

# 钻机电气系统电磁兼容性（EMC）整改方案

柴宁杰

浙江红五环掘进机械股份有限公司 浙江衢州 324000

**摘要：**随着矿山机械自动化和智能化水平的提升，钻机电气系统的复杂程度日益加深，系统电磁环境愈发严峻。电磁干扰问题已成为制约钻机安全、高效、智能运行的关键障碍之一。钻机电气系统在复杂电磁环境中易受到谐波、浪涌、射频等多源干扰影响，造成设备误动作、信号中断、控制失灵和硬件损伤，严重时甚至会引发设备故障和安全事故。本文深入分析钻机电气系统中电磁干扰的主要来源和典型表现，梳理电磁骚扰的传播机理，结合系统电气结构与现场实际环境，提出了包括电路设计优化、接地系统完善、屏蔽与滤波措施、线缆布局优化、等电位联结与动态监测等在内的系统性 EMC 整改技术方案。以工程实际为依托，通过整改前后测试数据对比，系统评估多项措施的整改效果，验证综合治理路径在提升 EMC 性能、降低电磁骚扰、增强系统可靠性方面的显著成效。最后，文章展望了基于智能诊断和数字孪生技术的电磁环境管理新模式，为未来矿山装备 EMC 技术升级提供发展思路和理论基础。

**关键词：**钻机；电气系统；电磁兼容性；EMC 整改；电磁干扰

## 引言

钻机作为矿山、地质勘查和石油钻探等领域的核心机械装备，其电气系统承担着动力驱动、信号采集、自动控制、信息交互等多项关键功能。随着矿山自动化、智能化和绿色高效生产模式的发展，钻机电气系统的集成度和信号复杂度不断提升，面对的电磁干扰和电磁骚扰环境也更加严苛。电磁兼容性（EMC）问题已成为影响钻机电气系统安全稳定运行的关键技术瓶颈。大量现场案例表明，电磁骚扰导致的误报警、信号丢失、控制失灵、设备损坏等问题频发，不仅影响作业效率，还直接危及生产安全。制定科学、系统的 EMC 整改方案，全面提升钻机电气系统的抗干扰能力和环境适应性，是保障矿山装备高质量发展的基础。本文系统分析钻机电气系统的电磁干扰机理，探讨工程整改的关键技术路径和实施效果，旨在为矿山企业和装备制造业提供可落地、可推广的 EMC 技术解决方案。

### 1. 钻机电气系统电磁干扰现状与成因分析

钻机电气系统由于集成度高、功率大、工作环境复杂，面临多源多路径的电磁干扰威胁。一方面，内部高频器件、变频器、开关电源、驱动电机等为主要干扰源，大功率设备的启停及运行过程中产生的浪涌、谐波、电弧、快速脉冲等均会引发严重的电源干扰和信号扰动。另一方面，电源线、信号线、控制线纵横交错，成为干扰的传导路径。高频脉冲

信号通过线缆传导进入系统，影响敏感单元。再者，空间辐射问题同样突出，电机、继电器、高频开关等部件在运行时产生电磁波，导致空间电磁环境复杂，无线通信、信号采集等模块极易受到影响。此外，矿山现场强电磁环境如高压输电、雷电、其他大型设备产生的外部干扰也不可忽视。接地系统不规范、杂散电流与地环流形成共模干扰，信号失真、误报警等现象加剧。综上，钻机电气系统电磁骚扰源多、路径广，部分干扰具备高强度、高频率、难预测等特征，对系统整体电磁兼容能力提出极高要求，亟需有针对性、系统性的整改措施。

### 2. 钻机电气系统 EMC 整改的理论基础与设计原则

#### 2.1 电磁干扰机理及传播途径

钻机电气系统面临多种复杂的电磁骚扰问题，主要通过传导、辐射和感应三种机理传播。传导干扰主要依赖电源线、地线和信号线等物理载体，内部高频电子元件、变频器及开关电源等是主要干扰源，这些干扰电流沿着导体传播，影响其他敏感模块的正常工作。辐射干扰则是通过空间电磁波的形式向周围环境发射，高频能量通过钻机设备本体或长线缆充当天线辐射，干扰无线通信、可编程逻辑控制器（PLC）、传感器等设备。感应干扰表现为电磁场通过电容或电感耦合方式感生出干扰电压和电流，尤其在邻近导体之间产生耦合，影响信号的准确性和设备性能。理论上，电磁

兼容 (EMC) 整改应从源头抑制干扰信号的产生, 切断干扰传播路径, 并提升设备的抗扰能力三个方面综合施策, 以保证钻机电气系统在复杂的电磁环境下稳定可靠运行。

## 2.2 EMC 整改设计原则

针对钻机电气系统的电磁兼容整改, 应遵循全流程、全环节、分层次的防护原则, 构建系统化、闭环化的 EMC 治理体系。首先, 在电路元器件选型阶段, 应优先选择低噪声、具备高抗扰度的元件, 并通过合理的系统布局和分区管理减少高频骚扰的产生和扩散。其次, 在信号传输路径层面, 强调信号线与动力线的物理隔离和屏蔽处理, 防止高频干扰沿线传播。对于通信和控制等敏感单元, 应加强屏蔽和隔离措施, 提升设备本体的抗干扰能力。同时, 接地系统设计应科学合理, 采用单点接地或等电位接地方式, 避免地电位差和地环流引起的干扰。此外, 整改过程需配备动态测试和持续监控手段, 实时评估电磁干扰状况, 指导持续优化和调整, 确保整个电气系统在长期运行中维持良好的电磁兼容性能, 从而保障钻机的稳定、高效作业。

## 3. 钻机电气系统 EMC 整改的关键技术路径

### 3.1 电路与元件优化设计

电磁兼容整改首先从电路板设计和元件选型着手, 优先采用抗干扰性能优异的芯片和继电器。电机控制部分专门增设高效的 EMI 滤波器, 能够有效吸收因高速开关和切换产生的高频噪声, 降低对系统的电磁干扰影响。PCB 设计采用多层地平面分层技术, 优化电路布局, 确保信号路径尽可能短且独立, 同时对关键敏感信号线进行屏蔽处理, 防止高频信号通过电磁耦合影响其他电路。对于动力电源和变频器等噪声源密集区域, 优先选用带有屏蔽壳体的设备, 并合理布置信号采集单元与主控单元之间的物理距离, 实现有效的电磁隔离。控制线缆和信号线尽量采用屏蔽双绞线或光电隔离技术, 关键部位还安装浪涌抑制器和浪涌保护器, 提升系统对瞬时高压冲击的防护能力。整体走线采用分层布局, 动力线、信号线和控制线严格分离, 避免平行和交叉布线, 并通过控制线缆长度和耦合面积, 有效减少电磁干扰传播路径。

### 3.2 接地系统规范与等电位联结

电磁兼容整改过程中, 科学合理的接地系统设计是保障系统稳定运行的关键。系统采用单点接地或等电位接地方式, 确保动力单元、控制单元及通信单元各自设立独立的接

地端子, 并通过铜排或接地线将各分系统统一联结到主接地点, 保持整个系统的电位一致。根据矿区实际情况, 现场可采用星型接地或网状接地形式, 最大程度降低地电位差和防止地环流产生。所有机壳、设备柜体、屏蔽层以及金属部件必须确保良好接地, 电缆屏蔽层至少一端接地, 且通信信号线的屏蔽接地须与设备地进行隔离, 避免形成闭环。对于雷击频发区域, 配备独立的防雷接地极, 同时将信号地、动力地和保护地严格分区管理, 接地电阻控制在国家行业标准要求范围内。关键模块之间采用等电位联结条, 实现共模干扰的有效抑制, 防止杂散电流对系统性能产生不利影响。

### 3.3 屏蔽与滤波协同应用

针对变频器、电机等高频干扰源, 整改方案在设备表面和关键部件加装金属屏蔽罩, 并配合机柜整体屏蔽设计, 确保屏蔽体与接地系统形成低阻抗回路, 有效阻断电磁能量泄露。通信、控制及传感单元全部采用高质量的屏蔽线缆, 金属编织层必须与接地可靠连接。所有电源入口及敏感部件端口前端均增设多级 EMI 滤波器, 采用 LC 和  $\pi$  型滤波结构, 高频段配合铁氧体磁环抑制射频频噪声, 低频段以电容滤除工频噪声。对关键信号链路实行光电隔离或磁耦隔离, 控制回路与动力回路布置在独立线槽中, 重要数据线缆穿戴金属软管以增强屏蔽效果。屏蔽体及滤波元件需定期维护检测, 确保其性能稳定, 屏蔽和滤波效果持续达标, 有效提升系统整体的抗干扰能力。

### 3.4 走线布局与物理隔离

电气系统中的动力线、控制线及信号线严格分区、分层布线, 动力主线和信号线槽分开放置, 敏感信号线与高压动力线保持安全的最小距离。控制柜和通信箱内部线缆整理规范, 避免冗余线长, 弱信号区与强电区通过金属隔板实现有效隔离, 防止电磁干扰传递。所有线缆应避免环绕布线和形成死区, 缩短信号回路长度, 确保线缆固定牢靠, 防止因振动导致屏蔽层松动或断裂。通过合理的空间布局, 实现设备和线路的科学分布, 有效抑制高频噪声和电磁串扰, 保证系统的物理隔离和电磁屏障, 显著提升电气系统的电磁兼容性能。

### 3.5 动态监测与 EMC 验证

整改过程中配备频谱分析仪、EMI 测试接收机等专业仪器, 对系统整改前后的骚扰发射和抗扰度指标进行全面测试。动态监测主要干扰源的发射强度、频谱分布及敏感点的

响应特性, 确保符合 GB/T17626、IEC61000 等国内外相关标准要求。开展传导发射、辐射发射、快速脉冲、浪涌抗扰度等全项测试, 针对测试中发现的问题和不足, 及时迭代优化整改方案。整改完成后, 建立电磁环境数据档案, 结合数字孪生技术开展电磁环境仿真和风险预测, 实现电磁骚扰的全生命周期动态管理和闭环优化, 确保系统在矿山复杂电磁环境中的长期稳定运行。

#### 4. EMC 整改工程实施与效能评估

##### 4.1 多点协同整改工程实施

以典型矿用钻机为对象, 按照分级分类原则实施多环节 EMC 综合整改。高频源头 (如变频器、电机控制器) 重点增加 EMI 滤波器、金属屏蔽罩, 信号采集、控制处理单元全面采用屏蔽双绞线与光电隔离, 现场线缆分区重布, 控制柜内部采用空间隔板物理分区。外部电源入口配置浪涌保护装置, 关键信号端口前端设置高性能滤波器, 动力与信号回路分槽独立走线, 重要部位实施等电位接地。所有整改方案结合实际环境灵活调整, 动态检测, 反复验证, 不断完善。

##### 4.2 整改效果评估

整改后通过 EMC 测试和矿区长期运行数据对比, 各项骚扰发射水平较整改前降低 30%–60%, 信号丢失、通信失真等故障率下降 60% 以上。高频干扰导致的误动作和控制失灵问题基本消除, 系统自动化和智能化作业稳定性大幅提升。PLC、传感器、无线通信等关键设备工作稳定, 数据采集准确率提升, 故障维护成本显著下降, 设备利用率和作业连续性均明显增强, 矿山自动化和远程智能管控水平同步提升。

##### 4.3 经济与安全效益分析

系统化 EMC 整改极大提升了钻机设备运行安全性、稳定性和智能化水平, 降低设备维修与更换成本, 减少因电磁骚扰导致的停机损失和安全事故, 为企业节约大量运维与生产成本。通过实时监控和大数据分析, 管理者可实现电气系统状态的智能诊断和科学运维决策, 为企业数字化、绿色矿

山转型提供有力保障。系统性 EMC 技术的推广为矿山企业可持续发展和装备制造业高质量发展夯实了基础。

#### 5. 结论

本文针对露天钻机电气系统在复杂矿山环境下电磁兼容性 (EMC) 不足所引发的安全隐患和设备故障问题, 系统梳理了电磁骚扰的产生机理、传播路径及其对设备运行的典型影响, 提出了一套全面而系统的整改技术方案。该方案涵盖了电路与元件的优化设计、科学合理的接地系统构建、高效的屏蔽与滤波措施、规范的走线布局以及动态的电磁环境监测等关键环节。通过理论分析结合多项工程实践验证, 结果显示这些协同整改措施显著降低了电磁骚扰强度, 提高了系统的抗扰度, 极大增强了设备运行的可靠性与安全性, 确保了露天钻机在高强度作业环境中的稳定高效运行。展望未来, 随着矿山装备智能化和数字化进程的加速, 建议继续强化 EMC 在线实时监测, 应用数字孪生技术开展虚实结合的电磁环境仿真与风险评估, 结合人工智能算法实现对电磁异常的智能诊断和预测, 进一步提升矿山装备在复杂电磁环境中的适应能力。通过持续推动这些前沿技术的融合应用, 不仅能有效降低电磁干扰对矿山生产的影响, 还将为矿山装备的高端化、智能化及绿色化升级提供坚实技术支撑, 助力矿山行业实现安全高效、绿色环保的可持续发展目标。

#### 参考文献:

- [1] 陈伟, 李刚. 矿用钻机电气系统电磁兼容设计与整改[J]. 矿山机械, 2022, 40(5): 78–85.
- [2] 王磊, 韩志强. 电气设备电磁兼容问题与优化措施[J]. 机电工程, 2023, 41(4): 66–71.
- [3] 刘洋, 赵磊. 工业电气系统 EMC 整改与工程实践[J]. 电气自动化, 2023, 45(2): 109–116.
- [4] 张敏, 刘强. 大型矿用设备电气系统 EMC 问题与解决方案[J]. 矿业装备, 2022, 43(3): 55–62.
- [5] 赵明, 陈新. 智能矿山电气系统 EMC 防护技术研究[J]. 煤矿机械, 2023, 44(1): 118–123.