

高等学校电子信息类教材

无线传感网技术

Wireless Sensor Network Technology

© 刘传清 刘化君 编著

朱玉全 主审



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

高等学校电子信息类教材

无线传感网技术

刘传清 刘化君 编著

朱玉全 主审

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书全面介绍了无线传感网的基本原理和应用开发技术,以及无线传感网领域的研究成果。首先介绍了无线传感网的体系结构、关键技术和发展历程,包括低功耗物理层无线通信技术、通信标准,并详细介绍了通信协议,主要涉及 MAC 协议和路由协议;其次介绍了无线传感网的支撑技术,包括定位技术、安全技术、数据融合与数据管理技术;最后讨论了无线传感网的应用开发技术,包括以数据为中心的网络互联技术,节点的硬件平台和软件平台的编程语言 nesC 和操作系统 TinyOS,并提供了开发设计案例,做到课程的理论与实践密切结合。

本书可作为高等院校电气信息类专业无线传感网技术课程的教材或教学参考书,也可作为物联网工程技术人员的培训教材或科研人员的参考用书。

本书的教学课件(PPT 文档)可从华信教育资源网(www.hxedu.com.cn)注册后免费下载,或者通过与本书责任编辑(zhangls@phei.com.cn)联系获得。

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

无线传感网技术 / 刘传清, 刘化君编著. —北京: 电子工业出版社, 2015.1

高等学校电子信息类教材

ISBN 978-7-121-20339-8

I. ①无... II. ①刘... ②刘... 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(2014)第 250555 号

责任编辑: 张来盛(zhangls@phei.com.cn)

印 刷: 北京季峰印刷有限公司

装 订: 北京季峰印刷有限公司

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: 17.25 字数: 440 千字

版 次: 2015 年 1 月第 1 版

印 次: 2015 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 2 500 册 定价: 44.80 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 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

物联网是国家新兴战略产业中信息产业发展的核心领域，将在国民经济发展中发挥重要作用。目前，物联网是全球研究热点，被称为继计算机、互联网之后的世界信息产业的第三次浪潮。加快“感知中国”计划，加快物联网、传感网发展已经上升为国家战略。为适应国家战略性产业发展需要，加大信息网络高级专门人才培养的力度，很多高校都建立了物联网学院和物联网、传感网专业。最近几年教育部要求高校逐步扩大物联网、传感网专业，加快物联网、传感网相关技术普及和人才培养。我们根据已有的基础和教学条件，设置了传感网工程专业，以满足新兴产业发展对物联网技术人才的要求。

无线传感网是物联网的重要分支，是随着无线通信、嵌入式计算技术、传感器技术、微机电技术以及分布式信息处理技术的进步而发展起来的一门新兴的信息获取技术，是当前在国际上备受关注、涉及多学科、高度交叉、知识高度集成的前沿热点研究领域。无线传感网采用自组织方式配置大量的传感器节点，通过节点的协同工作来采集和处理网络覆盖区域中的目标信息，是一个集数据采集、数据处理、数据传输于一体的复杂系统，它能够通过各类集成化的微型传感器协作，实时监测、感知和采集各种环境或监测对象的信息，这些信息通过无线方式被发送，并以自组织多跳的无线传播方式传送到用户终端，从而实现物理世界、计算世界以及人类社会三元世界的连通。

无线传感网技术所涉及的前沿学科和理论研究问题较多，很多技术还在探索过程中，因此目前已有的无线传感网教材都比较注重理论深度，不利于工程应用型人才的培养。本书是在作者多年对无线传感网的理论研究和教学实践基础上编写的，作为无线传感网技术的基础性教材，力求简明扼要，深入浅出，删减复杂、烦琐的理论推导，比较详细地描述了无线传感网所涉及的关键技术和基本理论，并结合相关应用，介绍具体无线传感网应用系统的设计方法，使理论与具体的实践相结合。全书总结了当今无线传感网研究领域中的研究成果和应用技术，详细阐述了无线传感网研究中的基本理论和研究方法。包括无线传感网络的概念、通信技术与通信协议、核心支撑技术，以及应用开发技术与应用实例等。全书结构合理，内容丰富，可分成三大部分：第一部分包括第1~5章，其中第1章介绍无线传感网的基本概念、关键技术和发展历程，第2章介绍物理层无线通信技术，第3章介绍无线传感网MAC协议，第4章介绍无线通信标准IEEE 802.15.4和Zigbee协议，第5章介绍传感网的路由协议；第二部分讲解无线传感网的主要支撑技术，包括第6~10章，其中第6~8章分别介绍无线传感网的定位技术、同步技术和安全技术，第9、10章分别介绍无线传感网的数据融合和数据管理技术；第三部分讲解无线传感网的应用开发技术，包括第11~13章，其中第11章详细介绍传感器节点设计的编程语言nesC和操作系统TinyOS，第12章介绍以数据为中心的数据互联技术和网关设计技术，第13章主要介绍无线传感网的设计开发技术，涉及节点的硬件平台、软件平台和仿真平台，并给出了设计案例，便于读者实践。通过阅读本书，读者可以快速、全面地掌握无线传感网的基本理论知识，并可

以根据应用进行一些简单的设计开发工作。

本教材依据物联网工程专业的教学大纲而编写，教学计划分为 48 课时（含实验实训）和 32 课时，可根据实际教学情况和要求进行删减。通过本课程的学习，为以后从事无线传感网技术的应用设计开发工作打下良好基础。

为了便于读者学习，本书在编写过程中尽量做到结合实际，着重介绍物理概念，以图文结合的方式来阐述问题，文字力求通俗易懂。为了适应教学需要，各章后面均附有思考题，书末附有主要的参考文献。

本书由刘传清、刘化君编著，参加部分编写工作的有柳群英、操天明、王志明、王琪等。本书作者诚挚地感谢参加本书资料收集和整理的老师们，感谢孟超博士对本书进行了全面的校对工作。本书相关的科研工作得到了江苏省高等教育教改立项研究课题（2013JSJG172）、南京工程学院硕士专业学位研究生专项课题（60973095）和南京工程学院创新基金项目（CKJB201309）的资助。最后感谢江苏大学博士生导师朱玉全教授对本书的全面审定。在此，向所有为本书编写出版做出贡献的人们表示衷心感谢！

由于水平有限，加之时间仓促，对于书中的缺点和错误，真诚地期望读者批评指正。

编著者
2014 年 7 月

目 录

第 1 章 无线传感网技术概述	(1)
1.1 无线传感网体系结构	(1)
1.1.1 无线传感网网络结构	(1)
1.1.2 无线传感器节点结构	(2)
1.1.3 无线传感器协议栈	(3)
1.2 无线传感网的主要特征	(4)
1.2.1 不同于移动自组网	(4)
1.2.2 不同于现场总线网络	(5)
1.2.3 无线传感器节点的限制	(5)
1.2.4 无线传感网的特点	(7)
1.3 无线传感网关键技术	(9)
1.4 无线传感网的应用	(13)
1.5 无线传感网发展与现状	(15)
1.5.1 无线传感网发展的三个阶段	(15)
1.5.2 无线传感网发展现状	(16)
1.5.3 无线传感网的发展趋势	(17)
本章小结	(19)
思考题	(20)
第 2 章 物理层通信技术	(21)
2.1 概述	(21)
2.2 链路特征	(21)
2.2.1 通信频率	(21)
2.2.2 无线通信信道	(22)
2.2.3 调制解调技术	(25)
2.3 物理层的设计	(31)
2.3.1 物理层帧结构	(32)
2.3.2 物理层设计要素	(32)
2.4 典型的物理层通信技术	(35)
2.4.1 近距离无线通信技术	(35)
2.4.2 广域网无线通信技术	(38)

本章小结	(41)
思考题	(42)
第3章 无线传感网 MAC 协议	(43)
3.1 概述	(43)
3.1.1 无线传感网 MAC 协议设计所面临的问题	(43)
3.1.2 无线传感网 MAC 协议分类	(45)
3.2 基于竞争的 MAC 协议	(46)
3.2.1 IEEE 802.11 MAC 协议	(46)
3.2.2 S-MAC 协议	(49)
3.2.3 T-MAC 协议	(52)
3.2.4 Sift 协议	(55)
3.3 基于时分复用的 MAC 协议	(57)
3.3.1 基于分簇网络的 MAC 协议	(57)
3.3.2 DEANA 协议	(58)
3.3.3 TRAMA 协议	(59)
3.3.4 DMAC 协议	(61)
3.4 其他类型的 MAC 协议	(63)
3.4.1 S-MACS/EAR 协议	(64)
3.4.2 基于 CDMA 的 MAC 协议	(66)
本章小结	(67)
思考题	(68)
第4章 IEEE 802.15.4 标准与 ZigBee 协议	(69)
4.1 概述	(69)
4.2 IEEE 802.15.4 网络简介	(70)
4.2.1 IEEE 802.15.4 网络拓扑结构	(71)
4.2.2 IEEE 802.15.4 网络协议栈	(71)
4.2.3 物理层	(72)
4.2.4 MAC 层	(73)
4.3 ZigBee 协议	(77)
4.3.1 ZigBee 协议框架	(77)
4.3.2 ZigBee 协议的主要特征	(78)
4.3.3 ZigBee 网络层	(78)
4.3.4 ZigBee 应用层	(80)
本章小结	(81)
思考题	(82)

第 5 章 无线传感网路由协议	(83)
5.1 概述	(83)
5.1.1 无线传感网路由协议的特点和要求	(83)
5.1.2 路由协议的分类	(84)
5.2 能量感知路由协议	(86)
5.2.1 能量路由协议	(86)
5.2.2 能量多路径路由协议	(87)
5.3 平面路由协议	(88)
5.4 层次路由协议	(91)
5.4.1 LEACH 协议	(92)
5.4.2 PEGASIS 协议	(94)
5.4.3 TEEN 协议	(95)
5.5 基于查询的路由协议	(96)
5.5.1 定向扩散路由协议	(96)
5.5.2 谣传路由机制	(98)
5.6 基于地理位置的路由协议	(100)
5.6.1 GEAR 路由协议	(100)
5.6.2 GAF 路由协议	(102)
5.6.3 GPSR 路由协议	(104)
5.6.4 GEM 路由协议	(105)
5.7 基于 QoS 的路由协议	(106)
5.7.1 SPEED 协议	(106)
5.7.2 SAR 协议	(107)
5.7.3 ReInForM 协议	(108)
5.8 路由协议自主切换	(108)
本章小结	(110)
思考题	(111)
第 6 章 定位技术	(112)
6.1 节点定位概述	(112)
6.2 基于测距的定位算法	(115)
6.2.1 测距方法	(115)
6.2.2 节点定位计算方法	(118)
6.3 无须测距的定位算法	(120)
6.4 定位技术的典型应用	(124)
本章小结	(125)
思考题	(125)

第 7 章 同步技术	(127)
7.1 无线传感网时间同步的重要性和协议特点.....	(127)
7.1.1 时间同步的重要性.....	(127)
7.1.2 时间同步协议.....	(128)
7.2 RBS 同步机制.....	(129)
7.3 Tiny-sync/Mini-sync 同步机制.....	(130)
7.4 TPSN 时间同步协议.....	(131)
7.5 时间同步的应用示例.....	(133)
本章小结.....	(133)
思考题.....	(134)
第 8 章 安全技术	(135)
8.1 概述.....	(135)
8.2 无线传感网的安全分析.....	(136)
8.2.1 物理层的攻击与防御.....	(136)
8.2.2 链路层的攻击与防御.....	(137)
8.2.3 网络层的攻击与防御.....	(137)
8.2.4 传输层的攻击与防御.....	(139)
8.3 无线传感网的安全防护技术.....	(140)
8.3.1 安全框架.....	(140)
8.3.2 安全协议与防护技术.....	(140)
本章小结.....	(142)
思考题.....	(143)
第 9 章 数据融合技术	(144)
9.1 概述.....	(144)
9.2 无线传感网数据融合的作用.....	(145)
9.3 无线传感网的数据融合模型.....	(148)
9.3.1 数据包级融合模型.....	(148)
9.3.2 跟踪级融合模型.....	(149)
9.4 无线传感网数据融合技术.....	(150)
9.4.1 基于路由的数据融合.....	(150)
9.4.2 基于反向组播树的数据融合.....	(151)
9.5 数据融合技术的主要算法.....	(152)
本章小结.....	(154)
思考题.....	(154)

第 10 章 数据管理技术	(155)
10.1 系统结构	(155)
10.2 数据模型与查询语言	(157)
10.3 数据存储与索引技术	(160)
10.4 查询处理技术	(163)
本章总结	(168)
思考题	(168)
第 11 章 nesC 语言与 TinyOS 操作系统	(169)
11.1 nesC 语言	(169)
11.1.1 nesC 语言规范	(170)
11.1.2 模块及其组成	(176)
11.1.3 配件及其组成	(179)
11.1.4 基于 nesC 语言的应用程序	(184)
11.1.5 Blink 实例	(187)
11.1.6 nesC 语言程序运行模型	(193)
11.1.7 编程约定	(202)
11.2 TinyOS 操作系统	(207)
11.2.1 无线传感网对操作系统的要求	(207)
11.2.2 TinyOS 组件模型	(208)
11.2.3 TinyOS 通信模型	(213)
本章小结	(217)
思考题	(218)
第 12 章 以数据为中心的网络互联	(219)
12.1 无线传感网互联技术概述	(219)
12.1.1 无线传感网接入 Internet 所面临的挑战	(219)
12.1.2 无线传感网接入 Internet 的结构	(220)
12.1.3 无线传感网接入 Internet 的方案	(222)
12.1.4 现有解决方案所存在的问题	(224)
12.2 无线传感网接入 Internet 体系结构的设计	(225)
12.2.1 WSN—Internet 网关设计	(225)
12.2.2 Internet→WSN 数据包转换	(226)
12.2.3 WSN→Internet 数据包转换	(228)
本章小结	(228)
思考题	(228)

第 13 章 无线传感网应用开发技术	(229)
13.1 无线传感网节点硬件平台	(229)
13.1.1 无线传感器节点的设计要求与内容	(229)
13.1.2 无线传感器节点的设计	(231)
13.1.3 传感器汇聚节点/网关节点的设计	(235)
13.2 无线传感网软件平台	(236)
13.2.1 节点的操作系统	(236)
13.2.2 应用软件开发	(239)
13.3 无线传感网的仿真平台	(242)
13.3.1 无线传感网仿真的特点	(242)
13.3.2 通用网络仿真平台	(243)
13.3.3 针对无线传感网的仿真平台	(248)
13.4 无线传感器节点设计案例	(255)
13.4.1 硬件设计	(255)
13.4.2 软件设计	(259)
本章小结	(264)
思考题	(265)
主要参考文献	(266)

第1章 无线传感网技术概述

无线传感器网络（wireless sensor network, WSN）简称无线传感网，是当前在国际上备受关注、涉及多学科且高度交叉、知识高度集成的前沿热点研究领域。它综合了传感器技术、嵌入式计算技术、现代网络及无线通信技术、分布式信息处理技术等，能够通过各类集成化的微型传感器协作地实时监测、感知和采集各种环境或监测对象的信息，这些信息通过无线方式被发送，并以自组多跳网络方式传送到用户终端，从而实现物理世界、计算世界以及人类社会三元世界的连通。无线传感网实现了将客观世界的物理信息同传输网络连接在一起，在下一代网络中将为人们提供最直接、最有效、最真实的信息。

本章对无线传感网技术做一个全面介绍，包括无线传感网的体系结构、主要特征、关键技术，以及应用领域、发展现状与发展趋势。

1.1 无线传感网体系结构

1.1.1 无线传感网网络结构

无线传感网是由一组无线传感器节点以 ad hoc（自组织）方式组成的无线网络，其目的是协作地感知、收集和处理无线传感网所覆盖的地理区域中感知对象的信息，并传递给观察者。这种无线传感网集中了传感器技术、嵌入式计算技术和无线通信技术，能协作地感知、监测和收集各种环境下所感知对象的信息，通过对这些信息的协作式信息处理，获得感知对象的准确信息，然后通过 ad hoc 方式传送到需要这些信息的用户。传感器、感知对象和观察者构成了无线传感网的三个要素。

无线传感网具有众多类型的传感器节点，可以用来探测包括地震、电磁、温度、湿度、噪声、光强度、压力、土壤成分等周边环境中多种多样的现象，使无线传感网的应用前景非常广泛，无线传感网受到越来越多研究人员的重视。但由于无线传感网的硬件资源十分有限，且其工作环境通常是一些资源受限的地方，这给理论研究人员和工程技术人员提出了大量具有挑战性的研究课题。

图 1-1 所示为典型的无线传感网结构，它由分布式传感器节点群组成。传感器节点可以通过飞机布撒或人工布置等方式，大量部署在被感知对象内部或者附近。这些节点通过自组织方式构成无线网络，以协作的方式实时感知、采集和处理网络覆盖区域中的信息，并通过多跳方式将整个区域内的信息传送给基站（base station, BS）或汇聚节点，BS 再通过传输通信网络（由互联网、卫星网或移动通信网构成）将数据传到数据中心或发送给远处的用户。反之，用户可以通过传输通信网发送命令给 BS，而 BS 再将命令转发给各个传感器节点。

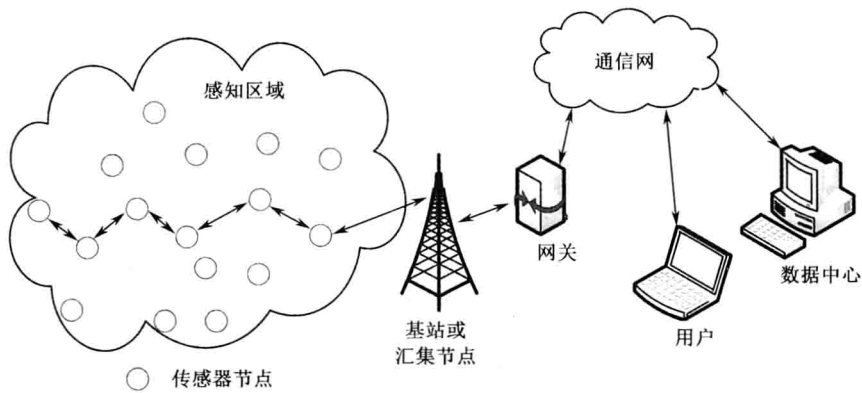


图 1-1 无线传感网结构

无线传感网是以数据为中心的网络，其关键技术和具体应用紧密相关：不同的应用场景，其技术相差很大。目前，分布式的无线传感网多为分簇形式，将传感器节点分成多个簇，每个簇存在一个簇头节点，负责簇内节点的管理和数据融合。基于分簇的无线传感网结构如图 1-2 所示。分簇方式的特点是簇群内的节点只能与本簇的簇头通信，簇头和簇头之间可以相互传递数据，可以通过多跳方式传送数据到数据中心。

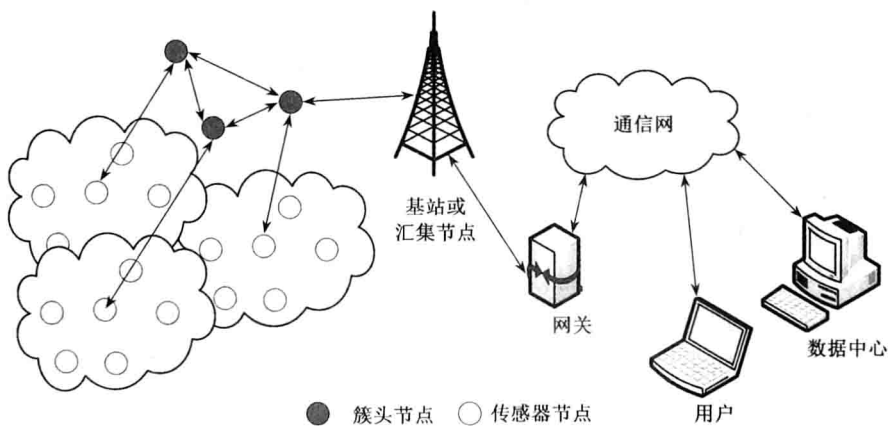


图 1-2 基于分簇的无线传感网结构

1.1.2 无线传感器节点结构

无线传感器节点是一个微型化的嵌入式系统，它构成了无线传感网的基础层支持平台。典型的传感器节点由数据采集的感知单元、数据处理和存储的处理单元、通信收发的传输单元和节点供电的能源供给单元四部分组成。图 1-3 所示是其硬件结构示意图。其中，感知单元由传感器、A/D 转换器组成，负责感知监控对象的信息；能源供给单元负责供给节点工作所消耗的能量，一般为小体积的电池；传输单元完成节点间的信息交互通信工作，一般为无线电收发装置，由物理层收发器、MAC 层协议、网络层路由协议组成；处理单元包括存储器、微处理器和应用部分，负责控制整个传感器节点的操作，存储和处理本身采集的数据以及其他节点发来的数据。同时，有些节点上还装配有能源再生装置、运动或执行

机构、定位系统等扩展设备，以获得更完善的功能。

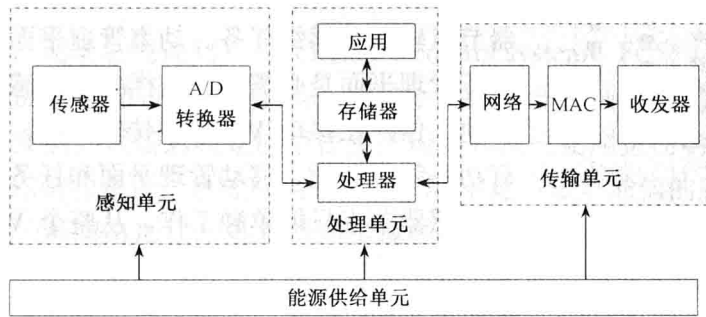


图 1-3 传感器节点硬件结构示意图

典型的传感器节点体积较小，甚至小于 1 cm^3 ，往往被部署在无人照看或恶劣的环境中，无法更换电池，节点能量受限。由于具体的应用背景不同，目前国内外出现了多种无线传感网节点的硬件平台。典型的节点包括美国的 CrossBow 公司开发的 Mote 系列节点 Mica2、MicaZ 以及 Mica2Dot，Infineon 公司开发的 EYES 传感器节点，等等。实际上，各平台最主要的区别是采用了不同的处理器、无线通信协议以及与应用相关的不同的传感器。常用的处理器有 Intel StrongARM、Texas Instrument MSP430 和 Atmel Atmega，常用的无线通信协议有 IEEE 802.11b、IEEE 802.15.4/ZigBee 和 Bluetooth 等。与应用相关的传感器有光传感器、热传感器、压力传感器以及湿度传感器等。虽然具体应用不同，传感器节点的设计也不尽相同，但是其基本结构都类似于图 1-3。

1.1.3 无线传感器协议栈

图 1-4 给出了无线传感器网（WSN）所使用的协议栈。协议栈将功率意识和路由意识组合在一起，将数据与网络协议综合在一起，在无线传输媒介上进行能量高效通信，支持各个传感器节点相互协作。协议栈由应用层、传输层、网络层、数据链路层、物理层，功率管理平面、移动管理平面、任务管理平面组成。根据感知任务，可以在应用层上建立和使用不同类型的应用软件。传输层帮助维护 WSN 应用所需的数据流。网络层解决传输层提供的数据的传输路由问题。由于环境噪声以及传感器节点可能是移动节点，所以 MAC 协议必须具有能量意识能力，能够使与临近节点广播的碰撞达到最低程度。物理层解决简单而又强壮的调制、发送、接收技术问题。此外，功率管理平面、移动管理平面、任务管理平面分别监视传感器节点之间的移动、任务分配，帮助传感器节点协调感知任务和降低总功耗。

功率管理平面管理每个传感器节点如何运用其能量。例如，传感器节点接收到其中一个相邻节点的一条消息后，可以关闭接收机，这样可以避免接收重复的消息。一个传感器节点剩余能量较低时，可以向其相邻节点广播，通知它们自己剩余能量较低，不能参与路由功能，而将剩余能量用于感知任务。移动管理平面用于检测和记录传感器节点的移动状况，因而总是维护返回到用户的路由，传感器节点能够连续不停地跟踪其相邻传感器节点。传感器节点获知其相邻传感器节点后，就能够平衡其能量和任务处理。任务管理平面平衡

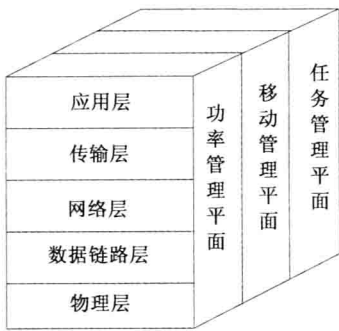


图 1-4 无线传感网协议栈

和安排特定区域内的全部传感器节点同时执行感知任务。因此，有些传感器节点根据其能量等级而执行比其他传感器节点较多的感知任务。功率管理平面、移动管理平面、任务管理平面是必需的，这样各个传感器节点才能一起高效地工作，在移动 WSN 中传输数据，共享资源。如果没有功率管理平面、移动管理平面和任务管理平面，那么每个传感器节点只能单独工作。从整个 WSN 来看，若传感器节点能够相互协作，则网络效率更高，因而 WSN 的寿命更长。

1.2 无线传感网的主要特征

1.2.1 不同于移动自组网

移动自组网（mobile ad hoc network）或移动 ad hoc 网络是一个由几十到上百个节点组成、采用无线通信方式、动态组网的多跳移动性对等网络。其目的是通过动态路由和移动管理技术传输具有服务质量要求的多媒体信息流，通常其节点具有持续的能量供给。

无线传感网虽然与无线自组网有相似之处，但同时也存在很大的差别。无线传感网是集成了检测、控制和无线通信的网络系统。与传统 ad hoc 网络相比，无线传感网的业务量较小，而移动 ad hoc 网络业务量较大，主要是 Internet 业务（包括多媒体业务）。无线传感网节点固定，处理能力、存储能力和通信能力有限，更换电池困难，因而能源问题是无线传感网的主要问题；而移动 ad hoc 网络移动性较强，易于更换电池，故其节点能量不受限制。

无线传感网是移动 ad hoc 网络的一种典型应用，虽然它具有移动自组织特征，但与传统的移动自组织网络相比，又有一些不同之处，它们之间的主要区别可归纳为以下几点：

- (1) 在网络节点规模方面，无线传感网包含的节点数量比 ad hoc 网络高几个数量级；
- (2) 在网络节点分布密度方面，因节点冗余的要求和部署的原因，无线传感网节点的分布密度很大；
- (3) 在网络节点的处理能力方面，ad hoc 网络的处理能力较强，而无线传感网节点的处理能力、计算能力和存储能力都有限；
- (4) 在网络拓扑结构方面，ad hoc 网络是由于节点的移动而产生的，而无线传感网是由于节点的休眠、环境干扰或节点故障而产生的；
- (5) 在通信方式方面，无线传感网节点主要使用广播通信，而别 ad hoc 节点采用点对点通信；
- (6) 由于无线传感网节点数量的原因，其节点没有统一的标识；
- (7) 无线传感网以数据为中心。

1.2.2 不同于现场总线网络

在自动化领域，现场总线控制系统（fieldbus control system, FCS）正在逐步取代一般的分布式控制系统（distributed control system, DCS），各种基于现场总线的智能传感器 / 执行器技术得到了迅速发展。现场总线是应用在生产现场和微机化测量控制设备之间，实现双向串行多节点数字通信的系统，也被称为开放式、数字化、多点通信的底层控制网络。

现场总线作为一种网络形式，是专门为实现在严格的实时约束条件下工作而特别设计的。现场总线技术将专用微处理器植入传统的测量控制仪表，使它们各自具有数字计算和数字通信的能力，然后采用简单连接的双绞线等作为总线，把多个测量控制仪表连接成网络系统，并按公开、规范的通信协议，在位于现场的多个微机化测量控制设备之间和现场仪表与远程监控计算机之间实现数据传输与信息交换，形成各种适应实际需要的自动控制系统。

现场总线是 20 世纪 80 年代中期在国际上发展起来的。随着微处理器与计算机功能的不断增强和价格的降低，计算机与计算机网络系统得到了迅速发展。现场总线可实现整个企业的信息集成，实现综合自动化，形成工厂底层网络，完成现场自动化设备之间的多点数字通信，实现底层现场设备之间以及生产现场与外界的信息交换。

目前市场上较为流行的现场总线有 CAN（控制局域网）、Lonworks（局部操作网络）、Profibus（过程现场总线）、HART（可寻址远程传感器数据通信）和 FF（基金会现场总线）等。

由于严格的实时性要求，这些现场总线的网络构成通常是有线的。在开放式通信系统互联参考模型中，它利用的只有第一层物理层、第二层链路层和第七层应用层，避开了多跳通信和中间节点的关联队列延迟。然而，尽管固有有限差错率不利于实现，人们仍然致力于在无线通信中实现现场总线的构想。

由于现场总线是通过报告传感数据而控制物理环境的，所以从某种程度上说它与无线传感网非常相似，甚至可以将天线传感网看作无线现场总线的实例。但是两者的区别是明显的；无线传感网关注的焦点不是数十毫秒范围内的实时性，而是具体的业务应用，这些应用能够容许较长时间的延迟和抖动。另外，基于无线传感网的一些自适应协议在现场总线中并不需要，如多跳、自组织的特点。而且现场总线及其协议也没有考虑节约能源的问题。

1.2.3 无线传感器节点的限制

无线传感器节点在实现各种网络协议和应用系统时，存在以下约束：

1. 电源能量有限

传感器节点体积微小，通常携带能量十分有限的电池。由于传感器节点个数多、成本要求低廉、分布区域广，而且部署区域环境复杂，有些区域甚至人员不能到达，所以传感器节点通过更换电他的方式来补充能源是不现实的。如何高效使用能量来使网络生命周期最大化是无线传感网面临的首要挑战。

传感器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，处理器和传感器模块的功耗变得很低，绝大部分能量消耗在无线通信模块上。因此，传感器节点传输信息时要比执行计算时更消耗电能。

无线通信模块存在发送、接收、空闲和睡眠四种状态。无线通信模块在空闲状态一直监听无线信道的使用情况，检查是否将数据发送给自己；而在睡眠状态时关闭通信模块。无线通信模块在发送状态的能量消耗最大；在空闲状态和接收状态的能量消耗接近，略少于发送状态的能量消耗；在睡眠状态的能量消耗最少。如何让网络通信更有效率，减少不必要的转发和接收，在不需要通信时尽快进入睡眠状态，是无线传感网协议设计需要重点考虑的问题。

图 1-5 所示是传感器节点各部分能量消耗的分布情况，从中可知传感器节点的绝大部分能量消耗在无线通信模块。传感器节点传输信息时要比执行计算时更消耗电能，传输 1 比特信息 100 m 距离所需的能量大约相当于执行 3000 条计算指令所消耗的能量。

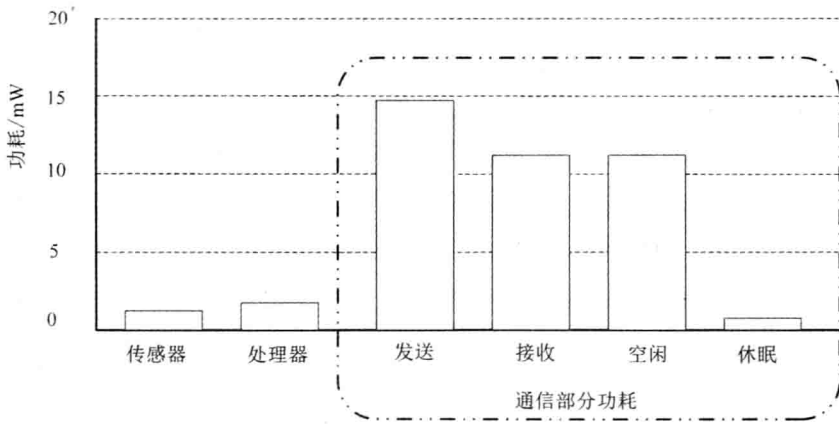


图 1-5 传感器节点各部分能量消耗的分布情况

2. 通信能力有限

无线通信的能量消耗与通信距离的关系为 $E = kd^n$ （参数 $n = 2 \sim 4$ 为衰落因子）， n 的取值与很多因素有关，例如在传感器节点部署于贴近地面时，因障碍物多、干扰大， n 的取值就大；天线质量对信号发射的影响也很大。考虑诸多因素，通常 n 取为 3，即通信消耗与距离的 3 次方成正比。随着通信距离 d 的增加，能耗将急剧增加。因此，在满足通信连通度的前提下应尽量减少通信距离。一般而言，传感器节点的无线通信半径在 100 m 以内比较合适。

考虑到传感器节点的能量限制和网络覆盖区域大，无线传感网采用多跳路由的传输机制。传感器节点的无线通信带宽有限，通常仅有数百 kb/s 的速率。由于节点能量的变化，受高层建筑物、障碍物等地势地貌以及风雨雷电等自然环境的影响，无线通信性能可能经常变化，频繁出现通信中断。在这样的通信环境和节点有限的通信能力情况下，如何设计网络通信机制以满足无线传感网的通信需求是无线传感网面临的挑战之一。