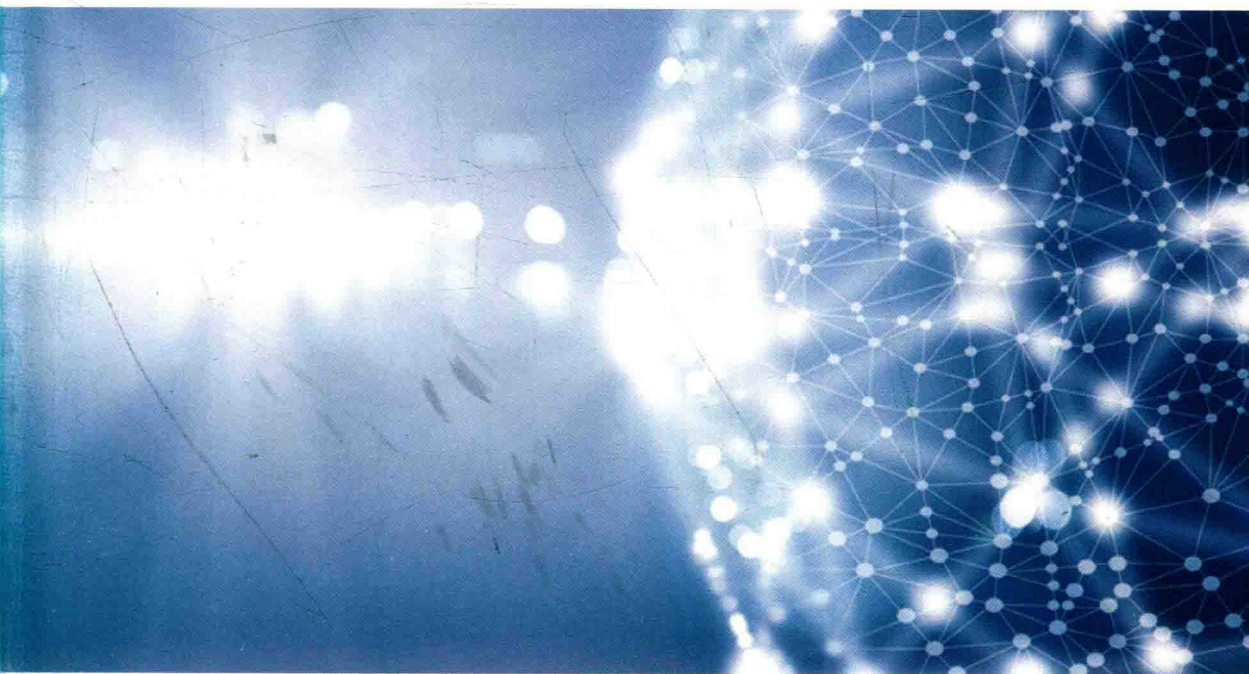


● 国家自然科学基金研究成果

Coverage Algorithms for Wireless Sensor Networks

无线传感器网络中的 覆盖算法研究

◎ 李小龙 著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

● 国家自然科学基金(61462021)

资助出版

● 新零售虚拟现实技术湖南省重点实验室

无线传感器网络中的 覆盖算法研究

coverage algorithms for wireless sensor networks

◎ 李小龙 著

常州大学图书馆
藏书章



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

无线传感器网络中的覆盖算法研究 / 李小龙著. —西安: 西安交通大学出版社, 2017.12

ISBN 978-7-5693-0376-6

I. ①无… II. ①李… III. ①无线电通信—传感器—算法—研究
IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 322898 号

书 名 无线传感器网络中的覆盖算法研究
著 者 李小龙
责任编辑 魏 杰 贺彦峰

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)
网 址 <http://www.xjtupress.com>
电 话 (029) 82668357 82667874 (发行中心)
(029) 82668315 (总编办)
传 真 (029) 82668280
印 刷 湖南省众鑫印务有限公司

开 本 710mm×1000mm 1/16 印张 11.5 字数 167 千字
版次印次 2017 年 12 月第 1 版 2018 年 1 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5693-0376-6
定 价 88.00 元

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题, 请与本社发行中心联系、调换。

版权所有, 侵权必究



前 言

传感器网络可以使人们从监测区域或监控对象处获取大量详实而有价值的信息，可广泛应用于军事和民用领域，如战场监视、环境和交通监测、医疗、空间探索和灾难救助等。从 21 世纪开始，它已经引起许多国家的军事部门、工业界和学术界的广泛关注。覆盖问题是无线传感器网络中的一个基本问题，它反映了传感器网络提供的感知服务质量。

传感器网络的覆盖问题，可以看作是在传感器网络节点能量、计算处理能力等资源受限的情况下，通过放置节点以及唤醒 / 休眠节点等手段，获得更好的服务质量。覆盖控制有着十分重要的意义：其一，影响整个网络的生存时间。在传感器节点的能量难以补充的环境下，在保证服务质量的前提下，覆盖控制的一个重要研究目标就是延长整个网络的生存时间。其二，减少节点间的通信干扰，提高网络通信效率，降低传感数据的冗余。其三，针对传感器节点的性能和行为容易受到环境条件的影响等问题，研究确保目标区域覆盖质量和覆盖可信度的覆盖算法。本书以满足服务质量、节约网络能量和延长网络生存时间、提高可靠性为目标，围绕无线传感器网络中的覆盖问题展开研究。

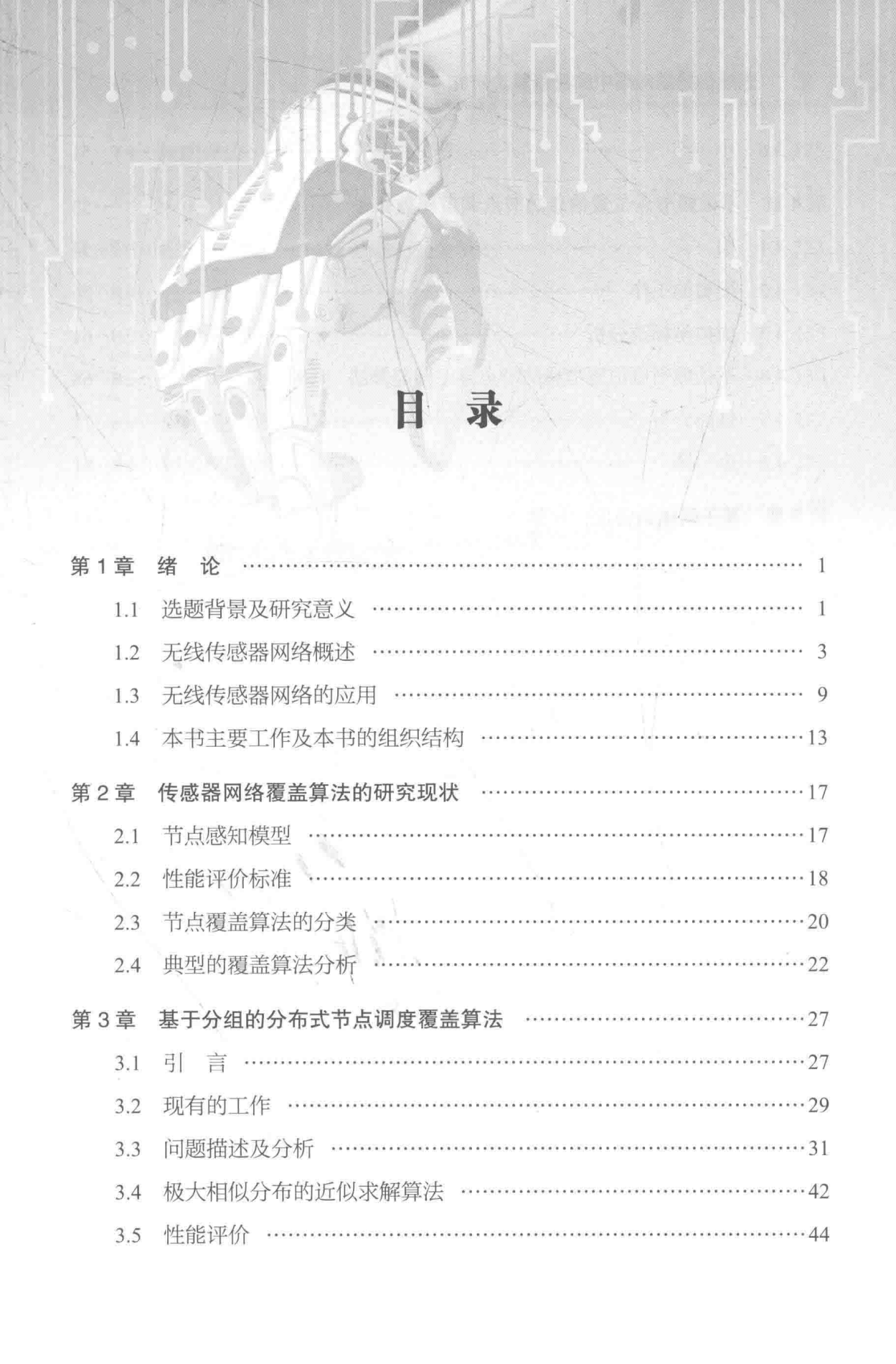
近二十年来，传感器网络中的覆盖在理论及应用上都取得了很大的发展。作者从 2005 年攻读博士学位开始，一直从事传感器网络方向和相关方向的研究，相关的研究工作受到了两项国家自然科学基金项目的资助，也取得了一定的研究

成果。本专著是对作者在该方向上十余年研究成果的总结。

本书在总结过去研究工作的基础上阐述了传感器网络覆盖问题的基础理论、技术方法和应用实践,为传感器网络覆盖算法研究提供了许多新的内容。本书共分为9章。第1章介绍传感器网络覆盖算法的选题背景及研究意义,分析传感器节点的特征和无线传感器网络的特征。第2章综述传感器网络节点调度覆盖算法的研究现状。第3章研究基于分组的节点调度覆盖算法,给出基于分组的集中式和分布式节点调度覆盖算法。第4章给出不依赖节点位置信息的节点调度覆盖算法 LCSS。第5章提出了一种基于网格的密度控制算法 GDCA。第6章提出了一种基于正方形的连通覆盖集快速实现算法 SFAMCCS。第7章设计了一种基于虚拟坐标的节点调度方案。第8章讨论了基于信任管理的安全机制。第9章提出了基于信任管理的高可靠覆盖机制。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金(61462021)、湖南商学院青年教师创新驱动计划项目(17QD09)、广西科学研究与技术开发计划项目(2016AD02010)、广西高校图像图形智能处理重点实验室(GIIP201406)、新零售虚拟现实技术湖南省重点实验室(2017TP1026)的资助,特此向长期支持和关心作者研究工作的所有单位和个人表示衷心的感谢。作者还要感谢培养、教育作者多年的师长,感谢作者家人的支持,感谢出版社同仁为本书付出的辛勤劳动。

由于作者水平有限,书中错误和缺点在所难免,欢迎广大读者提出宝贵的修改意见,以进一步提高本书稿的质量。



目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 选题背景及研究意义	1
1.2 无线传感器网络概述	3
1.3 无线传感器网络的应用	9
1.4 本书主要工作及本书的组织结构	13
第 2 章 传感器网络覆盖算法的研究现状	17
2.1 节点感知模型	17
2.2 性能评价标准	18
2.3 节点覆盖算法的分类	20
2.4 典型的覆盖算法分析	22
第 3 章 基于分组的分布式节点调度覆盖算法	27
3.1 引 言	27
3.2 现有的工作	29
3.3 问题描述及分析	31
3.4 极大相似分布的近似求解算法	42
3.5 性能评价	44

3.6 小 结	51
第 4 章 不依赖节点位置信息的节点调度覆盖算法	53
4.1 引 言	54
4.2 现有的工作	56
4.3 虚拟坐标及分析	61
4.4 不依赖节点位置信息的节点调度覆盖算法	68
4.5 性能分析	71
4.6 小 结	81
第 5 章 基于网格的密度控制算法	83
5.1 引 言	84
5.2 现有的工作	85
5.3 问题描述及分析	87
5.4 基于网格的密度控制算法 GDCA	91
5.5 性能评估	94
5.6 小 结	97
第 6 章 基于正方形剖分的连通覆盖集快速实现算法	99
6.1 引 言	100
6.2 问题描述及分析	102
6.3 基于正方形剖分的连通覆盖集快速实现算法	109
6.4 算法性能分析	113
6.5 小 结	117
第 7 章 基于虚拟坐标的节点调度方案	119
7.1 引 言	120
7.2 现有的工作	121
7.3 基于虚拟坐标的节点调度方案	123

7.4 性能评价	125
7.5 小 结	131
第 8 章 网络中一种基于信任管理的安全机制.....	133
8.1 引 言	134
8.2 TMS 框架	135
8.3 节点状态评估模块	136
8.4 信任建立模块	137
8.5 环境探测模块	139
8.6 性能评价	140
8.7 小 结	144
第 9 章 传感器网络中基于信任管理的高可靠覆盖机制	145
9.1 引 言	146
9.2 基于信任管理的模型	148
9.3 基于信任管理的覆盖算法	154
9.4 仿真实验	157
9.5 小 结	160
参考文献.....	161



第1章 绪 论

本章首先介绍本书的选题背景，阐述其研究意义，紧接着分析传感器节点的特征和无线传感器网络的特征，然后指出传感器网络潜在的应用领域。本章最后给出本书的研究内容及本书的组织结构。

1.1 选题背景及研究意义

随着嵌入式计算技术、无线通信技术和传感技术的飞速发展和日益成熟，构建低成本、低功耗、多功能的微型传感器节点成为可能。这些传感器节点集成了信息感知、数据处理和无线通信等功能，由这些传感器节点构成的传感器网络 WSN (Wireless Sensor Network) 在无人监管的情况下，通过传感器节点协同工作实时监测和采集各种环境或监测对象的相关信息，并将大量有价值的传感数据传送到基站进行处理。因此，人们可以通过无线传感器网络感知自然世界，如传感器网络向消防部门报告被监测的森林中是否出现火灾以及发生火灾的区域，为消防部门做决策提供可靠的信息。传感器网络可以使人们从监测区域或监控对象处获取大量有价值的信息，可广泛应用于军事和民用领域，如战场监视、环境和交通监测、医疗、空间探索和灾难救助等^[1-3]。美国《技术评论》(Technology

Review)杂志2003年2月份评选出对人类未来生活产生深远影响的十大新兴技术,无线传感器网络被列为第一。美国《今日防务》杂志更认为无线传感器网络的应用和发展将引起一场划时代的军事技术革命和未来战争的变革。由于无线传感器网络具有巨大的应用价值,从21世纪开始,它已经引起许多国家的军事部门、工业界和学术界的广泛关注。美国国防部和各军事部门较早开始启动了传感器网络的研究。美国陆军近年来确立了“灵巧传感器网络通信计划”“战场环境侦察与监视系统”“无人值守地面传感器群”等多个项目,利用无线传感器网络了解战场态势,获取更广阔的视野,帮助制定战斗行动方案。在工业界,瑞士ABB和法国Coronis Systems等公司已经采用无线传感器网络系统监控机器品质,美国Desert Mountain公司利用无线传感器网络调控高尔夫球场的自来水灌溉。据市场调研公司ON World发布的一份报告,2011年,世界市场无线传感器网络系统与服务飞升至约46亿美元。美国Dust Networks和Crossbow Technologies等公司研究的“智能尘埃、Mote”已进入应用测试。美国英特尔公司、美国微软公司等工业界巨头也开始了传感器网络方面的研究工作,设立或启动了相应的研究计划。在学术界,美国加州大学伯克利分校、加州大学洛杉矶分校、斯坦福大学、南加州大学等研究机构都有研究小组在从事传感器网络相关技术的研究^[4-8],加拿大、英国、德国、日本和意大利等国家的研究机构也纷纷进入该研究领域。近年来,我国的国家自然科学基金、863国家高技术研究发展计划和973国家重点基础研究发展计划连续对无线传感器网络的基础理论和关键技术的研究进行了资助,加快了国内无线传感器网络的研究进程^[9-14]。

覆盖问题是无线传感器网络中的一个基本问题,它反映了传感器网络提供的感知服务质量。传感器网络的覆盖问题,可以看作是在传感器网络节点能量、计算处理能力等资源受限的情况下,通过放置节点以及唤醒/休眠节点等手段,获得更好的服务质量^[15-16]。网络的覆盖控制有着十分重要的意义,主要表现在以下几个方面:

(1) 影响整个网络的生存时间。传感器网络一般采用电池供电,特别在很

多应用中,传感器节点被放置在极其恶劣的环境中,节点的能量难以补充。覆盖控制的一个重要目标就是在保证服务质量的前提下,延长整个网络的生存时间。

(2) 减少节点间通信干扰,提高网络通信效率,降低传感数据的冗余。传感器网络中节点通常密集部署,如果所有节点一直保持在工作状态,导致这些节点通信冲突增大,获得的传感数据冗余度高。由于传感器网络密度高,如果每个节点都处于工作状态,会造成信息冗余,增加网络能量消耗,降低网络通信效率。因此,在满足服务质量等条件下,采用节点调度方式,把所有节点划分为合适的节点子集,这些节点子集采用轮换活跃/休眠或采用密度控制方式,仅将最少量的节点投入活跃工作状态,而将其余节点投入低功耗的睡眠状态,都可以达到减少能量消耗和延长网络生存时间的目的。

本书以满足服务质量、节约网络能量和延长网络生存时间为目标,围绕无线传感器网络中的覆盖问题展开研究。

1.2 无线传感器网络概述

无线传感器网络由一组部署在目标区域内,低成本、低功耗,具备信息采集、数据处理和无线通信等多种功能的传感器节点组成,通过无线通信方式形成一个自组织网络系统^[17],其目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖区域中感知对象的信息,并发送给观察者。

1.2.1 传感器节点特征

无线传感器节点由四个基本模块组成,分别为传感器模块、处理器模块、无线收发模块和能量供应模块^[18],如图 1.1 所示。处理器模块包括存储单元和处理单元,是无线传感器节点的核心,所有的设备控制、任务调度、协作处理、数据整合都将在这个模块的支持下完成。传感器节点使用的处理器具有外形小、集成度高、功耗低、成本低且支持睡眠模式等特点,目前使用较多的有 ATMEL 公

司的 AVR 系列单片机。传感器模块由传感器和模数转换器两个子模块组成。传感器将测到的物理量,如温度、湿度、光强度、压力等,转换成电压信号。模数转换器将物理信号转换成数字信号并传送到处理器模块。为了进行一些比较复杂的监测操作或需要监测区域的不同物理信息,一个传感器节点常常装备了多种传感器,如美国 Crossbow 科技公司生产的 MicaZ 节点通过扩展方式带有的传感板 MTS300CB,板上载有光照传感器、温度传感器以及声音传感器等多种传感器。无线收发模块通过无线通信与网络中的其他节点进行信息交互,如收发传感数据以及交换控制消息等。能量供应模块为节点的各个单元提供能量,通常采用微型电池。有的传感器节点还携带有支持定位的硬件设备,如 GPS 定位系统,还有的传感器节点装备有移动机器人以支持移动功能。

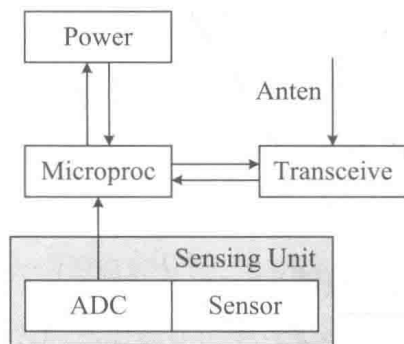


图 1.1 传感器节点的系统结构

在这四个基本模块中,能量供应模块包括传感器模块、处理器模块和无线通信模块。我们以 Rockwell 生产的 Wins 节点为例^[19],说明传感器节点各部分能量消耗的情况,如图 1.2 所示。从图中可以看出,处理器模块在工作状态的能量消耗要远大于在休眠状态,与无线收发模块在接收状态和空闲状态的能量消耗接近。传感器模块在工作状态的能量消耗最小,无线收发模块在发送状态的能量消耗最大。当传感器节点发送、接收和测试通信信道时,无线收发模块和处理器模块均处于工作状态,此时节点的功耗要远大于节点处于休眠状态时的功耗。

虽然随着嵌入式计算技术、存储技术、无线通信技术、电池技术等技术的进步,传感器节点的通信能力、数据处理能力逐步提高,电池容量进一步加大,然

而, 由于传感器节点体积、成本等多方面的限制, 在现实条件下, 传感器节点的能量资源、通信能力、计算和存储能力仍然是非常有限的。

1. 电源能量有限

传感器节点体积较小, 携带的电池能量十分有限。例如, 使用得较多的锂离子和锌电池能量密度大约分别为 300 mWh/cm^3 、 1500 mWh/cm^3 , 也就是说 1 cm^3 的锂离子电池和锌电池仅能支持 Wins 节点保持活跃状态的时间, 分别为 0.4 个小时和 2 个小时。由于传感器节点个数较多, 且常常部署在人难以到达的区域或敌对区域, 逐个对传感器节点更换电池来补充能量难以实现。为了克服电池难以补充的缺陷, 已有学者开始研究传感器网络的自我能量收集技术和电池无线充电技术。目前高效使用节点能量来最大化网络生命周期仍然是传感器网络的首要课题。

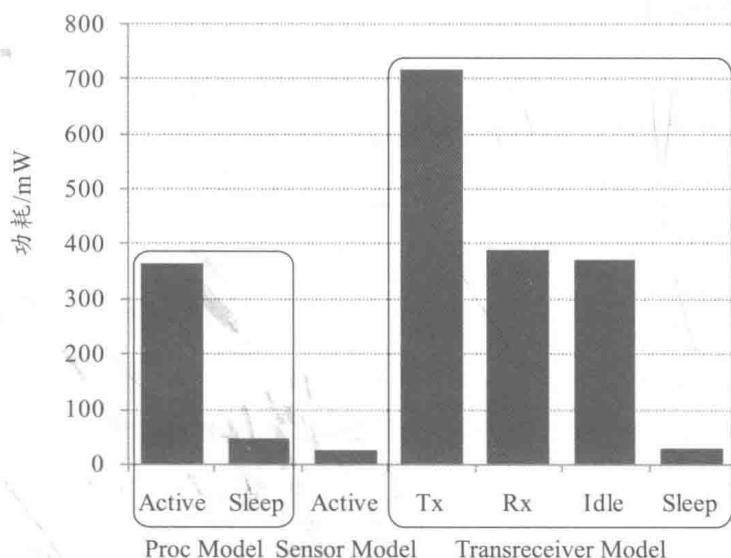


图 1.2 传感器节点能量消耗情况

2. 通信能力有限

根据传感器节点的载波频率及无线信号的衰减公式, 我们可以推出, 无线通信的能量消耗与通信距离的关系为^[20]:

$$E = kd^n \quad (1.1)$$

其中, $2 < n < 4$ 。 n 的取值与很多因素相关, 例如传感器节点所在区域有其他信号的干扰, 部署环境条件恶劣, n 的取值就大。随着通信距离的增加, 能耗将急剧增加, 因此在满足通信连通度的前提下应尽量减少单跳通信距离。由于传感器节点常常部署在条件恶劣的区域, 且节点的能量不断变化, 这些因素常常造成节点间的通信中断和传输数据包的丢失。在复杂的通信环境和节点通信能力有限的情况下, 传感器网络的算法和协议能否容忍节点间的通信中断和传输数据包的丢失这些错误, 关系到它们的实际应用范围。

3. 计算和存储能力有限

传感器节点是一种低功耗、低成本、微型的嵌入式系统, 这些限制使得所携带的处理器能力比较弱, 存储器容量比较小。例如, 加州大学伯克利分校生产的 Mica2 节点仅有 512 KB 的数据存储器, 处理器芯片 Atmega 128 时钟频率为 7.3728 MHz。加利福尼亚大学洛杉矶分校生产的 MK-II 节点拥有 1 MB 的数据空间总量, 处理器芯片也是 Atmega 128。如何利用有限的计算和存储资源, 通过协同处理完成各种监测任务成为传感器网络设计的挑战。

1.2.2 传感器网络特征

无线传感器网络通常包括传感器节点、汇聚节点和管理节点, 网络结构如图 1.3 所示^[18]。传感器节点通过人工放置或飞机撒播等方法部署在监测区域, 以自组织方式构成网络。传感器节点监测的数据沿着其他传感器节点逐跳地进行传输, 在传输过程中可能被多个节点处理, 经过多跳后到达汇聚节点, 最后通过互联网或卫星到达管理节点。与传统网络中的节点终端不同的是, 传感器节点既具有传感器网络中的节点终端功能, 也具有路由器的功能, 在实施监测任务、发送自身的监测数据、与其他节点协作完成一些特定任务的同时, 还需要对其他节点转发来的数据进行存储、融合等处理, 并将处理后的数据进一步地转发。汇聚节点的处理能力、存储能力和通信能力都比较强。一般情况下, 汇聚节点放置在监测区域的边缘等人能直接到达的区域, 节点的能量可以得到补充, 因此通常不会考虑

汇聚节点的能量问题。汇聚节点带有无线通信接口的特殊网关设备，它连接传感器网络和互联网等外部网络，同时发布管理节点的监测任务，并将收集的数据转发到外部网络上。用户通过管理节点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。

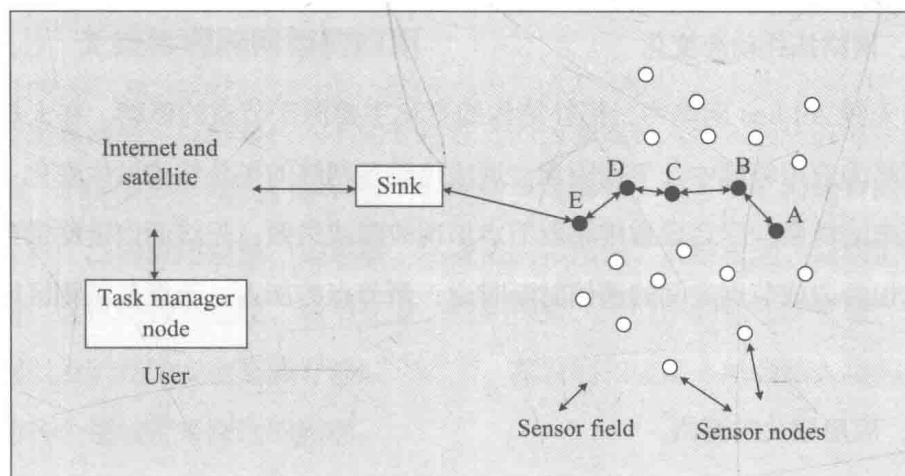


图 1.3 无线传感器网络的体系结构

由于传感器网络应用领域非常广泛，监测区域既可能是森林、战场等宏观区域，也可能是个体微观的生物环境，组网的成员节点数目迥异，形成的传感器网络的规模相差很大，网络特征也不尽相同。本书主要关注大规模传感器网络，其鲜明特点如下。

1. 节点分布稠密

为了获取精确信息，在监测区域通常密集部署了大量传感器节点。大量冗余节点的存在，可以降低或消除节点失效带来的监测盲区等问题，提高系统的容错性能，通过不同空间视角获得的信息具有更大的信噪比，并能够提高监测的精确度，降低对单个节点传感器的精度要求。

2. 自组织网络

由于部署的节点个数可能达到成千上万，甚至更多，且监测区域可能是人难以到达或者是极其危险的区域，如灾难现场，传感器节点很难逐个放置在目标区

域内,传感器节点常常通过飞机撒播或炮弹发射等方法部署在监测区域内,因此传感器节点的位置不能预先精确设定,节点之间的相关邻居关系预先也不知道。传感器节点能够自动配置和管理,通过拓扑控制机制和网络协议自动形成转发监测数据的多跳无线网络系统。

3. 网络拓扑动态变化

在无线 Ad-hoc 网络中,拓扑结构的变化主要源于节点的移动。在大规模传感器网络的应用领域中,下列因素会造成传感器网络的拓扑结构发生变化:物理破坏或电池能量耗尽会导致传感器节点出现故障或失效;无线通信链路带宽或信号干扰也会造成节点之间的通信时断时通;新节点的加入;节点在监测区域内的移动。

4. 应用相关的网络

传感器网络的应用领域非常广阔,如军事应用、环境观测、智能家居等等。不同的应用背景对传感器网络的要求不同,因此对应的硬件系统、网络协议也存在很大的差别。如草皮的自动灌溉系统要求传感器节点监测草皮的湿度信息,桥梁的监测系统要求传感器节点监测桥梁承受的压力和应变。针对每一个具体的应用要求,研究设计传感器网络硬件技术和网络协议,是无线传感器设计不同于传统网络的显著特征。

5. 以数据为中心^[21]的网络

传感器网络是任务型的网络。传感器网络报告监测事件或用户使用传感器网络查询事件时,用户仅关心传感器网络将所关心的事件汇报给自己,而并不关心哪个节点监测到事件。例如,在应用于森林火灾监测的传感器网络中,火灾可能出现在任何地方,用户只关心火灾出现的位置、时间和范围,而并不关心哪些节点监测到火灾。

传感器节点和形成的无线传感器网络独有的特点使得其明显区别于网络终端节点以及传统的计算机网络和无线 Ad-hoc 网络^[22],已有的研究成果很难直接应

用于无线传感器网络，因此需要研究新的硬件技术和设计新的网络协议，使其更好地适应于不同应用要求下的传感器网络，得到更高效的传感器网络应用系统。

1.3 无线传感器网络的应用

传感器网络可以部署在人不能长期驻守的区域或者人难以到达的危险区域，长期地、不间断地监测人们感兴趣的物理信息或事件，并及时汇报给管理节点，所以具有广泛的应用前景，如军事、环境监测和预报、灾难救助、健康护理、智能家居、建筑物状态监控、城市交通、空间探索、大型车间和仓库管理、地下水管检测以及矿井的安全监测等领域^[5-8, 23-39]。其发展和应用，将会给人类的生产和生活的各个领域带来深远的影响。

1.3.1 军事应用

与很多技术一样，军事上的应用推动了传感器网络的研究和发展。早在冷战时期，美国国防部就实施了 SOSUS 计划，将大量声音传感器放置在海洋底部，以监测苏联的潜水艇。在 1980 年左右，美国 DARPA 启动了分布式传感器网络计划，提出了分布式传感器网络中的关键技术：传感器，通信，处理技术和算法，分布式算法。然而，由于这些技术在当时尚未得到解决，因此对分布式传感器网络的研究和应用都十分有限。进入 20 世纪 90 年代，美国军方普遍认识到分布式传感器网络成为军事系统必不可少的一部分。如美国海军实施的 CEC 计划，通过在地面装置多个声纳传感器，用以监测空中目标。随着微电子技术、无线通信技术和处理器技术的迅速发展和日益成熟，现有的传感器网络越来越接近最初的设计目标。

传感器网络具有可快速部署、可自组织、成本低、隐蔽性强和高容错性的特点，非常适合在军事上应用。通过飞机撒播或炮弹发射等方法将传感器节点部署在敌方区域，就能够近距离地收集敌方的战场信息，如敌方兵力和装备，地形，生物