

·中药智造·

DOI: 10.11656/j.issn.1673-9043.2020.05.02

基于数据驱动的过程智能优化技术研究现状及其在中药先进制药中的应用展望*

司梦兰, 王璧璇, 缪培琪, 于洋, 所同川, 李正
(天津中医药大学中药制药工程学院, 天津 301617)

摘要:随着信息技术的发展,现代制造企业面临着信息化、智能化的转型升级需要,以实现产品质量与生产效率的提升及生产成本的降低。与此相应产生的工业大数据正逐渐成为新时代的企业核心资源,有效提取其背后隐藏的价值越来越成为企业的核心竞争力。基于数据驱动技术建立生产过程的数字化模型,从而实现基于模型的过程优化控制,这作为一种智能制造关键技术,已经在各个行业中逐步得到了应用。文章通过对数据驱动的智能制造技术在各个行业中的应用情况进行总结,并评述其研究成果如何为大数据时代下中药制药过程智能优化控制提供策略建议。

关键词:数据驱动;中药智能制药;过程控制优化;智能制造

中图分类号:R2-03

文献标志码:A

文章编号:1673-9043(2020)05-0485-08

近年来,随着人工智能、大数据等浪潮席卷全球,第4次工业革命悄然兴起,大国竞争已聚焦于智能制造领域。在新一代人工智能大数据的热潮驱动下,中国以“创新驱动,质量为先”的原则,发布了《中国制造2025》发展战略,并在该战略中明确提出:以新一代信息技术与制造业深度融合为主线,以推进智能制造为主攻方向,实现制造业由大变强的历史跨越^[1]。

中药产业作为医药制造业中具有独特原创优势的民族产业,自中国共产党第十八次全国代表大会以来,其发展已上升为国家战略高度。《中医药发展战略规划纲要(2016—2030年)》明确指出要注重信息化、智能化与工业化相融合,加快中国中药制药的现代化进程。纵观中国整个中药生产,可知目前中药制药技术总体水平仍较落后,制药过程相关的数据没有合理地采集、集成、挖掘和利用,医药行业中存在严重的“信息孤岛”现象^[2]。这些问题导致

了中药制药质量和疗效的不稳定,同时也制约了中药制药数字化、现代化的发展。在国家发展和改革委员会发布的《产业结构调整指导目录(2019年本)》中也明确表明要正式淘汰落后医药产能,并在医药领域鼓励系统控制等技术开发与应用等。因此,中药制药产业的现代化与智能化转型势在必行。

随着现代制造业生产过程复杂性的增加和被控系统规模的扩大,其对控制优化的要求也逐渐提高。仅仅依赖于传统的机理建模方法对工业生产进行预测、优化和控制已愈来愈难。通过数据驱动技术,精确分析与定义需求,用需求驱动、解决现实问题正成为一种趋势^[3]。许多企业开始对生产过程中产生的数据进行实时记录与储存,工业生产现场的过程参数、质检数据、设备参数等越来越受到重视,那么在难以进行机理建模的情况下,如何挖掘生产现场数据背后的信息,实现对工业生产的过程控制优化正成为一个研究热点。对中药制药过程而言,由于其本身具有非线性、时变性、滞后性的特点,一些常规的控制手段并不适用于中药制药。目前对于数据驱动在中药制药生产中的应用报道还比较少,故本文对数据驱动技术在制造业中的应用情况进行综述,并结合中药制药工业特点,对数据驱动技

* 基金项目:重大新药创制科技重大专项(2018ZX09201011);中国工程科技中长期发展战略研究项目(2019-ZCQ-10)。

作者简介:司梦兰(1995-),女,硕士研究生在读,主要从事中药制药工程方向研究。

通讯作者:李正, E-mail: lizheng@tjutcm.edu.cn。

术在中药制药中的应用前景进行展望,以期为后续研究奠定基础。

1 基于数据驱动的过程优化技术应用现状

数据驱动控制是指:控制器设计不包含受控过程机理模型信息,仅利用受控系统的在线和离线输入和输出数据以及经过数据处理得到的知识来设计控制器,并在一定的假设下,有收敛性、稳定性保障和鲁棒性结论的控制理论和方法^[3]。数据驱动的控制方法可分为两类:一是根据测量数据进行系统辨识,建立近似模型,再利用神经网络等工具的非线性逼近能力,通过不停的训练学习获取输入和输出间的函数式,从而基于该模型设计控制器;二是直接根据测量的数据对系统进行控制^[4]。数据驱动技术是一种应用广泛的数据处理技术,通过对大量在线和离线的数据进行分析处理,实现基于数据的监控、诊断、决策和优化等目标^[5]。

目前已有大量学者对制造业工业生产过程中的状态监测和控制进行了研究,涉及冶金、石油化工、电力、钢铁等多个重要领域^[6-9]。制造业包括以机械装备制造为代表,具有结构复杂、非标定制需求等特点的离散工业和以石化、建材等原材料工业和电力等能源工业为代表,具有连续程度高、机制不清等典型特点的流程工业。由于流程工业与离散工业的生产特点不同,数据驱动技术在应用上会有差别,故本文对此进行综述,借鉴其在发展较为成熟领域的研究成果,为中药制药的过程智能优化控制研究提供方向。

1.1 基于数据驱动的过程优化技术在流程工业中的应用 数据驱动的过程优化技术在流程工业中的应用主要体现在选矿、冶金、石油、炼钢、造纸等领域,另外在生物发酵等领域也有较好的应用。

一般可通过统计回归、支持向量机等方法建立数据驱动模型,然后基于模型实现对生产指标的预测和优化控制策略构建。柴天佑院士课题组针对选矿的过程,对提高全局生产指标的数据驱动混合智能优化控制方法和技术进行了综述^[10]。代伟等^[11]针对赤铁矿磨矿过程,提出了一种由回路预设值、优化设定值的优化和评估、功能指标预估以及磨矿过程中粒度的软测量构建的基于数据驱动的磨矿过程优化控制方法,并通过实际运行的数据验证了其有效性。桂卫华院士等^[12]针对铜闪速熔炼过程,提出了基于数据驱动的操作模式优化的概念和控制框架,并通过实际工业运行数据进行了仿真验证。

刘洪太^[13]针对石油工业信息系统的质量控制问题,采用支持向量机可靠性模型进行模拟仿真实验,表明数据驱动的软件可靠性模型预测结果具有较高的决策价值。

除了上述通过统计回归、支持向量机方法建立数据驱动模型外,还可利用神经网络方法对数据驱动模型进行建立。单文娟等^[14]利用纸浆洗涤过程累积的大量工业数据,以残碱和黑夜波美度为两大指标,基于两步神经网络法对数据进行聚类 and 模式匹配,构建优化模式库,最后找出最优操作模式,以此将数据驱动思想进行了应用。代伟等^[15]基于 Prey-Predator 的案例推理与 Elman 神经网络的 Q 函数神经网络模型相结合,在增强学习的框架下优化回路设定值,实现了磨矿过程的优化控制。

对于整个生产过程中机理模型都难以建立的工业生产过程,可基于机理方法和数据方法的优点,将数据驱动与已建立的简单机理模型进行结合,从而实现智能制造技术的应用。李康等^[16]针对湿法冶金过程的工序多、机理复杂等特性,将基于模型建模和基于数据建模结合起来,根据即时学习(JITL)方法,利用历史数据在当下的工作点附近建立操作补偿值和经济效益增量的相关模型,并通过优化求解出当下工作点使得经济效益增量最大的操作量补偿。

对于生物发酵领域,其除了具有流程工业通用特点外,还具有严重的非线性、不确定性和时变性的特点,这对实现生产过程的优化控制非常困难^[17]。相关领域的专家对此进行了许多研究,主要分为基于模型控制和基于数据驱动控制两大类,但由于基于模型的控制方法过分依赖机理模型,从而限制其使用范围。故对于生物发酵的过程优化,可通过函数建模等数据驱动方法进行智能优化。桑海峰等^[18]利用多支持向量机建模方法,对诺西肽发酵过程菌体浓度建立预估模型,表明了预估结果与实验结果具有较高的吻合度。Ben 等^[19]和 Soons 等^[20]分别针对乳酸多罐连续发酵和百日咳杆菌发酵过程,采用自适应控制方式,并取得了较好的控制效果。另外,对于生物发酵过程中难以测量的重要参数,可通过神经网络进行软测量,从而实现发酵过程的在线控制。乔晓艳等^[21]利用一种基于 RBF 神经网络的软测量方法解决了微生物发酵过程中菌体浓度难以实时在线检测的问题。高学金等^[22]利用人工神经网络对维生素 B₁₂ 的发酵过程建立了软测量模型并进行

了多步评估。

除此之外,通过训练神经网络,还可实现结果函数的预报以及一些关键参数的控制优化,从而达到智能化的控制。彭海刚等^[23]针对生物发酵过程难以用数学模型进行控制的问题,以大肠杆菌发酵生产类人胶原蛋白为例,将溶氧量作为关键因素,采用 BP 神经网络的控制方法进行训练,并用训练后的网络对发酵中的影响因素进行控制,表明了 BP 神经网络可以有效提高产量。李运锋等^[24]在头孢菌素 C 的生产中运用神经网络的滚动学习预报技术,对产量、产物质量浓度和罐批效益函数的超前预报进行研究,得到较好效果。魏同发^[25]针对生物质发酵制备燃料乙醇的过程控制,提出了基于神经网络的 PID 参数自整定算法,结果表明了该法在控制发酵温度方面的有效性。王斌等^[26]对于生化过程的温控问题,提出了神经网络自回归滑动平均控制方法,并取得了较满意的效果。

对于流程工业的智能化,除了上述的过程建模方法,还可结合数字孪生技术,将其与工业生产中的数据进行结合,从而达到过程优化控制的目的。徐钢等^[27]针对转炉冶炼终点碳含量预测精度偏低的问题,利用函数型数字孪生模型在拉碳阶段对钢水中含碳量的预测值来控制终吹点,证明了函数型数字孪生模型具有较好自学习和自适应能力。张旭辉等^[28]针对煤矿井下自动化工作面设备远程控制的需求,提出“虚实同步、数据驱动、远程干预、人机协作”的控制策略,以虚拟现实(VR)技术为媒介,通过数字孪生实现基于数据驱动的虚拟交互,达到了远程操控^[29]。

1.2 基于数据驱动的过程优化技术在离散工业中的应用 离散工业是通过构建制造单元的方式来进行生产,具有多品种、小批量、工艺路线和设备使用较灵活等特点。在工业生产中企业更加重视生产的柔性,那么对于过程控制的优化,企业更加注重的是制造物料流动过程的高度自动化、工厂内部参与产品制造过程的全要素互联与泛在感知以及对制造过程的信息物联系统建模与仿真^[30]。因此对于离散工业的转型升级,亟待解决的是零件如何进行生产分配,生产线如何规划,物流如何走向等车间优化调度问题,这些问题在中药制药生产中也同样存在。那么基于生产过程的原始调度数据,如何将这些物理空间的问题与信息数据空间进行交互和融合呢? 本文对此进行总结,以期建立中药制药

智能车间模型提供依据。

从近年研究可看出,越来越多的研究者根据离散工厂实际存在的问题,将数字孪生等知识注入到智能工厂模型中,形成了许多兼具创新性和实用性的方法,且效果显著。陶飞等^[31]在理论层面提出了数字孪生车间的概念模式,并对数据孪生数据驱动的物理车间与虚拟车间的交互融合进行了探讨总结。柳林燕等^[32]对车间实际生产线实现了数字孪生,并验证了该方案的正确有效性。尹超等^[33]提出了一种基于复杂网络理论的离散制造车间生产物流网络建模与性能分析方法,并以重庆某发动机箱体机加车间生产物流业务为例来验证该方法的有效性和适用性。

数字孪生车间如何建立? 考虑到智能车间实际存在的问题,徐鹏等^[34]从产品、生产线和过程信息 3 个方面构建了基于数字孪生的车间信息模型,并在某造船公司的直管柔性加工生产线实现了数字孪生智能车间。针对如何解决智能车间的调度问题,刘爱军等^[35]以加工时间最小、工件拖期最小为优化目标建立了数学模型,并通过自适应的遗传算法进行求解,从而实现了对柔性作业车间多目标动态调度问题的求解优化。刘志峰等^[36]以某企业零件智能制造车间为例,对解决零件智能制造车间调度问题的方法——调度云平台进行应用验证。张弦弦等^[37]提出离散工业生产过程的智能管控平台方案,结果表明该平台可实现生产线的精益管控。林雨谷等^[38]针对离散车间的能效优化,提出了一种调度数据环境下数据驱动差分进化算法。陈龙伟^[39]对企业进行数字化智能制造系统构建并进行生产使用,使得车间产能提高 30%以上。郑小虎等^[40]提出了对数字孪生技术进行分析,并基于该技术提出了纺纱智能工厂参考模型、纺纱生产装备互联互通信息模型、纺纱工艺流程信息模型等。

2 基于数据驱动的智能制造技术在中药制药中的应用

随着中药现代化发展,中药制药技术和设备得到了较大的升级,但是如何提高中药质量仍然是一个重大挑战。目前针对中药制药过程中产品质量传递的影响因素仍旧辨识不清,质量控制仍不精准,缺乏现代控制手段实现动态质量调控^[41]。而且从整个中药的发展历史来看,由于其历史局限性、已有数据的分散性以及关键技术的落后性等特点,其制造水平还处在数字化、自动化、信息化并存的局面,

这些使得中国中药制药迈向数字智能制药时代面临巨大的挑战^[42-43]。

现代中药制药企业已经积累了大量的过程数据,中药制药过程控制技术也有了较大的提升,但由于积累的历史数据分散于各个环节,形成了严重的“孤岛”现象,使得如何挖掘这些数据背后蕴含的信息以及如何将这些信息与物理车间相结合成了中药制药数字智能化新的挑战热点。基于上述数据驱动技术在流程与离散制造业各领域中较为成熟的研究结果与应用情况的总结,笔者团队初步提出数据驱动技术在中药制药过程质量优化管控的策略与建议。

中药制药过程中产生的数据包括质量数据、物料参数、工艺参数、设备参数等,与食品行业生产过程数据类似,中药制药过程现场数据存在复杂的耦合现象,监控参数和质量指标数据存在复杂非线性关系,有滞后性等特点^[44]。首先对于中药制药的过程优化控制来说,其优化的目标在于提高中药产品的质量。基于上述对数据驱动技术在流程工业以及在离散工业中的应用,可知采用神经网络对生产数据进行建模是一种较为可行的方法。中药制药的生产过程一般包括提取、浓缩、分离、干燥、制剂等工序。对于提取工序来说,可对提取时间、提取温度等参数进行优化;对于浓缩工序来说,可对料液温度、液位、流量、黏度、浓度等参数进行优化;对于干燥工序(如真空带式干燥)来说,可对传送带速度、进料黏度以及进出料含水率等参数进行优化^[45-47]。对于难以测量的参数,可以通过建立软测量模型实现^[48]。对于测量参数的优化,可以用基于BP神经网络的数据挖掘算法,设定神经网络模型,并对网络模型的相关参数进行调整,使得该模型的精度达到要求,从而可用于各个工序的相关工艺优化。

从目前已有的研究来看,利用神经网络的数据挖掘技术已在与中药领域相关的食品领域有了较为成熟的应用,且取得了较好的效果。沈守国等^[44]通过将神经网络数据挖掘技术模型应用到奶糖搅拌充气环节中,已为相关企业取得了近40余万元的直接经济效益。杨建国等^[49]针对煮糖过程,以PCI-6221数据采集卡为硬件搭建了数据采集平台,利用多传感器数据融合技术对糖液进行温度测量,实现了对煮糖过程的动态实时检测,投入生产使用后,创造了超过25万元的经济效益。

针对在大数据时代背景下如何利用数据驱动

实现中药生产质量的控制问题,徐冰等^[50]基于价值创造提出了中药工业大数据的3层架构设计原理,并以清开灵注射液、天舒片、桂枝茯苓胶囊等口服固体制剂、热毒宁注射液、中药配方颗粒的生产过程为例,分别介绍了不同数据储存能力工厂的数据挖掘方法,表明对中药工业大数据的挖掘利用将促进中药制药智能化的转变。夏春燕等^[51]以天舒片素片生产为例,通过系统建模将实时放行检验应用于片剂生产质量的控制,提高了其成型前的控制能力。王晴等^[52]基于物理指纹图谱的方法对桂枝茯苓胶囊生产过程进行数据采集,并通过偏最小二次算法对数据进行分析挖掘,建立预测性模型,提高药品的质量。通过本文“1.1”“1.2”部分对文献的综述,可知航天、造纸、炼钢等成熟的工业领域多数都是通过机理建模或者先通过机理建模再结合数据驱动进行质量控制,尤其是对控制要求非常严格的行业来说更是如此。对于中药制药来说,其智能化的第一任务是将智能技术与精益管理方法相融合、中药制药设备与智能管控技术相融合、数字世界与物理世界相融合,创设制造高质量中成药的技术模式,并且该技术模式已通过注射用血塞通(冻干)、注射用益气复脉(冻干)、冠心宁片3个实际生产进行了应用研究,并取得了较好的结果^[53]。因此对于中药制药的质量控制,也可尝试将数据驱动过程建模与机理过程建模相结合。即利用已有的实际生产数据,采用简化的方法初步建立适合的模型,形成相应的一些物料、能量以及质量守恒的方程。之后在该机理模型的基础上根据工艺参数的变化进行大量的数据学习,利用神经网络等进行数据挖掘,从而对初步模型进行修正,再根据实际工艺生产进行模型验证,将物理空间与信息空间相结合,从而可以实时对药厂生产进行控制,达到中药制药过程的智能优化控制。

3 总结

随着《新一代人工智能发展规划》《促进新一代人工智能产业发展三年行动计划(2018-2020年)》《政府工作报告》等相关政策的出台,以及按“构建一个体系、把握双重属性、坚持三位一体、强化四大制成”进行布局,形成人工智能健康持续发展的战略路径的提出。智能企业、智能车间、智能工厂的发展已成为趋势。中药制药生产过程透明化、生产现场无人化、生产管理智能化已成为必然走向。从目前中药生产的发展现状来看,中药制药生产已可以

实现自动化生产,即部分生产现场透明化、无人化,但从自动化逐渐完全向智能化转变还需要一定的时间。究其原因是中药生产过程的时变性以及生产产品的特殊性及不稳定性,这使得与传统船舶、冶金、炼钢等流程工业有一定差异性。从中药制药生产过程来看,由于各个生产部门之间的数据缺少联动性,导致在实际生产中各个操作单元之间的信息不能有效交流沟通,不能形成一个闭环信息交流圈,从而产生了很多“无用”的数据,致使很多数据背后隐含的信息被埋藏起来,造成了大量信息的流失,制约了中药数字工厂的发展。除此之外,其智能化转型的难点还在于每个单元操作的机理模型如何构建,大量工业数据的背后信息如何挖掘、以及如何将挖掘的信息有效地与实际生产进行交互形成数字孪生车间等。因此本文借鉴数据驱动技术已有的较为成熟应用的流程工业、离散工业以及生物发酵等领域的研究经验,并结合煮糖、奶糖生产等食品领域的研究方法,基于中药制药工艺的内在规律,为数据驱动技术在中药制药过程控制如何进行智能优化、如何挖掘出生产现场数据背后蕴含的信息、如何通过数字孪生技术将信息空间与物理空间交互融合等提供一定的方向建议,并为后续的深入研究奠定基础。

针对中药制造过程理解不清楚,过程控制不精细的问题,研究人员需要开展基于工业大数据和机理模型的中药制药过程动态模拟及过程优化控制研究,建立面向下一代中药智能制药的数字孪生研发平台,针对具体品种采集物性参数,从第一性原理出发,从设备工艺入手,针对企业的个性化需求,定制开发其所需要的数字孪生模拟系统,从而保证企业在现有的信息采集系统上进行智能升级。通过模型实现制药过程中物质流、信息流、质量流的传递及转化规律的仿真模拟。基于质量模型,进行产品质量优化研究,辨识关键工艺及关键参数。基于成本模型,进行成本最小化研究,辨识并优化关键运行指标。最后,综合质量与成本双模型,多目标同时优化,指导关键工艺与装备的优化设计与制造,实现提质增效,节能减排。

参考文献:

[1] 新华社. 国务院印发《中国制造2025》[J]. 现代焊接, 2015, 16(7): 139-140.
Xinhua News Agency. *Made in China 2025* issued by the State Council[J]. *Modern Welding*, 2015, 16(7): 139-140.

[2] 李振皓,钱忠直,程翼宇.基于大数据科技的中药质量控制技术创新战略[J].中国中药杂志,2015,40(17):3374-3378.
LI Z H,QIAN Z Z,CHENG Y Y. The technological innovation strategy for quality control of Chinese medicine based on Big Data [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2015, 40(17): 3374-3378.

[3] 张亚雄.人工智能舞动全球产业变革[N].北京:光明日报,2019-10-22(007).
ZHANG Y X. Artificial intelligence revolutionizes the global industry[N]. *Beijing:Guangming Daily*, 2019-10-22(007).

[4] 王康.数据驱动优化控制及其在矿渣微粉生产过程中的应用[D].北京:北京科技大学,2018.
WANG K. Data-based optimal control and its application in GGBS production process [D]. *Beijing:University of Science and Technology Beijing*, 2018.

[5] 侯忠生,许建新.数据驱动控制理论及方法的回顾和展望[J].自动化学报,2009,35(6):650-667.
HOU Z S,XU J X. On data-driven control theory:the State of the Art and Perspective [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 35(6): 650-667.

[6] ZHANG Y W,HONG Z,QIN S J. Decentralized fault diagnosis of large-scale processes using multiblock kernel principal component analysis [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2010, 36(4): 593-597.

[7] ZHANG Y,DUDZIC M S. Online monitoring of steel casting processes using multivariate statistical technologies:From continuous to transitional operations [J]. *Journal of Process Control*, 2006, 16(8): 819-829.

[8] 张曦,阎威武,刘振亚,等.基于核主元分析和邻近支持向量机的汽轮机凝汽器过程监控和故障诊断[J].中国电机工程学报,2007(14):56-61.
ZHANG X,YAN W W,LIU Z Y, et al. Process monitoring and fault diagnosis of condenser using KPCA and PSVM [J]. *Journal of Chinese Electrical Engineering*, 2007(14): 56-61.

[9] HU Z,YIN L,CHEN Z, et al. An efficient multi-PCA based on-line monitoring scheme for multi-stages imperial smelting process [J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2013, 11(2): 317-324.

[10] DING J,YANG C,CHAI T. Recent progress on data-based optimization for mineral processing plants [J]. *Engineering*, 2017, 3(2): 183-187.

[11] 代伟,柴天佑.数据驱动的复杂磨矿过程运行优化控制方法[J].自动化学报,2014,40(9):2005-2014.
DAI W,CHAI T Y. Data-driven optimal operational control of complex grinding processes [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(9): 2005-2014.

- [12] 桂卫华, 阳春华, 李勇刚, 等. 基于数据驱动的铜闪速冶炼过程操作模式优化及应用[J]. 自动化学报, 2009, 35(6): 717-724.
GUI W H, YANG C H, LI Y G, et al. Data-driven operational-pattern optimization for copper flash smelting process[J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(6): 717-724.
- [13] 刘洪太. 数据驱动的软件可靠性模型在石油工业信息系统中的应用[J]. 石油工业技术监督, 2017, 33(11): 62-65.
LIU H T. Application of data driven software reliability model in petroleum industry information system [J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2017, 33(11): 62-65.
- [14] 单文娟, 汤伟, 刘炳. 基于数据驱动的纸浆洗涤过程优化控制[J]. 中国造纸学报, 2018, 33(4): 44-49.
SHAN W J, TANG W, LIU B. Data-driven optimal control for pulp washing process[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2018, 33(4): 44-49.
- [15] 代伟, 王献伟, 路兴龙, 等. 基于案例推理增强学习的磨矿过程设定值优化[J]. 控制理论与应用, 2019, 36(1): 53-64.
DAI W, WANG X W, LU X L, et al. Case-based reasoning and reinforcement learning integrated set-point optimization method for grinding process[J]. Control Theory & Applications, 2019, 36(1): 53-64.
- [16] 李康, 王福利, 何大阔, 等. 基于数据的湿法冶金全流程操作量优化设定补偿方法[J]. 自动化学报, 2017, 43(6): 1047-1055.
LI K, WANG F L, HE D K, et al. A data-based compensation method for optimal setting of hydrometallurgical process[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(6): 1047-1055.
- [17] 黄丽. 基于数据驱动的生物反应过程软测量与优化控制[D]. 镇江: 江苏大学, 2011.
HUANG L. Soft Measurement and optimal control for biological fermentation process based on data driven [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2011.
- [18] 桑海峰, 王福利, 何人阔, 等. 基于多支持向量机的诺西肽发酵中菌体浓度软测量[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(7): 1983-1986.
SANG H F, WANG F L, HE R K, et al. Soft sensors of biomass concentration in nosiheptid fermentation process based on multiple support vector machines [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(7): 1983-1986.
- [19] BEN YOUSSEF C, GUILLOU V, OLMOS-DICHARA A. Modelling and adaptive control strategy in a lactic fermentation process[J]. Control Engineering Practice, 2000, 8(11): 1297-1307.
- [20] SOONS Z, VOOGT J A, VAN STRATEN G. et al. Constant specific growth rate in fed-batch cultivation of bordetella pertussis using adaptive control[J]. Journal of Biotechnology, 2006, 125(2): 252-268.
- [21] 乔晓艳, 贾莲凤. RBF神经网络在菌体细胞浓度软测量中的应用[J]. 计算机工程与设计, 2003, 24(3): 55-57.
QIAO X Y, JIA L F. Application for a soft-sensing model of cell concentration based on RBF neural network [J]. Computer Engineering and Design, 2003, 24(3): 55-57.
- [22] 高学金, 王普, 孙崇正, 等. 微生物发酵过程建模与优化控制[J]. 控制工程, 2006, 13(2): 152-153.
GAO X J, WANG P, SUN C Z. Modeling and optimization control for the microbial fermentation process [J]. Control Engineering of China, 2006, 13(2): 152-153.
- [23] 彭海刚, 谷田, 刘斌. 基于BP神经网络控制的生物发酵过程研究与实践[J]. 中小企业管理与科技(上旬刊), 2012(2): 317.
PENG H G, GU T, LIU B. Research and practice of biological fermentation process controlled by BP neural network[J]. Management & Technology of SME, 2012(2): 317.
- [24] 李运锋, 袁景淇. 头孢菌素C发酵过程状态变量及效益函数预报方法[J]. 化工学报, 2005, 56(7): 1281-1283.
LI Y F, YUAN J Q. Prediction of state variables and profit function for cephalosporin C fed-batch fermentation [J]. Journal of Chemical Engineering, 2005, 56(7): 1281-1283.
- [25] 魏同发. 基于神经网络的PID算法在生物质发酵控制中的应用研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2019.
WEI T F. Application research of PID algorithm based on neural network in biomass fermentation control[D]. Ji'nan: Qilu University of Technology, 2019.
- [26] 王斌, 王孙安. 生物发酵过程的温度控制模型研究[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(7): 737-740.
WANG B, WANG S A. Temperature control model in fermentation process[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(7): 737-740.
- [27] 徐钢, 黎敏, 徐金梧, 等. 基于函数型数字孪生模型的转炉炼钢终点碳控制技术[J]. 工程科学学报, 2019, 41(4): 521-527.
XU G, LI M, XU J W, et al. Control technology of end-point carbon in converter steelmaking based on functional digital twin model[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(4): 521-527.
- [28] 张旭辉, 董润霖, 马宏伟, 等. 基于虚拟现实的煤矿救援机器人远程控制技术[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(5): 52-57.
ZHANG X H, DONG R L, MA H W. Study on remote control technology of mine rescue robot based on virtual

- reality[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(5): 52-57.
- [29] 陈利. 基于VR的悬臂式掘进机远程操控与仿真系统研究[D]. 西安科技大学, 2017.
CHEN L. Research on Remote Control and Simulation System of Boom Roadheader Based on VR[D]. Xi'an University of Science and Technology, 2017.
- [30] 梅雪松, 刘亚东, 赵飞, 等. 离散制造型智能工厂及发展趋势[J]. 南昌工程学院学报, 2019, 38(1): 1-5.
MEI X S, LIU Y D, ZHAO F, et al. Developing trend of smart factory of discrete manufacturing[J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2019, 38(1): 1-5.
- [31] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 1-18.
TAO F, LIU W R, LIU J H, et al. Digital twin and its potential application exploration [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(1): 1-18.
- [32] 柳林燕, 杜宏祥, 汪惠芬, 等. 车间生产过程数字孪生系统构建及应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1536-1545.
LIU L Y, DU H X, WANG H F, et al. Construction and application of digital twin system for production process in workshop [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1536-1545.
- [33] 尹超, 高玲, 李孝斌. 基于复杂网络理论的离散制造车间生产物流网络建模与分析[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(8): 2157-2169.
YIN C, GAO L, LI X B. Modeling and analysis of production logistics network in the discrete manufacturing workshop based on complex network theory[J/OL]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(8): 2157-2169.
- [34] 徐鹏, 陈卫彬, 廖良闯, 等. 基于数字孪生的船舶管加工数字化车间研究[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(15): 139-144.
XU P, CHEN W B, LIAO L C, et al. Research on digital workshop of ship pipe machining based on digital twin[J]. Ship Science and Technology, 2019, 41(15): 139-144.
- [35] 刘爱军, 杨育, 邢青松, 等. 柔性作业车间多目标动态调度[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(12): 2629-2637.
LIU A J, YANG Y, XING Q S, et al. Dynamic scheduling on multi-objective flexible Job Shop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(12): 2629-2637.
- [36] 刘志峰, 陈伟, 杨聪彬, 等. 基于数字孪生的零件智能制造车间调度云平台[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1444-1453.
LIU Z F, CHEN W, YANG C B, et al. Intelligent manufacturing workshop dispatching cloud platform based on digital twins [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1444-1453.
- [37] 张弦弦, 张鑫, 刘治红. 基于物联网的离散制造过程智能管控平台[J]. 兵工自动化, 2019, 38(6): 19-23.
ZHANG X X, ZHANG X, LIU Z H. Intelligent control platform for discrete manufacturing process based on internet of things[J]. Ordnance Industry Automation, 2019, 38(6): 19-23.
- [38] 林雨谷, 王艳. 离散车间能效数据挖掘及调度优化[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(12): 2702-2711.
LIN Y G, WANG Y. Energy efficiency data mining and scheduling optimization of discrete workshop[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(12): 2702-2711.
- [39] 陈龙伟. 离散型制造企业数字化管理系统解决方案[J]. 数字通信世界, 2019(5): 129.
CHEN L W. Discrete manufacturing enterprise digital management system solutions [J]. Digital Communication World, 2019(5): 129.
- [40] 郑小虎, 张洁. 数字孪生技术在纺织智能工厂中的应用探索[J]. 纺织导报, 2019(3): 37-41.
ZHENG X H, ZHANG J. Application of digital twin technology in textile intelligent factory [J]. China Textile Leader, 2019(3): 37-41.
- [41] 严斌俊. 数据驱动的中药制药过程质量控制方法及应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
YAN B J. Data-driven quality control methods for manufacturing process of traditional Chinese medicines[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [42] 程翼宇, 瞿海斌, 张伯礼. 中药工业 4.0: 从数字制药迈向智慧制药[J]. 中国中药杂志, 2016, 41(1): 1-5.
CHENG Y Y, QU H B, ZHANG B L. Chinese medicine industry 4.0: advancing digital pharmaceutical manufacture toward intelligent pharmaceutical manufacture [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2016, 41(1): 1-5.
- [43] 熊皓舒, 章顺楠, 朱永宏, 等. 中药智能制造质量数字化研究及复方丹参滴丸实践[J]. 中国中药杂志, 2020, 45(7): 1698-1706.
XIONG H S, ZHANG S N, ZHU Y H, et al. Study of intelligent manufacturing quality digitalization of traditional Chinese medicine and practice on Compound Danshen Dripping Pills[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2020, 45(7): 1698-1706.
- [44] 沈守国, 杨建国, 张家梁, 等. 数据挖掘技术在流程制造工艺优化中的应用[J]. 微计算机信息, 2010, 26(21): 137-138, 81.
SHEN S G, YANG J G, ZHANG J L, et al. Application of data mining technique in process optimization of flow manufacturing[J]. Microcomputer Information, 2010, 26(21): 137-138, 81.

- 137-138,81.
- [45] 曾 艳. 丹参浸膏真空带式干燥过程模型化及工艺优化研究[D].杭州:浙江大学,2006.
ZENG Y. Studies on optimization and modeling for vacuum belt drying process of salvia miltiorrhiza bge extract [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [46] 朱海鹏. 中药提取浓缩系统的分析与研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019.
ZHU H P. Design and research of traditional Chinese medicine extraction and concentration system [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2019.
- [47] 杨 扬, 栾 杰, 卢红委, 等. 浅析中药提取工艺自动化系统程序设计[J]. 机电信息, 2019(18): 124-125.
YANG Y, LUAN J, LU H W, et al. A brief analysis of the program design of Chinese medicine extraction process automation system [J]. Mechanical and Electrical Information, 2019(18): 124-125.
- [48] 程 跃. 中药制药过程控制及集成化生产若干关键问题研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
CHENG Y. Research on several key issues for Chinese pharmaceutical manufacturing process control and integrated manufacture [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.
- [49] 杨建国, 任 鑫, 张家梁, 等. 流程制造过程监测中数据采集技术的研究[J]. 微计算机信息, 2009, 25(31): 23-25.
YANG J G, REN X, ZHANG J L, et al. The reseach of data acquisition technology in sugar boiling process detection [J]. Microcomputer Information, 2009, 25(31): 23-25.
- [50] 徐 冰, 史新元, 罗 赣, 等. 中药工业大数据关键技术与应用[J]. 中国中药杂志, 2020, 45(2): 221-232.
XU B, SHI X Y, LUO G, et al. Key technologies and applications of industrial big data in manufacturing of Chinese medicine [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2020, 45(2): 221-232.
- [51] 夏春燕, 徐 冰, 徐芳芳, 等. 天舒片素片崩解时间实时放行检验研究[J]. 中国中药杂志, 2020, 45(2): 250-258.
XIA C Y, XU B, XU F F, et al. Real time release testing of disintegration time of uncoated Tianshu Tablets [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2020, 45(2): 250-258.
- [52] 王 晴, 徐 冰, 王 芬, 等. 桂枝茯苓胶囊内容物吸湿性预测建模研究[J]. 中国中药杂志, 2020, 45(2): 242-249.
WANG Q, XU B, WANG F, et al. Predictive model for hygroscopicity of contents in Guizhi Fuling Capsules [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2020, 45 (2): 242-249.
- [53] 程翼宇, 张伯礼, 方同华, 等. 智慧精益制药工程理论及其中药工业转化研究[J]. 中国中药杂志, 2019, 44(23): 5017-5021.
CHENG Y Y, ZHANG B L, FANG T H, et al. Intelligent and lean manufacturing for Chinese medicine: theory and its applications [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2019, 44(23): 5017-5021.

(收稿日期: 2020-06-15)

Research progress of data driven technologies for intelligent process optimal control and prospects of its applications in advanced manufacturing of traditional Chinese medicine

SI Menglan, WANG Beixuan, MIAO Peiqi, YU Yang, SUO Tongchuan, LI Zheng

(College of Pharmaceutical engineering of Traditional Chinese Medicine, Tianjin University of Traditional Chinese Medicine, Tianjin 301617, China)

Abstract: With the development of information technologies, modern manufacturing enterprises are in urgent needs of informatic and intelligent manufacturing technologies, so as to improve product quality, production efficiency and production cost. Accordingly, industrial Big Data is gradually becoming the core resources for enterprises, and efficient data mining is becoming the core competitiveness of enterprises. As a key technology of intelligent manufacturing, the construction of data-driven models and the model based process controlling have been widely used in various industries. This article reviews the application of data-driven intelligent manufacturing technologies in various industries and how the research results can provide strategic suggestions for intelligent optimal control of the manufacturing of traditional Chinese medicine in the era of Big Data.

Keywords: data driven; intelligent manufacturing of traditional Chinese medicine; process control optimization; intelligent manufacturing