◆产业赋能与业态融合◆

智能化在磷酸精制生产过程中的应用

张博文，李航谦，张诗涵，陈非凡，曾佳栋，张　翼

（武汉工程大学 兴发矿业学院，湖北 武汉　430205）

［摘　要］综述湿法磷酸精制生产过程中存在的问题，讨论其智能化转型的必然性。智能技术已渗透至原料预处理（如LIBS在线检测与机器视觉分选）、反应控制（如多变量预测控制）、结晶监测及全流程优化（如MES平台集成）等核心环节，显著提升了生产效率、产品质量稳定性与能源利用效率。智能化是磷酸精制行业实现高质量、绿色化发展的必然路径，将推动产业升级。

［关键词］湿法磷酸精制；智能化转型；过程优化；产业升级

［中图分类号］TQ126.3　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097-4566（2026）01-0113-04

Application of intelligent technologies in the production process of wet-process phosphoric acid purification

ZHANG Bowen, LI Hangqian, ZHANG Shihan, CHEN Feifan, ZENG Jiadong, ZHANG Yi

(*Xingfa School of Mining Engineering*, *Wuhan Institute of Technology*, *Wuhan* 430205, *China*)

Abstract: The existing problems, and necessity of intelligent transformation in wet-process phosphoric acid purification are reviewed. Intelligent technology has penetrated into core processes such as raw material pretreatment (such as LIBS online detection and machine vision sorting), reaction control (such as multivariate predictive control), crystallization monitoring, and full process optimization (such as MES platform integration), significantly improving production efficiency, product quality stability, and energy utilization efficiency. Intelligence is an inevitable path for the phosphoric acid purification industry to achieve high-quality and green development. In the future, it will promote industrial upgrading.

Key words: wet-process phosphoric acid purification; intelligent transformation; process optimization; industrial upgrading

磷酸工业是支撑国计民生与新兴产业发展的重要支柱产业。湿法磷酸净化工艺包括物理吸附法、化学沉淀法、溶剂萃取法、离子交换法以及结晶法等。湿法磷酸净化过程中大量生产过程参数需要依靠经验来完成，部分生产关键参数缺乏定量指导，不利于数字化、标准化的应用；湿法磷酸净化过程中很多关键数据难以实现实时监控；同时由于工艺复杂，对工作人员的操作水平要求高。通过智能化手段可以很好解决上述难题。

1　精制磷酸系统中存在的问题

1.1　强耦合度与非线性

精制磷酸生产系统由多级工艺单元串联构成，各工序在物料、能量与信息层面高度耦合，难以实现独立运行。上游原料组成、流量、温度及反应条件等关键参数的微小波动，易通过物料与能量传递在系统中逐级放大，对下游分离、精制及产品质量控制产生显著影响，进而引发全流程运行波动。

同时，系统内部普遍存在多相反应、传质传热耦合及反应动力学高度非线性的特征，使过程动态表现出明显的非线性、时变性与不确定性，显著增加了建模与控制难度。传统基于线性假设或经验规则的控制策略难以准确描述系统整体行为，往往只能实现局部或被动调节，难以满足精细化控制与全流程协同优化的要求。

在此条件下，生产运行对人工经验和操作干预依赖较强，不同操作人员在工况理解和调节策略上

收稿日期：2025-12-24

作者简介：张博文（2002—　），男，湖北武汉人，在读硕士研究生，从事矿物加工自动化研究。

通信作者：张　翼，教授，从事矿山自动化研究。

的差异，容易导致系统稳定性不足，表现为生产效率波动及产品质量一致性偏差，从而制约了精制磷酸生产系统整体运行水平的提升，并对其智能化与自动化发展形成挑战。

1.2　专家经验移植难度大

部分工艺参数的调整依赖操作经验，或凭借个人直觉去判断，又因其不易被表达出来，在实际应用中存在着不能完全被标准化和数字化所表述的问题，因此实际运行水平参差不齐。此外，员工岗位调整时，由于在短时间内难以传授经验，容易因操作失误导致生产不稳定，进而产生经济损失，同时存在安全隐患。

1.3　关键数据与过程参数检测滞后

在精制磷酸生产过程中，部分对产品质量与工艺稳定性具有关键影响的指标（如残余离子浓度、杂质含量等）仍依赖人工取样和实验室分析获取，该方式在样品采集、分析及结果反馈环节存在不可避免的时间滞后，难以及时反映生产过程的动态变化。

由于缺乏实时在线监测手段，过程控制系统难以获得关键质量参数的即时信息，只能基于历史数据进行调节，导致控制策略呈现明显的被动性与滞后性，在工况波动或异常情况下易错失最佳调控时机，从而引发产品质量偏差甚至工艺运行失稳。

此外，人工取样与离线分析易受取样代表性不足、操作误差及环境因素影响，检测结果与实际过程状态可能存在偏差，造成数据失真与不确定性。这在一定程度上削弱了数据在质量评估、过程分析及优化决策中的可靠性，对精制磷酸生产过程实现精细化控制与智能化升级形成重要制约。

2　智能化转型的必然性

2.1　宏观趋势和政策导向

我国的碳排放、碳中和（“双碳”）目标对于高能耗、高污染的行业提出了非常严格的减排要求。智能化控制反应、分离、精制等过程有利于提高能源利用率，提高物料利用率，减少“三废”产生，促使行业更好地实现绿色发展，以此去符合国家的“双碳”目标。

2.2　解决传统困局

通过构建覆盖生产全流程的物联网传感器网络，实现多源、多尺度、多维度运行数据的实时采集与融合处理，在此基础上建立与物理实体高度一致的数字孪生模型[1]。依托先进过程控制与模型预测控制等方法，对复杂工业系统的非线性与时变特性进行建模、仿真与预测，实现多变量之间的协同优化与超前调控，从而完成全局层面的动态调节与优化控制。

进一步引入机器学习与数据挖掘等智能方法，对大量专家历史决策、工艺操作记录及操作人员历史行为数据进行系统分析，将难以用显式规则描述的专家经验进行结构化表达，转化为可视化、可复用和可传递的智能工艺模型。这一过程有助于实现生产经验的有效传承，并推动工艺操作向标准化、规范化和一致化方向发展。

在此基础上，将过程分析技术与软测量技术深度融合：一方面，利用在线光谱分析、机器视觉等先进传感与分析手段，对关键工艺参数和质量指标进行实时监测；另一方面，通过数据驱动建模方法，将易于获取的基础运行变量（如温度、压力、流量等）映射为难以直接测量的关键质量指标（如杂质含量、中间产物浓度、体系黏度等），从根本上提升过程可观测性，破解传统生产中的“暗箱”问题。工程实践表明，在某30万t/a湿法磷酸装置中引入先进过程控制系统后，月平均操作次数由70.5显著降低至18.0，在减轻操作人员劳动强度的同时，实现了生产过程的连续化与实时监控。先进过程控制系统的总体原理如图1所示。

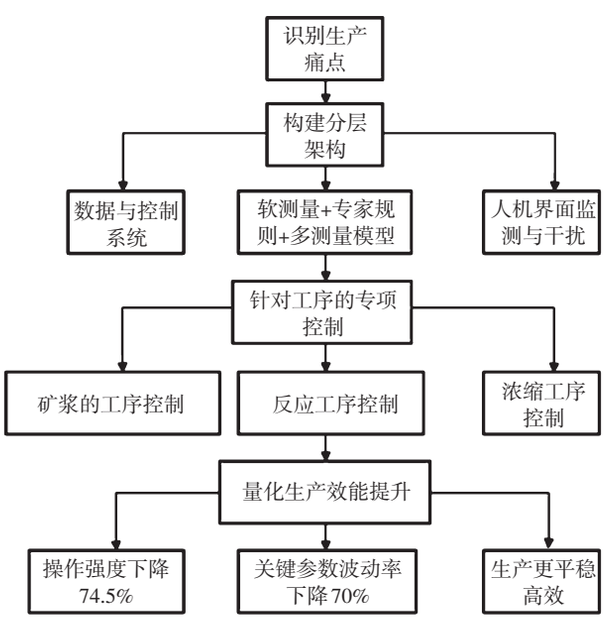


图1　先进过程控制系统原理

Fig. 1　Principle of advanced process control system

同时，基于实时运行数据、高阶机理模型及人工智能优化算法，对反应温度、反应压力等关键工艺参数进行动态寻优，在满足产品质量与产量要求的前提下，确定溶剂、助剂、沉淀剂及反应时间等

的最优组合，避免因参数不确定性带来的能源与原材料浪费，从而显著提升资源利用效率。

此外，通过构建设备在线监测与故障预警模型，可对高温工况、强腐蚀介质渗透以及有毒有害气体泄漏等潜在风险进行提前识别与预警，为安全生产提供有效技术支撑，降低事故发生概率，保障人员与装置运行安全。

3　智能化技术在磷酸精制中的应用现状

3.1　原料预处理环节

根据LIBS（激光诱导击穿光谱）原理的原矿在线分析系统：输送皮带通过安装LIBS探头，进行激光瞬时击穿、光谱采集分析，并在数秒内得到P_2O_5品位，以及MgO、Fe_2O_3、Al_2O_3等关键杂质的半定量结果；并将获取的即时数据送入配矿优化模型，通过DCS（分布式控制系统）实现对各个品位矿源输送比例的自动调节，使入磨矿石中各元素含量始终处于较优状态，可极大降低入口的杂质负荷。

LIBS是一种元素成分快速分析的光谱检测技术，具体地讲，就是将高能激光脉冲聚焦到样品表面，在此瞬间使样品气化并激发产生高温等离子体，在其冷凝的过程中，各个原子和离子会发射出具有特定波长（元素特征谱线）的光。再用光谱仪将其采集并根据分析光谱强度来确定样品中各元素的种类及含量（见图2）。

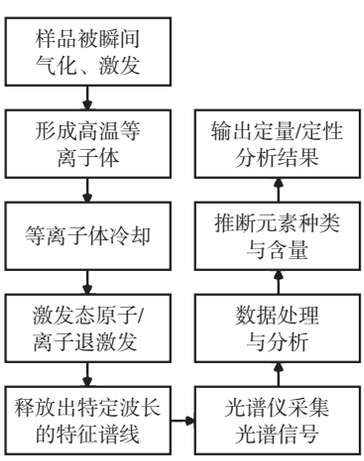


图2　LIBS工作原理

Fig. 2　Working principle of LIBS

LIBS技术是开展元素快速分析的有效手段之一，具有快速、原位、多元素同时检测，无需样品制备等特点，尤其适用于工业在线应用。但LIBS技术同样有较为明显的缺陷，主要包括检测结果容易受到样品基体效应的影响、对痕量元素检测不够灵敏、易受到激光波动及样品不均匀性影响，以及复杂光谱中可能存在谱线重叠及背景噪声等问题。为了克服上述问题，许多学者运用机器学习的方法对其进行改进，如基于遗传算法优化的XGBoost模型，通过对光谱进行智能处理、特征选择和模型优化，使该方法既能保留LIBS技术快速、原位的优势，又能有效地提高定量分析的准确度、稳定性和工业实用性。

机器视觉矿石分选系统：依据部分杂质与磷矿的颜色、纹理不同，在破碎以后，用高分辨率工业相机抓拍图像，用深度学习算法进行检测与分类，用高压气枪把检测出的高杂质矿石块剔除出去即可达到提高入选原矿品位的目的，从而节约了后续化学药剂的消耗，其工作原理如图3所示。

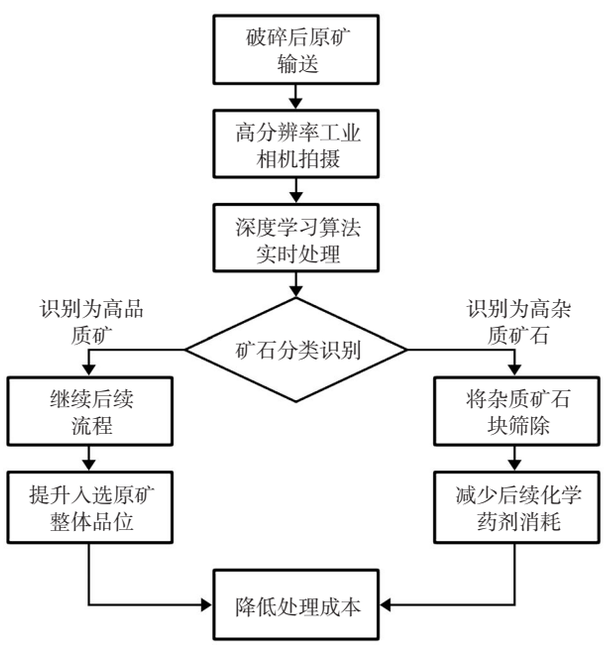


图3　机器视觉矿石分选系统工作原理

Fig. 3　Working principle of ore sorting system of machine vision

机器视觉矿石分选系统核心技术优势包括：该技术是基于矿石无接触式的，可以实现极高的选别效率，达到连续化、自动化作业的效果；可以大幅度降低人工分选成本，增加处理量，减少甚至代替后续的磨矿及浮选工艺，从源头上大幅度降低后续工序的电耗和药剂消耗，具有较好的经济、环保效益。但目前系统仍然只能识别矿石表面的颜色和形状，不能识别矿石内部包裹体或者表面特征相近的矿物种类，分选精度还受到矿石粒度均匀性、环境光照稳定性的限制以及深度学习模型泛化的局限性的影响。提升系统的综合性能，一方面可以通过将多光谱、高光谱或者X射线传感器等信息进行集成，实现更多的信息感知；另一方面也可以通过对

模型进行在线学习，提升模型对于矿石变化情况的敏感度，使得分选系统更加智能、精准和具有鲁棒性，同时也是现代选矿工业迈向自动化、数字化以及绿色化的一个重要发展方向。

3.2　化学反应与净化

磷酸生产工序（浓密、反应、浓缩）的多个参数（流量、液位、温度、压力等）可视作一个整体变量进行协调优化[2]，依靠系统自动超前调节来抵消工艺过程存在的滞后大、耦合强的缺点，使重要工艺指标始终稳定在最优设定值附近运行。多变量预测控制系统工作原理如图4所示。

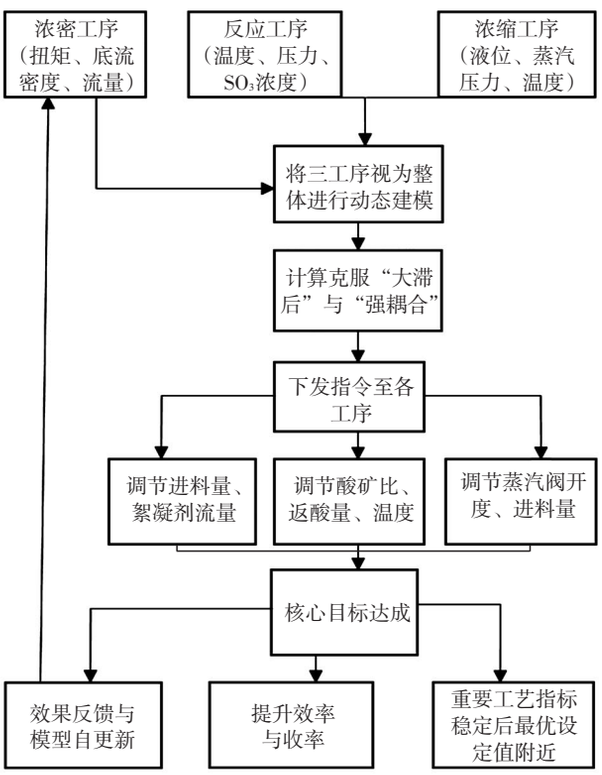


图4　多变量预测控制系统工作原理

Fig. 4　Working principle of multivariable predictive control system

应用先进过程控制、多变量模型预测控制、智能专家系统和软测量等技术，提升湿法磷酸这种复杂流程工艺的自动化和精细化程度，既能够保持关键工艺参数相对稳定，在一定程度上可以减少人工操作频率和减轻操作工人的劳动强度，同时节省资源消耗和电耗，提高生产系统的鲁棒性和经济性，但其实施前提是有准确的过程模型、可靠的检测仪表和稳定执行的操作机构。

3.3　分离与纯化

机器视觉可以直观获得结晶粒径、形貌、聚集体等关键技术参数信息[3]，并与结晶动力学、产品质量建立联系，可以将生产工艺从以前的离线、滞后的经验控制转化为在线的前瞻性闭环智能控制。结合机器视觉，调整电磁搅拌器的供电参数，以调节控制结晶的速度与形状，其工作原理如图5所示。

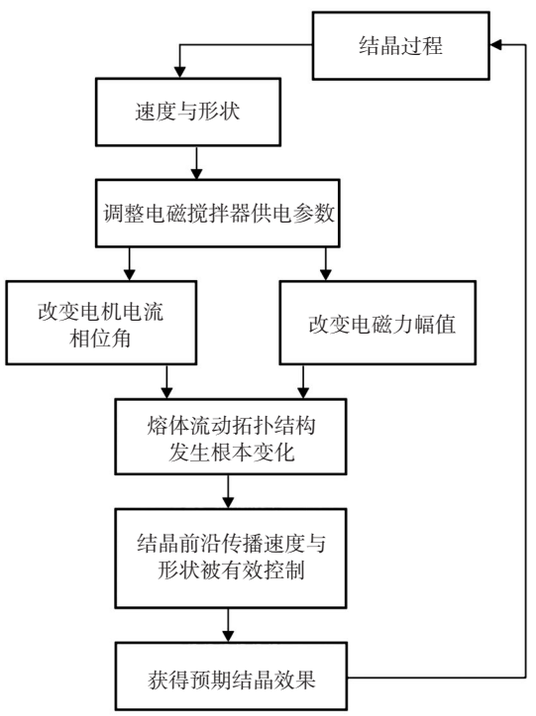


图5　机器视觉监控结晶过程工作原理

Fig. 5　Working principle of machine vision monitoring crystallization process

复杂工业现场易受到搅拌、气泡、雾滴的干扰，需要硬件辅助和算法模型的支持，受被测物特性（如透明度、对比度）的影响，无法检测较深部或微细晶内结构，即便机器视觉为实现结晶过程的数字化、精确控制提供了有效途径，但是必须考虑不同工艺的具体特点。

3.4　全流程集成与优化

基于MES平台部署实时优化系统（MTOR）[4–5]，定时获取原料成分配比、产品的订单规格和能源的价格，调用相关的工位工艺模型，计算全过程的最佳操作条件，下达到各控制层，实现稳定控制。

在精制磷酸的复杂生产流程中，神经网络技术正成为实现全流程集成与智能优化的核心驱动力量。通过实时汇聚萃取、净化、浓缩等多单元的海量工况数据，神经网络构建起工况参数与生产指标之间的深度非线性映射，精准预测关键质量控制点（如杂质含量、产品浓度）的动态变化。在此基础

（下转第125页）