

离散制造行业数字化转型与智能化升级路径研究

李新宇, 李昭甫, 高亮*

(华中科技大学机械科学与工程学院, 武汉 430074)

摘要: 在传统离散制造业加快转型升级的背景下, 发展智能制造将推进离散制造业提质增效、促进行业由大变强, 因此数字化转型与智能化升级成为必然选择。我国离散制造各细分行业存在极大的差异性, 相应的数字化转型与智能化升级路径也存在多样性, 因而需要结合企业实际探讨具体实施举措。本文提炼了离散制造行业的典型特性, 梳理了离散制造行业数字化转型与智能化升级面临的挑战, 阐述了包括先进制造技术、新一代信息技术、新一代人工智能在内的共性关键技术; 系统调研了我国离散型制造企业数字化转型与智能化升级的4个典型案例, 力求呈现领域前沿应用进展, 进而提出了突破智能制造关键使能技术, 研发智能制造装备, 建设数字化、智能化车间和工厂, 提供数字化、智能化服务, 构建标准与安全体系等重点发展任务。研究建议, 加快示范应用, 突出“中国制造”, 培育高新技术人才, 制定相应的法律法规, 以此推动我国离散制造行业的高质量发展。

关键词: 智能制造; 离散制造行业; 数字化转型; 智能化升级; 拓扑优化; 车间调度; 深度学习

中图分类号: T-01 **文献标识码:** A

Paths for the Digital Transformation and Intelligent Upgrade of China's Discrete Manufacturing Industry

Li Xinyu, Li Zhaofu, Gao Liang*

(School of Mechanical Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The discrete manufacturing industry in China is currently being transformed and upgraded. Digital transformation and intelligent upgrade is an inevitable choice for China's discrete manufacturing industry, as intelligent manufacturing can promote the quality, efficiency, and competitiveness of discrete manufacturing. The sub-sectors of discrete manufacturing in China differs significantly and requires diversified paths for digital transformation and intelligent upgrade. In this paper, we first summarize the typical characteristics of the discrete manufacturing industry, explore the challenges regarding the digital transformation and intelligent upgrade of the industry, and elaborate the common key technologies including advanced manufacturing, new-generation information, and new-generation artificial intelligence. Subsequently, we investigate four typical cases to present the frontier application progress in the field in China, and propose the following key development tasks: (1) achieving breakthroughs in keys enabling technologies for intelligent manufacturing, (2) developing intelligent manufacturing equipment, (3) building digital and intelligent workshops and factories, (4) providing digital and intelligent services, and (5) building standards and safety systems. Furthermore, it is necessary to accelerate pilot application, highlight domestication, increase the reserve of high-tech talents, and formulate relevant laws and

收稿日期: 2022-01-13; **修回日期:** 2022-02-11

通讯作者: *高亮, 华中科技大学机械科学与工程学院教授, 研究方向为智能优化与机器学习方法在设计制造中的应用;

E-mail: gaoliang@hust.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“新时期智能制造若干重大问题研究”(2021-HZ-11)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

regulations, to promote the high-quality development of China's discrete manufacturing industry.

Keywords: intelligent manufacturing; discrete manufacturing industry; digital transformation and intelligent upgrade; topological optimization; workshop scheduling; deep learning

一、前言

制造业是国家的经济基础,是立国之本、兴国之器、强国之基 [1,2]; 作为我国实体经济的主体,是国民经济体系的重要组成部分。按照产品制造工艺过程特点,制造业总体上可以分为离散型制造、流程型制造、混合型制造。离散制造包括家电、家居、纺织、食品、火箭、飞机、国防装备、船舶、电子设备、机床、汽车等行业,在我国制造业中占有较大比重,是解决就业等民生问题的重要产业,与居民生活息息相关。离散制造业中虽有航空、汽车、电子等数字化、智能化水平领先的行业,但也有自动化、数字化水平较低的通用及专用设备等行业,面临效益偏低、成本较高的现实挑战。同时,我国传统离散制造业发展存在产能过剩、利润率不高、市场竞争激烈等制约因素,迫切需要加快转型升级和提质增效,进行数字化转型与智能化升级 [3,4]。

当前,有关制造业数字化转型与智能化升级的科学研究及工程实践处于初期探索阶段。在科学研究方面,已有研究围绕装备革命在制造业智能化升级中的重要作用 [5],中小制造企业维护人员远程协助智能升级方案 [6],我国制造企业智能制造“并行推进、融合发展”的技术升级路线 [7],离散行业智能工厂建设的重点突破方向与实施途径 [8],石化工业与钢铁工业等流程制造业智能化目标、特征、路径等 [9] 展开了一系列研究。在工业方面,西门子股份公司推出的 MindSphere 平台支持企业打造智能工厂;通用电气公司的 Predix 平台广泛应用于航空、医疗、能源等行业;施耐德电气公司在全新 EcoStruxure 架构与平台的基础上打造可编程逻辑控制器,实现了针对生产过程的智能化升级;海尔集团公司自主研发的 COSMOPlat 工业互联网平台将用户需求和整个智能制造体系连接起来,让用户全流程参与产品设计研发、生产制造、物流配送、迭代升级等环节,实现了跨行业、跨领域的扩展与服务。

当前,我国离散制造各行业之间在行业应用基础、市场需求、关注点等诸多维度和层面存在显著差异 [10],因此离散制造行业的数字化转型与智能化升级没有一成不变的路径,需要结合行业和企业实际进行具体实施。本文在研究离散制造行业典型特征的基础上,分析数字化转型、智能化升级面临的挑战和共性关键技术,结合家电、家居、纺织、食品 4 个典型行业转型升级案例,提出数字化转型与智能化升级的技术路径;总结离散型制造企业数字化转型与智能化升级的重点任务,提出相应的对策建议。

二、离散制造行业的典型特征

传统离散制造行业普遍存在自动化、数字化水平较低,基础支撑技术薄弱,产品附加值低,制造过程资源、成本和能耗较高,污染严重等问题,发展智能制造是推进离散制造行业提质增效、促进中国制造业由大变强的重要支撑。离散制造行业的产品通常是由多个零件经过一系列不连续的工序加工,再经装配而成的较大型系统 [2]。离散制造行业的典型特征可概括为以下 9 个方面。

行业维度。离散制造行业细分门类多,且各个行业的产品及其市场需求都具有不同特点,如生产批量、制造模式、工艺流程等。各个行业的企业规模不同,企业的数字化、信息化、自动化以及管理运营水平也有明显差异,相应业务需求和未来发展路径也不相同。因此,离散制造各行业之间在应用基础、市场需求、关注点、知识壁垒、商业模式等方面存在显著差异。

产品全生命周期维度。离散制造行业涉及研发设计、生产制造、销售、运维服务、回收等多个环节,在应用场景、领域知识复杂度、管理方式等方面都具有很大的差异性,而各个环节之间既独立存在又具有很强的关联性 [11]。

工艺流程维度。按订单、库存生产,多品种、小批量或单件生产 [1],产研并重,混线生产,生产

设备不按照产品而按照工艺进行布置。

自动化水平维度。自动化水平主要指单元级的自动化水平。离散制造行业的自动化水平较低，需要对每个单件、每道工序的加工质量进行检验，操作人员的技术水平将在很大程度上决定产品的质量和生产效率。

生产计划管理维度。产品的工艺过程经常变更，需要具有良好的计划能力和生产系统支撑。

批号管理和跟踪维度。对批号管理和跟踪正在完善过程中。

作业计划调度维度。根据优先级、工作中心能力、设备能力等，对工序级和设备级的作业计划进行调度。

数据采集维度。以手工上报为主，结合条形码采集等半自动化信息采集技术，进行人员、设备、物料、质量等基本信息的采集。

设备管理维度。可以进行同一种加工工艺的机床一般有多台，单台设备故障不会对整个产品线的工艺过程产生严重影响。

三、离散制造行业数字化转型、智能化升级面临的挑战

（一）应用基础薄弱

数字化转型与智能化升级的前提是强化应用基础。数字化、信息化发展的不平衡和不充分是我国离散制造行业当前的主要矛盾。第五代移动通信技术（5G）等先进信息技术为离散制造行业转型升级提供了技术支撑，但工业技术发展时间短、基础弱，高端制造技术发展受制于人。离散制造行业虽然规模大、门类广，但自动化水平低、改造成本高且难度大，阻碍了离散制造行业的转型升级。针对离散制造行业的需求和痛点，强化智能制造的应用基础与平台推广是我国离散制造行业转型升级的挑战之一。

（二）关键技术缺乏

离散制造行业数字化转型与智能化升级的基础在于提升关键技术。我国工业的发展相较于发达国家起步晚、时间短、底子薄，自主可控技术整体偏少。目前，数字化转型与智能化升级所依赖的工业装备、工业软件等核心技术，在很大程度上仍依赖

进口。关键技术的发展是企业对行业制造工艺的长期积淀与探索，也是外部合作机构深入理解企业生产与运作方式并开展有效合作的前提。关键技术自主可控作为我国实现离散制造行业跨越式发展和提质增效的重要基础，也是面临的重要挑战之一。

（三）人才与文化资源短缺

离散制造行业的数字化转型与智能化升级，关键在于加强人才培养。科技创新归根结底是人才的创新，而人才短缺是离散制造行业转型升级过程中不可忽视的短板。数字化转型与智能化升级又是文化重塑的过程，敏捷、试错、反思、学习、尊重、平等、用户导向是更适应智能化时代的新文化。“自上而下”形成共识，以人为本、服务于人、激发全员主动性，这是离散制造行业转型升级的重要保障。需要加强行业人才与文化建设，激活人才创新内生动力。

（四）数据汇聚利用困难

数字化转型与智能化升级的要素包括众多数据的汇聚利用，因而结构化、完整、准确、可靠、实时的数据汇聚利用是转型升级的前提。企业工业设备、传感器等协议类型多样且数字化、智能化程度较低，致使数据采集不完备、不准确；数据安全和数据所有权等敏感问题导致企业不愿贸然使用智能化平台；数据准确性不高、利用率低和应用场景缺乏的问题影响企业转型升级的积极性，在价值创造方面收效甚微。因此，确保相关数据汇聚并准确、安全地利用，是推进离散制造行业转型升级所面临的又一挑战。

（五）经济效益不明显

数字化转型与智能化升级的根本目标是增加经济效益。目前，离散制造行业中的部分大企业在自身业务发展需要、政策支持与引导资金投入的推动下率先进行了转型升级，但中小企业转型升级仍面临诸多挑战，如应用场景不明晰、转型成本高、收益低、转型成本难以抵消、市场化商业模式挖掘难等，导致转型升级动力不足。对中小企业而言，进一步提高转型升级效率和效益、挖掘可行的商业模式、不断深耕应用场景、打造高性能系统和平台，进而解决效益不明显和应用前景不清晰问题，是离

散制造行业转型升级的长期挑战。

四、离散制造行业数字化转型与智能化升级的共性关键技术

离散制造行业数字化转型与智能化升级将深度融合先进制造技术、新一代信息技术、第一代人工智能(AI)技术等共性关键技术(见图1),从而提高研发生产效率、优化资源配置、创新商业模式、催生新业态和新技术。先进制造技术是工业技术生产的核心基础,也是离散制造业数字化转型、智能化升级技术体系中最重要环节;新一代信息技术开拓了与物理世界平行的虚拟世界,为人-机-物-法-环的交互、协同与共融提供了技术手段;新一代AI技术将推动社会经济从“数字经济”走向“智能经济”,催生一系列的新模式、新业态、新技术。

(一) 先进制造技术

先进制造技术是离散制造行业数字化转型与智能化升级的基石和内核[12],涵盖产品全生命周期各个环节,主要包括智能设计、智能加工[13]、智能调度、智能检测等技术。离散制造行业中的生产设备、装配车间、物流系统等生产资料数字化的核心是工业知识及其数字化模型,如制造机理模型、数据驱动模型、设计优化模型、管理调度模型等。基于AI技术的辅助,先进制造技术可以充分满足离散制造业柔性批量生产和产品规模化定制的需求,更好支持产品和服务的高质量实现。

拓扑优化技术依靠坚实的理论基础并与大规

模、高效率计算机技术结合,成为智能设计领域的核心技术之一。拓扑优化旨在给定边界条件和各类约束条件的基础上,获得最佳的材料分布形式以实现结构目标性能最优,近年来越来越多地用于解决各类工程设计问题(见图2)。基于传统的宏观结构拓扑优化设计技术可实现工程结构的智能设计,大幅减轻结构重量并提升承载能力,最大化材料利用率;可考虑结构的多种物理属性,如结构基频、强度、热变形等。基于拓扑优化领域的多尺度设计技术可实现智能超材料设计,如通过设计材料微观结构获得具有负泊松比特性的超材料[14],通过考虑材料微观特性对结构热传递的影响设计出具有热隐身性能的超材料[15]。相应超材料具有广泛的应用前景。

(二) 新一代信息技术

5G、边缘计算、区块链等新一代信息技术是数字化转型与智能化升级的引擎和助力。新一代信息技术高速发展并具有强大的渗透能力,将原本的“数字孤岛”连接起来,扩展了控制生产资源和生产流程的空间,也为人-机-物-法-环的交互、协同与共融提供了手段。区块链技术是离散制造系统中各智能体可靠、可信、安全、高效的联结途径,具有去中心化、自治化、透明不可篡改、可追溯性等特点。

5G技术具有高带宽、低时延、高可靠性、大规模节点等优势,结合网络切片、边缘计算等关键技术,为制造车间关键要素感知数据的互联互通以及准确分析预测提供了重要保障,促进了智能车间

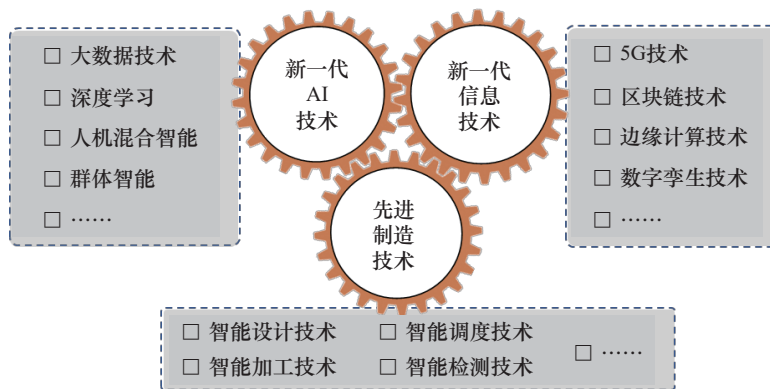


图1 离散制造行业数字化转型与智能化升级共性关键技术

调度技术的发展(见图3)。依托5G技术,设计云一边一端协同的感知体系,实现智能车间多源异构数据的互联互通;基于感知数据,利用AI技术实现不确定异常事件的准确预测,将不确定异常事件转化为可预测、可规避的确定事件[16];根据预测结果及时调整调度模型,变被动响应为主动调控,降低异常事件对生产过程的影响,确保生产计划高效稳定地执行[17]。

(三) 新一代人工智能技术

新一代AI技术是数字化转型与智能化升级的

“顶层建筑”。AI技术的快速发展推动社会经济从“数字经济”走向“智能经济”,社会形态和生产模式也将发生巨大变革[18~20]。例如,大数据技术、深度学习技术、强化学习技术、人机协作智能技术、基于网络的群体智能技术、跨媒体推理技术等融入,最终将给离散制造业转型升级带来质的飞跃。基于AI技术的海量数据实时处理与可视化技术,建立制造流程数字孪生模型与机理混合模型,是实现离散制造过程高效率数字化智能的关键。

在AI领域,深度学习是机器学习研究中的热门方向,近年来发展迅速。相较于传统的故障诊断

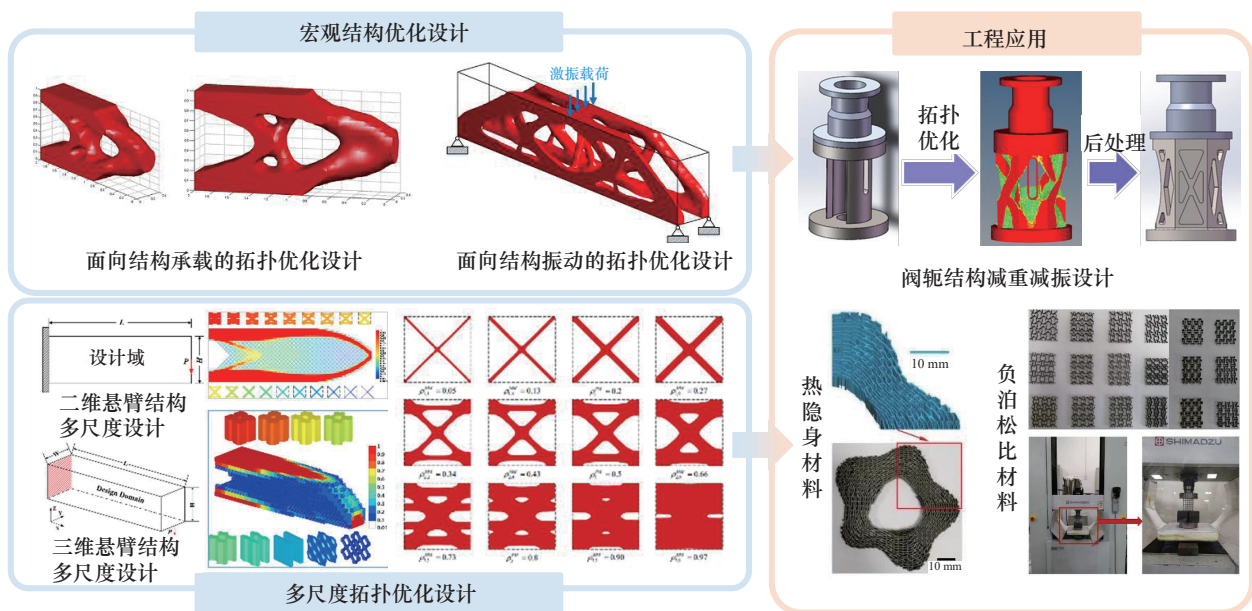


图2 基于拓扑优化技术的智能设计应用

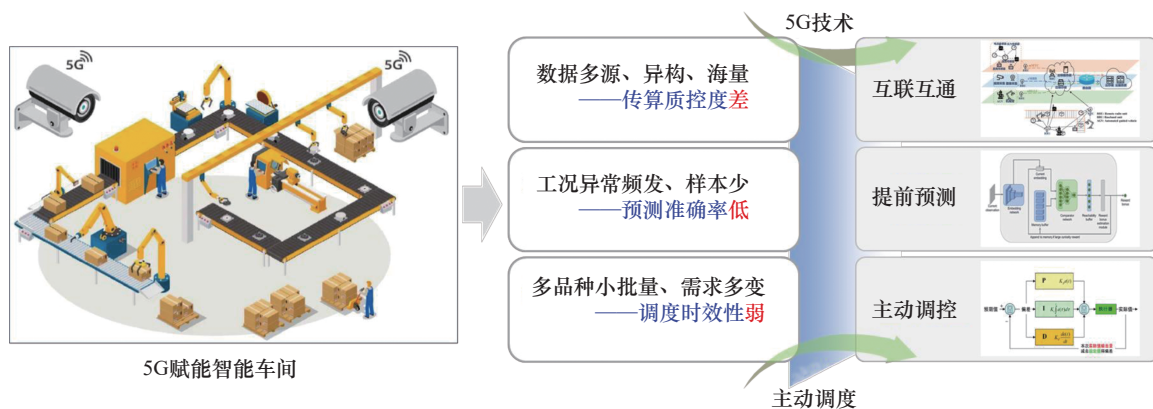


图3 基于5G的制造车间调度技术

方法, 基于深度学习的故障诊断可以自动提取特征而不需要复杂的信号处理过程 [21]; 基于深度学习方法可以高效地完成表面缺陷特征提取与定位 [22]。多标识的领域自适应网络故障诊断技术 [23], 可以节省特征工程的时间, 提高故障诊断的泛化程度; 半监督式卷积神经网络的表面缺陷检测技术节省了数据标记成本 [24], 在有限数据条件下实现了表面缺陷检测 (见图 4)。

五、离散制造行业数字化转型与智能化升级的典型案例分析及技术路径

目前, 中国制造业已步入平稳发展阶段。我国离散制造行业普遍处于工业 2.0 的后期阶段, 智能制造水平相对薄弱, 制造业亟待转型升级。离散制造行业数字化转型与智能化升级应是全方位的, 数字与智能技术的深化应用将在商业模式、服务模式、研发模式、运营模式、制造模式、决策模式 6 个方面推进转型升级 (见图 5)。离散制造行业处于应用不同转型升级模式进行尝试的阶段, 大部分处于转型升级的前期阶段, 以制造模式转型升级为主; 部分企业尝试进行运营模式和决策模式的转型升级; 商业模式、研发模式、服务模式的转型升级对企业要求较高, 仅有少部分企业在进行探索应用。以离散制造行业中的 4 个典型企业为例, 分析其数字化

转型与智能化升级技术路径。

(一) 研发模式转型升级

海尔集团公司积极实施数字化转型, 致力成为互联网时代智慧家庭的引领者; 已从传统制造家电企业转型为面向全社会孵化创客的平台, 为中小企业提供智能制造、个性化定制的解决方案。海尔集团公司的数字化转型与智能化升级主要经历了 3 个阶段 (见表 1)。

① 定制化与信息化升级阶段, 通过大电商平台的规划, 实现了企业对企业、企业对消费者、跨境电商等全电商业务的融合, 打通用户的前端获取、购买、配送、接收的全流程交互体验, 为用户提供了家电产品以外的增值服务。

② 自动化、网络化建设阶段, 海尔互联工厂实现了精密装配机器人集群, 引入企业资源规划系统 (ERP)、制造执行系统 (MES)、仓库管理系统 (WMS) 等, 实现产品与设备、产品与模块、产品与人员之间的多重互联, 颠覆了传统的串联式作业模式, 实现并联式生产。

③ 全面网络化、数字化转型、智能化探索阶段, 建立了 COSMOPlat 工业互联网平台, 通过聚合高水平获奖案例, 为行业提供数字化转型实践的路径参考, 显现了工业互联网领域数字化转型创新价值。整体来看, 海尔集团公司积极引入先进技术, 实现了家电制造产线的自动化及智能化升级转型, 使得产品研发周期缩短了 30%, 人均产值提

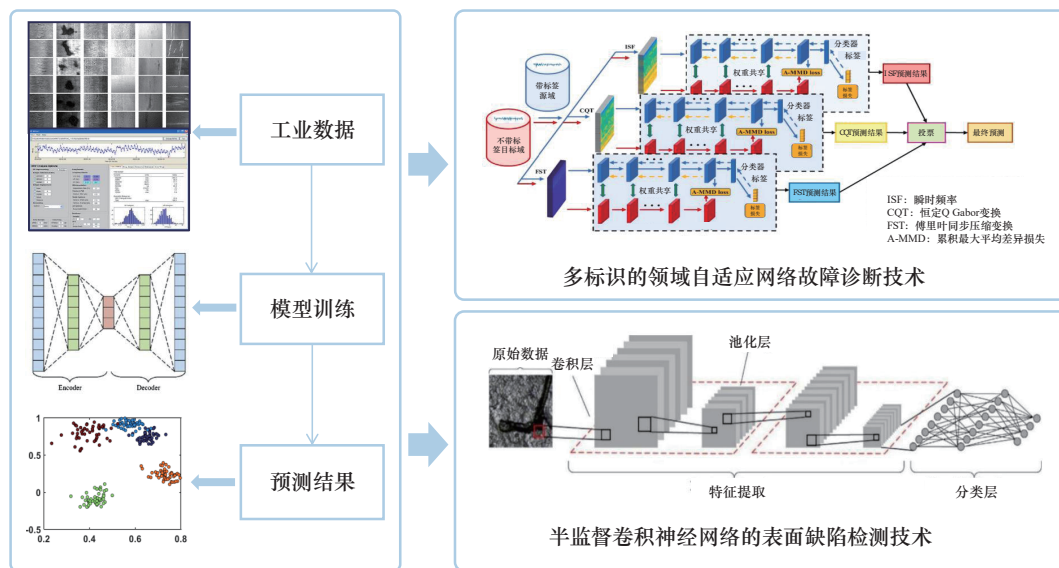


图 4 基于深度学习的智能诊断技术

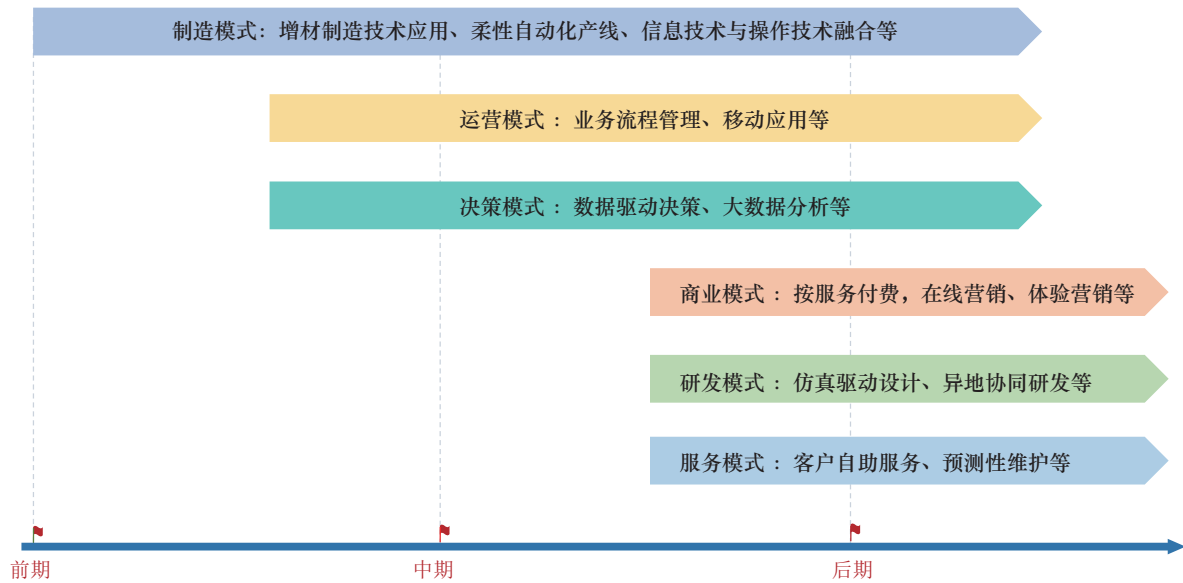


图 5 离散制造行业转型升级不同阶段的转型升级模式

高了 30%，产能提升近 1 倍；COSMOPlat 为工业互联网实际场景应用提供了平台支撑，成为离散制造业数字化转型创新的价值基准。

（二）运营模式转型升级

索菲亚家居股份有限公司（简称“索菲亚”）运用统一的制造运营管理平台，以生产现场可视化、制造过程透明化、跨工厂绩效管理标准化实现了企业的数字化转型。索菲亚的数字化转型与智能化升级主要经历了 4 个阶段（见表 2）。① 信息化管理阶段，运用计算机辅助设计（CAD）制图软件代替传统手工画图，应用条码系统、生产管理系统实现了信息化管理。② 信息化与自动化齐头并进阶段，在采用 ERP 系统的同时，引入柔性生产线以提高生产效率，成立信息与数字化中心以实现信息化系统全面覆盖并全面推广柔性生产线。③ 数字化转型、智能化探索阶段，实施“X 计划”，上线 MES、

WMS 及供应商管理系统以实现仓储智能自动化、分拣智能自动化，规划并建设智能工厂。④ 网络化、智能化探索阶段，“未来工厂”4.0 车间投产，以互联网为依托并通过运用大数据、AI 等先进技术手段，对商品生产、流通、销售过程进行升级改造，进而重塑了业态结构和生态圈。整体来看，索菲亚通过信息化、自动化、智能化相关技术的应用，实现了生产过程的智能化和生产管理的数字化，完成了制造模式和管理方式的转型升级，使得生产效益提升了 50%，人工成本降低了 30%~50%；综合应用基于互联网的大数据、AI 技术实现了商品生产、流通与销售过程的升级改造，成为离散制造业数字化转型与智能化升级的典型案列。

（三）商业模式转型升级

青岛酷特智能股份有限公司（简称“酷特”）是一家服装智造企业，形成了以大规模定制为核

表 1 海尔集团数字化转型与智能化升级时间表

时间 / 年	阶段	数字化转型、智能化升级技术
2000—2003	定制化与信息化升级	企业对消费者电商平台、柔性制造与定制化、U+智慧生活平台、ERP 改造
2004—2015	自动化、网络化建设	数字化共享协同、MES、智能机器人流水线、大数据与云计算
2016—2020	全面网络化、数字化转型、智能化探索	COSMOPlat 工业互联网平台、5G 海量机器类通信物联网通信、AI 视觉+虚拟现实、边缘计算+云端控制

心的酷特智能模式，提出了个性化定制模式和用户直连制造（C2M）商业模式，构建了酷特 C2M 产业互联网生态体系，更好满足了消费者的个性化需求 [7]。酷特的数字化转型与智能化升级主要经历了 4 个阶段（见表 3）。① 信息化管理与自动化生产阶段，选择了大规模个性化定制作为主要的商业模式，运用自动化设备升级生产工厂并推出电子商务系统。② 信息化和自动化齐头并进阶段，引入自动化设计、MES、WMS 等新技术，初步形成 C2M 的新商业模式。③ 数字化转型、智能化探索阶段，引入数字化生产计划系统，着力推动数据标准化建设，形成了数据驱动的大规模个性化定制新模式。④ 网络化、智能化探索阶段，在引入智能物流和自动化仓储系统后，物流部门的用工量减少了 80%；通过运用物联网（IoT）、“互联网+”等技术，形成了互联网生态体系，初步建成智能工厂。整体来看，酷特实现了 C2M 的新商业模式转型，建立了人、事、物互联互通的智能工厂；与传统模式相比，生产效率提高了 25%，成本下降了 50%，利润增长了 20%，成为质量提升和供给侧结构性改革的典型实践。

（四）制造模式转型升级

内蒙古伊利实业集团股份有限公司（简称“伊利”）是我国首批智能制造试点示范项目中唯一的乳制品企业，发展“智慧乳业”，引领全行业积极探索信息化、智能化。伊利的数字化转型与智能化升级主要经历了 3 个阶段（见表 4）。① 自动化建

设阶段，在连通平台、站点、在线自动包装系统、瑞士格物流库房等方面实施自动化建设，实现了乳制品生产全过程自动化。② 数字化、网络化转型阶段，搭建智能制造系统，实时获取设备状态和数据，进行统一的数据交互，形成了产品生命周期管理系统、政策法规数据库系统、食品安全风险评估系统等线上平台。③ 网络化、智能化探索阶段，投入生产计划执行系统、全生命周期质量追溯系统，自主研发配方管理系统等安全可控的核心软件，实现了制造装备升级、信息互联互通的智能建设，促使生产效率明显提升和运营成本显著降低。整体来看，伊利将数字化智能化技术应用到全产业链，推进“智慧乳业”建设，实现产业数字化、智能化，助力经营业绩稳步提升；为消费者提供了多元化、高品质的产品与服务，也为我国乳业高质量发展探索出新的路径。

六、离散制造行业数字化转型与智能化升级的重点任务

（一）突破制造智能关键使能技术

智能传感器与工业互联网是智能制造的基础，重点突破智能传感器与传感网络及智能终端、即插即用技术、实时网络操作系统技术、机器对机器技术、制造 IoT 技术。大数据和知识库是智能制造的核心，重点突破制造大数据挖掘技术、大数据智能分析与管理技术、面向制造大数据的综合推理技术。智能推理是智能制造的灵魂，重点突破智能建模与

表 2 索菲亚家居股份有限公司数字化转型与智能化升级时间表

时间 / 年	阶段	数字化转型、智能化升级技术
2005—2012	信息化管理	CAD制图软件化、条码系统、生产管理系统
2012—2015	信息化与自动化齐头并进	ERP系统改造、柔性生产线全面推广、包装自动化、信息化系统全面覆盖
2015—2018	数字化转型、智能化探索	MES、WMS及供应商管理系统、仓储智能自动化、分拣智能自动化
2018—2020	网络化、智能化探索	“未来工厂”4.0 车间、“互联网+”、大数据平台

表 3 青岛酷特智能股份有限公司数字化转型与智能化升级时间表

时间 / 年	阶段	数字化转型、智能化升级技术
2005—2012	信息化管理与自动化生产	个性化定制、电子商务系统、自动化产线
2012—2015	信息化与自动化齐头并进	工厂网络和各单模块的信息系统、信息管理系统、自动化设计、ERP、WMS
2015—2018	数字化转型、智能化探索	数字化装备、数字化缝纫和裁剪、WMS、数据驱动的服装大规模个性化定制模式
2018—2020	网络化、智能化探索	智能物流、IoT建设、“互联网+”、C2M商业模式、产业互联网生态体系

仿真技术、全息人机协同系统、复杂对象智能控制系统技术、数字孪生技术 [25,26]。

（二）研发智能制造装备

重点研发的智能制造装备包括智能机床、智能成形制造装备、特种智能制造装备、智能机器人、智能柔性制造产线等。智能机床应具有加工状态实时感知与交互、产品工艺自主决策与优化、加工精度持久保持能力等特性 [27]，智能成型制造装备应具有信息获取、模型预测、决策控制功能，特种智能制造装备应具有超高温、超高压等超常工作环境适应性以及超精密、高能束等超常工艺适应能力，智能机器人应能胜任焊接、打磨、精细装配、机加工、柔顺控制等工作，智能柔性制造生产线应具有多制造功能单元、制造岛结合协作的高度柔性化和智能化能力。

（三）建设数字化、智能化车间

数字化制造车间、网络化制造车间是智能化车间的初级形态 [28]：前者的各种设备要实现数字化管理和控制，对加工数据进行数字化描述、集成、分析和决策，进而对各种设备进行数字化控制；后者基于集成的数据进行智能分析和决策，智能地优化整个制造过程，使资源得到最合理的配置和优化。

（四）打造数字化、智能化工厂

数字化、智能化工厂是智能制造的典型代表。在产品方面，通过制造工艺与成品性能的三维模拟与仿真优化，实现计算机辅助的精确可靠规划设计。在生产制造方面，利用工业机器人、数控机床和其他智能装备，自动、高效、稳定地完成各项生产操作 [8]。在运营管理方面，在工业互联网的基础上，通过有效组织和融合制造领域知识，满足供应管理、生产营销、质量追溯、售后运维等全价值链的增长需求。

（五）提供数字化、智能化服务

相较传统制造服务，数字化、智能化服务主要体现在提高服务的状态环境感知、服务规划、决策和控制水平、服务质量等。在工业技术软件服务方面，提供网络化智能工业软件的集成应用。在工业产品智能服务方面，提供重大装备的智能运维服务。在生产服务方面，提供生产性服务过程的跟踪、调度和优化控制等智能服务。在云服务方面，提供全社会制造与服务能力的集成与共享服务。在社群化智能制造服务方面，提供实多企业间的无缝社交与协同生产、智能化产品运维服务。

（六）构建标准体系和安全体系

标准体系应重点构建：技术标准体系，如云计算、区块链、信息物理系统（CPS）等，以技术的应用和操作为重点；产品标准体系，如工业互联网平台，侧重于技术应用和产品服务方面；过程标准体系，如工业化和信息化深度融合、智能制造等，涵盖范围广、类型多，应侧重多个维度以分析发展演进过程；安全标准体系，构建离散制造行业信息安全和物理安全平台，汇聚安全数据，积累安全知识和攻防经验，开展大数据分析，进行预警、识别、审计、漏洞管理、防御、杀毒等。

七、对策建议

（一）加快示范应用

建议积极支持和引导离散制造行业数字化转型、智能化升级和智能工厂示范；在示范基础上，大规模推行制造装备的数字化转型、智能化升级工程及企业的数字化转型、智能化升级工程，支持形成具有区域优势的智能制造生态链。围绕高端纺织、新型电力装备、工程机械、家居、家电等重点行业，实施智能制造示范项目并筛选典型示范企业，树立标杆企业形象并传播推广。

表 4 内蒙古伊利实业集团股份有限公司数字化转型与智能化升级时间表

时间 / 年	阶段	数字化转型、智能化升级技术
2005—2010	自动化建设	产品自动化灌装、包装生产线、条码系统、自动生产管理系统
2004—2015	数字化、网络化转型	MES、Y-iLMILK智能车间通用模型标准、iICIC互联互通网络架构与信息模型标准、iTTS产品质量管控标准
2015—2020	网络化、智能化探索	5G + AI、数据共享、标准统一、平台建设打破“数字孤岛”、全周期产业链的数字化平台

(二) 突出“中国制造”

在离散制造行业数字化转型与智能化升级过程中,应突出核心技术、关键装备、工业软件的“中国制造”,警惕和防止高端装备、核心技术“空心化”现象。在核心技术、关键装备、工业软件方面推行“产学研用”一体化协同创新模式,着力解决离散制造行业数字化转型与智能化升级过程中的技术难题。

(三) 培育高新技术人才

离散制造行业的转型升级需要在战略、思想、技术、执行等方面加强人才储备。建议完善职业教育与专业人才培养模式,注重可持续发展,培养离散制造业智能化工厂方向的专业技术与人才队伍。推进智能制造人才队伍建设,培养智能制造人才 [29]: 一是智能制造高技术人才,培养掌握制造技术,熟悉数字化、网络化、智能化技术,精通智能制造技术,善于解决工程实际问题的智能制造高技术人才;二是智能制造高技能人才,培养知识先进、技术精湛、能工巧匠型的智能制造高技能人才;三是高水平的智能制造管理人才,尤其是企业家群体。

(四) 制定相应法律法规

探索通过立法引领产业发展,不断完善财税、金融、知识产权、人才培养等配套的政策法规体系,促进制造业的长期稳定发展。建立数字资产知识产权保护机制,引入数字资产许可制度,构建透明的数字资产使用环境;加大政府财政资金支持力度,实施必要的税收激励政策,采取多元化金融支持方式;利用信息技术对数字资产进行加密、标记、追溯和监控,加强对违规行为的法律约束。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: January 13, 2022; **Revised date:** February 11, 2022

Corresponding author: Gao Liang is a professor from the School of Mechanical Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology. His major research field is application of intelligent optimization and machine learning methods in design and manufacturing. E-mail: gaoliang@hust.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on Several Major Issues of Intelligent Manufacturing in the New Era”

(2021-HZ-11)

参考文献

- [1] 李培根,高亮. 智能制造概论 [M]. 北京:清华大学出版社,2021. Li P G, Gao L. Introduction to intelligent manufacturing [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2021
- [2] 周济,李培根. 智能制造导论 [M]. 北京:高等教育出版社,2021. Zhou J, Li P G. Introduction to intelligent manufacturing [M]. Beijing: Higher Education Press, 2021.
- [3] 周济. 智能制造——“中国制造2025”的主攻方向 [J]. 中国机械工程, 2015, 26(17): 2273–2284. Zhou J. Intelligent manufacturing: Main direction of “Made in China 2025” [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(17): 2273–2284.
- [4] Gao L, Shen W, Li X. New trends in intelligent manufacturing [J]. Engineering, 2019, 5(4): 619–620.
- [5] Fakhri A B, Mohammed S L, Choi I K, et al. Industry 4.0: Architecture and equipment revolution [J]. Computers, Materials & Continua, 2021, 66(2): 1175–1194.
- [6] García Á, Bregon A, Martínez-Prieto M A. A non-intrusive industry 4.0 retrofitting approach for collaborative maintenance in traditional manufacturing [J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 164: 1–12.
- [7] Zhou Y, Zang J, Miao Z, et al. Upgrading pathways of intelligent manufacturing in China: Transitioning across technological paradigms [J]. Engineering, 2019, 5(4): 691–701.
- [8] 卢秉恒,邵新宇,张俊,等. 离散型制造智能工厂发展战略 [J]. 中国工程科学, 2018, 20(4): 44–50. Lu B H, Shao X Y, Zhang J, et al. Development strategy for intelligent factory in discrete manufacturing [J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(4): 44–50.
- [9] 袁晴棠,殷瑞钰,曹湘洪,等. 面向2035的流程制造业智能化目标、特征和路径战略研究 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(3): 148–156. Yuan Q T, Yin R Y, Cao X H, et al. Strategic research on the goals, characteristics, and paths of intelligentization of process manufacturing industry for 2035 [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(3): 148–156.
- [10] 庄存波,刘检华,隋秀峰,等. 工业互联网推动离散制造业转型升级的发展现状、技术体系及应用挑战 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(12): 3061–3069. Zhuang C B, Liu J H, Sui X F, et al. Status, technical architecture and application challenges for transformation and updating of discrete manufacturing industry driven by industrial Internet [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(12): 3061–3069.
- [11] 李伯虎,柴旭东,张霖,等. 新一代人工智能技术引领下加快发展智能制造技术,产业与应用 [J]. 中国工程科学, 2018, 20(4): 73–78. Li B H, Cai X D, Zhang L, et al. Accelerate the development of intelligent manufacturing technologies, industries, and application under the guidance of a new-generation of artificial intelligence technology [J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(4): 73–78.
- [12] Zhong R Y, Xu X, Klotz E, et al. Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: A review [J]. Engineering, 2017, 3(5): 616–630.

- [13] Liu Q H, Li X Y, Gao L. A novel MILP model based on the topology of a network graph for process planning in an intelligent manufacturing system [J]. *Engineering*, 2021, 7(6): 807–817.
- [14] Li H, Luo Z, Gao L, et al. Topology optimization for functionally graded cellular composites with metamaterials by level sets [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2018, 328: 340–364.
- [15] Sha W, Xiao M, Zhang J, et al. Robustly printable freeform thermal metamaterials [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1–8.
- [16] Gao Y, Gao L, Li X, et al. A zero-shot learning method for fault diagnosis under unknown working loads [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2020, 31(4): 899–909.
- [17] Peng K, Pan Q K, Gao L, et al. A multi-start variable neighbourhood descent algorithm for hybrid flowshop rescheduling [J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2019, 45: 92–112.
- [18] Kusiak A. Smart manufacturing must embrace big data [J]. *Nature*, 2017, 544(7648): 23–25.
- [19] Zhou J, Li P G, Zhou Y H, et al. Toward new-generation intelligent manufacturing [J]. *Engineering*, 2018, 4(1): 11–20.
- [20] Zhou J, Zhou Y, Wang B C, et al. Human-cyber-physical systems (HCPSs) in the context of new-generation intelligent manufacturing [J]. *Engineering*, 2019, 5(4): 624–636.
- [21] Li W, Chen S, Peng X, et al. A comprehensive approach for the clustering of similar-performance cells for the design of a lithium-ion battery module for electric vehicles [J]. *Engineering*, 2019, 5(4): 795–802.
- [22] Gao Y, Li X, Wang X V, et al. A review on recent advances in vision-based defect recognition towards industrial intelligence [EB/OL]. (2021-05-21)[2022-01-10]. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0278612521001059?dgcid=rss_sd_all.
- [23] Zhao C, Liu G, Shen W, et al. A multi-representation-based domain adaptation network for fault diagnosis [J]. *Measurement*, 2021, 182(1): 1–12.
- [24] Gao Y, Gao L, Li X, et al. A semi-supervised convolutional neural network-based method for steel surface defect recognition [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, 61: 1–12.
- [25] Tao F, Qi Q, Wang L, et al. Digital twins and cyber-physical systems toward smart manufacturing and industry 4.0: Correlation and comparison [J]. *Engineering*, 2019, 5(4): 653–661.
- [26] Tao F, Qi Q. Make more digital twins [J]. *Nature*, 2019, 573(7775): 490–491.
- [27] Chen J H, Hu P C, Zhou H C, et al. Toward intelligent machine tool [J]. *Engineering*, 2019, 5(4): 679–690.
- [28] Peng K, Li X, Gao L, et al. A new joint data-model driven dynamic scheduling architecture for intelligent workshop [C]. Erie: ASME 2019 14th International Manufacturing Science and Engineering Conference, 2019.
- [29] 周济. 智能制造要培养三类人才三支队伍 [EB/OL]. (2021-12-09)[2021-12-28]. http://www.wimc.org.cn/news_show.aspx?id=501.
Zhou J. Intelligent manufacturing needs to cultivate three types of talents and three teams [EB/OL]. (2021-12-09)[2021-12-28]. http://www.wimc.org.cn/news_show.aspx?id=501.