

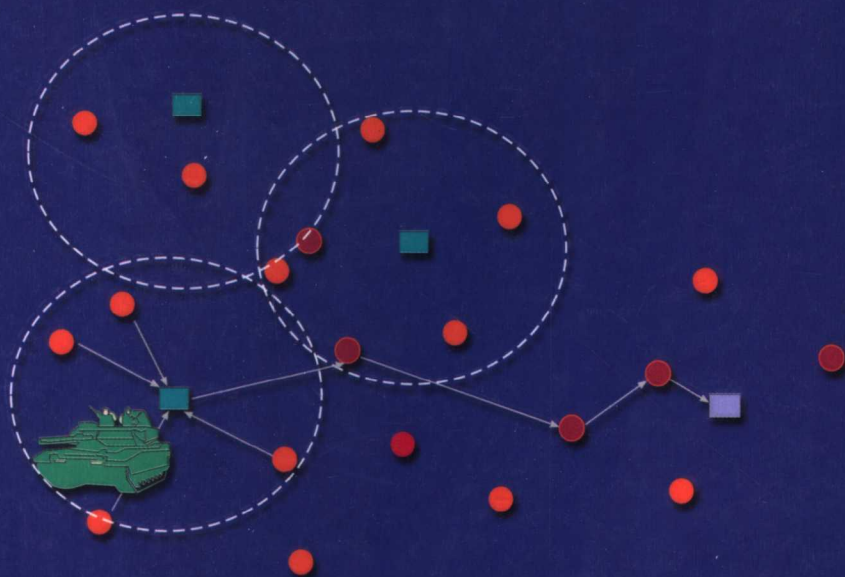


智能科学技术著作丛书

智能无线传感器网络系统

Intelligent Wireless Sensor Networks

于海斌 曾鹏 梁犇 编著



科学出版社

www.sciencep.com

智能科学技术著作丛书

智能无线传感器网络系统

于海斌 曾 鹏 梁 桦 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书系统地论述了无线传感器网络的概念、特点和关键技术,通过与传统网络系统的对比分析,提出了无线传感器网络面临的诸多挑战性问题,总结了当前最新的研究成果。全书共分六个部分,共13章。内容涉及无线传感器网络的概念、体系结构、研究与应用现状,无线传感器网络的通信技术、组网技术、管理技术和协同技术,无线传感器网络仿真与开发环境,以及无线传感器网络的典型应用实例。相信通过阅读本书,读者会加深对无线传感器网络的理解,为进一步研究提供良好的基础与参考。

本书既可作为计算机、通信、电子和自动化等专业本科高年级学生和研究生的教材,也可作为无线传感器网络领域的研究人员和工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

智能无线传感器网络系统/于海斌等编著. —北京:科学出版社, 2006

ISBN 7-03-016453-9

(智能科学技术著作丛书)

I. 智… II. 于… III. 无线电通信-传感器 IV. TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第132222号

责任编辑:李 锋 田士勇 姚庆奥/责任校对:赵桂芬

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年1月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2006年1月第一次印刷 印张:21 1/2

印数:1—3 000 字数:391 000

定价:49.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

《智能科学技术著作丛书》编委会

名誉主编：吴文俊

主 编：涂序彦

副 主 编：

钟义信 史忠植 何华灿 蔡自兴 孙增圻 童安奇 谭 民

秘 书 长：韩力群

副秘书长：田士勇

编 委：(按姓氏拼音排序)

蔡庆生(中国科技大学)

蔡自兴(中南大学)

杜军平(北京工商大学)

韩力群(北京工商大学)

何华灿(西北工业大学)

何 清(中国科学院计算技术研究所)

黄河燕(中国科学院计算语言研究所)

黄心汉(华中科技大学)

焦李成(西安电子科技大学)

李祖枢(重庆大学)

刘 宏(北京大学)

刘 清(南昌大学)

秦世引(北京航空航天大学)

邱玉辉(西南师范大学)

阮秋琦(北京交通大学)

史忠植(中国科学院计算技术研究所)

孙增圻(清华大学)

谭 民(中国科学院自动化研究所)

田士勇(科学出版社)

童安奇(科学出版社)

涂序彦(北京科技大学)

王国胤(重庆邮电学院)

王家钦(清华大学)

王万森(首都师范大学)

吴文俊(中国科学院系统科学研究所)

杨义先(北京邮电大学)

尹怡欣(北京科技大学)

于洪珍(中国矿业大学)

张琴珠(华东师范大学)

钟义信(北京邮电大学)

庄越挺(浙江大学)

感谢国家自然科学基金的资助!

(项目编号: 60434030, 60374072)

**纪念人工智能诞生 50 周年暨中国人工智能
学会成立 25 周年**

序

因特网改变了人与人的交互方式，传感器网络将改变未来人与自然的交互方式。

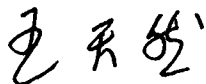
无线传感器网络作为新兴的测控网络技术，是能够自主实现数据的采集、融合和传输应用的智能网络应用系统。无线传感器网络使逻辑上的信息世界与真实的物理世界紧密结合，从而真正实现“无处不在的计算”模式。无线传感器网络是一个综合性学科，它所带来的新问题向研究者提出了严峻的挑战。未来的无线传感器网络将向海、陆、空、天立体化网络系统的方向发展，最终将成为人类生产和生活不可分割的一部分。无线传感器网络无论是在国防，还是在国民经济的各个领域均有着广阔的应用前景。对该技术的深入研究与推广应用将推动我国信息化建设的进程，并极大地带动相关产业和学科的发展，从而进一步提升我国的综合国力。为此，我们需要进一步研究无线传感器网络所引发的一系列技术问题。

研究无线传感器网络不仅具有重要的理论价值，同时也具有现实的指导意义。目前我们迫切需要一本有关无线传感器网络通信、组网、基础服务与网络管理、协同信息处理、仿真与开发环境等方面的综合性论著，以帮助和指导我们的研究与实践。

该书是由一群活跃的青年科技工作者研究团队，在国家自然科学基金委员会的支持下，基于已开展的无线传感器网络的研究与开发工作而撰写的。通过与传统（无线）网络系统的对比研究，明确了无线传感器网络的特点；从无线传感器网络系统应用推广过程中面临的关键问题出发，总结归纳了在无线传感器网络领域的研究成果和实践经验，全面系统地向读者阐述了无线传感器网络系统的新特点、新问题和新方法。

该书内容新颖、论述精辟、博采众长，注重理论与实际的有机结合，具有很强的可读性。希望该书的出版能为我国无线传感器网络的研究与发展发挥重要的推动作用。

中国工程院院士



2005年3月23日

前 言

人类进入 21 世纪以来, 微电子机械系统 (micro-electro-mechanism system, MEMS)、计算机、通信、自动控制和人工智能等学科的飞速发展孕育了一种新型的测控网络——无线传感器网络 (wireless sensor network, WSN)。

无线传感器网络是由大量无处不在的, 具有通信与计算能力的微小传感器节点密集布设在无人值守的监控区域而构成的能够根据环境自主完成指定任务的“智能”自治测控网络系统。无线传感器网络是一种超大规模、无人值守、资源严格受限的全分布系统, 采用多跳对等的通信方式, 其网络拓扑动态变化, 具有自组织、自治、自适应等智能属性。

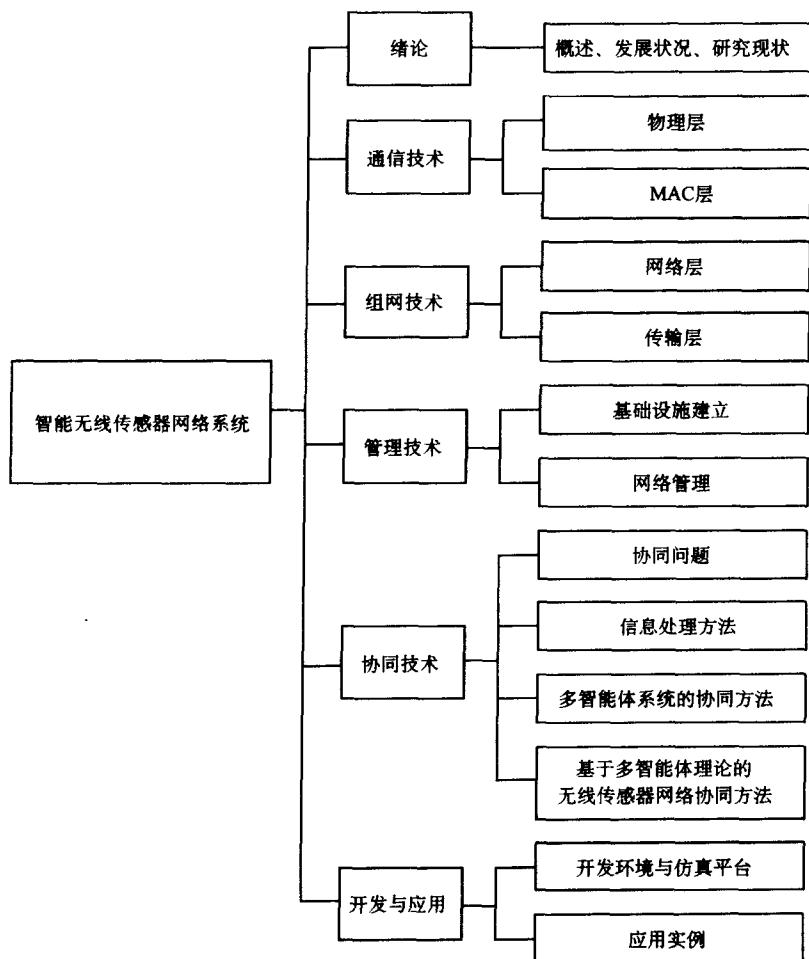
无线传感器网络是继因特网之后, 将对 21 世纪人类生活方式产生重大影响的 IT 热点技术。如果说因特网改变了人与人之间交流、沟通的方式, 那么无线传感器网络则将逻辑上的信息世界与真实物理世界融合在一起, 将改变人与自然交互的方式。为此, 1999 年, 美国商业周刊将无线传感器网络列为 21 世纪最具影响的 21 项技术之一; 2003 年, MIT 技术评论 (*Technology Review*) 在预测未来技术发展的报告中, 将其列为改变世界的 10 大新技术之一; 2003 年, 美国商业周刊又在其“未来技术专版”中发表文章指出, 传感器网络是全球未来的四大高技术产业之一, 将掀起新的产业浪潮。

无线传感器网络的出现引起了全世界范围的广泛关注。最早开始无线传感器网络技术研究的是美国军方。1978 年, 美国国防部高级研究计划局 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 在卡耐基-梅隆大学成立了新一代分布式传感器网络工作组。此后, DARPA 又联合美国自然科学基金委员会 (National Science Foundation, NSF) 设立了多项有关无线传感器网络的研究项目。我国近两年也以国家自然科学基金等多种形式支持无线传感器网络的研究。这些研究推动了以网络技术为核心的新军事革命, 诞生了网络中心战思想和体系。美国海军副司令 Arthur Cebrowski 曾经说: “我们时刻关注着正在兴起的基于传感器网络的战争。众所周知, 只要我们能感知到敌人的存在, 我们就一定能消灭之。”无线传感器网络是网络中心战体系中面向武器装备的网络系统, 是 C4ISRT (command, control, communication, computing, intelligence, surveillance, reconnaissance and targeting) 的重要组成部分。目前, 无线传感器网络的应用已由军事领域扩展到其他许多领域, 能够完成诸如灾难预警与救助、家庭健康监测、空间探索等传统系统无法完成的任务, 成为一种“无处不在”的传感技术。

无线传感器网络在为人类社会带来不可估量的好处的同时, 也提出了新的技术

挑战。规模超大、资源的严格受限及网络拓扑结构动态变化等特点给网络的通信、组网、基础设施建立、管理和协同信息处理等带来了新的问题，引起了各国国家政府和学者的广泛重视。国内很少有系统的资料可供借鉴。为了满足广大研究人员的迫切需要，笔者在自身研究的基础上，经过认真收集整理国内外的文献，编写了本书。

本书共分六个部分，共 13 章，具体安排如下图所示。



本书主要内容如下:

第一部分,即第1章,重点给出了无线传感器网络的基本概念、特点、体系结构、发展现状以及所面临的关键问题,其中体系结构是全书后续章节展开的基础。

第二部分包括第2章和第3章,介绍了无线传感器网络的通信技术。第2章介绍了无线通信的关键技术以及与无线传感器网络物理层协议相关的 IEEE 802.15.4 标准和超宽带技术,详细论述了无线传感器网络物理层协议设计的主要问题和解决策略;第3章分类介绍了无线通信的信道接入技术,并以3种典型的 MAC 协议为例,介绍无线传感器网络的 MAC 接入技术。

第三部分包括第4章和第5章,重点论述了无线传感器网络组网中的关键技术——路由技术和传输技术。第4章较详细地论述了移动 Ad Hoc 网路和无线传感器网络的路由协议;第5章介绍了无线传感器网络的两种典型传输层协议以及无线传感器网络与 Internet 互联技术。

第四部分包括第6章和第7章,介绍了无线传感器网络管理方面的研究成果。第6章讨论无线传感器网络基础设施建立的关键技术,包括拓扑发现、节点定位和时间同步;第7章介绍无线传感器网络管理的几个主要方面——拓扑管理、传感器管理、节能策略、性能监测和安全管理。

第五部分包括第8~11章,该部分以目标检测与追踪问题为背景详细地论述了无线传感器网络的协同技术。第8章介绍了无线传感器网络的协同问题,并描述了无线传感器网络的典型协同问题——目标检测与追踪;第9章重点介绍了目前无线传感器网络解决协同问题时所用到的两种数据融合方法;第10章介绍了多智能体系统中的主要协同方法和分布式决策与搜索方法,如果读者已经具备多智能体系统的基本知识,本章可以略过;第11章则以目标检测与追踪问题为背景详细论述了无线传感器网络中基于多智能体思想的各种协同解决方案。

第六部分包括第12章和第13章,主要介绍无线传感器网络设计与实现的平台和范例。第12章介绍了无线传感器网络的主要仿真平台、硬件开发环境和软件开发环境;第13章提供了无线传感器网络设计与实现的4个典型应用实例。

本书由于海斌、曾鹏、梁骅组织编写,参与本书编写的人员还有臧传治(参与第五部分第8~11章的编写)、尚志军(参与第四部分第6章、第7章的编写)、周悦(参与第二部分第3章的编写)、梁英(参与第三部分第4章、第5章的编写)、陈剑霞(参与第五部分第9章、第11章的编写)、白洁音(参与第三部分第5章、第六部分第12章的编写)、王军(参与第四部分第7章、第六部分第12章的编写)、卞永钊(参与第六部分第13章、第五部分第11章的编写)、赵雪峰(参与第六部分第12章的编写)、张华良、邢志浩、黄艳和刘琳等,在此对他们表示感谢,正是他们的共同努力,本书才得以出版。另外,对本书所参考的所有文献的作者表示诚挚的感谢。

笔者进行无线传感器网络的研究和开发,得到了下列基金的大力支持:国家自

然科学基金（项目编号：60374072；重点项目编号：60434030）、辽宁省青年人才基金（项目编号：3040004）、辽宁省博士启动基金（项目编号：20041004）。本书包含了这些基金资助项目的研究成果，为此特致以衷心的感谢。

由于时间仓促，再加上无线传感器网络的研究和应用是一个飞速发展的全新领域，尽管我们尽力想做到精益求精，但难免有疏漏之处，敬请读者批评指正。您的意见是对我们的最大帮助，也是我们进步的基石。

作 者

2004 年 12 月

目 录

序 前 言

第一部分 总 论

第1章 绪论	5
1.1 无线传感器网络概述	5
1.1.1 无线传感器网络的基本概念	5
1.1.2 无线传感器网络的特点	6
1.1.3 无线传感器网络的应用领域	8
1.2 无线传感器网络的发展	11
1.2.1 无线数据网络	11
1.2.2 无线传感器网络	14
1.3 无线传感器网络的研究	15
1.3.1 无线传感器网络面临的挑战	15
1.3.2 无线传感器网络的关键技术	17
1.3.3 无线传感器网络技术发展趋势	20
参考文献	22

第二部分 无线传感器网络通信技术

第2章 无线传感器网络的物理层	27
2.1 物理层技术概述	27
2.1.1 物理层的基本概念	27
2.1.2 无线通信物理层的主要技术	29
2.2 IEEE802.15.4	42
2.2.1 IEEE802.15.4 物理层概述	42
2.2.2 IEEE802.15.4 物理层服务规范	43
2.2.3 IEEE802.15.4 物理层的帧结构	48
2.3 超宽带技术	49
2.3.1 超宽带技术的基本原理	50
2.3.2 超宽带技术的特点	53
2.3.3 超宽带技术的研究现状	54

2.3.4 超宽带技术在无线传感器网络中的应用	55
2.4 无线传感器网络物理层的研究	56
2.4.1 无线传感器网络物理层需要解决的问题	56
2.4.2 无线传感器网络物理层的研究现状	58
2.5 无线传感器网络物理层面临的技术挑战	65
参考文献	66
第3章 无线传感器网络的信道接入	68
3.1 无线网络信道接入概述	68
3.2 基于竞争机制的信道接入技术	69
3.2.1 基于竞争协议的信道接入技术概述	69
3.2.2 隐藏终端和暴露终端	72
3.2.3 退避算法	75
3.3 基于固定分配的信道接入技术	77
3.3.1 FDMA 方式	77
3.3.2 TDMA 方式	77
3.3.3 CDMA 方式	80
3.3.4 SDMA 方式	82
3.4 按需分配的信道接入技术	82
3.4.1 PCF 方式	83
3.4.2 WTRP 方式	83
3.5 无线传感器网络信道接入技术的研究	88
3.5.1 无线传感器网络信道接入技术需要解决的问题	88
3.5.2 无线传感器网络信道接入技术的研究现状	89
3.5.3 S-MAC 协议	91
3.5.4 DE-MAC 协议	96
3.5.5 MD 协议	98
3.6 无线传感器网络信道接入技术面临的技术挑战	102
参考文献	102

第三部分 无线传感器网络组网技术

第4章 无线传感器网络的路由	107
4.1 无线网络路由协议概述	107
4.1.1 路由的基本概念	107
4.1.2 路由算法及协议	108
4.2 无线自组网络路由协议研究	110
4.2.1 无线自组网络路由协议需要解决的主要问题	110

4.2.2 无线自组网络路由协议的分类	111
4.2.3 无线自组网络平面路由协议	112
4.2.4 无线自组网络分层路由协议	115
4.2.5 无线自组网络地理定位辅助路由协议	116
4.3 无线传感器网络路由协议研究	118
4.3.1 无线传感器网络路由协议需要解决的问题	118
4.3.2 无线传感器网络路由协议的分类	119
4.3.3 无线传感器网络平面路由协议	120
4.3.4 网络分层路由协议	126
4.3.5 无线传感器网络地理定位辅助路由协议	132
4.4 无线传感器网络路由协议的优化	135
4.4.1 路由协议的比较	135
4.4.2 路由协议的优化方法	136
4.4.3 以数据为中心的启发式数据收集算法	137
4.5 无线传感器网络路由协议面临的技术挑战	138
参考文献	139
第5章 无线传感器网络传输协议	142
5.1 无线传输协议概述	142
5.1.1 传输层的基本概念	142
5.1.2 传输协议	142
5.2 无线传感器网络传输协议研究	144
5.2.1 无线传感器网络传输协议需要解决的问题	145
5.2.2 PSFQ 协议	146
5.2.3 ESRT 协议	148
5.3 无线传感器网络与 Internet 的互联	151
5.3.1 网络互联结构	152
5.3.2 网络互联协议	156
参考文献	158

第四部分 无线传感器网络管理技术

第6章 无线传感器网络的构建	161
6.1 无线传感器网络的拓扑发现	161
6.1.1 拓扑发现的基本概念	161
6.1.2 拓扑发现研究	161
6.1.3 拓扑发现面临的技术挑战	165
6.2 无线传感器网络节点定位	165

6.2.1 节点定位的基本概念	165
6.2.2 节点定位的研究	166
6.2.3 节点定位面临的技术挑战	173
6.3 无线传感器网络的时间同步	173
6.3.1 时间同步的基本概念	173
6.3.2 时间同步的研究	174
6.3.3 时间同步面临的技术挑战	178
参考文献	178
第7章 无线传感器网络的网络管理	181
7.1 网络管理技术及协议概述	181
7.1.1 网络管理的基本概念	181
7.1.2 网络管理的基本内容	181
7.1.3 Internet 网络管理协议	181
7.1.4 无线自组网络网络管理协议	182
7.1.5 无线传感器网络管理体系及协议	183
7.2 无线传感器网络的拓扑管理	184
7.2.1 拓扑管理的基本概念	184
7.2.2 拓扑管理的研究	184
7.2.3 拓扑管理面临的技术挑战	186
7.3 无线传感器网络的传感器管理	186
7.3.1 传感器管理的基本概念	186
7.3.2 传感器管理的研究	186
7.3.3 传感器管理面临的技术挑战	189
7.4 无线传感器网络的能量管理	190
7.4.1 能量管理的基本概念	190
7.4.2 能量管理研究	191
7.4.3 能量管理面临的技术挑战	193
7.5 无线传感器网络的网络性能监测	194
7.5.1 网络性能监测的基本概念	194
7.5.2 网络性能监测的研究	194
7.5.3 网络性能监测面临的技术挑战	196
7.6 无线传感器网络的安全管理	197
7.6.1 无线传感器网络的安全需求	198
7.6.2 无线传感器网络安全问题的特点	199
7.6.3 无线传感器网络安全问题的研究现状	201
7.6.4 基于生物免疫原理的无线传感器网络安全体系	204

7.6.5 实现无线传感器网络安全的途径	209
参考文献	209

第五部分 无线传感器网络协同技术

第8章 无线传感器网络的协同问题	215
8.1 无线传感器网络协同问题概述	215
8.2 无线传感器网络协同需要解决的问题	216
8.3 典型的无线传感器网络协同问题——追踪	217
8.3.1 追踪问题描述	217
8.3.2 追踪步骤	219
参考文献	221
第9章 协同信息处理方法	222
9.1 贝叶斯估计方法	222
9.1.1 贝叶斯估计的传感器节点模型	222
9.1.2 贝叶斯估计的过程模型	223
9.1.3 结论	229
9.2 卡尔曼滤波方法	229
9.2.1 卡尔曼滤波方法	230
9.2.2 扩展卡尔曼滤波方法	232
9.2.3 联合卡尔曼滤波方法	233
参考文献	235
第10章 多智能体系统中的协同方法	236
10.1 多智能体系统概述	236
10.2 协同方法	237
10.2.1 合同网	238
10.2.2 组织结构设计法	240
10.2.3 多智能体计划调度	240
10.2.4 协商	241
10.2.5 设计协同方法的准则	243
10.3 分布式决策及搜索方法	244
参考文献	245
第11章 基于多智能体理论的无线传感器网络协同方法	247
11.1 基于合同网及拍卖的无线传感器网络协同方法	247
11.1.1 基于合同网及拍卖的协同方法概述	247
11.1.2 无线传感器网络中任务间的相互作用关系	248
11.1.3 基于中心的任务分配方法	249

11.1.4 仲裁方法与组合拍卖方法	250
11.1.5 迭代式组合拍卖方法	253
11.1.6 动态仲裁方法	255
11.2 基于动态联盟的无线传感器网络协同方法	259
11.2.1 动态联盟方法概述	259
11.2.2 初始联盟的形成	260
11.2.3 联盟的形成	264
11.2.4 联盟的确认	269
11.3 基于组织结构设计的无线传感器网络协同方法	269
11.3.1 组织结构方法概述	269
11.3.2 组织结构方法的运行原理	270
11.4 基于分布式约束满足的无线传感器网络协同方法	273
11.4.1 分布式探测调度问题	273
11.4.2 低负载分布式方法	275
11.5 无线传感器网络协同问题面临的技术挑战	277
参考文献	278

第六部分 无线传感器网络开发与应用

第 12 章 无线传感器网络的典型开发环境与仿真平台	283
12.1 无线传感器网络硬件系统	283
12.1.1 传感器节点设计与开发需要解决的问题	283
12.1.2 传感器节点的开发	283
12.2 无线传感器网络软件环境	286
12.2.1 TinyOS 操作系统	286
12.2.2 nesC 编程语言	288
12.3 无线传感器网络仿真平台	292
12.3.1 网络仿真概述	292
12.3.2 无线传感器网络仿真需要解决的问题	292
12.3.3 无线传感器网络仿真的研究	293
12.3.4 无线传感器网络常用的仿真软件	297
参考文献	303
第 13 章 无线传感器网络的应用	304
13.1 NSOF 系统	304
13.1.1 NSOF 系统概述	304
13.1.2 系统体系结构	304
13.1.3 NSOF 系统关键技术	305

13.2 GDI 系统	307
13.2.1 GDI 系统概述	307
13.2.2 系统体系结构	307
13.2.3 原型系统与实验	309
13.3 建筑结构健康监测	311
13.3.1 建筑健康监测概述	311
13.3.2 系统体系结构	312
13.3.3 原型系统与实验	313
13.4 未来家庭健康监测	315
13.4.1 家庭健康监测概述	315
13.4.2 系统体系结构	316
13.4.3 WWM 实验系统	317
参考文献	319
附录 英汉缩略语对照表	320