

责任编辑：石长旭
封面设计：唐韵设计

智能制造基础技术系列教材

PLC应用技术
液压与气动技术
智能制造导论
数控加工工艺
制造执行系统（MES）
数控设备维护与装调

数控加工编程
可编程控制技术
变频器原理与应用技术
数控编程及零件加工
电机与电气控制
人工智能与Python编程

智能制造基础技术系列教材

智能制造导论

主编◎石金艳 王庆云 王晓琴

北京交通大学出版社

智能制造基础技术系列教材
“互联网+”新形态一体化教材

智能制造导论

主编◎石金艳 王庆云 王晓琴



定价：42.00元



北京交通大学出版社
<http://www.bjtup.com.cn>



智能制造基础技术系列教材
“互联网+”新形态一体化教材

智能制造导论

主编◎石金艳 王庆云 王晓琴

北京交通大学出版社
· 北京 ·

内 容 简 介

本书以加强学生职业素养教育、拓宽学生对智能制造相关领域的认知为原则,紧跟制造业的发展趋势,对智能制造的理论和实践知识进行了系统的概括和论述。全书共分为5个模块,分别是智能制造概述、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。

本书可作为高等职业院校机械设计制造类、机电设备类、自动化类及其他相关专业的教材,也可作为制造业相关从业人员的自学参考用书。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

智能制造导论 / 石金艳, 王庆云, 王晓琴主编. -- 北京: 北京交通大学出版社, 2025. 8. -- ISBN 978-7-5121-5599-2

I. TH166

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2025Y9Y323 号

智能制造导论

ZHINENG ZHIZAO DAOLUN

责任编辑: 石长旭

出版发行: 北京交通大学出版社 电话: 010-51686414 <http://www.bjtup.com.cn>

地 址: 北京市海淀区高粱桥斜街 44 号 邮编: 100044

印 刷 者: 三河市华骏印务包装有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 185 mm × 260 mm 印张: 14 字数: 314 千字

版 印 次: 2025 年 8 月第 1 版 2025 年 8 月第 1 次印刷

印 数: 1—3 000 册 定价: 42.00 元

本书如有质量问题, 请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评, 我们表示欢迎和感谢。
投诉电话: 010-51686043, 51686008; 传真: 010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

编委会

| **主 编** | 石金艳 王庆云 王晓琴

| **副主编** | 谢永超 黄剑锋 孙 豪
刘 梅 谢 菲 涂春莲



前言

党的二十大报告明确提出，要着力建设现代化产业体系，坚持把发展经济的着力点放在实体经济上，推进新型工业化，加快建设制造强国、质量强国、航天强国、交通强国、网络强国、数字中国。制造业是国民经济的主体，是立国之本、兴国之器、强国之基。装备制造业是实现工业化的基础条件，智能制造是未来制造业演进的核心驱动力。发展智能制造，不仅是加速生产方式变革、推动我国装备制造业迈向中高端、实现制造强国建设目标的战略之举，更是我国在全球制造业竞争中抢占先机、打造全新国际竞争优势的必由之路。

为了强化学生对智能制造基本理论、基本专业知识的理解，提高应用水平，增强学生的创新能力及职业素养，本书结合近年来智能制造技术的应用，从多视角阐述智能制造的本质、内涵和关键技术。书中不仅介绍了智能制造相关的技术知识，且含有智能制造相关的诸多案例，内容选材新颖、案例丰富、深入浅出。依据智能制造的特点，全书共分为 5 个模块，分别是智能制造概述、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。

此外，本书作者还为广大一线教师提供了服务于本书的教学资源库，有需要者可致电教学助手 13810412048 或发邮件至 2393867076@qq.com 领取。

本书由湖南铁道职业技术学院的石金艳、长沙南方职业学院的王庆云、湖南劳动人事职业学院的王晓琴任主编，湖南铁道职业技术学院的谢永超、黄剑锋、孙豪、刘梅、谢菲与长沙职业技术学院的涂春莲任副主编。本书在编写过程中得到了以上学院各级领导及同事的大力支持，在此表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，加之时间仓促，书中出现的疏漏和不妥之处，敬请广大读者批评指正。

编者

2025 年 5 月

目录

模块 1 智能制造概述

单元 1.1	制造业的历史与现状	003
1.1.1	制造业发展历程	003
1.1.2	全球制造业转型现状	006
单元 1.2	智能制造的概念与意义	010
1.2.1	智能制造的定义	010
1.2.2	智能制造的特征	011
1.2.3	智能制造的结构体系	013
1.2.4	智能制造的意义	014
单元 1.3	智能制造体系	016
1.3.1	数字化制造	016
1.3.2	数字化网络化制造	017
1.3.3	数字化网络化智能化制造	017
单元 1.4	智能制造的应用与前景	019
1.4.1	智能制造在行业中的应用	019
1.4.2	智能制造的发展前景	022

模块 2 智能制造装备技术

单元 2.1	工业机器人技术	031
2.1.1	工业机器人的定义	031
2.1.2	工业机器人的分类	032
2.1.3	工业机器人的系统组成	035
2.1.4	工业机器人的特点	036
2.1.5	工业机器人的关键核心技术	037
2.1.6	工业机器人技术应用现状及发展趋势	039
单元 2.2	增材制造技术	041
2.2.1	增材制造技术概述	041

2.2.2	增材制造技术的优点	046
2.2.3	增材制造技术的应用	047
2.2.4	增材制造技术的发展方向	051
单元 2.3 智能检测技术		053
2.3.1	智能检测技术的定义	054
2.3.2	智能检测系统的原理和组成	054
2.3.3	智能检测技术的应用	056
单元 2.4 物联网技术		060
2.4.1	物联网技术的概念	060
2.4.2	物联网的组成	061
2.4.3	物联网的关键技术	062
2.4.4	物联网在制造业领域的应用	067
单元 2.5 高档数控机床技术		069
2.5.1	数控机床的基本特点	069
2.5.2	数控技术的发展现状	070
2.5.3	高档数控机床的发展现状及发展趋势	075
2.5.4	智能数控机床	078
2.5.5	高档数控机床在制造业中的应用	081

模块 3 智能制造信息技术

单元 3.1 信息物理系统（CPS）		087
3.1.1	CPS 的定义及特征	087
3.1.2	CPS 的发展历程	088
3.1.3	CPS 的结构层次	089
3.1.4	CPS 的应用	092
单元 3.2 工业大数据技术		097
3.2.1	工业大数据的定义	097
3.2.2	工业大数据的特征	099
3.2.3	工业大数据的关键技术	101
3.2.4	工业大数据分析应用软件	104
3.2.5	工业大数据的应用	105
单元 3.3 工业云技术		108
3.3.1	云计算技术概述	108
3.3.2	工业云概述	111
3.3.3	工业云的架构	113

3.3.4	工业云的需求与发展	114
3.3.5	工业云的应用	116
单元 3.4	人工智能技术	122
3.4.1	人工智能技术概述	122
3.4.2	机器学习	123
3.4.3	人机交互与 HCPS	128
3.4.4	人工智能技术在制造业中的应用	130
单元 3.5	机器视觉识别技术	132
3.5.1	机器视觉识别技术概述	132
3.5.2	机器视觉识别的关键技术	133
3.5.3	机器视觉识别在智能制造中的应用	135
单元 3.6	数字孪生技术	136
3.6.1	数字孪生技术概述	136
3.6.2	数字孪生的关键技术	139
3.6.3	产品数字孪生体	141
3.6.4	数字孪生技术的应用	143

模块 4 智能制造生产管理

单元 4.1	产品全生命周期管理（PLM）系统	151
4.1.1	PLM 系统的定义	151
4.1.2	PLM 系统的功能模块	152
4.1.3	PLM 系统软件	153
4.1.4	PLM 系统的应用	155
单元 4.2	制造执行系统（MES）	157
4.2.1	MES 概述	157
4.2.2	MES 的三层模型	158
4.2.3	MES 的功能模块	159
4.2.4	MES 的应用及发展趋势	161
单元 4.3	精益生产管理	164
4.3.1	精益生产管理概述	164
4.3.2	精益生产管理的特点	167
4.3.3	精益管理优化目标	168
4.3.4	精益生产管理的应用	170

单元 4.4 智能制造工厂	172
4.4.1 智能制造工厂概述	172
4.4.2 智能制造工厂的关键技术	173
4.4.3 智能制造工厂的架构	176
4.4.4 智能制造工厂的发展趋势	181

模块 5 智能制造服务

单元 5.1 智能制造服务概述	189
5.1.1 智能制造服务的内涵	189
5.1.2 智能制造服务的作用	191
5.1.3 智能制造服务的关键技术	192
单元 5.2 智能制造协同规划	197
5.2.1 智能制造协同规划的内涵	197
5.2.2 智能制造协同规划体系结构	197
5.2.3 智能制造协同规划的优点	199
5.2.4 智能制造协同规划的应用	200
单元 5.3 智能定制	202
5.3.1 智能定制的内涵	202
5.3.2 智能定制的发展阶段	203
5.3.3 智能定制的应用案例	204
单元 5.4 智能制造服务体系	207
5.4.1 智能制造服务体系的内涵	207
5.4.2 智能制造服务体系的特征	208
5.4.3 智能制造服务体系的结构	210

参考文献	214
------------	-----

模块 1

智能制造概述

学习目标

知识目标

1. 了解制造业的历史与现状。
2. 掌握智能制造的概念。
3. 了解智能制造体系的构成。
4. 熟悉智能制造的应用与前景。

技能目标

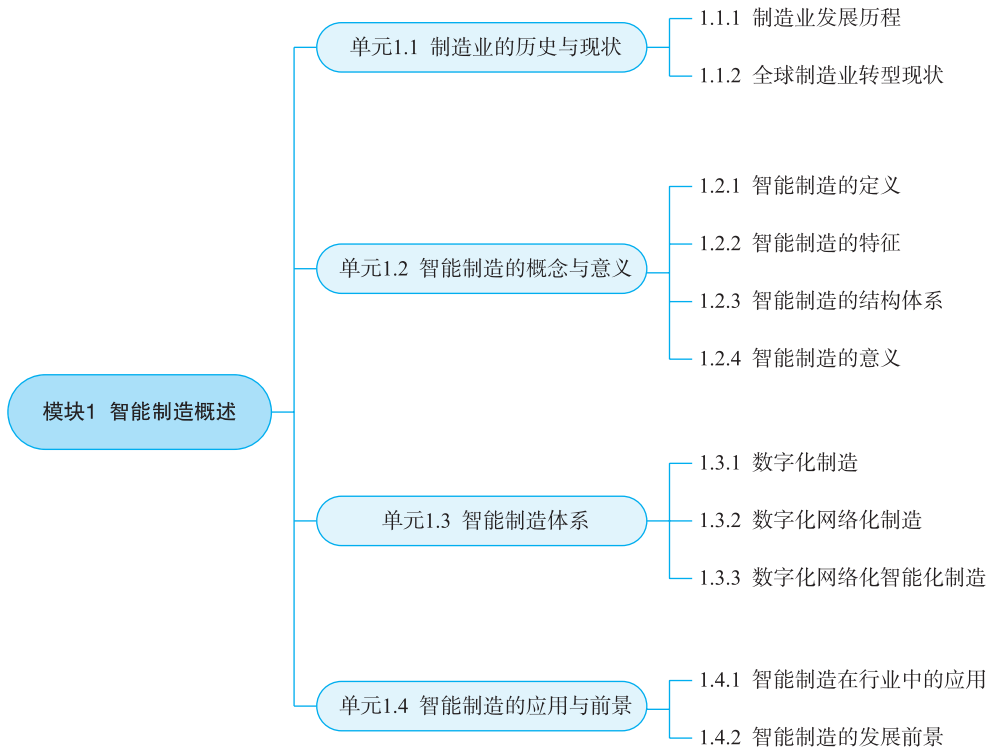
1. 能够查阅最新的技术文献资料。
2. 能够运用智能制造理论开展工作。
3. 能够开展智能制造应用分析。

素质目标

1. 培养爱国主义情怀。
2. 培养自主创新意识。
3. 增强民族自豪感和自信心。
4. 养成独立思考的习惯。
5. 提高查阅文献的能力。



知识导图



单元 1.1

制造业的历史与现状

1.1.1 制造业发展历程

1. 全球制造业发展历程概述

制造通常指的是产品的制作过程，即通过物理上的加工、装配等工序，将原材料转化为最终产品的过程。人类的制造活动历史悠久，可以追溯到远古时期。旧石器时代，人类会将卵石、兽骨、牛角等通过敲击、碰撞制造成在生产生活中使用的各种用具。中石器时代，人类能够生产木制工具、骨制工具等，并开始尝试制作陶器。新石器时代，人类可批量制造复合工具，如带柄的镰刀、斧子等，并大批量生产陶器。青铜器和铁器时代，开始出现手工作坊式的大规模铜器和铁器制造工坊，冶炼并铸造各种农耕器具。

制造业是指将制造资源（物料、能源、设备、工具、资金、技术、信息和人力等）按照市场要求，通过制造过程，转化为可供人们使用的物品的行业。

第一次工业革命前，农业是大多数国家的主要产业，制造业在国民经济中所占的比重较低，且主要集中在纺织、冶金等少数行业。詹姆斯·瓦特在 1765 年改良了蒸汽机，标志着第一次工业革命的开始，这次工业革命的结果是机械生产代替了手工劳动，经济社会从以农业、手工业为基础转型到了以工业及机械制造带动经济发展的模式，制造企业的雏形产生，企业形成了作坊式的管理模式。第一次工业革命推动了社会生产力的巨大提升，改变了人类社会的生产方式和生活方式，具有深远的历史意义。

第二次工业革命的标志是电力的发明和广泛应用。19 世纪六七十年代，出现了一系列电气发明，如发电机、电动机、电车等，这些发明推动了社会生产力的巨大提升，并使人类进入了电气时代。电气驱动的制造装备（如机床）逐步进入并主导制造行业，开启了制造业电气化时代。电力技术的广泛应用，极大地推动了化工、钢铁、内燃机等相关领域的技术革新，使汽车、船舶、机车及石油化工等一系列新型制造行业和化工行业迅速兴起。制造业进入以汽车制造为代表的大批量生产时代，生产流水线开始在工厂出现，劳动分工日趋明确，工厂管理从以经验为主转向以科学管理为核心，推行标准化、流程化管理模式，使得企业的人与工作得以更好地匹配。

第三次工业革命的标志是 20 世纪中叶电子计算机与信息技术的广泛应用。这个时期，由于电子计算机与信息技术的广泛应用，制造过程中自动化控制程度大幅提升，机器开始逐渐取代人类作业，生产率、良品率、分工合作效率、机械设备寿命等均得以大幅提高。在此阶段，工厂大量采用由 PC、PLC、单片机等电子信息技术自动化控制的机械设备进

行生产。生产组织形式转变为现代大工厂，人类进入产能过剩时代。

电子信息时代，企业在深化标准化管理模式的基础上推行精益管理，这就让岗位得以标准化细分。从 20 世纪 70 年代开始，受市场多样化、个性化的需求及商业竞争升级的影响，制造技术步入面向市场、柔性生产的新阶段，引发了生产模式和管理技术的革命，出现了计算机集成制造模式、丰田生产模式（精益生产）等。

21 世纪，第四次工业革命使人类步入“分散化”生产的新时代。互联网、大数据、云计算、物联网等新技术与工业生产相结合，最终可以实现工厂智能化生产和工厂直接与消费需求对接。企业建立柔性生产系统，进行个性化生产，生产组织形式从现代大工厂转变为虚实融合的工厂。企业管理的特点从大生产变成个性化生产，更加柔性化、智能化。制造业工业革命发展历程如图 1-1 所示。

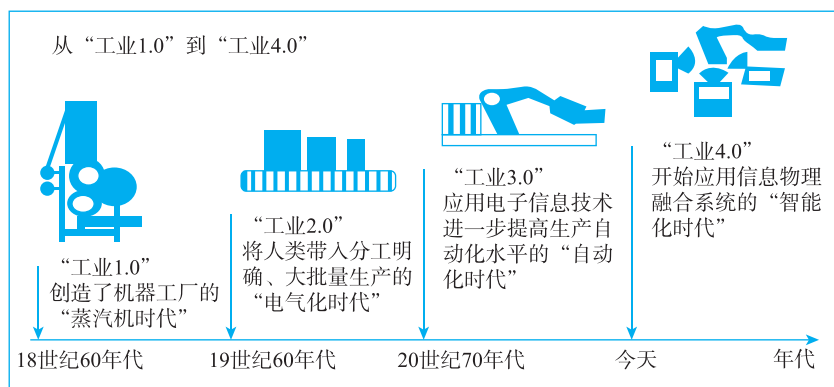


图 1-1 制造业工业革命发展历程

制造业作为实体经济的核心组成部分，直接反映了一个国家的生产力发展程度，是区分发展中国家与发达国家的重要标尺。在发达国家的国民经济结构中，制造业往往占据着举足轻重的份额，对国家经济的稳定增长和综合竞争力的提升起着关键支撑作用。

2. 中国制造业发展历程概述

新中国成立之初，我国是一个典型的农业大国，工业基础薄弱，产业体系不健全，工业化水平较低。历经 70 多年的建设和发展，中国制造业取得了辉煌的成就。中国已经从积贫积弱的农业国转变成一个拥有完整产业体系、完善产业配套的制造业大国和世界主要的加工制造业基地之一。

我国制造业发展历程大致可分为三个阶段。

第一阶段：20 世纪 80 年代，劳动力等生产要素活跃，制造业快速起步。

新中国成立初期至改革开放前夕，我国初步建立了较为完整的制造业体系，能够制造多类工业和少类消费产品。此阶段我国制造业主要是制造工业产品，在消费品制造方面，仅能满足基本的生活保障，消费品种类极为匮乏。

改革开放以后，中国的制造业迅速崛起，大量电子产品和轻工业产品被生产，中国逐

渐有了自己的电子产品品牌，如小天鹅全自动洗衣机、牡丹电视机、燕舞收录机等。国有企业是中国制造业的主流生产企业。随着国家政策的不断放宽以及沿海地区开放程度的逐渐提高，民营企业逐渐崛起，各省市开始大力兴建各类工业园区。低廉的劳动力成本、土地成本和原材料成本，以及巨大的中国市场，吸引了大批国外制造企业进入中国，形成了外资、合资和合作企业共存的局面。此时，中国制造业以加工贸易为主，通过大量引进外资，吸引跨国公司将生产基地转移到中国，生产的产品多为低附加值的劳动密集型产品。

第二阶段：20 世纪 90 年代，装备现代化推进，规模化经济形成。

改革开放的第二个十年，随着国家政策的持续优化与变革，以及发达国家为降低制造成本纷纷选择“去工业化”和产业转移，大量外资涌入中国，这个阶段成立了数量庞大的外资与合资制造企业。20 世纪 90 年代，伴随着民营经济的崛起和外资制造企业的进入，“苏南模式”和“温州模式”成为两种典型的发展模式，沿海地区的制造业得到了迅速发展，出现了越来越多的万人工厂，“Made in China（中国制造）”全球闻名。这些企业充分发挥低成本优势，逐渐增强了国际竞争力，赢得了大量的 OEM（原始设备制造商，俗称代工）订单，中国逐渐成为国际制造业的生产外包基地。同时，支撑低成本优势的是制造业设备的现代化，生产效率大幅提升，规模化经济开始逐步形成。

第三阶段：21 世纪以来，产品创新与信息化深化，能力升级带动产业链发展。

进入 21 世纪，中国制造业进入新一轮高速发展期，船舶、机床、汽车、工程机械、电子与通信等产业的产品创新尤为迅速，进而又拉动了对钢铁等原材料、模具及重型机械需求的大幅增长，从而带动了整个制造业产业链的发展。随着中国加入 WTO（世界贸易组织），中国制造业开始迅速融入全球经济，国际贸易额迅速攀升，出口顺差持续扩大，外汇储备也持续增长。此外，中国制造业开始从低端向中高端升级，加大企业研发投入，提高企业自主创新能力，逐步形成了一批具有国际竞争力的企业和品牌。大型国有企业的效益显著提升，烟草、钢铁等行业加速整合，资本市场为中国大中型制造企业的发展提供了充足的资金，ERP（企业资源计划）、PLM（产品生命周期管理）、CRM（客户关系管理）等制造业信息化技术也开始成为促进产业发展的重要手段。

自 2010 年起，中国制造业已跃居全球首位。经过 70 年的发展，中国是唯一拥有联合国产业分类中所列全部工业门类的国家。据中华人民共和国工业和信息化部数据表明，到 2024 年，中国全部工业增加值占 GDP 比重达到了 31.6%，增加值达到了 40.5 万亿元，连续 15 年保持全球领先地位。中国是全球制成品出口第一大国，是世界重要的制造业基地。

全球经济一体化日益成为国际发展的主流趋势，因此人员流动性增强，商品与资本流通日益自由化。尤其是信息技术、航运技术的发展推动了产品的模块化程度逐步提高，促进了生产过程的分解能力提升。通信技术的发展降低了国际经济贸易交流的成本支出。集

装箱、航空等技术的发展大幅降低运输成本，国际分工由发达国家出口制成品进口原材料、发展中国家出口原材料进口制成品的产业间水平分工，向全球价值链环节分工（即产业内垂直分工）转变。我国准确把握了发达国家离岸外包及全球垂直分工的机遇，凭借劳动力资源丰富和成本低廉的优势，迅速融入了全球产业分工体系，承载了发达国家跨国公司全球价值链中劳动密集型环节的转移，从而迅速崛起为全球制造业的重要基地。

1.1.2 全球制造业转型现状

自 19 世纪末以来，工业技术的演进日益迅猛，推动了制造业产出的持续增长，使制造业对人力和物力资源需求的不断扩大。由于各国在资源条件上的差异，全球制造业逐渐趋向互联互通，形成了一个基于产业链不同环节分工的全球化生产模式。成本因素是推动制造业地域性转移的核心因素，全球制造业历经了五次重大的地域性转移，其重心从英国转移至美国、日本、新兴工业经济体、中国、东南亚国家。随着工业化进程的加速和社会专业化分工的深化，产业迁移的形式亦在不断地演变与调整。全球制造业的迁移趋势正日益聚焦于劳动密集型产业的迁移。而在技术密集型、高附加值的制造业领域内，原有的全球制造业中心依旧保持着其明显的竞争优势。随着制造业逐步向外迁移，产业政策的方向开始转向第三产业，服务业在国内生产总值（GDP）中的占比不断提升，而制造业的占比则相应地有所降低。

在欧洲，德国政府视当前世界为“信息网络与实体世界融合”的时代，强调应聚焦于智能化工厂与智慧化生产这两个关键领域进行发展。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，大力促进机电一体化技术、电子电气技术、计算机和 IT 技术、传感器和变送器、生产工艺流程、驱动和执行系统、通信技术以及综合技术等方向的发展。2013 年 4 月，德国政府发布了名为“工业 4.0”的国家级战略蓝图，旨在率先把握新一轮工业革命的机遇，进一步巩固德国工业在全球范围内的领先地位。“工业 4.0”是以智能制造为主导的第四次工业革命，是利用信息物理系统（CPS）将生产中的供应、制造、销售信息数据化、智慧化，最后实现快速、有效、个性化的产品供应，其战略如图 1-2 所示。

在北美洲，经历了次贷危机的美国也在通过各种措施推动先进制造业发展。2009 年美国开始调整经济发展战略，于同年 12 月公布了《重振美国制造业框架》。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 月出台了《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。2013 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 打印等均被列入优先发展的重点领域。2018 年出台的《美国先进制造业领导战略》，要求智能制造，包括人工智能、大数

据、物联网等技术在制造业中的应用，实现生产过程的自主决策和优化。2022 年《美国先进制造业领导战略》进行更新，该战略将智能制造作为核心领域之一，旨在通过开发和转化变革性制造技术，保持美国在先进制造技术领域的全球领导地位，强调利用人工智能、大数据、物联网等新兴技术，实现制造过程的智能化、自主化和柔性化。2022 年美国颁布《芯片与科学法案》，该法案聚焦于半导体产业，为智能制造提供更稳定、高性能的芯片供应，降低对国外供应链的依赖，保障智能制造产业的稳定发展。

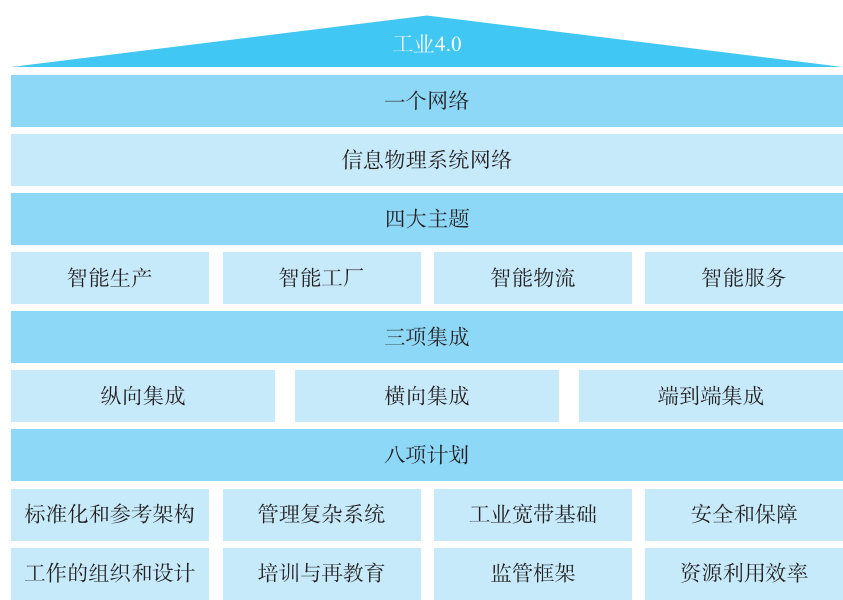


图 1-2 德国“工业 4.0”战略

在亚洲，日本也十分重视高端制造业的发展，日本早在 1989 年就已经提出“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。2011 年，为强化制造业竞争力，日本发布了第四期科技发展基本计划（2011—2015 年），主要部署了多功能电子设备、精密加工、信息通信技术、测量技术、嵌入式系统等重点研发方向，同时加强了智能网络、高速数据传输、云计算等智能制造支撑技术领域的研究。2014 年，日本发布《制造业白皮书》，提出重点发展机器人、下一代清洁能源汽车、再生医疗及 3D 打印技术。

改革开放以来，中国在制造业领域的研发投入显著增加，促使产业技术水平实现了大幅提升。为了谋取制造业发展中的“成本优势”与“规模优势”，中国制造业积极借鉴并吸纳了国际尖端技术。随着制造业产业体系逐步迈向中高端水平，制造业关键领域的自主创新能力取得了突破性进展。中国制造业的发展重心已从单纯的规模扩张转向追求高效运营，更加注重数据、信息、知识等新兴要素对产业的支撑效能，致力于孵化和推广智能制造、绿色制造、服务型制造等前沿制造模式，确保民营经济与国有经济在市场竞争中享有

平等的竞争机会和地位。在国际市场上，中国制造业获取了大量先进技术、管理经验以及稀缺资源，为中国制造业的迅猛发展注入了强劲的内在驱动力。

在全球制造业迁移中，中国制造业的发展步伐持续加快，创新成果频现，特别是在汽车制造、电子零部件供应及工程机械行业，中国已跻身世界领先行列。通过汲取发达国家制造业发展的先进经验，依托强大的中国制造实力，中国已崛起为世界制造业的核心，成为当今世界第二大经济体，其中制造业的贡献率超过 30%。当前，中国制造业的劳动力成本正逐年攀升，推动制造业步入更深层次的转型升级阶段。这一转型的核心在于全面提升制造业技术水平，不断提高中高端制造业的占比，使高精度加工、高度智能化、高附加值的制造业成为推动经济增长的主导力量。

2015 年 5 月，国务院印发《中国制造 2025》，是中国实施制造强国战略第一个十年的行动纲领，提出要以智能制造作为主攻方向，强化工业基础能力，提高综合集成水平，促进产业转型升级。“中国制造 2025”实施的五项重点工程如图 1-3 所示。

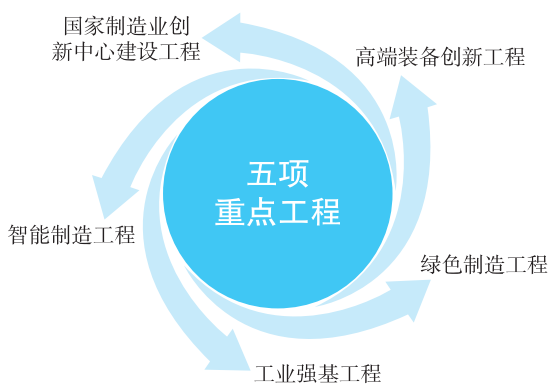


图 1-3 “中国制造 2025”实施的五项重点工程

（1）国家制造业创新中心建设工程：重点开展行业基础技术和具有行业共性的关键技术研发、成果产业化、人才培养等工作；2015 年建成 15 家制造业创新中心，2020 年建成 40 家制造业创新中心。

（2）智能制造工程：创建新一代信息技术与智能制造装备融合的集成创新和工程应用；建立智能制造标准体系和信息安全保障系统等。

（3）工业强基工程：以关键基础材料、核心基础零部件（元器件）、先进基础工艺、产业技术基础为发展重点。

（4）绿色制造工程：组织实施传统制造业能效提升、清洁生产、节水治污等专项技术改造；制定绿色产品、绿色工厂、绿色企业标准体系。

（5）高端装备创新工程：组织实施大型飞机、航空发动机、智能电网、高端诊疗设备等创新和产业化专项、重大工程。

世界各国主要经济体纷纷制定制造业发展战略规划，力图在未来制造业市场中占据领

先地位，扩大全球市场份额。“中国制造 2025”旨在持续增强中国制造业的核心竞争力，推动中国从“制造大国”稳步迈向“制造强国”的行列。通过机器代替人工、利用人工智能技术进行产品检测等智能化改造，在提高生产率、保持“中国制造”物美价廉优势的同时，进一步提高中国产品的性能和质量，推动实现“中国制造”向“中国智造”，“中国产品”向“中国品牌”的转变。

新一轮科技革命和产业变革方兴未艾，云计算、大数据、物联网、人工智能等新一代信息技术正推动制造业进入智能化时代，个性化定制模式已经出现。

随着人工智能技术从理论研究迈向产业化应用，无论是国家还是企业，都在全力促进制造业的智能化转型，制造企业在不断利用信息化技术优化生产线、革新产品架构，从而提升生产效率、产品质量，并能更敏捷地适应国际市场的变化。

单元 1.2

智能制造的概念与意义

1.2.1 智能制造的定义

智能制造是将物联网、大数据、云计算等新一代信息技术与设计、生产、管理、服务等制造活动的各个环节融合，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。它具备以智能工厂为载体，以关键制造环节智能化为核心，以端到端数据流为基础，以网通互联为支撑的四大特征，可有效缩短产品研制周期、提高生产率、提升产品质量、降低资源消耗，对推动制造业转型升级具有重要意义。

智能制造与传统制造在设计、生产、管理、服务等环节中的特点及智能制造的影响如表 1-1 所示。

表 1-1 智能制造与传统制造在部分环节中的特点及智能制造的影响

环节	分类		
	传统制造的特点	智能制造的特点	智能制造的影响
设计	常规产品 面向功能需要的设计 开发新产品周期长	虚实结合的个性化设计 面向客户需求设计 数字化设计、开发周期短	设计理念与使用价值观变化 设计方式与手段变化 产品功能变化
生产	加工过程按计划进行 半智能化加工与人工检测 生产组织模式高度集中 人机分离 减材加工方式	柔性化加工、可实时调整 智能化加工与在线监测 生产组织方式个性化 人机交互的网络化智能控制 减材、增材多种加工方式	劳动对象变化 生产方式变化 生产组织方式变化 加工方法多样化 新材料、新工艺不断涌现
管理	人工管理为主 企业内部管理	计算机信息管理技术 人机交互的指令管理 延伸到上下游企业	管理对象变化 管理方式与手段变化 管理范围变化
服务	产品本身	产品生命周期	服务对象范围扩大 服务方式改变 服务责任增强

从表 1-1 可以看出，智能制造与传统制造之间存在着显著的差异。这些差异主要体现在下列四个方面：一是智能制造设计更加注重以客户需求为核心导向，通过融合虚拟与现实的技术手段，能够实时动态地完成客户需求与设计之间的交互，从而极大地缩短设计周期；二是智能制造生产过程柔性化、智能化，生产组织方式更加个性化，检测过程在线

化、实时化，人机交互网络化，加工成型方式多样化；三是智能制造在制造管理方面高度依赖于信息系统，比如更广泛地使用计算机信息管理技术，采用更多人机交互的指令控制模式，并涵盖上下游企业甚至整个产业链的数据交互和管理沟通等；四是智能制造的产品服务可以做到涵盖整个产品生命周期，真正实现产品从设计到回收的全闭环管理，能够极大地提高产品适应市场的能力，更充分地满足客户的个性化需求。

1.2.2 智能制造的特征

智能制造的发展并非一蹴而就，它是一个逐步演进的过程，遵循事物发展的自然法则。智能制造的演进大致可以分为三个阶段。

第一阶段，单个生产企业的纵向集成。在这一阶段，企业将生产流程的各个阶段相互连接并集成起来，旨在不断提升企业的运营效率。生产企业逐步运用越来越多不同的信息技术（information technology, IT），通过在几乎所有的传感器、电动机和驱动器中嵌入微处理器芯片，并配套相应的软件，来实现对生产过程的计算机化控制。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”互联互通与系统集成，从而使数据在整个企业中实现共享。通过机器大数据的收集和人工智能的结合，推进工厂优化，提升企业管理绩效，显著增加企业经济效益，提高工人作业安全性，同时促进环境可持续发展。

第二阶段，生产企业间的横向集成。利用高性能计算平台，将不同生产企业的资源进行整合连接，实现工厂特定信息与原材料供应、客户需求的无缝对接。甚至借助智能电网技术，企业能够自主规划电力使用，在用电高峰时段减缓生产节奏，在低谷时段则加速生产。这一做法不仅提升了生产的安全性与精确度，还为实现更高效、更环保的生产模式提供了可能。

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。变革后的生产组织方式和商业模式通过贯穿整个价值链的工程化数字集成，可以达成基于价值链的跨企业整合，进而极大地促进个性化定制的实现，从根本上改变传统的商业模式和消费者的购买行为。

与传统制造相比，智能制造具有以下几个鲜明的特点。

1. 自律能力

自律能力是指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“智能机器”是智能制造不可或缺的条件。

2. 人机一体化

人机一体化代表了一种融合了人类智慧与机器能力的混合智能形式，它强调了人在制造系统中的主导和核心作用。同时，在智能机器的配合下，人的潜能得以更好地发挥，人

机之间呈现出一种平等共事、相互“理解”、相互协作的关系，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，具备高素质与高智能的人才将做出更加出色的表现，机器智能与人类智能将实现真正的融合，相互协作，共同发挥出最大的效能。

3. 自组织与超柔性

自组织是指在没有明确外部指令或控制的情况下，系统内部的元素通过相互作用自发地形成有序结构的过程。在智能制造系统中，自组织性表现为系统能够自主调整、改变与协同创新，以适应外部环境和内部需求的变化。超柔性在智能制造系统中指的是系统中的各组成单元能够依据工作任务的需要，自行组成一种最佳结构，其柔性不仅表现在运行方式上，也表现在结构形式上。

4. 虚拟现实技术

虚拟现实（virtual reality，VR）技术是以计算机为基础，融合信号处理、动画技术、智能推理、预测、仿真和多媒体等技术为一体的综合系统。虚拟现实技术是借助音像、传感装置、计算机等设备产生一个逼真的视觉、触觉、嗅觉等多种感官模拟的三维虚拟世界，从而使处于虚拟世界中的人产生一种身临其境的感觉。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。虚拟现实技术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。

5. 学习能力和自维护能力

智能制造系统依托于既有的知识体系，持续在工作实践中学习新知，同时剔除那些不再适用的旧知识，以此不断优化和扩充其知识库，使之更加科学和完善。此外，智能制造系统具备自我诊断、故障排除与自我修复的能力，能够不断自我优化，从而灵活适应各种复杂多变的环境条件。

图 1-4 所示为中国重型汽车集团有限公司智能制造生产加工现场。



图 1-4 中国重型汽车集团有限公司智能制造生产加工现场

1.2.3 智能制造的结构体系

智能制造由智能制造系统和智能制造技术两大要素构成，智能制造的实现则离不开基础硬件即智能制造装备的强力支撑。随着以智能制造系统、智能制造技术和智能制造装备为代表的智能制造时代的到来，越来越多的制造型企业开始由生产型制造向生产服务型制造转变，智能制造服务应运而生。如今，智能制造服务已成为智能制造的核心内容之一。

1. 智能制造系统

智能制造系统是一个集成了智能机器和人类专家智慧的人机一体化智能系统，由若干个具有一定自主性和合作性的智能制造单元组成。智能制造系统依据知识来源，可分成以专家系统为代表的非自主型制造系统和建立在系统自学习、自进化与自组织基础上的自主型制造系统两类。

2. 智能制造技术

智能制造技术是一种前沿的制造技术，它借助计算机模拟制造业领域专家的各种智能行为，如分析、判断、推理、构思及决策等，并将这些智能行为与智能机器紧密结合。这种技术贯穿于制造企业的各个子系统之中，包括经营决策、原材料采购、产品设计、生产计划制订、装配制造流程、质量保证措施以及市场销售等环节，从而实现制造过程的全面智能化与高效化。同时，智能制造技术还可实现整个制造企业经营运作的高度柔性化和高度集成化，取代或延伸制造业领域专家的部分脑力劳动，并对制造业领域专家的智能信息进行收集、存储、完善、共享、继承和发展，从而大幅度提高企业的生产效率。

3. 智能制造装备

智能制造装备是指具有感知、分析、推理、决策、控制功能的制造装备。智能制造装备产业的发展对促进制造业向更高层次转型，提升生产效率、技术创新能力及产品质量具有关键作用。同时，它有助于减少能源消耗，推动制造流程向智能化、绿色化方向迈进，从而实现制造业的可持续发展。当前智能制造装备产业的发展水平是衡量一个国家制造业竞争力的重要指标之一。一个国家拥有先进的智能制造装备产业，意味着其在高端制造领域具有更强的竞争力，能够在全球市场中占据更有利的地位。

4. 智能制造服务

智能制造服务由制造业与服务业融合而成，是智能制造的延伸。智能制造服务不仅关注产品的制造过程，更强调在产品全生命周期内提供增值服务。这些服务包括产品个性化定制、全生命周期管理、网络精准营销与在线支持服务等，以及系统集成总承包服务与整体解决方案等面向行业的社会化、专业化服务。智能制造服务在推动制造业转型升级、提升产品附加值、优化资源配置、增强客户体验以及推动产业创新等方面发挥着重要作用。

未来，随着生活水平的提高，人们对产品服务的需求会越来越大，智能制造服务将越发受到重视。

1.2.4 智能制造的意义

智能制造发展的关键在于提升企业生产效率并扩大其价值创造的领域，这主要体现在以下几个方面。

一是缩短产品的研制周期。从产品的初步设计直至最终上市销售，以及从接收订单到产品配送的全过程，智能制造技术都能显著加快其速度。此外，借助远程监控与预测性维护手段，智能制造有效缩短了机器设备与整个工厂的意外停机时间，也进一步减少了生产过程中的中断情况，确保了生产流程的持续顺畅。

二是提高生产的灵活性。借助数字化技术、设备互联以及虚拟工艺规划等先进手段，智能制造使得企业不仅能够高效地进行大批量生产，还能够灵活应对市场需求，实现批量定制乃至个性化小批量生产，从而极大地增强了生产的多样性和适应性。

三是开辟新的价值增长点。智能制造的发展促使企业转型，从传统上专注于“以产品为核心”的模式转变为“以集成服务为核心”的新范式。这种转变使企业能够将重心聚焦于提供更全面的解决方案和系统层面的服务，通过在整个产品生命周期中融入服务元素，开辟并实现新的价值增长点。

智能制造技术正引领全球制造业的发展潮流，受到众多工业发达国家的积极推广和广泛应用。对于我国而言，发展智能制造不仅贴合制造业的内在发展需求，更是重塑制造业国际竞争力、加速制造业转型升级的关键路径。

1. 智能制造产业备受各国政府关注，发展潜力巨大

在当今时代，工业先进的国家不断追求技术创新以驱动产业升级，同时更加聚焦于资源的有效利用、环境保护以及可持续发展。智能化与绿色化已成为制造业演进的必然路径，智能制造产业已成为全球各国竞相角逐的核心领域。后金融危机时期，美国、英国等发达国家通过“再工业化”战略，重新加大对高端制造业的投入；德国、日本则竭力巩固并扩大在智能制造领域的领先地位；韩国也力求跻身世界制造强国之列。

我国已拥有良好的智能制造发展根基，在一系列基础研究上取得显著成就，并成功掌握了多项曾经制约我国产业发展的智能制造核心技术，包括机器人技术、感知技术以及智能数据处理技术等；攻克了一批我国长期依赖并影响我国产业安全的核心高端装备难题，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，成立了越来越多的研究项目，研究资金也大幅增长。

2. 国内智能制造国产化率低，关键软硬件及核心部件仍依赖从国外进口

当前，我国制造业面临着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后所面临的挑战。尽管我国在智能制造技术方面已经取得长足进步，但产业化水平依然较低，高端智能制造装备及核心零部件（如可编程逻辑控制器、工业软件）仍然高度依赖进口，关键技术主要依靠国外的状况尚未实现根本性转变。部分行业以劳动密集型为主，附加值不高。

目前，虽然中国制造业在技术创新方面有所增强，但自主开发能力较为薄弱，总体研发投入水平偏低，导致缺乏具有自主知识产权的高新技术，缺乏世界顶尖的研发资源和技术积累，对国外先进技术的消化、吸收及再创新不足，尚未掌握新产品开发的主动权。

3. 目前国内智能制造信息安全保障能力较弱

我国智能制造行业信息安全防护手段相对单一，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赖软件防火墙，计算机病毒等问题依旧时常发生。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，其安全可靠性能愈发关键。当下，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，缺乏安全保障措施和专业测评工具，我国的智能制造系统面临着严峻的安全挑战。如果这些问题不能有效解决，无疑会制约我国的信息化和现代化进程。

4. 当前国内制造业质量成本过高，亟待发展智能制造业务，建设智能工厂

一方面，当前生产过程中的自动化水平相对不足，多数工序仍然依赖人工操作，产品质量主要依赖工人的技术熟练度，而工人的疲劳、情绪波动及压力等因素都可能导致产品质量（特别是精密部件的加工）的不稳定；另一方面，由于缺少完善的数据采集系统及车间生产管理系统，生产中的问题难以及时反馈，往往造成不必要的浪费。

单元 1.3

智能制造体系

数十年来，智能制造在不断发展中衍生出众多模式，如精益生产、柔性制造系统、并行工程方法、敏捷制造理念、数字化制造、计算机集成制造技术、网络制造体系、云制造平台以及智能化制造策略等。这些范式在推动制造业向智能化转型的过程中，扮演了至关重要的角色，发挥了积极的引导作用。由于智能制造领域内存在众多不同的技术范式，导致难以形成一个统一的智能制造技术路径，进而给企业在实施智能升级的过程中带来了诸多挑战和困惑。面对智能制造领域持续涌现的新技术、新理念和新运作模式，当前亟须对这些纷繁复杂的现象进行梳理和归纳，提炼出基本的技术范式或框架。

周济院士提出了以下三种智能制造的基本范式：

数字化制造——智能制造的基础；

数字化网络化制造——“互联网+制造”或第二代智能制造；

数字化网络化智能化制造——新一代智能制造。

智能制造的三个基本范式——数字化制造、数字化网络化制造及数字化网络化智能化制造，是逐步演进、不断升级的过程。从国际视角来看，这三个范式恰好映射了智能制造发展历程中的三个阶段。而我国须发挥后发优势，采取三个基本范式并行推进、融合发展的技术路线，以实现智能制造技术的跨越式进步。

1.3.1 数字化制造

数字化制造是智能制造的第一种基本范式，也就是通常所说的第一代智能制造，是智能制造的基础。以计算机数字控制为代表的数字化技术广泛运用于制造业，形成“数字一代”创新产品和以计算机集成制造系统（CIMS）为标志的集成解决方案。

20 世纪 80 年代以来，我国企业在推动数字化制造发展方面取得了显著的成就。但是我们必须正视这样一个事实：尽管我国企业在数字化制造方面有所进展，但大多数企业，尤其是广大中小型企业，尚未完成数字化转型。因此，在推进智能制造的进程中，我们必须坚持实事求是的原则，脚踏实地地弥补数字化方面的不足，从而为智能制造的进一步发展打下坚实的基础。

值得指出的是，数字化制造是构成智能制造的基石，其内涵随着技术进步而持续扩展，贯穿于智能制造的三个基本范式和全部发展历程。这里定义的数字化制造是作为第一种基本范式的数字化制造，是一种相对狭义的定位，相比之下，国际上存在一种更宽泛的定义和理论框架，它们将数字化制造与智能制造视为等同的概念。

1.3.2 数字化网络化制造

数字化网络化制造，是智能制造的第二种基本范式，也称为“互联网+制造”或第二代智能制造。20 世纪末互联网技术开始被广泛应用，“互联网+”不断推动制造业和互联网融合发展，网络将人、数据和事物连接起来，通过企业内、企业间的协同，以及各种社会资源的集成和共享，重塑制造业价值链，推动制造业从数字化制造向数字化网络化制造转变。

德国“工业 4.0”和美国工业互联网深入阐述了数字化网络化制造范式，提出了实现数字化网络化制造的技术路线。我国工业领域正积极推进“互联网+制造”，一方面，一批数字化制造基础较好的企业成功转型，迈入了数字化网络化制造的新阶段。另一方面，大量原本尚未完成数字化制造的企业，则采用并行推进数字化制造和数字化网络化制造的技术路线，完成了数字化制造的“补课”，同时跨越到数字化网络化制造阶段。今后较长一段时间内，我国推进智能制造的重点是大规模推广和全面应用数字化网络化制造，即第二代智能制造。

1.3.3 数字化网络化智能化制造

数字化网络化智能化制造，是智能制造的第三种基本范式，又称新一代智能制造。人工智能领域取得了飞速发展并实现战略性的飞跃，它与先进制造技术紧密结合，形成了新一代智能制造范式，也称为数字化网络化智能化制造。新一代智能制造的主要特征体现在制造系统具备了学习能力，通过将深度学习、增强学习等技术应用于制造领域，知识产生、获取、运用和传承效率发生革命性变化，创新与服务能力显著提高。新一代智能制造是真正意义上的智能制造。

智能制造在西方发达国家的发展过程是串联式的路径，西方发达国家的智能制造用了几十年时间，历经了数字化、网络化、智能化三个阶段的发展。西方发达国家是充分发展了数字化制造之后，再发展数字化网络化制造，进而开始发展新一代智能制造。我国不能走这条路，如果这样就无法完成中国制造业转型升级的历史性任务，必须充分发挥后发优势，采取“并联式”发展方式，要数字化、网络化、智能化并行推进，融合发展。

一方面，必须坚持创新驱动的发展战略，直接运用互联网、大数据、人工智能等最前沿的技术，并聚焦高端领域，加速新一代智能制造技术的研究、开发、推广与应用进程，从而探索出一条推进智能制造的创新路径，助力我国制造业实现弯道超车，跃升至新的发展阶段。

另一方面，必须坚持实事求是、循序渐进的原则，分阶段推进企业的技术改造和智能化升级。鉴于我国多数企业尚未完成数字化转型这一现状，各企业必须优先完成数字化转

型这一关键环节，夯实智能制造的基础。我们探索的是一条独特路径，不能简单照搬先数字化再网络化的传统模式，而要力求在转型过程中实现数字化、网络化与智能化的同步推进与融合。

当然，在并行推进不同的基本范式的过程中，各企业可以灵活采纳已成熟的先进技术，依据自身发展的实际需求，“以高打低、融合发展”，在扎实完成“数字化补课”任务的同时，奋力迈向更高层次的智能制造水平。

单元 1.4 智能制造的应用与前景

1.4.1 智能制造在行业中的应用

智能制造将深化制造系统的灵活性和自动化程度，赋予生产系统更出色的决策与适应机能，同时大幅度降低制造过程中的物料消耗和能源消耗，进而推动传统制造业的转型升级与效率提升。图 1-5 所示为智能制造应用框架。图 1-6 所示为智能工厂框架。

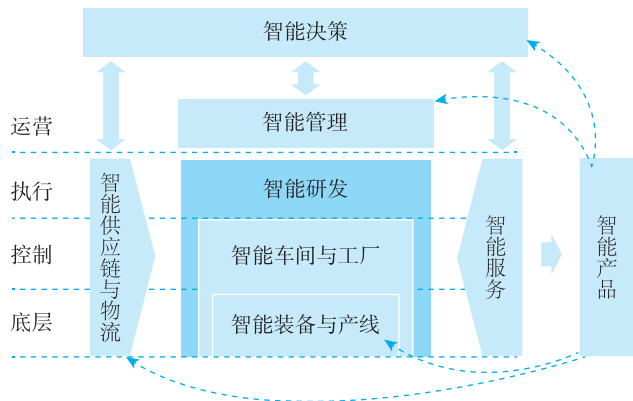


图 1-5 智能制造应用框架

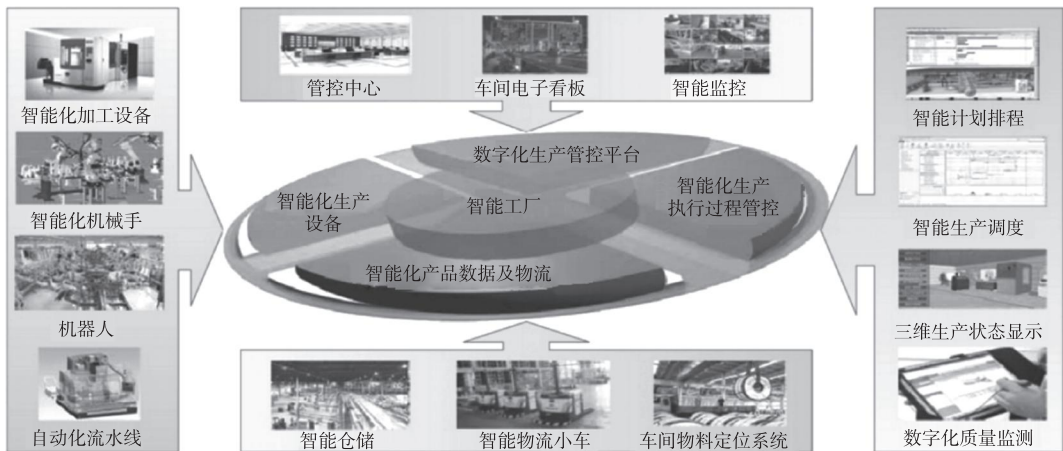


图 1-6 智能工厂框架

徐州工程机械集团有限公司是国内物联网建设领域的先行者，借助物联网技术，客户服务中心能够采取主动服务模式，通过电话、短信等方式指导客户纠正不当操作、提醒其

执行必要的维护保养，从而有效预防设备故障等问题的发生。物联网技术的应用使徐州工程机械集团有限公司在生产流程中实现即时库存管理，确保按需、准时供货，实现了零库存。在物联网技术应用的战略规划中，徐州工程机械集团有限公司旨在通过物联网技术，对分布各地的在用设备进行全天候的在线实时追踪与健康监测，监控设备作业状态及性能变化，提前预测并预警潜在事故，一旦出现故障立即触发报警机制，从而将传统的被动维修模式转变为前瞻性的预防性维护模式。

目前，制造业的信息化不仅是管理阶段的信息化，更是发展到以信息化创新研发设计，从而推动产业自主创新能力大幅提升。例如隆鑫通用动力股份有限公司利用计算机掌握生产情况，可以清楚地查阅企业资金流、信息流、物流数据，甚至可以看到车间情况。制造业向制造服务型的转化也非常明显，这一转型极大地促进了信息化与生产性服务业的深度融合，加速了生产性服务业的现代化进程，并助力制造企业围绕产品智能化、高端化及服务化探索和实施更为创新的商业模式。

案例 1 智能化钻井技术

智能化钻井技术是将大数据、人工智能、物联网、云计算、虚拟与现实、信息工程、控制工程等理论与技术应用于钻井过程，使其具有感知、学习、传输、操作和反馈等功能的一种先进钻井技术。智能化钻井系统主要包括以下几个关键部分。

（1）井下智能导向钻井系统：该系统利用随钻测量技术实时获取井下信息，并结合自动垂直钻井技术、旋转导向钻井技术及井下闭环控制技术，实现井眼轨迹的高效、精准控制。

（2）数据传输通信网络系统：该系统负责井下与地面之间的双向信息传输，确保能够实时、准确地传递钻井过程中的各种数据。

（3）现场地面智能控制平台：该平台对接收到的井下数据进行处理和分析，并发出相应的控制指令。

（4）远程实时智能控制中心：远程实时智能控制中心作为整个系统的“大脑”，利用智能钻井控制系统对钻井过程进行实时精准控制，实现智能完全闭环钻井。

目前，智能化钻井技术正在逐步成熟完善，并取得了初步的效果，薄油层钻井已经可以达到 0.8 m 以下。智能化钻井技术以随钻地质参数测量，包括已经研制成功的近钻头井斜、方位伽马、方位电阻率和正在攻关的随钻中子、密度、孔隙度等参数为“眼睛”，使钻头学会自己找油层；以随钻地震等参数为“探照灯”，让钻头“看”得更远、看到的信息更丰富；以地质导向钻井技术、旋转导向钻井技术和自动垂直钻井系统为“方向盘”，让钻头自动朝着油层钻探；以信息技术为“望远镜”，对井场的各类综合信息进行即时的收集、解析及加工处理，以便钻井领域的专家能够实时地进行故障诊断与远程指挥。

为了提高钻井效率和安全性，中石化胜利石油工程有限公司采用了智能化钻井技术。该技术包括钻井液智能坐岗系统和智能钻头等。钻井液智能坐岗系统能够实时监测钻井液的性能，确保施工安全；智能钻头则能够感知地层信息，并通过智能算法进行分析处理。在短短 29 天内，中石化胜利石油工程有限公司 70169SL 钻井队成功钻探至井深 6080 米，刷新了页岩油钻井纪录。这得益于智能化钻井技术的精准控制和高效作业。

随着制造业技术的持续发展，用户对产品的品质要求日益提升。计算机技术和网络通信技术与装备快速融合，促使各行业的工艺技术不断整合进装备之中。这种整合与装备制造自身的产品技术相结合，催生出新型装备，从而有效应对并满足了用户不断攀升的需求。装备制造的产品技术正向信息集成、接口集成、系统集成的方向发展，同时生产过程的自动化、智能化水平也不断提高。

案例 2 智能化轧制生产

当前，传统的轧制力计算公式已经不能适应高精度生产的要求，在轧制控制过程中和轧机设备设计过程中，数学建模和仿真技术的应用成为主要方法，我国近年来开展了热轧工艺的模拟和优化、人工智能在轧钢中的应用等研发工作，提出连轧数模参数智能优化的思想，开发了连轧过程数学模型解析工具，使数学模型的维护与参数优化由个人行为变为计算机的智能行为，形成具有我国特色的轧制过程数模调优理论体系和实用方法。

目前，国内正在开发热连轧精轧机组负荷分配智能优化技术，既可以对压下量的分配进行优化，以实现板形控制和负荷均衡的目标，又可以通过智能算法从实际生产积累的大量数据中提炼出最优的工艺参数，从而稳定和优化产品质量，智能化有助于缓解环境和能源对机械制造业的制约。

在热连轧过程中，智能化技术的应用主要体现在以下几个方面。

（1）加热炉智能燃烧技术：通过建立炉内炉气与钢坯辐射换热机理模型、对流换热机理模型等，实现对钢坯内部温度分布的精确控制。该技术利用数据挖掘技术分析不同工况下的数据关联特性，建立空燃比监测模型，优化加热炉各段温度控制。混装条件下的加热制度智能优化得以实现，能源消耗减少。

（2）质量在线监控、诊断与优化技术：搭建全流程数据存储平台，提供时间和物理长度同步后的工艺曲线和质量数据。该技术采用线性统计过程分析方法或非线性统计过程分析方法，分析工艺参数、质量指标间的对应关系及相关性；建立基于大数据和过程能力分析的多维自适应过程统计控制模型，实现产品质量在线精准综合评判；开发基于大数据的关键过程变量与关键产品质量变量关系模型，优化工艺参数设定。

（3）智能控制模型：针对非稳态轧制等复杂工况，采用神经网络分析、快速有限元分

析、案例推理技术、模糊控制策略等智能控制手段，对模型进行实时优化。智能控制模型能够实现轧制过程的精准控制，提高产品质量和生产效率。

案例 3 智能化数控机床加工

未来数控机床的一个重要发展方向是实现网络化，这意味着数控机床将通过开放式的 CNC 系统与网络连接，使得企业能够实时追踪和收集车间内机床的生产状态信息。同时，机床数据将在用户与设备供应商之间实现共享，这为用户和供应商都带来了便利。当数控系统发生故障时，数控系统的生产厂家能够利用互联网技术迅速对用户的数控系统进行远程诊断和维护，从而大大降低了维护的盲目性，提高了设备的完好率。这一趋势满足了用户对数控机床远程故障监控、诊断以及修复的需求，使得设备的维护和管理变得更加高效和便捷。

21 世纪以来，发达国家纷纷调整其产业政策与技术政策，重视智能化制造技术领域的发展，通过集成传感器、控制系统、人工智能算法等先进技术，使数控机床具备自主学习、自我优化和自适应控制的能力，从而实现对加工过程的精准控制和智能化数控机床加工的优化。

智能化数控机床加工具有加工精度高、加工效率高、自适应控制、智能化诊断与维护等显著优势，因而得以广泛应用。在模具制造领域，智能化数控机床通过多坐标联动和数字化控制，实现复杂模具的高效、高精度加工。在航空航天领域，智能化数控机床通过优化切削参数和刀具路径，确保航空航天零部件的精度和表面质量严格符合要求。在汽车零部件制造领域，通过自动化生产线和智能化控制系统，数控机床能够实现汽车零部件的大规模生产和定制化生产。

1.4.2 智能制造的发展前景

智能制造是未来制造业的发展方向，其发展前景主要体现在以下几个方面。

1. 人机协同

智能制造的进步与机器人的应用密不可分，虽然在某些特定的产品范畴和生产流程中，人工操作依然占据着举足轻重的地位，但是人机协同作业的重要性已日益凸显。

人机协同的工作模式是指机器人负责执行那些对精度和重复性要求较高的任务，而人类则在机器人的辅助下，专注于更具创造性的工作内容。这种模式为企业的生产线布局 and 资源配置开辟了新的空间，同时也显著降低了产品的次品率。

人机协同的实施方式主要有两种：一种是人类与机器人各自独立作业，另一种则是人类与机器人并肩工作，共同完成任务。人与机器人的关系并不是一成不变的。在智能制造不断进步的背景下，人与机器人之间需要建立起相互的认知、感知能力和互助机制，这是

实现紧密合作、流畅交互以及确保双方安全的关键所在。

2. 高端装备

高端装备指的是技术水平高、性能优越、功能复杂、高附加值的设备。高端装备通常代表着某一领域的顶尖技术水平，拥有独特的设计和制造工艺，能够实现高精度、高效率、高可靠性等目标。例如，在航空航天领域，大型客机、战斗机、运载火箭、卫星等都属于高端装备；在高端制造业中，数控机床、机器人、精密仪器、半导体制造设备等也是典型的高端装备；此外，在医疗领域和能源领域，高端医疗影像设备、手术机器人、基因测序仪以及核电站设备、风力发电设备、太阳能发电设备等同样被视为高端装备。

我国智能制造的重点发展领域为高端数控机床与基础制造装备、自动化成套生产线、智能控制系统、智能专用装备等，旨在实现生产过程自动化、智能化、精密化、绿色化，从而带动整体工业技术水平的提升。

3. 产业升级

传统制造业由自动化向智能化的升级需要具备实现智能生产所需要的智能机器人、高度智能化的智能生产线、融合虚拟生产和现实生产的物联网系统、贯穿产品全生命周期的制造信息系统。

智能制造时代，制造业的产业模式将发生翻天覆地的变化，具体表现为标准化物件的大规模流水线生产模式将转变为以个性化为宗旨的定制化生产模式；制造业的产业形态将从生产型制造升级为生产服务型制造，强调对消费者的服务意识。

我国制造业致力于通过采用智能制造技术推动产业升级，旨在打造自己的智能制造产业体系，而实现产业升级需要在产品、制造装备、生产方式、管理和服务五个方面实现智能化升级。

1) 产品的智能化

产品的智能化指的是给各类待加工产品安装微型的智能组件，如智能传感器、处理器、信息存储器、无线通信器等。智能产品的普及将为消费者的日常生活带来前所未有的便捷，因此，产品的智能化发展是未来智能制造领域的一个重要发展趋势。

2) 制造装备的智能化

智能化的制造装备是指那些能够自主完成或协助完成复杂制造任务的设备，它们具备感知、分析、决策和执行的能力。这些装备通过集成先进的信息技术和人工智能技术，实现对生产过程的实时监控、精确控制和优化调度。智能化的制造装备具有高度自动化、决策智能化、灵活性与可重构性、高精度、高质量等优点。智能化的制造装备是智能制造的主体，只有实现制造装备的智能化才能实现其他领域的智能化，制造业才能完成智能工厂的建设，实现工业产业链的重组。

以三一重能股份有限公司为例，该公司在风电智能制造领域取得了显著成就。其位于山东日照的风电智能制造基地采用了全球领先的智能生产线，深度融合了精益制造、智能

装备、工业互联网与绿色制造四大技术。该生产线具备高度自动化和智能化特点，能够自主完成风电装备的制造和测试任务。同时，该公司通过集成物联网和大数据技术，实现了对生产过程的实时监控和优化调度。这一案例充分展示了智能化制造装备在制造业中的广泛应用和巨大潜力。

3) 生产方式的智能化

生产方式的智能化，是指将智能化技术应用于生产过程中，通过智能感知、智能决策、智能执行等手段，实现生产过程的自动化、数字化、网络化和智能化。生产方式的智能化能够实现个性化生产与服务型制造，即按照消费者的个性化需求进行自动生产。这种智能化的生产方式，不仅提高了生产效率和质量，还降低了生产成本和能耗，增强了企业的竞争力和市场适应性。

4) 管理的智能化

管理的智能化，是指运用先进的信息技术和人工智能技术，依托信息管理平台，对企业管理流程进行全面改造和优化，实现管理决策的科学化、自动化和智能化。这种智能化的管理方式能够实时感知企业运营状态，快速响应市场变化，提高管理效率和决策准确性。

5) 服务的智能化

服务的智能化是随着人工智能、大数据、云计算等先进技术的快速发展而逐渐兴起的新型服务模式。服务的智能化是让最终用户全程参与整个产品的生命周期，与智能工厂携手完成研发设计、制造加工、组装包装、物流配送等环节。由于实现了与消费者的全程无障碍沟通，智能工厂可以在整个产品生命周期中为消费者提供更加人性化的服务。

当前，服务智能化在诸多领域广泛应用。智能家居领域通过智能家电、智能安防等设备，实现家居环境的智能化控制和管理，提高生活质量和便利性。智能交通领域通过智能交通系统，可以实时分析路况和交通流量，为用户规划最佳路线，避免拥堵和延误。

综上所述，智能制造背景下的产业升级不单是局部的升级，更是全行业的深度整合与彻底的智能化改造。智能制造革命不仅是换上一条先进的智能生产线，更是一项覆盖整个产业价值链的系统工程。

4. 跨界融合

如今，信息技术可在不同的企业间实现信息共享，从而使信息技术企业有更多的机会参与到制造业中。传统的制造企业将在全球范围内与信息技术企业开展合作，动态调整合作对象，整合优势资源，并逐渐向跨界融合企业转变，在研发、制造、物流等环节实现全球分散化生产。

在智能制造时代，跨界融合必将势不可挡。图 1-7 所示为跨界融合示意图，各行各业正经历着深度的整合过程，彼此间界限日益模糊，相互交融与渗透成为常态，一个更加便捷且全面的商业生态系统正在逐步构建成型。

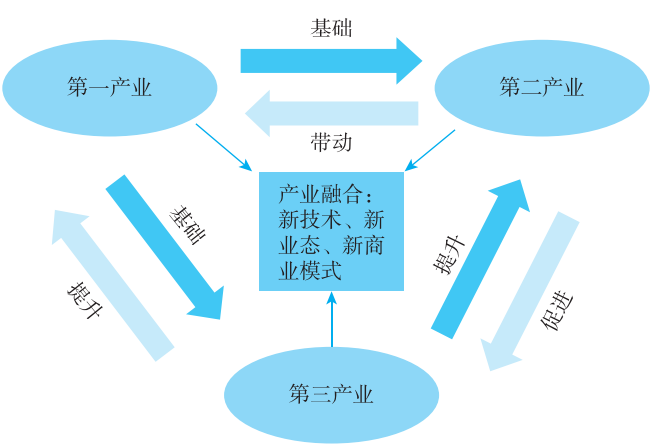


图 1-7 跨界融合示意图

拓展阅读

管延安——深海钳工专家

管延安，被誉为“中国深海钳工第一人”，是港珠澳大桥岛隧工程中的杰出工匠代表。他以精湛的技艺、精益求精的态度和无私奉献的精神，在深海沉管安装领域创造了多项奇迹，成为新时代产业工人的典范。

技术精湛，成就“深海钳工”传奇。管延安在港珠澳大桥建设中，负责沉管二次舾装，管内电气管线、压载水系统等设备的拆装维护及船机设备维修保养等工具。他带领团队完成了 33 节巨型沉管和 6000 吨最终接头的舾装任务，实现了 60 多万颗螺丝“零失误”的壮举。在深海条件下，他凭借“手感”和“听感”，将沉管接缝处的间隙控制在 1 毫米以内，确保了世界首条海外沉管隧道“滴水不漏”。这一技术突破不仅填补了国内空白，更达到了国际领先水平。

精益求精，诠释“工匠精神”。管延安对工作的要求近乎苛刻。他常说：“每一次都是第一次。”无论是安装沉管设备还是拧紧螺丝，他都坚持反复检查三至五遍，确保万无一失。在港珠澳大桥建设中，他带领团队攻克了深水深槽、强回淤、大径流等世界难题，创造了“一年安装十节沉管”的中国速度。他的“零缝隙”理念不仅体现在技术上，更体现在对每一个细节的极致追求上。

创新突破，推动技术进步。面对港珠澳大桥的高标准、高难度的要求，管延安不断探索创新。他针对世界上最大的外海抛石整平船“津平 1 号”90 米桩腿维修保养难题，提出了自主研发润滑油加油装置的思路，成功研制出桩腿齿轮喷淋加油润滑装置，节省资金 240 余万元。此外，他还带领团队取得 19 项专利，将创新成果应用于深中通道、大连湾海底隧道等国家重大工程中。

传承匠心，培养技术人才。管延安不仅是技术能手，更是技艺传承者。他成立了“大国工匠创新工作室”，带领团队开展技术攻关和工艺革新，培养了大量技术人才。在他的指导下，工作室成员全部成长为跨海通道和船机修造骨干，其中 1 人享受国务院政府特殊津贴，1 人获“山东省职工创新能手”荣誉称号，1 人获“青岛大工匠”荣誉称号。他常说：“我要把港珠澳大桥的精神传承下去，让更多年轻人成为新时代的工匠。”

荣誉加身，不忘初心。管延安的卓越贡献得到了广泛认可。他先后荣获“全国劳动模范”“全国五一劳动奖章”“全国最美职工”“全国技术能手”“中国质量工匠”“齐鲁大工匠”等荣誉称号。在港珠澳大桥开通仪式上，他受到习近平总书记的亲切接见，并于 2019 年参加了国庆 70 周年观礼活动。面对荣誉，他始终保持谦逊，表示：“我只是一个普通的钳工，只是做了自己该做的事。”如今，管延安依然忙碌在生产一线。他

带领团队参与大连湾海底隧道等超级工程建设，将“零缝隙”理念延伸到更多领域。他常说：“工匠精神不仅是一种技术，更是一种责任。”他用自己的行动诠释了新时代产业工人的担当与追求。

管延安以“深海钳工”的身份，书写了中国工匠的传奇。他的故事不仅是个人奋斗的缩影，更是中国制造向中国创造迈进的生动写照。在新时代，我们需要更多像管延安这样的工匠，以精益求精的态度、勇于创新的精神，为高质量发展注入不竭动力。



课后思考题

1. 简述我国制造业发展历程的三个阶段。
2. 什么是智能制造？
3. 智能制造的演进经历了哪几个阶段？
4. 智能制造具有哪些特征？
5. 智能制造的基本范式是什么？
6. 智能制造的发展前景主要体现在哪些方面？