光耦隔离电路在电动执行机构中的抗干扰优化

王泽健　雷震威　卢辰光
中广核核电运营有限公司　广东　深圳　518000

摘　要：光耦隔离电路是电动执行机构中阻隔强弱电信号交叉干扰的关键屏障，其性能优劣直接影响设备运行可靠性。本文从电动执行机构的电气干扰环境出发，系统剖析光耦隔离电路的基础架构、光电转换原理及干扰失效机理，深入揭示器件选型、布线结构、外围参数匹配及工况环境等方面的抗干扰缺陷。在此基础上，从器件选型优化、PCB布局调整、外围参数调校及多重隔离防护四个维度提出具体优化策略，为提升执行机构信号传输稳定性提供技术支撑。

关键词：光耦隔离电路；电动执行机构；抗干扰优化；电磁干扰；信号传输

引言：电动执行机构长期运行于强弱电交织的工业电气环境，控制回路与动力回路之间的电磁耦合问题始终是制约设备可靠运行的技术瓶颈。光耦隔离电路凭借光电转换的物理特性，在高低压回路之间构建起电气屏障，成为抑制干扰传导的有效手段。然而器件选型失配、布线结构缺陷、外围参数偏离及工况环境制约等因素，会持续削弱隔离电路的抗干扰效能。深入分析干扰机理并提出系统性优化方案，对保障执行机构长期稳定运行具有工程实践价值。

1 电动执行机构光耦隔离电路基础架构

1.1 电动执行机构电气干扰环境特征

电动执行机构工作期间始终处于强弱电交织的复杂电气环境，机身内部各类电气器件启停切换，会不断改变局部电磁场的分布状态。动力工作回路产生的电压与电流波动，会持续对低压精密信号回路造成电气影响。高低压线路在设备内部紧凑排布，极易形成耦合电气通路，环境中的杂散电磁能量会持续作用于弱电电路。器件长期连续运行产生的高频电磁辐射，会渗入内部信号传输链路，扰乱电路正常工作状态[1]。工业现场存在的电网扰动与电气噪声会持续侵入设备内部，进一步提升整体电气环境的复杂程度。

1.2 光耦隔离电路基本组成单元

光耦隔离电路依靠光电转换的物理特性实现电气隔离，整套电路由多个功能单元配合构成完整工作体系。内置发光结构接收前端传输的电气信号，将电能转化为光能完成跨区间的信号传递。感光结构精准捕捉光能信号，并重新转换为标准电气信号，为后端控制电路提供有效输入。回路搭配专属限流元件，合理约束输入电流范围，维持发光结构的稳定工作状态。链路中集成的滤波元件可以剔除信号中混杂的杂波干扰，纯净有效传输信号。芯片内部填充的隔离介质可以完全分隔输入与输出电气回路，从物理层面阻断干扰的直接传导。

1.3 光耦隔离电路硬件布局形式

光耦隔离电路的硬件排布遵循电气功能分区原则，对设备高压动力区域和低压控制区域做清晰划分。两者间距一般控制在15mm以上，光电隔离芯片安装于两类电气区域的分界位置，从布局上阻隔跨区域的电磁干扰传导。输入侧线路贴近前端信号采集模块布置，最大程度缩短原始信号的传输距离，走线长度控制在20mm以内，减少信号损耗。输出侧线路直接对接后端主控处理模块，保障光电转换后的电气信号具备充足传输精度。各类无源配套元件规整布置在芯片周边，缩减电路板整体走线长度。分区布局的布线方式能够有效弱化电磁耦合效应，降低电路运行过程中受到的干扰影响。

1.4 光耦隔离电路电气适配逻辑

光耦隔离电路的电气参数与工作特性，贴合电动执行机构的信号传输规范，能够适配低压控制信号的幅值范围与频率特征。电路输入端可兼容工业现场常规电压信号，对不稳定的波动信号进行预处理，规整信号传输状态。电路输出端可以生成主控芯片可精准识别的标准电平，契合设备控制模块的工作需求。物理隔离结构能够彻底断开高低压电气回路的电气关联，规避动力回路异常电气参数侵染弱电信号回路。电路整体参数经过适配设计，可适配电动执行机构长期连续的工作模式，保障信号传输全程保持稳定。

2 电动执行机构光耦隔离电路工作原理与干扰机制

2.1 光耦器件光电转换运行原理

光耦器件依托光电感应的物理特性完成信号转换工作，依靠光能作为媒介完成电气信号的非接触式传递。输入回路接入电气信号后，内部发光元件会根据电流变

化产生对应强度的光源信号。光源信号的强度会随输入电气信号的幅值变化产生线性波动，形成可精准传递电气信息的光信号[2]。器件内部感光元件接收光源信号后，会激发内部载流子发生运动变化。载流子的运动变化会生成对应强度的输出电流，完成光信号向电气信号的完整转化。光电转换的工作过程可以实现电气信号的无接触传输，杜绝电气回路之间的直接导通。

2.2 光耦隔离电路信号传输机制

光耦隔离电路以光电转换流程为核心搭建专属信号传输链路，区分输入输出两个独立电气区间。前端控制电路输出的电气信号会接入光耦输入端口，经过限流与稳压处理后驱动光电转换结构工作。光信号在封闭的器件内部空间完成单向传输，传输延迟通常在50ns至500ns之间，不会与外部电路产生电气接触。转换后的全新电气信号会从输出端口输出，持续向后端负载电路输送有效信号。独立的传输链路可以隔绝高低压电路的电气联系，让信号传输过程摆脱电气耦合带来的影响。整套传输流程依托物理介质完成信号迭代，维持信号传输的独立运行状态。

2.3 工业环境对光耦隔离电路的干扰类型

工业运行场景会持续产生多种类型的电磁干扰，持续作用于光耦隔离电路的运行过程。空间辐射干扰源自现场各类大功率电气设备的运行辐射，以电磁波形式侵入电路布线区域。线路传导干扰依托供电线路与信号线路传播，跟随电气链路进入光耦信号传输通道。电位偏移干扰来自设备接地系统的电位浮动，造成电路工作点位出现不稳定偏移。高频脉冲干扰多出现于设备启停阶段，瞬时的电气脉冲会冲击光耦器件的转换结构，扰乱常规信号转换节奏。

2.4 干扰作用下电路电气失效机理

各类干扰信号侵入光耦隔离电路后，会直接改变电路内部的电气运行参数。辐射干扰会扰乱光信号传输的稳定性，造成光电转换比例出现偏差，引发输出信号失真。传导干扰会改变输入回路的电流电压参数，导致发光元件工作状态偏移，无法生成标准光信号。电位波动会破坏电路工作点位的平衡状态，让感光元件无法精准感应光信号变化。持续的干扰冲击会改变器件内部电气特性，造成信号传输链路出现参数偏移，最终引发电路信号传输错乱与功能失效。

3 光耦隔离电路抗干扰缺陷与影响因素分析

3.1 电路硬件选型适配短板

光耦器件选型工作多依据常规电气参数完成筛选，未能深度适配电动执行机构复杂的工业运行场景。部分通用型光耦器件绝缘耐受能力有限，面对现场高频电磁波动无法维持稳定的光电转换精度。光电元件的响应速度无法匹配执行机构动态信号传输需求，信号传输过程容易出现波形畸变[3]。无源配套器件选型缺乏针对性，耐压与抗扰动指标无法适配现场电气环境。通用硬件选型标准难以贴合设备长期连续运行的工作属性，弱化电路整体抗干扰能力。

3.2 电路布线结构存在的干扰隐患

电路板布线设计存在较多优化空间，不合理的走线方式会滋生电磁干扰问题。信号走线与动力走线间距设置不合理，会增大线路间的电磁耦合程度。强弱电分区边界规划不够精细，部分弱电走线跨越电磁干扰密集区域。信号回路走线长度把控不够合理，过长线路会累积更多空间电磁噪声。接地走线布设过于简化，接地路径阻抗偏大，不利于电路杂散电荷的快速泄放。布线结构的各类缺陷会持续降低光耦隔离电路的抗扰动能力。

3.3 外围辅助电路参数匹配问题

光耦隔离电路外围辅助元件的电气参数设置存在不合理之处，影响电路整体工作状态。限流电阻阻值设置不合理，会改变输入光电元件的工作电流区间，偏离标准工作工况。滤波网络参数设置单一，对不同频率的电磁噪声抑制能力存在局限。分压与稳压元件参数搭配不够协调，无法对波动输入信号完成充分规整处理。辅助电路参数匹配失衡会造成光电转换工作点偏移，降低信号传输的稳定程度。

3.4 工况环境对光耦隔离性能的制约因素

电动执行机构的现场运行工况会从多方面制约光耦隔离电路的工作性能。工业现场温度的动态变化会改变光耦器件内部载流子活跃状态，影响光电转换线性度。环境湿度积累会改变电路板表面绝缘特性，弱化电路电气隔离效果。现场持续的电磁噪声会持续叠加在信号传输链路，加重电路运行负荷。设备机械振动会造成电路焊点与线路状态波动，间接引发电气参数偏移，限制隔离电路抗干扰性能的发挥。

4 电动执行机构光耦隔离电路抗干扰优化策略

4.1 光耦器件与周边元器件选型优化

工业现场电磁环境复杂多变，常规通用元器件难以长期稳定适配电动执行机构的运行场景。更换适配高强度工业工况的光电芯片，能够有效应对现场频繁的电磁波动，提升绝缘耐压水平与工作稳定性。选用温变适应性更强的光电器件，可以弱化环境温度浮动对内部载流子运动的影响，保证光电转换过程保持稳定线性状态[4]。结合设备常规信号传输速率与动态信号变化特征，匹配

响应性能适配的光电元件，缓解动态信号传输过程中出现的波形畸变问题。优化电阻、电容等无源器件的选型标准，结合现场电气环境设定器件耐压、耐温及抗扰动基础指标，夯实电路稳定运行的硬件基础。根据电路实际运行的电气状态，精准敲定限流、滤波、稳压元件的参数规格，从硬件层面提升电路抵御电磁干扰的基础能力。

4.2 电路布线与空间布局优化设计

电路板空间布局的合理调整，能够从物理层面大幅弱化电磁耦合带来的干扰问题。细化电路板强弱电功能分区，清晰划分动力电路与信号电路的布设区域，两者间距不低于15mm，提升整体布局规整度。适度拉开动力走线与弱电信号走线的布设距离，间距保持在5mm以上，削弱线路之间的电磁耦合效应，减少杂散电磁能量的互相影响。合理精简信号回路的走线长度，控制在30mm以内，缩减电磁噪声的累积路径，降低空间辐射对弱电信号的干扰幅度。优化接地线路的布设方案，压缩接地通路的物理距离，接地回路阻抗控制在5mΩ以下，减小接地回路产生的阻抗，帮助电路杂散电荷快速释放。调整光电芯片的安装点位，安置在强弱电区域的过渡隔离地带，避开电磁辐射集中的高危区域。理顺板内各类走线的排布走向，杜绝线路交叉缠绕的布设问题，减少不合理走线衍生的电气干扰。

4.3 外围匹配电路参数优化调整

外围电路参数的科学调校，能够有效改善光耦隔离电路的信号转换与抗干扰表现。结合电动执行机构长期运行的电气工况，精准校准输入回路限流电阻的实际阻值，稳定光电输入端的工作电流，让发光器件保持平稳的工作状态。调整滤波网络的元件参数配比，搭建覆盖多频率波段的滤波结构，提升电路对不同类型电磁噪声的过滤效果。优化稳压、分压元件的参数组合，强化电路对输入波动信号的规整能力，缓解电网不稳定带来的电气扰动。微调光电转换电路的静态工作点位，削弱电气参数偏移对信号转换精度造成的负面影响，让信号传输过程更加平稳。结合设备不同运行状态调整参数适配标准，让外围电路可以适配动态工况变化，提升整体电路运行的容错空间与稳定性能。

4.4 多重隔离防护电路结构优化

单一的光电隔离结构难以完全应对工业现场复杂的干扰信号，多层防护结构的优化升级可以全方位提升电路抗干扰水平。在信号输入前端增设独立的前置隔离结构，提前拦截线路传导的杂散干扰，避免异常信号侵入核心光电转换区域。为光电核心电路加装专属屏蔽防护结构，阻隔空间电磁波的渗透，减少外部辐射对信号转换过程的影响[5]。优化电路电荷泄放架构，搭建专属的噪声疏导通路，及时消解电路运行过程中累积的杂散电能与高频噪声。针对设备启停阶段产生的高频脉冲干扰，增设缓冲防护结构，弱化瞬时脉冲电压与电流对光电器件的冲击作用。多级防护结构覆盖信号输入、光电转换、信号输出的完整链路，逐层过滤、阻断各类干扰信号，适配电动执行机构复杂多变的工业运行环境。

结束语

光耦隔离电路的抗干扰性能取决于器件选型、布线布局、参数匹配与防护结构的协同水平。电动执行机构复杂的电磁环境对隔离电路提出了更高要求，单一优化手段难以从根本上解决干扰问题。从器件适配到布线调整，从参数调校到多重防护，各环节相互配合方能构筑完整的抗干扰体系。持续完善光耦隔离电路的设计与维护规范，能够有效延缓性能衰减，降低信号传输失真概率，保障电动执行机构在工业现场的长期稳定运行。

参考文献

[1]李河清.兼容光耦的电容隔离栅极驱动器电路设计[J].科学技术创新,2025(19):1-4.

[2]申迎风,余彦琼,张海洋.非线性光耦实现交流电线性隔离取样的电路设计[J].电力设备管理,2022(2):297-299.

[3]刘立三.电动执行器控制电路板柔性装夹测试设备设计与分析[J].科技创新与应用,2022,12(1):89-91.

[4]张敏.煤矿井下电动车自动化驱动控制器的电路设计[J].中国新技术新产品,2023(21):68-70.

[5]田丽艳,王成娟.ZD6型电动转辙机四线制道岔控制电路工作原理探究[J].机电元件,2022,42(5):23-25.