

产品结构设计合理性对性能与可靠性的影响研究

余敏科

身份证号: 442000199107094030

DOI:10.61369/ME.2025030022

摘要: 产品结构设计合理性对性能与可靠性至关重要。包括力学性能等多方面的平衡, 受几何拓扑等多种因素影响。涉及刚度匹配等动态影响, 还有失效冗余设计等。介绍多种评估及优化方法, 如量化评估模型等, 推动设计更科学合理。

关键词: 产品结构设计; 合理性; 性能与可靠性

Research on the Impact of Product Structural Design Rationality on Performance and Reliability

Yu Minke

ID: 442000199107094030

Abstract: The rationality of product structural design is crucial for performance and reliability. It involves balancing multiple aspects (e.g., mechanical performance) influenced by factors such as geometric topology. Key considerations include dynamic effects like stiffness matching and redundancy design for failure. This study introduces diverse evaluation and optimization methods, including quantitative assessment models, to enhance design scientificity and rationality.

Keywords: product structural design; rationality; performance and reliability

引言

产品结构设计合理性在多个方面对产品性能与可靠性起着关键作用。随着现代制造业的发展, 相关政策如《中国制造2025》(2015年颁布) 强调了提高产品质量和可靠性的重要性。产品结构设计需在满足功能需求的同时, 达到力学性能、材料利用等多方面的优化平衡。合理的结构设计受几何拓扑、载荷传递路径等多种因素影响, 并且结构刚度匹配、振动模态优化等对承载性能有动态影响。同时, 失效冗余设计、量化评估模型的建立以及考虑可靠性敏感度参数等都是确保产品性能与可靠性的重要环节, 这些都与政策导向相符, 共同推动产品结构设计的科学性和合理性。

一、产品结构设计合理性的理论分析

(一) 结构合理性的基本内涵

产品结构设计合理性是指在满足产品功能需求的前提下, 结构设计在力学性能、材料利用、制造工艺、装配维护以及成本效益等多个方面达到一种优化的平衡状态。合理的结构设计能够确保产品在使用过程中稳定可靠地运行, 有效地实现其预定功能。它与功能实现紧密相关, 产品的功能需求决定了结构的形式和布局, 而合理的结构设计又为功能的实现提供了保障。同时, 结构设计合理性也需考虑材料特性, 不同的材料具有不同的力学性能、物理性能和化学性能, 结构设计应充分利用材料的优势, 避免其劣势, 使材料与结构完美耦合, 从而提高产品的整体性能和可靠性^[1]。

(二) 关键影响因素识别

产品结构设计合理性受多种因素影响。从几何拓扑关系看, 其决定了结构的基本形状和空间布局, 影响着应力分布和变形特

性。合理的几何拓扑能有效避免应力集中, 提高结构的承载能力^[2]。载荷传递路径也是关键因素, 它直接关系到结构能否将外部载荷均匀、有效地传递到支撑部位。清晰、合理的载荷传递路径可减少局部过载, 增强结构的整体稳定性。界面连接方式同样重要, 不同的连接方式在强度、刚度和可靠性上存在差异。良好的界面连接能保证结构的整体性, 防止出现连接失效等问题。这些因素相互关联、相互影响, 共同决定了产品结构设计的合理性。

二、结构合理性对性能的作用机制

(一) 机械性能影响机理

结构刚度匹配和振动模态优化对产品的承载性能具有显著的动态影响。合理的结构刚度能确保在承受外力时, 各部件间的应力分布均匀, 避免局部应力过大导致的损坏, 从而提高承载能力^[3]。同时, 通过优化振动模态, 可使产品在工作过程中避免共

振现象的发生，减少因振动引起的疲劳损伤，进一步增强承载性能。建立数学模型来表征结构参数与性能响应的关系，能够量化这种影响机制。通过该模型，可以准确地分析不同结构参数下的性能变化，为结构设计的优化提供理论依据，从而实现产品性能与可靠性的提升。

（二）可靠性保障机制

产品结构设计的合理性对应力分布均匀性有重要影响。合理的结构能使应力均匀分布，避免局部应力集中，从而减少部件的疲劳损伤，延长产品寿命^[4]。例如，在机械结构中，通过优化几何形状和尺寸，可使应力在各个部位合理传递。

失效冗余设计也是可靠性保障的关键。它为产品提供了备用的功能路径，当某个部件出现故障时，冗余部分能够继续维持产品的基本功能，降低故障对产品整体性能的影响，提高产品在寿命周期内的可靠性。这种设计理念在很多关键领域，如航空航天、通信等，都得到了广泛应用，确保了系统在复杂环境下的稳定运行。

三、结构合理性评价方法研究

（一）多维度评价体系构建

1. 功能实现度指标

产品结构设计的合理性对其性能与可靠性有着至关重要的影响。为了量化评估结构的效能，建立基于工作载荷谱的结构效能量化评估模型是十分必要的^[5]。该模型能够考虑产品在实际工作过程中所承受的各种载荷情况，通过对载荷谱的分析和处理，获取与结构性能相关的关键参数。这些参数可以反映结构在不同载荷条件下的响应特性，进而为评估结构的合理性提供依据。同时，模型还可以结合产品的设计要求和性能指标，对结构的功能实现程度进行量化分析，从而全面、准确地评价结构设计的合理性及其对性能与可靠性的影响。

2. 可靠性敏感度参数

可靠性敏感度参数是产品结构合理性评价中的关键要素。它能够反映产品性能和可靠性对结构设计变量的敏感程度。通过开发考虑随机载荷的可靠性灵敏度分析算法，可精准量化这种敏感度。该算法需综合考虑多种因素，如载荷的随机性、材料特性的不确定性以及结构几何形状的变化等^[6]。这些因素相互作用，共同影响产品的性能和可靠性。可靠性敏感度参数的确定，有助于设计师在产品结构设计过程中，更准确地识别关键设计变量，从而有针对性地进行优化，提高产品的整体性能和可靠性，降低失效风险。

（二）典型案例研究方法

1. 工业产品选型研究

对于工业产品选型研究，以选取的典型机电设备为例。通过结构参数正交试验设计，对产品结构合理性进行研究，旨在探究其对性能与可靠性的影响。正交试验设计能够系统地分析多个结构参数及其交互作用对产品性能和可靠性的影响，为产品选型提供科学依据。在试验过程中，严格控制变量，确保试验结果的准

确性和可靠性。通过对试验数据的分析，可以明确不同结构参数对产品性能和可靠性的贡献程度，从而为优化产品结构设计提供参考，帮助企业工业产品选型时做出更合理的决策，提高产品在市场上的竞争力^[7]。

2. 有限元模拟验证

在产品结构设计合理性研究中，有限元模拟验证是重要环节。通过建立产品的有限元模型，考虑材料特性、边界条件和载荷情况等因素，模拟产品在实际工况下的力学行为。例如，可以分析结构的应力分布、变形情况以及模态特性等。将模拟结果与理论分析和实际测试数据进行对比，验证结构合理性指标的准确性和适用性。这种方法能够有效预测产品在不同工况下的性能表现，为结构设计的优化提供依据。同时，有限元模拟还可以考虑多物理场耦合的影响，如热-结构耦合、流-固耦合等，更全面地评估结构的合理性，提高产品的性能与可靠性^[8]。

四、结构设计优化策略

（一）合理性设计原则

1. 功能集成化准则

模块化结构的集成设计方法是实现功能集成化的有效途径。它强调将产品分解为若干个具有独立功能的模块，然后通过合理的接口设计将这些模块集成在一起，形成一个完整的产品。这种设计方法不仅可以提高产品的可维护性和可扩展性，还可以降低生产成本和开发周期。在实施模块化结构的集成设计方法时，需要考虑模块的划分原则、接口设计的合理性以及模块之间的兼容性问题。同时，还需要采用先进的设计工具和技术，如计算机辅助设计（CAD）和计算机辅助工程（CAE）等，以提高设计效率和质量。通过采用模块化结构的集成设计方法，可以实现产品结构设计的合理性和功能集成化，从而提高产品的性能和可靠性^[9]。

2. 制造可行性约束

在结构设计优化策略中，制造可行性约束是重要方面。从制造工艺角度出发，需考虑材料特性与加工方法的适配性，不同材料的可加工性差异大，如金属材料可能需要特定的切削、锻造工艺，而塑料材料可能适用注塑等工艺^[10]。同时，制造设备的能力限制也需纳入考量，设备的精度、加工范围等会约束设计的可行性。再者，生产效率和成本也是关键因素，过于复杂的结构设计可能导致生产周期延长、成本增加，因此要在满足产品性能要求的前提下，尽量简化结构，以提高制造可行性，确保产品能高效、经济地生产出来。

（二）参数化优化方法

1. 拓扑优化技术应用

拓扑优化技术在结构设计中具有重要应用。基于变密度法的结构轻量化优化算法是其中关键。该算法通过合理设定材料的密度分布，在满足结构性能要求的前提下，实现结构重量的减轻。它以数学模型为基础，将结构的设计空间离散为多个单元，对每个单元的密度进行优化。通过迭代计算，不断调整单元密度，使结构的刚度、强度等性能指标达到最优。同时，该算法考虑了多

种约束条件,如应力约束、位移约束等,确保优化后的结构在实际工况下能够可靠运行。这种算法为产品结构设计提供了一种有效的优化手段,有助于提高产品的性能和可靠性,降低生产成本。

2. 材料匹配优化

在材料匹配优化方面,建立多材料复合结构的界面优化模型是关键。这需要考虑不同材料的物理和化学特性,如热膨胀系数、弹性模量等。通过精确分析这些特性之间的相互关系,构建合理的数学模型来描述界面行为。模型应涵盖材料间的粘结强度、应力传递机制等重要因素。利用先进的数值模拟技术,如有限元分析,对模型进行求解和验证。通过模拟不同工况下复合结构的性能表现,评估界面优化的效果。同时,结合实验研究,对模拟结果进行进一步验证和修正。以确保模型能够准确反映实际情况,从而为多材料复合结构的设计提供科学依据,实现材料的最佳匹配,提升产品整体性能和可靠性。

(三) 可靠性验证技术

1. 加速寿命试验设计

构建基于失效物理的加速验证方法,需深入了解产品的失效模式和机理。通过对产品结构设计的详细分析,确定可能影响可靠性的关键因素。利用加速寿命试验设计,模拟极端条件,加速产品失效过程。在设计加速寿命试验时,要合理选择加速应力类型和水平,确保试验条件既能有效加速失效,又能真实反映产品在实际使用中的失效情况。同时,建立准确的失效物理模型,将试验结果与模型相结合,对产品的可靠性进行评估和预测。通过

这种方法,可以在较短时间内获得产品可靠性的相关信息,为结构设计优化提供有力依据,从而提高产品的性能和可靠性。

2. 故障模式关联分析

为开发结构缺陷与失效模式的关联度评价模型,需从多方面着手。要深入分析产品结构设计中可能存在的缺陷,如材料选择不合理、连接方式不当等。同时,对各种失效模式进行详细分类和研究,包括磨损、断裂、变形等。通过大量的实验数据和实际案例,建立起结构缺陷与失效模式之间的映射关系。利用数学方法,如概率论、统计学等,对这种关联度进行量化分析。这不仅有助于在设计阶段提前预测可能出现的问题,还能为优化结构设计提供有力依据,从而提高产品的性能和可靠性,减少因结构缺陷导致的失效事故,满足市场对产品质量的要求。

五、总结

产品结构设计的合理性对其性能与可靠性有着至关重要的影响。通过对结构合理性设计与产品性能提升的定量关系研究,我们能更精确地把握设计方向。多参数协同优化机制的揭示,为综合考虑多种因素实现最优设计提供了理论依据。基于可靠性增长的结构设计方法学的提出,有助于从根本上提高产品的可靠性。同时,智能优化算法与数字孪生技术在结构设计领域展现出巨大潜力,为未来的结构设计提供了新的思路和工具。这些研究成果将有助于推动产品结构设计更加科学、合理,从而提升产品在市场上的竞争力,更好地满足用户对产品性能和可靠性的需求。

参考文献

- [1] 杨雨豪. 基于等几何分析的结构设计分析优化一体化研究 [D]. 华南理工大学, 2023.
- [2] 卢柳. 论预防性刑法的合理性及其限制 [D]. 郑州大学, 2021.
- [3] 黄义金. 商业秘密保密措施合理性研究 [D]. 西南科技大学, 2021.
- [4] 罗翔宇. 象征性刑法合理性的法经济分析 [D]. 扬州大学, 2023.
- [5] 王晓哈. 合理性视域的技术意识形态化研究 [D]. 武汉理工大学, 2021.
- [6] 黄晓姣, 韦剑梅. 药学管理对临床用药合理性的影响 [J]. 东方药膳, 2021, 000(021): 276.
- [7] 王志愿, 闫磊磊. 工业设计专业产品结构设计课程思政教学研究 [J]. 设计, 2021, 34(21): 3.
- [8] 冯晓林. 药学管理对临床用药合理性的影响评价 [J]. 养生大世界, 2021(18): 200.
- [9] 杨静, 任道霞. 临床药师干预辅助用药对药品使用合理性的影响 [J]. 临床医学研究与实践, 2021, 006(35): 105-107.
- [10] 郑建波, 吴宏华. 中药饮片配方质量对中药处方的合理性及临床用药安全性的影响 [J]. 浙江中医杂志, 2022, 57(05): 383-384.