



WILEY

移动通信前沿技术丛书

# 无线传感器 网络协议与体系结构

Protocols and Architectures for  
Wireless Sensor Networks

[德] Holger Karl 著  
Andreas Willig

邱天爽 唐洪 李婷 译  
杨华 姜一



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

移动通信前沿技术丛书

# 无线传感器网络协议与体系结构

**Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks**

[德] Holger Karl Andreas Willig 著

邱天爽 唐 洪 李 婷 杨 华 姜 一 译



电子工业出版社

**Publishing House of Electronics Industry**

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书较为全面地介绍了无线传感器网络的各项关键技术，特别是无线传感器网络设计与实现所涵盖的硬件设计、信息与信号处理以及通信网络等领域的核心技术，并对无线传感器网络的技术发展及主要研究成果进行了全面介绍。本书详细论述了无线传感器网络的体系结构和通信协议，结合应用实例介绍了针对各种问题的不同解决方案，阐述了不同协议与体系结构之间的逻辑关系，并深入研究了相关的协议机制，还讨论了无线传感器网络中各个协议的适用条件。全书共分为 14 章，分别为：绪论、单节点体系结构、网络体系结构、物理层、MAC 协议、链路层协议、命名与寻址、时间同步、位置与定位、拓扑结构控制、路由协议、以数据为中心的和基于内容的网络、传输层与服务质量、高级应用支持。本书在深入介绍无线传感器基本原理的同时，给出了许多具有普遍指导意义的应用实例，是一本理论性与实践性结合得比较好的书。

本书既可以作为研究生和大学本科高年级学生的教学参考书，也可以供相关领域的工程技术人员阅读参考。

©2005 John Wiley & Sons Ltd.

All rights reserved. Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Ltd.

本书简体中文专有翻译出版版权由 John Wiley & Sons Ltd. 授予电子工业出版社。未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字：01-2006-0895

### 图书在版编目 (CIP) 数据

无线传感器网络协议与体系结构 / (德) 卡勒, 维里西著; 邱天爽等译. —北京: 电子工业出版社, 2007.1  
(移动通信前沿技术丛书)

书名原文: Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks

ISBN 7-121-03506-5

I. 无… II. ①卡… ②维… ③邱… III. 无线电通信—通信网—传感器—研究 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 139526 号

责任编辑: 王春宁

印 刷: 北京民族印刷厂

装 订: 北京鼎盛东极装订有限公司

出版发行: 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: 28 字数: 694 千字

印 次: 2007 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 49.00 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, 联系电话: (010) 68279077; 邮购电话: (010) 88254888。

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

服务热线: (010) 88258888。

## 出版说明

移动通信是当前发展最快、应用最广和最前沿的通信领域之一。移动通信的最终目标是实现任何人可以在任何地点、任何时间与其他任何人进行任何方式的通信。移动通信技术现在已经发展了以 WCDMA 为代表的第三代，而相互兼容各种移动通信技术的第四代标准目前已经悄然来临。为了促进和推动我国移动通信产业的发展，并不断满足社会各界和广大通信技术人员系统学习和掌握移动通信前沿技术的需求，电子工业出版社特约请在国内从事移动通信科研、教学、工程、管理等工作并具有丰富的理论和实践经验的专家、教授亲自编著或翻译国外“金”典著作，组成了这套《移动通信前沿技术丛书》，于新世纪之初相继推出。

该丛书从我国移动通信技术应用现状与发展情况出发，以系统与技术为中心，全面系统地介绍了当今移动通信领域涉及的有关关键技术与热点技术，如软件无线电原理与应用、智能天线原理与应用、蓝牙技术、移动 IP、通用无线分组业务（GPRS）、移动通信网络规划与优化、移动数据通信以及典型的第三代移动通信系统等内容。其特点是力求内容的先进性、实用性和系统性；突出理论性与工程实践性紧密结合；内容组织循序渐进、深入浅出，理论叙述概念清晰、层次清楚，经典实例源于实践。本丛书旨在引导读者将移动通信的原理、技术与应用有机结合。

这套丛书的主要读者对象是广大从事通信技术工作的工程技术人员，也适合高等院校通信、计算机等学科各专业在校师生和刚走上工作岗位的毕业生阅读参考。

在编辑出版这套丛书的过程中，参与编著、翻译和审定的各位专家都付出了大量心血，对此，我们表示衷心感谢。欢迎广大读者对这套丛书提出宝贵意见和建议，或推荐其他的选题（E-mail:davidzhu@phei.com.cn），以便我们今后为广大读者奉献更多、更好的优秀通信技术图书。

电子工业出版社  
通信图书事业部

## 译者序

无线传感器网络是近年来得到迅速发展和普遍重视的新型网络技术，它的出现和发展对现代科学技术产生了极其深刻的影响，也显著地改变了人们的观念。与传统的网络技术不同，无线传感器网络技术将现代无线通信技术、微型传感器技术和网络技术有机地融为一体，在国防、环境监测、家庭自动化、运输和其他许多领域具有广阔的应用前景和极高的应用价值。

本书的作者 Holger Karl 教授和 Andreas Willig 教授分别为德国帕特博恩大学和德国波茨坦大学 Hasso Plattner 研究所的教授，多年来致力于无线传感器网络技术的研究与教学工作，成果显著。

本书较为全面地介绍了无线传感器网络的各项关键技术，特别是无线传感器网络设计与实现所涵盖的硬件设计、信息与信号处理以及通信网络等领域的核心技术，并对无线传感器网络的技术发展及主要研究成果进行了全面介绍。本书详细论述了无线传感器网络的体系结构和通信协议，结合应用实例介绍了针对各种问题的不同解决方案，阐述了不同协议与体系结构之间的逻辑关系，并深入研究了相关的协议机制，还讨论了无线传感器网络中各个协议的适用条件。

全书共分为 14 章，分别为：绪论、单节点体系结构、网络体系结构、物理层、MAC 协议、链路层协议、命名与寻址、时间同步、位置与定位、拓扑结构控制、路由协议、以数据为中心的和基于内容的网络、传输层与服务质量、高级应用支持。本书在深入介绍无线传感器基本原理的同时，给出了许多具有普遍指导意义的应用实例，是一本理论性与实践性结合得比较好的书。本书既可以作为研究生和大学本科高年级学生的教学参考书，也可以供相关领域的工程技术人员阅读参考。

本书译本由大连理工大学电子与信息工程学院邱天爽教授等完成翻译工作。具体分工为：姜一（前言、第 1 章、第 2 章、第 3 章），邱天爽（第 4 章、第 5 章、第 6 章），唐洪（第 7 章、第 8 章、第 9 章），李婷（第 10 章、第 11 章、第 12 章），杨华（第 13 章、第 14 章）。全书由邱天爽统稿。

译者感谢英文版原书作者 Holger Karl 和 Andreas Willig 教授、英文版原书出版社 John Wiley and Sons, Inc. 和电子工业出版社对本书翻译工作的支持，感谢大连理工大学电子与信息工程学院对本书翻译工作的帮助。特别地，译者还衷心感谢大连理工大学电子与信息工程学院曾硕、王哲同学和部分博士、硕士研究生对本书成书所做出的贡献。

由于译者水平所限，加之时间比较仓促，翻译中难免存在不妥和错误之处，恳请读者批评指正。

译者

2006 年 9 月于大连理工大学

# 序 言

众所周知，在小规模、低成本的器件上实现处理、存储、传感和通信的一体化，并将这些器件组成无线传感器网络，为各种新应用开启了大门。虽然将理想变成现实的道路是坎坷的，但是一旦了解了技术的特点与局限性，就可以把创新思维应用于技术，进行有益的探索。使读者掌握这项新技术是撰写本书的初衷。

对这种新型网络技术的掌握和应用对我们提出了严峻的挑战。首先，必须宏观把握各个领域的知识，因为该技术既涉及初级的硬件和无线通信技术，又涵盖了高端技术，如数据库和中间设备及其实际应用。其次，需要利用电子工程、计算机科学和数学的有关准则调整系统的部件，对系统进行优化。由于严格的能源限制，复杂的优化过程是必不可少的。因此，我们没有完全按照通信网络的 ISO/OSI 模型或类似的分层模型进行讨论，而是以此模型为基础，指出不同“层次”之间的相互作用和相互依存关系。

在组织材料和编写的过程中，我们的目标是解释存在的主要问题，给出解决方案的准则和核心思想。我们一般不会深入讨论各种解决方法，感兴趣的读者可以参考书后的参考文献。同时，我们不讨论各种方案的性能。因为在现有的出版物中，找不到无线传感器网络性能的比较结果。原因可能是缺乏一套统一的应用标准来详细规定准则和前提假设（这里一台普通仿真器是必要的配置）。跟踪是无线传感器网络的一个基本应用，显然，它并不是唯一的应用重点。

我们常常在斟酌是否介绍某个思想、概念或者某篇论文。由于篇幅有限，除了介绍专业的技术性工作以外，我们更希望提出创新性的思想或一种潜在的新方案，尽管利用前者可以确定某个方案的可行性。

同时，我们尽量避免并且坚决反对思想僵化，力求建立一个开放的思想体系，说明什么是无线传感器网络及其主要研究领域。我们认为无线传感器网络是一个待开发的处女地，仅仅将其归类为几个简单问题是不恰当的（能量效率就是一个典型例子）。不可否认，这些问题很重要，但是这样做会埋没一些很有新意的思想。我们将尽力开阔读者的视野，在本书的索引和参考文献中包含了某些创新性的观点。

但是，由于篇幅所限，很多内容无法一一介绍：例如中间设备、安全性、管理、配置等领域，以及模型的性能均没有涉及。同时，书中没有包含最新科研成果，否则本书就不能截稿了。如果读者朋友发现我们遗漏了重要的内容或者有不明确之处，请与我们联系。我们希望读者对这块年轻、充满生机而又迷人的研究领域有一个崭新的认识。欢迎访问本书的网站：[www.wiley.com/go/wsn](http://www.wiley.com/go/wsn)，网站数据库中有大量关于 Ad hoc 和传感器网络的论文。

## 面向的读者和先修课程

本书主要面向高年级大学生或研究生、相关学术和产业领域的研究人员，以及研发无线传感器网络的工程师。我们认为本书是一本有关无线传感器网络的很好的教科书（例如，在欧洲学分制下，本课程对应 3 学分）。

本书并非是无线路由器的入门教材。虽然我们介绍了大部分背景知识，但是具备一定的无线通信知识有助于读者更好地理解本书，尤其是第一次接触无线 Ad hoc 网络的读者。我们假定读者已经掌握网络的基础知识。

此外，在本书的一些章节中，将涉及离散数学的有关概念和结论。若读者对优化问题、NP 完备性理论和类似课题有一定的了解，将能更好地理解本书。

### 致谢

在本书的调研阶段和编写过程中，得到了许多人的热忱帮助，我们在此表示深深的感谢。我们要特别感谢柏林理工大学电信网络研究所的同事们，尤其是 Adam Wolisz, Vlado Handziski, Jan-Hinrich Hauer, Andreas Köpke, Martin Kubisch 和 Günther Schäfer 等教授。我们同样感谢许多同事，能与他们探讨无线传感器网络的研究课题使我们感到无比的高兴与光荣。他们参与了不同的研究项目，例如 EU IST 项目 EYES，这里特别要指出的是德国基金项目 AVM 给予我们的帮助。Hasso Plattner 研究所的 Robert Mitschke 为本书做了校正，并提出了宝贵意见。普通读者对本书提出了积极的评论。Wiley 公司的编辑和支持团队，特别是 Birgit Gruber, Julie Ward 和 Joanna Tootill，一直给予我们无私的帮助。

在此，我们还要向所有本领域的研究人员表示深深的感谢。通过网络我们很容易地检索到他们的研究成果和发表的论文，否则仅收集资料一项工作就是一个巨大的挑战。

最后，也是最重要的，在本书的写作过程中，我们的家人给予了始终如一的支持和鼓励，在此表示特别的感谢。

Berlin & Paderborn

2005 年 4 月

# 本书导读

无线传感器网络的设计和优化涉及很多学科：无线电前端性能决定了 MAC 协议的选择，应用类型限制了路由协议的选择，电池的自充电特性影响了节点的休眠模式。本书按章节顺序，对无线传感器网络进行了全面解析与深度解读。

如图 1 所示，从结构上看，本书分成两部分。第一部分的前三章高度概括了硬件特性和基本网络结构的应用以及存在的问题。第一部分为第二部分详细介绍各个通信协议奠定了基础。

第二部分大体上按照标准 ISO/OSI 分层模型展开，但是我们关注的是无线传感器网络的算法和协议。我们从物理层、链路层和媒体接入层中两个相邻节点遵守的协议着手，讨论了无线传感器网络中的命名与寻址问题。后续三章（时间同步、位置与定位、拓扑结构控制）介绍的功能特性对传感器网络的正确或者有效运行很重要，但是没有直接涉及两个相邻节点的分组交换。从某种意义上说，它们是“辅助性协议”。

在掌握相邻节点通信和基本辅助性协议的基础上，后续三章介绍了各种路由协议的功能、传输层的功能和服务质量的定义。本书的最后一章为高级应用支持。更多的学习资料，请读者登录本书的网站 [www.wiley.com/go/wsn](http://www.wiley.com/go/wsn)，我们会及时更新。

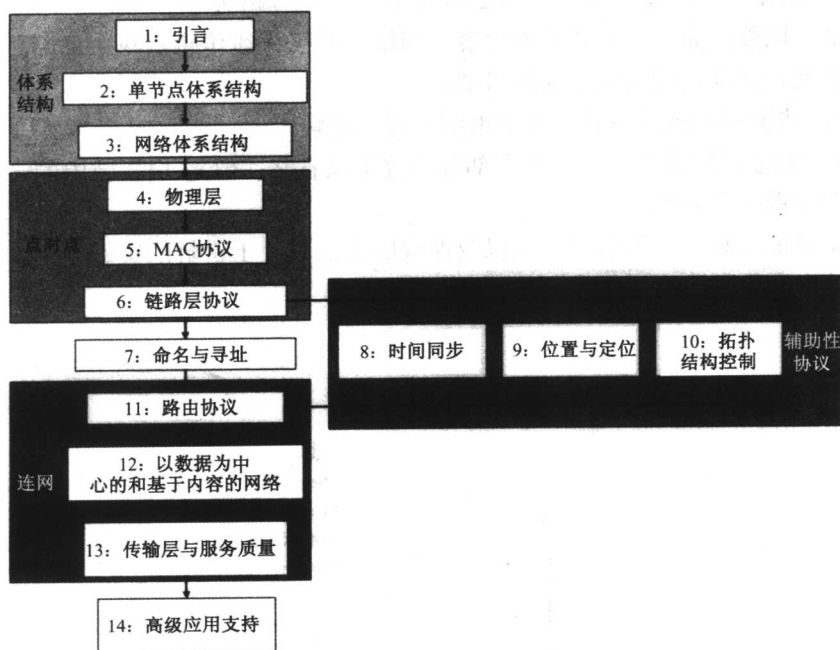


图 1 本书的结构

## 完整课时

选择本书作为一门完整课程非常方便。基本上，本书的所有知识点，在所给出的各协议实例中均给予了不同程度的涉及。

## 压缩课时

如果时间不允许讲授所有知识点，那么必须有所选取。建议尽可能地讲授以下这些知识点。



第1章：绪论。全部讲授。

第2章：单节点体系结构。至少比较详细地讲授2.1节和2.2节。2.3节操作系统可以略述（视课程的重点而定）。

第3章：网络体系结构。讲授3.1节到3.3节。这部分有关服务接口和网关的内容可以略去。

第4章：物理层。如果前期知识储备充分，整章可以略去。如果时间允许，至少讲授4.3节。

第5章：MAC协议。本章是重点章节。如果时间允许，建议讲授整章。如果学时短，那么每个协议的实例可以略讲。

第6章：链路层协议。任选6.2节、6.3节或6.4节作为重点讲授章节。

第7章：命名与寻址。本章建议深入讲解。7.3节和7.4节可以略去。

第8章：时间同步。本章可以略去。

第9章：位置与定位。本章可以略去。

第10章：拓扑结构控制。虽然本章原则上也可以略去，但是即使是压缩课程，一些基本的知识点还是应该介绍的。我们建议在10.1节、10.2节到10.6节中各选取一个实例分析。

第11章：路由协议。重点章节。11.2节和11.6节可以略去<sup>1</sup>。

第12章：以数据为中心的和基于内容的网络。对于无线传感器网络来说，本章非常重要且具有典型性。建议讲授过程中深入讲解。

第13章：传输层与服务质量。本章也应该深入讲解。

第14章：高级应用支持。本章的大部分内容可以省略，但是14.3节中的一些实例在讲授的过程中应该做一个归纳。

显然在讲授的过程中，细节的讨论以及课程的重点取决于讲解的实例数目。不可能通过一次课去讨论所有的知识点。

---

<sup>1</sup>我们要提醒读者注意的是11.4.2节讨论的施泰纳树问题。在本书编写的调研过程中，我们发现在传感器网络的参考文献中多次提到该问题，但是没有引起足够的重视。

# 目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 环境智能化的景象	(1)
1.2 应用举例	(2)
1.3 应用的类型	(5)
1.4 WSN 的挑战性	(6)
1.4.1 要求的特性	(6)
1.4.2 要求的机制	(7)
1.5 为什么说传感器网络是不同的	(8)
1.5.1 移动 Ad hoc 网络与无线传感器网络	(8)
1.5.2 现场总线与无线传感器网络	(10)
1.6 无线传感器网络的技术要求	(10)

## 第一部分 体系结构

第 2 章 单节点体系结构	(15)
2.1 硬件组成	(15)
2.1.1 传感器节点硬件概况	(15)
2.1.2 控制器	(16)
2.1.3 存储器	(18)
2.1.4 通信设备	(18)
2.1.5 传感器与执行器	(26)
2.1.6 传感器节点的电源	(27)
2.2 传感器节点的能量消耗	(30)
2.2.1 不同功率消耗条件下的工作状态	(30)
2.2.2 微控制器的能量消耗	(32)
2.2.3 存储器	(33)
2.2.4 无线收发机	(33)
2.2.5 计算与通信的关系	(37)
2.2.6 传感器与执行器的功率消耗	(37)
2.3 操作系统与运行环境	(38)
2.3.1 嵌入式操作系统	(38)
2.3.2 编程范例与应用编程接口	(38)
2.3.3 操作系统的结构与协议栈	(40)
2.3.4 动态能量与功率管理	(41)
2.3.5 实例研究: TinyOS 与 nesC	(42)

2.3.6 其他举例 .....	(45)
2.4 传感器节点的一些例子 .....	(45)
2.4.1 Mica Mote 系列 .....	(45)
2.4.2 EYES 节点 .....	(47)
2.4.3 BT 节点 .....	(47)
2.4.4 Scatter 网络 .....	(48)
2.4.5 商用器件 .....	(48)
2.5 小结 .....	(48)
<b>第 3 章 网络体系结构 .....</b>	<b>(50)</b>
3.1 传感器网络的构想 .....	(50)
3.1.1 信源与信宿的类型 .....	(50)
3.1.2 单跳与多跳网络 .....	(51)
3.1.3 多信宿与信源 .....	(52)
3.1.4 三种移动方式 .....	(52)
3.2 目标的最优化与品质参数 .....	(53)
3.2.1 服务质量 .....	(54)
3.2.2 能量效率 .....	(54)
3.2.3 可观测性 .....	(55)
3.2.4 稳健性 .....	(56)
3.3 WSN 的设计原理 .....	(56)
3.3.1 分布式组织 .....	(56)
3.3.2 网络内部处理 .....	(57)
3.3.3 自适应的保真度与精度 .....	(59)
3.3.4 以数据为中心 .....	(59)
3.3.5 利用位置信息 .....	(61)
3.3.6 利用主动模式 .....	(61)
3.3.7 利用多样性 .....	(61)
3.3.8 基于部件的协议栈与层间优化 .....	(62)
3.4 WSN 的服务接口 .....	(62)
3.4.1 构造应用 / 协议栈接口 .....	(62)
3.4.2 WSN 服务接口的可表示性要求 .....	(63)
3.4.3 讨论 .....	(64)
3.5 网关 .....	(65)
3.5.1 网关的必要性 .....	(65)
3.5.2 WSN 到因特网的通信 .....	(66)
3.5.3 因特网到 WSN 的通信 .....	(66)
3.5.4 WSN 隧道 .....	(67)
3.6 小结 .....	(68)

## 第二部分 通信协议

<b>第 4 章 物理层</b> .....	(71)
4.1 概述 .....	(71)
4.2 无线信道与通信基本问题 .....	(71)
4.2.1 频率分配 .....	(71)
4.2.2 调制与解调 .....	(73)
4.2.3 信号传播效应与噪声 .....	(76)
4.2.4 信道模型 .....	(81)
4.2.5 扩频通信 .....	(83)
4.2.6 分组传输与同步 .....	(84)
4.2.7 无线信道的质量与改进测量 .....	(86)
4.3 WSN 物理层与收发机设计的考虑 .....	(87)
4.3.1 能量使用概况 .....	(88)
4.3.2 调制方式选择 .....	(88)
4.3.3 动态调制调整 .....	(91)
4.3.4 关于天线的考虑 .....	(92)
4.4 进一步阅读的文献 .....	(92)
<b>第 5 章 MAC 协议</b> .....	(94)
5.1 无线 MAC 协议的基本知识 .....	(95)
5.1.1 关于无线 MAC 协议的需求与设计上的限制 .....	(95)
5.1.2 MAC 协议的分类 .....	(97)
5.1.3 无线传感器网络的 MAC 协议 .....	(101)
5.2 低占空比协议与唤醒的概念 .....	(103)
5.2.1 稀疏拓扑结构与能量管理 (STEM) .....	(104)
5.2.2 S-MAC .....	(105)
5.2.3 仲裁设备协议 .....	(108)
5.2.4 无线唤醒的概念 .....	(110)
5.2.5 进一步阅读的文献 .....	(111)
5.3 基于竞争的协议 .....	(111)
5.3.1 CSMA 协议 .....	(111)
5.3.2 PAMAS .....	(113)
5.3.3 进一步的解决方案 .....	(114)
5.4 基于时间表的协议 .....	(115)
5.4.1 LEACH .....	(115)
5.4.2 SMACS .....	(117)
5.4.3 通信量自适应媒体接入协议 (TRAMA) .....	(119)
5.4.4 进一步的解决方案 .....	(121)
5.5 IEEE 802.15.4 MAC 协议 .....	(121)

5.5.1	网络体系结构与节点的类型和作用	(122)
5.5.2	超帧结构	(122)
5.5.3	GTS 管理	(123)
5.5.4	数据传输过程	(123)
5.5.5	时隙 CSMA-CA 协议	(124)
5.5.6	无信标模式	(126)
5.5.7	进一步阅读的文献	(126)
5.6	关于 IEEE 802.11 和蓝牙	(126)
5.7	进一步阅读的文献	(127)
5.8	小结	(128)
<b>第 6 章</b>	<b>链路层协议</b>	<b>(129)</b>
6.1	基本知识: 任务与要求	(130)
6.2	差错控制	(130)
6.2.1	传输错误的原因与特征	(131)
6.2.2	ARQ 技术	(132)
6.2.3	FEC 技术	(137)
6.2.4	混合方案	(141)
6.2.5	功率控制	(143)
6.2.6	进一步研究以减小差错	(144)
6.2.7	差错控制小结	(144)
6.3	组帧	(145)
6.3.1	自适应方案	(147)
6.3.2	中间校验和	(148)
6.3.3	将分组大小的优化与 FEC 相结合	(149)
6.3.4	帧首部的处理	(150)
6.3.5	组帧: 小结	(150)
6.4	链路管理	(150)
6.4.1	链路质量特征	(151)
6.4.2	链路质量估计	(152)
6.5	小结	(154)
<b>第 7 章</b>	<b>命名与寻址</b>	<b>(155)</b>
7.1	基本原理	(156)
7.1.1	传感器网络中使用的地址和名称	(156)
7.1.2	地址管理	(156)
7.1.3	地址的唯一性	(157)
7.1.4	地址分配	(158)
7.1.5	寻址的通信开销	(159)
7.2	无线传感器网络中的名称与地址管理	(159)

7.3	MAC 地址的分配 .....	(160)
7.3.1	网内唯一性地址的分布式分配 .....	(160)
7.4	局部唯一性地址的分布式分配 .....	(162)
7.4.1	地址分配算法 .....	(163)
7.4.2	地址选择与地址表达 .....	(164)
7.4.3	其他方案 .....	(166)
7.5	基于内容的寻址和地理位置寻址 .....	(167)
7.5.1	基于内容的寻址 .....	(167)
7.5.2	地理位置寻址 (Geographic addressing) .....	(170)
7.6	小结 .....	(171)
<b>第 8 章</b>	<b>时间同步 .....</b>	<b>(172)</b>
8.1	时间同步问题的简介 .....	(172)
8.1.1	无线传感器网络中时间同步的需求 .....	(172)
8.1.2	节点的时钟与时钟计时精度问题 .....	(173)
8.1.3	时间同步算法的结构和特点 .....	(175)
8.1.4	无线传感器网络中的时间同步 .....	(176)
8.2	基于发送 / 接收的同步协议 .....	(177)
8.2.1	轻量时间同步协议 (Lightweight Time Synchronization, LTS) .....	(177)
8.2.2	怎样估计漂移并提高同步精度 .....	(182)
8.2.3	传感器网络的时间同步协议 (Time-Sync Protocol for Sensor Networks, TPSN) ...	(183)
8.3	基于接收 / 接收的同步协议 .....	(186)
8.3.1	参考广播同步 (Reference Broadcast Synchronization, RBS) .....	(186)
8.3.2	分级的参考时间同步 (Hierarchy Referencing Time Synchronization, HRTS) .....	(192)
8.4	进一步阅读 .....	(194)
<b>第 9 章</b>	<b>位置与定位 .....</b>	<b>(198)</b>
9.1	无线传感器网络定位的特点 .....	(198)
9.2	定位方法 .....	(200)
9.2.1	利用节点的邻近信息进行定位 .....	(200)
9.2.2	三边测量法 (Trilateration) 和三角测量法 (Triangulation) .....	(200)
9.2.3	情景分析 (Scene analysis) .....	(203)
9.3	测边定位问题的数学基础 .....	(203)
9.3.1	三边定位与求解 .....	(203)
9.3.2	由距离测量误差引出的三边定位与求解问题 .....	(204)
9.4	单跳定位 .....	(205)
9.4.1	一种室内的定位系统——Active Badge .....	(205)
9.4.2	另一种室内的定位系统——Active Office .....	(206)
9.4.3	Radar 定位系统 .....	(206)
9.4.4	Cricket 定位系统 .....	(206)

9.4.5	利用交叠区域的连通性进行定位 .....	(206)
9.4.6	近似三角形内点测试法 (Approximate Point In Triangle, APIT) .....	(207)
9.4.7	利用到达角进行定位 .....	(208)
9.5	多跳环境中的定位 .....	(208)
9.5.1	多跳网络内的连通性 .....	(209)
9.5.2	多跳距离的估计 .....	(209)
9.5.3	迭代多边定位与协作多边定位 .....	(210)
9.5.4	概率定位方法 .....	(212)
9.6	锚节点的配置对定位的影响 .....	(212)
9.7	进一步阅读 .....	(213)
9.8	小结 .....	(214)
<b>第 10 章</b>	<b>拓扑结构控制 .....</b>	<b>(215)</b>
10.1	动机与基本思路 .....	(215)
10.1.1	拓扑结构控制的可选方法 .....	(216)
10.1.2	拓扑结构控制算法的评价指标 .....	(217)
10.2	平面网络中的拓扑结构控制——功率控制 .....	(219)
10.2.1	一些复杂度结论 .....	(219)
10.2.2	存在魔数吗——临界参数的边界 .....	(220)
10.2.3	拓扑构造与协议举例 .....	(222)
10.2.4	关于平面拓扑结构控制的进一步阅读的文献 .....	(227)
10.3	采用控制集的层次型网络 .....	(228)
10.3.1	动机与定义 .....	(228)
10.3.2	难题的结果 .....	(229)
10.3.3	关于集中式算法的一些想法 .....	(229)
10.3.4	一些分布式的近似方法 .....	(232)
10.3.5	进一步阅读的文献 .....	(235)
10.4	分簇式层次型网络 .....	(236)
10.4.1	簇的定义 .....	(236)
10.4.2	构造独立集的基本思想 .....	(238)
10.4.3	算法的扩展和一些性能问题 .....	(239)
10.4.4	连接簇 .....	(240)
10.4.5	簇头轮换 .....	(240)
10.4.6	更多的算法举例 .....	(241)
10.4.7	多跳簇 .....	(242)
10.4.8	多层分簇 .....	(244)
10.4.9	被动分簇 .....	(244)
10.4.10	进一步阅读的文献 .....	(245)
10.5	层次型拓扑结构和功率控制相结合 .....	(246)
10.5.1	基于引导信号的功率控制 .....	(246)

10.5.2	Ad hoc 网络设计算法 (ANDA)	(246)
10.5.3	CLUSTERPOW	(246)
10.6	自适应节点活动	(247)
10.6.1	基于地理位置的拓扑算法 (GAF)	(247)
10.6.2	可变的自适应拓扑算法 (ASCENT)	(248)
10.6.3	在传感器覆盖率的基础上关闭节点	(248)
10.7	小结	(249)
<b>第 11 章</b>	<b>路由协议</b>	<b>(250)</b>
11.1	转发与路由选择的各种问题	(250)
11.2	谣传法与基于代理的单播转发	(253)
11.2.1	基本思路	(253)
11.2.2	随机转发	(253)
11.2.3	随机漫步	(254)
11.2.4	进一步阅读的文献	(255)
11.3	能量高效型单播	(255)
11.3.1	概述	(255)
11.3.2	单播协议举例	(258)
11.3.3	进一步阅读的文献	(260)
11.3.4	多路径单播路由	(261)
11.3.5	进一步阅读的文献	(264)
11.4	广播与多播	(265)
11.4.1	概述	(265)
11.4.2	基于信源树的协议	(267)
11.4.3	共享核心树协议	(273)
11.4.4	基于网格的协议	(273)
11.4.5	关于广播和多播的进一步阅读的文献	(274)
11.5	地理位置路由	(275)
11.5.1	基于位置的路由的基本知识	(275)
11.5.2	地域广播	(281)
11.5.3	关于地理位置路由的进一步阅读的文献	(285)
11.6	移动节点	(286)
11.6.1	移动的汇聚节点	(286)
11.6.2	移动的数据采集器	(287)
11.6.3	移动节点区域	(287)
11.7	小结	(288)
<b>第 12 章</b>	<b>以数据为中心的和基于内容的网络</b>	<b>(289)</b>
12.1	概述	(289)
12.1.1	发布 / 订阅的交互模式	(289)



12.1.2	寻址数据 .....	(290)
12.1.3	实现方法 .....	(291)
12.1.4	数据的分配与收集——网内处理 .....	(292)
12.2	以数据为中心的路由 .....	(292)
12.2.1	一次性交互 .....	(293)
12.2.2	重复交互 .....	(294)
12.2.3	进一步阅读的文献 .....	(298)
12.3	数据融合 .....	(298)
12.3.1	概述 .....	(298)
12.3.2	描述融合操作的数据库接口 .....	(299)
12.3.3	融合操作的分类 .....	(300)
12.3.4	融合点的放置 .....	(302)
12.3.5	何时停止等待更多的数据 .....	(302)
12.3.6	把融合看做是一个优化问题 .....	(303)
12.3.7	广播融合值 .....	(304)
12.3.8	信息定向的路由和融合 .....	(306)
12.3.9	更多的例子 .....	(309)
12.3.10	关于数据融合的进一步阅读的文献 .....	(311)
12.4	以数据为中心的存储 .....	(312)
12.5	小结 .....	(313)
<b>第 13 章</b>	<b>传输层与服务质量 .....</b>	<b>(314)</b>
13.1	无线传感器网络的传输层和服务质量 .....	(314)
13.1.1	服务质量 / 可靠性 .....	(315)
13.1.2	传输协议 .....	(315)
13.2	覆盖率与部署 .....	(316)
13.2.1	传感模型 .....	(317)
13.2.2	覆盖方法 .....	(318)
13.2.3	均匀随机部署: 泊松点过程 .....	(319)
13.2.4	随机部署的覆盖率: 布尔传感模型 .....	(320)
13.2.5	随机部署的覆盖率: 一般传感模型 .....	(322)
13.2.6	覆盖率确定 .....	(323)
13.2.7	网格部署的覆盖率 .....	(327)
13.2.8	进一步阅读的文献 .....	(328)
13.3	可靠数据传输 .....	(330)
13.4	单个分组传递 .....	(331)
13.4.1	使用单一路径 .....	(331)
13.4.2	使用多路径 .....	(336)
13.4.3	多接收机 .....	(340)
13.4.4	小结 .....	(340)