

直流电机控制器电损伤机理分析及解决方案

张剑波

常州汉姆智能科技有限公司 江苏常州

【摘要】针对直流电机控制器因电损伤导致的可靠性问题，本研究构建了涵盖瞬态电场、热场与机械场多物理场耦合作用的损伤分析模型，揭示了浪涌电压、热应力与机械振动协同作用下的失效机制。“主动防护-智能诊断-寿命预测”一体化解决方案的提出包括开发基于 TVS 管与压敏电阻复合防护电路（残留电压 < 120V）、相变材料智能散热系统（温升抑制 < 10°C）及堆叠双向 LSTM 故障预测算法（准确率 92%）。实验验证表明该方案使 IGBT 损坏率从 12.3% 降至 0.9%，MTBF 提升至 12,000 小时，满足 ISO 26262 ASIL-C 标准。研究成果已获 3 项发明专利，在工业机器人、新能源汽车等领域完成工程验证，为高精度运动控制技术突破提供理论支撑。

【关键词】直流电机控制器；电损伤机理；多物理场耦合；智能诊断；防护技术

【收稿日期】2025 年 6 月 14 日

【出刊日期】2025 年 7 月 15 日

【DOI】10.12208/j.sdr.20250110

Analysis and solutions for electrical damage mechanisms in DC motor controllers

Jianbo Zhang

Changzhou Ham Intelligent Technology Co., Ltd., Changzhou, Jiangsu

【Abstract】To address reliability issues caused by electrical damage in DC motor controllers, this study constructed a damage analysis model that incorporates the multi-physics coupling of transient electric, thermal, and mechanical fields, revealing the failure mechanism under the synergistic effects of surge voltage, thermal stress, and mechanical vibration. The proposed integrated "active protection - intelligent diagnosis - life prediction" solution includes the development of a TVS diode and varistor composite protection circuit (residual voltage < 120V), a phase change material intelligent heat dissipation system (temperature rise suppression < 10°C), and a stacked bidirectional LSTM fault prediction algorithm with 92% accuracy. Experimental verification shows that this solution reduces the IGBT damage rate from 12.3% to 0.9% and increases the mean time-to-market (MTBF) to 12,000 hours, meeting the ISO 26262 ASIL-C standard. The research results have been awarded three invention patents and have been successfully validated in industrial robots, new energy vehicles, and other fields, providing theoretical support for breakthroughs in high-precision motion control technology.

【Keywords】DC motor controller; Electrical damage mechanism; Multi-physics field coupling; Intelligent diagnosis; Protection technology

引言

随着工业装备向高精度与高可靠性方向演进，直流电机控制器在复杂工况下的失效问题日益凸显。现有研究多聚焦单一物理场作用机制，难以解释工程实践中器件跨尺度失效现象。

1 电损伤多场耦合与智能防护

1.1 战略价值重构

直流电机凭借其高效率、强控制精度和宽调速范围等优势在工业自动化、新能源汽车、家用电器等领域占据核心地位^[1]。以新能源汽车为例，永磁同步电机驱动系统因节能效果显著，已成为主流技术路线。然而控制器作为电机系统的“大脑”其可靠

作者简介：张剑波（1980-）男，湖北省谷城县人，汉族，常州汉姆智能科技有限公司总经理，研究方向：高效电机设计与优化、电机驱动与控制策略。

性问题长期制约行业发展。统计数据显示永磁同步电机控制器售后故障率比异步电机高 10 倍,主要表现为功率器件击穿、驱动电路失效等电损伤问题导致设备停机、维护成本攀升,甚至引发安全事故。当前行业对高可靠性控制器的需求日益迫切^[2]。研究电损伤机理并提出系统性解决方案,不仅能提升设备服役寿命,还可推动高精度运动控制技术的突破,对实现“双碳”目标下的工业智能化转型具有重要战略意义。

1.2 技术演进轨迹

电损伤机理研究始于 20 世纪末,早期聚焦于单一因素影响如雷电浪涌电压的瞬态特性分析^[3]。近年来学者逐步关注多因素耦合作用,例如温度波动对器件耐压能力的削弱效应以及机械振动引发的接触电阻突变。然而现有研究多局限于实验室环境,缺乏对复杂工况的动态模拟,且防护方案以被动防护为主,如增加滤波电容或 TVS 管难以适应实际应用中多物理场协同作用下的损伤演化。在解决方案层面国际前沿技术,如主动短路保护(ASC)和智能诊断系统已进入工程应用阶段,但其算法复杂度高、硬件成本昂贵难以在中小功率控制器中普及。国内研究则侧重于传统防护电路优化对动态适应性策略的探索尚处于起步阶段。

1.3 本文研究目标与创新点

本研究旨在构建直流电机控制器电损伤的多因素耦合模型,揭示浪涌电压、热应力与机械振动的协同作用规律并提出“主动防护-智能诊断-寿命预测”一体化解决方案。本研究的创新性体现在三方面,机理创新层面,首次构建涵盖瞬态电场、热场与机械场多物理场耦合作用的损伤分析模型,通过数值仿真定量解析温度梯度与电压波动的耦合作用机制,揭示振动频率对接触阻抗的非线性影响规律;技术创新层面,开发基于长短期记忆网络的故障预测算法,结合动态电压补偿策略实现防护参数的自适应调节,显著提升系统鲁棒性;应用创新层面,采用模块化硬件架构与轻量化软件设计,通过标准化接口实现防护组件的即插即用,在工业机器人关节驱动、新能源汽车电驱系统等场景中实现防护效能与成本控制的优化平衡。

2 直流电机控制器电损伤机理深度分析

2.1 电损伤核心诱因与理论模型

(1) 浪涌电压损伤

雷电传导与端子插拔是浪涌电压的两大主要来源^[4]。雷电击中电网时瞬态电流可达数十千安,通过传导路径在控制器内部形成高达数万伏的电压尖峰。端子倾斜拔出时,母线电容放电回路改变,电流流经保护二极管导致反向击穿。实验表明 3kV 浪涌电压经滤波后残留电压仍达 156V,叠加工作电压后模块端电压峰值超过 600V,远超 IGBT 耐压阈值。基于此建立瞬态能量方程: $E = \int_0^t V(t)^2 / Z(t) dt$ 其中, $V(t)$ 为瞬态电压, $Z(t)$ 为等效阻抗。该模型可精准预测不同工况下的能量累积效应。

(2) 热应力损伤

功率器件(如 IGBT)的失效与结温波动密切相关^[5]。以某型号 600V IGBT 为例,其结温从 80°C 升至 150°C 时耐压能力下降 40%。通过有限元仿真发现芯片边缘区域因散热不均,温度梯度可达 15°C/mm 导致局部热应力集中。热失效阈值与脉冲持续时间呈指数关系,当脉冲宽度超过 100μs 时失效概率陡增。

(3) 机械振动与接触不良

连接器松动引发的阻抗突变是电弧放电的主要诱因^[6]。振动频率在 10-50Hz 范围内接触电阻波动幅度可达 30%、电弧能量密度超过 50mJ/cm²时将造成触点材料熔融。建立振动-接触阻抗动态模型: $R_c = R_0 + K \cdot \sin(2\pi ft + \varphi)$ 其中, R_0 为静态接触电阻, k 为振动敏感系数, f 为振动频率。该模型揭示了振动能量向热能转化的路径。

2.2 关键器件失效模式分析

(1) 功率器件

以 IRG4BC40UD 型 IGBT 为例,在 85°C 结温下经历 1000 次高频开关循环后漏电流从初始值 0.1mA 激增至 0.5mA,微观分析显示栅氧化层因热应力导致晶格畸变出现直径约 50nm 的击穿孔洞,该现象与 Si-SiO₂界面态密度增加直接相关。

(2) 驱动电路

三相电流检测霍尔传感器因温度漂移导致信号幅值偏差达±12%引发电流闭环控制滞后超过 20μs,实验测得永磁同步电机转速波动幅度扩大至±15%,转矩脉动系数从 2.1%升至 5.3%。

(3) 电源模块

铝电解电容在纹波电压超过 2%时电解液分解

加速, ESR 值从初始 5mΩ 增至 20mΩ 容量衰减率超过 60%, 该过程伴随内部气体压力升高 6 个月内发生鼓包失效的概率提升至 87%。

2.3 多因素耦合作用分析

高温环境下器件耐压能力下降与热膨胀系数差异形成正反馈。例如某封装材料在 120°C 时热膨胀系数突变导致芯片与基板间出现微裂纹, 此时施加 500V 电压局部放电量增加 200%。振动-接触阻抗模型表明 50Hz 振动下接触电阻波动周期与 PWM 调制周期同步时电弧放电概率提升至 70%。

2.4 多物理场耦合模型参数标定方法

(1) 热应力模型参数标定

材料参数获取通过差示扫描量热仪(DSC)测试 IGBT 封装材料, 如环氧模塑料的玻璃化转变温度 (T_g) 和热膨胀系数 (CTE) 建立温度-形变关系曲线。某封装材料在 120°C 时 CTE 突变导致芯片与基板间出现微裂纹与仿真模型预测的应力集中区域误差小于 8%。热传导参数优化采用瞬态热阻测试仪测量功率模块结-壳热阻 (R_{th(j-c)}), 结合有限元仿真反推导热系数。填充相变材料 (PCM) 后瞬态温升抑制效果与仿真预测偏差控制在 5% 以内。

(2) 振动-接触阻抗模型参数标定

振动敏感系数 k 的确定通过激光多普勒测振仪采集连接器在不同频率 (10-50Hz) 下的振动幅值, 建立接触电阻波动与振动能量的量化关系。实验测得 k=0.035 N⁻¹, 与仿真模型预测值误差小于 12%。电弧能量密度阈值验证利用高速摄像系统记录接触点电弧放电过程, 测量电弧持续时间与能量密度。当电弧能量密度超过 50mJ/cm² 时触点熔融, 与模型预测的临界值吻合度达 91%。

(3) 浪涌电压模型参数标定

通过雷电浪涌模拟平台采集不同工况下的电流-电压波形, 采用最小二乘法拟合等效电路参数, TVS 管与压敏电阻串联时等效阻抗为 25Ω(1kHz), 仿真误差 < 5%。残留电压抑制效率验证使用高压脉冲发生器施加 4kV 浪涌电压, 测量防护电路后端残压, 残留电压 < 120V, 较理论模型预测值偏差仅 3.2%。

3 电损伤综合防护与智能诊断解决方案

3.1 多场景参数标定实验设计

(1) 热循环实验

基于 IEC 60512-5 标准, 对功率模块进行 -40°C

至 150°C 热循环测试, 同步采集 DSC 数据验证封装材料热膨胀系数突变点。

(2) 振动-电弧联合实验

在电磁振动台上模拟 50Hz 振动, 结合高速摄像系统捕捉接触点电弧熔融过程验证振动敏感系数 k 的工程适用性。

(3) 浪涌耐压实验

使用高压脉冲发生器 (精度 ± 0.5%) 施加 4kV 浪涌电压, 通过高压探头和示波器实时记录残压曲线。

3.2 硬件防护体系设计

(1) 浪涌抑制模块

采用三级防护电路。第一级 TVS 管 (SMBJ6.5CA) 实现纳秒级响应抑制浪涌峰值; 第二级压敏电阻 (MOV14D471K) 吸收残余能量; 第三级泄放电阻 (10Ω/2W) 配合续流二极管 (SS34) 将残留电压钳位至安全范围。实验显示该电路可将 4kV 浪涌残留电压降至 120V 以下。

(2) 热管理优化

设计智能散热系统。PID 算法根据 IGBT 结温动态调节 PWM 风扇转速使散热效率提升 40%。在功率模块封装中填充相变材料 (PCM) 其相变潜热达 200J/g, 可将瞬态温升幅度抑制在 10°C 以内。

3.3 软件防护与动态调控

(1) 自适应驱动算法

基于反电动势观测器的电流闭环控制模型:

$$i_{ref} = K_p e + K_i \int e dt + K_d \frac{de}{dt} \quad \text{其中, } e \text{ 为电流误差,}$$

K_p、K_i、K_d 为动态补偿系数。该算法使换向相位滞后减少至 2°, 效率提升 8%。

(2) 故障预诊断系统

基于多源信号融合架构, 通过电流谐波分析模块对电机驱动电流进行小波包分解提取 5-20kHz 频段特征能量值, 同步集成分布式光纤温度传感器阵列的 ± 0.5°C 温升数据^[7]。采用堆叠双向 LSTM 网络构建故障分类模型, 输入层融合时频域特征向量、隐藏层引入注意力机制强化关键时间步权重^[8]。实测显示该系统对 IGBT 开路故障预测准确率达 92%, 结合剩余寿命衰减曲线模型实现提前 500 小时以上的故障预警显著优于传统阈值报警策略。

3.4 实验验证与性能评估

(1) 抗电冲击评测系统

基于 IEC 61000-4-5 和 IEC 60512-5 标准构建的自动化测试系统,集成多通道高压脉冲发生器与精密插拔力传感器,模拟雷电浪涌(1.2/50 μ s 波形,峰值 8kV)及端子高频插拔(5-2000 次循环)等极端工况。通过高速示波器实时捕捉浪涌残压曲线,结合热成像仪监测 IGBT 结温变化。实验数据显示,采用 TVS 管与压敏电阻复合防护方案后,关键功率器件损坏率从 12.3%降至 0.9%,防护效能提升 12 倍,剩余寿命评估模型显示其 MTBF(平均无故障时间)达 12,000 小时,满足 UL 1977 和 IEC 60512-9-1 可靠性要求。

(2) 工业场景验证

基于 ISO 16750 标准构建的复合环境测试平台,对新能源物流车电机控制器实施高低温循环(-40 $^{\circ}$ C 至 105 $^{\circ}$ C,每个循环 12 小时)与随机振动(5-2000Hz,加速度 5gRMS)同步加载测试。通过三综合测试系统同步采集振动频谱、温升曲线及电流谐波数据,结合加速寿命模型(Arrhenius+Miner 法则)计算 MTBF。实测数据显示,在连续 1000 小时无故障运行后,系统高温高湿(85 $^{\circ}$ C/85%RH)及盐雾(5%NaCl 溶液)环境下运行稳定性验证通过率达 100%,关键部件热失控阈值提升至 175 $^{\circ}$ C(较基准提升 25%),满足 ISO 26262 ASIL-C 功能安全等级要求。

4 结论与展望

4.1 研究成果总结

本研究构建了涵盖电-热-力多场耦合的损伤模型,揭示了器件失效的跨尺度作用机制。提出的“防护-诊断-预测”一体化方案,通过硬件电路创新与智能算法融合,实现了电损伤的主动防控。

4.2 应用前景

方案可扩展至工业变频器、伺服驱动等场景,预计使设备维护成本降低 35%,故障停机时间减少 60%。在智能家电领域,集成化防护模块可提升产品可靠性等级,助力企业通过 UL 1004-1 等国际认证。

4.3 未来研究方向

数字孪生技术将深度融合实时数据与高精度仿真,构建覆盖控制器硬件、算法及机械执行机构的全生命周期数字镜像,通过多物理场耦合仿真实现损伤状态毫米级空间映射与亚秒级动态预测,结合

边缘计算部署的 LSTM 网络实现剩余寿命误差率<3%的精准评估。针对碳化硅 MOSFET 雪崩特性,开发氮化镓 HEMT 与磁芯电感协同的主动钳位电路,利用其快速恢复特性构建双向电流泄放路径,结合浪涌能量定向吸收结构将电压尖峰抑制效率提升至 98%以上。同时探索玻璃态聚合物与导电填料的复合自修复体系,在 PCB 微裂纹处形成三维互穿导电网络,通过周期性应变激活分子链滑移重组,实现裂纹宽度从 50 μ m 至完全闭合的自主修复,同时保持介电强度 \geq 30kV/mm,为高密度电路提供智能防护能力。

参考文献

- [1] 吴文贤,周丹,吴桐.直流电机控制器电损伤机理分析及解决方案[J].家用电器,2025(2):90-94.
- [2] 常心远,高继辉,刘千萌,成浩,薛晨澎,孙哲.一种基于 AT89C51 的直流电机 PWM 调速系统[J].电气工程,2024,12(1):12-18.
- [3] 李艳芳,李治慧.基于单片机的无刷直流电机调速控制系统设计[J].电子测试,2021,32(21):24-25+46.
- [4] 李克靖,徐婕,吴珏,宋锦.基于 STM32 的无刷直流电机矢量控制系统[J].电子与封装,2020,20(9):27-32.
- [5] 王晓蕾,徐彦,王振兴,涂金生,王传傲,朱毅.一种用于无刷直流电机控制器的低成本专用电路[J].电子技术应用,2019,45(8):124-127+130.
- [6] 朱金龙,王步来,陈东耀.基于改进 LADRC 的永磁同步电机控制研究[J].组合机床与自动化加工技术,2025(2):97-101.
- [7] 李李清,骆传旺,沈祖英,余淼.高速无刷直流电机无传感器控制[J].微电机,2014,47(5):31-35.
- [8] 周立,古富龙.改进遗传优化的无刷直流电机模糊 PI 控制[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2014,33(12):1679-1684.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS