

机械设计中基于 CAE 仿真的疲劳寿命预测研究

廖宦超

四川工业设备安装集团有限公司第二分公司, 四川省绵阳市, 621000;

摘要: 疲劳寿命问题始终贯穿于机械产品全生命周期设计中, 其评估准确性直接关系到结构安全与服役周期。在传统方法依赖试验与经验参数的背景下, CAE 仿真技术逐步成为现代疲劳寿命预测的重要手段。该方法通过构建有限元模型, 叠加复杂载荷边界与材料响应机制, 实现疲劳失效行为的数字化重构, 从而为早期设计提供更具前瞻性的预测依据。本文围绕 CAE 仿真在疲劳寿命预测中的理论路径展开探讨, 聚焦有限元模型构建、损伤演化逻辑、应力应变评估策略等关键环节, 阐明其在机械结构设计中的功能定位与系统价值, 旨在为结构轻量化、耐久性设计提供理论支撑。

关键词: CAE 仿真; 疲劳寿命; 机械设计; 虚拟试验; 有限元分析

DOI: 10.69979/3060-8767.25.07.060

引言

在多数工程机械构件中, 疲劳破坏并非源自瞬时极限载荷, 而是源于长周期交变应力所致的局部损伤积累。当构件处于复杂服役状态时, 其内部应力集中区域往往成为疲劳裂纹的初发点, 若无法有效识别与控制, 极易引发结构失效或潜在安全事故。传统疲劳寿命预测方法大多依赖标准 S-N 曲线与 Miner 线性累积准则, 在结构复杂性与载荷谱日益多样化的工程语境中, 其适用性与准确性受到制约。随着计算力的提升与工程软件工具的发展, CAE 仿真技术逐步走入疲劳寿命分析的主流领域。其通过构建数字化模型、模拟多工况载荷路径与局部应力分布, 可实现疲劳损伤过程的空间识别与寿命预测, 为设计初期提供可操作性的改进依据。本文旨在从理论视角系统梳理 CAE 疲劳寿命预测的路径机制, 并探讨其在机械结构设计中的嵌入方式, 以期丰富现代机械设计方法体系中对耐久性问题的技术应对策略。

1 疲劳寿命预测在机械设计中的地位

1.1 疲劳破坏在机械失效中的主导作用

多数机械构件在实际服役中承受着周期性载荷, 这类载荷虽未超过材料的屈服极限, 却会在局部区域持续引发微观结构的演化与能量耗散, 最终导致宏观疲劳破坏。相比瞬时断裂, 疲劳破坏往往表现为隐蔽性强、预警信号弱, 其危险性常在未及预期寿命前就显现, 直接威胁设备运行的安全边界^[1]。典型如高速列车转向架、航空发动机叶片等关键部件, 其服役过程中大多经历亿次数量级的交变应力循环, 一旦存在几何缺陷或材料不均性, 极易形成疲劳裂纹源。

从工程管理角度看, 疲劳问题不仅关系到构件的可靠性评价, 更影响到维修周期、使用寿命与全生命周期

成本评估。在装备产品不断向高强度、轻量化方向演进的背景下, 结构冗余被大幅压缩, 传统依赖经验安全系数的做法已难以满足对安全裕度的精准控制, 疲劳寿命预测逐渐成为保障设计合理性与运行安全性的核心指标。

1.2 传统疲劳分析方法的不足

经典的疲劳分析方法主要以实验为基础, 通过测定材料在不同载荷幅值下的疲劳寿命, 绘制出 S-N 曲线或 ϵ -N 曲线, 再结合矿山法 (Miner) 进行寿命估算。这类方法在早期工程实践中具有较高的适用性与可操作性, 特别是在构件形状规则、受力条件稳定的情况下, 往往能提供合理的设计依据^[2]。然而随着机械系统复杂度提升, 构件形貌呈现出多曲面、空腔、高应力梯度的特征, 局部载荷响应往往偏离材料试样的理想状态, 导致传统模型无法准确反映实际工况。

另一个突出问题在于, 传统方法难以捕捉多轴应力状态与非比例载荷路径下的疲劳损伤行为。例如复杂加载下产生的主应力方向旋转、应变幅值不稳定等因素均会导致实验数据在外推时出现偏差, 从而埋下结构失效的隐患。更为重要的是, 这些方法大多无法与三维复杂模型直接对接, 分析过程严重依赖人为简化与经验判断, 限制了其在现代精细化设计中的应用范围。

1.3 疲劳设计向模拟预测转变的趋势

疲劳寿命评估正逐步从实验驱动走向仿真驱动, 其背后的逻辑基础在于工程界对局部响应与非线性演化过程的重视不断增强。通过有限元方法 (FEM) 建立结构应力场模型, 配合疲劳损伤理论, 可以在理论层面上将构件寿命问题转化为应力波动过程的时域积分问题, 进而实现更贴近物理实况的疲劳预测。这种方式不仅提

高了预测效率，还显著降低了对实际试验的依赖程度。

此外，基于 CAE 平台开展疲劳预测使得工程师可以在结构设计早期对不同几何形态、材料选择与加载路径进行可行性筛选，从而避免传统设计中因后期结构返工带来的成本浪费。特别是在航空航天、汽车制造等对疲劳强度要求极高的领域，模拟预测已成为前期设计流程中不可或缺的一环。未来疲劳分析的趋势，是将其作为构件设计参数链中的一项刚性约束，贯穿于产品建模、仿真分析与性能验证的全过程。

2 CAE 仿真在疲劳寿命预测中的理论路径

2.1 有限元模型构建的基础逻辑

疲劳寿命预测依赖于准确的应力应变分布数据，而这正是有限元分析（FEA）所擅长模拟的对象。通过将复杂构件离散为若干单元，并依据材料属性、边界条件与载荷工况进行建模，有限元方法可以获取任意节点上的力学响应结果，从而为后续疲劳分析提供数据支撑^[3]。在建模过程中，网格划分的密度与质量、几何细节的保留程度、约束设定的真实性等因素，均会影响预测结果的可信度。因此，高精度的有限元模型往往被视为疲劳仿真的基础保障。

在疲劳寿命预测中，模型构建不仅要追求结果精度，也需兼顾计算效率与适配性。特别是在多构件系统或具有复杂连接关系的组件中，如何在保证响应合理的前提下控制分析规模，是工程师必须面对的现实问题。为此，区域建模、子模型技术与接触单元参数调控等策略被广泛应用于实际工程仿真中，以实现性能与效率的协同优化。

2.2 应力应变转换与损伤准则选取

在 CAE 疲劳仿真流程中，构件受载后的应力应变历史数据需通过特定准则转化为疲劳损伤量，并进一步整合成寿命估值。常用的转换方式包括基于应力幅值的应力-寿命（S-N）法与基于应变幅值的应变-寿命（ ϵ -N）法^[4]。前者适用于高周疲劳场景，后者则常用于低周疲劳分析，特别是在局部塑性变形较明显的区域。这些方法大多依托材料库中的实验曲线作为基础参数，结合实际工况进行内插与外推计算。

损伤准则的选择决定了疲劳寿命预测的精细程度与适用范围。经典的 Miner 线性累积准则因其计算简便而被广泛采用，但在多轴加载、非比例循环等复杂载荷情境下，其线性叠加假设已难以涵盖实际损伤演化行为。为此，诸如 Smith-Watson-Topper（SWT）、Brown-Miller 等多轴损伤模型被引入工程实践，以提升预测结果在真实载荷谱下的代表性。这些理论的嵌入，使得 CAE 疲劳分析不仅限于数字结果输出，更具备了行为解释与失效识别的能力。

2.3 辅助分析与数据可视化支持

疲劳寿命预测的可靠性还依赖于对仿真数据的有效识别与综合判断。在 CAE 平台中，疲劳分析模块通常配备一系列后处理工具，用于对热点区域的损伤分布、临界节点的寿命估算与整体结构的风险等级进行分类展示^[5]。这些数据可视化结果，帮助设计人员快速识别问题位置并进行模型修正，从而在结构设计迭代中形成闭环反馈。

更进一步，一些高级 CAE 系统还支持将疲劳仿真结果与形貌优化工具结合，开展结构拓扑优化与多目标权衡分析。这种方式不仅可以在保证强度的前提下降低材料使用，还能使疲劳寿命预测成果转化为可操作性的设计改进方案。可视化工具与优化算法的协同，使得疲劳仿真不再只是被动的评估环节，而成为面向结构性能提升的主动策略支撑。

3 疲劳寿命仿真在机械设计中的应用策略

3.1 面向结构优化的设计前置策略

疲劳寿命问题在传统工程设计流程中往往处于被动验证位置，通常是在结构设计完成后，才通过实验或有限元仿真手段进行寿命评估。这种后置式的流程虽然具备一定的纠错能力，但也显著拉长了产品研发周期，增加了返工与材料浪费的风险。为提升设计效率与产品可靠性，将疲劳仿真工作前移至设计初期，已成为机械设计流程革新的重要方向。

在设计阶段引入疲劳分析，可以帮助设计人员明确哪些区域存在应力集中风险，哪类加载工况对结构寿命影响最大，从而通过几何变更、材料替换或结构重构等方式，提升构件的疲劳适应能力。例如，通过优化过渡曲线、倒角设计、加强肋布置等局部细节，可以有效改善高应力区域的载荷传导路径，降低裂纹源形成概率。这种“设计—仿真—再设计”的前置循环，有助于在产品定型前解决潜在失效隐患。

在结构拓扑优化与多目标设计中，CAE 疲劳仿真提供了数据支持，使设计人员不再依赖经验判断，而是以结构应力场与寿命预测结果为导向进行决策。通过对不同设计方案的疲劳寿命对比，可以实现强度、刚度与寿命的协同优化，推动产品向着更高效、轻量化与可靠性的方向演进。

3.2 与制造工艺联动的精细化控制

机械构件的疲劳性能不仅取决于其结构与材料，更受制造工艺因素的显著影响。加工过程中引入的残余应力、热处理硬化层、焊缝组织特征、表面粗糙度等都会改变构件局部的力学响应，从而直接作用于疲劳裂纹的萌生与扩展过程。传统的疲劳分析往往忽略这些工艺因

素,造成预测值与实测寿命出现偏差。为弥合这一差距,CAE 疲劳仿真逐步引入工艺参数,推动仿真分析与制造过程的深度耦合。

例如,在焊接构件分析中,通过模拟焊缝残余应力场的分布特征,可更真实地再现其在循环载荷下的应力响应,识别出易发生裂纹的热影响区或应力集中点。类似地,对于经表面强化处理的零件,仿真中引入加工硬化层、压应力场与表面几何扰动参数,可以在寿命预测中体现强化效果,支持后续加工工艺优化。

现代CAE平台逐渐支持对制造过程的参数输入建模,如热处理路径、冷却速率、机加工余量、装配预应力等均可在仿真中表达。通过这些手段,疲劳寿命预测不再是“理想状态”下的寿命估值,而更接近实际构件的服役表现。这不仅为质量控制与工艺制定提供依据,也促进设计、工艺与分析三者之间的闭环融合。

3.3 面向产品全生命周期的集成应用

疲劳寿命仿真的价值,远不止于研发阶段的设计辅助,而在于其贯穿产品生命周期的广泛应用潜力。在生产阶段,仿真结果可用于制定质量检验标准,如设定关键部位的无损检测频率、划定寿命敏感区的装配精度要求等。在使用阶段,配合传感器与监测系统,疲劳仿真模型还可实现剩余寿命预测、风险预警与维修计划制定。

当前,许多企业已尝试将 CAE 疲劳分析模型嵌入数字孪生系统中,以实现构件实际使用状态的实时反馈。通过采集振动信号、载荷数据与温度变化等信息,并实时更新仿真模型,可以动态修正构件的寿命曲线,建立起“数字副本”与实物的一致性。这种模型驱动的维护方式被广泛应用于高价值设备、飞行器与大型机床等领域,不仅提升了设备运维的科学性,也显著降低了非计划性停机的经济损失。

疲劳仿真还可以作为知识积累平台,通过对历代产品失效模式的归纳总结,形成经验数据库,反哺下一代设计优化工作。在平台化研发趋势下,疲劳分析的标准化、模块化与可重用性成为其扩展应用的技术基础,助推机械产品从“被动防护”向“主动健康管理”转型。通过全生命周期的视角审视疲劳寿命问题,CAE 仿真不仅是分析工具,更是实现产品高可靠性设计的基础支撑。

4 结语

疲劳寿命问题一直是机械设计领域关注的重要方向,其复杂性不仅源于材料本身的微观特性,还涉及结构几何、载荷路径、制造工艺以及使用环境等多重变量。传统疲劳寿命预测手段虽具备一定理论基础与工程实用性,但在复杂结构、多载荷工况与高可靠性要求日益

普遍的背景下,其适用范围逐渐受到限制。CAE 仿真作为一种融合建模计算与工程分析的数字化工具,为疲劳寿命预测提供了全新路径,其在精度、效率与适应性方面的优势逐渐显现,并成为当前机械结构设计中不可或缺的分析环节。

从设计前置的角度看,疲劳仿真可提前识别高应力区域与结构薄弱点,辅助设计人员在构型方案制定阶段即进行结构优化,避免后期重复验证所带来的时间与成本浪费。在制造环节,仿真手段可引入工艺影响参数,如残余应力、加工纹理与热处理状态等,将制造对疲劳性能的影响纳入分析框架,使寿命预测更贴近实际服役状态。在产品运行与维护阶段,仿真模型则可与传感数据结合,开展动态寿命评估与状态监测,为精细化维修与寿命管理提供依据。

尤其值得强调的是,疲劳寿命仿真不仅是一种单纯的计算手段,其背后蕴含着对结构行为规律的系统认知与对工程逻辑的抽象表达。在数字化设计与智能制造不断融合的趋势下,疲劳仿真正从“单点分析”向“全流程集成”演进,逐步嵌入设计、制造、监测与维护等各个阶段,成为驱动机械产品全生命周期可靠性提升的关键技术力量。

未来,随着仿真平台的功能拓展、材料模型的精细化表达及算法求解能力的持续增强,疲劳寿命仿真将在多物理场耦合、高维非线性分析等复杂场景中展现更大潜力。同时,其与 AI 技术、数字孪生、边缘计算等新兴技术的融合,也将推动疲劳分析模式从定值型预测迈向智能化演进。机械设计领域对疲劳问题的应对思路,也将在仿真支持下更加科学、系统与前瞻。

参考文献

- [1] 杨明霞,曲志江. 机械设计中材料的选择和应用分析[J]. 冶金与材料,2025,45(02):91-93.
- [2] 崔方圆,陈小龙,高志强. 数字化转型在机械设计制造教育中的实践与创新:基于 CAD/CAE/CAM 课程体系的构建[J]. 吉林省教育学院学报,2025,41(02):129-136.
- [3] 叶华. CAD/CAE 技术在机械设计与模具设计中的应用研究[J]. 造纸装备及材料,2024,53(06):76-78.
- [4] 吴香林,吴敬权,陈典龙. 机械设计制造及自动化专业 CAE 分析软件实践教学[J]. 轻工科技,2022,38(05):192-194.
- [5] 杨莎莎,沈承. 浅谈力学及 CAE 技术在机械设计专业及机械学科发展中的意义[J]. 教育教学论坛,2020,(04):171-172.