

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
现代机械工程系列精品教材



Introduction to Intelligent Manufacturing

智能制造导论

李晓雪 ◎ 主 编

刘怀兰 惠恩明 ◎ 副主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
现代机械工程系列精品教材

智能制造导论

主 编 李晓雪
副主编 刘怀兰 惠恩明
参 编 胡树山 刘荣娥 曹 宇
陆 鹏 金 磊



机械工业出版社

本书是“十三五”国家重点出版物出版规划项目——现代机械工程系系列精品教材中的一本。本书以加强学生素质教育和能力培养、拓宽学生对智能制造相关领域的认知为原则，由多位工科院校相关专业的教授与从事智能制造行业的工程技术人员共同编写而成。本书全面、详细地讲解了智能制造在设计、生产、管理、服务等各个环节的相关内容。本书共5章，包括：智能制造概述、智能制造装备技术、智能制造信息技术、智能制造生产管理、智能制造服务。

本书可作为普通高等学校机械类与近机械类专业的教材，也可供其他相关专业的师生和工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

智能制造导论/李晓雪主编. —北京: 机械工业出版社, 2019.5

“十三五”国家重点出版物出版规划项目 现代机械工程系系列精品教材

ISBN 978-7-111-62089-1

I. ①智… II. ①李… III. ①智能制造系统-高等学校-教材
IV. ①TH166

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 034432 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 余 皞 责任编辑: 余 皞

责任校对: 梁 静 封面设计: 张 静

责任印制: 张 博

河北鑫兆源印刷有限公司印刷

2019 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 10 印张 · 246 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-62089-1

定价: 29.80 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88379833

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-68326294


机工官博: weibo.com/cmp1952

教育服务网: www.cmpedu.com

封面防伪标均为盗版

金书网: www.golden-book.com

前言



随着新兴信息技术的产生和应用，传统的生产方式和商业模式正在不可避免地发生巨大变化。在新工业革命来临之际，我国约 80% 的制造业中小企业已经主动开始谋求由中国制造向“中国智造”转型。这不仅是将信息技术应用于加工生产，而且对于生产中的管理、体制模式也是一种创新和挑战。“中国智造”的核心，就是更深层次地推动信息技术和其他产业的融合，以引领颠覆性创新技术的研发，成功实现中国制造向智能制造转型。

“两化融合”是中国制造业转型的必由之路，智能制造是实现“两化融合”的核心途径，而装备制造业是实现工业化的基础条件。2015 年 9 月 10 日，工业和信息化部公布 2015 年智能制造试点示范项目名单，46 个项目入围。这些项目包括沈机智能机床试点、北京航天智慧云制造试点、中化化肥智能制造及服务试点等。46 个试点示范项目覆盖了 38 个行业，分布在 21 个省，涉及流程制造、离散制造、智能装备和产品、智能制造新业态新模式、智能化管理、智能服务 6 个类别，行业、区域覆盖面广，且有较强的示范性。

智能制造已日益成为未来制造业发展的重大趋势和核心内容，是加快发展方式转变，促进工业向中高端迈进，建设制造强国的重要举措，也是新常态下打造新的国际竞争优势的必然选择。而推进智能制造是一项复杂而庞大的系统工程，是新生事物，需要不断探索、试错，难以一蹴而就，更不能急于求成。

本书作为智能制造的导论教材，其内容符合“中国智造”国情，并兼顾学科的广度和深度，旨在为各工程专业学生、各企业研究设计人员、制造业生产人员、管理人员、服务人员、院校老师等提供有利的学习和参考支持。本书从智能制造起源、发展、前景、体系到制造装备技术、信息技术、生产管理、制造服务等知识，贯穿了智能制造中的各个环节，并列举了典型的案例描述工厂和企业内部、企业之间和产品全生命周期的实时管理和优化过程，将信息深度自感知、智慧优化自决策、精准控制自执行等功能的先进制造过程、系统与模式的实际应用一一展现在读者面前。本书主要包括制造装备技术、工业互联网、工业大数据、新一代人工智能、生产管理等。其中：制造装备技术是实现工业化的基础条件，是“两化融合”和智能制造的主力军；工业互联网实现数据从端到端的无损流动，是实现智能制造的关键基础设施，也是支撑企业实现智能制造的关键使能技术；工业大数据对工业企业运行中产生的海量的、异构的数据进行汇聚处理，是实现智能制造的重要信息资源；新一代人工智能是基于算法、算力和大数据的综合技术，是体现智能制造中的“智能”的精髓；生产管理则是智能制造转型中，重新协调人与机器、设备之间关系的重要研究方向。

本书由李晓雪（鄂尔多斯应用技术学院）任主编，刘怀兰（华中科技大学）、惠恩明（华中科技大学）任副主编，参与编写的人员还有胡树山、刘荣娥、曹宇、陆鹏、金磊。

限于编者的水平，书中难免有不当之处，请读者不吝批评指正。

目 录

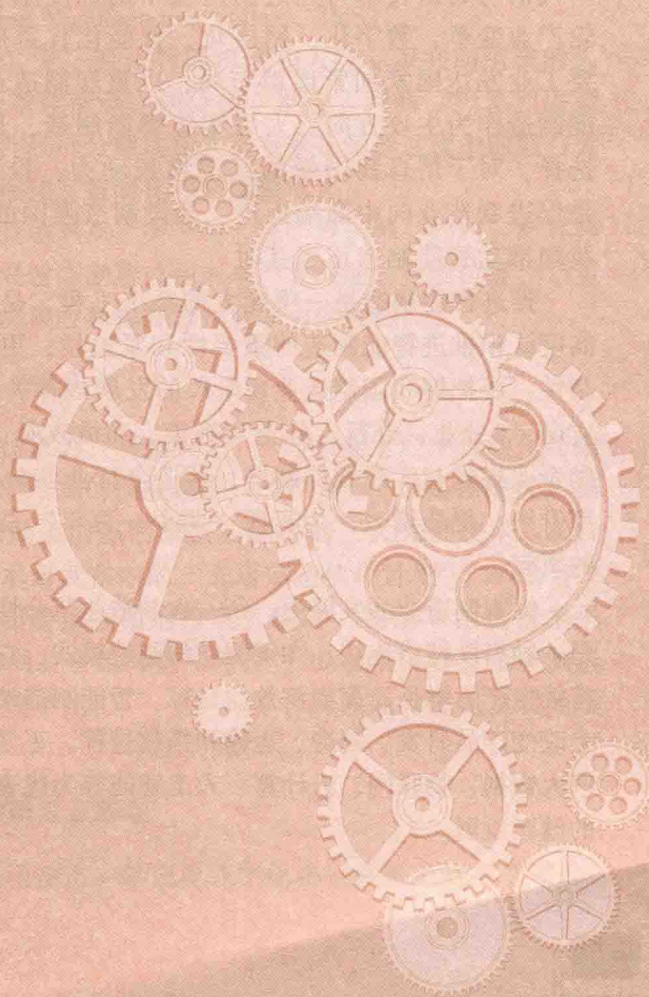


前 言

第 1 章 智能制造概述	1
1.1 智能制造的产生	3
1.2 智能制造的发展	7
1.3 智能制造的意义	10
1.4 全球智能制造现状与前景	11
1.5 智能制造体系	18
第 2 章 智能制造装备技术	21
2.1 机器人技术	22
2.2 增材制造技术	31
2.3 智能检测技术	38
2.4 物联网技术	54
2.5 高档数控机床技术	62
第 3 章 智能制造信息技术	77
3.1 智能制造与 CPS	78
3.2 大数据技术	89
3.3 工业云技术	98
3.4 新一代人工智能技术	102
3.5 视觉识别技术	110
第 4 章 智能制造生产管理	116
4.1 MES	117
4.2 精益管理	122
4.3 智能制造工厂	131
第 5 章 智能制造服务	141
5.1 协同规划	142
5.2 智能定制	145
5.3 服役系统智能健康管理	147
5.4 智能供应链优化	152
参考文献	156

第1章

智能制造概述



制造业是现代工业的基石，是实现国家现代化的保障，也是国家综合国力的体现，是一个国家的脊梁，这早已是世界各国的共识。自18世纪中叶开启工业文明以来，每一次制造技术与装备的重大突破，都深刻影响了世界强国的竞争格局，制造业的兴衰印证着世界强国的兴衰；与此同时，制造业是创新的主战场，是保持国家竞争实力和创新能力的重要源泉。而自国际金融危机以来，世界各国对制造业在推动贸易增长、提高研发和创新水平、促进就业等方面的重要作用又有了新的认识，纷纷提出制造业的国家战略，如美国的“先进制造业国家战略计划”、德国的“工业4.0计划”和日本的《制造业白皮书》等，制造业正重新成为国家竞争力的重要体现。

十八届五中全会、中央经济工作会明确指出，牢固树立创新、协调、绿色、开放、共享的发展理念，构建产业新体系，加快建设制造强国，加快实施《中国制造2025》。大力发展制造业，对我国实施创新驱动发展战略、加快经济转型升级、实现百年强国梦具有十分重要的战略意义。自改革开放以来，我国制造业发展取得长足进步，总体规模位居世界前列，自主创新能力显著增强，综合实力和国际地位大幅提升，已站到新的历史起点上。就当前来看，我国经济发展进入新常态，如何做到换挡不失速，推动产业结构向中高端迈进，重点、难点和出路都在制造业。我国制造业正处于爬坡过坎的重要关口，在原有比较优势逐步削弱、新的竞争优势尚未形成的新旧交替期，转型升级任务十分艰巨，面临的困难相当严峻，很多需要解决的问题迫在眉睫。随着新一代信息通信技术与先进制造技术的深度融合，全球兴起了以智能制造为代表的新一轮产业变革，数字化、网络化、智能化日益成为未来制造业发展的主要趋势。世界主要工业发达国家加紧谋篇布局，以重塑制造业竞争新优势。《中国制造2025》已将智能制造作为主攻方向。大力实施智能制造，是新常态下打造新的国际竞争优势的必然选择，对于培育我国新的经济增长动力，抢占新一轮产业竞争制高点具有重要意义，是促进制造业向中高端迈进、建设制造强国的重要举措。智能制造国际环境前所未有，我国推动智能制造正当其时。

推进智能制造是一项庞大的系统工程，是一项必须长期坚持的战略任务，我们既要高度认识推进智能制造的重要性和紧迫性，更要清醒地认识发展智能制造的长期性和复杂性，要把握我国制造业现阶段的发展规律，认真梳理出当前和今后一个时期的重点和方向，“分业、分行、分企”施策，动员政府、企业和社会各界力量，采取有力措施，鼓励企业探索与实践智能制造，营造全行业实施智能制造的良好氛围，加速我国制造业转型升级、提质增效，为实现“两个一百年”奋斗目标，实现中华民族伟大复兴做出应有的贡献。

纵观制造业的发展史，每一次制造业革命性的变革都离不开相应技术的支持。智能制造是一种高度网络连接、知识驱动的制造模式，它优化了企业全部业务和作业流程，可实现可持续生产力增长、高经济效益目标。智能制造结合信息技术、工程技术和人类智慧，从根本上改变产品研发、制造、运输和销售过程。正像电子信息技术推动了工业3.0的变革一样，以大数据、物联网、云计算、人工智能等为代表的新一代信息技术也必将不断推进智能制造的健康发展。

1.1 智能制造的产生

1.1.1 智能制造的起源与历史

制造业是国民经济的主体，是立国之本、兴国之器、强国之基，是决定国家发展水平的最基本因素之一。从机械制造业发展的历程来看，经历了由手工制作、泰勒化制造、高度自动化、柔性自动化和集成化制造、并行规划设计制造等阶段。就制造自动化而言，大体上每十年上一个台阶：20世纪50—60年代是单机数控，20世纪70年代以后则是CNC机床及由它们组成的自动化岛，20世纪80年代出现了世界性的柔性自动化热潮。与此同时，出现了计算机集成制造，但与实用化相距甚远。随着计算机的问世与发展，机械制造大体沿两条路线发展：一是传统制造技术的发展；二是借助计算机和自动化科学的制造技术与系统的发展。20世纪80年代以来，传统制造技术得到了不同程度的发展，但存在着很多问题。先进的计算机技术和制造技术向产品、工艺和系统的设计人员和管理人员提出了新的挑战，传统的设计和管理方法不能有效地解决现代制造系统中所出现的问题，这就促使我们借助现代的工具和方法，利用各学科最新研究成果，通过集成传统制造技术、计算机技术及人工智能等技术，发展一种新型的制造技术与系统，这便是智能制造技术（Intelligent Manufacturing Technology, IMT）与智能制造系统（Intelligent Manufacturing System, IMS）。

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，如分析、推理、判断、构思和决策等。通过人与智能机器的合作，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。

当前，智能制造已成为全球主要国家的竞争热点。美、德、法、日、韩、巴西、土耳其等传统发达国家和新兴国家都不约而同把发展智能制造放在未来产业战略的重要位置，乃至把发展智能制造定位为国家产业结构重建的核心和提升国家竞争力的关键。

1. 美国：以智能制造新技术引领“再工业化”

罗克韦尔自动化公司主席基斯·诺斯布什认为“智能制造”，即工业生产中自动化与信息化的深度融合，以提升生产效率，加快面向市场的反应速度。2012年，《华盛顿邮报》提出：人工智能、机器人及数字化制造将是帮助美国赢回制造业优势的三大关键技术。2011年6月，美国正式启动包括工业机器人等技术研发在内的“先进制造伙伴计划”。2012年2月又出台“先进制造业国家战略计划”，提出要加大政府投资、建设“智能”制造技术平台，以促进智能制造技术的创新。2012年3月，奥巴马宣布将投资10亿美元建立全美制造业创新网络，其中智能制造的框架和方法、数字化工厂、3D打印等均被列为优先发展的重点领域。

2. 欧洲：技术创新与业态创新结合推动新工业革命

英国《经济学家》杂志编辑保罗·麦基里指出，制造业数字化将引领第三次工业革命。

智能化工业软件、机器人、以3D打印为代表的新制造方法以及基于网络的商业服务模式创新将形成合力，改变制造业的发展方式和经济社会进程。欧盟委员会在《未来制造业：2020年展望》报告中提出，欧洲制造业要提升生产装备的智能化、自动化水平，并实现制造与服务的有效集成；产品和工艺的更新方式应由线性模式向“制造工程”战略转变，以便同时解决相互关联的各种问题；要发展虚拟工程和虚拟企业等新的商业模式。2009年9月，欧洲智能制造路线图正式出台，确立了以实现可持续及精益化制造为目标的制造业发展战略。2010年，德国制定了十年（2011—2020年）自动化发展计划，将制造业自动化水平的提升作为国策来执行，大力促进电子电气技术、机电一体化技术、生产工艺流程、计算机和IT技术、传感器和变频器、驱动和执行系统、通信技术以及综合技术等方向的发展。

3. 日本：建设产业链全过程覆盖的智能制造系统

日本早在1989年即已提出“智能制造系统（IMS）”的思想，并于1990年4月启动了智能制造系统国际合作研究计划。该计划将智能制造系统定义为“一种在整个制造过程中贯穿智能活动，并将这种智能活动与智能机器有机融合，将整个制造过程从订货、产品设计、生产到市场销售等各个环节以柔性方式集成起来的能发挥最大生产力的先进生产系统”，其主要研究目标包括：以智能计算机部分替代生产过程中人的智能活动；通过虚拟现实技术集成设计与制造过程，实现虚拟制造；通过数据网络实现全球化制造；开发自律化、协作化的智能加工系统等。2011年，日本发布了第四期科技发展基本计划（2011—2015年）。为强化制造业竞争力，在该计划中主要部署了多功能电子设备、信息通信技术、测量技术、精密加工、嵌入式系统等重点研发方向；同时，加强智能网络、高速数据传输、云计算等智能制造支撑技术领域的研究。

4. 韩国：以工业设计和数字标准为重点集中突破

韩国于1999年提出了“数字经济”的国家战略。在此战略的指导下，韩国政府制订了国家制造业电子化计划，建立了制造业电子化中心，并确定了数字化工业设计和制造业数字化协作标准作为创新研发的重点。目前，该战略已在电子、造船等行业获得了显著的成效。

除了以上针对性的技术创新计划和产业发展战略之外，发达国家也已经认识到：智能制造网络以及支撑智能制造网络的相关体制机制、法律规则、服务体系、行业标准、产业文化等，将是未来产业的高端，也是难以学习、无法转移的核心价值。当前，发达国家正在加紧布局，通过加强基础技术、共性技术研发投入；推广3D打印等代表未来制造模式新发展趋势的技术应用；制定适应智能制造时代经济体系的知识产权保护规则；建设促进信息化产业技术创新及应用的软硬件环境等多种方式，不断完善产业创新体系，培育智能制造网络。如美国在俄亥俄州建立了增材制造技术创新研究所，还即将继续设立另外三家制造技术研究所并最终期望增加到15家；欧盟编制智能制造系统IMS2020路线图等，都是这一战略付诸实施的体现。

自美国20世纪80年代提出智能制造的概念后，一直受到众多国家的重视和关注，纷纷将智能制造列为国家级计划并着力发展。目前，在全球范围内具有广泛影响的是德国“工业4.0”战略和美国工业互联网战略。

毫无疑问，智能化是制造自动化的发展方向。在制造过程的各个环节几乎都广泛应用人

工智能技术。如：专家系统技术可以用于工程设计、工艺过程设计、生产调度、故障诊断等；神经网络和模糊控制技术等应用于产品配方、生产调度等，实现制造过程智能化。而人工智能技术尤其适合于解决特别复杂和不确定性的问题。但同样显然的是，要在企业制造的全过程中全部实现智能化，还距离现实十分遥远。有人甚至提出这样的问题，21世纪会实现智能自动化吗？而如果只是在企业的某个局部环节实现智能化，而又无法保证全局的优化，则这种智能化的意义是有限的。

20世纪90年代以后，世界各国竞相大力发展IMT和IMS的深层次原因有：

1) 集成化智能制造系统是一个复杂的大系统，其中有多数积累的生产经验，生产过程中的人—机交互作用，必须使用的智能机器（如智能机器人）等。脱离了智能化，集成化也就不能完美地实现。

2) 机器智能化比较灵活，可以选择系统智能化，也可以选择单机智能化。单机可发展一种智能，也可发展几种智能。无论在系统中或单机上，智能化均可工作，不像集成制造系统，只有全系统集成才可工作。

3) 智能化的投入较高。现有的计算机集成制造系统（Computer Integrated Manufacturing System, CIMS）少则投资数千万元，多则投资数亿元乃至数十亿元，很少有企业能承担得起，而且投入正常运行的很少，维护费用也高，还要废弃原有的设备，难以推广。

4) 白领化使得有丰富经验的机械工人和技术人员日益缺少，产品制造技术越来越复杂，促使企业使用人工智能和知识工程技术来解决现代化的加工问题。

5) 工厂生产率的提高更多地取决于生产管理和生产自动化。人工智能与计算机管理相结合，使得不懂计算机的人也能通过视觉、对话等智能手段实现生产管理的科学化。

总之，以计算机信息技术为基础的高新技术得到迅猛发展，为传统的制造业提供了新的发展机遇。计算机技术、信息技术、自动化技术与传统制造技术相结合，形成了先进制造技术概念。冷战结束以后，国际竞争的重点由单纯的军事实力较量转向以发展经济和提高国民生活水平的综合国力较量，随之而来的这种国际高新技术领域的竞争越演越烈，且其发展形势由最初的仅依托本国的人力、物力和财力，发展到国际的大规模合作。近年来由发达国家倡导的面向21世纪的“智能制造系统”“信息高速公路”等国际研究计划，无疑是该背景下的产物，也是国际进行高科技研究开发的具体表现和积极占领21世纪科技制高点的象征。

1.1.2 智能制造的概念

关于智能制造的研究大致经历了三个阶段：起始于20世纪80年代人工智能在制造领域中的应用，智能制造概念正式提出；发展于20世纪90年代智能制造技术、智能制造系统的提出；成熟于21世纪以来新一代信息技术条件下的“智能制造（Smart Manufacturing, SM）”。

20世纪80年代：概念的提出。1989年日本提出了智能制造系统的概念。在美国赖特（Paul Kenneth Wright）、伯恩（David Alan Bourne）正式出版的专著《制造智能》（Smart Manufacturing, SM）中，就智能制造的内涵与前景进行了系统描述，将智能制造定义为“通过集成知识工程、制造软件系统、机器人视觉和机器人控制来对制造技工们的技能与专家知识进行建模，以使智能机器能够在没有人工干预的情况下进行小批量生产”。在此基础上，英国技术大学Williams教授对上述定义做了更为广泛的补充，认为“集成范围还应包括贯穿制造组织内部的智能决策支持系统”。麦格劳·希尔科技词典将智能制造界定为：采

用自适应环境和工艺要求的生产技术，最大限度地减少监督和操作，制造物品的活动。

20世纪90年代：概念的发展。在智能制造概念提出不久后，智能制造的研究获得欧、美、日等工业化发达国家的普遍重视，围绕智能制造技术（IMT）与智能制造系统（IMS）开展国际合作研究。1991年，日、美、欧共同发起实施的“智能制造国际合作研究计划”中提出：“智能制造系统是一种在整个制造过程中贯穿智能活动，并将这种智能活动与智能机器有机融合，将整个制造过程从订货、产品设计、生产到市场销售等各个环节以柔性方式集成起来的能发挥最大生产力的先进生产系统”。

21世纪以来：概念的深化。21世纪以来，随着物联网、大数据、云计算等新一代信息技术的快速发展及应用，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（Smart Manufacturing, SM）。2010年9月，美国在华盛顿举办的“21世纪智能制造的研讨会”指出，智能制造是对先进智能系统的强化应用，使得新产品的迅速制造，产品需求的动态响应以及对工业生产和供应链网络的实时优化成为可能。德国正式推出“工业4.0”战略，虽没明确提出智能制造概念，但包含了智能制造的内涵，即将企业的机器、存储系统和生产设施融入虚拟网络—实体物理系统（CPS）。在制造系统中，这些虚拟网络—实体物理系统包括智能机器、存储系统和生产设施，能够相互独立地自动交换信息、触发动作和控制。

综上所述，智能制造是将物联网、大数据、云计算等新一代信息技术与先进自动化技术、传感技术、控制技术、数字制造技术结合，贯穿设计、生产、管理、服务等制造活动各环节，实现工厂和企业内部、企业之间和产品全生命周期的实时管理和优化，具有信息深度自感知、智慧优化自决策、精准控制自执行等功能的先进制造过程、系统与模式的总称。

1.1.3 智能制造的特征

智能制造的发展不是一蹴而就的，而是一个循序渐进的过程。按照事物发展的内在规律，智能制造的发展大体可以划分为三个阶段。

第一阶段，单个生产企业的纵向集成。生产企业将生产过程的各个阶段集成互联，不断提高企业效率。一个典型的生产企业逐步使用越来越多的不同信息技术（IT），在几乎所有的传感器和电动机或驱动器中植入微处理器芯片，结合相关软件实现计算机控制。从制造过程中某个特定阶段或制造工艺的智能化，到逐步将各个制造环节的“信息孤岛”互联互通，系统集成，从而使数据在整个企业中得以共享。通过机器大数据的收集和人类智能的结合，推进工厂优化，改进企业管理绩效，大幅增加企业经济效益，提高工人操作安全性，并促进环境可持续发展。

第二阶段，生产企业间的横向集成。通过高性能计算平台将不同生产企业的数据库源进行连接，将工厂的特定信息与原材料供应、客户需求进行连接，甚至可以利用智能电网，企业自动规划用电，在用电高峰期放缓生产，在用电低谷期加快生产。这将使更加安全生产、更加精确生产成为可能。

第三阶段，端对端集成，实现生产组织方式和商业模式的变革。通过贯穿整个价值链的工程化数字集成，实现基于价值链与不同企业之间的整合，从而最大限度地实现个性化定制，根本改变传统的商业模式和消费者的购买行为。

和传统的制造相比，智能制造具有几个鲜明的特点：

(1) 自律能力 即具备搜集与理解环境和自身的信息,并进行分析判断和规划自身行为的能力。只有具有自律能力的设备,才能称为“智能机器”,而具备自律能力的“智能机器”是智能制造不可或缺的条件。

(2) 人机一体化 人机一体化是一种混合智能,突出了人在制造系统中的核心地位;同时,在智能机器的配合下,更好地发挥出人的潜能,使人机之间表现出一种平等共事、相互“理解”、相互协作的关系,使两者在不同的层次上各显其能,相辅相成。因此,在智能制造系统中,高素质、高智能的人将发挥更好的作用,机器智能和人类智能将真正地集成在一起,互相配合,相得益彰。

(3) 虚拟现实(Virtual Reality, VR)技术 这是实现虚拟制造的支持技术,也是实现高水平人机一体化的关键技术之一。虚拟现实技术是以计算机为基础,融信号处理、动画技术、智能推理、预测、仿真和多媒体技术为一体;借助各种音像和传感装置,虚拟展示现实生活中的各种过程、物件等,使人们从感官和视觉上获得接近真实的感受。这种人机结合的新一代智能技术,是智能制造的一个显著特征。

(4) 自组织与超柔性 智能制造系统中的各组成单元能够依据工作任务的需要,自行组成一种最佳的组织结构。这种柔性不仅表现在运行方式上,还表现在结构形式上,所以称这种柔性为超柔性,如同一群人类专家组成的群体,具有生物特征。

图 1-1 所示为智能制造生产线。

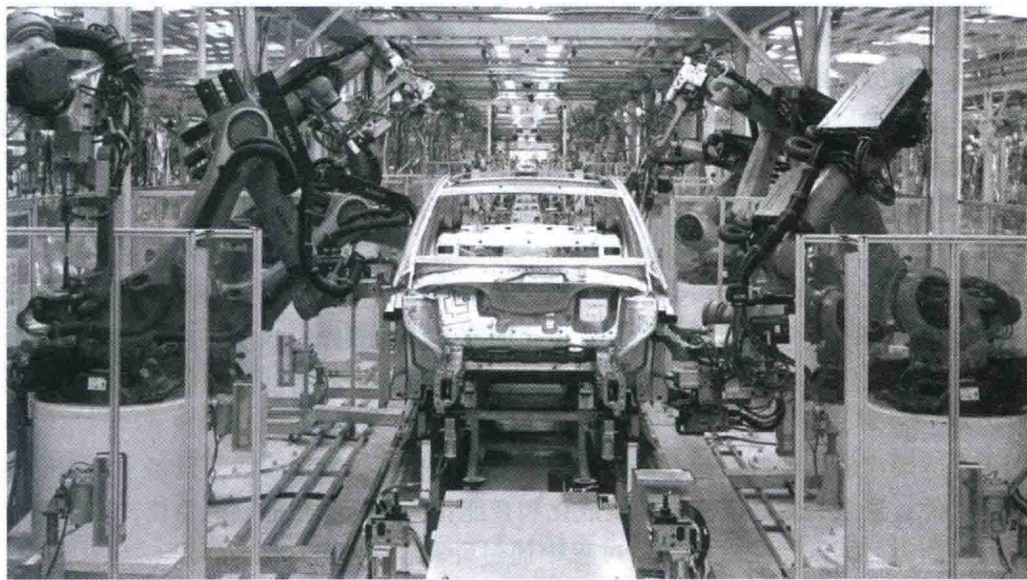


图 1-1 智能制造生产线

1.2 智能制造的发展

智能制造是从 20 世纪 80 年代末发展起来的,最早的有关智能制造及系统方面的专著是由 Wrightg MilaciC 等人编写的,随后 Kusiak 和 Pain 也相继出版了这方面的研究著作。在许

多发达工业化国家,人工智能已被当作求解现代工业提出的问题的工具和方法。因此,这些专著仅着力于人工智能在制造业中的应用和智能系统研究与应用中提出的问题的求解、使用基于知识的系统(如级联结构系统)和优化方法来解决自动化制造环境中零件、产品、系统的设计与制造,以及自动化制造系统的规划与调度(管理)问题。先进的工业化国家在研究FMS、CIMS、FA及AI等的基础上,为了进行国际制造业的协作研究、开发、设计、生产、物流、信息流、经营管理乃至制造过程的集成化与智能化等而提出来的智能制造系统,也是为了解决各发达国家面临的企业活动全球化、重复投资增大、现场熟练技术工人不足和社会对产品的需求变化等因素而倡导国际制造业的合作。在并行智能制造及其相关技术与系统的研究方面,首推日本在1990年提议和倡导的日、美、欧之间建立的国际运营委员会、国际技术委员会和附属机构IMS中心。1991—1993年Barschdor和Monostori等应用人工神经网络(ANNS)在制造过程中进行加工过程的建模、监测、诊断、自适应控制;通过神经网络的知识表示和学习能力,缩短CIMS的反应时间,提高产品的质量,使系统更可靠。而Furukawa则对智能机器的设计程序及它在自动导引车中的应用作了介绍。被称为是二十一世纪的制造技术的智能制造系统,目前国内外已相继开展了国际联合研究计划。智能制造系统与当前任何制造系统相比,在体系结构上有着根本意义上的不同,具体体现在:一是采用开放式系统设计策略。通过计算机网络技术,实现共享制造数据和制造知识,以保证系统质量。这是将计算机界先进的设计和开发思想融入制造系统的结果,因而使制造系统向拟人化的方向进一步发展。二是采用分布式多自主体智能系统设计策略,其基本思想是:赋予制造系统中各组成部分或子系统一定的自主权,使其形成一个封闭的具有完整功能的自主体,这些自主体以网络智能结点的形式连接在通信网络上,各个智能结点在物理上是分散的,在逻辑上是平等的。通过各结点的协同处理与合作,共同完成制造系统任务,实现人与人的知识在制造中的核心地位。

此外,生物制造与仿生机械学、生物自生长成形制造、绿色制造、产品绿色工艺(如Near2Zero Waste)等也极大地丰富了智能制造的范畴,促进了智能制造系统的发展。

制造业是国民经济的支柱产业,是工业化和现代化的主导力量,是衡量一个国家或地区综合经济实力和国际竞争力的重要标志,也是国家安全的保障。当前,新一轮科技革命与产业变革风起云涌,以信息技术与制造业加速融合为主要特征的智能制造成为全球制造业发展的主要趋势。

工业发达国家经历了机械化、电气化、数字化三个历史发展阶段,具备了向智能制造阶段转型的条件。未来必然是以高度的集成化和智能化为特征的智能制造系统,取代制造中的人的脑力劳动为目标,即在整个制造过程中通过计算机将人的智能活动与智能机器有机融合,以便有效地推广专家的经验知识,从而实现制造过程的最优化、自动化、智能化。

当今世界制造业智能化发展的五大趋势。

趋势一:制造全系统、全过程应用建模与仿真技术

建模与仿真技术是制造业不可或缺的工具与手段。基于建模的工程、基于建模的制造、基于建模的维护作为单一数据源的数字化企业系统建模中的三个主要组成部分,涵盖从产品设计、制造到服务的产品全生命周期业务,从虚拟的工程设计到现实的制造工厂直至产品的上市流通,建模与仿真技术始终服务于产品生命周期的每个阶段,为制造系统的智能化及高效研究与运行提供了使能技术。

趋势二：重视使用机器人和柔性化生产

柔性自动生产线和机器人的使用可以积极应对劳动力短缺和用工成本上涨。同时，利用机器人高精度操作，提高产品品质和作业安全，是市场竞争的取胜之道。以工业机器人为代表的自动化制造装备在生产过程中应用日趋广泛，在汽车、电子设备、奶制品和饮料等行业已大量使用基于工业机器人的自动化生产线。

趋势三：物联网和务联网在制造业中作用日益突出

通过虚拟网络——实体物理系统，整合职能机器、储存系统和生产设施。通过物联网、服务计算、云计算等信息技术与制造技术融合，构成制造务联网，实现软硬件制造资源和能力的全系统、全生命周期、全方位的透彻的感知、互联、决策、控制、执行和服务化，使得从入场物流配送到生产、销售、出厂物流和服务，实现泛在的人、机、物、信息的集成、共享、协同与优化的云制造。

趋势四：普遍关注供应链动态管理、整合与优化

供应链管理是一个复杂、动态、多变的过程。供应链管理更多地应用物联网、互联网、人工智能、大数据等新一代信息技术，更倾向于使用可视化的手段来显示数据，采用移动化的手段来访问数据。供应链管理更加重视人机系统的协调性，实现人性化的技术和管理系统。企业通过供应链的全过程管理、信息集中化管理、系统动态化管理实现整个供应链的可持续发展，进而缩短了满足客户订单的时间，提高了价值链协同效率，提升了生产效率，使全球范围的供应链管理更具效率。

趋势五：增材制造技术与工作发展迅速

增材制造技术（3D 打印技术）是综合材料、制造、信息技术的多学科复合型技术。它以数字模型文件为基础，运用粉末状的沉积、黏合材料，采用分层加工或叠加成行的方式逐层增加材料来生成各三维实体。突出的特点是无须机械加工或模具，就能直接从计算机数据库中生成任何形状的物体，从而缩短研制周期、提高生产效率和降低生产成本。三维打印与云制造技术的融合将是实现个性化、社会化制造的有效制造模式与手段。

美国、欧洲、日本都将智能制造视为 21 世纪最重要的先进制造技术，是国际制造业科技竞争的制高点。综合分析我国智能制造发展迅速，取得了较为显著的成效，然而与工业发达国家及制造业快速发展的需求相比，依然存在以下问题。

其一，智能装备核心部件如传感器、控制系统、工业机器人、高压液压部件及系统等，主要还依赖进口，其价格、产能、服务、软件的适用性等严重制约和限制了智能制造的发展与推广。

其二，企业管理观念转变滞后，信息化人才缺乏，很难针对本企业的实施情况和特点制订整体的规划。

其三，大部分生产现场设备没有数字化的接口，无法采集数据及进行传递，难以用数字化、智能化的手段管理起来，即使一些设备具备一定的通信能力，但是不同生产厂商通信接口与信息接口不统一，很难进行系统的集成。

其四，先进软件大部分是国外开发，成本高，水土不服，影响企业数字化、智能化的积极性。

其五，“机器换人”是大部分制造企业的现实需求，而哪里换，如何换，系统地解决这一系列问题需要多方面的协调支持。

根据以上分析,发展智能制造应优先从以下行动入手:建立智能制造标准体系、突破关键部件和装置并实现产业化、大力推广数字化制造、开发核心工业软件、建立数字化/智能化工厂、发展服务型制造业、攻克共性关键技术、保障信息和网络安全、强化人才队伍建设等。

1.3 智能制造的意义

发展智能制造的核心是提高企业生产效率,拓展企业价值增值空间,主要表现在以下几个方面:

一是缩短产品的研制周期。通过智能制造,产品从研发到上市,从下订单到配送时间可以得以缩短。通过远程监控和预测性维护为机器和工厂减少高昂的停机时间,生产中断时间也得以不断减少。

二是提高生产的灵活性。通过采用数字化、互联和虚拟工艺规划,智能制造可以实现大规模批量定制生产,乃至个性化小批量生产。

三是创造新价值。通过发展智能制造,企业将实现从传统的“以产品为中心”向“以集成服务为中心”转变,将重心放在解决方案和系统层面上,利用服务在整个产品生命周期中实现新价值。

智能制造技术已成为世界制造业发展的客观趋势,世界上主要工业发达国家正在大力推广和应用。发展智能制造既符合我国制造业发展的内在要求,又是重塑我国制造业新优势,实现转型升级的必然选择。

1. 智能制造产业备受各国政府关注,发展前景广阔

当今,工业发达国家始终致力于以技术创新引领产业升级,更加注重资源节约、环境友好、可持续发展,智能化、绿色化已成为制造业发展的必然趋势,智能制造产业的发展将成为世界各国竞争的焦点。后金融危机时代,美国、英国等发达国家的“再工业化”,重新重视发展高技术的制造业;德国、日本竭力保持在智能制造产业领域的优势和垄断地位;韩国也力求跻身世界制造强国之列。

我国已具备发展智能制造业的产业基础,取得了一大批相关的基础研究成果,掌握了长期制约我国产业发展的智能制造相关技术,如机器人技术、感知技术、复杂制造系统、智能信息处理技术等;攻克了一批长期严重依赖并影响我国产业安全的核心高端装备,如盾构机、自动化控制系统、高档数控机床等;建设了一批相关的国家级研发基地;培养了一大批长期从事相关技术研究开发工作的高技术人才。国家对智能制造的扶持力度不断加大。近年来,我国对智能制造的发展也越来越重视,越来越多的研究项目成立,研究资金也大幅增长。

2. 目前国内智能制造国产化率低,关键软硬件核心部件仍依赖于国外进口产品

当前,我国制造业面临来自发达国家加速重振制造业与发展中国家以更低生产成本承接国际产业转移的“双向挤压”。我国必须加快推进智能制造技术研发,提高其产业化水平,

以应对传统低成本优势削弱所面临的挑战。虽然我国智能制造技术已经取得长足进步，但其产业化水平依然较低，高端智能制造装备及核心零部件（如 PLC、工业软件）仍然严重依赖进口，关键技术主要依靠国外的状况仍未从根本上改变。部分行业劳动密集型为主，附加值不高。目前，尽管中国制造业的技术创新有所提高，但自主开发能力仍较薄弱，研发投入总体不足，缺少自主知识产权的高新技术，缺乏世界一流的研发资源和技术知识，对国外先进技术的消化、吸收、创新不足，基本上没有掌握新产品开发的主动权。

3. 目前国内智能制造信息安全水平低下

我国智能制造行业信息安全防护手段比较单一，如在生产车间仅靠简单的网络物理隔离防范网络攻击；在信息化系统上主要依靠软件防火墙，计算机病毒等问题仍然时有发生。随着我国信息化和工业化的不断融合，工业控制系统作为智能制造装备和重要基础设施的核心，其安全可靠性和重要性尤为突出。目前，由于越来越多的工业控制系统与外网相连，加之智能制造系统的高端市场和核心技术受制于国外，安全保障措施和专业测评工具缺乏，我国的智能制造系统面临着严重的安全威胁。如果这些问题得不到妥善解决，势必会影响我国的信息化和现代化的进程。

4. 当前国内制造业质量成本过高，亟须进行智能制造业务的发展，打造智能工厂

一方面，生产过程的自动化程度较低，大部分工序仍由人工手工完成，产品质量对工人个人技术水平的依赖性高，人的疲劳、情绪、压力等都会使产品质量（尤其是精密零部件的加工）产生波动；另一方面，由于数据采集系统不完善、缺少车间生产管理系统，生产问题的反馈滞后，造成不必要的浪费。

1.4 全球智能制造现状与前景

全球新一轮科技革命和产业变革加紧孕育兴起，与我国制造业转型升级形成历史性交汇。智能制造在全球范围内快速发展，已成为制造业重要发展趋势，对产业发展和分工格局带来深刻影响，推动形成新的生产方式、产业形态、商业模式。发达国家实施“再工业化”战略，不断推出发展智能制造的新举措，通过政府、行业组织、企业等协同推进，积极培育制造业未来竞争优势。

经过几十年的快速发展，我国制造业规模跃居世界第一位，建立起门类齐全、独立完整的制造体系，但与先进国家相比，大而不强的问题突出。随着我国经济发展进入新常态，经济增速换挡、结构调整阵痛、增长动能转换等相互交织，长期以来主要依靠资源要素投入、规模扩张的粗放型发展模式难以为继。加快发展智能制造，对于推进我国制造业供给侧结构性改革，培育经济增长新动能，构建新型制造体系，促进制造业向中高端迈进、实现制造强国具有重要意义。

随着新一代信息技术和制造业的深度融合，我国智能制造发展取得明显成效，以高档数控机床、工业机器人、智能仪器仪表为代表的关键技术装备取得积极进展；智能制造装备和先进工艺在重点行业不断普及，离散型行业制造装备的数字化、网络化、智能化步伐加快，

流程型行业过程控制和制造执行系统全面普及，关键工艺流程数控化率大大提高；在典型行业不断探索、逐步形成了一些可复制推广的智能制造新模式，为深入推进智能制造奠定了一定的基础。但目前我国制造业尚处于机械化、电气化、自动化、数字化并存，不同地区、不同行业、不同企业发展不平衡的阶段。发展智能制造面临关键共性技术和核心装备受制于人，智能制造标准/软件/网络/信息安全基础薄弱，智能制造新模式成熟度不高，系统整体解决方案供给能力不足，缺乏国际性的行业巨头企业和跨界融合的智能制造人才等突出问题。相对工业发达国家，推动我国制造业智能转型，环境更为复杂，形势更为严峻，任务更加艰巨。必须遵循客观规律，立足国情、着眼长远，加强统筹谋划，积极应对挑战，抓住全球制造业分工调整和我国智能制造快速发展的战略机遇期，使企业在智能制造方面走出一条具有中国特色的发展道路。

1.4.1 智能制造系统架构

智能制造系统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。智能工厂在制造过程中能以一种高度柔性集成不高的方式，借助计算机模拟人类专家的智能活动进行分析、推理、判断、构思和决策等，从而取代或者延伸制造环境中人的部分脑力劳动。同时，收集、存储、完善、共享、集成和发展人类专家的智能。

自美国 20 世纪 80 年代提出智能制造的概念后，一直受到众多国家的重视和关注，纷纷将智能制造列为国家级计划并着力发展。

1. 德国

2013 年 4 月，德国在汉诺威工业博览会上正式推出了“工业 4.0”战略，其核心是通过信息物理系统（CPS）实现人、设备与产品的实时连通、相互识别和有效交流，构建一个高度灵活的个性化和数字化的智能制造模式。在这种模式下，生产由集中向分散转变，规模效应不再是工业生产的关键因素；产品由趋同向个性化转变，未来产品都将完全按照个人意愿进行生产，极端情况下将成为自动化、个性化的单件制造；用户由部分参与向全程参与转变，用户不仅出现在生产流程的两端，而且广泛、实时参与生产和价值创造的全过程。

德国“工业 4.0”战略提出了三个方面的特征：一是价值网络的横向集成，即通过应用 CPS，加强企业之间在研究、开发与应用的协同推进，以及在可持续发展、商业保密、标准化、员工培训等方面的合作；二是全价值链的纵向集成，即在企业内部通过采用 CPS，实现从产品设计、研发、计划、工艺到生产、服务的全价值链的数字化；三是端对端系统工程，即在工厂生产层面，通过应用 CPS，根据个性化需求定制特殊的 IT 结构模块，确保传感器、控制器采集的数据与 ERP 管理系统进行有机集成，打造智能工厂。

2013 年 12 月，德国电气电子和信息技术协会发表了《德国“工业 4.0”标准化路线图》，其目标是制定出一套单一的共同标准，形成一个标准化的、具有开放性特点的标准参考体系，最终达到通过价值网络实现不同公司间的网络连接和集成。德国“工业 4.0”提出的标准参考体系是一个通用模型，适用于所有合作伙伴公司的产品和服务，提供了“工业 4.0”相关的技术系统的构建、开发、集成和运行的框架，意图是将不同业务模型的企业采用的不同作业方法统一为共同的作业方法。