

机械结构优化设计方法及其在工业设备中的应用

王文贤 王佳鹏

宁波海天增材科技有限公司 浙江 宁波 315000

摘要: 本文聚焦机械结构优化设计方法及其在工业设备中的应用。阐述了优化设计基础理论,包括基本概念、数学原理与常用方法;介绍了优化设计流程与实施步骤;通过重型机械、精密加工、自动化生产线设备等案例,展示其应用效果;最后探讨了未来发展趋势,如智能优化设计、多学科优化设计融合及绿色环保设计理念融入。旨在为机械结构优化设计提供理论指导与实践参考。

关键词: 机械结构;优化设计;工业设备;应用

1 机械结构优化设计基础理论

1.1 优化设计的基本概念

优化设计是一种以数学规划为基础,结合计算机技术,从众多可行设计方案中寻找最优方案的设计方法。其核心目标是在满足一系列约束条件的前提下,使设计目标达到最优。这里的约束条件可能包括机械结构的强度、刚度、稳定性要求,以及制造工艺、成本等方面的限制;而设计目标则可以是多种多样的,例如最小化结构重量、最大化结构承载能力、最小化制造成本等。与传统设计方法相比,优化设计具有显著的优势。传统设计往往依赖于设计者的经验和反复试验,不仅效率低下,而且难以保证得到最优方案。而优化设计通过建立数学模型,利用计算机强大的计算能力,能够快速、准确地搜索到满足要求的最优解,大大提高了设计效率和质量。在机械结构设计中,优化设计的应用范围十分广泛,从简单的零部件设计,如轴、齿轮、连杆等,到复杂的机械系统设计,如机床、汽车、飞机等,都可以采用优化设计方法来提高性能、降低成本。

1.2 优化设计的数学原理

优化设计的数学原理主要基于数学规划理论。数学规划是研究在给定约束条件下,如何选择决策变量,使得目标函数达到最优值的一门学科。常见的数学规划问题包括线性规划、非线性规划、整数规划等。在机械结构优化设计中,目标函数和约束条件的数学表达是关键^[1]。目标函数通常是根据设计目标建立的,例如,若以最小化结构重量为目标,则目标函数可以表示为结构各部分重量的总和。约束条件则根据设计要求来确定,如强度约束可以表示为结构在各种工况下的应力不超过材料的许用应力;刚度约束可以表示为结构的变形不超过允许的变形量。对于线性规划问题,其目标函数和约束条件都是

线性的,可以采用单纯形法等经典算法进行求解。而对于非线性规划问题,由于目标函数和约束条件的非线性特性,求解过程更加复杂,常用的方法有梯度法、牛顿法、共轭梯度法等。另外,对于一些具有离散变量的优化问题,如机械结构中的某些尺寸参数只能取整数,则需要采用整数规划方法进行求解。

1.3 常用的优化设计方法

梯度法是一种基于目标函数梯度信息的优化方法。其基本思想是沿着目标函数梯度的反方向进行搜索,逐步逼近最优解。梯度法具有收敛速度快的优点,但要求目标函数具有连续可微的性质,并且在接近最优解时可能会出现振荡现象。在机械结构优化设计中,梯度法常用于求解具有连续变量的非线性规划问题,例如在设计机械零件的形状和尺寸时,可以通过梯度法来优化其结构参数,以最小化应力集中或提高刚度。遗传算法是一种模拟生物进化过程的优化算法,它通过选择、交叉、变异等操作,不断产生新的个体,逐步淘汰不适应环境的个体,从而搜索到最优解。遗传算法具有全局搜索能力强、不依赖于目标函数的梯度信息等优点,适用于解决复杂的、非线性的、多峰值的优化问题。在机械结构优化设计中,遗传算法可以用于优化机械系统的布局、结构参数等,例如在设计自动化生产线的设备布局时,遗传算法可以帮助找到最优的设备排列方式,以提高生产效率和空间利用率。模拟退火算法是模拟固体退火过程的优化算法,它通过引入随机因素,允许在搜索过程中接受一些劣解,从而避免陷入局部最优解。模拟退火算法具有较好的全局搜索能力,但计算时间相对较长。在机械结构优化设计中,模拟退火算法可以用于解决一些具有多个局部最优解的问题,例如在设计机械结构的拓扑时,模拟退火算法可以帮助找到全局最优的拓扑结构,以实现结构的最小重量或最大刚度。

2 机械结构优化设计流程与实施步骤

2.1 设计需求分析

设计需求分析是机械结构优化设计的第一步，也是至关重要的一步。在这一阶段，需要明确设计目标、功能要求和约束条件。设计目标应根据产品的使用要求和市场竞争情况来确定，例如，对于一款新型的智能手机，设计目标可能是减小手机厚度、提高屏幕占比、增强电池续航能力等^[2]。功能要求则包括机械结构需要实现的各种功能，如运动传递、承载、密封等。约束条件则涵盖了制造工艺、成本、材料性能等多个方面，例如，制造工艺可能限制结构的形状和尺寸精度，成本可能限制材料的选择和加工方法。为了准确获取设计需求，需要与设计团队、市场部门、生产部门等进行充分的沟通和交流。同时还需要对相关的技术标准和规范进行研究，确保设计符合行业要求。

2.2 优化设计模型建立

优化设计模型是优化设计的核心，它包括目标函数和约束条件的数学表达式。在建立优化设计模型时，需要选择合适的设计变量。设计变量是影响设计目标的独立参数，例如，在设计机械零件时，设计变量可以是零件的尺寸、形状、材料等。选择设计变量时，应尽量减少变量的数量，以降低问题的复杂度，但同时要确保变量能够充分反映设计目标的变化。目标函数的建立应根据设计目标来确定。如前文所述，目标函数可以是结构重量、承载能力、成本等。在建立目标函数时，需要考虑各设计变量对目标函数的影响，并确保目标函数的表达式准确、合理。约束条件的建立则需要根据设计要求来确定，包括强度约束、刚度约束、稳定性约束、制造工艺约束等。约束条件的表达应清晰、明确，便于后续和优化计算。

2.3 优化算法的选择与实现

根据优化设计模型的特点，选择合适的优化算法是确保优化设计成功的关键。如前文所述，不同的优化算法具有不同的特点和适用范围。对于简单的线性规划问题，可以选择单纯形法；对于复杂的非线性规划问题，可以选择梯度法、遗传算法或模拟退火算法等。在选择优化算法后，需要利用计算机编程语言（如MATLAB、Python等）实现算法。在实现算法时，需要注意算法的参数设置、收敛条件等。例如，对于遗传算法，需要设置种群大小、交叉概率、变异概率等参数；对于模拟退火算法，需要设置初始温度、降温速率等参数。同时，还需要对算法进行调试和优化，以提高算法的计算效率和收敛速度。

2.4 结果验证与优化迭代

通过优化算法得到优化结果后，需要对结果进行验证。验证的方法包括理论分析、数值模拟和实验测试等。理论分析可以通过对优化后的结构进行力学分析，检查其是否满足强度、刚度等要求；数值模拟可以利用有限元分析软件（如ANSYS、ABAQUS等）对优化后的结构进行仿真分析，评估其性能；实验测试则是通过制作样机，对优化后的结构进行实际测试，验证其是否满足设计要求。如果验证结果不满足设计要求，需要对优化设计模型和算法进行调整和改进，进行优化迭代。优化迭代的过程可能需要多次进行，直到得到满足设计要求的优化结果为止。例如，在设计一款新型的汽车发动机时，通过优化设计得到了发动机的曲轴结构，但经过实验测试发现曲轴的疲劳寿命不满足要求，此时需要对曲轴的结构参数进行进一步优化，重新进行优化设计和验证^[3]。

3 机械结构优化设计在工业设备中的应用案例

3.1 重型机械设备优化设计

重型机械设备通常具有体积大、重量重、工作载荷大等特点，其结构优化设计对于提高设备的性能和可靠性具有重要意义。以大型起重机为例，起重机的臂架是其关键部件之一，其结构优化设计直接影响到起重机的起重量、工作幅度和稳定性。在设计大型起重机的臂架时，可以采用拓扑优化方法。拓扑优化是一种在给定设计空间内寻找最优材料分布的优化方法。通过拓扑优化，可以在满足臂架强度和刚度要求的前提下，减轻臂架的重量，提高起重机的起重性能。例如，某企业在设计一款新型的汽车起重机臂架时，采用拓扑优化方法对臂架结构进行了优化，优化后的臂架重量减轻了15%，而起重量和工作幅度分别提高了10%和8%，大大提高起重机的市场竞争力。另外，对于重型机械设备的传动系统，也可以进行优化设计。例如，在设计大型矿用挖掘机的减速器时，通过优化齿轮的参数（如模数、齿数、压力角等）和传动比，可以提高减速器的传动效率和承载能力，降低噪音和振动。

3.2 精密加工设备优化设计

精密加工设备对加工精度和稳定性要求极高，其结构优化设计对于提高加工质量至关重要。以数控机床为例，机床的主轴系统是其核心部件之一，其刚度和热稳定性直接影响到加工精度。在设计数控机床的主轴系统时，可以采用有限元分析方法对主轴的结构进行优化。通过有限元分析，可以模拟主轴在不同工况下的受力情况和变形情况，从而优化主轴的结构参数（如直径、长

度、壁厚等)和支撑方式,提高主轴的刚度和热稳定性。例如,某企业在设计一款高精度数控车床的主轴时,通过有限元分析和优化设计,将主轴的热变形量降低了30%,加工精度提高了20%,满足高端制造业对加工精度的要求。此外,对于精密加工设备的床身、立柱等部件,也可以进行结构优化设计。例如,通过优化床身的结构和材料,可以提高床身的刚度和减振性能,减少加工过程中的振动和误差。

3.3 自动化生产线设备优化设计

自动化生产线设备通常由多个工作站和输送系统组成,其结构优化设计对于提高生产效率和降低成本具有重要意义。以汽车装配生产线为例,生产线的布局和输送系统的设计直接影响到生产效率和物流成本。在设计汽车装配生产线的布局时,可以采用遗传算法等优化算法进行优化。通过遗传算法,可以搜索到最优的生产线布局方案,使各工作站之间的距离最短、物流路径最合理,从而提高生产效率。例如,某汽车制造企业在设计新的装配生产线时,采用遗传算法对生产线布局进行优化,优化后的生产线生产效率提高15%,物流成本降低了10%。另外,对于自动化生产线设备的机械手、夹具等部件,也可以进行结构优化设计。例如,通过优化机械手的结构和运动轨迹,可以提高机械手的抓取精度和运动速度,减少生产周期。

4 机械结构优化设计的未来发展趋势

4.1 智能优化设计方法的发展

随着人工智能技术的不断发展,智能优化设计方法将成为未来机械结构优化设计的重要发展方向。智能优化设计方法将人工智能算法(如深度学习、强化学习等)与传统优化算法相结合,能够自动学习和适应不同的设计问题,提高优化设计的效率和精度。例如,深度学习算法可以通过对大量设计案例的学习,自动提取设计特征和规律,为优化设计提供更准确的初始解和参数设置。强化学习算法则可以通过与环境的交互,不断调整优化策略,实现自适应的优化设计。未来,智能优化设计方法将在复杂机械结构的设计、多目标优化设计等领域发挥重要作用。

4.2 多学科优化设计(MDO)的融合与应用

机械结构的设计涉及到多个学科领域,如力学、材

科学、热学、控制学等。多学科优化设计(MDO)是一种将多个学科的知识和方法进行集成和协同优化的设计方法。通过MDO,可以充分考虑各学科之间的耦合关系,实现机械结构的整体性能优化^[4]。例如,在设计航空航天机械结构时,需要同时考虑结构的强度、刚度、重量、热稳定性、气动性能等多个学科的要求。通过MDO,可以将这些学科的要求进行统一建模和优化,得到满足各学科要求的最优设计方案。未来,MDO将在复杂机械系统的设计中得到更广泛的应用。

4.3 绿色环保与可持续设计理念的融入

随着全球对环境保护和可持续发展的重视程度不断提高,绿色环保与可持续设计理念将融入机械结构优化设计中。在设计机械结构时,将更加注重材料的环保性、能源的高效利用和产品的可回收性。例如,在设计机械产品时,优先选择可再生材料和可降解材料,减少对环境的影响;通过优化设计,降低机械产品的能耗,提高能源利用效率;在设计产品时,考虑产品的可拆卸性和可回收性,便于产品的维修和回收利用。未来,绿色环保与可持续设计理念将成为机械结构优化设计的重要指导原则。

结束语

机械结构优化设计作为提升工业设备性能、降低成本的关键手段,正不断发展和完善。从基础理论到实际应用,再到未来趋势,都展现出其重要性和广阔前景。智能优化设计、多学科优化设计融合以及绿色环保理念的融入,将推动机械结构优化设计迈向新高度。未来,相关人员应持续探索创新,将先进理念和技术应用于实际,以设计出更优质、高效、环保的机械结构,助力工业领域高质量发展。

参考文献

- [1]曹云.建筑结构设计优化方法在房屋结构设计中的应用[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(07):172-174.
- [2]马帅斌.结构优化方法及其在航空航天工程设计中的应用[J].科技视界,2024,(30):26-27.
- [3]刘丽.钢结构在工业建筑设计施工环节中的优化[J].中国建筑金属结构,2020,(09):102-103.
- [4]王丽,王海林.钢结构在工业建筑设计施工环节中的优化研究[J].四川水泥,2020,(09):349+328.