

# 轴类零件疲劳断裂的有限元分析及其优化设计

尚亿鹏

镇海石化海达发展有限责任公司 浙江 宁波 315200

**摘要：**本文深入探讨了轴类零件疲劳断裂的基础理论，包括其基本结构、疲劳断裂机理及影响因素。在此基础上，文章详细介绍了轴类零件疲劳断裂的有限元分析方法，包括有限元模型的建立、疲劳分析的步骤与方法以及分析结果与讨论。进一步地，文章提出了基于有限元分析的轴类零件优化设计策略与方法，并阐述了优化方案的实施与验证过程。另外，还讨论了轴类零件疲劳断裂的预防措施与维护建议，旨在为轴类零件的设计、制造与维护提供全面的指导。

**关键词：**轴类零件；疲劳断裂；有限元分析；优化设计

## 1 轴类零件疲劳断裂的基础理论

### 1.1 轴类零件的基本结构

轴类零件是机械装备中的关键部件，起着传递动力、支撑旋转部件等重要作用。常见的轴类零件有直轴、曲轴、传动轴等。直轴一般呈圆柱形，结构相对简单，主要用于传递扭矩和承受弯矩；曲轴则具有复杂的曲拐结构，用于将活塞的往复运动转换为旋转运动，如汽车发动机曲轴；传动轴主要用于连接不同轴线的部件，实现动力的传递。轴类零件通常由轴颈、轴头、轴身等部分组成。轴颈是与轴承配合的部分，其尺寸精度和表面质量要求较高，以保证与轴承的良好配合和运转平稳性；轴头是用于安装传动零件（如齿轮、带轮等）的部分，一般有键槽、花键等结构，以实现与传动零件的可靠连接；轴身是连接轴颈和轴头的部分，其形状和尺寸根据轴的受力情况和结构要求设计。

### 1.2 疲劳断裂的机理与影响因素

疲劳断裂是轴类零件在交变载荷作用下，经过一定次数的循环后发生的断裂现象。其断裂过程通常分为裂纹萌生、裂纹扩展和最终断裂三个阶段。在交变载荷作用下，轴类零件表面或内部缺陷处会产生应力集中，当应力超过材料的疲劳极限时，就会在这些部位形成微裂纹，即裂纹萌生阶段。随着循环次数的增加，微裂纹逐渐扩展，形成宏观裂纹，即裂纹扩展阶段。当裂纹扩展到一定程度，剩余截面无法承受载荷时，就会发生最终断裂<sup>[1]</sup>。

影响轴类零件疲劳断裂的因素众多，主要包括载荷因素、材料因素、几何因素和环境因素。载荷因素方面，交变载荷的类型（如对称循环载荷、非对称循环载荷）、载荷频率、载荷幅值等都会影响疲劳寿命。材料因素中，材料的化学成分、组织结构、力学性能（如强度、塑性、韧性）等与疲劳性能密切相关。几何因素方

面，轴类零件的形状尺寸、表面粗糙度、圆角半径、键槽等几何特征会引起应力集中，从而影响疲劳寿命。环境因素如温度、腐蚀介质等会加速材料的疲劳损伤，降低疲劳寿命。

### 1.3 有限元分析的基本原理

有限元分析是一种将连续体离散化为有限个单元，通过对单元进行分析和组合，求解整个连续体问题的数值方法。其基本原理是将复杂的结构或物理问题转化为简单的单元问题，利用数学方法建立单元的刚度方程，然后将所有单元的刚度方程组合成整体的刚度方程，通过求解整体刚度方程得到结构的位移、应力、应变等物理量。在有限元分析中，首先需要对结构进行离散化，将连续体划分为有限个单元，单元之间通过节点连接。然后选择合适的单元类型，如杆单元、梁单元、板单元、实体单元等，根据问题的特点和分析要求确定。接着定义材料的属性和边界条件，材料属性包括弹性模量、泊松比、密度等，边界条件包括约束条件和载荷条件。最后通过求解有限元方程，得到结构的响应结果，如应力分布、变形情况等。

## 2 轴类零件疲劳断裂的有限元分析

### 2.1 轴类零件的有限元模型建立

建立准确的有限元模型是进行轴类零件疲劳断裂分析的基础。首先，根据轴类零件的实际结构和尺寸，利用三维建模软件（如SolidWorks、UG等）创建精确的几何模型。在建模过程中，需要对一些次要特征进行合理简化，以减少计算量，如忽略倒角、小孔等对整体应力分布影响较小的特征。然后，将几何模型导入有限元分析软件（如ANSYS、Abaqus等）中，进行网格划分。网格划分的质量直接影响分析结果的准确性，应根据轴类零件的几何形状和分析要求选择合适的网格类型和网格

密度。对于形状规则的部分，可以采用六面体网格；对于形状复杂的部分，可以采用四面体网格。在应力集中区域，如轴颈与轴身的过渡圆角、键槽等部位，应进行网格细化，以提高计算精度。最后，定义材料的属性和边界条件。材料属性根据轴类零件所用材料的实际性能参数确定，包括弹性模量、泊松比、密度、屈服强度、抗拉强度等。边界条件根据轴类零件的实际工作情况确定，包括约束条件和载荷条件。约束条件模拟轴类零件的支撑方式，如固定支撑、旋转支撑等；载荷条件模拟轴类零件所承受的力、力矩、压力等载荷<sup>[2]</sup>。

## 2.2 疲劳分析的步骤与方法

疲劳分析是在有限元静力分析的基础上进行的。首先，进行静力分析，得到轴类零件在不同载荷作用下的应力分布情况。然后，根据材料的疲劳性能数据，选择合适的疲劳分析方法，如名义应力法、局部应力应变法等。名义应力法是基于材料的S-N曲线（应力-寿命曲线）进行疲劳分析的方法。该方法首先确定轴类零件的危险截面和名义应力，然后根据材料的S-N曲线和载荷谱，计算疲劳损伤和疲劳寿命。局部应力应变法是基于材料的循环应力-应变曲线和应变-寿命曲线进行疲劳分析的方法。该方法考虑了局部塑性变形对疲劳寿命的影响，通过计算危险部位的局部应力应变历程，预测疲劳寿命；在疲劳分析过程中，还需要考虑载荷谱的编制。载荷谱是描述轴类零件在实际工作中所承受载荷随时间变化的规律，可以通过实际测量或理论计算得到。根据载荷谱的类型，疲劳分析可以分为恒幅载荷疲劳分析和变幅载荷疲劳分析。

## 2.3 有限元分析的结果与讨论

通过有限元疲劳分析，可以得到轴类零件的疲劳寿命分布云图、疲劳损伤分布云图等结果。从疲劳寿命分布云图中可以看出，轴类零件的疲劳寿命在不同部位存在较大差异，应力集中区域的疲劳寿命明显低于其他部位。分析结果表明，轴颈与轴身的过渡圆角、键槽等部位是轴类零件的疲劳危险部位，这些部位的应力集中程度较高，容易萌生裂纹并扩展。同时，载荷的大小和类型对疲劳寿命也有显著影响，载荷幅值越大、循环次数越多，疲劳寿命越短。另外，材料性能对疲劳寿命也有重要影响。提高材料的强度和韧性可以降低应力集中程度，延缓裂纹萌生和扩展，从而提高疲劳寿命。通过对比不同材料和不同结构参数下的疲劳分析结果，可以为轴类零件的设计和优化提供依据。

## 3 基于有限元分析的轴类零件优化设计

### 3.1 优化设计的基本原则

基于有限元分析的轴类零件优化设计应遵循以下基本原则：一是满足使用性能要求，确保优化后的轴类零件在强度、刚度、疲劳寿命等方面能够满足实际工作条件的需求；二是提高材料的利用率，通过合理设计轴的结构和尺寸，降低材料的消耗，减轻零件的重量，降低成本；三是考虑制造工艺的可行性，优化设计方案应便于零件的加工和制造，避免出现过于复杂的结构或难以加工的尺寸；四是保证零件的可靠性和安全性，在优化设计过程中要充分考虑各种不确定因素对零件性能的影响，确保零件在长期运行过程中不会发生疲劳断裂等失效形式。

## 3.2 优化设计的策略与方法

优化设计的策略主要包括尺寸优化、形状优化和拓扑优化等。尺寸优化是通过调整轴类零件的尺寸参数（如直径、长度等）来改善零件的性能；形状优化则是改变轴的几何形状，如优化键槽的形状、圆角半径等，以降低应力集中，提高疲劳寿命；拓扑优化是在给定的设计空间内，通过优化材料的分布，得到最优的结构拓扑形式，实现零件的轻量化和高性能化。常用的优化设计方法有数学规划法、遗传算法、模拟退火算法等。数学规划法是一种基于数学模型的优化方法，通过建立目标函数和约束条件，求解最优解；遗传算法是一种模拟生物进化过程的优化算法，具有全局搜索能力强、适用于复杂非线性问题等优点；模拟退火算法则是模拟金属退火过程的优化算法，能够在搜索过程中避免陷入局部最优解<sup>[3]</sup>。

## 3.3 优化设计方案的实施与验证

在确定优化设计方案后，需要进行详细的工程设计和制造。根据优化后的尺寸和形状参数，重新绘制轴类零件的工程图纸，并制定相应的制造工艺规程。在制造过程中，要严格控制加工精度和表面质量，确保零件的质量符合设计要求。优化设计方案实施后，还需要进行验证试验，以检验优化效果是否达到预期目标。验证试验可以通过实际运行试验或模拟试验的方式进行，对比优化前后轴类零件的疲劳寿命、应力应变分布等性能指标，评估优化设计的有效性和可靠性。如果验证结果不理想，需要对优化方案进行调整和改进，直至满足设计要求。

## 4 轴类零件疲劳断裂的预防措施与维护建议

### 4.1 预防措施

#### 4.1.1 优化设计与制造工艺的控制

在轴类零件的设计阶段，应充分考虑疲劳断裂问题，采用合理的结构设计和尺寸参数，减少应力集中。

例如，优化轴颈与轴身的过渡圆角、合理设计键槽的形状和尺寸等。在制造工艺方面，应严格控制加工精度和表面质量，避免表面缺陷和加工硬化等问题的产生。采用先进的加工工艺，如精密锻造、滚压加工等，可以提高零件的表面质量和疲劳性能。

#### 4.1.2 材料的选择与热处理工艺的改进

选择合适的材料是提高轴类零件疲劳性能的关键。应根据零件的工作条件和性能要求，选择具有高强度、高韧性、良好疲劳性能的材料。同时，通过合理的热处理工艺，如淬火、回火、调质处理等，可以改善材料的组织结构和力学性能，提高疲劳寿命。例如，对轴类零件进行表面淬火处理，可以提高表面硬度和耐磨性，同时保留心部的韧性，从而提高抗疲劳性能<sup>[4]</sup>。

#### 4.1.3 定期检查与维护制度的建立

建立定期检查与维护制度，对轴类零件进行定期检查和维护，及时发现和处理潜在的疲劳裂纹和损伤。检查内容包括零件的外观、尺寸精度、表面质量等，可以采用无损检测方法，如超声波检测、磁粉检测、涡流检测等，对零件内部缺陷进行检测。根据检查结果，制定相应的维护计划，如更换零件、进行修复处理等。

### 4.2 维护建议

#### 4.2.1 轴类零件的润滑与保养

良好的润滑对于轴类零件而言至关重要，它是减少零件磨损、降低疲劳损伤的关键举措。轴类零件的工作条件复杂多样，不同的转速、载荷和工作环境对润滑有着不同要求。例如，高速旋转的轴类零件，其线速度高，摩擦生热快，若润滑不当，极易导致温度过高，加速零件磨损和疲劳破坏。此时，油润滑或脂润滑是较为合适的选择，油润滑散热效果好，脂润滑密封性好。并且要定期更换润滑剂，因为随着使用时间的增长，润滑剂会变质、失效，无法起到良好的润滑作用。同时，要保持轴类零件及其周围环境的清洁，灰尘、杂质等一旦进入润滑系统，会像磨料一样加剧零件的磨损，影响润滑性能，进而缩短轴类零件的使用寿命，所以定期清理和检查润滑系统必不可少。

#### 4.2.2 疲劳裂纹的检测与修复方法

轴类零件在长期运行过程中，由于交变载荷的作用，容易产生疲劳裂纹。一旦发现存在疲劳裂纹，必须及时采取修复措施，否则裂纹会不断扩展，最终导致零件断裂，引发严重事故。对于较小的裂纹，打磨是一种

简单有效的修复方法，通过打磨去除裂纹尖端的应力集中，防止裂纹进一步扩展。补焊则适用于有一定深度和宽度的裂纹，但要注意选择合适的焊材和焊接工艺，避免产生新的缺陷。而对于较大的裂纹或严重损伤的零件，更换是更为安全可靠的选择。在修复过程中，必须严格按照修复工艺要求操作，确保修复质量。修复完成后，要对零件进行再次检测，如采用无损检测方法，确认裂纹已完全消除，保证零件的使用安全。

#### 4.2.3 长期运行中的性能监测与预警机制

建立轴类零件长期运行中的性能监测与预警机制是保障设备安全运行的重要手段。通过在轴类零件上安装传感器等设备，能够实时监测其振动、温度、应力等关键参数。振动参数可以反映轴的平衡状态和运转平稳性，异常振动往往预示着轴存在故障隐患；温度变化能体现轴的摩擦和散热情况，温度过高可能是润滑不良或过载的信号；应力监测则有助于了解轴的受力状态，及时发现应力集中区域。当监测参数超过设定阈值时，系统应立即发出预警信号，提醒工作人员进行检查和处理。工作人员可根据预警信息，迅速定位故障部位，采取相应的维修措施，避免疲劳断裂等事故的发生，从而保障设备的正常运行和生产的安全稳定。

### 结束语

本文通过对轴类零件疲劳断裂的有限元分析及其优化设计的研究，揭示了轴类零件在交变载荷作用下的疲劳断裂机理和影响因素，为轴类零件的优化设计提供了理论依据。同时，提出的预防措施与维护建议，对于提高轴类零件的疲劳寿命和运行可靠性具有重要意义。未来，随着有限元分析技术和优化设计方法的不断进步，轴类零件的设计将更加精准、高效，为机械装备的安全运行提供有力保障。

### 参考文献

- [1]李伟.机械零件强度设计优化方法研究[J].机械设计,2022,34(5):78-84.
- [2]张华.有限元分析在机械零件设计中的应用研究[J].工程技术,2023,29(7):55-61.
- [3]夏冬梅,胡波,金松.电气铁舾件及常用设备基座精细建模研究[J].广东造船,2022,41(01):88-90+101.
- [4]王雁飞.基于增材制造技术的机械零部件设计与性能研究[J].冶金与材料,2025,45(02):82-84.