

机械设备结构的可靠性设计与寿命评估方法研究

王一坤 王溪路 张颖蕊

西安远方航空技术发展有限公司 陕西 西安 710089

摘要：本文探讨了机械设备结构的可靠性设计与寿命评估方法。在可靠性设计方面，介绍了基于概率的设计方法、可靠性灵敏度分析及稳健设计方法。在寿命评估方面，详细阐述了疲劳寿命、磨损寿命和腐蚀寿命的评估方法。此外还分析了不确定性因素对可靠性与寿命评估的影响，并提出了相应的应对策略。本研究旨在为机械设备结构的优化设计和维护提供理论支持，提高设备的可靠性和使用寿命，降低因故障导致的经济损失和安全风险。

关键词：机械设备结构；可靠性设计；寿命评估方法

引言

工业技术的迅猛进步使得机械设备成为各行各业不可或缺的关键要素。然而机械设备的故障与失效不仅影响生产效率，更可能带来重大经济损失。因此深入研究机械设备结构的可靠性设计与寿命评估方法显得尤为重要。本文旨在探讨这些设计方法和评估技术，旨在为机械设备的优化设计与维护策略提供科学依据和实践指导，以期降低故障风险，提升设备效能与使用寿命。

1 可靠性设计方法

1.1 基于概率的设计方法

基于概率的设计方法是一种先进的设计理念，它将设计变量视为随机变量，充分考虑这些变量的概率分布特性，这种方法在机械零件的强度设计中尤为重要，因为材料的屈服强度、零件所承受荷载等参数往往存在一定的分散性^[1]。以某起重机吊臂的设计为例，吊臂在作业过程中需要承受起吊重力、风载荷等多种力的作用，而这些力的大小往往因作业环境的不同而有所波动。传统的设计方法往往基于经验或保守的估计来确定吊臂的尺寸和材料性能，这可能导致设计结果过于保守，增加制造成本，或者过于冒险，降低设备的可靠性。而基于概率的设计方法则能够克服这些缺陷。它首先通过大量的试验或历史数据拟合出吊臂所承受荷载及材料强度的概率密度函数，如正态分布、威布尔分布等。然后，在设计过程中，依据设定的目标可靠度（如95%）来确定吊臂的截面尺寸和材料性能要求。经过复杂的计算和分析，可以得出在满足目标可靠度的前提下，吊臂所需的最小截面尺寸和最优材料性能组合。这种方法不仅能够提高设计的准确性和可靠性，还能够降低制造成本，提高设备的综合性能。因此，基于概率的设计方法在机械零件的强度设计中具有广泛的应用前景。

1.2 可靠性灵敏度分析

可靠性灵敏度分析是一种深入探究设计参数微小变化对结构可靠性影响程度的重要方法。在复杂机械设备结构的设计中，众多的设计参数，如尺寸公差、材料弹性模量、摩擦系数等，相互关联并共同影响着结构的可靠度。这些参数之间的复杂关系使得设计过程充满了挑战。为了精准地定位那些对结构可靠性影响最大的关键参数，我们可以采用可靠性灵敏度分析方法。该方法通过计算灵敏度系数，能够清晰地揭示出哪些参数的微小变化会导致结构可靠性的显著波动。在汽车发动机的关键连接件设计中，通过灵敏度分析，我们可以发现螺栓预紧力和连接件孔径公差是对可靠性影响最为显著的参数。在制造过程中，对这些敏感参数进行严格的把控，可以确保产品的高可靠性，同时降低生产成本。因为一旦明确了哪些参数是关键因素，我们就可以有针对性地加强对这些参数的监测和控制，避免不必要的浪费和返工。在设计改进阶段，可靠性灵敏度分析也发挥着重要作用。通过优先调整那些对可靠性影响最大的关键参数，我们可以加速优化的进程，提升设计的效率和质量。这种方法不仅能够使我们在设计过程中更加精准地把握关键要素，还能够为后续的制造和维护提供有力的支持。

1.3 稳健设计方法

稳健设计是一种前沿的设计理念，其核心在于增强产品性能对各种不确定性因素的抵抗力，确保设备结构在生命周期内保持稳定的性能。这一理念颠覆了传统设计仅关注标准工况下性能的思维模式。以电子产品的散热结构设计为例，传统设计往往忽视了工作环境温度、散热风扇性能波动等不确定性因素对散热效果的影响。而稳健设计则深入考虑这些潜在干扰，通过先进的技术手段如田口方法等，对散热片形状、布局及风扇选型等关键参数进行优化。通过大量的模拟实验和数据分析，

稳健设计能够精准识别出那些在各种工况下都能保持高效散热的设计方案。这意味着，即便在实际应用中遇到环境温度升高、风扇性能下降等不利条件，产品仍能维持良好的散热效果，显著降低因过热引发的故障率，从而延长使用寿命。稳健设计不仅提升了产品的性能和稳定性，还降低了因不确定性因素导致的维护成本和风险。它强调在设计阶段就全面考虑各种潜在干扰，通过优化设计方案来增强产品的适应性，确保产品在实际使用中能够始终保持优异的性能表现。这一设计理念为产品设计和优化提供了新的思路和方法，是推动产品质量提升和性能稳定的关键所在。

2 寿命评估方法

2.1 疲劳寿命评估

在机械结构设计与维护的广阔领域中，疲劳寿命评估扮演着至关重要的角色。它不仅关乎结构的安全性和可靠性，更是确保设备长期稳定运行的关键。在众多评估方法中，应力-寿命（S-N）曲线法和应变-寿命（ ϵ -N）曲线法以其独特的优势和适用范围，成为了机械结构疲劳寿命评估的两大主流工具。S-N曲线法，通过标准试件的疲劳试验，建立了应力幅与循环次数至失效之间的紧密联系。这一方法尤其适用于那些承受交变载荷的机械零部件，如轴类、齿轮等。以风力发电机主轴为例，利用S-N曲线法，我们能够结合先进的有限元模拟技术，精准预测主轴在复杂交变风力矩作用下的疲劳损伤累积情况，为制定合理的定期维护与更换计划提供了坚实的科学依据。而 ϵ -N曲线法，则更加注重材料的塑性变形特性。它以应变幅为变量，构建了 ϵ -N曲线，因此更适用于那些承受塑性应变较大的结构，如焊接接头、承受冲击载荷的部件等。在汽车底盘焊接结构的应用中， ϵ -N曲线法能够结合焊点实际应变历程，对焊接接头的疲劳寿命进行精准评估，进而指导我们优化焊接工艺参数，提升底盘的整体耐久性。S-N曲线法和 ϵ -N曲线法各有千秋，共同构成了机械结构疲劳寿命评估的坚实基石。它们不仅为我们提供了科学的评估手段，更为确保机械结构的安全运行提供了有力保障。

2.2 磨损寿命评估

磨损寿命评估在机械设备的设计与维护中占据着举足轻重的地位，它直接关系到设备的长期稳定运行和性能表现。在众多的评估方法中，基于Archard磨损模型和经验磨损公式的两种方法尤为常用，且各具特色。Archard磨损模型以其深刻的物理意义，揭示了磨损量与接触压力、滑动距离及材料硬度之间的内在联系^[2]。这一模型在机床导轨等机械设备摩擦副的设计中得到了广

泛的应用。设计师们通过计算导轨在预期运行里程下的磨损量，可以科学地选择导轨材料、优化润滑方式以及确定表面处理工艺，从而确保机床的加工精度在设备寿命期内始终保持在要求的范围内，有效避免因磨损而导致的精度丧失和设备故障。在某些特定工况与材料组合下，经验磨损公式则展现出了其独特的优势。以矿山破碎机颧板为例，由于工况恶劣、物料冲击磨损严重，行业专家依据大量的现场数据，总结出了适用于不同矿石特性和颧板材质的磨损公式。这些公式结合生产计划，能够准确地估算出颧板的更换周期，从而确保破碎效率，降低设备维护成本，提高矿山开采的连续性和稳定性。基于Archard磨损模型和经验磨损公式的磨损寿命评估方法各有千秋，它们共同为机械设备的长期稳定运行提供了有力的保障。在实际应用中，我们应根据具体的设备类型、工况条件以及材料特性，选择最合适的评估方法，以确保评估结果的准确性和可靠性。通过不断的实践和优化，我们可以进一步提升机械设备的耐磨性能和使用寿命，为企业的生产和发展创造更大的价值。

2.3 腐蚀寿命评估

腐蚀寿命评估是确保金属结构在腐蚀性环境中安全运行的关键环节。针对不同类型的腐蚀情况，采用不同的评估方法至关重要。对于均匀腐蚀情况，失重法结合腐蚀速率模型是一种有效的评估手段。通过定期测量试件的失重，并结合腐蚀环境参数（如温度、湿度、介质浓度等），可以建立腐蚀速率模型，从而预测结构的腐蚀寿命。在化工管道中，通过前期实验标定不同工况下管道材料的腐蚀速率，并考虑管道壁厚的安全余量，可以依据工艺运行时长合理规划管道的更新周期，以防止因腐蚀泄漏而引发安全事故与环境污染。电化学腐蚀监测与寿命预测技术也具有重要意义。利用电化学阻抗谱、极化曲线等技术，可以实时监测金属结构的腐蚀电位、电流等参数，进而推算腐蚀深度与剩余寿命。在海上石油平台钢结构等长期受海水腐蚀的环境中，安装电化学传感器网络进行远程监控腐蚀动态，可以依据监测结果动态调整防腐措施（如增加牺牲阳极、涂刷防腐漆等），以确保平台在设计寿命内（如20年）保持结构完整性，有效抵御海洋恶劣环境的侵蚀。

3 不确定性因素对可靠性与寿命评估的影响及应对

3.1 不确定性来源

在结构设计与分析中，不确定性是一个不可忽视的重要因素。它主要来源于材料性能、载荷以及制造与装配等多个方面，对结构的承载能力和长期安全运行构成潜在威胁^[3]。首先，材料性能的不确定性是一个核心问

题。即使是同一牌号的钢材，由于生产批次差异和加工工艺波动，其屈服强度等关键性能指标也可能存在显著分散现象。这种分散性不仅增加了设计阶段准确预估结构性能的难度，还可能导致结构寿命预估的不确定性增大，从而给结构的长期安全运行埋下隐患。其次，载荷的不确定性同样不容忽视。实际工况的复杂性和多变性使得设备承受的动载荷、冲击载荷的幅值与频率难以精确预测。飞机在飞行过程中可能遭遇的气流颠簸等瞬间过载情况，远远超出了常规设计载荷工况，这对结构的可靠性极限构成了严峻挑战。在结构设计中必须充分考虑载荷的不确定性，设置足够的安全裕量和冗余度，以确保结构在极端工况下的可靠性。此外，制造与装配过程中的误差也是导致结构不确定性的的重要因素。零部件的尺寸公差、形位公差积累，以及装配时的间隙、过盈不合理等，都会改变结构的应力分布，进而影响其整体性能和可靠性。特别是在高精度机床等精密设备的装配过程中，微小的误差变化都可能对关键部件的接触应力产生显著影响，从而加速磨损与疲劳失效过程。材料性能、载荷以及制造与装配等方面的不确定性共同构成了结构设计与分析中的复杂挑战。为了降低这些不确定性带来的风险，必须在设计阶段充分考虑各种因素，并采取相应的措施加以应对。

3.2 应对策略

(1) 概率统计与模糊数学方法，为了更准确地评估结构的安全性，我们可以运用概率统计与模糊数学方法。首先，通过概率分布来描述材料性能和载荷的不确定性，这样可以使我们更全面地了解这些不确定性因素可能对结构产生的影响。利用模糊集理论来处理那些难以量化的模糊信息，如操作工人的技能水平对装配质量的影响。将这些不确定性因素融入可靠性计算模型中，可以使我们的评估结果更加贴近实际情况。在机械臂结

构的设计中，我们可以综合考虑设计参数的模糊性与随机性，通过模糊可靠性设计来优化结构，从而提升其在复杂工况下的适应性。(2) 多源信息融合与监测技术，为了实时监测设备的状态并及时发现潜在故障，我们可以采用多源信息融合与监测技术。这项技术能够融合设计、制造和运行全流程的数据，通过物联网传感器采集振动、温度、应变等信号，并结合大数据分析人工智能算法来诊断设备的潜在故障。通过动态修正寿命评估模型，我们可以更准确地预测设备的剩余寿命。在工业泵机组中，我们可以利用在线监测系统实时跟踪轴承的温度和振动频谱，从而提前预警疲劳裂纹的萌生。我们还可以根据运行数据回溯优化设计参数，以增强后续产品的可靠性。

结语

综上，机械设备结构的可靠性设计与寿命评估方法是提升设备性能和延长使用寿命的关键所在。通过融合多种设计理念和评估技术，我们能够更有效地应对不确定性因素带来的挑战，为机械设备的优化设计与精准维护提供坚实支撑。展望未来，随着科技的不断革新，我们有理由相信，这些方法和技术将会得到进一步的完善和发展，为工业生产的稳定与高效注入更强动力，助力机械设备在各行各业中发挥更加重要的作用。

参考文献

- [1] 蒋修华,王有亮,胡真清,等.基于机械手运作的机床行程开关自动装配设备设计与实现[J].机电工程技术,2023,52(10):189-191,223.
- [2] 薛明亮.小型搅拌设备及其控制系统的设计与研究[J].中国设备工程,2024(1):94-96.
- [3] 曹名亮.机械结构的疲劳寿命预测与可靠性设计研究[J].中国高新科技,2018(3):55-57.