

从数字制造到智能制造的关键技术途径研究

谭建荣, 刘达新, 刘振宇, 程锦

(浙江大学计算机辅助设计与图形学国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 在深入研究智能制造的内涵及关键技术的基础上, 提出了我国从数字制造到智能制造的三大发展模式, 以及实现从数字制造到智能制造发展的具体技术途径。针对典型行业的生产特点, 提出了从数字制造到智能制造发展的技术路线图, 为推动我国制造业从数字制造到智能制造的发展提供技术途径的指引。

关键词: 数字制造; 智能制造; 技术途径; 机器人; 路线图

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A

Research on Key Technical Approaches for the Transition from Digital Manufacturing to Intelligent Manufacturing

Tan Jianrong, Liu Daxin, Liu Zhenyu, Cheng Jin

(State Key Lab of CAD & CG, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Based on a thorough study of the implications and key techniques of intelligent manufacturing, this paper proposes three development models and specific technical approaches to assist in China's transition from digital manufacturing to intelligent manufacturing. Starting from the production characteristics of a typical industry, it puts forward a corresponding technical roadmap for the development of intelligent manufacturing. This roadmap provides guidance for technical approaches that can promote the development of China's manufacturing industry from digital manufacturing to intelligent manufacturing.

Keywords: digital manufacturing; intelligent manufacturing; technical approach; robot; roadmap

一、前言

作为“中国制造 2025”国家战略计划的重要组成部分, 从数字制造到智能制造的转型升级, 已成为高端装备制造业发展的必然趋势, 也是促进我国从制造大国向制造强国转变的必然之路。

近年来, 我国在数字制造技术研究与应用方面取得了重要的进展与突破 [1,2], 数字制造技术得到广泛应用, 并成为解决高、精、尖复杂装备制造难题的核心技术之一; 智能制造技术研究与应用也初现端倪 [3~5], 部分制造企业积极采用智能制造技术提升产品的智能化水平, 智能化生产线、智

收稿日期: 2017-04-25; 修回日期: 2017-05-16

通讯作者: 谭建荣, 浙江大学, 教授, 中国工程院, 院士, 主要研究方向为机械设计及理论, 数字化设计与制造; E-mail: egi@zju.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“从数字制造到智能制造的技术途径”(2014-XY-03)

本刊网址: www.enginsci.cn

能化车间、智能化工厂不断涌现。但就我国从数字制造到智能制造的发展水平而言，与工业发达国家相比仍存在很大差距。

德勤有限公司与中国机械工业联合会 2015 年对上百家制造业企业智能制造与信息化情况开展调研，报告显示中国智能制造尚处于初级发展阶段，仅 23% 的企业进入智能制造广泛应用阶段；除在汽车及零部件行业智能设备应用程度超过 90% 外，其他行业尤其是机械加工制造行业的智能设备应用程度均较低（如图 1 所示）。造成上述差距的根源，主要是缺乏从数字制造到智能制造发展的具体技术途径指引，导致我国智能制造应用推广进展缓慢。

因此，迫切需要在深入研究数字制造与智能制造内涵及关键技术的基础上，提出我国从数字制造到智能制造发展的技术途径，构建典型行业从数字制造到智能制造发展的技术路线图。这对引领机械制造业学术前沿的发展、推动我国从制造大国走向制造强国、提升我国相关行业的产品竞争力，具有十分重要的意义。

二、智能制造的内涵

智能制造，是智能技术与制造技术的融合，是用智能技术解决制造的问题，是指对产品全生命周期中设计、加工、装配等环节的制造活动进行知识表达与学习、信息感知与分析、智能决策与执行，实现制造过程、制造系统与制造装备的知识推理、动态传感与自主决策。

智能制造是涉及产品全生命周期中各环节的制造活动，包括智能设计、智能加工、智能装配三大关键环节。智能制造的实现可以分为三个不同的层面，即制造对象或产品的智能化、制造过程的智能化、制造工具的智能化；而知识库 / 知识工程、动态传感与自主决策，构成了智能制造的三大核心。

智能制造是在数字制造的基础上发展的更前阶段，其实现离不开数字制造的基础，因此数字制造技术，包括产品数据管理技术、虚拟制造技术、快速成型技术、计算机辅助检测技术、数字控制技术 etc，均为智能制造的基础技术。但是，智能制造过程以知识和推理为核心，数字制造过程以数据和信息处理为核心，两者之间有着本质的区别：

(1) 数字制造系统处理的对象是数据，而智能制造系统处理的对象是知识；

(2) 数字制造系统处理方法主要停留在数据处理层面，而智能制造系统处理方法基于新一代人工智能；

(3) 数字制造系统建模的数学方法是经典数学（微积分）方法，智能制造系统建模的数学方法是非经典数学（智能数学）方法；

(4) 数字制造系统的性能在使用中是不断退化的，而智能制造系统具有自优化功能，其性能在使用中可以不断优化；

(5) 数字制造系统在环境异常或使用错误时无法正常工作，而智能制造系统则具有容错功能。

智能制造是智能技术与制造技术不断融合、发展和应用的结果。数据挖掘、机器学习、专家系统、

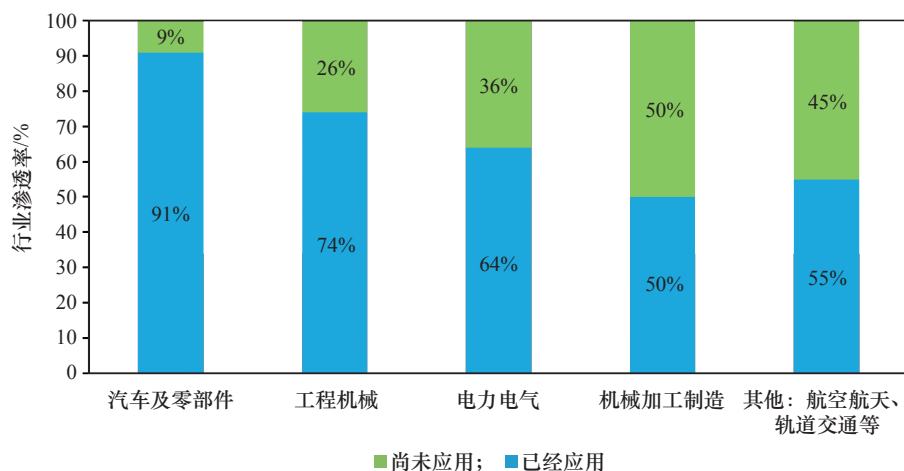


图 1 我国智能设备应用行业渗透率（2015 年）

神经网络、计算机视觉、物联网、云计算等智能方法 [6] 与产品设计、产品加工、产品装配等制造技术融合, 就形成了知识表达与建模技术、知识库构建与检索技术、异构知识传递与共享技术、实时定位技术、无线传感技术、动态导航技术、自主推理技术、自主补偿技术、自主预警技术等形式的智能制造技术, 如图 2 所示。

通过将智能制造技术应用于各个制造子系统, 实现制造过程的智能感知、智能推理、智能决策和智能控制, 可显著提高整个制造系统的自动化和柔性化程度。在智能制造技术基础上构建的智能制造系统, 其主要特征如下:

(1) 智能感知。智能制造系统中的制造装备具有对自身状态与环境的感知能力, 通过对自身工况的实时感知分析, 支撑智能分析和决策。

(2) 智能决策。智能制造系统具有基于感知搜集信息进行分析判断和决策的能力, 强大的知识库是智能决策能力的重要支撑。

(3) 智能学习。智能制造系统能基于制造运行数据或用户使用数据进行数据分析与挖掘, 通过学习不断完善知识库。

(4) 智能诊断。智能制造系统能基于对运行数据的实时监控, 自动进行故障诊断和预测, 进而实现故障的智能排除与修复。

(5) 智能优化。智能制造系统能根据感知的信息自适应地调整组织结构和运行模式, 使系统性能和效率始终处于最优状态。

三、从数字制造到智能制造的关键技术途径

(一) 从数字制造到智能制造的发展模式

针对不同行业 and 不同企业的特点及优势, 实现从数字制造到智能制造的发展模式可以分为以下三大类。

1. 在通过数字制造实现数字工厂的基础上, 实现智能工厂, 进而实现智能制造。

在通过数字制造实现数字工厂的基础上, 基于物联网和服务互联网加强产品制造过程的信息管理和服务, 提高生产过程的可控性, 并利用大数据、云计算等技术实现加工与装配过程的智能管理与决策, 实现智能工厂与智能制造。具备较好数字制造基础和较强信息集成能力的大型企业集团, 适合采用从数字工厂到智能工厂的发展途径。通过对企业管理和生产运行过程的持续动态优化, 全面提升制造的自动化和智能化水平。

2. 数字制造与智能制造并举, 实现信息化、数字化, 并且实现实时传感、知识推理、智能控制, 进而实现智能制造。

数字制造与智能制造并举, 在利用数字制造先进技术的发展和推广应用推广来实现制造信息化和数字化的同时, 发展和应用智能制造技术以实现制造装备的实时传感、知识推理、智能控制、自主决策。数控机床等基础制造装备行业, 超精密加工、难加工材料加工、巨型零件加工、高能束加工、化学抛光加工等所需特种制造装备行业, 适合采用数字制

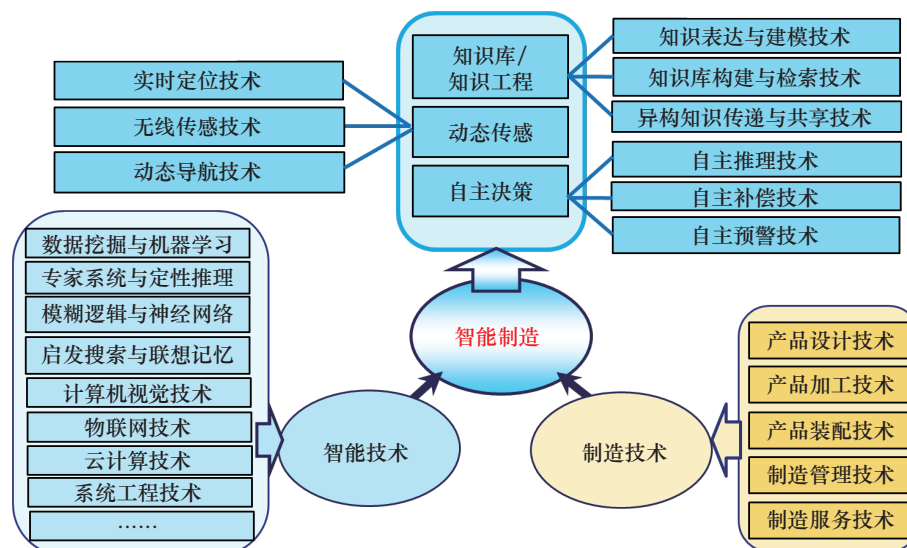


图 2 智能制造的关键技术

造与智能制造并举的发展途径。

3. 在单元技术、单元工艺、单元加工实现数字化的基础上，实现单元制造智能化，一个单元、一个单元逐步实现整机智能化制造，进而实现企业智能制造。

对于高度复杂、超大型尺寸产品的制造行业，如大型舰船、大型商用飞机等，产品制造单元数量众多，且需分布式协同制造，适合采用将制造单元逐个智能化的途径以实现整机的智能制造。

（二）从数字制造到智能制造的具体途径

基于从数字制造到智能制造的三大发展模式，具体落实到不同行业的制造企业，均可以通过以下三条具体途径实现从数字制造到智能制造的发展。

1. 智能设计到智能加工、智能装配、智能服务，进而实现智能制造。

从智能设计到智能加工、智能装配、智能管理、智能服务，实现制造过程各环节的智能化，进而实现智能制造，如图3所示。

2. 通过机器人流水线作业智能化，实现制造过程物质流、信息流、能量流和资金流的智能化。

依托机器人流水线作业智能化，利用机器人手、

自动化控制设备或自动流水线推动企业技术改造向机械化、自动化、集成化、生态化、智能化发展，实现制造过程物质流、信息流、能量流和资金流的智能化[7]。机器换人的实现可以分4个步骤进行：机器换人工、自动换机械、成套换单台、智能换数字，如图4所示。

3. 通过机器人的应用、推广，提高机器人的智能性，使机器人不仅能够替代人的体力劳动，而且能够替代人的一部分脑力劳动。

在工业机器人核心技术与关键零部件自主研发取得突破性进展的基础上，提高工业机器人的智能化水平，使机器人的操控越来越简单，不需要人示教，甚至不需要高级技术人员操作即可完成作业任务，实现高层次的智能机器人，如图5所示。

四、典型行业智能制造发展技术路线图

以基础制造装备中的数控机床行业这一典型行业为例，在相关技术研究的基础上，针对数控机床行业数字化设计制造的现状和需求，采用数字制造与智能制造并举的发展技术途径，制定符合其行业

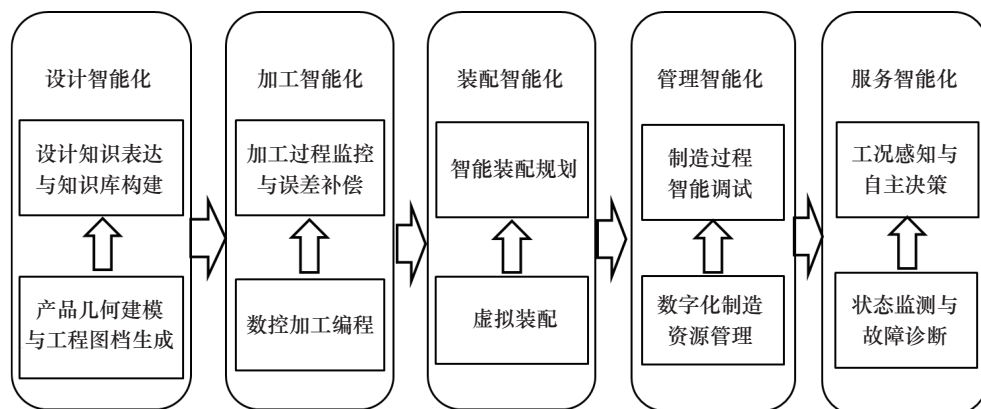


图3 制造环节的智能化

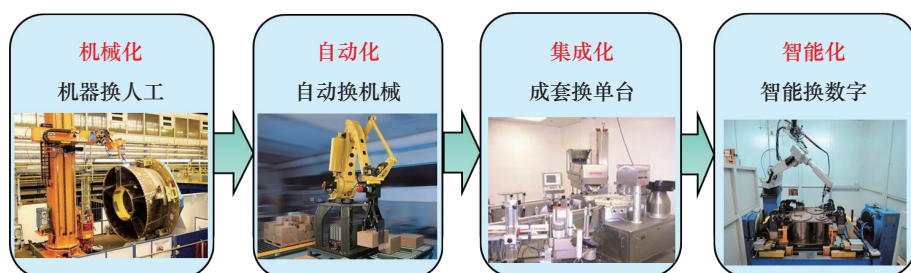


图4 机器人流水线作业智能化的四大步骤

生产特点的、从数字制造到智能制造发展的技术路线图，如图6所示。

数控机床行业要实现从数字制造到智能制造的发展，应重点突破以下四项关键技术：

(1) 大数据驱动的数控机床制造知识发现与知识库构建技术。通过语义分析技术和元搜索引擎，对数控机床工况大数据进行深层分析挖掘，形成对数控机床设计制造有用的知识，并构建数控机床设计制造知识库。

(2) 基于分布式传感的数控机床工况实时感知技术。将多种传感器嵌入数控机床的主要部件中，以各传感器的返回数据作为判定基础，以内置智能

判定算法为判定依据，对数控机床当前运行工况进行实时感知。

(3) 基于物联网的数控加工系统智能控制技术。将多台具有不同加工特性的数控机床进行信息关联，构建基于物联网的数控加工智能控制系统，实现对数控加工设备的智能识别、定位、追踪和管理，以及对数控加工系统的实时监测与智能控制。

(4) 基于云平台的数控机床制造资源自主决策技术。根据云平台用户的资源需求，将数控机床设计资源按相应规则条件进行匹配，并根据数控机床设计资源的实时状态，实现基于云平台的数控机床制造资源的自主决策。

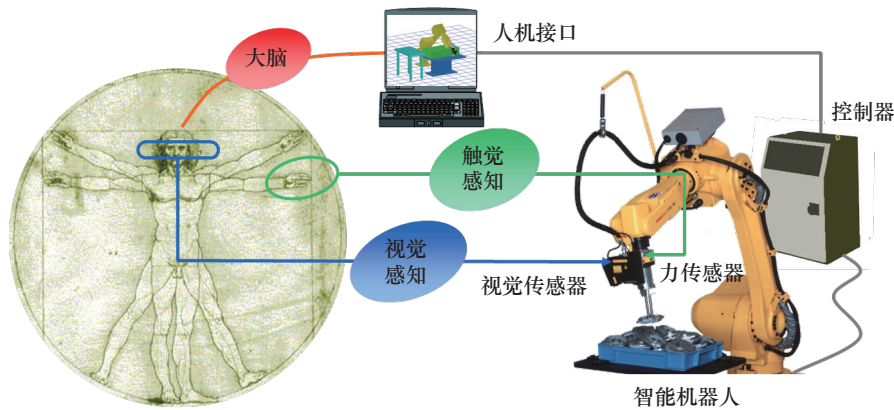


图5 智能机器人

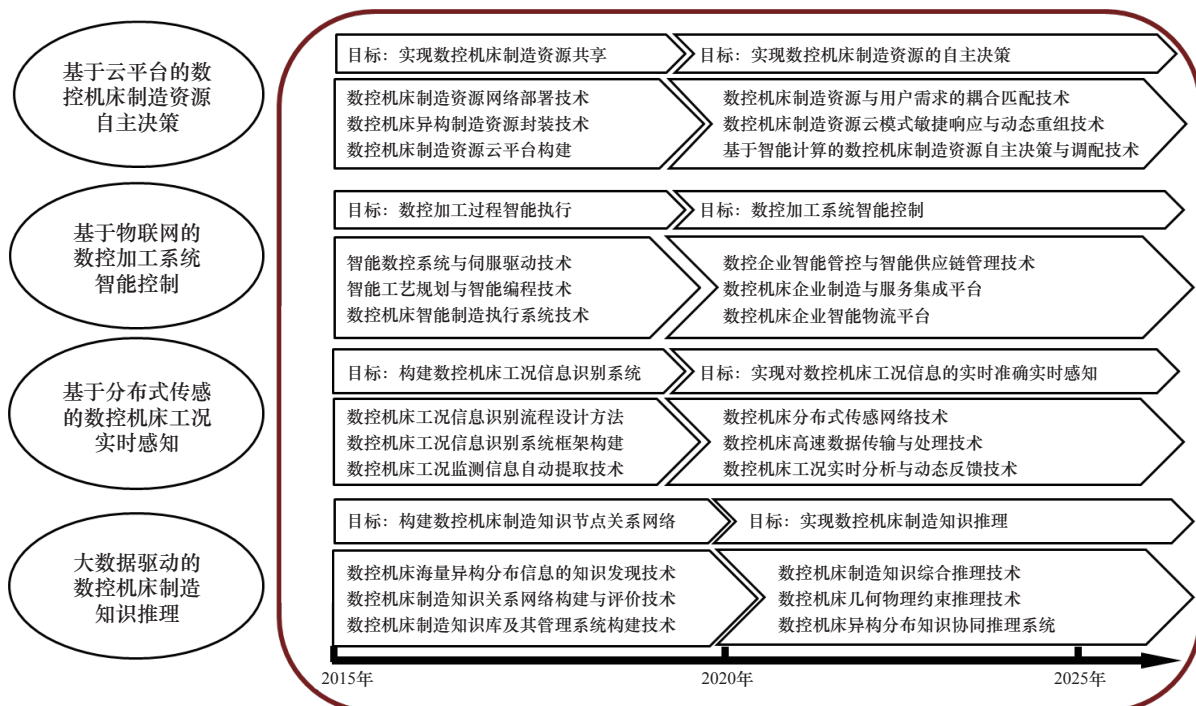


图6 数控机床行业从数字制造到智能制造发展的技术路线图

五、结语

因为缺乏从数字制造到智能制造发展的具体技术途径指引，导致我国智能制造应用推广的进展缓慢，与工业发达国家相比仍存在较大差距。通过深入研究智能制造的内涵，提出我国从数字制造到智能制造的三大发展模式，以及实现从数字制造到智能制造发展的具体技术途径；在此基础上，针对数控机床行业等典型行业的生产特点，研究并提出了相应行业从数字制造到智能制造发展的技术路线图。

参考文献

- [1] Zhou Z D, Fuh J, Xie S, et al. Digital manufacturing and cloud manufacturing [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2013 (4): 1-2.
- [2] 周祖德, 余文勇, 陈幼平. 数字制造的概念与科学问题 [J]. *中国机械工程*, 2001, 12(1): 100-104.
Zhou Z D, Yu W Y, Chen Y P. Concept and related scientific problems of digital manufacturing [J]. *China Mechanical Engineering*, 2001, 12(1): 100-104.
- [3] 路甬祥. 走向绿色和智能制造——中国制造发展之路 [J]. *中国机械工程*, 2010, 21(4): 379-386.
Lu Y X. Toward green manufacturing and intelligent manufacturing—Development road of China manufacturing [J]. *China Mechanical Engineering*, 2010, 21(4): 379-386.
- [4] 朱剑英. 智能制造的意义、技术与实现 [J]. *机械制造与自动化*, 2013, 42(3): 1-7.
Zhu J Y. The significance, technologies and implementation of intelligent manufacturing [J]. *Machine Building & Automation*, 2013, 42(3): 1-7.
- [5] 傅建中. 智能制造装备的发展现状与趋势 [J]. *机电工程*, 2014, 31(8): 959-962.
Fu J Z. Development status and trend of intelligent manufacturing equipment [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014, 31(8): 959-962.
- [6] 李伯虎, 张霖, 任磊, 等. 云制造典型特征、关键技术与应用 [J]. *计算机集成制造系统*, 2012, 18(7): 1345-1356.
Li B H, Zhang L, Ren L, et al. Typical characteristics, technologies and applications of cloud manufacturing [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2012, 18(7): 1345-1356.
- [7] 王田苗, 陶永. 我国工业机器人技术现状与产业化发展战略 [J]. *机械工程学报*, 2014, 50(9): 1-13.
Wang T M, Tao Y. Research status and industrialization development strategy of Chinese industrial robot [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(9): 1-13.