

第3章

ZigBee 通信技术

CHAPTER 3

教学提示

ZigBee 是一种短距离、低功耗、低速率、低成本、低复杂度的无线通信技术,是一种介于无线标记技术和蓝牙技术之间的解决方案。ZigBee 技术以 IEEE 802.15.4 协议为基础,在 IEEE 的物理层和数据链路层协议基础上,对其网络层和应用层协议重新进行了定义,形成了自己的无线电标准。应用 ZigBee 技术能够在数千个微小的传感器之间相互协调实现通信,主要适用于自动控制和远程控制等领域。

学习目标

- 了解 ZigBee 技术的形成及发展。
- 了解 ZigBee 网络的应用领域。
- 掌握 ZigBee 通信技术的相关概念和原理。
- 掌握 ZigBee 网络的组建流程。
- 能够应用 ZigBee 技术实现简单物联网的组建。

知识结构

本章的知识结构如图 3.1 所示。

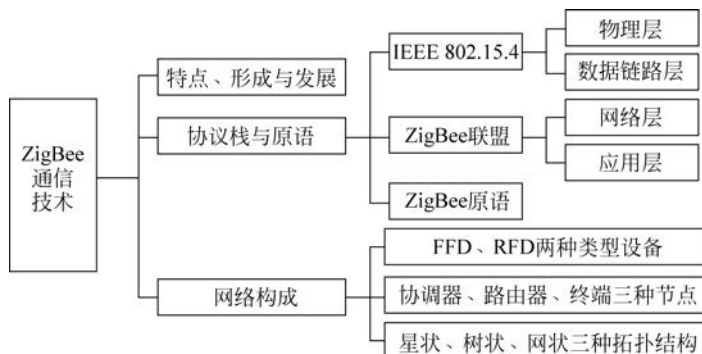


图 3.1 本章知识结构图



图 3.1 (续)

3.1 ZigBee 技术概述

ZigBee 是基于 IEEE 802.15.4 标准的低功耗局域网协议,是一种近距离、低复杂度、低功耗、低速率、低成本的双向无线通信技术。ZigBee 技术主要用于距离短、功耗低且传输速率不高的各种电子设备之间进行数据传输以及典型的周期性数据、间歇性数据和低反应时间数据的传输应用。

3.1.1 ZigBee 技术的形成、发展

1. ZigBee 技术的形成

ZigBee 名称的由来与蜜蜂相关,蜜蜂在发现花丛后会通过一种特殊的肢体语言来告知同伴新发现的食物源的位置等信息,这种肢体语言就是之字形舞蹈,英文名称为 Zig-Zag,是蜜蜂之间一种简单的传达信息方式。在通信技术领域,借此寓意用 ZigBee 来命名新一代无线通信技术,ZigBee 技术的标志性图标如图 3.2 所示。



图 3.2 ZigBee 图标

那么到底什么是 ZigBee 技术? ZigBee 是一种开放式的基于 IEEE 802.15.4 协议的无线个人局域网标准。IEEE 802.15.4 标准定义了 ZigBee 协议栈的物理层和数据链路层,而 ZigBee 联盟则定义了网络层及应用层。简单而言,ZigBee 是一种无线自组网技术标准,ZigBee 技术有自己的无线电标准,在数千个微小的传感器之间相互协调实现网络通信。这些传感器只需要很低的功耗,以接力的方式通过无线电波将数据从一个传感器传到另一个传感器,因此它们的通信效率非常高。

ZigBee 联盟是一个非营利物联网产业标准化国际组织,联盟的目的在于制定一个基于 IEEE 802.15.4、可靠的、高性价比的、低功耗的 ZigBee 网络应用技术。生产商可以利用 ZigBee 标准化无线网络平台设计简单、可靠、便宜又省电的各种无线产品。ZigBee 联盟的成员包括:国际著名半导体生产商、技术提供者、代工生产商以及最终使用者。ZigBee 联盟成立于 2002 年,是一个非营利物联网产业标准化国际组织,ZigBee 联盟的目的在于制定一个基于 IEEE 802.15.4、可靠的、高性价比的、低功耗的 ZigBee 网络应用技术。生产商可以利用 ZigBee 标准化无线网络平台设计简单、可靠、便宜又省电的各种无线产品。ZigBee 联盟的成员包括:国际著名半导体生产商、技术提供者、代工生产商以及最终使用者。2021 年,ZigBee 联盟更名为 CSA 连接标准联盟,作为处于物联网行业发展中心的领先组织,CSA 连接标准联盟的全球影响力不断增长,其成员遍布 37 个国家/地区,联盟成员数量超过 350 家,图 3.3 所示为 ZigBee 联盟的部分成员。



图 3.3 ZigBee 联盟的部分成员

2. ZigBee 技术的发展

ZigBee 是以 IEEE 802.15.4 标准为基础发展起来的无线通信技术。在 ZigBee 技术的发展过程中经历了几个重要的发展阶段,如表 3.1 所示。

表 3.1 ZigBee 技术的发展历程

时 间	事 件
2000 年 12 月	成立工作小组起草 IEEE 802.15.4 标准
2001 年 8 月	ZigBee 联盟成立
2004 年 12 月	ZigBee 1.0 标准敲定(又称 ZigBee 2004)
2005 年 9 月	公布 ZigBee 1.0 标准并提供下载
2006 年 12 月	进行标准修订,推出 ZigBee 1.1 版(又称 ZigBee 2006)
2007 年 10 月	ZigBee 标准完成再次修订(又称 ZigBee 2007/Pro)
2009 年 3 月	ZigBee RF4CE 推出,具备更强的灵活性和远程控制能力

ZigBee 的前身是 1998 年由 Intel 公司、IBM 公司等产业巨头发起的 HomeRF 技术,在 2000 年 12 月成立了工作小组起草 IEEE 802.15.4 标准。2001 年 8 月,ZigBee 联盟成立,在 2002 年下半年,英国英维思公司、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四大巨头共同宣布加盟“ZigBee 联盟”,研发名称为 ZigBee 的下一代无线通信标准,这一事件成为该项技术发展过程中的里程碑。

2004 年 12 月,ZigBee 1.0 标准敲定,这使 ZigBee 有了自己的发展基本标准。2005 年 9 月,ZigBee 1.0 标准公布并提供下载,在这一年里,华为技术有限公司和 IBM 公司加入了 ZigBee 联盟。虽然基于 ZigBee 1.0 标准的应用很少,而且该版本与后续的其他版本也不兼容,但其仍是 ZigBee 技术发展中的标志事件。2006 年 12 月推出了 ZigBee 1.1 版本,对原有 ZigBee 1.0 版本进行了若干修改,例如,新增 ZCL(ZigBee 簇群库)、群化式装置、多播功效、直接透过无线方式进行组态配置等。

2007 年 10 月,ZigBee 标准完成再次修订,推出 ZigBee Pro Feature Set(简称 ZigBee Pro)新标准,新标准能够兼容之前的 ZigBee 2006 版本。此时 ZigBee 联盟更加专注于家庭自动化、建筑/商业大楼自动化、先进抄表基础建设三方面。2009 年 3 月,ZigBee 又推出 RF4CE 标准,采用了 IETF 的 IPv6 6Lowpan 作为新一代智能电网的标准,致力于形成全球统一的易于与互联网集成的网络,实现端到端的网络通信。

3.1.2 ZigBee 技术的特点

与同类通信技术相比,ZigBee 技术具备如下特点。

1. 数据传输率低

ZigBee 网络的数据传输率在 20~250kb/s。比如,在频率为 2.4GHz 的波段,其数据传输率为 250kb/s,在频率为 915MHz 的波段,其数据传输率为 40kb/s,而在频率为 868MHz 的波段,其数据传输率则为 20kb/s。

2. 网络容量大

ZigBee 网络中一个主节点最多可管理 254 个子节点,同时主节点还可由上一层网络节点管理,最多可组成 65 000 个节点的大网。例如,一个星状结构的 ZigBee 网络最多可以容纳 254 个从设备和一个主设备,一个区域内可以同时存在最多 100 个 ZigBee 网络,而且网络组成灵活。

3. 成本低、功耗低

早期的 ZigBee 模块初始成本在 6 美元左右,目前已经降到 1.5~2.5 美元,并且 ZigBee 协议免专利费。由于 ZigBee 的传输速率低,其发射功率仅为 1mW,而且又采用了休眠模式使其具有较低功耗,因此 ZigBee 设备非常省电。据估算,ZigBee 设备仅靠两节 5 号电池就可以维持长达 6 个月到 2 年左右的使用时间,这是其他无线设备望尘莫及的。

4. 安全、可靠

ZigBee 网络提供了基于循环冗余校验的数据包完整性检查功能,支持鉴权和认证,并采用了 AES-128 的加密算法。ZigBee 网络采取了碰撞避免策略,同时为需要固定带宽的通信业务预留了专用时隙,避免了发送数据的竞争和冲突。此外,ZigBee 技术还采用了完全确认的数据传输模式,每个发送的数据包都必须等待接收方的确认信息,如果传输过程中出现问题,可以进行重发。

5. 网络速度快、时延短

ZigBee 网络的通信时延以及从休眠状态激活的时延都非常短,典型的搜索设备时延 30ms,休眠激活的时延是 15ms,活动设备信道接入的时延为 15ms。因此 ZigBee 技术适用于对时延要求苛刻的无线控制应用。

3.1.3 ZigBee 技术的应用

ZigBee 作为一种新兴的近距离无线网络技术,有效弥补了低成本、低功耗和低速率无线通信市场的空缺,其成功的关键在于丰富而便捷的应用,而不是技术本身。

1. ZigBee 技术的适用条件

ZigBee 技术适合于承载数据流量较小的业务,能为低能耗的简单设备提供有效覆盖范围在 10m 左右的低速连接。通常符合下述条件之一的应用就可以考虑采用 ZigBee 技术。

(1) 若需组建的网络中设备成本很低,而且要传输的数据量很小,则使用 ZigBee 技术可以实现。

(2) 若需组建的网络中设备体积很小,不方便放置较大的充电电池或者电源模块,则使用 ZigBee 技术可以实现。

(3) 若需组建的网络中没有充足的电源支持,只能使用一次性电池,则可以考虑使用 ZigBee 技术。

(4) 若组建的网络主要用于监测或控制,且通信覆盖范围较大,则可以使用 ZigBee 技术实现。

(5) 若网络中的设备需要频繁地更换电池或者反复充电,无法做到或者很困难,则可以考虑使用 ZigBee 技术。

2. ZigBee 技术的应用领域

ZigBee 技术具有强大的组网能力,使用 ZigBee 技术可以组建低速率传输的无线短距离网络,具有非常广泛的应用领域,如图 3.4 所示。

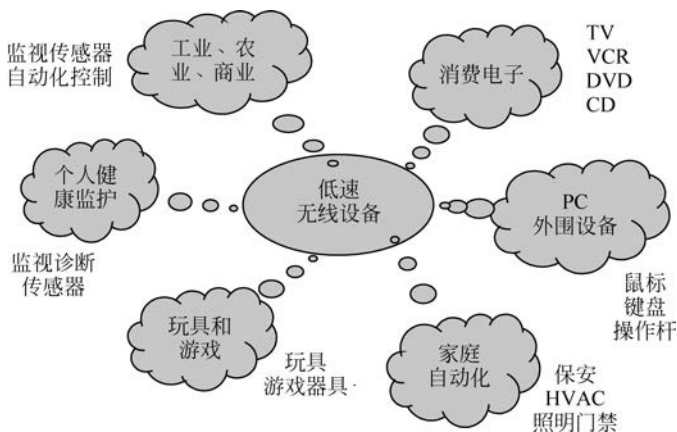


图 3.4 ZigBee 技术的应用领域

(1) 数字家庭领域。

在数字家庭领域,ZigBee 技术拥有广阔的市场,可应用于家庭的照明、温度、安全、控制等各个方面。ZigBee 模块可安装在电视、遥控器、儿童玩具、游戏机、门禁系统、空调系统等产品中。例如,利用 ZigBee 网络可以实现电表、气表、水表的自动抄表与自动监控等功能,如图 3.5 所示。在实际应用中,要求抄表采集器具有超低功耗、低成本,但数据传输速率要求不高,可将 ZigBee 技术与 GPRS/CDMA 结合起来,根据抄表用户的不同分布灵活构建无线抄表网络,采集器采集到的数据可通过 GPRS/CDMA 网络送到抄表监控中心。使用

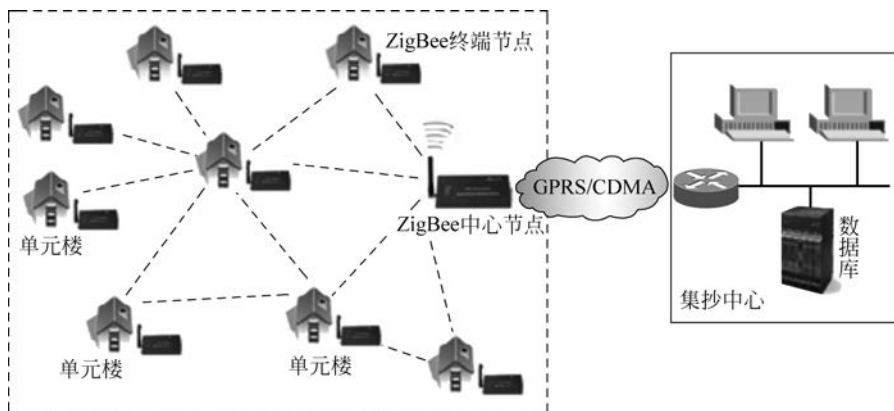


图 3.5 应用 ZigBee 技术的智能抄表系统

ZigBee 技术实现远程抄表的公司有湖南威盛仪表、华蓝佳声、蓝斯通信、南京正泰龙等。

(2) 工业领域。

在工业领域,利用传感器和 ZigBee 网络可以实现数据的自动采集、分析和处理,也可以作为决策辅助系统的重要组成部分。例如,在油田无线测控数据通信系统中利用 ZigBee 技术的组网能力可以组成复杂多跳的路由网络,从而保证数据无线采集系统的可靠和稳定,如图 3.6 所示。系统主要由采油场监控中心、油井无线遥测遥控主机、传感器、电机控保装置等组成,通信部分采用 ZigBee 无线网络传输。

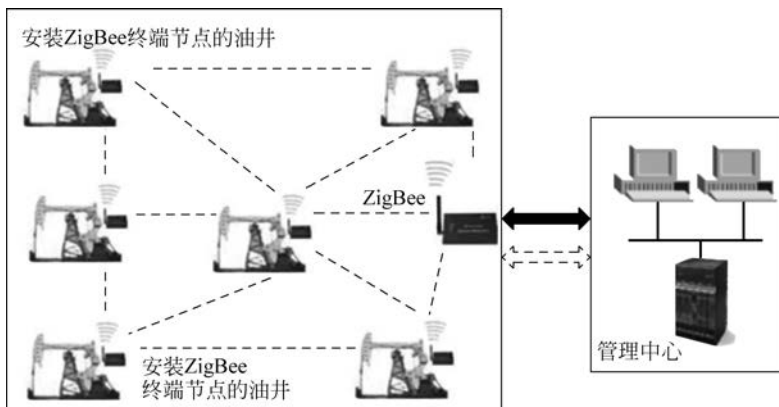


图 3.6 基于 ZigBee 技术的油田无线测控数据通信系统

(3) 现代农业领域。

将 ZigBee 技术运用于传统农业中,可以使传统农业改变为以现代信息技术为中心的精准农业模式,让农业种植全面实现智能化、网络化、自动化,从而进一步提高农业生产的效率。例如,温室大棚的智能控制系统就可采用 ZigBee 技术实现,如图 3.7 所示。智能控制系统采用 ZigBee 技术进行组网,利用传感器可将土壤湿度、氮浓度、pH 值、降水量、气温、气压、光照强度等环境因子信息经由 ZigBee 网络传送到中央控制设备,并能对环境因子进行控制,以基于作物和环境信息知识的专家决策系统为依托,使农民能够及早而且准确地发现

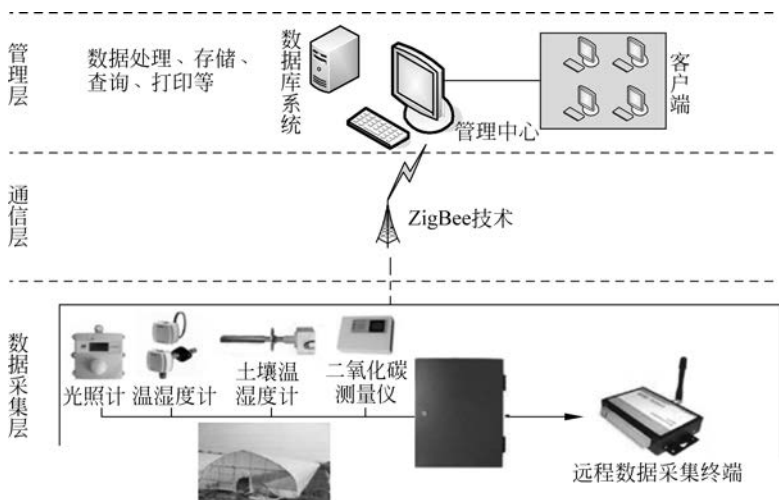


图 3.7 基于 ZigBee 技术的温室大棚智能控制系统

问题,从而有助于保持并提高农作物的产量。

(4) 医学领域。

在医学领域,借助于传感器和 ZigBee 网络可以准确而且实时地检测病人的血压、体温和心跳速度等信息,从而减少医生查房的工作负担,有助于医生做出快速的反应,特别是对重病和危重病患者的监护和治疗。例如,应用 ZigBee 技术可以设计无线医疗监护系统,如图 3.8 所示。监护系统由监护中心和 ZigBee 传感器节点构成,具有 ZigBee 通信功能的传感器节点采集到监护对象的生理参数信息后,以多跳中继的无线网络传输方式经路由器节点传递到 ZigBee 网络的中心节点,监护终端设备通过 Internet 将数据传输至远程医疗监护中心或者通过终端外接的 3G/4G 模块传送到指定医疗人员的手机中,由专业医疗人员对数据进行统计观察,提供必要的咨询服务,实现远程医疗监护和诊治。

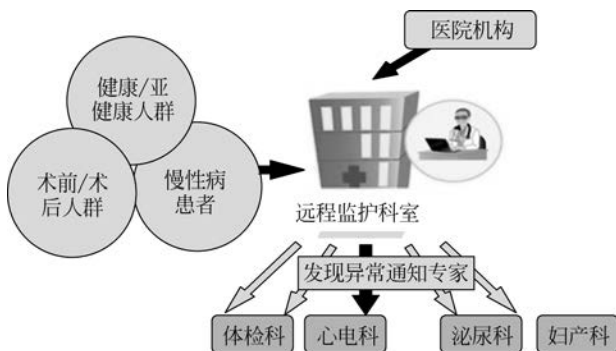


图 3.8 基于 ZigBee 技术的无线医疗监护系统

(5) 智能交通领域。

在智能交通领域,交通运输具有高度的流动性,可以通过 ZigBee 网络对高速移动的车辆进行定位、监测、信息采集等。例如,通过 ZigBee 网络可对交通路口车辆信息进行检测,如图 3.9 所示。系统运用红外传感器采集交通路口的路况信息,并通过 ZigBee 无线通信网络将信息传送给控制中心,通过对数据进行分析,可以直接控制交通信号。此外,利用 ZigBee 技术实现区域路口信号灯的联动管理,可以使路口车辆在最短的时间内通过,缩短不必要的等待时间,不但可以改善城市的交通拥挤状况,而且还可以减少车辆等待所带来的燃油浪费造成的环境污染。

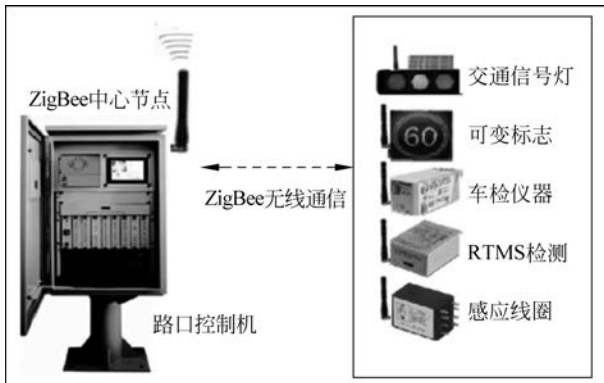


图 3.9 基于 ZigBee 技术的交通路口车辆信息检测系统

3.2 ZigBee 协议栈

ZigBee 协议栈是基于标准的开放式系统互联参考模型设计的,共包括四个层次,分别为物理层、数据链路层、网络层和应用层。其中,较低的两个层次,即物理层和数据链路层由 IEEE 802.15.4 标准定义,网络层和应用层标准由 ZigBee 联盟制定。图 3.10 所示为 ZigBee 协议栈的体系结构模型。

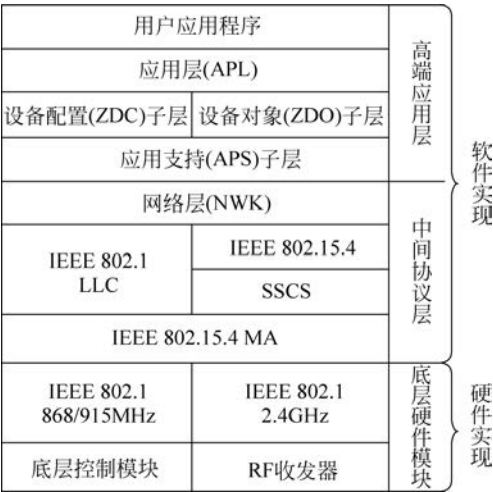
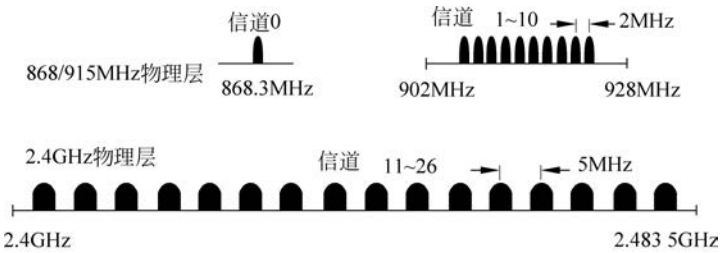


图 3.10 ZigBee 协议栈的体系结构模型

3.2.1 物理层

IEEE 802.15.4 标准定义物理层的任务是通过无线信道进行安全、有效的数据通信,为数据链路层提供服务。IEEE 802.15.4 标准定义了两个物理层,分别为运行在 868/915MHz 的物理层和 2.4GHz 的物理层,如图 3.11 所示。



(a) 物理层的信道

频率	频带	覆盖范围	数据传输速率	信道数量
2.4GHz	ISM	全球	250kb/s	16
915MHz	ISM	美洲	40kb/s	10
868MHz	ISM	欧洲	20kb/s	1

(b) 物理层的频段

图 3.11 物理层的频段及信道

物理层通过射频固件和射频硬件提供了一个从 MAC(媒体访问控制)层到物理层无线信道的接口,物理层的参考模型如图 3.12 所示。在物理层中有数据服务接入点(PD-SAP)和物理层管理实体服务接入点(PLME-SAP),通过 PD-SAP 为物理层数据提供服务,通过 PLME-SAP 为物理层管理提供服务。

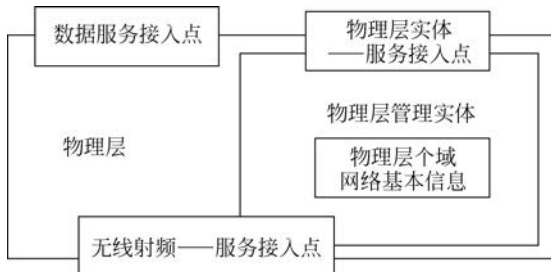


图 3.12 物理层的参考模型

3.2.2 数据链路层

IEEE 802 系列标准把数据链路层分成逻辑链路控制(LLC)层和媒体访问控制(MAC)层。LLC 层在 IEEE 802.6 标准中定义,为 802 标准系列所共用,而 MAC 层协议则依赖于各自的物理层。LLC 层进行数据包的分段与重组以及确保数据包按顺序传输,MAC 层为两个 ZigBee 设备的 MAC 层实体之间提供可靠的数据链路。MAC 层的参考模型如图 3.13 所示。

MAC 层在服务协议汇聚层(SSCS)和物理层之间提供了一个接口。MAC 层包括一个管理实体,该实体通过一个服务接口可调用 MAC 层管理功能,该实体还负责维护 MAC 层固有的管理对象的数据库。MAC 层的主要功能是通过 CSMA-CA 机制解决信道访问时的冲突,并且可实现发送信标或检测、跟踪信标,能够处理和维护保护时隙(GTS),实现设备间链路连接的建立和断开,为设备提供安全机制。

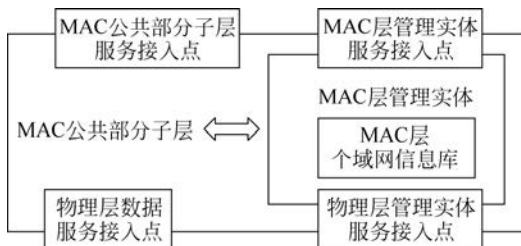


图 3.13 MAC 层的参考模型

3.2.3 网络层

网络层是 ZigBee 协议栈的核心部分,其主要功能是确保 MAC 层的正确工作,同时为应用层提供服务,具体包括网络维护、网络层数据的发送与接收、路由的选择、广播通信和多播通信等。网络层的参考模型如图 3.14 所示。

为实现与应用层的通信,网络层定义了两个服务实体,分别为网络层数据实体(NLDE)和网络层管理实体(NLME)。NLDE 通过服务接入点 NLDE-SAP 提供数据传输服务,NLME 则通过服务接入点 NLME-SAP 提供网络管理服务,并完成对网络信息库(NIB)的维护和管理。NLDE 提供数据服务是通过允许一个应用程序在两个或多个设备之间传输应用协议数据单元(APDU)实现的,但是设备本身必须位于同一个网络中。NLME 提供管理服务则是通过允许一个应用程序与协议栈相互作用来实现的。

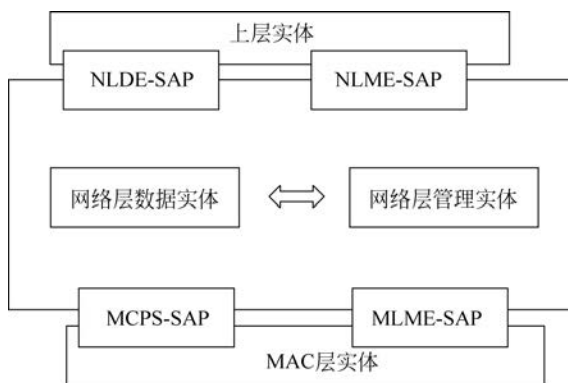


图 3.14 网络层的参考模型

3.2.4 应用层

ZigBee 应用层由应用支持子层(APS)、厂商定义的应用对象(AF)和 ZigBee 设备对象(ZDO)三部分组成,应用层的参考模型如图 3.15 所示。ZigBee 应用层除了为网络层提供必要的服务接口和函数,还允许应用者自定义应用对象。ZigBee 网络中的应用框架是为驻扎在 ZigBee 设备中的应用对象提供活动的环境。

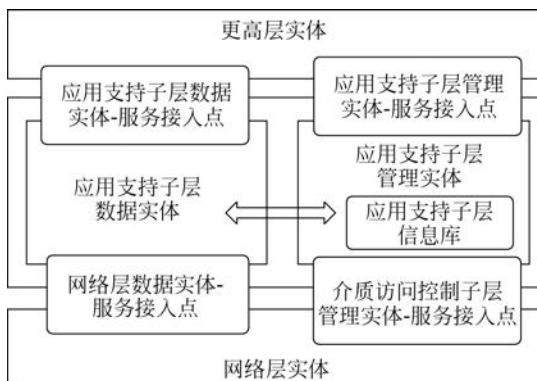


图 3.15 应用层的参考模型

APS 主要用于绑定 ZigBee 设备之间的传送信息并维护绑定信息。在网络层和应用层之间,APS 提供了从 ZDO 到供应商应用对象的通用服务集接口,由 APS 数据实体(APSDE)和 APS 管理实体(APSME)实现。APSDE 通过服务接入点 APSDE-SAP 实现在同一个网络中的两个或者更多的应用实体之间的数据通信。APSME 通过服务接入点 APSME-SAP 提供多种服务给应用对象,并维护管理对象的数据库 AIB。

ZDO 是一个应用程序,位于应用框架和 APS 之间,通过使用网络层和应用支持子层的服务原语来执行 ZigBee 终端设备、ZigBee 路由器和 ZigBee 协调器功能。ZDO 的主要功能是发现网络中的设备、定义设备在网络中的角色、确定向设备提供某种服务、发起和响应绑定请求以及在设备间建立安全机制等。

3.2.5 Z-Stack 协议栈

ZigBee 协议栈由各层定义的协议组成,以函数库的形式实现,为编程人员提供应用层

接口(API)。ZigBee 协议栈的具体实现有很多版本,但不同厂商提供的 ZigBee 协议栈存在差别。目前,常见的 ZigBee 协议栈有美国德州仪器(TI)公司研发的 Z-Stack 协议栈,美国飞思卡尔(Freescale)公司研发的 BeeStack 协议栈,此外还有 EmberNet、freakz 和 msstatePAN 等 ZigBee 协议栈。TI 公司的 Z-Stack 协议栈已经成为 ZigBee 联盟认可并推广的指定软件规范,全球众多 ZigBee 开发商都广泛采用该协议栈。Z-Stack 协议栈属于半开源,程序代码以库的形式体现,在实际应用中底层驱动的程序基本不需要修改,只需要调用 API 函数既可。Z-Stack 协议栈的软件架构如图 3.16 所示。

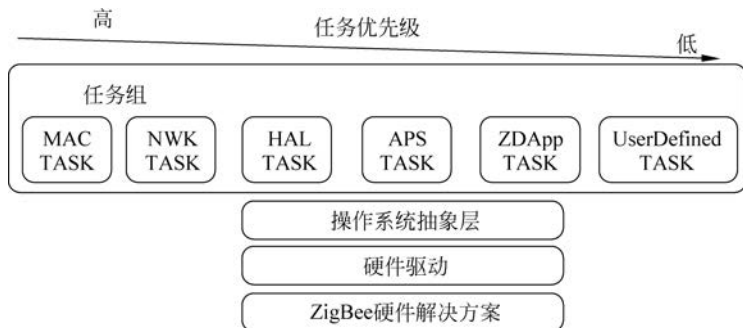


图 3.16 Z-Stack 协议栈的软件架构

Z-Stack 协议栈采用分层的软件结构,硬件抽象层(HAL)提供各种硬件模块的驱动,操作系统抽象层(OSAL)实现类似操作系统的某些功能,可以通过时间片轮转算法实现多任务调度,用户也可以调用 OSAL 提供的相关 API 进行多任务编程,将自己的应用程序作为一个独立的任务来实现。Z-Stack 协议栈源码结构如图 3.17 所示。

App 为应用层目录,是用户创建各种不同工程的区域,在该目录中包含了应用层和项目的主要内容;HAL 为硬件层目录,包含与硬件相关的配置和驱动及操作函数;MAC 目录包含了 MAC 层的参数配置文件及 MAC 的 LIB 库的函数接口文件;MT 为监控调试层目录,通过串口可控各层,并与各层进行直接交互;NWK 目录包含网络层配置参数文件、网络层库的函数接口文件及 APS 子层库的函数接口;ZDO 目录包含 ZigBee 设备对象,是一种公共的功能集,方便用户用自定义的对象调用 APS 子层的服务和 NWK 层的服务。

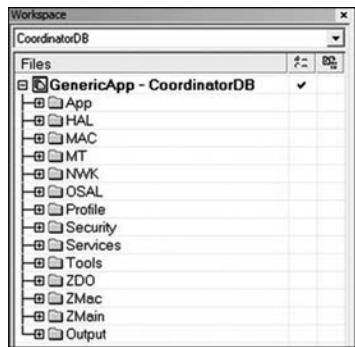


图 3.17 Z-Stack 协议栈源码结构

3.2.6 ZigBee 原语

ZigBee 协议栈的各层之间通过相应的服务访问点来提供服务。一方面,层结构使处于协议中的不同层能够根据各自的功能进行独立的运作,从而使整个协议栈的结构变得清晰明朗;另一方面,由于 ZigBee 协议栈是一个有机整体,任何 ZigBee 设备要能够正确无误地工作,就要求协议栈各层之间共同协作。ZigBee 设备在工作时,各种不同的任务在不同的层次上执行,每层的服务主要完成两种功能:一是根据它的下层服务要求,为上层提供相应的服务;二是根据上层的服务要求,对它的下层提供相应的

服务。

ZigBee 协议为了实现层与层之间的关联,采用了称为“服务原语”的操作。服务原语是一个抽象的概念,仅仅指出提供的服务内容,而没有指出由谁来提供服务,它的定义与其他任何接口的实现无关,由代表其特点的服务原语和参数的描述来指定一种服务。一种服务可能有一个或多个相关的原语,这些原语构成了与具体服务相关的执行命令。每种服务原语提供服务时,根据具体的服务类型,可能不带有传输信息,也可能带有多个传输必需的信息参数。ZigBee 原语有四种类型,分别是请求(Request)原语、指示(Indication)原语、响应(Response)原语及确认(Confirm)原语。

【例 3.1】假设原语环境设置为一个具有 m 个用户的网络,阐述两个对等用户及其与第 k 层或子层对等协议实体建立连接的服务原语。

具体如下:

- ① 请求原语是从第 m_1 个用户发送到它的第 k 层,请求服务开始。
- ② 指示原语是从第 m_1 个用户的第 k 层向第 m_2 个用户发送,指出对于第 m_2 个用户有重要意义的内部 k 层的事件,该事件可能与一个服务请求有关,或者可能是由一个 k 层的内部事件引起。
- ③ 响应原语是从第 m_2 个用户向它的第 k 层发送,用来表示用户执行上一条原语调用过程的响应。
- ④ 确认原语是由第 k 层向第 m_1 个用户发送,用来传递一个或多个前面服务请求原语的执行结果。

3.3 ZigBee 网络的拓扑结构

ZigBee 技术具有强大的组网能力,基于 ZigBee 技术的无线传感器网络适用于网点多、体积小、数据量小,传输可靠、功耗低等场合,在环境监测、无线抄表、智能小区、工业控制等领域已取得一席之地。网络拓扑是网络形状,或者是它在物理上的连通性,ZigBee 技术可以形成星状、树状和网状网络,具体由 ZigBee 协议栈的网络层来管理。

3.3.1 设备类型

ZigBee 网络中包括两种无线设备:全功能设备(Full-Function Device,FFD)和精简功能设备(Reduced-Function Device,RFD)。

FFD 具备控制器的功能,可设置网络。FFD 可以和 FFD、RFD 通信,而 RFD 只能和 FFD 通信,RFD 之间需要通信时只能通过 FFD 转发。FFD 不仅可以发送和接收数据,还具备路由器的功能。

RFD 的应用相对简单,例如,在无线传感器网络中只负责将采集的数据信息发送给协调器,并不具备数据转发、路由发现和路由维护等功能,采用极少的存储容量就可实现。因此,RFD 相对于 FFD 具有较低的成本。

3.3.2 节点类型

从网络配置上来讲,ZigBee 网络中有三种类型的节点,分别是 ZigBee 协调器节点,

ZigBee 路由器节点和 ZigBee 终端节点。

ZigBee 协调器节点在 IEEE 802.15.4 标准中也称作 PAN(个域网)协调器节点,在无线传感器网络中可以作为汇聚节点。ZigBee 协调器节点必须是全功能设备,而且在一个 ZigBee 网络中只能有一个 ZigBee 协调器节点,它往往比网络中其他节点的功能更强大,是整个网络的主控节点,主要负责发起建立新的网络,设定网络参数、管理网络中的节点以及存储网络中节点信息等,网络形成后也可以执行路由器的功能。ZigBee 协调器节点是三种类型 ZigBee 节点中最为复杂的一种,一般由交流电源持续供电。图 3.18 所示为部分厂家生产的 ZigBee 协调器产品。



图 3.18 ZigBee 协调器产品示例

ZigBee 路由器节点也必须是全功能设备,路由器节点可以参与路由发现、消息转发、通过连接其他节点来扩展网络的覆盖范围等。此外,ZigBee 路由器节点还可以在它的操作空间中充当普通协调器节点,但普通协调器节点与 ZigBee 协调器节点不同,它仍然受 ZigBee 协调器节点的控制。图 3.19 所示为部分厂家生产的 ZigBee 路由器产品。

ZigBee 终端节点可以是全功能设备或者精简功能设备,通过 ZigBee 协调器节点或者 ZigBee 路由器节点连接到网络,不允许其他任何节点通过终端节点加入网络,ZigBee 终端节点能够以非常低的功率运行。图 3.20 所示为部分厂家生产的 ZigBee 终端产品。



图 3.19 ZigBee 路由器产品示例



图 3.20 ZigBee 终端产品示例

协调器在 ZigBee 系统中的作用是建立并管理网络,自动允许其他节点加入网络的请求,收集终端节点传来的数据,并通过串口同上位机进行通信,协调器建立网络并处理节点请求的程序流程如图 3.21 所示。在 ZigBee 系统中,路由器节点的主要作用是路由选择和数据转发,路由器节点建立网络的流程如图 3.22 所示。终端节点在 ZigBee 系统中的作用是采集数据,并通过与协调器建立“绑定”将数据发送给协调器,同时接收协调器发来的控制命令。在终端节点以终端的身份启动并加入网络后,即开始与协调器建立绑定。一旦一个绑定被创建,终端节点就可以在不需要知道明确的目的地址的情况下发送数据,其与协调器建立绑定的流程如图 3.23 所示。

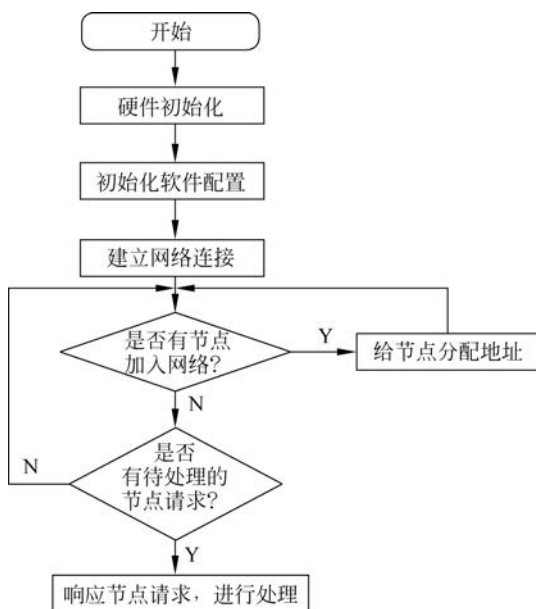


图 3.21 协调器节点的工作流程

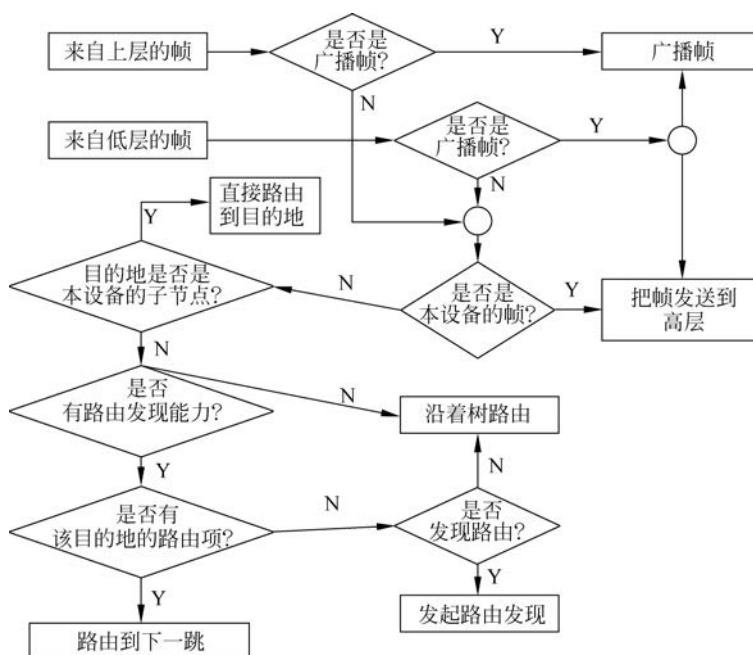


图 3.22 路由器节点建立网络的流程

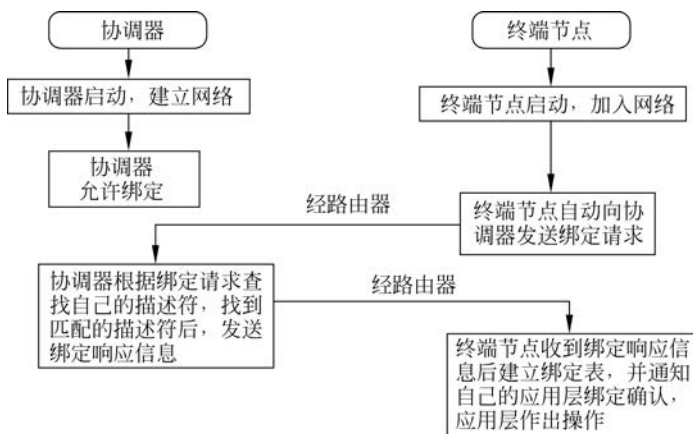


图 3.23 终端节点建立绑定的流程

3.3.3 拓扑结构类型

ZigBee 网络层主要支持三种拓扑结构，分别是星状拓扑结构、树状拓扑结构和网状拓扑结构，如图 3.24 所示。

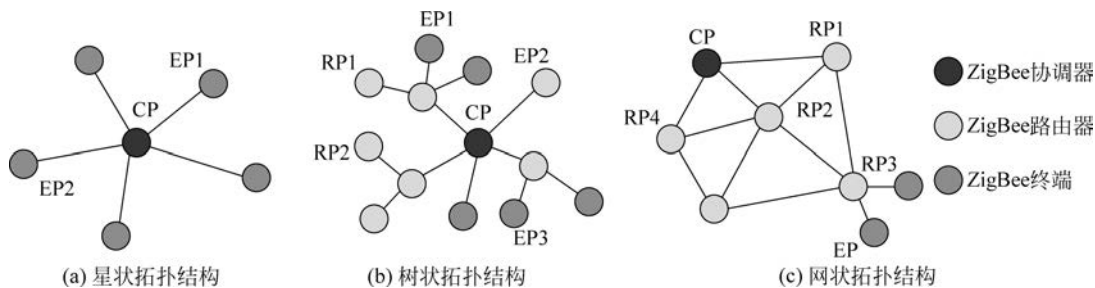


图 3.24 拓扑结构类型

1. 星状拓扑结构

星状拓扑结构网络由一个 ZigBee 协调器节点和一个或多个 ZigBee 终端节点组成。ZigBee 协调器节点位于网络的中心，负责发起建立和维护整个网络。其他的节点一般为 RFD，也可以为 FFD，它们分布在 ZigBee 协调器节点的覆盖范围内，直接与 ZigBee 协调器节点进行通信。如果需要在两个终端节点之间进行通信则必须通过协调器节点转发。例如，若图 3.24(a)中的 EP1 节点要和 EP2 节点进行通信，则必须经过协调器节点 CP 的转发方可实现。星状拓扑结构具有结构简单、成本低、不需要路由功能，网络管理和维护方便等优点，但是由于网络中的终端节点必须要布置在协调器的通信范围之内，因而限制了星状网络的覆盖距离，而且由于网络中的终端节点均向协调器发送数据，容易形成网络拥塞，影响网络性能。

【例 3.2】基于 ZigBee 技术采用星状拓扑结构组建智能电源监控系统的无线传感器网络，解决传统电源监控系统中安装困难、布线烦琐及维护不便等问题。

图 3.25 所示为星状拓扑结构的智能电源监控系统结构图，系统由若干终端节点、一个协调器节点和一个上位机(PC)组成。协调器设备用于实现组建网络和串口通信等功能，一方面通过串口与上位机通信把终端设备的数据发送给上位机进行处理；另一方面接收上位

机下达的采样、标定、关闭电源等命令信息,然后发送给对应的终端节点。终端节点负责采集电源设备的电压数据,发送给协调器节点,同时还要接收协调器的控制命令并作相应处理。

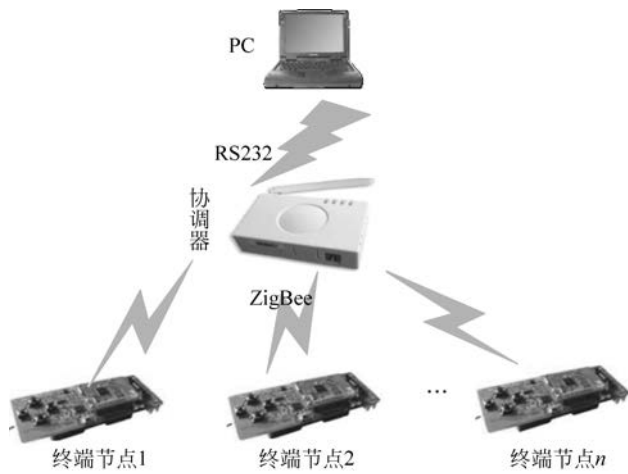


图 3.25 星状拓扑结构的智能电源监控系统结构图

2. 树状拓扑结构

树状网络由星状网络连接形成,通过多个星状网络的连接使网络覆盖范围更大。树状网络中枝干末端的叶节点一般为 RFD,协调器节点和路由器节点可包含子节点,而终端节点不能有子节点。树状拓扑的通信规则是每个节点都只能与其父节点或子节点进行通信,如果需从一个节点向另一个节点发送数据,那么信息将沿着树的路径向上传递到最近的祖先节点,然后再向下传递到目标节点。树状网络具有结构比较固定、网络覆盖范围大、可实现网络范围内多跳信息服务、路由算法比较简单等优点,但当网络中的某个节点发生故障脱离网络时,与该节点相连的子节点都将脱离网络,而且信息的传输时延会增大,同步也会变得比较复杂。

【例 3.3】基于 ZigBee 技术采用树状拓扑结构组建智能家居内部无线网络,通过 ZigBee 无线传感器网络节点的设计,实现对各种传感器信息的采集、传输和控制功能。

图 3.26 所示为树状拓扑结构的智能家居系统结构框图。系统中的无线传感器网络有一个协调器,负责整个网络中数据的处理、转发以及网络的管理,终端节点(传感器节点)上电复位后,会搜索协调器节点,当能够搜索到协调器时,直接申请加入网络,当终端节点搜索

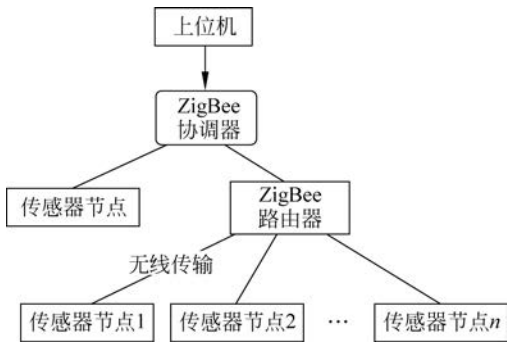


图 3.26 树状拓扑结构的智能家居系统结构框图

不到协调器时,则通过路由器节点找到协调器来加入网络,加入网络后保持待机状态,当有数据需要发送时,按照网络组建时的路径进行数据收发。协调器通过串口与 PC 相连,利用超级终端实现发送命令或者显示数据。

3. 网状拓扑结构

网状网络是三种拓扑结构中最复杂的一种,网络一般由若干 FFD 连接在一起组成骨干网,网络中的节点均具有路由功能,且采用点对点的连接方式。网络中的节点不仅可以

和其通信覆盖范围内的邻居节点直接通信,而且可以通过中间节点的转发,经由多条路径将数据发送给其覆盖范围之外的节点。网状网络具有高可靠性、“自恢复”能力、灵活的信息路由规则,可为传输的数据包提供多条路径,一旦一条路径出现故障则存在另一条或多条路径可供选择,但也正是由于两个节点之间存在多条路径,同时它也是一种“高冗余”的网络。网状网络的不足之处在于,需要复杂的路由算法来实现多跳通信和路径重选等功能,对网络中节点的计算处理能力要求也较高。

【例 3.4】基于 ZigBee 技术采用网状拓扑结构设计智能电源监控系统。

图 3.27 所示为网状拓扑结构的智能电源监控系统结构框图。系统由一个协调器节点、多个路由器节点、多个终端节点和上位机组成。协调器节点一方面接收终端节点采集到的电源电压数据,并把该数据通过串口发送给上位机,另一方面接收上位机的命令信息,然后发送给对应的终端节点。路由器节点在系统中的主要任务是数据中转,确保协调器节点与终端节点间的数据交换正确,增加了 ZigBee 网络的覆盖范围。终端节点通过采集/保护模块采集电源设备的电压数据,通过路由器节点发送给协调器节点,同时还要接收协调器的控制命令并作相应处理。上位机实现对监控设备状态信息的管理,包括系统配置、实时状态显示、节点控制、数据处理及数据查询等功能。

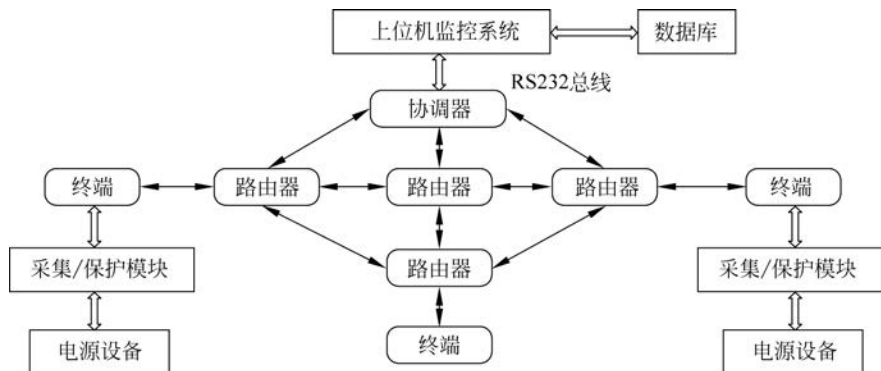


图 3.27 网状拓扑结构的智能电源监控系统结构框图

3.4 ZigBee 网络的路由协议

路由协议是自组网体系结构中不可或缺的重要组成部分,其主要作用是发现和维护路由。ZigBee 路由协议不同于传统的无线传感器网络,传统的传感器网络中除了汇聚节点是一个增强功能的传感器节点外,其他传感器节点功能基本相同,都兼具终端和路由器双重功能,即除了能够进行本地信息收集和数据处理外,还要处理其他节点转发来的数据。在 ZigBee 传感器网络中,除了 ZigBee 协调器节点在网络中具有与汇聚节点相似的功能和地位外,其余节点功能并不相同。为了达到节约成本、节省能量消耗的设计目的,ZigBee 网络中一部分节点的功能被简化,这些节点只能进行简单的收发,而不能充当路由器。因而,传统无线传感器网络中的路由协议并不适用于 ZigBee 网络。

ZigBee 路由协议是指 ZigBee 规范中规定的与路由相关的功能和算法部分,主要包括不同网络拓扑结构下 ZigBee 协议数据单元的路由方式、路由发现和路由维护等内容。

3.4.1 网络层地址分配机制

ZigBee 网络中的每个节点都有一个 16 位网络短地址和一个 64 位 IEEE 扩展地址。其中,16 位网络地址是在节点加入网络时由其父节点动态分配,这种地址仅仅用于路由机制和网络中的数据传输,类似于 Interact 中使用的 IP 地址;64 位地址类似于 MAC 地址,是每个节点的唯一标识。

加入 ZigBee 网络的节点通过 IEEE 802.15.4 MAC 层提供的关联过程组成一棵逻辑树,当网络中的节点允许一个新节点通过它加入网络时,它们之间就形成了父子关系,每个进入网络的节点都会得到父节点为其分配的一个在此网络中唯一的 16 位网络地址,如图 3.28 所示。

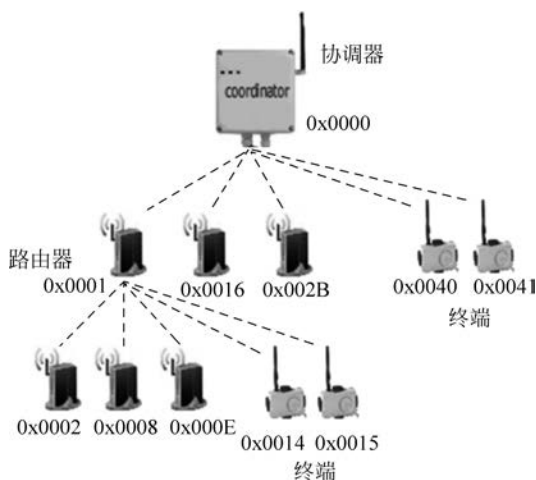


图 3.28 网络地址逻辑树图示例

节点的网络深度是指从节点到根节点协调器的最短跳数,标识节点在网络拓扑图中的层次位置。当协调器建立一个新的网络后,首先将自己的 16 位网络地址初始化为 0,网络深度初始化为 0。在 ZigBee 网络中,16 位短地址的分配机制如下。

规定每个父节点最多可以连接 C 个子节点,这些子节点中最多可以有 R 个路由器节点,网络的最大深度为 L , $C_{\text{skip}}(d)$ 是网络深度为 d 的父节点为其子节点分配的地址之间的偏移量,其值按照式(3.1)计算。

$$C_{\text{skip}}(d) = \begin{cases} 1 + C \cdot (L - d - 1), & R = 1 \\ \frac{1 + C - R - C \cdot R^{L-d-1}}{1 - R}, & \text{其他} \end{cases} \quad (3.1)$$

说明:

① 当一个路由器节点的 $C_{\text{skip}}(d)$ 为 0 时,它就不再具备为子节点分配地址的能力,也即表明不能够再使其他节点通过它加入网络。

② 当 $C_{\text{skip}}(d)$ 大于 0 时,表明父节点可以接受其他节点为其子节点,并为子节点分配网络地址。父节点会为第一个与它关联的路由器节点分配比自己大 1 的地址,之后与之关联的路由器节点的地址之间都相隔偏移量 $C_{\text{skip}}(d)$ 。

③ 每个父节点最多可以分配 R 个这样的地址。为终端节点分配地址与为路由器节点分配地址不同,假设父节点的地址为 A_p ,则第 n 个与之关联的终端子节点地址 A_n 按

式(3.2)计算。

$$A_n = A_p + C_{\text{skip}}(d) \cdot R + n, \quad 1 \leq n \leq (C - R) \quad (3.2)$$

【例 3.5】在图 3.29 所示的网络中,共有 11 个节点。其中,中间的深色节点为 ZigBee 协调器节点,其他节点是与协调器相连的路由器节点和终端节点。假设在当前的网络结构中,每个父节点最多可以连接 4 个子节点($C=4$),且这些子节点中最多可以有 4 个路由器节点($R=4$),当前网络的最大深度为 3($L=3$)。计算各个节点的网络地址。

首先,计算偏移量。根据偏移量 C_{skip} 的计算公式,计算出不同网络深度的父节点为其子节点分配的地址之间的偏移量,具体结果见表 3.2。

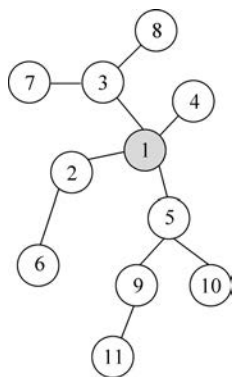


图 3.29 网络示例

表 3.2 地址偏移量的计算结果

已知条件	网络深度(d)	偏移量(C_{skip})
$C=4$ $R=4$ $L=3$	0	21
	1	5
	2	1
	3	0

然后,计算各个节点的网络地址。作为网络中的协调器节点也即 1 号节点,是网络的初始化节点,其深度为 0,16 位地址也为 0,与其相连的 2 号节点其地址为 $0+1$,也即 1,之后与其相连的其他节点地址都相差偏移量 21。因此,3 号、4 号、5 号节点的地址分别为 $1+21=22$ 、 $22+21=43$ 、 $43+21=64$,6 号节点的偏移量为 1,地址为 2,7 号节点的偏移量为 1,地址为 23,8 号、9 号、10 号节点的地址分别为 28、65、70,深度为 3 的 11 号节点其地址为 66。注意到 11 号节点的偏移量为 0,因此该节点不具备地址分配能力。图 3.12 中各节点的网络地址计算结果见表 3.3。

表 3.3 各节点的网络地址

节点编号	网络深度(d)	偏移量(C_{skip})	地址(Addr)
1	0	21	0
2	1	5	1
3	1	5	22
4	1	5	43
5	1	5	64
6	2	1	2
7	2	1	23
8	2	1	28
9	2	1	65
10	2	1	70
11	3	0	66

3.4.2 ZigBee 网络路由的数据结构

1. 节点存储的数据结构

ZigBee 协调器节点和路由器节点都保存一张路由表和路由发现表,路由表用来转发数

据分组,为网络中的其他节点保存一个路由表条目,路由发现表用来储存路由发现过程中的一些临时路由信息。此外,ZigBee 网络中的每个节点都保存一张邻居节点列表,用来存储此节点传输范围内其他节点的信息。路由表的构成见表 3.4,路由发现表的构成见表 3.5,邻居节点列表的构成见表 3.6。

表 3.4 路由表的构成

比特数	16	3	16
含义	目的节点地址	状态信息	下一跳节点地址

表 3.5 路由发现表的构成

比特数	8	16	16	8	8	16
含义	发起路由请求的节点产生的序列号	发起路由发现的节点地址	发送路由请求分组的节点地址	路由请求分组中携带的开销	路由应答分组中携带的开销	路由建立过程的有效时间

表 3.6 邻居节点列表的构成

比特数	16	64	16	8	8
含义	邻节点 PAN 标识符	邻节点的 64 位 IEEE 扩展地址	邻节点 16 位网络地址	邻节点类型	邻节点与当前节点的关系

2. 节点交互的分组结构

ZigBee 网络层的控制分组包括三种类型,分别是路由请求(RREQ)分组、路由应答(RREP)分组和路由出错(RERR)分组。ZigBee 网络中具有路由功能的节点可以向周围邻节点广播一个 RREQ 分组,目的是找到一条通往目的节点的有效路径;RREQ 分组希望到达的目的节点收到路由请求分组后向路由请求分组的发起节点回复一个 RREP;当节点转发数据分组失败时将产生一个 RERR 分组,目的是通知此数据分组的源节点分组转发失败。RREQ 分组格式见表 3.7,RREP 分组格式见表 3.8,RERR 分组格式见表 3.9。

表 3.7 RREQ 分组格式

比特数	8	8	8	16	8
含义	控制分组类型(0x01: RREQ; 0x02: RREP; 0x03: RERR)	RREQ 分组是否是在路由修复过程中产生	发起 RREQ 分组的节点产生的序列号	发起 RREQ 分组的节点希望建立的路径的目的地址	从 RREQ 分组的发起节点到接收节点的路径开销

表 3.8 RREP 分组格式

比特数	8	8	8	16	16	8
含义	控制分组类型(0x01: RREQ; 0x02: RREP; 0x03: RERR)	RREQ 分组是否是在路由修复过程中产生	发起 RREQ 分组的节点产生的序列号	发起路由请求的节点的网络地址	响应 RREQ 分组的节点网络地址	发起 RREP 分组的节点到接收节点的路径开销

表 3.9 RERR 分组格式

比特数	8	8	16
含义	控制分组的类型(0x01: RREQ; 0x02: RREP; 0x03: RERR)	路由出错的原因	被转发失败的数据分组的地址

3.4.3 ZigBee 网络的路由算法

1. AODVjr 路由算法

AODV(Ad-hoc On-demand Distance Vector)是指按需距离矢量路由利用扩展环搜索的办法来限制搜索发现过的目的节点的范围,支持组播,可以实现在 ZigBee 节点间动态的、自发的路由,使节点很快获得通向所需目的地址的路由。ZigBee 网络中使用一种简化版本的 AODV 协议——AODVjr。

AODVjr 路由协议只有在路由器节点接收到网络数据包,并且网络数据包的目的地址不在节点的路由表中时才会进行路由发现过程,也即路由表的内容按照需要建立,而且它可能仅仅是整个网络拓扑结构的一部分。AODVjr 路由算法中一次路由建立由三个步骤组成:路由发现、反向路由建立、正向路由建立,经过这三个步骤,即可建立起一条路由器节点到目的节点的有效传输路径。在路由建立过程中,AODVjr 路由算法使用三种消息作为控制信息:路由请求分组、路由应答分组、路由出错分组。

1) 路由发现

对于一个具有路由能力的节点,当接收到一个从网络层的更高层发出的发送数据帧的请求,且路由表中没有和目的节点对应的条目时,就会发起路由发现过程。源节点首先创建一个路由请求分组,并使用多播的方式向周围节点进行广播。

如果一个节点发起了路由发现过程,就应该建立相应的路由表条目和路由发现表条目,状态设置为路由发现中。任何一个节点都可能从不同的邻居节点处接收到广播的 RREQ,接收到 RREQ 后,节点将进行分析。如果是第一次接收到 RREQ 消息,且消息的目的地址不是自己,则节点会保留该 RREQ 的信息用于建立反向路径,然后将该 RREQ 消息广播出去;如果节点之前已经接收过该 RREQ 消息,则表明这是由于网络内多个节点频繁广播产生的多余消息,对路由建立过程没有任何作用,则节点将丢弃该消息。

2) 反向路由建立

当 RREQ 消息从一个源节点转发到不同的目的地时,沿途所经过的节点都要自动建立到源节点的反向路由,用于记录当前接收到的 RREQ 消息由哪一个节点转发而来。通过记录收到的第一个 RREQ 消息的邻居地址来建立反向路由,这些反向路由将会维持一定时间,该段时间足够 RREQ 消息在网内转发以及产生的 RREP 消息返回源节点。

当 RREQ 消息最终到达了目的节点,节点验证 RREQ 中的目的地址为自己的地址之后,目的节点就会产生 RREP 消息,作为一个对 RREQ 消息的应答。由于之前已经建立了明确的反向路由,因此 RREP 无须进行广播,只需按照反向路由的指导,采取单播的方式即可把 RREP 消息传送给源节点。

3) 正向路由建立

在 RREP 以单播方式转发回源节点的过程中,沿着这条路径上的每个节点都会根据

PREP 的指导建立到目的节点的路由,也即确定到目的地址节点的下一跳。通过记录 RREP 从哪个节点传播而来,然后将该邻居节点写入路由表中的路由表项,一直到 RREP 传送到源节点,至此,一次路由建立过程完毕,源节点与目标节点之间可以开始数据传输。

【例 3.6】在图 3.30 中,当 RFD 设备 J 要发送数据给 D,J 先把数据发送给具有路由功能的父节点 G,G 查找自身路由表,没有发现一条到 D 的有效路径,于是发起一个路由发现过程,构建并广播 RREQ 消息。D 选择最先到达的 RREQ 消息的传送路径 G-C-D,并返回 RREP 消息,G 收到 D 发来的 RREP 信号,路由路径建立,G 就会按这条路径来发送缓存的数据。同时 D 定期发送 KEEP-ALIVE 包,以维护路由信息。

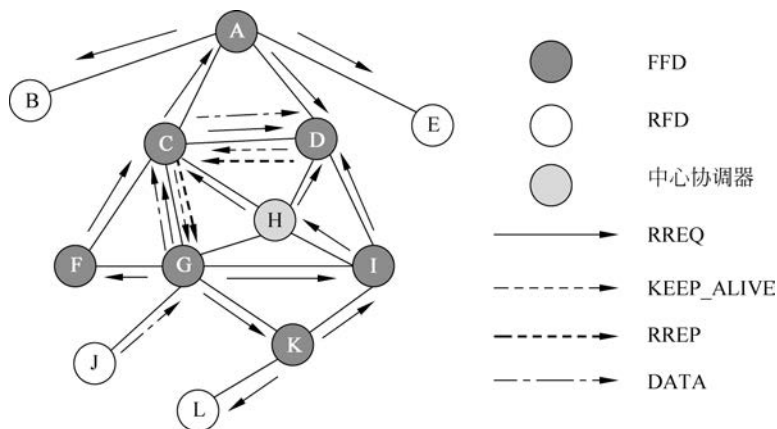


图 3.30 AODVjr 算法路由策略

可以看出,AODVjr 路由算法按照需求驱动、使用 RREQ 和 RREP 控制实现、先广播、后单播的路由建立过程。AODVjr 取消了 AODV 中 HELLO 信息的发送,由目的节点定期向源节点发送 KEEP-ALIVE 连接信息来维持路由。当源节点在一段时间内没有收到目的节点发来的 KEEP-ALIVE 信号时,它认为此条路径失效,必要时重新进行路由发现。

2. 树状网络结构路由算法

树状网络结构路由算法(Cluster-Tree 路由算法)包括地址的分配与寻址路由两部分。其中,地址分配主要是指子节点的 16 位网络短地址,而寻址路由则根据目的节点的网络地址来计算下一跳(Next Hop)的路由。

ZigBee 网络中,节点可以按照网络的树状结构中父子关系使用 Cluster-Tree 路由算法选择路径,即每个节点都会试图将收到的信息包转发给自己的后代节点,如果通过计算发现目的地址不是自己的一个后代节点,则将这个数据包转发给自身上一级的父节点,由父节点进行类似的判断处理,直到找到目的节点。

Cluster-Tree 路由算法的基本思想: 当一个网络地址为 A ,网络深度为 d 的路由器节点收到目的地址为 D 的转发数据包时,路由器节点首先要判断目的地址 D 是否为自身的一个子节点,然后根据判断的结果采取不同的方式来处理该数据包。

若地址 D 满足式(3.3),则可以判断 D 地址节点是 A 地址节点的一个后代节点。如果 D 不在该范围之内,则 D 地址节点是 A 地址节点的父节点。

$$A < D < A + C_{\text{skip}}(d - 1) \quad (3.3)$$

判断后采取的数据包转发措施如下。

(1) 目的节点是自身的一个后代节点,则下一跳的节点地址有两种可能,计算标准见式(3.4)。若为终端节点,其地址为 D ,否则由地址 A 、 D 和深度为 d 的偏移量三部分计算得到。

$$N = \begin{cases} D, & \text{终端节点} \\ A + 1 + \left\lfloor \frac{D - (A + 1)}{C_{\text{skip}}(d)} \right\rfloor \times C_{\text{skip}}(d), & \text{其他} \end{cases} \quad (3.4)$$

(2) 目的节点不是自身的一个后代节点,路由器节点将把该包送交自己的父节点处理。这与 TCP/IP 协议中路由器将路由表项中不存在的数据包发送给自己的网关处理相类似。

3. 路由算法比较

AODVjr 算法的优点是相对于有线网络的路由协议而言,它不需要周期性的路由信息广播,节省了一定的网络资源,并降低了网络功耗。缺点是在需要时才发起路由寻找过程,会增加数据到达目的地址的时间。Cluster-Tree 路由算法的优点在于使不具有路由功能的节点间通过与各自的父节点间的通信仍然可以发送数据分组和控制分组,但它的缺点是效率不高。

为实现低成本、低功耗、高可靠性等设计目标,ZigBee 网络中采用了树状网络结构路由与按需距离向量路由相结合的路由算法。ZigBee 网络中当节点允许一个新节点通过它加入网络时,它们之间就形成了父子关系。节点可以按照父子关系使用 Cluster-Tree 路由算法选择路径,即当一个节点接收到分组后发现该分组不是给自己的,则只能转发给它的父节点或者子节点。显而易见,这并不一定是最优的路径,为了提高路由效率,ZigBee 中也让具有路由功能的节点使用 AODVjr 去发现路由,即具有路由功能的节点可以不按照父子关系而直接发送信息到其通信范围内的其他具有路由功能的节点,而不具有路由功能的节点仍然使用 Cluster-Tree 路由算法发送数据分组和控制分组。ZigBee 网络中将节点分为两类:RN+和 RN-。其中 RN+是指具有足够的存储空间和能力执行 AODVjr 路由协议的节点,RN-是指其存储空间受限,不具有执行 AODVjr 路由协议能力的节点,RN-收到一个分组后只能用 Cluster-Tree 路由算法处理。

3.4.4 ZigBee 网络的路由机制

1. 路由的建立过程

ZigBee 路由协议中,RN-节点需要发送分组到网络中的某个节点时使用 Cluster-Tree 路由算法。RN+节点需要发送分组到网络中的某个节点而又没有通往目的节点的路由表条目时,它会发起如下路由建立过程。

(1) 节点创建并向周围节点广播一个 RREQ 分组,如果收到 RREQ 的节点是一个 RN-节点,则按照 Cluster-Tree 路由算法转发此分组;如果收到 RREQ 的节点是一个 RN+,则根据 RREQ 中的信息建立相应的路由发现表条目和路由表条目(在路由表中建立一个指向 RREQ 源节点的反向路由)并继续广播此分组。

(2) 节点在转发 RREQ 之前会计算将 RREQ 发送给它的邻节点与本节点之间的链路开销,并将其加到 RREQ 中存储的链路开销上,然后将更新后的链路开销存入路由发现表条目中。

(3) 一旦 RREQ 到达目的节点或者目的节点的父节点,此节点就向 RREQ 的源节点回复一个 RREP 分组(RN-节点也可以回复 RREP 分组,但无法记录路由信息),RREP 应沿

着已建立的反向路径向源节点传输,收到 RREP 的节点建立到目的节点的正向路径并更新相应的路由信息。

(4) 节点在转发 RREP 前会计算反向路径中下一跳节点与本节点之间的链路开销,并将其加到 RREP 中存储的链路开销上。当 RREP 到达相应 RREQ 的发起节点时,路由建立过程结束。

下面通过一个例子来说明 ZigBee 网络的路由建立过程。

【例 3.7】图 3.31 所示为一个包含 10 个节点的 ZigBee 网络,图中白色节点为 RN+节点,灰色节点为 RN-节点,节点 0 为 ZigBee 协调器节点。假设节点 2 要向节点 9 发送数据分组,但路由表中没有到达节点 9 的路由。因为节点 2 是一个 RN+节点,所以它将发起路由建立过程。

首先节点 2 创建 RREQ 并向周围节点广播此分组,节点 0、1、3 收到 RREQ 后建立到节点 2 的反向路由(见图 3.31(a)),并继续广播 RREQ(见图 3.31(b))。图 3.31(c)中,节点 3 已经转发过 RREQ,因此它不再转发此分组;由于节点 5 是 RN-节点,不具有路由功能,因此它收到 RREQ 后发现自己不是目的节点,只有将其发送给它的父节点(节点 3);节点 6 发现 RREQ 的目的节点是它的一个子节点,它便代替此目的节点沿着刚刚建立的反向路径向 RREQ 的源节点(节点 2)回复一个 RREP,收到 RREP 的节点建立到目的节点(节点 9)的正向路由。RREP 到达源节点 2 后,路由建立过程结束,数据分组沿着刚刚发现的路径 2-3-6-9 传输(见图 3.31(d))。在这个例子中,如果是节点 9 要发送数据分组到节点 2,由于节点 9 是 RN-节点,它只有将分组发送给它的父节点(节点 6),由其父节点发起路由建立过程。

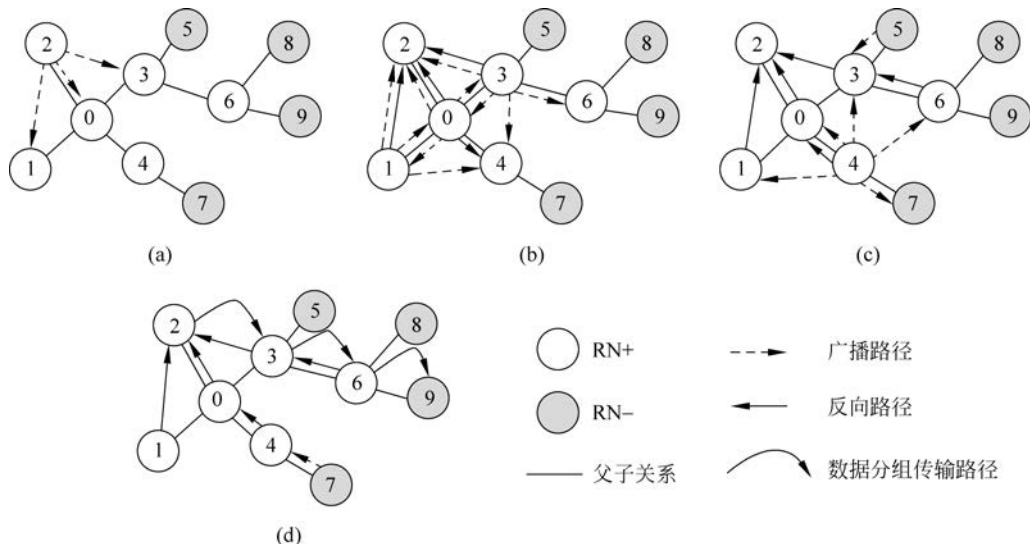


图 3.31 ZigBee 网络的路由建立示例

2. 路由维护过程

对于路由的维护分以下四种情况进行讨论。

(1) 如果在数据传输中发生链路中断,将由中断链路的上游节点激活路由维护过程。

(2) 如果检测到链路失效的是 RN+节点,它将采用本地修复方式来维护路由,即缓存来自源节点的数据分组并广播 RREQ。如果在一定时间内没有收到 RREP,此节点将向源

节点发送 RERR 报告路由失败的消息,由源节点重新发起路由建立过程。

(3) 如果检测到链路失效的是 RN—节点,它将直接向源节点发送 RERR,由源节点重建路由。

(4) 如果一个为 RFD 的 ZigBee 终端节点发现它与父节点之间的通信中断,此节点将发起 IEEE 802.15.4 MAC 层中的孤立通知过程,尝试重新加入网络并恢复与原来父节点之间的通信。如果孤立通知过程失败,节点将发起 IEEE 802.15.4 MAC 层中的关联过程,尝试通过新的父节点重新加入网络。如果节点找不到具有接受它能力的父节点,它则不能重新加入网络。在这种情况下,需要用户干涉才能使此节点重新加入网络。

3.5 ZigBee 网络的组建

任何一个 ZigBee 网络其实质都是由若干个终端节点,一定数量的路由器节点及协调器节点按照一定的拓扑结构组建而成。通常组建一个完整的 ZigBee 网络主要包括两个步骤,一是网络的初始化,二是节点入网。

3.5.1 ZigBee 网络的初始化

ZigBee 网络的建立由协调器发起,组建网络的 ZigBee 节点需满足两个条件:一是初始组建网络的节点必须是全功能设备,也即要求该节点具备 ZigBee 协调器的功能;二是要求该节点未与其他网络连接。具体网络初始化流程包括三个步骤,如图 3.32 所示。

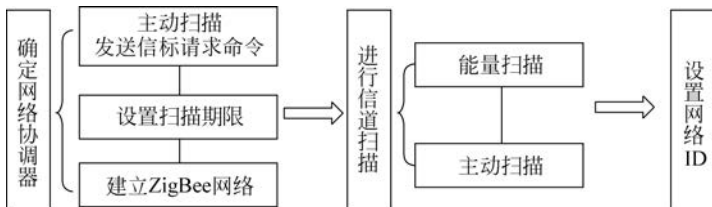


图 3.32 网络初始化流程

1. 确定网络协调器

在一个 ZigBee 网络中,哪个节点作为协调器一般由上层规定,不在 ZigBee 协议规定的范围内,比较简单的做法是让先启动的 FFD 节点作为网络协调器。因此,对于初始加入的节点需要先判断该节点是否为 FFD 节点,然后判断此 FFD 节点是否在其他网络里或者网络里是否已经存在协调器。节点可以通过主动扫描的形式发送一个信标请求命令,并且设置一个扫描期限,如果在扫描期限内没有检测到信标,则表明在其指定区域内没有协调器,该节点可作为网络的协调器组建 ZigBee 网络。

建立一个新的网络由节点通过网络层的“网络形成请求原语”(NLME_NETWORK_FORMATION.request)发起。当然,发起原语的节点必须具备两个条件:一是这个节点具有 ZigBee 协调器功能;二是这个节点没有加入其他网络中。任何不满足这两个条件的节点在发起建立一个新网络的进程时都会被网络层管理实体终止。

2. 进行信道扫描

协调器发起建立一个新网络的进程后,网络层管理实体将请求 MAC 子层对信道进行

扫描。信道扫描包括能量扫描和主动扫描两个过程。

能量扫描的目的是避免可能的干扰,节点通过对指定的信道或物理层所有默认的信道进行能量扫描,以排除干扰。网络层管理实体将根据信道能量测量值对信道进行一个递增排序,并且抛弃能量值超过了可允许能量值的信道,保留可允许能量值内的信道等待进一步处理。

在主动扫描阶段,节点搜索通信半径内的网络信息,捕获网络中广播的信标帧,寻找一个最好的、相对安静的信道,该信道应存在最少的 ZigBee 网络,最好没有 ZigBee 设备。网络层管理实体通过审查返回的 PAN 描述符列表,确定一个用于建立新网络的信道,网络层管理实体将优先选择没有网络的信道。如果没有扫描到一个合适的信道,进程将被终止。

3. 设置网络 ID

如果扫描到一个合适的信道,网络层管理实体将为新网络选择一个网络标识符,也即网络 ID。网络 ID 可以由设备随机选择,也可以在网络形成的请求原语里指定,但必须保证这个 ID 在所使用的信道中必须唯一,不能和其他 ZigBee 网络冲突,也不能为广播地址 0xFFFF。如果没有符合条件的 ID 可选择,进程将被终止。

网络参数配置好后,网络层管理实体通过 MAC 层的“开启超帧请求原语”(MLME_START.request)通知 MAC 层启动并运行新网络。启动状态通过“开启超帧的确认原语”(MLME_START.confirm)通知网络层,网络层管理实体再通过“网络形成的确认原语”通知上层协调器初始化的状态。只有 ZigBee 协调器或路由器才能通过“允许设备连接请求原语”(NLME_PERMIT_JOINING.request)来设置节点处于允许设备加入网络的状态。图 3.33 所示为在通过协调器初始化网络的过程中,各个协议层间原语的执行情况。

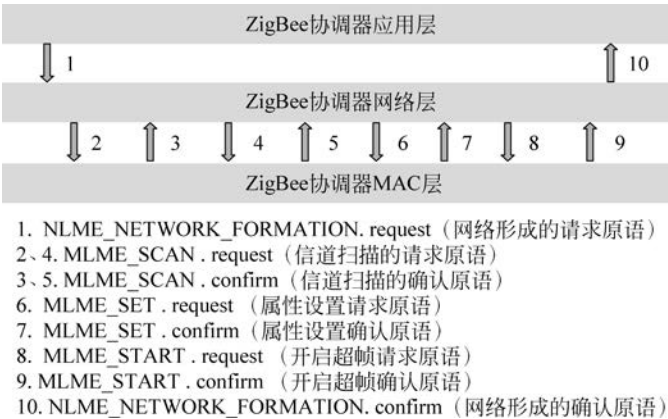


图 3.33 网络初始化过程原语的执行情况

3.5.2 设备节点加入 ZigBee 网络

1. 协调器允许设备加入网络

在协调器允许设备加入网络的过程中,首先也是由设备的应用层向网络层提出执行“允许设备加入网络的请求原语”;然后设备的网络层和 MAC 层之间通过执行“属性设置请求原语和确认原语”来完成设备的属性设置;最后网络层向应用层回复一个“允许设备入网的确认原语”,至此,网络允许设备加入。协调器允许设备入网的原语执行情况如图 3.34 所示。

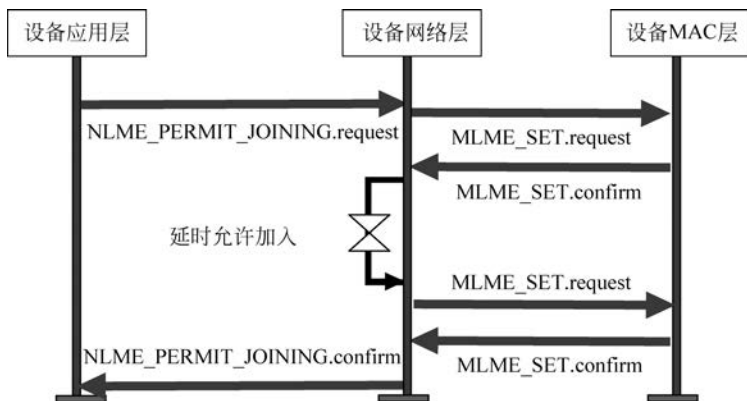


图 3.34 协调器允许设备入网的原语执行情况

节点入网时将选择检测范围内信号最强的父节点加入网络,当然父节点也包括协调器节点,成功后将得到一个网络短地址并通过这个地址进行数据的发送和接收。

2. 节点通过协调器加入网络

节点通过协调器加入网络的具体流程如图 3.35 所示。节点首先会主动扫描,查找周围网络的协调器,如果在扫描期限内没有检测到信标,则间隔一段时间后,可重新发起扫描。若检测到信标即表明有协调器存在,节点可向协调器发送关联请求命令。协调器收到后立即回复一个确认帧,表示已经收到节点的连接请求。当节点收到协调器的确认帧后,节点将处于等待状态,在设置的等待响应时间内等待协调器对其加入请求命令的处理。

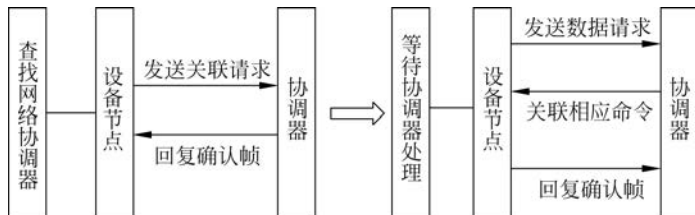


图 3.35 节点通过协调器加入网络的具体流程

如果协调器在响应时间内同意节点加入,协调器会给节点分配一个 16 位的短地址,产生包含新地址和连接成功状态的连接响应命令,并存储这个命令。当响应时间过后,节点发送数据请求命令给协调器,协调器收到后立即回复一个确认帧,然后将存储的关联响应命令发给节点。节点收到关联响应命令后,再立即向协调器回复一个确认帧,以确认接收到连接响应命令,表明入网成功。节点入网过程中原语执行情况如图 3.36 所示。

3. 节点通过已有节点加入网络

当靠近协调器的全功能节点和协调器关联成功后,处于这个网络范围内的其他节点就能以该全功能节点作为父节点加入网络。具体加入网络的方式有两种:一种是通过关联方式,也即由待加入的节点发起加入网络;另一种是直接方式,也即指定将待加入的节点加入某个节点下,作为该节点的子节点。其中关联方式是 ZigBee 网络中新节点加入网络的主要途径。

节点通过已有节点加入网络的两种情形如图 3.37 所示。在申请入网的节点中,有些是曾经加入过网络,但却与其父节点失去联系,将这样的节点称为孤儿节点。虽然是孤儿节点,但在其相应的数据结构中仍存有原父节点的信息,因此孤儿节点可以直接给原父节点发

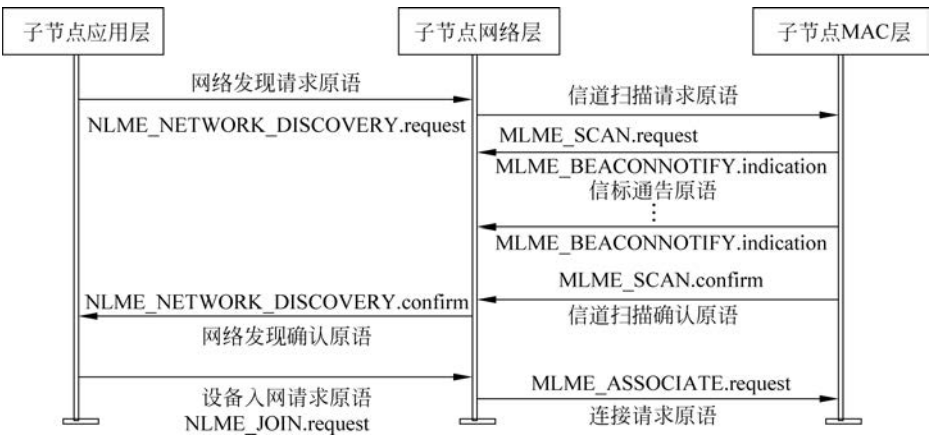


图 3.36 节点入网过程中原语执行情况

送入网请求。若父节点同意其加入,则直接获得以前分配的网络地址,入网成功;若此时原来父节点的网络中,子节点数已达到最大值,父节点便无法批准其加入,则该节点只能以新节点身份重新申请入网。

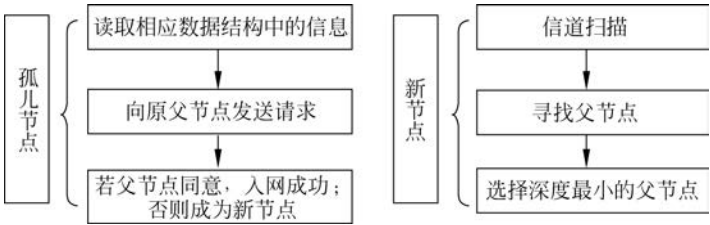


图 3.37 节点通过已有节点加入网络的两种情形

对于新节点来说,首先会在预先设定的一个或多个信道上通过主动或被动扫描查找其周围的网络,寻找有能力批准自己加入网络的父节点,并将找到的父节点的信息进行存储。然后在所有的父节点中选择一个深度最小的节点,对其发出入网请求,如果出现最小深度相同的多个父节点,则可随机选取。如果发出的请求被批准,那么父节点同时会分配一个 16 位的网络地址给该节点,此时入网成功,子节点可以开始通信。如果没有找到合适的父节点,则表示入网失败,则需继续发送请求信息,直到加入网络。

3.5.3 智能家居系统的组建

下面以智能家居系统为例介绍 ZigBee 网络的组建。智能家居作为家庭信息化的实现方式,已成为社会信息化发展的重要组成部分,其发展呈现多样化,技术实现方式也更加丰富。目前,ZigBee 技术广泛地应用在 PC 外设、消费类电子产品、智能家居控制、医疗技术以及工业自动化等领域。由于 ZigBee 无线网络属于自组织网络,且其具有较高的灵活性,因此可应用 ZigBee 技术组建智能家居系统的内部网络。

将基于 ZigBee 芯片的无线网络收发模块嵌入各种家居设备中,从而构建家居无线控制网络。智能家居控制网络采用自动模式的控制方式,由全功能协调器建立网络,路由器和终端设备加入网络后在协调器与终端节点之间建立绑定,绑定成功之后终端节点开始采集数据。网络中的各传感器节点将采集到的信息发送到全功能协调器上,然后协调器通过特

定的接口将信息发送给智能家居网关,随后通过开发的人机交互界面进行显示,另外,通过 PC 或智能手机可以实现设备控制与状态查询,智能家居系统总体架构如图 3.38 所示。设计采用 ZigBee、GPRS、Internet 三层网络将家居终端信息接入互联网的分布式系统架构。

由于智能家居系统覆盖的家庭室内区域相对较小(最远直线距离一般小于 20m),网络中的节点数目较少(节点总数一般有数十个),主要用于采集环境信息、安防信息、控制灯光及家电设备,而且传感器模块的数据量较小,控制输出模块操作不频繁,因此可以选用星状拓扑结构搭建一个简单高效的系统,在满足需求的前提下,具有最高的性价比。

目前,星状拓扑结构是最常见的网络配置结构,被大量应用在远程监测和控制中,星状拓扑结构的无线网络组建流程如图 3.39 所示。首先,节点发出入网请求,检测网络中是否存在协调器,若存在则请求分配地址,若在一定时间内收到分配地址,则节点进行地址设置并发送地址确认信息,表明成功加入网络。若在规定时间内没

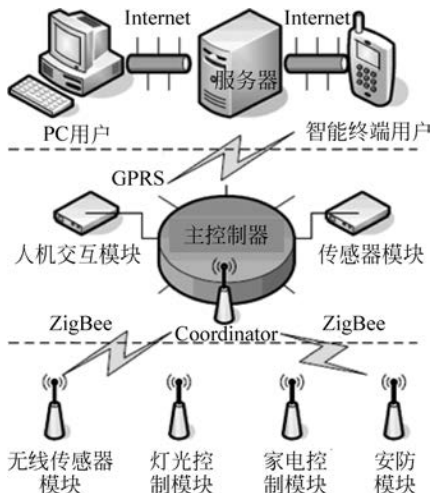


图 3.38 智能家居系统总体架构

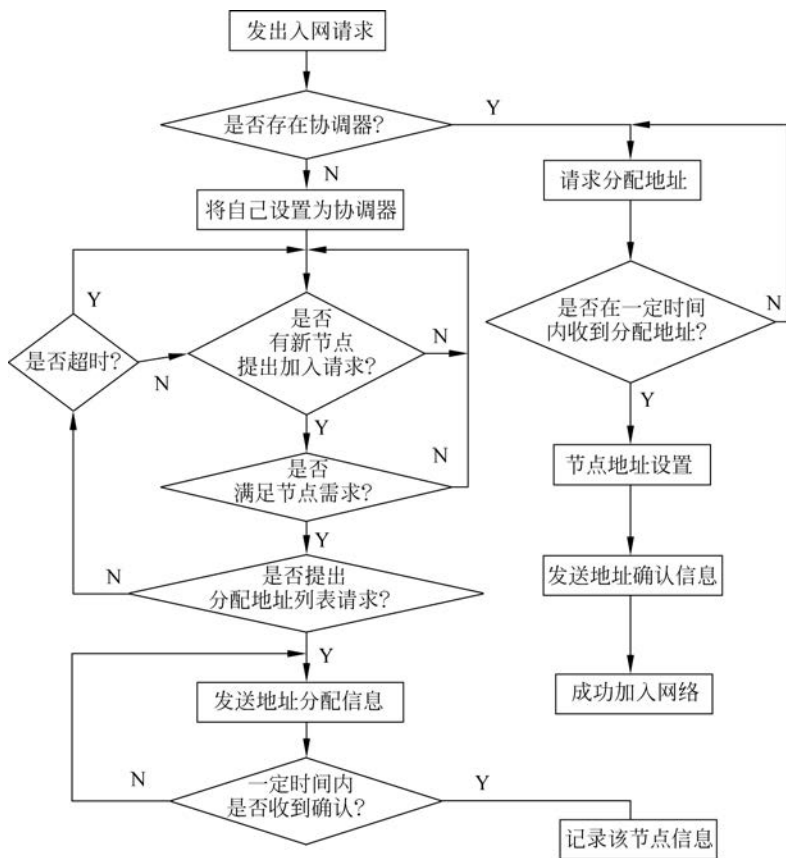


图 3.39 星状拓扑结构的无线网络组建流程

有收到分配地址,则重新向协调器提出请求。若没有检测到协调器存在,则可将发出入网请求的节点设置为协调器,组建 ZigBee 网络。然后可检测是否有新节点提出加入请求,若有新节点提出入网请求,需判断资源是否满足节点需求,若满足则同意其入网,再判断节点是否有提出分配地址列表请求,若有提出则给节点发送地址分配信息,若在规定时间内收到节点的确认信息,则记录该节点信息。若相应的条件判断不符合要求,则回溯到前面的步骤继续执行。

ZigBee 家庭无线网络是智能家居系统中最重要的一部分,主要负责监控家庭中的各种信息,采集相关数据,并将内部处理过的数据存储在家庭网关中。终端节点由传感器和 ZigBee 模块构成,负责监控信息和采集数据;协调器节点创建和管理网络,收集数据和传输来自家庭网关的命令,由一个 ZigBee 模块充当。终端节点和协调器节点共同构成了内部网的 ZigBee 无线网络部分。其中,家庭网关是全功能设备,充当网络协调器,由它主导网络的建立,监督网络的正常运行。家庭网关配置较多的存储空间,完成网络初始化、数据采集、设备控制等功能。另外,它配置 16 位本地地址给设备以节省带宽。其他的无线通信 ZigBee 子节点模块则是精简功能设备,完成传感器状态采集、查询响应、控制设备等,它们只能与家庭网关之间进行通信,相互之间不能进行通信。

下面采用 TI 公司生产的 CC2530 芯片设计 ZigBee 网络节点,CC2530 是真正的片上系统(System on Chip, SoC) CMOS 解决方案,它在单个芯片上整合了 2.4GHz 的高性能 ZigBee 射频前端、内存和微控制器,使用 1 个 8 位 8051MCU,具有 256KB 可编程闪存以及 21 个可编程 I/O 引脚。CC2530 芯片内存容量足够大,允许芯片无线下载,可满足设计者开发先进的应用程序的要求。CC2530 芯片的应用电路如图 3.40 所示,其中用到的部分集成

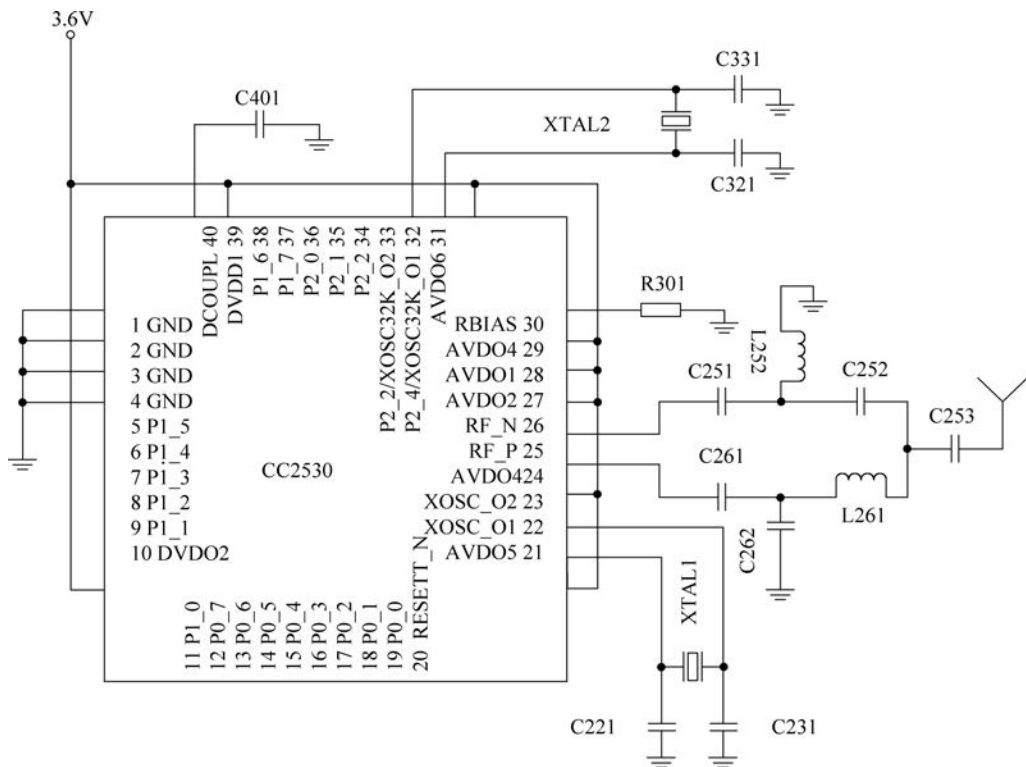


图 3.40 CC2530 芯片的应用电路图

CC2530 芯片的传感器如图 3.41 所示。

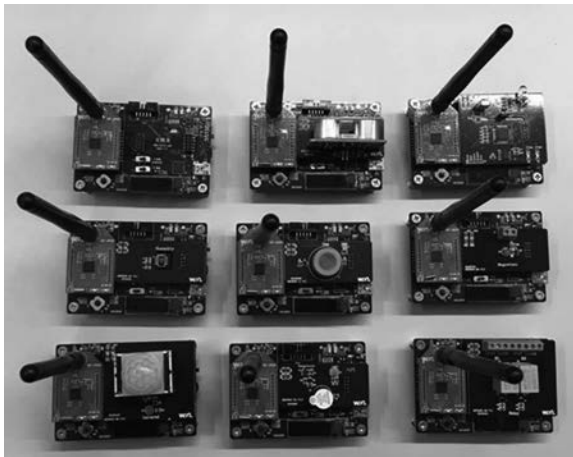


图 3.41 集成 CC2530 芯片的传感器示例

在星状网络结构中由于没有专用的路由器,因此当协调器创建网络完成以后,即被动地等待设备请求,终端设备即可直接加入网络并收发数据。终端节点上电初始化以后,应用层向网络层发送原语请求加入网络,网络层收到请求后主动扫描周围的网络,找到合适的 PAN 后即向 MAC 层请求关联,MAC 层关联以后响应网络层的关联请求,网络层再向应用层报告加入网络的结果。终端节点与协调器交互的流程如图 3.42 所示。通过上位机监控软件可以查看各个终端节点加入网络的情况,如图 3.43 所示。

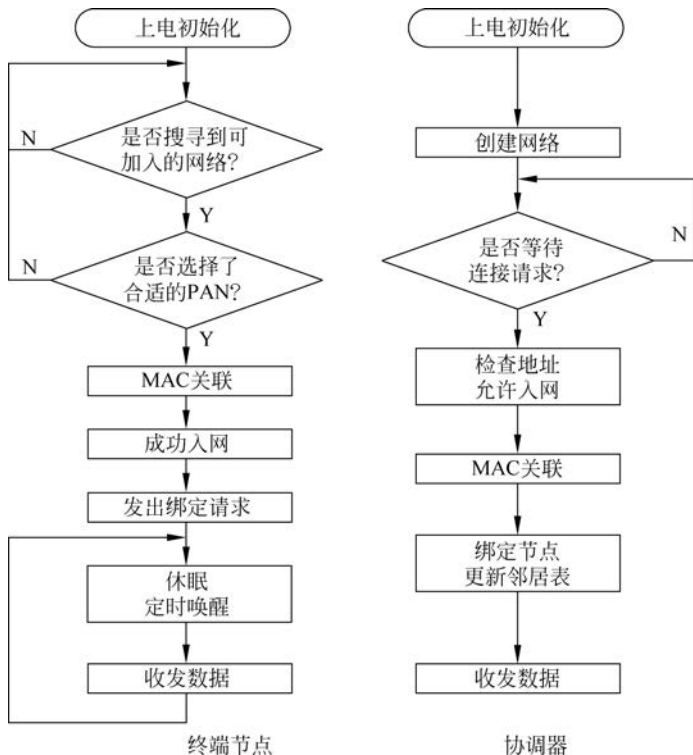


图 3.42 终端设备与协调器的交互流程

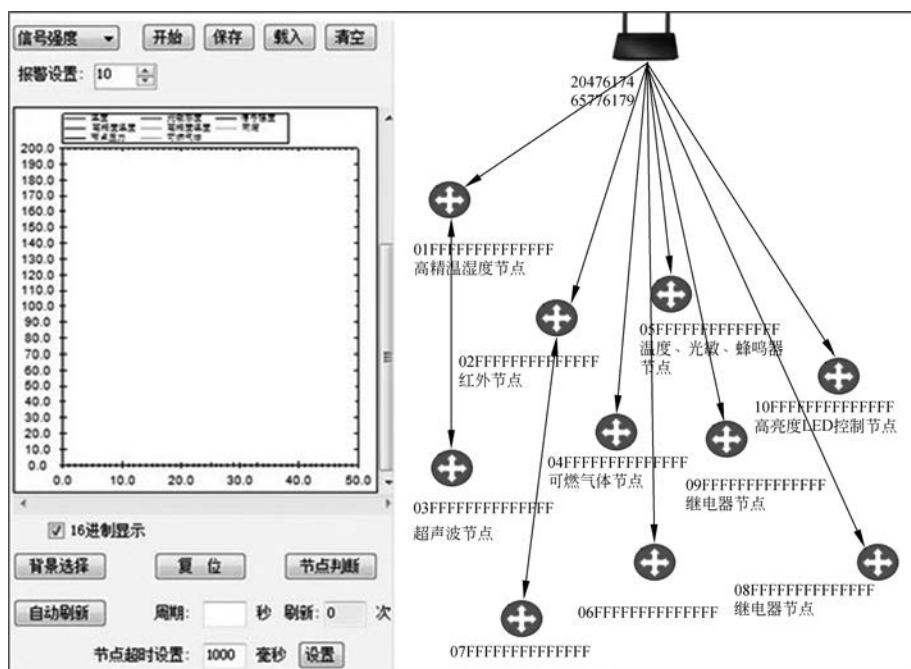


图 3.43 终端设备入网情况

图 3.44 所示为物联网工程实验实训平台。上位机监控软件采用 B/S 架构,建立在 .net 平台上。用户根据权限登录后,可以直观地看到各个节点的在线状态,节点图标形象地标记了节点的控制设备名称及所处位置,用户可以方便地单击节点并在弹出框中进行数据配置、查询或开关控制。当出现报警信息时,报警节点弹出红色警报图标提示用户及时处理。上位机客户端软件的部分界面如图 3.45 所示。



图 3.44 物联网工程实验实训平台



图 3.45 上位机客户端软件的部分界面

本章小结

本章主要介绍了 ZigBee 通信技术中所涉及的相关概念, ZigBee 技术的形成、发展; ZigBee 协议栈中各层的具体信息; ZigBee 网络的拓扑结构; ZigBee 网络的路由协议; ZigBee 网络的组建步骤及 ZigBee 网络的具体实例。通过本章的学习, 可使读者了解和掌握 ZigBee 通信技术的相关概念和原理, 并能应用 ZigBee 技术进行简单的物联网组建。

习题

一、填空题

1. 节点的网络深度是指从节点到根节点协调器的_____。
2. 网络层管理实体提供管理服务是允许一个应用程序与_____相互作用。
3. ZigBee 是一种开放式的基于_____协议的无线个人局域网标准。
4. ZigBee 采用了_____的碰撞避免机制, 以提高系统的兼容性。
5. 节点的_____标识节点在网络拓扑图中的层次位置。
6. ZigBee 技术的安全性高, 其加密技术采用了_____算法。

4. ZigBee 适应的应用场合为_____。
- A. 个人健康监测 B. 玩具和游戏 C. 家庭自动化 D. 上述全部
5. ZigBee 无线网络技术用于_____无线连接。
- A. 近距离 B. 远距离 C. 任意距离 D. 中远距离
6. 根据 IEEE 802.15.4 标准协议,ZigBee 的工作频段分为_____。
- A. 868MHz、918MHz、2.3GHz B. 848MHz、915MHz、2.4GHz
C. 868MHz、915MHz、2.4GHz D. 868MHz、960MHz、2.4GHz
7. ZigBee 使用了 3 个频段,其中 2450MHz 定义了_____个频道。
- A. 1 B. 10 C. 16 D. 20
8. 中国使用的 ZigBee 工作的频段是_____。
- A. 848MHz B. 915MHz C. 2.4GHz D. 868/915MHz
9. 在 2.4GHz 的物理层的数据传输速率为_____。
- A. 250kb/s B. 40kb/s C. 20kb/s D. 140kb/s
10. 家居系统中负责监控信息和采集数据的是_____节点。
- A. 终端 B. 路由 C. 协调器 D. 家庭网关
11. 在 ZigBee 技术的体系结构中,具有信标管理、信道接入、时隙管理、发送确认帧、发送连接及断开连接请求的特征是_____层。
- A. 物理层 B. 网络/安全层 C. MAC 层 D. 应用框架层
12. ZigBee 物理层通过射频固件和射频硬件提供一个从_____到物理层的无线信道接口。
- A. 网络层 B. 数据链路层 C. MAC 层 D. 传输层
13. 新节点加入网络后,其短地址由_____分配。
- A. 自己获取 B. 协调器节点 C. 路由器节点 D. 父节点
14. request 原语是_____。
- A. 确认原语 B. 指示原语 C. 响应原语 D. 请求原语
15. indication 原语是_____。
- A. 确认原语 B. 指示原语 C. 响应原语 D. 请求原语
16. 下列在 ZigBee 技术中,各英文缩写与汉语解释对应错误的是_____。
- A. FFD: 完整功能的设备 B. RFD: 简化功能的设备
C. MAC: 应用框架层 D. CAP: 竞争接入时期
17. PAN 标识符值为 0xffff,代表的是_____。
- A. 以广播传输方式 B. 短的广播地址
C. 长的广播地址 D. 以上都不对
18. ZigBee 中每个协调器节点最多可连接_____个节点。
- A. 255 B. 258 C. 254 D. 126
19. 一个 ZigBee 网络最多可容纳_____个节点。
- A. 1024 B. 258 C. 65 535 D. 526

20. ZigBee 不支持的网络拓扑结构是_____。

- A. 星状 B. 树状 C. 环型 D. 网状

三、简答题

1. 与同类通信技术相比,ZigBee 技术具备哪些优势?
2. MAC 子层的主要功能有哪些?
3. ZigBee 设备对象有哪些作用?
4. ZigBee 协议中各层间如何实现通信和服务?
5. ZigBee 原语有几种? 工作机制是什么?
6. FFD 和 RFD 的区别是什么?
7. PAN 协调器节点的作用是什么?
8. 网络拓扑结构有几种? 各有什么优缺点?
9. 简述 ZigBee 网络中 16 位短地址的分配机制。
10. 简述 AODVjr 路由建立的过程。
11. AODVjr 算法和 Cluster-Tree 算法各有哪些优点?
12. 组建网络的 ZigBee 节点需满足哪两个要求?
13. 网络初始化具体步骤有哪些?
14. 简述节点通过协调器加入网络的具体流程。
15. 节点通过已有节点加入网络的具体方式有哪些?

四、综合题

1. 计算图 3.46 中各个节点的网络地址。其中,1 号节点为 ZigBee 协调器,与协调器相连的其他节点为路由器和终端;假设在当前的网络结构中,每个父节点最多可以连接 4 个子节点,子节点中最多可以有 4 个路由器节点,当前网络的最大深度为 3。

2. 请给出图 3.47 中节点 2 到节点 7 的路由建立过程。图中所示 ZigBee 网络包含 7 个节点,白色节点为 RN+节点,黑色节点为 RN-节点,节点 0 为 ZigBee 协调器节点。

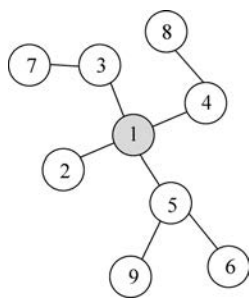


图 3.46 ZigBee 网络节点结构图

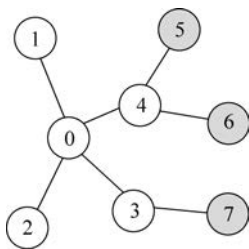


图 3.47 ZigBee 网络中 RN+ 和 RN- 节点结构图

3. 设计一个基于 ZigBee 技术组建的应用于企业的设备监控系统,该系统能够监控设备的当前工作环境和运行状况。要求设备监控节点在现场检测车间设备情况,并经无线传感器网络将所有数据传输至远距离的带有协调器节点的中央监控中心。监控中心是基于 PC 机的监控平台,实现系统历史记录查询等功能。请画出该系统的总体框图,并给出具体的设计方案。

4. 设计一个基于 ZigBee 技术组建的应用于仓库的智能仓储系统,要求该系统能够对

仓库中现有的货物进行管理,并可准确快速地找到目标货物,还可对进出的货物进行调配及对仓库的环境进行检测,如发现异常可以及时反映到上位机。请画出该系统的总体框图,并给出具体的设计方案。

5. 设计一个基于 ZigBee 技术组建的无线楼层呼叫系统,该系统能够快捷而准确地对施工起吊送料设备进行合理的调度、提高施工升降机效率。要求在此楼层呼叫系统中,楼高达数十层,每层分布一个 ZigBee 节点。请画出系统的总体框图,并给出具体的设计方案。

6. 设计一个基于 ZigBee 技术组建的体温监测系统,该系统能够对群体体温大规模、快速、准确地监测,及时发现患者体温异常现象。要求在病房区布置 ZigBee 无线体温监测网络,通过腕带终端实现对佩戴人员体温的测量,体温相关数据的通信通过 ZigBee 无线网络来完成。请画出该系统的总体框图,并给出具体的设计方案。

7. 图 3.48 所示为基于 ZigBee 技术的智能照明系统总体设计方案模型。该系统主要包括远端用户、数据中心、接入节点和底层无线传感器网络。底层的无线传感器网络主要用于监测室内的电池电压、光强和温度等环境信息,最终通过接入点转发到数据中心或者远端用户。请给出采用 ZigBee 技术实现的底层无线传感器网络的设计方案。

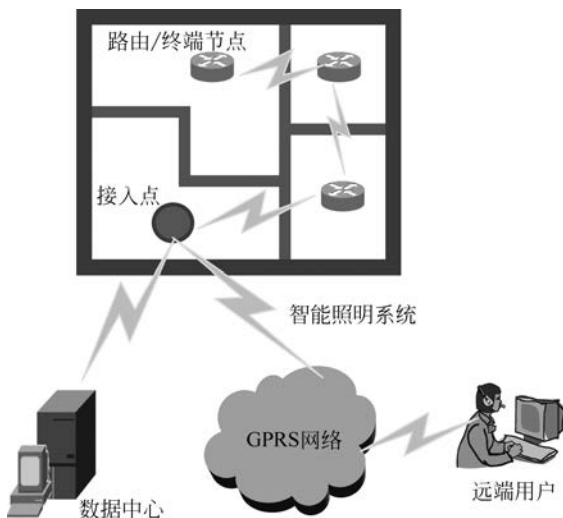


图 3.48 智能照明系统总体设计方案模型

8. 请基于 ZigBee 技术模拟设计室内环境监控系统,通过组建无线传感器网络,用于监控室内环境中空气的温度、湿度、光照度、甲醛、二氧化碳浓度等。以 CC2530 芯片作为无线节点的核心,选用配套的传感器,构成无线传感器网络检测子节点。无线传感器节点定时检测该区域内的环境参数,将数据通过 ZigBee 网络上传给中央监控端,监控端对数据进行接收、处理后将其在软件界面上显示出并进行存储、分析和响应,同时将环境参数信息与用户设定值进行对比,若某一检测参数超过报警阈值,则驱动声光报警器进行报警,提醒室内人员进行相应处理。系统的总体设计结构如图 3.49 所示。

9. 请基于 ZigBee 技术模拟设计学校寝室火灾报警系统,整个报警系统可分为终端探测器、路由器、系统协调器、火灾控制器,其中探测器、路由器和协调器节点之间采用 ZigBee 协议通信,协调器节点和控制器之间采用串口通信。以 CC2530 芯片作为无线节点的核心,

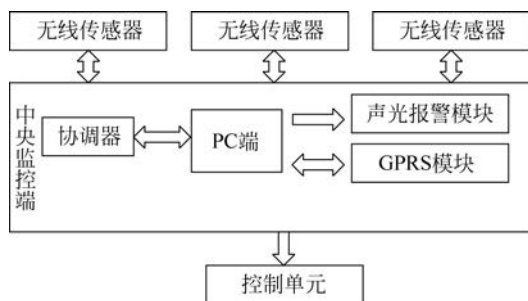


图 3.49 室内环境监控系统架构图

选用配套的传感器构成无线传感器网络终端探测子节点。通过温度传感器和烟雾传感器的变化来反映火灾的发生,然后将信息传递给路由探测器,同时触发报警器报警,再由系统协调器传递给火灾控制器,最终实现火灾报警联网。系统的总体设计结构如图 3.50 所示。

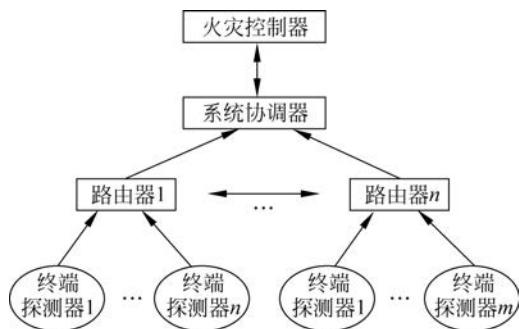


图 3.50 学校寝室火灾报警系统架构图

10. 请基于 ZigBee 技术模拟设计无线温湿度测控系统,该系统要求由协调器节点、终端节点和传感器模块组成,总体结构如图 3.51 所示。监测主机通过 RS232 接口有线连接协调器节点实时显示每个温、湿度传感器节点的信息。协调器节点负责网络的建立和管理,终端节点与温湿度传感器模块连接,进行数据的采集、处理和发送等工作。

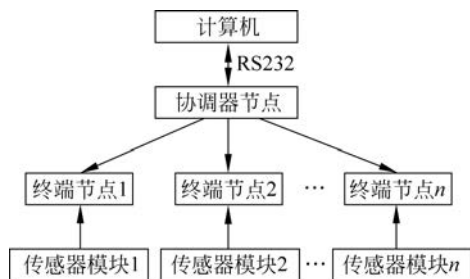


图 3.51 无线温湿度测控系统架构图