

文章编号 1004-924X(2013)06-1464-08

地下隧道变形检测的无线倾角传感器

何 斌, 纪 云*, 沈润杰

(同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804)

摘要:设计了一种无线倾角传感器来检测地下隧道的结构变形,并研究了该无线倾角传感器所采用的温度补偿和数字滤波算法。首先,根据地下隧道结构特点,结合微机电系统(MEMS)技术和无线传感器网络技术,给出无线倾角传感器的硬件结构,并描述了传感器实现无线通信和可视化上位机界面的软件设计流程。然后,针对地下隧道温度变化大、振动扰动频繁等因素,分析其对传感器精度的影响,实现了对无线倾角传感器的温度补偿。最后,通过对传感器数据噪声频谱分析,选择数字滤波方法,充分抑制振动对传感器的影响,提升了无线倾角传感器的测量精度。实验结果表明:无线倾角传感器在 $\pm 30^\circ$ 范围内的测量精度为 0.05° ,符合地下隧道变形检测的功能需求。

关键词:微机电系统;无线传感器网络;倾角传感器;温度补偿;数字滤波

中图分类号:TP212.12 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132106.1464

Wireless inclinometer for monitoring deformation of underground tunnel

HE Bin, JI Yun*, SHEN Run-jie

(College of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

* Corresponding author, E-mail: shaizi666@126.com

Abstract: To monitor the structure deformation of an underground tunnel, a high-resolution wireless inclinometer was developed in this paper, and the algorithm of temperature compensation and digital filter applied to the wireless inclinometer were analyzed. First, based on complex conditions in the underground tunnel, the hardware structure of the wireless inclinometer was presented combined the Micro-electromechanical System (MEMS) with the Wireless Sensor Network (WSN) technology and the software processes of wireless communication and PC interface of the inclinometer were described. Then the effects of different environment parameters on the inclinometer were discussed according to the conditions of underground tunnel such as wide-range temperature changes and frequent vibration. Finally, the temperature compensation and resistance to vibration interference were achieved, and the accuracy of the inclinometer was improved. Experimental results indicate that the precision of the inclinometer is 0.05° in the range from -30° to 30° , which meets the design requirements of the underground tunnel for the monitoring deformation.

Key words: Micro-electromechanical System (MEMS); Wireless Sensing Network (WSN); inclinometer; temperature compensation; digital filter

收稿日期:2013-01-20;修订日期:2013-02-21.

基金项目:国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2011CB013800);国家自然科学基金资助项目 (No. 51145013);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (No. 20100101120017);铁道部科技研究开发计划资助项目 (No. J2011Z004)

1 引言

目前,我国轨道交通发展迅猛,轨道交通的结构健康监测的重要性日渐突出。轨道交通地下隧道一般建在软土层中,多处于地质复杂、地下管道密集的闹市中心。加上地铁沿线区域的城市建设和不均匀沉降等原因,会造成地下隧道结构变形,给地铁的正常运行带来安全隐患,甚至会对周边环境或建筑造成沉降和位移等^[1-2]。当变形超出安全范围,隧道会发生塌方、透水等危及人身和财产安全的重大事故。因此,对地下隧道结构变形的安全状况实时监控越来越重要。

由于地下隧道监控数据点种类多、环境复杂,并且分布分散,对地下隧道监控网络布置及传感器提出了更高的要求。传统的地下隧道变形监测技术只能用于隧道施工和隧道建成非运营时段的监测,却不能对隧道内正常运营的高密度行车区间进行全天候实时监测,也不能对采集到的相关数据实时分析^[3],这样就不能全面地了解地下隧道运营期间的结构形变,造成很多隧道病害事故得不到及时的预警。无线传感器网络具有布局灵活、结构易变、生命力较强等特点^[4];MEMS传感器具有体积小、重量轻、功耗低、易于集成以及耐恶劣工作环境等优势,极大地促进了传感器的微型化、智能化、多功能化和网络化^[5]。将MEMS技术和无线传感器网络技术相结合,用于结构安全健康检测,已经成为土木工程领域的前沿方向^[6]。

本文根据地下隧道环境复杂的特点,设计了一种结合MEMS技术和无线传感器网络的无线倾角传感器。针对隧道内环境复杂的特点,通过分析各种环境参数对传感器精度的影响来实现对无线倾角传感器的温度补偿。最后,通过对传感器数据噪声频谱分析,选择软件滤波方法,充分抑制了振动对传感器的影响,提升了无线倾角传感器的测量精度。

2 无线倾角传感器设计

2.1 传感器硬件结构

图1所示为无线倾角传感器的硬件结构。由MEMS倾角传感器芯片SCA100T,高精度稳压

芯片AD586,AD转换芯片ADS1115,温度传感器DS18B20,片上集成无线RF和微处理器的CC2530以及信号调理电路等组成。

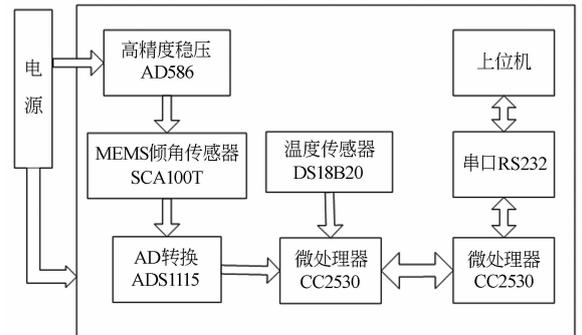


图1 无线倾角传感器硬件结构图

Fig. 1 Hardware structure of wireless inclinometer

选用Murata的SCA100T系列作为倾角传感器来获取倾斜角度信号,SCA100T双轴倾角传感器分辨率高,噪声低,工作温度范围宽,有过阻尼感应元件,能够承受大于20 000g的机械振动^[7]。其模拟输出的分辨率为 0.0025° ,数字输出分辨率为 $0.035^\circ/\text{LSB}$,故采用其模拟输出。

MEMS倾角传感器供电电压的稳定性将直接影响传感器的测量精度。如果倾角传感器的电源电压存在波动,则其相应的输出电压也会产生扰动。为了减少电源波动带来的模拟噪声,选用AD公司的高精度5V稳压芯片AD586为SCA100T供电,其5V输出的初始偏差小于2mV,可保证高精度的信号输出。

ADS1115是TI公司推出的超小型16位精密模数转换器,通过IIC兼容接口传输数据,SCA100T-D01的灵敏度为 $70\text{mV}/(^\circ)$,模拟输出的分辨率为 0.0025° ,则需要检测的最小信号为 0.175mV ,而ADS1115可以分辨 0.0625mV 的信号,完全满足设计要求。

DS18B20是一种采用单总线传输的数字型温度传感器,可以程序设定9~12位的分辨率,测量温度为 $-55^\circ\text{C}\sim+125^\circ\text{C}$,在 $-10^\circ\text{C}\sim+85^\circ\text{C}$ 内,精度为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。

CC2530集成了增强型高速8051内核处理器和无线RF收发模块,支持2.0~3.6V供电电压^[8],具有低功耗工作模式、较高的无线接收灵敏度和抗干扰性。从能量耗费、通信速率、系统成本等方面考虑,选用CC2530。

2.2 传感器软件架构

无线倾角传感器软件设计分为发送节点程序、接收节点程序和上位机程序。CC2530 芯片支持 C 语言开发,由于 CC2530 没有专门的 IIC 接口和单总线接口,需要通过 GPIO 模拟驱动。发送节点程序主要包括主程序、初始化程序、IIC 软件模拟驱动程序、单总线驱动程序、定时读取 ADS1115 和 DS18B20 程序和数据处理等程序。为了提高系统通信的传输效率和节省硬件资源,接收节点程序只负责数据的接收和与上位机的通信。上位机软件采用 Visual Basic 6.0 编程,采用事件驱动法利用 MSComm 控件的 OnComm 事件捕获串口通信事件^[9],实现接收节点与 PC 机之间的异步通信。程序流程如图 2 所示。

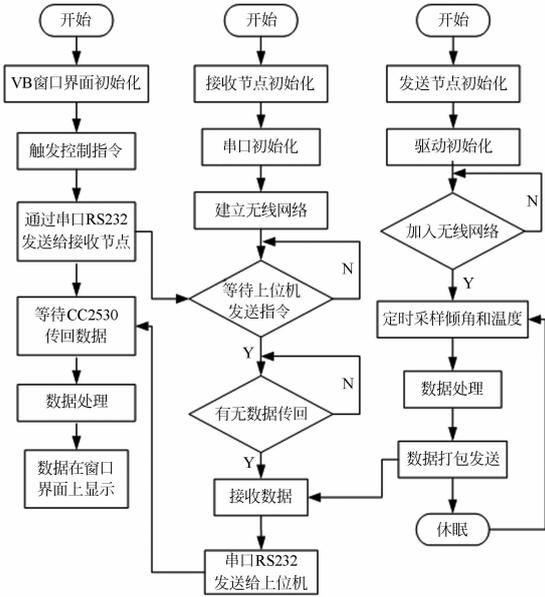


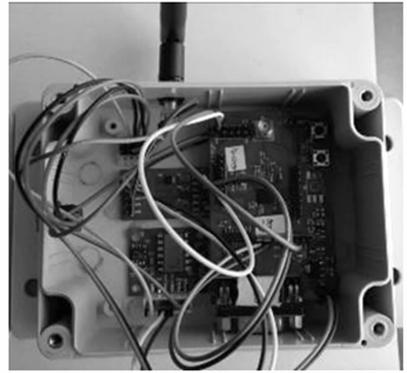
图 2 无线倾角传感器软件架构流程图

Fig.2 Program flow chart of wireless inclinometer system

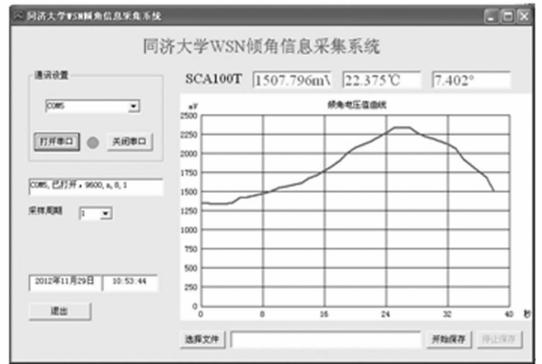
3 无线倾角传感器集成与应用

无线倾角传感器采用电池供电,通过升/降压模块得到所需要的电压,硬件实物如图 3(a)所示。上位机软件实现了串口参数设置、实时绘制倾角曲线、数据保存、采样周期设置等功能,软件界面如图 3(b)所示。将 MEMS 无线倾角传感器安装在盾构隧道内衬砌圆环的管片上,包括封顶块、邻接块、标准块、封底块和块与块间以环向螺连接构成的纵向接头等不同部位;实时测量隧道

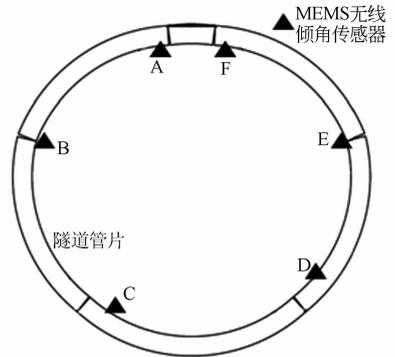
管片内各部位的倾斜角度,通过组合计算得出管片的实际形变,实现对隧道结构变化准确、有效地实时监测,应用示意如图 3(c)所示。



(a) 硬件平台
(a) Hardware platform



(b) 软件界面
(b) Software interface



(c) 应用示意图

(c) Schematic diagram of application

图 3 无线倾角传感器硬件平台、软件界面和应用示意图

Fig.3 Integration and application of wireless inclinometer

4 环境干扰分析

地下隧道环境复杂,主要存在两种因素:温度扰动和振动干扰会对倾角传感器的测量精度造成影响,影响测量角度的准确性。

4.1 温度干扰

地铁系统的地下隧道是一个由车站、隧道和通风竖井组成的复杂三维网络,空气的流通状态会造成地下隧道不同节点处温度的变化^[10]。隧道土层对热量的吸收和传导也会影响温度场的分布规律^[11]。因此,地下隧道是一个复杂的温度梯度场,温度的变化会对传感器的精度造成一定影响。

SCA100T 是一种静态加速度的倾角传感器,重力和传感器加速度灵敏轴之间的夹角就是倾斜的角度,其倾斜角度的转换模型为

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{V_{\text{out}} - V_0}{S}\right), \quad (1)$$

式中: α 为倾斜角度, V_{out} 为 SCA100T 的输出电压, V_0 为传感器在角度为 0° 时的输出电压, S 为芯片的灵敏度。由于温度变化会引起输出电压的偏移,考虑到地下隧道温差的实时变化,需要提取隧道中的温度信息,补偿倾角传感器的偏移电压,从而减小温度干扰对传感器精度的影响。

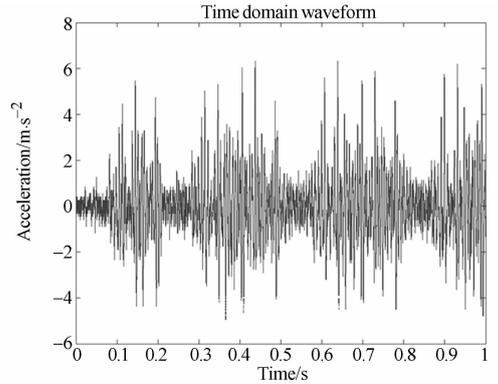
4.2 振动干扰

地下隧道环境内振动噪声主要来源于机车行驶过程中产生的振动。文献[12-14]指出,当前地铁产生的振动噪声的频率一般在 $20 \sim 200$ Hz,峰值一般出现在 $20 \sim 80$ Hz。

在上海地铁 11 号线昌吉东路站对振动信号进行检测,利用加速度传感器对振动信号进行采样,采样频率为 5 kHz,采样点数为 32 678,得到实测地铁振动信号时域曲线如图 4(a)所示,通过 Matlab 利用 FFT 变换得到其频域曲线,如图 4(b)所示。

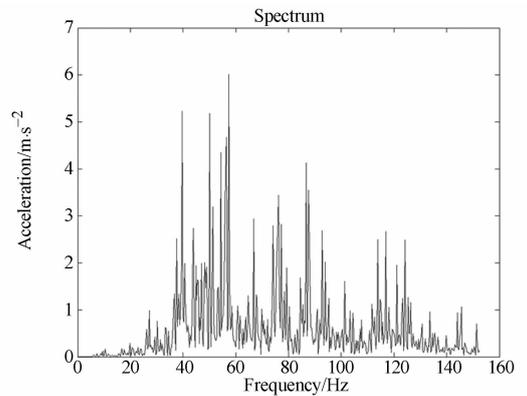
从图(4)看出,地铁振动噪声频率主要集中在 $20 \sim 160$ Hz,其他频段的分量很小。地铁振动在隧道结构上产生的噪声幅值一般是 $0.02g$ 左右。由于 SCA100T 分辨率非常高,可以识别出 $40 \mu g$ 左右的微加速度信号,在倾角测量过程中很容易受到地铁振动噪声的干扰。因此需要给控制器选择合适的数字滤波算法,消除地铁振动噪声对传

感器精度的影响。



(a) 振动干扰时域响应

(a) Time-domain response of vibration



(b) 振动干扰频域响应

(b) Frequency-domain response of vibration

图 4 实测地铁振动结构响应图

Fig. 4 Measured response curves of vibration in tunnel

5 精度补偿分析

5.1 温度补偿

通过对倾角传感器进行温度标定测试,以 23°C 下倾角传感器水平 0° 放置时为水平基准,每 20°C 为区间,测得传感器在 $-20 \sim 80^\circ\text{C}$ 不同温度下在水平位置上的角度偏移,其数据对照表如表 1 所示。

表 1 不同温度下倾角传感器在水平位置上的偏移
Tab. 1 Temperature dependency of SCA100T offset

温度/ $^\circ\text{C}$	偏移/ $^\circ$	温度/ $^\circ\text{C}$	偏移/ $^\circ$
-20	0.174	0	0.051
20	0.005	23	0
40	0.011	60	0.038
80	0.083		

根据表 1 数据中偏移角度随温度的变化趋势,利用最小二乘法拟合倾角传感器温度补偿的三阶曲线拟合公式,令:

$$\sum_{i=1}^7 y_i T_i^k = a_0 \sum_{i=1}^7 T_i^k + a_1 \sum_{i=1}^7 T_i^{k+1} + a_2 \sum_{i=1}^7 T_i^{k+2} + a_3 \sum_{i=1}^7 T_i^{k+3}, (k = 0, 1, 2, 3), \quad (2)$$

其中: y_i 为不同温度下的偏移角度, T 为对应的温度, $a_n (n=0, 1, 2, 3)$ 为所求系数,代入表 1 数据可得:

$$y = -0.000\ 000\ 45T^3 + 0.000\ 092T^2 - 0.004\ 057T + 0.052\ 047. \quad (3)$$

三阶拟合曲线如图 5 所示,上位机通过提取无线 MEMS 倾角传感器节点用 DS18B20 测得的 16 位温度信息,将其转换成对应的标准摄氏温度 T 。将 T 代入式(3),通过上位机实时计算,智能补偿倾角传感器受到温度的影响,修正倾角传感器的角度测量值,进一步提升 MEMS 无线倾角传感器的精度。

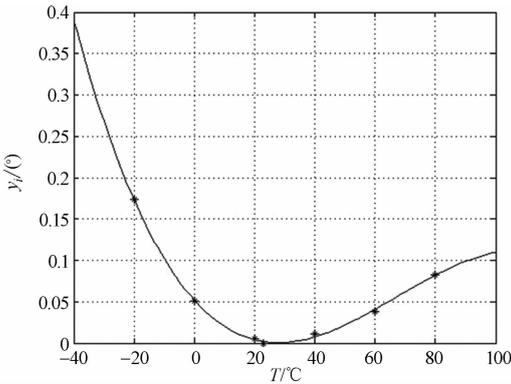


图 5 温度-偏移角度三阶拟合曲线

Fig. 5 3rd order polynome curve of temperature-offset error

5.2 滤波处理

通过给控制器编写数字滤波算法可以消除振动噪声对传感器精度的干扰。数字滤波器是具有—定传输选择特性的数字信号处理装置,实质上是一个由有限精度算法实现的线性时不变离散系统^[15]。数字滤波无需硬件,只用一个计算过程,可靠性高且不存在阻抗匹配问题。

由于地下隧道衬砌圆环的变形是一个缓慢的累计过程,所以传感器产生的信号频率远远小于地铁振动噪声的频率,通常小于 1 Hz。用正弦函数模拟初始信号,则微控制器采样信号,即初始信号叠加振动噪声信号可以表示为:

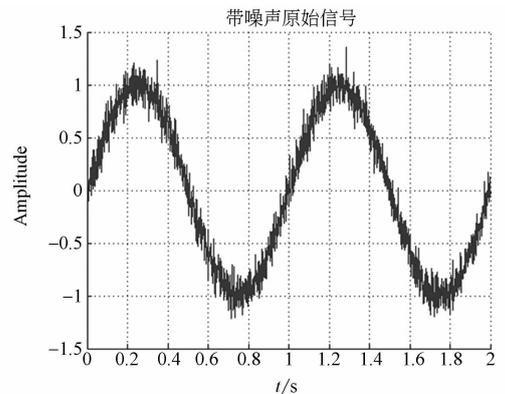
$$x(t) = c \cdot \sin(2\pi f_{in} \cdot t) + n(t), \quad (4)$$

式中: $x(t)$ 为采样的叠加信号, $n(t)$ 为振动噪声信号, f_{in} 为传感器的信号频率, f_n 为振动噪声频率, c 为传感器信号系数。

作为现代滤波器的一种,自适应滤波器以输入和输出信号的统计特性的估计为依据,采取特定算法自动地调整滤波器系数,使其达到最佳滤波特性。利用最小均方误差(LMS)算法,调整滤波器自身参数,使滤波器的输出信号与期望输出信号之间的均方误差最小^[16],其基本关系式为:

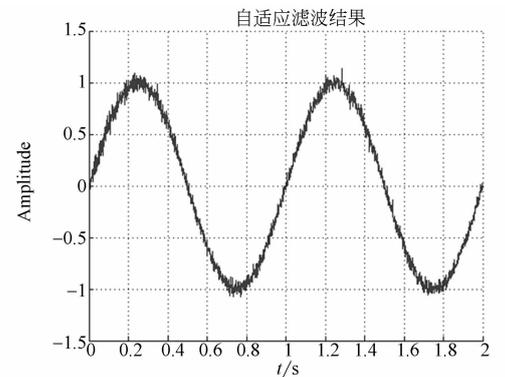
$$\omega(n+1) = \omega(n) + 2\mu e(n)x(n), \quad (5)$$

其中: $\omega(n)$ 为迭代计算加权矢量, $e(n)$ 为误差信号, $x(n)$ 为输入信号, μ 为收敛因子,决定收敛速度及稳定性,通过 Matlab 仿真分析滤波器的效果。



(a) 带噪声采样信号

(a) Sampled signal with vibration



(b) 自适应滤波结果

(b) Performance of adaptive filter

图 6 滤波器效果仿真分析

Fig. 6 Simulation of filter performance

图 6(a)为叠加地铁振动噪声的采样信号;图 6(b)为采用 LMS 算法,收敛因子 μ 为 0.025 的自适应滤波器的滤波效果。仿真结果表明,所设计的自适应滤波器满足相位要求,并且将振动噪声幅值收敛在一个很小的范围内。综上所述,选择自适应滤波器,没有受到相位的影响,并将地铁振动噪声影响收敛到一个很小的范围内,提升了无线倾角传感器在地铁振动噪声下的测量精度,符合系统的总体设计要求。

5.3 标定实验

通过将无线倾角传感器固定于高精度角度转台上,如图 7 所示,调节转台到合适角度,读取相应标定角度值和无线倾角传感器输出,检验标定角度值与输出显示值之间的误差,确定无线倾角传感器的测量精度,标定结果如表 2 所示。

由上述的测量结果可知,无线倾角传感器在测量范围为 $\pm 30^\circ$ 内时,测量最大误差为 0.0494° ,因此,测量精度可达到 0.05° 。



图 7 角度标定实验

Fig. 7 Calibrating precision of wireless inclinometer

参考文献:

- [1] HUANG K P, WANG T T, HUANG T H, *et al.*. Profile deformation of a circular tunnel induced by ambient stress changes [J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2010, 25(3): 266-278.
- [2] 叶耀东,朱合华,王如路.软土地铁运营隧道病害现状及成因分析[J].*地下空间与工程学报*,2007,3(1):157-160.

表 2 无线倾角传感器的标定结果 ($^\circ$)

标定角度	传感器输出角度	误差
-30	-29.950 6	-0.049 4
-26	-25.959 2	-0.040 8
-22	-21.967 7	-0.032 3
-18	-17.976 4	-0.023 6
-14	-13.981 7	-0.018 3
-10	-9.987 4	-0.012 6
-6	-5.967 9	-0.032 1
-2	-1.972 9	-0.027 1
0	0.001 9	-0.001 9
2	1.978 0	0.022 0
6	5.981 1	0.018 9
10	9.980 0	0.020 0
14	13.986 7	0.013 3
18	17.985 7	0.014 3
22	21.982 6	0.017 4
26	25.985 2	0.014 8
30	29.987 1	0.012 9

6 结 论

为实现轨道交通地下隧道的实时变形监测和数据的及时反馈分析,结合 MEMS 技术和无线传感器网络技术,设计了一种高精度的无线倾角传感器,给出了无线倾角传感器的硬件和软件的实现过程和整体方案设计。分析各种环境参数对传感器精度的影响,实现对无线倾角传感器的温度补偿;通过对传感器数据噪声频谱分析,选择软件滤波方法,充分抑制振动对传感器的影响,进一步提升无线倾角传感器的测量精度。实验结果证明:无线倾角传感器在 $\pm 30^\circ$ 内的测量精度为 0.05° ,符合地下隧道变形检测的功能需求。

- YE Y D, ZHU H H, WANG R L. Analysis on the current status of metro operating tunnel damage in soft ground and its causes [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2007, 3(1): 157-160. (in Chinese)
- [3] 邢卫民,张敏,程强强,等.地铁隧道结构位移远程实时监测及数据处理技术[J].*现代城市轨道交通技术*,2011(6):86-88.
- XING W M, ZHANG M, CHENG Q Q, *et al.*.

- Remote real-time monitor and data process of displacement in underground tunnel structure [J]. *Modern Urban Rail Transit*, 2011(6): 86-88. (in Chinese)
- [4] AKYILDIZ I F, SU W, SANKARA Y, *et al.*. Wireless sensor networks: a survey [J]. *Computer Networks*, 2010, 38: 333-341.
- [5] SAAFI M, ROMINE P. Embedded MEMS for health monitoring and management of civil infrastructure[C]. *SPIE, Int. Soc. Opt. Eng.*, 2004, 5391: 331-343.
- [6] 魏康林, 温志渝, 赵新强, 等. 基于 MEMS 的结构监测无线传感器网络研究进展[J]. *压电与声光*, 2010, 32(4): 692-696.
- WEI K L, WEN ZH Y, ZHAO X Q, *et al.*. Study on the development of the WSN based on MEMS sensors for structural health monitoring [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2010, 32(4): 692-696. (in Chinese)
- [7] Murata Electronics Oy. SCA100T *Inclinometers* [EB/OL]. <http://www.muratamems.fi/en/products/inclinometers/sca100t-inclinometers>.
- [8] Texas Instruments. CC2530 [EB/OL]. <http://www.ti.com.cn/product/en/cc2530>.
- [9] 张辉, 李荣利, 王和平. Visual Basic 串口通信及编程实例[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- ZHANG H, LI R L, WANG H P. *Serial communication and programming with Visual Basic* [M], Beijing: Chemical Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [10] 朱永全, 宋玉香. 地下铁道(第二版)[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2012.
- ZHU Y Q, SONG Y X. *Underground Tunnel (Second Edition)* [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2012. (in Chinese)
- [11] CHOI S, KRARTI M. Thermally optimal insulation distribution for underground structures [J]. *Energy and Buildings*, 2000, (32): 251-265.
- [12] 袁扬, 刘维宁, 刘卫丰. 基于现场测试的曲线段地铁地面振动传播规律[J]. *中国铁道科学*, 2012, 33(4): 133-138.
- YUAN Y, LIU W N, LIU W F. Propagation law of ground vibration in the curve section of metro based on in-situ measurement [J]. *China Railway Science*, 2012, 33(4): 133-138. (in Chinese)
- [13] 闫维明, 张伟, 任珉, 等. 地铁运营诱发振动实测及传播规律[J]. *北京工业大学学报*, 2006, 32(2): 149-153.
- YAN W M, ZHANG W, REN M, *et al.*. In situ experiment and analysis of environmental vibration induced by urban subway transit [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2006, 32(2): 149-153. (in Chinese)
- [14] 张艳平, 杨宜谦, 柯在田, 等. 城市轨道交通振动和噪声的控制[J]. *城市轨道交通*, 2000(3): 43-45.
- ZHANG Y P, YANG Y Q, KE Z T, *et al.*. Control of noise and vibration in urban rail transit [J]. *Urban Rail Transit*, 2000(3): 43-45. (in Chinese)
- [15] 罗华, 高山, 李翔龙. 粗光栅信号全数字化处理法实现高倍数细分[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(2): 283-288.
- LUO H, GAO SH, LI X L. Realization of high division number of coarse grating signals by fully digital processing method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2): 283-288. (in Chinese)
- [16] 王国富, 余法山, 汪旭东, 等. 机载光电转台的谐振分析及自适应滤波器设计[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(11): 1802-1808.
- WANG G F, YU F SH, WANG X D, *et al.*. Analysis on resonance of air-borne opto-electronic tracking turntable and design of adaptive filter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11): 1802-1808. (in Chinese)

作者简介:



纪 云(1988—),男,上海人,硕士研究生,2010年于同济大学获得学士学位,主要从事无线传感器网络方面的研究。E-mail: shaizi666@126.com



沈润杰(1973—),男,内蒙古赤峰人,副研究员,硕士生导师,2004年于浙江大学获得博士学位,主要从事超生波电机、压电驱动器、电磁振动控制等方面的研究。E-mail: shenrunjie@tongji.edu.cn

导师简介:



何 斌(1975—),男,安徽安庆人,教授,博士生导师,1996年于吉林大学获得学士学位,2001年于浙江大学获得博士学位,2003年于浙江大学流体传动及控制国家重点实验室博士后出站,主要从事机器人智能及控制、图像处理与融合等方面研究。E-mail: hebin@tongji.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)