

DOI:10.13196/j.cims.2016.11.022

基于大数据的智慧工厂技术框架

吕佑龙, 张 洁⁺

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘要:为了在分析智慧工厂国内外研究现状的基础上,对制造业如何利用物联网、云计算、大数据等新兴技术实现智慧工厂展开研究,为智慧工厂的实施过程提供参考框架,探讨了集成制造物联、智能制造执行与制造协同的智慧工厂内涵,以及智慧工厂具备的大数据特征。提出由物物互联层、对象感知层、数据分析层、业务应用层和云端服务层五个层次和一个大数据中心构成的智慧工厂技术体系架构。特别针对大数据驱动的制造过程动态优化关键技术,探讨了其中涉及的大数据集成、大数据存储、相关性分析和相关性描述等大数据分析技术。所提智慧工厂技术体系与所展开的智慧工厂大数据技术讨论,将对制造业实现智慧工厂具有重要的借鉴价值。

关键词:智慧工厂;大数据;技术框架

中图分类号:TP18;TP274 文献标识码:A

Big-data-based technical framework of smart factory

LYU Youlong, ZHANG Jie⁺

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Based on a comprehensive literature review of the smart factory, its nature composed of internet of things, intelligent manufacturing execution system and manufacturing collaboration was discussed, and its big data characteristics were also analyzed. The technical framework contained the physical interconnection layer, the object sensing layer, the data analysis layer, the business application layer and the cloud service layer was proposed. The content of critical big-data-based manufacturing optimization technology for three middle layers was elaborated, which involved the big data integration method, the big data storage method, the correlation analysis method and the correlation description method. The big-data-based technical system would provide important referential value for manufacturing industry to realize the smart factory.

Keywords: smart factory; big data; technical framework

0 引言

随着全球市场竞争的日益激烈,制造行业在提高产品质量、增加生产效益、降低生产成本和减少资源消耗等范畴面对着更为严苛的要求。制造企业借力于制造技术的不断革新,通过引入物联网、大数据、3D 打印和云计算等新兴技术,实现生产过程的透明化、智能化和全局优化,来应对以上挑战^[1],由此引发了新一轮产业革命,即以全球化、信息化、智

能化、智慧化和绿色化为发展方向的智慧制造浪潮,并得到了世界主要制造国家的高度重视。

欧美发达国家在金融危机年代发现了虚拟经济的脆弱性之后,重新认识到制造业的重要地位,在新一轮产业革命中相继提出各自的发展战略规划,以进一步巩固其在全球制造业的支配地位,其中智慧工厂作为产业革命的核心,得到了空前重视与广泛研究。德国在积极参与以“未来的工厂”为主题的尤里卡项目、智能制造 IMS2020 计划的基础上,根据

收稿日期:2015-09-30;修订日期:2016-08-25。Received 30 Sep. 2015;accepted 25 Aug. 2016.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51435009)。**Foundation item:** Project supported by the National Natural Science Foundation, China (No. 51435009).

德国制造业的发展现状,提出工业 4.0 计划^[2]。计划针对“智慧工厂”主题,将重点研究智能化生产系统和过程,以及网络化分布式生产设施的实现,期望通过制造业智能化转型保证德国制造业的未来^[3]。从德国安贝格西门子智能工厂实现的互联网制造、产品可靠性追溯与德国博世洪堡工厂的无线射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)追溯系统可知,德国在新一轮产业革命中的智慧工厂研究已初见成效。美国政府在 2009 年至 2012 年期间陆续提出《重振美国制造业政策框架》、《先进制造伙伴计划》与《先进制造业国家战略计划》等一系列制造业振兴计划,以保持其制造业的全球竞争优势^[4]。通用电气、AT&T、思科、IBM 和英特尔(Intel)针对互联网技术在制造业应用中的不断深入,于 2014 年年初宣布成立工业互联网联盟,旨在打破技术壁垒,促进物理世界和数字世界的融合,释放所有制造领域的商业价值。通用电气在印度投资成立的炫工厂,利用互联网技术对来自航空发动机、涡轮发动机的传感器数据进行采集存储,在此基础上通过大数据技术的分析与处理,实现设备维护维修、生产效率提升等全局优化,以提高工厂的智慧化水平^[5]。

在中国,随着要素成本的持续上升和传统比较优势的不断弱化,过去依靠发达国家拉动作为增长引擎的局面正在发生变化,从低附加值、劳动密集型模式向追求高附加值、高技术含量模式的转变,是中国制造业面临的巨大挑战。针对以上挑战,政府提出“中国制造 2025 规划”,以信息化与工业化深度融合为主线重点促进以云计算、物联网、大数据为代表的新一代信息技术与现代制造业、生产性服务业等的融合创新,从而提升中国制造的水平。在学术研究上,李伯虎等阐述了云计算服务模式、云安全、高性能计算、物联网等理念和新技术对制造的变革性影响,在此基础上提出一种面向服务的工厂网络化制造新模式——云制造^[6];吉旭等具体针对高分子行业工厂,提出基于云计算和大数据技术的高分子行业云制造架构,讨论了云制造支撑平台中的关键技术^[7];黄琛等针对知识在信息化制造企业中的重要性,提出基于知识的企业计算机集成制造系统(Computer Integrated Manufacturing System, CIMS)框架,以提高企业的智慧水平^[8];张映峰等针对物联网技术对制造工厂带来的改变,提出一种“物物互联,感知制造”环境下的制造执行系统——基于物联技术的制造执行系统^[9];姚锡凡等对制造物联

的定义进行探讨,分析了制造物联与智能制造和云制造的关系,展望了制造物联未来真正实现智慧工厂的发展前景^[10]。以上学者从各自的角度出发,对物联网、大数据、云计算等新兴技术冲击下如何提高制造业水平进行了探讨,但是这些研究存在明显的局限性。例如,云制造更侧重于利用服务互联网为工厂间的相互沟通、协同制造提供平台支撑,制造物联更侧重于在工厂内部利用物联网提高制造过程的智能化。作为新一轮产业革命的最终成果,智慧工厂应当是比现有智能制造、云制造和制造物联等更为宽广的概念。不同于智能工厂中智能设备加上传统制造执行系统的本质,智慧工厂的本质应该是对工厂自身运行状况有着规律性了解,并自发形成新的生产运行模式的智慧存在。具体来说,智慧工厂需要在制造物联的基础上,通过数据分析发现工厂运行规律,利用规律实现智能化决策,然后将智能化决策封装为智能化服务,最后通过云端敏捷配置实现服务协同,以自主学习与自我适应方式形成工厂新产物。然而由于智慧工厂的概念仅处于初步形成阶段,行业对如何在新一轮产业革命中实现以上过程还存在迷茫,亟需对其进行深入探讨,以帮助制造业工厂准确把握未来的发展方向。

本文将结合国内外研究工作,深入探讨智慧工厂的内涵与特征,分析智慧工厂的技术体系及大数据关键技术,展望新一轮产业革命中智慧工厂的发展前景。

1 智慧工厂的内涵与大数据技术

2010 年,Chand 等在著名杂志《时代周刊》发文探讨了制造业的未来发展^[11],将其划分为三个阶段:①工厂和企业范围的互联化,通过整合不同车间工厂和企业的数据库,实现数据共享,以更好地协调生产的各个环节,提高企业整体效率;②通过计算机模拟和建模对数据加以处理,生成“制造智能”,以实现柔性制造、生产优化和更快的产品定制;③由不断增长的制造智能激发工艺和产品创新引起市场变革,改变现有商业模式和消费者的购物行为。本质上,这三个阶段是从数据的角度出发,通过自底向上的过程构建未来智慧工厂的蓝图,并且描述了实现智慧工厂的三个主要需求特征,即透明化制造、智能化管控和智慧化协同。第一阶段通过物联网技术,实现工厂内的物物互联与数据共享,透明化制造过程;第二阶段在第一阶段的基础上,通过数据处理与分

析实现生产调度优化、产品质量监控等制造执行系统功能模块的实施应用,提升工厂智能化水平;第三阶段引入服务互联网对工厂智能化功能做服务包装,通过基于互联网数据交互在云制造平台实现客户参与的全球化工厂资源协同,形成以大规模个性化定制为特征的商业新模式。

具体来说,在智慧工厂运作过程中,首先应当在传统的车间局部小范围智能制造基础上,通过物联网集成底层设备资源,实现制造系统的泛在感知、互通互联和数据集成;其次利用生产数据分析与性能优化决策,实现工厂生产过程的实时监控、生产调度、设备维护和质量控制等工厂智能化服务;最后通过引入服务互联网,将工厂智能化服务资源虚拟化到云端,通过人际网络互联互动,根据客户个性化需求,按需动态构建全球化工厂的协同智能制造过程。因此,智慧工厂的运作方法是由制造物联、制造执行和制造协同三个重要内涵层次化整合而成的体系化内容(如图 1),它不但包括工厂生产过程数据的采集与处理等制造信息化手段^[12],也包括从数据分析中获取工厂运行规律并对工厂制造过程做出实时决策的智能化手段,同时还包括利用人际互联网数据形成定制化等商业新模式的协同组织手段。由此,如何行之有效地将制造信息化方法、智能决策方法与协同组织方法进行合理整合,满足透明化制造、智能化管控和智慧化协同三大需求特征,将对智慧工厂的成功实施与高效运作产生极为关键的影响。

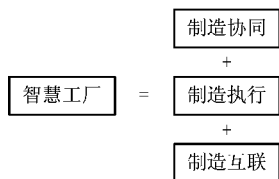


图1 智慧工厂的内涵

特别地,在传统工厂的智慧化转型过程中,由于在物物互联阶段广泛采用了传感器网络、RFID 设备,以及在服务互联过程中普遍应用了互联网技术,工厂数据在规模性(volume)、多样性(variety)和高速性(velocity)上都明显增加^[13],因此智慧工厂数据呈现出典型的大数据“3V”特性。并且由于数据采集的设备与手段多样、工厂制造过程的动态事件频发、工厂运行环境的交互开放,智慧工厂大数据还具备了高维度、多尺度、不确定和高噪声等特性。从范围上,智慧工厂大数据包括了从车间生产现场到工厂供应链管理所有生成、交换和集成的数据,包含

了所有与设计、制造和服务相关的业务数据和衍生附加信息。从作用上,智慧工厂大数据实现了客户需求、产品设计、协同制造、售后服务等过程的全面描述,在此基础上的大数据分析技术支持生产调度优化、产品质量监控、生产资源配置等实时决策优化,提升工厂智能化水平,从而更好地服务于全球化工厂协同制造。

鉴于制造资源配置逐步呈现信息密集型趋势,利用大数据融合、处理、存储、分析等技术使智慧工厂大数据为制造资源实时感知、制造过程优化控制、制造服务敏捷配置等环节提供决策支持,成为传统制造过程实现数据化制造、信息化制造、知识化制造、智慧化制造逐步升级发展的关键基础^[14-15]。因此大数据技术作为智慧工厂技术体系中的核心技术,将进行重点关注与深入讨论。

2 基于大数据的智慧制造技术体系架构

根据对智慧工厂内涵和大数据技术的探讨可知:制造互联通过各种工业化通讯手段提供数据采集基础,其本质是实现工厂资源的“互联化”目标;制造执行基于广泛互联和透彻感知,通过大数据采集与分析发现工厂运行规律,利用智能决策手段实现工厂性能优化,其本质是通过工厂内部、车间层面的数据分析与应用服务实现“智能化”目标;制造协同在“智能”基础上引入互联网大数据,通过客户行为分析、市场趋势预测等手段,对分布式的工厂资源与服务进行配置优化,达到工厂组织结构、运行模式的自适应变化,其本质是通过多个“智能化”服务的合理优化配置实现“智慧化”目标。根据制造互联中的工厂互联化环节,与制造执行中的数据采集、分析与应用三个环节,以及制造协同中的服务配置环节,智慧工厂的技术架构体系应包括五个层次(如图 2),即物物互联层、对象感知层、数据分析层、业务应用层和云端服务层,这些层次将逐步实现工厂制造过程的互联化、数字化、信息化、智能化和智慧化这“五化”目标。同时,体系中还包括大数据中心,负责完成智慧工厂大数据的处理、存储、分析和应用等环节,为各层次功能实现提供数据支撑。下面分别展开详细介绍。

2.1 物物互联层

物物互联层主要面向包括生产设备、计算机与操作人员在内的物理制造资源,针对要采集的多源制造数据,通过配置各类传感器、RFID 标签和二维

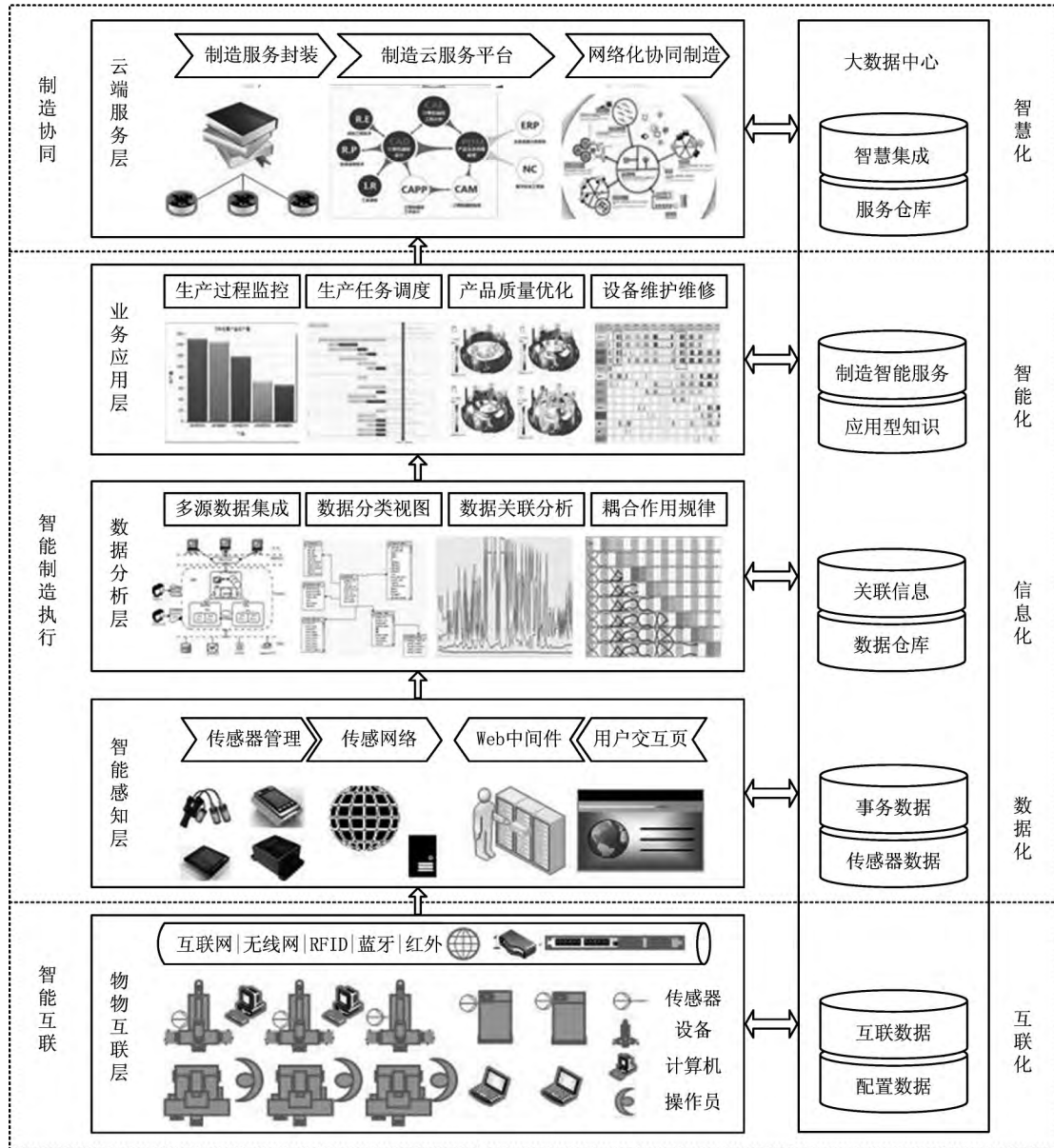


图2 智慧工厂技术框架

码来采集制造数据,并利用工业互联网、无线网络、蓝牙、红外等,按照约定的协议进行数据交换和通信。最终实现物理制造资源的互联和互感,确保制造过程多源数据的实时、精确和可靠获取。

2.2 对象感知层

智能感知层首先针对多种类型传感器形成体系化管理,在实现异构传感器管理、传感器数据格式化封装、传感器数据传输协议等的基础上,利用传感器数据的网络传输,实现对物理制造资源相关数据的主动感知和数据实时获取。同时针对 Web 端的用户交互操作形成标准化定义,在对用户界面进行模块化设计的基础上,利用 Web 中间件的用户行为解

析功能,实现对用户事务数据的实时感知获取。

2.3 数据分析层

数据分析层是在获得制造数据的基础上,通过提取—转换—装载 (Extract-Transform-Load, ETL) 过程将源自异构传感器和用户界面上多源、分散的数据抽取集成为全局统一的数据形式,以构建制造过程数据仓库;并根据数据间属性连接和主题相关性,构建以数据为节点、数据相关性为边的数据关系复杂网络;通过数据关联分析手段,从复杂网络模型中获取数据间的耦合作用机理,构建数据演化规律预测模型,从而实现对制造过程变化规律的准确描述,并提供可用于制造业务应用的标准化

信息。

2.4 业务应用层

业务应用层主要面向制造企业的不同优化角度,在构建面向具体主题的数据仓库的基础上,通过数据分析过程获取关联信息描述的数据演化规律,并采用实时预警、反馈调控和仿真优化等具体手段,实现生产过程监控服务、生产任务调度服务、产品质量优化服务、设备维护维修服务等各种制造服务业务,其本质是对工厂运行知识的应用,以实现制造过程的实时动态优化,提升制造企业智能化水平。

2.5 云端服务层

云端服务层将制造资源等基础设施、数据分析平台、业务应用软件与生产制造服务虚拟化封装成云端服务,构建面向制造的服务仓库。同时基于服务互联网和云制造服务平台实现对封装制造资源及服务的集中管理和高度共享,根据客户大规模定制产品全生命周期的个性化需求,通过制造资源的敏捷配置与制造服务的客户定制,实现全球化互联工厂的协同制造,为客户提供可靠的个性化服务,形成智慧工厂下的协同制造新模式。

2.6 大数据中心

大数据中心的相关数据包括制造资源基本配置数据和互联网络数据、传感器采集数据和用户操作事务数据、全局统一格式数据和数据关联规则信息、业务应用优化知识和制造增值智能服务、制造服务封装平台和网络协同智慧集成等不同体现形式。大数据中心不但需要针对这些数据存在的高噪声、多样性、多尺度的特点采用合适的清洗方法与数据集成方法提高数据质量与数据可用性,还需要针对数据存在的规模性和高速性采用高效并行的数据查询、存储与读取算法以提高数据获取与分析效率,针对智慧工厂多维度业务应用情况下数据存在的高维度特性构建面向主题的数据仓库,以提高业务相关数据的集聚程度;最后可以将智慧工厂大数据作为云制造平台中重要的制造资源进行虚拟化封装与网络化交易,以提高数据的全局共享程度。基于大数据中心提供的数据支撑,大数据技术可根据智慧工厂技术体系不同层次的互联化、数据化、信息化、智能化和智慧化目标,提供数据采集、数据融合、数据分析、数据应用、数据交易等诸多功能,使智慧工厂的技术体系实现与发挥智慧化效用。

3 智慧工厂核心技术——大数据驱动的制造过程动态优化技术

根据智慧工厂内涵分析与相应提出的技术架构体系,智慧工厂技术主要包括基于工业互联网的制造资源互联技术、大数据驱动的制造过程动态优化技术与制造云服务敏捷配置技术。其中,在物物互联层,基于工业互联网的制造资源互联技术通过工业互联网为各种不同制造资源的端到端互联提供技术支撑,其本质是通过物理制造资源的互联通信,确保制造过程多源数据的实时、精确和可靠获取,提供工厂透明化的基础。在云端服务层,制造云服务敏捷配置技术通过服务互联网将工厂资源与工厂服务进行虚拟化封装并接入到云制造公共服务平台,为各类客户的个性化大规模定制提供相应的敏捷配置,形成全球化工厂的网络化协同制造,其本质是通过客户需求驱动的工厂服务敏捷配置形成协同制造新模式。这两项技术作为智慧工厂的基础技术,在制造物联、云制造等相关文献中已经形成较为详细与完整的技术体系,因此不做展开介绍^[6,9-10]。

而智慧工厂技术体系中的对象感知层、数据分析层、业务应用层三个层次,向下基于制造互联完成制造系统的全面感知,根据制造实时数据完成质量监控优化、生产调度优化、产品创新设计等不同业务需求,向上完成工厂服务的虚拟化封装,为客户提供定制化增值服务。这些层次所扮演的角色与传统制造执行系统有一定重复,但是它们的目标责任获得了进一步扩展,其本质是在工厂数字化的基础上通过知识发现与智能决策实现智能制造服务,是智慧工厂技术体系的核心。并且,以上智能制造执行层是直面智慧工厂大数据挑战、需要借助大数据技术提高工厂智能化服务水平的主要环节,它们基于大量实时的设备监控数据、物料库存数据等生产数据,以及源源不断的客户定制化交互数据,通过大数据处理、分析与决策技术来满足不同维度的工厂智能化服务应用需求。由此可知,针对对象感知层、数据分析层与业务应用层的大数据驱动的制造过程动态优化技术,是智慧工厂的核心技术。

大数据驱动的制造过程动态优化技术需要在制造资源全面互联获取制造过程数据的基础上,通过智慧工厂大数据分析实现面向智慧工厂不同维度性能决策优化的应用。由于海量多维制造数据对智慧工厂制造过程进行了全面细致地描述,智慧工厂的

动态优化技术可以直接从数据中寻找隐藏其中的关系和联系,通过数据分析深层次地认识和挖掘工厂运行规律知识,以此为依据针对产品设计、质量分析等不同业务应用形成具体决策体系。其中的关键是在多种来源数据采集的基础上,实现智慧工厂大数据分析的方法,具体包括多源异构工厂制造数据的统一描述、面向主题数据仓库的快速构建、数据间关联关系的高效分析与数据相关性的准确描述,从而为具体的业务应用决策提供支持。由此提出的大数据驱动的制造过程动态优化方法体系如图 3 所示。

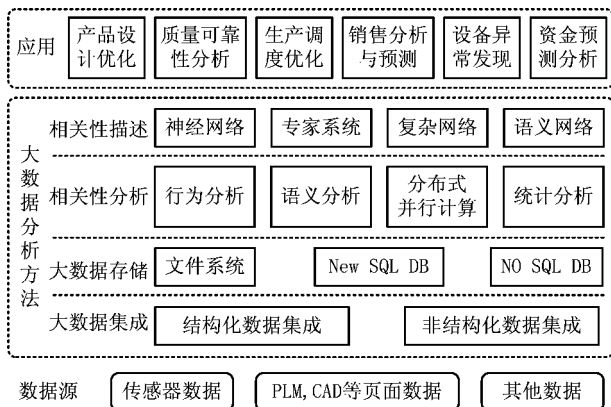


图3 大数据驱动的制造过程动态优化方法体系

(1) 多源数据采集方法

数据采集实现对制造过程的全面描述,是大数据驱动的制造过程动态优化技术的基础。在智慧工厂中,具体的数据采集对象和方法主要包括面向产品全生命周期管理(Product Lifecycle Management, PLM)、CAD 等多种信息系统的数据库连接技术,基于传感器、可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)与图像采集设备的上位机通讯技术,面向其他形式数据(图片、PDF 等)的路径化标签技术等。并且,由于不同业务应用所需的数据来源不尽相同,需要形成面向具体业务应用的数据采集方案与数据采集内容。

(2) 大数据集成方法

智慧工厂运行过程中,从传感器网络、PLM 与 CAD 等系统的网页服务端、RFID 阅读器和设计文档库等不同数据源实时获取包括数值、统计模型和图像等多种形式,以及具有温度、百分比和 PH 值等多种量纲的各类异构数据,这些数据因其海量、高维、多源异构、多尺度和高噪声等特性而难以直接用于制造过程动态优化,需要针对以上数据特点,在数据清洗的基础上,通过元数据模型管理实现企业结

构化和非结构化数据的统一集成与高度共享,为智慧工厂制造过程动态优化提供可靠、可复用的数据资源。

(3) 大数据存储方法

产品、工艺、装备、系统运行等不同主题的制造数据相互影响,使智慧工厂呈现复杂的运行特性。首先需要根据数据的结构化、非结构化和半结构化等特点将智慧工厂大数据分布式存储在文件系统、New SQL 数据库和 NO SQL 数据库等多种数据仓库中,并通过增量式索引、基于字典的分类视图等手段实现数据的快速查询与索引,构建面向主题的数据仓库。

(4) 相关性分析方法

在面向主题数据仓库的基础上,需进一步通过面向大数据的行为分析、语义分析、统计分析和分布式并行计算引擎,实现对工艺参数、装备状态参数等制造数据的关联分析,并利用复杂网络等理论描述制造数据之间的关联关系,以分析制造数据间的耦合机理,获取智慧工厂演化规律知识。

(5) 相关性描述方法

利用各种数学模型对智慧工厂演化规律知识进行进一步提炼与集中表述,具体包括神经网络、专家系统与复杂网络等多种方法,这些模型实现智慧工厂演化规律知识的数学化表述,可以根据工厂制造数据实时在线预测工厂性能。

(6) 工厂性能优化方法

在构建面向产品质量、运行效率、设备可用性等不同性能指标的实时预测模型的基础上,对预测模型中涉及的可控参数进行实时调节,具体包括基于性能优化目标值与实际值误差的负反馈机制、预测模型输入变量的协同优化机制等多种方法,最终实现工厂性能的持续优化。

4 结束语

随着以计算机和互联网为代表的信息技术在行业应用的不断深入,制造业正在经历以信息化与自动化深度融合为标志的新一代产业革命,逐步形成具备全球化、信息化、透明化和智能化等特点的智慧化新工厂。本文在对智慧工厂“制造互联+智能制造执行+制造协同”内涵和大数据特点深入探讨和分析的基础上,提出包括物物互联、对象感知、数据分析、业务应用和云端服务的智慧工厂技术体系层次化架构,讨论了大数据驱动的制造过程动态优化

技术方法体系。本文所提的基于大数据的智慧工厂技术体系,对物联网、服务互联网、用户交互网和企业知识网等技术在工厂层级的集成具有重要借鉴价值,为传统制造工厂从数字化、信息化、智能化到智慧化发展奠定了研究基础。下一步将以晶圆制造车间、汽车装配车间为具体应用场景,通过实施大数据驱动的制造过程动态优化技术,提升质量、成本和服务等多个方面的工厂性能。

参考文献:

- [1] LU Yongxiang. On the way to green and intelligent manufacturing[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(4): 379-386 (in Chinese). [路甬祥. 走向绿色和智能制造[J]. 中国机械工程, 2010, 21(4): 379-386.]
- [2] MARCO T. IMS2020_action-roadmap_KAT1-5. [EB/OL]. [2016-08-02]. <http://www.ims2020.net/>.
- [3] Industrial 4.0 working group, The German federal ministry of education. German industrial strategic plan implementation suggestion 4.0[J]. Mechanical Engineering, 2013(7/8/9): 23-45(in Chinese). [工业 4.0 工作组, 德国联邦教育研究部. 德国工业 4.0 战略计划实施建议(上)[J]. 机械工程导报, 2013(7/8/9): 23-45.]
- [4] HOLDREN J P, POWER T, TASSEY G, et al. A national strategic plan for advanced manufacturing[R]. Washington, D. C., USA; US National Science and Technology Council, 2012.
- [5] LI Gang, MENG Zhaoli. Internet +: manufacturing[R]. Shenzhen: Tencent Institute, 2015(in Chinese). [李刚, 孟昭莉. 互联网+: 制造业篇[R]. 深圳: 腾讯研究院, 2015.]
- [6] LI Bohu, ZHANG Lin, WANG Shilong. Cloud manufacturing: a new service-oriented networked manufacturing model [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(1): 1-7, 16(in Chinese). [李伯虎, 张霖, 王时龙. 云制造—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, 16.]
- [7] JI Xu, ZHONG Ganji, YU Yang et al. Key technologies for cloud manufacturing in polymer industry[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(1): 3073-3078(in Chinese). [吉旭, 钟淦基, 于洋, 等. 高分子材料行业云制造的关键技术及应用[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(1): 3073-3078.]
- [8] HUANG Chen, FAN Yushun. Knowledge-based CIMS framework and key technologies[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2003, 9(10): 830-833(in Chinese). [黄琛, 范玉顺. 基于知识的企业 CIMS 框架及关键技术研究[J]. 计算机集成制造系统, 2003, 9(10): 830-833.]
- [9] ZHANG Yingfeng, ZHAO Xibin, SUN Shudong, et al. Implementing method and key technologies for IoT-based manufacturing execution system[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(12): 2634-2642 (in Chinese). [张映锋, 赵曦滨, 孙树栋, 等. 一种基于物联技术的制造执行系统实现方法与关键技术[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(12): 2634-2642.]
- [10] YAO Xifan, YU Miao, CHEN Yong, et al. Connotation, architecture and key technologies of Internet of manufacturing things [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(1): 1-10(in Chinese). [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): 1-10.]
- [11] CHAND S, DAVIS J F. What is smart manufacturing[J]. Time Magazine Wrapper, 2010(7): 28-33.
- [12] OCTAVIAN M, THEODOR B, SILVIU R. VMES: virtualization aware manufacturing execution system[J]. Computers in Industry, 2015, 67: 27-37. DOI: 10.1016/j.compind.2014.11.003.
- [13] MANYIKA J, CHUI M, BROWN B, et al. Big data, the next frontier for innovation, competition and productivity[R]. New York, N. Y., USA; McKinsey Global Institute, 2011.
- [14] KELLY J, FLOYER D. The industrial internet and big data analytics: opportunities and challenges[EB/OL]. [2016-08-02]. http://wikibon.org/wiki/v/The_Industrial_Internet_and_Big_Data_Analytics:_Opportunities_and_Challenges. Wikibon, 2013.
- [15] TCSET. SIEMENS: using big data and analytics to design a successful future[EB/OL]. [2016-08-02]. <http://blogs.teradata.com/customers/siemens-using-big-data-analytics-design-successful-future/>. 2014.

作者简介:

吕佑龙(1988—),男,湖南邵阳人,博士研究生,研究方向:智能决策、大数据等, E-mail: xsygll@sju.edu.cn;
 张洁(1963—),女,江苏江阴人,教授,博士生导师,研究方向:制造信息工程、智能制造系统及制造型服务等,通信作者, E-mail: zhangjie@sju.edu.cn.