

引用格式:段晓晖,郭帅. 矿山有轨运输无人化安全保障体系研究[J]. 有色设备,2025,39(1):55-62,68.

DUAN Xiaohui, GUO Shuai. Research on safety assurance system of unmanned locomotive transportation for mine[J]. Non-ferrous Metallurgical Equipment,2025,39(1):55-62,68.

# 矿山有轨运输无人化安全保障体系研究

段晓晖<sup>1</sup>, 郭帅<sup>2</sup>

(1. 湖南宝山有色金属矿业有限责任公司, 湖南 桂阳 424400;

2. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

**[摘要]** 为了确保矿山有轨运输无人化技术实施后生产的连续性及设备的安全性,实现矿山无人化运输有效的风险控制,本文构建了矿山有轨运输无人化安全保障体系(SASUM),该体系针对矿山有轨运输机车端、集控调度端、线路环境端以及管理制度端4个关键要素,涵盖了系统指标评估、原则设定、技术路线研究等内容,同时集成了新型信息物理系统的应用,通过对设备、环境、运营管理等多方面的风险进行全面识别、分析与管控,建立了一整套动态、高效的安全保障机制,为矿山环境下实现高效、安全的有轨运输以及矿山生产无人化转型提供有力的支持。

**[关键词]** 安全保障;体系架构;井下有轨运输;无人驾驶;智能矿山

**[中图分类号]** TD64 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2025)01-0055-08

**DOI:**10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.01.007

## 0 引言

随着矿山生产管理向智能化和无人化方向发展,矿山生产的智能化程度不断提高。其中,有轨运输的无人化技术正逐步成熟,并在多个矿山实现了有轨运输各环节的现场无人化生产作业<sup>[1]</sup>。作为矿山生产运输的关键环节,有轨运输系统不仅要实现“现场无人”的技术目标,更要满足更高的安全保障需求。该需求包括生产和运输的连续性、设备运行的安全性以及异常情况下的风险控制等。然而,目前矿山有轨运输无人化系统的安全保障体系尚未形成完整的理论框架和实践指导。

国内针对矿山无人驾驶系统研究起步于21世纪初,主要聚焦于无人化技术的实现和部分应用场景优化。针对无人化系统的安全保障方面,李元吉<sup>[2]</sup>针对某金矿电机车无人驾驶系统运行过程中的诸如门禁报警处、放矿口、防碰撞处、岔道口等点位的安全管理进行了研究,提出了相关安全管理制度和措施。蒋成云等<sup>[3]</sup>根据人-机-环境系统工程的理论,对井下运输系统的安全性进行了初步的探讨。程志鹏等<sup>[4]</sup>针对铁运电机车无人驾驶技术的

开发与应用问题,就涉及铁运沿线相关场景应用了运输安全保障系统。在传统轨道交通领域,如高速铁路、地铁等,经过多年发展已形成了较为完善的安全管理体系及研究成果。李学伟等<sup>[5]</sup>以高速铁路运营系统为研究对象,构建以“人”为核心、以“装备”为基础、以“环境”为条件、以“管理”为纽带的高速铁路普适安全理论体系。谢泽等<sup>[6]</sup>针对高速铁路运营安全保障技防体系发展及建设存在的问题,从高速铁路人防、物防与技防定义和技防体系基础内涵等角度解析技防体系范围边界。秦勇等<sup>[7]</sup>构建了轨道交通自主化安全保障系统(RASAS),该系统能够实现对轨道交通领域“人-机-环境-管理”各类风险因素的感知、辨识、研判、运维以及性能测试评估,涵盖了设备可靠性评估、运行状态监测、故障处理预案以及安全管理标准等方面,为确保轨道交通的高效运行和系统安全提供了有力保障。然而,这些经验并未完全移植到矿山有轨运输领域。故在现有的研究中,针对矿山有轨运输无人化背景下的安全保障体系和系统安全评估手段仍存在显著的理论和实践空白。

此外,目前的矿山安全管理规范和指导文件主

**[收稿日期]** 2024-10-23

**[第一作者]** 段晓晖(1972—),男,湖南桂阳人,工程师,主要从事电气设备维护管理和技术支持工作。

要面向有人操作环境,对于无人化场景的特殊需求覆盖较少,仅有少数基本规定,缺乏具体的指导和实施策略<sup>[8]</sup>。这种差距使得矿山有轨运输无人化系统在实际应用中面临诸多挑战,如突发故障的快速响应能力、复杂环境下的安全隐患识别和干预机制等。为此,研究和构建适用于矿山有轨运输无人化的安全保障体系,成为实现矿山无人化运输可持续发展的核心课题。

本文将在借鉴传统轨道交通行业安全管理理念和技术的基础上,结合矿山无人化运输的特殊需求,针对性地构建一套科学、系统、面向生产及管理的矿山有轨运输无人化安全保障体系(Safety Assurance System of Unmanned locomotive transportation for Mine,以下简称 SASUM)。研究重点将包括体系的定义和相关评测指标、体系架构以及主要技术路线,为矿山智能化发展提供理论支持和实践指导。

## 1 SASUM 体系定义和发展目标

### 1.1 体系定义

矿山有轨运输无人化系统的安全保障体系,围绕运输安全保障与生产连续性维系两大核心目标,对设备、环境以及运营管理等领域的风险予以精准识别、细致剖析与有效管控,整合新型信息物理系统的多元应用,涵盖人工智能算法、现代传感器技术以及 5G 与物联网通讯技术等前沿科技要素,进而构建起一套兼具动态性与高效性的安全保障机制,有效管控人、设备、环境与管理这四大维度间错综复杂的关联,全面覆盖自风险辨识起始至安全管理各环节的完整流程。凭借实时监控、预警机制、智能调度以及应急响应等多元手段和多层次的安全设计策略,能够达成对无人化运输全程的周全防护,显著削减人为干预所致的不确定性,有力提升系统整体的安全性与可靠性,为无人化矿山有轨运输作业提供安全保障。

### 1.2 体系目标及相关评估指标

针对目前矿山有轨运输无人化安全体系及系统安全评估手段的构建需求,本体系旨在矿山实现现场无人化、管控集中化、远程化的生产模式基础上,构建一个安全、高效、可持续的运输环境,以满足现代矿山生产对运输系统的高安全性、高可靠性和高智能化需求。最终实现严重事故数量为零、系统停机时间为零。

为了实现上述目标,需要对已投入生产运行的系统进行综合性评估,本体系对评估系统的具体指标进行如下定义。

1) 安全性能指数(Safety Performance Index, SPI)。综合多个安全性指标构建的量化评估公式,安全性能指数定义为式(1)。

$$SPI = \omega_1(1 - AR) + \omega_2 \frac{1}{RRT} + \omega_3 SR \quad (1)$$

式中: $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  为各指标权重(根据实际需求分配,三者相加等于 1); $AR$  为事故率,在特定时间或距离内发生的事故数量与运行时间或距离的比值; $RRT$  为风险响应时间,反映系统从风险检测到采取有效措施的时间, $\frac{1}{RRT}$  为响应时间的反向比例,响应越快越好; $SR$  为安全冗余度,可替代功能模块数量占总模块数量的比例,度通常以百分比表示; $SPI$  越高,系统的综合安全性表现越好。

2) 可靠性指数(Reliability Index, RI)。为了综合评价矿山有轨运输无人化系统的可靠性,设计一个多指标综合的可靠性指数  $RI$ 。该指数整合关键可靠性指标,量化系统的整体可靠性表现,公式见式(2)。

$$RI = \omega_1 \frac{MTBF}{MTBF_{target}} + \omega_2 \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} + \omega_3 (1 - \lambda T_{operation}) \quad (2)$$

式中: $MTBF$  为平均故障间隔时间,即系统在两次故障之间的平均运行时间; $MTTR$  为平均修复时间,系统在发生故障后恢复正常工作的平均时间; $MTBF_{target}$  为系统设计目标的平均故障间隔时间; $\lambda$  为故障率,系统单位时间内发生故障的概率; $T_{operation}$  为实际运行时间; $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  为各指标权重(根据实际需求分配,三者相加等于 1)。

3) 连续性可靠性指数(Continuity Reliability Index, CRI),为衡量系统运行连续性的综合指标,公式见式(3)。

$$CRI = \omega_1 COR + \omega_2 \frac{MCOT}{MCOT_{target}} + \omega_3 (1 - IRT) \quad (3)$$

式中: $COR$  为连续运行时间比率,系统在单位时间内连续运行的比例,%, $COR$  越高,系统的运行连续性越好; $MCOT$  为平均连续运行时间,衡量系统每次连续运行的平均时间长度; $MCOT_{target}$  为目标连续运行时间; $IRT$  为中断时间比率,系统中断时间占总运行时间的比例,%, $IRT$  越低,系统的运行连续性越

高; $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  为各指标权重(根据实际需求分配,三者加和等于1)。

4) 系统韧性指数 (System Resilience Index, SRI)。综合衡量系统韧性的指标,考虑系统在干扰中的稳定性、恢复速度和适应能力。系统韧性指数计算见式(4)。

$$SRI = \omega_1 (1 - RDR) + \omega_2 \frac{RCR}{RCR_{target}} + \omega_3 \frac{T_{target\ recovery}}{RT} \quad (4)$$

式中: $RDR$  为韧性下降比率,系统因故障或干扰导致的性能下降程度; $RCR$  为恢复能力比率,衡量系统在规定时间内恢复到功能水平的能力; $RCR_{target}$  为目标恢复能力比率; $T_{target\ recovery}$  为目标恢复时间; $RT$  为实际恢复时间,即系统从故障或中断状态恢复到正常状态所需的时间; $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  为各指标权重(根据实际需求分配,三者加和等于1)。

5) 鲁棒性指数 (Robustness Index, RI), 为综合衡量系统的鲁棒性表现,公式见式(5)。

$$RI = \omega_1 (1 - PDR) + \omega_2 DRI + \omega_3 ECS + \omega_4 FT \quad (5)$$

式中: $PDR$  为性能偏差比率,衡量系统在干扰下性能变化的程度; $DRI$  为抗干扰能力指数,系统对不同强度干扰的抗拒能力,单位为无量纲值,范围在  $[0, 1]$ ,  $DRI$  越接近 1, 系统的抗干扰能力越强; $ECS$  为极端条件稳定性,极端条件下系统的功能水平与正常条件下的比值; $FT$  为故障累积耐受度,通过故障影响因子对累计故障影响进行求和再与 1 求差,无量纲值,范围在  $[0, 1]$ ,  $FT$  越接近 1, 系统的故障耐受能力越强; $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$  为各指标权重(根据实际需求分配,四者加和等于1)。

6) 风险感知能力指数 (Risk Perception Ability Index, RPAI), 为综合评估系统感知风险能力的指标,公式见式(6)。

$$RPAI = \omega_1 RIR + \omega_2 RPA + \omega_3 RPC - \omega_4 \frac{RRT}{T_{target}} \quad (6)$$

式中: $RIR$  为风险识别率,成功识别的风险事件数量与风险事件的总数量的比值; $RPA$  为风险预测准确率,预测正确的风险事件数量与总的风险预测次数的比值; $RPC$  为风险感知覆盖率,系统覆盖潜在风险场景的比例; $T_{target}$  为目标响应时间; $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$  为各指标权重(根据实际需求分配,四者加和等于1),无量纲值,范围在  $[0, 1]$ ,  $RPAI$  越接近 1, 系统的风险感知能力越强。

通过上述 6 个关键参数的评估,建立安全管理评估系统,通过与控制系统数据通讯采集实时参数,实现对系统的安全性进行动态的量化评估,从而实现对系统安全状态的监控和掌握。

## 2 SASUM 体系架构及原则

### 2.1 体系功能架构

SASUM 是为确保无人驾驶运输系统在复杂矿山环境下实现高效、安全、稳定运行而设计的全方位技术和管理框架。该框架以保障机车编组安全自主运行为目标,架构主要从机车端、集控调度端、线路环境端以及管理制度端 4 个方向构建,形成 1 个多层次、闭环化的安全保障体系。

本体系包含系统综合安全评估模型和四大核心要素 2 部分,综合安全评估模型通过关键指标分析,评估系统整体安全状况,四大核心要素通过分析机车端、集控调度端、线路环境段和管理制度端的安全保护需求,结合先进的技术实现路径,提出无人化安全保障具体需求及措施,体系架构图如图 1 所示。

### 2.2 体系基本原则

矿山有轨运输无人化安全保障体系能够凭借先进技术的全方位整合运用,在复杂且多变的工况以及动态的环境条件下,实时且精准的感知能力、自主化的决策功能以及主动式的防护手段,构建起具备高度自主性、强适应性以及高可持续性的智能化运输保障体系。首先,系统需要集成理念,注重多元系统的有机融合,风险管理策略,对各类潜在风险进行全面把控;其次,针对标准化与规范化要求,需要确保各环节操作有章可循;最后,需要考虑人机协同机制,实现人与机器的高效配合等多个关键范畴。以下为该体系所遵循的 5 条基本原则。

#### 2.2.1 安全导向优先原则

在系统规划、设备设计、调度管理等环节,始终以人员、设备和环境的安全保障为首要任务。通过多层次防护措施,包括实时监测、自动报警、应急预案等,降低事故发生的可能性与危害。系统运行需严格遵守国家安全法规与行业标准,构建从风险识别到应急处置的闭环管理机制,确保无人化环境下安全目标的全面实现。在任何故障、异常或突发事件情境下,系统的行为决策应始终倾向于安全一侧,最大限度地减少可能产生的负面影响。

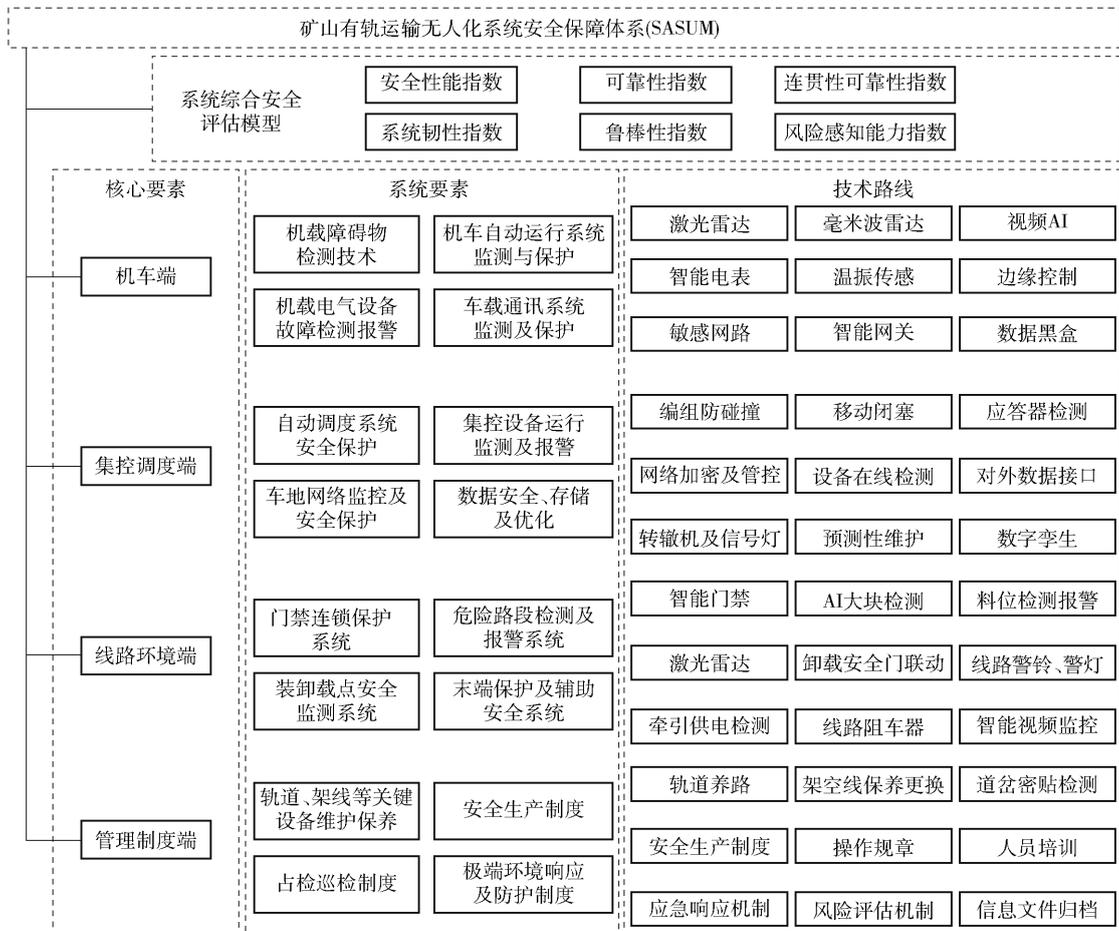


图1 矿山有轨运输无人化安全保障体系架构图

Fig. 1 Architecture diagram of the unmanned safety assurance system for mine rail transportation

2.2.2 自主性原则

无人化系统运行需具备高自主性,即在无人工干预或减少人参与情况下,依靠智能算法和自动控制技术,实现自主感知、分析、决策与执行。系统通过多传感器数据融合和人工智能模型的深度学习,构建高度自适应的决策机制,以应对复杂工况和动态风险。高自主性不仅保障日常运输的效率与安全,还为突发状况提供即时反应能力,使系统在无人值守环境中仍能保持可靠运行。

2.2.3 韧性提升与冗余容错原则

系统需具备应对突发事件或外部干扰的快速恢复能力。在灾害或设备故障情况下,通过冗余设计、智能调度和多层防护措施,最大程度减少对运输效率和安全性影响。系统的恢复能力可通过动态风险评估和数字孪生模拟不断优化。系统在设计中应充分考虑冗余与容错机制,通过关键设备和功能的备份设计,增强对单点故障的抵御能力。冗余技术

覆盖通信、控制和电力供应等关键环节,当主系统失效时,备用系统自动接管以确保连续运行。同时,通过智能诊断和自修复机制,快速定位并隔离故障区域,防止影响扩散。冗余与容错设计有效提升系统稳定性,为无人化条件下的安全运行提供坚实保障。

2.2.4 透明与可追溯性原则

系统运行的每个环节需具有透明性,确保设备状态、调度决策和操作记录等信息可视化呈现。通过日志记录、数据存储和实时监控,全部事件和操作都能被追溯,为系统优化和事故调查提供依据。数字孪生技术与可视化平台进一步增强了追溯能力,使复杂的运行过程简洁明了。透明与可追溯性原则为管理层提供全面的信息支撑,提升系统运行的可信度和合规性。

2.2.5 安全操作与降级处理原则

系统在运行过程中,应确保在出现故障或异常情况下能够自动进入安全操作模式。通过设计一套

完善的降级处理机制,在系统无法达到全功能运行时,能够通过减少操作复杂性、降低运行负荷或限制部分功能等方式,保障运输安全。降级模式下,系统应保持最小的运行能力,以减少对矿山作业的影响,并能够在故障修复后迅速恢复正常运行。同时,操作人员应能及时获得系统状态反馈,并根据情况采取必要的手动干预,确保运输过程少受干扰。

### 3 体系核心要素及技术路线

#### 3.1 机车端

机车端的安全防护技术涉及机载障碍物检测技术、机载电气设备故障检测报警技术、机车自动运行系统监测及保护技术、车地通讯系统监测及保护技术等多种设备与先进技术的集成与协同工作。

##### 3.1.1 机载障碍物检测技术

矿山有轨运输无人化系统的机车端面临的挑战之一是障碍物的实时检测与处理,矿山环境中可能存在较为复杂的障碍物,如不同距离、不同位置轨道中间和两侧的人、设备、碎石等物体。为了有效的识别和预警,机车端采用多种感知技术协同工作,确保能够有效识别和规避障碍物。机车端集成激光雷达(LiDAR)、毫米波雷达、摄像头等传感器,通过数据融合感知技术<sup>[9]</sup>及深度学习算法<sup>[10]</sup>实现对轨道周围环境的全景感知。这些传感器能够实时扫描轨道前方的障碍物,并通过算法模型进行图像识别、动态障碍物追踪和碰撞预测,进而生成实时避障指令。同时,传感器数据通过边缘计算模块进行处理,确保反应时间在毫秒级别,从而保障机车的安全运行。

##### 3.1.2 机载电气设备故障检测报警技术

机车端的电气设备故障检测与报警技术是保障矿山运输系统安全运行的关键组成部分。矿山运输系统的常见设备故障主要集中在逆变器、电动机及自动化控制系统等领域。为此,机车端引入了电气设备的实时监测机制,基于传感器技术、数据采集与分析手段,对电气设备的健康状态进行综合评估。系统通过电流、电压、温度等多维度数据采集,借助工业总线、网关等通讯方式,将数据传输至车载 PLC 控制器,并结合智能算法实现故障的预测与诊断。实时监控系統能够识别潜在的故障模式,如短路、过载、过热等,并在故障前兆被检测到时自动触发报警信号。同时,通过无线通信技术,系统将故障信息即时传输至集控端,进行进一步的分析与处理。如果

故障情况持续或加剧,系统会自动启动降级模式,切换至备份系统或控制模块,从而保障系统在设备故障情况下仍能保持安全稳定的运行。

##### 3.1.3 机车自动运行系统监测及保护技术

在矿山有轨运输无人化系统中,机车自动运行的监测与保护技术起着至关重要的作用,确保在无人值守的情况下,机车能够按预定轨迹安全且稳定地运行。作为核心控制单元,车载 PLC 不仅负责协调各类传感器与执行器的运作,还通过实时监控与智能决策实现多种安全保护功能。具体保护措施包括工业总线与通讯链路的监控、高精度编码器支持下的位置信息突变检测、基于变频器反馈与速度监测的调速及制动失效检测等多重保障机制。

##### 3.1.4 车地通讯系统监测及保护技术

车地通讯系统负责实现机车与集控端、其他车辆及周围环境之间的实时数据交换。对于矿山无人化系统而言,要求该通讯系统具备更高的可靠性与低延迟,以确保系统在复杂且恶劣的工作环境中依然能够稳定运行。机车端配备了双向车地通信设备,并采用高带宽、低时延及成熟的无线通信技术,如 5G、WiFi6 或专用无线电频率通信系统,从而确保机车与集控端及其他车辆之间的信息能够实时交换。在遇到通讯干扰或系统故障时,系统将自动启用冗余通信链路,并进行故障切换,以保障通讯的连续性与可靠性。此外,通过实时监控车地通讯系统的工作状态,当出现异常情况时,系统可即时启动自动保护机制,以防止因通讯中断而引发的潜在安全风险。

#### 3.2 集控端

集控端安全保障体系作为系统运行的中枢,承担了数据处理、风险监控及应急指挥等关键任务,其安全保护技术主要围绕自动调度系统、集控设备运行监测、车地网络监控及数据安全存储优化展开,通过技术集成和智能化应用,确保系统在高负荷、复杂环境下的安全稳定运行<sup>[13-14]</sup>。

##### 3.2.1 自动调度系统安全保护技术

自动调度系统是集控端的核心,负责对运输任务的动态监控与全局协调。系统虽然不及高铁 CTCS 系统复杂,但为保证其安全运行,自动调度系统可能采用多层次冗余结构与防护策略<sup>[11]</sup>。系统通过综合分析实时数据,如各编组位置、任务负载、道岔状态、机车速度等,利用智能算法进行运行路径优化与动态调度。若检测到异常事件,如调度冲突、

指令失效、道岔未到位、异常停车等,系统立即启动异常预警与自动恢复机制,包括任务重分配、备用路径启用及优先级调整等功能。此外,调度系统与机车端实现双向通信,确保指令传输的完整性和一致性,并在突发情况下通过集控端的人工介入功能提供多层次应急响应能力。

### 3.2.2 集控设备运行监测及报警技术

集控设备运行监测及报警技术通过分布式传感器网络与实时状态监测系统,对关键设备,如服务器、控制面板、通信模块、上位机等性能参数进行全天候监控。监测数据通过边缘计算设备预处理后,实时传输至核心控制器进行分析。若检测到设备异常(如过载、过热、通讯失联、面板失效等),系统会立即触发多级报警机制,包括视觉、声音警示及远程通知。与此同时,系统根据故障级别自动切换到冗余设备或降级运行模式,确保调度和监控功能的连续性。此外,通过故障预测模型,集控端能够提前识别潜在风险,及时安排预防性维护,提高设备使用寿命和运行可靠性。

### 3.2.3 网络监控及安全保护技术

网络监控包括车地网络及固定网络,是机车与集控端数据交换的关键通道,其安全性直接影响系统的整体可靠性。网络监控及保护技术基于 5G、WiFi6、光纤通讯等高带宽无线通信和加密协议,构建了一个低时延、高可靠的通信网络。系统通过链路状态监控、数据包完整性校验及传输延迟分析,实现对网络运行状态的全面感知。当通信网络出现中断或干扰时,系统会自动切换至备用频段或使用冗余通信链路,同时启用本地缓存机制保障机车端的短时独立运行。为了防范网络攻击,系统采用多层加密技术、动态密钥分发机制及入侵检测系统,确保数据传输的保密性与完整性。

### 3.2.4 数据安全存储及优化技术

数据安全存储与优化是集控端的重要组成部分,直接关系到系统的长期稳定性和应急响应能力。为实现数据的高效存储与安全保护,系统采用分布式数据库与多节点冗余存储架构,通过冗余备份记录关键数据,确保数据的防篡改性与可追溯性。实时数据通过边缘计算设备进行过滤与压缩,以减少数据中心负载,并通过机器学习算法对历史数据进行优化分析,为调度优化与风险预测提供支持。存储系统还集成了访问控制机制,确保数据仅限授权

人员访问,同时通过周期性备份与异地同步存储,保障数据的高可用性和灾备能力。

## 3.3 线路端

在矿山有轨运输无人化系统中,线路端作为承载机车运行的核心物理基础,面临着多样化的安全风险。为保障线路端的运行安全与可靠性,线路端安全保护技术结合机车与门禁联动、装卸载点安全监测、危险线路检测及报警、线路末端保护与辅助安全等多方面技术手段,构建了多层次安全防护体系。

### 3.3.1 门禁系统

机车与门禁联动技术旨在保障封闭区域内的人员与设备安全,防止非授权人员进入危险区域并确保机车运行的安全性。该技术通过集成门禁控制系统和机车运行监控系统,实现对人员进出的精准管理与机车连锁停车保护。在封闭区域,门禁系统通过身份识别技术(如人脸识别、指纹验证或 RFID)对进出人员进行授权验证。若发现未经授权的人员试图进入,门禁将自动拒绝开放,并向安全监控中心发出警报。与此同时,机车系统通过与门禁系统的实时通信获取区域状态信息。一旦门禁检测到人员违规进入或封闭区域的大门异常开启,系统将立即触发机车连锁保护机制,包括机车自动减速或紧急停车,防止潜在事故发生。

### 3.3.2 装卸载点安全监测

装卸载点是有轨运输重要环节,装载站部分主要通过安装 PLC 子站,采集和控制给矿机,包括电机的分合闸、电流、电压、温度等信号,通过逻辑判断与集控和车载系统联动,实现装载设备的安全检测。另外,针对装载部分可能存在的矿石块度过大导致卡矿、超高问题,可采用视觉识别和深度学习算法,实现超大块度识别和报警。

卸载点的安全保护主要通过安全门、料位检测及视频监控系统来实现。安全门保护主要通过机车定位联动,确保在机车经过卸载站时安全门打开,其余时间处于关闭状态,料位检测系统通过料位与任务分配系统联动,在高料位时禁止发卸载任务,已下发的任务机车禁止通行。同时,通过视频监控系统对卸载坑区域进行人员检测并报警。

### 3.3.3 危险线路检测及报警系统

系统在可通过线路沿线布置高精度激光雷达,扫描轨道及周边环境,以检测潜在的障碍物、路基异常或轨道异物侵入。结合视频 AI 分析技术,系统能

够通过摄像头采集的画面,自动识别危险场景(如异物侵入、滑坡、积水等)并分类评估风险级别。通过多传感器数据融合,系统显著提升了对动态环境的感知能力及报警精准度。当检测到危险情况时,系统会立即触发沿线设置的报警灯与警铃,同时将预警信息发送至集控端与相关工作人员的移动终端。报警灯与警铃的视觉与听觉信号能够迅速提醒作业人员采取紧急措施。

### 3.3.4 末端保护及辅助安全系统

在有轨运输线路末端尤其是折返式运输模式,存在机车行至轨道尽头与墙体或者构筑物发生冲撞的风险,通过设置物理与智能化的多重保护措施进行防护。物理保护包括缓冲装置、限位器及末端阻挡设施,以吸收机车的剩余动能,减少冲撞损害。智能保护则结合机车位置监控与速度控制技术,通过车载传感器实时感知机车与末端距离,在接近末端时主动减速并精确停车,还可通过在末端线路安装物理传感器,如接近开关、磁力开关等接入集中控制系统,实现保护动作。

## 3.4 管理制度端

管理制度端在矿山有轨运输无人化安全保障体系中起着组织、指导和规范作用,是保障系统长期安全高效运行的基础。围绕轨道架线及转辙机设备维护、安全生产制度、点检巡检制度以及极端环境响应与防护制度,管理制度端通过科学规范的制定和实施,协同技术手段,形成了系统化的安全保障机制。以下是4个主要方面的实现路线。

### 3.4.1 轨道、架线、转辙机设备维护制度制定

在矿山轨道运输中,轨道、架线、转辙机起着至关重要的作用,对于矿山运输系统的安全性、效率和经济性均有着重要影响。缺乏维护的轨道施工会造成机车及矿车掉轨事故的发生,对设备和人员安全造成极大隐患。无人化机车一般安装有控制器、传感器等精密设备,在长期颠簸振动的环境下运行,上述设备的使用寿命会受到影响甚至损坏,从而导致设备可靠性变差。欠维护的接触网架空线施工可能导致电力系统的安全隐患增加。例如,架线接头连接不牢固导致的架线掉落造成短路;线路距离地面高度不合适造成安全隐患;过度磨损导致集电弓碰到线卡,造成集电弓损坏等。维护不到位可能导致接触网架空线与井下设备之间的连接不良或电力传输异常,增加设备的故障和损坏风险。例如在线岔

处平整度过差导致集电弓钻弓,道岔和转辙机维护不当,轻则造成生产连续性受到影响,重则导致机车掉轨、损坏机车及轨道设备。

为确保轨道及相关设备的长期安全稳定运行,维护制度基于设备全生命周期管理理念,明确了定期维护、故障预防及应急修复的具体规范。制度规定了设备的检查周期、性能评估方法及维修流程,并结合传感器数据与智能分析系统,动态调整维护计划。通过引入预测性维护技术,利用历史数据和实时监测结果,提前识别设备可能的失效风险,减少非计划停机时间。此外,制度要求全部维护操作均需详细记录,并上传至中央数据库,以便追踪设备状态及优化维护策略。

### 3.4.2 安全生产制度制定

安全生产制度是指导系统运行及作业行为的核心文件,通过明确岗位职责、操作规程和应急预案,为无人化系统提供全面的安全框架。制度在结合实际运行环境与风险评估结果的基础上,制订了一系列针对性措施,包括人员培训计划、紧急情况的应急响应流程以及异常情况下的降级处理方案。为增强制度的执行力,系统通过集控端平台进行全程监控,利用报警系统与日志管理功能记录并评估制度执行效果,同时动态优化相关规范,以适应矿山环境的变化与技术升级需求。

### 3.4.3 点检巡检制度制定

点检巡检制度通过规范设备与环境的日常检查与定期巡检流程,确保系统潜在风险能够被及时发现与处置。制度规定了巡检的责任范围、频率、检查项目及记录方式,同时引入智能巡检设备(智能巡检轨道机器人<sup>[12]</sup>等),提高了点检的覆盖面与精确度。巡检数据通过移动终端上传至集控端,由分析系统进行实时评估,生成设备健康状态报告及改进建议。巡检中发现的问题将被自动分类与优先级排序,并触发相应的维护任务分配流程,确保风险的快速处置与闭环管理。

### 3.4.4 极端环境响应及防护制度制定

极端环境响应及防护制度针对矿山复杂环境条件下的突发风险(如雷击、高温或低温天气),明确了防护措施及应急操作流程。制度结合区域环境特征与历史数据,建立了风险预测模型与预警机制。系统在极端天气来临前,通过实时气象数据与环境传感器监控,提前触发预警并实施预防性防护措施

(如机车停运、设备封存)。制度还要求定期开展应急演练,提升人员与系统对突发事件的响应能力。应急操作的全过程记录将用于评估制度的适用性与效果,并为后续优化提供数据支持。

## 4 结论

针对国内矿山无人化、智能化转型过程中有轨运输无人化系统安全保障体系尚未完善的问题,本文深入研究了无人化矿山有轨运输系统的安全保障需求,构建了一套系统性安全保障体系(SASUM)。该体系明确了定义、评估指标、基本原则及主要技术路线,形成了一个多层次、闭环化的安全保障框架。研究表明,这一技术路线在理论上是可行的,为无人化矿山有轨运输系统的安全运行提供了有力的理论支撑。

在技术细节上,本文得出了优化后的参数和技术数据。这些数据经过验证,为无人化矿山有轨运输系统的安全评估提供了科学依据。优化参数的确定不仅提升了系统的安全性能,也为后续的技术改进和标准制定奠定了基础。

在现场应用方面,本文完成了 SASUM 体系在无人化矿山有轨运输系统中的实际应用测试。测试结果表明,该体系在提升系统安全性能、减少事故发生等方面取得了显著成效,证明了其在同类场景中的广泛适用性和推广价值。体系的建立将加强系统各层级安全保障技术的研发与实践,同时也将推动金属非金属矿山无人化转型及相关技术标准向更加智能化、安全化方向发展。

### [参考文献]

[1] 胡乃联,李国清.我国金属矿山智能化现状与问题探讨[J].金属矿山,2024(1):7-19.

- [2] 李元吉.井下无人驾驶电机车安全管控措施研究[J].世界有色金属,2023(24):37-39.
- [3] 蒋成云,谢贤平,李建功.斗南锰矿井下有轨运输系统安全性探讨[C]//2014 第五届中国矿业科技大会论文集,2014:440-444.
- [4] 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.
- [5] 李学伟,郭竹学.高速铁路普适安全理论及其实践研究[J].中国铁路,2014(8):6-11.
- [6] 谢泽,张可新,李金波.高速铁路运营安全保障技防体系研究[J].铁道运输与经济,2024,46(7):151-158.
- [7] 秦勇,王莉,王志鹏,等.轨道交通自主化安全保障系统及架构[J].铁道技术标准(中英文),2024,6(6):1-10.
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.金属非金属矿山安全规程:GB 16423—2006[S].
- [9] 胡青松,孟春蕾,李世银,等.矿井无人驾驶环境感知技术研究现状及展望[J].工矿自动化,2023,49(6):128-140.
- [10] 于骞翔,张元生.井下电机车轨道障碍物图像处理方法的智能识别技术[J].金属矿山,2021(8):150-157.
- [11] 苏树鹏.基于遗传蚁群强化学习算法的露天矿运输路径优化试验研究[J].矿业研究与开发,2024,44(12):221-227.
- [12] 刘震,郑祯国,张世杰,等.基于移动设备机器视觉的无砟轨道钢轨爬行状态检测方法[J].中国铁路,2024(9):202-212.
- [13] 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.
- [14] 温瑞恒,陈功,张维国,等.矿山有轨运输无人驾驶信息化系统的方案研究[J].有色设备,2022,36(6):13-17.

## Research on safety assurance system of unmanned locomotive transportation for mine

DUAN Xiaohui<sup>1</sup>, GUO Shuai<sup>2</sup>

(1. Hunan Baoshan Nonferrous Metals Mining Co., Ltd., Guiyang 424400, China;

2. China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

**Abstract:** In order to ensure the continuity of production and the safety of equipment after the implementation of unmanned mining railway transportation technology, as well as to effectively manage

(下转第 68 页)

[11] 顾士林. 机械工程的可靠性优化设计分析[J]. 内燃机与配件, 2019(24): 216-217.

[12] 梁邵禹, 罗雨涵, 贾文姗, 等. 基于 LEC 评价的铝电解多功能天车安全性分析[J]. 有色设备, 2024, 38(6): 43-49.

## Design and research on track lifting unit in corridor of the electrolytic aluminum workshop

LU Yanfeng

(Shenyang Aluminum and Magnesium Engineering and Research Institute Co., Ltd., Shenyang 110001, China)

**Abstract:** This study addresses the structural design and optimization of rail lifting units installed in the corridor of an electrolytic aluminum workshop. The design considerations include the necessity for a multi-functional crane to pass during non-centralized overhauls and the requirement to lift the units during centralized overhauls. Given the characteristics of unequal wheel spacing and asymmetric load distribution at each end beam of the crane, the maximum value principle of functional analysis is applied to determine the position of maximum bending moment and the corresponding calculation formula, providing a theoretical basis for identifying the most critical section in the design. Furthermore, by combining flexural beam stress analysis with the solution of the minimum value of a second-order nonlinear differential equation, the optimal installation positions for the two dynamic pulleys are derived. Specifically, when  $l/L=0.551$ , the deformation of beams made from the same material and with the same moment of inertia is minimized under self-weight load, effectively reducing bending fatigue damage. The calculation formulas and design methods proposed in this study offer valuable references for the design and calculation of similar structures.

**Keywords:** rail lifting unit; maximum bending moment; functional analysis; flexural beam stress analysis; optimal installation position ▲

(上接第 62 页)

the risks associated with unmanned transportation, this paper constructs a Unmanned Mining Railway Transportation Safety Assurance System (SASUM). The system addresses four key elements: the locomotive end, the central control and scheduling end, the track environment end, and the management system end. It includes system performance evaluation, principle formulation, and technical route research, while also integrating the application of novel cyber-physical systems. By comprehensively identifying, analyzing, and managing risks from equipment, environment, and operational management perspectives, a dynamic and efficient safety assurance mechanism is established. This paper provides strong support for the realization of efficient and safe railway transportation in mining environments and the unmanned transformation of mining production.

**Keywords:** safety assurance; system architecture; underground rail transportation; unmanned transportation; mine intelligence ▲