



普通高等教育“十三五”规划教材
“十三五”江苏省高等学校重点教材

智能制造 技术基础

Foundation of Intelligent
Manufacturing Technology

葛英飞 主编



非外借



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



“十三五”江苏省高等学校重点教材
普通高等教育“十三五”规划教材

智能制造技术基础

主 编 葛英飞
副主编 邱胜海 李光荣
参 编 贾晓林 贾丙辉 程 科

机械工业出版社

本教材是普通高等教育“十三五”规划教材、“十三五”江苏省高等学校重点教材，全书共七章，内容包括：智能制造技术概述、智能设计技术、智能加工技术、加工过程的智能监测与控制、智能制造系统、智能制造装备、人工智能。

本教材着重概述或阐述关于智能制造技术的各种基础概念、名词术语及其产生、发展和演进，对智能制造的关键技术进行了简明的阐述、归纳和总结。

本教材内容适当，适合作为机械类（机械设计制造及自动化、机械电子、机械工程、智能制造等）专业课程或品牌专业核心课程的教材，也可作为研究生的专业课程教材或相关工程技术人员的参考资料。

图书在版编目（CIP）数据

智能制造技术基础/葛英飞主编. —北京：机械工业出版社，2019.9
“十三五”江苏省高等学校重点教材 普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-111-63353-2

I. ①智… II. ①葛… 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 165604 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 焯 责任编辑：余 焯 张亚捷

责任校对：陈 越 封面设计：张 静

责任印制：张 博

三河市宏达印刷有限公司印刷

2019 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 17.75 印张 · 437 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-63353-2

定价：45.80 元

电话服务

客服电话：010-88361066

010-88379833

010-68326294

封底无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网：www.cmpbook.com

机工官博：weibo.com/cmp1952

金书网：www.golden-book.com

机工教育服务网：www.cmpedu.com

前 言

制造业是国民经济的基础和产业主体，是经济增长的引擎和重要保证，也是国民经济和综合国力的重要体现。尤其对人口众多的我国而言，吸纳劳动力最多的制造业是我国的立国之本、兴国之器、强国之基。改革开放以来所取得的辉煌成绩，充分体现了制造业对国民经济、社会进步及人民富裕起到的关键作用。制造业所依靠的制造技术发展至今，智能化是其重要标志。智能制造技术是当前世界各国，特别是发达国家的研究和发展重点。为适应工业化进入后期阶段的发展特征，应对新科技革命和产业变革的挑战，近年来，我国中央政府、地方政府和企业都制定、实施了一系列促进智能制造技术和智能制造产业发展的战略、政策和具体措施，以推动智能制造的发展和普及。2015年我国发布了《中国制造2025》，指出今后将着力推动3D打印、云计算、移动互联网、生物工程、新能源、新材料等领域的突破和创新。智能制造正在引领中国制造方式的变革，我国制造业转型升级、创新发展迎来重大机遇。2017年世界智能制造大会在南京成功举办，标志着我国在智能制造技术方面取得了举世瞩目的成绩。制造技术的飞速发展使得社会对掌握相关技能人才的需求剧增，同时对高水平教材的需求也非常迫切。因此，本教材的编写较好地切合了时代和社会背景，顺应了社会对相关专业人才培养的要求。

在现有的智能制造技术教材中，主要偏重智能制造技术在工程实际中的具体应用，专业性较强而基础性不足。本教材编写组从2017年10月教材立项〔“十三五”江苏省高等学校重点教材（新编）〕以来，开展了一年多的编写工作。在参考了若干同类教材和大量国内外相关文献的基础上，对编写大纲和主要内容做了充分研究和规划。本教材的特色是着重对智能制造技术的出现、兴起、发展、概念形成、关键技术、应用和发展趋势进行了较为全面而深入浅出的讲解，与其他同类教材相比，本教材更偏重各种与智能制造技术有关的背景、概念、术语、关键基础技术、应用及其典型案例的阐述。本书各章节及其主要内容如下：

第1章 智能制造技术概述，主要阐述智能制造技术的产生、兴起、发展以及智能制造技术的概念、内涵和特征，并对智能制造技术体系及关键技术进行了综述，最后对智能制造技术的发展趋势进行了总结。

第2章 智能设计技术，主要对智能设计的产生与发展、智能设计与决策、智能设计系统、智能设计方法等基础概念和知识进行了综述。

第3章 智能加工技术，主要对智能制造过程中各种基础关键技术及其典型应用、制造加工过程中的智能预测、智能制造数据库及其建模、智能制造专家系统设计等重要和基础内容进行了阐述。

第4章 加工过程的智能监测与控制，主要对智能监测与控制的主要内容、各种智能监测技术及其具体应用、加工过程的智能诊断、机床加工精度的控制等进行了综述。

第5章 智能制造系统，重点对智能制造系统的特征与体系架构、智能制造系统调度控制、智能制造系统供应链管理、智能管理与服务等内容进行了阐述。

第6章 智能制造装备，主要对智能数控机床、工业机器人、3D打印装备、智能生产线与智能工厂等内容进行了综述。

第7章 人工智能，主要对人工智能的定义和发展、知识表示方法、确定性推理、状态空间搜索、专家系统、机器学习、人工神经网络等进行了阐述。

参加本教材编写的人员有：葛英飞（第1、3、7章）、李光荣（第2、3章）、邱胜海（第3、5、7章）、贾丙辉（第4章）、贾晓林（第6章）、程科（第7章）。本教材由葛英飞任主编并负责统稿，邱胜海、李光荣任副主编。

由于编者水平有限，书中难免存在不足和错误，恳请广大读者批评指正。

编者

目 录

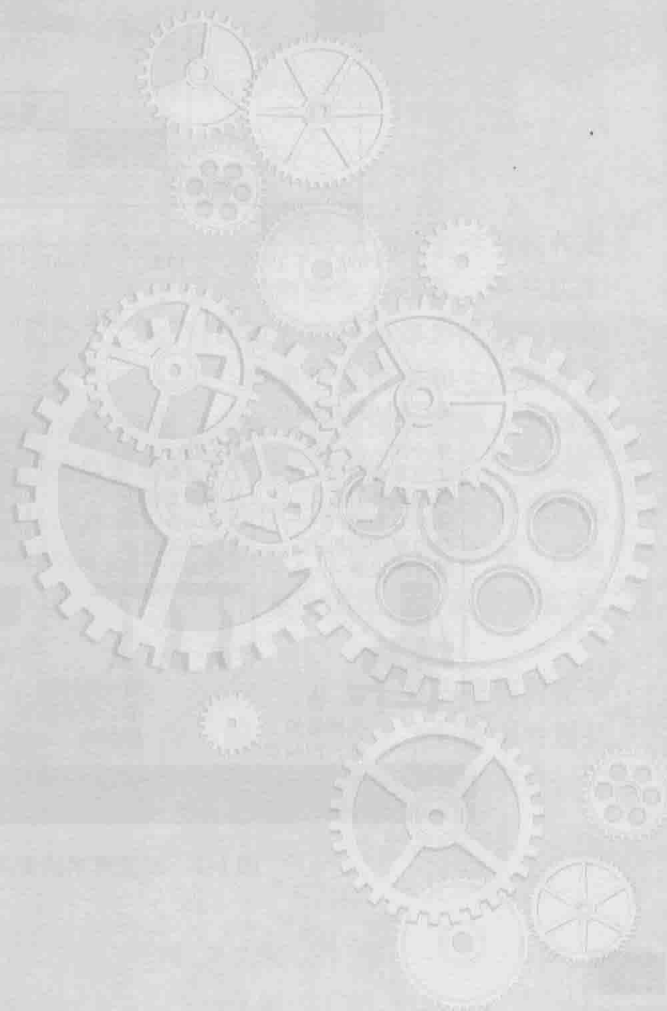
前 言

| | |
|---------------------------|-----|
| 第 1 章 智能制造技术概述 | 1 |
| 1.1 智能制造技术的发展、内涵和特征 | 2 |
| 1.2 智能制造模式和技术体系 | 11 |
| 1.3 智能制造技术的应用及发展趋势 | 25 |
| 第 2 章 智能设计技术 | 29 |
| 2.1 概述 | 30 |
| 2.2 设计方案智能映射与决策 | 32 |
| 2.3 智能设计系统 | 39 |
| 2.4 智能 CAD 系统及设计方法 | 42 |
| 第 3 章 智能加工技术 | 45 |
| 3.1 概述 | 46 |
| 3.2 智能加工工艺 | 47 |
| 3.3 制造加工过程的智能预测 | 83 |
| 3.4 智能制造数据库及其建模 | 91 |
| 3.5 智能制造专家系统设计及实例 | 103 |
| 第 4 章 加工过程的智能监测与控制 | 120 |
| 4.1 概述 | 121 |
| 4.2 加工过程的无损检测技术 | 122 |
| 4.3 加工过程的智能诊断 | 149 |
| 4.4 机床加工精度的控制 | 152 |
| 第 5 章 智能制造系统 | 161 |
| 5.1 智能制造系统的定义及特征 | 162 |
| 5.2 智能制造系统体系架构 | 164 |
| 5.3 智能制造系统调度控制 | 173 |
| 5.4 智能制造系统供应链管理 | 180 |
| 5.5 智能管理与服务 | 189 |
| 第 6 章 智能制造装备 | 197 |
| 6.1 概述 | 198 |
| 6.2 智能数控机床 | 198 |
| 6.3 工业机器人 | 204 |
| 6.4 3D 打印装备 | 214 |
| 6.5 智能生产线与智能工厂 | 222 |

| | |
|---------------------|-----|
| 第 7 章 人工智能 | 230 |
| 7.1 概述 | 231 |
| 7.2 知识表示方法 | 233 |
| 7.3 确定性推理 | 241 |
| 7.4 状态空间搜索 | 245 |
| 7.5 专家系统 | 250 |
| 7.6 机器学习 | 257 |
| 7.7 人工神经网络 | 264 |
| 7.8 人工智能的应用现状 | 268 |
| 参考文献 | 271 |

第1章

智能制造技术概述



1.1 智能制造技术的发展、内涵和特征

1.1.1 智能制造概念的产生、兴起和发展

制造业是国民经济的基础和产业主体，是经济增长的引擎和重要保证，也是国民经济和综合国力的重要体现。尤其对人口众多的我国而言，吸纳劳动力最多的制造业是我国的立国之本、兴国之器、强国之基。改革开放以来所取得的辉煌成绩，充分体现了制造业对国民经济、社会进步及人民富裕起到的关键作用。

客户需求变化、全球市场竞争和社会可持续发展的需求使得制造环境发生了根本性转变。如图 1-1 所示，制造系统的追求目标从 20 世纪 60 年代的大规模生产、70 年代的低成本制造、80 年代的产品质量、90 年代的市场响应速度、21 世纪的知识和服务，到如今以德国“工业 4.0”而兴起的泛在感知和深入智能化。信息技术、网络技术、管理技术和其他相关技术的发展有力地推动了制造系统追求目标的实现，生产过程从手工化、机械化、刚性化逐步过渡到柔性化、服务化、智能化。制造业已从传统的劳动和装备密集型，逐渐向信息、知识和服务密集型转变，新的工业革命即将到来（见图 1-2）。



图 1-1 不同阶段制造系统的追求目标

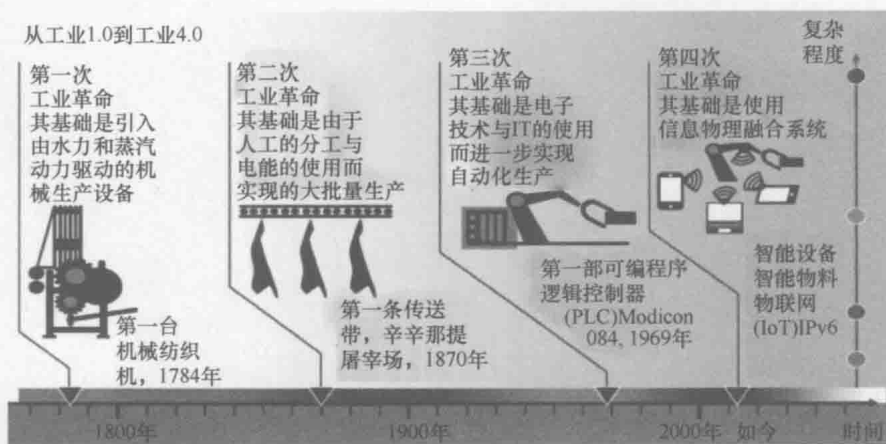


图 1-2 制造技术的发展与四次工业革命

目前,全球制造业孕育着制造技术体系、制造模式、产业形态和价值链的巨大变革,延续性特别是颠覆性技术的创新层出不穷。云计算、大数据、物联网、移动互联网等新一代信息技术开始大爆发,从而开启了全新的智慧时代。机器人、数字化制造、3D打印等技术的重大突破正在重构制造业技术体系。云制造、网络众包、异地协同设计、大规模个性化定制、精准供应链、电子商务等网络协同制造模式正在重塑产业价值链体系。随着制造业飞速发展,机械产品的市场竞争越来越激烈,从而给制造企业提出了越来越高的要求,产品制造过程的国际分工也发生了深刻的变化,如图1-3所示。

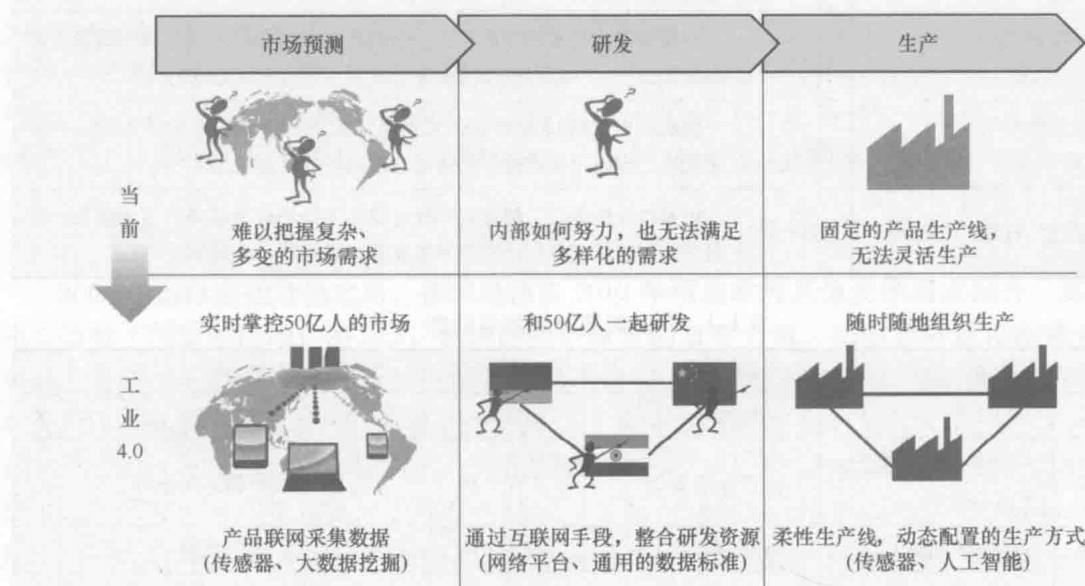


图 1-3 产品制造过程国际分工的变化

当前,信息技术、新能源、新材料、生物技术等重要领域和前沿方向的革命性突破和交叉融合,正在引发新一轮产业变革。英国学者保罗·麦里基在《制造业和创新:第三次工业革命》中认为,新一轮工业革命的核心是以机器人、3D打印机和新材料等为代表的智能制造业。这一轮产业革命本质可概括为“一主多翼”：“一主”就是信息技术和生产服务领域的深度融合,出现数字化、网络化和智能化生产;所谓“多翼”是包括新能源、生物技术及新材料等新的发展领域。当前及今后一段时间最重要的表现形式还是“一主”,“多翼”的主要影响则在其后。因此,计算机及其衍生的信息通信和智能技术革命是本轮工业革命的标志或原因。装备制造业、研发部门及其生产性服务业作为新一轮工业革命主导产业,凸显了制造业“智能化”革命的重要性,这些部门的核心工作就是使整个国民经济系统智能化,因此智能化将成为新一轮工业革命的本质内容之一。

2008年国际金融危机之后,为了刺激本国经济增长,重新塑造在实体经济领域的竞争力,许多国家都实施了一系列国家战略,见表1-1。中、美、德、日都将先进制造业特别是智能制造视为21世纪的制造技术和尖端科学,并认为是国际制造业科技竞争的制高点,四国制造业的发展动态见表1-2。

表 1-1 一些国家对智能制造的政策计划

| 政策名称 | 国家 | 时间 | 政策目标 |
|----------------|----|--------|--|
| “再工业化”计划 | 美国 | 2009 年 | 发展先进制造业，实现制造业的智能化，保持美国制造业价值链上的高端位置和全球控制者地位 |
| “工业 4.0”计划 | 德国 | 2013 年 | 由分布式、组合式的工业制造单元模块，通过组建多组合、智能化的工业制造系统，应对以智能制造为主导的第四次工业革命 |
| “创新 25 战略”计划 | 日本 | 2006 年 | 通过科技和服务创造新价值，以“智能制造系统”作为该计划核心理念，促进日本经济的持续增长，应对全球大竞争时代 |
| “高价值制造”战略 | 英国 | 2014 年 | 应用智能化技术和专业知识，以创造力带来持续增长和高经济价值潜力的产品、生产过程和相关服务，达到重振英国制造业的目标 |
| “新增长动力规划及发展战略” | 韩国 | 2009 年 | 确定三大领域 17 个产业为发展重点推进数字化工业设计和制造业数字化协作建设，加强对智能制造基础开发的政策支持 |
| “印度制造”计划 | 印度 | 2014 年 | 以基础设施建设、制造业和智慧城市为经济改革战略的三根支柱，通过智能制造技术的广泛应用将印度打造成新的“全球制造中心” |

表 1-2 四国制造业的发展动态

| 国 家 | 美国 | 中国 | 德国 | 日本 |
|------|-------------------------------|---|--|---|
| 提出时间 | 2011 年 | 2014 年 | 2011 年 | 2014 年 |
| 规划名称 | AMP（先进制造业伙伴关系） | 中国制造 2025 | 工业 4.0 | 机器人新战略 |
| 口 号 | 制造业回流 | 智能制造 | 智慧工厂 | 人机共存 |
| 纲 领 | 强化先进材料、生产技术、先进制程、数据与设计等产业共通基础 | 发展智能制造设备、新一代移动通信、三网融合、物联网、云计算等战略性新兴产业技术 | 以物联网为范畴，发展水平整合价值网络、终端对终端流程整合、垂直整合制造网络、工作站基础及 GPS 等技术 | 未来工厂 传感器、控制/驱动系统、云端运算、人工智能等技术发展机器人，且让其相互联网 |

1. 美国

2008 年金融危机以来，美国为重振本国制造业，密集出台了多项政策文件，对未来的制造业发展进行了重新规划，体现了美国抢占新一轮技术革命领导权，通过发展智能制造重塑国家竞争优势的战略意图。美国 2011 年提出“先进制造业伙伴计划”（Advanced Manufacturing Partnership, AMP），通过规划加强先进制造布局，提高美国国家安全相关行业的制造业水平，保障美国在未来的全球竞争力。2012 年美国推出“先进制造业国家战略计划”（A National Strategic Plan for Advanced Manufacturing, 2012），该计划的主要政策包括，为先进制造业提供良好的创新环境，促进先进制造技术规模的迅速扩大和市场渗透，促进公共和私人部门对先进制造技术基础设施进行投资等。在智能制造领域，美国在 2011 年专门成立智能制造领导联盟（Smart Manufacturing Leadership Coalition, SMLC），该联盟发表了《实施 21 世纪智能制造》（Implementing 21st Century Smart Manufacturing, 2011）报告。该报告给出了智能制造企业框架，智能制造企业将融合所有方面的制造，从工厂运营到供应链，并且

使得对固定资产、过程和资源的虚拟追踪横跨整个产品的生命周期。最终结果将是在一个柔性的、敏捷的、创新的制造环境中，优化性能和效率，并且使业务与制造过程有效串联在一起。2011年6月奥巴马总统宣布启动国家机器人技术计划，并于2013年制定了《从互联网到机器人——美国机器人路线图》，从战略意义、研究路线图、重点发展领域等方面分析了美国制造机器人、医疗保健机器人、服务机器人、空间机器人、国防机器人的发展路线图，推动机器人技术在各领域的广泛应用。2012年，美国通用电气（GE）公司发布了《工业互联网：突破智慧和机器的界限》（Industrial Internet: Pushing the Boundaries of Minds and Machines, 2012），正式提出“工业互联网”概念。它倡导将人、数据和机器连接起来，形成开放而全球化的工业网络。工业互联网系统由智能设备、智能系统和智能决策三大核心要素构成，形成数据流、硬件、软件和智能的交互。由智能设备和网络收集的数据存储之后，利用大数据分析工具进行数据分析和可视化，由此产生的“智能信息”可以由决策者在必要时进行实时判断处理，成为大范围工业系统中工业资产优化战略决策过程的一部分。

2. 德国

2008年国际金融危机之后，德国经济在2010年领先欧洲其他发达国家回升，其制造业出口贡献了国家经济增长的2/3，是德国经济恢复的重要力量。德国始终重视制造业发展，并且专注于工业科技产品的创新和对复杂工业过程的管理。2010年，德国发布《高技术战略2020》，着眼于未来科技和全球竞争，并将工业4.0战略作为十大未来项目之一。德国提出的“工业4.0”也是在全球具有广泛影响的战略。2013年4月，德国发表了《保障德国制造业的未来——关于实施工业4.0战略的建议》（Securing the future of German manufacturing industry: Recommendations for implementing the strategic initiative Industries 4.0, 2013）报告，正式推出了“工业4.0”战略。报告指出，德国在制造技术创新、复杂工业过程管理以及信息技术领域都表现出很高的水平和能力，在嵌入式系统和自动化工程方面也颇有建树，这些因素共同奠定了德国在制造行业的领军地位。其工业4.0战略的核心是，通过信息物理系统实现人、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，规模效应不再是工业生产的关键因素，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；用户甚至可以广泛、实时参与生产和价值创造的全过程。

3. 英国

2008年的国际金融危机中，曾一度推行去工业化战略的英国实体经济遭受沉重打击，迫使英国政府重新摸索重振制造业的方法。为增强英国制造业对全球的吸引力，英国政府积极推进制造基地建设，面向境外企业进行招商。2011年12月，英国政府提出“先进制造业产业链倡议”，支持范围不仅包括汽车、飞机等传统产业，还包括在全球领先的可再生能源和低碳技术等领域，政府计划投资1.25亿英镑，打造先进制造业产业链，从而带动制造业竞争力的恢复。随着新科学技术、新产业形态的不断涌现，传统制造模式和全球产业格局都发生了深刻的变化，英国政府于2012年1月启动了对未来制造业进行预测的战略研究项目。该项目是定位于2050年英国制造业发展的一项长期战略研究，通过分析制造业面临的问题和挑战，提出英国制造业发展与复苏的政策。2013年10月，英国政府科技办公室发布报告

《未来制造业：一个新时代给英国带来的机遇与挑战》。报告认为制造业并不是传统意义上的“制造之后进行销售”，而是“服务+再制造（以生产为中心的价值链）”，并在通信、传感器、发光材料、生物技术、绿色技术、大数据、物联网、机器人、增材制造、移动网络等多个技术领域开展布局，从而形成智能制造的格局。2014年，英国商业、创新和技能部发布了《工业战略：政府与工业之间的伙伴关系》，旨在增强英国制造业的竞争性，促使其可持续发展，并减少未来的不确定性。报告分析了当前产业现状，明确了重点扶持领域及前沿技术，提出通过创新平台，加强创新研发与工业的衔接，并且提出完善技能培训体系，支持高成长性的小企业进行技术创新，激励商业合作创新，建立公平、透明的政府采购体系等多项政策措施，重点支持大数据、高效能计算，卫星及航天商业化，机器人与自动化，先进制造业等多个重大前沿产业领域。

4. 日本

早在1990年6月，日本通产省就提出了智能制造研究的十年计划，并联合欧洲共同体委员会、美国商务部协商共同成立IMS（智能制造系统）国际委员会。早在2004年日本就制定了《新产业创造战略》，其中将机器人、信息家电等作为重点发展的新兴产业。日本2013年版《制造业白皮书》将机器人、新能源汽车及3D打印等作为今后制造业发展的重点领域；2014年和2015年连续发布了《机器人白皮书》和《机器人新战略》，后者提出机器人发展的三核心目标，即“世界机器人创新基地”“世界第一的机器人应用国家”“迈向世界领先的机器人新时代”。2014年版《制造业白皮书》中指出，日本制造业在发挥IT作用方面落后于欧美，建议日本转型为利用大数据的“下一代”制造业。

5. 中国

为适应工业化进入后期阶段的发展特征，应对新科技革命和产业变革的挑战，近年来，我国中央政府、地方政府和企业都制定、实施了一系列促进智能制造和智能制造产业发展的战略、政策和具体措施，以推动智能制造的发展和普及。中央政府连续出台政策力推智能制造，国家层面智能制造战略框架逐渐清晰完善。2010年10月，国务院发布《关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》，明确提出要加大培育和发展高端装备制造产业等七大战略性新兴产业，并将智能制造装备列为高端装备制造产业的重点方向之一。2012年5月，工业和信息化部发布《高端装备制造业“十二五”发展规划》，指出在智能制造装备领域将重点发展智能仪器仪表与控制系统、关键基础零部件、高档数控机床与基础制造装备、重大智能制造成套装备等四大类产品。2012年3月27日，科技部发布《智能制造科技发展“十二五”专项规划》，布局了基础理论与技术研究、智能化装备、制造过程智能化成套技术与装备、智能制造基础技术与部件、系统集成与重大示范应用等五项重点任务。从2011年到2014年连续四年，国家发展和改革委员会同财政部、工业和信息化部共同实施《智能制造装备发展专项》，重点突破以自动控制系统、工业机器人、伺服和执行部件为代表的智能装置，加大对智能制造的金融财税政策支持力度。2015年3月，工业和信息化部启动智能制造试点示范专项行动，并且部署了智能制造综合标准化体系建设。2015年5月19日，我国发布了《中国制造2025》报告，指出当前各国都在加大科技创新力度，推动3D打印、云计算、移动互联网、生物工程、新能源、新材料等领域的突破和创新。智能制造正在引领制造

方式的变革,我国制造业转型升级、创新发展迎来重大机遇。在战略任务和重点方面,要把智能制造作为“两化”深度融合的主攻方向,推进生产过程智能化,全面提升企业在创新研发、生产、管理和服务领域的智能化水平。

1.1.2 智能制造的概念、内涵和特征

1. 智能制造的概念

智能制造的概念起源于20世纪80年代,智能制造是伴随信息技术的不断普及而逐步发展起来的。1988年,美国纽约大学的怀特教授(P. K. Wright)和卡内基梅隆大学的布恩教授(D. A. Bourne)出版了《智能制造》一书,首次提出了智能制造的概念,并指出智能制造的目的在于通过集成知识工程、制造软件系统、机器人视觉和机器控制对制造技工的技能和专家知识进行建模,以使智能机器人在没有人工干预的情况下进行小批量生产。

日本在1989年提出一种人与计算机相结合的“智能制造系统(Intelligent Manufacturing System, IMS)”,并且于1994年启动了IMS国际合作研究项目,率先拉开了智能制造的序幕。

早期的“智能制造系统”将人工智能(AI)视为核心技术,以“智能体(Agent)”为智能载体,其目的是试图用技术系统突破人的自然智力的局限,达到对人脑智力的部分代替、延伸和加强。

人类对人工智能的正式研究是20世纪50年代中期开始的。1956年,“人工智能”这个概念在美国新罕布什尔州的达特茅斯大学正式诞生。随后,人们从逻辑推理、语音识别、数学运算处理、自动化控制、学习模拟等多个领域进行研究,建立了具有不同能力的人工智能系统。例如,能够进行数据处理、分析集成电路、模拟光路系统、识别人类的语言、识别手写、进行情报信息收集等的人工智能设备。

人工智能历史上有三个学派:符号主义、联结主义与行为主义。这三派智能理论中,符号主义关注人脑的抽象思维的特性;联结主义只模仿人的形象思维;行为主义则着眼于人类或人造系统智能行为特性及进化过程,它们都从不同的角度致力于推动机器智能接近人的智能水平。行为主义在工业界的影响是比较大的。

由于人的智能是多功能、多层次、多侧面、全方位的,而三派AI的模型原理本身存在门户之别,并未走向统一和融合。此外AI在学习算法、稳定性分析、商业化应用等方面屡屡遭遇技术的“瓶颈”,始终制约着系统“智能化”水平与智能制造技术的提升,也导致一度兴旺的IMS在其发源地日本被政府和工业界放弃。

近年来,随着机器学习尤其是深度学习技术的突破,AI热潮再度兴起。最为经典的案例是谷歌公司的“AlphaGo”,仅仅通过一年多的学习进化,就在最复杂的博弈游戏——围棋中迅速战胜了中日韩顶尖高手。AI的最新进展再度让智能制造燃起新的希望。

人工智能是由机器和智能控制系统组成的工作系统,所以也称机器智能,它是由计算机科学、机械设计制造学、信息传感收集与处理科学、语言学、生命科学等多个领域互交叉发展形成的一门综合的科学。人工智能是以计算机系统为基础,通过各种信息收集、信息处理、执行命令,以达到模拟人类的判断和活动是人类的智能和工作能力得以延伸的科学。

广义而论,智能制造是一个大概念,是先进制造技术与新一代信息技术的深度融合,贯穿于产品、制造、服务全生命周期各个环节,以及制造系统集成,实现制造业数字化、网络

化、智能化，不断提升企业产品质量、效益、服务水平，推动制造业创新、绿色、协调、开放、共享发展。

美国能源部对智能制造的定义是先进传感、仪器、监测、控制和过程优化的技术和实际的组合，它们将信息和通信技术与制造环境融合在一起，实现工厂和企业中能量、生产率和成本的实时管理。

当今，智能制造一般指综合集成信息技术、先进制造技术和智能自动化技术，在制造企业的各个环节（如经营决策、采购、产品设计、生产计划、制造、装配、质量保证、市场销售和售后服务等）融合应用，实现企业研发、制造、服务、管理全过程的精确感知、自动控制、自主分析和综合决策，具有高度感知化、物联化和智能化特征的一种新型制造模式。

2. 智能制造的内涵和特征

智能制造（Intelligent Manufacturing, IM）是以新一代信息技术为基础，配合新能源、新材料、新工艺，贯穿设计、生产、管理、服务等制造活动各个环节，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。智能制造技术是制造技术与数字技术、智能技术及新一代信息技术的融合，是面向产品全生命周期的具有信息感知、优化决策、执行控制功能的制造系统，旨在高效、优质、柔性、清洁、安全、敏捷地制造产品和服务用户。虚拟网络和实体生产的相互渗透是智能制造的本质：一方面，信息网络将彻底改变制造业的生产组织方式，大大提高制造效率；另一方面，生产制造将作为互联网的延伸和重要节点，扩大网络经济的范围和效应。以网络互联为支撑，以智能工厂为载体，构成了制造业的最新形态，即智能制造。这种模式可以有效缩短产品研制周期、降低运营成本、提高生产效率、提升产品质量、降低资源能源消耗。从软硬结合的角度看，智能制造即是一个“虚拟网络+实体物理”的制造系统。美国的“工业互联网”、德国“工业4.0”以及我国的“互联网+”战略都体现出虚拟网络与实体物理深度融合——智能制造的特征。

智能制造是未来制造业产业革命的核心，是制造业由数字化制造向智能化制造转变的方向，是人类专家和智能化机器共同组成的人机一体化的智能系统，特征是将智能活动融合到生产制造全过程，通过人与机器协同工作，逐渐增大、拓展和部分替代人类在制造过程中的脑力劳动，已由最初的制造自动化扩展到生产的柔性化、智能化和高度集成化。智能制造不但采用新型制造技术和设备，而且将由新一代信息技术构成的物联网和服务互联网贯穿整个生产过程，在制造业领域构建的信息物理系统，将彻底改变传统制造业的生产组织方式，它不是简单地用信息技术改造传统产业，而是信息技术与制造业融合发展和集成创新的新型业态。智能制造要求实现设备之间、人与设备之间、企业之间、企业与客户之间的无缝网络链接，实时动态调整，进行资源的智能优化配置。它以智能技术和系统为支撑点，以智能工厂为载体，以智能产品和服务为落脚点，大幅度提高生产效率、生产能力。

智能制造包括智能制造技术与智能制造系统两大关键组成要素和智能设计、智能生产、智能产品、智能管理与服务4大环节。其中智能制造技术是指在制造业的各个流程环节，实现了大数据、人工智能、3D打印、物联网、仿真等新型技术与制造技术的深度融合。它具有学习、组织、自我思考等功能，能够对生产过程中产生的问题进行自我分析、自我推理、自我处理；同时，对智能化制造运行中产生的信息进行存储，对自身知识库不断积累、完

善、共享和发展。智能制造系统就是要通过集成知识工程、智能软件系统、机器人技术和智能控制等来对制造技术与专家知识进行模拟，最终实现物理世界和虚拟世界的衔接与融合，使得智能机器在没有人干预的情况下进行生产。智能制造系统相较于传统系统更具智能化的自治能力、容错功能、感知能力、系统集成能力。

智能制造的内容包括：制造装备的智能化，设计过程的智能化，加工工艺的优化，管理的信息化和服务的敏捷化、远程化。

3. 传统智能制造

在2010年前，中文的“智能制造”主要是指传统智能制造。IM是20世纪80年代末随着计算机集成制造系统（Computer Integrated Manufacturing Systems, CIMS）的研究开始兴起的，核心是借助IM系统实现制造过程的自测量、自适应、自诊断、自学习，达到制造柔性化、无人化。制造智能主要表现在智能调度、智能设计、智能加工、智能操作、智能控制、智能工艺规划、智能测量和诊断等多方面。

人工智能广泛地应用于制造，使制造知识的获取、表示、存储和推理成为可能，推动了制造智能的发展与制造技术的智能化。智能行为最早体现在计算机的符号推理中，即专家系统，如基于专家系统的机床自适应控制。专家系统将人类思维的一般规律研究转为知识的研究，并导致知识工程学科的诞生。大量的专家系统开发应用与实践证实了专家系统是人工智能的重要部分，但其是建立在符号推理基础之上的，有内在不足，专家系统存在对领域专家的依赖性、知识获取困难以及解决问题的灵活性差等问题。

为摆脱传统人工智能在感知、理解、学习、联想和协作等方面遇到的困难，智能模拟方法进入了一个全新的发展时期，以数据为基础的计算智能技术包括人工神经网络（Artificial Neural Network, ANN）、模糊逻辑（Fuzzy Logic, FL）、启发式算法（Heuristic Algorithms, HA）、多智能体（Multi-agent）分布式人工智能等智能技术获得诸多领域专家学者的广泛关注。由于专家系统基于符号推理，对于一些纯符号技术无法解决的问题往往束手无策，这时可用ANN等计算智能方法来解决。ANN具有自学习、容错抗错、并行计算和联想能力的特点，擅长解决模糊非线性映射问题，常应用于有噪声污染环境下的预报或模式识别、制造过程控制和故障诊断领域。由于制造过程的复杂性、随机性和不确定性，模糊逻辑常用来处理常规方法难以解决的带有模糊信息的问题，如模糊逻辑故障诊断、模糊生产决策及模糊控制等，但模糊逻辑的学习能力很差，在知识获取方面十分软弱。

模糊逻辑和ANN在许多方面具有关联性和互补性，两者有机结合可以弥补模糊系统学习机制的不足和神经网络难以表达基于规则的知识的特点。

另一方面，虽然ANN比起过去基于规则的系统在很多方面显示出优越性，但其实际使用的多数是只含有一层隐层节点的浅层模型，同时训练样本特征的好坏成为制约整个系统性能的瓶颈。大数据时代的到来对智能化分析和预测提出了巨大需求，大数据中含有丰富的信息维度，传统的ANN模型通常处于欠拟合状态，因而需要引入深度学习（Deep Learning, DL），或称深度神经网络（Deep Neural Network, DNN）。DL的实质是通过构建具有很多隐层的多层感知学习模型和海量的训练数据，从大量输入数据中学习有效的特征表示，并对未来或未知事件做出更精准的预测。区别于传统的ANN，DL的不同在于：①强调了模型结构的深度，通常有5层、6层甚至10多层的隐层；②突出了特征学习的重要性，通过逐层特

征变换,从底层到高层逐级提取输入数据的特征,避免显式的特征提取,学习得到的特征对数据有更本质的刻画,从而深刻揭示海量数据中所承载的丰富信息。DL已受到学术界和工业界的广泛重视,目前初步应用于语音图像的智能识别等。

启发式算法是在搜索过程中模拟自然过程、利用一些启发式规则来指导算法寻优,从而加速问题求解过程的一类优化算法。如群智能算法(粒子群优化算法、蚁群算法、鱼群算法和蜂群算法等)、遗传算法、免疫算法、和声搜索算法、模拟退火算法和文化算法等。这类算法具有不需要先验知识及隐含的并行性等优势,可以快速近似求解一些复杂优化问题,如NP难题。多智能体是由具有感知、通信、协作、学习、反馈等功能属性的智能体构成的相互协作的系统,大型复杂问题被划分为复杂程度相对较低的子问题,再由不同智能体经过沟通协作和自主决策完成,多智能体是分布式人工智能最重要的研究领域之一。多智能体技术广泛应用于柔性制造和智能制造领域。然而,由于人工智能进展缓慢,传统的智能制造技术未能在企业中获得广泛应用。

综上所述,为了克服基于知识的传统人工智能的缺点,人工智能研究重点已转向计算智能。计算智能主要包括神经网络、模糊系统、启发式算法等,是人工智能发展的新阶段,特别是在ANN基础之上发展起来的DL,应用于制造工程领域,将大大加速推进智能制造向前发展。另一方面,泛在计算、云计算、物联网、信息物理系统及大数据等新一代信息技术的出现,形成了基于泛在感知数值计算的普适智能及社会感知计算(Socially Aware Computing, SAC)。社会感知计算是借助泛在环境大规模新型多种类传感设备来感知现实世界的实时、多源数据,经过分析和处理,通过大量作动器和智能设备直接作用于现实世界,同时支持社群的互动、沟通和协作,从而高效地支持社会目标的实现。SAC的核心在于“感知”,首先感知现实世界,然后觉察并做出响应,其灵活性、通用性及严密性明显优于基于知识的传统人工智能,进而对智能制造产生革命性影响。与此同时,制造业已向社会化和服务化方向发展,与当初提出AM时的背景有根本性的不同,因此对AM进行研究时也应考虑这些因素。

4. 新一代智能制造模式

在2010年后,中文的“智能制造”是指IM或Smart Manufacturing(SM)或两者。SM又被译为智慧制造。2008年,IBM提出“智慧地球”的概念,从而拉开了新一代信息技术应用的大幕,先是物联网技术,接着是移动宽带、云计算技术、信息物理系统,然后是大数据。这些新一代信息技术具有诸多有别于传统IT技术的特点,将其应用于制造系统将从根本上改变当前的制造模式发展格局,从诸多方面改变制造业信息化建设的路径,使得智能制造范畴有了较大扩展。新一代信息技术极大地推动了新兴制造模式的发展,其中具有代表性的先进制造模式有:以社会化媒体/Web2.0为支撑平台的社会化企业、以云计算为使能技术的云制造、以物联网(Internet of Things, IoT)为支撑的制造物联、以泛在计算(Ubiquitous Computing, UC)为基础的泛在制造、以信息物理系统(Cyber Physical Systems, CPS)为核心的工业4.0下的智能制造、以大数据为驱动力的预测制造乃至主动制造等。

5. 智能制造的特点

第一,生产过程高度智能。智能制造在生产过程中能够自我感知周围环境,实时采集、监控生产信息。智能制造系统中的各个组成部分能够依据具体的工作需要,自我组成一种超