

机械设计制造中可靠性优化设计分析

李静芬 张考杰 胡旭刚 楼春辉
宁波海伯集团有限公司 浙江 宁波 315800

摘要：机械设计制造的可靠性直接决定产品使用寿命与运行安全性，是现代机械工业高质量发展的核心诉求。本文结合机械设计制造全流程，阐述了机械设计制造与可靠性优化设计的核心内涵及内在关联，分析了影响可靠性优化的设计、制造、材料、环境四大核心因素，重点探讨了可靠性设计、制造过程控制、建模与仿真及智能化应用等关键技术与方法。研究表明，将可靠性优化融入设计制造全流程，可有效降低产品故障概率、提升运行稳定性。

关键词：机械设计制造；可靠性；优化设计；技术与方法

引言：随着机械工业向智能化、高端化转型，市场对机械产品的可靠性、稳定性提出了更高要求，可靠性优化设计已成为机械设计制造领域的研究重点与发展趋势。当前，部分机械产品因设计不合理、制造精度不足、技术应用不规范等问题，存在故障频发、使用寿命短等弊端，制约了机械工业的高质量发展。基于此，本文围绕机械设计制造中可靠性优化设计展开研究，梳理相关理论内涵，分析核心影响因素，探讨实用关键技术与方法，旨在解决实际应用中的可靠性难题，推动机械产品可靠性与制造水平的协同提升。

1 机械设计制造与可靠性优化设计概述

1.1 机械设计制造的核心内涵与流程

机械设计制造是一门融合设计、加工、装配等多环节的综合性技术，核心内涵是根据使用需求，通过科学设计与精准制造，实现机械产品的功能、性能与经济性的统一。其完整流程主要包括四个核心阶段：一是设计阶段，结合用户需求完成方案论证、结构设计、参数计算与图纸绘制，为产品制造奠定基础；二是工艺规划阶段，确定加工工艺、选择加工设备与刀具，制定合理的加工流程；三是实际制造阶段，通过车、铣、刨、磨等加工方式，将原材料转化为符合设计要求的零部件，并完成装配；四是检验阶段，对零部件及成品进行性能检测与质量验收，确保产品符合设计标准，保障后续使用安全性。

1.2 可靠性优化设计的定义与核心要素

可靠性优化设计是在机械设计制造过程中，以提高产品可靠性为核心目标，结合优化理论与方法，对产品的设计、制造环节进行系统性改进的设计模式。其核心定义在于，在满足产品功能需求、成本约束的前提下，通过科学优化，降低产品故障概率，延长使用寿命，提升使用稳定性。核心要素主要包括三个方面：（1）可靠性

目标，明确产品在规定工况、规定时间内的故障概率、使用寿命等具体指标；（2）优化对象，涵盖产品结构、设计参数、制造工艺、材料选择等多个维度；（3）优化方法，结合数学建模、仿真分析等手段，实现各环节的最优配置，平衡可靠性与经济性。

1.3 机械设计制造与可靠性优化的内在关联

机械设计制造与可靠性优化设计是相互依存、相互促进的统一整体，二者贯穿产品全生命周期。机械设计制造是可靠性优化的基础，若设计不合理、制造精度不足，即便采用先进的优化方法，也无法实现产品可靠性提升；反之，可靠性优化设计为机械设计制造提供明确方向，指导设计环节优化结构、制造环节控制精度、选择适配材料，避免设计与制造的盲目性。二者的内在关联体现在，可靠性优化需融入设计制造全流程，通过设计阶段的可靠性预判、制造阶段的可靠性控制，实现产品可靠性与制造效率的双重提升，最终达成产品功能、性能与可靠性的协同优化^[1]。

2 机械设计制造中可靠性优化设计的核心影响因素

机械设计制造中，可靠性优化设计的效果受多维度因素制约，各因素相互关联、相互影响，直接决定产品最终可靠性水平。结合设计制造全流程，核心影响因素主要包括以下几方面，具体如下：（1）设计环节因素。核心是结构与参数设计的合理性，结构设计中零部件的受力分配、连接方式、冗余设计是否科学，直接影响产品抗疲劳、抗磨损能力；参数设计需匹配产品使用工况，如载荷参数、尺寸公差、配合精度等，参数偏差易导致零部件应力集中，降低可靠性。（2）制造环节因素。关键在于加工精度与工艺稳定性，加工过程中尺寸误差、形位公差超标，会导致零部件配合间隙不合理；切削、焊接、热处理等工艺选择不当或工艺参数失控，会破坏材料内部组织结构，降低零部件力学性能，留下

可靠性隐患。(3)材料性能因素。材料的力学性能、耐环境性能是基础,材料的强度、硬度、韧性、耐磨性等指标需与产品使用要求匹配;材料内部缺陷、杂质含量及材质均匀性,会直接影响零部件的承载能力和使用寿命,是可靠性优化的核心前提。(4)环境适配因素。产品使用环境的温度、湿度、腐蚀介质、振动冲击等条件,会加速零部件老化、磨损或腐蚀,需在可靠性优化中充分考虑环境适应性设计,避免环境因素导致的可靠性下降^[2]。

3 机械设计制造中可靠性优化设计的关键技术与方法

3.1 可靠性设计方法

可靠性设计方法核心是通过规范化设计流程,从源头降低产品故障概率,结合实际工程应用,常用方法主要包括以下几种:(1)冗余设计技术。冗余设计是通过增设冗余零部件或冗余功能提升产品可靠性的实用技术,适用于工程机械、航空航天机械等对可靠性要求严苛的领域。实际应用中需结合产品结构 with 工况,合理选择冗余类型,规避过度冗余导致的成本攀升与结构冗余。具体分为并联冗余与串联冗余:并联冗余通过在关键零部件旁设置备用件,主件故障时备用件可快速投入使用,如机械传动系统中关键轴承的备用布置及切换机构设计;串联冗余通过多环节串联设置,确保单一环节故障不影响系统整体运行,如机械控制系统中多组传感器串联布置以提升信号传输可靠性。其核心在于精准识别关键失效环节,结合工况确定冗余零部件的规格、数量及切换方式,确保与主结构适配且不影响产品整体性能。(2)稳健设计技术。稳健设计又称田口设计,核心是通过优化设计参数,降低产品性能对外部干扰及内部误差的敏感性,广泛应用于机械零部件批量生产。实际应用分为系统设计、参数设计与容差设计三阶段:系统设计确定产品整体结构方案;参数设计通过正交试验、方差分析等手段,筛选对可靠性影响显著的设计参数并优化组合,最小化参数波动对性能的影响;容差设计在保障性能的前提下,合理设定零部件尺寸与形位公差,降低制造难度与成本。(3)故障树分析设计、失效模式与影响分析(FMEA)也是常用可靠性设计方法。其中FMEA通过提前识别零部件潜在失效模式、失效原因及影响程度,针对性优化设计方案,规避可靠性隐患,是机械产品批量生产中核心的预防性设计手段^[3]。

3.2 制造过程可靠性控制技术

制造过程是机械产品可靠性形成的关键环节,其可靠性控制技术核心是通过加工、装配、热处理全流程的精准管控,减少制造误差,确保零部件性能达标,

核心技术如下:(1)加工精度控制技术。加工精度直接决定零部件配合精度与力学性能,是制造过程可靠性控制的核心。实际应用中采用在线检测与闭环控制结合模式,通过三坐标测量仪、激光测径仪等设备,实时采集零部件尺寸、形位公差数据,反馈至加工设备并自动调整参数,避免误差超标。例如数控机床加工轴类零件时,在线检测系统实时监测直径、圆度,超出公差范围时自动调整切削速度与进给量;同时优化切削工艺,匹配刀具与切削液,减少切削力、切削热对加工精度的影响,降低缺陷发生率。(2)装配过程可靠性控制技术。装配环节的配合精度、连接强度直接影响产品整体可靠性,核心是通过规范化流程与精准管控保障装配质量。实际生产中采用分组装配法,按尺寸公差分组零部件,确保装配间隙均匀,如轴承与轴的分组匹配,规避配合间隙异常导致的磨损、卡滞问题;采用扭矩控制技术,精准管控螺栓、螺钉等连接件扭矩,避免松动或零部件损坏;建立装配质量检验流程,对成品进行气密性、动静态性能检测,及时排查装配缺陷。(3)热处理工艺可靠性控制技术。热处理是提升零部件力学性能的关键工序,工艺稳定性直接影响材料强度、硬度、韧性等指标。实际应用中精准控制热处理温度、保温时间、冷却速度,规避淬火开裂、回火不足等缺陷,如齿轮、轴类零件采用分段加热、匀速冷却方式,确保材料内部组织结构均匀,提升抗疲劳性能;同时对热处理后零部件进行硬度检测、金相分析,验证处理效果,不合格产品及返工,保障力学性能达标。

3.3 可靠性优化的建模与仿真技术

可靠性优化的建模与仿真技术,是实现可靠性优化精准化、高效化的核心手段,通过构建数学模型、模拟产品运行工况,预判可靠性水平并优化方案,规避实际试验的高成本与高风险,核心技术与方法如下:(1)可靠性优化建模技术。核心是结合产品结构、工况及失效机制,构建贴合实际的可靠性数学模型,量化设计参数、制造误差与产品可靠性的关联。建模过程中先明确失效模式(疲劳、磨损、腐蚀等),结合材料性能、加工精度等参数,采用概率统计、有限元分析等方法构建模型。例如机械结构可靠性建模中,以零部件疲劳寿命为目标函数,以结构尺寸、材料性能为设计变量,以制造误差、载荷波动为约束条件,构建疲劳可靠性优化模型;批量生产中构建制造过程可靠性模型,量化加工精度、工艺参数与产品合格率的关系,为工艺优化提供数据支撑。建模需结合实际工程数据修正参数,保障模型准确性与实用性。(2)可靠性仿真技术。通过计算机

模拟产品全生命周期运行状态,分析不同设计方案、制造误差、使用环境对可靠性的影响,提前排查隐患。实际应用中常用ANSYS、ADAMS、MATLAB等软件:ANSYS用于机械结构应力、应变仿真,预判疲劳失效风险;ADAMS用于系统动力学仿真,排查运动干涉、振动过大等问题;MATLAB用于可靠性数据处理与概率仿真,预测故障概率与使用寿命(3)建模与仿真协同优化方法。核心是构建“建模-仿真-验证-优化”闭环流程,通过仿真验证模型合理性,通过模型优化指导仿真方向。实际应用中先构建可靠性优化模型,通过仿真模拟不同设计参数下的可靠性水平,对比筛选最优方案;针对仿真发现的应力过大、运动干涉等问题,修正模型参数并再次仿真验证,直至达成优化目标,提升设计效率与精度^[4]。

3.4 智能化技术在可靠性优化中的应用

随着智能制造技术发展,智能化手段逐步融入机械设计制造全流程,为可靠性优化提供新路径,核心是通过智能化技术实现可靠性数据的精准采集、分析与优化,提升自动化、智能化水平,结合实际应用主要包括以下方面:(1)物联网(IoT)技术的应用。通过在产品及生产设备上安装传感器、数据采集模块,实时采集设计、制造、使用全流程数据(设计参数、加工精度、运行状态、环境参数等),为优化提供数据支撑。生产设备上的振动、温度传感器,可实时监测运行状态并预判故障,规避设备故障导致的制造误差;成品机械上的运行状态传感器,采集零部件温度、振动、磨损数据,分析可靠性并优化设计制造方案。(2)大数据与人工智能(AI)技术的应用。大数据技术处理全流程可靠性数据,通过数据挖掘、统计分析识别关键影响因素,挖掘数据规律;AI技术通过机器学习算法构建可靠性预测模型,预判产品故障并优化方案。实际应用中,利用AI算法训练零部件加工、失效数据,构建故障预测模型,精准预判失效时间并提前维护替换;通过大数据分析识别制造工艺参数最优区间,优化工艺提升可靠性。例如

汽车零部件制造中,通过大数据分析加工误差数据,识别关键工艺参数,借助AI算法优化组合,降低缺陷发生率。(3)数字孪生技术的应用。通过构建产品、生产过程的虚拟孪生体,实现虚实实时映射,模拟全生命周期可靠性状态,提供可视化、可交互优化平台。构建产品数字孪生模型,模拟不同设计方案的运行状态,对比优化设计;构建生产过程数字孪生模型,模拟加工、装配环节,排查可靠性隐患并优化流程。例如航空发动机制造中,通过数字孪生构建虚拟模型,模拟不同工况下的运行状态,预判零部件失效风险,优化设计制造工艺,提升发动机可靠性^[5]。

结束语:本文系统研究了机械设计制造中可靠性优化设计的相关理论、影响因素及关键技术与方法,明确了可靠性优化与设计制造全流程的深度融合是提升产品可靠性的核心路径。通过对冗余设计、制造精度控制、建模仿真及智能化技术的探讨,为机械产品可靠性优化提供了可操作的实践方案。后续可结合具体机械产品场景,进一步优化技术应用细节、完善优化模型。未来,随着智能制造技术的持续发展,可靠性优化设计将向更精准、高效、智能化方向发展,为机械工业高质量发展注入新动力。

参考文献

- [1]谢伟东,李运强,姜澎涛,顾晓宇.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]张振鹏.可靠性分析在机械设计环境适应性中的应用研究[J].中国科技期刊数据库工业A,2025(1):037-040.
- [3]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.
- [4]邹星星.机械制造过程中的精度控制技术及其设计优化[J].科技信息与研究,2026,6(2):184-186.
- [5]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.