

矿井环境自适应直流驱动系统研发与动态负载特性分析

胡海涛 唐黎明 刘雪峰
中煤电气有限公司 北京 101300

摘要: 矿井高湿、高粉尘、高扰动等复杂工况下,传统直流驱动系统存在响应滞后、调节精度不足与稳定性差等问题,难以满足井下作业对设备快速响应与智能控制的要求。自适应控制策略具备参数在线调整能力,可有效提升系统在动态负载下的跟踪性能与鲁棒性。本文构建了矿井环境自适应直流驱动系统,完成了系统结构设计、控制目标建模与嵌入式实现,提出了具有实时调节能力的自适应控制算法,并从冲击响应、状态切换与控制鲁棒性三个维度进行了动态性能分析,验证了系统的环境适应能力与控制性能,为矿井驱动系统智能化提供了技术支撑。

关键词: 矿井工况; 直流驱动系统; 自适应控制; 动态特性分析

引言

矿井作业环境具有高湿、高粉尘、高干扰等典型工况特征,电气驱动系统长期处于高负荷冲击、频繁启停和复杂扰动交叠的运行状态,对驱动设备的响应速度、控制稳定性及环境适应能力提出了更高要求。传统直流驱动系统在参数固定结构下难以应对负载动态变化与环境非线性因素,存在调节滞后、控制精度下降及系统鲁棒性不足等问题。随着矿山自动化与智能化水平的提升,构建具备快速响应、自调整能力的驱动系统成为矿井电气装备升级的关键方向。引入自适应控制机制以增强系统在动态扰动条件下的调节性能与稳定能力,对于提升矿井装备的运行可靠性与控制智能化水平具有重要意义。

1 矿井工况与驱动系统适应性需求分析

矿井作业区域常年处于高湿度、高温差、高粉尘浓度的封闭空间,空气中悬浮微粒粒径分布不均,金属粉尘与硫化物颗粒易在电机端子、电刷、开关触点处形成导电桥接或腐蚀膜层,造成短路、接触电阻增大及局部过热现象^[1]。系统结构长期暴露于含湿气体环境中,易引发绝缘材料吸湿膨胀、电晕击穿风险上升,特别是在冷启动阶段,端部结露问题显著。矿井负载波动频繁,主要表现为短周期内高幅度转矩扰动,负载阶跃率变化范围可达到额定转矩的2.5倍,系统需具备对强扰动工况的动态跟踪与调节能力。由于负载惯量突变易导致电枢电流剧烈波动,需对驱动系统调节速率、过电流限制逻辑及转速反馈响应精度提出更高要求。电机结构应在磁路布置、绕组热容量、轴端密封等方面增强抗干扰与抗腐蚀能力,满足低速高载启动和频繁正反转工况下的稳定性。电源模块必须具备输入电压扰动抑制能力和输出侧恒压限流调节能力,具备宽输入

范围及高耐压能力。控制系统需配置快速响应控制器,具备动态自适应参数整定机制,实现负载扰动下的实时补偿和稳定控制,避免系统在高粉尘、高湿及强干扰环境中产生跟踪误差放大、稳定裕度降低等现象,保障整机长期稳定运行。

2 直流驱动系统结构设计

2.1 硬件构成与功能划分

矿用隔爆兼本质安全型直流配电一体机集成于系统输入整流模块与主功率转换单元之间,具备井下本质安全电路隔离和隔爆保护能力,实现供电回路故障隔离、短路限流及瞬态过压抑制功能,保护负载侧直流设备在井下瓦斯与煤尘爆炸性环境中安全运行。矿井用直流驱动系统由输入整流模块、主功率转换单元、控制处理单元、执行电机、本地采样模块及通信接口模块构成,结构上呈现能量流与信号流并行的并列型架构。电源侧输入通常接入矿区本地交流母线,经工频整流与EMC滤波形成稳定直流母线电压,为主变换电路提供驱动电源。主功率转换部分配置高频PWM控制的半桥或全桥功率器件,形成电压可调、频率可控的脉冲信号以实现直流电机的调速控制。控制核心单元布置专用DSP控制器,负责逻辑调度、调制算法计算、限流限压保护及人机界面交互逻辑的统一协调。电流、电压、转速等运行状态信息由分布式采样节点获取,经A/D转换后送入控制核心实现闭环控制。电流采样回路设置于电枢回路串联段,使用霍尔闭环传感器增强抗干扰性能,响应时间控制在5 μ s以内,保证高速动态控制场景下的跟踪精度。图1为本系统结构的功能架构图,展示了系统的能量路径与控制信息流向,图中信号流路径与功率流路径在空间布局上物理隔离,避免磁干扰耦合,提升控制稳定性。

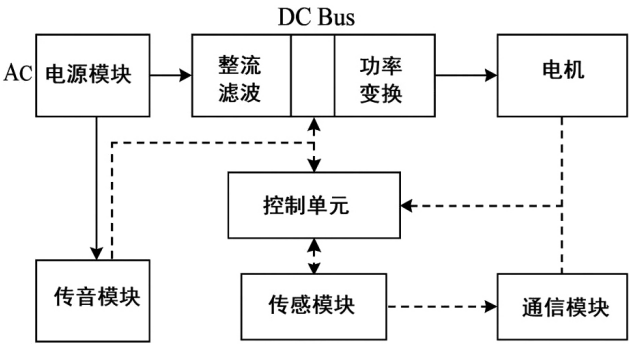


图1 直流驱动系统结构架构图

2.2 变换电路拓扑结构

直流驱动系统核心电压调节环节采用Buck型变换拓扑配合双极性H桥结构构建输出调压与电流换向功能模块，主变换器中MOSFET或IGBT桥臂构成双开关同步控制电路，在高频PWM调制作用下输出脉冲电压，经过电机绕组等效滤波后形成平滑电枢电压以驱动负载^[2]。PWM调制频率控制在20~30kHz范围内，平衡开关损耗与输出响应速度。输出电压与PWM占空比呈线性正比关系，其稳态工作时的输出电压可表示为 $V_o = D \cdot V_m$ ，其中 V_o 为电机端电压（单位：V）， V_m 为直流母线电压（单位：V）， D 为PWM占空比，该关系式体现了系统对负载电压的可控调节能力。矿用隔爆兼本质安全型直流配电一体机在电源输出侧集成软启动回路和可调恒压限流单元，与Buck型变换拓扑结构协同工作以实现输出端电压稳定调节和过流保护，保证电机启动阶段电流平滑上升且在设定安全阈值范围内运行。该设备配备双冗余隔离继电器和瞬态过电压吸收模块，在H桥换向和PWM调制时提供附加保护，避免因桥臂击穿或谐振尖峰引发井下安全事故。

3 自适应控制策略与系统实现

3.1 控制目标参数建模

直流驱动系统在矿井复杂工况下运行时，控制对象需准确表征电机—负载系统在扰动作用下的响应关系，动力学建模是控制策略设计的基础。电机部分以永磁直流电机为核心，其机械侧模型可简化为一阶转动惯量系统，描述式为

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) = T_e(t) - T_L(t)$$

其中 J 为转动惯量（单位： $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ）， B 为粘性阻尼系数（单位： $\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$ ）， $\omega(t)$ 为电机角速度（单位： rad/s ）， $T_e(t)$ 为电磁转矩（单位： $\text{N} \cdot \text{m}$ ）， $T_L(t)$ 为负载转矩（单位： $\text{N} \cdot \text{m}$ ）^[3]。负载扰动视为时变外部输入，扰动特性呈不确定性且频率成分广，易引发系统响应滞后或超调。为实现精确跟踪与稳定响应，需构建

以 $\omega(t)$ 为主输出、以 $T_e(t)$ 为主控制量的状态模型，供后续自适应控制器进行调节律匹配与实时修正。

3.2 自适应算法调节机制

自适应控制策略在动态负载扰动作用下实现参数在线调节，核心结构由状态误差反馈模块、参考模型及调节律计算单元组成^[4]。控制器期望系统输出 $\omega(t)$ 能逼近参考模型输出 $\omega_m(t)$ ，参考模型一般定义为稳定一阶或二阶系统，其特征响应由设计参数指定。实际输出与参考模型输出之间的误差 $e(t) = \omega(t) - \omega_m(t)$ 被实时计算并传入调节律模块控制控制器参数变化。选取梯度型自适应律可实现稳定性与结构简洁性的平衡，调节律表示为 $\dot{\theta}(t) = -\gamma x(t)e(t)$ ，其中 $\dot{\theta}(t)$ 为控制器增益参数， γ 为自适应增益系数（单位： $1/\text{s}^2$ ）， $x(t)$ 为系统输入量（单位：V或A）， $e(t)$ 为实时误差（单位： rad/s ）。该调节公式实现了以状态误差为驱动的闭环修正，增益变化方向与误差极性保持一致，有效抑制扰动放大与系统漂移。在参数边界附近引入投影算子可防止控制器增益发散问题，对误差进行加权滤波后输入调节律模块可提高对高频干扰的鲁棒性。自适应策略内部融合前馈补偿路径与抗积分饱和机制，增强低速启动阶段及强负载突变下的跟踪能力，保证系统在负载惯量突变、电源波动等非线性干扰作用下依然具备稳定控制性能。

3.3 嵌入式平台集成实现

自适应控制系统在嵌入式平台上的实现依赖于高精度硬件资源调度与实时控制内核的紧耦合设计，系统结构中将DSP控制器作为核心处理单元，集成状态采集、控制计算与信号输出模块^[5]。主程序在系统启动后完成驱动初始化、控制参数装载、通信接口配置，并进入周期调度循环，每周期内完成状态采样、误差计算、参数更新与PWM输出调节操作。系统采样周期固定为 $50\mu\text{s}$ ，PWM更新周期与采样周期一致，确保控制输出对负载扰动具有高时效性响应。各采样变量通过ADC模块并行采集，确保电流、电压、速度信号具有时间一致性，控制参数更新逻辑以调节律为核心，由中断控制单元调度并行执行，保证计算与输出无延迟堆积。通信接口配置RS485冗余链路，支持外部监控主站与平台间的参数写入与运行状态读取功能。平台软硬件逻辑在设计时考虑多线程隔离与异常管理，异常数据自动过滤后进入默认安全参数配置，避免干扰信号造成系统异常跳变。整体控制程序遵循状态机机制组织，任务划分明确，逻辑结构封闭稳定，支持后续控制器升级与外部诊断模块接入扩展。

4 动态负载特性分析

4.1 短时冲击响应行为

直流驱动系统在矿井突发负载工况下需具备高动态响应能力以抑制电流冲击与速度突跳。在负载突变或启动瞬间，电枢回路中感性器件对电流变化存在显著延迟，初始阶段存在明显电流上冲现象，幅值可能超过稳态工作值的1.8倍，易对功率器件构成热击穿风险。矿用隔爆兼本质安全型直流配电一体机在短时冲击响应环节提供快速短路限流和分段断电能力，当负载突变引发输入支路电流激增时，其内置快速电子开关模块可在0.2ms内执行关断操作，抑制冲击电流超过本安阈值，避免对下游功率器件和电机绕组造成损伤。短时扰动下，电流闭环控制结合自适应调节机制可实现周期内的动态参数调整，误差收敛速率控制在3个控制周期以内，系统在扰动后能稳定恢复至设定转速且无稳态偏移，保证启动过程电气变量波动范围可控，满足复杂工况对电流稳定性与响应一致性的要求。

4.2 状态切换调节性能

直流驱动系统在矿井作业中需频繁经历工况切换过程，控制器必须在不同负载状态之间实现无滞后切换与过渡平滑处理。系统在调速、起停或换向操作中，驱动回路的功率输出状态、控制器内部参数匹配状态与传感器反馈特性均发生突变，若调节路径未做前馈补偿或状态预判，易引发输出响应超调与稳态偏移。自适应控制器以误差跟踪为核心，内嵌控制增益在线更新机制，在系统输入信号阶跃变化或负载突变条件下，控制器可快速完成对等效系统参数的修正，调节周期内完成增益重构，压缩调节过渡带长度。状态切换过程中，系统输出电流响应时间控制在2ms以内，速度过冲量小于额定转速的5%，超调峰值后能快速收敛至稳态，调节过程无持续震荡或漂移，稳定误差维持在0.3rad/s以内。控制器内部采用死区动态修正机制与状态预测边界控制算法，输出端PWM信号在负载切换中维持平滑过渡，避免桥臂开关状态急剧跳变导致的电压扰动与EMI峰值叠加，系统整体调节性能稳定，适配频繁切换运行模式下的控制需求。在状态切换调节过程中，矿用隔爆兼本质安全型直流配电一体机配合控制器完成输出电压和电流的无缝过渡，保障换向和调速时不会因瞬态电压尖峰或电流冲击触发安全保护误动作。

4.3 控制鲁棒性对比分析

控制系统在复杂扰动环境下的稳定性与跟踪能力体现出控制策略对系统鲁棒性的影响差异，传统PID控制在参数固定结构下难以适应负载转矩波动与供电电压漂

移，其响应稳定性依赖于初期整定精度，对扰动信号的抑制能力有限。自适应控制策略通过在线调整控制器参数，增强系统对模型不确定性与外部扰动的动态适应能力，提升在负载扰动、参数漂移等工况下的闭环性能。表1为两种控制策略在典型扰动条件下的关键性能指标对比，其中自适应控制在峰值超调量、稳态误差与扰动恢复时间上表现出明显优势，系统输出信号在扰动后的恢复速度更快，调节精度更高。

表1 控制策略动态性能对比

指标名称	传统PID控制	自适应控制	单位
峰值超调量	12.3	6.5	%
稳态误差	0.8	0.2	rad/s
抗扰恢复时间	0.91	0.48	s
电流均方波动幅度	1.6	0.7	A ²

自适应控制系统在面对模型不确定性、负载扰动与系统非线性特性时，能维持较高的控制精度与动态稳定性，其结构对矿井工作环境中的高频干扰与工况波动具有更强的抵抗能力，是实现高鲁棒性闭环控制的关键路径。

5 总结

本文围绕矿井复杂环境下直流驱动系统的结构设计 with 自适应控制实现进行了系统分析，构建了具备抗扰能力的硬件结构与自调节能力的控制体系，并通过动态负载特性验证了系统在冲击响应、状态切换及鲁棒性方面的性能优势。自适应策略有效解决了负载扰动下传统控制器响应滞后与精度下降的问题，为矿井智能驱动系统的工程应用提供了理论支撑和实现路径。未来可进一步拓展至多驱动协同与智能诊断方向。

参考文献

[1]张景钢,何鑫,林桂玲.基于IWOA算法的矿井风量智能优化研究[J].矿业安全与环保,2024,51(06):177-184+191.
[2]武强,张小燕,赵颖旺,等.矿井巷道系统突(涌)水蔓延过程物理仿真试验模拟与应用[J].中国矿业大学学报,2024,53(03):421-434.
[3]李玉鹏,刘平,刘海涛,等.矿井通风安全智能实时监测与控制系统研制[J].陕西煤炭,2024,43(04):128-132.
[4]殷爱娟.PLC在矿井局部通风机变频调速系统中的应用研究[J].西部探矿工程,2024,36(03):153-155.
[5]兰莹,耿安朝,耿策,等.非浸没式超滤技术净化处理煤矿矿井水的试验研究[J].工业水处理,2024,44(04):179-186.