

引用格式:郭帅,郝毅,周永伟. 矿山有轨运输电机车双机牵引技术及无人化应用研究[J]. 有色设备,2024,38(4):9-15.

GUO Shuai, HAO Yi, ZHOU Yongwei. Research on double locomotive traction technology and unmanned application of rail transport electric locomotive in mine[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2024, 38(4): 9-15.

# 矿山有轨运输电机车双机牵引技术及无人化应用研究

郭帅, 郝毅, 周永伟

(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

**[摘要]** 本文对现有矿山有轨运输电机车双机牵引技术应用进行了调查及研究,对矿山有轨运输环节双机牵引运输方式从其应用背景、工艺特点、关键技术及目前的应用情况进行了分析讨论。主要总结了双机牵引的通讯技术、联动控制技术和负载平衡技术的应用;从控制连续性、制动距离、调度效率和运输适应性等方面探讨总结了双机牵引运输方式的优缺点和应用前景,为矿山有轨运输系统的无人化、智能化设计及改造实施提供了一定的参考依据。

**[关键词]** 有轨运输; 双机牵引; 无人驾驶; 矿山智能化; 控制; 平衡

**[中图分类号]** TD64 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2024)04-0009-07

**DOI:** 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2024.04.002

## 0 引言

在矿山矿石转运生产环节中,电机车运输具有运量大、用途广、清洁节能、维修简单等优点,在长距离运输中更具有经济方面优势,在我国和其他国家的矿山运输中,机车运输占有相当的比重,是一种十分重要的运输方式<sup>[1-4]</sup>。

关于电机车运输,根据机车的数量,可简单分为单机牵引和多机牵引。单机牵引为机车置于编组首部的牵引方式。多机牵引方式根据在运输编组中所处的位置可分为首部、首中、首尾牵引等方式<sup>[1]</sup>,其中,双机首部牵引时,2台机车串联置于列车首部,统一受电,集中控制,同步运行及制动,也称作机车重联;双机首中牵引时,2台机车分别置于列车首部和中部,分别受电,集中控制,同步运行及制动;双机首尾牵引时,2台机车分别置于列车首部和尾部,分别受电,集中控制,同步运行及制动。对于双机首尾牵引,应用上又分为双机首尾同步牵引(即2个机头前拉后推)以及双机头切换牵引(即前后虽设置

2个机头),但同时只有1台机头出力。以上方式各具优缺点。

矿山井下及地表矿石运输工艺中,线路大致可分为2种类型。①第一种为循环式运输线路,其特点是运输编组可进行装-运-卸流程的环线运行,此类线路可采用双机或单机运输模式。②第二种为折返式运输线路,其特点为机车需要在装、卸点之间进行往复式运输,此类线路多采用双机牵引运输模式。在设计应用时,生产企业根据运输线路特点和经济性等进行对比确定运输模式。

电机车双机牵引的运输模式,在煤矿、有色矿山、标准铁路客货运输及内燃机车运输等不同行业场景均有着广泛的应用。国外,最早在1904年,英国大西部铁路公司进行了首次双机牵引的测试,随着测试成功,爱尔兰、法国、新西兰等国家在20世纪均实现了首尾双机牵引的客运列车。国内,早在1983年,桑树坪矿进行了井下双机牵引电机车测试和运输,其采用10T架线式电机车,头尾车间采用电缆连接控制,牵引3t底卸式矿车<sup>[5]</sup>。2019年,冬瓜山铜矿-1000m运输中段实现了双机牵引无人驾驶运输,采用20T变频机车,前后双机同步牵引,每个编组牵引12辆10m<sup>3</sup>矿车,实现了局部运输无人化<sup>[6]</sup>。2020年,红牛铜矿4047m主运输水平实现了电机车双机牵引无人驾驶运输,采用14T变频

**[收稿日期]** 2024-06-12

**[第一作者]** 郭帅(1992—),男,陕西渭南人,工程师,硕士,主要从事智能矿山相关工作。

**[基金项目]** 五矿集团科创基金项目“有轨运输无人驾驶系统研发”。

架线式电机车,每列编组牵引16节4 m<sup>3</sup>矿车,实现有轨运输系统的集中控制和现场无人化作业<sup>[7]</sup>。

随着近年来控制技术、5G网络通讯技术在铁运场景的成熟应用<sup>[8]</sup>、先进传感技术的蓬勃发展,对有轨运输电机车的牵引方式进行研究,探求有利于矿山生产智能化及无人化发展的运输方式是十分有必要的。考虑到目前应用的广泛性,本文对多机牵引的讨论仅限于双机首尾同步牵引方式。

## 1 电机车双机牵引关键技术

根据《金属非金属矿山安全规程》要求:顶车速度不大于0.5 m/s,并应有专人在行驶前方观察监护<sup>[9]</sup>。由于绝大多数矿山机车运行速度大于0.5 m/s,双机牵引对不同类型运行线路的适应性具有较大优势。

为了满足机车双机牵引运输工艺的平稳作业,矿山电机车运输系工艺在以下性能方面面临着技术挑战,包括:首尾机车的通讯可靠性、首尾机车联动控制的指令准确性和时效性、机车运行过程中首尾机车负载平衡性、双机牵引的安全性、系统的维护便捷性以及如今智能矿山无人化要求下双机牵引在无人驾驶系统下的控制可靠性。

### 1.1 电机车双机牵引通讯技术

早期的双机牵引通讯技术,主要采用通讯电缆连接的方式,实现编组首尾机车的直接通讯,使得司机在一端驾驶室实现整列编组的控制。该种方式主要问题是连接首尾机车的电缆通常较长,需要通过中间矿车进行固定或者通过安装在矿车上的电缆接头,逐节连接,矿车之间的电缆驰度如果过小或者过大,会导致电缆在运行过程中被拉断或者压坏。另外,由于井下环境灰尘和湿度较大,电缆接头处容易受环境影响导致接触不良,造成通讯故障等问题,该连接方式也造成了维护工

作量的增加。综上,电缆连接的方式在矿山生产环境中适应性较差,逐步被淘汰。

随着射频通讯、WIFI通讯等无线通讯方式的成熟和市场化,双机牵引通讯首尾车开始采用无线通讯的方式实现控制。为了确保双机牵引系统的稳定运行,无线通讯技术针对性地设计并实现功能。

1)独立性和可靠性。考虑到在无人及有人驾驶情况下,无论外部网络是否具备,双机牵引均需要可靠操作,因此采用了首尾车无中继直接通讯,编组自身独立实现首尾车直接通讯,不借助外部网络或者中继。

2)首尾机车通讯距离。在双机牵引的过程中,由于首尾车中间有若干节矿车,距离有时超过100 m,因此无线通讯距离必须满足编组长度要求。

3)巷道无线信号传播。机车编组在井下环境运行至弯道或者弯道起步时,首尾机车可能会处于弯道的两端,此时无线通讯信号需要经过巷道壁绕射实现首尾通讯,考虑到矿山井下巷道的电磁波传播特性<sup>[10]</sup>,无线通讯方式采用了具有较强的绕射能力的低频通讯及多链路冗余。

4)同频干扰。在多编组运行时,如果多编组首尾机车采用同一频段无线通讯,可能会造成频段之间的干扰,需要利用技术手段进行隔离,使得每列编组首尾车无线通讯与其他编组互不干扰。

5)链路冗余。在工业控制应用中,对于重要链路一般采用冗余通讯方式,因此为了确保运行的可靠安全,首尾机车通讯需要至少2条链路,结构如图1所示。在实际应用中,如果实施无人驾驶系统,首尾通讯还会增加集控系统无线通讯控制链路。对于多路冗余通讯系统,需要成熟的硬件设计和选型确保不同链路之间不互相干扰,同时需要有专用的数据筛选软件,对多链路数据进行筛分和收发。

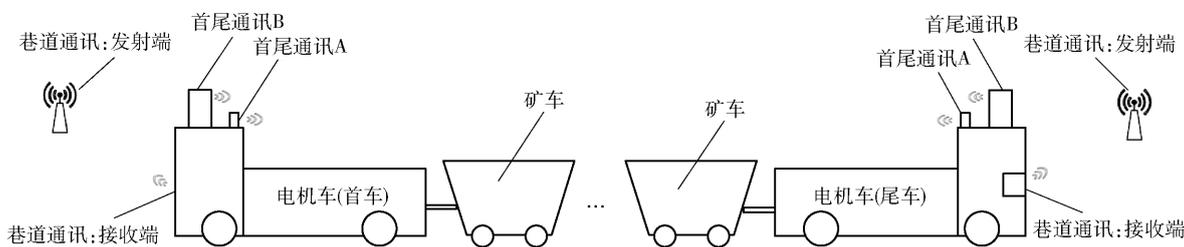


图1 双机牵引首尾及巷道通讯示意

Fig.1 Schematic diagram of dual locomotive traction head tail and tunnel communication

## 1.2 电机车双机联动控制技术

在双电机车牵引系统中,首尾2个电机车可靠平稳执行指令的前提,是要保证控制指令的准确性和高时效性以及机车接收数据的一致性。另外,由于两电机车系统中矿车机械结构间隙、阻尼特性、载荷对称性、电气响应特性等特性参数不一致,将导致被编组指令实际执行结果的不一致性,造成位移和速度同步误差。该同步误差的存在将影响整个系统的快速响应性和运行平稳性,甚至造成机械结构故障,在生产中表现为首尾电机车之间无法做到高质量双机联动,首尾电机车出力方向不同可能造成脱轨或对电机车和矿车的严重冲击;速度档位不同时,一般容易造成一端出力明显增大可能烧坏电机或损失双机牵引的双机

出力优势,严重时也可能造成脱轨、损坏机械结构等问题。因此,可靠的双机联动控制技术是实现双机牵引的关键。

在双机联动控制技术的实现过程中,首先要实现数据来源的一致性,通过上述双机通讯技术确保主车接收到操作员就地发出的指令或者集控系统发出的指令后,作出快判断速响应并发送尾车执行。其次,首尾双车的电机需要实现闭环调节,通过软硬件算法实现双机车的速度环和位置环双闭环调节,实时消除同步误差。硬件上,双机车的控制和采样电路需要保持严格的时延和阻抗的一致性与采样周期和控制周期的一致性,确保闭环调节的精度以及避免发生系统振荡。图2为典型双机牵引同步驱动控制逻辑图。

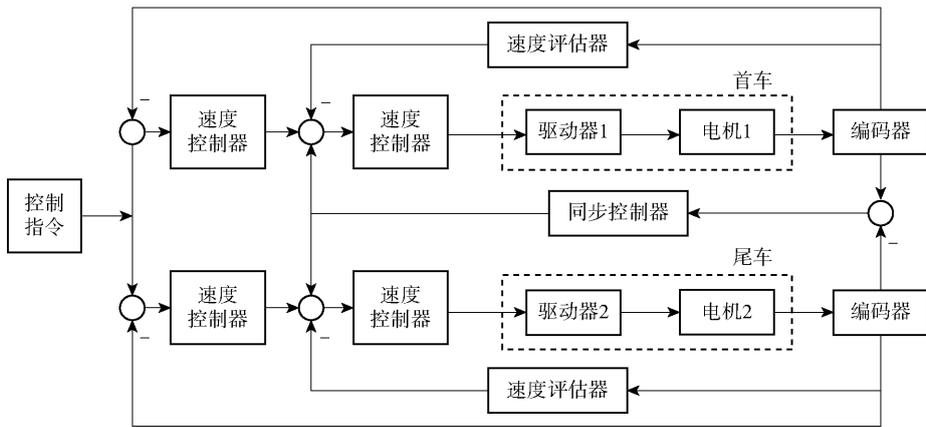


图2 双机牵引同步驱动控制逻辑

Fig. 2 Logic diagram of dual locomotive traction synchronous drive control

在双机联动控制技术中,通过上述关键技术的实施,结合实际生产运输需求,机车控制系统在应用端实现了下述功能。

1) 灵活的控制模式。在人工驾驶情况下,双机牵引为了满足1名司机控制1列编组的人工驾驶需求,具备双机主从切换功能。该功能使得司机可通过就地操作界面,实现机车主从模式的设置和转换,即司机可将其所在机车设置为主车,通过操作主车而间接控制从车,从而控制整列双机编组,以满足实际使用中司机需坐在编组运行方向前方机车从而监视前方路况的要求。同时,在人工驾驶模式下具备就地检修操作模式,以满足解列、编组以及检修维护情况下单机控制的需求。另外,为了实现无人化控制的需求,编组具备遥控模式,通过接收集中控制系统的指令进行作业。最后,在一些矿山生产应用中,

因为井下运输班组人员有限,有时需要1人进行解列和编组,传统的操作情况下需要2人配合,1人控制连接器,1人控制电机车。为了解决该问题,满足少人化操作需求,控制系统具备就地遥控功能,提供目视距离内的遥控控制。

2) 机车动作记录功能。该功能实现记录首尾双机车的就地操作记录、故障报警信息、变频器电压电流曲线等关键信息,为机车维护及故障查询提供数据基础。

## 1.3 电机车双机负载平衡技术

在双机牵引运输过程中,由于矿车之间连接器形式不同,牵引的矿车编组并不是一个固定不变的整体结构,另外,各车皮的装矿情况可能也大不相同,不能保证首尾电机车在相同控制指令的情况下所负担的负载一定是平衡状态。当2个电机车在同

样的电气参数环境下负担了不同重量,可能造成电机等设备长时间高负荷工作,缩短使用寿命。此外,因矿车车皮每次装矿情况不同,各矿车轮保养情况不同,各位置坡度不同,电机车运行状态不同,这种负载的分配是随时变化且没有规律的。因此,控制系统实现了智能判断并自动平衡负载即双机负载平衡技术。

在双机负载平衡技术的实现中,负载平衡的方法主要包括以下几个方式。

1)速度同步控制。使用编码器或速度传感器实时监测2个电机的速度。通过闭环控制(如PID控制器)调整电机的输入,以使2个电机的速度保持一致。

2)电流/力矩平衡控制。监测2个电机的电流,因为电流与电机输出力矩成正比。通过控制算法(如PID控制器)调整电机电流,使2个电机的电流相等,从而实现力矩平衡。主从控制结构:选定一个电机为主电机,另一个为从电机。主电机根据设定的控制目标运行,从电机根据主电机的状态调整自己的运行参数,以实现同步和负载平衡。

在实际数字控制系统中,PID控制器通常以离散形式实现。离散时间的PID控制公式见式(1)。

$$u[k] = K_p e[k] + K_i \sum_{i=0}^k e[i] \Delta t + K_d \frac{e[k] - e[k-1]}{\Delta t} \quad (1)$$

式中: $K_p$ 为比例系数; $K_i$ 为积分系数; $u[k]$ 为第 $k$ 个时刻的控制器电流输出; $e[k]$ 为第 $k$ 个时刻的误差; $\Delta t$ 为采样时间间隔。

通过该方式可以实现电流/力矩平衡控制,使2个电机的电流保持一致,从而确保输出力矩的平衡。这一过程依赖于PID控制器对电流误差的实时调整,确保系统在动态情况下依然能够保持平衡。具体实现时,要进行参数调整和优化,考虑采样的实时性、启动时间及电流测量精度等因素。

3)分布式控制系统。采用多个控制器分别控制每个电机,并通过通讯协议(如CAN总线、Modbus等)进行实时数据交换和协调。通过共享信息,系统可以动态调整每个电机的控制参数,实现负载平衡。

4)实时反馈控制。使用实时传感器(如扭矩传感器、位移传感器)获取负载信息。基于反馈信息调整电机的驱动信号,确保负载均匀分布。

5)采用基于神经网络PID控制技术。以多电

机组成元素为对象,利用神经网络PID算法优化设计电机的协调控制器,并生成能够作用在多轮轮毂电机上的协调控制指令,最终分别从力矩、转矩、速度等方面实现对多轮轮毂电机的协调控制,最大程度地保证电机运行参数同步<sup>[11]</sup>。

随着多个矿山双机牵引运输及其无人驾驶系统的应用,以上双机牵引关键技术已经逐步趋于成熟化,也形成了相关专用设备和模组,主要由系统集成方进行研发和实施,实际生产作业过程中,就地操作、远程操作及自动运行的操作模式基本与单机牵引相同。

## 2 双机牵引运输特点

### 2.1 控制连续性

在矿山有轨运输工艺环节中,矿石卸载环节主要有翻车机卸矿、侧卸、底卸、底侧卸等方式。其中,底卸式和底侧卸式卸载站由于其卸载过程连续、卸载效率高,目前在矿山广泛使用。在生产中,单机方式下,底卸式矿车过卸载坑时有以下几种方式:①机车不过卸载坑,将列车顶过卸载坑;②机车在前部牵引列车,当列车达到一定速度时机车摘钩过道岔,列车靠惯性过卸载坑;③机车牵引列车一起靠惯性冲过卸载坑。

以上卸载方式中,由于第①种需要顶车,因此在卸载区域需要设置调车线路,将机车头调制尾部进行顶车,并且该过程会降低卸载效率。第②种和第③种方式主要问题是速度不可控,列车靠惯性冲过时,由于车身翼板被卸载托轮托起,处于无动力状态,若机车速度太慢,机车可能冲不过卸载坑,需另调机车顶出列车,若机车速度太快,往往矿车卸载不干净。为了确保编组能够利用惯性通过卸载站,现场往往会以较快速度通过,电机车和编组经过卸载站的振动也会随之增加,长期的较大振动会增加机车车载控制设备和传感器的故障频率及缩短使用寿命,同时矿车和卸载站机械设备也会因频繁振动而增加维护频率。

当采用双机牵引模式时,编组首尾始终有一辆车具备动力,使得编组能够以恒定的速度通过卸载站,实现了连续平稳控制,机车根据设计速度匀速通过,减少了故障率及对设备的冲击。

### 2.2 制动距离

机车制动距离关系着运输安全性,矿山运输线

路设计出于能源经济性考虑,多采用重车下坡、轻车上坡的方式,坡度多为3‰。在生产运输中,制动距离越短,应对突发事件的能力越强,运输越安全。

应急管理部也在相关的安全规程中对制动距离进行了规定。在《金属非金属矿山安全规程》(GB 16423—2020)中规定:列车制动距离不超过80 m;10 t以下机车牵引运输时,制动距离不超过40 m;运送人员时,制动距离不超过20 m。在《煤矿安全规程》中规定:采用轨道机车运输时,运送物料时制动距离不得超过40 m;运送人员时制动距离不得超过20 m。

目前井工矿应用环境中,电机车紧急制动主要使用气制动方式,即制动气缸将推力通过机械杆件传递给闸瓦,同时将制动气缸的推力按照制动倍率的关系进行传递,变为作用在车轮踏面上的闸瓦压力,摩擦车轮产生制动力,使得机车减速或停车。电机车制动过程可分为2个阶段,即制动空行程和实际制动。前者指需要制动但在车轮和闸瓦接触前电机车仍按照原速度运行的阶段;后者指实际制动过程中车轮和闸瓦接触后到电机车完全停止的阶段。实际计算中,当矿车无制动力时,编组制动距离可按照式(2)进行计算<sup>[12]</sup>。

$$L_z = \frac{4.17V_z^2 g}{B_z + p_z \omega_j + Q_{zh} \omega_1 + gi} + \frac{V_z t_{kz}}{3.6} \quad (2)$$

式中: $L_z$ 为列车制动距离,m; $V_z$ 为制动开始时列车速度,km/h; $B_z$ 为单机正常制动力,N; $p_z$ 为电机车制动粘着质量,t; $\omega_j$ 为电机车运行基本阻力,N/t; $Q_{zh}$ 为牵引时实际牵引质量,t; $\omega_1$ 为重车组运行时单位基本阻力,N/t; $i$ 为计算坡度,‰; $t_{kz}$ 为列车空走时间,s。

根据上式,机车制动主要取决于机车自重、运行速度、环境阻力以及制动力的作用,下面通过实际取值进行双机制动和单机制动距离比较。根据湖北某矿山设计资料,式(1)主要工艺参数实际取值见表1。

根据表1中参数计算得出单机 $L_z = 46.9$  m,在双机牵引模式下,其他条件不变,其制动力为单机的2倍,即 $B_z = 17\ 800$  N, $P_z = 20$  t, $Q_{zh} = 76$  t,计算得出 $L_z = 32.4$  m,制动距离比单机缩短约31%。

综上,电机车双机牵引模式下,由于增加1辆机车,增加了1倍的制动力,制动距离较单机牵引有显著提高。

表1 主要工艺参数

Table 1 Key process parameters

工艺参数	数值
制动开始时列车速度 $V_z/(km \cdot h^{-1})$	12
单机正常制动力 $B_z/N$	8 900
电机车制动粘着质量 $p_z/t$	10
电机车运行基本阻力 $\omega_j/(N \cdot t^{-1})$	69
牵引时实际牵引质量 $Q_{zh}/t$	66
重车组运行时单位基本阻力 $\omega_1/(N \cdot t^{-1})$	69
计算坡度 $i/\%$	-3
列车空走时间 $t_{kz}/s$	2.8
重力加速度 $g/(m \cdot s^{-2})$	9.8

### 2.3 调度效率

矿山有轨运输无人驾驶系统是矿山生产以及矿石流转的关键系统,其运输能力以及运输调度效率对于提高矿山企业的生产能力和效率具有十分必要的意义,合理的线路规划与设计,有利于提高投资的经济性。

运行线路方面,由于受到装矿溜井的位置、卸载站布置及岔线布置的影响,运输过程中经常会出现机车的装卸矿等待情况,从而影响调度效率。在相关 Anylogic 矿山有轨运输仿真研究<sup>[13]</sup>中,对比了某矿山有轨运输中段基于当前线路的最优编组数量和单双机牵引模式对运量及运输效率的影响,从结果中可得出,在完成同样运力的情况下,双机模式运行的单个编组等待时间比单机模式运行的单个编组等待时间低,因此可以说双机牵引模式的调度效率比较高,并且等待时间短意味着启停排队的次数较少,减少设备的保养维护,节约能源耗费。

另外,对于实现相同的运力目标,单机牵引总是比双机牵引多1倍的编组数量,因此,双机模式会减少司机人员配置数量。同理,行车密度的减少使得双机牵引的监控调度工作量和人员配置得以减少,因此也具有一定的经济性优势。

### 2.4 运输适应性

循环式生产中机车沿环线运行,只牵引不顶车,折返式则是在线路上往复运行生产。实际生产中,常常由于装卸站轨道的检修或者巷道施工等原因,部分线路无法通过,在双机牵引模式下,因其他原因环线不通的情况下可切换为折返运输方式,增加了运输的灵活性。

在故障处理方面,单机牵引模式中,如果机车出现故障,往往需要通过调度其他车辆协助拖车的方

式将故障车辆移动至维修硐室。双机牵引情况下,如果 1 台机车出现故障,可通过另外 1 台机车临时将编组牵引至维修车间,减少了因主干道被堵塞影响生产的时间。

### 2.5 矿车连接

常规生产中,矿车之间的连接分为软连接和硬连接,其中软连接多采用插销加两环链(三环链)的方式,硬连接多采用铁板连接或者詹式挂钩的形式。

双机编组运行过程中,列车会受到各种综合阻力,包括轨道本身阻力、弯道阻力、矿车轮轴阻力等,由于首尾编组进行前拉后推,中间矿车的状态也分为被牵引、被推顶和临界自由态三种,而且随着时间不断变化,对于处于临界自由态的矿车,不同的环链挂接形式对其约束作用是不同的。

对于软连接形式的矿车编组,当矿车处于被牵引状态时,环链可以很好地传递前车的牵引力,如图 3 所示, $F$  为矿车间牵引力;在编组运动的某一个临界瞬间,编组中某些矿车处于自由态,环链失去了牵引力且不受顶推力时,该矿车即处于无约束状态,此时矿车的安全风险较大,很可能受到轨道因素影响进行蛇形运动、左右摆动甚至上下跳动,极有可能造成掉轨情况发生;当矿车处于被推顶状态时,由于环链只传递牵引力,通常依靠缓冲器传递推力。在编组通过弯道或者道岔时,缓冲器单侧受力挤压前车,推力和受到的弹簧回弹力在水平方向分力会形成矿车向曲线外侧的翻倒力,如图 4 所示, $P$  为矿车之间顶推力,致使矿车失稳<sup>[12]</sup>,也存在一定的安全风险。对于硬连接形式的编组,由于连接器之间的间隙较小,矿车存在自由态的空间十分有限且时间很短,并且牵引和顶推力均在车体中心位置,整个机车编组的负荷传递和分配、过弯及制动的平稳性均能得到较好的保证。综上,在采用双机牵引模式生产时应

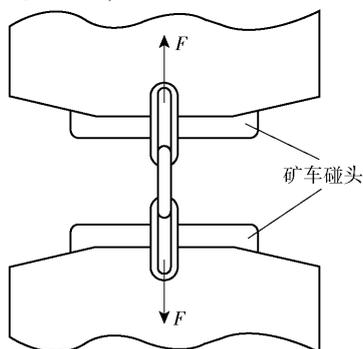


图 3 环链挂接牵引状态

Fig.3 Chain attachment traction state

尽量选取硬连接的矿车挂接方式。

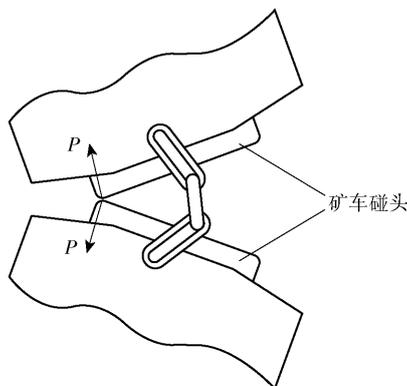


图 4 环链挂接顶推状态

Fig.4 Chain hanging top push state

### 3 无人化应用情况

安徽某矿山井下 -1 000 m 有轨运输无人驾驶系统由 20 t 架线式电机车双机牵引 11 节 10 m<sup>3</sup>底侧卸式矿车组成,矿车间采用单环链插销式连接,自 2020 年投入生产以来,各项运行指标均达到要求,运输能力 1 万 t/d,劳动定员减少 54.5%,有效运行效率与生产能力均提升约 20%;云南某高海拔矿山 4 047 m 中段矿石运输采用 4 列双机牵引无人驾驶编组,由 10 t 架线式电机车双机牵引 12 节 4 m<sup>3</sup>底侧卸式矿车组成,矿车间采用詹式车钩式连接,运输能力约 4 000 t/d,集控室 1 人可控制 2 列编组,无人化系统共减少操作员 40 人,取消全部现场操作人员;湖南某矿山有轨运输无人驾驶系统由 2 列 7 架线式电机车双机牵引 10 节 2.5 m<sup>3</sup>矿车组成,矿车间采用三环链方式连接,2024 年实现了双机编组自动运行、自动装矿、自动卸载、自动调度等功能,运输量 45 万 t/a,仅需集控室 1 人可完成运输系统的监控。

有轨运输无人化的应用在实现减人增效的同时,也带来了良好的社会效益,系统投入后大幅改善了机车司机原本恶劣的工作环境、降低了劳动强度、实现了人员的本质安全,同时缓解了矿山生产企业招工、用工难的问题。无人化系统通过管控集中化、生产管理数字化和设备维护信息化提高了矿山生产和维护管理水平。

### 4 结论

随着无线通讯技术、传感器技术及自动控制技术的不断成熟和广泛普及,矿山有轨运输双机牵引

技术在实际应用方面可得出如下结论。

1) 根据矿山有轨运输特性, 电机车双机牵引系统主要通过相应的通讯技术、联动控制技术以及负载平衡技术的实现和逐步成熟, 在多个矿山实现了稳定和可靠的运行。

2) 双机牵引技术以其控制连续性好、制动距离短、线路适应性强等显著优势, 能够更好地满足当前矿山行业推进智能化转型升级及防范重大安全风险的需求。

3) 电机车双机牵引技术在实际应用中表现出色, 提供了稳定且高效的运输解决方案。其可靠的性能和较强的适应性, 为矿山智能化建设提供了有效的技术支持, 也为未来矿山运输系统的进一步优化和提升提供了坚实的保障。

综上所述, 双机牵引技术在矿山有轨运输中的应用前景广阔, 值得在更多具备条件的矿山智能化改造项目中推广和应用, 为实现矿山行业的全面智能化和安全生产贡献力量。

#### [参考文献]

- [1] 《采矿设计手册》编写委员会. 采矿设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988.
- [2] 李洪文. 5G 电机车无人驾驶技术的应用[J]. 中国矿山工程, 2021, 50(1): 47-51.

- [3] 张静. 730E 矿用自卸卡车牵引系统优化改进[J]. 露天采矿技术, 2019, 34(6): 111-113.
- [4] 王社光, 于庆磊, 于兴社, 等. 中关铁矿有轨运输巷底鼓变形监测分析及控制技术研究[J]. 矿业研究与开发, 2024, 44(4): 107-113.
- [5] 王喜来. 电机车双机牵引在桑树坪矿试用[J]. 煤矿设计, 1984(6): 7-9.
- [6] 陈慧泉, 黄坚. 地下矿山双机牵引无人驾驶电机车运输系统的应用实践[J]. 矿山机械, 2020, 48(10): 24-27.
- [7] 谷龙飞. 中国恩菲总承包红牛铜矿无人驾驶电机车项目顺利投产达标[J]. 中国有色金属, 2020(1): 24.
- [8] 程智鹏, 王雪峰, 谢文波, 等. 5G + 铁运系统智能化的开发与工业应用[J]. 有色设备, 2023, 37(6): 29-33.
- [9] 金属非金属矿山安全规程: GB16423—2020[S].
- [10] 张会清, 刘林, 王普, 等. 隧道中无线电波多径传播特性及仿真[J]. 电子测量与仪器学报, 2008, 22(z1): 273-278.
- [11] 苏清源. 基于神经网络 PID 的多轮轮毂电机协调控制研究[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(8): 135-141.
- [12] 郭帅, 谷龙飞, 李硕. 基于 Anylogic 仿真的矿山有轨运输无人驾驶系统运力研究[J]. 有色设备, 2022, 36(3): 5-11.
- [13] 唐大根. 煤矿井下运输双机牵引的研究与分析[J]. 煤矿设计, 1990(4): 18-24.

## Research on double locomotive traction technology and unmanned application of rail transport electric locomotive in mine

GUO Shuai, HAO Yi, ZHOU Yongwei

(China ENFI Engineering Co. Ltd., Beijing 100038, China)

**Abstract:** This paper investigates and studies the application of double locomotive traction technology of existing mine rail transport electric locomotive, analyzes and discusses the application background, process characteristics, key technologies and current application of double locomotive traction transportation mode in mine rail transportation system. It mainly summarizes the application of communication technology, linkage control technology and load balancing technology of double locomotive traction. From the aspects of control continuity, braking distance, scheduling efficiency and transportation adaptability, the advantages and disadvantages and application prospects of the double locomotive traction transportation mode are discussed and summarized, which provides a certain reference basis for the unmanned and intelligent design and transformation implementation of the mine rail transportation system.

**Key words:** rail transportation; double locomotive traction; unmanned; mine intelligence; control; load balance

