

无

线传感器网络的

核心及安全技术研究

WUXIAN CHUANGANQI WANGLUO DE
HEXIN JI ANQUAN JISHU YANJIU

宋吾力◎著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

无

线传感器网络的

核心及安全技术研究

WUXIAN CHUANGANQI WANGLUO DE
HEXIN JI ANQUAN JISHU YANJIU

宋吾力◎著



中国水利水电出版社

内 容 提 要

全书共7章,主要包括:无线传感器网络概述,无线传感器网络的相关通信协议,无线传感器网络的定位、跟踪与时间同步技术,无线传感器网络的拓扑控制与覆盖技术,无线传感器网络中间件技术,无线传感器网络的数据融合与数据管理技术,无线传感器网络的安全技术。

本书作者在无线传感器网络领域进行了多年研究,书中大部分内容是研究的成果。全书内容新颖翔实、概念明确、逻辑缜密、文字精炼易懂,可供无线传感器网络研究人员和无线传感器网络设计工程师参考。

图书在版编目(CIP)数据

无线传感器网络的核心及安全技术研究/宋吾力著
.-北京:中国水利水电出版社,2015.6
ISBN 978-7-5170-3300-4

I. ①无… II. ①宋… III. ①无线电通信—传感器—
研究②无线电通信—传感器—安全技术 IV. ①TP212
②TN915.05

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 140001 号

策划编辑:杨庆川 责任编辑:陈 洁 封面设计:崔 蕾

书 名	无线传感器网络的核心及安全技术研究
作 者	宋吾力 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座100038) 网址:www.waterpub.com.cn E-mail:mchannel@263.net(万水) sales@waterpub.com.cn 电话:(010)68367658(发行部)、82562819(万水)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话:(010)88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京厚诚则铭印刷科技有限公司
印 刷	三河市佳星印装有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 15.75印张 204千字
版 次	2015年11月第1版 2015年11月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	48.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

无线传感器网络是一种综合信息采集、处理和传输功能于一体的智能网络信息系统。无线传感器网络由大量传感器节点组成,这些传感器节点被部署在指定的地理区域,通过无线通信和自组织方式形成无线网络,能够实时感知与采集指定区域内的各种环境数据和目标信息,并将所感知与采集到的数据和信息传送给监控中心或终端用户,实现对物理世界的感知、人与物理世界之间的通信和信息交互。如果说互联网的出现改变了人与人之间的沟通方式,那么无线传感器网络的出现将改变人类与自然界之间的交互方式,使人类可以通过无线传感器网络直接感知客观世界,极大地提高人类认识、改造物理世界的能力。因此,无线传感器网络在民用和军事领域具有十分广阔的应用前景。在民用领域,无线传感器网络可以应用于环境监测、工业控制、医疗健康、智能家居、科学探索、抢险救灾和公共安全等方面;在军事领域,无线传感器网络可以应用于国土安全、战场监视、战场侦察、目标定位、目标识别、目标跟踪等方面。

无线传感器网络技术涉及微电子、网络通信和嵌入式计算等主要技术,是当前国际上备受关注的、多学科交叉的一个前沿热点研究领域。由于无线传感器网络拥有广阔的应用前景,近年来引起了国际上许多国家的高度重视。1999年,美国《商业周刊》将无线传感器网络技术列为21世纪最重要的21项技术之一,认为这一技术将对未来社会进步和人类生活产生巨大影响,极大地改变人们的生活、工作以及人与物理世界交互的方式。因此,无线传感器网络在过去的十多年中得到了广泛、深入的研究,并在基础理论、关键技术和实际应用等方面取得显著的成果。然而,尽管一些商用的无线传感器网络系统已经出现,并

开始投入实际应用,无线传感器网络在传感器、组网、节能、安全等技术方面仍然受到许多限制,许多相关技术和问题还有待进一步探索、研究和解决。

本书作者在无线传感器网络领域进行了多年研究,本书的大部分内容是这些研究的成果,此外还吸收了国内外现有相关著作中许多精华内容。它既有国内外专家精华浓缩,也包含了作者从事多年无线传感器网络的教学经验和科研成果,希望能给读者带来一些启迪和帮助。

全书共有7章,第1章无线传感器网络概述,第2章无线传感器网络的相关通信协议,第3章无线传感器网络的定位、跟踪与时间同步技术,第4章无线传感器网络的拓扑控制与覆盖技术,第5章无线传感器网络中间件技术,第6章无线传感器网络的数据融合与数据管理技术,第7章无线传感器网络的安全技术。

每一项重要工作的背后都跟团队的密切协作有很大关系,本书也不例外。作者在此要感谢所有在漫长写作过程中给予帮助的同仁。同时,本书也参考了一些网络信息、期刊文献等,在此对相关作者致以最真诚的谢意。由于时间仓促以及知识水平所限,书中难免存在不妥和错误之处,真诚希望广大读者批评指正。

作 者

2015年4月

目 录

第 1 章 无线传感器网络概述	1
1.1 无线传感器网络的概念与特征	1
1.2 无线传感器网络的体系结构	6
1.3 无线传感器网络的发展历史和研究现状	14
1.4 无线传感器网络的应用领域	18
1.5 无线传感器网络研究热点	23
1.6 无线传感器网络与物联网	32
参考文献	37
第 2 章 无线传感器网络的相关通信协议	38
2.1 无线传感器网络的 MAC 协议	38
2.2 无线传感器网络的路由协议	47
2.3 无线传感器网络的组播路由协议	55
2.4 无线传感器网络的典型传输协议	64
2.5 无线传感器网络的协议标准	78
参考文献	101
第 3 章 无线传感器网络的定位、跟踪与时间同步技术 ...	103
3.1 无线传感器网络定位技术	103
3.2 无线传感器网络目标跟踪技术	112
3.3 无线传感器网络时间同步技术	118
参考文献	127

第 4 章 无线传感器网络的拓扑控制与覆盖技术·····	129
4.1 无线传感器网络拓扑控制技术 ·····	129
4.2 无线传感器网络覆盖技术 ·····	147
参考文献·····	152
第 5 章 无线传感器网络中间件技术·····	154
5.1 概述 ·····	154
5.2 无线传感器网络中间件体系结构及功能要求 ·····	160
5.3 典型的无线传感器网络中间件 ·····	161
参考文献·····	172
第 6 章 无线传感器网络的数据融合与数据管理技术·····	173
6.1 数据融合技术概述 ·····	173
6.2 无线传感器网络的数据融合方法与策略 ·····	181
6.3 无线传感器网络数据管理的概念 ·····	195
6.4 无线传感器网络数据管理的方法 ·····	201
参考文献·····	212
第 7 章 无线传感器网络的安全技术·····	213
7.1 无线传感器网络安全问题概述 ·····	213
7.2 无线传感器网络中的安全威胁因素及应对策略 ···	221
7.3 无线传感器网络中的密钥管理 ·····	225
7.4 无线传感器网络安全防护技术 ·····	237
7.5 无线传感器网络的发展与安全趋势 ·····	242
参考文献·····	244

第 1 章 无线传感器网络概述

许多领域需要监视和测量各种物理现象[比如温度、液位、振动、损伤(张力)、湿度、酸度、泵、生产线的发电机、航空、建筑物维护等],包括建筑工程、农林业、卫生、后勤、交通运输、军事应用等。有线传感器网络一直长期用于支持这种环境,直到最近也只是在有线基础设施不可行的时候(比如偏僻区域、敌对环境)才使用无线传感器。有线传感器网络安装、停机、测试、维护、故障定位、升级的成本高,从而使得无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)很有吸引力。

最新技术发展已经使得人们能够生产智能、自治、能量高效并且可以大量使用的传感器,在地理区域中构成自组织和自愈 WSN。无线传感器技术成本大幅度下降,因而具有广泛的应用。随着 WSN 技术和其他相关技术的不断发展进步,WSN 将不断成熟,极有可能长期而显著地改变人类的日常生活。

1.1 无线传感器网络的概念与特征

1.1.1 无线传感器网络的概念

随着电子信息技术、网络技术的不断发展,在人们生活、工作、娱乐等方方面面均可见到无线通信技术的身影。作为无线通信中一个新兴领域——无线传感器网络,也得到了长足发展,并渐渐走向集成化、规模化发展。

与此同时,传感器节点变得越来越微型化,功能却变得越来越强大,在进行无线通信的同时,还可以进行简单的信息处理。

这类传感器除了监测环境中我们所需要的一些数据外,还具有对收集到的有用数据进行处理的能力,直接将处理后的数据发送到网关,有的甚至还能够实现数据融合的功能。随着电子信息技术的不断发展,无线传感器节点早已具备信息处理和无线通信的能力,就是在这样的背景下,产生了无线传感器网络。

无线传感器网络是对上一代传感器网络进行的技术上的革命^①。早在1999年,一篇名为“传感器走向无线时代”的文章将无线传感器网络的这一理念传递给了很多人,此后在美国的移动计算和网络国际会议中,无线传感器的概念被提出。并预测WSN将是21世纪难得的发展领域。2003年,美国的一家杂志在谈到未来新兴的十大技术时,排在第一的就是无线传感器网络技术;同年,美国的《商业周刊》在论述四大新兴网络技术时,无线传感器网络也被列入其中;甚至《今日防务》杂志给出评论说,WSN的出现和大规模发展将会带来一场跨时代的战争革新,这不仅体现在信息网络领域,军事领域和未来战争也会随之发生巨大变化。从上面我们可以看出,WSN的快速发展和大规模应用,将会推动社会和科技发展,引领时代潮流。

WSN是一种特殊的无线网络,它是由许多个传感器节点通过无线自组织的方式构成的,应用在如战场、环境监控等一些特殊领域;通过无线的形式将传感器感知到的数据进行简单的处理之后,传送给网关或者外部网络;因为它具有自组网形式和抗击毁的特点,各个国家对其关注度都比较高。

无线传感器网络由多个无线传感器节点和少数几个汇聚(Sink)节点构成,一般来说,无线传感器网络工作流程大致如下:首先使用飞机或其他设备在被关注地点撒播大量微型且具有一定数据处理能力的无线传感器节点,节点若想要激活搜集其附近的传感器节点的话,需要先激活再借助于无线方式与这些节点之间建立连接,从而形成多节点分布式网络,这些节点通

^① 马祖长,孙怡宁.无线传感器网络综述[J].通信学报,2004.(03).

过传感器感知功能采集这些区域的信息,经过本身处理之后,采用节点间相互通信最终传给外部网络。

1.1.2 无线传感器网络的特征

无线传感器网络是一种面向任务的无线自组织网络系统,通常由大量密集部署在某个监测区域的传感器节点以及一个或多个位于区域内或区域附近的数据汇聚节点组成,如图 1-1 所示。这些传感器节点体积小,但配备有传感器、嵌入式微处理器和无线收发器等器件,集信息采集、数据处理和无线通信等功能于一体,能够通过无线通信和自组织方式形成网络,可以检测和处理监测区域内的各种环境数据或目标信息,并将所监测到的数据和信息传送给汇聚节点,从而协作完成指定的监测任务。同时,传感器节点还可以通过汇聚节点作为网关,与现有的网络基础设施(如互联网、卫星网、移动通信网等)建立连接,使远程的监控中心或终端用户能够使用采集到的数据和信息。

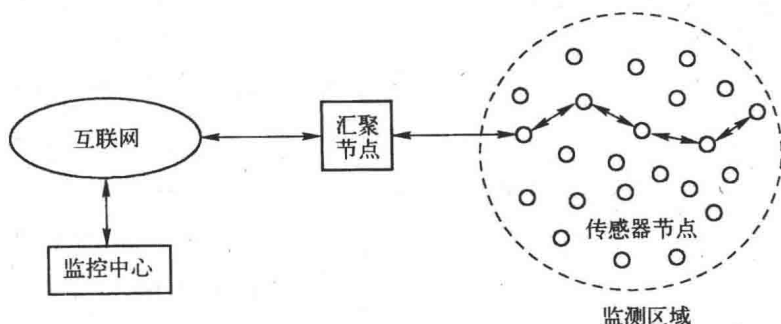


图 1-1 无线传感器网络基本结构示意图

无线传感器网络是一种特殊的无线自组织网络,跟传统的无线自组织网络比较接近,主要表现在自组织特性、分布式控制、拓扑动态性等方面。

(1) 自组织特性

在许多无线传感器网络应用中,传感器节点通常是随机部

署的,事先无法确定节点的位置和节点间的相邻关系。例如,通过飞机将大量传感器节点撒播在面积广阔的原始森林或用火炮将传感器节点投射到敌方战区。因此,传感器节点需要具有自组织能力。在部署后,能够在任何时间、任何地点自动构建成多跳的无线网络,组网跟任何固定网络设施关系都不大,并且能够在网络拓扑发生变化的情况下自动重构网络。

(2) 分布式控制

在无线传感器网络中,不存在绝对的控制中心,所有传感器节点都是一样的,可以通过分布式控制协调来完成节点之间的工作,故无线传感器网络也可以看作是分布式感知网络。无线传感器网络可以随时增加节点或撤掉节点,整个网络的运行不会因任何节点的故障而受到任何影响,抗毁性比较强。

(3) 拓扑动态性

无线传感器网络的拓扑结构会由于各种不同的因素而频繁发生变化。例如,环境条件的变化会影响到无线信道的质量,导致通信链路的间断。传感器节点由于工作环境恶劣容易损坏,并随时可能由于各种原因发生故障而导致失效,节点会由于能量耗尽而死亡,节点会加入或离开网络,某些节点和监测目标具有移动性等。所有这些情况的发生都会使网络的拓扑结构发生变化。因此,无线传感器网络的拓扑结构具有很强的动态性。

但是,无线传感器网络与传统的无线自组织网络差别非常明显,重点表现在网络规模大、节点能力受限、节点可靠性差、多对一传输模式、应用相关性、冗余度高、以数据为中心等方面。

①网络规模大。为了保证网络有效、可靠地工作,获取准确的监测数据或目标信息,无线传感器网络通常需要大规模地部署在指定地理区域。这里,大规模主要体现在以下两个方面:一方面是传感器节点分布的区域范围大且节点数量多。和传统无线自组织网络比起来,其节点的数量和密度均有若干数量级的提高。无线传感器网络不是依靠单个节点的能力,而是通过大量冗余节点的协同工作来完成指定的任务。

②节点能力受限。传感器节点通常由电池供电。由于传感器节点的微型化,节点的电池容量并不大。且传感器节点往往会被部署在恶劣或敌对的环境下,更换电池或给电池充电的难度比较大甚至是无法实现。因此,传感器节点的能量十分受限,这对节点的工作寿命和网络的生存时间具有决定性的影响。同时,传感器节点低成本、微型化的要求使节点的处理能力和存储容量大打折扣,也就无法再进行复杂的计算。此外,传感器节点在体积、能量方面的限制会在很大程度上影响节点的通信能力。

③以数据为中心。无线传感器网络是围绕着数据存在的,用户通常只关注指定区域内所监测对象的数据,而某个具体节点所监测到的数据不是其关注的对象。用户在查询数据或事件时,并不是网络中某个具体的节点来完成该任务,而是由整个网络在完成相关信息的采集和处理后传递给客户。无线传感器网络的以数据为中心的特点也因此得以体现,不同于传统网络的寻址过程,各个节点的信息能够被快速、有效地收集起来,融合提取出有用信息并直接传送给终端用户。

④节点可靠性差。无线传感器网络通常部署在恶劣或敌对的环境中,往往没有人来具体的管理传感器节点,导致节点和网络的维护难度非常大,甚至不可能。因此,传感器节点容易损坏或发生故障。

⑤多对一传输模式。在无线传感器网络中,节点所监测和采集到的信息和数据通常由多个源节点向一个汇聚节点传送,呈现为多对一的数据传输模式。这种数据传输模式与传统网络中的模式差别非常明显。

⑥冗余度高。在无线传感器网络中,相关收集数据的任务是由大量传感器节点协同完成的,这些节点在指定的地理区域密集地部署着,多个传感器节点所获取的数据和信息通常具有较强的相关性和较高的冗余度。

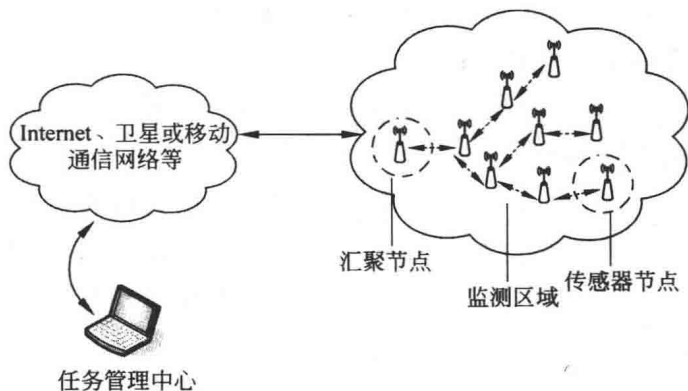
⑦应用相关性。无线传感器网络是以任务或应用为出发点的,不同的传感器网络所要收集的数据类型也会有所差别,故导

致了在设计网络时要按照不同的要求来进行,也就无法避免其硬件平台、软件系统和网络协议之间的差异。因此,在传统计算机网络中使用统一的通信协议的情况不会出现在无线传感器网络中。要根据具体的应用需求来设计传感器网络,这也充分体现了传感器网络与传统网络设计之间的差别。

1.2 无线传感器网络的体系结构

1.2.1 无线传感器节点结构

在无线传感器网络中,节点有传感器节点、汇聚节点和管理节点之分,具体如图 1-2 所示。在监测区域(sensor field)内部或附近部署着数量庞大的传感器节点,其具有无线通信与计算功能,通过自组织的方式构成了能够完成相关应用需求的分布式智能化网络系统,并以协作的方式实现网络覆盖区域中信息的感知、采集和处理,通过多跳后路由到汇聚节点,最后借助于互联网或者卫星到达数据处理中心管理节点。沿着相反方向,用户可以通过管理节点来配置和管理传感器网络,发布监测任务以及收集监测数据。



1. 传感器节点

有数量庞大的传感器节点构成无线传感器网络,事实上,每个传感器节点就是一个微型的嵌入式系统,它具有感知功能、处理功能、存储功能和通信功能。传感器节点一般由数据采集模块、处理控制模块、无线通信模块和能量供应模块这四个模块构成(如图 1-3 所示)。

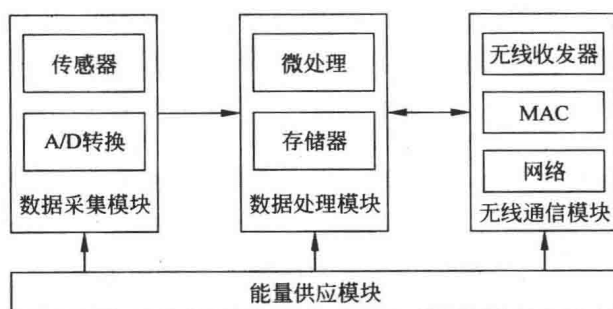


图 1-3 传感器节点的一般结构

①数据采集模块。在整个传感器网络中,区别于其他三个模块,该模块是唯一直接与外部信号量接触的,由传感器探头和变送系统共同构成,负责完成对感知对象信息的采集和数据转换工作。

②处理控制模块。和其他三个模块比起来,该模块负担的工作量最大也就使其成为关键的模块,负责完成整个传感器节点的操作(设备控制、任务分配与调度)、存储与处理自身采集的数据以及其他节点发来数据的控制工作。

③无线通信模块。传感器网络节点间数据通信的需求借助于该模块,该模块能够完成与其他传感器节点之间的无线通信、交换控制信息和收发采集数据。

④能量供应模块。在传感器节点的四个模块中,其他三个模块功能的发挥需要立足于该模块,能够为传感器节点提供运行所需的能量,基于此节点才能正常工作。鉴于整个传感器节点的数量非常庞大,且其部署在很大的监控区域内,故采用普通

工业电能是不可能的,所以仅能使用自己已存储的能源(如电池供电)或者从自然界自动摄取能量(如太阳能、振动能等),一旦电源耗尽,节点就不再具备工作能力。节点的设计因应用不同而会有一定的差异,但其基本原则是采用尽量灵敏的传感器、尽量低功耗的器件、尽量节省的信号处理和尽量持久的电源。本模块中能源消耗与网络运行可靠性的关系是必须要解决好的。目前,电池无线充电技术日益引起人们的关注并成为可能的发展方向;另外,利用周围环境获取能量(如太阳能、振动能、风能、物理能量等)为节点供电相结合也是 WSN 节点设计技术的不错发展方向。

2. 汇聚节点

由于汇聚节点需要完成更多的工作,故要求其拥有更加强大的处理、存储和通信能力,传感器网络借助于该节点能够和 Internet 等外部网络之间建立连接,能够完成两种协议栈之间的通信协议的转换,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上。汇聚节点既可以是一个具有增强功能的传感器节点,有足够的能量供给和更多的内存与计算资源,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. 管理节点

即用户节点,用户对传感器网络进行配置和管理即要通过管理节点来实现,发布监测任务以及收集监测数据。抛撒在监测区域的传感器节点以自组织方式构成网络,在完成数据的收集后,将以多跳中继方式将数据传回 sink 节点,借助于互联网技术或者是移动通信网络技术, sink 节点会将收集到的数据传递给远程监控中心进行处理。在这个过程中,传感器节点在完成感知数据功能的同时还需要扮演转发数据的路由角色。目前,为了尽可能地提高无线传感器网络的性能,人们把精力都集中在了对提高传感器节点的软硬件性能上。

1.2.2 无线传感器网络结构

在实际应用中,无线传感器网络由大量密集部署在指定地理区域的传感器节点以及一个或多个位于区域内或区域附近的数据汇聚节点构成。汇聚节点所要完成的工作区别于传感器节点所要完成的工作,汇聚节点负责向监测区域内的传感器节点发送查询消息或指令,传感器节点则负责完成监测任务,并将监测数据发送给汇聚节点。同时,汇聚节点还作为连接外部传输网络(如互联网、卫星网等)的网关,收集来自传感器节点的数据,然而简单处理收集到的数据,然后将处理后的数据通过互联网或其他传输网络,传送给远程监控中心和有使用该数据需求的终端用户。

在无线传感器网络应用中,可以采用的网络结构也不相同。这些网络结构主要可以划分为单跳网络结构和多跳网络结构两大类,其中多跳网络结构又可划分为平面结构和分层结构两种类型。单跳网络结构简单控制起来比较容易,适合在一些小的区域内部署少量传感器节点的应用场合。多跳网络应用范围广泛,但网络结构复杂,部署和管理成本相对较高。

1. 单跳网络结构

为了向汇聚节点传送数据,各传感器节点可以采用单跳的方式将各自的数据直接发送给汇聚节点,采用这种方式所形成的网络结构为单跳网络结构,如图 1-4 所示。然而,在无线传感器网络中,节点用于通信所消耗的能量跟感知和处理所消耗的能量完全不在一个数量级。在无线信道上传送 1 比特数据所消耗的能量与处理相同比特数据所消耗的能量比率,可以达到 1000~10000。而且,用于无线发射的能量占通信所需能量的主要部分,随着发射距离的增加,所需的发射功率呈指数型增长。因此,为了节省能量和延长网络生存时间,所传送的数据量要做

到尽可能地少,使发射距离得以缩短。由于无线传感器节点的低成本、微型化以及节点在能量方面的限制,单跳网络结构不适合大多数无线传感器网络应用,多跳短距离通信是更适合无线传感器网络的一种通信方式。

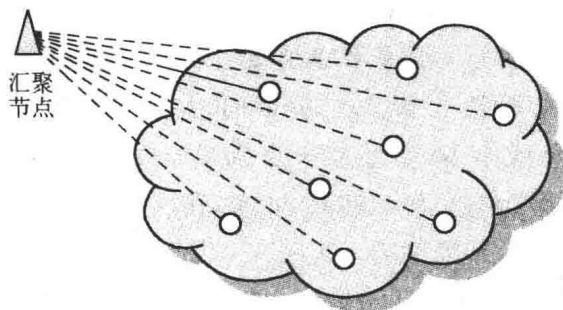


图 1-4 单跳网络结构

2. 多跳网络结构

在大多数无线传感器网络应用中,传感器节点密集分布在指定区域,相邻节点间距离非常近,因此可以采用多跳网络结构和短距离通信实现数据传输。在多跳网络结构中,传感器节点通过一个或多个网络中间节点将所采集到的数据传送给汇聚节点,使通信所需的能耗得以尽可能地降低,如图 1-5 所示。多跳网络结构又可分为平面结构和分层结构这两种结构。

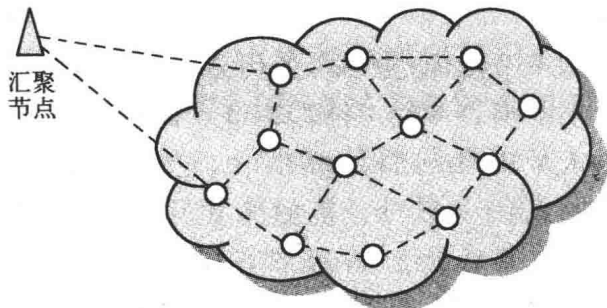


图 1-5 多跳网络结构

(1) 平面结构

平面结构是一种简单的多跳网络结构,如图 1-5 所示。在