

五轴数控机床电气控制中急停回路的可靠性设计与验证

贺文斌

(深圳市博视精密机械有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要 在五轴数控机床的电气控制系统中, 急停回路是保障设备运行安全、避免人员伤亡与财产损失的核心保护环节。这类机床作为高精度、高复杂度的制造装备, 运行过程中涉及多轴联动、高速切削以及复杂负载变化, 急停回路的可靠性直接决定了设备在异常工况下的风险控制能力。本文采用故障树分析、加速寿命试验及现场试运行测试等方法, 构建了硬件冗余、逻辑联锁优化、故障监测预警的三级可靠性设计方案。经验证, 该方案可将急停回路平均无故障工作时间提升至 31 250 h, 误触发率降至 0.2 次/千小时, 有效保障设备安全稳定运行。

关键词 五轴数控机床; 电气控制; 急停回路; 可靠性设计; 故障树分析

中图分类号: TG659

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.041

0 引言

在航空航天、汽车零部件等高端制造领域, 五轴数控机床凭借多轴联动、高速高精的加工特性成为核心装备, 其运行安全性直接关系到生产效益与人员安全。急停回路作为设备电气控制系统的最后一道安全屏障, 需满足《机械安全 机械电气设备 第 1 部分: 通用技术条件》(GB 5226.1-2019) 中 MTBF 不低于 15 000 h 的要求。但在实际工况中, 五轴联动带来的高动态负载、车间高湿与电磁干扰、人为操作不规范等因素, 易导致传统单回路急停系统出现响应延迟、误触发或失效问题。基于此, 本文剖析其失效模式与影响因素, 构建三级可靠性设计方案并进行验证, 为提升设备安全防护水平提供技术参考。

1 五轴数控机床急停回路失效模式与影响因素剖析

在五轴数控机床的电气控制系统中, 急停回路作为设备安全保护的最后一道屏障, 其可靠性直接关系到设备运行安全与操作人员生命安全, 根据《机械安全 机械电气设备 第 1 部分: 通用技术条件》(GB 5226.1-2019) 要求, 急停回路的平均无故障工作时间 (MTBF) 需不低于 15 000 h。五轴数控机床运行过程中涉及 X、Y、Z、A、C 五轴联动, 最高进给速度可达 60 m/min, 主轴转速普遍超过 10 000 r/min, 当出现刀具崩损、工件松动或程序错误等异常工况时, 急停回路需在 0.5 s 内切断主驱动力源与进给驱动回路, 若回路失效将导致事故后果扩大化^[1]。因此, 深入分析急停回路的失

效模式及影响因素对提升设备安全性具有关键意义。

影响急停回路可靠性的因素需从环境、负载、人为操作三个方面综合分析: 在环境因素中, 数控机床工作现场的切削液飞溅会导致电气柜内湿度升高, 当相对湿度超过 70% 时, 元件绝缘电阻将从 100 M Ω 降至 5 M Ω , 满足不了《低压开关设备和控制设备 第 1 部分: 总则》(GB/T 14048.1-2023) 规定的最小绝缘电阻要求, 同时高频主轴产生的电磁辐射 (频率范围 10 kHz ~ 100 MHz) 会对急停信号线路产生干扰, 干扰电压超过 5 V 时即导致信号失真; 在负载变化方面, 五轴联动加工时进给电机负载电流波动范围可达 0 ~ 15 A, 当负载突变率超过 5 A/ms 时, 会在急停回路中产生感应电动势, 最高可达 8 V, 影响回路正常信号传输; 人为操作因素主要包括急停按钮误按、端子接线时的力矩不足 (标准力矩为 1.2 ~ 1.5 N·m, 当实际力矩仅为 0.8 N·m 时, 端子松动概率在 1 000 h 内达 12.5%), 以及维护时未按规程进行回路测试等, 这些因素均会直接降低急停回路的可靠性水平。

2 五轴数控机床急停回路三级可靠性设计方案

2.1 硬件冗余设计: 双回路与故障安全型元器件

硬件冗余设计是提升急停回路可靠性的基础, 采用双回路冗余架构可大幅降低单点失效风险。本方案中, 急停回路主回路采用两条独立导线 (型号 RVV 2 \times 1.5 mm²) 分别连接急停按钮与 PLC 输入模块, 两条回路分别接入 PLC 的不同输入端子 (I0.0 与 I0.1), 且

作者简介: 贺文斌 (1995-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 数控机床电气设计。

导线敷设时采用分开布线方式, 间距不小于 50 mm, 避免因单条线路故障导致整个回路失效^[2]。

2.2 逻辑联锁优化: PLC 程序的双重校验与延时判断

逻辑联锁优化通过 PLC 程序设计实现急停信号的精准识别与可靠执行, 首先采用急停信号双重校验逻辑, PLC 程序中同时采集双回路的急停信号 (I0.0 与 I0.1), 设置“双信号一致”判断条件, 仅当 I0.0 与 I0.1 同时为急停状态 (低电平) 且持续时间超过 200 ms 时, 才判定为有效急停信号, 若仅单一信号为急停状态或信号持续时间不足 200 ms, 则判定为无效信号, PLC 不执行急停动作, 该设计可有效避免单一信号干扰或瞬时波动引发的误停, 经测试, 误触发概率从 1.8 次/千小时降至 0.2 次/千小时^[3]。

为验证逻辑设计的可靠性, 采用故障注入测试方法, 在 PLC 输入端子处注入不同类型的干扰信号: 注入 5 V、10 ms 的瞬时高电平信号时, 程序未触发急停动作; 注入双回路同时低电平、150 ms 的信号时, 程序判定为无效信号; 仅注入 I0.0 端子低电平信号时, 程序触发故障报警, 测试结果表明, 该逻辑设计可有效识别并排除各类干扰信号与故障信号, 满足《控制网络 HBES 技术规范 住宅和楼宇控制系统》(GB/T 20965-2025) 中对安全信号传输的要求。

2.3 故障监测预警: 电流、电压与回路阻抗检测

故障监测预警系统通过实时采集急停回路的电流、电压与阻抗参数, 实现潜在故障的提前识别与预警, 该系统由数据采集模块、信号处理模块与预警模块三部分组成: 数据采集模块选用研华 ADAM-4017+ 模拟量输入模块, 其分辨率为 12 位, 采样速率达 10 Hz, 可同时采集回路电流 (通过串联 0.1 Ω 分流电阻实现, 电流测量范围 0 ~ 2 A, 精度 $\pm 0.5\%$)、电压 (并联 1 M Ω 分压电阻, 电压测量范围 0 ~ 24 V, 精度 $\pm 0.3\%$) 与回路阻抗 (采用恒流源法, 注入 1 mA 恒定电流, 通过测量电压计算阻抗, 测量范围 0 ~ 100 Ω , 精度 $\pm 1\%$); 信号处理模块采用 STM32F103 单片机, 对采集到的数据进行滤波 (采用卡尔曼滤波算法, 滤波后信号波动幅度从 ± 50 mV 降至 ± 5 mV)、校准与分析, 计算回路参数的实时值与变化趋势; 预警模块通过 RS485 通信将数据上传至 HMI, 并设置三级预警阈值, 实现分级预警。

电流监测主要用于识别回路过载与元件故障, 其监测链路的构建依托于精准的硬件选型与数据处理逻辑。在硬件层面, 通过在回路中串联 0.1 Ω 高精度分流电阻实现电流信号的采集, 该电阻具备低温漂、高

稳定性的特性, 可避免因电阻自身参数变化导致的监测误差, 配合研华 ADAM-4017+ 模拟量输入模块 10 Hz 的采样速率, 能实时捕捉电流的动态变化。正常工作时急停回路电流为 0.3 ~ 0.5 A, 这一区间是基于故障安全型接触器、急停按钮等元器件的额定工作电流测算得出的稳定区间。当电流超过 0.8 A (一级预警阈值) 时, HMI 会自动弹出黄色预警弹窗并标注“回路负载异常”, 同时系统将预警信息推送至车间维护终端, 提示维护人员在 2 小时内检查回路负载, 此类电流异常多由接触器触点轻微粘连、导线绝缘层局部破损引发的微小短路导致, 及时排查可避免故障扩大; 当电流超过 1.0 A (二级预警阈值) 时, 系统会立即触发声光报警, 报警灯以 1 Hz 频率闪烁、蜂鸣器持续鸣响, 同时自动切断机床冷却风机、液压泵站等非关键负载, 降低回路整体负荷, 此时故障多为元件老化引发的局部短路, 维护人员需在 30 min 内到场开展全面检测; 当电流超过 1.2 A (三级预警阈值) 时, 说明回路已出现严重短路故障, 主回路已无法保障安全, 系统会直接启动备用急停回路, 在 0.2 s 内切断主轴与进给驱动的全部动力源, 同时锁定机床操作权限, 直至故障完全排除, 从根本上确保设备与人员安全。电压监测重点关注回路压降, 其核心是通过监测回路两端电压差判断线路与端子的健康状态。急停回路的供电电源为 24 V 直流电源, 在正常情况下, 因导线内阻与端子接触电阻产生的回路压降 ≤ 0.5 V, 该数值符合《低压开关设备和控制设备 第 1 部分: 总则》(GB/T 14048.1-2023) 中对控制回路压降的限定标准; 当压降超过 1.0 V (一级预警) 时, 系统会判定为端子松动或导线老化, 这是因为端子力矩不足会导致接触电阻增大, 而导线老化会使线径变细、内阻上升, 二者均会引发压降升高, 此时系统会提示维护人员使用扭矩扳手复紧端子 (按 1.2 ~ 1.5 N·m 标准力矩)、抽检导线绝缘层状态; 当压降超过 1.5 V (二级预警) 时, 表明故障已进入需紧急处理阶段, 可能是导线断裂、端子氧化严重等问题, 系统会通过阻抗定位算法自动锁定故障大致位置, 同时以短信、HMI 弹窗双渠道通知维护主管, 确保故障在 10 min 内被响应, 避免因压降过大导致急停信号传输中断。回路阻抗监测可提前发现线路老化与接触不良问题, 其采用恒流源法实现精准测量, 通过向回路注入 1 mA 恒定电流, 依据欧姆定律换算出回路实时阻抗。新回路因导线导电性好、端子接触紧密, 阻抗通常为 0.05 ~ 0.1 Ω , 随着设备运行时间增加, 切削液侵蚀、粉尘堆积会逐步破坏导线绝缘层、增大端子接触电阻, 阻抗值随之上升^[4]。

3 五轴数控机床急停回路可靠性验证

3.1 可靠性验证方法与流程

为验证急停回路可靠性设计方案的有效性,采用故障树分析(FTA)、加速寿命试验与现场试运行测试相结合的验证方法,形成完整的可靠性验证体系。故障树分析以“急停回路失效”为顶事件,建立包含 23 个底事件的故障树模型,通过最小割集计算得出系统最小割集总数为 18 个,其中一阶最小割集(单一底事件导致顶事件发生)有 3 个,分别为“主回路导线断裂”“急停按钮触点失效”“PLC 输入模块故障”,针对这 3 个关键底事件,在设计中分别采用双回路冗余、故障安全型按钮、模块冗余备份等措施,使一阶最小割集失效概率从 $1.2 \times 10^{-4}/\text{h}$ 降至 $8.5 \times 10^{-6}/\text{h}$,系统整体失效率从 $5.8 \times 10^{-4}/\text{h}$ 降至 $3.2 \times 10^{-5}/\text{h}$,MTBF 从 1 724 h 提升至 31 250 h,满足设计目标要求。

现场试运行测试在某航空制造企业的 5 台五轴数控机床(型号 DMU 85 monoBLOCK)上进行,试运行周期为 12 个月,此期间记录急停回路的故障次数、故障类型、响应时间等参数:试运行期间共触发急停动作 42 次,其中有效急停 38 次,误触发 4 次,误触发率为 9.5%,较优化前的 32.7% 显著降低^[5];急停响应时间平均为 0.32 s,最长响应时间 0.45 s,均满足 ≤ 0.5 s 的设计要求;共发生 2 次回路故障,均被监测系统提前预警,故障排除时间分别为 10 min 和 15 min,未造成设备损坏或人员伤亡。试运行结果表明,该可靠性设计方案可有效提升急停回路的安全性与稳定性。

3.2 实际应用案例分析

1. 某汽车零部件制造企业五轴数控加工中心(型号 MV-8000),该设备主要用于加工发动机缸体,此前因急停回路可靠性不足,2022 年共发生 3 次安全事故:1 次因急停按钮触点失效导致主轴无法停机,造成刀具崩损与工件报废,经济损失达 8.6 万元;2 次因回路误触发导致生产中断,每次中断时间约 2 h,影响订单交付。2023 年企业采用本文提出的三级可靠性设计方案对设备急停回路进行改造,改造内容包括:将单回路改为双回路冗余架构,更换为故障安全型急停按钮与接触器,优化 PLC 程序中的急停逻辑,加装电流、电压、阻抗监测模块。

改造后设备运行 18 个月内的性能数据显示:急停回路 MTBF 从改造前的 1 200 h 提升至 35 000 h,故障发生率从 2.8 次/千小时降至 0.08 次/千小时;有效急停响应时间稳定在 0.25 ~ 0.35 s,未出现响应延迟情况;误触发次数从改造前的 15 次/年降至 2 次/年,误触发率从 4.2% 降至 0.3%;监测系统共发出一级预警

12 次、二级预警 3 次,均通过及时维护排除潜在故障,未发生因回路失效导致的安全事故。从经济效益来看,改造投入成本为 6.8 万元,改造后因故障减少、停机时间缩短带来的年收益增加约 32 万元,投资回收期仅为 2.7 个月,同时设备加工精度稳定性提升,产品合格率从改造前的 97.2% 提升至 99.5%,进一步增强了企业的市场竞争力。

2. 某新能源汽车电机壳体加工企业的 5 台五轴数控加工中心,因车间切削液飞溅、高湿环境侵蚀,原急停回路线路老化故障频发,平均每月出现 1 次回路失效,年维护成本达 1.5 万元,2023 年还因回路触点故障导致主轴停机延迟,造成工件报废,直接损失 6 万元。

企业采用本文方案改造:更换 AGRP 耐油耐高低温导线、加装 IP54 防护电气柜,增设回路阻抗实时监测模块。改造后设备稳定运行 24 个月,仅触发 1 次一级预警并及时排除故障,未发生回路失效事故,年维护成本降至 0.2 万元,急停回路 MTBF 提升至 32 000 h,完全满足高精度加工安全需求。

4 结束语

随着五轴数控机床向高速化、智能化、集成化方向发展,急停回路可靠性设计将面临新的挑战与机遇。从技术发展趋势来看,智能化监测技术的深度应用尤为关键,未来将引入 AI 算法(如 LSTM 神经网络)对急停回路的电流、电压、阻抗等数据进行深度学习,建立更精准的故障预测模型,如通过分析信号波形的微小变化,提前 1 ~ 2 个月预测元件老化。该技术升级可大幅降低回路突发失效概率,减少设备非计划停机时间,同时降低人工维护的盲目性与成本,既保障了操作人员的人身安全,也为高端装备制造的连续稳定生产筑牢安全防线。

参考文献:

- [1] 河北新铁虎石油机械有限公司. 高低压双回路地面防喷器电气控制系统:202223248293.4[P].2023-05-02.
- [2] 天津一重电气自动化有限公司. 一种有机废液处理设备的电气控制系统:202211587059.6[P].2023-04-04.
- [3] 中国市政工程西北设计研究院有限公司. 一种高压变频器旁路接线一拖二模式的电气控制系统:202121161136.2[P].2021-12-28.
- [4] 浙江志高动力科技有限公司. 设备电气控制系统安装工艺、测试系统以及电气控制柜:202110686307.1[P].2021-10-22.
- [5] 安徽新诺精工股份有限公司. 一种数控铣床急停电气控制系统:201921503301.0[P].2020-02-28.