

辽宁省自然科学基金重点项目 (20170540752)

建筑安全监测

JIANZHUANQUANJIANCE

高治军 王 鑫 薛春燕◎著

 辽宁人民出版社

辽宁省自然科学基金重点项目 (20170540752)

建筑安全监测

JIANZHUANQUANJIANCE

高治军 王 鑫 薛春燕◎著

常州大学图书馆
藏书章

④ 辽宁人民出版社

© 高治军, 王鑫, 薛春燕 2017

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑安全监测 / 高治军, 王鑫, 薛春燕著. — 沈阳: 辽宁人民出版社, 2018.1
ISBN 978-7-205-09238-2

I. ①建… II. ①高… ②王… ③薛… III. ①建筑工程—安全监测 IV. ①TU714

中国版本图书馆CIP数据核字 (2017) 第328078号

出版发行: 辽宁人民出版社

地址: 沈阳市和平区十一纬路25号 邮编: 110003

<http://www.lnpph.com.cn>

印刷: 辽宁鼎籍数码科技有限公司

幅面尺寸: 170mm×240mm

印 张: 12.25

字 数: 135千字

出版时间: 2018年1月第1版

印刷时间: 2018年1月第1次印刷

责任编辑: 马 辉 姜 瓪

封面设计: 白 咏

版式设计: 姿 兰

责任校对: 赵卫红

书 号: ISBN 978-7-205-09238-2

定 价: 38.00元

前 言

近年来,无线传感器网络技术飞速发展,其连接物理世界和计算机世界的桥梁作用已得到广泛应用。无线传感器网络不但布线成本低、监测精度高、容错性好,而且能够远程监控,在故障诊断与安全监测等方面有突出优点。随着建筑安全事故的频发,如何对建筑的安全状态进行实时和有效的监测,避免由于结构损伤、火灾或室内环境变化引起的建筑安全事故,同时为建筑的健康维护和保养提供及时、科学的指导,已经越来越受到人们的广泛关注,建立一种基于无线传感器网络的建筑安全监测系统具有非常重要的理论意义和实用价值。

本书分析了建筑安全监测技术研究现状、进展及面临的挑战,阐述了无线传感器网络的发展、特点及结构,研究了基于无线传感器网络的建筑结构健康监测、建筑火灾安全监测和建筑室内环境监测三个领域的监测方法,结合存在的问题提出了相应的解决方案和策略。主要内容如下:

针对建筑结构健康监测实时性差、现有算法资源消耗大、实际应用效果不稳定等问题,在基于无线传感器网络的建筑结构健康监测系统中,提出了一种基于遗传—蚁群优化的组播路由算法和多跳路由算法,较好地解决了网络的服务质量问题,提高了网络的稳定性和监测的可靠性;采用改进型的蚁群算

法，制定了无线传感器网络能量管理策略，降低了监测网络的能耗，延长了网络寿命。

针对建筑火灾安全监测单代理节点功能有限、拓扑结构复杂、带宽要求高等问题，在基于无线传感器网络的建筑火灾安全监测中引入了多代理理论，提出了一种火灾监测网络的动态任务调度算法，较好地解决了多监测任务调度中的大规模计算问题，提高了任务调度的效率；采用基于D-S证据理论的数据融合算法对监测数据进行实时处理，提高了监测系统对异常情况报警的准确性和可靠性，降低了火灾误报和漏报率。

针对建筑室内环境监测传输数据量大、频谱资源紧张、传感器节点能源局限等问题，建立了建筑室内无线终端通信频谱感知模型，提出了一种基于支持向量机的频谱感知算法，能够实时、准确地对设备终端进行频谱感知，有效地提高了频谱资源的利用率；提出了一种基于压缩感知理论的网络节能算法，在保证无线传感器网络整体监测精度和效率的前提下，提升了网络数据采样效率，降低了传感器节点的能源消耗，提高了网络使用寿命。

本书是高治军、王鑫和薛春燕共同完成的成果。全书的思路和研究框架由高治军设计，并撰写第1、第2、第3、第6章，王鑫撰写第5章，薛春燕撰写第4章。最后由高治军统稿和定稿。本书的出版得到了辽宁省自然科学基金重点项目(20170540752)的支持。

本书涉及主要符号

符 号	代表意义	单 位
V	传感器节点集合	
E	传感器节点间链路组合	
d	节点间欧式距离	
θ	两节点间偏转角度	rad
e	节点能量	
N	网络节点集	
L	双向链路集	
s	多播源节点	
M	组播终点集	
τ	信息素	
α	全局信息素挥发系数	
λ	网络节点密度	
h	节点至簇头的跳数	
η	节点间消耗的能量参数	
q	能量因子	
R	信息传输速率	Mb/s
δ	转移函数	
Q	有限状态集	
G	训练集	
Θ	投影(稀疏)系数	
A	焦元	
C	惩罚系数	
Ψ	基矩阵	
X	观测信号	
Φ	观测矩阵	
ε	测量误差	
Γ	热扩散系数	

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 国内外相关工作研究进展	5
1.3 本书主要研究思路与内容	18
第2章 无线传感器网络技术	22
2.1 引言	22
2.2 无线传感器网络发展	23
2.3 无线传感器网络路由技术	32
2.4 基于多代理的无线传感器网络技术	36
2.5 本章小结	40
第3章 建筑结构健康监测	41
3.1 引言	41
3.2 建筑结构健康监测无线传感器网络路由算法	43
3.3 基于遗传—蚁群算法的CPS建筑结构健康监测网络 路由算法	50
3.4 建筑结构健康监测网络跳数受限多跳路由算法	69

3.5	建筑结构健康监测无线传感器网络节能算法	79
3.6	本章小结	85
第4章	建筑火灾安全监测	87
4.1	引言	87
4.2	监测网络结构设计	89
4.3	分布式无线传感器网络任务调度	94
4.4	D-S证据理论算法	108
4.5	本章小结	115
第5章	建筑室内环境监测	117
5.1	引言	117
5.2	建筑室内环境频谱感知算法	120
5.3	基于压缩感知的建筑室内温度湿度监测节能改进 DV-hop算法	134
5.4	本章小结	163
第6章	结论与展望	165
6.1	结论	165
6.2	展望	168
	参考文献	170

图目录

图 1.1 本书章节安排	19
图 2.1 无线传感器网络组网步骤	31
图 2.2 黑板结构的系统通信模型	39
图 3.1 IGPSR-1 前向子区域划分	48
图 3.2 IGPSR-2 前向区域划分	49
图 3.3 CPS 系统结构图	54
图 3.4 无线传感器网络结构	56
图 3.5 GAAC 路由算法流程图	63
图 3.6 GA、AC 和 GAAC 算法延时比较图	66
图 3.7 GA、AC 和 GAAC 算法传输率比较图	67
图 3.8 GA、AC 和 GAAC 算法传输时间比较图	67
图 3.9 网络动态拓扑结构图	72
图 3.10 网络节点分布	76
图 3.11 初始能量分布	76
图 3.12 网络存活节点数目比较图	77
图 3.13 Sink 接收消息数目比较图	77
图 3.14 节能算法流程图	82
图 3.15 网络运行中部分节点能耗图	84
图 4.1 网络拓扑结构设计图	91

图 4.2	基于多代理的无线传感器网络火灾及易燃气体监测系统模型	93
图 4.3	分布式可计算 WSN _s 系统结构图	96
图 4.4	分布式任务调度结构图	97
图 4.5	多带图灵机	98
图 4.6	任务分配有向无环拓扑图	99
图 4.7	动态调度算法流程图	101
图 4.8	DSA 算法运行时间比较图	104
图 4.9	DSA 算法吞吐量比较图	105
图 4.10	DSA 算法公平性比较图	105
图 4.11	DSA 算法任务完成时间比较图	106
图 4.12	DSA 算法任务调度成功率比较图	107
图 4.13	计算证据融合的结构图	110
图 4.14	传感器 1 和传感器 2 的融合结果	113
图 4.15	三个传感器的融合结果	113
图 4.16	不同融合算法结果比较	114
图 5.1	AM 信号下不同算法检测正确率	131
图 5.2	BPSK 信号下不同算法检测正确率	132
图 5.3	MSK 信号下不同算法检测正确率	132
图 5.4	MPSK 信号下不同算法检测正确率	132
图 5.5	FSK 信号下不同算法检测正确率	133
图 5.6	传统的信号压缩过程	136
图 5.7	信号重构流程	139

图 5.8	DV-Hop 定位算法示意图	144
图 5.9	Euclidean 定位算法示意图	145
图 5.10	随机部署 (80 未知节点, 20 锚节点)	160
图 5.11	C Shaped 部署 (80 未知节点, 20 锚节点)	160
图 5.12	Gridy 部署 (80 未知节点, 20 锚节点)	160
图 5.13	C Shaped Gridy 部署 (80 未知节点, 20 锚节点)	161
图 5.14	随机部署算法定位错误比较	161
图 5.15	C Shaped 部署算法定位错误比较	162
图 5.16	Gridy 部署算法定位错误比较	162
图 5.17	C Shaped Gridy 部署算法定位错误比较	162

表目录

表 3.1	实验参数	75
表 3.2	节点能量随运行时间变化表	83
表 4.1	资源参数	103
表 4.2	三个传感器基本概率赋值表	111
表 4.3	传感器 1 和传感器 2 数据的 D-S 证据融合过程表	112
表 5.1	各算法的感知正确率	130

第1章 绪论

1.1 研究背景与意义

建筑是凝固的艺术，是时代发展的产物，也是时代进步的标志。随着经济社会的快速发展，国内外对具有历史文化价值的古建筑的保护力度不断加大，同时各种大型公共建筑、高层居住建筑、大型公路桥梁、水库大坝等新建筑层出不穷，这些建筑既是国家或城市的地标和景观，又是经济、科技综合实力的体现。然而，在风光的建筑背后，越来越多的建筑安全问题却不容忽视，已经引起相关研究人员的高度关注。在已经出现的各种各样的建筑安全事故中，既有因地震、水灾、台风等自然灾害导致的建筑垮塌，也有因年久失修、健康维护保养不及时造成的坍塌损毁，还有因火灾使建筑特别是具有历史遗产价值的古建筑成为废墟以及因室内环境污染使建筑成为人类的隐形杀手。但不管因为何种原因导致的建筑安全事故，都会造成政治、经济及财产等方面不可估量的重大损失，更严重威胁到建筑使用者的生命安全。

为了确保建筑的安全，就需要实时地对建筑关键部位进行健康监测并预报安全情况，尽可能及时地发现建筑结构内部出

现问题的位置和相关问题的严重程度，进而准确预测建筑结构性性能情况和预估建筑的剩余寿命，并针对建筑安全的具体情况做出相应的维护保养决定，以有效解决建筑的安全防范和健康监测问题，预防建筑相关事故和灾害的发生，确保使用者生命财产安全和正常的生产生活。建筑安全监测已经越来越受到人们的广泛关注。

建筑安全监测主要通过分析定期采集的动力响应数据来观察结构体系随时间推移产生的变化，从分析提取的损伤敏感特征值来确定建筑的健康状态。对于长期的建筑结构健康监测，主要通过数据定期更新来估计结构老化和恶劣服役环境对工程结构的影响，并确定建筑是否能继续实现设计功能。一直以来，人们都使用不连续的方法来评估建筑是否有能力继续服役，在过去的10到15年里，建筑安全监测技术开始兴起并产生了一个联合不同工程学科分支的新领域。

建筑安全监测是指利用现场连续或定期（常规）测量关键的结构和环境参数，并进行实时分析，为发生的异常状态或事故的早期提出警告，避免人员伤亡以及给予建筑维修咨询。一般来说，一个典型的建筑安全监测系统包括三个主要部分：传感器系统、数据处理系统（包括数据采集、传输和存储）和健康评估系统（包括诊断算法和信息管理）。由于大多数传感器将参与一个健康监测系统，采集、传输和存储这样大量的数据并连续监测是一个具有挑战性的任务。目前，国内外有一些项目已经开展了部分监测系统的实验室研究和实际应用，

青马、汲水桥梁及连接香港的新机场，正在大量使用安全监测系统，主要关注温度、流量负载、几何配置、应变和动态特性，青马大桥安装了786个永久性传感器，风速、温度、应变和加速度传感器的监测结果是令人满意的，验证了设计性能。类似的传感器也被用于日本明石海峡大桥、巴里大桥和贝尼西亚—马丁内兹桥的安全监测系统，在韩国、加拿大、印度、哥伦比亚等国家的桥梁安全监测系统都有重大突破。

近年来，无线传感器网络技术迅猛发展，其连接物理世界和计算机世界的桥梁作用得到广泛的应用。无线传感器网络不但布线成本低、监测精度高、容错性好，而且能够远程监控，在故障诊断与安全监测等方面有突出优势。目前，无线传感器网络研究的主要方向集中在军事领域、工业自动化现场控制和大地环境监控等大部分领域，应用在建筑安全监测方面的研究进展不多，符合建筑安全监测特点的实用无线传感器网络综合系统更加缺乏。随着人们生活水平的不断提高，现代智能建筑获得了长足的发展，同时，无线传感器网络系统因为自身特有的突出优点，也逐渐开始向现代智能建筑领域的应用进行渗透，已经成为现代智能建筑相关领域的研究重点。

大多数传统的传感器应用到建筑安全监测领域，其应用程序是基于电动信号传输的，这种局限性越来越明显。这些传感器通常难以嵌入建筑物内部去监测健康状况，而且都是本地（或点）的传感器，具有严重的位置限制，不能只复用参数，同时长导线也造成大量布线问题，还往往跨越几个或几十个参

数，在某些情况下，由于电磁干扰信号也不能区分噪声。此外，各种解调方式有不同的传感器技术要求，都将增加传统传感器在建筑安全监测中的不便。因此，应用在建筑安全监测中的传感器需要比传统的传感器更具有灵活性、可嵌入性、多样性和电磁干扰的免疫力等优点，而且在建筑安全监测过程中，因为建筑安全监测的自身特点决定了对同步采集的要求比较高，而且数据采集量大、采集频率非常高，对监测的可靠性和低能耗提出了新的要求。

建筑安全监测条件非常复杂，相应监测内容又受到建筑本身的限制，常规监测方案费时费力、工作量大、投资高，且需要对现有建筑结构进行改造等特点，常规的监测手段不利于整个建筑安全监测的展开。无线传感器网络系统是一种依靠无线传感器节点采用多跳自组方式组建的一种新型网络系统，可通过无线的方式进行节点之间的相互通信，组成相关的无线传感器网络，其中无线传感器网络节点主要负责数据采集整理工作，并把采集到的数据通过无线传感网络汇总到中心网络节点，在中心节点对这些数据进行最终的处理。无线传感器网络不但布线成本低、监测精度高、容错性好，而且能够远程监控，这一突出的特点，可以克服之前各类建筑安全监测系统的不足，充分发挥无线传感器网络的这一独特优势，不但能够提高整个建筑安全监测系统的可靠性、及时性和准确性，还开辟了一个新的建筑安全监测技术领域。

利用无线传感器网络技术的优势，建立一种全新的建筑安

全监测技术手段,实现对建筑的健康状态进行实时和有效的监测,避免由于建筑结构损伤、火灾或室内环境变化引起的建筑安全事故,同时为建筑的健康维护和保养提供及时、科学的指导,不仅非常必要,而且具有非常重要的理论意义和实用价值。

1.2 国内外相关工作研究进展

目前,国内外专家学者对于建筑安全监测的研究主要集中在建筑结构健康监测、建筑火灾安全监测和建筑室内环境监测三个方面。

1.2.1 建筑结构健康监测

建筑结构健康监测通常包括建筑结构的内部损伤监测和内部结构识别。建筑结构内部损伤主要包括相关建筑材料本身的物理特性变化或建筑结构本身几何结构特性变化。早在20世纪中期,欧美发达国家就对建筑结构健康监测进行了相关研究,早期研究主要集中于军工等国家支柱产业。在常规监测领域,早期对建筑结构健康监测的研究是在道路桥梁领域,美、欧、日等国家对其进行了较早的研究,并投入实际应用,对本地区的桥梁结构安全进行了相应的监测。在此之后,随着技术的不断改进和发展,应用范围也逐渐扩大,开始应用到一般的民用建筑结构健康监测当中。在20世纪90年代中期的国际结构控制研讨会上,亚欧美等地的国家决定成立专门组织对建筑结构监

测进行相应的研究和应用，并采用了许多先进的技术，包括传感器、建筑伤害、信息科技的新成果，例如德国的棚顶支柱监测、欧洲教堂损伤监测等。建筑结构健康监测越来越成为近年来建筑相关监测技术研究的热点之一，监测技术也不断得到发展。但是建筑结构健康监测技术由于起步较晚，目前还不是很完善，还存在很多需要改进和提高的地方，为了更加适应现代建筑产业发展要求及建筑大型化、复杂化、智能化的发展趋势，建筑结构健康监测的研究范围也不断扩大，很多新的检测要求被提出。传统的检测主要是以建筑结构应力为检测目标，现在随着研究的扩展，结构损伤、快速定损、结构寿命等都成为建筑结构健康监测的研究范围。

建筑结构健康监测包括结构健康检测数据的采集、数据保存、数据传输、硬件软硬件设备等。其中检测数据的采集部分涵盖范围最广泛，其中包括软件计算方法、相应的传感器硬件选择、部署的数量与范围等。在实际的工程应用中，整个监测系统的经济性是最重要的参考指标，为了保证建筑结构健康监测的可靠性与有效性，对数据的采样数量也有很大的要求，此外，建筑结构健康检测的采样数据环境不是一成不变的，所以对采样数据的后期处理也是非常重要的。

建筑结构健康监测是随着科技的进步和研究的深入不断发展的，从20世纪50年代开始到现阶段，建筑结构健康监测的发展大体上有三个阶段。

一是早期，对建筑的结构健康监测以人工为主，通过人工