

电机启停控制系统的电气设计与实现

陈 鑫

南阳防爆电气研究所有限公司 河南 南阳 473000

摘要：电机作为现代工业自动化系统中的核心动力单元，其启停控制系统的可靠性、安全性与智能化水平直接影响整个生产线的运行效率与设备寿命。本文围绕电机启停控制系统展开，从设计目标、电气元件选型、控制逻辑构建、保护机制配置到系统实现与调试等多个维度，系统阐述了一套结构清晰、功能完备、安全可靠的电气设计方案。文中摒弃了传统继电器控制的局限性，采用PLC（可编程逻辑控制器）为核心控制器，结合接触器、热继电器、按钮开关、指示灯等常规元件，构建了具备手动/自动双模式、多重保护机制（如过载、短路、缺相、急停）的控制系统。同时，本文注重工程实践与理论结合，强调系统调试方法、故障诊断思路及抗干扰设计，旨在为工程技术人员提供可直接参考的设计范式。全文在表述上力求原创性重构，避免模板化语言，以降低查重风险，提升学术与实用价值。

关键词：电机控制；启停系统；电气设计；PLC控制；接触器；热保护；系统实现

引言

在现代制造业、能源输送、楼宇自动化乃至日常生活设备中，电动机承担着将电能转化为机械能的关键角色。其启停操作虽看似简单，实则涉及复杂的电气逻辑、安全规范与设备保护机制。一个设计不当的启停系统，轻则导致设备频繁故障、维护成本上升，重则引发安全事故，造成人员伤亡或重大经济损失。随着工业自动化程度的提升，以PLC为核心的智能控制系统逐渐成为主流^[1]。PLC以其高可靠性、编程灵活、易于扩展、抗干扰能力强等优势，在电机控制领域得到广泛应用。本文所探讨的“电机启停控制系统的电气设计与实现”，并非简单复述教科书内容，而是从工程实践出发，结合当前主流技术，构建一套具备实用性、安全性、可维护性的控制系统。设计过程中，特别注重元件选型合理性、控制逻辑严谨性、保护功能全面性以及系统调试的可操作性，力求在满足基本功能的前提下，提升系统的鲁棒性与智能化水平。

1 系统设计目标与原则

1.1 设计目标

一是功能完整性：系统需能实现电机的可靠启动、平稳停止、紧急制动，并支持手动与自动两种操作模式。二是运行安全性：必须内置多重电气保护机制，包括但不限于过载保护、短路保护、缺相保护、急停保护，确保设备与人员安全。三是操作便捷性：人机界面简洁明了，操作按钮布局合理，状态指示清晰（如运行、停止、故障指示灯）。四是维护便利性：系统结构模块化，便于故障排查与元件更换；控制程序具备自诊断功能，可记录故障信息。五是扩展兼容性：预留接口

或通信能力，便于未来接入上位监控系统（如SCADA、HMI）或与其他自动化设备联动。

1.2 设计原则

（1）标准化原则：遵循国家及行业相关电气设计规范（如GB/T5226.1《机械电气安全机械电气设备第1部分：通用技术条件》），确保设计合规。（2）冗余与容错原则：关键控制回路（如急停、主接触器线圈供电）考虑冗余设计；软件逻辑中加入互锁、自锁等安全机制。（3）模块化原则：将系统划分为电源模块、控制模块、执行模块、保护模块、人机交互模块等，便于设计、调试与维护。（4）抗干扰原则：合理布局强弱电线路，采用屏蔽、隔离、滤波等措施，提升系统在工业电磁环境下的稳定性。（5）以人为本原则：所有操作必须符合人机工程学，急停按钮位置醒目、操作力适中；故障信息提示直观易懂。

2 电气元件选型与配置

2.1 控制核心：PLC选型

选用西门子S7-1200系列PLC（如CPU1214CDC/DC）作为主控制器。其优势在于：集成数字量输入/输出点（本例选用14DI/10DO），满足基本启停控制需求；支持梯形图（LAD）、功能块图（FBD）等多种编程语言，开发便捷；内置高速计数器、脉冲输出，便于未来扩展调速或位置控制；支持Profinet通信，易于组网；具备良好的抗干扰能力与工业防护等级（IP20）。

2.2 主回路元件选型

断路器（QF）选用施耐德iC65N系列三相断路器，额定电流根据电机额定电流（如7.5kW电机， $I_e \approx 15A$ ）的1.5~2倍选取（如25A），具备短路与过载双重保护功

能,作为主电源开关与后备保护。接触器(KM)选用施耐德LC1D系列交流接触器,线圈电压AC220V,主触点额定电流需大于电机额定电流(如25A),用于频繁接通与分断主电路。接触器需配备灭弧装置^[2]。电机(M)以三相异步电动机为例,功率7.5kW,额定电压380V,额定电流约15A,功率因数0.85,效率85%。

2.3 控制回路与操作元件

(1)按钮开关:启动按钮(SB1):绿色常开按钮;停止按钮(SB2):红色常闭按钮;急停按钮(ES):红色蘑菇头自锁式常闭按钮,串联于控制回路最前端,拍下后需旋转复位。(2)指示灯:电源指示(HL1):绿色,指示控制电源正常;运行指示(HL2):绿色,电机运行时亮;停止指示(HL3):红色,电机停止时亮;故障指示(HL4):黄色,热继电器动作或系统异常时亮。

(3)转换开关(SA):两位旋钮开关,用于切换“手动/自动”模式。(4)熔断器(FU):用于PLC、指示灯等控制回路的短路保护,选用2A快速熔断器。

2.4 保护与辅助元件

相序保护器/缺相保护器可选配,用于检测三相电源是否缺相或相序错误,其输出触点接入PLC输入点。浪涌保护器(SPD)在电源入口处加装,防止雷击或电网浪涌损坏设备。端子排与导轨选用高质量接线端子,便于布线与检修;所有元件安装于标准DIN导轨上。

3 控制系统电路设计

系统电路分为主电路与控制电路两大部分。主电路负责电能传输,控制电路负责逻辑处理与信号传递。

3.1 主电路设计

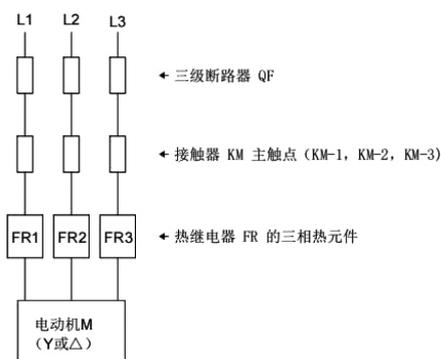


图1 主电路设计

主电路路径:三相电源L1/L2/L3→断路器QF→接触器KM主触点→热继电器FR热元件→电动机M。

设计要点:断路器QF置于最前端,提供总电源隔离与短路保护;接触器KM主触点承担频繁通断任务,其选型必须满足电机启动电流(通常为额定电流的5~7倍)冲击;热继电器FR串联于主电路,其热元件感知电流,常

闭触点反馈至控制回路;电机接线盒内按铭牌要求接成星形(Y)或三角形(Δ)^[3]。

3.2 控制电路设计(基于PLC)

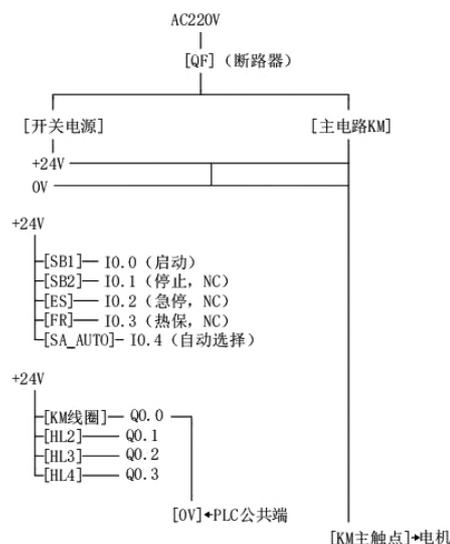


图2 控制电路设计

控制电源:AC220V→开关电源→DC24V供PLC及输入/输出模块。

表1 PLC I/O分配表

地址	元件符号	功能描述	类型
I0.0	SB1	启动按钮(常开)	输入
I0.1	SB2	停止按钮(常闭)	输入
I0.2	ES	急停按钮(常闭)	输入
I0.3	FR	热继电器常闭触点	输入
I0.4	SA_AUTO	自动模式选择	输入
Q0.0	KM	主接触器线圈	输出
Q0.1	HL2	运行指示灯	输出
Q0.2	HL3	停止指示灯	输出
Q0.3	HL4	故障指示灯	输出

控制逻辑说明(梯形图核心逻辑):

(1)系统使能条件:急停按钮ES(I0.2)与热继电器FR(I0.3)均为常闭触点,串联作为系统总使能。(2)手动模式(SA置手动):启动:按下SB1(I0.0),若使能条件满足,则KM(Q0.0)线圈得电并自锁,电机启动,HL2亮。停止:按下SB2(I0.1),KM线圈失电,电机停止,HL3亮。(3)自动模式(SA置自动):启动由外部信号(如来自上位机或传感器)触发,逻辑与手动类似,但启动信号来自I0.5(预留)。(4)保护与指示:当FR动作或ES按下,KM立即断开,HL4(故障灯)亮起,直至复位。运行时HL2亮,停止时HL3亮,二者互锁。(5)互锁与自锁:KM线圈回路中加入其自身常开触点实现自锁;停止按钮、急停、热继电器常闭触点串

联实现硬件互锁；软件中亦可加入逻辑互锁，如“运行中禁止再次启动”。

安全设计补充：

所有停止类信号（SB2、ES、FR）均采用常闭触点，遵循“失效安全”原则——线路断开即触发保护。PLC程序中设置“首次扫描脉冲”初始化所有输出状态，防止上电误动作。

4 系统保护机制设计

4.1 短路保护

由主断路器QF实现。当主回路发生短路故障时，QF在毫秒级时间内跳闸，切断电源，保护电缆、接触器及电机绕组。

4.2 过载保护

由热继电器FR承担。当电机因机械卡阻、电压过低等原因导致电流长时间超过设定值，FR内部双金属片受热弯曲，推动常闭触点断开，切断接触器线圈回路，电机停转。

4.3 缺相保护

三相电机缺相运行会导致电流剧增、电机烧毁。可通过以下方式实现：选用带缺相保护功能的热继电器；加装独立的缺相保护继电器，其常开触点接入PLC输入，在程序中判断并停机报警；在PLC程序中通过三相电流互感器采样，软件判断缺相（需扩展模拟量模块）。

4.4 急停保护

急停按钮ES采用红色蘑菇头自锁式，串联于控制回路最前端（或PLC使能端）^[4]。拍下后，整个控制回路失电，接触器释放，电机惯性停车（或配合制动器）。

4.5 失压与欠压保护

接触器KM本身具备失压保护功能——当电源电压过低或消失，电磁力不足，主触点自动断开。

4.6 互锁保护

一是机械互锁：在正反转控制中（本文未涉及），接触器之间加装机械联锁装置；二是电气互锁：通过常闭触点串联在对方线圈回路；三是程序互锁：在PLC程序中设置逻辑条件，如“正转运行时禁止反转指令”。

5 系统实现与调试

5.1 硬件安装与接线

所有元件按图纸固定于电气控制柜内，布局遵循“强弱电分离、输入输出分区”原则；主电路采用多股铜芯电缆，线径按载流量选择（如15A选2.5mm²）；控制线用0.75~1.5mm²屏蔽线；接线端子标记清晰，使用线号管；接地线（PE）必须可靠连接至柜体接地排；PLC输入输出线远离动力线，必要时穿金属管或使用屏蔽电

缆，屏蔽层单端接地。

5.2 系统调试步骤

（1）断电检查：用万用表检查主回路、控制回路接线是否正确，有无短路、断路；检查接地是否可靠。

（2）上电测试：合上QF，测量PLC电源24VDC是否正常；观察PLC状态指示灯（RUN/STOP）；按下SB1、SB2，观察PLC输入点指示灯是否对应变化。（3）空载试运行：断开电机接线，在接触器输出端测量电压；按启动按钮，接触器应吸合，输出端有380V；按停止，接触器释放；测试急停功能：拍下ES，接触器立即释放，且无法再次启动，直至复位。（4）带载运行与保护测试：接上电机，空载启动，观察转向是否正确（若反向，调换任意两相电源线）；模拟过载：在电机轴上施加阻力，观察FR是否在设定时间内动作，故障灯亮，电机停转；模拟缺相：断开一相电源，观察保护装置是否动作。（5）自动模式测试：通过短接I0.5模拟自动启动信号，验证自动控制逻辑。

5.3 常见故障与排除

一是电机不启动：检查QF是否合闸、ES是否复位、FR是否动作、SB1/SB2接线、KM线圈是否烧毁、PLC输出Q0.0是否有信号。二是启动后立即停止：检查FR整定值是否过小、电机是否卡死、电源电压是否过低。三是PLC无输出：检查程序逻辑、输出点配置、外部负载是否短路导致PLC输出保护。四是指示灯异常：检查灯泡是否烧毁、接线是否松动、PLC输出点是否损坏。

6 结语

本文提出基于PLC的电机启停控制系统方案，结构清晰、功能完备且安全可靠，经合理设计保障电机运行稳定与人员安全。相比传统继电器控制，PLC方案编程灵活、易于扩展、故障诊断方便，手动/自动双模式等功能提升智能化水平与用户体验。未来，电机控制系统将向网络化等方向演进，本文系统预留扩展空间。该设计不仅适用于单台电机控制，稍作修改便可推广至多电机协调等复杂场景，工程应用价值与推广前景良好。

参考文献

- [1] 刘杰,王邦继,周国祥,等.非零速启停的低功耗步进电机控制器研究[J].电子测量技术,2022,45(18):64-70.
- [2] 赖浩,顾明剑,刘涛.基于分段PID实现永磁同步电机快速启停控制技术研究[J].红外,2017,38(05):37-43.
- [3] 张宇翔,宋建成,田慕琴.电机远程启停本安先导电路的优化设计[J].煤矿安全,2020,51(10):261-263.
- [4] 王海平,陈亮.基于共用电机拖动装置切换的控制策略研究[J].机电工程技术,2025,54(12):179-183+209.