

高等学校物联网专业系列教材



无线传感器网络

WUXIAN CHUANGANQI WANGLUO

郭晓玲◎编著
武仁杰◎主审

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

高等学校物联网专业系列教材

无线传感器网络

郭晓玲 编著
武仁杰 主审



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

内 容 简 介

本书首先详细讨论了无线传感器网络领域的基本术语和概念；接着按照无线传感器网络的分层体系结构，系统地讨论了物理层、数据链路层及网络层的主要内容和关键技术；然后详细讨论了无线传感器网络的数据传输可采用的各种无线通信技术和这些技术各自的特点及应用场合；最后对无线传感器网络领域的各项支撑技术进行了逐一讨论，包括操作系统、拓扑控制、节点定位、时间同步和安全机制。

本书分为9章，主要包括无线传感器网络概述、物理层及数据链路层、网络层、无线通信技术、操作系统、拓扑结构、节点定位、时间同步及安全机制。为了便于学习者加深对各章内容的理解，在每章的后面配有习题，并附有参考答案。

本书适合作为高等学校计算机科学与技术、信息工程、电子信息工程、信息安全、通信等相关专业本科生与硕士研究生无线传感器网络课程的教材，也可作为从事信息技术的工程技术人员与技术管理人员学习和研究无线传感器网络技术的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

无线传感器网络/郭晓玲编著. —北京: 中国铁道出版社,
2018.2

高等学校物联网专业系列教材
ISBN 978-7-113-24273-2

I. ①无… II. ①郭… III. ①无线电通信-传感器-
高等学校-教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第023931号

书 名: 无线传感器网络
作 者: 郭晓玲 编著

策 划: 魏 娜 读者热线: (010) 63550836
责任编辑: 贾 星 冯彩茹
封面设计: 一克米工作室
封面制作: 刘 颖
责任校对: 张玉华
责任印制: 郭向伟

出版发行: 中国铁道出版社(100054, 北京市西城区右安门西街8号)

网 址: <http://www.tdpress.com/51eds/>

印 刷: 虎彩印艺股份有限公司

版 次: 2018年2月第1版 2018年2月第1次印刷

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16 印张: 14.75 字数: 327千

书 号: ISBN 978-7-113-24273-2

定 价: 39.00元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书, 如有印制质量问题, 请与本社教材图书营销部联系调换。电话: (010) 63550836

打击盗版举报电话: (010) 51873659

前 言

Internet 改变了人与人的交流方式，无线传感器网络改变了人与自然的交互方式。无线传感器网络是物联网获取数据的重要手段，它极大地提高了人类获取物理世界数据的准确性和灵敏性，在物联网应用体系中的作用越来越重要。无线传感器网络技术涉及微电子技术、微型传感器技术、片上系统技术、嵌入式计算技术、分布式信息处理技术等多个技术领域，已经被广泛应用到军事侦测、智能家居、环境监测、工业控制、农业种植、交通管理和医疗监护等领域，有着广泛的应用场景和巨大的市场竞争力，被认为是 21 世纪备受国内外关注的热点领域之一。

本书根据当前高等学校传感器网络教学实际需求，结合最新的物联网技术编写而成。本书从初学者的角度出发，详尽地讲解了无线传感器网络的原理和技术，结构合理，语言通俗易懂，讲解深入浅出。

全书共 9 章，主要包括无线传感器网络概述、物理层及数据链路层、网络层、无线通信技术、操作系统、拓扑结构、节点定位、时间同步及安全机制。在每章的后面配有习题，便于学习者加深对本章内容的理解。

本书由郭晓玲编著。本书是 2017 年教育部产学合作协同育人项目“201701046023 传感器网络”的研究成果之一，凝聚了编者多年的教学经验，教材内容丰富、系统、完整。在编写过程中，李子恒、李朴艳、王玲玲、范杏蕊、郑盼盼、卜晓茵和向炜等绘制了大量的插图并完成了部分文字整理工作，感谢他们的付出；本书参考了大量的书籍和相关资料，并从网络中获取了许多最新资料，在此向所有作者表示衷心的感谢；中国铁道出版社对本书的出版给予了大力支持，在此一并表示感谢。全书由武仁杰主审。

由于编者水平有限，加之时间仓促，书中难免存在疏漏和不足之处，敬请广大读者批评、指正。

编 者
2017 年 12 月

目 录

第 1 章 无线传感器网络概述	1
1.1 无线传感器网络的发展历程.....	2
1.2 无线传感器网络的概念.....	3
1.3 无线传感器网络的特点.....	4
1.4 无线传感器网络结构.....	5
1.4.1 网络结构.....	5
1.4.2 感知节点结构.....	6
1.4.3 感知节点的限制条件.....	7
1.5 无线传感器网络的协议栈.....	9
1.6 无线传感器网络的应用.....	10
1.7 无线传感器网络的发展趋势.....	16
1.7.1 未来的发展方向.....	16
1.7.2 关键技术.....	17
1.8 与其他网络的区别与联系.....	19
本章小结.....	20
习题.....	20
第 2 章 物理层及数据链路层	25
2.1 物理层.....	26
2.1.1 物理层的主要技术.....	26
2.1.2 物理层设计.....	29
2.2 数据链路层.....	30
2.2.1 数据链路层概述.....	30
2.2.2 介质访问控制技术.....	31
2.2.3 介质访问控制技术的发展趋势.....	39
本章小结.....	39
习题.....	39
第 3 章 网络层	41
3.1 路由协议的作用.....	42

3.2	路由协议的类型	43
3.3	路由协议设计的原则	44
3.4	典型的路由协议	45
3.4.1	平面路由协议	45
3.4.2	基于分簇的路由协议	47
3.4.3	基于查询的路由协议	51
3.4.4	基于地理位置的路由协议	54
3.4.5	基于 QoS 的路由协议	59
	本章小结	61
	习题	62
第 4 章	无线通信技术	65
4.1	ZigBee 技术	66
4.1.1	ZigBee 概述	66
4.1.2	ZigBee 的特点	66
4.1.3	ZigBee 的体系结构	67
4.1.4	ZigBee 模块	78
4.2	6LoWPAN 技术	82
4.2.1	6LoWPAN 概述	83
4.2.2	6LoWPAN 的优势	83
4.2.3	6LoWPAN 的体系结构	84
4.2.4	6LoWPAN 的适配层各模块的功能	84
4.2.5	6LoWPAN 的关键技术分析	86
4.3	Bluetooth 技术	86
4.3.1	Bluetooth 概述	87
4.3.2	Bluetooth 的特点	87
4.3.3	Bluetooth 的体系结构	88
4.3.4	Bluetooth 的工作过程	90
4.4	Wi-Fi 技术	90
4.4.1	Wi-Fi 概述	91
4.4.2	Wi-Fi 的特点	91
4.4.3	Wi-Fi 的技术标准	92
4.4.4	Wi-Fi 的安全风险及防范措施	93
4.5	RFID 技术	94
4.5.1	RFID 概述	94
4.5.2	RFID 的特点	95
4.5.3	RFID 的工作原理	95
4.5.4	RFID 的应用场合	96

4.6	NFC 技术	97
4.6.1	NFC 技术概述	97
4.6.2	NFC 技术优势	98
4.6.3	NFC 现实应用举例	98
4.7	UWB 技术	99
4.7.1	UWB 概述	99
4.7.2	UWB 应用	101
4.8	LoRa 技术	101
4.8.1	LoRa 概述	101
4.8.2	LoRa 技术优势	102
4.9	NB-IoT 技术	103
4.9.1	NB-IoT 技术特点	103
4.9.2	NB-IoT 技术应用	104
	本章小结	106
	习题	106
第 5 章	操作系统	111
5.1	Z-Stack 协议栈	112
5.1.1	Z-Stack 概述	112
5.1.2	Z-Stack 的体系结构	113
5.1.3	Z-Stack 的基本术语	114
5.1.4	Z-Stack 的目录结构	116
5.1.5	Z-Stack 的工作过程	117
5.2	Contiki 操作系统	127
5.2.1	Contiki 概述	127
5.2.2	Contiki 的特点	128
5.2.3	Contiki 的目录结构	128
5.3	TinyOS 操作系统	131
5.3.1	TinyOS 概述	131
5.3.2	TinyOS 的体系结构及通信机制	132
5.3.3	TinyOS 的特点	133
5.3.4	TinyOS 与 Contiki 的比较	133
5.4	MantisOS 操作系统	134
5.5	SOS 操作系统	137
	本章小结	139
	习题	139
第 6 章	拓扑控制	143
6.1	拓扑控制概述	144

6.1.1	拓扑控制基本概念	144
6.1.2	拓扑控制设计的目标	145
6.2	拓扑结构形式	146
6.2.1	平面结构	146
6.2.2	分层结构	146
6.2.3	混合结构	147
6.2.4	Mesh 结构	147
6.3	典型的拓扑控制算法	148
6.3.1	基于功率控制的拓扑算法	148
6.3.2	基于层次控制的拓扑算法	151
6.3.3	基于休眠调度的拓扑算法	154
	本章小结	155
	习题	156
第 7 章	节点定位	159
7.1	节点定位概述	160
7.2	节点定位的分类	160
7.3	节点定位的基本术语	161
7.4	节点定位的技术指标	162
7.5	基于测距的节点定位	163
7.5.1	测距阶段	163
7.5.2	定位阶段	165
7.6	无需测距的节点定位	168
7.6.1	质心算法	168
7.6.2	DV-Hop 定位	169
7.6.3	APIT 定位	170
	本章小结	171
	习题	171
第 8 章	时间同步	175
8.1	时间同步概述	176
8.1.1	时间同步的意义	176
8.1.2	时间同步的分类	176
8.1.3	时间同步的特点	177
8.2	时间同步模型	178
8.2.1	通信模型	178
8.2.2	误差来源分析	180
8.3	时间同步协议	181

8.3.1	TPSN 协议	181
8.3.2	RBS 协议	183
8.3.3	DMTS 同步机制	185
8.3.4	FTSP 协议	186
8.3.5	LTS 协议	187
8.4	各种时间同步协议及未来发展趋势	189
	本章小结	190
	习题	190
第 9 章	安全机制	193
9.1	安全问题概述	194
9.2	安全问题分析	195
9.2.1	安全需求	195
9.2.2	安全设计	196
9.3	安全策略	200
9.3.1	密钥管理	200
9.3.2	安全认证技术	202
9.3.3	访问控制和权限管理技术	203
9.3.4	安全路由	204
9.3.5	入侵检测	205
9.4	无线传感器网络安全协议	207
9.4.1	依赖基站的网络安全框架协议——SPINS	207
9.4.2	SPINS 协议的实现问题	213
9.4.3	美国加州大学伯克利分校的模型系统	216
	本章小结	216
	习题	217
附录	习题部分参考答案	219
	参考文献	225



第1章 无线传感器网络概述



学习重点

无线传感器网络是21世纪备受国内外关注的热点领域之一，它已经被广泛应用到军事侦测、智能家居、环境监测、工业控制、农业种植、交通管理和医疗监护等领域，有着广泛的应用场景和巨大的市场竞争力。它由多个学科高度交叉而成，是一门比较综合的专业课程，涉及微电子技术、微型传感器技术、片上系统SoC技术、嵌入式计算技术、分布式信息处理技术等多个技术领域。无线传感器网络是物联网获取数据的重要手段，极大地提高了人类获取物理世界数据的准确性和灵敏性，在物联网应用体系中的作用越来越重要。

本章对无线传感器网络的基本概念和原理进行了介绍，包括发展历程、基本概念、网络特点、系统结构、网络协议栈、应用场景、未来的发展方向及关键技术。通过本章的学习可以为后续章节打下基础。

1.1 无线传感器网络的发展历程

无线传感器网络从最初的简单传感器系统到今天的智能传感器系统，其发展大致经历了三个阶段，如图 1-1 所示。下面对每个阶段的特点分别进行介绍。



图 1-1 无线传感器网络发展的三个阶段

1. 第一阶段：简单的传感器系统

第一阶段是 20 世纪 70 年代至 20 世纪 80 年代。

美越战争期间，美越双方在密林覆盖的“胡志明小道”进行了一场较量。“胡志明小道”是胡志明部队向南方游击队输送物资的秘密通道，美军对其进行了狂轰滥炸，但效果不大。后来，美军投放了 2 万多个“热带树”传感器。“热带树”实际上是由震动和声响传感器组成的系统，它由飞机投放，落地后插入泥土中，只露出伪装成树枝的无线天线，因而被称为“热带树”。只要对方车队经过，传感器探测出目标产生的震动和声响信息，自动发送到指挥中心，美机立即展开追杀，总共炸毁或炸坏 4.6 万辆卡车。

这个阶段的传感器节点具有简单的信息获取能力，节点之间初步实现了信息的传递。

2. 第二阶段：节点集成化

第二阶段是 20 世纪 80 年代至 90 年代。

1978 年，美国国防部高级研究计划局的分布式传感器网络项目，被看作开启了现代传感器网络研究的先河。该项目的初步设想是建立低功耗传感器节点构成的网络，这些节点之间相互协作将信息发送到处理节点。这个阶段出现了美军研制的分布式传感器网络系统、海军协同交战能力系统、远程战场传感器系统等。

这个阶段的特征是采用了现代微型化的传感器节点，节点具备感知能力、计算能力和通信能力，节点之间的通信能力也逐渐增强。因此在 1999 年，《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。

3. 第三阶段：多跳自组网

第三阶段是 21 世纪开始至今。

美国在 2001 年发生了震惊世界的“9·11”事件。如何在地形极其复杂的山区找到恐怖分子，人们设想通过在山区投放各种微型低功耗的探测传感器，网络采用无线多跳

自组织的方式,将传感器探测到的信息传送给美国军方。因此,能够实现无线多跳自组织的无线传感器网络成为当时的应用需求和后来的研究热潮。

第三阶段的传感器网络技术特点在于网络传输自组织、节点设计低功耗。无线传感器网络除了应用于反恐活动以外,在其他领域也获得了很好的应用,所以2002年美国国家重点实验室——橡树岭实验室提出了“网络就是传感器”的论断。

由于无线传感器网络在国际上被认为是继互联网之后的第二大网络,2003年美国《技术评论》杂志评出对人类未来生活产生深远影响的十大新兴技术,无线传感器网络被列为第一。美国《今日防务》杂志认为无线传感器网络的应用和发展将会对未来战争的形式产生质的变化。同年,美国自然科学基金委员会对一项关于传感器及传感器网络的项目投入资金高达3400万美元。2004年,《IEEE Spectrum》杂志发表专集《传感器的国度》,论述了无线传感器网络的广阔前景和巨大的社会生活推动力。随后,美国的一些大型公司(英特尔、微软、HP、Texas Instruments等)也纷纷加入到无线传感器网络的研发工作中。同时很多著名大学也纷纷开展关于无线传感器网络的研究,如加州大学伯克利分校、加州大学洛杉矶分校、南加州大学、斯坦福大学、麻省理工学院等院校。英国、意大利等国家也积极开展无线传感器网络领域的研究工作,并将其研究成果产品化和产业化。

我国非常重视无线传感器网络的研究工作。我国的无线传感器网络研究与发达国家几乎同步启动,它已经成为我国信息领域位居世界前列的几个方向之一。在2001年,中国科学院成立了中科院上海微系统所,开启了无线传感器网络的研究。从2002年开始,我国国家自然科学基金委员会部署和审批了多个无线传感器网络的相关课题。在2006年我国发布的《国家中长期科学与技术发展规划纲要》中,为信息技术确定了三个前沿方向,其中有两项直接与传感器网络相关。2009年,我国提出“感知中国”的概念。2010年,“物联网”被写入我国“政府工作报告”。同年,“物联网”被正式列为国家五大新兴战略性产业之一。

我国参与无线传感器网络研究的主体非常丰富。哈尔滨工业大学、清华大学、北京邮电大学等率先开展了无线传感器网络的研究。2010年我国教育部首次批准开设物联网工程专业,2011年正式招生。目前,我国绝大多数工科院校都已经开展了与无线传感器网络相关的研究和教育工作。中国移动、华为、中兴等大型企业也纷纷加入了研发行列。

现实的应用需求推动了无线传感器网络技术的进步和发展。未来,无线传感器网络将对人们的生活工作产生巨大的影响。

1.2 无线传感器网络的概念

无线传感器网络最早由美国提出,它由不同学科之间相互交叉、知识高度集成形成。无线传感器网络技术涉及传感器技术、嵌入式计算技术、分布式信息处理技术、无线通信技术、微机电系统技术等多个技术领域,被认为是21世纪最具影响力的技术之一。

无线传感器网络是一个由大量廉价的传感器节点组成的无线自组网，节点之间通过相互的协作，对指定监测区域的对象实现数据感知、采集和处理，并将数据传输给用户，具有快速展开、安全可靠的良好性能，有着广阔的应用前景。无线传感器网络的部署极大地扩展了人类认知物理世界的的能力，提高了人类获取数据的准确性和灵敏度，是物联网获取数据的重要手段。无线传感器网络很好地实现了物理世界、计算机世界和人类世界的连通。

无线传感器网络可以使人们在任何时间、地点和环境下，获取大量可靠的信息，真正实现了“无处不在的计算”理念。无线传感器网络在军事国防、工业控制、环境监测、智能家居、医疗护理等方面已经表现出了巨大的潜力和应用价值。

普遍的关于无线传感器网络的定义是：无线传感器网络（Wireless Sensor Network, WSN）是由大量的静止或移动的传感器以自组织和多跳的方式构成的无线网络，目的是协作的感知、处理和传输网络覆盖区域内的感知对象信息，并报告给观察者。

传感器、感知对象和观察者共同构成了无线传感器网络的三个基本要素。感知对象是网络监测区域的被观察对象。无线传感器网络包含了类型丰富的传感器节点，如温湿度传感器、红外传感器、烟雾传感器、压力传感器、电磁传感器等。这些传感器负责采集感知对象的数据，然后经过多跳传输到汇聚节点，最后通过远程数据传输方式（因特网、卫星等）传递到观察者。观察者也可以对无线传感器网络进行任务发布或配置管理。

1.3 无线传感器网络的特点

无线传感器网络技术由大量的传感器节点以自组织多跳的形式构成无线通信网络，实现对网络区域内监测对象的数据采集、处理和传输。

无线传感器网络具有以下特点：

1. 大规模

无线传感器网络大规模的含义包括两层：一层是监测的区域一般比较大，传感器部署在很广的范围内；另一层的含义是部署的传感器节点的数量较多，目的是通过部署冗余节点，使网络系统具有很强的容错能力，提高监测的准确性，减少覆盖盲区。

2. 自组织

通常情况下，传感器节点被随机抛撒部署，节点的位置不能预先精确确定，节点之间的邻居关系也不能预先知道。在使用的过程中，部分传感器节点有可能由于能量耗尽或环境因素失效，也有一些节点后期可能会补充到网络中。这就要求无线传感器网络必须能够拥有自组织网络结构的能力，能够确保自动配置和管理，从而适应网络结构的变化。

3. 动态性

无线传感器网络的拓扑结构可能会因为很多原因而发生变化，如能量耗尽、环境

因素、节点故障、通信链路质量变化、节点移动或加入等。无线传感器网络受到这些因素的影响导致网络拓扑结构发生变化，因此说无线传感器网络具有动态性。这种特点要求无线传感器网络必须能够自行组织网络结构、自动配置和管理，适应动态性的变化。

4. 可靠性

无线传感器网络通常部署在环境恶劣的地方，极易遭到损坏或破坏，而且还常被部署在人类不宜到达的地方，后期更换维护的难度增大。无线传感器网络的节点数目众多，分布的区域较大，这也大大增加了维护的难度。因此，要求无线传感器网络的软硬件都必须具有良好的健壮性和容错性。

5. 应用相关性

不同的传感器网络关心不同的物理量，因此它们的应用系统也多种多样，比一般的网络系统更贴近实际的需求和应用。不同的应用背景，无线传感器网络的开发设计各不相同，系统的硬件平台、软件系统和网络协议会有所差别。针对每一个具体的应用来研究传感器网络技术，是传感器网络设计不同于传统网络的一个很重要特征。

6. 资源受限

由于无线传感器网络的节点数量多，一般情况下节点的价格低，而且无线传感器网络要求节点的体积小和功耗低，所以节点的计算能力、存储能力、通信能力和电源能量等都有限。无线传感器网络在设计 and 开发时必须充分考虑到其资源受限的特点。

7. 以数据为中心

传统的互联网是一个以 IP 地址为中心的网络，要想访问互联网中的资源，必须知道存放资源的服务器的 IP 地址。

在传感器网络中，大量节点随机部署在监测区域内，用户往往感兴趣的是某一个事件的发生，而不关心这个事件是由哪个传感器监测到目标。所以说，无线传感器网络是以数据为中心的。例如，在实现目标跟踪的无线传感器网络中，用户只关心目标出现的位置和事件，并不关心哪个节点监测到目标。事实上，在目标移动的过程中，必然是不同的节点提供目标的位置消息。

1.4 无线传感器网络结构

WSN 的结构包括网络结构和感知节点结构组成两部分。典型的无线传感器网络结构包括感知节点 (Sensor Node)、汇聚节点 (Sink Node)、任务管理节点 (Manager Node)。

1.4.1 网络结构

典型的无线传感器网络结构如图 1-2 所示。

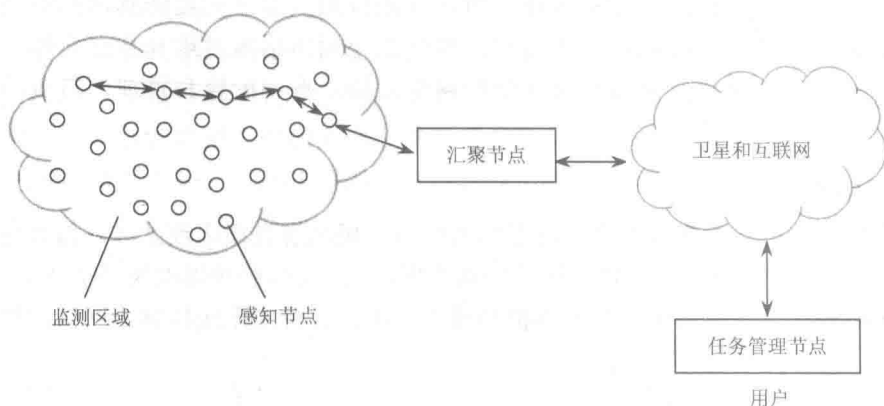


图 1-2 无线传感器网络结构示意图

无线传感器网络中，在实际的监测区域内部署了大量的感知节点，这些节点以自组织的方式构成网络，将实时采集的信息通过多跳中继的方式传送给汇聚节点，然后通过卫星或互联网到达任务管理节点。用户也可以通过任务管理节点对无线传感器网络进行远程配置和管理，发布监测任务。

1. 感知节点

感知节点是无线传感器网络的基本单元，节点承担着信息采集和路由传递的双重功能。具体来讲，它的作用包括进行本地信息收集及数据处理、对其他节点转发来的数据进行管理和融合等处理、转发收到的数据、与其他节点协同完成特定任务。

2. 汇聚节点

汇聚节点通常是指传感器网络中的网关设备，其处理能力、存储能力及通信能力都相对较强。它连接传感器网络和 Internet 等外部网络，实现两种协议栈之间的通信协议转换，可以将任务管理节点给出的任务发布出去，并把收集的数据转发至 Internet 等外网。

3. 任务管理节点

无线传感器网络的所有者通过任务管理节点访问无线传感器网络的资源。任务管理节点通常是运行有网络管理软件的 PC 或手持移动终端等设备。

1.4.2 感知节点结构

感知节点是无线传感器网络的重要组成部分，起到采集信息和传递信息的作用。其结构组成主要有四部分：传感器模块、处理器模块、无线通信模块、供电管理模块，如图 1-3 所示。

1. 传感器模块

传感器模块包括传感器和 AD/DC 转换器，传感器部分负责采集信息，AD/DC 转换器负责模数信号转换。在实际应用中，要根据需要采集的信号选择相应类型的传感器。

常见的传感器有感光传感器、加速度传感器、温度传感器、湿度传感器等。

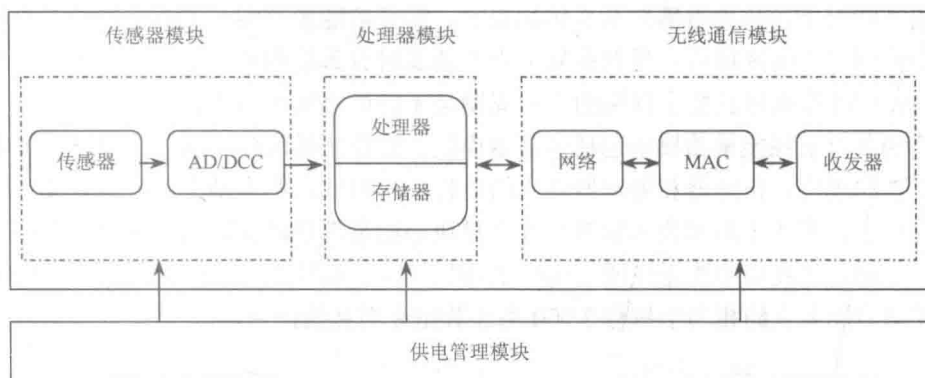


图 1-3 感知节点结构示意图

2. 处理器模块

处理器模块是感知节点结构的核心，包括处理器和存储器两部分，节点的所有功能及任务进度都需要它来协调完成。常见的处理器芯片有很多，如 TI 公司研发的 CC2530 系列芯片等。

3. 无线通信模块

无线通信模块由信号接收器、信号发射器等部件构成。无线通信模块的主要功能是和其他无线网络传感器节点进行通信。这个模块是能耗最大的模块。

4. 供电管理模块

供电管理模块的作用是提供并管理电能。在具体应用中，要根据能耗情况选择供电设备，用电量小的则可以选择微型电池。

近年来，随着无线传感器网络技术的发展和研究的深入，已经陆续出现了很多种无线传感器网络节点。例如，Mica Mote 系列传感器节点由美国加州大学伯克利分校支持研发，具有低功耗、自组织、可重构的特点，主要采用 Atmel 系列微控制器。该系列的传感器节点已经完成产业化，如 Mica2、MicaDot、MicaZ 等产品。

SP-WSNCE15A 平台的系列节点由凌阳科技大学提供。该平台中的主控芯片采用 TI 公司的 CC2530 芯片。CC2530 芯片能够提供用于 2.4 GHz 的 IEEE802.15.4、ZigBee 和 RF4CE 应用的片上系统解决方案，且外设资源丰富。

1.4.3 感知节点的限制条件

感知节点是无线传感器网络的基本单元，节点承担着信息采集和路由传递的双重功能。由于无线传感器网络是一个由大规模、低功耗的感知节点组成的协同工作网络，决定了单个感知节点的成本不能太高。由于成本的限制，导致了感知节点有如下限制条件：

1. 电源能量有限

通常情况下，传感器感知节点体积很小，携带的能量有限。大量的感知节点被部署在分布范围很广的区域内，导致感知节点不能及时有效地得到能量补充。因此，尽可能高效地使用能量来延长整个网络的生命周期是无线传感器网络的首要目标。

感知节点消耗能量的模块包括传感器模块、处理器模块和无线通信模块。随着集成电路工艺的进步，传感器和处理器模块的功耗变得很低，绝大部分能量消耗集中在无线通信模块上。图 1-4 所示为感知节点各个模块的能量消耗情况，从图中可以看出节点的绝大部分能量消耗集中在无线通信模块上。据了解，感知节点在 100 m 的距离上传输 1 bit 信息需要的能量大约相当于执行 3 000 条计算指令消耗的能量。

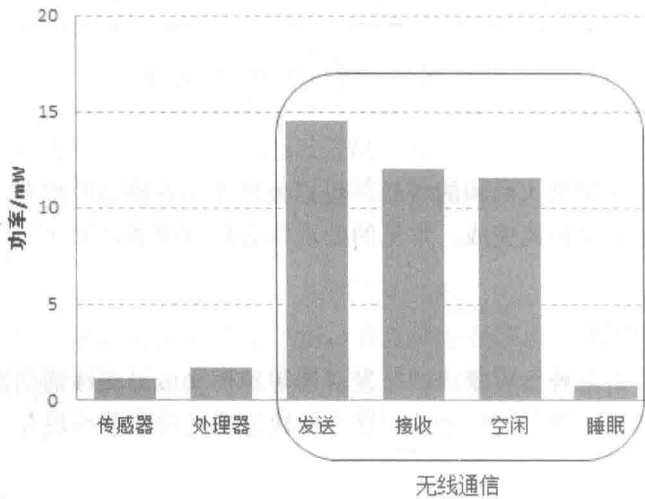


图 1-4 感知节点各个模块的能量消耗情况示意图

一般，通信信道可以分四个状态：发送、接收、空闲和睡眠。无线通信模块在空闲状态会一直侦听无线信道的使用情况，检查是否有数据发送给自己，而在睡眠状态则关闭通信模块。从图 1-4 可以看出，无线通信模块在发送状态消耗的能量最大，睡眠状态消耗的能量最少。因此，为了达到高效使用能量的目标，让不需要通信的模块尽快进入睡眠状态，是传感器网络设计协议时需要重点考虑的问题。

2. 通信能力受限

无线通信的能量消耗 E 与通信距离 d 的关系如式 (1-1) 所示。

$$E = kd^n \tag{1-1}$$

式中， k 是系数，参数 n 满足关系 $2 < n < 4$ 。 n 的取值与很多因素有关，例如感知节点部署贴近地面时，障碍物多，干扰大， n 的取值就大；无线质量对信号发射质量的影响也很大。通常 n 为 3，即假定通信能耗与距离的三次方成正比。随着通信距离的增加，能耗会急剧增加。有实验数据证明，在满足连通性的前提下应尽量减少长距离传输，改为短距离的多跳传输。一般而言，感知节点的无线通信半径在 100 m 以内比较合适。