

# 超长柔性悬挂固体充填刮板输送机异常工况表征及自主调控方法

张强<sup>1,2</sup>, 张吉雄<sup>1,2</sup>, 宗庭成<sup>1,2</sup>, 金子山<sup>1,3</sup>, 韩雨<sup>1,2</sup>, 杨康<sup>1,2</sup>, 张斌<sup>4</sup>, 傅瑞华<sup>5</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; 3. 中国矿业大学 孙越崎学院, 江苏 徐州 221116; 4. 山东新巨龙能源有限责任公司, 山东 菏泽 274918; 5. 宁夏天地奔牛实业集团有限公司, 宁夏 石嘴山 753000)

**摘要:** 固体充填刮板输送机是固体充填开采技术的关键装备, 其高效智能化的程度制约着固体智能充填开采技术的进步, 暂难突破超大采长、大功率、高可靠性的瓶颈, 运行状态受地质条件、充填工艺等主控因素影响显著, 异常工况自主调控问题亟待解决。总结了固体充填刮板输送机特征; 构建了固体充填刮板输送机位姿形态与运输状态表征方法; 通过分析异常工况的形成机理, 选取异常工况判别指标, 结合位姿与运输状态表征方法, 给出了其空间位姿、牵引状态等异常工况判别准则与典型异常工况的调控路径, 揭示了多工况状态下固体充填刮板输送机运载调控机制, 提出了实时调控充填材料运输量、直线及水平程度组合的异常工况自主调控方法。全国首个 260 m 工作面长固体充填工程案例表明: 通过异常工况自主调控, 平均最大水平偏移距每减少 100 mm, 刮板链牵引力可减少 85 kN, 输送功率损耗可减少 55 kW; 平均最大垂直偏移距每减小 100 mm 时, 输送功率损耗可减少 7.2 kW; 单位长度货载运量每减少 100 kN/m, 刮板链牵引力可减少 31.9 kN, 输送功率损耗可减少 38.2 kW。所提出的异常工况自主调控方法可显著提升固体充填刮板输送机的输送效能, 可助力实现固体智能充填开采。

**关键词:** 固体充填刮板输送机; 工况表征; 自主调控; 工况判别; 路径解调; 充填开采

**中图分类号:** TD528; TD823.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)04-2141-11

## Characterization and autonomous control method of abnormal working conditions of super-long flexible suspended solid backfilling scraper conveyor

ZHANG Qiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Jixiong<sup>1,2</sup>, ZONG Tingcheng<sup>1,2</sup>, JIN Zishan<sup>1,3</sup>, HAN Yu<sup>1,2</sup>, YANG Kang<sup>1,2</sup>, ZHANG Bin<sup>4</sup>, FU Ruihua<sup>5</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; 3. Sun Yueqi Honors College, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 4. Shandong Energy Xinwen Group Xinjulong Co., Ltd., Heze 274918, China; 5. Ningxia Tiandi Benniu Industrial Group Co., Ltd., Shizuishan 753000, China)

**Abstract:** Solid backfilling scraper conveyor is a key equipment of solid backfilling mining technology, and the degree of its high efficiency and intelligence restricts the development of solid intelligent backfilling mining technology. Currently,

收稿日期: 2023-10-24 修回日期: 2024-02-17 责任编辑: 郭晓炜 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.1365

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金资助项目(2021GJZPY12)

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

通讯作者: 张吉雄(1974—), 男, 宁夏中卫人, 教授, 博士生导师。E-mail: zjxiong@163.com

引用格式: 张强, 张吉雄, 宗庭成, 等. 超长柔性悬挂固体充填刮板输送机异常工况表征及自主调控方法[J]. 煤炭学报, 2024, 49(4): 2141-2151.

ZHANG Qiang, ZHANG Jixiong, ZONG Tingcheng, et al. Characterization and autonomous control method of abnormal working conditions of super-long flexible suspended solid backfilling scraper conveyor[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(4): 2141-2151.



移动阅读

it is difficult to break through the bottleneck of high power, super-large mining and high reliability. The operating state is significantly affected by the main controlling factors such as geological conditions and filling process. The problem of autonomous control of abnormal working conditions needs to be solved urgently. The characteristics of solid backfilling scraper conveyor is summarized, and the posture and conveyance state characterization method of solid backfilling scraper conveyor is developed. By analyzing the formation principle of abnormal working conditions, selecting the discriminant index of abnormal working conditions, and combined with the characterization method of posture and conveyance state, the discriminant criteria of abnormal working conditions of the spatial posture and traction state of the scraper conveyor and the adjustment and control path of typical abnormal working conditions are given. The mechanism of conveyance control of solid backfilling scraper conveyor under multi-working conditions is revealed, and the efficient autonomous control method for abnormal working conditions is proposed to real-time control the transportation volume of backfilling materials, the straight line and horizontal extent. The first 260-meter-long solid filling project in China shows that through the autonomous control of abnormal working conditions, for every 100 mm reduction in horizontal offset, the traction is reduced by 85 kN and the transmission power loss is reduced by 55 kW, when the maximum vertical offset is reduced by 100 mm, the conveying power loss can be reduced by 7.2 kW, and for every 100 kN/m reduction in the mass of the cargo per unit length, the traction is reduced by 31.9 kN and the transmission power loss is reduced by 38.2 kW. The proposed autonomous control method of abnormal working conditions can significantly improve the conveying efficiency of solid backfilling scraper conveyor, and can help realize intelligent solid backfilling mining.

**Key words:** solid backfilling scraper conveyor; condition characterization; self-regulation; condition identification; path demodulation; backfill mining

煤炭目前我国一次能源中占据主体地位, 仍是新时代构建清洁低碳安全高效能源体系的“稳定器”与“压舱石”<sup>[1]</sup>, 但煤炭资源开采导致的地表沉陷、固废排放等问题依然严峻, 国家在《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》中明确指出“大力发展绿色矿业, 推广应用矸石不出井模式, 鼓励采矿企业利用尾矿、共伴生矿填充采空区, 推动实现尾矿就地消纳”<sup>[2]</sup>。充填开采作为绿色开采技术的典型代表, 能够有效控制岩层移动、处理固废排放等, 其应用需求还将与日俱增<sup>[3]</sup>。同时, “十三五”规划纲要明确提出“加快推进煤矿无人开采技术研发和应用”, “十四五”期间国家将积极推进煤矿的智能化建设与智慧矿山发展, 《煤炭工业“十四五”高质量发展指导意见》提出“十四五”建成智能化煤矿 1 000 处以上<sup>[4-6]</sup>。2022 年, 在冀中能源公司邢东矿进行了全国首个固体智能充填采煤工程试验<sup>[7]</sup>, 与非智能充填开采相比, 智能化充填开采每班可减少用工 4~5 人, 充填工效提升约 54%。由此可见, 高效智能化必然是固体充填技术未来发展的主流趋势。

固体充填刮板输送机(在相关论文及工程现场也称为多孔底卸式刮板输送机、矸石充填刮板输送机、悬挂式刮板输送机、吊挂式固体充填刮板输送机、充填刮板输送机等, 本文统称为固体充填刮板输送机)作为固体充填技术的核心设备, 其性能的发挥与可靠性保障制约着固体充填技术的整体效能。

传统落地式运煤刮板输送机在智能调速、实时监测、远程集中控制等研究方面已取得较大进展<sup>[8-9]</sup>, 基本实现了刮板输送机智能运煤; 但对于柔性悬挂的固体充填刮板输送机而言, 其工作条件复杂, 工况状态受到地质条件、充填工艺等因素影响较大, 易产生多种复杂工况甚至异常工况, 影响其运行状态的可靠程度, 进而直接影响固体充填技术的效率与产能。因此, 固体充填刮板输送机结构特征、空间位姿实时表征、异常工况状态自动判别、高可靠性运料及智能运载调控等问题亟待研究解决。

目前, 在空间位姿表征及判别方面, 笔者<sup>[10]</sup>建立了充填支架 MDH 运动学模型, 实现各充填关键装备工况位姿精准表征, 提出了充填支架的工况判别及解调方法; 方新秋等<sup>[11]</sup>利用光纤光栅三维曲率传感器实现了刮板输送机空间位姿的实时感知等。在运载智能调控方面, 毛君等<sup>[12]</sup>基于链条张力自动控制原理构建了电液力伺服液压系统数学模型, 实现了对刮板输送机链条张力的自动调节控制; 杨刚等<sup>[13]</sup>分析了将高效节能永磁同步电机及其变频系统应用于刮板输送机的可行性及优势。

上述研究主要集中在前部运煤刮板输送机位姿感知与智能调控方面, 而针对固体充填刮板输送机, 尤其是耦合超大采长(针对固体充填开采而言, 也即 200 m 以上的超长运距)、柔性悬挂、非均载等特征而导致异常姿态与复杂运载工况的调控方法研究还比

较少, 本文在以下方面进行了研究:

(1) 总结了固体充填刮板输送机特征, 建立了针对刮板输送机位姿形态与牵引输送工况状态精确的表征方法, 有效量化了刮板输送机的实际工况, 并进一步得到了固体充填刮板输送机牵引力与长度或运距的关系。

(2) 分析异常工况形成机理, 提出了异常工况的判别指标及准则, 为固体充填刮板输送机空间位姿与牵引状态的自主识别提供了可靠的准则。

(3) 针对 260 m 超大采长柔性悬挂固体充填刮板输送机应用场景, 构建了高可靠性输送的智能运载调控方法, 并结合实际工程案例进行验证分析。

### 1 固体充填刮板输送机特征

#### 1.1 演化历程与发展趋势

固体充填刮板输送机<sup>[14-15]</sup>作为充填开采技术的核心装备, 是散体充填材料运输的载体, 主要实现散状固态充填材料定时、定量、多点输送, 而充填材料运输环节又是固体充填技术的咽喉, 直接决定充填工效高效与否。

经过调研多个矿区所使用的固体充填刮板输送机类型, 总结出固体充填刮板输送机前后经历的 6 代更新与改进, 具体历程如图 1 所示。

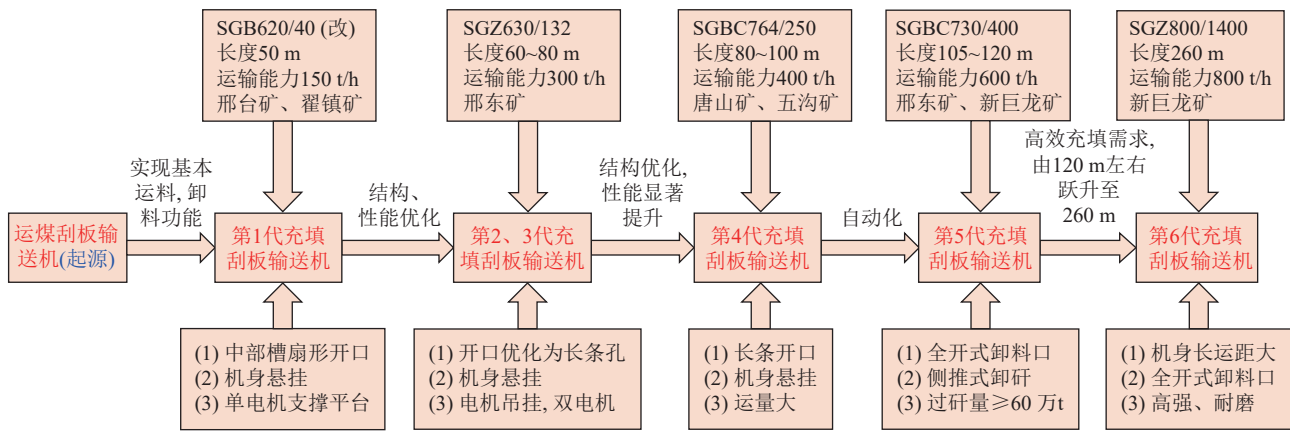


图 1 固体充填刮板输送机起源及发展演化

Fig.1 Origin and development evolution of solid backfilling scraper conveyor

其中前 5 代固体充填刮板输送机均属小运距 (50~120 m), 技术相对成熟, 运行基本可靠, 而第 6 代则是超大采长超大运距 (260 m), 在山东新巨龙煤矿首次运用。固体充填刮板输送机的技术革新代表着充填技术高效智能化的发展历程, 超大采长、大功率、高可靠性瓶颈正在逐步突破。

#### 1.2 结构、功能与运动状态特征

相较于传统运煤刮板输送机, 固体充填刮板输送

机柔性悬挂于液压支架后顶梁下方, 在中部槽处具有由伸缩油缸控制的卸料口, 用于充填材料卸载, 其具体结构如图 2 所示。

根据现场实践调研总结, 从基本结构、运动特性、运行环境、工况状态等方面对比分析运煤刮板输送机与固体充填刮板输送机的差异对比, 具体见表 1。

因固体充填刮板输送机存在柔性悬挂、矸石运载

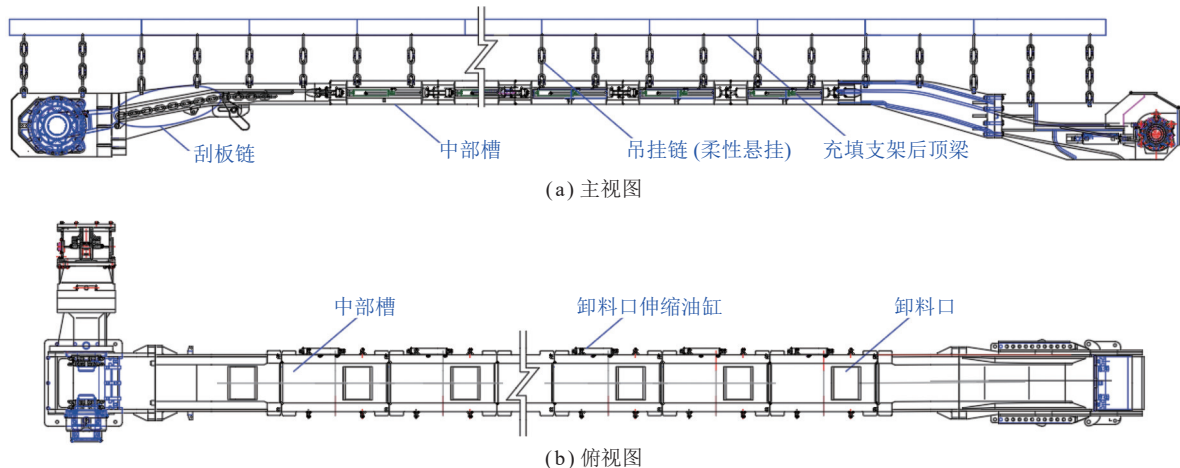


图 2 固体充填刮板输送机基本结构

Fig.2 Basic structure of solid filling scraper conveyor

表 1 运煤刮板输送机与固体充填刮板输送机的差异对比

Table 1 Comparison of the difference between coal scraper conveyor and solid backfilling scraper conveyor

序号	区别点	运煤刮板输送机	固体充填刮板输送机	备注	
1	基本结构	没有卸料口、卸料口伸缩油缸、吊挂链等结构	有卸料口、卸料口伸缩油缸、吊挂链等结构	结构差异大	
2	运动特性	工序动作 运动机构	随采随推 推溜油缸、链条链轮	随充随拉、拉溜滞后充填一个循环 拉溜油缸、卸料口伸缩油缸、链条、链轮、支架后顶梁	机构多，工序复杂
3	运行环境	输送对象 运载阻力	煤炭 煤流煤块冲击阻力、弯曲段附加阻力、运煤摩擦阻力小	矸石散体 矸石散体，弯曲段附加阻力、散体矸石摩擦阻力大	摩擦力更大
4	工况状态	影响因素 空间位置 空间形态	推溜油缸行程、移架、底板条件 落地式 弯曲程度小	移架、支架后顶梁下沉、吊挂链长度、拉溜油缸行程、夯实机构行程、顶底板条件 柔性悬挂 弯曲程度大	影响因素多，工况复杂，表征困难

等特征,因此其位姿易受支架后顶梁下沉、充填体托举和顶板构造等因素影响,导致在执行充填工序流程时固体充填刮板输送机易发生机构联动,进一步加剧了空间位姿的多样性与工况状态的复杂性。尤其当移架时支架出现拉溜不齐,或因工作面长度较长再加之顶底板不平整,以及出现向斜构造或者工作面煤层厚度变化等特殊地质条件时,都将造成附加摩擦力的产生,使固体充填刮板输送机超载变形、电动机功率超额、链条受到较大的局部牵引力而导致链条别卡、飘链甚至断裂等异常工况。因此,对固体充填刮板输送机的位姿形态及牵引输送状态建立表征、判别与调控方法是保证固体充填刮板输送机高可靠运行的基础。

## 2 固体充填刮板输送机异常工况状态表征

### 2.1 位姿形态表征

为量化固体充填刮板输送机位姿形态,寻求位姿形态由正常转化为异常的判别依据,基于固体充填刮板输送机的结构特征,选取表征对象、建立坐标系、选取表征指标和构建位姿方程,构建固体充填刮板输送机位姿表征方法(图3)。

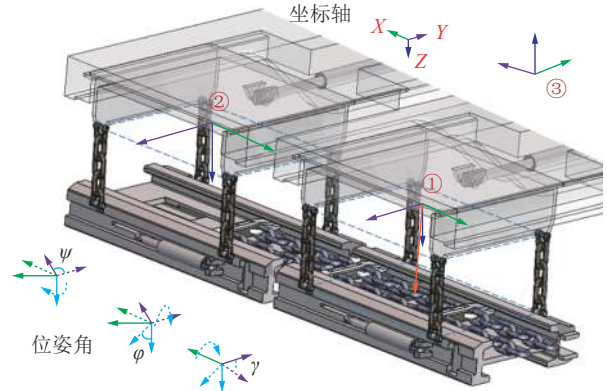
第1步:选取表征对象。考虑主要针对位姿状态进行表征,选取单节刮板输送机中部槽和输送机整体姿态作为表征对象。

第2步:建立坐标系。建立局部坐标系对单节刮板输送机中部槽进行表征。再建立全局坐标系,在每个局部坐标系之间建立联系,进行全局表征。

第3步:选取表征指标。表征指标的选取主要考虑参数应便于实时监测,能准确表征出表征对象的位姿以及可以与后续的判别指标建立一定联系。综合

分析,对于单节中部槽选取位置向量及俯仰角、偏航角、横滚角作为表征指标;对于输送机整体姿态,选取弯曲段水平及垂直方向的最大偏移距作为表征指标。

通过上述3步,选取输送机中部槽和整体姿态作为表征对象,建立局部与全局坐标系,构建的位姿形态表征示意如图3所示。



注:①为参考坐标系;②为相邻参考坐标系;③为全局坐标系; $\varphi$ 为俯仰角, ( $^{\circ}$ ); $\psi$ 为偏航角, ( $^{\circ}$ ); $\gamma$ 为横滚角, ( $^{\circ}$ )。

图3 位姿形态表征示意

Fig.3 Schematic diagram of pose characterization

第4步:构建位姿方程,按照上述方法,构建出任意充填工序下任意充填位置处单节固体充填刮板输送机的中部槽位姿方程,以编号 $j$ 为例

$$\mathbf{P}_{ZBC}(j) = [\varphi_j, \psi_j, \gamma_j, \mathbf{x}_j, \mathbf{y}_j, \mathbf{z}_j] \quad (1)$$

式中, $\mathbf{P}_{ZBC}$ 为中部槽位姿向量; $\mathbf{x}$ 、 $\mathbf{y}$ 、 $\mathbf{z}$ 为位置向量。

由式(1)可知,与 $j$ 处相邻的 $j+1$ 处中部槽可表示为

$$\mathbf{P}_{ZBC}(j+1) = [\varphi_{j+1}, \psi_{j+1}, \gamma_{j+1}, \mathbf{x}_{j+1}, \mathbf{y}_{j+1}, \mathbf{z}_{j+1}] \quad (2)$$

由于姿态角参数的值在局部参考系与全局参考系下相同,因此两相邻中部槽之间的角度可表示为

$$\begin{cases} \Delta\varphi = \varphi_{j+1} - \varphi_j \\ \Delta\psi = \psi_{j+1} - \psi_j \\ \Delta\gamma = \gamma_{j+1} - \gamma_j \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $\Delta\varphi$ 、 $\Delta\psi$ 、 $\Delta\gamma$  为相邻中部槽俯仰角、偏航角、横滚角的差值, ( $^\circ$ )。

进而, 对固体充填刮板输送机整机位姿进行表征, 比如正常条件下的平直状态工况, 或因柔性悬挂、运距变长等各种原因在水平或垂直方向上形成的近似 S 形或 V 型的弯曲工况等, 如图 4 所示。

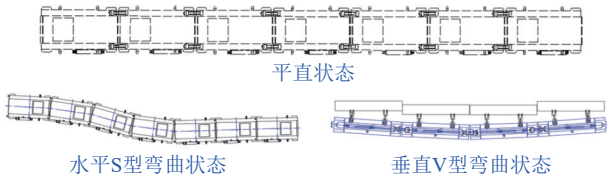


图4 固体充填刮板输送机不同工况示意

Fig.4 Schematic diagram of different conditions of solid backfilling scraper conveyor

固体充填刮板输送机弯曲工况表征方法具体如下: 选取弯曲段的总长度及最大水平或垂直偏移距作为指标, 对于该指标的求解, 以水平方向某一 S 弯曲段为例, 首先, 将中部槽简化为矩形<sup>[16]</sup>, 取弯曲段第 1 个中部槽右侧短边中点为坐标原点, 建立坐标系如图 5 所示。

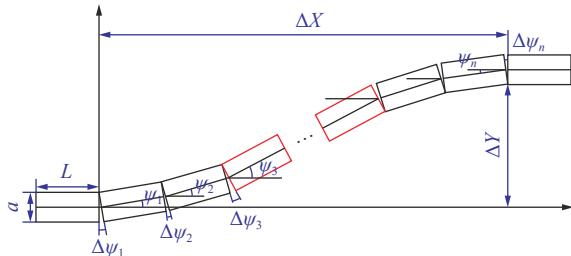


图5 S形弯曲段计算模型

Fig.5 S-shaped bending section calculation model

根据上述几何关系, 在不考虑垂直方向微小变形的情况下, 可进一步推导出单个弯曲段长度、弯曲段最大偏移距与偏航角之间的关系:

$$\begin{cases} \Delta X = \sum_{i=1}^n \left( L \cos \psi_i + \frac{a}{2} \tan \Delta \psi_i \cos \psi_i \right) \\ \Delta Y = \sum_{i=1}^n \left( L \sin \psi_i + \frac{a}{2} \tan \Delta \psi_i \sin \psi_i \right) \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $L$  为中部槽的长度, m;  $a$  为中部槽的宽度, m;  $\Delta X$  为该 S 弯曲段的总长度, m;  $\Delta Y$  为该弯曲段的最大水平偏移距, m。

同理, 对于垂直方向的 V 型弯曲段, 可以得出弯曲段最大垂直偏移距与俯仰角之间的关系:

$$\Delta Z = \sum_{i=1}^n \left( L \sin \varphi_i + \frac{a}{2} \tan \Delta \varphi_i \sin \varphi_i \right) \quad (5)$$

通过上述公式的建立, 形成固体充填刮板输送机位姿形态的表征方法。

### 2.2 牵引输送状态表征

在固体充填刮板输送机产生垂直或水平弯曲工况时, 运载的矸石会随着刮板输送机改变运载路径, 产生附加摩擦力, 影响正常的牵引状态, 因此需要根据以上建立的位姿表征方法进一步量化工况的受力状态。

正常工况的刮板输送机工作中要克服货载及刮板链在上溜槽上的移动阻力及倾斜运输时负载及刮板链的自重分力。在产生水平弯曲段时, 还需要额外克服弯曲附加的摩擦力。附加摩擦力根据弯曲角的大小和链条中存在的牵引力值计算, 以刮板输送机产生水平 S 型弯曲工况为例进行分析, 如图 6 所示, 采用 5 节中部槽为例进行分析<sup>[17-18]</sup>。

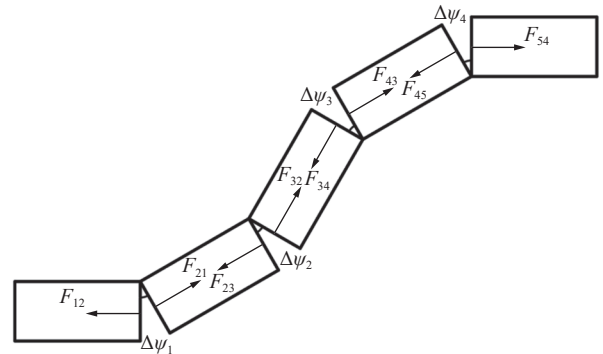


图6 刮板输送机 S 型弯曲段刮板链牵引力示意

Fig.6 Schematic diagram of traction of S-type bending section of scraper conveyor

可以得到第 1 节中部槽出口处的牵引力  $F_{12}$  为

$$F_{12} = L(q_b + q_l)(\mu_0 \cos \Delta\varphi \pm \sin \Delta\varphi) + F_0 \quad (6)$$

$$\text{令 } C = L(q_b + q_l)(\mu_0 \cos \Delta\varphi \pm \sin \Delta\varphi) \quad (7)$$

$$F_{21} = F_{12} e^{\mu_0 |\Delta\psi_1|} \quad (8)$$

式中,  $q_l$  为刮板单位长度的质量, kg/m;  $\mu_0$  为刮板链与中部槽的摩擦因数;  $q_b$  为货载单位长度的质量, kg/m;  $F_0$  为链条进入第 1 节中部槽时的牵引力, N;  $\Delta\psi_1$  为第 1、2 节中部槽偏航角的差值, ( $^\circ$ ); 当俯仰角  $\varphi > 0$  时取“+”, 当俯仰角  $\varphi < 0$  时取“-”, 实际刮板输送机上行段与下行段的刮板链牵引力相差极小, 且  $\Delta\varphi$  的范围一般为  $0^\circ \sim 3^\circ$ , 计算时可忽略两者之间的差异, 将  $C$  作为固定常数计算。

则第 2 节中部槽出口处的牵引力  $F_{23}$  为

$$F_{23} = F_{12}e^{\mu_0|\Delta\psi_{i1}|} + C = C(1 + e^{\mu_0|\Delta\psi_{i1}|}) + F_0e^{\mu_0|\Delta\psi_{i1}|} \quad (9)$$

第 5 节中部槽进口处的牵引力  $F_{54}$  为

$$F_{54} = C(e^{\mu_0\sum_{i=1}^4|\Delta\psi_{i1}|} + e^{\mu_0\sum_{i=2}^4|\Delta\psi_{i1}|} + e^{\mu_0\sum_{i=3}^4|\Delta\psi_{i1}|} + e^{\mu_0|\Delta\psi_{i4}|} + 1) + F_0e^{\mu_0\sum_{i=1}^4|\Delta\psi_{i1}|} \quad (10)$$

以此类推,第  $(n+1)$  节中部槽进口处的牵引力  $F_{(n+1)n}$  为

$$F_{(n+1)n} = C(e^{\mu_0\sum_{i=1}^n|\Delta\psi_{i1}|} + e^{\mu_0\sum_{i=2}^n|\Delta\psi_{i1}|} + \dots + e^{\mu_0\sum_{i=n-1}^n|\Delta\psi_{i1}|} + e^{\mu_0|\Delta\psi_{in}|} + 1) + F_0e^{\mu_0\sum_{i=1}^n|\Delta\psi_{i1}|} \quad (11)$$

由式 (11) 可以计算出水平弯曲段的中部槽刮板链的内部牵引力,而中部槽受到哑铃销的水平方向定位尺寸的限制,相邻 2 个中部槽之间的偏航角差值  $\Delta\psi_i$  会有最大值限制,在未发生大的变形条件下,一般为  $0^\circ \sim 1^\circ$ ,所以取  $|\Delta\psi_i| = \alpha_0 = 0.5^\circ$ ,则可得到

$$F_{(n+1)n} = C \frac{e^{\mu_0(n+1)\alpha_0} - 1}{e^{\mu_0\alpha_0} - 1} + F_0e^{\mu_0n\alpha_0} \quad (12)$$

其中,  $F_{(n+1)n}$  为第  $n+1$  节中部槽出口处的刮板链牵引力,该位置刮板输送机长度为  $(n+1)L$ ,因  $\alpha_0$  较小,  $e^{\mu_0\alpha_0} - 1$  可近似为  $\mu_0\alpha_0$  进行后续化简,又因  $\alpha_0$  为相邻中部槽间偏转角,将其平均到两节中部槽长度上,得到单位长度弯曲角  $\gamma = \alpha_0/(2L)$ ,令固体充填刮板输送机长度为  $x_g$ ,则可进一步得到固体充填刮板输送机牵引力与长度的关系为

$$f(x_g) = \frac{C}{\mu_0\alpha_0} (e^{\mu_0x_g\gamma} - 1) + F_0e^{\mu_0(x_g-L)\gamma} \quad (13)$$

如图 7 所示,在刮板输送机产生水平弯曲姿态时,随着固体充填刮板输送机长度的增加,其牵引力呈指数型增长。产生垂直弯曲时,同样可以照此计算。

可以看出在输送机长度超过 150 m 时,弯曲段所引起的附加摩擦力急剧增加。对于普通的采煤工作面,工作面长度一般不超过 150 m,而对于新一代超大采长 (260 m) 固体充填刮板输送机,牵引力极大影响着刮板输送机工况的正常与否,应作为重要的判别指标。

通过上述公式的建立,形成固体充填刮板输送机牵引运输状态的表征方法。

固体充填刮板输送机位姿及牵引输送状态的表征,是实现智能化判别、姿态调整、运载状态调控的基础,也是其实现智能化的前提。本文在上述表征的基础上,进一步分析工况状态。

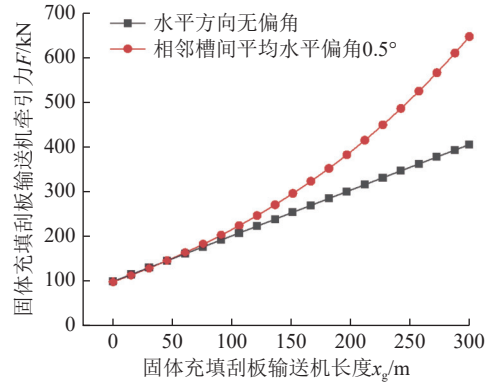


图 7 固体充填刮板输送机牵引力随长度变化曲线

Fig.7 Curves of traction force variation with length of solid backfilling scraper conveyor

### 3 异常工况自主调控方法

#### 3.1 异常工况判别指标及准则

根据上文对固体充填刮板输送机异常工况形成机理的分析,可以确定刮板输送机工况状态由正常转为异常的判别指标,主要由位姿参数与内部牵引力组成,通过给定其临界值,确定异常工况临界状态,设定相应的判别准则。

随着工作面长度和刮板输送机弯曲段的增加,相对偏航角及相对俯仰角增大,刮板链条的牵引力将变大,增加链条的负载,以单节刮板链附加力与牵引力总和为标准进行判别。水平与垂直弯曲产生的附加力与刮板链牵引力的值可通过式 (11) 计算得出,其和即为牵引力总值  $F_z$ ,根据输送机刮板链强度可确定  $F_z$  的最大值  $F_{zmax}$ ,并设置安全系数  $\mu$ ,根据长期工程实践,有效牵引力须达到牵引力总值的 80% 左右,因此设置安全系数  $\mu=1.2 \sim 1.3$ ,则其判别准则为

$$\begin{cases} \mu F_z \geq F_{zmax}, & \text{异常状态} \\ \mu F_z < F_{zmax}, & \text{正常状态} \end{cases} \quad (14)$$

对于刮板输送机整体姿态,当弯曲段水平及垂直偏移距过大,会导致附加摩擦力过大与整机结构变形。因此以刮板输送机各弯曲段水平及垂直方向的最大偏移距和整机的附加力与牵引力总和  $F_{z0}$ ,即驱动链轮处的中部槽链条牵引力为判别依据。通过式 (15) 可以计算出牵引力  $F_{z0}$  的最大临界值  $F_{z0max}$ :

$$F_{z0max} = \frac{1\,000\eta N}{v_g(k_r + 1)} \quad (15)$$

式中,  $\eta$  为减速器的机械效率;  $N$  为电动机功率, kW;  $v_g$  为刮板链运行速度, m/s;  $k_r$  为刮板链绕经驱动链轮的阻力系数,  $k_r=0.030 \sim 0.045$ 。

则固体充填刮板输送机整体姿态异常工况状态判别准则为

$$\begin{cases} \Delta Y_i \geq \Delta Y_{\max}, & \text{异常状态} \\ \Delta Y_i < \Delta Y_{\max}, & \text{正常状态} \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \Delta Z_i \geq \Delta Z_{\max}, & \text{异常状态} \\ \Delta Z_i < \Delta Z_{\max}, & \text{正常状态} \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} \mu F_{z0} \geq F_{z0\max}, & \text{异常状态} \\ \mu F_{z0} < F_{z0\max}, & \text{正常状态} \end{cases} \quad (18)$$

### 3.2 异常工况智能运载调控机制

由上述分析可知, 固体充填刮板输送机产生的异常工况主要外在表现形式为位姿形态异常, 实际内在表现形式为附加摩擦力增加, 构建调控路径时应从此两方面考虑。固体充填刮板输送机水平和垂直弯曲程度由偏航角  $\psi$ 、俯仰角  $\phi$  决定, 由式 (11)~(13) 可以看出附加摩擦力主要由重载段中部槽个数  $n$ 、货载单位长度的质量  $q_b$ 、偏航角  $\psi$ 、俯仰角  $\phi$  等决定, 牵引状态也主要通过调整水平和垂直弯曲程度及附加摩擦力实现。因此, 以固体充填刮板输送机产生 S 型或 V 型弯曲进而引起牵引状态异常工况为例进行分析, 基于影响因素寻求到的自调控路径为:

路径 1:  $\psi$  减少, 偏航角减小, 即控制滑移油缸伸缩调节中部槽水平位姿, 尽量保证刮板输送机呈直线状态;

路径 2:  $\phi$  减少, 俯仰角减小, 即控制充填液压支架后立柱伸缩油缸动作, 调控后承载梁位姿, 尽量保证刮板输送机保持水平;

路径 3:  $q_b$  减少, 刮板输送机单位长度承载质量减少, 即适当减少充填材料的运载量;

路径 4:  $n$  减少, 运载充填材料中部槽数量减少, 即减少充填材料运载距离。

上述路径均可调控固体充填刮板输送机的附加作用力的大小, 保证输送机牵引运输状态的正常。

根据式 (13) 分析, 重载段中部槽个数  $n$  和偏航角  $\psi$  与刮板链牵引力呈指数关系, 货载单位长度的质量  $q_b$  和俯仰角  $\phi$  与刮板链牵引力呈线性关系。而在实际工程场景下, 调节中部槽个数  $n$  可行性较低, 不做优先考虑; 为保证充填效率, 也不优先选择减少充填材料运输量。综上考虑, 建立表 2 所示的优先级关系, 根据具体情况选择最优路径进行调控。

表 2 异常工况调控路径优先级关系

Table 2 Priority relationship of the regulation path of the abnormal working conditions

优先级	参数
1	偏航角 $\psi$
2	俯仰角 $\phi$
3	货载单位长度的质量 $q_b$
4	重载段中部槽个数 $n$

进一步对调控路径进行参数化处理, 将  $n$ 、 $q_b$ 、 $\psi$  和  $\phi$  进行参数化表达, 得到解调路径参数化公式为

$$\begin{pmatrix} \text{路径1: } \psi \text{ 减少} \\ \text{路径2: } \phi \text{ 减少} \\ \text{路径3: } q_b \text{ 减少} \\ \text{路径4: } n \text{ 减少} \end{pmatrix} \quad (19)$$

在确定异常工况调控路径的基础上, 进行超长柔性悬挂固体充填刮板输送机异常工况调控机制的构建, 主要包括参数实时感知与输出、异常工况判别及智能调控部分。

根据上述工况指标、异常工况临界判别准则, 设计异常工况智能调控流程逻辑, 如图 8 所示。异常工况智能调控流程逻辑主要涵盖判别指标临界值确定算法、异常工况判别算法及调控路径选择。

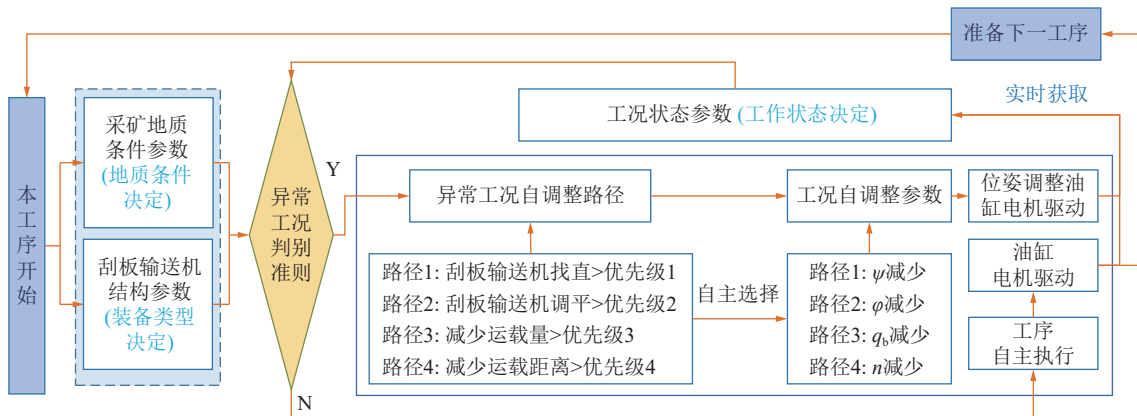


图 8 固体充填刮板输送机智能运载调控逻辑

Fig.8 Intelligent regulatory logic of conveyance of solid backfilling scraper conveyor

对于固体充填刮板输送机的位姿参数,可采用多种手段实现实时感知,如在中部槽底部安装惯性传感器,可获取单节刮板输送机的俯仰角、偏航角及横滚角;或在充填液压支架后顶梁底部架设相机,观测固定 3 个位点,也可反解出单节刮板输送机的 3 个方位角。

工序开始时,根据刮板输送机的主要技术参数,结合地质条件及工作面实际状况,确定异常工况判别指标的临界值,并通过读取基础数据库及实时感知的数据集,运用编写的异常工况判别算法,进行异常工况判别。

若判别为异常工况,则运用算法自主选择最优的调控路径,对重载段中部槽个数  $n$ 、货载单位长度的质量  $q_b$ 、偏航角  $\psi$  及俯仰角  $\phi$  与进行调整。根据数据统计,固体充填刮板输送机货载单位长度的平均质量为 384 kg,主要通过矸石仓给料机的开闭进行调控。结合实践经验,每次调控货载单位长度质量减少 10 kg,即给料机减少给料 2.6 t。对于偏航角  $\psi$  及俯仰角  $\phi$ ,主要通过油缸驱动进行调整。后顶梁滑移油缸每次移架推拉行程为 800 mm,根据经验确定每次调控油缸伸缩 80 mm。以上调控的具体数值需结合工作面参数进行实际调整。

之后进行二次数据感知和异常工况判别反馈,直至判别工况正常,则自主执行相应工序,并进行下一工序的执行,由此形成多工况状态下固体充填刮板输送机运载调控机制。

需要说明的是,本文主要考虑固体充填刮板输送机位姿形态异常造成的牵引状态异常工况,形成实时调控充填材料运输量、刮板输送机直线及水平程度的自主调控方法。而对于其他异常工况,如刮板输送机运行过程中链轮与链环的啮合过程多边形效应带来振动冲击、充填材料对中部槽的冲击等,需根据其具体特征提出针对性的调控方法,本文不对此进行详细阐述。

### 4 工程案例析

#### 4.1 采矿地质条件及装备参数

山东新巨龙煤矿 2304 固体充填工作面位于 3 号煤层,工作面长 260 m,煤层平均厚度 3.48 m,整体位于刘海向斜构造的轴部区域,煤层倾角  $0^\circ \sim 8^\circ$ 。

2304 固体充填工作面选用 SGZ800/1400 型固体充填刮板输送机,实景工况如图 9 所示。充填物料为矸石,中部槽联接方式为哑铃销联接。具体技术参数见表 3。

基于上述基本采矿地质条件及装备技术参数,2304

固体充填工作面特征如下:一是工作面面长为 260 m,为国内首个超大采长固体充填工作面,导致固体充填刮板输送机更易出现 V 型等异常工况,发生断链、卡板等概率显著增大,风险系数大于 120 m 左右的短充填工作面。二是存在向斜构造:2304 充填工作面赋存刘海向斜构造,向斜具体位置如图 10 所示。



(a) 空载工况状态



(b) 柔性悬挂状态

图 9 SGZ800/1400 型固体充填刮板输送机实景工况  
Fig.9 Actual working conditions of SGZ800/1400 solid backfilling scraper conveyor

表 3 SGZ800/1400 固体充填刮板输送机技术参数  
Table 3 Technical parameters of SGZ800/1400 solid backfilling scraper conveyor

参数	参数值
总长度 $L_0/m$	260
电动机的额定功率 $N/kW$	700
电动机效率 $\eta$	0.83
刮板链牵引速度 $v/(m \cdot s^{-1})$	1.2
刮板链牵引力 $F_{zmax}/kN$	$\geq 1810$

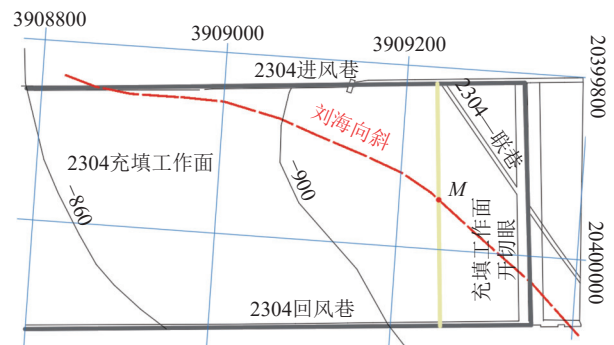


图 10 刘海向斜示意

Fig.10 Schematic diagram of bangs-type oblique



该向斜自北向南自采区东部边界进入采区, 贯穿采区东南部, 导致工作面两巷的标高随向斜构造位置变化而变化, 影响固体充填刮板输送机的位姿形态, 从而引起固体充填刮板输送机存在垂直方向的 V 型弯曲, 造成较大附加摩擦力。

#### 4.2 刮板输送机异常工况调控实例

由于 2304 固体充填工作面长达 260 m, SGZ800/1400 型超长固体充填刮板输送机使用过程中易产生较大水平偏移距及附加摩擦力, 且工作面受刘海向斜影响, 固体充填刮板输送机在垂直方向存在弯曲段, 同样产生附加摩擦力, 可能引起输送机牵引状态异常, 需进行异常工况判别与调控。

如图 10 所示, M 点位于向斜的轴部区域, 工作面受刘海向斜影响严重, 以充填工作面开采至此位置为例进行分析。

采充工序开始, 根据表 3 的刮板输送机技术参数和式 (15) 可以得出中部槽间的最大牵引力  $F_{z\max} = 1\ 810\ \text{kN}$  和整机最大牵引力  $F_{z0\max} = 463.32\ \text{kN}$ 。刮板输送机的实际位姿参数, 采用激光测距仪及地质罗盘进行测量, 如图 11 所示, 具体包括中部槽 3 个方向的偏转角度, 即俯仰角、横滚角与偏航角。



(a) 地质罗盘测姿态角



(b) 激光测距仪测姿态角

图 11 固体充填刮板输送机位姿参数现场实测

Fig.11 Field measurement of the position parameters of the solid backfilling scraper conveyor

根据所测数据, 代入式 (1)、(2) 所示的位姿向量, 运用式 (3) 求解出中部槽间偏航角的差值  $\Delta\psi_n$  和俯仰角的差值  $\Delta\phi_n$ , 进而运用式 (4)、(5) 与式 (11) 得出最大水平与垂直偏移距与运行摩擦力。其中刮板输送机中部槽间的牵引力均远小于  $F_{z\max}$ , 不再对其计算及判别过程进行阐述。对各个弯曲段的最大水平与垂直

偏移距取平均值, 可得出刮板输送机整机平均最大水平偏移距与最大垂直偏移距均为 500 mm, 最大牵引力为 434.27 kN, 由式 (16)~(18) 判别属于水平及垂直弯曲过大造成牵引状态异常工况。

判别出异常工况, 则需进行调控, 对于水平弯曲异常问题, 经判别应通过式 (19) 的路径 1 减少偏航角  $\psi$  进行调控, 通过控制滑移油缸推拉刮板输送机, 每次调控油缸伸缩 80 mm, 再次反馈数据进行二次判别与调控, 直至判别结果属于正常状态即调控完成, 继续执行下一采充工序。

对于刮板输送机垂直弯曲过大问题, 通过式 (19) 的路径 2 减小各节中部槽的俯仰角  $\phi$  调控。实际工况中调控方法为通过调控驱动系统, 使液压支架立柱伸缩油缸动作, 调控方法与水平弯曲异常调控相同, 使远离刘海向斜轴部的支架降架至合理高度, 保留部分顶煤, 保证刮板输送机呈水平状态。

上述方法组合使用, 并辅以调节单位长度承载质量  $q_b$ , 使超长柔性悬挂固体充填刮板输送机的弯曲维持在合理范围内。

#### 4.3 刮板输送机异常工况调控效果分析

为分析调控效果, 通过控制滑移油缸及立柱油缸, 使刮板输送机逐步恢复平直。在刮板输送机整机呈现不同程度的弯曲时, 利用激光测距仪测量各个弯曲段的最大偏移距, 取平均值即得到多组平均最大偏移距。根据不同平均最大偏移距下刮板输送机电机的电流、电压数据, 可得出实际输送功率, 进而结合刮板输送机当时的运行速度求解刮板链牵引力, 进行如下分析。

(1) 水平弯曲调控效果分析。固体充填刮板输送机弯曲段不同水平偏移距刮板链牵引力及功率见表 4, 由表可知: 当平均最大水平偏移距为 500 mm 时, 刮板链牵引力为 414.27 kN, 与前文数学模型所计算的牵引力相差小于 5%, 证明所建立数学模型合理。当平

表 4 SGZ800/1400 固体充填刮板输送机弯曲段不同水平偏移距刮板链牵引力及功率

Table 4 Traction and power at different offsets of the bending section of the SGZ800/1400 solid backfilling scraper conveyor

平均最大水平偏移距/mm	刮板链牵引力/kN	实际输送功率/kW
100	102.45	728.06
200	188.39	831.19
300	268.69	940.75
400	349.92	1 041.02
500	414.27	1 096.58

均最大水平偏移距减小至 100 mm, 进入合理范围。在此过程中, 水平弯曲段牵引力由 414.27 kN 减小至 268.69 kN, 输送功率损耗减少 155.83 kW。也即水平偏移量每减少 100 mm, 刮板链牵引力减少 85 kN, 输送功率损耗可减少 55 kW, 降阻减耗效果明显。

(2) 垂直弯曲调控效果分析。俯仰角  $\varphi$  调整结果如图 12 所示, 当平均最大垂直偏移距由 500 mm 减小至 200 mm 时, 刮板链牵引力由 286 kN 减小至 268 kN。可见, 将平均最大垂直偏移距每减小 100 mm 时, 输送功率损耗可减少 7.2 kW, 有效减小功耗, 提高了输送能力。

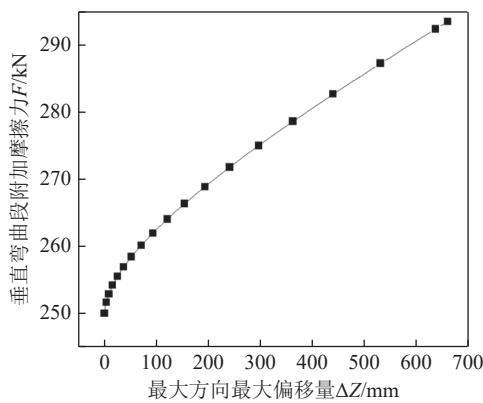


图 12 垂直弯曲牵引力与平均最大垂直偏移距的关系

Fig.12 Relationship between vertical bending traction and the average maximum vertical offset

(3) 货载量调控效果分析。在 (1) 与 (2) 部分进行了偏航角  $\psi$  及俯仰角  $\varphi$  调整对附加摩擦力减小效果的分析, 本部分不考虑偏航角  $\psi$  及俯仰角  $\varphi$  调整效果, 仅分析货载量调整对牵引状态的调控效果。利用皮带秤测量一段时间带式输送机的运矸量, 得出刮板输送机不同时间的货载量, 使用上述同样方式得出不同货载量下刮板输送机的实际输送功率和刮板链牵引力。总结得出, 固体充填刮板输送机的刮板链牵引力与货载单位长度的质量呈线性关系, 当刮板输送机单位长度承载质量每减少 100 kN/m, 刮板链牵引力减少 31.9 kN, 输送功率损耗可减少 38.2 kW。

通过上述异常工况自主调控效果量化分析可知: 通过异常工况自主调控, 平均最大水平偏移距每减少 100 mm, 刮板链牵引力可减少 85 kN, 输送功率损耗可减少 55 kW; 平均最大垂直偏移距每减小 100 mm 时, 刮板链牵引力可减少 18 kN, 输送功率损耗可减少 7.2 kW; 单位长度货载运量每减少 100 kN/m, 刮板链牵引力可减少 31.9 kN, 输送功率损耗可减少 38.2 kW。对本文所建立的表征方法和判定准则进行了有效验证, 同样说明异常工况自主调控方法对突破

固体充填刮板输送机超大采长、大功率、高可靠性技术瓶颈有显著促进作用。

## 5 结 论

(1) 研究了固体充填刮板输送机特征和工序执行中存在的工况状态类型, 建立了固体充填刮板输送机位姿及牵引输送状态的表征方法, 位姿及牵引输送状态的表征是进行工况状态判别、姿态调整、运载状态调控的基础, 也是其实现智能化的前提。

(2) 构建了充填工序执行过程中异常工况的判别准则, 给出了异常工况的调控路径, 构建了固体充填刮板输送机运载调控机制。

(3) 充填刮板输送机作为固体充填开采的核心设备, 其运行状态及可靠性显著影响充填开采的效率, 本文所研究的异常工况及自主调控方法是提高固体充填刮板输送机高可靠运行的基础。

(4) 全国首个 260 m 工作面长固体充填开采工程案例表明: 运用所建立的固体充填刮板输送机异常工况自主调控方法, 可有效提高超大采长柔性悬挂条件下固体充填刮板输送机的运输效能, 增大其输送能力, 显著提高了固体充填工作面的产能, 提升了关键充填装备的使用效率, 可助力实现固体充填开采的智能化。

## 参考文献(References):

- [1] 谢和平, 任世华, 谢亚辰, 等. 碳中和目标下煤炭行业发展机遇[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2197-2211.  
XIE Heping, REN Shihua, XIE Yachen, et al. Development opportunities of the coal industry towards the goal of carbon neutrality[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2197-2211.
- [2] 中华人民共和国中央人民政府. 《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》[EB/OL]. (2021-03-18) [2023-10-23]. [http://www.gov.cn/zheng-ce/zhengceku/2021-03/25/content\\_5595566.htm](http://www.gov.cn/zheng-ce/zhengceku/2021-03/25/content_5595566.htm).
- [3] 钱鸣高, 许家林, 王家臣. 再论煤炭的科学开采[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 1-13.  
QIAN Minggao, XU Jialin, WANG Jiachen. Further on the sustainable mining of coal[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 1-13.
- [4] 王国法, 富佳兴, 孟令宇. 煤矿智能化创新团队建设 with 关键技术研发进展[J]. 工矿自动化, 2022, 48(12): 1-15.  
WANG Guofa, FU Jiaxing, MENG Lingyu. Development of innovation team construction and key technology research in coal mine intelligence[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(12): 1-15.
- [5] WANG Guofa, REN Huaiwei, ZHAO Guorui, et al. Research and practice of intelligent coal mine technology systems in China[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2022, 9(2): 19-35.
- [6] 王国法, 张德生. 煤炭智能化综采技术创新实践与发展展望[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(3): 459-467.

- WANG Guofa, ZHANG Desheng. Innovation practice and development prospect of intelligent fully mechanized technology for coal mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(3): 459-467.
- [7] 冀中能源集团. 冀中股份建成全国首个智能化矸石充填工作面[EB/OL]. (2021-03-16) [2023-10-23]. <http://www.zgmtgyzz.com/news/1167.html>.
- [8] 王雪松, 王世博, 王世佳, 等. 刮板输送机直线度误差预测模型[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(1): 168-177.
- WANG Xuesong, WANG Shibo, WANG Shijia, et al. Prediction model of straightness error of scraper conveyor[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(1): 168-177.
- [9] 王学文, 李素华, 谢嘉成, 等. 机器人运动学与时序预测融合驱动的刮板输送机调直方法[J]. 煤炭学报, 2021, 46(2): 652-666.
- WANG Xuewen, LI Suhua, XIE Jiacheng, et al. Straightening method of scraper conveyor driven by fusion of robot kinematics and time sequence prediction[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(2): 652-666.
- [10] 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.
- [11] 方新秋, 宁耀圣, 李爽, 等. 基于光纤光栅的刮板输送机直线度感知关键技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(1): 152-158.
- FANG Xinqiu, NING Yaosheng, LI Shuang, et al. Research on key technique of straightness perception of scraper conveyor based on fiber grating[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(1): 152-158.
- [12] 毛君, 曹昊, 谢苗, 等. 刮板输送机链条张力模糊滑模变结构控制研究[J]. 控制工程, 2018, 25(11): 2041-2045.
- MAO Jun, CAO Hao, XIE Miao, et al. Research on fuzzy sliding-mode variable structure control for chain tension of scraper conveyors[J]. Control Engineering of China, 2018, 25(11): 2041-2045.
- [13] 杨刚, 蔡树梅, 武文颖. 永磁变频驱动系统在刮板输送机上的应用[J]. 煤矿机械, 2019, 40(9): 154-156.
- YANG Gang, CAI Shumei, WU Wenyong. Application of permanent magnet frequency conversion driving system for scraper conveyor. journal of china coal society[J]. Coal Mine Machinery, 2019, 40(9): 154-156.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 李昊, 张晞. 自动化工作面刮板输送机横向移动矩形模型计算方法[J]. 煤炭学报, 2019, 44(S1): 313-319.
- LI Hao, ZHANG Xi. Calculation method of mathematical model on transverse bending movement of scraper in working face[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(S1): 313-319.
- [17] 毛君, 张云升, 谢春雪, 等. 刮板输送机扭转振动动力学模型构建与过弯曲段工况分析[J]. 机械强度, 2022, 44(2): 279-286.
- MAO Jun, ZHANG Yunsheng, XIE Chunxue, et al. Construction of torsional mechanics model of scraper conveyor and analysis of working conditions through bending section[J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(2): 279-286.
- [18] 毛君. 刮板输送机动力学行为分析与控制理论研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2006.
- MAO Jun. Dynamic behavior analysis and control theory re-search of scraper conveyor[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2006.