

# 无线传感器网络在桥梁健康监测中的应用\*

俞姝颖<sup>1,2</sup>, 吴小兵<sup>1,2</sup>, 陈贵海<sup>1,2</sup>, 戴海鹏<sup>1,2</sup>, 洪卫星<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(计算机软件新技术国家重点实验室(南京大学), 江苏 南京 210023)

<sup>2</sup>(南京大学 计算机科学与技术系, 江苏 南京 210023)

<sup>3</sup>(江苏省交通工程建设局, 江苏 南京 210004)

通信作者: 陈贵海, E-mail: gchen@nju.edu.cn

**摘要:** 桥梁的安全运营, 是关系到国计民生的大事. 因此, 桥梁结构健康监测系统正成为国内外学术界和工程界的研究热点. 无线传感器网络由于安装方便、维护成本低和部署灵活等特点, 已被广泛应用于桥梁健康监测系统中. 对现有的基于无线传感器网络的桥梁健康监测系统进行了综述, 依次介绍了各个子系统的基本原理和典型方法, 并结合多个具体实例分析了系统中的关键技术, 最后总结了已有系统中存在的问题和未来的研究方向.

**关键词:** 结构健康监测; 桥梁; 无线传感器网络; 损伤识别

**中图分类号:** TP393

中文引用格式: 俞姝颖, 吴小兵, 陈贵海, 戴海鹏, 洪卫星. 无线传感器网络在桥梁健康监测中的应用. 软件学报, 2015, 26(6): 1486-1498. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4580.htm>

英文引用格式: Yu SY, Wu XB, Chen GH, Dai HP, Hong WX. Wireless sensor networks for bridge structural health monitoring of. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2015, 26(6): 1486-1498 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4580.htm>

## Wireless Sensor Networks for Bridge Structural Health Monitoring

YU Shu-Ying<sup>1,2</sup>, WU Xiao-Bing<sup>1,2</sup>, CHEN Gui-Hai<sup>1,2</sup>, DAI Hai-Peng<sup>1,2</sup>, HONG Wei-Xing<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(State Key Laboratory for Novel Software Technology (Nanjing University), Nanjing 210023, China)

<sup>2</sup>(Department of Computer Science and Technology, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

<sup>3</sup>(Jiangsu Provincial Transportation Engineering Construction Bureau, Nanjing 210004, China)

**Abstract:** Bridge operation safety is critical to national security and people's livelihood. The structural health monitoring of bridges has emerged as an increasingly active research area. Wireless sensor networks (WSNs) technology is known to be easy to deploy and inexpensive to maintain. It is thus suitable for structural health monitoring of bridges. This paper gives a survey on structural health monitoring systems based on WSNs technology. Some basic theories and typical methods in subsystems are presented, and critical technologies are analyzed. At the end, various issues in existing systems and directions on future work are analyzed and summarized.

**Key words:** structural health monitoring; bridge; wireless sensor network; damage detection

## 1 背景介绍

### 1.1 桥梁健康监测系统

桥梁作为一种重要的交通枢纽, 它的安全运营, 关系着人民的生命财产安全和国家的经济建设发展. 在长达几十年甚至上百年的使用过程中, 受到材料老化、环境侵蚀、荷载增加、养护不当等因素的影响, 桥梁不可避免地出现各种结构损伤, 使得承载力与耐久性降低, 影响运营的安全性.

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61373130, 61321491, 61133006); 国家重点基础研究发展计划(973)(2012CB316200, 2014CB340300)

收稿时间: 2013-06-07; 定稿时间: 2014-01-24

国内外桥梁坍塌引起的安全事故时有发生.造成这些事故的原因多种多样.抛开设计与施工方面的缺陷,这些桥梁长期处于超荷载运营状态,致使许多构件疲劳损伤,是导致事故的一个重要原因.如果能够实时监控桥梁各个部件的状态,并对桥梁的健康状况做出及时的评估,类似的惨剧或许可以避免.桥梁结构健康监测系统的研究与发展,正是在这样的背景下出现的.

结构健康监测技术(structural health monitoring,简称 SHM)<sup>[1-5]</sup>是指利用现场的无损传感技术,通过对包括结构响应在内的结构系统特性进行分析,达到检测结构损伤或退化、制定延长结构寿命策略的目的.结构健康监测技术主要应用于一些造价昂贵、对可靠性要求很高的结构中,如空间飞行器、桥梁、大坝、隧道、核电站等,在提高可靠性、降低维护费用、灾害预警等方面有着重要的作用.

在传统的桥梁健康监测中,技术工人通过目测或者借助位移计、倾角仪、应变仪等便携式设备测量数据来对桥梁结构进行评估.这种方式一方面需要耗费大量的人力物力;另一方面,检测结果与检测人员的经验和素质相关,所以存在很大的局限性.随着现代检测技术与传感技术的发展,部分桥梁在施工过程中部署了有线传感器网络对桥梁健康状况进行监测.但是有线健康监测系统和维护成本极高,特殊部位布线困难且易受环境破坏,并且传输距离受到布线长度的限制<sup>[6-8]</sup>.无线传感器网络具有安装方便、维护成本低和部署灵活等特点,能够很好地解决有线健康监测系统在应用中遇到的困难.通过对各种传感器实时采集的数据进行处理和分析,能够及时地了解桥梁的工作状态和健康状况,为桥梁的安全运营提供保障.

## 1.2 无线传感器网络

无线传感器网络(wireless sensor network,简称 WSN)<sup>[9,10]</sup>是一种新型的传感器网络,由具有感知能力、计算能力和通信能力的大量微型传感器节点组成,通过无线通信方式形成一个多跳的自组织的网络系统,其目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖区域中感知对象的信息,并发送给观察者.

典型的无线传感器网络结构如图 1 所示,主要包括无线传感器节点(sensor node)、汇聚节点(sink node)、传输介质(Internet 或卫星通信)和网络用户.节点通过飞行器撒播、火箭弹射、人工安置等方式部署在监测区域内,节点之间以自组织(ad-hoc)方式进行通信.传感器节点将所探测到的有用信息经过初步处理之后,以多跳转发的方式到达汇聚节点,然后由汇聚节点以有线网络或卫星信道的方式传送给最终用户.

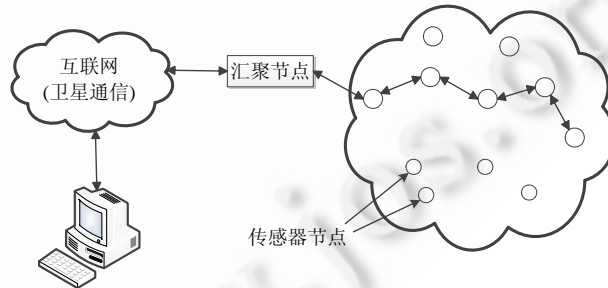


Fig.1 Framework of wireless sensor network

图 1 无线传感器网络结构

传感器节点由 4 部分组成:传感器模块、处理器模块、无线通信模块和能量供应模块.它的处理能力、存储能力和通信能力相对较弱,并且电池能量有限.从网络功能上看,每个传感器节点都具有传统网络节点和路由器的双重功能,除了进行本地信息收集和数据处理外,还可能对其他节点转发来的数据进行存储、融合、转发等处理.汇聚节点是具有较强处理能力、存储能力和通信能力的节点.从功能上看,它负责将传感器网络与外部网络进行连接,从而把收集的数据通过外部网络传送到用户终端上.用户对采集到的信息进行处理和分析,最终根据特定的规则做出决策.

微小传感器技术和节点间的无线通信能力,使得无线传感器网络具有十分广阔的应用前景.作为一种无处不在的传感技术,无线传感器网络广泛应用于国防军事、环境监测、设施农业、医疗卫生、智能家居、交通管

理、反恐救灾等领域.

## 2 系统概述

一个完整的结构健康监测系统包括 4 个部分:传感子系统、数据采集子系统、数据传输子系统和损伤识别子系统.各个子系统分别涉及不同的软硬件,完成不同的功能,它们相互配合、协同运作,共同完成桥梁健康监测的任务.整个系统的工作方式是:传感子系统利用传感器感知环境数据,数据采集子系统收集整理这些数据,数据传输子系统将这些数据以无线方式传输至损伤识别子系统,最后,损伤识别子系统根据所得数据采用结构损伤识别方法进行桥梁健康评估.

### 2.1 传感子系统

传感子系统通过各种类型的传感器对桥梁进行实时监测采集数据.监测内容主要分为两大类:荷载(load)和结构响应(structure response).其中,荷载包括交通荷载、风、温度、地震等;结构响应包括应变(strain)、加速度(acceleration)、位移(displacement)等.

对于荷载监测,交通荷载可采用动态地秤测量;风荷载可采用旋桨式风速仪或超声式风速仪测量;温度可由热电偶温度计、热电阻温度计或光纤光栅温度传感器进行测量;地震可使用地震仪进行监测.对于响应监测,应变常采用电阻应变计、振弦式应变计或光纤光栅应变传感器等测量;加速度可采用压阻式加速度传感器、电容式加速度传感器或压电式加速度传感器等测量;位移可由位移计、倾角计、电子测距仪等测量.对于斜拉桥和悬索桥,其索力可以通过测量应变或者加速度获得.例如,Kim 等人<sup>[6,11]</sup>在金门大桥上部署的健康监测系统中,通过加速度传感器获取桥梁的动态响应,进一步得到桥梁的固有频率、模态振型等信息;Dai 等人<sup>[12]</sup>在武汉郑店高架桥上部署的健康监测系统 BSHM-WSN 中,通过测量振动加速度来得到桥梁的自然频率;Whelan 等人<sup>[13]</sup>设计的结构健康监测系统中,既使用应变转换器进行荷载实验,又使用加速度传感器测量动态响应;Zhao 等人<sup>[14]</sup>在无锡蓉湖大桥上部署的加速度传感器通过测量斜拉索的加速度获得其自振频率,从而推断拉索的健康状况.

传感器的具体选型主要从两个方面进行考虑:测量精度和测量范围.例如,由风荷载和车辆荷载等引起的微小振动通常为几百  $\mu\text{g}$  ( $\text{g}$  为重力加速度),可以选用精度高、测量范围小的 SD1221L 型加速度传感器进行测量;由地震等自然灾害引起的大幅振动通常在  $2\text{g}$  左右,可以选用精度低、测量范围大的 ADXL202E 型加速度传感器进行测量.

桥梁健康监测系统中,常用的传感器节点有 CrossBow 公司的 Mica 系列<sup>[6,15]</sup>、Intel 公司的 IMote 系列<sup>[16]</sup>、Moteiv 公司的 Tmote(Telos)<sup>[17]</sup>等.由表 1 可以看出:各公司生产的传感器节点由于所选用的处理器、射频芯片以及扩展功能的不同,分别具有不同的特点.另外,大多数传感器节点本身不包含传感设备,需要按照具体的应用需求在上面集成不同类型的传感器.软件方面,嵌入式操作系统 TinyOS 可以运行在多个硬件平台之上,因而在无线传感器网络中处于主导地位.它的主要特点是:采用由 C 语言扩展而成的 NesC 语言实现组件化的编程,模块化的设计;采用事件驱动机制,可以处理高并发事件,达到节能的目的;轻量级线程技术和基于 FIFO 的任务调度,使得短流程的并发任务共享堆栈存储空间,并能快速切换;主动消息通信方式,构成 TinyOS 极小内核的通信系统,可以有效避免网络阻塞,实现低功耗通信.

Table 1 Comparison of wireless sensor nodes

表 1 无线传感器节点比较

传感器节点	处理器	射频芯片	扩展存储器	特点	示例系统
Mica2	ATMega128L	CC1000	512KB	低功耗;电源监测;全球唯一地址	Reyer <sup>[15]</sup>
MicaZ	ATMega128L	CC2420	512KB	低功耗	Kim <sup>[6]</sup>
IMote2	PXA270	CC2420	32MB	USB接口;处理功能强大	Jang <sup>[16]</sup>
Tmote	PXA270	CC2420	-	USB接口;超低功耗;集成温湿度、光照传感器	Chebrolu <sup>[17]</sup>

### 2.2 数据采集子系统

信号采样频率、对信号的预处理以及数据存储/发送策略等,是数据采集子系统中需要考虑的一些问题.

采样频率的选择,是数据采集过程中的一个关键问题.若采样频率过高,单个节点将迅速产生大量的采样数据而增加存储和通信开销,同时,系统对于节点之间的同步性要求更高;若采样频率过低,则会导致采集到的数据无法真实有效地反映桥梁的结构特性.在实际的系统中,通常根据桥梁监测内容的频响范围来确定信号采样频率.例如,桥梁的静态变化如形变、倾斜等具有频率极低的特性,采样频率通常小于 1Hz;而桥梁的振动频率在 20Hz 左右,宜选择 50Hz 以上的采样频率.

结构健康监测系统要求采集到的数据真实有效.一方面,需要对硬件设备(传感器、放大器、模/数转换器等)进行校正;另一方面,对于传感器获取的模拟信号,通常需要进行放大、滤波、去噪等操作,将模拟信号转化为数字信号后,还需要去除高斯噪声.美国 Clarkson 大学的智能基础设施和交通技术实验室设计了一种用于结构健康监测的无线传感器解决方案(wireless sensor solution,简称 WSS)<sup>[13,18-20]</sup>,其中:传感器节点采集到的单端模拟信号(如加速度等)需要经过信号调节(包括自动偏移调零、可编程增益放大和抗混叠低通滤波)之后进行模/数转换;差分模拟信号(如压力、位移等)需要经过 ZMD31050 信号调节器(包括偏移校正、可编程增益放大、模/数转换)处理.金门大桥健康监测系统<sup>[6]</sup>中,对于加速度传感器获得的模拟信号首先经过 25Hz 抗混叠低通滤波器处理,然后进行 16 位模/数转换;由于采样频率高达 1KHz,因此对数字信号进行缩减采样到 50Hz(每 20 个采样数据值取平均值),有效地平滑了高斯噪声.

单个节点在采样过程中产生的数据量与采样频率、模/数转换器分辨率、数据通道数目密切相关.假设采样频率  $F_s$  为 50Hz,模/数转换器的分辨率  $b$  为 16,数据通道数目  $s$  为 2,那么单个节点产生的数据速率  $F_s \cdot b \cdot s$  为 1.6kbps.如果网络中节点数目为 50,那么所有节点同时产生的数据速率将达到 80kbps.由于无线网络传输带宽有限、无线链路不可靠等因素,大量数据的实时传输必然导致丢包率的急剧上升.因此,数据的存储/发送策略显得至关重要.见表 2,数据的存储/发送策略主要分为 3 类:(1) 在采样频率不高或者节点数目不多的情况下,节点实时传输数据,如 Whelan 等人部署在 RT345 公路桥上部署的实时无线传感器网络<sup>[18]</sup>;(2) 采样过程中节点本地存储数据,采样完成后原样进行传输,如金门大桥健康监测系统<sup>[6]</sup>;(3) 节点在采样完成后对数据进行本地分析处理,将处理后的结果进行传输,如 Lynch 等人提出的 2004 年提出的无线健康监测系统中使用了嵌入式损伤检测算法<sup>[21]</sup>,Bhuiyan 等人于 2012 年设计的容错健康监测系统(FTSHM)中也使用了分散化决策的方法<sup>[22]</sup>.

Table 2 Comparison of storage/sending schemes

表 2 数据存储/发送策略比较

传输策略	适用情况	优点	缺点	示例系统
实时传输	采样频率不高; 节点数目不多	得到实时有效数据	应用场景有限; 实时传输带宽受限	Whelan <sup>[18]</sup>
采样后传输 原始数据	节点本地存储较大	消除传输带宽限制	无法进行连续监测; 采样后传输耗时耗能	Kim <sup>[6]</sup>
采样后传输 处理结果	节点处理能力较强	消除传输带宽限制; 减少数据传输能耗	无法进行连续监测; 无法进行全局数据分析	Lynch <sup>[21]</sup> Bhuiyan <sup>[22]</sup>

### 2.3 数据传输子系统

根据不同桥梁监测系统的拓扑结构,可以按照平面方式或层次方式组织数据的传输过程.

平面结构中,所有节点具有相同的功能特点,相互之间没有等级和层次的差异.平面结构中又可分为多种拓扑形式,如线性、树形、星型等.金门大桥健康监测系统<sup>[6,11]</sup>中,由于桥体主跨较长(1 280m)的特点,桥上部署的 64 个传感器节点组成一个 46 跳的长线性拓扑结构.为了有效地利用带宽并减少数据传输时延,系统采用管道(pipelining)传输方式:相距  $K$  跳的多个节点同时发送数据,并且  $K \geq 3$ ,以保证相互之间没有信号干扰.Reyer 等人设计的桥梁监测系统<sup>[15]</sup>是一种树形拓扑结构,首先以基站为根建立一棵多跳树,根节点深度为 0,其余节点记录自己的深度信息(到达根节点的跳数)和父节点信息.数据传输过程中,节点只需将数据发送给自己的父节点并接收和转发以自己为目的的数据. Whelan 等人设计的高速公路桥健康监测系统<sup>[19]</sup>中采用了星型结构,桥梁上安装的 20 个加速度传感器直接将采样数据发送至中央控制节点.

层次网络中,节点通常可以分为 3 类:普通传感器节点、功能较强的中继节点和汇聚节点. Kottapalli 等人设

计了一种两层式的无线传感器网络拓扑结构<sup>[23]</sup>,网络由普通传感器节点、外源供电的本地主节点 LSM(local site master)和中央主节点 CSM(central site master)组成.传感器节点与本地 LSM 通信形成低层网络;LSM 之间、LSM 与 CSM 之间通信形成高层网络.传感器节点将采集到的信息通过低层网络发送给 LSM,LSM 通过高层网络将数据发送给 CSM.Xiao 等人设计了另一种层次式的桥梁监测系统<sup>[24]</sup>,网络中按照传感器节点、路由器、收集装置组成 3 层拓扑结构,传感器节点将数据发送给路由器,路由器集合多个传感器的数据后发送给收集装置.

几种数据传输方式各有其优缺点,见表 3.

Table 3 Comparison of data propagation types

表 3 数据传输方式比较

拓扑结构	优点	缺点	示例系统
线性	简单;传输距离不受限	传输时延大;节点能耗不均衡	Kim <sup>[6]</sup>
树形	传输距离不受限	节点能耗不均衡	Reyer <sup>[15]</sup>
星型	简单;节点能耗均衡	传输距离受限;单点失效问题	Whelan <sup>[19]</sup>
层次	传输时延小;节点能耗均衡	需要额外设备;单点失效问题	Kottapalli <sup>[23]</sup> ; Xiao <sup>[24]</sup>

## 2.4 损伤识别子系统

在桥梁上安装健康监测系统的目的是及时发现结构内部可能存在的损伤,进一步评估桥梁的健康和安全状况,并对潜在的危险发出预警.因此,损伤识别是桥梁健康监测系统中的核心技术.

目前,桥梁的损伤识别仍然存在着极大的挑战性,这是因为桥梁体积大、质量重,自然频率和振动水平都较低,其动态响应容易受到不可预见的环境状态以及非结构构件等的影响,这些变化往往被误认为是结构的损伤而影响评估结果的准确性.现有的结构损伤识别方法大致可以分为 3 类:动力指纹法(signature analysis approach)、模型修正法(model updating approach)和神经网络法(neural networks approach).

动力指纹法通过分析结构与动力特性相关的动力指纹的变化来判断结构的健康状况.结构一旦发生损伤,其结构参数如刚度(stiffness)、质量(mass)、阻尼(damping)等会发生改变,进而导致相应的动力指纹的变化.因此,动力指纹的改变可以看作结构损伤发生的标志,用于诊断结构损伤.常用的动力指纹有频响函数(frequency response function,简称 FRF)、固有频率(frequency)、模态振型(mode shape)、模态确信准则(modal assurance criterion,简称 MAC)、坐标模态确信准则(coordinate modal assurance criterion,简称 COMAC)等.Dai 等人<sup>[12]</sup>部署的桥梁健康监测系统 BSHM-WSN 中,将加速度采样信号经过 FFT(fast fourier transform)变换得到桥梁的自然频率,通过与设计值相比较得出桥梁健康的结论;Weng 等人<sup>[25]</sup>在台湾集鹿斜拉桥健康监测系统中,分别采用 SSI (stochastic subspace identification)和 FDD(frequency domain decomposition)方法识别结构的固有频率和模态振型,并且从中发现桥体的振动与拉索的振动之间存在紧密的联系.

大量的结构实验表明,每种动力指纹方法都存在一定的局限性.例如:固有频率易于测量且测量精度较高,但它对结构的局部损伤不敏感;模态振型尤其是高阶振型对局部刚度变化比较敏感,但却难以精确测量;频响函数相对于模态数据包含更多的结构信息,但在理论推导和实际应用中比较复杂.可以说,动力指纹法对结构损伤的识别能力仍然有限.

模型修正法依赖于有限元模型(finite element model,简称 FEM).基于结构设计蓝图而构建的初始有限元模型往往在静动力响应上与实际结构之间存在着差异,因此,需要根据实际结构的静动力响应修正初始有限元模型,使得修正后的有限元模型能够如实地反映实际结构的力学响应、结构的损伤.最后,通过修正后有限元模型与基准模型之间的对比实现结构的损伤识别.通常,可以根据结构的动力响应如频率、模态振型、模态阻尼比等来修正有限元模型.Li 等人<sup>[26]</sup>设计的结构健康监测系统中采用了模型修正法,通过多次迭代分析,不断修正有限元模型.

模型修正法的主要优点在于其概念清晰,并可以广泛应用于大多数的工程问题.但是,在复杂的结构上运用模型修正法时,一些关键性问题如待修正参数过多、优化过程难收敛以及计算量过大等都容易出现.

神经网络用于损伤识别的基本原理是:选择对结构损伤敏感的参数作为输入,结构的损伤状态作为输出,建

立损伤分类训练样本集.将样本集送入神经网络进行训练,建立输入参数与损伤状态之间的映射关系.实际应用时,只需将待测结构相应的参数输入神经网络,即可得到其损伤状态信息.目前,用于结构损伤识别的神经网络模型多为前向神经网络,此外还有对偶传播神经网络、自回归神经网络、径向基神经网络、模糊神经网络等.例如,Zhou 等人<sup>[27]</sup>研究了基于自回归神经网络的结构损伤识别中如何避免错误警报,并在香港汀九大桥上进行了实验验证.

神经网络方法以其强大的非线性映射能力,对于复杂结构的损伤识别有很大优势,但是前期网络训练和学习的过程运算量相当大,且不同的桥梁需要分别训练,普适性差;应选取能够代表结构损伤状态的参数作为网络的输入,以提高网络对结构损伤的敏感性.另外,网络训练样本的代表性,也是关系到损伤识别精度的重要因素.

### 3 关键技术

随着现代传感技术、计算机与通信技术、信号分析与处理技术以及结构振动分析理论的迅速发展,基于无线传感器网络的桥梁结构健康监测系统已经成为国内外工程界和学术界关注的热点.无线健康监测系统通过多种类型的传感器实时监测获取桥梁的环境激励和结构响应等信息,然后采用信号分析处理技术提取桥梁的状态指标,并结合结构损伤识别技术对桥梁的健康状况做出评估,以保证桥梁的安全运营并为其维修养护提供科学依据.其中的关键技术主要包括以下几个方面.

#### 3.1 节点部署技术

由于经济等客观因素的制约,系统能够选用的传感器数量总是有限的.如何选择合适的测点部署有限数量的传感器以实现结构信息的最优采集,是桥梁健康监测中的关键技术之一.如果桥梁健康监测系统由计算机专业人员进行部署,由于他们缺乏丰富的桥梁检测与评估经验,设置的测点往往不甚合理,一方面造成资源浪费,另一方面导致关键数据的缺失进而影响评估结果的准确性.如果桥梁健康监测系统由土木工程专业人员进行部署,那么他们往往会忽略无线传感器网络自身的一些限制条件,如网络连通性、节点能耗等问题.因此,部署无线传感器网络时既要考虑网络特性,又要结合被监测桥梁的特点,综合考虑桥梁检测方面的知识来选择测点.

根据土木工程中的相关理论,FIM(fisher information matrix)是一种用于衡量部署位置品质的指标,而 EFI(effective independence method)是一种常用的节点部署方法<sup>[22,26,28,29]</sup>.因此,计算机专业人员考虑节点部署问题时,为了充分地满足土木工程方面的要求,往往需要考虑测点位置的 FIM 指标,并且结合使用 EFI 方法.

Li 等人<sup>[26]</sup>于 2010 年提出了结构健康监测应用中的节点部署问题,并且给出了一种结合土木工程要求和无线传感器网络特性的节点部署方法.如图 2 所示,作者在文献[30]提出的结构健康监测框架中增加了 SPEM(sensor placement using EFI method)模块和 CS(computer science)优化模块.这两个模块介于有限元模型模块和节点部署模块之间,用于选择合理的测点位置.SPEM 模块根据结构的模型信息(来自有限元模型)、待选测点位置集合以及实际的节点数目(来自 CS 优化模块),选出工程最优的测点位置及各位置的 FIM 值;CS 优化模块根据 SPEM 模块的输出,结合无线传感器网络的特点和具体的应用要求重新考虑待选测点位置集合及所需的节点数目.两个模块之间经过多次迭代得到最终的测点集合.

Bhuiyan 等人<sup>[29]</sup>于 2012 年提出了用于结构健康监测的无线传感器网络多目标节点部署方法,如图 3 所示,网络由 3 种节点组成:底层节点 LN、高层节点 HN 和冗余节点 RN.其中,LN 是普通的传感器节点,使用可调半径  $0 < r \leq R_c$  与相邻 LN 和 HN 通信;HN 是资源相对充足的传感器节点,使用半径  $R_c$  与 LN 通信,半径  $R_h$  与相邻 HN 和汇聚节点通信,并且  $R_h > R_c$ .RN 的功能与 LN 相似,主要部署在脆弱位置来提高网络的可靠性.设 3 种节点的数量分别为  $n_l, n_h, n_r$ ,那么有  $n_h < n_r < n_l$ .对于给定的候选测点个数  $M$  以及  $n_l, n_h, n_r$ ,采用三阶段方法 TPSP(three-phase sensor placement)构建网络:(1) 阶段 1:根据各位置的品质值和位置之间的距离部署 HN;(2) 阶段 2:根据各位置的品质值部署 LN;(3) 将 LN 与 HN 进行分组并保证网络的连通性.在某个 HN 的通信半径  $R_c$  范围内的 LN,以此 HN 为根节点构成一棵连通树(HN-LN 树);(4) 阶段 3:采用 PRSP 算法部署 RN.另外,对于网络中的节点失效,由于 HN 存储了 HN-LN 树中所有 LN 和相邻 HN 的信息,因此能够及时发现网络中的节点失效及丢包现象,进而通过算法维持本地网络的连通性.

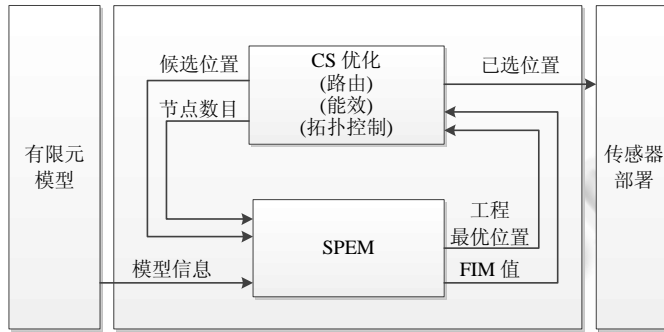


Fig.2 Sensor placement using EFI method

图 2 使用 EFI 的节点部署方法

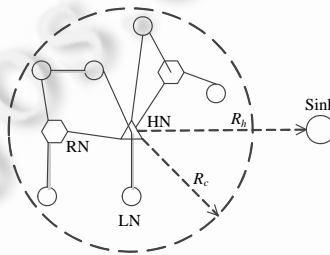


Fig.3 Sensor placement with multiple objectives

图 3 多目标节点部署方法

以上所述的节点部署方法都存在一定的局限性:SPEM 仅适用于有限元分析法,但是现有的大多数桥梁往往不具备精确的有限元模型;而 TPSP 的三阶段过程相对较为复杂.另一方面,这两种方法都是从结构健康监测这个大的方向出发考虑节点部署问题,并且两者都通过在塔类建筑之上实验来验证其效果,而桥梁与这些结构之间存在一定的差异性.因此,设计一种适用于桥梁结构的传感器节点部署方法,使网络既能满足土木工程中桥梁监测的要求,又能充分利用无线传感器网络本身的特性,是未来值得研究的问题

### 3.2 能量管理技术

无线传感器网络用于桥梁监测时,往往要求运行较长的时期.但是,传感器节点所带电池的能量通常十分有限,而人工更换电池的方式耗时耗力甚至无法实现.因此,在设计整个网络的过程中,应当充分考虑节点能量的有效性,最大化网络的生命周期<sup>[31-33]</sup>.

传感器节点消耗能量的模块包括传感器模块、处理器模块和无线通信模块.随着集成电路工艺的发展,传感器模块和处理器模块的功耗变得很低,而将近 80% 的节点能量消耗在无线通信模块上<sup>[34]</sup>.因此,为了有效减少节点发送和接收的数据,无线传感器网络中普遍采用 duty-cycling 机制和网内信息处理方法.Duty-cycling 机制通过调度传感器节点的睡眠/唤醒状态来节省能量,而网内信息处理主要通过数据压缩和数据融合技术来实现.

Xu 等人于 2004 年设计的结构响应数据收集系统 Wisden<sup>[35]</sup>中采用了数据压缩的方法,其主要过程如图 4 所示.传感器节点首先对收集到的振动数据进行阈值判断,将达到一定阈值的数据存下并使用双正交 CDF(2,2) 进行小波分解,并将结果(无损数据)存入 flash;数据传输之前从 flash 中读出并进行量化、阈值分割、游程编码、封装,最后发送出去.当基站处的数据收集人员需要查看原始数据或者其余细节时,节点根据 flash 中的数据进行二次发送.根据作者的实验分析,这种方式所需的计算时间较少且所需的存储容量也不大;另外,当使用 4 比特进行量化时,能够达到 20 倍的压缩比和 3.1 的均方根误差.

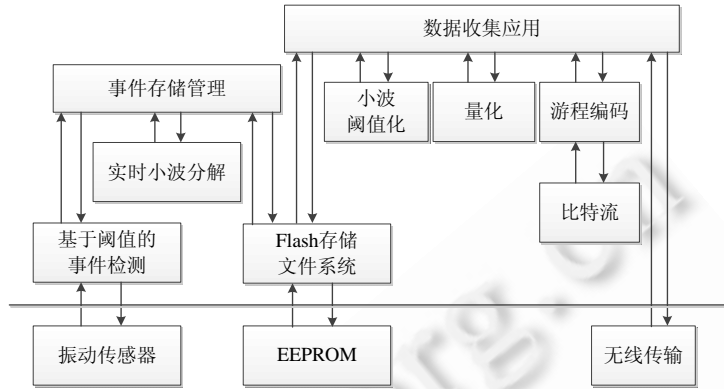


Fig.4 Data compression of Wisden

图 4 Wisden 数据压缩策略

Kundu 等人于 2008 年设计了一种能量已知的无线桥梁监测系统<sup>[36]</sup>,同时采用了 duty-cycling 和数据融合机制.传感器节点沿着桥梁方向组成线性拓扑结构,并且在两端分别设有两个基站 B1,B2.为了有效地节省能量,每个节点有两种状态:ACTIVE 和 SLEEP.当节点处于 ACTIVE 状态时,所有功能都打开;当节点处于 SLEEP 状态时,使用一个 wake-up 天线来监测信道,当天线接收到 wake-up 信号时就产生中断来唤醒节点.数据的传输过程从一个基站(B1)开始,首先发送 wake-up 信号唤醒第 1 个节点,然后采用 S-MAC 机制(RTS/CTS/DATA/ACK 四次握手)<sup>[37]</sup>进行数据传输;每个节点收到前一个节点的数据包后融合自己的数据,然后采用同样的方式发送至下一个节点,最终所有数据到达另一端的基站(B2).为了有效地平衡节点能量,每次按照与上一次不同的方向进行数据传输.

Xiao 等人于 2010 年提出了一种用于桥梁诊断的分布式数据融合监测系统(distributed data aggregation active monitoring system,简称 DAMS)<sup>[24]</sup>,利用网络中功能较强的路由器节点进行数据融合.传感器节点将数据发送至路由器,路由器等待一定时间收集子节点的数据后,将所有收到的数据与自己的数据融合之后进行发送.通过这种方式,有效地减少了数据发送次数,达到减少能耗的目的.

以上各个系统中所采用的减少节点能耗的方式都有一定的局限性:Xu 等人因为采用了小波压缩的方法,导致数据传输存在较大的时延;Kundu 等人因为采用了 duty-cycling 机制而不能进行连续的桥梁监测,并且其数据融合方式仅仅适用于线性拓扑网络,同时存在较大的数据传输时延;而 Xiao 等人所采用的数据融合方式仅仅适用于树形拓扑网络.因此,如何在不影响桥梁健康监测系统正常工作的情况下,有效地减少节点能量消耗、延长整个网络的工作寿命,是一个值得研究和探索的问题.另一方面,将能量收集技术<sup>[8,16]</sup>和无线充电技术<sup>[38]</sup>应用于桥梁健康监测系统中,也将成为今后研究的热点问题.

### 3.3 时间同步技术

节点之间的时间同步,是桥梁健康监测系统的關鍵性技术之一<sup>[6,33]</sup>,是进行后期数据分析处理和桥梁健康评估的前提条件.传感器节点的本地时钟是通过晶振的中断计数实现的,初始计时时刻的不同和晶振的频率误差,都会导致节点之间的本地时钟不同步.即使各个节点在初始时刻达到时间同步,也会由于晶振频率随着温度、湿度等外界环境的变化产生波动而导致节点间时钟产生偏差<sup>[39,40]</sup>.因此,需要通过网络节点之间的时间信息交换来实现同步.

现有的桥梁健康监测系统中,有些采用了无线传感器网络中较为成熟的时间同步算法,而有些则根据具体的应用场景设计了新的时间同步算法.

金门大桥健康监测系统<sup>[6]</sup>、BSHM-WSN<sup>[12]</sup>等系统中采用了泛洪时间同步协议(the flooding time



synchronization protocol,简称 FTSP)<sup>[41]</sup>.FTSP 算法由 Maroti 等人于 2004 年提出,使用单个广播消息实现发送节点与接收节点之间的时间同步.其实现过程为:(1) 发送节点在完成 SYNC 字节发射后给时间同步消息标记时间戳  $t$  并发射出去,时间戳  $t$  为当前时间减去包含时间戳  $t$  的消息数据部分的发射时间,消息数据部分的发射时间通过数据长度和发射速率得出;(2) 接收节点记录 SYNC 字节最后到达时间  $t_r$ ,并计算位偏移;在收到完整消息后,接收节点计算位偏移产生的时间延迟  $t_b$ ,这通过偏移位数与接收速率得出;(3) 接收节点计算与发送节点间的时钟偏移量: $offset=t_r-t_b-t$ ,然后调整本地时钟达到时钟同步.FTSP 算法对时钟漂移进行了线性回归分析.FTSP 算法考虑到在一定时间范围内节点的时钟晶振频率是稳定的,因此,节点间时钟偏移量与时间成线性关系;通过发送节点周期性广播时间同步消息,接收节点取得多个数据对( $time,offset$ ),并构造最佳拟合直线  $L(time)$ .利用回归直线  $L(time)$ ,在误差允许的时间间隔内,节点可直接通过  $L(time)$  计算某一时间点节点间的时钟偏移量,从而减少了消息的发送次数,并有效降低了系统的能量开销.

Xu 等人在 Wisden<sup>[35]</sup>中采用了一种轻量级的数据同步方法,其基本思想是:所有数据只需要在基站取得一致的时间戳,即可进行后续的分析处理.该方法在数据包中增加一个停留时间(residence time)域,节点使用本地时钟计算数据包在本地停留的时间,并在发送时刻将其写入停留时间域中.基站收到数据包时记录本地时间,通过减去停留时间域中的值,就能得到采样开始的时间.该方法较多地受到时钟漂移的影响,根据作者的实验结果,漂移时间与停留时间存在线性关系且漂移率约为 10ppm,表明数据在网络中停留 15 分钟导致的累积时间误差将达到 10ms.因此,该方法仅适用于规模较小、数据传输及时的网络.

Whelan 等人于 2009 年设计的实时无线振动监测系统<sup>[19]</sup>中使用了 WSS 硬件,其内置的 32.768kHz 的晶体振荡器能够为每个节点提供精确而稳定的时钟.另一方面,节点之间组成星型拓扑结构,系统通过一个广播命令就能使得所有节点同时开始采样.当然,这种情况仅适用于范围较小的星型结构网络中.

Xiao 等人于 2012 年提出了一种通过广播消息即可完成的分布式多跳低代价时间同步算法(distribution multi-hop low cost time synchronization,简称 DMLTS)<sup>[42]</sup>,它主要针对树形拓扑结构的桥梁监测系统,同步过程从根节点开始逐层向下进行.如图 5 所示,首轮同步过程由根节点开始,同步子节点 1~节点 3.根节点广播一个同步包并记录发包时间  $t_1$ ,同步包中含有选定的消息节点标号(如节点 1),假定所有子节点同时收到这个包,节点 1 记录收包时间  $T_{2,Node1}$ ,并在一个较短时间内返回一个包,其中包含  $T_{2,Node1}$  和发包的时间  $T_{3,Node1}$ ,根节点记录收包时间  $t_4$ ,并根据包内的  $T_{2,Node1},T_{3,Node1}$  计算得到节点 1 的时间偏差:

$$O_{R,Node1} = \frac{(T_{2,Node1} - t_1) - (t_4 - T_{3,Node1})}{2}.$$

然后,根节点广播一个包含  $T_{2,Node1},O_{R,Node1}$  的包,节点 1 根据  $O_{R,Node1}$  调整本地时钟与根节点同步,其余子节点同样可以根据包中的信息进行同步,例如对于节点 2,其时间偏差为

$$O_{R,Node2} = O_{R,Node1} - (T_{2,Node1} - T_{2,Node2}).$$

所有子节点同步之后,在以自己为根的子树中采用同样的方式进行同步.当然,考虑到节点之间能量的均衡性,每次同步过程中需要根据节点能量、历史记录和 RSSI 值选择合适的消息节点.

以上各个系统中所采用的时间同步方法都存在一些不足之处.例如:FTSP 算法中,节点需要对收到的多个数据对进行线性回归计算,因而对于硬件的要求相对较高;而 Xu,Whelan,Xiao 等人所提出的时间同步方法仅适用于相应系统所采用的拓扑结构,无法得到有效的推广.另一方面,考虑时间同步误差对于结构健康监测系统的影响<sup>[43]</sup>,必须把时间同步误差控制在 120 $\mu$ s 以内<sup>[44]</sup>,而这些方法仍然存在一定的差距.因此,如何设计一种具有通用性并且能够达到系统精度要求的时间同步算法,切实地提高桥梁健康监测系统中节点之间的时间同步性,是需要进一步深入研究的问题.

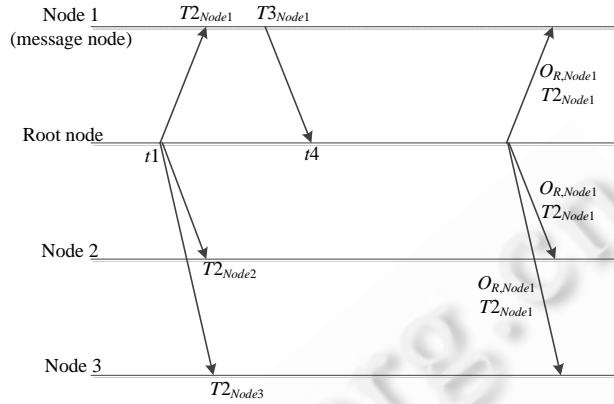


Fig.5 DMLTS

图 5 DMLTS 示意图

#### 4 总结与展望

相比传统人工检查方式和有线网络监测方式,无线传感器网络因其安装方便、维护成本低和部署灵活等特点,应用于桥梁健康监测领域具有一定的优势.因此,基于无线传感器网络的桥梁结构健康监测系统已经成为国内外学术界和工程界关注的热点.本文总结了无线传感器网络在桥梁健康监测中的应用,结合一些具体的实例分析了其中的关键技术.可以看出:在实际的工程应用中,仍然存在一些问题有待进一步研究.我们将其概括为以下几点.

##### (1) 传感器的选择与部署

选择传感器时,需要根据实际的测量需求并结合经济预算确定具体类型及相应的数量.具体来说,除了测量精度、测量范围这些技术指标外,传感器的可靠性、耐久性和价格也是需要考虑的因素.现有的大部分桥梁健康监测系统没有考虑节点部署的合理性,造成了投资浪费或者关键数据的缺失,影响整个系统的性能.因此,传感器节点部署方法是值得深入研究的问题.

##### (2) 健康监测系统的寿命

健康监测系统的寿命依赖于各个节点的剩余能量,因此,节点能量的有效性是设计系统过程中应当充分考虑的问题.已有的系统虽然采用了 duty-cycling、数据压缩、数据融合等方式减少节点的能量消耗,但是都存在一定的局限性.因此,如何在不影响桥梁健康监测系统正常工作的情况下,合理地利用每个节点的能量,采用能量收集和无线充电等技术及时补充节点能量,是值得研究和探索的方向.

##### (3) 数据的存储与处理

桥梁健康监测系统每天都将产生大量数据,如果不能及时进行处理,必将造成数据灾难.因此,一方面,对于传感器实时收集的数据,需要选用合适的算法及时分析处理;另一方面,需要制定合理的数据存储策略,定期地将数据库中的冗余数据进行清除.

##### (4) 结构损伤识别的效果

测量数据的不完整、不精确以及现有损伤识别方法本身的局限性,制约了结构损伤识别的效果,进而影响系统评估结果的准确性.因此,如何提高测量数据的完整性与精确性,是需要进一步研究的方向.另一方面,需要积极研究新的高灵敏度指标来提高损伤识别的效果.

总的看来,无线传感器网络应用于桥梁监测还存在许多问题,这些问题相互联系、相互制约,构成了未来研究的丰富内容.但是我们可以预计:未来结构健康监测系统将在桥梁管理中发挥越来越大的作用,桥梁数字化的时代正在来临.

**References:**

- [1] Lynch JP, Loh KJ. A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring. *The Shock and Vibration Digest*, 2006,38(2):91–128. [doi: 10.1177/0583102406061499]
- [2] Farrar CR, Keith Worden K. An introduction to structural health monitoring. *Philosophical Trans. of the Royal Society*, 2007,365: 303–315. [doi: 10.1098/rsta.2006.1928]
- [3] Harms T, Sedigh S, Bastianini F. Structural health monitoring of bridges using wireless sensor networks. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 2010,13(6):14–18. [doi: 10.1109/MIM.2010.5669608]
- [4] Wang P, Yan Y, Tian GY, Bouzid O, Ding ZG. Investigation of wireless sensor networks for structural health monitoring. *Journal of Sensors*, 2012:1–7. [doi: 10.1155/2012/156329]
- [5] Zhou GD, Yi TH. Recent developments on wireless sensor networks technology for bridge health monitoring. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013:1–33.
- [6] Kim S, Pakzad S, Culler D, Demmel J. Health monitoring of civil infrastructures using wireless sensor networks. In: *Proc. of the 6th Int'l Conf. on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*. New York: ACM Press, 2007. 254–263. [doi: 10.1109/IPSN.2007.4379685]
- [7] Xiao H, Gong YX, Ogai H, Zhang J, Zou XH, Otawa T, Tsuji T. A data collection system in wireless network integrated WSN and zigbee for bridge health diagnosis. In: *Proc. of the Society of Instrument and Control Engineers (SICE) Annual Conf.* 2011. 2024–2028.
- [8] Chae MJ, Yoo HS, Kim JY, Cho MY. Development of a wireless sensor network system for suspension bridge health monitoring. *Automation in Construction*, 2012,21:237–252. [doi: 10.1016/j.autcon.2011.06.008]
- [9] Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 2002,40(8): 102–114. [doi: 10.1109/MCOM.2002.1024422]
- [10] Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor network survey. *Computer Networks*, 2008,52(12):2292–2330. [doi: 10.1016/j.comnet.2008.04.002]
- [11] Pakzad SN, Fennes GL, Kim S, Culler DE. Design and implementation of scalable wireless sensor network for structural monitoring. *Journal of Infrastructure Systems*, 2008,14:89–101. [doi: 10.1061/(ASCE)1076-0342(2008)14:1(89)]
- [12] Dai ZC, Wang SM, Yan ZH. BSHM-WSN: A wireless sensor network for bridge structure health monitoring. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Modelling, Identification and Control*. 2012. 24–26.
- [13] Whelan MJ, Janoyan KD. Design of a robust, high-rate wireless sensor network for static and dynamic structural monitoring. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2009,20:849–863. [doi: 10.1177/1045389X08098768]
- [14] Zhao ZZ, Sun JB, Fei XT, Liu W, Cheng XH, Wang ZG, Yang HZ. Wireless sensor network based cable tension monitoring for cable-stayed bridges. In: *Proc. of the 14th Int'l Conf. on Advanced Communication Technology (ICACT)*. 2012. 527–532.
- [15] Reyer M, Hurlbauss S, Mander J, Ozbulut OE. Design of a wireless sensor network for structural health monitoring of bridges. In: *Proc. of the 5th Int'l Conf. on Sensing Technology (ICST)*. 2011. 515–520. [doi: 10.1109/ICSensT.2011.6137033]
- [16] Jang S, Jo H, Cho S, Mechitov K, Rice JA, Sim SH, Jung HJ, Yun CB, Spencer BF, Agha G. Structural health monitoring of a cable-stayed bridge using smart sensor technology: Deployment and evaluation. *Smart Structures and Systems*, 2010,6(5-6): 439–459. [doi: 10.12989/sss.2010.6.5\_6.439]
- [17] Chebrolu K, Raman B, Mishra N. BriMon: A sensor network system for railway bridge monitoring. In: *Proc. of the 6th Int'l Conf. on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys)*. New York: ACM Press, 2008. 2–14. [doi: 10.1145/1378600.1378603]
- [18] Whelan MJ, Gangone MV, Janoyan KD. Highway bridge assessment using an adaptive real-time wireless sensor network. *IEEE Sensors Journal*, 2009,9(11):1405–1413. [doi: 10.1109/JSEN.2009.2026546]
- [19] Whelan MJ, Gangone MV, Janoyan KD, Jha R. Real-Time wireless vibration monitoring for operational modal analysis of an integral abutment highway bridge. *Engineering Structures*, 2009,31:2224–2235. [doi: 10.1016/j.engstruct.2009.03.022]
- [20] Gangone MV, Whelan MJ, Janoyan KD. Deployment of a dense hybrid wireless sensing system for bridge assessment. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2011,7(5):369–378. [doi: 10.1080/15732470802670842]
- [21] Lynch JP, Sundararajan A, Law KH, Kiremidjian AS, Carryer E. Embedding damage detection algorithms in a wireless sensing unit for operational power efficiency. *Smart Materials and Structures*, 2004,13(4):800–810. [doi: 10.1088/0964-1726/13/4/018]

- [22] Bhuiyan MZA, Cao JN, Wang GJ. Deploying wireless sensor networks with fault tolerance for structural health monitoring. In: Proc. of the 8th IEEE Int'l Conf. on Distributed Computing in Sensor Systems. 2012. 194–202. [doi: 10.1109/DCOSS.2012.38]
- [23] Kottapalli VA, Kiremidjian AS, Lynch JP, Carryer E, Kenny TW, Law KH, Lei Y. Two-Tiered wireless sensor network architecture for structural health monitoring. *Smart Structures and Materials*, 2003,5057:8–19. [doi: 10.1117/12.482717]
- [24] Xiao H, Li TS, Ogai H, Zou XH, Ottawa T, Umeda S, Tsuji T. The health monitoring system based on distributed data aggregation for WSN used in bridge diagnosis. In: Proc. of the Society of Instrument and Control Engineers (SICE) Annual Conf. 2010. 2134–2138.
- [25] Weng JH, Loh CH, Lynch JP, Lu KC, Lin PY, Wang Y. Output-Only modal identification of a cable-stayed bridge using wireless monitoring systems. *Engineering Structures*, 2008,30:1820–1830. [doi: 10.1016/j.engstruct.2007.12.002]
- [26] Li B, Wang D, Wang F, Ni YQ. High quality sensor placement for SHM systems: Refocusing on application demands. In: Proc. of the 29th IEEE Conf. on Information Communications (INFOCOM). New York: IEEE Press, 2010. 650–658. [doi: 10.1109/INFOCOM.2010.5462159]
- [27] Zhou HF, Ni YQ, Ko JM. Structural damage alarming using auto-associative neural network technique: Exploration of environment-tolerant capacity and setup of alarming threshold. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011,25:1508–1526. [doi: 10.1016/j.ymsp.2011.01.005]
- [28] Meo M, Zumpano G. On the optimal sensor placement techniques for a bridge structure. *Engineering Structures*, 2005,27(10): 1488–1497. [doi: 10.1016/j.engstruct.2005.03.015]
- [29] Bhuiyan MZA, Wang GJ, Cao JN. Sensor placement with multiple objectives for structural health monitoring in WSNs. In: Proc. of the IEEE 14th Int'l Conf. on High Performance Computing and Communications (HPCC). New York: IEEE Press, 2012. 699–706. [doi: 10.1109/HPCC.2012.99]
- [30] Ni YQ, Xia Y, Liao WY, Ko JM. Technology innovation in developing the structural health monitoring system for Guangzhou new TV tower. *Structural Control and Health Monitoring*, 2009,16:73–98. [doi: 10.1002/stc.303]
- [31] Anastasi G, Conti M, Francesco MD, Passarella A. Energy conservation in wireless sensor networks: A survey. *Ad Hoc Networks*, 2009,7:537–568. [doi: 10.1016/j.adhoc.2008.06.003]
- [32] Alippi C, Anastasi G, Francesco MD, Roveri M. Energy management in wireless sensor networks with energy-hungry sensors. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, 2009,12(2):16–23. [doi: 10.1109/MIM.2009.4811133]
- [33] Araujo A, García-Palacios J, Blesa J, Tirado F, Romero E, Samartín A, Nieto-Taladriz O. Wireless measurement system for structural health monitoring with high time-synchronization accuracy. *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 2012, 61(3):801–810. [doi: 10.1109/TIM.2011.2170889]
- [34] Kimura N, Latifi S. A survey on data compression in wireless sensor networks. In: Selvaraj H, Srimani PK, eds. Proc. of the Int'l Conf. on Information Technology: Coding and Computing (ITCC). 2005. 8–13. [doi: 10.1109/ITCC.2005.43]
- [35] Xu N, Rangwala S, Chintalapudi KK, Ganesan D, Broad A, Govindan R, Estrin D. A wireless sensor network for structural monitoring. In: Stankovic JA, Arora A, Govindan R, eds. Proc. of the 2nd ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys). New York: ACM Press, 2004. 13–24. [doi: 10.1145/1031495.1031498]
- [36] Kundu S, Roy S, Pal A. A power-aware wireless sensor network based bridge monitoring system. In: Proc. of the 16th Int'l Conf. on Networks (ICON). 2008. 1–7. [doi: 10.1109/ICON.2008.4772584]
- [37] Ye W, Heidemann J, Estrin D. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2004,12(3):493–506. [doi: 10.1109/TNET.2004.828953]
- [38] Mascareñas D, Flynn E, Todd M, Park G, Farrar C. Wireless sensor technologies for monitoring civil structures. *Sound and Vibration*, 2008,4:16–20.
- [39] Sundararaman B, Buy U, Kshemkalyani AD. Clock synchronization for wireless sensor networks: A survey. *Ad Hoc Network*, 2005, 3(3):281–323. [doi: 10.1016/j.adhoc.2005.01.002]
- [40] Rhee IK, Lee J, Kim J, Serpedin E, Wu YC. Clock synchronization in wireless sensor networks: An overview. *Sensors*, 2009,9: 56–85. [doi: 10.3390/s90100056]

- [41] Maroti M, Kusy B, Simon G, Ledeczi A. The flooding time synchronization protocol. In: Stankovic JA, Arora A, Govindan R, eds. Proc. of the 2nd ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys). New York: ACM Press, 2004. 39–49. [doi: 10.1145/1031495.1031501]
- [42] Xiao H, Lu C, Ogai H. A multi-hop low cost time synchronization algorithm for wireless sensor network in bridge health diagnosis system. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications (RTCSA). 2012. 392–395. [doi: 10.1109/RTCSA.2012.65]
- [43] Sim SH, Spencer BF, Zhang M, Xie H. Automated decentralized modal analysis using smart sensors. Structural Control and Health Monitoring, 2010,17:872–894. [doi: 10.1002/stc.348]
- [44] Sazonov E, Krishnamurthy V, Shilling R. Wireless intelligent sensor and actuator network—A scalable platform for time-synchronous applications of structural health monitoring. Structural Health Monitoring, 2010,9(5):465–476. [doi: 10.1177/1475921710370003]



俞姝颖(1989—),女,江苏苏州人,硕士生,主要研究领域为无线传感器网络.



戴海鹏(1985—),男,博士生,CCF 会员,主要研究领域为无线传感器网络,无线充电技术.



吴小兵(1979—),男,博士,讲师,主要研究领域为物联网技术.



洪卫星(1971—),男,高级工程师,主要研究领域为软件应用,无线物联网技术,大数据分析,云计算平台.



陈贵海(1963—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 会员,主要研究领域为无线网络,P2P 网络,并行计算,算法设计.