

# 煤矿固体智能充填支护机器人及其关键技术

张 强<sup>1,2</sup>, 张吉雄<sup>1,2</sup>, 宗庭成<sup>1,2</sup>, 杨 康<sup>1,2</sup>, 金子山<sup>1,2</sup>, 吕浩南<sup>1,2</sup>, 白 雨<sup>1,2</sup>, 邓攀博<sup>1,2</sup>

(1. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 深部煤炭资源开采教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116)

**摘 要:** 固体充填开采技术已日臻成熟, 但存在自主作业程度低、自适应能力不足等瓶颈, 智能化水平偏低, 影响其应用效果与推广范围。煤矿大型装备机器人化是行业发展必然趋势, 煤矿固体智能充填支护机器人的研究及其关键技术的突破势在必行。定义了煤矿固体智能充填支护机器人的概念并设计了其系统构成, 揭示了其工序自驱作业机制与运行逻辑; 构建了煤矿固体智能充填支护机器人全工况状态感知、运动学建模与控制方法; 构建了全类别参数指标集, 形成了全类别参数感知方法; 对全工况场景类别进行了划分, 建立了位姿精确表征与实时输出方法; 形成了全工况场景运行状态判别与机械臂组自调控方法; 构建了煤矿固体智能充填支护机器人虚拟样机仿真试验平台, 设置了“俯采仰充”“水平采充”“仰采俯充”3 种工况进行工序自驱仿真, 仿真测试结果表明: 充填支护机器人可精准判别干涉并解算出调控目标参数, 系统整体运行及工序自驱执行等智能功能得到验证。针对煤矿固体智能充填支护机器人研发面临的关键科学问题, 初步构建了煤矿固体智能充填支护机器人及其关键技术的研究框架、研发思路与技术路线, 为深度升级充填开采技术、研发我国完全自主知识产权的煤矿固体智能充填支护机器人装备产品提供理论及技术支持。

**关键词:** 充填支护机器人; 位姿表征; 自主调控; 工序自驱作业; 联合仿真; 固体充填开采技术

**中图分类号:** TD823.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)02-1372-17

## Intelligent solid backfilling support robot in coal mine and its key technology

ZHANG Qiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Jixiong<sup>1,2</sup>, ZONG Tingcheng<sup>1,2</sup>, YANG Kang<sup>1,2</sup>, JIN Zishan<sup>1,2</sup>, LYU Haonan<sup>1,2</sup>, BAI Yu<sup>1,2</sup>, DENG Panbo<sup>1,2</sup>

(1. School of Mines, China University of Mining & Technology, Xuzhou, 221116, China; 2. Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining, Ministry of Education of China, China University of Mining & Technology, Xuzhou, 221116, China)

**Abstract:** Solid backfilling mining technology has matured, but still faces bottlenecks such as low autonomy and insufficient self-adaptive control capabilities, resulting in a low level of intelligence that affects its application effectiveness and promotion scope. The robotization of large-scale coal mine equipment is an inevitable trend in development of the industry, and it is imperative to research coal mine solid intelligent backfilling support robot and achieve breakthroughs in its key technologies. The concept and system composition of coal mine solid intelligent backfilling support robots are proposed, revealing the mechanism of process self-driven operation. A full-category parameter index set is constructed, and a full-category parameter perception method is formed. The full-condition scenario categories are divided, and an accurate

收稿日期: 2024-07-28 策划编辑: 郭晓炜 责任编辑: 刘雅清 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0890

基金项目: 国家重点研发计划青年科学家资助项目 (2024YFC2910600); 国家自然科学基金面上资助项目 (52174134); 新疆维吾尔自治区重点研发任务专项-厅厅联动资助项目 (2022B01051-3)

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

引用格式: 张强, 张吉雄, 宗庭成, 等. 煤矿固体智能充填支护机器人及其关键技术[J]. 煤炭学报, 2025, 50(2): 1372-1388.

ZHANG Qiang, ZHANG Jixiong, ZONG Tingcheng, et al. Intelligent solid backfilling support robot in coal mine and its key technology[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(2): 1372-1388.



移动阅读

representation and real-time output method of pose were established. A method for judging operating states of the whole working condition and self-regulating robotic arm group is formed. A virtual prototype simulation test platform for solid intelligent backfilling support robot is constructed and three working conditions, “downward mining and upward backfilling” “horizontal mining and backfilling” and “upward mining and downward backfilling”, are set up for process self-driving simulation. The result of simulation test shows that backfilling support robot can accurately identify interference and calculate target parameters to regulation, and intelligent functions such as the overall operation of the system and the self-driven execution of the process have been verified. In view of the key scientific problems faced by the R&D of the coal mine solid intelligent backfilling support robot, the research framework, R&D ideas and technical routes of the coal mine solid intelligent backfilling support robot and their key technologies are preliminarily constructed. It provides theoretical and technical support for in-depth upgrading of backfilling mining technology and R&D of completely independent intellectual property rights of coal mine solid intelligent backfilling and support robot products in China.

**Key words:** backfilling support robot; position and posture characterization; autonomous control; self-driving operation process; joint simulation; solid backfilling mining technology

## 0 引 言

煤炭作为我国的主体能源,是国家安全稳定的基石,经济稳步发展的保障,在能源结构变革和新型能源体系的构建进程中,仍将担当保驾护航的作用<sup>[1-2]</sup>。

近年来,充填开采技术作为典型的绿色开采技术,已在国内外学术界和煤炭行业进行了深入的研究和工程实践<sup>[3-4]</sup>,目前广泛研究的代表性煤基固废充填开采技术包括:综合机械化固体充填开采技术<sup>[5]</sup>、固废膏体充填技术<sup>[6]</sup>、长壁巷式胶结充填开采(连采连充)技术<sup>[7-8]</sup>、覆岩隔离注浆充填技术<sup>[9]</sup>、井下采选充+X绿色化开采技术<sup>[10]</sup>、放顶煤充填开采技术<sup>[11]</sup>等。其中,固体充填开采技术以其在解放“三下”压煤、防止地表沉陷、大规模处置煤基固废、降低矿山生态环境损害等方面的显著优势,需求日益旺盛<sup>[12]</sup>。

固体充填开采技术历经机械化、自动化与智能化阶段<sup>[6,13-14]</sup>,其核心装备充填液压支架与充填刮板输送机从最早人工操控实施充填工艺,演化为采用电液控系统控制充填作业,目前可基本实现远程控制作业。在此过程中,采场作业人员数量逐渐减少,安全系数与工作效率逐渐提高,但仍存在设备运行可靠性差、参数感知及位姿自主调控能力不足、自主作业程度低等技术瓶颈,智能化水平总体偏低等问题,迫切需要深度智能化升级。

2019年1月国家煤矿安全监察局发布《煤矿机器人重点研发目录》(2019年第1号),鼓励大力研发应用煤矿机器人,规划了5类38种煤矿机器人,充填支护机器人作为采煤类机器人位列其中,但行业高校、科研院所及大型煤机装备集团在该机器人方向的研究进展缓慢,研究成果寥寥无几<sup>[15-17]</sup>。2023年1月工业和信息化部等十七部门印发的《“机器人+”应用行

动实施方案》中明确指出:“推进机器人与能源领域深度融合,助力构建现代能源体系”<sup>[18]</sup>。由此可见,采充机械设备机器人化是固体充填开采技术发展的重要方向和主流趋势,也是固体充填开采技术智能化进程中的关键阶段性目标。

目前,在参数感知方面,任怀伟等<sup>[19]</sup>建立了融合视觉的装备全位姿监测系统,融合视觉扫描、图像识别技术,实现液压支架位姿状态的实时测量;方新秋等<sup>[20]</sup>利用光纤光栅系列传感器,构建了液压支架姿态感知指标体系;廉自生等<sup>[21]</sup>提出了结合 ZigBee 技术的液压支架整机传感器布置方案,实现液压支架关键参数的全面感知。

在位姿表征与工况判别方面,张强等<sup>[13]</sup>采用 MDH 坐标系表征模型及坐标转换方法,实现了固体充填液压支架关键节点的表征;宗庭成等<sup>[22]</sup>明确了夯实机构、后顶梁和底卸式输送机的几何关系,建立了机构干涉临界状态的表征式;杨印朝等<sup>[23]</sup>建立了固体智能充填机械关键机构的骨架模型及静态特征与动态轨迹方程,给出了落料夯实过程各阶段干涉位姿判别准则与临界范围。庞义辉等<sup>[24]</sup>建立了液压支架支护姿态与支护高度的数学表达式,并结合牛顿-拉夫逊方法、弦割法、布罗伊登法提出求解方法。

在控制算法方面,王虹等<sup>[25]</sup>提出了一种基于 GA-BP 组合模型的液压支架跟机自动化方法,并验证了模型具有更高的快速性和稳定性;解盘石等<sup>[26]</sup>构建了基于数字孪生的液压支架姿态感知和仿真系统,其在多变的倾角条件下能够保持稳定和精确的姿态控制;ZHANG 等<sup>[27]</sup>利用粒子群优化算法和 Bang-Bang 控制算法,构建液压支架控制系统。

上述研究多数主要集中于非充填装备的参数感知、自适应控制等方面,针对固体智能充填支护机器

人的系统构建、参数感知、工况分类、位姿表征、异常工况自主判别与调控等方面研究较少。可见,目前国内外尚缺乏煤矿固体智能充填支护机器人的系统性研究。

本文在前人研究基础上,首次定义煤矿固体智能充填支护机器人的概念并设计其系统构成;构建全类别参数指标集,对全工况场景类别进行划分,形成了参数感知与位姿精确表征方法;形成了全工况场景运行状态判据构建逻辑,形成了工况状态精确判别与动

作精细执行方法。

## 1 煤矿固体智能充填支护机器人概述

### 1.1 应用场景与需求分析

煤矿固体智能充填支护机器人的典型应用场景为煤矿井下受限空间的长壁充填采场,如图1所示,与采煤机器人、运煤机器人、巷道支护机器人等机器人群组协同配合作业,实现全工况场景全时序工序全自动固体充填作业。

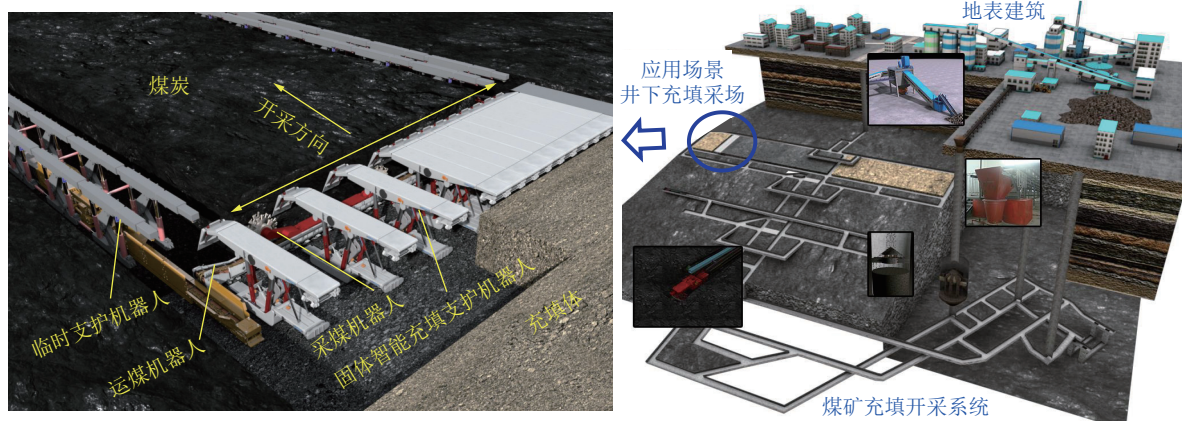


图1 煤矿固体智能充填支护机器人典型应用场景

Fig.1 Typical application scene of coal mine solid intelligent backfilling support robot

鉴于现有充填装备技术发展程度及应用水平,煤矿固体智能充填支护机器人基于现有机械基础进行研发创新,通过优化机构结构及布置、增设传感器、研发控制系统、编制控制算法及软件等系统性工作,使机器人能够精准感知周围环境和自身工况参数,自主规划和调控机械臂工作轨迹,实现工序自驱执行。

### 1.2 基本概念

定义煤矿固体智能充填支护机器人的基本概念:在固体充填液压支架及充填刮板输送机(简称输送机)为机械本体结构的基础上,融合工艺参数自行感知、支护状态自适应调控、机构轨迹自主调控、采充工序自驱执行、工序执行效果自敏判断等技术,与采煤机器人、运煤机器人等配合,用于充填工作面推移刮板输送机、支护与充填等工序自主执行的一种固体智能充填支护机器人。

结合煤矿固体智能充填支护机器人功能需求及概念定义,设计其结构组成如图2所示。

### 1.3 系统构成与功能设计

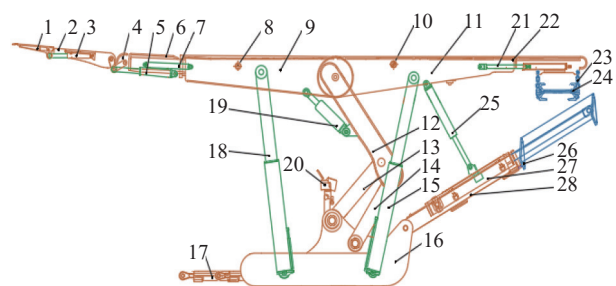
设计煤矿固体智能充填支护机器人<sup>[28]</sup>由机械本体系统、感知系统、分析决策系统、软件系统、驱动控制系统、动力系统、人机交互系统构成,如图3所示。各系统根据采充工序运行逻辑,通过逐个或成组实施参数感知、工况判别、自调控、工序自驱等功能,完成

完整的工序自驱作业。

上述系统及功能为匹配充填支护机器人基本功能需求的第1代设计,在后续研究中,为适应新的功能需求或引入和发明新的配合机制,则在第1代设计基础上,对系统构成和功能进行完善升级。

### 1.4 工序自驱作业与系统运行逻辑

工序自驱作业指固体智能充填支护机器人自主



注: 1.一级护帮板; 2.二级护帮板; 3.一级护帮机械臂; 4.伸缩梁; 5.二级护帮机械臂; 6.前探梁; 7.伸缩梁机械臂; 8.前侧推机械臂; 9.前承载梁; 10.后侧推机械臂; 11.后承载梁; 12.上连杆; 13.前连杆; 14.后连杆; 15.后支撑机械臂; 16.底座; 17.前推移机械臂; 18.前支撑机械臂; 19.平衡机械臂; 20.控制器; 21.后拉滑移机械臂; 22.后铰接梁; 23.输送机悬挂链; 24.输送机滑轨; 25.斜拉摆角机械臂; 26.挡板; 27.摆梁; 28.夯实机械臂。

图2 煤矿固体智能充填支护机器人本体结构

Fig.2 Basic structure of coal mine solid intelligent backfilling support robot body



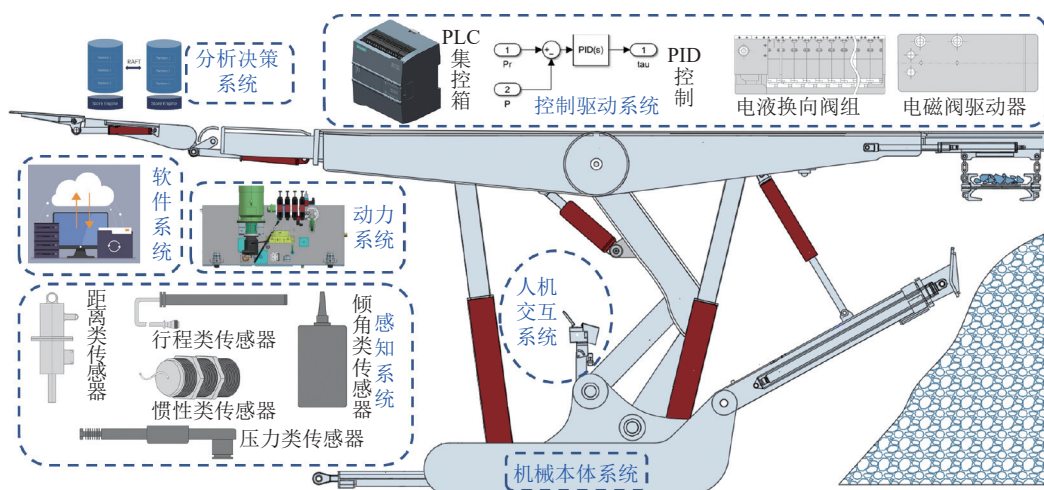


图3 煤矿固体智能充填支护机器人系统构成示意

Fig.3 Schematic diagram of structure of coal mine solid intelligent backfilling support robot system

感知结构参数、支护状态及工作环境等运行状态参数,规划作业流程,驱动机械本体自主执行支护、充填、夯实等工艺流程,在煤矿固体充填工作面实现充填采煤

自动作业。其中,工艺流程涵盖若干工序,为实现机器人的工序流程自驱执行,应明确其自驱作业工艺流程,如图4所示。

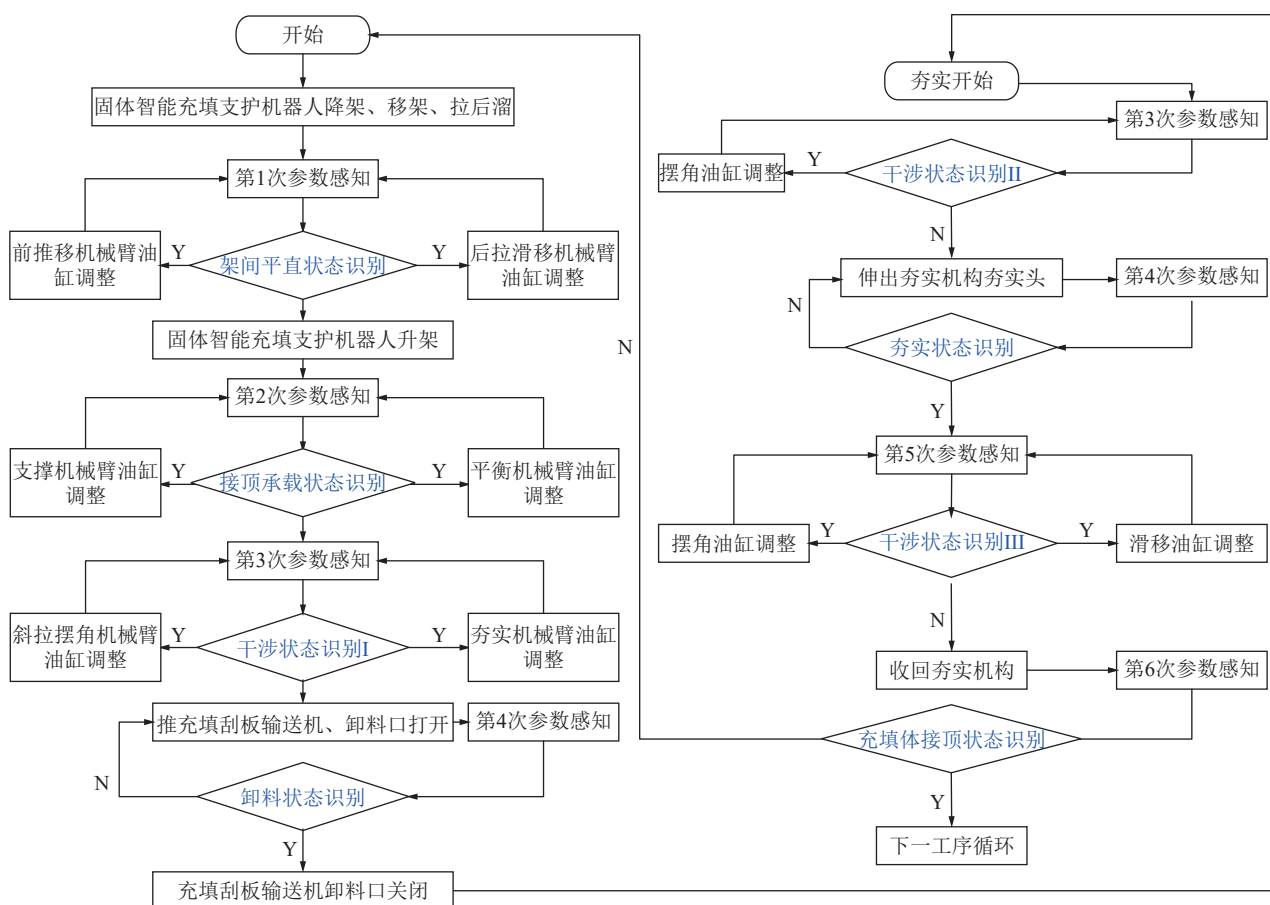


图4 煤矿固体智能充填支护机器人自驱作业工艺流程

Fig.4 Self-driving operation process of coal mine solid intelligent backfilling support robot

煤矿固体智能充填支护机器人各系统工作运行机制和配合逻辑为: 首先启动动力系统供给动力,调用感知系统获取参数指标集,结合位姿表征算法表征

工况位姿,通过分析决策系统输出工况判定结果,若判定为异常工况则自调控位姿,判定为正常则通过软件系统的算法,根据原规划工序动作输出动作参数,

通过驱动控制系统控制机械臂组动作,由分析决策系统反馈工序效果,若不达标需调控重新执行工序动作,若达标则启动下一工序。同时,相关参数传输至人机

交互系统,若遇到特殊工况则人工介入判断。在各系统工作机制和配合关系的支持下完成全流程自驱作业,具体如图 5 所示

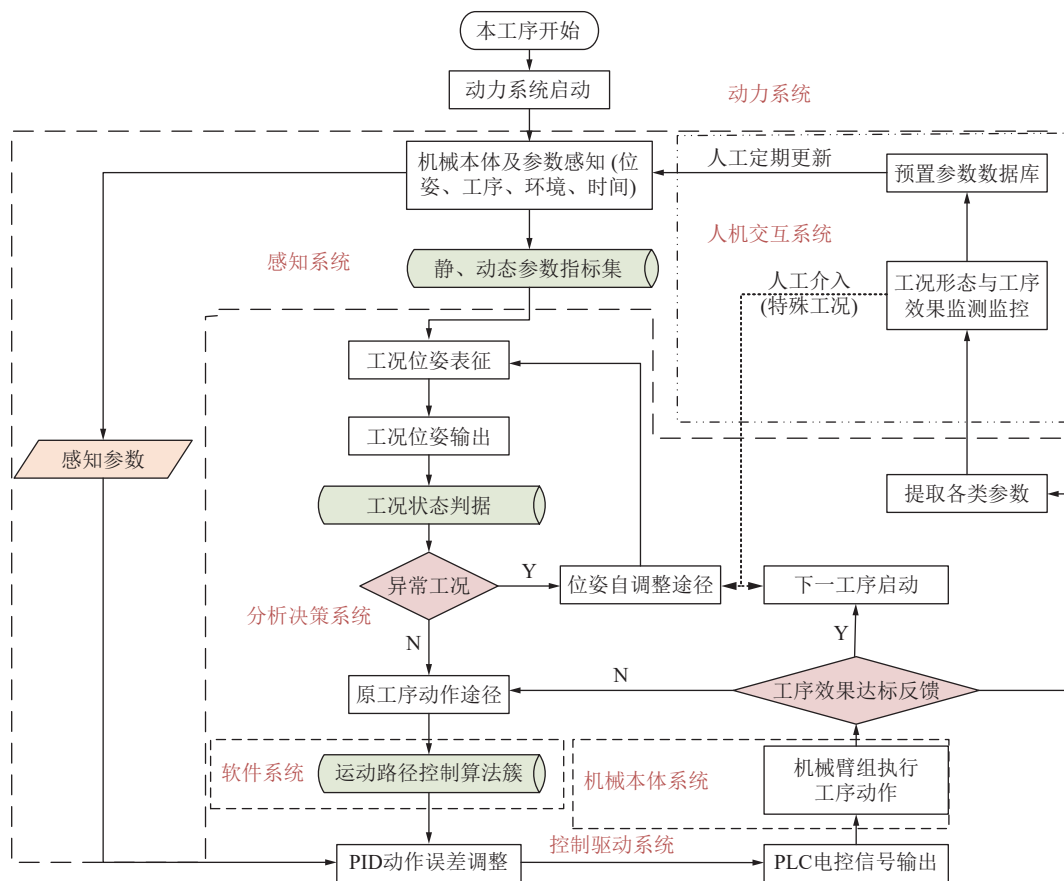


图 5 煤矿固体智能充填支护机器人系统运行逻辑

Fig.5 Operation logic of coal mine solid intelligent backfilling support robot system

### 1.5 关键科学与技术问题

煤矿固体智能充填支护机器人的研制需综合运用采矿工程、机器人工程、自动控制原理、计算机科学等多个学科,其中的关键科学与技术问题包括但不限于以下方面:

#### 1) 自主感知与识别技术

运用各类先进的传感器技术,如激光雷达、惯性传感器等,对工艺参数、环境条件和机器人状态进行实时准确感知,以及设计相应的异常工况判别算法,实现在复杂工作环境下的工况识别。

#### 2) 机械臂组路径规划技术

需要实现机器人的机械臂组在煤矿工作面等复杂环境中规划最优移动路径,需要考虑地质条件、障碍物、支护区域等因素以避免干涉碰撞,实现工作效率最大化。

#### 3) 驱动控制技术

控制机器人运动,以实现工序自驱执行以及异常自主调控。可以运用 PID 控制、模糊控制及神经网络

控制等控制策略,实现对煤矿固体智能充填支护机器人动作的精确控制和优化调节。

本文针对上述的关键科学技术问题,先行开展基础理论研究。

## 2 煤矿固体智能充填支护机器人全类别参数感知方法

### 2.1 运行状态参数分类

煤矿固体智能充填支护机器人在自驱执行工序过程中,需要不断进行感知-判别-调控的循环,每个环节均需要用到各种不同类别的参数。采用姿态、位置、压力、环境、时间、工序这 6 类参数描述固体充填支护机器人的工况运行状态,6 类参数指标集如图 6 所示。

### 2.2 全类别参数感知方法与传感器配置

姿态参数指任意时刻静态结构参数矩阵,其中承载梁长度、输送机悬挂链长度、底座高度等不随机械本体运动而变化的静态结构参数以预制数据库形式

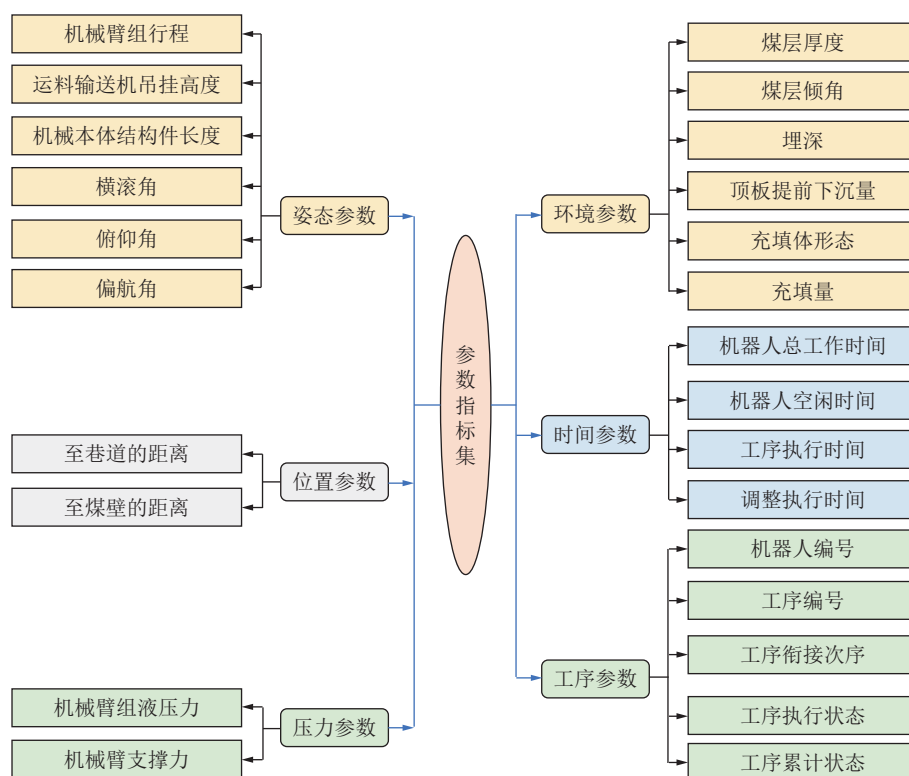


图6 煤矿固体智能充填支护机器人6类参数指标集

Fig.6 Indicator set of six types of parameters of coal mine solid intelligent backfilling support robot

导入;而机械臂长度、机械臂角度等随机械本体运动而变化的参数则通过传感器感知与尺寸与运动学关系间接获得。

位置参数指充填支护机器人中心点所在位置,通过其至巷道、采煤机器人等特征点的空间距离表征,通过机组编号及距离类传感器等获得。

压力参数中的机械臂组内部压力、支撑力等都可 通过压力类传感器感知获得。

环境参数指机械本体结构位姿参数之外的环境 参数,包括煤层倾角、顶板提前下沉量、矸石充填量等, 通过倾角传感器、距离传感器、质量类传感器等感知 获取。

时间参数包括总工作时间、空闲时间、工序执行 时间、调整执行时间等,通过计时器获得。

工序参数包括当前运动状态对应的工序执行状 态、工序衔接次序。通过定义工序编号、状态参数等 编写程序反馈输出。

将相应传感器安装在机械本体对应位置,并与 计算机进行连接,选取适合的软件读取、显示和存储传 感器数据,并将数据传输到分析决策系统,实现传感 器对全类别参数的实时感知获取。

根据参数感知所需的传感器类别,通过调研分析 煤矿井下使用的传感器种类、型号,建立各类参数指 标感知的传感器配置库,如图7所示。

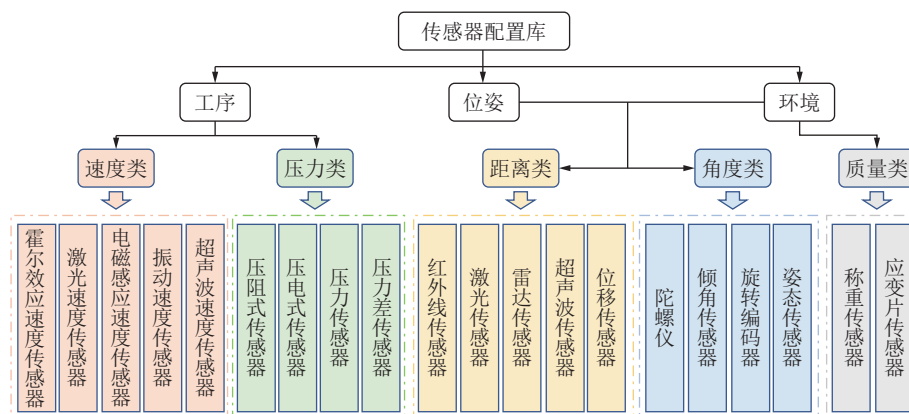


图7 传感器配置库

Fig.7 Sensor configuration library



通过上述参数分类,并针对各类别参数给出相应的感知方法,建立了煤矿固体智能充填支护机器人全

类别参数感知方法,相应传感器安装位置如图 8 所示。

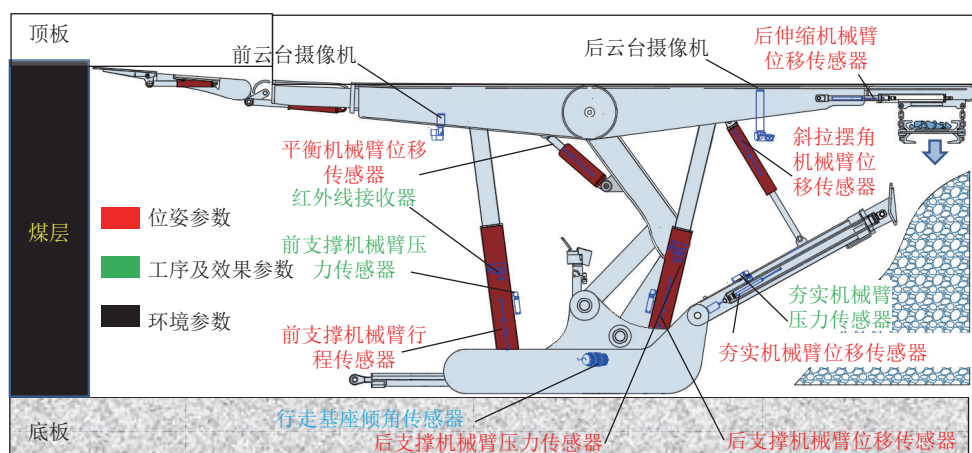


图 8 传感器安装位置示意

Fig.8 Schematic diagram of sensor installation location

### 3 煤矿固体智能充填支护机器人位姿表征

#### 3.1 全工况场景分类

随着充填采场的推进作业及对应每一个采充完整流程工序的执行,煤矿固体智能充填支护机器人将身处全工况场景(全场景所呈现出的各种工况及位姿

形态)。煤层倾角、顶底板完整程度、工序动作等因素的变化,使得全工况场景呈现出多种繁杂形态,根据理论分析与实践调查,多种繁杂工况状态分为以下五类:地质条件类、支护效果类、支护姿态类、机械臂干涉类、行走轨迹类。部分典型工况场景如图 9 所示。

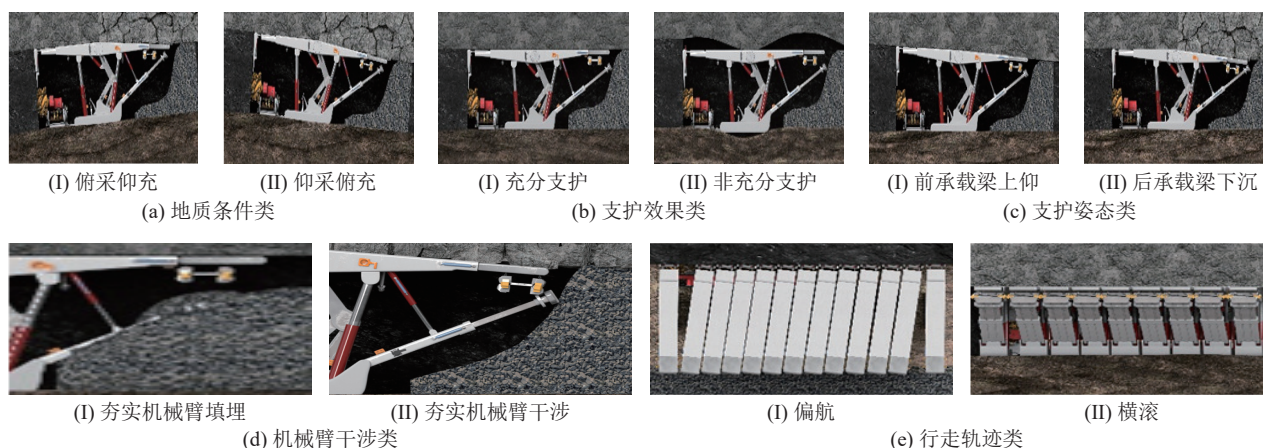


图 9 煤矿固体智能充填支护机器人的全工况场景分类示意

Fig.9 Schematic diagram of full working condition scenario classification of coal mine solid intelligent backfilling and supporting robot

#### 3.2 全工况场景位姿表征方法

##### 3.2.1 位姿表征原理及方程构建

煤矿固体智能充填支护机器人在全场景下位置与姿态表征包含 3 个方面,一是单机内部机械臂组的位姿,二是相邻两机器人的相对位姿,三是机器人群组间的相对位姿。

位姿表征问题属于机器人正向运动学问题,并联机器人或机械臂的运动学分析适合选用闭环矢量法研究,因为充填支护机器人自由度与驱动关节数量

相等,所以仅需监测与机械臂自由度相同数量的驱动关节运动量或与之相当的独立自由度变量即可确定机器人整体的运动状态。

##### 1) 单机机械臂位姿闭环矢量法表征

建立充填支护机器人位姿分析模型如图 10 所示。

图中,点  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$ 、 $F$ 、 $G$ 、 $H$ 、 $I$ 、 $J$ 、 $K$ 、 $L$ 、 $M$ 、 $O$  为各机械臂之间的铰接点,进行运动学分析时视为转动关节。 $\varphi_1 \sim \varphi_{12}$  为待求位姿角度参数; $\omega_1 \sim \omega_{11}$  为机构间的角度常量参数,方向为以  $x$  轴正方向起,逆

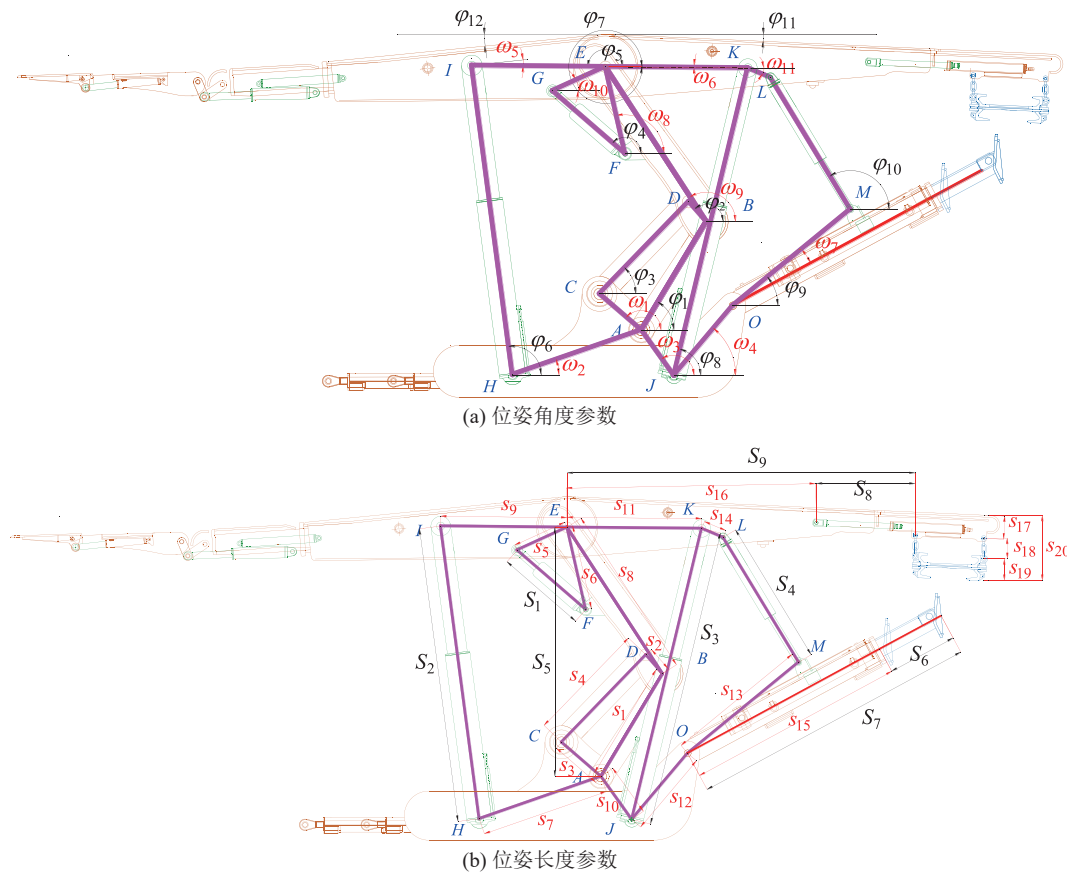


图 10 充填支护机器人位姿表征示意

Fig.10 Schematic diagram of position and posture characterization of backfilling support robot

时针旋转为正;  $s_1 \sim s_{20}$  为机构间的长度常量参数;  $S_1 \sim S_9$  为长度变量, 可通过传感器监测, 直接或间接确定其具体参数值。

充填支护机器人内部机械臂的位姿主要反映在前承载梁、后承载梁和夯实机械臂上, 由驱动机械臂在其自由度方向上的动作量决定, 前承载梁的位姿由前支撑机械臂和平衡机械臂位移量决定, 通过构造  $ABDC$ 、 $EFG$ 、 $ABEIH$  三个闭环建立方程组, 见式 (1)。

$$\begin{cases} s_1 e^{i\varphi_1} + s_2 e^{i\varphi_2} = s_3 e^{i\omega_1} + s_4 e^{i\varphi_3} \\ s_1 e^{i\varphi_4} + s_5 e^{i\omega_{10}} = s_6 e^{i\omega_8} \\ s_2 e^{i\varphi_6} = s_7 e^{i\omega_2} + s_1 e^{i\varphi_1} + s_8 e^{i\omega_9} + s_9 e^{i\varphi_5} \end{cases} \quad (1)$$

后承载梁的位姿由后支撑机械臂位移以及四连杆机构的位姿决定, 通过构造  $ABEKJ$  闭环建立方程, 见式 (2)。

$$S_3 e^{i\varphi_8} + s_{10} e^{i\omega_3} = s_1 e^{i\varphi_1} + s_8 e^{i\omega_9} + s_{11} e^{i\varphi_3} \quad (2)$$

夯实机械臂的位姿, 由斜拉摆角机械臂的位移和后承载梁的姿态决定, 通过构造  $JOMLK$  闭环建立方程, 见式 (3)。

$$S_{12} e^{i\omega_4} + s_{13} e^{i\varphi_9} + S_4 e^{i\varphi_{10}} = S_3 e^{i\varphi_8} + s_{14} e^{i\omega_{11}} \quad (3)$$

要确定夯实头的位姿则还需补充夯实机械臂的位移。

利用欧拉公式, 可将上述各复数方程拆分为 2 个非线性超越方程组, 共计 10 个方程, 采用数值算法可求解 10 个未知量  $\varphi_1 \sim \varphi_{10}$ , 可实现由 5 个油缸行程参数求解所有机械臂姿态角。同时, 为直观表示各机械臂位姿, 以底座平面为参考, 利用前、后承载梁与四连杆机构的同轴铰接点相对后连杆铰接点的垂直高度表征充填支护机器人的支护高度, 利用前承载梁相对底座平面的倾角表征前承载梁的位姿, 同理, 利用后承载梁相对底座平面的倾角表征后承载梁的位姿; 充填刮板输送机中部槽位姿受后拉滑移机械臂位移以及在重力作用下输送机悬挂链的姿态影响, 基于文献 [22], 以后承载梁上部平面为参考, 选用输送机底部相对上述同轴铰接点的垂直距离以及水平距离表征输送机的位姿。综上, 构造充填支护机器人的位姿表征方程, 见式 (4):

$$\begin{cases} S_5 = s_1 \sin \varphi_1 + s_8 \sin \omega_9 & \text{铰接点高度} \\ + s_{10} \sin \omega_3 - s_{12} \sin \omega_4 & \text{前梁倾角} \\ \varphi_{12} = \varphi_5 + \omega_5 & \text{后梁倾角} \\ \varphi_{11} = \varphi_7 + \omega_6 & \text{夯实角} \\ \theta = \varphi_9 + \omega_7 & \text{夯机械臂长度} \\ S_7 = s_{15} + S_6 & \text{输送机-后梁平距} \\ S_9 = s_{16} + S_8 + s_{18} \sin \varphi_{11} & \text{输送机-后梁垂距} \\ S_{20} = s_{17} + s_{19} + s_{18} \cos \varphi_{11} \end{cases} \quad (4)$$



## 2) 多机相对位姿表征

在构建出单机充填支护机器人的位姿表征方程后,在单个机器人的底座或某个关键部件上建立载体坐标系,即可运用上述式(1)中的方法解算各机械臂关节节点的位置坐标。若求解 2 个相邻机器人间的相对位姿关系,需将载体坐标系下的位置坐标转换到导航坐标系下。载体坐标系与导航坐标系的坐标转换需通过绕 Z 轴、Y 轴及 X 轴的旋转矩阵实现,见式(5)~式(7)。

$$\mathbf{R}_Z(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{R}_Y(\varphi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{R}_X(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & \sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{R}_Z$ ,  $\mathbf{R}_Y$ ,  $\mathbf{R}_X$  分别为绕 Z 轴、Y 轴及 X 轴的旋转矩阵;  $\psi$ ,  $\varphi$ ,  $\gamma$  分别为机器人的偏航角、俯仰角、横滚角, ( $^\circ$ ), 可利用惯性传感器测量得出。

将上述 3 个矩阵依次相乘,即可得到导航坐标系下的参数转换到载体坐标系下的转换矩阵  $\mathbf{M}$ , 见式(8)。

$$\mathbf{M}(\psi, \varphi, \gamma) = \mathbf{R}_Z(\psi)\mathbf{R}_Y(\varphi)\mathbf{R}_X(\gamma) \quad (8)$$

采用 Bursa-Wolf 模型<sup>[29]</sup>进行坐标转换,模型可表示为:

$$\begin{bmatrix} x^{(u)} \\ y^{(u)} \\ z^{(u)} \end{bmatrix} = \lambda \mathbf{M}^T \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中:  $[x \ y \ z]^T$  为转换前的坐标;  $[x^{(u)} \ y^{(u)} \ z^{(u)}]^T$  为转换后的坐标;  $\lambda$  为尺度系数;  $\mathbf{M}^T$  为转换矩阵;  $[x_0 \ y_0 \ z_0]^T$  为平移参数。

由于各载体坐标系与导航坐标系的尺度相同,则  $\lambda=1$ 。根据实际地质条件设置导航坐标系的初始状态,确定导航坐标系 X 轴、Y 轴和 Z 轴的原点,即可根据充填支护机器人结构参数得出各节中部槽的平移参量  $[x_0 \ y_0 \ z_0]^T$ 。

固体智能充填支护机器人工况复杂,作业时姿态角实时变化,采用四元数法<sup>[30]</sup>进行坐标转换矩阵的实时更新,其中只有 4 个待解参数,实时性高,解算过程没有奇点现象以及大量的三角函数计算,可有效实现坐标转换矩阵的实时解算。

在实时解算过程中,四元数随姿态角变化不断进

行更新,通过四元数微分方程可解算出每一时刻下的四元数,四元数微分方程如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_0 \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} q_0 & -q_1 & -q_2 & -q_3 \\ q_1 & q_0 & q_3 & -q_2 \\ q_2 & -q_3 & q_0 & q_1 \\ q_3 & q_2 & -q_1 & q_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中:  $q_0 \sim q_3$  为实数;  $\omega_x$ ,  $\omega_y$ ,  $\omega_z$  为机器人 3 个坐标轴方向的转动角速度矢量。

通过式(10)可以求得四元数的实时数据,再利用四元数即可求得坐标转换矩阵  $\mathbf{M}^T(\mathbf{Q})$ , 见式(11)。

$$\mathbf{M}^T(\mathbf{Q}) = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

完成坐标转换方程的建立及实时解算,即可运用得到的机器人导航坐标系下的位置坐标组,进行两个相邻机器人间的相对位姿关系的求解。以此类推,可得到工作面机器人群组间的相对位姿。

### 3.2.2 位姿实时输出方法

为实现充填支护机器人位姿的实时输出,构建数字孪生模型,监测机器人的驱动机械臂运动量或其他可确定机器人完整运动状态的参量驱动孪生模型,然后又再基于孪生模型获取其余位姿参数。

通过三维仿真软件建立充填支护机器人数字模型,再使用插件工具导入数学仿真软件,利用接口技术输入传感器实时采集数据,实现孪生模型的驱动。位姿解算与孪生输出测试界面如图 11 所示。

通过监测和导入全工况场景下影响充填支护机器人位姿的参数,采用上述途径实现全工况场景下的位姿表征与输出。

## 4 煤矿固体智能充填支护机器人机械臂组自调控方法

### 4.1 异常工况判别机制

异常工况包括充填支护机器人单机或群组自身的位置姿态、与其他机器人的配合状态以及和充填采场地质环境的耦合状态中潜在的非正常状态,前文将充填支护机器人全工况场景划分为地质条件类、支护效果类、支护姿态类、机械臂干涉类和行走轨迹类 5 类具体工况类型,可进一步将机械臂组干涉类、行走轨迹类、支护姿态类概括为干涉类工况,反映单机、多机位姿及干涉状态,将支护效果类、地质条件类等概括为工序执行效果类工况,反映支护、夯实及其他采



图 11 充填支护机器人位姿解算与孪生输出测试

Fig.11 Position and pose solution and twin output test of backfilling support robot

充工序的完成效果。

为保障机器人的自主执行能力、实现采充工序全自动作业,采用以下4个指标共同作为工况异常与否的通用判别准则。①能否正常完成工序流程?②工序执行过程中是否会造成结构干涉、损坏或其他危险?③工序执行是否会影响下一工序?④工序执行效果是否最佳?

4个评判指标的优先级依次递减,在机器人感知环境、工序、位姿3类参数后,定义各类工况的表征指标。

针对单机的干涉类工况,单机内部机械臂之间的干涉工况文献[22-23]有充分研究,基于位姿表征指标利用投影法可建立起夯实机械臂被物料掩埋的落料干涉临界方程以及与输送机底部或后部碰撞的干涉临界方程,并以夯实机械臂姿态角与位移构建干涉临界曲线,可实现干涉工况的表征和判别;

针对多机干涉类工况,可基于多机位姿表征指标利用投影法构建相应的干涉临界进行表征。针对机器人姿态类工况,有单机及多机位姿表征指标即可完成表征;

针对支护效果、夯实效果等工序执行效果类工况,对于支护效果表征判别,需要进行机器人姿态参数、结构和工作阻力等主要技术参数与承载状态的耦合关系理论研究,并且依赖一定的地质条件环境参数监测手段;对于夯实效果表征判别,需进行充填材料散体成体效果与机械夯实工艺参数、地质参数、材料参数的耦合关系理论研究,并采用非接触式传感器识别充填体形态和精确监测充填量。

在完成相关工况的实时表征后,可构建出煤矿固体智能充填支护机器人全工况状态判别判据。进而综合判别各类指标值是否满足上述4项判别准则,若

不满足前三项则界定为异常工况、满足第3项而不满足第4项时界定为非理想工况(夯实效果是否最佳,支护姿态、工作阻力、承载状态是否最佳等),形成充填支护机器人异常工况的判别机制,如图12所示。

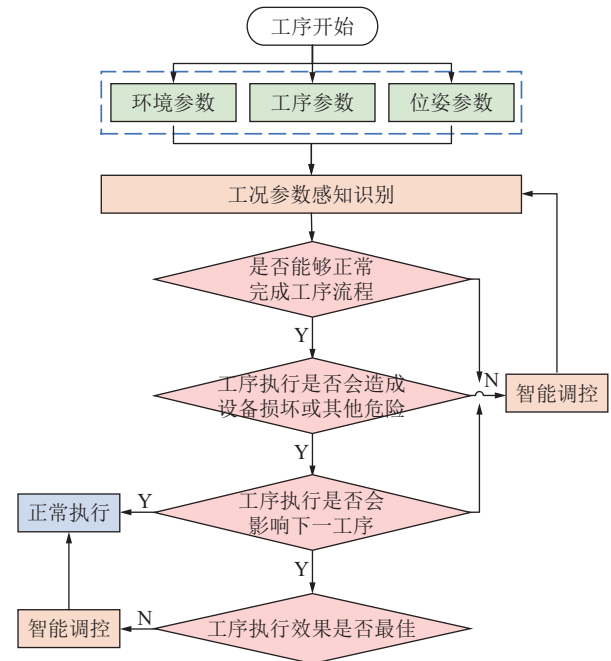


图 12 异常工况的判别机制

Fig.12 Identification mechanism for abnormal working conditions

#### 4.2 复杂工况机械臂组运动规划机制

采煤工作面环境条件复杂多变,充填工序过程中各机构联动,导致煤矿固体智能充填支护机器人工作过程中存在多种复杂工况。结合4.1节建立的工况状态判据,分析其中各判别参数对工况状态的影响程度,确定异常工况转为正常工况的最优调控路径,进一步得到全工况路径规划。权衡分析该路径执行对下一工序影响程度、本调控路径是否潜在新的异常工况状

态等因素,确定最优调控路径。

机械本体结构受支撑机械臂数目、支撑机械臂缸径、四连杆机构形式等变化而变化,或支护高度及煤层倾角变化以后,静态参数特征与动态参数特征也将发生变化,进而导致全工况状态的判别准则随之发生变化,相应最优调控途径也发生变化。通过分析

机械本体结构、采高、煤层倾角等因素对判别准则、自调控路径及参数化表达影响规律,结合前节所述全工况状态判别与调控路径,进而形成覆盖多种采充装备类型、多种地质条件、多种工作环境状态下全工况场景精确判别与机械臂组运动规划机制,如图 13 所示。

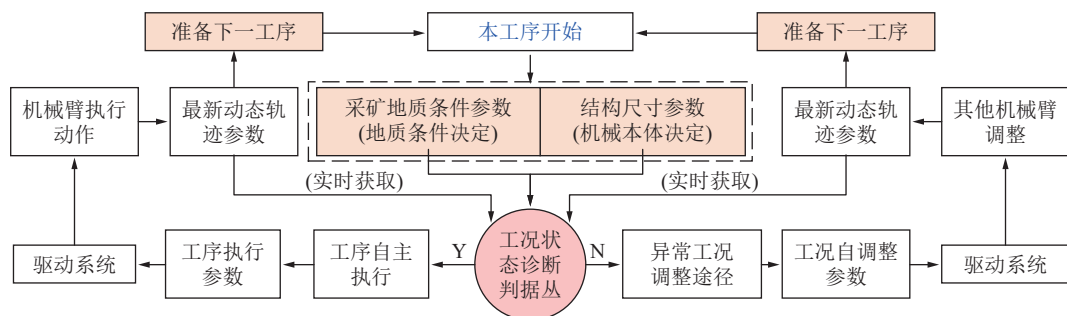


图 13 工况状态精确判别与机械臂组运动规划机制

Fig.13 Precise discrimination of working condition and action planning mechanism of robotic arm group

#### 4.3 机械臂组控制驱动原理与方法

工况状态判别与调控机制建立后,正常工况自主执行或者异常工况调控执行,均由单个或成组机械臂运动完成。机械臂组基于工序执行参数或工况自调

控参数精准执行轨迹,实现工况调控或正常工序动作。利用液压系统与控制系统相结合对机械臂组进行控制,控制系统包括运动规划模块和控制器。以 PID 控制为例阐述控制逻辑如图 14 所示。

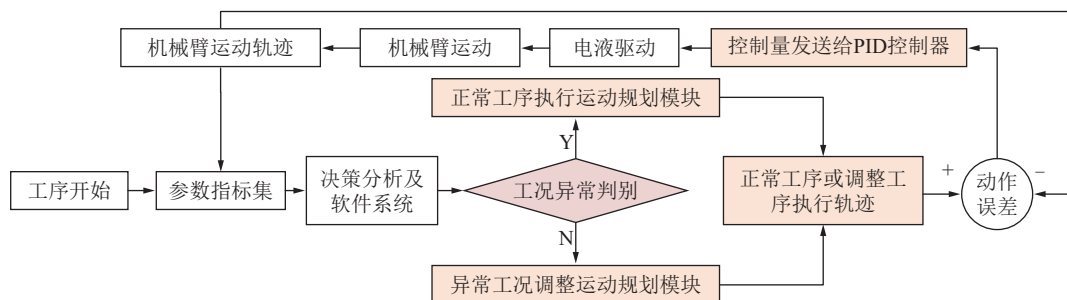


图 14 PID 控制器控制机械臂组运动路径逻辑

Fig.14 PID controller to control the motion path logic of the robotic arm group

运动规划模块计算机械臂组工序执行或动作调控的理想运动轨迹,作为 PID 控制器目标输入, PID 控制器根据理想轨迹和实际位置偏差,计算液压油缸驱动控制量,调节机械臂组运动,确保油缸驱动精准,使机械臂组沿理想轨迹执行工序动作或进行工序调控。

综上所述,给出了机械臂组异常判别、运动规划、控制驱动的逻辑。以机械臂组碰撞异常工况为例,卸料工序开始前,以夯实头恰好不被物料掩埋的干涉临界曲线为界,避免卸料干涉,夯实机械臂恰好不与输送机后侧棱边碰撞时的夯实角为临界夯实角,当夯实角小于临界夯实角时,可不必考虑干涉问题,当夯实角超过临界夯实角后,以夯实机械臂与输送机底部、后部及后承载梁不同位置恰好碰撞时干涉临界曲线为界,避免碰撞干涉。再基于运动学方程,正解实现位姿表征指标、干涉临界曲线、临界夯实角的更新,逆

解实现由目标位姿反解规划机械臂运动轨迹,具体干涉解调机制如图 15 所示。

## 5 煤矿固体智能充填支护机器人工序自驱仿真测试

### 5.1 工序自驱作业机制

根据上述研究,煤矿固体智能充填支护机器人工序自驱作业包含“全类别参数感知→位姿表征与解算→异常工况判别→机械臂组运动规划→机械臂组控制驱动”。

工序开始时,机器人参数采集模块根据第 2 节参数感知方法,感知机械臂组行程等内部结构参数与环境参数、工序参数、充填体形态等外部参数,将内部参数输入位姿解算模块,利用 3.2 节构建的表征模型,采用运动学正解输出位姿等相应指标至工况判别模块,



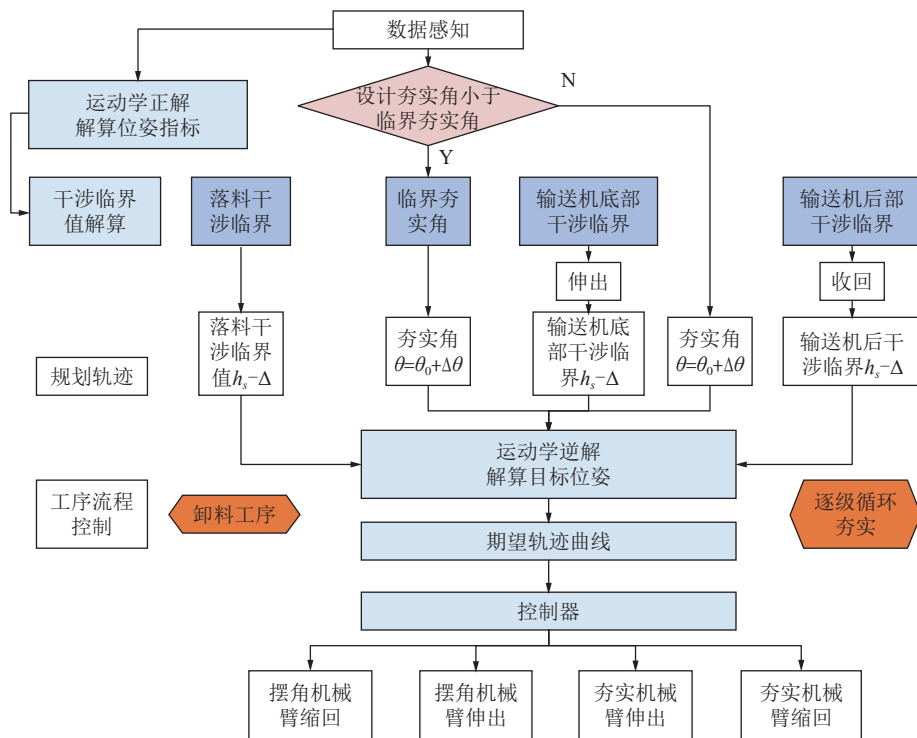


图 15 煤矿固体智能充填支护机器人干涉解调机制

Fig.15 Interference demodulation mechanism of coal mine solid intelligent backfilling support robot

结合外部参数与 4.1 节的异常工况的判别机制,设计判据判别工况状态,若判别出异常工况,则运用运动学逆解由目标位姿反解出各机械臂油缸的动作量,再由 PID 控制器跟踪执行,实现多缸联动控制。根据以上原理设计了工序自驱作业机制,如图 16 所示。

## 5.2 仿真测试样机构建

### 1) 仿真测试样机构建方法

固体智能充填支护机器人仿真测试样机的数字模型主要基于动力学仿真、系统仿真和数学仿真等软

件,利用联合仿真接口技术搭建而成。

机器人机械本体系统以 ZC5160/30/50 型充填液压支架为机械基础,利用三维仿真软件建立模型,然后导出相关格式文件,再导入动力学仿真软件,建立运动约束、接触参数和材料属性。

在系统仿真软件中根据固体充填支护机器人的液压系统原理建立动力系统,同时利用自带的运动控制仿真模块构建各驱动机械臂的控制器,完成机器人驱动控制系统构建。

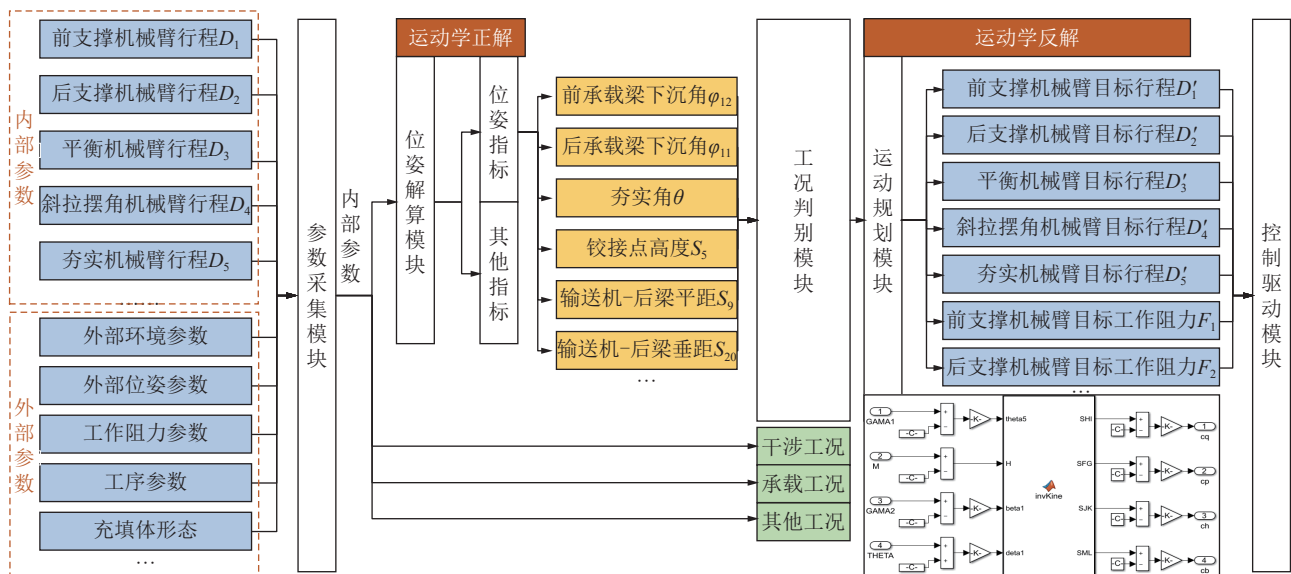


图 16 煤矿固体智能充填支护机器人工序自驱作业机制

Fig.16 Process self-driving operation mechanism of the coal mine solid intelligent filling support robot

在动力学仿真软件和系统仿真软件中完成机器人机械本体系统、驱动控制及动力系统构建,由于两系统之间数据通信的需要,在 2 个软件中设置了各机械臂速度、位移、液压力等变量的传感器测点,完成感知系统的构建。

利用数学仿真软件的可视化仿真工具,基于第 3 与第 4 节的研究,应用自定义函数模块编写程序求解运动学方程、位姿指标方程和干涉工况指标方程。

## 2) 仿真测试数字样机数据通信与集成

为实现各子系统之间的数据传输,将动力学仿真

软件中与分析决策系统交互的输入输出端口导出到数学仿真软件中,与系统仿真软件连接,在系统仿真软件中创建数据接口模块,用于接收机械系统的位移、速度和控制系统输出的期望位移信号,以及将驱动力传递给机械系统,实现机械系统中机械臂位移、底座倾角等参数传入和机械臂组期望位移传出。

基于动力学仿真软件中建立的机械系统、系统仿真软件建立的动力系统以及数学仿真软件中建立的感知系统和分析决策系统,通过联合仿真接口技术<sup>[31]</sup>,集成了机电液一体化的数字样机,如图 17 所示。

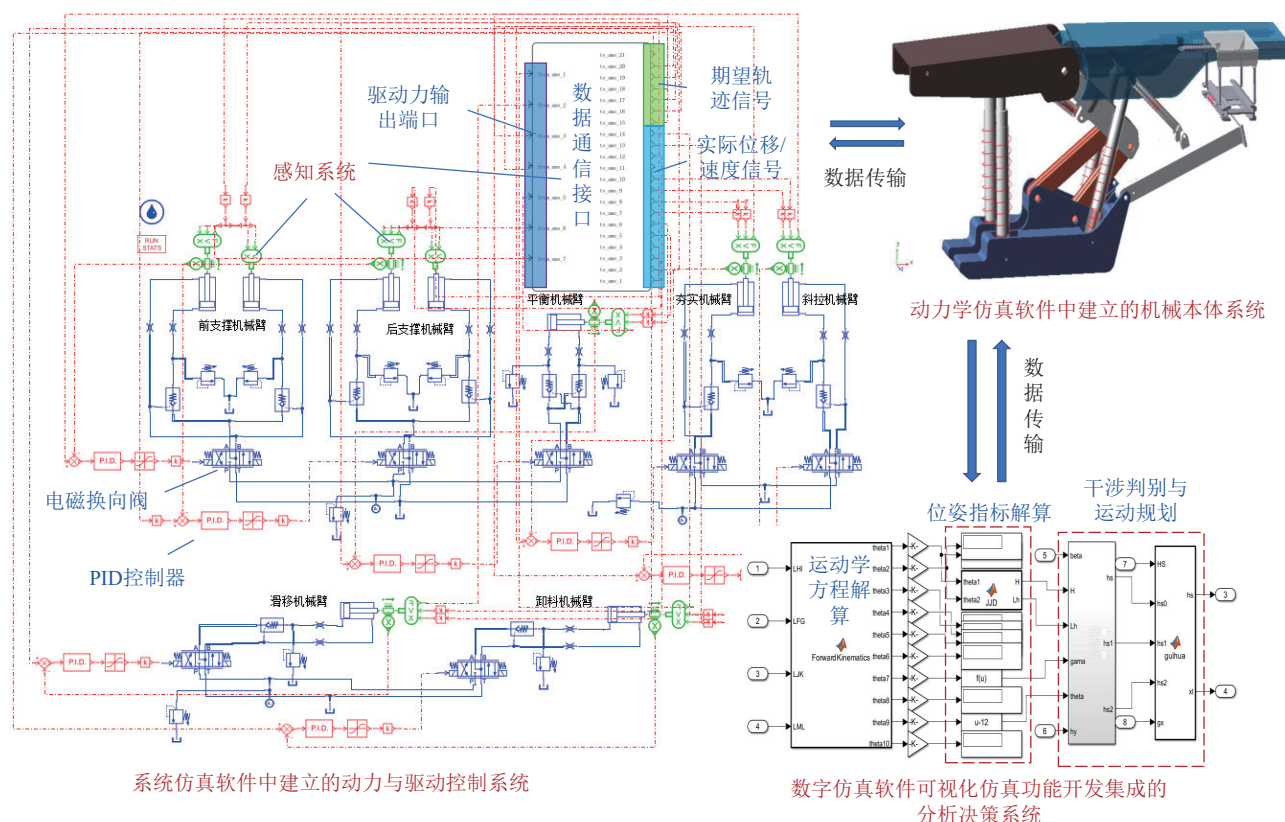


图 17 各子系统集成及数据通信原理

Fig.17 Schematic diagram of subsystem integration and data communication

## 5.3 工序自驱仿真执行测试方案

### 1) 工况环境设定

工况改变会引起充填支护机器人的姿态变化,导致夯实机械臂与输送机发生碰撞以及卸料时被掩埋的干涉临界值也随之改变。为了检验分析决策系统的可靠性,设置“俯采仰充”“水平采充”“仰采俯充”3种工况进行工序自驱仿真。

根据工程经验值,机械本体对应型号支架在使用过程中顶板提前下沉量为 472.44 mm,对应后承载梁下沉角为 5°。设计采高 4 500 mm,煤层倾角分别取 -15°、0°和 15°,滑移机械臂行程取最大值 800 mm。

### 2) 分析决策系统设定

机械臂组干涉判别及夯实轨迹规划是工序自驱作业的核心智能内涵,集成系统如图 18 所示。

该系统需要传入 8 个参数,输出 2 个参数,其中除底座(煤层)的倾角和后拉滑移机械臂位移需要额外采集外,其余参数均利用 3.2 节建立的位姿解算方程解算得出,位姿解算所需机械臂位移在动力学仿真软件模型中设置测点测量得出,由端口 1~4 传入。根据 4.1 节建立的工况状态判据,设置干涉临界方程并编写成 Function 模块,由端口 5 传入煤层倾角、端口 6 传入滑移机械臂位移用于解算输送机的位姿,进一步完成干涉临界方程的求解输出当前状态下潜在干涉位置的临界值,再通过端口 8 传入当前的工序信

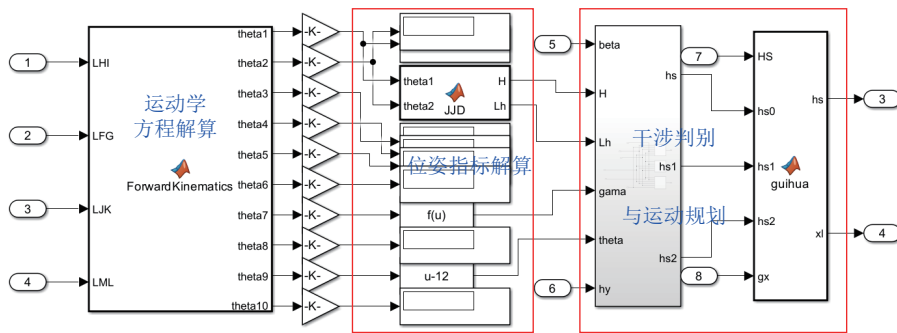


图 18 工序自驱作业分析决策系统

Fig.18 Self-driving operation process analysis and decision system

息,选取与当前工序对应的干涉临界值,通过端口 7 采集夯实机械臂实时位移,由规划模块解算出夯实机械臂和斜拉机械臂的期望轨迹值,通过输出端口 3、4 传入到驱动控制系统内执行,从而形成具备位姿工况实时输出、干涉工况自主判别与夯实机械臂运动自主规划的功能。

### 3) 自驱工序流程设定

在工况仿真时,设定卸料工序开始前的夯实机械臂初始夯实角和初始位移;卸料工序结束后,进行第一次夯实;增大角度进行第二次夯实,为测试夯实机械臂收回时与输送机干涉的判别情况,设置第二次目标夯实角为  $28^\circ$ ;最后降低夯实角度进行第三次夯实,夯实结束后回到起始点。

## 5.4 工序自驱执行测试结果分析

按照上述流程运行仿真模型进行了完整测试,解算出各工况下不同夯实角对应干涉临界曲线,以及以夯实角与夯实机械臂油缸行程表征的夯实头轨迹,如图 19 所示。

由图 19 可知,工况判别模块可根据工况参数明确干涉临界曲线,并判别出机构间是否存在干涉,进而,运动规划模块可合理规划夯实机械臂油缸与斜拉摆角机械臂油缸的行程,使之在 3 次夯实的过程中避免与输送机发生碰撞。

输送机的柔性悬吊特征导致其受重力作用,在“俯采仰充”时向煤壁侧摆动,卸料中心距减小,卸料时夯实机械臂更容易被掩埋,而夯实时不易与输送机碰撞;“仰采俯充”时向采空区摆动,影响效果则相反;“水平采充”工况则相对理想。如图 19 所示,“仰采俯充”时,夯实头恰好不与输送机底部碰撞的临界夯实角为输送机底部干涉临界曲线的最小值  $23.36^\circ$ ,“水平采充”与“仰采俯充”时该值为  $22.52^\circ$ 、 $22.27^\circ$ ,呈递减趋势,即夯实头与输送机底部碰撞概率越来越小。三种工况干涉临界曲线的极值见表 1,可以看出“俯采仰充”“水平采充”“仰采俯充”的夯实角临界

极值呈递减,夯实机械臂油缸行程临界极值呈递增,即夯实头与输送机底部碰撞概率越来越低。仿真结果与理论分析相同,可验证工况判别模块所生成判据的有效性。

以“俯采仰充”工况为例,提取模型监测的以夯实机械臂与底座铰接点为坐标原点的坐标系下的夯实头轨迹如图 20 所示。

图 19b 为以夯实机械臂与底座铰接点为坐标原点的坐标系下的夯实头轨迹。图中 1、9 表示夯实机械臂夯实头初始和工序执行完毕后的目标位置;4、5、7、8 表示工序执行过程中规划的夯实头理论目标位置;2、3、6 表示工序执行过程中调控解算出的目标位置点;序号①~⑧代表夯实头的运动次序;箭头表示夯实头的运动方向。

通过对图中“1”“2”“3”“6”等典型目标位置点的精确识别,可有效避免碰撞、干涉等异常工况发生。

综上所述,固体智能充填支护机器人可精准判别干涉并解算出调控的目标位置,系统整体运行及工序自驱执行功能得到验证,后续通过算法优化及构建机械臂组执行速度和精准度的评价指标,评测优化执行智能程度,进一步缩小执行轨迹与理论目标位置点的偏差,以提高工序自驱执行的精度。

## 6 结 论

1) 提出了煤矿固体智能充填支护机器人的概念与系统构成,阐明了其关键科学问题与技术挑战。首次定义了煤矿固体智能充填支护机器人的概念,设计了由感知系统、分析决策系统、驱动控制系统、动力系统等组成的机器人系统构成;揭示了煤矿固体智能充填支护机器人工序自驱作业机制。

2) 构建了煤矿固体智能充填支护机器人全工况状态感知、运动学建模与控制方法。针对全工况作业需求,提出了全类别运行状态参数的感知方法,构建



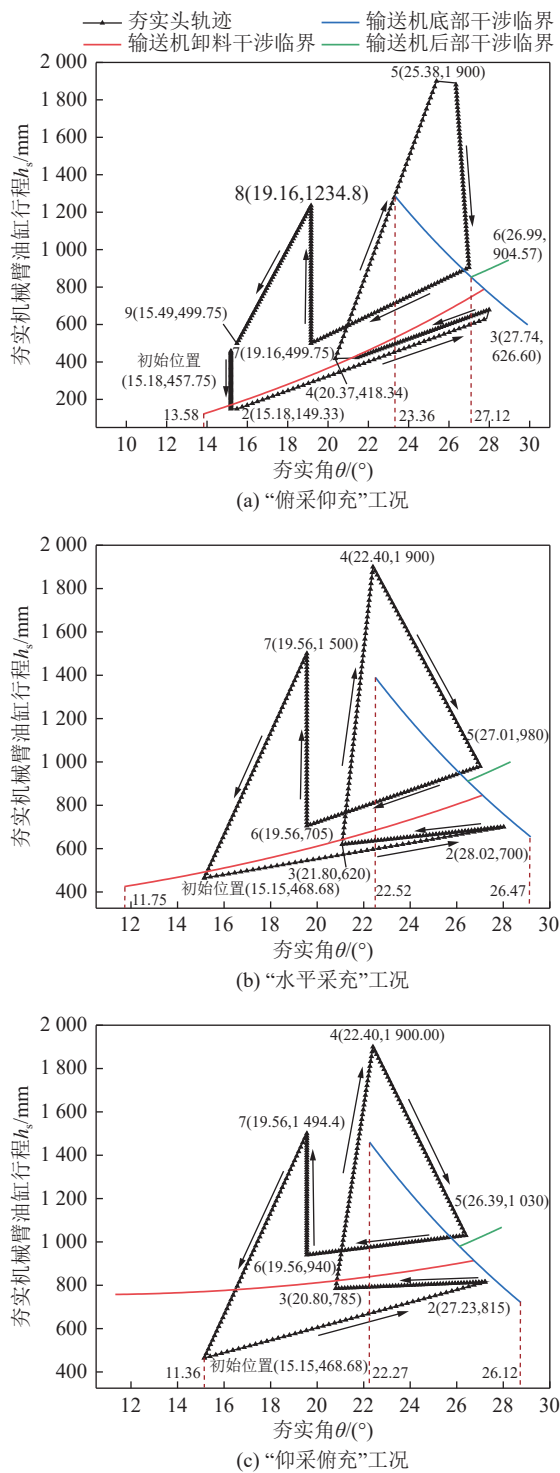


图 19 各工况下干涉临界曲线

Fig.19 Interference critical curves under various operating conditions

了全工况运行状态判别方法;建立了机器人全工况运动学模型,形成了全工况位姿的精确表征与输出方法并构建了机械臂组自调控方法。

3) 构建了煤矿固体智能充填支护机器人虚拟样机仿真试验平台。建立了煤矿固体智能充填支护机器人仿真测试样机的数字模型,进行了自驱充填工序

表 1 3 种工况干涉临界曲线极值汇总

Table 1 Summary of extreme values of interferometric critical curves for three working conditions

采充工况 临界极值		俯采仰充	水平采充	仰采俯充
夯实角/(°)	卸料干涉	13.85	11.75	11.36
	底部干涉	23.36	22.52	22.27
	后部干涉	27.12	26.47	26.12
油缸行程/(mm)	卸料干涉	122.91	425.63	757.60
	底部干涉	1 280.85	1 387.31	1 457.38
	后部干涉	854.60	911.86	979.95

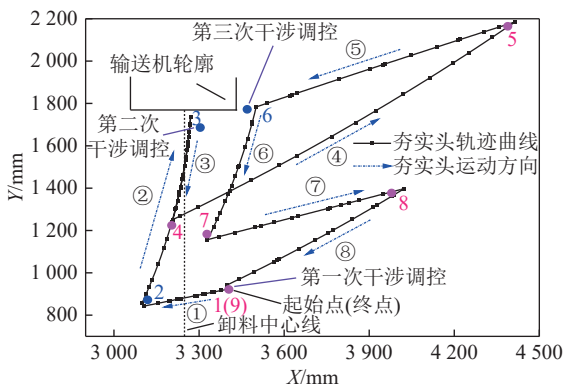


图 20 “俯采仰充”工况下自驱充填工序测试结果

Fig.20 Test results of self-driving backfilling process under the condition of “downward mining and upward backfilling”

仿真,验证了充填支护机器人系统整体运行及位姿指标实时解算输出、干涉工况自主判别、夯实轨迹自主规划等智能功能。后续着手搭建机器人的物理实验平台,进一步验证及深度研发其智能功能。

4) 针对煤矿固体智能充填支护机器人研发面临的关键科学问题,初步构建了煤矿固体智能充填支护机器人及其关键技术的研究框架、研发思路与技术路线,可为深度升级充填开采技术、研发我国完全自主知识产权的煤矿固体智能充填支护机器人装备产品提供理论及技术支撑。

参考文献(References):

[1] 葛世荣,樊静丽,刘淑琴,等. 低碳化现代煤基能源技术体系及开发战略[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 203–223.  
GE Shirong, FAN Jingli, LIU Shuqin, et al. Low carbon modern coal-based energy technology system and development strategy[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 203–223.

[2] 王国法,刘合,王丹丹,等. 新形势下我国能源高质量发展与能源安全[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(1): 23–37.  
WANG Guofa, LIU He, WANG Dandan, et al. High-quality energy development and energy security under the new situation for China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(1):

- 23-37.
- [3] 康红普, 李全生, 张玉军, 等. 我国煤矿绿色开采与生态修复技术发展现状及展望[J]. 绿色矿山, 2023(1): 1-24.  
KANG Hongpu, LI Quansheng, ZHANG Yujun, et al. Development status and prospect of greenmining and ecological restoration technology of coal mines in China[J]. Journal of Green Mine, 2023(1): 1-24.
- [4] 武强, 刘宏磊, 曾一凡, 等. 我国绿色矿山建设现状与存在问题及对策建议[J]. 绿色矿山, 2023(1): 25-32.  
WU Qiang, LIU Honglei, ZENG Yifan, et al. Situation, challenges, and proposed strategies for green mine construction in China[J]. Journal of Green Mine, 2023(1): 25-32.
- [5] 张吉雄, 周跃进, 黄艳利. 综合机械化固体充填采煤一体化技术[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(11): 10-13, 27.  
ZHANG Jixiong, ZHOU Yuejin, HUANG Yanli. Integrated technology of fully mechanized solid backfill mining[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(11): 10-13, 27.
- [6] 周华强, 侯朝炯, 孙希奎, 等. 固体废物膏体充填不迁村采煤[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(2): 154-158, 177.  
ZHOU Huaqiang, HOU Chaojiong, SUN Xikui, et al. Solid waste paste filling for none-village-relocation coal mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(2): 154-158, 177.
- [7] 李永亮, 路彬, 杨仁树, 等. 煤矿连采连充式胶结充填采煤技术与典型工程案例[J]. 煤炭学报, 2022, 47(3): 1055-1071.  
LI Yongliang, LU Bin, YANG Renshu, et al. Cemented backfilling mining technology with continuous mining and continuous backfilling method for underground coal mine and typical engineering cases[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(3): 1055-1071.
- [8] 马立强, 许玉军, 张东升, 等. 壁式连采连充保水采煤条件下隔水层与地表变形特征[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(1): 30-36.  
MA Liqiang, XU Yujun, ZHANG Dongsheng, et al. Characteristics of aquiclude and surface deformation in continuous mining and filling with wall system for water conservation[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(1): 30-36.
- [9] 许家林, 轩大洋, 朱卫兵, 等. 部分充填采煤技术的研究与实践[J]. 煤炭学报, 2015, 40(6): 1303-1312.  
XU Jialin, XUAN Dayang, ZHU Weibing, et al. Study and application of coal mining with partial backfilling[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(6): 1303-1312.
- [10] 张吉雄, 张强, 巨峰, 等. 煤矿“采选充+X”绿色化开采技术体系与工程实践[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 64-73.  
ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, JU Feng, et al. Practice and technique of green mining with integration of mining, dressing, backfilling and X in coal resources[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 64-73.
- [11] 张强, 张吉雄, 杨康, 等. 综合机械化放顶煤充填开采技术构想及理论框架研究[J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(3): 469-482.  
ZHANG Qiang, ZHANG Jixiong, YANG Kang, et al. Research on technical conception and theoretical framework of fully mechanized top-coal caving backfill mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(3): 469-482.
- [12] 张吉雄, 张强, 周楠, 等. 煤基固废充填开采技术研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2022, 47(12): 4167-4181.  
ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, ZHOU Nan, et al. Research progress and prospect of coal based solid waste backfilling mining technology[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12): 4167-4181.
- [13] 张强, 崔鹏飞, 张吉雄, 等. 固体智能充填关键装备工况位态表征及自主识别调控方法[J]. 煤炭学报, 2022, 47(12): 4237-4249.  
ZHANG Qiang, CUI Pengfei, ZHANG Jixiong, et al. Condition state characterization and self-identification control method of key equipment for intelligent solid backfilling[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12): 4237-4249.
- [14] 张强, 王云搏, 张吉雄, 等. 煤矿固体智能充填开采方法研究[J]. 煤炭学报, 2022, 47(7): 2546-2556.  
ZHANG Qiang, WANG Yunbo, ZHANG Jixiong, et al. Research on intelligent solid backfilling mining method in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(7): 2546-2556.
- [15] 葛世荣, 胡而已, 李允旺. 煤矿机器人技术新进展及新方向[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 54-73.  
GE Shirong, HU Eryi, LI Yunwang. New progress and direction of robot technology in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 54-73.
- [16] 葛世荣, 张晞, 薛光辉, 等. 我国煤矿煤机智能技术与装备发展研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(5): 146-156.  
GE Shirong, ZHANG Xi, XUE Guanghui, et al. Development of intelligent technologies and machinery for coal mining in China's underground coal mines[J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(5): 146-156.
- [17] 葛世荣. 煤矿机器人现状及发展方向[J]. 中国煤炭, 2019, 45(7): 18-27.  
GE Shirong. Present situation and development direction of coal mine robots[J]. China Coal, 2019, 45(7): 18-27.
- [18] 中华人民共和国中央人民政府. 工业和信息化部等十七部门关于印发“机器人+”应用行动实施方案的通知[EB/OL]. [2023-01-18]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2023-01/19/content\\_5738112.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2023-01/19/content_5738112.htm).
- [19] 任怀伟, 赵国瑞, 周杰, 等. 智能开采装备全位姿测量及虚拟仿真控制技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 956-971.  
REN Huaiwei, ZHAO Guorui, ZHOU Jie, et al. Key technologies of all position and orientation monitoring and virtual simulation and control for smart mining equipment[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 956-971.
- [20] 方新秋, 梁敏富, 李爽, 等. 智能工作面多参量精准感知与安全决策关键技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 493-508.  
FANG Xinqiu, LIANG Minfu, LI Shuang, et al. Key technologies of multi-parameter accurate perception and security decision in intelligent working face[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 493-508.
- [21] 廉自生, 袁祥, 高飞, 等. 液压支架网络化智能感控方法[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2078-2089.  
LIAN Zisheng, YUAN Xiang, GAO Fei, et al. Networked intelligent sensing method for powered support[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2078-2089.
- [22] 宗庭成, 张强, 时培涛, 等. 固体充填液压支架机构干涉临界表征与自主解调方法[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(8): 260-270.

- ZONG Tingcheng, ZHANG Qiang, SHI Peitao, et al. Mechanism interference critical characterization and autonomous demodulation method of solid filling hydraulic support[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(8): 260–270.
- [23] 杨印朝, 王云搏, 张强, 等. 固体智能充填机械自主夯实过程机构干涉判别与调控研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2022, 39(5): 921–929.
- YANG Yinchao, WANG Yunbo, ZHANG Qiang, et al. Mechanism of interference discrimination and adjustment in the mechanical independent compaction process of intelligent solid backfilling method[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2022, 39(5): 921–929.
- [24] 庞义辉, 刘新华, 王泓博, 等. 基于千斤顶行程驱动的液压支架支护姿态与高度解析方法[J]. *采矿与安全工程学报*, 2023, 40(6): 1231–1242.
- PANG Yihui, LIU Xinhua, WANG Hongbo, et al. Support attitude and height analysis method of hydraulic support based on jack stroke drive[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2023, 40(6): 1231–1242.
- [25] 王虹, 尤秀松, 李首滨, 等. 基于遗传算法与 BP 神经网络的支架跟机自动化研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(1): 272–277.
- WANG Hong, YOU Xiusong, LI Shoubin, et al. Research on automation of support based on genetic algorithm and BP neural network[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(1): 272–277.
- [26] 解盘石, 杨航, 伍永平, 等. 基于数字孪生的倾斜采场装备力学行为测控研究[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(12): 259–271.
- XIE Panshi, YANG Hang, WU Yongping, et al. Investigation into the Monitoring and Control of Mechanical Dynamics in Inclined Mining Equipment Utilizing Digital Twin Technology[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(12): 259–271.
- [27] ZHANG Y, ZHANG H Y, GAO K D, et al. Research on intelligent control system of hydraulic support based on position and posture detection[J]. *Machines*, 2023, 11(1): 33.
- [28] 张强, 张吉雄, 宗庭成, 等. 煤矿固体智能充填支护机器人[P]. 江苏省: CN117588256A, 2024–02–23.
- ZHANG Qiang, ZHANG Jixiong, ZONG Tingcheng, et al. intelligent solid backfilling support robot in coal mine[P]. Jiangsu: CN117588256A, 2024–02–23.
- [29] 宋超, 原菲菲, 尚姣, 等. 基于 Bursa-Wolf 模型的坐标转换工具设计[J]. *地理空间信息*, 2014, 12(2): 139–140, 148, 11.
- SONG Chao, YUAN Feifei, SHANG Jiao, et al. Design of coordinate system conversion tools based on bursa-wolf model[J]. *Geospatial Information*, 2014, 12(2): 139–140, 148, 11.
- [30] 秦锋, 鹿松, 张振虎. 基于单位四元数矩阵实表示的坐标转换算法研究[J]. *现代测绘*, 2023, 46(6): 25–30.
- QIN Feng, LU Song, ZHANG Zhenhu. Coordinate transformation algorithm based on matrix real representation of unit quaternion[J]. *Modern Surveying and Mapping*, 2023, 46(6): 25–30.
- [31] MENG, Z S, ZENG, Q L, WAN, L R, et al. Pose adjusting simulation of hydraulic support based on mechanical-electrical-hydraulic coordination[J]. *Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette*, 2018, 25(4): 1110–1118.