

# 自动化钻井设备中电气控制系统的集成与优化探讨

全道标

中原石油工程有限公司钻井二公司 河南 濮阳 457001

**【摘要】**：钻机正在从“电驱动为主、人工操作为主”的模式，逐步转向“电驱动与自动化协同、岗位少人化”的现场组织方式。电气控制系统在这一转型中承担了多源动力分配、执行机构协同、安全联锁和数据采集的核心职责，其工程质量直接决定钻井作业的节拍稳定性与故障可控性。本文围绕中国自动化钻井装备的电气控制系统，结合司钻房集中改造、顶驱与泥浆泵交流变频配套，以及多厂家成套设备并网联调等现场经历，讨论电控系统在功能集成与运行优化中的关键做法。

**【关键词】**：石油；自动化钻井设备；电气控制系统；集成；优化；探讨

DOI:10.12417/3083-5526.25.05.020

自动化钻井装备的电气控制系统承担动力分配、执行机构联动、工况监测与安全联锁等任务，是钻机实现少人化作业的关键环节。国内多数项目采用交流变频电驱动与 PLC 控制架构，在多套成橇设备集中到司钻房后，系统接口、时序关系与安全边界需要重新定义<sup>[1]</sup>。结合公开研究中关于集成控制、环网通信与“一键联动”的工程实践，本文面向现场常见痛点提出可直接落地的集成要点与优化策略。

## 1 自动化钻机设备的电气控制系统概述

在中国油田常用的 3000 m 至 9000 m 交流变频钻机上，电气控制系统一般由供配电、变频传动、PLC 控制、监测仪表、人机界面与安全联锁几部分组成。供配电侧以柴油发电机组或电网为主，经高压房或 VFD 房（SCR 房）内 MCC 柜或进线柜向顶驱、绞车、泥浆泵及辅助设备分路供电。传动侧多采用变频器或直流控制系统对电机实现转速与扭矩闭环控制。控制侧以 PLC 为主站，通过现场总线或工业以太网采集压力、转速、扭矩等信号，并向电磁阀、制动器和变频器下发指令。司钻房内配置综合显示终端，对关键参数、报警与联锁状态进行集中呈现。为适应野外现场复杂的环境、振动和电磁干扰等工况，柜内接地、屏蔽与电源隔离也需同步落实。由于成套设备来源分散，现场更看重电缆敷设整齐、设备布局标准、电气设计逻辑清晰以及使用中便于操作维护检修等。

## 2 自动化钻井设备中电气控制系统的集成

### 2.1 通信与接口统一

在自动化钻井装备电控一体化实施中，通信与接口统一决定了各分系统能否在同一控制平台稳定协同。第一，项目启动阶段应对顶驱、绞车、泥浆泵、铁钻工与猫道等子站逐台清点通信介质类型、物理层接线、波特率与校验方式与站号，并核对寄存器或报文对象的编码规则与字节序，形成可执行点表、报警字典和量程映射表，随设计评审一并固化版本，同时建立变更单与签核流程，避免现场边调边改引起地址漂移与误报

警。第二，多协议并存时需在控制层设置协议边界与网关，将 Modbus、Profibus 或 Profinet 等转换限定在统一入口，明确变频器控制字、运行许可、急停链与联锁位的优先级和保持策略，通信中断或数据超时应触发驱动降级，自动转入端子回路或本地面板接管，并保持制动、卸载或停机等安全状态<sup>[2]</sup>。第三，现场网络宜按司钻房层、动力房层和设备层分区布置，采用双环或 RSTP 环网交换结构，核心交换机配置双电源与告警继电器并引入机柜告警汇总，光纤与网线分桥架敷设并做屏蔽接地，且做抗拉固定与编号管理，搬迁时执行端面清洁与回波测试，减少隐性断纤和偶发丢包。第四，全场 IP 地址、VLAN 与端口需统一规划并预留第三方接口，关键交换机启用端口镜像并结合抓包核对时延、抖动与重传，同时检查端口速率、自动协商与冗余切换状态，对刷新周期设定工程上限，闭环量在本地 PLC 或驱动器高速回路完成，监测量按 1 s 刷新即可，涉及联锁的量采用硬接点或双通道采集，人机界面统一单位、量程与小数位，联调完成后保存参数与程序备份。

### 2.2 司钻房集中控制与权限划分

自动化钻机设备在现场各成套装备的操控入口汇聚到司钻房后，电气控制集成的重心由信号接入转向权限边界与时序一致性的治理。第一，依据钻进、起下钻、循环、甩钻具等各种作业工况，将顶驱、绞车、泥浆泵、管汇及辅助设备按各工况分别打包为操作包，操作包内的启停、调速、刹车制动与各电磁阀控制命令采用同一仲裁点下发，并写入互斥与优先级表，关键输入量采用双通道取样后在 PLC 侧锁存，当某包占用关键机构或通信通道时，其余包仅保留监视与联锁提示，避免多端同时写入导致动作抖动。第二，将手动、半自动、自动固化为统一状态机，模式切换前必须满足转速为零、制动器闭合反馈到位、液压压力与润滑流量达标、急停链路闭合及门禁信号许可等条件，控制器按步骤释放互锁并在 HMI 以逐项勾选提示司钻确认，状态机各状态带时间戳与退出条件，切换后对

作者简介：全道标（1983.10-），汉族，男，河南省濮阳市，本科，工程师，研究方向：石油装备管理。

关键指令设定缓升斜率与限速曲线。第三，对一键联动类功能采用分级确认流程，先执行驱动就绪、自检结果、工艺许可与现场确认信号的汇总判定，再进入联动序列，联动开始前禁止手轮与脚踏输入，程序内对转矩、负载、泵压和位移量设置限幅与超时退出，同时对未到位设备给出退回路径，避免单点滞后使流程悬停。第四，保留顶驱、绞车与泵组本地盘的就近控制通道，本地接管时自动屏蔽远程下发并在司钻房显示占用来源与剩余权限，日志、报警确认和参数修改按账号分级授权，采用 B/S 维护时仅开放诊断与参数查看，远程写入需现场二次授权并自动留痕，同时统一多屏布局与快捷键，配套班组操作清单，运维按周期校核权限表、密码策略与联锁试验记录。

### 2.3 模块化成套与现场联调管理

在石油自动化钻机设备中，电气控制系统集成经常跨越设计、制造、运输、搬迁与复装多个阶段，只有把模块化和联调流程固化，系统一致性才不会随井队搬迁而下降。第一，在出厂调试阶段按主配电、变频驱动、仪表采集与网络通信划分柜组，控制柜与变频柜统一外形尺寸、进出线方向、母排走向及接地排位置，柜内采用可插拔端子排和标准化电缆固定点，预留 RJ45 接口、光纤适配器及电参量测试插座，现场仅需对接主电缆、光纤和少量信号线即可恢复拓扑。第二，对关键回路执行图纸到端子的双向校核，主配电按回路号分层贴标并在端子排侧再标一次，I/O 点按 PLC 地址与点位名称同步标识，电缆两端采用同号套管并核对屏蔽层单端接地，交接前完成绝缘电阻、屏蔽连续性与 PE 贯通测试，验收采用点检表逐项签名并留存照片。第三，联调采取 FAT 与 SAT 两级实施，厂内先完成单机空载、互锁逻辑、急停链路及网络连通性测试，必要时用仿真负载检查再生制动与功率限幅，到井场后再开展带载联动，按工况记录变频器参数、制动斜率、报警阈值、通讯波特率与软件版本号，导出配置文件并生成校验码，形成可回放的调试包<sup>[3]</sup>。第四，备件与工具按清单随队管理，配置交换机、编码器、通讯模块、制动电阻及常用传感器，配套标准跳线、光纤尾纤与备份程序，故障处置按模块直接替换并在 HMI 上执行一键恢复，工具箱内固定配置万用表、绝缘表、光功率计与网线测试仪，关键端子用力矩扳手复紧并记录，备件采用防潮包装并按位号入库，同时在复装后进行接地电阻复测、屏蔽压接复核、柜门密封与紧固件防松检查，复核 EMC 滤波器接线与动力、信号电缆分层走向。

## 3 自动化钻井设备中电气控制系统的优化

### 3.1 传动参数与制动策略整定

电气控制系统完成投用后，传动参数与制动策略的细化整定决定了顶驱、绞车与泥浆泵在现场工况下的动作平顺与保护边界。第一，顶驱与绞车变频器应结合实测转动惯量、齿轮箱间隙及发电机容量重新校核加减速时间，按轻载、常规、重载分档设定转矩上限与过流阈值，低速区采用 S 形给定、限幅滤

波与转矩前馈，必要时启用带阻抑振与弱磁约束，起下钻等工况对应独立参数组，参数切换执行母线预充、斜坡跟随与转速保持，抑制电流尖峰和扭振<sup>[4]</sup>。第二，绞车制动建议划分电制动控制段与机械抱闸保持段，电制动负责速度闭环、下放稳定及零速跟踪，机械抱闸负责停稳保持与急停冗余，切换点由速度阈值、抱闸行程开关和制动器压力反馈三信号一致判定，同时对抱闸压力配置缓升曲线并监测闸瓦温升，制动电阻温度、再生功率与直流母线电压采用分级保护及降额逻辑，避免长时间下放触发过热或过压停机。第三，泥浆泵按排量建立分区控制，小排量侧重出口压力波动抑制与冲次微调，中排量优化效率区间的频率与功率因数，高排量限制过载持续时间并加入软限矩和脉动补偿，联动吸入压力、泵冲频率、润滑油压、冷却水温与安全阀状态，出现空化趋势或闷泵征兆时先降频再降载，恢复后按斜坡回升并复位累计时间，必要时触发旁通冲洗。第四，将波形、故障码与温升曲线周度复盘，围绕谐波、母线纹波与风道堵塞迹象，微调滤波电抗、风机启停点和报警门限，并在换季前封存基线参数组并将修订记录入参数版本库，便于井队交接，定期核对现场各关键传感器零点与量程。

### 3.2 冗余配置与故障自诊断完善

自动化钻井井场连续作业对控制系统的可用性提出更高要求，冗余配置与自诊断需按故障传播路径同步完善。第一，在控制与供电两条链路实施分级冗余，主控 PLC 采用双 CPU 热备并对主备、扫描周期及数据一致性做在线校核，现场总线与以太网通信模块配置双通道并支持自动切换，控制柜内双网口上行至环网并预留旁路跳线，24 V 控制电源采用两路整流电源加隔离二极管汇流，关键继电器、急停回路与安全继电器单独设端子排分段供电，环网交换机配双电源输入并把掉电、端口丢包纳入状态字上送。第二，面向高发元件建立在线诊断逻辑，编码器信号设置断线与相位丢失判据，模拟量通道采用零点漂移、量程越界及变化率限幅联合判定，电磁阀与液压比例阀通过动作指令与回读反馈比对实现卡滞识别，抱闸与限位开关按超时与互锁关系检查，并设置作业模式屏蔽与延时确认，诊断结果以设备号、I/O 点位、回路编号和时间戳写入事件缓冲区并可按班次导出。第三，在人机界面侧采用分级告警与降级策略，提示级仅弹窗并记录，限制级自动进入限速、限压或降低占空比模式并提示允许的操作范围，联锁级立即切断使能输出并给出复位顺序、必要确认条件与现场检查项，告警颜色、声光信号与优先级保持一致，同时对重复报警做合并计数与静默处理，避免画面刷屏掩盖关键项。第四，将远程诊断与现场检修闭环管理，利用井队通信或 5G 网络建立受控访问，按周导出 PLC 运行日志、网络状态与关键参数快照，按月完成程序版本、硬件清单和配置文件镜像备份，故障处理单据与事件码关联存档，并在同型号机队内维护知识条目与推荐备件清单。

### 3.3 联锁逻辑与应急处置流程优化

自动化钻机设备中电气控制系统的连续可用性,关键在于联锁边界清晰且异常处置可落地。第一,电气、机械与司钻共同编制联锁矩阵,围绕顶驱使能、绞车制动许可、泥浆泵启停、井口防喷器及液压站供能建立动作清单,逐条写明输入信号的端子号、采集通道与信号类型,明确阈值、保持时间和判定方法,并标注被切断的变频器使能、接触器或阀组输出,对同源信号设唯一主控点并加互斥条件,避免多系统并行触发矛盾停机,矩阵按编号进行版本冻结与变更追溯。第二,联锁逻辑分层配置,急停类使用硬线回路直切主使能并监测回路完整性,必要时双通道输入取交集,保护类由 PLC 按减矩、卸载、抱闸顺序停机并锁存状态,过程限制类仅执行限速限矩与提示,不直接中断流程,同时对复位信号加入去抖、延时窗口和再启动等待,并设置单次故障复位次数上限。第三,将应急处置脚本嵌入 HMI 报警页,报警弹出时同步呈现必检点位、复位前置条件与推荐操作序列,页面提示检查制动压力、冷却水流量、门禁状态和液压站油位等,并在后台记录触发时刻、关联信号、

操作员确认与权限等级,解除联锁必须填写原因并由班长复核后放行。第四,建立联锁验证与回归测试制度,在停钻窗口按标准脚本完成急停回路、制动反馈、门禁开关、压力开关与安全阀动作试验,测试通过钥匙开关或信号模拟逐项确认,记录含执行人、点位值与结果,发现误动作时仅修正该联锁条件与阈值,不联动改动无关参数<sup>[5]</sup>。

### 结束语

综上所述,在国内油气田钻井现场,电驱动钻机已成为主流配置,顶驱、绞车、泥浆泵等关键设备多采用变频调速与 PLC 集中控制。随着自动化钻井装备的推广,现场对“一键联动”、参数闭环控制以及远程监视提出了更高要求。基于此,上文在结合相关文献研究以及自身工作实践情况下,针对自动化钻机设备中电气控制系统先提出了通信接口、集中控制、模块联调三个集成要点,随后从传动整定、冗余诊断、联锁逻辑与应急处置三个方向提出了优化策略,从而在增强钻井作业效率、安全性与可靠性情况下推动石油行业高质量发展。

### 参考文献:

- [1] 康乃文.石油钻井平台电气自动化控制系统优化设计及能效分析[J].科学与信息化, 2025(4):109-111.
- [2] 李可成.基于 PLC 的钻井电气设备自动化变频调速方法[J].能源与环保, 2022(007):044.
- [3] 齐赋宁.深水石油平台钻井设备自动化控制技术应用研究[J].设备管理与维修, 2021(023):000.
- [4] 胡有忠.石油钻井生产中电气设备的节能措施[J].化工管理, 2021(16):2.DOI:10.19900/j.cnki.ISSN1008-4800.2021.16.017.
- [5] 赵辉,芦宇鹏,程亮,等.石油钻机电气控制系统及其功能优化研究[J].石化技术, 2024, 31(8):346-348.