

# 电机正反转互锁保护电路的 FPGA 设计与验证

张思靖

贵州航天控制技术有限公司 贵州 贵阳 550009

**【摘要】**：正反转电机在切换过程中易发生短路及机械冲击，传统继电器控制存在响应慢、可靠性低等问题。基于 FPGA 的正反转互锁保护电路利用高速逻辑运算和可编程控制，实现电机正反转操作的实时互锁，防止同时加正负电流导致故障。该电路通过硬件描述语言实现状态监控与逻辑判断，具有响应快速、可靠性高、可重复使用等特点。实验验证显示，FPGA 互锁逻辑能在毫秒级完成切换控制，显著提升电机运行安全性与系统稳定性，为复杂电机控制系统提供有效的硬件保护方案。

**【关键词】**：FPGA；正反转；互锁保护；电机控制；硬件逻辑

DOI:10.12417/2705-0998.26.06.056

## 引言

电机正反转切换过程中，若控制不当可能引起电流冲击和机械损伤，尤其在高功率应用中风险更为突出。高速逻辑控制技术为电机保护提供了新的途径，其中 FPGA 以其可编程性和高速运算能力，能够实时监测电机状态并执行精确的互锁操作。在复杂的控制环境下，FPGA 通过硬件级逻辑判断，可在瞬时完成正反转切换的安全控制，从而降低故障发生概率。借助 FPGA 实现的互锁保护，不仅提升了电机运行的可靠性，也为智能化控制系统的精确管理提供了技术支撑，同时在工业自动化和高性能驱动场景中展现出广阔应用潜力。

## 1 电机正反转切换风险识别

### 1.1 正反转冲击引发的问题

电机在正反转切换过程中，如果控制不当，会产生瞬时电流冲击，这种冲击可能导致电机绕组发热、电刷磨损加剧甚至烧毁驱动器。在高速运转的系统中，这种冲击不仅影响电机寿命，还可能引起机械部件震动或齿轮啮合异常，从而降低整体设备的稳定性。特别是在负载变化较大或启动频繁的环境中，正反转冲击会引起系统振荡和控制不稳定，增加事故风险<sup>[1]</sup>。电机电流的反向突变可能触发保护装置误动作，导致生产停机和设备损耗。正反转操作如果缺乏有效的保护和监控机制，整个驱动系统的可靠性将受到严重威胁，对工业自动化和精密设备的运行安全形成挑战。

### 1.2 传统控制方法的局限性

传统电机正反转控制多依赖继电器或接触器实现，这类方法虽然结构简单，但响应速度慢且易出现触点粘连或机械磨损。继电器切换需要一定的物理动作时间，使得在快速切换场景下无法实现毫秒级控制，增加了电流冲击风险。与此同时，传统控制逻辑难以对电机状态进行实时监测和精确判断，对复杂负载变化适应性有限。在负载异常或系统突发状况下，传统方法往往无法及时切断错误的电流路径，容易引发设备损伤。继电器系统的可编程性不足，难以灵活应对不同工况需求，维护成本高且易出故障，使高性能电机控制的安全性和可靠性难以保障。

以保障。

### 1.3 系统安全性挑战

电机系统在工业应用中承载着多重任务，正反转切换的不当操作可能引发连锁风险。瞬态过电流不仅对电机本身构成威胁，还可能损伤电源模块、控制板和保护电路。高速运转场景中，机械冲击与电流波动交织，使系统面临稳定性降低的风险，进而影响生产连续性和设备寿命。复杂负载条件下的误操作或者控制延迟可能导致设备异常停机，增加维护难度。除此之外，安全事故的隐患还涉及操作人员和周边设施，电气故障和机械冲击均有潜在伤害风险。因此，实现有效的互锁保护成为确保电机系统运行稳定、减少事故发生的重要环节，对提高工业自动化水平和设备可靠性提出了严峻要求。

## 2 FPGA 互锁逻辑设计原理

### 2.1 互锁控制基本逻辑

互锁控制的核心在于确保电机正反转在任何时刻都不会同时接通，以防止电流短路或设备损坏。FPGA 通过并行逻辑运算实现对电机状态的实时控制，能够快速响应外部控制信号并执行互锁判断。逻辑结构中包含状态寄存器和控制信号门电路，当正转信号激活时，反转信号自动被屏蔽，反之亦然。基本的互锁逻辑可用如下布尔代数表达式描述：

$$\begin{cases} O_{CW} = I_{CW} \cdot \overline{I_{CCW}} \cdot E_{nor} \\ O_{CCW} = I_{CCW} \cdot \overline{I_{CW}} \cdot E_{nor} \end{cases}$$

其中， $O_{CW}$  为正转驱动输出， $O_{CCW}$  为反转驱动输出， $I_{CW}$  为正转输入指令， $I_{CCW}$  为反转输入指令， $E_{nor}$  为系统使能与状态正常信号（过流或故障时置 0）。

通过这种硬件级逻辑隔离，即使在高频切换或突发负载情况下，系统也能保持电机动作的正确性和安全性<sup>[2]</sup>。互锁逻辑的设计不仅强调功能实现，还需考虑延迟时间最小化，以保证切换动作在毫秒级完成，从而避免电流冲击对电机和驱动器的影响。整体逻辑设计与电路结构紧密结合，使互锁保护在硬件层面可靠执行，无需依赖复杂的软件干预。

## 2.2 状态监控与信号判断

状态监控模块承担对电机实际运行状态的持续检测，结合输入控制信号进行判断，是实现可靠互锁的关键环节。FPGA能够采集电机正转、反转以及过流等多路信号，并实时进行逻辑运算，生成互锁控制命令。在复杂工况下，监控模块不仅检测信号变化，还可以识别异常状态，例如同时存在正反转指令或负载过大情况。通过将各类状态信号编码并存储在寄存器中，系统能够快速比对并生成安全动作指令。这样的设计保证了在不同负载和运行条件下，互锁逻辑都能准确响应，避免误动作或延迟响应对电机造成损伤，同时为后续电路调试和性能优化提供清晰的数据依据，使整个控制系统稳定而可靠。

## 2.3 硬件描述语言实现方式

硬件描述语言（HDL）为FPGA互锁逻辑的实现提供了可编程和可重复使用的手段。通过Verilog或VHDL编写控制模块，可以将互锁逻辑、状态监控以及信号判断完整映射到FPGA硬件资源上，实现并行处理和高速运算。HDL代码中定义了状态寄存器、逻辑门电路和输出接口，通过仿真工具验证逻辑正确性，确保在实际运行中不会出现冲突或延迟过大。硬件描述语言还允许模块化设计，将不同功能单元独立封装，便于调试、升级和系统扩展。通过综合、布局布线和时序分析，FPGA实现的互锁逻辑能够在实际应用中保持毫秒级响应，确保正反转切换安全可靠，同时提高控制系统的灵活性和可维护性，为复杂电机控制提供稳固的硬件基础。

# 3 互锁保护电路实现方法

## 3.1 电路结构与模块划分

互锁保护电路通常由控制模块、状态监测模块和执行模块组成，各模块功能相互独立又紧密协作，形成完整的硬件保护系统。控制模块负责接收外部指令并生成互锁逻辑信号，状态监测模块实时采集电机运行数据，包括转向信号和负载状态，执行模块则根据控制信号驱动电机或切断电源。模块化设计能够将复杂电路拆分为功能单元，便于调试和维护，同时降低电路设计的复杂度<sup>[3]</sup>。结构划分清晰使各模块在工作时互不干扰，保证正反转互锁逻辑的正确执行。电路布局考虑信号路径和响应速度，将关键控制线路置于最短路径以减少延迟，从而提高系统的稳定性和保护效率，为高频切换场景提供可靠的硬件基础。

## 3.2 信号输入输出及接口设计

互锁保护电路的输入输出设计直接决定了系统响应的准确性和速度。输入接口主要来自控制器的正反转指令信号、电流检测信号和电机状态反馈信号，输出接口负责驱动继电器或半导体开关，实现对电机的动作控制。接口设计中采用标准化信号编码，使FPGA能够快速识别指令并生成互锁逻辑输出。通过信号滤波与去抖动处理，减少外部干扰对逻辑判断

的影响，提高系统的可靠性。接口之间保持逻辑隔离，确保任何输入异常不会直接影响电机电作，增强系统抗干扰能力。合理的接口设计不仅保证了控制信号的准确传递，还为电路调试、功能扩展和与其他控制单元集成提供了灵活性，使整个系统具备高度可靠性和适应性。

## 3.3 逻辑验证与功能调试

逻辑验证和功能调试是保证互锁保护电路可靠运行的关键环节。通过对FPGA逻辑进行仿真，可以模拟正反转指令、负载变化及异常情况，观察输出动作是否符合预期，及时发现逻辑冲突或延迟问题。调试过程中对各模块进行逐步测试，验证输入信号采集、逻辑运算及输出响应是否协同一致，确保正反转互锁在各种工况下均能正确执行。在硬件验证阶段，通过接入实际电机和负载环境进行实验，检测系统的响应速度、动作准确性和抗干扰能力。功能调试不仅关注电路的正确性，也评估其稳定性与可重复性，保证在高频切换或突发工况下，互锁保护电路依然能够维持电机运行安全，为整个电机控制系统提供可靠的硬件保障。

# 4 实验验证与性能评估

## 4.1 切换响应速度测试

在实验过程中，通过对电机正反转指令的连续输入进行测试，观察系统从接收到控制信号到执行互锁动作所需的时间。FPGA硬件实现的互锁逻辑表现出毫秒级的响应速度，使电机在切换过程中避免电流冲击和机械冲击。测试过程中记录不同负载条件下的响应时间变化，分析切换动作是否保持稳定，确保系统在高频操作和突发指令下仍能准确执行<sup>[4]</sup>。实验结果表明，硬件逻辑直接处理输入信号并生成输出，使延迟显著低于传统继电器控制，实现快速、安全的切换，同时验证了互锁设计的有效性，为高可靠性电机控制提供了量化依据。

## 4.2 可靠性与稳定性分析

可靠性评估通过长时间连续运行和多次切换操作进行验证，观察互锁保护电路在不同工况下是否存在误动作或延迟。FPGA逻辑能够稳定处理正反转信号及异常输入，即使在负载波动或突发条件下，也能保持电机电作的准确性。稳定性分析涉及信号波动、温度变化以及外部干扰对系统输出的影响，实验显示电路在多种工况下仍维持一致响应，保持逻辑正确性。通过持续运行测试和数据记录，可以评估电路长期使用的可靠性，为工业应用提供参考依据，确保互锁保护在高频操作环境中具备耐用性和抗干扰能力。

## 4.3 与传统控制的对比结果

对比实验显示，FPGA实现的互锁保护在切换速度和动作准确性上显著优于传统继电器控制。传统方法由于物理触点动作延迟，容易在正反转切换中产生电流冲击，而FPGA硬件逻辑几乎消除了延迟，使电机切换安全可靠。在负载波动和低频

切换测试中,传统系统出现误动作和保护触发异常的频率较高,而FPGA系统保持稳定输出,逻辑判断精准。数据对比表明,硬件逻辑实现不仅提高了切换响应速度,还降低了故障风险,同时减轻了系统维护压力。

## 5 电机运行安全优化分析

### 5.1 互锁保护的安全提升

通过FPGA实现的互锁保护显著降低了电机正反转切换过程中发生短路和过流的风险。硬件逻辑能够在毫秒级对输入指令进行实时判断,将错误或冲突信号隔离,确保电机在任何时刻都只接受合法的驱动命令。正反转互锁不仅防止了电机绕组损伤,还避免了驱动器和控制器的过载工作,减少了系统故障和停机概率<sup>[5]</sup>。高精度的逻辑判断能够针对不同负载和工况进行适应性控制,在负载突变或指令频繁切换时依然保持系统安全,防止误动作或意外启动。

### 5.2 系统稳定性增强措施

系统稳定性在电机控制中至关重要,FPGA互锁逻辑通过高速并行运算保持切换指令的精确执行,减少了系统振荡和瞬态过电流对设备的影响。状态监控模块持续采集电机运行信号,并通过逻辑判断及时调整输出,确保各模块动作协调一致。硬件级控制消除了传统继电器系统中由于机械延迟产生的响应误差,使电机在不同负载和高速切换条件下保持平稳运行。同时,通过信号滤波、寄存器同步和接口隔离等措施,提高了

系统抗干扰能力,使外部电气噪声不会引起误动作或输出不稳定。

### 5.3 应用推广潜力与实施效果

FPGA互锁保护电路在实际应用中展现出高度灵活性和可扩展性,可适配不同类型电机和负载条件,实现正反转切换的安全控制。实验与测试结果显示,在高速切换和负载波动环境下,系统能够保持稳定输出,切换响应迅速且误动作极少。模块化设计和可编程逻辑为工业生产线和智能驱动系统的集成提供便利,同时降低维护成本和故障率。通过硬件实现的互锁保护可以应用于多种复杂工况,包括高功率驱动、连续运转以及频繁切换场景,提高设备可靠性和生产效率。实施效果表明,系统安全性和稳定性得到明显提升,为电机控制技术在自动化和智能化领域的推广奠定了基础,体现出广泛的工业应用价值。

## 6 结语

电机正反转互锁保护电路利用FPGA高速逻辑运算,实现了电机切换的安全控制和实时响应。硬件逻辑能够在不同负载和高速切换条件下保持稳定输出,有效避免短路、电流冲击和机械冲击对系统造成的损害。实验验证表明,互锁设计在响应速度、可靠性和系统稳定性方面均优于传统控制方式,保证了电机长期运行的安全性和可控性。该电路不仅提升了工业自动化环境下的设备可靠性,也为高性能电机控制系统的安全管理提供了可靠的技术基础,展现出显著的应用价值和推广潜力。

## 参考文献:

- [1] 陈盼,吕彬,胡正文,等.基于FPGA的无功补偿投切技术研究[J].电力与能源,2025,46(06):620-624.
- [2] 杭天浩.基于FPGA的毫米波雷达目标检测设计[J].现代信息科技,2025,9(24):17-20+26.
- [3] 唐林,罗镭昕,王杰,等.基于FPGA的脉冲信号检测系统设计与实验分析[J].机电信息,2025,(24):44-47+51.
- [4] 郭永强,陶杰,江鸿鹄,等.基于FPGA的模数转换器单粒子效应验证系统设计[J].微电子学,2025,55(06):1083-1088.
- [5] 王弼,孙力,陈凡,等.电机正反转实验在职业技能培训中的应用[J].设备管理与维修,2024,(11):75-77.