

矿山机电设备自动化控制系统的抗干扰技术研究

任志军

山西宁武大运华盛南沟煤业有限公司 山西 忻州 036700

【摘要】：矿山井下环境恶劣，电磁辐射、机械振动、湿度变化等因素极易对机电设备自动化控制系统造成干扰，导致系统运行稳定性下降、控制指令失效，甚至引发安全事故。本文分析了矿山机电设备自动化控制系统的干扰来源与传播途径，从硬件抗干扰、软件抗干扰、系统结构优化三个维度提出针对性技术策略，旨在构建全方位的抗干扰体系，提升控制系统在复杂矿山环境下的可靠性与稳定性，为矿山智能化建设提供技术支撑。

【关键词】：矿山机电设备；自动化控制系统；抗干扰技术；系统稳定性

DOI:10.12417/2705-0998.25.24.038

引言

随着矿山开采技术向智能化、自动化方向发展，机电设备自动化控制系统已成为矿山生产的核心枢纽，承担着设备启停、参数调节、故障诊断等关键功能。传统的抗干扰手段多侧重于单一环节的防护，难以适应矿山复杂多变的干扰环境。因此，开展矿山机电设备自动化控制系统抗干扰技术研究，构建多层次、全方位的抗干扰体系，对保障矿山安全生产、推动智能化矿山建设具有重要的现实意义。本文围绕干扰来源分析、抗干扰技术路径展开研究，为矿山自动化控制系统的稳定运行提供理论与技术参考。

1 矿山机电设备自动化控制系统干扰来源与传播途径

1.1 干扰来源分类

矿山机电设备自动化控制系统的干扰源可分为内部干扰与外部干扰两大类，不同干扰源的作用机理与影响范围存在显著差异。一是内部干扰。内部干扰源于控制系统自身组件的运行特性，主要包括设备元器件干扰、电路设计缺陷干扰和系统软件干扰。其一，元器件干扰是指电阻、电容、晶体管等电子元件在工作过程中产生的热噪声、散粒噪声，此类干扰虽强度较弱，但会叠加在微弱的检测信号上，降低信号的信噪比；其二，电路设计缺陷干扰是指因电路板布线不合理、接地方式错误、电源纹波过大等导致的干扰，例如电源电路与信号电路平行布线时，电源波动会通过电磁耦合影响信号传输；其三，系统软件干扰主要包括程序逻辑冲突、数据传输错误、中断优先级设置不当等，软件干扰会导致控制系统出现指令执行延迟、数据丢失等问题。二是外部干扰。外部干扰是矿山环境中各类因素对控制系统的影响，是矿山场景下的主要干扰来源，可分为电磁干扰、机械干扰、环境因素干扰三类。第一，电磁干扰是最主要的外部干扰源，矿山井下存在大量高压电机、变压器、

变频器等电力设备，这些设备在启停或运行时会产生强电磁辐射，形成高频电磁场；同时，设备电缆中的交变电流会产生感应磁场，对附近的信号电缆产生电磁耦合干扰。此外，井下无线通信设备、电火花等也会产生电磁脉冲，干扰控制系统的正常工作。第二，机械干扰源于矿山开采过程中的振动与冲击，采掘设备、运输设备的运行会产生剧烈振动，这种振动会传递到控制系统的传感器、控制器等部件，导致传感器检测精度下降、元器件接触不良，甚至造成电路板焊点脱落。第三，环境因素干扰包括高湿度、高粉尘、温度变化等。高湿度环境易导致电路板受潮、元器件腐蚀，降低绝缘性能；高粉尘会附着在设备表面，堵塞散热通道，引发元器件过热故障；温度的剧烈变化会导致元器件参数漂移，影响系统的稳定性。

1.2 干扰传播途径

干扰信号需通过特定途径才能作用于控制系统，其传播途径主要包括传导耦合、电磁耦合和辐射耦合三种。传导耦合是干扰信号通过导线、电缆等导体传输至控制系统，例如电源线上的电压波动通过供电线路传入控制器；电磁耦合又称互感耦合，是指干扰源产生的磁场通过互感作用在控制系统的信号线上感应出干扰电压；辐射耦合是干扰源以电磁波的形式向空间辐射能量，被控制系统的天线、电缆等接收，从而对系统造成干扰。在矿山实际环境中，三种传播途径往往同时存在，形成复杂的干扰网络。

2 矿山机电设备自动化控制系统硬件抗干扰技术

2.1 屏蔽技术

屏蔽技术的核心是利用金属材料对电磁信号的反射与吸收作用，阻断电磁辐射的传播路径，可分为电场屏蔽、磁场屏蔽和电磁屏蔽三类。对于矿山井下的强电磁干扰环境，控制系统的传感器、控制器、通信电缆等关键部件需采取针对性的屏蔽措施。其一，电缆屏蔽。

信号电缆应选用带金属编织网的屏蔽电缆，屏蔽层可有效抑制外界电磁信号的辐射耦合，同时减少电缆内部信号的向外辐射。安装时，屏蔽层需单端接地或双端接地，避免形成接地环路产生新的干扰。其二，设备屏蔽。控制器、传感器等核心设备应采用金属外壳封装，外壳需具备良好的导电性，可将外界电磁辐射反射出去，同时防止内部电磁信号外泄。对于高灵敏度的传感器，可采用双层屏蔽结构，进一步提升抗干扰能力。

2.2 接地技术

接地技术是通过建立低阻抗的电流回路，将干扰电流引入大地，避免干扰信号在系统内积累。矿山自动化控制系统的接地设计需遵循“单点接地”原则，避免多点接地形成接地环路。系统接地可分为工作接地、保护接地和屏蔽接地三类。工作接地是为控制系统的正常运行提供基准电位，例如控制器的直流接地，需保证接地电阻小于 4Ω ；保护接地是将设备的金属外壳接地，防止设备漏电引发触电事故，同时可降低外壳的电磁辐射；屏蔽接地是将屏蔽层接地，使屏蔽层形成等电位体，增强屏蔽效果。在实际布线时，需将工作地线、保护地线、屏蔽地线分开铺设，避免不同地线之间的干扰。

2.3 隔离技术

隔离技术是通过隔离器件将控制系统的输入、输出、电源等模块进行电气隔离，切断干扰信号的传导路径。常用的隔离器件包括光电耦合器、隔离变压器、继电器等。光电耦合器利用光信号传输电信号，实现了输入与输出之间的电气隔离，可有效抑制电源波动、电磁干扰等通过导线传导的干扰信号，广泛应用于控制器的开关量输入/输出模块；隔离变压器可对供电电源进行隔离，降低电网中的谐波干扰，同时防止地环路电流的产生；继电器则通过电磁感应原理控制电路的通断，可将强电回路与弱电回路隔离开，避免强电干扰对控制系统的影响。

2.4 电源滤波技术

电源是控制系统的能量来源，电网中的电压波动、谐波干扰会通过电源电路传入系统，影响元器件的正常工作。电源滤波技术是通过在电源输入端加装滤波器，滤除电网中的干扰信号。常用的电源滤波器包括电容滤波器、电感滤波器和 π 型滤波器。电容滤波器可滤除高频干扰，电感滤波器对低频干扰具有良好的抑制效果， π 型滤波器则结合了两者的优点，可同时滤除高低频干扰。此外，对于精度要求较高的控制系统，可采用不间断电源（UPS）或稳压电源供电，保证电源电压的稳定性，进一步提升系统的抗干扰能力。

3 矿山机电设备自动化控制系统软件抗干扰技术

3.1 数字滤波技术

数字滤波技术是通过软件算法对传感器采集的信号进行处理，滤除叠加在有效信号上的干扰噪声，相较于硬件滤波，具有灵活性高、成本低的优点。矿山控制系统中常用的数字滤

波算法包括算术平均滤波法、加权平均滤波法、中值滤波法和限幅滤波法。算术平均滤波法适用于干扰信号为随机噪声的场景，通过对多次采集的信号求平均值，降低噪声的影响；加权平均滤波法对不同时刻的采样值赋予不同的权重，可突出有效信号的特征，适用于信号变化缓慢的场合；中值滤波法通过选取多次采样值的中值作为有效信号，可有效抑制脉冲干扰，适用于矿山振动环境下的传感器信号处理；限幅滤波法则通过设定信号的变化范围，剔除超出范围的干扰信号，避免系统因异常信号产生误动作。

3.2 指令冗余技术

指令冗余技术是针对干扰导致的程序“跑飞”问题，在程序中插入冗余的空操作指令或跳转指令，使程序在受到干扰后能够恢复正常的执行流程。矿山井下的强电磁干扰可能导致控制器的程序计数器数值发生错误，使程序跳转到错误的地址执行，引发系统故障。在软件设计时，可在关键指令前后插入空操作指令，如子程序调用、中断返回指令，延长指令的执行时间，降低干扰对程序执行的影响；同时，在程序的空闲区域填充跳转指令，使程序跑飞后能够跳转到指定的错误处理程序，避免系统陷入死循环。

3.3 软件陷阱技术

软件陷阱技术是在程序存储器的空闲区域设置陷阱指令，当程序因干扰跳转到空闲区域时，陷阱指令可将程序引导至故障处理子程序，实现系统的自恢复。陷阱指令通常由跳转指令和空操作指令组成，例如在51单片机系统中，可在空闲区域填充“LJMP 0000H”指令，使程序跑飞后跳转到主程序入口。为提升陷阱技术的有效性，需合理设置陷阱指令的密度，在程序的关键区域附近增加陷阱指令的数量，同时在故障处理子程序中加入系统复位、参数重置等功能，确保系统能够快速恢复正常运行。

3.4 容错技术

容错技术是通过设计冗余的程序模块或数据存储单元，使系统在部分组件失效或数据出错时仍能保持正常功能。矿山自动化控制系统中常用的容错技术包括程序冗余、数据冗余和表决机制。程序冗余是指在系统中设计多个功能相同的程序模块，当主程序模块受到干扰失效时，备用程序模块可自动切换运行；数据冗余是指对关键数据进行多重备份，存储在不同的存储单元中，读取数据时通过对比多个备份数据，剔除错误数据；表决机制则是通过多个模块同时处理同一任务，对结果进行表决，选取多数模块的一致结果作为最终输出，适用于对可靠性要求极高的控制场景。

4 矿山机电设备自动化控制系统结构优化抗干扰技术

4.1 采用分布式控制系统架构

传统的集中式控制系统将所有控制功能集中在一个控制器中，一旦控制器受到干扰失效，整个系统将陷入瘫痪。分布式控制系统（DCS）将控制功能分散到多个现场控制单元中，各单元通过通信网络连接，实现数据共享与协同控制。在矿山机电设备控制中，可将采掘设备、运输设备、通风设备等划分为不同的控制单元，每个单元配备独立的控制器，负责本单元的设备控制与数据采集。当某个控制单元受到干扰时，其他单元仍能正常运行，避免系统整体失效。同时，分布式架构可缩短信号传输距离，减少干扰信号在传输过程中的耦合机会。

4.2 优化通信链路设计

通信链路是控制系统数据传输的通道，其抗干扰能力直接影响系统的稳定性。矿山自动化控制系统的通信方式主要包括有线通信和无线通信，需根据矿山环境特点优化通信链路设计。对于有线通信，RS-485总线具有抗干扰能力强、传输距离远的优点，适用于矿山井下的信号传输。在布线时，需将通信电缆与电力电缆分开布设，保持一定的安全距离，避免电磁耦合干扰；同时，在总线两端加装终端电阻，减少信号反射。对于无线通信，需选择抗干扰能力强的通信频段，采用跳频技术或扩频技术，避免外界电磁信号的干扰；同时，在通信协议中

加入数据校验机制，及时发现并纠正传输过程中的数据错误。

4.3 合理规划设备布局

设备布局的合理性直接影响干扰的传播与耦合程度，在矿山机电设备安装时，需遵循干扰源与敏感设备分离的原则。其一，将高压电力设备与控制系统的传感器、控制器保持足够的距离，避免强电磁辐射对敏感设备的影响；其二，将振动较大的设备与控制系统的硬件设备隔离开，可采用减震垫等减震措施，降低机械振动的传递；其三，控制系统的设备应安装在干燥、通风的区域，避免高湿高尘环境对设备的侵蚀，同时采取温控措施，保持设备运行环境的温度稳定。

5 结语

矿山机电设备自动化控制系统的抗干扰技术是保障矿山安全生产、推动智能化矿山建设的关键技术。通过分析干扰来源与传播途径，从硬件、软件、系统结构三个维度提出了抗干扰技术策略，硬件抗干扰技术从物理层面阻断干扰传播，软件抗干扰技术实现系统的主动容错与自恢复，系统结构优化技术从整体层面提升系统的抗干扰能力，三者的有机结合可构建全方位的抗干扰体系。未来，可结合人工智能、机器学习等技术，实现干扰信号的自动识别与自适应抑制；同时，开展基于物联网的远程监测与故障诊断技术研究，实时监测系统的运行状态，为矿山机电设备自动化控制系统的稳定运行提供更可靠的技术保障。

参考文献：

- [1] 尹廷周.煤矿井下电气设备抗干扰技术的研究[J].中国设备工程,2024,(10):220-222.
- [2] 毛目华,张琨,王海君,等.关于煤矿机电运输电气控制系统抗干扰技术的应用研究[J].通讯世界,2024,31(04):82-84.
- [3] 张鲁,刘勇,孙来运.矿井电磁环境机电系统抗干扰研究[J].科技创新导报,2020,17(12):6-7.
- [4] 杨云涛,关贞珍.基于 EMD 和形态滤波算法的地磁测量抗干扰技术研究[J].传感技术学报,2020,33(02):173-179.
- [5] 赵强.改善煤矿选煤厂电气抗干扰质量及措施[J].中国石油和化工标准与质量,2019,39(16):124-125.