重载列车 LTE–R 无线重联车载设备闪红研究

梁延利
国能朔黄铁路发展有限责任公司肃宁分公司 062350

【摘 要】LTE-R无线宽带移动通信网络作为重载列车编组开行的核心系统，承担着机车同步操控、列调通信等关键业务。车载设备闪红预警对列车运行安全有着直接影响，急需展开系统性研究。本文将重载列车LTE-R无线重联车载设备作为研究切入点，详细分析了其工作原理以及闪红预警机制，全面剖析了导致闪红的主要原因，比如基带处理单元故障、射频拉远单元异常、天馈系统故障等。针对不同的故障类型，提出了网络设备预防性维护、天馈系统故障快速定位等创新性处置方案，以此提升重载列车运行安全性以及设备可靠性。

【关键词】LTE-R；无线重联；闪红故障；天馈系统；故障处置

Study on flashing red of LTE-R wireless coupling equipment in heavy-haul train

Liang Yanli
Suning Branch of Guoneng Shuohuang Railway Development Co.，LTD 062350

【Abstract】As the core system for heavy-haul train formations，the LTE-R wireless broadband mobile communication network is responsible for key tasks such as locomotive synchronization control and train dispatch communication.The flashing red warning from on-board equipment has a direct impact on train operation safety and urgently requires systematic research.This paper focuses on the LTE-R wireless interconnection on-board equipment of heavy-haul trains，providing a detailed analysis of its working principles and the flashing red warning mechanism.It comprehensively examines the main causes of the flashing red warnings，such as baseband processing unit failures，RF extension unit anomalies，and antenna feeder system faults.For different types of faults，innovative solutions are proposed，including preventive maintenance of network equipment and rapid fault location in the antenna feeder system，to enhance the operational safety and reliability of heavy-haul trains.

【Key words】LTE-R；wireless reconnection；flash red fault；antenna feeder system；fault disposal

LTE–R 宽带移动通信技术在重载铁路运输里扮演着关键角色，在机车同步操控、可控列尾以及通信等方面占据着不可替代的位置。在国能朔黄铁路等重载运输线路上，无线重联系统达成了列车编组期间的数据传输以及协同控制，然而车载设备频繁出现闪红预警会致使列车运行受到妨碍，影响运量的完成。从技术角度而言，闪红预警牵涉到数据传输设备、机车同步操控设备、网络通信等诸多环节，故障成因颇为复杂，深入剖析无线重联车载设备闪红的机理，构建起系统化的故障预防及处置方案，对于保障重载列车安全且高效地运行有着关键的意义。

一、LTE–R 无线重联车载设备工作原理

（一）设备组成结构

LTE–R 无线重联车载设备借助精密的系统架构达成列车运行期间的数据传输以及同步操控功能，该设备是由无线重联 LTE 数据传输设备也就是 DTE–L 和机车同步操控设备即 OCE 构成其核心架构的，其中集成了电源单元、接口单元、控制单元以及通信单元等关键模块[1]。在实际的应用场景中，每台机车的 A 节跟 B 节都各自独立拥有 OCE 和 DTE–L 设备组，依靠双系统冗余配置来保证运行的可靠性。设备之间凭借 RS422 串口和 M12 以太网接口构建起通信链路，达成设备之间的数据交互以及状态监测，这种模块化的设计思路提高了系统维护的效率，还为性能的优化给予了灵活的空间。

（二）数据传输机制

LTE–R 无线重联系统运用复合式数据传输机制来保障列车运行的安全，此系统在网络接入阶段，依据机车号信息以及节点标识生成十位数字编码的用户名，再结合 SIM 卡的 IMSI 号码来完成身份鉴权工作，该系统借助 IP 地址动态查询技术达成设备间的精准寻址，还构建了信号强度、连接状态以及附着状态监测机制，监测周期为 2 秒[2]。当编组成功后，主从车之间会以 200 毫秒的周期开展数据交互，A 网设备和 B 网设备分别在独立信道上传输控制指令与状态反馈信息，以此保证通信链路稳定且可靠，这样的多层级数据传输架构切实规避了信号干扰以及数据丢失的风险，为列车同步操控提供了稳固的通信基础。

二、闪红预警机制分析

（一）闪红预警触发条件

LTE–R 无线重联车载设备借助精密的安全预警体系来

监控系统状态，当该设备检测到主从车之间的数据中断时长超过 20 秒时，系统会触发闪红预警机制，以此提示机车司机采取相应的安全操作规程，在正常运行状态下，系统会对数据传输质量、网络连接状态以及设备运行参数进行监测。一旦出现网络信号强度衰减、数据包丢失率超标或者设备运行异常等状况，预警机制便会进入准备状态，这种基于多重阈值的预警触发机制，保证了系统对故障有较高的敏感度，还可以有效避免误报和漏报现象的发生，为列车的安全运行提供了保障。

（二）数据交互时序要求

LTE-R 系统针对数据交互的时序控制呈现出严格的技术标准。在列车编组运作期间，该系统借助 200 毫秒的固定周期来达成主从车之间状态信息的采集与传递，并且在网络层面实现 A 网和 B 网的数据流传送，主车发给从车的控制指令以及从车反馈的状态信息要在规定的时间窗口内完成传输确认，超过时间窗口的数据包会被系统判定为无效。这种精准的时序控制机制保证了列车操控指令的及时性，还依靠双网传输提高了系统的容错能力，为列车运行安全打造了可靠的数据交互根基。

（三）安全监测机制

LTE-R 无线重联系统借助全面的安全监测机制来保障列车的运行安全，这一机制在核心层面达成了对网络信号强度、设备运行状态以及数据传输质量的监测工作，同时结合小区信息 LAC 和 CI 等位置参数展开分析，系统每隔 2 秒就会对 LTE 信号强度、连接状态以及附着状态进行检测，依靠数据分析引擎对异常指标进行智能化的判断[3]。一旦监测到网络性能出现下降或者设备运行出现异常，系统会马上触发相应级别的响应，并依靠显示屏向机车司机发出清晰的操作指示，以此保证运行安全以及应急处置的及时性。

三、闪红故障原因分析

（一）LTE-R 无线网络设备故障

1.基带处理单元故障类型

基带处理单元在 LTE-R 无线网络里是核心控制设备，呈现出多种故障特点。在负责信令处理以及资源管理期间，该单元可能出现单板无法使用、GPS 失去锁定以及 CPRI 光功率异常等典型故障，单板出现故障时，其连接的多个射频拉远单元会同时失去控制，致使基站业务承载能力下降。GPS 失锁故障会让时钟同步精度降低，对小区间切换性能产生影响，CPRI 光功率异大多时候常是因为光模块性能变差或者链路损耗超过限度，使得基带处理单元和射频拉远单元之间的通信质量变差，影响整个系统的数据传输可靠性。

2.射频拉远单元故障特征

射频拉远单元于 LTE-R 系统里呈现出独特的故障表现特性，此单元承担着射频信号的上下变频转换以及放大处理工作。在运行期间有可能出现发射功率受限、设备无法使用以及信号质量变差等故障状况，当发射功率受到限制时，射频信号的覆盖范围会明显减小，致使移动终端接收信号的强度降低，设备无法使用的故障会直接致使覆盖区域内的通信中断[4]。相较于基带处理单元的故障，射频拉远单元的故障影响范围相对有限，仅仅影响单个覆盖区域的通信质量，不过其故障特征更容易借助现场测试设备来进行识别与定位。

3.CPRI 通信异常

CPRI 通信链路于基带处理单元以及射频拉远单元之间，肩负着颇为关键的数据传输使命，此链路借助介质传输来传送基带信号以及控制信息，一旦光模块性能有所退化或者光纤链路遭受损害，系统便会呈现出如光衰减过大、光信号失真等之类的状态，要是光功率低于设备接收门限，便会径直致使 CPRI 链路中断，而光信号失真则会造成数据传输误码率上升，对系统性能产生影响。这种通信方面的异常状况，会使基站的业务承载能力下降，还可能引发系统告警以及设备重启，对运行安全带来影响。

（二）天馈系统故障

1.漏缆系统故障特征

在重载铁路隧道通信环境里，漏缆系统呈现出复杂的故障特征谱，此系统因长期处于振动、潮湿等恶劣环境中，容易出现如物理损伤、连接器腐蚀以及进水等问题，引发驻波比升高、传输损耗增大等技术性故障，当漏缆受到外力挤压或者弯曲半径超出规定限值时，其内部结构发生变形会致使射频信号传输性能降低，而连接器处出现失效状况则会引起信号反射提高，导致驻波比异常。这些故障现象大多时候相互叠加，在隧道内形成信号覆盖的空洞区域或者场强剧烈抖动的区域，严重影响无线通信系统的稳定性。

2.天线及连接器件故障

天线以及连接器件在复杂的铁路运行环境里大多时候呈现出多发性故障的特性，此系统长时间暴露于自然环境之中，遭受风雨侵蚀以及温度变化的影响，使得天线方位角出现偏移、下倾角发生变化，致使信号覆盖方向与范围产生改变，当电桥、避雷器等连接器件性能变差时，系统驻波比上升，造成信号反射提高以及传输损耗增大，而防水密封失效会引发器件内部金属接触面腐蚀，让信号传输质量不断下降。这种性能退化过程有渐进性的特点，要借助定期测试与预防性维护来保证系统可靠运行。

3.信号传输异常分析

LTE-R 系统的信号传输异常呈现出复杂的故障链式反应特性，此系统在漏缆出现物理损伤或者天线性能有所退化的状况下，大多时候会引发信号场强衰减、覆盖范围缩小等一系列连锁故障现象，一旦信号传输性能降低，移动终端就会出现频繁的小区切换失败、上下行吞吐率下降等业务质量变差的表现，而覆盖范围的不连续则易于在隧道区域形成信号盲区，致使车载设备与基站的通信中断。这种信号传输异常会对列车运行控制指令的可靠传输产生影响，还会触发车载设备的安全保护机制，造成闪红预警频繁出现。

四、故障处置策略研究

（一）网络设备故障处置方案

1.网管监控策略

U2000 网络管理系统在 LTE-R 设备故障预防里起着核心监控的关键作用，此系统借助实时采集基站运行的状态、性能指标以及告警信息，构建起了设备全生命周期的健康监测体系。在日常监控工作当中，系统针对基带处理单元、射频拉远单元的关键性能指标开展趋势分析，运用大数据算法来预测设备性能的劣化趋势，达成故障预警。当检测出异常指标时，系统会自动生成维护工单，指导维护人员进行针对性地处置，把设备故障修模式转变为状态修模式，切实降低了设备故障率。

2.日常维护优化

LTE-R 系统维护流程借助精细化管理达成了质量的提升，此流程是在传统的设备清洁以及防尘等基础维护工作之上，增添了如 GPS 系统驻波比测试、电压测试等专项检测项目，同时还构建了基带处理单元与射频拉远单元的定期备件轮换机制，借助对备换下的设备单板开展本地性能测试，可及时察觉到潜在的故障隐患，而 CPRI 光功率定期测试则切实有效地预防了光模块性能劣化所引发的通信故障[5]。同时，系统通过定期开展设备性能评估报告分析，建立设备健康档案，结合历史故障数据制定针对性地预防措施。并实现了维护工作的标准化和可追溯性。这样一种有多层次的维护优化策略提升了设备运行的可靠性，为列车安全运行给予了坚实的技术保障。

3.设备性能测试方法

LTE-R 系统测试方法构建起了一套完整的技术评估体系，此方法借助光功率计精确测量 CPRI 链路的收发光功率，同时运用 OTDR 设备剖析链路特性指标，可准确评估基带处理单元与射频拉远单元之间的通信质量。在单板测试环节，系统运用专业测试仪表对基带信号处理能力、射频发射功率以及信号调制精度等关键参数展开评估，针对可疑单板，凭借本地环路测试深入分析其功能模块的工作状态。这种多维度的测试方法提高了诊断的准确性以及维护效率。

（二）天馈系统故障处置方案

1.天线和漏缆检测方法

天馈系统检测流程针对故障预防构建了一套较为系统的技术方案，此流程借助巡检方式，对缆线外观、固定支架以及密封状况展开细致检查，运用专业测量仪器针对天线方位角、下倾角等工程参数给予定期测量与校准，在恶劣天气过后，检测人员需要马上开展应急巡检，着重排查缆线物理损伤、天线偏转等异常情形，对于隧道内的缆线系统，则着重检测连接器的防水性能以及缆线槽道的堵塞情况。这种有多个层级的检测方案凭借预防性维护，切实降低了设备故障率，保证了通信系统的稳定运行。

2.驻波比测试策略

天馈系统驻波比测试策略构建起一套高效的故障定位方法体系，此策略借助 U2000 网管系统来对全网设备的驻波比实施实时监测以及趋势分析，可迅速识别出驻波比出现异常或者接近告警阈值的站点。针对所发现的异常站点，维护人员会运用 SITEMASTER 等专业测试仪器前往现场开展测量工作，借助频谱分析来确定故障点的精确位置，在隧道漏缆系统当中，会着重关注各个连接器处的驻波比变化趋势，及时察觉因防水失效而引发的阻抗匹配问题。这样的分层测试策略较大提高了故障定位的效率，切实缩短了设备故障修复所需的时间。

3.网络优化测试应用

LTE-R 网络优化测试系统于天馈故障诊断方面呈现出独特的技术优势，此系统借助专业测试终端顺着线路开展信号覆盖测试，精准采集信号强度、信噪比以及误码率等关键性能指标，构建起完整的网络覆盖质量评估体系。在隧道区域，测试终端着重留意信号场强分布特征与切换性能指标，借助数据分析迅速辨认出覆盖盲区以及性能劣化区域，针对开阔地带，重点评估小区间重叠覆盖度以及切换参数优化效果。这种依据实测数据的网络优化方式为天馈系统故障定位给予了有力的技术支持。

结束语

结束语：LTE-R 无线重联车载设备闪红故障有多发、关联且复杂的特点，解决此问题要从网络设备到天馈系统构建全面监测与维护体系，随着重载铁路运输需求不断增加，保证无线重联系统稳定运行对提高运输效率和安全性意义重大。未来要强化基于大数据分析的智能化故障预测、精准故障定位及快速故障处置能力建设，构建设备全生命周期的健康管理体系。如此能有效降低闪红故障发生率，提升设备可靠性，为重载列车安全运行提供有力技术保障。

参考文献

[1]沈红海.20000 t 重载列车 LTE 无线同步控制系统脱网故障原因分析及改进措施[J].科技创新与应用，2023，13（11）：144-147.
[2]张淑炳.重载列车 LTE-R 无线重联车载设备闪红浅析[J].设备管理与维修，2023，（04）：38-39.
[3]梁建东.基于 LTE 网络的机车重联闪红问题分析[J].设备管理与维修，2022，（04）：61-63.
[4]陈波.ZPW-2000A 轨道电路改方过程闪红光带原因分析及对策[J].铁路通信信号工程技术，2021，18（S1）：52-55.
[5]张洁.两万吨重载列车 LTE 无线同步控制系统故障原因分析及改进措施[J].科技创新与应用，2019，（11）：11-14.
作者简介：梁延利（1981.6）女，河南汝州人，本科，铁路通信工。