

文章编号: 1671-251X(2025)01-0061-11

DOI: [10.13272/j.issn.1671-251x.2024070084](https://doi.org/10.13272/j.issn.1671-251x.2024070084)

基于卷积神经网络和模糊 PID 的掘进机 截割控制系统研究

李英娜¹, 崔彦平², 安博烁², 刘百健³, 靳建伟²

(1. 石家庄煤矿机械有限责任公司, 河北 石家庄 050000; 2. 河北科技大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050018; 3. 河北科技大学 材料科学与工程学院, 河北 石家庄 050018)

摘要: 针对悬臂式掘进机在掘进过程中面对煤岩硬度复杂变化时适应性不足、系统稳定性低等问题, 提出一种基于卷积神经网络(CNN)及模糊 PID 的掘进机截割控制系统, 该系统包括巷道断面成形特性和智能截割控制策略 2 个部分, 其中掘进机智能截割控制策略由 CNN 煤岩硬度动态感知模块和截割臂摆速模糊 PID 控制模块组成。提出一种有效的截割路径, 使截割头沿规划路径从上至下进行煤岩截割, 以提高断面完整性, 减小掘进方向的误差。采用 CNN 煤岩硬度动态感知模块分析采集的截割电动机电流、截割臂振动加速度、回转油缸压力数据信息, 以感知煤岩特性; 采用截割臂摆速模糊 PID 控制模块对感知后的数据进行模糊化与解模糊化处理, 输出相应控制参数信号; 电液比例阀根据接收到的信号控制液压油的流量和压力, 通过阀控液压缸控制截割臂摆速, 实现截割臂摆速的自适应控制。现场实验结果表明: 当掘进机截割较软介质与煤时, 截割臂以高摆速工作; 当掘进机截割复杂岩层时, 摆速随截割信号的增大而降低, 截割信号在 0~1 之间变动; 当掘进机截割较硬岩层时, 截割载荷信号接近 1, 截割臂的摆速降低至 0。

关键词: 悬臂式掘进机; 智能截割; 截割臂摆速; 截割路径; 模糊 PID 控制; 煤岩硬度动态感知; 卷积神经网络

中图分类号: TD632

文献标志码: A

Research on the roadheader cutting control system based on convolutional neural network and fuzzy PID

LI Yingna¹, CUI Yanping², AN Boshuo², LIU Baijian³, JIN Jianwei²

(1. Shijiazhuang Coal Mining Machinery Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China;

2. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China;

3. School of Material Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology,
Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: In response to the insufficient adaptability and low system stability of cantilever roadheader when facing changes in coal and rock hardness during tunneling, a roadheader cutting control system based on convolutional neural networks (CNN) and fuzzy PID is proposed. This includes two parts: the cross-section forming characteristics of the tunnel and the intelligent cutting control strategy. The intelligent roadheader cutting control strategy consists of a CNN coal rock hardness dynamic perception module and a cutting arm swing speed fuzzy PID control module. An effective cutting path is proposed to make the cutting head cut coal and rock top to

收稿日期: 2024-07-25; 修回日期: 2025-01-06; 责任编辑: 王晖, 郑海霞。

基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目(226Z1906G); 河北省高等学校自然科学研究项目(CXY2024038); 石家庄市驻冀高校基础研究项目(241791157A)。

作者简介: 李英娜(1983—), 女, 河北石家庄人, 硕士研究生, 研究方向为电力电子、机械电子工程, E-mail: 15533113702@163.com。

引用格式: 李英娜, 崔彦平, 安博烁, 等. 基于卷积神经网络和模糊 PID 的掘进机截割控制系统研究[J]. 工矿自动化, 2025, 51(1): 61-70, 137.

LI Yingna, CUI Yanping, AN Boshuo, et al. Research on the roadheader cutting control system based on convolutional neural network and fuzzy PID[J]. Journal of Mine Automation, 2025, 51(1): 61-70, 137.



扫码移动阅读

bottom along the planned path, aiming to improve the integrity of the cross-section and reduce the error in the tunneling direction. The CNN coal and hardness dynamic perception module is used to analyze the collected cutting motor current, cutting arm vibration acceleration, and rotary oil cylinder pressure data information to perceive the characteristics of coal and; the cutting arm swing speed fuzzy PID control module is used to process the perceived data for fuzzification and defuzzification, and to output the corresponding control parameter signals the electro-hydraulic proportional valve controls the flow and pressure of hydraulic oil according to the received signals, and then the valve-controlled hydraulic cylinder controls the swing speed of cutting arm, achieving the adaptive control of the cutting arm swing speed. The experimental results in the field show that when the roadheader cuts softer media and coal, the arm works at a high swing speed; when cutting complex rock strata, the swing speed decreases as the cutting signal increases, and the cutting signal varies between 0-1; when the roadheader cuts harder rock strata, the cutting load signal is close to 1, and the swing speed of the cutting arm is reduced 0.

Key words: cantilever roadheader; intelligent cutting; cutting arm swing speed; cutting path; fuzzy PID control; dynamic perception of coal and rock hardness; convolution neural network

0 引言

近年来,掘进机技术在断面自动成形、记忆截割和截割轨迹规划等方面取得了显著进展^[1-3],但在煤岩识别和自适应截割方面发展缓慢^[4]。为提高巷道断面自动成形质量和掘进工作面智能化水平,曹军^[5]研究了煤岩截割载荷自动识别方法,并在此基础上建立了掘进机截割臂模糊 PID 控制,通过控制截割臂的摆动速度实现掘进机的恒功率截割,但该方法在煤岩硬度动态变化下的适应性仍显不足,特别是在复杂工况下难以快速响应和调整截割臂的控制参数;焦可辉^[6]提出了一种基于 PID 的悬臂摆动速度控制方法,可快速调节掘进机悬臂,并确保截割电动机恒功率运行,但 PID 控制方法的线性本质使掘进机在应对非线性复杂环境(如煤岩混合)时表现不足,难以有效应对煤岩硬度和载荷的快速变化,尤其是在动态复杂工况下容易出现过冲或响应延迟等问题;宗凯^[7]提出了一种基于多参数判据的截割载荷变化判定策略,采用遗传算法优化后的 BP 神经网络实现截割电动机恒功率输出,但在处理大规模数据时面临梯度消失或爆炸等问题,尤其是在实时性要求高的系统中,BP 神经网络的计算复杂度和训练时间限制了其实际应用。为提高掘进机控制系统数据处理能力,谢亚洲^[8]提出了以复杂可编程逻辑器件-数字信号处理器为核心的悬臂式掘进机智能控制系统解决方案,通过多传感器融合技术对煤岩进行动态感知,并实现了煤岩的自适应截割,但在煤岩硬度剧烈变化的情况下,该系统过于依赖固定算法,灵活性较差,难以根据不同工况实时调整控制策略,未能实现真正意义上的动态自适应;宋煜栋^[9]提出

了一种掘进机自动截割方法,选用“S”形截割路径,对不同形状巷道断面进行边界控制,为掘进机在多条件下巷道掘进施工提供了理论依据,但该路径对特定地质条件具有一定的依赖性,在面对其他不同地质条件(如更复杂的地层结构、岩石硬度变化较大等)时,其适应性受到限制,进而影响整体的截割效率;张磊等^[10]提出了一种基于反馈控制的巷道断面自动截割控制方案,利用数学模型和实时位置计算,实现了 EBZ220 型掘进机的高精度自动截割,但所提方案针对的样本相对单一,无法全面涵盖不同工况和机型下的系统性能表现,影响其在复杂地质条件下的应用效果。以上方法在面对煤岩硬度复杂变化、复杂地质工况要求时,均存在适应性不足、系统稳定性及效率较低等问题。

针对上述问题,本文提出一种基于卷积神经网络(Convolutional Neural Networks, CNN)和模糊 PID 的掘进机截割控制系统。首先,提出合理有效的截割路径,使截割头沿规划路径从上至下进行煤岩截割,以提高断面完整性,减小掘进方向的误差,提高掘进效率;其次,通过 CNN 实时感知煤岩硬度信息,利用截割电动机电流、回转油缸压力和截割臂振动加速度等控制变量进行煤岩硬度识别,为智能截割系统提供动态、准确的输入信息;然后,在合理有效的截割路径基础上,以 CNN 预测的载荷信息为依据,采用自整定模糊 PID 控制方法实现不同煤岩情况的自适应截割;最后,建立自整定模糊 PID 控制器仿真模型,以验证该控制方法的稳定性。

1 基于 CNN 和模糊 PID 的掘进机截割控制系统

基于 CNN 和模糊 PID 的掘进机截割控制系统包括巷道断面成形特性和智能截割控制策略 2 个部

分, 如图 1 所示。首先, 研究巷道断面成形特性, 规划合理截割路径, 以提高断面成形质量与效率。然后, 利用传感器信息进行煤岩强度识别, 在识别过程中进行误差分析, 确保识别的准确性, 为后续控制提供数据。最后, 根据煤岩强度设计模糊 PID 控制器块, 并通过仿真及实验验证控制策略的有效性。

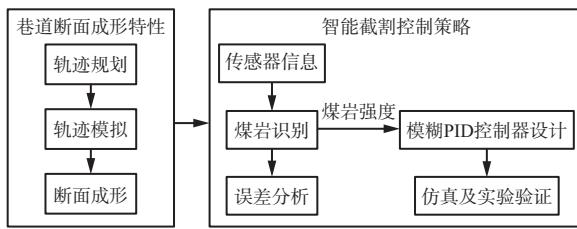


图 1 基于 CNN 和模糊 PID 的掘进机截割控制系统结构

Fig. 1 Structure of roadheader cutting control system based on convolutional neural network(CNN) and fuzzy proportional integral derivative(PID)

2 巷道断面成形特性分析

巷道断面成形是依靠截割臂的摆动运动提供给进量、截割头旋转运动切割煤岩共同完成的。因此, 需要根据煤岩特性合理规划截割路线, 以截割出高精度的断面形状, 避免截割路径不合理导致断面成形误差大, 甚至损坏截割机构的现象。本文针对不同的截割路径进行分析, 规划符合要求的截割路径, 提高断面成形效率。

2.1 截割头运动轨迹规划

掘进机工作时, 截割头上分布的截割齿会随截割头一同转动, 并且与截割头以螺旋式的轨迹协同运动, 进而实现对煤岩的有效截割^[11]。截割臂运动时, 在断面上形成运动方向上的圆柱面, 1 次工序完成后留下的断面形状就是断面截割的轨迹。为方便研究, 将截割头的运动轨迹简化, 截割头顶点划过的轨迹代表截割头运动路径。理想状态下的截割头切入断面深度相同, 截割齿在断面上形成螺旋状轨迹, 将其近似成一系列圆, 用叠加的圆代表截割齿在截割路径上留下的轨迹形成的轮廓。截割头的尺寸小于截割臂长度。因此, 认为截割头运行的包络线是断面轮廓线。

截割路径规划即规划悬臂带动截割头截割煤岩的路径, 悬臂自身有水平、垂直 2 个方向上的运动, 在路径规划时, 参照大多数的煤岩分布条件, 选择先水平后垂直的截割方式, 避免因机身抖动而造成误差变大或煤岩大块掉落, 影响收煤进度和掘进效率^[12]。

掘进机截割断面的标准形状主要有梯形、矩形、圆弧拱型、半圆弧拱型 4 种, 本文以矩形断面为研究对象。依据操作规程, 断面成形工艺流程依次为扫底、掘进机前进、截割断面、刷帮。扫底由掘进机的

收煤部完成收煤工作, 在煤岩截割过程中, 煤岩被截割头截下掉落在断面底部, 由掘进机星轮和铲斗共同进行收煤工作, 在实际的工作环境下, 收煤效率对掘进效率影响较大。掘进机前进为掘进机在完成 1 次任务后向前进刀。截割断面的路径是否合理是关乎收煤流程能否顺利进行的关键, 是影响掘进效率的主要因素。刷帮工作使形成的巷道断面更加平整, 减小掘进机行进误差。

根据以上分析, 提出的截割路径如图 2 所示, 截割头从初始位置自上而下运动。此截割路径呈现为往复式折线形态, 路径先沿水平方向直线行进, 抵达边界后垂直转向(从标有 1 的水平线段起, 线条按数字 1—28 依次连接), 含水平、垂直与倾斜线段, 构成此截割轨迹。截割头在截割两侧边缘位置时存在斜向上的角度, 因截割头旋转方向不变, 截割齿会带动掉落的煤岩向中间靠拢, 减少铲斗收集煤岩所用时间, 提高收煤效率。

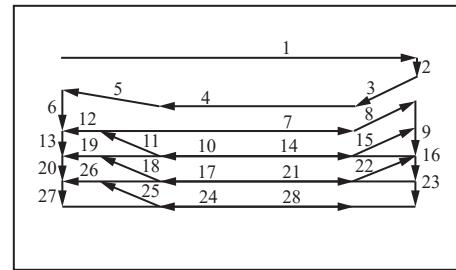


图 2 截割路径

Fig. 2 Cutting path

2.2 巷道断面形状特征仿真分析

巷道断面的形状由截割头划过轨迹形成, 断面边缘位置与规划截割位置间的误差决定巷道断面的成形质量, 通过 Matlab 编制 M 文件进行 EBZ200 型掘进机运动学仿真研究, 将运动学仿真数据代入建立的运动学模型中。掘进机参数见表 1。

表 1 掘进机参数

Table 1 Roadheader parameters

回转关节摆角 $\theta_1(^{\circ})$	升降关节摆角 $\theta_2(^{\circ})$	伸缩量 d_3/mm
(-39, 39)	(-121, -48)	[0, 500]

2.2.1 极限平面矩形断面截割仿真

当按规划的截割路径与形状进行截割时, 为防止截割偏差, 要求掘进机截割臂水平回转关节与垂直回转关节均随时间变化。设定矩形巷道断面宽 4 000 mm, 高 2 000 mm, 按截割路径进行仿真, 矩形断面截割轮廓如图 3 所示。

2.2.2 截割头曲面运行轨迹轮廓仿真

伸缩量 $d_3=0$, $d_3=500 \text{ mm}$ 时断面成形仿真结果如图 4 所示。

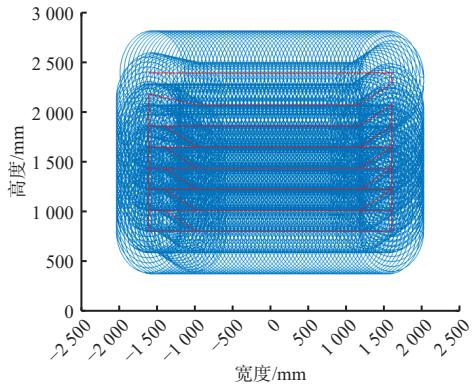


图 3 矩形断面截割轮廓

Fig. 3 Cutting contour of rectangular cross-section

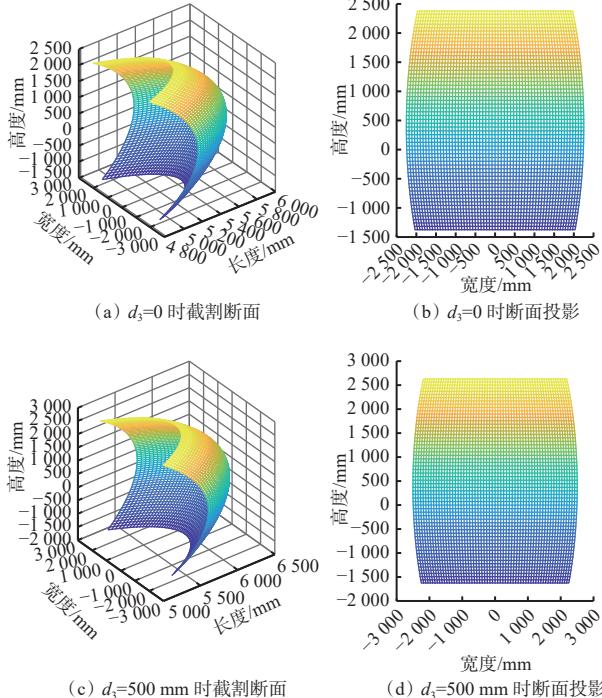


图 4 截割断面轮廓仿真

Fig. 4 Simulation of cutting cross-section contour

由图 4 可看出,掘进机截割臂依靠回转运动与垂直运动进行煤岩截割时,截割出来的面为曲面。在各转动关节及伸缩关节处于极限范围时,得到的最大巷道尺寸即断面成形的有效范围。因此,巷道截割过程中,为保证截割工作有效性,应在断面极限范围内规划截割路径。

2.2.3 平面截割时极限运行轨迹轮廓仿真

在实际工程应用中,对于一些巷道壁面平整度要求较高的场合,有时需要将巷道断面截割成平面。研究平面截割时的极限运行轨迹轮廓,可以明确在要求截割断面为平面的情况下,掘进机依靠伸缩、回转、垂直运动共同完成煤岩截割的可达域。仿真结果如图 5 所示。

由图 5 可看出,将截割断面限制为平面时,掘进

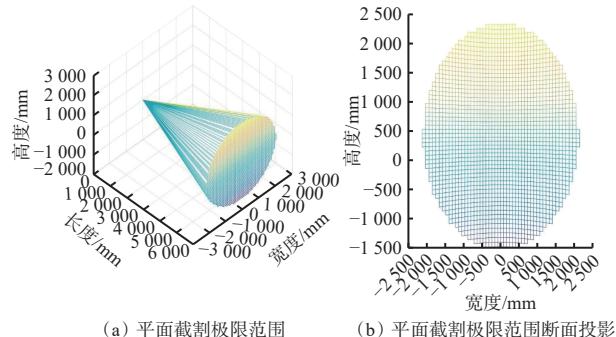


图 5 平面极限运行轨迹轮廓仿真

Fig. 5 Simulation of planar limit operating trajectory contour

机依靠伸缩、回转、垂直运动共同完成煤岩截割,可达域为近似圆形的区域。在该区域内设置一个矩形范围,则可以得到极限位置时平面矩形轮廓的尺寸,即在截割矩形断面时规划截割路径的有效范围,平面矩形截割断面仿真如图 6 所示。

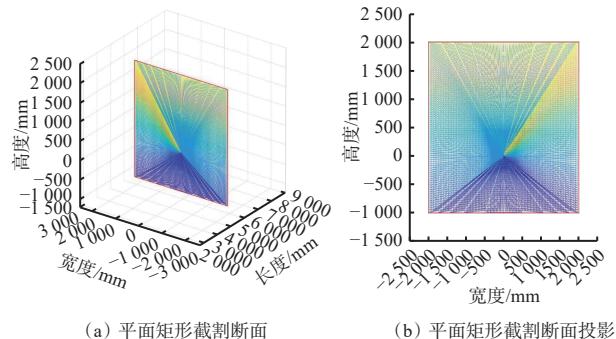


图 6 平面矩形截割仿真

Fig. 6 Simulation of planar rectangular cutting

由上述仿真可知,研究不同巷道断面形状下的极限断面轮廓,有助于合理规划截割路径的有效范围,从而更好地控制截割质量。

3 智能截割控制策略

在掘进机实际操作中,回转运动的频率高且作用更突出,直接影响截割范围和效率,而俯仰运动的幅度较小且较少使用。因此本文选择截割臂回转油缸作为研究对象,旨在优化截割臂的回转摆速控制。

掘进机在截割煤岩过程中,单一传感器易受到外界环境干扰,无法全面准确地反映实际工况。本文以压力、加速度、电流等传感器信息为依据识别载荷信息,从而提高可信度^[13]。

掘进机智能截割控制策略由 CNN 煤岩硬度动态感知模块和截割臂摆速模糊 PID 控制模块组成,如图 7 所示。首先,通过多传感器实时采集截割电动机电流 I 、截割臂振动加速度 A_{cc} 、回转油缸压力 P 的信息,将经过处理后的数据存储在静态随机存取存储器(SRAM)中,采用 CNN 煤岩硬度动态感知模

块分析采集数据信息,以感知煤岩特性。然后,采用截割臂摆速模糊 PID 控制模块对感知后数据进行模糊化与解模糊化处理,输出相应控制参数信号。信号经过比例放大器后传递至电液比例阀,电液比例阀根据接收到的信号控制液压油流量和压力,进而通过阀控液压缸来控制截割臂摆速。最后,压力变送器、加速度传感器和电流传感器实时监测截割控制系统状态,并将数据反馈给控制系统,形成闭环控制。该系统可根据煤岩实际情况动态调整截割臂摆速,以实现截割臂摆速的高效自适应控制。

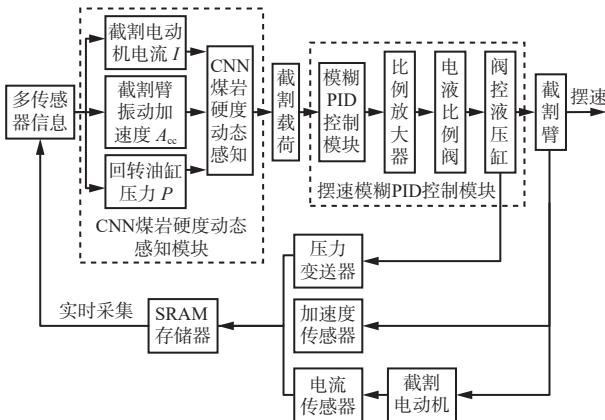


图 7 掘进机智能截割控制策略

Fig. 7 Intelligent cutting control strategy for roadheader

3.1 CNN 煤岩硬度动态感知模块

CNN 煤岩硬度动态感知模块主要由输入层、卷积层、激活函数、池化层、全连接层构成,通过特征提取与分类完成识别工作,其结构如图 8 所示^[14]。首先,将三通道的一维掘进机工况数据作为 3 个通道的输入。然后,对掘进机工况数据进行归一化处理和 2 个卷积层和池化层处理,实现原始信号降维,并自适应提取原始时域信号中隐藏的特征信息。最后,通过特征融合层融合载荷信息,并利用全连接层将提取到的特征映射到截割载荷的预测值,通过分类层进行载荷分类。

查阅相关井下数据,对现有数据添加不同噪声得到样本数据,采样频率为 1.5 kHz,采样时间为 0.171 s,将同一工况数据按照采样点数为 256 的长度进行分割,构建 $3 \times 256 \times \tau$ 的数据集, τ 为同一工况下样本数^[15]。所拍摄煤岩视频内存约为 20 GiB,通过 Python 脚本从视频固定帧数中截取图像,得到静态图像 2 000 张。目标总数为 8 482,其中标签为煤的为 7 842,标签为砾石的为 1 640。将自建数据集按 8:1:1 划分为训练集、测试集、验证集。煤岩数据样本量较小难以满足需求,导致过拟合风险,因此需要增加煤岩样本总量。采用水平翻转、随机旋转 90°、

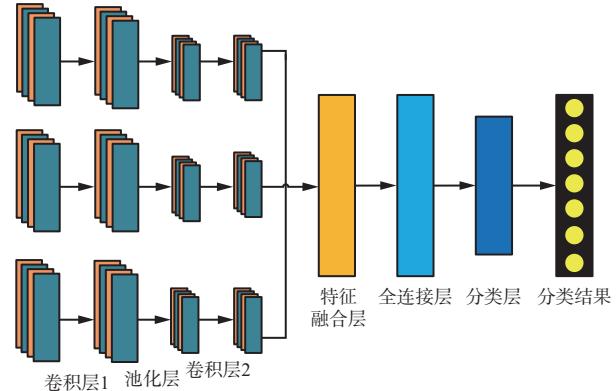


图 8 CNN 煤岩硬度动态感知模块结构

Fig. 8 Structure of the CNN-based coal rock hardness dynamic perception module

HSV 变换操作对数据集进行扩充,统一处理为 960 像素×960 像素的图像,并输入至 CNN 模型。

选取 800 组数据对 CNN 煤岩硬度动态感知模块进行训练,在训练过程中,将数据集按 4:1 划分为训练集和测试集。为了优化模块性能,训练采用 Adam 自适应优化算法,初始学习率设定为 0.001,迭代次数为 50,并通过调整超参数提升模型的训练效率。损失函数选择交叉熵损失函数,训练结果如图 9 所示。可看出模块收敛速度较快,在迭代 15 次后训练集与测试集的结果均达到误差要求(损失值小于 0.1),可以满足煤岩硬度识别要求。

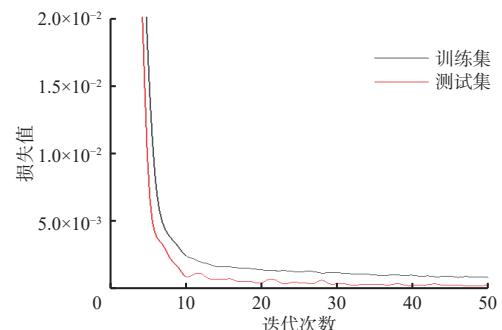


图 9 CNN 煤岩硬度动态感知模块的迭代过程

Fig. 9 Iterative process of the CNN-based coal rock hardness dynamic perception module

3.2 煤岩破碎强度与载荷关系分析

掘进机的回转运动和俯仰运动都与煤岩力学特性紧密相关,而煤岩力学特性又直接关联到煤岩破碎强度 P_k 。 P_k 与反映煤岩破碎特性的坚固性系数 f 存在以下对应关系:

$$P_k = 7.857f^2 + 66.714f - 40.857 \quad (1)$$

在截割过程中,截割头所受截割阻力一般为横向阻力^[16]。在截割头横摆过程中,作用在截割头的水平阻力 R_x 为

$$R_x = \sum_{i=1}^j (E_z \cos \phi_i + E_r \sin \phi_i) \quad (2)$$

$$E_z = P_k [k_t k_g k_y (0.25 + 0.018d\sigma) + 0.1S] \quad (3)$$

$$E_r = E_z (0.15 + 0.00056P_k) \frac{2.5}{0.4\sigma} \quad (4)$$

式中: j 为截割齿总数; E_z 为作用在截割齿上的切向力; ϕ_i 为截割头第 i 个截割齿的位置角; E_r 为作用在截割齿上的径向力; k_t , k_g , k_y 分别为截割齿配置系数、截割齿形状系数和截割角影响系数; d 为截距; σ 为平均截割厚度; S 为磨钝截割齿端面在截割平面上的投影面积。

对采集的多传感器数据进行分析,并依据 CNN 煤岩硬度动态感知模块判断传感器数据与煤岩硬度对应关系,以有效确定每组传感器数据对应载荷大小^[17-18]。样本数据与载荷关系见表 2。

表 2 样本数据与载荷关系

Table 2 Relationship between sample data and load

参数	不同煤岩种类的参数值		
	较软介质与煤	煤岩夹杂	硬岩
煤岩硬度	0~3	3~6	≥6
截割电动机电流/A	<68	68~121	≥121
回转油缸压力/MPa	<10	10~21	≥21
截割臂振动加速度/(m·s ⁻²)	<25.40	25.40~56.84	≥56.84
截割载荷/kN	≤20.29	20.29~54.7	≥54.7

3.3 截割臂摆速模糊 PID 控制模块

截割臂摆速模糊 PID 控制模块结构如图 10 所示,其中 r , J 为截割臂摆速模糊 PID 控制系统设定值,实际输出值, u 为实际状态与期望状态的偏差, t 为时间, e 和 n 分别为设定值与 CNN 煤岩硬度动态感知模块的输出值之间的误差和误差变化率, ΔK_p , ΔK_i , ΔK_d 分别为 PID 控制中的比例系数 K_p 、积分系数 K_i 、微分系数 K_d 的修正量。

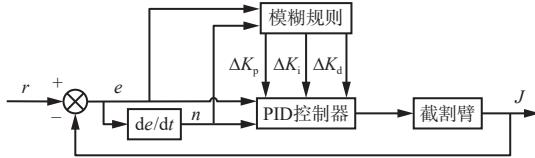


图 10 截割臂摆速模糊 PID 控制模块结构

Fig. 10 Structure of fuzzy PID control module for cutting arm swing speed

设定值与截割臂摆速模糊 PID 控制系统的输出值之间的 e 和 n 作为 PID 控制器的输入, 经过模糊规则模块得到 ΔK_p , ΔK_i , ΔK_d , 与 PID 控制器相结合, 控制截割臂摆速。

e , n 与 ΔK_p , ΔK_i , ΔK_d 需要设定基本论域范围和

模糊子集。 e 的论域为 $[-3, 3]$, n 的论域为 $[-3, 3]$, ΔK_p 的论域为 $[-0.3, 0.3]$, ΔK_i 的论域为 $[-0.05, 0.05]$, ΔK_d 的论域为 $[-2, 2]$ 。 e , n , ΔK_p , ΔK_i , ΔK_d 的模糊子集为{负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}, 即 {NB, NM, NS, IO, PS, PM, PB}。

确定模糊子集和论域后,需确定模糊变量的隶属度函数。隶属度函数包括三角形、梯形、高斯型、钟形等。 e 和 n 的隶属度函数选取三角形与高斯型相结合的方式, ΔK_p , ΔK_i , ΔK_d 的隶属度函数选取高斯型, 如图 11 所示。

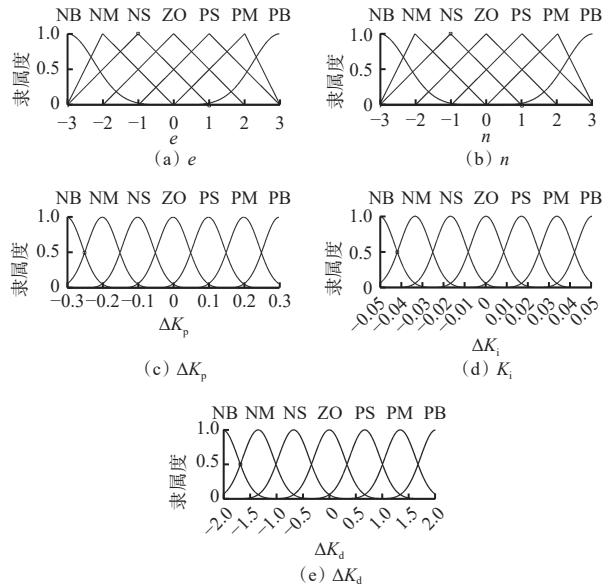


图 11 隶属度函数曲线

Fig. 11 Membership function curves

3.4 模糊控制规则

参考 PID 参数整定原则^[19],从系统的动态、静态、超调量和稳定性出发,来制定模糊控制规则。

1) 当 e 不断增大时,系统的响应速度增加,为弥补偏差的大小,应加大 K_p 且减小 K_d , 取 $K_i = 0$ 。

2) 当 e 和 n 均为中等时,降低 K_p ,为减少系统响应过冲,且不影响系统响应速度, K_i 和 K_d 应取中等大小。

3) 当 e 不断变小时, K_p 和 K_i 应适当取大,并取合适大小的 K_d 来增强系统的抗干扰能力,当 n 略小时, K_d 应适当取大,反之则取小。

模糊控制规则见表 3—表 5。

根据表 3、表 4、表 5 可得到 49 条模糊条件语句构成模糊控制规则,由此得到参数在模糊集合上的隶属度,再通过解模糊化,得到最终精确输出。截割臂摆速模糊 PID 控制模块输出如图 12 所示。

4 掘进机截割控制系统仿真分析

4.1 控制系统建模

在 Matlab 中建立截割臂摆速仿真控制系统。该

表 3 ΔK_p 模糊规则Table 3 ΔK_p fuzzy rule

e	n						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	PS	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 4 ΔK_i 模糊规则Table 4 ΔK_i fuzzy rule

e	n						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表 5 ΔK_d 模糊规则Table 5 ΔK_d fuzzy rule

e	n						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

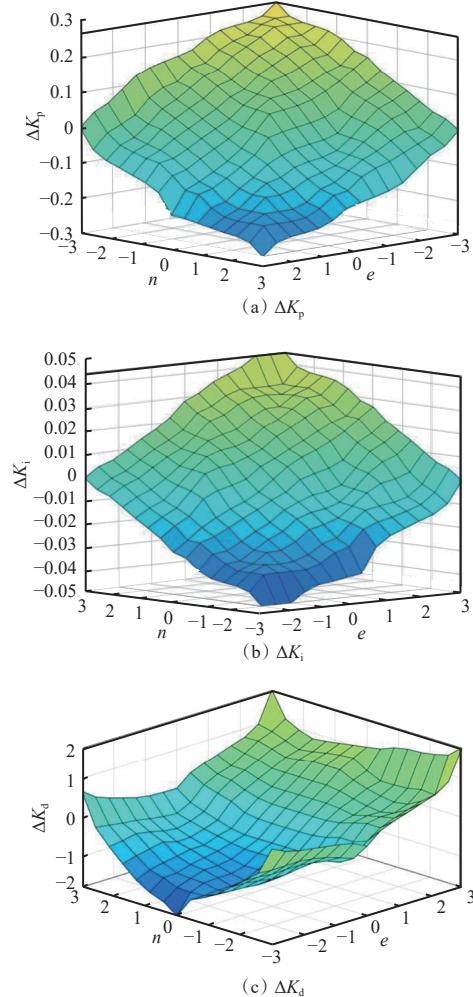


图 12 截割臂摆速模糊 PID 控制模块输出

Fig. 12 The output of fuzzy PID control module for cutting arm swing speed

系统由 CNN 煤岩硬度动态感知模块、自适应截割控制模块及比例放大器、电液比例方向阀、阀控液压缸、液压缸行程与摆角位移转换模块等组成, 如图 13 所示, b 为截割臂摆速。建立各部分传递函数, 编写控制模块程序并写入 Simulink 仿真系统中。

比例放大器对电液比例方向阀的控制信号进行放大, 输出电流信号对电液比例方向阀进行控制, 数学模型为

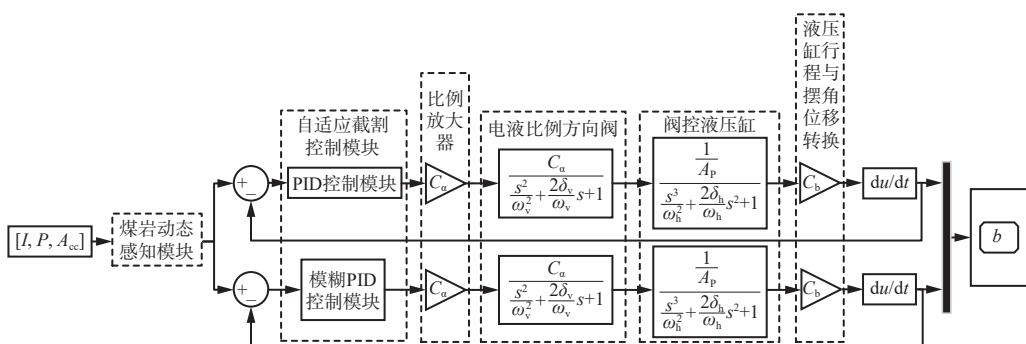


图 13 截割臂摆速仿真控制系统控制流程

Fig. 13 Control flow of the cutting arm swing speed simulation control system

$$C_a = \frac{I_s}{\rho} \quad (5)$$

式中: C_a 为比例放大增益; I_s 为比例放大器的输出电流信号; ρ 为比例放大器的输入信号。

电液比例方向阀可以对油液进行节流和流向控制, 可看作二阶震荡环节, 传递函数为

$$\frac{Q(s)}{I(s)} = \frac{C_a}{\frac{s^2}{\omega_v^2} + \frac{2\delta_v}{\omega_v}s + 1} \quad (6)$$

式中: s 为拉普拉斯算子; $Q(s)$ 为油缸中油液的流量; C_a 为电液比例方向阀流量增益; ω_v 为电液比例方向阀的固有频率; δ_v 为电液比例方向阀的阻尼比。

阀控液压缸环节传递函数为

$$\frac{L_c}{Q_L} = \frac{\frac{1}{A_p}}{\frac{s^3}{\omega_h^2} + \frac{2\delta_h}{\omega_h}s^2 + 1} \quad (7)$$

式中: L_c 为油缸活塞杆行程; Q_L 为输入油缸的流量; A_p 为无杆腔横截面积; ω_h 为油缸系统的固有频率; δ_h 为液压缸系统阻尼比。

油缸行程与摆角转换环节的数学模型为

$$C_b = \frac{B_s}{L_c} \quad (8)$$

式中: C_b 为油缸行程与摆角转换增益; B_s 为截割臂摆角位移。

4.2 实验仿真结果分析

基于 EBZ135 型悬臂式掘进机设定参数, 查阅相关文献^[20-21]及相应计算, 得到截割臂摆速仿真控制系统各参数(表 6)。

表 6 截割臂摆速仿真控制系统参数

Table 6 Parameters of cutting arm swing speed simulation control system

参数	值	参数	值
$C_a / (m^3 \cdot s^{-1} \cdot A^{-1})$	3.5×10^{-4}	δ_h	0.180
$\omega_v / (\text{rad} \cdot s^{-1})$	157.100	$\omega_h / (\text{rad} \cdot s^{-1})$	55.570
δ_v	0.600	$C_b / (^{\circ} \cdot m^{-1})$	80
A_p / m^2	0.025	$C_a / (A \cdot V^{-1})$	0.200

选取煤岩硬度较高与较低的 2 组不同工况数据信息, 分别输入截割臂摆速仿真控制系统进行仿真分析, 系统输出曲线如图 14 所示。在只有煤的工况下, 截割臂摆速期望值约为 $5.6^{\circ}/s$, PID 控制截割臂摆速最大值超过了期望值, 约为 $7.0^{\circ}/s$, 超调量为 25%, 模糊 PID 控制截割臂摆速最大值接近期望值, 约为 $5.6^{\circ}/s$, 基本无超调。这说明模糊 PID 能够更好地控制系统响应, 抑制过冲。PID 控制响应时间达到

期望值, 且稳定的时间大约为 0.4 s; 模糊 PID 控制响应时间达到期望值, 且稳定的时间约为 0.2 s。这说明模糊 PID 控制在系统动态性能方面较传统 PID 更加高效。在煤岩夹杂工况下, 截割臂摆速期望值为 $1.7^{\circ}/s$, PID 控制截割臂摆速最大值高于期望值, 约为 $2.0^{\circ}/s$, 超调量为 17.6%, 模糊 PID 控制截割臂摆速最大值依然接近期望值, 约为 $1.7^{\circ}/s$, 能够保持无超调状态, 显示出其在复杂工况下的优越性能。PID 控制响应时间达到期望值, 且稳定的时间约为 0.4 s; 模糊 PID 控制响应时间达到期望值, 且稳定的时间约为 0.2 s。这说明模糊 PID 控制能够在复杂工况下较快地达到稳定状态。

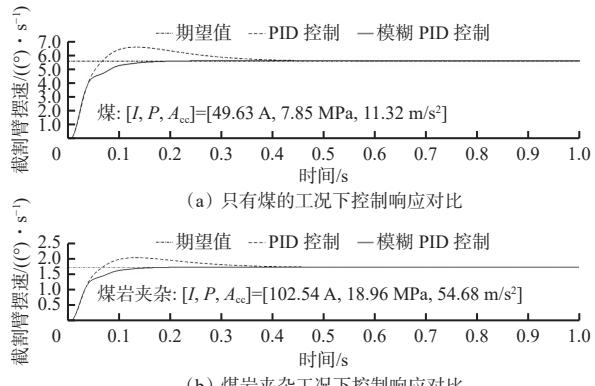


图 14 截割臂摆速控制仿真结果

Fig. 14 Simulation results of cutting arm swing speed control

由上述分析可知, 当输入信号表示掘进机处于截割煤的工况时, 截割臂会在短暂响应后稳定在较高摆速下进行煤岩截割; 当输入信号表示掘进机处于截割煤岩夹杂的工况时, 截割臂会根据载荷信号自适应调速, 载荷信号越小则截割臂的摆速越大, 载荷信号越大则截割臂的摆速越小。仿真结果表明, 掘进机截割臂在截割煤岩过程中, 当煤岩硬度发生变化时, 通过 CNN 煤岩硬度动态感知模块预测载荷信息可精确调控截割臂摆速, 实现自适应截割。

5 现场实验验证

在石家庄煤矿机械有限公司实验场地进行地面性实验。实验平台包括悬臂式掘进机、控制系统、计算机等, 如图 15 所示。悬臂式掘进机为实验平台主体, 型号为 EBZ135, 实时数据通过油缸位移传感器、油缸压力传感器、加速度传感器、电流传感器、惯性导航系统采集。位移传感器为拉线式, 传感器布置在截割部回转液压缸与升降液压缸缸筒一侧, 拉线布置在液压缸杠杆一侧, 当液压缸伸缩时, 高精度电位器产生电阻变化, 再转换为电压信号输出。加速度传感器布置在掘进机机身侧边靠近截割部位位置。电流传感器为掘进机机载传感器。



图 15 地面实验现场

Fig. 15 Field experiment at ground testing facility

将掘进机截割煤岩时不同工况下的传感器数据作为截割载荷信号模拟量,以模拟量为依据,作为控制系统判断煤岩强度的输入,进而模拟掘进机在实际工作过程中截割载荷的变化。

1) 将载荷信号模拟量输入控制系统中,对模拟量进行解算。载荷识别器识别载荷信息输出,控制器根据载荷信息控制电液系统调节截割臂摆速。

2) 通过驱动油缸对应的位移传感器得到位移数据,根据位移数据解算出油缸伸长量,并解算出截割臂摆角信息,进而得出截割臂摆动速度。

3) 间隔 15 s 换不同工况下的传感器数据输入,记录所识别载荷信息与截割臂摆速变化及截割载荷信号变化,结果如图 16 所示。

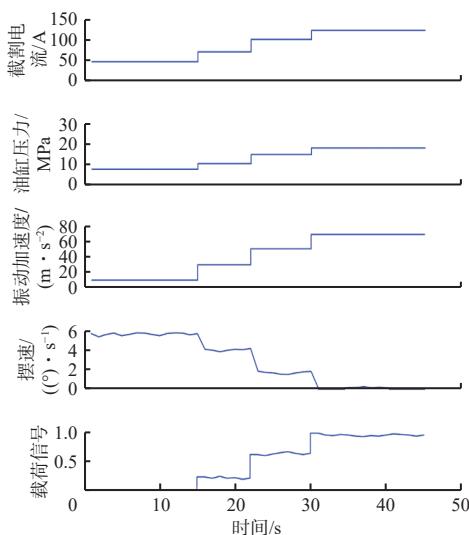


图 16 控制信号分析对比结果

Fig. 16 Comparison results of control signal analysis

由图 16 可看出,在 0~50 s 截割过程中,截割电流从初始的 50 A 逐步增加至 150 A,特别是在 15, 22, 30 s 左右,电流出现了较大幅度的上升,这是因为在不同硬度的煤岩之间进行截割时,掘进机的负载会增加,电动机需要提供更多的功率,导致电流突增,显示出设备在这些时间点的工作强度显著增加。油缸压力从初始的 9 MPa 逐渐增至 19 MPa,同样在 15, 22, 30 s 时显著增加,这是因为当掘进机遇到较硬的煤岩时,截割臂需要更大的力来保持运

动,从而使油缸压力升高,这表明载荷在逐渐增大。振动加速度也从初始值接近 10 m/s^2 逐渐增至约 70 m/s^2 , 主要的增幅出现在 15, 22, 30 s 后,因为当掘进机从较软的煤层切换到较硬的煤岩时,机械负载的突然变化会引发系统振动加剧,导致振动加速度突增。摆速在初始阶段为 6 °/s , 随后逐渐降低,在 40 s 时降至 0, 特别是在 15, 22, 30 s 时出现了明显的下降,这是因为当煤岩硬度增加时,摆速会下降,以保持恒定的截割功率。可看出摆速的下降与油缸压力的上升同时发生,反映了系统在负载增加时对设备摆速的调整。载荷信号从初始的 0 逐步上升至 1, 主要的上升也集中在 15, 22, 30 s。

因此,当掘进机截割较软介质与煤时,截割臂以高摆速工作;当截割复杂岩层时,摆速随截割信号的增大而降低,截割信号在 0~1 之间变动;当掘进机截割较硬岩层时,截割载荷信号接近 1, 截割臂的摆速降低至 0。

根据实验结果可看出,基于 CNN 与模糊 PID 控制的截割控制策略可根据不同的传感器信息得到截割载荷信号,进而自适应调节截割臂摆速,降低煤岩强度突变对截割作业质量的影响,提高掘进机工作效率与使用寿命。

6 结论

1) 提出 CNN 煤岩硬度动态感知模块,以准确判断煤岩硬度。

2) 设计了截割臂摆速模糊 PID 控制模块,实现了截割臂摆速的模糊控制,解决了截割臂摆速与煤岩硬度之间的自适应问题。

3) 搭建了截割臂摆速仿真控制系统,针对不同工况数据进行仿真分析,验证了截割控制策略在不同工况下的有效性及其反应迅速、稳态响应时间短、抗干扰能力强的特点。

4) 现场实验结果表明: CNN 与模糊 PID 控制相结合的截割控制策略可以有效识别载荷信息并对截割臂的摆速进行快速调节,有助于提高掘进机截割煤岩的智能化水平,满足煤岩截割控制需求。

参考文献(References):

- [1] 张超, 张旭辉, 张楷鑫, 等. 数字孪生驱动掘进机远程自动截割控制技术[J]. 工矿自动化, 2020, 46(9): 15-20, 32.
ZHANG Chao, ZHANG Xuhui, ZHANG Kaixin, et al. Digital twin driven remote automatic cutting control technology of roadheader[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(9): 15-20, 32.

- [2] 伍普照. 悬臂式掘进机智能截割控制系统研究与设计[J]. 中国煤炭, 2017, 43(8): 100-104.
WU Puzhao. Research and design of intelligent cutting control system for boom-type roadheader[J]. China Coal, 2017, 43(8): 100-104.
- [3] 刘辉, 靳帅. 不同工况下掘进机水平方向振动特性分析[J]. 机械设计与研究, 2020, 36(5): 198-202, 207.
LIU Hui, JIN Shuai. Analysis of horizontal vibration characteristics of roadheader under different working conditions[J]. Machine Design & Research, 2020, 36(5): 198-202, 207.
- [4] 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(增刊2): 1124-1134.
WANG Pengjiang, YANG Yang, WANG Dongjie, et al. Intelligent cutting control system and method of coal and gangue in robotic roadheader[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S2): 1124-1134.
- [5] 曹军. 矿用悬臂式纵轴掘进机断面截割技术研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2018.
CAO Jun. Research on section cutting technology of the cantilever vertical axis roadheader[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2018.
- [6] 焦可辉. 纵轴式掘进机断面成形技术研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2019.
JIAO Kehui. Research on section forming technology of longitudinal roadheader[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019.
- [7] 宗凯. 悬臂式掘进机截割过程位姿响应与截割臂摆速控制研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2019.
ZONG Kai. Research on pose response of roadheader during cutting process and swing speed control of the cutting arm[D]. Bei jing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2019.
- [8] 谢亚洲. 悬臂式掘进机智能控制系统研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2019.
XIE Yazhou. Research on intelligent control system of boom-type roadheader[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019.
- [9] 宋煜栋. 悬臂掘进机自动截割路径研究[J]. 江西煤炭科技, 2024(1): 57-60.
SONG Yudong. Study on automatic cutting path of cantilever roadheader[J]. Jiangxi Coal Science & Technology, 2024(1): 57-60.
- [10] 张磊, 周开平, 张宁波, 等. 悬臂式掘进机自动截割控制系统研究[J]. 金属矿山, 2022(6): 144-149.
ZHANG Lei, ZHOU Kaiping, ZHANG Ningbo, et al. Research on automatic cutting control system of cantilever roadheader[J]. Metal Mine, 2022(6) : 144-149.
- [11] 玉米提·尼加提, 向晓丹, 张官禹. 煤矿掘进机巷道断面自动截割成形控制方法研究[J]. 自动化应用, 2024, 65(16): 4-7.
YUMITI Nijati, XIANG Xiaodan, ZHANG Guanyu. Research on automatic cutting and forming control method for tunnel cross-section of coal mine tunneling machine[J]. Automation Application, 2024, 65(16): 4-7.
- [12] 黄国青. 悬臂式掘进机截割头自动截割成形控制仿真[J]. 煤矿机电, 2024, 45(3): 71-74.
HUANG Guoqing. Simulation of automatic cutting and forming control for the cutting head of the cantilever tunneling boring machine[J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2024, 45(3): 71-74.
- [13] 王东杰, 王鹏江, 李悦, 等. 掘进机截割臂自适应截割控制策略研究[J]. 中国机械工程, 2022, 33(20): 2492-2501.
WANG Dongjie, WANG Pengjiang, LI Yue, et al. Research on adaptive cutting control strategy of roadheader cutting arms[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(20): 2492-2501.
- [14] 周红旭, 孙海军, 张雷, 等. 基于一维卷积神经网络的掘进机截割部磁场辅助定位技术[J]. 河北科技大学学报, 2022, 43(3): 231-239.
ZHOU Hongxu, SUN Haijun, ZHANG Lei, et al. Magnetic field aided positioning technology of roadheader cutting part based on one-dimensional convolution neural network[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2022, 43(3) : 231-239.
- [15] 李四维. 基于不同煤岩性质的矿井掘进机截割载荷分析研究[J]. 机械管理开发, 2023, 38(3): 54-55, 61.
LI Siwei. Analysis of cut-off load of mine boring machine based on different coal rock properties[J]. Mechanical Management and Development, 2023, 38(3): 54-55, 61.
- [16] 柴博, 李建辉. 不同性质煤岩下掘进机截割载荷研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2017, 36(2): 170-175.
CHAI Bo, LI Jianhui. Study on roadheader cutting load at different properties of coal and rock[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2017, 36(2): 170-175.
- [17] 赵学雷. 基于多传感器信息融合的载荷及煤岩判定与识别技术研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2011.
ZHAO Xuelei. Research of identification of coal and rock and load torque observer of roadheader based on multi-sensor information fusion[D]. Beijing: China University of Mining and Technolog-Beijing, 2011.

(下转第 137 页)

- gait analysis[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(6):47-51.
- [11] 李秋生, 闫小军. 履带式煤矿救援机器人行走机构研究[J]. 煤炭技术, 2017, 36(10): 199-201.
LI Qiusheng, YAN Xiaojun. Design of crawler traveling mechanism of coal mine rescue robot[J]. Coal Technology, 2017, 36(10): 199-201.
- [12] 鲍周洋. 煤矿井下巷道全方位巡检轮式机器人设计与研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
BAO Zhouyang. Design and research of wheeled robot for omni-directional inspection of underground roadway in coal mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [13] 国家煤矿安全监察局. 煤矿安全规程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2022.
State Coal Mine Safety Supervision Bureau. Coal mine safety regulations[M]. Beijing: China Coal Industry Press, 2022.
- [14] 骆彬. 井下蓄电池无轨胶轮车无人驾驶系统设计研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
LUO Bin. Design and research on unmanned driving system of underground battery trackless rubber-tired vehicle[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [15] 毛浩, 张建安, 解云龙, 等. 张家峁煤矿变电所智能巡检机器人系统设计[J]. 煤矿机械, 2022, 43(4): 18-20.
MAO Hao, ZHANG Jian'an, XIE Yunlong, et al. Design of intelligent inspection robot system for Zhangjiaomo Coal Mine substation[J]. Coal Mine Machinery, 2022, 43(4): 18-20.
- [16] 鲍久圣, 鲍周洋, 阴妍, 等. 一种井下巷道与硐室全方位巡检轮式机器人及其控制方法:202110487271.4[P]. 2021-06-29.
BAO Jiusheng, BAO Zhouyang, YIN Yan, et al. A wheeled robot for all-round inspection of underground roadway and chamber and its control method: 202110487271.4[P]. 2021-06-29.
- [17] 周丹. 煤矿轮式移动机器人隔爆仓体与控制模式研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2012.
ZHOU Dan. Research on explosion-proof compartment and control mode of wheeled mobile robot in coal mine[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2012.
- [18] 郑学召, 闫兴, 郭军, 等. 煤矿救灾机器人防爆技术研究[J]. 工矿自动化, 2019, 45(9): 13-17.
ZHENG Xuezao, YAN Xing, GUO Jun, et al. Research on explosion-proof technology for coal mine rescue robot[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(9): 13-17.
- [19] 巩固, 朱华. 基于目标识别与避障的煤矿救援机器人自主行走[J]. 南京理工大学学报, 2022, 46(1): 32-39.
GONG Gu, ZHU Hua. Autonomous walking of coal mine rescue robot based on target recognition and obstacle avoidance[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2022, 46(1): 32-39.
- [20] 宗成国, 王海艳, 于晓. 履带式煤矿搜救机器人机构设计及越障性能分析[J]. 煤炭工程, 2019, 51(10): 123-126.
ZONG Chengguo, WANG Haiyan, YU Xiao. Structure design and obstacle-surmounting performance analysis about tracked robot of coal mine rescue[J]. Coal Engineering, 2019, 51(10): 123-126.
- [21] 于翠平. 基于德尔菲法的突发公共卫生危机多主体响应指标设计评价[J]. 中国医院, 2022, 26(4): 29-32.
YU Cuiping. Design and evaluation of multi-agent response indicators for sudden public health emergencies based on Delphi method[J]. Chinese Hospitals, 2022, 26(4): 29-32.
- [22] 洪志国, 李焱, 范植华, 等. 层次分析法中高阶平均随机一致性指标(RI)的计算[J]. 计算机工程与应用, 2002, 38(12): 45-47, 150.
HONG Zhiguo, LI Yan, FAN Zhihua, et al. Calculation on high-ranked RI of analytic hierarchy process[J]. Computer Engineering and Applications, 2002, 38(12): 45-47, 150.

(上接第 70 页)

- [18] 张美晨, 张凯, 赵丽娟, 等. 煤岩识别及采煤机自适应控制技术研究进展[J]. 山西焦煤科技, 2023, 47(12): 4-10.
ZHANG Meichen, ZHANG Kai, ZHAO Lijuan, et al. Research progress of coal and rock identification and adaptive control technology for shearer[J]. Shanxi Coking Coal Science & Technology, 2023, 47(12): 4-10.
- [19] 王鑫, 刘怡明, 王明明, 等. 基于改进模糊 PID 的轮式机器人速度控制器设计[J]. 河北科技大学学报, 2020, 41(1): 50-57.
WANG Xin, LIU Yiming, WANG Mingming, et al. Design of wheeled robot speed controller based on improved fuzzy PID[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2020, 41(1): 50-57.
- [20] 张介夫. 纵轴掘进机自动截割成形和恒功率截割控制技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
ZHANG Jiefu. Research on control system with automatic forming and constant power cutting of a longitudinal axis type roadheader[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [21] 何兴川. 悬臂式掘进机自动截割控制仿真研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022.
HE Xingchuan. Simulation study on the automatic cutting control of boom-type roadheader[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2022.