



移动扫码阅读

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.

## 固体充填液压支架机构干涉临界表征与自主解调方法

宗庭成<sup>1,2</sup>, 张 强<sup>1,2</sup>, 时培涛<sup>1,2</sup>, 王云搏<sup>1,2</sup>, 李凤铭<sup>1,2</sup>, 常天骄<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 221008)

**摘要:**在采充工序自驱执行过程中, 能否实现机构干涉的自主解调, 是固体充填液压支架能否实现智能化的基础。利用理论分析方法, 以 ZC5160/30/50 型固体充填液压支架为例, 从充填支架机构的几何及运动约束关系出发, 建立了正交位姿控制指标: 夯实铰点顶梁平距和夯实铰点顶梁垂距, 实现了任意工况下支架后顶梁的位姿表征; 分析了充填支架底卸式输送机在各工况因素作用下的运动特征, 建立了正交位姿控制指标: 底卸式输送机顶梁垂距和输送机顶梁平距, 实现了任意工况下底卸式输送机的位姿表征; 基于后顶梁和底卸式输送机的位姿控制指标进一步得出充填物料卸料过程中在煤层底板的落点位置表征指标: 卸料中心距, 实现了任意工况下充填物料的落点位置表征; 分析了采充工序执行过程中各工序阶段机构动作与位姿调整的衔接关系和易干涉位置, 基于正交位姿控制指标, 利用投影法建立了任意工况下落料与典型碰撞位置的干涉临界控制方程; 以夯实机构转角和夯实油缸行程表征典型工况下的干涉临界曲线, 提出采用“干涉区、易干涉区、非干涉区”的三区分布特征表征干涉临界程度, 并给出各干涉状态的解调路径; 基于干涉临界控制方程、干涉三区分布特征和充填工序过程中机构动作与位姿调整的衔接关系, 提出了干涉状态自主识别方法: 利用角度传感器及行程传感器获取夯实机构的实时转角和行程, 代入各易干涉位置的干涉临界方程得到处于该位置干涉临界状态的夯实机构转角或行程的理论值和干涉临界曲线, 判断实际值在干涉临界曲线三区分布图上的位置即可实现干涉位置及状态的自主判别, 根据干涉三区分布曲线图即可实现自主解调; 基于干涉位置及干涉状态自主识别方法设计了干涉自主判别和解调算法。研究结果为充填液压支架机构位姿表征提供了新的参考指标, 为机构干涉的智能避障和解调提供了基础判据, 为固体智能充填的采充工序自驱执行提供了算法基础。

**关键词:** 智能充填; 充填开采; 液压支架; 干涉临界; 表征方法; 自主解调

中图分类号: TD822

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)08-0260-11

### Mechanism interference critical characterization and autonomous demodulation method of solid filling hydraulic support

ZONG Tingcheng<sup>1,2</sup>, ZHANG Qiang<sup>1,2</sup>, SHI Peitao<sup>1,2</sup>, WANG Yunbo<sup>1,2</sup>, LI Fengming<sup>1,2</sup>, CHANG Tianjiao<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:** Whether the self-demodulation of mechanism interference can be realized in the self-driven execution process of filling operation is the basis for the solid filling hydraulic support to achieve intelligence. Using the theoretical analysis method, taking the ZC5160/30/50 type solid filling hydraulic support as an example, starting from the geometric and motion constraint relationship of the filling support mechanism, the orthogonal pose control index is established: the horizontal distance and vertical distance of the tamping hinge point top beam, which realizes the pose characterization of the rear top beam of the support under any working condition; The motion char-

收稿日期: 2022-07-06 责任编辑: 常 琛 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1062

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(52174134); 中央高校基本科研业务费专项资助项目(2021GJZPY12)

作者简介: 宗庭成(1997—), 男, 云南鲁甸人, 硕士研究生。E-mail: TS21020078A31@cumt.edu.cn

通讯作者: 张 强(1986—), 男, 湖北宣恩人, 副教授, 博士生导师。E-mail: leafky@163.com

acteristics of the bottom-discharge conveyor of the filling support under various working condition factors were analyzed, and the orthogonal pose control index was established: the vertical distance and horizontal distance of the top beam of the bottom-discharge conveyor, which realized the pose characterization of the bottom-discharge conveyor under any working condition; Based on the pose control index of the rear top beam and the bottom-discharge conveyor, the landing position characterization index of the filling material on the coal seam floor during the discharge process is further obtained: the discharge center distance, which realizes the landing position characterization of the filling material under any working condition; the connection relationship and easy interference position of the mechanism action and pose adjustment in each stage of the filling operation process are analyzed, based on the orthogonal pose control index, the interference critical control equation of the discharge and typical collision position under any working condition is established by using the projection method; taking the tamping mechanism rotation angle and tamping cylinder stroke as the characterization of the interference critical curve under typical working conditions, it is proposed to use the three-zone distribution characteristics of “interference zone, easy interference zone, and non-interference zone” to characterize the interference critical degree, and give the demodulation path of each interference state; based on the interference critical control equation, interference three-zone distribution characteristics and the connection relationship of mechanism action and pose adjustment in the filling operation process, an interference state autonomous identification method is proposed: using angle sensor and stroke sensor to obtain the real-time rotation angle and stroke of the tamping mechanism, substituting into the interference critical equation of each easy interference position to obtain the theoretical value and interference critical curve of the tamping mechanism rotation angle or stroke in that position, judging the position of the actual value on the interference critical curve three-zone distribution diagram can realize the autonomous discrimination of interference position and state, and autonomous demodulation can be realized according to the interference three-zone distribution curve diagram; based on the interference position and interference state autonomous identification method, the interference autonomous discrimination and demodulation algorithm is designed. The research results provide new reference indicators for the pose characterization of the filling hydraulic support mechanism, provide basic criteria for the intelligent obstacle avoidance and demodulation of mechanism interference, and provide algorithm basis for the self-driven execution of the filling operation of solid intelligent filling.

**Key words:** intelligent mine; back filling mining; hydraulic support; interference threshold; characterization method; autonomous identification

## 0 引 言

固体充填开采的发展受限于其成本和效率, 尤其是其复杂的充填工序及频繁出现的机构干涉问题。为了实现固体充填开采工作面的智能化高效开采, 必须解决固体充填液压支架机构干涉问题, 而确定液压支架的机构干涉临界是解决机构干涉问题的首要前提。

固体充填液压支架结构属于复杂串-并联机构类型, 支架内部各机构的运动状态相互关联, 各机构可达空间存在交集, 这是机构干涉现象产生的根源。

固体充填液压支架在长期应用与实践过程中已有广泛研究主要包含以下几个方面: 充填支架的力学承载特性<sup>[1-2]</sup>; 充填工作面支架控顶机理<sup>[2-4]</sup>; 充填支架的充填特性<sup>[2,5-6]</sup>; 充实率影响因素与控制<sup>[7-8]</sup>; 架型结构<sup>[9-10]</sup>与强度<sup>[11-12]</sup>优化设计; 充填支架底卸式输送机性能<sup>[13-15]</sup>等方面研究。

近年来随矸石固废处置需求的增加, 固体充填开采工作面智能化的发展和提效增产需求逐渐增大, 固体充填液压支架机构干涉问题是制约其提高效率并进一步实现智能化的关键问题。目前相关研究主要集中在充填支架运动学分析与位姿监

测<sup>[15-18]</sup>和智能化控制<sup>[19-21]</sup>等方面, 以下文献推展固体充填液压支架机构干涉与解调相关问题的研究: 文献[22]对机构干涉问题进行了定义, 并将干涉类别按夯实工序分为: 卸料前准备阶段干涉, 卸料完成阶段干涉, 夯实阶段干涉, 夯实完成阶段干涉。文献[23]从采矿地质条件、架型、采充工艺布置等方面分析了支架干涉的影响因素, 并分析了固定工况下的典型干涉临界状态, 给出了简单工况下的干涉解调方法。文献[24]基于固体充填支架的静态特征建立了骨架模型, 给出了夯实机构的动态轨迹方程和干涉位态判别准则, 建立了各干涉位态调控路径。上述文献中用于判别干涉状态的指标考虑工况因素及支架本身运动特性方面还不够全面, 所得结果接近准静态条件下机构干涉问题。

综上, 现有研究对固体充填液压支架机构干涉临界等基础问题研究还不够深入, 需要进一步研究。

采用理论分析方法, 从分析固体充填液压支架机构干涉影响因素出发, 基于固体充填液压支架各机构的运动及几何约束关系, 定义了机构位姿控制指标, 分析了充填工序中易干涉阶段与位置, 并建立了任意工况下易干涉位置的干涉临界控制方程。结合典型工况以夯实机构转角和夯实油缸行程表征的

干涉临界曲线, 提出干涉三区分布, 结合干涉临界方程和充填工序, 提出了任意工况下干涉位置及干涉状态判别方法, 设计并通过仿真试验初步验证了充填面固体充填液压支架机构干涉自主识别与调控算法。

### 1 任意工况机构位姿控制指标构建

#### 1.1 机构位姿控制指标定义

机构干涉主要是指固体充填液压支架在执行充填工序过程中夯实机构与底卸式输送机、后顶梁和物料干涉。干涉问题主要涉及夯实机构、后顶梁和底卸式输送机 3 个机构, 另外, 物料落点位置与后顶梁、输送机位姿以及支架倾角和方向有关。因此有必要建立夯实机构、后顶梁和底卸式输送机 3 个机构的位姿以及物料落点位置的控制指标, 进而建立干涉状态临界的控制方程。

支架的位姿受多重复杂因素影响, 但由于几何和运动约束作用, 在一定限度内支架内部机构间的几何关系保持不变, 以 ZC5160/30/50 型固体充填液压支架为例, 对其进行几何分析如图 1 所示。

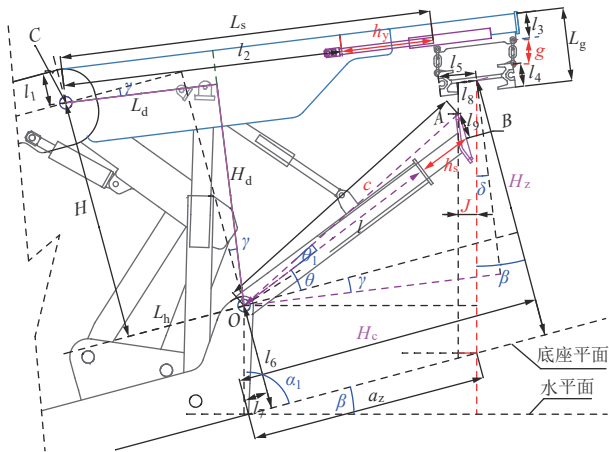


图 1 机构位姿几何分析

Fig.1 Geometric analysis of mechanism position and posture

图 1 中,  $O$  为夯实机构铰接点中心;  $A$  为夯实的上端点;  $B$  为夯实头面的中点;  $\beta$  为煤层倾角, “俯采”时取负值, “仰采”时取正值, 其余变量默认取正值;  $\gamma$  为后顶梁下沉角;  $\theta$  为夯实角 (以支架底座平面为基准);  $\theta_1$  为  $OA$  与  $OB$  夹角;  $\alpha_1$  为  $O$  点与支架底座后棱边连线与底座平面夹角;  $c$  为点  $O$  至点  $A$  的距离;  $L_s$  为输送机前端沿后顶梁轴线方向距点  $C$  距离;  $L_g$  为输送机底面到后顶梁顶面的垂直距离;  $H_d$  为点  $O$  至点  $C$  沿后顶梁轴线的垂距;  $L_d$  为点  $O$  至点  $C$  沿后顶梁轴线的水平距离;  $\delta$  为卸料中心摆角;  $H$  为点  $O$  至点  $C$  沿底座平面垂直距离;  $L_h$  为点  $O$  至点  $C$  沿底座平面水平距离;  $H_z$  为输送机中点至底板平面的

垂直距离;  $H_c$  为底板平面  $H_z$  垂足到底座后端的距离;  $a_z$  为卸料中心距;  $J$  为最小卸料间隙距;  $l_1$  为顶梁铰接点到顶梁顶面的垂直距离;  $l_2$  为滑移油缸行程最小时悬挂链上铰接点距顶梁铰接点距离;  $l_3$  为链条上铰接点至后顶梁顶面距离;  $l_4$  为链条下铰接点至输送机底面距离;  $l_5$  为输送机的半宽;  $l_6$  为夯实机构铰接点到底板平面垂直距离;  $l_7$  为夯实机构铰接点到底座后端的水平距离;  $l_8$  为输送机内测棱边到中轴线的距离;  $l_9$  为输送机端面长的一半;  $h_s$  为夯实油缸行程;  $h_y$  为滑移油缸行程;  $g$  为输送机悬挂链长。

图 1 几何分析可以根据支架在复杂工况因素作用下的几何及运动约束特征建立固体充填液压支架的机构位姿控制指标。

1) 输送机位姿控制指标。任意工况下, 输送机底面与后顶梁底面平行。在重力作用下, 只要底卸式刮板输送机悬挂链受力 (输送机不与后顶梁碰撞), 其始终保持竖直, 则输送机底面始终与后顶梁底面平行。

输送机的摆角和摆向与支架布置方向、煤层倾角和后顶梁下沉角度有关, 俯采仰充时, 输送机摆向支架前方, 仰采俯冲时输送机摆向后方。另外, 后顶梁下沉一定角度时, 输送机摆向后方。

综上, 可得摆角与煤层倾角、后顶梁下沉角关系, 见式 (1):

$$\delta = \beta + \gamma \quad (1)$$

可得输送机相对后顶梁的位置关系, 包括输送机顶梁平距和输送机顶梁垂距, 其中输送机顶梁平距 (沿后顶梁轴线方向) 见式 (2):

$$L_s = l_2 + h_y + g \sin \delta \quad (2)$$

输送机顶梁垂距 (沿后顶梁顶面法线方向) 见式 (3):

$$L_g = l_3 + l_4 + g \cos \delta \quad (3)$$

式 (2)、(3) 分别控制了输送机相对于后顶梁的水平和垂直方向位姿, 且两个指标正交。

2) 偏移特性控制指标。后顶梁与输送机位姿受四连杆偏移特性影响。四连杆机构中, 上连杆的运动轨迹呈现似双扭线形状, 支架升降过程中存在偏移现象, 导致与四连杆直接或间接相连的机构受影响。输送机既受偏移现象影响, 又受煤层倾角、顶板破碎度布置方式等多方面因素影响。夯实机构铰接于底座并通过斜拉摆角油缸及后顶梁和四连杆间接相连。

综上, 定义一对正交指标: ①点  $O$  至点  $C$  沿后顶梁轴线的垂距记作夯实铰点-顶梁垂距, ②点  $O$  至

点 C 沿后顶梁轴向的水平距离记作夯实铰点-顶梁平距。两指标对应控制方程见式 (4)、(5)：

$$H_d = H \cos \gamma - L_h \sin \gamma \quad (4)$$

$$L_d = L_h \sec \gamma + H_d \tan \gamma \quad (5)$$

3) 物料落点位置控制指标。支架在所处空间中的位姿不同,物料落点位置也不同,以卸料中心距来表征,其主要与输送机位姿相关,受支架倾角、高度、布置方向、后顶梁下沉角度和输送机悬挂链长度等因素影响。任意工况下卸料中心距见式 (6)：

$$a_z = H_c + H_z \tan \beta \quad (6)$$

式 (6) 中,中间变量需满足式 (7)：

$$\begin{cases} H_z = H - (L_s + l_5) \sin \gamma - (L_g - l_1 - l_4/2) \cos \gamma + l_6 \\ H_c = (L_s + l_5) \cos \gamma - (L_g - l_1 - l_4/2) \sin \gamma - L_h + l_7 \end{cases} \quad (7)$$

### 1.2 机构位姿控制指标分析

综上,2 对正交指标  $L_s, L_g$  与  $H_d, L_d$  建立了输送机、后顶梁与夯实机构的联系,物料底板落点位置由卸料中心距  $a_z$  表征。以上指标将工况及运动特性的复杂性转化到了指标内部,实现表征指标具备部分复杂,整体简洁的特点,各指标及表征对象见表 1。

表 1 机构位姿控制指标及表征对象

Table 1 Position and attitude control index and characterization object of mechanism

指标	表达式	表征对象
① 输送机顶梁平距	$L_s = l_2 + h_y + g \sin \delta$	输送机位姿
② 输送机顶梁垂距	$L_g = l_3 + l_4 + g \cos \delta$	
③ 夯实铰点顶梁垂距	$H_d = H \cos \gamma - L_h \sin \gamma$	后顶梁位姿
④ 夯实铰点顶梁平距	$L_d = L_h \sec \gamma + H_d \tan \gamma$	
⑤ 卸料中心距	$a_z = H_c + H_z \tan \beta$	物料落点位置

指标③、④、⑤的中间变量： $L_h, H$  分别为夯实机构铰接点至顶梁铰接点沿底座平面的水平距离和垂直距离,与支架四连杆机构的运动特性相关, $L_h$  是  $H$  的函数。四连杆机构的运动特性已有充分研究<sup>[25]</sup>,指标  $L_h$  与  $H$  存在函数关系,又因  $h = H + l_1 + l_6$  故可将  $L_h$  转化为采高  $h$  的函数： $L_h = \varphi(h)$ 。

指标①、②可以确定输送机相对后顶梁的位姿,指标③、④可确定后顶梁相对夯实机构铰接点的位姿,指标⑤确定物料在底板落点相对支架底座的位置。另外,夯实机构的位姿由其转角和行程即可控制。综合位姿控制指标,利用传感器实时获取煤层倾角、支架高度、后顶梁下沉角、输送机滑移油缸行程等参数,即可实现固体充填液压支架在任意工况下关键机构位姿的实时表征,为机构干涉问题的求解和智能控制奠定了基础。

## 2 充填工序分析与干涉临界方程构建

### 2.1 充填工序特征及最易干涉位置

1) 充填工序特征。充填面执行充填工序主要分为“落料”和“夯实”2 个阶段。为完成两阶段工序过程,一个充填工序循环中机构位姿需要经历 3 次调整,分别为:落料前调整、落料完成后调整和循环夯实过程中调整。涉及动作机构有:夯实油缸和摆角油缸,控制夯实机构位姿;滑移油缸,控制底卸式输送机位姿。一个充填工序循环中涉及的工序阶段、机构动作和位姿调整时机接续和对应关系如图 2 所示。

2) 最易干涉位置分析。充填工序中 3 次机构位姿调整的目的各有不同。调整一:落料前位姿调整是为了避免卸料时物料落到夯实机构前侧,发生落

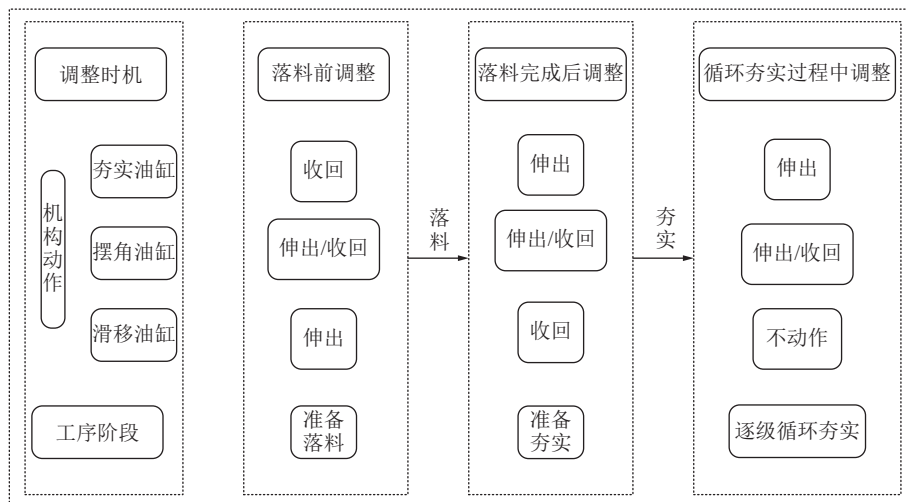


图 2 充填工序及位姿调整

Fig.2 Filling process and posture adjustment

料干涉。调整过程中, 夯实机构易与输送机底部发生干涉。调整二: 落料完成后位姿调整是为了避免夯实机构循环夯实过程中碰撞输送机, 发生碰撞干涉。调整三: 循环夯实过程中位姿调整是为了调整夯实角度, 充分夯实各位置物料。位姿调整流程及典型路径如图3所示。

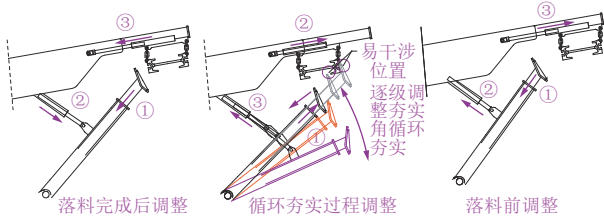


图3 位姿调整流程及典型路径

Fig.3 Posture adjustment process and typical path

图3展示了机构位姿调整的一次循环, 包括: 落料前调整 (在循环夯实结束后调整), 落料完成后调整 (在循环夯实前调整) 和循环夯实过程中调整。典型调整路径如图3中①~③所示, 3次位姿调整过程中, 夯实油缸伸出时易与输送机底发生干涉, 收回时因物料反作用等原因易与输送机后侧发生干涉。

## 2.2 位姿调整判别标准构建的必要性

1) 机构位姿调整缺乏有效判别标准。①工况变化影响机构动作幅度。夯实机构的转动由斜拉摆角油缸控制, 但因四连杆机构的运动特性, 支架处于不同高度时斜拉摆角油缸可控行程从最小值增加至最大值过程中, 控制夯实机构转过的角度范围不同。另外, 斜拉摆角油缸铰接于后顶梁上, 当后顶梁受载荷发生下沉时同样会导致斜拉摆角油缸控制夯实机构的转角范围发生变化。因工况改变而造成的机构动作幅度的变化, 致使不同工况下机构位姿调整操作需要实时的动态参照, 若能实现任意工况下机构实时干涉临界的感知便可提供上述动态参照。②位姿调整流程随意性。根据机构动作顺序差异, 位姿调整不限于图3中典型调整路径。同一工作面 (工况), 执行机构位姿调整的路径、顺序、幅度因技术规范或实际操作而不同, 不同工作面则因工况改变而不同。充填面执行机构位姿调整仍没有普适的规范流程及判别标准。

2) 位姿调整判别标准构建的必要性。①充填工序的执行效率有待提升。充填工序是固体充填开采工作面提效的薄弱环节。首先, 充填的工序流程复杂, 其中一个循环就包括“落料”“循环夯实”2个工序过程和3次“机构位姿调整”。另外, 执行充填工序通常若干相邻支架成组作业, 各支架及内部机构

动作需要整体协调配合。充填工序中间环节多, 占用采充整体循环时间长。尤其在位姿调整或循环夯实过程中出现机构干涉现象时, 将在不同程度影响充填工作面效率, 甚至导致停机或设备损坏, 系统稳定性不足, 故充填各工序的稳定高效执行是提效的突破点。②充填工序智能化发展的需要。针对充填工序的自动化和智能化发展, 需要干涉自主识别和自主调控的理论需要和技术支持, 建立任意工况下易干涉位置的干涉临界控制方程是研究干涉解调和规避的基础。

充填工序智能化应具备特性: 根据工况自主优化确定最佳工序执行顺序, 如“落料”“夯实”及其位姿调整; 执行充填工序过程要避免发生“机构干涉”; 因不可控因素如工况变化导致干涉时应具备自主识别干涉状态及解调的能力; 以上功能的实现需建立在任意工况下机构干涉临界的理论基础上。

## 2.3 任意工况下干涉临界控制方程

考虑工况参数, 理论上可使得同型号支架得到的控制方程适用于不同工况的工作面。基于充填工序特征、最易干涉位置分析以及任意工况下机构位姿控制指标, 分别建立落料干涉临界的控制方程以及输送机底部和后侧2个易干涉位置的干涉临界方程。

1) 落料干涉。卸料中心距越小, 越容易发生落料干涉。物料由卸料口放出部分或全部落到夯实机构左侧的现象称作落料干涉, 其临界状态如图4所示。

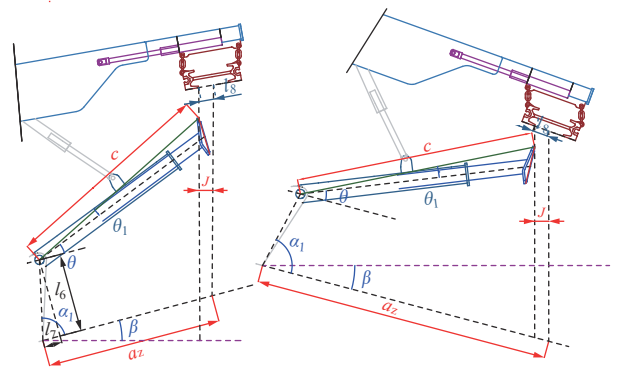


图4 落料干涉几何分析

Fig.4 Geometric analysis of blanking interference

由图4可知, 无论支架呈“仰采”或“俯采”布置, 物料最左侧的下落轨迹线位于夯实头上端点右侧时不会发生干涉, “俯采”时最小间隙距如图中 $J$ 所示。任意工况下, 处于干涉临界状态时夯实头上端点至夯实机构铰接点距离 $c$ 与卸料中心距 $a_2$ 向水平面投影可建立干涉临界控制方程见式(8):

$$c \cos(\theta + \theta_1 - \beta) + l_{11} \cos(\alpha_1 - \beta) = a_2 \cos \beta - J \quad (8)$$

式(8)中各变量满足式(9):

$$\begin{cases} J = l_8 \cos \delta + l_9 \sin \delta \\ (h_s + D)^2 + l_{10}^2 - c^2 = 2(h_s + D)l_{10} \cos \alpha_3 \\ \theta_1 = \arcsin[(l_{10}/c) \sin \alpha_3] \end{cases} \quad (9)$$

由式(8)、(9)知,落料干涉临界控制方程实质是建立了夯实机构行程及转角与卸料中心距的关系,当工况确定时, $a_2$ 为定值,此时方程剩下变量仅为夯实机构转角 $\theta$ 和行程 $h_s$ ,确定了夯实机构处于临界状态时的位姿。

2) 夯实头与输送机底面干涉。输送机底部为循环夯实及位姿调整过程中易干涉位置之一,具体为夯实机构伸出时夯实头上端碰撞输送机底部而发生碰撞干涉,处于干涉临界状态时如图5所示。

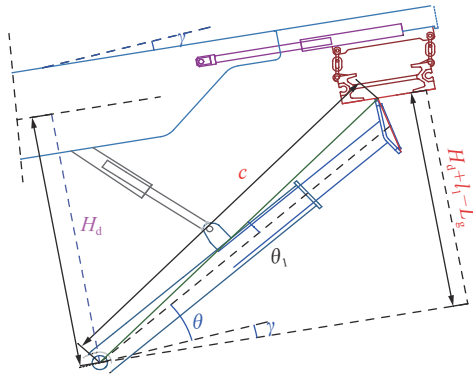


图5 输送机底部干涉

Fig.5 Conveyor bottom mechanism interference

距离 $c$ 向夯实铰点顶梁垂距 $H_d$ 方向投影,可建立该干涉临界状态的控制方程见式(10):

$$c \sin(\theta + \theta_1 + \gamma) = H_d + l_1 - L_g \quad (10)$$

式(10)中包含位姿控制指标,即夯实铰点顶梁垂距 $H_d$ 和输送机顶梁垂距 $L_g$ ,分别表征后顶梁相对夯实机构铰接点垂直方向位姿及输送机相对后顶梁垂直方向位姿。当工况确定时,能确定处于该位置干涉临界状态时夯实机构的位姿。

3) 夯实头与输送机后侧干涉。输送机后侧为循环夯实及位姿调整过程中另一易干涉位置,具体为夯实机构收回时夯实头上端碰撞输送机后侧而发生碰撞干涉,处于干涉临界状态时如图6所示。

同理,距离 $c$ 向后顶梁轴线( $L_d$ )方向投影,建立该干涉临界状态的控制方程见式(11):

$$c \cos(\theta + \gamma + \theta_1) = L_s + 2l_5 - L_d \quad (11)$$

式(11)中包含夯实铰点顶梁平距 $L_d$ 和输送机顶梁平距 $L_s$ ,分别表征后顶梁相对夯实机构铰接点水平方向位姿及输送机相对后顶梁水平方向位姿。同理,当工况确定时,方程确定了该位置处于干涉临界状态时的夯实机构位姿。

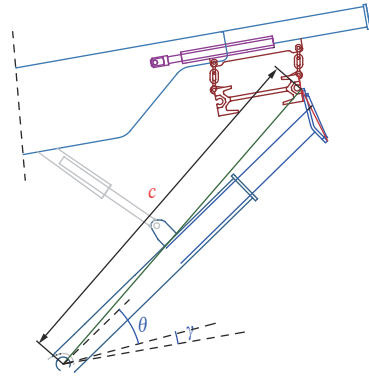


图6 输送机后侧干涉

Fig.6 Conveyor rear side mechanism interference

综上,干涉临界控制方程可以实现任意工况下的夯实机构位姿控制,另外,当输送机与夯实机构同时动作时,通过控制变量能够即时得到处于干涉临界状态时的输送机与夯实机构的实时位姿,为干涉规避及解调提供临界判据。

### 3 干涉临界定义范围及干涉三区分布

#### 3.1 干涉临界方程定义范围

易干涉位置处于干涉临界状态时的几何尺寸边界对应该位置的干涉临界方程,其表征变量有一定定义范围,分析各易干涉位置干涉临界方程的定义范围。

针对落料干涉,下边界为斜拉油缸最大行程所控制的夯实机构转角,上边界为输送机底部对夯实机构转角的限制。针对输送机底部,干涉临界范围由干涉点处于输送机底面前端及后端时对应的夯实机构转角范围。针对输送机后侧,干涉临界范围的下边界与输送机底部下边界重合,上边界为夯实机构背侧与输送机后棱边接触时对应的转角。干涉临界定义范围如图7所示。

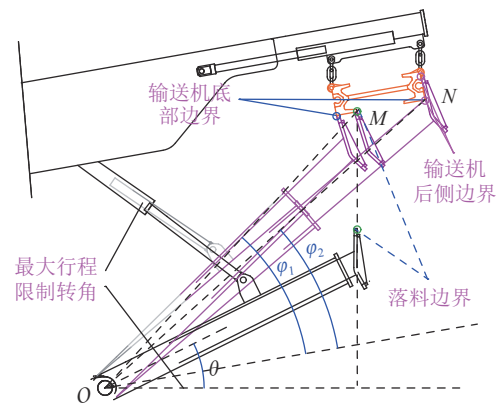


图7 干涉临界定义范围

Fig.7 Mechanism interference critical definition range

由图7可知,以夯实机构转角为参考时:落料干涉下边界<输送机底下边界=输送机后侧下边界<输

送机后侧上边界<落料干涉上边界<输送机底上边界。故输送机底及后侧干涉临界下边界与落料干涉临界上边界为3个干涉位置的分界点。基于位姿控制指标首先求解分界点。图中角 $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ 分别对应线段 $OM_1ON$ 与后顶梁顶面的夹角,控制方程见式(12):

$$\begin{cases} \varphi_1 = \arctan(H_d + l_1 - L_g/L_s - L_d + l_5 - l_8) \\ \varphi_2 = \arctan(H_d + l_1 - L_g/L_s - L_d + 2l_5) \end{cases} \quad (12)$$

输送机底部及后侧干涉临界范围下边界见式(13):

$$\theta_s = \varphi_2 - \theta_1 - \gamma \quad (13)$$

落料干涉临界范围上边界见式(14):

$$\theta_l = \varphi_3 - \theta_1 - \gamma \quad (14)$$

由各干涉位置分界点可知,当夯实机构转角 $\theta < \theta_s$ 时,可能处于落料干涉范围;当 $\theta_s < \theta < \theta_l$ 时,3个位置均可能发生干涉; $\theta_l < \theta$ 时,可能处于输送机底干涉。因3个位置干涉临界定义范围有重合,故仅依靠定义范围仍不能识别具体干涉位置。

### 3.2 典型工况下干涉临界曲线及三区分布

1) 典型工况下干涉临界曲线。为研究干涉临界

方程的特性及说明干涉临界的具体表征形式。取一组典型的工况参数代入干涉临界控制方程:式(8)、(10)和(11)。借助数值软件绘出以夯实机构转角和夯实油缸行程表征的干涉临界曲线图,以研究同一工况条件下干涉临界曲线的性质及工况变化对干涉的影响。典型工况参数取值见表2,其余变量按ZC5160/30/50支架几何尺寸取值。

表2 干涉临界典型工况参数取值

Table 2 Parameter values of interference critical typical working conditions

工况参数	$h/\text{mm}$	$\beta/(\text{°})$	$\gamma/(\text{°})$	$h_s/\text{mm}$
落料干涉		-15、0、15		800
输送机底部	4500	-15、0、15	5	800
输送机后侧		-15、0、15		200

表中煤层倾角 $\beta$ 分别取-15°、0°、15°分别对应“俯采”“水平布置”和“仰采”3种充填面典型布置方式,不同位置干涉临界方程分别得到3条干涉临界曲线如图8所示。

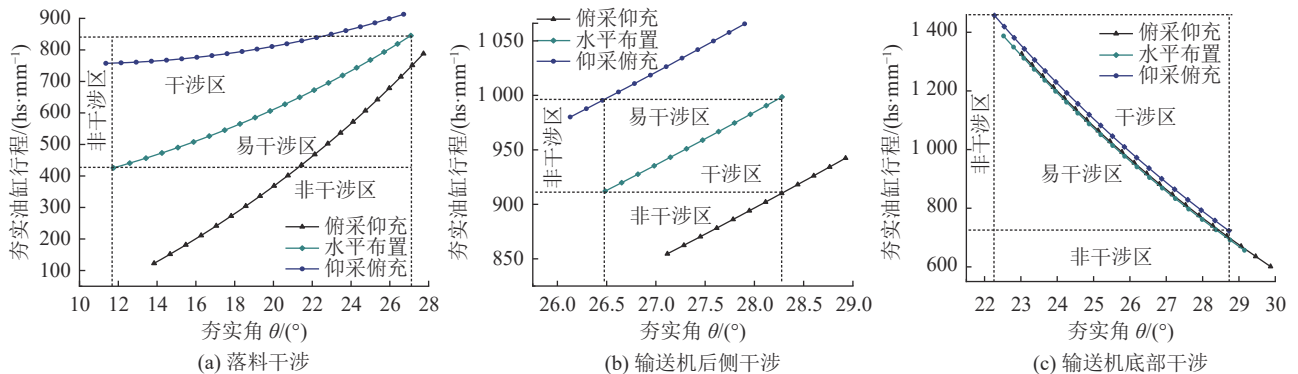


图8 典型工况下干涉临界曲线

Fig.8 Interference critical curve under typical working conditions

2) 干涉三区定义及分布特征。如图8所示,干涉临界曲线图以夯实角(夯实机构转角)为横轴,夯实油缸行程为纵轴(就表征角度而言,干涉临界曲线图的横纵轴可不做区分),每条干涉临界曲线上的点 $(\theta, h_s)$ 确定了夯实机构处于该位置干涉临界状态时的位姿。

干涉三区定义:

针对每个易干涉位置,以夯实机构位姿控制点 $(\theta, h_s)$ 落入干涉临界曲线图不同位置时对应的干涉状态来定义干涉三区。

①干涉区:当控制点落入干涉临界曲线横纵坐标定义区域,干涉临界曲线将该区域一分为二,在曲线上取一点 $(\theta, h_s)$ ,朝其中一个区域移动,若夯实机

构与该位置发生干涉,则该区域为该易干涉位置的干涉区。另一区域则为易干涉区,具体特征见②。

②易干涉区:控制点落入该区域,虽夯实机构暂未与该易干涉位置发生干涉,但当控制点变量之一 $\theta$ 或 $h_s$ ,即夯实机构转角或行程取到干涉区值时则在该位置发生干涉。

③非干涉区:控制点仅落入干涉临界曲线其中一个轴的定义区域,在该区域仅夯实机构的转角或行程之一处于易干涉区域,而另一变量不进入该位置干涉临界曲线的定义范围,故不会发生该位置的干涉。

根据干涉三区定义,由图8a—8c可知,不同易干涉位置对应的干涉三区分布特征分析如下:在各干

涉临界曲线定义范围内, 夯实机构所处位置可分为“易干涉区”、“干涉区”和“非干涉区”。在曲线横轴或纵轴定义范围内, 对应2个“非干涉区”如图8a—8c所示, 其他区域为该工况下其他曲线的定义区域或夯实机构可达空间以外区域。

在各干涉临界位置夯实机构朝夯实角增大或夯实油缸行程增大方向运动, 夯实机构所处干涉状态有所区别。落料干涉的“干涉区”位于临界曲线上方。输送机后侧位置干涉对应“干涉区”位于临界曲线下方。

3) 不同位置干涉临界工况响应特性。①由图8可知, 同一干涉位置不同工况条件下, 干涉临界曲线的定义范围不同。不同干涉位置处于干涉临界状态时, 夯实机构最大允许伸出行程: “仰采” > “水平” > “俯采”。②针对图8c输送机底部干涉临界曲线, “俯采”、“水平”、“仰采”对应曲线间距较其他曲线间距较小, 说明该干涉位置工况响应不明显。另外曲线间距: “俯采”至“水平” < “水平”至“仰采”。由输送机摆角  $\delta = \beta + \gamma$ , 俯采时煤层倾角  $\beta$  取负值, 反之取正;  $\gamma$  为后顶梁下沉角。规定:  $\delta_r$ 、 $\delta_s$  和  $\delta_i$  分别代表“俯采”“仰采”和“水平”布置时输送机的摆角。则  $|\delta_r| < |\delta_s|$  且  $|\delta_r| < |\beta|$ ,  $|\delta_s| = \gamma$ 、 $|\delta_i| > |\beta|$ , 故有以上规律。

## 4 干涉状态自主识别与解调方法

### 4.1 干涉状态自主识别方法

任意工况下不同位置的干涉临界控制方程中, 包括采高、煤层倾角和后顶梁下沉角等工况因素变量、滑移油缸行程、夯实机构转角和夯实油缸行程等支架工作机构的运动参数变量以及输送机悬挂链长等配套设备几何参数。

不同位置干涉临界方程均可表示为式(15):

$$0 = f_i(h, \beta, \gamma, g, h_s, h_y, \theta) \quad (15)$$

式中:  $h$  为采高;  $\beta$  为煤层倾角;  $\gamma$  为后顶梁下沉角;  $g$  为输送机悬挂链长度;  $h_s$  为夯实油缸行程;  $h_y$  为滑移油缸行程;  $\theta$  为夯实机构转角;  $i$  为不同干涉位置临界曲线编号,  $i=1, 2, 3$ 。

针对某一确定工况和工序中某一确定时刻, 将工况变量和机构自由度变量代入方程, 化简得到以  $h_s$  和  $\theta$  或以  $h_y$  和  $\theta$  表征的干涉临界函数, 见式(16):

$$\begin{cases} 0 = f_i(h_s, \theta) \\ 0 = f_i(h_y, \theta) \end{cases} \quad (16)$$

式(16)通常是隐函数、超越方程形式, 难以求出解析解, 但容易得到数值解。

将确定工况下某一时刻的夯实机构转角  $\theta$  依次代入所有干涉位置的临界方程  $f_i$  得到若干个处于该

位置临界状态时的夯实油缸行程  $h_s$ , 再利用位移传感器获取该时刻夯实油缸实时行程  $h_s'$ , 比较  $h_s'$  和  $h_s$  大小, 判断  $h_s'$  位于曲线  $f_i$  的干涉三区位置, 若  $h_s'$  均位于每个位置的非干涉区, 则该时刻夯实机构处于非干涉状态, 若  $h_s'$  位于某一干涉位置的干涉区, 则该时刻夯实机构处于该位置的干涉状态。

### 4.2 干涉解调路径确定方法

“易干涉区”实质仍属于非干涉状态, 是“非干涉区”的一部分, 工作机构在执行充填工序过程中绝大多数时间工作于“易干涉区”。当机构处于“干涉区”时, 需要向“易干涉区”解调, 因不同干涉位置干涉三区分布及干涉临界曲线的差异, 不同干涉位置的解调方向不同。

针对落料干涉和输送机后侧干涉的情况, 干涉临界曲线呈“单调增”型, 当“干涉区”位于曲线下方时, 解调方向为: 增大  $h_s$ , 减小  $\theta$ ; 当“干涉区”位于曲线上方时, 解调方向为: 减小  $h_s$ , 增大  $\theta$ 。针对输送机底部干涉的情况, 干涉临界曲线呈“单调减”型, 且“干涉区”均位于曲线上方, 解调方向为: 减小  $h_s$ , 减小  $\theta$ 。

### 4.3 干涉自主识别与解调算法设计

1) 干涉自主识别与解调算法基础。①任意工况下充填工序执行机构位姿控制指标实现了理论上的机构位姿表征和控制, 结合位移、角度传感器等实现表征参数获取形成闭环控制系统。可实现任意工况下执行机构的位姿实时表征和精准控制。②将复杂充填工序的一个循环简化为2个执行工序“落料”和“夯实”, 3次机构位姿调整“落料前调整”“落料后调整”和“循环夯实调整”, 得出机构位姿调整过程中的易干涉位置及其与工序阶段的衔接与对应关系, 为干涉位置判别提供了基础判据。③构建任意工况下易干涉位置的干涉临界控制方程, 得出对应位置的“干涉区”“易干涉区”和“非干涉区”分布特征。在由传感器实时获取工况参数前提下, 求出任意工况任意时刻的干涉临界值。由干涉三区分布特征, 结合易干涉位置判别方法以及干涉临界方程, 通过传感器获取实时值, 对比临界方程理论干涉临界值对比, 能够实现机构干涉状态的实时判别。

2) 干涉自主识别与解调算法设计。干涉自主识别与解调算法流程如图9所示。该算法的核心逻辑为: 传感器实时采集工况参数代入某一干涉临界控制方程, 使方程仅剩余  $h_s$ 、 $h_y$ 、 $\theta$  3个变量, 由传感器实时获取其中2个值时, 可得出另一个变量处于临界时的值, 将临界值与实测值对比, 判断实测值的三区



分布,结合所处工序过程即可判别所处易干涉位置及当前干涉状态。若判别干涉状态对应方程与实际工序阶段的易干涉位置不符,则将实测值代入下一

个干涉临界控制方程,依次循环判断。配合可靠的控制系统,理论上能够实现充填工序中机构干涉的自主识别与解调。

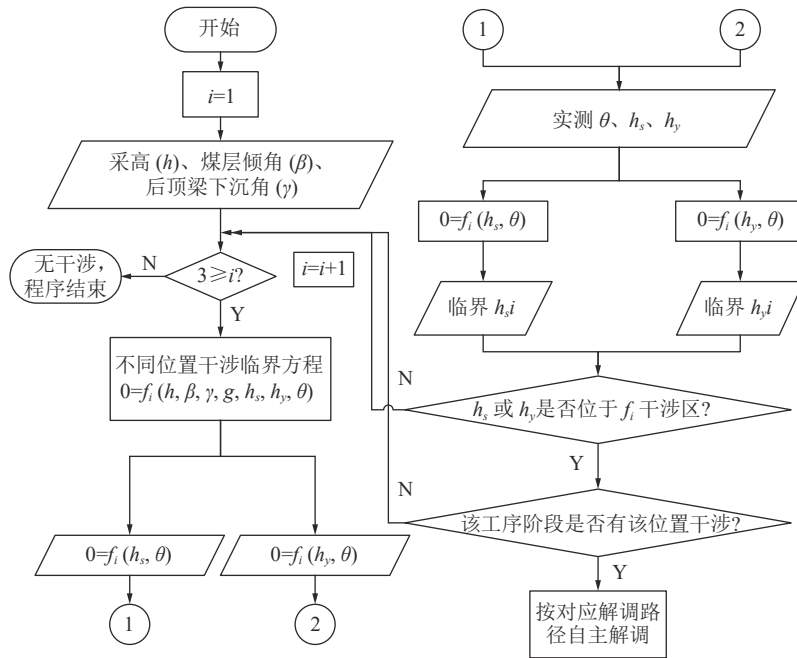


图 9 干涉临界自主判别与调控算法

Fig.9 Interference critical autonomous discrimination and regulation algorithm

若为机构动作设置安全阈值,即在临界值的基础上加上或减去一个值,配合可靠的控制算法,理论上能够实现充填工序中机构干涉的自主规避与解调。

4.4 干涉自主识别与解调算法仿真试验分析

1) 仿真试验平台构建。利用 PTC 公司旗下 Creo 三维建模与数值仿真软件搭建 ZC5 160/30/50 型固体充填液压支架运动骨架模型仿真试验平台,如图 10 所示。

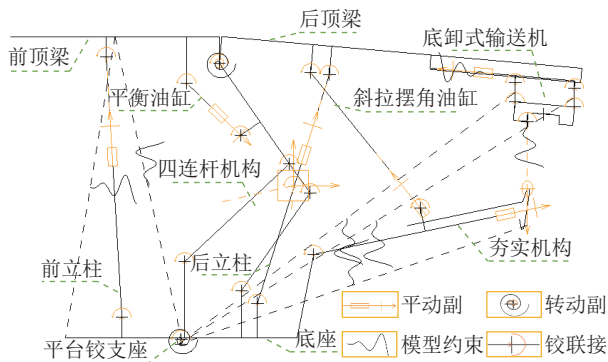


图 10 充填液压支架数值仿真试验平台

Fig.10 Numerical simulation test platform of filling hydraulic support

图 10 所示骨架模型依据 ZC5 160/30/50 型固体充填液压支架 1:1 装配图纸并严格按照各机构油

缸行程建立,在支架整架底座中部增加一个铰支座,使得支架整体能绕其转动以模拟不同倾角的“仰采”和“俯采”状态。利用该数值试验平台模拟典型工况下夯实机构在易干涉位置的“干涉”与“非干涉”状态,并监测夯实机构实时的行程和转角值。

充填面“俯采”布置时各易干涉位置的干涉几率增大,故取典型“俯采”极限工况进行仿真试验,分别模拟卸料干涉、输送机底部干涉和输送机后侧干涉,采高取 4 500 mm 为该架型设计采高,俯采角取 15° 为该架型设计适应最大倾角、后顶梁下沉角 5° 对应顶板提前下沉量约为 472.44 mm,为工程经验值。

2) 干涉临界自主判别与调控算法数值仿真试验分析。利用干涉临界自主判别与调控算法对干涉状态进行判别以验证其正确性,根据充填工序特征,卸料、及循环夯实时,底卸式输送机置于后顶梁最底端,则滑移油缸行程  $h_y$  可当作定值,简化了算法的分析步骤。仿真试验监测值与算法分析结果见表 3。

由表可知:①干涉临界自主判别与调控算法针对 3 个易干涉位置的干涉状态需要借助工序流程辅助识别,故进一步拓展干涉自主识别与解调算法时需要增加实时工序阶段的感知模块;②仿真试验初步验证了算法主体逻辑的正确性,为进一步开发控

表3 干涉自主识别与解调算法仿真试验结果

Table 3 Simulation test results of interference self-recognition and demodulation algorithm

夯实角试验值 $\theta'$ ( $^{\circ}$ )	夯实行程试验值 $h_s'$ /mm	夯实行程临界值 $h_s$ /mm	干涉三区分布			模拟工序阶段	识别干涉状态
			卸料	输送机底部 (夯实机构伸出)	输送机后侧 (夯实机构收回)		
27.73	800	786.64	干涉区	干涉区	干涉区	卸料前准备	卸料干涉
	600		易干涉区	易干涉区	易干涉区		正常卸料
23.02	1 400	1 328.95	干涉区	干涉区	易干涉区	循环夯实(伸出)	输送机底部干涉
	1 200		干涉区	易干涉区	干涉区		正常伸出夯实
24.47	1 500	1 427.53	干涉区	干涉区	易干涉区	循环夯实(收回)	收回过程易干涉
	1 350		干涉区	干涉区	干涉区		输送机后侧干涉
20	2 105	—	干涉区	易干涉区	非干涉区	循环夯实(往复)	正常循环夯实

制算法奠定了良好基础,为完善算法细节并增强其可靠性还需借助实体样机或生产现场进一步验证。

## 5 结 语

1) 建立了以煤层倾角、采高、后顶梁下沉角、输送机悬挂链长为基本变量的机构位姿指标控制方程,为充填液压支架机构位姿表征提供了新的参考指标,并以卸料中心距为综合指标分析了工况响应特性。

2) 分析了充填工序中易干涉位置,基于充填工序特征、最易干涉位置以及任意工况下机构位姿控制指标,分别建立了落料、输送机底部和后侧等3个易干涉位置的干涉临界方程,为机构干涉的智能避障和解调提供了基础判据。

3) 以夯实机构转角和夯实油缸行程表征典型工况下干涉临界曲线,提出采用“干涉区、易干涉区、非干涉区”的三区分布特征表征干涉临界程度。

4) 基于干涉临界控制方程,干涉三区分布特征和充填工序过程中机构位置特征,提出了干涉位置及干涉状态自主识别方法,设计并初步验证了干涉自主判别和解调算法,为固体智能充填的采充工序自驱执行提供了算法基础。

### 参考文献(References):

[1] 周跃进,张吉雄,聂守江,等. 充填采煤液压支架受力分析与运动学仿真研究[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(3): 366-370.  
ZHOU Yuejin, ZHANG Jixiong, NIE Shoujiang, et al. Force analysis and kinematics simulation research of hydraulic support in filling mining[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2012, 41(3): 366-370.

[2] 张强. 固体充填体与液压支架协同控顶机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015: 60-95.  
ZHANG Qiang. Research on synergistic roof control mechanism of solid backfill and hydraulic support [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015: 60-95.

[3] 张强,杨康,张吉雄,等. 固体充填开采直接顶位态控制机制及工程案例[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(1): 35-45.  
ZHANG Qiang, YANG Kang, ZHANG Jixiong, et al. Immediate roof control mechanism in solid backfill mining method and its engineering case[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2022, 51(1): 35-45.

[4] 张强,武中亚,杜二宝,等. 充填采煤液压支架工作阻力设计方法研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(1): 118-127.  
ZHANG Qiang, WU Zhongya, DU Erbao, et al. Research on working resistance design method of hydraulic support in backfill mining[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2020, 37(1): 118-127.

[5] 张强,张吉雄,邵阳,等. 充填采煤液压支架夯实离顶距影响因素研究[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(5): 757-764.  
ZHANG Qiang, ZHANG Jixiong, TAI Yang, et al. Study of factors influencing the gap between backfill hydraulic support and roof[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2014, 43(5): 757-764.

[6] 张强,张吉雄,邵阳,等. 充填采煤液压支架充填特性理论研究及工程实践[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(6): 845-851.  
ZHANG Qiang, ZHANG Jixiong, TAI Yang, et al. Theoretical research and engineering practice on backfilling characteristics of hydraulic support in backfilling mining[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2014, 31(6): 845-851.

[7] 张强,张吉雄,巨峰,等. 固体充填采煤充实率设计与控制理论研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(1): 64-71.  
ZHANG Qiang, ZHANG Jixiong, JU Feng, et al. Backfill body's compression ratio design and control theory research in solid backfill coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(1): 64-71.

[8] 张强,张吉雄,吴晓刚,等. 固体充填采煤液压支架合理夯实离顶距研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(8): 1325-1330.  
ZHANG Qiang, ZHANG Jixiong, WU Xiaogang, et al. Roof gap rationality research of backfilling-coal mining hydraulic support [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(8): 1325-1330.

[9] 杨姝航. 充填液压支架后顶梁性能分析及多目标优化设计[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2019: 32-43.  
YANG Shuhang. Performance analysis and multi-objective optimization design of top beam after filling hydraulic support [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2019: 32-43.

- [10] 马 婧. 干式充填液压支架结构设计与加载试验方式研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020: 62–73.  
MA Jing. Research on structural design and loadingtest method of dry-fill hydraulic support [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2020: 62–73.
- [11] 唐 琨. 充填综采液压支架底座强度分析及其结构优化[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014: 50–74.  
TANG Kun. Strength Analysis and structure optimization for foundation of hydraulic support in filling mining [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014: 50–74.
- [12] 路兰勇. ZC6000/18/38型综采充填液压支架关键技术研究 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013: 21–44.  
LU Lanyong. Research on key technologies of ZC6000/18/38 fully-mechanized hydraulic support for filling [D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2013: 21–44.
- [13] 高 昊. 充填支架吊挂刮板输送机主要部件结构及力学特性研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2016: 22–34.  
GAO Hao. Mechanics properties research and structure on the main partof hanging scraper conveyor of solid backfill hydraulic support [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2016: 22–34.
- [14] 王晓峰, 万宏凤, 孙跃军. 固体充填刮板输送机卸料口控制机构的优化设计[J]. 煤矿机械, 2016, 37(10): 119–121.  
WANG Xiaofeng, WAN Hongfeng, SUN Yuejun, *et al.* Optimization design of discharge port control mechanism of solid backfilling scraper conveyor[J]. Coal Mine Machinery, 2016, 37(10): 119–121.
- [15] 张东升, 袁 帅, 袁 智, 等. 固体充填液压支架吊挂刮板输送机仿真研究[J]. 机械传动, 2017, 41(10): 140–145.  
ZHANG Dongsheng, YUAN Shuai, YUAN Zhi, *et al.* Simulation research of the solid filling hydraulic support hangs scraper conveyor[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2017, 41(10): 140–145.
- [16] 曾晓腾. 充填开采液压支架性能分析与姿态监控技术研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2020: 43–67.  
ZENG Xiaoteng. Research on Performance Analysis and Attitude Monitoring Technology of Hydraulic Support for Filling Mining [D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2020: 43–67.
- [17] 任怀伟, 李帅帅, 李 颀, 等. 液压支架顶梁位姿调控仿真分析[J]. 工矿自动化, 2019, 45(10): 11–16.  
REN Huaiwei, LI Shuishuai, LI Xie, *et al.* Simulation analysis of roof beam position and attitude control of hydraulic support[J]. Journal of Mine Automation, 2019, 45(10): 11–16.
- [18] 周 凯, 任怀伟, 华宏星, 等. 基于油缸压力的液压支架姿态及受载反演[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2017, 22(5): 36–40.  
ZHOU Kai, REN Huaiwei, HUA Hongxing, *et al.* Loading inversion and hydraulic support pose based on cylinder pressure[J]. Journal of Mining And Strata Control Engineering, 2017, 22(5): 36–40.
- [19] 赵立胜, 宋光婕. 基于PLC的固体充填液压支架自动控制系统[J]. 电声技术, 2019, 43(7): 53–54.  
ZHAO Lisheng, SONG Guangjie. Automatic control system of solid filling hydraulic support based on PLC[J]. Audio Engineering, 2019, 43(7): 53–54.
- [20] 焦山林, 刘建功, 郑强强, 等. 矿用固体充填液压支架控制系统[J]. 煤矿机械, 2015, 36(2): 236–238.  
JIAO Shanlin, LIU Jianguo, ZHENG Qiangqiang, *et al.* Control system of mine solid backfilling hydraulic support[J]. Coal Mine Machinery, 2015, 36(2): 236–238.
- [21] 赵立胜. 固体充填液压支架自动控制系统研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020: 25–47.  
ZHAO Lisheng. Research on automatic control system of solid filling hydraulic support [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2020: 25–47.
- [22] 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, 2021, 47(7): 1–10.  
ZHANG Qiang, WANG Yunbo, ZHANG Jixiong, *et al.* Research on intelligent solid backfilling mining method in coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 47(7): 1–10.
- [23] 张 强, 刘 勇, 张吉雄, 等. 固体智能充填自主夯实过程机构干涉影响因素与调控方法 [J]. 煤炭学报, 2022, 47(3): 1043–1054.  
ZHANG Qiang, LIU Yong, ZHANG Jixiong, *et al.* Influencing factors and control method of mechanism interference in autonomous compaction process of intelligent solid backfilling technology[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(3): 1043–1054.
- [24] 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 and Safety Engineering, 2022, 39(5): 921–929.
- [25] 钱鸣高, 何富连, 李全生, 等. 综采工作面端面顶板控制[J]. 煤炭科学技术, 1992(1): 41–46, 59.  
QIAN Minggao, HE Fulian, LI Quansheng, *et al.* Roof of head face control in fully mechanized mining face[J]. Coal Science and Technology, 1992(1): 41–46, 59.