

盾构隧道变形的无线感知技术研究

黄宏伟¹, 张东明¹, 王飞², 何斌³, 吴俨⁴

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学上海防灾救灾研究所, 上海 200092; 3. 同济大学电信学院, 上海 200092; 4. 悟莘科技有限公司, 江苏无锡 214135)

摘要: 盾构隧道是城市及软土地下基础设施的主要结构, 保证其在建设和运营期的安全至关重要。盾构隧道纵横向变形的监测更是掌控其安全性态的重要方面。在“互联网+”的时代发展背景下, 本文针对隧道结构特点和环境条件, 在研发TJ_UWIS双轴倾角传感器的基础上, 基于Zigbee构建了具有二层网络拓扑结构的无线感知网络(Wireless Sensing Network, 简称WSN), 实现了盾构隧道结构变形实时动态监测。通过室内试验以及现场案例应用得到验证, 该方法可以不受运营列车通行影响, 真正实现运营隧道全天候实时监控, 为隧道安全提供技术支持, 有效保障隧道运营安全。

关键词: 盾构隧道, 无线感知, 变形控制

SHIELD TUNNEL DEFORMATION MONITORING BY WIRELESS SENSING TECHNIQUE

HUANG Hongwei¹, ZHANG Dongming¹, WANG Fei², HE Bin³ and WU Yan⁴

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai, 200092, China; 2. Shanghai Institute of Disaster Prevention and Relief, Tongji University, Shanghai, 200092, China; 3. Department of Control Science & Engineering, Shanghai, 200092; 4. Wisen Innovation Ltd, Jiangsu Wuxi, 214135)

Abstract: Shield tunnel plays an important role in the underground infrastructure for cities in soft ground. Its safety during the construction and operation thus should be most crucial. Monitoring the tunnel deformation is an effective way to control the lifetime safety of shield tunnel. In this paper, a “smart” sensing system coupling the MEMS inclinometer with Zigbee-based Topological network is firstly proposed and subsequently validated by indoor model test and in-situ full scale test for shield tunnel segmental lining structure. The merit of this system, compared to the conventional monitoring system, is its ability of real-time dynamic monitoring regardless of the running of metro tunnel.

Key words: Shield tunnel; Wireless sensing; Deformation control

1 引言

近十年来, 城市及软土地下基础设施的建设越来越呈现出规模大、速度快、网络化等特点, 用以缓解日益增长的城市交通压力。其中盾构隧道作为地下基础设施主要的结构形式之一, 其在建设和运营期的安全更是保障城市交通运输快速畅通的先决条件。盾构隧道是典型的超长筒状体结构, 其横向结构变形特征能够有效地反应结构安全性态特征。因此, 针对盾构隧道结构横向变形的监测是掌控隧道结构安全性态的重要方面^[1]。尽管目前盾构隧道在建设及运营期已较多实施变形监测, 然而, 现有传统监测大多是静态的, 往往由于信息滞后而延误安全救援的最佳时机。2015年6月, 深圳地铁某区间盾构机换刀过程中泥水突涌导致地表塌陷、房屋受损、人员伤亡^[2]。2014年8月, 广州某运营地铁盾构隧道遭地表勘探钻管凿穿导致地铁停运2小时^[3]。上述事故表明实现实时动态的盾构隧道结构监测在保证结构安全性态方面的需求已十分迫切。

社会已步入“互联网+”的时代, 利用信息通信技术以及互联网平台, “互联网+”的应用能够让互联网与传统工程行业进行深度融合, 创造新的工程行业发展方向, 提升工程相关产业生产力。目前, “互联网+”已经改造及影响了多个行业, 诸如电子商务、互联网金融等行业都是“互联网+”的产物, 而在土木工程领域中的应用, 目前才刚刚起步。如何将传统地下工程监测系统与互联网相结合, 通过无线网络实现监测数据的实时无缝传输, 最终达到盾构隧道结构安全动态监控的目的, 是非常契合“互联网+”的时代特征。因此, 本文将探讨通过互联网技术实现无线感知盾构隧道变形控制安全技术的可行性, 并通过某一工程具体应用案例来验证这一监测新技术的适用性。

2 无线感知在土木工程中应用现状

无线传感网络（Wireless Sensor Network, WSN）是通过无线通信技术将一系列的传感节点联系起来而构建的网络系统。在监测过程中，传感节点不仅可以感知本结点处的信息，还可以对其他传感节点感知的信息进行收集和处理。各感知节点之间通过无线网络连接，并最终形成WSN的基站，通过与Internet的连接，将信息传递至需要的位置。应用无线传感网络进行结构健康监测由Straser和Kiremidjian在1998年首次提出^[4]，此后迅速成为工程界的研究热点。各国知名研究机构如美国密西根大学的智能结构技术实验室（LIST）^[5]、伊利诺伊大学香槟分校^[6]、英国剑桥大学的智慧基础设施和建筑中心（CSIC）^[7]等在无线感知单元的研制、结构现场布设、网络协议等方面进行了大量研究，其中剑桥大学已率先尝试将WSN应用于地铁隧道监测中并初步验证了其可行性和优越性，其在伦敦地铁中的应用试验如图1所示。

在国内，大连理工大学在建筑结构方面^[8]、同济大学在地铁盾构隧道的无线监测方面作了一系列研究和试验。黄宏伟和张伟^[9]率先对WSN技术在城市地铁盾构隧道中的应用进行了探讨。嵇中^[10]对应用无线传感网络于隧道变形与防灾监测进行了可行性试验研究，并基于WEB-GIS技术搭建了无线传感网络的数字化平台。谢雄耀等^[11]在地下通道和电力隧道中搭建无线传感网络并测试其性能表现。何斌等^[12]研制了TJ_UWIS系列无线MEMS倾角感知单元，黄宏伟等^[13]通过室内实验和现场试验验证了将其应用于地铁隧道收敛变形监测的适用性，现场试验照片如图2所示。王魁和黄宏伟^[14]通过研制已将无线感知元件应用于地铁盾构隧道结构裂缝监测实践中。

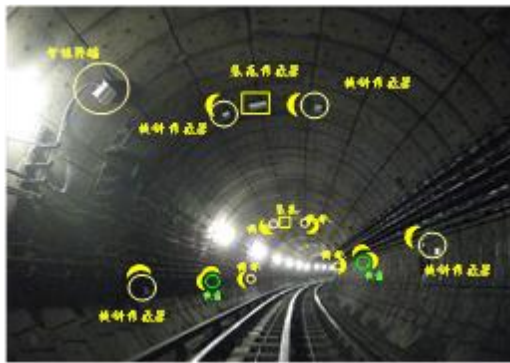


图1 伦敦地铁现场WSN监测系统试验



图2 上海地铁现场WSN监测系统试验

3 无线感知技术的应用开发

地铁盾构隧道变形监测，传统方法是通过人工利用全站仪或收敛计进行。该方法不仅耗时耗力，在监测频率上亦不能做到实时动态。因此，结合目前国内外变形监测通常采用倾角传感元件通过几何换算而得到结构变形的现状，本文采用作者自主研发的TJ_UWIS系列MEMS倾角无线感知技术^[12]，并通过室内试验对该技术进行了初步验证，以下将通过感知元件的开发、无线传输网络的架构以及无线感知方法的应用与室内试验验证三个方面简单介绍。

3.1 无线感知终端元件

由于地铁盾构隧道需要大量的倾角传感器进行实时监测，地下隧道的恶劣环境和高精度的监控要求对传感器的性能与稳定性提出了更高的要求。进一步提高倾角传感器的分辨率和测量范围，并且减少传感器的功耗和成本，成为自制倾角传感器的设计需求。TJ_UWIS倾角传感器选用芬兰VTI科技的SCA系列来获取倾斜角度信号，该系列传感器是基于3D-MEMS传感器技术的加速度型高分辨率倾角传感器，其质量轻，体积小，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20000 g的机械振动。图3是MEMS无线倾角传感器系统的硬件结构图。整个系统由MEMS倾角传感器芯片，高精度稳压芯片，AD转换芯片，片上集成无线RF和微处理器以及信号调理电路。图4为TJ_UWIS倾角传感器实物照片。

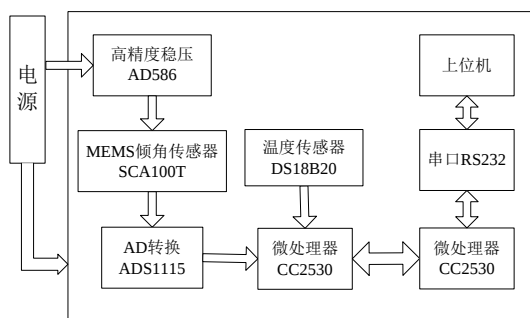


图3 MEMS无线倾角传感器硬件结构图

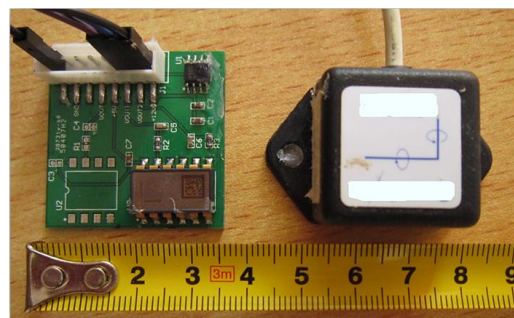


图4 TJ_UWIS倾角传感器实物图

该系列传感器共有三种型号：TJ_UWIS 1.1 为双轴倾角传感器；TJ_UWIS 1.2为单轴倾角传感器；TJ_UWIS1.3为单轴差分式倾角传感器。这三种传感器性能接近，但电路结构以及各项参数指标有所不同，如表1所示。通过传感器室内标定试验，得到了输出稳定性指标、温度漂移曲线、振动频响曲线。综合各项实验结果表明，TJ_UWIS系列双轴以及差分式传感器在输出稳定性、温度漂移等方面要优于商业产品，是较为理想的倾角传感器选型。

表1 TJ_UWIS系列MEMS倾角传感器基本参数

	轴数	尺寸(mm)	精度(°)	分辨率(°)	量程(°)	供电(V)	输出(V)	工作温度(°C)
商业传感器	单轴	27×27	0.5	0.003	-20~20	6~30V	0~5	-40~85
TJ_UWIS1.1	双轴	35×35	0.1	0.0025	-90~90	12V	0~5	-40~125
TJ_UWIS1.2	单轴	35×35	0.1	0.0025	-30~30	12V	0~5	-40~125
TJ_UWIS1.3	差分	35×35	0.1	0.0013	-30~30	12V	0~5	-40~125

3.2 无线传输网络架构

布设在终端的传感元件需要通过盾构隧道中的无线传输网络形成最终的感知网络。在盾构隧道内部特殊的复杂电磁环境下，无线感知网络架构的建立，离不开网络结构、网络通讯协议以及数据无线传输及压缩方法等三个方面。

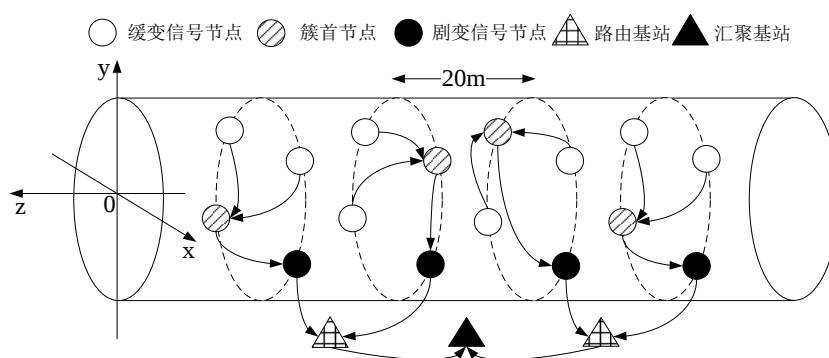


图5 盾构隧道结构感知监测系统信号传输网络模型

针对网络结构，本文研发的无线感知网络采用具有很好的可扩展性的二层网络拓扑结构，如图5所示。该二层网络拓扑结构能够考虑大数据量传感器对局部节点寿命的影响，同时可通过修正的最小集覆盖方法来进行求解。通过计算机仿真得到采用二层网络拓扑结构能够利用最少的中继节点实现网络的连通性，并且保证各个中继节点的中继负担处于允许的范围之内，防止局部节点由于过高的能耗而过早死亡，影响全网寿命。针对地下隧道特殊环境中的网络传输通讯协议，本文采用通过zigbee与wifi通讯协议的一体化完成网络传输通讯协议，通过该一体化网络协议实现了后端的无线通道，成功构建了基于无线广域网、无线局域网、无线个域网的WSN网络结构，主要包含Zigbee-3G、Zigbee-WiFi、Zigbee-Bluetooth。由于在隧道内布置感知节点数目众多，针对数据无线传输及压缩，则需要转发及预存大量数据。本文所设计的感知网络采用一种时空数据压缩方法^[15]，通过数据的有效压缩，减少所发送数据的容量，进而能降低能耗，延长网络寿命。

3.3 无线感知方式

3.3.1 隧道横向变形感知方式

通过布设在盾构隧道结构上的传感元件，经过无线传输网络，可以感知盾构隧道结构横断面变形情况（具体可参见文献^[16]）。其中无线传感元件布设在管片AB及管片BC段中点附近 I_1 、 I_2 位置处。通过无线感知技术可以捕捉得到两点的倾角变化 I_{1s} 、 I_{2s} ，进而通过下式得到跨中两块管片间接头的挠度变化 a_{cs} ：

$$a_{cs} = \frac{AC^2 [\sin(\alpha_0) - \sin(\alpha_0 - I_{1s})] + BC^2 [\sin(\beta_0) - \sin(\beta_0 + I_{2s})]}{AC + BC} \quad (1)$$

上式中AC、BC为管片弦长，角度 α_0 、 β_0 为初始管片对应圆周角。上述通过无线感知方法量测隧道横断面变形方式进一步通过室内原型管片加载试验得到验证。

3.3.2 隧道纵向变形感知方式

采用上述研发的TJ_UWIS双轴倾角传感器可在隧道结构纵向上测得管片的倾角变化 θ ，采用如图6所示的计算原理图，可以得到不同区段累计的纵向不均匀沉降 Δ 的数据：

$$\Delta = L \cdot \theta \quad (2)$$

针对应用MEMS倾角传感器感知盾构隧道纵向沉降的功能要求（精度及量程），本文针对性的进行了电路设计和芯片选择，其测量精度理论上能够满足工程监测的精度要求，误差小于3mm/km。其测量精度理论上能够满足工程监测的精度要求，误差小于3mm/km。

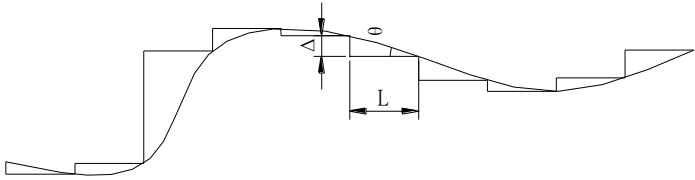


图6 倾角感知纵向沉降原理图

4 上海地铁工程应用

4.1 工程概况

某地铁区间隧道2010年上部发生突发堆载，平均堆高约4.0m，最大堆高达7.0m，堆高与原顶覆土厚比值达0.43，如图7所示。大面积地表堆载造成隧道横断面大变形，呈现明显“横鸭蛋”变形，约100环管片产生明显收敛变形，最大水平直径收敛值达21.4cm，与理论直径比值达34.6%。为保护隧道结构，采取了卸载、堵漏、修补及加固等一系列整治措施。经过3年运行，该区间部分区段仍有较大的收敛变形发展，因此，需进行再次整治。本次整治采用侧边注浆、钢环加固的方式加固管片。侧边注浆将在隧道两侧钻孔注浆，分别在上下行隧道中间布设1排注浆孔，在隧道外侧布设3排注浆孔，如图8所示。侧边注浆过程中隧道横断面收敛将会减小，从而增加隧道净空，在此基础上进行钢环永久加固。

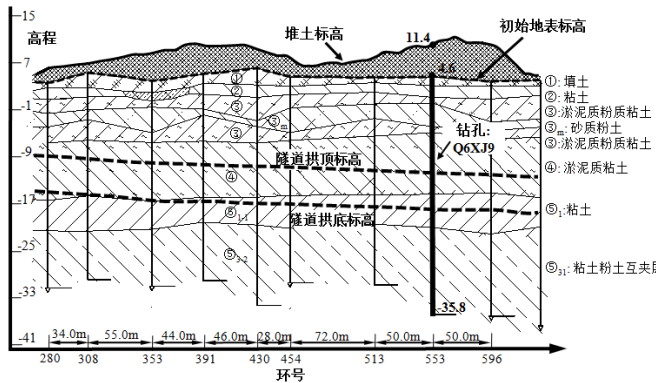


图7 隧道地层纵剖面示意

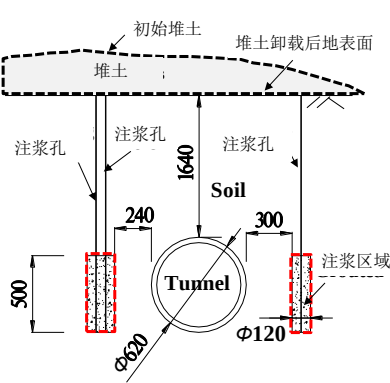


图8 隧道注浆

4.2 设备安装

为掌握在注浆过程中的隧道结构变形变化规律，在注浆区域选择411和433两环布设无线MEMS倾角传感器。每环布设4个倾角传感器，分别安装在邻接块（L1和L2）和标准块（B1和B2）的管片中心。同时，在隧道水平直径位置腰部布设激光测距仪，并采用全站仪进行人工测量。图9标示了无线MEMS倾角传感器及激光测距仪安装位置，传感器具体编号详见表2，图10为传感器现场安装图。

表2 MEMS倾角传感器编号与隧道管片对应关系

	L1	L2	B1	B2
411 环	ID02	ID03	ID05	ID04
433 环	ID06	ID08	ID0A	ID09

表3 隧道收敛累计变化值对比分析

	倾角传感器	激光测距仪	人工全站仪
411 环	-20.17 mm	-21 mm	-19.1 mm
433 环	-11.91 mm	-14 mm	-12.6 mm

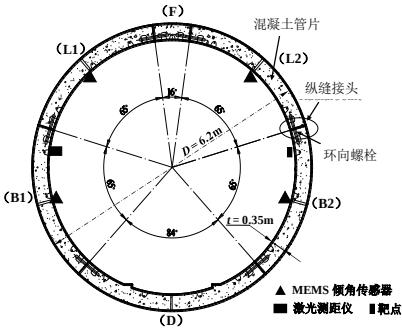


图 9 无线 MEMS 倾角传感器及激光测距仪安装位置示意图



图 10 传感器现场安装图

4.3 横线收敛变形感知

在注浆过程中，MEMS倾角传感器实时测量隧道管片的转动变化，图11为433环倾角传感器在单次注浆过程中的倾角变化曲线，单次注浆分别引起L1管片逆时针转动0.049°、L2管片顺时针转动0.041°、B1管片顺时针转动0.037°、B2管片逆时针转动0.039°，如图12所示。通过分析计算，隧道水平收敛值减少3.057mm。激光测距仪与全站仪测量的水平收敛结果分别为-3 mm和-3.1mm。

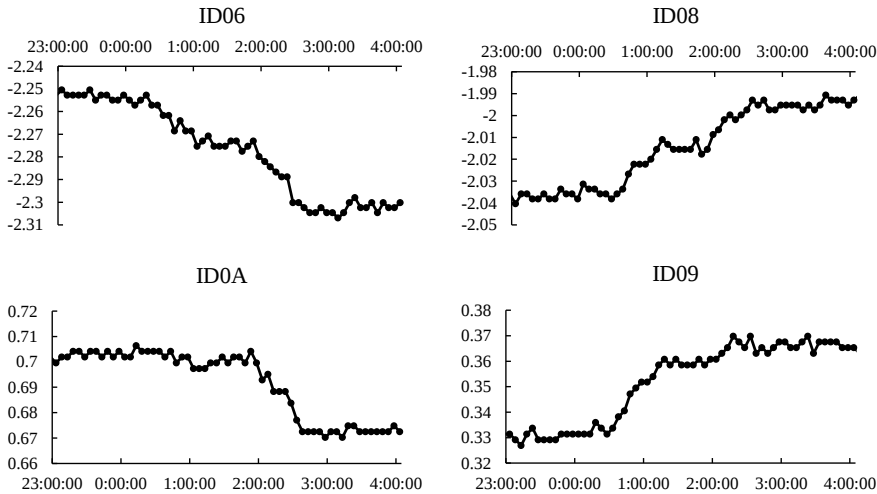


图 11 单次注浆过程 433 环倾角传感器倾角变化曲线

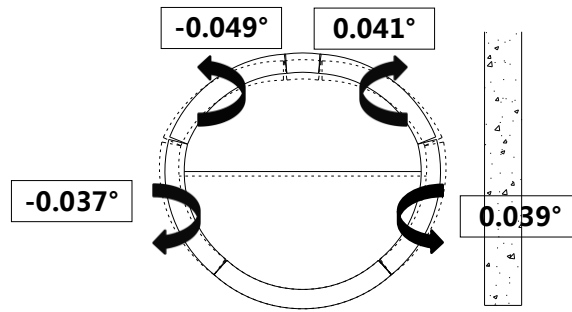


图 12 单次注浆过程 433 环管片转动模式

通过对注浆过程的长期监测，注浆20天后，隧道水平收敛的累计变化值如表3所示。采用无线倾角传感器计算分析得到的411环累计收敛为-21.17mm、433环累计收敛为-11.91mm。通过与全站仪测量结果对比，411环和433环误差分别为5.6 %和5.5%。结果表明，采用无线MEMS倾角传感器测量隧道收敛的方法与人工测量和激光测距与具有较好的一致性，可用于工程实践中。

5 结论

本研究针对隧道结构特点和环境条件，研发了 TJ_UWIS 双轴倾角传感器，并基于 Zigbee 构建了具有二层网络拓扑结构的 WSN 网络。基于倾角传感器提出了盾构隧道结构横断面及纵向沉降的感知方法，通过室内试验验证了算法的可靠性。通过现场应用研究，验证了无线传感网络的数据传输的可靠性及基于倾角传感器横断面收敛算法的准确性。结果表明，采用无线 MEMS 倾角传感器可有效监控隧道结构变形，不但能实时监控隧道管片转动变化，而且可以计算分析隧道横断面收敛变化。此外，该方法可以不受运营列车通行影响，真正实现运营隧道全天候实时监控，为隧道安全提供技术支持，有效保障隧道运营安全。

致谢： 论文的研究受到国家自然科学基金(51278381)、973 项目(2011CB013803)的资助，在此一并致谢。

参考文献(References):

- [1]BAKKER K J, DE BOER F, ADMIRAAL J B M, et al. Monitoring pilot projects using bored tunnelling: the Second Heinenoord Tunnel and the Botlek Rail Tunnel [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1999, 14(2): 121-129.
- [2]窦延文. 深圳地铁 7 号线工地坍塌事故原因查明 [M]. 中国新闻网. 2015.
- [3]陈杰生, 熊薇, 连楷等. 广州地铁勘探擅改钻探位置凿穿 5 号线隧道 [M]. 南方都市报. 2014.
- [4]STRASER E G, KIREMIDJIAN A S. A modular, wireless damage monitoring system for structures [M]. John A. Blume Earthquake Engineering Center Stanford, CA, USA, 1998.
- [5]LYNCH J P. An overview of wireless structural health monitoring for civil structures [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2007, 365(1851): 345-372.
- [6]SPENCER B F. Wireless Smart Sensor for Mointoring Civil Infrastructure[C], Proceedings of 6th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, Hongkong, China, 2013.
- [7]BENNETT P J, SOGA K, WASSELL I, et al. Wireless sensor networks for underground railway applications: case studies in Prague and London [J]. Smart Structures and Systems, 2010, 6(5-6): 619-639.
- [8]LI H, OU J P. Life-Cycle Performance-Based Monitoring, Evaluation and Control of Infrastructure [C], Proceedings of SHMII-6--the 6th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, Hongkong, China, 2013.
- [9]黄宏伟, 张伟. WSN 在城市地铁盾构隧道中的应用探讨 [C]. 第十一届海峡两岸隧道与地下工程学术与技术研讨会, 台湾 溪头, 2012.
- [10]嵇中. 无线传感网络技术在隧道变形与防灾监测中的应用研究 [J]. 隧道建设, 2014, 34(2): 134-139.
- [11]XIE X Y, WANG Y, FENG L. Performance Testing of Wireless MEMS Sensor Network Applied in Underground Tunnel Health Monitoring Scenario [C], Proceedings of the 6th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent

Infrastructure, Hongkong, China, 2013.

- [12]何斌, 纪云, 沈润杰. 地下隧道变形检测的无线倾角传感器 [J]. 光学 精密工程, 2013, 21(6):
- [13]HUANG H W, XU R, ZHANG W. Comparative Performance Test of an Inclinomter Wireless Smart Sensor Prototype for Subway Tunnel [J]. International Journal of Architecture, Engineering and Construction, 2013, 2(1): 25-34.
- [14]WANG K, HUANG H W. Smart crack sensor and its application in subway shield tunnel [C], Proceedings of the 6th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, Hongkong, China, 2013.
- [15]He B, Li Y, Huang H, et al., Spatial - temporal compression and recovery in a wireless sensor network in an underground tunnel environment [J]. Knowledge and Information Systems, 2014, 41(2): 449-465.
- [16]黄宏伟, 殷建国, 张伟. 基于倾斜传感的地铁盾构隧道横向收敛变形推算方法 [C], 第七届中日盾构隧道技术交流会会议论文集, 中国 西安, 2013.

作者简介:



本文第一作者: 黄宏伟, 1966年生, 男, 教授/博士, 同济大学土木工程学院副院长, 主要从事隧道及地下建筑工程智能感知、风险管理与控制方向研究, email: huanghw@tongji.edu.cn;



本文第二作者: 张东明, 1987年生, 男, 博士, 同济大学, 主要从事隧道及地下建筑工程风险管控、结构安全性能评价方向研究, email: 09zhang@tongji.edu.cn;



本文第三作者: 王飞, 1985年生, 男, 助理教授/博士, 同济大学防灾救灾研究所讲师, 主要从事隧道及地下建筑工程智能感知、结构健康监测方向研究, email: wangfei0602@126.com;



本文第四作者: 何斌, 1975年生, 男, 教授/博士, 同济大学科学与技术研究院副院长, 主要从事控制科学与工程方向研究, email: hebin@tongji.edu.cn;



本文第五作者: 吴俨, 1982年生, 男, 博士, 无锡悟莘科技有限公司董事长, 主要从事物联网、控制科学与工程方向研究, email: wuyan@wisencn.com ;