

机械设计优化方法在工程实践中的应用分析

王子宇

邢台纳科诺尔精轧科技股份有限公司, 河北 邢台 054000

[摘要]机械设计优化方法属于改善产品性能, 削减制造成本, 缩减研发周期的关键技术手段。整理拓扑优化、多学科设计优化、响应面法、智能优化等方法在工程实践中运用的途径, 分析结构优化、材料轻量化、制造工艺优化、数字化设计等领域典型的实践案例。拓扑优化技术是用数学方法自动生成最优的材料分布构型, 不需要多次迭代就可以满足设定的性能约束。在滚翻保护结构设计中采用粒子群多目标优化算法, 最大变形减小了 78.5%, 最大应力降低了 58%。根据典型案例, 从平台建设、多学科协同、设计验证和质量控制、智能化融合四个方面给出优化应用实施策略, 给机械设计优化方法的工程化应用给予参照。

[关键词]机械设计优化; 多学科设计优化; 智能优化

DOI: 10.33142/sca.v9i7.20014

中图分类号: TH122

文献标识码: A

Application Analysis of Mechanical Design Optimization Methods in Engineering Practice

WANG Ziyu

Xingtai Naknor Technology Co., Ltd., Xingtai, Hebei, 054000, China

Abstract: Mechanical design optimization methods are key technical means to improve product performance, reduce manufacturing costs, and shorten research and development cycles. Organize the ways in which topology optimization, multidisciplinary design optimization, response surface methodology, intelligent optimization and other methods are applied in engineering practice, analyze typical practical cases in the fields of structural optimization, material lightweighting, manufacturing process optimization, digital design, etc. Topology optimization technology is the use of mathematical methods to automatically generate the optimal material distribution configuration, which can meet the set performance constraints without multiple iterations. The use of particle swarm multi-objective optimization algorithm in the design of rollover protection structure reduced the maximum deformation by 78.5% and the maximum stress by 58%. Based on typical cases, optimization application implementation strategies are proposed from four aspects: platform construction, interdisciplinary collaboration, design verification and quality control, and intelligent integration, providing reference for the engineering application of mechanical design optimization methods.

Keywords: mechanical design optimization; multidisciplinary design optimization; intelligent optimization

引言

高端装备制造业对于产品性能、轻量化水平和研发效率的要求越来越高, 传统的依靠经验、试错的设计方式已经不能满足复杂工程约束下最优设计的需求了。机械设计优化方法用数学规划、数值分析等手段, 在设计空间里自动寻找满足约束条件的最优设计方案, 已经成为提高产品综合效能的主要技术途径。目前各种优化方法层出不穷, 拓扑优化、多学科设计优化、可靠性设计优化等在概念设计阶段和优化手段相结合的方式, 在装备产品设计中是一种高效的可靠的方法。但是优化方法由学术研究走向工程实践还存在着建模复杂度大、多学科耦合严重、验证周期

长等诸多现实难题。对机械设计优化方法的理论体系、工程应用和实施策略进行系统的分析, 对促进设计方法学工程化有现实意义。

1 机械设计优化方法概述

机械设计优化方法是以数学规划理论为基础, 用计算机数值分析为手段来形成的设计决策技术体系。其主要思想就是把工程设计问题转化为数学模型, 用迭代求解的方法得到满足性能约束的最优设计方案。相比传统的试错设计来说, 优化方法有系统性、可重复性以及高效性这些明显的优势。从方法论演进的角度来说, 机械设计优化由原来的单目标确定性优化发展为现在的多目标、多学科、不

确定性量化。早期的优化方法主要是参数优化,设计变量一般是结构尺寸参数,目标函数比较单一。伴随着有限元分析、计算流体动力学等数值仿真技术的发展,拓扑优化、形状优化等结构优化方法得到发展,设计空间由原来的参数层面扩展到了材料分布和几何构型的层次上。多学科设计优化方法是针对装备设计中包含多个学科并且各学科之间相互耦合的情况,给获取装备整体性能最佳设计方案提供了一种有效的方法。近些年来,人工智能技术的出现促使出现了数据驱动优化以及智能优化的方法,从而加强了优化过程的自动化程度。

2 机械设计优化方法的理论基础与关键技术

2.1 机械设计优化的基本原则

机械设计优化要遵循三个基本准则,即系统性原则,优化过程要把产品看作是由多个部件、多个学科相互联系构成的系统,不能为了局部最优而牺牲整体性能;约束完备性原则,优化模型应该包含全部的强度、刚度、稳定性、制造工艺、成本等约束条件,否则最优解就无法可行;可行性与可验证性原则,优化结果要具有工程可实现性,可以通过仿真或者实验来验证它的可靠性。

2.2 常用机械设计优化方法及技术特点

常用的机械设计优化方法根据优化对象和求解策略可以分为四类。拓扑优化方法以材料在设计域内最优分布为目标,用变密度法、水平集法或者渐进结构优化法等手段来完成构型创新设计。拓扑优化的优势是可以自动生成最优构型,可以降低直接和间接的成本,比如使用较原部件更轻的零部件制造的飞机具有更好的环保性,也能给乘客带来更好的经济效益。该方法适合于概念设计阶段,在没有先验构型的情况下产生新的结构方案。参数优化方法就是对已经确定的构型设计变量(尺寸、厚度、角度等)进行寻优,常用的有遗传算法、粒子群算法、序列二次规划等。粒子群多目标优化算法把结构变形最小、结构质量最小作为目标函数,根据支撑梁的厚度、长度、宽度等设计参数来完成多目标优化。参数优化方法的优势在于和现有的 CAD/CAE 软件体系集成度高,工程设计人员不需要再学习复杂的数学理论就可以利用商用软件中的优化模块进行求解,是工程实践中使用最广的优化方法。

响应面法、近似模型方法都是利用设计变量和响应指标的代理模型来代替高成本的仿真计算,从而大大提高优化效率。根据参数敏感性选择关键参数,用最佳空间填充设计选择样本点,用克里格法拟合响应面,可以用于螺栓拉伸器缸体的优化。对含有非线性瞬态响应或者大量有限元模型的高成本分析问题来说,近似模型方法可以将单次

优化迭代的计算时间由数天缩减到数小时,大大拓宽了优化方法在复杂工程问题上的应用范围。多学科设计优化方法处理力、热、流、电等多物理场耦合问题,用协同优化、BLISS 等求解策略协调各个学科分析模型,追求系统级整体最优而不是单学科最优。该类方法对组织协调能力的要求比较高,在优化流程中需要统一各个学科的分析精度以及数据交换的标准,但是其在航空发动机、高速列车等复杂装备研发过程中所体现出的系统级效益,是高端制造业优化能力建设的主要方向。

3 机械设计优化方法在工程实践中的具体应用

3.1 结构优化设计中的应用

结构优化设计属于优化方法在工程中最早、最成熟的应用领域。拓扑优化技术已经由原来的学术研究扩展到汽车、航空、航天等高端制造业。马德里卡洛斯三世大学的研究小组把拓扑优化的方法应用到竞赛摩托车部件的设计当中,利用自动算法直接处理密度场的过滤系统制备出具有最优材料分布的部件,完全符合重量、体积和应力等预设的性能约束。该方法对于承受载荷或者振动的各类部件都是适用的。工程实践中拓扑优化同增材制造的深度融合渐渐成为结构改良的关键趋向,增材制造几乎不会受到传统切削加工时刀具可达性以及拔模斜度的制约,可以将拓扑优化得出的复杂镂空或者仿生构型直接转化为实物,从而最大程度地释放拓扑优化的设计自由度。结构优化不单是材料的合理利用,还要在复杂的载荷作用下保证结构的安全性和耐久性。航空航天领域对于结构效率的极致追求促使拓扑优化率先实现了工程化应用,飞机起落架支架、发动机吊架等承力件经由拓扑优化可在减重 15%~25% 的情况下维持强度储备不变,并且优化构型常常带有有机仿生特点,其传力路径同有限元分析显示的主应力迹线十分接近,从而证明了优化结果在力学方面是合理的。

机械结构优化实践当中,把优化算法同仿真技术融合起来可以达到结构强度、刚度以及轻量化水平三者共同改善的目的,并且可以把研发周期缩减 30%以上^[1]。结构优化的工程价值不单表现在减重和性能提高上,更主要的是可以促使设计人员在概念设计阶段迅速选出各种候选构型方案,给之后的详细设计赋予更多样的决策支撑。结构优化在工程应用时必须考虑到实际工况下非线性因素的影响,即材料弹塑性、接触非线性以及大变形几何非线性等,如果优化模型过分简化而忽略了这些因素,那么得到的最优解在精细化仿真或者样件试验中就会提前失效,因此基于非线性有限元的优化校核已经成为工程标准流程中的重要环节。

3.2 材料选择与轻量化设计中的应用

轻量化设计是机械产品节能减排、提高性能的主要要求。优化方法在轻量化设计中分为两个方面，一是用拓扑优化、尺寸优化在保证结构性能的前提下减小冗余材料，二是用优化算法在材料性能和成本之间做权衡，在多材料方案中进行选择。豪华轿车座椅框架的设计是将拓扑优化技术和产品生命周期分析结合起来，从而达到减重、环保的目的。螺栓拉伸器缸体优化以响应面法为依托，所得到的结构可以达到强度及疲劳设计的要求，比原来减轻了10.7%。轻量化设计要兼顾可制造性约束，不能因为过度减重而造成制造难度增大或者成本失控。

3.3 制造工艺优化中的应用

机械设计优化不能只看产品的性能，还要考虑制造的可行性以及经济性。制造工艺优化把加工参数、工装结构、成形质量等纳入优化范围，达到设计和工艺的协同优化。增材制造领域中，研究人员已经开发出专门用于3D打印的拓扑优化方法，并且用它来制造摩托车部件并且取得明显的重量减轻效果^[2]。这说明把制造约束加入到优化模型当中是提高优化方案可制造性的一种方式。基于人工智能的制造过程优化正慢慢产生。基于生成式设计算法和有限元分析的多目标优化框架可以达到结构轻量化和性能平衡的目的，用数字孪生技术创建虚拟仿真环境加快迭代验证。制造工艺优化和设计优化相结合，可以促使从设计、试制、修改这种串行的模式变为设计和工艺共同优化的并行模式。

3.4 数字化设计与智能优化中的应用

数字化技术给机械设计优化赋予了新的达成办法。参数化建模、有限元仿真、多目标优化算法的结合使用，把优化过程由人工经验驱动变成数据和模型共同推动。大连理工大学开发的AI优化设计系统DADOS采用FBP框架以及零编程、拖拽式的操作方式，可以实现用户自定义搭建求解流程，对工程实例进行快速分析并得到产品性能可信的预测。智能优化方法在机械设计中主要分为两种，第一种是用神经网络、强化学习等算法代替或者辅助传统的

迭代优化过程，第二种是以大语言模型为基础构建智能设计系统。基于大语言模型驱动的AI-AD智能设计系统是将计算、感知、认知等智能技术融合在一起的，可以按照用户的自然语言描述自动进行设计、参数优化以及三维模型的输出。智能优化法使设计系统部分地具有了自学习、自推理的能力，但是在数据标准化、小样本泛化方面还有待进一步研究。

4 提升机械设计优化应用效果的实施策略

4.1 完善数字化设计平台建设

数字化设计平台属于优化方法工程应用的根基支撑。企业应该建立一个包含参数化建模、有限元分析、优化求解和后处理的集成化平台，打通CAD、CAE、Optimization之间数据接口，避免数据转换造成的损失^[3]。不同类型的优化方法对于平台的功能需求是不同的，平台的建设要兼顾通用性和专用性。

平台的建设要重视云化部署和协同能力。DADOS系统云端化实践表明，云端优化设计系统可以有效地促进工程装备和基础件的优化设计，零编程、拖拽式的操作方式很好地考虑到了工程师的操作习惯。

4.2 加强多学科协同优化设计

复杂的机械产品优化设计牵涉到固体力学、流体力学、热学、控制等诸多学科，单靠某一学科的视角去寻找最优方案，在系统层面上未必是最佳选择。加强多学科协同优化设计要从三个方面着手，即建立跨学科的设计变量耦合关系模型、采用分布式分析架构、建立协同工作流程。

4.3 健全设计验证与质量控制机制

经过严格的验证程序后，才能把得到的优化设计方案投入工程应用。验证机制应该包含仿真验证和实验验证这两个方面。仿真验证主要是对优化方案的强度、刚度、疲劳寿命等性能指标进行详细的校核，保证分析结果达到工程的要求。实验验证就是通过样件测试获得实测数据，与优化预测结果进行比较来评价优化模型的准确性、可靠性。滚翻保护结构优化研究中，用有限元仿真和实验验证优化后的结构可靠，保证设计方案的工程可行性。

表1 不同类型优化方法对数字化平台的功能需求对比

优化方法类型	核心功能需求	平台关键模块	典型应用场景
拓扑优化	密度场/水平集求解、几何重构	有限元求解器、后处理可视化	概念设计、结构创成
参数优化	参数化建模、多方案批处理	CAD参数驱动、优化算法库	尺寸优化、形状优化
多学科设计优化	多物理场耦合分析、学科协调	多求解器耦合、近似建模	航空发动机、车辆系统
智能优化	数据驱动建模、代理模型训练	机器学习框架、云端计算	性能预测、智能决策

4.4 推动智能化设计技术融合应用

人工智能同机械设计优化的深度整合是重要的发展方向。一方面,用神经网络等代理模型技术在保证预测精度的基础上可以大幅度减少高成本仿真调用次数,提高优化效率。另一方面,使用强化学习自适应优化算法,根据搜索过程的变化来及时改变优化参数,可以提高算法收敛

速度以及鲁棒性。图1中智能优化方法的加入使机械设计流程由原来的“人工建模、仿真、优化、修正”变为现在的“需求输入、自动建模、智能寻优、方案输出”。基于人工智能的新工具是开发出可以自主调节优化参数的智能体,有可能改变机械设计范式,更快、更准确、更高效地产生最优部件。

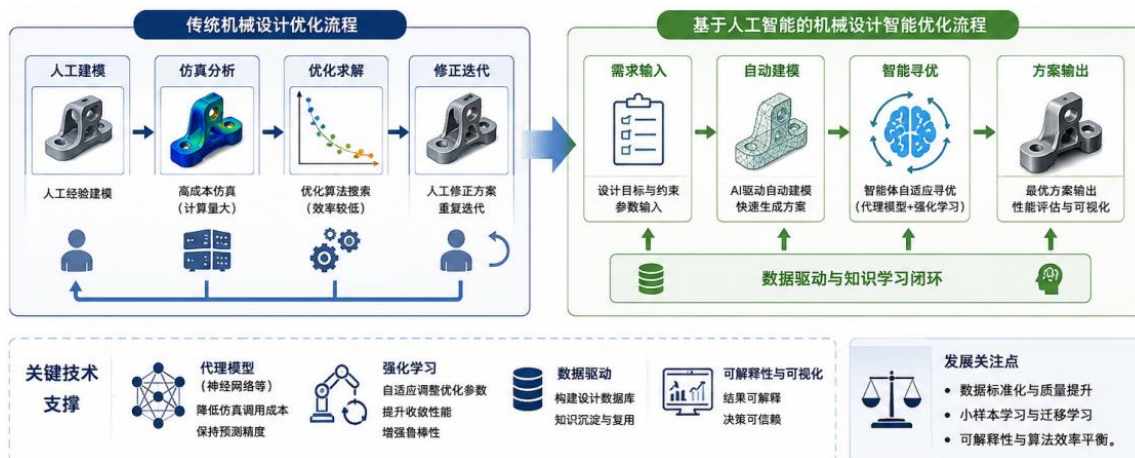


图1 基于人工智能的机械设计智能优化流程示意图

智能化融合要解决数据标准化、小样本学习问题,找到数据标准化、小样本学习之间的一种平衡。

5 结语

机械设计优化方法经过几十年的发展,已经形成了包含拓扑优化、参数优化、多学科设计优化和智能优化的机械设计优化方法体系,在结构设计、轻量化、工艺优化和数字化设计等领域具有较好的应用价值。拓扑优化在概念设计阶段已经得到了证实,可以达到材料的最佳利用率,在保证性能的基础上。多目标优化算法同数值仿真技术相结合之后,便使得结构综合效能得到改善并且研发时间得以缩减的现象变得可行起来。随着智能化技术不断深入以及数字化平台不断完善,机械设计优化的方法会由原来的“辅助设计工具”变成现在的“自主设计引擎”,给高

端装备的高性能、轻量化和快速研发提供更加有力的技术支持。

[参考文献]

- [1]马洪伟,刘泉,张海涛.人工智能技术在机械设计与制造中的应用[J].智慧中国,2025(4):22-23.
 - [2]舒应秋,常宝玉,赵耀忠,等.土方机械滚翻保护结构多目标粒子群优化设计[J].武汉理工大学学报,2024,46(6):137-142.
 - [3]郭新博,苏东海,王海啸,等.基于响应面法的螺栓拉伸器缸体优化设计[J].重型机械,2024(1):82-88.
- 作者简介:王子宇(2000—),男,汉族,河北邢台沙河市人,售前技术现职称:工程师,2023年6月毕业于北华航天工业学院,本科,目前主要从事售前技术交流工作。