

 普通高等教育“十三五”规划教材暨智能制造领域人才培养规划教材

智能制造技术基础

Foundation of Intelligent Manufacturing Technology

主编 邓朝晖 万林林 邓 辉
 张晓红 刘 伟



华中科技大学出版社

地址：武汉市洪山区珞珈山华中科技大学出版大厦
电话：(027) 87543767 87543768 87543769
网址：http://www.hztc.com.cn

普通高等教育“十三五”规划教材 智能制造领域人才培养规划教材

智能制造技术基础

Foundation of Intelligent Manufacturing Technology

主 编 邓朝晖 万林林 邓 辉
张 晓 红 刘 伟



华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 简 介

本书主要内容包括:智能制造技术的内涵和体系,人工智能与专家系统,智能设计,智能工艺规划和智能加工数据库,智能监测、诊断与控制,智能制造系统,智能制造装备等。本书可作为高等学校机械工程、电气工程及自动化、自动化、计算机科学与技术等专业本科生和研究生专业课程的教材,同时可供从事智能制造技术研究及工作的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

智能制造技术基础/邓朝晖等主编. —武汉:华中科技大学出版社,2017.7

普通高等教育“十三五”规划教材暨智能制造领域人才培养规划教材

ISBN 978-7-5680-2767-0

I. ①智… II. ①邓… 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(2017)第 086697 号

智能制造技术基础

Zhineng Zhizao Jishu Jichu

邓朝晖 万林林 邓 辉 张晓红 刘 伟 主编

策划编辑:汪 富

责任编辑:吴 晗

封面设计:杨小川

责任校对:李 琴

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:武汉楚海文化传播有限公司

印 刷:武汉市籍缘印刷厂

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:20.25

字 数:519千字

印 次:2017年7月第1版第1次印刷

定 价:48.00元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

纵观近两百年制造业的发展历程,影响制造业和制造技术发展的主要因素是科学技术的推动与市场需求的牵引。在市场需求不断变化的驱动下,制造业的生产规模沿着“小批量→少品种大批量→多品种变批量→大规模定制”的方向发展。在科技高速发展的推动下,制造业的资源配置沿着“劳动密集→设备密集→信息密集→知识密集”的方向发展。与之相适应,制造技术的生产方式沿着“手工→机械化→单机自动化→刚性自动化→柔性自动化→集成敏捷虚拟自动化→数字网络绿色智能化”的方向发展。近年来,工业领域与信息技术领域都发生了深刻的变革。在工业领域主要包括工业机器人、智能机床、3D 打印等,而在信息技术领域主要包括大数据、云计算、社交网络、移动互联等。这些变革带来了制造业的新一轮革命,特别是作为信息化与工业化高度融合产物的智能制造得到长足发展。随着数字化、自动化、信息化、网络化和人工智能技术的发展,特别是2013年德国工业4.0概念的推出、2015年《中国制造2025》的颁布,“智能制造”被定位为中国制造的主攻方向,智能制造已成为现代先进制造业的重要发展方向。

目前,学术界普遍认为智能制造是现代制造技术、人工智能技术和计算机技术三者结合的产物。智能制造定义为:面向产品的全生命周期,以物联网、大数据、云计算等新一代信息技术为基础,以制造装备、制造单元、制造车间、制造企业和企业生态系统等不同层次的制造系统为载体,在其设计、生产、管理、服务等制造活动的关键环节,具有一定自主性的感知、学习、分析、决策、通信与协调控制、执行能力,能动态地适应制造环境的变化,从而实现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、降低资源能源消耗等目标。智能制造技术是现代制造技术、人工智能技术与计算机技术发展的必然结果。智能制造技术是在现代制造技术、新一代信息技术支撑下,面向产品全生命周期的智能设计、智能加工与装配、智能监测与控制、智能服务、智能管理等专门技术及其集成。智能制造系统是指应用智能制造技术,达成全面或部分智能化的制造过程或组织,按其规模与功能可分为智能机床、智能加工单元、智能生产线、智能车间、智能工厂、智能制造联盟等层级。

制造活动中包含着大量的数据、信息、经验和知识,智能制造技术追求的目标之一就是要更加有效、充分地利用这些数据、信息、经验和知识,不断提高制造活动的智能水平。人工智能技术在制造系统及其各个环节的广泛应用,使制造信息及知识的获取、表示、传递、存储和推理成为可能;计算机软、硬件和计算机网络技术的发展,为智能制造系统提供了基本的技术支撑;传感与控制技术的发展与普及,为大量获取制造数据和信息提供了方便快捷的技术手段,极大提高了对制造数据与信息的获取、处理及应用能力;互联网技术、移动互联网技术、物联网技术、工业互联网技术的发展及其与智能制造技术的融合,促进了分布智能制造技术的发展,扩展了智能制造的研究领域;数学学科直接推动了制造活动从经验到技术、从技术向科学的发展,不仅为智能制造技术奠定了坚实的理论基础,而且还是智能制造技术不断向前发展的理论源泉。

智能制造技术是市场的必然选择,是先进生产力的重要体现。智能制造技术能提升产品

的设计水平,提高企业的生产质量、效率、安全性以及市场快速响应能力。智能制造技术不仅推动了机械制造、航空航天、电子信息、轨道交通、化工冶金等行业的智能化进程,而且还将孕育和促进以制造资源软件中间件、制造资源模型库、材料及工艺数据库、制造知识库、智能物流管理与配送等为主要产品,为其他制造企业提供咨询、分析、设计、维护和生产服务的现代制造服务业发展。智能制造技术在中国的应用和普及,必将催生一批具有世界先进水平、引领世界制造业发展的龙头企业,推动我国制造业实现自主创新、跨越发展。

本书由邓朝晖、万林林、邓辉、张晓红、刘伟主编。在本书的编撰过程中,编者参阅引用了不少国内外学术文献,已在书后的参考文献中列出。同时,在本书的编写过程中,余帅龙、钟君焜、戴鹏、尹晖、商圆圆、胡扬轩、黄文良等做了大量的文字和图表的处理工作,特在此表示感谢。

智能制造技术作为制造业重点发展和主攻的新兴技术,涉及面广,其概念与内涵也在不断地发展和丰富。恳切希望读者对本书中存在的不足之处给予批评指正,不胜感激。

编者

2017年3月于湖南科技大学

目 录

| | |
|------------------------------------|-------|
| 第 1 章 概论 | (1) |
| 1.1 智能制造技术发展和意义 | (1) |
| 1.2 智能制造技术内涵、特征、目标及发展趋势..... | (16) |
| 1.3 智能制造技术体系..... | (21) |
| 第 2 章 人工智能 | (34) |
| 2.1 概述..... | (34) |
| 2.2 知识表示方法..... | (40) |
| 2.3 确定性推理..... | (54) |
| 2.4 状态空间搜索..... | (62) |
| 2.5 专家系统..... | (71) |
| 2.6 机器学习..... | (82) |
| 2.7 人工神经网络..... | (91) |
| 第 3 章 智能设计 | (99) |
| 3.1 概述..... | (99) |
| 3.2 智能设计系统 | (104) |
| 3.3 智能设计系统的产品模型 | (109) |
| 3.4 智能 CAD 系统的设计方法 | (113) |
| 3.5 智能 CAD 系统的开发与实例 | (118) |
| 第 4 章 工艺智能规划与智能数据库 | (131) |
| 4.1 概述 | (131) |
| 4.2 计算机辅助工艺规划及其智能化 | (136) |
| 4.3 切削智能数据库 | (156) |
| 4.4 磨削智能数据库 | (167) |
| 4.5 数控加工自动编程 | (175) |
| 第 5 章 制造过程的智能监测、诊断与控制 | (187) |
| 5.1 概述 | (187) |
| 5.2 智能监测 | (188) |
| 5.3 智能诊断 | (207) |
| 5.4 智能控制 | (218) |
| 5.5 典型示范案例 | (231) |

| | |
|---------------------------|-------|
| 第 6 章 智能制造系统 | (237) |
| 6.1 概述 | (237) |
| 6.2 智能制造系统体系架构 | (238) |
| 6.3 智能制造系统调度控制 | (241) |
| 6.4 智能制造系统供应链管理 | (257) |
| 第 7 章 智能制造装备 | (275) |
| 7.1 概述 | (275) |
| 7.2 高档数控机床 | (278) |
| 7.3 工业机器人 | (283) |
| 7.4 3D 打印装备..... | (293) |
| 7.5 智能生产线 | (301) |
| 7.6 智能工厂 | (305) |
| 参考文献 | (313) |
| [1] | |
| [2] | |
| [3] | |
| [4] | |
| [5] | |
| [6] | |
| [7] | |
| [8] | |
| [9] | |
| [10] | |
| [11] | |
| [12] | |
| [13] | |
| [14] | |
| [15] | |
| [16] | |
| [17] | |
| [18] | |
| [19] | |
| [20] | |
| [21] | |
| [22] | |
| [23] | |
| [24] | |
| [25] | |
| [26] | |
| [27] | |
| [28] | |
| [29] | |
| [30] | |
| [31] | |
| [32] | |
| [33] | |
| [34] | |
| [35] | |
| [36] | |
| [37] | |
| [38] | |
| [39] | |
| [40] | |
| [41] | |
| [42] | |
| [43] | |
| [44] | |
| [45] | |
| [46] | |
| [47] | |
| [48] | |
| [49] | |
| [50] | |
| [51] | |
| [52] | |
| [53] | |
| [54] | |
| [55] | |
| [56] | |
| [57] | |
| [58] | |
| [59] | |
| [60] | |
| [61] | |
| [62] | |
| [63] | |
| [64] | |
| [65] | |
| [66] | |
| [67] | |
| [68] | |
| [69] | |
| [70] | |
| [71] | |
| [72] | |
| [73] | |
| [74] | |
| [75] | |
| [76] | |
| [77] | |
| [78] | |
| [79] | |
| [80] | |
| [81] | |
| [82] | |
| [83] | |
| [84] | |
| [85] | |
| [86] | |
| [87] | |
| [88] | |
| [89] | |
| [90] | |
| [91] | |
| [92] | |
| [93] | |
| [94] | |
| [95] | |
| [96] | |
| [97] | |
| [98] | |
| [99] | |
| [100] | |

第1章 概 论

1.1 智能制造技术发展和意义

制造业是国民经济的主体,是立国之本、兴国之器、强国之基。制造是把原材料变成有用物品的过程,它包括产品设计、材料选择、加工生产、质量保证、管理和营销等一系列有内在联系的运作和活动。制造系统是一个相对的概念,小的如柔性制造单元(flexible manufacturing cell, FMC)、柔性制造系统(flexible manufacturing system, FMS)、计算机/现代集成制造系统(computer/contemporary integrated manufacturing systems, CIMS),大至一个车间、企业,乃至以某一企业为中心包括其供需链而形成的系统,都可称为“制造系统”,制造系统是人、设备、物流/能量流/信息流/资金流、制造模式的一个组合体。

制造活动中包含着大量的数据、信息、经验和知识。这些数据、信息、经验和知识可能是定性和定量的、精确和模糊的、确定和随机的、连续和离散的、显性和隐性的、具体和抽象的。它们的表达模型可能是同构和异构的、结构化或非结构化的,存储形式可能是集中和分布的。制造技术追求的永恒目标之一就是更加有效、充分地利用这些数据、信息、经验和知识,不断提高制造活动的智能水平。智能制造(intelligent manufacturing, IM)通常泛指智能制造技术和智能制造系统,它是人工智能技术和制造技术相结合后的产物。人工智能(artificial intelligence, AI)是智能机器所执行的与人类智能有关的功能,如判断、推理、证明、识别、感知、理解、设计、思考、规划、学习和问题求解等思维活动。人工智能具有对外部世界的感知能力、记忆和思维能力、学习和自适应能力、行为决策能力、执行控制能力等。一般来说,人工智能分为计算智能、感知智能和认知智能三个阶段。第一阶段为计算智能,即快速计算和记忆存储能力。第二阶段为感知智能,即视觉、听觉、触觉等感知能力。第三阶段为认知智能,即能理解、会思考。认知智能是目前机器与人差距最大的领域,让机器学会推理和决策异常艰难。将人工智能技术和制造技术相结合,实现智能制造,通常有如下好处:①智能机器的计算智能高于人类,在一些有固定数学优化模型、需要大量计算,但无需进行知识推理的地方,比如,设计结果的工程分析、高级计划排产、模式识别等,与人根据经验来判断相比,机器能更快地给出更优的方案,因此,智能优化技术有助于提高设计与生产效率、降低成本,并提高能源利用率。②智能机器对制造工况的主动感知和自动控制能力高于人类,以数控加工过程为例,“机床/工件/刀具”系统的振动、温度变化对产品质量有重要影响,需要自适应调整工艺参数。应用智能传感与控制技术,实现“感知→分析→决策→执行”的闭环控制,能显著提高制造质量。同样,一个企业的制造过程中,存在很多动态的、变化的环境,制造系统中的某些要素(设备、检测机构、物料输送和存储系统等)必须能动态地、自动地响应系统变化,这也依赖于制造系统的自主智能决策。③随着工业互联网等技术的普及应用,制造系统正在由资源驱动型向信息驱动型转变。制造企业能拥有的产品全生命周期数据是非常丰富的,通过基于大数据的智能分析方法,将有助于

创新或优化企业的研发、生产、运营、营销和管理过程,为企业带来更快的响应速度、更高的效率和更深远的洞察力。工业大数据的典型应用包括产品创新、产品故障诊断与预测、企业供应链优化和产品精准营销等诸多方面。

近年来,在工业领域与信息技术领域都发生了深刻的变革。在工业领域主要包括智能机床、工业机器人、3D 打印等,而在信息技术领域主要包括大数据、云计算、社交网络、移动互联网等。这些变革带来了制造业的新一轮革命,特别是作为信息化与工业化高度融合产物的智能制造得到长足发展。无论是在微观层面,还是宏观层面,智能制造技术都能给制造企业带来切实的好处。我国从制造大国迈向制造强国过程中制造业面临 5 个转变:产品从跟踪向自主创新转变;从传统模式向数字化、网络化、智能化转变;从粗放型向质量效益型转变;从高污染、高能耗向绿色制造转变;从生产型向“生产+服务”型转变。在这些转变过程中,智能制造是重要手段。在“中国制造 2025”中,智能制造是制造业创新驱动、转型升级的制高点、突破口和主攻方向。

1.1.1 制造技术发展的市场需求和技术推动的背景

纵观其近两百年来发展历程,影响制造技术发展的主要因素是技术推动与市场牵引。科学技术的每次革命,必然引起制造技术的不断发展,也推动了制造业的发展;随着人类社会的不断进步,人类的需求也在不断发生变化,因而从另一方面推动了制造业的不断发展,促进了制造技术的不断进步。同时制造过程和制造技术作为科学技术的物化基础,又反过来极大地促进了科技进步和社会发展。下面根据两百多年来制造技术与产业发展的历史轨迹来简要回顾科技进步和市场需求是如何促进制造技术与制造产业不断创新发展的。

18 世纪,以蒸汽机和工具机的发明为标志的英国工业革命,揭开了工业经济时代的序幕,开创了以机器占主导地位的制造业新纪元,造就了制造企业的雏形——工场式生产。19 世纪末 20 世纪初,交通与运载工具对轻小、高效发动机的需求是诱发内燃机发明的社会动因,而内燃机的发明及其宏大的市场需求继而引发了制造产业的革命。人类社会对以汽车、武器弹药为代表产品的大批量需求促进了标准化、自动化的发展,福特、斯隆开创的大批量流水线生产模式和泰勒创立的科学管理理论导致了制造技术的分工和制造系统的功能分解,从而使成本大幅度降低。第二次世界大战后,市场需求多样化、个性化、高品质的趋势推动了微电子技术、计算机技术、自动化技术的飞速发展,导致了制造技术向程序控制的方向发展,柔性制造单元、柔性生产线、计算机集成制造及精益生产等相继问世,制造技术由此进入了面向市场多样需求的柔性生产的新阶段,引发了生产模式和管理技术的革命。1959 年提出的微型机械的设想最终依靠信息技术、生物医学工程、航空航天、国防及诸多民用产品的市场需求推动才得以成为现实,并将继续拥有灿烂的发展前景。以集成电路为代表的微电子技术的广泛应用有力推动了微电子制造工艺水平的提高和微电子制造装备业的快速发展。20 世纪末,信息技术的发展促成传统制造技术与以计算机为核心的信息技术和现代管理技术三者的有机结合,形成了当代先进制造技术和现代制造业,从而为当今世界丰富多彩的物质文明奠定了可靠基础;激光的发明导致巨大的光通信产业及激光测量、激光加工和激光表面处理工艺的发展;无线通信、手提电话的发明诱发了人类对移动通信的新需求。由此可见,创新的动力既来自市场需求,也源于科学发现与技术进步。技术创新不仅仅是被动地满足市场的需求,而且它还能主动地创造

新的市场、新的战略性需求。

两百多年来,在市场需求不断变化的驱动下,制造业的生产规模沿着“小批量→少品种大批量→多品种变批量→大规模定制”的方向发展。在科技高速发展的推动下,制造业的资源配置沿着“劳动密集→设备密集→信息密集→知识密集”的方向发展。与之相适应,制造技术的生产方式沿着“手工→机械化→单机自动化→刚性流水自动化→柔性自动化→集成敏捷虚拟自动化→数字网络绿色智能化”的方向发展。

1.1.2 智能制造技术的发展和意义

1. 智能制造技术的发展

20世纪60年代后,由于市场经济的冲击和信息革命的推动,作为世界财富主要来源的制造业经历一场重大的变革。从市场竞争来看,企业面临的是一个变化越来越快的市场和越来越激烈的竞争环境,社会对产品的需求正从大批量产品转向多品种、小批量甚至单件产品上。企业要在这样的市场环境中立于不败之地,必须对自身不断进行改造以适应变化了的市场。20世纪50年代诞生的数控技术,以及随后诞生的机器人技术、柔性制造技术、计算机集成制造技术、CAD/CAPP/CAM技术和现代生产管理技术,正是为了适应以上市场变化的新型制造技术。柔性制造和计算机集成制造开数字化技术用于制造活动的先河,加速了制造技术与信息技术的融合,从此,信息和数据成为制造技术发展的重要驱动力之一,推动了数字制造技术的发展。20世纪80年代,将人工智能技术引入到制造领域,对于制造业来说无疑是一场革命性的变革,导致一种新型的制造模式——智能制造的诞生。

智能制造技术是现代制造技术、人工智能技术与计算机科学发展的必然结果,也是三者结合的产物。人工智能技术和计算机技术是推动智能制造技术形成与发展的重要因素。

人工智能技术自1956年问世以来,在研究者们的努力下,60多年来无论在理论和实践方面都取得了重大进展。1965年,斯坦福大学计算机系的Feigenbaum提出为了使人工智能走向实用化,必须把模仿人类思维规律的解题策略与大量专门知识相结合,基于这种思想,他与遗传学家J. Lederberg、物理化学家C. Djerassi等人合作研制出了根据化合物分子式及其质谱数据来帮助化学家推断的计算机程序系统DENDRAL,此系统解决问题的能力已达到专家水平,某些方面甚至超过同领域的专家。DENDRAL系统的出现,标志人工智能的一个新的研究领域——专家系统的诞生。随着专家系统的成熟和发展,其应用领域迅速扩大,20世纪70年代中期以前的专家系统多属于数据信号解释型和故障诊断型,20世纪70年代以后专家系统的应用开始扩展到其他领域,如设计、规划、预测、监视、控制等领域。

神经网络是人工智能的另一个重要发展领域,特别是1987年电气与电子工程师协会(IEEE)召开了第一次国际神经网络会议后,神经网络的理论与应用的研究进入了一个蓬勃发展的新阶段。迄今,神经网络的研究已获得诸多方面的新进展和新成果,提出了大量的网络模型,发展了许多学习算法,对神经网络的系统理论和实现方法进行了成功的探讨和实验。在此基础上,人工神经网络还在模式分类、机器视觉、机器听觉、智能计算、机器人控制、故障诊断、信号处理、组合优化问题求解、联想记忆、编码理论和经营决策等许多领域获得了卓有成效的应用。

人工智能技术中的数据分析、知识表示、机器学习、自动推理、实例推理、规则推理、智能计

算等与制造技术相结合,不仅为生产数据和信息的分析和处理提供了新的有效方法,而且直接推动了对生产知识与智慧的研究与应用,促进了智能控制理论与技术的发展及其在制造工程中的应用,为制造技术增添了智慧的翅膀。

随着专家系统、知识推理、神经网络、遗传算法等人工智能技术在制造系统及其各个环节的广泛应用,使得制造信息及知识的获取、表示、传递、存储和推理成为可能,出现了智能制造的新型生产模式。制造中的智能主要表现在智能设计、智能工艺规划、智能加工、智能测量、机器人、智能控制、智能调度、智能服务、智能运维等方面。

计算机技术自从问世以后,迅速在制造业中得到广泛的应用,在软件方面,有计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助工艺设计(CAPP)、计算机辅助制造(CAM)、管理信息系统(MIS)、制造资源计划(MRP II)、企业资源计划(ERP)、产品数据管理系统(PDM)等大量计算机辅助软件产品。在硬件方面有计算机数控机床、工业机器人、三坐标测量仪和大量的由计算机或可编程控制器进行控制的高度自动化设备。上述软、硬件和计算机网络技术的发展,为柔性制造系统、敏捷生产系统、精益生产系统、计算机/现代集成制造系统、智能制造系统等先进制造系统提供了基本的技术支撑。

传感与控制技术的发展与普及,为大量获取制造数据和信息提供了方便快捷的技术手段。新型光机电传感技术、MEMS技术、可编程门阵列和嵌入式控制系统技术、智能仪表/变送器/调节器/调节阀技术、集散控制技术、RFID技术、大数据融合技术等,极大提高了对制造数据与信息的获取、处理及应用能力,加强了信息在离散/连续制造技术中的核心作用。

互联网技术、移动互联网技术、物联网技术、工业互联网技术的发展及其与智能制造技术的融合,产生了制造业大数据,促进了分布智能制造技术的发展,扩展了智能制造的研究领域。分布智能控制/集散智能控制理论推动了离散与连续制造技术的进步。网络技术使制造企业拥有了广阔的全球市场、丰富多样的客户群、数量庞大的合作资源,以及来自产品和过程的制造业大数据。快速组织个性化产品设计、生产、销售和服务,实现合作企业之间的共享、共创、共赢等制造业发展的新需求,既为分布智能制造技术提出了更高要求,也为其提供了广阔的发展空间。

数学作为科学技术的共性基础,直接推动了制造活动从经验到技术、从技术向科学的发展。近几十年来,数理逻辑与数学机械化理论、随机过程与统计分析、运筹学与决策分析、计算几何、微分几何、非线性系统动力学等数学分支正成为推动智能制造技术发展的动力,并为数字化分析与设计、过程监测与控制、产品加工与装配、故障诊断与质量管理、制造中的几何表示与推理、机器视觉、制造业大数据挖掘和分析等问题的研究提供了基础理论和有效方法。数学不仅为智能制造技术奠定了坚实的理论基础,而且还是智能制造技术不断向前发展的理论源泉。

随着数据经济和知识经济的到来,世界经济在原有资源、设备、资本竞争的基础上又增加了对生产数据和知识的竞争,数据和知识正逐步成为生产力中最活跃、最重要的因素。数据和知识是一种可持续发展战略资源。对数据和知识的不断获取、传递、积累、融合、更新、发现及应用,既能为企业创造巨大财富,又能增强企业在竞争中的优势地位,支撑企业不断发展壮大。以数据和知识为核心的智能制造正成为制造技术的重要发展方向。

2. 智能制造是制造业发展的重要方向

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,是国际间进行高科技研究开发的重点和占领 21 世纪高科技制高点的象征。目前,世界各国竞相大力发展智能制造,其主要原因如下。

1) 实体经济的战略意义再次凸显是直接原因

2008 年国际金融危机以来,世界经济竞争格局发生了深刻变化。一方面,实体经济的战略意义再次凸显,美国、德国、日本、英国等世界主要发达国家纷纷实施以重振制造业为核心的“再工业化”战略。另一方面,发达国家以信息网络技术、数字化制造技术应用为重点,力图依靠科技创新,抢占国际产业竞争的制高点、谋求未来发展的主动权。

2) 企业提高核心竞争能力的要求是内在动力

多样化的市场需求和激烈的全球化竞争,迫切需要企业迅速、高效制造新产品、动态响应市场需求以及实时优化供应链网络。通过信息技术与智能技术的发展从根本上改变制造企业的生产运营模式,实现从产品设计、工艺规划、加工装配、检测监测、质量保证、生产执行到销售服务、报废回收等全生命周期的高效运行,以最小的资源消耗获取最高的生产效率和最好经济效益。

3) 新一代信息技术的高速发展是技术基础

传感技术、智能技术、机器人技术、数字制造技术的发展,特别是新一代信息和网络技术的快速发展,同时加上新能源、新材料、生物技术、现代管理技术等方面的突破,为智能制造提供了良好的技术基础和发展环境。

4) 制造智能化是历史发展的必然趋势

工业发达国家已走过了机械化、电气化、数字化三个发展历史阶段,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化制造系统,并以部分取代制造中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。发展智能制造不仅是为了提高产品质量和生产效率及降低成本,而且也是为了提高快速响应市场变化的能力,以期在未来国际竞争中求得生存和发展。

3. 中国发展智能制造的基础和必要性

新中国成立以来,特别是改革开放以来,中国制造业取得了伟大的历史性成就,走出了一条中国特色工业化发展道路,已经具备了建设制造强国的基础和条件:①我国制造业拥有巨大市场,需求是最强大的发展动力;②我国制造业有着世界上门类最为齐全、独立完整的体系,具备强大的产业基础;③我国一直坚持信息化与工业化融合发展,在制造业数字化、网络化、智能化方面掌握了核心关键技术,具有强大的技术基础;④我国在制造业人才队伍建设方面已经形成了独特的人力资源优势;⑤我国制造业在自主创新方面成就辉煌,上天、入地、下海、高铁、输电、发电、国防装备等都显示出我国制造业巨大的创新力量。

但是,我国制造业大而不强,存在着突出的问题和巨大的困难:①自主创新能力不强,核心技术受制于人,关键技术对外依存度高;②产品质量问题突出;③资源利用效率低;④产业结构调整刻不容缓,战略性新兴产业弱,传统产业亟待升级换代,服务型制造业刚刚起步,产业集聚

和集群发展水平低,总体处于世界制造产业链的中低端。

国际金融危机爆发后,世界制造业分工格局面临新的调整,我国制造业面临重大挑战,且挑战越来越严峻。从内部因素看,我国经济发展已由较长时期的高速增长进入中高速增长阶段,前一时期非常成功的经济发展方式已不可持续,转变经济发展方式已刻不容缓,对制造业创新驱动、转型升级提出了紧迫的要求。从外部因素看:一方面,欧美发达国家推行“再工业化”战略,谋求在技术、产业方面继续领先优势,抢占制造业高端,进一步拉大与我国的距离;另一方面,印度、越南等发展中国家则以更低的劳动力成本承接劳动密集型产业的转移,抢占制造业的中低端。我国制造业正面临来自发达国家和发展中国家“前后夹击”的双重挑战。

与此同时,中国制造业面临世界范围内新一轮工业革命的历史性机遇。紧紧抓住新一轮科技革命和产业变革与我国加快转变经济发展方式历史性交汇的重大机遇,将大大加快我国工业化和建设制造强国的进程。

在此背景下,2015年国务院印发《中国制造2025》,部署全面推进实施制造强国战略,根据规划,通过“三步走”实现制造强国的战略目标,其中第一步,即到2025年迈入制造强国行列。我国从制造大国迈向制造强国过程中制造业面临5个转变:产品从跟踪向自主创新转变;从传统模式向数字化、网络化、智能化的转变;从粗放型向质量效益型转变;从高污染、高能耗向绿色制造转变;从生产型向“生产+服务”型转变。在这些转变过程中,智能制造是重要手段。“中国制造2025”要以创新驱动发展为主要动力,以信息化与工业化深度融合为主线,以推进智能制造为主攻方向。智能制造——制造业数字化、网络化、智能化是新一轮工业革命的核心技术,应该作为“中国制造2025”的制高点、突破口和主攻方向。

我国智能制造发展已具备了较好的基础,表现在以下方面。

1) 我国制造业信息化水平不断提高

(1) 计算机辅助设计(CAD)的应用得到普及。20世纪80年代,我国制造业企业开始逐步应用CAD软件。20世纪90年代初,科技部启动的“甩图板”工程,推动了我国制造业CAD的普及和应用。目前,我国工业行业大中型企业数字化设计工具普及率超过60%。2011年工业企业信息化和工业化融合评估报告表明:被评估的装备制造业(机床、商用车、船舶)近85%的企业在二维CAD基础上,采用二维、三维混合或全三维CAD设计;钢铁、电解铝、水泥行业在产品设计环节采用信息技术支撑手段和工具的企业达50%;家电、服装消费品制造业近100%的大中型企业进行了产品数字化设计,约82%的家电企业和63%的服装企业采用二维、三维混合或全三维CAD设计。

(2) 计算机辅助制造(CAM)应用水平逐步提高。车间级的以精益制造、柔性制造、敏捷制造、制造执行系统(MES)为代表的数字化生产模式,在制造企业开始得到应用,重点行业关键工序数(自)控化率超过50%。2011年工业企业信息化和工业化融合评估报告表明:被评估的原材料行业(钢铁、电解铝、纯碱)应用制造执行系统的企业占77.1%;钢铁行业应用车间级制造执行系统(MES)的企业比例为32.4%;装备制造业(机床、船舶)大中型企业应用制造执行系统(MES)平均约为61.2%;家电制造行业中56%的企业能根据企业生产计划逐级分解为指导现场作业的工序计划;棉纺织行业和服装制造行业实现自动排产的企业分别占45%和14.5%。

(3) 信息技术在企业管理中发挥作用。我国大中型工业企业财务及办公自动化系统的应

用普及率较高,并逐步实现了对采购、生产制造、销售等各环节的覆盖。2011年工业企业信息化和工业化融合评估报告表明:被评估的重点行业,如钢铁、水泥、机床、商用车行业的财务管理系统普及率达到95%以上,采购、销售和库存管理的应用普及率达到70%以上。

(4)综合集成能力不断提高。2011年工业企业信息化和工业化融合评估报告表明:被评估的装备制造业(机床、船舶、商用车)企业实现产品设计与工艺设计集成的企业约占69.2%,其中机床行业和商用车行业达到75%;家电行业中38%的企业实现设计物料清单(EBOM)自动向工艺设计系统转换,20%的企业实现设计形成的物料清单自动向生产系统转换;装备制造业(机床、船舶)实现企业生产管理与车间级生产管理集成的企业为39.6%;家电、服装、乳制品行业实现车间级生产管理与控制系统集成的企业为30%。我国制造企业数字化、智能化、网络化发展是不平衡的,航空、航天、钢铁、石化、机床、汽车、集成电路领域的大中型企业,在数字化设计、数字化及智能化装备(生产线)、生产制造的数字控制、企业信息管理方面都具有较好的基础和水平,而大部分中小型企业在设计环节中CAD技术应用具有一定基础,而在数字化及智能化装备(生产线)、生产状态监控和设备监控、企业信息管理方面基础较为薄弱。

2) 智能制造装备所需关键部件产业已具雏形

传感器与测量仪表、控制系统、机器人、伺服传动装置、高性能变频器、液压、液力和气动执行装置是智能制造的核心,也是我国发展智能制造的基础。经过多年的研发和产业化推进,已取得重要进展,自主化水平得到一定提升,产业已具雏形。

3) 智能制造装备研发取得重大进展

进入21世纪,我国政府通过实施重大科技专项“高档数控机床与基础制造装备”和战略性新兴产业“智能制造装备发展专项”,加快推进智能制造装备的研发和应用示范。

(1)高档数控机床与基础制造装备研发及产业化成果显著。2008年12月,国务院常务会议审议并原则通过《高档数控机床与基础制造装备科技重大专项实施方案》,将“高档数控机床与基础制造装备”的研制列为我国16项重大科技专项之一。2009—2012年,该专项共部署了课题407项,其中高档数控机床与基础制造装备主机180项,数控系统31项,功能部件与关键部件82项,共性技术80项,应用示范工程13项,创新能力平台建设17项,用户工艺应用试验研究4项。在专项的引导下,“十一五”以来,我国国产机床的数控化率和国内市场占有率均大幅提高,其中,国产机床数控化率由“十五”末的35.5%提高到“十一五”末的51.9%,国内市场占有率由“十五”末的26.4%提高到“十一五”末的56.7%。济南二机床与福特汽车公司签订6条用于美国本土新建工厂和2条用于福特在中国工厂的全自动快速冲压生产线订货合同,开创了我国高档数控机床首次出口至欧美汽车主机制造厂的成功案例。

(2)智能制造装备研发及应用快速推进。2010年发布的《国务院关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》,将智能制造装备作为重点发展方向之一及率先启动的五个发展专项之一。2011—2014年,国家发展改革委、财政部、工业和信息化部组织了智能制造装备发展专项的实施。该专项旨在推进制造业领域智能制造成套装备的创新发展和应用,加强智能测控装置的研发、应用与产业化,促进智能技术和智能制造系统在国民经济重点领域的应用。该专项四年安排项目123项,合同总金额近200亿元,中央预算资金补助近40亿元。其中,专项支持的项目涵盖智能成套装备、关键部件和装置、自动化生产线、数字化车间、智能装备的示范应用等内容,涉及机械制造、印刷、棉纺印染、食品包装、大化肥成套装备、大型煤化工成套装备、废

弃物智能处理系统、煤炭综采成套智能装备等 35 个领域,智能制造成套设备 31 项、关键测控系统应用 10 项、关键部件和装置 11 项、数字化车间 57 项、非制造业成套设备 14 项。

近年来,我国数字化智能化制造发展迅速,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,矛盾和问题依然存在,表现在以下方面:①智能装备核心部件如传感器、控制系统、机器人、高压液压部件及系统等,主要还依赖进口,其价格、交期、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;②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;③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信息传递,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;④软件大部分是国外开发,对于国内现状了解不够,软件商执行、咨询、开发能力不强,软件开发成本过高,软件系统水土不服,影响了企业进行数字化智能化的积极性;⑤系统匹配性差,业务流程重组实施难度大,软件本身内置的管理思想不能很好地结合企业实际情况,信息共享存在困难。

我国有发展智能制造的巨大需求,并具有一定的基础和条件,大力发展智能制造,对于我国制造业应对环境压力、实施创新驱动战略、加快工业化进程、提高企业竞争力具有重要而深远的意义。

4. 智能制造发展的意义

信息化与工业化、信息技术与制造技术的深度融合,智能制造将引发制造业的革命。

1) 产品创新:生产装备和产品的数字化智能化

将数字技术和智能技术融入制造所必需的装备及产品中,使装备和产品的功能极大提高。

(1)智能制造装备和系统的创新。数字化智能化技术一方面使数字化制造装备(如数控机床、工业机器人)得到快速发展,大幅度提升生产系统的功能、性能与自动化程度;另一方面,这些技术的集成进一步形成柔性制造单元、数字化车间乃至数字化工厂,使生产系统的柔性自动化程度不断提高,并向具有信息感知、优化决策、执行控制等功能特征的智能化生产系统方向发展。

(2)具有智能的产品不断诞生。例如,作为典型的颠覆性变化的产品之一是数码相机,采用电荷耦合器件(charge-coupled device, CCD)代替了原始胶片感光,实现了照片的数字化获取,同时采用人工智能技术实现人脸的识别,并自动选择感光与调焦参数,保证普通摄影者获得逼真而清晰的照片。这一创新产品的出现,完全颠覆了传统的摄影器材产业,造成了传统的摄影设备帝国——柯达公司的倒闭。

(3)改变了为用户服务的方式。例如,在传统的飞机发动机、高速压缩机等旋转机械中植入小型传感器,可将设备运行状态的信息,通过互联网远程传送到制造商的客户服务中心,实现对设备进行破坏性损伤的预警、寿命的预测、最佳工作状态的监控。这不仅使设备智能化,而且改变了产业的形态;使制造商不仅为用户提供智能化的设备,而且可以为用户提供全生命周期的服务;而且服务的收入常常超过了卖设备的收入,从而推动制造商向服务商转型。

2) 制造过程创新:制造过程的智能化

(1)设计过程创新。采用面向产品全生命周期、具有丰富设计知识库和模拟仿真技术支持

的数字化智能化设计系统,在虚拟现实、计算机网络、数据库等技术支持下,可在虚拟的数字环境里并行、协同实现产品的全数字化设计,结构、性能、功能的模拟仿真与优化,极大地提高了产品设计质量和一次研发成功率。中国航空工业集团正是采用了数字化设计技术,实现了产品的无图纸化设计、制造和虚拟装配,仅用五年时间就创造了大型军用运输机试飞一次成功的佳绩。

(2) 制造工艺创新。数字化、智能化技术不仅将催生加工原理的重大创新,同时,工艺数据的积累、加工过程的仿真与优化、数字化控制、状态信息实时检测与自适应控制等数字化、智能化技术的全面应用,将使制造工艺得到优化,极大地提高制造的精度和效率,大幅度提升制造工艺水平。

3) 管理创新:管理信息化

管理的信息化将使企业组织结构、运行方式发生明显变化。

(1) 扁平化。一个由人、计算机和网络组成的信息系统,可使得传统的金字塔式多层组织结构变成扁平化的组织结构,大大提高管理效率。

(2) 开放性。制造商、生产型服务商、客户在一个平台上,生成一个无边界、开放式协同创新平台,代替传统的内生、封闭、单打独斗式创新。

(3) 柔性。企业可按照用户的需求,通过互联网无缝集成社会资源,重组成一个无围墙的高效运作的、柔性的企业,以便快速响应市场。

4) 制造模式和产业形态发生颠覆性变革

以数字技术、智能技术为基础,在互联网、物联网、云计算、大数据的支持下,制造模式、商业模式、产业形态将发生重大变化。

(1) 个性化的批量定制生产将成为一种趋势。通过互联网,制造企业与客户、市场的联系更为密切,用户可以通过创新设计平台将自己的个性化的需求及时传送给制造商,或直接参与产品的设计,而柔性的制造系统可以高效、经济地满足用户的诉求,一种新的个性化批量定制生产模式将成为一种趋势。

(2) 进入全球化制造阶段。制造资源的优化配置已经突破了企业、社会、国家的界限,正在全球范围内寻求优化配置,物流、资金流、信息流在全球经济一体化及信息网络的支持下突破国界流动,世界已进入了全球制造时代。

(3) 制造业的产业链优化重构,企业专注于核心竞争力的提高。无处不在的信息网络和便捷的物流系统,使得研发、设计、生产、销售和服务活动被分解、外包、众包到全球,一个企业只要专注于自己核心业务的提高。当今一个企业竞争力的强弱已不在于拥有多少资源和多少核心技术,而是整合社会化、国际化资源的能力。

(4) 服务型制造将渐成主流业态。当前,制造业发展的主动权已由生产者向消费者转移,“客户是上帝”的经营理念已成为制造商的普适信念。经济活动已由制造为中心日渐转变为创新与服务为中心,产品经济正在向服务经济过渡,制造业也正在由生产型制造向服务型制造转变。传统工业化社会的制造服务业是以商业和运输形态为主,而在泛在信息环境下的制造服务业是以技术、知识和公共服务为主,是以信息服务为主。融入了信息技术、智能技术的创新设计和服务是服务型制造的核心。

(5) 电子商务的应用日益广泛。通过信息技术,特别是网络技术,把处于盟主地位的制造

企业与相关的配套企业及用户的采购、生产、销售、财务等业务在电子商务平台上进行整合,不仅有助于增加商务活动的直接化和透明化,而且提高了效率、减少了交易成本。可以预期,电子商务将会无所不在、越来越多地代替传统的、店铺式的销售方式和商务方式。

通过以上分析,智能制造将使制造业的产品形态、设计和制造过程、管理方法和组织结构、制造模式、商务模式发生重大甚至革命性变革,并带动人类生活方式的大变革。智能制造技术是市场的必然选择,是先进生产力的重要体现之一。智能制造技术能提高能源和原材料的利用效率,降低污染排放水平;能提升产品的设计水平,增强产品的文化、知识和技术含量;提高企业的生产质量、生产效率、生产安全性和快速市场响应能力。智能制造技术不仅推动了机械制造、航空航天、电子信息、轨道交通、化工冶金等行业的智能化进程,而且还将孕育和促进以制造资源软件中间件、制造资源模型库、材料及工艺数据库、制造知识库、智能物流管理与配送等为主要产品,为其他制造企业提供咨询、分析、设计、维护和生产服务的现代制造服务业发展。智能制造技术在我国的应用和普及,必将催生一批具有世界先进水平、引领世界制造业发展的龙头企业,引领我国制造业实现自主创新、跨越发展。

1.1.3 各国智能制造的发展概况

1. 美国

美国是智能制造思想的发源地之一,“智能制造”的概念就是由普渡大学智能制造国家工程中心于1987年提出来的。美国国家科学基金(NSF)在1991—1993年间着重资助了有关智能制造的诸项研究,这些项目覆盖了智能制造领域的绝大部分。美国还建立了许多重要实验基地,美国国家标准和技术研究所(NIST)的自动化制造与实验基地就把“为下一代以知识库为基础的自动化制造系统提供研究与实验设施”作为其三大任务之一。卡内基梅隆大学的制造系统构造实验室一直从事制造智能化的研究,包括制造组织描述语言、制造知识表示、制造通信协议、谈判策略和分布式知识库,先后开发了车间调度系统、项目管理系统等项目。在美国空军科学制造计划的支持下,于1989年由D. A. Boume组织完成了首台智能加工工作站的样机。该样机能直接根据零件的定义数据完成零件的全自动加工,具有产品三维实体建模、创成式工艺规划设计、NC程序自动生成、加工过程智能监控等一系列智能功能,它的完成被认为是智能制造机器发展史上的一个重要里程碑。与此同时,美国工业界也以极高的热情投入智能制造的研究开发,1993年4月在美国底特律由美国工程师协会召开的第22届可编程控制国际会议中,有200多家厂商参展,以极大的篇幅介绍了智能制造,提出了“智能制造,新技术、新市场、新动力”的口号,展出了大量先进的、具有一定智能的硬件设备。这次大会讨论的议题有开放式PLC体系及标准、模糊逻辑、人工神经网络、自动化加工的用户接口、通往智能制造之路、精良生产等。

2005年,美国国家标准与技术研究所提出了“聪明加工系统(Smart Machining System, SMS)”研究计划。聪明加工系统的实质是智能化,该系统的主要目标和研究内容包括:①系统动态优化,即将相关工艺过程和设备知识加以集成后进行建模,进行系统的动态性能优化;②设备特征化,即开发特征化的测量方法、模型和标准,并在运行状态下对机床性能进行测量和通信;③下一代数控系统,即与STEP-NC兼容的接口和数据格式,使基于模型的机器控制能够无缝运行;④状态监控和可靠性,即开发测量、传感和分析方法;⑤在加工过程中直接测量