



# 视频AI算法分析的煤矿固体智能充填开采方法

张强 杨康 曹津铭 白雨 邓攀博 杨子

引用本文：

张强, 杨康, 曹津铭, 等. 视频AI算法分析的煤矿固体智能充填开采方法[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(11): 163–173.  
ZHANG Qiang, YANG Kang, CAO Jinming. Solid intelligent backfill coal mining method with video ai algorithm analysis in coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(11): 163–173.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2024-0955>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 煤矿安全生产视频AI识别关键技术研究综述

Review on key technologies of AI recognition for videos in coal mine  
煤炭科学技术. 2023, 51(2): 349–365 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2022-0359>

### 基于顶板结构断裂特征的煤矿结构充填关键位置确定方法

Method determination on key position of coal mine constructional backfill based on fracture characteristics of roof structure  
煤炭科学技术. 2024, 52(4): 38–49 <https://doi.org/10.12438/est.2023-1747>

### 煤矿固体充填采煤技术发展回顾与展望

Review and prospect of development of coal mine solid filling technology  
煤炭科学技术. 2020, 48(9): 27–38 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/773505ed-eb50-4f27-a626-fda242764a07>

### “三下”采煤膏体充填开采技术研究

Research on paste backfilling mining technology of coal mining under buildings, water bodies and railways  
煤炭科学技术. 2021, 49(1): 218–224 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2021.01.017>

### 煤矿固体废弃物流态化浆体充填技术

Fluidization slurry backfilling technology of coal mine solid waste  
煤炭科学技术. 2021, 49(3): 83–91 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2021.03.010>

### 矿山绿色充填开采发展现状及展望

Present situation and prospect of green filling mining in mines  
煤炭科学技术. 2020, 48(9): 48–55 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d9c85a30-5f8d-4a8c-abef-e217e8224d49>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

张 强, 杨 康, 曹津铭, 等. 视频 AI 算法分析的煤矿固体智能充填开采方法[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(11): 163-173.  
ZHANG Qiang, YANG Kang, CAO Jinming, et al. Solid intelligent backfill coal mining method with video ai algorithm analysis in coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(11): 163-173.

## 视频 AI 算法分析的煤矿固体智能充填开采方法

张 强<sup>1,2</sup>, 杨 康<sup>1,2</sup>, 曹津铭<sup>1,3</sup>, 白 雨<sup>1,2</sup>, 邓攀博<sup>1,2</sup>, 杨 子<sup>4</sup>

(1. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 深部煤炭资源开采教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 陕西煤业化工集团陕西小保当矿业有限公司, 陕西 榆林 719302; 4. 香港大学 统计与精算学系, 香港 999077)

**摘要:** 固体充填开采方法在处理煤基固废和控制地表沉降方面具有较大优势, 但其充填效率低、接续时间长、劳动强度大等问题制约着绿色充填开采的发展。针对固体充填技术升级的内生动力、行业发展的迫切需求以及矿山智能化建设的必然趋势, 提出视频 AI 算法分析的固体智能充填方法。本文首先通过分析该固体智能充填方法的内涵及难点, 构建出视频 AI 算法分析的固体智能充填开采方法系统构架, 阐述视频 AI 算法的工作原理与实现流程, 并给出视频 AI 算法可以实现的功能。根据不同地质条件分析了关键充填装备在不同工序下的影响因素, 通过 Creo 进行液压支架骨架建模, 实现液压支架在不同工况下机构的运动, 给出对应的调控判据及路径, 并设计关键充填装备在不同工序下的控制算法流程。根据视频算法特征及算法优缺点初步选择了图像识别算法, 将构建好的目标数据集经过算法模型的训练及调参最终确定了最佳算法及对应的参数。通过某矿充填面应用效果分析, SVM 各评价指标均优于其他算法, 表明 SVM 模型在工况判别时表现出色, 具有高度的准确性和可靠性。本研究可实现关键充填装备机构非正常工况的识别及调控、提高充填效率、机构位姿参数识别、充填空间夯实效果展示, 可为视频 AI 算法分析的固体智能充填开采技术研发与应用提供理论指导。

**关键词:** 充填开采; 视频 AI 算法; 工况识别与调控; 充填效率; 位姿识别

**中图分类号:** TD822      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0253-2336(2024)11-0163-11

### Solid intelligent backfill coal mining method with video ai algorithm analysis in coal mine

ZHANG Qiang<sup>1,2</sup>, YANG Kang<sup>1,2</sup>, CAO Jinming<sup>1,3</sup>, BAI Yu<sup>1,2</sup>, DENG Panbo<sup>1,2</sup>, YANG Zi<sup>4</sup>

(1. School of Mines, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining, Ministry of Education of China; Xuzhou 221116, China; 3. Xiaobaodang Mining Co., Ltd., Shaanxi Coaland Chemical Industry Group, Yulin 719302, China; 4. The Department of Statistics and Actuarial, The University of Hong Kong, HongKong 999077, China)

**Abstract:** The solid backfilling mining method has great advantages in handling coal-based solid waste and controlling surface subsidence, but its low backfilling efficiency, long succession time and high labour intensity constrain the development of green backfilling mining. Aiming at the endogenous driving force of solid backfilling technology upgrading, the urgent demand of industry development and the inevitable trend of mine intelligent construction, the solid intelligent backfilling method analysed by video AI algorithm is proposed. Initially, this paper examines the essence and challenges of intelligent solid backfilling methods, establishes the system framework for analyzing the intelligent solid backfilling mining method using video AI algorithms, elucidates the operational principles and implementation process of the video AI algorithm, and outlines the capabilities that can be achieved through this algorithm. It analyzes the influencing factors on key backfilling equipment under different geological conditions. The hydraulic support framework modeling was conducted us-

收稿日期: 2024-07-07      策划编辑: 常 琛      责任编辑: 黄小雨      DOI: 10.12438/cst.2024-0955

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目 (52174134); 江苏高校“青蓝工程”资助项目 (苏教师函 [2024]14 号); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (2021GJZPY12)

作者简介: 张 强(1986—), 男, 湖北宣恩人, 副教授, 博士。E-mail: leafkky@163.com

ing Creo to simulate its movement in various working conditions; corresponding control criteria and paths were provided, along with a designed control algorithm flow for key backfilling equipment across different processes. Based on the characteristics of video algorithms and their pros and cons, an image recognition algorithm is initially chosen; after training and adjusting the model, optimal algorithms and corresponding parameters are determined. Through an analysis of application effects on coal mine fill surfaces, it is found that SVM evaluation indices outperform other algorithms, indicating excellent performance in discriminating working conditions with high accuracy and reliability. The research can realize the identification and regulation of abnormal working conditions of key backfilling equipment mechanism, improve backfilling efficiency, identify the positional parameters of the mechanism, and display the effect of backfilling space tamping, which can provide theoretical guidance for the research, development and application of solid intelligent backfilling and mining technology analyzed by video AI algorithm.

**Key words:** backfilling mining; video AI algorithms; condition identification and control; backfilling efficiency; position recognition

## 0 引言

煤炭在一次能源结构中的主体地位和“压舱石”的地位未变,但地表沉陷治理和固体废弃物的处置和排放问题仍十分突出。固体充填采煤法是煤矿绿色开采<sup>[1-5]</sup>的一个重要代表,在防治岩层失稳、减少煤基固体废弃物、治理地表沉陷等方面有明显的优势。“十四五”中国煤炭行业科技创新的进展与发展<sup>[6]</sup>趋势明确指出了8个重点研究方向,有对矿山大宗固体废物的回收和协同处置,即用煤矸石作充填材料,实现高效低耗的充填-置换工艺;《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》提出“不断提升煤矸石综合利用水平,推广“矿井下充填+地表回填”,降低矸石的排量”。由此可见煤炭领域今后对充填采煤技术的需求仍将不断增加。

“十三五”期间,随着智能化矿井政策实施,我国矿井已经进入智能化的发展阶段,一些技术和工程实践已经在世界范围内发挥着主导作用。《煤炭工业“十四五”高质量发展指导意见》指出“十四五”前,将建设1000座以上的智慧矿井。我国目前煤矿井下采煤机在控制系统结构、控制模式、反应速度、智能特性、生产能力等智能传感和控制技术水平<sup>[7-9]</sup>都处于国际领先地位。当前智能化采煤<sup>[10-13]</sup>技术的发展和智慧矿山<sup>[14-18]</sup>的建设已经全面展开。固体充填开采是实现煤炭绿色生产的重要途径,其智能化也是行业发展的大势所趋。目前固体充填技术的智能化<sup>[19-21]</sup>基本实现自动化控制,但存在以下技术瓶颈:①充填装备机构静态结构、动态轨迹及工艺参数如何精准感知;②机构工况位态如何自主识别;③机构干涉如何避障调控。

针对上述固体充填技术升级的内生动力、行业发展的迫切需求以及矿山智能化建设的必然趋势,提出基于视频AI算法分析的固体智能充填方法,借

助人工智能平台、python等工具,构建视频AI算法分析智能控制系统、设计关键机构运动轨迹视频获取方法、训练装备干涉行为自主识别AI算法、提出充填装备机构轨迹智能修正控制方法,形成“AI算法+煤炭矿山充填开采”特色应用场景解决方案,促进智能充填开采技术发展。

## 1 视频AI算法分析的固体智能充填开采方法内涵与难点

### 1.1 方法定义

视频AI算法分析的固体智能充填方法,是在原有固体充填液压支架上安装高清摄像头、传感器、控制器及控制系统,构成视频拍摄-AI分析-驱动执行的智能识别与驱动系统,通过机构行为识别与机构运动自行驱动实现固体智能充填。

### 1.2 技术特征

与传统固体充填采煤方法相比,在充填工序过程不需要作业人员操作,视频AI算法分析的固体智能充填开采方法在工序执行上可以实现自动化,主要技术特征:①实时显示充填空间夯实效果;②实时显示固体充填液压支架位姿参数指标;③实时识别各机构间非正常工况;④发生非正常工况可以自主调控;⑤在非正常工况不可调控时可以人工干预;⑥不同支架间充填工艺自动衔接;⑦可全面掌握多孔底卸式刮板输送机位姿形态。

传统机械固体充填采煤方法常因作业人员需要通过架间间隙观察后方充填效果、卸料口开关时机、夯实机构角度和行程等,故接序时间过长,造成充填效率低;而视频AI算法分析的固体智能充填开采方法可以实现充填工艺的自主控制,并对非正常工况进行自主判别和调控,可以极大降低作业人员劳动强度,减少传统方法因非正常工况人工调节的时间,从而提高充填速率,固体智能充填开采方法原理如图1所示。

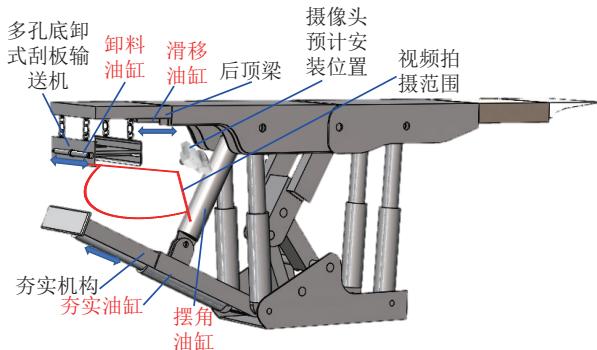


图 1 视频 AI 算法分析的智能充填开采方法原理

Fig.1 Schematic diagram of intelligent backfilling mining method by AI Video Algorithm Analysis

### 1.3 技术难点

视频 AI 算法分析的固体智能充填开采通过将视频 AI 算法应用到充填开采工作面, 与传统综合机械化固体充填采煤方法相比, 在非正常工况自主识别与调控、全面可视化后部夯实空间方面都存在一

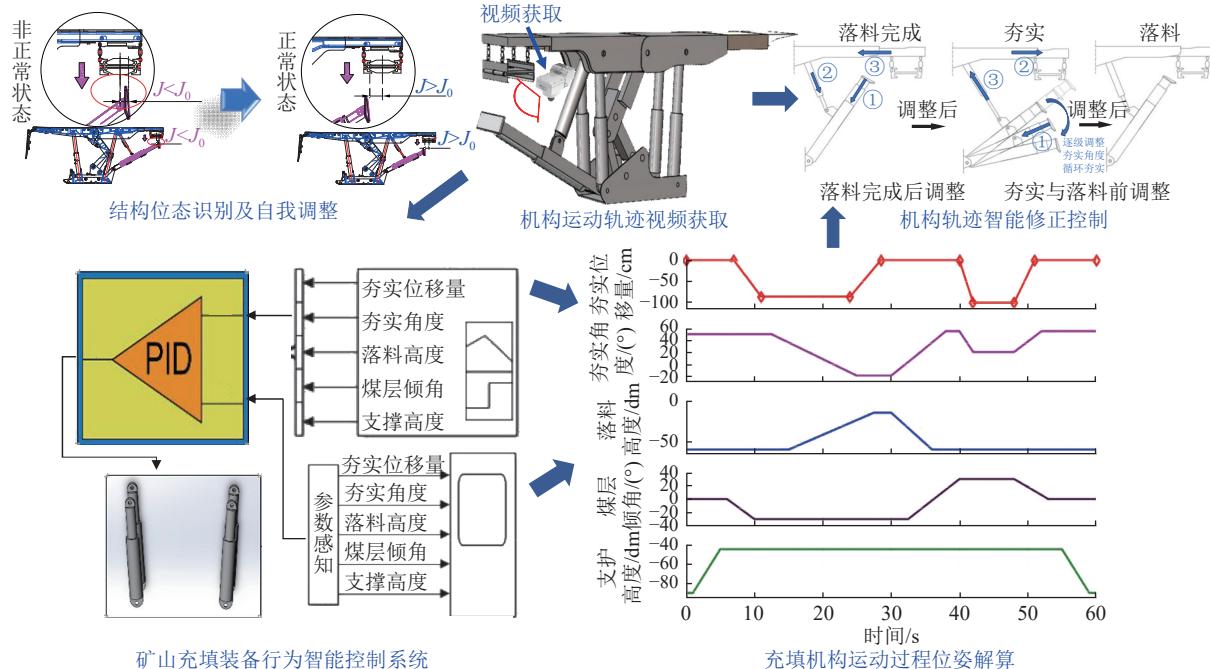


图 2 充填装备行为视频 AI 算法分析智能控制系统

Fig.2 Intelligent control system for backfilling equipment behavior by video AI algorithm analysis

该系统需要在固体充填液压支架上安装高清摄像头和各类传感器, 其高清摄像头和传感器的具体安装要求与位置如下:

**安装要求:** 在固体充填液压支架后方中间与多孔底卸式输送机前方, 摄像头机体不干涉充填液压支架与多孔底卸式输送机的机构运动, 且视频可摄入夯实机构和多孔底卸式输送机的全部结构、所有支护高度下夯实机构摆动偏转以及多孔底卸式输送

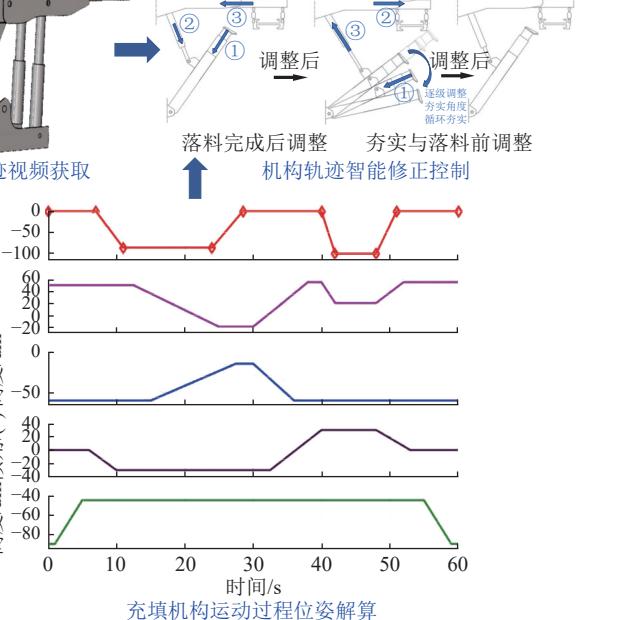
定的技术难点, 具体为: ①实现非正常工况的自主识别方面, 需要对固体充填装备进行改造, 以及找到对应工况条件下的算法及对应的参数。②实现关键充填装备机构参数实时感知, 需根据不同的位姿参数确定对应感知方法。③为实现后部充填空间夯实效果实时显示, 需安装智能摄像头并匹配相应的 AI 算法。④在显示屏上实时显示关键充填装备位姿参数, 需选配硬件、读取传感器数据并转换为数字值等步骤, 其系统的稳定性、可靠性、安全性等方面需全面考虑。

## 2 视频 AI 算法分析的固体智能充填系统架构、工作原理及主要功能

### 2.1 系统架构

充填装备行为视频 AI 分析智能系统架构如图 2 所示(图 2 中,  $J$  为落料间隙距, mm;  $J_0$  为安全落料间隙距, mm)。

### 2.2 工作原理



机前后移动。

**安装位置:** 在夯实机构内部安装压力、角度和行程传感器, 用于监测夯实机构在夯实过程中的夯实力、角度和行程; 在多孔底卸式刮板输送机下面装高度传感器, 用来监控落料过程中物料的高度; 在液压支架前方安置显示屏将后方摄像头所拍摄画面进行实时显示。

传感器所采集的模拟量信号不能直接被使用,

需要使用模数转换器将模拟量信号转换成数字信号,通过在可编程控制柜输入控制算法,可以实现在充填开采过程中支架在支护、落料和夯实工艺的智能控制。使用矿用交换机通过万兆以太环网将关键充填装备的参数信息实时显示在地面监控中心的大屏幕上,并对摄像头所拍摄视频进行储存。通过AI视频分析算法,对支架异常工况进行判别,即将发生异常时,运用PID控制器进行调控。

## 2.2 工作原理与实现流程

### 2.2.1 视频AI算法工作原理

下面对视频AI算法的工作原理进行介绍,首先根据工作场景和所要解决的问题进行算法模型的初步选择,然后通过对视频AI算法模型训练与评估找出最佳的算法模型及参数,将其嵌入到高清摄像头对应模块中,可以实现对固体充填液压支架后部所拍摄工况的实时判别,若为正常工况,则执行下一操作,若为非正常工况,则进行工序动作调整,调整完为正常工况时再执行下一工序流程。工作原理如图3所示。

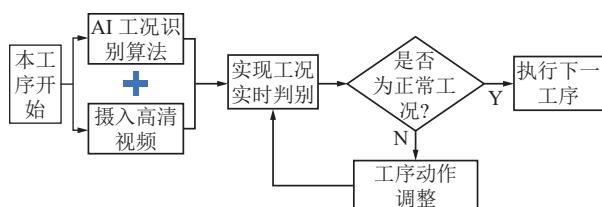


图3 视频AI算法工作原理流程

Fig.3 Video AI algorithm work flow chart

### 2.2.2 视频AI算法实现流程

在具体工况条件下选取最佳视频AI算法模型步骤:将摄像头安装到指定位置进行拍摄,选取其中的落料夯实工序视频片段;并对其进行目标数据集的构建,其中包括对视频的截取、标签及分类等;对图像进行缺失值、异常值等基本处理;对图像进行增强,大小变换,灰度化等预处理;再选择合适的模型进行训练;将训练好的模型进行评估,找出对应模型的最佳参数;然后对各种模型进行相互比较,最终选择最佳的工况识别算法模型。流程如图4所示。

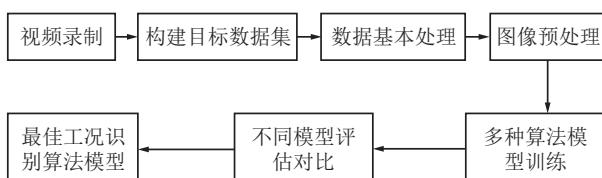


图4 视频AI算法模型实现流程

Fig.4 Video AI algorithm model implementation flowchart

## 2.3 视频AI算法可实现功能

视频AI智能系统实现四种功能:人工辅助、指标识别、视频拼接、工况判别。

1)人工辅助。人工辅助功能是指在充填液压支架前方安装显示屏,将充填液压支架后方高清摄像头所拍摄的内容在显示屏内显示出来,便于作业人员对后方充填空间夯实效果的实时判别。若发生智能控制系统不能自我解决的情况,可以通过人工介入解决,清晰的看到后面整个落料和夯实工艺过程。无需像传统固体充填开采通过支架间隙进行夯实操作,不仅提高充填效率,且降低劳动强度。

2)指标识别。指标识别是指可以通过各类传感器和对应的视频AI算法对支架位姿参数进行识别并在液压支架前方显示屏内显示出来,其中指标包括液压支架高度、倾角、夯实机构角度和行程、落料高度、前后立柱的压力、夯实机构的夯实力等。可以为后续各工序调控提供数据支持,以及实时了解充填装备各机构情况。

3)视频拼接。视频拼接是指将充填液压支架后方各高清摄像头所拍摄的视频图像拼接成一个完整的视频。因为单一摄像头所拍摄画面具有局部性,通过视频拼接可以对后方采空区和夯实效果有一个整体全面的了解;同时可以确定后方多孔底卸式刮板输送机的偏转角度,以便及时对后立柱进行调节改变输送机最大偏角,降低吊环的损坏率。

4)工况判别。工况判别是指在高清摄像头内部嵌入视频AI算法,该算法可以实现夯实机构与多孔底卸式刮板输送机两者在落料和夯实工艺过程中的非正常工况实时判别,并通过对夯实机构的角度和行程进行调控使其达到正常工况,从而降低非正常工况发生率、减少作业人员参与调控时间。

## 3 关键充填装备工况行为调控机理及算法流程设计

### 3.1 关键充填装备工况行为特征及类别

#### 3.1.1 支护工序影响因素分析

在固体智能充填开采中,受地质构造、顶板状况、埋深、煤层厚度、机采高度和倾角等多种因素的影响,导致支护过程不能长时间处于稳定位置,很难确保充填条件。

充填作业时,如顶板状况不好,会出现顶板断裂,造成固体充填液压支架后顶板下沉严重,不能得到很好的充填空间。此时支架工作示意如图5所示,后顶梁下沉角度为 $\theta$ 。

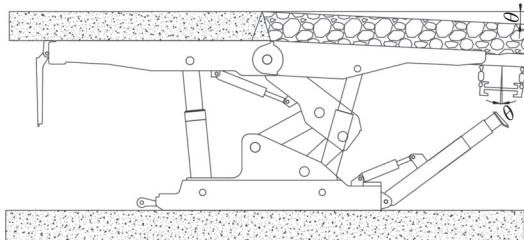


图 5 近水平煤层顶梁下沉支架工作示意

Fig.5 Schematic diagram of the working of top beam sinking stent in near horizontal coal seam

同时,如图 6 与图 7 所示后顶梁偏转角度  $\theta$ ,煤层倾角  $\beta$ ,如回采工作面顶板破断,采用俯充式和仰充式充填开采方法,多孔底卸式刮板输送机在重力影响下发生偏转,夯实机构最大夯实角发生变化,不能保证良好的充填效果。

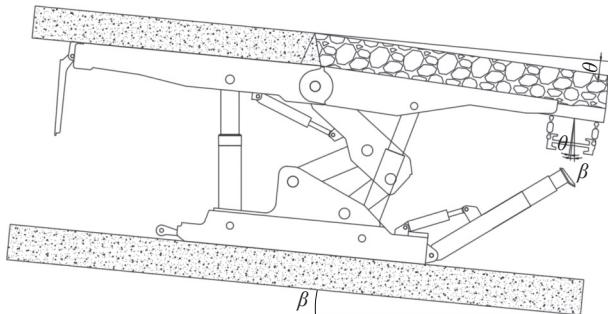


图 6 仰采俯充工况示意

Fig.6 Schematic diagram of the working condition of the top-charging of the backing mining

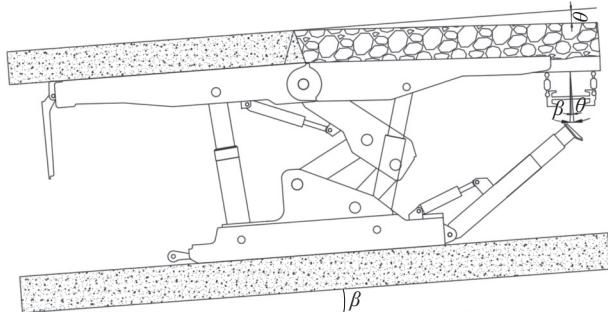


图 7 俯采仰充工况示意

Fig.7 Schematic diagram of downward mining and upward charging working conditions

支架会发生倾向滑移和倾倒失稳工况,其中支架滑动失稳是由支架顶板与底板之间的摩擦比其本身重量(或上覆载荷)在滑动方向上的分力小造成的,在开采过程中,常出现大倾角或平滑顶板(工作面有积水,顶板情况良好等)。其中支架发生倾倒性破坏的原因是支架本身的自重及其所承受的荷载等外力的共同作用而发生偏移,导致支架沿倾向具有倾倒风险。支架沿倾向滑移和倾倒失稳如图 8 所示。

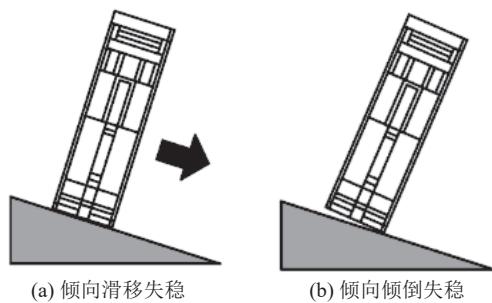


图 8 支架倾向失稳示意

Fig.8 Schematic diagram of brace tendency to destabilize

因此,固体充填式液压支架在不同的煤层倾角、采高、顶板状况等多种地质因素的综合作用下,形成了较为复杂的工作状态,这是制约其顺利实施的重要原因,在设计相应的智能控制算法时,必须保证前后顶梁与煤层顶板在同一时间内处于相对稳定的位置。

### 3.1.2 落料工序影响因素分析

固体充填液压支架夯实机构对充填过程的影响很大,由于在多孔底卸运输机下方设置了一个高度传感器,用于对落料高度进行监控。如果压实机构伸得过长,则会造成测高数据的异常;误判落料已完成,将会关闭卸料口,致使落料工序无法正常进行,难以保证充实率和充填效率。为了避免上述情况发生,需要在每次落料前应将夯实机构收回,这样就可避免因高度传感器测量非正常数据影响落料工序的正常进行。

在落料期间还应考虑多孔底卸式刮板输送机内侧与夯实机构最高点之间的水平距离,如果之间的距离过大造成充填材料落料时在夯实机构上方,会造成落料不充分以及造成夯实机构夯实不充分等状况。具体情况如图 9 所示。图 9 中:  $d_1$  为安全卸料水平距, mm, 基于夯实机构内侧结构的长度;  $d$  为卸料水平距, mm, 表示夯实机构与多孔底卸式输送机(靠近中间一侧)在水平方向间距,通过调节夯实机构行程油缸和摆角油缸进行变化。

图 9a 和图 9b 可知,当  $d < d_1$  时,为正常工况;当  $d > d_1$  时,为非正常工况;需要调整夯实机构角度和行程来增大  $d$  值使其成为正常工况确保落料工序正常进行。因此固体充填液压支架夯实机构与多孔底卸式输送机之间水平方向上的距离是影响落料工序正常运行的主要因素,所以后续的控制算法流程应该保证卸料水平距小于等于安全落料水平距。

### 3.1.3 夯实工序影响因素分析

在常规的夯实过程中,固体充填液压支架夯实

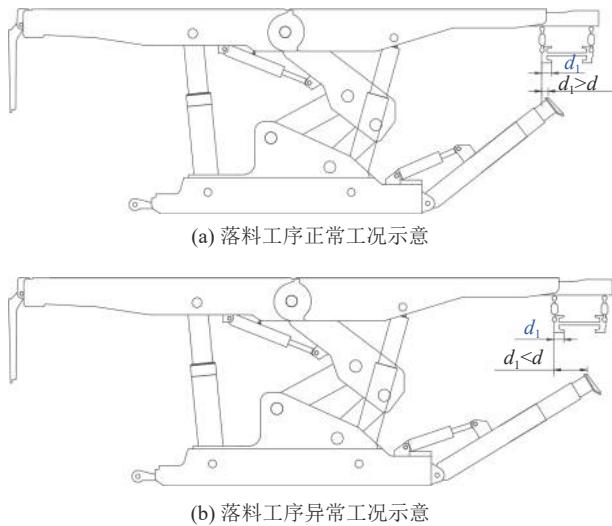


图9 落料工况示意

Fig.9 Schematic diagram of the working conditions of the discharge material

机构和后面的多孔底卸刮板输送机都会对其产生影响,在夯实机构和底卸式刮板输送机底面出现碰撞干扰的情况下,将导致卸料过程不能正常工作,增加设备的耗损率。

在夯实机作业中,压实机构伸缩时,易撞到多孔底卸式刮板输送机的底部,造成夯实机构头部破损与多孔底卸式刮板输送机所挂吊环因受力集中而损坏,机构间碰撞干涉如图10所示。

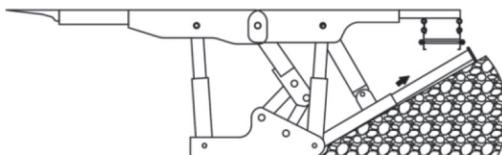
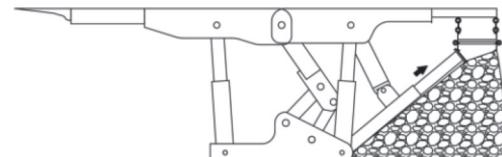
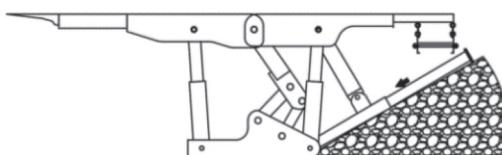
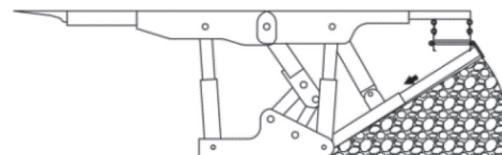
固体充填液压支架设计好后,夯实机构活动角度和行程是固定的,因后顶梁悬挂多孔底卸式刮板输送机,所以夯实机构在伸出与回收可能会与其发生碰撞,当距离大于临界状态时为正常工况;当距离小于临界状态时夯实机构与多孔底卸式刮板输送机之间发生非正常工况。

为了减少夯实机构与多孔底卸式刮板输送机之间发生非正常工况次数,应该先根据角度和行程确定夯实机构的活动范围,再确定发生非正常工况时,夯实机构对应的角度和行程,智能控制算法应确保夯实机构端头与底卸式刮板输送机底部距离大于临界距离(防止因夯实机构角度和行程误差带来的影响)。

### 3.2 充填装备工况行为调控判据与路径

#### 3.2.1 调控判据

使用Creo进行液压支架骨架建模可以实现液压支架在不同工况下机构的运动,下面分别对不同工况条件下的夯实空间进行量化,其中夯实空间为夯实机构在夯实工序期间所能活动的范围。夯实空间示意如图11所示。

(a) 夯实机构正常伸出示意,  $L_y < y_0$  且  $X > X_0$ (b) 夯实机构伸出干涉示意,  $L_y > y_0$  且  $X < X_0$ (c) 夯实机构正常回收示意,  $L_y < y_0$  且  $X > X_0$ (d) 夯实机构回收干涉示意,  $L_y > y_0$  且  $X < X_0$ 

注:  $L_y$ —夯实头的垂直运动轨迹的距离;  $X$ —夯实头的水平运动轨迹距离;  $y_0$ —夯实机构按照当前角度伸出的竖直运动轨迹的安全位置, mm;  $X_0$ —夯实机构按照当前角度伸出的水平运动轨迹的安全位置, mm

图10 夯实机构碰撞干涉示意

Fig.10 Schematic diagram of ramming mechanism collision interference

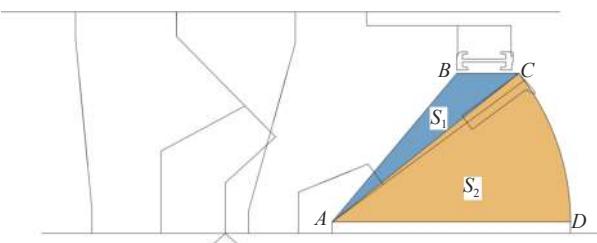


图11 夯实空间示意

Fig.11 Schematic of ramming space

其中夯实空间  $V_2$  可以被看作两部分的体积之和,下面首先给出  $S_1$  和  $S_2$  的面积计算公式,见下式(1)和(2)所示。夯实空间的体积见式(3)所示。

$$S_1 = \frac{1}{2}wl_1 \quad (1)$$

式中:  $w$  为多孔底卸式刮板输送机宽度, m;  $l_1$  为夯实机构铰链点  $A$  距离线段  $BC$  的距离, m。

$$S_2 = \frac{\theta\pi L^2}{360} \quad (2)$$

式中,  $\theta$  为夯实机构最大安全夯实角度, ( $^{\circ}$ );  $L$  为夯实机构最大伸出长度, m。

$$V_z = (S_1 + S_2)W \quad (3)$$

式中,  $W$  为液压支架宽度, m。

将式(1)和式(2)代入到式(3)中可得最终的夯实机构体积, 可以通过 Creo 在骨架模型中增加伺服电动机模拟液压支架在不同工况条件下运动情况和建立坐标系求出式中的  $l_1$  和  $\theta$  值。其中调控判据为夯实机构在夯实过程中角度和行程需在夯实空间之

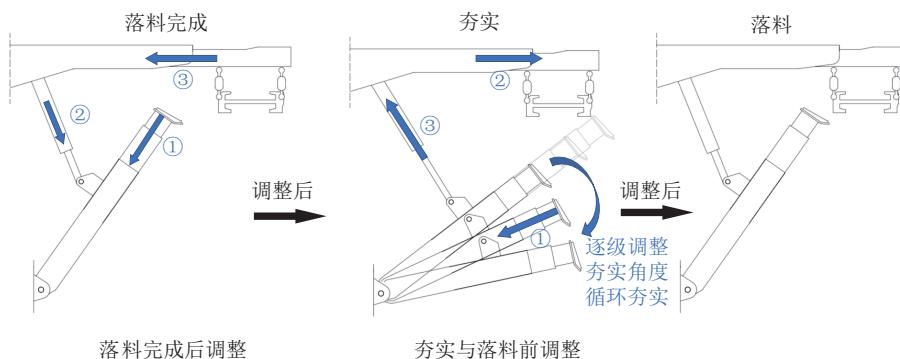


图 12 位姿调整流程及典型路径

Fig.12 Position adjustment flow and typical paths

### 3.3 关键充填装备不同工序下智能控制算法流程设计

对于不同工序下的控制其发生 3.1 节分析的非正常工况, 需要在不同工序条件下识别对应的参数, 实施对应控制流程。其中不同工序动作智能控制算法流程如图 13 所示。

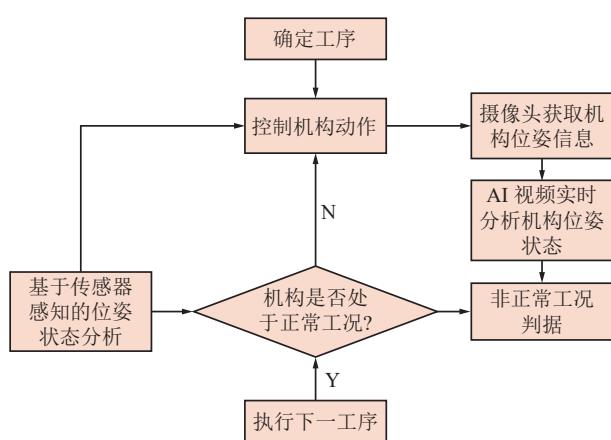


图 13 不同工序动作智能控制算法流程

Fig.13 Intelligent control algorithm flow for different process actions

#### 3.3.2 轨迹参数识别算法流程设计

为了识别关键充填装备机构运动轨迹参数, 需

内, 若超过空间范围, 则需要进行调控。

#### 3.2.2 调控路径

在落料夯实过程中, 机构的位姿调节目标不尽相同。下面给出具体调控路径: 落料前位姿调节是防止落料时物料落到夯实机构上方, 出现落料干涉; 落料完成后位姿调节是避免夯实机构进行夯实时碰到底卸式刮板输送机底部, 出现碰撞干涉; 循环夯实时位姿调节是调整夯实机构角度, 使各个部位的充填材料都能被压实。上述位姿调节路径如图 12 所示。

要通过对机构不同角度和行程图像数据进行训练, 可以实现视频 AI 算法实时识别机构轨迹参数。其中轨迹参数识别算法流程如图 14 所示。

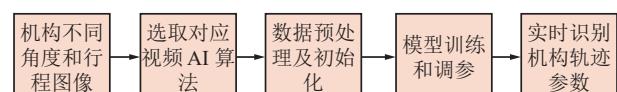


图 14 轨迹参数识别算法流程

Fig.14 Flowchart of trajectory parameter recognition algorithm

## 4 视频图像识别主要算法及初步选择

### 4.1 关键充填装备工况行为视频算法特征

关键充填装备工况行为视频的特征为: ①井下噪音大: 井下充填装备的噪音会对视频拍摄产生干扰; ②煤尘大: 煤尘大会造成摄像头所拍摄画面不清晰; ③背景相似: 所拍摄画面中的机构运动与背景画面近似难以提取关键信息; ④视频数据量大: 需要长时间对工作场景进行拍摄。

为了处理关键充填装备工况行为视频上述特征, 需要进行以下处理: ①对于噪音问题进行图像去噪技术; ②煤尘大需要选择煤安及自动清洗功能摄像头; ③对于背景相似需要进行灰度化处理; ④数据量大需要进行视频流管理。

## 4.2 视频图像识别的主要算法及原理

支持向量机(SVM)适用于分类和回归的机器学习算法;卷积神经网络(CNN)通过一系列卷积和池化层,从图像中提取特征,并逐渐抽象出更高层次的特征表示;逻辑回归是用于解决分类问题的机器学习算法,特别适用于线性可分或近似线性可分的分类问题;残差网络(ResNets)是一种深层神经网络架构,用于解决深度神经网络中的梯度消失和网络退化问题;决策树是一种仿照树结构的分类模型,也可用于回归分析;K近邻算法(KNN)是一种基于实例的学习算法,用于分类和回归;循环神经网络(RNN)是一种循环连通的神经网络,具有周期连接性,能有效地处理时间序列数据;生成对抗网络(GANs)是一种基于深度学习的模型,采用对抗训练方法,产生具有相似特征样本。

## 4.3 视频图像识别算法的初步选择

根据4.1节关键充填装备工况行为视频算法特征,结合4.2节所述的主要算法原理,将各个算法的优缺点进行汇总统计,其对应的不同图像识别算法的优缺点见表1。

表1 图像识别算法优缺点对比

Table 1 Comparison of advantages and disadvantages of image recognition algorithms

算法	优点	缺点
支持向量机	高维空间表现好;泛化能力强;非线性分类	数据大时训练时间长;参数调节敏感;无法处理多分类问题
卷积神经网络	网格数据处理能力强;模型更加轻量级;更具鲁棒性	大规模数据需要较大资源和时间;非网格结构数据效果差
逻辑回归	计算简单高效;正则化避免过拟合;输出结果为事件发生概率	在多条或非线性决策边界性能差;数据不平衡需特殊处理;特征间相关性强较差
残差网络	解决梯度消失和爆炸问题;比传统深度网络好;更易训练和优化	数据较小时,过度深的残差网络可能会导致过拟合
决策树	可视化展示;可处理数值型和类别型数据;对噪声和异常值敏感;缺失值不敏感	易过拟合;不稳定性强
K近邻算法	易实现和理解;多分类问题效果好;非线性数据较好的适应性	需大量存储空间;预测数据相对较慢;高维数据等情况易受维度灾难
循环神经网络	可处理序列数据;具有记忆功能;解决输入输出序列长度不固定	长期依赖信息难以传递;训练时存在时间延迟等问题;较长序列易出现信息遗忘
生成对抗网络	高质量逼真数据样本;图像生成、超分辨率、修复方面表现优异	训练时易出现模式崩溃;训练过程相对不稳定;生成样本存在随机性

夯实机构与多孔底卸式刮板输送机之间的非正常工况识别属于图形识别中的二分类问题,而且需要计算高效的模型,并且易于训练和优化,基

于以上条件最终选择支持向量机、卷积神经网络、逻辑回归和残差网络作为该工况场景下的模型进行训练。

## 5 视频算法模型训练

### 5.1 运动轨迹视频获取

主要包括充填工作面关键机构目标数据集制作、目标检测模型构建、充填工作面多路视频流的实时检测,具体关键机构运动轨迹视频获取方法流程如图15所示。

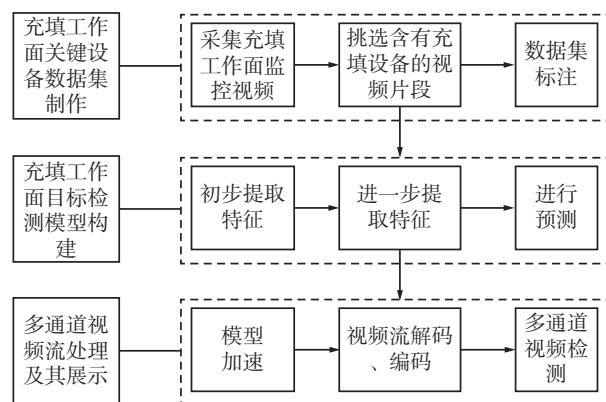


图15 关键机构运动轨迹视频获取方法流程

Fig.15 Flow of video acquisition method of key mechanism motion trajectory

1)充填工作面关键设备目标数据集制作。首先数据集背景分类,根据光照条件、尘雾和检测区间等背景条件,进行视频图像初步筛选;对对应的视频图像进行截图处理,制作吊挂孔、底卸中板、多孔底卸式输送机、夯实头、夯实机构和矸石流共六类目标数据集,并对数据集进行对应的标注。

2)充填工作面目标检测模型构建。先读取目标数据集并将对应的标签与图像进行合并,将图像调整为统一尺寸并转化为灰度图像,将目标数据集划分为训练集和测试集,对数据集进行数据增强、归一化等处理;调用所选用的支持向量机、残差网络、逻辑回归等模型库进行迭代训练,然后采用召回率、准确率、精确度等评级指标对训练结果进行评估;最后选择最佳的参数作为对应的目标检测模型。

3)充填工作面多路视频流的实时检测。充填工作面的充填设备繁多,进行卸料、夯实等充填作业时,多台支架夯实机构协同刮板输送机进行工作,为实现充填工作面充填装备时空协调,应用流媒体服务器对视频流进行管理,同时进行边缘计算、模型优化和GPU加速等方式对模型进行推理加速,实现充填工作面多路视频流的实时识别检测。

## 5.2 目标检测数据集制作

要进行关键充填装备工况行为的分析,首先要明确关键充填装备的具体位置,其次确定关键充填装备的工况行为判别属于分类问题、预测问题还是聚类问题。对于分类问题,要区别二分类,多分类和多标签分类问题;对于预测问题,则要区别标量和向量预测;问题的识别与目标的明晰,对模型的选取、损失函数的合理选取与评价等都是十分重要的。

数据的来源是在井下充填采煤液压支架夯实机构的落料夯实视频,由于数据涵盖多个视频,且拍摄角度及环境场景各异,因此数据的异质性相当显著。在此背景下挑选摄录角度固定的视频,随后进行手动截图选取样本。在挑选的样本中去除模糊不清的

图像,并对其进行分类,一类为正常工况,另一类为非正常工况,具体数据集制作流程如图 16 所示。

构建的数据集中包含 907 个正常工况状态样本

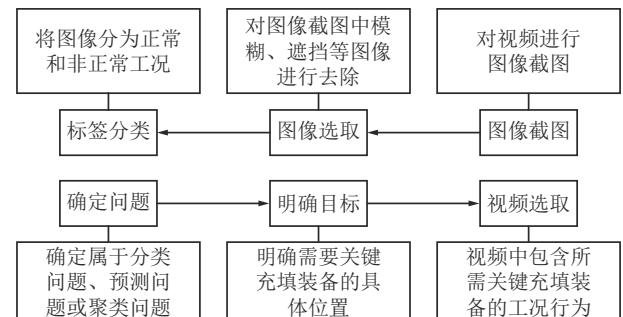
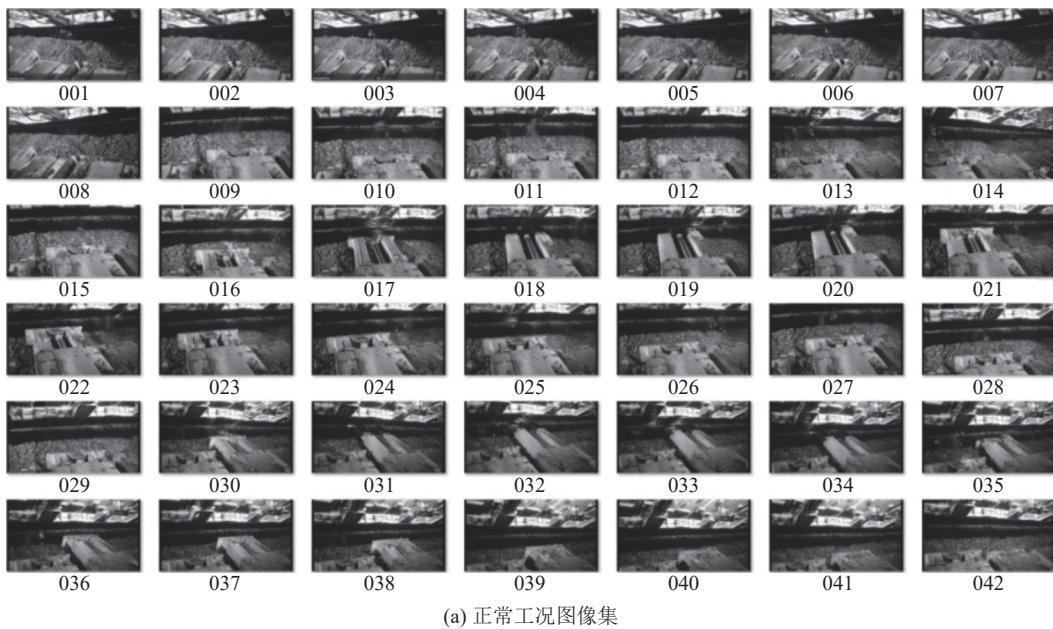


图 16 数据集制作流程

Fig.16 Flowchart of data set production



(a) 正常工况图像集



(b) 非正常工况图像

图 17 夯实机构数据集制作

Fig.17 Compacting mechanism data set production

以及107个被定义为非正常工况状态样本。在模型训练过程中,选择其中的4/5为训练组,1/5为测试组,其中训练组的作用是通过该训练组的训练,使模型能够达到可以判别工况行为的目的,测试组的目的是确定在所选模型下对工况判别的准确性。本次目标数据集的制作过程如图17所示。

### 5.3 最优视频算法模型及参数确定

将初步确定的四种算法分别对目标数据集进行模型训练及评估,找出各模型调参的最佳超参数。各模型最佳评估指标见表2。

表2 不同算法模型最佳评估指标对比

Table 2 Comparison of the best evaluation metrics for different algorithmic models

序号	模型算法	训练集准确率/%	测试集准确率/%	测试集精确度/%	F1分数
1	支持向量机	100	92.12	91.48	0.917
2	逻辑回归	96.42	90.64	88.42	0.885
3	卷积神经网络	89.88	90.25	91.12	0.855
4	残差网络	43.43	52.46	75.24	0.362

由表2可知,支持向量机训练集准确率、测试集准确率、精确度和F1分数均为4种模型中最大值,且该算法模型具有简单易懂和泛化能力强等优点,故本次夯实机构工况判别的最佳算法模型为支持向量机模型。

## 6 工程案例分析

### 6.1 工程概况

某矿固体充填综采工作面煤层厚平均3.5 m,煤层倾角平均1°,伪顶为粉砂岩含粉砂黏土结构、基本顶以中砂岩为主的黏土质胶结,硬度较大;直接底为细砂岩,设计采高为3.5 m,关键充填装备为充填刮板输送机、充填开采液压支架;采用固体充填开采工艺,充填材料采用破碎后的散体矸石,通过夯实机构将散体矸石压实为致密充填体。

### 6.2 视频AI算法应用效果分析

将采集到的视频首先进行截图处理,处理完后再进行正常工况与非正常工况分类;将训练好的各种最佳超参数模型使用不同的代码库进行加载;接着读取分类好的图像,然后生成图像对应标签、灰度化图像和调整图像大小等预处理操作,将数据进行标准化处理;使用加载好的各模型对处理后的图像数据进行预测;预测完成后对评估模型性能,其中包括准确度、精确度、F1分数等评价指标,并绘制对应

的ROC曲线。

本次共有100张正常工况和100张非正常工况图像,对已完成模型预测的各项评估指标进行汇总,见表3。

表3 模型预测各评价指标汇总表

Table 3 Summary of model predictions for each evaluation indicator

模型	损失	准确率/%	精确度/%	F1分数	ROC
SVM	0.565	93.5	94.2	0.9347	0.9812
Logistic	0.930	57.0	76.8	0.4725	0.9580
CNN	0.976	50.0	75.0	0.3333	0.8546
RN	0.530	50.0	75.0	0.3333	0.6250

由表3可知:SVM评价指标的损失较低,准确率、精确度、F1分数等参数均优于其他算法模型,且均高于90%;表明SVM算法模型在工况判别时表现出色,具有高度的准确性和可靠性。

## 7 结论

1)本文提出了一种视频AI算法分析的固体智能充填开采方法,与传统固体充填采煤方法相比,在充填工序过程不需要作业人员操作,视频AI算法分析的固体智能充填开采方法在工序执行上可以实现自动化。

2)该方法是在原有固体充填液压支架上安装高清摄像头、传感器、控制器及控制系统,构成视频拍摄-AI分析-驱动执行的智能识别与驱动系统,通过机构行为识别与机构运动自行驱动实现固体智能充填。通过分析在支护、落料、夯实工序过程中对固体充填液压支架的影响因素,给出关键充填装备在落料夯实过程中的调控判据及路径,并据各算法优缺点对比及工况行为特征初步选择了本次视频图像识别选择的算法。

3)阐述运动轨迹视频获取及目标数据制作流程,通过模型训练及调参确定了最优视频算法模型及参数,并通过某矿充填面应用效果分析,SVM各评价指标均优于其他算法,表明SVM模型在工况判别时表现出色,具有高度的准确性和可靠性。

### 参考文献(References):

- [1] 钱鸣高,许家林,王家臣.再论煤炭的科学开采[J].煤炭学报,2018,43(1):1-13.  
QIAN Minggao, XU Jialin, WANG Jiachen. Further on the sustainable mining of coal[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 1-13.

- [2] 谢和平, 王金华, 王国法, 等. 煤炭革命新理念与煤炭科技发展构想[J]. 煤炭学报, 2018, 43(5): 1187–1197.  
XIE Heping, WANG Jinhua, WANG Guofa, et al. New ideas of coal revolution and layout of coal science and technology development[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1187–1197.
- [3] 康红普, 徐刚, 王彪谋, 等. 我国煤炭开采与岩层控制技术发展 40 a 及展望[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2019, 1(2): 7–39.  
KANG Hongpu, XU Gang, WANG Biaomou, et al. Forty years development and prospects of underground coal mining and strata control technologies in China[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2019, 1(2): 7–39.
- [4] 张吉雄, 张强, 周楠, 等. 煤基固废充填开采技术研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2022, 47(12): 4167–4181.  
ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, ZHOU Nan, et al. Research progress and prospect of coal based solid waste backfilling mining technology[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12): 4167–4181.
- [5] 刘建功, 王翰秋, 赵家巍. 煤矿固体充填采煤技术发展回顾与展望[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(9): 27–38.  
LIU Jiangong, WANG Hanqiu, ZHAO Jiawei. Review and prospect of development of solid backfill technology in coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(9): 27–38.
- [6] 刘峰, 曹文君, 张建明, 等. 我国煤炭工业科技创新进展及“十四五”发展方向[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 1–15.  
LIU Feng, CAO Wenjun, ZHANG Jianming, et al. Current technological innovation and development direction of the 14<sup>th</sup> Five-Year Plan period in China coal industry[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 1–15.
- [7] 石金龙, 马宏伟, 毛清华, 等. “惯导+里程计”的采煤机定位方法研究[J]. 煤炭工程, 2021, 53(10): 143–147.  
SHI Jinlong, MA Hongwei, MAO Qinghua, et al. Positioning method of shearer based on “SINS+OD” [J]. Coal Engineering, 2021, 53(10): 143–147.
- [8] 曹波, 王世博, 葛世荣, 等. 基于超宽带系统的采煤机端头定位策略及定位技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(3): 257–266.  
CAO Bo, WANG Shibo, GE Shirong, et al. Study on positioning strategy and technology at end of shearer based on ultra-wideband system[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(3): 257–266.
- [9] 崔耀, 叶壮. 基于 5G+云边端协同技术的采煤机智能调高调速控制系统设计与应用[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(6): 205–216.  
CUI Yao, YE Zhuang. Research on cloud-edge-terminal collaborative intelligent control of coal shearer based on 5G communication[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(6): 205–216.
- [10] 王国法, 刘峰, 庞义辉, 等. 煤矿智能化: 煤炭工业高质量发展的核心技术支撑[J]. 煤炭学报, 2019, 44(2): 349–357.  
WANG Guofa, LIU Feng, PANG Yihui, et al. Coal mine intellectualization: The core technology of high quality development[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(2): 349–357.
- [11] 韩剑. 采煤机智能化截割监测系统的研究[J]. 机械管理开发, 2022, 37(9): 236–237, 242.  
HAN Jian. Research on intelligent cut-off monitoring system for coal mining machines[J]. Mechanical Management and Development, 2022, 37(9): 236–237, 242.
- [12] 邹富标. 智能化综采工作面采煤机与液压支架协同控制技术应用研究[J]. 煤矿机械, 2021, 42(2): 177–180.  
ZU Fubiao. Application research on cooperative control technology of shearer and hydraulic support in intelligent fully mechanized coal mining face[J]. Coal Mine Machinery, 2021, 42(2): 177–180.
- [13] 袁亮. 煤炭精准开采科学构想[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 1–7.  
YUAN Liang. Scientific conception of precision coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 1–7.
- [14] 张强, 王云搏, 张吉雄, 等. 煤矿固体智能充填开采方法研究[J]. 煤炭学报, 2022, 47(7): 2546–2556.  
ZHANG Qiang, WANG Yunbo, ZHANG Jixiong, et al. Research on intelligent solid backfilling mining method in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(7): 2546–2556.
- [15] 廉自生, 袁祥, 高飞, 等. 液压支架网络化智能操控方法[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2078–2089.  
LIAN Zisheng, YUAN Xiang, GAO Fei, et al. Networked intelligent sensing method for powered support[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2078–2089.
- [16] 王增加, 齐兆军, 寇云鹏, 等. 智慧充填系统赋能矿山新发展[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(1): 156–161.  
WANG Zengjia, QI Zhaojun, KOU Yunpeng, et al. Intelligent filling system enabling new development of mine[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(1): 156–161.
- [17] 任怀伟, 王国法, 赵国瑞, 等. 智慧煤矿信息逻辑模型及开采系统决策控制方法[J]. 煤炭学报, 2019, 44(9): 2923–2935.  
REN Huaiwei, WANG Guofa, ZHAO Guorui, et al. Smart coal mine logic model and decision control method of mining system[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(9): 2923–2935.
- [18] 张建中, 郭军. 智慧矿山工业互联网技术架构探讨[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(5): 238–246.  
ZHANG Jianzhong, GUO Jun. Discussion on industrial Internet technology framework of smart mine[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(5): 238–246.
- [19] 高辉, 赵磊, 杜新胜, 等. 多孔底卸式充填刮板输送机的研究与设计[J]. 煤矿机械, 2014, 35(6): 131–133.  
GAO Hui, ZHAO Lei, DU Xinseng, et al. Research and design on waste backfilling AFC[J]. Coal Mine Machinery, 2014, 35(6): 131–133.
- [20] 王晓峰, 万宏凤, 孙跃军. 固体充填刮板输送机卸料口控制机构的优化设计[J]. 煤矿机械, 2016, 37(10): 119–121.  
WANG Xiaofeng, WAN Hongfeng, SUN Yuejun. Study on structure optimization design of unloading mouth of solid filling armored face conveyor[J]. Coal Mine Machinery, 2016, 37(10): 119–121.
- [21] 李凤锦, 吴桐, 翟荣涛, 等. 邢东矿充填自动化控制技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(S1): 84–88.  
LI Fengjin, WU Tong, ZHAI Rongtao, et al. Research on backfilling automation control technology in Xingdong Mine[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(S1): 84–88.