

绪 论

导读

本章介绍了无线传感器网络的基本概念、典型应用、主要特征，并分析了无线传感器网络设计和应用中的挑战及关键技术。接下来概要介绍了无线传感器网络相关的标准化工作。最后对无线传感器网络技术相关的无线传感反应网络、容迟网络、信息物理融合系统、物联网、泛在网络等网络类型或概念进行了对比分析。

引言

在当今信息技术飞速发展的时代，以 Internet 为代表的信息网络给人们的生活带来了巨大的变化。通过 Internet，人们能够及时了解世界各地的新闻，方便地获得许多有用信息，如股市行情、旅游信息、商品介绍，参与网上的互动游戏等娱乐活动，进行网上远程教育和购物，发送电子邮件等等，Internet 已经成为很多人日常活动不可缺少的部分。

随着微电子技术、计算技术和无线通信等技术的进步，推动低功耗多功能传感器快速发展，使得在微小体积内能够集成信息采集、数据处理和无线通信等多种功能，这些智能传感器以无线方式进行通信形成无线传感器网络^①(wireless sensor network, WSN)，能够获取监测区域内人们感兴趣的信息。如果说 Internet 构成了逻辑上的信息世界，改变了人与人之间的沟通方式，那么，无线传感器网络将逻辑上的信息世界与客观上的物理世界融合在一起，将改变人类与自然界的交互方式。人们可以通过传感器网络直接感知客观世界，从而极大地扩展现有网络的功能和人类认识世界的能力。美国《商业周刊》和《MIT 技术评论》在预测未来技术发展的报告中，分别将无线传感器网络列为 21 世纪最有影响的 21 项技术和改变世界的十大技术之一。传感器网络、塑料电子部件和仿生人体器官又被称为全球未来的三大高科技产业。

无线传感器网络可以在任何时间、地点和任何环境条件下获取大量的监测信息。因此，

^① 本书如无特殊声明，“传感器网络”即指“无线传感器网络”。

无线传感器网络作为一种新型的信息获取系统，以其高度的灵活性、容错性、自治性以及快速部署等优势为其带来广阔的应用前景，在军事、航空、防爆、救灾、环境、医疗、保健、家居、工业、商业等诸多应用领域有广阔的应用空间。

无线传感器网络作为 Mark Weiser 的普适计算 (ubiquitous computing) 思想衍生的产物，通过近几年的研究，人们对传感器网络特点的认识已经逐渐明确，但是许多基础理论和关键技术还没有得到完全解决，如能量有限性、计算存储能力、传输层和服务质量、覆盖率与部署、可靠数据传输、网络协议的统一标准等。但无线传感器网络作为信息科学领域中一个全新的发展方向，同时也是新兴学科与传统学科进行领域间学术交叉的结果，将会对人类未来的日常生活和社会生产活动的各个领域产生深远影响，应用前景十分广阔，实现普适计算思想将不再遥远。

1.1 传感器网络的概念

1.1.1 传感器及其发展

1) 传感器的基本知识

换能器是把一种形式的能量转换成另一种形式的设备。传感器就是一种典型的换能器，把物理世界的物理或化学等能量转换成电能，具有“感知”现实世界的物理量，按照一定规律把感知结果以某种形式的信息“传”输出去，而且输出量与输入量有明确的对应关系，满足一定的精确程度。国际上把传感器解释为测量系统中的一种前置部件，把输入变量转换成可供测量的信号。中国国家标准 GB 7665—1987 对传感器下的定义如下：传感器能感受规定的被测量，并按一定规律转换成可用输出信号的器件或装置，通常由敏感元件和转换元件组成。其中，敏感元件是指传感器中能直接感受或响应被测量的部分；转换元件是指传感器中能将敏感元件感受或响应的被测量转换成适于传送或测量的电信号部分。

传感器种类繁多，声、光（可见光、红外光）、电、温、压、磁、流量、转速、位移、化学等数不胜数，使用何种传感器完全取决于应用系统。传感器一般包括传感器探头和变送系统两个部分，不同种类、不同精度要求的传感器其自身体积和对变送系统的要求也不相同。传感器的工作原理如图 1-1 所示。

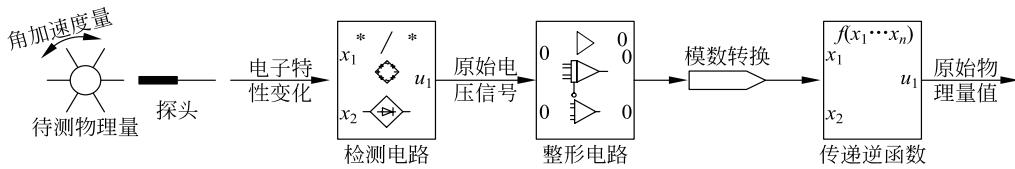


图 1-1 传感器工作原理

首先，物理量的变化通过各种机制转换成电阻、电容或者电感变化；然后，这些电子特性变化通过转换电路，如阻桥电路，转换成电压信号；接着，电压信号经过积分电路、放大电路进行整形处理；最后，采集电路（ADC）将模拟电压信号转换成数字信号。转换的数字和采

集的电压之间是线性关系,但采集的电压信号和原始物理量之间的关系往往要用特定的传递函数描述,故要把采集到的数据直接对应到原始物理量还需要通过处理器查表或者用传递逆函数进行计算。

温湿度、光照传感器和声音传感器,其价格不高,体积也可以做得很小。图 1-2 是瑞士 Sensirion 公司的温湿度一体传感器,其体积只有火柴头大小。加速度传感器、超声波传感器、振动传感器、压力传感器和磁传感器的变送电路比较复杂、体积稍大,且价格较高,在传感器网络中可以设置部分包含此种传感器的节点。化学传感器的体积较大,工作时的预热时间长(有的甚至需要数十个小时的预热时间),加上成本也相当高,不适用于直接网络化使用,如果目标应用需要使用这样的传感器,可以考虑作为独立测试节点使用。

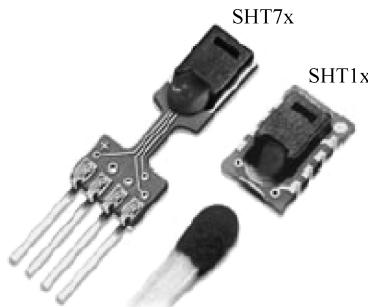


图 1-2 SHTxx 温湿度一体传感器

为了研究和应用传感器,人们从不同的角度对传感器进行了分类。根据感知的物理量,传感器分为温度、湿度、位移、速度、压力、流量、化学成分等传感器;根据工作原理,传感器分为电阻、电容、电感、电压、霍尔、光电、光栅、热电偶等传感器;根据输出信号的性质,传感器分为输出为“1”和“0”的开关型传感器、模拟型传感器,以及输出为脉冲或代码的数字型传感器等。

根据对感知物理量的方向敏感性,传感器分为全向传感器和定向传感器,全向传感器在测量中对方向不敏感,如测量温度、湿度、气压、烟浓度等,而定向传感器对测量有一个明确方向,如摄像传感器等。在无线传感器网络的部署中,为了满足应用的感知覆盖需求,需要关注传感器感知方向的敏感性,在满足相同覆盖度的前提下,全向传感器需要部署的数量相对定向传感器要少。

根据是否需要主动发射信号来感知目标,传感器分为主动传感器和被动传感器。主动传感器通过主动发射微波、光和声音等形式的能量来触发响应或检测发送信号能量的变化,往往需要外部提供电源;被动传感器通过接收外界发射或反射的信号来感知目标,具有较强的隐蔽性和抗干扰性,往往不需要外部提供电源来发送能量。被动传感器相对主动传感器消耗的能量少,非常适合应用在低功耗的无线传感器网络的设备中。

由于传感器的物理效应和工作机理不同,有些传感器需要直接接触被测对象,有些则无需直接接触被测对象。人们希望传感器的输出与输入之间表现出完全的线性关系,但实际上由于物理效应、制作工艺和应用场景复杂性等影响,很难完全做到输出与输入之间的稳定线性关系。理想传感器的遵循原则是:仅对被测试物理量敏感,不应对其他物理量敏感,不受其他因素的影响;传感器本身不要对测试环境中被测试物理量产生影响。

传感器能够连接物理世界和信息空间,感知物理世界的细微变化,并转化成能够处理、存储和操作的信号。把各种传感器集成到大量设备、机械和环境中,能够极大增强人们感知物理世界的能力,帮助避免大型基础设施倒塌的灾难,保护宝贵的自然资源和环境,增加农作物的产量,增强生产安全和社会安全,以及带来丰富多样的新应用,产生巨大的经济效益和社会效益。

2) 传感器的发展

传感器发展从早期的模拟信号输出,经过了数字化传感器、多功能传感器、智能化传感器到传感器网络的自治传感器,在通信上从单个连接、有线网络、无线单跳到无线多跳网络,在体积上逐渐向小型化、微型化的方向发展。

早期传感器输出模拟信号,只能感知单一物理参数,传感器采集的感知信息输出给控制单元进行存储和分析,通常用来制作单一的采集设备,或参与单一的采集控制过程。随着电子技术的发展,A/D 模拟数字转化电路集成到传感器设计中,传感器输出数字信号,信息传输对环境的抗干扰能力得到增强,延长了传感器与控制单元之间的距离。传感器集成化技术的发展,能够把传感器与放大、运算以及温度补偿等环节组装到一个传感器件中,在单个芯片上集成多个或多种传感器,在增加多功能和提高可靠性的同时,传感器的体积也逐渐缩小。传统传感器仅产生数据流而没有计算能力,应用时把传感器部署在感知对象附近。随着应用系统的规模逐渐扩大,多个传感器节点把采集的感知信息传输到中心处理系统,中心处理系统基于汇总的感知信息进行系统优化和决策控制。

网络通信技术的发展推动了在传感器节点中集成网络接口,初期主要集成有线网络的接口。这使得传感器节点能够部署在更大的空间范围内,通过局域网或互联网远程获取传感器节点采集的感知信息,形成跨区域、跨系统的数据收集系统。有线网络需要布线,部署成本较高且不够灵活,有些应用场景可能无法或不允许布线,人们就在传感器节点中集成无线接口,传感器节点可直接与无线基站进行通信。传感器节点在通信能力不断增强的同时,也逐渐增加了智能性。借助于半导体集成化技术把传感器与信号预处理电路、输入输出接口、微处理器等制作在同一块芯片上,使之不仅具有采集信息的功能,还具有检测判断和信息处理的功能,成为新型的智能传感器。智能传感器能够对采集信息进行剔除、纠错和过滤等预处理,减少需要传输的数据量,及时检测传感器节点的工作状态以及对紧急事件做出适当响应,甚至还可以结合模糊推理、神经网络等人工智能技术,成为传感器重要的发展方向之一。

在最近 10 多年,人们研发了具有自治能力的新型传感器节点。它利用携带的存储器存储程序代码和采集的数据,利用处理器运行相对简单的通信协议和信息处理代码,通过无线方式实现与基站之间的通信,相互之间还能够形成多跳无线网络。这种具备一定自治能力的节点就是无线传感器网络节点,通过自组织方式形成无线多跳网络,不仅能够采集物理信息和传输感知数据,而且能够对自身和其他传感器节点的数据进行网内分析、关联和融合处理。当大量传感器网络的节点部署在监测环境中,它们无需人工干预就能够协同完成预先规划的信息收集、事件监测和决策控制等任务。

具有无线通信能力的传感器节点在 10 年前已经在技术上达到实用水平,但由于传感器

节点的生产成本和系统的维护成本高,一直没有得到大规模的应用。哪些技术的进步使无线传感器网络的广泛应用成为可能?第一是半导体技术的发展。对于给定的处理能力,芯片的物理尺寸每年成倍减小,价格成倍降低,摩尔定律被预测经过10~20年才会最终失效;半导体制造技术还驱动节点设备的小型化发展,催生出体积极小的无线和机械结构部件。第二是电池体积的小型化。传感器网络节点往往通过电池供电。在过去的20多年,一节AA碱性电池的容量在快速充电情况下从0.4Ah增加到1.2Ah;电路的能量消耗与它的计算性能正相关,通常电路的设计要求是对于一个给定的任务,如果用较长的时间完成,它消耗的能量相对要少;目前已经有多项技术能够动态调整性能来最小化能量消耗。第三是片上系统(SoC)集成技术。在非常微小的芯片上集成微传感器、处理器和无线通信接口,使得传感器网络节点能够微型化和低功耗,适用大规模应用场景。

1.1.2 无线传感器网络

1) 网络系统架构

微电子技术、计算技术和无线通信等技术的进步,推动了低功耗多功能的智能传感器的快速发展,使其在微小体积内能够集成信息采集、数据处理和无线通信等多种功能。这些微小传感器节点嵌入在监测区域内的物理环境中或部署在监测对象的附近,协同监测人们感兴趣的现象或事件,及时把感知信息通过网络传递给人们。

早期研究无线传感器网络,目标是在监测区域内部署大量的传感器节点,在无需人工干预条件下,这些节点能够以自组织的方式形成多跳无线网络,协同地完成采集、处理和传输网络覆盖地理区域内感知对象的信息,及时发布给使用网络的观察者。传感器节点、感知对象和观察者构成无线传感器网络的三个基本要素。如同诸多新技术一样,军事应用成为早期无线传感器网络发展的推动力,在条件恶劣的战场环境大规模部署无线传感器网络,及时获取各种战场信息可为指挥决策和作战行动提供有力支持。现在,无线传感器网络已经应用到诸多的民用领域,帮助人们更高效地从事生产和科研,也为人们的社会和生活活动带来了安全和便利。

传感器网络的应用场景如图1-3所示。传感器网络系统通常包括传感器节点和汇聚节点(sink),以及网络后端的感知信息的管理平台和使用者。部署在监测区域内部或附近大

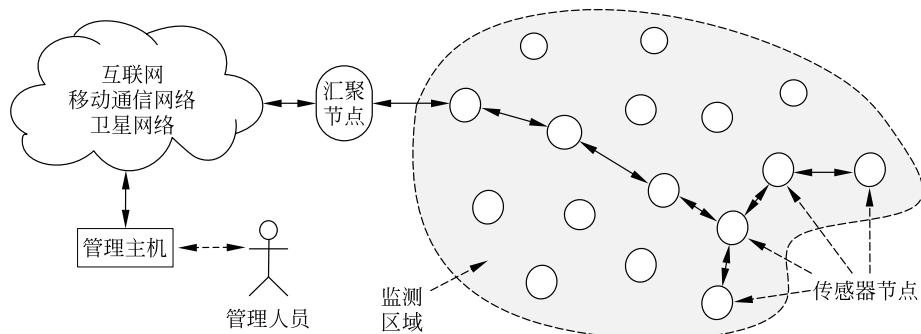


图1-3 传感器网络的系统架构

量的传感器节点形成无线网络，节点采集的信息通过其他节点的协助进行逐跳传输，在传输过程中采集数据可能被多个节点处理，经过多跳后路由到汇聚节点，最后通过互联网或卫星传输到相应的数据存储和处理服务器。用户通过管理平台对传感器网络进行配置和管理，发布监测任务以及收集监测数据。

传感器节点通常是微型价廉的嵌入式设备，它的处理能力、存储能力和通信能力相对较弱，通过能量有限的电池供电。从网络功能上看，每个传感器节点兼有传统网络的终端节点和网络路由器的双重功能，不仅负责本地信息的采集和数据处理，还可对其他节点转发来的数据进行存储、管理和融合等处理，以及把自己和其他节点的数据转发给下一跳节点或直接发送给汇聚节点。另外，相邻节点之间还可通过合作实现协同通信机制、事件联合判断等功能。

汇聚节点又称网关节点或基站，连接传感器网络与 Internet 等外部网络，实现两种网络之间的通信协议转换。汇聚节点把收集的数据转发到外部网络上，同时还向传感器网络转发外部管理节点的监测任务。一般来说，汇聚节点的处理能力、存储能力和通信能力相对比较强，既可以是增强的传感器节点，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多种通信接口的转发设备。

2) 节点结构

传感器节点通常由传感器模块、处理器模块、无线通信模块和能量供应模块四个部分组成，如图 1-4 所示。传感器模块负责监测区域内信息的采集和数据转换；处理器模块负责控制整个传感器节点的操作，存储和处理本身采集的数据和其他节点发来的数据，运行网络通信协议；无线通信模块负责与其他传感器节点进行无线通信，交换控制消息和收发采集数据；能量供应模块为传感器节点提供运行所需的能量，通常采用微型电池。

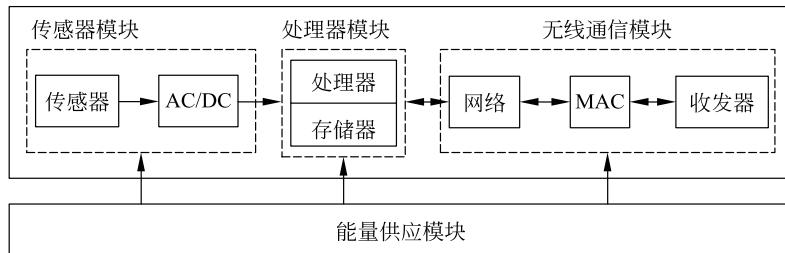


图 1-4 传感器网络节点的体系结构

传感器网络应用场景千差万别，对传感器节点提出了不同的性能需求。在处理能力方面，从简单单片机到 8 位、16 位以及 32 位处理器的处理能力；在通信能力方面，采用不同的传输速率、距离和延迟的无线通信技术，如超声波、红外和无线射频技术等；在感知能力方面，简单传感器只能感知单一物理参数，而复杂感知设备可同时感知多种物理参数，如声、光和磁等。性能相对弱的传感器节点仅仅收集和传输采集的信息，而具有较强处理、存储、通信等能力和大容量电能的传感器节点（有文献称为富节点）能够完成丰富的处理和汇聚功能，在网络中常常承担更多的任务，如形成骨干网来转发资源受限节点的采集信息到汇聚节点。一些传感器节点可携带 GPS 等功能模块，利用 GPS 模块实现节点的精确定位，其代价

是消耗更多的能量。

传感器节点在能量供应方面也存在差异。有些节点携带微小电池,只能支持节点工作几个小时或几天时间;有些节点携带大容量电池,能够支持节点连续运行几周时间;在有些应用中,节点采用太阳能电池板不断补充电能,支持节点长时间工作。还有一些应用,传感器节点通过嵌入到其他设备中,不断从这些设备中获取电能来支持其长期运行。节点要长期运行,就需要能够从环境或其他设备中不断获取能量,这可能带来成本的增加或部署的不便。尽管节点携带的能量存在差异,传感器网络都需要关注能量的高效使用。

1.1.3 无线传感器网络的优势

在物理环境中部署无线传感器网络,人们能够远程获取感知区域的信息,扩大了人们对物理世界的感知。近年来无线传感器网络越来越受到广泛重视,主要源于如下的显著优势:

(1) 传感器节点具有自治能力,能够自主组网和自行配置维护,实时转发监测数据,适应感知场景的动态变化,在无人值守条件下能够有效工作,特别适合在恶劣环境下工作,如战场、危险区域或人类不能到达的区域;

(2) 传感器节点成本低廉可以大规模部署,而且不需要布线,能够快速形成覆盖广阔的传感器网络系统,通过多传感器混合、多节点联合,近距离对覆盖区域进行更精细、更全面的感知,避免出现感知盲区,同时,节点的冗余和自治特性也使传感器网络能够自主调整拓扑结构,增加了感知的可靠性;

(3) 节点的低功耗和微型化,使得传感器网络能够部署在越来越多的应用场景,可安装在工控设备、运输车辆、历史建筑、林木等之上,甚至植入到人或其他动物的体内,而伴随着互联网和3G/4G网络的广泛应用,更是能实现无处不在的感知,极大地提高了人类的感知能力扩大了感知范围。

1.2 传感器网络的典型应用

1.2.1 应用类型

随着大规模、分布式传感器网络的应用,传感器网络将会覆盖和装备整个地球,连续监测和收集各种各样的物理、生物等信息,包括土壤和空气条件、各种基础设施的状况、濒危物种的习性特征等。传感器网络的广泛应用,能够帮助人们理解和管理与我们不断增强连接的物理世界。

根据监测对象的特性,传感器网络应用可以分类为空间监测、目标监测,以及空间和目标的交互监测。空间监测包括战场环境、室内气候、环境质量等监测,目前碳循环、气候变化和有害海藻等生物现象在时空维度上没有合适的观察手段,传感器网络能够提高相关的模型精度和预报的准确率。目标监测包括建筑物状况、设备维护、医疗诊断等。更多的动态应用包含复杂的交互,如灾难管理、应急响应、健康医疗、泛在计算环境等。定位与追踪应用就是传感器网络通过节点间的距离(或角度)测量,并进行定位计算获得目标节点的位置。

根据感知数据的获取方式,传感器网络应用可以分类为事件驱动、时间驱动和查询驱动。

事件驱动的应用是传感器网络监测和报告特定的事件是否发生，如火警或区域入侵事件。这类应用在事件发生时由传感器节点发送数据到汇聚节点。目标发现和跟踪是典型的事件驱动的应用例子，包含目标监测、分类和确定目标的位置等，一旦目标出现在监测区域，通常需要及时报告和跟踪目标的位置。目标监测和跟踪中的目标可以分为两种类型，一种是相对活动区域来说较小的目标，如战场上的坦克或士兵；另一类是在监测区域不断扩散的目标，如森林大火、战场毒气等，不仅要监测到目标，还要监测扩散的区域和速度等。事件驱动的应用往往对传输可靠性、实时性要求较高。

时间驱动的应用需要周期性的数据收集，如环境监测、交通流量监测等。传感器节点周期性地发送感知数据到汇聚节点，感知数据上报周期可以被预先配置，或根据所监测环境及应用的要求由用户动态设置。这类应用通过传感器网络的连续监测来反映监测对象的变化，适合连续状态的监测，如农作物监测。但对用户来说，返回的大部分数据可能是无用的，会导致传输和处理资源的浪费。这类应用通常是监测区域内多数或所有节点都要报告，对网络传输的实时性及传输质量的要求不如事件驱动高，但需要确定最优的上报时间间隔。

查询驱动的应用就是用户希望查询覆盖区域内的信息，向传感器网络发送查询请求，节点根据查询请求检索所需数据。查询驱动的应用实际上就是用户或应用组件与传感器节点之间的请求-响应交互，这类应用也可被视为事件驱动的应用，其中事件就是用户发送的查询指令。查询驱动的应用将网络视作数据库，为用户提供了一个高层查询接口，向用户隐藏了网络拓扑以及无线通信的细节。

在事件驱动的应用中，当感兴趣的事件发生时，才会产生数据流量，而在时间驱动的应用中，数据每隔一定间隔被发送到汇聚节点。查询驱动的应用则是按照用户的需要收集数据。很多实际应用需要完成多种任务，既有事件驱动的流量，也有时间驱动的流量，往往是混合的流量模式。混合方法综合利用了两种或更多的方法，可降低单个方法的缺陷所造成的影响。

1.2.2 典型应用领域

传感器网络研究最早起源于军事应用，随着研究的不断深入，传感器网络正逐渐深入到人类活动的各个领域，并展现出了非常广阔的应用前景。这里按照军事反恐、环境监测、精细农业、健康医疗、家居生活、工业生产、其他应用等领域来分析传感器网络的应用特点和典型系统，如图 1-5 所示。

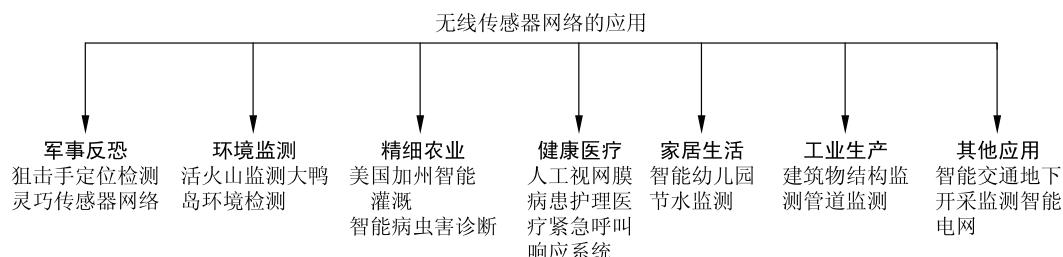


图 1-5 传感器网络应用领域

1.2.2.1 军事反恐

相对于其他信息探测系统和网络系统,在军事反恐领域传感器网络的优势主要体现在:战场适应能力强,可快速自动地组成一个独立的网络;战场生存能力强,在部分节点失效或链路被干扰情况下,通过协调互补动态连接成新的网络系统,继续原来的工作;监测准确性高,通过在监测区域大量布设传感器节点与监测目标近距离接触,对监测对象形成分布式、多角度、全方位的监测能力。传感器网络在军事反恐领域中的主要应用方式介绍如下。

(1) 战场信息侦查。利用传感器网络获取作战区域的温湿度、光照、地形地貌等环境信息,侦查友方、敌方部队的活动去向和武器、装备的部署,及早发现己方阵地上的核、生物、化学污染,为己方组织防护提供快速反应时间从而降低人员伤亡。美国国防部远景计划研究局资助的智能尘埃(Smart Dust)项目^[3]最早提出了利用传感器网络对战场态势进行监控的设想。美国弗吉尼亚大学研制的 VigilNet 系统^[4]利用传感器网络执行敌后监视任务,可以定位和跟踪人员和车辆目标。美国陆军开发的沙地直线系统(A Line in the Sand)^[5]利用播撒在战场上的传感器可侦测战区内高金属含量的运动目标。美国国防部提出的灵巧无线传感器网络(Smart Sensor Web)^[8]是基于传感器网络的战场信息发布系统,把前方战场视图和相关数据实时发布给指挥人员和士兵,使他们及时了解整个战场的态势。美国海军的 SeaWeb^[9]利用传感器网络监测舰船、潜艇和水下航行器,并为己方提供定位和导航服务。

(2) 后勤物资与装备管理。利用传感器网络对军事物资和装备进行管理和调配,实现军事物资的可视化管理,缩短物资的调配时间,提高战场保障效率。同时,利用传感器网络实时获取武器装备的状态,进行实时故障分析和诊断。

(3) 反恐。利用传感器网络来测量枪声和爆破的声波信号以及子弹发射产生的冲击波的到达时间、强度、角度等数据,可以精确地定位射击者的位置。范德堡大学于 2003 年研发了第一套基于传感器网络的狙击手定位系统 PinPtr^[6],PinPtr 具有很高的精度,但需要提前部署在固定的位置。美国雷神 BBN 公司研制的 Boomerang 狙击手定位系统^[7]支持传感器节点的移动部署。其他还有利用传感器网络实现的防范生化武器袭击的监测系统,可监测车站和机场等公共场所的化学毒气。

1.2.2.2 环境监测

环境监测是传感器网络应用最广泛的领域之一。利用传感器网络进行环境监测的优势主要体现在:节点具有通信及路由能力,能提供实时监测网络;节点体积微小,且自供电,对监控对象的影响很小,可以长期自主工作;可部署在偏远、有毒等条件苛刻的环境中,还可以根据需要协同执行较为复杂的监测。传感器网络在环境监测领域的主要应用方式如下。

(1) 大范围大尺度的环境监测,如大气环境、海洋环境、冰川环境、森林和城市生态系统等。澳大利亚墨尔本大学和詹姆斯库克大学在澳洲东北沿海部署了大堡礁监测系统来监视变化的气候环境。英国南安普顿大学在挪威约斯特达尔冰盖的布里克斯达斯布尔冰河部署了冰川监测系统,来实时获取温度、气压、天气及冰下移动等信息。新加坡南洋理工大学建立的城市天气监测系统,对城市天气进行大范围细粒度的监测。

(2) 局部环境或小环境的监测,如粮棉仓库、博物馆、写字楼等建筑物内的温湿度和空气质量等。

(3) 自然灾害的预报和监测,如洪水灾害、森林火灾、山体滑坡、江湖红藻等。哈佛大学和南加州大学合作利用传感器网络监测厄瓜多尔中部的活火山活动情况。中国科学院在无锡太湖部署传感器网络监测太湖水资源,进行红藻预报。美国麻省理工学院利用传感器网络在频繁受洪涝灾害影响的洪都拉斯进行了早期洪灾监测的测试。

(4) 动植物生活习性监测。美国加州大学伯克利分校在一棵 70 米高的红杉树上用传感器网络来监测其生存环境,记录空气温度、湿度、太阳光强(光合作用)等的变化。普林斯顿大学在肯尼亚国家野生动物园建立了 ZebreNet 系统来监测斑马的生活习性和生存环境。美国加州大学伯克利分校 Intel 实验室与大西洋大学联合,在大鸭岛利用传感器网络系统监视海燕的生活习性。

1.2.2.3 精细农业

农业是传感器网络应用的重要领域。在农业领域,传感器网络的主要优势为:节点可以通过不同类型的传感器采集农作物生长及环境信息;传感器网络能够长时间持续进行监测;通过智能分析可准确发现问题原因,自动进行温度调节、节能灌溉、精准施肥等处理,支持传统农业从机械的生产方式向新型的、以信息采集和分析为中心的生产方式逐步转变,实现农业的自动化、智能化、远程监控。传感器网络在农业领域的应用方式如下。

(1) 温室和农场管理。利用传感器网络对温室和农场进行监测,如土壤水分、pH 值、二氧化碳、光照、温度等,还可根据农作物的生长状况高效合理地进行节水灌溉和精准施肥。2002 年,Intel 公司率先在俄勒冈州建立了世界上第一个无线监测葡萄园,利用传感器节点监测葡萄园的土壤温度、湿度以及所测区域的害虫的数量。美国加州大学伯克利分校与 Intel 公司开发了土壤湿度监测系统,灌溉控制中心根据监测信息实时调整灌溉方案,提升了葡萄的品质和产量,并节约了灌溉用水。Digital Sun 公司^[12]的智能喷灌系统可根据土壤湿度来判断是否需要喷灌以及喷灌的水量和时间,其中的控制器会下发命令自动检测喷灌线路是否断裂,或喷灌头阻塞等故障,并发出警告。

(2) 病虫害智能诊断。利用摄像头、光电等传感器采集农作物叶片图像和环境参数,据此分析所监测区域内是否有病虫害发生。有研究人员通过传感器网络节点上的摄像头自动采集粘虫板图像,利用图像处理技术估算粘虫板上的害虫数量,当害虫密度超过阈值时会给出警告,通知种植户及早喷洒农药。

(3) 牧群和家禽家畜养殖。利用传感器网络大范围、实时、连续地对畜牧业、家禽养殖的个体或者群体进行行为分析和疾病监测,及时发现、预防和有效控制其存在的健康问题,提高畜禽养殖的产量与质量。澳大利亚联邦科学与工业研究组织信息通信技术中心(CSIRO ICT Center)将传感器节点安装在牧场中各种动物的身上,实时对动物的脉搏、血压等生理状况和周边环境进行监测,建立草地放牧与动物模型,以指导牧场的合理放牧,还采用旋转角度传感器与运动速度传感器测量奶牛颈部扭动和运动状况,以识别牛的病症。

1.2.2.4 健康医疗

利用传感器网络进行健康监护是人们非常关注的领域。在健康医疗领域,传感器网络的