

科技论坛

低碳目标下机电产品轻量化设计的材料与结构协同策略

江勇强

杭州鸿浩实业有限公司 311400

【摘要】为助力低碳发展，机电产品轻量化设计需推动材料与结构深度协同。本文先明确全生命周期低碳、多要素协同优化原则，再分析二者协同存在机制缺失、适配技术不足等困境，最后从材料拓扑适配、仿生绿色融合、复合模块协同、高强参数匹配四方面，提出针对性协同策略，为机电产品低碳轻量化设计提供参考。

【关键词】低碳目标；机电产品；轻量化设计；材料-结构协同

Synergistic Strategies for Materials and Structure in Lightweight Design of Electromechanical Products under Low-Carbon Goals

Jiang Yongqiang

Hangzhou Honghao Industrial Co., Ltd. Postal Code 311400

【Abstract】To support low-carbon development, lightweight design of electromechanical products requires deep synergy between materials and structural design. This paper first establishes principles for low-carbon and multi-element collaborative optimization across the entire life cycle, then analyzes challenges such as insufficient synergistic mechanisms and inadequate supporting technologies. Finally, it proposes targeted strategies focusing on four dimensions—material topology adaptation, biomimetic green integration, composite module coordination, and high-strength parameter matching—to provide references for low-carbon lightweight design of electromechanical products.

【Key words】Low-carbon goals; Electromechanical products; Lightweight design; Material-structure synergy

一、低碳目标下机电产品轻量化设计的材料与结构协同原则

企业需遵循全生命周期低碳导向原则，将材料从开采、加工、使用到回收的全流程碳足迹数据，与结构设计的力学需求、工艺适配性深度绑定，打破材料选型与结构设计的割裂状态，避免单一环节优化导致的整体碳排冗余，确保设计方案在减重与低碳目标上协同统一^[1]。同时，企业应坚守多要素协同优化原则，以材料性能参数为基础、结构功能需求为核心、工艺可行性为支撑，构建“材料-结构-工艺”三维联动体系。在设计过程中同步考量材料的力学强度、低碳属性，结构的承载能力、拓扑形态，以及工艺的能耗水平、成型效果。通过跨学科协作实现多要素间的动态平衡，提升设计方案的工程实用性与低碳效益。

二、机电产品轻量化设计的材料与结构协同现存困境分析

（一）材料选型与结构设计协同机制缺失

企业在机电产品轻量化设计中，普遍存在材料选型与结

构设计环节割裂的问题，尚未建立系统性协同机制。多数企业仍沿用“先结构设计后材料匹配”的传统模式，材料研发团队与结构设计团队缺乏常态化数据共享与协同决策渠道，导致材料性能参数与结构受力需求难以精准适配^[2]。同时，现有设计体系未将全生命周期碳足迹数据纳入协同考量，材料选型多侧重力学性能指标，忽视开采、加工及回收阶段的碳排放差异，而结构设计也未针对低碳材料特性进行针对性优化，最终造成材料冗余与碳排超标，制约轻量化与低碳化协同目标的实现。

（二）仿生结构与绿色材料适配技术不足

企业在融合仿生结构与绿色材料的过程中，面临适配技术不成熟与数据支撑缺失的双重困境。一方面，绿色材料数据库缺乏动态更新机制，竹纤维增强复合材料、可降解聚酰胺等材料的力学性能、成型特性与碳足迹数据碎片化，难以与仿生结构的孔隙率、壁厚梯度等参数实现数字化匹配；另一方面，仿生结构与绿色材料的结合界面设计缺乏多场耦合优化算法支撑，承载强度、振动阻尼与碳排放量的多目标平衡难以达成。此外，适配仿生复杂形态的成型装备匮乏，绿色材料在仿生结构中易出现成型缺陷、结合力不足等问题，严重影响设计方案的工程可行性^[3]。

（三）复合材料与模块化结构协同性薄弱

企业在推进复合材料与模块化结构协同设计时，存在协同体系不完善与接口标准不统一的突出问题。现有设计模式未建立“材料性能-结构受力-模块接口”的联动机制，梯度复合材料的特性未充分融入模块化单元开发，导致模块划分与材料梯度参数匹配度低。同时，模块化接口缺乏统一的尺寸精度与连接标准，传统金属连接件的使用不仅增加重量与碳排，还造成不同模块间装配兼容性差。此外，数字孪生技术在材料-结构耦合仿真中的应用不足，难以实时捕捉复合材料成型过程中的纤维取向、树脂固化度等数据，无法为模块化结构优化提供精准反馈。

（四）高强材料与结构参数优化联动不足

企业在匹配高强轻质材料与优化结构参数的过程中，存在线性设计局限与多目标协同缺失的问题。多数企业仍采用“材料选定后再优化结构”的线性模式，未建立材料性能与结构参数的双向反馈调整机制，导致结构设计难以充分发挥高强轻质材料的性能优势。同时，参数优化算法未将材料许用应力、结构刚度与低碳指标同步纳入目标函数，仅以减重为单一导向，易造成材料过度设计或结构强度不足。此外，跨部门协同设计平台缺失，材料研发、结构设计与工艺制造团队的数据流转不畅，结构参数优化与材料成型工艺脱节，导致加工过程能耗损失增加，违背低碳设计初衷。

三、低碳目标下机电产品轻量化设计的材料与结构协同策略分析

（一）优化材料选型适配结构拓扑，助力机电产品低碳轻量化

企业需以全生命周期低碳为导向，打破材料选型与结构设计的割裂壁垒，构建“材料基因库-拓扑优化-工艺适配”三维协同体系，实现从单一要素优化到系统协同创新的转变。

在材料基因库搭建上，企业应摒弃传统“性能优先”的选型逻辑，联合材料科研机构建立包含低碳属性的材料数据库。数据库需纳入材料从开采、冶炼到回收全流程的碳足迹数据，同时标注弹性模量、疲劳强度等力学参数及3D打印、锻造等工艺适配性指标，形成“低碳属性+力学性能+工艺特性”的三维评价标准。针对电机壳体、传动部件等核心结构，采用聚类分析算法筛选出低碳高性价比材料组合，如针对高频振动部件，优先匹配“碳纤维增强聚酰胺+局部金属嵌件”的复合方案，在保障抗振性的同时降低碳排。

而在拓扑优化环节，企业需将材料基因库数据与结构仿真模型实时联动，开发自适应优化算法。区别于传统“先结

构后选材”的模式，采用“材料特性引导结构生成”的逆向设计思路。在拓扑优化初始阶段即输入目标材料的力学参数，算法依据材料屈服强度、导热系数等特性，自动生成应力分布与材料分布相匹配的结构形态。例如，在设计液压阀块时，算法可根据铝合金的导热特性，在高温区域优化出蜂窝状散热结构，在承压区域保留致密拓扑形态，使结构减重率提升15%以上的同时，降低散热能耗。

工艺适配层面，企业需建立协同验证机制，将拓扑优化后的结构模型与材料加工工艺进行参数匹配。通过数字孪生技术模拟不同工艺下的材料成型效果，如针对拓扑优化后的复杂晶格结构，若选用钛合金材料则匹配电子束熔融3D打印工艺，精准控制激光功率与扫描速度，避免材料内部出现孔隙缺陷；若选用铝合金则采用挤压铸造工艺，优化模具温度与压力参数，保障结构致密度。同时，企业需将工艺参数反馈至材料基因库，形成“选型-优化-工艺”的闭环迭代，持续提升协同设计的精准度。

（二）融合仿生结构形态与绿色材料，赋能机电产品低碳减重

企业应构建“仿生形态参数化建模-绿色材料性能适配-多场耦合优化”的一体化设计体系，以实现结构与材料的精准协同。在仿生形态提取环节，企业需依托机器视觉与生物力学分析，对荷叶叶脉、蜂巢阵列等典型承载结构进行特征量化，建立包含孔隙率、壁厚梯度等参数的仿生模型库，突破传统仿生设计的经验化局限。针对绿色材料选用，企业应建立动态数据库，整合竹纤维增强复合材料、可降解聚乳酸基金属等材料的力学性能、成型特性及碳足迹数据，实现材料选型与仿生结构的数字化匹配。

企业需引入多目标拓扑优化算法，将承载强度、振动阻尼、碳排放量等指标纳入目标函数，对仿生结构与绿色材料的结合界面进行参数迭代。在设计过程中，企业应搭建跨学科协作平台，推动材料研发、结构设计与工艺工程师的协同，针对不同机电产品的工况需求，定制化调整仿生结构的拓扑形态与绿色材料的增强相比。例如在小型电机外壳设计中，企业可采用仿生蜂窝夹芯结构，搭配玄武岩纤维增强聚酰胺材料，通过调整蜂窝胞元尺寸与纤维铺层角度，实现结构承载性能与材料利用效率的最优平衡。

为提高机电产品轻量化设计的低碳精准度与落地实效性，企业应建立设计过程的碳足迹追溯机制，将绿色材料的开采、加工及仿生结构成型过程中的碳排放数据实时反馈至设计系统，形成“设计-评估-修正”的闭环。同时，企业需联合高校开展前沿技术攻关，探索仿生结构与绿色材料的协同成型工艺，开发适应仿生复杂形态的3D打印、模压成型等专用装备，解决绿色材料在仿生结构中成型难、结

合力不足等技术瓶颈，确保轻量化设计方案的工程可行性与经济性。

(三) 协同复合材料特性与模块化结构，推进机电产品低碳轻量

企业需构建“材料性能数据库-结构受力模型-模块化接口标准”三位一体的协同体系，打破材料选用与结构设计的割裂状态。基于机电产品核心部件的载荷分布差异，企业可采用梯度复合材料定制技术。通过调整碳纤维、玄武岩纤维与可降解树脂的混合比例，在轴类、壳体等关键部位形成“高刚性表层-吸震中间层-轻量化芯层”的梯度结构，使材料性能与受力需求精准匹配，避免单一材料过度设计导致的碳冗余。

在结构设计环节，企业应将梯度复合材料特性融入模块化单元开发，建立“功能单元-材料适配-接口通用”的设计规范。针对电机端盖、减速器箱体等典型部件，按功能划分为动力传输、密封防护等标准化模块，依据各模块的力学要求预设材料梯度参数。如传动模块采用高纤维含量的梯度材料保证强度，防护模块通过低树脂损耗的复合工艺降低重量。同时，企业需统一模块连接接口的尺寸精度与连接方式，采用榫卯式复合材料接口替代传统金属连接件，减少装配环节的耗材与能耗。

为提升协同设计的精准度，企业可引入数字孪生技术，构建材料-结构耦合仿真模型。通过实时采集复合材料成型过程中的纤维取向、树脂固化度等数据，与模块化结构的应力应变仿真结果进行联动分析，优化梯度材料的分布边界与模块的拼接位置。例如在新能源汽车驱动电机设计中，企业可通过仿真调整定子铁芯的复合材料梯度范围，使模块重量降低18%以上的同时，保持铁芯损耗指标稳定，实现轻量化与低碳化的同步提升。

此外，企业应建立跨部门的协同工作机制，由材料研发团队提供梯度复合材料的性能参数与成型工艺限制，结构设计团队基于此完成模块化单元的拆分与接口设计，生产部门则同步优化模块的成型与装配流程。通过制定统一的数字化设计标准，实现各环节数据的实时流转，避免因设计与生产脱节导致材料浪费，从源头降低产品全生命周期的碳排放。

参考文献

- [1]刘春雨. 高效蓝光有机电致发光材料的设计, 合成及性能研究[D]. 大连理工大学, 2025.
- [2]刘强. 大型机电设备储运信息处理系统设计与研究[D]. 山西大学, 2025.
- [3]郝金星,王健壮,侯梦雪. 集装箱式模块化机电产品的设计方法与应用验证[J]. 机电工程技术, 2026, 55(09): 207-211.

作者简介: 江勇强, 出生年月: 19670619, 男, 汉族, 籍贯: 富阳, 学历: 初中, 研究方向: 机电。

(四) 匹配高强轻质材料与优化结构参数，实现机电产品低碳降耗

企业需建立包含碳纤维复合材料、铝锂合金等多元高强轻质材料的基因数据库，嵌入材料力学性能、成型能耗、生命周期碳排放等多维度参数，结合产品工况需求进行材料初筛与性能预判。基于初筛材料特性搭建产品结构数字孪生模型，通过有限元分析模拟材料在不同结构形态下的应力分布，打破“材料选定-结构设计”的线性模式，实现二者的双向反馈调整。

在参数优化环节，企业需引入多目标协同算法，将材料许用应力、结构刚度要求与低碳指标同步纳入优化目标函数。针对关键承载部件，采用“拓扑优化-尺寸细化-形状修正”的递进式方法。并以最小化材料用量为约束进行拓扑优化，确定结构核心承载路径；结合选定材料的强度阈值细化截面尺寸参数，避免材料冗余。基于数字孪生的动态仿真结果修正结构形状，减少应力集中区域的材料堆积。同时，企业应建立材料成型工艺与结构参数的关联模型，确保优化后的结构参数与材料成型特性相匹配，降低加工过程中的能耗损失。

为强化协同效果，企业需搭建跨部门的协同设计平台，整合材料研发、结构设计、工艺制造等专业团队的技术资源。通过平台实现材料性能数据与结构设计参数的实时共享，建立设计参数变更的连锁反应分析机制，当某一参数调整时自动触发关联参数的适应性校核。此外，企业应将全生命周期理念融入设计过程，在材料选型阶段考量回收再利用性能，在结构优化中预留模块化拆解接口，使轻量化设计贯穿产品从研发到报废的全流程，形成低碳闭环。

四、结论

低碳目标下，机电产品轻量化设计的核心在于材料与结构的深度协同。打破二者割裂壁垒，遵循全生命周期低碳与多要素优化原则，是实现减重与降碳双赢的关键。针对现存协同机制缺失、适配技术不足等问题，需通过材料-结构-工艺三维联动、仿生与绿色材料融合等策略突破。