉. 煤岩声发射机理及实验研究[J]. 湘潭矿业学院学报,2003,18(4):18-21.
- [7] 张明,李仲奎,杨强,等. 准脆性材料声发射的损伤模型及统计分析[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(12):2493-2501.
- [8] 席道英. 加载速率对岩石力学性质及声发射率的影响[C]. 第四届全国岩石力学学术会议论文集. 北京:人民建筑出版社,1994:13-15.
- [9] Muravin G B, Likhod ko A D, Lezvinskaya L M. Investigation of the dynamic strength of concrete and of its acoustic emission[J]. Strength of Materials,1982,(6):883-886.
- [10] Zietlow W K, Labuz J F. Measurement of the intrinsic process zone in rock using acoustic emission[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci,1998,35(3):291.
- [11] Sang Ho Cho, Yuji Ogata, Katsuhiko Kaneko. Strain-rate dependency of the dynamic tensile strength of rock[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences,2003,40:763-777.

(上接第114页)

- [14] Yu Yan, Ou Jinping. Development of a kind of multi-variable wireless sensor for structural health monitoring in civil engineering[A]. Proceedings of SPIE 5765[C]. Bellingham: The International Society for

Optical Engineering,2005:158-166.

- [15] 森村正直,山崎弘郎. 传感器工程学[M]. 孙宝元,译. 大连:大连工学院出版社,1998:53-55.
- [16] 陶宝祺,王妮. 电阻应变式传感器[M]. 北京:国防工业出版社,1993:6-10.