



## Editorial

## 人工智能赋能流程制造

钱锋

Key Laboratory of Smart Manufacturing in Energy Chemical Process, Ministry of Education, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China



流程工业是国民经济的支柱产业，石化、化工、钢铁、有色等是典型的流程制造业。为了解决流程制造中资源、能源利用率和安全环保问题，亟需研发新方法和新系统，推动流程制造绿色化低碳化、高端化高值化和数字化智能化发展。当前，人工智能已经成功应用于自动驾驶、图像处理、机器人、实时辅助决策、智能推荐等诸多领域，并且在知识表示、认知理解和自主学习等方面展现出了强大的优势。如何将人工智能与流程制造进行深度融合是“流程工业智能制造”的重点研究方向。近年来，各国政府纷纷发布与流程工业智能制造相关的战略规划，旨在推动流程工业制造技术的迭代升级。

鉴于流程工业面临着多尺度信息集成、人机物交互以及具有约束的多目标优化等诸多挑战，在流程工业智能制造中研究与应用人工智能技术成为各国学者们的研究重点。因此，本专题主要聚焦流程制造在信息集成、生产效率、运营管理、生产安全等方面的瓶颈问题，从智能感知、建模优化、自主控制、智能决策等多个维度推动人工智能赋能流程制造。

在中国工程院的大力支持下，我们很荣幸邀请到美国、德国、比利时、加拿大、丹麦、韩国、新加坡、瑞典、中国等多个国家的院士和知名学者介绍流程工业智能制造相关的新思想、新理论和新技术。通过严格而仔细的同行评审，我们挑选出了9篇论文予以发表。以下对这些

文章进行简要介绍。

通过开发化工产品建模方法以及工具，工程师和学者们能直观地了解流程制造中各种变量之间的内在关系，并通过数学建模来获取这些关系的主要特性。一般而言，建模是实现流程智能制造中过程监控、自主控制、智能决策以及性能评估等功能的前提条件。在本专题中，丹麦皇家科学院院士 Rafiqul Gani 教授、德国马克斯-普朗克复杂技术系统动力学研究所所长 Kai Sundmacher 教授等解决了由材料选择和工艺操作之间的强耦合关系所引起的复杂设计问题。因为材料的属性需要用数据驱动的描述进行描述，而与工艺相关的规则需要基于机理进行描述，所以该工作强调了混合建模有利于多尺度材料以及过程工艺的设计。通过关联数据驱动制造、分散制造、区块链集成这三个方面，清华大学王笑楠教授等对信息物理生产系统（CPPS）在推动下一代制造中的作用提出了系统性的观点。此外，提出了通过数据驱动建模，CPPS 有助于提升制造过程的直观性以及自动化水平。比利时根特大学教授 Christian V. Stevens 等总结了在过程控制中应用机器学习实现化学过程建模的优势、局限、机会和挑战，在提升基于机器学习的建模方法可信度方面提出了三项建议。他们还指出，机器学习特别适用于实时优化和规划等有时间约束的情况。

在实际工业过程中，传感设备所采集的测量值容易受操作环境、原材料和产品质量指标的变化等诸多因素的影响。因此，有必要开发新的过程监控技术来评估流程制造的运行状态。中国工程院院士桂卫华教授等提出子带瞬态能谱（SIEP）来定量地表示不同条件下铝电解槽电压指定频段的特性；在 SIEP 的基础上，进一步提出了一种对

电池条件敏感的频率分割方法，从而提高铝基电解槽电压监测的可靠性和准确性。由于操作环境的不断变化，测量数据的分布可能会随着时间的变化而变化，因此，基于历史训练数据的过程监控模型无法实现在线数据流的准确监测。鉴于此，中南大学阳春华教授、中国工程院院士桂卫华教授等提出了一种鲁棒的转移字典学习方法。基于代表性学习和域自适应转移学习的协同框架，该方法可以消除环境干扰所引起的分布差异，并且维持工业过程的监测性能。加拿大国家工程院院士黄彪教授等采用了基于演员-评论家策略的强化学习方法，来解决流程工业中对象的实时跟踪问题。这种方法不仅可以提高监测系统在不确定环境下的鲁棒性，而且可以利用较少的由计算机视觉所生成的图像降低维护成本。

优化控制一直是确保流程制造运行效能的闭环稳定性与决策的关键。近年来，随着工业系统的规模逐渐庞大，系统的结构越来越复杂，引入先进的机器学习技术来优化流程工业决策过程和控制策略是十分必要的。由于炼铁过程中难以满足实时响应和弹性计算的要求，中国工程院院士孙优贤教授等提出了一种基于云服务和云分发系统的多

目标优化框架。在此基础上，作者利用深度学习和进化计算，提出了多目标优化算法对高炉炼铁过程中的冲突目标进行优化。从监控、控制、优化和故障检测的角度来看，美国康奈尔大学Fengqi You教授等回顾了考虑随机不确定性影响的机器学习和数据驱动控制在发电系统中的典型应用；作者们指出机器学习和数据驱动的控制技术有助于提高智能发电系统的可见性、可操作性、灵活性、收益性以及安全性，因此有望成为传统基于模型方法的可替代方案。瑞典皇家工程科学院院士Karl Henrik Johansson教授、中国工程院院士柴天佑教授等回顾了流程工业生产全过程中现有决策、控制和运行管理框架的不足，并且提出了将工业人工智能、工业互联网与过程领域知识深度融合的设想，在实现流程工业智能制造方面具有较大的潜力。

综上所述，本专题选取的9篇论文从工业过程建模、过程监测与性能评估、智能决策与优化控制等方面报道了流程工业智能制造的最新进展。我们希望本专题的出版能够帮助学术界和工业界的研究人员和从业者进一步了解人工智能在流程工业智能制造中的作用。最后，我们对作者、审稿人、编辑部和客座编辑的辛勤付出表示衷心的感谢！