

# 平行制造与工业 5.0: 从虚拟制造到智能制造

王飞跃<sup>1,2</sup>, 高彦臣<sup>3</sup>, 商秀芹<sup>1,2,3</sup>, 张俊<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院自动化研究所, 复杂系统管理与控制国家重点实验室, 北京 100190

2. 中国科学院自动化研究所, 北京智能技术工程研究中心, 北京 100190

3. 青岛市智能产业技术研究院, 青岛 266109

**摘要** 以虚拟制造为基础, 提出一种智能制造的新范式——平行制造。它融合了社会物理信息系统(cyber-physical-social-systems, CPSS)和工业互联网的概念, 综合物理系统、信息和社会系统的复杂性, 以 ACP(artificial systems, 人工系统)、计算实验(computational experiments)、平行执行(parallel execution)方法为理论指导, 结合工业互联网技术、软件定义技术和知识自动化技术, 构建了平行演化、闭环反馈、协同优化的智能制造体系。该系统由 3 部分组成: 软件定义的过程与工厂确定其描述智能、计算实验优化建立其预测智能、虚实互动的平行执行构建其引导智能。通过描述、预测和引导智能的全方位综合利用, 实现数字化与透明化的制造企业智能化体系。

**关键词** 平行制造; 智能制造; 虚拟制造; 人工系统; 社会物理信息系统; 知识自动化

近年来, 随着《中国制造 2025》的推动和深入, 互联网、大数据、云计算、人工智能与工业化深度融合, 制造业正面临着向智能制造转变的重大机遇。新时代的新型工业化之路, 要求工业化与信息化的两化融合, 并进一步走向智能化; 信息化、工业化、城镇化与农业现代化的四化同步; 绿色可持续发展。这一切, 给新型制造业提出了新要求和发展方向。

智能制造是复杂的系统工程, 智能产品是主体, 智能生产是主线, 以智能服务为中心的产业模式变革是主题, 而信息物理系统(cyber-physical-systems, CPS)和工业互联网为只是初步的基础设施。目前, 工业 4.0 以 CPS 为基础, 以网络化为特征, 把产品、机器、资源有机

结合在一起, 通过信息通信技术建立一个高度灵活的个性化、数字化、网络化制造模式。在网络化模式下, 创造新价值的过程将逐步改变, 产业链分工将重组, 传统的行业界限将消失, 各种新的活动领域和合作形式将出现<sup>[1-10]</sup>。网络化的虚拟空间已然成为与现实化的物理空间平行的另一半。社会进入虚实交互的平行时代, 即工业 5.0。如果说工业 4.0 的特征是网络化, 虚实交互、闭环反馈、动态执行的平行化, 将是工业 5.0 的最大特征。工业 4.0, 以路由器为核心设备, 带来了网络化时代, 以致信息和物理系统深度融合, 构成了 CPS。随着网络化应用的推进, 工业 5.0 进一步加强了信息和物理系统的融合, 并使工业与人类社会充分融合, 形成了

收稿日期: 2018-04-12; 修回日期: 2018-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(61533019, 71232006, 61233001, 61773381, 61773382, 71702182, 91520301)

作者简介: 王飞跃, 研究员, 研究方向为智能制造, 电子信箱: feiyue@gmail.com; 商秀芹(通信作者), 博士, 研究方向为智能制造, 电子信箱: xiuqin.shang@ia.ac.cn

引用格式: 王飞跃, 高彦臣, 商秀芹, 等. 平行制造与工业 5.0: 从虚拟制造到智能制造[J]. 科技导报, 2018, 36(21): 10-22; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.21.001

社会物理信息系统 (cyber-physical-social-systems, CPSS)和工业物联网,该系统的核心设备为虚拟人工系统,其运行模式将引领工业迈入平行化产业时代<sup>[11-12]</sup>。

在上述发展趋势下,本文以虚拟制造为基础,描述一种智能制造的新范式——平行制造。为实现智能制造中的虚拟化、网络化、智能化,融合了社会物理信息系统 CPSS,综合物理系统、信息系统和社会系统的复杂性,通过 ACP方法与知识自动化技术,构建平行演化、闭环反馈、协同优化的智能制造体系。

### 1 平行制造的框架与流程

在 CPSS 工业环境下,一方面,企业利用工业物联网<sup>[13]</sup>,借助虚实系统的平行演化及闭环反馈,协同优化管理系统内部流程执行、生产制造以及资源调度。另一方面,基于知识自动化技术,社会情报服务系统实时将数据转化为客户需求,快速响应市场变化,同时通过任务分解、快速重组、众包等方式集合小微创新和群体智慧来创造产品,从而减少投放时间、增加市场份额。同时,网民借助物联网、互联网、移动互联网的无缝连接,表达自身个性化需求及创意,可全面参与产品创新的整个生产制造流程,实现实时化、个性化、大规模的“灵敏”移动“智造”。这种平行工业时代的制造模式称为平行制造,如图1所示。

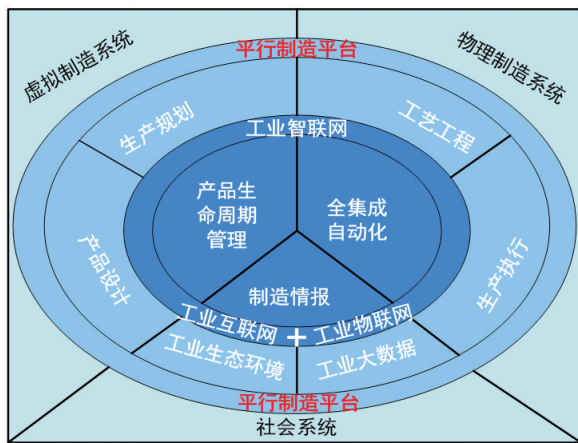


图1 平行制造内涵示意  
Fig. 1 Parallel manufacturing

#### 1.1 研究框架

基于 CPSS、ACP方法和知识自动化技术,提出平行钢铁的研究框架,如图2所示。首先,通过软件定义的钢厂确定其描述智能,构建钢厂的人工系统;基于人工

系统,实现情报分析、生产计划优化与智能预测的计算实验优化,建立其预测智能;最后,通过钢厂的人工系统与实际系统构建的平行系统,进行虚实互动的平行执行,来实现系统的引导智能。

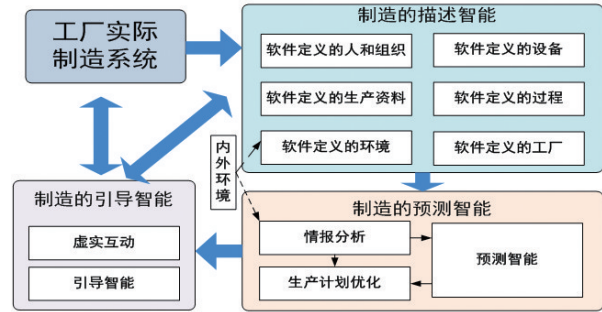


图2 平行制造的研究框架

Fig. 2 Research framework of parallel manufacturing

#### 1.2 研究流程

根据上述研究内容,提出平行钢铁的智能化体系结构参考模型,如图3所示。该模型分为6层:对象、感知层、存储层、知识层、智能层和应用层。依据 CPSS,其对象包括钢铁制造的物理系统、信息系统与社会系统。在感知层,结合现有钢铁制造信息系统 DCS-MES-ERP中的数据、RFID网络与信息互连网络构成泛在感知网络,对3个对象进行较为全面的数据和信息感知。在存储层,把泛在感知网络的数据存入生产数据库、办公数据库、物联信息数据库、社会情报数据库。在知识层,通过自然语言处理、机器学习、计算智能方法等实现知识获取、知识表达、知识匹配等知识自动化。在智能层,通过软件定义的钢厂、计算实验和平行执行,实现描述智能、预测智能和引导智能。在应用层,实现生

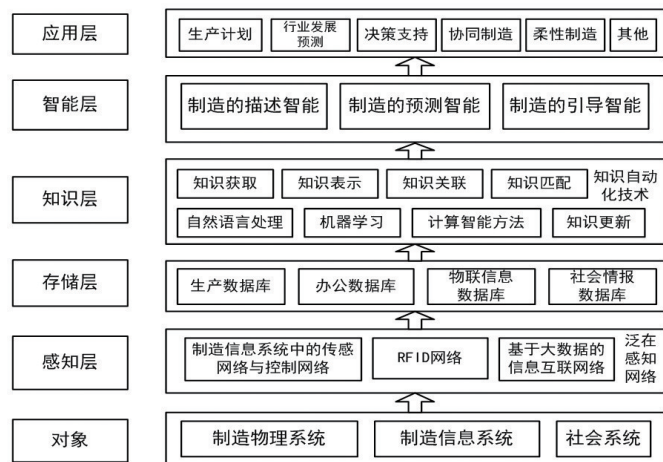


图3 平行制造结构参考模型

Fig. 3 Reference model of architecture for parallel manufacturing

产计划优化与预测、决策支持、协同制造与柔性制造等应用。

### 1.3 平行制造的技术方法

#### 1.3.1 社会物理信息系统

在互联网与大数据飞速发展的背景下,钢铁等制造业受社会性因素影响日益凸显。为了深入研究制造业中社会系统、物理系统与信息系统之间的交互作用,把工业4.0中的CPS进一步发展,并使工业与人类社会充分融合,形成了更为复杂的社会物理信息系统CPSS(图4)<sup>[11]</sup>。

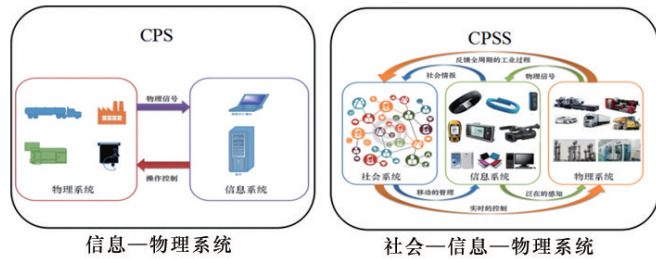


图4 CPS与CPSS  
Fig. 4 CPS and CPSS

在CPSS中的数据流与信息流主要有:物理系统的传感、监控数据;信息控制作用下,物理系统产生的相关数据;虚拟人工系统数据、社会计算数据及人工系统的

建模、推理和控制;泛在的社会大数据及社会政策等信息的建模和人类行为的数据等。由于其复杂性,所以传统建模很难实现,形成了“建模鸿沟”的客观现象<sup>[14]</sup>。传统的仿真和控制不再适应,需要采用知识自动化的理论、方法和技术。让数据说话,成为构筑平行系统中虚拟人工系统的关键。

#### 1.3.2 ACP方法

在社会物理信息系统工业环境下,钢铁制造面临更为严峻的系统复杂性挑战。王飞跃<sup>[15-16]</sup>就如何利用计算方法来综合解决复杂系统管控的科学问题,提出了人工社会、计算实验与平行系统相结合的ACP理论社会计算方法,以解决实际复杂系统中不可准确预测、难以拆分还原、无法重复实验等问题。ACP方法的核心思想包括应用基于Agent智能体等数据驱动算法构建的人工系统来描述复杂系统,解决复杂系统本质上不能解析建模的问题;以计算机为实验室通过对人工系统的计算实验来解决真实系统的预测解析;最后,通过对实际系统与人工系统构成的平行系统进行平行执行来实现系统的管控与引导智能,如图5所示。近年来,ACP方法已经成功地应用于交通、化工、经济、社会安全等多领域,为面向以人为核心的复杂社会问题的研究提供了完整的解决方案<sup>[17-38]</sup>。

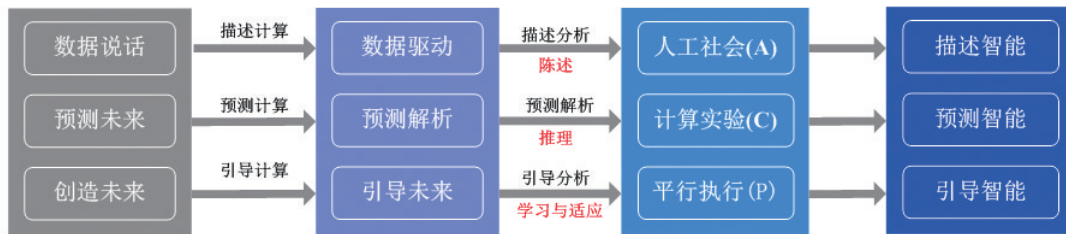


图5 ACP方法  
Fig. 5 ACP methodology

#### 1.3.3 知识自动化

在制造业智能化发展道路上,离不开从数据到知识再到智慧的知识自动化技术<sup>[20,27,29]</sup>。从自动化的角度来看,知识自动化是将知识作为被控对象,实现对其自动化地产生、获取、应用以及再创造的循环过程。知识自动化的过程,将人嵌入到系统,是人在环内的自动化系统研究和发展的必然要求。知识自动化的本质是将人的行为特征考虑到传统的知识表示、知识工程中。因此,从数据到知识、从知识到人的行为应该是贯穿知识自动化研究的核心<sup>[20,27,29]</sup>。知识的产生、获取、应用和

再创造的知识自动化过程可分为知识产生、知识获取、知识运用和知识创新4个子过程(图6)。从技术层面讲,如何获取知识是核心。

1) 知识产生子过程:知识可以通过视频解析、数据挖掘,文本挖掘或者web挖掘等技术手段初步形成。初步知识往往难以直接应用,将专家经验和数据挖掘技术结合起来以挖掘过程及挖掘后获取的知识智能化处理为手段,实现智能化决策支持,形成具有一定价值和实效性的有效知识。

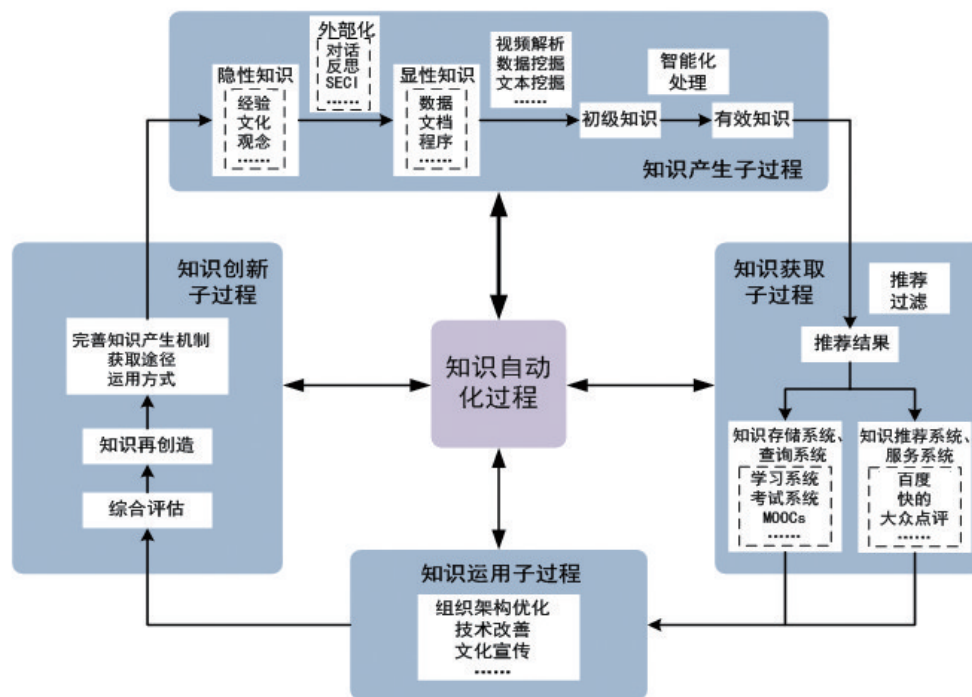


图6 知识自动化过程示意

Fig. 6 Process schematic of knowledge automation

2) 知识获取子过程:主要通过主动的知识搜索或被动的知识推送来实现。知识存储和查询系统可以方便地为人们提供所需要的知识。知识推荐系统和服务系统,通常是电子商务的核心技术,它利用电子商务网站向客户提供商品信息和建议,帮助用户决定购买所需要的产品或服务。基于知识的推荐方法因所使用的功能知识不同而有明显的区别,如基于语义扩展的知识推荐、基于用户情境感知的知识推荐、或基于内部网络结构的知识推荐等。

3) 知识运用子过程:是指企业运用知识子系统形成企业的知识地图,通过调整组织结构、生产技术、管理培训方式等实现对组织架构的优化,技术的改善,企业文化的宣传,达到提高企业竞争力的目的。

4) 知识创新子过程:知识的运用必会带来些波动,通过人对知识运用效果的评价以及再创造,完善知识产生机制,获取途径以及知识运用的方式,实现人对知识全生命周期的控制。

### 1.3.4 工业智联网

当代工业正在经历从传统工业到智能工业的转变,改善工业结构,促进工业知识化、智能化、软件化发展成为未来工业的必然趋势。

2017年11月27日,国务院印发《关于深化“互联

网+先进制造业”发展工业互联网的指导意见》指出,以全面支撑制造强国和网络强国建设为目标,围绕推动互联网和实体经济深度融合,聚焦发展智能、绿色的先进制造业,构建网络、平台、安全3大功能体系,增强工业互联网产业供给能力,持续提升中国工业互联网发展水平,深入推进“互联网+”,形成实体经济与网络相互促进、同步提升的良好格局,有力推动现代化经济体系建设。

为了应对新时代的工业需求,有必要改变工业系统的运营模式,不断提高工业系统的效率和质量,而解决方案就是工业智联网技术。

智联网是建立在互联网(数据信息互联)和物联网(感知控制互联)基础上的,以知识自动化系统为核心,以知识计算为核心技术,以获取、表达、交换、关联知识为关键任务,以达成智能体群体之间的“协同知识自动化”和“协同认知智能”为目标的系统。基于多网合一的智联网,可构建智能工业系统新形态,即工业智联网,其基本框架如图7所示。

工业智联网以互联网、物联网、智联网技术为基础科技,整合工业的各项资源,协调管控工业的各个部门,并实现工业系统的反射智能、反应智能和认知智能。工业智联网需要借助前沿智能系统工程技术来实

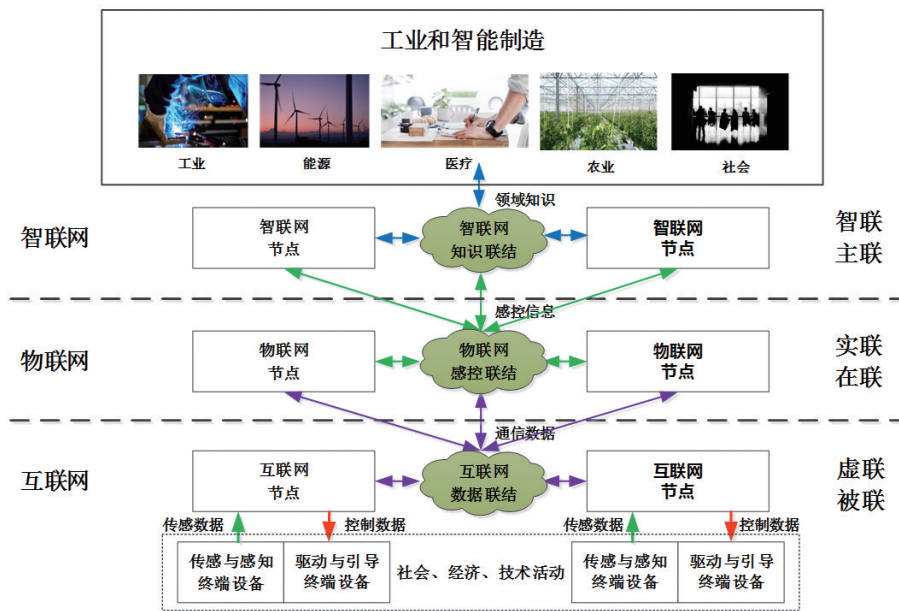


图7 工业物联网的基本框架

Fig. 7 Industrial intelligence networking framework

现:其中包括运用基于 ACP 的虚实平行系统进行智慧管控、基于知识自动化的社会通信云计算,以及基于区块链的 DAO 实现。

更进一步,工业物联网最大的特征是实现的“数信协同”、“感控协同”和“知智协同”。互联网传输的是数据与信息,实现的是数据和信息的协同(数信协同),物联网传输的是传感和管控的信号,实现的是感知和控制的协同(感控协同);智能网的智能互联,交换的是知识本身,经过充分的交互,在知识的交换中完成复杂知识系统的建立、配置和优化,实现知识和智能的协同(知智协同)。通过着3个层次的协同,海量的智能实体、感控实体、数信实体,组成由知识联结的复杂系统,依据一定的运行规则和机制,如同人类社会般的,形成社会化的自组织、自运行、自优化、自适应、自协作的网络组织。

期待基于工业物联网能够创造出新的人工智能系统科技范式,其系统智能水平能够达跃升到全新的高度,同时更期待在这样一个由知智实体、感控实体、数信实体组成的复杂系统中,全新的智能现象能够从复杂性中涌现并带来革命性的突破。

### 1.3.5 软件定义技术

近年兴起的软件定义的网络(software-defined networks, SDN)技术,代表硬件“软化”的另一方向,但实质与虚拟的实化目标一致。SDN 打破常规网络构架和流

程,将网络的控制面(control plane)与数据面(data plane)分离,并通过开放的软件定义 API 实现网络功能的灵活重构,极大地改善了网络的扩展能力和灵活性,成为信息通信领域的热议对象,对下一代网络的发展有着重要的影响。

2009年,此项技术经《麻省理工科技评论》(MIT Technology Review)名以 SDN 迅速风靡世界,流行于网络、信息甚至许多其他与科技无关的领域。

实际上,SDN 把网络的控制与转发功能分离,同默顿系统中把“行为模型”与“目标模型”分离异曲同工。而且,可以在知识自动化中拓展 SDN 的思想,结合知识表示和知识工程,构造各类针对特定领域和问题的软件定义的流程(software-defined processes, SDP)和软件定义的系统(software-defined systems, SDS),形成 SDP 体系(systems of SDP, SoSDP)和 SDS 体系(systems of SDS, SoSDS),使知识自动化的实施从“无形”到“有形”,从一般到具体。通过 SDP 和 SDS,不但使常识、经验、猜测、假定、希望等形式化,并使其组织、过程、功能等软件化,变为可操作、可计算、可试验的流程和系统,从而进一步深入复杂知识自动化系统的构想、设计、实施、运营、管理与控制。

同时,软件定义的流程和系统,特别是 SoSDP 和 SoSDS 将知识自动化与系统工程更加密切地联系起来。系统工程的实质就是寻求有效的手段,减少完成特

定目标的不确定性,化多样为归一,使复杂变简单,是一种应对UDC的有效方式。利用系统工程的思想,可以帮助我们构造知识自动化系统整个生命周期的各类“人工流程”,使相关的任务执行过程可描述、可度量、可验证,进而使实现各项目标的途径和方式明确、经济、可靠,为构造知识自动化的SDP和SDS打下坚实的基础。这里强调流程的“人工”特性,因为这些流程一般并不服从自然法则而具有“必然性”,易被环境改变,从而具有“权变性”。

因此,流程和系统的软件化将是知识自动化的核心技术之一。基于业已成熟并不断推陈出新的智能技术,加之从C4ISRAF转化到DoDAF和TOGAF后的系统工程架构体系,特别是DoDAF所提供的各类模型(models)、视图(views)以及衍生的观点(view points)等方法与工具,由此可以方便地将人、社会、知识等因素纳入系统流程及相关的分析与决策之中,灵活地处理各类复杂的CPSS问题,为知识自动化的设计与实施奠定坚实的系统工程基础。

总之,有了SDP和SDS,知识自动化就能形式化、具体化;以SDP和SDS为纲,知识自动化的设想、设计、实施与实践就可“纲举目张”。

## 2 从制造情报到制造智能

### 2.1 制造情报

制造情报是通过制造业大数据构建制造业情报系统,其核心是制造业大数据,主要包括制造企业内部工业大数据和制造企业外部的上下游及行业生态相关工业互联网大数据。在制造情报系统中对企业外部生态环境大数据实施情报传感、情报处理与情报解析,为计算实验中的优化和预测提供数据和情报支持,如图8所示。智能制造需要对企业外部生态环境大数据进行情报和分析。需要迅速收集原材料的价格信息、产品的市场销售情况、市场存量、未来趋势、国家政策、上下游行业信息等基本信息,这些信息往往以文本、图像、视频等格式分布于不同的媒体中,如何实现社会媒体的在线动态感知;如何让这些异构的多源数据进行统一、完整的数据管理与数据共享,实现数据集中智能管理;如何进行动态感知、结构化、存储、管理并对其进行计算建模和知识获取,高保真地利用这些数据和知识,是非常重要的研究内容。

为了建立制造情报系统,需研究网页信息内容高效采集的聚焦爬虫技术,确保采集信息一致性的增量

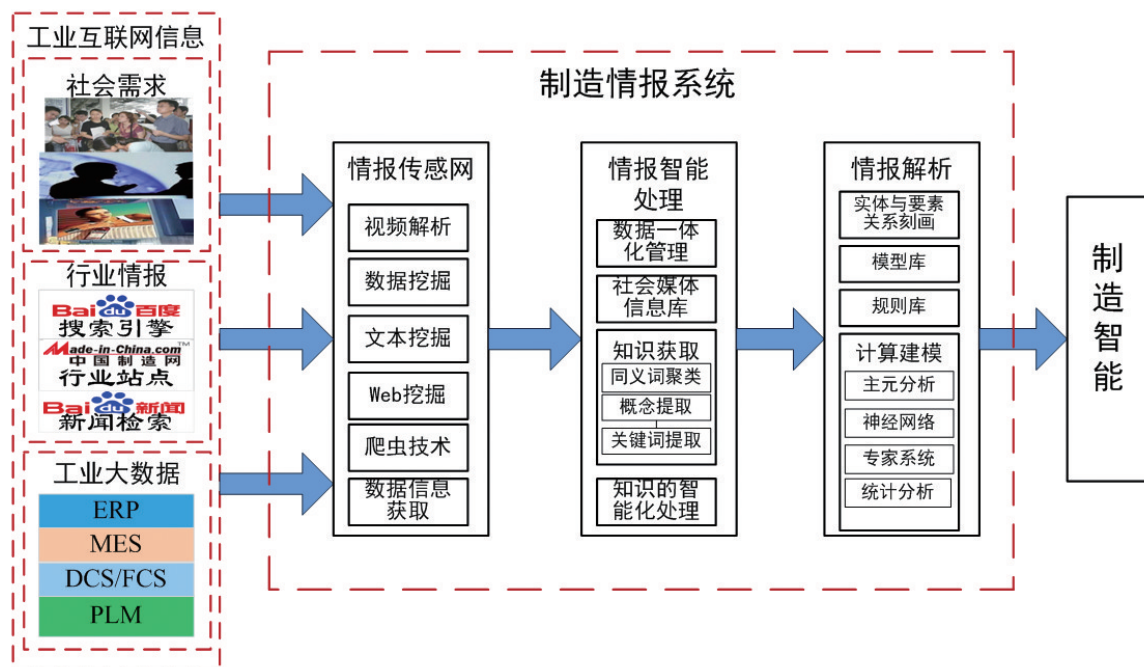


图8 制造情报系统

Fig. 8 Manufacturing intelligence system

式融合方法;研究相关数据的校正、清洗和标定技术,实现数据的可用性;构建海量数据的一体化数据管理平台,实现数据的集中智能管理;构建面向制造业的社交媒体信息库,包括实体库、事件库、情感库、观点库的分类体系构建;研究数据信息的同义词聚类、概念术语提取、实体和要素关系刻画等知识获取的技术。

## 2.2 制造智能

平行制造把制造企业视为一个开放的系统,通过制造情报实时感知工业互联网中制造企业外部相关信息,对制造企业管控进行大数据分析支持。因此,平行制造中的制造智能是结合制造情报系统,采用 ACP 的方法与知识自动化技术,实现制造过程中的描述智能、预测智能和引导智能。

## 3 制造的描述智能

知识自动化的核心技术之一是软件定义的系统等软件化技术<sup>[18]</sup>。SDN 技术,代表硬件“软化”的一种方向,但实质与虚拟的实化目标一致。本节将人、社会、知识等因素纳入系统流程及相关的分析与决策之中构建软件定义的过程和软件定义的工厂,灵活地处理钢铁制造管控中的复杂 CPSS 问题,实现智能制造的描述智能,构建人工系统,实现制造业的数字化、透明化。

### 3.1 软件定义的过程

根据产品全生命周期管理(PLM),构建平行制造中软件定义的过程。对产品战略、产品市场、产品需求、产品规划、产品开发、产品上市、产品市场生命周期管理过程实行数字化和软件化,以实现进度计划管理、任务跟踪和资源调配。主要过程分为产品设计过程、产品生产过程、产品销售过程、用户使用过程、协同工作过程,实现产品生命周期透明化管理。平行制造中软件定义的过程可分为软件定义的产品设计过程、软件定义的产品生产过程、软件定义的产品销售过程、软件定义的用户使用过程、软件定义的协同工作过程。

### 3.2 软件定义的工厂

根据人、机、料、法、环各要素,基于多 Agent 智能体建模方法,构建软件定义的工厂如下。

1) 人员行为建模:包括个体行为建模与组织行为建模。在个体层次,建模依据在系统中涉及到的人的数目,所考虑人的同质性或异质性以及对人的典型描述方法。组织层次建模的任务是构建个体之间的关系

模型,利用的工具主要是社会网络和复杂网络。基于 Agent 智能体方法,构建软件定义的员工、班组、车间,以及由生产计划、质检、营销、采购、经营等部门组成的多级管理组织,实现钢厂各员工、班组、车间与多级管理组织的属性与行为特征的描述。

2) 制造设备建模。采用基于 Agent 智能体的建模方法,根据研究问题,建立各设备在使用过程中主要输入变量和输出变量之间的映射关系,在成本、安全等约束下为各设备管理提供量化依据。

3) 软件定义的生产资料(料):对矿石、合金、辅料、备件等生产材料采用基于 Agent 智能体方法建模。

4) 软件定义的方法(法):基于现有仿真软件实现钢厂典型工艺过程与控制方法、管理方法等进行建模。化工工艺建模方法,综合利用了热力学原理、化学反应、单元操作原理等基础学科,用数学解析方法建立各类方程式。

5) 软件定义的环境(环):对所处生态环境因素构建模型,包括上下游产业、同行钢铁企业等。

6) 软件定义的钢厂:集合软件定义的人、机、料、法、环,构建软件定义的钢厂,实现钢厂的人工系统,实现钢厂透明化,如图 9 所示。

此外,整个炼钢过程的原材料、过程材料和成品材料也可用平行材料的方式描述<sup>[19]</sup>。

### 3.3 软件定义的工厂典型案例

基于软件定义技术,构建大规模定制服装厂数字化工厂。图 10 为大规模定制服装厂数字化工厂系统架构,该数字化工厂时间的工作流程如图 11 所示。

## 4 制造的预测智能

结合企业外部互联网大数据和情报分析系统与企业内部工业大数据,可以实现制造生产与管理过程的智能预测。以钢铁生产计划进行优化为例,其覆盖范围从分厂扩展到全流程,兼顾工业复杂性与社会复杂性。生产计划综合考虑交货期、质量、生产效率、物流周转、能耗、综合成本等多目标优化,实现上下游、生产-能源-物流等动态协同调度,如图 12 所示。

现在钢厂生产计划主要依据实际订单和粗略的市场预测定制合同计划,并在合同计划中分解出月生产计划、旬生产计划和日生产计划。市场波动与订单的变动经常导致生产计划的变动,因此生产计划的制定

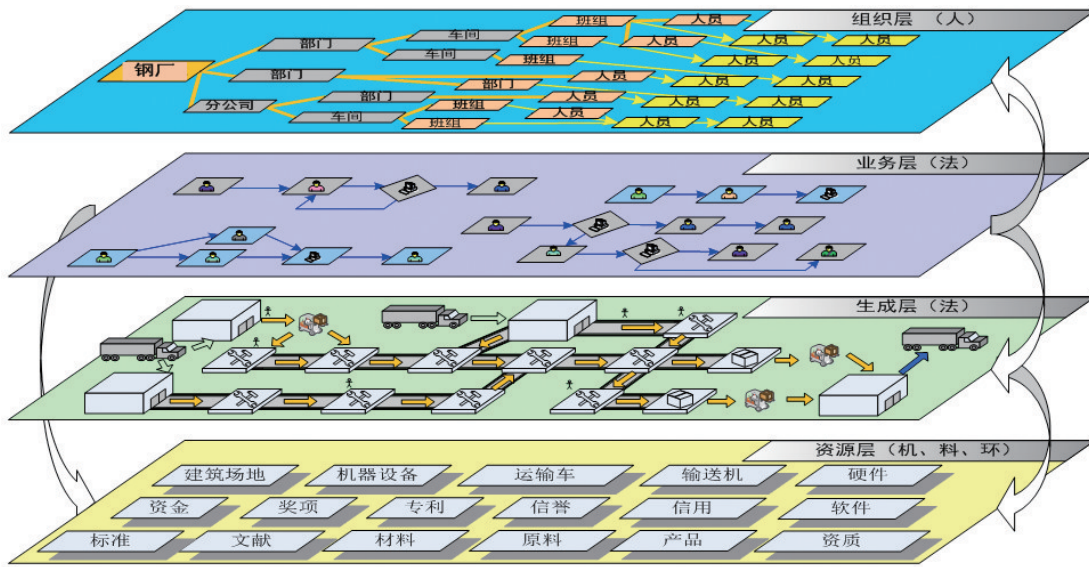


图9 软件定义的钢厂

Fig. 9 Software defined steelworks

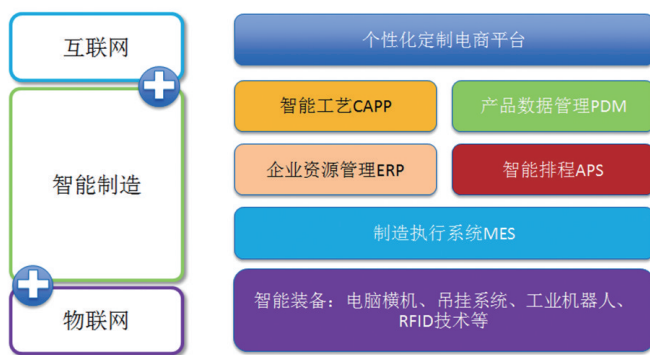


图10 大规模定制服装厂数字化工厂系统架构  
Fig. 10 System architecture of a mass customized digital garment factory

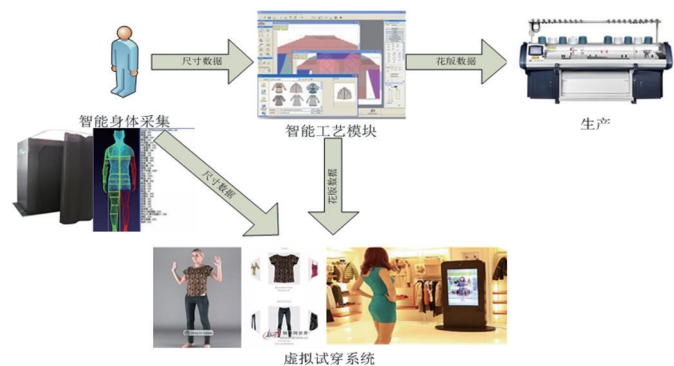


图11 大规模定制服装厂数字化工厂工作流程  
Fig. 11 Workflow of digital customized garment factory

需要具有动态性与可调控性。在平行钢铁中,钢厂的生产计划牵涉到工程性的要素(库存、设备、工序、物料等)和社会性的要素(员工、社会属性),属于社会物理信息系统。因此,在钢厂工人系统平台下结合钢厂情报系统的外界生产环境大数据分析,对钢厂内部工业大数据分析,实现钢厂的生产计划与排产优化计算实验。基于上下游企业接口数据,实现与其生产计划的协同管理;通过与生产工艺控制模型的接口数据,实现生产调度与工艺生产的协同优化。

在人工系统基础中,采用大数据与知识混杂的挖掘分析等技术,建立基于生产经验的高精度生产模型和知识库。基于生产模型库和知识库,结合钢厂情报

系统,利用知识自动化技术实现钢厂的预测智能。以生产计划预测为例,生产计划的预测分为生产计划短期预测与生产计划中期预测。在短期预测中,对钢厂的生产工作流与短期生产计划进行模拟预测;在中期预测中,对钢厂的中期生产计划、企业经济决策及行业的发展做出模拟与预测。

### 5 制造的引导智能

在软件定义的工厂和计算实验基础上,对复杂制造控制与管理过程实现智能引导。同样,以钢厂生产管理为例,钢厂物理系统(实际系统)与钢厂人工系统

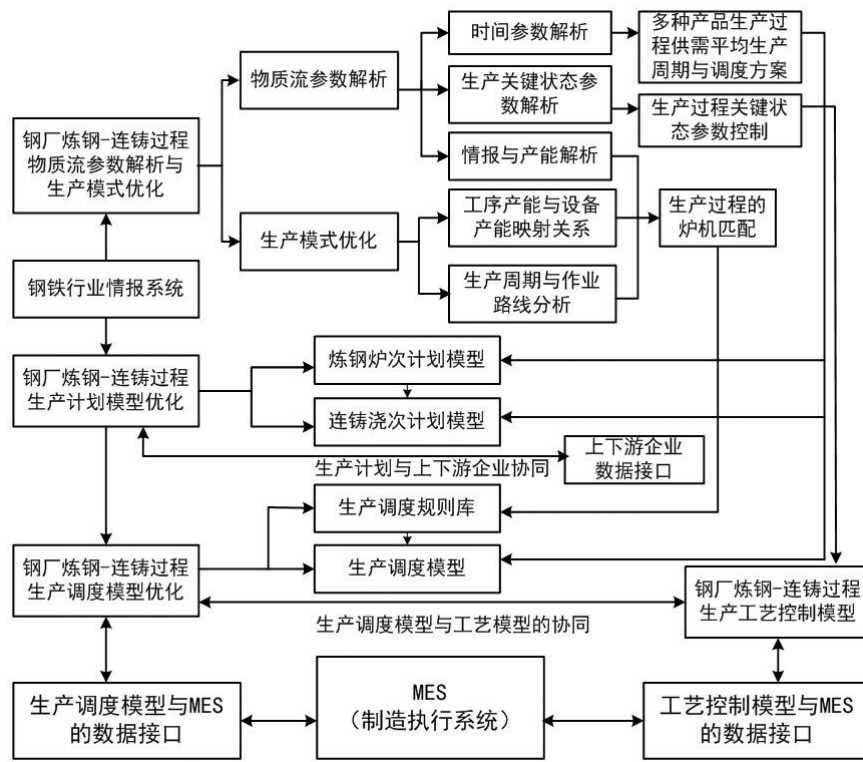


图 12 钢厂生产计划优化的计算实验

Fig. 12 Computational experiment for production plan of steelworks

构成的平行系统进行虚实互动的平行执行,来实现平行系统的引导智能,如图 13 所示。具体过程如下:在计算实验中,多种生产计划方案输入人工系统进行优化,得到的优化结果输入物理系统,物理系统在社会系统环境干扰下得到输出;人工系统通过输入输出进行自

学习和模型校正;同时计算实验中通过情报系统感知外部生态大数据,再结合新的人工系统,进行预测智能,预测结果作为物理系统的动态优化目标,最终实现物理系统与人工系统的引导智能。

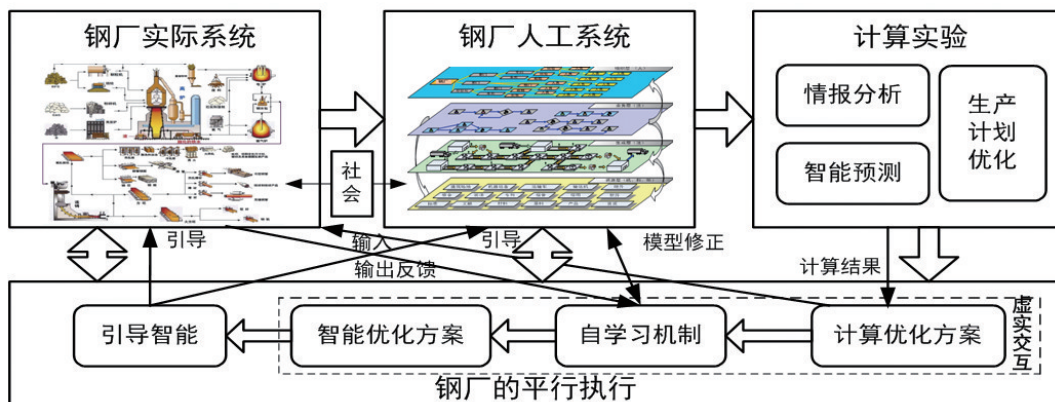


图 13 钢厂的平行执行

Fig. 13 Parallel execution of steelworks

## 6 迈向社会制造

在平行制造中,针对大规模定制化生产需求,提出了有一类产消者驱动(procustomer-driven)的平行制造范式,称之为社会制造,其流程如图14所示。在社会制造中,产消者顾名思义为产品的消费者同时也是生产参与者,可以参与到制造过程中。社会制造是在产消

者驱动下以众包的形式完成设计、制造和销售等过程,并以互联网物联网、大数据、3D扫描与3D打印等技术支撑,以区块链技术构生产过程供需各方信任机制,形成资源公平共享的分布式、虚拟化、网络化、智能化的大规模个性化定制生产范式。

## 7 展望

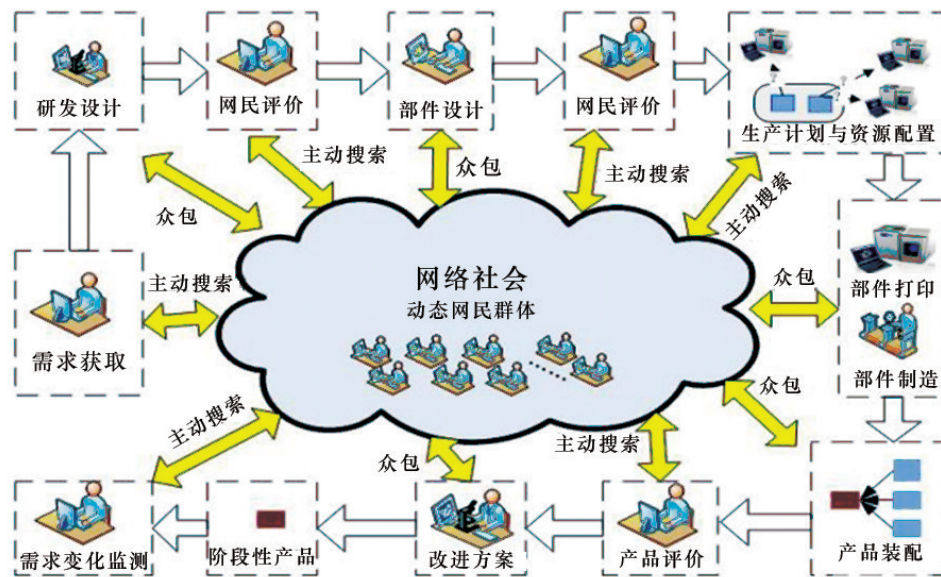


图14 社会制造流程

Fig. 14 Social manufacturing process

工业5.0时代的智能制造是针对虚实互动的CPSS工业环境,以互联网、物联网、移动互联网等“互联网+”为平台,借助大数据、云计算、社会计算、机器学习等技术手段,构建实时感知社会需求的企业情报系统,构建与工业流程、车间、工厂、企业等平行的数字化平台及人工系统,促使制造系统由被动管理向主动响应、自适应协调、平行引导的智能制造模式的转变。

一定程度上,新一轮工业革命中的智能制造就是综合利用搜索技术、先进的生产制造技术、社会服务应用(社交媒体)及泛在的移动终端设备,通过众包等方式让社会民众充分参与产品的全生命周期生产制造过程,实现实时化、个性化、大规模创新和“敏捷移动智造”,或称社会智造。不久的将来,一个企业的竞争力和实力,很大程度上可能并不取决于其外在规模与资产的大小,而取决于其掌控CMOs的手段和能力,取决于其对虚实互动的认识、实践和效率,取决于与其伴生的人工企业之规模和深度。工业化和信息化的深度融合必将是平行工厂、平行企业、平行制造的应用和普及。

## 参考文献(References)

- [1] 殷瑞钰. 关于智能化钢厂的讨论——从物理系统一侧出发讨论钢厂智能化[J]. 钢铁, 2017, 52(6): 1-12.  
Yin Ruiyu. A discussion on "smart" steel palant: View from physical system side [J]. Iron and Steel, 2017, 52(6): 1-12.
- [2] 毕学工, 李九林, 李鹏, 等. 德国工业4.0、中国制造2025与智能冶金浅议[J]. 钢铁, 2016, 51(3): 1-8, 26.  
Bi Xuegong, Li Jiulin, Li Peng, et al. Brief discussions on German industry 4.0, Chinese manufacturing 2025 and intelligent metallurgy [J]. Iron and Steel, 2016, 51(3): 1-8.
- [3] 张建良, 周芸, 徐润生, 等. 智慧钢铁工厂的互联网+CPSS模式[J]. 钢铁, 2016, 51(4): 1-7.  
Zhang Jianliang, Zhou Yun, Xu Runsheng, et al. Model of internet +CPSS for smart steel factory[J]. Iron and Steel, 2016, 51(4): 1-7.
- [4] 于勇. 唐钢智能制造的信息化架构设计[J]. 钢铁, 2017, 52(1): 1-6.  
Yu Yong. Information architecture design of Tangsteel industry

- for intelligent manufacturing[J]. *Iron and Steel*, 2017, 52(1): 1-6.
- [5] 李新创, 施灿涛, 赵峰. “工业 4.0”与中国钢铁工业[J]. *钢铁*, 2015, 50(11): 1-7.  
Li Xinchuang, Shi Cantao, Zhao Feng. Industry 4.0 meets with China iron and steel industry[J]. *Iron and Steel*, 2015, 50(11): 1-7.
- [6] 周佳军, 姚锡凡, 刘敏, 等. 几种新兴智能制造模式研究评述[J]. *计算机集成制造系统*, 2017, 23(3): 624-639.  
Zhou Jiajun, Yao Xifan, Liu Min, et al. State-of-art review on new emerging intelligent manufacturing paradigms[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2017, 23(3): 624-639.
- [7] 张益, 冯毅萍, 荣冈. 智慧工厂的参考模型关键技术[J]. *计算机集成制造系统*, 2016, 22(1): 1-12.  
Zhang Yi, Feng Yiping, Rong Gang. Reference model and key technologies of smart factory[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2016, 22(1): 1-12.
- [8] 张祖国. 面向社会化协同的智能制造体系结构[J]. *计算机集成制造系统*, 2016, 22(7): 1779-1788.  
Zhang Zuguo. System architecture for SNS-based collaborative intelligent manufacturing[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2016, 22(7): 1779-1788.
- [9] 肖莹莹, 李伯虎, 侯宝存, 等. 智慧制造云中供应链管理的计划调度技术综述[J]. *计算机集成制造系统*, 2016, 22(7): 1619-1635.  
Xiao Yingying, Li Bohu, Hou Baocun, et al. Planning and scheduling technology review supply chain management in smart manufacturing cloud[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2016, 22(7): 1619-1635.
- [10] 吕佑龙, 张洁. 基于大数据的智慧工厂技术框架[J]. *计算机集成制造系统*, 2016, 22(11): 2691-2697.  
Lü Youlong, Zhang Jie. Big-data-based technical framework of smart factory[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2016, 22(11): 2691-2697.
- [11] 邓建玲, 王飞跃, 陈耀斌, 等. 从工业 4.0 到能源 5.0: 智能能源系统的概念、内涵及体系框架[J]. *自动化学报*, 2015, 41(12): 2003-2016.  
Deng Jianling, Wang Feiyue, Chen Yaobin, et al. From industries 4.0 to energy 5.0: Concept and framework of intelligent energy systems[J]. *ACTA Automatica Sinica*, 2015, 41(12): 2003-2016.
- [12] 王飞跃, 孙奇, 江国进, 等. 核能 5.0: 智能时代的核电工业新形态与体系架构[J]. *自动化学报*, 2018, 44(5): 922-934.  
Wang Feiyue, Sun Qi, Jiang Guojin, et al. Nuclear energy 5.0: New forms and architectures of nuclear power industry in the intelligent age[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2018, 44(5): 922-934.
- [13] 王飞跃, 张俊. 物联网: 概念、问题和平台[J]. *自动化学报*, 2017, 43(12): 2061-2070.  
Wang Feiyue, Zhang Jun. Smart network: Concepts, problems and platforms[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(12): 2061-2070.
- [14] 桂卫华, 刘晓颖. 基于人工智能方法的复杂过程故障诊断技术[J]. *控制工程*, 2002, 9(4): 1-6.  
Gui Weihua, Liu Xiaoying. Fault diagnosis technologies based on artificial intelligence for complex process[J]. *Control Engineering of China*, 2002, 9(4): 1-6.
- [15] 王飞跃. 平行系统方法与复杂系统的管理和控制[J]. *控制与决策*, 2004, 19(5): 485-489.  
Wang Feiyue. Parallel system methods for management and control of complex systems[J]. *Control and Decision*, 2004, 19(5): 485-489.
- [16] 王飞跃. 计算实验方法与复杂系统行为分析和决策评估[J]. *系统仿真学报*, 2004, 16(5): 893-897.  
Wang Feiyue. Computational experiments for behavior analysis and decision evaluation of complex systems [J]. *Journal of System Simulation*, 2004, 16(5): 893-897.
- [17] 王飞跃. 人工社会、计算实验、平行系统——关于复杂社会经济系统计算研究的讨论[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2004, 1(4): 25-35.  
Wang Feiyue. Artificial societies, computational experiments and parallel systems: A discussion on computational theory of complex social-economic systems[J]. *Complex System and Complexity Science*, 2004, 1(4): 25-33.
- [18] 王飞跃. 平行控制: 数据驱动的计算控制方法[J]. *自动化学报*, 2013, 39(4): 293-302.  
Wang Feiyue. Parallel control: A method for data-driven and computational control [J]. *ACTA Automatica Sinica*, 2013, 39(4): 293-302.
- [19] 王飞跃. 基于社会计算和平行系统的动态网民群体研究[J]. *上海理工大学学报*, 2011, 33(1): 8-17.  
Wang Feiyue. Study on cyber-enabled social movement organizations based on social computing and parallel systems[J]. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 2011, 33(1): 8-17.
- [20] 王飞跃. 软件定义的系统与知识自动化: 从牛顿到默顿的平行升华[J]. *自动化学报*, 2015, 41(1): 293-302.  
Wang Feiyue. Software-defined systems and knowledge automation: a parallel paradigm shift from Newton to Merton. *ACTA Automatica Sinica*, 2015, 41(1): 293-302.
- [21] 王飞跃. 平行材料: 从虚拟材料到软件定义的智能材料[R]. *QAI 技术报告*, 2015.  
Wang Feiyue. Parallel material: From virtual material to software-defined intelligent material[R]. *QAI Technology Report*, 2015.
- [22] 李力, 林懿伦, 曹东璞, 等. 平行学习——机器学习的一个新

- 型理论框架[J]. 自动化学报, 2017, 43(1): 1-8.
- Li Li, Lin Yilun, Cao Dongpu, et al. Parallel learning: A new framework for machine learning[J]. ACTA Automatica Sinica, 2017, 43(1): 1-8.
- [23] 段伟, 曹志冬, 邱晓刚, 等. 平行应急管理系统中人工社会的语义建模[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(5): 1010-1017.
- Duan Wei, Cao Zhidong, Qiu Xiaogang, et al. Semantic modeling for artificial society in parallel emergency management system[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2012, 32(5): 1010-1017.
- [24] 白天翔, 王帅, 沈震, 等. 平行机器人与平行无人系统: 框架、结构、过程、平台及其应用[J]. 自动化学报, 2017, 43(2): 161-175.
- Bai Tianxiang, Wang Shuai, Shen Zhen, et al. Parallel robotics and parallel unmanned systems: Framework, structure, process, platform and applications[J]. ACTA Automatica Sinica, 2017, 43(2): 161-175.
- [25] 王坤峰, 苟超, 王飞跃. 平行视觉: 基于 ACP 的智能视觉计算方法[J]. 自动化学报, 2016, 42(10): 1490-1500.
- Wang Kunfeng, Gou Chao, Wang Feiyue. Parallel vision: An ACP-based approach to intelligent vision computing [J]. ACTA Automatica Sinica, 2016, 42(10): 1490-1500.
- [26] 王飞跃. 社会信号处理与分析的基本框架: 从社会传感网络到计算辩证解析方法[J]. 中国科学: 信息科学, 2013, 43(12): 1598-1611.
- Wang Feiyue. A framework for social signal processing and analysis: from social sensing networks to computational dialectical analytics[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2013, 43(12): 1598-1611.
- [27] 王飞跃. 机器人的未来发展: 从工业自动化到知识自动化[J]. 科技导报, 2015, 33(21): 39-44.
- Wang Feiyue. On future development of robotics: From industrial automation to knowledge automation[J]. Science & Technology Review, 2015, 33(21): 39-44.
- [28] 袁勇, 王飞跃. 区块链技术发展现状与展望[J]. 自动化学报, 2016, 42(4): 481-494.
- Yuan Yong, Wang Feiyue. Blockchain: The state of the art and future trends[J]. ACTA Automatica Sinica, 2016, 42(4): 481-494.
- [29] 刘烁, 王帅, 傅焕章, 等. 软件定义的犯罪现场分析过程及其知识自动化方案[J]. 模式识别与人工智能, 2016, 29(10): 876-883.
- Liu Shuo, Wang Shuai, Fu Huanzhang, et al. Software-defined crime scene analysis process and its knowledge automation scheme[J]. PR & AI, 2016, 29(10): 876-883.
- [30] 胡玉玲, 王飞跃, 刘希未. 基于 ACP 方法的高层建筑火灾中人员疏散策略研究[J]. 自动化学报, 2014, 40(2): 185-196.
- Hu Yuling, Wang Feiyue, Liu Xiwei. ACP-based research on evacuation strategies for high-rise building fire[J]. ACTA Automatica Sinica, 2014, 40(2): 185-196.
- [31] 张益, 冯毅萍, 荣冈. 面上智能制造的生产执行系统及其技术转型[J]. 信息与控制, 2017, 46(4): 452-461.
- Zhang Yi, Feng Yiping, Rong Gang. Intelligent manufacturing-oriented technical transformation of manufacturing execution system[J]. Information and Control, 2017, 46(4): 452-461.
- [32] Wang F Y, Zhang J, Wei Q, et al. PDP: Parallel dynamic programming[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2017, 4(1): 1-5.
- [33] Zhang N, Wang F Y, Zhu F H, et al. DynaCAS: Computational experiments and decision support for ITS[J]. IEEE Intelligent Systems, 2008, 23(6): 19-23.
- [34] Wang F Y. Parallel control and management for intelligent transportation systems: Concepts, architectures, and applications[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2010, 11(3): 630-638.
- [35] Li L, Wen D. Parallel systems for traffic control: A rethinking [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(4): 1179-1182.
- [36] Wang F Y, Wang X, Li L X, et al. Steps toward parallel intelligence[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2016, 3(4): 345-348.
- [37] 王飞跃. 平行制造: 新 IT 时代的智能制造科学与技术[R]. 第二届中国北京国际科技产业博览会科技创新与城市管理论坛, 北京, 2017.
- Wang Feiyue. Parallel Manufacturing: Intelligent manufacturing science and technology in the new IT era[R]. Science and Technology Innovation and Urban Management Forum of the 20th China Beijing International Technology Industry Expo, Beijing, 2017.
- [38] 王飞跃. 复杂性研究与智能产业: 平行企业与工业 5.0, CES 控制工程师峰会[R]. 上海, 2014.
- Wang Feiyue. Complexity research and intelligent industry: Parallel enterprises and industries 5.0, CES control engineer summit[R]. Shanghai, 2014.

## Parallel manufacturing and industries 5.0: From virtual manufacturing to intelligent manufacturing

WANG Fei-Yue<sup>1,2</sup>, GAO Yanchen<sup>3</sup>, SHANG Xiuqin<sup>1,2</sup>, ZHANG Jun<sup>1,2</sup>

1. The State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems; Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
2. Beijing Engineering Research Center of Intelligent Systems and Technology; Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
3. Qingdao Academy of Intelligent Industries, Qingdao 266109, China

**Abstract** Based on virtual manufacturing, a new paradigm of intelligent manufacturing, parallel manufacturing is proposed. It integrates the concepts of cyber-physical-social system (CPSS) and industrial IoM by considering the complexity of physical, information and social systems. Based on ACP (artificial systems, computational experiments, parallel execution) method, an intelligent system of steel manufacturing is developed to realize parallel evolution, closed-loop feedback and cooperative optimization. It consists of three parts, namely, descriptive intelligence through software defined steelworks (SDS), predictive intelligence based on computational experiment and optimization, and prescriptive intelligence using parallel execution between virtuality and reality. Through the comprehensive utilization of descriptive, predictive and prescriptive intelligence, intelligent production is realized to transparentize and digitize the manufacturing system.

**Keywords** parallel manufacturing; intelligent manufacturing; virtual manufacturing; artificial systems; cyber-physical-social-systems; knowledge automation ●



(责任编辑 祝叶华)