

人工智能助力有色金属工业转型升级

袁小锋, 桂卫华, 陈晓方, 黄科科, 阳春华

(中南大学, 长沙 410083)

摘要: 有色金属是国民经济和国防军工的重要原料和战略物资。近年来, 我国有色金属工业取得突飞猛进的发展, 但仍面临着绿色、高效和智能化发展的挑战。有色金属生产工况复杂、原料多变, 资源、能源、环保的要求日益严格, 需要通过灵敏感知、精细操作、智能分析和敏捷决策来处理这些复杂变化和严苛要求。人工智能的飞速发展有色金属生产过程的转型升级提供了核心驱动力。本文从有色金属工业的发展及面临的挑战、人工智能技术助力有色金属生产转型升级案例以及有色金属工业转型升级对人工智能的挑战三个方面阐述人工智能助力有色金属生产过程绿色高效智能化发展的主要内涵。

关键词: 有色金属工业; 人工智能; 智能制造; 转型升级

中图分类号: TP2 **文献标识码:** A

Transforming and Upgrading Nonferrous Metal Industry with Artificial Intelligence

Yuan Xiaofeng, Gui Weihua, Chen Xiaofang, Huang Keke, Yang Chunhua

(Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Nonferrous metals are important fundamental and strategic materials for national economy and the national defense industry. In recent years, the nonferrous metal industry has made great progress in China. However, it is still facing the challenges of green, efficient, and intelligent development. In the nonferrous metal industry, the production conditions are complicated, the raw materials are changeable, and requirements for resources, energies, and environment protection become increasingly strict. Therefore, techniques for sensitive perception, precise operation, intelligent analysis, and quick decision-making are needed for coping with these complex changes and strict requirements. The rapid development of artificial intelligence fitly provides the core techniques for the transformation and upgrading of the nonferrous metal production process. In this paper, three aspects are mainly discussed: development and bottlenecks of the nonferrous metal industry, two cases of transforming and upgrading the nonferrous metal industry with artificial intelligent, and the challenges faced by artificial intelligence in the transformation and upgrading of the nonferrous metal production.

Keywords: nonferrous metal industry; artificial intelligence; intelligent manufacturing; transformation and upgrading

收稿日期: 2018-08-24; 修回日期: 2018-08-28

通讯作者: 桂卫华, 中南大学, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为复杂有色金属生产过程控制理论、技术和工程应用;

E-mail: gwh@csu.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“新一代人工智能引领下的智能制造研究”(2017-ZD-08-03)

本刊网址: www.enginsci.cn

一、有色金属工业现状与面临的挑战

在党的“十九大”报告中，习近平总书记号召加快建设制造强国，加快发展先进制造业，特别强调加快发展实体经济，筑牢现代化经济体系的坚实基础。实体经济是一国经济的立身之本，是财富创造的根本源泉，是国家强盛的重要支柱。李克强总理在 2018 年政府工作报告中明确指出实施《中国制造 2025》，推进工业强基、智能制造、绿色制造等重大工程。《中国制造 2025》从国家层面确定了我国建设制造强国的总体战略，推进智能制造是主攻方向 [1]。有色金属工业是我国实体经济的基石，是实现制造强国的重要支撑，也是我国结构性改革和绿色发展的主战场之一，其智能制造的发展尤为重要。

改革开放以来，经过技术引进、消化吸收和自主创新，我国有色金属工业在装备提升、工艺技术改进、产能结构调整、境外资源开发利用等方面取得了明显成效。目前，我国已成为世界上品种最齐全、规模最庞大的有色金属制造大国和消费大国，形成了较为完整的现代有色金属工业体系。然而，我国整体上还不是有色金属工业制造强国，仍面临着绿色化与高效化发展的挑战与问题，主要表现为：①优质资源枯竭，难冶资源比例大，生产装备和工艺水平有待进一步改善；②废水、废气和废固排放体量大，能耗总量大，能效与环保有待进一步提高；③生产过程自动化程度不高，对操作人员依赖性大，生产控制优化有待进一步智能化；④企业生产、经营和管理缺乏快速和主动响应市场变化的敏捷决策机制，智能决策水平有待进一步提升。由此可知，资源、能源、效益和环境是制约我国有色金属工业发展的主要瓶颈问题。我国有色金属工业绿色化和高效化转型升级已迫在眉睫。为此，智能制造是有色金属工业绿色化、高效化转型升级的必经之路。其中，以高效综合利用复杂矿产资源的绿色选冶技术、实现生产过程的智能自主控制、提升企业经营决策的智能化水平，是我国有色金属工业高效化和绿色化转型升级的关键问题。

新一轮科技革命和产业变革与我国加快转变经济发展方式形成历史性交汇，为有色金属工业实施创新驱动发展战略提供了重大机遇。新一代人工智能、大数据等现代信息技术和有色金属工业的紧密

结合，为我国有色金属工业的转型升级提供了重要技术保障。以人工智能驱动有色金属工业绿色化和高效化转型，实现智能化发展，对我国有色金属工业智能制造具有重大意义。

二、人工智能助力有色金属工业转型升级案例

智能制造是由智能机器和人类专家共同组成的人机一体化智能系统，在制造过程中进行诸如分析、推理、判断、构思和决策等智能活动，扩大、延伸和部分地取代人类专家在制造过程中的脑力劳动，已成为公认的提升制造业整体竞争力的核心高技术。有色冶金生产过程生产原料多变、工况复杂、生产工艺复杂且生产流程长，从绿色、高效和智能化生产的转型升级要求出发，需要通过灵敏感知、精细操作、智能分析和敏捷决策来应对处理这些复杂变化和严苛要求。因此，人工智能技术在有色金属工业绿色化、高效化和智能化的进程中发挥着重要作用，并取得了实际的应用和经济效果。在此，以基于分布机器视觉的浮选过程智能化和冶炼企业原料采购决策知识自动化为例，分别从控制级和决策级阐述人工智能技术助力有色金属工业优化升级的重要作用和意义。

（一）基于分布机器视觉的泡沫浮选过程智能化升级

选矿是矿产资源加工的一个重要环节，选矿水平高低直接影响矿物资源回收率和环保效益。泡沫浮选是一种主要的选矿方法，广泛应用于钢铁、有色金属、煤炭等工业部门。泡沫浮选是以一定的工艺路线，在矿浆中加入浮选药剂，产生携带矿粒的稳定气泡，通过收集含矿物质点的泡沫，从而提高被加工矿物品位的过程。由于泡沫浮选工艺流程长、矿源组分频繁波动、工况多变、关键质量指标无法在线检测等原因，其生产过程主要是依赖操作人员根据自身经验对多工序多槽泡沫的视觉特征（大小分布、颜色、虚实等）进行综合关联分析，判断浮选和工况状态，完成多槽药剂添加量、液位、流量、鼓风量等的协调操作，如图 1 所示。然而，由于人的主观性强、分析判断误差大、工作效率低等原因，很难及时应对原料

的变化，造成工况不稳定、生产指标频繁波动和精矿产品质量不稳定，从而导致药剂消耗大、资源回收率低、环境污染严重等问题。

机器视觉作为人工智能的一个重要分支，已被广泛用于国民经济的各个行业。工业机器视觉系统通过图像视频摄取装置，将目标转换成图像视频信号，经过图像视频处理系统，抽取目标的特征，通过特征识别来指导和控制生产过程。因此，机器视觉具有能够用机器代替人进行感知和认知的潜能，其具有处理速度快和精度高的特点，可以极大地提高生产的灵活性和自动化程度。并且，在高危和大批量重复性生产过程中，机器视觉具有比人工视觉更强的感知能力和更精确的识别能力。为了解决人工操作在浮选过程中的缺陷，通过引入机器视觉技术，利用分布机器视觉提取泡沫图像敏感特征，达

到生产过程金属品位实时预测，浮选工况识别，浮选流程药剂添加量协调优化控制，从而能够有效应对矿源条件的频繁变化，提高资源回收率，降低药剂消耗和污染物排放，为实现浮选过程的智能化提供关键技术之一 [2]。图2给出了基于分布机器视觉的泡沫浮选生产过程工况智能识别与协调优化控制流程图。

1. 浮选泡沫图像敏感特征提取与关键指标预测

基于泡沫对药剂变化的敏感性分析，可确定浮选过程中泡沫尺寸、纹理、流动速度、颜色、稳定性和承载率等敏感特征集，通过一定的特征描述方法，并融合泡沫图像特征、机理模型和运行数据实现金属品位预测（见图3），从而能够为浮选过程的工况识别、分析与协调控制提供一定依据 [3~5]。

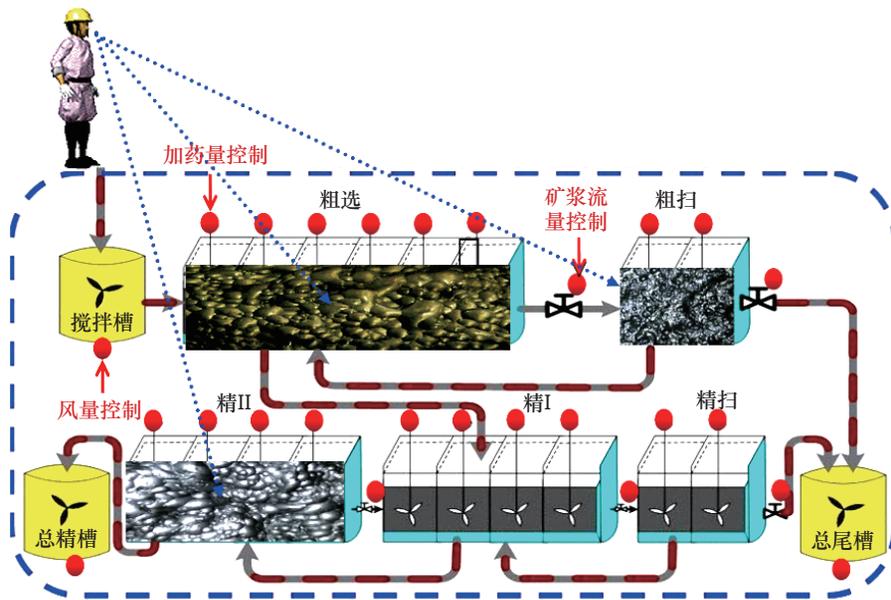


图1 基于人工的泡沫特征分析与操作

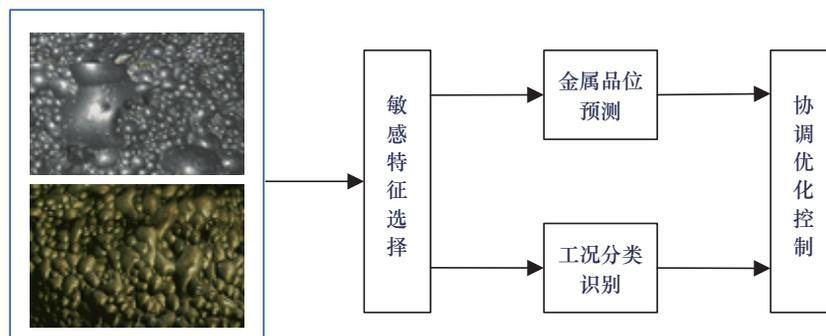


图2 基于机器视觉的浮选过程工况智能识别与协调优化控制

2. 基于泡沫图像特征的浮选过程工况识别

浮选过程工况和泡沫图像具有较强的相关性，不同的工况产生不同的泡沫图像特征，不同的泡沫图像能够反映不同的生产工况。针对机器视觉特征与工况之间的关系，可建立基于机器视觉特征的多工况智能识别方法，如基于泡沫视觉特征与工艺参数融合的浮选入矿类型识别、基于泡沫大小动态分布特征的加药量健康状态自学习识别；基于多尺度泡沫特征和嵌入先验知识聚类的病态工况识别等 [6~8]。

3. 基于泡沫图像敏感特征的浮选全流程智能协调优化控制

智能协调优化是基于不同工序泡沫图像特征的分析 and 工况智能识别，确定每道工序最佳的泡沫图

像特征，并通过加药量、风量等操作量的自动控制，确保工况稳定运行在最佳状态，从而改变人工观察泡沫、手动调节的工作方式 [9~11]。图 4 给出了基于泡沫图像敏感特征的浮选全流程智能协调优化控制方案。

上述研究工作已应用于多家矿物浮选企业，实现了根据泡沫图像自动识别、分析和控制工况的智能化操作，稳定了精矿品位，有效提升了选矿过程有价金属回收率，取得了很好的社会和经济效益。

(二) 冶炼企业原料采购决策知识自动化

在现代有色金属工业企业中，许多体力劳动已逐渐被机器所替代，企业的管理和控制主要依靠知识型工作者来完成，其核心是知识型工作。随着企

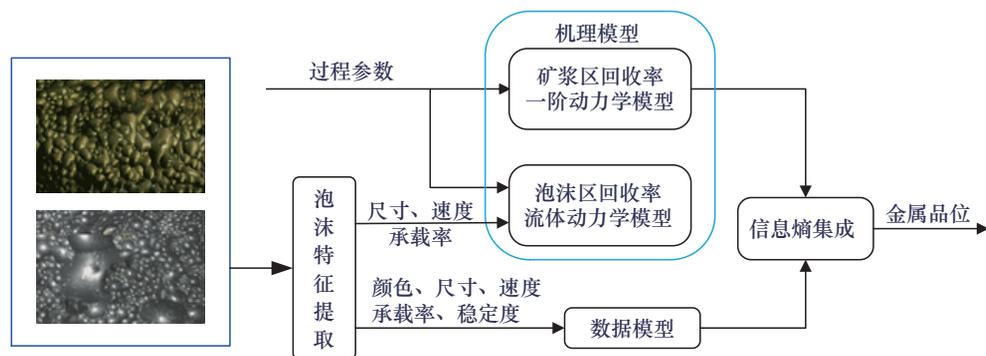


图 3 浮选过程金属品位智能预测建模

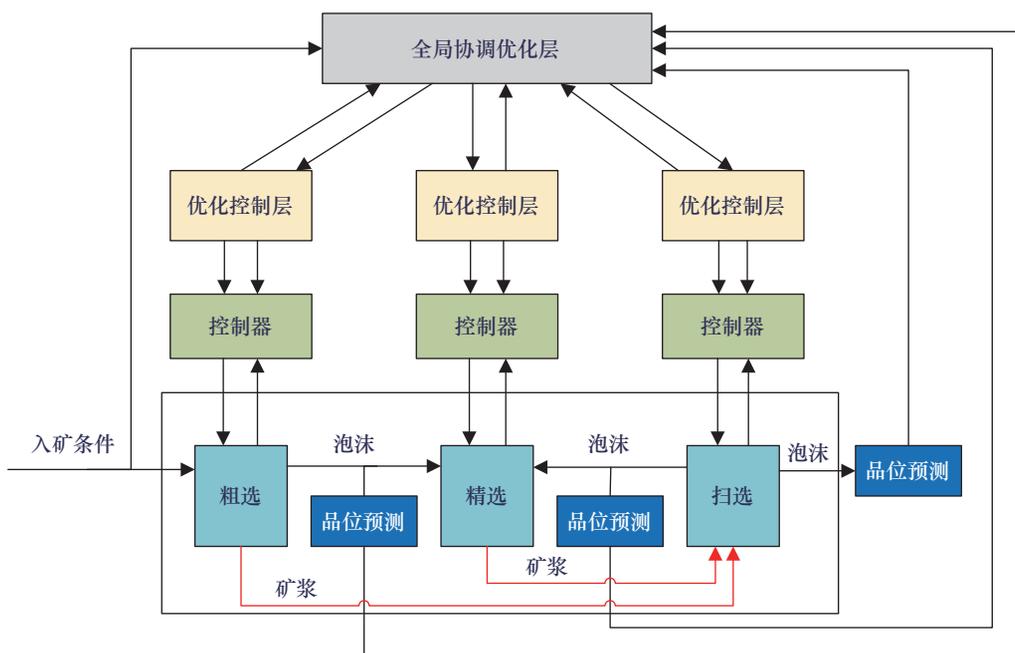


图 4 浮选全流程智能协调优化控制框架

业规模的扩大和信息化技术的深化应用, 知识型工作者无法胜任新信息环境和海量数据下的工作, 人工操作、决策存在主观性和不一致性, 无法实现工业生产全流程的整体优化, 知识的推广、积累和传承十分困难。知识型工作是对知识的利用和创造, 其核心要求是完成复杂分析, 精确判断和创新决策的任务 [12]。知识自动化主要是指知识型工作的自动化 [13]。著名的 McKinsey 全球研究院曾在其发布的名为《展望 2025: 决定未来经济的 12 大颠覆技术》的报告中, 将知识型工作自动化 (automation of knowledge work) 列为第二大颠覆性技术 [14]。因此, 知识自动化在有色金属工业中应用潜力大、前景广阔。

本文以某铅锌冶炼企业原料采购决策为例, 阐述知识自动化的重要意义。我国有色金属冶炼企业在原料采购时往往面临以下问题: 原料资源来源广 (往往超过百家的供应商), 成分复杂多变, 品位、价格不一; 企业生产规模大, 对原料需求量大, 原料采购占用企业大量资金; 生产对原料有严格的质量要求 (如金属品位、杂质含量等); 由于生产的连续性要求企业有合理的库存来应对各种不确定性因素; 市场变化快, 企业产品市场与原料市场存在脱节现象。

在以往的生产经营管理中, 企业的原料采购主要凭借采购人员自身经验进行决策, 是一项典型的知识型工作。人工决策时要考虑采购目标、外部状况、供应状况、企业状况, 以及资金、库存、供应商关系等复杂问题, 并时常会因决策考虑不周全而给企业带来损失。为此, 在该铅锌冶炼企业构建如图 5 所示的原料采购决策知识自动化系统。

决策过程中将从 100 多家矿山的原料采购决策问题分为两步决策: 首先根据配矿数据知识、配矿机理知识及原矿分类基准模型, 将 100 多种矿源按质量分为若干类, 以每类采购资金最小为目标, 以满足生产要求为约束, 建立原料分类采购模型, 依据分类采购决策模型以及市场知识、企业生产知识等决策每一类原料各自采购量。在实际的采购过程中, 采购决策者还需要考虑同一种类型的精矿, 可能由于地区和分承包方的不同而价格会有不同; 各个分承包方履行合同的情况可能不同, 有些分承包方的到货量超过了合同量, 有些则不能完成合同量; 有些分承包方属于经营性公司, 每年提供的精矿品位可能不同。为此, 第二步决策是对每一类的采购进行进一步优化, 即在分类决策结果的基础上根据基于知识分析的供应商评估结果和矿源信息建立的供应商采购模型

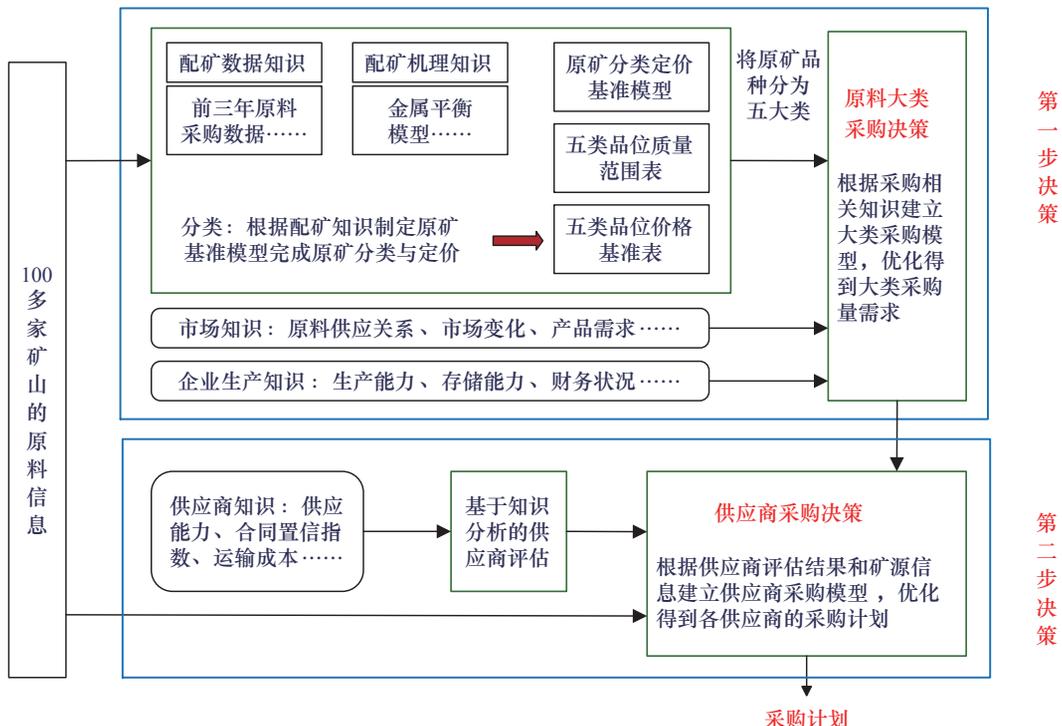


图 5 企业原料采购决策知识自动化系统

型，优化得到各供应商的采购计划。两步决策知识自动化系统采购方案借鉴了人工凭借知识进行采购决策的思路，不仅能够简化优化决策的计算量，而且一旦由于供应商原因导致某矿源供货不足时，可以很容易从同大类矿源中找到替代供应商，从而避免人工决策的弊端，每年为企业节约数百万至数千万元的原料采购经费 [15,16]。

上述两个案例分别从控制层面和决策层面说明，人工智能技术能够助力有色金属生产智能制造，实现从传统生产方式向绿色化、高效化和智能化生产方式的转变。借助人工智能技术，建立具有智能感知、智能认知和智能控制的智能自主系统和具有智能协同的优化决策系统，是实现有色金属全流程绿色高效化生产的必由之路。

三、有色金属工业转型升级对人工智能的挑战

有色金属工业高效化、绿色化转型升级的主要途径是生产过程智能化，其关键是通过人工智能技术实现生产过程的智能感知、认知和决策。

从人工智能技术发展史看，主要可以分为两大流派，一类是以框架知识和语义网络为代表的基于规则的方法，模仿人类认识处理对象的方法，自上而下地建立规则体系解决智能问题；另一类是以机器学习和神经网络为代表的基于数据统计的方法，依托大规模数据集和强大计算能力进行学习，自下而上地通过训练得到计算模型实现智能计算的目的。从 IBM 深蓝到 AlphaGo 的成功说明了面向数据的人工智能具有强大的生命力，其决策是按照确定胜负规则，从精确信息中评估学习找出最优解，其适用对象一般仍然是封闭集合、完备规则和有限约束的问题，在互联网、安保、金融等领域已经取得了重要的应用。由于有色金属工业的复杂性和大规模性，其智能化转型升级对人工智能技术提出了更高的挑战。

有色金属生产过程智能化面临的问题主要在于：①需要面对开放受扰、不确定的动态生产环境，多时空尺度和不完备数据集进行全局工况态势感知和认知；②生产情境难以表征，生产控制和决策对应的复杂信息难以计算，需要学习处理冲突不完备小样本数据中包含的碎片化隐性知识；③过程机理

复杂，无法精确建模，多工序关联耦合，协同操作优化难度大；④影响决策的各种要素存在定义不清晰、尺度不一致和多目标冲突等问题，分层跨域敏捷决策困难。由此可知，有色金属工业生产并不满足封闭集合、完备规则和有限约束等现有前提，其智能化对人工智能具有更大的挑战性。要实现有色金属生产过程的智能化，应当把自上而下的规则和自下而上的数据两类资源在有色金属工业生产过程的机物信息物理空间中有效融合起来，从有色金属制造环境的智能感知、机物系统协同的智能自主控制以及动态智能优化决策等方面实现有色金属工业智能化。主要科学问题包括：

(1) 复杂过程动态建模和工况动态感知。①具有复杂机理的生产过程动态建模、虚拟仿真与可视化；②复杂环境下物料成分、特殊生产参数快速检测技术；③多源异构多模态动态数据特征表示与提取；④大数据与机理知识相结合的运行工况动态感知。

(2) 动态特性认知和知识发现。①多时空动态数据时序因果关联的深度学习；②大数据环境下生产过程知识发现与高效获取；③知识关联建模与自学习方法；④生产过程多源知识的融合与迁移学习。

(3) 大数据环境下知识驱动的多目标动态决策。①大数据与知识驱动的多尺度、多冲突目标动态协同决策理论；②高动态性能的智能自主控制方法；③生产全流程动态性能评估与智能调整方法。

(4) 信息物理系统融合与协同。①机物系统自主协同控制与智能优化；②信息物理系统的防御与安全；③不确定、开放环境下的人机合作决策与互学习。

四、结语

目前，我国有色金属工业在生产装置与工艺技术等方面与世界先进水平相比，正处于从大到强的关键时期，迫切需要通过生产全流程的智能化实现绿色高效生产，人工智能技术与有色金属工业的深度融合，可为有色金属工业转型升级提供强有力的支撑，把我国建成具有技术引领能力的有色金属工业强国，同时也可促进人工智能技术的进一步发展，实现工业文明与生态文明的协同发展。

参考文献

- [1] 周济. 智能制造——“中国制造2025”的主攻方向 [J]. 中国机械工程, 2015, 26(17): 2273–2284.
Zhou J. Intelligent manufacturing—Main direction of “Made in China 2025” [J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26(17): 2273–2284.
- [2] 桂卫华, 阳春华, 徐德刚, 等. 基于机器视觉的矿物浮选过程监控技术研究进展 [J]. 自动化学报, 2013, 39(11): 1879–1888.
Gui W H, Yang C H, Xu D G, et al. Machine-vision-based online measuring and controlling technologies for mineral flotation—A review [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(11): 1879–1888.
- [3] 黄三思. 基于泡沫图像特征的铝土矿粗选矿浆浓度预测模型 [D]. 长沙: 中南大学(硕士学位论文), 2013.
Huang S S. Modeling for the prediction of the pulp density in bauxite froth rougher flotation process based on froth image feature [D]. Changsha: Central South University (Master’s thesis), 2013.
- [4] 魏利君. 基于多槽机器视觉的铝土矿浮选精矿品位预测方法研究 [D]. 长沙: 中南大学(硕士学位论文), 2014.
Wei L J. Prediction of concentrate grade in bauxite flotation process based on multi-cameras [D]. Changsha: Central South University (Master’s thesis), 2014.
- [5] 周开军, 阳春华, 牟学民, 等. 基于图像特征提取的浮选关键参数智能预测算法 [J]. 控制与决策, 2009, 24(9): 1300–1305.
Zhou K J, Yang C H, Mou X M, et al. Intelligent prediction algorithm for floatation key parameters based on image features extraction [J]. *Journal of Control and Decision*, 2009, 24(9): 1300–1305.
- [6] Liu J, Gui W, Tang Z, et al. Recognition of the operational statuses of reagent addition using dynamic bubble size distribution in copper flotation process [J]. *Minerals Engineering*, 2013, 45(5): 128–141.
- [7] Xu C, Gui W, Yang C, et al. Flotation process fault detection using output PDF of bubble size distribution [J]. *Minerals Engineering*, 2012, 26(1): 5–12.
- [8] 任会峰, 阳春华, 周璇, 等. 基于泡沫图像特征加权SVM的浮选工况识别 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, 45(12): 2115–2119.
Ren H F, Yang C H, Zhou X, et al. Froth image feature weighted SVM based working condition recognition for flotation process [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2011, 45(12): 2115–2119.
- [9] Zhu J, Gui W, Liu J, et al. Combined fuzzy based feed forward and bubble size distribution based feedback control for reagent dosage in copper flotation process [J]. *Journal of Process Control*, 2016, 39: 50–63.
- [10] 唐朝晖, 王伟, 刘金平, 等. 基于泡沫尺寸PDF模型的铜粗选过程加药量预测控制 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015 (3): 856–863.
Tang Z H, Wang W, Liu J P, et al. Predictive control of reagent-addition amount based on PDF model of bubble size in copper roughing flotation process [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2015 (3): 856–863.
- [11] 王晓丽, 曾子骄, 黄蕾, 等. 基于图像特征的锑浮选矿浆pH值预测控制 [J]. 控制与决策, 2016, 31(11): 1973–1978.
Wang X L, Zeng Z J, Huang L, et al. Predictive control of slurry pH based on froth characteristics for antimony flotation process [J]. *Journal of Control and Decision*, 2016, 31(11): 1973–1978.
- [12] 王飞跃. 天命唯新: 迈向知识自动化——《自动化学报》创刊50周年专刊序 [J]. 自动化学报, 2013, 39(11): 1741–1743.
Wang F Y. The destiny: Towards knowledge automation—Preface of the special issue for the 50th anniversary of *Acta Automatica Sinica* [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(11): 1741–1743.
- [13] 桂卫华, 陈晓方, 阳春华, 等. 知识自动化及工业应用 [J]. 中国科学: 信息科学, 2016, 46(8): 1016–1034.
Gui W H, Chen X F, Yang C H, et al. Knowledge automation and its applications [J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2016, 46(8): 1016–1034.
- [14] Manyika J, Chui M, Bughin J, et al. Disruptive technologies: Advances that will transform life, business, and the global economy [R]. New York: McKinsey Global Institute, 2013.
- [15] 桂卫华, 黄泰松, 阳春华. 一种改进遗传算法及其在企业原料采购优化中的应用 [J]. 矿冶工程, 2001, 21(3): 59–62.
Gui W H, Huang T S, Yang C H. An improved genetic algorithm and its application in raw material purchase of nonferrous enterprise [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2001, 21(3): 59–62.
- [16] 桂卫华, 黄泰松, 朱爽, 等. 智能集成有色冶炼企业原料采购量价预警系统研究 [J]. 小型微型计算机系统, 2002, 23(11): 1366–1370.
Gui W H, Huang T S, Zhu S, et al. Intelligent integrated early warning system and its application in raw material purchase of nonferrous smelt enterprise [J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2002, 23(11): 1366–1370.