



田景文 高美娟 ● 编著

物联网 设计与应用

(基于IPv6)

- 介绍物联网领域技术前沿
- 提出异构网络互联的体系结构
- 讨论基于IPv6的适配层问题
- 探讨物联网中的RPL路由技术

清华大学出版社



.. 013034132

TP393.4
505

物联网设计与应用（基于 IPv6）

田景文 高美娟 编著



清华大学出版社
北 京



北航

C1641370

TP393.4
505

内 容 简 介

本书介绍了当前物联网领域新的技术进展——物联网智能IP互联技术,针对当前物联网中各种异构网络互存带来的困难和协议转换成本高昂的问题,提出了基于IPv6标准实现物联网中各种异构网络互联的体系结构,讨论了物联网智能互联的节点基本结构、操作系统以及网络的通信机制、媒介访问、传输协议,介绍了基于IPv6的uIP、低功耗无线个域网上IPv6(6LoWPAN)的适配层问题,探讨了物联网智能互联网络中的RPL路由技术、网络服务技术。

本书可作为与物联网相关专业的本科生、研究生的教材,同时也可作为从事物联网研究与设计的技术人员的参考用书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

物联网设计与应用(基于IPv6)/田景文,高美娟编著. —北京:清华大学出版社,2013.5

ISBN 978-7-302-31197-3

I. ①物… II. ①田… ②高… III. ①互联网络-应用-高等学校-教材 ②智能技术-应用-高等学校-教材 IV. ①TP393.4 ②TP18

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第002542号

责任编辑:钟志芳

封面设计:刘超

版式设计:文森时代

责任校对:张莹莹

责任印制:何芊

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:15.5

字 数:366千字

版 次:2013年5月第1版

印 次:2013年5月第1次印刷

印 数:1~4000

定 价:32.00元

产品编号:050588-01

前 言

2010 年教育部办公厅 13 号文件“教育部办公厅关于战略性新兴产业相关专业申报和审批工作的通知”明确地把“传感网、物联网技术”作为战略性新兴产业相关专业提出。中国已经把物联网的发展提高到了国家战略高度，将其列入了《国家中长期科学与技术发展规划纲要（2006—2020）》。2010 年国家批准了部分高校设立首批物联网工程和传感网技术专业，2011 年，教育部重新规划整合专业，把物联网工程和传感网技术整合成一个专业即物联网工程专业。国家批准设立物联网工程专业的学校已有几十所。

物联网工程涉及的主要学科领域包括电子科学与技术、计算机科学与技术、信息与通信工程，近几年随着这些学科的新理论与新技术快速发展以及人类对网络信息的不断需求，使物联网工程成为一个应该单独设立学科和专业的知识和技术领域。

关于物联网、传感网，国内和国外已经有一些著作发表，这些著作从不同的方面和不同的角度介绍了传感网和物联网的相关理论的技术以及部分的应用实例。有关物联网的理论和技术的也一直在热烈地讨论和探索交流中。本书在介绍物联网的一些理论和技术的基础上，提出了一种基于 IPv6 的物联网智能互联的技术，希望在物联网工程的发展和完善中，能够提供一个探索和交流的角度，或为物联网领域相关的学者和工程技术人员提供参考和借鉴。

在此感谢田纳西大学的谈金东教授、北京航空航天大学的魏洪兴博士，他们对本书的成稿提供了很多帮助。感谢研究室的硕士研究生何勇刚、张振彬、孔垂超在文字编辑校对方面所做的大量工作。

本书的出版受到“北京市信息服务工程重点实验室”的资助，在此表示感谢！

编 者

目 录

第 1 章 智能体概述.....	1
1.1 智能体的由来.....	2
1.1.1 嵌入式系统.....	3
1.1.2 无处不在的计算和普适计算.....	4
1.1.3 移动电话技术.....	6
1.1.4 遥测和机对机通信.....	6
1.1.5 无线传感器和无处不在的传感器网络.....	7
1.1.6 移动计算.....	8
1.1.7 计算机网络.....	9
1.2 智能体的难题.....	10
1.2.1 节点级挑战.....	10
1.2.2 网络级难题.....	11
1.2.3 标准化.....	13
1.2.4 互操作性.....	14
1.3 结论.....	14
第 2 章 智能体硬件.....	16
2.1 感知子系统.....	17
2.2 处理子系统.....	19
2.2.1 架构综述.....	20
2.2.2 微控制器.....	22
2.2.3 数字信号处理器.....	23
2.2.4 专用集成电路.....	23
2.2.5 FPGA.....	24
2.2.6 ASIC 与 DSP 及 FPGA 的比较.....	24
2.3 通信接口.....	25
2.3.1 串行通信接口.....	26
2.3.2 I ² C 总线.....	27
2.3.3 小结.....	29
2.4 模型.....	30
2.4.1 IMote 节点架构.....	30
2.4.2 XYZ 节点架构.....	31
2.4.3 Hogthrob 节点架构.....	32

第 3 章 操作系统	33
3.1 功能性方面	33
3.1.1 数据类型	33
3.1.2 调度	34
3.1.3 栈	34
3.1.4 系统调用	35
3.1.5 中断处理	35
3.1.6 多线程	35
3.1.7 基于线程与基于事件的编程	36
3.1.8 内存分配	36
3.2 非功能方面的问题	36
3.2.1 关注点分离	36
3.2.2 系统开销	37
3.2.3 可移植性	37
3.2.4 动态编程	37
3.3 原型	38
3.3.1 TinyOS（微操作系统）	38
3.3.2 SOS	40
3.3.3 Contiki	42
3.3.4 LiteOS	45
3.4 评价	48
第 4 章 智能体的通信机制	50
4.1 智能体通信类型	50
4.1.1 一对一通信	50
4.1.2 一对多通信	51
4.1.3 多对一通信	52
4.2 物理通信规则	53
4.3 IEEE 802.15.4	53
4.3.1 802.15.4 地址	54
4.3.2 802.15.4 物理层	55
4.3.3 802.15.4 的 MAC 层	56
4.3.4 802.15.4 帧格式	57
4.3.5 能耗	58
4.4 IEEE 802.11 和 WiFi	59
4.4.1 网络拓扑和形式	59
4.4.2 物理层	60
4.4.3 802.11 的 MAC 层	61

4.4.4	低功耗 WiFi.....	62
4.5	PLC.....	63
4.5.1	物理层.....	64
4.5.2	PLC 的 MAC 层	64
4.5.3	功耗.....	64
4.6	结论.....	65
第 5 章	物理层.....	66
5.1	基础部件.....	66
5.2	信源编码.....	67
5.2.1	信源编码效率.....	68
5.2.2	脉码调制和增量调制.....	70
5.3	信道编码.....	71
5.3.1	信道类型.....	72
5.3.2	信道中的信息传输.....	73
5.3.3	错误识别与纠正.....	75
5.4	调制.....	75
5.4.1	调制类型.....	75
5.4.2	二次调幅.....	81
5.4.3	总结.....	82
5.5	信号传播.....	83
第 6 章	媒介访问控制	85
6.1	概述.....	85
6.1.1	无竞争的媒介访问.....	86
6.1.2	基于竞争的媒介访问.....	87
6.2	无线 MAC 协议	88
6.2.1	载波侦听多路访问.....	88
6.2.2	带有冲突避免机制的多路访问 (MACA) 与 MACAW.....	89
6.2.3	邀请方式的 MACA.....	89
6.2.4	IEEE 802.11	90
6.2.5	IEEE 802.15.4 和 ZigBee.....	91
6.3	传感器网络 MAC 协议的特点.....	92
6.3.1	能源效率.....	92
6.3.2	可扩展性.....	93
6.3.3	适应性.....	93
6.3.4	低延迟和可预测性.....	93
6.3.5	可靠性.....	94
6.4	无竞争的 MAC 协议.....	94

6.4.1	特性.....	94
6.4.2	通信自适应媒介访问控制.....	95
6.4.3	Y-MAC	96
6.4.4	DESYNC-TDMA.....	97
6.4.5	低功耗自适应分簇层.....	99
6.4.6	轻量级媒介访问控制（LMAC）.....	100
6.5	基于竞争的 MAC 协议.....	101
6.5.1	能量感知多接入信令.....	102
6.5.2	传感器 MAC 协议.....	103
6.5.3	超时 MAC 协议.....	104
6.5.4	模型 MAC 协议.....	105
6.5.5	增强路由的 MAC 协议.....	106
6.5.6	数据汇聚 MAC.....	108
6.5.7	前文采样和 WiseMAC 协议.....	109
6.5.8	接收端启动 MAC.....	110
6.6	混合 MAC 协议	111
6.6.1	Zebra MAC	111
6.6.2	移动自适应混合 MAC.....	112
6.7	总结.....	113
第 7 章	传输协议	114
7.1	UDP.....	114
7.1.1	尽最大努力的数据报传送.....	115
7.1.2	UDP 头标.....	115
7.2	TCP	116
7.2.1	可靠的流传输.....	116
7.2.2	TCP 头标.....	118
7.2.3	TCP 选项.....	119
7.2.4	往返时间估计	120
7.2.5	流控制.....	120
7.2.6	拥塞控制.....	121
7.2.7	TCP 状态.....	121
7.3	UDP 的智能体.....	123
7.4	智能体的 TCP	124
7.5	结论.....	125
第 8 章	UIP 和 IPV6.....	126
8.1	UIP.....	126
8.1.1	处理机制.....	127

8.1.2	uIP 内存缓冲区管理	132
8.1.3	uIP 应用编程接口	133
8.1.4	uIP 协议实现	135
8.1.5	内存占用	136
8.1.6	小结	137
8.2	智能体网络的 IPv6	137
8.2.1	IPv6 的功能	137
8.2.2	IPv6 数据头标	138
8.2.3	IPv6 编址体系结构	143
8.2.4	IPv6 的 ICMP	148
8.2.5	邻居发现协议	150
8.2.6	负载平衡	155
8.2.7	IPv6 的自动配置	155
8.2.8	DHCPv6	159
8.2.9	IPv6 QoS	160
8.2.10	IPv4 的骨干网络上的 IPv6	161
8.2.11	IPv6 多播	162
8.2.12	总结	164
第 9 章	低功耗无线个域网上 IPv6 (6LoWPAN) 的适配层	165
9.1	术语	165
9.2	6LoWPAN 适配层	166
9.2.1	网状网地址头标	168
9.2.2	分组	169
9.2.3	6LoWPAN 头标压缩	170
9.2.4	无状态配置	179
9.3	结论	180
第 10 章	智能体网络中的 RPL 路由	181
10.1	简介	181
10.2	什么是低功耗有损网络	181
10.3	路由需求	182
10.4	智能体网络中的路由指标	184
10.4.1	汇总路由度量 VS 记录路由度量	185
10.4.2	局部度量 VS 全局度量	185
10.4.3	路由指标/约束的公共头标	185
10.4.4	节点状态和属性对象	185
10.4.5	节点能量对象	185
10.4.6	跳数对象	186

10.4.7	吞吐量对象.....	186
10.4.8	延时对象.....	186
10.4.9	链路稳定性对象.....	186
10.4.10	链接颜色属性.....	187
10.5	目标函数.....	187
10.6	RPL: 针对智能体网络的新型路由协议.....	189
10.6.1	协议概述.....	189
10.6.2	多 DODAG 和 RPL 实例概念的应用.....	191
10.6.3	RPL 消息.....	192
10.6.4	RPL DODAG 创建过程.....	195
10.6.5	节点在 DODAG 内部或 DODAG 之间的移动.....	198
10.6.6	使用 DAO 消息沿着 DODAG 填充路由表.....	199
10.6.7	RPL 中的循环回避和循环探测机制.....	201
10.6.8	全局和局部修复.....	203
10.6.9	路由与 RPL 的邻接.....	207
10.6.10	RPL 定时器管理.....	207
10.6.11	仿真结果.....	208
10.7	结论.....	213
第 11 章	智能体的网络服务.....	214
11.1	网络服务概念.....	215
11.1.1	通用数据格式.....	216
11.1.2	表述性状态转移.....	217
11.2	智能体网络服务的性能.....	220
11.2.1	执行的复杂性.....	220
11.2.2	性能.....	222
11.3	Pachube: 智能体的网络服务系统.....	223
11.3.1	交互模型.....	225
11.3.2	Pachube 数据格式.....	225
11.3.3	HTTP 请求.....	226
11.3.4	HTTP 返回代码.....	227
11.3.5	验证和安全性.....	227
11.3.6	触发器.....	228
11.4	结论.....	229
参考文献		230

第 1 章 智能体概述

本书是关于智能体、智能体网络 and 如何应用互联网协议 (IP) 将智能体网络互联在一起的书籍。本章将给出智能体的定义，简单概述智能体技术的发展史，并且讨论目前智能体所面临的困难和挑战。

智能体 (Smart Object) 有很多别名，但本书将使用“智能体”这一术语以代替在技术和应用中所使用的物联网、对象网络、事件网络和合作对象。尽管这些名称在定义和涵义上有细微的差异，但是它们却代表着相同的基本技术类型。

对智能体的定义是一个纯粹的技术定义：一个智能体应具备有传感器或执行器以及一个很小的微处理器、通信设备、电源。智能体通过传感器或执行器与物理世界进行交互。在一定的速度和一定的复杂度下，微处理器能够处理由传感器获得的数据。通信设备能够完成智能体与外界的数据交换，并收到来自其他智能体的信息。在这个过程中，电源会向智能体供电。

对于智能体而言，大小是至关重要的。它们明显要比笔记本电脑和手机小得多，对于嵌入到日常用品中的智能体，其物理尺寸更不能超过几立方厘米。

我们已经知道，智能体可通过有限的计算形式完成与外部世界和其他智能体的通信。以上是对智能体技术的描述，但智能体实际上是做什么的呢？

回答这个问题并不容易。首先，一个智能体的行为很大程度上取决于它所处的位置以及使用方式。安装在货轮集装箱内用于监测温度与用于监测停车位的智能体所表现的行为是不同的。其次，更重要的是，虽然我们能够根据目前智能体的使用方式，来准确地预测未来智能体的应用，但是我们无法全面预测将来人们如何使用智能体。这一点很重要，所以它为智能体系统的设计者们提出了要求——他们所设计的智能体系统必须面向将来的协议和体系结构。

尽管不知道一个智能体所具有的确切的行为，但是任何一个智能体都具有两种相同的行为属性：与物理世界的交互功能和通信能力。

智能体通过其本身的传感器从物理世界获取信息，并通过自身的执行器作用于物理世界来实现与物理世界的交互。智能体使用传感器来检测一些物理参数，这些物理参数包括一些简单、易于测量的诸如光、温度和空气湿度等参数，还包括一些复杂的诸如空气污染、汽车运行状态、一台工业机器即将出现故障的时刻等特性参数。智能体通过使用不同形式的执行器作用于物理世界，这或许会像接通一个小的发光二极管那样简单，也可能会像在建筑物的特定部分进行热交换那样复杂。

智能交互。单个的智能体是非常有用的，例如当门打开时，门口的灯会自动打开，智能体的实际性能来源于它们之间的通信能力。打开门灯的智能体能够与控制门被打开的智能体进行信息交换。还有一些智能体可能会打开房间中其他的灯或加热器等。同样，在工业工厂中用于检测机械振动的智能体会将它们检测到的振动读数彼此交互，并且发送给工

厂操作员。交互通信对于智能体来说是必不可少的行为，因此在整本书中我们会不断地使用智能体网络这一术语。

1.1 智能体的由来

智能体来自许多不同的技术领域和科学领域，并且每个领域都有各自的技术特征。

要了解智能体的起源，必须回顾智能体概念的发展过程以及与之相关的技术发展的过程。概念和技术已经共存了很长一段时间，并在各自领域的发展中交织在一起，但是它们基本上是相互独立地发展和完善。

计算机技术和电话通信两个完全不同领域的发展促进了智能体的发展，同时计算机技术和电话通信在智能体的构建上都发挥了举足轻重的作用，但是这两种技术有不同的文化和技术历史。

计算机技术的根源可追溯到第二次世界大战后期的学术基础，在第二次世界大战期间被美国军方雇用的计算机科学家（如冯·诺依曼）在美国军方的资助以及美国的学术环境下继续他们的工作。正是在这种环境下出现了第一代计算机、最初的操作系统和随后的互联网。这种文化通常以智能工程、可进化系统的发展和充分利用现有工具的期望为特征表现出来。通常，在这种环境下开发出来的系统不会有全球性的分布。因为这些系统的建立和发展都是以具体的工程应用为原则，但是它们具有极其重要的意义。如 UNIX 系列，其后继版本支持大多数目前的互联网，而事实上是全球的互联网。

电话通信的起源比计算机技术还要早，并且经历了略微不同的发展路径。电话通信的第一项专利是由亚历山大·格雷姆·贝尔于 1876 年提出的（虽然其他人在贝尔之前已经设计出了电话）。在开始阶段，电话只提供给少数人使用，在家里安装一部电话需要比较大的基础设施投资，不仅是房子内所需的电线，而且还要从中央交换机台单独拉线到房间。此外，为了使电缆连接跨越更大的距离，使用长距离的拉线将交换板连接起来，甚至每个交换板由不同的公司运营。总而言之，在系统能够运行之前，大量的投资是必需的，并且一旦系统安装完成，系统的正常运行将是最重要的。如果没有严格的规范说明，连接各个分散的操作以及装置是极其困难的，甚至是不可能的。

智能体是计算机和电话交叉融合的产物，兼备两方面的特征，智能体继承了计算机工程可演进的理念。这一点很重要，即使我们当前对智能体的发展前景有一个比较清晰的认识，但是完全预测未来智能体系统的行为是不可能的；智能体从电话通信继承下来的是应用连接分布式系统，由不同公司和组织机构管理的原则。智能体不是由单一的组织机构而是由众多不同的人群和团体生产的。智能体技术都必须是可演进的和可标准化的。

在本章最后，我们将讨论一些领域，而这些领域最终产生了智能体。智能体是嵌入式系统(Embedded systems)、普适计算(Ubiquitous computing)、移动技术(Mobile telephony)、遥测技术(Telemetry)、无线传感器网络(Wireless sensor networks)、移动计算(Mobile telephony)和计算机网络(Computer networking)的交叉点，如图 1.1 所示。其中的一些领域继承了计算机技术和电话通信技术的特征。这些技术一部分来自于学术研究团体，另外

的部分来自于以工业应用的背景。

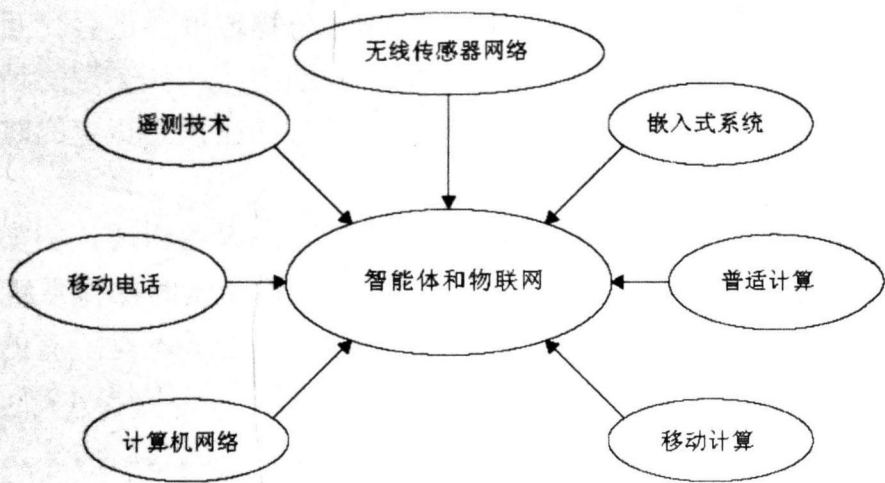


图 1.1 智能体概念图

然而，它们都可以通过无线通信的方式来处理现实物理对象与外部世界的通信，也可以进行虚拟世界与现实世界之间的交互。

1.1.1 嵌入式系统

嵌入式系统是植入到其他物体中的特殊计算机。依据这一定义，除了 PC 机、笔记本电脑和被确定为计算机的一些设备以外，凡具有微处理器的系统都可以认为具有嵌入式系统。如图 1.2 所示为不同类型的嵌入式系统。

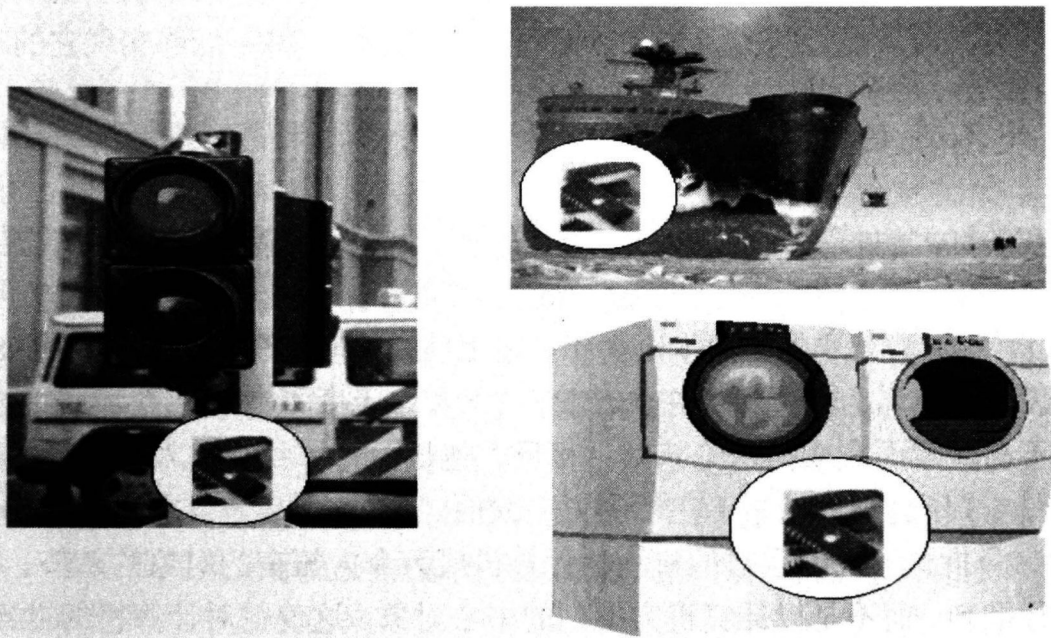


图 1.2 各种嵌入式系统

传统上认为，早在 20 世纪 90 年代后期，实时控制系统就已经被认为是嵌入式系统。实时控制系统是基于计算机的系统，用于控制喷嘴的压力、船舶的舵或散热器温度等物理过程。

在控制系统中，一台典型的嵌入式计算机用来控制发送给执行器的信号，执行器根据

发送过来的信号来控制其对应的对象。对于控制系统的运行，嵌入式计算机发出控制信号来实时精确地控制执行器是至关重要的。由于控制器与物理世界进行交互，所以精确计时是必需的。没有精确定向的船舵，将无法可靠地引导船舶。这种类型的精确时序要求体现在实时的概念上。一个实时系统是对外部的输入或定时器在预先指定的时间内不断地做出响应的系统。这些设备的软件需要严格设计。

嵌入式系统由微处理器系统和与物理世界进行交互的设备组成，例如交通灯、船的方向舵控制器、洗衣机控制器。提供严格时序的操作系统称为实时操作系统（RTOS）。

虽然传统的嵌入式系统的定义以其实施方面为重点，但并不是所有的嵌入式系统都有实时方面的要求。随着微控制器广泛地应用在电视机遥控器、无线车钥匙和玩具等日常用品中，一种新的嵌入式系统便诞生了。上述那些系统并没有像传统的嵌入式控制系统那样有严格的实时要求，但是都采用相同的硬件类型构建。许多嵌入式系统中采用类似实时系统的 RIOS，因为这是一种广泛使用的硬件类的软件技术。

嵌入式实时系统与智能体有许多相似的属性，嵌入式系统中所使用的硬件大体上与智能体所使用的硬件类似或者相同。嵌入式系统通常也存在如计算能力和内存方面的限制。用于嵌入式系统中相同类型的微控制器通常应用于智能体。因此，许多嵌入式系统所使用的软件都可用于智能体，反之亦然。

一个传统的嵌入式系统和智能体的主要区别在于通信通常不是嵌入式系统的核心功能，但却是智能体的重要特性。尽管通信嵌入式系统的例子有很多，例如配备嵌入式微处理器的汽车引擎在服务时间内可以发送它们的状态信息到与汽车引擎相连接的计算机上，但是通信能力却不是这些系统的特性。一个没有通信功能的汽车发动机仍然可以启动。与此相反，一个失去通信能力的智能体（如无线温度传感器）将不能够实现它的功能。

1.1.2 无处不在的计算和普适计算

无处不在的计算也被称为普适计算，一种是当计算机远离桌面并将其放置在如图 1.3 所示的周围环境中时会发生什么的一种概念的研究领域。无处不在的计算作为一个研究学科起源于 20 世纪 80 年代中期，此术语由麻省理工学院的教授马克·韦泽于 1988 年提出。后来韦泽发表了两篇名为“无所不在的计算 #1”和“无所不在的计算 #2”的短文，奠定了未来计算不会在桌面完成的理论基础。相反，他认为计算将会进入到我们的日常生活环境中。就像图 1.3 所体现的植根于生活的方方面面。

马克·韦泽批评了凭借自己的权利让计算机成为令人振奋的对象的趋势。他采取了不同的角度进行批判，而不是以计算机为批判的中心对象，这使得对计算机的批判并不明显。韦泽进一步认为，随着普适计算技术的成功，桌面计算将不复存在。

技术成功成为无形的一个例子就是电机，在 20 世纪初，总部位于美国的西尔斯公司以邮购的方式卖出了一部“家用电机”。这种家用电机是根据人们家中的中央位置而设计的。家用电机的功能是运行各种类型的外部设备。连同电机，客户可以购买连接器，这会使电机能够运行缝纫机、绞肉机和吹风机。

如今电机已成为无形的成功技术，各种类型的设备和机器都在使用电机（如牙刷、吹

风机、车窗和自动锁)。

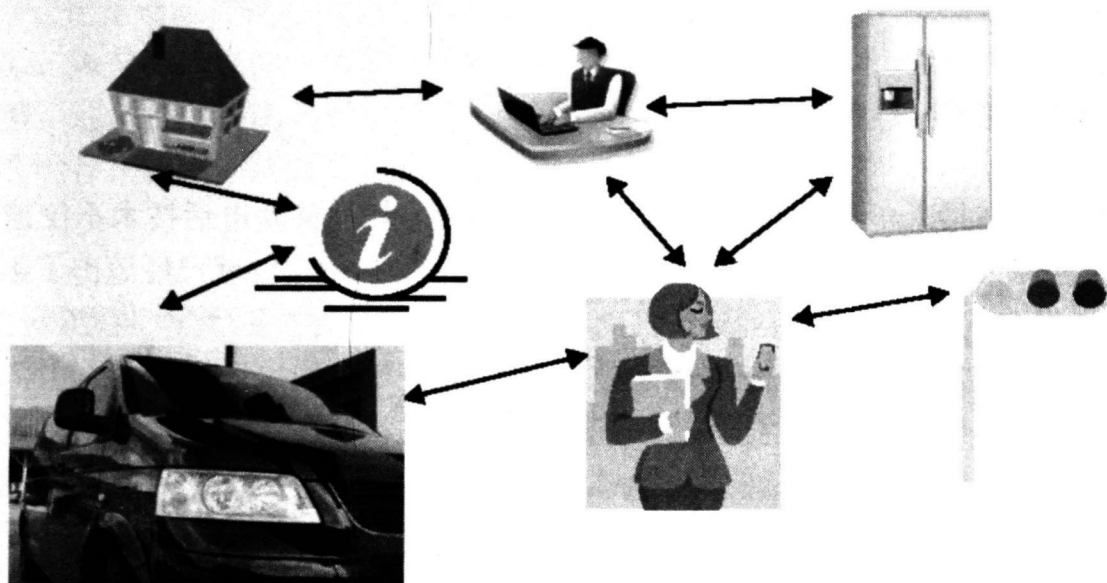


图 1.3 进入日常生活的普适计算

普适计算是未来计算机发展的前景，其计算功能将会移至日常用品中。然而，很少有人知道一个电机能驱动这些日常用品。如果我们停下来思考一下，能够想象到在这些系统中还会有更小的电机，但是我们从没有想到电机竟然起到了决定性的作用，并且电机已成为无形。

普适计算已经成为一个既定的学术研究领域，对此每年会举行几次大型的年度会议和发行一定数量的科学期刊。在过去的 20 年里，有关普适计算的数以百计的博士论文被发表。

作为一个学科，普适计算在建立体现其思想的真正系统方面备受强烈关注。在普适计算领域，有一个长字符串叫做重要的原型系统。原型系统已经成为探求普适计算领域的一种工具，并展示了一个联系日益紧密的可行性。

一个无处不在的原型系统的早期例子是由英国剑桥 AT&T 实验室在 20 世纪 80 年代末和 90 年代初开发的活动徽章系统^[1]。活动徽章系统是由办公室中佩戴徽章的人和一些分散在办公室的读者组成。徽章唯一标识每个佩戴者和读者，来使系统保持跟踪所有徽章配戴者的位置。此位置将被记录，并且显示在参与者运行应用程序计算机的桌面上。于是系统中的每个参与者都知道其他人的位置，并且知道在哪里取得联系。

普适领域与融入周围环境的普适系统进行交互，1996 年在麻省理工学院的 ambientROOM 项目开发就是丰富普适计算环境的一个例子^[2]。ambientROOM 配置了齐全的交互设备。墙壁被用来显示光的抽象图案，这种光随着外部的输入信号而改变。环境声音的强弱会在本地网络中显示出来。

可穿戴计算是从普适计算领域发展而来的一个学科。在可穿戴技术中，计算设备会移至使用者的身体上^[3]或者是衣服里^[4]，可穿戴计算使普适计算真正实现了以人为中心。

智能体的发展主要归功于普适计算。普适计算的早期发展和远景直接适用于智能体。而普适计算对普适计算系统和人类之间的交互感兴趣，智能体方面需要更多的技术方法。

^[1] 表示参见参考文献[1]，余同。

针对智能体发展起来的技术对普适计算有直接的适用性。同样，在普适计算领域开发出来的许多设计也能够应用于智能体。

1.1.3 移动电话技术

移动电话是在接入电话不断出现的前景下产生的。如今移动电话技术不仅使电话随处可见，而且也实现了互联网的接入。虽然移动电话在 20 世纪中叶就已经迈出了第一步，但是直到 20 世纪 80 年代第一个商业化的移动电话运营商才开始准备运营，在 20 世纪 90 年代后期，发达国家近 20% 的人口拥有了移动电话，到 2008 年移动电话的用户超过了 40 亿。

因为移动电话机在结构化的无线网络中运行，所以移动电话通常称为蜂窝电话，移动电话机也被称为手机。移动电话的网络分为若干节点，每部电话在一个节点中能够与另一个节点在任意给定时间进行精确的连接。一个单元可以覆盖一个物理区域，其所在的物理区域由网络运营商决定。由于每个单元通常处理同时打电话的数量有限，所以网络运营商规划它们的网络，以便使单元更小，运营商预测更多人使用电话，其区域内容纳的单元会更多。每个单元由一个安装有无线收发基站的单元塔来运行。基站保持所在单元内所有活动的手机的无线连接。当用户或手机移动到另一个单元时，基站将执行一个称为交接的交互。

移动电话引发了如全球移动通信（GSM）、通用分组无线业务（GPRS）、增强数据率 GSM 演进（EDGE）以及通用移动通信系统（UMTS）等远距离无线网络技术，以及如蓝牙（IEEE 802.15.1）等短程无线通信技术。远程通信是在手机和其最近的基站之间传输语音和互联网数据，短距离无线通信用于在手机和无线接入点（如无线耳机）之间进行通信。移动电话已经彻底改变了人与人的联系方式。电话的使用往往被限制在几个被频繁使用的固定物理位置上：我们曾经在办公室的办公桌上、家里一些紧要的位置（例如厨房和电视机旁）安放电话。随着电话成为可移动的设备，我们不再考虑位置绑定的电话，而是随处可见的任何一个可以服务的位置。

移动电话不仅彻底改变了人与人之间的联系方式，也改变了网络接入的方式。在 20 世纪 90 年代末，互联网只限于接入电脑，而建立互联网的连接需要一系列的步骤：打开调制解调器，运行 PC 调制解调器上的拨号程序，然后单击“连接”按钮。经过半分钟调制解调器频响，一个连接才建立起来，而互动也绝不是无缝的。

随着现代智能手机的出现，上网不再局限于电脑，它实现了真正的无处不在。只需按下几个简单的按钮，电子邮件、即时消息和万维网便立即可用。快速互联网接入同样在全世界得到了应用，即使这有时是一笔不小的花费。移动电话改变了人们对连接方式的普遍看法，这对不断发展的智能体是一个很重要的因素。因为我们现在习惯于认为连接是无处不在的，那么我们同样也习惯于认为对智能体的访问也是无处不在的。这种观点在 21 世纪初并没有得到广泛的认同。

1.1.4 遥测和机对机通信

遥测是由希腊语 tele（远程）和 metron（衡量）组合而成的词，遥测顾名思义就是进

行远程测量。机对机通信就是指一种泛化的遥测，它意味着非人类操作的机器之间的自动通信，并且它也是遥测的核心概念。遥测是用来传输从遥远的气象观测站测得的当前温度、湿度、风力、风向等信息的（如图 1.4 所示）。遥测设备允许读取诸如气象站等远程系统的测量数据，通常使用移动电话系统传输数据。遥测也用来传输卡车的油耗数据，以便车主优化卡车的行车路线，从而节省燃料成本并降低污染。

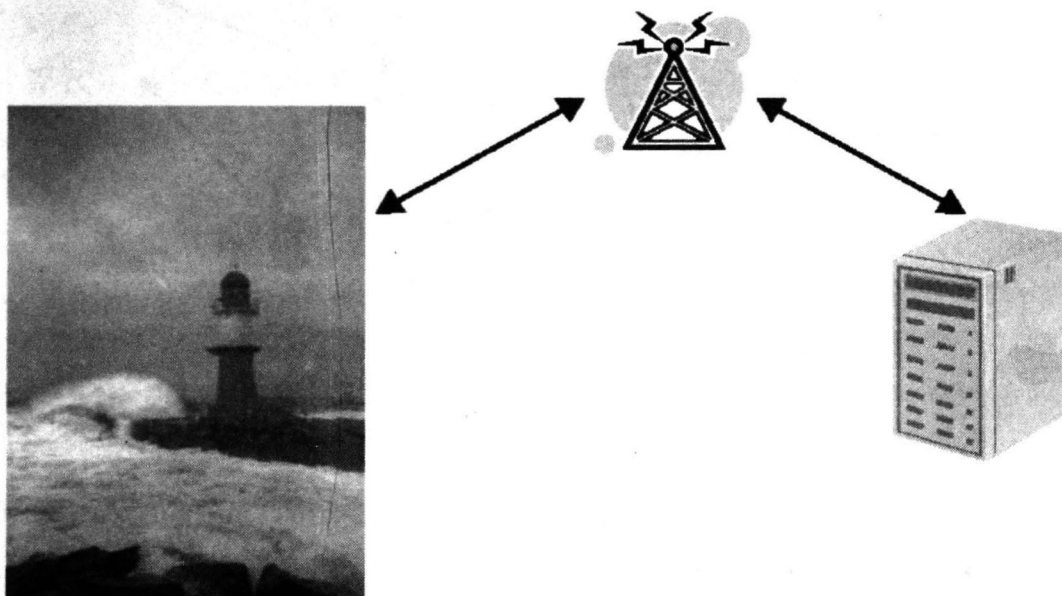


图 1.4 遥测示意图

机对机通信和遥测的思想也可以用于较短的距离。今天的起搏器（植入心脏病人心脏的装置）常会包含一个叫“遥感线圈”的设备，它会使医生在没有做手术的情况下监视起搏器的活动。相反，医生使用了一个可以在病人周围产生一个低功耗的电磁场的设备。通过遥感线圈对电场反应进行调节来创造一个低功耗的通信机制，在这种机制下，信息就从病人的心脏传递给了医生。

遥测和机对机通信类似于智能体，因为它们都用来进行大规模的测量。使用遥测技术，那些测量可以由远程站点来执行，而不是通过直接的物理访问。使用遥测技术进行远程接入通常由现有的移动电话网络（如 GSM 或 3G）来执行，或者是通过诸如国际海事卫星组织的卫星网络等专用网络。智能体不仅用于测量和传感，其所使用的执行器也会影响它们的环境。很多针对遥测系统而开发的远程接入技术将被应用于智能体系统。

1.1.5 无线传感器和无处不在的传感器网络

无线传感器网络已经从用于在广阔的物理环境（从野外火灾监测到动物观察）收集信息的小型无线传感器发展到了农业管理和工业监测。每个传感器以无线的方式向基站发送信息。传感器以中继的方式相互传递信息至基站，通过使用大量的以无线传输方式传递数据到基站的传感器，无线传感器网络提供大规模的物理性质测量，如图 1.5 所示。自从 20 世纪初以来，无线传感器网络的研究领域一直十分活跃，每年都会召开几次相关会议，出版许多期刊并举行大量的年度讨论会。无线传感器网络有时也被称为无处不在的传感器网络以突显传感器的重要作用。