

## 智能采煤机器人关键技术

马宏伟<sup>1,2</sup>, 赵英杰<sup>1,2</sup>, 薛旭升<sup>1,2</sup>, 吴海雁<sup>2,3</sup>, 毛清华<sup>1,2</sup>, 杨会武<sup>2,3</sup>, 张旭辉<sup>1,2</sup>, 车万里<sup>2,4</sup>, 曹现刚<sup>1,2</sup>,  
赵友军<sup>2,4</sup>, 王川伟<sup>1,2</sup>, 赵亦辉<sup>2,4</sup>, 王 鹏<sup>1,2</sup>, 孙思雅<sup>1,2</sup>, 马柯翔<sup>1,2</sup>, 李 焱<sup>1,2</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检测与控制重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 西安重工装备制造集团有限公司, 陕西 西安 710054; 4. 西安煤矿机械有限公司, 陕西 西安 710200)

**摘 要:** 采煤机是综采工作面的核心装备, 研发智能采煤机器人是实现综采工作面智能化的关键。综合分析当前采煤机机器人化研究进程中的传感检测、位姿控制、速度控制、截割轨迹规划与跟踪控制等技术的研究现状, 提出研发智能采煤机器人必须破解的“智能感知、位姿控制、速度控制、截割轨迹规划与跟踪控制、位-姿-速协同控制”五大关键技术, 并给出解决方案。针对智能感知问题, 提出了构建智能感知系统思路, 给出了智能采煤机器人智能感知系统的架构, 实现对运行状态、位姿、环境等全面感知, 为智能采煤机器人安全、可靠运行提供保障; 针对位姿控制问题, 提出了智能PID位姿控制思路, 给出了改进遗传算法的PID位姿控制方法, 实现了智能采煤机器人位姿精准控制; 针对速度控制问题, 提出了融合“力-电”异构数据的截割载荷测量思路, 给出了基于神经网络算法的截割载荷测量方法, 实现了截割载荷的精准测量; 提出牵引与截割速度自适应控制思路, 给出了人工智能算法牵引与截割速度决策方法和滑模自抗扰控制的牵引与截割速度控制方法, 实现了智能采煤机器人速度精准自适应控制; 针对截割轨迹规划与跟踪控制问题, 提出了截割轨迹精准规划思路, 给出了融合地质数据和历史截割数据的截割轨迹规划模型, 实现了截割轨迹的精准规划; 提出了截割轨迹精准跟踪控制思路, 给出了智能插补算法的截割轨迹跟踪控制方法, 实现了智能采煤机器人截割轨迹高精度规划与精准跟踪控制; 针对“位-姿-速”协同控制问题, 提出了“位-姿-速”协同控制参数智能优化思路, 给出了基于多系统互约束的改进粒子群“位-姿-速”协同控制参数优化方法, 实现了智能采煤机器人智能高效作业。深入研究五大关键技术破解思路, 有利于加快推动研发高性能、高效率、高可靠的智能采煤机器人。

**关键词:** 智能采煤机器人; 智能感知; 速度控制; 截割轨迹规划与跟踪控制; 协同控制

**中图分类号:** TD421 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)02-1174-09

## Key technologies of intelligent mining robot

MA Hongwei<sup>1,2</sup>, ZHAO Yingjie<sup>1,2</sup>, XUE Xusheng<sup>1,2</sup>, WU Haiyan<sup>2,3</sup>, MAO Qinghua<sup>1,2</sup>, YANG Huiwu<sup>2,3</sup>,  
ZHANG Xuhui<sup>1,2</sup>, CHE Wanli<sup>2,4</sup>, CAO Xiangang<sup>1,2</sup>, ZHAO Youjun<sup>2,4</sup>, WANG Chuanwei<sup>1,2</sup>, ZHAO Yihui<sup>2,4</sup>,  
WANG Peng<sup>1,2</sup>, SUN Siya<sup>1,2</sup>, MA Kexiang<sup>1,2</sup>, LI Lang<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Intelligent Testing and Control of Mine Electromechanical Equipment, Xi'an 710054, China; 3. Xi'an Heavy Equipment Manufacturing Group Co., Ltd., Xi'an 710054, China; 4. Xi'an Coal Mining Machinery Co., Ltd., Xi'an 710200, China)

**Abstract:** Coal mining machine is the core equipment of completely automated working face, and the research and devel-

收稿日期: 2023-10-26 修回日期: 2024-01-05 责任编辑: 王 凡 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.1372

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (51834006)

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

通讯作者: 薛旭升 (1987—), 男, 陕西兴平人, 副教授。E-mail: xuexsh@xust.edu.cn

引用格式: 马宏伟, 赵英杰, 薛旭升, 等. 智能采煤机器人关键技术[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 1174-1182.

MA Hongwei, ZHAO Yingjie, XUE Xusheng, et al. Key technologies of intelligent mining robot[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 1174-1182.



移动阅读

opment of intelligent coal mining robot is crucial for achieving the intellectualization of fully mechanized working face. This paper comprehensively analyzes the current research status of sensing detection, position and attitude control, speed control, cutting trajectory planning, and tracking control in the coal mining machine roboticization process, and proposes five key technologies that must be solved in the development of intelligent shearer robots, including sensing and detection, pose control, velocity control, cutting trajectory planning and tracking control. Aiming at the problem of intelligent perception, this paper proposes the construction thought of a coal mining robot intelligent perception system, as well as the architecture of a coal mining robot intelligent perception system. The architecture of the intelligent perception system for coal mining robots is outlined, enabling a comprehensive sensing of running state, posture, environment, and so on, thereby ensuring the safe and reliable operation of intelligent coal mining robots. In terms of the position and attitude control problem of intelligent coal mining robots, the intelligent PID position and attitude control thought is proposed, along with an improved genetic algorithm-based PID pose control method, enabling precise pose control for the coal mining robot. As to the problem of velocity control, the thought of cutting load measurement based on the fusion of "force-electricity" heterogeneous data is proposed. Additionally, a neural network-based algorithm for cutting load measurement is presented, achieving an accurate load measurement. Furthermore, a traction and cutting speed adaptive control approach is proposed, including an artificial intelligence-based decision-making method for traction and cutting speed and a sliding mode control method for traction and cutting speed with disturbance rejection. This approach enables a precise and adaptive speed control for the coal mining robot. Regarding the problem of cutting trajectory planning and tracking control, the precise cutting trajectory planning thought is proposed, incorporating geological data and historical cutting data into a cutting trajectory planning model. The precise cutting trajectory tracking control thought is proposed, and an intelligent interpolation algorithm-based cutting trajectory tracking control method is given, achieving a high-precision trajectory planning and accurate tracking control for the coal mining robot. Considering the "position-attitude-velocity" collaborative control problem, the intelligent optimization idea of "position-attitude-velocity" collaborative control parameters is proposed, which utilizes an improved particle swarm optimization method based on multi-system constraints to optimize the coordinated control parameters, resulting in intelligent and efficient operation of the coal mining robot. The in-depth investigation of these five key technologies for intelligent coal mining robot provides some valuable insights for accelerating the development of high-performance, efficient, and reliable intelligent coal mining robot.

**Key words:** intelligent coal mining robot; intelligent perception; velocity control; cutting trajectory planning and tracking control; collaborative control

2021年12月,工业和信息化部等15部门联合发布了《“十四五”机器人产业发展规划》<sup>[1]</sup>,2023年1月工业和信息化部等十七部门颁布了《“机器人+”应用行动实施方案》,明确指出加快推动煤矿机器人的研发与应用<sup>[2]</sup>。因此,随着煤矿智能化的深入推进,关键设备的机器人化已经成为研发的重点。

电牵引滚筒采煤机作为煤矿综采工作面的核心装备,其机器人化、智能化程度直接影响煤炭开采的精度、质量和效率。智能化综采工作面建设,要求采煤机器人具备精确导航定位、位姿检测与控制、速度自适应控制、精准高效截割等能力<sup>[3]</sup>。近年来,有关科研人员和制造企业在采煤机机器人化方面开展了一系列卓有成效的研究工作,取得了丰硕的研究成果。

(1) 采煤机传感检测研究现状。在采煤机运行状态感知方面,毛清华等<sup>[4]</sup>采用压电加速度传感器采集采煤机摇臂振动信号,运用频谱与 Morlet 小波包络解

调融合分析摇臂振动数据,实现对采煤机摇臂传动系统振源的准确定位。张强等<sup>[5]</sup>利用三向振动传感器和声发射仪器采集截齿截割过程中的振动和声发射特征信号,采用多传感信息融合方法诊断采煤机截齿的磨损及失效状态。于宁等<sup>[6]</sup>利用截齿传感器、惰轮轴传感器、摇臂应变传感器等采集采煤机截割部的振动和应变数据,利用改进深度信念网络对滚筒三向截割载荷和滚筒扭矩进行预测。在采煤机位姿检测方面,笔者团队<sup>[7]</sup>提出了一种基于“惯导+里程计”的采煤机定位导航方法,有效提高了采煤机定位精度。毛善君等<sup>[8]</sup>设计了基于陀螺寻北仪和全站仪组成的测量机器人,当测量机器人与采煤机安装棱镜通视时,测量采煤机的三维大地坐标作为采煤机的定位坐标,并校正“惯导+编码器”组合定位误差。李曼等<sup>[9]</sup>设计了一种基于巨磁阻效应的角度传感器,通过采集采煤机摇臂转动角度获取滚筒高度数据。在采煤机环境感知方

面,张旭辉等<sup>[10]</sup>在采煤机上安装防爆相机识别液压支架上布置的4个红外LED标识板,对标识板图像处理与解算,实现采煤机对液压支架的位姿感知。魏东等<sup>[11]</sup>利用红外热成像技术,融合Lucas-Kanade光流法、图像局部信息权重的直觉模糊C均值聚类算法和形态学加权投票法,对作业区域人员精确检测。程继杰等<sup>[12]</sup>采用红外热像仪和甲烷传感器对采煤工作面冲击地压和煤与瓦斯突出感知。

由此可见,现有的采煤机传感检测技术主要集中在对运行状态、位姿、环境等单一对象的检测,缺乏整体性、综合性、系统性的研究。因此,构建全面的传感检测系统,提高检测的准确性、可靠性是研发智能采煤机器人亟待解决的关键技术问题之一。

(2) 采煤机位姿控制研究现状。在采煤机位姿控制方面,郭松林等<sup>[13]</sup>提出一种基于粒子群算法优化的采煤机位置伺服滑模控制器,提高了采煤机运行位置控制的稳定性和鲁棒性。王鹏等<sup>[14]</sup>提出了一种采煤机自适应导向滑靴的新型结构,实现对采煤机倾角的调控。HOU等<sup>[15]</sup>提出了基于迭代学习的综采工作面调直方法,提高液压支架推移油缸位置控制精度,从而实现采煤机推移位置的精确控制。张科学等<sup>[16]</sup>提出了基于实时推进度监测的工作面智能调斜控制技术,实现采煤机位姿智能控制。在滚筒位姿控制方面,陈金国等<sup>[17]</sup>提出了一种基于模糊PID控制器的滚筒调高方法,提高了滚筒调高系统响应速度和跟踪精度。GE等<sup>[18]</sup>提出了一种基于指数逼近律滑模控制器的滚筒调高方法,提高了滚筒调高响应速度和控制精度。张斯涵等<sup>[19]</sup>提出了在滚筒调高系统中引入模型预测控制器进行高度控制,提高了系统的稳定性与实时性。

综上,现有采煤机位姿控制普遍应用开环或半闭环控制方法,存在控制精度低、抗干扰能力差等问题。因此,深入研究精准、可靠的位姿控制方法,是研发智能采煤机器人亟待解决的关键技术问题之一。

(3) 采煤机速度控制研究现状。在牵引速度控制方面,周元华等<sup>[20]</sup>提出了一种基于动态模糊神经网络的牵引电机控制方法,使得牵引从电机能够实时跟踪主电机的转矩,实现了在线功率平衡控制。刘旭南等<sup>[21]</sup>提出了一种基于采煤机关键零件可靠性的智能调速系统,利用神经网络决策出不同煤岩坚固性系数下的最优牵引速度。在截割速度控制方面,李季等<sup>[22]</sup>建立了滚筒截割电机模糊PID矢量控制系统模型,对截割电机调速系统进行自适应控制。HU等<sup>[23]</sup>提出了适应不同突变负荷工况的滚筒截割速度与牵引速度控制策略,实现在不同突变负荷工况下的速度自适应

控制。刘送永等<sup>[24]</sup>通过划分煤层截割阻抗范围,制定了采煤机截割速度与牵引速度的自适应调速控制策略,并构建参数自整定PI控制器对速度进行控制。

由此可见,现有的速度控制研究主要集中在基于截割载荷的速度控制方法,由于载荷测量精度低,速度控制参数单一,导致控制的鲁棒性偏弱。因此,深入研究精准的自适应速度控制是研发智能采煤机器人亟待解决的关键技术问题之一。

(4) 采煤机截割轨迹规划与跟踪控制技术研究现状。在采煤机截割轨迹规划方面,袁亮等<sup>[25]</sup>提出了构建透明地质进行煤炭精准开采的思路,李森等<sup>[26]</sup>基于透明地质模型,采用基于趋势分解与机器学习的滚筒高度预测方法,预测滚筒下一刀截割轨迹。侯运炳等<sup>[27]</sup>提出利用煤层精细化物探数据构建工作面高精度三维地质模型,对采煤机的未来截割路径进行规划。董刚等<sup>[28]</sup>提出了一种基于虚拟煤岩界面的采煤机滚筒轨迹规划方法,提高了截割轨迹规划的有效性。在采煤机截割轨迹跟踪控制方面,刘送永等<sup>[29]</sup>通过实时计算调高油缸活塞杆的目标位移量,提出基于神经网络的无模型间接自适应轨迹跟踪控制方法。王慧等<sup>[30]</sup>建立了基于单变量边缘分布算法的参数自整定模糊PID控制模型,提高了截割轨迹跟踪精度。王福忠等<sup>[31]</sup>提出了基于迭代学习的采煤机截割滚筒轨迹跟踪控制算法,提升了跟踪记忆截割目标轨迹的精度。

综上,轨迹规划存在精度较低、误差偏大、轨迹跟踪控制存在实时性较差、精度偏低等问题。因此,深入研究精准的采煤机轨迹规划和跟踪控制是研发智能采煤机器人亟待解决的关键技术问题之一。

(5) 采煤机“位-姿-速”协同控制技术研究现状。采煤机“位-姿-速”协同控制,是指其位置、姿态、速度控制子系统之间的协同控制。葛帅帅等<sup>[32]</sup>分析采煤工作面煤岩特征与采煤机的截割过程,构建了采煤机自主调高-调速二元协同控制模式及截割状态关联特征模型。赵丽娟等<sup>[33]</sup>利用深度确定性策略梯度算法构建了采煤机牵引速度-滚筒转速协同调速和自适应调高控制系统模型,实现了速度与滚筒高度的协同控制,旨在提升采煤机自适应截割能力。

由此可见,在采煤机“位-姿-速”协同控制方面的研究鲜见报道。因此,为实现安全、高效、智能开采,深入研究“位-姿-速”协同控制是研发智能采煤机器人亟待解决的关键技术问题之一。

综上所述,研发智能采煤机器人必须解决智能感知、位姿控制、速度控制、截割轨迹规划与跟踪控制、“位-姿-速”协同控制五大关键技术,如图1所示。



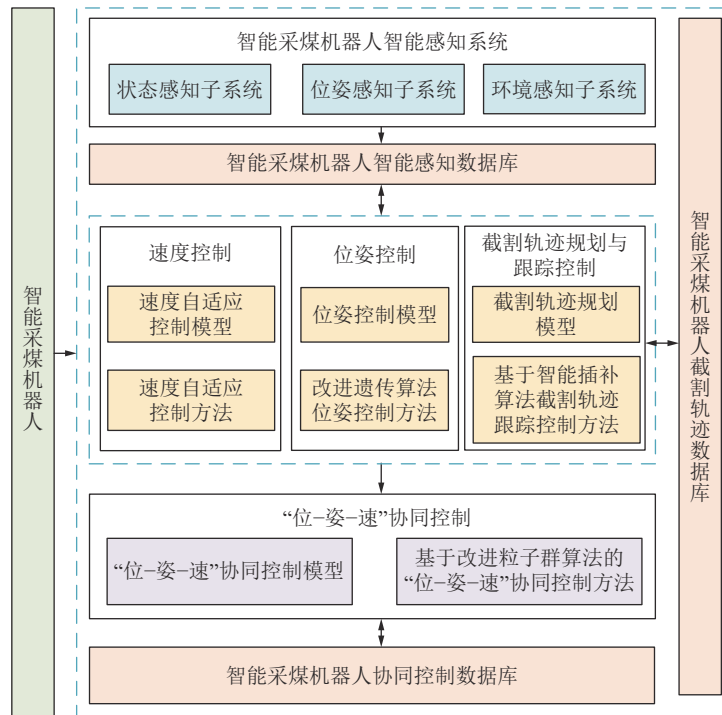


图1 智能采煤机器人关键技术逻辑架构

Fig.1 Key technology logical architecture of the intelligent coal mining robot

## 1 智能采煤机器人智能感知系统

智能采煤机器人智能感知系统由状态感知子系统、位姿感知子系统、环境感知子系统组成。状态感知子系统主要由机械系统、液压系统、电气系统的相关状态检测传感器组成,通过对系统内部振动、电流、温度、速度等数据融合与数据分析处理,得到机械、电气、液压系统的运行状态;位姿感知子系统由机身和滚筒位姿检测传感器组成,融合机身位姿数据、摇臂角度数据、定位标靶位置数据、调高油缸位移等数据,实现对机身和滚筒位姿的精确感知;环境感知子系统主要由人员、设备、环境检测传感器组成,采集气体浓度、环境温度、环境湿度、人机监测数据等,进行数据融合与分析处理,实现对人员、设备、环境的感知。智能采煤机器人智能感知系统架构如图2所示。

## 2 智能采煤机器人位姿控制技术

### 2.1 智能采煤机器人位姿控制系统架构

智能采煤机器人位姿包括机身在刮板输送机上的位姿和滚筒的位姿。智能采煤机器人机身位姿与滚筒位姿是紧耦合关系,通过控制牵引电机实现机身位置调控,通过控制滚筒调高油缸实现滚筒高度调控。机身位姿与刮板输送机位姿是紧耦合关系,通过对液压支架推移油缸的控制,实现机身的位姿控制。下滚筒的截割高度直接影响工作面倾角,间接影响机身位

姿和滚筒位姿控制量的变化。智能采煤机器人位姿控制架构如图3所示。

### 2.2 智能采煤机器人位姿控制方法

位姿控制对象包括机身牵引电机、滚筒调高油缸、液压支架推移油缸等。为实现采煤机器人位姿智能控制,提出了智能PID位姿控制研究思路,给出了改进遗传算法PID的位姿控制原理(图4)。该方法以系统控制误差、超调量、调整时间等构建适应度函数,将PID控制参数组成的染色体进行繁殖交叉与变异,最终迭代计算出最优的PID控制参数,对PID位姿控制进行参数自整定,实现最优的位姿控制效果。

## 3 智能采煤机器人速度控制技术

截割载荷测量是速度自适应控制的重要依据。建立基于“力-电”检测系统的截割力和截割电流异构数据库;提出了融合“力-电”异构数据的截割载荷测量研究思路,给出了基于神经网络算法的截割载荷测量方法,以截割力和截割电流为输入,相应的截割阻抗为期望输出,利用神经网络模型迭代训练,求解截割载荷测量值,截割载荷测量原理如图5所示。

为实现基于截割载荷的最优牵引与截割速度决策,提出了牵引与截割速度最优决策研究思路,给出了基于人工智能算法的牵引与截割速度决策方法,以高效生产为目标,以截割载荷、牵引速度、截割速度为

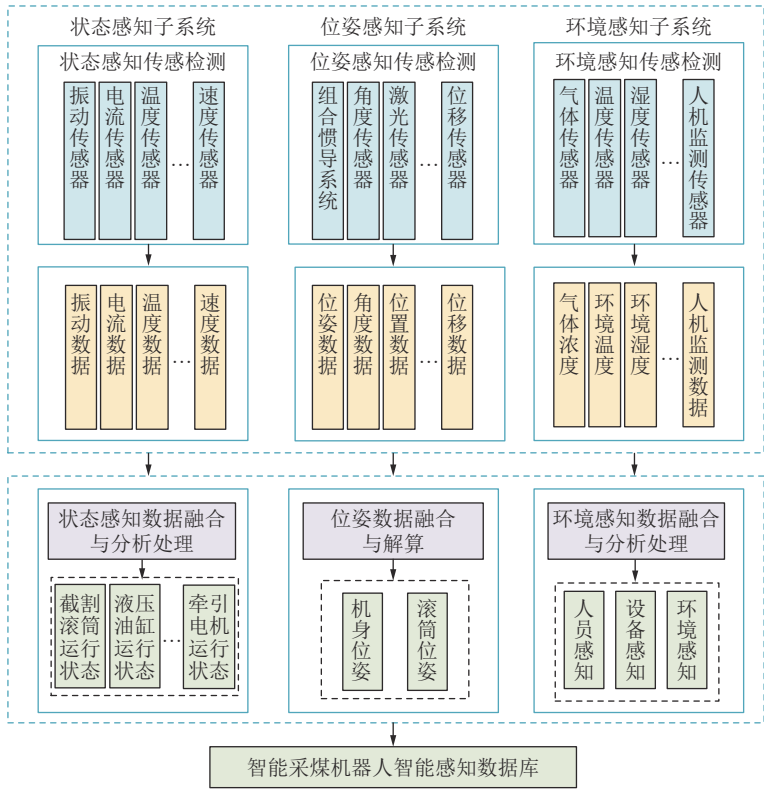


图 2 智能采煤机器人智能感知系统架构

Fig.2 Intelligent sensing system architecture of the intelligent coal mining robot

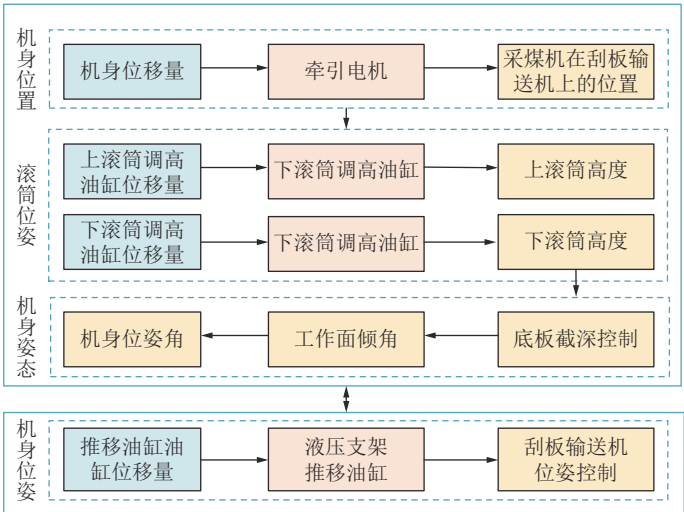


图 3 智能采煤机器人位姿控制架构

Fig.3 Pose control architecture of the intelligent coal mining robot

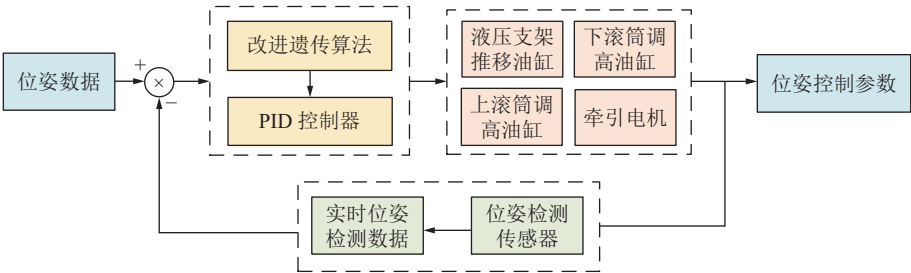


图 4 位姿控制原理

Fig.4 Schematic diagram of pose control

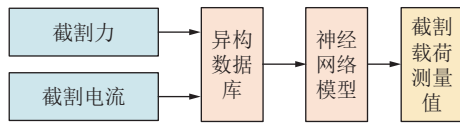


图5 截割载荷测量原理

Fig.5 Schematic diagram of cutting load measurement

约束条件,将截割载荷作为输入,利用人工智能算法决策出最优的牵引和截割速度。为提高速度控制的

稳定性和精准度,提出了牵引与截割速度精准控制研究思路,给出了基于滑模自抗扰控制器的牵引与截割速度控制方法。该方法利用滑模控制改进非线性组合的控制律,减小牵引与截割速度控制量的波动范围,从而提升控制系统的控制精度和鲁棒性。

截割载荷测量、牵引与截割速度决策、滑模自抗扰速度控制,构成了智能采煤机器人速度自适应控制模型,其原理如图6所示。

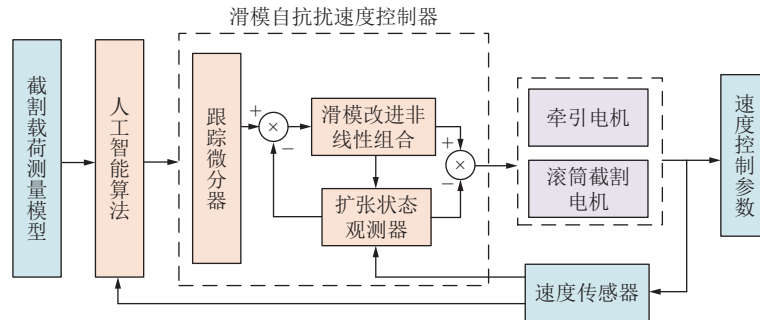


图6 智能采煤机器人速度自适应控制模型

Fig.6 Velocity adaptive control model of the intelligent coal mining robot

## 4 智能采煤机器人截割轨迹规划与跟踪控制技术

### 4.1 智能采煤机器人截割轨迹规划方法

融合煤层三维模型数据和历史截割数据规划截割轨迹,是提升截割轨迹精度的有效途径。为提高规划截割轨迹精度,给出了智能采煤机器人截割轨迹规划模型。如图7所示,智能采煤机器人截割轨迹数据库包括煤层地质数据块和历史截割轨迹数据块。煤层地质数据块存放煤层地质数据,历史截割轨迹数据块存放已开采工作面的截割轨迹位姿数据。由于煤层地质数据规划截割轨迹精度仍存在较大误差,将历史截割数据通过截割轨迹优化模型进行运算处理,得到截割轨迹修正误差数据组,用来修正煤层地质数据规划截割轨迹,依据规划截割轨迹截割的实时位姿数据反馈至截割轨迹数据库中历史截割轨迹数据块进行迭代运算,从而提升规划截割轨迹精度。

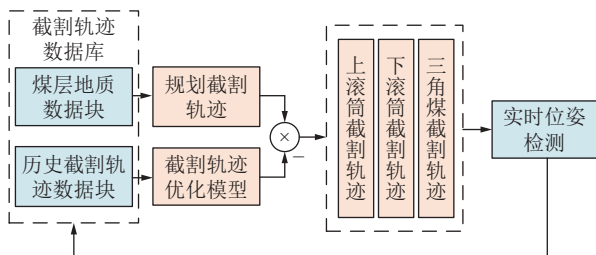


图7 智能采煤机器人截割轨迹规划模型原理

Fig.7 Schematic diagram of cutting trajectory planning model for intelligent coal mining robot

### 4.2 智能采煤机器人截割轨迹跟踪控制方法

为实现截割轨迹的精准跟踪控制,给出了基于智能插补算法截割轨迹跟踪控制方法。该方法,以最小插补误差为目标,牵引速度为约束条件,利用神经网络对截割轨迹进行迭代计算,求解截割轨迹跟踪控制的最优末端位姿,利用位姿解算模型(图8)求解滚筒调高油缸位移和推移油缸位移。基于截割轨迹数据解算的位姿数据作为输入,通过位姿控制模型,实现轨迹跟踪控制;利用位姿检测传感器采集跟踪轨迹数据,并实时反馈,从而实现截割轨迹的精准跟踪控制。智能采煤机器人截割轨迹跟踪控制原理如图9所示。

## 5 智能采煤机器人“位-姿-速”协同控制技术

### 5.1 “位-姿-速”协同控制架构

智能采煤机器人“位-姿-速”协同控制关系包括牵引速度与截割速度的协同、机身与滚筒位姿的协同、工作面直线度与整机位姿的协同、整机位姿与速度的协同。建立“位-姿-速”协同控制模型,求解位置、姿态、速度最优控制数据,构建智能采煤机器人协同控制数据库,指导智能采煤机器人进行高效作业。智能采煤机器人“位-姿-速”协同控制原理如图10所示。

### 5.2 “位-姿-速”协同控制方法

为实现高效生产,提出了“位-姿-速”协同控制参数智能优化研究思路,给出了基于多系统互约束的改进粒子群“位-姿-速”协同控制参数优化方法。其原理如图11所示,以高效生产为目标,以“位-姿-速”

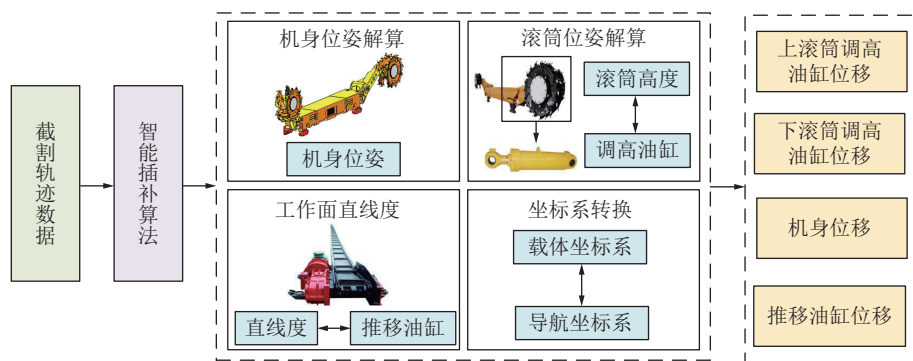


图 8 基于截割轨迹数据的位姿解算模型

Fig.8 Pose calculation model based on cutting trajectory data

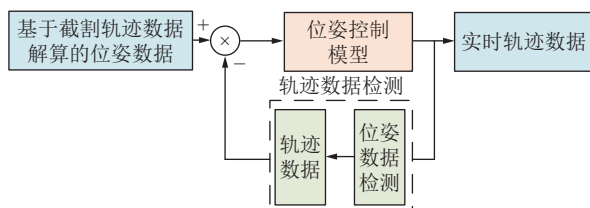


图 9 智能采煤机器人截割轨迹跟踪控制原理

Fig.9 Cutting trajectory tracking control principle of the intelligent coal mining robot

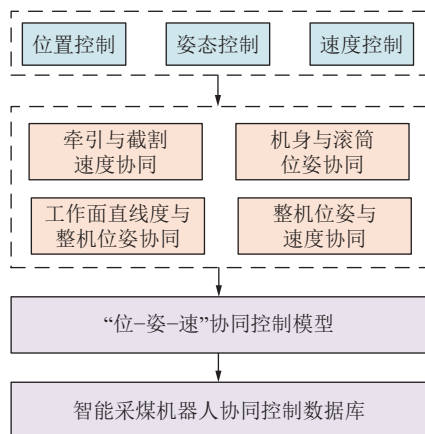


图 10 “位-姿-速”协同控制架构

Fig.10 “Position-attitude-velocity” collaborative control architecture

协同运行边界条件为约束,利用退火算法改进的粒子群算法对位置、姿态、速度协同控制参数进行全局寻优,经迭代运算后得到最优的位置、姿态、速度协同控制参数,输出到智能采煤机器人协同控制数据库。

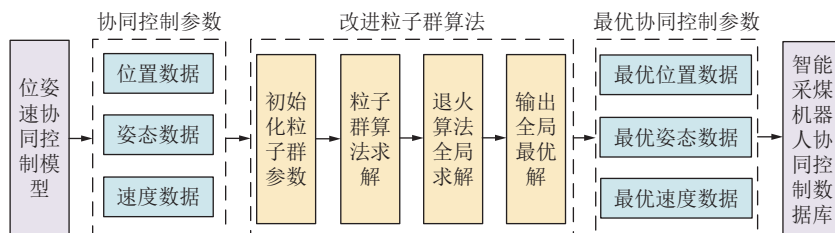


图 11 “位-姿-速”协同控制方法

Fig.11 “Position-attitude-velocity” coordinated control method

## 6 工程应用

笔者提出的智能采煤机器人“智能感知、位姿控制、速度控制、截割轨迹规划与跟踪控制、位-姿-速协同控制”等关键技术的解决方法,已经在西安煤矿机械有限公司多种型号智能采煤机中得到不同程度的应用,有效提高了采煤机的智能化水平。

研发的 MG750/1980-WD、MG650/1630-WD 等智能采煤机在陕煤集团黄陵矿业有限公司、小保当矿业有限公司等煤矿应用,构建了采煤机智能感知系统,实现对采煤机关键部位的运行状态、采煤机位姿数据、工作面环境数据的智能感知。采用“惯导+倾角+里程计”组合定位方法,使机身位姿检测精度达到毫米级;采用油缸位移传感器和角度传感器融合方法,使滚筒调高精度达到毫米级。以煤层地质模型数据和历史截割数据进行迭代运算规划截割轨迹,采用基于智能插补算法的截割轨迹跟踪控制方法,提高轨迹规划和跟踪控制的精度;采用基于粒子群的“位-姿-速”协同控制技术,对采煤机速度控制系统、滚筒调高系统、液压支架位姿控制系统进行协同控制,实现了智能、高效截割,生产效率提升了 30% 左右。智能采煤机人工程应用部分截图如图 12 所示。

## 7 结 论

(1) 针对智能感知问题,构建了智能采煤机器人状态感知子系统、位姿感知子系统、环境感知子系统,实





图12 工程应用部分截图

Fig.12 Screenshot of the engineering application section

现了智能采煤机器人运行状态、位姿数据、环境数据的全面智能感知,确保了智能采煤机器人安全稳定可靠运行。

(2) 针对位姿控制问题,构建了智能采煤机器人位姿控制系统架构,提出了智能PID位姿控制研究思路,给出了改进遗传算法PID位姿控制方法,实现了智能采煤机器人位姿的精准控制。

(3) 针对速度自适应控制问题,提出了融合“力-电”异构数据的截割载荷测量研究思路,给出了基于神经网络算法的截割载荷测量方法,实现了截割载荷的实时精确测量;提出牵引与截割速度自适应控制研究思路,给出了人工智能算法牵引与截割速度决策方法和滑模自抗扰控制的牵引与截割速度控制方法,实现了牵引与截割速度的精准自适应控制。

(4) 针对截割轨迹规划与跟踪控制问题,提出了截割轨迹精准规划研究思路,给出了融合地质数据和历史截割数据的截割轨迹规划模型,提升了截割轨迹规划精度;提出了截割轨迹精准跟踪控制研究思路,给出了智能插补算法的截割轨迹跟踪控制方法,实现了截割轨迹的精准跟踪控制。

(5) 针对“位-姿-速”协同控制问题,提出了“位-姿-速”协同控制参数智能优化研究思路,给出了基于多系统互约束的改进粒子群“位-姿-速”协同控制参数优化方法,实现了智能采煤机器人安全、精准、稳定、高效截割。

## 参考文献(References):

- [1] 《“十四五”机器人产业发展规划》解读[J]. 自动化博览, 2022, 39(3): 14-15.  
Interpretation of the "14th five-year plan" for the development of robot industry [J]. Automation Panorama, 2022, 39(3): 14-15.
- [2] 工业和信息化部等十七部门.《“机器人+”应用行动实施方案》[M]. 北京: 工业和信息化部, 2023.
- [3] 国家煤矿安全监察局. 煤矿机器人重点研发目录[M]. 北京: 中国招标, 2019.
- [4] 毛清华, 张旭辉, 马宏伟, 等. 采煤机摇臂齿轮传动系统振源定位分析[J]. 振动. 测试与诊断, 2016, 36(3): 466-470, 601-602.
- MAO Qinghua, ZHANG Xuhui, MA Hongwei, et al. Vibration source localization analysis method for coal mining machine rocker gear transmission system[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(3): 466-470, 601-602.
- [5] 张强, 王海舰, 李立莹, 等. 基于多传感特征信息融合的采煤机截割失效诊断[J]. 中国机械工程, 2016, 27(17): 2334-2340.
- ZHANG Qiang, WANG Haijian, LI Liying, et al. Failure diagnosis of shearers picks based on information fusion from multi sensors[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(17): 2334-2340.
- [6] 于宁, 孙业新, 陈洪月. 基于多源数据融合的采煤机截割载荷预测方法[J]. 中国机械工程, 2021, 32(10): 1247-1253, 1259.
- YU Ning, SUN Yexin, CHEN Hongyue. Prediction method of cutting loads of shearers based on multisource data fusion[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(10): 1247-1253, 1259.
- [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] 毛善君, 鲁守明, 李存禄, 等. 基于精确大地坐标的煤矿透明化智能综采工作面自适应制煤关键技术研究及系统应用[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 515-526.
- MAO Shanjun, LU Shouming, LI Cunlu, et al. Key technologie and system of adaptive coal cutting in transparent intelligent fully mechanize coal mining face based on precisegeodetic coordinates[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 515-526.
- [9] 李曼, 王志鹏. 基于巨磁阻效应的采煤机摇臂角度传感器设计研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(4): 26-31.
- LI Man, WANG Zhipeng. Design and research on angle sensor for shearer rocker based on giant Magneto resistance effect[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(4): 26-31.
- [10] 张旭辉, 王冬曼, 杨文娟. 基于视觉测量的液压支架位姿检测方法[J]. 工矿自动化, 2019, 45(3): 56-60.
- ZHANG Xuhui, WANG Dongman, YANG Wenjuan. Position detection method of hydraulic support based on vision measurement[J]. Journal of Mine Automation, 2019, 45(3): 56-60.
- [11] 魏东, 王忠宾, 司垒, 等. 采煤机作业区域人员精确检测方法研究[J]. 工矿自动化, 2022, 48(2): 19-28.
- WEI Dong, WANG Zhongbin, SI Lei, et al. Research on precise detection method of personnel in shearer operation area[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(2): 19-28.
- [12] 程继杰, 刘毅, 李小伟. 基于热红外图像的煤矿冲击地压和煤与瓦斯突出感知报警方法[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 2236-2248.
- CHENG Jijie, LIU Yi, LI Xiaowei. Coal mine rock burst and coal and gas outburst perception alarm method based on thermal infrared image[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 2236-2248.
- [13] 郭松林, 张伟. 采煤机运行位置伺服系统的滑模控制[J]. 黑龙江科技大学学报, 2017, 27(3): 251-255.
- GUO Songlin, ZHANG Wei. Research on position servo system of shearers using fuzzy sliding mode control[J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2017, 27(3): 251-255.
- [14] 王鹏, 马宏伟. 采煤机自适应滑靴系统研究[J]. 煤矿机械, 2015,



- 36(5): 104–106.
- WANG Peng, MA Hongwei. Research on slipper system of coalmining machine[J]. Coal Mining Machinery, 2015, 36(5): 104–106.
- [15] HOU T, KOU Z, WU J, et al. Research on positioning control strategy for a hydraulic support pushing system based on iterative learning [J]. Actuators, 2023, 12(8): 306.
- [16] 张科学, 李首滨, 何满潮, 等. 智能化无人开采系列关键技术之一——综采智能化工作面调斜控制技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(1): 139–149.
- ZHANG Kexue, LI Shoubin, HE Manchao, et al. Study on key technologies of intelligent unmanned coal mining series I: Study on diagonal adjustment control technology of intelligent fully mechanized coal mining face[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1): 139–149.
- [17] 陈金国, 刘春生, 范剑红, 等. 采煤机滚筒调高系统建模及仿真[J]. 工矿自动化, 2017, 43(10): 78–82.
- CHEN Jinguo, LIU Chunsheng, FAN Jianhong, et al. Modeling and simulation of drum height adjusting system of shearer[J]. Journal of Mine Automation, 2017, 43(10): 78–82.
- [18] GE S, ZHAO R, LI W, et al. “Sliding-mode control for coal shearer drum height adjustment based on variable speed reaching law” [J]. Journal of Vibroengineering, 2020, 22(8): 1782–1797.
- [19] 张斯涵, 刘振坚, 邱锦波. 模型预测控制模型在采煤机调高系统中的应用研究[J]. 工矿自动化, 2018, 44(5): 42–46.
- ZHANG Sihan, LIU Zhenjian, QIU Jinbo. Research on model predictive control model in application of shearer height adjusting system[J]. Journal of Mine Automation, 2018, 44(5): 42–46.
- [20] 周元华, 马宏伟. 基于 DFNN 的采煤机牵引电机功率平衡控制[J]. 煤矿机械, 2014, 35(6): 35–36.
- ZHOU Yuanhua, MA Hongwei. Synchronized control of shearer traction motors based on dynamic fuzzy neural network[J]. Coal Mining Machinery, 2014, 35(6): 35–36.
- [21] 刘旭南, 赵丽娟, 盖东民, 等. 基于采煤机可靠性的智能牵引调速系统研究[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(7): 1601–1608.
- LIU Xunan, ZHAO Lijuan, GAI Dongmin, et al. Research on intelligenthauling speed regulation system based on shearer’s reliability[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(7): 1601–1608.
- [22] 李季, 许军, 刘飞. 采煤机截割电机的模糊 PID 控制方法[J]. 煤炭技术, 2019, 38(11): 154–159.
- LI Ji, XU Jun, LIU Fei. Fuzzy PID control method of shearer cutting motor[J]. Coal Technology, 2019, 38(11): 154–159.
- [23] 葛帅帅, 秦大同, 胡明辉. 突变工况下滚筒式采煤机调速控制策略研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(11): 2569–2578.
- GE Shuaishuai, QIN Datong, HU Minghui. Research on drum shearer speed control strategies under impact conditions[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(11): 2569–2578.
- [24] 刘永刚, 闫忠良, 秦大同, 等. 采煤机无人自适应变速截割控制方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(6): 1513–1521.
- LIU Yonggang, YAN Zhongliang, QIN Datong, et al. Adaptive control method of unmanned shearer with variable speed cutting[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2017, 48(6): 1513–1521.
- [25] 袁亮, 张平松. 煤炭精准开采透明地质条件的重构与思考[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2346–2356.
- YUAN Liang, ZHANG Pingsong. Framework and thinking of transparent geological conditions for precise mining of coal[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2346–2356.
- [26] 李森, 李重重, 刘清. 基于透明地质的综采工作面规划截割协同控制系统[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(4): 175–184.
- LI Sen, LI Chongzhong, LIU Qing. Planned cutting and collaborative control system for fully-mechanized mining face based on transparent geology[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(4): 175–184.
- [27] 侯运炳, 张弘, 毛善君, 等. 基于高精度三维动态地质模型的采煤机自适应智能截割技术研究[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(1): 26–38.
- HOU Yunbing, ZHANG Hong, MAO Shanjun, et al. Adaptive intelligent cutting technology of the shearer based on the high precision three-dimensional dynamic geological model[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2023, 8(1): 26–38.
- [28] 董刚, 马宏伟, 聂珍. 基于虚拟煤岩界面的采煤机上滚筒路径规划[J]. 工矿自动化, 2016, 42(10): 22–26.
- DONG Gang, MA Hongwei, NIE Zhen. Path planning of shearer up-drum based on virtual coal rock interface[J]. Journal of Mine Automation, 2016, 42(10): 22–26.
- [29] 刘送永, 程诚, 吴洪状, 等. 基于煤岩界面识别的采煤机智能调高控制方法研究[J/OL]. 煤炭科学技术: 1–14[2023–09–28]. <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0004>.
- LIU Fanyong, CHENG Cheng, WU Hongzhuang, et al. Study on intelligent height adjustment control method of shearer based on coal-rock interface recognition [J/OL]. Coal Science and Technology: 1–14 [2023–09–28]. <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0004>
- [30] 王慧, 赵国超, 宋宇宁, 等. 采煤机调高过程的轨迹跟踪模糊 PID 控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(8): 164–171.
- WANG Hui, ZHAO Guochao, SONG Yuning, et al. Trajectory tracking fuzzy PID control for height adjustment process of shearer[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(8): 164–171.
- [31] 王福忠, 高颖. 采煤机截割滚筒轨迹的迭代学习跟踪控制[J]. 控制工程, 2018, 25(6): 966–971.
- WANG Fuzhong, GAO Ying. Tracking control of shearer cutting-drum using iterative learning[J]. Control Engineering of China, 2018, 25(6): 966–971.
- [32] 刘春生, 刘延婷, 刘若涵, 等. 采煤机截割状态与煤岩识别的关联载荷特征模型[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 527–540.
- LIU Chunsheng, LIU Yanting, LIU Ruohan, et al. Correlation load characteristic model between shearer cutting state and coal-rock recognition[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 527–540.
- [33] 赵丽娟, 王雅东, 张美晨, 等. 复杂煤层条件下采煤机自适应截割控制策略[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 541–563.
- ZHAO Lijuan, WANG Yadong, ZHANG Meichen, et al. Research on self-adaptive cutting control strategy of shearer in complex coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 541–563.