

无线传感器网络

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是一种由传感器节点构成的网络,能够实时地监测、感知和采集节点部署区的环境或观察者感兴趣的感知对象的各种信息(如光强、温度、湿度、噪声和有害气体浓度等物理现象),并对这些信息进行处理后以无线的方式发送出去。无线传感器网络使普通物体具有了感知能力和通信能力,在军事侦察、环境监测、医疗护理、智能家居、工业生产控制以及商业等领域有着广阔的应用前景。无线传感器网络是物联网的主要组成部分,物联网的两个重要特征:全面的感知能力和可靠的数据传递都是与无线传感器网络技术密不可分的。

5.1 无线传感器网络概述

5.1.1 WSN 对物联网的支撑作用

物联网需要在人们周围物理世界的实体中嵌入具有一定感知能力、计算能力和执行能力的微型芯片并执行程序,使之成为达到“智慧”状态的智能物体。通过网络设施实现信息传输、协同和处理,从而方便对物理实体的识别、管理、控制和使用,实现物与物、物与人之间的通信和互联^[1]。其三个关键环节为感知、传输、处理。大体上可分为三个层次:网络感知层、传输网络层、应用网络层^[2,4]。

智能物体的感知能力和通信能力是物联网发展和应用的基础之一^[3]。无线传感器网络技术是传统传感技术和网络通信技术的融合,通过将无线网络节点附加采集各种物理量的传感器而成为兼有感知能力和通信能力的智能节点,是物联网的核心支撑技术之一^[9]。它是物联网网络感知层和传输网络层的主要实现技术,负责物理世界中的各种物理信号、标识、音频、视频或 GPS 定位信息等数据的采集与感知,并通过广泛、快速和灵活的网络互联,将感知到的数据信息可靠、安全地进行传送。

无线传感器网络与生物神经网络有特别相似的地方^[6,7]:无线传感器网络的节点就好

比神经元,具有感受和处理的功能;而 WSN 节点之间的连接,则好比通过突触的神经元的连接,完成信号的传递。无线传感器网络节点之间通过无线信号进行互联结构,非常类似于大脑中大量的神经元通过突触连接形成了一个复杂的网络系统。如果将物联网比喻为一个智能生物的话,无线传感器网络则形成了遍布该智能生物的神经系统,而无线传感器网络的节点则是该智能生物的神经末梢。

随着物联网概念的提出和对各个产业巨大拉伸作用的逐渐体现,无线传感器网络已成为当前国际上备受关注的、有多学科交叉的新兴前沿研究热点领域。无线传感器网络综合了传感器技术、嵌入式计算技术、无线通信技术、分布式信息处理技术等,是这些技术发展一定程度后融合的新技术^[5]。它可以广泛应用于军事、交通、环境监测和预报、卫生保健、空间探索、智能家居^[8]等各个领域,是物联网的核心组成环节之一。与塑料电子学和仿生人体器官合称为全球未来的三大高科技产业^[19]。

5.1.2 WSN 的概念

无线传感器网络是由一组稠密布置、随机散布的传感器节点构成的无线自组织网络,其目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖的地理区域内感知对象的信息,并将其提供给用户。在整个网络系统中,大量的传感器节点收集、处理、交换来自于外界环境的数据,最终传输到外部基站。传感器节点、感知对象和观察者构成了传感器网络的三个要素^[7]。传感器网络的用户,是感知信息的观察者和应用者。它可以是人,也可以是计算机或其他设备。观察者可以主动查询或收集传感器网络的感知信息,也可以被动地接收传感器网络发布的信息。观察者将对感知信息进行观察、分析、挖掘,从而制定决策,或对感知对象采取相应的行动。感知对象一般通过表示物理现象、化学现象或其他现象的数字量来表征,如温度、湿度等。一个传感器网络可以感知网络分布区域内的多个对象。一个对象也可以被多个传感器网络所感知。

无线传感器网络节点的传感器是一种检测装置,能感受到被测量的信息,并能将检测感受到的信息,按一定规律变换成为电信号或其他所需形式的信息输出,以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等要求。它是实现自动检测和自动控制的首要环节,是机器感知物质世界的“感觉器官”,通过感知热、力、光、电、声、位移等物理信号,为网络系统的处理、传输、分析和反馈提供最原始的信息。随着科学技术的进步,正不断向微型化、智能化、信息化、网络化的方向发展。经历了模拟传感器、数字传感器、智能传感器、现场传感器、无线智能传感器、无线传感器网络等若干发展阶段。

从功能上来看,现场传感器具有了联网功能,智能传感器则将计算能力嵌入到传感器中,使传感器节点不仅具有数据采集能力,而且具有信息处理能力。无线智能传感器在智能传感器的基础上,增加了无线通信能力。无线通信能力大大增加了传感器节点部署的灵活性和方便性,为传感器技术在除工控环境之外的各个领域如野外勘测、室内家居等场景中的广泛应用打下了基础。无线传感器网络则将交换网络技术引入无线智能传感器中,使传感器在感知功能基础上还具备交换信息、协调控制功能,扩展了无线传感器节点的部署范围,并使其能够进入传统的通信网和互联网,使超远程控制和更高层次的数据处理和融合成为可能。

无线传感器网络的应用一般不需要很高的带宽但是对功耗要求却很严格,大部分时间

内必须保持较低的功耗,因此节点间的通信联网技术主要是使用近距离无线通信技术。该技术的主要特点是通信距离较短,一般在 100m 范围内。但成本较低,功耗较小,发射功率通常在毫瓦量级,比较适合于无线传感器网络节点布点较多、能耗有限的场合。是传感网、个域网、家庭网、工控网等延伸网的底层通信基础。其代表技术有蓝牙、超宽带(UWB)、低速低功耗通信(802.15.4)等物理层和链路层技术以及 ZigBee、ISA100、WiFi、Wireless HART、基于 IPv6 的 WPAN 等低速低功耗无线通信组网技术^[12,18]。

5.1.3 WSN 的发展历史

可以认为,无线传感器网络技术从早期的传感器技术和工业现场总线技术发展而来。最早的传感器网络出现在 20 世纪 70 年代,将传统传感器采用点对点传输、连接传感控制器而构成传感器网络,称之为第一代传感器网络。随着传感器技术以及计算机技术的发展,传感器网络同时还具有了获取多种信息信号的综合处理能力,并通过与传感控制器的相连,组成了有信息综合和处理能力的传感器网络,这是第二代传感器网络。而从 20 世纪末开始,现场总线技术开始应用于传感器网络,人们用其组建智能化传感器网络,大量多功能传感器被运用,并使用无线技术连接,无线传感器网络逐渐形成。简而言之,传统的传感器设备,加上通信的模块,以及数据传输和处理的模块,构成了传感器节点,使它具有感知、计算和通信的能力。传感器节点之间,通过无线通信技术和自组织的方式形成一种新的网络形式——无线传感器网络^[17]。

随着传感器技术和网络技术的不断发展融合,无线传感器网络的概念开始产生并出现了针对无线传感器网络的专门研究和应用。1993 年,美国加州大学洛杉矶分校(UCLA)联合 rockwell 研究中心在 DARPA 的资助下开始进行了 WINS(Wireless Integrated Network Sensors)的项目研究。该项目的主要目的是为嵌入仪器、设备和环境中的传感器、执行机构和处理器构建一个分布式网络环境,并提供对互联网的访问能力。该项目研究了传感器和接收器、信号处理结构、网络协议设计和检测理论的基本原理,对传感器网络设计的各个方面都进行了初步探索,开始了对传感器网络的系统和专门研究。

1996 年起麻省理工学院(MIT)进行了 μ AMPS(Micro, Adaptive Multi. domain Power. aware Sensors)项目的研究,该项目主要关注网络问题,提出了无线传感器网络的组织应该以节能、自组织和可重构为目标。该项目并针对无线传感器网络的网络层提出了一种层次路由协议——LEACH(低功耗自适应分簇层次路由算法)。该算法对无线传感器网络进行分簇管理,后来成为拓扑和路由控制算法的基础。

加州大学伯克利分校(UC Berkeley)于 1999 年在 DARPA 的资助下开始进行 Smart Dust 项目的研究,该项目的目标是研制体积不超过 1mm^3 ,使用太阳能电池供电,具有光通信能力的自治传感器节点。之所以称为 Smart Dust,是希望能够研制出该节点体积小、重量轻,甚至可以飘浮在空气中并附着在其他物体上的传感器节点。该项目的实际成果是在形如硬币大小的节点中配置了温度、湿度、压力、磁场等多种传感器,该传感器在车辆跟踪、动物学家关于水鸟活动的研究中都得到了成功应用。

该项目还开发出了一系列用于研究和试验的无线传感器节点和节点软件。如 Mica 系列无线传感器网络硬件平台和 TinyOS 操作系统。Mica 的硬件采用模块式结构,将“运算和通信平台”与“传感平台”分开设计,有利于其他研究者自由组合。TinyOS 采用轻量级线

程、主动消息机制和事件驱动模型,以适应无线传感器网络节点资源少、并行度相对较高的要求;而且采用了组件模型,扩展性较好。由于 Mica 和 TinyOS 都是公开的和开放的,因此成为许多机构采用的公共研究平台,并且成为很多后续项目的基础。

在美国自然科学基金(NSF)等单位的资助下,UCLA 联合其他一些机构成立了 CENS (Center for Embedded Network Sensing)。该中心对无线传感器网络相关的很多领域进行了研究,在多个方面取得成果,比如跟踪定位与节点部署、调试工具、数据存储与查询、能量管理,等诸多方面。UC Berkeley 则成立了 WEBS(Wireless Embedded Systems),WEBS 负责很多项目,包括前面所述的 Smart Dust,以及 NEST 项目(含原来的 Mica、TinyOS,以及一些关联项目,如数据查询系统 TinyDB)。该项目组的研究涉及硬件平台、安全路由、环境监测和定位系统等许多方面。

无线传感器网络技术最先在空间探索领域和军事领域上得到展开,如 NASA 的 JPL (Jet Propulsion Lab)实验室研制的应用于火星探测的 Sensor Web 项目,如 2000 年被美国国防部定为国防部科学技术五个尖端项目之一的 Smart Sensor Web 项目,又如 DARPA 资助的 Sensor IT(Sensor Information Technology)项目,通过部署战场的不同种类的传感器组成的传感器网络,使士兵可迅速全面地获得战场真实信息。美国海军研究局则资助了由国家航空航天局实施的 DADS (Deployable Autonomous Distributed System)项目,旨在开发可在近海水域部署的水下无线传感器网络,利用多传感器数据融合技术,监测水下的敌军潜艇活动情况,并引导攻击敌军目标。

在民用方面,Intel 和微软等公司也开始关注传感器网络方面的研究工作,纷纷设立或启动相应的行动计划。比如,2002 年 10 月 24 日,Intel 公司发布了“基于微型传感器网络的新型计算发展规划”。今后,Intel 将致力于微型传感器网络在预防医学、环境监测、森林灭火乃至海底板块调查、行星探查等领域的应用。

除美国以外,英国、日本、韩国、意大利、巴西等国家也对传感器网络表现出了极大的兴趣,并各自展开了该领域的研究工作,如日本总务省在 2004 年 3 月成立了泛在传感器网络调查研究会,该研究会的主要目的就是无线传感器网络的研究开发课题、标准化课题、社会的认知性和技术推进政策等进行探讨。NEC 等公司已经推出了相关产品,并进行了一些应用试验。韩国信息通信部所制定的信息技术 839 战略中,3 就是指 IT 产业的三大基础设施,即宽带融合网络、无线传感器网络和下一代互联网协议。为实现 839 战略,韩国目前已经采取了推动无线传感器技术发展的一系列具体措施。

中国现代意义的无线传感器网络及其应用研究几乎与发达国家同步启动,首先被记录在 1999 年发表的中国科学院《知识创新工程试点领域方向研究》的信息与自动化领域研究报告中。2001 年,中国科学院挂靠中科院上海微系统所成立了微系统研究与发展中心,旨在整合中科院内部的相关单位,共同推进传感器网络的研究^[18]。

从 2002 年开始,中国国家自然科学基金委员会开始部署传感器网络相关的课题。截至 2008 年年底,中国国家自然科学基金共支持面上项目 111 项,重点项目 3 项;国家“863”重点项目发展计划共支持面上项目 30 余项,国家重点基础研究发展计划“973”也设立 2 项与传感器网络直接相关的项目。国家发改委中国下一代互联网工程项目(CNGI)也对传感器网络项目进行了连续资助。“中国未来 20 年技术预见研究”提出的 157 个技术课题中有 7 项直接涉及无线传感器网络。2006 年年初发布的《国家中长期科学和技术发展规划纲要》

为信息技术确定了 3 个前沿方向,其中 2 个与无线传感器网络研究直接相关;中国工业和信息化部在 2008 年启动的“新一代宽带移动通信网”国家级重大专项中,第 6 个子专题“短距离无线互联与无线传感器网络研发和产业化”是专门针对传感器网络技术而设立的。

近年来,随着物联网概念的兴起,无线传感器网络的研究进展十分迅速,取得了较为丰富的研究成果。特别是进入 21 世纪后,对无线传感器网络的核心问题有了许多新颖的解决方案和设想。但已有的研究工作也为该领域提出了越来越多需要解决的问题,如无线传感器网络的频谱认知和利用、节点的协同和通信安全等问题。随着这些关键性问题的解决以及传感器节点价格的逐步下降,无线传感器网络将进一步得到广泛应用。

5.1.4 WSN 的特点和优点

作为一种由若干微小节点组成,实时地监测、感知和采集节点部署区的感知对象的各种信息(如光强、温度、湿度、噪声和有害气体浓度等物理现象),并对这些信息进行处理后以无线的方式发送出去以提供各种控制和决策依据的网络,在实际的部署和使用中,具有以下特点^[16]。

(1) 网络规模大。大部分无线传感器网络的节点分布在很大的地理区域内,覆盖范围很大并且部署密集,有些应用下传感器节点的数量可能达到几百万个,在单位面积内可能存在大量的传感器节点。

(2) 节点微型化。电源能量、通信能力、计算存储能力有限。传感器网络节点一般采用电池供电,能量有限。节能设计非常关键。无线传感器网络以“多跳”方式传输数据,通信范围一般在百米之内。其节点由于体积、成本以及能量的限制,处理器和存储器的能力和容量有限,计算能力十分有限。因此对节点运行的程序包括使用的存储空间、算法时间开销有较高的要求。

(3) 动态性。网络的拓扑结构可能因为很多因素的改变而变化。比如,环境因素、新节点的加入离开或已有节点失效等,而且对于很多野外架设的无线传感器网络,为更好地节省能源,延长生存时间,其节点具有休眠功能。这就要求网络协议具有足够的灵活性,能适应节点周期性睡眠特性。

(4) 自组织。无线传感器网络的动态性,要求传感器节点需要具有自组织的能力,能够进行配置和管理,通过拓扑控制机制和网络协议自动形成能够转发数据的多跳无线网络系统。

(5) 可靠性。节点的维护可能性很小,通信机密和安全十分重要。传感器网络具有强壮性和容错性。

(6) 时效性。无线传感器网络采集的光强、温度、湿度、噪声或有害气体浓度等数据都需要在一定时间内及时送达观察者或数据处理中心,以及时监控环境或设备的状态,对可能发生的事故和危险情况进行及时预告和提醒。

(7) 以数据为中心。在无线传感器网络中,位于监测区域的传感器节点负责采集相关观察者感兴趣的数据信息,最终将数据传送至汇聚节点并转发给观察者。其网络感知和通信的目标是采集具有某种特征属性的数据或报告事件的发生信息,而不关心数据具体来源于哪个传感器节点。其传感器节点可以采用编号标识。但发送数据时并不一定发送节点编号,而是通告数据或事件的类型和特征。因此无线传感器网络是一个以数据为中心组织通

信的网络^[22]。

(8) 应用相关性强。不同的传感器网络应用关心不同的物理量,对系统的要求也不同,其硬件平台、软件系统和网络协议有很大差别。这要求操作系统具有良好的移植性能,能满足各种各样的硬件平台,同时能够提供各种不同的功能,满足实际需要。

在上述特点中,节点的可感知、微型化和自组织能力是无线传感器网络所具有的三个最基本的特点。

基于上述特点,无线传感器网络非常适合应用于恶劣的环境尤其是无人值守的场景中。即使被监测区域中的部分节点损坏或休眠时,也不会造成该区域的无线传感网络崩溃或影响数据的获得,网络仍能为系统提供可靠的监测数据。因此,无线传感网络可应用于航空航天、野外勘测、军事国防、农业生态、应急指挥等诸多领域。其优势集中体现在以最少的成本和最大的灵活性,连接任何有通信需求的终端设备,采集数据并发送指令。作为无线自组织网络,能以最大的灵活性自动完成不规则分布的各种传感器与控制节点的组网,同时适应一定的移动能力和动态调整能力。

通过引入无线传感器网络,可以使系统在信息获取方面具有以下优点。

(1) 分布节点中多角度和多方位信息的综合,有效地提高了对被监测区域观测的准确度和信息的全面性。

(2) 传感器网络低成本、高冗余的设计原则为整个系统提供了较强的容错能力。即使在极为恶劣的应用环境中,监控系统也可以正常工作。

(3) 节点中多种传感器的混合应用有利于提高探测的性能指标。

(4) 多节点联合,可形成覆盖面积较大的实时探测区域。借助于个别具有移动能力的节点对网络拓扑结构的调整能力,可以有效地消除探测区域内的阴影和盲点。

5.1.5 WSN 的发展趋势

在今后的发展中,无线传感器网络将结合物联网的应用更大规模地应用到太空、野外、工控或是室内各种有人或无人的场景中,节点的体积和生存时间仍然是实际应用中所考虑的主要问题。无线传感器网络节点将产生海量的、各具特征的传感数据,包括音频、视频等多媒体数据。同时会对网络的灵活性,网络管理和配置的开销,数据的可靠性和安全性提出更高要求;对可能有冲突和冗余的传感器数据进行进一步融合也是重要的发展方向。总的来说,未来传感器网络的研究主要有以下几个方面^[18]。

(1) 节点进一步微型化。利用现在的芯片集成技术、微机电技术和微无线通信技术,设计体积更小、生存周期更长、成本更低的无线传感器网络节点仍然是无线传感器网络发展一个基础的研究方面。

(2) 寻求更好的系统节能策略。绝大部分无线传感器网络的电源不可更换或不能短时间内更换,因此功耗问题一直是制约无线传感器网络发展的核心。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。

(3) 进一步降低节点成本。由于传感器网络的节点数量非常大,往往是成千上万个。要使传感器网络达到实用化,要求每个节点的价格控制在较为低廉的价格,甚至是一次性使用。而现在每个传感器节点的造价仍然无法满足普通工业环境或家居环境的高密度使用。

如果能够有效地降低节点的成本,将会大大推动传感器网络的发展。

(4) 提高传感器网络安全性和抗干扰能力,与普通的网络一样,传感器网络同样也面临着安全性的考验,即如何利用较少的能量和较小的计算量来完成数据加密、身份认证等功能,在破坏或受干扰的情况下可靠地完成执行的任务,也是一个重要的研究课题。

(5) 提高节点的自动配置能力。对于逐渐增大的网络,将研究如何在部分节点出现错误或休眠时能将大量的节点迅速按照一定的规则组成一定的结构,研究在网络拓扑变化的情况下数据实时性的保证,并减少网络管理的开销。

(6) 完善高效的跨层网络协议栈。在无线传感器网络已有的分层体系结构上引入跨层的机制和参数,打破层的界限,多层合作实现某些优化目标。从而在无线传感器节点上构造高效精巧的网络协议栈,达到性能平衡。

(7) 网络的多应用和异构化。随着无线传感器网络的发展,同一传感器网络将从支持单一应用向支持多种不同应用发展,大规模的无线传感器网络中将包括大量的异构传感器节点。作为以数据为中心的网络,这样的无线传感器网络中将产生具有不同属性的、海量的传感数据。传感器节点的功能不一定相同,它们产生的传感数据种类可能不同。同时由于需要满足不同的服务质量要求,传感数据的分发速率也可能不同。传感器节点的异构性还体现在节点的能源状况、通信能力、通信愿望、数据处理能力和数据处理愿望等方面的不同。无线传感器网络是与应用相关的网络,支持多种应用必然导致网络节点的异构化。

(8) 进一步与其他网络的融合。无线传感器网络与现有网络的融合将带来新的应用。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基于无线传感器网络的网格体系来完成。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的操作平台。

无线传感器网络目前已经展示出了非凡的应用前景。在今后的发展中,随着新材料、新能源技术的进步和物联网的兴起应用,通过进一步与其他产业的结合,无线传感器网络节点成本、功耗和体积等关键问题会逐渐得到解决,无线传感器的更多应用也将逐渐被发掘出来,并对整个社会和经济的发展起到巨大的推动作用。

5.2 无线传感器网络的系统结构

在无线传感器网络的传感器节点、感知对象和观察者三要素中,大量的传感器节点随机部署,通过自组织的方式构成网络,以协作的方式实时感知、采集和处理网络覆盖区域中的感知对象,检测到的信号由本地传感器节点通过邻近传感器节点多跳传输到观测者。在传感信息从本地到观测者的过程中,有三类无线传感器节点参与了信息的产生、交换和接收,分别是本地观测节点、中继节点和汇聚节点。有的网络还具有管理节点。

一类是本地观测节点,该节点利用本身加装的传感器检测、感知对象的各种物理信号,并能够对信号进行简单的处理再发送出去;一类是中继节点,该节点接收本地观测节点或其他中继节点传来的信息,并通过路由策略选择下一跳节点将其向观察者传递,中继节点的选择策略和中继节点的路由策略决定了无线传感器网络的网络结构;第三类节点称为汇聚节点,该节点通常具有比普通节点更强大的处理能力和通信能力,往往直接或通过其他网络与观察者相连,可将分布到各处的传感器节点采集的数据送往观察者,这类节点起着无线传

传感器网络网关的作用。管理节点可能是网关或观察者,也可能是不同于观察者,但可以与无线传感器网络通信的其他机器或设备,起着对无线传感器网络进行配置和管理的作用。

可以从这几个角度来认识无线传感器网络的系统结构:(1)无线传感器网络的节点结构;(2)无线传感器网络的软件体系结构;(3)无线传感器网络的网络拓扑结构;(4)无线传感器网络的协议结构。

5.2.1 节点结构

传感器网络节点就是一个微型的嵌入式系统,构成了无线传感器网络的基础支持平台,监测感知对象及其变化过程。本地观测节点和中继节点都是普通的传感器节点,所谓的观测和中继的划分只是针对某个具体观测对象在数据采集和传输上的功能划分,其节点结构包括运行的程序都是完全相同的。一个本地观测节点在相对其他观测节点时可以成为一个中继节点。在不同的应用中,传感器网络节点的结构不尽相同。但无论是本地观测节点、中继节点还是汇聚节点都会有如图 5.1 所示的 4 个主要的组成部分^[15]:数据采集模块(传感器、A/D 转换器)、数据处理和控制模块(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)。可以选择的其他功能单元包括定位模块、移动模块以及电源自供电模块等。

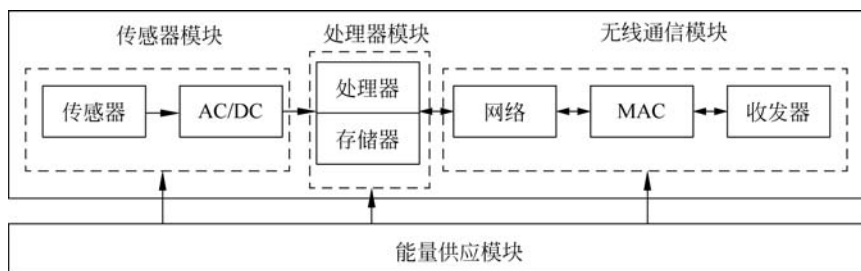


图 5.1 传感器节点体系结构

传感器模块负责监测区域内针对特定观测对象和物理信号的采集和数据转换;处理器模块负责控制整个传感器的硬件,存储和处理本身采集的或其他节点发来的数据;无线通信模块负责与其他传感器节点进行无线通信,交换应用数据和网络管理控制数据;能量供应模块为传感器节点提供运行所需要的能量,通常采用微型电池供电;定位模块用于得到节点的位置信息,该模块通常要利用已知位置的几个锚点信息;移动模块支持节点在自身或被观测对象移动的情况下采集、通信和定位功能的正确;电源自供电模块将节点周围的太阳能、化学能或是节点自身的动能转化为电能为节点供电,增加节点的生存时间。

对于无线传感器网络节点结构的设计,微型化和低功耗的应用意义重大。在今后的发展中,首先,可研究采用微电子机械系统(Micro Electro Mechanical Systems, MEMS)加工技术,并结合新材料的研究,设计符合未来要求的微型传感器;其次,需要研究智能传感器网络节点的设计理论,使之可识别和配接多种敏感元件,并适用于主被动各种检测方法;第三,各节点必须具备足够的抗干扰能力和适应恶劣环境的能力,并能够适合不同应用场合、尺寸的要求;第四,研究利用传感器网络节点具有的局域信号处理功能,在传感器节点附近局部完成多种信号信息处理工作,将原来由中央处理器实现的串行处理、集中决策的系统,改变为一种并行的分布式信息处理系统。

5.2.2 软件结构

无线传感器网络节点的软件结构与其他大多数嵌入系统的软件结构类似,最靠近基础硬件并对各种软硬件资源进行管理的是操作系统。但相比一般的嵌入式系统,无线传感器网络节点对操作系统的体积大小、能量利用率、节点相互间通信以及可重配置、可靠性和适应性等方面提出了更高的要求。传感器网络的操作系统均采用微内核的设计,需要具有代码量小、耗能量少、并发性高、鲁棒性好并可以适应不同的应用的特性。目前无线传感器网络操作系统大多采用事件驱动的组件设计模式,完整的系统由调度器和分层组件组成。高层组件面向应用,向低层组件发出命令;底层组件管理硬件,向高层组件报告事件^[11]。

对于每一类完整的无线传感器网络的软件结构,都需要有面向特定应用的业务逻辑部分软件。这部分软件类似微机上普通的应用程序,可根据传感器网络节点采集的数据的类型、特性、用途和用户的需要对数据进行特定的处理。除了管理各种节点资源的无线传感器网络操作系统和面向应用的应用软件,在现代的无线传感器网络软件体系中,还会设计处理分布系统所特有功能的软件,形成无线传感器网络中间件软件,无线传感器网络中间件将使无线传感器网络应用业务的开发者集中于设计与应用有关的部分,从而简化设计和维护工作。

无线传感器网络中间件和平台软件构成无线传感器网络业务应用的公共基础,提供了高度的灵活性、模块性和可移植性。在一般无线传感器网络应用系统中,管理和信息安全纵向贯穿各个层次的技术架构,最底层是无线传感器网络基础设施层,逐渐向上展开的是应用支撑层、应用业务层、具体的应用领域——军事、环境、健康和商业等。无线传感器网络中间件和平台软件在无线传感器网络软件系统架构中的位置如图 5.2 所示^[17]。

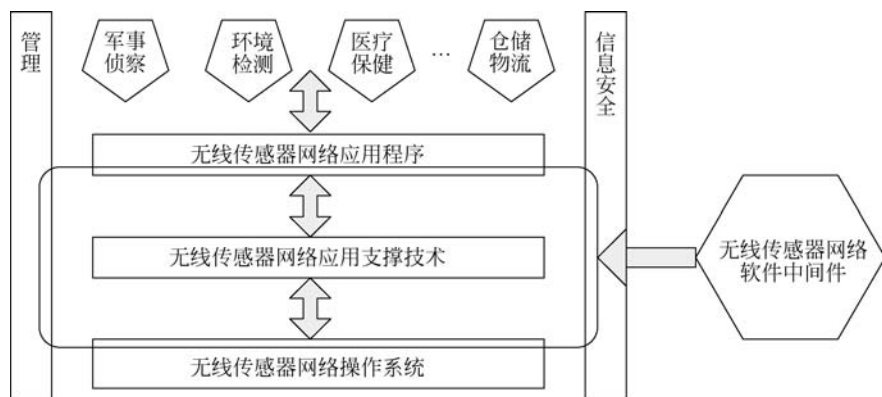


图 5.2 无线传感器网络软件体系结构

无线传感器网络应用支撑层、无线传感器网络基础设施和基于无线传感器网络应用业务层的一部分共性功能以及管理、信息安全等部分组成了无线传感器网络中间件和平台软件。其中应用支撑层支持应用业务层为各个应用领域服务,提供所需的各种通用服务,在这一层中核心的是中间件软件,管理和信息安全是贯穿各个层次的保障。

无线传感器网络中间件和平台软件采用层次化、模块化的体系结构,使其更加适应无线传感器网络应用系统的要求,并用自身的复杂换取应用开发的简单。一方面,中间件提供满

是无线传感器网络个性化应用的解决方案,形成一种特别适用的支撑环境;另一方面,中间件通过整合,使无线传感器网络应用只需面对一个可以解决问题的软件平台,因而以无线传感器网络中间件和平台软件的灵活性和可扩展性保证了无线传感器网络的安全性,提高了无线传感器网络数据管理能力和能量效率,降低了应用开发的复杂性。

5.2.3 拓扑结构

通常将网络中的主机、终端和其他通信控制与处理设备抽象为节点,将通信线路抽象为线路;而将节点和线路连接而成的几何图形称为网络的拓扑结构。网络拓扑结构可以反映网络中各实体之间的结构关系。无线传感器网络的拓扑结构是组织无线传感器节点的组网技术,有多种形态和组网方式。常用的拓扑结构有平面网络结构、分级网络结构、混合网络结构和 Mesh 网络结构^[21,22]。下面根据节点功能及结构层次分别加以介绍。

(1) 平面网络结构

平面网络结构是无线传感器网络中最简单的一种拓扑结构,如图 5.3 所示,所有节点为对等结构,具有完全一致的功能特性,也就是说每个节点均包含相同的 MAC、路由、管理和安全等协议。这种网络拓扑结构简单,易维护,具有较好的健壮性,事实上就是一种 Ad Hoc 网络结构形式。由于没有中心管理节点,故采用自组织协同算法形成网络,其组网算法比较复杂。

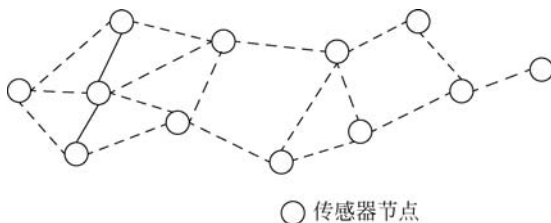


图 5.3 无线传感器平面网络结构

(2) 分级网络结构(也称层次网络结构)

分级网络结构是无线传感器网络中平面网络结构的一种扩展拓扑结构,如图 5.4 所示,网络分为上层和下层两个部分:上层为中心骨干节点;下层为一般传感器节点。通常网络可能存在一个或多个骨干节点,骨干节点之间或一般传感器节点之间采用的是平面网络结构。具有汇聚功能的骨干节点和一般传感器节点之间采用的是分级网络结构。所有骨干节点为对等结构,骨干节点和一般传感器节点有不同的功能特性,也就是说每个骨干节点均包含相同的 MAC、路由、管理和安全等功能协议,而一般传感器节点可能没有路由、管理及汇聚处理等功能。这种分级网络通常以簇的形式存在,按功能分为簇首(具有汇聚功能的骨干节点: cluster-head)和成员节点(一般传感器节点: members)。这种网络拓扑结构扩展性好,便于集中管理,可以降低系统建设成本,提高网络覆盖率和可靠性,但是集中管理开销大,硬件成本高,一般传感器节点之间不能直接通信。

(3) 混合网络结构

混合网络结构是无线传感器网络中平面结构和分级结构的一种混合拓扑结构,如图 5.5 所示。

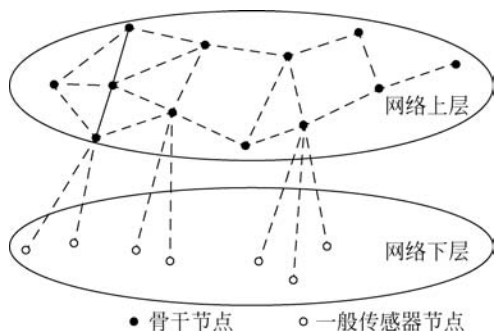


图 5.4 无线传感器网络分级网络结构

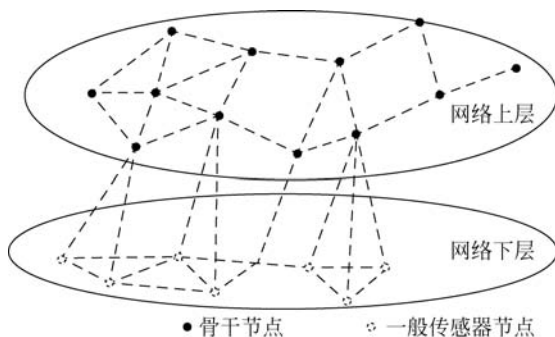


图 5.5 无线传感器网络混合网络结构

网络骨干节点之间及一般传感器节点之间都采用平面网络结构，而网络骨干节点和一般传感器节点之间采用分级网络结构。这种网络拓扑结构和分级网络结构不同的是，一般传感器节点之间可以直接通信，无须通过汇聚骨干节点来转发数据。这种结构同分级网络结构相比，支持的功能更加强大，但所需硬件成本更高。

(4) Mesh 网络结构

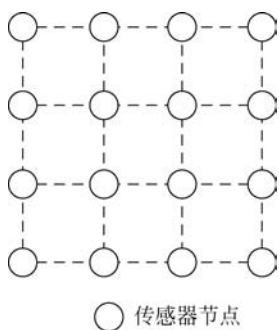


图 5.6 无线传感器网络 Mesh 网络结构

Mesh 网络结构是一种新型的无线传感器网络结构，较传统无线网络拓扑结构具有一些结构和技术上的不同。从结构来看，Mesh 网络是规则分布的网络，不同于完全连接的网络结构，该结构中通常只允许和节点最近的邻居通信，如图 5.6 所示，网络内部的节点一般都是相同的，因此 Mesh 网络也称为对等网。

Mesh 网络是构建大规模无线传感器网络的一个很好的结构模型，特别是那些分布在一个地理区域的传感器网络，如人员或车辆安全监控系统。由于通常 Mesh 网络结构节点之间存在多条路由路径，网络对于单点或单个链路故障具有较强的容错能力和鲁棒性。Mesh 网络结构最大的优点就是尽管所有节点都是对等的地位，且具有相同的计算和通信传输功能。但 Mesh

网络可采用如图 5.7 所示的分级网络结构，这种结构中，由于一些数据处理可以在每个分级的层次里面完成，因而比较适合于无线传感器网络的分布式信号处理和决策。

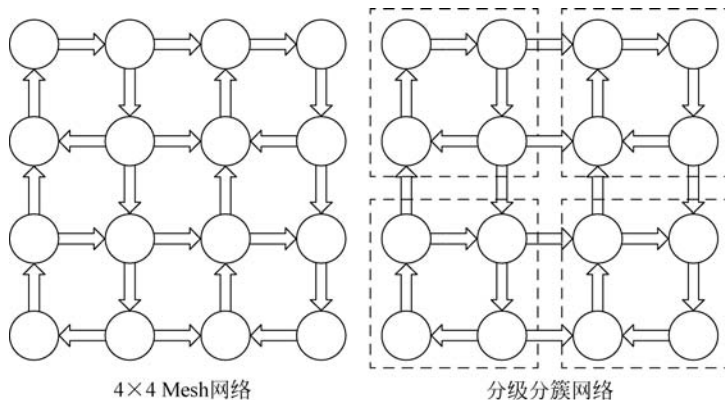


图 5.7 采用分级网络结构技术的 Mesh 结构

在无线传感器网络实际应用中,通常根据应用需求来灵活地选择合适的网络拓扑结构。

5.2.4 协议结构

无线传感器网络的协议结构实现需要支持无线传感器网络的自组织。现有的有线网络协议栈,如 TCP/IP 协议栈和一些自组织网络协议并不能够满足传感器网络的需求。相对于一般意义上的自组织网络,传感器网络有以下一些特色,在对无线传感器网络协议结构的设计中需要特殊考虑。

(1) 无线传感器网络中的节点数目高出 Ad hoc 网络节点数目几个数量级,这就对传感器网络的可扩展性提出了要求。由于传感器节点的数目多、开销大,传感器网络通常不具备全球唯一的地址标识。这使得传感器网络的网络层和传输层相对于一般网络而言,有很大的简化。此外,由于传感器网络节点众多,单个节点的价格对整个传感器网络的成本而言非常重要。

(2) 自组织传感器网络最大的特点就是能量受限。传感器节点受环境的限制,通常由电量有限且不可更换的电池供电,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。

(3) 由于传感器网络应用环境的特殊性、无线信道不稳定以及能源受限的特点,传感器网络节点受损的概率远大于传统网络节点,因此自组织网络的健壮性保障是必需的,以保证部分传感器网络的损坏不会影响全局任务的进行。

(4) 传感器节点高密度部署,网络拓扑结构变化快,对拓扑结构的维护也提出了挑战。上述这些特点使得无线传感器网络有别于传统的自组织网络,并在当前的一些体系结构设计的尝试中得到了突出的表现。

根据以上特性,传感器网络需要根据用户对网络的需求设计适应自身特点的网络体系结构,为网络协议和算法的标准化提供统一的技术规范,使其能够满足用户的需求。传感器网络体系结构具有二维结构,即如图 5.8(a)所示的横向的通信协议层和纵向的传感器网络管理面。通信协议层可以划分为物理层、链路层、网络层、传输层和应用层五层^[15],而网络管理面则可以划分为能耗管理面、移动性管理面以及任务管理面。管理面的存在主要是用于协调不同层次的功能,以求在能耗管理、移动性管理和任务管理方面获得综合考虑的最优设计。

图 5.8(b)是对图 5.8(a)的细化和改进。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感器网络协议都需要定位和同步信息。诸多机制一部分融入各层协议中,用以优化和管理协议流程,另一部分则独立在协议外层,通过各种手机和配置接口对相应机制进行配置和监控。

1) 物理层

无线传感器网络的传输介质可以是无线、红外或者光介质。例如,在微尘项目中,使用了光介质进行通信。还有使用红外技术的传感器网络,它们都需要在收发双方之间存在视距传输通路。而大量的传感器网络节点则基于射频电路。

2) 数据链路层

数据链路层负责数据流的多路复用、数据帧检测、媒体接入和差错控制。数据链路层保证了传感器网络内点到点和点到多点的连接。

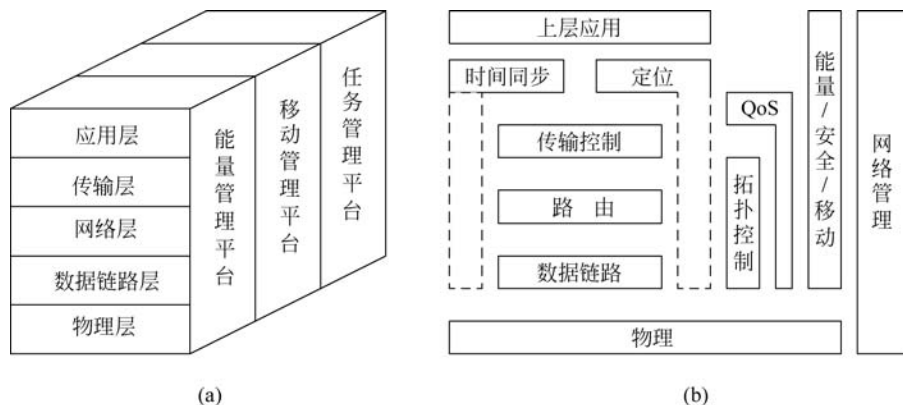


图 5.8 无线传感器网络协议结构

(1) 媒体接入控制。

在无线多跳 Ad hoc 网络中,媒体访问控制(MAC)层协议主要负责两个职能。其一是网络结构的建立。因为成千上万个传感器节点高密度地分布于待测地域,MAC 层机制需要为数据传输提供有效的通信链路,并为无线通信的多跳传输和网络的自组织特性提供网络组织结构。其二是为传感器节点有效合理地分配资源。

(2) 差错控制。

数据链路层的另一个重要功能是传输数据的差错控制。在通信网中有两种重要的差错控制模式,分别是前向差错控制(FEC)和自动重传请求(ARQ)。在多跳网络中,由于重传的附加能耗和开销而很少使用 ARQ,即便是使用 FEC 方式,也只有低复杂度的循环码被考虑到,而其他的适合传感器网络的差错控制方案仍处于探索阶段。

3) 网络层

传感器网络节点高密度地分布于待测环境内或周围。在传感器网络节点和接收器节点之间需要特殊的多跳无线路由协议。无线传感器网络的路由算法在设计时需要特别考虑能耗的问题。基于节能的路由有若干种,如最大有效功率(PA)路由算法、最小能量路由算法,以及基于最大最小有效功率节点路由算法等^[29]。传感器网络的网络层设计特色还体现在以数据为中心。以数据为中心的特点要求传感器网络能够脱离传统网络的寻址过程,快速有效地组织起各个节点的信息并融合提取出有用信息直接送给用户^[23,24]。

4) 传输层

无线传感器网络的计算资源和存储资源都十分有限,早期无线传感器网络数据传输量并不是很大。而且互联网的传输控制协议(TCP)并不适应无线传感器网络环境,因此早先的传感器网络一般没有专门的传输层,而是把传输层的一些重要功能分解到以下各层实现。随着无线传感器网络应用范围的增大,无线传感器网络上出现了较大的数据流量,并开始传输包括音视频数据在内的媒体数据流。因此目前面向无线传感器网络的传输层研究也在展开,以在多种类型数据传输任务的前提下,保障各种数据的端到端的传输质量。

5) 应用层

包括一系列基于监测任务的应用层软件。与传输层类似,应用层研究也相对较少。应用层的传感器管理协议、任务分配和数据广播管理协议以及传感器查询和数据传播管理协

议是传感器网络应用层需要解决的潜在问题。

网络协议结构是网络的协议分层以及网络协议的集合,是对网络及其部件所应完成功能的定义和描述。对无线传感器网络来说,其网络协议结构不同于传统的计算机网络和通信网络。相对已有的有线网络协议栈和自组织网络协议栈,需要更为精巧和灵活的结构,用于支持节点的低功耗、高密度,提高网络的自组织能力、自动配置能力、可扩展能力和传感器数据的实时性保证。

在未来,有许多广阔的应用领域可以使传感器网络成为人们生活中的一个不可缺少的组成部分。实现这些和其他的一些传感器网络的应用需要自组织网络技术。充分认识和研究传感器网络自组织方式及传感器网络的体系结构,为网络协议和算法的标准化提供理论依据,为设备制造商提供参考,成为目前的紧迫任务。也只有从网络体系结构的研究入手,带动传感器组织方式及通信技术的研究,才能更有力地推动这一具有战略意义的新技术的研究和发展。

5.3 无线传感器网络的应用

无线传感器网络的快速布置、自组织性和容错能力使其不会因为某些节点在恶意攻击中的损坏而导致整个系统的崩溃,快速布置、自组织性和容错能力等特性使它们非常适合应用于各种恶劣的不适合有人值守或参与的环境中,如战场侦察环境,因此受到了军事发达国家的普遍重视。同时,无线传感器网络在工农业、生物医疗、环境监测、抢险救灾等很多民用领域也都拥有十分广阔的应用前景。特别适用于那些设备成本较低,传输数据量较少,使用电池供电并且要求工作时间较长的应用场合。正是这些特点,传感器网络在现代社会的诸多领域中显现了很有价值的应用前景^[17]。

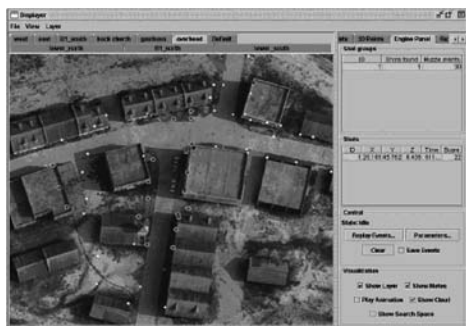
5.3.1 军事领域

早在 20 世纪 90 年代,美国就开始了传感器网络的军事应用研究工作。无线传感器网络非常适合应用于恶劣的战场环境中,因此军事领域成为无线传感器网络最早展开的领域。目前国际许多机构的课题都是以战场需求为背景展开的。例如,美军开展的 C4ISR(T(command, control, communication, computing, intelligence, surveillance, reconnaissance and targeting)计划、Smart Sensor Web、灵巧传感器网络通信、无人值守地面传感器群、传感器组网系统、网状传感器系统 CEC,等等。未来战争中的战场指挥系统将会是一个集命令、控制、通信、计算、智能、监视、侦察和定位于一体的战场指挥系统。在该领域,无线传感器网络将会成为军事作战不可或缺的一部分^[25]。

由于战争的伤亡性,传感器设备将取代人去执行一些危险任务,如监控我军兵力、装备和物资,监视冲突区,侦察敌方地形和布防,定位攻击目标,评估损失,侦察和探测核、生物和化学攻击。另外由于传感器网络是由密集型、低成本、随机分布的节点组成的,自组织性和容错能力使其不会因为某些节点在恶意攻击中的损坏而导致整个系统的崩溃,这一点是传统的传感器技术所无法比拟的^[30],图 5.9 展示了狙击手利用无线传感器网络进行定位射击。

因此,可以通过传感器网络来获取战争信息。如在友军人员、装备及军火上加装传感器

节点以供识别,随时掌控自己情况。还可以利用飞机或火炮等发射装置,将大量廉价传感器节点按照一定的密度布放在待测区域或敌方阵地,对周边的各种参数,如温度、湿度、声音、磁场、红外线等各种信息进行采集,然后由传感器自身构建的网络,通过网关、互联网、卫星等信道,传回战场指挥中心。做到知己知彼,先发制人。传感器网络也可以为火控和制导系统提供准确的目标定位信息,传感器节点可作为智慧型武器的引导器,与雷达、卫星等相互配合,利用自身接近环境的特点,可避免盲区,使武器的使用效果大幅度提升。



(a) 检测区域俯瞰



(b) 狙击手定位图(红色为狙击手的位置,绿色为节点位置)

图 5.9 狙击手定位系统

一些典型的军方展开的与无线传感器网络相关的项目有 2001 年美国陆军提出的“灵巧传感器网络通信”计划、“无人值守地面传感器群”项目与“战场环境侦察与监视系统”。2002 年 5 月,美国 Sandia 国家实验室与美国能源部共同研究开发基于传感器网络的防生化武器袭击系统。2004 年 12 月美国陆军进行的 ExScal 的网络试验是迄今为止最大规模的无线传感器网络试验。2005 年 Crossbow 公司构建了枪声定位系统。

5.3.2 环境观测和预报领域

随着人们对环境的日益关注,环境科学所涉及的范围越来越广泛。通过传统方式采集环境数据是一件困难的工作,传感器网络正适合解决环境科学研究中遇到的普遍问题。通过布置传感器节点,可以跟踪候鸟昆虫的迁徙活动,研究它们的生活习性。另外可以通过撒播微型传感器于海洋以监测海洋状况。利用传感器网络还可以监测土壤状态,利用多种传感器来监测降雨量、河水水位和土壤水分,并依此预测爆发山洪的可能性。类似地,无线传感器网络可在森林防火中提高预报的准确性和及时性:传感器节点被随机密布在森林之中,平常状态下定期报告森林环境数据,当发生火灾时,这些传感器节点通过协同合作会在很短的时间内将火源的具体地点、火势的大小等信息传送给相关部门。

环境观测和预报领域的一些常见的应用包括^[13]:

- (1) 可通过跟踪珍稀鸟类、动物和昆虫的栖息、觅食习惯等进行濒危种群的研究;
- (2) 可在河流沿线分区域布设传感器节点,随时监测水位及相关水资源被污染的信息;
- (3) 在山区中泥石流、滑坡等自然灾害容易发生的地区布设节点,可提前发出预警,以便做好准备,采取相应措施,防止进一步的恶性事故的发生;
- (4) 可在重点保护林区铺设大量节点随时监控内部火险情况,一旦有危险,可立刻发出警报,并给出具体方位及当前火势大小;

(5) 布放在地震、水灾、强热带风暴灾害地区、边远或偏僻野外地区,用于紧急和临时场合应急通信。

以上应用都有一些成功的范例,如夏威夷大学在夏威夷火山国家公园内铺设的无线传感器网络,以监测那些濒临灭绝的植物所在地的微小气候变化。美国俄勒冈州研究生院在哥伦比亚河设置了 13 个站来监测每个站所在区域的流速、盐度、温度及水位。上海交通大学自动化系基于气体污染源浓度衰减模型,开展了气体源预估定位系统。同样,该项技术也可推广到放射性元素、化学元素等的跟踪定位中。

在生物种群研究方面,2002 年,英特尔的研究小组和加州大学伯克利分校以及巴港大西洋大学的科学家把无线传感器网络技术应用于监视大鸭岛海鸟的栖息情况。2005 年,澳洲的科学家利用无线传感器网络来探测北澳大利亚蟾蜍的分布情况,由于蟾蜍的叫声响亮而独特,因此利用声音作为检测特征非常有效。科研人员将采集到的信号在节点上就地处理,然后将处理后的少量结果数据发回给控制中心。通过处理,人们就可以大致了解蟾蜍的分布、栖息情况。

5.3.3 空间、海洋探索

探索外部星球一直是人类梦寐以求的理想,借助于航天器布撒的传感器节点实现对星球表面大范围、长时期和近距离的监测和探索,是一种经济可行的方案。NASA 的 JPL 实验室研制的 Sensor Webs 就是为将来的火星探测、选定着陆场地等需求进行技术准备的。现在该项目已在佛罗里达宇航中心的环境监测项目中进行测试和完善。美国宇航局空间探索计划中无线传感器网络的应用模式示意图如图 5.10 所示,水下无线传感器网络技术示意图如图 5.11 所示。

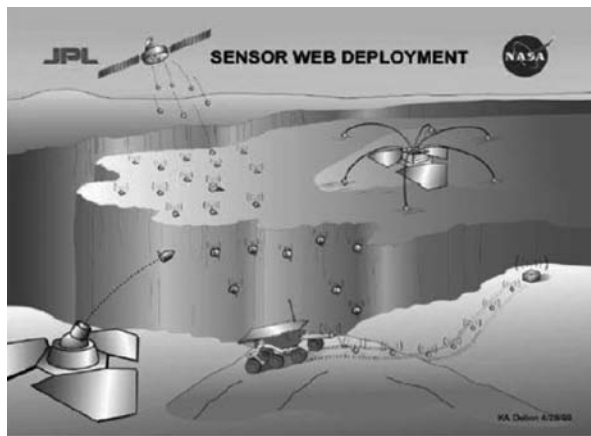


图 5.10 美国宇航局空间探索计划中无线传感器网络的应用模式示意图

21 世纪是人类深入开发利用海洋资源的世纪,海洋物理研究、数据采集、交通导航、资源勘探、污染监控、灾难预防,以及对水下军事目标的监测、定位、跟踪与分类等,都迫切需要高度智能化、自主性强、分布式、全天候的信息采集、传输、处理及融合技术。印度洋海啸之后,全球领导人在印尼雅加达举行峰会,议程的首要事务就是计划在印度洋构建传感器网络,以便对未来的海底地震做出预警。

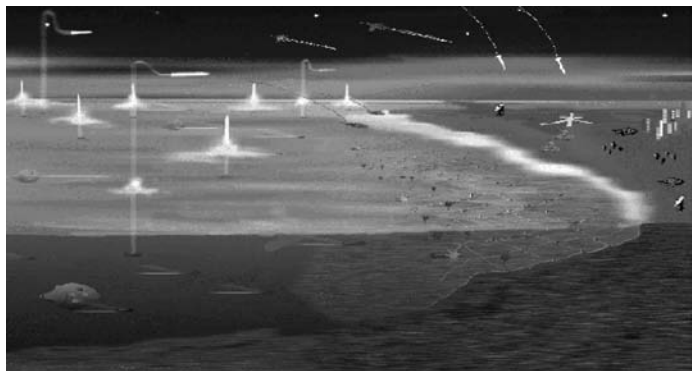


图 5.11 水下无线传感器网络技术示意图

5.3.4 工业领域

无线传感器网络可用于工业领域中的危险环境。在煤矿、石化、冶金行业对工作人员安全、易燃、易爆、有毒物质的监测的成本一直居高不下,通过无线传感器网络可方便地随时对煤矿、石油钻井、核电厂和组装线工作的员工进行监控,以及时得到工作现场有哪些员工、员工当前的身体状况以及他们的安全保障等重要信息。可以在相关的工厂每个有可能产生有毒物质的排放口安装相应的无线节点,可以完成对工厂废水、废气污染源的监测,样本的采集、分析和流量测定。无线传感器网络技术几乎可在各个工业的安防中得到应用,而使用规模也从几十个节点或几百个节点到数以万计节点不等^[23]。

无线传感器网络把部分操作人员从高危环境中解脱出来的同时,也提高了险情的反应精度和速度。尤其是在我国的煤炭开采行业,频繁发生的矿难使得对先进的井下安全保障系统的需求非常巨大。我国有大型煤矿 600 多家,中型煤矿 2000 多家,中小型煤矿 1 万余家。这些煤矿可利用无线传感器网络对运动目标的跟踪功能和对周边环境的多传感器融合监测功能,使井下安全生产的诸多环节得到更高的安全保障,也为矿难发生后的搜救工作提供了更多的便利。

成功应用的系统还有成峰公司与陕西天和集团共同研发的矿工井下区段定位系统,其结构框图如图 5.12 所示。各个工作地点放置一定数量的传感器节点,通过接收矿工随身携带的节点所发射的具有唯一识别码的无线信号进行人员定位。同时各个传感器节点还可以进行温度、湿度、光、声音、风速等参量的实时检测,并将结果传输至基站,进而传至管理中心。

除了煤矿、石化和冶金等行业,其他普通制造行业的生产设备监控也是无线传感器网络的重要应用领域。制造业技术的发展,使各类生产设备越来越复杂精密。在生产流水线及复杂机器设备上安装相应的传感器节点,可时刻掌握设备的工作健康状况,及早发现问题并及早处理,从而有效地减少损失,降低事故发生率。

成功应用的案例有电子科技大学、中国空气动力研究与发展中心以及北京航天指挥控制中心利用无线传感器网络技术设计的大型风洞测控系统,该系统对旋转机构、气源系统、风洞运行系统,以及其他没有基础设施而有线传感器系统安装又不方便或不安全的应用环境进行全方位检测。

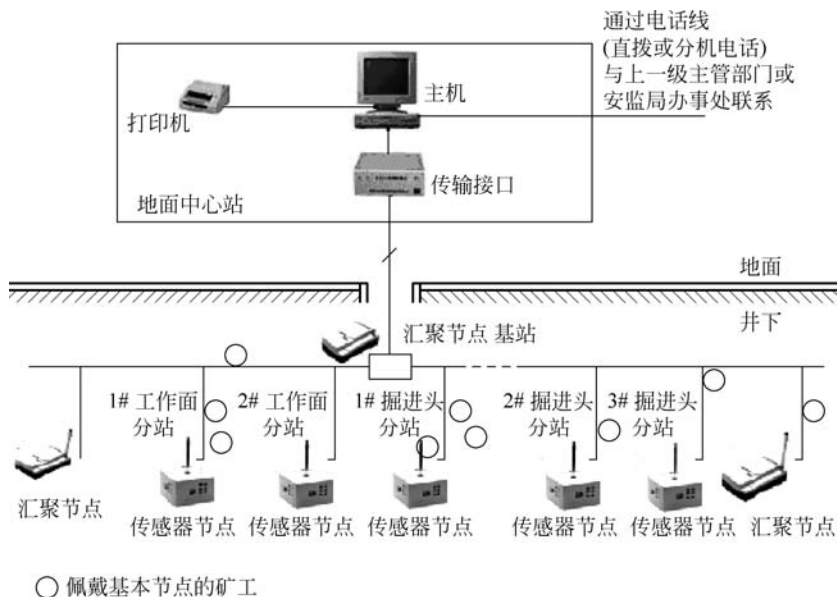


图 5.12 煤矿安全环境监测无线传感器网络的基本结构

5.3.5 农业领域

农作物的优质高产对经济发展的意义重大,在农业领域无线传感器网络有着卓越的技术优势。它可用于监视农作物灌溉情况、土壤空气变更情况、牲畜和家禽的环境状况以及大面积地表检测。一个典型的系统通常由环境监测节点、基站、通信系统、互联网以及监控软硬件系统构成,典型系统如图 5.13 所示。根据需要,人们可以在待测区域安放不同功能的传感器并组成网络,长期大面积地监测微小的气候变化,包括温度、湿度、风力、大气和降雨量等,收集有关土地的湿度、氮浓缩量和土壤 pH 值等,从而进行科学预测,帮助农民抗灾、减灾,科学种植,获得较高的农作物产量。在“九五”计划中,智能传感器和传感器网络化的研制被列为国家重点项目。以下介绍国内外在这个领域所做的一些尝试。

2002 年,英特尔公司率先在俄勒冈建立了世界上第一个无线葡萄园。传感器节点被分布在葡萄园的每个角落,每隔 1min 检测一次土壤温度、湿度或该区域有害物的数量,以确保葡萄可以健康生长。研究人员发现,葡萄园气候的细微变化可极大地影响葡萄酒的质量。通过长年的数据记录以及相关分析,便能精确地掌握葡萄酒的质地与葡萄生长过程中的日照、温度、湿度的确切关系。这是一个典型的精准农业、智能耕种的实例(见图 5.14)。

北京市科委计划项目“蔬菜生产智能网络传感器体系研究与应用”正式把农用无线传感器网络示范应用于温室蔬菜生产中。在温室环境里单个温室即可成为无线传感器网络的一个测量控制区,采用不同的传感器节点构成无线网络,来测量土壤湿度、土壤成分、pH 值、降水量、温度、空气湿度和气压、光照强度、CO₂ 浓度等,获得农作物生长的最佳条件,为温室精准调控提供科学依据。最终使温室中传感器、执行机构标准化、数字化、网络化,从而达到增加作物产量、提高经济效益的目的。多温室间无线传感器网络通信示意图如图 5.15 所示。

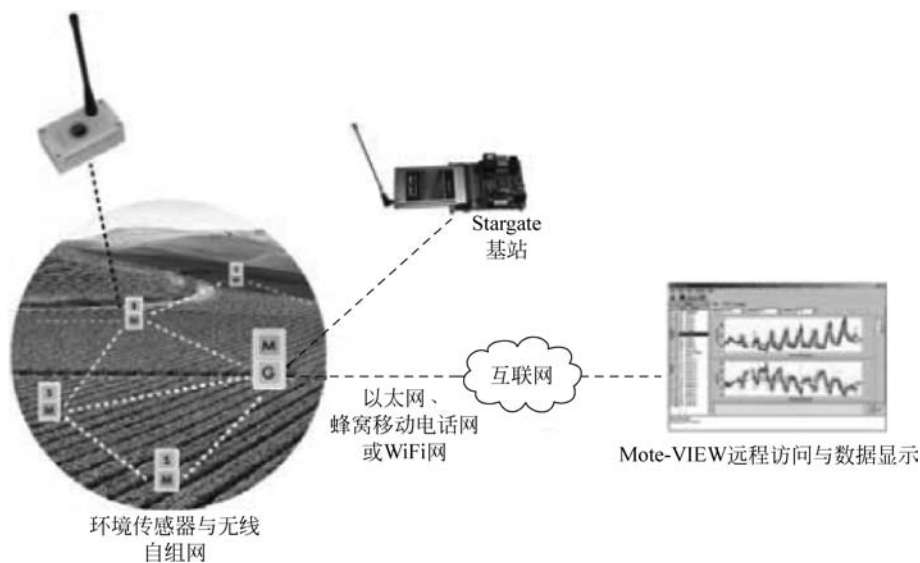


图 5.13 农业生态环境监测实例结构图



图 5.14 葡萄园环境监测系统示意图



图 5.15 多温室间无线传感器网络通信示意图

5.3.6 医疗健康与监护领域

传感器节点小的特点在医学上有特殊的用途。可以利用传感器监测病人的心率和血压等生理特征,并且利用传感器网络,医生就可以随时了解病人的病情,进行及时有效处理。可以利用传感器网络长期不间断地收集医学实验对象的生理数据,这为医学实验提供了极大的帮助,改变了传统数据采集模式,其收集的生理数据可以被长期保存用于医学研究。此外,在药物管理等诸多方面也有独特的应用。无线传感器网络在医疗研究、护理领域主要的应用包括远程健康管理、重症病人或老龄人看护、生活支持设备、病理数据实时采集与管理、紧急救护等,也为未来的远程医疗提供了更加方便、快捷的技术实现手段。

美国英特尔公司目前正在研制家庭护理的无线传感器网络系统,该系统是美国“应对老龄化社会技术项目”的一个环节。根据演示,该系统在鞋、家具以及家用电器等中嵌入传感

器,帮助老年人及患者、残障人士独立地进行家庭生活,并在必要时由医务人员、社会工作者进行帮助。研究人员开发出了基于多个加速度传感器的无线传感器网络系统,用于对人体行为模式进行监测,如坐、站、躺、行走、跌倒、爬行等(参见图 5.16)。

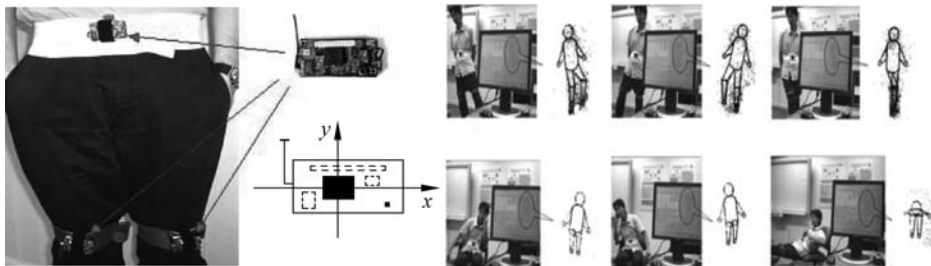


图 5.16 基于无线传感器网络技术的人体行为监测系统

该系统使用多个传感器节点,安装在人体几个特征部位。系统实时地把人体因行动而产生的三维加速度信息进行提取、融合、分类,进而由监控界面显示受检测人的行为模式。这个系统稍加产品化,便可成为一些老人及行动不便的病人的安全助手。同时,该系统也可以应用到一些残障人士的康复中心,对病人的各类肢体恢复进展进行精确测量,从而为设计复健方案带来宝贵的参考依据。

在该项目中研究人员可以利用无线传感器网络来实现远程医疗监视。在一个公寓内,17个传感器节点分布在各个房间,包括卫生间。每个传感器节点上包括了温度、湿度、光、红外传感器及声音传感器,部分节点使用了超声节点。根据这些节点收集到的信息,监控界面实时显示人员的活动情况。根据多传感器的信息融合,可以相当精确地判断出被检测人正在进行的行为,如做饭、睡觉、看电视、淋浴,等等,从而可以对老年人健康状况等进行精确检测。因为系统不使用摄像机,比较容易得到病人及其家属的接受。

5.3.7 建筑领域

各类大型工程的安全施工及监控是建筑设计单位长期关注的问题。如三峡工程、苏通大桥、渤海海域的大量的海洋平台和海底管线、2008年的奥运场馆等,其施工过程和后期使用过程的安全监控都是非常重要的环节。采用无线传感器网络,可以让大楼、桥梁和其他建筑物能够自身感觉并意识到它们的状况,使得安装了传感器网络的智能建筑自动告诉管理部门它们的状态信息,从而可以让管理部门进行及时定期的维修工作。

利用适当的传感器,例如压电传感器、加速度传感器、超声传感器、湿度传感器等,可以有效地构建一个三维立体的防护检测网络(参见图 5.17)。该系统可用于监测桥梁、高架桥、高速公路等道路环境。对于许多老旧的桥梁,桥墩长期受到水流的冲刷,传感器能够放置在桥墩底部,用以感测桥墩结构;也可放置在桥梁两侧或底部,搜集桥梁的温度、湿度、震动幅度、桥墩被侵蚀程度等,能减少断桥所造成的生命财产损失。

2003年,哈工大欧进萍院士的课题组开发了一种用于海洋平台和其他土木工程结构健康监测的无线传感器网络。利用多种智能传感器,如光纤光栅传感器、纤维增强聚合物光纤光栅筋及其应变传感器、压电薄膜传感器、形状记忆合金传感器、疲劳寿命传感器、加速度传感器等进行建筑结构的监测。该课题组2004年又针对超高层建筑的动态测试开发了一种



图 5.17 基于无线传感器网络的桥梁结构监测系统示意图

新型系统,并应用到深圳地王大厦的环境噪声和加速度响应测试中。在现场测试中,通过竖向布置在大厦结构外表面的无线传感器网络,系统成功测得了环境噪声沿建筑高度的分布以及结构的风致震动加速度响应。

对珍贵的古老建筑进行保护,是文物保护单位长期以来的工作重点。将具有温度、湿度、压力、加速度、光照等传感器的节点布放在重点保护对象当中,无须拉线钻孔,便可有效地对建筑物进行长期的监测(参见图 5.18)。此外,对珍贵文物而言,在保存地点的墙角、天花板等位置,监测环境的温度、湿度是否超过安全值,可以更妥善地保护展览品的品质。



图 5.18 将无线传感器网络应用在珍贵文物的保护场地

5.3.8 其他领域

(1) 智能交通控制管理

1995 年美国交通部就提出了“国家职能交通系统项目规划”,预计到 2025 年全面投入使用。该系统综合运用大量传感器网络,配合 GPS 系统、区域网络系统等资源,目的是使所有车辆都能保持在高效、低耗的最佳运行状态,前后自动保持车距,推荐最佳路线,并就潜在的故障发出警告。目前在宾夕法尼亚州的匹兹堡市就已经建有这样的交通信息系统,并由电台媒体附带产生了一定的商业价值^[24,25,30]。

(2) 安防系统

随着高科技产品在现代家庭中的应用,相应地也带来了一系列不安全因素,如煤气管道、热水器以及其他许多大容量家用电器的使用,都明显地增加了发生火灾的可能性以及煤气中毒、爆炸的危险等,且社会上不法分子行凶、盗窃等违法犯罪活动时有发生,给社会带来了不安定因素。因此安防系统是室内环境的必须保障。利用无线传感器网络低成本和易于部署的特点,可以提高安防系统的灵活性和可用性。如英国的一家博物馆利用无线传感器网络设计了一个报警系统,将节点放在珍贵文物或艺术品的底部或背面,通过侦测灯光的亮度是否改变,测量物品是否遭受到振动等因素,来确保展览品的安全。

(3) 仓储物流管理

利用无线传感器网络的多传感器高度集成,以及部署方便、组网灵活的特点,可用来进行粮食、蔬菜、水果、蛋肉存储仓库的温度、湿度控制,中央空调系统的监测与控制,厂房环境控制,特殊实验室环境的控制等,为保障存货质量安全、降低能耗提供解决方案。著名的沃尔玛连锁店已经投入资金,在其货物上加装无线传感器节点和射频识别条形码芯片,以保证其各类货物处在最佳的储藏环境中,同时,使该公司和供应商能够跟踪从生产到收款台的商品流向^[18]。超级市场中应用无线传感器网络进行各种物流检测和环境监测如图 5.19 所示。



图 5.19 超级市场中应用无线传感器网络进行各种物流检测和环境监测

(4) 智能家居系统

智能家居系统的设计目标是将住宅内的各种家居设备联系起来,使它们能够自动运行,相互协作,为居住者提供尽可能多的便利和舒适^[14]。如随着社会的发展及高层建筑的普及,传统电表、水表抄表操作将给抄表人员带来越来越多的麻烦。因此浙江大学计算机系的研究人员开发了一种基于无线传感器网络的无线水表系统,具有高度的自动化性能,抄表人员无须访问每户人家,只要在楼下按下抄表键,即可获得该楼的所有水表的读数。

5.4 无线传感器网络的研究方向

无线传感器网络技术是多学科交叉的研究领域,因而包含众多研究方向,无线传感器网络技术具有很强的应用相关性,要求网络节点设备能够在有限能量(功率)供给下实现

对特定目标的长时间监控,因此网络运行的能量效率是一切技术元素的优化目标^[31]。以下从核心关键技术和关键支撑技术两个层面分别介绍应用系统所必需的设计和优化的技术要点。

核心关键技术包括组网模式、拓扑控制、无线通信技术、介质访问控制和链路控制、网络层与路由协议设计、QoS 保障和可靠性设计以及移动模型研究等方面。

其中组网模式决定网络是否采取和采取什么样的层次结构。常用的组网模式包括扁平组网模式、基于分簇的层次型组网模式、网状网模式和移动汇聚模式等。在网络的总体层次结构确定之后,还应该对每个节点的连接关系进行具体的控制。为达到能量均衡的要求,这种控制往往是动态时变的。

常用的拓扑控制技术可分为时间控制、空间控制和逻辑控制 3 种。时间控制通过控制每个节点睡眠、工作的占空比、节点间睡眠起始时间的调度,让节点交替工作;空间控制通过控制节点发送功率改变节点的连通区域,使网络呈现不同的连通形态,从而获得控制能耗、提高网络容量的效果;逻辑控制则是通过邻居表将不“理想的”节点排除在外,从而形成更稳固、可靠和强健的拓扑。

对于每个节点来说,所使用的通信技术需要满足低成本、低功耗和便于安装的要求,因此一般使用短距无线通信技术。在各种短距无线通信技术中,IEEE 802.15.4 标准是针对低速无线个人域网络的无线通信标准,把低功耗、低成本作为设计的主要目标。由于 IEEE 802.15.4 标准的网络特征与无线传感器网络存在很多相似之处,故很多研究机构把它作为无线传感器网络的无线通信平台。ZigBee 协议即采用 IEEE 802.15.4 作为其 MAC 层和物理层协议。并在此之上提供了灵活的网络层协议。

在网络协议设计中,MAC 控制是无线传感器网络最为活跃的研究热点,这是因为传感器网络研究的核心问题之一是功耗管理。而无线传感器节点的射频模块是节点中最大的耗能部件,是优化的最主要目标。MAC 协议直接控制射频模块,因此对节点功耗有重要影响。传感器网络 MAC 协议一般采用了“侦听/休眠”交替的信道侦听机制,节点空闲时自动转换为休眠状态,以减少空闲侦听。MAC 协议利用频道的机制可分为三类:时分复用方式、频分复用方式和码分复用方式。对链路层控制来说,复杂环境的短距离无线链路特性与长距离完全不同,其过渡临界区宽度与通信距离的比例较大,复杂的链路特征也是在数据转发和汇聚中需要考虑的重要因素。

网络层和路由协议的任务是在传感器节点和汇聚节点之间建立信息传递的通路。由于传感器网络资源严重受限,因此路由协议要遵循的设计原则包括不能执行太复杂的计算、不能在节点保存太多的状态信息、节点间不能交换太多的路由信息等。为了有效地完成上述任务,已经提出了很多种针对无线传感器网络的路由协议,它们大都利用了无线传感器网络的以下特点:①传感器节点按照数据属性寻址,而不是 IP 寻址;②传感器节点监测到的数据往往被发送到汇聚节点;③原始监测数据中有大量冗余信息,路由协议可以合并数据,减少冗余性,从而降低带宽消耗和发射功耗;④传感器节点的计算速度、存储空间、发射功率和电源能量有限,需要节约这些资源。传感器网络路由协议可以归纳为以下 4 个类别:能量感知路由、以数据为中心的路由、洪泛式路由和基于地理位置的路由。

除了几类经典的路由协议设计方法,近年又出现了很多针对传感器网络的新路由协议

和设计方法,路由协议研究正逐渐深入和务实。例如,利用图论中流量优化的方法来为采样数据报选择路由;将 MAC 层和路由层协议捆绑设计,用跨层优化技术来进一步节省功耗;路由能对随机部署的传感器网络进行自适应调整网络拓扑,并让冗余节点经常处于睡眠状态。

QoS 保障和可靠性设计技术是传感器网络走向可用的关键技术之一。QoS 保障技术包括通信层控制和服务层控制。传感器网络大量的节点如果没有质量控制,将很难完成实时监测环境变化的任务。可靠性设计技术的目的则是保证节点和网络在恶劣工作条件下长时间工作。节点计算和通信模块的失效直接导致节点脱离网络,而传感模块的失效则可能导致数据出现变化,造成网络的误警。如何通过数据检测失效节点也是关键研究内容之一。

随着无线传感器网络组织结构从固定模式向半移动乃至全移动转换,节点的移动控制模型变得越来越重要。当汇聚节点沿着网络边缘移动收集,可以最大限度地提高网络生命周期。目前已经出现了多种汇聚点移动策略。可以根据每轮数据汇聚情况,估计下一轮能够最大延长网络生命期的汇聚点位置。也可针对事件发生频度自适应移动节点的位置,使感知节点更多地聚集在使事件经常发生的地方,从而分担事件汇报任务,延长网络寿命。

以上是无线传感器网络的核心支撑技术,在核心支撑技术之上,为更好地支持无线传感器网络的应用,无线传感器网络还需要若干关键支撑技术。主要的关键支撑技术包括无线传感器网络的时间同步技术、无线传感器网络的自动定位和目标定位技术、无线传感器网络的数据管理和信息融合技术、无线传感器网络的安全技术、无线传感器网络的操作系统技术和能量工程等。

5.5 本章小结

无线传感器网络是物联网的重要组成部分,是全球未来的三大高科技产业之一。无线传感器网络使物联网中的普通物体成为具有感知能力和通信能力的智能节点,从而可以与现有的网络互联互通并传送环境和感知对象的特征信息。无线传感器网络所具有的快速和灵活的无线连接特性,使网络的部署非常容易,特别适用于野外和危险的场景,在军事领域、空间海洋勘测领域、工业领域、农业领域、医疗领域、建筑领域和家居领域都有着广泛的应用前景。在今后的发展过程中将朝着微型化、低功耗和网络自组织的方向进一步发展。其核心研究技术包括无线传感器网络体系结构研究、能耗研究、无线传感器网络操作系统研究、无线传感器网络软件开发和中间件研究、面向应用的无线传感器网络数据管理和应用研究等。

思考与练习

1. 论述无线传感器网络在物联网中的作用。
2. 给出无线传感器网络的概念。

3. 简述无线传感器网络的特点和发展趋势。
4. 概要叙述无线传感器网络的体系结构。
5. 说明无线传感器网络关于降低能耗的机制。
6. 列出无线传感器网络较为重要的应用领域。
7. 结合自己的切身经历,给出一些无线传感器网络的应用实例。
8. 列出无线传感器网络的主要关键技术。
9. 设想一个有关野外森林防火的无线传感器网络的设计,包括网络节点结构、通信模式、组网模式、网络协议、操作系统、应用程序、数据管理和实际部署方式等方面。