

面向智能制造的生产执行系统及其技术转型

张 益, 冯毅萍, 荣 冈

浙江大学智能系统与控制研究所工业控制技术国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

基金项目: 国家工业和信息化部智能制造综合标准化与新模式应用项目(2016-101); 国家自然科学基金资助项目(61621002)

通信作者: 荣冈, grong@zju.edu.cn 收稿/录用/修回: 2017-03-06/2017-05-27/2017-06-01

摘要

根据德、中、美相继提出的工业 4.0 参考体系架构(RAMI 4.0)、智能制造系统架构以及智能制造生态系统(smart manufacturing ecosystem, SME), 企业面向智能制造的转型视角再次回归到传统的企业多层级架构上. 本文构建以企业金字塔架构为核心的多维价值网络, 其中生产执行系统(manufacturing execution system, MES)被视为企业转型方案落地的主要着陆点. 从企业智能制造的生态现状出发, 本文详细分析 MES 的核心功能转型所需的关键技术, 以及其服务模式、管理模式的转型思路, 旨在为研究学者、企业及 MES 供应商提供参考价值.

关键词

生产执行系统
智能制造
关键技术
转型分析

中图分类号: TP18

文献标识码: A

Intelligent Manufacturing-Oriented Technical Transformation of Manufacturing Execution System

ZHANG Yi, FENG Yiping, RONG Gang

State Key Laboratory of Industrial Control Technology, Institute of Cyber-Systems and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

Abstract

With the reference architecture model for Industries 4.0 (RAMI 4.0), smart manufacturing ecosystems, and the architecture for intelligent manufacturing systems proposed by Germany, the US, and China, respectively, an increasing number of studies have been focusing on the pyramid of enterprises. On the basis of the product life cycle, production life cycle, business cycle, and supply chain, a multi-dimensional value network for intelligent manufacturing is constructed, thereby providing a new perspective for positioning analysis of enterprises. As the core problem of modern enterprises' development, the transformation directions of functions, key technologies, and service patterns for the manufacturing execution system (MES) are analyzed in detail, thereby providing reference values for researchers, enterprises, and MES suppliers.

Keywords

manufacturing execution system (MES);
intelligent manufacturing;
key technology;
transformation analysis

1 引言

在当下众多企业面向智能制造转型的背景下, 制造产业信息化、实体资源虚拟化、生产过程智能化以及产业资源服务化等成为热门的研究课题和工程命题. 同时, 以信息化与工业化融合为主流的制造业变革正全方位展开, 其核心问题即是如何将先进技术有机融合并实现资源、服务和生产管理的高度集成, 实现生产模式的转型升级. 当下转型过程中, 国内外企业界与学术界分别对“智能制造”生产模式有着丰富的诠释, 其中主流思想均围绕着中、德、美三国分别提出的“中国制造 2025”^[1]、“工业 4.0 (Industry 4.0)”^[2]及“智能制造 (smart manufacturing)”. 在上述

提出的制造业转型升级的战略中, 中国工业和信息化部在《国家智能制造标准体系建设指南(2015)》中提出基于生命周期、系统层级及智能功能三个维度的智能制造系统架构; 德国电气电子行业协会(ZVEI)在2015年4月确定了工业4.0的参考模型架构(RAMI 4.0)^[3], 其中同样包括3个维度: 生命周期及价值流(life cycle & value stream), 系统层级及功能层级. 战略中同样明确了离散行业中以汽车、半导体电子制造业等为主, 流程工业中的示范应用领域包括化工、石油化工、钢铁制造、医药等行业, 混合行业则以食品行业为主. 因此, 行业内关键技术及理论创新、工程项目研发实施以及标准体系的构建及协调成为了当下研究学者及工程师们共同关注的突破点.

在各学科领域技术飞速发展的背景下, 国内外学者纷纷将新技术引入到工业生产中, 以攻克目前企业智能化转型中亟待解决的难题. 2010 年, 在云计算及物联网等技术的推动下, “云制造”生产模式及其关键技术被提出^[4-5]; 2014 年姚锡凡提出以嵌入式、RFID 以及仿真建模等技术为支撑的“制造物联(internet of manufacturing things, IMOT)”制造模式^[6]; 基于信息物理系统(cyber physical system, CPS)及 RAMI 4.0, 物理信息融合生产系统(Cyber-Physical Production Systems, CPPSSs)^[7]逐渐成为企业界及学者关注的概念之一, 而后一种新的智能制造架构^[8]及智慧工厂的参考模型^[9]也相继被提出. 2017 年 3 月中国工业和信息化部发布《信息物理系统白皮书(2017)》, 其中提出 CPS 下的制造“新四基”, 包括“一硬、一软、一网、一平台”, 即指感知和自动控制系统、工业软件、工业网络、工业云和智能服务平台, 这与目前许多企业的转型思路相一致. 而为了打通企业产品及系统全生命周期的数据流, 生产执行系统(MES)成为了工业软件方面转型方案落地的主要着陆点之一. 在智能制造模式下, MES 与其在传统制造模式中的任务粒度、对象范围及服务模式也发生了新的变化, 许多学者对其软件架构及其在企业中的应用研发进行了系统分析^[10-11]; 为实现 MES 在不同行业中的可扩展性、可重用性以及互操作性, MES 的软件基础设施架构^[12]及关键性能指标评估技术^[13]也被深入研究.

本文将结合当前各行业、企业面向智能制造的转型思想以及关键技术的最新研究进展, 分析在新的技术背景下, 企业多层次架构的变革及其在智能制造系统架构中的定位; 最终本文将分析支撑 MES 面向智能制造转型的多项关键技术, 为当下各行业的理念转变、功能优化、生产模式转型提供参考.

2 不同行业中的智能制造

如工业 4.0、中国制造 2025 等战略中所述, 个性化定制、更短的产品及系统生命周期、互联互通的服务模式等成为目前企业在智能制造转型中的主要竞争点. 然而, 对于不同行业(离散行业、流程工业、混合行业)中的企业而言, 智能制造所预示的生产模式及企业的服务需求存在很大差异.

2.1 个性化定制

首先以离散行业中的产品为例, 如电子器件、汽车、航空航天零部件等, 这些产品均是依赖于机械设计、可分散加工、可灵活组装且同类产品款式极多. 对于此类产品, 客户可能提出的产品需求难以穷举、订单规模难以预测且产品质量要求极高. 此时“个性化定制”的服务需求则要求企业具有高效快速的需求分析及产品设计能力、具有柔性且精益的生产流程、具有完整且精细的全流程生产管控能力.

然而在流程工业中, 企业所能生产的产品往往是固定的, 其中工业产品大多是大宗商品, 如石油、有色金属、钢铁、矿石、煤炭等, 相应的生产流程难以柔性改造, 物料及设备的可组态性极低, 市场对特定产品的“个性化”需求也较少. 相似地, 混合行业中也存在相近的问题, 即工

艺流程可组态性低、操作条件复杂等. 但在烟草、食品等此类行业中, 客户的定制化需求往往更为复杂, 即需同时满足多种类、小规模、高质量的客户需求. 因此, 流程工业中的个性化需求, 指的不是产品款式和类型, 更倾向于是指对生产规模的定制化需求, 如下游企业对某类产品提出了临时性的生产订单, 企业如何在自身生产能力范围内及时调用生产资源, 满足需求完成订单并获得收益. 而混合行业则需在离散工业和流程工业中响应个性化定制需求的技术中寻求交叉点和可行的技术方案.

2.2 缩短产品/系统生命周期

从产品及系统的设计、研发、制造生产/安装运行、销售到维护及回收, 各个环节所占的生命周期比重随着企业产业链中的产值分配的变化而发生改变. 然而, 三类行业中的产值分配存在较大差异, 以离散行业中的汽车行业为例, 预计到 2025 年, 制造环节的产值将降至三成, 研发环节的产值将从现在的六成降至约 50%, 而设计服务环节的产值反而会增长将近一倍, 增长至近两成. 相反地, 流程工业中产值更多地集中于生产环节, 在设计、研发环节所占产值的比重相对较低; 而混合行业的产值更集中于研发和制造环节.

由此, 离散工业着重将设计及服务环节与生产、研发环节打通, 通过端到端的数据流通及软件服务, 实现工程数据、生产数据与服务数据的集成. 而流程工业和混合行业则着重关注提高生产资源利用率、产品转化率及产品质量; 基于模型优化生产工艺流程, 并实现高精度的工艺参数实时控制; 通过对生产信息的集成管控, 将 PCS 层的安防连锁、故障诊断等功能与 MES 层的设备维修及管理等功能紧密结合; 通过数据进行产品需求分析并合理规划生产资源, 兼并订单驱动及需求驱动两种生产模式, 缩短市场需求到产品交付、流通的周期, 从而实现高效、节能、精益、安全的连续生产.

2.3 新工业服务模式

以信息技术驱动的智能制造业转型不仅将改变企业的生产运行模式, 同时将企业的实体资源(如人员、设备、物料等)及虚拟资源(如数据、信息、功能等)转化为可为企业增长效益的服务资源. 通过在云平台上注册、发布服务信息及服务需求, 可灵活构建企业之间的服务契约关系, 从而实现企业网络的效益增长并提高产能利用率.

然而在新的工业服务模式下, 离散行业和混合行业往往能得到更大的效益提升, 而流程工业似乎受新的服务模式影响较小. 比如, 离散行业在产品需求分解时, 则需选择合适的零配件制造商提供生产服务; 在产品制造时, 则需选择合适的设备及生产管控软件的供应商; 在产品销售及维护时也需选择合适的营销及售后服务平台. 混合行业需要根据多变的客户需求进行自身服务资源的快速调配以及协作企业的搜索及匹配. 而对流程工业而言, 产品的生产成本及运输成本占据较大比重, 企业的选址往往与原料开采地或供应链上下游企业所在地有关, 因此供应服务关系往往较为稳定, 可供动态选择的服务企业较少. 往往在紧缺原料采购、工艺设备更换或维护、生产管控软件定制

或维护等方面需要服务平台的协助。

不同行业面向智能制造转型过程中不仅目标不同,而且不同行业中的基础设施建设的完善程度和自动化水平也参差不齐,这导致各行业的转型可采取的技术方案也将不同。因此,企业面向智能制造转型时需结合行业特点进行系统需求分析、功能架构设计以及工业现场及软件的改造实施,而不可盲目照搬照抄其他行业或个别企业的转型思路。在明确行业转型目标的基础上,思考从当下的生产流程、软件架构以及服务模式顺利转型至智能制造生产模式所依赖的可行技术方案。

3 智能制造下的企业多层次架构

自 2015 年开始,德、中、美相继提出工业 4.0 参考体系架构(RAMI 4.0)、智能制造体系架构、智能制造生态系统(smart manufacturing ecosystem, SME)^[14],共同关注智能制造的标准体系建设,并为企业转型提供参考。不同于

前两者,2016 年 2 月,美国商务部及国家标准技术研究院提出的 SME 架构将传统的企业金字塔架构 ERP/MOM/PCS 融入其中,将其作为融合生产系统生命周期(production system lifecycle)、产品生命周期(product lifecycle)以及业务环(business cycle)三个维度的核心。在该架构中,系统层级及功能层级的概念被再次融入企业多层次架构中,两个生命周期维度分别关注产品和生产系统的设计、研发/构建、测试/模拟/试运行、生产/运行、应用/操作、维护、回收及再利用,而供应链管理则被融入业务环维度,由此将智能制造标准化的视角再次锁定在传统的多层次架构上。

3.1 面向智能制造的多维价值网络

融合上述标准体系架构中的多维度体系,由于供应链是企业间价值流动的核心维度,因此可将其作为企业多层次架构定位分析的又一参考维度,独立于 SME 中的三个维度,形成定位企业多层次架构的四维网络。如图 1 所示。

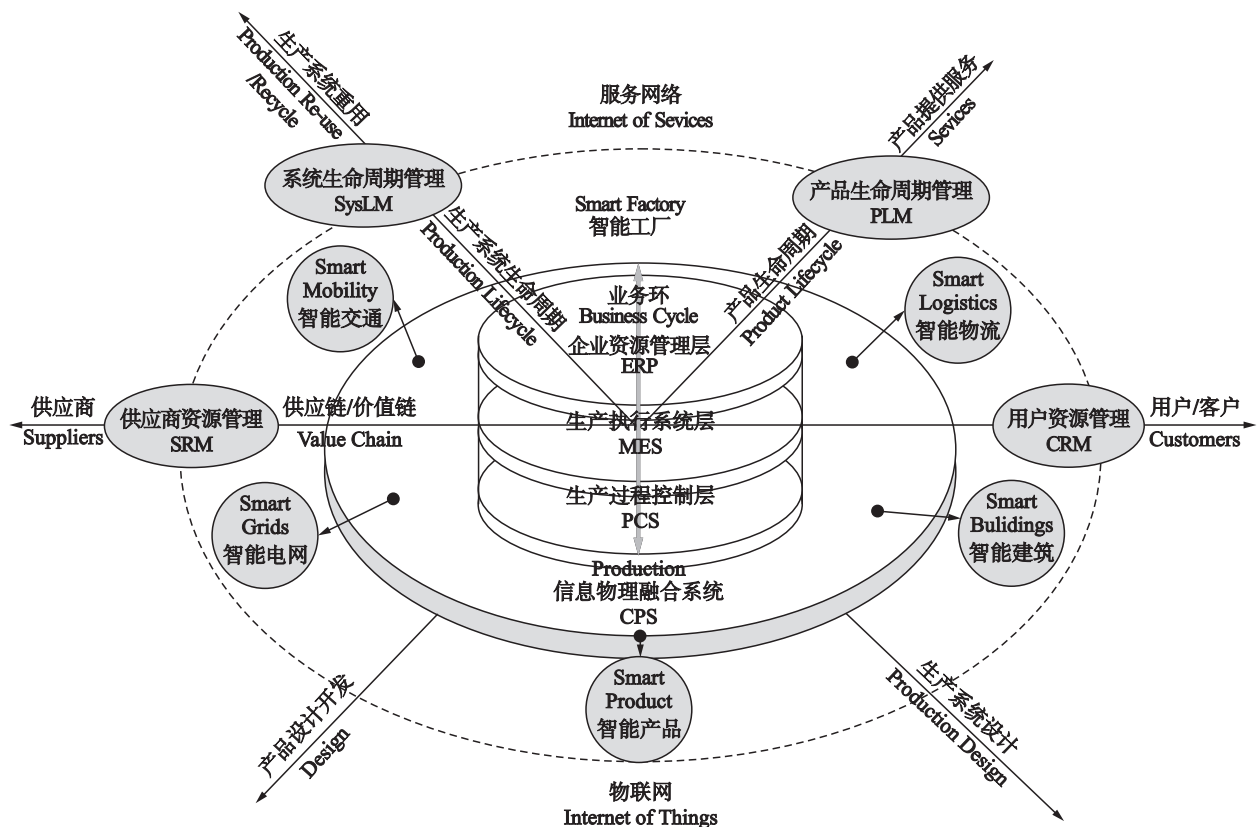


图 1 企业多层次架构在智能制造多维标准体系中的定位

Fig.1 Position of enterprise's multi-level architecture in multi-dimensional value network

从智能制造的转型需求出发,制造业需要能够在工业数据的基础上,进行闭环的状态感知、实时分析、科学决策、精准执行,从而提高资源配置效率并实现资源优化。其中,智能工厂则是制造业实现物联网、服务网络融合的标志。因此,企业的多层次架构处于新的网络环境中,各层次需要通过调整功能内涵和边界来实现层次架构的整体转型,从而实现从底层物联网到顶层服务网络的紧密融合。

3.2 多维度价值网络中的企业多层次架构

为全面定位分析企业多层次架构,此处可选择如下不同的维度及视角对智能制造下的企业架构进行功能需求分析。

3.2.1 产品生命周期维度

对于产品而言,生命周期可分为引入期、成长期、成熟期和衰退期,而体现在以产品为核心的活动上,则可分为设计、开发、测试、生产、销售、使用/维护到回收/再利用多个阶段。这其中生产执行系统(manufacturing execution

system, MES)则主要负责生产环节的信息管控和物流跟踪等^[15]. 当以离散行业企业作为分析对象时, 产品设计、开发及测试的环节主要依赖于 CAD、CAE 等辅助工具, 而对于流程行业而言, 这部分则更集中于产品结构及物性设计、试验分析及采样化验, 相应支撑性的系统模块和软件

工具也将发生重大变化. 在该维度的生产后环节中, 各企业的主产品往往是输送至下游生产商或终端服务商, 其质量指标将直接影响到下游产品的质量及服务质量, 因此质量管理成为产品生命周期尾端的核心功能. 企业多层次架构在产品生命周期维度的定位如图 2 所示.

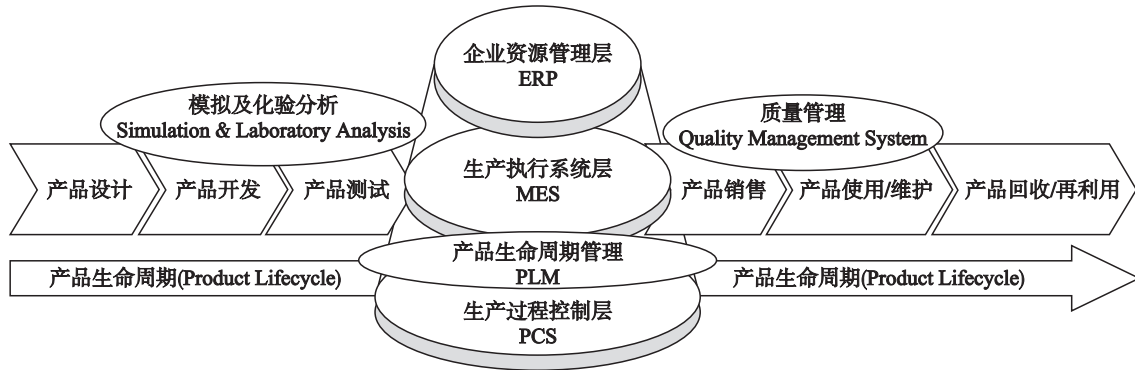


图2 企业多层次架构在产品生命周期维度的定位

Fig.2 Position of the pyramid in product lifecycle

沿着产品全生命周期维度, 全部产品信息被规范描述及集成管理至产品生命周期管理 (product lifecycle management, PLM) 系统中. PLM 作为该维度信息的枢纽, 其信息来源不仅包括维度上游的模拟及化验分析以及下游的质量管理系统, PLM 也须与 MES 及 PCS 层的信息保持一致.

3.2.2 生产系统生命周期维度

生产系统指的是机器、设备以及通过各种资源提供服

务所需的附属系统的总和. 系统生命周期维度与产品生命周期维度不同, 其关注的核心不再是数据, 而是对生产流程和组织的整体管理. 系统生命周期管理 (System Lifecycle Management, SysLM)^[16] 可将现有的流程、解决方案和工具按一定方式紧密联系起来, 从而提升企业生产系统的可持续性 & 灵活性. 企业多层次架构在该维度的定位如图 3 所示.

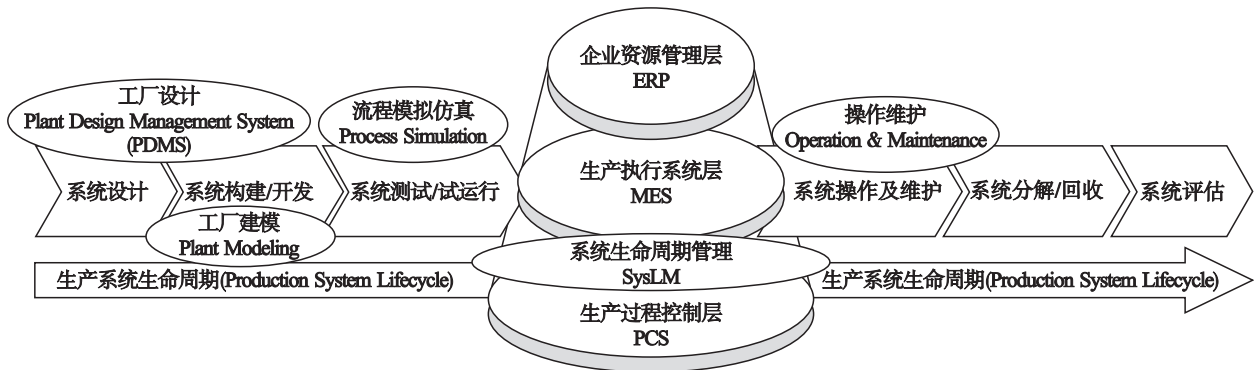


图3 企业多层次架构在生产系统生命周期维度的定位

Fig.3 Position of the pyramid in production system lifecycle

相较于产品的生命周期, 生产系统的全生命周期往往更长, 且各个环节要求的可配置性及可扩展性更高. 以工艺流程为例, 从工艺设计、过程建模、流程模拟仿真到生产、操作维护及改造、评估, 完整的系统生命周期要求工厂从系统整体角度进行可持续性的转型和升级; 相似地, 各个维度上的软件系统也与此生命周期维度紧密相关. SysLM 关注从 ERP、MES 到 PLM、SCM 等系统模块的信息集成, 该维度要求智能制造下的多层次架构要能够兼容协调多维网络中的功能系统, 从而实现复杂系统的简单化 (simplicity + complexity, simplicity)^[14].

3.2.3 供应链维度

一般来说, 企业的产品往往具有多种下游流向: 次级生产企业、分销中心或终端服务商. 在智能制造环境下, 供应链不仅管理原料、产品等生产物料资源, 还需关注设备维护、能源保障等服务性资源. 因此, 供应链维度的供应商资源管理 (SRM) 和客户资源管理 (CRM) 需与新的工业服务模式相契合, 各企业与上下游企业需通过开放平台进行服务资源的注册、发布及匹配, 从而形成可动态调整的合作契约关系, 实现供应链整体的产能利用率最大化. 而这其中供应链管理 (supply chain management, SCM) 不再

局限于 ERP 层,而是同时需与 MES 层进行服务信息交互,通过 MES 层评估工厂当前生产能力及服务需求,通过 ERP

及 SCM 与其它企业构建服务与被服务关系.因此,企业多层次架构在供应链维度的定位如图 4 所示.

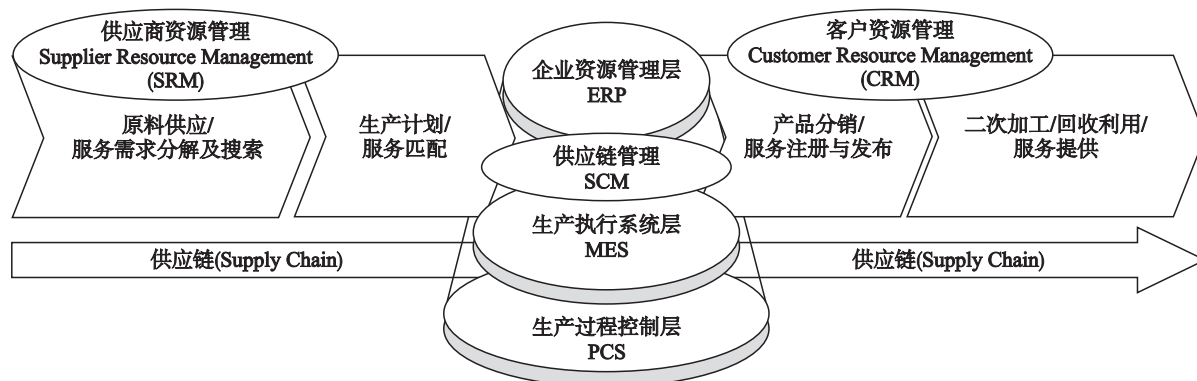


图 4 企业多层次架构在供应链维度的定位
Fig.4 Position of the pyramid in supply chain

3.2.4 企业业务环维度

沿企业内部垂直集成管理制造系统的业务维度,企业多层次架构的定位如图 5 所示.其中,顶层服务模式的变化以及底层泛在感知网络的不断完善使得企业内从决策层到控制层的核心功能发生了信息流及应用模式的变化.首先从信息流的角度看,企业自上而下的决策计划分解、调度排产、控制操作使得生产过程严格按照企业的生产目标运行;基于异构的感知信息及实时生产数据,生产信息可通过企业各层次内的功能模块实现信息集成、处理、分

析、统计以及绩效评估,从而评估企业的服务质量及企业自身的生产效益、产能利用率以及边际效益.同样,服务网络和泛在感知网络推动了企业各层次子系统的应用模式改变,如 MES 层的物流跟踪、质量管理以及设备维护等功能.在新的技术环境下,根据生产信息可对产品质量进行评估、可对设备进行风险预测分析及故障诊断,可基于数据驱动的方法对设备的维护需求进行预判,从而降低生产安全事故发生的可能性,提高生产系统的可靠性和稳定性.

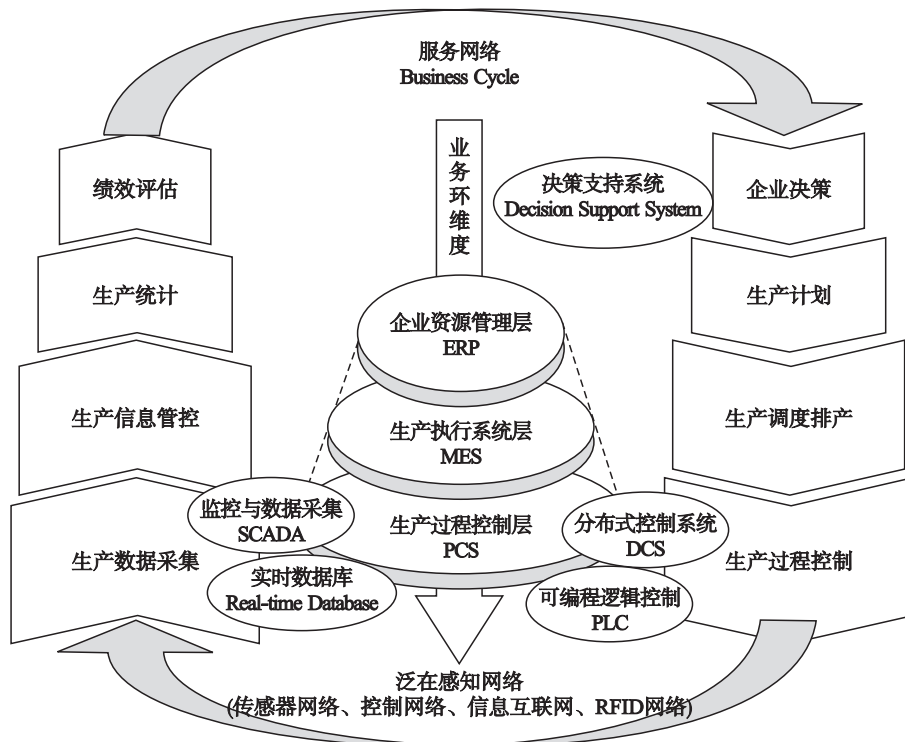


图 5 企业多层次架构在业务环维度的定位
Fig.5 Position of the pyramid in business cycle

在完整的企业业务环中,除 ERP、MES 外,许多子系统如控制系统、决策支持系统等可对各环节起支撑作用,

而企业多层次架构则需对上述子系统提供开放的数据结构和集成工艺操作的决策及管控平台.

综合上述4个维度内的架构定位分析,企业多层次架构可概括为:处于各维度的中心,以生产环节为核心,负责兼容上下游产品信息、生产系统、供需关系的变化,同时需要与物联网及服务网络相融合的新工业生产环境保持一致.通过明确企业多层次架构的定位,下一步则可着眼于MES讨论其功能、关键技术及服务模式的转型方向.

4 生产执行系统功能及技术转型

在近年来的各行业智能制造相关技术的研究及示范应用中,信息化技术正逐步融入到企业架构的各个层级.首先,工业现场的生产环境正逐步发生改变,如感知网络中移动终端以及无线传感器网络的大规模应用;其次,基于工业大数据及实时生产信息进行决策优化、生产监控、故障诊断以及风险识别等,数据、信息、知识等虚拟资源成为了企业进行生产管控的“决策辅助工具”;最后着眼于企业的资源管理和服务模式,云制造等新的生产模式的引入,催生企业解耦、评价并注册自身的服务资源及服务需求,从而实现企业间产能利用率和经济效益的提升.

而从企业多层次架构在产品生命周期、生产系统生命周期、供应链、企业业务四个维度中的定位出发,MES成为流通多元信息的枢纽,同时MES也是各子系统间兼容、协作的媒介,更是聚焦于企业生产环节、推动生产管控功能智能化转型的核心.

4.1 MES 核心功能转型

从MES的核心功能出发,近五年来研究学者及企业机构分别在不同程度上探索MES核心功能的智能化转型^[17].本节分别从核心功能的现状、转型目标以及支撑技术三个层面进行分析,具体内容如下:

(1) 绩效分析:通过与历史报告和预期绩效进行对比,以“分钟”为单位分析实际作业运行结果,包括资源利用率、资源可用性以及标准绩效一致性等指标的度量.

转型方向:绩效分析 & 闭环管控,即基于周期性或在线实时的历史数据及报告分析,对生产操作条件、生产计划及调度方案、资源分配情况及运营管理措施给出优化解决方案,进而通过下一阶段分析报告对方案执行情况进行效益分析,形成闭环的以经济效益为核心的企业管控模式.同时,该功能模块的转型也将是企业MES与ERP、PCS协同工作的核心标志.

支撑技术:基于经济指标的控制优化模型研究^[18-19];基于大数据和先进分析工具的在线绩效分析及生产操作优化^[20-21];集成流程模拟和优化模型的装置操作优化^[22];企业绩效评估及可视化管控等.

(2) 资源配置和状态:主要管理实体资源(物料、人员、设备等),提供资源使用情况的历史记录和实时状态信息,以确保资源能够正常部署和使用.部分管理模块中还包含资源预约、分派等功能.

转型方向:服务资源状态管理及匹配,即根据资源使用记录及状态信息,对ERP层的生产服务需求进行动态资源匹配.

支撑技术:服务资源语义描述^[23]、服务搜索与匹

配^[24-25]、服务组合^[26]、面向服务的平台开发及应用示范^[11]等.

(3) 数据采集与获取:负责提供接口以“分钟”为单位采集工业现场测量点的实时数据,获取手工录入/设备录入的生产操作信息等.

转型方向:虚拟资源获取与封装,即对生产数据、多源异构信息、模型以及知识资源的集成,其中模型和知识资源可来源于专家经验或其他组件工具平台.

支撑技术:数据及信息集成管理^[27];模型等知识资源封装,一般通过网络本体语言(OWL, web ontology language)对领域知识进行组织表达和建模^[28-30].

(4) 文档管理:主要管理虚拟资源(操作规程、工程文件、操作记录等),同样提供信息修改功能,可进行与环境、健康、安全制度有关的数据及信息完整性维护.

转型方向:知识管理,即将模型、工艺图纸等工程文件以及专家经验、生产规则等知识资源进行规范化管理,以使知识资源沿生产系统的全生命周期传递,从而支撑各子系统的功能运行,同时可供企业各层级人员进行调用及维护.

支撑技术:生产子系统间知识共享及知识管理互操作^[31]、知识驱动系统重构^[32]及知识驱动核心功能模块运行^[33]等.

(5) 操作及调度排产 & 分派生产单元:负责依据工序优先级、产品特性以及生产规则进行工序调配,进而以作业、订单、批次及工作指令的形式对生产单元进行任务指派.其本质是资源配置和状态的一项子功能,具体排产及分派结果可根据生产工况变化进行动态调整.

转型方向:生产调度优化及任务管理,即基于专家经验及模型进行生产调度优化及排产,同时对生产任务执行情况进行动态跟踪,可支持在流程模拟仿真、优化等模型的基础上进行生产再调度或任务调整.

支撑技术:生产调度优化建模(确定性/不确定性、连续时间/离散时间)及算法^[34-35],基于仿真的生产调度优化^[36],其中仿真技术包括基于智能体的仿真、分布式及混合式仿真等^[37].

(6) 维护管理:负责跟踪并指导对设备进行周期性、预防性维修调度,其中包括对维护事件及活动信息的管理.

转型方向:生产系统维护管理,即需从设备维护拓展至功能模块、知识库、应用系统等生产子系统的维护;同时在设备维护方面,可通过虚拟资源及组件工具为设备状态监控、故障诊断及维修提供决策支持^[38].

支撑技术:基于模型、数据、信息驱动的方式进行设备状态监控、故障诊断以及维修^[39-40];基于智能体进行设备操作优化、状态监测及维护^[41];基于专家经验等知识资源进行设备维护管理^[42];基于模型、数据进行设备维护管理;组件工具、应用系统等生产子系统的状态评估及维护^[43-44].

(7) 过程管理:通过监控生产过程,对生产活动进行自动校正及纠错;可向操作者提供决策支持,通过安全联锁、报警管理等子功能确保生产过程安全、平稳运行.

转型方向:过程管理 & 安全管理,即在监控生产过程的基础上,强化生产安全防护及应急技术,支持对工艺设

备进行动态风险识别、评估以及安全防护,同时在安全事故发生时可及时进行应急响应。

支撑技术:生产过程模拟仿真技术(离散事件驱动仿真、工艺机理仿真、基于智能体/Petri 网的仿真等)^[37];基于仿真的生产过程监控及分析^[45-46];数据驱动的故障诊断及风险识别^[47];基于专家经验及操作规程等知识的安全应急等^[48-49]。

以上功能在新技术引入后,其功能内涵及应用模式均有较大改变。而对于其他核心功能而言,由于 MES 体系架构及服务模式的改变,部分功能在目前应用模式的基础上有一定改善,也有助于提升企业在感知和分析方面的水平,其中包括:

(8) 产品跟踪和谱系:负责将产品有关的组分、批量、当前生产条件、质量等相关信息集中管理并可视化,以供对产品进行成分及使用情况的追溯跟踪。在智能制造模式下,该功能模块关系到用户体验和上下游资源的使用限制,是 MES 与 PLM 信息共享的关键。企业将不仅关注产品在生产环节的属性变化,同时需管理从原料开采到产品使用及再生生产的全生命周期谱系信息。

(9) 质量管理:通过分析实时生产数据进行产品质量控制,具体措施包括通过关联征兆、动作和结果进行根本原因分析,以及在实验室信息管理系统(LIMS)中的分析。质量管理的转型方向即包括:通过流程模拟仿真进行生产过程模拟,从而辅助进行质量问题根本原因分析及质量事故的预防;基于工业数据分析进行质量事故预测和质量控制。

(10) 人力管理:负责以“分钟”为单位对人的状态信息进行管理,包括出勤、资质以及操作行为等。该部分功能由于移动终端、GPS 定位等感知技术的引入,人员的状态管理及人与设备、生产环境的交互将更加高效和频繁。如日常巡检工作、设备维护操作、应急救援活动等,人力资源的分布状况及行为状态将同设备一样被实时接入生产系统中。

4.2 MES 服务及管理模式转型

企业在面向智能制造转型过程中, MES 将不再仅仅是专注生产信息管控的软件工具,而是将转型为企业兼容多应用系统、多维度信息以及多服务目标的核心系统。而同时,通过如上所述的 MES 架构和技术方案的转型, MES 将更好地践行 MOM(Manufacturing Operation Management)中定义的多种生产运行管理功能,从而以生产环节为核心,提升企业的竞争力和服务质量。

1) 服务模式转型

MES 作为企业生产子系统之一,其服务模式将从两方面转型:一是 MES 内各功能模块、组件工具及虚拟资源的协同服务;二是 MES 与多维度上的生产子系统进行协同工作及信息共享。未来企业如需在 MES 中体现 CPS 中提出的物理空间与信息空间的融合思想,例如将生产过程设计及模拟测试中产生的工厂模型等工程文件用于实际生产操作的管控中,则需明确企业所需的虚拟资源范畴,并考虑怎样采集并管理虚拟资源并将其融入到生产管控功能中,这将是 MES 成功转型的基础。

另外,对于开放式架构的 MES 而言,人机交互服务模

式的调整也将是企业及供应商着重关注的转型问题。其中包括以 MES 为核心的多平台信息的传递及面向不同角色用户的信息可视化技术;以 MES 为门户的多生产子系统的无缝连接,以支持多平台的功能访问及应用操作;以 MES 中知识库为主体的多维度共享的知识资源的更新和维护;不同角色用户访问知识库、组件工具以及功能模块的权限区分及友好交互;多种终端形式的交互,如非智能化的手持终端、智能手机等移动终端、PC 客户端等。在特定需求下,也可考虑是引入穿戴设备后的虚拟现实交互方式。总之,对于 MES 而言,交互技术的引入和交互模式的转型方案需要遵循友好化、便携化的原则,结合行业特点与 MES 架构及技术方案同步转型。

2) 管理模式转型

由于生产系统生命周期(Production System Lifecycle)维度的引入,企业各生产子系统,包括 MES 本身,需要被同等看作企业的“软设备”,即需如产品及硬件设施一样被从全生命周期的视角进行管理,包括系统设计、开发、测试/试运行、部署应用、操作/维护、分解/下线等多个环节。系统生命周期管理(SysLM)为各生产子系统提供的管理模式则将是 MES 管理模式的主要转型目标。

MES 作为企业日常操作的软件系统之一,若要实现其预先设计好的功能及服务目标,则其内部的数据结构、功能模块、组件工具将较为复杂。目前,企业对 MES 的管理方式一般为外包定制开发后部署应用,企业往往因费用昂贵而倾向于在出现问题后进行维护,因此其系统内信息管理模式单一、功能应用性逐渐降低;操作者常常更依赖自身的“经验技巧”,而 MES 在更多时间仅仅充当了企业的生产信息可视化平台。这种管理模式一则不利于 MES 成为提升企业生产管控效率和质量的决策辅助工具,二则阻碍了企业自身生产模式的真正转型。因此,企业在软硬件设施转型的同时,人对企业生产模式和多种手段辅助的管理模式的接纳和思想的转型也将是一大挑战。

着眼于 SysLM 本身,目前国内外对其技术支撑及具体应用模式的讨论还不成熟,可以从管理的系统对象及系统生命周期的各环节等视角进行分析。对于企业中设备、生产流程等实体生产系统, SysLM 可依赖三维可视化技术、泛在仿真技术等对管理对象进行建模及工艺过程模拟,从而进行生产系统的设计、研发及离线测试;而在系统部署应用后,与其相关的操作、维护等环节可在 MES 的辅助下协作运行;对于企业中的其他生产子系统,如知识库、数据库、应用软件等, SysLM 需对企业操作者的应用需求进行动态跟踪,从而及时对此类系统进行基础信息维护、联调测试、故障维护等,从而实现企业内生产系统与生产能力间的一致提升,最终在系统服务能力和企业预期目标之间形成良好的反馈和协调机制。

4.3 MES 转型的挑战及难点

上述两节详细分析了 MES 在功能架构、关键技术、服务及管理模式的转型目标和方向,其可为 MES 的转型实践提供参考。总体来看, MES 的转型路径可以概括为“三步走”,如图 6 所示。

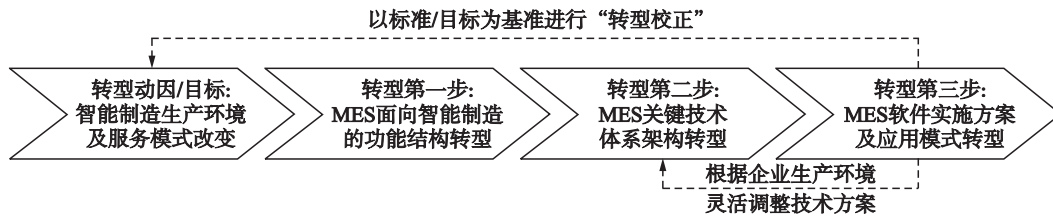


图6 MES 转型路径“三步走”示意图

Fig.6 Roadmap for the Transformation of MES

在 4.1 节中,许多企业及研究者在 MES 不同的核心功能方面已进行了支撑技术的前瞻性研究,其中部分研究在离散行业已有良好示范应用,部分成果则在流程行业中取得成效.需要明确的一点是,MES 的转型路径对于不同行业而言,需要遵循相同的标准体系、相近的体系架构和相通的技术理论,但在技术方案上需要综合考虑行业特点、企业规模、工厂建设成熟度等因素因地制宜践行 MES 转型.而其转型的挑战和难点则是在于如何“因地制宜”.如下即是对挑战及难点进行简要的逐点分析:

1) 转型动因及技术投资力度分析

智能制造在企业转型过程中可以具象化为不同的转型目标,比如经济效益的提升、产品质量的提升、服务质量的提高等.在技术投资有限的情况下,离散行业倾向优先实现设计环节与生产环节的数据流通和快速响应,从而响应 2.1-2.2 的转型需求;而流程行业则倾向优先实现业务环维度的计划、调度与控制的紧密结合和供应链的服务模式转型,从而在确保“安稳长满优”的前提下,实现供应链整体效益的提升.

2) 技术方案的选择

无论对于哪种行业,MES 转型技术方案的选择首先取决于企业自身基础设施建设的成熟度,比如传感器网络和通信网络的建设情况、测量点的分布及覆盖情况、安全服务设施的设置及维护情况等.其次,选择技术方案需要遵循“尽量小地改变已有生产模式”的原则,循序渐进的引进前瞻性技术成果.原因有二:一是技术转型需要与企业技术人员的业务知识和思想转型水平相契合;二是需要优先选择已经有优秀实践效果的技术方案.如企业生产系统及设备老旧、不完善时则需优先改进物理系统,而不适合引入模拟仿真相关的技术方案;企业测量点铺设不完善、数据库规模较小时则不适合引入数据驱动的相关技术方案;企业人员信息化技术水平较弱或经验依赖性较强时则不适合引入决策支持类的系统等.

综合来看,基础的信息化、可视化相关的技术方案目前在企业中接受度较高;其次是决策辅助类技术方案.企业需要灵活根据转型现状进行方案调整和“转型校正”.

致谢 本文感谢国家工业和信息化部智能制造综合标准化与新模式应用项目(2016-101)和国家自然科学基金(61621002)的资助.

参考文献

- [1] 国务院. 中国制造 2025[M]. 2015.
The State Council. Made in China 2025[M]. 2015
- [2] Group I W. Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0[J]. Final report, 2013.

3) 以 MES 驱动的生产模式转型

MES 作为企业的核心工业软件之一,其在未来的制造模式中将兼并承担“应用门户”、“数据及信息流通枢纽”、“虚拟资源平台”等角色.若局限于传统的生产模式中,MES 将仍是生产统计、数据可视化、生产监控的基础信息化软件.而在转型过程中,MES 与其他生产系统如 PLM、ERP、SCM 等均需同步转型,其所依赖的生产环境、资源基础是一致的.因此协同多个工业系统进行生产模式的整体转型将是企业转型的最大挑战.

5 总结与展望

本文结合离散行业、流程工业以及混合行业的行业特点,对其面向智能制造生产模式的转型目标及行业现状进行了详细剖析.结合德、中、美相继提出的关于智能制造标准体系架构的战略方案,本文从中提炼得到由产品生命周期(product lifecycle)、生产系统生命周期(production system lifecycle)、企业业务环(business cycle)以及供应链(supply chain)组成的四维价值网络,以分析企业多层级架构在智能制造模式下的定位变化.MES 作为企业多层级架构的核心,在多维网络中成为了各维度上生产子系统间的信息枢纽、平台门户以及服务中心.因此本文概括了 MES 核心功能的具体智能化转型方向及支撑技术;MES 的服务模式及管理模式转型方向也将为企业及 MES 软件供应商提供参考.

本文从 MES 的角度为企业提出一种转型途径,即通过优化自身的企业层级架构,明确各层级的职责及功能,改善目前生产执行系统的架构及核心功能,从而逐渐提升企业的生产效率、资源利用率,逐渐转变企业的服务模式.同时,不局限于 MES 的当前应用现状,多方面的前沿技术可助力 MES 的技术转型.本文提出的技术转型方案可为供应商对 MES 的进一步设计和研发提供参考方向.其中关于 MES 的智能化转型分析可能还存在遗漏之处,需在不断的功能测试、架构分析以及行业内具体的示范应用中进行补充和完善.

- [3] Hankel M, Rexroth B. The reference architectural model industrie 4.0 (RAMI 4.0)[J]. ZVEI, 2015.
- [4] 李伯虎, 张霖, 王时龙. 云制造一面向服务的网络化制造新模式[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(1): 1-7.
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.
- [5] 李伯虎, 张霖, 任磊, 等. 再论云制造[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(3): 449-457.
Li B H, Zhang L, Ren L, et al. Further discussion on cloud manufacturing[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(3): 449-457.
- [6] 姚锡凡, 于淼, 陈勇, 等. 制造物联网的内涵, 体系结构和关键技术[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(1): 1.
Yao X F, Miao Y U, Yong C, et al. Connotation, architecture and key technologies of Internet of manufacturing things[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(1): 1-10.
- [7] Monostori L. Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R & D challenges[J]. Procedia CIRP, 2014, 17: 9-13.
- [8] 张彩霞, 程良伦, 王向东. 基于信息物理融合系统的智能制造架构研究[J]. 计算机科学, 2013, 40(06A): 37-40.
Zhang C X, Cheng L L, Wang X D. Research on architecture of intelligent manufacturing based on cyber-physical system[J]. Computer Science, 2013, 40(06A): 37-40.
- [9] 张益, 冯毅萍, 荣冈. 智慧工厂的参考模型与关键技术[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(1): 1-12.
Zhang Y, Feng Y, Rong G. Reference model and key technologies of smart factory[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(1): 1-12.
- [10] 王云. 面向云制造的制造执行系统优化技术及其在机床生产企业中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
Wang Y. Optimization technologies of manufacturing execution system in cloud manufacturing and applications in machine production enterprise [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [11] 李亚白. 面向服务的协同制造执行系统集成与重构技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
Li Y B. Research on integration and reconfiguration technology of service-oriented collaborative manufacturing execution system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [12] 董天翔, 荣冈. 流程工业生产执行系统的软件基础设施[J]. 计算机与应用化学, 2010, 27(1): 117-122.
Dong T X, Rong G. Software infrastructure of manufacturing execution system for process industries [J]. Computers & Applied Chemistry, 2010, 27(1): 117-122.
- [13] 沈清泓. 企业制造执行系统和关键性能指标评估技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
Shen Q H. Research on manufacturing execution system and key performance indicator evaluation technology of enterprise [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [14] Lu Y, Morris K, Frechette S. Current standards landscape for smart manufacturing systems[M]. Berlin, Germany: Springer, 2016.
- [15] Kletti J. Manufacturing execution systems-MES[M]. Berlin, Germany: Springer, 2007.
- [16] Sendler U. Industrie 4.0: Beherrschung der industriellen komplexitat mit SysLM[M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2013.
- [17] Qiu R G, Zhou M. Mighty MESs: State-of-the-art and future manufacturing execution systems[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2004, 11(1): 19-25, 40.
- [18] Heidarnejad M, Liu J, Christofides P D. Economic model predictive control of nonlinear process systems using Lyapunov techniques[J]. AIChE Journal, 2012, 58(3): 855-70.
- [19] Chen X, Heidarnejad M, Liu J, et al. Distributed economic MPC: Application to a nonlinear chemical process network[J]. Journal of Process Control, 2012, 22(4): 689-99.
- [20] Sharma S, Kumar D. Stochastic behaviour and performance analysis of an industrial system using GABLT technique[J]. International Journal of Industrial and Systems Engineering, 2010, 6(1): 1-23.
- [21] Wei D, Lu X, Lu Z, et al. Performance analysis and optimization of organic Rankine cycle (ORC) for waste heat recovery[J]. Energy conversion and Management, 2007, 48(4): 1113-1119.
- [22] Dong M. Process modeling, performance analysis and configuration simulation in integrated supply chain network design[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.
- [23] 尹胜, 尹超, 刘飞, 等. 云制造环境下外协加工资源集成服务模式及语义描述[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(3): 525-32.
Sheng Y, Chao Y, Fei L, et al. Outsourcing resources integration service mode and semantic description in cloud manufacturing environment [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(3): 525-532.
- [24] 李成海, 黄必清. 基于属性描述匹配的云制造服务资源搜索方法[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(6): 1499-507.
Li C H, Huang B Q. Cloud manufacturing service resources based on attribute description matching[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(6): 1499-1507.
- [25] 高一聪, 冯毅雄, 谭建荣, 等. 制造资源耦合映射与模糊匹配技术研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24(3): 290-298.
Gao Y C, Feng Y X, Tan J R, et al. Research on coupled mapping and service matching technology of cloud manufacturing based on fuzzy integral[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2012, 24(3): 290-298.

- [26] 尹超, 张云, 钟婷. 面向新产品开发的云制造服务资源组合优选模型[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(7): 1368–1378.
Yin C, Zhang Y, Zhong T. Optimization model of cloud manufacturing services resource combination for new product development[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(7): 1368–1378.
- [27] Zhou B H, Wang S J, Xi L F. Data model design for manufacturing execution system[J]. Journal of Manufacturing Technology Management, 2005, 16(8): 909–35.
- [28] Lin L, Zhang W, Lou Y, et al. Developing manufacturing ontologies for knowledge reuse in distributed manufacturing environment[J]. International Journal of Production Research, 2011, 49(2): 343–59.
- [29] Alsafi Y, Vyatkin V. Ontology-based reconfiguration agent for intelligent mechatronic systems in flexible manufacturing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2010, 26(4): 381–91.
- [30] Ye L, Shao M H. Machining services description modeling based on OWL DL[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(4): 767–75.
- [31] Chungoora N, Young R I, Gunendran G, et al. A model-driven ontology approach for manufacturing system interoperability and knowledge sharing[J]. Computers in Industry, 2013, 64(4): 392–401.
- [32] Panetto H, Dassisti M, Tursi A. ONTO-PDM: Product-driven ONTOlogy for Product Data Management interoperability within manufacturing process environment[J]. Advanced Engineering Informatics, 2012, 26(2): 334–48.
- [33] Okeyo G, Chen L, Wang H, et al. Dynamic sensor data segmentation for real-time knowledge-driven activity recognition[J]. Pervasive and Mobile Computing, 2014, 10(2): 155–72.
- [34] Li Z. Chance constrained planning and scheduling under uncertainty using robust optimization approximation[J]. IFAC-PapersOnLine, 2015, 48(8): 1156–61.
- [35] Chu Y, You F. Integrated planning, scheduling, and dynamic optimization for batch processes: MINLP model formulation and efficient solution methods via surrogate modeling[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2014, 53(34): 13391–411.
- [36] Gosavi A. Simulation-based optimization[J]. Parametric Optimization Techniques and Reinforcement Learning Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [37] Jahangirian M, Eldabi T, Naseer A, et al. Simulation in manufacturing and business: A review[J]. European Journal of Operational Research, 2010, 203(1): 1–13.
- [38] Garg A, Deshmukh S. Maintenance management: literature review and directions[J]. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2006, 12(3): 205–38.
- [39] Espndola D B, Fumagalli L, Garetti M, et al. A model-based approach for data integration to improve maintenance management by mixed reality[J]. Computers in Industry, 2013, 64(4): 376–91.
- [40] Bevilacqua M, Ciarapica F, Giacchetta G, et al. Innovative maintenance management methods in oil refineries[M]//Quality and Reliability Management and Its Applications. Berlin, Germany: Springer, 2016: 197–226.
- [41] Shen W, Hao Q, Xue Y. A loosely coupled system integration approach for decision support in facility management and maintenance[J]. Automation in Construction, 2012, 25(1): 41–48.
- [42] Ruiz P A P, Kamsu-foguem B, Noyes D. Knowledge reuse integrating the collaboration from experts in industrial maintenance management[J]. Knowledge-Based Systems, 2013, 50(3): 171–86.
- [43] Lientz B P, Swanson E B. Software maintenance management[J]. IEE Proceedings E Computers & Digital Techniques, 1980, 127(6): 277.
- [44] April A, Abran A. Software maintenance management: Evaluation and continuous improvement[M]. New York, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2012.
- [45] Khan F, Rathnayaka S, Ahmed S. Methods and models in process safety and risk management: Past, present and future[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2015, 98: 116–147.
- [46] Chatha K A, Weston R H. Combined enterprise and simulation modelling in support of process engineering[J]. International Journal of Computer integrated manufacturing, 2005, 18(8): 652–70.
- [47] Aven T. Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundation[J]. European Journal of Operational Research, 2016, 253(1): 1–13.
- [48] Perry R W, Lindell M K. Preparedness for emergency response: Guidelines for the emergency planning process[J]. Disasters, 2003, 27(4): 336–50.
- [49] Crowl D A, Louvar J F. Chemical process safety: Fundamentals with applications[M]. New York, NJ, USA: Pearson Education, 2001.

作者简介

张 益(1993–), 男, 博士生. 研究领域为流程工业生产执行系统 MES, 数据驱动的生产计划调度优化等.

冯毅萍(1969–), 女, 博士, 高级工程师, 硕士生导师. 研究领域为复杂工业过程仿真、建模与优化, 企业综合自动化.

荣 冈(1963–), 男, 博士, 教授, 博士生导师. 研究领域为智慧供应链和智慧工厂整体解决方案, 流程工业生产执行系统 MES, 数据校正与数据挖掘, 复杂工业工程的虚拟现实与信息可视化等.