



# 物联网 与无线传感器网络

刘伟荣 何云 编著

- ◎ 阐述了无线传感器网络的网络层次及其路由算法
- ◎ 深入讲述了无线传感器网络的核心技术、仿真、操作系统和软/硬件设计
- ◎ 配有教学课件，方便教学使用



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

国家级特色专业（物联网工程）规划教材

# 物联网与无线传感器网络

刘伟荣 何 云 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书是依托中南大学国家级特色专业（物联网工程）的建设，结合国内物联网工程专业的教学情况编写的。本书主要介绍物联网中核心技术之一的无线传感器网络（WSN）的知识，在简要介绍 WSN 的基础上，详细地叙述 WSN 的物理层、数据链路层和网络层的设计要点及其路由协议；然后介绍 WSN 中的主要技术，如通信标准、时间同步技术、节点定位技术、服务质量保障和网络管理，并给出 WSN 的仿真技术；接着介绍 WSN 中硬件开发、操作系统和软件开发的内容；最后给出 WSN 的应用案例。

本书可作为普通高等学校物联网工程专业的教材，也可供从事物联网及其相关专业的人士阅读。

本书配有教学用的 PPT 课件，读者可登录华信教育资源网（[www.hxedu.com.cn](http://www.hxedu.com.cn)）免费注册后下载。

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

物联网与无线传感器网络/刘伟荣，何云编著. —北京：电子工业出版社，2013.1

国家级特色专业（物联网工程）规划教材

ISBN 978-7-121-19118-3

I. ①物… II. ①刘… ②何… III. ①互连网络—应用—高等学校—教材 ②智能技术—应用—高等学校—教材 ③无线电通信—传感器—高等学校—教材 IV. ①TP393.4 ②TP18 ③TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 286701 号

责任编辑：田宏峰 特约编辑：牛雪峰

印 刷：三河市鑫金马印装有限公司

装 订：三河市鑫金马印装有限公司

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：787×980 1/16 印张：19.25 字数：428 千字

印 次：2013 年 1 月第 1 次印刷

印 数：3 000 册 定价：45.00 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](mailto:zltz@phei.com.cn)，盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线：（010）88258888。

# 出版说明

---

物联网是通过射频识别 (RFID)、红外感应器、全球定位系统、激光扫描器等信息传感设备,按约定的协议,把任何物品与互联网相连接,进行信息交换和通信,以实现智能化识别、定位、跟踪、监控和管理的一种网络概念。物联网是继计算机、互联网和移动通信之后的又一次信息产业的革命性发展。物联网产业具有产业链长、涉及多个产业群的特点,其应用范围几乎覆盖了各行各业。

2009年8月,物联网被正式列为国家五大新兴战略性产业之一,写入“政府工作报告”,物联网在中国受到了全社会极大的关注。

2010年年初,教育部下发了高校设置物联网专业申报通知,截至目前,我国已经有100多所高校开设了物联网工程专业,其中有包括中南大学在内的9所高校的物联网工程专业于2011年被批准为国家级特色专业建设点。

从2010年起,部分学校的物联网工程专业已经开始招生,目前已经进入专业课程的学习阶段,因此物联网工程专业的专业课教材建设迫在眉睫。

由于物联网所涉及的领域非常广泛,很多专业课涉及其他专业,但是原有的专业课的教材无法满足物联网工程专业的教学需求,又由于不同院校的物联网专业的特色有较大的差异,因此很有必要出版一套适用于不同院校的物联网专业的教材。

为此,电子工业出版社依托国内高校物联网工程专业的建设情况,策划出版了“国家级特色专业(物联网工程)规划教材”,以满足国内高校物联网工程的专业课教学的需求。

本套教材紧密结合物联网专业的教学大纲,以满足教学需求为目的,以充分体现物联网工程的专业特点为原则来进行编写。今后,我们将继续和国内高校物联网专业的一线教师合作,以完善我国物联网工程专业的专业课程教材的建设。

电子工业出版社

# 教材编委会

---

编委会主任：施荣华 黄东军

编委会成员：（按姓氏字母拼音顺序排序）

董 健 高建良 桂劲松 贺建飏

黄东军 刘连浩 刘少强 刘伟荣

鲁鸣鸣 施荣华 张士庚

传感器网络是物联网的基本组成部分，是物联网用来感知和识别周围环境的信息生成和采集系统，传感器网络对信息处理来说如同人体的感觉突触一样重要。为了方便感知和部署并提高网络的可扩展性，传感器网络一般采用无线通信方式，从而形成了节点之间可自组织拓扑结构的无线传感器网络。无线传感器网络技术集成了传感器技术、嵌入式计算技术、计算机网络和无线通信技术等重要信息技术，目前已经逐渐走向成熟，在各个领域的应用不断扩大，被认为 21 世纪最有影响力的技术之一。

本书比较系统地介绍无线传感器网络的理论、技术和若干应用。全书从结构上可以分为三个部分：无线传感器网络的基础理论，主要介绍无线传感器网络从物理层到网络层的各层通信协议，给出了目前常用的针对无线传感器网络特点的网络协议设计思想和若干典型协议，这些理论和技术为无线传感器网络的部署和通信提供了基本的支持；无线传感器的若干关键技术，包括无线传感器网络的时间同步、节点定位、容错设计、质量保证和网络管理等技术，这些技术为无线传感器网络的各种应用提供了有力的支撑；无线传感器网络的网络仿真、无线传感器网络的硬件开发、操作系统、无线传感器网络应用开发等，并给出了部署和应用开发实例。

本书主要有以下特点：

(1) 基础性。本书注重无线传感器网络的基本理论和关键技术，包括无线传感器的基本概念、基本原理、基本架构、基本协议和典型基础应用。力求展示出无线传感器网络重要和基础的内容，并介绍了当前主流的无线传感器网络节点和开发平台，适合于初学者对无线传感器网络有清楚的认识和理解，并做到通俗易懂。

(2) 系统性。本书涉及无线传感器网络的各个方面，注重内容的系统性，以无线传感器网络的体系为内容框架，涵盖了无线传感器网络的从物理层到网络层的各种协议、时间同步技术、节点定位技术、容错设计技术、网络管理技术、硬件设计技术、操作系统平台、应用开发技术等，内容全面，体系完整。

(3) 新颖性。为适应无线传感器网络理论和技术发展迅速、知识更新快的特点，本书紧跟学科发展前沿，针对当前新出现的各种应用，及时将无线传感器网络的新技术、新手段和新工具融入内容体系，及时对无线传感器网络的技术框架进行扩充和完善，并给出了

新的应用和实例。

(4) 逻辑性。无线传感器网络牵涉的技术众多, 应用领域宽广, 本书注重介绍时的逻辑性, 面向无线传感器网络应用这一关键问题, 由无线传感器网络的基本架构和协议引入, 再介绍无线传感器网络的关键支撑技术和建立在基本架构与关键技术上的应用开发, 以此为主线介绍若干仿真环境、系统平台和开发环境。层层深入, 由浅入深, 层次分明, 有利于对无线传感器网络理论和技术的掌握和实践。

本书可作为高等院校物联网工程专业以及电气信息类专业的高年级本科生、研究生教材和教学参考用书, 也可供从事相关行业的工程技术人员与研究人员参考。

本书的写作受到国家自然科学基金(61003233、61071096)和高等学校博士点科研基金(20100162110012、2011016211042)资助, 在此表示感谢。

由于时间仓促, 本书的错误和不足在所难免, 敬请广大读者批评指正。

第 1 章 无线传感器网络概述	1
1.1 无线传感器网络介绍	2
1.1.1 无线传感器网络的概念	2
1.1.2 无线传感器网络的特点及优势	3
1.1.3 无线传感器网络的应用	5
1.2 无线传感器网络的体系结构	7
1.2.1 传感器的节点结构	7
1.2.2 无线传感器网络架构	8
1.3 无线传感器网络研究及发展现状	11
1.4 无线传感器网络所面临的挑战	12
1.5 本章小结	13
参考文献	14
第 2 章 无线传感器网络物理层设计	15
2.1 无线传感器网络物理层概述	16
2.2 无线传感器网络物理层研究现状及发展	16
2.3 无线传感器网络物理层关键技术	18
2.3.1 编码调制方式的选择	18
2.3.2 频率的选择	18
2.4 物理层调制/解调方式与编码方式	20
2.4.1 M-ary 调制机制	20
2.4.2 差分脉冲位置调制机制	21
2.4.3 自适应编码位置调制机制	21
2.5 无线传感器网络物理层设计	22
2.5.1 频率分配	22
2.5.2 通信信道	23
2.6 本章小结	27



参考文献	28
<b>第 3 章 无线传感器网络的数据链路层设计</b>	<b>29</b>
3.1 无线传感器网络数据链路层概述	30
3.2 无线传感器网络数据链路层研究现状与发展	30
3.2.1 无线传感器网络 MAC 协议的分类	30
3.2.2 无线传感器网络 MAC 协议需要解决的问题	31
3.3 无线传感器网络数据链路层的关键问题	31
3.4 无线传感器网络的 MAC 协议	33
3.4.1 基于竞争的 MAC 协议	33
3.4.2 基于分配的 MAC 协议	41
3.4.3 混合型 MAC 协议	49
3.4.4 跨层 MAC 协议	52
3.5 本章小结	55
参考文献	56
<b>第 4 章 无线传感器网络的网络层</b>	<b>57</b>
4.1 无线传感器网络网络层概述	58
4.2 无线传感器网络网络层研究现状和发展	59
4.3 无线传感器网络网络层关键问题	61
4.4 无线传感器网络路由协议	63
4.4.1 基于数据的路由协议	63
4.4.2 基于集群结构的路由协议	68
4.4.3 基于地理位置信息的路由协议	71
4.5 本章小结	76
参考文献	76
<b>第 5 章 无线传感器网络传输层协议</b>	<b>78</b>
5.1 无线传感器网络传输层协议概述	79
5.2 无线传感器网络传输层研究现状和发展	81
5.2.1 无线传感器网络传输层关键问题	82
5.2.2 无线传感器网络传输层协议分析	83
5.3 无线传感器网络体系	92
5.3.1 无线传感器网络网络体系结构	93
5.3.2 MPAS 设计	93
5.4 本章小结	96
参考文献	96

<b>第 6 章 通信标准</b> .....	98
6.1 IEEE 802.15.4 标准.....	99
6.1.1 IEEE 802.15.4 协议简介.....	99
6.1.2 IEEE 802.15.4 协议栈.....	100
6.2 ZigBee 标准.....	107
6.2.1 网络层规范.....	107
6.2.2 应用层规范简介.....	109
6.3 无线局域网技术.....	109
6.3.1 无线局域网概述.....	109
6.3.2 网络拓扑结构.....	110
6.3.3 IEEE 802.11 协议栈.....	112
6.4 蓝牙技术.....	114
6.4.1 蓝牙核心协议.....	115
6.4.2 蓝牙优势.....	116
6.5 UWB 技术.....	117
6.5.1 UWB 协议模型.....	117
6.5.2 UWB 优势.....	118
6.6 本章小结.....	119
参考文献.....	119
<b>第 7 章 时间同步技术</b> .....	121
7.1 时间同步技术概述.....	122
7.2 时间同步技术研究现状与发展.....	123
7.3 时间同步技术关键问题.....	125
7.4 传统时间同步技术.....	127
7.4.1 DMTS 同步.....	127
7.4.2 RBS 同步.....	128
7.4.3 TPSN 同步.....	129
7.4.4 FTSP 同步.....	131
7.4.5 传统协议比较.....	132
7.5 新型时间同步技术.....	133
7.5.1 协作同步.....	135
7.5.2 萤火虫同步.....	135
7.6 本章小结.....	138
参考文献.....	138

<b>第 8 章 无线传感器网络节点定位技术</b> .....	140
8.1 节点定位技术概述.....	141
8.2 节点定位技术研究现状与发展.....	142
8.3 节点定位技术关键问题.....	143
8.4 基于测距的定位技术.....	144
8.4.1 三边定位技术.....	144
8.4.2 角度定位.....	148
8.4.3 测距定位算法性能比较分析.....	149
8.5 基于非测距定位技术.....	150
8.5.1 基本原理.....	150
8.5.2 典型算法.....	151
8.5.3 几种非测距的定位技术性能分析.....	155
8.6 协作定位技术.....	156
8.6.1 刚性体理论概述.....	156
8.6.2 协作体的定义.....	157
8.6.3 协作定义原理.....	158
8.7 本章小结.....	160
参考文献.....	160
<b>第 9 章 容错设计技术</b> .....	162
9.1 无线传感器网络容错技术概述.....	163
9.2 容错设计模型.....	164
9.3 无线传感器网络可靠性分析.....	166
9.3.1 网络层可靠性.....	166
9.3.2 传输层可靠性.....	167
9.4 无线传感器网络故障检测与诊断.....	167
9.4.1 基于空间相关性的故障诊断.....	168
9.4.2 基于贝叶斯信任网络的故障诊断.....	170
9.5 无线传感器网络的自恢复策略.....	171
9.5.1 基于连接的修复.....	171
9.5.2 基于覆盖的修复.....	171
9.6 本章小结.....	172
参考文献.....	172
<b>第 10 章 服务质量保证</b> .....	173
10.1 无线传感器网络服务质量概述.....	174
10.2 无线传感器网络服务质量研究现状与发展.....	175

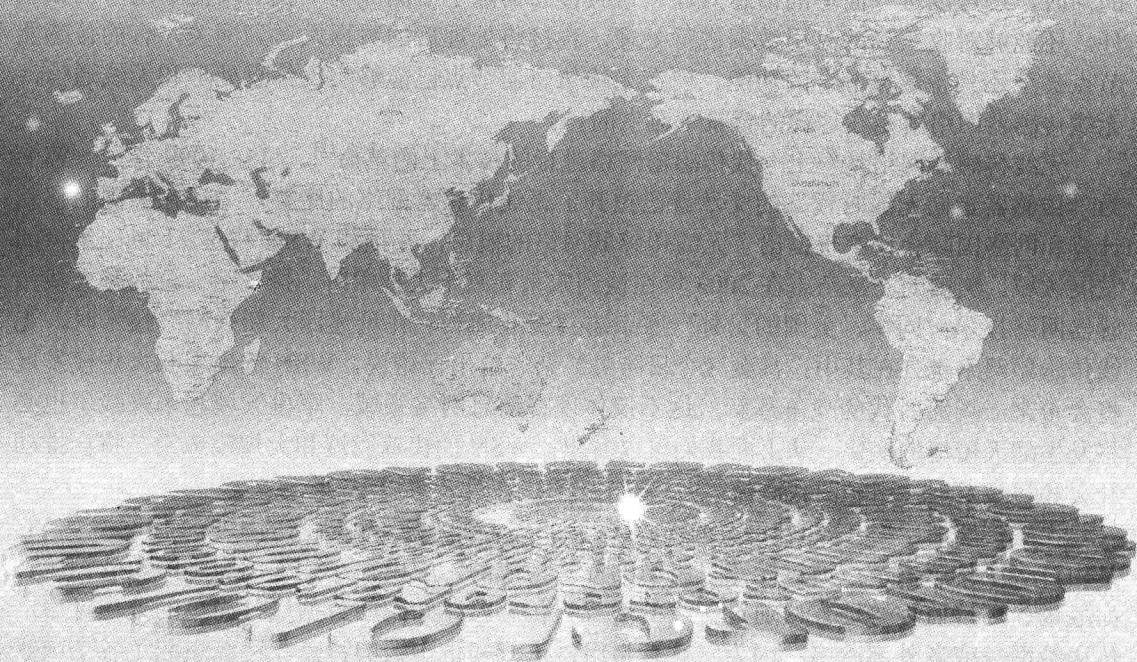
10.3	无线传感器网络 QoS 关键问题	178
10.4	感知 QoS 保证	179
10.4.1	感知 QoS 概述	179
10.4.2	感知模型	180
10.4.3	典型的无线传感器网络覆盖控制算法与协议	181
10.4.4	亟待解决的问题	188
10.5	传输 QoS 保证	188
10.5.1	可靠数据传输	189
10.5.2	拥塞控制	190
10.6	本章小结	191
	参考文献	191
<b>第 11 章</b>	<b>网络管理</b>	<b>194</b>
11.1	网络管理概述	195
11.1.1	网络管理的概念	195
11.1.2	网络管理的体系结构	196
11.2	网络管理研究现状与发展	198
11.2.1	SNMP 网络管理架构	198
11.2.2	网络管理新技术	199
11.3	网络管理关键问题	201
11.4	典型网络管理系统	203
11.4.1	集中式网络管理系统	203
11.4.2	层次式网络管理系统	205
11.4.3	分布式网络管理系统	207
11.5	本章小结	209
	参考文献	209
<b>第 12 章</b>	<b>无线传感器网络的仿真技术</b>	<b>211</b>
12.1	网络仿真概述	212
12.2	无线传感器网络仿真研究现状与发展	213
12.3	常用的仿真软件	214
12.3.1	OPNET	214
12.3.2	NS2	216
12.3.3	TOSSIM	218
12.4	仿真软件比较	220
12.5	本章小结	221
	参考文献	221

<b>第 13 章</b>	<b>无线传感器网络的硬件开发</b> .....	222
13.1	无线传感器网络硬件开发概述 .....	223
13.2	无线传感器网络硬件开发研究现状与发展 .....	224
13.3	传感器节点的设计 .....	226
13.3.1	核心处理模块设计 .....	226
13.3.2	能量模块设计 .....	228
13.4	本章小结 .....	228
	参考文献 .....	229
<b>第 14 章</b>	<b>无线传感器网络的操作系统</b> .....	230
14.1	无线传感器网络操作系统概述 .....	231
14.2	TinyOS 操作系统 .....	232
14.2.1	概述 .....	232
14.2.2	TinyOS 的系统架构 .....	233
14.2.3	TinyOS 编译机制 .....	234
14.2.4	TinyOS 启动机制 .....	234
14.2.5	TinyOS 任务调度机制 .....	236
14.2.6	TinyOS 的并发性 .....	238
14.2.7	TinyOS 的能量管理机制 .....	240
14.2.8	通信机制 .....	243
14.3	MANTIS OS 操作系统 .....	246
14.3.1	MANTIS OS 的系统架构 .....	247
14.3.2	应用程序设计 .....	247
14.4	SOS 操作系统 .....	251
14.5	操作系统比较分析 .....	255
14.6	本章小结 .....	255
	参考文献 .....	255
<b>第 15 章</b>	<b>无线传感器网络的软件开发</b> .....	257
15.1	无线传感器网络软件开发概述 .....	258
15.1.1	软件开发特点和设计要求 .....	258
15.1.2	软件开发的内容 .....	259
15.1.3	无线传感器网络软件开发的主要技术挑战 .....	260
15.2	主要开发环境 .....	260
15.2.1	nesC 语言结构 .....	261
15.2.2	nesC 应用程序的分析 .....	262
15.2.3	nesC 程序的仿真 .....	264

15.3	无线传感器网络中间件设计 .....	265
15.4	本章小结 .....	268
	参考文献 .....	268
<b>第 16 章</b>	<b>无线传感器网络应用 .....</b>	<b>270</b>
16.1	概述 .....	271
16.2	无线传感器网络的应用场景 .....	272
16.3	无线传感器网络应用技术 .....	274
16.3.1	静态部署 .....	275
16.3.2	动态部署 .....	276
16.4	无线传感器网络应用实例分析 .....	277
16.4.1	用于矿井环境监测的无线传感器网络 .....	278
16.4.2	山体滑坡案例 .....	283
16.5	本章小结 .....	289
	参考文献 .....	289

# 第 1 章

## 无线传感器网络概述



计算机及相关技术的发展,使得将计算、通信、网络与传感等功能都集成在一个设备成为了可能,无线传感器网络正是这些技术的紧密结合。无线传感器网络是一种由传感器节点构成的网络,能够实时地监测、感知和采集节点部署区的环境或观察者感兴趣的感知对象的各种信息(如光强、温度、湿度、噪声和有害气体浓度等物理现象),并对这些信息进行处理后以无线的方式发送出去。无线传感器网络使普通物体具有了感知能力和通信能力,在军事侦察、环境监测、医疗护理、智能家居、工业生产控制以及商业等领域有着广阔的应用前景。

## 1.1 无线传感器网络介绍

### 1.1.1 无线传感器网络的概念

随着社会的发展,通信技术发展得越来越快,无线技术的应用也越来越广泛。作为无线通信中一个新兴领域——无线传感器网络,也得到了迅速的发展,并渐渐走向集成化、规模化发展。

与此同时,传感器节点变得越来越微型化,功能却变得越来越强大,在进行无线通信的同时,还可以进行简单的信息处理。这类传感器除了监测环境中我们所需要的一些数据外,还能够对收集到的有用数据进行处理,直接将处理后的数据发送到网关,有的传感器节点甚至还具备数据融合的功能。现在无线传感器节点已能够实现信息处理和无线通信,无线传感器网络就是在这样的背景下诞生的。

无线传感器网络是对上一代传感器网络进行的技术上的革命<sup>[1]</sup>。早在1999年,一篇名为“传感器走向无线时代”的文章就已拉开了无线传感器网络的序幕,之后在美国的移动计算和网络国际会议中也提出了无线传感器网络的概念,并预测WSN将是21世纪难得的发展领域。美国的一家杂志在2003年在谈到未来新兴十大技术时,排在第一位的是无线传感器网络技术;同年,美国的另外一家杂志《商业周刊》在论述四大新兴网络技术时,无线传感器网络也列在其中;甚至《今日防务》杂志给出评论说,WSN的出现和大规模发展将会带来一场跨时代的战争革新,这不仅体现在信息网络领域,军事领域和未来战争也必将发生翻天覆地的变化。从上面我们可以看出,WSN的快速发展和大规模应用,将会推动社会和科技发展,引领时代潮流。

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)是一种特殊的无线通信网络<sup>[4]</sup>,它是由许多个传感器节点通过无线自组织的方式构成的,应用在一些人们力不能及的领域,如战场、环境监控等地方;通过无线的形式将传感器感知到的数据进行简单的处理之后,传送给网关或者外部网络;因为它具有自组网形式和抗击毁的特点,已经引起了各个国家的积极关注。

无线传感器网络由多个无线传感器节点和少数几个汇聚(Sink)节点构成,一般来说,



无线传感器网络工作流程如下：首先使用飞机或其他设备在被关注地点撒播大量微型且具有一定数据处理能力的无线传感器节点，节点激活之后通过无线方式来搜集它附近的传感器节点，并与这些节点建立连接，从而形成多节点分布式网络，这些节点通过传感器感知功能采集这些区域的信息，经过本身处理之后，采用节点间相互通信最终传给外部网络。

如图 1.1 所示，无线传感器网络由传感区域内大量的无线节点、Sink 节点、外部网络构成，其中无线传感器节点随机地分布在被检测区域内，通过协作感知的形式实现区域内节点间的通信。由于通信范围或者出于能量节省考虑，节点只能与固定范围内的节点交换数据，因此要访问邻居节点以外的节点或者要将数据送到外部网络，必须采用多跳传输。Sink 节点的能量值和通信距离比传感器节点稍强，负责整个无线通信网络和外部网络之间的信息交换，从而实现外部网与传感区域内节点的相互通信。例如，其中节点 A 感知到数据之后，通过节点 B、C、D、E 多跳传送给 Sink 节点，再由 Sink 节点传送给外部网络（如 Internet）。

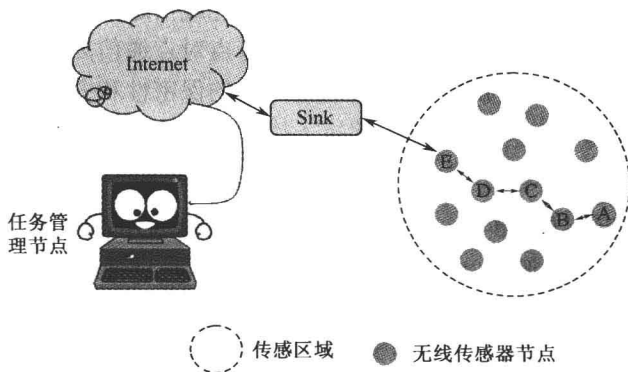


图 1.1 无线传感器网络

## 1.1.2 无线传感器网络的特点及优势

### 1. WSN 与 Ad hoc 共有的特征

无线通信作为通信行业一个单独的分支，已经取得了非常不错的成果。而其中取得较好成果的有无线自组织网络（Ad hoc），这种网络不需要固定的通信设备作为支撑，各个终端节点能够自己构建自己的网络域，动态地实现网络的互联，而作为一种特殊的无线自组织网络（Ad hoc），无线传感器网络与无线自组织网络一样，具有以下特征。

(1) 自组织。无线传感器网络和无线自组织网络一样，都是应用在地理条件比较恶劣或者人不能到达的地方，因此减少了人为的干扰，增加了许多大自然的不确定因素，比如节点的分布是随机的，突然的泥石流或者人为破坏致使部分节点失效，新增加一些节点等。为了达到网络所要求的可靠性，节点本身必须具有自组织成网络的能力。在节点位置确定之后，节点能够自己寻找其邻居节点，实现相邻节点之间的通信，通过多跳