

钻探机械电气协同运行安全风险防范技术

于春雪

河北省煤田地质局水文地质队 河北 邯郸 056200

摘要: 钻探作业中机械动力与电气控制系统高度耦合,单一子系统故障易沿耦合通道向另一系统扩散,形成叠加放大效应。钻探现场高振动、强电磁干扰环境进一步压缩设备安全运行的容错空间。本文围绕机械-电气协同运行的风险传导机理展开分析,梳理了典型电气安全风险与机械故障的双向诱发路径,探讨了冗余架构设计、自适应保护整定与电磁兼容防护等关键技术,并从动态监测、分级联锁与闭环管控等维度构建了综合防控体系,为提升钻探设备安全运行水平提供了系统性技术参照。

关键词: 钻探机械; 电气协同; 安全风险; 动态监测; 闭环管控

引言: 钻探机械长期处于高振动、强电磁干扰的复杂工况,机械动力系统与电气控制系统形成深度耦合关系,任一子系统的运行异常均可通过耦合通道向另一系统持续扩散。传统单一系统的安全防护模式难以应对耦合风险带来的叠加放大效应,设备安全运行面临严峻挑战。深入剖析机械-电气协同运行的风险传导机理与典型故障诱发路径,探索适配钻探工况的安全防护关键技术,构建多维度综合防控体系,已成为保障钻探作业安全的迫切需求。

1 钻探机械电气协同运行的安全风险特征与成因分析

1.1 机械-电气耦合系统的风险传导机理

钻探作业体系中,机械动力传输体系与电气调控体系呈现高度融合的耦合运行状态,两类系统的运行状态深度绑定,任一子系统产生的运行异常状态,都会依托系统耦合通道向关联子系统持续扩散蔓延^[1]。液压动力调控体系运行过程中产生的压力波动,会干扰现场传感设备的工作状态,造成电气传感信号出现偏移失真问题。电气调控执行部件产生的运行故障,会打乱机械结构预设的运行节奏,引发机械作业动作失控问题。两类系统的运行隐患会在耦合交互界面产生叠加扩增效应,逐步放大设备整体运行异常程度。钻探作业所处的复杂工况会进一步提升耦合系统的运行不稳定性,作业环境中持续存在的振动干扰、电磁辐射影响,都会压缩设备安全运行的容错空间。单一子系统产生的局部运行偏差与功能异常,会沿着耦合关联链路持续传导扩散,逐步发展为整套钻探设备的整体性运行故障,大幅提升现场安全事故的发生概率。

1.2 钻探作业典型电气安全风险识别

钻探设备电气体系长期处于复杂工况环境中,运行隐患主要体现在绝缘性能衰减、负载运行过热、线路接

触失效与电磁信号干扰四类核心问题上。钻机动力电机长期处于高负荷连续运转状态,绕组表层的绝缘结构会出现持续性老化损耗,绝缘防护性能逐步衰减。作业空间内的潮湿水汽会持续侵蚀电气设备表层结构,加速绝缘结构破损击穿的进程,破坏电气体系运行稳定性。设备运行过程中产生的持续振动,会造成电气连接点位松动偏移,线路接触状态失衡后极易产生电弧现象,滋生安全隐患。变频调控设备工作过程中输出的高频谐波,会对周边控制线路的信号传输状态产生负面影响,扰乱电气保护装置的工作逻辑,引发保护功能误触发或失效问题,弱化电气体系自身的安全防护能力,让设备长期处于不稳定的运行状态。

1.3 机械系统电气关联故障的诱发路径

钻探设备机械结构与电气体系存在双向故障诱发关联特性,机械结构的运行损耗会催生电气故障,电气部件的性能衰减也会引发机械运行异常。传动轴承长期摩擦损耗会改变转轴运行轨迹,造成电机转子运转偏心,设备运转过程中出现周期性电流波动,产生的瞬时电流冲击会损伤电路保护模块的内部结构。齿轮传动机构持续作业会产生热能堆积,油温上升会触动热控保护结构切断设备动力供给,保护结构预设参数出现偏移偏差时,设备过载运行状态无法被有效识别,保护功能彻底失效。设备机械结构的往复运动状态,会造成配套电缆结构反复弯折拉伸,电缆表层绝缘结构逐步出现疲劳开裂损伤,引发线路相间短路或对地漏电问题,形成机械结构物理损伤向电气运行故障转化的固定路径,持续威胁钻探设备整体运行安全。这种双向诱发关系意味着机械与电气的故障边界日益模糊,运维人员在排查故障时不能仅关注单一系统,必须从机电协同的全局视角出发,才能准确定位故障源头并采取有效处置措施。

2 电气控制系统安全防护关键技术

2.1 钻探电气控制系统的冗余架构设计

适配钻探复杂工况的电气调控体系,采用双路供电架构与双通道信号传输架构完成整体搭建,整套架构可在单一供电回路或信号传输通道失效的工况下,维持设备基础作业功能与安全防护功能的稳定运行^[2]。主控单元与备用调控单元之间搭载无扰切换调控逻辑,调控权限切换的全过程不会中断设备核心安全防护功能,保障作业过程中防护体系的连续性。设备关键动力执行回路采用双控防护结构设计,两道防护结构相互配合制约,任意一道防护结构触发断开动作,即可终止设备危险作业动作。硬件架构的优化设计能够彻底规避单点结构失效引发的连锁故障,从设备底层结构层面提升电气调控体系的运行稳定性与安全冗余能力,适配钻探作业多变的负载工况与复杂环境。冗余架构的价值不仅体现在故障发生后的应急切换,更在于日常运行中对单一通道的定期自检与轮换使用,通过均衡各通道的负荷分配延长设备整体使用寿命,同时确保备用通道始终处于可即时投入的待命状态。此外,冗余设计还需充分考虑钻探现场空间受限与环境恶劣等实际约束,在保证安全冗余的前提下尽量简化结构布局,降低维护难度与制造成本。

2.2 电气过载与短路保护的自适应整定技术

钻探作业负载状态始终处于动态波动状态,固定参数的电气保护模式无法适配全工况运行需求,难以平衡保护体系的灵敏性与运行可靠性。自适应参数整定技术依托电机实时运行的电流数据与温度变化数据,动态调整电气保护阈值标准。设备轻载平稳运行阶段,保护参数维持合理区间,降低保护装置误触发的概率。设备遭遇负载骤增等异常工况时,保护参数快速响应调整,缩短故障识别与动作响应时长,及时阻断过载运行状态带来的设备损伤。短路防护体系采用分级延时匹配的运行逻辑,上级防护结构设置适配设备启动工况的延时参数,规避设备启动瞬时冲击电流引发的误保护动作。下级防护结构设置短延时响应机制,快速识别并切除线路短路故障,让电气保护体系的动作选择性与响应速动性形成有效平衡,全方位适配钻探设备动态运行工况。

2.3 电磁兼容与抗干扰防护技术

钻探作业现场大功率设备启停与变频装置运行过程中,会产生高强度电磁辐射干扰,干扰场强可达每米30至50伏特,极易破坏电气控制信号的传输完整性与精准度。现场信号传输线路选用屏蔽双绞线结构,搭配标准化接地处理方式,屏蔽效能可达60至80分贝,有效阻隔外部电磁信号侵入传输线路。模拟量信号传输链路加装

隔离变送设备,切断共模干扰传播通道,稳定保障采集信号传输精度。电气控制柜内部采用分区布局模式,划分强电运行模块与弱电控制模块,模块之间加装金属隔离结构,规避各类电磁串扰问题。电路接入端口配置多级浪涌保护设备与滤波设备,能够抑制幅值最高4千伏的瞬态过电压,阻挡电网瞬时电压波动与高频噪声向内层控制系统传导。设备接地体系融合单点接地与等电位连接技术优势,接地电阻稳定控制在4欧姆以内,降低地环路电流对精密调控回路带来的干扰,维持复杂电磁环境里电气调控信号的稳定传输。

3 机械-电气协同运行的动态风险监测技术

3.1 机械运行状态的电气化感知技术

针对钻探设备核心机械运行结构,布设振动传感、温度传感与位移传感等多类感知设备,将机械结构运转过程中的物理运行状态,转化为可采集、可分析的电气信号,实现机械运行状态的全天候动态采集^[3]。依托电机运行电流信号特征分析技术,可精准甄别齿轮啮合状态、轴承运转状态等设备内部运行工况,无需加装外置机械检测设备,即可完成设备内部核心结构的健康状态研判。扭矩感知设备与编码调控设备相互配合,精准捕捉钻进作业过程中机械负载的动态变化规律,采集的高精度运行数据,可为电气保护参数的动态优化调整提供核心数据支撑。电气化感知模式能够突破传统机械检测方式的局限,实现设备运行状态的精细化、实时化采集监测。

3.2 电气参数异常的机械关联诊断技术

电气运行参数的异常波动,能够直观反映机械结构的早期运行隐患,可作为机械故障预判的核心判定依据。电机三相运行电流失衡状态持续加剧,代表设备机械负载分布出现偏移问题,或电机转子运转状态出现偏心异常。变频设备直流母线运行电压的无序波动,对应传动机械结构承受周期性冲击负载的运行状态。搭建电气运行参数与机械运行状态的关联映射模型,能够从海量电气监测数据中,挖掘机械结构磨损、偏移、负载异常等隐性故障特征,完成机械故障的前置预判。依托电气监测数据实现机械运行状态诊断,可提前识别传统检测方式难以发现的早期隐患,延长设备故障预警周期,为设备运维与故障处置预留充足时间。

3.3 多源信息融合的协同安全判别技术

单一传感设备采集的监测数据存在监测维度局限,无法覆盖全部设备运行隐患,容易出现故障误判、漏判问题。多源信息融合技术整合机械振动状态、电气运行参数、设备温度分布等多维度监测数据,开展跨维度

关联分析,构建适配钻探复杂工况的综合安全判定指标体系。机械振动异常特征与电气电流波动特征同步出现时,系统识别设备进入高风险运行状态,自动触发对应的安全防护动作。融合分析算法引入加权置信度评估机制,结合不同监测数据的精准度与适配性,差异化分配数据权重,弱化单一数据偏差对整体判定结果的影响。该技术模式能够提升复杂钻探工况下设备安全状态判定的精准度,保障风险监测与防护动作的有效性。

4 钻探机械电气协同安全风险的综合防控体系

4.1 分级安全保护与联锁控制策略

结合钻探作业不同工序的风险等级差异,搭建层级化安全防护机制,适配不同作业工况的安全防控需求。常规钻进作业阶段启动基础防护功能,保障设备平稳运行。设备出现异常运行趋势时,系统自动切换高强度防护模式,强化隐患管控力度^[4]。作业场景触发紧急风险工况时,最高等级安全联锁机制启动,直接切断设备动力供给并锁定钻具结构,杜绝危险作业动作持续开展。机械运行动作与电气防护体系设置闭环联锁逻辑,液压动力体系压力参数偏离安全区间时,电气调控体系自动锁定钻具旋转功能。电机运行温度超出安全阈值时,机械进给结构终止作业进程,阻断机械故障与电气故障的交叉诱发链条,从运行逻辑层面规避复合型安全隐患。

4.2 电气设备的防爆防尘与环境适应性设计

钻探作业空间的潮湿水汽等环境条件,会持续侵蚀电气设备结构,影响设备运行稳定性。电机设备与电气控制柜采用高等级防护结构设计,抵御水汽侵蚀,满足设备长期户外作业的运行要求。电气线路连接点位采用防松动结构设计,连接缝隙灌注密封材质,阻隔水汽侵入线路连接部位。电缆防护管路搭配防爆挠性连接结构,消解设备振动产生的应力传导,避免刚性结构拉扯造成的电缆绝缘损伤。电气设备散热结构设计充分考虑长期连续作业需求,适度扩充散热结构冗余空间,保障设备长时间运转过程中的散热效果,提升电气设备对钻探恶劣工况的适配能力。

4.3 安全风险的闭环管控与持续优化机制

搭建覆盖隐患识别、状态监测、预警触发、防护执行、数据复盘的全流程闭环管控模式,实现设备运行风险的常态化管理。防护机制触发过程中,系统完整留存设备运行参数、工况状态与动作逻辑等全套数据,纳入设备故障数据资源库^[5]。定期梳理统计各类故障的发生规律与触发特征,锁定高频安全风险点位,针对性优化设备防护策略与运行调控逻辑。依托长期积累的现场运行数据,周期性校核电气保护参数的适配性,结合工况变化完成参数迭代优化。机械设备运维计划结合电气监测体系反馈的设备健康状态动态调整,实现精准化运维管控。搭建技术设计团队与现场作业团队的常态化沟通渠道,结合一线作业工况反馈持续优化防控体系,让安全防控体系始终适配钻探设备的动态运行需求。

结束语

钻探机械电气协同运行的安全风险防范,是一项贯穿设备设计、运行监测与运维管理全过程的系统工程。从冗余架构与自适应保护技术的底层设计,到电气化感知与多源融合监测的动态跟踪,再到分级联锁与闭环管控的持续优化,各环节紧密衔接、协同发力。唯有将机电协同安全理念贯穿于设备全生命周期,方能有效遏制复合型安全隐患的发生,推动钻探装备向更高安全等级持续迈进。

参考文献

- [1]李志立.机械电气设备安装工程中的风险管控技术与施工保障措施实践[J].科技视界,2026,16(2):81-85.
- [2]刘延博.基于物联网通信的机械电气系统安全监测技术研究[J].通信电源技术,2026,43(4):206-208.
- [3]张学.登高车机械和电气控制联锁保护在施工中的安全隐患分析与防范[J].石油库与加油站,2024,33(5):33-36.
- [4]蒋文峰.钻探机械在农业生产中的应用[J].南方农机,2025,56(15):168-170.
- [5]何进超,张飞龙,李庚.浅谈矿山地质工程的钻探机械设备技术发展趋势[J].世界有色金属,2024(1):34-36.