

机械可靠性设计优化的概率与非概率方法对比研究

范克健

泰山科技学院 山东 泰安 271000

摘要: 概率方法基于概率论, 通过随机变量描述不确定性, 适用于大数据样本; 非概率方法则依赖区间、凸集等边界信息, 适用于小样本、贫信息场景。两者在理论基础、应用场景、计算复杂度与效率上各有优劣。概率方法精确但依赖大量数据, 计算复杂; 非概率方法简单快捷, 但结果偏保守。两者各有适用场景, 共同推动机械可靠性设计优化的发展。

关键词: 机械可靠性设计优化; 概率; 非概率; 方法对比

引言: 在机械系统设计中, 确保产品的可靠性至关重要。概率与非概率方法是两种常用的可靠性设计优化手段。概率方法基于概率论, 能够量化不确定性, 但依赖于大量数据; 非概率方法则侧重于处理认知不确定性, 适用于小样本或数据不足的情况。本文将对这两种方法进行对比分析, 以期机械可靠性设计提供全面的理论参考和实践指导。

1 机械可靠性设计基础理论

1.1 可靠性定义与评估指标

1.1.1 可靠性的基本概念

指机械产品在规定的条件下和规定的时间内, 完成规定功能的能力。它是产品质量的重要属性, 涵盖产品从设计、制造到使用的全生命周期。规定条件包括环境温度、湿度、载荷等; 规定时间根据产品用途而定, 短则几小时, 长则数年; 规定功能则是产品应实现的技术性能, 如机床的加工精度、汽车的行驶能力等。

1.1.2 常见的可靠性评估指标

可靠度是产品在规定条件和时间内完成规定功能的概率, 用 $R(t)$ 表示, 取值范围在0到1之间, 越接近1说明可靠性越高。失效概率是产品在规定条件和时间内不能完成规定功能的概率, 用 $F(t)$ 表示, 且 $R(t)+F(t)=1$ 。此外, 还有平均无故障工作时间, 指产品两次故障之间的平均工作时间, 反映产品无故障工作的持续能力; 失效率, 即工作到某一时刻尚未失效的产品, 在该时刻后单位时间内发生失效的概率, 能体现产品随时间的失效趋势。

1.2 机械设计中的可靠性要求

1.2.1 机械设计的基本原则

包括功能满足原则, 确保产品实现预定功能; 安全可靠原则, 保障使用过程中的安全性和稳定性; 经济性

原则, 在满足性能的前提下降低成本; 可维护性原则, 便于产品的维修和保养; 标准化与系列化原则, 采用标准件和通用结构, 提高设计效率和互换性。

1.2.2 可靠性设计在机械设计中的具体应用

在零部件设计中, 通过对材料强度、几何尺寸等参数进行概率分析, 确定合理的尺寸公差和安全系数, 如齿轮设计中考虑齿面接触疲劳强度和齿根弯曲疲劳强度的概率分布。在系统设计中, 进行可靠性分配, 将整体可靠性指标分解到各个子系统和零部件, 如汽车传动系统的可靠性分配到变速箱、传动轴等部件。同时, 运用故障模式与影响分析等方法, 识别潜在故障并采取预防措施, 提升机械产品的可靠性^[1]。

2 概率方法在机械可靠性设计中的应用

2.1 概率可靠性设计模型

2.1.1 概率可靠性设计的基本框架

以随机变量理论为核心, 通过建立载荷与强度的概率关系评估产品可靠性。核心是“强度-载荷干涉模型”: 强度随机变量大于载荷随机变量时产品可靠, 反之失效。该框架含三个关键环节: 一是识别设计中的随机变量(如材料性能、几何参数、工作载荷等); 二是建立变量间数学关系(常用极限状态方程描述); 三是通过概率计算得可靠度。此框架突破传统安全系数设计的确定性局限, 更贴合工程实际的不确定性特征。

2.1.2 载荷、强度等随机变量的描述与处理

载荷和强度均为随机变量, 需用概率分布描述。载荷常为交变载荷, 经统计分析可拟合为正态分布、威布尔分布等(如汽车悬架路面载荷多符合正态分布); 强度与材料性能、加工工艺相关(金属材料强度多服从正态分布, 脆性材料强度可能呈威布尔分布)。处理时需通过试验或现场数据获取样本, 用参数估计(如极大似然估计)确定分布参数, 再经分布函数转换将非正态变

基金项目: 2024yb041基于新工科的数控技术与编程教学改革研究项目

量标准化,为后续可靠性计算奠定基础^[2]。

2.2 概率设计法的具体应用

2.2.1 概率设计法的实施步骤

以下是概率设计法实施步骤的流程图,如图1。直观呈现各环节的逻辑关系:



图1 概率设计法实施步骤的流程图

2.2.2 工程实例分析

在涡轮叶片设计中,叶片承受的离心载荷和热载荷为随机变量,材料高温强度也存在分散性。采用概率设计法时,先通过疲劳试验获得叶片材料强度分布,再结合发动机工况统计载荷分布,建立“强度-载荷”干涉模型,计算得出可靠度为99.9%,相比传统设计,在重量减轻15%的同时提升了可靠性。在飞机结构设计中,机身蒙皮的气动载荷和材料强度均按随机变量处理,通过蒙特卡洛模拟10万次抽样,确定关键部位厚度参数,使结构在满足可靠度要求的前提下减少了20%的材料消耗。

2.3 概率方法的优缺点分析

2.3.1 优点

理论基础成熟,基于概率论和数理统计,可量化评估可靠性,结果具有明确的概率意义;适用于大数据样本场景,当试验数据充足时,能通过分布拟合精准描述变量特性,如汽车零部件的批量试验数据可支撑高精度概率设计;相比确定性设计,能更合理分配安全余量,避免过度设计或设计不足。

2.3.2 缺点

对小样本、贫信息情况处理不足,在新型材料或复杂结构设计中,若缺乏足够试验数据,分布参数估计误差大,导致可靠度计算失真;计算复杂度高,尤其是多变量耦合场景,蒙特卡洛模拟需大量抽样,一次二阶矩法在非线性问题中精度下降,需结合神经网络等算法优

化,增加了工程应用门槛;对设计人员的概率统计知识要求较高,限制了在部分中小企业的推广。

3 非概率方法在机械可靠性设计中的应用

3.1 非概率可靠性设计模型

3.1.1 非概率可靠性设计的基本思想

以不确定性变量的边界信息为核心,不依赖精确的概率分布,通过描述变量的可能取值范围评估可靠性。其核心逻辑是“安全域-不确定域”的分离程度,即当结构性能参数的安全域与变量的不确定域无交集时,产品可靠。该思想突破了概率方法对大量样本数据的依赖,尤其适用于试验数据有限的复杂机械系统,将不确定性转化为区间或集合的边界约束,更注重变量的波动范围而非概率特征。

3.1.2 凸集模型、区间模型等非概率方法的介绍

区间模型是最常用的非概率模型,将随机变量表示为确定的区间范围,如材料强度用 $[a, b]$ 区间描述,不涉及具体分布形式,仅通过上下限反映不确定性;凸集模型则将变量的不确定域定义为凸多边形或椭球体,适用于多变量耦合场景,可通过凸集的几何特性描述变量间的相关性。此外,还有证据理论模型,通过信任函数和似然函数处理信息的不完全性,适用于模糊或冲突数据场景,为小样本条件下的可靠性评估提供了灵活工具^[3]。

3.2 非概率设计法的具体应用

3.2.1 非概率设计法的实施步骤

首先确定设计中的不确定参数,如制造误差、载荷波动等,无需获取概率分布,仅需明确变量的边界范围;其次建立非概率极限状态方程,用区间或凸集表示安全与失效的临界状态;接着通过区间运算或凸集投影计算可靠度指标,常用“可靠度距离”衡量安全域与不确定域的分离程度,距离越大可靠性越高;最后根据指标优化设计参数,迭代调整结构尺寸或材料选择,直至满足可靠性要求。

3.2.2 工程实例分析

在螺栓联接设计中,螺栓预紧力、螺纹强度受制造精度影响呈现不确定性,但缺乏大量试验数据。采用区间模型时,将预紧力界定在 $[18\text{kN}, 22\text{kN}]$,强度界定在 $[25\text{kN}, 30\text{kN}]$,通过区间运算得出强度区间始终大于载荷区间,可靠度指标为1.2,无需精确概率分布即可判定联接安全。在机床主轴设计中,主轴的弯曲刚度和切削载荷均为不确定变量,采用凸集模型描述参数相关性后,通过凸集投影计算得出可靠度距离为0.85,指导设计人员将主轴直径从80mm增至85mm,使可靠度指标提升至1.1,有效规避了小样本数据下的设计风险。

3.3 非概率方法的优缺点分析

(1) 优点: 对数据依赖度低, 适用于小样本、贫信息场景, 如新型航空发动机零部件设计, 无需积累大量试验数据即可开展可靠性评估; 计算逻辑简洁, 区间运算、凸集分析等方法避免了复杂的概率积分, 降低了对计算资源的需求, 便于工程人员快速应用; 能有效处理认知不确定性, 当变量分布未知时, 通过边界约束保证设计的保守性与安全性, 尤其适合创新产品的早期设计阶段。(2) 缺点: 理论基础相对较新, 部分模型的数学严谨性仍需完善, 如凸集模型中相关性描述的规范性尚未形成统一标准; 评估结果偏于保守, 区间或凸集的边界取值常包含极端情况, 可能导致过度设计, 增加产品成本; 对变量内在随机性的刻画不足, 当样本数据充足时, 其精度低于概率方法, 难以充分挖掘数据中的概率信息, 在批量生产的成熟产品设计中应用受限。

4 机械可靠性设计优化的概率与非概率方法的对比研究

4.1 理论基础对比

4.1.1 概率方法与非概率方法在理论基础上的差异

概率方法以概率论和数理统计为核心, 通过随机变量概率分布描述不确定性, 基于“频率学派”或“贝叶斯学派”理论计算可靠度, 核心是建立载荷与强度的概率干涉模型, 通过概率积分求解失效概率。非概率方法以集合论和凸分析为基础, 将不确定性参数视为区间、凸集等确定性边界, 无需预设概率分布, 通过安全域与不确定域的几何关系评估可靠性, 本质是通过边界约束处理认知不确定性。

4.1.2 两者在描述不确定性因素时的优劣分析

概率方法能量化随机特性, 精确区分大概率与小概率事件, 适用于已知分布场景, 但需假设变量独立且依赖大量样本, 对未知分布描述有限。非概率方法无需分布假设, 凭边界信息即可建模, 有效处理小样本认知不确定性, 但其描述笼统, 无法区分区间内不同概率密度变量, 结果易保守^[4]。

4.2 应用场景对比

4.2.1 概率方法与非概率方法在不同机械系统设计中的应用场景

概率方法适用于批量生产、数据充足的成熟机械系统, 如汽车底盘、通用机床等, 其载荷、材料性能等参数可通过长期试验积累数据, 精准拟合概率分布。非概率方法更适合小批量、高复杂度创新机械系统, 如航天器结构、新型风电设备等, 这类系统缺乏历史数据, 设计周期短, 需在贫信息下快速评估可靠性。

4.2.2 两者在解决特定问题时的有效性分析

处理交变载荷下的疲劳可靠性问题, 概率方法可通过应力-寿命曲线概率模型精准预测疲劳寿命, 如发动机曲轴设计; 非概率方法在处理几何参数误差导致的装配可靠性问题时更高效, 如精密齿轮箱间隙控制, 无需复杂分布拟合即可通过区间运算保障精度。极端工况下(如核反应堆压力容器), 非概率方法的保守性设计更能规避未知风险, 而概率方法在常规工况的经济性优化中更具优势。

4.3 计算复杂度与效率对比

4.3.1 概率方法与非概率方法在计算复杂度上的差异

概率方法计算复杂度随变量维度呈指数增长, 蒙特卡洛模拟需数千次抽样收敛, 一次二阶矩法在非线性问题中需多次迭代线性化; 涉及相关变量时, 引入协方差矩阵会进一步增加计算量。非概率方法基于区间算术或凸集运算, 变量维度对复杂度影响小, 如区间模型极限状态方程求解仅需边界值代入, 凸集投影算法计算量与变量维度呈线性关系, 整体复杂度远低于概率方法。

4.3.2 两者在实际应用中的效率对比

大数据样本场景下, 概率方法前期数据处理耗时(如分布拟合、参数估计), 但模型建立后可通过优化算法快速迭代方案; 小样本场景下, 非概率方法无需数据预处理, 直接基于边界参数设计, 周期可缩短30%~50%。多目标可靠性优化问题中, 非概率方法因计算简单, 更易与遗传算法、粒子群算法结合高效寻优; 概率方法需搭配高精度近似模型(如响应面法)平衡精度与效率, 工程实践中对硬件算力要求更高。

结束语

综上所述, 概率方法与非概率方法在机械可靠性设计优化中各具特色, 概率方法依赖于大量数据, 能够精确量化不确定性, 适用于成熟产品设计; 非概率方法则在小样本、贫信息条件下展现出独特优势, 其简洁高效的计算逻辑适用于创新设计。未来, 融合概率与非概率方法, 探索更高效的可靠性设计优化策略, 将是机械可靠性研究领域的重要方向。

参考文献

- [1]尹冬娥.机械产品可靠性设计与优化[J].机械工程学报,2023,(10):116-117.
- [2]谭智勇.机械产品的可靠性分析与优化方法研究[J].现代制造技术与装备,2024,(07):81-82.
- [3]李凤.基于仿真技术的机械产品可靠性设计[J].计算机辅助设计与图形学,2023,(05):54-55.
- [4]姜天根.农业机械设计中的可靠性分析与故障诊断技术研究[J].南方农机,2024,55(08):87-89.