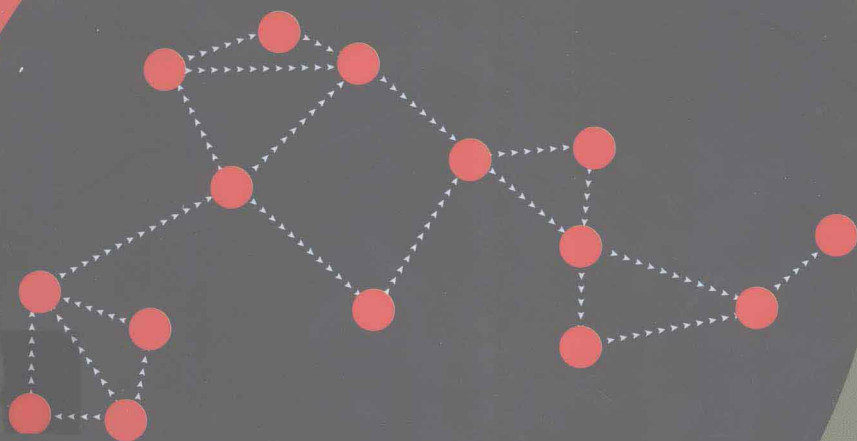


无线传感器网络技术 及在煤矿安全监控中的应用

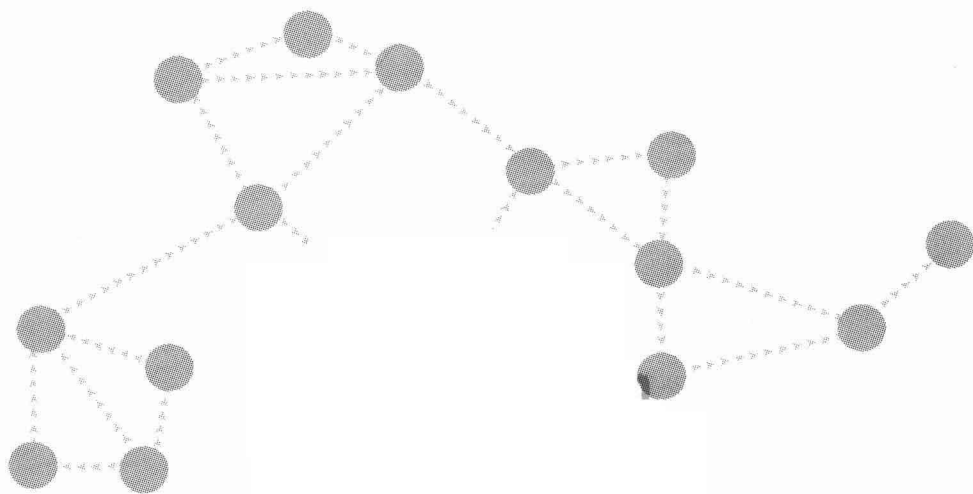
◎ 陈 岩 郭 宏 / 著



中央民族大学出版社
China Minzu University Press

无线传感器网络技术 及在煤矿安全监控中的应用

◎ 陈 岩 郭 宏 / 著



中央民族大学出版社
China Minzu University Press

图书在版编目(CIP)数据

无线传感器网络技术及在煤矿安全监控中的应用/陈岩,郭宏著.
—北京:中央民族大学出版社,2011.8
ISBN 978-7-5660-0040-8

I. ①无… II. ①陈… ②郭… III. ①无线电通信—传感器—
应用—矿山安全—安全监控系统 IV. ①TD76-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 152528 号

无线传感器网络技术及在煤矿安全监控中的应用

作 者 陈 岩 郭 宏
责任编辑 方 圆
封面设计 布拉格
出 版 者 中央民族大学出版社
北京市海淀区中关村南大街 27 号 邮编:100081
电话:68472815(发行部) 传真:68932751(发行部)
68932218(总编室) 68932447(办公室)
发 行 者 全国各地新华书店
印 刷 厂 北京九州迅驰传媒文化有限公司
开 本 787×1092(毫米) 1/16 印张:14.75
字 数 220 千字
版 次 2011 年 8 月第 1 版 2011 年 8 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5660-0040-8
定 价 30.00 元

版权所有 翻印必究

前 言

无线传感器网络的根本功能是准确获取物理世界的有价值信息,具有布线成本低、监测精度高、容错性好、可远程监控、便于诊断与维护等众多优点,在环境监测、事故定位救援等领域有着广阔的应用前景。无线传感器网络借助于节点的时间与位置信息,实现传感器节点之间的控制和传感数据高速率、低延迟的交换,以保证整个检测与控制系统的准确性与实时性。因为无线传感器网络面临计算、存储与网络资源等方面的限制,因此针对如何进行无线传感器网络中节点高效、低能耗的定位以及覆盖等问题展开研究具有十分重要的意义。利用无线传感器网络技术对复杂环境进行监测,一直是无线传感器网络中一项热点研究课题,围绕这一课题产生的实际应用都蕴涵着巨大的社会效益。

本书从项目团队当前正在开展的基于无线传感器网络技术的煤矿安全监控系统研究工作出发,比较全面地论述了无线传感器网络所涉及的关键技术,包括无线传感器网络的概念、理论、特点和节点的开发等,着重论述设计思路与关键技术方案等内容,可以使读者全方位地了解 and 掌握无线传感器的相关技术。

本书共分七章:第一章是有关传感器网络的概述,阐述了无线传感器网络的发展历程、基本概念及无线传感器网络系统所涉及的关键技术;第二章介绍了无线传感器网络的主要研究内容、网络类型划分、网络基本结构形式、网络协议与软件环境设计原则及评价无线传感器网络的主要性能指标;第三章讨论了无线传感器网络路由协议与成簇算法,比较了常见的几种成簇算法的特点,分析了现有各种成簇算法在应用过程中面临的主要问题;第四章对现有无线传感器网络 MAC 层技术与协议进行了分析比较,重点研究了 LP-MAC 协议的设计原则;第五章首先介绍了无线传感器网络定位技术的发展与研究现状,然后分析了几种典型定位算法及定位算法目前存在的主要问题;第六章研究了无线传感器网络节点覆盖技术,重点研究了 Node Self-Scheduling 覆盖控制算法和质心节能覆盖节点集方案;第七章设计和实现了针对煤矿安全监控系统的无线传感器网络系统,主要对系统架构、硬件、网络通信协议及煤矿井下人员定位进行了详细介绍。

本书第一章、第三章、第四章、第五章、第六章和第七章由陈岩撰写,第二章

由郭宏撰写,全书由陈岩统稿。

近年来作者及其科研团队与昆山诺金传感技术有限公司共同开展了有关无线传感器网络技术在温室农业监控和煤矿安全监控等应用方面的研究项目,本书的主要内容就是在上述科研工作的基础上完成的。

在此向科研团队的所有成员及所有参考文献的作者表示衷心的感谢,同时也向为本书出版付出辛勤劳动的同志们表示感谢!

由于作者水平有限,难免有疏漏和不完善之处,恳请专家和同行不吝指正!

作 者

2011年7月15日

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 无线传感器网络概述	(2)
1.1.1 无线传感器网络发展历程	(2)
1.1.2 无线传感器网络的基本概念	(5)
1.1.3 无线传感器网络的结构与特点	(6)
1.1.4 无线传感器网络的属性分类	(8)
1.2 无线传感器网络系统所涉及的关键技术	(10)
1.2.1 MAC(Media Access Control)协议和路由协议	(10)
1.2.2 能量管理机制和 QoS 保证技术	(12)
1.2.3 数据融合技术	(13)
1.2.4 节点定位技术	(14)
1.2.5 数据管理	(14)
1.2.6 网络安全	(15)
1.2.7 无线通信技术	(15)
1.2.8 嵌入式操作系统	(15)
1.3 相关研究领域	(16)
1.3.1 无线个域网 · 802.15.4 · UWB · Zigbee	(16)
1.3.2 Ad-hoc 网络	(18)
1.3.3 普适计算(泛在计算) · 智能空间	(19)
参考文献	(21)
第二章 无线传感器网络	(24)
2.1 无线传感器网络主要研究内容	(24)
2.1.1 节点硬件和操作系统研究	(24)
2.1.2 网络的拓扑结构及各层通信协议栈研究	(25)
2.1.3 无线传感器网络的纵向管理平面研究	(26)
2.1.4 无线传感器网络的应用研究	(26)
2.1.5 开发工具和环境	(27)
2.2 无线传感器网络类型划分	(28)

2.2.1	从数据处理角度对网络进行区分	(28)
2.2.2	从任务角度对网络进行区分	(29)
2.2.3	从节点移动性的角度对网络进行区分	(30)
2.3	无线传感器网络基本结构形式	(30)
2.3.1	基本结构	(30)
2.3.2	节点同一性原则	(32)
2.3.3	同传统网络的区别	(33)
2.4	无线传感器网络协议与软件环境设计原则	(34)
2.4.1	协议设计的基本原则	(34)
2.4.2	节点软件设计应注意的问题	(35)
2.5	无线传感器网络 QoS(Quality of Service) 问题	(36)
2.5.1	传统网络的 QoS 保障技术	(36)
2.5.2	Ad Hoc 网络的 QoS 保障技术	(37)
2.5.3	无线传感器网络的 QoS 保障技术	(42)
2.5.4	无线传感器网络 QoS 问题分析	(45)
2.5.5	无线传感器网络主动 QoS 机制	(46)
2.6	无线传感器网络主要性能评价指标	(49)
	参考文献	(50)
第三章	路由协议与成簇算法	(52)
3.1	无线传感器网络路由协议	(52)
3.1.1	路由协议设计的特点与要求	(52)
3.1.2	无线传感器网络路由协议的分类	(53)
3.1.3	路由协议的性能指标	(54)
3.2	分簇路由技术	(55)
3.3	成簇协议研究的进展	(57)
3.3.1	LEACH 系列算法	(57)
3.3.2	均衡性的改进	(61)
3.3.3	异构	(63)
3.3.4	覆盖模型的影响	(66)
3.3.5	数据发布模型的影响	(67)
3.3.6	移动性的影响	(68)
3.4	各算法的比较分析	(69)
3.4.1	算法的内在性质	(70)

3.4.2	对节点的要求	(70)
3.4.3	算法的应用场景	(71)
3.4.4	算法的效果	(72)
3.5	各种成簇算法在应用过程中面临的主要问题	(73)
3.5.1	实验模拟与计算模型的局限性	(73)
3.5.2	初始参数与二次部署	(73)
3.5.3	簇首轮转方案的改进	(74)
	参考文献	(74)
第四章	无线传感器网络 MAC 层技术与协议	(79)
4.1	无线传感器网络 MAC 协议概述	(79)
4.1.1	设计原则	(79)
4.1.2	无线传感器网络 MAC 协议分类	(80)
4.2	现有 MAC 协议分析	(82)
4.2.1	基于竞争的 MAC 协议	(83)
4.2.2	基于调度的 MAC 协议	(88)
4.2.3	混合 MAC 协议	(93)
4.2.4	跨层 MAC 协议	(95)
4.2.5	其它 MAC 协议及相关研究工作	(98)
4.3	基于休眠调度的介质访问控制	(101)
4.3.1	无线传感器网络休眠调度	(101)
4.3.2	现有协议及不足	(103)
4.3.3	能量消耗与传输延时之间的矛盾	(104)
4.4	LP-MAC 协议设计	(105)
4.4.1	流量模型和梯型调度	(105)
4.4.2	数据分组传输和冲突避免	(108)
4.4.3	临时唤醒机制	(110)
4.4.4	延迟分析	(111)
	参考文献	(114)
第五章	无线传感器网络节点定位技术	(121)
5.1	无线传感器网络定位技术	(121)
5.1.1	概述	(121)
5.1.2	无线传感器网络定位技术研究现状	(123)
5.1.3	定位算法分类	(126)

5.2 典型无线传感器网络节点定位方法	(127)
5.2.1 基于测距技术的定位方法	(128)
5.2.2 无须测距定位方法	(134)
5.2.3 算法分析与比较	(138)
5.3 定位算法的评价标准	(140)
5.4 定位技术目前存在的主要问题	(143)
参考文献	(145)
第六章 无线传感器网络节点覆盖技术	(150)
6.1 无线传感器网络节点节能覆盖技术的研究现状	(150)
6.2 无线传感器网络的简单覆盖模型	(153)
6.3 无线传感器网络覆盖问题的分类	(155)
6.3.1 按覆盖区域分类	(155)
6.3.2 按目标特性分类	(157)
6.4 评价无线传感器网络覆盖控制算法的主要指标	(158)
6.5 Node Self-Scheduling 覆盖控制算法	(160)
6.5.1 基本原理与实现方法	(161)
6.5.2 冗余节点的判断	(161)
6.5.3 盲点的判断与消除	(163)
6.6 质心节能覆盖和节能覆盖节点集方案	(164)
6.6.1 覆盖与定位	(164)
6.6.2 无线传感器网络节能覆盖和质心覆盖法	(164)
6.6.3 选择覆盖网络传感器节点集的方法	(166)
参考文献	(167)
第七章 煤矿安全监控系统	(169)
7.1 系统分析与系统总体方案	(170)
7.1.1 煤矿瓦斯浓度监测系统	(170)
7.1.2 矿工定位系统	(171)
7.1.3 系统总体方案	(171)
7.2 系统中无线网络的通信协议	(173)
7.2.1 无线传感器网络常用的通信协议	(173)
7.2.2 ZigBee 技术及其特点	(175)
7.2.3 ZigBee 协议栈和支持的拓扑结构	(177)
7.3 煤矿安全监控系统的架构	(182)

7.3.1	系统的总体架构	(182)
7.3.2	系统各组成部分的功能	(183)
7.3.3	系统中无线网络和无线网络的连接	(183)
7.4	系统设计方案	(184)
7.4.1	传感器节点的硬件设计	(184)
7.4.2	系统软件设计	(192)
7.5	煤矿井下人员定位	(201)
7.5.1	煤矿井下人员定位系统软件设计思路	(202)
7.5.2	煤矿井下定位算法的选择与改进	(204)
7.5.3	定位算法误差分析	(209)
7.6	灾害信息的特征分析	(211)
7.6.1	时域特征分析	(211)
7.6.2	频域特征分析	(212)
7.7	监控界面开发与性能测试	(213)
7.7.1	上位机监控界面软件开发	(213)
7.7.2	系统调试	(217)
	参考文献	(222)

第一章 绪 论

1.1 无线传感器网络概述

随着半导体技术和通信技术的发展,我们已经由 PC 时代和网络时代,进入后 PC 时代。自 Mark Weiser 在 1991 年首次提出普适计算^[1](Ubiquitous Computing)思想以来,普适计算作为 21 世纪的计算模式,日益受到人们的关注和重视。“普适计算”是指“无论何时何地,人们都可以通过某种设备访问到所需的信息”。从计算技术的角度来看,人类已经由网络计算逐步延伸到了普适计算。从软件系统的角度来讲,普适计算是指使用各种微型的嵌入式计算设备在分布相对广泛的地域范围内,采集处理各种相关信息,然后利用各种通信技术手段同其它异构的计算设备实现各种联机事务处理和数据交互。因为一般嵌入式设备的计算资源(内存、存储设备和 CPU)和能源都相当有限,因此大部分复杂的处理工作需要由功能强大的服务器完成。普适计算作为 21 世纪的计算模式,受到人们的普遍重视和关注。国内外研究机构投入大量的人力、物力和财力进行研究工作,要研究方向包括支持普适计算的新技术(如无线传感器网络)、软件系统(如支持普适计算的操作系统与网络中间件技术),上下文感知计算技术等。其中无线传感器网络技术作为普适计算思想大系统中的一个典型的应用,其研究起步于 20 世纪 80 年代,集合了传感测量、微电机系统(Micro-Electro-Mechanism System, MEMS)、嵌入式计算以及网络通信等多种学科的最新成就,是一门新兴综合性科学技术,是现代高新技术领域的重要组成部分。

1.1.1 无线传感器网络发展历程

传感器网络研究首先源自国防军事领域的需求,其最新研究成果和主要进展也反映在该领域。美国军方率先开展研究,实施了一系列项目,取得较多成果。20 世纪 80 年代,美国国防部高级研究计划局(Denfense Advanced Research Projects Agency, DARPA)启动分布式传感器网络(Distributed SensorNetwork, DSN)项目,在传感器、网络通信协议、信息处理和分布式系统设计等技术领域开展了研究,主要成果包括:卡内基梅隆大学面向通信的网络操作系统 Accen 以及后来的 Mach^[1-2];麻省理工学院基于知识的信号处理技术^[3];麻省理工学院林肯实验室面向低空飞行器、基于声音信号的实时跟踪测试平台^[4]等。

20 世纪 90 年代,美国军方提出未来战争主要模式将从“平台中心战”转变为“网络中心战”(Network Centric Warfare, NCW)^[5],传感器网络可有机结合交战网络和信息网络,支持完成各作战平台的网络化和一体化,是实现网络中心战的关键技术之一。在此期间军方推动了多个项目的研究,主要包括:加州大学洛杉矶分校和 Rockwell 研究中心的 WINS(Wireless Integrated Network Sensors)项目^[6],主要目标是构建分布式传感节点网络,提供各种环境下的节点操作能力,并与 Intemet 互联;加州大学伯克利分校的“智能微尘”(SmartDust)^[7],试图实现如尘埃般悬浮在空中的微型传感节点,已成功研制出 Macro mote、Laser mote 和 Milli mote 等多种节点,并已商业化;随后启动的 NEST^[8]项目则在传感节点的嵌入式操作系统 TinyOs、编译器 NesC 和仿真环境等领域开展工作。

21 世纪初, DARPA 提出“C4KISR”(Command, Control, Communications, Computers, Kill, Intelligence, Surveillance, Reconnaissance)^[9],主要目标是整合“指挥、控制、通信、计算机、杀伤、情报及监视与侦察”各网络平台,强调战场情报的获取能力、信息的综合处理和利用能力,旨在缩短目前发现、定位、跟踪、瞄准、交战和评估各步骤之间的延迟,传感器网络是该系统的重要研

究领域之一。随后, DARPA 启动了 SensIT (Sensor Information Technology) 项目^[10], 主要研究可应用于战场环境下以 Ad Hoc 形式快速部署, 适应高度动态变化环境的网络技术, 以及准确、可靠、快速的网络信息处理技术, 建立一个廉价的无处不在的网络系统。2001 年美国陆军开始实施“灵巧传感器网络”(Smart Sensor Web, SSW) 项目, 基本思想是在战场上布设大量传感器以收集和传输信息, 并对相关原始数据进行过滤, 再把重要信息传送到各数据融合中心得到战场全景图, 以提高对战场态势的感知能力。

2002 年 5 月, 美国 Sandia 国家实验室与美国能源部合作, 开发对付生化武器恐怖袭击的传感器网络系统, 该系统配备可检测有毒气体的化学传感器, 其目标是尽早发现以地铁或车站等场所为目标的生化武器袭击, 并及时采取防范对策。

在工业生产和民用领域, 无线传感器网络可应用于环境监测、医疗护理、智能家居、智能交通监控和航天探索等方面。环境监测方面, 传感器网络可用于监控工厂设备和人员运作情况, 以及工作场所的灯光、空气温度或湿度等条件; 监视农作物灌溉、土壤空气、气象形成和地质变化等; 监测和预报火山、洪水或地震等灾害现象; 还可用于对动物种群生活习性进行跟踪研究等。比如, ALERT 系统通过配备多种传感器监测降雨量、河水水位和土壤水分, 并依此预测山洪; 加州大学伯克利分校 Intel 实验室和大西洋学院联合在大鸭岛上部署监测海燕生活习性的传感器网络^[11]。

医疗护理方面, 传感器网络可用于监测人体内各种生理数据, 跟踪和监控医院内医生和患者的行动, 以及实施药物管理等。比如, SSIM (Smart Sensor and Integrated Microsystems) 项目^[12]旨在研制可植入人眼的, 由上百个微型传感器组成的人工视网膜芯片来帮助失明者和弱视者。

智能家居方面, 通过置于房间内的各种传感器感知居室不同部分的微观状况, 从而对空调、门窗以及其它家电进行自动控制, 可提供更舒适、方便和人性化的智能家居环境^[13]。比如, 在美国国家科学基金委员会 (National Science Foundation, NSF) 和 HP 等公司的资助下, 乔治工学院启动 AHRI (Aware Home Research

Initiative) 项目^[14], 目标是在建筑物内部署可感测居住者需求的传感器网络。

智能交通方面, 美国交通部在 1995 年提出“国家智能交通系统项目规划”, 计划集成先进的传感器、数据通信、控制及计算机处理技术, 建立一个大范围全方位的实时高效综合交通运输管理系统。

航天探索方面, 传感器网络可部署在飞行器或空间站的各个角落, 实施状态监控, 也可借助飞行器撒播在外星体, 对星球表面和空间物质进行长时间监测。比如, 2005 年, 我国神舟六号飞船上配备了各类传感器, 联合对飞行器状态提供多角度实时监测, 而宇航员太空服中内嵌的传感器系统则不间断采集航天员的生理数据, 它们是飞船和宇航员成功返回的重要保证; 美国喷气动力实验室启动 Sensor webs 项目^[15], 目标是研究用于火星探测的环境感知传感器系统。

目前, 国际上对无线传感器网络的研究非常活跃。美国、加拿大、英国、德国、芬兰、意大利和日本等国都有研究机构从事相关技术研究。比如, 美国 NSF 在 2003 年制定了无线传感器网络研究计划, 在加州洛杉矶分校成立了传感器网络研究中心, 开展“嵌入式智能传感器”(Embedded Networked Sensing, CENS) 项目, 希望通过相关基础理论研究, 实现传感器网络对现实世界的全方位监测和控制^[16], 2002~2005 年, 乔治工学院在 NSF 资助下, 进行了 SensoNet 项目, 研究适合无线传感器网络的通信协议, 包括路由协议、MAC 协议、时间同步、拓扑控制和时空相关分析等, 目前, 相关研究还在继续深入中^[17-18]。在相关外文期刊和国际会议中, 每年有大量关于无线传感器网络各层面研究成果的论文发表, 且呈逐步增多趋势。

我国也同步展开了在传感器网络方面的研究, 得到政府各部门和院校的重视^[19-23]; 2006 年初, 国务院发布“国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020)”, 将传感器网络及其智能信息处理技术作为信息产业及现代服务业领域中的优先发展课题之一; 国家自然科学基金委员会已经审批了无线传感器网络相关的一个重点

课题和多个面上课题；国家发展改革委员会在下一代互联网示范工程中部署了相关课题；国防科工委也资助了相关项目的开展；中科院上海微系统研究所、软件研究所和计算所等科研机构，哈尔滨工业大学、清华大学、北京邮电大学、国防科技大学、西安交通大学、西安电子科技大学和西北工业大学等院校较早开展了传感器网络的研究，2004 年开始，已有更多院校和科研机构投入该领域。

1.1.2 无线传感器网络的基本概念

无线传感器网络由部署在监测区域内的大量传感节点组成，节点可通过测量目标的热、红外、声纳、雷达或震动等信号获取温度、光强度、噪声、压力、运动物体大小、速度和方向等目标属性，网络通过多节点协作，完成对感兴趣目标属性或事件的感知、采集和处理，并及时告知用户。构成无线传感器网络的传感器节点具有通信和计算能力，是可根据环境自主完成任务的“智能”自组织分布式网络系统。2000 年以来，随着微电子技术、计算技术和无线通信等技术的进步，制造廉价、微型，低功耗、多功能的传感器节点成为可能。它具有如下优势：(1)网络部署灵活，覆盖面广；(2)节点密布，靠近目标，可进行多角度、多方位和高精度的信息获取和综合，实现“以数量换质量”；(3)低成本，高冗余的网络设计提供高可靠性保证；(4)分布式自组网，支持多用户多模式的并发访问和任务实现等。

如果说 Internet 改变了人与人之间的沟通方式，构成了逻辑上的信息世界，那么，传感器网络将改变人与自然界的交互方式，可更加直接地感知客观世界，把逻辑上的信息世界和客观上的物理世界融为一体，将大大扩展现有网络的功能和人类认识改造世界的能力。传感器网络巨大的科学意义和应用价值，已引起了世界各国学术界、军事部门和工业界的极大关注。1999 年的美国商业周刊和 2003 年的 MIT 技术评论分别将其列为 21 世纪最有影响的技术和 10 个即将改变世界的技术之一。我国的无线传感器网络应用研究几乎与发达国家同步启动，正逐渐成为热点，开展我国在该领域的相关

研究,具有重要的社会、经济意义和长远的战略意义。

1.1.3 无线传感器网络的结构与特点

无线传感器网络综合了传感器、嵌入式计算、分布式信息处理、现代网络及无线通信等技术,是多学科高度交叉的新兴前沿热点研究领域^[24]。网络中大量节点以无线多跳的无中心方式连接,通过各种高度集成的微型传感器对感兴趣事件或目标属性进行监测,利用嵌入式系统和低功耗处理器对感知数据进行处理,并基于网络通信实现协作信息处理,再以多跳中继方式将数据传输给用户。当前,无线传感器网络的研究主要集中在网络设计、信息处理和网络模拟仿真等方面。

传统网络面向数据传输,无线传感器网络则面向应用,以数据为中心。传统的网络设计方法对传感器网络并不适合,但仍可参考传统网络分层的方法,从应用层、传输层、网络层、数据链路层和物理层来考察其网络设计问题。此外,交叉层优化可在资源消耗和性能提升之间获得平衡,已受到越来越多的关注。

无线传感器网络中,数据具有空域广布、时域累积和高度冗余的特点,要求资源有限的多个节点通过协商和合作完成网络信息处理。这种节点间的协作信号信息处理需综合考虑信息增益、网络性能、资源消耗和可靠性等约束。

一般情况下,无线传感器网络的系统结构如图 1.1 所示,具有无线通信功能的传感器节点分布于无线传感器网络的各个部分,负责对数据的感知采集,并将数据发送至汇聚节点。汇聚节点与监控或管理中心通过 Internet 等网络进行通信,管理人员对收集到的数据进行分析处理,然后做出判断或者决策。

传感器节点是一个微型的嵌入式系统,它的处理、存储和通信能力相对较弱,一般采用电池供电。每个传感器节点还兼顾采集终端和路由器双重功能,在收集和处理区域信息数据的同时,还负责存储、管理和融合来自其他不同节点的数据。汇聚节点的各种能力相对较强,它是传感器网络和外部网络连接的桥梁,负责发布管理

中心的监控任务，并把收集的数据转发到外部网络上。

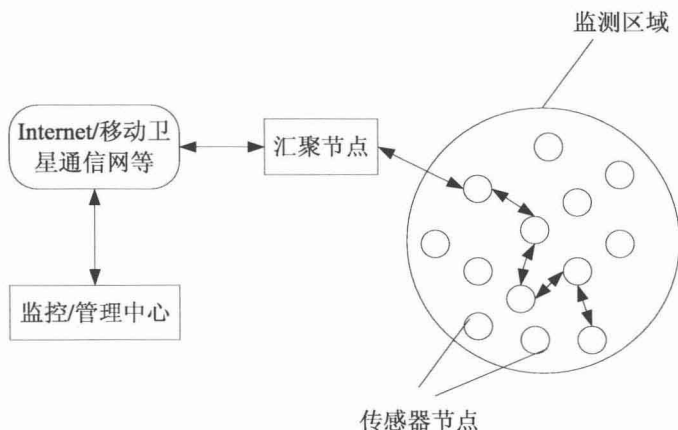


图 1.1 无线传感器网络体系结构

传感器节点由传感器模块、处理器模块、无线通信模块和能量供应模块四部分组成，如图 1.2 所示。传感器模块负责监控区域内信息的采集和转换；处理器模块负责控制整个传感器节点的各项操作，存储和处理本身采集的数据以及来自其他节点的数据；无线通信模块负责与其他传感器节点进行无线通信，交换控制消息和收发采集数据；能量供应模块为传感器节点提供运行时所需的能量，通常采用微型电池。

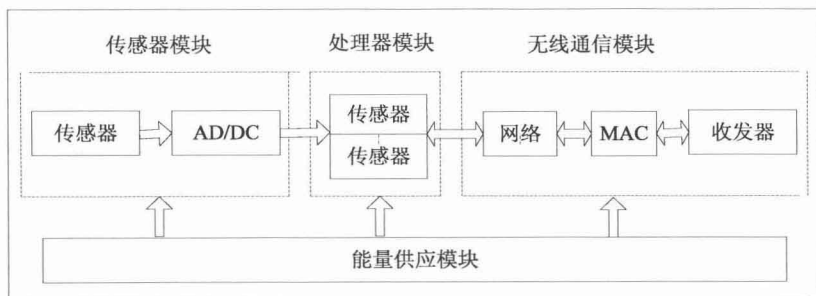


图 1.2 传感器节点结构图