

无线传感器监测网络 信息处理技术

WUXIAN CHUANGANQI JIANCE WANGLUO
XINXI CHULI JISHU



王慧斌 肖贤建 严锡君 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

无线传感器监测网络 信息处理技术

王慧斌 肖贤建 严锡君 著

国防工业出版社

· 北京 ·

前 言

信息化社会最主要的特征之一是网络化和智能化,而以众多智能微型化传感器(Smart Sensor)为基础,以网络化为信息获取方式的无线传感器网络技术,是实现泛在信息获取的重要途径,同时也是当今最重要的技术之一。无线传感器网络技术研究起步于 20 世纪 90 年代末期,并从 21 世纪开始引起学术界、军事领域和工业界的极大关注。随着最近 10 年的发展,有关无线传感器网络研究的理论和技术正逐渐成熟,并已在许多领域中得到探索性应用。

从应用角度看,无线传感器网络最主要的功能是对监测信息的获取。为了实现对目标的检测、跟踪和识别等监测应用,信息处理问题始终是无线传感器网络的核心研究内容,并反映在无线传感器网络系统中的各个方面,如传感器节点感知、节点之间的协作、网络能量控制、数据可靠传输及应用服务等。

尽管面向不同的应用领域,无线传感器网络所涉及到的技术侧重点不同,然而,总体上其信息处理过程主要是围绕节点、网络及服务等方面展开,主要包括协同信息处理、信息融合以及新的传感信息处理方法及技术等。

本书主要围绕有关无线传感器网络监测应用中信息处理技术所进行的研究开展论述,并结合作者近年来有关研究与应用实践,重点介绍了协同信息处理及信息融合的主要方法和技术,详细介绍了无线传感器监测网络信息处理和系统应用的理论、方法和技术。

本书共 9 章,主要内容包括无线传感器网络监测技术,协同信息处理与信息融合技术,基于动态簇的协同信息获取,基于可重配置策略的传感器融合,基于时间序列预测的信息融合,汇聚节点硬件融合方法,无线传感器监测网络与遥感信息处理,无线传感器监测网络应用设计

与实现。

第1章简要分析介绍信息化技术发展趋势,阐明无线传感器网络技术的重要作用,简要分析介绍无线传感器网络技术发展,并对无线传感器网络的几个典型应用发展方向进行了分析。

第2章围绕无线传感器监测网络的信息处理问题,重点介绍了协同信息处理、信息融合及压缩传感等信息处理方法。

第3章围绕无线传感器监测网络节点组织问题,对局部动态簇协同信息处理算法进行了介绍。分析了协同信息获取时,能够满足精度要求的最少参与感测节点数目和信息获取最佳时机。分析了基于目标感知的一种二维元胞自动机自组织算法,可以自适应地根据探测目标的位置和周围节点的状态重设自己的状态,在获得最佳探测效果的同时,使尽可能多的节点处于休眠状态,以节省能量。

第4章以降雨测量传感器为例,介绍了基于可重配置策略的传感器协同信息处理方法。

第5章针对簇内节点信息融合问题,介绍了一种基于多变量时间序列预测融合的信息处理方法。该方法对多变量时间序列进行相空间重构融合,消除单一时间序列的误差以及多变量时间序列带来的冗余信息和噪声,并建立对多变量时间序列进行预测的模型。

第6章针对无线传感器监测网络的网内节点处理器的能力有限,分布式的数据处理算法尚不够完善,有大量的粗数据涌入汇聚节点等问题,介绍了一种基于BP神经网络信息融合的协同信息获取与处理方案。

第7章分析了基于遥感信息融合方式的水环境监测应用,设计了地面数据与遥感数据融合的框架,分析和介绍了采用对多个BP神经网络进行模糊积分的融合模型,以对Chl-a浓度进行估计的方法。为了解决小数目训练集的问题,该方法充分考虑了采样点邻居信息。

第8章设计和实现了针对雨情监测的无线传感器网络系统,主要对硬件、网络协议以及数据管理进行了详细介绍。

第9章设计和实现了面向灌区监测的无线传感器网络系统,重点对传感器节点、汇聚节点、通信协议、信息中心软件架构和移动终端等

进行了介绍。

本书第1章、第2章由王慧斌撰写;第3章、第5章、第7章由王慧斌、樊棠怀、肖贤建撰写;第4章、第6章、第8章由肖贤建、王慧斌撰写;第9章由严锡君撰写;全书由王慧斌统稿。

近年来,作者及其所在的研究团队较深入地开展了无线传感器网络及应用技术的研究,先后得到了国家“863”计划项目、国家自然科学基金、教育部科学技术研究重点项目、江苏省自然科学基金、江苏省社会发展计划等项目的资助,曾获得省部级科技进步二等奖1项、三等奖2项,国家发明专利10余项。本书的写作是在以上科研工作经历的基础上完成的。

在此,向所有的参考文献作者及为本书出版付出辛勤劳动的同志表示感谢。

限于作者的水平,书中会有许多缺点和不完善之处,恳请广大专家同行批评指正。

作者
2010年6月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 信息化社会发展的技术趋势	1
1.2 基于无线传感器网络的信息获取	4
1.2.1 信息获取与 WSN	4
1.2.2 WSN 的发展及特点	7
1.2.3 WSN 的主要技术	9
1.3 无线传感器网络监测应用	11
1.3.1 工业无线传感器网络	11
1.3.2 水下无线传感器网络	13
1.3.3 多媒体无线传感器网络	16
参考文献	19
第 2 章 无线传感器监测网络信息处理	22
2.1 引言	22
2.2 无线传感器监测网络协同信息处理	27
2.2.1 协同信息处理	27
2.2.2 协同信息处理方法	28
2.2.3 协同信息处理研究进展	31
2.3 无线传感器监测网络信息融合技术	33
2.3.1 融合方法主要特征	34
2.3.2 融合方法类型	36
2.4 压缩传感与网络化信息获取	39
2.4.1 压缩传感	39
2.4.2 网络化压缩传感的关键技术	41

2.4.3 网络化压缩传感理论的研究热点	44
参考文献	48
第3章 基于动态组簇策略的协同信息获取	56
3.1 引言	56
3.2 动态组簇	58
3.2.1 背景描述	58
3.2.2 目标定位与运动预测	61
3.2.3 节点加入/退出与动态组簇	62
3.3 局部动态簇协同信息获取算法	63
3.3.1 性能指标函数设计	63
3.3.2 协同信息处理算法	68
3.3.3 信息获取分析	73
3.3.4 协同信息获取算法仿真分析	77
3.4 基于元胞自动机的局部动态组簇方法	83
3.4.1 二维目标跟随元胞自动机模型	83
3.4.2 模型建立	84
3.4.3 目标运动对规则因素影响的表达	86
3.4.4 局部动态元胞簇自组织算法	88
参考文献	94
第4章 基于可重配置策略的传感器信息融合处理	98
4.1 引言	98
4.2 基于可重配置策略的降雨传感器协同模型	99
4.3 降雨传感器的协同控制策略	101
4.3.1 等面积积分型传感器	101
4.3.2 信息量输出的时间间隔拟合预测	104
4.3.3 传感器协同模型	108
4.4 实验与分析	109
参考文献	116

第 5 章 基于时间序列预测的信息融合	118
5.1 引言	118
5.2 多变量时间序列的相空间重构融合方法	119
5.3 基于平均预测误差最小化的重构参数确定	120
5.3.1 延迟时间 τ 的确定方法	120
5.3.2 嵌入维数 m 的确定方法	124
5.4 支持向量机模型预测	127
5.5 仿真与分析	128
参考文献	133
第 6 章 无线传感器监测网络汇聚节点硬件融合算法设计	134
6.1 引言	134
6.2 硬件信息融合算法	135
6.2.1 BP 神经网络	135
6.2.2 BP 神经网络的可重构性分析	136
6.3 硬件信息融合算法实现	137
6.3.1 数据融合模块的 FPGA 硬件实现	138
6.3.2 硬件实现方法及其结果	143
6.4 实验与分析	144
6.4.1 实验介绍	144
6.4.2 结果分析	145
参考文献	146
第 7 章 水环境监测信息处理与无线传感器监测网络	148
7.1 背景	148
7.2 水环境监测技术发展现状	149
7.2.1 水环境遥测技术	149
7.2.2 水环境遥感监测技术现状	154
7.2.3 无线传感器网络在环境监测应用中的研究	160
7.3 基于无线传感器网络的水环境监测信息融合模型	161

7.3.1	水环境监测系统物理架构	162
7.3.2	水环境监测信息处理模式	165
7.3.3	水环境监测信息融合结构	167
7.3.4	水环境监测信息融合功能模型	168
7.4	基于模糊积分的遥感水质监测信息融合	170
7.4.1	模糊积分水质监测模型	171
7.4.2	BPNN 水质分类器	172
7.4.3	模糊积分融合方法	174
7.4.4	实验结果与分析	176
	参考文献	183
第 8 章	面向雨情监测的无线传感器网络设计与实现	188
8.1	背景	188
8.1.1	降雨信息监测技术发展现状	188
8.1.2	降雨信息处理技术发展现状	193
8.1.3	存在的问题及其对策	194
8.2	雨情无线传感器网络技术特征	196
8.2.1	基于雨情无线传感器网络的水文 自动测报系统	196
8.2.2	雨情无线传感器网络与现有水文 自动测报网互联	199
8.2.3	雨情无线传感器网络拓扑控制	200
8.2.4	雨情无线传感器网络数据链路	203
8.2.5	雨情无线传感器网络的网络安全	204
8.3	雨情无线传感器系统总体设计方案	208
8.4	雨情无线传感器网络硬件设计	208
8.4.1	传感器节点硬件设计	208
8.4.2	汇聚节点硬件设计	209
8.4.3	节点操作系统	214
8.5	雨情无线传感器网络的网络协议设计	216
8.5.1	网络协议	216

8.5.2	物理层设计	219
8.5.3	数据链路层设计	219
8.5.4	网络层设计	221
8.5.5	应用层设计	221
8.6	雨情无线传感器网络数据管理	222
8.6.1	雨情无线传感器网络数据管理的系统结构	223
8.6.2	数据模式	224
8.6.3	数据存储与索引	225
8.6.4	分布式查询处理	229
8.7	雨情数据处理系统实现	229
	参考文献	231
第9章	面向灌区监测的无线传感器网络设计与实现	235
9.1	背景	235
9.1.1	灌区信息化概述	235
9.1.2	灌区信息化系统的研究现状	237
9.2	灌区监测无线传感器网络的结构和特点	239
9.3	灌区监测无线传感器网络应用系统设计	242
9.3.1	系统结构	242
9.3.2	功能	242
9.4	传感器节点设计	244
9.4.1	低功耗设计	244
9.4.2	传感器节点硬件设计	247
9.4.3	传感器节点软件设计	251
9.4.4	现地信号处理	251
9.5	汇聚节点设计	254
9.6	通信协议	256
9.7	管理节点	257
9.7.1	信息中心软件架构	257
9.7.2	移动终端	259
	参考文献	261

第1章 绪 论

本章简要介绍了无线传感器网络技术的应用需求、发展及主要技术内容 and 应用领域。

1.1 信息化社会发展的技术趋势

未来信息化社会有何发展特点? 构成信息化社会的重要技术基础是什么? 哲学家和社会学家已经描述和诠释了未来社会的信息化美景。科学工作者也已经以网络化和智能化对其特征进行了高度的概括。实际上,网络化和智能化所包含的内涵丰富而复杂,实现起来还需要解决众多技术理念和挑战。以下主要从网络化发展的角度分析信息化社会的技術发展趋势。

网络化的主要目标是通过网络和通信技术实现任何人、任何时间、在任何地点 (Anyone, Anytime, Anywhere) 的信息交换。依时间顺序网络化技术发展的形态特征如下:

(1) 互联网 (Internet) 技术的出现和发展为人们之间的信息交流建立了平台。

互联网技术最早在 20 世纪 60 年代出现,90 年代对公众开放,经过近 20 年的发展,现在已发展成为当今世界上最大的信息网络。其主要思想是通过小型的桌面型设备,任何人都可以在信息空间 (Cyber Space) 中获得服务与支持。显然,互联网所具有的空间跨越特性使得世界平面化。全球范围内,任何人之间都可以在 1s 内实现联系并且获得有用信息。互联网已经或正在改变着人们的研究、学习、商务、服务和娱乐的方式。同时,随着无线通信技术的发展以及无线终端设备的普及,基于互联网进行的信息交流发展成为今天的移动互联网技术形态。

(2) 泛在计算和泛在网社会的提出构筑了未来信息社会的高级形态。

在互联网技术发展的同时,另外一个非常重要的技术理念也渐现其重要价值。1990 年美国人马克·维塞尔(Mark Weiser)提出“泛在计算”(Ubiquitous Computing)的概念^[1]。泛在计算是指将计算能力融入到环境中,成为物理环境的一部分,其核心思想是小型、便宜、网络化的处理设备广泛分布在日常生活的各个场所,计算设备将不只依赖命令行、图形界面进行人机交互,而是更依赖于“自然”交互方式。在这一思想的支撑下,信息化社会的发展理念实际上得到了进一步完善,追求“泛在网社会”(Ubiquitous Network Society, UNS)成为了发展目标。从现阶段来看,泛在网社会已经穷极人们的想象空间,并且已近于实现信息沟通的无所不在。因此,将 UNS 列入国家顶级战略性发展规划中并籍以推动社会的发展和进步自然成为世界主要发达国家的共识,如美国正在考虑将 IBM 提出的“智慧地球”计划作为其未来发展的目标,日本推出了 U-Japan 计划等。

泛在网社会的实质是实现所谓的“四 A 通信”(Anyone, Anytime, Anywhere, Anything),目标是实现任何人和任何物在任何时候和任何地点的通信与联系,其最重要内容之一是实现物—人和物—物之间的信息交流。与之前相比较,Anything 成为其关注的重点。因此,泛在网社会实现的是正真意义上的全社会的信息交流,可以将其看成是信息社会的高级形态。

(3) 物联网为物理世界的信息交流提供了平台。

与 UNS 直接关联的技术是物联网(Internet of Things, IOT)^[2]。物联网是由物理世界的各种物体(Object)以及设备相互连接所构成的网络。它以物—物互联为形式,以实现对广泛的物理世界信息感知为目标,因此,物联网被看成是实现 UNS 的重要基础。

可以肯定的是,物联网并不仅仅是目前互联网的延伸,更是一种新的独立系统。不仅需要自己的基础设施,而且将提供新的服务,同时也将包括不同的通信模式(物—人通信、物—物通信)。欧洲联盟委员会非常重视 IOT,特别制定了相关的发展框架,如推出了 FP7 Internet of things、i2010 计划,并在交通领域开始进行探索性研究^[3]。

无论何时、何地都可以实现与物体联系的物联网理念可以通过图 1-1 所示描述。

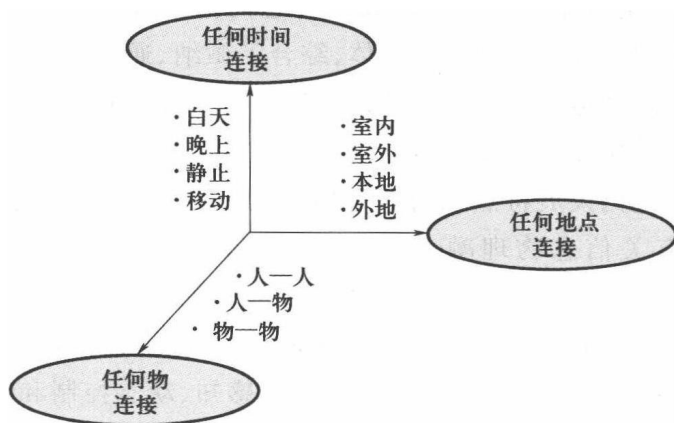


图 1-1 物联网理念示意图

(4) 无线传感器网络技术是物理世界信息感知的核心。

可以实现物联网的关键技术主要包括无线射频识别 (Radio Frequency Identification, RFID) 技术、近距离无线通信 (Near Field Communication, NFC)、无线传感器 (Wireless Sensor)、互联网协议 (IPv6)、超宽带 (Ultrawideband, UWB) 和 3G/4G 等技术。

在物联网技术发展初期, RFID 技术被认为是物联网的一个关键技术, RFID 是基于无线电波识别物体, 提供搜集和处理物体数据的功能, 通过 RFID 系统能够实时跟踪物体产生的关于位置及状态的重要信息。传感器在物理与虚拟世界之间的沟通发挥着重要作用, 与 RFID 不同, 传感器技术可以提供对物体物理变化的识别并搜集相关数据。例如, 一个电子板上的传感器能够搜集外部温度变化以及感应电子板特性的相关信息并且能够做出相应的调整。另外, 嵌入式技术提高了对信息的处理能力, 使得物体、感知设备和系统更具智能性。因此, 在多种技术的综合驱动下, 感知物理世界的基本技术形式演变成为一种是由众多的智能传感器节点感知物体信息, 通过各种短距离无线通信技术和 3/4G 技术传输信息 (这里的信息传输包括两个方面, 一个是从传感器节点到数据处理中心, 另一个是从数据中心到用户), 并为用户提供服务的无线传感器网络系统。

也可以这样认为,物联网是基于无线传感器网(Wireless Sensing Network, WSN)及所形成的物—物互联业务所构成。从信息感知的角度看,物联网的基本技术形态为无线传感网,它集传感技术、通信互联技术与计算机智能应用计算为一体,综合了微纳、通信、自治网络、协同处理、传感器、微电子等多个领域,是继互联网、移动通信网之后信息产业新一轮竞争中新的主要发展方向。

通过上述的发展特点,我们不难理解为什么近年来学术界和科技界提出了有关信息物理融合系统(Cyber-Physical System, CPS)的概念^[4-6]。CPS是一个综合计算、网络和物理环境的多空间复杂系统,通过3C(Computation、Communication、Control)技术的有机融合与深度协作,实现大型物理与信息交互系统的实时感知、动态控制和信息服务。这实际上是对信息科学研究内容的发展,也是从一个新的、系统的角度深入分析和设计有关计算、通信技术与物理工程的融合问题。

CPS的提出实际上诠释了与物联网相一致的理念,即如何消除在信息交换与传播的网络世界和人们生活的物理世界之间所存在的隔阂。CPS的目标就是要使之前不可能完成的超越时空界限的社会服务成为现实。当然,如何把网络世界和物理世界紧密联系起来,还需要建立一个能同时融合计算和物理信息,能提供一个统一框架的系统。这个系统以某种适当的方式包含多尺度动态信息,利用有线和无线网络管理信息和能量的变动,通过无处不在的基础设施组成各种全球和本地网络,用户、传感器、设备、系统和应用装置可以实现物理世界前所未有的无缝连接。

目前CPS不仅成为国际学术界与科技界研究和开发的重要方向,也成为企业界优先发展的产业领域,具有重要而广泛的应用前景。

可见,未来信息社会的主要特征是泛在网社会,而构成泛在网社会的重要基础是物联网,而实现物联网的核心技术之一是无线传感器网络。

1.2 基于无线传感器网络的信息获取

1.2.1 信息获取与 WSN

信息获取技术主要研究如何提高信号或信息质量,以完成目标识别任

务。与计算机及网络通信所追求的理念相一致,信息获取所追求的最高目标是信息获取的无所不在,也可称为“泛在感知”(Ubiquitous Sensing)。

信息获取、处理和传输是组成信息链的三个重要环节。然而,信息链的源头——信息获取技术,相对于信息处理和信息传输技术的成熟度来讲,长期以来一直处于比较薄弱的技术层次,成为制约信息技术发展的一个重要瓶颈。同时,随着人类对自然世界探索的逐步深入,从微观感测到宏观探测,从局部感知到整体认知,都迫切需要更为先进的信息获取技术,以满足对大规模复杂感知应用的巨大需求。因此,近年来国内外非常重视并积极发展这一技术领域,并试图通过与已有信息处理与通信技术相结合,力求取得较大的突破和进展。

信息获取技术从其发展演变的角度而言,主要经历了最简单的传统传感器、智能传感器、分布式智能传感器和分布式智能感知系统等阶段^[7]。其中,传统传感器技术是信息获取与处理技术的基础,智能传感器技术是随着大规模集成电路和微处理技术的发展应运而生,分布式智能传感器技术是为满足网络化信息获取的需求而产生的。信息获取技术的最终实现目标是分布式智能感知系统。因此,在不同的发展阶段,信息获取技术的研究重点和方法不同。总体上讲,信息获取技术所拥有的信息处理能力越来越强大,所涉及的信息处理内容也越来越丰富。

另外,上述传感器技术所经历的发展过程实际上也反映出了信息获取方式的发展趋势。国外学者用“三代论”来描述,如图 1-2 所示。

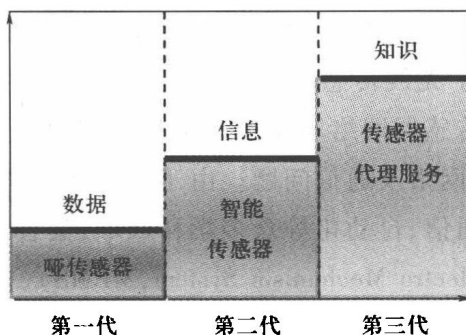


图 1-2 传感器技术发展过程

第一代称为哑传感器(Dumb Sensor),主要面向数据采集,是扁平结构,没有智能;第二代称为智能传感器(Smart Sensor),是以应用为中心,多级分层结构,具有本地智能;第三代称为传感器代理服务(Sensor Agents),面向目标,动态结构,具有网络智能。从第一代到第三代,信息的处理过程是从数据到信息再到知识。

从信息科学的角度而言,信息技术的发展目标是扩展人类的信息器官和思维器官的功能。而信息获取技术的发展,就是要使人类在探知外部世界时能够具有更为强大的能力,从而把人类获取外界信息的能力提高到空前的高度。例如,超视距、空间分辨、光谱分辨、立体分辨等技术。

目前,在信息获取研究领域中较前沿的技术主题,除了已发展为崭新技术方向的对地(对空)探测技术之外,最重要的就是新型智能化感知技术。在智能化感知技术中有两个重要技术热点:一个是多传感器信息融合(Multi Sensor Information Fusion, MSIF)技术,另一个是无线传感器网络系统。

多传感器信息融合技术依赖于多模式、多类型传感器对目标进行检测,运用在复杂模式下,面对不确定性问题而进行的信息处理方法与理论,以提高对目标的感测精度,侧重于对复杂不确定信息处理的理论和方法的研究,是智能化感知技术的核心和前沿课题。

在网络化环境下,如何通过众多的传感器之间的相互协作与通信完成更为广泛与精细的监测任务,并且把监测的数据以及部分处理的结果通过网络传送给相应的用户,完成更为复杂的计算、分析以及处理,这其实就是基于无线传感器网络信息获取技术的产生背景和基本思想。显然,无线传感器网络不仅包含了对所获取信息的处理问题,还包括了更为复杂的网络及通信问题。由于无线传感器网络技术研究涉及到包括计算机、通信、自动化等众多学科领域,集合了传感器测量、机电系统(Micro Electro Mechanism System, MEMS)、嵌入式计算、片上系统(System on Chip, SoC)、无线通信等技术的最新发展成就,大大提升了信息获取技术研究的层次。因而,无线传感器网络技术成为信息获取最重要的技术之一是必然结果。

无线传感器网络是由大量、低功耗的传感器节点,通过无线通信方式组织成的一个多跳的、自组织的分布式网络系统,网络中的节点通过互相协作,能够实时监测、感知和集成周边环境或者监测对象的信息,并对这些信息进行处理,传送给终端用户。WSN 这种信息获取方式不仅增强了对客观物理世界的感测能力,而且由于信息获取是通过多个智能传感器节点间的协同来进行,从信号及信息处理角度理解,WSN 技术也充分体现了智能化感知思想的内涵。

WSN 所具有的应用优势表现在:无需固定设备支撑,可以快速部署,易于组网,不受有线网络的约束等。在军事、灾难自救、环境监测、医疗救护、森林火险报警、地震及火山监测等方面的应用前景非常广阔。特别是将其应用于无人值守、危险的环境中,可以快速、准确和可靠地获取信息。

1.2.2 WSN 的发展及特点

无线传感器网络的目的是协作地感知、采集处理和传输网络覆盖地理区域内感知对象的监测信息,并把信息报告给用户。因此,无线传感器网络能实时监测、感知和采集网络分布区域内监测对象的信息,并采用协同技术、信息融合技术与传感器资源配置进行信息处理。典型的无线传感器网络体系结构如图 1-3 所示,由传感器节点、通信系统、数据中心和用户组成。在不同的应用中,无线传感器网络的节点组成不尽相同,但基本上都由数据采集单元、数据处理单元、数据传输单元、电源等四部分组成^[8,9]。

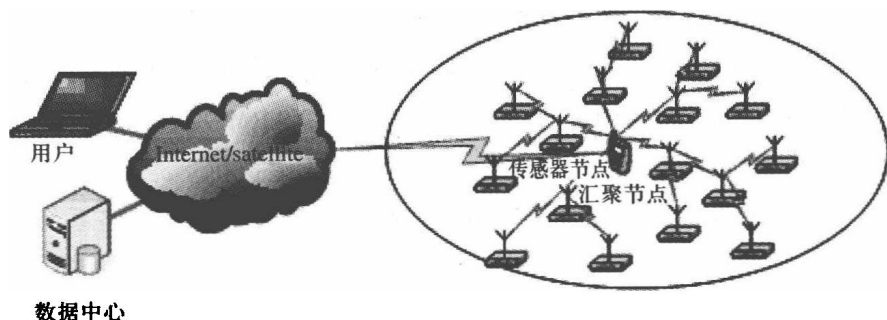


图 1-3 无线传感器网络体系结构