

机械产品设计中的有限元分析与结构优化

王彬根¹ 陈加利¹ 蔡起跑² 张阿丰³

1. 温州名创知识产权代理有限公司, 浙江 温州 325000
2. 温州名创科技信息服务有限公司, 浙江 温州 325000
3. 浙江广合智能科技有限公司, 浙江 温州 325000

[摘要]有限元分析 (FEA) 已广泛应用于机械产品设计中, 用于预测和评估产品的性能。通过将产品分解为有限个小单元, FEA 能够准确模拟产品在不同工况下的响应, 为结构优化提供数据支持。本文将探讨有限元分析在机械产品设计中的应用, 并结合结构优化技术, 分析如何通过调整设计参数, 提升产品性能、减少重量、提高强度等目标。通过实例分析, 展示有限元分析与结构优化结合的实际应用效果, 探讨未来的发展趋势。

[关键词]有限元分析; 结构优化; 机械设计; 性能提升; 数值模拟

DOI: 10.33142/ec.v8i3.15662

中图分类号: U466

文献标识码: A

Finite Element Analysis and Structural Optimization in Mechanical Product Design

WANG Bingen¹, CHEN Jiali¹, CAI Qipao², ZHANG Afeng³

1. Wenzhou Mingchuang Intellectual Property Agency Co., Ltd., Wenzhou, Zhejiang, 325000, China
2. Wenzhou Mingchuang Technology Information Service Co., Ltd., Wenzhou, Zhejiang, 325000, China
3. Zhejiang Guanghe Intelligent Technology Co., Ltd., Wenzhou, Zhejiang, 325000, China

Abstract: Finite element analysis (FEA) has been widely used in mechanical product design to predict and evaluate product performance. By decomposing the product into a finite number of small elements, FEA can accurately simulate the response of the product under different working conditions, providing data support for structural optimization. This article will explore the application of finite element analysis in mechanical product design, and combine structural optimization techniques to analyze how to improve product performance, reduce weight, and enhance strength by adjusting design parameters. Through case analysis, demonstrate the practical application effect of combining finite element analysis with structural optimization, and explore future development trends.

Keywords: finite element analysis; structural optimization; mechanical design; performance improvement; numerical simulation

引言

随着机械产品设计复杂度的增加, 传统的设计方法已难以满足高精度、高性能的要求。有限元分析 (FEA) 作为一种先进的数值模拟技术, 在机械产品的设计和优化中发挥了重要作用。通过对产品进行离散化处理, FEA 能够准确模拟其在不同工况下的力学行为, 预测结构性能。结合结构优化技术, 可以对设计参数进行调整, 实现更好的设计目标, 如提高强度、降低重量、提升耐久性等。本文将深入探讨有限元分析与结构优化在机械产品设计中的应用, 并通过案例分析展示其优势。

1 有限元分析概述

1.1 有限元法原理

有限元法 (Finite Element Method, FEM) 是一种将连续介质分割为离散单元的数值计算方法, 广泛应用于解决复杂结构和物理场问题。其基本原理是通过将结构或物体划分为有限多个小单元, 然后利用各个小单元的物理方程组 (如平衡方程、材料本构关系等), 建立全局的方程系统, 再通过数值解法求解这些方程, 从而获得结构的变

形、应力、应变等信息。每个单元的行为通过一组简单的代数方程来描述, 通过这些方程的集成, 得到整体结构的响应。有限元分析不仅可以处理静力学问题, 还能应对动态分析、热分析、流体分析等多种工况, 具有较高的精度和广泛的适用性。

1.2 有限元分析在机械设计中的应用

在机械产品设计中, 有限元分析主要用于验证设计方案、评估产品性能及优化结构。通过 FEA, 工程师可以模拟和预测产品在各种工况下的表现, 避免传统试验方法中可能出现的高成本和时间浪费。例如, 在设计机械零件时, 可以通过有限元分析预测其在工作中的受力情况、变形行为及应力集中区域, 从而优化设计, 确保产品在使用过程中具有更好的可靠性和性能。除此之外, FEA 在振动分析、热应力分析、疲劳寿命预测等方面也有广泛应用。在多学科优化设计中, 有限元分析能够为材料选择、形状优化等提供数据支持, 有效提升设计质量^[1]。

1.3 有限元分析的优势与挑战

有限元分析在机械设计中具有显著优势。FEA 能够处

理复杂几何形状和边界条件的分析,这是传统解析方法难以实现的。其次,FEA 提供了直观的结果展示,如应力、应变、位移等场变量分布,帮助工程师更加精准地了解产品的工作状态。此外,FEA 还能够不同工况下进行多场耦合分析,提高设计的全面性和准确性。

有限元分析也面临一定的挑战。首先,有限元模型的建立需要较强的专业知识和经验,错误的建模会导致不准确的分析结果。其次,FEA 的计算量较大,尤其是在进行复杂结构分析时,需要消耗大量的计算资源和时间。为了提高计算效率,优化算法和高性能计算技术仍然是当前研究的重点。有限元分析结果的可靠性也受到模型精度、边界条件设定以及材料参数选择等因素的影响,需要在实际应用中谨慎处理。

通过有效的模型验证和计算优化,有限元分析可以在机械产品设计中发挥重要作用,助力产品实现更高的性能和可靠性。

2 结构优化的基本原理

2.1 结构优化的定义与目标

结构优化是指在一定的设计约束条件下,通过优化设计参数、形状或尺寸等,达到改善结构性能的过程。其目标通常是提高结构的强度、刚度、稳定性,或者在满足性能要求的前提下减轻结构重量、降低成本、提高使用寿命等。结构优化不仅仅是对某一单一目标的改进,而是考虑多目标的平衡,如在强度与重量、刚度与成本等之间做出合理的折中。优化的过程中需要借助先进的数学方法和计算工具,以最优的设计方案来满足设计需求并提升产品的综合性能^[2]。

2.2 结构优化的分类

结构优化可以根据不同的优化目标和方法进行分类。常见的分类方式有以下几种:

尺寸优化:通过改变结构的尺寸(如梁的截面尺寸、厚度等)来达到优化目的。这类优化方法常用于已有结构的改进,通常对结构的形状保持不变,重点是调整各部分尺寸以提高性能。

形状优化:不同于尺寸优化,形状优化主要针对结构的几何形状进行调整,如改变零件的曲线、轮廓等,优化结构外形以提高刚度、减少应力集中或改善流体动力学性能。

拓扑优化:拓扑优化是一种新兴的结构优化方法,它通过优化材料分布来寻找最佳的结构布局。拓扑优化的目标是通过材料去除或重新分配,使结构在满足一定约束条件下,具有最优的性能表现,常用于新产品的的设计阶段。

多目标优化:在实际工程设计中,往往需要同时考虑多个优化目标,如强度、刚度、重量和成本等。这时可以

采用多目标优化方法,通过数学模型求解不同目标之间的平衡点,得到最优的设计方案。

2.3 结构优化的常用方法

结构优化的方法可以分为数学优化方法和启发式优化方法。常用的优化方法包括:

线性规划和非线性规划:这类方法适用于结构优化问题中的约束和目标函数均为线性或非线性的情况。通过求解优化问题的数学模型,可以得到最优解。对于非线性问题,常采用梯度法、牛顿法等进行迭代求解。

遗传算法:遗传算法是一种基于自然选择和遗传学原理的全局优化方法,适用于解决复杂的非线性、多约束的结构优化问题。通过模拟自然界中的进化过程,不断生成新解,选择更好的解,最终得到全局最优解。

粒子群优化:粒子群优化(PSO)是一种模拟鸟群觅食行为的群体智能优化方法,适用于大规模、复杂的结构优化问题。该方法通过调整“粒子”的位置和速度,逐步接近最优解。

模拟退火算法:模拟退火算法借鉴物理学中的退火过程,通过在较高的温度下随机搜索解空间,随着“温度”逐步降低,逐渐收敛到全局最优解。这种方法适用于处理非线性、多峰值的优化问题。

通过这些方法,工程师可以在众多设计方案中筛选出最优解,从而实现对结构的有效优化,提高产品的性能与可靠性。

3 有限元分析与结构优化的结合

3.1 有限元分析在结构优化中的角色

有限元分析(FEA)在结构优化中扮演着至关重要的角色,它为优化设计提供了精确的数值分析结果。通过FEA,工程师可以准确地模拟结构在各种工况下的表现,获取结构的应力、应变、位移等关键性能数据。这些数据成为结构优化的基础,有助于识别结构中潜在的薄弱环节,如应力集中区域、变形过大等,从而为优化目标设定提供依据。

在结构优化过程中,FEA 可以实时反馈优化过程中设计参数的变化对结构性能的影响,帮助设计人员做出更有针对性的调整。通过与优化算法的结合,FEA 可以用于反复迭代计算,直至达到设计目标。此外,FEA 可以与多学科优化技术(如热分析、动力学分析等)相结合,进一步提高优化设计的精度和综合性。因此,FEA 是结构优化过程中不可或缺的工具,它使得优化不仅仅依赖于理论推导,而是基于真实的物理模拟和数值计算。

3.2 基于有限元分析的优化算法

基于有限元分析的优化算法通常采用数值模拟和迭代计算的方式,以达到最佳的设计结果。常见的优化算法有^[3]:

梯度法:通过计算结构性能函数(如总能量、应力等)的梯度,来指导设计参数的更新。这种方法适用于目标函数和约束条件为连续可导的优化问题,但对非线性问题的处理能力较弱。

遗传算法:遗传算法(GA)是一种基于自然选择原理的启发式优化方法。它通过模拟基因变异、交叉和选择等操作,逐步改进设计解,适用于处理非线性、多约束的优化问题。结合 FEA,遗传算法能够有效探索设计空间,找到全局最优解。

拓扑优化算法:拓扑优化算法通过不断改变结构内材料的分布,优化设计方案。该方法能够在保持结构强度和刚度的同时,减少材料的使用量,达到轻量化设计。与 FEA 结合后,拓扑优化可以实现复杂结构的优化,广泛应用于航空、汽车等行业。

粒子群优化:粒子群优化(PSO)是一种模拟群体行为的全局优化算法。在结构优化中,PSO 通过多个“粒子”的位置和速度更新,逐步寻找到优化设计的最优解。与 FEA 结合时,PSO 能够高效地搜索大规模、多维度的设计空间,适用于复杂的多目标优化问题。这些优化算法通过 FEA 进行评估和反馈,使得结构优化过程更加精确和可靠。

3.3 结构优化案例分析

以汽车车身的轻量化设计为例,有限元分析与结构优化的结合可帮助设计人员在满足安全性和强度要求的前提下,实现车身重量的最小化。通过 FEA,分析车身在碰撞和振动等工况下的应力分布和变形行为,确定可能的薄弱区域。然后,结合拓扑优化算法,进行材料分布优化,找到结构的最佳布局。

在该过程中,FEA 提供了详细的性能数据,帮助设计人员识别和验证优化方案。优化过程中,不仅考虑了材料的强度和刚度,还结合了制造工艺、成本等因素,确保最终方案既满足功能需求,又具有较高的经济性。

另一个经典案例是航空航天领域中的发动机支架设计。通过有限元分析,首先对现有支架结构进行应力、振动等分析,找出性能瓶颈。然后,结合尺寸优化和形状优化,通过迭代分析和优化算法,减少支架的重量,提升其承载能力。最终,采用 FEA 验证优化结果,确保支架在极端工况下的可靠性和安全性。

这些案例表明,有限元分析与结构优化的结合,可以大大提高设计的精度和效率,帮助工程师在设计过程中实现多方面的优化目标。

4 有限元分析与结构优化在机械产品设计中的实际应用

4.1 机械零部件设计优化案例

在机械零部件的设计中,有限元分析与结构优化的结

合应用广泛。以汽车零部件中的车轮为例,设计过程中,FEA 可以模拟车轮在高速行驶和刹车时的受力情况,通过分析车轮的应力和变形情况,识别可能存在的薄弱环节。基于有限元分析的结果,设计人员可以进行尺寸优化和形状优化,使车轮在保持强度和刚度的同时,减少不必要的材料使用,实现轻量化。通过拓扑优化技术,车轮的内部结构可以被重新设计,达到更好的性能。最终,优化后的设计不仅能提高车轮的耐久性,还能降低生产成本,提升车辆的燃油效率。

4.2 复杂结构的优化设计实例

复杂结构的优化设计是有限元分析与结构优化结合的重要应用领域。以飞机机翼的优化设计为例,机翼不仅要承受来自飞行的气动载荷,还需要抵御来自风速变化、飞行状态改变等因素的影响。通过有限元分析,设计人员可以精确地模拟机翼在不同飞行工况下的受力分布、振动响应和温度变化等多重因素。在此基础上,结合拓扑优化和形状优化方法,对机翼的结构进行调整,去除不必要的材料,优化其形状,以提高强度、减轻重量、增强抗疲劳性能。考虑到航空材料的成本和制造难度,优化设计还需要综合考虑这些约束条件,确保机翼既满足性能要求,又符合生产要求。优化设计能够显著提高机翼的性能和飞行安全性^[4]。

4.3 基于 FEA 与结构优化的性能提升分析

FEA 与结构优化的结合不仅能提高设计的性能,还能在多个领域实现显著的性能提升。以风力发电机的叶片设计为例,风力发电机叶片需要在高风速条件下保持良好的强度和稳定性,同时又要尽可能减轻重量。通过有限元分析,设计人员可以对叶片的应力、振动及动态响应进行详细分析,识别其设计中的薄弱环节。基于这些分析结果,结合尺寸优化和拓扑优化方法,优化设计的叶片不仅具备较高的强度和刚度,还能降低材料使用,减少整体重量。结构优化还能有效提升叶片的空气动力学性能,减少风阻,增加发电效率。在实际应用中,优化后的叶片能够承受更高的风速,增加使用寿命,同时降低了生产和维护成本。

通过这些实例可以看出,有限元分析与结构优化的结合在机械产品设计中具有重要的实际意义。它不仅能提高产品的性能,还能实现轻量化、成本降低和寿命延长等多个目标,促进了各行业产品设计的创新和发展。

5 结语

有限元分析与结构优化的结合为机械产品设计提供了强大的技术支持,能够有效提高产品性能、降低设计成本。随着计算能力的提升和优化算法的不断发展,有限元分析在结构优化中的应用将更加广泛。在未来的机械产品设计中,FEA 与结构优化将更加紧密地融合,为设计人员

提供更精准的优化方案,推动产品设计的智能化和高效化。然而,有限元分析和优化方法的精度与复杂性依然面临挑战,需要在实际应用中不断积累经验,提升方法的可靠性和适用性。

[参考文献]

[1]任明章.机械振动的分析与控制以及计算方法[M].北京:机械工业出版社,2011.
[2]陈艺,张子军,潘明.结构优化设计&有限元分析在机械设计中的应用——ABAQUS 分析桁架结构[J].现代农业装

备,2007(5):40-46.

[3]陈森林.基于数字化逆向工程的产品结构优化设计研究[J].湖南城市学院学报(自然科学版),2025,34(1):67-73.

[4]梁伟波.机械设备结构的可靠性设计与寿命评估方法研究[J].中国设备工程,2024(22):107-110.

作者简介:王彬根(1985.8—),毕业院校:山东大学,所学专业:机械与电子工程,当前就职单位温州名创知识产权代理有限公司,职称级别:工程师。