机械结构协同优化设计理论与实践

陶晓庆

陕西能源职业技术学院, 陕西 咸阳 712000

摘要: 本文旨在探索机械结构协同优化设计的理论与实践, 全面分析多目标优化理论与协同设计方法的核心思想及其在工程中的应用。通过案例研究, 文章详细讨论了协同优化设计在飞行器结构轻量化、复合材料优化、跨学科协同设计、振动与噪声控制, 以及数字化设计与仿真等领域的具体应用, 并结合工程机械装备和机床主轴系统的优化实践, 证明了其提升性能、降低成本和缩短开发周期的优势。

关键词: 机械结构; 协同优化; 设计理论; 实践参考

Theory and Practice of Collaborative Optimization Design of Mechanical Structure

Tao, Xiaoping

Shaanxi Energy Institute, Xianyang, Shaanxi, 712000, China

Abstract: This paper aims to explore the theory and practice of collaborative optimization design of mechanical structures, and comprehensively analyze the core ideas of multi-objective optimization theory and collaborative design method and their applications in engineering. Through case study, this paper discusses in detail the specific application of collaborative optimization design in the fields of aircraft structure lightweight, composite material optimization, interdisciplinary collaborative design, vibration and noise control, digital design and simulation, and proves its advantages of improving performance, reducing cost and shortening development cycle by combining the optimization practice of construction machinery and machine tool spindle system.

Keywords: Mechanical structure; Collaborative optimization; Design theory; Practical reference

DOI: 10.62639/ssps1.20240104

随着现代工业技术的快速发展, 机械结构设计面临着日益复杂的挑战。协同优化设计作为一种创新的设计方法, 在提高产品性能、降低成本、缩短开发周期等方面发挥着重要作用。

一、理论基础

(一) 多目标优化理论

在现代机械工程中, 多目标优化理论是机械结构协同优化设计的核心, 主要通过建立数学模型和优化算法, 提供解决工程实践中各类优化问题的科学方法。该理论将工程问题转化为数学模型, 考虑多个性能指标的相互制约, 寻求最优设计方案。在应用层面, 参数优化通过灵敏度分析调整结构参数, 并利用智能优化算法探索最优解空间^[1]; 拓扑优化基于材料分布理论, 通过离散化处理和迭代计算, 优化材料分布方案以满足约束条件; 形状优化则调整结构几何形状和尺寸, 以提升性能指标^[2]。这三种优化方法在一定条件下可互补结合, 构成完整的多目标优化框架, 为机械结构创新设计和性能提升提供理论支持。

(二) 协同设计方法

协同设计方法可以整合多个学科的专业知识, 实现机械产品设计各环节的深度融合与优化。多学科协同设计要充分考虑力学、材料、控制等多个维度的相互作用, 建立跨学科的分析模型和

协同机制, 有效解决传统单一学科设计方法难以应对的复杂问题。多目标协同设计需要以产品整体性能为目标, 统一优化强度、刚度、重量、振动等指标, 平衡各项指标的矛盾, 从而实现性能的综合优化^[3]。在系统层面, 多系统协同设计可以打破机械、电气、软件等领域的壁垒, 建立统一的信息平台和协同决策机制, 提升设计效率和产品性能。这种方法不仅可以提升产品性能和可靠性, 缩短开发周期、降低成本, 还能为企业带来经济效益和竞争优势。在数字化转型的背景下, 协同设计方法与人工智能、大数据等技术融合, 可以充分拓展其应用边界, 为产品创新提供强大的技术支持^[4]。

二、实践应用

(一) 航空航天领域的应用

1. 飞行器结构轻量化设计

在航空航天器的设计中, 重量的减少直接影响到飞行器的性能、燃料效率和经济性。协同优化设计通过综合考虑结构强度、刚度和稳定性等多种性能目标, 利用拓扑优化和形状优化技术实现材料的最优分布。例如, 在飞机机翼的设计过程中, 通过拓扑优化, 可以帮助设计人员确定材料在机翼结构中的合理分布区域, 从而在保持高强度和高刚度的同时大幅减轻重量。结合形状优

(稿件编号: IS-24-4-1022)

作者简介: 陶晓庆 (1987-09), 女, 汉, 陕西西安人, 硕士, 陕西能源职业技术学院教师, 主要研究方向为机械设计及理论。

基金项目: 本文系陕西能源职业技术学院校级科研项目: “纯电矿用宽体自卸车电池箱快换机构的研究” (编号: 2021KYPO6)。

化技术,对机翼的外形和厚度分布进一步调整,可以使机翼在不同飞行条件下具有优异的空气动力学性能。

2. 复合材料结构优化

航空航天领域广泛采用复合材料(如碳纤维增强复合材料)来提高结构性能和降低重量。然而,复合材料的各向异性特性使其设计和制造变得复杂,涉及力学性能、制造工艺、服役环境和成本等多方面的约束条件。协同优化设计方法通过综合力学、材料科学和制造工艺领域的知识,能够实现多目标优化^[5]。在卫星面板的设计中,例如通过对复合材料铺层顺序、厚度分布和纤维方向的优化,可以提升其抗冲击性能和热稳定性。进一步地,协同优化设计还可以平衡制造过程中的成本与复杂性,确保高性能的同时降低生产难度。在火箭壳体的设计中,协同优化也被广泛应用,通过调整复合材料结构来满足轻量化和高强度的双重要求,从而提高运载效率。

3. 跨学科协同设计

飞行器设计是一个涉及结构力学、空气动力学、热学、控制等多学科交叉的复杂系统工程。传统设计方法往往是各个学科独立进行优化,但这种割裂方式可能导致系统整体性能的不足。协同优化设计方法通过构建多学科设计优化(MDO)模型,实现不同学科间的协同与优化。在火箭发动机设计中,热力学性能(如燃烧效率)与结构强度(如燃烧室耐压性)往往存在矛盾。协同优化模型可以通过权衡不同学科的设计目标,寻求综合性能的最优解,从而显著提升发动机的效率和可靠性。数字孪生技术的引入进一步强化了跨学科协同设计的能力,通过实时仿真和数据反馈,设计人员能够动态调整参数,极大缩短开发周期。

4. 振动与噪声控制

飞行器在运行过程中会受到复杂的振动和噪声干扰,这不仅影响乘客的舒适性,还可能导致结构的疲劳损伤和早期失效。协同优化设计通过综合考虑结构动力学特性、振动控制策略和噪声抑制方法,能够在设计阶段解决这些问题。例如,在航空发动机叶片的设计中,通过协同使用形状优化和材料选择技术,可以显著降低叶片在工作时的振动幅度,从而提升发动机的稳定性和寿命。此外,协同优化设计还可以结合主动噪声控制技术,将噪声抑制纳入结构设计框架,优化机舱隔音材料和发动机吊挂系统,从而显著提升乘客的飞行体验。

5. 数字化设计与仿真

数字化技术的快速发展为航空航天领域的协同优化设计提供了强大的技术支持。从早期的概念设计到详细设计,再到产品的制造与测试,协同优化设计可以实现全流程的数字化管理^[6]。通过有限元分析、计算流体动力学(CFD)仿真和多目标优化算法,工程师能够快速模拟飞行器在不同工况下的性能表现。例如,波音公司在新型飞机的研发中,引入了协同优化设计平台,将多学科设计与数字化仿真深度结合。这一平台可以

在短时间内对大量设计方案进行评估和优化,从而显著缩短研发周期,降低试验成本和失败风险。此外,人工智能技术的应用也为协同优化设计注入了新的活力,通过机器学习算法,系统可以自动识别性能提升的潜在方向,辅助设计师完成更复杂的优化任务。

(二) 工程机械装备的应用

工程机械装备作为现代工业建设的重要支撑工具,其设计水平直接影响到施工效率和工程质量。在工程机械装备的研发过程中,机械结构协同优化设计同样发挥着重要作用。

1. 结构强度与轻量化的平衡

工程机械装备通常需要在恶劣环境中承受高强度工作负载,例如挖掘机的臂杆和起重机的吊臂。传统设计往往侧重于提高强度,而忽略重量的控制。然而,过大的结构重量会导致设备运行能耗增加,降低施工效率。协同优化设计通过多目标优化方法,在结构强度和轻量化之间找到最佳平衡点。例如,某些工程机械制造商通过引入拓扑优化和参数化建模技术,对挖掘机臂杆的关键部位进行材料分布优化。研究表明,这种方法能够在减轻整体重量15%的同时,将臂杆的屈服强度提升超过20%,显著提高了能效与工作性能。此外,协同优化还能结合先进材料的应用,如高强度钢和复合材料,以进一步提升强度-重量比,满足严苛的使用要求。

2. 复杂工况下的性能优化

工程机械装备需要在多种复杂工况下保持稳定的性能表现,这些工况可能包括高温、低温、高湿度以及冲击载荷等。传统设计方法难以兼顾这些复杂条件,而协同优化设计通过构建综合性能优化模型,能够为复杂工况提供更可靠的设计方案。此外,对于高温工况,协同优化设计可以加入热管理系统的设计,例如优化冷却通道的分布和材料的导热性能,从而确保设备在高温条件下的正常运行。

3. 多学科系统的协同优化

现代工程机械装备集成了机械、液压和电控等多个系统,子系统之间的耦合作用对整体性能的影响越来越显著。协同优化设计通过多学科协同优化方法,能够在设计阶段实现各子系统间的无缝配合^[7]。例如,在液压挖掘机的设计中,将液压系统的动态响应与机械结构的运动性能结合,能够优化液压传动的效率与机械臂的工作轨迹。某些案例显示,通过调整液压管路布局、优化阀门控制策略并改进机械结构响应,挖掘机的工作精度提高了15%,同时能耗降低约10%。另外,在起重机的刚度设计进行协同优化,有效减少了重载状态下的振动幅度,显著提升了吊装作业的稳定性和安全性。

4. 振动与疲劳寿命优化

工程机械装备长时间运行时易受到振动和疲劳损伤的影响,协同优化设计能够通过结构动力学分析和疲劳分析,在设计阶段优化零部件结构,提升其抗疲劳能力。

5. 数字化设计与制造

数字化技术的迅速发展为工程机械设备装备的协同优化设计提供了全新的工具和平台。借助CAD/CAE/CAM一体化系统和数字孪生技术, 协同优化设计可以覆盖从概念设计到制造工艺的全过程。例如, 在推土机传动系统的优化中, 利用数字化仿真技术分析变速箱齿轮的强度分布和热量生成情况, 进而协同优化齿轮材料和润滑冷却系统, 可以有效降低传动损失。研究表明, 这种优化设计可以使推土机的动力性能提高约12%, 同时显著降低传动系统的故障率。此外, 增材制造技术(3D打印)在制造阶段支持协同优化, 通过实现复杂结构的轻量化与功能集成, 也可以有效缩短开发周期。结合数字化仿真和增材制造技术, 复杂零件如多功能液压阀体的内腔设计可以一次性完成, 且显著提升液压性能。

(三) 机床主轴系统的应用

机床主轴系统作为机床的核心部件, 其性能直接决定了加工精度、稳定性和生产效率。协同优化设计在机床主轴系统中的应用主要表现在以下几个方面:

1. 动态性能优化

主轴系统在高速旋转过程中面临着振动和动态不平衡的挑战, 这会直接影响加工精度和表面质量。协同优化设计可以通过综合考虑主轴的几何结构、支承系统、润滑方式和动平衡方案, 构建动态特性优化模型。例如, 在高速主轴的设计中, 优化了主轴的质量分布和支承刚度, 同时调整润滑油膜厚度, 有效降低了振动幅度和旋转偏心率, 显著提升了加工稳定性。优化后的主轴系统可以满足高速切削条件下的更高精度需求, 同时延长轴承寿命。

2. 热特性优化

高速运转会导致主轴产生大量热量, 热膨胀和热应力的累积可能导致加工误差甚至零件报废。协同优化设计可以引入热-结构耦合分析模型, 能够在设计阶段优化冷却通道的布局、导热材料的选择以及主轴内外温差的控制策略。例如, 在某高速机床主轴的开发中, 通过优化主轴内部冷却通道的结构设计, 使热流分布更加均匀, 热变形量减少了30%, 大幅度提升了主轴的热稳定性。这种优化设计确保了主轴系统在高温条件下的加工精度。

3. 多目标综合性能优化

主轴系统优化常涉及刚度、精度、寿命、成本等多方面目标, 这些指标之间通常存在制约和权衡关系。协同优化设计可以采用多目标优化模型, 利用智能算法权衡不同性能指标间的矛盾。例如, 在某加工中心的主轴系统优化中, 通过协同优化设计提升了主轴的动态刚度和热稳定性, 使加工误差减少了约20%; 同时采用成本优化策略, 改进制造工艺, 主轴制造成本降低了约10%。这种多目标综合优化设计能够更好地满足市场需求和实际使用条件。

4. 制造与装配工艺的协同优化

主轴性能不仅依赖设计, 还受到制造精度和

装配质量的影响。协同优化设计可以结合制造工艺参数和装配误差分析, 通过改进关键工艺环节, 确保主轴实际性能接近理论设计目标。例如, 通过对主轴轴承的配合间隙进行优化, 减少装配误差的传递, 主轴的径向跳动减少了15%, 加工稳定性显著提升。与此同时, 利用数字化装配技术, 对关键部件进行高精度对准和在线调整, 进一步提高了装配效率和质量。

5. 智能化协同优化

随着智能制造技术的快速发展, 人工智能和大数据技术被引入主轴系统设计中, 极大提高了设计效率和优化深度。例如, 通过机器学习算法分析历史设计数据和工况性能反馈, 建立数据驱动的性能预测模型, 实现了快速优化迭代。在某主轴系统的开发过程中, 利用智能化协同优化平台, 设计周期缩短了约30%, 同时在稳定性、加工精度等多个方面实现了显著改进。此外, 智能化技术还支持主轴系统的在线监测与自适应优化, 使其在复杂工况下具有更强的适应性。

三、结语

机械结构协同优化设计在现代工业领域具有重要的理论价值与实践意义。通过融合多目标优化理论和多学科协同设计方法, 可以有效解决复杂机械系统中性能、成本与效率之间的平衡问题, 从而提升产品性能和设计效率。实践证明, 协同优化设计在飞行器、工程机械和机床主轴系统等多个领域中, 不仅能够改善结构性能, 还能在缩短研发周期、节约成本等方面实现显著成效。未来, 随着智能制造、大数据与人工智能技术的不断发展, 协同优化设计将迎来新的技术机遇与挑战。在此基础上, 研究者可以着重探索基于数字孪生技术的实时协同优化和智能化决策系统, 全面提升设计与制造的智能化水平, 为复杂工程系统的创新发展提供坚实支撑。同时, 加强对跨学科协同优化机制和多目标权衡策略的研究, 将进一步推动协同优化设计理论的完善与实践的深化, 从而不断拓展其在更多工业领域中的应用边界。

参考文献:

- [1] 张若楠. 机械结构动态优化的创新方法与实际应用研究[J]. 科技创新与生产力, 2024, 45 (07): 127-129+132.
- [2] 淡书桥. 机械设计制造及其自动化中计算机技术的应用[J]. 产业创新研究, 2024, (12): 78-80.
- [3] 周华. 机械自动化技术与数控技术融合探讨[J]. 造纸装备及材料, 2023, 52 (10): 76-78.
- [4] 袁源. 运动力学在机械结构设计中的应用[J]. 模具制造, 2023, 23 (09): 148-150.
- [5] 孙胜兵, 杨进步, 周林浩. 产品设计在机械设计制造中的因素分析和应用研究[J]. 现代制造技术与装备, 2023, 59 (04): 92-94.
- [6] 顾寄南, 朱林童. 一种快速可协同的机械结构原型设计方法[J]. 机械设计与制造, 2021, (08): 132-134+140.
- [7] 张荣宝. 机械结构优化设计应用与趋势研究[J]. 设备管理与维修, 2019, (18): 86-87.