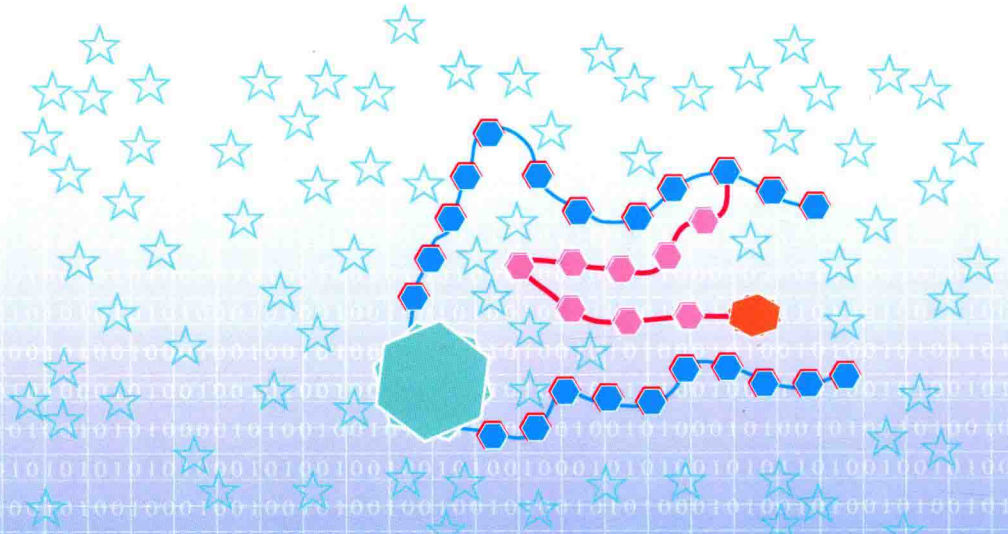
中央民族大学“985工程”三期培育学科建设项目
ZHONGYANG MINZU DAXUE 985GONGCHENG SANQI PEIYUXUEKE JIANSHE XIANGMU

无线传感器网络关键技术

◎ 李霞丽 编著



中央民族大学出版社
China Minzu University Press

中央民族大学“985工程”三期培育学科建设项目
ZHONGYANG MINZU DAXUE 985GONGCHENG SANQI PEIYUXUEKE JIANSHE XIANGMU

无线传感器网络关键技术

Key Technologies Research on Wireless Sensor Networks

◎ 李霞丽 编著

安徽大学图书馆
藏书
www.lib.ahu.edu.cn

中央民族大学出版社
China Minzu University Press

图书在版编目（CIP）数据

无线传感器网络关键技术/李霞丽编著. —北京：中央民族大学出版社，2012.7

ISBN 978-7-5660-0246-4

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 144405 号

无线传感器网络关键技术

编　　著　李霞丽
责任编辑　蔚　然
封面设计　布拉格
出 版 者　中央民族大学出版社
　　北京市海淀区中关村南大街 27 号　　邮编：100081
　　电话：68472815（发行部）　传真：68932751（发行部）
　　68932218（总编室）　　68932447（办公室）
发 行 者　全国各地新华书店
印 刷 者　北京九州迅驰传媒文化有限公司
开　　本　787×1092（毫米）　1/16　印张：6.75
字　　数　123 千字
版　　次　2012 年 11 月第 1 版　2012 年 11 月第 1 次印刷
书　　号　ISBN 978-7-5660-0246-4
定　　价　24.00 元

版权所有　翻印必究

前　言

无线传感器网络是随着微机电技术、嵌入式技术、片上系统、传感器技术、无线通信技术的飞速发展而迅速发展起来的。无线传感器网络是由具有感知、计算和通信能力的传感器节点以自组织和多跳方式构成的无线网络。无线传感器网络实现了互联网从虚拟世界到物理世界的延伸，将逻辑信息世界与真实物理世界相结合，改变了人与自然交互的方式及信息感知的方法。

无线传感器网络最初是由军方提出，逐渐发展到民用领域。其应用领域及应用前景非常广阔，涉及环境监测、航空航天、交通管理、医疗卫生、制造业、反恐抗灾、商业和普通家庭等。

无线传感器网络技术是一门综合性网络系统技术，涉及计算机、通信、电子等多学科领域的专业知识。随着无线传感器网络研究的深入，在规模化应用中一些关键技术的研究逐步成为研究的重点。本书主要研究无线传感器网络中的一些关键技术，主要内容涉及无线传感器网络概述、拓扑结构、网络协议、时钟同步算法、数据融合几个方面。具体分为以下几个章节。

第 1 章是无线传感器网络概述，详细介绍无线传感器网络特点、无线传感器网络体系结构、无线传感器网络应用领域及无线传感器网络研究内容。

第 2 章是无线传感器网络拓扑结构，重点介绍了星型拓扑结构、网状拓扑结构等，并且总结分析了无线传感器网络拓扑控制应该满足的条件及其研究方法。

第 3 章是无线传感器网络协议。主要包括物理层协议、介质访问协议（MAC 层协议）和路由协议。详细介绍及分析 S-MAC、T-MAC、B-MAC、Z-MAC 协议及基于非竞争的 MAC 协议。重点研究洪泛式路由协议、层次式路由协议、以数据为中心的路由协议、基于 QoS 的路由协议和基于地理位置信息的路由协议。

第 4 章是无线传感器网络时钟同步算法。论述 RBS 时钟同步算法、FTSP 同步算法、RFA 同步算法及多模型卡尔曼滤波自适应时钟同步算法（ADASYNCH）。重点研究及评

估 ADASYNCH 算法。

第 5 章主要讨论数据融合的概念、分类及算法。包括数据融合概述、数据融合层次结构、数据融合分类、基于簇的数据融合、基于树的数据融合、其他数据融合方法以及数据融合未来研究内容展望。

本书的编写参阅了大量的研究文献和资料，在全书的最后列出主要参考文献。在本书第 4 章的编写过程中，郗旻给予了大力支持和无私帮助，对本章第二节内容的编写给出了具体的、切实可行的建议，并且审阅了本部分内容。本书的顺利完成与中央民族大学信息工程学院“985 工程”建设的大力支持密不可分，在此表示深深的感谢！

由于作者水平有限，时间仓促，本书难免会有缺陷甚至错误，恳请读者批评指正。

作者联系邮箱：xiaer_li@163.com.

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

目　录

第 1 章　无线传感器网络概述 1
1.1　无线传感器网络特点 1
1.2　无线传感器网络体系结构 2
1.3　无线传感器网络应用领域 5
1.4　无线传感器网络主要研究内容 6
1.5　小结 10
第 2 章　无线传感器网络拓扑结构 11
2.1　星型拓扑结构 11
2.2　网状拓扑结构 12
2.3　无线传感器网络拓扑控制 17
2.4　小结 21
第 3 章　无线传感器网络协议 22
3.1　物理层协议 23
3.2　MAC 协议 27
3.3　路由协议 35
3.4　小结 51
第 4 章　无线传感器网络时钟同步算法 53
4.1　几种时钟同步算法 53
4.2　多模型卡尔曼滤波时钟同步算法 AdaSynch 57
4.3　小结 71
第 5 章　无线传感器网络数据融合 72
5.1　数据融合概述 72
5.2　数据融合的层次结构 74

5.3 数据融合分类 76
5.4 基于簇的数据融合 79
5.5 基于树的数据融合 81
5.6 其他数据融合 82
5.7 小结 84
参考文献 **85**

第 1 章　无线传感器网络概述

无线传感器网络（Wireless Sensor Networks, WSN）是由具有感知、计算和通信能力的传感器节点以自组织方式构成的无线网络，它通过节点间的协作对目标区域进行实时监测、感知和采集，对采集到的数据进行分析和处理，将分析处理后的结果信息传送到汇聚节点（Sink）。无线传感器网络是随着传感器技术、微机电系统（Micro-Electro-Mechanism System，MEMS）技术和无线通信技术的飞速发展应运而生并且茁壮成长起来的。无线传感器网络是需求推动与技术发展相结合的产物，是互联网从虚拟世界到物理世界的延伸，将逻辑信息世界与真实物理世界融合在一起，变革了人与自然交互的方式。

随着无线传感器网络研究的深入，当前比较热门的研究内容主要包括无线传感器网络拓扑结构、网络协议、大规模应用中的定位、时钟同步算法、大范围监测的覆盖问题、多媒体传感器网络的网络效用问题以及规模化网络的性能瓶颈问题、无线传感器网络系统平台及仿真工具等，本书从无线传感器网络概述、网络拓扑结构、网络协议、时钟同步算法、数据融合五个方面论述无线传感器网络关键技术。

无线传感器网络被研究机构及商业界广泛关注，应用前景十分广阔。本章主要分析无线传感器网络特点、介绍无线传感器网络体系结构、指出无线传感器网络主要应用领域、总结无线传感器网络主要研究内容，最后对本章内容进行总结。

1.1 无线传感器网络特点

无线传感器网络和无线 Ad-Hoc 网络都具有自组织网络的特点，但是两者具有较大差别。现有的无线 Ad-Hoc 网络技术无法完全满足无线传感器网络的需求，和 Ad-Hoc 网络相比，无线传感器网络具有以下特点：

1．网络规模大、密度大

在无线传感器网络中，网络中节点数量远远高于 Ad-Hoc 网络中的节点数量，并且在传感器网络中节点部署的密度也大于 Ad-Hoc 网络，抵抗通信干扰的能力也强于 Ad-Hoc 网络。无线传感器节点通常为同质节点，而 Ad-Hoc 的节点具有异构特征。

2．网络动态性强

受硬件限制及部署环境影响，传感器节点可能受到恶劣环境影响或者人为破坏而无法工作，或者出现电量耗尽，通讯阻塞、软件崩溃等多种问题，这些因素都导致无线传感器网络拓扑变化非常频繁，动态性很强，使得无线传感器网络在路由、拓扑、能量控制等方面面临很大的挑战。

3．传感器节点资源受限

传感器节点的通信能力、存储和计算能力、能量都十分有限。

（1）通信能力受限

无线通信的功耗和通信距离的次幂（一般在 2 到 4 之间）成正比。随着通信距离的增大，通信功耗急剧增加，所以无线传感器网络一般采用多跳中继的通信模式，通信能力十分有限。

（2）存储和计算能力受限

传感器节点一般采用嵌入式微处理器，存储器容量非常小，微处理器的体积小，计算能力相对也比较弱，所以传感器存储和计算能力受到很大限制。

（3）能量受限

通常采用能量受限的蓄电池为传感器节点提供能量，所以传感器节点能量十分受限，如何高效使用有限的能量也成为无线传感器网络设计的重要目标之一。

1.2 无线传感器网络体系结构

无线传感网络(Wireless Sensor Network)是由部署在指定区域内的大量具有无线通信能力的传感器节点，通过自组织方式建立的网络系统。这些传感器节点不间断地监测指定区域内的各种对象，收集需要的信息，然后以多跳方式将信息传送至基站。基站集中处理收集到的信息之后，根据不同的应用要求及用户的需求，对各个传感器节点下达

指令，这些指令通过多跳方式发送给每一个传感器节点。

由于具有自主组网、易于部署、覆盖面广等特点，无线传感器网络能够在许多应用中尤其是在大范围区域内的集中监控中发挥重要的作用。因为传感器易于部署，所以对应用环境适应性很强，能够在较为复杂、人类难以到达的区域使用。传感器网络具有较强的可扩展性，因为传感器网络具有自主组网特点，部署工作非常简单，甚至可以通过空中撒布等方式实现传感器部署。一个典型的无线传感器网络体系结构如图 1-1 所示。

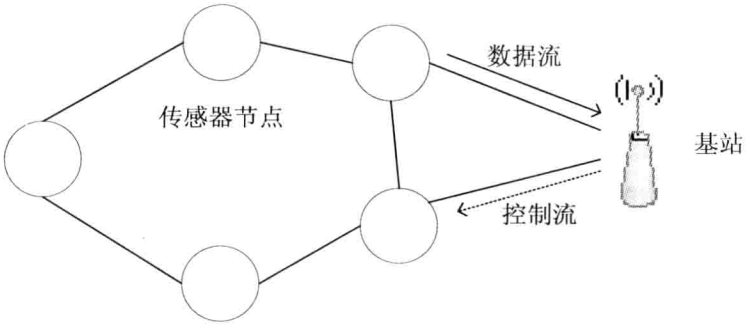


图 1-1　无线传感器网络体系结构

无线传感器网络体系结构由分布式传感器节点、基站和用户组成。基站也称为汇聚节点（Sink），负责将传感器网络与包括互联网在内的其他网络连通在一起，实现跨协议栈之间的通信转换；汇聚、存储和处理传感器节点的数据；管理和监控无线传感器网络。基站通过收集到的数据和状态信息，依据用户提出的指令以及事先定义的规则对网络发出控制指令，基站和每个传感器节点都是通过多跳路由进行通信，用户能够对传感器网络进行监控和管理。

1.2.1 传感器节点

微机电技术的发展，促生了价格更便宜、功耗更低、体积更小的微传感器。这种微传感器和微处理模块、无线通信模块集成为无线微传感器节点。传感器节点根据其处理器和通讯协议可以分为不同种类。典型的节点包括 TelosB，Intel iMote 及 MICA 系列等。图 1-2 展示了伯克利大学制作的 Mica 型无线传感器节点的外形。

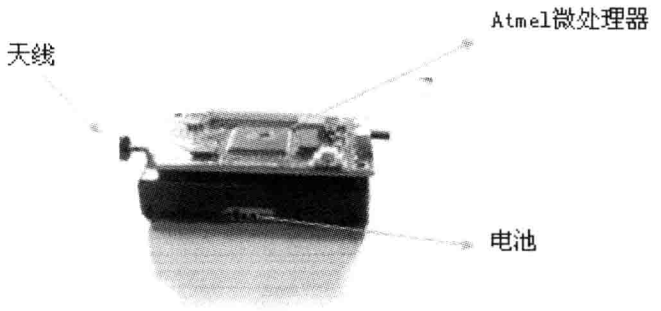


图 1-2　伯克利 Mica 节点

设计传感器节点时，主要考虑体积、成本和可靠性三个要素。传感器节点一般由以传感器模块（包含传感器和 AD/DA 模块）、无线通信模块（MAC 和收发器）、处理模块（微处理器）、以及能量供应模块组成，还包括拓扑控制、节点定位、时间同步等其他一些功能模块。传感器模块负责对传感对象进行信息采集和数据转换，通常要把采集到的模拟信号转换成数字信号，如测量周边环境中的红外、声波、光、电磁等物理属性，从而获取温度、湿度、噪声、运动速度等信息；无线通信模块负责在传感器节点中间进行无线通信，接收和发送采集到的数据，转发控制信息；处理模块负责控制整个传感器节点的操作，存储和处理自身采集到的数据，对其他节点发来的数据进行处理；能量供应模块为传感器节点提供运行所需的能量。一个典型的传感器节点结构图如图 1-3 所示。

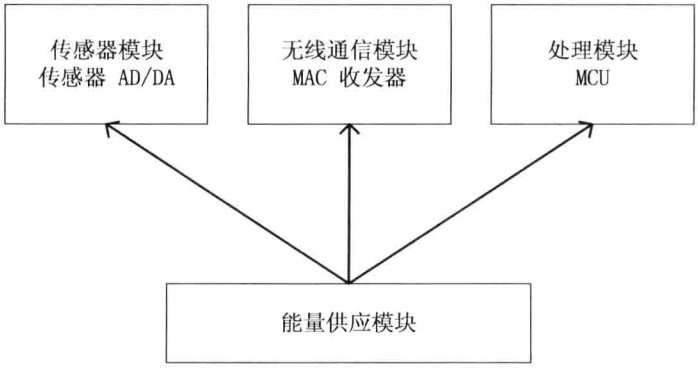


图 1-3　传感器节点结构

1.2.2 汇聚节点

传感器网络系统通常由大量的普通传感器节点及一个或者几个汇聚节点组成。汇聚

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

节点（基站）是一个功能增强的传感器节点，和普通的传感器节点相比，汇聚节点具有更多的能量、更大的内存和更丰富的计算资源，承担着更多的计算、数据处理和数据收发等任务。汇聚节点在无线传感器网络中实现两种协议栈之间的通信协议转换，下发管理节点的监测命令，发送感知节点采集的数据到外部网络，汇聚节点对整个无线传感器网络的稳定运行起着关键性的作用。因此，研究如何避免汇聚节点成为网络瓶颈节点，如何有效使用片上有限的各种资源尤其是严格受限的能量资源，是无线传感器网络中的重点及难点。

1.3　无线传感器网络应用领域

无线传感器网络应用前景十分光明，可以应用在军事、环境科学、灾害救援、医疗监控、空间探索、反恐等领域。

在军事应用领域，由于传感器网络由密集、低成本的节点组成，部分节点的损坏不会造成整个系统的失效，因此非常适合战区这种破坏性场所。传感器还将取代人去执行一些危险的任务，如监控兵力、装备和物资，监视冲突区域，侦查敌方阵形和布防，定位攻击目标等。

在环境科学领域，数据收集是最基础也是非常艰难的一项工作，但是在传感器网络帮助下，收据收集将能够得到有力的解决。例如，通过在动物身上安装传感器节点，可以跟踪动物的迁徙或者生育发展过程；通过包含多种传感器节点的混合网络，可以监测热带雨林降雨量及水位等信息，得到水文数据；通过在森林中部署无线传感器网络，全方位采集土壤中的 CO2 浓度、温度、湿度和林内风速等环境信息，可以精确反映森林土壤呼吸过程，实现大尺度、多类型生态系统土壤呼吸过程的长期、连续、实时、远程和自动监测。利用传感器网络，可以将环境科学研究由原来的“基于单点监测的简单推算”转变为“以高精度、多层次、动态化为基础，多传感数据相融合”的全方位系统监测，促进环境科学研究的快速发展。

在灾害救援方面，传感器网络能够在很短的时间内完成部署，提供救援需要的信息。在发生了地震、火灾等大面积自然灾害后，基础的网络通信设施如蜂窝移动电话设备、有线通信网络等均会受到不同程度的破坏，因此需要迅速部署无线通信设施构建救灾所

必需的监测、联络环境。无线传感器网络由于其自组织、高可靠性、部署简便性等特征，是灾后救援最有力的工具。

在医疗监控方面，通过在病人身上安装的心律或者血压传感器等检测设备，通过无线传感器网络定时向监控中心发送病人的实时病症特征信号，医生和护士就能根据病人的安全信号库的比较，对病人的病情做出实时的判断，使危急或者突发病情恶化的病人得到及时救治。

另外，无线传感器网络在空间探索、反恐等领域也具有很高的应用价值。人类推测借助于航天器布下无线传感器网络节点实现对星球表面长时间的检测应该是一种经济可行的方案。

1.4 无线传感器网络主要研究内容

人们分别从物理平台、系统平台、网络平台、数据平台和应用平台五个方面对无线传感器网络进行研究，研究内容囊括了通信、电子、计算机软件等多个学科的专门领域。

我们从计算机软件体系结构的角度出发，将与计算机软件领域相关的研究内容提取出来，进行分类，形成如图 1-4 所示的研究体系结构示意图。下面我们分别对这几类研究内容进行简要的介绍。

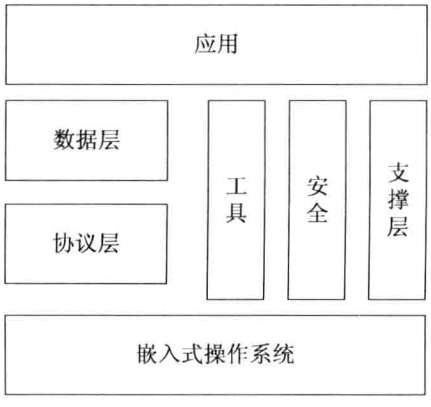


图 1-4 无线传感器网络软件领域研究框架

1．应用

无线传感器网络自产生之日起就以其独特的优势表现出了巨大的潜力，许多研究机

构纷纷建立了示范应用或者原型系统，并取得了一定成果。以下是一些典型的应用案例：

（1）斑马网络（ZebraNet）：通过在斑马身上佩带具有 GPS 模块的无线传感器对斑马的行动路线和运动方式进行跟踪，这个传感器网络的目的是对野外斑马的生活习性进行调查研究。

（2）大鸭岛监测系统（Great Duck Island system）：该系统是第一个较为完整的无线传感器网络系统，由加州大学伯克利分校和英特尔公司在大鸭岛上合作建立，对岛上的温度、湿度等数据进行实时监测。

（3）绿野千传（GreenOrbs）：该系统是由西安交通大学、香港科技大学和浙江农林大学共同建立的森林生态传感器网络系统。这一系统是目前世界上规模最大、连续运行时间最长的系统之一。系统的主要目的是通过测量林区内的温度、湿度、光照及二氧化碳等指标，对森林生态环境进行持续监测，为大规模无线传感器网络和精准林业的建立提供应用示范。

（4）金门大桥建筑结构监测系统：该系统由加州大学伯克利分校构建，利用部署在金门大桥上的无线传感器网络对大桥结构进行实时监控。

2．数据层

无线传感器网络的主要目标就是进行数据传输，因此研究数据层是具有重要意义的。研究的目标是保证传输的成功率和准确率，尽可能降低功耗，提高系统的寿命，从而更好地完成数据传输任务。主要研究内容包括两个方面，一个是数据收集，另一个是数据查询，前者是对全网内的传感器节点数据进行获取，后者则是根据用户需求对部分节点进行数据查询。

3．协议层

与传统互联网一样，无线传感器网络协议层包括物理层、数据链路层、网络层和传输层等。但是由于无线传感器节点和网络的特点，和传统网络协议层相比，研究无线传感器网络的协议层具有很大的挑战性。

物理层主要完成信道选择、信号发送与接收等功能，通信介质可以采用无线电、红外线和光波等。

数据链路层的主要功能是成帧、分帧、介质访问控制与差错控制，负责节点间如何共享可用的信道资源，为网络层提供无差错的数据传输链路。数据链路层协议通过多种优化方案来达到避免冲突、降低功耗的设计目标。数据链路层的研究主要集中在 MAC 子层。目前已经产生了很多 MAC 协议，例如 B-MAC、S-MAC、T-MAC、Z-MAC 等。

网络层是无线传感器网络的重要组成部分，主要负责路由的建立和维护，利用多跳方式将数据从源传感器节点发送到目标传感器节点。网络层现有的路由协议主要包括以数据为中心 (data-centric)的协议，如 Gossiping 和 Directed Diffusion 等；基于簇(cluster)信息的协议如 LEACH；基于地理位置的路由协议如 GPSR 等；以服务质量（Qos）为目的的路由协议等。

无线传感器网络传输层的实际功能不够清晰，目前在这方面研究较少。

近年来逐步产生了许多跨层 (cross-layer)的优化策略，实现了多协议层次的全局优化，以代替分层设计思路。

4．工具

无线传感器网络的动态性和随机性远远高于有线网络，并且传感器节点能量及资源受限，所以应用于有线网络的各种工具无法平滑应用于无线传感器网络，为了提高无线传感器网络的可用性和可靠性，系统需要提供多种类型的工具对网络的开发、维护和更新进行支持。

无线传感器网络中使用的工具主要包括仿真测试工具，运行时的调试、诊断工具以及用于程序更新的工具等。目前比较典型的仿真测试工具主要有 TOSSIM、Emstar 和 Motelab 等。TOSSIM 工具是 TinyOS 系统自带的一款能够在应用开发完成后进行一定程度的模拟测试的工具，可以验证程序的正确性、监测系统资源消耗等。Clairvoyant 是知名的运行时调试工具，它能够调试远端终端，具有在线程序纠错功能。

5．安全

无线传感器网络采用无线通信方式，如果某一节点被敌人捕获并植入恶意代码，则可能造成整个网络被攻破。节点部署范围大、目标小，一旦被破坏很难被发现。无线传感器网络也很容易被干扰和监听。因此，安全问题是无线传感器网络中的重要问题，必须针对无线传感器网络的特点研究安全技术，保证节点在低功耗情况下的安全运转。目前无线传感器网络的安全问题研究主要集中在密码技术、密钥管理、路由安全、位置安全、数据融合安全等方面。

6．支撑层

无线传感器网络的支撑层是为了满足各种类型的网络和应用需求，为上层应用提供基础的层次，主要研究拓扑结构、时钟同步、节点定位、覆盖等。

（1）拓扑结构

拓扑结构及拓扑控制是研究无线传感器网络的重要基础之一。拓扑结构的好坏直接

影响网络的总体开销、生存时间、节点能量的消耗。拓扑结构还能影响传感器节点间的通信,并为路由协议提供基础。无线传感器网络的网络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。按照其组网形态和方式来看，有星型拓扑结构、网状拓扑结构，混合拓扑结构等。

（2）时钟同步

在无线传感器网络中，时钟同步是非常重要的研究内容。很多应用需要进行时钟同步进行节点间的合作。但由于已有的时钟同步协议并不适用于无线传感器网络环境，因此需要针对无线传感器网络开展时钟同步问题研究。

（3）节点定位

无线传感器网络的组网特点决定了传感器节点所处位置是不固定的。为了更好地为上层应用提供支撑，网络需要明确某些节点的具体位置，为此需要提供节点定位算法。由于成本和功耗等方面的原因，能够提供相对准确的定位结果的 GPS 等室外定位技术不适合在无线传感器节点中使用。为此，需要提出适用于无线传感器网络中的定位算法。目前已有多种算法被提出并得到应用。

（4）覆盖

覆盖是指根据被监测区域和对象的覆盖要求，合理部署和调度传感器节点。在许多使用无线传感网的应用中，被监测区域的监测覆盖率是一个重要指标，直接关系着应用程序执行的效果。节点覆盖问题分为全局覆盖（Full Coverage），边界覆盖（Barrier Coverage）和扫描覆盖（Sweep Coverage）。

7．嵌入式操作系统

嵌入式系统早期主要应用于工业控制和国防系统领域，是一种用于计算能力、资源受限的小型设备的系统软件，全面负责系统内的全部软、硬件资源的分配、调度工作，控制协调并发活动。随着智能设备的普及、计算机技术的发展、以及制造技术的微型化和专业化，嵌入式系统从单一功能向高专业化的方向发展。

与传统的 PC 机和 PDA 等设备相比，传感器节点的运算、存储能力等资源都受到极大限制，因此为传感器设计嵌入式操作系统时，需要考虑功能和效率的平衡问题。TinyOS 系统是目前传感器节点使用最广泛的操作系统，该系统提供了较为完整的组件框架和开发平台，但它缺乏进程调度、内存管理等能力，并不是一个真正意义上的操作系统。t-kernel 和 LiteOS 是后来逐渐发展的无线传感器网络操作系统，和 TinyOS 相比，这两种操作系统在无线传感器节点上实现了传统操作系统的许多重要特性，例如操作系统保

护，虚拟内存等，LiteOs 还具有多进程调度功能。

1.5 小结

无线传感器网络(Wireless Sensor Network)是由部署在指定区域内的大量具有无线通信能力的传感器节点，通过自组织方式建立的网络系统。本章从无线传感器网络体系结构、特点、主要研究内容、应用领域等几方面全面论述无线传感器网络。无线传感器网络体系结构由分布式传感器节点、基站和用户组成。无线传感器网络具有网络规模、密度大，节点同质；动态性强；资源受限等特点。人们主要从应用、数据层、协议层、工具、支撑层、安全、嵌入式操作系统几个方面研究无线传感器网络。无线传感器网络主要应用在军事、环境科学、灾害救援、医疗监控、空间探索、反恐等领域。我们主要从无线传感器网络拓扑结构、协议、时钟同步、数据融合几个方面研究其关键技术。

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com