

动车组牵引电机接地故障的常见原因及排查方法研究

孙宝坤

中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东青岛, 266111;

摘要: 牵引电机接地故障分析与防控体系围绕核心诱因、排查方法及实践验证展开。绕组绝缘性能劣化、外部污染物侵入、引线及连接部件损坏是三大核心诱因, 均与电机长期运行工况及运维质量密切相关。故障排查需经信号捕捉与工控确认锁定范围、断电隔离与分区检测定位故障点, 形成标准化流程。结合某型动车组案例验证, 该排查体系可精准定位多重因素叠加引发的故障, 整改措施能有效恢复设备性能, 为同类故障防控提供实操支撑, 提升动车组运行可靠性。

关键词: 动车组; 接地故障; 常见原因; 排查方法

DOI: 10.64216/3080-1508.26.03.041

1 动车组牵引电机接地故障常见原因

1.1 牵引电机内部绕组绝缘性能劣化

牵引电机内部绕组绝缘性能劣化, 是诱发接地故障的核心诱因。该部件在动车组长期高速运转进程中, 持续承受剧烈机械振动、频繁高低温交变冲击, 同时还要抵御牵引变流器输出脉冲电压带来的应力侵蚀, 这些多重作用逐步致使绕组绝缘层出现老化迹象, 先是表面泛黄发脆, 继而产生细微龟裂, 最终呈现大面积脆化破损。日常运维工作中, 若技术人员未能通过精准检测及时发现这些隐患, 绝缘层破损范围会持续扩大, 直至绕组导体直接与电机外壳接触, 形成稳定接地通路。尤其当潮湿空气或微小杂质渗入电机内部时, 会快速加剧绝缘层击穿速度, 短短数小时内就可能突破绝缘临界值, 最终引发接地故障。此类故障在老旧动车组或高频次运行车次中发生率显著偏高, 且初期故障信号隐蔽, 极易被常规检测忽略, 需借助专项绝缘监测设备才能精准识别。

1.2 外部污染物侵入与内部部件磨损脱落

外部污染物侵入与内部部件磨损脱落, 同样是破坏电机绝缘、引发接地故障的重要因素。动车组运行期间, 轮轨摩擦产生的金属碎屑、线路周边飘散的风沙、雨雪天气携带的水汽及灰尘等污染物, 会顺着电机通风口、密封间隙等薄弱部位侵入内部, 长期附着在绕组、引线等关键绝缘部件表面并不断堆积。这些污染物不仅会大量吸附空气中的潮气, 持续加剧绝缘层腐蚀程度, 还会在电机运转的振动摩擦中, 像磨料一样划伤绝缘层表面, 造成不可逆损伤。与此同时, 电机转子、轴承等运动部件在长期高速运转中会发生自然磨损, 产生的金属粉末

混入污染物中, 形成导电性介质, 逐步破坏绝缘层的完整性与绝缘性能。当绝缘电阻值下降至设备规定临界值以下时, 绝缘层会发生击穿现象, 进而快速形成接地回路, 引发接地故障。此类故障具有明显季节性特征, 风沙频发季节、雨雪天气过后的故障发生率远高于正常天气, 且故障点多集中在电机通风侧绝缘部件上。

1.3 牵引电机引线及连接部件损坏

牵引电机引线及连接部件损坏, 会直接导致芯线外露, 最终形成接地故障。此类故障的发生, 多与安装工艺缺陷、部件长期受力及摩擦损耗密切相关。电机引线、电缆需适应车体与电机之间的相对运动, 长期承受弯折、拉伸、扭转等周期性应力, 同时还可能与车体金属部件、电机外壳发生持续摩擦, 这些作用会逐步磨损电缆外皮, 从局部变薄到出现裂纹, 最终发生断裂破损。此外, 引线接头处的绝缘包扎层会因长期振动松动、高温环境老化而脱落, 接线端子则可能因潮湿环境、电化学反应发生腐蚀氧化, 这些问题都会导致电缆芯线外露。外露的芯线一旦与电机壳体、车体金属结构接触, 就会快速形成接地回路, 触发接地故障。该类故障在动车组启停频繁、线路颠簸路段运行后更易出现, 且故障点多集中在引线弯折处、接头包扎部位及接线端子处, 排查时可重点关注这些区域。

2 动车组牵引电机接地故障排查方法

2.1 故障信号与工控确认, 锁定排查范围

故障信号捕捉与工控工况确认, 是精准锁定接地故障排查范围的前提。排查工作启动后, 技术人员需优先启动动车组综合监测系统, 全面整合电气参数监测、温

度监测、振动监测等多个子系统的反馈数据,通过专用数据接口将各子系统实时采集的信息汇总至中央处理单元。该单元会依据预设算法模型对汇总数据进行快速比对分析,一旦捕捉到电气参数异常波动、温度超出正常阈值、振动频率出现异常峰值等信号特征,会立即触发声光警报机制。技术人员需迅速响应警报,详细记录触发时间、具体监测参数、异常数值等关键信息,同时精准确认动车组当前运行工况,包括实时运行速度、所处线路路况、牵引负载大小等核心要素,这些信息能为后续故障分析提供坚实数据支撑,确保故障信号与工况信息精准对应。基于上述数据,技术人员结合牵引电机结构特点与工作原理,初步锁定排查范围,将重点聚焦于电机绕组、电缆连接部分及接地装置等关键区域,通过绝缘电阻测试仪检测绕组绝缘电阻、红外热成像仪监测接线部位温度、接地电阻测试仪检测接地装置性能,逐步将排查范围从整个牵引电机系统缩小至具体部件或线路段,大幅提升排查效率与准确性。

2.2 断电隔离与分区排查, 定位故障区段

断电隔离操作与分区排查工作,是安全高效定位故障区段的核心环节。为规避电机运行产生的电气干扰与安全隐患,技术人员需先执行断电隔离操作,依据动车组电气系统图,精确定位牵引电机供电回路中的断路器与隔离开关,这些设备是实现断电隔离的关键控制节点。操作过程中,技术人员需严格遵循安全规范,先断开断路器切断电机主电源供应,此时电机虽停止运转,但回路中仍可能残留电荷,需进一步操作隔离开关,将牵引电机与整个电气系统完全隔离,确保两者无任何电气连接。随后,技术人员使用验电器对电机及相关线路进行全面验电,确认无电压残留后,在隔离设备上悬挂“禁止合闸,有人工作”警示标识,杜绝误操作引发的安全事故。完成断电隔离后,工作人员依据牵引电机结构布局与电气连接特点,结合设计图纸及技术文档,明确各部件电气连接关系与信号传输路径,将整个电机系统划分为电机绕组区、电缆接线区、接地装置区三个独立排查区域,制定针对性排查计划。对绕组区采用绝缘电阻测试仪精准检测,对电缆接线区通过万用表测量连接部位电阻值并检查紧固性,对接地装置区核查线路可靠性及接地电阻合规性,通过逐区检测、数据比对,逐步缩小故障范围,精确定位故障区段。

3 案例分析

3.1 故障现象与初步范围锁定

某型动车组综合监测系统突然触发牵引电机接地警报,系统界面显示对应牵引电机的绝缘电阻数值出现异常波动,初始监测值从标准阈值 $2M\Omega$ 快速降至 $0.8M\Omega$,且伴随电机壳体温度较相邻电机偏高 $3^{\circ}C$ 的现象。技术人员立即调取系统记录的电气参数与工况数据,发现故障触发时动车组正运行在多风沙路段,牵引负载维持在额定负载的 75% 左右,无急加速、急减速等特殊工况。综合监测系统通过预设算法模型比对分析后,将故障排查范围初步锁定在该牵引电机绕组及通风侧绝缘部件,同时提示需重点关注绝缘层状态与污染物侵入情况,为后续精准排查提供了核心方向。

技术人员优先通过专用数据接口导出该电机近 3 次运维检测数据,发现绝缘电阻值呈渐进式下降趋势,上一次运维检测时数值为 $1.5M\Omega$,较前一次检测降低 $0.3M\Omega$,当时未达到故障警报阈值故未触发预警。结合理论中老旧动车组或高频次运行车次绝缘劣化故障隐蔽性强的特点,技术人员判断该故障大概率为绕组绝缘层逐步老化叠加外部污染物侵入所致,随即准备专项检测设备开展现场排查。

3.2 断电隔离与分区排查

技术人员严格遵循动车组电气系统安全操作规范,先断开该牵引电机供电回路中的真空断路器,切断主电源供应以停止电机运转,随后操作隔离开关将该电机与整个牵引电气系统完全隔离,杜绝回路残留电荷引发的检测误差与安全隐患。隔离操作完成后,技术人员使用 2500V 验电器对电机接线端子、引线接头等关键部位进行全面验电,确认无电压残留后,在断路器与隔离开关处悬挂中文“禁止合闸,有人工作”警示标识,同时设置现场防护区域避免无关人员接触。

按照电机结构布局与电气连接特点,技术人员将故障电机系统划分为绕组区、电缆接线区、接地装置区三个独立区域开展分区排查。对接地装置区检测时,使用接地电阻测试仪测量接地回路电阻值,结果为 0.1Ω ,符合不大于 0.5Ω 的设备规定标准,排除接地装置本身故障的可能;对电缆接线区检测时,通过万用表测量各接线部位电阻值,数值均处于正常范围,且接头紧固性良好,绝缘包扎层无明显脱落、破损,仅在引线弯折处发现少量细微粉尘附着,初步判断该区域并非故障核心点(表 1 所示)。

表 1：排查细节

排查环节	具体操作内容	使用设备	检测数值/状态	设备规定标准	结果判断	操作依据/备注
断电隔离操作	断开牵引电机供电回路开关	真空断路器	断路器成功分闸，主电源切断	断路器分闸信号反馈正常，无卡顿	主电源供应停止，电机停运	遵循动车组电气系统安全操作规范，杜绝带电操作
	隔离电机与牵引电气系统	隔离开关	隔离开关到位，两者完全无电气连接	隔离触点接触紧密，无漏电隐患	彻底隔离残留电荷，避免检测误差	防止回路残留电荷影响检测结果及引发安全事故
	对关键部位全面验电	2500V 验电器	电机接线端子、引线接头无电压残留	验电器无声光警报，指示正常	确认设备处于无电状态，可开展后续排查	覆盖所有带电风险点，确保验电无死角
	设置安全警示与防护	警示标识、防护围栏	悬挂中文“禁止合闸，有人工作”标识，防护区域划定完毕	警示标识清晰醒目，防护区域无盲区	杜绝误操作及无关人员接触，保障作业安全	现场安全防护标准化要求，明确作业范围
分区排查操作	接地装置区电阻检测	接地电阻测试仪	接地回路电阻值为 0.1Ω	接地回路电阻不大于 0.5Ω	排除接地装置本身故障可能	按电机结构布局，优先排查基础保障部件
	电缆接线区检测（电阻+外观）	万用表、目视检查工具	各接线部位电阻值正常，接头紧固，绝缘包扎层完好，引线弯折处有少量细微粉尘附着	接线部位电阻无异常波动，绝缘层无脱落、破损，接头无松动	该区域非故障核心点，粉尘附着无明显影响	粉尘附着需后续清理，避免长期堆积加剧隐患
	绕组区初步排查（衔接后续定位）	2500V 绝缘电阻测试仪	绕组与壳体间绝缘电阻值 0.3MΩ	绕组绝缘电阻临界标准值 2MΩ	确认绕组存在绝缘击穿问题，需精准定位故障点	基于前期排查结果，锁定绕组区为重点排查对象

3.3 故障定位与原因细节确认

技术人员将排查重点聚焦于绕组区，使用 2500V 绝缘电阻测试仪对电机绕组与壳体之间的绝缘电阻进行精准测量，实测数值仅为 0.3MΩ，远低于 2MΩ 的临界标准值，确认绕组存在绝缘击穿问题。为进一步定位故障点，技术人员拆卸电机通风罩，发现通风口内侧密封垫存在轻微老化变形，缝隙处堆积大量混合杂质，包含轮轨摩擦产生的铁磁性金属碎屑、线路周边的风沙颗粒及少量潮湿粉尘，这些杂质顺着密封缝隙侵入电机内部并附着在绕组表面。

借助高清内窥镜观察绕组状态，发现绕组绝缘层整体泛黄发脆，表面分布多条不规则龟裂纹路，部分区域绝缘层已完全破损，露出内部导体，且破损部位与附着的金属碎屑紧密接触，形成稳定接地通路。技术人员对侵入的杂质样本进行简易分析，确认金属碎屑粒径在 0.1 至 0.3 毫米之间，混合粉尘中含水量约 12%，这些污染物不仅吸附潮气加剧了绝缘层腐蚀，还在电机运转

振动中划伤绝缘表面，加速了绝缘劣化进程。结合前期参数变化趋势，可判断绝缘层老化先于污染物侵入，污染物的进入则快速突破绝缘临界值，最终引发接地故障，这与理论中多重因素叠加诱发故障的表述形成精准验证。

3.4 整改操作与验证复盘

技术人员先使用专用高压气体吹扫电机内部，彻底清除绕组表面及通风通道内的混合杂质，再用无水乙醇擦拭绕组绝缘层表面，去除残留潮气与油污，随后对绝缘层破损部位进行修补，采用耐高温绝缘胶带层层缠绕包扎，包扎范围超出破损边缘 5 厘米，确保绝缘密封性。针对密封垫老化问题，更换同型号新密封垫，安装时在密封面均匀涂抹专用密封胶，消除通风口缝隙隐患，避免后续污染物再次侵入。

整改完成后，技术人员重新测量绕组绝缘电阻值，数值回升至 2.8MΩ，符合设备运行标准；启动电机空载试运行 30 分钟，通过综合监测系统实时监测，绝缘电

阻值稳定在 2.7 至 2.8MΩ 之间，电机壳体温度与相邻电机差值控制在 1°C 以内，无异常波动。为强化验证效果，技术人员模拟风沙、潮湿环境开展针对性测试，在电机通风口附近放置模拟污染物，持续监测 2 小时，绝缘电阻值无明显下降，确认故障已彻底排除，同时验证了理论中绝缘监测、密封防护等运维措施的实际有效性。

4 结束语

总体来说，牵引电机接地故障的多重诱因叠加机制揭示了故障防控的核心逻辑，并非单一因素独立作用，而是工况损耗、污染物影响与部件缺陷的协同作用结果。

排查与整改实践印证了针对性防控措施的有效性，同时凸显绝缘状态动态监测与密封防护的关键价值。

参考文献

- [1] 吴宏彬, 王鑫, 朱忠超. 动车组牵引电机定子绕组接地故障分析及对策 [J]. 轨道交通装备与技术, 2024, 32 (04): 38-41+52.
- [2] 刘克思, 贾焕军, 王安, 等. 动车组牵引系统接地故障分析及优化研究 [J]. 铁道机车车辆, 2024, 44 (01): 136-141.