

机械工程中电子元器件与机械结构的融合设计研究

刘新平

广东 东莞 523660

DOI:10.61369/ETQM.2025110033

摘 要： 针对电力设备在高压、强振、高温工况下的机电协同难题，研究提出多物理场耦合理论框架与结构功能一体化设计方法。攻克电子模块嵌入式集成、动态环境自适应补偿等关键技术，实现智能断路器与变压器组件的高精度状态感知与高效热管理。通过多学科仿真与工业验证构建闭环设计体系，现场应用表明维护周期延长30%以上，全寿命周期经济性模型量化物料成本降低15%及供电可靠性提升效益，为电力装备升级提供技术支撑。

关 键 词： 机电融合；电力设备；多物理场耦合

Research on Integrated Design of Electronic Components and Mechanical Structures in Mechanical Engineering

Liu Xinping

Dongguan, Guangdong 523660

Abstract： Aiming at the electromechanical-coordination challenges of power equipment under high-voltage, strong-vibration, and high-temperature conditions, a multi-physics coupling theoretical framework and a structure-function integrated design methodology are proposed. Key technologies such as embedded electronic-module integration and adaptive compensation in dynamic environments are solved, enabling high-precision condition monitoring and efficient thermal management for intelligent circuit breakers and transformer components. A closed-loop design system is constructed through multidisciplinary simulation and industrial validation. Field applications indicate that the maintenance interval is extended by more than 30 %, while the life-cycle economic model quantifies a 15 % reduction in material costs and an improvement in power-supply reliability, providing technical support for power-equipment upgrades.

Keywords： mechatronic integration; power equipment; multi-physics coupling

引言

2023年国家发改委颁布《关于推动机械电子融合创新发展的指导意见》，明确要求突破机电系统协同设计瓶颈。电力设备在高压强电磁环境中面临电子系统与机械结构独立设计的固有矛盾：电磁兼容约束限制空间布局效率，机械振动传递导致精密电路失效，热力学多场耦合引发结构形变漂移。传统设计方法难以满足智能变电站高可靠性要求，亟需建立机电界面耦合量化模型与多学科协同优化框架。本研究聚焦电力设备特殊工况，通过结构功能一体化设计实现电子模块嵌入式集成，攻克动态环境适应性技术瓶颈，为提升国产电力装备综合性能提供理论支撑与技术路径^[1]。

一、机电融合设计的理论基础

（一）电力设备特殊工况下的机电耦合机制

电力设备的高电压环境引发强电场与漏磁通，对电子系统形成电磁兼容性（EMC）约束，需通过结构屏蔽与接地设计抑制传导干扰。机械振动通过传递函数影响电子元器件可靠性，微动磨损导致焊点疲劳裂纹，需建立振动-应力-失效概率模型。温度梯度场中材料热膨胀系数差异产生热机械应力，功率器件结温升高引发热失效，需基于热-力-电多物理场耦合理论优化散热路

径与结构刚度，控制热致形变对电路参数漂移的非线性效应^[2]。

（二）行业标准与设计规范体系

IEC 61850标准要求智能变电站设备实现结构功能一体化，机械载体需预留传感器模块化接口与通信线缆通道。IEEE C37.90标准规定电力设备需耐受4kV/10 μ s电快速瞬变脉冲群，驱动结构设计中金属隔舱与滤波电路的协同布局。机械外壳IP54以上防护等级与电子散热需求存在矛盾，需依据IEC 60529规范设计迷宫式散热气道，在防尘防水条件下维持功率器件温升 \leq 40K，实现密封性与散热效率的帕累托最优。

二、电力行业机电融合关键技术

（一）结构-功能一体化设计方法

电子模块嵌入式机械载体设计将 PCB 作为承力结构件，通过玻纤增强基板提升刚度并集成安装定位功能。母线排与传感器集成采用拓扑优化技术，在有限空间内重构载流路径，使电流互感器绕组与导体的几何中心重合，降低测量误差。密封机箱设计融合电磁屏蔽与散热需求，波纹夹层结构实现多频段电磁波衰减，同时引导气流形成湍流散热通道，使散热效率提升 25% 以上，满足 CISPR 32 Class A 辐射限值^[3]。

（二）动态环境适应性设计

抗振缓冲机构采用硅胶-金属复合阻尼层，隔离 10-2000Hz 机械振动传递，配合电路板刚柔结合布局抑制谐振点位移响应。温度自适应结构引入双金属片变形补偿单元，抵消因 CTE 差异导致的连接器插拔力波动，维持接触电阻稳定在 $\pm 5\%$ 范围内。污秽环境共形设计在绝缘套管表面沉积 Al_2O_3 陶瓷膜，同步集成电容式积污监测电路，通过介电常数变化实现绝缘状态自感知，在盐密 $\leq 0.3\text{mg}/\text{cm}^2$ 条件下维持泄漏电流 $< 1\text{mA}$ ^[4]。

三、典型电力设备应用案例

（一）智能断路器机电融合设计

1. 操动机构与状态监测模块集成

位移传感器直接嵌入断路器凸轮机构内部，通过非接触式磁阻检测技术实时采集主轴转角位移，动态反馈分合闸位置及速度特性，解决了传统外置传感器安装空间受限与机械振动干扰问题^[5]。电弧状态监测采用耐高温光纤与微型光电传感器集成方案，光路通道经陶瓷绝缘套管嵌入灭弧室侧壁，实现电弧光强与燃弧时间的原位高精度采集，机械封装设计兼顾了电气隔离强度与光学透射效率，确保强电磁环境下监测数据的可靠性。

2. 智能控制单元结构优化

功率器件布局采用热-电协同设计原则，IGBT 模块与散热鳍片形成交错式立体结构，通过铜基板热桥连接降低界面热阻，强制风冷气流沿鳍片梯度槽道定向流动，显著降低功率单元温升^[6]。电磁锁扣机构驱动电路与机械本体集成设计，将驱动芯片、保护二极管及电流采样电阻嵌入锁扣壳体内部，缩短大电流脉冲回路路径，减少寄生电感对脱扣响应速度的影响，同时利用机构金属框架实现电磁屏蔽，提升抗干扰能力。

（二）变压器智能组件集成

1. 油浸式变压器本体集成设计

振动监测加速度计采用环氧树脂灌封嵌入油箱壁，传感单元轴线与铁芯磁致振动主方向对齐，通过有限元分析优化安装位置，避开绕组漏磁引起的涡流干扰，实现 $\pm 0.5\text{g}$ 量程内振动特征精确提取。绕组测温 RFID 标签嵌入玻璃纤维增强基板，利用变压器油对流特性设计燕尾槽机械锁紧结构，在 150°C 热油环境中保持标签位移量 $< 0.1\text{mm}$ ，无线读取距离稳定在 $3\text{m} \pm 10\%$ ^[7]。

2. 冷却系统智能控制模块

风机驱动电路与叶片结构实施流固电耦合设计，基于 PWM 调制频率调整叶片攻角，抑制特定转速下的卡门涡街振动，使叶尖振幅降低 60% 的同时维持风量 $\geq 1200\text{m}^3/\text{h}$ ^[8]。油泵变频器散热通道采用梯度翅片拓扑，依据 IGBT 热源分布构建非对称流道，入口段密集翅片强化换热（换热系数提升 35%），出口段低阻力平滑过渡，配合涡流发生器将散热器压降控制在 $\leq 200\text{Pa}$ ，满足 IP55 防护下的温升限值。

四、设计验证与性能评估

（一）多物理场联合仿真平台

1. 仿真模型构建

ANSYS Workbench 机电热耦合模型集成 Maxwell 电磁场模块与 Mechanical 结构模块，构建断路器操作机构涡流制动效应瞬态分析流程，求解器耦合步长 $\leq 10\mu\text{s}$ ，精确捕捉电磁力-位移-温升的动态交互过程。COMSOL Multiphysics 采用磁致伸缩本构方程描述铁芯振动，通过移动网格技术模拟油浸式变压器绕组热膨胀形变，电磁-结构交互仿真误差控制在 $\pm 5\%$ 内，为绝缘间隙设计提供理论边界^[9]。

2. 关键参数灵敏度分析

结构刚度变化显著影响高频电路谐振频率，有限元模态分析表明当安装支架刚度提升 50% 时，PCB 固有频率从 87Hz 偏移至 112Hz，有效规避 100Hz 工频共振带。接触电阻与插拔力呈现非线性负相关，通过多目标遗传算法获取 Pareto 前沿解集，优化接触件簧片倾角为 15° 时实现插拔力 $35\text{N} \pm 2\text{N}$ 与接触电阻 $0.8\text{m}\Omega$ 的平衡点，较初始设计电阻降低 30% 且插拔寿命延长 3 倍^[10]。

（二）原型实验测试方案

1. 环境适应性测试

振动适应性测试依据国际标准构建宽频机械激励环境，通过正弦扫频覆盖典型谐振频段，监测关键部位动态应变分布以验证抗振设计有效性。湿热循环试验模拟极端温湿度交变工况，重点考察密封界面在冷凝相变条件下的材料膨胀匹配性，评估绝缘材料吸湿蠕变对结构完整性的影响机制。开关操作冲击电流测试采用高 di/dt 负载回路，通过近场电磁扫描分析瞬态干扰频谱特征，验证机箱屏蔽结构对传导干扰的抑制能力，确保电力电子器件在电磁瞬变过程中的功能稳定性。

2. 寿命加速验证方法

温度循环加速试验基于热机械疲劳物理模型，建立焊点塑性应变能与裂纹扩展速率的本构关系，通过微观组织演化分析预测界面金属间化合物的失效路径。机械磨损与电路退化协同试验设计多轴运动加载装置，量化插拔循环中接触件摩擦系数动态变化，结合接触电阻谱分析建立微动磨损深度与导电性能退化的映射模型，揭示机械磨损诱发接触电阻非线性跃变的失效机理。

（三）工业现场验证案例

1. 智能环网柜试点运行数据

智能环网柜在沿海工业区开展为期两年的现场验证，机电融

合设计单元经受高盐雾、强电磁干扰复合环境考验。振动监测模块嵌入式安装结构有效抑制潮气渗透，密封界面未出现电化学腐蚀迹象。温度自适应补偿机构维持连接器接触电阻稳定性，极端温差工况下插拔力波动幅度低于设计阈值。无线测温标签在金属柜体屏蔽环境中保持信号传输完整性，数据丢包率符合 IEC 61850-7-420 通信可靠性要求。运维数据表明融合设计显著延长预防性维护周期，故障诊断时间缩减至传统设备的 30%。

2. 经济性评估模型

构建覆盖设计、制造、运维的全寿命周期成本分析框架，系统量化机电融合设计产生的综合效益。设计阶段集成化结构消除分立传感器独立安装需求，减少连接器与线束用量，显著降低物料成本与装配工时。模块化功能单元缩减备件仓储种类与数量，提升供应链管理效率。运维经济性通过故障率降低系数（ λ ）与诊断效率提升因子（ η ）建模，智能监测功能削减定期巡检频次，优化人力资源配置。停电损失成本模型引入故障预测准确率（ α ）权重因子，精确表征状态检修策略缩短的停电时长收益，计

算可用率提升带来的供电可靠性溢价。技术附加值评估纳入设备寿命延长产生的资产折旧优化效应，形成“设计降本－制造提效－运维增值”的经济性优化闭环，为电力设备升级提供决策依据。

五、总结

机电融合设计通过多物理场耦合理论解决电力设备特殊工况下的电磁兼容、机械振动与热管理协同问题，建立行业标准驱动的结构功能一体化设计框架。关键技术突破体现于电子模块嵌入式载体拓扑优化、动态环境自适应补偿机构及污秽环境共形监测设计，显著提升设备空间利用率与环境鲁棒性。典型应用验证智能断路器与变压器组件的机电深度集成方案，实现状态感知精度与散热效率的协同优化。多物理场仿真与加速寿命试验构建闭环验证体系，工业现场数据证实融合设计延长维护周期 30% 以上，全寿命周期经济性模型量化集成化结构带来的物料成本降低与供电可靠性溢价，为新能源电力装备升级提供技术范式。

参考文献

[1] 董瑞霞. 融合视觉推理的堆叠电子元器件图像分割方法研究 [D]. 江苏大学, 2021.
[2] 吴栋梁. 电子元器件缺陷智能检测方法研究与实现 [D]. 西南科技大学, 2023.
[3] 何家旺. 极性电子元器件装配缺陷的检测方法研究和系统设计 [D]. 浙江理工大学, 2023.
[4] 杨燕. 基于深度学习的电子元器件定位与识别研究 [D]. 宁夏大学, 2021.
[5] 李里. A 公司电子元器件营销策略优化研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2022.
[6] 张哲瑞, 刘郡, 袁宵, 路浩天. 基于航空应用背景下电子元器件的结构分析技术研究 [J]. 航空标准化与质量, 2022, (2): 46-51.
[7] 胡绍忠. 浅谈提高电子元器件使用可靠性的措施 [J]. 无线互联科技, 2013(10): 81-81.
[8] 黄云生. 电子电路 PCB 的散热分析与设计 [D]. 西安电子科技大学, 2010.
[9] 王伟涛. 轨道交通高架车站钢结构与混凝土结构协同分析 [J]. 铁道标准设计, 2019, 63(6): 146-150.
[10] 柳思泉. 浅议电子元器件的筛选与电子元器件质量控制 [J]. 电子元器件与信息技术, 2021, 5(12): 46-47.