



## 采煤机电缆自动拖拽系统的设计及应用

崔耀 王军 赵旭 潘占仁 李艳杰

### 引用本文:

崔耀, 王军, 赵旭, 等. 采煤机电缆自动拖拽系统的设计及应用[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S2): 268–274.

CUI Yao, WANG Jun, ZHAO Xu. Design and application of automatic cable dragging system for shearer[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S2): 268–274.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2022-1786>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 采煤机滚筒高度测量传感器工作环境磁场仿真与屏蔽研究

Study on magnetic field simulation and shielding design of shearer drum height measurement sensor working environment

煤炭科学技术. 2022, 50(8): 204–209 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/6912748f-0746-45f4-b8b7-04f2499a95b7>

#### 基于多感知方式组合测量的采煤机位姿检测系统研究

Position detection system of shearer based on combined measurement of multiple sensing modes

煤炭科学技术. 2021, 49(11): 218–224 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/4508eaec-172c-4cb6-a094-e7bb9612e9d0>

#### 复杂起伏煤层自适应开采截割路径优化与仿真

Optimization and simulation of adaptive mining cutting path in complex undulating coal seam

煤炭科学技术. 2023, 51(S2): 210–218 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1651>

#### 基于DEMMFBD双向耦合技术的采煤机摇臂壳体疲劳寿命预测

Fatigue life prediction of shearer rocker shell based on DEMMFBD bidirectional coupling technology

煤炭科学技术. 2023, 51(S2): 252–258 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1908>

#### 基于巨磁阻效应的采煤机摇臂角度传感器设计研究

Design and research on angle sensor for shearer rocker based on giant Magneto resistance effect

煤炭科学技术. 2019(4) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/23fb6dbf-c946-4c90-b3ab-9b46e7e4286c>

#### 基于5G+云边端协同技术的采煤机智能调高调速 控制系统设计与应用

Research on cloud-edge-terminal collaborative intelligent control of coal shearer based on 5G communication

煤炭科学技术. 2023, 51(6): 205–216 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1017>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

崔耀,王军,赵旭,等.采煤机电缆自动拖拽系统的设计及应用[J].煤炭科学技术,2023,51(S2):268-274.  
CUI Yao, WANG Jun, ZHAO Xu, *et al.* Design and application of automatic cable dragging system for shearer[J].  
Coal Science and Technology, 2023, 51(S2): 268-274.

## 采煤机电缆自动拖拽系统的设计及应用

崔耀<sup>1</sup>,王军<sup>2</sup>,赵旭<sup>1</sup>,潘占仁<sup>1</sup>,李艳杰<sup>3</sup>

(1.北京天玛智控科技股份有限公司,北京 101399;2.神华神东煤炭集团有限责任公司,内蒙古鄂尔多斯 017209;

3.中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院,北京 100083)

**摘要:**为满足薄煤层综采工作面无人化需求,针对现有采煤机电缆存在需要专人看护的问题,设计了采煤机电缆自动拖拽系统,系统额定功率15 kW,工作面最大长度400 m,适应采煤机最大速度30 m/min。重点介绍了采煤机电缆自动拖拽系统的整体设计、参数设计和适配设计,并详细阐述了基于动力学仿真分析的拖缆链传动系统设计、适用于复杂工作面的轨道浮动对中技术、基于速度与转矩的自适应控制技术、电缆快速拆装技术等4项关键技术,解决了系统设计、机械结构、控制策略、故障保护等难题,实现了电缆夹始终处于微张紧状态。在张家峁煤矿14301工作面进行了工程应用,实现了全工作面自适应常态化运行,跟机率达到94.7%。该系统结构合理、可靠性高、拆装维护方便,可在现有工作面进行改造,可推广性强,促进了薄煤层无人化开采技术的进步。

**关键词:**采煤机;电缆拖拽;动力学仿真;自适应控制;浮动结构;无人化

中图分类号:TD63+2

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2023)S2-0268-07

### Design and application of automatic cable dragging system for shearer

CUI Yao<sup>1</sup>, WANG Jun<sup>2</sup>, ZHAO Xu<sup>1</sup>, PAN Zhanren<sup>1</sup>, LI Yanjie<sup>3</sup>

(1. Beijing Tianma Intelligent Control Technology Co., Ltd., Beijing 101399, China; 2. Shenhua Shendong Energy Shendong Coal Group Co., Ltd., Ordos 017209, China; 3. School of Mechanical Electronic & Information Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to meet the unmanned needs of thin coal seam fully mechanized mining faces and address the issue of requiring dedicated personnel to monitor the cables of existing coal mining machines, an automatic cable dragging system for coal mining machines has been designed. The system has a rated power of 15 kW, a maximum length of 400m for the working face, and is suitable for a maximum speed of 30 m/min. This article focuses on the overall design, parameter design, and adaptation design of the automatic cable dragging system for coal mining machines. It elaborates in detail on four key technologies: the design of the cable chain transmission system based on dynamic simulation analysis, the track floating alignment technology suitable for complex working faces, the self adaptive control technology based on speed and torque, and the fast cable disassembly and assembly technology. The system design, mechanical structure, control strategy, fault protection, and other difficulties have been solved. It solves the problems of system design, mechanical structure, control strategy, and fault protection, and achieves that the cable clamp is always in a slightly tensioned state. Engineering application was carried out in the 14301 working face of Zhangjiamao Coal Mine, achieving adaptive and normalized operation of the entire working face, with a follow-up rate of 94.7%. The system has a reasonable structure, high reliability, convenient disassembly and maintenance, and can be retrofitted on existing working faces. It has strong scalability and promotes the progress of unmanned mining technology in thin coal seams.

**Key words:** shearer; cable dragging; dynamic simulation; adaptive control; floating structure; unmanned

## 0 引言

采煤机作为煤矿综采工作面最重要的设备之一,

其运行状态直接影响煤炭开采效率。采煤机的电缆负责为采煤机的正常工作提供电能,在现有结构中,电缆安装在电缆夹板中,采煤机行进过程中,直接拉

收稿日期:2022-10-28

责任编辑:周子博

DOI: 10.12438/cst.2022-1786

基金项目:天地科技股份有限公司重点资助项目(00000050048)

作者简介:崔耀(1983—),男,山东泰安人,高级工程师,硕士。E-mail: cuiyao@tdmarco.com

动电缆夹板运行。现有的采煤工艺,在割三角煤时,采煤机会多次往返,此时电缆夹板会发生多层叠加的现象,容易出现掉落、被支架挤压等问题。为防止电缆发生故障影响工作面采煤,采煤机电缆一般由专人看护。因此,如何将智能化的技术与装备应用到采煤机拖缆系统中,实现采煤机割煤过程中拖缆系统的智能化、无人化与高效化,已经成为工作面无人化开采的一项重要课题<sup>[1-3]</sup>。

国外制造商首先开展了采煤机电缆自动拖拽系统的研究。波兰 famur 集团的 MIKRUS 等高式采煤系统,采煤机的切割头机身与截割部采用一体设计,无调高油缸,配备电缆自动拖拽装置,满足两顺槽垂直进刀采煤工艺<sup>[4]</sup>。国家能源集团神东煤炭集团于 2020 年引进该系统,并在石圪台煤矿成功应用。该系统的电缆自动拖拽装置与采煤机高度集成,且由于其采煤工艺与传统采煤机不同,简化了割三角煤的过程,因此应用效果较好。然而,此系统不具有普遍适用性,必须与等高式采煤机一起成套应用,该设备应用、改造的成本过高。

国内也进行了一些电缆自动拖拽装置的研究工作来解决此问题,如液压绞车型电缆拖拽系统、采煤机电缆收放装置、基于钢丝绳的采煤机自动拖缆装置等<sup>[5-6]</sup>。这些装置中,有些采用钢丝绳牵引,钢丝绳的张力变化剧烈,无法适应井下复杂环境;有些未能

解决工作面高低起伏、与采煤机的联动控制等问题,均未能实现常态化运行,无法推广应用。

针对现有采煤机电缆自动拖拽系统存在的如何保证牵引链条适度张紧、如何克服工作面高低起伏、如何实现与采煤机的智能联动、如何实现系统的安全运行等难题,笔者成功研制了采煤机电缆自动拖拽系统,该套系统以智能化控制为目标,将拖缆小车与采煤机的运行参数相匹配,实现全过程实时同步控制,保证电缆夹板处于恒定的张紧状态,并且能够适应工作面高低起伏状态,实现电缆夹板始终保持 2 层叠加,自主跟随采煤机运动,无需派专人维护,提高了生产效率。该系统在陕煤集团张家峁矿 14301 工作面实现常态化运行,在上行、下行、割三角煤的过程中,都能与采煤机保持协同联动,提高了综采工作面的自动化水平,达到了减人增效的目的。

## 1 采煤机电缆自动拖拽系统设计

### 1.1 整体设计

采煤机电缆自动拖拽系统基于动滑轮的原理而设计,拖缆小车带动采煤机电缆跟随采煤机运动,相当于动滑轮,速度时刻保持采煤机速度的一半,因此采煤机电缆能够时刻保持 2 层的状态。其总体结构根据工作面的采煤机电缆夹板、电缆槽、刮板输送机头机尾的实际情况而设计,如图 1 所示。

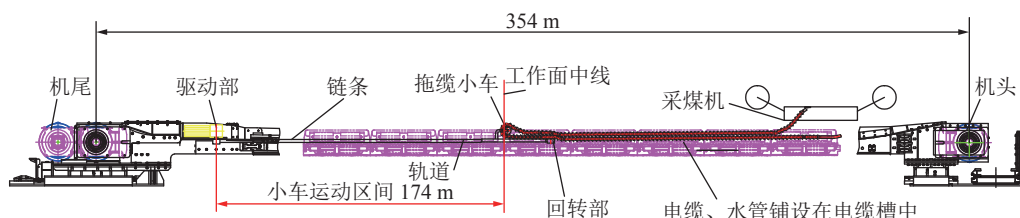


图 1 采煤机电缆自动拖拽系统整体布置

Fig.1 The general layout of automatic cable dragging system for shearer

系统的机械部分由驱动部、轨道、拖缆小车、回转部、链条(传动部)等组成。电气部分包含 PLC 电控系统、传感器、链条张紧系统、上位机等。相对于目前现有产品,该系统最核心优势是解决了传动部张紧力相对恒定、拖缆小车对工作面高低起伏的适应性、控制系统自适应控制以及系统快速拆装等问题,能够实现井下常态化运行。

### 1.2 参数设计

对工作面采煤机连续运行工况下电缆夹板拉力进行监测,如图 2 所示,其最大拉力不超过 7 000 N。在本套系统运行过程中,要保证最大压力不超过上述数值。

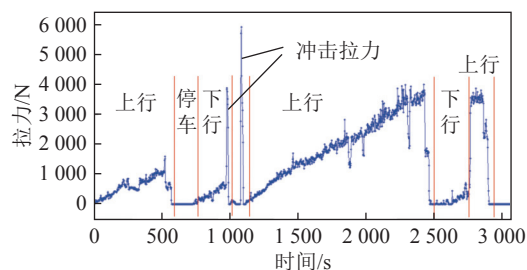


图 2 电缆夹板拉力变化曲线

Fig.2 The tensile change curve of the cable splint

圆环链系统工作时,因受力会产生弹性变形,会导致驱动链轮处无法啮合,出现掉链和卡链问题。为防止这种状态的出现,系统要有一定的预紧力<sup>[7-8]</sup>。

系统采用单电机,因此驱动链轮与圆环链分离处的张力最小<sup>[9]</sup>,假定此处为 0,此时即为最小张紧力,由此可逐步计算各部分的张力,链条张紧力计算的示意如图 3 所示。

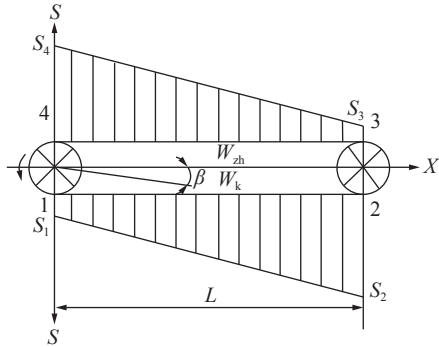


图 3 链条张紧力计算示意  
Fig.3 Calculation sketch map of the chain tension

位置 4、1、2、3 分别为主动链轮及被动链轮绕入绕出点,  $S_4$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  分别为主动链轮及被动链轮绕入绕出点的张力载荷,其中  $S_4$  为最大张力点张力,  $S_1$  为最小张力点张力,在最小张紧力情况下:

$$S_4 - S_1 = W = \eta(W_{zh} + W_k) \quad (1)$$

$$S_2 - S_3 = 0 \quad (2)$$

$$S_1 = 0 \quad (3)$$

$$W_{zh} = (q + q_0 \cdot L) \cdot g (\omega' \cos \beta \pm \sin \beta) + 2F_a \quad (4)$$

$$W_k = q_0 L g (\omega' \cos \beta \mp \sin \beta) \quad (5)$$

式中:  $W$  为系统总牵引阻力, N;  $\eta$  为阻力系数,一般取 1.2;  $W_{zh}$  为拖缆小车侧运行阻力, N;  $W_k$  为无负载侧运行阻力, N;  $L$  为拖缆系统设计长度,取 200 m;  $g$  为重力加速度,取  $9.8 \text{ m/s}^2$ ;  $\beta$  为工作面倾角,取  $5^\circ$ ;  $q$  为拖缆小车质量, 200 kg;  $q_0$  为链条单位长度质量,  $6.6 \text{ kg/m}$ ;  $\omega'$  为摩擦阻力系数,取 0.4;  $F_a$  为电缆夹板拉力,取最大 7 000 N。机头向机尾运行取+;反之取-。

通过上述计算可得总牵引力  $W = 34.9 \text{ kN}$ ,进而得到系统整体技术参数,见表 1。

系统选用 15 kW 的驱动电动机,配备变频器及摩擦限矩器,链条选用 18\*64-C 型标准圆环链,拖缆小车运行区间长度 174 m。

### 1.3 电缆槽与拖缆系统适配设计

设计的拖缆系统结构简单,可在现有设备上直接改造升级,适应性强,改造成本低。

轨道由底座、主链活动压盖、辅链压盖、扁型定位销、安装固定销、浮动弹簧等组成,为整个电缆拖拽装置提供支撑和保护。轨道的设计有 2 种类型,

表 1 技术参数

Table 1 Technical parameters

参数	数值
电机功率 $P/\text{kW}$	15
链条规格	18*64-C
采煤机速度 $v_c/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0 ~ 30
拖缆小车速度 $v_t/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0 ~ 15
减速器减速比 $i$	70.95
电机转速 $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	1 451

一种是单侧可拆卸式,其辅链压盖固定;另一种是两侧均可拆卸式,其辅链压盖活动。理论上轨道应从中间支架开始安装,一直铺设到采煤机头处。

轨道组装后尺寸如图 4 所示。从图 4 可知,电缆槽内宽 230 mm,内高 343 mm,2 种轨道宽度分别为 120 和 70 mm,总高度为 82 mm。对于不同煤矿,电缆槽尺寸会有所不同,轨道尺寸会发生相应变化。本系统中,轨道占据了电缆槽内部 82 mm 的空间,电缆槽深大于 340 mm,电缆夹板高度为 120 mm,电缆槽发生双层叠加时,总高度低于电缆槽,与加装拖缆系统之前相比,电缆槽未受到该系统影响。

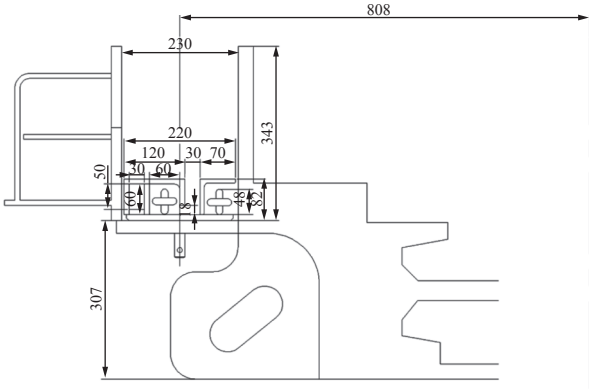


图 4 电缆槽与拖缆轨道配套尺寸  
Fig.4 The matching size of Cable tray and track

采煤机电缆自动拖拽系统的轨道放置于电缆槽内,电缆槽会发生弯曲起伏的变化,因此该系统的轨道要保证与电缆槽的一致连续性,以此来保证拖缆小车在轨道内的畅通运行。

## 2 采煤机电缆自动拖拽系统关键技术

### 2.1 基于动力学仿真分析的拖缆链传动系统设计

由于拖缆小车运行阻力的不断变化,在系统回转部增加弹簧缸,从而实现张紧力的自动调节。由于圆环链系统的特性以及采煤机电缆的拉力不断变化,容易导致拖缆小车发生抖动,在实际工作过程中,



最小张紧力状态并不是系统的最优状态。通过对拖缆链传动系统运行情况的仿真分析,得到合适的张紧力及弹簧缸刚度参数,并分析合适张紧力情况下拖缆小车的运行状态。

建立系统的模型,并对模型进行简化<sup>[10-11]</sup>:

1)驱动部简化:其主要作用是用于提供系统驱动力,不需要对其底座等其他部件进行分析校核,因此保留驱动部的驱动轮、花键轴及分链器部件,其余组件简化。

2)拖缆小车简化:其坐落在轨道上,小车在 Z 轴正向的载荷均由轨道承担,建模时省略轨道的模型而设置小车的附带摩擦的位移约束,从而模拟小车在轨道上的运行情况。

3)负载简化:建模时省略负载模型,使用集中力代替负载,负载施加在小车的导向轮上,方向延小车运动方向的反方向,并随小车的位移递减。建模时将小车视为刚体,将负载施加在导向轮中心部位。

4)弹簧缸简化:其内部为压缩弹簧,工作时压缩弹簧应处在弹性范围内,其产生的力与弹簧的压缩量满足胡克定律。

5)链条简化:保证系统整体质量、受力、运动学关系不变,以确保计算精度。在计算行程内与驱动轮和回转轮接触的链环进行实体建模并按照实际连接关系进行模拟;中间部分采用圆柱体和弹簧连接的方式进行简化。

最终简化后的仿真模型如图 5 所示。



图 5 系统简化模型

Fig.5 Simplified model of the system

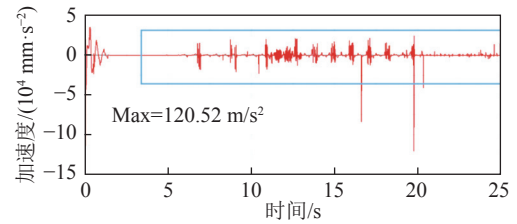
对模型施加约束、驱动、负载,进行仿真分析,最终得出了临界张紧力和弹簧缸刚度之间的数学关系式:

$$F = \frac{KL_1 + F_0}{1 + \frac{2K}{K'}} = \frac{442.48K + 3\,447.63}{1 + \frac{2K}{154.7}} \quad (6)$$

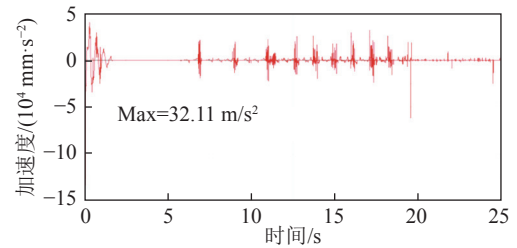
式中:  $F$  为张紧力, N;  $F_0$  为弹簧缸初始张紧力, 取 3 447.63 N;  $K$  为弹簧缸刚度, N/mm;  $K'$  为链条整体刚度, 取 154.7 N/mm;  $L_1$  为油缸初始张紧力位移, 442.48 mm。

同时得出最适宜的弹簧缸刚度为 54 N/mm, 最合

适张紧力为 36 kN, 系统能够保证不发生余链情况, 拖缆小车最大加速度由  $120.52 \text{ m/s}^2$  降低到  $32.11 \text{ m/s}^2$ , 如图 6 所示, 小车运行过程中加速度波动有明显改善。



(a) 弹簧缸刚度优化前小车加速度曲线



(b) 弹簧缸刚度优化后小车加速度曲线

图 6 小车加速度曲线变化

Fig.6 Acceleration curve change of the trolley

## 2.2 适用于复杂工作面的轨道浮动对中技术

综采工作面起伏不定,采煤工艺要求推溜拉架时刮板输送机呈现弯曲状态,因此正常情况下要求刮板输送机中部槽两节之间垂直弯曲可达 $\pm 3^\circ$ ,水平弯曲可达 $\pm 1^\circ$ <sup>[2,8]</sup>,该系统安装在刮板输送机电缆槽内,这就要求拖缆系统的轨道也能够满足上述要求。

设计适用于复杂工作面的轨道浮动对中结构,核心是轨道相对于电缆槽是浮动的自适应对中的,如图 7 所示。在垂直方向上,在轨道上设计 2 个固定销,插入到电缆槽的孔内进行固定,轨道和电缆槽之间有弹簧,能够同时保证浮动及紧密连接;在水平方向上,2 节轨道之间采用楔形销连接,一边固定一边可以上下左右摆动,跟随刮板输送机自适应对中。该结构能够适应刮板输送机水平、垂直方向的弯曲,并且能够适应最高 30 mm 的垂直方向的落差,同时也限制了轨道的弯曲极限,保证了拖缆小车通过时的稳定性。

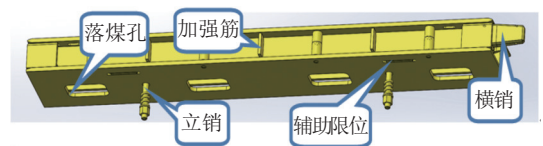


图 7 轨道浮动对中结构

Fig.7 Track floating centering structure

这种方式对现有电缆槽改动量最小,只需要在原有刮板输送机电缆槽底部打 2 个小孔,拖缆系统

即可加装至现有刮板输送机上。实际上可以实现垂直弯曲 $\pm 4.5^\circ$ , 水平弯曲 $\pm 1.9^\circ$ , 垂直落差 30 mm 的要求, 满足采煤工艺需求。通过搭建三维模型进行仿真验证, 如图 8 所示。

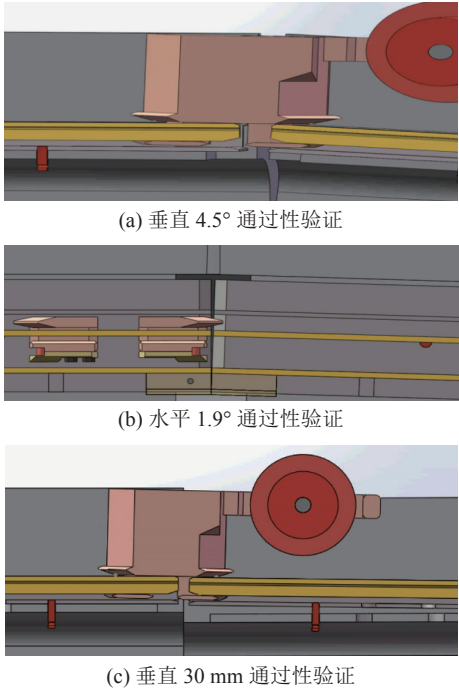


图 8 轨道通过能力验证

Fig.8 Passing ability verification of the track

上述结构经过井下实际验证, 在工作面起伏较大及移架和推溜过程中, 拖缆小车能够保持良好通过性, 运行稳定无卡阻, 验证了自适应浮动对中轨道的可行性。

2.3 基于速度与转矩的自适应控制技术

目前拖缆电控系统的控制方法主要包括速度跟随控制和恒转矩控制 2 种方式, 无法解决误差、卡滞, 甚至拉断采煤机电缆等问题, 不能实现常态化应用<sup>[12-15]</sup>。

系统建立了基于速度与转矩等的自适应控制模型, 如图 9 所示。系统的调节依据包含 4 个变量, 分别是采煤机的当前速度  $v_c$ 、当前位置  $P_1$ 、拖缆系统电机的转矩  $T$ 、采煤机牛头电缆拉力  $F$ 。通过安装在拖缆小车与采煤机上的速度、位置及转矩传感器采集其速度、位置及转矩信息, 通过拉力传感器可以采集电缆拉力  $F$ , 拖缆控制与采煤机控制系统进行通讯, 主要的控制策略是拖缆小车时刻保持采煤机运行速度的一半, 以比例积分微分控制(Proportional-Integral-Derivative, PID)调节的方式, 其中  $K$  为比例环节系数, 变频器根据负载情况自动调节输出转矩, 控制输出电机的转速。为了实现闭环控制, 总共有 3 个负反馈, 分别是采煤机电缆拉力误差、拖缆电机转矩误

差、拖缆小车位置误差, 将反馈的输出结果叠加至拖缆小车的位置和速度的给定中, 最终使采煤机电缆时刻处于微张紧的状态。此种控制方式要求调试时必须在搭载采煤机电缆条件下按照实际工况运行。

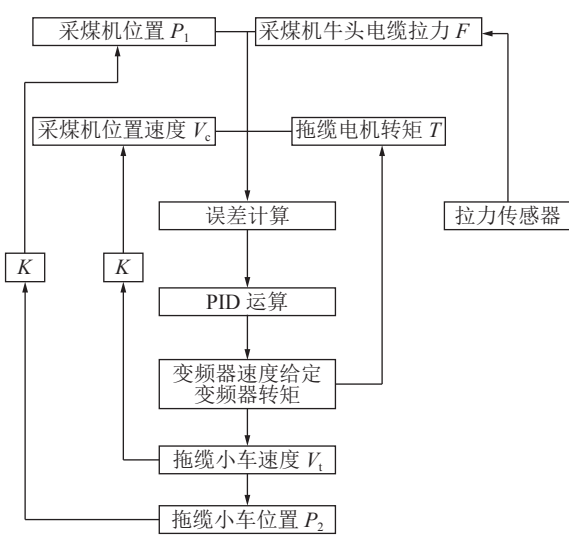


图 9 控制策略

Fig.9 The control strategy

采煤机能否稳定运行直接影响工作面生产效率, 因此系统的稳定与保护尤为重要, 本系统在控制上采用多种安全保障机制: ①拖缆控制器通过控制器局域网(Controllor Area Network, CAN)总线直接与采煤机控制器通讯, 稳定可靠, 即使上位机监测系统出现故障, 拖缆系统依然可自主运行; ②控制器也可通过以太网进行通讯, 用以获取采煤机的主要运行信息(位置、速度、方向、拉力), 这种方式作为冗余机制; ③采煤机控制系统与拖缆的控制系统可实现互锁联动, 系统设置拉力保护、扭矩保护、限位保护等急停闭锁控制措施; ④上位机系统可实现故障预警、历史数据记录等功能, 如图 10 所示。

以上措施构成了整个安全体系, 保障了不发生断缆等严重故障。

2.4 电缆快速安装技术

系统设计了一种拖缆小车快速拆装及电缆入滚自适应对中的结构, 如图 11 所示。当工作面生产, 拖缆系统发生故障不能运行时, 要实现快速拆装, 不影响生产, 通过螺栓加连接销的连接形式, 既方便了拆卸又实现柔性连接, 10 min 即可将拖缆系统的拆除, 采煤机可继续生产, 系统故障延迟至检修班处理, 保证不影响生产进度; 拖缆小车增加了导向装置, 实现煤机电缆夹装入滚筒后, 能够自动对中, 防止电缆夹磨损。



图 10 上位机界面

Fig.10 Interface of the upper computer

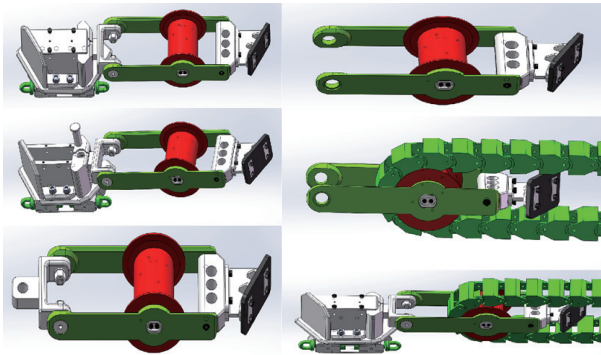


图 11 快速拆装结构

Fig.11 The quick disassembly structure

3 现场试验与应用

2020 年 10 月至 2021 年 8 月,该系统在张家崩矿 14301 综采工作面成功应用,工作面平均采高 1.2 m,采煤机最大速度 18 m/min。通过井下的多次调试,最终实现了电缆拖拽系统的常态化、包含三角煤区域的全工作面运行,根据数据统计,跟机率达到 94.7%,采煤机电缆夹在电缆槽内始终处于平铺状态,最多出线两层叠加,采煤机电缆夹未出现挤压、掉落、堆叠和憋卡等影响工作面正常生产的情况。

系统在近一年的运行过程中,除采煤机电缆和冷却水管由于折弯问题更换外,未发生重大故障问题,系统可靠性高,成功减少了 2 名电缆看护工,达到了减人增效的目的,满足了综采自动化、无人化开采的需求。系统具有完全的自主知识产权,并且能够在现有煤矿工作面进行改造,成本低,为今后薄煤层综采无人化工作面的改造升级提供了新的可行方案。

4 结 论

1)为满足综采工作面无人化开采需求,解决采煤机电缆需要人看护的问题,设计了采煤机电缆自动拖拽系统,系统额定功率 15 kW,工作面最大长度 400 m,适应采煤机最大速度 30 m/min。控制系统基于速度和转矩,能够实现自适应常态化运行。

2)介绍了基于动力学仿真分析的拖缆链传动系统设计,适用于复杂工作面的轨道浮动对中技术、基于速度与转矩的自适应控制技术、电缆快速拆装技术等关键技术,解决了系统设计、机械结构、控制策略、故障保护等难题,实现了电缆夹始终处于微张紧状态,提高了系统的自动化运行率,跟机率达到 94.7%。

3)采煤机电缆自动拖拽系统是工作面无人化开采的重要设备,解决了采煤机电缆的脱槽问题,本系统结构合理、可靠性高、拆装维护方便,除 PLC 外全部采用国产设备,可在现有工作面进行改造,可推广性强。

参考文献(References):

[1] 王国法. 煤矿智能化最新技术进展与问题探讨[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 1-27.  
WANG Guofa. New technological progress of coal mine intelligence and its problems[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 1-27.

[2] 王国法, 杜毅博, 徐亚军, 等. 中国煤炭开采技术及装备 50 年发展与创新实践—纪念《煤炭科学技术》创刊 50 周年[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 1-18.  
WANG Guofa, DU Yibo, XU Yajun, et al. Development and innovation practice of China coal mining technology and equipment for 50 years: Commemorate the 50th anniversary of the publica-

- tion of Coal Science and Technology[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 1–18.
- [3] 崔 耀. 采煤机电缆拖拽装置跟机自适应控制系统的应用[J]. 煤矿机械, 2021, 42(9): 137–141
- CUI Yao. Research and application of following self-adaptive control system for cable dragging device of shearer.[J]. Coal Mine Machinery, 2021, 42(9): 137–141.
- [4] 崔 耀, 原长锁. 采煤机电缆自动拖拽系统研发与试验[J]. 煤矿机械, 2021, 42(8): 29–31.
- CUI Yao, YUAN Changsuo. Design and test of automatic cable towing system of shearer[J]. Coal Mine Machinery, 2021, 42(8): 29–31.
- [5] 曹 杨. 采煤机新型自动拖缆系统设计[J]. 煤炭技术, 2022, 41(4): 171–174.
- CAO Yang. Design of new automatic cable-towing system for shearer[J]. Coal Technology, 2022, 41(4): 171–174.
- [6] 谷 斌. 综采工作面采煤机自动拖缆系统研发及应用[J]. 煤炭工程, 2021, 53(8): 184–188.
- GU Bin. Development and application of automatic cable towing system for shearer in fully mechanized mining face [J]. Coal Engineering, 2021, 53(8): 184–188.
- [7] 马 凯. 梭车输送机构张紧力研究[J]. 煤炭技术, 2016, 35(4): 234–235.
- MA Kai. Tension research of shuttle car conveying mechanism [J]. Coal Technology, 2016, 35(4): 234–235.
- [8] 丁守坤. 重型刮板输送机预张力的计算及伸缩机尾 紧链油缸的确定[J]. 煤矿机械, 2010, 31(10): 3–6.
- DING Shoukun. Calculation of pretension of heavy-duty scraper conveyor and determination of tight chained cylinder of expansion-tail[J]. Coal Mine Machinery, 2010, 31(10): 3–6.
- [9] 白晓辉, 任中全, 刘海燕. 刮板输送机中部槽弯曲角度设计计算[J]. 煤矿机械, 2011, 32(6): 21–22.
- BAI Xiaohui, REN Zhongquan, LIU Haiyan. Design calculation of rotated angle of middle trough in scraper conveyor[J]. Coal Mine Machinery, 2011, 32(6): 21–22.
- [10] 谭宇硕. 采煤机电缆拖拽装置传动部件应力分析[J]. 煤炭技术, 2018, 37(6): 288–290.
- TAN Yushuo. Stress analysis of transmission components of shearer cable dragging device[J]. Coal Technology, 2018, 37(6): 288–290.
- [11] 崔 耀, 叶 壮. 基于 5G+云边端协同技术的采煤机智能调高调速控制系统设计与应用[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(6): 205–216.
- CUI Yao, YE Zhuang. Research on cloud-edge-terminal collaborative intelligent control of coal shearer based on 5G communication[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(6): 205–216.
- [12] 张 平, 沈 丰, 张成武, 等. 基于机器学习的采煤机拖缆装置控制系统研究[J]. 煤矿机械, 2022, 43(3): 105–107.
- ZHANG Ping, SHEN Feng, ZHANG Chengwu, *et al.* Research on control system of shearer towing device based on machine learning[J]. Coal Mine Machinery, 2022, 43(3): 105–107.
- [13] 杨 立. 采煤机电缆自动拖拽装置试验台设计研究[J]. 煤矿机械, 2020, 41(11): 16–19.
- YANG Li. Design and research on testbed of automatic cable dragging device for shearer[J]. Coal Mine Machinery, 2020, 41(11): 16–19.
- [14] 孙 鹭, 王 宁, 毕 伟, 等. 综采工作面采煤机线缆智能联动系统设计[J]. 煤矿机械, 2019, 40(12): 4–5.
- SUN Lu, WANG Ning, BI Wei, *et al.* Design of intelligent linkage system for shearer cable in fully mechanized mining face[J]. Coal Mine Machinery, 2019, 40(12): 4–5.
- [15] 汪佳彪, 王忠宾, 张 霖, 等. 基于以太网和 CAN 总线的液压支架电液控制系统研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(6): 1575–1581.
- WANG Jiabiao, WANG Zhongbin, ZHANG Lin, *et al.* Research on electro-hydraulic control system of hydraulic support based on Ethernet and CAN-Bus[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(6): 1575–1581.