

侵,单一指标无法准确判断劣化原因,且新能源设备运行工况多样致劣化特征差异显著,固定阈值标准难适应不同工况检测需求,易致漏警或误警现象,同时在线检测系统产生海量数据缺有效分析模型,难实现劣化趋势预测与故障定位^[5]。

4 新能源电力设备绝缘油检测技术优化策略

4.1 离线检测方法的精准化改进

针对离线检测取样误差大问题,优化取样流程与样品预处理技术,设计专用密封式取样装置防外界杂质与水分入侵,增设过滤模块与脱水模块对样品现场初步处理以减后续实验室检测误差,同时开发多组分同步检测技术,基于气相色谱-质谱联用技术优化检测参数,实现对绝缘油中氧化产物、溶解气体与金属杂质全组分精准检测,通过建立不同劣化阶段组分数据库明确各组分与介电性能对应关系提升离线检测诊断精度。为解离线检测时效性不足问题,构建“周期性检测+针对性抽检”检测体系,结合新能源设备负荷特性建立负荷波动与劣化速率关联模型,对负荷波动剧烈设备缩短检测周期,对稳定运行设备延长检测周期。同时,凭借在线检测系统所供应的实时数据,于在线数据呈现异常趋势之时,应及时开展离线抽检工作,以此实现离线检测与在线检测相互之间的协同配合,进而在保障检测精度的这个过程里能够同步提升时效性。

4.2 在线检测系统的集成化优化

关于在线检测系统的集成化优化方面,传感器技术的优化被视为在线检测系统升级的核心要点。其具体举措为开发宽温域自适应传感器,并采用温度补偿电路设计方案,借助内置温度传感器对环境温度进行实时采集这一手段,利用软件算法针对测量数据展开温度校正工作,从而让传感器在-40℃-120℃如此宽泛的温度范围之内,能够将测量精度误差控制在5%以内。并且,通过采用电磁屏蔽技术来优化传感器的结构,于传感器的外部额外设置金属屏蔽罩以及滤波电路,以降低高频电磁辐射给信号采集所带来的干扰。针对新能源设备具有的振动特性,运用抗振动封装设计方式,提升传感器的机械稳定性程度,以此延长其使用寿命。

在系统集成领域,致力于构建多参数融合检测系统,对介损、击穿电压、油中溶解气体、水分含量等众多检测参数进行整合,凭借数据总线达成各传感器之间的协同工作。开发智能化的数据采集模块,运用高速AD转换技术,提升数据采集的速率,以确保能够捕捉到因负荷波动而引发的介电性能突变现象。同时,对系统通信协议予以优化,采用

5G无线通信技术,达成检测数据的实时传输目的,解决偏远地区新能源设备在数据传输方面所面临的难题。此外,设计低功耗运行模式,借助休眠唤醒机制来降低系统能耗,从而适应新能源设备对于节能方面的需求。

4.3 诊断模型的智能化构建

在诊断模型的智能化构建板块,基于多参数融合数据来构建智能化的诊断模型,以此提升劣化评估具备的准确性以及趋势预测能力。采用机器学习算法,以历史检测数据、设备运行参数连同故障记录作为训练样本,进而建立起介电性能劣化诊断模型。通过随机森林算法筛选出关键的特征参数,减少模型的输入维度,提升运算效率;利用神经网络算法构建劣化程度评估模型,达成对绝缘油劣化等级的精准分类。并且,引入时间序列分析算法,基于连续不断的在线检测数据构建劣化趋势预测模型,预测未来一段时间之内绝缘油介电性能的变化趋势,为设备维护工作提供一定的提前量。

5 结论

新能源电力设备绝缘油介电性能出现劣化这一状况,实则是内在化学组分发生变化以及外在工况因素耦合作用所产生的结果,其中烃类氧化、添加剂损耗、电场-热场耦合以及污染物入侵共同构成了劣化的核心机制。当前现有的离线检测技术存在取样误差较大、时效性不足这样的问题,而在线检测技术则面临着传感器精度偏低、诊断模型较为单一的挑战。通过优化离线检测所采用的取样以及检测方法,升级在线检测系统的传感器及集成技术,构建智能化诊断模型等一系列措施,能够有效地提升绝缘油介电性能检测的精准性与可靠性。

参考文献

- [1] 谢颖.基于物联网的智慧电力新能源系统设计研究[J].仪器仪表用户,2025,32(08):4-5+8.
- [2] 石海芹.逐梦电力前沿铸就行业先锋——记全国劳动模范、北京电力设备总厂有限公司新能源研究院常务副院长刘成柱[J].工会博览,2025,(21):34-36.
- [3] 李翠翠,韩晓梅,周中原.基于电力设备新能源并网技术探究[J].电工技术,2025,(S1):128-130+133.
- [4] 董鹏程,阎凯.基于半监督SVM模型的新能源发电成套电力设备故障诊断方法[J].机电工程技术,2025,54(10):164-167.
- [5] 刘明月,赵菁磊,陈韵霖,沈忠明,尹浩霖.基于改进集成学习的新能源发电设备故障辨识研究[J].河南科技,2025,52(05):28-31.

Material-Structure-Energy Synergy Optimization Model for Green Design of Electromechanical Products

Long Zhou

Qinhuangdao Water Supply Co., Ltd., Qinhuangdao, Hebei, 066000, China

Abstract

The application of green design in the lifecycle of electromechanical products requires coordinated optimization of materials, structures, and energy consumption to meet comprehensive performance demands such as low carbon footprint, lightweight design, and high efficiency. Material properties directly influence structural performance, processing energy consumption, and operational energy efficiency; structural configurations determine load transfer mechanisms, dynamic stability, and energy loss levels; while system energy consumption is determined by the coupled effects of materials and structures. Therefore, it is essential to establish a collaborative optimization framework integrating material performance functions, parametric structural models, and operational energy consumption models to achieve comprehensive balance under multi-objective constraints. This study integrates material performance evolution mechanisms, structural sensitivity analysis, and multi-condition energy consumption prediction methods, employing multi-objective optimization algorithms to balance carbon emissions, energy consumption, weight, and reliability.

Keywords

green design; electromechanical products; material-structure-energy consumption co-optimization

机电产品绿色设计中的材料—结构—能耗协同优化模型

周龙

秦皇岛排水有限责任公司, 中国·河北 秦皇岛 066000

摘要

绿色设计在机电产品生命周期中的应用要求材料、结构与能耗实现协同优化,以满足低碳、轻量化与高效率等综合性能需求。材料特性直接影响结构性能、加工能耗与服役能效;结构方案决定载荷传递方式、动态稳定性与损耗水平;系统能耗则由材料与结构的耦合效应共同决定。因此,有必要构建覆盖材料性能函数、结构参数化模型与运行能耗模型的协同优化框架,实现多目标约束下的综合平衡。本研究集成材料性能演化机理、结构敏感性分析与多工况能耗预测方法,并采用多目标优化算法对碳排放、能耗、重量与可靠性进行权衡。

关键词

绿色设计; 机电产品; 材料—结构—能耗协同优化

1 引言

绿色制造背景下,机电产品的环境性能已成为衡量产品竞争力与可持续价值的重要指标。材料消耗、结构形式与运行能耗是机电产品生命周期环境负荷的主要来源,但传统设计往往以单目标或局部优化为主,

使材料、结构与能耗之间难以形成协同作用。材料选择通常强调强度、成本与加工性,结构设计关注刚度、重量与可靠性,而能耗优化多发生在运行阶段,导致设计初期难以全面评估产品环境影响。随着先进材料、高性能仿真技术与能耗建模方法的发展,构建材料—结构—能耗一体化优化模型成为推动绿色设计的重要方向。在实际设计中,材料、

结构与能耗呈现显著耦合:材料属性影响结构可行性,结构特性决定摩擦损失与驱动需求,材料替代与结构优化均会改变产品的能耗曲线。例如,轻量化材料可降低重量,但可能带来刚度下降与热稳定性不足;拓扑优化减少材料用量却可能提升加工能耗;能耗优化需控制惯量,则依赖结构与材料的协同调节。因此,本研究从材料特性、结构参数化设计与运行能耗机理三个维度构建协同优化模型,对耦合机理、数学描述与多目标权衡方法进行系统分析,并通过典型案例验证模型的工程可行性,为绿色机电产品设计提供理论支撑与方法体系。

2 机电产品绿色设计中材料特性的协同影响机制

2.1 材料性能与环境负荷的关联性分析

材料是绿色设计的起点,其性能不仅影响产品强度、

【作者简介】周龙(1986-),男,中国河北秦皇岛人,助理工程师,从事机电研究。

刚度与寿命，也对生产、加工与回收阶段的环境负荷具有显著影响。材料密度、比强度、比刚度等参数直接决定部件重量，从而影响驱动系统的能耗需求；材料的导热性能、电磁性能与耐腐蚀性能又影响运行阶段的能量损失与维护需求。此外，不同材料在生产过程中消耗的能源、排放的碳量存在较大差异。研究通过建立材料环境负荷函数，将原材料采集、冶炼、加工、运输及报废等环节纳入生命周期评价框架，从而使材料选择能够与整体能耗优化目标一致。

2.2 材料属性对结构方案的约束与协同效应

材料与结构之间存在强耦合关系。材料的弹性模量、泊松比、耐热性及疲劳特性直接决定可采纳的结构形式与截面设计。例如，高强度轻质合金能支持薄壁结构以降低重量，但其加工性与可焊性可能限制结构复杂度；复合材料能实现各向异性设计，但对层合方向与载荷路径敏感。研究通过建立材料-结构耦合约束模型，将材料性能指标与结构可行域进行映射，使结构设计能够充分发挥材料优势。同时，材料的阻尼特性、磁导率或导电性也影响机电系统的动态特性与能效表现，从而需在设计阶段进行综合考量。

2.3 材料替代在能耗优化中的潜在价值

材料替代是降低机电产品运行能耗的直接途径之一。降低部件重量可减少驱动力需求，减少电机功率配置；改善传动部件材料的摩擦性能可降低运动阻力；提高散热材料性能可使系统在相同输入能量下维持更低温升，从而提升电机与电子元件效率。本研究构建材料替代对能耗影响的敏感性分析模型，从重量变化、摩擦系数变化、热阻变化等角度量化其能耗影响程度，为材料替代提供定量决策依据。

3 机电产品结构设计中的轻量化与能效耦合关系

3.1 结构拓扑优化在绿色设计中的作用

拓扑优化作为结构轻量化的核心方法，通过在结构域内对材料分布进行数学化配置，使结构在满足强度与刚度条件下实现材料最优利用。在绿色设计背景下，拓扑优化不仅能降低材料消耗，减少制造阶段的环境负荷，还可通过减轻质量降低运行阶段的驱动能耗。然而，经典拓扑优化结果通常呈现复杂形态，可能造成加工难度上升、局部应力集中或疲劳寿命降低。本研究在传统目标函数基础上引入加工性约束、疲劳寿命约束和能耗约束，使优化结果兼顾可制造性、耐久性与运行能效。通过建立拓扑变量与环境性能的映射关系，优化框架能够输出更符合工程应用需求的绿色结构方案，为机电产品的轻量化与节能提供更具实践价值的设计路径。

3.2 结构参数化设计与能耗行为的联动机制

机电产品结构的参数化设计对运行能耗具有直接影响。结构几何参数如壁厚、截面形状与支撑布局决定结构的质量分布与刚度特性，进而影响驱动系统的加速度能量需求。

质量增加会导致惯量增大，使能耗成倍上升；刚度不足会造成系统动态响应恶化，引起运动误差和振动损失；结构热稳定性差则会导致温升加剧，提高散热能耗。本研究建立结构参数-能耗耦合函数，将驱动能耗、热管理能耗与振动能量损失纳入统一模型。通过灵敏度分析识别对能耗影响最显著的关键结构参数，为结构方案优化提供量化依据。该方法使能耗评估从运行层面前移至设计阶段，使结构几何设计与能量效率之间实现紧密联动，有助于形成更加高效的绿色设计策略。

3.3 结构可靠性与绿色性能的平衡策略

在绿色设计体系中，如果一味追求结构轻量化，可能导致可靠性降低和维护频次增加，从而在生命周期层面造成能耗反弹。因此，绿色结构设计必须在减重、性能与寿命之间实现协调。本研究提出可靠性约束下的结构优化方法，通过将疲劳寿命模型、损伤演化模型与可靠度指标引入设计空间，使结构在轻量化的同时保持足够的承载能力与耐久性。模型可对不同载荷工况下的疲劳损伤进行预测，避免结构因减重过度而在运行阶段出现裂纹扩展加速等问题。通过可靠性与绿色性能的联动评价，可形成低材料消耗、低能耗及长寿命的综合设计目标，使机电产品在生命周期内实现资源占用最小化与环境负荷最小化，体现绿色设计的本质要求。

4 机电产品能耗建模与绿色评价体系构建

4.1 运行阶段能耗的机理建模方法

机电产品在运行阶段的能耗由驱动能耗、摩擦损失、控制系统功耗及热管理能耗共同构成。为准确刻画运行能耗行为，本研究构建系统动力学模型，将加速度需求、载荷传递路径、摩擦阻力变化与热损失机制纳入统一表达框架。驱动能耗模型基于电机电磁关系与反电势特性描述不同工况下的瞬时功率需求；传动链效率模型通过摩擦系数、润滑状态与机构啮合精度等参数刻画能量损失；控制系统功耗模型则考虑信号处理、电源转换及执行模块的能量分布。研究通过多工况实验对模型进行验证，使模型能够真实反映负载波动、加减速模式与温升特性对能耗的影响，为后续能耗优化奠定可靠基础。

4.2 生命周期能耗评价模型

机电产品的能耗贯穿研发、制造、运输、运行、维护与报废等多个阶段，运行能耗只是其中一部分。基于生命周期评价(LCA)方法，本研究构建覆盖材料生产、结构加工、组件装配、运行维护与回收处理全过程的能耗评价模型。模型通过能耗清单对各环节能源输入进行量化，并结合不同能源来源的碳排放因子计算生命周期碳排放量。材料生产阶段依据材料密度、加工方式及回收特性计算加工能耗；结构制造阶段结合制造路径、工艺能耗与设备效率进行建模；运行维护阶段根据实际工况能耗模型进行累积计算；报废阶段则考虑回收率与再利用效率。该模型为绿色设计提供系统化评