

电气化铁路常见牵引供电故障分析及应对措施

任 隳

国家能源集团新朔铁路有限责任公司供电分公司 内蒙古鄂尔多斯 010300

摘 要：电气化铁路作为现代轨道交通的核心，其牵引供电系统的稳定性直接关系到列车运行安全与效率。本文聚焦牵引供电系统常见故障类型，系统分析接触网断线、变电所设备过载、回流系统接地异常及气候因素等典型故障的物理机制与技术诱因，并提出涵盖快速隔离故障区段、临时供电方案实施、抢修队伍响应管理及恢复供电标准化作业的应急处理流程，为提升电气化铁路供电可靠性提供理论支撑与实践指导。

关键词：电气化铁路；牵引供电故障；应对措施

引言

电气化铁路凭借其高效、环保的优势，已成为现代轨道交通的主流形式。牵引供电系统作为电气化铁路的“心脏”，其稳定运行对保障列车准点率、提升运输效率具有决定性作用。然而，受设备老化、环境因素及操作管理等多重影响，牵引供电系统故障频发，轻则导致列车晚点，重则引发安全事故。因此，深入剖析常见故障类型，明确其物理机制与技术诱因，并构建科学系统的应急处理体系，对提升电气化铁路供电可靠性、保障运输安全具有重要现实意义。

一、电气化铁路牵引供电系统概述

以电力为主要牵引动能的电气化铁路与传统的以化石燃料燃烧提供动能的铁路相比，具有运行效率高、安全可靠等优势。而电力机车起步、制动、平稳运行等行进功能的实现均依赖沿铁路线建设的牵引供电系统。牵引供电系统在电气化铁路运营过程中起到的作用包括为机车的正常运行提供充足的电能，使机车受到牵引力运行起来，并能够完成制动操作、满足照明需求。在电气化铁路运维过程中，保障牵引供电系统的正常运行是保障列车行进效率和行进安全的核心工作内容。牵引供电系统主要由牵引变电所和接触网两大部分构成。牵引变电所负责将电力系统输送来的高压电转换为适合电力机车使用的低压电，并通过接触网将电能传输给电力机车。接触网作为牵引供电系统与电力机车之间的电能传输桥梁，其稳定性和可靠性直接关系到电力机车的正常运行。此外，回流系统也是牵引供电系统中不可或缺的一部分，它负责将电力机车使用后的电流安全回流至牵引变电所，确保整个供电系统的闭合运行。在实际运营中，牵引供

电系统还面临着诸多挑战，如设备老化、环境因素影响、操作管理不当等，这些都可能引发供电故障，对电气化铁路的运营安全造成威胁

一旦供电故障发生，不仅会导致列车运行中断，影响运输效率，还可能因列车失去动力或制动失效而引发严重的安全事故。例如，接触网断线可能导致列车受电弓受损，甚至引发火灾；牵引变电所设备故障可能使整个区段的列车失去电力供应，造成大面积晚点或停运；回流系统接地不良则可能引发轨道电位升高，对人员和设备安全构成威胁。因此，深入分析牵引供电系统的常见故障类型及其成因，并制定相应的应对措施，对于保障电气化铁路的运营安全具有重要意义^[1]。

二、常见牵引供电故障类型及成因

（一）接触网断线、打火与异物侵限故障的物理机制

接触网是电气化铁路牵引供电系统中的关键组成部分，其稳定运行直接影响列车的正常运营。然而，接触网时常会遭遇断线、打火和异物侵限等故障，这些故障的物理机制复杂多样，需要深入理解并采取针对性的预防措施。

外部侵害：鸟巢、塑料布等异物短路放弧烧断线索，或附近施工吊车、树木倒伏等外力撞击。

支持装置损坏原因：绝缘子损坏：雷击过电压、污闪（污秽在潮湿条件下导电）、材质老化、机械应力过大导致击穿或破裂。定位器、腕臂变形或脱落：受电弓撞击（如钻弓、打弓）、安装调整不当、紧固件松动。补偿装置卡滞或坠砣落地：a、b值过小或过大，滑轮卡死，导致补偿失效，线索张力异常。

弓网故障原因：接触压力异常：压力过小导致离线拉弧，烧损接触线；压力过大导致磨耗加剧甚至撞

坏设备。

硬点冲击：定位点、线岔、分段绝缘器、接头线夹等处不平顺，受电弓通过时产生剧烈冲击。

受电弓损坏：滑板磨损到限、碳滑板有缺损、弓头变形，在运行中刮伤甚至刚蹭接触网设备。

（二）牵引变电所设备过载、短路或保护误动的技术诱因

牵引变电所是电气化铁路供电系统的核心，其设备的稳定运行至关重要。设备过载、短路或保护误动是影响供电安全的常见问题，这些问题往往源于多因素交织。过载可能由于供电负荷预测不准确，导致实际负荷超过设备额定容量，长期过载运行会加速设备老化，降低绝缘性能。短路事件通常由设备绝缘损坏、外物短接或操作失误引起，瞬间大电流可能导致设备严重损坏甚至局部火灾。保护误动则可能由于保护定值设定不当、设备故障误报或保护系统自身缺陷造成。这种情况下，原本为保护系统的动作反而可能导致不必要的停电，影响铁路运营^[2]。

此外，过载问题还可能涉及散热设计的不合理，当设备长时间处于高负荷运行状态时，若散热系统无法有效将热量导出，会导致设备内部温度持续升高，进一步加剧设备老化，增加短路风险。对于短路事件，除了设备绝缘损坏和外物短接外，还可能在设计缺陷或制造工艺问题，导致设备在正常运行过程中出现意外的短路现象。而保护误动方面，除了保护定值设定不当和设备故障误报外，还可能受到电磁干扰的影响，使得保护系统误判运行状态，从而引发不必要的动作。

（三）回流系统接地不良导致的轨道电位异常问题

回流系统在电气化铁路中起着至关重要的作用，它确保了牵引电流能够有效地从接触网流回牵引变电所，从而维持系统稳定。然而，当回流系统出现接地不良时，轨道电位可能会出现异常升高，对列车运行安全构成严重威胁。轨道电位异常问题的分析通常涉及多因素模型，包括接触网与轨道的接触电阻、土壤条件对接地电阻的影响，以及回流电缆的阻抗等。接触电阻的增大可能导致电流在传输过程中产生更大的电压降，进而使得轨道电位偏离正常范围。土壤条件对接地电阻的影响也不容忽视，不同地质条件下的土壤电阻率差异显著，这会影响到回流电流在土壤中的分布和散失，从而间接影响轨道电位。此外，回流电缆的阻抗特性也是关键因素之一，电缆的材质、长度、截面积以及敷设方式等都会对其阻抗产生影响，进而影响到回流效果和轨道电位的稳定性^[3]。

（四）气候因素

气候因素在电气化铁路回流系统及轨道电位稳定性方面也扮演着不可忽视的角色。极端天气条件，如暴雨、洪水可能导致土壤湿度大幅增加，进而显著降低土壤电阻率，使得回流电流更容易通过土壤散失，这种变化可能引发轨道电位的波动。相反，在干旱季节，土壤干燥会导致电阻率上升，回流电流受阻，同样可能对轨道电位产生不利影响。此外，高温天气可能影响电气设备的散热性能，导致设备运行温度升高，进而可能引发设备性能下降或故障，间接影响回流系统的稳定性和轨道电位的正常范围，因此，在电气化铁路的设计和运营过程中，必须充分考虑气候因素对回流系统和轨道电位的影响，并采取相应的防护措施。

三、应对措施与应急处理流程

（一）快速隔离故障区段的倒闸操作规程与安全规范

在电气化铁路牵引供电系统中，快速隔离故障区段是确保故障后快速恢复运营的关键步骤。这一过程遵循严格的倒闸操作规程与安全规范，以防止故障扩大和二次损害。例如，当接触网发生故障时，调度员会根据SCADA系统提供的实时信息，迅速判断故障范围，并指令变电所操作员执行隔离操作。操作员需按照预先设定的应急预案，结合模拟训练中的经验，执行一系列的断路器操作，在确保自身安全距离的前提下，按照“先断后合”的原则，切断故障区段与非故障区段的连接，需在15秒内完成，以减少对列车运行的影响。同时，倒闸操作过程中必须严格遵守操作票制度，每一步操作都要经过核对、记录，确保无误。此外，为了防止误操作，系统可能还配备有二次防护措施，如五防闭锁系统，防止在带电或未确认状态下的误操作。在安全规范方面，操作员需穿戴绝缘防护装备，并在操作过程中保持与地面指挥的持续通信，确保在复杂故障情况下也能做出正确判断^[4]。

（二）临时供电方案（如越区供电、支援供电）的设计与实施

在电气化铁路牵引供电系统中，临时供电方案的设计与实施是保障铁路运营连续性的重要环节。在遇到故障导致正常供电无法维持时，越区供电和支援供电策略能够迅速介入，以减少服务中断的时间和影响范围。例如，在某次故障事件中，由于接触网发生故障，一条主要线路的供电瞬间受到影响，此时调度中心依据预先制定的应急预案，通过越区供电系统，将相邻供电区段的电力调配至故障区段，确保了列车的有限运行，最大程

度地降低了停运时间。越区供电方案的设计需要考虑电网的承载能力、馈线的瞬时过载能力以及不同供电区段之间的电气隔离措施,确保在切换过程中不会对其他正常运行的线路造成影响。此外,系统须具备动态调整能力,以适应故障规模的变化。这通常涉及复杂的计算和仿真,可能包括使用优化算法(如遗传算法或粒子群优化算法)来寻找最佳的供电路径和功率分配。支援供电则更侧重于利用备用或冗余设备,如备用变电所或移动式应急电源,快速接入故障点,提供临时的电力供应。在某次枢纽变电所故障事件中,备用电源在3分钟内启动并接入,为抢修工作提供了稳定的电力支持,大大缩短了恢复供电的时间^[5]。

为了提高临时供电方案的实施效率,通常会结合数字化工具进行故障模拟和应急演练。通过构建基于大数据和机器学习的故障响应模型,可以预测不同故障场景下最优的支援策略,同时通过定期的模拟演练,提升运维人员的应急处理能力,确保在实际故障发生时能够迅速、准确地执行供电切换。因此,临时供电方案的设计与实施是电气化铁路牵引供电系统中不可或缺的组成部分,它结合了电力工程、系统控制和应急管理的理论与实践,旨在面对复杂多变的运行环境时,提供快速、安全的电力保障,以实现铁路运营的高效和稳定。

(三) 故障抢修队伍的组织架构与响应时效管理

在电气化铁路牵引供电系统的故障应对中,故障抢修队伍的组织架构与响应时效管理是确保铁路运营安全和效率的关键环节。一支高效的抢修队伍需要具备清晰的指挥体系、专业的技能培训以及快速地响应能力。例如,队伍应设立由专业工程师组成的指挥中心,24小时监控系统状态,一旦发生故障,能在几分钟内启动应急预案。同时,各地段应配置常备的抢修小组,通过定期的模拟演练,确保在接到指令后能迅速出动,能在30分钟内抵达现场,以减少故障对行车的影响时间。在组织架构上,可以借鉴“总—分—总”的模式,设立总指挥、区域指挥和现场指挥三个层次。总指挥负责整体协调和决策,区域指挥根据地理位置和设备管辖范围指导多支抢修队伍,而现场指挥则根据实际情况指挥现场作业。这种分层管理方式有助于在复杂故障情况下快速做出决策,确保抢修工作的有序进行。此外,引入时间—效果分析模型,通过历史数据和模拟场景,分析不同响应时间对故障修复效果的影响,可以进一步优化资源配置,缩短故障修复时间。例如,通过TOA模型可能发现,前15分钟的快速定位和隔离故障比后续的修复工

作更能显著减少停运时间,从而指导抢修策略的优先级设定。

(四) 故障后恢复供电的标准化作业流程与质量验收标准

故障后恢复供电的标准化作业流程应包含以下几个关键步骤:首先,在确认故障已完全排除且现场安全条件满足后,由现场指挥发起恢复供电申请;其次,区域指挥根据系统状态和调度指令,审核并下达恢复供电命令;接着,抢修人员按照既定顺序和操作规范,逐步恢复接触网、变电所等关键设备的供电;最后,通过专业设备对恢复供电的区域进行电压、电流等参数的检测,确保供电质量符合标准。质量验收标准方面,应制定详细的验收指标和检测方法。例如,接触网恢复供电后,需检测其导高、拉出值等几何参数是否满足设计要求;变电所设备恢复运行后,要监测其输出电压、频率等关键指标是否稳定;同时,还需对恢复供电区域的轨道电位进行检测,确保无异常电位差存在。所有检测项目均应达到预设标准,方可认为恢复供电工作合格。

结束语

综上所述,电气化铁路牵引供电系统的稳定运行对于保障铁路运输安全与效率至关重要。通过深入分析常见牵引供电故障类型及其成因,并制定相应的应对措施与应急处理流程,我们能够有效提升牵引供电系统的可靠性与稳定性。未来,随着技术的不断进步与经验的持续积累,电气化铁路牵引供电系统将更加完善,为铁路运输事业的发展提供有力支撑。

参考文献

- [1] 林峰. 城际铁路牵引供电系统故障仿真与自愈重构技术研究[J]. 运输经理世界, 2024, (29): 166-168.
- [2] 张一鸣, 智慧, 林宗良, 任卓. 高速铁路全并联AT供电牵引网短路故障仿真研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(04): 100-107.
- [3] 李道德, 刘长利, 张韬. 高速铁路牵引供电故障对动车组运行影响及应急处置研究[J]. 铁道运输与经济, 2021, 43(11): 82-88.
- [4] 翟延涛, 王鑫, 卫永刚, 赵顺, 郝长金. 非接触式牵引供电线路故障定位系统研究[J]. 机车电传动, 2021, (04): 131-137.
- [5] 王璟, 张于峰. 高速铁路牵引供电系统健康管理及故障预警体系[J]. 中国高新科技, 2019, (14): 81-83.