



浙江省普通高校新形态教材项目



物联网工程专业系列教材



# 从创意到原型 物联网应用快速开发

董玮 高艺 编著

RAPID DEVELOPMENT OF  
INTERNET OF  
THINGS APPLICATIONS

 科学出版社

浙江省普通高校新形态教材项目

物联网工程专业系列教材

从创意到原型

# 物联网应用快速开发

董 玮 高 艺 编著

科学出版社

北 京



## 内 容 简 介

本书共分 8 章, 内容涉及物联网“端-管-云”全链路开发流程。第 1 章介绍物联网发展现状、应用架构、典型应用; 第 2、3 章分别从硬件平台和操作系统的角度介绍物联网设备端开发; 第 4 章介绍基于 TinyLink 系统的物联网设备端快速开发; 第 5、6 章分别介绍物联网应用中常用的低功耗短距离以及长距离通信技术; 第 7、8 章分别介绍目前主流的物联网云平台 and 物联网云-端一体开发平台。

本书适合作为高等院校计算机、通信、物联网工程等专业高年级本科生、研究生的教学用书, 也适合作为物联网专业开发人员的技术参考用书。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

从创意到原型: 物联网应用快速开发/董玮, 高艺编著. —北京: 科学出版社, 2019.6

(物联网工程专业系列教材)

ISBN 978-7-03-061010-2

I. ①从… II. ①董… ②高… III. ①互联网络-应用-教材  
②智能技术-应用-教材 IV. ①TP393.4 ②TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 067532 号

责任编辑: 赵丽欣 王会明 / 责任校对: 王万红

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

\*

2019 年 6 月第 一 版 开本: 889×1194 1/16

2019 年 6 月第一次印刷 印张: 22 1/4

字数: 525 000

定价: 56.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈骏杰〉)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62134021

**版权所有, 侵权必究**

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

### 董 玮

浙江大学计算机学院教授、博士生导师，浙江大学求是青年学者，IEEE/ACM会员，CCF高级会员，CCF互联网专业委员会、物联网专业委员会委员，浙江省计算机学会嵌入式与物联网技术专业委员会秘书长。主要研究方向包括物联网、边缘计算、无线与移动计算等。承担国家和省部级项目10多项，在ACM MobiCom、UbiComp、IEEE INFOCOM、ICNP等国际高水平会议，以及ToN、TMC、TC等国际高水平期刊发表论文100余篇，其中CCF A类期刊/会议论文40余篇，IEEE/ACM Transactions系列长文30余篇。两次获国际会议最佳论文奖，多次担任国际知名会议程序委员会委员。获全国优秀博士论文提名、CCF-Intel青年学者提升计划、浙江省杰出青年基金、浙江省科技进步一等奖等奖励或荣誉。



### 高 艺

浙江大学计算机学院副教授，IEEE/ACM会员，CCF专业会员，CCF青年工作委员会委员。主要研究方向包括物联网与传感网、边缘计算、无线和移动计算、软件定义网络等。承担国家和省部级项目多项，在ACM MobiCom、UbiComp、IEEE INFOCOM、ICNP等国际高水平会议，以及ToN、TMC等国际高水平期刊发表论文40余篇。入选首届中国计算机学会CCF青年人才发展计划。



### 物联网导论 (第3版)

书号: 978-7-03-051685-5

定价: 45元

作者: 刘云浩 编著

### 射频识别技术原理、协议及系统设计 (第2版)

书号: 978-7-03-049237-1

定价: 48元

作者: 谢磊 陆桑璐 编著

### 物联网系统设计与应用

书号: 978-7-03-052151-4

定价: 45元

作者: 郭忠文 著

### 物联网安全基础

书号: 978-7-03-037267-3

定价: 49元

作者: 武传坤 等 编著

### 农业物联网导论

书号: 978-7-03-035691-8

定价: 52元

作者: 李道亮 著

### NB-IoT技术详解与行业应用

书号: 978-7-03-052702-8

定价: 98元

作者: 解运洲 编著

### 边缘计算

书号: 978-7-03-056144-2

定价: 48元

作者: 施巍松 刘芳 孙辉 裴庆祺 编著

### NB-IoT实战指南

书号: 978-7-03-057329-2

定价: 39元

作者: 史治国 潘骏 陈积明 编著

### 从创意到原型: 物联网应用快速开发

书号: 978-7-03-061010-2

定价: 56元

作者: 董玮 高艺 编著



专业、行业、就业资讯共享, 请进“IoT科学讲堂”。

扫码加编辑微信, 或加微信“sciclassroom”邀请入群。

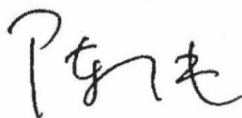
# 序 言

在过去二十年中，科技的不断进步使得人类社会在现实物理世界之外重新构建了一个信息空间。互联网和移动互联网等技术把人类社会和信息空间紧密地联系起来，深刻地改变了人们的通信、居住、购物、出行等各个方面。同时，嵌入式系统、无线传感器网络、物联网等技术的不断发展使得现实物理世界与信息空间的连接不断加强，物联网技术的应用前景越来越广阔。

物联网应用开发有两个显著特点：一是开发技术多，二是应用定制性强。第一个特点使得物联网应用开发周期长、成本高，难以快速迭代，对应用创新十分不利。第二个特点是每一个物联网应用几乎都需要一定的定制开发，难以像传统 IT 产品一样快速低成本地复制。这两个特点是制约物联网产业快速发展的原因之一。物联网行业产业需求多、技术发展快，因此物联网应用快速开发方面的教学十分必要。

本书的作者从攻读博士学位开始就从事传感网/物联网相关方面的研究，紧跟物联网发展中的最新技术，在物联网基础理论方面有着坚实的研究基础；本书对于物联网开发中所涉及的技术进行了较为全面且深入的介绍，从底层硬件，到操作系统，再到低功耗无线网络，最后到应用构建，既有基础性的原理阐述，也有实践性很强的案例介绍。我相信本书对物联网方向的学生及物联网产业的技术人员都会有所帮助，对物联网技术应用的进一步发展将发挥积极作用。

中国工程院院士



2019年3月25日

# 前 言

物联网的概念由来已久，但其大规模实际应用则是近年来的事情。十几年前，我接触并研究传感网，经历了传感网到物联网发展过程中核心技术的巨大变化。目前，物联网硬件平台的异构性进一步加剧，工业界开始主导物联网操作系统领域，低功耗广域网的飞速发展使得物联网设备接入因特网不再困难，各大企业纷纷推出物联网云平台，物联网云-端一体化的趋势日益明显。

尽管物联网技术在飞速发展，但从应用开发的角度来看，用户想要开发一个完整的物联网应用仍不容易，他需要熟悉并掌握物联网设备端、云端、移动端中各种不同的技术。这些技术所需要的开发环境、工具链成熟度各不相同，从而给应用开发带来巨大挑战。

物联网领域中多种新技术的出现，以及物联网应用开发的困难性，使我觉得有必要撰写一本物联网开发方面的教材。愿望大都是美好的，但实施过程中往往会遇到很多选择和困难，本书的撰写也不例外。

首先是重原理还是重实践的选择。从本书的书名看，应该是重实践。但如果太偏重实践而忽略原理介绍，知识点的组织将变得十分零散，教师上课就无法围绕知识点展开，学习者也无法系统地掌握物联网各种关键技术。所以，本书借鉴了经典教材 *Computer Networks* (Andrew S. Tanenbaum) 的写法：每章先介绍基本原理，再介绍现有技术，最后是案例开发。介绍完基本原理之后，对各种技术的介绍就会更加简洁，也容易看出各种不同技术的相似点和不同点。案例开发部分则尽量自成一体；使得工程开发人员也可以跳过前面部分快速上手。

其次是全面性还是针对性的选择。物联网产业链长，开发技术多。硬件平台有 TelosB、Arduino、树莓派、BeagleBone 等；操作系统有 TinyOS、Contiki OS、Huawei liteOS、AliOS Things、Android Things 等；通信技术有 ZigBee、蓝牙、NFC、红外、可见光、NB-IoT、LoRa、SigFox 等；物联网云平台更是有亚马逊 AWS IoT、微软 Azure IoT、中国移动 OneNet、阿里云 IoT、华为 OceanConnect 等。每一个方面都可以单独出一本教材。但是，一个完整的物联网应用恰恰包括了物联网硬件、操作系统、通信协议、云平台以及移动端等各个方面。本书的内容涵盖了典型物联网应用架构的四个方面：物联网设备硬件及软件、通信协议、物联网云平台、移动/应用端。在每个方面只选取了最具代表性的几个技术做了详细介绍。我们希望读者通过对这些技术的深入理解，能够举一反三，快速学习并掌握其他相关技术。

最后是新颖性还是基础性的选择。新颖性无论是对一篇论文还是一本书都十分重要。本书介绍了目前物联网领域比较新的技术，如 Huawei liteOS、AliOS Things、NB-IoT、LoRa、微软 Azure IoT 和阿里云 IoT 的 IoT Studio 开发平台等。此外，在与学术研究相关的章节中，专门介绍了最新的学术研究前沿。基础性的知识也同样重要。引用

Tanenbaum 教授的话，某类技术非常优美，虽然现在没被使用，但有可能在未来解决某个关键问题。所以我们既要学习当前流行的各种技术，也要学习很多设计优美、在未来可能大有用处的技术。因此，本书也介绍了 TinyOS、Contiki OS、基于 802.15.4 的传感网协议中重要的基础性知识，包括其中组件化编程的思想、轻量级线程的设计、低功耗 MAC 的设计等。

变与不变是一个领域微妙的两面。不变，领域就没有生机；经常变，领域就没有知识的沉淀。研究了十多年的传感网/物联网，我经常在思考，物联网到底是重在系统，还是网络，或是感知与信号处理？什么是物联网专业的特长？在写完本书之后，我自己的一个体会就是，系统、网络、感知等方面都是物联网不可或缺的要素。对物联网从业者来说，熟悉并了解上述每个方面固然重要，但更重要的是怎样去更好地理解各种不同的应用场景，怎样去选择并定制各种不同的技术，怎样去提高快速开发并实现一个完整的物联网应用的能力。

### 本书面向的读者

本书适合作为高等院校计算机、通信、物联网工程等专业的高年级本科生、研究生的教学用书，也适合作为物联网专业开发人员的技术参考用书。

### 本书的内容组织

如图 1 所示，本书共分 8 章内容，涉及物联网“端-管-云”全链路开发流程。第 1 章介绍物联网发展现状、应用架构、典型应用；第 2、3 章分别从硬件平台和操作系统的角度介绍物联网设备端开发；第 4 章介绍基于 TinyLink 系统的物联网设备端快速开发；第 5、6 章分别介绍物联网应用中常用的低功耗短距离以及长距离通信技术；第 7、8 章分别介绍目前主流的物联网云平台 and 物联网云-端一体开发平台。

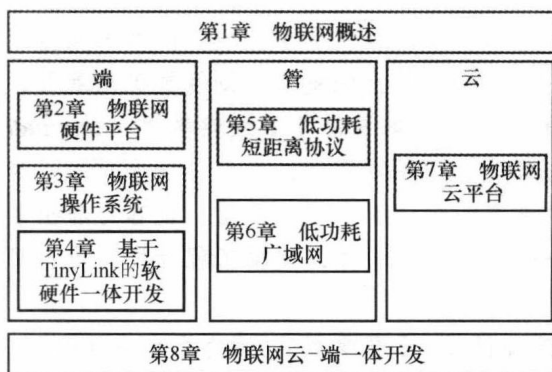


图 1 本书内容组织

### 本书配套的电子材料

本书配备丰富的电子材料，包括课程讲义、案例示例代码、参考答案、案例开发视频教程等。为方便读者学习，其中，案例开发视频教程及部分内容的详细讲解在书中以二维码的形式呈现。其他材料读者可向本书责任编辑索取，发送 E-mail 至 56813984@qq.com。

### 致谢

要在短时间内深入了解本书涉及的许多新技术，特别是要基于这些技术做实际案例的开发着实不易。为此，自我从 2018 年 8 月决定编写教材以来的半年内，浙江大学物联网系统与网络 (EmNets) 课题组的学生都花费了大量的时间和精力准备素材，在此对他们的努力表示感谢。他们是：蔡振宇、曹晨红、陈共龙、程志浩、管高扬、靖远、李博睿、李惠康、林宇翔、刘汶鑫、吕嘉美、宋心怡、王一卉、张甲栋、张文照。

还要感谢阿里云 IoT 事业部的支持，在过去的一年多时间里，课题组与阿里云 IoT 事业部同为阿里巴巴-浙江大学前沿技术联合研究中心 (AZFT) 物联网实验室的成员，双方在物联网平台方面的合作与交流也是本书许多重要内容的来源。此外，需要特别感谢科学出版社的赵丽欣女士，没有她的大力支持，这本书不会这么快和读者见面。

由于编者知识有限，加之时间仓促，书中难免存在疏漏，恳请读者批评指正。

董 玮

2019年3月

# 目 录

第 1 章 物联网概述	1
1.1 物联网的定义和发展趋势	1
1.2 物联网的应用架构及挑战	2
1.2.1 应用架构	2
1.2.2 机遇及挑战	3
1.3 物联网典型应用	4
1.3.1 智慧城市——鸿山物联网小镇	4
1.3.2 智慧校园——CMU Living Lab	7
1.3.3 空气质量监测——Mosaic	11
1.4 物联网相关学术研究及前沿问题	15
1.4.1 相关学术研究领域	15
1.4.2 物联网的关注点及其前沿挑战问题	17
1.5 总结与展望	23
习题	23
参考文献	24
第 2 章 物联网硬件平台	25
2.1 概述	25
2.1.1 简介	25
2.1.2 平台组成	27
2.2 关键特性	27
2.2.1 成本与体积	27
2.2.2 能耗	28
2.2.3 运算速度和内存大小	29
2.2.4 接口类型	30
2.2.5 安全性	39
2.3 常见的硬件平台	40
2.3.1 传感器节点平台	40
2.3.2 Arduino 系列硬件平台	42
2.3.3 树莓派系列硬件平台	48
2.4 案例开发——室内环境监测	51

2.4.1	基于 Arduino UNO 的开发	52
2.4.2	基于树莓派 3B 的开发	55
2.5	学术研究前沿	58
2.6	总结	59
	习题	59
	参考文献	61
<b>第 3 章</b>	<b>物联网操作系统</b>	<b>63</b>
3.1	概述	63
3.1.1	简介	63
3.1.2	系统构成	64
3.2	关键特性	65
3.2.1	编程模型	65
3.2.2	调度方式	68
3.2.3	I/O 操作方式	69
3.2.4	内存分配	70
3.2.5	软件更新	71
3.2.6	网络服务	72
3.2.7	系统安全	72
3.3	典型物联网操作系统	75
3.3.1	TinyOS	76
3.3.2	Contiki OS	82
3.3.3	AliOS Things	91
3.4	案例开发——物联网防盗节点（增强版）	95
3.4.1	基于 TinyOS 的开发	96
3.4.2	基于 Contiki OS 的开发	99
3.4.3	基于 AliOS Things 的开发	101
3.5	学术研究前沿	105
3.6	总结与展望	105
	习题	106
	参考文献	109
<b>第 4 章</b>	<b>基于 TinyLink 的软硬件一体开发</b>	<b>111</b>
4.1	概述	111
4.2	TinyLink 使用说明	114
4.2.1	开发流程	114
4.2.2	功能描述	117

4.2.3	API 说明	119
4.3	TinyLink 开发实例	121
4.3.1	功能使用	122
4.3.2	功能扩充	126
4.4	TinyLink 实现机理	127
4.4.1	TinyLink 系统框架	127
4.4.2	硬件生成系统	128
4.4.3	软件生成系统	129
4.5	远程实验室 uDevice Center	130
4.5.1	uDevice Center 简介	130
4.5.2	uDevice Center 与 TinyLink 的集成	131
4.5.3	开发示例	132
4.6	案例开发——物联网防盗节点（增强版）	135
4.6.1	使用默认功能开发	135
4.6.2	指定硬件平台开发	138
4.6.3	使用推荐系统开发	139
4.6.4	增加新外设并开发	140
4.7	其他相关工作	143
4.8	总结与展望	145
	习题	145
	参考文献	147
<b>第 5 章</b>	<b>低功耗短距离协议</b>	<b>149</b>
5.1	概述	149
5.1.1	简介	149
5.1.2	典型协议	150
5.2	关键特性	153
5.2.1	通信距离	155
5.2.2	频段	155
5.2.3	数据率	156
5.2.4	安全性	156
5.2.5	非技术特性	157
5.3	代表性协议	157
5.3.1	基于 IEEE 802.15.4 的传感网协议	157
5.3.2	蓝牙低功耗协议（BLE）	178
5.4	案例开发——智能灯泡远程控制系统	191
5.4.1	案例描述	191

5.4.2 开发步骤 .....	191
5.5 学术研究前沿 .....	195
5.6 总结与展望 .....	196
习题 .....	196
参考文献 .....	197
<b>第6章 低功耗广域网 .....</b>	<b>199</b>
6.1 概述 .....	199
6.1.1 简介 .....	199
6.1.2 典型协议 .....	201
6.2 关键特性 .....	202
6.2.1 通信距离 .....	202
6.2.2 功耗 .....	203
6.2.3 数据率 .....	205
6.2.4 频段的分配与使用 .....	206
6.2.5 基站部署 .....	207
6.2.6 非技术特性 .....	207
6.3 代表性协议 .....	207
6.3.1 NB-IoT .....	207
6.3.2 LoRaWAN .....	227
6.4 案例开发——智能垃圾桶 .....	238
6.4.1 案例描述 .....	238
6.4.2 开发步骤 .....	238
6.5 学术研究前沿 .....	242
6.6 总结与展望 .....	242
习题 .....	243
参考文献 .....	244
<b>第7章 物联网云平台 .....</b>	<b>245</b>
7.1 概述 .....	245
7.2 主要功能 .....	248
7.2.1 设备连接 .....	249
7.2.2 设备管理 .....	257
7.2.3 IFTTT 与规则引擎 .....	259
7.2.4 时序数据库与流计算 .....	264
7.2.5 安全认证 .....	265
7.2.6 无服务器计算 .....	267

7.2.7 边缘计算 .....	269
7.3 典型物联网云平台 .....	271
7.3.1 Amazon AWS IoT .....	271
7.3.2 Microsoft Azure IoT .....	272
7.3.3 阿里云 IoT .....	274
7.4 案例开发——语音控制智能电灯 .....	277
7.4.1 案例描述 .....	277
7.4.2 开发步骤 .....	278
7.5 总结 .....	293
习题 .....	293
参考文献 .....	295
<b>第 8 章 物联网云-端一体开发 .....</b>	<b>296</b>
8.1 概述 .....	296
8.2 主要功能 .....	297
8.2.1 设备端开发 .....	297
8.2.2 云服务开发 .....	301
8.2.3 Web 应用/移动应用开发 .....	303
8.2.4 集成与简化 .....	306
8.3 典型开发平台 .....	312
8.3.1 TinyLink 2.0 .....	312
8.3.2 IoT Studio .....	316
8.4 案例开发——智能教室座位使用统计系统 .....	331
8.4.1 基于 TinyLink 2.0 的开发 .....	332
8.4.2 基于 IoT Studio 的开发 .....	335
8.4.3 基于 TinyLink + IoT Studio 的开发 .....	338
8.5 总结 .....	340
习题 .....	341
参考文献 .....	342



# 第 1 章 物联网概述

## 【学习目标】

- 理解物联网的定义，了解物联网的发展趋势；
- 掌握物联网的应用架构及挑战；
- 了解物联网的典型应用；
- 了解物联网相关的学术领域和学术关注点；
- 掌握物联网与传感网的不同点。

## 1.1 物联网的定义和发展趋势

什么是物联网？根据维基百科上的定义，物联网就是物理设备以及其他嵌入了电子器件、软件、传感器的物件组成的网络。这些物件具有感知能力、计算能力以及连接能力，从而能更直接地将物理世界集成到数字世界中。

### 扩展阅读

早在 1995 年 Bill Gates 就在《未来之路》一书中提出了物物互联的基本思想。2005 年国际电信联盟指出，无所不在的“物联网”通信时代即将来临。2009 年，IBM 提出了“智慧地球”的概念。同年，中国提出了“感知中国”的概念。国际电信联盟这样描绘物联网时代的图景：衣服会告诉洗衣机对颜色和水温的要求，公文包会提醒主人忘带了什么东西。物联网时代的来临将会使人们的日常生活发生翻天覆地的变化。

近年来，在学术界和工业界的共同推动下，物联网技术有了极大的发展。早在 2003 年，ACM 就组织了嵌入式网络传感器系统大会（Conference on Embedded Networked Sensor Systems, SenSys），聚焦基于微型传感器节点的系统设计、组网、计算以及感知等关键问题。2016 年，IEEE、ACM 共同资助首届物联网设计与实现大会（Internet of Things Design and Implementation, IoTDI），该会拓展了基于传统微型传感器节点的研究

究范围，关注基于物联网的交互性、可靠性、安全性等前沿问题。在物联网领域的学术期刊方面，IEEE 和 ACM 分别推出了两本期刊：*IEEE Internet of Things Journal* 和 *ACM Transactions on Internet of Things*，值得物联网领域的科技工作者参考借鉴。

在工业界，物联网也得到了极大的关注。2017年6月，工业和信息化部发布了《关于全面推进移动物联网（NB-IoT）建设发展的通知》。华为、中国移动、中国电信等公司投入巨资建设物联网基础设施，大量低功耗物联网设备如何接入互联网的关键问题有望得到全面解决。阿里巴巴、IBM、亚马逊、微软等互联网公司以及众多创业公司正在物联网平台与应用方面布局，以解决大量物联网数据如何存储、查询、处理等共性问题。相继推出的物联网开发云平台包括亚马逊 IoT 平台、微软 Azure IoT 云平台、阿里云 Link 平台等。

## 1.2 物联网的应用架构及挑战

### 1.2.1 应用架构

一个典型物联网应用的架构如图 1-1 所示，包括 4 个主要部分。

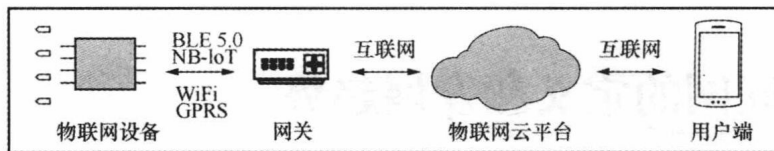


图 1-1  
物联网应用架构

① 物联网设备 这是物联网的终端感知设备。例如，可以是一个 PM2.5 感知节点，该节点采集 PM2.5 空气质量数据，并通过某一种通信方式上传到物联网云平台。

② 网关 物联网设备通常通过无线方式接入互联网。传统的接入方式包括 WiFi、GPRS 等，新兴的接入方式包括 NB-IoT、蓝牙 5.0 等。在这些接入方式中通常需要一个网关（如 WiFi 接入点、蜂窝网基站等）。网关通过无线接收数据，并通过有线将数据传输到物联网云平台。

③ 物联网云平台 物联网云平台的功能主要包括存储物联网感知数据，并提供相应的数据查询、分析、处理、展示；物联网终端、网关设备的接入和管理；设备间通信支持；多重安全防护保障等。

④ 用户端 基于物联网云平台，应用开发者也可以开发各类用户端应用，可以是 PC（个人计算机）应用程序、网站，或者是智能手机 App 等。

由此可见，一个物联网应用的开发涉及多个方面。而在每一个方面都可能涉及众多的软硬件平台。图 1-2 展示了部分常见的设备与平台。



图 1-2  
物联网应用涉及的软硬件平台

## 1.2.2 机遇及挑战

在物联网云平台方面，目前各大互联网公司基于已有的云计算技术推出了相对成熟的物联网平台产品，大大简化了物联网数据的存储、分析和处理。但在物联网设备的选型和开发、无线接入方式的选择、应用程序流程的简化和优化等方面还面临很大的机遇和挑战。这些机遇和挑战可以总结为以下几个方面：

- **开发链长。**一个完整的物联网应用包括嵌入式开发、云端开发以及用户端开发。目前，物联网应用的开发还是非常复杂的，需要不同类型的开发人员共同协作。国际著名芯片半导体公司 TI 曾明确提出：如何使物联网的设计和开发变得简单非常必要。物联网应用的开发需要让所有开发者觉得容易，而不仅限于专家。
- **物联网领域还没有出现固定的终端类型。**在 PC 领域，大家熟知的硬件架构有 Intel、AMD，操作系统有 Windows、Linux；在移动领域，大家熟知的有 Android 平台、iOS 平台。但是在物联网领域，还没有形成被大家广泛接受的硬件平台和软件平台。
- **目前，物联网应用开发的架构还是属于“垂直一体化”的。**如图 1-3 所示，构建一个完整的物联网应用，开发者需要考虑硬件平台、软件系统、传输技术、云平台以及用户端应用。但在每一个层次，都还没有统一的平台和技术。作为对比，我们来看一下计算机软件和网络协议的系统架构，如图 1-4 所示。它们的一个共同点是这个架构形成一个倒沙漏的形状，即中间部分形成统一的接口，而在底层和上层则有很多不同的技术和应用。这样的架构分离了上层应用逻辑和底层的技术细节，使得应用和协议的开发可以基于统一的接口而不必考虑底层细节。这可能是物联网应用开发架构应该努力的一个方向。