



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

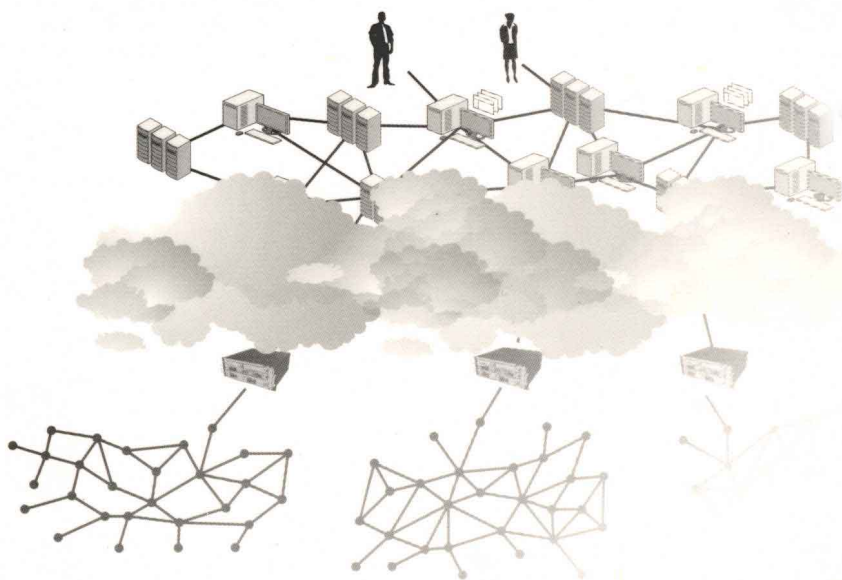
物联网在中国

邹永华

“十二五”国家重点图书出版规划项目

无线传感器网络

王营冠 王智 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

物联网在中国

“十二五”国家重点图书出版规划项目

国家出版基金项目

无线传感器网络

王营冠 王 智 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书根据国家“十二五”发展规划及物联网工程专业发展方向和教学需要,结合无线传感器网络与物联网最新发展及其应用现状编写而成。

感知物理对象信息及信息协同处理是无线传感器网络与其他网络的根本区别,本书追本溯源,从协同感知与信息处理的角度论述无线传感器网络,通过追溯感知的本质系统地介绍了无线传感器网络。

本书主要介绍了无线传感器网络概述,并系统阐述了无线传感器网络体系架构、网络与通信技术、管理技术和协同信息处理技术;在此基础上,介绍了无线传感器网络平台,以及无线传感器网络标准与典型应用;最后探讨了相关的前沿技术。本书的特色在于内容简单明了、概念准确、图文并茂。

本书既可作为高等学校高年级本科生和研究生的教学教材和工程技术开发人员的参考书,也可供无线传感器网络和物联网相关专业人士阅读。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

无线传感器网络 / 王誉冠, 王智编著. —北京: 电子工业出版社, 2012.6

(物联网在中国)

ISBN 978-7-121-17783-5

I. ①无… II. ①王… ②王… III. ①无线电通信—传感器—研究 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 178096 号

策划编辑: 刘宪兰

责任编辑: 桑 昀

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 25.5 字数: 656 千字

印 次: 2012 年 6 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 65.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

“物联网在中国”系列丛书 编委会名单

“物联网在中国”系列丛书专家顾问委员会

主任：潘云鹤

副主任：邬贺铨 刘韵洁

委员：李国杰 何积丰 陈左宁 方滨兴 邓中翰 张文军
朱洪波 郑立荣 熊群力 芮晓武 姜文波

“物联网在中国”系列丛书编写委员会

主任：张琪

副主任：敖然 刘爱民

主编：潘云鹤

副主编：邬贺铨 刘韵洁

委员：（以下按姓氏笔画排序）：

马彦 王智 王毅 王立健 王营冠 叶甜春 刘星
刘风军 刘建明 刘宪兰 刘海涛 刘烈宏 毕开春 许罗德
何明 吴巍 吴亚林 吴建平 吴曼青 张晖 张为民
张学庆 张海霞 李安民 李作敏 李海峰 杨志强 杨放春
肖波 邹力 周翔 周晓鹏 宗平 欧阳宇 骆连合
俞春俊 洪晓枫 赵立君 倪江波 夏万利 徐勇军 徐晋耀
秦龔龙 郭先臣 顾金星 高燕婕 谢锦辉 蓝羽石 雷吉成
靳东滨 戴定一 魏凤

信息技术的高速发展与广泛应用，引发了一场全球性的产业革命，正推动着各国经济的发展与人类社会的进步。信息化是当今世界经济和社会发展的的大趋势，信息化水平已成为衡量一个国家综合国力与现代化水平的重要标志。中国政府高度重视信息化工作，紧紧抓住全球信息技术革命和信息化发展的难得历史机遇，不失时机地将信息化建设提到国家战略高度，大力推进国民经济与社会服务的信息化，以加快实现我国工业化和现代化，并将信息产业作为国家的先导、支柱与战略性新兴产业，放在优先发展的地位上。

党的十五届五中全会明确指出：信息化是覆盖现代化建设全局的战略举措；要优先发展信息产业，大力推广信息技术应用。党的“十六大”把大力推进信息化作为我国在 21 世纪头 20 年经济建设和改革的一项重要任务，明确要求“坚持以信息化带动工业化，以工业化促进信息化”，“走新型工业化道路”。党的“十七大”进一步提出了“五化并举”与“两化融合发展”的目标，再次强调了走新型工业化道路，大力推广信息技术应用与推动国家信息化建设的战略方针。在中央领导的亲切关怀、指导，各部门、各地方及各界的积极参与和共同努力下，我国的信息产业持续高速发展，信息技术应用与信息化建设坚持“以人为本”、科学发展，取得了利国惠民、举世瞩目的骄人业绩。

近几年来，在全球金融危机的大背景下，各国政要纷纷以政治家的胆略和战略思维提出了振兴本国经济、确立竞争优势的关键战略。2009 年，美国奥巴马政府把“智慧地球”上升为国家战略；欧盟也在同年推出《欧洲物联网行动计划》；我国领导在 2009 年提出了“感知中国”的理念，并于 2010 年把包含物联网在内的新一代信息技术等 7 个重点产业，列入“国务院加快培育和发展的战略性新兴产业的决定”中，同时纳入我国“十二五”重点发展战略及规划。日本在 2009 年颁布了新一代信息化战略“i-Japan”；韩国 2006 年提出“u-Korea”战略，2009 年具体推出 IT839 战略以呼应“u-Korea”战略；澳大利亚推出了基于智慧城市和智能电网的国家发展战略；此外，还有“数字英国”、“数字法国”、“新加坡智慧国 2015 (iN2015)”等，都从国家角度提出了重大信息化发展目标，作为各国走出金融危机、重振经济的重要战略举措。

物联网在中国的迅速兴起绝非炒作。我们认为它是我国战略性新兴产业——信息产业创新发展的新的增长点，是中国信息化重大工程，特别是国家金卡工程最近 10 年的创新应用、大胆探索与成功实践所奠定的市场与应用基础，是中国信息化建设在更高层次，

向更广领域纵深发展的必然结果。

近两年来，胡锦涛总书记、温家宝总理等中央领导同志深入基层调研，多次强调要依靠科技创新引领经济社会发展，要注重经济结构调整和发展模式转变，重视和支持战略性新兴产业发展，并对建设“感知中国”、积极发展物联网应用等做出明确指示。中央领导在视察过程中，充分肯定了国家金卡工程银行卡产业发展及城市多功能卡应用和物联网 RFID 行业应用示范工程取得的成果，鼓励我国信息业界加强对超高频 UHF 等核心芯片的研发，并就推动物联网产业和应用发展等问题发表了重要讲话，就加快标准制定、核心技术产品研发、抢占科技制高点、掌握发展主动权等，做出一系列重要指示。我们将全面贯彻落实中央领导的指示精神，进一步发挥信息产业对国家经济增长的“倍增器”、发展方式的“转换器”和产业升级的“助推器”作用，促进两化融合发展，真正走出一条具有中国特色的信息产业发展与国家信息化之路。

我们编辑出版“物联网在中国”系列丛书（以下简称“丛书”），旨在探索中国特色的物联网发展之路，通过全面介绍中国物联网的发展背景、体系架构、技术标准体系、关键核心技术产品与产业体系、典型应用系统及重点领域、公共服务平台及服务业发展等，为各级政府部门、广大用户及信息业界提供决策参考和工作指南，以推动物联网产业与应用在中国的健康有序发展。

“丛书”首批 20 分册将于 2012 年 6 月正式发行，我们衷心感谢国家新闻出版总署的大力支持，将“丛书”列入“十二五”国家重点图书出版规划项目，并给予国家出版基金的支持；感谢国务院各相关部门、行业及有关地方，以及我国信息产业界相关企事业单位对“丛书”编写工作的指导、支持和积极参与；感谢社会各界朋友的支持与帮助。谨以此“丛书”献给为中国的信息化事业奋力拼搏的人们！

“物联网在中国”系列丛书编委会

潘云鹤

2012 年 5 月于北京

PREFACE



Wireless sensor network (WSN) is an emerging information technology that promises to revolutionize how distributed, embedded miniature microsystems seamlessly interface with physical world to realize dreams of cyber physical systems (CPS). In the grand vision of CPS, low cost smart devices embedded in natural environment, civil infrastructures, smart appliances, and even living bodies will provide perpetual sensing, monitoring of vital information to empower enhanced natural disaster prevention, public safety, and health care.

To fully realize the potential of the WSN, multi-disciplinary technical break-through must be accomplished. Core WSN information technologies include sensing, computing and communication. The inter-disciplinary nature makes WSN a fascinating, yet challenging area for new comers to grasp the big picture of this exciting new information technology. Project managers, engineers and graduate students often found that in order to conduct research and development in WSN, one must be familiar with a multitude of disciplinary knowledge in sensor properties, wireless network, data acquisition, database, wireless communication, and many other fields. Although there are several published books in WSN, they often focus on some specific aspects of WSN or on a specific research project by the authors. There is a desperate need to have a book that offers a comprehensive, in-depth introduction to WSN.

This book *Wireless Sensor Network* by Professor Yingguan Wang and Professor Zhi Wang represents a break-through in WSN publishing. It provides an unbiased, inclusive, complete overview of all subject areas that contribute to the inter-disciplinary research in wireless sensor network. It covers applications, design, theory, and case studies. Professor Yingguan has successfully led several large scale real world wireless sensor network projects in China and is in a unique position to share his experiences and vision with the readers. Professor Zhi Wang has extensive experiences in industrial application of WSN and development of WSN platforms. His broad knowledge and in-depth analysis in WSN research provides the theoretical development in this book.

A unique feature of this book is that it is written for a broad audience with different background. It is very suitable for engineers in the laboratories or in the field to gain in-depth

understanding of this exciting new subject. It also can serve as important references for a graduate level or undergraduate level course in wireless sensor network. Being an academic researcher working in wireless sensor network, I am most happy to learn that this book is to be published to serve the broad engineering community in China.

Yu Hen Hu
Professor and Vice-Chair
Electrical Engineering Department
University of Wisconsin – Madison
Madison, WI 53706, USA

本书重点介绍无线传感器网络技术，共分为 8 章，章节安排如下。

第 1 章为无线传感器网络概述。主要讨论无线传感器网络的概念，描述无线传感器网络的应用领域，阐述无线传感器网络的体系结构及其基本工作模式；分析其自身的特点，以及网络性能评价指标；阐述无线传感器网络体系架构，概述无线传感器网络研究的发展现状及重要项目。

第 2 章为无线传感器网络软/硬件设计与测试。针对随机布设的无线传感器网络具有规模大、节点数量众多、无人值守的特点，系统地介绍了适用于无线传感器网络的硬件和软件设计、网络系统设计。主要介绍硬件平台设计的通用模块，并总结概述国内外典型的无线传感器网络硬件平台。同时，从减少重复开发的角度出发，介绍低功耗的包括操作系统和中间件的无线传感器网络软件平台。最后，关注于系统测试评估的网络系统设计，并介绍典型的应用于无线传感器网络的仿真测试和物理测试。

第 3 章为无线传感器网络通信与网络技术。针对无线传感器网络节点能量有限、拓扑结构易变、通信链路质量不稳定等诸多特点，系统地分析了无线传感器网络在通信技术方面所面临的特殊挑战，以及现有的主要解决方法。为了应对这些挑战，区别于传统网络的节能和健壮的机制被引入到通信协议的各层中，从物理层开始，介绍了无线传感器网络的通信最底层环境，进而介绍其上的链路控制协议。无线传感器网络规模大，常常拥有巨大的节点数，还介绍了路由协议、拓扑控制及覆盖技术。

第 4 章为无线传感器网络管理技术。无线传感器网络大规模实用化的关键技术包括无线传感器网络的时间同步技术、定位技术、安全技术和数据管理技术等。这些技术解决了网络节点时钟的不一致性，获取了节点及目标的位置信息，保障了网络的安全运行，并且管理了传感器网络的大量感知数据（存储和查询）。本章介绍的网络管理技术对保障无线传感器网络有效、可靠和安全地实现网络任务，具有重要意义。

第 5 章为无线传感器网络协同信息处理技术。无线传感器网络将逻辑上的信息世界与客观上的物理世界融合在一起，改变了人类与物理世界的交互方式。客观物理世界的感知及信息协同处理是无线传感器网络与一般网络通信系统的一个根本区别。本章以目标监测应用为主线，主要研究信号特征提取与选择、模式识别与分类、协同感知方法、目标跟踪等协同信息处理技术，以及系统框架下面向协同信息处理的 QoS 体系。

第 6 章为无线传感器网络技术标准。信息技术标准在产业整体链条中扮演着至关重

要的角色，掌握了标准的制定权，就把握住了整个产业的发展方向。无线传感器网络具有高度跨行业性，它的标准制定对统筹各个行业协同发展意义重大。

国内外有多项标准与无线传感器网络具有关联性。其中明确提出其研究对象为无线传感器网络标准的组织包括中国国家传感器网络标准工作组（WGSN）和国际 ISO/IEC JTC1 的 WG7 工作组。其他与无线传感器网络标准相关的典型标准包括典型应用相关标准（GIS 系统等标准），通信标准（如 ITU, IEEE 短距通信等标准），接口标准（IEEE 传感器接口等标准），行业标准（ZigBee, ISA100, LETF 等标准）。目前无线传感器网络的标准制定工作正在稳步推进中。

第 7 章为无线传感器网络典型应用。无线传感器网络凭借其可快速部署、可自组织、隐蔽性强等技术特点，被广泛应用于国防军事、围界防入侵、工业监控、环境监测、智能电网、智能交通、医疗卫生等多个领域，本章介绍无线传感器网络在国内外的国防军事、围界防入侵等这些重要领域的发展现状及典型应用实例。

第 8 章为前沿探讨。无线传感器网络是一个多学科高度交叉的领域，相关技术的发展对无线传感器网络有强大的推动作用。本章主要探讨基于信息驱动的感知技术、海量数据处理技术、具有能量意识的网络技术等前沿技术，并对这些前沿技术在无线传感器网络中的应用前景做出展望。

由于时间和水平有限，疏漏和错误之处在所难免，敬请批评指正。

编 著 者
2012 年 5 月

第 1 章 无线传感器网络概述	1
1.1 无线传感器网络概况	2
1.1.1 无线传感器网络基础	2
1.1.2 物联网与无线传感器网络	7
1.2 无线传感器网络的应用领域	10
1.2.1 无线传感器网络在军事领域中的应用	10
1.2.2 无线传感器网络在工业领域中的应用	11
1.2.3 无线传感器网络在农业领域中的应用	11
1.2.4 无线传感器网络在智能电网领域中的应用	11
1.2.5 无线传感器网络在医疗领域中的应用	12
1.3 无线传感器网络的特点	12
1.3.1 系统特点	12
1.3.2 技术特点	14
1.4 无线传感器网络设计要点	17
1.4.1 设计依据	17
1.4.2 网络拓扑	19
1.4.3 应用服务	21
1.5 无线传感器网络技术体系	22
1.5.1 无线传感器网络技术组成	22
1.5.2 网络与通信技术	23
1.5.3 管理技术	25
1.5.4 协同信息处理技术	26
1.6 当前各国无线传感器网络的发展战略和研究现状	27
1.6.1 发展战略	27
1.6.2 研究现状	31
本章小结	35
参考文献	35
第 2 章 无线传感器网络软/硬件设计与测试	39
2.1 引言	40

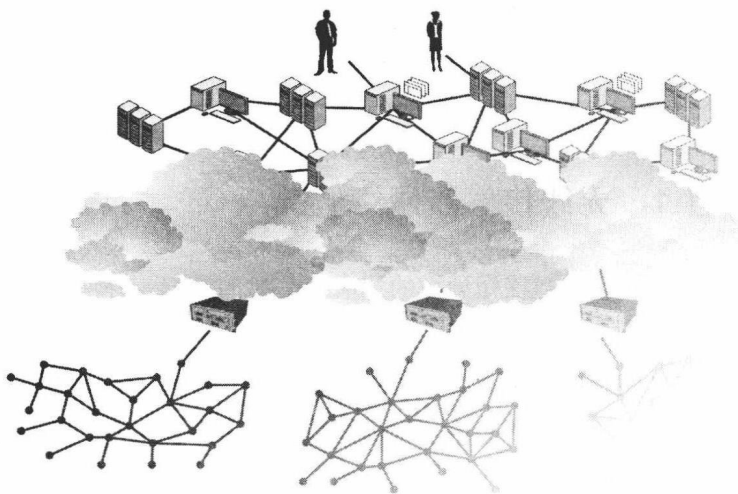
2.2	无线传感器网络节点硬件设计	40
2.2.1	传感节点	41
2.2.2	网关和汇聚节点设计	46
2.2.3	典型节点	47
2.2.4	节点产业化技术	52
2.3	无线传感器网络节点软件技术	54
2.3.1	软件架构	54
2.3.2	中间件	56
2.3.3	操作系统	61
2.4	无线传感器网络测试平台技术	67
2.4.1	仿真测试	67
2.4.2	物理测试	72
	本章小结	79
	参考文献	79
第3章	无线传感器网络通信与网络技术	83
3.1	引言	84
3.2	物理层	84
3.2.1	物理层概述	84
3.2.2	链路特性	85
3.2.3	物理层设计	96
3.2.4	低速物理层	99
3.2.5	中高速物理层	102
3.3	数据链路层	103
3.3.1	数据链路层概述	103
3.3.2	MAC 概述	104
3.3.3	基于竞争的 MAC 协议	106
3.3.4	基于调度的 MAC 协议	113
3.3.5	混合式 MAC 协议	119
3.3.6	数据链路层协议	122
3.3.7	链路质量估计与建模	124
3.4	拓扑控制	129
3.4.1	拓扑控制概述	129
3.4.2	功率控制	130
3.4.3	层次型拓扑控制	132
3.4.4	结构自适应拓扑控制	135
3.5	路由协议	136
3.5.1	路由协议概述	137

3.5.2	传统路由协议	138
3.5.3	数据中心路由协议	141
3.5.4	地理位置路由协议	142
3.5.5	可靠路由协议	147
3.5.6	机会路由	149
3.6	与 IPv6 互连	153
3.6.1	WSN 与 IPv6 网络互连的可能性	153
3.6.2	WSN 与 IPv6 网络互连的方式	154
3.6.3	WSN 与 IPv6 网络互连需要解决的问题	158
3.7	覆盖技术	159
3.7.1	覆盖概述	159
3.7.2	覆盖基本概念	159
3.7.3	覆盖模型	162
3.7.4	覆盖指标	165
3.7.5	覆盖算法	168
	本章小结	172
	参考文献	172
第 4 章	无线传感器网络管理技术	181
4.1	引言	182
4.2	时间同步技术	182
4.2.1	时间同步概述	182
4.2.2	节点时钟概述	184
4.2.3	同步信息传输延时分析	185
4.2.4	同步算法	186
4.2.5	同步模型参数的估计	191
4.3	定位技术	194
4.3.1	定位技术概述	194
4.3.2	源定位算法	195
4.3.3	节点自定位	204
4.3.4	匹配定位	208
4.3.5	典型定位系统实例	210
4.4	安全技术	214
4.4.1	安全问题概述	215
4.4.2	安全性分析	216
4.4.3	安全协议	219
4.4.4	安全定位	222
4.5	数据管理技术	231

4.5.1	数据管理技术概述	231
4.5.2	系统结构	231
4.5.3	数据模式	233
4.5.4	数据存储与索引技术	234
4.5.5	查询处理技术	239
	本章小结	240
	参考文献	240
第 5 章	无线传感器网络协同信息处理技术	249
5.1	引言	250
5.2	信号特征提取与选择	251
5.2.1	信号特征提取与选择概述	251
5.2.2	特征提取技术	252
5.2.3	特征选择技术	254
5.2.4	声震信号的特征提取与选择	256
5.3	模式识别与分类	261
5.3.1	模式识别与分类概述	261
5.3.2	传统模式识别算法	263
5.3.3	基于模糊推理的分类算法	266
5.4	协同感知方法	270
5.4.1	协同信息感知方法概述	270
5.4.2	协同感知理论基础	271
5.4.3	同构协同感知	275
5.4.4	异构协同感知	280
5.4.5	协同感知算法案例	283
5.4.6	面向 WSN 的协同感知体系架构	284
5.5	目标跟踪技术	285
5.5.1	目标跟踪技术概述	285
5.5.2	跟踪滤波技术	287
5.5.3	数据关联技术	293
5.5.4	跟踪系统辅助技术	297
5.6	面向协同信息处理的 QoS 体系	303
5.6.1	QoS 指标体系概述	303
5.6.2	QoS 体系设计	303
	本章小结	307
	参考文献	307
第 6 章	无线传感器网络技术标准	313
6.1	引言	314

6.2	国内标准	315
6.3	无线传感器网络标准工作组	316
6.3.1	WGSN 工作组简介	316
6.3.2	WGSN 标准框架	319
6.4	ISO/IEC JTC1 WG7 标准	323
6.4.1	ISO/IEC JTC1 WG7 标准工作组简介	323
6.4.2	ISO/IEC JTC1 WG7 标准框架	324
6.5	无线传感器网络相关标准	327
6.5.1	ISO 系列相关标准	327
6.5.2	IEC 系列相关标准	330
6.5.3	ITU-T 系列相关标准	332
6.5.4	IEEE 802.15 系列相关标准	333
6.5.5	IEEE 1451 系列相关标准	335
6.5.6	IEEE 1588 相关标准	337
6.5.7	ISA100 相关标准	338
6.5.8	ZigBee 联盟标准	339
6.5.9	LETF 相关标准	340
6.5.10	OGC OpenGIS 相关标准	342
	本章小结	343
	参考文献	343
第 7 章	无线传感器网络典型应用	345
7.1	引言	346
7.2	无线传感器网络在军事方面的应用	346
7.2.1	REMBASS 系列	347
7.2.2	网络中心战	348
7.3	无线传感器网络在围界防入侵方面的应用	349
7.4	无线传感器网络在工业监控方面的应用	350
7.5	无线传感器网络在环境监测方面的应用	351
7.5.1	水文水质环境监测	352
7.5.2	泥石流监测	354
7.5.3	CitySense 城市监测系统	354
7.6	无线传感器网络在农业方面的应用	355
7.7	无线传感器网络在智能电网方面的应用	359
7.8	无线传感器网络在智能交通方面的应用	361
7.9	无线传感器网络在医疗方面的应用	363
	本章小结	364
	参考文献	364

第 8 章 前沿探讨	367
8.1 引言	368
8.2 基于信息驱动感知技术	368
8.3 海量数据处理技术	372
8.3.1 基于海量数据的协同网络架构	372
8.3.2 海量数据的存储与管理	373
8.3.3 海量数据的知识获取	375
8.4 具有能量意识的网络技术	376
8.5 其他前沿技术	378
8.5.1 新型能量供应技术	378
8.5.2 绿色传感器技术	379
本章小结	379
参考文献	379
附录 A 思考题	381
附录 B 简略符号注释表	385



第 1 章

无线传感器网络概述

内容提要

无线传感器网络技术的兴起，给信息感知、获取和处理技术带来了革命性的变化。逻辑上的信息世界与客观上的物理世界的融合不再是梦想，从此人类与自然界的交互作用发生了极大的改变。目前，无线传感器网络已成为面向未来的信息技术研究中最受关注的研究课题之一。特别是随着物联网概念的提出，以及“智慧地球”、“感知中国”等宏伟愿景构建了信息化社会的美好蓝图，也为无线传感器网络技术的进一步发展指明了方向。

本章首先介绍了无线传感器网络与物联网的基本概念、无线传感器网络应用领域和主要工作方式，其次分析了无线传感器网络的特点与设计准则，并从协同信息处理角度给出了无线传感器网络体系架构，然后阐述了无线传感器网络发展现状，最后给出了本书的章节安排。

