

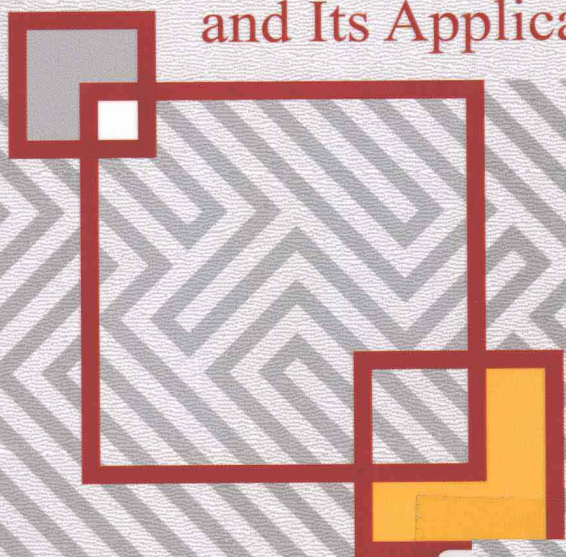
战略性新兴产业系列丛书——物联网

21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

无线传感器网络 技术及其应用

王汝传 孙力娟 主编
黄海平 沙超 蒋凌云 肖甫 郭剑 编著

Wireless Sensor Network
and Its Applications



 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

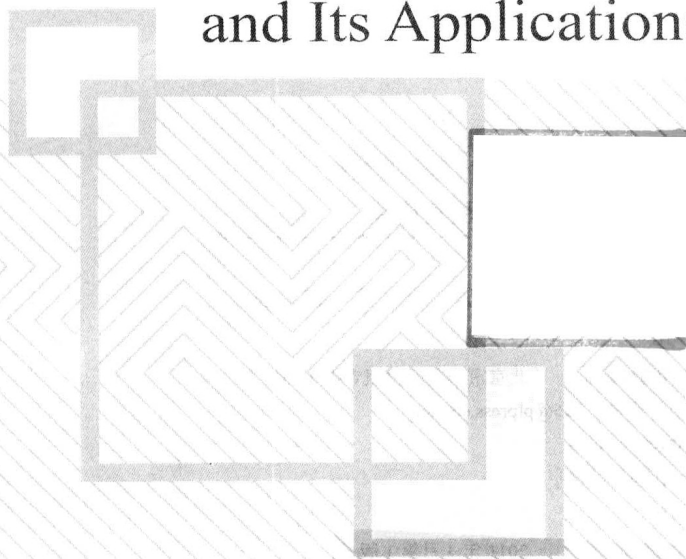

精品系列

战略性新兴产业系列丛书——物联网
21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

无线传感器网络 技术及其应用

王汝传 孙力娟 主编
黄海平 沙超 蒋凌云 肖甫 郭剑 编著

Wireless Sensor Network
and Its Applications



人民邮电出版社
北京



图书在版编目(CIP)数据

无线传感器网络技术及其应用 / 王汝传, 孙力娟主编. -- 北京: 人民邮电出版社, 2011.4
21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
ISBN 978-7-115-24987-6

I. ①无… II. ①王… ②孙… 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(2011)第031913号

内 容 提 要

本书介绍了无线传感器网络研究领域中的相关技术和应用,共11章,内容涵盖无线传感器网络的物理层及信道接入技术,路由、覆盖与拓扑控制技术,定位、跟踪与时间同步技术,网络安全和数据管理技术,短距离低功耗无线通信协议标准,无线传感器网络操作系统等方面。本书还重点介绍了无线传感器网络中间件技术、物联网环境下的无线传感器网络接入技术、传感器节点的硬件设计,最后介绍了多个典型的无线传感器网络的应用实例。本书在编写上既重视基础知识,又跟踪前沿技术;既具有学术深度,又具有教材的系统性和可读性。

本书可以作为普通高等院校物联网、传感器网络通信工程、电子信息、计算机等专业高年级本科生和研究生的教材,也可作为无线传感器网络领域的研究人员及广大对无线传感器网络感兴趣的工程技术人员的参考书。

21世纪高等院校信息与通信工程规划教材

无线传感器网络技术及其应用

-
- ◆ 主 编 王汝传 孙力娟
编 著 黄海平 沙 超 蒋凌云 肖 甫 郭 剑
责任编辑 蒋 亮
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
中国铁道出版社印刷厂印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 24.25 2011年4月第1版
字数: 596千字 2011年4月北京第1次印刷

ISBN 978-7-115-24987-6

定价: 48.00元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

广告经营许可证: 京崇工商广字第0021号

作为物联网最重要的基础支撑技术之一，无线传感器网络作为一种新型的网络技术得到了广泛的关注。目前，国内外都开展了对无线传感器网络技术的研究，许多企业和科研院所都介入该领域，扩大了对该领域的人才需求。国内许多高校申请了物联网或者无线传感器网络等相关专业，这就使得无线传感器网络技术不能仅停留在学术研究中，更应该走向教学和实践环节。鉴于此，编者在从事无线传感器网络技术近十年的研究基础上，结合自身的教学经验，参考了许多高校物联网或者无线传感器网络的教学大纲，编撰了这本教材。

本书对无线传感器网络核心的关键技术进行了较为深入和全面的剖析，在编写上力求新颖完整、深入浅出，能适用于各种层次的“工科”学生和工程技术人员掌握传感器网络方面的前沿理论和技术。在内容描述上，做到理论与实际并重，技术与应用结合。在阐述理论和方法的同时，注重实例分析和实用技术介绍。本书涉及计算机、电子通信和自动化等领域，内容涵盖了计算机网络、无线通信技术、嵌入式系统开发、计算机软件和算法、信息安全、自动控制等方面，因此在编撰时还特别注重基础知识的介绍，尽可能以通俗易懂的语言进行描述。读者通过对本书的学习和课后习题的解答，将对无线传感器网络技术有较全面的认识，对一些基本的开发技术、协议和算法有较深刻的理解。由于该课程是一门实践性较强的课程，本书还配套有相应的实验，对于实现基本的无线传感器网络应用、提高动手实践能力将大有裨益。同时，本书的撰写还建立在对国家自然科学基金、国家“863”项目和江苏省高技术研究计划等项目的研究基础上，具有较高的学术价值，可以作为科学工作者的参考书。

本书建立了一套完善的课程体系，共分为 11 章，第 1 章对无线传感器网络技术进行了简要概述，第 2 章介绍物理层及信道接入技术，第 3 章介绍路由、拓扑和覆盖控制技术，第 4 章介绍无线传感器网络定位、跟踪与时间同步技术，第 5 章介绍无线传感器网络安全技术，第 6 章介绍无线传感器网络的操作系统，第 7 章介绍无线传感器网络中间件技术，第 8 章介绍无线传感器网络数据管理技术，第 9 章介绍物联网环境下的无线传感器网络接入技术，第 10 章介绍无线传感器网络硬件节点设计，第 11 章介绍无线传感器网络的应用。

本书由南京邮电大学计算机学院博士生导师王汝传教授和孙力娟教授统一策划，同时对各篇章结构进行了详细规划。本书由黄海平、沙超、蒋凌云、肖甫、郭剑编写。在本书

2 | 无线传感器网络技术及其应用

的编写过程中，博士研究生王玉斐、凡高娟和赵传信，硕士研究生李靖、金逸超、陈国伟、吴万烽、唐静、孟翀、杨小波、杨英军和李明等同学参加了部分章节的编写工作，张军强老师对书稿的校对付出了大量辛勤的劳动。南京邮电大学教务处陈鹤鸣教授和计算机学院李玲娟教授对书稿进行认真审阅并提出宝贵的意见，同时与书稿作者进行了有益的讨论，为本书的形成给予了很大的帮助。此外，本书还引用了其他同行的工作成果，在此一并表示衷心的感谢。

由于编写时间仓促，加上编者水平有限，书中不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者

2011年3月于南京

目 录

第 1 章 无线传感器网络概述 1	
1.1 无线传感器网络的基本概念..... 1	
1.2 无线传感器网络的体系结构..... 2	
1.3 无线传感器网络的基本特点..... 4	
1.4 无线传感器网络的发展现状 与趋势..... 5	
1.5 无线传感器网络面临的挑战..... 7	
1.6 无线传感器网络的应用领域..... 8	
参考文献..... 11	
课后习题..... 11	
第 2 章 物理层及信道接入技术 12	
2.1 物理层相关技术..... 12	
2.1.1 频率分配..... 12	
2.1.2 物理层设计..... 13	
2.2 信道接入技术..... 14	
2.2.1 无线传感器网络信道接入 概述..... 14	
2.2.2 基于竞争的信道接入技术..... 16	
2.2.3 基于固定分配的信道接入 技术..... 22	
2.2.4 按需分配的信道接入技术..... 27	
2.2.5 无线传感器网络信道接入技术 面临的挑战..... 28	
2.3 IEEE 802.15.4 标准..... 28	
2.4 ZigBee 标准..... 32	
参考文献..... 39	
课后习题..... 39	
第 3 章 路由、覆盖与拓扑技术 40	
3.1 无线传感器网络路由..... 40	
3.1.1 无线传感器网络路由概述..... 40	
3.1.2 路由协议设计的关键问题..... 41	
3.1.3 简单的无结构路由协议..... 42	
3.1.4 树类路由协议..... 46	
3.1.5 地理路由协议..... 50	
3.1.6 无线传感器网络路由协议 比较..... 53	
3.2 无线传感器网络拓扑控制技术..... 55	
3.2.1 拓扑控制技术概述..... 55	
3.2.2 拓扑控制的意义..... 56	
3.2.3 拓扑控制的设计目标..... 57	
3.2.4 功率控制技术..... 58	
3.2.5 典型的层次型拓扑控制方法..... 59	
3.2.6 拓扑控制中的休眠调度技术..... 61	
3.3 无线传感器网络覆盖技术..... 63	
3.3.1 无线传感器网络覆盖算法 设计思路及性能评价标准..... 63	
3.3.2 无线传感器网络覆盖感知 模型..... 64	
3.3.3 无线传感器网络覆盖算法 分类..... 65	
3.3.4 典型的无线传感器网络覆盖算 法与协议..... 66	
参考文献..... 70	
课后习题..... 73	
第 4 章 无线传感器网络定位、跟踪与 时间同步技术 74	
4.1 无线传感器网络定位技术..... 74	
4.1.1 无线传感器网络测距技术..... 75	
4.1.2 无线传感器网络定位机制与 性能评价标准..... 77	
4.1.3 现有无线传感器网络定位 方法..... 80	
4.2 无线传感器网络跟踪技术..... 89	
4.2.1 无线传感器网络跟踪技术 概述..... 89	
4.2.2 无线传感器网络目标跟踪的 基本过程..... 90	
4.3 无线传感器网络时间同步技术..... 91	

4.3.1 时间同步模型.....	91	6.4 SOS 操作系统.....	158
4.3.2 时间同步协议.....	95	6.4.1 SOS 简介.....	158
参考文献.....	102	6.4.2 系统架构.....	159
课后习题.....	103	6.4.3 SOS 的通信机制.....	162
第 5 章 无线传感器网络安全.....	104	6.4.4 SOS 应用程序开发与发布.....	164
5.1 无线传感器网络安全问题概述.....	104	6.5 无线传感器网络操作系统的主要技术挑战.....	166
5.1.1 安全需求.....	104	参考文献.....	168
5.1.2 攻击与威胁.....	106	课后习题.....	168
5.1.3 跨层的安全框架.....	108	第 7 章 无线传感器网络中间件.....	169
5.2 无线传感器网络中的密码学理论.....	108	7.1 无线传感器中间件体系结构及功能.....	169
5.2.1 密码算法的选择.....	108	7.1.1 通用的中间件体系结构及功能.....	169
5.2.2 密钥管理.....	110	7.1.2 体系结构设计原则.....	172
5.2.3 安全协议.....	113	7.1.3 已有的不同无线传感器网络中间件体系结构.....	173
5.3 无线传感器网络安全防护技术.....	116	7.2 典型的无线传感器网络中间件.....	177
5.3.1 安全认证技术.....	116	7.2.1 Impala.....	177
5.3.2 访问控制技术.....	117	7.2.2 MiLAN.....	181
5.3.3 安全通信与路由技术.....	118	7.2.3 AMF.....	183
5.3.4 安全定位与时钟同步技术.....	119	7.2.4 DSWare.....	184
5.3.5 入侵检测、容侵容错技术.....	121	7.2.5 MSM.....	186
5.4 无线传感器网络的发展与安全趋势.....	123	7.2.6 DFuse.....	187
5.4.1 车载传感网络及其安全性.....	123	7.2.7 SensorWare.....	188
5.4.2 物联网及其安全性.....	124	7.2.8 Agilla.....	191
参考文献.....	126	7.2.9 TinyDB.....	192
课后习题.....	129	7.3 基于 Agent 的无线传感器网络中间件 DisWare.....	194
第 6 章 无线传感器网络操作系统.....	130	7.3.1 DisWare 体系结构.....	194
6.1 无线传感器网络操作系统概述.....	130	7.3.2 DisWare 关键技术.....	196
6.2 TinyOS 操作系统.....	130	7.3.3 DisWare 中间件.....	198
6.2.1 nesC 语言基础.....	131	7.4 DisWare 中间件平台软件 MeshIDE.....	201
6.2.2 TinyOS 的组件模型.....	139	7.4.1 无线传感器网络集成开发平台 MeshIDE 概述.....	202
6.2.3 TinyOS 的通信模型.....	140	7.4.2 无线传感器网络集成开发平台 MeshIDE for TinyOS.....	202
6.2.4 TinyOS 1.0 的安装与调试.....	141	7.4.3 无线传感器网络集成开发平台.....	
6.2.5 TinyOS 2.0 的安装与调试.....	145		
6.2.6 TinyOS 的典型应用分析.....	147		
6.3 MantisOS 操作系统.....	150		
6.3.1 MantisOS 简介.....	150		
6.3.2 MantisOS 的体系架构.....	150		
6.3.3 MantisOS 应用程序开发与发布.....	153		

MeshIDE for DisWare.....	210	设计.....	249
7.5 无线多媒体传感器网络中间件技术.....	214	8.4.4 DiswareDM 的系统功能.....	253
7.5.1 无线多媒体传感器网络的概述.....	214	参考文献.....	256
7.5.2 无线多媒体传感器网络中间件的特点.....	216	课后习题.....	258
7.5.3 基于 Agent 的无线多媒体传感器网络中间件体系结构.....	217	第 9 章 物联网环境下的无线传感器网络接入技术.....	259
参考文献.....	219	9.1 基于无线传感器网络的多网络融合系统结构.....	259
课后习题.....	220	9.2 多种无线传感器网络接入技术的比较.....	260
第 8 章 无线传感器网络数据管理技术.....	221	9.2.1 现有接入技术概述.....	260
8.1 无线传感器网络数据管理的基本概念.....	221	9.2.2 面向以太网的无线传感器网络接入技术.....	262
8.1.1 以数据为中心的无线传感器网络数据库.....	221	9.2.3 面向无线局域网的无线传感器网络接入技术.....	264
8.1.2 无线传感器网络数据管理系统的特殊性及其设计目标.....	222	9.2.4 面向移动通信网的无线传感器网络接入技术.....	269
8.1.3 无线传感器网络数据管理技术的研究热点.....	224	9.3 多网络融合网关硬件设计.....	271
8.2 无线传感器网络数据管理的关键技术.....	225	9.3.1 多网络融合网关硬件总体结构设计.....	272
8.2.1 无线传感器网络数据存储结构.....	225	9.3.2 通信模块设计.....	276
8.2.2 数据查询处理技术.....	228	9.3.3 外围应用电路设计.....	283
8.2.3 数据压缩技术.....	232	9.4 多网络融合网关数据传输方式的设计与实现.....	288
8.2.4 数据融合技术.....	234	9.4.1 多网络融合网关与无线传感器网络节点的数据传输.....	288
8.3 现有传感器网络数据管理系统介绍.....	237	9.4.2 多网络融合网关接入外部基础设施网络的实现.....	289
8.3.1 TinyDB 系统.....	237	参考文献.....	291
8.3.2 Cougar 系统.....	239	课后习题.....	291
8.3.3 现有无线传感器网络数据管理系统分析.....	241	第 10 章 无线传感器网络硬件设计.....	292
8.4 无线传感器网络数据管理系统 DiswareDM.....	242	10.1 无线传感器网络硬件节点设计.....	292
8.4.1 基于移动 Agent 中间件的传感器网络数据管理概述.....	242	10.1.1 无线传感器网络节点设计技术概述.....	292
8.4.2 DiswareDM 整体功能和系统结构设计.....	245	10.1.2 中央处理模块.....	295
8.4.3 DiswareDM 系统的详细设计.....	249	10.1.3 高频无线通信模块.....	299
		10.1.4 传感模块.....	304
		10.1.5 能量供应模块.....	305
		10.1.6 节点外围功能模块.....	307
		10.1.7 典型的无线传感器网络	

节点.....	310	传感器网络监测系统.....	345
10.1.8 无线传感器网络节点开发 套件.....	314	11.2 无线传感器网络在智能交通的 应用.....	348
10.2 面向应用的多媒体传感器网络 节点.....	317	11.2.1 应用背景概述.....	348
10.2.1 无线多媒体传感器网络节点 总体架构.....	317	11.2.2 采集传感器选择.....	348
10.2.2 无线音频传感器节点设计与 实现.....	320	11.2.3 无线传感器网络在智能交通 系统的应用.....	351
10.2.3 无线图像传感器节点设计与 实现.....	325	11.3 基于无线传感器网络的医疗健康 护理系统.....	352
10.2.4 无线视频传感器节点设计与 实现.....	331	11.3.1 应用背景概述.....	352
10.3 无线传感器网络低功耗硬件设计 技术.....	336	11.3.2 总体系统架构.....	354
10.3.1 无线传感器网络能耗问题 概述.....	336	11.3.3 无线医疗传感节点的设计与 实现.....	354
10.3.2 MEMS 技术基本原理.....	337	11.3.4 无线传感器网络网关设备的 设计与实现.....	358
10.3.3 MEMS 通信设计理论.....	338	11.3.5 泛在无线医疗信息传感 系统的设计与实现.....	360
10.3.4 无线传感器网络硬件供能 模块设计.....	339	11.4 基于无线多媒体传感器网络的 智能家居系统.....	363
参考文献.....	340	11.4.1 应用背景概述.....	363
课后习题.....	341	11.4.2 基于无线多媒体传感器 网络的智能家居场景设计.....	365
第 11 章 无线传感器网络的应用	342	11.4.3 智能家居系统实现流程.....	366
11.1 无线传感器网络在农业中的 应用.....	342	11.4.4 节点片上程序设计.....	366
11.1.1 应用背景描述.....	342	11.4.5 基站节点的设计与实现.....	373
11.1.2 无线传感器网络应用于 农业中的主要关键技术.....	343	11.4.6 电器控制节点的设计与 实现.....	374
11.1.3 面向智能化温室种植的无线		11.4.7 基站上位机控制端软件设计.....	376
		参考文献.....	379
		课后习题.....	380

第 1 章 无线传感器网络概述

无线传感器网络是当前国内外备受关注的新兴研究热点领域，它由多学科高度交叉而成，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多种技术，能够通过各类集成化的微型传感器节点协作完成监测、感知和采集各种环境信息或被监测对象的信息，并对信息进行处理，可以通过随机自组织无线通信网络以多跳中继方式将所感知的信息传送到用户终端。本章对无线传感器网络进行基本的介绍，主要介绍了无线传感器网络的基本概念、体系结构、主要特点及无线传感器网络的发展与应用。

1.1 无线传感器网络的基本概念

无线传感器网络（Wireless Sensor Network, WSN^[1~3]）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。

正如因特网使得计算机能够访问各种数字信息而可以不管其保存在什么地方，传感器网络将扩展人们与现实世界进行远程交互的能力。由于它具有可到处散布的特点及集体分析能力，因此它被称为一种全新类型的计算机系统。无线传感器网络具有众多类型的传感器节点，可用来探测包括地震、电磁、温度、湿度、噪声、光强度、压力、土壤成分、移动物体的大小、速度和方向等周边环境多种多样的现象。美国《商业周刊》和 MIT 技术评论在预测未来技术发展的报告中，分别将无线传感器网络列为 21 世纪最有影响的 21 项技术之一和改变世界的 10 大技术之一^[4,5]。传感器网络、塑料电子学和仿生人体器官又被称为全球未来的 3 大高科技产业。

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织网络。每个传感器节点由传感单元、处理单元、无线通信单元和能量供应单元等构成。一种普遍被接受的无线传感器网络的定义为：大规模、无线、自组织、多跳、无基础设施支持的网络，其中节点是同构的，成本较低、体积较小，大部分节点不移动，被随意地散布在监测区域，要求网络系统有尽可能长的工作时间。

无线传感器网络的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。它综合了计算技术、通信技术及传感器技术，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信息或被监测对象的信

息，这些信息以无线方式传送，并以自组多跳的网络方式传送到用户终端，从而实现物理世界、计算机世界及人类社会三元世界的连通。

1.2 无线传感器网络的体系结构

一个典型的无线传感器网络结构如图 1-1 所示，其中包括传感节点（Sensor 节点）、汇聚节点（Sink 节点）以及互联网或通信卫星和管理节点等^[6]。

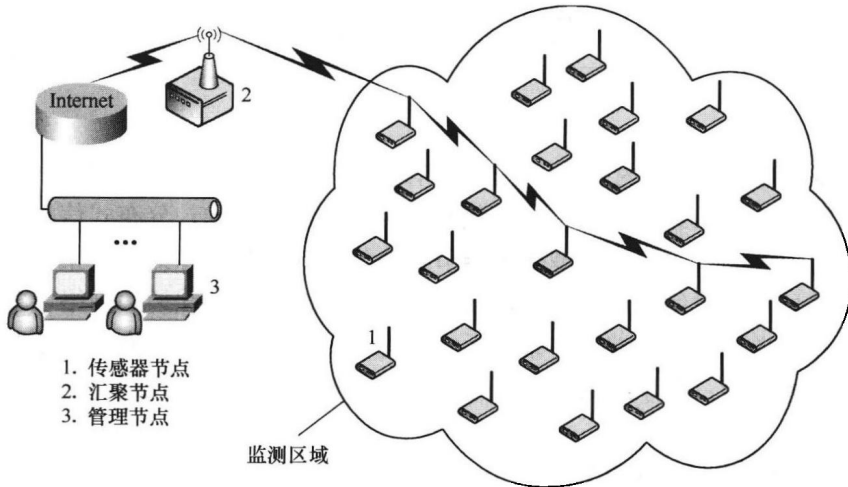


图 1-1 典型的无线传感器网络结构

传感器节点通常是一个微型的嵌入式系统，具有感知物理环境数据和处理数据的能力，但它的处理能力、存储能力和通信能力都相对较弱。目前常见的传感器节点一般通过能量有限的电池供电，所以通常传感器节点的电源能量有限。从网络功能上看，每个传感器节点既具有传统网络节点的终端功能，也具有路由器功能，除了进行本地信息收集和数据处理外，还要对其他节点转发来的数据进行存储、管理和融合等处理，同时与其他节点协作完成一些特定任务。网络中传感器节点的地位相同，各个节点之间可独立采集相关信息，并可通过传感器节点间的相互通信共享彼此之间的信息。

汇聚节点是传感器网络中的网关设备，其处理能力、存储能力和通信能力比传感器节点强，没有感知能力，但一般有充足、稳定的固定电源为其供电。汇聚节点通过无线方式连接传感器网络，通过有线或具有可靠通信质量的无线接入网络与 Internet 等外部网络通信，可以实现两种通信协议栈之间的通信协议转换，充当基站管理设备和传感器网络之间的通信员，可以发布基站管理设备的检测任务，并把收集的传感数据转发到外部网络中。

管理节点一般即为普通的计算机系统，充当无线传感器网络服务器的角色，通过与传感器汇聚节点的信息传递来监控整个网络的数据和状态。

随着人们对传感器网络研究的不断深入，研究人员提出了多个传感器节点上的协议栈。图 1-2 (a) 所示为早期提出的一个协议栈，该协议栈包括物理层、数据链路层、网络层、传输层和应用层，与互联网协议的五层相对应。另外，该协议栈还包括能量管理平台、移动管理平台和任务管理平台。这些管理平台使得传感器节点能够按照能源高效的方式协同工作，

在节点移动的无线传感器网络中转发数据，并支持多任务和资源共享。

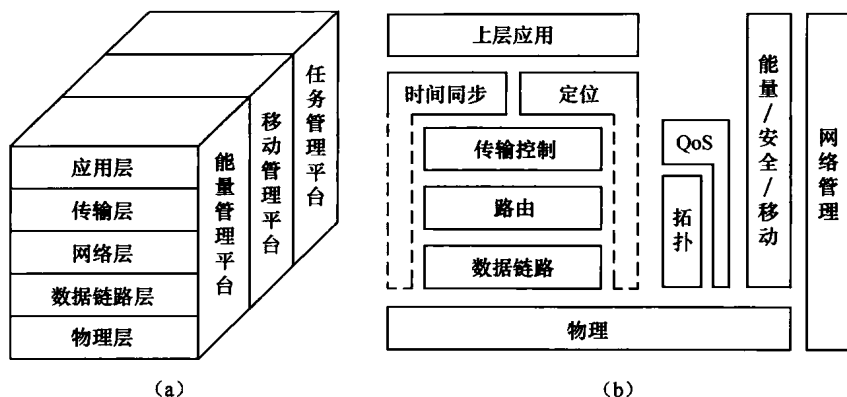


图 1-2 无线传感器网络协议栈

各层协议的功能如下。

① 物理层负责数据传输的介质规范，如规定了传感器工作频段、工作温度、数据调制、信道编码、定时、同步等标准。物理层的设计直接影响到电路的复杂度和传输能耗等问题，研究目标是设计低成本、低功耗和小体积、简单但健壮的传感器节点。

② 数据链路层除了要完成传统网络数据链路层数据成帧、差错校验和帧检测等功能外，最主要的是设计一个适合于传感器网络的介质访问控制方法（MAC），以减少传感器网络的能量损耗。

③ 网络层主要实现数据融合，负责路由发现、路由维护和路由选择，使得传感器节点可以进行有效的相互通信。路由算法执行效率的高低，直接决定了传感器节点收发控制性数据与有效采集数据的比率。控制性数据越少能量损耗越少，控制性数据越多能量损耗越多，从而影响到整个传感器网络的生存时间，可以说“路由算法”是网络层的最核心内容。

④ 传输层负责数据流的传输控制，是保证通信服务质量的重要部分。

⑤ 应用层包括一系列基于监测任务的应用层软件。

传感器网络协议栈的 3 个管理平台功能如下。

① 能量管理平台管理传感器节点如何使用能源，在各个协议层都需要考虑节省能量。

② 移动管理平台检测并注册传感器节点的移动，维护到汇聚节点的路由，使得传感器节点能够动态跟踪其邻居的位置。

③ 任务管理平台在一个给定的区域内平衡和调度监测任务。

3 个管理平台应该在传感器网络协议栈的 5 个层次中都有所体现。现在的实际情况是，能量管理平台和移动管理平台的研究虽没有系统化，但在网络层、数据链路层和物理层都有所考虑和体现；而任务管理平台更多体现的是传输层和应用层问题，如一个刚刚传送来的数据可能会触发一系列事件，某项任务只能工作在传输层的某个端口，数据传输的安全性也是高层要解决的一个问题等。

图 1-2 (b) 所示的协议栈细化并改进了原始模型。定位和时间同步子层在协议栈中的位置比较特殊。它们既要依赖于数据传输通道进行协作定位和时间同步协商，同时又要为网络协议各层提供信息支持，如基于时分复用的 MAC 协议，基于地理位置的路由协议等很多传

传感器网络协议都需要定位和同步信息。

1.3 无线传感器网络的基本特点

无线传感器网络是一种独立出现的计算机网络，是由大量传感器节点通过无线通信技术自组织构成的网络。传感器网络可实现数据的采集量化、处理融合和传输应用，它是信息技术中的一个新的领域，在军事和民用领域均有着非常广阔的应用前景。它具有以下特点^[6,7]。

1. 传感器节点体积小，能量有限

无线传感器网络是在微电机系统技术、数字电路技术基础上发展起来的，传感器节点各部分集成度很高，因此具有体积小的优点，通常携带能量十分有限的电池，由于传感器节点数目庞大、分布区域广，而且部署环境复杂，有些区域甚至人员不能到达，无法通过更换电池的方式来补充能量，所以在考虑传感器网络体系结构以及各层协议设计时，节能是设计的主要考虑目标之一。

2. 传感器节点计算和存储能力有限

由于无线传感器网络应用的特殊性，要求传感器节点的价格低、功耗小，必然导致其携带的处理器能力比较弱，存储器容量比较小，因此，如何利用有限的计算和存储资源，完成诸多协同任务，也是无线传感器网络技术面临的挑战之一。事实上，随着低功耗电路和系统设计技术的提高，目前已经开发出很多超低功耗微处理器，同时，一般传感器节点还会配上一些外部存储器，目前的 Flash 存储器是一种可以低电压操作、多次写、无限次读的非易失存储介质。

3. 通信半径小，带宽低

无线传感器网络是利用“多跳”来实现低功耗下的数据传输，因此其设计的通信覆盖范围只有几十米。和传统无线网络不同，传感器网络中传输的数据大部分是经过节点处理过的数据，因此流量较小。根据目前观察到的现象特性来看，传感数据所需的带宽将会很低（1~100kbit/s）。

4. 传感器节点数量大且具有自适应性

无线传感器网络中传感器节点密集，数量巨大，可能达到几百、几千，甚至更多。此外，无线传感器网络可以分布在很广泛的地理区域，网络的拓扑结构变化很快，而且网络一旦形成，人很少干预其运行。因此，无线传感器网络的软、硬件必须具有高强壮性和容错性，相应的通信协议必须具有可重构和自适应性。

5. 无中心和自组织

在无线传感器网络中，所有节点的地位都是平等的，没有预先指定的中心，各节点通过分布式算法来相互协调，可以在无人工干预和任何其他预置的网络设施的情况下，节点自动组织成网络。正是由于无线传感器网络中没有中心，所以网络不会因为单个节点的损坏而损毁，使得网络具有较好的鲁棒性和抗毁性。

6. 网络动态性强

无线传感器网络中的传感器、感知对象和观察者这三要素都可能具有一定的移动性，并且经常有新节点加入或已有节点失效。网络的拓扑结构动态变化，传感器、感知对象和观察者三者之间的路径也随之变化，网络必须具有可重构和自调整性。因此，无线传感器网络具有很强的动态性。

7. 以数据为中心的网络

对于观察者来说，传感器网络的核心是感知数据而不是网络硬件。以数据为中心的特点要求传感器网络的设计必须以感知数据管理和处理为中心，把数据库技术和网络技术紧密结合，从逻辑概念和软、硬件技术两个方面实现一个高性能的以数据为中心的网络系统，使用户如同使用通常的数据库管理系统和数据处理系统一样自如地在传感器网络上进行感知数据的管理和处理。

1.4 无线传感器网络的发展现状与趋势

无线传感器网络的研究最初起源于美国军方，其研究的项目包括 CEC、REMBASS、TRSS、Sensor IT、WINS、Smart Dust、SeaWeb、 μ AMPS、NEST 等。美国国防部远景计划研究局已投资几千万美元，帮助大学进行无线传感器网络技术的研发。美国国家自然科学基金委员会 (NSF) 也开设了大量与其相关的项目，NSF 于 2003 年制定了无线传感器网络研究计划，每年拨款 3 400 万美元支持相关研究项目，并在加州大学洛杉矶分校成立了传感器网络研究中心；2005 年对网络技术和系统的研究计划中，主要研究下一代高可靠、安全的可扩展的网络、可编程的无线网络及传感器系统的网络特性，资助金额达 4 000 万美元。此外，美国交通部、能源部、美国国家航空航天局也相继启动了相关的研究项目。

美国所有著名的院校几乎都有研究小组从事传感器网络相关技术的研究，如加州大学洛杉矶分校、康奈尔大学、麻省理工学院和加州大学伯克利分校等都先后开展了传感器网络方面的研究工作。Crossbow、Mote IV 等一批以传感器节点为产业的公司已为大家所熟知，他们的产品 Mica2、Micaz、Telos 等为很多研究机构搭建起了硬件平台，方便的开发平台使得大部分研究机构开始转而研究大规模无线组网、传感信息融合、时间同步与定位、低功耗设计技术等关键技术。

加拿大、英国、德国、芬兰、日本和意大利等国家的研究机构都先后开始了无线传感器网络的研究。欧盟第 6 个框架计划将“信息社会技术”作为优先发展的领域之一，其中多处涉及对无线传感器网络的研究。日本总务省在 2004 年 3 月成立了“泛在传感器网络”调查研究会。韩国信息通信部制订了信息技术 839 战略，其中“3”是指 IT 产业的 3 大基础设施，即宽带融合网络、泛在传感器网络、下一代互联网协议。企业界中欧盟的 Philips、Siemens、Ericsson、ZMD、France Telecom、Chipcon 等公司，日本的 NEC、OKI、Skyleynetworks、世康、欧姆龙等公司都开展了无线传感器网络的研究。

我国对无线传感器网络的研究起步较晚，首次正式启动出现于 1999 年中国科学院《知识创新工程点领域方向研究》的“信息与自动化领域研究报告”中，该领域的五大重点项目之一。2001 年中国科学院依托上海微系统所成立微系统研究与发展中心，旨在引领中科院无线传感器网络的相关工作。我国学者非常重视无线传感器网络方面的研究，南京邮电大学、北

京邮电大学和哈尔滨工业大学等高校科研机构均已开始了该领域的探索研究，其中南京邮电大学无线传感器网络研究中心在无线传感器网络领域已经有了一定的科研成果。

国家自然科学基金已经审批了与无线传感器网络相关的多项课题。2004年，将一项无线传感器网络项目（面向传感器网络的分布自治系统关键技术及协调控制理论）列为重点研究项目。2005年，将网络传感器中的基础理论和关键技术列入计划。2006年将水下移动传感器网络的关键技术列为重点研究项目。国家发改委下一代互联网（CNGI）示范工程中，也部署了无线传感器网络相关的课题。

在一份我国未来20年预见技术的调查报告中，信息领域157项技术课题中有7项与传感器网络直接相关。2006年年初发布的《国家中长期科学与技术发展规划纲要》为信息技术定义了3个前沿方向，其中2个与无线传感器网络的研究直接相关，即智能感知技术和自组织网络技术。我国2010年远景规划和“十五”计划中，将无线传感器网络列为重点发展的产业之一。

国内也有越来越多的企事业开始关注传感器网络技术的发展，宁波中科、北京鑫诺金传感与控制技术有限公司、成都无线龙科技等公司也开始推出针对无线传感器网络及 ZigBee 的解决方案，以及面向一定产业应用的系统方案。

近年来，人们对无线传感器网络研究的不断深入，已经使得无线传感器网络得到了很大的发展，也产生了越来越多的实际应用。随着人们对信息获取的需求不断增加，由这些传统传感器网络所获取的简单数据愈加不能满足人们对信息获取的全面需求，使得人们已经开始在研究功能更强的无线多媒体传感器节点，使用无线多媒体传感器节点能够获取图像、音频、视频等多媒体信息，从而人们能获取监测区域更加详细的信息。

无线传感器网络有着十分广泛的应用前景，我们可以大胆的预见，将来无线传感器网络将无处不在，将完全融入我们的生活。比如微型传感器网最终可能将家用电器、个人电脑和其他日常用品同互联网相连，实现远距离跟踪，家庭采用无线传感器网络负责安全调控、节电等。无线传感器网络将是未来的一个无孔不入的十分庞大的网络，其应用可以涉及人类日常生活和社会生产活动的所有领域。但是，我们还应该清楚地认识到，无线传感器网络才刚刚开始发展，它的技术、应用都还远远谈不上成熟，国内企业应该抓住商机，加大投入力度，推动整个行业的发展。

根据无线传感器网络的研究现状，无线传感器网络技术的发展趋势主要有以下几个方面。

1. 灵活、自适应的网络协议体系

无线传感器网络广泛地应用于军事、环境、医疗、家庭、工业等领域。其网络协议、算法的设计和实现与具体的应用场景有着紧密的关联。在环境监测中需要使用静止、低速的无线传感器网络；在军事应用中需要使用移动的、实时性强的无线传感器网络；在智能交通中还需要将射频识别（Radio Frequency Identification, RFID）技术和无线传感器网络技术融合起来使用。这些面向不同应用背景的无线传感器网络所使用的路由机制、数据传输模式、实时性要求以及组网机制等都有着很大的差异，因而网络性能各有不同。目前无线传感器网络研究中所提出的各种网络协议都是基于某种特定应用而提出的，这给无线传感器网络的通用化设计和使用带来了巨大的困难。如何设计功能可裁减、自主灵活、可重构和适应于不同应用需求的无线传感器网络协议体系结构，将是未来无线传感器网络发展的

一个重要方向。

2. 跨层设计

无线传感器网络有着分层的体系结构，因此在设计时也大都是分层进行的。各层的设计相互独立且具有一定的局限性，因而各层的优化设计并不能保证整个网络的设计最优。针对此问题，一些研究者提出了跨层设计的概念。跨层设计的目标就是实现逻辑上并不相邻的协议层之间的设计互动与性能平衡。对无线传感器网络，能量管理机制、低功耗设计等在各层设计中都有所体现；但要使整个网络的节能效果达到最优，还应采用跨层设计的思想。

将 MAC 与路由相结合进行跨层设计可以有效节省能量，延长网络的寿命。同样，传感器网络的能量管理和低功耗设计也必须结合实际跨层进行。此外，在时间同步和节点定位方面，采用跨层优化设计的方式，能够使节点直接获取物理层的信息，有效避免本地处理带来的误差，获得较为准确的相关信息。

3. 寻求系统节能策略

无线传感器网络应用于特殊场合时，电源不可更换，因此功耗问题显得至关重要。现在国内外在节点的低功耗问题上已经取得了很大的研究成果，提出了一些低功耗的无线传感器网络协议，未来将会取得更大的进步。

4. 节点的自动配置

未来将着重于研究如何将大量的节点按照一定的规则组成一个网络。当其中某些节点出现错误时，网络能够迅速找到这些节点，并且不影响到网络的正常使用。配置冗余节点是必要的。

5. 与其他网络的融合

无线传感器网络和现有网络的融合将带来新的应用。例如，无线传感器网络与互联网、移动通信网的融合，一方面使无线传感器网络得以借助这两种传统网络传递信息，另一方面这两种网络可以利用传感信息实现应用的创新。此外，将无线传感器网络作为传感与信息采集的基础设施融合进网格体系，构建一种全新的基于无线传感器网络的网格体系——无线传感器网络。传感器网络专注于探测和收集环境信息；复杂的数据处理和存储等服务则交给网格来完成，将能够为大型的军事应用、科研、工业生产和商业交易等应用领域提供一个集数据感知、密集处理和海量存储于一体的强大操作平台。

1.5 无线传感器网络面临的挑战

无线传感器网络不同于传统数据网络的特点，对无线传感器网络的设计与实现提出了新的挑战，无线传感器网络的发展在基础理论和实现技术两个层面提出了大量的富有挑战性的研究课题，主要体现在 5 个方面：低能耗、实时性、低成本、安全和抗干扰、协作。

1. 低能耗

无线传感器网络节点的电源极为有限，又因为它通常工作在危险或人们无法到达的环

境中，所以在大多数情况下无法补充能量，网络中的传感器节点会由于电源能量耗尽而失效或废弃，这就要求在无线传感器网络运行的过程中，每个节点都要最小化自身的能量消耗，获得最长的工作时间；因而无线传感器网络中的各项技术和协议的使用一般都以节能为前提。

2. 实时性

无线传感器网络的应用大多要求有较好的实时性。例如，目标在进入监测区域之后，传感器网络需要在一个很短的时间内对这一事件做出响应，若其反应的时间过慢，则可能目标已离开监测区域，从而使得到的数据失效。又如，车载监控系统需要在很短的时间内就读一次加速度仪的测量值，否则无法正确估计速度，导致交通事故，这些应用都对无线传感器网络的实时性设计提出了很大的挑战。

3. 低成本

无线传感器网络是由大量的传感器节点组成的，单个传感器节点的价格会极大程度地影响系统的成本。为了达到降低单个节点成本的目的，需要设计出对计算、通信和存储能力均要求较低的简单网络系统和通信协议。此外，还可以通过减少系统管理与维护的开销来降低系统的成本，这需要无线传感器网络系统具有自配置和自修复的能力。

4. 安全和抗干扰

无线传感器网络系统具有严格的资源限制，需要设计低开销的通信协议，同时也会带来严重的安全问题。由于传感器节点有些会设置在屋内，也有许多会设置在户外，会在各种环境下部署节点，所以节点必须具备良好的抗干扰能力，现场环境可能极寒冷、极炎热、极干或极湿等恶劣条件，这些都不能对节点的感知产生影响，也不能对节点内的电路运作产生影响，同时也不能对节点间的信息传递产生影响。关于这些就相当考验节点的设计，不仅要考虑节点的外壳设计，还要考虑内部电路的设计。因此，如何使用较少的能量完成数据加密、身份认证、入侵检测及在破坏或受干扰的情况下可靠地完成任务，也是无线传感器网络研究与设计面临的一个重要挑战。

5. 协作

由于单个传感器节点的能力有限，往往不能单独完成对目标的测量、跟踪和识别工作，而需要多个传感器节点采用一定的算法通过交换信息，对所获得的数据进行加工、汇总和过滤，并以事件的形式得到最终结果。数据的协作传递过程中涉及网络协议的设计和节点的能量消耗问题，也是目前研究热点之一。

1.6 无线传感器网络的应用领域

无线传感器网络是由大量价格低廉的传感器节点组成的无线网络，它具有分布式处理带来的高监测精度、高容错性、大覆盖区域、可远程监控等众多优点，这使得它在军事、智能农业和环境监测、医疗健康、紧急和临时场合、家庭、空间探索等领域具有广阔的应用前景^[8-10]。