



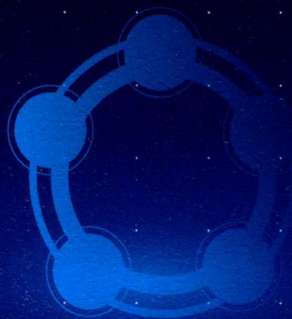
“十三五”国家重点出版物  
出版规划项目



“中国制造2025”  
出版工程

# 物联网与智能制造

张晶 徐鼎 刘旭 等编



化学工业出版社



“十三五”国家重点出版物  
出版规划项目



“中国制造2025”  
出版工程

# 物联网与智能制造

张晶 徐鼎 刘旭 等编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书共分为6章,从广义物联网体系架构的角度出发,阐述构建物联网的相关关键技术与未来发展趋势,进而探讨基于工业物联网实现智能制造的技术方法与应用案例。内容包括物联网的体系架构、感知技术、网络层技术,以及物联网的平台和基于工业物联网的智能制造系统,通过案例介绍工业物联网在智能制造中的应用模式与应用方法。

本书适合从事智能制造、物联网相关行业的科研、开发人员阅读,也适合大专院校相关专业师生使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

物联网与智能制造/张晶等编.—北京:化学工业出版社,2019.1

“中国制造2025”出版工程

ISBN 978-7-122-33242-4

I. ①物… II. ①张… III. ①互连网络-应用②智能技术应用③智能制造系统 IV. ①TP393.4②TP18③TH166

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第249183号

责任编辑:刘哲 宋辉  
责任校对:王静

文字编辑:陈喆  
装帧设计:尹琳琳

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:三河市延风印装有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张21½ 字数403千字 2019年4月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888

售后服务:010-64518899

网址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:89.00元

版权所有 违者必究



科学是永无止境的，它是一个永恒之谜。

——爱因斯坦



“中国制造2025”  
出版工程



# 《“中国制造 2025”出版工程》

## 编委会

### 主任

孙优贤（院士）

### 副主任（按姓氏笔画排序）

王天然（院士） 杨华勇（院士） 吴澄（院士）

陈纯（院士） 陈杰（院士） 郑南宁（院士）

桂卫华（院士） 钱锋（院士） 管晓宏（院士）

### 委员（按姓氏笔画排序）

马正先 王大轶 王天然 王荣明 王耀南 田彦涛

巩水利 乔非 任春年 伊廷锋 刘敏 刘延俊

刘会聪 刘利军 孙长银 孙优贤 杜宇雷 巫英才

李莉 李慧 李少远 李亚江 李嘉宁 杨卫民

杨华勇 吴飞 吴澄 吴伟国 宋浩 张平

张晶 张从鹏 张玉茹 张永德 张进生 陈为

陈刚 陈纯 陈杰 陈万米 陈长军 陈华钧

陈兵旗 陈茂爱 陈继文 陈增强 罗映 罗学科

郑南宁 房立金 赵春晖 胡昌华 胡福文 姜金刚

费燕琼 贺威 桂卫华 柴毅 钱锋 徐继宁

郭彤颖 曹巨江 康锐 梁桥康 焦志伟 曾宪武

谢颖 谢胜利 蔡登 管晓宏 魏青松

# 序

制造业是国民经济的主体，是立国之本、兴国之器、强国之基。近十年来，我国制造业持续快速发展，综合实力不断增强，国际地位得到大幅提升，已成为世界制造业规模最大的国家。但我国仍处于工业化进程中，大而不强的问题突出，与先进国家相比还有较大差距。为解决制造业大而不强、自主创新能力弱、关键核心技术与高端装备对外依存度高等制约我国发展的问题，国务院于2015年5月8日发布了“中国制造2025”国家规划。随后，工信部发布了“中国制造2025”规划，提出了我国制造业“三步走”的强国发展战略及2025年的奋斗目标、指导方针和战略路线，制定了九大战略任务、十大重点发展领域。2016年8月19日，工信部、国家发展改革委、科技部、财政部四部委联合发布了“中国制造2025”制造业创新中心、工业强基、绿色制造、智能制造和高端装备创新五大工程实施指南。

为了响应党中央、国务院做出的建设制造强国的重大战略部署，各地政府、企业、科研部门都在进行积极的探索和部署。加快推动新一代信息技术与制造技术融合发展，推动我国制造模式从“中国制造”向“中国智造”转变，加快实现我国制造业由大变强，正成为我们新的历史使命。当前，信息革命进程持续快速演进，物联网、云计算、大数据、人工智能等技术广泛渗透于经济社会各个领域，信息经济繁荣程度成为国家实力的重要标志。增材制造（3D打印）、机器人与智能制造、控制和信息化、人工智能等领域技术不断取得重大突破，推动传统工业体系分化变革，并将重塑制造业国际分工格局。制造技术与互联网等信息技术融合发展，成为新一轮科技革命和产业变革的重大趋势和主要特征。在这种中国制造业大发展、大变革背景之下，化学工业出版社主动顺应技术和产业发展趋势，组织出版《“中国制造2025”出版工程》丛书可谓勇于引领、恰逢其时。

《“中国制造2025”出版工程》丛书是紧紧围绕国务院发布的实施制造强国战略的第一个十年的行动纲领——“中国制造2025”的一套高水平、原创性强的学术专著。丛书立足智能制造及装备、控制及信息技术两大领域，涵盖了物联网、大数

据、3D 打印、机器人、智能装备、工业网络安全、知识自动化、人工智能等一系列的核心技术。丛书的选题策划紧密结合“中国制造 2025”规划及 11 个配套实施指南、行动计划或专项规划，每个分册针对各个领域的一些核心技术组织内容，集中体现了国内制造业领域的技术发展成果，旨在加强先进技术的研发、推广和应用，为“中国制造 2025”行动纲领的落地生根提供了有针对性的方向引导和系统性的技术参考。

这套书集中体现以下几大特点：

首先，丛书内容都力求原创，以网络化、智能化技术为核心，汇集了许多前沿科技，反映了国内外最新的一些技术成果，尤其使国内的相关原创性科技成果得到了体现。这些图书中，包含了获得国家与省部级诸多科技奖励的许多新技术，因此图书的出版对新技术的推广应用很有帮助！这些内容不仅为技术人员解决实际问题，也为研究提供新方向、拓展新思路。

其次，丛书各分册在介绍相应专业领域的新技术、新理论和新方法的同时，优先介绍有应用前景的新技术及其推广应用的范例，以促进优秀科研成果向产业的转化。

丛书由我国控制工程专家孙优贤院士牵头并担任编委会主任，吴澄、王天然、郑南宁等多位院士参与策划组织工作，众多长江学者、杰青、优青等中青年学者参与具体的编写工作，具有较高的学术水平与编写质量。

相信本套丛书的出版对推动“中国制造 2025”国家重要战略规划的实施具有积极的意义，可以有效促进我国智能制造技术的研发和创新，推动装备制造业的技术转型和升级，提高产品的设计能力和技术水平，从而多角度地提升中国制造业的核心竞争力。

中国工程院院士

潘雲鶴



# 前言

随着无线通信技术和移动互联网的迅速发展以及无线终端设备的广泛应用，机器类通信业务呈现爆发式增长，面向人-机-物实时动态信息交互的网络——物联网应运而生。作为融合通信、计算、控制的新型信息通信技术，物联网被称为继计算机、互联网之后世界信息产业的第三次浪潮，受到各国政府、企业和学术界的高度重视，美国、欧盟、日本等已经将其纳入国家和区域信息化发展战略。我国从2009年开始将物联网列为重点发展的战略性新兴产业，并将其视为未来信息产业竞争的制高点和产业升级的核心驱动力。

物联网的颠覆性在于将包括人、机、物在内的所有事物通过网络自主互联，使得物理设备与系统具有计算、通信、控制、远程协调和自治五大功能，从而改变我们与物理世界的互动方式。物联网的理念和相关技术产品已经广泛渗透到社会经济与民生的各个领域，小到智能家庭网络，大到工业控制系统、智能交通系统等国家级甚至世界级的应用，物联网在越来越多的行业创新中发挥着关键作用。借助信息技术与传感、控制、计算等技术的深度集成和综合应用，物联网正在成为加速产业升级、提升政务服务、改善社会民生、促进增效节能等方面的推动力，在工业制造、交通等领域正带来真正的“智慧”应用。

如果说物联网是决定未来经济发展程度的引擎，那么智能制造就是实现强国之路的核心。从德国的工业4.0，到美国的CPS和工业互联网，再到我国提出的“智能制造”，全球各主要国家都在大力布局制造强国战略，以期抢占未来经济发展的制高点和下一代产业的领导权。智能制造的本质是将新一代信息技术与现代化的生产制造相融合，通过建设“智能工厂”，开展“智能生产”，实现生产要素的高效、低耗、协同以及个性化的批量定制生产。这一概念与物联网通过资源的高效、协同实现面向用户的智慧化服务内涵不谋而合。因此，物联网和智能制造两者具有天然的耦合关系，基于工业物联网实现智能制造是必然选择。

目前,围绕物联网和智能制造的学术研究、标准制定以及产业应用正在火热地展开中。尽管针对物联网的技术文献和报告很多,但绝大多数研究成果均是针对某一个技术领域或者某一个精细的技术点展开研究,有必要对当前物联网的最新研究成果进行全面梳理与系统归类,为相关领域的应用实践提供指导,这是撰写本书的第一个出发点。另一方面,作为物联网的一个重要应用领域,国内制造业的网络化与信息化水平仍然较低,如何整合现有资源构建新型工业物联网,实现生产要素的信息化与网络化问题,进而基于工业物联网实现智能制造,这是一个极具挑战性的问题,也是撰写本书的第二个出发点。

基于上述出发点,本书编者在广泛调研物联网与智能制造国内外研究成果的基础上,结合自身在相关技术领域的研究积累,尝试从广义物联网体系架构的角度出发,阐述构建物联网的相关关键技术与未来发展趋势,进而探讨基于工业物联网实现智能制造的技术方法与应用案例。全书共分为6个章节:第1章介绍物联网的概念、内涵与特点,概述物联网的发展现状与趋势,阐述智能制造的概念,并说明工业物联网对实现智能制造的重要意义;第2章从网络架构、技术与标准体系、资源与标识体系、服务与安全体系、产业与创新体系五个方面阐述广义物联网的构成要素以及要素关系;第3章介绍物联网的感知技术,包含传感技术、识别技术以及传感网;第4章介绍物联网的网络层技术,包括接入网、核心网以及网络资源管理相关技术;第5章介绍物联网的平台,包括云计算平台、应用平台以及工业物联网平台等;第6章通过案例介绍工业物联网在智能制造中的应用模式与应用方法。

本书由南京邮电大学通信与信息工程学院、通信技术研究所的多位教师共同编写完成,其中第1、2章由张晶编写,

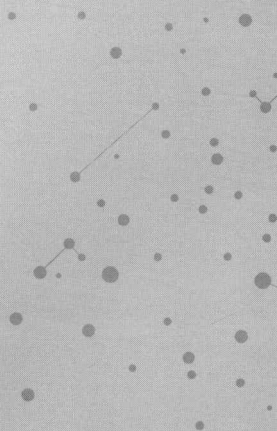
第3章由徐鼎编写，第4章由邵汉钦编写，第5章由刘旭编写，第6章由朱霞编写。通信技术研究所的李文超、刘孝祥、杨杰、谢晨升、李恒民、程万里、王慧、尤莉、康晓燕等参与了前期资料调研与翻译、文档图表绘制等工作。研究所的其他同志对本书的撰写提出了修改意见和建议，在此向大家表示衷心的感谢。

特别要感谢的是本书编写者的家人们，正是他们的鼎力支持，本书才能按照计划如期完成。同时要感谢多位编写者的年幼宝宝们，为了尽早完成本书的撰写，爸爸妈妈只能牺牲部分陪伴宝宝的时间，有时甚至狠心置他们的哭闹索抱于不顾，尽管委屈，但他们最终还是默默配合了。谢谢各位亲爱的家人们！

此外，各位评审专家和编辑对本书的内容与格式也提出了宝贵意见与修改建议，在此向大家一并表示衷心的感谢。

物联网与智能制造两大领域的技术正处于重点发展时期，技术更新速度较快，书中疏漏之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编者





## 1 第1章 绪论

- 1.1 物联网的概念 / 1
- 1.2 物联网的发展现状与趋势 / 2
  - 1.2.1 政策环境 / 2
  - 1.2.2 技术研究现状 / 3
  - 1.2.3 产业发展现状 / 10
  - 1.2.4 标准研究现状 / 11
  - 1.2.5 未来发展趋势 / 12
- 1.3 基于工业物联网的智能制造 / 13
  - 1.3.1 智能制造的概念与内涵 / 13
  - 1.3.2 实现智能制造的基础——工业物联网 / 17
  - 1.3.3 工业物联网对实现智能制造的意义 / 18
- 参考文献 / 21

## 26 第2章 物联网的体系架构

- 2.1 概述 / 26
- 2.2 物联网网络体系架构 / 28
  - 2.2.1 系统总体架构 / 28
  - 2.2.2 软件体系架构 / 40
- 2.3 物联网技术与标准体系 / 49
  - 2.3.1 物联网技术体系 / 50
  - 2.3.2 物联网标准体系 / 55
- 2.4 物联网资源与标识体系 / 59
  - 2.4.1 物联网资源体系 / 59
  - 2.4.2 物联网标识体系 / 63
- 2.5 物联网服务与安全体系 / 66
  - 2.5.1 物联网服务体系 / 66
  - 2.5.2 物联网安全体系 / 69
- 2.6 物联网产业与创新体系 / 72

- 2.6.1 物联网产业体系 / 72
- 2.6.2 物联网创新体系 / 74
- 2.7 工业物联网体系架构 / 77
  - 2.7.1 工业物联网系统构成 / 77
  - 2.7.2 工业物联网总体架构 / 78
  - 2.7.3 工业物联网技术体系 / 82
  - 2.7.4 工业物联网标准体系 / 83
  - 2.7.5 工业物联网标识体系 / 88
- 参考文献 / 90

## 95 第3章 传感与识别技术

- 3.1 自动识别技术 / 95
  - 3.1.1 条形码技术 / 95
  - 3.1.2 光学符号识别技术 / 97
  - 3.1.3 生物特征识别技术 / 97
  - 3.1.4 磁卡与 IC 卡 / 98
  - 3.1.5 射频识别系统 / 99
  - 3.1.6 自动识别系统比较 / 105
- 3.2 传感器 / 106
  - 3.2.1 传感器构成 / 106
  - 3.2.2 光信息采集器 / 107
  - 3.2.3 声波信息采集器 / 108
  - 3.2.4 图像信息采集器 / 109
  - 3.2.5 化学信息采集器 / 110
  - 3.2.6 生物信息采集器 / 112
  - 3.2.7 智能传感器 / 113
- 3.3 传感网 / 114
  - 3.3.1 节点结构 / 116
  - 3.3.2 网络结构 / 123
  - 3.3.3 体系结构 / 125
  - 3.3.4 物理层 / 125
  - 3.3.5 数据链路层 / 126
  - 3.3.6 网络层 / 139
  - 3.3.7 传输层 / 152
  - 3.3.8 中间件技术 / 158
- 参考文献 / 164

## 第4章 接入与传输网络

- 4.1 接入网技术 / 167
  - 4.1.1 无线个域网 / 168
  - 4.1.2 无线局域网 / 184
  - 4.1.3 无线城域网 / 193
  - 4.1.4 无线广域网 / 198
- 4.2 核心网技术 / 206
  - 4.2.1 概述 / 206
  - 4.2.2 IP 网络 / 207
  - 4.2.3 全 IP 核心网的体系结构 / 209
  - 4.2.4 全 IP 核心网的关键技术 / 212
- 4.3 网络层关键技术 / 220
  - 4.3.1 泛在无线技术 / 220
  - 4.3.2 异构网络融合与协同技术 / 238
  - 4.3.3 无线资源管理技术 / 240
  - 4.3.4 海量信息处理与云计算技术 / 242
- 参考文献 / 251

## 第5章 物联网综合服务平台

- 5.1 云计算平台 / 254
  - 5.1.1 概述 / 254
  - 5.1.2 云计算的部署模式 / 255
  - 5.1.3 云计算的体系结构 / 257
  - 5.1.4 云平台服务模式 / 259
- 5.2 物联网应用平台 / 263
  - 5.2.1 概述 / 263
  - 5.2.2 物联网应用平台现状 / 265
  - 5.2.3 物联网应用平台架构 / 267
  - 5.2.4 物联网应用平台的分类 / 270
  - 5.2.5 工业物联网平台 / 272
- 5.3 典型工业物联网平台 / 275
  - 5.3.1 Predix 平台 / 275
  - 5.3.2 Uniformance Suite 平台 / 283
  - 5.3.3 AWS IoT 平台 / 290



## 297 第 6 章 基于工业物联网的智能制造系统

### 6.1 离散工业环境中的智能制造系统 / 297

#### 6.1.1 离散制造 / 297

#### 6.1.2 典型离散型制造行业分析 / 300

#### 6.1.3 离散制造中的控制系统 / 305

### 6.2 流程工业环境中的智能制造系统 / 311

#### 6.2.1 流程制造 / 311

#### 6.2.2 流程制造中的控制系统 / 312

### 6.3 新一代物联网化工业环境控制平台 / 320

#### 参考文献 / 324

## 326 索引

## 1.1 物联网的概念

物联网 (Internet of Things, IOT) 是由美国麻省理工学院 (MIT) 的 Kevin Ashton 于 1991 年首次提出的<sup>[1,2]</sup>。1999 年, MIT 建立了自动识别中心 (Auto-ID Labs), 提出了网络射频识别 (Radio Frequency Identification, RFID) 的概念, 指出“万物皆可通过网络互联”<sup>[3]</sup>。2001 年, MIT 的 Sanjey Sarma 和 David Brock 阐明了物联网的基本含义: 把所有物品通过 RFID 等信息传感设备与互联网连接起来, 实现智能化识别和管理<sup>[4,5]</sup>。2005 年, 国际电信联盟 (ITU) 发布了 *ITU Internet reports 2005: the Internet of Things* 报告, 指出: 信息与通信技术的目标已经从任何时间、任何地点连接任何人, 发展到连接任何人与物品, 由亿万件物品的信息连接、实时共同分享就形成了物联网<sup>[6]</sup>。

现代意义的物联网可以实现对物品的感知识别控制、网络化互联和智能处理的有机统一, 从而形成高智能的决策。工业和信息化部电信研究院在其发布的《物联网白皮书 (2011 年)》上明确指出: 物联网是通信网和互联网的拓展应用和网络延伸, 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、物与物信息交互和无缝链接, 达到对物理世界实时控制、精确管理和科学决策的目的<sup>[7]</sup>。另一种广为接受的物联网定义为: 物联网是通过射频识别 (RFID)、红外感应器、全球定位系统、激光扫描器等信息传感设备, 按约定的协议, 把物品与网络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<sup>[8]</sup>。中国科学院计算技术研究所的陈海明教授、南京理工大学的吴启辉教授等则分别从软件系统能力<sup>[9]</sup>、网络认知过程<sup>[10]</sup> 的角度阐述了物联网的概念。

本书认为: 物联网是由互联网与传感网有机融合形成的一种面向人、机、物泛在智慧互联的信息服务网络, 它利用传感器、RFID 等技术赋予事物 (包括人) 感知识别能力, 基于融合的通信网络实现事物的泛在接入与信息交互, 借助虚拟组网、智能计算、自动控制等技术实现事物的动态组网、功能重构与决策控制, 最终面向用户个性化需求提供高效信息服务。物联网应具备四个特征: 异构

性、可扩展性、可软件定义、安全性，即对异构资源（包括终端、网络、服务器等）的协同融合，对异构网络的自由连接，可软件定义的服务能力，安全的信息处理与交互，如图 1-1 所示。



图 1-1 物联网的特征

需要说明的是，物联网有狭义和广义两种定义。狭义物联网，是指物品之间通过传感器连接起来的局域网，这个网络可以不接入互联网，但如果有需要的时候，随时能够接入互联网<sup>[8]</sup>。广义物联网，等同于“未来的互联网”或者“泛在网络”，能够实现人在任何时间、地点，使用任何网络与任何人与物的信息交换。本书所指物联网，是指广义物联网。

## 1.2 物联网的发展现状与趋势

### 1.2.1 政策环境

作为一场技术革命，物联网把我们带进一个泛在连接、计算和通信相融合的新时代。一方面，物联网的发展依赖于从无线传感器到纳米技术等众多领域的动态技术创新<sup>[11]</sup>。另一方面，物联网技术的拓展和创新极大地推动了各行各业的飞速发展与社会经济的快速增长。

当前，国内外都将发展物联网视为新的技术创新点和经济增长点。国际方面，美国政府全面推进物联网发展，重点支持物联网在能源、宽带和医疗三大领域的应用<sup>[12]</sup>，以建设智慧城市为契机，发展物联网应用服务平台，构建信息物理系统（Cyber Physical System, CPS），以推进物联网在各行业的应用<sup>[13]</sup>。欧盟于 2015 年成立了横跨欧盟及产业界的物联网产业创新联盟，以构建“四横七

纵”物联网创新体系架构，协同推进欧盟物联网整体跨越式创新发展<sup>[11]</sup>。日本政府于2008年推出i-Japan战略，致力于构建一个智能的物联网服务体系，重点推进农业物联网发展<sup>[12]</sup>。韩国未来科学创造部和产业通商资源部，从2015年起投资370亿韩元，用于物联网核心技术以及微机电系统（Micro Electromechanical System, MEMS）传感器芯片、宽带传感设备的研发。新加坡等其他亚洲国家也在加紧部署物联网科技与经济发展战略。

国内方面，国务院和各部委持续推进物联网相关工作，从顶层设计、组织机制、智库支撑等多个方面持续完善政策环境<sup>[11]</sup>。继制定《物联网“十二五”发展规划》之后，国家建立了物联网发展部际联席会议制度和物联网发展专家咨询委员会，以加强统筹协调和决策支撑，国务院出台《关于推进物联网有序健康发展的指导意见》，进一步明确发展目标和思路，推出10个物联网发展专项行动计划，落实具体任务<sup>[11]</sup>。在国家其他有关信息产业和信息化的政策文件中，也提出推动物联网产业发展。国内多所高校、科研院所、通信运营商、以华为为代表的各大通信企业等都积极开展物联网关键技术研发，推进物联网的产业化应用，在智慧家居、智能电网、智慧健康等领域的研发初具规模。物联网在我国正处于加速发展阶段。

## 1.2.2 技术研究现状

在过去的十多年里，通过学术界、服务人员、网络运营商和标准开发组织的共同努力，众多突破性的创新技术从理念转变成实际产品或者应用。从技术上看，物联网研究主要集中在体系架构、感知技术、通信技术、服务平台等领域。

### 1.2.2.1 体系架构

针对物联网的体系架构研究一直是国际关注的重点。欧盟在第七框架计划（Framework Program 7, FP7）中设立了两个关于物联网体系架构的项目，其中SENSEI<sup>[13]</sup>项目目标是通过互联网将分布在全球的传感器与执行器网络连接起来，IoT-A<sup>[14]</sup>项目目标是建立物联网体系结构参考模型。韩国电子与通信技术研究所（ETRI）提出了泛在传感器网络（Ubiquitous Sensor Network, USN）<sup>[15]</sup>体系架构并已形成国际电信联盟（ITU-T）标准，目前正在进一步推动基于Web的物联网架构的国际化工作。物联网标准化组织（oneM2M）<sup>[16]</sup>自成立以来，在需求、架构、语义等方面积极开展研究，目前正在积极开展基于表征状态转移风格（RESTful）的体系<sup>[17]</sup>。

国内中国科学院上海微系统与信息技术研究所、南京邮电大学、无锡国家传感信息中心等科研院所及高校，对物联网体系架构及软硬件开发进行了相关的研