doi: 10.20239/j.issn.1671-9492.2026.08.019

我国选矿摇床智能化技术研究进展

刘惠中[1,2,3],黄佳颖[1,2,3],胡 军[1,2,3]

(1. 江西理工大学 机电工程学院,江西 赣州 341000;
2. 先进金属材料与关键矿产开发江西省实验室,江西 赣州 341000;
3. 江西省低空技术与工程学科交叉中心,江西 赣州 341000)

摘 要:选矿摇床是钨、锡、钽铌及伴生细粒金矿等细粒矿物分选的核心重选设备。传统选矿摇床高度依赖人工经验操作,存在劳动强度大、分选指标稳定性差、矿物易流失等问题。为破解该生产难题,国内围绕选矿摇床智能化开展了大量研发攻关。国外摇床选矿智能化技术报道不多,所以本文仅梳理我国选矿摇床智能化技术自主研发成果,系统总结了国内选矿摇床智能化技术发展现状,涵盖替代人工目视判矿的矿带图像视觉识别技术、替代手动操作的床面坡度自适应调节及精矿自动截取执行机构、超越人工经验的多控制参数自适应优化算法,以及巡检、操作一体化选矿机器人四大核心方向,梳理各类算法、技术特点与应用效果,最后分析现有技术瓶颈并预判行业发展趋势,可为国内重选摇床智能化迭代升级提供研究参考。

关键词:选矿摇床;摇床智能化;机器视觉;自动控制;参数自适应优化;精矿自动截取;选矿机器人

中图分类号:TD922;TP391 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-9492(2026)08-0210-11

Research Progress on Intelligent Technology for Mineral Processing Shaking Tables in China

Liu Huizhong[1,2,3], Huang Jiaying[1,2,3], Hu Jun[1,2,3]

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China;
2. Jiangxi Provincial Laboratory of Advanced Metallic Materials and Critical Mineral Development, Ganzhou 341000, Jiangxi, China;
3. Jiangxi Provincial Interdisciplinary Center for Low-Altitude Technology and Engineering, Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

Abstract: Shaking tables serve as the core gravity-concentration equipment for the separation of fine-grained minerals including tungsten, tin, tantalum-niobium ores and associated fine-grained gold ores. The operation of traditional shaking tables highly relies on manual experience, which brings problems such as high-intensity labour, poor stability of separation indices and easy loss of minerals. To tackle these production-related difficulties, extensive research and development have been conducted in China targeting the intelligentization of shaking tables. There are few overseas reports on intelligent technologies for shaking-table beneficiation. Therefore, this paper only sorts out the independent research and development achievements of domestic intelligent shaking-table technologies and systematically summarizes their domestic development status. It covers four core research orientations: mineral-belt image visual recognition technology that replaces manual visual ore judgement, actuators for adaptive deck-slope adjustment and automatic concentrate interception to substitute manual operation, multi-control-parameter adaptive optimization algorithms superior to manual experience, and beneficiation robots integrating patrol inspection and operation. This paper organizes various algorithms, technical characteristics and application effects, analyses existing technical bottlenecks and predicts industrial development trends. It can provide research references for the iterative upgrading of intelligent domestic shaking-table equipment for gravity concentration.

收稿日期:2026-08-05
基金项目:江西省重点研发计划项目(20212BBE53026);江西省研究生创新专项资金项目(YC2023-S649);江西省研究生创新专项资金项目(YC2023-S50);江西省“双千计划”引进高层次创新人才项目(jxsq2018101046)
作者简介:刘惠中(1969—),男,江西信丰人,博士,教授,博士生导师,主要从事选矿装备及智能化技术等方面的研究。

Key words：mineral processing shaking table；intelligent shaking table；machine vision；automatic control；parameter adaptive optimization；automatic concentrate cutting；beneficiation robot

0　引言

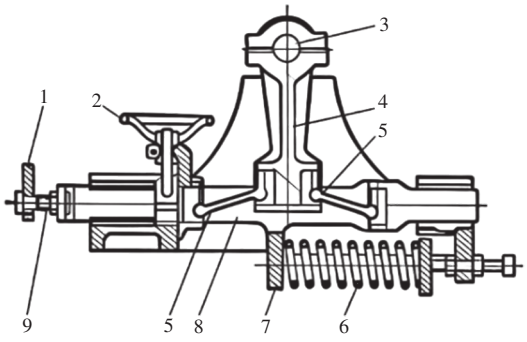
选矿是矿物资源获得有效利用的重要环节。选矿包括重选、浮选、磁选等方法。

其中，重选是利用矿物颗粒的密度差异，借助重力、流体压力、摩擦力等外力实现矿物颗粒按密度分离、分选的一种选矿方法。选矿摇床是一种典型的重选设备，凭借分选精度高、富集性能好、可直接获得合格精矿等优势，是钨、锡、钽铌等矿物分选的主要选矿设备[1-2]。选矿摇床分选过程中，工人需凭借肉眼依次观察每台选矿摇床的床面矿带分布情况，并根据经验手动调节精矿截取位置进而相应调节精矿的品位，调整床面坡度、横向冲洗水量等控制参数以稳定摇床运行状态。但人工操作受人员经验、技术水平等因素影响，容易导致摇床选矿指标的波动和有用矿物资源的流失[3]。针对以上困境，我国率先展开了选矿摇床的智能化技术研究。本文对近年来选矿摇床智能化技术研究进展进行了总结，探讨了智能化选矿摇床的发展趋势，旨在为选矿摇床智能化研究方向提供借鉴与参考。国外摇床选矿智能化技术报道几乎没有，所以本文聚焦我国选矿摇床智能化技术的自主研发成果与工程应用进展，侧重梳理国内摇床选矿机器视觉、自动控制技术、控制优化算法及摇床选矿机器人等技术成果。

1　选矿摇床的发展历程

选矿摇床的发展可追溯至19世纪末的选煤工业，最初研制摇床是为了满足工业选煤的需求，1890年美国制造了第一台选煤用的打击式摇床[4]，标志着摇床作为独立分选设备的诞生。1896年美国工程师威尔弗利(Wilfuley)发明了采用偏心肘板机构的威尔弗利(Wilfuley)摇床，该摇床首次实现了床面不对称往复运动的机械设计，解决了早期打击式摇床运动不稳定、分选效率低的问题[5]，其结构及原理如图1所示。

威尔弗利摇床诞生几年后，美国的普拉特-奥发明了以凸轮杠杆式传动机构的摇床，这两种摇床为摇床的发展奠定了重要基础。20世纪中后期，随着矿产资源开发规模的不断扩大，为提升选矿摇床的分选效率，国内外在摇床多层化方面展开了大量的研究，并且成功研发了多种型式的多层摇床。我国在威尔弗利摇床基础上研制成功6-S摇床(又称衡阳式摇床)，

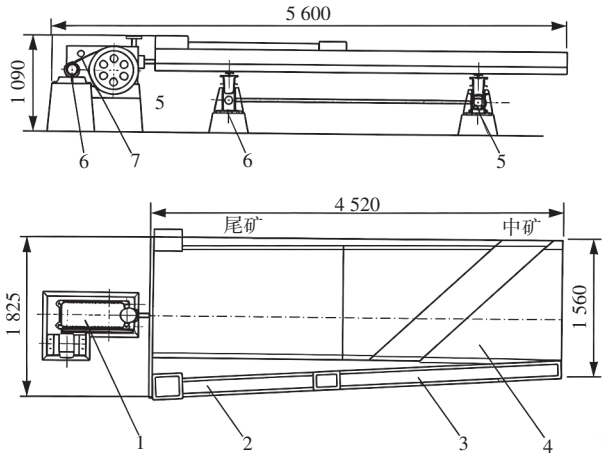


1—床面；2—手轮；3—偏心轴；4—连杆；5—肘板；6—弹簧；7—连动座；8—拉杆；9—连接螺栓。

图1　威尔弗利摇床传动机构

Fig. 1　Driving mechanism of wilfley shaking table

也是我国目前选矿摇床的主要型号，该摇床结构示意图如图2所示。云南锡业公司在原苏式CC-2型摇床上研制成功了云锡摇床。北京矿冶研究总院20世纪80年代前后开发了玻璃钢材质床面的摇床和多层悬挂摇床，解决了传统单层木制摇床面容易变形、干裂、不耐磨、床面生漆有毒和生产效率低等问题，以上成果为我国选矿摇床的智能化奠定了基础。



1—传动箱；2—给矿槽；3—给水槽；4—床面；5—调坡器及支架；6—电机；7—润滑系统。

注：图中尺寸单位均为mm。

图2　6-S摇床结构示意图

Fig. 2　Schematic diagram of 6-S shaking table

进入21世纪，随着矿产资源日益枯竭和环保要求持续提高[6]，选矿厂规模越来越大，配置的摇床数量越来越多，而人工成本越来越高。选矿摇床的自动化、智能化及无人化需求越来越迫切。2018年，北京矿冶科技集团的刘惠中、杨文旺等提出了借助机器视觉获取精矿带位置并开发相应的精矿截取机构以实现精

矿的自适应截取，并开发了国内首台摇床巡检机器人及精矿自动截取机构[7]，该成果获得2018年度北京矿冶科技集团科技进步一等奖[8]。2025年江西理工大学[9-10]开发了可实现床面坡度自适应调整的JS数字化智能选矿摇床。此外，我国其他机构及高校对选矿摇床的机器视觉、自动控制、优化算法、机器学习等技术也展开了研究，研究成果有效提升了选矿摇床的智能化水平和选矿效率。

2 选矿摇床视觉识别技术

视觉识别技术是选矿摇床实现智能化的基础，主要目的是用于替代操作工人肉眼和经验快速准确获取矿物分带特征，并判定摇床的运行状态。摇床视觉识别的信息主要包括矿带的形状和分布特征、精矿带边界位置信息等。摇床矿带视觉算法一般包括图像分割算法和目标检测算法等。

2.1 矿带图像分割算法

摇床矿带图像分割算法目的是将摇床床面上的矿物分带的精矿边界识别分割出来，进而获取精矿带的位置、形状、边界坐标等关键特征信息。针对选矿摇床矿带图像特征的实时检测和识别，刘惠中等[11]提出了一种基于改进U2-Net的摇床精矿带图像分割算法，通过引入注意力机制突出精矿带形状、边缘等显著特征，并结合改进的FFM特征融合模块提取上下文边缘细节信息来提升算法分割精度，试验结果显示，改进后算法分割精度达到98.86%，与原始算法相比提升了0.54%，取得了较好的分割效果。改进后U2-Net算法与原模型分割效果对比如图3所示；Liu等[12]还构建了DeepLab V3+语义分割模型，结合卷积神经网络回归模型建立矿带几何特征与精矿品位、回收率的映射关系，实现对选矿摇床选矿过程的实时监测；和丽芳等[13]提出基于粒子群优化(PSO)的灰度动态分割方法，通过低通滤波去噪后求解最佳阈值，实现了精矿、中矿、尾矿带的高精度与实时性分割；卢明等[14]为了准确得到精矿、中矿和尾矿的分界线，融合OUST算法、自适应阈值分割与区域生长法，实现三类矿带分界线的实时性与精准提取。

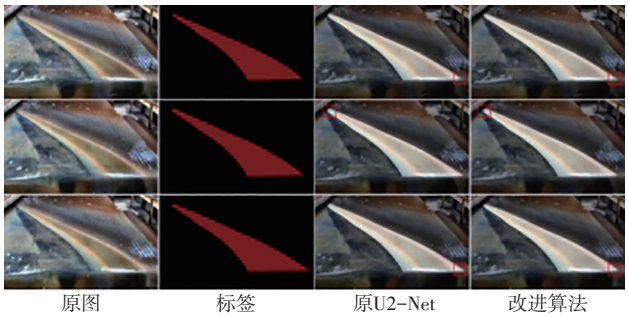


图3 改进后与原模型分割效果对比

Fig. 3 Comparison of segmentation effects between the improved model and the original model

由于选矿车间环境恶劣，矿带图像易受纹理干扰、光照变化、床面反光等因素影响，存在图像对比度低、矿带难以精准分割等问题。赵玉华等[15]提出基于色彩三要素的分割方法，利用矿带图像亮度、色调和饱和度信息构建相似度灰度图，使模型更符合人工操作时人眼对矿带的区分逻辑，有效解决了矿带存在水泡、光源反光等问题；袁明才等[16]将最大熵阈值化算法与形态学运算结合，完成图像光照补偿与精矿带区域提取，有效解决了矿带窄薄、边界模糊、光源反光等问题；针对低光与床条纹理干扰问题，周欣宇等[17]提出了基于区域梯度信息的RGV纹理滤波方法，结合多尺度特征融合的Unet-VGG网络构建语义分割模型，该方法能够提升选矿摇床矿带图像的分割精度；阮顺领等[18]在U-Net模型的基础上融合VGG-16主干网络的高层次语义特征提取能力与CBAM跳跃连接模块的多尺度特征优化机制，显著提升了模型对矿带边界和复杂纹理的识别能力；戴昊霖等[19]提出纹理去噪-聚类分割方法，采用直方图均衡化增强灰度图像对比度，同时引入双边滤波器(BTF)实现纹理平滑并保留矿带边缘特征，有效解决了选矿摇床矿带图像纹理干扰难题。矿带图像纹理去除试验结果如图4所示。

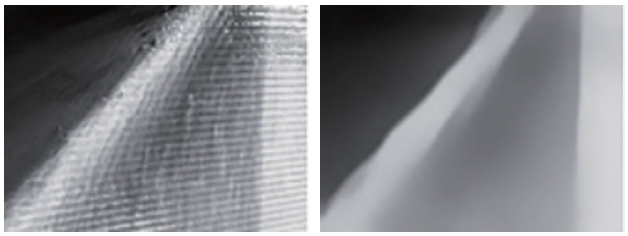


图4 矿带图像纹理去除试验结果

Fig. 4 Experimental results of texture removal for ore belt images

针对矿带边界模糊的问题，刘惠中等[20]提出了基于深度学习图像边缘检测和Hough变换的方法，可以从复杂环境的矿带图像中成功提取精矿带边界线与摇床边界线特征，实现了矿物分选状态的有效识别。通过Hough变换的摇床矿物带边缘特征提取如图5所示。王锦煜[21]提出混合图像分割算法，融合

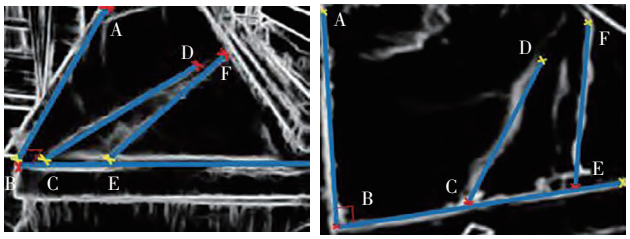


图 5　Hough 变换的摇床矿物带边缘特征提取

Fig. 5　Edge feature extraction of mineral belt on shaking table using hough transform

Otsu 算法、自适应分割、积分投影与区域生长法，先实现精矿左侧分界线提取与中矿分界线粗定位，再完成中矿分界线的细定位，有效解决了矿尾与中矿灰度值相似导致的分界模糊的难题。

He 等[22]通过融合 Otsu 算法与萤火虫算法，解决了传统 Otsu 算法在分割摇床矿带时随阈值数量增加导致运算耗时激增的问题，在保障最优分割阈值稳定输出的同时，实现了不同工况下选矿摇床矿带的高精度分割；和丽芳等[23-25]构建多类改进智能优化算法体系，提出基于 Logistic 映射初始化的改进海鸥算法，实现了锡矿摇床矿带分带图像的高精度分割，同时设计随迭代自适应惯性权重的磷虾优化算法，进一步提升灰度矿带图像分割的鲁棒性，此外还提出改进萤火虫算法驱动的多阈值彩色图像分割方法，分别对 RGB 三通道求取最优阈值，实现了彩色选矿摇床矿物分带图像的精细化分割，有效提升矿带边界识别精度与算法寻优性能。

2.2　矿带分离点目标检测算法

矿带分离点目标检测技术可自动识别并精准定位选矿摇床矿带分离点的坐标，为精矿的准确截取提供依据。为了有效提取选矿摇床精矿带分离点，刘惠中等[26]提出了基于改进 YOLOv5 算法的选矿摇床矿带分离点目标检测识别算法，通过集成 CBAM 注意力机制以及深度可分离卷积模块来提升算法对选矿摇床精矿带分离点的提取精度，改进后算法提取平均精度达 98.3%，有效减少了人工操作带来的选矿指标波动。改进 YOLOv5 的网络模型如图 6 所示。

为了兼顾工业设备的轻量化部署需求，刘惠中等[27]提出了一种摇床轻量化融合网络(YC-Lightweight Net)目标检测算法，先通过重复视觉转换网络提取矿带图像特征，再设计引入分组空间卷积、多尺度高效跨阶段融合模块的轻量颈部网络，最后采用基于权重的层自适应剪枝算法压缩模型大小，实验结果显示，该模型精确度和平均精度均值分别达到 98.4% 和 98.8%，具有良好的检测精度和实时性能。剪枝后 YC-Lightweight Net 模型检测结果如图 7 所示。

针对算法在选矿摇床工作复杂场景下浅层特征提取不足、高阶特征图通道表达能力弱的问题，邵平等[28]提出了基于改进 YOLOv8 的摇床矿带分界点目标检测算法，通过融合浅层特征注意力模块(LLA)和深层特征注意力模块(HLA)，分别增强低阶与高阶特征图的表达能力，同时引入 C2f-faster 模块降低模型参数量，改进后模型 *mAP* 达到 89.02%，较原始模型提升 3.90%，可高效准确识别矿带分离点。

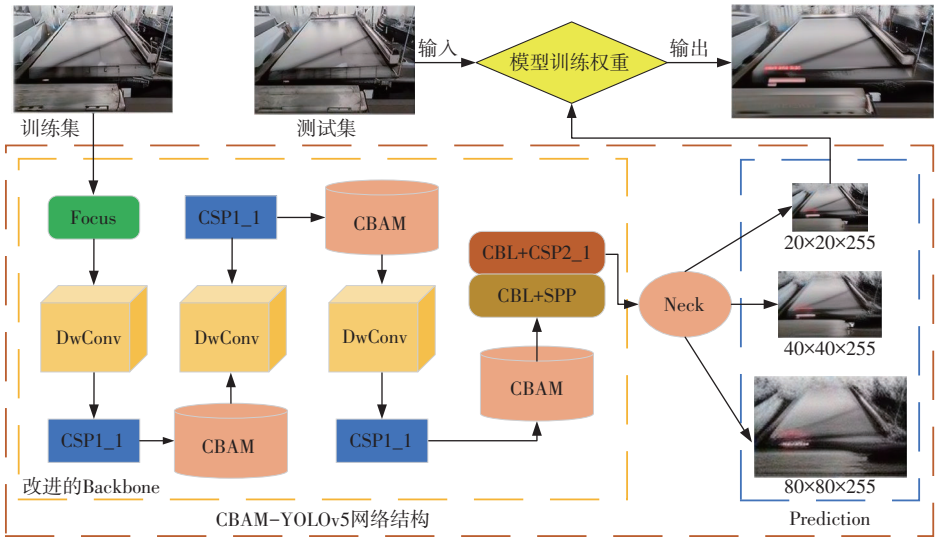


图 6　改进 YOLOv5 的网络模型

Fig. 6　Network model of improved YOLOv5

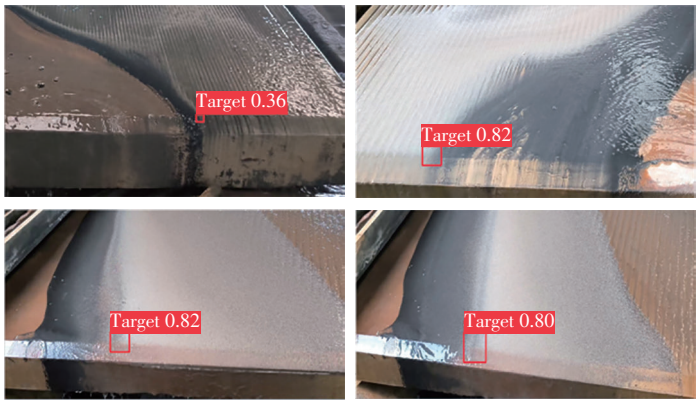


图 7 剪枝后 YC-Lightweight Net 模型检测结果

Fig. 7 Detection results of pruned YC-Lightweight net model

3 选矿摇床自动控制技术

自动控制技术主要用于替代人工操作实现精矿的自动截取、床面坡度的自动调整以及横向冲洗水等参数的自动控制，达到提高摇床的运行控制精度和选矿效率的目的。选矿摇床中床面坡度和精矿截取是摇床自动控制的关键，以下重点对床面坡度的自动调节技术和精矿截取的自动控制技术进行介绍。

3.1 床面坡度自动调节

选矿摇床床面坡度是影响选矿摇床矿带分布和选矿效率的关键因素[29]，因此需根据矿石性质变化对床面坡度进行及时调整。传统摇床坡度调节需通过人工转动手轮来实现，调节速度慢、精度低，且调节幅度全凭经验。为解决此问题，刘惠中等[30]开发了一种基于机器视觉的摇床自动调坡系统，系统包括伺服调坡机构及床面坡度控制模型，控制误差小于0.03°，调节速度则达到0.48°/s，并可根据矿带特征自适应修正床面坡度，保证了摇床选矿效率的最大化，自动调坡控制原理如图8所示。

3.2 精矿截取装置自动控制

传统摇床精矿的截取方式采用人工手动移动接矿板位置来实现，无法实时适应矿带位置的变化，易导致精矿品位的波动和有用矿物的流失。精矿自动截取装置开发的目的就是为了替代人工实现精矿的自动截取。刘利敏等[31]和赵玉华等[32]设计了一种伺服电机驱动丝杠并带动截取板移动的精矿自动截取装置。开发了基于深度学习的摇床接矿位置预测方法，以VGG-16为基础网络结构，通过批量大小、迭代次数以及学习率等超参数调整卷积层中的权重值，让计算机通过学习操作工人的接矿经验以计算出满

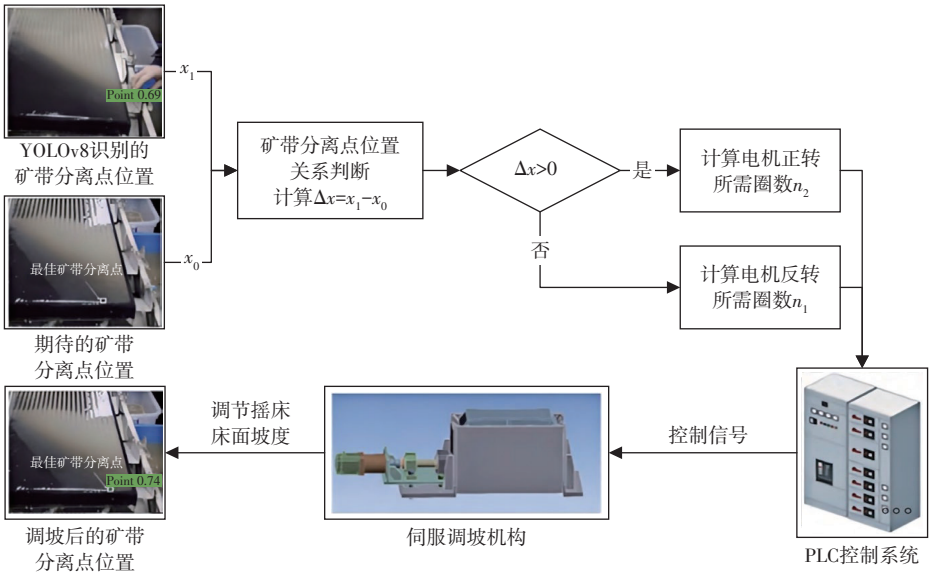


图 8 摇床自动调坡控制原理

Fig. 8 Control principle of automatic slope adjustment for shaking table

足生产需要的接矿位置，实现了选矿摇床的自动化接矿。摇床接矿位置预测方法训练过程如图 9 所示；赵继平等[33]设计了一种智能摇床接矿板执行器，可实现接矿装置精准自动定位，同时采用PLC控制实时反馈接矿板位置；杨文龙等[34]设计了一种选矿摇床矿带识别及接矿板自动调节的装置，该装置调节及时、反应速度快，能够实现矿物的精准分离。

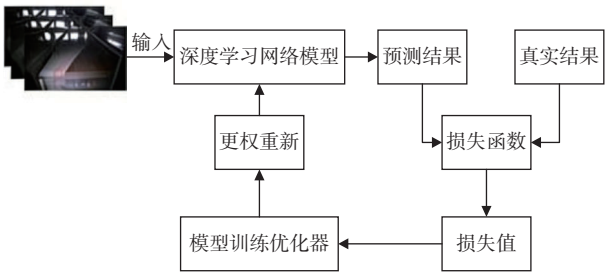


图 9　摇床接矿位置预测方法训练过程

Fig. 9　Training process of the prediction method for ore receiving position of shaking table

4　选矿摇床智能化技术

选矿摇床分选效率受床面坡度、横向冲洗水、冲程和冲次等多参数耦合影响，单一参数的优化难以实现矿物分选效率最大化。选矿摇床的智能化是在自动控制的基础上结合大数据、机器视觉、优化算法等技术，通过建立映射关系模型与多参数的协同寻优来实现分选过程中控制参数的自适应优化。

4.1　控制参数映射关系建模

映射关系建模是参数优化的基础，可精准表征控制参数与分选效果之间的内在联系。由于选矿摇床分选过程的复杂性，传统数学模型难以准确描述参数与分选效果的非线性关系。为提升选矿摇床的分选效率，刘建业[35]构建了“控制参数-精矿边界位置”映射关系模型，提出了CNN-GRU-Attention混合模型，结合CNN的空间特征提取能力与GRU的时序信息处理优势，并引入注意力机制增强关键参数的权重来准确预测不同控制参数条件下的选矿摇床床面分带精矿边界位置；游科顺[36]利用HALCON开发深度学习语义分割方法，精准提取矿带多维分区信息，并且结合机器学习模型建立分区属性、浓度等与回收率之间的映射关系；何微等[37]提出基于XGBoost算法的分选指标预测方法，通过颜色矩、图像矩、灰度共生矩阵分别量化矿带的颜色、形态、纹理特征，以提取的多维图像特征为输入、选矿指标为输出，构建预测模型并在测试集上预测精矿品位、回收率和精矿产率，实现对分选指标的准确预测。预测效果如图 10 所示；Panda等[38]采用人工神经网络模型，以横向冲洗水流量、床面坡度和冲程为输入参数，精矿品位与回收率为输出参数，构建了参数-分选效果映射模型，实现精矿品位及回收率的精准预测。

4.2　多控制参数协同寻优

多控制参数协同寻优是在建立控制参数映射关系建模的基础上找到使选矿摇床分选效率最大化的控制参数组合。刘建业[35]提出了基于多元非线性回归方程代理模型，采用改进蜣螂优化算法(DBO)求解最优控制参数，通过Logistic混沌映射初始化种群，提升了算法在多控制参数中全局寻优能力与收敛速度，获得床面坡度、横向冲洗水量的最优参数组合；游科顺[36]采用基于麻雀搜索优化的支持向量回归(SSA-SVR)算法，构建了控制参数与分带特征的关系模型，提出了一种基于最大选矿效率的选矿摇床多参数组合渐进寻优方法，成功获得最优控制参数组合，显著提升了选矿摇床的分选效率。优化后的参数组合如图 11 所示。

5　摇床选矿机器人

传统选矿摇床在选矿车间的巡检和操作高度依赖人工完成，难以实现选矿摇床工作状态的实时监测。随着机器人技术的快速发展，机器人为选矿摇床的智能化升级提供了技术支撑。目前，选矿摇床巡检机器人具有图像采集、矿带识别等功能，可替代人工完成多台选矿摇床的巡检，操作机器人除具备以上功能外，还能实现精矿截取等操作，能显著提升矿物分选精度与生产效率。

5.1　摇床巡检机器人

摇床巡检机器人的开发目的是代替人工实现对摇床分选状态的实时监测。杨文旺等[39]设计了一种摇床巡检机器人，该巡检机器人可对多组摇床矿带图像进行自行采集，并通过图像识别算法对矿带宽度、边界和颜色特征进行数字化识别解析，利用机器人巡检采集矿带图像并获取矿带信息，并将矿带位置信息发送给摇床端的精矿自动截取装置，实现巡检机器人和摇床截取机构的联动，从而实现摇床精矿的自动截取，有效提升了精矿品位的稳定性并降低工人劳动强度[31, 37]。选矿摇床智能巡检机器人如图 12 所示。

5.2　巡检机器人的路径规划

路径规划是巡检机器人实现多台选矿摇床自主巡检与操作的前提，通过在复杂的选矿车间环境中

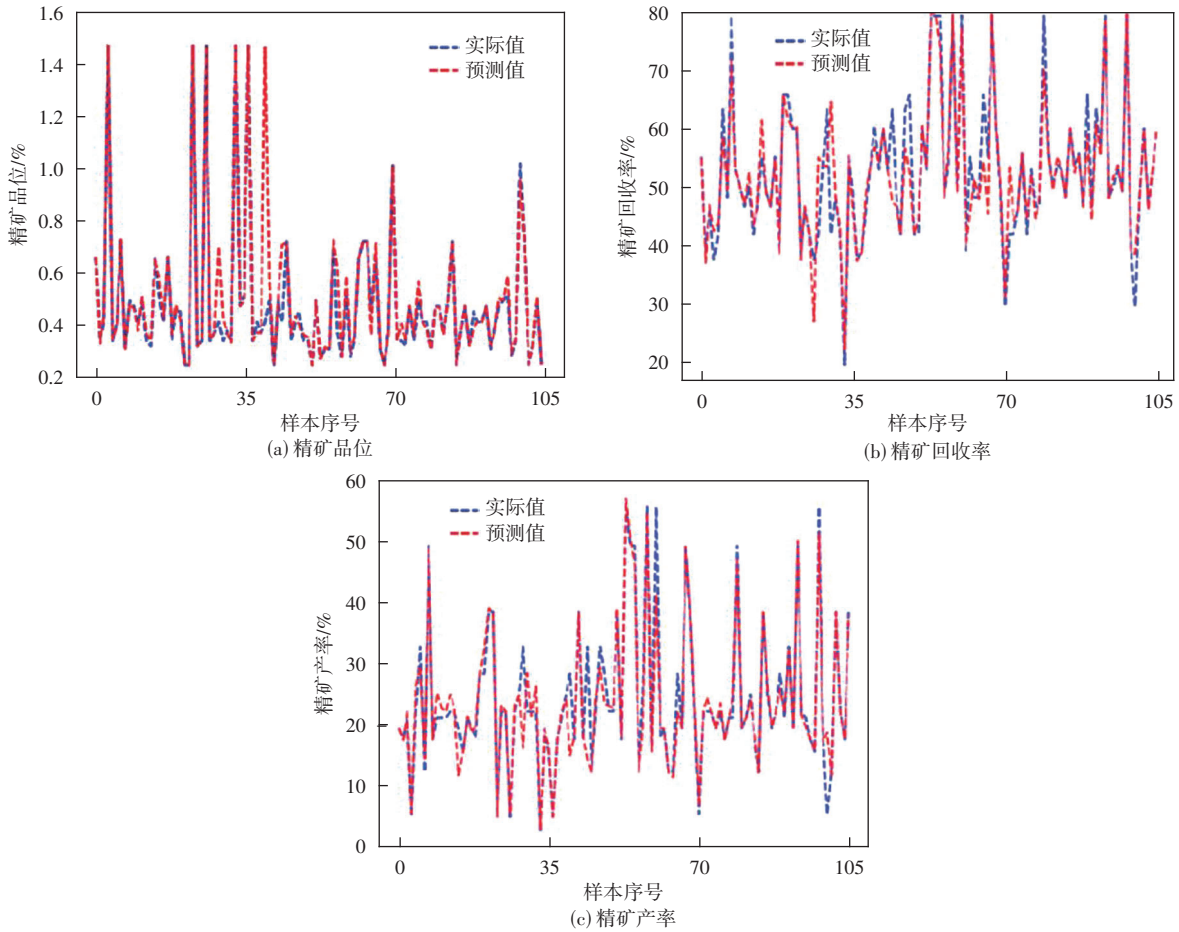


图 10　XGBoost 算法模型预测效果

Fig. 10　Prediction performance of XGBoost algorithm model

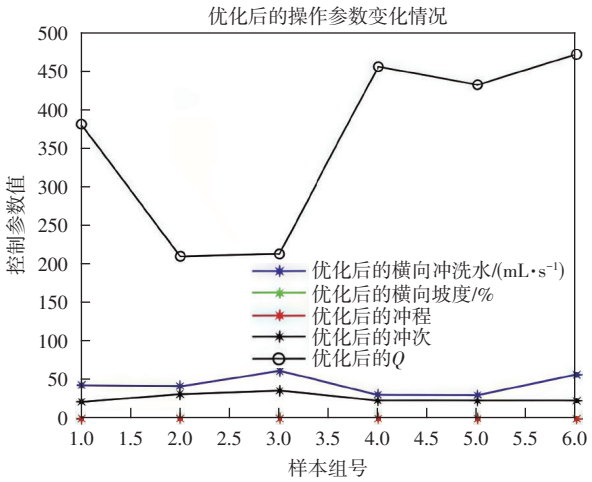


图 11　优化后的控制参数组合

Fig. 11　Optimized combination of control parameters

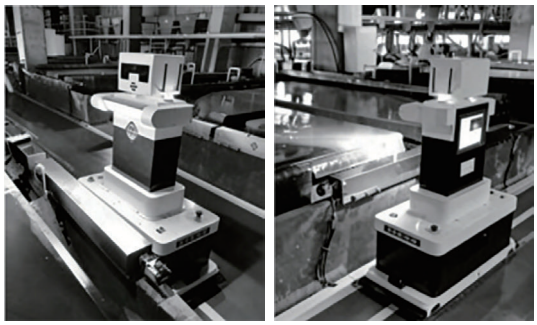


图 12　选矿摇床智能巡检机器人

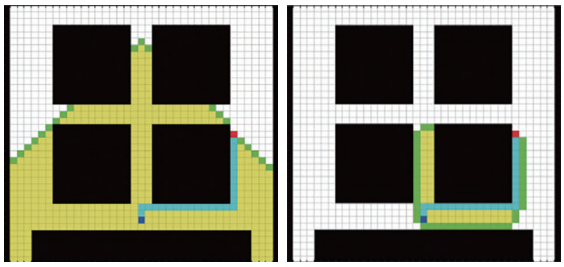
Fig. 12　Intelligent inspection robot for mineral processing shaking table

寻求一条从当前位置到目标选矿摇床的最优路径。刘惠中等[40]结合了不同计算方法对选矿摇床巡检机器人的全局巡检路径和局部巡检路径进行了合理规划。将改进的遗传算法与传统遗传算法和模拟退火算法进行对比，如表 1 所示，结果显示改进遗传算法总距离更小且迭代次数更少，更适用于巡检机器人的全局巡检路径规划，同时将带栅格地图的 A* 算法与 Dijkstra 算法进行了比较分析，如图 13 所示，得出带

表 1　全局巡检仿真结果

Table 1　Global inspection simulation results

算法名称	总距离/m	算法效率/s	迭代次数
改进遗传算法	100.156 1	1.67	25
模拟退火算法	102.465 0	0.45	300
遗传算法	133.909 6	0.86	200



(a) Dijkstra算法　　(b) A*算法

图 13　局部巡检路径规划图

Fig. 13　Local inspection path planning diagram

栅格地图的A*算法相较于Dijkstra算法具有更高的效率，更适用于巡检机器人的局部巡检路径规划。该选矿摇床巡检机器人能在避开车间障碍的情况下寻得最短巡检路径，可显著提高巡检效率。

5.3　摇床选矿操作机器人

江西理工大学邹起华[41]将摇床巡检与操作集成于一体，开发了摇床选矿机器人。机器人主要由AGV、图像采集机构、操作机械臂、腕部视觉、夹爪、图像服务器、远程通讯系统等构成，AGV采用了SLAM导航和定位技术，可将机器人根据规划的路径依次行走定位到目标摇床，到位后图像采集机构自动张开伸到摇床床面正上方采集矿物分带图像，然后将图像传输给集成的图像服务器，由图像服务器对图像进行识别获取矿物分带特征并将矿物分带坐标信息发给操作机械臂，随后机械臂伸到摇床精矿端，借助腕部视觉识别到截取板并驱动夹爪夹取截矿板移动到目标位置，从而实现精矿的机器人截取。同时通过远程通讯系统，向对应摇床的调坡PLC控制系统发送调坡命令，实现摇床床面坡度的实时调整。实现了选矿摇床的巡检和操作无人化运行。摇床选矿机器人结构如图14所示。

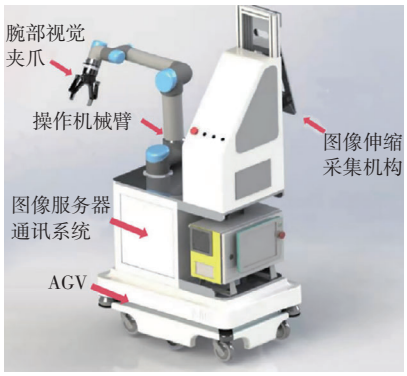


图 14　江西理工大学JMR摇床选矿机器人结构图

Fig. 14　Structure diagram of JMR shaking table mineral processing robot, Jiangxi University of Science and Technology

6　结论与展望

1）选矿摇床作为钨、锡等矿物分选的关键设备，其智能化升级对于提升钨、锡等金属矿重力选矿的智能化和生产效率具有重要意义。

2）要实现摇床的智能化，首先要解决摇床分选矿物分带特征的提取技术，包括精矿带边界信息、分带特征信息等。目前看U^2-Net、DeepLab V3＋语义分割等分割算法及YOLO系列目标检测算法都取得了满意的效果，未来在模型的轻量化和抗干扰性方面有待进一步提升。

3）在摇床自动化方面，基于视觉的精矿自动截取装置开发和应用较早，也相对比较成熟。床面坡度的自动调节可以保证摇床选矿状态的稳定，但应用成果相对较少。基于矿物分带特征的控制参数优化可以保证选矿摇床的选矿效率最大化，也是未来研究的重点。

4）选矿机器人主要包括巡检机器人和操作机器人两种，目前巡检机器人应用较多，但功能有限。可自主调节精矿截取的操作机器人已开发出来，工业应用是下一步需要重点研究的方向。

5）对比国内外重力选矿技术发展差异：我国在摇床床面矿带深度学习识别、自适应调坡、自动精矿截取、一体化选矿操作机器人细分领域，研发体系完整、成果丰富，具备全球独有成套解决方案；但也要客观认识，国外在矿物在线品位分析、矿山全流程协同数字平台、高端伺服与视觉核心元器件方面仍具备技术优势，是后续国内智能化摇床迭代升级的重要借鉴方向。

参考文献

[1] 孙传尧. 选矿工程师手册，第4册下：选矿工业实践[M]. 北京：冶金工业出版社，2015.
Sun Chuanyao. Handbook of mineral processing engineers: Volume 4, Part 2: industrial practice of mineral processing[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2015.

[2] 刘惠中. 重选设备在我国金属矿选矿中的应用进展及展望[J]. 有色金属(选矿部分)，2011(增刊1)：18-23.
Liu Huizhong. Application progress and prospect of gravity separation equipment in metal ore beneficiation in China[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2011(S1): 18-23.

[3] 杨文旺，武涛，赵玉华，等. 重选摇床智能控制系统的设计与应用[J]. 黄金，2020，41(8)：57-60.
Yang Wenwang, Wu Tao, Zhao Yuhua, et al. Design and application of intelligent control system for gravity shaking table[J]. Gold, 2020, 41(8): 57-60.

[4] 李正骅. 国外多层摇床研制概况[J]. 国外金属矿选矿，

1975(增刊2):46-54.
Li Zhenghua. General situation of foreign multi-deck shaking table development[J]. Metallic Ore Dressing Abroad, 1975(S2): 46-54.

[5] 刘惠中,彭志龙. 选矿摇床的研究现状及发展趋势[J]. 有色金属(选矿部分),2023(5):120-126.
Liu Huizhong, Peng Zhilong. Research status and development trend of mineral processing shaking table[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2023(5): 120-126.

[6] 张照志,潘昭帅,李厚民,等. 中国矿产资源国情调查评价历史回顾及对推动国民经济发展的作用[J]. 地质与勘探,2023,59(1):188-210.
Zhang Zhaozhi, Pan Zhaoshuai, Li Houmin, et al. Historical review of national survey and evaluation of mineral resources in China and its role in promoting national economic development[J]. Geology and Exploration, 2023, 59(1): 188-210.

[7] 赵继平,杨文旺,武涛,等. 智能摇床接矿板执行器:201820195238.8[P]. 2019-03-05.
Zhao Jiping, Yang Wenwang, Wu Tao, et al. Actuator for ore receiving plate of intelligent shaking table: 201820195238.8[P]. 2019-03-05.

[8] 杨文旺,武涛,赵玉华,等. 基于机器视觉技术的选矿摇床自动控制系统[R]. 北京:北京矿冶科技集团有限公司,2018.
Yang Wenwang, Wu Tao, Zhao Yuhua, et al. Automatic control system of mineral processing shaking table based on machine vision technology[R]. Beijing: BGRIMM Technology Group, 2018.

[9] 科技日报. 数字化选矿摇床精准淘"钨"[N/OL]. (2025-06-10)[2026-08-02]. https://2fie.jxust.edu.cn/info/1012/34399.htm.
Science and Technology Daily. Digital mineral processing shaking table for precise tungsten separation[N/OL]. (2025-06-10)[2026-08-02]. https://2fie.jxust.edu.cn/info/1012/34399.htm.

[10] 刘惠中,廖阳,张云琛,等. 基于机器视觉与自适应控制的JS智能选矿摇床系统研制[J/OL]. 有色金属科学与工程:1-8[2026-08-02]. https://link.cnki.net/urlid/36.1311.TF.20260710.1917.006.
Liu Huizhong, Liao Yang, Zhang Yunchen, et al. Development of JS intelligent mineral processing shaking table system based on machine vision and adaptive control[J/OL]. Nonferrous Metals Science and Engineering: 1-8[2026-08-02]. https://link.cnki.net/urlid/36.1311.TF.20260710.1917.006.

[11] 刘惠中,邹起华. 基于改进U2-Net的摇床精矿带图像分割方法[J]. 传感器与微系统,2025,44(5):124-128.
Liu Huizhong, Zou Qihua. Image segmentation method of shaking table concentrate belt based on improved U2-Net[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2025, 44(5): 124-128.

[12] Liu Huizhong, You Keshun, Liu Jianye, et al. Research on image multi-feature extraction of ore belt and real-time monitoring of the tabling by semantic segmentation of deeplab V3+[C]// Advances in Artificial Intelligence and Security: 8th International Conference on Artificial Intelligence and Security, ICAIS 2022. Cham: Springer, 2022.

[13] 和丽芳,童雄,黄宋魏. 一种利用矿带图像灰度动态分割摇床矿带的方法:201210012398.1[P]. 2012-07-04.
He Lifang, Tong Xiong, Huang Songwei. A method for dynamic segmentation of shaking table ore belt using ore belt image gray scale: 201210012398.1[P]. 2012-07-04.

[14] 卢明,覃左栋,刘黎辉,等. 一种摇床矿带图像分割方法:202010766804.8[P]. 2024-08-20.
Lu Ming, Qin Zuodong, Liu Lihui, et al. An image segmentation method for shaking table ore belt: 202010766804.8[P]. 2024-08-20.

[15] 赵玉华,武涛,杨文旺,等. 一种基于色彩三要素的摇床矿带分割方法:201911334684.8[P]. 2023-11-10.
Zhao Yuhua, Wu Tao, Yang Wenwang, et al. A segmentation method of shaking table ore belt based on three color elements: 201911334684.8[P]. 2023-11-10.

[16] 袁明才,杨文旺,武涛,等. 一种钽铌矿摇床矿带的图像识别方法:202011239542.6[P]. 2024-05-24.
Yuan Mingcai, Yang Wenwang, Wu Tao, et al. An image recognition method for tantalum-niobium ore shaking table belt: 202011239542.6[P]. 2024-05-24.

[17] 周欣宇,杨波,蒋朝辉,等. 基于RGV纹理滤波的摇床矿带图像分割方法[C]//中国自动化学会过程控制专业委员会,中国自动化学会. 第35届中国过程控制会议论文集. 长沙:中南大学自动化学院,2024:777.
Zhou Xinyu, Yang Bo, Jiang Zhaohui, et al. Image segmentation method of shaking table ore belt based on RGV texture filtering[C]//Process Control Technical Committee of Chinese Association of Automation, Chinese Association of Automation. Proceedings of the 35th Chinese Process Control Conference. Changsha: School of Automation, Central South University, 2024: 777.

[18] 阮顺领,张一凡,陈思睿,等. 一种基于改进U-Net模型的矿选摇床矿带分割方法及系统:202511162214.3[P]. 2025-12-02.
Ruan Shunling, Zhang Yifan, Chen Sirui, et al. Ore belt segmentation method and system of mineral processing shaking table based on improved U-Net model: 202511162214.3[P]. 2025-12-02.

[19] 戴昊霖,陈雯,蒋朝辉,等. 基于纹理去噪的摇床多矿带分割方法[J]. 有色金属(选矿部分),2023(6):183-190.
Dai Haolin, Chen Wen, Jiang Zhaohui, et al. Multi-

ore-belt segmentation method of shaking table based on texture denoising[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2023(6): 183-190.

[20] 刘惠中，游科顺. 基于深度学习边缘检测和Hough变换的摇床矿物带边界提取和特征表示[J]. 制造业自动化，2023，45(6)：180-183，188.
Liu Huizhong, You Keshun. Boundary extraction and feature representation of mineral belt on shaking table based on deep learning edge detection and Hough transform[J]. Manufacturing Automation, 2023, 45(6): 180-183, 188.

[21] 王锦煜. 摇床矿带识别算法及其应用[D]. 湘潭：湖南科技大学，2022.
Wang Jinyu. Recognition algorithm of shaking table ore belt and its application[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2022.

[22] He Lifang, Tong Xiong, Huang Songwei. Mineral belt image segmentation using firefly algorithm[J]. Advanced Materials Research, 2014, 3326(989-994): 4074-4077.

[23] 和丽芳，黄斌，黄宋魏，等. 一种基于改进海鸥算法的锡矿摇床矿带分带图像分割法：202310469979.6[P]. 2025-09-30.
He Lifang, Huang Bin, Huang Songwei, et al. Image segmentation method for tin ore shaking table zoning based on improved seagull optimization algorithm: 202310469979.6[P]. 2025-09-30.

[24] 和丽芳，郭思哲，黄宋魏，等. 一种基于磷虾优化算法的摇床矿带分带图像分割法：201610159915.6[P]. 2016-08-10.
He Lifang, Guo Sizhe, Huang Songwei, et al. Ore belt zoning image segmentation method of shaking table based on krill herd optimization algorithm: 201610159915.6[P]. 2016-08-10.

[25] 和丽芳，郭思哲，黄宋魏，等. 一种基于改进萤火虫算法的多阈值摇床彩色矿带分带图像分割法：201710338971.0[P]. 2017-10-03.
He Lifang, Guo Sizhe, Huang Songwei, et al. Multi-threshold color ore belt zoning segmentation method for shaking table based on improved firefly algorithm: 201710338971.0[P]. 2017-10-03.

[26] 刘惠中，芮作为，朱合钧，等. 基于改进YOLOv5算法的选矿摇床矿带分离点目标检测识别研究[J]. 有色金属科学与工程，2025，16(1)：115-124.
Liu Huizhong, Rui Zuowei, Zhu Hejun, et al. Target detection and recognition of ore belt separation point on mineral processing shaking table based on improved YOLOv5 algorithm[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2025, 16(1): 115-124.

[27] 刘惠中，刘建业，黄翱，等. 基于轻量化融合网络的摇床精矿带分离点位置提取研究[J]. 矿业研究与开发，2025，45(10)：199-206.
Liu Huizhong, Liu Jianye, Huang Ao, et al. Position extraction of concentrate separation point of shaking table based on lightweight fusion network[J]. Mining Research and Development, 2025, 45(10): 199-206.

[28] 邵平，刘丹，余龙舟，等. 基于改进YOLOv8的摇床矿带分界点目标检测算法[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版)，2025，50(5)：45-55.
Shao Ping, Liu Dan, Yu Longzhou, et al. Target detection algorithm for ore belt boundary point of shaking table based on improved YOLOv8[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2025, 50(5): 45-55.

[29] 浦友尚. 摇床运动参数对流场及分离性能的影响与调控[D]. 昆明：昆明理工大学，2021.
Pu Youshang. Influence and regulation of shaking table motion parameters on flow field and separation performance[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021.

[30] 刘惠中，刘紫腾，廖阳，等. 基于机器视觉的选矿摇床自动调坡系统研究[J]. 有色金属(选矿部分)，2025(11)：90-98，119.
Liu Huizhong, Liu Ziteng, Liao Yang, et al. Research on automatic slope adjustment system of mineral processing shaking table based on machine vision[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2025(11): 90-98, 119.

[31] 刘利敏，李强，武涛，等. 摇床自动接矿装置的设计与应用[J]. 黄金，2018，39(10)：48-51.
Liu Limin, Li Qiang, Wu Tao, et al. Design and application of automatic ore receiving device for shaking table[J]. Gold, 2018, 39(10): 48-51.

[32] 赵玉华，杨文旺，武涛，等. 基于深度学习的摇床接矿位置预测方法[J]. 有色金属(选矿部分)，2023(2)：142-146，172.
Zhao Yuhua, Yang Wenwang, Wu Tao, et al. Prediction method of ore receiving position of shaking table based on deep learning[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2023(2): 142-146, 172.

[33] 赵继平，杨文旺，武涛，等. 智能摇床接矿板执行器：201820195238.8[P]. 2019-03-05.
Zhao Jiping, Yang Wenwang, Wu Tao, et al. Actuator for ore receiving plate of intelligent shaking table: 201820195238.8[P]. 2019-03-05.

[34] 杨文龙，吴富姬，罗璇，等. 一种选矿摇床矿带识别及接矿板自动调节装置：201610444703.2[P]. 2016-08-31.
Yang Wenlong, Wu Fuji, Luo Xuan, et al. A device for ore belt identification and automatic adjustment of ore receiving plate of mineral processing shaking table: 201610444703.2[P]. 2016-08-31.

[35] 刘建业. 基于机器视觉的选矿摇床控制参数优化策略研

究[D]. 赣州:江西理工大学,2025.
Liu Jianye. Research on optimization strategy of control parameters of mineral processing shaking table based on machine vision[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2025.
[36] 游科顺. 选矿摇床分选过程模型构建及控制参数优化研究[D]. 赣州:江西理工大学,2022.
You Keshun. Model construction and control parameter optimization of separation process for mineral processing shaking table[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2022.
[37] 何微,戴昊霖,陈雯. 基于XGBoost算法的摇床分选指标预测研究[J]. 矿冶工程,2025,45(1):70-75.
He Wei, Dai Haolin, Chen Wen. Prediction of shaking table separation indexes based on XGBoost algorithm[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(1): 70-75.
[38] Panda L, Tripathy S K. Performance prediction of gravity concentrator by using artificial neural network-a case study[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2014, 24(4): 461-465.
[39] 杨文旺,何庆浪,兰希雄,等. 选矿摇床智能巡检机器人开发与应用[J]. 有色金属(选矿部分),2020(5):102-106.
Yang Wenwang, He Qinglang, Lan Xixiong, et al. Development and application of intelligent inspection robot for mineral processing shaking table[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2020(5): 102-106.
[40] 刘惠中,邓浩宗. 智能选矿摇床巡检机器人的路径规划[J]. 有色金属(选矿部分),2023(2):133-141.
Liu Huizhong, Deng Haozong. Path planning of intelligent inspection robot for mineral processing shaking table[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2023(2): 133-141.
[41] 邹起华. 摇床选矿机器人矿物分带特征提取与机械臂目标识别及控制研究[D]. 赣州:江西理工大学,2024.
Zou Qihua. Research on mineral zoning feature extraction, manipulator target recognition and control of shaking table beneficiation robot[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2024.

(本文编辑 刘水红)

【缅怀寄语】

我和孙传尧老师的缘分始于1991年盛夏。刚从江西理工大学毕业的我,长途奔赴北京矿冶研究总院报到入职,恰逢周末总院不办公,初来北京孤身一人,一时间茫然无措。正当一筹莫展之际,我在院门口遇见骑车赶来加班的孙传尧老师。他主动上前关切询问,几句闲谈宽慰,便稍稍化解了我初到异乡的局促不安。那时我阅历尚浅,只以为他是院里的普通职工,事后才知晓,他正是总院的院长。先生谦和质朴的风范,深深烙印在我的心底。

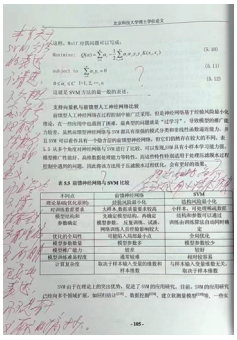
2003年,我有幸拜入先生门下攻读博士学位。求学岁月里,他严谨务实的科研作风深深影响着我。从研究选题、试验方案设计,到学位论文撰写、答辩准备,每一个环节他都悉心把关,逐字逐句批阅文稿,纸上密密麻麻的批注,尽显他对学术的敬畏,也饱含对后辈学子的殷切期许。先生言传身教,教我严谨治学、诚恳做人,是我一生学习的榜样。

2019年,我在北京矿冶研究总院历经二十八载科研工作,决意回到江西理工大学投身教育事业。因为事先没有征求恩师的意见,临行前去向他道别时,我内心十分忐忑,生怕受到先生的责备。未曾料到,先生听罢先是微微错愕,随即爽朗说道:“你去吧,我支持你!”三十余年求学共事,他从未苛责于我。先生这般胸襟与格局,令我感动至今。

如今先生离世已一周年,他坚守科研、倾心育人、深耕矿冶事业的精神,始终激励警醒着我。师恩如山,薪火相传。今后我将继续深耕矿冶领域的科学研究与人才培养,承袭先生务实治学、科技报国的志向,笃行实干,报效国家。先生教诲,永记于心,学生永远感念您、怀念您!







——刘惠中