

Mass Concrete Crack Monitoring Technology Based on Wireless Sensor Networks*

SUN Hongbing^{1,2*}, YU Along¹

(1. School of Physics and Electronic Electrical Engineering, Huaiyin Normal University, Huai'an Jiangsu 223300, China;

2. The Aeronautical Key Laboratory for Smart Materials and Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The monitor and control of temperature and temperature stress for large volume concrete casting process can effectively prevent the generation of cracks. After analyzing the characteristics of the usual monitoring methods for mass concrete temperature and stress, the paper has presented a distributed temperature and stress monitoring system based on wireless sensor networks and mobile agent technology. By using wireless sensor node for the concrete temperature and stress, the parallel distributed information collection and processing are realized. The operation and installment are convenient and reliable with network topology and the real overall distributed pattern. By applying mobile agent into wireless sensor networks to solve the collaboration, coordination and information fusion between heterogeneous systems, the transmission of the redundant data and the node energy consumption are effectively reduced. The experimental results show that the system can achieve real-time online monitor of the temperature and strain of the concrete construction.

Key words: wireless sensor network; mass concrete; crack; mobile agent

EEACC: 6150P; 7210

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2013.03.024

基于无线传感网络的大体积混凝土裂缝监控技术*

孙红兵^{1,2*}, 俞阿龙¹

(1. 淮阴师范学院物理与电子电气工程学院, 江苏 淮安 223001; 2. 南京航空航天大学智能材料与结构研究所, 南京 210016)

摘要: 对大体积混凝土浇灌过程中的温度和温度应力进行监测与控制, 可以有效防止裂缝的产生。在分析了大体积混凝土温度和应力常见监测方法的特点后, 提出一种基于无线传感网络和移动 agent 技术的分布式温度和应力监控系统。系统利用无线传感器节点采集混凝土温度和应力等信号, 实现并行的分布式信息采集与处理, 安装布置简便; 将移动 agent 应用于无线传感网络以解决异构系统间协作、协调及信息融合, 有效降低了冗余数据的传输及节点能耗。详细分析了系统结构组成及设计方法, 并利用该系统进行了现场测试, 实验结果表明, 该系统能够较好实现对混凝土施工过程中的温度、应变情况进行实时在线监测。

关键词: 无线传感网络; 大体积混凝土; 裂缝; 移动 agent

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2013)03-0415-06

各类大型工程的施工质量及监控是建筑设计及施工单位长期关注的问题。大体积混凝土的浇灌有比较成熟的理论, 但在大体积混凝土实际浇灌过程中, 存在很多因素, 如混凝土的脆性和不均匀性, 以及结构不合理, 原材料不合格, 模板变形, 基础不均匀沉降, 水化热导致的温度分布不均, 热膨胀系数不一致等, 都可能导致浇灌完的大体积混凝土产生裂缝, 在一定程度上影响工程的质量。在这些因素中, 水化热

导致的温度分布不均是裂缝产生的主要原因。混凝土在硬化过程中会放出大量水化热, 这些热量散发速度不均衡, 表面散发的较快, 将导致混凝土内部温度较高而外表温度较低, 在表面引起拉应力; 在降温过程中, 由于受到基础的约束又会在内部出现拉应力。当这些拉应力超出混凝土的抗拉能力时就出现了裂缝, 破坏混凝土的整体性和耐久性, 危及建筑物的安全, 这种现象在现浇大体积混凝土结构中表现尤为突

项目来源: 江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2012145); 省高校科研成果产业化推进项目(JH11-009); 淮安市科技支撑计划项目(HAG2011046)

收稿日期: 2012-12-09 **修改日期:** 2013-02-27

出,在一定程度上影响工程的质量^[1-3]。

为了提高大体积混凝土浇灌的施工质量,必须在大体积混凝土施工过程中对混凝土温度场以及应变的分布情况进行实时监测与控制,将由于温差引起的温度应力降低到混凝土的抗拉强度范围,避免或减小裂缝的产生。早期是在混凝土不同监测点位布置温度、应力测试仪表,监测数据的读取与处理工作由技术人员按设定的时间间隔定时完成。这样的测量需要监测人员频繁来往于施工现场,劳动强度大,数据采集与处理不方便。科研人员经过不断改进,逐渐采用带有智能传感器的自动化检测仪表,减少了人工误差,提高了测量精度。这些系统应用于大体积混凝土,由于需要监测的点多而且分布范围广,所用传感器的数目及种类也很多,因而需要在施工现场布设数目庞大的电缆,使施工现场凌乱不堪,安装与维护不方便,也会带来许多安全隐患^[4-8]。

近年来发展起来的无线传感网络(WSN)综合了微型传感器技术、通信技术、嵌入式计算技术以及分布式信息处理技术,能够协作地实时监测、感知和采集各分布区域的各种信息,并对这些信息进行处理和传送,在工业、农业、军事等领域具有广泛的应用前景^[9-12]。本文结合混凝土施工监测特点,提出一种基于无线传感网络和移动 agent(Mobile agent, MA)的分布式裂缝监控系统,系统由温度及应变无线传感器节点、基站及远程监控中心组成。系统根据监测任务将其分解并将对应的移动 agent 发送到传感节点运行,实现数据采集与信息处理,以显著减少冗余数据的传输,并将原来传统的串行处理、集中决策的系统,变为一种并行的分布式信息处理系统,降低节点的能耗,提高了监测系统的运行速度及决策的可靠性和灵活性。系统使用无线传感节点后,大大减少了器件引线数量,使系统安装布置简便,实现对监测对象的长期在线监测^[13-15]。

1 基于 WSN 和 MA 的监控系统体系结构

本文设计的基于无线传感网络的大体积混凝土裂缝远程监控系统的主要功能是利用分布在大体积混凝土不同位置的传感器节点采集混凝土不同位置的温度、应力、应变等参数,通过基站传输这些数据到远程监控中心进行实时数据处理与分析,用户在监控中心或通过 Internet 在远程终端实现对施工现场全天候的实时监测与控制,以实现混凝土温度场的异常变化进行实时报警并采取控制措施,为混凝土裂缝的防治提供决策支持。

在传统的 C/S 结构的无线传感网络监控系统

中,每个传感节点采集的大量原始数据需要通过中继传送给远程监控中心,由远程监控中心对这些数据进行分析、处理与综合决策。节点的信息采集与传送虽然是并行的,但是传送的原始数据量很大,将会消耗传感节点大量的能量,降低了节点使用寿命;而远程监控中心对各节点数据的接收是串行的,所需时间也随着网络的规模增加而极大增加,带来了较大的时间延迟。针对 C/S 结构无线传感网络监测系统的不足,在设计基于无线传感网络的混凝土裂缝监控系统中,采用移动 agent 技术用于节点的数据处理与信息的传输,图 1 为系统体系结构框图。

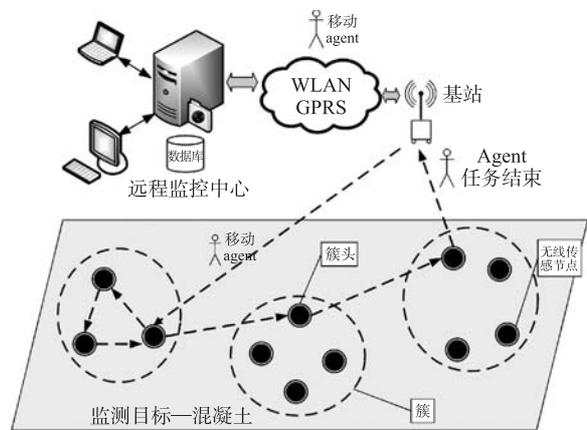


图 1 基于 WSN 和 MA 的监控系统体系结构

根据大体积混凝土参数监测需求,按照一定的规则确定传感节点的数量及布置位置,各传感节点在实际工作过程中根据需要动态汇聚成多个簇,每个簇都有簇头,簇头一般具有较多的存储空间、电源能量及较强的计算能力。在任务下达后,监控中心首先根据任务特点及复杂程度将其分解为多个易于实现的子任务,并向各传感器节点发送能够实现某种功能的移动 agent(一段可执行的代码,可以携带数据、状态等信息在不同系统间移动,并可以在到达目标主机时自动运行),各节点接收移动 agent 后,就会在该节点运行该移动 agent,进行各种处理工作,如启动数据采集、对采集的原始数据进行处理等,也可和其他节点进行协作以完成各种复杂任务。任务完成后该移动 agent 将处理结果按最佳路径发送给基站,由基站收集各节点数据并传送给远程监控中心,由其做综合决策。移动 agent 的移动过程如图 1 所示。

在这样的系统中,许多任务都通过移动 agent 在本地节点完成,任务结束后移动 agent 将中间结果及一些状态数据带到下一节点(本地节点恢复原状态,为执行其他任务做好准备),完成任务后将结果通过基站送给远程监控中心,最终由监控中心进

行综合决策,实现对大体积混凝土的温度、应变及应力进行监控,进而采取相关措施以预防混凝土裂缝的产生。系统通过移动 agent 有效解决了监控中心、传感节点及基站等异构单元间的信息传输问题,解决了节点存储空间不足的困难,也避免了大量原始数据的传送,极大节约了系统能量消耗,延长了节点的使用寿命。

2 监控系统功能模块设计

2.1 无线传感节点及基站设计

根据图1结构设计的混凝土裂缝监控系统由无线传感节点、基站和远程监测中心组成。无线传感节点和基站由若干温度传感器、应变传感器及相应的信号调理电路、单片机、无线收发模块等组成,将这些传感器预埋在混凝土内部,对混凝土各点的温度、应变等参数进行采集与处理。图2为无线传感节点及基站组成框图。

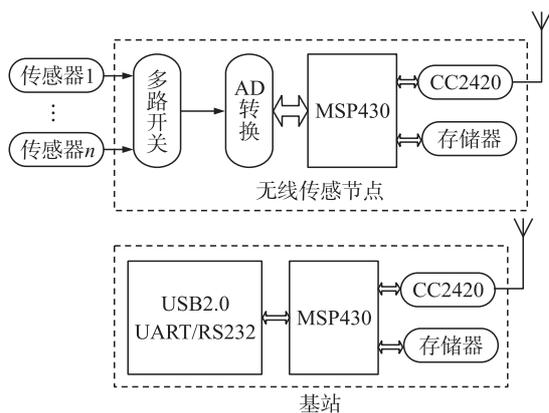


图2 无线传感节点及基站组成框图

数字处理及控制模块的核心采用TI公司的16 bit 超低功耗的混合信号处理器MSP430,无线收发模块采用CC2420,采用PT100对温度进行测量,采用BSQ120-10AA电阻应变片、光纤布拉格光栅(FBG)对混凝土的应变、应力进行检测。在信号调理电路设计中,为BSQ120-10AA设计了应变全桥,并用补偿片对环境温度进行了补偿,同时在软件中采取了相应的温度补偿措施。对于光纤布拉格光栅,当受到轴向外力时,光栅周期 Λ 和纤芯折射率 n_e 将发生变化,峰值反射波长随之变化,根据光纤耦合模理论,当宽带光在FBG中传输时,产生模式耦合,满足布拉格条件的光被反射,其关系式为:

$$\lambda_B = 2n_e \Lambda \quad (1)$$

式中: Λ 为光栅周期, n_e 为有效折射率, λ_B 为峰值反射波长。由此可知 Λ 和 n_e 的改变都将引起 λ_B 的改变。温度、应力等参数的变化可导致 Λ 和 n_e 改变,

引起峰值反射波长的变化,FBG反射光的中心波长随应变和温度变化的位移为:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \left(\frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} + \frac{\Delta n_e}{n_e} \right) = K_\varepsilon \Delta\varepsilon + K_T \Delta T \quad (2)$$

式中: $\Delta\lambda_B$ 为应力和温度变化引起的改变量, $\Delta\Lambda$ 为光栅周期变化量, Δn_e 折射率的变化量, K_ε 为应变灵敏系数, K_T 为FBG温度系数, $\Delta\varepsilon$ 为光纤轴向应变, ΔT 为温度变化。若假设外界温度不变,则有:

$$\Delta\lambda_B = K_\varepsilon \Delta\varepsilon \quad (3)$$

即FBG波长的变化与应变成线性关系。使用光纤光栅解调仪SI425对FBG的信号进行解调即可得到中心波长变化情况,进而计算出应变。SI425具有四个光学通道,一条单模光纤可以串接128个FBG传感器,可分辨的最小波长间隔为0.5 nm,自动按照中心波长的大小排列,可解调的波长范围是1520 nm~1570 nm,分辨率小于1 pm,可重复性2 pm,扫描频率为250 Hz。

2.2 无线传感节点优化布置

大体积混凝土结构的可测自由度较多,而实践中所布置的测点数由于受成本等因素的限制要远小于结构的自由度数,需要对有限的传感器进行优化配置,确定合理的、能反映测试要求的传感器数量及配置位置。

常用的传感器优化配置准则,大多是以位移模态为目标对传感器的位置进行优化的配置准则,适用于位移传感器以及加速度传感器的位置优化。而本监测系统所用的是由应变传感器测量得到的结构应变信息,由于应变(应变模态)与位移(位移模态)在空间坐标上不存在一致对应关系,为此需要研究应变传感器位置优化方法。目前国内混凝土结构应变监测传感器布设多采用传统的经验方法,效率比较低。遗传算法是基于概率的方法,不易陷入局部最优解。针对混凝土结构应变应力监测中的应变传感器优化配置问题,提出基于有限元仿真技术和生物进化的原理相结合的应变传感器优化配置准则,初步利用有限元分析软件(MSC. PATRAN、MSC. NASTRON)给出一小组传感器位置,然后采用改进遗传算法对剩余的传感器的位置进行组合优化,具体做法如下:

参考图3,根据混凝土的受力特点,先利用有限元分析软件(例如MSC. PATRAN、MSC. NASTRON)对欲施工混凝土结构的应变、应力分布进行有限元分析,以应变模态为目标,找出各截面的应力、应变极值点,得到模态/应变最大值,把那些对模态反应起主要作用的自由度保留下来作为测点的位置,进而初步确定必须的应变传感器数量及最佳布置点,

然后采用遗传算法对剩余的传感器的位置进行组合优化,最终给出大体积混凝土应变监测传感器的最优数量及最佳布置点。在这些能够反映大体积混凝土

土结构特性的重要位置布置合理数量的传感器,不但可以有效地降低监测成本,还可以提高监测系统处理信息的效率。

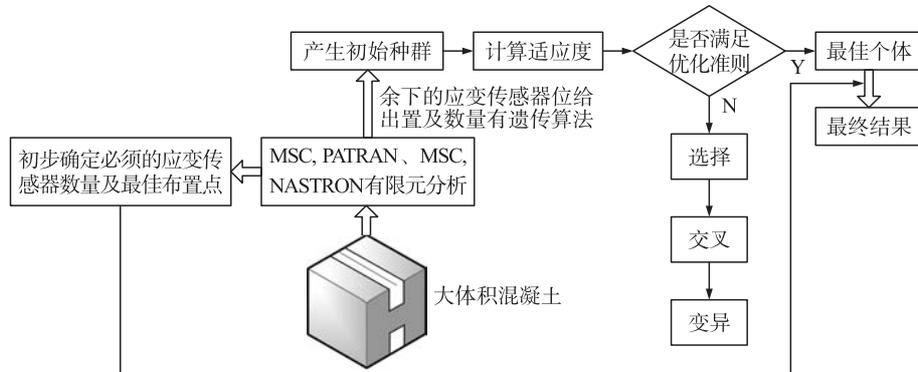


图3 基于有限元和遗传算法的传感器位置优化

2.3 基于MA的数据融合与路径优化

系统要得到混凝土各点的温度、应变等参数,需要启动各传感节点进行数据采集与处理。考虑到节点存储空间、计算能力的局限性,系统没有在节点上编制并保存大量的数据处理算法,而是根据需要将相应功能的移动 agent 派遣到目标节点,MA 运行并进行数据采集与处理等操作,如不能完成任务则携带中间结果与状态数据向下一节点移动,和其他节点进行协作,直到任务完成后该移动 agent 即将结果发送给远程监控中心,由其做综合决策。这样的系统结构,数据处理等工作在节点完成,需要传送的只是 MA 及其处理结果,避免了大量原始数据的传送,节省了节点能量消耗,也减少了时间延迟。

MA 从监控中心迁移到目标节点的过程中可以选择多条路径,不同的路径选择直接关系到中继次数及系统的能量消耗,容易引起节点能量消耗不平衡,导致有的节点能量消耗大而过早失效。本文在设计 MA 移动路径时,既考虑路径最优,又考虑节点的剩余能量的均衡。为此,每个节点都需知道自己的位置信息和剩余能量,并且可以获取邻居节点的剩余能量。设节点的剩余能量为 E_{res} ,考虑一定的冗余情况下完成某任务的最低能量阈值 E_{th} 。监控中心在派遣移动 agent 之前先查询每个节点的 E_{res} ,标记下 $E_{res} > E_{th}$ 的节点,以这些节点为集合,结合目标节点的位置,计算出 MA 的最小移动路径。如果必须访问剩余能量低的节点,也只是将这些节点作为路由节点,不在其上进行处理运算,以延长该节点的寿命。

基于移动 Agent 的数据融合与路由算法,充分利用移动 Agent 的移动计算的优点,工作过程包括初始化、路径确定及数据融合三个阶段。①监控中

心根据任务生成相应的移动 agent,并通过广播获取各传感节点的位置信息及剩余能量状态;②根据收集到的节点信息,标记出 $E_{res} > E_{th}$ 的节点,以此为节点集合按照最优路径算法确定迁移路径,也就是尽量选择能量剩余较多的节点执行数据采集与融合任务;移动 agent 按照确定的最优路径迁移到目标节点运行,执行数据采集与数据融合等处理任务,如果能够完成任务,则将结果返回监控中心,如果未能完成任务,则需携带中间结果及状态信息向下一节点移动,经过不断融合与处理,最后将结果返回。

3 系统测试及结果分析

监测系统设计完成后,对 205 国道后六塘河至丁集段某桥梁工程进行监测。该工程某区块基础底板平面尺寸为 $55.6 \text{ m} \times 36 \text{ m}$,其中中间区域板厚 5.2 m ,混凝土采用 C40。在进行该工程基础底板的混凝土施工过程中,利用该系统进行了测试。为描述方便,对该工程基础底板的混凝土结构进行划分,利用有限元和遗传算法确定各“区”、“层”的监测点位置及数量,并对其进行编号,如图 4 所示。为加快混凝土水化热快速排出,避免内外温差过大引起温度应力过大而产生裂缝,施工过程中在混凝土内部放置了管径为 25 mm 的冷却水管,用河水作冷却水,根据检测结果确定冷却的时间。远程监控中心根据任务生成移动 agent 并按一定的路由发送到目标节点运行,对该点的温度、应力、应变等信息进行采集、处理,必要时与其他节点协作,直到完成任务,将结果送回监控中心做综合决策,对高温及应变较大的区域通水降温,以减少温差,控制裂缝的产生与扩展。以 A 区 a、b、c 层的 1~3 号测点为例,在施工后 16 天内的温度变化如图 5 所示,应变变化如图 6 所

示。由图5可见,混凝土浇筑过程中有明显的升温 and 降温阶段,约48 h~80 h混凝土中心达到最高温度。A区2号测点位于混凝土中间层,散热效果差,温度也较高;1号点由于受环境气温影响较大,测量结果变动也较大,且温度明显低于2、3号测点。图6表明混凝土在升温阶段有微小的膨胀,表面出现压应变,随着时间推移,表层降温快而变现为拉应变,内部降温缓慢,表现出压应变,这样的应变分布易使混凝土产生裂缝,这和混凝土建筑出现裂缝的时间一致。

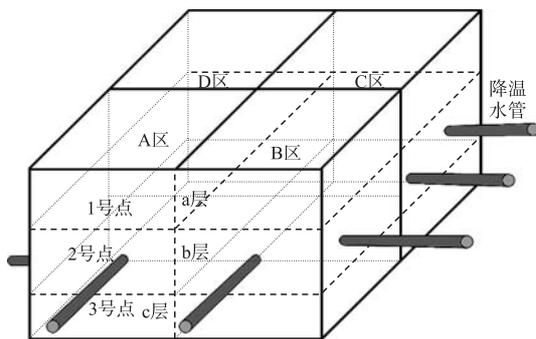


图4 混凝土结构层次划分及传感器布置

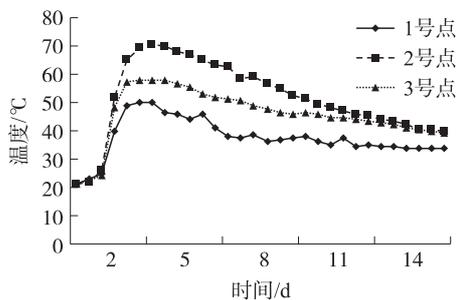


图5 A区各测点温度及变化曲线

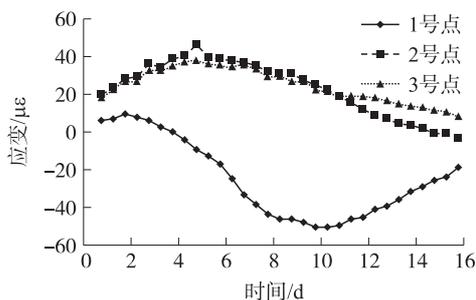


图6 A区各测点应变变化曲线

4 结束语

本文针对传统的混凝土施工过程中的温度、应力及应变监测系统的不足进行改进,提出基于无线传感网络与移动 agent 技术的混凝土施工参数监控系统,以有效预防混凝土裂缝的产生与扩展。该系统由远程监控中心、多个无线传感器节点以及基站等组成,监控中心根据监控任务的特点及复杂程度将其分解为多个易于实现的子任务,并向各传感器节点发送能

够实现这些功能的移动 agent,各节点接收并运行这些移动 agent,实现数据采集与处理等任务。当任务比较复杂,移动 agent 在一个节点无法完成任务,则需要与其他节点进行协作,直到任务完成后该移动 agent 将处理结果按最佳路径发送给基站,由基站收集各节点数据并传送给远程监控中心,由其做融合与综合决策,实现对大体积混凝土的温度、应变及应力进行监测,进而采取相关措施以预防混凝土裂缝的产生。监控系统安装布置简便,通过移动 agent 有效解决了异构单元间的信息传输问题,解决了节点存储空间不足的困难,也避免了大量原始数据的传送,极大节约了系统能量消耗,延长了节点的使用寿命。现场测试结果表明,该系统能够较好实现对混凝土施工过程中的温度、应变情况进行实时在线监测。

参考文献:

- [1] Isgor O B, Razaqpur A G. Finite Element Modeling of Coupled Heat Transfer, Moisture Transport and Carbonation Processes in Concrete Structures[J]. Cement and Concrete Composites, 2004, 26(1):57-73.
- [2] 陈瑜,张起森. 水泥混凝土早期抗裂性能的研究现状[J]. 建筑材料学报, 2007, 7:411-417.
- [3] 李鹏程,陈雨,谭斌,等. 背衬对埋入混凝土中压电陶瓷电-声特性的影响[J]. 传感技术学报, 2012, 25(1):44-48.
- [4] 屈伟. 大体积混凝土施工裂缝控制措施[J]. 建筑科学, 2007, 23(5):75-77.
- [5] 李小平,金虎. 大体积混凝土水化热温度裂缝分析[J]. 低温建筑技术, 2007(1):141-142.
- [6] 杨秋玲,马可栓. 大体积混凝土水化热温度场三维有限元分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(2):61-63.
- [7] 叶见曙,贾琳,钱培舒. 混凝土箱梁温度分布观测与研究[J]. 东南大学学报, 2002, 32(5):788-793.
- [8] 叶雯,杨永民. 大体积混凝土施工温度监测及其温度应力分析[J]. 混凝土, 2008(9):104-107.
- [9] Yuan Shenfang, Lai Xiaosong, Zhao Xia, et. al. Distributed Structural Health Monitoring System Based on Smart Wireless Sensor and Multi-Agent Technology [J]. Smart Materials and Structures, 2006, 15(1):1-8.
- [10] Wen-Tsai S. Employed BPN to Multi-Sensors Data Fusion for Environment Monitoring Services [J]. Autonomic and Trusted Computing, 2009, (6):149-163.
- [11] Qi Chang, Yuan Shenfang. A Design Strategy of Structural Health Management System [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2010, 33(2):961-971.
- [12] 付永生,李善平,周波. 无线传感网络中能量均衡的连通支配集算法[J]. 传感技术学报, 2010, 23(8):1142-1145.
- [13] Zhao Xia, Yuan Shenfang, Yu Zhenghua, et. al. Designing Strategy for Multi-Agent System Based Large Structural Health Monitoring [J]. Expert Systems with Applications, 2008, 34(2):1154-1168.
- [14] Sun Hongbing, Yuan Shenfang, Zhao Xia, et. al. Technology of

Structure Damage Monitoring Based on Multi-Agent[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2010, 21(4): 616-622, .

[15] 吕方旭, 张金成, 刘立阳. 基于 WSN 的多声源目标定位算法 [J]. 传感技术学报, 2012, 25(8): 1121-1125.



孙红兵(1970-),男,博士,副教授,研究方向为计算机测控,信号与信息处理,结构健康监测,无线传感网络,shbnuaa@126.com;



俞阿龙(1964-),男,博士,教授,硕士生导师,研究方向为信号与信息处理,无线传感网络,yal@hytc.edu.cn。