

适用于重载铁路的无线闭塞中心设备研究

蒋国良

国能新朔铁路大准分公司, 中国·内蒙古 鄂尔多斯 010300

摘要: 无线闭塞中心 (Radio Block Center, RBC) 作为列车运行控制系统的地面核心设备, 在保障列车安全运行和提高运输效率中发挥关键作用。论文针对重载铁路运输需求, 提出一种新型无线闭塞中心设备架构, 通过优化车地通信、灵活配置闭塞制式、增强调车防护功能等技术改进, 解决了传统固定闭塞系统在重载铁路中存在的发车间隔长、调车安全防护缺失、司机劳动强度高等问题。结合朔黄铁路等实际工程案例, 验证了该设备在提升运输效率、降低运营成本方面的显著效果, 为重载铁路智能化发展提供了技术支撑。

关键词: 重载铁路; 无线闭塞中心 (RBC); 调车防护; 智能列控系统

Research on Wireless Block Center Equipment for Heavy-haul Railways

Guoliang Jiang

Guoneng Xinshuo Railway Dazhun Branch, Ordos, Inner Mongolia, 010300, China

Abstract: As the core ground equipment of the train operation control system, the Radio Block Center (RBC) plays a critical role in ensuring the safe operation of trains and improving transportation efficiency. Aiming at the transportation needs of heavy-haul railways, this paper proposes a new architecture for wireless block center equipment. Through technical improvements such as optimizing train-ground communication, flexibly configuring block systems, and enhancing shunting protection functions, it solves the problems existing in traditional fixed block systems for heavy-haul railways, including long train departure intervals, lack of shunting safety protection, and high labor intensity for drivers. Combined with practical engineering cases such as the Shuohuang Railway, the remarkable effects of this equipment in improving transportation efficiency and reducing operation costs are verified, providing technical support for the intelligent development of heavy-haul railways.

Keywords: heavy-haul railways; radio block center (RBC); shunting protection; intelligent train control system

1 概述

1.1 研究背景

重载铁路因运量大、成本低的特点, 成为大宗货物运输的核心方式。然而, 传统信号系统 (如三 / 四显示自动闭塞) 存在以下问题: ①发车间隔长。固定闭塞依赖轨道电路划分闭塞分区, 导致追踪间隔难以压缩。②调车防护缺失。现有 RBC 设备未覆盖调车作业安全防护, 易引发事故。司机劳动强度高。人工驾驶需频繁操作空气制动, 易因操作失误导致断钩或非计划停车。

基于移动闭塞的智能列控系统成为解决上述问题的关键。研究表明, 采用移动闭塞可将追踪间隔从 11 分钟缩短至 7.3 分钟, 提升发车能力约 50%。但现有 RBC 设备主要面向高速铁路设计, 需针对重载铁路特性进行适应性改进。

1.2 研究意义

论文提出的重载铁路专用 RBC 设备, 通过以下创新实现技术突破: ①兼容多种闭塞制式。支持固定闭塞与移动闭塞的灵活切换, 适应不同线路改造阶段需求。②低成本集成方案。直接与 LKJ-15 车载设备通信, 避免叠加车载 ATP 设备带来的成本增加。③增强安全防护。新增调车防护功能, 覆盖全作业场景的安全控制。

2 重载铁路 RBC 设备原理及功能

2.1 重载铁路 RBC 设备简介

适用于重载铁路的无线闭塞中心设备是一种专门针对重载铁路设计的信号控制系统, 它包括可配置闭塞制式的 RBC 主机单元和 RBC 维护单元。该设备的闭塞制式包括固定闭塞制式和移动闭塞制式, 可以根据线路要求进行配置。RBC 主机单元通过以太网直接与计算机联锁系统、调度集中系统、相邻无线闭塞中心设备以及列车运行监控装置相连接。它能够根据这些系统的运行状态信息, 并结合列车运行监控装置发送的列车状态, 向列车运行监控装置发送调车运行指令, 以控制列车安全调车。

2.2 重载铁路 RBC 设备具体功能

无线闭塞中心 (RBC) 是高速铁路信号系统中的地面核心子系统, 它在重载铁路上的具体功能包括: ①监控和指挥: 无线闭塞中心负责监控和指挥列车运行, 确保行车安全和运输效率。②信息传递: 与调度集中系统交互, 实现列车运行状态信息及控制信息的传递; 与车站联锁系统交互, 实现列车运行状态信息及进路状态信息的传递; 与列车车载系统交互, 实现列车运行状态信息、行车许可及列车运行间隔管理信息的传递; 与相邻 RBC 系统交互, 实现列车控制权

的交接。③行车许可管理：根据调度命令、进路状态、线路参数、列车当前位置及速度等信息，向列车发放行车许可并管理列车运行，从而保证列车在 RBC 系统管辖范围内安全、高效运行。④安全防护：对实现高速铁路信号系统“运行指挥、安全防护”的功能起着关键作用。综上所述，无线闭塞中心在重载铁路中扮演着至关重要的角色，它不仅确保了列车运行的安全性，还提高了运输效率。

2.3 与列车运行监控装置协同工作机制

无线闭塞中心与列车运行监控装置的协同工作主要通过表 1 方式实现。

表 1 无线闭塞中心与列车运行监控装置的协同工作

协同方式	详细说明
数据交换	RBC 通过无线通信系统与列车上的 LKJ 设备进行实时数据交换。RBC 向 LKJ 发送列车运行指令、进路信息、速度限制等数据，而 LKJ 则向 RBC 反馈列车的实际位置、速度等信息。
实时监控	RBC 实时监控列车的运行状态，通过 LKJ 设备获取的列车数据，RBC 可以判断列车是否按照预定的进路和速度运行。如果发现异常，RBC 可以立即采取措施，如发送减速或停车指令。
安全防护	RBC 根据列车的位置和速度信息，计算出安全的行车间隔，并通过 LKJ 设备向列车发送相应的指令，确保列车间的安全距离。如果列车接近前车或遇到其他危险情况，RBC 会通过 LKJ 设备发出警报或自动制动指令。
进路控制	RBC 根据列车的运行计划和实时情况，自动或手动设置进路，并通过 LKJ 设备向列车发送进路信息。列车根据接收到的进路信息，调整运行状态，确保按照预定的路径行驶。

2.4 技术实现

为了实现上述协同工作，RBC 和 LKJ 设备需要具备以下技术特点：①无线通信技术：RBC 和 LKJ 设备之间通过无线通信系统进行数据交换，确保信息的实时性和可靠性。②数据处理能力：RBC 需要具备强大的数据处理能力，能够实时分析列车的运行数据，并做出相应的决策。③安全机制：RBC 和 LKJ 设备之间需要具备完善的安全机制，确保数据传输的安全性和完整性，防止数据被篡改或丢失。

通过上述协同工作机制，无线闭塞中心和列车运行监控装置能够共同确保铁路列车的安全、高效运行。

2.5 提升重载铁路安全关键点

实时监控与调度：无线闭塞中心能够实时监控列车的运行状态和位置，并根据实际情况进行调度，确保列车之间的安全距离，防止追尾等事故发生。

自动化与信息化：通过高度自动化和信息化的管理，无线闭塞中心能够减少人为操作失误的可能性，提高铁路运输的整体安全水平。

安全风险评估与控制：无线闭塞中心能够进行安全风险评估，识别潜在的安全隐患，并采取相应的控制措施，如优化安全策略、更新安全设备等，以降低安全风险的发生概率和影响。

应急响应能力：在发生突发事件时，无线闭塞中心能够迅速做出反应，指导列车采取正确的应对措施，如紧急制动、退行等，以确保乘客和货物的安全。

综上所述，无线闭塞中心设备通过其强大的监控、调度、自动化管理、安全风险评估和应急响应能力，显著提升了重载铁路的安全性。

2.6 重载铁路 RBC 设备的技术特点

重载铁路无线闭塞中心设备的技术特点主要包括以下几个方面：

大规模的设备和网络：无线闭塞中心包括大量的计算设备、通信设备、服务器以及网络设备，这些设备之间通过高速网络连接，并且需要满足高可用性和高可靠性的要求。

高度自动化和信息化：无线闭塞中心实现了对列车运行的全面监控和调度，包括自动装车、运输管理和数据分析等功能。这使得无线闭塞中心变得高度自动化和信息化，但也增加了系统的复杂性。

关键调度作用：无线闭塞中心的操作决策直接影响列车运行的安全和效率。一旦无线闭塞中心发生故障，将对铁路运输造成极大的影响，可能导致事故和经济损失。

安全性要求高：由于无线闭塞中心在铁路运输中的关键作用，其安全性要求极高。它需要防范各种安全风险，包括物理安全风险、网络安全风险、数据安全风险和人员安全风险。

技术规范严格：无线闭塞中心的技术规范非常严格，例如在列车注册与注销、级间转换、RBC-RBC 移交等方面都有详细的规定和要求。

综上所述，重载铁路无线闭塞中心设备的技术特点体现了其在铁路运输系统中的重要地位和作用，同时也反映了其在技术实现上的复杂性和高标准要求。

3 重载铁路 RBC 设备架构设计

3.1 系统组成

设备由 RBC 主机单元和 RBC 维护单元构成：① RBC 主机单元：采用 2 乘 2 取 2 的 SIL4 级安全计算机平台，包含安全网通信插件（连接联锁系统）、调度网通信插件（对接 CTC 系统）、无线网通信插件（基于 LTE-R 网络与车载 LKJ 交互）等模块。② RBC 维护单元：提供人机交互界面，支持日志查询与设备状态监控，通过冗余设计保障可靠性。

3.2 与传统 RBC 的差异

与传统 RBC 的差异见表 2。

表 2 与传统 RBC 的差异

功能项	普速铁路	RBC 重载铁路 RBC
通信网络	GSM-R	LTE-R（带宽更高）
闭塞制式	固定闭塞	可配置固定 / 移动闭塞
车载接口	CTCS-3 级 ATP	LKJ-15（兼容 CTCS-0 级）
调车防护	不支持	新增调车指令下发功能

4 关键技术改进与创新

4.1 车地通信优化

①LTE-R 网络替代 GSM-R：采用 LTE-R 网络实现车地双向连续通信，通信频率提升至每秒 1 次，满足移动闭塞对实时性的要求。②虚拟应答器技术：基于北斗卫星定位生成虚拟应答器，减少轨旁设备部署成本，避免高铁场景中的定位歧义问题。

4.2 灵活闭塞制式配置

①固定闭塞模式：在未完成移动闭塞改造的区段，沿用既有轨道电路划分闭塞分区。②移动闭塞模式：根据前方列车动态位置生成行车许可（MA），最小化追踪间隔。试验数据显示，移动闭塞模式下追踪间隔可缩短至 7.3 分钟，较固定闭塞提升 34%。

4.3 调车安全防护功能

①调车指令下发：RBC 结合联锁系统进路状态，向 LKJ-15 发送调车防护指令，限制调车速度并监控越界风险。②兼容既有操作习惯：临时限速命令格式与 LKJ 原有规范一致，降低司机学习成本。

4.4 虚拟编组列车交权技术

针对多 RBC 管辖场景，设计两种交权模式：①RBC 主导模式：适用于通信质量稳定的长区间，移交 RBC 与接收 RBC 以应答器为界独立管理列车注册与行车许可计算。②车载主导模式：在通信不稳定区间，列车同时连接两个 RBC，自主管理编组授权，减少交权失败风险。

5 工程应用与效果分析

5.1 朔黄铁路应用案例

2019 年，“神华号”机车智能驾驶系统在朔黄铁路开通，其地面子系统采用论文设计的 RBC 设备。主要成效包括：控车率超 90%：系统自动生成行车曲线，司机人工干预率低于 10%。运输能力提升：每日增开 5~6 列万吨重载列车，年货运量增加约 1500 万吨。

5.2 朔黄铁路移动闭塞试验

2023 年，朔黄铁路完成移动闭塞系统改造，关键数据

对比如表 3 所示。

表 3 2023 年朔黄铁路完成移动闭塞系统改造的相关数据

指标	固定闭塞	移动闭塞
追踪间隔（分钟）	11	7.3
日发车量（列）	114	171
维护成本	100%	降低 20%

试验表明，移动闭塞技术使列车技术速度提升 10%，能耗降低 8%。

6 挑战与未来展望

6.1 当前技术瓶颈

①复杂环境适应性：重载铁路线路动态形变（如桥墩基础冲刷）可能影响列车定位精度，需结合轨道状态监测数据优化 RBC 决策逻辑。②虚拟编组协同控制：多列车编组场景下，RBC 需实现高实时性的协同调度算法，目前仍处于试验阶段。

6.2 发展方向

①全自动无人驾驶。结合 ATO 子系统，实现发车、制动、停车全流程自动化，进一步降低司机劳动强度。②智能化维护体系。通过大数据分析预测设备故障，结合 RBC 维护单元的日志功能构建健康管理模型。

7 结论

论文提出的重载铁路专用 RBC 设备，通过通信网络升级、闭塞制式灵活配置、调车防护功能增强等技术创新，显著提升了运输效率与安全性。实际工程应用验证了其技术可行性与经济性，为重载铁路智能化转型提供了核心装备支撑。未来需进一步攻克复杂环境适应性与编组协同控制难题，推动重载铁路向全自动无人驾驶方向发展。

参考文献：

[1] 刘志明,王飞跃,李开成.基于LTE-R的铁路移动闭塞系统设计与验证[J].铁道学报,2020,42(6):89-97.

[2] 神华铁路装备有限责任公司.神朔铁路重载列车智能驾驶系统技术白皮书[R].陕西:神华集团内部技术报告,2019.

[3] 国家铁路局.朔黄铁路移动闭塞系统工程验收报告[R].北京:国家铁路局档案库,2023.

[4] 何华武,钱立新.重载铁路技术创新[M].北京:科学出版社,2019.

[5] 中国铁道科学研究院.重载铁路移动闭塞系统仿真测试平台构建[J].铁道通信信号,2022,58(5):12-18.