

文章编号: 2097-5899(2026)09-0037-06

中图分类号: U292.92*1

文献标识码: A

DOI: 10.16669/j.cnki.issn.2097-5899.202512180003

引用格式: 李瑞, 周黎, 曾令辉, 等. 基于自主式充排风的长大重载列车智能列尾研究[J]. 铁路物流, 2026, 44(9): 37-42.

LI Rui, ZHOU Li, ZENG Linghui, et al. Intelligent End-of-Train System for Long and Heavy-Haul Trains Based on Autonomous Charging and Exhausting Process[J]. Railway Logistics, 2026, 44(9): 37-42.

基于自主式充排风的长大重载列车 智能列尾研究

李 瑞¹, 周 黎², 曾令辉³, 张红亮⁴, 范云峰³, 李竞成⁴

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司 电子计算技术研究所, 北京 100081; 2. 中国铁道学会 智能铁路委员会, 北京 100081; 3. 成都威奥畅通科技有限公司 技术中心, 四川 成都 610100; 4. 北京交通大学 智能铁路研究院, 北京 100091)

摘 要: 为解决长大重载列车在途运输过程中因循环制动而导致的充风不足、风管路压不稳定问题, 研发了一种自主式充排风的列车智能列尾装置及系统。在不影响车辆正常运行的前提下, 通过对列车尾部进行适当改造优化, 增加机车风源及制动机, 实现自主式充排风功能, 并通过无线组网和自动控制模块, 实现与主控机车同步充排风, 相较于在重载列车尾部加挂机车来解决重载列车缓解不同步和循环制动充风不足问题, 既降低重载列车在制动和缓解过程中的纵向力, 提升长大列车在途运输过程中充排风的精度, 提高列车的整体制动和缓解性能, 更好保障行车安全, 且不需要增加机车和司机, 整体社会经济效益更高。

关键词: 重载铁路; 长大列车; 智能化; 列尾装置; 自主式充排风

0 引言

随着重载铁路运输效能需求的不断提升, 目前2万吨列车的开行已常态化, 3万吨列车的开行技术也日趋成熟, 在现有轴重不变的基础上, 编组列车的长度成比例增加, 由此带来的长大列车安全运行问题势必更加明显, 一方面是列车运行时同步操控过程中可控列尾操纵的技术复杂, 纵向冲击力仍然较大, 对车钩的承受力考验大, 容易引发中部机车渡板变形、列车脱轨等风险, 另一方面, 对于途中面临长大坡道等特殊线路环境, 往往需要循环制动, 受制于充风模式的限制, 在一定程度上存在充风不足、管压波动大的问题^[1-2]。为使得长大重载列车在不同工况下车钩力均能控制在合理范围内, 前期对大秦线的万吨列车编组方式进行了测试研究, 分别对1+1+可控列尾, 1+2+1, 单

编组万吨列车进行了相应的测试, 测试结果表明, 1+2+1编组在长大下坡道调速制动时车钩力最小, 最大车钩力小于1 000 kN。如果在尾部加挂一台机车, 能较好地解决牵引及制动的同步性问题, 但需要增加司机, 运输组织也不方便, 经济效益不高^[3]。综合国外重载运输资料分析, 对于此类问题大多数采用在尾部加挂机车的方式来解决, 或者采用电控空气制动技术(ECP)进行制动, 成本高昂^[4]。因此提出对可控列尾装置进行适度改造的创新方案, 通过在列尾增加充风装置, 协同控制实现与主控机车同步充排风, 从而解决长大列车同步制动难题。

1 自主式充排风装置设计

受重载列车运输过程的工况限制, 考虑列车充排风装置要具备可靠、易改装、好维护等因素, 提出2种

收稿日期: 2025-12-18

基金项目: 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题(P2024J002); 北京交通大学科研课题(T24L00070)

自主式充排风装置，一种是以空气压缩机供风，另一种采用液氮方式供风。

1.1 空压机供风方式

空压机供风方案是以电动空气压缩机提供风源，与总风缸、列车管及均衡风缸连接，实现充风缓解、减压制动及保压等功能，结构上主要包括大容量动力电池、逆变器、空气压缩机、干燥器、油过滤器、总风缸、控制主机、充排风控制阀板等。设备安装在后部车辆上，以C₈₀为例，需占用两侧浴盆及两侧的清扫窗口，约占用8 m³的空间，包括多台空压机，2套干燥过滤设备，2组动力电池，2个600 L总风缸，1套控制箱，1套气阀板，对称布置在2个浴盆内部，总质量约800 kg。空气压缩机供风方式安装示意图如图1所示。

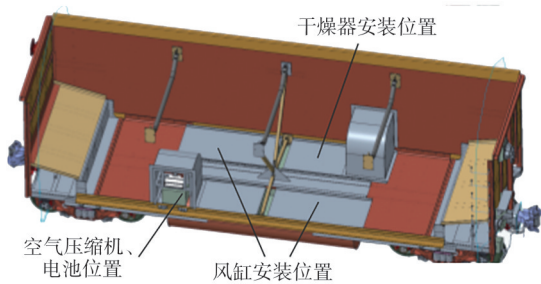


图1 空气压缩机供风方式安装示意图
Fig.1 Air supply type by air compressor

1.2 液氮供风方式

液氮供风方案是以液态氮蒸发膨胀为高压气体的方式作为供风风源，风源压力主要通过安全阀及调压阀控制，氮气出口温度与环境温度的差值控制在2℃左右。系统组件主要包括液氮存储罐、汽化器、缓冲风缸、控制电路、充排风阀板、锂离子电池等。

液氮供风方案主要利用车辆浴盆空间进行安装，

需占用约5 m³的空间，设计为对称布置，安装在两侧浴盆空间内，总重约500 kg。液氮供风方式安装示意图如图2所示。

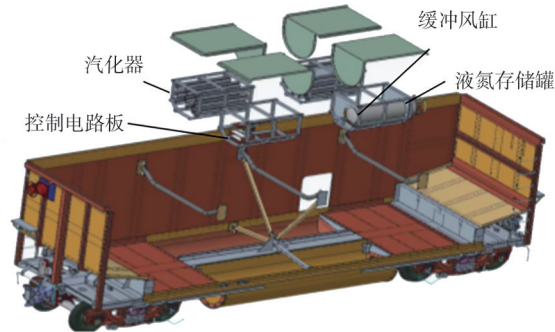


图2 液氮供风方式安装示意图
Fig.2 Air supply type by liquid nitrogen

1.3 2种装置部署及对比

由于设计结构的差异，2种装置在安装方式上存在差异。空压机供风装置需要对车辆进行特定改造，在车体预留位置加装空气压缩机、总风缸、充排风控制阀板、控制主机等装置，液氮供风方式装置安装也需要对车辆进行特定改装，在图2中相应的位置安装液氮存储罐、汽化器、缓冲风缸、控制电路、充排风阀板、锂离子电池等装置。在作业过程中，安装上述2种装置的车辆均需调车作业调整到列尾。针对实际现场应用需求，为尽量减少对原车辆的改动，针对液氮供风方式开展了外挂式设备的研究，车辆上加装简易安装支架，充排风装置作为移动式设备，设备通过移动小车在始发前进行安装，到达后取下。列车发生紧急或者其他异常情况需要救援时，该设备不影响机车连挂作业，能满足特殊线路小曲线半径要求。2种供风装置技术参数对比如表1所示。

表1 2种供风装置技术参数对比

Tab.1 Comparison of technical parameters between two types of air supply device technologies

对比维度	空压机供风方式	液氮蒸发供风方式
核心部件	涡旋空压机（4台，排量0.6 m ³ /min）、大容量锂电池组、干燥器、油过滤器、1200 L总风缸，总质量约800 kg	液氮存储罐、汽化器、缓冲风缸、调压阀，总质量约500 kg
工作条件	每趟列车需拆卸动力电池并充电，需配备电池拆装设备与充电站	每趟列车始发前加注液氮，出口温度与环境温差≤2℃
维护要求及经济性	空压机定期保养，干燥器干燥剂定期更换，电池状态监测，电池充电维护，安装及养护成本高	液氮存储罐定期安全检查，符合TSGR0006—2014标准，定期加注液氮，安装养护成本低
安装空间	占用车辆两侧浴盆及清扫窗口，约8 m ³	占用单侧浴盆空间，约5 m ³
技术特点	技术成熟、无需额外加注介质	结构紧凑、维护简便、首次应用于列车制动系统

2 智能列尾系统总体方案

改造后的充排风装置需要与现有列尾系统进行硬件集成和系统集成,形成全新的智能列尾系统。智能列尾系统采用“车载子系统+地面监测子系统”的分布式架构,实现列车充排风的实时控制、状态监测与数据追溯。其中车载子系统包含机车端设备、可控列尾主机、车辆端设备三大核心模块,地面监测子系统负责远程运维与数据分析^[5],智能列尾系统总体方案架构图如图3所示。

2.1 机车车载系统

机车车载系统机车端信息采集子系统主要包括信息采集主机、无线传输模块、压力传感器等,实现对机车制动、缓解、均衡风缸、列车管等信息的采集,列车运行过程中,系统多通道检测主控机车制动机状态,生成制动或缓解指令,通过无线网络实时传输到尾部车辆设备,确保尾部充排风动作与机车的一致性。同时司机室增加显示设备,显示尾部充排风设备的工作状态。

(1) 机车端设备。由信息采集主机、无线传输模块、压力传感器及司机室显示单元组成,负责采集机车制动机状态(大小闸位置)、均衡风缸压力、列车管压力等关键参数,通过多通道检测生成制动/缓解指令,经GSM-R/LTE-R双网实时传输至尾部车辆,同时向司机反馈尾部充排风设备工作状态^[6]。

(2) 可控列尾主机。安装于尾部车钩,通过双网无线通信获取机车端指令与同步控制信息,采用双通道无线+有线冗余通信方式与车辆端设备交互,在车辆子系统故障掉线时,仍能维持原有同步排风与司机控制制动功能。

(3) 车辆端设备。作为系统核心执行单元,包含充排风控制模块、信息采集控制主机、无线传输模块、大容量风缸及风源系统,接收机车端指令后,通过专用控制模块实现列车管精准充排风,充排风速率匹配车辆制

动系统要求^[7]。当车辆端子系统故障掉线后,可控列尾装置同步排风及司机控制排风制动功能可正常启用。

2.2 地面监测子系统

通过专用网络与车载子系统通信,实现设备运行状态实时监测、关键参数(充排风时间、风压变化、车钩力)数据采集、故障预警与远程诊断,同时通过用户访问接入控制策略和数据包加密传输协议确保数据安全;基于大数据分析技术对运行数据进行统计建模,优化充排风控制策略,为设备维护提供决策支持,构建“实时监测-数据分析-策略优化-维护升级”的闭环管理体系^[8]。

3 智能列尾系统试验关键技术

新型智能列尾系统研制成功后,为确保其功能的可用性和可靠性,仍需对充排风装置、通信及控制模块等关键技术进行研究,包括系统建模仿真、通信模拟及集成化设计等。

3.1 多工况充排风建模与仿真技术

基于空气动力学与重载列车制动系统动力学理论,构建1+1+尾部充排风(2万吨列车)、1+1+可控列尾2种编组模式的多场耦合仿真模型。针对平道、长大坡道等不同线路条件,50 kPa等典型减压量工况,建立多点充排风与列车动力学响应的耦合关系,重点仿真分析制动时间、缓解时间、车钩纵向力及列车平稳性等关键指标,通过仿真迭代优化充排风控制参数与设备布局方案,为硬件研发提供理论依据。

3.2 安全冗余通信与控制技术

构建“机车-列尾-车辆”三级冗余通信网络,车载系统及地面监测系统通信方式如图4所示。机车与尾部车辆采用GSM-R/LTE-R双网并行传输,保障通信可靠传输;车辆端与可控列尾主机采用无线+有线双通道备份,通信协议在既有可控列尾协议基础上扩展充风指令集,并封装RSSP安全通信协议,确保指令传



图3 智能列尾系统总体方案架构图

Fig.3 Architecture of intelligent train tail system

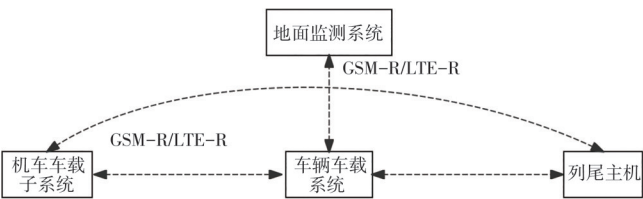


图4 车载系统及地面监测系统通信方式

Fig.4 Communication mode between on-board system and ground monitoring system

输的实时性与安全性^[9]。

车辆控制子系统主要功能为控制风源系统工作，为风缸进行充风保持800 kPa以上压力；根据接收到的机车控制指令并结合尾部压力情况，依据建立的充排风控制模型，精确控制对列车管进行充风或排风，充排风速率满足车辆制动系统要求。车辆控制系统采用SIL2安全架构，搭载双CPU运算模块(运算速率 ≥ 1.5 G)，实现多通道机车状态检测与充排风精准控制；压力采集精度达 ± 2 kPa，充排风响应时间小于2 s，通过PWM控制类ZJ1中继阀，实现充风缓解、减压制动、保压3种工况的平稳切换，匹配重载列车制动系统动态特性。

根据系统对安全、可靠性的需求，车辆控制系统采用安全架构设计，单个处理器运算速率达1.5 G以上，无线通信封装RSSP安全协议。系统压力采集精度为0.2%，充排风控制响应时间小于1 s。

3.3 模块化装备集成与安装技术

针对C₈₀/C_{80B}车辆结构特点，采用模块化设计理念，将充排风系统拆解为风源模块、控制模块、风缸模块、通信模块，各模块独立封装、标准化接口，便于安装调试与维护更换。固定式安装方案通过对称布置优化质量分布，确保车辆轴重符合运营要求；外挂式装备采用轻量化设计，可承受沿车辆前进方向-5 g、车轴方向-1 g、竖直方向3 g的极限冲击加速度。

4 充排风试验仿真及样机试验

4.1 仿真条件预设

根据大秦线(韩家岭—柳村南)、朔黄线(神池南—

黄骅港)等重载铁路实际运输情况，以2万吨列车为研究对象，采用“机车1+108辆C₈₀+机车2+108辆C₈₀+充排风装置”的编组方案，设定平道运行、初速度70 km/h、减压50 kPa制动50 s后缓解的典型工况，对比分析1+1+可控列尾(无充风)、1+1+1(尾部机车)、1+1+充风设备3种模式的动力学特性；同时开展5次循环制动仿真，记录最慢充风车辆达到580 kPa，590 kPa的时间及车钩力变化数据。

4.2 仿真结果分析

(1) 充风效率提升分析。以2万吨列车在循环制动情况下进行对比充风实验，循环制动下有/无充风能力最慢车充风到580 kPa时间对比如表2所示。2万吨列车无充风装置时，第1把闸最慢车辆充至580 kPa需115.7 s，加装充风设备后仅需51.8 s，时间缩短64 s (55.3%)；5次循环制动中，充风时间平均缩短50%以上，且稳定性显著提升，表明尾部加装充排风装置后，列车充风时间显著缩短。

通过同样的循环制动工况进行对比实验，循环制动下有/无充风能力最慢车充风到590 kPa时间对比如表3所示。590 kPa工况下，无充风装置时第1把闸需180.4 s，加装充风设备后仅需79.4 s，时间缩短101 s (56.0%)，后续循环充风时间波动幅度控制在10%以内。充风时间较无充风装置缩短15%以上，满足循环制动工况下的快速充风需求。

(2) 车钩力改善分析。通过对2万吨列车编组情况下，尾部是否有充风装置对车钩力影响进行模拟仿真实验，循环制动下有/无充风能力不同拉闸情况下车钩力变化如表4所示。尾部充风装置通过提升制动系统缓解同步性，显著降低车钩纵向力。第3把闸循环制动中，无充风装置时最大压缩车钩力为-848 kN，加装充风设备后降至-610 kN，降幅28.0%；最大拉伸车钩力由250 kN降至180 kN，降幅28.0%。第5把闸压缩车钩力降幅达29.2%，拉伸车钩力基本保持稳定，有效降低了列车纵向车钩力，避免车钩力超限导致的结构损伤。

(3) 样机试验验证。基于仿真优化方案研制系统

表2 循环制动下有/无充风能力最慢车充风到580 kPa时间对比

Tab.2 Time taken for last vehicle with/without air charging capability to reach 580 kPa under cyclic braking

列车编组方式	第1把闸充风到580 kPa的时间	第2把闸充风到580 kPa的时间	第3把闸充风到580 kPa的时间	第4把闸充风到580 kPa的时间	第5把闸充风到580 kPa的时间
1+1+可控列尾(216车)	115.7	95.8	105.2	106.5	120.3
1+1+尾部充风设备(181车)	51.8	40.7	44.61	44.6	50.1
缩短时间	64	55	61	62	70

表 3 循环制动下有/无充风能力最慢车充风到 590 kPa 时间对比

s

Tab.3 Time taken for last vehicle with/without air charging capability to reach 590 kPa under cyclic braking

列车编组方式	第1把闸充风到 590 kPa 的时间	第2把闸充风到 590 kPa 的时间	第3把闸充风到 590 kPa 的时间	第4把闸充风到 590 kPa 的时间	第5把闸充风到 590 kPa 的时间
1+1+可控列尾(216 车)	180.4	157.3	166.3	165.0	183.0
1+1+尾部充风设备(181 车)	79.4	67.0	71.6	71.6	77.6
缩短时间	101.0	90.3	94.7	93.4	105.4

表 4 循环制动下有/无充风能力不同拉闸情况下车钩力变化

Tab.4 Coupler force changes with/without air charging capability under cyclic braking

闸序号	有/无尾部充风	压缩车钩力/kN, 位置	变化百分比/%	拉伸车钩力/kN, 位置	变化百分比/%
第1把闸	尾车无充风	-716, 110	—	194, 206	—
	尾车有充风	-687, 110	-4.0	83, 106	-57.2
第2把闸	尾车无充风	-833, 110	—	0	—
	尾车有充风	-729, 110	-12.5	0	0
第3把闸	尾车无充风	-848, 110	—	250, 109	—
	尾车有充风	-610, 110	-28.0	180, 105	-28.0
第4把闸	尾车无充风	-882, 110	—	440, 108	—
	尾车有充风	-702, 110	-20.4	444, 69	0.9
第5把闸	尾车无充风	-651, 129	—	426, 109	—
	尾车有充风	-461, 136	-29.2	432, 109	1

样机,开展地面测试与实车试验。地面测试结果表明,装备在-30~55℃环境温度、3 000 m海拔条件下运行稳定,压力采集精度±2 kPa,系统响应时间≤1.8 s,满足设计指标;实车安装于C₈₀车辆后,2万吨列车(1+108+1+108编组)充风时间较未加装列车缩短22.3%,与仿真结果偏差小于5%。

5 结论

针对长大重载列车循环制动中充风不足的技术瓶颈,研发了长大重载列车充排风列尾智能化系统,构建了“车载控制+地面监测”的分布式协同架构,创新采用2种风源技术与模块化集成设计,实现了与主控机车同步的尾部精准充排风。通过仿真分析与实车试验验证,得出以下结论。

(1)系统采用空压机与液氮蒸发2种风源方案,可灵活适配2万吨列车的固定式改造与外挂式部署需求,不影响车辆正常运营功能,安装维护便捷。

(2)尾部充风装置可使2万吨列车充风时间缩短50%以上,显著提升循环制动工况下的充风效率,降低司机操控难度。

(3)系统能有效改善列车制动缓解同步性,最大

压缩车钩力降幅达29.2%,拉伸车钩力保持稳定,大幅降低纵向力,提升列车运行安全性。

(4)液氮蒸发风源技术的创新应用,大幅简化系统结构、减少安装空间,为列车制动系统风源提供了新的技术路径。

该系统的成功研发与应用,有效解决了长大重载列车充风不足的行业难题,无需新增机车与司机配置,具有显著的安全效益与经济效益,可广泛应用于既有车辆改造与新造重载列车,推广前景广阔。后续研究将重点开展3万吨列车长距离试运行试验,进一步完善充排风控制算法,提升复杂线路条件下的自适应能力;丰富完善地面监测系统的AI诊断功能^[10],实现基于大数据的预测性维护,为重载铁路向更高牵引质量、更高效运营模式发展提供持续技术支撑^[11]。

参考文献:

[1] 耿志修.大秦铁路重载运输技术[M].北京:中国铁道出版社,2009.
[2] 倪继娜,张 巍,刘宁馨,等.“十四五”重载铁路运输需求预测及发展对策探讨[J].铁道货运,2022,40(1):7-11,19.
NI Jina, ZHANG Wei, LIU Ningxin, et al. Discussion on Railway Transport Demand Forecast and Development Countermeasures

- during the 14th Five-Year Plan Period[J]. Railway Freight Transport, 2022, 40(1): 7-11, 19.
- [3] 赵志荣, 倪继娜, 游艳雯, 等. 面向更大牵引质量的重载列车运输组织关键技术探讨[J]. 铁道货运, 2024, 42(6): 1-5, 74.
ZHAO Zhirong, NI Jina, YOU Yanwen, et al. Discussion on Key Technologies for Transportation Organization of Heavy-Haul Trains with Larger Traction Quality[J]. Railway Freight Transport, 2024, 42(6): 1-5, 74.
- [4] 刘彦虎. 国内外重载铁路技术发展研究[J]. 冶金经济与管理, 2020 (4): 24-26.
- [5] 李 平, 曹鸿飞, 谢 鹏. 新一代信息技术驱动下的智能重载铁路总体架构研究[J]. 铁路计算机应用, 2020, 29(6): 25-29.
LI Ping, CAO Hongfei, XIE Peng. Overall Framework of Intelligent Heavy Haul Railway Driven by New Generation of Information Technology[J]. Railway Computer Application, 2020, 29(6): 25-29.
- [6] 单 伟, 秦 凯, 李 苗, 等. 重载铁路云数据中心网络架构与优化研究[J]. 铁道货运, 2024, 42(12): 71-80.
SHAN Wei, QIN Kai, LI Miao, et al. Network Architecture and Optimization of Cloud Data Center for Heavy-Haul Railway[J]. Railway Freight Transport, 2024, 42(12): 71-80.
- [7] 李东晓, 丁 浩, 李太空. 重载铁路通信技术现状与发展综述[J]. 中国新通信, 2023, 25(10): 25-27.
- [8] 郭永伟, 徐 闯, 张雨蒙, 等. 铁路货运列车状态信息监测系统设计[J]. 电子设计工程, 2020, 28(9): 12-17.
GUO Yongwei, XU Chuang, ZHANG Yumeng, et al. Design of State Information Monitoring System for Freight Trains[J]. Electronic Design Engineering, 2020, 28(9): 12-17.
- [9] 朱 雨, 石利刚, 王健慧. 面向智慧化的重载铁路发展研究[J]. 交通科技与经济, 2021, 23(4): 59-64.
ZHU Yu, SHI Ligang, WANG Jianhui. Research on the Development of Intelligent Heavy-Haul Railway[J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2021, 23(4): 59-64.
- [10] LU C F, LIU J F, LIU Y H, et al. Intelligent Construction Technology of Railway Engineering in China[J]. Frontiers of Engineering Management, 2019, 6(4): 503-516.
- [11] 杜天军, 程 朝, 张 强, 等. 基于云平台的重载铁路智能化应用方案研究[J]. 铁道货运, 2024, 42(12): 64-70, 80.
DU Tianjun, CHENG Zhao, ZHANG Qiang, et al. Intelligent Application Scheme for Heavy-Haul Railways Based on Cloud Platform[J]. Railway Freight Transport, 2024, 42(12): 64-70, 80.
- (责任编辑: 魏 然)

Intelligent End-of-Train System for Long and Heavy-Haul Trains Based on Autonomous Charging and Exhausting Process

LI Rui¹, ZHOU Li², ZENG Linghui³, ZHANG Hongliang⁴, FAN Yunfeng³, LI Jingcheng⁴

(1. Institute of Electronic Computing Technologies, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China;
2. Intelligent Railway Committee, China Railway Society, Beijing 100081, China; 3. Technology Center, Chengdu Weiao Changtong Technology Co., Ltd., Chengdu 610100, Sichuan, China; 4. Institute of Intelligent Railway, Beijing Jiaotong University, Beijing 100091, China)

Abstract: To solve the problems of insufficient charging and unstable brake pipe pressure caused by cyclic braking during the in-transit operation of long and heavy-haul trains, an intelligent end-of-train device and system with autonomous charging and ventilating functions was developed. Without affecting normal train operation, the tail end of the train was appropriately retrofitted and optimized by adding a locomotive air source and braking system to achieve autonomous charging and exhausting functions. Through wireless networking and automatic control modules, synchronous charging and exhausting with the master locomotive was realized. Compared with solving the problems of asynchronous release and insufficient air charging during cyclic braking in heavy-haul trains by adding a locomotive at the tail end, this approach reduces the longitudinal forces on heavy-haul trains during braking and release processes, improves the precision of charging and exhausting for long trains during en-route transportation, enhances the overall braking and release performance of the train, and better ensures operational safety. In addition, it does not require additional locomotives or drivers, resulting in higher overall social and economic benefits.

Keywords: Heavy-Haul Railway; Long and Heavy-Haul Train; Intelligence; End-of-Train Device; Autonomous Charging and Exhausting