

光纤通信技术在铁路通信系统中的应用

郭智宇

国能朔黄铁路发展有限公司原平分公司 034100

【摘要】当前,我国铁路运输逐渐向智能化趋势发展,铁路通信系统作为其中的重要组成部分,也面临迫切的变革需求。尤其现阶段,铁路列车运输过程涉及众多数据交换与度指令跨区域传输情况,导致传统GSM-R、数字调度等通信技术在运行中存在的问题逐渐凸显,不仅无法保证传输效率,还难以适应新环境。而光纤通信技术的应用,为铁路通信系统优化升级奠定了良好基础,既能规避电磁干扰,又可以增强数据信息传输能力。所以,本文将结合实践,光纤通信技术在铁路通信系统中的应用,旨在为筑牢铁路运输安全防线提供技术保障。

【关键词】光纤通信技术;铁路;通信系统

Application of optical fiber communication technology in railway communication system

Guo Zhiyu

Guoneng Shuohuang Railway Development Co., LTD. Yuanping Branch 034100

【Abstract】Currently, China's railway transportation is gradually moving towards intelligent development. As an essential component, the railway communication system also faces urgent needs for transformation. Especially at this stage, the railway train transportation process involves extensive data exchange and cross-regional transmission of commands, leading to issues with traditional GSM-R and digital dispatching communication technologies becoming increasingly prominent. These technologies not only fail to ensure transmission efficiency but also struggle to adapt to new environments. The application of optical fiber communication technology lays a solid foundation for optimizing and upgrading the railway communication system. It can avoid electromagnetic interference and enhance data transmission capabilities. Therefore, this paper will combine practical experience to explore the application of optical fiber communication technology in railway communication systems, aiming to provide technical support for strengthening the safety defense of railway transportation.

【Key words】optical fiber communication technology; railway; communication system

引言:

结合我国铁路发展进程可以看出,通信技术的更新换代在促进行业持续进步方面发挥重要作用。当下,物联网在铁路运输领域广泛应用,真正实现了智能化调度和全过程管控。这一形势下,传统铁路通信模式存在的问题逐渐凸显,想要突破发展瓶颈就要向智能化、高效化趋势转型。而光纤通信技术的诞生,凭借光信号在石英纤维中的高速传输特性,弥补了铁路运输传统通信系统宽带不足、信号干扰等不足之处,通过重构信息传递逻辑,有效提高了铁路通信效率。所以,本文对光纤通信技术在铁路通信系统中的应用展开分析,希望为更多人研究贡献一己之力。

一、光纤通信技术的原理及特点

(一) 原理

光纤通信技术以光为信息载体,通过发送端电光转换、光纤传输、接收端光电转换三个核心环节实现信息传递。以发送端半导体激光器和发光二极管作为核心器件,分别利用受激辐射和自发辐射机制,将携带信息的电信号转化为光信

号。其中,半导体激光器产生的光信号具有高相干性、窄谱线的特性,而发光二极管输出的光信号则发散性较强,二者联合使用能够显著提高信号转换效率。光耦合器在运行中通过精密的光学对准与耦合技术将光信号高效注入光纤,确保信号以最小损耗进入传输通道^[1]。光信号在光纤中的传输依赖纤芯与包层的折射率差异,基于全反射原理实现长距离传输。由于纤芯折射率高于包层,光信号在包层处不断发生全反射,并沿着光纤轴向前进,加之石英材质的低损耗特性,在1.55 μm波长窗口下,传输产生的损耗仅为0.2dB/km,所以光信号无需频繁中继即可传输上百公里。在接收端,光探测器基于内光电效应,将光信号转换为电信号。当光照射到PN结时,激发产生电子-空穴对,在电场作用下形成光电流。但转换后的电信号微弱且存在畸变,需经过前置放大、滤波、整形等处理,最终还原出原始信息数据,完整实现信息从发送端到接收端的传递过程。

(二) 特点

光纤通信技术凭借其容量大、抗电磁干扰能力强、远距离传输等性能优势,为铁路通信系统的升级提供了关键技术支撑。其单根光纤具备数十兆赫兹的理论传输带宽,可同时承载数十万路高清语音通话或实现百Gbps级的数据传输,能够高效满足铁路多源异构数据的并发传输需求。无论是列

车运行状态实时回传、调度指令交互,还是高清视频监控画面传输,都能实现无阻塞、低延迟的信息传递。在传输损耗方面,光纤在 $1.55\ \mu\text{m}$ 波长窗口下损耗可以降低到 0.2dB/km ,相比传统电缆呈现数量级优势,不仅减少了铁路沿线中继站的部署,降低建设运维成本,更能保障长距离通信的稳定性^[2]。光纤作为绝缘介质,在运行中不受电磁干扰影响,在铁路复杂电磁环境中,能确保列车控制信号等关键信息的精准传输,能有效规避安全隐患。其将全反射传输机制与光加密技术结合,形成双重保密体系,有效防止敏感信息泄露。此外,光纤直径仅几十微米,重量轻、柔韧性强,在铁路隧道、车厢等空间受限场景中便于灵活布设,能够减少资源消耗,极大提升了铁路通信系统建设的效率与灵活性。

二、铁路通信系统的特点及需求

(一) 重载铁路通信的特点

重载铁路通信特点显著。其沿线环境复杂多变,涵盖山地荒漠等特殊地貌,长期经受风沙雨雪、极温差异及强烈电磁干扰。超长线路与稀疏站点加剧网络覆盖困境,传统人工检修效率低下且故障排查缓慢。此外,海量的列车运行数据、调度信息需即时传输,这要求通信系统必须具备高稳定性、低延时、强抗扰性和智能化运维功能。

第一,在环境层面:线路常绵延超千公里,穿越高山峡谷、荒漠戈壁等复杂地貌,密集的隧道群犹如天然的信号屏蔽器,致使信号严重衰减;而高架桥与山区路段则极易受强风、暴雪、暴雨等极端天气影响,通信杆塔倒塌、线缆断裂等事件频发。所以,重载列车对通信系统的环境适应能力与极端情况下的持续运行能力要求极高。

第二,在网络覆盖需求及传统检修的弊端等方:为了保障重载列车安全高效运行,铁路沿线需部署覆盖范围较广的通信设备网络^[3]。从基站、中继器到传输线缆,再到车载通信终端,各类设备数量繁多且分布在数百公里的线路上。传统人工巡检维护模式因设备间距大、交通不便导致效率低下,迫切需要借助物联网、大数据等前沿技术构建远程智能运维体系,实现设备状态的实时监测与故障的快速响应。

第三,在数据传输层面:重载铁路通信系统承载着多维度、多类型的业务需求。关乎行车安全的调度指令、运行控制信号必须以零误差、低延迟的标准传输;同时,高清视频监控、列车健康监测、车载服务信息发布等业务也对通信系统提出了更高要求。尤其是万吨级重载列车,其数十节车厢的制动压力、牵引功率等运行参数需实时采集回传,并且这些运行参数对传输速率、延迟和可靠性的要求差异显著,致使重载铁路对通信系统的数据处理、传输性能及资源调度能力要求极高。

(二) 重载铁路通信质量及可靠性需求

重载铁路作为国家能源运输的主要渠道,承载着巨量物资的跨区域输送,其通信系统的性能直接关乎运输安全与效率。

第一,可靠性与稳定性需求:由于列车编组庞大、载重常达万吨以上,通信故障极易引发连锁反应,甚至造成重大安全事故,因此重载列车对通信系统可靠性与稳定性等方面的要求极为严苛。为确保重载铁路通信系统稳定运行,要构建主备协同的高可靠架构体系。通过部署双系统并行运行与冗余备份机制,结合智能故障监测模块,实现故障瞬间的自动无缝切换;同时建立常态化压力测试与应急演练机制,模拟极端场景下的系统响应,持续优化性能,保障核心设备运行可靠。

第二,应对恶劣环境保护需求:针对山区雷暴、强风及洪涝等自然灾害,为应对重载铁路复杂环境挑战,搭建光纤与无线融合的双链路通信体系,借助卫星通信网络、4G/5G 公共通信网络形成多维度冗余保障。同时,对通信设备进行全方位防护升级,配备专业防雷装置、密闭防水外壳及高强度防风固定组件,从而在各类极端工况下,都能稳定传输信号。

第三,数据、参数低延迟与高实时性传输需求:在数据传输层面,列车运行控制指令的低延迟与高实时性传输是安全运行的关键。制动、速度调节等指令必须在毫秒级时间内完成传递,否则将因列车响应滞后引发追尾、脱轨等事故;同时,轮轴温度、制动压力等列车状态监测数据也需实时回传,以便及时排查设备隐患。

第四,抗干扰需求:重载铁路沿线牵引供电系统产生的强电磁辐射,以及周边通信设备的信号串扰,严重威胁信号传输质量,要求通信系统具备强大的抗干扰能力,通过电磁屏蔽、滤波等技术确保信号稳定。

第五,保密需求:鉴于列车运行控制数据、调度计划等信息涉及运输安全核心,还需采用先进加密算法与防护机制,对数据进行全流程加密,防止信息泄露或篡改,从而全方位筑牢铁路运输的安全防线。

三、光纤通信技术在重载铁路通信系统中的实际应用

(一) 重载列车控制系统通信

在重载铁路列车控制系统中,光纤通信技术凭借低延迟、高可靠、强抗干扰以及超大带宽的综合优势,成为保障列车安全高效运行的核心支撑。重载列车运行时,其即时速度、精确位置等关键信息,以及调度中心发出的制动、调速指令,均可通过光纤网络实现毫秒级传输^[4]。例如,在列车驶入长大下坡路段前,列控系统能借助光纤通信的高速特性迅速传递制动指令,确保列车及时降速,有效规避因信号延迟导致的超速风险。同时,面对牵引供电系统产生的强电磁干扰,光纤通信的抗干扰能力可保障列控信号精准传输,避免失真误码。此外,列车上牵引、制动、轴温监测等众多车载设备产生的海量运行参数,如电机电流、制动压力、轴承温度等,也能通过光纤通信网络快速稳定回传至地面控制中心。便于地面技术人员实时掌握列车设备健康状态,通过监测数据波动提前发现潜在故障,实现预防性维护,全面提升重载铁路运输的可靠性与效率。

（二）调度通信

重载铁路作为国家大宗商品运输的主要途径,线路蜿蜒延伸数千公里,跨越不同地域与行政辖区,沿途车站数量较多且分布零散,这种超长跨度与复杂布局使调度管理成为极具挑战性的系统工程。光纤通信技术打造的全域互联网络,将分散各地的调度中心、站点紧密串联,实现数据毫秒级低延迟、高可靠传输。调度人员依托该网络可实时追踪列车运行坐标,动态掌握货物装卸流程,便于精准协调各区域运输资源,实现跨地域高效联动调度。当某路段列车遭遇设备故障或突发状况导致晚点时,光纤通信的极速传输能力即刻发挥作用,瞬间将故障详情同步至关联调度中心。各中心据此快速协同调整列车运行图,灵活变更车次停靠站点、优化行车速度,有效避免列车大面积积压,确保运输链条顺畅运转。在应对山体滑坡阻断线路、列车脱轨等极端事件时,光纤通信系统凭借预先部署的冗余链路与不间断电源系统,切实保障指挥指令、现场高清影像等关键信息快速穿透灾害干扰直达救援一线。指挥人员通过实时回传的高清画面能够精准指挥救援力量调配,科学规划抢险方案,争分夺秒减少事故损失,加速铁路运输秩序恢复。

（三）视频监控通信

面对重载铁路复杂多样的运行环境,光纤通信以其优异的超大带宽和低损耗性能,打造出全方位、无死角的高清视频监控网络,覆盖铁路沿线及列车车厢内部。在桥梁、隧道、车站等关键节点,高清摄像头能够24小时不间断地捕捉列车运行画面、设备实时状态。凭借光纤网络的强大传输能力,这些高分辨率视频能够以近乎无损的状态快速抵达监控中心^[5]。尤其在长隧道场景中,合理布置摄像头能从多个角度监测列车运行姿态和隧道内设施情况,监控人员通过清晰稳定的画面,可第一时间察觉轨道异物、设备异常等潜在威胁,并立即启动应急处理流程。随着重载铁路功能日益多元化,车载视频监控系统的的重要性愈发凸显。在进行客运化改造的重载列车上,监控设备既要关注乘客活动,又要保障货物装载安全;纯货运列车则着重监控货物在运输途中的状态变化。车厢内产生的大量视频数据,通过车载光纤网络高效整合,并在列车停靠站点时迅速上传至地面服务器。管理人员可以随时调取相关视频资料,对货物移位、车厢内突发状况等事件进行详细复盘,准确找出问题源头并及时解决,不仅有效维护了运输秩序、保障了货物安全,还为优化运输管理

策略提供了宝贵的数据支持,为重载铁路的安全高效运营构筑起坚实的可视化保障体系。

（四）通信系统内部数据传输

重载铁路通信系统的高效运转,离不开光纤通信技术在网络架构中的全方位深度应用,其已然成为保障通信稳定与流畅的核心力量。分布于铁路沿线的通信基站,借助光纤搭建的高速通道,与核心网形成稳固连接,将列车运行期间产生的海量无线调度指令、车载终端数据等信息,快速且精准地传送至核心网进行处理。光纤通信凭借超大带宽优势,在运行过程中即便面对列车密集运行时爆发式增长的数据流量,也能确保每秒数G甚至更高量级的数据实现无阻碍传输,使调度指令及时传达、车载数据完整回传。同时,其出色的稳定性特质,保障了无线通信网络在穿山越岭、跨江过河等复杂环境下,始终保持信号强度与覆盖范围的稳定,实现列车与调度中心、列车之间语音通话与数据传输的不间断、无延迟。在通信系统内部,光纤将光传输设备、交换机、电源模块等关键设备紧密串联,构建起智能化的设备监测与管理体系。网管系统通过光纤链路,能够实时、精准地采集各类设备运行参数,无论是光模块温度细微变化、交换机电压波动,还是设备运行状态切换,都能被及时捕捉并动态监测。一旦设备出现信号衰减异常、电压骤降等故障,告警信息会以极快的速度沿光纤链路传输至网管中心,继而为技术人员提供精确的故障定位依据,使其能够迅速采取远程修复或现场维护等措施,从而有效保障通信系统稳定运行,为铁路运输通信构建起坚实可靠的底层支撑。

结束语:

综上所述,从列车控制系统的毫秒级指令传输,到跨区域调度的实时协同;从全线路高清监控的稳定画面传输,到通信设备间的智能数据交互,光纤通信技术已成为重载铁路通信系统的核心支柱。其卓越的带宽性能、极低的信号衰减以及强大的抗干扰能力,不仅确保了铁路运输的安全与高效,更为智慧铁路建设提供了有力支撑。面向未来,随着技术的不断突破,光纤通信将以更智能、更可靠的姿态,推动铁路运输迈向新的发展阶段。

参考文献

- [1]呼元.光纤通信技术在铁路通信系统中的应用[J].数字通信世界,2024(8):130-132.
 - [2]胡明.光纤通信技术在铁路通信系统中的应用探讨[J].通信电源技术,2022,39(9):87-89.
 - [3]张文超,祝绘青,李丽萍.光纤通信技术在铁路通信系统中的应用探究[J].中国设备工程,2022(15):220-222.
 - [4]殷立军.光纤通信技术在铁路通信系统中的应用[J].工程研究与实用,2023,4(10).
 - [5]刁伟聪.光纤通信技术在铁路通信系统中的应用[J].电脑采购,2023(41):59-61.
- 作者简介:郭智宇(1999.02-)男,山西朔州人,本科,助理工程师,研究方向:铁路通信专业。