

2000A 轨道电路 50Hz 工频干扰产生原因及解决方法

李 攀

通号工程局集团有限公司北京分公司 北京 100070

摘 要: ZPW-2000A轨道电路是铁路信号关键设备,但易受50Hz工频干扰。本文先阐述其与干扰的核心理论,包括概念、工作原理、传播路径与机制;接着分析干扰产生原因,涉及电源耦合、电磁感应等多方面;随后构建解决方法体系,涵盖源头抑制、过程阻断、终端优化和运维强化。通过多维度研究,为降低50Hz工频干扰对轨道电路的影响,保障铁路行车安全提供理论依据与解决策略。

关键词: ZPW-2000A轨道电路; 50Hz工频干扰; 牵引回流平衡; 电磁兼容; 动态监测

引言:在铁路运输蓬勃发展的当下,ZPW-2000A轨道电路作为保障行车安全的关键设备,其稳定运行至关重要。然而,50Hz工频干扰却如影随形,凭借频率固定、传播范围广等特性,通过多种路径侵入轨道电路,致使信号畸变、信噪比下降,严重威胁铁路行车安全。深入剖析其产生原因并探寻有效的解决方法,已成为当前铁路信号领域亟待解决的重要课题。

1 2000A轨道电路与50Hz工频干扰核心理论基础

1.1 核心概念界定

2000 A轨道电路是铁路信号系统中用于实现列车占用检测、区间闭塞及信号联锁的关键设备,以数字编码方式传输信号,具备高可靠性和抗干扰潜力,广泛应用于客运专线及高速铁路。50Hz工频干扰是指电力系统中50Hz基波及其谐波成分通过多种路径侵入轨道电路系统,导致信号畸变、信噪比下降的电磁干扰类型。该干扰属于稳态干扰,具有频率固定、传播范围广、耦合强度与电力负荷相关的特征^[1]。核心概念界定明确了研究对象的技术属性与干扰本质,为后续分析干扰作用机制、制定防控策略提供统一的理论认知基础,是开展相关技术研究的前提条件。

1.2 2000A轨道电路工作原理与抗干扰需求

2000A轨道电路通过发送设备向轨道传输特定频率的数字编码信号,经轨道传输后由接收设备接收并解码,根据信号幅值、相位等参数判断轨道是否被占用。其工作流程中,轨道作为信号传输介质直接暴露于复杂电磁环境,信号传输功率较低,易受外部干扰影响。抗干扰需求主要体现在三个方面:一是保证信号在干扰环境下的传输完整性,避免编码错误;二是确保接收设备能准确区分有用信号与干扰信号,防止误判;三是维持系统在不同干扰强度下的稳定运行,不出现频繁故障或停机,这对铁路行车安全至关重要。

1.3 50Hz工频干扰的传播路径与作用机制

50Hz工频干扰主要通过三种路径传播:一是电源耦合路径,通过轨道电路供电系统与电力系统的共网连接,干扰信号经电源线路侵入设备内部;二是电磁感应路径,电力线路与轨道之间形成互感回路,电力电流产生的交变磁场在轨道中感应出干扰电压;三是接地回路耦合路径,不同设备接地电阻差异导致接地电位不同,形成地电位差干扰。作用机制表现为:干扰信号与轨道电路有用信号在传输介质中叠加,导致接收端信号幅值波动、相位偏移;侵入设备内部的干扰会干扰电路中放大、滤波等模块的正常工作,降低信号处理精度;持续高强度干扰还可能导致设备元器件发热、老化,缩短使用寿命,甚至引发电路故障。

2 2000A轨道电路50Hz工频干扰产生原因分析

2.1 电源系统耦合:干扰引入的首要路径

电源系统耦合是50Hz工频干扰引入的首要路径,主要源于轨道电路供电系统与电力系统的电气连接。轨道电路发送、接收等设备的供电多取自铁路沿线电力配电网,该网络同时为牵引供电、车站动力等大功率设备供电。当大功率设备启动、负载变化或出现故障时,会导致供电电压波动、产生谐波成分,这些干扰通过电源线传导至轨道电路设备。此外,供电线路的共模干扰和差模干扰也会通过电源变压器、滤波电容等元件耦合到轨道电路内部。尤其是在电源线路敷设过程中,若与高压电力线路平行敷设距离过近、无有效屏蔽措施,会进一步增强耦合强度,使干扰信号直接影响轨道电路的信号生成与处理过程。

2.2 电磁感应:轨道回路的干扰叠加

电磁感应是轨道回路干扰叠加的主要原因,基于电磁感应定律,铁路沿线的高压输电线路、牵引接触网等电力导体中的50Hz电流会产生交变磁场。轨道作为金属

导体形成的闭合回路,恰好处于该交变磁场中,会在轨道回路中感应出50Hz感应电动势。感应电动势的大小与电力导体电流强度、轨道与电力导体的平行长度、间距及空间布置方式相关,平行长度越长、间距越近,感应电动势越大。这些感应电动势与轨道电路的有用信号叠加后,会改变接收端的信号幅值和相位关系,当感应电动势强度较大时,会导致接收设备误判轨道状态。此外,轨道接头处的接触电阻变化会加剧干扰的不均匀分布,使局部区段干扰问题更为突出^[2]。

2.3 接地系统缺陷:干扰泄放的关键障碍

接地系统缺陷是干扰泄放的关键障碍,完善的接地系统可将侵入的工频干扰通过接地极快速泄放至大地,降低干扰影响。接地系统缺陷主要表现为三个方面:一是接地电阻超标,由于施工时接地极埋深不足、土壤电阻率过高或接地极腐蚀老化,导致接地电阻大于设计值,干扰电流无法有效泄放;二是接地系统存在单点接地、多点接地混乱等问题,形成接地环路,反而引入新的干扰;三是设备接地端子与接地网连接不牢固、接触电阻过大,干扰信号在传输至接地网过程中受阻。这些缺陷使轨道电路设备外壳、信号回路中的干扰无法及时排出,积累后侵入信号处理模块,影响系统正常工作,同时还会增加设备遭受雷击等过电压损坏的风险。

2.4 设备自身特性:抗干扰能力的内在局限

设备自身的特性在很大程度上决定了其抗干扰能力的内在局限。对于2000A轨道电路而言,其发送、接收、解码等核心模块的电路设计,直接关乎着整个系统的抗干扰性能。在部分早期生产的设备中,电源滤波电路的设计较为简单,仅仅采用了单级电容滤波的方式。这种方式对于一些简单的干扰或许能起到一定作用,但对于50Hz工频及其谐波干扰却显得力不从心,无法有效将其滤除。信号放大模块的输入阻抗设计若不合理,就如同给干扰信号打开了一扇方便之门,使其更容易被接收进来。解码模块的阈值电压调节范围狭窄,当干扰致使信号幅值出现波动时,就极易出现解码错误的情况。此外,设备元器件的性能差异也不容忽视。滤波电容容值发生漂移、晶体管噪声系数超标等,都会像一颗颗“定时炸弹”,降低设备对工频干扰的抑制能力。虽然新型设备在设计上进行了诸多优化,但受成本、体积等现实因素的限制,其抗干扰性能仍然存在一定的上限,难以做到尽善尽美。

2.5 施工与运维疏漏:干扰防控的人为隐患

施工与运维过程中的疏漏,是干扰防控中不容忽视的人为隐患。在施工阶段,存在诸多可能引发干扰的问

题。轨道敷设时,若未按规范设置绝缘节,轨道回路就会与其他金属结构连通,这无疑为干扰信号开辟了更多的耦合路径,使得干扰更容易侵入轨道电路。电缆敷设过程中,若未采取有效的屏蔽措施,或者屏蔽层接地不规范,就无法有效阻挡电磁感应干扰,让干扰信号有机可乘。设备安装时,接地端子连接不牢固,就如同埋下了一颗隐患的种子,为后续接地缺陷的出现埋下了伏笔。在运维阶段,同样存在不少问题。未定期对电源线路、接地系统进行检测,线路老化、接地电阻超标等问题就无法及时发现,导致干扰问题逐渐积累。设备检修时,若未对滤波元件、绝缘部件等关键部件进行检查更换,设备的抗干扰能力就会逐渐下降。

2.6 外部环境变化:干扰场景的动态新增

外部环境的变化犹如一个“变数因子”,会导致干扰场景动态新增。铁路沿线的电力设施、交通状况等环境因素的变化,都可能引入新的工频干扰。随着铁路运量的不断增加,牵引供电系统的负荷也日益增大,牵引电流的波动幅度和频率也随之增加。这使得通过电磁感应和电源耦合产生的干扰强度不断提升,给轨道电路带来了更大的挑战。沿线新建的高压输电线路、变电站等电力设施,让轨道电路所处的电磁环境变得更加复杂^[3]。新增的50Hz工频磁场会在轨道回路中感应出干扰电压,干扰信号无处不在。城市轨道交通、公路等邻近工程施工时,临时供电线路若敷设靠近轨道电路,就会形成一个临时的干扰源,对轨道电路产生干扰。

3 2000A轨道电路50Hz工频干扰的解决方法体系构建

3.1 源头抑制:切断干扰产生与输出路径

源头抑制是控制干扰的重要手段,其核心在于切断干扰产生与输出的路径,针对干扰源采取有效的管控措施。在电源系统方面,为避免共网耦合带来的干扰,采用独立供电模式,将轨道电路供电系统与牵引供电、动力供电系统完全分离。同时,在电源输出端安装高精度稳压器和多级滤波装置,这些装置能够精准地滤除供电网络中的50Hz工频及其谐波干扰,确保电源输出的稳定性。对于牵引系统干扰,优化牵引变压器接线方式,可有效减少不平衡电流产生的干扰。在牵引接触网关键区段安装滤波装置,可降低牵引电流中的工频谐波成分。对于沿线新增电力设施,严格开展干扰评估工作,要求其安装干扰抑制装置,如高压线路安装屏蔽线,可减少电磁辐射干扰;变电站设置接地网,能将干扰电流引入大地。通过对干扰源的精准管控,从根本上减少干扰信号的产生和输出,从而降低干扰对轨道电路的影响,保障轨道电路的正常运行。

3.2 过程阻断：抑制干扰的传播与耦合

过程阻断主要通过抑制干扰的传播与耦合来阻断干扰路径，重点强化传输环节的屏蔽和隔离。在电缆敷设方面，采用铠装屏蔽电缆传输轨道电路信号，屏蔽层两端可靠接地，形成完整的屏蔽回路，能有效阻挡电磁感应干扰。当电缆与高压电力线路平行敷设时，需严格控制平行长度和间距，若超出规范要求，则采取交叉敷设或设置隔离屏障的方式，减少干扰耦合。在轨道回路设计上，增加绝缘节数量，缩短轨道回路长度，可降低感应干扰的积累。在轨道接头处采用镀锡铜编织线进行等电位连接，能减少接触电阻，避免干扰集中。在设备与电缆连接端安装信号隔离器，通过光电隔离方式阻断干扰信号的传导，防止干扰从电缆侵入设备内部。这些措施可有效降低干扰传播效率，保障轨道电路信号传输的稳定性和可靠性。

3.3 终端优化：提升轨道电路抗干扰能力

终端优化旨在通过提升轨道电路自身抗干扰能力来抵御干扰，主要从设备升级和参数调整两方面入手。对于老旧设备，进行针对性改造或更换，采用具备宽范围电源滤波、高输入阻抗放大模块的新型设备，这些新型设备能够有效增强对干扰的抑制能力。同时，在设备内部增加工频陷波电路，专门滤除50Hz工频干扰信号，减少其对设备的影响。对于现有设备，优化信号处理参数，扩大解码模块的阈值电压调节范围，使设备能适应不同干扰强度下的信号变化。调整发送设备的信号幅值，提高有用信号与干扰信号的信噪比，确保接收设备能准确识别有用信号。另外，对设备外壳进行强化接地，将侵入的干扰信号通过外壳快速泄放，减少干扰对内部电路的影响。通过这些措施，全面提升终端设备的抗干扰性能，保障轨道电路在复杂干扰环境下的稳定运行。

3.4 运维强化：建立全流程干扰防控机制

运维强化通过建立全流程干扰防控机制来保障系统稳定，构建了“施工验收—日常监测—定期检修—应急

处置”的全流程管理体系。在施工验收阶段，严格执行接地电阻、绝缘性能等关键指标的检测，对于不合格的工程坚决不予验收，确保系统建设初期就具备良好的抗干扰基础。在日常监测中，安装干扰监测装置，实时采集轨道电路的信号参数和干扰强度，并建立干扰数据库，实现干扰的动态监控，及时发现潜在的干扰问题^[4]。定期检修时，重点检查电源滤波元件、接地系统、屏蔽电缆等关键部件，及时更换老化、性能下降的元件，确保接地电阻符合要求，保证系统始终处于良好的运行状态。建立应急处置预案，当发生严重干扰导致系统故障时，能快速定位干扰源并采取临时屏蔽、设备切换等措施恢复系统运行。同时，定期开展应急演练，提升运维人员的处置能力，确保在面对突发干扰情况时能够迅速、有效地进行应对，保障轨道电路系统的稳定运行。

结束语

ZPW-2000A轨道电路面临的50Hz工频干扰问题复杂多样，其产生原因涉及电源、电磁、接地、设备、施工运维及外部环境等多个层面。本文构建的解决方法体系，从源头、过程、终端及运维四个维度综合施策，能有效降低干扰影响。未来，随着铁路技术发展，需持续优化防控策略，加强动态监测与智能管理，进一步提升轨道电路抗干扰能力，为铁路安全高效运行提供坚实保障。

参考文献

- [1]丁昀, 郭芝权, 伍妍蝶, 等. 车载轨道电路补偿电容故障诊断装置设计[J]. 铁道科学与工程学报, 2025, 22(9): 4172-4181.
- [2]司静. 50Hz牵引回流干扰问题的研究与分析[J]. 铁路通信信号工程技术, 2021, 18(02): 93-98.
- [3]刘博. 50Hz相敏轨道电路在直流牵引矿山铁路车站的应用[J]. 价值工程, 2025, 44(04): 127-129.
- [4]邱峰, 张坤, 曾凡飞, 等. 城市轨道交通车辆应急启动电路改进及控制方法优化方案[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(12): 229-233.