

无线传感器网络 理论与技术应用

谭励 著



无线传感器网络 理论与技术应用

谭 励 著



机械工业出版社

前 言

随着因特网技术、无线通信技术和微机电技术（Micro-Electro-Mechanism System, MEMS）的高速发展，无线传感器网络在世界范围内引起了广泛的关注，被认为是会对人类未来的生活方式产生深远影响的重要技术之一。无线传感器网络以其自组织性、微型性、低成本、灵活性等优点，能够广泛应用于军事、环境监测和预报、健康护理、智能家居、建筑物状态监控、复杂机械监控、城市交通、空间探索、仓储管理，以及机场、大型工业园区的安全监测等领域。随着无线传感器网络的深入研究和广泛应用，无线传感器网络将逐步深入到人类生活的各个领域。

近年来在应用需求的带动下，无线传感器网络研究得到了迅速发展。无线传感器网络研究属于新兴研究领域，涉及传感器技术、网络通信技术、无线传输技术、嵌入式计算技术、分布式信息处理技术、微电子制造技术、软件编程技术等多学科交叉的研究领域，具有鲜明的跨学科研究特点，作为一个全新的研究领域，其在基础理论和工程技术两个层面向科技工作者提出了大量具有挑战性的研究课题。

笔者所在的实验室较早就已开展了无线传感器网络相关研究，相关研究成果已经在桥梁健康监测、智慧农业、声源定位等项目中得到应用。有感于无线传感器网络迅猛上升的发展前景以及国内外研究水平的现实差距，笔者在总结多年相关研究、教学及工程应用的基础上精心编著了本书，全书分为上、下两篇，共12章，以当前最新理论成果为基础，系统阐述了无线传感器网络的基本概念、体系结构、核心支撑技术、部署算法以及应用开发实例。

全书结构清晰、内容丰富、叙述深入浅出，既可帮助感兴趣的初学者加深对无线传感器网络相关技术的理解，迅速接触到研究领域的最前沿，也可帮助有一定研究基础的同行巩固研究积累、扩展研究思路。

本书的出版得到了北京工商大学“北京市属市管高校人才强校计划”项目的资助，在此对北京工商大学各级领导的关心、支持和帮助表示感谢。本书的基础来源于作者攻读博士学位期间的工作，在此感谢导师曹元大教授对本人的精心指导，感谢北京理工大学计算机学院的培养。感谢曾为本书做出贡献的同学、同事、朋友，他们是杨明华、李大伟、祝烈煌、于炯、张常有、张昱、朱东锋、周瑞涛、靳军等。本书的完成，也离不开于重重、苏维均、陈智伟等良师益友的建议和帮助。书中包括了笔者自身的研究成果和观点，同时也吸收了国内外学术界和工程技术界的一些研究成果，相关知识产权属于原作者，在此一并致以衷心的感谢。由于本书所涉及的课题内容较新，一些理论方法和技术还在继续研究之中，而且由于笔者学术水平有限，书中错漏之处难免，欢迎读者批评指正。

作者

2011年1月3日

目 录

前言

上篇 静态传感器网络

第 1 章 无线传感器网络概述	1
1.1 无线传感器网络的基本概念	1
1.2 无线传感器的体系结构	3
1.2.1 传感器网络的结构	3
1.2.2 传感器的节点结构	4
1.2.3 传感器网络通信体系结构	4
1.3 无线传感器网络的特点及优势	5
1.4 无线传感器网络的应用	7
1.5 无线传感器网络研究及发展概况	9
参考文献	11
第 2 章 无线传感器网络的 MAC 协议	13
2.1 MAC 协议概述	13
2.2 IEEE 802.11 MAC 协议	15
2.3 斑马 MAC 协议	18
2.4 漏斗 MAC 协议	20
2.5 TRAMA 协议	21
2.5.1 TRAMA 协议概述	21
2.5.2 TRAMA 协议组成	22
2.5.3 访问方式与相邻节点协议	23
2.5.4 传输时间安排交换协议	23
参考文献	24
第 3 章 无线传感器网络的路由协议	26
3.1 路由协议概述	26
3.2 低能量自适应分群分层协议	27
3.3 两层数据分发协议	31

参考文献	33
第4章 无线传感器网络时间同步技术	35
4.1 传感器网络的时间同步概述	35
4.2 典型的无线传感器网络时间同步方法分析	36
4.2.1 无线传感器网络时间同步基本原理	36
4.2.2 时间同步性能指标	38
4.2.3 典型的时间同步算法	39
4.2.4 典型算法性能分析	46
4.3 改进的RBS和TPSN时间同步方法	48
4.3.1 RBS改进算法	49
4.3.2 TPSN改进算法	56
4.4 本章小结	62
参考文献	62
第5章 基于注意的融合算法在视频传感器网络中的应用	64
5.1 视频传感器网络简介	64
5.2 基于注意的多质量图像融合	66
5.2.1 设计原理及系统模型	66
5.2.2 节点的部署	66
5.2.3 层间节点视图区域的映射	67
5.2.4 高层节点基于动态注意的唤醒机制	68
5.2.5 低层节点图像的采集与预处理	69
5.2.6 多质量图像的融合	70
5.2.7 高层节点的融合算法	71
5.3 实验结果	71
5.3.1 基于区域映射的多质量图像融合	72
5.3.2 基于静态注意的多质量图像融合	72
5.4 本章小结	74
参考文献	74
第6章 无线传感器网络声源定位技术	76
6.1 影响声源定位的主要因素	76
6.2 声音信号的采集	77
6.2.1 声音传感器的特征分析	77
6.2.2 信号采集条件	78
6.2.3 采样频率选择	78
6.2.4 前端信号放大	78
6.3 数据处理与参数提取	79
6.3.1 目标特征提取	79
6.3.2 数据处理	79

6.4 定位算法几何模型	82
6.4.1 圆周定位算法	82
6.4.2 双曲线定位算法	83
6.4.3 角度测量定位算法	83
6.5 传统声源定位方式	84
6.5.1 传统声源定位分类	84
6.5.2 TDOA 声源算法	85
6.6 无线传感器网络声源定位算法	85
6.7 声源定位原型系统的设计和实现	89
6.7.1 系统设计	89
6.7.2 编程与实现	96
6.8 本章小结	105
参考文献	105

下篇 移动传感器网络

第7章 移动传感器网络概述	106
7.1 移动传感器网络的特点及应用	106
7.2 部署问题的性能评价	107
7.2.1 覆盖率	108
7.2.2 重叠率	109
7.2.3 覆盖重数	109
7.2.4 丢失质量	110
7.2.5 节点密度	110
7.2.6 均匀度	110
7.2.7 部署时间	110
7.2.8 连通性	111
7.2.9 节点平均移动距离	111
7.3 国内外研究现状	112
7.3.1 几何向量法	112
7.3.2 基于网格划分	113
7.3.3 人工势场算法	113
7.3.4 虚拟力算法	115
7.3.5 Delaunay 三角形和人工势场技术	115
7.4 问题的引出	116
参考文献	117
第8章 虚拟力在移动传感器网络部署中的运用	119
8.1 虚拟力算法基本原理	119

8.2 问题描述	120
8.3 快速自部署算法	121
8.3.1 节点模型	122
8.3.2 作用力公式	122
8.3.3 节点的运动方程	124
8.3.4 快速部署算法描述	124
8.4 仿真与性能分析	125
8.4.1 实例研究	126
8.4.2 与 VOR 算法的对比分析	127
8.5 本章小结	130
参考文献	130
第 9 章 移动传感器网络的分割问题	132
9.1 覆盖与连通	132
9.2 网络分割问题分析	133
9.3 抗分割的移动传感器网络自部署算法	135
9.3.1 抗分割自部署算法模型	136
9.3.2 算法的节点模型	136
9.3.3 作用力公式及运动方程	137
9.3.4 算法描述	138
9.4 改进的多中心自部署算法	139
9.4.1 算法的节点模型	139
9.4.2 MCDA 描述	139
9.5 仿真与结果分析	140
9.5.1 APSDA 实例研究	141
9.5.2 与 VFA 的对比实验及分析	143
9.5.3 MCDA 的实例研究	146
9.6 本章小结	149
参考文献	149
第 10 章 移动传感器网络的精确部署问题	151
10.1 精确部署的思想	151
10.2 部署时间与平均移动距离	151
10.3 Priority-based 算法	152
10.4 面向目标精确部署算法	153
10.4.1 TPSA 部署原理	153
10.4.2 算法的节点模型	153
10.4.3 作用力公式及运动方程	154
10.4.4 TPSA 描述	155
10.5 仿真与性能分析	157

10.5.1	实例研究	157
10.5.2	与 Priority-based 算法的对比实验及分析	157
10.5.3	部署时间的实验结果及分析	160
10.5.4	平均移动距离的实验结果及分析	161
10.5.5	最大移动距离的实验结果及分析	162
10.6	本章小结	162
	参考文献	162
第 11 章	混合传感器网络部署增强技术	164
11.1	混合无线传感器网络概念	164
11.2	相关算法分析	165
11.2.1	Bidding protocol 算法	166
11.2.2	Cell Density-based 算法	168
11.2.3	HSDA 介绍	168
11.3	问题描述	169
11.4	混合传感器网络部署增强算法	170
11.4.1	混合传感器网络的结构模型与部署原理	170
11.4.2	VFDEA 的节点模型	173
11.4.3	作用力公式与运动方程	173
11.4.4	VFDEA 描述	174
11.5	仿真与性能分析	176
11.5.1	实例研究	176
11.5.2	与 HSDA 的对比实验及分析	182
11.6	本章小结	184
	参考文献	185
第 12 章	移动传感器网络动态管理技术	187
12.1	无线传感器网络的拓扑控制	187
12.2	网络的扩张与收缩	187
12.3	多密度部署方法	189
12.3.1	多密度部署问题分析	190
12.3.2	MDDA 的节点模型	190
12.3.3	作用力公式及运动方程	191
12.3.4	MDDA 描述	191
12.3.5	仿真与结果分析	192
12.4	网络的迁移	194
12.5	本章小结	196
	参考文献	197

上篇 静态传感器网络

第 1 章 无线传感器网络概述

无线传感器网络技术被认为是 21 世纪中能够对信息技术、经济和社会进步发展发挥重要作用的技术，有巨大的发展潜力。将来人们将通过遍布周围的传感器网络直接感知客观世界，极大地改变人们认识世界、改造世界的能力。

本章首先对无线传感器网络的基本概念和体系结构作一个简要的介绍，然后介绍传感器网络的特点及优势，基于这些特征，讲述无线传感器网络的应用领域。最后介绍无线传感器网络的发展历程与趋势。

1.1 无线传感器网络的基本概念

2002 年夏季，研究人员把一些被称为“尘埃”的很小的监控装置装到了有海燕巢的洞穴中。这些装置的尺寸只有一对 AA 电池大小，装备了一个处理器，一个小容量计算机存储器以及监控光、湿度、压力和热量的传感器。然而就是这些小小的“尘埃”预示着一个到处是以电池为能源的无线传感器网络（Wireless Sensor Network, WSN）时代^[1,2]的到来。

2003 年美国《MIT 技术评论》认为，在不远的将来有 10 种新兴技术会对人类社会生活产生巨大影响，很快就可以改变计算、医疗、制造、运输以及能源基础设施的面貌。这些技术是全新的，包括纳米太阳电池、机械电子学、网格计算、量子密码等，而其中第一项就是无线传感器网络。

随着低功耗无线通信技术、传感器技术、微机电技术和嵌入式系统技术的迅速发展，生产具备感应、无线通信以及信息处理能力的微型无线传感器已成为可能。从 20 世纪 90 年代中期开始，无线传感器网络技术受到了越来越多的关注。无线传感器网络的应用研究也被认为是 21 世纪的一项挑战性科研课题。近期，国内外网络研究的热点也集中在无线传感器网络方面，国内外的许多大学和科研院所都展开了相关的研究，比较著名的有美国加州大学伯克利分校的“Smart Dust^[3,4]（智能微尘）”项目与“Great Duck Island 项目”^[5,6]等。

无线传感器网络是一种特殊的 Ad-Hoc 网络，是集数据采集、数据处理、数

据传输于一体的复杂系统。关于无线传感器网络的研究主要从对 Ad-Hoc 网络的研究衍生而来，但不同于 Ad-Hoc 网络高速变化的网络拓扑，无线传感器网络的拓扑相对稳定。由于无线传感器网络中节点功率受限，因此无线传感器网络在节点部署、节点定位、路由和跟踪等方面都表现出与 Ad-Hoc 网络明显的不同。

无线传感器网络由很多随机分布的具有无线通信模块、数据处理模块、传感器模块和电源模块的无线传感器节点构成。网络中的每个节点可以感知周围的环境、执行简单的计算，并且每个节点可以与其无线通信半径内的邻居节点进行信息传输。通过自组织的方式，这些节点构成了一个高度灵活的、低能耗的网络。在实际应用中，无线传感器网络一般有两种结构：同构型结构和异构型结构。典型的同构型结构如图 1-1 所示。部署在监测区域中的节点相互协作，将其监测和感应的多种环境信息（如温度、湿度等）进行采集、处理、融合，并通过主节点路由到基站（Sink），用户可以通过卫星或因特网（Internet）执行查看、控制等操作。大规模的无线传感器网络依靠成千上万的微型、廉价、低功耗的传感器节点来完成对目标的监测。

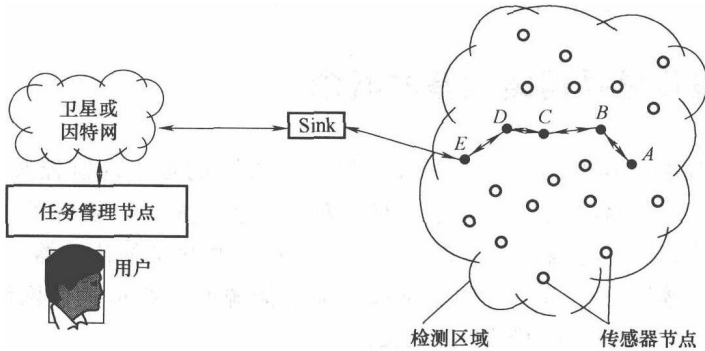


图 1-1 典型的同构型结构

从无线传感器网络各部分功能的角度出发，网络可以分为基础通信结构、支撑技术和应用层 3 个部分。基础通信结构由底向上包括物理层、数据链路层、路由层和传输层。支撑技术包括时间同步、节点定位、系统管理等一些中间件技术。上层即应用层包括节点部署、动态管理、信息处理等几个部分。无线传感器网络的体系结构及各部分功能关系如图 1-2 所示。

无线传感器网络的分布式处理机制所带来的检测精度高、容错性能好、监测区域大、可远程监控等优点，使得它在监控和军事领域具有尤为重要的应用价值。然而，新技术在带来应用机会的同时，也带来了新的研究问题^[7-9]。由于其设计的特殊性，一般认为传感器节点具有电源能量有限且难以更换、计算能力有限、多跳路由、自组织、动态拓扑和节点数量众多等特点。通常情况下，无线传感器节点的能量由电池提供，根据应用的要求，这些节点需要在不补充能量的情

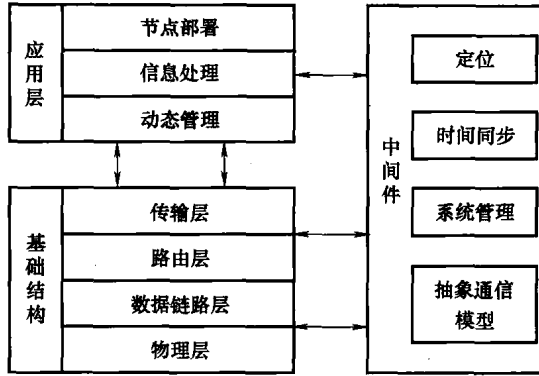


图 1-2 无线传感器网络的体系结构及各部分功能关系

况下持续工作几个月甚至一年。因此，必须通过有效的方法来合理地利用节点的能量，使节点计算和通信的工作量最小化，使网络的生命期最大化。同时，由于传感器节点密集部署，必须克服其自身带来的可扩展性、重叠覆盖以及无线信道干涉等问题。

Akyildiz 等人^[1,10,11]对无线传感器网络研究的系列问题进行了权威性的综述，包括物理层至应用层的各种急需解决的技术。

1.2 无线传感器的体系结构

1.2.1 传感器网络的结构

从用户的角度看，无线传感器网络的宏观系统结构如图 1-3 所示，通常包括传感器节点、汇聚节点（网关节点）和管理节点。传感器随机分布在整个观测

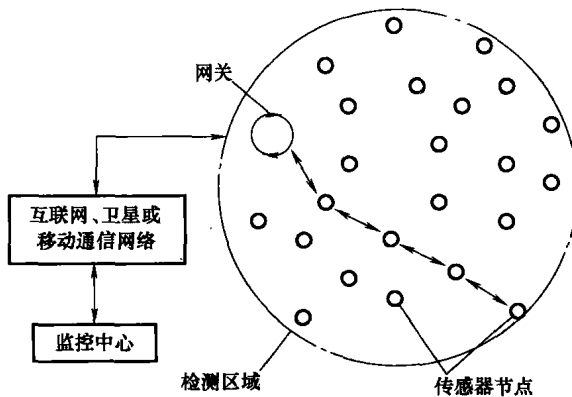


图 1-3 无线传感器网络的宏观系统结构

区域，通过自组织方式组网。在传输过程中，传感器节点在对所测数据进行初步处理后，经过多跳路由到达汇聚节点，最后通过互联网或卫星或者移动通信网络等途径到达用户所在的管理节点。

从网络功能上看，每个传感器节点兼顾数据采集和路由双重功能，除了进行本地信息收集和数据处理外，还要对其他的节点转发来的数据进行存储、管理和融合处理，同时与其他节点协作完成一些特定的任务。汇聚节点是增强功能的传感器节点，它连接传感器网络与因特网等外部网络，实现两种协议栈之间的通信协议转换，发布管理节点的检测任务，并把收集的数据转发到外部网络上。

1.2.2 传感器的节点结构

一个典型的传感器网络节点主要由传感器模块、处理器模块、无线通信模块和能量供应模块四部分组成，如图 1-4 所示，其中点划线表示可选模块。传感器模块负责监测区域内的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以及其他节点发来的数据；无线通信模块负责与其他传感器网络节点进行无线通信、交换控制信息和收发采集数据；能量供应模块为传感器网络节点提供运行所需要的能量。

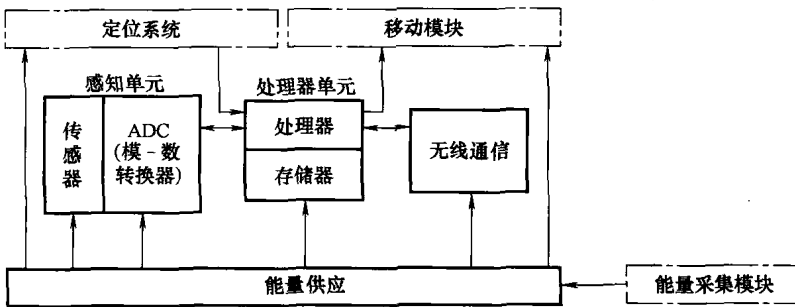


图 1-4 无线传感器节点的构成

1.2.3 传感器网络通信体系结构

开放式系统互连 (Open System Inter connect, OSI) 网络参考模型共有 7 个层次，从底向上依次是物理层、数据链路层、网络层、传输层、会话层、表示层和应用层。除物理层和应用层外，其余各层都和相邻上下两层进行通信。例如传统的无线网络和现有的因特网，就是采用类似的协议分层设计结构模型，只不过根据功能的优化和合并做了一些简化，将网络层上面的 3 层合并为一个整体的应用层，从而简化了协议栈的设计，因此，因特网是典型的 5 层结构。无线传感器网络协议栈的也是 5 层模型，分别对应 OSI 参考模型的物理层、数据链路层、网络层、传输层和应用层，同时无线传感器网络协议体系结构中定义了跨层管理技

术和应用支持技术，比如能量管理、拓扑管理等，如图 1-5 所示。

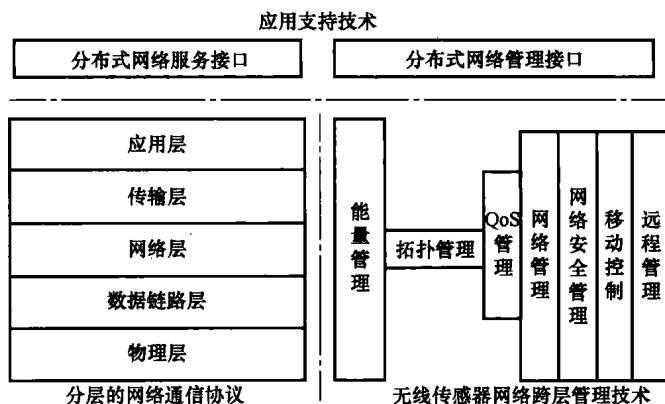


图 1-5 无线传感器网络协议体系结构

(Qos: Quality of Service, 服务质量)

物理层负责对收集到的数据进行抽样量化，以及信号的调制、发送与接收，也就是进行比特流的传输。数据链路层考虑到网络环境存在噪声和传感器节点的移动，主要负责数据流的多路技术、数据帧检测、介质访问控制，以及差错控制，减少临近节点广播的冲突，保证可靠的点到点、点到多点通信。网络层维护传输层提供的数据流，主要完成数据的路由转发，实现传感器与传感器、传感器与信息接收中心之间的通信，关注的是路由技术，负责路由生成和路由选择。如果信息只是在无线传感器内部传递，传输层可以不需要，但是从实际应用来看，无线传感器网络需要和外部的网络进行通信来传递数据，这时传输层提供无线传感器网络内部以数据为基础的寻址方式变换为外部网络的寻址方式，也就是完成数据格式的转换功能。应用层由各种传感器网络应用软件系统构成，为用户开发各种传感器网络应用软件提供有效的软件开发环境和软件工具。

1.3 无线传感器网络的特点及优势

无线传感器网络与传统的无线网络（如 WLAN 和蜂窝移动电话网络）以及在组网形式上相似的移动 Ad-Hoc 网络（MANET）相比，它们有着明显不同的设计目标、技术要求和应用要求。

传统的无线网络和 MANET 网络都是以传输数据完成通信为目的的，中间节点仅仅负责分组数据的转发，它们注重在高度移动的环境中通过优化路由和资源管理策略，最大化带宽的利用率，同时为用户提供一定的服务质量。

而无线传感器网络是以数据为中心，获取信息为目的的，中间节点不但要转

发数据，还要进行与具体应用相关的数据处理、融合和缓存，除了少数节点可能移动外，大部分节点都是静止的。无线传感器网络有时运行在恶劣甚至危险的远程环境中，传感器节点的电池无法补充更新；即使无线传感器网络工作在友好的环境中，对数量巨大的传感器节点进行电池更换也是不现实的。因此设计有效的策略延长网络的生存寿命是无线传感器网络的核心问题，能量效率的设计准则贯彻在无线传感器网络的硬件、软件、算法和协议等各个层面。无线传感器网络的主要特点如下：

(1) 网络节点密度高，传感器节点数量众多，单位面积内所拥有的网络节点数较多，可以分布在很广泛的地理区域。无需底层基础设施，成千上万的传感器节点被抛撒或放置在特定区域后，自动完成邻居发现和路由发现，以自组织方式构成网络。

(2) 传感器节点要求小型化和微型化，且网络应具备容错能力以便适应恶劣的环境，由于其携带的电池能量有限，为尽可能地延长传感器节点的使用寿命，其邻居节点间一般采用低功耗短距无线电通信，非邻居节点间采用多跳方式通信。

(3) 通信能力有限。传感器网络的传感器的通信带宽窄而且经常变化，通信覆盖范围只有几十到几百米。传感器之间的通信断接频繁，经常导致通信失败。由于传感器网络更多地受到高山、建筑物、障碍物等地势地貌以及风雨雷电等自然环境的影响，传感器可能会长时间脱离网络，离线工作。如何在有限通信能力的条件下高质量地完成感知信息的处理与传输是需要解决的问题之一。

(4) 传感器网络中的传感器网关节点都具有嵌入式处理器和存储器。这些网关节点都具有计算能力，可以完成一些信息处理工作。但是，由于嵌入式处理器和存储器的能力和容量有限，传感器的计算能力还十分有限，存取和运算处理是分布式并行的，这样就大大缩短了信息获取和处理的总时间，从而能够及时、准确地得到所需要的信息。

(5) 传感器节点由电池供电，由于节点能量有限，无可避免地存在移动节点和传感器节点失效或废弃，在某些情况下可能需要增补，这可能会致使网络拓扑动态变化。这样，传感器、感知对象和观察者三者之间的路径就会随之发生变化。因此，传感器网络必须具有可重构和自调整性。

(6) 无线传感器网络应用目的的多样性使得信息在网协同处理方法（数据融合方法）复杂化。在无线传感器网络的许多应用中，数据处理或融合与路由机制相关联，因此无线传感器网络很难形成统一的通信协议。另外，传感器节点角色的多样性，使得传感器节点的协议和软件平台复杂化。

无线传感器网络是一种全新的信息获取和处理技术，与传统的非网络化传感器技术相比，它具有如下优点：

(1) 传感器网络的规模和覆盖范围不受限制, 可根据实际情况的需要, 确定无线传感器网络的规模和覆盖范围, 这样, 就有利于其应用范围的拓展。

(2) 在无线传感器网络中, 空间密集分布的传感器节点可由不同种类的传感器构成, 这样它们就能够同时多方位、多角度、分布式监测被测对象, 从而获取监测对象的多种特征信息, 利用传感器融合技术对测得的多路信号进行信息融合处理, 就可以确保获得的信息具有更高的精确性、完整性和可靠性。

(3) 无线传感器网络可由分布密集的大量传感器节点构成, 这就带来了需要处理大量冗余信息的缺陷, 但同时, 信息的冗余性也提高了网络的容错能力。因为冗余的数据信息可以在一定程度上弥补因网络中个别传感器节点出现故障而缺失的部分数据或引入部分错误信息, 辅以良好的信息融合算法, 从而提高整个网络的容错能力。

(4) 传感器节点的小型化和微型化, 以及网络应具备的容错能力, 使得传感器节点本身就能够适应恶劣的环境, 而且, 分布式放置和密集分布的传感器节点在很大程度上有助于提高网络的抗毁性。此外, 传感器自动识别组网的特点, 使得对网络实施传感器节点替换或增补成为可能。

(5) 由于无线传感器网络节点本身带有处理能力, 并因其信息的获取和运算处理是分布式并行的, 这样就大大缩短了信息获取和处理的总时间, 从而能够及时、准确地得到所需要的信息。

1.4 无线传感器网络的应用

无线传感器网络一般通过飞行器或其他工具将大量传感器节点(数量从几十到几千个)抛撒到所要监测的区域, 节点通过自组织快速形成无线网络, 从而可以在人类无法监守、条件极其恶劣的环境中应用(如火灾现场、生化试验区域或者人迹罕至的沙漠甚至外星球)。在军事、环境、生物、医疗保健、空间探索、目标跟踪、入侵检测、气候监测、灾难救援和商业贸易等方面, 无线传感器网络显示了极高的应用价值。根据无线传感器网络的应用领域, 其任务类型可以分为环境数据收集、安全性监控、事件跟踪以及三者的混合任务^[12]。无线传感器网络改变了人与自然界的交互方式, 作为一种全新的信息获取和处理技术, 它可在很多应用领域(见表1-1)实现复杂的大规模监测和跟踪服务, 具体可分为下述几类。

表1-1 无线传感器网络的典型应用及其前景

领 域	应 用
军事及反恐防爆应用	兵力、装备等的监视;战区监控;战场态势感知;目标追踪;战争损伤评估;核、生物和化学攻击的检测
环境应用	森林火险的预警、环境的生物复杂性映射、洪水监测、火山爆发、精密农业 ^[13]

(续)

领 域	应 用
保健应用	人体生理指标的远程监测、患者的跟踪调查、药品的流转
家庭应用	智能家居、居住环境智能化
商务应用	汽车防盗、交互式博物馆、库存管理、车辆追踪与定位

1. 军事侦察领域应用

无线传感器网络的特性非常适合用于军事侦察，在恶劣的战场环境中，其低成本、低功耗、小体积、高抗毁、高隐蔽性、自组能力等特点为军事侦察提供了可靠而有效的手段。与其他侦察手段相比，无线传感器网络具有以下突出的优势：

(1) 无线传感器网络自组织、冗余、分布式控制和路由算法等特点，使它在个别节点被摧毁或失效时，也可使整个网络不致崩溃。

(2) 无线传感器节点可以做得很小，易于伪装，可用于近距离侦察，减小了环境噪声以及人为干扰的影响，可以消除侦察盲区，确保侦察的有效性。

(3) 由多种传感器组成的无线传感器网络，有利于获取更多的信息，并进行多节点、多角度和多方位信息的综合，有效地提高了侦察信息的可信度。无线传感器网络可以用于侦察敌方兵力的部署、兵力的运动；侦察战场的核、生、化环境；侦察战斗区域的地形地貌特征；侦察战斗区域的天气变化等。

2. 地理环境监测领域应用

通过传统方式采集地理信息原始数据是一项十分困难的工作，无线传感器网络为野外和随机性的研究数据获取提供了方便。在所研究的地理区域放置无线传感器网络就能够很方便地监测地理环境的变化。例如，监测预报山体滑坡、泥石流、火山爆发，可以避免或降低自然灾害造成的损失；监测气候环境、土壤环境等变化，可以起到对农业生产有利的影响；监测桥梁、水利设施的微小变化，可以为桥梁等重要设施的状态评估提供依据。此外，无线传感器网络还可用于监测海洋、大气等成分的变化，监测地层、地下水的变化等方面。

3. 医疗健康监测应用

如果在住院病人身体安装或穿戴相应的传感器节点，如心率、体温和血压监测设备等，构成无线传感器网络，医生就可以随时了解被监护病人的病情，进行及时处理。随着医用 MEMS 技术的发展，某些特殊用途的微型传感器节点可以被植入人体内，加上人身上外戴的传感器节点组成无线传感器网络，长时间广泛地收集人的生理数据，监测健康状况，使人们能尽早发现病症，及时治疗。倘若这样的数据是来自疫苗或新药受试者，那么它对疫苗或新药品的研究也是非常有用的。

4. 其他应用

无线传感器网络还有许多应用点,如工业生产过程的监控;城市交通状况的监控;外星及外太空的探索;家庭自动化控制等。在众多的领域中无线传感器网络都将体现出它的优越性,随着无线传感器网络的进一步发展,必将有许多新的设计和应用模式出现。

1.5 无线传感器网络研究及发展概况

无线传感器网络的研究起步于20世纪90年代。从21世纪开始,无线传感器网络引起了各国军事部门、工业界和学术界的极大关注,欧美国家,特别是美国相继启动了多项关于无线传感器网络的研究计划。随着研究的深入,它正在逐渐深入到人类生活的各个应用领域^[7,14]。

传感器网络研究首先源自国防军事领域的需求,其最新研究成果和主要进展也反映在该领域。美国军方率先开展研究,实施了一系列项目,取得较多成果。20世纪90年代,美国军方提出未来战争主要模式将从“平台中心战”转变为“网络中心战(Network Centric Warfare, NCW)”,传感器网络可有机结合交战网络和信息网络,支持完成各作战平台的网络化和一体化,是实现网络中心战的关键技术之一。在此期间美国军方推动了多个项目的研究,主要包括加州大学洛杉矶分校和Rockwell研究中心的WINS(Wireless Integrated Network Sensors,无线集成传感器)项目^[15]、加州大学伯克利分校的Smart Dust项目和随后启动的NEST项目^[16]。此外,美国海军提出的协同作战能力(Cooperative Engagement Capability, CEC)系统,通过机载或舰载雷达传感器构成立体监测网,可极大提高测量精度并快速有效地识别和跟踪战场环境下的敌方目标;美国陆军的无人地面传感器网络(Unattended Ground Sensors, UGS)项目,由REMBASS(Remote Battlefield-Sensor System,远程战场传感器系统)和TRSS(Tactical Remote Sensor System,战术远程传感器系统)组成,主要目标是根据需要将传感器节点灵活部署到任何区域,实施战场监控以扩展陆军的视野。21世纪初,DARPA(美国国防部先进研究项目局)提出了“C⁴KISR”(Command Control Communications Computers Kilt, Intelligence, Surveillance, Reconnaissance)概念,主要目标是整合“指挥、控制、通信、计算机、杀伤、情报及监视与侦察”各网络平台,强调战场情报的获取能力、信息的综合处理和利用能力,旨在缩短目前发现、定位、跟踪、瞄准、交战和评估各步骤之间的延迟,传感器网络是该系统的重要研究领域之一。随后,DARPA启动了SensIT(Sensor Information Technology,传感器信息技术)项目^[11],主要研究可应用于战场环境下以Ad-Hoc形式快速部署,适应高度动态变化环境的网络技术,以及准确、可靠、快速的网络信息处理技术,建立一个廉价且无处不在的网络系统。2001年开始,美国陆军实施“灵巧传感器网络