

WIRELESS SENSOR NETWORK, WSN



无线传感器网络 技术及应用

Technology and Application of
Wireless Sensor Network

王平 王恒◎编著

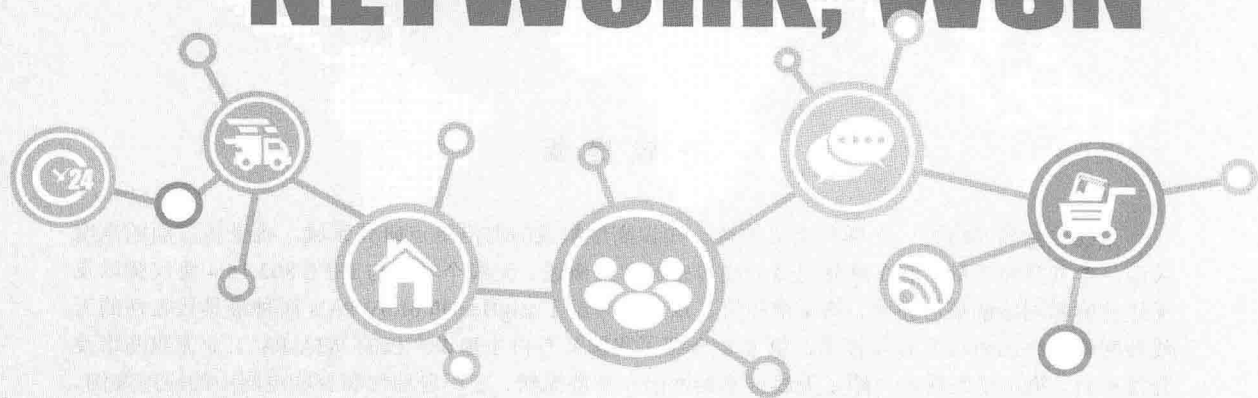


中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

WIRELESS SENSOR NETWORK, WSN



无线传感器网络 技术及应用

王平 王恒 编著

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

无线传感器网络技术的应用 / 王平, 王恒编著. --
北京: 人民邮电出版社, 2016. 1
ISBN 978-7-115-41072-6

I. ①无… II. ①王… ②王… III. ①无线电通信—
传感器 IV. ①TP212

中国版本图书馆CIP数据核字 (2015) 第292635号

内 容 提 要

无线传感器网络是一个学科交叉综合、知识高度集成的前沿热点研究领域, 备受各方面的高度关注。本书共分 7 章, 前 3 章分别是无线传感器网络概述、无线个域网与 IEEE 802.15.4 协议簇以及无线传感器网络的核心技术, 第 4 章和第 5 章分别介绍了 ZigBee 和 6LoWPAN 两种最具代表性的无线传感器网络的协议及开发技术, 第 6 章介绍了我国具有自主知识产权的 WIA-PA 工业无线网络及开发平台, 第 7 章则重点介绍了无线传感器网络在智能家居、工厂自动化和智能电网中的应用案例。

本书以作者牵头承担国家重大科技专项项目和制定国际、国内标准取得的一系列科研成果为基础, 全面系统地介绍了无线传感器网络的基本概念、标准规范、关键技术和主流协议, 结合作者开发的实验平台, 通过大量的软硬件开发实例, 详细介绍了无线传感器网络的设备和应用系统的开发方法。

本书注重理论与实践相结合, 内容新颖, 重点突出, 结构清晰, 语言精练, 易于理解, 既可作为无线传感器网络领域从事科学研究、产品开发与工程应用的科技人员的参考用书, 也可作为物联网、自动化、测控、电气、计算机、通信等相关学科的研究生和高年级本科生的教学用书。

◆ 编 著 王 平 王 恒

责任编辑 邹文波

执行编辑 税梦玲

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>

三河市潮河印业有限公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 20.25

2016 年 1 月第 1 版

字数: 509 千字

2016 年 1 月河北第 1 次印刷

定价: 49.80 元

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

反盗版热线: (010) 81055315

本书作者牵头承担了“基于 IPv6 的无线传感器网的网络协议研发及验证（项目编号：2012ZX03005002）”“面向工业无线网络协议 WIA-PA 的网络设备研发及应用——专用芯片研发（项目编号：2013ZX03005005）”及“高实时 WIA-PA 网络片上系统（SoC）研发与示范应用（项目编号：2015ZX0303011）”3 项国家科技重大专项项目，主持研究了国家 863 计划先进制造领域主题项目“全互联制造网络技术（项目编号：2015AA043800）”，牵头制定无线传感网测试国际标准（ISO/IEC 1963: Sensor Network Testing Framework）和 3 项无线传感网国家标准，突破了一系列无线传感网的关键技术问题，率先推出了全球工业无线传感网系列核心芯片（CY2420: 2.4GHz、CY2420S: 2.4GHz/SIP、CY4520: 433~470MHz），核心技术初步形成了专利保护群，研究成果得到了国际上的广泛认可。同时，本书作者所在的国家工业物联网国际合作示范基地、工业物联网与网络化控制教育部重点实验室与全球领先的网络解决方案供应商——思科公司（CISCO）共建“重庆邮电大学—思科公司绿色科技联合研发中心”，联合研发基于 WSN、3G/LTE 与 IPv6 这 3 种技术的高可适性、多用途物联网技术标准与产品架构，共同推进 IETF 标准的制定，形成了具有国际影响的研究特色与技术优势。

本书以作者所在团队解决的工业无线网络关键技术问题、通过国际金牌认证的自主 IPv6 传感网协议栈软件——6LoWSN、牵头制定的传感器网络测试领域首个国际标准（ISO/IEC 1963 Sensor Network Testing Framework，传感器网络测试体系结构）等具有自主知识产权的技术积累为基础，融入了作者多年参加国家重大科技专项项目、国家 863 项目研究和制定国际国内标准所取得的研究成果，全面系统地介绍了无线传感网的基本概念、标准规范、关键技术和主流协议，并结合作者研发的实验平台和大量软硬件开发实例，详细介绍了无线传感网网络产品和应用系统的开发方法。全书注重理论与实践相结合，强化开发实例，内容新颖，重点突出，结构清晰，语言精练，易于理解。

全书共分 7 章。第 1 章介绍了无线传感器网络的发展历程、基本概念、体系结构、应用前景与标准现状；第 2 章介绍无线个域网与 IEEE 802.15.4 协议簇，重点介绍了 IEEE 802.15.4 协议簇标准、超帧结构、物理层服务与 MAC 层协议；第 3 章结合作者的科研成果介绍了无线传感网关键技术，重点叙述了时间同步、网络调度、安全管理、传感器接入的基本原理与实现方法；第 4 章介绍了 ZigBee 协议架构、通信卡与网关的设计方法和应用实例；第 5 章结合作者的科研成果介绍了 6LoWPAN 技术，重点阐述 6LoWPAN 网络协议

架构与开发技术，结合 6LoWPAN 传感网设备开发平台，详细介绍了 6LoWPAN 传感网节点、网关、边界路由器的开发技术和 Sniffer 抓包器的使用方法；第 6 章介绍了 WIA-PA 技术，并结合作者的科研成果重点介绍了 WIA-PA 协议栈的开发技术和 WIA-PA 开发平台的使用方法；第 7 章则以无线传感网在智能家居、工厂自动化和智能电网为应用背景，重点介绍了无线传感网设备与应用系统的设计方法与开发技术。

本书是工业物联网与网络化控制教育部重点实验室全体同仁多年来在无线传感器网络及物联网技术、工业通信与网络化控制技术等方面从事科学研究、应用开发的工作结晶。本书由王平、王恒、魏旻、付蔚、王浩、李勇、严冬共同著述。同时，研究生蒲成亘承担第 5 章的著述，夏枢洋、汪朋、王雄、蔡龙腾、温鑫荣、邓晓渝等研究生参加了相关章节的著述。同时，对本书所参考的所有文献的作者表示诚挚的谢意。

作者

2015 年 7 月于重庆邮电大学

第 1 章 无线传感器网络技术概述	1
1.1 WSN 的发展	1
1.1.1 国外 WSN 的发展历程	1
1.1.2 国内 WSN 的发展	2
1.2 WSN 的定义	3
1.2.1 传感器网络与 WSN	3
1.2.2 WSN 的定义	4
1.2.3 WSN 与现有网络的比较	5
1.3 WSN 的体系结构	5
1.4 WSN 的应用前景	8
1.5 WSN 的研究现状	12
1.5.1 WSN 的基础研究	12
1.5.2 WSN 的应用研究	13
1.5.3 WSN 研究的热点问题	13
1.6 WSN 的技术标准	14
第 2 章 无线个域网与 IEEE 802.15.4 协议簇	16
2.1 无线个域网	16
2.1.1 无线个域网的发展	16
2.1.2 IEEE 802.15 系列标准	17
2.1.3 IEEE 802.15.4 协议簇	19
2.2 IEEE 802.15.4 标准	20
2.2.1 IEEE 802.15.4 网络拓扑结构	20
2.2.2 IEEE 802.15.4 协议层次结构	21
2.2.3 IEEE 802.15.4 网络形成与维护	21
2.2.4 IEEE 802.15.4 标准的超帧结构与信标	23
2.3 IEEE 802.15.4 物理层	26
2.3.1 物理层结构模型	26
2.3.2 物理层管理服务	29
2.3.3 物理层数据服务	30
2.4 IEEE 802.15.4 MAC 层	31
2.4.1 MAC 层服务模型	31
2.4.2 MAC 层帧结构	34
2.4.3 MAC 层管理服务	36
2.4.4 MAC 层数据服务	44
第 3 章 无线传感网关键技术	45
3.1 无线传感网时间同步技术	45
3.1.1 时间同步的基本原理	45
3.1.2 无线传感网时间同步技术分类	48
3.1.3 典型的无线传感器网络时间同步协议	51
3.1.4 一种典型的无线传感网时间同步方法设计	54
3.2 无线传感网网络调度技术	60
3.2.1 典型无线传感网调度技术	60
3.2.2 确定性通信调度方法的设计	65
3.3 无线传感网跳信道技术	71
3.3.1 无线传感网跳信道基本原理	71
3.3.2 一种典型的自适应跳信道实现方法	76

3.4 无线传感网安全技术	80	5.2.4 CoAP 协议	149
3.4.1 无线传感网安全概述	80	5.3 轻量级 IPv6 无线传感网	
3.4.2 无线传感网安全关键技术	81	协议栈	155
3.4.3 无线传感网安全管理技术	94	5.3.1 协议栈体系结构	155
3.5 IEEE 1451 标准与传感器		5.3.2 协议栈设计要求	156
接入技术	103	5.3.3 协议栈整体方案设计	157
3.5.1 IEEE 1451 协议族	103	5.3.4 协议栈应用层设计	158
3.5.2 IEEE 1451 标准的		5.3.5 协议栈传输层设计	161
实现模型	105	5.3.6 协议栈网络层设计	163
第 4 章 ZigBee 技术	109	5.3.7 协议栈适配层设计	170
4.1 ZigBee 技术的发展	109	5.4 6LoWPAN 传感网设备	
4.2 ZigBee 协议体系	110	开发平台	173
4.2.1 ZigBee 协议栈架构	110	5.4.1 6LoWPAN 传感网设备开发	
4.2.2 ZigBee 网络层模型	112	平台总体设计	173
4.2.3 ZigBee 应用层模型	114	5.4.2 6LoWPAN 传感网设备开发	
4.3 ZigBee 网络的构成	115	平台硬件设计	175
4.3.1 设备分类及功能	115	5.4.3 6LoWPAN 传感网设备开发	
4.3.2 ZigBee 的网络拓扑	115	平台软件设计	178
4.4 ZigBee 通信卡的开发	118	5.4.4 LoWPAN 传感网网络管理	
4.4.1 ZigBee 通信卡硬件设计	118	程序设计	191
4.4.2 ZigBee 通信卡软件设计	119	5.4.5 上位机 GUI 软件设计	198
4.5 ZigBee 网关的开发	120	5.5 6LoWPAN 无线传感网	
4.5.1 ZigBee 网关通信模型	120	系统实验	202
4.5.2 ZigBee 网关的硬件设计	121	5.5.1 6LoWPAN 无线传感网	
4.5.3 ZigBee 网关的软件实现	125	系统组成	202
4.6 基于 ZigBee 的三表数据		5.5.2 IEEE 802.15.4 网关功能	
采集系统设计	127	实验	203
4.6.1 三表数据采集系统设计	127	5.5.3 6LoWPAN 边界路由实验	205
4.6.2 三表数据采集中继器		5.5.4 6LoWPAN 协议分析实验	213
硬件设计	128	5.5.5 GUI 监控实验	214
4.6.3 三表数据采集中继器		第 6 章 WIA-PA 技术	216
软件设计	131	6.1 WIA-PA 标准的发展	216
4.6.4 三表数据采集系统测试	135	6.1.1 WIA-PA 标准发展概述	216
第 5 章 6LoWPAN 技术	139	6.1.2 WIA-PA 的技术特征	216
5.1 6LoWPAN 技术的发展	139	6.2 WIA-PA 网络构成	217
5.2 6LoWPAN 网络核心协议	140	6.2.1 WIA-PA 网络的拓扑结构	217
5.2.1 适配层协议	140	6.2.2 WIA-PA 的设备分类及	
5.2.2 路由协议	143	功能	218
5.2.3 邻居发现协议	148	6.3 WIA-PA 协议栈的设计与实现	219

6.3.1 WIA-PA 协议体系	219	7.2 智能化 ANDON 系统	281
6.3.2 WIA-PA 协议栈总体设计	221	7.2.1 ANDON 系统概述	281
6.3.3 WIA-PA 数据结构设计	222	7.2.2 ANDON 工位子系统开发	283
6.3.4 WIA-PA 主要流程及 接口设计	229	7.2.3 ANDON 系统软件 运行测试	295
6.3.5 WIA-PA 协议栈的实现	233	7.3 水电厂智能监控系统	298
6.4 WIA-PA 开发平台	262	7.3.1 水电厂智能监控系统概述	298
6.4.1 开发平台简介	262	7.3.2 水电站智能在线监测系统 设计	299
6.4.2 开发平台实验	263	7.3.3 水电站智能在线监测系统 现场设备设计	302
第 7 章 无线传感网络综合应用	267	7.3.4 水电站智能在线监测系统运行 测试	315
7.1 智能家居	267		
7.1.1 智能家居概述	267		
7.1.2 家居安防开发实例	268		
7.1.3 家居安防运行测试	275		

1.1 WSN 的发展

1.1.1 国外 WSN 的发展历程

无线传感器网络 (Wireless Sensor Network, WSN) 是一个学科交叉综合、知识高度集成的前沿热点研究领域,正受到各方面的高度关注。特别是无线传感器网络在军事领域的应用引领着其发展方向。

二十世纪 70 年代,传感网研究的重点在国防项目上,如冷战时期的声音监测系统 (Sound Surveillance System-SOSUS)、空中预警与控制系统 (Air borne Warning and Control System-AWACS) 等。最具代表性的是越战时期使用的传统传感器系统。1978 年美国国防部高级研究计划局 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 在卡耐基-梅隆大学成立了分布式传感器网络工作组,从而拉开了无线传感器网络研究的序幕。

二十世纪 80 年代至 90 年代之间,美国海军先后研制了协同交战能力系统 (Cooperative Engagement Capability-CEC)、用于反潜的确定性分布系统 (Fixed Distributed System-FDS)、高级配置系统 (Advanced Deployment System-ADS)、远程战场传感器网络系统 (Remote Battlefield Sensor System-REMBASS) 以及战术远程传感器系统 (Tactical Remote Sensor System) 等无人看管的地面传感器网络系统。

1994 年,加州大学洛杉矶分校的 William J. Kaiser 向 DARPA 提交建议书 “Low Power Wireless Integrated Microsensors” 成为无线传感器网络领域中的一个重要里程碑。

1998 年, Gregory. J. Pottie 阐释了 WSN 的科学意义。同年, DARPA 巨资启动了 SensIT 项目,目标是实现 “超视距” 战场监测。

1999 年,美国橡树岭国家实验室 (Oak Ridge National Laboratory ,ORNL) 提出了 “网络就是传感器” (Network is Sensor) 的论断。同年,商业周刊将传感器网络列为 21 世纪最具影响的 21 项技术之一。

2001 年 1 月,《MIT 技术评论》将 WSN 列于十种改变未来世界新兴技术之首。

2003 年 8 月,《商业周刊》预测: WSN 和其他三项信息技术将会在不远的将来掀起新的产业浪潮。

2004 年《IEEE Spectrum》杂志发表一期专集: 传感器的国度,论述 WSN 的发展和可能

的广泛应用。

2004 年,日本第一个提出“泛在”战略;2008 年,进一步提出“u-japan xICT”政策。

2004 年,韩国发表‘u-korea’计划,出台 RFID/USN 相关政策。

2005 年,欧盟委员会公布 i2010 框架;2009 年,欧盟及物联网领域的专业研究项目组先后颁布了多份规划欧洲物联网未来发展动向的相关报告。

2009 年,在奥巴马就任总统后的首次美国工商业领袖圆桌会上,IBM 首席执行官建议政府投资新一代的智能型基础设施,并提出了“智慧地球”的发展理念。这一理念涵盖范围包括银行金融、通信、电子、汽车、航天、能源、公共事业、政府管理、医疗保健、保险业、零售、交通运输等诸多日常生活中的基本领域。旨在将传感器嵌入和装配到电网、铁路、建筑、大坝、油气管道等各种物体中,形成物物相联,通过超级计算机和云计算将其整合,实现社会与物理世界融合。提议获得了奥巴马的积极肯定,并很快被提升为国家发展战略。

2009 年,ISO/IEC JTC1 成立 WG7 传感网标准工作组,负责传感网领域标准的制定工作。

2011 年,ZigBee 联盟宣布推出的 Smart Energy 应用标准,为先进计量基础设施提供标准规范,使得公用事业公司和政府很容易就能部署可靠、易于安装、可相互操作以及用户友好型的智能电网解决方案。同年,美国政府先后发布了先进制造伙伴计划、总统创新伙伴计划,将以物联网技术为基础的信息物理系统(Cyber-Physical System, CPS)列为扶持重点。

2013 年,欧盟通过了“地平线 2020”科研计划,旨在利用科技创新促进增长、增加就业,以塑造欧洲在未来发展的竞争新优势。“地平线 2020”计划中,传感网/物联网领域的研发重点集中在传感器、架构、标识、安全和隐私等方面。2013 年 4 月,在汉诺威工业博览会上,德国正式发布了关于实施“工业 4.0”战略的建议。工业 4.0 将软件、传感器和通信系统集成于 CPS,通过将物联网与服务引入制造业,改变制造业发展范式,重构全新的生产体系,形成新的产业革命。2013 年,韩国政府发布了 ICT(信息通信技术)研究与开发计划“ICT WAVE(信息通信技术浪潮计划)”,目标是未来 5 年投入 8.5 万亿韩元(约 80 亿美元),发展包括“物联网平台”的 10 大 ICT 关键技术和 15 项关键服务。

2014 年 3 月,AT&T、思科、通用电气、IBM 和 Intel 成立了工业互联网联盟(Industrial Internet Consortium, IIC),将促进物理世界和数字世界的融合,并推动大数据应用。IIC 计划提出一系列物联网互操作标准,使设备、传感器和网络终端在确保安全的前提下变得可辨识、可互联、可互操作。未来工业互联网产品和系统可广泛应用于智能制造、医疗保健、交通等新领域。

《2013—2014 年中国物联网发展年度报告》分析认为:2013 年以来,传感技术、云计算、大数据、移动互联网融合发展,全球物联网应用已进入实质推进阶段。欧美日韩等国家和地区也在物联网技术、行业应用等方面取得重要进展,信息化、数字化、智能化成为新一轮技术革命的引领与方向。

1.1.2 国内 WSN 的发展

在现代意义上的无线传感网研究及其应用方面,我国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少数方向之一。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,其中有智能感知和自组网技术两个方向就与传感器网络直接相关。也就是说,传感器网络是随着信息技术的发展而演化产生。

根据中国科学院知识创新工程方向性项目“中国未来 20 年技术预见研究”的研究成果写

成的《技术预见报告 2008》，对中国未来 20 年各个领域最重要的技术课题进行了详细的述评，报告所述信息领域 157 项技术课题中有 7 项与传感器网络直接相关。

2009 年 8 月，温家宝总理到中科院无锡高新微纳传感网工程技术研发中心考察时说，至少三件事情可以立刻去做，一是把传感器系统和 3G 中的 TD 技术结合起来；二是在国家重大科技专项中，加快推进传感网发展；三是尽快建立中国的传感信息中心，或者叫“感知中国心”。同年 9 月，传感网国家标准工作组在京成立。11 月，温家宝总理在北京向首都科技界发表了题为《让科技引领中国可持续发展》的讲话，强调“要着力突破传感网、物联网关键技术，及早部署后 IP 时代相关技术研发，使信息网络产业成为推动产业升级、迈向信息社会的‘发动机’”。2010 年、2011 年国家相继成立了“国家传感网创新示范区”与“国家传感信息中心”，发布了《物联网“十二五”发展规划》，设立了“物联网专项资金项目”“国家物联网应用示范工程”“国家物联网重大应用示范工程”“智慧城市”等重大项目计划推进传感网/物联网技术的发展与应用。

2012 年 7 月发布了《“十二五”国家战略性新兴产业发展规划》（国发〔2012〕28 号）该规划指出，实施物联网与云计算创新发展工程，加快 IPv4/IPv6 网络互通设备，以及支持 IPv6 的高速、高性能网络和终端设备、支撑系统、网络安全设备、测试设备及相关芯片的研发和产业化。

2013 年国家相继发布了《国务院关于推进物联网有序健康发展的指导意见》（国发〔2013〕7 号）、《物联网发展专项行动计划（2013-2015）》（发改高技〔2013〕1718 号），要求到 2015 年，实现物联网在经济社会重要领域的规模示范作用，突破一批核心技术，初步形成物联网产业体系，安全保障能力明显提高。实现物联网在经济社会各领域的广泛应用。

2015 年，李克强总理在政府工作报告中提出制定“互联网+”行动计划，“互联网+”利用信息通信技术、无线传感器网络及互联网等平台，让传统行业和互联网行业进行深度融合，创造新发展生态。“互联网+”行动充分发挥互联网和传感网等新兴网络在生产要素配置中的优化和集成作用，将网络的创新成果深度融合于经济社会各领域之中，提升实体经济的创新力和生产力，形成更广泛的以传感网和互联网为基础设施和实现工具的经济发展模式。

以上表明，传感网和物联网技术已成为当前各国科技和产业竞争的热点，许多发达国家都加大对物联网技术和智慧型基础设施的投入与研发力度，力图抢占科技制高点。我国也及时地将传感网和物联网列为国家重点发展的战略性新兴产业之一。

1.2 WSN 的定义

1.2.1 传感器网络与 WSN

传感器网络自 20 世纪 70 年代出现以来已经发展到第四代，即无线传感器网络。

第一代传感器网络出现在 20 世纪 70 年代。使用具有简单信息信号获取能力的传统传感器，采用点对点传输、连接传感控制器构成传感器网络；第二代传感器网络出现在 20 世纪 80 年代末期，具有获取多种信息信号的综合能力，采用串并接口（如 RS-232、RS-485）与传感控制器相联，构成能综合多种信息的传感器网络；第三代传感器网络出现在 20 世纪 90 年代，用具有智能获取多种信息信号的传感器，采用现场总线连接传感控制器，构成局域网络，成为智能化传感器网络；20 世纪 90 年后期和本世纪初末，随着现代传感器、无线

通信、现代网络、嵌入式计算、微机电、集成电路、分布式信息处理与人工智能等新兴技术的发展与融合,以及新材料、新工艺的出现,传感器技术向微型化、无线化、数字化、网络化、智能化方向迅速发展,传感器网络进入第四代,即由各种具有感知、无线通信与计算功能的智能微型传感器节点构成的无线传感器网络,通过无线通信方式智能组网,形成一个自组织网络系统,该系统具有信号采集、实时监测、信息传输、协同处理、信息服务等功能,能感知、采集和处理网络所覆盖区域中感知对象的各种信息,并将处理后的信息传递给用户。

1.2.2 WSN 的定义

目前 WSN 没有统一的定义,比较具有代表性的定义如下所述。

(1) 大规模、无线、自组织、多跳、无分区、无基础设施支持的网络。其中的节点是同构的,成本较低、体积较小、大部分节点不移动,被随意散布在工作区域,要求网络系统有尽可能长的工作时间。(参见李晓维《无线传感器网络技术》)

(2) 无线传感器网络就是由部署在监测区域内大量的廉价微型传感器节点组成,通过无线通信方式形成的一个多跳的自组织网络系统,其目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖区域中被感知对象的信息,并发送给观察者。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。(参见孙利民《无线传感器网络》)

(3) 无线传感器网络由若干个空间分布的自主传感器组成,用于监控物理或环境条件,如温度、声音、振动、压力、运动或污染等,同时通过协同网络将数据传递到某个地方。(A wireless sensor network consists of spatially distributed autonomous sensors to monitor physical or environmental conditions, such as temperature, sound, vibration, pressure, motion or pollutants and to cooperatively pass their data through the network to a main location)(参见维基百科)

基于上述代表性的定义,无线传感器网络具有如下主要特点(每一种传感器网络具有几个或全部特征)。

(1) 以数据为中心:无线传感器网络中节点数目巨大,而且由于网络拓扑的动态特性和节点放置的随机性,节点并不需要也不可能以全局唯一的 IP 地址来标识,只需使用局部可以区分的标号标识。用户对所需数据的收集,是以数据为中心进行,并不依靠节点的标号。

(2) 资源受限:无线传感器网络中,节点只具有有限的硬件资源。其计算能力和对数据的处理能力相当受限。此外,节点只能携带有限的电池能量,且在应用过程中不方便更换电池,因此能量也相当受限。

(3) 部署方式:无线传感或网络具有可快速部署的特点。节点一旦被抛撒即以自组织方式构成网络,无需任何预设的网络设施。

(4) 动态性与维护:传感器网络的拓扑结构可能因为下列因素而改变,①环境因素或能耗尽造成的传感器节点故障或失效;②环境条件变化可能造成无线通信链路带宽变化,甚至时断时通;③传感器网络的传感器、感知对象和观察者这三要素都可能具有移动性;④新节点的加入。这就要求传感器网络系统要能够适应这种变化,具有网络自动配置和自动维护功能,实现系统的自动组网与动态重构。

(5) 多跳路由:网络中节点的电池能源非常有限,因此其通信覆盖范围一般只有几十米,即每个节点都只能与其邻居节点进行通信。若要与通信覆盖范围外的节点通信,则需要通过

中间节点进行多跳路由。

(6) 应用相关性: 传感器网络用来感知客观物理世界, 获取物理世界的信息量。客观世界的物理量多种多样, 不可穷尽。不同的传感器网络应用关心不同的物理量, 因此对传感器的应用系统也有多种多样的要求。不同的应用背景对传感器内容的要求不同, 其硬件平台、软件系统和网络协议必然会有很大差别。只有针对每一个具体应用来设计传感器网络系统才能做出最高效的应用系统。这也是传感器网络设计不同于传统网络的显著特征。

1.2.3 WSN 与现有网络的比较

无线传感器网络与移动通信网、因特网等网络相比有很大差别, 但与移动 Ad hoc 网络相比却有许多共同之处。

移动 Ad hoc 网络是由无线移动节点组成的具有任意和临时性网络拓扑的动态自组织网络系统, 有时称作 MANET (Mobile Ad-hoc NETworks)。节点之间是以对等方式连接, 每个节点既可以作为主机, 也可以作为路由器或终端节点使用, 除了可以运行用户应用程序外, 还可以通过它转发节点的数据包。

自组织 (Ad hoc) 网络是一种由移动节点组成的临时、多跳、对等的自治系统, 可以认为 WSN 是 Ad hoc 网络的一种典型应用。

WSN 与 Ad hoc 网络的相同之处主要有两点: 一是基本不需要人工干预, 大部分工作是以自组织的方式完成的; 二是两者的目标都是追求低功耗的自组织网络设计。

但 WSN 与传统的 Ad hoc 网络也存在以下区别:

- (1) WSN 节点数量更为庞大, 分布更为密集;
- (2) WSN 节点更容易失效, 网络拓扑变化频繁;
- (3) WSN 主要使用广播通信机制, 而 Ad hoc 网络是基于点对点的通信;
- (4) WSN 节点的能源供应、运算能力、存储器大小均受局限;
- (5) WSN 不必拥有全球统一标识符;
- (6) WSN 以数据为中心。

1.3 WSN 的体系结构

无线传感器网络的部署可通过飞行器散播、人工埋置和火箭弹射等方式, 部署完成后 (如图 1-1 所示) 各节点任意分布在被监测区域内, 节点以自组织的形式构成网络。

无线传感器网络系统通常包括传感器节点 (sensor node)、汇聚网关/节点 (sink node) 和管理节点 (见图 1-2)。借助于节点内置的形式多样的感知模块测量所在环境中的热、红外、声纳、雷达和地震波信号, 从而探测包括温度、湿度、噪声、光强度、压力、土壤成分、移动物体的大小、速度和方向等众多我们感兴趣的物理现象。而节点的计算模块则完成对数据进行简单处理, 再采用微波、无线、红外和光等多种通信形式, 通过多跳中继方式将监测数据传送到汇聚节点, 汇聚节点将接收到的数据进行融合及压缩后, 最后通过互联网或卫星到达管理节点。同样地, 用户也可以通过管理节点对传感器网络进行配置和管理, 发布检测任务以及收集检测数据。

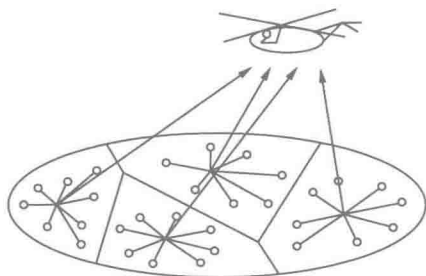


图 1-1 无线传感器网络节点部署

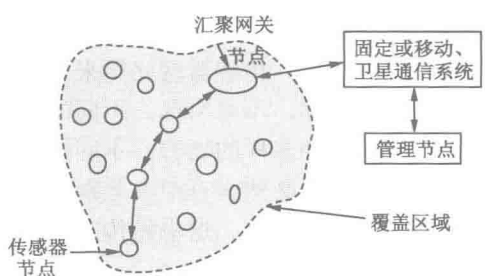
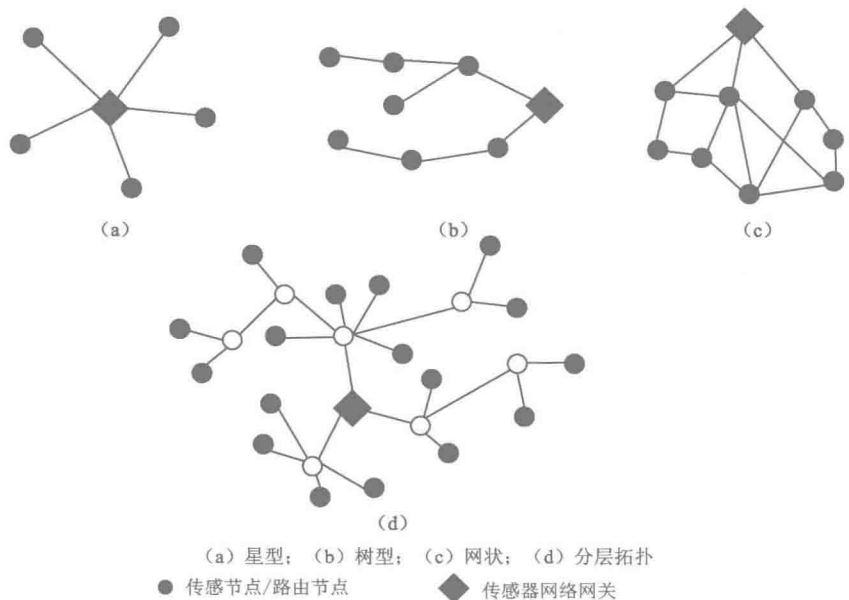


图 1-2 无线传感器网络的体系结构

根据功能，传感器网络可以把节点分成传感器节点、路由节点（亦称簇头节点）和网关（亦称汇聚节点）3 种类型。传感器节点主要是采集周围环境的数据（温度、光度和湿度等），然后进行 A/D 转换，交由处理器处理，最后由通信模块发送到相邻节点，同时该节点也要执行数据转发的功能，即把相邻节点发送过来的数据发送到汇聚节点或离汇聚节点更近的节点；路由节点主要是收集该簇内所有节点采集到的信息，经数据融合后发往网关，或将从网关接收到的信息分发到簇内相应节点；传感器网络的网关是感知数据向网络外部传递的有效设备，其主要功能就是连接传感器网络与外部网络（如 Internet），将传感器节点采集到的数据通过互联网或卫星发送给用户。针对不同应用场景、布设物理环境、节点规模等在感知层内选取合理的网络拓扑和传输方式。其中，传感节点、路由节点和传感器网络网关构成的感知层存在多种拓扑结构，如星型、树型、网状、分层拓扑等，如图 1-3 所示。也可以根据网络规模大小定义层次性的拓扑结构，如图 1-3（d）所示的分层结构。



(a) 星型；(b) 树型；(c) 网状；(d) 分层拓扑
● 传感节点/路由节点 ◆ 传感器网络网关
○ 分层拓扑中层较高的传感节点/路由节点

图 1-3 无线传感器网络的网络拓扑

无线传感器网络的传感器节点应具备体积小、能耗低、无线传输、传感和数据处理等功能，节点设计的好坏直接影响到整个网络的质量。它一般由如图 1-4 所示的传感器模块（传

感器、A/D 转换器)、处理器模块(微处理器、存储器)、无线通信模块(无线收发器)和能量供应模块(电池)等组成。

根据 ISO/IEC JTC1 WG7 (国际标准化组织国际电工委员会联合第一工作组无线传感器工作研究组)制定的无线传感器网络 ISO/IEC 29182 系列标准,传感器网络的参考体系架构如图 1-5 所示。该无线传感器网络的通用架构可以用于传感器网络设计者、软件开发商、系统集成商和服务提供商,以满足客户的要求,包括任何适用的互操作性要求。

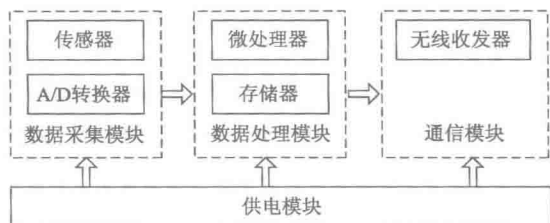


图 1-4 无线传感器网络节点基本结构

由图 1-5 可知,该参考架构分为三层,即感知层、网络层、应用层。

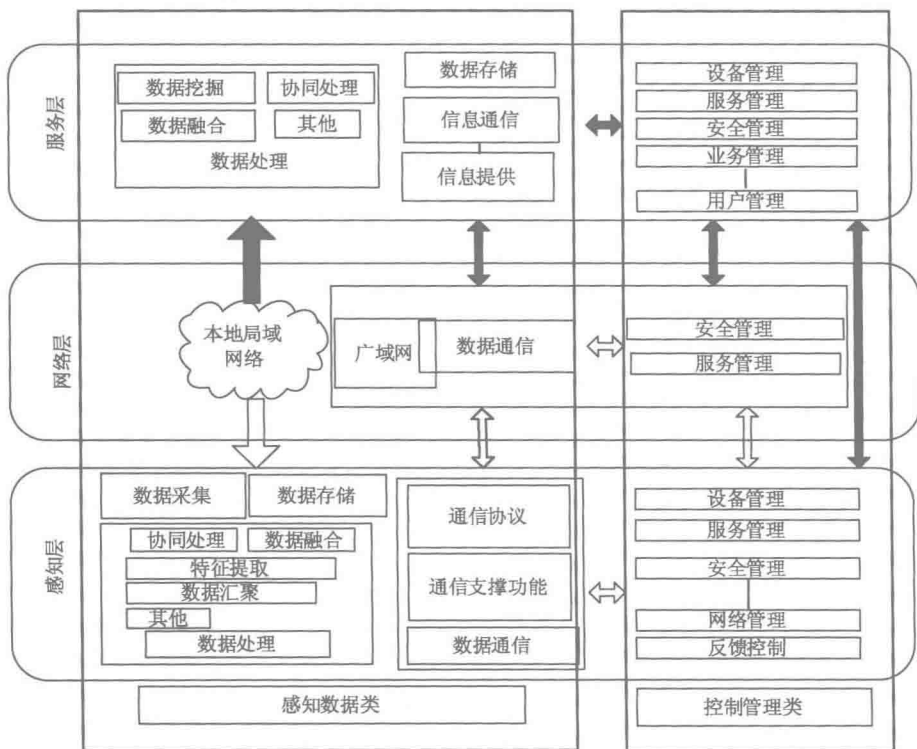


图 1-5 传感器网络的参考体系架构

(1) 感知层

感知层不仅要完成数据采集、处理和汇聚等功能,同时完成传感节点、路由节点和传感器网络网关的通信和控制管理功能,按照功能类别来划分,包含如下功能。

感知数据类: 包括数据采集、数据存储、数据处理和数据通信,数据处理将采集数据经过多种处理方式提取出有用的感知数据。数据处理功能可细分为协同处理、特征提取、数据融合、数据汇聚等。数据通信包括传感节点、路由节点和传感器网络网关等各类设备之间的通信功能,包括通信协议和通信支撑功能。通信协议包括物理层信号收发、接入调度、路由

技术、拓扑控制、应用服务。通信支撑功能包括时间同步和节点定位等。

控制管理类：包括设备管理、安全管理、网络管理、服务管理，反馈控制实现对设备的控制，该项为可选。

(2) 网络层

网络层完成感知数据到应用服务系统的传输，不需要对感知数据处理，包含如下功能。

感知数据类：数据通信体现网络层的核心功能，目标是保证数据无损、高效地传输。它包含该层的通信协议和通信支撑功能。

控制管理类：主要是指现有网络对物联网网关等设备接入和设备认证、设备离开等的管理，包括设备管理和安全管理，这项功能实现需要配合应用层的设备管理和安全管理功能。

(3) 应用层

应用层的功能是利用感知数据为用户提供服务，包含如下功能。

感知数据类：对感知数据进行最后的数据处理，使其满足用户应用，可包含数据存储、数据处理、信息通信、信息提供。数据处理可包含数据挖掘、信息提取、数据融合、数据汇聚等。

控制管理类：对用户及网络各类资源的配置、使用进行管理。可包括服务管理、安全管理、设备管理、用户管理和业务管理。其中，用户管理和业务管理为可选项。

1.4 WSN 的应用前景

美国《技术评论》认为无线传感器网络将是未来改变人们生活方式的十大技术之首、美国《经济周刊》认为传感网是全球未来四大高技术产业之一、美国《每日防务》认为无线传感器网络技术将会在战场上带来革命性的变化，并将改变战争的样式（见图 1-6）。

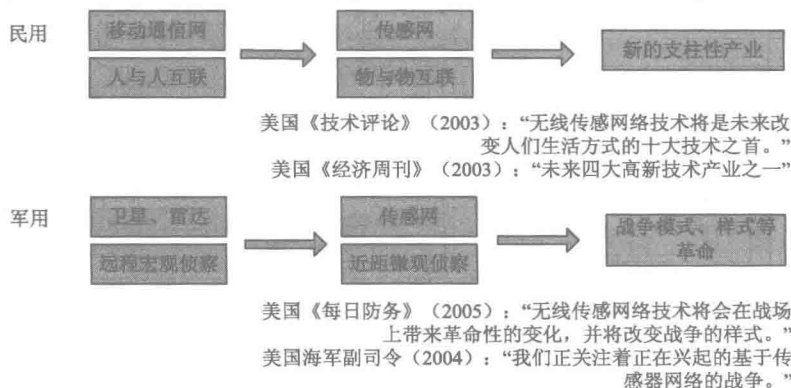


图 1-6 对传感器网络的重要评价

传感网将极大地拓展现有及未来网络的业务领域，美国《福布斯》杂志评论“未来的传感网将比现有的 Internet 大得多”。据 Forrester 等权威机构预测，到 2020 年物物互联业务与现有人人互联业务之比将达到 30:1，下一个万亿级的通信业务将是物物互联。如果说移动通信是人和人的连接，而传感网则连接的是物和物。传感网在军事、民用及工商业领域都具有广阔的应用前景（见图 1-7）。在军事领域，通过无线传感网，可将隐蔽地分布在战场上的传感器获取的信息回传给指挥部；在民用领域，传感网可在家居智能化、环境监测、交通管

理、医疗保健、灾害预测、智能电网等方面得到广泛应用；在工商业领域，传感网在工业自动化、空间探索和其他商业领域都得到了广泛应用。

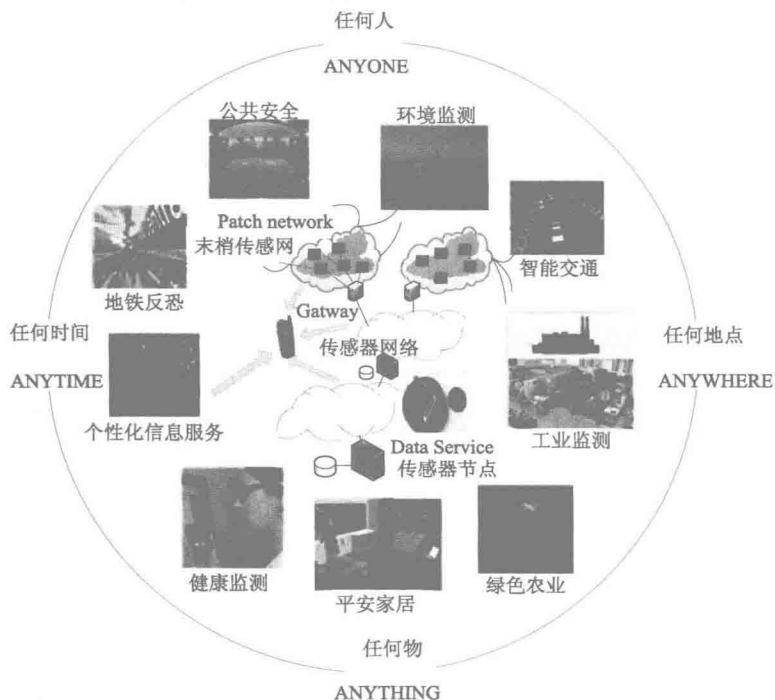


图 1-7 物联网的应用前景示意图

目前，无线传感器网络的典型应用领域包括以下方面。

(1) 在军事应用领域的应用

无线传感器网络具有可快速部署、可自组织、隐蔽性强和高容错性的特点，因此它非常适合在军事领域的应用。无线传感器网络能实现对敌军兵力和装备的监控、战场的实时监视、目标的定位、战场评估、核攻击和生物化学攻击的监测和搜索等功能。通过飞机或炮弹直接将传感器节点播撒到敌方阵地内部，或在公共隔离带部署传感器网络，能非常隐蔽和近距离地准确收集战场信息，迅速地获取有利于作战的信息。传感器网络由大量的、随机分布的节点组成，即使一部分传感器节点被敌方破坏，剩下的节点依然能自组织地形成网络。利用生物和化学传感器，可以准确探测生化武器的成分并及时提供信息，有利于正确防范和实施有效的反击。传感器网络已成为军事系统必不可少的部分，并且受到各国军方的普遍重视。如：美国在 2008~2013 年间部署海军装备协同作战系统 21 套。该系统将海基雷达、机载/舰载目标探测传感器与机载/舰载武器系统组成一个一体化、网络化的作战平台。通过在全系统范围内分发、共享传感器的情报信息和武器的火力部署，可以实现对空目标早期预警、精确定位，并自主地调配处于最佳位置的武器系统实施火力拦截，从而提高整个网络系统的防空作战能力。

(2) 在环境监测与预报中的应用

在环境监测和预报方面，无线传感器网络可用于监视水质状况、空气情况、土壤成分、气象变化、地表变动、雨量大小、森林火灾等环境参数，并预报环境变化趋势。基于无线传