

化工机械轻量化与节能化协同设计技术

牛天芳

河北科防治金安全评价有限公司，河北 石家庄 050000

[摘要]针对化工行业普遍存在的高耗材、高能耗的发展痛点，提出轻量化与节能化深度融合的协同设计技术体系，通过多维度的优化策略，提高资源利用效率与系统的性能。通过多学科建立协同设计的理论框架，对材料结构以及能耗的耦合关系进行清晰明确，基于实际情况构建优化措施，整合轻量化与节能化目标。研究结果显示，协同设计技术的应用可以有效降低能量损耗，文章研究为化工机械的绿色化升级就够提供了切实可行的技术路径，以供参考。

[关键词]化工机械；协同设计；轻量化；节能化；多目标优化；多场耦合仿真

DOI: 10.33142/ec.v8i11.18581 中图分类号: TU201 文献标识码: A

Collaborative Design Technology for Lightweight and Energy-saving of Chemical Machinery

NIU Tianfang

Hebei Kefang Metallurgy Safety Evaluation Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: In response to the common pain points of high consumables and high energy consumption in the chemical industry, a collaborative design technology system that deeply integrates lightweight and energy-saving is proposed. Through multidimensional optimization strategies, resource utilization efficiency and system performance are improved. Establish a theoretical framework for collaborative design through multiple disciplines, clarify the coupling relationship between material structure and energy consumption, construct optimization measures based on actual situations, and integrate lightweight and energy-saving goals. The research results show that the application of collaborative design technology can effectively reduce energy loss. This article provides a practical and feasible technical path for the green upgrading of chemical machinery for reference.

Keywords: chemical machinery; collaborative design; lightweight; energy-saving; multi objective optimization; multi field coupling simulation

引言

化工行业在实际的生产过程中，涵盖一系列复杂的物理与化学反应过程，对化石能源的消耗比较大^[1]，且在生产过程中伴随着材料消耗以及大量的碳排放。现代化工工艺迅速演变，传统化工机械设备的性能、安全和效率逐渐难以与之匹配。特别是在精细化工、高端材料合成和绿色反应工程中，对于设备的需求已经不限于反应的基本承载，而是更加注重其对于复杂反应体系的调控能力、极端工况适应性以及其长时间工作可靠性。化工机械承载着整个生产过程的关键载体，其设计水平的高低直接决定着行业的资源利用率以及能耗效率。我国十分重视节能降耗问题，从化工机械设计制造的角度进行分析，自动化技术的应用可以提高化工机械设计制造的节能性，有助于相关资源的充分利用，有助于保证化工机械制造经济效益最大化^[2]。然而常规的化工机械设计将安全作为核心的考量目标，在设计方面通常采用“经验冗余”设计模式，这种设计模式不仅导致设备重量较大，而且在运行过程中能耗较高，在一定程度上大大提高了设备的制造、运输成本，同时也加剧了能源的浪费，对环境造成污染。伴随着绿色制造理念的深度渗透，以及在双碳战略的引领下，化工机械升级进程中轻量化与

节能化尤为关键^[3]。鉴于此，为了达成两者的平衡优化目标与有机融合，本文研究致力构建一套轻量化与节能化协同设计技术体系，助力产业转型升级。

2 化工机械轻量化与节能化协同设计理论基础

2.1 协同设计的核心内涵

轻量化与节能化协同设计策略的核心目标主要是确保化工机械全生命周期综合性能最优，通过多学科协同与多目标的优化，进而实现减少材料的使用量，以及降低化工机械在运程过程中的能耗^[4]。其中目标协同主要是突破轻量化设计与节能化设计各自孤立优化的传统范式，构建“减重-节能”双向驱动、协同共进的目标体系架构；学科协同主要是通过融合材料科学、热力学、结构力学等学科的前沿理论体系，拓展设计的思路，解决单一学科的局限性流程协同主要是基于实际情况构建一个贯穿设计初始阶段到性能验证阶段的全流程协同框架，在此框架下动态监测和优化设计。

2.2 材料-结构-能耗耦合机制

化工机械的轻量化与节能化性能主要源自于结构形态设计、材料的固有属性以及能耗的传递机制的相互作用，共同形成了多维度的耦合关系。

(1) 材料-结构耦合：材料固有的属性是影响结构在

实现轻量化目标过程中的关键因素，如强度、密度等直接影响结构设计的轻量化与可行性。

(2) 结构-能耗耦合：结构形态对能量的传递效率有着直接性的影响。通过科学合理的优化结构布局，既能提高能源利用效率，又可达到节能降耗的目标。

(3) 材料-能耗耦合：材料的热导率、阻尼特性等参数对设备的振动能耗状况，热损耗有着直接性的影响，其中低导热材料应用可以减少热交换过程中能量的散失，可以提高设备的能源利用率，高阻尼材料可以有效抑制振动过程中能量的无谓损耗。

基于上述耦合机制，建协同设计理论模型框架(图1)。

3 化工机械轻量化与节能化协同设计的基本原则

3.1 安全优先原则

通常化工机械工作主要处于强腐蚀性、高压高温等极端工况环境中，因此在化工机械设计过程中需要优先考虑安全因素。在化工机械协同设计的过程之中，无论是推行何种高效的节能方案，还是采用何种轻量化的材料，均要全面满足安全运行的标准。在确保设备密封性能强度的前提下，实现减重或节能效果。

3.2 目标平衡原则

在化工机械的设计优化进程中，轻量化与节能化的目标常常呈现出一定程度的矛盾。部分高强度轻量化材料虽然具备出色的减轻设备重量的特性，但是应用成本比较高，在设计过程中将侧重点放于轻量化目标，可能导致前期项目成本提高。基于上述情况，在化工机械设计的过程中应该追寻目标平衡的原则，全面考量节能化与轻量化所带来的效率，结合工况的实际状况、设备的使用场景合理优化轻量化与节能化各自的优化权重。

3.3 全生命周期原则

在化工机械领域协同设计需全面且深入地贯穿化工机械的全生命周期，在设计阶段不仅要考虑材料的轻量化选用先进的新型材料，还需要兼顾动力的节能化，在设计方案时需要全面分析现有的制造工艺、设备能力，考虑制造过程的可行性和经济性；设备进入运行阶段挖掘轻量化设备的节能潜力，对设备的运行状态进行实时监测，自动调整设备的运行参数。在维护阶段，协同设计需要充分考虑轻量化结构的维护便利性，降低维护成本。在化工机械协同设计中全生命周期原则持续不断地贯穿于设备的整个使用过程，可以有效避免了因某一阶段的疏忽无法实现预期的设计目标，导致整体效益下降。

3.4 简洁实用原则

在化工机械协同设计方案务必遵循简洁可行这一核心准则，避免嵌入过多不必要的零件等过度复杂的设计增加制造难度，提高运维成本。因此，为了确保设备整体的可靠性与稳定性，在确保能够达成轻量化的前提下，尽量采用成熟的材料、结构与技术，降低设计与实施过程中的成本。简单合理的结构优化方案可提升协同设计方案的操作性，相较于复杂的异形罐体与多层次的内部结构可以加快技术落地速度。

4 轻量化与节能化协同设计关键技术

4.1 轻质高性能材料选型与调控技术

4.1.1 多维度材料性能评估

材料选型是协同设计基石，关键要平衡轻量化潜力、节能特性与性能可靠性。需构建科学完备的材料评估指标体系(见表1)，评估时用归一化处理转化指标，全面筛选材料。

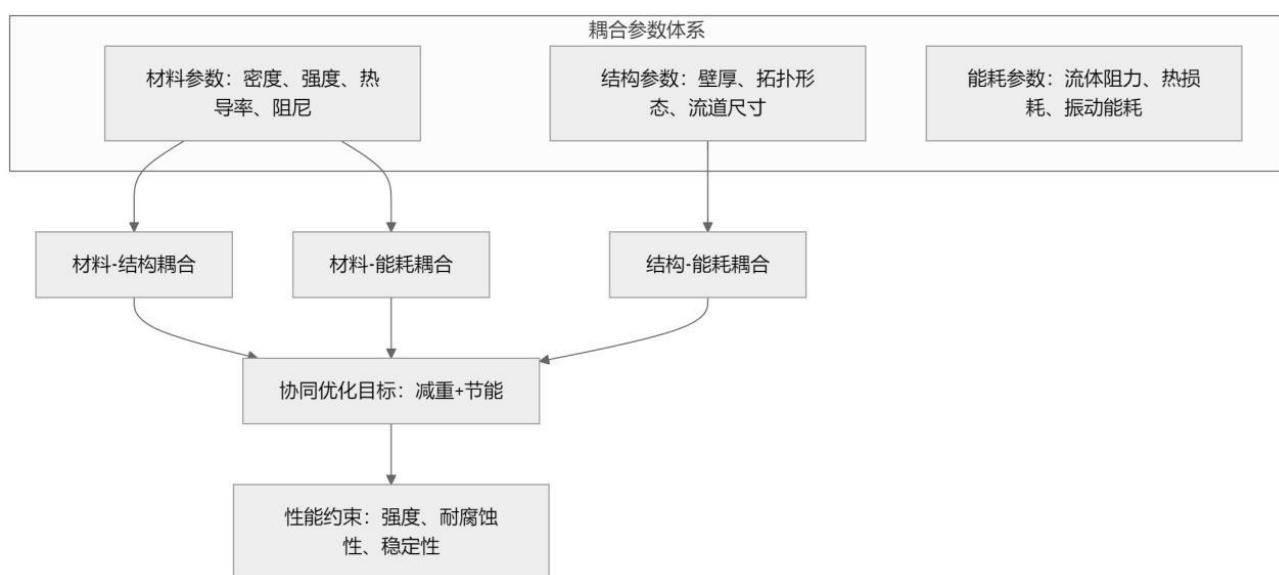


图 1 材料-结构-能耗耦合机制框架

表1 材料性能多维度评估指标体系

评估维度	核心指标	量化方法
力学性能	比强度、比刚度、疲劳强度	指标值/行业标准值
热性能	热导率、热膨胀系数	标准值/指标值(热膨胀系数); 指标值/标准值(热导率)
耐腐蚀性	PREN 值、腐蚀速率	PREN 值/35(临界值); 标准腐蚀速率/实际腐蚀速率
能耗特性	阻尼损耗因子、摩擦系数	指标值/基准材料指标值

4.1.2 材料改性与复合调控技术

对于单一材料所存在的性能不足问题,可以采用改性与复合技术。一方面对于金属材料而言,通过应用表面强化、热处理、合金化等干预措施,以提高金属材料的性能。通过对不锈钢实施氮合金化工工艺处理,可以提高不锈钢的屈服强度,可达到 650MPa 量级,不仅可以达成材料减重的目标,而且增强不锈钢材料的耐腐蚀性^[5]。另一方面通过运用纳米复合纤维增强等前沿技术手段制备高性能的复合材料,借助科学的铺设设计实现性能定向调控。石墨烯改性环氧树脂在经过特殊的工艺处理之后可以提升阻抗模量,并且在耐腐蚀性方面展现出良好的提升效果。以碳纤维增强聚合物(CFRP)为例,通过±45°铺层,可以提高其抗剪切的性能,同时,降低材料的密度。石墨烯改性环氧树脂可使阻抗模量提升 2 个数量级,显著增强耐腐蚀性。

4.2 结构优化与轻量化集成设计技术

结构优化作为实现轻量化与节能化协同增效的核心手段,过科学合理的结构重构设计也可提升节能效益。这种协同设计框架下的结构优化通过整合结构功能、优化结构形态达成质量效率与能源效率的双重优化。一方面,集成化结构设计通过拓扑优化方法将离散型部件重构为多功能一体化结构体系,减少部件数量与连接部位,种设计范式变革降低设备重量,同时减少装配误差,降低能量损耗。在化工装备创新设计实践中将电机、泵体、底座整合为一体化结构,采用多物理场耦合拓扑优化方法减少连接部件的重量,降低能量损耗。用拓扑优化法在满足性能约束下建立包含结构强度、刚度及动态响应的多目标优化模型实现材料最优分布与能量损耗最小,在满足结构强度与刚度要求的前提下,去除结构中的冗余部分,优化结构的受力分布,通过优化设计策略提升结构的可制造性。热交换、液体输送等关键工艺过程在化工机械领域中广泛存在,针对这些过程开展流固热耦合结构优化工作可以有效实现系统能源损耗的控制。流道结构的优化设计借助计算流体力学(CFD)仿真系统对流道内部的三维速度场、湍流特性分布规律以及压力场展开全面且深入的分析^[6],通过参数化建模,对流道截面形状进行优化,在兼顾结构强硬要求的前提下,从而可以有效降低流体沿程阻力损失。

4.3 能耗与协同调控技术

将化工机械能耗细分为制造、运行、运输三阶段,构建全生命周期能耗管理措施。对于运行能耗过程中的关键核心环节进行针对性的靶向调控干预策略,对于驱动能耗优化调控方面,主要采用轻量化的设计理念,同时辅以高效传动结构的深度优化,可以有效降低旋转部件的惯性力矩,减少驱动功率的需求。当结构重量降低 10%时,驱动能耗也相应降低。在热损耗的调控方面,除了优化材料导热率,同时进行保温结构的设计,该设计策略可以有效抑制设备与环境之间的热交换过程^[7]。在振动能耗调控方面主要应用高阻尼材料,并配合结构阻尼优化,从而可实现降低振动能量损耗的目的。

4.4 动力系统与轻量化设备的协同匹配技术

在化工机械体系中动力系统作为能耗核心,其与轻量化设备的协同匹配是达成节能化目标的关键所在。协同匹配技术的核心主要是以工况实际需求、轻量化设备的重量变化为依据,对动力系统的选型与控制策略进行不断的优化,通过这种优化手段确保动力输出与设备负载精准匹配,避免因动力不足而引发的设备运行效率低下等能耗浪费现象,防止因动力过剩而造成的能源无端损耗。当电机驱动的化工机械完成轻量化改造后,此时,必须重新对设备的运行负载进行精确核算,并基于核算结果选择功率更适配的电机,实现能源的高效利用。结合应用变频控制技术,以设备的实际运行负荷动态为依据,对电机转速进行合理调节,从而实现系统的节能运行。对于液压或气动驱动的设备,在实现轻量化改造后负载降低,此时需要对液压泵、气动泵的排量及压力参数进行优化调整,减少液压油,降低压缩空气的消耗。同时,采用节能型液压阀、气动阀,提升动力传输效率,实现动力系统与轻量化设备的协同节能^[8]。

5 协同设计性能验证方法

5.1 性能评价指标体系

构建协同设计性能评价指标体系,从轻量化、节能化、可靠性三维度量化评估(如表 2)。以实测或仿真得指标数据,对比基准方案评估协同设计效果。

表2 协同设计性能评价指标体系

评价维度	核心指标	评价标准
轻量化性能	重量降低率、材料利用率	重量降低率≥15%, 材料利用率≥85%
节能化性能	运行能耗降低率、热损耗降低率	运行能耗降低率≥10%, 热损耗降低率≥20%
可靠性	最大应力安全系数、疲劳寿命、振动幅度	安全系数≥1.8, 疲劳寿命≥设计寿命, 振动幅度≤5μm

6 结论与展望

在化工行业不断发展过程中,新型化工机械装备的设计和应用的不断创新至关重要,本文研究成功构建了关于化工机械轻量化与节能化协同设计的技术体系,该体系通

过多学科技术的深度融合理论。首先对材料-结构-能耗的耦合机制进行了详细的阐述，构建系统性的理论框架，为后续的多目标协同优化研究奠定了理论基础。成功开发了拓扑优化与结构协同设计技术、轻质高性能材料选型与精准调控技术、能耗建模与动态调控技术三大关键技术，达成了轻量化技术与节能化技术的有机融合。同时，提出了层次分析法的方案决策方法，借助该方法可对众多设计方案进行精准的筛选，实现设计方案的全局优化。除此之外，本文研究还完善了性能评价体系，反复验证设计方案并加以改进，这种闭环优化迭代机制确保了设计方案的有效性与可靠性，可实现重量降低、运行能耗下降的协同效益。未来可引入数字孪生技术，紧密结合循环经济理念，构建化工机械的虚拟仿真模型体系与探索生物基轻质复合材料与可降解材料，进而提升协同设计的精准度与效率，降低设备全生命周期的环境负荷。

[参考文献]

[1]张子彪.智能制造背景下机械设计制造及其自动化技术发展趋势分析[J].大众标准化,2023,11(11):140-142.

- [2]陈威.机械设计制造及其自动化优势及发展趋势探讨[J].机电产品开发与创新,2023,36(2):162-164.
- [3]王子健,汤浩森,陈献策.化工机械设计制造及其自动化的特点、优势和发展趋势[J].当代化工研究,2022(3):20-22.
- [4]祖锡华.机械设计制造及其自动化特点与优势以及发展趋势研究[J].产业创新研究,2021,11(8):89-91.
- [5]赵粉菊.机械设计制造及其自动化的发展趋势研究[J].内燃机与配件,2021(6):187-188.
- [6]李翔宇.机械设计制造及其自动化发展趋势探讨[J].湖北农机化,2020(3):64.
- [7]孙杰.机械设计制造及其自动化的特点与优势及发展趋势研究[J].科技风,2019,11(18):159-160.
- [8]王冬寒.基于机械设计制造及其自动化特征分析的发展趋势研究[J].电子测试,2019,11(8):132-133.

作者简介：牛天芳（1985.6—），毕业院校：河北工业大学，所学专业：化学工程与工艺，当前就职单位：河北科防治金安全评价有限公司，职务：安全评价师，职称级别：中级。