

文章编号: 1671-251X(2023)01-0080-10

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2022110066

## 悬臂式掘进机自主调速截割控制系统

张旭辉<sup>1,2</sup>, 石硕<sup>1</sup>, 杨红强<sup>1</sup>, 杨文娟<sup>1,2</sup>, 张超<sup>1</sup>, 王甜<sup>1</sup>

(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监测重点实验室, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 现有悬臂式掘进机截割控制采用较为单一的控制方法且截割头以定速完成巷道断面截割, 未综合考虑轨迹规划和自主调速控制, 在复杂地质条件下难以实现较高的巷道工程质量。针对上述问题, 提出了一种悬臂式掘进机自主调速截割控制系统。首先, 建立截割头和煤层的三维模型并导入 ABAQUS 软件进行有限元分析, 获取截割头受到的反作用力与截割臂摆动速度之间的关系, 进而得到截割臂摆动速度与截割头加速度之间的关系, 利用 k-means 聚类方法对加速度进行分层。然后, 采用层次包围盒算法建立截割头碰撞检测模型, 规划合适的矩形巷道断面截割轨迹, 经多次离散化生成离散截割轨迹规划点, 对截割臂进行运动学逆解计算, 获取截割头到达离散截割轨迹规划点所需的截割臂回转弧度、抬升弧度和伸长量, 并利用全局最优速度模型求解截割头运动至离散截割轨迹规划点的速度。最后, 利用加速度传感器采集截割臂振动信号, 根据加速度分层结果确定截割臂目标摆动速度, 并通过模糊 PID 控制使截割臂摆动速度及时准确地随截割头加速度的变化调整到目标摆动速度。实验结果表明: 采用模糊 PID 控制可实现较为快速、无超调量的截割臂摆动速度调节; 与定速截割控制相比, 采用自主调速截割控制的巷道断面成形质量高, 宽度规格偏差降低了 37%, 高度规格偏差降低了 17%, 满足 MT/T 5009—1994《煤矿井巷工程质量检验评定标准》规定的巷道成形质量要求。

**关键词:** 悬臂式掘进机; 智能截割控制; 截割臂; 自主调速; 自动截割控制; 巷道断面成形

中图分类号: TD632

文献标志码: A

Boom-type roadheader autonomous speed regulation cutting control system

ZHANG Xuhui<sup>1,2</sup>, SHI Shuo<sup>1</sup>, YANG Hongqiang<sup>1</sup>, YANG Wenjuan<sup>1,2</sup>, ZHANG Chao<sup>1</sup>, WANG Tian<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Mine Electromechanical Equipment Intelligent Monitoring, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The existing boom-type roadheader cutting control adopts a relatively simple control method and the cutting head completes the roadway section cutting at a constant speed. There's no comprehensive consideration of trajectory planning and autonomous speed control. Therefore, it is difficult to achieve high roadway engineering quality under complex geological conditions. In order to solve the above problems, a boom-type roadheader autonomous speed regulation cutting control system is proposed. Firstly, the three-dimensional model of the cutting head and coal seam are established and imported to ABAQUS software for finite element analysis. The relationship between the reaction force on the cutting head and the swing speed of the cutting arm is obtained. Then the relationship between the swing speed of the cutting arm and the acceleration of the cutting head is obtained. The acceleration is stratified by k-means clustering method. Secondly, the collision detection model of the cutting head is established by using the bounding volume hierarchy algorithm. The appropriate

收稿日期: 2022-11-16; 修回日期: 2023-01-10; 责任编辑: 盛男。

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(52104166, 52174150); 陕煤联合基金项目(2021JLM-03)。

作者简介: 张旭辉(1972—), 男, 陕西凤翔人, 教授, 博士, 研究方向为煤矿机电设备智能检测与控制, E-mail: zhangxh@xust.edu.cn。

通信作者: 石硕(1998—), 男, 河南许昌人, 硕士研究生, 研究方向为设备智能检测与控制, E-mail: ooooshishuo@163.com。

引用格式: 张旭辉, 石硕, 杨红强, 等. 悬臂式掘进机自主调速截割控制系统[J]. 工矿自动化, 2023, 49(1): 80-89.

ZHANG Xuhui, SHI Shuo, YANG Hongqiang, et al. Boom-type roadheader autonomous speed regulation cutting control system[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(1): 80-89.



扫码移动阅读

cutting trajectory of the rectangular roadway section is planned. The discrete cutting path planning points are generated through multiple discretizations. The inverse kinematics solution of the cutting arm is calculated to obtain the rotation radian, lifting radian and elongation of the cutting arm required for the cutting head to reach the discrete cutting path planning point. The global optimal speed model is used to solve the speed of the cutting head to move to the discrete cutting path planning point. Finally, the acceleration sensor is used to collect the vibration signal of the cutting arm. The target swing speed of the cutting arm is determined according to the acceleration layering result. Through fuzzy PID control, the swing speed of the cutting arm is adjusted to the target swing speed in time and accurately with the change of the cutting head acceleration. The experimental results show that the fuzzy PID control can achieve a relatively fast and non-overshoot swing speed adjustment of the cutting arm. Compared with the constant speed cutting control, the roadway section forming quality using the autonomous speed control cutting control is high. The width specification deviation is reduced by 37%, and the height specification deviation is reduced by 17%. The results meet the requirements of roadway forming quality specified in MT/T 5009-1994 *Standard for quality inspection and assessment of coal mine roadway engineering*.

**Key words:** boom-type roadheader; intelligent cutting control; cutting arm; autonomous speed regulation; autonomous cutting control; roadway section forming

## 0 引言

“十四五”煤炭科技的发展目标是实现井下重点岗位机器人作业,大型煤机装备的智能化和可靠性水平大幅提升,控制系统与软件实现自主化<sup>[1-2]</sup>。在掘进工作面,煤矿井下光照强弱不均、高粉尘等增加了司机对掘进机截割臂控制的难度<sup>[3-4]</sup>。为了提高巷道断面自动成形质量,需要深入研究悬臂式掘进机智能截割控制<sup>[5-6]</sup>,对于提高掘进工作面智能化水平具有重要意义<sup>[7]</sup>。

王苏或等<sup>[8]</sup>探究了掘进机断面成形轨迹优化方法,采用基于知识库精简的多目标粒子群算法求得最优轨迹,但产生的曲折轨迹在实际运动中截割臂较难跟踪。田劼等<sup>[9]</sup>采用混合杂草优化(Invasive Weed Optimization, IWO)-粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法对掘进机截割轨迹进行优化,但是没有考虑负载情况下的断面成形精度。王旭启等<sup>[10]</sup>提出了一种基于模糊算法的掘进机截割机构变频控制策略,利用截割电动机电流对掘进机截割参数进行调整,但仅对控制策略进行了验证。谢亚洲<sup>[11]</sup>提出了一种悬臂式掘进机智能控制系统,该系统以DSP+CPLD为核心,实现了掘进机自适应煤岩截割,但延时较大。谢苗等<sup>[12]</sup>提出了一种基于神经网络和PID的智能调速系统,以压力为反馈对掘进机摆动速度进行调节,但安装在掘进机截齿上的压力传感器易损坏,难以应用于环境复杂的掘进工作面。毛清华等<sup>[13]</sup>提出了一种基于PID控制的悬臂式掘进机截割头位置控制方法,但采用无调速的位置控制方法在长时间运行后控制精度较差。张旭辉等<sup>[14]</sup>提出了一种悬臂式掘进机视觉伺服截割控制系统,利用视觉测量系统反馈截割头位姿,实现巷道断

面截割成形,但未考虑截割过程中的自主调速。

上述研究采用较为单一的控制方法且截割头以定速实现巷道断面截割,未综合考虑轨迹规划和自主调速控制,在复杂地质条件下较难提升井巷工程质量。因此,本文提出了一种悬臂式掘进机自主调速截割控制系统。通过分析截割头受到的反作用力和截割臂摆动速度之间的关系,对截割头加速度进行分层以获取目标截割臂摆动速度;利用运动学逆解计算截割头到达离散截割轨迹规划点所需的控制量,并采用模糊PID控制驱动截割头变速截割煤壁,从而提高巷道断面成形质量。

## 1 总体方案

悬臂式掘进机自主调速截割控制系统由MV-EMV510后置工业相机、MV-EMV130前置工业相机、激光指向仪、工控机、加速度传感器和红外LED标靶组成,如图1所示。

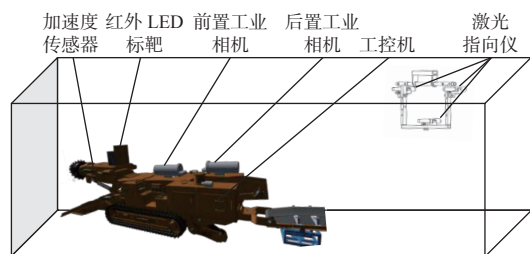


图1 悬臂式掘进机自主调速截割控制系统组成

Fig. 1 Composition of boom-type roadheader autonomous speed regulation cutting control system

悬臂式掘进机自主调速截割控制系统总体方案如图2所示。该系统主要包括破岩仿真模块、截割头定位模块、截割头轨迹规划模块、截割头运动控制模块和掘进机液压系统模块。通过截割头定位模

块获取掘进机截割头位姿信息,根据破岩仿真模块得到的加速度分层结果,结合截割头轨迹规划模块计算得到的截割头到达离散截割轨迹规划点所需控制量,截割头运动控制模块生成运动指令并下发至掘进机液压系统进行动作执行,最终实现掘进机自主调速截割。

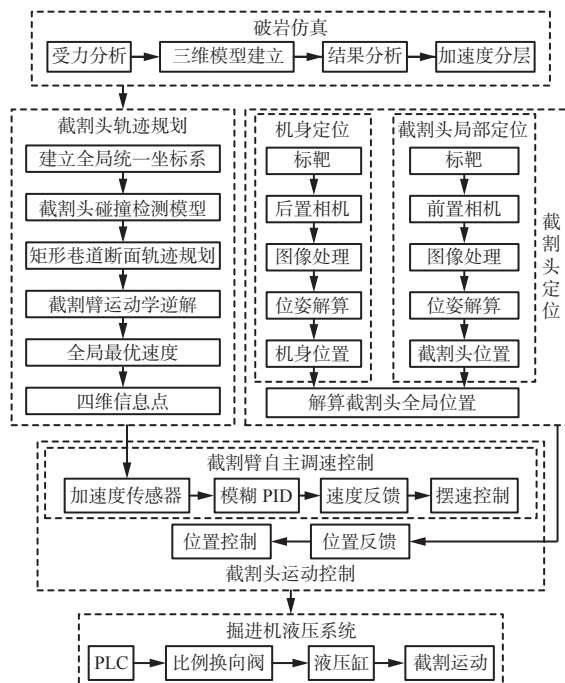


图2 悬臂式掘进机自主调速截割控制系统总体方案

Fig. 2 Overall scheme of boom-type roadheader autonomous speed regulation cutting control system

(1) 破岩仿真模块。利用 SolidWorks 软件建立截割头和煤壁的三维模型,将其导入 ABAQUS 软件后进行煤岩有限元分析,获得不同截割臂摆动速度下截割头受到的反作用力,利用 k-means 聚类方法进行分析后得到加速度分层结果。

(2) 截割头定位模块。首先,后置工业相机采集 3 个激光指向仪发出的 3 条平行激光线,基于颜色分量的峰值聚类约束对激光束标靶图像进行分割,利用 Hessian 矩阵求解中心线像素的法线方向,最终基于泰勒展开进行特征提取和定位,构建基于三点三线特征的掘进机机身位姿测量模型<sup>[15]</sup>,获得掘进机机身位姿信息。然后,通过前置相机采集红外 LED 标靶图像,利用高斯曲面拟合算法对特征点进行中心定位,使用 P4P 方法对特征点的空间坐标进行求解,利用对偶四元数最优位姿计算模型完成截割头位姿检测。最后,在已知掘进机机身位姿的基础上将截割头局部位姿转换为全局位姿,得到巷道坐标系下的截割头位姿。

(3) 截割头轨迹规划模块。利用截割头碰撞检测模型提前规划合适的截割轨迹,多次离散化形成

离散截割轨迹规划点。利用全局最优速度模型获取截割头到达离散截割轨迹规划点的速度,通过运动学逆解计算截割头到达离散截割轨迹规划点所需的截割臂回转弧度、抬升弧度和伸长量。

(4) 截割头运动控制模块。包括截割头位置控制和截割臂自主调速控制:截割头位置控制利用视觉测量结果和目标之间的差值驱动截割头运动;截割臂自主调速控制根据加速度分层结果寻找对应的目标速度,使用模糊 PID 控制对截割臂摆动速度进行调节。

## 2 破岩仿真

掘进机截割煤壁过程中,由于截割头和煤壁之间发生不稳定的相互作用,会发生再生颤振,可通过改变截割臂摆动速度降低截割过程中产生的振动。通过模拟仿真获取截割臂不同摆动速度下截割头受到的反作用力,对截割头加速度划分等级,从而为自主调速截割控制提供数据反馈。

(1) 基本假设。本文主要研究截割煤壁过程中截割头受到的反作用力与截割臂摆动速度之间的关系,为了更好地分析截割头掘进过程,作如下假设:① 将截割头视为整个刚体,不考虑变形和磨损。② 将煤层视为连续、均匀的介质。③ 破碎后的煤块可以快速离开截割头。

(2) 材料准则及失效判据。在非线性仿真软件中,Drucker-Prager 模型更适用于砂土、煤体等粒状材料,黏土类型的材料一般用修正剑桥模型。

煤层失效的塑性应变判据为

$$\varepsilon^p \leq \varepsilon_t^{p_i} \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon^p$  为岩石的等效塑性应变;  $\varepsilon_t^{p_i}$  为岩石完全失效时的等效塑性应变。

岩石在弹性阶段的应力与应变之比可认为是线性关系,本构方程可表达为

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_z + \sigma_x)] \\ \varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] \\ \gamma_{yz} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{yz} \\ \gamma_{zx} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{zx} \\ \gamma_{xy} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{xy} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  为线应变分量;  $E$  为弹性模量;  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  为线应力分量;  $\mu$  为泊松比;  $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$  为角应变分量;  $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$  为角应力分量。



截割头受到的反作用力与截割臂摆动速度之间的关系为

$$\sigma_{\tau} = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{ma}{\Delta S} = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{F}{\Delta S} = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{mv}{\Delta S \Delta t} \quad (3)$$

式中:  $\sigma_{\tau}$  为截割头受到的应力;  $m$  为掘进机质量;  $a$  为截割头瞬时加速度;  $\Delta S$  为单位面积;  $F$  为截割头受到的反作用力;  $v$  为截割臂摆动速度;  $\Delta t$  为单位时间。

### 3 截割头轨迹规划

#### 3.1 截割头碰撞检测模型

截割头截割煤壁碰撞检测可以简化为2个对象两两相交测试,为降低计算量,可以采用层次包围盒算法。该算法原理是用包围盒将物体封装起来,将物体之间的碰撞检测转换为包围盒之间的相交检测,若包围盒相交,则物体间可能发生碰撞。球形包围盒结构较为简单,优点是不受旋转变化的影响,适用于运动环境中的检测。建立球形包围盒实际就是计算球心坐标和半径,球心坐标即球形表面上各点坐标的均值,半径即球心与球形表面之间的距离。球形包围盒空间状态如图3所示,对于2个球形包围盒( $c_1, c_2$  分别为2个球形包围盒的圆心坐标,  $r_1, r_2$  分别为2个球形包围盒的半径),若  $|c_1 - c_2| \leq r_1 + r_2$ ,则可判断2个球形包围盒相交。

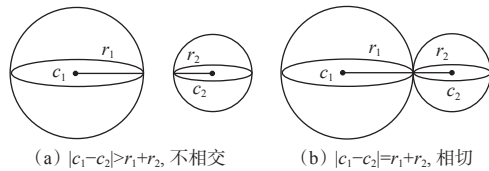


图3 球形包围盒空间状态

Fig. 3 Space state of spherical bounding box

采用球形包围盒对截割头进行预处理,为进一步提高包围盒的紧密性,本文使用双层包围盒的碰撞检测算法对移动中的截割头进行碰撞检测。

使用层次包围盒树<sup>[16]</sup>(Bounding Volume Hierarchy Based on Tree, BVT)进行分析,在有限元分析中,三维物体一般被划分为六边形和三角形。假定有一个由若干几何对象组成的集合  $R$ ,集合  $R$  被认为是多边形模型的边界即截割头的边界。设  $BVT(R)$  是集合  $R$  的边界体积层次结构,每一个节点均属于该集合。 $BVT(R)$  满足以下条件:  $BVT(R)$  内部每个节点都有2个或多个子节点;  $BVT(R)$  内部任何一个节点下最大子节点数目的度称为树的度,记为  $\delta$ ; 在集合  $R$  中,叶节点数目  $\lambda$  和单个子集合相关联;  $BVT(R)$  的节点总数最多为  $2\lambda - 1$ ,完整树的层次为  $\log_{\delta} \lambda$ 。离散取向多面体<sup>[17]</sup>(k-Discrete Orientation Polytopes, k-DOPs)包围盒利用  $\psi$  个平面形成的凸多

面体确定边界体积,多面体的平面由半空间确定,半空间的外向法线由固定的  $\psi$  个方向确定。截割头包围盒模型如图4所示。

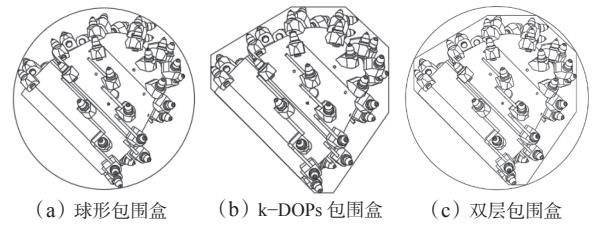


图4 截割头包围盒模型

Fig. 4 Cutting head bounding box model

#### 3.2 矩形巷道断面轨迹规划

为了实现断面截割控制,针对常见的矩形巷道断面,采用改进S形截割路线,对关键路线多次离散化,形成离散截割轨迹规划点,并以离散截割轨迹规划点为目标,控制截割头运动。首先设定巷道的宽度和高度并用实线表示,截割过程中规划的理论边界用虚线表示;然后对掘进机截割头使用双层包围盒,第1层内部包围盒采用18-DOPs包围盒,第2层外层包围盒为球形包围盒;最后依照截割路线从断面底部钻进截割,按照离散截割轨迹规划点依次截割,并进行刷帮以降低两侧边界粗糙度,完成一次断面截割。矩形巷道断面轨迹规划如图5所示。

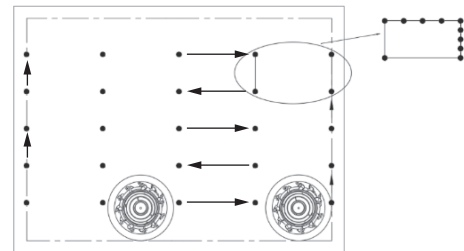


图5 矩形巷道断面轨迹规划

Fig. 5 Rectangular roadway section trajectory planning

将截割的煤壁定为集合  $A$ ,截割头运动过程中经过的坐标点定义为集合  $B$ 。集合  $A$  中的任意一个煤块都采用球形包围盒模型进行包围,集合  $B$  中截割头由于采用双层包围盒,位于外层的球形包围盒首先和集合  $A$  产生交集,由截割头碰撞检测模型进行判断,对截割臂摆动速度进行调整,之后内层18-DOPs包围盒和集合  $A$  产生交集,判断是否到达离散截割轨迹规划点。整个截割流程如下:

步骤1:初始化。生成初始位置,设置初始速度。

步骤2:更新解集。输入目标巷道宽和高、掘进机参数和煤层信息。计算最优值,生成离散截割轨迹规划点的四维数据。

步骤3:选取局部最优。在截割过程中,若振动幅值超过阈值,则进行速度判定,进而局部调整速度。

步骤 4: 更新速度和位置。基于离散截割轨迹规划点更新下一时刻的位置和速度。

步骤 5: 判断是否达到终止条件。

### 3.3 截割臂运动学逆解

截割头定位的具体求解需要建立坐标系, 如图 6 所示。\$O\_m X\_m Y\_m Z\_m\$ 为断面坐标系, 以断面底线的中点为坐标系原点 \$O\_m\$, \$X\_m\$ 轴沿断面底部指向巷道右侧, \$Z\_m\$ 轴沿断面中线竖直向上。\$O\_c X\_c Y\_c Z\_c\$ 为相机坐标系, 以相机光心为坐标系原点 \$O\_c\$, 光轴为 \$Z\_c\$ 轴。\$O\_b X\_b Y\_b Z\_b\$ 为标靶坐标系, 以标靶中心为坐标系原点 \$O\_b\$, \$Y\_b\$ 轴方向向下过标靶右下角特征点, \$Z\_b\$ 轴方向与悬臂轴线方向重合。掘进机机身坐标系 \$O\_0 X\_0 Y\_0 Z\_0\$ 与回转台坐标系 \$O\_1 X\_1 Y\_1 Z\_1\$ 重合, 以回转台中心为坐标系原点 \$O\_0(O\_1)\$, \$X\_0(X\_1)\$ 轴指向掘进机前进方向, \$Y\_0(Y\_1)\$ 轴指向掘进机左侧。\$O\_2 X\_2 Y\_2 Z\_2\$ 为截割臂升降关节坐标系, \$Z\_2\$ 轴沿升降轴指向右侧, \$X\_2\$ 轴竖直向上。\$O\_3 X\_3 Y\_3 Z\_3\$ 为截割臂伸缩关节坐标系, \$Z\_3\$ 轴与 \$Y\_2\$ 轴重合。\$O\_4 X\_4 Y\_4 Z\_4\$ 为截割头坐标系, 以截割头末端中心为坐标系原点 \$O\_4\$, \$Z\_4\$ 轴与 \$Z\_3\$ 轴重合。\$O\_5 X\_5 Y\_5 Z\_5\$ 为巷道坐标系, 以巷道起点为坐标系原点 \$O\_5\$, 面向掘进方向垂直中线向右为 \$X\_5\$ 轴, 以底板垂直向上为 \$Z\_5\$ 轴。

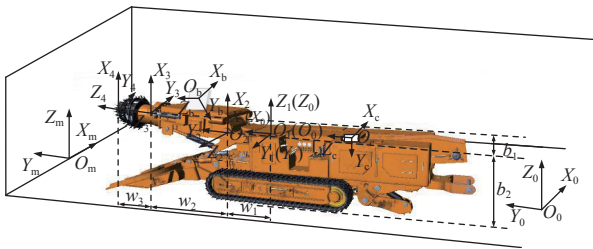


图 6 坐标系建立

Fig. 6 Establishment of coordinate system

通过对离散截割轨迹规划点求逆解, 可得截割头到达离散截割轨迹规划点所需的回转弧度、抬升弧度和伸长量。按照机器人运动学分析方法对截割臂进行运动学求解计算, 可得截割头中心在掘进机身坐标系中的位置模型:

$$\begin{cases} \theta_1 = -\arctan \frac{o_x}{o_y} \\ \theta_2 = -\arctan \frac{\xi_z}{\kappa_z} \\ d = \frac{\phi_x + w_1 j_y - b_1 \xi_x}{\kappa_x} - (w_2 + w_3) \\ d = \frac{\phi_y + w_1 j_x - b_2 \xi_y}{\kappa_y} - (w_2 + w_3) \\ d = \frac{\phi_z - b_2 \xi_z - b_1}{\kappa_z} - (w_2 + w_3) \end{cases} \quad (4)$$

式中: \$\theta\_1\$ 为截割臂回转角度; \$o\_x, o\_y\$ 为截割头水平移动距离在断面坐标系的分量; \$\theta\_2\$ 为截割臂抬升角度;

\$\xi\_x, \xi\_y, \xi\_z\$ 为截割头竖直移动距离在断面坐标系的分量; \$\kappa\_x, \kappa\_y, \kappa\_z\$ 为截割头伸缩距离在断面坐标系的分量; \$d\$ 为截割头伸长量; \$\phi\_x, \phi\_y, \phi\_z\$ 为截割头中心点在断面坐标系的分量; \$w\_1\$ 为机身回转台中心到截割臂靠近机身关节处的距离; \$w\_2\$ 为截割臂靠近机身关节处到截割臂伸缩油缸靠近机身端的距离; \$w\_3\$ 为截割臂伸缩油缸靠近机身端到截割头前端的距离; \$b\_1\$ 为截割头中心到机身回转台中心的距离; \$b\_2\$ 为回转台中心到地面之间的距离。

### 3.4 全局最优速度模型

为了有效控制悬臂式掘进机截割臂的摆动速度, 需要建立全局最优速度模型。对该模型作如下假定: ① 掘进机截割的煤壁均为软岩。② 目标断面形状为矩形。

全局最优速度模型分为决策单元、目标和约束条件。

#### 3.4.1 决策单元

对目标巷道断面进行网格划分, 截割头到达离散截割轨迹规划点的理论速度构成集合, 将该集合作为决策单元 \$G\_\alpha (\alpha = 1, 2, \dots, N, N\$ 为离散截割轨迹规划点的数量)。

#### 3.4.2 目标

(1) 效率。掘进机截割整个巷道断面的耗时为掘进机截割头水平方向运动耗时与截割头垂直方向运动耗时之和。定义每个离散截割轨迹规划点之间的距离为 \$u\$, 则截割整个巷道断面所需时间为

$$t = \int_0^N \frac{1}{G_\alpha} du \quad (5)$$

效率目标函数为

$$f(t) = \int_0^N \frac{1}{G_\alpha} du \quad (6)$$

(2) 反作用力。作用于质点的力可以分为彻体力和面力 2 类。设在介质内部有某一点, 并在其周围有体元 \$\Delta\eta\$, 作用于该体元的总彻体力为 \$P\$。该点的单位体积彻体力为

$$\Delta P = \lim_{\Delta\eta \rightarrow 0} \frac{P}{\Delta\eta} \quad (7)$$

截割头受到的反作用力为

$$F = p_k [k_t k_v k_g (0.25 + 0.018 s_i h_i) + 0.1 D_d] \quad (8)$$

式中: \$p\_k\$ 为被截割煤岩的接触强度; \$k\_t\$ 为镐形截齿齿形影响系数, 对于旋转截割, 取 1.5; \$k\_v\$ 为镐形截齿几何形状影响系数, 取 0.95; \$k\_g\$ 为截齿的截角影响系数,

取 0.65;  $s_i$  为第  $i$  个截齿的截线间距;  $h_i$  为第  $i$  个截齿处于任意位置时的切削厚度;  $D_d$  为截齿的后刃面在牵引力方向的投影面积。

$$h_i = \frac{1\,000v}{nj} \sin \varphi_i \tag{9}$$

式中:  $n$  为截割头转速;  $j$  为同一截线上的截齿数;  $\varphi_i$  为第  $i$  个截齿的位置角。

反作用力目标函数为

$$f(F) = p_k \left[ k_1 k_v k_g \left( 0.25 + 18 s_i \frac{v}{nj} \sin \varphi_i \right) + 0.1 D_d \right] \tag{10}$$

当截割臂摆动速度最大时,效率目标函数值最优;当截割臂摆动速度最小时,反作用力目标函数值最优。

3.4.3 约束条件

对截割臂摆动速度进行优化时,需要对目标函数添加约束条件:截割头有效直径应不大于截割头带截齿时的最大直径;截割臂摆动速度应小于由于较大振动导致截割头位姿测量结果产生较大误差对应的摆动速度;掘进机每次循环进刀距离小于掘进机截割臂最大伸长量;煤岩坚固性系数不大于 4;巷道宽度应小于视觉测量截割头摆动距离最大值。

4 截割臂自主调速控制

PID 控制算法具有稳定性好、结构简单等特点,在工业控制领域得到广泛应用。PID 控制算法根据误差的比例、积分和微分计算出系统所需控制量,得到最优的控制参数:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \tag{11}$$

表 1 模糊控制规则  
Table 1 Fuzzy control rules

$\Delta e$	$e$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NS/NB	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/PS
NM	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/ZO/ZO
NS	PM/NB/ZO	PM/NM/NS	PM/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZO
ZO	PM/NM/ZO	PM/NM/NS	PS/NS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/ZO
PS	PS/NM/ZO	PS/NS/ZO	PS/ZO/ZO	ZO/PS/ZO	NS/PS/ZO	NM/PM/ZO	NM/PB/ZO
PM	PS/ZO/PB	ZO/ZO/NS	NS/PS/PS	NM/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PB/PS	NB/PB/PB
PB	ZO/ZO/PB	ZO/ZO/PM	NM/PS/PM	NM/PM/PM	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PS

将输出量的量化值转换为模糊 PID 控制算法的实际参数,根据速度偏差调节截割臂摆动速度,实现截割臂摆动速度的动态调整。

式中:  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  分别为比例、积分、微分系数;  $e(t)$  为误差信息,  $t$  为时间。

面对掘进机截割煤壁的复杂运行环境, PID 控制算法抗干扰能力较差<sup>[18]</sup>,需要调节参数,因此采用模糊 PID 控制算法。以截割臂当前摆动速度与预设速度的偏差  $e$  和本次速度偏差与上次速度偏差的变化量  $\Delta e$  作为输入量,以比例、积分和微分系数的增量  $\Delta K_p$ ,  $\Delta K_i$ ,  $\Delta K_d$  作为输出量,通过动态改变 PID 控制参数,实现不同工况下截割臂摆动速度调节。模糊 PID 控制原理如图 7 所示。

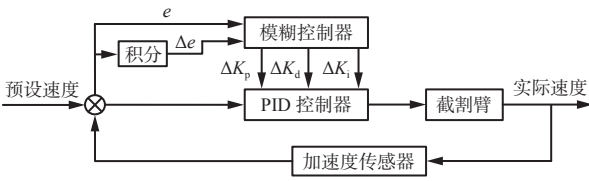


图 7 模糊 PID 控制原理  
Fig. 7 Fuzzy PID control principle

通过不同速度要求下输入量的量化因子,将精确值转换为模糊值。

$$J(e) = \frac{6e}{v_{\max} - v_{\min}} \tag{12}$$

式中:  $J(e)$  为速度偏差模糊值;  $v_{\max}$  为最大设定速度;  $v_{\min}$  为最小设定速度。

$$J(\Delta e) = \frac{6\Delta e}{2(v_{\max} - v_{\min})} \tag{13}$$

式中  $J(\Delta e)$  为速度偏差变化量模糊值。

根据建立的模糊控制规则(表 1)和输入量的模糊结果,推理出输出量对应的模糊语言子集。

$$u(t) = (K_p + \Delta K_p)e(t) + (K_i + \Delta K_i) \int_0^t e(t) dt + (K_d + \Delta K_d) \frac{de(t)}{dt} \tag{14}$$



## 5 仿真及实验验证

### 5.1 加速度分层

在 SolidWorks 软件中建立尺寸(长×宽×高)为 4 000 mm×2 000 mm×3 000 mm 的煤层和截割头三维模型,将其转为 SAT 格式文件后导入 ABAQUS 中,并进行网格划分,如图 8 所示。

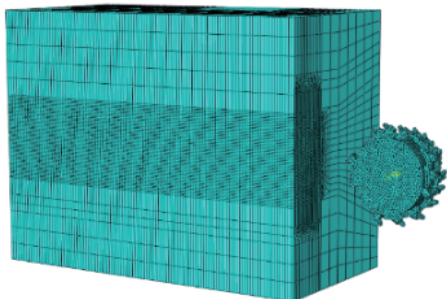


图 8 煤层和截割头的三维模型网格

Fig. 8 Three-dimensional model grid of coal seam and cutting head

截割头材料为钢,密度为 $7.8 \times 10^{-9} \text{ kg/m}^3$ ,弹性模量为 $2.1 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,泊松比为 0.3。煤层具体参数见表 2。

表 2 煤层参数

Table 2 Coal seam parameters

密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	内摩擦角/ ( $^\circ$ )	流变 应力比	膨胀角/ ( $^\circ$ )	屈服应力/ Pa	弹性模量/ Pa	泊松比
$1.4 \times 10^{-9}$	47.73	1	35	26.7	2 375	0.26

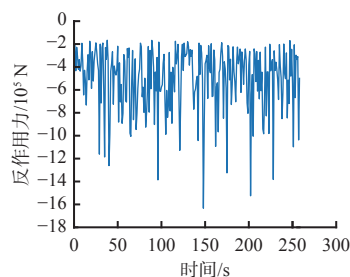
将截割臂摆动速度分别设置为 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30 m/s, 仿真不同截割臂摆动速度下截割头受到的反作用力,结果如图 9 所示。可看出掘进机截割头在截割煤壁过程中会受到变化的反作用力,导致截割头产生较大振动。

对不同截割臂摆动速度下截割头受到的平均反作用力数据进行滤波处理后,利用 k-means 算法对数据进行聚类分析,相同摆动速度下抽取 5 组数据,将数据按照摆动速度从大到小的顺序依次编号,编号和速度对应关系见表 3。

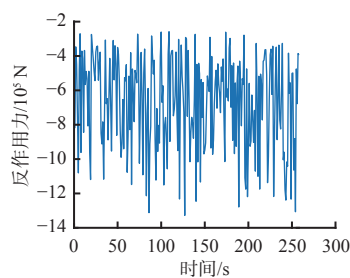
设置 k-means 聚类的簇数为 5, 计算得到 5 个聚类中心,如图 10 所示。当加速度为  $0 \sim 1.3 \text{ m/s}^2$  时,截割臂摆动速度为 0.30 m/s; 当加速度为  $1.3 \sim 2.0 \text{ m/s}^2$  时,截割臂摆动速度为 0.25 m/s; 当加速度为  $2.0 \sim 2.8 \text{ m/s}^2$  时,截割臂摆动速度为 0.20 m/s; 当加速度为  $2.8 \sim 3.5 \text{ m/s}^2$  时,截割臂摆动速度为 0.15 m/s; 当加速度为  $3.5 \sim 4.5 \text{ m/s}^2$  时,截割臂摆动速度为 0.10 m/s。

### 5.2 模糊 PID 控制

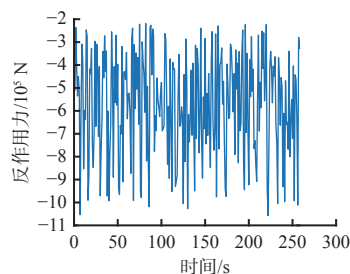
为验证截割臂在产生较大振动时能够及时调整摆动速度,对模糊 PID 控制方法进行仿真,观察截割臂摆动速度变化情况。通过 Matlab 中 Simulink 模块



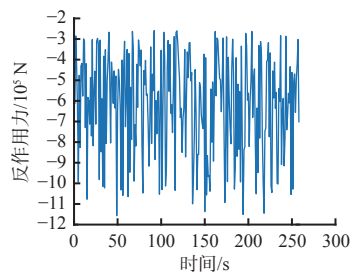
(a) 摆动速度为 0.10 m/s



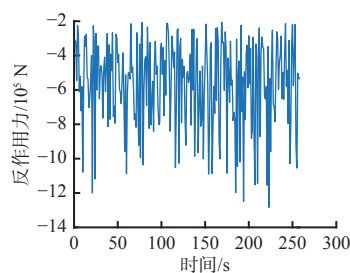
(b) 摆动速度为 0.15 m/s



(c) 摆动速度为 0.20 m/s



(d) 摆动速度为 0.25 m/s



(e) 摆动速度为 0.30 m/s

图 9 不同截割臂摆动速度下截割头受到的反作用力

Fig. 9 Reaction force of cutting head under different swing speed of cutting arm

构建掘进机截割臂仿真模型,分别采用 PID 控制和模糊 PID 控制对模型进行仿真(幅值从 0 到 1 变化模拟速度信号的变化),结果如图 11 所示。可看出采用模糊 PID 控制可使模型在波动较小、无超调、调节时间较短情况下达到稳定状态,在控制精度较

表 3 编号和速度对应关系

Table 3 Mapping between number and speed

编号	速度/(m·s <sup>-1</sup> )
1—5	0.30
6—10	0.25
11—15	0.20
16—20	0.15
21—25	0.10

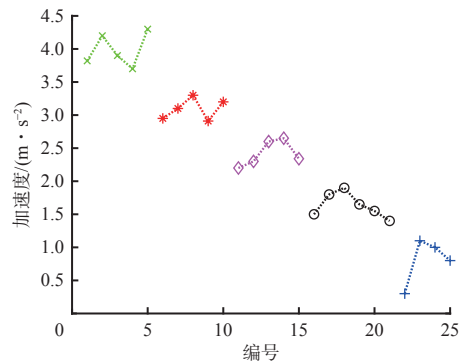


图 10 聚类结果

Fig. 10 Clustering results

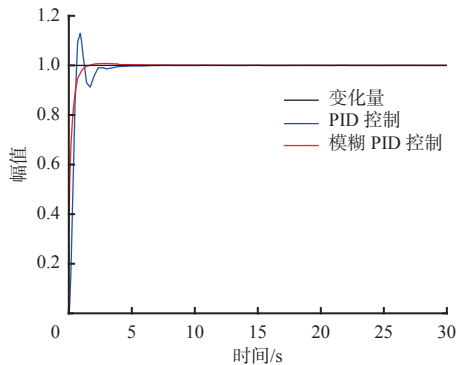


图 11 PID 控制和模糊 PID 控制效果对比

Fig. 11 Effect comparison of PID control and fuzzy PID control

高、响应速度较快的情况下保证掘进机截割臂摆动速度达到目标值。

5.3 掘进机自主调速截割控制

为验证掘进机自主调速截割控制的可行性，构建悬臂式掘进机虚拟调速截割控制实验平台，如图 12 所示，该平台由本地控制模块、远程虚拟模块和振动模块组成。

振动模块中的加速度传感器采集的振动信号经解析后传输至本地控制模块。本地控制模块中防爆计算机上安装基于 VS+QT 开发的自主调速截割控制系统，在程序的管理员界面上输入目标巷道宽度、高度和煤层地质条件等初始参数，保存后完成程序的初始化操作。本地控制模块接收到振动模块发来的信号后，经过计算输出控制指令并通过 MQTT 通

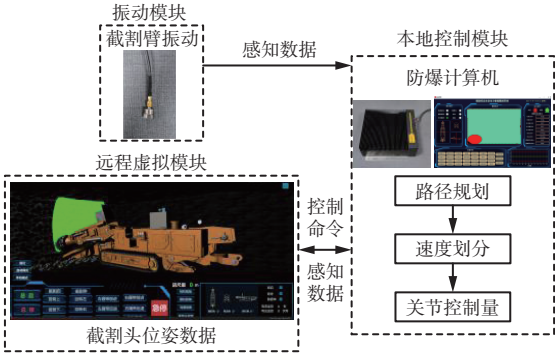


图 12 悬臂式掘进机虚拟调速截割控制实验平台

Fig. 12 Experimental platform of boom-type roadheader virtual speed regulation cutting control

信协议传递给远程虚拟模块。远程虚拟模块基于 Unity3D 平台开发，接收到本地控制模块发送的数据后，驱动虚拟掘进机模型截割臂按照控制指令移动，同时虚拟掘进机模型反馈截割头实时位姿数据到本地控制模块，不断循环以上步骤，最终实现掘进机自主调速截割控制。

参考实际工况，设置巷道宽度为 3 000 mm，高度为 3 000 mm，每次截割深度为 400 mm，岩石坚固性系数为 2， $w_1=776$  mm， $w_2=2\,441$  mm， $w_3=2\,305$  mm， $b_1=297$  mm， $b_2=1\,613$  mm。通过运动学逆解计算可获得截割头到达离散截割轨迹规划点所需的回转弧度、抬升弧度和伸长量等信息，结合获取的速度信息，得到离散截割轨迹规划点的四维数据，见表 4。

表 4 离散截割轨迹规划点的四维数据

Table 4 Four-dimensional data of discrete cutting trajectory planning points

回转弧度/rad	抬升弧度/rad	伸长量/mm	速度/(m·s <sup>-1</sup> )
0.220	-1.289	656.4	0.3
0	-1.282	535.7	0.3
-0.220	-1.289	656.4	0.3
-0.220	-1.397	542.7	0.3
0	-1.393	418.9	0.3
0.220	-1.397	542.7	0.3
0.220	-1.510	483.8	0.3
0	-1.508	358.4	0.3
-0.220	-1.510	483.8	0.3
-0.220	-1.624	482.0	0.3
0	-1.626	356.5	0.3
0.220	-1.624	482.0	0.3
0.220	-1.737	537.3	0.3
0	-1.742	413.4	0.3
-0.220	-1.737	537.3	0.3



振动模块采集到的截割头加速度和本地控制模块输出的截割臂摆动速度如图 13 所示。可看出截割头开始截割时,加速度发生突变,截割臂摆动速度可以及时准确地随着截割头加速度的变化调整到目标摆动速度。

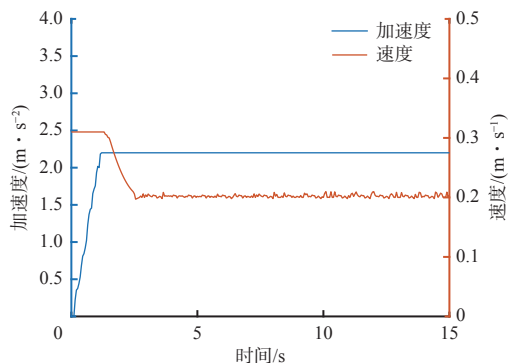


图 13 模拟截割结果

Fig. 13 Simulated cutting results

设置 3 种不同截面面积的巷道: 1 号巷道宽度为 4 000 mm, 高度为 3 000 mm; 2 号巷道宽度为 4 000 mm, 高度为 2 500 mm; 3 号巷道宽度为 3 000 mm, 高度为 2 500 mm。采用定速截割控制和自主调速截割控制分别对 3 种巷道进行截割, 实验结果见表 5 (为模拟真实情况下从控制指令下发到截割头运动之间的通信延迟, 将远程虚拟模块获取当前截割头信息的脚本刷新频率设置为 400 ms)。可看出相对于定速截割控制, 使用自主调速截割控制完成的巷道断面宽度规格偏差降低了 37%, 高度规格偏差降低了 17%。根据煤炭行业标准 MT/T 5009—1994《煤矿井巷工程质量检验评定标准》的规定, 掘进过程中巷道宽度规格偏差是无中线测全宽距离在  $-50 \sim +250$  mm 为合格,  $0 \sim +200$  mm 为优良, 巷道高度规格偏差是无腰线测全高距离在  $-50 \sim +250$  mm 为合格,  $0 \sim +250$  mm 为优良, 实验数据基本符合要求。

表 5 巷道断面截割实验结果

Table 5 Experimental results of roadway section cutting

巷道	实验次数	定速截割控制		自主调速截割控制	
		巷道宽度/ mm	巷道高度/ mm	巷道宽度/ mm	巷道高度/ mm
1号	1	4 276	3 260	4 172	3 245
	2	4 265	3 240	4 151	3 180
	3	4 242	3 255	4 168	3 204
2号	1	4 240	2 750	4 162	2 694
	2	4 261	2 735	4 155	2 715
	3	4 247	2 742	4 168	2 707
3号	1	3 241	2 740	3 140	2 690
	2	3 232	2 743	3 148	2 682
	3	3 246	2 760	3 162	2 680

## 6 结论

(1) 利用非线性仿真软件分析了掘进机截割煤壁过程中截割头受到的反作用力和截割臂摆动速度之间的关系, 得到截割臂摆动速度和截割头加速度之间的关系, 对截割头加速度进行分层, 以便根据加速度分层结果寻找对应的目标速度。

(2) 以截割头碰撞检测模型为基础, 构造采用改进 S 形截割路线设计的离散截割轨迹规划点, 利用全局最优速度模型求解截割头运动至离散截割轨迹规划点的速度, 利用运动学逆解计算获得截割头到达离散截割轨迹规划点所需的控制量, 并通过模糊 PID 控制驱动截割头完成断面截割。

(3) 搭建掘进机虚拟调速截割控制实验平台进行巷道断面截割实验, 结果表明, 采用自主调速截割控制的断面成形质量较高, 宽度规格偏差降低了 37%, 高度规格偏差降低了 17%, 满足 MT/T 5009—1994 巷道成形质量要求。

## 参考文献(References):

- [1] 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 14th Five-Year Plan period in China coal industry[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 1-15.
- [2] 王国法, 王虹, 任怀伟, 等. 智慧煤矿2025情景目标和发展路径[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2): 295-305.  
WANG Guofa, WANG Hong, REN Huaiwei, et al. 2025 scenarios and development path of intelligent coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 295-305.
- [3] 张旭辉, 赵建勋, 杨文娟, 等. 悬臂式掘进机视觉导航与定向掘进控制技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2186-2196.  
ZHANG Xuhui, ZHAO Jianxun, YANG Wenjuan, et al. Vision-based navigation and directional heading control technologies of boom-type roadheader[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2186-2196.
- [4] 张旭辉, 张超, 杨文娟, 等. 悬臂式掘进机可视化辅助截割系统研制[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(12): 21-26.  
ZHANG Xuhui, ZHANG Chao, YANG Wenjuan, et al. Research and development of visual auxiliary cutting system for cantilever roadheader[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(12): 21-26.
- [5] 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.
- [6] 马宏伟, 王世斌, 毛清华, 等. 煤矿巷道智能掘进关键共性技术[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(1): 310-320.
- MA Hongwei, WANG Shibin, MAO Qinghua, et al. Key common technology of intelligent heading in coal mine roadway[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(1): 310-320.
- [7] 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.
- [8] 王苏戡, 马登成, 任泽, 等. 悬臂式掘进机断面成型轨迹多目标优化方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 41(8): 183-192.
- WANG Suyu, MA Dengcheng, REN Ze, et al. A multi-objective optimization method for cantilever roadheader section forming trajectory[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 41(8): 183-192.
- [9] 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 Xiaoqi, 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.
- [10] 王旭启, 杜振华. 基于模糊算法的掘进机截割机构变频控制策略研究[J]. *现代电子技术*, 2017, 40(11): 176-178, 182.
- WANG Xuqi, DU Zhenhua. Research on fuzzy algorithm based variable-frequency control strategy for cutting device of roadheader[J]. *Modern Electronics Technique*, 2017, 40(11): 176-178, 182.
- [11] 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.
- [12] 谢苗, 李晓婧, 刘治翔. 基于PID的掘进机横摆速度智能控制[J]. *机械设计与研究*, 2019, 35(1): 125-127, 132.
- XIE Miao, LI Xiaojing, LIU Zhixiang. The intelligent control of roadheaders yaw velocity is established based on neural network PID control method[J]. *Machine Design and Research*, 2019, 35(1): 125-127, 132.
- [13] 毛清华, 陈磊, 闫昱州, 等. 煤矿悬臂式掘进机截割头位置精确控制方法[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(增刊2): 562-567.
- MAO Qinghua, CHEN Lei, YAN Yuzhou, et al. Precise control method of cutting head position for boom-type roadheader in coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(S2): 562-567.
- [14] 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.
- [15] 杨文娟, 张旭辉, 张超, 等. 基于三激光束标靶的煤矿井下长距离视觉定位方法[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(2): 986-1001.
- YANG Wenjuan, ZHANG Xuhui, ZHANG Chao, et al. Long distance vision localization method based on triple laser beams target in coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(2): 986-1001.
- [16] WANG Xinlei, TANG Min, DINESH M, et al. Efficient BVH-based collision detection scheme with ordering and restructuring[J]. *Computer Graphics Forum*, 2018, 37(2): 227-237.
- [17] KLOSOWSKI J T, HELD M, MITCHELL J S B, et al. Efficient collision detection using bounding volume hierarchies of k-DOPs[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1998, 4(1): 21-36.
- [18] 王威, 杨平. 智能PID控制方法的研究现状及应用展望[J]. *自动化仪表*, 2008, 29(10): 1-3, 7.
- WANG Wei, YANG Ping. Intelligent PID control of the status and the application of prospect[J]. *Process Automation Instrumentation*, 2008, 29(10): 1-3, 7.