



普通高等教育
物联网工程类规划教材

INTERNET OF THINGS, IOT



无线传感器 网络概论

Wireless Sensor Network

马飒飒 张磊 夏明飞 张勇◎编著



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



普通高等教育
物联网工程类规划教材

INTERNET OF THINGS, IOT



无线传感器 网络概论

马飒飒 张磊 夏明飞 张勇 编著

人民邮电出版社

北京

图书在版编目(CIP)数据

无线传感器网络概论 / 马飒飒等编著. — 北京 :
人民邮电出版社, 2015. 12
普通高等教育物联网工程类规划教材
ISBN 978-7-115-40762-7

I. ①无… II. ①马… 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(2015)第248023号

内 容 提 要

本书结合作者长期以来在无线传感网络领域的研究工作, 全面、系统地论述了无线传感器网络的基本理论和最新技术。全书分九章, 内容涉及无线传感器网络的结构、特征、关键技术; 无线传感器网络物理层、数据链路层、网络层、传输层、应用层的通信标准; 无线传感器网络的节点定位技术、时间同步技术以及无线传感器网络的应用实例。

本书既可以作为大学生本科高年级学生和研究生的教学参考书, 也可以供相关教学科研和工程技术人员阅读和参考。

-
- ◆ 编 著 马飒飒 张 磊 夏明飞 张 勇
 - 责任编辑 邹文波
 - 责任印制 沈 蓉 彭志环
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号
 - 邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
 - 网址 <http://www.ptpress.com.cn>
 - 北京昌平百善印刷厂印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
 - 印张: 15.5 2015 年 12 月第 1 版
 - 字数: 309 千字 2015 年 12 月北京第 1 次印刷
-

定价 39.00 元

读者服务热线: (010) 81055256 印装质量热线: (010) 81055316

反盗版热线: (010) 81055315

随着人们对信息获取需求的不断增加,由传统传感器网络所获取的简单数据越发不能满足人们对信息获取的全面需求,也随着人们对无线传感器网络研究的不断深入,无线传感器网络得到了很大的发展。随着无线通信、集成电路、传感器以及微机电系统(MEMS)等技术的飞速发展和日益成熟,传感器信息获取技术已经从过去的单一化逐渐向集成化、微型化和网络化的方向发展,无线传感器网络因此孕育而生。

无线传感器网络综合了计算技术、通信技术及传感器技术,其任务是利用传感器节点来监测节点周围的环境,收集相关数据,然后通过无线收发装置采用多跳路由的方式将数据发送给汇聚节点,再通过汇聚节点将数据传送到用户端,从而达到对目标区域的监测。无线传感器网络的应用已经由军事国防领域扩展到环境监测、交通管理、医疗健康、工商服务和反恐抗灾等诸多领域。它是继因特网之后,将对21世纪人类生活方式产生重大影响的IT技术之一。

本书从无线传感器网络绪论、无线传感器网络结构与通信协议、无线传感器网络的支撑技术和无线传感器网络的应用四个方面,对无线传感器网络做了系统的介绍。

本书内容丰富、条理清晰,既注重对基础知识的介绍,又紧密结合领域现状与发展趋势。第1章绪论介绍了无线传感器网络的基本概念、关键技术和应用现状,大部分为基础内容,建议学时数为4~6学时。第2章~第5章详细介绍了无线传感器网络结构与通信协议这一部分,从物理层、数据链路层、网络层和传输层这些方面进行了详细的论述,建议学时为12~14学时。第6章~第8章针对无线传感器网络的几大基本技术进行了详细的论述。在论述基本原理的同时,还将当前比较前沿的各种算法进行了分析和比

较，并给出了各种算法的优缺点，建议学时为 18~20 学时。第 9 章为无线传感器网络的应用分析，对当前无线传感器网络的应用场景进行了详细论述，并从军事、工业和其他领域详细阐述了无线传感器的应用实例，建议学时为 4~6 学时。本书在深入介绍无线传感器网络基本原理的同时，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。

本书第 1、2、9 章由马飒飒编写，第 3、4 章由张勇编写，第 5、6 章由夏明飞编写，第 7、8 章由张磊编写。全书由马飒飒主编并定稿。

编 者

2015 年 9 月

第 1 章 绪论.....	1	第 2 章 无线传感器网络的物理层.....	25
1.1 物联网与无线传感器网络.....	1	2.1 无线传感器网络物理层概述.....	25
1.1.1 物联网.....	2	2.1.1 物理层的基本概念.....	25
1.1.2 无线传感器网络.....	4	2.1.2 物理层协议.....	28
1.2 无线传感器网络的结构与特征.....	5	2.2 无线传感器网络物理层关键技术.....	30
1.2.1 无线传感器网络的结构.....	5	2.2.1 频段的选择.....	30
1.2.2 无线传感器网络的特征.....	12	2.2.2 信道编码.....	32
1.3 无线传感器网络关键技术分析.....	14	2.2.3 调制和解调技术.....	37
1.3.1 基础服务.....	14	2.2.4 扩频技术.....	41
1.3.2 网络与通信.....	17	2.3 物理层调制解调方式与编码方式.....	44
1.3.3 故障诊断.....	18	2.3.1 差分脉冲位置调制机制.....	45
1.4 无线传感器网络的应用.....	19	2.3.2 自适应编码调制技术.....	46
1.4.1 无线传感器网络在军事领域的应用.....	19	习题.....	51
1.4.2 无线传感器网络在民用领域的应用.....	21	第 3 章 无线传感器网络的数据链路层.....	53
习题.....	23	3.1 无线传感器网络数据链路层概述.....	53

3.1.1 数据链路层的功能	53	5.1.2 无线传感器网络传输层的 关键技术	106
3.1.2 数据链路层的主要研究 内容	55	5.1.3 无线传感器网络传输层 协议分类	108
3.1.3 无线传感器网络数据链路层 关键问题	55	5.1.4 无线传感器网络传输层 跨层设计	118
3.2 MAC 协议概述	57	5.2 无线传感器网络体系	119
3.2.1 MAC 协议基础	58	5.2.1 无线传感器网络和网格 结合框架	119
3.2.2 基于竞争的 MAC 协议	67	5.2.2 无线传感器网络体系 结构	120
3.2.3 基于分配的 MAC 协议	73	5.2.3 无线传感器网络的注意 要点	123
3.2.4 混合型 MAC 协议	76	5.3 MPAS 设计	124
3.2.5 跨层 MAC 协议	77	习题	128
习题	79	第 6 章 无线传感器网络的通信 标准	129
第 4 章 无线传感器网络的网络层	81	6.1 IEEE 802.15.4 标准	129
4.1 无线传感器网络的网络层 概述	81	6.1.1 IEEE 802.15.4 协议简介	130
4.1.1 路由过程及功能简介	82	6.1.2 IEEE 802.15.4 协议栈	132
4.1.2 无线传感器网络的特点及 路由协议分类	82	6.2 ZigBee 标准	135
4.2 无线传感器网络路由协议	85	6.2.1 网络层规范	136
4.2.1 基于数据的路由协议	85	6.2.2 应用层规范	137
4.2.2 基于集群结构的路由 协议	90	6.3 RFID 标准	140
4.2.3 基于地理位置信息的路由 协议	94	6.3.1 RFID 标准的具体内容	140
习题	100	6.3.2 RFID 主要技术标准 简介	141
第 5 章 无线传感器网络的传输层	103	6.3.3 RFID 空中接口协议	144
5.1 无线传感器网络传输层概述	103	6.4 Bluetooth 技术	147
5.1.1 无线传感器网络传输层 简介	103		

6.4.1 Bluetooth 核心协议	147	7.4.1 刚性体理论概述	181
6.4.2 Bluetooth 优势	151	7.4.2 协作体的定义	182
6.5 UWB 技术	152	7.4.3 协作定位原理	184
6.5.1 UWB 协议模型	153	习题	185
6.5.2 UWB 优势	154	第 8 章 时间同步技术	187
习题	155	8.1 时间同步技术概述	187
第 7 章 节点定位技术概述	157	8.1.1 应用场合	187
7.1 节点定位技术概述	157	8.1.2 时间同步的设计	188
7.1.1 节点定位相关的基本 术语	158	8.1.3 同步协议分类	189
7.1.2 节点定位技术的定义及基本 原理	158	8.1.4 无线传感器网络时间 同步机制	190
7.1.3 定位算法的分类	159	8.2 时钟模型及时间传输延迟的 组成	192
7.1.4 节点定位的意义及 必要性	160	8.2.1 时钟模型	192
7.2 基于测距的定位技术	161	8.2.2 时间传输延迟的组成	194
7.2.1 测距技术	161	8.3 时间同步的基本原理	195
7.2.2 三边定位技术	164	8.3.1 影响时间同步的关键 因素	195
7.2.3 三角测量定位技术	165	8.3.2 传感器节点时钟的基本 原理	196
7.2.4 最大似然估计定位 技术	166	8.4 几种经典的时间同步算法	198
7.2.5 测距定位算法性能比较 分析	168	8.4.1 RBS 同步算法	198
7.3 基于非测距定位技术	170	8.4.2 TPSN 同步算法	200
7.3.1 基本原理	170	8.4.3 DMTS 同步机制	201
7.3.2 典型算法	171	8.4.4 FTSP	202
7.3.3 几种非测距的定位技术 性能分析	177	8.4.5 LTS 同步机制	204
7.4 协作定位技术	178	8.4.6 协作同步	205
		8.5 时间同步的挑战	207
		习题	207

第9章 无线传感器网络应用	209
9.1 概述	209
9.2 无线传感器网络的应用场景	210
9.2.1 无线传感器网络覆盖感知模型	210
9.2.2 无线传感器网络覆盖算法分类	212
9.2.3 无线传感器网络覆盖算法与协议	213
9.3 无线传感器网络应用技术	216
9.3.1 节点部署主要内容	216
9.3.2 节点部署评价标准	217
9.3.3 节点部署分类	219
9.4 无线传感器网络应用实例分析	222
9.4.1 军事无线传感器网络应用	223
9.4.2 工业无线传感器网络应用	224
9.4.3 其他领域无线传感器网络典型应用	227
习题	231
参考文献	233

从 20 世纪 90 年代末期开始,世界各国开始展开对无线传感器网络的研究,由于无线传感器网络具有巨大的应用价值,它已经引起了国内外学术界、工业界和各国军事部门的极大关注。从 2000 年起,国际上开始出现一些有关传感器网络研究结果的报道,美国国家自然科学基金委员会于 2003 年制定了无线传感器网络研究计划,支持相关基础理论的研究。美国国防部和各军事部门设立了一系列的军事传感器网络研究项目,高度重视对无线传感器网络领域的研究工作。日本、德国、英国、意大利等发达国家也对无线传感器网络表现出了极大的兴趣,纷纷在该领域展开了研究工作。美国英特尔公司、微软公司等信息行业巨头也开始了无线传感器网络方面的研究工作。

本章对无线传感器网络进行了基本的介绍,包括无线传感器网络的基本概念、体系结构、主要特征、无线传感器网络领域的关键技术,以及无线传感器网络的发展与应用。

1.1 物联网与无线传感器网络

为加快物联网发展,培育和壮大新一代信息技术产业,国家工业和信息化部制定了《物联网“十二五”发展规划》,进一步确定了物联网技术在新兴科技领域中的重要位置。通过无线传感器网络,物联网实现了对物理世界的感知,获取详细准确的目标信息和环境数据,以实现人、物和网三者之间的通信和信息交互,并在此基础上提供各种应用和服务。而无线传感器网络作为物联网中的重要组成部分,也需要更多的关注与研究,它

对促进物联网的发展，加快转变经济发展方式具有重要的推进作用，使得物联网成为新的全球经济增长点。

1.1.1 物联网

物联网是通过射频识别、红外感应器、全球定位系统、激光扫描器等信息传感设备与互联网连接起来，进行信息交换和通信，以实现物品的智能化识别和信息的互联与共享。物联网由感知层、网络层和应用层构成。感知层通过射频识别技术、传感器等信息传感设备进行数据的采集工作；然后通过网络层，将数据及时准确地传递到数据中心；在应用层利用各种先进智能技术对大量的感知数据进行分析 and 处理，根据用户需要开发各种各样的应用，从而实现对物体的智能控制。

物联网最为明显的特征就是将物与物连接起来，在不需要人员的干预下，就可以自动对信息进行采集与处理，具有较高的效率，降低了由于人为因素造成的不稳定性。因此，物联网在各个行业中的应用潜力非常巨大，应用领域也非常广泛，如智能家居、智能医疗、智能城市、智能环保、智能交通、智能司法等。

1. 智能家居

智能家居系统结合了自动化控制系统、计算机网络系统和网络通信技术，将家庭里的各种音频和视频设备、照明系统、窗帘、空调、安防系统、家用电器等设备通过互联网连接在一起，实现对家庭设备的远程操作及自动控制。智能家居不仅具有普通家居的功能，还可以实现更智能的家庭安防系统、全面的信息交互功能，将家居环境由原来的被动的静态结构转变为具有能动智慧的工具，提供一个更舒适、优质的家庭生活空间。

2. 智能医疗

智能医疗系统依靠物联网技术，通过简易实用的家庭医疗传感设备实时监测家中病人或老人的生理指标，护理人或有关医疗单位可以通过无线通信技术实时查看患者的生理指标数据，建立医疗信息资源共享平台，实现患者与医务人员、医疗机构、医疗设备之间的信息交互。物联网的快速发展对于提升医院综合管理水平、服务效率和服务质量，实现护理工作无线化具有重要促进作用，将会帮助解决建立现代化数字医疗模式、实现智能医疗及健康管理、建设医院信息系统等问题，降低公众医疗成本，有效推动医疗事

业快速发展。

3. 智能城市

智能城市系统是信息技术、网络技术渗透到城市生活各个方面的具体体现，主要包括对城市的数字化管理和对城市安全的统一监控两个方面。城市的数字化管理基于“数字城市”理论，在地理信息系统、全球定位系统、遥感系统等关键技术的基础上，深入开发和应用空间信息资源，建设信息基础设施和信息系统，为城市规划、城市建设和城市管理服务，为政府、企业和公众服务，为人口、资源环境和经济社会服务。城市安全统一监控是在宽带互联网和无线通信的基础上实现对整个城市实时远程监控、传输、存储与管理的业务。通过智能城市系统将这些分散的、独立的图像采集点连接起来构成网络，从而使对城市安全的统一监控、存储和管理成为可能，为城市管理者和建设者提供全新的城市规划、建设和管理的调控手段。

4. 智能环保

智能环保系统借助物联网技术，通过把各类感知设备安装到各种环境监控对象中，建设实时环境参数感知系统，通过云计算、模糊识别等技术，整合现有信息资源，建设具有高速计算能力、海量存储能力和并行处理能力的智能环境信息处理平台，以更加精细化和动态化的方式实现环境管理。例如通过全流程自动监测城市供水水质，实现水质的实时连续监测和远程监控，及时掌握主要水源地排污、水源建设、供水设施改造情况，预警、预报突发性水质风险，解决跨行政区域的水污染事故纠纷，保障城市用水安全，提高供水应急能力。

5. 智能交通

现阶段的城市交通管理基本是自发的，驾驶员根据自己对道路信息的判断选择行车路线，交通信号标志的指导作用是静态的、有限的。这导致城市道路资源的使用不能达到最高的效率，有可能造成不必要的交通拥堵甚至瘫痪。

物联网技术为智能交通的发展提供了更全面的认识，智能交通系统的应用有助于在整个城市交通管理系统上建立一种在大范围内全方面发挥作用的，实时、准确、高效的综合交通运输管理系统。安装在道路基础设施及车辆中的传感器可以实时对交通流量和

车辆状态进行监控，通过泛在的移动通信网络将数据传输至管理中心，向用户提供泛在的网络服务。驾驶员能够通过智能交通系统实时了解道路交通状况以及车辆信息，降低交通事故、减少对环境污染，选择最优行车路线，以安全和经济的方式到达目的地。管理人员可以实时分析与处理通过智能交通系统采集上来的车辆、驾驶员和道路信息，实时进行车辆调度、道路监控等，提高管理效率和服务水平。公众在旅途中能够获得实时的道路和周边环境信息，享受高效、安全、便捷、舒适的出行服务。

6. 智能司法

智能司法系统是一个集监控、定位、管理、考核、矫正于一体的综合管理系统。借助物联网技术，可以实现对社区矫正人员精确定位、动态监控、位置监管，同时可以为每一位社区矫正人员建立电子档案，实现对矫正人员的全面管理与考核，为矫正工作人员的日常行为监控与预警提供信息化、智能化的高效管理平台。智能司法系统还可以帮助司法部门建立一套规范化、系统化的社区矫正管理综合解决方案，为社区矫正工作提供数据支撑，使社区矫正管理流程规范化，提升管理效率，降低刑罚成本，使社区矫正工作更加人性化、智能化、效率化。

1.1.2 无线传感器网络

随着人们对信息获取需求的不断增加，由传统传感器网络所获取的简单数据越发不能满足人们对信息获取的全面需求，人们对无线传感器网络的研究不断深入，已经使得无线传感器网络得到了很大的发展。无线传感器网络作为物联网底层网络的重要技术形式，它将大量传感器节点部署在监测区域内，这些传感器节点相互通信，形成一个多跳自组织网络系统。无线传感器网络的传感器节点有很多类型，可以用来探测包括地震、电磁、温度、湿度、噪声、光强度、压力、土壤成分等多种多样的现象。无线传感器网络综合了计算机技术、通信技术及传感器技术，其任务是利用传感器节点来监测节点周围的环境，收集相关数据，然后通过无线收发装置采用多跳路由的方式将数据发送给汇聚节点，再通过汇聚节点将数据传送到用户端，从而达到对目标区域的监测。无线传感器网络可以帮助人们在任何时间、任何地点、任何环境条件下获取所需要的信息，无论是在理论上还是在实际应用中无线传感器网络的研究都具有非常重要的意义。

无线传感器网络是一种全新的信息获取平台，能够实时监测和采集网络分布区域内

的各种检测对象的信息，并将这些信息发送到网关节点，以实现复杂的指定范围内目标检测与跟踪，具有快速展开、抗毁性强等特点，有着广阔的应用前景。在物联网中，物品能够彼此进行“交流”，物联网利用射频识别技术，通过计算机互联网实现物品的自动识别和信息的互联与共享，而无需人的干预。

无线传感器网络与物联网最根本的区别在于无线传感器网络是基于传感器节点构成的网络，传感器节点通过无线通信协议进行相互通信，目的是解决如何感知和获取物理世界信息的问题；而物联网需要通过无线传感器网络以及射频识别技术实现感知数据的采集，另外还要把采集上来的大量感知数据完成传输、存储、提取、分析、处理以及相应的管理和控制等。在物联网中，从多个无线传感器网络获取的大量数据在传输过程中可能需要跨越多个异构通信网络才能到达管理中心，因此无线传感器网络只是物联网的一个重要组成部分，而不是物联网的全部。

1.2 无线传感器网络的结构与特征

无线传感器网络是一种大规模的分布式网络，通常部署在无人值守、环境恶劣的区域内，而且在大多数情况下传感器节点的使用都是一次性的，不会回收，从而决定了传感器节点是廉价的无线通信设备，且其资源是极度受限的。

1.2.1 无线传感器网络的结构

在无线传感器网络的监测区域内，部署了大量的廉价微型的静止或移动的传感器。这些传感器以自组织和多跳的方式构成无线网络，相互通信及合作，以完成在网络覆盖地理区域内感知、采集、处理和传输被感知对象信息的任务，然后将这些信息发送给观察者。传感器、感知对象和观察者构成了无线传感器网络的三个要素。

1. 无线传感器网络体系结构

无线传感器网络通常包括传感器节点、汇聚节点和任务管理节点。在监测区域内部或附近随机部署大量的传感器节点，这些传感器节点能够通过自组织及多跳的方式构成网络。传感器节点监测到的数据经本地简单处理后沿着临近的传感器节点多跳地进行传输并路由到汇聚节点，在传输过程中每个传感器节点都有可能对监测数据进行处理，这

些监测数据在汇聚节点进行聚集后再通过互联网或卫星通信网络到达管理节点。用户通过管理节点可以配置和管理无线传感器网络，向网络发布查询请求和控制命令以及接收传感器节点返回的监测数据。无线传感器网络结构如图 1.1 所示。

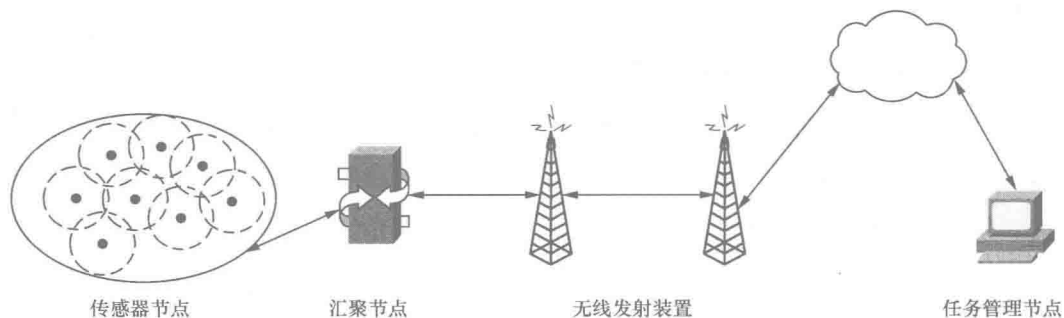


图 1.1 无线传感器网络结构

(1) 传感器节点

数据转发使用的是自组织网络和无线通信技术，每个传感器节点都可以在采集数据的同时，进行数据融合转发。节点当前处理的数据包括节点本身采集到的数据和其他节点转发给它的数据，节点对这些数据进行初步的数据处理和数据融合之后以相邻节点中继的方式向基站传输信息，然后通过互联网、卫星通信等方式用户从基站获取有效信息。

(2) 汇聚节点。

汇聚节点主要负责连接无线传感器网络与互联网等外部网络，负责实现协议栈之间两种通信协议间的转换，同时向传感器网络发布来自用户在管理节点设置的监测任务，并向外部网络转发传感器节点监测到的数据。汇聚节点是一个具有增强功能的传感器节点，具有较强的数据处理能力、足够的能量供给和更多的存储空间，可以对传感器节点传送来的大量数据进行处理、融合、打包，并能够稳定地与外部网络进行通信，管理和监控整个无线传感器网络的运行。

(3) 任务管理节点。

用户通过任务管理节点对无线传感器网络进行高效配置、管理和实时发布监测任务，采集监测数据。

一般情况下，无线传感器网络的工作流程大致可以分为以下 5 个步骤。

步骤一：用户在监控区域内通过使用飞机播撒、炮弹发射或者其他人工方式随机部

署大量廉价的微型的传感器节点。

步骤二：用户通过任务管理节点对部署的无线传感器网络进行正确的配置。

步骤三：用户通过任务管理节点发布网络监测任务。

步骤四：无线传感器网络实时采集监测区域内的数据并进行数据处理，一旦监测到与监测任务相一致的事件或信息，就立即通过多跳路由的方式发送到汇聚节点。

步骤五：任务管理节点借助外部网络接收需要的数据信息。

2. 无线传感器网络节点结构

无线传感器网络是与应用相关的网络，不同的应用背景对无线传感器网络的要求是不同的，无线传感器网络在监测区域内部署了大量具有传感、数据处理、通信功能的传感器节点，这些传感器节点的结构也是不同的，一般情况下由以下4个基本单元组成：数据采集单元、控制单元、无线通信单元以及能量供应单元，如图1.2所示。

（1）数据采集单元。

数据采集单元主要由传感器和模数转换这两个子模块构成，其中传感器子模块通常负责采集数据，而模数转换子模块主要负责将采集到的模拟信号转换成数字信号。由于节点采集到的信号通常是模拟的，而处理器仅用于对数字信号进行处理，因此需要先将采集的模拟信号转换为数字信号，然后才能作为控制单元的输入。

（2）控制单元。

控制单元对整个传感器节点的运行负责，一般由微处理器和存储器两个子单元构成。微处理器单元的主要作用是对节点自身采集到的数据以及其他传感器节点转发而来的数据进行实时的处理，而存储器单元的主要作用是对节点自身采集到的数据、其他传感器节点转发而来的数据和数据处理过程中的临时数据等进行存储。

（3）无线通信单元。

无线通信单元的主要作用是负责实现与其他传感器节点之间的通信，与其他传感器节点交互控制信息和收发数据。

（4）能量供应单元。

能量供应单元的主要作用是负责给传感器节点提供持续的能量，保证传感器节点的正常运行，它对整个系统能否安全可靠工作具有至关重要性。无线传感器网络大部分采用电池对传感器节点进行供电，由于传感器节点工作环境通常比较恶劣，而且数量非常

大，更换电池十分困难，所以在传感器节点进行设计时要把低功耗作为最重要的设计准则之一。

传感器节点结构如图 1.2 所示，除了以上 4 个单元外，传感器节点还包括其他辅助单元，如移动系统、定位系统和自供电系统等。

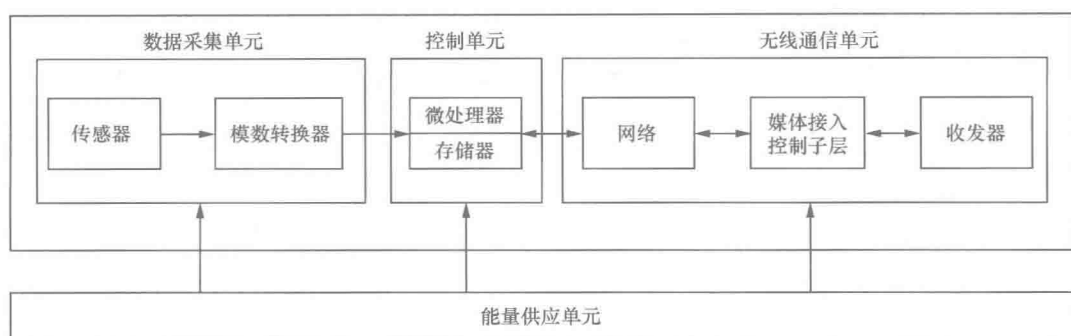


图 1.2 传感器节点结构

3. 无线传感器网络节点拓扑结构

无线传感器网络主要特点之一就是不需要底层的基础设施。当在监测区域内部署传感器节点后，传感器节点将自行组织并构成网络。其基本节点拓扑结构可分为基于簇的拓扑结构和基于平面的拓扑结构两种。

(1) 基于簇的拓扑结构。

具有某种关联的网络节点集合被称为簇。每个簇由一个簇头和多个簇成员组成。基于簇的拓扑结构具有天然的分布式处理能力。每个簇成员都把数据传给簇头，簇头完成对数据的分布式处理和融合，然后经过其他簇头多跳转发或直接传送给用户节点。簇头负责大量的通信和计算任务，能量消耗也更快，但是其结构与普通的传感器节点并无区别，为避免这种情况发生，簇中的成员按顺序或者每次选择剩余能量最多的成员作为簇头。图 1.3 显示了传感器节点基于簇的拓扑结构。

(2) 基于平面的拓扑结构。

基于平面的拓扑结构可分为两种：基于网的平面结构和基于链的线结构。基于网的平面结构中，传感器网络节点组织成一张网，每个传感器节点结构相同，功能特性完全一致，且只允许与其距离最近的节点通信。这种结构下，在个别链路和传感器节点发生故障时不会引起网络瘫痪，网络的容错能力和鲁棒性很好。从图 1.4 中可以看出，基于