



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101408487 B

(45) 授权公告日 2011.06.29

(21) 申请号 200810155659.9

H04L 29/08(2006.01)

(22) 申请日 2008.10.28

G01N 19/08(2006.01)

(73) 专利权人 常州赛杰电子信息有限公司

审查员 李蓓

地址 213164 江苏省常州市武进区常武中路  
801号科技城大楼2306

专利权人 南京大学  
江苏省长江公路大桥建设指挥部

(72) 发明人 沈庆宏 吉林 张巍 冯兆祥  
丁华平 陈策 徐春红 阮静  
都思丹

(74) 专利代理机构 南京天翼专利代理有限责任  
公司 32112

代理人 汤志武 王鹏翔

(51) Int. Cl.

G01M 99/00(2011.01)

权利要求书 2 页 说明书 7 页 附图 4 页

(54) 发明名称

基于无线传感器网络的桥梁结构安全状态应  
急监测及预警方法与系统

(57) 摘要

基于无线传感器网络的桥梁结构安全状态应  
急监测及预警方法，采用传感器模块安装在桥梁  
两侧或底部受力点或梁、柱受力支承部位的网络，  
用来采集桥梁温度、湿度、震动幅度、梁、柱的受力  
应变数据，以及桥梁结构变化的频度和幅度进行  
数据采集，传感器模块通过无线通信模块无线与  
汇集节点和基站节点进行收发，传送采集并进行  
处理过的数据，无线收发汇集节点连接基站节点，  
基站节点通过网络连接计算机；采用无线传感器  
网络实现对桥梁结构安全状态应急监测和预警，  
传感系统对数据经过处理系统分解、变换以获取  
所需要的参数后通过网络连接计算机后，利用可  
实现诊断功能的各种软硬件对接收到的数据进行  
诊断。

1. 基于无线传感器网络的桥梁结构安全状态应急监测及预警方法,采用传感器模块安装在桥梁两侧或底部受力点或梁、柱受力支承部位的网络,用来采集桥梁温度、湿度、震动幅度、梁、柱的受力应变数据,以及桥梁结构变化的频度和幅度数据,传感器模块通过无线通信模块无线与汇集节点和基站节点进行收发,传送采集并进行处理过的数据,无线收发汇集节点连接基站节点,基站节点通过网络连接计算机;其特征是采用无线传感器网络实现对桥梁结构安全状态应急监测和预警,传感系统对数据经过处理系统分解、变换以获取所需要的参数后通过网络连接计算机后,利用可实现诊断功能的各种软硬件对接收到的数据进行诊断,包括结构是否受到损伤以及损伤位置、损伤程度;无线传感器网络如下构成:监测桥梁的传感器节点每2-6个组成一个无线传感器节点群组,每一个群组有一个汇集节点,该汇集节点完成群组内传感器节点的数据汇集功能,且传感器节点与且仅与群组内汇集节点进行通信,汇集节点和基站节点不接传感器;所有构成一个节点群组的汇集节点组成1个群组,1个群组时直接与基站节点通信,多个群组时通过群组内的汇集节点与基站节点通信,基站节点将汇集节点的监测数据通过网络连接计算机;

桥梁结构安全状态应急监测和预警采用分层结构的方法,分层结构的方法由数值计算函数、桥梁结构安全状态应急监测及预警的中间件和定位损伤识别算法给出桥梁结构安全状态;分层结构的方法应用于密集布置的智能传感器网络;临近的汇集节点间共享数据,利用空间信息;数据只在有限的临近汇集节点间共享,总的数据传输量仍然保持适度;算法扩展到密集布置传感器的大型结构上;

分层结构的方法采用的数值方法是奇异值分解、复特征值求解、快速傅立叶变换或快速排序和复数矩阵逆;桥梁结构安全状态应急监测及预警的中间件是数据处理、可靠的通信和同步传感;定位损伤识别的算法是环境激振技术NExT,特征系统实现算法ERA和损伤定位矢量法;并采用多尺度方法损伤识别方法,对加速度与应变信号同时进行分析,这种方法融合了整体结构信息和局部结构响应。

2. 基于无线传感器网络的桥梁结构安全状态应急监测及预警系统,其特征是无线传感器节点由传感器模块、数据采集模块、微处理器模块构成的数据处理和控制模块、无线通信模块和电源模块组成;数据采集模块用来进行外部传感器信号的接收和转换;数据处理和控制模块用来进行节点设备控制、任务调度、能量计算、功能协调等;无线通信模块负责与其他传感器节点进行无线通信,交换控制信息和收发采集数据;电源模块为传感器节点提供运行所需的能量;电源管理模块、连接电源管理模块的电源模块和无线通信模块;无线通信模块包括射频收发模块、功率放大器、射频开关和天线,微处理器模块与DAC模块相连接,传感器输出接DAC模块,电源管理模块分别与传感器模块、微处理器、射频收发模块和功率放大模块相连接,微处理器分别连接射频收发模块、DAC模块和射频开关,功率放大模块连接射频收发模块,并通过射频开关连接收发天线;传感器模块用来采集桥梁温度、湿度、震动幅度等数据;传感器节点模块从数量上达到5至30个,利用多个传感器可以有效地构建一个三维立体的防护检测网络;每个传感器节点模块均带有三轴加速度传感器、应变片、温度湿度传感器以及风速风压传感器和四通道16位A/D转换器;加速度传感器用以桥梁振动测试与分析,温湿度传感器用来测量加速度传感器所处位置的环境温湿度用于进行温湿度补偿;传感器节点模块从数量上达到5至30个,传感器节点模块每2-6个组成一个传感器节点群组,每一个群组有一个汇集点,该汇集点完成群组内传感器节点的数据汇集

功能，且传感器节点跟且仅跟群组内汇集节点进行通信，汇集节点和基站节点不接传感器；传感器节点模块通过无线通信模块无线与汇集节点和基站节点进行收发，传送采集并进行处理过的数据，无线收发汇集节点连接基站节点，基站节点通过网络连接计算机；所有群组的汇集节点，组成1个或者多个群组，直接与1个群组的基站节点通信，或多个群组时通过群组内的汇集节点与基站节点通信，基站节点汇集数据，将汇集后的数据通过节点附带的USB接口，传输到USB口至网口的转换装置上，数据通过网络可以就地使用计算机采集、存储和处理或通过无线局域网收发设备WLAN，进行远程传输，以便于远程计算机进行数据采集、数据存储和数据处理；无线收发汇集节点和基站节点由微处理器PXA271作为微处理器模块的芯片。

# 基于无线传感器网络的桥梁结构安全状态应急监测及预警方法与系统

## 一、技术领域：

[0001] 本发明涉及桥梁结构安全状态的应急监测和预警控制技术，具体涉及一种智能无线传感器网络的桥梁结构安全状态应急监测和预警系统。

## [0002] 二、背景技术：

[0003] 近年来大跨桥梁在遭受地震、洪水、飓风、爆炸等自然或人为灾害时，以及由于材料性能的退化带来的安全问题，已经引起人们的广泛关注。人们意识到桥梁并不是一个一次性投入后就可以放任不管的公共交通基础设施，它的健康状况同样关乎着人民的生命和国家经济的安全。一般桥梁结构损伤可以分为两类：突发事件（强烈地震、爆炸、撞船等）引起的损伤，和逐渐发展的累积损伤。前者的发生时间甚至损伤位置是已知的，因此可以立即临时封桥，在有限时间内完成检查、维修和加固。累积损伤则不然，累积损伤的初期并不危及安全，发展到一定程度后桥梁结构的抗力降低到一定限值，就会引起重大事故，我国近几年的塌桥事故多属于这种损伤。但事先不可能知道在什么时候抗力降低到某个限值，而桥梁结构在露天工作，并承受疲劳荷载，所以累积损伤（疲劳、锈蚀）是桥梁的重要损伤形式。如果用封桥检查的办法对付累积损伤，则桥梁永远处于封桥状态，导致桥梁根本不能使用。目前，随着传感器技术、电子技术的发展，振动、应变、负载变化等力、温度、电、磁、光等多种信号的采集与处理。并已在工程中得到了应用，200710132811.7070930 嵌入式旋转机械运行监控保护装置与方法，涉及嵌入式现场总线协议接口装置和实现方法，将仪表或设备与 PROFIBUS 总线连接，实现 Profibus 现场总线中 DP 从站的通讯功能。该接口模块一端通过双口 RAM、或 TTL 电平的异步串行口，与 8 位或 16 位微处理器为智能控制器交换数据，可嵌入智能仪表设备的电路。另一端是标准 Profibus-DP 从站接口，使设备或仪表作为 Profibus-DR 从站接入总线与其他设备通讯。本发明用于高速、运动控制装置的 Profibus 接口，如变频器、伺服定位控制器等，或用于变频器、电机启动保护装置、高低压电器、现场测量设备及仪表等。

[0004] 对桥梁的监测可以采用传感器技术和动态测试技术，以信号处理的方法进行，但对付累积损伤的传统办法是人工检查，但人工检查的周期相对很长，效率低，难以保证桥梁结构的安全。利用传统的传感器和测量监控设备对桥梁健康进行监测需要在整个桥面上铺设信号和供电电缆，不仅浪费资源而且铺设起来工程复杂庞大，使得系统安装成本、维护成本都很高。目前未有对桥梁结构安全状态应急监测和预警方法与系统

## [0005] 三、发明内容：

[0006] 本发明的目的在于提供一种易于安装维护，覆盖范围广和测量精度高的桥梁结构安全状态应急监测和预警系统。采用无线数据传输方式，便于桥梁维护使用单位，快速地进行系统安装调试，进入运行状态，无需有线电缆和前期线缆敷设。当检测任务完成后，可以快速地拆卸系统设备，以便于下一次布设使用。该系统的特点是移动性、安装便捷、可以反复安装拆卸，使用灵活。

[0007] 本发明的目的是这样实现的：基于无线传感器网络的桥梁结构安全状态应急监测

及预警方法,其特征是采用传感器模块安装在桥梁两侧或底部受力点或梁、柱受力支承部位的网络,用来采集桥梁温度、湿度、震动幅度、梁、柱的受力应变数据,以及桥梁结构变化的频度和幅度进行数据采集,传感器模块通过无线通信模块无线与汇集节点和基站节点进行收发,传送采集并进行处理过的数据,无线收发汇集节点连接基站节点,基站节点通过网络连接计算机;

[0008] 采用无线传感器网络实现对桥梁结构安全状态应急监测和预警,传感系统对数据经过处理系统分解、变换以获取所需要的参数后通过网络连接计算机后,利用可实现诊断功能的各种软硬件对接收到的数据进行诊断,包括结构是否受到损伤以及损伤位置、损伤程度;

[0009] 采用多尺度方法损伤识别方法,对加速度与应变信号同时进行分析,这种方法融合了整体结构信息(加速度)和局部结构响应(应变)。

[0010] 无线传感器网络如下构成:监测桥梁的传感器节点每2-6个组成一个无线传感器节点群组,每一个群组有一个汇集节点,该汇集节点完成群组内传感器节点的数据汇集功能,且传感器节点与且仅与群组内汇集节点进行通信,汇集节点和基站节点不接传感器。所有群组的汇集节点,组成1个或者多个群组,直接与基站节点通信(1个群组),或通过群组内的汇集节点与基站节点通信(多个群组),基站节点将汇集节点的监测数据通过网络连接计算机,送到监控中心,并且计算机系统在异常情况下进行报警,监测人员可随时了解桥梁运行情况,达到结构安全状态应急监测及预警的目的。

[0011] 桥梁结构安全状态应急监测和预警系统采用分层结构的方法,分层结构包括数值计算函数、中间件和损伤识别算法给出桥梁结构安全状态。

[0012] 分层结构的方法采用的数值方法有奇异值分解、复特征值求解、快速傅立叶变换、快速排序和复数矩阵逆。桥梁结构安全状态应急监测及预警的中间件包括:数据处理、可靠的通信和同步传感。定位损伤识别的算法包括环境激振技术(NEXT),特征系统实现算法(ERA)和损伤定位矢量法。

[0013] 分层结构的方法应用于密集布置的智能传感器网络。临近的汇集节点间可以共享数据,充分利用了空间信息。由于数据只在有限的临近汇集节点间共享,总的数据传输量仍然保持适度;算法可以扩展到密集布置传感器的大型结构上。

[0014] 无线传感器节点由数据采集模块、微处理器模块构成的数据处理和控制模块、无线通信模块和电源模块组成;数据采集模块用来进行外部传感器信号的接收和转换;数据处理和控制模块用来进行节点设备控制、任务调度、能量计算、功能协调等;无线通信模块负责与其他传感器节点进行无线通信,交换控制信息和收发采集数据;电源模块为传感器节点提供运行所需的能量;电源管理模块、连接电源管理模块的电源模块和无线通信模块。无线通信模块包括射频收发模块、功率放大器、射频开关和天线,微处理器模块与DAC模块相连接,传感器输出接DAC模块,电源管理模块分别与传感器模块、微处理器、射频收发模块和功率放大模块相连接,微处理器分别连接射频收发模块、DAC模块和射频开关,功率放大模块连接射频收发模块,并通过射频开关连接收发天线;

[0015] 传感器模块用来采集桥梁温度、湿度、震动幅度等数据。传感器节点模块从数量上达到5至30个,利用多个传感器可以有效地构建一个三维立体的防护检测网络。每个节点模块均带有三轴加速度传感器、应变片、温度湿度传感器以及风速风压传感器和四通道16

位 A/D 转换器。加速度传感器用以桥梁振动测试与分析,温湿度传感器用来测量加速度传感器所处位置的环境温湿度用于进行温湿度补偿;所述的电源模块为电池供电和外接交流电源供电两种可选方案。

[0016] 无线收发汇集节点和基站节点主要由微处理器 PXA271 作为微处理器模块的芯片,该处理器可工作于低电压 (0.85V) 低频率 (13MHz) 模式,可进行低功耗操作。无线通信模块采用 CC2420 芯片。

[0017] 传感器节点模块从数量上达到 5 至 30 个,传感器节点模块每 2-6 个组成一个传感器节点群组,每一个群组有一个汇集点,该汇集点完成群组内传感器节点的数据汇集功能,且传感器节点跟且仅跟群组内汇集节点进行通信,汇集节点和基站节点不接传感器。所有群组的汇集节点,组成 1 个或者多个群组,直接与基站节点通信 (1 个群组),或通过群组内的汇集节点与基站节点通信 (多个群组),基站节点汇集数据,将汇集后的数据通过节点附带的 USB 接口,传输到 USB 口至网口的转换装置上,数据通过网络可以就地使用计算机采集、存储和处理,或通过无线局域网收发设备 WLAN,进行远程传输,以便于远程计算机进行数据采集、数据存储和数据处理。

[0018] 所述无线收发汇集节点和基站节点包括微处理器、射频收发模块、射频开关和天线、电源管理模块、连接电源管理模块的电源模块,电源管理模块与微处理器、射频收发模块相连接,微处理器分别连接射频收发模块和射频开关,射频开关连接接收天线;计算机服务于 WSN 桥梁结构安全状态应急监测和预警系统,用于存储数据 (数据库)、处理数据、图形化显示,和警讯发布。

[0019] 本发明采用无线传感器网络技术实现对桥梁结构安全状态应急监测和预警。传感系统对桥梁结构变化的频度和幅度进行数据采集,数据经过处理系统分解、变换以获取所需要的参数后通过通信系统传输到监控中心,监控人员利用可实现诊断功能的各种软硬件对接收到的数据进行诊断,包括结构是否受到损伤以及损伤位置、损伤程度等。系统工作流程图见图 1。

[0020] 传感器模块是硬件平台中直接与外部信号量接触的模块,这里采用网络化的传感器系统,传感器节点模块从数量上达到 5 至 30 个,这样可以减少单点测量可能造成的瞬态误差和单点环境激变造成的系统测量误差。每个节点模块均带有三轴加速度传感器、应变片、温度湿度传感器以及风速风压传感器。这些传感器节点每 2-6 个组成一个传感器节点群组,每一个群组有一个汇集点,该汇集点完成群组内传感器节点的数据汇集功能,且传感器节点跟且仅跟群组内汇集节点进行通信,汇集节点和基站节点不接传感器。所有群组的汇集节点,组成 1 个或者多个群组,直接与基站节点通信 (1 个群组),或通过群组内的汇集节点与基站节点通信 (多个群组),基站节点汇集数据,将汇集后的数据通过节点附带的 USB 接口,传输到 USB 口至网口的转换装置上,数据通过网络可以就地使用计算机采集、存储和处理,也可以通过无线局域网收发设备 WLAN,进行远程传输,以便于远程计算机进行数据采集、数据存储和数据处理。

[0021] 电源模块作为整个无线传感器节点的基础供电模块,是节点正常顺利工作的保证。节点的电能供给一般只能通过自身存储的电能,这里采用电池供电是比较低廉可行的方法,当然除了电池供电之外,系统也提供了外部电源供电的选择。

[0022] 计算机服务于无线传感器网络桥梁结构安全状态应急监测和预警系统,用于存储

数据（数据库）、处理数据、图形化显示，和警讯发布。

[0023] 本发明的有益效果有：

[0024] 1、采用了智能无线传感器网络，避免了应急监测的现场布线工作，使得系统易于安装维护；

[0025] 2、通过传感器可搜集桥梁的温度、湿度、震动幅度、桥墩被侵蚀程度等，能减少断桥所造成生命财产的损失。

[0026] 3、节点具有低功耗能力，一经部署不需要频繁更换。具有局域信号处理功能，减少所需传输的信息量，提高了监测系统的运行速度。

[0027] 4、施工周期短，网络扩展性好，可靠性高，其独有的自组织性和容错能力又使其非常适用于无人值守，恶劣的自然环境中。

[0028] 5、依靠先进测试系统，减少劳动力，降低人为因素造成的误差。

[0029] 本发明设计了一种基于智能无线传感器网络的桥梁结构安全状态应急监测和预警系统，有其内在优势。采用智能无线传感器网络，避免对桥梁的损伤性破坏以及繁琐的现场布线工作，系统易于安装维护。采用网络化的传感器系统，减少单点测量可能造成的瞬态误差和单点环境激变造成的系统测量误差。其独有的自组织性和容错能力使其非常适用于桥梁的这种无人值守，恶劣的自然环境中，工程技术人员只需在监控中心对桥梁安全状况进行应急监测和发布警讯。

#### 四、附图说明：

[0030] 图 1 是本发明的系统工作流程图；

[0031] 图 2 是智能无线传感器网络体系结构图；

[0032] 图 3 是无线传感器节点电路原理框图；

[0033] 图 4 是传感器板结构图；

[0034] 图 5 是无线收发汇集节点和基站节点的电路原理框图；

[0035] 图 6 是本发明的实验装置图；

[0036] 图 7 是本发明的实验结果图例。其中 7a 是群组 1 损伤识别结果，图 7b 是群组 2 损伤识别结果，图 7c 是组 3 损伤识别结果。

#### 五、具体实施方式

[0037] 下面结合附图和具体实例对本发明做详细阐述，但本系统应用范围不限于此例。

[0038] 结合图 1-5，本实例由一组多个传感器模块、无线通信模块和控制计算机组成。无线通信模块包括无线收发汇集节点和基站节点。传感器节点模块安装在桥梁两侧或底部的受力点或梁、柱受力支承部位，用来采集桥梁温度、湿度、震动幅度、梁、柱的受力应变等数据，无线收发汇集节点连接基站节点传送采集并进行处理过的数据，基站节点通过网络连接计算机。

[0039] 结合图 2，监测区域的传感器节点每 2-6 个组成一个传感器节点群组，每一个群组有一个汇集点，该汇集点完成群组内传感器节点的数据汇集功能，且传感器节点跟且仅跟群组内汇集节点进行通信，汇集节点和基站节点不接传感器。所有群组的汇集节点，组成 1 个或者多个群组，直接与基站节点通信（1 个群组），或通过群组内的汇集节点与基站节点

通信（多个群组），基站节点汇集数据，将监测数据送到监控中心并且系统可在异常情况下进行报警，监测人员可随时了解桥梁运行情况，达到结构安全状态应急监测及预警的目的。

[0040] 无线传感器节点由数据采集模块、数据处理和控制模块、无线通信模块和电源模块四部分组成，如图 3 所示。数据采集模块用来进行外部传感器信号的接收和转换；数据处理和控制模块用来进行节点设备控制、任务调度、能量计算、功能协调等；无线通信模块负责与其他传感器节点进行无线通信，交换控制信息和收发采集数据；电源模块为传感器节点提供运行所需的能量，可提供电池供电和外接交流电源供电两种方案。

[0041] 传感器模块用来采集桥梁温度、湿度、震动幅度等数据。传感器节点模块从数量上达到 5 至 30 个，利用多个传感器可以有效地构建一个三维立体的防护检测网络。结合图 4，每个节点模块均带有三轴加速度传感器、应变片、温度湿度传感器以及风速风压传感器和四通道 16 位 A/D 转换器。加速度传感器用以桥梁振动测试与分析，温湿度传感器用来测量加速度传感器所处位置的环境温湿度用于进行温湿度补偿。

[0042] 结合图 5，所述的无线收发汇集节点和基站节点主要由微处理器 PXA271 作为核心控制元件，该处理器可工作于低电压 (0.85V) 低频率 (13MHz) 模式，可进行低功耗操作。处理器支持几种不同的低功耗模式，如睡眠和深度睡眠模式。PXA271 是多芯片模块，即在一个 CPU 封装内集成 3 个芯片：256KB SRAM, 32MB FLASH 以及 32MB SDRAM。无线通信模块采用 CC2420 芯片。CC2420 具有完全集成的压控振荡器，只需要天线、16MHz 晶体等非常少的外围电路就能在 2.4GHz 频段上工作。微处理器和无线通信模块采用 SPI 方式进行连接，在无线收发器板卡表面安装了 2.4GHz 天线，如果需要更长的无线覆盖范围可将 SMA 连接器（射频同轴连接器）直接焊在板子上以便连接外部天线。

[0043] 桥梁结构安全状态应急监测和预警系统采用分层结构，它能较好地应用于密集布置的智能传感器网络。这种方法临近的节点间可以共享数据，充分利用了空间信息。由于数据只在有限的临近节点间共享，总的数据传输量仍然保持适度。因此，算法可以扩展到密集布置传感器的大型结构上。分层结构由以下几部分组成，包括数值计算函数、中间件和损伤识别算法。用于这个策略的主要数值方法有奇异值分解、复特征值求解、快速傅立叶变换、快速排序和复数矩阵逆。结构安全状态应急监测及预警的中间件包括：数据处理、可靠的通信和同步传感。定位损伤的算法包括环境激振技术 (NEXT)，特征系统实现算法 (ERA) 和损伤定位矢量法 (DLV)，这些方法先用 C 语言编写，然后通过编译连接转化为 TinyOS 下的可执行程序。

[0044] 传感器节点经编程可以独立地实现分布式桥梁结构安全状态应急监测和预警系统。所有需要的参数，例如节点号码、传感器方向和数据长度都通过基站转发传输到整个网络。传感器节点发送这些参数到汇集节点或基站节点，接着，基站节点又将参数信息继续发送给传感器节点。参数输入完成后，连接到基站的计算机不再需要给整个传感器网络的任意节点提供输入。通过可靠的通信协议发送的命令预先指定好对应的任务。

[0045] 测量到的加速度时程数据送回基站，以便网络中的时程处理可以和计算机对应的等效数据处理进行比较。模态参数，损伤定位矢量和累计应力等中间结果也同样被送回基站。节点间关键的通信数据包通过可靠的通信协议，多点传送给基站，以便为调试系统储存重要的数据。

[0046] 此外，采用多尺度方法损伤识别方法，对加速度与应变信号同时进行分析，这种方

法融合了整体结构信息（加速度）和局部结构响应（应变），从而降低了损伤探测失败的次数。比起单独使用其中之一更加有效。

[0047] 本实例采用智能无线传感器网络为平台，主要完成对桥梁结构安全状态应急监测和预警。在应用中，将多个传感器安装在桥梁关键区域，通过监测桥梁主体结构的变化来评估桥梁稳定状况。系统可在异常情况下进行报警，监测人员可随时了解桥梁运行情况，达到结构安全状态应急监测及预警的目的。

[0048] 参见图 6，图 6 是本发明一实施例：一钢桁架桥梁二维缩尺模型，其每一榀两个方向都是 0.6m 长。桁架两端刚性支承，一端铰接，另一端为滑动支座。铰接端可以自由的转动，但是限制三个方向的平动，而滑动支座端可以沿纵向滑动。模型共 21 个杆件，12 个节点，在其中 1 至 10 号节点上布置无线传感器节点。

[0049] 采用激振器激励。由计算机发送限带白噪声到激振器，直到结构振动频率最高达到 100Hz。固定在桁架节点上的无线传感器节点测量两个方向的加速度。无线传感器节点加速度计沿横向和竖向均匀布置。安装在连续的两榀前幅上 6 个节点组成了一个监测桁架两榀间损伤的局部群落。总共 10 个节点形成了三个互相重叠的群组。

[0050] 10 号杆件用一个横截面变小的杆代替，以模拟结构损伤，其横截面积减小 52.7%。横截面积的减小将导致单元刚度的损失，采用系统软件进行结构损伤识别。

[0051] 参见图 7，分别对 3 个组群的监测结果进行分析，各个群落的损伤识别结果再由邻近的簇主节点共享，进行最终的损伤识别。如果邻近的簇主节点识别结果一致，损伤识别结果报告至基站，簇主节点转入睡眠状态。反之，如果结果出现矛盾，重复进行损伤识别过程。单元 10 是唯一被识别有损伤的单元，其正则应力小于临界阈值 0.4，系统将发出预警信号，提醒对 10 单元相应位置进行人工核查。

[0052] 桥梁结构安全状态应急监测和预警系统采用分层结构，它能较好地应用于密集布置的智能传感器网络。这种方法临近的节点间可以共享数据，充分利用了空间信息。由于数据只在有限的临近节点间共享，总的数据传输量仍然保持适度。因此，算法可以扩展到密集布置传感器的大型结构上。

[0053] 分层结构由以下几部分组成，包括数值计算函数、中间件和损伤识别算法。用于这个策略的主要数值方法有奇异值分解、复特征值求解、快速傅立叶变换、快速排序和复数矩阵逆。结构安全状态应急监测及预警的中间件包括：数据处理、可靠的通信和同步传感。定位损伤识别的算法包括环境激振技术 (NExT)，特征系统实现算法 (ERA) 和损伤定位矢量法 (DLV)，这些方法先用 C 语言编写，然后通过编译连接转化为 TinyOS 下的可执行程序。此外，采用多尺度方法损伤识别方法，对加速度与应变信号同时进行分析，这种方法融合了整体结构信息（加速度）和局部结构响应（应变），从而降低了损伤探测失败的次数。比起单独使用其中之一更加有效。

[0054] 传感器节点经编程可以独立地实现分布式桥梁结构安全状态应急监测和预警系统。所有需要的参数，例如节点号码、传感器方向和数据长度都通过基站转发传输到整个网络。传感器节点发送这些参数到汇集节点或基站节点，接着，基站节点又将参数信息继续发送给传感器节点。参数输入完成后，连接到基站的计算机不再需要给整个传感器网络的任意节点提供输入。通过可靠的通信协议发送的命令预先指定好对应的任务。

[0055] 测量到的加速度时程数据送回基站，以便网络中的时程处理可以和计算机对应的

等效数据处理进行比较。模态参数,损伤定位矢量和累计应力等中间结果也同样被送回基站。节点间关键的通信数据包通过可靠的通信协议,多点传送给基站,以便为调试系统储存重要的数据。

[0056] 本实施例采用智能无线传感器网络为平台,主要完成对桥梁结构安全状态应急监测和预警。在应用中,将多个传感器安装在桥梁关键区域,通过监测桥梁主体结构的变化来评估桥梁稳定状况。系统可在异常情况下进行报警,监测人员可随时了解桥梁运行情况,达到结构安全状态应急监测及预警的目的。

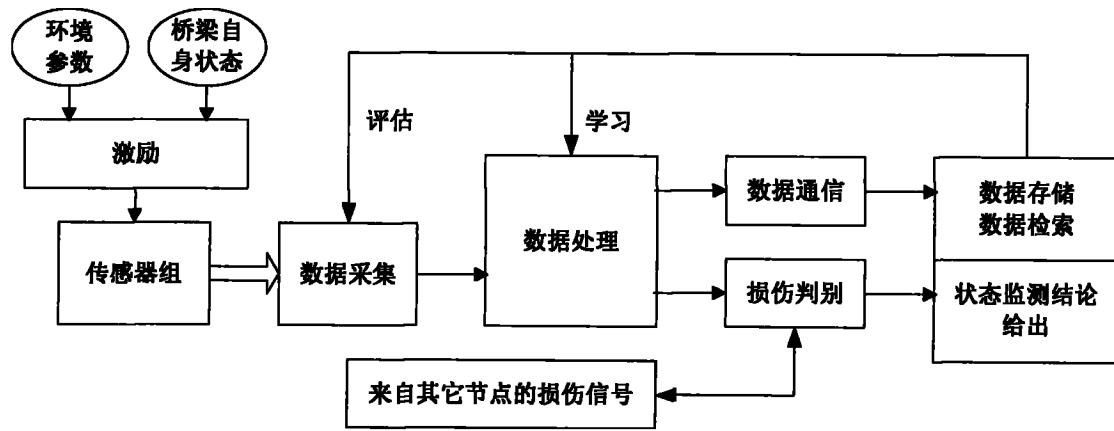


图 1

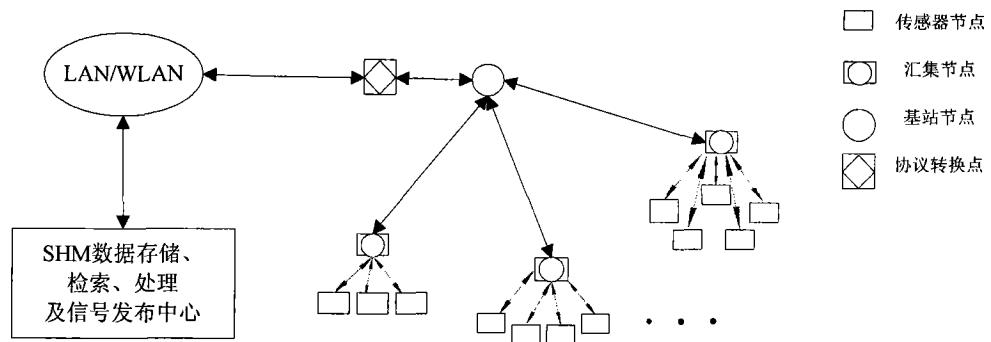


图 2

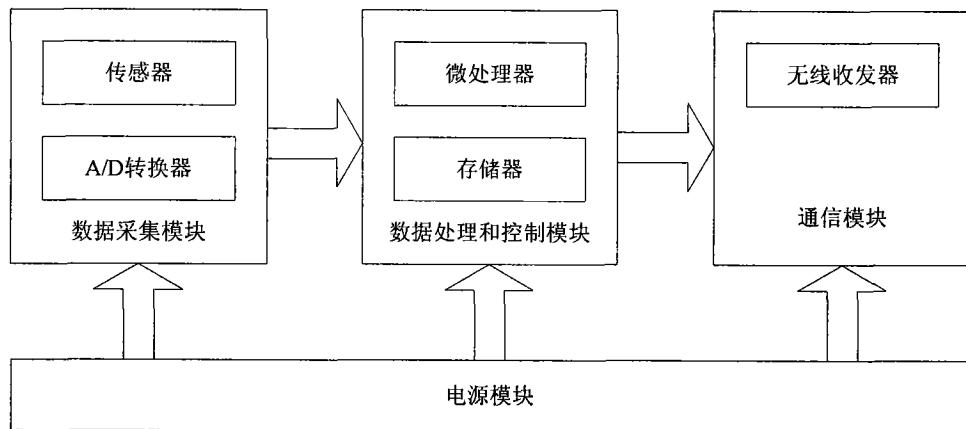


图 3

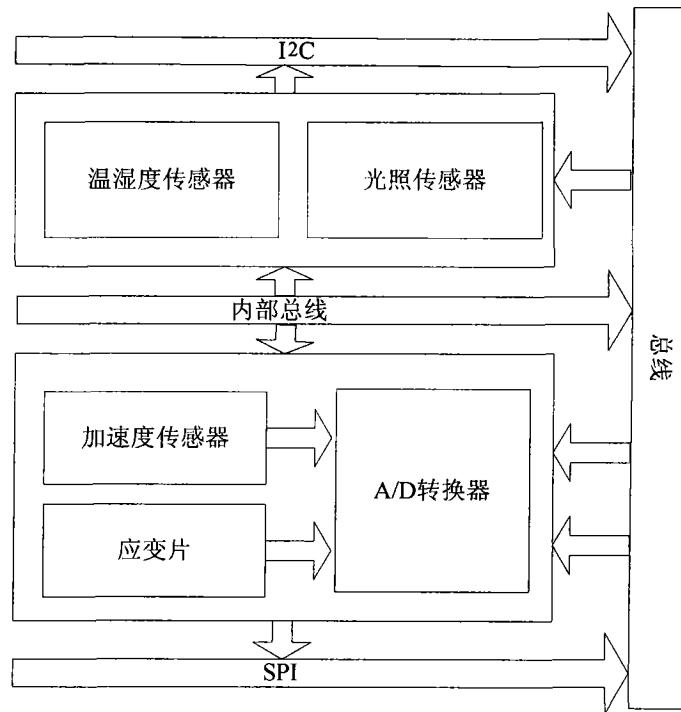


图 4

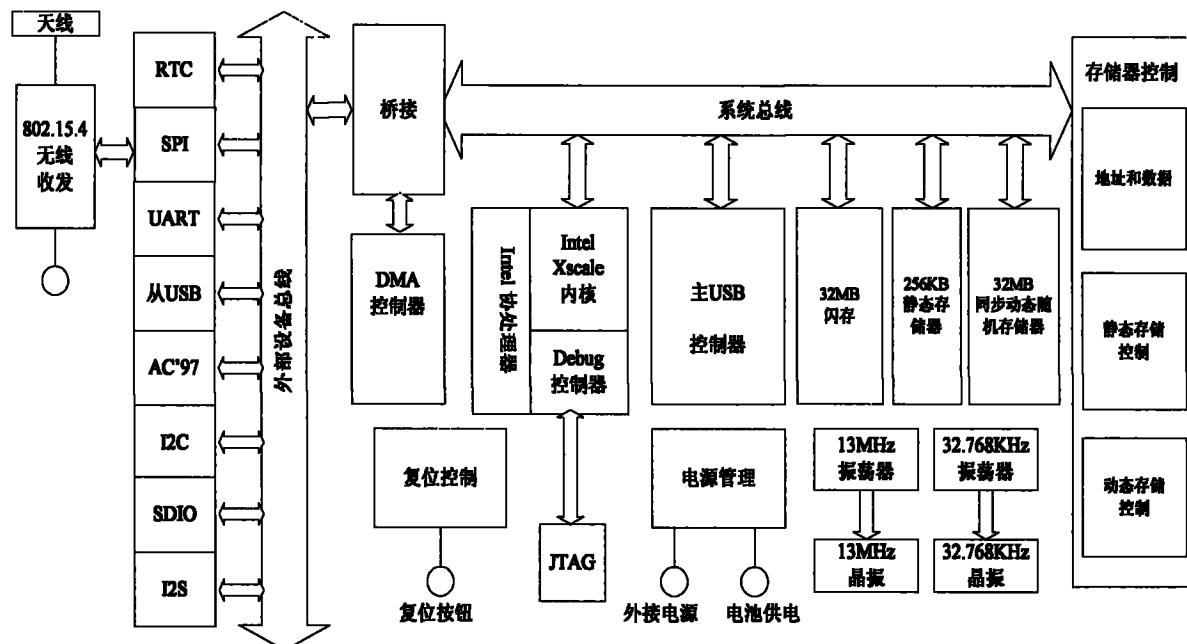


图 5

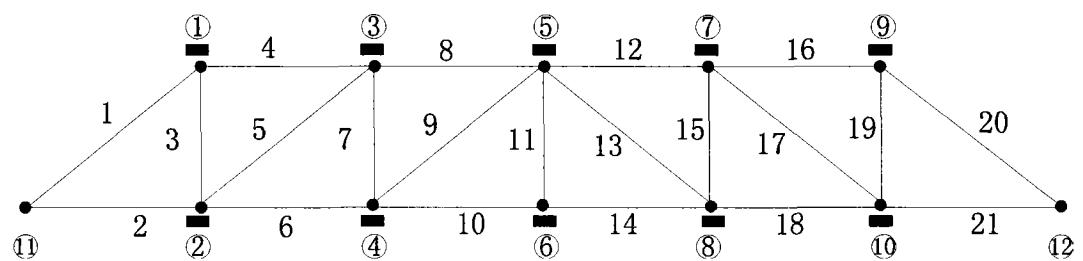


图 6

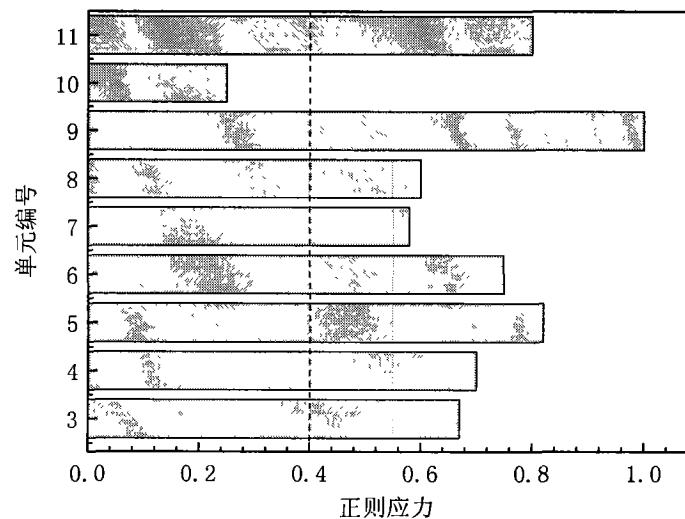


图 7a

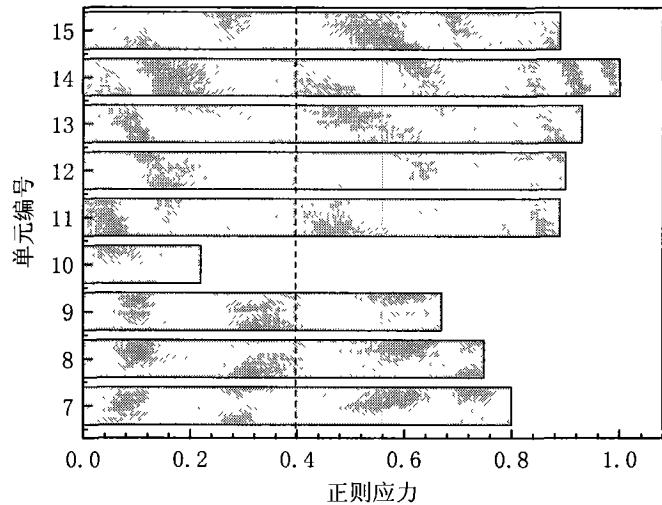


图 7b

