

文章编号: 2095-2163(2021)03-0098-08

中图分类号: TH16

文献标志码: A

# 新时代计算机智能制造模式的研究进展

李佳意, 董万鹏, 任 梦, 张吉超, 弓成美琪

(上海工程技术大学 材料工程学院, 上海 201620)

**摘要:** 在工业 4.0 的推动下, 智能制造备受关注, 智能制造的生产模式及其结构现已成为瞩目焦点。全文通过以集成制造、数字制造、网络制造为基础, 构建智能制造框架, 分别解释集成制造、数字制造、网络制造的特点及其相互之间的联系, 对应智能制造的理论基础模块、先进技术模块以及实时数据采集模块。运用智能制造的当前应用状况, 展望未来制造业的新模式, 智能制造成为 21 世纪先进制造业的关键制造模式。

**关键词:** 智能制造; 数字化集成; 网络制造; 计算机应用; 先进技术

## Research on computer intelligent manufacturing in the new era

LI Jiayi, DONG Wanpeng, REN Meng, ZHANG Jichao, GONG Chengmeiqi

(School of Material Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**[Abstract]** Driven by Industry 4.0, smart manufacturing has attracted much attention, and the production mode and structure of smart manufacturing also have attracted much attention. The full text builds an intelligent manufacturing framework based on integrated manufacturing, digital manufacturing and network manufacturing, which explains the characteristics of integrated manufacturing, digital manufacturing, and network manufacturing as well as their relationships, and corresponds to the theoretical basic modules, advanced technologies of intelligent manufacturing module and the real-time data acquisition module. Using the current application status of intelligent manufacturing and looking forward to the new model of manufacturing in the future, smart manufacturing will become the key manufacturing model of advanced manufacturing in the 21st century.

**[Key words]** intelligent manufacturing; digital integration; network manufacturing; computer application; advanced technology

## 0 引言

最近几年来, 制造技术面临着诸多挑战, 例如: 越来越高的产品性能指标要求, 更加独特的个性化设计、日益缩短的交付期时间以及更为优秀的环境友好性等。但是同时, 新一代信息通信技术和新一代人工智能技术也在与制造技术进行着深度融合, 给制造业带来新的理念、模式、技术以及应用, 展现出未来制造技术和制造业发展的新前景<sup>[1]</sup>。

在制造业由原来的工业 1.0 发展到工业 4.0, 智能制造已然成为了制造业的发展趋势。智能制造是先进制造技术与新一代信息技术、新一代人工智能等新技术深度融合形成的新型生产方式和制造技术, 是以产品全生命周期价值链的数字化、网络化、集成化和智能化为核心, 以企业内部纵向管控集成和企业外部网络化协同集成为支撑, 以各层级数字孪生映射融合为基础, 建立起具有动态感知、实时分析、自主决策和精准执行功能的智能工厂, 实现高效、优质、低耗、绿色、安全的制造和服务<sup>[2]</sup>。本文

将从集成制造、数字制造、网络制造以及智能制造四个方面对各个制造技术进行调查研究, 通过结合各个技术之间的相互联系, 对制造业的发展趋势进行综述。

## 1 计算机集成制造

### 1.1 计算机集成制造介绍

计算机集成制造主要是将信息技术、现代管理技术和制造技术相结合, 应用于企业产品全生产周期的各个阶段; 通过信息集成、过程优化及资源优化方式, 实现企业产品从产品概念设计、模式建立、产品检测、工艺规划、封装管理到生产制造全过程的数据管理<sup>[3]</sup>。

计算机集成制造 (Computer Integrated Manufacturing, CIM) 是由 Harrington 博士于 1973 年在其编写的《Computer Integrated Manufacturing》书中首次提出的<sup>[4]</sup>。从推出开始, 全世界工业国开始对 CIM 进行深层次的研究和推广。自 20 世纪 80 年代初<sup>[5]</sup>, 美国国家标准所属自动化研究实验基地

**作者简介:** 李佳意(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 自动化智能制造、模拟仿真分析。

**通讯作者:** 董万鹏 Email: 1549149376@qq.com

**收稿日期:** 2020-10-28

建立了世界上第一个 CIMS 实验系统。20 世纪 90 年代<sup>[6]</sup>,国内开始研究和推广应用计算机集成制造系统(CIMS),清华国家工程研究中心(ERC)、北京第一机床厂等应用工厂先后建成,数字化设计、自动化生产线、自动运输机械及立体仓库等设施接连登场。

## 1.2 CIM 的应用与发展

集成技术能够将制造生产数据有机统一以及深度应用,实现数据的有效更新和存储。数据集成技术就是把不同来源、多种格式、各种特点和性质的数据在逻辑上和应用上有机结合,为系统存储大量直面主题的、相对稳定的、能够反映历史变化的数据集,从而为系统提供全面的数据利用和共享<sup>[7]</sup>。根据数据集成的位置点不同,主要可以分为数据源端集成和数据应用端集成<sup>[8]</sup>。对此可做阐释分述如下。

(1)数据源端集成:源端数据集成如图 1(a)所示,在信息膨胀的新时代,数据的来源广泛,数据的格式存在差异。倘若不加以修改,直接应用与生产,不仅会降低生产效率,还会产生一定的产品质量问题,所以在数据分析之前,需对数据源集成,修改为统一的格式。

(2)数据应用端集成:应用端集成如图 1(b)所示,在制造业的内部存在多个制造行业,即多种应用端,比如设计应用端、制造应用端、调控应用端等。每个应用端都有对应的数据格式,容易在各个应用端上形成孤立,不能进行有效的数据传递。通过对应用端数据集成,可以在各个应用部门间构建信息共享的桥梁。

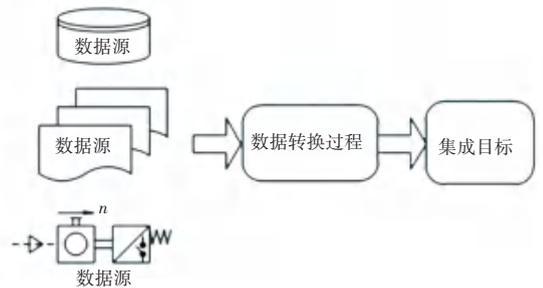
面对越来越严格的生产要求,集成制造能力出现“片段化”,无法支撑信息技术、自动化技术及先进制造技术的集成要求。在信息技术与通信技术光速发展下,集成制造需要实现软件与网络深度耦合、软件与硬件相互磨合、应用与服务紧密融合,加快向网络化、服务化、体系化与智能化方向转变<sup>[10]</sup>。

## 2 数字制造

数字制造(Digital Manufacturing, DM)是一种基于网络的、基于技术的制造方法,通过数字链接建模、仿真、可视化、数据分析、制造、供应链,来定义、管理和协作整个产品生命周期。DM 技术可以通过分析数据来优化设计,从而缩短产品上市时间,降低成本,并提高产品和流程的效率,甚至能够在构建数据之前就即对其进行分析。

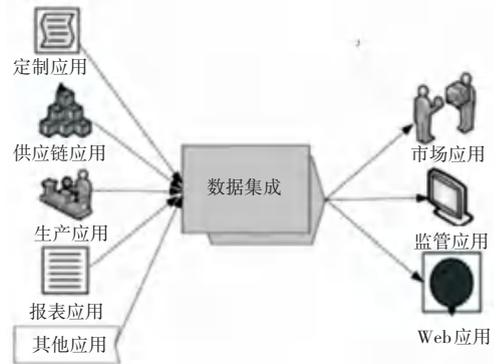
## 2.1 数字制造的背景

传统制造方法是一种在线过程,其中设计产品并将图纸转发到车间以制造原型。然而数字技术是一个循环制造过程,从概念模型出发,通过计算机辅助设计软件进行模型绘制与创新,然后对设计及其过程进行仿真,检验产品制造的可行性。在生产过程中实行数字化,可以通过检查技术对产品实行检测,有效避免加工误差;在供应链管理上实行数字化,能够实现有效库存和生产定制产品;在产品营销上实行数字化,可以通过社交媒体提高盈利能力。



(a) 数据源端集成

(a) Source-side data integration



(b) 数据应用端集成<sup>[9]</sup>

(b) Application-side data integration<sup>[9]</sup>

图 1 集成制造

Fig. 1 Integrated manufacturing

在生产方式方面,数字化新型计算机网络技术的全方位渗透,促使传统制造业朝着智能化、绿色化、共享化方向发展;在组织方式方面,在数字制造转型模式的影响下,传统制造企业组织形式呈现出平台化、扁平化、机械化的发展趋势;在商业模式方面,新时期大量新技术、产品、管理方式的诞生,迫使传统以生产企业为核心的商业模式朝着以消费者为核心的商业模式转变;在竞争格局方面,数字化转型升级改变着传统制造业竞争格局,凭数量取胜的标准向着质量取胜标准转变。

## 2.2 数字制造的应用

数字制造技术的应用范围极广<sup>[11]</sup>,现已应用于

汽车、航空航天、医疗、材料、建筑、食品、时装等各个领域。赵虎林等人<sup>[12]</sup>将数字化技术应用于焊接工艺中,通过焊接材料数字化、焊接过程数字化、焊接检验数字化,将焊接自动化和数字化与设备、材料、设计、工艺以及检测等一系列工作进行融合,实现全面自动化。刘飞香<sup>[13]</sup>通过数字化研发三维模型的产品,动态调整产品设计不同的作业环境和作业时间,设计优化环境数据。

数字制造技术还包含精益制造、柔性制造、敏捷制造与并行工程等先进制造工艺。精益生产<sup>[14]</sup>通过需求量的数据计算,按需要的量生产需要的产品,由准时生产、全面质量管理、全面生产维护和资源管理构成。柔性制造<sup>[15]</sup>是在自动化与信息化的基础上扩展了柔性制造能力,能够根据制造任务或生产环境的变化迅速进行调整,适用于多品种、中小批量生产,系统具备柔性、敏捷和精准的反应能力。并行工程<sup>[16]</sup>是指将原先串联进行的制造过程,经过结构重组和流程再造后,实现制造过程并列进行的一种工作方式,强调产品模型设计、工艺方案设计、生产技术准备、以及采购和生产等环节交叉进行,并行且有序。敏捷制造<sup>[17]</sup>是指通过改善传统的生产技术,将最新的机械工艺、电子数据、信息传输、能源开发、组织管理等成果综合运用用于生产过程,快速配置技术、管理和人力等资源,缩短产品生产周期,快速响应市场需求。

智能制造的发展历程可归纳为数字化制造、网络化制造到智能化制造3个基本发展模式<sup>[18]</sup>。其中,数字化是智能制造的理论和实践基础,为智能制造提供技术基础和制造方法;网络化制造是实现智能制造的沟通桥梁,是数字化制造的进一步延伸和扩展,其先进制造技术融合了物联网、大数据和云制造等新一代信息技术,实现工业制造领域全要素、全产业链互联互通以及优化产品研发、生产和服务,制造模式由生产型制造向服务型制造转变,由大规模批量生产向个性化定制化生产转变。

### 3 网络制造

工业互联网由通用电气公司(GE)在2012年首次提出,其定义网络制造(Network manufacturing, NM)为“全球工业系统与互联网所允许的先进计算、分析、低成本传感能力的融合”<sup>[19]</sup>。工业互联网的核心部分主要包括2个方面。一个是用于车间与企业之间的智能传导和安全传输网络,其覆盖产品的整个生命周期;另一个是极为强大的计算与分析

能力,可以用于设备检验维修、能源分配优化、产品质量分析和市场供需预测等<sup>[19-21]</sup>。

21世纪初,网络化制造兴起,这是先进的网络技术、制造技术及其他相关技术结合构建的制造系统,是提高企业的市场快速反应和社会竞争能力的新模式<sup>[22]</sup>。近几年,为解决更加复杂的制造问题和开展更大规模的协同制造,网络制造作用愈加明显。本节通过网络制造的三大应用来解释网络制造优势与不足以及网络制造对智能制造的作用。

#### 3.1 物联网

物联网(Internet of Things)指的是将各种信息传感设备,如射频识别(RFID)装置、激光扫描仪、红外感应器、全球定位系统(GPS)等装置与互联网结合起来形成的巨大网络平台<sup>[23-25]</sup>。物联网是在计算机、互联网与移动通信网之后的世界信息产业革命第三次浪潮。

物联网广泛应用于多个领域。在农业领域,梁金鑫等人<sup>[26]</sup>通过物联网技术手段实现动态监控大棚温度、光照、棚外天气状况等智能操作,实现自动收放大棚棉被和控制卷帘机的升降;在水利领域,陈小英<sup>[27]</sup>基于细带物联网的远程水文测报系统,使用传感器进行数据采集,通过细带物联网传输到数据管理中心,完成水文数据的实时上传。宁爱民等人<sup>[28]</sup>基于水位与流速传感器建立一套物联网水文监测系统,研究传感器智能接口开发、数据融合与智库实现、无线网络与智库集成等关键技术,并通过室内试验与室外试点证明该系统的稳定性,达到了预期的效果。在矿物采集领域,苏建涛<sup>[29]</sup>把大数据、物联网、互联网、人工智能技术以及5G运用到原油开采中,大大提高采油的效率。在计算机通信领域,刘金魁<sup>[30]</sup>通过物联网技术有效提升计算机通信网络的总数量,丰富计算机通信网络类型,而且能够有效提升计算机网络运行的稳定性和系统的安全性。物联网还具有实时数据收集和在各种制造资源(例如机器、工人、材料和工作)之间共享的功能<sup>[31]</sup>。例如在车间、装配线和仓库,通过为制造对象配备射频识别(RFID)设备来创建智能对象,从而使得车间的干扰得以实时检测并反馈给制造系统<sup>[32]</sup>,如此就提高了制造和生产决策的效率。

以物联网智能物流系统为例,物联网智能物流系统是利用物联网系统,结合先进的现代信息传感技术和现代信息处理与存储技术,从产品的生产制造出发,实现从供应商向消费者产品运输、包装、配送和卸货的全过程智能化,在供应商利益最大化的

同时,使消费者享受最佳的服务,同时还能消耗更少的能源与社会资源,实现全程绿色化的物流管理系统<sup>[33]</sup>。物联网智能物流系统如图 2 所示,传统物流系统一般指产品出厂后的包装、运输、装卸、仓储,主要分布在图 2 中的物流应用层。与传统物流系统相比,物联网智能物流系统包括物联网感知层、网络层、信息处理层以及物流应用层。总地来说,物联网感知层主要功能是收集信息,将收集的信息通过网络层传输到信息处理层;信息处理层提供数据服务中心和信息服务平台,实现物流从生产到消费以及回收的全面调控,有效提高物流效率,减少失误<sup>[34]</sup>。

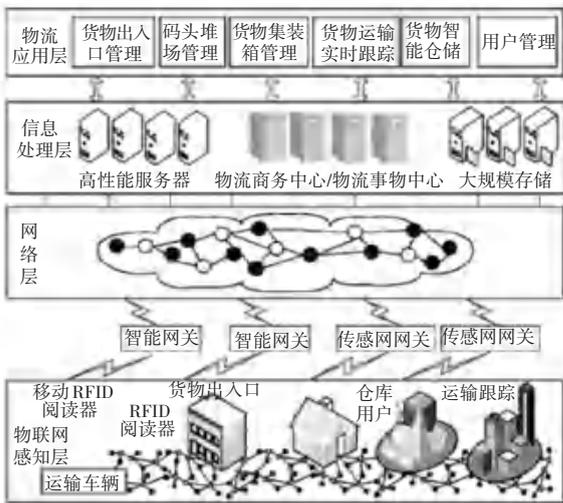


图 2 物联网智能物流系统结构<sup>[35]</sup>

Fig. 2 IoT smart logistics system structure<sup>[35]</sup>

### 3.2 云制造

云制造是新一代智能制造的重要组成部分<sup>[36-37]</sup>。云制造是指在云计算、物联网、虚拟化的应用下,一种面向服务的先进制造模型,该模型将制造资源转换为可以全面共享和流通的服务<sup>[38-39]</sup>。模型中,蕴含产品从虚拟构造、模型设计、运动仿真、加工制造、成品测试和维护的整个生命周期,因此通常被视为并行工程,网络化和智能化的制造系统(“制造云”)。云制造中的生产资源和容量可以智能管理。

图 3 中说明这项研究工作中开发的云制造框架,该框架能够共享分布式资源,在工业网络上循环有效使用,主要由制造商网络中不同供应商提供的分布式制造资源与 Internet 云平台相连接,进而实现用户动态共享。

### 3.3 大数据

大数据上有许多不同的定义,Gartner<sup>[40]</sup>对大数据的定义被广泛接受。Gartner 通过 3 个突出的特

征(也称为 3V)来定义大数据:大容量、高速度和高多样性<sup>[41]</sup>。随着人工智能进一步发展,深度学习、边缘计算等新模型和新算法被不断提出和发展,工业大数据也为智能制造带来新的理念、方法、技术与应用<sup>[42]</sup>。



图 3 云制造框架<sup>[39]</sup>

Fig. 3 Cloud manufacturing framework<sup>[39]</sup>

随着云计算和物联网技术的积极推动,数据在许多行业中变得越来越可访问和无处不在,从而导致数据广泛却不精确的问题<sup>[43]</sup>。大数据通常来自各种渠道,包括传感器、生产设备、视频资源、网页浏览痕迹、日志文件、事务性应用程序和社交媒体信息<sup>[44]</sup>。在这种情况下,制造业中的“大数据环境”逐渐形成。尽管物联网(例如,智能传感器)的发展简化了数据收集,但仍然存在以下问题:是否可以正确处理此数据,以便在正确的时间为正确的目的提供正确的信息<sup>[45]</sup>。

大数据平台是重要的使能技术,是连通工业资源要素的重要枢纽,是工业数据管理分析的重要载体,是支撑制造系统自学习、自进化的重要基础,逐渐成为智能制造体系的“操作系统”<sup>[46]</sup>。

网络制造<sup>[35]</sup>通过物联网、云制造、大数据多种方式实现数据的采集及应用,其主要的功能是发布式的采集及应用数据,实现信息数据的共享。表 1 展示了云制造、IoT 和智能制造的研究现状,智能制造和网络制造相互联系,相互促进,智能制造通过网络制造实现数据的收集,网络制造通过智能化实现数据的筛选和调控。

但网络制造存在许多问题<sup>[55]</sup>,其各个模块的结果通常相互矛盾,由于具体涉及的不是直接相关的制造信息和环境(例如,长期战略计划与短期运营计划),在输入/输出级别和实际信息内容上的协调

通常是一个饱受争议的问题,阻碍了工具在现实生活中的制造系统的适用性。

表1 云制造、IoT、智能制造的研究状况

Tab. 1 Research status of cloud manufacturing, IoT and smart manufacturing

概念	主要特征	技术提供	主要研究	应用
智能制造 <sup>[47-49]</sup>	1 基于人工智能的智能决策 2 先进的汽车生产 3 适应性和灵活性的制造系统	1 大数据处理 2 高级机器人 3 工业互联服务 4 传感器	1 先进的制造决策模型 2 人机交互 3 机器智能学习 4 机器间的互联	1 支持智能制造的产品生命周期测试台 2 智能制造计划和控制系统
物联网 <sup>[50-52]</sup>	1 基于自动识别技术的智能制造系统 2 实时数据收集 3 生产过程的实时可见性和可追溯性 4 实时制造决策	1 物联网技术 2 无线生产技术 3 云计算	1 实时数据驱动的决策模型 2 实时数据可视化	1 资源管理系统 2 智能建筑生产系统 3 制品库存管理系统 4 实时生产计划和调度系统
云制造 <sup>[53-54]</sup>	1 制造服务分配与共享 2 智能库存管理 3 制造云服务管理	1 云计算 2 互联网 3 虚拟化方法	1 制造资源和能力的建模 2 制造服务配置 3 制造云架构	1 云制造车间中的数据可视化 2 基于物联网的智能云制造 3 云制造的网络构架

## 4 智能制造

智能制造(Intelligent Manufacturing, IM)是新一代信息技术与先进制造技术的深度融合,贯穿于产品、制造、服务全生命周期的各个环节及相应系统的优化集成,实现制造的数字化、网络化、智能化,并不断提升企业的产品质量、效率和服务能力,推动制造业创新化、绿色化、协调化、开放化和共享化发展<sup>[56]</sup>。

### 4.1 智能制造的背景

智能制造<sup>[57]</sup>通过融合新一代信息技术和先进制造技术,实现设备与设备之间、设备与人之间、设备与信息系统之间以及企业与企业之间的信息互联与集成,具有高敏捷性、强扩展性和可持续发展的特点。

智能制造随着工业4.0、工业互联网和中国制造2025的提出,受到了广泛的关注。工业4.0是由德国<sup>[58]</sup>提出的概念,认为制造业未来只能通过智能化的生产创造价值,即制造本身是创造价值的,认为工业4.0的本质特征便是智能化,即以智能工厂为核心,建立起一整套规模化、定制化的产品设计、生产及服务模式。美国<sup>[59]</sup>则相应提出工业互联网,以通用电气(GE)为代表,注重通过机器互联、软件及大数据分析,提升生产效率,创造数字工业的未来。中国<sup>[60]</sup>提出的智能制造主要包括: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、远程化等,提出智能制造是基于新一代信息通信技术与先进制造技术深度融合,贯穿于设计、生产、管理、服务等制造活动的各个环节,具有自感知、自学习、自决策、自执行、自适应等

功能的新型生产方式。

### 4.2 智能制造算法

以智能制造的生产调度为例;目前用来解决调度问题的智能算法主要有模拟退火法(SA)、禁忌搜索法(TS)、和遗传算法(GA)<sup>[61]</sup>。由于遗传算法具有良好的鲁棒性、隐含并行性以及全局搜索能力等,优点遗传算法(Genetic algorithm, GA)被广泛应用于作业车间调度中<sup>[62]</sup>。

智能制造调度问题可以描述为:一个任务订单要求生产 $a$ 个工件 $J = \{J_i\}, 1 \leq i \leq a$ ;每个工件需要进行 $b$ 道加工工序 $O = \{O_j\}, 1 \leq j \leq b$ ;一共需要在 $c$ 台机床上完成所有 $a$ 件工件的 $b$ 道所有加工工序。其中,每一个机床都可以进行工序加工,但加工时间不同(即机床的加工效率不一样)。此外,当机床 $d(d \leq c)$ 加工完工件 $J_i$ 的第 $O_{j-1}$ 道工序后,机器人需要立即将该工件送到加工 $O_j$ 工序的机床上进行加工,并且在不同机床之间的工件搬运时间不同。

求解调度问题的数学模型如下所示<sup>[63]</sup>:

$$T_{\min} = \min(\max(C_i)), \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^m X_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{工序在机床 } k \text{ 的加工,} \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (2)$$

$$S_{ij} = S_{ij} \sum_{k=1}^m X_{ijk}, \quad (3)$$

$$T_{ij} = T_{ij} \sum_{k=1}^m X_{ijk}, \quad (4)$$

$$S_{i(j+1)} \geq S_{ij}, \quad (5)$$

$$T^* = C_{i(j-1)w} + T_{i(j-1)wk}, \quad (6)$$

$$S_{ijk} = \begin{cases} T^*, & T^* \geq t_{ijk}, \\ t_{ijk}, & T^* \leq t_{ijk}. \end{cases} \quad (7)$$

$$C_{ijk} = S_{ijk} + T_{ijk} \quad (8)$$

其中,  $i$  为工件制造顺序( $i = 1, 2, \dots, n$ );  $j$  为工序排列序号( $j = 1, 2, \dots, h$ );  $k, w$  为加工机床加工顺序( $k = 1, 2, \dots, m; w = 1, 2, \dots, m$ );  $C_i$  为第  $i$  个工件的加工完成所需时间;  $S_{ij}$  为工序  $O_{ij}$  开始进行加工的时间;  $T_{ijk}$  为  $i$  工件的第  $j$  道工序在  $k$  机床上进行加工的总时间;  $S_{ijk}$  为工序  $O_{ij}$  在机床  $k$  上的实际生产开始加工的时间;  $C_{ijk}$  为工序  $O_{ij}$  在机床  $k$  上的最终完工时间;  $X_{ijk}$  为工序  $O_{ij}$  在机床  $k$  上加工显示为 1, 其他显示为 0;  $C_{i(j-1)w}$  为工件  $i$  上所有工序完工时间;  $T_{i(j-1)wk}$  为从上道工序加工机床运输到下道工序加工机床的运输时间;  $T^*$  为临时时间存储变量;  $t_{ijk}$  为工序  $O_{ij}$  在机床  $k$  上的预计开始时间。

### 4.3 智能制造框架

智能制造框架如图 4 所示, 主要分为 4 个层次, 分别为: 基础设施层、技术关联层、数据管理层和智能应用层。其中, 基础设施层中通过数字制造提供基本技术支持, 模具、注塑、冲压成形等传统工艺具有大批量、成本低廉等优点, 但是其材料利用率低, 生产效率低, 难成形复杂件的缺点明显, 增材制造、柔性制造等先进制造技术可以有效解决传统制造技术的问题, 但生产成本却较高, 应用范围小。结合传统技术与先进制造技术的技术特点, 可以依据不同的生产要求, 确定相应的制造技术, 为智能制造提供必要的技术支持; 技术关联层是智能制造的数据、工艺、技术的糅合层, 通过数据集成、工艺集成和技术集成有效提高生产效率, 能够为智能制造提供生产技术参考。数据集成指的是通过集成不同来源、格式和特点性质的数据, 提供全面的数据信息, 可以有效避免错误再犯; 工艺集成指的是结合各个生产部门的工艺生产要求、特点, 对生产工艺进行调整, 改善; 技术集成指的是集成各种来源的相应生产技术, 对技术进行改进。数据管理层是信息收集层, 通过大数据、云计算、物联网等方式采集数据信息, 实现数据的保存和实时更新, 为智能制造提供数据信息支撑, 对市场需求和消费具有重大价值。智能应用层是智能制造的体现层, 结合数字制造、集成制造和网络制造的特点, 从设计、设备、监控和调试等方面做到了无人化、智能化, 既保证了生产的有效运行, 又可以实时智能调控, 减低生产误差。

### 4.4 智能制造的应用与研究

Yang 等人<sup>[64]</sup>把智能制造与 3D 打印技术相结合, 提出了 3D 复制技术, 通过 3 个流程, 分别是基于产品的虚拟设计或者 3D 扫描建模、结构智能规

划的 3D 打印磨具以及智能注塑成型来实现产品的快速、高精度和大批量的生产。Priego 等人<sup>[65]</sup>以自动化制造系统为例, 通过多代理技术并行控制具有分布式代理体系结构启用特点的智能机器人, 从而简化智能制造的实施。对于制造企业涉及到的许多不同元素, 例如制造流程、车间监控和仓库管理, Shen 等人<sup>[66]</sup>基于智能制造系统的代理的框架来解决生产计划和制定计划问题的合适解决方案。Zhang 等人<sup>[67]</sup>提出一种能够进行实时信息捕捉和集成的 IoMT 框架, 该框架通过将制造资源如机器、托盘、物料等信息嵌入传感设备, 可以实现企业层、车间层和机器层间的双向无缝连接和互操作。王婷等人<sup>[68]</sup>运用系统工程理论分析智能制造和绿色制造协同互补性的基础上, 提出一种大数据驱动的绿色智能制造新模式。张祖国<sup>[69]</sup>研究从研发创新到产品运维的全制造服务生命周期迭代过程, 成功构造智能工厂系统结构模型。智能制造的合理运用, 能够有效解决实际生产问题, 提高生产效率。

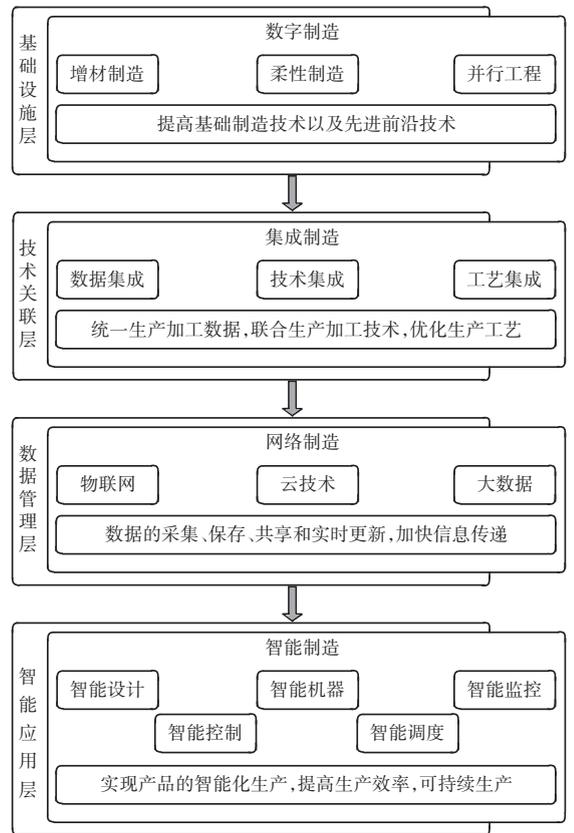


图 4 智能制造框架

Fig. 4 Intelligent manufacturing framework

智能制造的研究主题主要分为智能设计、智能机器、智能监控、智能控制和智能调度。其中, 智能设计是指计算机辅助设计(CAD)和计算机辅助制造(CAM)等设计软件能够通过 CPS 和 AR 集成

的三维(3D)打印实现与物理智能原型系统的实时交互。智能机器是指可以借助智能机器人和其他各种类型的智能对象来实现智能机器,这些对象可以实时感测并可以相互交互。智能监控是指制造系统的监控操作,可以实时获取有关各种制造因素(例如温度、电力消耗以及振动和速度)的数据和信息。智能控制可以通过开发网络物理生产控制系统来实现高分辨率的自适应生产控制、即智能控制,以便通过支持云的平台物理管理各种智能机或工具。智能调度主要包括高级模型和算法,利用传感器捕获的数据进行智能分析。

智能制造技术(IM)的应用渐渐普及,部分制造企业集团采用IM提高产品的智能化水平,智能化生产线、智能化车间、智能化工厂不断涌现,各种智能软件层出不穷,IM已经成为了朝阳产业,具有广阔的发展空间。

## 5 结束语

本文通过联立集成制造、数字制造、网络制造和智能制造之间的联系,构建智能制造结构框架,分析智能制造的优势。智能制造能够极大提高企业生产效率和服务质量,将是未来制造业发展的必然趋势。但是智能制造作为新兴制造模式存在着些许问题,生产标准未实现统一、基础技术支撑不够完善等。在后续的发展和完善后,智能制造模式将会逐步代替传统制造模式,实现产品优质、生产高效、能源低耗、环保绿色和信息安全。

## 参考文献

[1] 刘强. 智能制造理论体系架构研究[J]. 中国机械工程, 2020, 31(1):24-36.

[2] 刘强, 丁德宇. 智能制造之路—专家智慧实践路线[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.

[3] 何志通, 李子旭, 王天立. 浅谈汽车产业智能制造中的信息化系统集成[J]. 信息化技术应用, 2019(11):1.

[4] 刘飞, 杨丹, 王时龙. CIMS系列培训教材—CIM制造自动化[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.

[5] WU Yaohua. Based on CIMS application of small and medium-sized enterprise information system integration[J]. Advanced Materials Research, 2014, 3137(912).

[6] REHGJA, KRACBBER. Computerintegrated manufacturing[M]. New Jersey: Prentice Hall, 2005.

[7] 彭小圣, 邓迪元, 程时杰, 等. 面向智能电网应用的电力大数据关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3):503-511.

[8] 李少波, 陈永前. 大数据环境下制造业关键技术分析[J]. 电子技术应用, 2017, 43(2): 18-21, 25.

[9] 楼巍. 面向大数据的高维数据挖掘技术研究[D]. 上海: 上海大学, 2013.

[10] 王恩海. 系统集成支撑智能制造的未来发展[J]. 现代制造技术与装备, 2019, 276(11):194-195.

[11] PARITALAA P K, MANCHIKATLAB S. Digital manufacturing—applications past, current, and future trends [J]. Procedia Engineering, 2017, 174: 982-991.

[12] 赵虎林, 苟藏红. 数字化技术在焊接工艺中的应用[J]. 现代制造技术与设备, 2019(1):146-147.

[13] 刘飞香. 定制化装备制造企业数字化体系探索与实践[J]. 科技管理研究, 2019(7):127-130.

[14] SHAH R, WARD P T. Lean manufacturing: Context, practice bundles, and performance [J]. Journal of Operations Management, 2004, 21(2): 129-149.

[15] 李德贵, 郭鑫, 赵武, 等. 发展柔性制造系统的决策方法[J]. 制造业自动化, 2019, 41(6):54-58, 82.

[16] 赵一卿. 并行工程在分段起驳和运输中的应用[J]. 广东造船, 2019, 38(5):89-91, 88.

[17] 姜妍. 现代企业的敏捷制造系统初探[J]. 财会学习, 2019(15):166-167.

[18] 余凯, 贾磊, 陈雨强, 等. 深度学习的昨天、今天和明天[J]. 计算机研究与发展, 2013, 50(9):1799-1804.

[19] EVANS P C, ANNUZIATA M. Industrial Internet: Pushing the boundaries of minds and machines [R]. Boston, USA: General Electric, 2012.

[20] LIN S W, MILLER B, DURAND J, et al. Industrial Internet reference architecture [R]. USA: Industrial Internet Consortium (IIC), 2015.

[21] XU L D, HE W, LI S. Internet of things in industries: A survey [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(4): 2233-2243.

[22] 杨叔子, 吴波, 胡春华, 等. 网络化制造与企业集成[J]. 中国机械工程, 2000, 11(2): 54-57.

[23] International Telecommunication Union UIT. ITU Internet Reports 2005: The Internet of Things[R]. Tunis: ITU, 2005.

[24] GUSTAVO R G, MARIO M O, CARLOS D K. Early infrastructure of an Internet of Things in Spaces for Learning [C]// Eighth IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies. NW Washington, DC, USA: IEEE, 2008: 381-383.

[25] SARMA A C, GIRÃO J. Identities in the future Internet of Things [J]. Wireless Personal Communications, 2009, 49:353-363.

[26] 梁金鑫, 刘海英, 王兰超, 等. 基于51单片机的智能大棚卷帘机控制系统[J]. 齐鲁工业大学学报, 2019, 33(6):69-73.

[27] 陈小英. 基于窄带物联网的远程水文测报系统[J]. 电子技术与软件工程, 2019(24):7-8.

[28] 宁爱民, 张存吉. 基于物联网的水文监测系统关键技术研究[J]. 物联网技术, 2019, 9(12):11-14.

[29] 苏建涛. 数字采集传输技术在采油工程的应用[J]. 集成电路应用, 2020, 37(1):34-35, 38.

[30] 刘金魁. 物联网对计算机通信网络产生的影响[J]. 通信电源技术, 2019, 36(12):162, 164.

[31] BI Z, XU L D, WANG C. Internet of Things for enterprise systems of modern manufacturing [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(2):1537-1546.

[32] HUANG G Q, ZHANG Y F, CHEN X, et al. RFID-enabled real-time wireless manufacturing for adaptive assembly planning and control[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2008, 19(6): 701-713.

[33] BUJARI A, FURINI M, MANDREOLI F, et al. Standards, security and business models: key challenges for the IoT scenario

- [J]. *Mobile Networks and Applications*, 2018, 23(1): 147-154.
- [34] 郭荣佐, 冯朝胜, 秦志光. 物联网智能物流系统容错服务组合建模与分析[J]. *计算机应用*, 2019, 39(2): 589-597.
- [35] ZHONG R Y, XU Xun, KLOTZ E, et al. Intelligent manufacturing in the context of Industry 4.0: A review [J]. *Engineering*, 2017, 3(5): 616-630.
- [36] ZHANG Lin, LUO Yongliang, TAO Fei, et al. Cloud manufacturing: A new manufacturing paradigm [J]. *Enterprise Information Systems*, 2018(2): 167-187.
- [37] ZHOU Longfei, ZHANG Lin, ZHAO Chun, et al. Diverse task scheduling for individualized requirements in cloud manufacturing [J]. *Enterprise Information Systems*, 2012(3): 300-318.
- [38] LI B H, ZHANG L, WANG S L, et al. Cloud manufacturing: A new service-oriented networked manufacturing model [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2010, 16(1): 1-7.
- [39] XU X. From cloud computing to cloud manufacturing [J]. *Robot Computer-Internet Manufacturing*, 2012, 28(1): 75-86.
- [40] ULARU E, PUICAN F, APOSTU A, et al. Perspectives on big data and big data analytics [J]. *Database Systems Journal*, 2012, 4(3): 3-14.
- [41] LOSHIN D. *Big Data Analytics: From strategic planning to enterprise integration with tools, Techniques, NoSQL, and Graph* [M]. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2013.
- [42] 王东强, 鄢萍, 刘飞, 等. 基于EPC规范的车间层多源信息集成技术[J]. *中国机械工程*, 2010, 21(3): 319-377.
- [43] MANYIKA J, CHUI M, BROWN B, et al. Big data: The next frontier for innovation, competition, and productivity [EB/OL]. [2011-05]. [http://www.mckinsey.com/insights/business\\_technology/big\\_data\\_the\\_next\\_frontier\\_for\\_innovation](http://www.mckinsey.com/insights/business_technology/big_data_the_next_frontier_for_innovation).
- [44] RICH S. Big data is a "new natural resource" [EB/OL]. [2012-06-27]. <http://IBM.says>.
- [45] LEE J, LAPIRA E, BAGHERI B, et al. Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment [J]. *Manufacturing Letters* 2013, 1(1): 38-41.
- [46] 张洁, 汪俊亮, 吕佑龙, 等. 大数据驱动的智能制造[J]. *中国机械工程*, 2019, 30(2): 127-133.
- [47] FEENEY A B, FRECHETTE S P, SRINIVASAN V. A portrait of an ISO STEP tolerancing standard as an enabler of smart manufacturing systems [J]. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2015, 15(2): 021001.
- [48] HELU M, HEDBERG T J. Enabling smart manufacturing research and development using a product lifecycle test bed [J]. *Procedia Manufacturing*, 2015, 1: 86-97.
- [49] SHEN Weiming, HAO Qi, YOON H J, et al. Applications of agent-based systems in intelligent manufacturing: An updated review [J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2006, 20(4): 415-431.
- [50] HUANG G Q, ZHANG Y F, JIANG P Y. RFID-based wireless manufacturing for real-time management of job shop WIP inventories [J]. *International Journal of Materials and Product Technology*, 2008, 36(7-8): 752-764.
- [51] ZHANG Yingfeng, JIANG Pingyu, HUANG G Q. RFID-based smart Kanbans for Just-In-Time manufacturing [J]. *International Journal of Materials and Product Technology*, 2008, 33(1-2): 170-184.
- [52] WANG Meilin, ZHONG R Y, DAI Qingyun, et al. A MPN-based scheduling model for IoT-enabled hybrid flow shop manufacturing [J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2016, 30(4): 728-736.
- [53] ZHONG R Y, LAN Shulin, XU Chen, et al. Visualization of RFID-enabled shopfloor logistics big data in cloud manufacturing [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 84(1-4): 5-16.
- [54] QU T, LEI S P, WANG Z Z, et al. IoT-based real-time production logistics synchronization system under smart cloud manufacturing [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 84(1-4): 147-164.
- [55] LEE J Y, KANG H S, KIM G Y, et al. Concurrent material flow analysis by P3R-driven modelling and simulation in PLM [J]. *Computers in Industry*, 2012, 63(5): 513-527.
- [56] ZHOU Ji, LI Peigen, ZHOU Yanhong, et al. Toward new-generation intelligent manufacturing [J]. *Engineering*, 2018, 4(4): 11-20.
- [57] 张明建. 智能制造系统框架运作模型研究 [J]. *宁德师范学院学报(自然科学版)*, 2018, 30(2): 127-131.
- [58] KAGERMANN H, WSHLSTER W, HELBIG J. Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group [R]. Munich: National Academy of Science and Engineering, 2013.
- [59] EVANS P C, ANNUNZIATA M. Industrial Internet: Pushing the boundaries of minds and machines [R/OL]. (2012-12-26) [2021-01-19]. [https://www.researchgate.net/publication/271524319\\_Industrial\\_Internet\\_Pushing\\_th](https://www.researchgate.net/publication/271524319_Industrial_Internet_Pushing_th).
- [60] 制造强国战略研究项目组. 制造强国战略研究: 智能制造专题卷 [M]. 北京: 中国工信出版集团, 电子工业出版社, 2015.
- [61] GAO Liang, PENG Chuanyong, ZHOU Chi, et al. Solving flexible job-shop scheduling problem using general particle swarm optimization [C] // *Proceeding of The 36th International Conference on Computers & Industrial Engineering*. Taipei, China: ACM, 2006: 3018-3027.
- [62] 张国辉, 吴立辉. 求解柔性作业车间调度的 GATOC 混合方法 [J]. *计算机工程与应用*, 2015, 51(23): 266-270.
- [63] 徐金辉, 涂海宁, 陆远. 智能制造单元生产调度算法研究 [J]. *制造技术与机床*, 2020(3): 134-138.
- [64] YANG Weimin, JIAN Ranran Jian. Research on intelligent manufacturing of 3D printing/copying of polymer [J]. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 2019, 2: 88-90.
- [65] PRIEGO R, IRIONDO N, GANGOITI U, et al. Agent-based middleware architecture for reconfigurable manufacturing systems [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 92(5-8): 1579-1590.
- [66] SHEN Weiming, HAO Qi, WANG Shujing, et al. An agent-based service-oriented integration architecture for collaborative intelligent manufacturing [J]. *Robot Computer-Integrated Manufacturing*, 2007, 23(3): 315-325.
- [67] ZHANG Y, ZHANG G, WANG J, et al. Real-time information capturing and integration framework of the internet of manufacturing things [J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2015, 28(8): 811-822.
- [68] 王婷, 廖斌, 杨承诚. 大数据驱动的绿色智能制造模式及实现技术 [J]. *重庆大学学报*, 2020, 43(1): 64-73.
- [69] 张祖国. 基于全制造服务周期的智能工厂系统结构模型 [J]. *舰船科学技术*, 2016, 38(5): 121-128.