



工业和信息化人才培养规划教材
Industry And Information Technology Training Planning Materials

物联网无线传感器 网络技术与应用 (ZigBee版)

谢金龙 邓人铭 编著



Wireless Sensor
for Internet of Things

“教”“学”“做”一体化互动教学

重构知识体系，突出实践

内容新颖，好学易教



中国工信出版集团



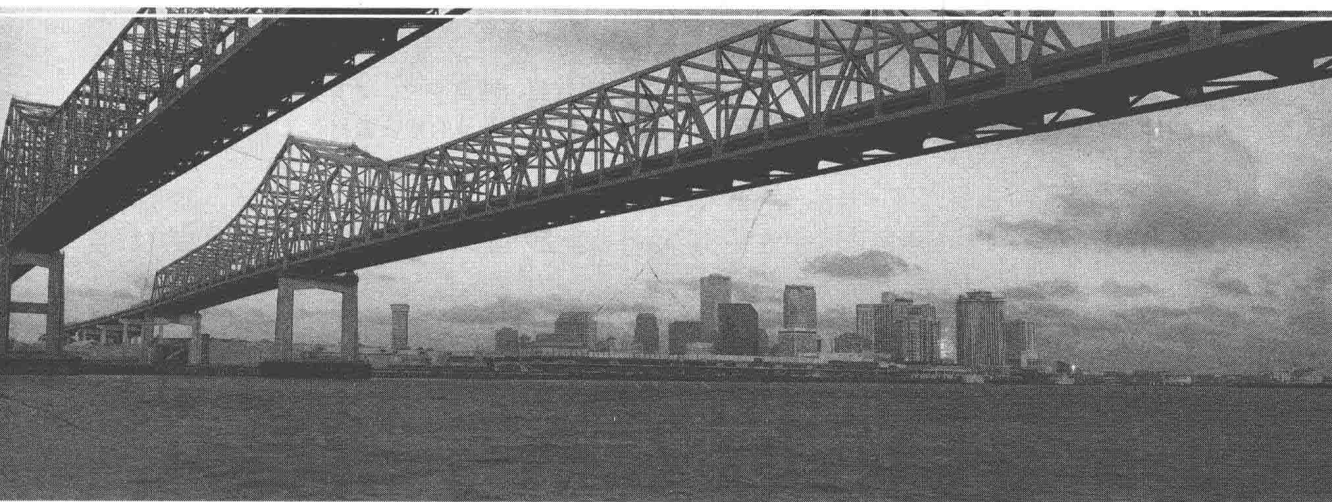
人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



工业和信息化人才培养规划教材
Industry And Information Technology Training Planning Materials

物联网无线传感器 网络技术与应用 (ZigBee版)

谢金龙 邓人铭 编著



Wireless Sensor
for Internet of Things

人民邮电出版社
北京

图书在版编目(CIP)数据

物联网无线传感器网络技术与应用 : ZigBee版 / 谢金龙, 邓人铭编著. — 北京 : 人民邮电出版社, 2016. 4
工业和信息化人才培养规划教材
ISBN 978-7-115-39440-8

I. ①物… II. ①谢… ②邓… III. ①无线网—高等学校—教材 IV. ①TN92

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第273835号

内 容 提 要

本书全面、系统地介绍了 ZigBee 无线传感器网络的基本理论及其相关应用。全书共分为 8 个项目, 内容包括初识 ZigBee 无线传感器网络、ZigBee 无线传感器网络入门、了解 ZigBee 无线传感器网络协议栈、ZigBee 无线传感器网络数据通信、ZigBee 无线传感器网络的管理、网关技术应用、ZigBee 无线传感器网络设计、ZigBee 无线传感器网络测试。

本书可作为高等院校和高职院校的物联网应用技术专业、通信专业、计算机应用专业、网络专业等相关专业的教材, 也可作为物联网领域相关企业工程技术人员的培训教材和工具书。

-
- ◆ 编 著 谢金龙 邓人铭
责任编辑 范博涛
责任印制 张佳莹 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>
大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 17.5 2016 年 4 月第 1 版
字数: 446 千字 2016 年 4 月河北第 1 次印刷
-

定价: 45.00 元

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

反盗版热线: (010)81055315

前言 PREFACE

随着物联网产业的迅猛发展，企业对物联网工程应用型人才的需求越来越大。“全面贴近企业需求，无缝打造专业实用人才”是目前高校物联网应用技术专业教育改革追求的目标。为了实现这一目标，我们坚持以教学改革为中心，以实践教学为重点，不断提高教学质量，突出实际应用的指导思想。本书是教育部高等院校教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目的成果，由高等院校物联网应用技术专业教学改革试点院校和企业联合编写。

关于本课程

ZigBee 无线传感器网络应用是采用工程设计思想，按照需求分析、设备选型、方案设计、方案实施、测试、管理等工作流程进行的。ZigBee 无线传感器网络依据角色分工、组网管理，对收发数据包进行监测和管理。节点可以上传采集信息，协调器下发控制信息，相同的事件节点利用端口进行分类管理，采用默认的网状网（根据需要添加路由设备，默认不添加）进行集中智能管理。其突出基本知识和基本技能培养相结合的要求，内容新颖，适用性强。

关于本书

以往出版的教材大多存在理论过多、缺乏实操等缺点。为实现培养一代“技术技能型”人才的目标，必须重构知识体系，努力加强实践教学，以学生为主体进行教学活动，实行“教”“学”“做”一体化的互动式教学，激发学生的学习兴趣 and 积极性，努力提高学生的基本技能。本教材也是湖南省物联网应用技术专业课程标准及学生技能抽查题库的培训教程。

本书的知识结构如下。



本书的基本技能如下。



如何使用本书

每个项目教学安排如下。

项目名称	学时
项目一 初识 ZigBee 无线传感器网络	6 学时
项目二 ZigBee 无线传感器网络入门	6 学时
项目三 了解 ZigBee 无线传感器网络协议栈	12 学时
项目四 ZigBee 无线传感器网络数据通信	12 学时
项目五 ZigBee 无线传感器网络的管理	12 学时
项目六 网关技术应用	4 学时
项目七 ZigBee 无线传感器网络设计	4 学时
项目八 ZigBee 无线传感器网络测试	4 学时
总学时	60 学时

本书配套资源

本书配套资源包括电子课件、源代码、习题答案、实验指导、习题集等，读者可从人民邮电出版社教学服务与资源网（[http:// www.ptpedu.com.cn](http://www.ptpedu.com.cn)）下载。

本书编写队伍

本书由谢金龙（湖南现代物流职业技术学院）、邓人铭（广东粤嵌通信科技有限公司）编著完成。在此，感谢武献宇、杨立雄、邹志贤、马勇赞（长沙民政职业技术学院）、汪瑛（湖南邮电职业技术学院）等老师为本书的编写提供了帮助。

由于编者水平有限，书中难免存在不妥之处，敬请广大读者批评指正。您的宝贵意见请反馈到邮箱 498073710@qq.com。

编者

2015年10月

目 录 CONTENTS

项目一 初识 ZigBee 无线传感器网络 1

1.1 ZigBee 无线传感网络概述	2	1.4 ZigBee 无线传感器网络拓扑结构	12
1.1.1 ZigBee 无线传感器网络的定义	2	1.5 ZigBee 无线传感器网络面临的	
1.1.2 ZigBee 无线传感器网络的特点	3	技术挑战和发展趋势	14
1.2 ZigBee 无线传感器网络构架	5	1.5.1 ZigBee 无线传感器网络面临的	
1.2.1 ZigBee 无线传感器网络的组成	5	技术挑战	14
1.2.2 ZigBee 无线传感器网络系统结构	7	1.5.2 ZigBee 无线传感器网络的发展趋势	15
1.2.3 ZigBee 无线传感器网络工作流程	8	1.6 ZigBee 无线传感器网络的应用	17
1.3 ZigBee 无线传感器网络的通信		项目小结	18
协议架构	8	主要概念	18
1.3.1 概述	8	实训项目	18
1.3.2 ZigBee 无线网络通信信道分析	9	实训考核	19
1.3.3 ZigBee 的网络号	11	实训参考	21
1.3.4 ZigBee 的地址	11	课后练习	25
1.3.5 ZigBee 的设备类型	11		

项目二 ZigBee 无线传感器网络入门 26

2.1 需求分析	27	2.4 软件应用	43
2.1.1 各层功能简介	27	2.4.1 IAR 的使用	43
2.1.2 最低需求估算	27	2.4.2 协议栈的安装	52
2.2 硬件资源	28	2.4.3 协议栈的移除和增加文件	58
2.2.1 节点芯片选型	28	2.4.4 协议栈的基本操作	59
2.2.2 核心板硬件资源	28	项目小结	62
2.2.3 底板硬件资源	32	主要概念	62
2.3 软件资源	34	实训项目	62
2.3.1 ZigBee 协议栈选型	34	实训考核	63
2.3.2 IAR 集成开发环境的安装	34	实训参考	63
2.3.3 安装仿真器驱动程序	38	课后练习	75
2.3.4 安装物理地址烧写软件	41		

项目三 了解 ZigBee 无线传感器网络协议栈 77

3.1 Z-Stack 协议栈	78	3.2.1 物理层	79
3.1.1 协议与协议栈	78	3.2.2 介质访问控制层	80
3.1.2 使用 Z-Stack 协议栈传输	78	3.2.3 网络层	80
3.2 ZigBee 无线传感器网络功能层简介	79	3.2.4 应用层	83

3.3	OSAL 多任务分配机制	84	3.4.5	事件的捕获	103
3.3.1	OSAL 基础知识	84	3.5	OSAL 应用编程接口	105
3.3.2	OSAL 简介	85	3.6	OSAL 应用编程	107
3.3.3	协议栈软件架构	87		项目小结	109
3.4	OSAL 的运行机制	88		主要概念	110
3.4.1	OSAL 任务启动和初始化	89		实训项目	110
3.4.2	OSAL 任务的执行	92		实训考核	110
3.4.3	OSAL 的事件传递机制	97		实训参考	111
3.4.4	OSAL 添加新任务	98		课后练习	118

项目四 ZigBee 无线传感器网络数据通信 119

4.1	ZigBee 无线数据传输	120	4.4.1	NV 操作函数	153
4.1.1	开发基础	120	4.4.2	NV 基本操作	154
4.1.2	工作流程	125	4.4.3	NV 基础实验	155
4.1.3	数据发送	126	4.4.4	NV 基础实验效果	159
4.1.4	数据接收	128	4.5	组网验证	159
4.2	ZigBee 数据包	135	4.5.1	帧格式介绍	159
4.2.1	ZigBee 数据包的结构	135	4.5.2	组网测试	160
4.2.2	ZigBee 数据传输流程	135		项目小结	160
4.2.3	数据包格式	138		主要概念	160
4.3	利用串口收发数据	140		项目实训	160
4.3.1	串口概述	140		实训考核	161
4.3.2	收发数据的实现方法	140		实训参考	161
4.3.3	协议栈中的串口操作	146		课后练习	169
4.4	非易失性存储器操作	152			

项目五 ZigBee 无线传感器网络的管理 170

5.1	ZigBee 无线传感器网络设备	171	5.3.2	Z-Stack 协议栈的网络管理实验	189
5.1.1	概述	171		项目小结	192
5.1.2	地址分配	171		主要概念	193
5.1.3	地址分配机制	172		实训项目	193
5.1.4	ZigBee 的路由参数	173		实训考核	194
5.2	ZigBee 无线数据通信编程	174		实训参考	195
5.3	Z-Stack 协议栈的网络管理	188		课后练习	203
5.3.1	Z-Stack 协议栈的网络管理概述	188			

项目六 网关技术应用 204

6.1	概述	205	6.2.2	应用网关	206
6.2	网关的分类	205	6.2.3	安全网关	206
6.2.1	协议网关	205	6.3	网关的特点与功能	207

6.3.1 网关的特点	207	项目小结	209
6.3.2 网关的功能	207	主要概念	209
6.4 ZigBee 无线传感器网络网关选型	208	项目实训	209
6.4.1 网关开发板	208	实训考核	210
6.4.2 CC2530 模块	208	实训参考	210
6.4.3 网关协议的转换	209	课后练习	215

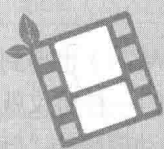
项目七 ZigBee 无线传感器网络设计 216

7.1 ZigBee 无线传感器网络系统设计的基本要求	217	7.4 ZigBee 无线传感器网络软件的设计	230
7.1.1 系统总体设计原则	217	7.4.1 软件架构	231
7.1.2 WSN 路由协议设计要求	217	7.4.2 中间件	232
7.1.3 评价指标体系	218	7.4.3 操作系统	234
7.2 ZigBee 无线传感器网络的安全	218	7.5 无线传感器网络的操作系统	235
7.2.1 传感器网络的安全分析	218	7.5.1 WSN 操作系统概述	235
7.2.2 传感器网络的安全性目标	219	7.5.2 TinyOS 的技术特点	237
7.2.3 传感器网络的安全策略	220	7.5.3 TinyOS 的体系结构	237
7.3 ZigBee 无线传感器网络硬件的设计	222	项目小结	238
7.3.1 传感节点的设计	223	主要概念	238
7.3.2 网关和汇聚节点的设计	225	项目实训	239
7.3.3 典型节点	226	实训考核	239
7.3.4 节点应用选型	230	实训参考	240
		课后练习	247

项目八 ZigBee 无线传感器网络测试 248

8.1 检测技术的基础	249	8.3.1 带宽测试	257
8.1.1 概述	249	8.3.2 频率稳定性测试	258
8.1.2 测试场地	251	8.3.3 功率测试	258
8.1.3 测试设备	253	项目小结	258
8.2 ZigBee 无线传感器网络的测试方法	256	主要概念	259
8.2.1 物理测试	256	项目实训	259
8.2.2 仿真测试	257	实训考核	259
8.3 ZigBee 无线传感器网络常见的测试项目	257	实训参考	260
		课后练习	269

初识 ZigBee 无线传感器网络



本章目标

知识目标

- 理解 ZigBee 无线传感器网络的定义。
- 掌握 ZigBee 无线传感器网络的系统结构。
- 了解 ZigBee 无线传感器网络的特点及应用。
- 掌握 IEEE 802.15.4 与 ZigBee 协议的区别。

技能目标



- 掌握 ZigBee 无线传感器网络的组成及组网实现的方法。
- 掌握 ZigBee 无线传感器网络组网监测软件的使用与分析方法。
- 掌握 ZigBee 无线传感器网络数据包分析的方法。

1.1 ZigBee 无线传感网络概述

1.1.1 ZigBee 无线传感器网络的定义

20 世纪 90 年代末,随着微电子技术、无线通信技术与计算机技术的快速发展,无线网络得到了快速的发展,用于无线个人区域网范围的短距离无线通信技术标准也得到了迅速的发展,典型技术标准有 Wi-Fi (IEEE 802.11b/g)、无线 USB (Wireless USB)、蓝牙 (Bluetooth)、超低功耗蓝牙无线技术 (Wibree)、红外无线技术等数据传输协议标准。不同的协议标准对应不同的应用领域。其中, Wi-Fi 主要用于大量数据的传输, Wireless USB 主要用于视频数据的传输, Bluetooth 主要用于少量设备的短距离数据交换。

随着物联网应用技术的发展,无线传感器网络 (Wireless Sensor Networks, WSN) 也得到了相应的发展。无线传感器网络协议标准日渐规范,其中得到广泛应用和推广的一种协议就是 ZigBee 2007 协议 (紫蜂协议)——蜜蜂 (bee) 是靠飞翔和“嗡嗡” (zig) 地抖动翅膀的“舞蹈”来与同伴传递花粉所在的方位信息,也就是说蜜蜂依靠这样的方式构成了群体中的通信网络)。它主要适合用于自动控制和远程控制领域,可以嵌入各种设备。德州公司 (Texas Instruments, TI) 公司已经推出了完全兼容该协议的片上系统 (System on Chip, SoC) 芯片 CC2530,同时也开发了相关的软件协议栈 Z-Stack。开发者可以利用上述硬件和软件资源,搭建自己的无线传感器网络。

如图 1.1 所示, ZigBee 无线传感器网络综合了传感器技术、RFID 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进行实时监测、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、计算机世界和现实世界的连通。与传统的互联网不同, ZigBee 无线传感器网络实现了信息采集、信息处理和信息传输等功能,改变了人类与物理世界交互的方式。

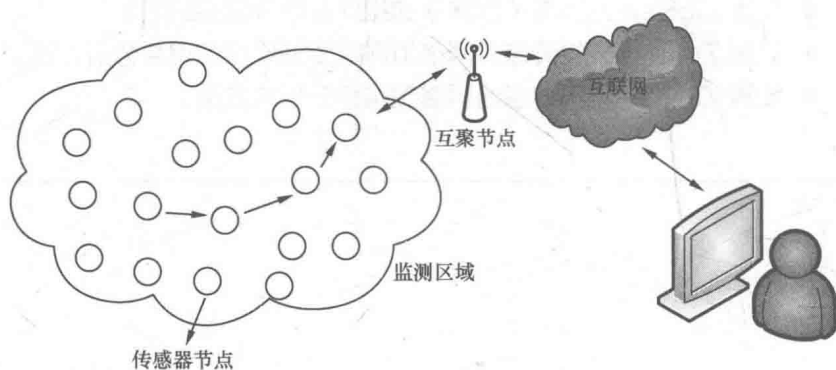


图 1.1 ZigBee 无线传感器网络示意图

目前,国内外可提供 ZigBee 解决方案的公司有 TI、Jennic、ST、Atmel 等。其中, TI 公司提供的方案最全,新出的有 CC2530、CC2538 等无线节点; Atmel 公司生产的基于 ARM 内核的 MC13244 能够在低功耗的情况下输出更大的功率。表 1.1 列出了目前国内外 5 大 ZigBee 芯片厂商、代表型号以及协议栈名称。

表 1.1 国内外 ZigBee 芯片厂商、代表型号以及协议栈名称

公 司	产品型号	类 型	内 核	协 议 栈
Silicon Lab (Ember)	Em35x	SoC	m3	EmberZnet
TI (Chipcon)	CC2430 CC2530 CC2538	SoC	8051 CC2420 CC2520	Z-Stack
Atmel	ATmega256	SoC	AVR8	BitCloud
Jennic (NXP)	JN5184	SoC	32bit	Stack
Freescale	MC13224V KV20	SoC	ARM7	BeeStack

美国《商业周刊》在 1999 年将 ZigBee 无线传感器网络列为 21 世纪最有影响的 21 项技术之一。2003 年, MIT《技术评论》(麻省理工科技评论杂志)在对 10 大新兴技术的评价中,将传感器网络列为改变世界的 10 大技术之一。美国军方于 20 世纪 90 年代率先开展了对 ZigBee 无线传感器网络的研究,用于提高战场实时监控与作战反应能力。WINS、SmartDust 与 SensIT 等都是其早期著名的研究项目。随后,在美国国家自然科学基金委的推动下,美国多所著名大学,如哈佛大学、加州大学伯克利分校与弗吉尼亚大学等,展开了对 ZigBee 无线传感器网络更加深入广泛的研究。至此, ZigBee 无线传感器网络不再仅仅应用于军事领域,也被逐渐应用于民用领域。此后,世界各国纷纷加大了在 ZigBee 无线传感器网络方面的科研投入。

在我国, ZigBee 无线传感器网络也得到高度重视并迅速发展。清华大学的任丰原教授等人率先开展了对 ZigBee 无线传感器网络的研究,并发表了第一篇中文 ZigBee 无线传感器网络的综述,揭开了我国 ZigBee 无线传感器网络研究的序幕。中国科学院信息工程研究所的孙利民教授编纂了《ZigBee 无线传感器网络》一书,详细介绍了 ZigBee 无线传感器网络的研究现状,为国内众多研究者提供了宝贵的学习资料。我国政府在 2006 年将传感器网络技术列进未来 15 年的《国家中长期科学和技术发展规划纲要》,标志着 ZigBee 无线传感器网络研究的兴起。2009 年,温家宝总理将传感器网络和物联网列为我国 5 大新兴战略性产业。物联网是在传感器网络技术上发展的物物相连的网络。为落实国家对发展物联网技术与产业的发展规划,2009 年无锡市建立了无锡物联网研究基地,正式标志着传感器网络进入标准化和产业化阶段。ZigBee 无线传感器网络正随着科技的创新而快速发展,并逐渐渗透到人类生活的方方面面。

1.1.2 ZigBee 无线传感器网络的特点

与其他无线通信协议相比, ZigBee 无线传感器网络具有协议复杂程序低、资源要求少等特点,具体如下。

1. 低功耗

低功耗是 ZigBee 的一个显著特点。由于工作周期较短、收发信息功耗低且采用了休眠的工作模式,可以确保 2 节 5 号电池支持长达 6 个月到 2 年的使用时间。由于不同应用具有不同的功耗,因此具体的使用时间还受具体应用场合的影响。

2. 低成本

协议简单且所需的存储空间小,这极大地降低了 ZigBee 的成本。每块芯片价格仅 2~5

美元,而且 ZigBee 协议是免专利费。

3. 时延短

ZigBee 无线传感器网络的通信时延和从休眠状态激活的时延都非常短。设备搜索时延为 30ms,休眠时延为 15ms,活动设备信道接入时延为 15ms。这样,一方面节省了能量消耗,另一方面更适用于对时延敏感的场所。例如,一些应用在工业上的传感器就需要以毫秒的速度获取信息,以及安装在厨房内的烟雾探测器也需要在尽量短的时间内获取信息并传输给网络控制者,从而阻止火灾的发生。

4. 数据传输速率低

ZigBee 无线传感器网络的数据传输速率为 10~250kbit/s,专注低传输应用,数据传输可靠性高;采用碰撞避免机制,同时为需要固定带宽的通信业务预留了专用时隙,避免了发送数据时的竞争和冲突。介质访问控制层(Media Access Control, MAC)采用了完全确认的数据传输机制,发送的数据包都必须等待接收方的确认信息。

5. 网络容量大

一个 ZigBee 设备可以与 254 个设备相连接,一个 ZigBee 网络可以容纳 65 536 个从设备和一个主设备,一个区域内可以同时存在 100 个 ZigBee 网络。网络有星状、树状和网状网络结构。在有节点加入和撤出时,网络具有自动修复功能。

6. 有效范围小

ZigBee 无线传感器网络的有效覆盖范围在 10~200m,具体根据实际发射功率的大小和应用模式而定。

7. 工作频段灵活

ZigBee 无线传感器网络的工作频段为 2.4GHz(全球)、868MHz(欧洲)和 915MHz(美国),均为免执照频段。

8. 兼容性好

ZigBee 无线传感器网络与现有的控制网络标准无缝集成;通过网络协调器(Coordinator)自动建立网络,采用 CSMA-CA 方式进行信道存取;为了传递的可靠性,提供全握手协议。

9. 安全性高

ZigBee 提供了数据完整性检查和鉴权功能,加密算法采用 AES-128,同时各个应用可以灵活确定其安全属性。

10. 协议套件紧凑而简单

ZigBee 具体实现的要求很低。ZigBee 套件需要 8 位微处理器,如 80C51;全协议套件需要 32KB 的 ROM;最小协议套件需要大约 4KB 的 ROM。

表 1.2 为 ZigBee 技术与其他几种常见的短距离无线通信技术之间参数的比较。通过比较不难发现,ZigBee 技术在网络容量、功耗及成本等方面有着明显的优势。

表 1.2 ZigBee 技术与其他几种常见的短距离无线通信技术之间参数的比较

参 数	Wi-Fi	Bluetooth	ZigBee	IrDA
无线电频段	2.4GHz 射频	2.4GHz 射频	2.4GHz/868MHz/915MHz 射频	980nm 红外
传输速率 (bit/s)	1~54M	1~24M	20~250k	4~16M
传输距离(m)	100	10	10~75	定向 1

参 数	Wi-Fi	Bluetooth	ZigBee	IrDA
网络节点(个)	32	8	255 /65 535	2
功耗	高	较低	最低	很低
芯片成本	20 美元	4 美元	2 美元	2 美元以下

1.2 ZigBee 无线传感器网络构架

1.2.1 ZigBee 无线传感器网络的组成

ZigBee 无线传感器网络是由 PC、网关部分、路由节点部分和传感器节点部分 4 部分组成的,如图 1.2 所示。用户可以很方便地实现传感器网络无线化、网络化、规模化的演示、教学、观测和再次开发。

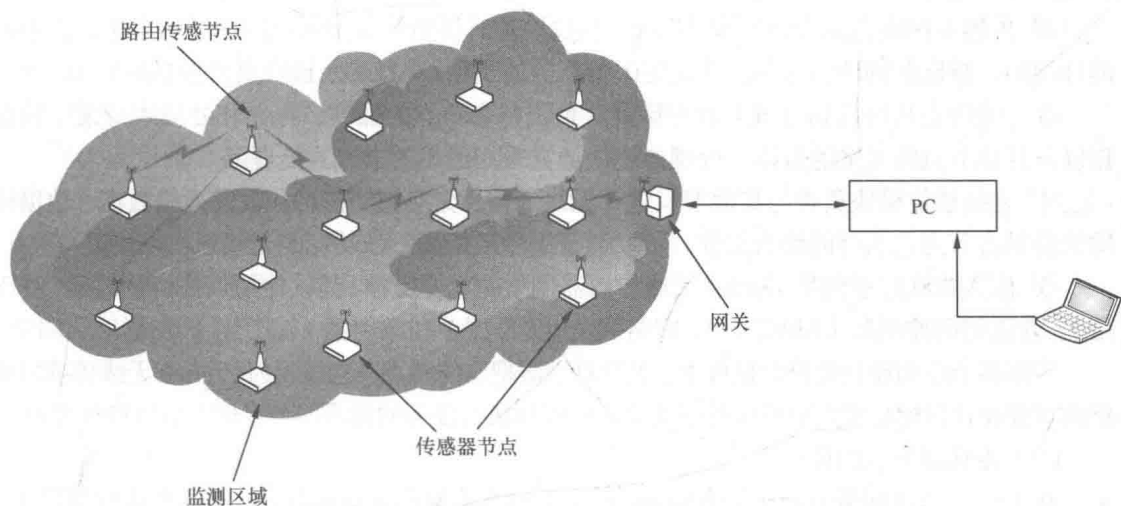


图 1.2 ZigBee 无线传感器网络组成示意图

1. PC (数据管理中心)

PC 直接面向用户,它负责从网络中获取所需要的信息,同时也可以对网络做出各种各样的指示、应用支撑技术操作等。

2. 网关

网关被用于连接传感器网络、互联网等外部网络,各方面能力相对于传感器节点来说较强,可实现几种通信协议之间的转换;同时发布管理节点的监测任务,并把收集的数据转发到外部网络。汇聚节点可以是一个具有增强功能的传感器节点(如协调器),有足够的能量和更多的内存与计算机资源;也可以是没有监测功能仅带有无线通信接口的特殊网关设备。

3. 路由节点

路由节点主要实现路径选择和数据转发功能。

4. 传感器节点

(1) 传感器节点的组成

传感器节点负责监测区域内数据的采集和处理。一般的传感器节点主要由能量供应模块、传感器模块、处理器模块、无线通信模块和嵌入式软件系统 5 部分组成。传感器节点的结构

如图 1.3 所示。

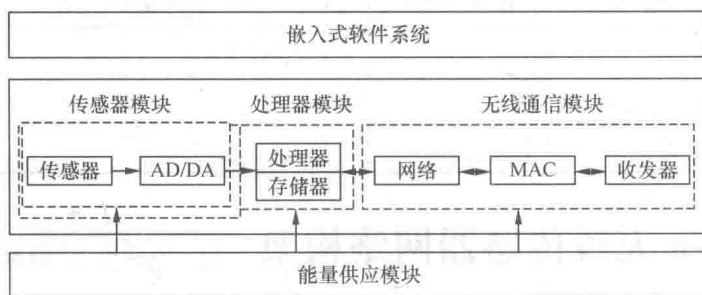


图 1.3 传感器节点的结构示意图

传感器节点各组成部分的作用如下。

① 能量供应模块为传感器节点的其他模块提供运行所需要的能量，可以采取多种灵活的供电方式，通常采用微型电池。

② 传感器模块包括传感器和 AD/DA 模块。传感器负责监测区域内信息的采集，在不同的环境中，被监测物理信号的形式决定了传感器的类型。AD/DA 模块负责数据的转换。

③ 处理器模块包括处理器和存储器，负责整个节点的操作、存储和处理本身采集的数据以及其他节点转发来的数据。处理器模块通常采用通用的嵌入式处理器。

④ 无线通信模块负责与其他节点进行无线通信、交换控制信息和收发采集数据。数据传输的能量占节点总能耗的绝大部分，所以通常采用短距离、低功耗的无线通信模块。

⑤ 嵌入式软件系统是 ZigBee 无线传感器网络的重要支撑，其软件协议栈由物理层（PHY 层）、介质访问控制层（MAC 层）、网络层（NWK 层）和应用层（APL 层）组成。

传感器节点的设计要符合低成本、低功耗、微型化的特点，这是因为 ZigBee 无线传感器网络的重要设计目标是将大量可长时间监测、处理和执行任务的传感器节点嵌入到物理世界中。

（2）传感器节点的设计

在无线传感器网络中，节点在不同的状态下具有不同的能量消耗，传感器节点共有以下 6 种工作状态。

- ① 睡眠状态：传感器模块关闭，通信模块关闭，能量消耗最低。
- ② 感知状态：传感器模块开启，通信模块关闭，节点感知事件发生。
- ③ 侦听状态：传感器模块开启，通信模块空闲。
- ④ 接收状态：传感器模块开启，通信模块接收。
- ⑤ 发送状态：传感器模块开启，通信模块发送。
- ⑥ 长期睡眠状态：表示该节点能量处于阈值，不响应任何事件。

无线传感器网络的一个重要优势是摆脱了传统网络的连线限制和成本问题。但是如果没有合适的无线电源，这一优势就无法体现出来，因此电源效率是设计考虑的关键因素。因为如果必须时常更换电池，那么相关的劳动力成本便会远远超过它相对有线网络节省的成本。因此，电池必须具有较长的寿命。此外，减小节点尺寸也是在传感器网络设计时必须考虑的设计因素。

传感器节点能量是通过电池供应的。节点能源有限，应考虑尽可能地延长整个传感器网络的生命周期。在设计传感器节点时，保证能量供应的持续性是一个重要的设计原则。传感器节点的能量消耗主要包括传感器模块、信息处理模块和无线通信模块，而绝大部分的能量

消耗集中在无线通信模块上，约占整个传感器节点能量消耗的 80%。因此，传感器节点设计应围绕低功耗进行。

(3) 节点限制

传感器节点具有的处理能力、存储能力、通信能力和电源能力都十分有限，所以传感器节点在实现各种网络协议和应用控制中存在以下约束条件。

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、成本低、分布区域广、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池的方式来补充能源是不现实的。

传感器的能耗模块包括传感器模块、处理器模块和无线通信模块。随着电路工艺的进步，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。

无线通信模块存在发送、接收、空闲和休眠 4 种状态。无线通信模块在空闲状态一直监听无线信息的使用情况，检查是否有数据发送给自己，而在休眠状态则关闭通信模块。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，比发送状态的能量消耗少一些；在休眠状态的能量消耗是最小的。所以，在设计 ZigBee 无线传感器网络系统时，如何让网络通信更有效率，减少不必要的转发和接收，在不需要通信时传感器节点尽快进入休眠状态，是传感器网络协议设计需要重点考虑的问题。

② 通信能力有限。随着通信距离的增加，无线通信的能量消耗急剧增加。因此，在满足通信连通度的前提下，应尽量减少单跳（即一跳）的通信距离。考虑到传感器节点的能量限制和网络覆盖区域大，ZigBee 无线传感器网络采用多跳的传输机制。

③ 计算和存储能力有限。传感器节点通常是一个微型的嵌入式系统，它的处理能力、存储能力和通信能力相对较弱。每个传感器节点兼顾传统网络的终端和路由器双重功能。为了完成各种任务，传感器节点需要完成监测数据的采集和转换、数据管理和处理、应答汇聚节点的任务请求和节点控制等多种工作。如何利用有限的计算和存储完成诸多协同任务成为传感器网络协议设计的挑战。

1.2.2 ZigBee 无线传感器网络系统结构

ZigBee 无线传感器网络根据不同的情况可以由一个网关、一个或多个路由器、一个或多个传感器节点组成。系统大小只受 PC 软件观测数量、路由深度和网络最大负载量限制。ZigBee 2007 无线传感器网络在没有进行网络拓扑修改之前支持 5 级路由、31 101 个网络节点。传感器网络系统结构如图 1.4 所示。

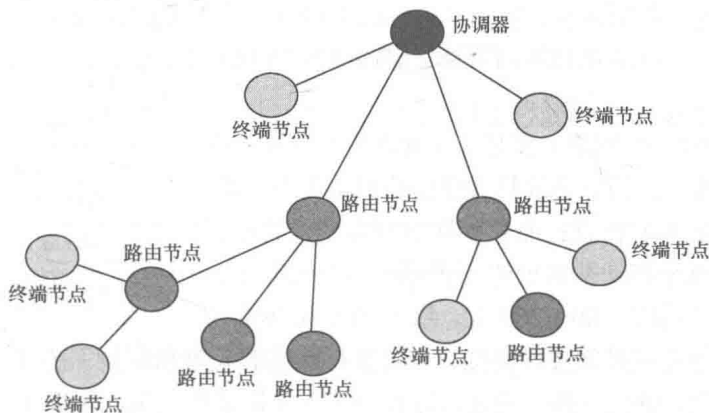


图 1.4 ZigBee 无线传感器网络系统结构示意图

1.2.3 ZigBee 无线传感器网络工作流程

ZigBee 无线传感器网络基于 ZigBee 协议栈无线网络，在网络设备安装过程、架设过程中自动完成。完成网络的架设后用户便可以由 PC、ARM 终端，平板电脑或者手持设备发出命令读取网络中任何设备上挂接的传感器的数据，以及测试其电压。简单的工作流程描述如图 1.5 所示。

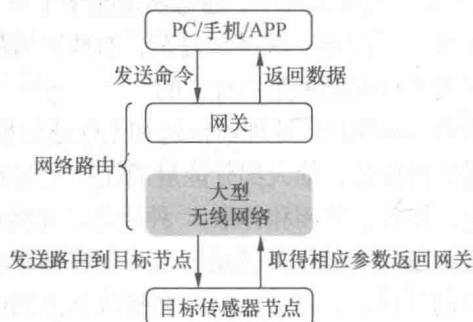


图 1.5 ZigBee 无线传感器网络工作流程示意图

1.3 ZigBee 无线传感器网络的通信协议架构

1.3.1 概述

ZigBee 以 IEEE 802.15.4 协议为基础，使用全球免费频段进行通信。传输速率分别为 250kbps、20kbps 和 40kbps。IEEE 802.15.4 工作组主要负责制定 PHY 层和 MAC 层的协议，其余协议主要参照和采用现有的标准，高层应用、测试和市场推广等方面的工作将由 ZigBee 联盟负责。ZigBee 联盟成立于 2002 年 8 月，由英国 Invensys 公司、日本三菱电气公司、美国摩托罗拉公司以及荷兰飞利浦半导体公司组成，如今已经吸引了 200 多家芯片公司、无线设备公司及开发商加入。ZigBee 是一个由可多到 65 000 个无线数传模块组成的一个无线数传网络平台，十分类似于现有的移动通信的 CDMA 网或 GSM 网，每一个 ZigBee 网络数传模块类似于移动网络的一个基站，在整个网络范围内，它们之间可以相互通信；每个网络节点间的距离可以从标准的 75m，到扩展后的几百米，甚至几千米；另外，整个 ZigBee 网络不仅可以无限扩展，而且还可以与现有的各种网络进行连接。

IEEE 802.15.4 描述了低速率无线个人局域网（Wireless Personal Area Network, WPAN）的物理层和媒体接入控制协议，属于 IEEE 802.15.4 工作组。ZigBee 技术是基于 IEEE 802.15.4 标准的无线技术，IEEE 802.15.4 只负责 ZigBee 的物理层和 MAC 层，ZigBee 网络协议架构分层如图 1.6 所示。

不同的是，ZigBee 网络主要是为工业现场自动化控制数据传输而建立的，因而它必须具有操作简单、使用方便、工作可靠、价格低廉的特点；而移动通信网主要是为语音通信而建立的。每个移动基站价值一般都在百万元以上，而每个 ZigBee 基站仅需 100~200 元。每个 ZigBee 网络节点不仅本身可以与监控对象进行连接，直接进行数据的采集和监控，还可以自动中转别的网络节点采集的数据；除此以外，它还可以在自己信号覆盖的范围内和多个不承担网络信息中转任务的孤立的子节点无线连接。



图 1.6 ZigBee 网络协议架构分层

每个 ZigBee 网络节点可以支持 255 个传感器和受控设备，每一个传感器和受控设备都可以有 8 种不同的接口方式，可以采集和传输数字量和模拟量。

1.3.2 ZigBee 无线网络通信信道分析

各个国家都有自己的无线电管理结构，如美国的联邦通信委员会（Federal Communications Commission, FCC）、欧洲的电信标准协会（European Telecommunications Standards Institute, ETSI）等。我国的无线电管理机构是中国无线电管理委员会，其主要负责无线电频率的划分、分配与指配，卫星轨道位置的协调和管理，无线电监测、检测、干扰的查处，协调处理电磁干扰事宜和维护空中电波秩序等。中国无线电管理机构对频段的划分及其主要用途如表 1.3 所示。

表 1.3 频段的划分及其主要用途

频段	符号	频率	波段	波长	传播特性	主要用途
甚低频	VLF	3~30kHz	超长波	10~101km	空间波	对潜通信
低频	LF	30~300kHz	长波	1~10km	地波	对潜通信
中频	MF	0.3~3MHz	中波	100~1000m	地波与天波	通用业务、无线电广播
高频	HF	3~30MHz	短波	10~100m	天波与地波	远距离短波通信
甚高频	VHF	30~300MHz	米波	1~10m	空间波	空间飞行器通信
超高频	UHF	0.3~3GHz	分米波	0.1~1m	空间波	微波通信
特高频	SHF	3~30GHz	厘米波	1~10cm	空间波	卫星通信
极高频	EHF	30~300GHz	毫米波	1~10mm	空间波	波导通信

IEEE 802.15.4 工作在工业科学医疗（Industrial、Scientific and Medical, ISM）频段，即 2.4GHz 频段和 868/915MHz 频段。在 IEEE 802.15.4 中，总共分配了 27 个具有 3 种速率的信息。

在 2.4GHz 频段，共有 16 个信道，信道通信速率为 250kbit/s。

在 915MHz 频段，共有 10 个信道，信道通信速率为 40kbit/s。

在 868MHz 频段，共有 1 个信道，信道通信速率为 20kbit/s。

ZigBee 无线传感器网络系统统一使用 2.4GHz 频段，这些信息的中心频段按表 1.4 所示的定义（ k 为信道数）进行分配。

表 1.4 ZigBee 无线传感器网络信道分布

信道编号	中心频率	信道间隔	频率上限	频率下限
$k=0$	868.3		868.6	868.0
$k=1, 2, 3, \dots, 10$	$906+2(k-1)$	2	9 028.0	902.0
$k=11, 12, 13$	$2 401+5(k-11)$	5	2 483.5	2 400.0

ISM 频段分布示意如图 1.7 所示。

一个 IEEE 802.15.4 可以根据 ISM 频段、可用性、拥挤状况和数据速率在 27 个信道中选择一个工作信道。从能量和成本效率来看，不同的数据速率能为不同的应用提供较好的选择。例如，对于有些计算机外围设备与互动式玩具，可能需要 250kbit/s 的速率，而对于其他许多