



论“拣矸就是拣图像”的学术思想

马宏伟 张烨 王鹏 曹现刚 聂珍 魏小荣 周文剑 张明臻

引用本文：

马宏伟, 张烨, 王鹏, 等. 论“拣矸就是拣图像”的学术思想[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(5): 291–300.
MA Hongwei, ZHANG Ye, WANG Peng. On the academic ideology of “Sorting the gangue is sorting the images” [J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(5): 291–300.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2024-1752>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

柔索驱动拣矸机器人分拣轨迹跟踪控制研究

Pick-and-place trajectory tracking control for cable-driven gangue sorting robots
煤炭科学技术. 2023, 51(10): 280–290 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1898>

煤矸分拣机器人设计与关键技术分析

Design and key technology analysis of coal-gangue sorting robot
煤炭科学技术. 2022, 50(3): 232–238 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/941fe867-4493-4ef1-9dbf-8462a2f31f9b>

多机械臂煤矸石智能分拣机器人关键共性技术研究

Research on key generic technology of multi-arm intelligent coal gangue sorting robot
煤炭科学技术. 2023, 51(1): 427–436 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2215>

基于CSPNet-YOLOv7目标检测算法的煤矸图像识别模型

Coal gangue image recognition model based on CSPNet-YOLOv7 target detection algorithm
煤炭科学技术. 2024, 52(S1): 238–248 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0546>

面向煤矸分拣机器人的煤矸识别定位系统研究

Research on coal gangue identification and positioning system based on coal-gangue sorting robot
煤炭科学技术. 2022, 50(1): 237–246 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/44286d3f-7340-456c-a4fb-cb6e4fc67aea>

基于图像识别的矿山相似材料试验模型变形信息提取

Deformation information extraction of similar material model based on image intelligent processing
煤炭科学技术. 2023, 51(11): 214–222 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.CLNH21-016>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

机电工程与智能化



移动扫码阅读

马宏伟, 张 烨, 王 鹏, 等. 论“拣矸就是拣图像”的学术思想[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(5): 291–300.
MA Hongwei, ZHANG Ye, WANG Peng, et al. On the academic ideology of “Sorting the gangue is sorting the images” [J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(5): 291–300.

论“拣矸就是拣图像”的学术思想

马宏伟^{1,2}, 张 烨^{1,2}, 王 鹏^{1,2}, 曹现刚^{1,2}, 聂 珍^{1,2}, 魏小荣^{1,2}, 周文剑^{1,2}, 张明臻³

(1. 西安科技大学 机械工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 陕西省矿山机电装备智能检测与控制重点实验室, 陕西 西安 710054;
3. 华中科技大学 人工智能与自动化学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 煤矸石分拣是提高煤炭质量最基本、最有效、最重要的技术措施, 提高煤矸石分拣的准确性、高效性是煤矸石分拣面临的严峻挑战。深入研究分析了现有“抓取分拣”“拨叉分拣”和“气动分拣”3种煤矸石智能分拣系统架构和原理, 提出了“拣矸就是拣图像”的学术思想, 建立了“拣矸就是拣图像”学术思想的逻辑架构, 阐明了“拣矸就是拣图像”学术思想的基本内涵, 主要包括基于图像的煤矸石识别、基于图像的煤矸石分拣特征提取、图像驱动的分拣器动态目标跟踪和基于图像序列的多任务多分拣器协同等关键技术。针对基于图像的煤矸石识别问题, 提出了将视觉图像和射线图像融合的识别原理和方法, 能够有效提高煤矸石识别的准确率; 针对煤矸石图像分拣特征提取问题, 提出了基于煤矸石图像的平面特征和深度特征提取和融合算法, 构建了煤矸石分拣立方体, 能够提高煤矸石分拣的准确性; 针对动态煤矸石跟踪问题, 提出了基于图像的煤矸石匹配跟踪和路径规划方法, 能够提高分拣的精准性和可靠性; 针对多分拣器智能协同分拣问题, 提出了以煤矸石图像信息库为基础, 构建分拣器综合收益函数实现多分拣器多任务最优分配, 融合强化学习方法实现多分拣器智能协同控制以及分拣器数量最优配置, 能够有效提高多分拣器系统的分拣效率。按照“拣矸就是拣图像”的学术思想, 自主研发了双机械臂桁架式煤矸石分拣机器人实验平台, 验证了该学术思想的正确性和可行性, 并在铜川矿业公司玉华煤矿成功应用。“拣矸就是拣图像”的学术思想为破解煤矸石分拣智能化、精准化、高效化难题奠定了理论基础。

关键词: 拣矸就是拣图像; 图像识别; 图像特征提取; 图像驱动; 动态目标跟踪; 智能协同分拣

中图分类号: TD67 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2025)05-0291-10

On the academic ideology of “Sorting the gangue is sorting the images”

MA Hongwei^{1,2}, ZHANG Ye^{1,2}, WANG Peng^{1,2}, CAO Xiangang^{1,2}, NIE Zhen^{1,2},
WEI Xiaorong^{1,2}, ZHOU Wenjian^{1,2}, ZHANG Mingzhen³

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Mine Electromechanical Equipment Intelligent Detection and Control, Xi'an 710054, China; 3. School of Artificial Intelligence and Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Coal gangue sorting is the most basic, effective, and important technical measure to improve coal quality. Improving the accuracy and efficiency of coal gangue sorting is a serious challenge faced by coal gangue sorting. In-depth research and analysis have been conducted on the existing intelligent sorting systems for coal gangue, including “grabbing sorting”, “fork sorting”, and “pneumatic sorting”. The academic thought of “Sorting gangue is sorting images” has been proposed, and the logical framework of the academic ideology of “Sorting gangue is sorting images” has been established. The basic connotation of the academic ideology of “Sorting gangue is sorting images” has been elucidated, mainly including image-based coal gangue recognition, image-based coal gangue sorting feature extraction, image-driven sorting machine dynamic target tracking, and multi-task multi-sorting machine collaboration based on image se-

收稿日期: 2024-02-08 策划编辑: 常 琛 责任编辑: 李雅楠 DOI: 10.12438/cst.2024-1752

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(52374161, 52174150); 陕西省重点研发计划专项资助项目(2023-LL-QY-03)

作者简介: 马宏伟(1957—), 男, 陕西兴平人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: mahw@xust.edu.cn

通讯作者: 王 鹏(1986—), 男, 陕西澄城人, 工程师, 硕士生导师, 博士。E-mail: wpeng@xust.edu.cn

quences. Aiming at the problem of image-based coal gangue recognition, a recognition principle and metsorting rates visual images and X-ray images is proposed, which can effectively improve the accuracy of coal gangue recognition; Aiming at the problem of feature extraction in coal gangue image sorting, a plane and depth feature extraction and fusion algorithm based on coal gangue images is proposed. A coal gangue sorting cube is constructed, which can improve the accuracy of coal gangue sorting; An image-based coal gangue matching tracking and path planning method is proposed for dynamic coal gangue tracking, which can improve the accuracy and reliability of sorting; Aiming at the problem of intelligent collaborative sorting of multiple sorters, it is proposed to construct a comprehensive benefit function of sorters based on the coal gangue image information database to achieve optimal allocation of multiple tasks for multiple sorters, and to integrate reinforcement learning methods to achieve intelligent collaborative control of multiple sorters and optimal configuration of the number of sorters. This can effectively improve the sorting efficiency of the multiple-sorter system. Following the academic ideology of “Sorting gangue is sorting images”, our team independently developed a double robotic arm truss type coal gangue sorting robot experimental platform, which verified the correctness and feasibility of this academic ideology and successfully applied it in Yuhua Coal Mine of Tongchuan Mining Company. The academic ideology that “Sorting the gangue is sorting the images” has laid a theoretical foundation for solving the problems of intelligent, precise, and efficient coal gangue sorting.

Key words: Sorting the gangue is the sorting images; image recognition; image feature extraction; image driven; dynamic target tracking; intelligent collaborative sorting

0 引言

煤矸石智能分拣已经成为煤矿智能化、绿色化的重要组成部分,现有的煤矸石智能分拣系统主要包括煤矸带式输送系统、识别系统、分拣系统等,主要分拣方法有抓取分拣、拨叉分拣和气动分拣等^[1]。拨叉智能分拣系统利用视觉或射线识别煤与矸石位置,并控制拨叉在其进入分拣区域后将其拨出输送带,实现自动分拣。抓取分拣同样依赖于煤矸石识别结果,并通过图像方法对煤矸石进行定位跟踪,控制机械臂对煤矸石进行抓取分拣。气动分拣则是在煤矸石识别定位的基础上,根据煤矸石位姿变化对气枪进行动态控制,用高压气体将煤矸石分拣出来。分析现有煤矸石智能分拣系统架构和原理,其共性关键技术主要包含:煤矸石识别、煤矸石分拣特征提取、分拣器动态目标跟踪和多任务多分拣器协同控制等^[2]。在煤矸石智能分拣系统共性关键技术中,煤矸石图像的分析处理贯穿始终,对于提高分拣精度和效率发挥着决定性的作用。

煤矸石识别方法^[3-5]均以煤矸石图像为基础(如RGB图像,射线图像,多光谱图像等),从图像中提取煤矸石识别特征^[6-8],通过AI算法实现自动识别,并构建煤矸石图像信息库;分拣器动态目标跟踪则需要通过视觉方式获取煤矸石图像,并对目标矸石进行匹配和跟踪,以此实时获取目标矸石位姿信息^[9-10];多任务多分拣器协同控制则是在煤矸石图像信息库的基础上,结合分拣器状态,完成煤矸石任务分配、分拣器路径规划、轨迹跟踪^[11-14]和多分拣器协同控制^[15-18]。

由此可见,在煤矸石智能分拣系统中,图像是实

现煤矸石智能分拣的基础,不仅作为系统的感知输入,更是在整个流程中,从图像的采集与识别特征提取,到后续的目标匹配、姿态估计、动态跟踪与多分拣器协同控制,起到了连接感知、认知与执行的关键枢纽作用。图像贯穿煤矸石识别、煤矸石分拣特征提取、分拣器动态目标跟踪和多任务多分拣器协同控制等全过程,决定了煤矸石智能分拣系统分拣效率、智能化程度,是实现系统高精度、高效率运行的核心支撑。因此,本文提出“拣矸就是拣图像”的智能拣矸学术思想。

1 “拣矸就是拣图像”学术思想系统架构

为了系统化阐述“拣矸就是拣图像”的核心思想,本文结合煤矸石智能分拣系统中的关键技术,构建了该学术思想的逻辑架构,如图1所示。该架构全面梳理了图像在信息采集与预处理、神经网络识别分析、任务目标匹配、精准跟踪与抓取控制、多机械臂协同决策等关键环节中的作用,形成了从感知输入到智能执行的完整闭环,突出展现了图像在煤矸石分拣过程中的基础性与枢纽性地位。

2 基于图像的煤矸石识别

煤矸石的准确识别是实现机器人高效智能分拣的首要条件。基于图像的煤矸石识别可以将分拣目标数字化,为整个分拣过程提供数据支撑。通过图像对煤矸石进行识别主要有2个目的,一是通过图像分析获得目标类别信息;二是获得目标在煤矸石分拣机器人系统中的位姿信息。

煤矸石识别受光照、粉尘以及煤矸石污染程度等因素影响。在井上识别煤矸石时,可利用视觉系

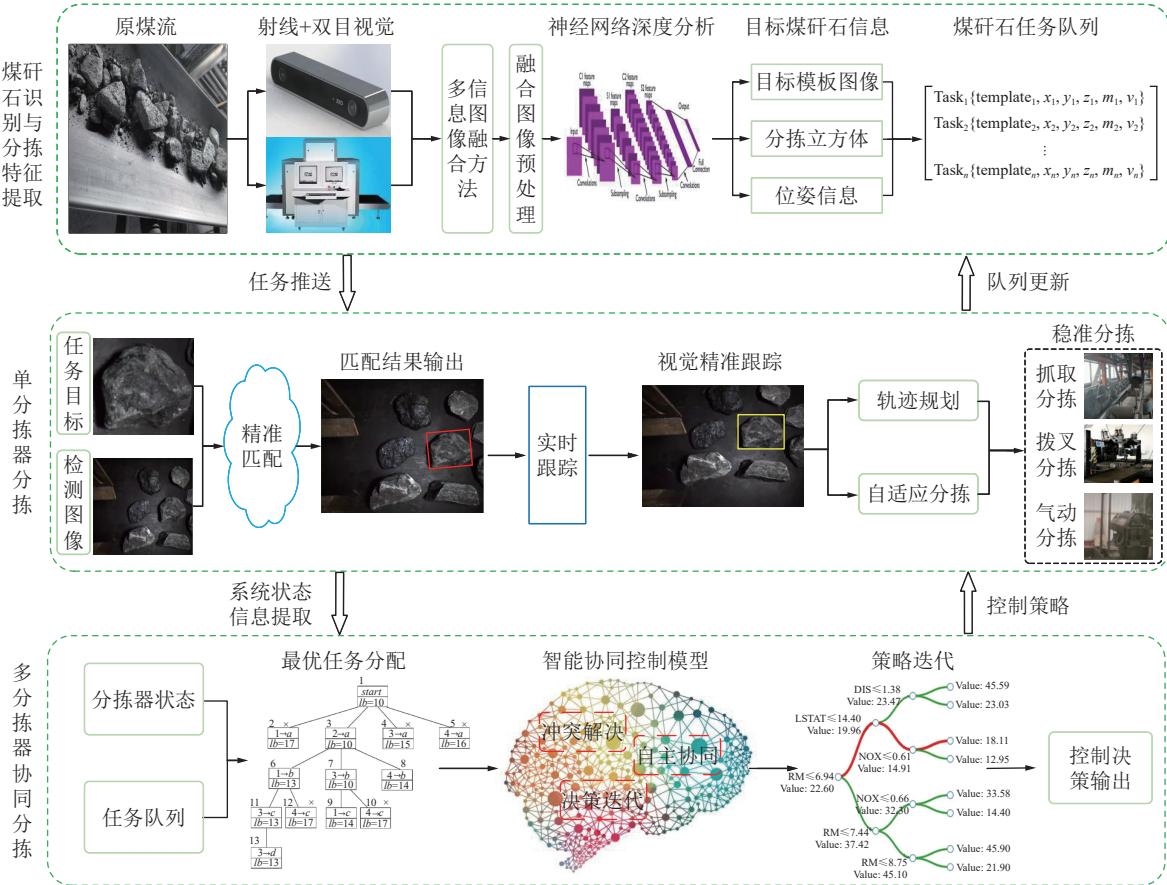


图 1 “拣研就是拣图像”学术思想逻辑架构

Fig.1 Logical framework of the academic ideology of “Sorting the gangue is sorting the images”

统,通过提取煤研石灰度和纹理信息,计算灰度均值、灰度共生矩阵最大值、二阶矩、对比度、相关性、熵等参数^[19-21],同时结合小波变换^[22-23]、支持向量机^[24]等方法进行阈值计算实现煤研识别,且具有较高的识别准确率,但适应性较弱。基于卷积神经网络的煤研石识别方法^[25-26]能提取到更多煤研石表面特征,通过深度学习^[27-29]能够提高算法的实时性和鲁

棒性。

在煤矿井下,由于煤研石表面被煤泥严重包裹,通过视觉图像难以识别,可利用射线检测方法获取煤研石图像^[30-31],具有较高的识别率,但无法获取图像的深度信息。因此,融合射线图像和视觉图像获取煤研石分拣位姿信息,能够有效提高煤研石识别的准确率,提高分拣效率。原理如图 2 所示。

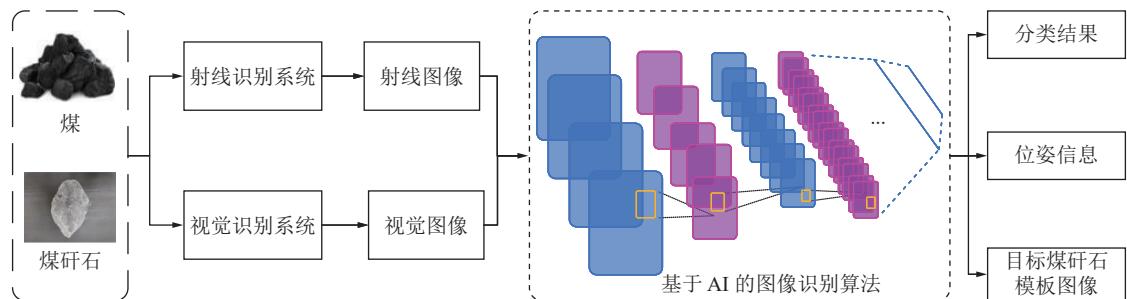


图 2 基于图像的煤研石识别

Fig.2 Image based coal gangue recognition

在获取煤研石识别结果的基础上,构建煤研石图像信息库,信息库主要包括煤研石的质心位置坐标、分拣角度、分拣宽度、研石厚度、研石模板和质量等参数信息,如图 3 所示。

3 基于图像的煤研石分拣特征提取

在准确获取煤研石目标类别信息和位置信息的基础上,如何控制分拣器以最佳姿态对煤研石进行

研石序号	质心位置坐标			分拣角度	分拣宽度	研石厚度	研石模板	研石质量
1	x_1	y_1	z_1	θ_1	L_1	H_1	T_1	m_1
2	x_2	y_2	z_2	θ_2	L_2	H_2	T_2	m_2
3	x_3	y_3	z_3	θ_3	L_3	H_3	T_3	m_3
4	x_4	y_4	z_4	θ_4	L_4	H_4	T_4	m_4
5	x_5	y_5	z_5	θ_5	L_5	H_5	T_5	m_5
...
n	x_n	y_n	z_n	θ_n	L_n	H_n	T_n	m_n

图3 煤矸石图像信息库

Fig.3 Coal gangue image information database

精准分拣是实现机器人高效分拣的关键所在。从力学角度分析,无论以何种方式对煤矸石进行分拣,分拣器与煤矸石质心的作用关系是实现精准分拣的前提。

气动分拣和机械手“拨叉”分拣在得到目标的质心位置坐标后即可执行分拣动作,但对于机械手“抓取”分拣形式,除需以质心为依据外,还需考虑最佳分拣角度、分拣宽度、矸石厚度等姿态信息。因此,煤矸石分拣特征主要包括质心位置坐标、分拣角度、分拣宽度、矸石厚度等。

分拣宽度、分拣角度可通过对目标煤矸石图像进行图像分割和边缘提取等处理,获取其二维图像包络矩形后计算得出,如图4所示。但分拣矩形只获得目标煤矸石的平面图像信息,只能计算出形心坐标,无法得到质心坐标。因此,可通过X射线识别煤矸石并提取轮廓特征,生成煤矸石包络矩形;融合

煤矸石X射线图像与双目视觉点云图像,对目标煤矸石点云数据进行目标分割,采用OBB包围盒算法生成煤矸石抓取特征,基于此特征构建煤矸石最优抓取立方体,如图5所示。分拣立方体包含了质心位置坐标、分拣角度、分拣宽度、矸石厚度等参数信息^[32-33],煤矸石分拣特征提取原理如图6所示。



图4 煤矸石分拣矩形效果

Fig.4 Rectangular rendering of coal gangue sorting

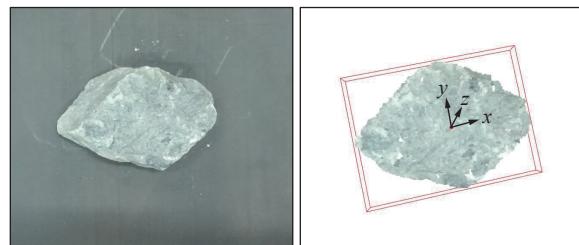


图5 煤矸石分拣立方体

Fig.5 Coal gangue sorting cube

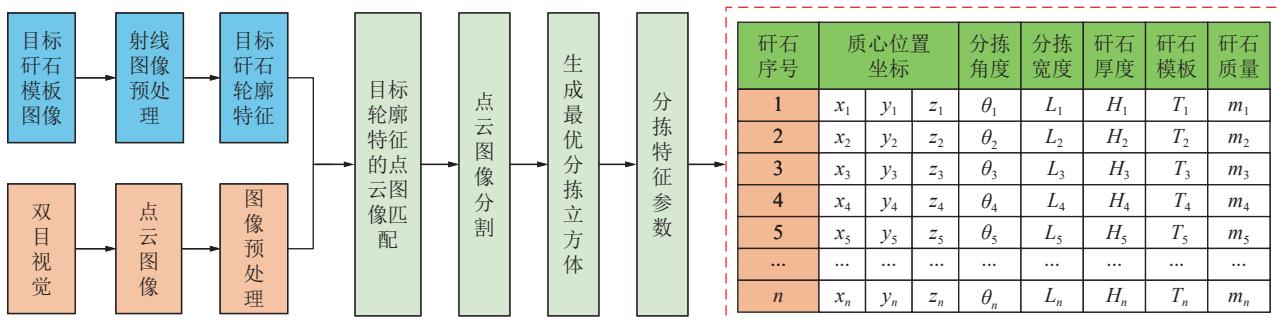


图6 煤矸石图像分拣特征提取原理

Fig.6 Principle diagram of feature extraction for coal gangue image sorting

4 图像驱动的分拣器动态目标跟踪

煤矸石分拣器对煤矸石进行高效分拣取决于煤矸石的精确定位和同步跟踪。现有的定位方法主要是通过时间和带速来计算分拣位置,得到目标运动轨迹。但未考虑带式输送机在运行过程中存在带速波动或跑偏因素。在获取目标质心位置后,分拣器

不能直接进行分拣动作,还需要对分拣器进行控制,确保分拣器对目标煤矸石精准跟踪。因此,基于图像驱动的动态目标煤矸石实时定位和分拣器路径规划与轨迹跟踪是亟待破解的关键难题。

4.1 基于图像的动态目标煤矸石实时定位

动态目标煤矸石从识别区域进入分拣区域后,

常常会出现位姿变化和遮挡等现象。因此,分拣器在执行分拣动作之前,需通过目标模板图像匹配检测图像,确定待分拣目标煤研石。在目标煤研石被遮挡时,仅采用匹配算法无法满足对目标位置信息的精确获取。因此,需进一步采用图像跟踪算法(如FDSST跟踪算法^[34-35]、基于深度学习的跟踪算法^[36-37]、基于孪生神经网络跟踪算法^[38-39])对动态煤研石进行跟踪,确保目标煤研石位姿信息的实时准确获取。基于图像的动态目标煤研石实时定位原理如图7所示。

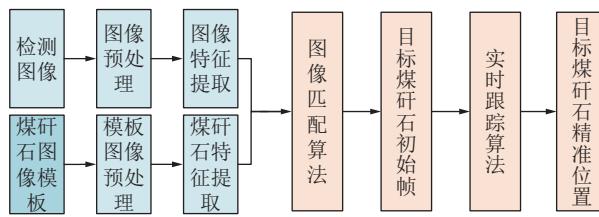


图7 基于图像的动态目标煤研石实时定位原理

Fig.7 Principle diagram of real-time positioning of dynamic target coal gangue based on images

4.2 图像驱动的分拣器路径规划与轨迹跟踪

基于图像的动态目标煤研石实时定位方法为分拣器同步跟踪提供了准确的位置信息。煤研运输具有速度快、研石质量大等特点,机械手直接抓取存在冲击载荷,极易造成抓取失败或机械手损坏。因此,融合分拣器末端位姿信息和目标煤研石位姿信息,建立基于全局规划和局部优化的“位置-速度-加速度”多约束条件分拣器动态目标路径规划模型^[13,40]在此基础上,融合最短跟踪时间和最优分拣位姿,建立分拣器轨迹跟踪模型,以此来提高分拣精度和效率。分拣器路径规划和轨迹跟踪原理如图8所示。

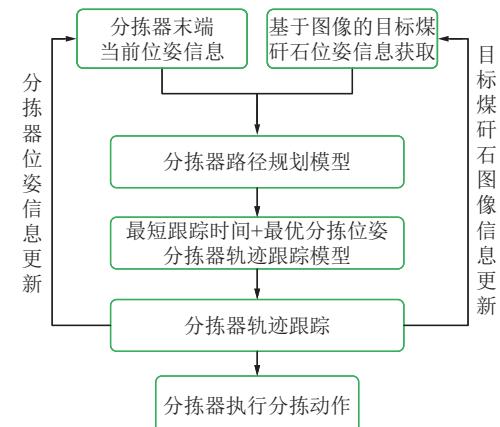


图8 分拣器路径规划与轨迹跟踪原理

Fig.8 Principles of path planning and trajectory tracking for sorter

5 基于煤研石图像信息的多任务多分拣器智能协同控制

在多任务、多分拣器煤研石协同拣研系统中,基于煤研石图像信息(位姿、尺寸和质量)的多分拣器多任务分配、多分拣器协同控制和多分拣器数量最优配置等是亟待解决的关键难题。

5.1 多分拣器多任务分配

通过分拣器动态煤研石跟踪方法可得到分拣器分拣煤研石路径和分拣时间。多分拣器多任务分配在煤研石图像信息库的基础上,构建分拣器综合收益函数,获得分拣器任务收益矩阵。结合分拣器工作空间可行域和煤研石图像分布对分拣器任务空间进行优化,获得分拣器任务可行域。分拣器按照可行域内收益最大的原则进行任务分配。多分拣器多任务分配原理如图9所示。

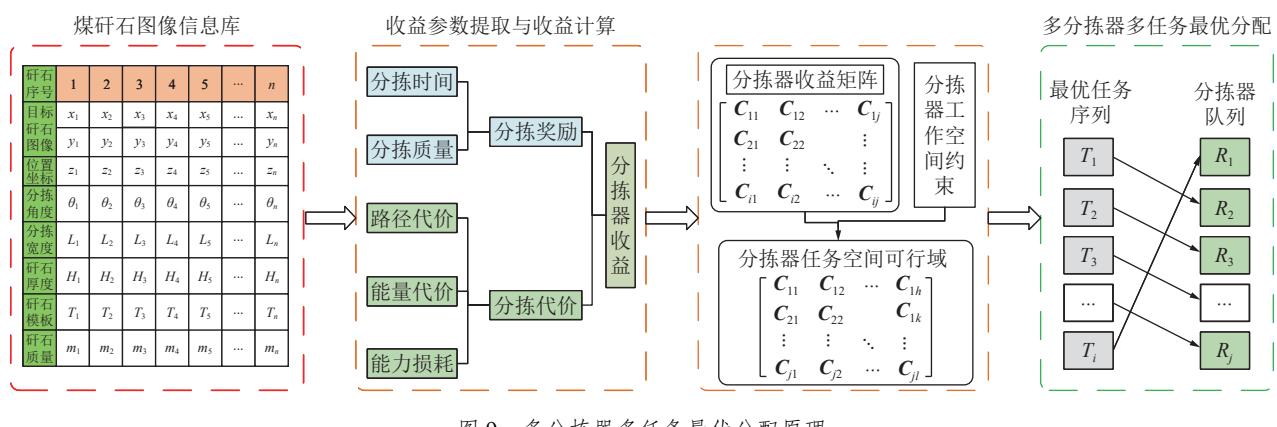


图9 多分拣器多任务最优分配原理

Fig.9 Optimal allocation principle for multiple sorting machines and tasks

5.2 多任务多分拣器协同控制

多分拣器煤研石分拣系统中,分拣器之间既相

互约束又相互协同。多分拣器系统在煤研石图像信息库的基础上,通过对分拣器状态进行监测,按照

多分拣器多任务分配方法进行任务分配。分拣器根据图像驱动的动态煤矸石跟踪模型进行路径规划,对目标煤矸石进行跟踪分拣。多分拣器协同控制策略库根据执行任务分布图谱进行分拣器和任务可执行度分析,当分拣器路径发生冲突时,通过全局策略收益评价函数对分拣器执行任务全局收益进行评价,选择收益最大任务执行。同时通过分拣避让协同控制模型对其他分拣器进行协同动作控制。当

任务分布图谱密度较大时,采用多分拣器协同路径控制模型对多分拣器路径进行控制。利用强化学习过程计算多分拣器系统效益,建立奖惩机制并对煤矸石图像信息库进行更新,根据煤矸石图像信息对分拣器动作进行动态控制,并更新控制策略,同时反馈一定的奖惩给多分拣器控制系统进一步优化感知决策过程,借助煤矸石图像信息库进行决策训练。多任务多分拣器智能协同控制系统框架如图 10 所示。

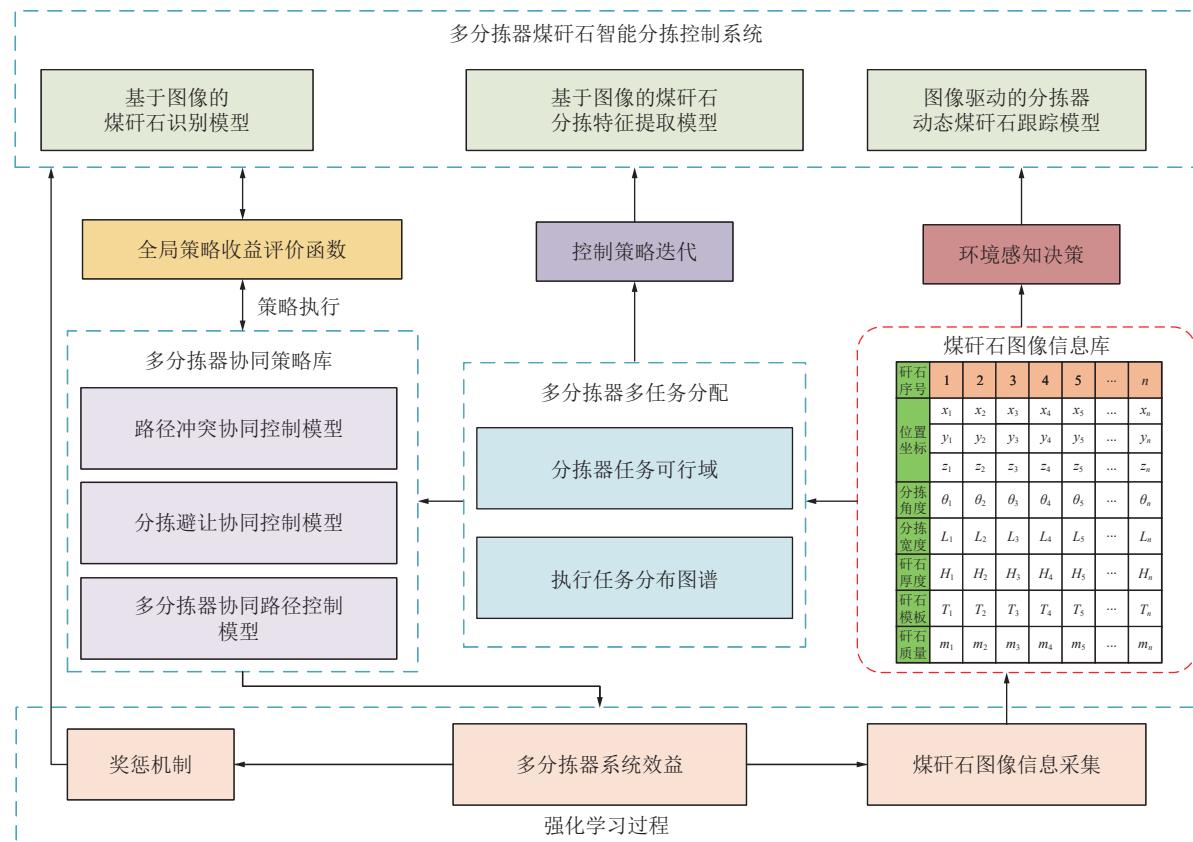


图 10 分拣器系统控制抓取原理

Fig.10 Schematic diagram of the control and grasping principle of the sorter system

5.3 分拣器数量最优配置

分拣器数量配置与含矸率、过煤量、带式输送机带速和拣矸要求等因素密切相关。在煤矸石图像信息库的基础上,结合分拣器数量影响因素,构建多分拣器系统任务动态库。通过多分拣器协同控制方法构建分拣器数量配置数学模型,将分拣器数量影响因素参数化,并作为分拣器数量配置数学模型输入,以拣矸效率作为评价指标,求解分拣器最优数量。分拣器数量配置原理如图 11 所示。

6 实验验证

基于“拣矸就是拣图像”的学术思想,研发了双机械臂桁架式煤矸石分拣机器人系统,系统由煤矸

石识别子系统、机械臂分拣子系统、检测与控制子系统、带式输送机等组成。双机械臂煤矸石分拣机器人系统如图 12 所示。

系统通过图像识别子系统获取大量煤矸图像,构建了煤矸图像数据集,采用改进的 VGG-16 网络识别算法^[41]实现对煤和矸石的分类识别,获得煤矸石分拣特征参数,识别准确率为 97.58%,结果如图 13—图 14 所示。

机械臂通过匹配跟踪算法获取目标煤矸石的实时精准位姿。分拣器根据煤矸石质心位姿信息,采用多约束条件分拣器动态目标路径规划方法^[42],对分拣器路径进行实时规划;采用基于长短期神经网络的分拣器轨迹跟踪方法,控制分拣器对规划的路

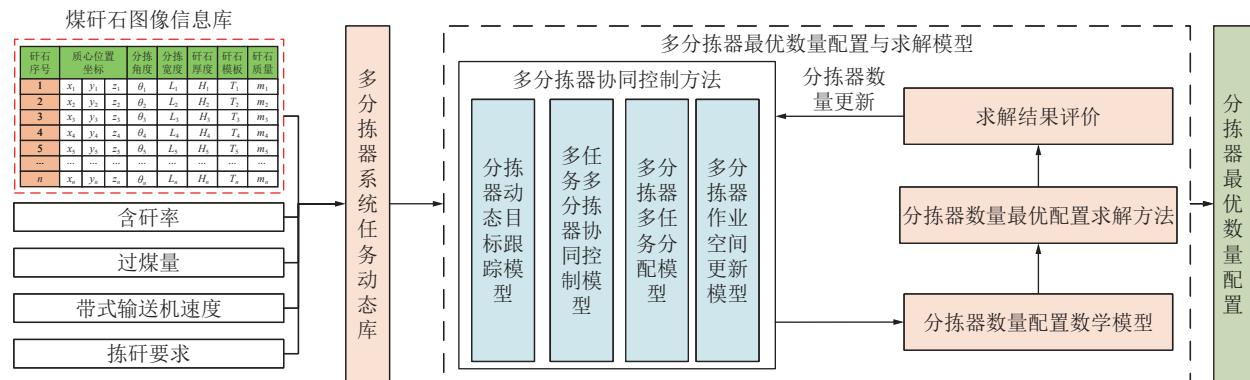


图 11 分拣器数量最优配置原理

Fig.11 Principle of optimal configuration of sorter quantity



图 12 双机械臂煤矸石分拣机器人系统

Fig.12 Dual robotic arm coal gangue sorting robot system

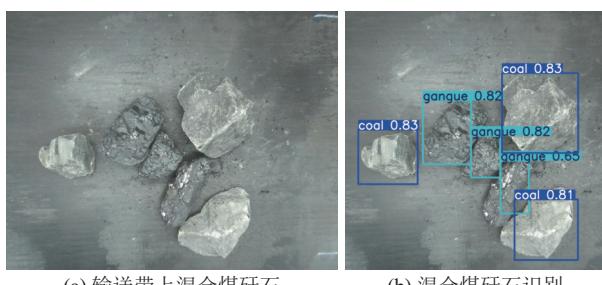


图 13 煤矸石识别结果

Fig.13 Identification results of coal gangue

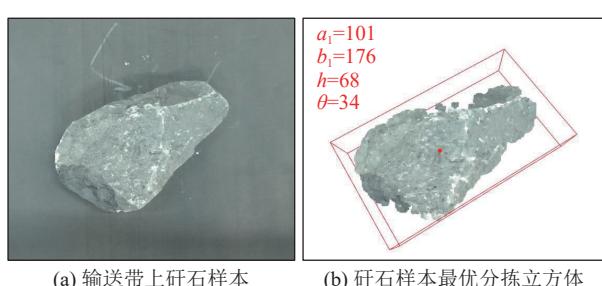


图 14 煤矸石分拣特征提取结果

Fig.14 Feature extraction results of coal gangue sorting

径进行跟踪,结果如图 15 所示。图中分拣器末端在接收到分拣任务后,其位置超前于目标位置,因此,分拣器在实时路径规划时,首先反向逼近目标,然后

再进行同向跟踪,当分拣器与动态目标煤矸石快速同步后执行分拣动作。

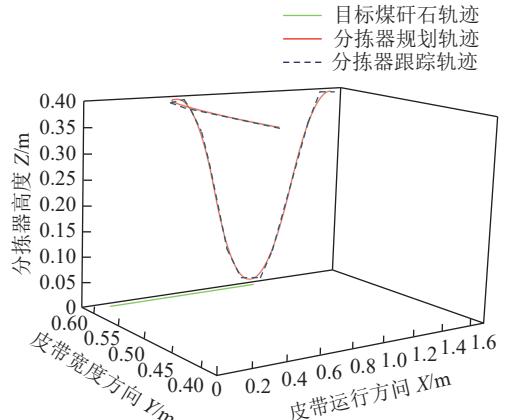


图 15 分拣器路径规划与轨迹跟踪曲线

Fig.15 Sorting path planning and trajectory tracking curve

通过制备不同含矸率的试验样本,结合多任务多分拣器系统控制原理,采用基于免疫动态工作空间多分拣器协同控制方法^[15]进行实验。试验结果如图 16 所示。分拣器未达到最大分拣能力时,随着含矸率的增加,分拣器的分拣能力增强,但是到达一定程度后,分拣能力保持稳定,分拣能力为 1.96 t/min,

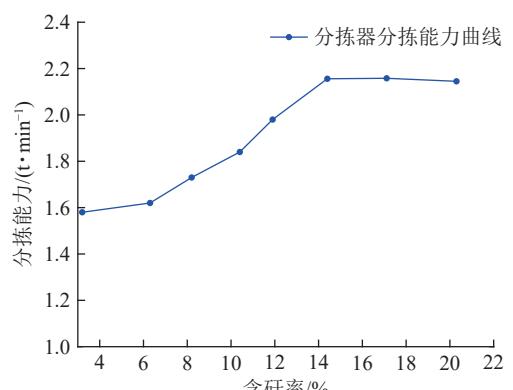


图 16 分拣器分拣能力曲线

Fig.16 Sorting capacity curve of sorter

充分发挥多分拣器的分拣效能,实现煤矸石的高效分拣。

7 结 论

1) 煤矸石识别就是对图像的识别。基于图像的识别方法不仅能够获得煤矸石表面特征,也可以获得其内部特征,将视觉图像和射线图像融合,提高煤矸石识别的准确率。

2) 煤矸石分拣特征提取就是对图像特征的提取。对煤矸石平面特征和深度特征进行提取和融合,构建煤矸石分拣立方体,得到煤矸石质心坐标和其他特征参数,为分拣器的精准控制提供数据支撑。

3) 动态煤矸石跟踪是对动态图像的跟踪。通过基于图像的煤矸石匹配跟踪方法对煤矸石质心进行精准定位,以此对分拣器进行路径规划,并驱动分拣器准确跟踪目标煤矸石,提高分拣的精准性和可靠性。

4) 多分拣器智能协同就是对煤矸石图像序列的协同分拣。以煤矸石图像信息库为基础,通过构建分拣器综合收益函数,实现多分拣器多任务最优分配;融合强化学习方法,实现多分拣器智能协同控制。在此基础上获得分拣器数量最优配置,提高多分拣器系统的分拣效率。

参考文献(References):

- [1] 权春锋,马利云.基于X射线的高含矸煤一体化干法选煤技术研究[J].*矿山机械*,2020,48(4):73-76.
QUAN Chunfeng, MA Liyun. Study on integrated dry coal preparation technology of high gangue coal based on X-ray[J]. *Mining & Processing Equipment*, 2020, 48(4): 73-76.
- [2] 马宏伟,张烨,王鹏,等.多机械臂煤矸石智能分拣机器人关键共性技术研究[J].*煤炭科学技术*,2023,51(1):427-436.
MA Hongwei, ZHANG Ye, WANG Peng, et al. Research on key generic technology of multi-arm intelligent coal gangue sorting robot[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(1): 427-436.
- [3] 赵子文,金永,陈友兴,等.基于改进YOLOv5s的X射线图像粘接缺陷实时检测[J].*国外电子测量技术*,2023,42(4):181-186.
ZHAO Ziwen, JIN Yong, CHEN Youxing, et al. Real-time detection of adhesive defects in X-ray images based on improved YOLOv5s[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2023, 42(4): 181-186.
- [4] 申利飞,田子建,白林绪.改进纹理模糊筛选下煤矸石X射线图像处理[J].*激光与红外*,2022,52(7):1090-1097.
SHEN Lifei, TIAN Zijian, BAI Linxu. X-ray image processing of coal gangue under improved texture fuzzy screening[J]. *Laser & Infrared*, 2022, 52(7): 1090-1097.
- [5] 来文豪,周孟然,王锦国,等.多光谱波段筛选的煤矸石快速定位[J].*中国激光*,2021,48(16):1611001.
LAI Wenhao, ZHOU Mengran, WANG Jinguo, et al. Fast location of coal gangue based on multispectral band selection[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(16): 1611001.
- [6] 张红,李晨阳.基于光学图像的煤矸石识别方法综述[J].*煤炭工程*,2022,54(7):159-163.
ZHANG Hong, LI Chenyang. Review on coal gangue identification methods based on optical images[J]. *Coal Engineering*, 2022, 54(7): 159-163.
- [7] 马宏伟,周文剑,王鹏,等.改进的ORB-FLANN煤矸石图像高效匹配方法[J].*煤炭科学技术*,2024,52(1):288-296.
MA Hongwei, ZHOU Wenjian, WANG Peng, et al. Improved ORB-FLANN efficient matching method for coal gangue image[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(1): 288-296.
- [8] 范振,陈乃建,黄玉林,等.基于支持向量机与多种特征的煤矸石识别[J].*济南大学学报(自然科学版)*,2021,35(3):277-284.
FAN Zhen, CHEN Naijian, HUANG Yulin, et al. Coal gangue identification based on support vector machine and multi-features[J]. *Journal of University of Jinan (Science and Technology)*, 2021, 35(3): 277-284.
- [9] 巩师鑫,赵国瑞,王飞.机器视觉感知理论与技术在煤炭工业领域应用进展综述[J].*工矿自动化*,2023,49(5):7-21.
GONG Shixin, ZHAO Guorui, WANG Fei. Review on the application of machine vision perception theory and technology in coal industry[J]. *Journal of Mine Automation*, 2023, 49(5): 7-21.
- [10] 张烨,马宏伟,王鹏,等.煤矸石智能分拣机器人研究进展与关键技术[J].*工矿自动化*,2022,48(12):42-48,56.
ZHANG Ye, MA Hongwei, WANG Peng, et al. Research progress and key technologies of intelligent coal-gangue sorting robot[J]. *Journal of Mine Automation*, 2022, 48(12): 42-48, 56.
- [11] 赵明辉.双臂并联煤矸石分拣机器人及其轨迹规划研究[J].*工矿自动化*,2020,46(9):57-63.
ZHAO Minghui. Research on dual-arm parallel coal gangue sorting robot and its trajectory planning[J]. *Industry and Mine Automation*, 2020, 46(9): 57-63.
- [12] 曹现刚,李宁,王鹏,等.基于比例导引法的机械臂拣矸过程轨迹规划方法研究[J].*煤炭工程*,2019,51(5):154-158.
CAO Xiangang, LI Ning, WANG Peng, et al. Research and simulation on priority and path planning of manipulator gangue picking[J]. *Coal Engineering*, 2019, 51(5): 154-158.
- [13] 马宏伟,孙那新,张烨,等.煤矸石分拣机器人动态目标稳定抓取轨迹规划[J].*工矿自动化*,2022,48(4):20-30.
MA Hongwei, SUN Naxin, ZHANG Ye, et al. Track planning of coal gangue sorting robot for dynamic target stable grasping[J]. *Journal of Mine Automation*, 2022, 48(4): 20-30.
- [14] 王鹏,曹现刚,马宏伟,等.基于余弦定理-PID的煤矸石分拣机器人动态目标稳准抓取算法[J].*煤炭学报*,2020,45(12):4240-4247.
WANG Peng, CAO Xiangang, MA Hongwei, et al. Dynamic target steady and accurate grasping algorithm of gangue sorting ro-

- bot based on cosine theorem-PID [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(12): 4240–4247.
- [15] MA H W, WEI X R, WANG P, et al. Multi-arm global cooperative coal gangue sorting method based on improved Hungarian algorithm [J]. *Sensors*, 2022, 22(20): 7987.
- [16] 曹现刚, 吴旭东, 王鹏, 等. 面向煤矸分拣机器人的多机械臂协同策略 [J]. 煤炭学报, 2019, 44(S2): 763–774.
- CAO Xiangang, WU Xudong, WANG Peng, et al. Multi-manipulator cooperation strategy for coal gangue sorting robot [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(S2): 763–774.
- [17] 曹现刚, 费佳浩, 王鹏, 等. 基于多机械臂协同的煤矸分拣方法研究 [J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(4): 7–12.
- CAO Xiangang, FEI Jiahao, WANG Peng, et al. Study on coal-gangue sorting method based on multi-manipulator collaboration [J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(4): 7–12.
- [18] 王鹏, 曹现刚, 夏晶, 等. 基于机器视觉的多机械臂煤矸分拣机器人系统研究 [J]. 工矿自动化, 2019, 45(9): 47–53.
- WANG Peng, CAO Xiangang, XIA Jing, et al. Research on multi-manipulator coal and gangue sorting robot system based on machine vision [J]. *Industry and Mine Automation*, 2019, 45(9): 47–53.
- [19] 巩文迪, 卢兆林, 唐全, 等. 灰度自适应边缘检测在煤矸石分选中的应用 [J]. *煤炭技术*, 2013, 32(10): 95–96.
- GONG Wendi, LU Zhaolin, TANG Quan, et al. Application of gray adaptive edge detection in gangue sorting [J]. *Coal Technology*, 2013, 32(10): 95–96.
- [20] 于国防, 邹士威, 秦聪. 图像灰度信息在煤矸石自动分选中的应用研究 [J]. 工矿自动化, 2012, 38(2): 36–39.
- YU Guofang, ZOU Shiwei, QIN Cong. Application research of image gray information in automatic separation of coal and gangue [J]. *Industry and Mine Automation*, 2012, 38(2): 36–39.
- [21] 曹现刚, 李莹, 王鹏, 等. 煤矸石识别方法研究现状与展望 [J]. 工矿自动化, 2020, 46(1): 38–43.
- CAO Xiangang, LI Ying, WANG Peng, et al. Research status of coal-gangue identification method and its prospect [J]. *Industry and Mine Automation*, 2020, 46(1): 38–43.
- [22] 陈立, 杜文华, 曾志强, 等. 基于小波变换的煤矸石自动分选方法 [J]. 工矿自动化, 2018, 44(12): 60–64.
- CHEN Li, DU Wenhua, ZENG Zhiqiang, et al. Automatic separation method of coal and gangue based on wavelet transform [J]. *Industry and Mine Automation*, 2018, 44(12): 60–64.
- [23] 马宪民. 一种基于小波变换的煤矸石图像边缘检测方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2006, 27(S3): 2130–2131.
- MA Xianmin. Edge detection based on wavelet transform for coal gangue image [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(S3): 2130–2131.
- [24] 何敏, 王培培, 蒋慧慧. 基于 SVM 和纹理的煤和煤矸石自动识别 [J]. *计算机工程与设计*, 2012, 33(3): 1117–1121.
- HE Min, WANG Peipei, JIANG Huihui. Recognition of coal and stone based on SVM and texture [J]. *Computer Engineering and Design*, 2012, 33(3): 1117–1121.
- [25] 刘中钰, 吴景涛, 李明. 煤矸石图像分类方法 [J]. 工矿自动化, 2020, 46(3): 69–73.
- RAO Zhongyu, WU Jingtao, LI Ming. Coal-gangue image classification method [J]. *Industry and Mine Automation*, 2020, 46(3): 69–73.
- [26] 孙涛, 王宏伟, 闫志蕊. 基于卷积神经网络和语义分割混合模型的煤岩识别系统研究 [J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(11): 179–187.
- SUN Tao, WANG Hongwei, YAN Zhirui. Research on coal-rock recognition system based on convolutional neural network and semantic segmentation hybrid model [J]. *Mining Research and Development*, 2022, 42(11): 179–187.
- [27] 蔡秀凡, 谢金辰. YOLOv4 煤矸石检测方法研究 [J]. 煤炭工程, 2022, 54(8): 157–162.
- CAI Xiufan, XIE Jinchen. YOLOv4-based detection method of coal and gangue [J]. *Coal Engineering*, 2022, 54(8): 157–162.
- [28] 桂方俊, 李尧. 基于 CBA-YOLO 模型的煤矸石检测 [J]. 工矿自动化, 2022, 48(6): 128–133.
- GUI Fangjun, LI Yao. Coal gangue detection based on CBA-YOLO model [J]. *Journal of Mine Automation*, 2022, 48(6): 128–133.
- [29] 郁亚松, 张步勤, 郎利影. 基于深度学习的煤矸石识别技术与实现 [J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(12): 202–208.
- GAO Yasong, ZHANG Buqin, LANG Liying. Coal and gangue recognition technology and implementation based on deep learning [J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(12): 202–208.
- [30] 司奎, 谭超, 朱嘉皓, 等. 基于 X 射线图像和激光点云的煤矸识别方法 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(9): 193–205.
- SI Lei, TAN Chao, ZHU Jiahao, et al. A coal-gangue recognition method based on X-ray image and laser point cloud [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(9): 193–205.
- [31] 刘辉, 张春波, 卢进南, 等. 基于激光三角法的煤矸石装载体积测量方法 [J]. *激光技术*, 2021, 45(5): 630.
- LIU Hui, ZHANG Chunbo, LU Jinnan, et al. Coal gangue loading volume measurement method based on laser triangulation [J]. *Laser Technology*, 2021, 45(5): 630.
- [32] 赵艳秋. 基于 X 射线探测技术的煤矸光电识别机理及实验研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2023.
- ZHAO Yanqiu. Mechanism and experimental study on photoelectric identification of coal gangue based on X-ray detection technology [D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2023.
- [33] 方正, 李光磊. 基于 X 射线吸收光谱的煤矸石鉴别 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(9): 63–68.
- FANG Zheng, LI Guanglei. Identification of coal gangue based on X-ray absorption spectroscopy [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2024, 52(9): 63–68.
- [34] 李轶锟, 吴庆宪, 丁晨辉, 等. 基于 TLD 和 fDSST 的长时间目标跟踪算法 [J]. 电光与控制, 2019, 26(4): 44.
- LI Yikun, WU Qingxian, DING Shenghui, et al. A long-term

- tracking algorithm based on TLD and fDSST[J]. *Electronics Optics & Control*, 2019, 26(4): 44.
- [35] 余铎, 王耀南, 毛建旭, 等. 基于视觉的移动机器人目标跟踪方法[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(1): 227–235.
- YU Duo, WANG Yaonan, MAO Jianxu, et al. Vision-based object tracking method of mobile robot[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(1): 227–235.
- [36] 张玉涛, 张梦凡, 史学强, 等. 基于深度学习的井下运动目标跟踪算法研究[J]. *煤炭工程*, 2022, 54(10): 151–155.
- ZHANG Yutao, ZHANG Mengfan, SHI Xueqiang, et al. Object tracking algorithm of moving objects in underground mine based on deep learning[J]. *Coal Engineering*, 2022, 54(10): 151–155.
- [37] 张旭辉, 闫建星, 张超, 等. 基于改进 YOLOv5s+DeepSORT 的煤块行为异常识别[J]. *工矿自动化*, 2022, 48(6): 77–86, 117.
- ZHANG Xuhui, YAN Jianxing, ZHANG Chao, et al. Coal block abnormal behavior identification based on improved YOLOv5s + DeepSORT[J]. *Journal of Mine Automation*, 2022, 48(6): 77–86, 117.
- [38] 仇祝令, 查宇飞, 朱鹏, 等. 基于孪生神经网络在线判别特征的视觉跟踪算法[J]. *光学学报*, 2019, 39(9): 0915003.
- QIU Zhuling, ZHA Yufei, ZHU Peng, et al. Visual tracking algorithm based on online feature discrimination with Siamese network[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(9): 0915003.
- [39] 陈云芳, 吴懿, 张伟. 基于孪生网络结构的目标跟踪算法综述[J]. *计算机工程与应用*, 2020, 56(6): 10–18.
- CHEN Yunfang, WU Yi, ZHANG Wei. Survey of target tracking algorithm based on Siamese network structure[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2020, 56(6): 10–18.
- [40] ZHANG Y, MA H W, WANG P, et al. Research on dynamic target steady and quasi-grasping method of coal gangue sorting robot based on global planning and local vision[J]. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2024: 1–20.
- [41] 李亚坤, 马宏伟, 王鹏. 基于 VGG_16 网络的煤和矸石识别技术研究[J]. *煤炭技术*, 2022, 41(9): 156–159.
- LI Yakun, MA Hongwei, WANG Peng. Research on coal and gangue recognition technology based on VGG_16 network[J]. *Coal Technology*, 2022, 41(9): 156–159.
- [42] WANG P, MA H W, ZHANG Y, et al. Trajectory planning for coal gangue sorting robot tracking fast-mass target under multiple constraints[J]. *Sensors*, 2023, 23(9): 4412.