



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



物联网工程专业系列教材



物联网导论 第3版

刘云浩 编著

INTRODUCTION TO
INTERNET OF
THINGS



科学出版社

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
物联网工程专业系列教材

物联网导论

(第3版)

刘云浩 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

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。它具有普通对象设备化、自治终端互联化和普适服务智能化三个重要特征。

本书从物联网的感知识别层、网络构建层、管理服务层和综合应用层这四层分别进行阐述,深入浅出地为读者拨开萦绕于物联网这个概念的重重迷雾,引领求知者渐渐步入物联网世界,帮助探索者把握第三次 IT 科技浪潮的方向。

本书适合高等院校物联网工程专业作为专业教材使用,也适合其他各专业作为选修课教材使用,还适合对物联网感兴趣的各类读者参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

物联网导论/刘云浩编著. —3 版. —北京:科学出版社,2017

(“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材·物联网工程专业系列教材)

ISBN 978-7-03-051685-5

I. ①物… II. ①刘… III. 互连网络-应用-高等学校-教材②智能技术-应用-高等学校-教材 IV. ①TP393.4②TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 018400 号

责任编辑:赵丽欣 张瑞涛/ 责任校对:刘玉靖

责任印制:吕春珉 / 封面设计:蒋宏工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 3 月第 一 版 2017 年 1 月第二十一次印刷

2013 年 8 月第 二 版 开本:787×1092 1/16

2017 年 1 月第 三 版 印张:18

字数:420 000

定价:45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈骏杰〉)

编辑部电话 010-62134021 销售部电话 010-62136230

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

第3版前言

与第2版相比，第3版增加、删除并合并了一些章节。具体来讲，增加了大数据、云计算、Li-Fi、NB-IoT、Wi-Fi 雷达、工业互联网等新内容，压缩了传感网、移动通信网络、信息存储等内容，更新了物联网技术在智能建筑、智能交通、智能物流等领域的应用，更正了一些错误。在整个修订过程中，我要感谢杨铮收集建议并参与修订工作，感谢刘克彬、王继良、李振华、曹志超、吴陈沐、陈茜提供新的素材，感谢清华大学建筑学院林波荣教授提供物联网在智能建筑中的应用案例，感谢郑月、王常旭、钱堃的细致修订，感谢刘桐彤重新绘制了大量精美插图。他们的工作为本书增色不少！

不久之前，我参加过一次关于如何加大支持创新力度的研讨会，一位长期主管科技项目的大咖在茶歇的时候感叹了一句：“每三四年就出来一个新的热点概念。”我暗中点算了一下，长了不敢说，进入本世纪这十几年还真是：网格计算、P2P、传感网、云计算、物联网、大数据。随着2009年物联网的概念一夜之间变得家喻户晓，我们这本《物联网导论》（第1版）2011年一正式面世就受到了欢迎。

2011年，一批生力军加入学习物联网的大潮中，这就是物联网工程专业的学生。教育部2010年首次将物联网工程列入新增本科专业名单，北京理工大学、北京科技大学、哈尔滨工业大学等30多所高校成为首批获准开设物联网工程专业的学校，部分高校于2011年首次招生。2012年，教育部批准北京交通大学、西安电子科技大学、暨南大学等80多所高校开设物联网工程专业。2013年，又有100多所高校获批增设该专业，目前全国共有400多所学校开设了这一专业。

随着招生规模不断扩大，物联网专业也逐渐暴露出一些问题。物联网专业几乎处于一个从零起步的状态，设置时间短，学校也在实验阶段，对此教师和学生都有点懵。有学生反映“在上专业导论的时候，教授就告诉我们，课程可能会有点多、有点杂，叫我们做好心理准备，后来我们才发现，这课程不仅是有点杂，而且还是有点乱”。我在和物联网专业学生交流时，也会被他们提出的困惑给难住，有些困惑甚至经过长期思考后依然无从回答。如果能暂时搁置这些难题，那么我思考的结论是学物联网不能认死理。具体来说，我给物联网专业学生的建议是：学习物联网要强调具体技术、重视应用、破除专业藩篱、把握大趋势。

1. 强调具体技术

物联网的浪潮一浪高过一浪，这让人想起了巴菲特有句名言“只有在退潮的时候，才能看出谁没有穿泳裤”。巴菲特的本意肯定与物联网无关，估计是指只有当经济大环境不好的时候，才能看出谁的投资策略更高明。那么问题来了，物联网浪潮退去之后，会露出什么？我相信会露出一些散落着分布的礁石，就像南海中的岛礁，涨潮时就不见了，退潮时才会出现。这些礁石是物联网概念下的各种具体的技术，比如传感网技术、定位技术、低功耗通信技术、自组织网络技术、RFID 技术、嵌入式系统技术等，以及这些技术的综合应用，例如智能交通、智能物流、智能建筑、群智感知等。在物联网大潮到来之前，这些礁石就存在并生长着；等潮水退去之后，人们将站在这些屹立着的礁石上面，人类社会的信息化水平将更上一个台阶。

学习物联网，不能把学习精力和热情仅仅投入物联网这三个字上面，要深入具体的技术，要实践具体的应用。在这些具体的地方做出创新性的工作，才能推动物联网的进步，尽管可能仅仅是某一方面的一小步。凡是要在物联网这个层面上做创新的，而没有具体技术和应用做支撑的，要瞪大双眼小心被骗。说个玩笑话，按照演员范伟在小品里说的，如果“有人出脑筋急转弯，直接拨打 110”。范伟也是在多次被“忽悠”中学精明了。学习物联网要具体、要言之有物，不要笼统、不要浮于概念，这是我对物联网专业学生的一条建议。

2. 重视应用

如果把物联网放在理论和应用的天平上，物联网应该是偏向应用的。尽管物联网中也包含一些理论研究的成分，但应用才是主流。学习物联网也是如此，在课堂上要充分重视实验环节，课外踊跃参加各项技能比赛和项目实习。学习传感网，就要真正拿出几个传感器节点感知周围的环境；学习定位技术时，就要用自己的智能手机在室内和室外试试定位精度；学习 RFID 时，要尝试用阅读器读取标签中的信息；学习无线 Mesh 网络时，要搭建一个小型的自组织多跳网络。在我主讲的计算机网络课程上，我会特意挤出时间安排无线传感器实验，让学生体会嵌入式系统编程并了解低功耗的无线传输协议。本课程还邀请了部分学有余力的学生在校内部署基于 Mesh 网络技术的无线视频监控系統，让学生在这个平台上学习并实验自己的路由算法、信道调度机制、功率控制算法、服务质量保障机制以及视频处理算法。另外，还可以通过参加课外科技竞赛来获得实践经验。针对物联网方向，清华大学承办了全国高校物联网应用创新大赛，第一届就吸引了全国参赛队超过 1000 支，第二届和第三届更是有 2000 多支队伍参赛。竞赛作品中涌现出一批颇有创新的高水平物联网技术和产品，在创意和应用潜力上征服了评审专家和现场听众，吸引了图灵奖获得者 Ivan Sutherland 和 Michael Stonebreaker 前来颁奖。对于学习物联网的人来说，怎么强调应用都不过分。

3. 破除专业藩篱

根据最新的《普通高等学校本科专业目录(2012年)》，物联网工程专业(专业代码 080905)

从属于计算机类(专业代码 0809),与计算机科学与技术(专业代码 080901)、软件工程(专业代码 080902)、网络工程(专业代码 080903)、信息安全(专业代码 080904K)、数字媒体技术(专业代码 080906)等并列。物联网专业是一个新兴的专业,很多学生对于学什么课程存在困惑,对于老师来说,教什么课程也存在困惑。例如,计算机网络要不要学?感觉这应该是计算机专业的课啊。无线通信技术要不要学?这似乎是电子系通信专业的课啊。机器人要不要学,这难道不是自动化专业的课程吗?无线定位技术要不要学?这都说不清楚该是哪个专业的课程了。

正如我们一直强调的,物联网不是某项具体的技术,而是很多推动万物相联趋势的具体技术的集合。例如,传感网一般被认为是物联网技术的典型代表,其自组织网络组网技术与计算机网络相关,其低功耗数据传输与无线通信相关,其定位功能与无线定位技术相关,对于有些结合反馈控制功能的传感网,其控制策略与机器人技术相关。因此,传感网本身就是学科交叉的产物,结合不同专业的技术形成“感、联、知、控”的完整体系。

因此,对于学习物联网的人(特别是本科生)而言,抛开专业合理性不谈,我们的一个实在建议是:破除专业藩篱,根据自己的兴趣和项目的需要,选择学习的课程。物联网专业的学生切不可纠结于专业的名字,在无休止的争论中浪费了宝贵的学习时间,最终无一技之长。姑且把争论留给专家们,而自己专注于具体技术的学习。在学习中贯彻“拿来主义”,不问专业,直接学习对自己的成长有利的课程和知识。物联网既是人们预见到的、规划出来的路,也是人们走出来的路,规划只能给出大概的方向,而路径是靠“走的人多了”形成的。

聪明的同学马上就发现问题了,物联网“包罗万象”,学习物联网变成了一项不可能完成的任务。如果我们把学习物联网的目标设定为掌握物联网的方方面面,那真是“吾生也有涯,而知也无涯”。就像我们说一个人擅长体育运动,不一定要掌握体育的所有门类。因此,我上面的建议还包含另一方面,要根据自己的兴趣和项目的需要进行学习。

4. 把握大趋势

物联网不是无源之水、无本之木。我曾经写过一个小文章《万物相联万物生》,也时常以此为题做物联网技术介绍。物联网的出现是信息技术对“物物互联”趋势的回应,体现了信息技术走向更广泛的互联互通、更透彻的感知、更深入的智能,是人类社会信息化不断深入的必然结果。在这个大趋势下,物联网不是一个人在战斗,还有云计算、大数据在内的许多炙手可热的新技术领域。物联网、云计算、大数据不是泾渭分明的,它们之间存在着难以割舍互相依赖的联系。

在英文里互联网是 Internet,物联网是 Internet of Things,换言之,不管移动电信网、固定电话网、广电网,还是传统意义的互联网、移动互联网,最终都要互联互通。“One World, One Network”,大家都是一个网,这个网叫什么就不那么重要了。

网络到底带给我们什么呢?

波普艺术领袖安迪·沃霍尔曾说过:“未来,每个人都能当上 15 分钟的名人。”毫无疑

问，这个“未来”已经来临，“出名”似乎变得越来越容易，可能是一段有趣的视频，可能是一篇辛辣点评，也可能仅仅是一两句流行的段子。这种汇集了无数“明星”的网络越来越像一个整体，所有人的精华都被凝聚在此：既有二十年的匠心独运，也有两分钟的灵光一现。就像凯文·凯利曾利用蜂巢思维比喻人类的协作带来的群体智慧，网络会自动帮我们筛选出最有用、最精华的部分，而这种群智（Crowdsourcing）的用户协作方式就是网络最大的魅力所在。

仔细想想，几乎所有行业都可以搭上网络的顺风车，这种事先不被功利心束缚的协作方式必将盛行于更多的领域。非专业化人士的“灵光一现”将会迅速地捕捉下来，并通过物联网不断扩散，发挥其长尾效应。而未来的分工也不再是特定的“什么人做什么事”，也许是“什么时间做什么事”，亦或是“什么场景做什么事”，甚至是“想起什么事做什么事”。

工业革命，把农民从土地中解放出来；而网络，把人的创造力从固有的领域中释放出来。非专业人士的专业智慧，从此开启。

刘云浩

2016年12月

第2版前言

转眼之间，初次编写这本书已经是三年多以前的事情了，正式发行也有两年多的时间了。感谢各位读者，使得本书销售令人惊喜地突破了3万册。从向我要材料或者抱怨本书质量的邮件里就可以知道，至少有200多个学校选用本书做了教材。本书得到如此厚爱，实在超乎我的预料。

这么快出第2版并非我太闲。一方面，技术发展太快，许多内容有了更新，鉴于这么大的发行量，我害怕误导了读者；另一方面，编写第1版的时候有些仓促，内容编排不太科学。网上对于本书的评价很多，大多是鼓励，批评的话也都非常客气。但是很多读者，尤其是使用本书做教材的老师私下里给了我不少非常有价值的意见和建议。本来打算把这些老师和朋友都在此致谢一番，但是看了一下列表，恐怕要花费太多篇幅了，只好这样一句话谢之。

根据大家的意见和我对物联网进一步的研究和实践，本书第2版做了如下调整。

在第1章中，我们从计算技术发展的角度，回顾了物联网的起源，阐述了物联网是将物理世界数字化并形成数字世界的一个途径。第1章新增加1.4节，详细讨论了物联网“三更”的发展趋势：更广泛的互联互通、更透彻的感知和更深入的智能。

在第2章中，细化了RFID技术底层通信的工作原理，增加了自动识别领域的最新研究成果，对RFID技术在物联网中的典型应用进行了介绍。

在第3章中，增加了无线传感器网络历史进展介绍，从技术发展角度介绍了无线传感器网络的经典实用系统。在3.3节中，增加了对Contiki操作系统的介绍，总结了当前主要节点操作系统的特征、典型应用场景和发展趋势，为无线传感器网络系统设计提供决策支撑。

在第4章中，增加了对新兴WiFi基站定位系统的介绍。同时，在4.3节中，增加了对新兴的利用群智感知实现无需人工勘测的室内定位技术的介绍。

在第5章中，根据当前技术发展形式，适当删减了与PDA相关的部分内容，增加了对智能手机的介绍，对智能手机在物联网中发挥的作用及其地位进行了探讨。

在第6章中，增加了无线网络技术的最新进展，包括基于MIMO的干扰对齐与消去、全双工无线通信的内容等。

在第7章中，增加了目前学术界和产业界的研究热点，如蓝牙4.0、体域网、延迟网络的相关内容。在撰写思路，更重视以需求为牵引，强调不同无线协议的异同点，跟踪技术发展动态，特别是产业界的最新应用。同时，根据目前技术发展趋势，适当删减IEEE802.15.4

和 6LOWPAN 的相关内容。

在第 8 章中，更新了各种移动通信技术的相关统计数据 and 最新发展动态，对 3G 和 4G 通信技术和标准进行了更加系统和精细的说明，增加了对最新的移动互联网应用（如移动社交网络）的介绍。

在第 9 章中，按照数据中心建设中的相关问题以及数据中心的采用具体技术进行内容划分，并适当删减调整内容，便于读者更清晰地了解数据中心这一物联网海量存储的关键技术。同时，为适应存储技术的发展趋势，增加了对云存储这一新兴技术的介绍与讨论。

在第 11 章中，按 RFID 信息安全和位置隐私保护两部分内容划分，对章节内容进行了整理，便于读者更好地了解物联网中的两大安全隐私问题。

在第 12 章中，结合车联网，回顾了智能交通的发展史以及世界各国具有代表性的智能交通系统，更加系统和详细地介绍了智能交通的架构和各种物联网技术在智能交通中的作用，补充了大量物联网时代的新型智能交通应用，并基于国内外现状展望了智能交通的未来发展。

在第 14 章中，增加了对智能建筑发展史的回顾，分析了现代建筑对智能化的强烈需求，细化了对各种物联网技术在智能建筑中的作用的介绍，扩充了物联网时代赋予智能建筑的新型应用系统，并结合国内外现状对智能建筑的未来进行了展望。

在第 15 章中，增加了传感网在碳汇和碳排放监测应用中的案例，讨论了环境监测的特点以及传感网应用于环境监测所面临的“传感失谐”、“诊疗失据”和“模型失用”三个挑战。

除上述增改的内容以外，根据读者的阅读兴趣和物联网的最新发展趋势，删去了部分章节，以使本书内容更加贴合“物联网”的主题。删去的内容主要包括本书第 1 版的互联网（第 6 章）、搜索引擎（第 12 章）、物联网中的智能决策（第 13 章）和智能电网（第 15 章）等章节。

除了对现有章节进行了修订以外，第 2 版还做了一个新尝试，即在最后部分，增加了一篇“物联网前沿专题”，将原来正文中选学的内容和时下流行的话题归集到一起。这些专题文章的撰写者全部来自我们科研组，内容基于他们多年的研究工作。其中“无线自组织网络路由”由王继良撰写，“无线传感网操作系统”由董玮撰写，“物联网管理：调试与诊断”由刘克彬撰写，“认知无线电”由杨盘隆撰写，“移动计算中的群智感知”由杨铮和吴陈沐撰写。每个短文自成一个专题，难度介于科普介绍与专业论文之间。希望这样的安排对于想在某一具体方向做深入了解的读者有所帮助。

本书第 2 版得到了我们科研组杨铮、刘峻良、吴陈沐、张兰、杨盘隆、杨磊、王胤的大力协助与支持，也感谢家人对于我一直繁忙的谅解！

刘云浩

2013 年 8 月

第 1 版前言

人类的生命周期从未如今天一样长过，而人们从来也没有像今天一般轻易就能触摸到自己与时代的隔膜：不是因为身体的老化，而是面对排山倒海而来的新科技。十几年前非常时髦的“知识爆炸”这个词如今已很少人提起，因为爆炸这个力度，远远赶不上真实的场景。

24年前，家里有人逾期未返，我和朋友历尽千辛万苦，在中关村邮局排队花4元1角打了一个18秒钟的国内长途电话，终于确认平安；11年前，一个久未联络的朋友偶然拿到我的手机号码，一拨的结果竟然花掉我远在南非的国际漫游费，令他惊叹通信业的发展已到如此地步；但这些都比不上计算机与互联网技术带来的巨大冲击：坐在地球两端的人，聊上一天，并未感到花了特别的多金钱或付出了额外的努力。

1965年，戈顿·摩尔提出他那个著名定律的时候，人们不免大吃一惊，认为芯片发展18个月翻一番的速度接近于神话，以至于摩尔后来也一再修改自己说过的话，将自己说的一年翻一番后来又改为两年。现在他终于可以安心了，如今在计算机网络领域这个定律不仅兑现，而且实际上互联网的用户数量已接近指数增长趋势，根本不用18个月就会翻一番。保守地预测也认为2012年互联网用户数将超过18亿，占到全球总人口的30%左右。

近日整理资料翻到石勒听汉书的时候，联想到了关于2012年这个有趣的预计。如果保持这样一个互联网上网用户的涨幅，IPv4很快就不够用了，幸亏人们已经提前想到了IPv6，大家大可以也说一句“赖有此耳”。但转念一想其实有点杞人忧天啊，互联网用户无非是人口，地球上就这么多人，管你什么摩尔定律呢？到了60亿互联网用户之后还能把动物都“搞”上网？难道又是千年虫一样的笑话？

笑过了之后猛地意识到突破这个用户数其实并非笑谈。在计算科技与网络技术发展的今天，智能化以无与伦比的迅猛速度延展和覆盖下来。每一个有功能的对象都可能成为互联网的连接对象。黑格尔的话，也许终将会改成：存在的，就是上网的。

在进入人类世界短短的20年里，互联网已渐渐成为人们日常生活的信息载体和平台，广泛参与到社会的运行和人们的各种活动中。在学术圈与工业圈孜孜不倦地探求互联网走向的时候，其实还有一条不太显眼的探索主线从没有放弃过，这就是马克·维赛尔(Mark Weiser)在互联网刚刚兴起的时候提出的普适计算(Pervasive Computing)。一般认为互联网代表着主流的网络计算模式，把人们的使用吸引在信息空间(Cyber Space)中，主要依赖桌面型计算获取服务与支持；而普适计算则倡导发展可以广泛部署的微小计算设备，并在此基础上实现

透明和智能的计算服务, 又称为不可见计算 (Invisible Computing)。如果说互联网计算此前一直崇尚人围绕着网络进行, 那么普适计算则主张让微小系统形成的网络围绕着人运转。

普适计算的提出也是考虑到小型化或微型化成为计算机的发展趋势, 各种小型计算设备如掌上电脑、智能手机、传感器、射频标签等崭露头角。同时, 无线技术的运用也使移动计算变得日益成熟和普及。在这种趋势下, 人们开始尝试突破桌面计算的模式, 将计算和互联技术普及到日常生活中。普适计算的目的是在日常生活的各种环境和场景中广泛部署微型化且具备一定计算能力的普适设备, 并与已有的互联网技术结合, 实现移动、无缝、透明和泛在的计算支持和服务。普适计算是人们摆脱计算设备对人类活动的束缚, 将互联网推广到物理世界的初步尝试。

但是执着于普适计算的人们很快就吃到了苦头, 由于普适计算设备大多是互联网上已有的各种计算系统的延伸和拓展, 扮演探测和感知的角色, 智能化程度相对较低; 而服务对象主要是个体, 如移动互联、家居、医疗、导游等, 找不到真正穿透国民经济发展的突破点, 很快沦落到一个尴尬的地位: 每个人看了演示都觉得不错, 但哪一个应用也没能大规模推广, 普通民众更多时候的感觉就是一个词——麻烦。

无线传感器网络 (简称传感网) 作为普适计算的一个实际延伸, 数年前被美国加利福尼亚大学 (常简称为加州大学) 伯克利分校的戴维·卡勒 (David Culler) 掀起一阵热潮之后, 大鸭岛、斑马网、金门大桥监控、火山与泥石流、青岛海洋、精准农业、煤矿救援以及林业生态监控, 一系列概念系统纷纷走进人们的视野。作为人们对物理世界进行有效感知和探测的手段, 传感器早已开发、研究和使用了超过 100 年; 但是把传感器组成网络, 形成智能化的自我协同、自我定位则是一个巨大的进步。在一个传感网中, 大量的传感器等微型化计算设备自组织地连接在一起, 将计算和服务从满足个人需要进一步延伸到制造、运输、能源、环境和建筑等国民经济生产领域, 适应人们对探索、利用和管理物理世界的需求。

另一方面, 现实中, 国民经济的发展对信息系统早已提出了更高的要求。在过往国民经济的各主要领域, 物理基础设施和信息基础设施的建设往往是分开进行的。一方面人们不断地建设和完善周围的物理世界, 如机场、公路、建筑物、交通工具等; 另一方面, 人们也在不遗余力地发展包含数据中心、个人计算机、宽带网络等的信息世界。两者如此被割裂为两个次元。但现代经济的发展显然开始要求将计算技术拓展到整个人类生存和活动的空间, 将人类的物理世界网络化、信息化, 实现物理世界与信息系统整合统一。

最先意识到这一点的还是要算美国国家科学基金会 (National Science Foundation), 在近几年推出了 Cyber-Physical Systems (CPS) 研究计划。CPS 追求有效地连接诸如自动驾驶汽车、机器人、嵌入式医疗器械等物理设备, 在物理设备和网络基础上, 通过开发智能计算、通信, 控制及新型传感技术, 提供智能化的、快速响应的、因应用户需求的高质量服务, 如结合传感器网络与移动通信技术的紧急救援与自动驾驶、建立车辆间网络辅助安全与自动化驾驶。CPS 企图超越已有传感网系统自成一体、计算设备单一、缺乏开放性等缺点, 更注重多个系统间的互联互通, 并开发标准的互联协议和解决方案, 同时强调与互联网进行联通,

真正实现开放的、动态的、可控的、闭环的计算和服务支持。

2009年1月28日，美国总统奥巴马在与美国工商业领袖举行的“圆桌会议”上，打破了这个僵局，他对IBM提出的“智慧地球”概念给予了非常积极的回应：“经济刺激资金将会投入到宽带网络等新兴技术中去，毫无疑问，这就是美国在21世纪保持和夺回竞争优势的方式。”“智慧地球”主张更透彻的感知，更全面的互联互通和更深入的智能化。奥巴马的经济振兴计划的核心就包括兴建高速公路等基础设施，对互联网宽带进行升级、对公共建筑物进行节能改造等内容。这个举措也使得物联网概念一举登上了网络大舞台。

什么是物联网，至今并没有一个精准而公认的定义。关于这一点，在本书的正文中还要更加正规和详细地讨论到。很多学者为了找英文的对应，使用了Internet of Things (IoT)作为物联网的英文对应，关于这一点是值得商榷的。现在讨论的物联网概念，实际上是中国人的一个发明，整合了美国的CPS、欧盟的IoT和日本的i-Japan等概念，但又不完全和哪一个相同。前些日子我偶然和我的老师倪明选教授说起这一点，他笑呵呵地告诉我：“30年前我们也争论过到底什么才是互联网。”

物联网理念的出现应该说首先归功于物流系统的现代化需要。现代物流系统希望利用信息生成设备，如无线射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)、传感器，以及全球定位系统等种种装置与互联网结合起来而形成一个巨大的网络。类似于条形码这种自动识别技术(Auto-ID)，就是物联网的最初应用。除了物流领域，物联网还可以广泛应用在道路、交通、医疗、能源、家用电器监控等各个领域。物联网的发展要求将新一代信息化技术充分运用在各行各业之中，具体地说，就是把诸如感应器、RFID标签等信息化设备嵌入和装备到电网、铁路、桥梁、隧道、公路、建筑、供水系统、大坝、油气管道、商品、货物等各种物理物体和基础设施中，甚至人体里，将它们普遍互联，并与互联网连接起来，形成“物联”。值得注意的是，物联网这个概念虽然来自于物流行业的需要，但是把它局限在物流领域里就显得视野狭窄了。当人们仔细审视这个概念的时候，忽然惊讶于它的深远内涵：物联网无疑做到了十几年来人们一直想做的无线与有线在互联网上的有机融合；而潜在用户群一旦拓展到地球上所有的物体，摩尔定律竟然巧妙地继续有效了！

在这种意义上来说，下一代互联网的发展远景立刻明晰起来。人们可以大胆假设下一代互联网将是物联化的互联网，或者称之为“大物联网”。大物联网不仅局限于目前互联网中信息系统和设备的连接与组合，还将继承和极大地拓展大型计算、桌面计算、普适计算、CPS、物联网、云等计算模式的应用范畴，彻底地整合物理世界与信息系统，为未来人类建设统一的赖以生存的智能化环境。

说到这里，似乎有超越这个前言范围的嫌疑了。言归正传，说说出版这本书的缘由和目的。

1998年，我作为原邮电部临时翻译被派到纽约，坐在卖烟草晋身的IBM总裁郭士纳一尺远的地方听他说理想中的E-service概念。那时我还不知道后来异常有名的“智慧尘埃”(Smart Dust)概念已经公之于众了，郭士纳先生也未必知道自己后来将因为所谓的15年周期定律被人们频频说起；大家抽空用中文悄悄交换着刚听到的传奇般的雅虎和免费的

E-mail 空间。真正在听郭士纳滔滔不绝的,其实只有我这个翻译。没有人意识到此后一年多 Internet 要经历一次泡沫迸裂,而桌上半数的精英即将加入失业大军。人们热烈地规划着今后几年的暴发路;津津乐道的是贫困的大妈因为住在网络中心楼上就发财 3 千万的故事,还有王菲的《相约九八》。

1999 年我参加原信息产业部一个代表团到日内瓦参观电信展,正值邮政综合计算机网规划建设期间,因为其中有邮运指挥这一部分,大家都很关注相关的内容。展览会上有人极力宣传 IoT/IoM 等一系列概念,有点闹笑话的是,那时候我还以为 IoM 就是 Internet of Money,这么想也有一定的合理性,因为那时候都把金融流和物流挂在嘴边,几年之后看一篇文章才意识到 IoM 是 Internet of Media 的简写。

2001~2004 年跟随倪明选老师做科研,第一个题目就是利用 RFID 进行位置的感知,基于系统实验发表了“LANDMARC: Indoor Location Sensing Using Active RFID”这篇论文。

LANDMARC 作为最早使用主动式 RFID 的定位系统之一,迄今为止被国际国内研究者引用超过 700 次。2004~2007 年,我们以煤矿安全生产和紧急救援为应用目标,提出无线传感器网络煤矿监控系统。通过自动监控煤矿工作空间的氧气含量、瓦斯浓度,实时检测渗水和矿道地质结构变形等事件,为煤矿意外事故的发生提供预警,并为发生事故后的紧急救援提供关键导航功能。2007~2008 年,我们和中国海洋大学一起把传感网络应用到海洋生态环境监控中,研制了 OceanSense 系统,在黄海海域最多部署了上百个节点收集温度、光照、海深等环境数据。2008 年至今,为了探求传感网大规模部署的技术壁垒,我们展开了绿野千传传感网林业监测系统。当时提出了“三个一”的决心,即在一个野外的真实环境,部署超过 1000 个节点的无线传感网系统,连续运转一年以上。在 2009 年 5 月我们成功部署了一个 120 个节点的原型系统,到 10 月份原型系统扩充至 330 个点,2010 年 11 月扩展到 500 个点,至今已经运转超过 16 个月(<http://greenorbs.org/>)。2009 年 8 月我们在浙江省天目山自然保护区实现了一个超过 200 个节点的实用系统,该系统至今已经连续运转超过一年。

在 2009 年 8 月,由于温家宝总理的无锡讲话,大家对传感网和物联网的关注度达到了一个新高。冷静下来之后,近来批评的声音此起彼伏了。这和我们 10 年前经历的 Internet 泡沫多么相像啊。批评与倡导都是应该尊重的,但前提必须是基于前瞻性的研究本身而并非盲目的。

我在各个高校及公司学习和访问的时候,大家的讨论经常会涉及这样几个问题:第一,什么是物联网,到底有什么新的内涵在里面;第二,常见的物流网和传感网,与物联网的关系是什么;第三,真正意义的物联网到底还要发展多少年。

这三个问题都太难了,但是关心这三个问题的老师和学生太多了,甚至社会上很多各行各业的人,通俗地说就是圈外的人,对物联网的发展也颇有兴趣。作为在普适计算、传感网、对等网里挣扎了 10 年左右的人,我逐渐觉得有必要做一点薪水以外的工作,就是根据以前的探究,写这样一本书来抛砖引玉。

物联网形式多样、技术复杂、牵涉面广。根据信息生成、传输、处理和应用的原理,可以把物联网分为 4 层:感知识别层、网络构建层、管理服务层和综合应用层。物联网各层之

间既相对独立又联系紧密。在综合应用层以下,同一层次上的不同技术互为补充,适用于不同环境,构成该层次技术的全套应对策略。而不同层次提供各种技术的配置和组合,根据应用需求,构成完整解决方案。本书按照上述四层模型由浅入深展开讨论,力争为读者系统全面地展示物联网及其相关技术。在每一层中,把内容上相对独立的技术和系统编排成独立的章节,从RFID、传感网,到互联网和移动通信网络,再到云计算和数据安全,基本囊括了物联网的主要内容。最后,通过讨论物联网的具体应用,如智能物流和环境监测等,综合阐述并总结全书内容。

希望这本书首先能作为一本入门的教材供大学和相关研究机构使用;其次也尽量使其成为一个通俗的读物能引起普通读者的一些共鸣。本书的特点在于讨论物联网言之有“物”,从基本概念入手,强调应用,将内容落实到具体技术和解决方案,避免了炒作概念如建“空中楼阁”或者只谈技术却“见木不见林”。本书语言通俗,适合不同层次的读者,加“*”号的内容为选学,供教师根据课程实际情况取舍。另外,在本书的写作过程中,我们非常荣幸地采访了物联网和传感网领域的国内外著名学者和教授。他们结合自身的研究经历,生动地阐述了物联网技术对社会的影响。我们将采访记录放置在几个篇章的结尾部分,供读者课外延伸阅读使用。这些内容有助于读者了解物联网的发展状态,掌握当今学术研究的热点。

这本书从下定了决心要写,到成稿,只有短短6个月的时间。我们整个科研小组的同学都为本书的编写做出了贡献,他们包括(按姓氏拼音排序):曹志超、陈涛、董玮、韩劲松、何源、惠维、李默、李镇江、连朔、刘峻良、刘克彬、马强、苗欣、王成、王继良、郝旻、熊曙光、杨磊、杨铮和姚青松。第一稿出来之后,我和杨铮、陈涛、戴婧瑶、曹志超、张兰又进行了若干轮的反复修订和统稿。

自从我表明了打算编写这样一本书的意愿之后,许多国内外同行和业内人士都表达了热烈的鼓励和支持,在本书的写作过程中他们也给予了很大的帮助。我首先要感谢香港科技大学的倪明选教授,他多年来在科研工作上的教诲和指导让我受益良多。同时,过去6个月当中,对于本书写作以及物联网科研过程中遇到的困惑,我曾一次或者多次当面请教过清华大学孙家广院士,中国科学院计算技术研究所李国杰院士,北京航空航天大学怀进鹏院士,北京邮电大学陈俊亮院士, *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* (《IEEE 并行与分布式系统学报》) 主编伊万·斯托伊孟诺维奇(Ivan Stojmenovic)教授,浙江农林大学周国模和江洪教授,美国伊利诺伊理工大学李向阳教授,西安交通大学赵季中和齐勇教授,清华大学郑纬民、林闯和顾明教授,北京邮电大学马华东教授,南京大学吕建教授,东北大学于戈教授,哈尔滨工业大学李建中教授,东南大学罗军舟教授,上海交通大学陈贵海和王新兵教授,人民大学王珊教授,北京大学梅宏教授,西北工业大学周兴社教授,西安电子科技大学马建峰教授,中国科技大学黄刘生教授,中国科学院计算技术研究所谢高岗和崔莉教授,南京邮电大学杨震教授,上海同济大学蒋昌俊教授,国防科技大学肖侬教授,山东大学孟祥旭教授,成都电子科技大学秦志光教授,中国海洋大学郭忠文教授等,书中的很多观点来自和他们的交流讨论。除此之外,许多高校教师审阅了本书的草稿,提出了许多宝贵的意见。

另外,科学出版社的文戈在本书的写作过程中提供了很多出版方面的建议。物联网所涉

及的内容跨越多个学科，而我的研究工作只限于其中几个方面，因此，本书实际上凝聚了很多物联网领域科研人员的智慧和见解。在此对这些专家表示衷心的感谢。

物联网正在以超越“爆炸”的速度发展，目前能够参考的材料几乎是千篇一律甚至可以说少得可怜，因此本书从某种程度上也成了雾里看花。当十年二十年之后来看今天这些文字，也许充满了错误与笑料。但是，如果我可以用一个豪迈的句子来结束这些小小探讨的时候，我想说，既然每个尘埃都将有一个独立的地址，现在我们可以认真地考虑把它们都连起来了。

刘云浩

2010年11月

目 录

第一篇 概 述

第 1 章 物联网概述	3
1.1 起源与发展	5
1.2 核心技术	6
1.3 主要特点	9
1.4 发展趋势	9
1.5 应用前景	11

第二篇 感 知 识 别

第 2 章 自动识别技术与 RFID	17
2.1 自动识别技术	18
2.1.1 光符号识别技术	18
2.1.2 语音识别技术	18
2.1.3 生物计量识别技术	18
2.1.4 IC 卡技术	19
2.1.5 条形码技术	20
2.1.6 RFID 技术	24
2.2 RFID 的历史和现状	25
2.2.1 历史	25
2.2.2 现状	28
2.3 RFID 技术分析	29
2.3.1 阅读器	30
2.3.2 天线	30
2.3.3 标签	30
2.3.4 频率	32
2.4 RFID 和物联网	34

第 3 章 无线传感网	35
3.1 发展历史	36
3.2 硬件平台	38
3.2.1 传感器	38
3.2.2 微处理器	39
3.2.3 通信芯片	41
3.2.4 供能装置	43
3.3 操作系统	43
3.3.1 开发语言	44
3.3.2 任务调度	44
3.3.3 关键服务	44
3.3.4 其他传感器节点操作系统	45
3.4 组网技术	45
3.4.1 选路指标 ETX	45
3.4.2 路由协议 CTP	47
3.4.3 数据分发协议 Drip	48
3.5 传感网发展前景	48
第 4 章 系统定位	52
4.1 基于位置的服务	52
4.2 定位系统	53
4.2.1 GPS 卫星定位系统	53
4.2.2 蜂窝基站定位	56
4.2.3 室内精确定位	58
4.3 定位方法	59
4.3.1 基于距离的定位	60
4.3.2 基于距离差的定位	61
4.3.3 基于信号特征的定位	62

4.4 物联网环境下定位技术的新挑 战和发展前景	65
著名科学家访谈录之一	67

第三篇 网络构建

第5章 互联网与移动互联网	73
5.1 互联网	73
5.1.1 互联网简介	73
5.1.2 互联网的发展历程	74
5.2 移动互联网	76
5.2.1 第一代移动通信	77
5.2.2 第二代移动通信	78
5.2.3 第三代移动通信	79
5.2.4 第四代移动通信	81
5.2.5 第五代移动通信	82
5.3 总结	84
第6章 无线接入	85
6.1 无线网络接入技术简介	85
6.1.1 基本组成元素	85
6.1.2 无线网络接入技术的特点	86
6.2 Wi-Fi: 无线局域网	88
6.2.1 IEEE 802.11 协议简史	88
6.2.2 IEEE 802.11 架构	89
6.2.3 IEEE 802.11 介质访问控制协议	91
6.3 蓝牙	93
6.3.1 蓝牙的起源	93
6.3.2 蓝牙的发展	94
6.3.3 蓝牙 4.0	95
6.4 ZigBee	95
6.4.1 ZigBee 的起源	95
6.4.2 ZigBee 的特点	96
6.4.3 ZigBee 的协议栈	97
6.5 60GHz 毫米波通信	101
6.5.1 60GHz 通信的兴起	101
6.5.2 60GHz 毫米波通信的优缺点	102

6.6 可见光通信	103
6.6.1 Li-Fi 的产生背景	104
6.6.2 Li-Fi 的优缺点	105
6.7 低功耗广域网	106
6.7.1 低功耗广域网技术的发展	106
6.7.2 LoRa	108
6.7.3 NB-IoT	109
6.8 无线物联世界	109
著名科学家访谈录之二	111

第四篇 管理服务

第7章 物联网与大数据	115
7.1 大数据热潮	116
7.1.1 “大数据”横空出世	116
7.1.2 数据增长的历史	116
7.1.3 物联网与大数据	118
7.2 从网络化存储到数据中心	118
7.3 大数据处理	121
7.3.1 Google File System	121
7.3.2 MapReduce	123
7.3.3 BigTable	124
7.3.4 Hadoop	126
7.4 典型的数据中心	127
7.5 大数据的意义	131
7.5.1 数据以意想不到的方式在收集和 利用	131
7.5.2 数据以极简的方式在分析处理	131
7.5.3 数据以真实又诡异的方式在讲故事	132
7.5.4 数据是一种重要的资源	133
第8章 云计算	135
8.1 云计算生态系统	136
8.2 服务器、操作系统和网络	137
8.3 虚拟化	140
8.4 云存储与云下载	142
8.5 “云物联”的展望	144