

考虑地质强度指标的悬臂式掘进机自适应 截割控制方法研究

董征¹, 张旭辉^{1,2}, 杨文娟^{1,2}, 雷孟宇¹, 张超¹, 万继成¹

(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重点实验室, 陕西西安 710054)

摘要: 煤矿巷道掘进智能化发展缓慢, “采掘失衡”严重制约了煤矿高效生产, 如何提高掘进效率是现阶段煤矿生产面临的重要问题。悬臂式掘进机作为巷道掘进作业的重要设备之一, 在截割硬岩或复杂地质煤层时具有优势。面对复杂地质变化条件下的巷道断面时, 传统悬臂式掘进机的记忆截割方法具有不足之处, 无法满足自适应截割的要求。为此, 提出了一种考虑地质强度指标(GSI, Geological Strength Index)的悬臂式掘进机自适应截割控制方法, 通过结合地质特征指导悬臂式掘进机的截割作业, 从而提高掘进效率和智能化水平。首先, 通过机器视觉对掘进巷道断面进行拍照, 使用连通域提取、骨架链接等方法对裂隙进行检测, 识别裂隙的几何参数, 包括数量、长度、宽度和密度, 以裂隙的几何参数作为输入, 以地质强度指标作为输出, 建立神经网络模型, 预测掘进巷道断面的地质特征。其次, 建立地质强度指标栅格地图, 使用改进蚁群优化算法在栅格地图上进行截割轨迹规划, 通过改进信息素初始浓度和信息素挥发策略来对目标函数进行优化, 以时间最优、能耗最优、地质匹配最优为目标, 得到最优截割轨迹。建立截割头转动速度和截割臂摆动速度档位控制模型, 对经过当前栅格的截割速度进行控制, 使其匹配当前栅格的地质强度指标, 提高掘进效率。最后, 在有限元软件中对截割模型在不同地质强度指标下的作业进行了受力分析, 并在实验室搭建了悬臂式掘进机控制平台, 在截割轨迹规划和截割速度控制方法上与其他优化算法进行了性能对比。实验结果表明: 所预测的地质强度指标准确率为95.5%, 截割完整巷道断面所消耗时间降低6%, 能耗降低19%。相比于其他方法, 本方法能够减少截割能耗、提高截割效率, 为智能掘进与悬臂式掘进机的自适应截割提供了新思路。

关键词: 智能掘进; 悬臂式掘进机; 巷道断面裂隙; 截割轨迹; 地质强度指标(GSI)

中图分类号: TD421 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2025)S1-0685-12

Research on adaptive cutting control method of boom-type roadheader considering geological strength index

DONG Zheng¹, ZHANG Xuhui^{1,2}, YANG Wenjuan^{1,2}, LEI Mengyu¹, ZHANG Chao¹, WAN Jicheng¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Intelligent Detection and Control for Mining Electromechanical Equipment, Xi'an 710054, China)

Abstract: The intelligent development of coal mine roadway excavation has been progressing slowly, with the serious issue of mining-excitation imbalance significantly constraining the high-efficiency production of coal mines. Improving ex-

收稿日期: 2024-07-04 责任编辑: 郭晓炜 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0780

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52104166); 中国博士后科学基金面上资助项目(2022MD723826); 陕西省重点研发计划资助项目(2023-YBGY-063)

作者简介: 董征(1994—), 男, 河南焦作人, 博士研究生。E-mail: 22105016008@stu.xust.edu.cn

通讯作者: 张旭辉(1972—), 男, 陕西凤翔人, 教授, 博导, 博士。E-mail: zhangxh@xust.edu.cn

引用格式: 董征, 张旭辉, 杨文娟, 等. 考虑地质强度指标的悬臂式掘进机自适应截割控制方法研究[J]. 煤炭学报, 2025, 50(S1): 685-696.

DONG Zheng, ZHANG Xuhui, YANG Wenjuan, et al. Research on adaptive cutting control method of boom-type roadheader considering geological strength index[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(S1): 685-696.



移动阅读

cavation efficiency is a crucial issue facing the current stage. As one of the crucial equipment for roadway excavation operations, the boom-type roadheader exhibits advantages in cutting hard rock or complex geological coal seams. The traditional memory cutting method of the boom-type roadheader has shortcomings in dealing with the tunnel cross-section under complex geological variations, failing to meet the requirements of autonomous cutting. In response to this issue, a boom-type roadheader adaptive cutting control method that considers the geological strength index (GSI) is proposed. By guiding the cutting operations of the boom-type roadheader based on geological characteristics, the excavation efficiency and level of intelligence can be enhanced. Firstly, photographs of the excavation roadway cross-sections are taken using machine vision. Cracks are detected using methods such as connected domain extraction and skeleton linking to identify the geometric parameters of the cracks, including quantity, length, width, and density. These geometric parameters of the cracks are used as inputs, and geological strength indicators are used as outputs to establish a neural network model for predicting the geological characteristics of the excavation roadway cross-section. Secondly, a geological strength indicator grid map is established, and an improved ant colony optimization algorithm is employed for cutting trajectory planning on the grid map. By optimizing the objective function through improved initial concentration of pheromones and pheromone evaporation strategies, with the objectives of optimizing time, energy consumption, and geological matching, the optimal cutting trajectory is determined. A model for controlling the rotation speed of the cutting head and the swinging speed of the cutting arm is established to control the cutting speed passing through the current grid, matching the geological strength indicator of the current grid to enhance excavation efficiency. Finally, a stress analysis of the cutting model under different geological strength indicators was conducted in finite element software. A control platform for the boom-type roadheader was set up in the laboratory to compare the performance of cutting trajectory planning and cutting speed control methods with other optimization algorithms. Experimental results indicate that the predicted accuracy of geological intensity index is 95.5%, the consumption time of cutting the complete roadway section is reduced by 6%, and the energy consumption is reduced by 19%. Compared to other methods, this approach can reduce energy consumption and improve cutting efficiency. This method provides a new direction for intelligent excavation and autonomous cutting of boom-type roadheader.

Key words: intelligent tunneling; boom-type roadheader; roadway section fracture; cutting trajectory; geological strength index (GSI)

0 引 言

悬臂式掘进机通过截割头高速旋转对巷道断面煤岩进行截割,将煤炭源源不断地运输到地面,是目前煤矿运用最广泛的采掘设备之一。在截割硬岩与复杂煤岩时,悬臂式掘进机因其灵活性而表现优异,可以大大提高掘进效率,减少人力成本,降低劳动强度,为煤矿工人提供良好的采掘条件,因此悬臂式掘进机拥有良好的发展前景^[1-3]。目前智能掘进正处于记忆截割阶段,通过人工示教指导掘进机的截割轨迹。然而,记忆截割受操作人员的主观经验的影响,且无法根据煤岩强度自动调整,不能满足智能掘进的要求^[4-6]。为了实现智能掘进从记忆截割到自主截割的过渡,笔者提出了一种悬臂式掘进机自适应截割控制方法,通过引入地质强度指标,根据截割断面的煤岩强度特征进行规划截割轨迹与截割速度,从而提高悬臂式掘进机的效率^[7-8]。

地质强度指标是判断岩体稳定性的一种量化指

标,反映了岩体的稳定性,取值区间为 0~100。地质强度指标越大,表明岩体裂隙越少、结构越稳定;地质强度指标越小,表明岩体裂隙越多、结构越不稳定^[9-10]。传统的地质强度指标由专业人员根据地质强度指标图像对照估算,估算结果受人员主观因素影响容易出现偏差。地质强度指标常用于岩土工程,近年来一些专家将地质强度指标引入煤炭地质工程中,该指标成为巷道掘进、瓦斯抽采等环节的一种重要参数^[11]。通过对地质强度指标的定量计算,截割断面的地质特征可以被有效表示,根据地质特征进行截割轨迹的规划与截割速度的控制,悬臂式掘进机无法根据煤岩性质进行自适应截割的问题可以得到解决^[12]。河南理工大学苏现波团队^[13-14]使用地质强度指标对煤体结构进行定量表征,探究了地质强度指标 GSI 与煤体的定量关系,并根据地质强度指标将煤体结构划分为原生结构煤、碎粒煤、碎裂煤、糜棱煤等,并使用手机图像处理技术对特制煤芯进行分析获取地质强度指标 GSI 值^[15],在采矿工程中得到了广泛应用。张农等^[16]

提出了一种基于 Mask R-CNN 的煤矿巷道掘进迎头裂隙检测方法, 可以准确检测煤矿巷道裂隙。

在悬臂式掘进机截割轨迹规划方面, 记忆截割技术在煤矿应用广泛, 每个巷道断面都按照人工示教的截割轨迹进行截割, 张旭辉等^[17]提出了数字孪生驱动的记忆截割方法, 结合数字孪生方法, 提高了掘进机轨迹跟踪精度。然而, 记忆截割技术在面对复杂地质工作面时, 无法根据连续变换的地质条件调整截割轨迹, 导致截割效率低。为了解决这个问题, 智能截割技术得到了发展, 研究人员通常采用栅格法对截割断面进行建模, 并将夹矸、断层作为扰动载荷和截割轨迹规划需要避开的障碍。以栅格地图为基础, 国内外学者采用了 Dijkstra 算法^[18]、A*算法^[19]、蚁群算法^[20]、粒子群算法^[21]、遗传算法^[22]等进行了截割轨迹规划的研究, 可以有效避开矸石, 寻找到最优的截割轨迹。然而, 这些方法并没有考虑到地质特征对悬臂式掘进机截割效率的影响, 虽然规划了截割轨迹, 但并没有做到优先从地质强度较弱的区域开始截割。此外, 巷道掘进作为一种全覆盖路径规划, 需要将整个巷道断面全部截割, 这些方法考虑的夹矸作为障碍物, 从而进行避障的算法, 在巷道掘进中效果和必要性值得商榷。

在悬臂式掘进机截割速度控制方面, 中国矿业大学吴森团队^[23-24]针对悬臂式掘进机截割臂摆动速度自适应调节问题, 提出了一种基于多传感器信息融合算法的悬臂式掘进机控制策略, 通过检测电机电流、油缸压力与截割臂振动加速度来驱动截割臂进行智能截割; 西安科技大学张旭辉团队^[25-27]提出一种悬臂式掘进机视觉伺服控制系统, 采用视觉测量、电液伺服控制、路径规划与人工示教四者结合的办法, 实现了复杂环境下悬臂式掘进机的视觉伺服控制。徐向前等^[28]提出了一种考虑煤岩硬度的悬臂式掘进机截割控制方法, 采用 PID 控制和闭环模糊控制方法实现掘进机自动化截割控制。然而这些方法虽然高度依赖掘进机传感器数据, 但由于缺乏合理的速度规划, 导致控制精度易受干扰, 影响悬臂式掘进机的高效控制。

综上所述, 国内外研究虽然对悬臂式掘进机截割控制进行了大量研究, 但往往局限于掘进机本身传感器数据的分析, 并没有考虑掘进工艺与巷道地质环境的交互。针对上述问题, 提出了一种考虑地质强度指标的悬臂式掘进机自适应截割控制方法, 通过机器视觉检测巷道断面裂隙纹理, 计算裂隙几何参数并预测地质强度指标 GSI, 对巷道断面进行二维栅格建模, 根据 GSI 对截割轨迹进行规划, 并在规划好的截割路径

上根据地质强度指标控制截割头的转速和截割臂的摆速, 从而实现悬臂式掘进机的自适应调速截割控制。在仿真软件中进行了离散元分析, 计算截割不同 GSI 的煤岩的截割力与截割能耗, 并在实验室环境下进行了验证。验证结果表明, 所提出的方法可以有效检测巷道断面裂隙纹理并规划截割轨迹与截割速度, 提高悬臂式掘进机的截割效率。

1 系统研究方案

本研究包括 2 部分: 第 1 部分是使用机器视觉捕获巷道断面的裂隙, 并建立栅格地图计算其地质强度指标; 第 2 部分根据栅格内的地质强度指标, 对截割轨迹和截割速度进行规划, 实现悬臂式掘进机与煤岩的自适应截割。具体来说, 在第 1 部分中使用图像处理技术实现裂隙提取与骨架连接, 并计算裂隙几何参数, 包括裂隙数量、长度、宽度、密度, 根据裂隙几何参数建立神经网络模型, 计算地质强度指标。在第 2 部分中, 使用改进蚁群算法规划截割轨迹, 通过改进初始信息素的分配以及信息素挥发策略, 使得蚁群寻找到最优截割轨迹, 优先截割强度较低的煤岩, 留下强度较高的煤岩使其成为自由态最后截割。建立截割臂头转速和截割臂摆速档位控制模型, 根据截割轨迹经过的路径, 指导截割头转动速度与截割臂摆动速度的控制, 总体方案如图 1 所示。

悬臂式掘进机机身前侧安装防爆相机, 相机正对巷道断面, 掘进机头安装可以将整个巷道断面照亮的高强度光源, 使得相机能够获取裂隙节理清晰显示的巷道断面照片。拍照获取的图像使用工业以太网传输到工控机中, 工控机软件首先对图像进行预处理^[29-30], 提高图像的清晰度, 然后根据巷道断面图像的裂隙节理计算 GSI, 控制截割头动作。悬臂式掘进机工作示意图如图 2 所示。

对巷道断面进行拍照之前, 首先需要确保光照充足, 以便于清晰地看到巷道断面的裂隙纹理情况, 其次需要人工清理巷道断面下方的余煤, 使得巷道断面完整地暴露在摄像头之中。悬臂式掘进机在运行过程中会产生大量煤粉雾尘, 矿用摄像头采集到的视频图像受煤尘影响, 视频图像可能无法清晰显示; 掘进面巷道灯光较少, 照明分布不均, 也会大幅影响视频图像的质量。因此要对采集的视频图像进行清晰化处理, 获得煤矿清晰图像, 提高图像检测精度。

2 巷道断面裂隙图像检测与地质强度指标预测

2.1 裂隙图像检测

裂隙是煤层在形成过程中受到自然界各种应力

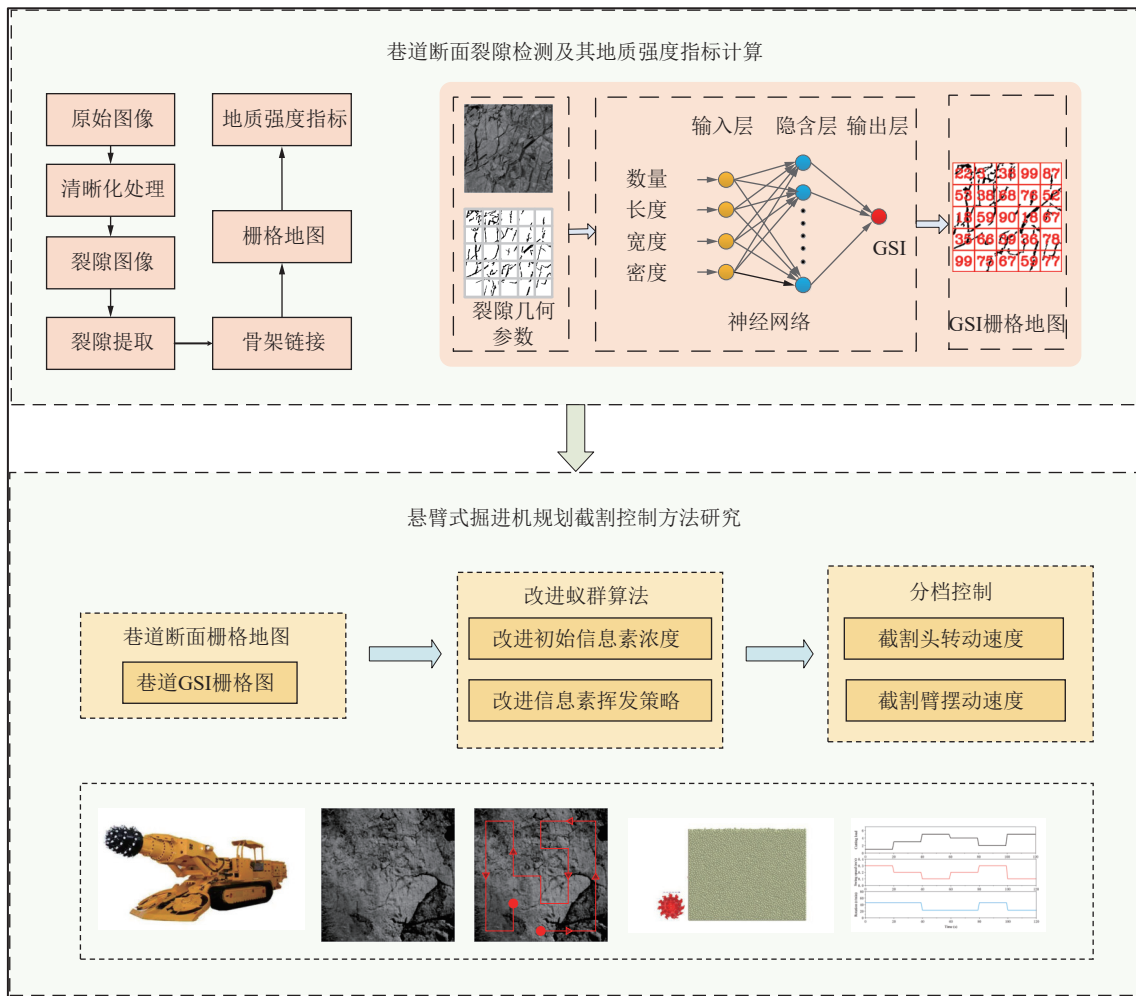


图 1 系统研究方案

Fig.1 Systematic reachprotocol

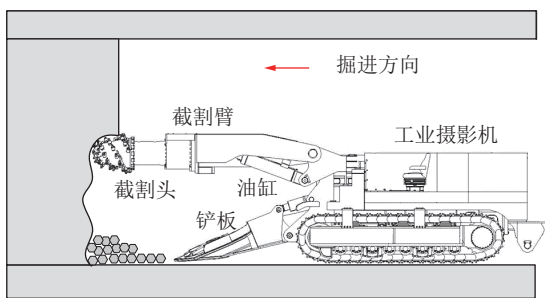


图 2 悬臂式掘进机工作示意

Fig.2 Working diagram of boom type roadheader

作用产生的一种开裂现场, 裂隙越多说明煤层开裂现象越严重, 煤层结构不稳定; 裂隙越少说明煤层结构越稳定。煤炭岩石的地质强度指标与裂隙节理有高度相关性, 裂隙节理越多, 地质强度指标越小; 裂隙节理越少, 地质强度指标越大, 因此可以探究出地质强度指标与裂隙节理的拟合关系, 通过裂隙节理特征的提取来定量的表示地质强度指标。获取清晰巷道断面图像后, 通过灰度值三维视图可以直观表示裂隙节

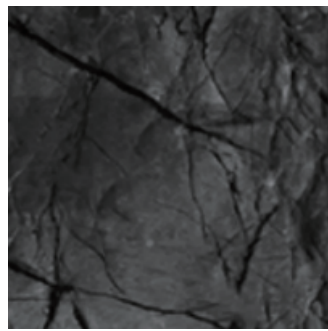
理的特征, 裂隙像素点的灰度值明显高于周围非裂隙像素点, 如图 3 所示。

巷道断面裂隙检测方法如下: 对巷道断面图像进行灰度转换、二值化和高斯去噪, 以去除图像中的椒盐噪声。使用边缘检测算法提取巷道断面裂隙的边缘。利用连通分量提取方法来获得裂隙的面积, 并使用阈值方法去除较小的裂隙区域。采用骨架连接法提取断裂区域的骨架, 得到裂隙图像。

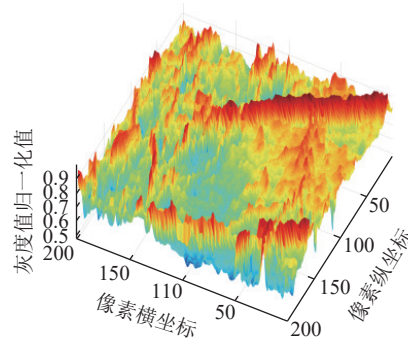
1) 图像采集。使用高分辨率工业相机获取掘进工作面截割断面的图像。确保适当的照明条件和相机设置, 以获得清晰的图像。

2) 边缘检测。使用灰度化、二值化对图像进行预处理, 通过 Canny 边缘检测方法提取巷道断面的裂隙边缘, 计算图像的梯度幅值和方向, 接着对梯度幅值进行非极大值抑制, 最后通过双阈值法确定边缘。

3) 噪声处理。噪声去除可以减少二值图像中的噪声, 通过高斯滤波消除图像中的椒盐噪声。图像中含有大量的非裂隙像素点, 通过检测裂隙连通域, 计



(a) 原始图像



(b) 灰度值归一化3D图

图 3 巷道断面裂隙检测

Fig.3 Coal wall crack detection

算连通域的面积,消除面积小于阈值的噪声。

4) 骨架连接。裂隙提取过程中,会出现边缘断裂情况,此时无法检测到裂隙的真实信息,因此需要进行骨架连接,将断裂的裂隙进行连接。

2.2 裂隙几何参数

巷道断面裂隙参数包括数量、长度、宽度和密度。这些参数可用于描述和评价巷道断面裂隙的特征和性质,为巷道掘进的设计和施工提供了重要的指导。

裂隙的几何参数如图 4 所示,裂隙的数量通过计算连接区域的数量确定。裂隙的长度通过计算起点 p_1 和终点 p_2 之间的欧氏距离得到。裂隙的宽度通过沿着裂隙像素点的垂直线穿过裂隙长度的距离确定,距离最大值为裂隙的宽度。裂隙密度通过裂隙像素数与图像中背景像素数的比值计算得到。

$$L = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (1)$$

$$W = \max |d_1, d_2| \quad (2)$$

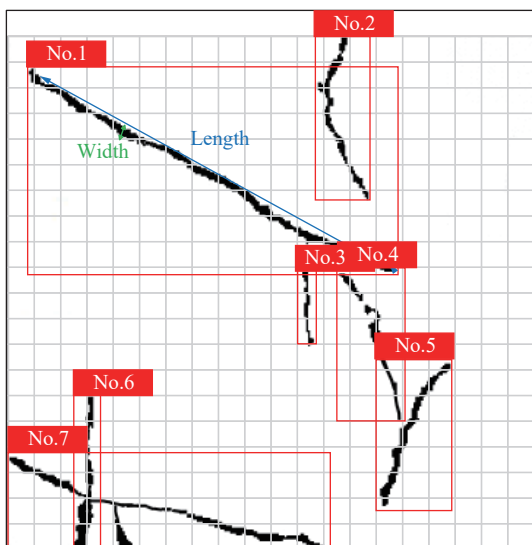


图 4 裂隙几何参数

Fig.4 Fracture geometry parameters

$$r = \frac{i}{I} \quad (3)$$

式中: L 为裂隙的平均长度; W 为裂隙的平均宽度; r 为裂隙的密度; (x_1, y_1) 为裂隙的开始点; (x_2, y_2) 为裂隙的终点。 d_1 、 d_2 为裂隙中任意 2 个点的宽度; i 为裂隙点的像素数量; I 为图像中所有像素的数量。

2.3 地质强度指标计算

煤层裂隙节理检测地质强度指标过程中,地质强度指标往往需要多项参数进行确定,其中存在着精确的映射关系,经过大量数据进行分析,地质强度指标 GSI 与裂隙特征的拟合关系可以通过神经网络确定。

如图 5 所示,应用于地质强度指标 GSI 识别的人工神经网络结构包含 3 层,以巷道断面裂隙节理数量 S 、平均长度 L 、平均宽度 W 、密度 r 作为输入层,以地质强度指标 GSI 作为输出层。经过神经网络控制器优化后,输出的地质强度指标稳定性和收敛性均达到最佳效果。

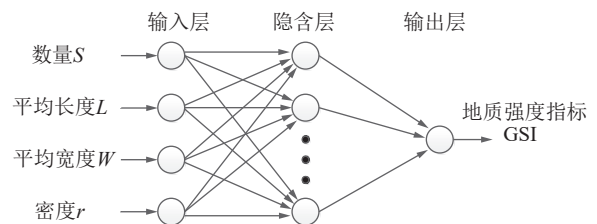


图 5 人工神经网络结构设计

Fig.5 Design of artificial neural network

研究中使用的巷道断面图像主要来自本团队前期工作中在煤矿掘进巷道中拍摄的照片。图像数据由工程师通过智能手机拍摄获取。共拍摄 455 张照片,其中训练集 330 张,测试集 125 张。

对训练后的神经网络模型进行验证,验证结果如图 6 所示。结果表明, GSI 真实值与预测值符合线性拟合关系,预测精度为 95.5%,本研究提出的神经网络模型能够快速有效地预测 GSI,为巷道掘进自适应截

割提供了基础。

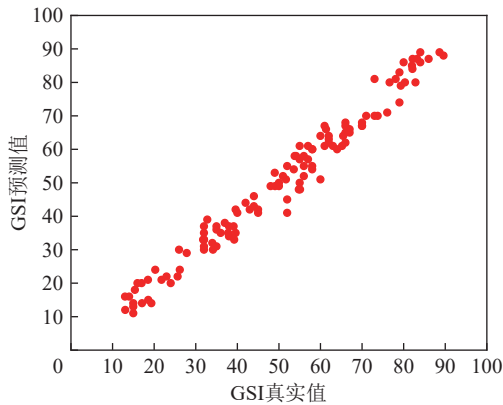


图 6 真实值与预测值

Fig.6 True values and predicted values

2.4 断面栅格地图建立

巷道的巷道断面通常为矩形,本研究使用栅格法对巷道断面进行建模,如图 7 所示。栅格的规格根据切割头和巷道断面的尺寸确定。假设切割头直径为 D ,巷道断面尺寸为 $N \times M$,栅格应设置为 $N/D \times M/D$ 。在本研究中,切割头直径为 600 mm,巷道断面尺寸为 3 000 mm \times 3 000 mm,经过计算,笔者选择 5 \times 5 网格作为案例进行研究。

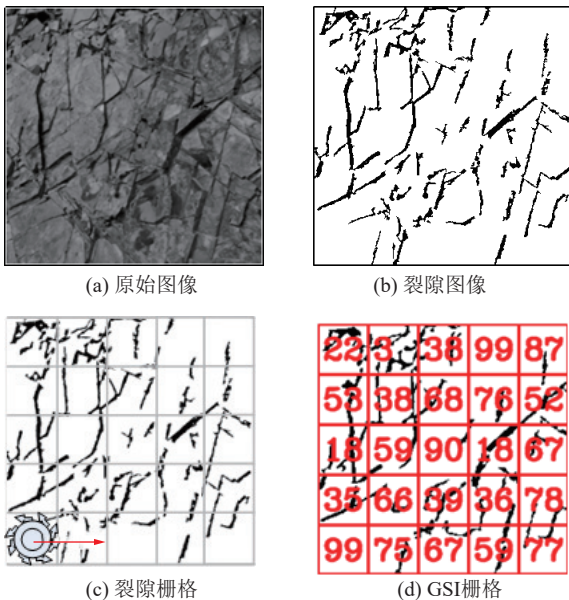


图 7 地质强度指标栅格建模

Fig.7 Grid modeling of GSI

3 悬臂式掘进机自适应切割控制方法

3.1 切割轨迹规划

3.1.1 传统切割轨迹

在已知的裂隙分布情况下,本研究的目的是在考虑经济和断面成形质量的同时,找到一个最优全覆盖

切割轨迹。经济主要以节约能耗衡量,而断面成形质量则以轨迹的覆盖面积评估。切割能源消耗主要有 2 个来源:① 切割臂的摆动运动所引起的能量消耗,其与切割路径的长度呈正相关;② 切割头旋转引起的能量消耗,其与巷道断面的切割载荷呈正相关。

传统切割轨迹分为往复式和螺旋式,如图 8 所示。传统切割轨迹较为简单,无法根据煤岩性质进行自适应调整,不满足智能化的要求。

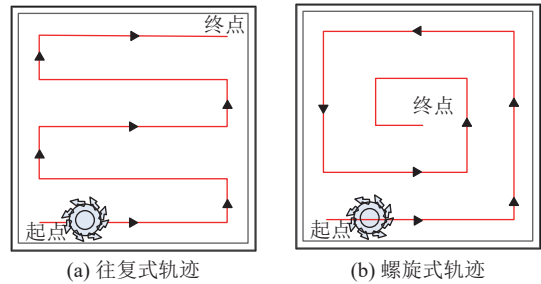


图 8 传统切割轨迹

Fig.8 Traditional cutting trajectory

在传统轨迹的基础上,记忆切割越来越多地被应用在巷道掘进过程中。记忆切割根据操作人员的经验进行人工示教,将人工示教的切割轨迹与速度保存,后续的每次断面切割都使用记忆切割的轨迹进行。然而,记忆切割的方法在复杂地质环境多变的情况下,仍不能满足智能切割的要求。

3.1.2 切割约束条件

切割规划涉及切割头位置、切割头运动方向、切割头旋转速度、切割臂摆动速度等决策变量。切割头位置表示切割头在巷道断面上的当前坐标位置,并随着算法的进行而不断更新。切割头的移动方向决定了切割头从其当前位置移动到下一个位置的方向。切割头的转速和切割臂的摆动速度可根据地质条件和切割要求进行调整。具体来讲,该算法受到以下约束条件:

- 1) 全覆盖路径规划。这种约束要求生成的切割轨迹覆盖需要切割的整个区域,并避免在同一区域进行重复切割,以节省能耗和时间。
- 2) 较小的转向次数。转向不仅会增加能源消耗,还可能影响掘进机的稳定性和切割效率。切割过程中应努力尽量减少切割轨迹中的转向次数。
- 3) 匹配的地质特征。地质强度指数较高的地区优先级较低,地质强度指数较低的地区优先级较高,即在规划切割轨迹时,应优先考虑切割地质强度指数较低的区域。
- 4) 限制掘进机最大性能。掘进机的最大切割头旋转速度和最大切割臂摆动速度,受到物理性能限制,

必须稳定在一定范围内, 不能超过极限值。

3.1.3 基于改进蚁群算法的截割轨迹

本研究采用改进的蚁群优化方法, 规划悬臂式掘进机的截割轨迹, 以节省能耗, 提高巷道断面成形质量。对于传统的蚁群算法做了 2 个改进: 改变初始信息素的分布和调整信息素分配策略。

在传统的蚁群优化方法中, 每只蚂蚁单位时间产生的信息素量都相同, 所有路径的初始信息素浓度也都相同, 随机搜索效率低下。笔者利用 GSI 值为路径提供正确的方向性指导。在既定时间内, 根据周围的 GSI 值设置不同的信息素浓度, 使蚁群以更直接的方式进行搜索, 减少搜索时间。

笔者提出的改进的蚁群优化采用自适应调整策略, 从最小 GSI 值区域开始, 至最大 GSI 值区域结束。蚁群逐渐从 GSI 最小值区域向 GSI 最大值区域移动。本研究的目标函数是能量消耗最优、时间最优和 GSI 匹配度最优:

$$W = -\lambda_1 \sum_{i=1}^r Q_i - \lambda_2 \sum_{i=1}^r t_i + \lambda_3 \sum_{i=1}^r \text{GSI}_i \quad (4)$$

式中: W 为目标函数的权重; λ_1 为最优能耗函数; λ_2 为最短时间函数的权重; λ_3 为能量消耗 GSI 匹配度的最优函数的权重; i 为轨迹经过的网格的顺序; r 为栅格的数量。

能耗最优函数表示所消耗的能量由所有网格通过轨迹, 时间最优函数表示所花的时间通过所有的轨迹, 和 GSI 匹配度最优表示匹配值的顺序标题通过轨迹和当前 GSI 值。

根据悬臂式掘进机的运动规则, 当悬臂式掘进机从一个网格移动到下一个网格时, 只有 4 个方向可供选择: 上、下、左、右。该决策基于网格间信息素的浓度, 笔者使用轮盘赌轮选择方法的概率公式:

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{(\tau_{ij}(t))^\alpha (\eta_{ij}(t))^\beta}{\sum_{k \in A_k} (\tau_{ij}(t))^\alpha (\eta_{ij}(t))^\beta}, & k \in A_k \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (5)$$

式中: p 为截割头从网格 i 到 j 的移动概率; τ 为网格 i 到 j 的信息素浓度; η 为启发式函数和目标函数的逆; α 和 β 为信息素与启发式信息的相对重要性权重, 通常是常数; A_k 为截割头未经过的网格。

信息素浓度的更新是蚁群算法中最重要的一步, 其影响着切割路径的选择。笔者改进了传统的信息素更新机制, 通过提高信息素浓度以获得更好的路径, 并降低了对于较差的路径的信息素浓度。此方法中使用的更新公式为

$$\tau_{ij}(t) = (1 - \rho) \tau_{ij} + \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k \quad (6)$$

$$\Delta \tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{M}{D_k}, & D_k \neq 0 \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (7)$$

$$D_k = \begin{cases} \log_2 S, & S = S_k \\ S, & S_k < S \leq 2S_k \\ S^2, & S > 2S_k \end{cases} \quad (8)$$

式中: M 为信息素增强系数; D_k 为信息素增强系数; S_k 为能量最优路径; S 为当前时刻的路径。

3.2 截割速度规划

3.2.1 截割速度档位设置

1) 截割头转动速度档位。截割头进行高速旋转将煤岩切割, 通过掘进机的变频器进行旋转速度控制, 因此改变掘进机变频器的频率可以调整截割头的转动速度。截割头沿规划好的路径进行摆动, 截割头经过不同的网格, 截割头的转速根据所在网格内的地质强度指标 GSI 值进行调速。掘进机截割头转速模式分为高速、低速两种模式, 通过调整掘进机变频器的频率可以切换截割头转速模式, 从而实现掘进机截割头自动调速。地质强度指标为 0~50 时, 截割头转速为高速; 地质强度指标为 50~100 时, 截割头转速为低速, 见表 1。

表 1 截割头转速档位

Table 1 Speed regulation mode of cutting head

模式	转速/(r · min ⁻¹)	频率/Hz	地质强度指标GSI
高速	46	50	0~50
低速	23	25	50~100

2) 截割臂摆动速度档位。悬臂式掘进机截割臂主要有水平和垂直两种摆动方式, 其中水平摆动由两侧的回转油缸驱动, 当掘进机向左摆动时, 左侧的油缸缩短, 右侧的油缸伸长; 当掘进机向右摆动时, 左侧的油缸伸长, 右侧的油缸缩短。垂直摆动由一对升降油缸进行驱动, 当截割臂向上摆动时, 左右两侧的升降油缸同时伸长; 当截割臂向下摆动时, 左右两侧的升降油缸同时缩短。

悬臂式掘进机截割臂的摆动速度由液压进行驱动, 通过电液比例阀进行控制, 根据阀门的开口面积来控制液压系统的流量。本研究将截割臂摆动速度设置 3 个档位, 分别是高速、中速、低速, 见表 2。

3.2.2 截割速度联合控制策略

将悬臂式掘进机的截割头转动速度与截割臂摆动速度分档后, 可以根据地质强度指标栅格对截割速

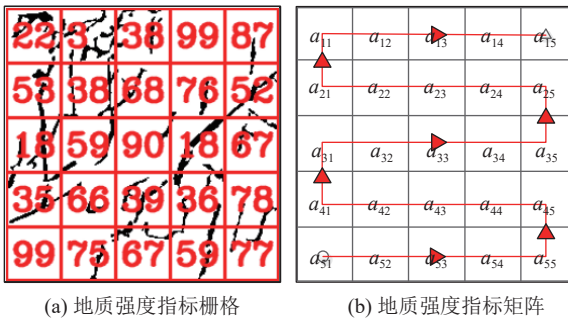
表 2 截割臂摆速档位

Table 2 Speed regulation mode of cutting arm

档位	速度/(m · s ⁻¹)	地质强度指标GSI
高速	0.3	70~100
中速	0.2	35~70
低速	0.1	0~35

度进行规划。具体来讲,在截割作业前,对截割巷道断面进行地质强度指标建模与轨迹规划,当截割头经过相应的栅格,根据栅格内的 GSI 进行调速。当栅格内的 GSI 较高时,掘进机应具有较低的截割速度,以缓解截割受到的冲击,提高掘进机的机械寿命;当栅格内的 GSI 较低时,掘进机截割速度应较高,以提高掘进机的截割效率。

如图 9 所示,获取巷道断面图像后,检测识别裂隙节理特征,根据每个网格内的裂隙节理情况预测 GSI 值,将 GSI 值显示在网格中。



(a) 地质强度指标栅格 (b) 地质强度指标矩阵

图 9 地质强度指标栅格

Fig.9 Geological strength index grid

为了减小预测的误差、增加系统的鲁棒性,本方法使用均值滤波对数据进行平滑处理,并使用了矩阵形式对巷道断面地质特征分布进行表示,矩阵 A 表示如下:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} \end{bmatrix} \quad (9)$$

相机获取的巷道断面图像转化为方便处理的矩阵形式,通过对矩阵的处理计算,获得地质强度指标输入参数,提高了处理效率。截割路径沿线经过的 GSI 值为: $a_{51} \rightarrow a_{55} \rightarrow a_{45} \rightarrow a_{41} \rightarrow a_{31} \rightarrow a_{35} \rightarrow a_{25} \rightarrow a_{21} \rightarrow a_{11} \rightarrow a_{15}$ 。

4 仿真测试

4.1 离散元模型

为了分析不同地质强度指标下的掘进机截割能

耗,笔者采用 EDEM 对截割过程进行分析, X 为截割头的横向运动方向, Y 为截割头的纵向运动方向, Z 为截割头的掘进方向,如图 10 所示。

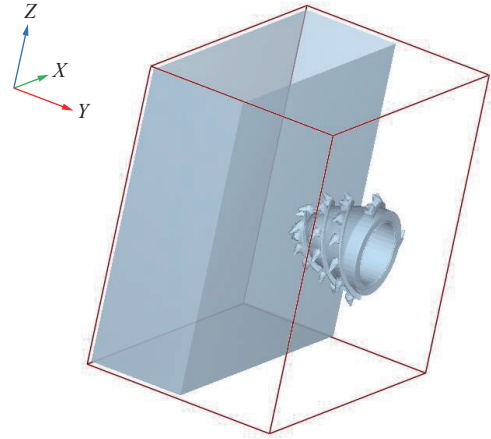


图 10 有限元仿真模型

Fig.10 Finite element simulation model

将巷道断面矩形体作为均衡载荷,并在模型中插入裂隙作为模型中的扰动载荷,截割头视为刚体。煤岩和截割头的材料参数见表 3。

表 3 煤岩与截割部参数

Table 3 Parameters of coal rock and cutting head

项目	煤岩	截割头
密度/(mg · mm ⁻³)	1.5	7.8
泊松比	0.3	0.3
弹性模量/GPa	1.4	270
摩擦角/rad	0.45	—
黏附力/N	0.766	—

在 EDEM 中,岩石中的颗粒密度、泊松比、弹性模量、摩擦角和附着力都与地质强度指数有关。较高的颗粒密度可以增强岩石强度,较大的泊松比使岩石更容易断裂,弹性模量越大,岩石强度越高,摩擦角越大,岩石越容易断裂,增加黏附力可以增强岩石的黏结力,从而增加岩石强度。

4.2 仿真分析

为了得到不同 GSI 下三相力的变化规律,截割头受力的最大值和平均值,以及不同地质强度指数下的受力分析如图 11 所示。

从图 11a 和图 11b 可以看出,随着 GSI 的增加,3 个方向的截割最大力和平均力也增大,截割力在 X 、 Y 方向的增长幅度大于 Z 方向。结果表明,随着煤岩 GSI 的增加,煤岩的截割力增大,截割头的荷载显著增大。从图 11c 和图 11d 可以看出,在一定时间内,随

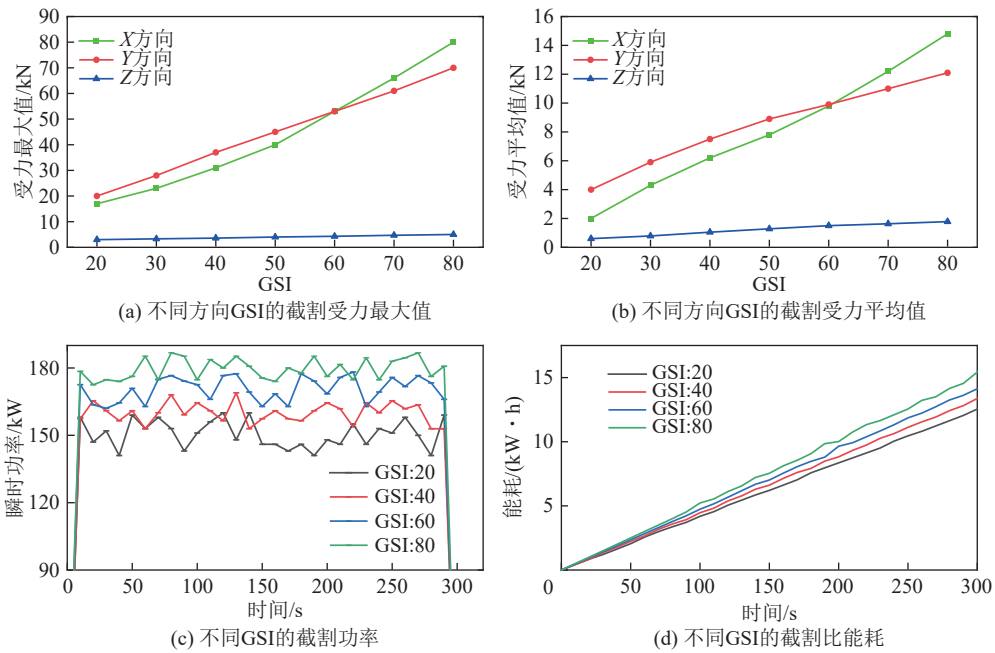


图 11 截割模型受力分析

Fig.11 Force analysis of the cut model

着 GSI 的增加,平均截割功率和能耗也在增加。截割能比是指切割材料单位体积所消耗的能量,可以评价掘进机在切割过程中的效率。

此外,除了存在自然裂隙外,煤岩还存在机械破碎作用产生的岩石裂隙。截割头在工作过程中切割巷道断面,造成周围煤岩断裂,降低巷道断面 GSI。因此,有必要正确规划截割轨迹,从裂隙较多的区域开始,直至裂隙较少的区域截止。利用截割过程中的致裂效果降低截割头周围岩体的地质强度,从而降低截割功率和能耗,增加设备寿命。

5 实验验证

5.1 实验设置

在实验室中建立了悬臂式掘进机的仿真平台,如图 12 所示。悬臂式掘进机的模型按 3 : 1 比例缩小,

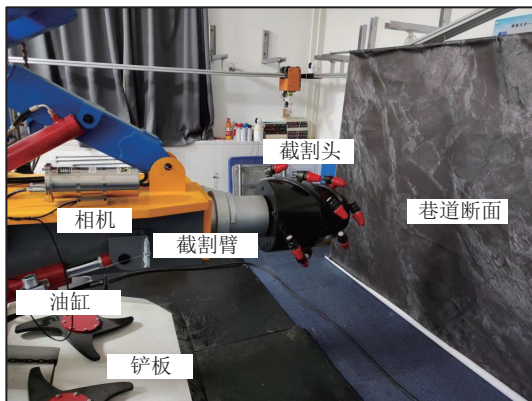


图 12 实验设置

Fig.12 Laboratory set

其中包括 1 个履带式机身和 1 个截割臂。履带式机身控制掘进机的行动。截割臂由回转油缸和抬升油缸控制。回转油缸控制截割臂的横向运动,抬升油缸控制截割臂的垂直运动。截割头位于截割臂的前端,其转速可由变频器控制。

选择分辨率为 2 456×2 058、帧率为 15 的防爆工业相机作为图像采集设备,进行高清防爆成像。选择的 PC 处理器是英特尔酷睿 i5-10400F,频率为 2.9 GHz,显卡为 GTX 3060Ti。本系统还补充了 1 个 80 W 的照明灯光用于提高巷道断面图像清晰度。

5.2 截割轨迹规划验证

通过机器视觉获得巷道断面图像,如图 13a 所示,根据实验室巷道断面和截割头的大小采用 5×5 网格对巷道断面环境进行建模,如图 13b 所示。采用该方法预测每个网格中的 GSI 如图 13c 所示。采用改进后的蚁群优化方法进行轨迹规划,将从红色区域到绿色区域的截割轨迹进行优先排序,如图 13d 所示。

利用数字孪生技术构建了虚拟空间中掘进机的数字模型。该模型能够实时反映掘进机的运行状态、性能参数和环境变化,为截割轨迹规划提供准确的数据支持。通过数字孪生技术^[31],可以在不干扰实际生产的情况下,模拟和预测掘进机的性能和截割过程,从而提前识别和解决问题。通过实时监测掘进机的运行状态和环境变化,对实际数据与虚拟模型进行实时比较分析,对截割轨迹规划方案进行调整和优化,如图 13 所示。

为了评估所提出的截割轨迹规划方法的有效性,

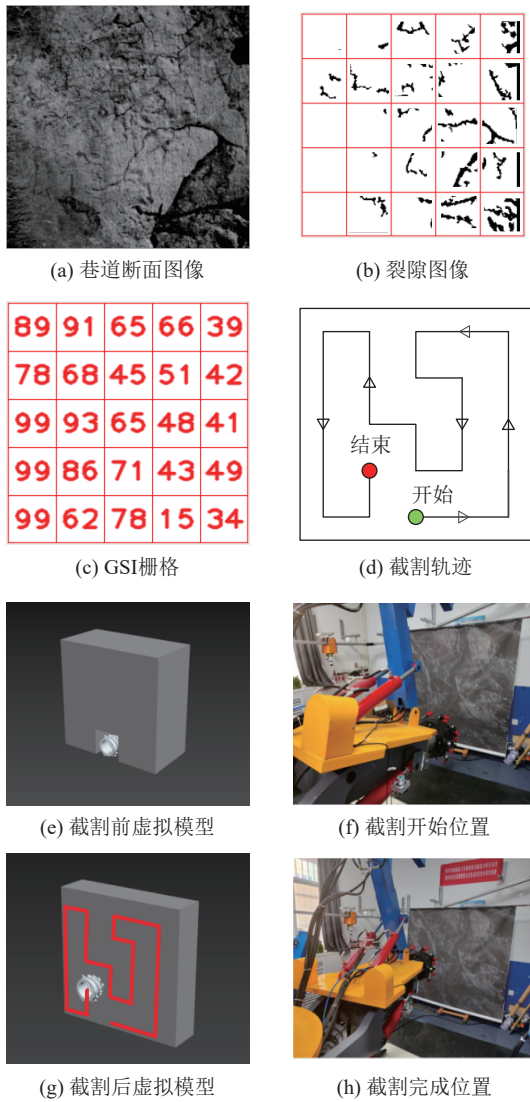


图 13 规划切割轨迹实验

Fig.13 Experiment of planning cutting trajectory

将所提方法与往复式、螺旋式、A-star、Dijkstra、ACO 方法进行了比较分析。分别从遍历面积、运行

时间和能耗 3 个指标进行了验证,结果见表 4。

表 4 切割轨迹方法性能对比

Table 4 Performance comparison of cutting trajectory

方法	遍历面积/m ²	运行时间/s	能耗/(kW·h)
往复式	12.25	305	12.72
螺旋式	12.25	306	12.76
A-star	6.9	156	6.51
Dijkstra	7.4	168	7.01
ACO	10.8	236	9.84
所提算法	12.74	287	10.29

从表 4 可以看出,传统的往复式和螺旋式切割轨迹虽然实现了全覆盖路径,但是能耗较高,且没有考虑地质强度因素。A-star 算法由于其快速的搜索速度和寻找网格中最短路径的高实时性能,但是无法进行整个巷道断面的全覆盖路径切割。Dijkstra 算法基于贪婪策略来寻找最短路径,很难实现全覆盖的切割路径。传统的 ACO 算法通过蚂蚁挥发信息素策略寻找最优路径,所提算法在 ACO 算法的基础上改进了信息素初始浓度与挥发策略,能做到全覆盖路径的同时,还能结合地质强度,实现高效率切割。

5.3 切割速度控制验证

规划好切割轨迹之后,需要对切割头转速和切割臂摆速进行联合控制,联合控制的主要方法是根据切割头经过的栅格内的 GSI 进行分档控制,从而实现规划切割。

悬臂式掘进机切割速度控制实验结果如图 14 所示。实验结果表明,本研究所提的方法可以根据切割头负荷自动控制切割速度,从而提高切割效率。

为了验证该方法的有效性,笔者将所提算法与传

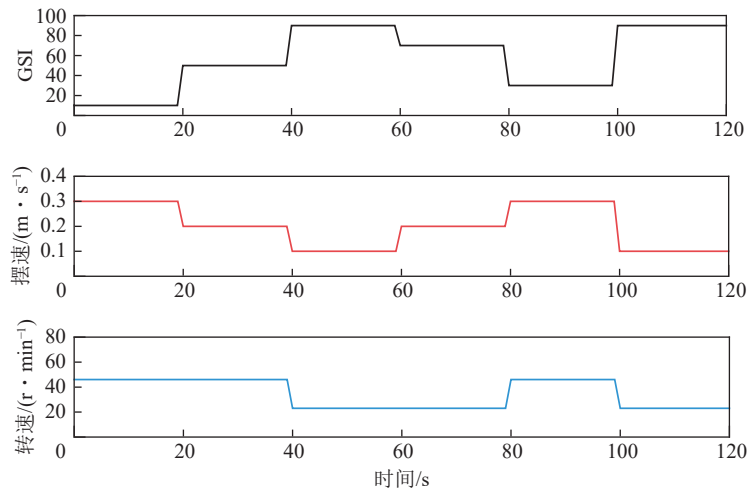


图 14 切割速度控制验证

Fig.14 Cutting speed control verification

统方法进行了比较,包括 PID、粒子群优化算法和模糊算法,以完成时间、截割能耗和响应速度作为评价指标。性能效果见表 5。

表 5 截割速度控制方法性能对比
Table 5 Performance comparison of the cutting speed control

方法	时间/s	能耗/(kW·h)	响应速度/s
PID	297	3.5	0.01
粒子群算法	290	3.3	0.05
模糊算法	291	3.4	0.04
所提方法	253	2.7	0.17

从表 5 可以看出,所提截割速度分档控制方法相比于传统的 PID 算法、粒子群算法、模糊算法,截割效率得到了提高。其中,所提方法截割完整巷道断面消耗的时间最少,能耗最低。由于需要计算 GSI 导致响应速度较高,但是符合正常范围。实验结果表明,本研究提出的分档控制算法可以提高截割效率,降低能耗。

6 结 论

1) 提出了一种基于视觉图像的巷道断面煤岩地质强度指标检测方法,通过巷道断面裂隙节理的 4 个特征参数,即裂隙节理数量、长度、宽度、占有率,建立地质强度指标检测模型,输出地质强度指标 GSI 值。相比于传统的人工对比估算方法,该方法具有更高的检测精度和更快的检测速度,有效地对截割断面煤岩地质强度指标进行量化。

2) 提出了一种悬臂式掘进机自适应截割方法,对巷道断面进行二维栅格建模,使用改进蚁群算法规划截割轨迹,通过改进信息素初始量与分配策略,使截割轨迹优先从地质强度较弱的区域开始截割。建立截割头转速和截割臂摆速档位模型,根据截割轨迹路径上的地质强度指标进行分档控制,提高截割效率。

3) 在仿真软件中建立了悬臂式掘进机截割模型,对不同地质强度指标的煤岩进行了截割受力分析。并在实验室悬臂式掘进机进行了实验验证,结果表明,本研究提出的规划截割方法可以根据地质强度指标进行截割轨迹与截割速度的控制,具有节能降耗的效果。该方法对智能掘进具有一定的理论和实践意义。

参考文献(References):

[1] 王国法,任怀伟,庞义辉,等. 煤矿智能化(初级阶段)技术体系研究与工程进展[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(7): 1-27.
WANG Guofa, REN Huaiwei, PANG Yihui, et al. Research and en-

gineering progress of intelligent coal mine technical system in early stages[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 1-27.

[2] 王国法,杜毅博. 智慧煤矿与智能化开采技术的发展方向[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(1): 1-10.
WANG Guofa, DU Yibo. Development direction of intelligent coal mine and intelligent mining technology[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(1): 1-10.

[3] 王虹,王步康,张小峰,等. 煤矿智能快掘关键技术与工程实践[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2068-2083.
WANG Hong, WANG Bukang, ZHANG Xiaofeng, et al. Key technology and engineering practice of intelligent rapid heading in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2068-2083.

[4] 张旭辉,杨文娟,薛旭升,等. 煤矿远程智能掘进面临的挑战与研究进展[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 579-597.
ZHANG Xuhui, YANG Wenjuan, XUE Xusheng, et al. Challenges and developing of the intelligent remote control on roadheaders in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 579-597.

[5] 杨健健,张强,王超,等. 煤矿掘进机的机器人化研究现状与发展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(8): 2995-3005.
YANG Jianjian, ZHANG Qiang, WANG Chao, et al. Status and development of robotization research on roadheader for coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(8): 2995-3005.

[6] 许家林,鞠金峰,轩大洋,等. 煤矿全生命周期绿色开采研究展望[J]. 绿色矿山, 2023(1): 79-90.
XU Jialin, JU Jinfeng, XUAN Dayang, et al. Prospects for green mining research of coal mine life cycle[J]. Journal of Green Mine, 2023(1): 79-90.

[7] DONG Z, ZHANG X H, YANG W J, et al. Automatic cutting speed control system of boom-type roadheader based on geological strength index[J]. Minerals, 2022, 12(12): 1582.

[8] DONG Z, ZHANG X H, YANG W J, et al. Ant colony optimization-based method for energy-efficient cutting trajectory planning in axial robotic roadheader[J]. Applied Soft Computing, 2024, 163: 111965.

[9] ZHANG Y B, LIU X R, LIU X, et al. Numerical characterization for rock mass integrating GSI/Hoek-Brown system and synthetic rock mass method[J]. Journal of Structural Geology, 2019, 126: 318-329.

[10] BERTUZZI R, DOUGLAS K, MOSTYN G. Improving the GSI hoek-brown criterion relationships[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 89: 185-199.

[11] MICHALOWSKI R L, PARK D. Stability assessment of slopes in rock governed by the Hoek-Brown strength criterion[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 127: 104217.

[12] 李桂臣,邵泽宇,孙元田,等. 煤矿掘采空间垮塌岩体稳定性与救援通道构建[J]. 绿色矿山, 2024(1): 11-20.
LI Guichen, SHAO Zeyu, SUN Yuantian, et al. Stability of collapsed rock body in coal mine excavation space and construction of rescue channel[J]. Journal of Green Mine, 2024(1): 11-20.

[13] 王鹏,苏现波,韩颖,等. 煤体结构的定量表征及其意义[J]. 煤矿安全, 2014, 45(11): 12-15.
WANG Peng, SU Xianbo, HAN Ying, et al. Quantitative characterization of coal structure and its significance[J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(11): 12-15.

- [14] 郭红玉, 苏现波, 夏大平, 等. 煤储层渗透率与地质强度指标的关系研究及意义[J]. 煤炭学报, 2010, 35(8): 1319–1322.
GUO Hongyu, SU Xianbo, XIA Daping, et al. Relationship of the permeability and geological strength index (GSI) of coal reservoir and its significance[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(8): 1319–1322.
- [15] 王泰华, 董征, 刘加奇, 等. 基于手机图像处理的煤炭 GSI 检测系统设计与实现[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(3): 154–159.
WANG Taihua, DONG Zheng, LIU Jiaqi, et al. Design and complete of coal GSI detection system based on mobile image processing[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(3): 154–159.
- [16] 张农, 袁钰鑫, 韩昌良, 等. 基于 Mask R-CNN 的煤矿巷道掘进迎头裂隙检测与定位算法[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(5): 925–932.
ZHANG Nong, YUAN Yuxin, HAN Changliang, et al. Research on crack detection and localization algorithm for advancing face in coalmine roadways based on Mask R-CNN[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(5): 925–932.
- [17] 张旭辉, 王甜, 张超, 等. 数字孪生驱动的悬臂式掘进机虚拟示教记忆截割方法[J]. 煤炭学报, 2023, 48(11): 4247–4260.
ZHANG Xuhui, WANG Tian, ZHANG Chao, et al. DT-driven memory cutting control method using VR instruction of boom-type roadheader[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(11): 4247–4260.
- [18] 刘若涵, 刘永立. 栅格法与 Dijkstra 算法的掘进机截割轨迹规划[J]. 黑龙江科技大学学报, 2021, 31(1): 60–67.
LIU Ruohan, LIU Yongli. Cutting trajectory planning of cantilever roadheader based on grid method and Dijkstra algorithm[J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2021, 31(1): 60–67.
- [19] 沈显庆, 王贺, 马志鹏, 等. 基于栅格法与改进 A* 算法的掘进机截割轨迹规划[J]. 黑龙江科技大学学报, 2021, 31(5): 642–647.
SHEN Xianqing, WANG He, MA Zhipeng, et al. Cutting trajectory planning of roadheader based on raster method and improved A* algorithm[J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2021, 31(5): 642–647.
- [20] 禚静, 梁凡. 改进蚁群算法的掘进机截割轨迹规划方法[J]. 煤炭技术, 2023, 42(5): 250–253.
XUAN Jing, LIANG Fan. Cutting trajectory planning method of roadheader based on improved ACO[J]. Coal Technology, 2023, 42(5): 250–253.
- [21] 田劼, 银晓琦, 文艺成. 基于混合 IWO—PSO 算法的掘进机截割轨迹规划方法[J]. 工矿自动化, 2021, 47(12): 55–61.
TIAN Jie, YIN Xiaochi, WEN Yicheng. Method of cutting trajectory planning of roadheader based on hybrid IWO-PSO algorithm[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(12): 55–61.
- [22] 张瑞, 赵杰, 王富利, 等. 基于改进自适应遗传算法的掘进机截割轨迹规划方法[J]. 煤矿机械, 2023, 44(9): 1–4.
ZHANG Rui, ZHAO Jie, WANG Fuli, et al. Cutting trajectory planning method for roadheader based on improved adaptive genetic algorithm[J]. Coal Mine Machinery, 2023, 44(9): 1–4.
- [23] 王鹏江, 杨阳, 王东杰, 等. 悬臂式掘进机煤矸智能截割控制系统与方法[J]. 煤炭学报, 2021, 46(S2): 1124–1134.
WANG Pengjiang, YANG Yang, WANG Dongjie, et al. Intelligent cutting control system and method for coal gangue of cantilever roadheader[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S2): 1124–1134.
- [24] 宗凯, 符世琛, 吴森, 等. 基于 GA-BP 网络的掘进机截割臂摆速控制策略与仿真[J]. 煤炭学报, 2021, 46(S1): 511–519.
ZONG Kai, FU Shichen, WU Miao, et al. Simulation of control strategy for swing speed of roadheader's cutting arm based on GA-BP network[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S1): 511–519.
- [25] 雷孟宇, 张旭辉, 杨文娟, 等. 煤矿掘进装备视觉姿态检测与控制研究现状与趋势[J]. 煤炭学报, 2021, 46(S2): 1135–1148.
LEI Mengyu, ZHANG Xuhui, YANG Wenjuan, et al. Present situation and trend of research on visual pose detection and control of coal mine tunneling equipment[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S2): 1135–1148.
- [26] 张旭辉, 赵建勋, 张超, 等. 悬臂式掘进机视觉伺服截割控制系统研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(2): 263–270.
ZHANG Xuhui, ZHAO Jianxun, ZHANG Chao, et al. Study on visual servo control system for cutting of cantilever roadheader[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(2): 263–270.
- [27] 杨文娟, 张旭辉, 张超, 等. 悬臂式掘进机器人巷道成形智能截割控制系统研究[J]. 工矿自动化, 2019, 45(9): 40–46.
YANG Wenjuan, ZHANG Xuhui, ZHANG Chao, et al. Research on intelligent cutting control system for roadway forming of boom-type tunneling robot[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(9): 40–46.
- [28] 许向前, 简阔, 王宁, 等. 考虑煤岩硬度的悬臂式掘进机截割控制[J]. 工矿自动化, 2024, 50(4): 153–158.
XU Xiangqian, JIAN Kuo, WANG Ning, et al. Cutting control of boom-type roadheader considering coal rock hardness[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(4): 153–158.
- [29] 张旭辉, 杨红强, 白琳娜, 等. 煤矿掘进工作面低照度视频增强技术研究[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 309–316.
ZHANG Xuhui, YANG Hongqiang, BAI Linna, et al. Research on low illumination video enhancement technology in coal mine heading face[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 309–316.
- [30] 张旭辉, 麻兵, 杨文娟, 等. 煤矿井下非均匀照度图像去噪研究[J]. 工矿自动化, 2024, 50(2): 1–8.
ZHANG Xuhui, MA Bing, YANG Wenjuan, et al. Research on denoising of uneven lighting images in coal mine underground[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(2): 1–8.
- [31] 鲍久圣, 张可琨, 王茂森, 等. 矿山数字孪生 MiDT: 模型架构、关键技术及研究展望[J]. 绿色矿山, 2023(1): 166–177.
BAO Jiusheng, ZHANG Kekun, WANG Maosen, et al. Mine Digital Twin: Model architecture, key technologies and research prospects[J]. Journal of Green Mine, 2023(1): 166–177.