



“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

# 信息通信技术(ICT) 与智能制造

马楠 黄育侦 秦晓琦 编著

# ICT



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

# 信息通信技术(ICT) 与智能制造

马楠 黄育侦 秦晓琦 编著



化学工业出版社

·北京·

本书探讨了信息通信技术 (ICT) 与智能制造业的相互促进和融合问题。书中不但涉及以 5G 为代表的先进移动通信网络、物联网、工业互联网和工业大数据等新技术, 也对信息物理系统 (CPS) 进行了详细介绍。此外, 以智能制造中的手机制造为例, 研究通信与制造的结合、通信测试测量仪器的原理及其在手机制造中的应用, 也是本书的一个特色。

本书可供信息通信行业、工业制造领域的技术人员阅读, 也可以作为相关专业高年级本科生和研究生的学习参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

信息通信技术 (ICT) 与智能制造/马楠, 黄育侦, 秦晓琦编著.

—北京: 化学工业出版社, 2019. 3

“中国制造 2025” 出版工程

ISBN 978-7-122-33734-4

I. ①信… II. ①马…②黄…③秦… III. ①信息技术-通信技术-应用-智能制造系统-研究 IV. ①TH166-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 010091 号

---

责任编辑: 宋 辉

文字编辑: 陈 喆

责任校对: 王素芹

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 12¼ 字数 224 千字 2019 年 5 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: 56.00 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 姜金钢

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、控制和信息化技术、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

潘云鹤

# 前言

信息通信技术 (Information Communication Technology, ICT) 领域, 尤其是移动通信领域, 是我国具有国际竞争力的领域之一。21 世纪以来, 信息通信技术在 我国得到高速发展, 使我国步入通信强国的行列。

我国在移动通信领域已经走出了一条“1G 空白、2G 跟随、3G 突破、4G 同步、5G 引领”的创新之路。5G 针对性地提出了三种应用场景: 增强移动宽带、大规模机器通信和高可靠低时延通信场景, 除了满足人的通信需求外, 更多的是考虑了机器通信的需求。广义的 5G 网络将融合多类现有或未来的无线接入传输技术和功能网络, 包括传统蜂窝网络、认知无线网络 (CR)、无线局域网 (WiFi)、无线传感器网络 (WSN)、可见光通信 (VLC) 等。

信息物理系统 (Cyber-Physical Systems, CPS) 是支撑信息化和工业化深度融合的一套综合技术体系。本书作者尝试从信息与通信工程学科的角度, 分析信息通信技术与工业制造的结合方式, 深入讨论其推动智能制造的发展模式, 提出了 ICT 与 CPS 结合的技术体系架构。

本书基于三位作者在 ICT 领域的理论基础以及在智能制造领域的实践经验撰写而成。本书共分为 6 章, 其中第 1 章、第 2 章由黄育侦编写; 第 3 章、第 6 章由马楠编写; 第 4 章、第 5 章由秦晓琦编写; 马楠负责完成了全书的统稿。作者在此特别感谢北京邮电大学张平教授对本书的指导, 三位作者均师从张平教授, 他渊博的知识和在信息通信科技领域孜孜不倦的探索精神, 鼓励作者完成了这项艰巨的工作。此外, 北京邮电大学张治副教授提出了许多宝贵的建议, 在此向他致以诚挚的谢意。参与本书资料收集和整理的博士生、研究生均来自北京邮电大学无线新技术研究室, 其中李晓夙、王凌锋、李霄希、王妙伊、牛煜霞、周方圆参与了第 3、6 章工作; 李世林、孟月、王紫荆、厉承林、贾泽坤参与了第 1、2 章工作; 刘



龙、夏洋洋、朱叶青、项明均、黄舒晨参与了第 4、5 章工作。在此一并表示感谢。

由于编写时间仓促，难免会出现不足之处，敬请批评指正。

编著者

## 1 第1章 智能制造概述

- 1.1 智能制造的背景 / 2
- 1.2 智能制造的核心 / 3
  - 1.2.1 从 ICT 视角看智能制造 / 3
  - 1.2.2 ICT 与智能制造的关系 / 6
- 1.3 智能制造的内涵与特征 / 7
  - 1.3.1 智能制造的定义 / 7
  - 1.3.2 智能制造与传统制造的区别 / 10
  - 1.3.3 智能制造面临的挑战 / 12
  - 1.3.4 智能制造的未来发展趋势 / 14
- 参考文献 / 15

## 16 第2章 智能制造中的通信网络

- 2.1 第五代移动通信系统 / 17
  - 2.1.1 概述 / 17
  - 2.1.2 5G 网络架构 / 18
  - 2.1.3 5G 主要应用场景 / 20
  - 2.1.4 5G 关键技术 / 22
  - 2.1.5 5G 未来发展 / 28
- 2.2 工业互联网 / 29
- 2.3 认知无线网络 / 30
- 2.4 工业认知网络 / 31
  - 2.4.1 系统网络架构 / 33
  - 2.4.2 软硬件平台 / 35
- 参考文献 / 37

## 39 第3章 信息物理系统



- 3.1 总体定位 / 40
  - 3.1.1 CPS 的作用与背景 / 40
  - 3.1.2 CPS 应用场景 / 41
- 3.2 CPS 体系架构 / 42
  - 3.2.1 单元级、系统级与系统之系统级体系架构 / 42
  - 3.2.2 ICT 在 CPS 体系架构中的应用 / 43
- 3.3 CPS 中的 ICT 关键技术 / 44
  - 3.3.1 信息感知层中的嵌入式系统 / 44
  - 3.3.2 通信传输层技术 / 49
  - 3.3.3 计算与执行层技术 / 52
- 3.4 CPS 安全技术 / 58
  - 3.4.1 CPS 安全要求 / 58
  - 3.4.2 CPS 安全威胁 / 59
  - 3.4.3 CPS 安全技术 / 61
- 参考文献 / 63

65

## 第 4 章 智能制造中的工业互联网

- 4.1 智能制造中的数据传输难题与挑战 / 66
  - 4.1.1 数据传输系统的新发展 / 66
  - 4.1.2 数据传输系统的功能需求 / 68
  - 4.1.3 数据传输难题与挑战 / 70
- 4.2 工业互联网中的关键组网技术 / 72
  - 4.2.1 无线中继技术 / 72
  - 4.2.2 自组织网络技术 / 78
  - 4.2.3 实时定位技术 / 87
  - 4.2.4 传感器网络 / 95
- 4.3 工业互联网中的关键通信技术 / 103
  - 4.3.1 射频识别技术 / 103
  - 4.3.2 ZigBee 技术 / 105
  - 4.3.3 蓝牙技术 / 106
  - 4.3.4 超宽带技术 / 108
- 参考文献 / 109

112

## 第 5 章 智能制造中的工业大数据

- 5.1 工业大数据的来源 / 113

- 5.2 工业大数据关键技术 / 117
  - 5.2.1 数据采集技术 / 117
  - 5.2.2 数据存储与管理技术 / 120
  - 5.2.3 大数据计算模式与系统 / 125
  - 5.2.4 大数据分析 with 挖掘 / 128
- 5.3 工业大数据与智能制造 / 131
  - 5.3.1 工业大数据标准 / 131
  - 5.3.2 大数据的工业应用 / 133
  - 5.3.3 大数据构成新一代智能工厂 / 136
  - 5.3.4 智能制造中的大数据安全 / 139
- 参考文献 / 140

## 142 第6章 智能制造中的手机制造

- 6.1 智能制造主要内容 / 143
  - 6.1.1 智能工厂 / 143
  - 6.1.2 智能装备 / 144
  - 6.1.3 互联互通 / 144
  - 6.1.4 端到端数据流 / 145
- 6.2 手机制造智能化趋势 / 145
- 6.3 智能制造与手机测试 / 146
- 6.4 通信测试原理 / 148
  - 6.4.1 射频测试 / 149
  - 6.4.2 无线资源管理测试 / 156
  - 6.4.3 协议测试 / 161
- 6.5 模块化通信测试仪表 / 170
  - 6.5.1 模块化仪表原理 / 170
  - 6.5.2 模块化仪表实现 / 171
- 6.6 通信测试自动化 / 173
  - 6.6.1 云测试 / 173
  - 6.6.2 总线控制技术 / 177
- 参考文献 / 179

## 181 索引



## 第1章

# 智能制造概述

## 1.1 智能制造的背景

近年来,随着科学技术的发展,特别是5G通信技术、物联网技术、人工智能技术、量子加密技术等的大力推进,人类社会正在发生深层次的变革。而这些技术的发展,为推进新工业革命、加快制造业转型奠定了强大的基础。

a. 虚拟现实、人工智能、增强现实已经慢慢深入人们的生活,互联网与通信技术的高度发展为人们生活带来了很多便利,也进一步加速了科技的发展。

b. 越来越多功能强大、自主的微型计算机(嵌入式系统)实现了与其他微型计算机、传感器设备的互联互通。

c. 物理世界和虚拟世界(网络空间)以信息物理系统(Cyber Physical System, CPS)的形式实现了全方位的融合。

正是由于新科学技术的快速发展,以及人类面临的多重挑战,以智能制造为主导的“第四次工业革命”应运而生。从图1-1可看出,第四次工业革命与前三次工业革命有着本质的区别,其核心是物理信息系统的深度融合。第四次工业革命旨在通过充分利用信息通信技术和网络空间虚拟系统相结合的手段,即信息物理系统(CPS),实现传统制造业的智能化转型。智能制造(Intelligent Manufacturing, IM)是一种由智能机器和人类专家共同组成的人机一体化智能系统,它在制造过程中能进行智能活动,诸如分析、推理、判断、构思和决策等,通过人与智能机器的合作共事,去扩大、延伸和部分地取代人类专家在制造过程中的脑力劳动。它把制造自动化的概念更新、扩展到柔性化、智能化和高度集成化。

随着全球产业结构的调整,各发达国家及发展中国家正面临着前所未有的挑战和机遇。如何促进制造业的整体升级已成为一个挑战,也深刻影响着国家经济的发展。

目前,智能化工业设备已成为全球制造业升级换代的基础。因此,发达国家总是把制造业升级作为新一轮工业革命的首要任务。美国的“再工业化”(工业互联网)趋势、德国的“工业4.0”和“互联工厂”战略、中国的“中国制造2025”、日本的“产业重振计划”以及韩国的“制造业创新3.0”等国家的制造业转型计划,其目的不仅仅是传统制造业的回归,而且还伴随着生产效率的提高和生产方式的创新。而其中最为典型的新工业发展,即德国的“工业4.0”战略,更被视为新一轮工业革命

的代表。



图 1-1 工业革命的发展进程<sup>[1]</sup>

## 1.2 智能制造的核心

### 1.2.1 从 ICT 视角看智能制造

自 21 世纪以来，随着移动互联网、物联网、大数据、云计算、人工智能等新一代信息通信技术（ICT）的快速发展及应用，社会进入了“万物互联”时代，智能制造被赋予了新的内涵，即新一代信息技术条件下的智能制造。

ICT 是信息技术与通信技术相融合而形成的一个新的概念和新的技术领域。近二三十年来，世界各国已成功地将 ICT 应用于生产制造中，利用 ICT 实现对工业生产全流程的监控与管理。接下来，我们主要针对新一代 ICT 所包含的移动互联网、物联网、大数据、云计算、人工智能等技术对智能制造所产生的作用作简要的分析（在后续章节将对各部分内容展开详细讨论），进而阐明智能制造与 ICT 之间的紧耦合关系。

#### （1）移动互联网

移动互联网（Mobile Internet）将移动通信和互联网结合起来，是互

联网技术、平台、商业模式和应用与移动通信技术结合并实践的活动的总称。移动互联网是网络通信的补充,可以帮助打通信息孤岛和业务隔阂,实现信息之间的无缝衔接。基于移动互联的移动 APP,具有开放性接口、可兼容、易扩展的移动操作系统,是实现泛在智能制造体系中人与人、人与物互联的关键<sup>[2]</sup>。

## (2) 物联网

物联网 (Internet of Things, IoT) 是指通过各种信息传感设备,实时采集任何需要监控、连接、互动的物体或过程等的信息,与互联网结合形成的一个巨大网络<sup>[3]</sup>。目的是实现所有物品与网络的连接,方便识别、管理和控制。物联网产生大数据,大数据助力物联网,从物联网到大数据,再到智慧决策可以帮助实现智能制造体系从感知到认知的过程。物联网是产业互联网的核心技术,在推动实现信息物理系统 (CPS) 融合的同时,与云计算、大数据、人工智能等技术相互结合,成为未来信息社会的重要支柱。此外,车联网、窄带物联网以及产业互联网等新技术极大提升了物联网在智能制造体系中的应用价值。CPS 是一个以通信和计算为核心的工程化物理系统,是计算、通信和控制的融合 (图 1-2),具有很高的可靠性、安全性和执行效率,所有参与制造的设备 and 产品都可以相互交换数据,而且能实现跨越价值链的横向集成。

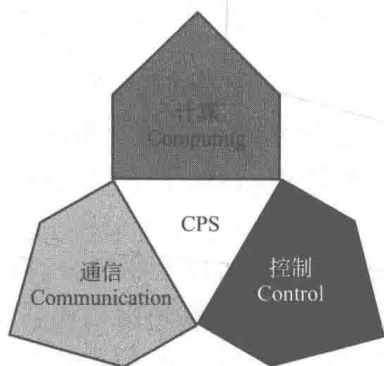


图 1-2 CPS 的核心组成

## (3) 云计算

云计算 (Mobile Cloud Computing, MCC) 作为计算领域的一种新模式,将计算功能、存储功能和网络管理功能统一集中在“云端”,如数



据中心、IP 骨干网络、蜂窝核心网络<sup>[4]</sup>。近几年来，计算领域的新趋势是将云计算的功能不断地迁移到边缘网络。移动边缘计算（Mobile Edge Computing, MEC）由欧洲电信标准协会在 2014 年提出，并被定义为一个无线接入网络中在移动用户近端为其提供计算能力的边缘节点，如基站或者接入点。雾计算（Fog Computing, FC）作为 MEC 概念的一般形式由 Cisco 公司提出，其中对边缘设备的定义也更加广泛了（从智能手机到机顶盒等）。据 Cisco 公司预测，到 2020 年，接入因特网的 IoT 设备（如传感器、可穿戴设备等）会增加大约 50 万亿，这些设备大部分都是资源受限的，它们必须依赖 MCC 或者 MEC 来获取足够维持自己运行的各种资源<sup>[5]</sup>。计算领域中云、雾、边缘计算模式相互协作，可以为智能制造系统提供无处不在的计算资源，是支撑智能制造体系实现“柔性生产”的必要条件。

#### (4) 大数据

大数据（Big Data）是需要新处理模式才能具有更强的决策力、洞察发现力和流程优化能力的海量、高增长率和多样化的信息资产<sup>[6]</sup>。随着大数据的迅速发展与计算能力的不断提升，各类学科越发期望通过一定的手段对多种数据展开分析，挖掘这些数据中的有价值部分。当前，面对“万物互联”信息时代网络中数据量、数据维度的暴增，要想全面把握研究对象特征，仅从单一维度对数据进行挖掘，其结论的准确性和全面性已显现不足。针对智能制造体系中的海量异构数据，需引入多维视角对数据进行深度挖掘。

#### (5) 人工智能

人工智能（Artificial Intelligence）是研究、开发用于模拟、延伸和扩展人的智能的理论、方法、技术及应用系统的新技术，对社会的影响极为深远，在机器人、无人机、金融、农业、医疗、教育、能源、国防等诸多领域得到了较为广泛的应用<sup>[7]</sup>。在电气自动化领域中，人工智能技术可以应用于电气产品的设计，在增加产品设计精度的同时缩短设计时间，从而提高生产效率。在电气控制环节，目前常用的人工智能算法有神经网络控制与专家系统模糊控制。机器学习作为人工智能研究的一个核心领域，它可以让计算机通过训练不断提高自身性能，从而在未编程的前提下作出更合理的反应。现代机器学习是一个基于大量数据的统计学过程，试图通过数据分析导出规则或者流程，用于解释数据或者预测未来数据。因此，人工智能的发展深度对智能制造体系的“聪明”程度起着决定性作用。