

机械设计制造中可靠性优化设计分析

张占奎

许昌豫盛昌电气股份有限公司 河南 许昌 461000

摘要: 本文聚焦机械设计制造中可靠性优化设计, 阐述其基础理论、关键技术、实施流程及发展趋势。先界定可靠性与优化设计的核心内涵, 明确二者融合的核心价值; 再剖析可靠性建模、FMEA、仿真及多目标优化等关键技术的应用逻辑; 随后梳理设计准备、分析、优化、验证全流程要点; 最后探讨智能化、数字化孪生融合等发展方向。研究旨在为机械产品可靠性提升提供理论支撑与实践路径, 助力平衡产品可靠性、经济性与综合性能, 为制造业转型升级提供核心技术参考, 推动高可靠性机械系统的研发与应用。

关键词: 机械设计制造; 可靠性; 优化设计

引言: 随着制造业向高端化、智能化转型, 机械产品工况复杂度与性能要求持续提升, 可靠性已成为决定产品竞争力的核心要素。传统设计模式难以兼顾可靠性与多目标约束, 易导致产品失效风险增加、运维成本攀升。在此背景下, 可靠性优化设计凭借理论与方法的融合优势, 成为解决这一难题的关键路径。本文系统梳理可靠性优化设计的基础理论与关键技术, 规范实施流程, 分析前沿发展趋势, 为机械设计制造领域规避失效风险、提升产品质量、降低综合成本提供可行方案, 契合现代制造业高质量发展需求。

1 机械设计制造中可靠性优化设计的基础理论

1.1 可靠性的基本概念

可靠性作为机械产品设计制造的核心指标, 指产品在规定条件、既定时间内完成预定功能的能力, 是衡量机械系统性能稳定性与使用寿命的关键标尺。其核心内涵涵盖耐久性、安全性、维修性三大维度, 既体现产品抵御失效风险的固有属性, 也反映设计、制造、运维全流程的质量管控水平。在机械工程领域, 可靠性需通过定量与定性指标综合表征, 定量指标包括可靠度、失效率、平均无故障工作时间等, 定性指标则聚焦产品适应复杂工况、极端环境的能力^[1]。不同机械产品的可靠性要求存在差异, 如航空航天机械需满足超高可靠性标准, 而普通民用机械则需在可靠性与成本间寻求平衡。理解可靠性基本概念, 是开展优化设计的前提, 可为后续技术应用与流程实施提供理论锚点, 同时助力规避因可靠性不足导致的安全事故与经济损失。

1.2 可靠性优化设计的内涵

可靠性优化设计是将可靠性理论与优化设计方法深度融合的机械工程技术, 核心是在满足产品功能需求、成本约束、结构强度等前提条件下, 通过系统性设计优

化, 最大化提升产品可靠性水平, 实现性能与经济性的协同最优。其区别于传统设计的核心优势的是, 将可靠性指标贯穿设计全流程, 而非仅在设计后期进行可靠性验证。该设计模式以概率统计、运筹学为理论支撑, 结合机械设计原理, 针对产品可能出现的失效风险, 通过参数优化、结构改进、材料筛选等手段, 构建兼顾可靠性与实用性的设计方案。可靠性优化设计注重多因素耦合分析, 需综合考量载荷波动、材料性能离散性、制造误差等不确定因素对产品可靠性的影响。其内涵既包括对单一零部件的可靠性优化, 也涵盖对整个机械系统的统筹设计, 最终实现产品在全生命周期内可靠性达标、成本可控、效益最大化的目标。

2 机械设计制造中可靠性优化设计的关键技术

2.1 可靠性建模技术

可靠性建模技术是可靠性优化设计的核心支撑, 指通过数学模型量化产品可靠性指标与设计参数、工况条件间的内在关联, 为优化分析提供量化工具。该技术需基于产品结构特性、工作机理与失效规律, 结合试验数据与理论推导, 构建贴合实际工况的可靠性模型。常用建模方法包括概率统计模型、故障树分析模型、马尔可夫模型等, 不同模型适用于不同机械系统场景。马尔可夫模型则擅长描述产品状态随时间的转移过程, 适用于可修复机械的可靠性评估。建模过程中需重点解决参数不确定性问题, 通过数据拟合、灵敏度分析等手段, 提升模型的准确性与适用性。可靠的数学模型能够精准预测产品可靠性水平, 为后续优化设计提供数据支撑, 避免因模型偏差导致优化方案失效, 是保障可靠性优化设计效果的关键环节。

2.2 失效模式与影响分析(FMEA)技术

失效模式与影响分析(FMEA)技术是一种前瞻性

风险评估技术，核心是识别机械产品各零部件可能的失效模式、分析失效原因及对产品功能、系统安全的影响程度，进而确定风险优先级，为优化设计提供针对性方向。该技术实施需遵循“识别失效模式—分析失效影响—评估风险等级—制定改进措施”的流程，通过风险优先数（RPN）量化风险程度，优先处理高风险失效项。在机械设计制造中，FMEA技术可覆盖概念设计、详细设计、制造装配等全阶段，提前规避潜在失效风险，减少后期设计变更与返工成本^[2]。相较于传统事后失效分析，FMEA技术具有前瞻性、系统性优势，能够从源头提升产品可靠性，是可靠性优化设计中不可或缺的风险管控技术。

2.3 可靠性仿真技术

可靠性仿真技术是依托计算机仿真平台，模拟机械产品在实际工况下的运行状态、失效过程，进而评估产品可靠性水平的虚拟试验技术，可有效弥补物理试验成本高、周期长、工况模拟有限的缺陷。该技术以可靠性理论、有限元分析、多体动力学等为基础，通过构建产品三维模型、设定工况参数、模拟载荷变化，精准预测产品在不同工况下的可靠性指标。常用仿真软件包括ANSYS、ADAMS、MATLAB等，可实现结构强度可靠性仿真、疲劳寿命仿真、系统动力学可靠性仿真等多场景应用。在优化设计中，通过可靠性仿真可快速对比不同设计方案的可靠性表现，优化结构参数、材料选型与工艺方案，无需进行大量物理试验。同时，仿真技术可模拟极端工况、复杂载荷组合等物理试验难以实现的场景，提升可靠性评估的全面性。

2.4 多目标优化技术

多目标优化技术是针对机械可靠性优化设计中多约束、多目标冲突问题的核心技术，指在满足可靠性指标的同时，兼顾成本、重量、结构强度、加工工艺性等多个目标，构建多目标优化模型，寻求最优均衡解。机械设计制造中，可靠性与其他目标常存在冲突，如提升可靠性可能导致成本增加、重量上升，多目标优化技术可通过科学的优化算法，平衡各目标间的关系。常用优化算法包括遗传算法、粒子群算法、模拟退火算法等智能优化算法，这类算法具有全局搜索能力强、适用于复杂非线性问题的优势，可有效求解多目标优化模型。实施过程中，需先明确各目标的优先级与约束条件，将可靠性指标转化为量化目标，结合设计参数的取值范围，构建多目标优化数学模型，通过算法迭代求解得到Pareto最优解集，为设计人员提供多样化优化方案。多目标优化技术的应用，打破了单一目标优化的局限性，实现了机

械产品可靠性与综合性能的协同提升。

3 机械设计制造中可靠性优化设计的实施流程

3.1 设计准备阶段

设计准备阶段是可靠性优化设计的基础环节，直接影响后续设计流程的顺畅性与优化效果，核心任务是明确设计需求、收集基础数据、搭建设计框架。首先，需结合产品使用场景、功能需求、行业标准，明确可靠性指标要求，如可靠度、使用寿命、失效率等量化目标，同时梳理成本、重量、加工工艺、环保等约束条件，形成设计任务书。其次，开展基础数据收集工作，包括同类产品的可靠性试验数据、失效案例、材料性能参数、加工工艺水平、工况载荷数据等，为后续可靠性分析与建模提供数据支撑。同时组建跨领域设计团队，涵盖机械设计、材料工程、制造工艺、可靠性分析等专业人员，明确各岗位职责与协作流程。另外，需确定设计工具与方法，如仿真软件、优化算法、评估标准等，搭建设计平台。设计准备阶段需注重需求调研的全面性与数据的准确性，避免因需求模糊、数据缺失导致后续设计返工，为可靠性优化设计奠定坚实基础。

3.2 可靠性分析阶段

可靠性分析阶段是衔接设计准备与优化设计的关键环节，核心是通过系统性分析，明确产品可靠性薄弱环节，为优化设计提供针对性方向。该阶段首先需基于设计准备阶段收集的数据，开展失效模式识别与分析，结合FMEA技术，梳理各零部件的失效模式、失效原因及影响程度，确定高风险项^[3]。其次，运用可靠性建模技术，构建产品可靠性数学模型，量化设计参数与可靠性指标的关联，结合仿真技术模拟产品在不同工况下的运行状态，评估当前设计方案的可靠性水平。同时，开展灵敏度分析，识别对产品可靠性影响显著的设计参数，为优化设计聚焦重点。此外，需验证模型的准确性与合理性，通过对比仿真结果与同类产品试验数据，修正模型参数。可靠性分析阶段需全面覆盖零部件、子系统、整体系统三个层面，避免局部分析导致的片面性，确保精准定位可靠性短板，为后续优化设计提供清晰的改进方向与数据支撑。

3.3 优化设计阶段

优化设计阶段是可靠性优化设计的核心实施环节，核心是基于可靠性分析结果，通过参数优化、结构改进、方案调整等手段，提升产品可靠性水平，同时平衡多目标约束。首先，明确优化目标与变量，以可靠性指标最大化为核心目标，将灵敏度分析识别出的关键参数作为优化变量，设定变量取值范围与约束条件，构建多目标优化模

型。其次,选择适配的优化算法与工具,结合产品结构复杂度与优化需求,选用遗传算法、粒子群算法等智能优化算法,借助仿真平台迭代求解,得到Pareto最优解集。随后,设计人员结合实际设计需求、加工工艺可行性、成本预算等因素,从最优解集中筛选出最优设计方案,对产品结构、材料选型、工艺参数等进行调整优化。优化过程中需反复迭代验证,对比优化前后的可靠性指标、综合性能,确保优化方案满足设计要求。

3.4 设计验证阶段

设计验证阶段是可靠性优化设计的收尾环节,核心是通过试验与检测,验证优化后设计方案的可靠性指标是否达标,确保产品性能符合设计要求,为批量生产提供保障。该阶段需制定完善的验证方案,结合产品特性与行业标准,开展物理试验与虚拟仿真验证双重检测。物理试验包括可靠性寿命试验、疲劳试验、工况模拟试验等,通过在实际或模拟工况下长时间运行产品,测试其可靠性指标、失效情况,验证优化方案的有效性。虚拟仿真验证则通过精细化仿真模型,模拟批量生产条件下产品的可靠性表现,弥补物理试验样本量有限、周期长的不足。同时,需对验证数据进行统计分析,对比设计目标与实际验证结果,若未达标则返回优化设计阶段重新调整方案,直至满足要求。另外,需形成设计验证报告,梳理验证过程、数据结果、改进措施,为产品后续批量生产、运维保养提供技术依据。设计验证阶段需注重试验的严谨性与数据的真实性,避免因验证不到位导致不合格产品流入市场。

4 机械设计制造中可靠性优化设计的发展趋势

在机械设计制造领域,可靠性优化设计正朝着智能化、数字化与绿色化方向加速演进。智能化趋势尤为显著,人工智能算法通过分析历史数据与实时监测信息,可自动生成多组优化设计方案,并基于仿真结果筛选最优解。数字化技术则通过数字孪生平台实现全生命周期管理,工程师可在虚拟环境中模拟机械系统的运行状

态,提前发现潜在故障点,使研发周期缩短40%。绿色化要求推动可靠性设计向节能环保转型^[4]。生物基复合材料的应用使机械部件重量降低15%-20%,同时减少碳排放;拓扑优化技术通过去除冗余材料,在保证结构强度的前提下降低能耗。此外,模块化设计理念与柔性制造系统的结合,使机械产品能快速适应个性化需求,通过标准化接口实现功能扩展,减少资源浪费。未来,可靠性优化设计将深度融合物联网、大数据与云计算技术,构建智能监测网络,实现故障预测的精准化与维护决策的自动化。同时,跨学科协同创新将成为关键,机械工程与材料科学、电子技术的交叉融合,将催生更多高可靠性、低能耗的智能机械系统,为制造业转型升级提供核心支撑。

结束语

机械设计制造中可靠性优化设计是兼顾产品性能与市场需求的核心手段,贯穿产品全生命周期,对制造业提质增效具有重要意义。本文从理论、技术、流程及趋势多维度展开分析,明确了各环节的核心要点与实施逻辑。未来,需深化智能化、数字化技术与可靠性设计的融合,强化跨学科协同创新。唯有持续优化设计方法、迭代技术手段,才能适配复杂工况与高端制造需求,研发出更多高可靠性、低能耗的机械产品,为制造业高质量发展注入持久动力。

参考文献

- [1]谢伟东,李运强,姜澎涛,等.机械设计制造中可靠性优化设计分析[J].现代制造技术与装备,2025,61(1):216-218.
- [2]芦博.机械设计制造中可靠性优化设计分析[J].内燃机与配件,2021(5):102-103.
- [3]谭小俊,姜磊.机械设计制造中可靠性优化设计研究[J].模具制造,2023,23(7):116-118.
- [4]宋志强.机械设计制造中可靠性优化设计研究[J].河北农机,2022(1):47-48.