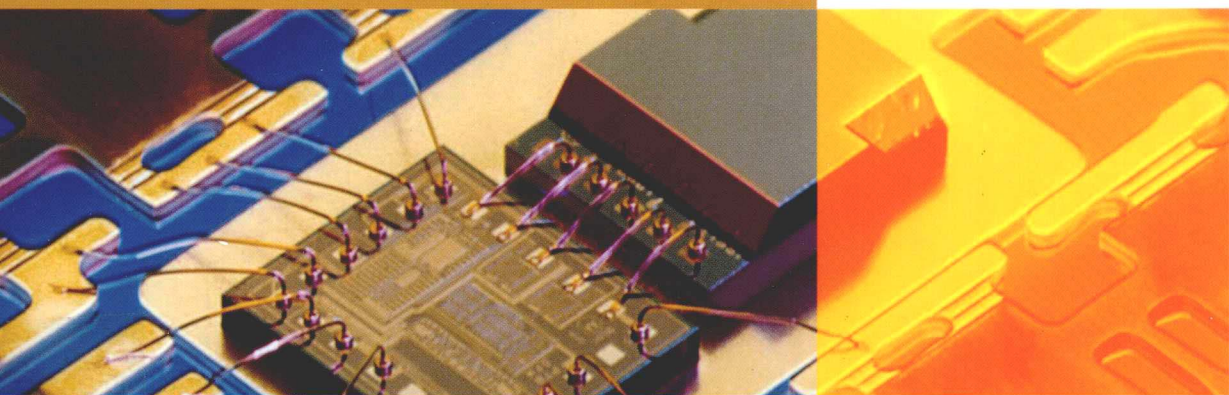


新一代信息科学与技术

无线传感器网络 原理与应用

Principles and Applications of
Wireless Sensor Networks

姚向华 杨新宇
易劲刚 韩九强



新一代信息科学与技术

Principles and Applications of Wireless Sensor Networks

无线传感器网络原理与应用

WUXIAN CHUANGANQI WANGLUO YUANLI YU YINGYONG

姚向华 杨新宇 易劲刚 韩九强



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

图书在版编目(CIP)数据

无线传感器网络原理与应用/姚向华等编著. —北京:高等教育出版社, 2012. 4

ISBN 978 - 7 - 04 - 034177 - 5

I. ①无… II. ①姚… III. ①无线电通信 - 传感器 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 027535 号

策划编辑 陈红英
插图绘制 尹 莉

责任编辑 陈红英
责任校对 窦丽娜

封面设计 张 楠
责任印制 毛斯璐

版式设计 于 婕

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 北京北苑印刷有限责任公司
开 本 787mm × 1092mm 1/16
印 张 19.5
字 数 360 千字
购书热线 010 - 58581118

咨询电话 400 - 810 - 0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 2012 年 4 月第 1 版
印 次 2012 年 4 月第 1 次印刷
定 价 49.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 34177 - 00

前言

无线传感器网络最初应用于军事侦查和入侵检测,随着相关技术的成熟和成本的降低,逐渐扩展到环境监测和工业信息获取等领域。科学界对无线传感器网络的研究兴起于 20 世纪 90 年代,多家媒体和科研机构都预言,该项技术将会改变人们的生活方式。近年来,随着物联网概念的兴起,无线传感器网络作为主要的支撑技术之一再次成为人们的研究热点。

无线传感器网络集成了计算机、通信和信息感知三大学科中众多的科学知识。无线传感器网络的布设目的是为了获取信息,因此,其应用场景决定了无线传感器网络所采用的网络形式。无线传感器网络不同于以往网络以传输速度和服务质量作为主要研究方向,它是针对复杂情况下如何可靠获得信息而展开研究的。由于无线传感器网络需要应用于各种复杂情况,例如野外、工业现场,甚至敌对方控制区,因此很多传统网络包括无线网络的技术很难适用。研究人员针对这些不同的应用,设计了网络协议栈和相关技术标准。

2003 年我开始关注无线传感器网络技术,并于 2006 年获国家自然科学基金支持对无线传感器网络节点配置算法进行研究,2009 年获得国家留学基金委资助,前往美国罗格斯新泽西州立大学继续从事相关领域的研究。2003 年至今,我与西安交通大学自动化系、计算机系的多位老师进行合作,承担或参与了包括国家自然科学基金、国家 863 计划、国家 973 计划在内的多项科研工作,在相关领域积累了一定的经验。随着对无线传感器网络技术认识的不断加深,我感觉到该技术在工业和民用领域巨大的应用前景。在工业现场,大量的传感器依靠电缆连接,其连接成本甚至超出了传感器本身,因此以基于无线传感器网络技术的监控系统取代传统的总线式监控系统是新的趋势。在民用领域,智能家居、物联网等新兴领域都需要以无线传感器网络作为技术基础。

基于上述观点以及多年的相关教学和研究,我们编写了本书。由于无线传感器网络的应用相关性非常强,不同的应用对技术的要求完全不同。因此,本书并未就原理与基础技术做过多的展开,而是针对具体的应用场景,结合相关技术

详细介绍如何构成可以实际使用的无线传感器网络。此外,还分别就无线传感器网络在工业监控系统、矿井安全监控的应用以及智能家居、远程测控中的技术实现做了详细介绍。对所涉及的技术进行了进一步的讲解。我们希望,通过本书能够为无线传感器网络技术在我国的应用与推广尽绵薄之力。

本书在编写过程中得到西安交通大学电信学院的大力支持,被列为学院的重点规划教材,同时自动化系领导在各个方面也给予了关心和支持在此表示感谢。特别需要感谢郑辑光老师所提供的部分素材和实例。

无线传感器网络是新兴的研究领域,目前的研究仍在不断深入中,作者能与全国众多的专家学者共同参与讨论感到非常荣幸。由于水平有限,本书难免存在不足,恳切希望得到广大读者的指正。

姚向华

2011年10月

于西安

目录

- 第 1 章 无线传感器网络概述 1
 - 1.1 无线传感器网络基本概念 1
 - 1.1.1 无线传感器网络的研究内容 1
 - 1.1.2 无线传感器网络与 Ad hoc 网络的区别 2
 - 1.2 无线传感器网络的体系结构 3
 - 1.2.1 无线传感器网络的组成 3
 - 1.2.2 无线传感器网络的通信结构 4
 - 1.3 无线传感器网络节点 5
 - 1.3.1 传感器模块 6
 - 1.3.2 无线通信模块 7
 - 1.3.3 处理器模块 8
 - 1.3.4 能量供应模块 8
 - 1.4 无线传感器网络的典型应用 9
 - 1.4.1 国防军事领域中的应用 9
 - 1.4.2 环境监测 9
 - 1.4.3 工业及民用的无线传感器网络 10
 - 1.5 无线网络的发展与现状 11
 - 1.5.1 无线数据通信网 11
 - 1.5.2 无线传感器网络 12
 - 小结 13
 - 思考题 13
 - 参考文献 14
- 第 2 章 物理层及 MAC 层协议——IEEE 802.15.4 16
 - 2.1 无线传感器网络物理层协议 16
 - 2.1.1 无线传感器网络的通信介质 16
 - 2.1.2 无线传感器网络物理层的研究现状 18

2.1.3 无线传感器网络物理层设计的主要问题·····	18
2.2 无线传感器网络数据链路层·····	19
2.2.1 数据链路协议·····	19
2.2.2 介质访问控制层协议·····	19
2.3 IEEE 802.15.4 标准·····	23
2.3.1 物理层·····	23
2.3.2 介质访问层·····	25
2.3.3 IEEE 802.15.4 标准的特点·····	33
小结·····	34
思考题·····	34
参考文献·····	35
第3章 网络层及应用层协议——ZigBee ·····	36
3.1 网络层协议·····	36
3.1.1 无线传感器网络层协议·····	36
3.1.2 无线传感器网络路由协议·····	37
3.2 应用层协议·····	48
3.2.1 传感器管理协议·····	49
3.2.2 任务分配和数据广播管理协议·····	49
3.2.3 传感器查询和数据传播管理协议·····	49
3.3 无线传感器网络拓扑结构·····	50
3.3.1 平面网络结构·····	50
3.3.2 层次网络结构·····	51
3.3.3 混合网络结构·····	51
3.3.4 Mesh 网络结构·····	52
3.4 能量控制·····	53
3.5 ZigBee 协议标准·····	55
3.5.1 ZigBee 概述·····	55
3.5.2 网络层规范·····	57
3.5.3 应用层规范·····	62
3.5.4 ZigBee 网络系统的设计开发·····	63
3.6 CC2420 芯片·····	65
3.6.1 CC2420 芯片的内部结构·····	66
3.6.2 CC2420 芯片的外围电路·····	67
3.6.3 CC2420 芯片的典型电路·····	68

小结	69
思考题	69
参考文献	69
第4章 无线传感器网络支撑技术	70
4.1 时间同步	70
4.1.1 传感器网络的时间同步机制	70
4.1.2 基于接收者-接收者机制的时间同步算法	72
4.1.3 基于发送者-接收者的时间同步算法	72
4.1.4 基于发送者的同步算法	77
4.1.5 其他同步机制	78
4.2 定位技术	80
4.2.1 定位的基本概念	80
4.2.2 基于距离的定位	84
4.2.3 距离无关的定位算法	86
4.2.4 定位算法的性能评价	89
4.3 数据融合	90
4.3.1 多传感器数据融合	90
4.3.2 数据融合技术的分类	91
4.3.3 独立于应用的数据融合方法	92
4.3.4 其他融合方式	94
4.4 数据管理	94
4.4.1 无线传感器网络的数据管理	94
4.4.2 无线传感器网络数据的存储、索引与查询方法	95
4.4.3 传感器网络数据管理系统	97
4.5 安全机制	98
4.5.1 传感器网络的安全问题	99
4.5.2 传感器网络的安全技术	99
4.5.3 密钥管理	103
4.5.4 入侵检测	103
4.5.5 传感器网络安全框架协议	104
4.5.6 安全管理	112
小结	114
思考题	115
参考文献	115

第 5 章 传感器	117
5.1 传感器概述	117
5.1.1 传感器的定义	117
5.1.2 传感器的分类	117
5.1.3 传感器的特性	118
5.2 常见传感器	119
5.2.1 电阻式传感器	119
5.2.2 电容式传感器	120
5.2.3 电感式传感器	120
5.2.4 温度传感器	120
5.2.5 压力传感器	122
5.2.6 压电式传感器	123
5.2.7 气敏湿敏传感器	123
5.2.8 光敏传感器	124
5.2.9 超声波传感器	124
5.3 传感器的工作过程	124
5.3.1 传感器的选型	125
5.3.2 典型电路	126
5.4 微型传感器	127
5.4.1 微机电系统简介	127
5.4.2 微光机电系统	128
5.4.3 微型传感器分类	129
5.4.4 微传感器系统	131
小结	133
思考题	133
参考文献	133
第 6 章 无线传感器网络开发	135
6.1 仿真平台	135
6.1.1 传感器网络的仿真技术概述	135
6.1.2 NS-2	136
6.1.3 OPNET	137
6.1.4 OMNET++	139
6.1.5 TOSSIM	140
6.2 无线传感器网络的硬件开发	141

6.2.1 传感器节点的模块化设计	142
6.2.2 传感器节点的开发实例	145
6.3 无线传感器网络操作系统和编程语言	147
6.3.1 TinyOS 操作系统	149
6.3.2 nesC 语言	150
6.3.3 基于 TinyOS 系统的软件开发	151
6.3.4 后台管理软件	153
小结	154
思考题	154
参考文献	154
第 7 章 无线传感器网络的典型应用	156
7.1 基于无线传感器网络的工业监控系统	156
7.1.1 工业监控无线传感器网络的特点及相关协议分析	157
7.1.2 高可靠能量均衡跨层通信协议	165
7.1.3 跨层协议仿真与性能分析	185
7.1.4 基于无线传感器网络的工业监控系统	195
7.2 用于矿井安全的无线传感器网络系统	205
7.2.1 无线传感器网络技术应用于矿井安全监测的可行性	206
7.2.2 安全监测系统硬件设计方案	208
7.2.3 软件设计与实现	215
7.2.4 系统抗干扰性能分析	220
小结	227
参考文献	228
第 8 章 无线传感器网络与物联网	231
8.1 物联网简介	231
8.1.1 物联网的发展现状	232
8.1.2 无线传感器网络应用于物联网的关键技术	232
8.2 物联网智能家居无线传感器网络	233
8.2.1 智能家居网络的关键技术	233
8.2.2 智能家居系统设计及功能设计	240
8.2.3 智能家居 ZigBee 网络子系统的设计与实现	242
8.2.4 智能家居家庭控制子系统设计	247
8.2.5 智能家居家庭安防子系统设计	259
8.2.6 智能家居中央网关子系统设计	260

8.2.7 智能家居控制系统应用效果	262
8.3 物联网远程无线测控系统	264
8.3.1 模块化制造系统	264
8.3.2 节点设计	269
8.3.3 系统软件设计	279
8.3.4 应用设计	288
小结	291
参考文献	291
名词术语英汉对照	294

第1章 无线传感器网络概述

本章介绍无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)的基本概念以及与传统网络尤其是Ad hoc网络的区别;无线传感器网络的体系结构,包括网络的组成模式以及协议栈的模型;无线传感器网络节点的构造,包括传感器、无线通信、处理器以及电源模块;无线传感器网络的典型应用,主要是在军事、环境监测、工业以及民用领域的应用;无线传感器网络的发展过程与研究热点。

1.1 无线传感器网络基本概念

无线传感器网络是由静止或移动的传感器以自组织和多跳的方式构成的无线网络,其目的是感知、采集、处理和传输网络覆盖区域内感知对象的信息,并发送给用户。

1.1.1 无线传感器网络的研究内容

无线传感器网络是集成了计算机、通信和信息感知三大学科中众多科学知识的新兴领域,对无线传感器网络的认识,随着大量的相关研究而不断深入。简单来说,无线传感器网络就是由传感器节点组成的,通过无线通信方式形成的一个多跳自组织网络。

从信息感知的研究来看,无线传感器网络的布设目的是为了获取信息,因此,其应用场景决定了无线传感器网络所采用的传感器形式。如果用于野外环境信息的采集,则希望传感器节点尽量廉价,因为需要大量的传感器以便对整个监测区域进行采样;如果是用于战场环境,则希望节点尽量微型化,这样不会被敌对方发现;如果用于工业环境下,传感器的精度和可靠性就成为首要考虑的问题,而通常需要重点强调的能量问题则不再是关键。

从通信方式来看,无线传感器网络采用的是无线的通信方式,其优势在于可以省去大量的数据线。当然,由于是无线连接,供电问题必须依靠其自身所携带的电池来解决。尤其是在条件恶劣的野外环境,通过更换电池的方式来接续供电是不现实的,所以到目前为止,如何为无线传感器网络节省能量一直是这一领

域内的研究热点。

从计算机科学的角度来看,无线传感器网络是典型的自组织多跳网络。所谓自组织网络是一种无中心的网络形式,每个节点都可以作为中继节点为其他节点传递信息。这种网络可以在节点布设之后按照某种机制自动地形成一个功能网络。而多跳则是区别于单跳(指网络中的每一个节点都必须和其他所有节点直接连接才能互相通信)的网络连接方式。在多跳网络中,网络中的各个节点不需要直接连接,而是通过中继的方式在两个距离很远而无法直接通信的节点之间传送信息^[1-4]。

1.1.2 无线传感器网络与 Ad hoc 网络的区别

这里之所以强调两者的区别,是因为这两种网络都是典型的无线自组织多跳网络,从某种意义上来说,可以认为无线传感器网络的形式源自 Ad hoc。

Ad hoc 是拉丁语,意思是“特别的”。IEEE802.11 标准委员会采用了“Ad hoc 网络”一词来描述自组织对等式多跳移动通信网络。Ad hoc 网络是一种特殊的无线移动网络。网络中所有节点的地位平等,无须设置任何的中心控制节点。网络中的节点不仅具有普通移动终端所需的功能,而且具有报文转发能力。与普通的移动网络和固定网络相比,它具有无中心、自组织、多跳路由、动态拓扑等特点^[5]。

无线传感器网络与 Ad hoc 网络的区别体现在如下几个方面:

(1) 移动性:Ad hoc 网络是移动通信网络,主要用于支持手持式的移动设备,如个人数字处理(Personal Digital Assistant, PDA)等设备的无线连接。因此,对于 Ad hoc 网络来说,必须能够很好地处理这些可移动节点间的组网问题;而无线传感器网络中的传感器节点虽然也可以移动,但是这并非为其主要的设计目的。因为一般情况下,传感器节点在布设后几乎不移动,或很少移动。

(2) 能量问题:无线传感器网络的设计初衷是解决在野外恶劣环境下工作的能量补给困难的问题,因此能量的利用效率往往关系到整个网络的生存周期,是十分关键的问题。而 Ad hoc 网络虽然也要考虑能量问题,但是并非为关键问题。

(3) 网络规模:无线传感器网络的应用往往是大型网络,具有大量的网络节点,相比 Ad hoc 网络可能会高出若干个数量级,因此,无线传感器网络一般情况下并不支持识别码(Identification Code, ID)。

(4) 通信方式:无线传感器网络采用的是广播式的通信方式,而 Ad hoc 一般采用点对点方式。

(5) 无线传感器网络的节点由于能量有限或者工作于野外恶劣环境下,经常容易失效,这导致其网络拓扑结构频繁变化,而 Ad hoc 网络则基本不考虑这

一问题。

1.2 无线传感器网络的体系结构

无线传感器网络采用的是无线通信模式,在体系结构方面借鉴了传统无线网络的一些方式,例如开放式系统互连(Open System Interconnect, OSI)的协议栈模型。但是,由于在规模、能量利用、通信方式以及工作环境方面的特殊要求,无线传感器网络具有区别于其他网络形式的特殊体系结构。

1.2.1 无线传感器网络的组成

无线传感器网络是由传感器节点组成的网络,这些节点既是采集信息的终端节点,又是传递信息的中继节点。节点以各种方式大量部署在被监测的区域后,通过自组织方式构成无线网络,以协作的方式感知、采集和处理网络覆盖区域中特定的信息。一种典型的传感器网络的结构如图 1.1 所示,包括分布式传感器节点、汇聚节点、互联网等。

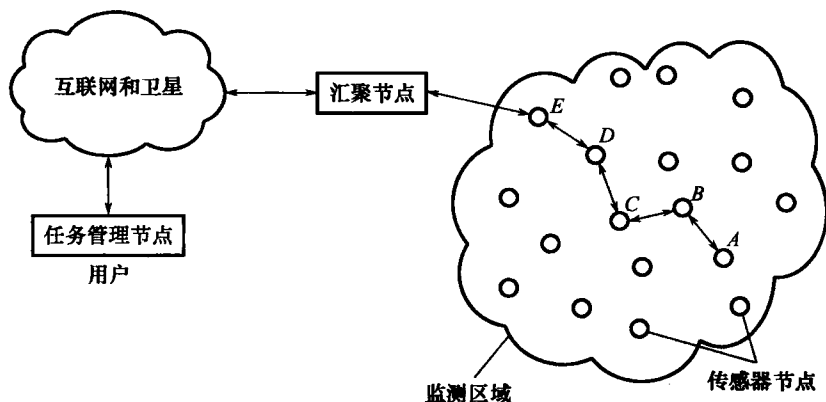


图 1.1 传感器网络结构

传感节点之间可以相互通信,自己组织成网并通过多跳的方式连接至汇聚节点,汇聚节点收到数据后,通过网关完成和公用因特网(Internet)的连接。整个系统通过任务管理器来管理和控制。

汇聚节点用于沟通无线传感器网络与外部网络的联系,将采集到的信息进行通信协议的转换后送到监测者或管理者,同时接受来自管理者的指令,并向整个无线传感器网络进行发布。一般情况下,汇聚节点较之传感器节点具有更强的处理和存储能力^[6-8]。

1.2.2 无线传感器网络的通信结构

图 1.2 示出了无线传感器网络中的协议栈。这个协议栈包括物理层、数据链路层、网络层、传输层和应用层,与传统协议栈国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO) OSI 中的五层协议相对应。另外,协议栈还包括能量管理平台、移动管理平台和任务管理平台。各层协议和平台如下^[9-10]:

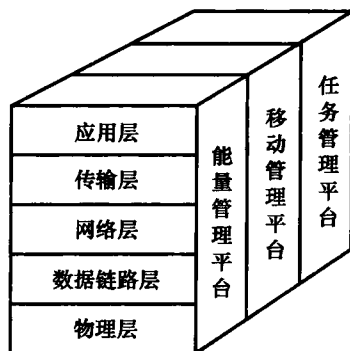


图 1.2 传感器网络协议栈

(1) 物理层:负责数据传输的介质规范。针对无线传感器网络,物理层规定了工作频率、工作温度、数据调制、信道编码、定时、同步等标准,其目标是降低节点的成本、功耗和体积。

(2) 数据链路层:负责数据成帧、帧检测、媒体访问和差错控制。在无线传感器网络中,需要在该层设计介质访问控制层(Medium Access Control, MAC),其作用是,在与物理层紧密结合的基础上减小网络的能量消耗。

(3) 网络层:主要负责路由生成与路由选择。传统的网络层主要是将网络地址翻译成对应的物理地址,并决定如何将数据从发送方路由到接收方。在无线传感器网络中,网络层需要自动寻找路由、选择路由并维护路由,使得传感器节点之间可以进行有效的通信。

(4) 传输层:负责数据流的传输控制。在传统的网络模型中,传输层可以说是最重要的一层协议,如传输控制协议/Internet 协议(Transmission Control Protocol/Internet Protocol, TCP/IP),负责进行流量控制和数据打包。但是,在无线传感器网络中,如果信息只在网络内部传递,传输层并不是必需的,而如果需要通过 Internet 或卫星直接与外部网络进行通信,则传输层是必不可少的。目前关于传输层的研究还处于初期阶段。

(5) 应用层:包括一系列基于监测任务的应用层软件。目前,应用层的研究也相对较少。

(6) 能量管理平台:负责传感器节点的能源使用管理。在无线传感器网络中,每个协议层都要增加能量控制的功能,以便操作系统进行能量分配的决策。

(7) 移动管理平台:检测并管理传感器节点的移动,维护整个网络的路由,使得传感器节点能够动态感知到邻近节点的位置。

(8) 任务管理平台:在一个给定的区域内平衡和调度监测任务。

协议栈改进模型如图 1.3 所示。除了传统的五层协议栈之外,对原先的 3

个管理平台进行了进一步的细化。

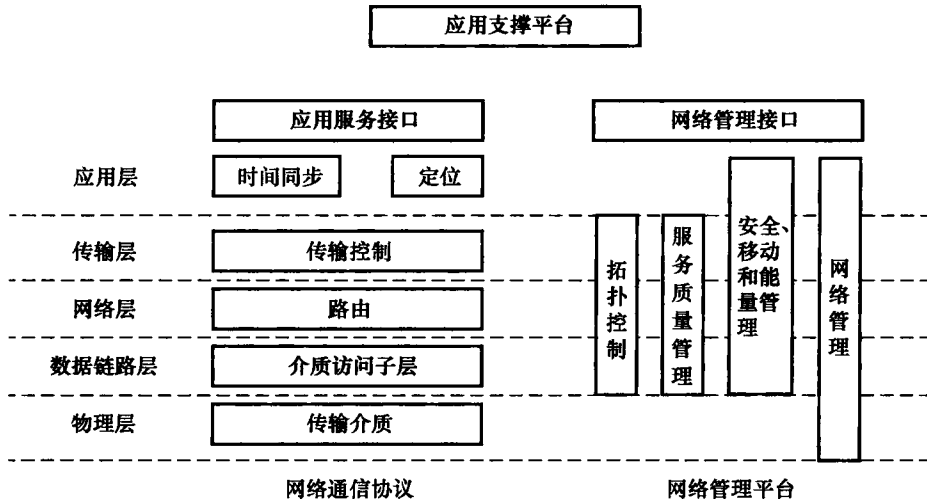


图 1.3 无线传感器网络协议栈改进模型

网络管理平台由四部分组成：

- (1) 拓扑控制：用于控制由于节点位置或状态变化导致的拓扑结构改变。
- (2) 服务质量管理：设计各协议层的队列和优先级等机制，保证无线传感器网络向用户提供足够的资源，满足用户要求的性能指标。
- (3) 安全、移动和能量管理：其中能量管理和移动管理与原模型功能基本相同，安全管理主要指的是网络安全机制，即身份认证和数字加密等。
- (4) 网络管理：负责对所有节点进行监视、控制、诊断和测试，并协调物理层到应用层各组件的运行^[11-13]。

应用支撑平台包括四部分：

- (1) 时间同步：保证所有节点在统一同步的时钟节拍指挥下工作，使得所有节点能够协调有序地协同工作。
- (2) 定位：用于确定每个节点的相对位置或绝对位置。
- (3) 应用服务接口：针对不同的应用环境定义应用层协议。
- (4) 网络管理接口：负责将传感器采集到的数据传递到应用层。

1.3 无线传感器网络节点

无线传感器网络的功能是将物理世界中的信息通过采集、传输、处理、存储等过程，最终提交给对该信息感兴趣的数据接收者。围绕这一基本功能，无线传感器节点应包括：传感器模块，用于信息的采集；处理模块用于信息的处理和存

储;无线通信模块用于信息的传输;此外,还需要能量供应模块等其他必要组成部分。如图 1.4 所示^[14-15]。

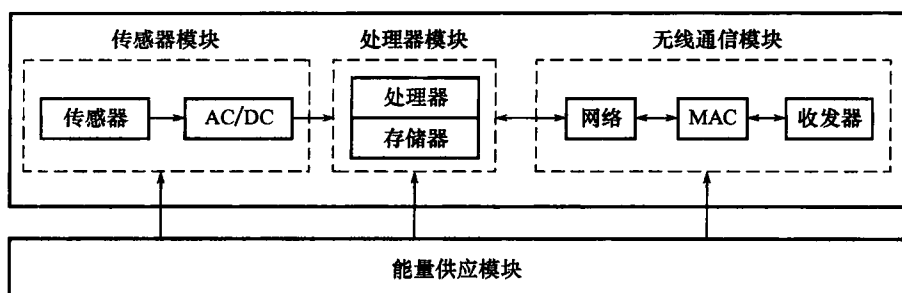


图 1.4 无线传感器节点结构

1.3.1 传感器模块

传感器指的是能感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用信号的器件或装置,通常由敏感元件和转换元件组成。

传感器按照工作原理可分为物理传感器和化学传感器两大类。物理传感器应用的是物理效应,诸如压电、伸缩、热电、光电、磁电等。被测信号量的变化将转换成电信号。化学传感器包括以化学吸附、电化学反应等现象为因果关系的传感器,被测信号量的变化也被转换成电信号。

此外,传感器还可以按照其他方式进行进一步的分类。

按用途分类,包括压力敏和力敏传感器、位置传感器、液面传感器、能耗传感器、速度传感器、加速度传感器、射线辐射传感器、热敏传感器、雷达传感器等。

按原理分类,包括振动传感器、湿敏传感器、磁敏传感器、气敏传感器、真空度传感器、生物传感器等。

按输出信号分类,包括模拟传感器和数字传感器。

按材料分类,包括金属、聚合物、陶瓷、混合物,导体、绝缘体、半导体、磁性材料,以及单晶、多晶、非晶材料,等等。

按制造工艺分类,包括集成传感器、薄膜传感器、厚膜传感器、陶瓷传感器等。

网络技术的引入为现有的基于传感器的测量系统提供了新的解决办法。在传统的测量系统中,测量结果完全依赖于敏感元件和变送器的精度,而传感器网络则可以通过放置冗余传感器的方式来改善。首先,冗余传感器可以保证在单个传感器出现故障时信息点的数据不会丢失。其次,多个传感器共同检测一个信息点,可以利用信息融合技术,剔除测量值明显有偏差的问题节点,然后利用取平均值等统计方法消除误差,提高测量精度。