



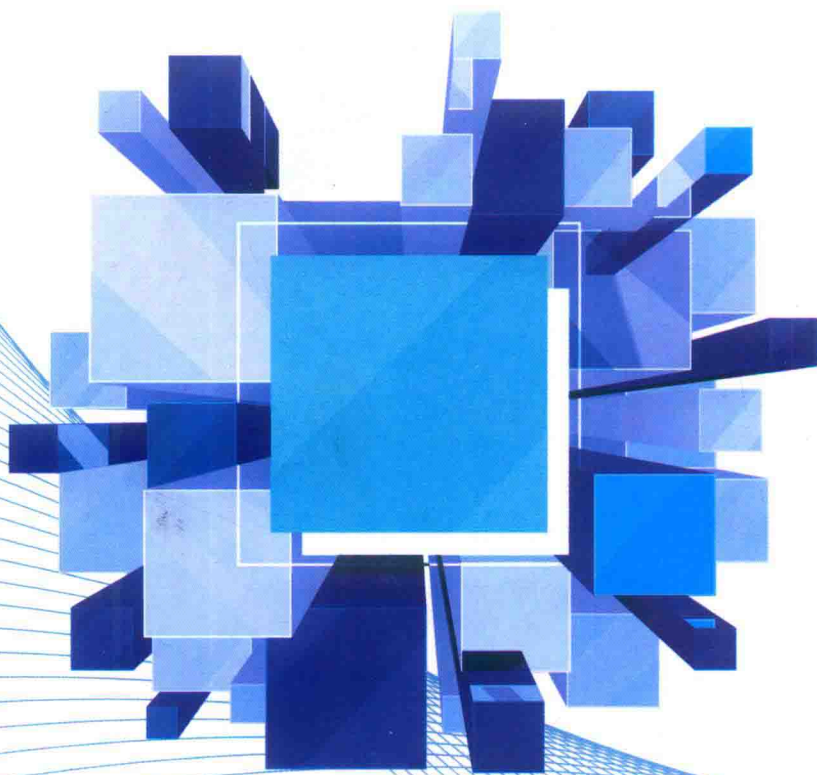
中国电子学会物联网专家委员会推荐

普通高等教育物联网工程专业“十三五”规划教材

# 无线传感器网络技术概论

*Introduction To Wireless Sensor Network Technology*

主编 施云波



西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>

中国电子学会物联网专家委员会推荐

普通高等教育物联网工程专业“十三五”规划教材

# 无线传感器网络技术概论

主编 施云波

参编 冯侨华 赵文杰 罗 毅

于潇禹 于明岩 刘丛宁

西安电子科技大学出版社

## 内 容 简 介

本书重点介绍无线传感器网络的技术基础和应用,具体包括:无线传感器网络的基本概况、体系结构、传感技术、感知节点技术、通信技术、控制技术、管理技术、安全技术、其他关键技术及应用等。本书内容深入浅出、概念清晰、理论与实际应用相结合,是一本比较全面、系统、深入的无线传感器网络技术专著。

本书既可作为高等院校物联网工程专业的本科生教材,也可作为计算机类、通信类、信息类、电子类等专业的本科生及研究生教材,还可作为相关领域的科研人员及工程师的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

无线传感器网络技术概论/施云波主编. —西安:西安电子科技大学出版社, 2017.9

ISBN 978-7-5606-4607-7

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

## 中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 193163 号

策 划 刘玉芳

责任编辑 张 倩 阎 彬

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西利达印务有限责任公司

版 次 2017 年 9 月第 1 版 2017 年 9 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印 张 26.75

字 数 636 千字

印 数 1~3000 册

定 价 52.00 元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 4607 - 7/TP

**XDUP 4899001-1**

\*\*\*如有印装问题可调换\*\*\*

# 普通高等教育物联网工程专业“十三五”规划教材

## 编审专家委员会名单

- 总顾问：姚建铨 天津大学、中国科学院院士 教授
- 顾问：王新霞 中国电子学会物联网专家委员会秘书长
- 主任：王志良 北京科技大学信息工程学院首席教授
- 副主任：孙小菡 东南大学电子科学与工程学院 教授
- 曾宪武 青岛科技大学信息科学技术学院物联网系主任 教授
- 委员：（成员按姓氏笔画排列）
- 王洪君 山东大学信息科学与工程学院副院长 教授
- 王春枝 湖北工业大学计算机学院院长 教授
- 王宜怀 苏州大学计算机科学与技术学院 教授
- 白秋果 东北大学秦皇岛分校计算机与通信工程学院院长 教授
- 孙知信 南京邮电大学物联网学院副院长 教授
- 朱昌平 河海大学计算机与信息学院副院长 教授
- 邢建平 山东大学电工电子中心副主任 教授
- 刘国柱 青岛科技大学信息科学技术学院副院长 教授
- 张小平 陕西物联网实验研究中心主任 教授
- 张 申 中国矿业大学物联网中心副主任 教授
- 李仁发 湖南大学教务处处长 教授
- 李朱峰 北京师范大学物联网与嵌入式系统研究中心主任 教授
- 李克清 常熟理工学院计算机科学与工程学院副院长 教授
- 林水生 电子科技大学通信与信息工程学院物联网工程系主任 教授
- 赵付青 兰州理工大学计算机与通信学院副院长 教授

武奇生 长安大学电子与控制工程学院自动化卓越工程师主任 教授  
房 胜 山东科技大学信息科学与工程学院物联网专业系主任 教授  
赵庶旭 兰州交通大学电信工程学院计算机科学与技术系副主任 教授  
施云波 哈尔滨理工大学测控技术与通信学院物联网工程系主任 教授  
桂小林 西安交通大学网络与可信计算技术研究中心主任 教授  
秦成德 西安邮电大学教学督导 教授  
黄传河 武汉大学计算机学院副院长 教授  
黄 炜 电子科技大学通信与信息工程学院 教授  
黄贤英 重庆理工大学计算机科学与技术系主任 教授  
彭 力 江南大学物联网系副主任 教授  
谢红薇 太原理工大学计算机科学与技术学院软件工程系主任 教授  
薛建彬 兰州理工大学计算机与通信学院物联网工程系主任 副教授

项目策划：毛红兵

策 划：邵汉平 刘玉芳

# 前言

近几年，物联网技术的快速发展，带来了一场信息技术的变革。其中，作为物联网中感知层的核心技术——无线传感器网络(WSN)，是物联网建设成败的关键，也是国内外学术界和产业界共同关注的热点话题。自 20 世纪 70 年代末以来，WSN 已经引起了那些和物理世界紧密关联的、范围广泛的学科领域的专家的兴趣。分布式的环境感知能力及基于无线通信技术的简单灵活的部署方式，使得 WSN 成为影响我们日常生活的重要因素。通过提供分布式的实时的环境感知信息，WSN 将现代通信技术拓展到了物理世界中，并且相关研究工作已经在世界各主要发达国家轰轰烈烈地开展起来。

无线传感器网络是通过信息传感设备，按约定的协议实现人与人、人与物、物与物全面互联的网络，其主要特征是通过射频识别、传感器等方式获取物理世界的各种信息，结合互联网、移动通信网等网络进行信息的传送与交互，采用智能计算技术对信息进行分析处理。WSN 能够提高对物理世界的感知能力，实现智能化的决策和控制。

传感器技术、微机电系统、现代网络和无线通信等技术的进步推动了具有现代意义的无线传感器网络的产生和发展。无线传感器网络涉及众多学科，已成为目前 IT 领域中的研究热点之一。现在，互联网为公众提供了快捷的通信平台，极大地方便了人们的信息交流。无线传感器网络扩展了人们获取信息的能力，将客观世界的物理信息与传输网络连接在一起，在下一代互联网中将为人们提供最直接、最有效、最真实的信息。

基于以上对无线传感器网络的认识，在梳理相关知识的基础上，我们编写了本书，以满足我国高等学校物联网工程专业或相关专业的需要。本书可作为物联网工程技术或原理的专业教材，以帮助读者全面了解无线传感器网络的基本理论知识，初步掌握无线传感器网络的关键技术及应用方法，为运用这些技术和方法构建无线传感器网络应用系统打下基础。

本书从物联网的感知层角度出发，将涉及无线传感器网络的关键内容及应用分为 10 章进行介绍，具体如下：

第 1 章为无线传感器网络基本概况，主要介绍了无线传感器网络的产生与发展、含义与作用、技术特点以及相关技术基础，分析了无线传感器网络与物联网、互联网的关系；

第 2 章为无线传感器网络体系结构，介绍了无线传感器网络的系统结构、节点结

构、传感器网络工作模式、网络整体结构,分析了网络服务质量与体系结构的关系、体系结构的设计原则与优化设计方法;

第3章为无线传感器网络传感技术,介绍了传感技术的基本情况、传感器的含义与分类、典型传感器以及射频识别、模式识别、图像识别等广义传感技术,分析了纳米技术与小型化技术等的发展趋势;

第4章为无线传感器网络感知节点技术,论述了感知节点设计的基本原则,介绍了感知节点的硬件、软件、微处理器及操作系统;

第5章为无线传感器网络通信技术,分析了信息通信构建基础和IEEE 802标准,介绍了通信模块硬件架构和无线通信协议;

第6章为无线传感器网络控制技术,分析了无线传感器网络控制系统的构成、网络远程控制技术、无线传感器网络的控制策略及数据融合与优化决策,介绍了无线传感器网络的控制终端和现场控制网络通信;

第7章为无线传感器网络管理技术,介绍了管理系统的分类、拓扑结构,分析了管理系统设计要求和能量管理;

第8章为无线传感器网络安全技术,介绍了安全防护技术的分类、安全机制、信息隐私权与保护、业务认证与加密技术,分析了安全设计策略、数据计算安全性、物理设备安全问题及移动互联网安全漏洞与防范技术;

第9章为无线传感器网络其他关键技术,分析了时间同步机制、传感器网络定位技术、数据融合技术和传感器网络目标跟踪技术;

第10章为无线传感器网络的应用,综述了传感器网络在军事、气象生态环保、工业、智能电网、农林、智能交通、数字家居等领域的应用。

本书由施云波主编,并负责统稿工作。各章编写分工如下:第1章由哈尔滨理工大学的施云波、刘丛宁编写,第2章由哈尔滨理工大学的于明岩编写,第3章和第10章由哈尔滨理工大学的冯侨华编写,第4章和第6章由云南师范大学的罗毅编写,第5章和第7章由哈尔滨理工大学的赵文杰编写,第8章和第9章由哈尔滨理工大学的于潇禹编写。哈尔滨理工大学的任喆、刘合欢等做了大量的资料整理和图片编辑工作,还有许多老师、同学以不同形式对本书做出了贡献,在此一并致谢!

无线传感器网络技术是一个不断发展的技术,有一些技术内容在本书中没有涉及;同时,由于编者水平有限,书中难免有对一些技术理解不准确的地方,可能存在疏漏之处,恳请读者批评指正。

编 者

2017年5月

# 目 录

|                           |    |                                      |    |
|---------------------------|----|--------------------------------------|----|
| 第 1 章 无线传感器网络基本概况.....    | 1  | 2.3.2 通信机制.....                      | 34 |
| 1.1 无线传感器网络概述.....        | 1  | 2.4 网络整体结构.....                      | 36 |
| 1.1.1 无线传感器网络的产生与发展.....  | 1  | 2.4.1 OSI 分层模型.....                  | 37 |
| 1.1.2 无线传感器网络的含义与作用.....  | 2  | 2.4.2 网络体系结构.....                    | 37 |
| 1.2 物联网与 WSN 的关系.....     | 3  | 2.5 无线传感器网络服务质量及其<br>体系结构.....       | 40 |
| 1.2.1 物联网的产生与发展.....      | 3  | 2.5.1 服务质量体系.....                    | 40 |
| 1.2.2 物联网的含义.....         | 4  | 2.5.2 通信协议 QoS.....                  | 42 |
| 1.2.3 物联网体系结构.....        | 5  | 2.5.3 管理系统 QoS.....                  | 43 |
| 1.2.4 WSN 与物联网的关系.....    | 6  | 2.5.4 功能模块 QoS.....                  | 46 |
| 1.3 WSN 与互联网的关系.....      | 7  | 2.6 无线传感器网络体系结构的设计原则与<br>优化设计方法..... | 46 |
| 1.3.1 互联网内涵的理解.....       | 7  | 2.6.1 设计原则.....                      | 46 |
| 1.3.2 互联网的特点.....         | 8  | 2.6.2 优化设计方法.....                    | 48 |
| 1.3.3 WSN 与互联网的关系.....    | 8  | 2.6.3 跨层设计总体架构.....                  | 49 |
| 1.4 WSN 的技术特点.....        | 12 | 2.6.4 跨层设计的步骤.....                   | 50 |
| 1.4.1 WSN 与现有无线网络的区别..... | 12 | 2.6.5 设计模型与问题求解方法.....               | 51 |
| 1.4.2 WSN 与现场总线网络的区别..... | 13 | 2.6.6 网络效能最大化模型.....                 | 53 |
| 1.4.3 WSN 的特点.....        | 13 | 思考题.....                             | 54 |
| 1.5 WSN 的相关技术基础.....      | 15 | 第 3 章 无线传感器网络传感技术.....               | 55 |
| 1.5.1 传感器技术.....          | 15 | 3.1 传感技术概述.....                      | 55 |
| 1.5.2 无线电技术.....          | 16 | 3.1.1 传感技术的地位和作用.....                | 55 |
| 1.5.3 短距离无线通信技术.....      | 19 | 3.1.2 传感技术的现状及发展趋势.....              | 58 |
| 思考题.....                  | 26 | 3.1.3 传感技术与无线传感器网络系统.....            | 61 |
| 第 2 章 无线传感器网络体系结构.....    | 27 | 3.2 传感器的含义与分类.....                   | 62 |
| 2.1 系统结构.....             | 27 | 3.2.1 传感器的含义.....                    | 62 |
| 2.1.1 基本结构.....           | 27 | 3.2.2 传感器的分类和性能要求.....               | 63 |
| 2.1.2 多网络融合系统结构.....      | 28 | 3.3 典型传感器.....                       | 64 |
| 2.1.3 无线传感器网络拓扑结构.....    | 29 | 3.3.1 力敏传感器.....                     | 64 |
| 2.2 节点结构.....             | 31 | 3.3.2 磁敏传感器.....                     | 65 |
| 2.2.1 传感器节点的特点与类型.....    | 31 | 3.3.3 光敏传感器.....                     | 68 |
| 2.2.2 节点结构与作用.....        | 32 | 3.3.4 温度传感器.....                     | 70 |
| 2.2.3 节点约束条件.....         | 32 | 3.3.5 气敏传感器.....                     | 74 |
| 2.3 传感器网络工作模式.....        | 33 |                                      |    |
| 2.3.1 网络的组成和特点.....       | 33 |                                      |    |

|                                       |     |                                |     |
|---------------------------------------|-----|--------------------------------|-----|
| 3.3.6 湿敏传感器.....                      | 76  | 4.3.6 VHDL 语言.....             | 152 |
| 3.3.7 其他传感器.....                      | 78  | 4.4 常用微处理器.....                | 154 |
| 3.4 射频识别传感技术.....                     | 83  | 4.4.1 单片微处理器.....              | 154 |
| 3.4.1 射频识别技术概述.....                   | 83  | 4.4.2 ARM 处理器.....             | 161 |
| 3.4.2 射频识别系统基本构成.....                 | 84  | 4.4.3 DSP 处理器.....             | 164 |
| 3.4.3 射频识别系统分类及典型应用.....              | 89  | 4.4.4 FPGA 处理器.....            | 169 |
| 3.4.4 射频识别的基本原理及关键技术.....             | 92  | 4.5 操作系统.....                  | 175 |
| 3.5 模式识别传感技术.....                     | 95  | 4.5.1 操作系统基本概述.....            | 175 |
| 3.5.1 模式和模式识别.....                    | 95  | 4.5.2 WSN 操作系统(WSNOS).....     | 179 |
| 3.5.2 模式识别的发展和应用.....                 | 95  | 思考题.....                       | 185 |
| 3.5.3 模式识别的研究内容、分类及<br>研究方法.....      | 97  | <b>第 5 章 无线传感器网络通信技术</b> ..... | 186 |
| 3.6 图像识别传感技术.....                     | 99  | 5.1 信息通信构建基础.....              | 186 |
| 3.6.1 图像的定义及分类.....                   | 99  | 5.1.1 构建框架.....                | 186 |
| 3.6.2 数字图像处理与应用.....                  | 101 | 5.1.2 物理层.....                 | 187 |
| 3.6.3 图像识别过程.....                     | 103 | 5.1.3 数据链路层.....               | 187 |
| 3.6.4 二值图像压缩编码技术.....                 | 104 | 5.1.4 网络层.....                 | 187 |
| 3.7 纳米技术与小型化技术.....                   | 107 | 5.1.5 传输层.....                 | 190 |
| 3.7.1 纳米技术.....                       | 107 | 5.1.6 应用层.....                 | 190 |
| 3.7.2 微机电系统及装置.....                   | 109 | 5.2 IEEE 802 标准.....           | 190 |
| 3.7.3 封装、组装与连接技术.....                 | 111 | 5.2.1 标准概述.....                | 190 |
| 思考题.....                              | 112 | 5.2.2 MAC 协议.....              | 191 |
| <b>第 4 章 无线传感器网络感知节点<br/>技术</b> ..... | 113 | 5.3 通信模块硬件架构.....              | 212 |
| 4.1 感知节点技术的基本概况.....                  | 113 | 5.3.1 蓝牙模块.....                | 212 |
| 4.1.1 感知节点技术的发展情况.....                | 113 | 5.3.2 ZigBee 模块.....           | 220 |
| 4.1.2 感知节点设计的基本原则.....                | 115 | 5.3.3 无线射频模块.....              | 224 |
| 4.2 感知节点硬件技术.....                     | 117 | 5.3.4 WiFi 通信模块.....           | 226 |
| 4.2.1 电源技术.....                       | 117 | 5.3.5 红外通信模块.....              | 228 |
| 4.2.2 传感器模块.....                      | 123 | 5.3.6 GPRS 模块.....             | 229 |
| 4.2.3 微处理器模块.....                     | 124 | 5.3.7 全球定位系统模块.....            | 231 |
| 4.2.4 存储模块.....                       | 130 | 5.4 无线通信协议.....                | 235 |
| 4.2.5 通信模块.....                       | 135 | 5.4.1 ZigBee 协议.....           | 235 |
| 4.3 感知节点软件技术.....                     | 138 | 5.4.2 蓝牙协议.....                | 238 |
| 4.3.1 软件的基本概况.....                    | 138 | 5.4.3 WiFi 协议.....             | 240 |
| 4.3.2 汇编语言.....                       | 141 | 5.4.4 其他协议.....                | 244 |
| 4.3.3 C 语言.....                       | 143 | 思考题.....                       | 245 |
| 4.3.4 C++语言.....                      | 145 | <b>第 6 章 无线传感器网络控制技术</b> ..... | 246 |
| 4.3.5 Java 语言.....                    | 147 | 6.1 无线传感器网络控制系统的构成.....        | 246 |
|                                       |     | 6.1.1 控制系统结构.....              | 246 |
|                                       |     | 6.1.2 控制关键技术.....              | 251 |

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 6.1.3 控制模式.....                | 252        |
| 6.1.4 控制系统设计原则.....            | 255        |
| 6.2 无线传感器网络的控制终端.....          | 255        |
| 6.2.1 可编程逻辑控制器.....            | 255        |
| 6.2.2 数字控制器.....               | 261        |
| 6.2.3 嵌入式控制器.....              | 264        |
| 6.3 网络远程控制技术.....              | 266        |
| 6.3.1 移动通信远程控制.....            | 266        |
| 6.3.2 网络遥控操作.....              | 268        |
| 6.3.3 Web 动态服务及控制.....         | 269        |
| 6.4 无线传感器网络的控制策略.....          | 271        |
| 6.4.1 智能控制策略.....              | 271        |
| 6.4.2 自适应控制系统策略.....           | 273        |
| 6.4.3 能耗控制策略.....              | 275        |
| 6.5 数据融合与优化决策.....             | 276        |
| 6.5.1 数据融合结构.....              | 276        |
| 6.5.2 优化决策.....                | 278        |
| 6.6 现场控制网络通信.....              | 281        |
| 6.6.1 现场总线简介.....              | 281        |
| 6.6.2 基金会现场总线.....             | 281        |
| 6.6.3 局部操作网络总线.....            | 282        |
| 6.6.4 过程现场总线.....              | 283        |
| 6.6.5 CAN 总线网络.....            | 285        |
| 思考题.....                       | 286        |
| <b>第 7 章 无线传感器网络管理技术.....</b>  | <b>287</b> |
| 7.1 无线传感器网络管理概述.....           | 287        |
| 7.1.1 无线传感器网络管理面临的问题.....      | 287        |
| 7.1.2 无线传感器网络管理系统设计<br>要求..... | 288        |
| 7.1.3 无线传感器网络管理系统的分类.....      | 288        |
| 7.2 网络拓扑结构管理系统.....            | 290        |
| 7.2.1 网络拓扑结构管理系统概述.....        | 290        |
| 7.2.2 分簇层次型拓扑结构.....           | 291        |
| 7.2.3 功率控制的拓扑结构.....           | 295        |
| 7.2.4 启发式节点唤醒和睡眠机制.....        | 296        |
| 7.3 能量管理.....                  | 298        |
| 7.3.1 能量管理概述.....              | 298        |
| 7.3.2 硬件能耗设计.....              | 299        |
| 7.3.3 状态调制机制.....              | 302        |

|                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| 7.3.4 通信能耗.....                 | 303        |
| 7.3.5 拓扑结构能耗分析.....             | 304        |
| 7.3.6 路由协议能耗分析.....             | 305        |
| 思考题.....                        | 306        |
| <b>第 8 章 无线传感器网络安全技术.....</b>   | <b>307</b> |
| 8.1 网络安全技术概述.....               | 307        |
| 8.1.1 网络安全问题.....               | 307        |
| 8.1.2 安全防护技术的分类.....            | 310        |
| 8.1.3 WSN 的网络安全设计策略.....        | 312        |
| 8.1.4 网络安全框架协议分析.....           | 317        |
| 8.2 无线传感器网络的安全机制.....           | 320        |
| 8.2.1 节点的安全机制.....              | 320        |
| 8.2.2 信息通信的安全机制.....            | 322        |
| 8.2.3 信息应用的安全机制.....            | 323        |
| 8.3 信息隐私权与保护.....               | 325        |
| 8.3.1 隐私保护.....                 | 325        |
| 8.3.2 隐私保护面临的威胁.....            | 327        |
| 8.3.3 隐私权的保护策略.....             | 328        |
| 8.4 数据计算安全性.....                | 330        |
| 8.4.1 数据计算的关键技术.....            | 330        |
| 8.4.2 数据计算安全问题.....             | 333        |
| 8.5 业务认证与加密技术.....              | 335        |
| 8.5.1 业务认证机制.....               | 335        |
| 8.5.2 加密机制.....                 | 337        |
| 8.6 物理设备安全问题.....               | 343        |
| 8.6.1 物理安全概况.....               | 343        |
| 8.6.2 物理设备的安全问题.....            | 344        |
| 8.6.3 其他物理安全问题.....             | 346        |
| 8.7 移动互联网安全漏洞与防范技术.....         | 349        |
| 8.7.1 移动互联网的基本概况.....           | 349        |
| 8.7.2 移动互联网面临的安全威胁.....         | 350        |
| 8.7.3 移动系统的安全措施.....            | 351        |
| 思考题.....                        | 354        |
| <b>第 9 章 无线传感器网络其他关键技术.....</b> | <b>355</b> |
| 9.1 时间同步机制.....                 | 355        |
| 9.1.1 时间同步面临的问题.....            | 355        |
| 9.1.2 时钟模型.....                 | 356        |
| 9.1.3 接收者和接收者交互时间同步             |            |

|                               |            |                           |     |
|-------------------------------|------------|---------------------------|-----|
| 机制.....                       | 357        | 10.2 军事领域的应用.....         | 391 |
| 9.1.4 发送者和接收者的双向时间同步          |            | 10.2.1 智能尘埃网络系统.....      | 392 |
| 机制.....                       | 358        | 10.2.2 灵巧传感器网络.....       | 393 |
| 9.1.5 发送者和接收者的单向时间同步          |            | 10.2.3 WSN 在协同作战中的应用..... | 393 |
| 机制.....                       | 359        | 10.2.4 WSN 在军事目标定位和跟踪中的   |     |
| 9.1.6 时间同步机制的误差来源及性能          |            | 应用.....                   | 396 |
| 指标.....                       | 361        | 10.3 气象生态环保领域的应用.....     | 397 |
| 9.1.7 时间同步机制的主要应用.....        | 362        | 10.3.1 气象环境监测.....        | 397 |
| 9.2 无线传感器网络定位技术.....          | 363        | 10.3.2 生态环境监测.....        | 399 |
| 9.2.1 无线传感器网络节点定位的基本          |            | 10.3.3 海洋与空间生态监测.....     | 401 |
| 原理.....                       | 363        | 10.4 工业领域的应用.....         | 403 |
| 9.2.2 无线传感器网络节点定位算法.....      | 365        | 10.4.1 智能制造传感器网络.....     | 403 |
| 9.2.3 定位算法的应用案例.....          | 369        | 10.4.2 矿业领域传感器网络.....     | 405 |
| 9.3 数据融合技术.....               | 370        | 10.4.3 数字化油田传感器网络.....    | 406 |
| 9.3.1 数据融合概述.....             | 370        | 10.5 智能电网领域的应用.....       | 408 |
| 9.3.2 主要数据融合方法分析.....         | 374        | 10.5.1 智能抄表传感器网络.....     | 408 |
| 9.4 无线传感器网络目标跟踪技术.....        | 379        | 10.5.2 智能变电站传感器网络.....    | 409 |
| 9.4.1 目标跟踪概述.....             | 379        | 10.6 农林领域的应用.....         | 412 |
| 9.4.2 无线传感器网络协作跟踪方法.....      | 381        | 10.6.1 智慧农业传感器网络.....     | 412 |
| 9.4.3 典型目标跟踪算法比较分析.....       | 384        | 10.6.2 智慧林业传感器网络.....     | 413 |
| 9.4.4 无线传感器网络主要跟踪技术.....      | 386        | 10.7 智能交通领域的应用.....       | 415 |
| 思考题.....                      | 389        | 10.8 智能家居领域的应用.....       | 416 |
| <b>第 10 章 无线传感器网络的应用.....</b> | <b>390</b> | 10.9 其他领域的应用.....         | 417 |
| 10.1 无线传感器网络应用基本概况.....       | 390        | 思考题.....                  | 418 |

## 第1章

## Chapter 1

## 无线传感器网络基本概况

## 1.1 无线传感器网络概述

微机电系统(Micro-Electro-Mechanism System, MEMS)、片上系统(System on Chip, SOC)、无线通信技术和低功耗嵌入式技术的飞速发展,孕育出了无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)。WSN 具有低功耗、低成本、分布式和自组织等特点。

## 1.1.1 无线传感器网络的产生与发展

无线传感器网络(简称无线传感网)的研究起源于 20 世纪 70 年代,起初的无线传感网只能捕获单一信号,且传感器节点之间只能进行简单的点对点通信。无线传感器网络最早应用于军事领域,比如战场监测。当年美越双方在密林覆盖的“胡志明小道”进行了一场血腥较量。“胡志明小道”是胡志明部队向南方游击队输送物资的秘密通道,美军对其进行狂轰滥炸,但效果不大。后来,美军投放了数万个“热带树”传感器。“热带树”实际上是由振动传感器和声响传感器组成的系统,它由飞机投放,落地后插入泥土中,只露出伪装成树枝的无线电天线,因而被称为“热带树”。只要对方车队经过,传感器就能探测出目标产生的振动和声响信息并自动发送到指挥中心,美机便立即展开追杀。在此期间,美军总共炸毁或炸坏越军 4.6 万辆卡车。

20 世纪 80 年代至 90 年代期间,美国国防部启动了分布式传感器网络系统、海军协同交战能力系统、远程战场传感器系统等,这些系统主要由卡内基梅隆大学、匹兹堡大学和麻省理工学院等承担,从而建立一个由空间分布的低功耗传感器节点构成的网络,节点之间能相互协助并自主运行,传递待处理的信息。这种现代微型化的传感器具备感知能力、计算能力和通信能力。因此,1999 年,《商业周刊》将传感器网络列为 21 世纪最具影响的 21 项技术之一和改变世界的十大技术之一。

进入 21 世纪,尤其是“9·11 事件”之后,无线传感器网络的发展开始引起全世界范围的广泛关注,这个阶段的传感器网络技术特点是网络传输自组织、节点设计低功耗。2001—2005 年期间,美军执行了“灵巧传感器网络通信计划”,其设计思想是:在战场上布设大量的无线传感器节点以收集和传输信息,并对原始数据进行筛选,再将关键的信息传送至各个信息融合中心,从而将大量的信息集成为一幅战场信息图,使参战人员能够实

时了解战场态势。2002年,英特尔公司开始涉足无线传感器网络技术研究领域,制定了“基于微型传感器网络的新型计算的发展规划”,致力于微型传感器网络在医学、环境监测等领域的应用。2003年,美国国家自然科学基金委员会制定设立无线传感器网络专项研究计划,并在加州大学洛杉矶分校设立“无线传感器网络研发中心”,与康奈尔大学伯克利分校、南加州大学等联合开展了“嵌入式智能传感器”的研究项目。由于无线传感器网络在国际上被认为是继互联网之后的第二大网络,2003年美国《技术评论》杂志评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。目前,欧盟国家以及加拿大、澳大利亚、日本等国家已加入无线传感器网络的研究,这表明无线传感器网络已成为信息学科领域的热点课题。无线传感器网络除了应用于军事领域、反恐活动以外,在航空、防爆、救灾、环境、医疗、保健、家居、工业、商业等领域也应用广泛。

我国的无线传感器网络及其应用研究几乎与发达国家同步启动,1999年首次正式出现于中国科学院《知识创新工程试点领域方向研究专题报告》之一的《信息与自动化领域研究报告》中,是该领域提出的五个重大项目之一。随着知识创新工程试点工作的深入,2001年中科院依托上海微系统所成立微系统研究与发展中心,引领院内的相关工作,并通过该中心在无线传感器网络的方向上陆续部署了若干重大研究项目和方向性项目,参加项目研究的单位包括上海微系统所、声学所、微电子所、半导体所、电子所、软件所等十余个研究所,初步建立无线传感器网络系统研究平台,在无线智能传感器网络通信技术、微型传感器、传感器节点、簇点和应用系统等方面取得很大的进展。相关成果于2004年进行了大规模外场演示,部分成果已在实际工程系统中得到应用。

2006年我国发布的《国家中长期科学与技术发展规划纲要》为信息技术确定了三个前沿方向,其中两个就与无线传感器网络的研究直接相关,即智能感知技术和自组网技术。当然,无线传感器网络的发展符合计算设备的演化规律。国内的许多高校也掀起了无线传感器网络的研究热潮,如清华大学、中国科技大学、浙江大学、华中科技大学、天津大学、南开大学、北京邮电大学、东北大学、西北工业大学、西南交通大学、沈阳理工大学和哈尔滨理工大学等单位纷纷开展了有关无线传感器网络方面的基础研究工作;一些企业如中国移动公司、中国联通公司、中兴通讯公司、华为技术有限公司等也加入无线传感器网络研究的行列,并已在许多领域开展了示范和实际应用。

### 1.1.2 无线传感器网络的含义与作用

无线传感器网络综合了无线传感器技术、嵌入式计算技术、现代网络及无线通信技术、分布式信息处理技术等,能够通过各类集成化的微型传感器协作地实时监测、感知和采集各种环境或监测对象的信息,然后通过嵌入式系统对信息进行处理,最后通过随机自组织无线通信网络以多跳中继方式将所感知信息传送到用户终端,从而真正实现“无处不在的计算”理念。

无线传感器网络是由大量部署在监测区域内的、具有无线通信与计算能力的微小、廉价传感器节点,通过自组织方式构成的,能根据环境自主完成指定任务的分布式智能化网络系统。无线传感器网络节点间距离很短,一般采用多跳(Multi-hop)的无线通信方式进行通信。

无线传感器网络可以在独立的环境下运行,也可以通过网关连接到互联网,使用户可以远程访问。无线传感器网络的作用是协作地感知、采集和处理网络覆盖区域中被感知对象的信息并发送给监测者。无线传感器、感知对象和监测者构成了无线传感器网络的三个要素。无线传感器能够获取监控不同位置的物理或环境状况(比如温度、声音、振动、压力、运动或污染物);感知对象是指在监测区域内的需要感知的具体信息载体;监测者不仅包括观测者,还包括监测信息处理中心的软硬件等系统。

无线传感器网络的作用主要包括三个方面:信息感应、信息通信和信息计算(包括硬件、软件、算法)。信息感应是通过传感器将感知对象的非电量信息转化为可以无线发送的电量信息;信息通信是通过无线通信协议将感应的信息发送至目的地;信息计算是依据系统的硬件、软件和算法对传送来的信息进行数据处理、整理和应用。

## 1.2 物联网与 WSN 的关系

近几年出现了与无线传感器网络密切相关的新概念——物联网(Internet of Things, IoT),它已成为各国构建经济社会发展新模式和重塑国家综合竞争力的新兴信息产业。

### 1.2.1 物联网的产生与发展

物联网的实践最早可以追溯到 1990 年施乐公司研制的网络可乐贩售机(Networked Coke Machine)。1991 年美国麻省理工学院(MIT)的 Kevin Ashton 教授首次提出物联网的概念,1995 年比尔·盖茨在《未来之路》一书中也曾提及物联网,但未引起广泛重视。1999 年美国麻省理工学院建立了“自动识别中心(Auto-ID)”,提出“万物皆可通过网络互联”,阐明了物联网的基本含义。早期的物联网是依托射频识别(RFID)技术的物流网络,随着技术和应用的发展,物联网的内涵已经发生了较大变化。

2004 年,日本总务省(MIC)提出“u-Japan”战略,该战略的理念是以人为本,实现人与人、物与物、人与物之间的连接,希望将日本建设成一个“随时、随地、任何物体、任何人均可连接的泛在网络社会”。

2005 年,在突尼斯举行的信息社会世界峰会(WSIS)上,国际电信联盟(ITU)发布《ITU 互联网报告 2005:物联网》,引用了“物联网”的概念。物联网的定义和范围已经发生了变化,覆盖范围有了较大的拓展,不再局限于 RFID 技术。

2006 年,韩国确立了“u-Korea”计划,该计划旨在建立无所不在的社会(Ubiquitous Society),在民众的生活环境里建设智能型网络(如 IPv6、BcN、USN)和各种新型应用(如 DMB、Telematics、RFID),让民众可以随时随地享有科技智慧服务。2009 年,韩国通信委员会出台了《物联网基础设施构建基本规划》,将物联网市场确定为新增长动力,提出到 2012 年实现“通过构建世界最先进的物联网基础实施,打造未来广播通信融合领域超一流信息通信技术强国”的目标。

2008 年,为了促进科技发展,寻找经济新的增长点,各国政府开始重视下一代的技术

规划,将目光放在了物联网上。在中国,同年11月在北京大学举行的第二届中国移动政务研讨会“知识社会与创新2.0”上提出了移动技术、物联网技术的发展代表着新一代信息技术的形成,并带动了经济社会形态、创新形态的变革,推动了面向知识社会的以用户体验为核心的下一代创新(创新2.0)形态的形成,创新与发展更加关注用户、注重以人为本。而“创新2.0”形态的形成又进一步推动了新一代信息技术的健康发展。

2009年,欧盟委员会发布了《欧盟物联网行动计划》,描绘了物联网技术的应用前景,提出欧盟政府要加强对物联网的管理,促进物联网的发展。

2009年,奥巴马就任美国总统后,与美国工商业领袖举行了一次“圆桌会议”。作为仅有的两名代表之一,IBM首席执行官彭明盛首次提出“智慧地球”这一概念,建议新政府投资新一代的智慧型基础设施。当年,美国将新能源和物联网列为振兴经济的两大重点。

2009年,IBM大中华区首席执行官钱大群在IBM论坛上公布了名为“智慧地球”的最新策略。此概念一经提出,即得到美国各界的高度关注,甚至有分析认为IBM公司的这一构想极有可能上升至美国的国家战略,并在世界范围内引起轰动。“智慧地球”战略被不少美国人认为与当年的“信息高速公路”有许多相似之处,同样被他们认为是振兴经济、确立竞争优势的关键战略。该战略能否掀起如当年互联网革命一样的科技和经济浪潮,不仅为美国关注,更为其他国家所关注。

2009年8月,温家宝总理“感知中国”的讲话把我国物联网领域的研究和应用开发推向了高潮。无锡市率先建立了“感知中国”研究中心,中国科学院、部分运营商、多所大学在无锡建立了物联网研究院,无锡市江南大学还建立了全国首家实体物联网工程学院。自温总理提出“感知中国”以来,物联网被正式列为国家五大新兴战略性新兴产业之一,并写入“政府工作报告”,物联网在中国受到了极大的关注,其受关注程度是美国、欧盟以及其他各国无可比拟的。物联网的概念已经是一个“中国制造”的概念,它的覆盖范围与时俱进,已经超越了1999年Ashton教授和2005年ITU报告所指的范围,物联网已被贴上“中国式”标签。

我国对新一代信息技术十分重视,已形成支持新一代信息技术的一些新政策措施,从而推动我国经济的发展。物联网作为一个新经济增长点的战略新兴产业,具有良好的市场效益。《2014—2018年中国物联网行业应用领域市场需求与投资预测分析报告》数据表明,2010年物联网在安防、交通、电力和物流领域的市场规模分别为600亿元、300亿元、280亿元和150亿元,2011年中国物联网产业市场规模达到2600多亿元。

### 1.2.2 物联网的含义

物联网概念最早于1999年由美国麻省理工学院提出,国际电信联盟(ITU)发布的《ITU互联网报告2005:物联网》对物联网做了如下定义:物联网即通过射频识别(RFID或RFID+互联网)、红外感应器、全球定位系统、激光扫描器、智能感应器等信息传感设备,按约定的协议,把任何物品与互联网连接起来,进行信息交换和通信,以实现智能化识别、定位、跟踪、监控和管理的一种网络。随着科技的不断发展,物联网的内涵不断扩展,现代意义的物联网可以实现对物的感知识别控制、网络化互联和智能信息处理的有机统一,从而形成高智能决策。

根据国际电信联盟(ITU)的定义,物联网主要解决物品与物品(Thing to Thing, T2T)、人与物品(Human to Thing, H2T)、人与人(Human to Human, H2H)之间的互联。但是,与传统互联网不同的是, H2T 是指人利用通用装置与物品之间的连接,从而使得物品连接更加简化;而 H2H 是指人与人之间不依赖于 PC 而进行的互联。因为互联网并没有考虑到对于任何物品连接的问题,故我们使用物联网来解决这个传统意义上的问题。物联网,顾名思义就是连接物品的网络,许多学者在讨论物联网时,经常会引入一个 M2M 的概念,它可以解释为人到人(Man to Man)、人到机器(Man to Machine)、机器到机器(Machine to Machine)。从本质上而言,人与机器、机器与机器的交互,大部分是为了实现人与人之间的信息交互。

2011 年,我国工信部发表的《物联网白皮书》中将物联网定义为:物联网是通信网和互联网的拓展应用及网络延伸,它利用感知技术与智能装置对物理世界进行感知识别,通过网络传输互联,进行计算、处理和知识挖掘,实现人与物、物与物的信息交互和无缝连接,达到对物理世界实时控制、精确管理和科学决策的目的。

从其定义可知,物联网涵盖了当今所有的信息技术,它与计算机、互联网技术相结合,实现物体与物体之间的环境、状态信息实时地共享,以及智能化地收集、传递、处理、执行。广义上说,当下涉及信息技术的应用都可以纳入物联网的范畴。而在其著名的科技融合体模型中,提出了物联网是当下最接近该模型顶端的科技概念和应用。物联网是一个基于互联网、传统电信网等信息承载体,让所有能够被独立寻址的普通物理对象实现互联互通的网络,它具有智能、先进、互联三个重要特征。

1.2.3 物联网体系结构

物联网网络架构由感知层、网络层和应用层组成,如图 1-1 所示。感知层实现对物理

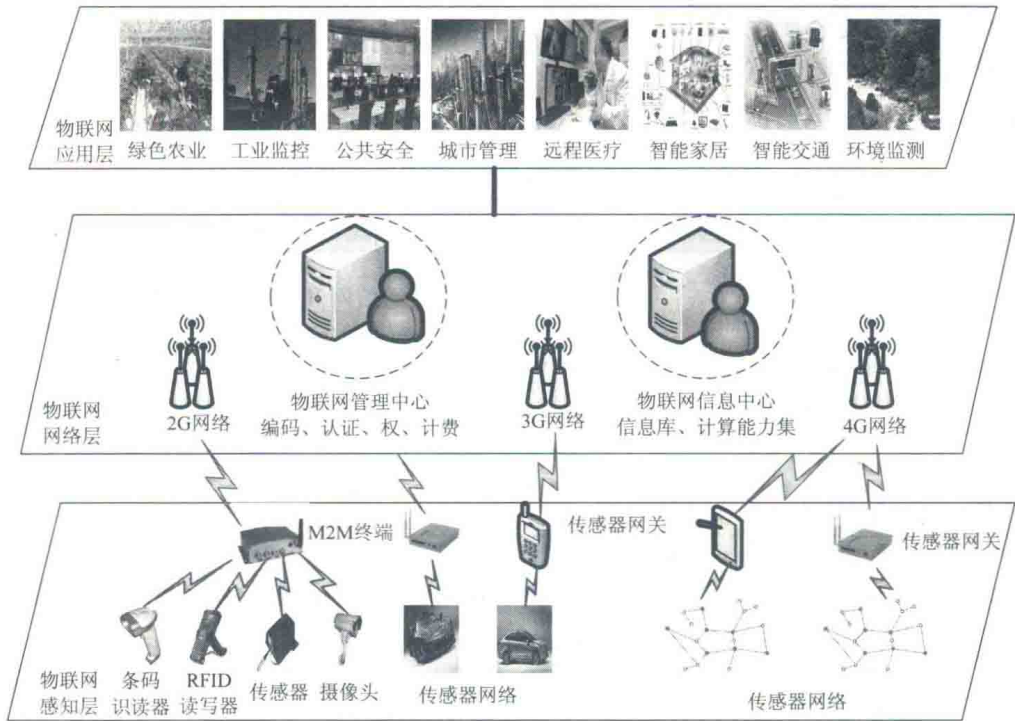


图 1-1 物联网网络架构

世界的智能感知识别、信息采集处理和自动控制，并通过通信模块将物理实体连接到网络层和应用层。网络层主要实现信息传递、路由和控制，包括延伸网、接入网和核心网，网络层可依托公众电信网和互联网，也可以依托行业专用通信网络。应用层包括应用基础设施/中间件和各种物联网应用。应用基础设施/中间件为物联网应用提供信息处理、计算等通用基础服务设施、能力及资源调用接口，以此为基础实现物联网在众多领域的各种应用。

物联网涉及感知、测控、网络通信、微电子、计算机、软件、嵌入式系统、微机电系统等许多技术领域，因此物联网体系的关键技术可划分为感知关键技术、网络通信关键技术、应用关键技术、共性技术和支撑技术。

1.2.4 WSN 与物联网的关系

目前，有人把无线传感器网络和物联网的概念混为一谈，认为无线传感器网络就是物联网，也有人认为二者有一点区别，那么，应如何理解二者的关系呢？

从 1.2.2 节可知，物联网是通信网和互联网的拓展应用及网络延伸，它利用感知技术与智能装置对物理世界进行感知识别，通过网络传输互联，进行计算、处理和知识挖掘，实现人与物、物与物的信息交互和无缝连接。简而言之，物联网就是“物物相连的互联网”。

而无线传感器网络所使用的硬件首先是传感器，用于感知震动、温度、压力、声音等，然后结合无线通信技术与通信或组网模块构成独立网络。相对而言，无线传感器网络的概念和涵盖的范围要小一些，仅限于小范围的物与物之间的信息传递。

WSN 不可能做得太大，只能在局部的地方使用，例如战场、地震监测、建筑工程、保安、智能家居等。但是，物联网就大得多，它可以把世界上任何物品通过电子标签和网络联系起来，是一种“无处不在”的概念，与当前蓬勃发展的电子商务、网络交易有关，将贡献于全球经济并造福于全人类。

无线传感器网络与物联网的对比如表 1-1 所示，表中所说的基础网络是指已经铺设的、广泛应用的移动网、电信网和互联网等。

表 1-1 无线传感器网络与物联网的对比

|      | 无线传感器网络                       | 物 联 网                                         |
|------|-------------------------------|-----------------------------------------------|
| 定义   | 大量的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 | 物联网是通信网和互联网的拓展应用及网络延伸，它利用感知技术与智能装置对物理世界进行感知识别 |
| 感知终端 | 传感器节点                         | 传感器、RFID、条形码、GPS 等任何信息采集模块                    |
| 基础网络 | 无                             | 互联网、电信网、移动网、传感网等                              |
| 感知对象 | 物对物                           | 物对物、物对人                                       |

由表 1-1 可知，物联网的概念内涵比无线传感器网络的要大一些，无线传感器网络是构成物联网感知层和网络层的内容之一，是物联网的重要组成部分。

虽然目前无线传感器网络组网仍以非 IP 技术为主，还没形成通用网，但将 IP 技术特别是 IPv6 技术延伸应用到感知层已经成为重要的趋势，它将逐步发展成标准化的通信模式，彻底与物联网融为一体。