说 明 书

# 一种考虑装配不确定性的齿轮接触疲劳强度可靠性仿真评估方法

# 所属技术领域

本发明属于机械产品可靠性设计分析领域，特别涉及一种考虑装配不确定性的齿轮接触疲劳强度可靠性仿真评估方法。

# 背景技术

由于齿轮具有结构紧凑、承载能力强和动力传输能力大的优点，目前齿轮已成为航空航天、汽车、铁路、船舶和风力发电等各工业领域机械传动系统的重要组成部分。然而，在实际工程应用中，齿面接触疲劳问题已成为严重影响齿轮使用寿命和运行可靠性的关键失效模式。齿面接触疲劳失效会导致点蚀、剥落或齿面断裂等问题的发生，进而会降低齿轮的传动效率。因此，对齿轮接触疲劳强度进行有效的可靠性评估对于指导齿轮的预测性维修和降低机械系统的运行成本至关重要。

受到材料内部缺陷的不均匀分布、制造工艺的不稳定性、工况环境的波动和人因误差等各种因素的影响，齿轮的材料特性、工况载荷和几何尺寸等参数往往表现出随机性的特征，使得理论上满足接触疲劳强度要求的齿轮副设计在工程应用中可能会由于参数偏差而变得不可行。一般地，齿轮接触疲劳强度的可靠性分析是指通过考虑各种随机因素的影响，对齿轮的接触应力是否满足规定的允许接触应力要求进行概率分析。因此，必须高度重视随机变量的不确定性。然而，现有的可靠性仿真评估方法并未充分重视由于装配误差导致的齿轮装配尺寸的不确定性，从而导致缺乏对影响齿轮可靠性的不确定性因素的全面考虑。一般来说，齿轮装配误差是由多种因素造成的，如支撑轴轴肩的加工误差、轴承座在支撑轴上的定位误差以及安装人员的操作习惯等。因此，为提升齿轮接触疲劳强度可靠性仿真评估的精度水平，需充分重视齿轮的装配不确定性。

# 发明内容

为提升齿轮接触疲劳可靠性评估的精度水平，充分考虑齿轮实际运行过程中出现的装配误差，本发明提供一种考虑装配不确定性的齿轮接触疲劳强度可靠性仿真评估方法。该方法能够在考虑包括装配不确定性在内的多源不确定性下，开展齿轮的接触疲劳强度可靠性仿真，避免了成本高昂的实物试验，可用于指导齿轮的接触疲劳强度可靠性设计，具有较强的实际应用价值。

本发明提出的一种考虑装配不确定性的齿轮接触疲劳强度可靠性仿真评估方法，包括以下步骤：

**步骤1：**基于齿轮的齿面最大接触应力和许用接触应力，建立表征齿轮接触疲劳强度的功能函数，进而建立表征齿轮接触疲劳强度的可靠性模型；

进一步地，所述表征齿轮接触疲劳强度的功能函数如式（1）所示：



其中， 指齿面的最大接触应力,  指许用接触应力，是指影响齿轮功能函数的*n*维相互独立的随机变量。当时齿轮处于安全状态，当时齿轮处于失效状态。

进一步地，所述表征齿轮接触疲劳强度的可靠性模型如式（2）所示：



其中，表示齿轮的接触疲劳强度可靠度，表示功能函数大于零的概率，表示功能函数不大于零的概率，表示随机变量的联合概率密度函数，表示概率分布参数向量。

**步骤2：**建立含有装配结构的齿轮副参数化模型，开展网格划分，确定载荷条件和约束条件，建立齿轮副的有限元模型；

具体地，齿轮副装配参数的参数化是指齿轮副中心距和端面偏移量两个装配尺寸的参数化，以体现齿轮副的装配不确定性。

**步骤3：**梳理齿轮副相关的随机变量，主要包括载荷参数、材料参数及装配参数，并建立随机变量的概率不确定性表征模型；

进一步地，共计考虑齿轮副相关的7个随机变量。所考虑的载荷参数指齿轮副的负载转矩*M*，材料参数指齿轮材料的杨氏模量YM、泊松比PR、密度D和接触疲劳强度（即许用接触应力ACS），装配参数指主动轮与从动轮的中心距CD和两者间的端面偏移量FO。

进一步地，采用正态概率分布量化表征随机变量的不确定性。具体地，对于载荷参数和材料参数，以其名义取值作为相应正态概率分布的均值，以0.05的变异系数确定相应正态分布的标准差。对于齿轮的中心距，以理论中心距作为相应正态分布的均值。同时，基于正态分布的6sigma原则，根据齿轮精度等级对应的中心距偏差确定中心距参数的标准差。对于齿轮的端面偏移量，以设计端面偏移量0作为相应正态概率分布的均值，根据工程经验确定相应正态分布的标准差。

**步骤4：**基于随机变量的概率不确定性表征模型进行随机抽样，生成一个不少于500组随机样本的样本池，并开展各组随机样本下的有限元仿真以提取各组样本下的最大接触应力；

具体地，每组随机样本由负载转矩、杨氏模量、泊松比、密度、许用接触应力、中心距和端面偏移量七个参数的样本点构成，第*i*组随机样本可表示为。

**步骤5：**基于蒙特卡洛仿真评估齿轮的接触疲劳强度可靠度。

具体地，考虑到式（2）所示的可靠性模型的直接求解相对复杂，故采用蒙特卡洛仿真的方法评估齿轮的接触疲劳可靠度，如式（3）所示。



其中，表示样本池中的第*i*个样本，为功能函数的指示函数，当时，否则。

与现有技术相比，本发明的优点在于：

本发明提供的一种考虑装配不确定性的齿轮接触疲劳强度可靠性评估方法，其在考虑材料参数和载荷参数不确定性的同时，充分考虑了由于装配误差带来的装配不确定性，对影响齿轮可靠性的不确定性因素的考虑更加全面。同时，采用仿真的方式避免了成本高昂的实物试验，提供了一种有效的考虑多源不确定性的齿轮接触疲劳强度可靠性仿真评估方法。

# 附图说明

图1为本发明一种考虑装配不确定性的齿轮接触疲劳强度可靠性仿真评估方法的流程图；

图2为本发明实施案例中圆柱齿轮副的三维装配模型；

图3为本发明实施案例中圆柱齿轮副中心距误差的示意图；

图4为本发明实施案例中圆柱齿轮副端面偏移误差的示意图；

图5为本发明实施案例中圆柱齿轮副的网格划分结果；

图6为本发明实施案例中圆柱齿轮副的载荷和约束条件；

# 具体实施方式

参照附图，进一步说明本发明。

**步骤1：**基于齿轮的齿面最大接触应力和许用接触应力，建立表征齿轮接触疲劳强度的功能函数，进而建立表征齿轮接触疲劳强度的可靠性模型；

进一步地，所述表征齿轮接触疲劳强度的功能函数如式（4）所示：



其中， 指齿面的最大接触应力,  指许用接触应力，是指影响齿轮功能函数的*n*维相互独立的随机变量。当时齿轮处于安全状态，当时齿轮处于失效状态。

进一步地，所述表征齿轮接触疲劳强度的可靠性模型如式（5）所示：



其中，表示齿轮的接触疲劳可靠度，表示功能函数大于零的概率，表示功能函数不大于零的概率，表示随机变量的联合概率密度函数，表示概率分布参数向量。

**步骤2：**建立含有装配结构的齿轮副参数化模型，开展网格划分，确定载荷条件和约束条件，建立齿轮副的有限元模型；

具体地，含有装配结构的齿轮副参数化模型中的参数化，具体指齿轮副中心距和端面偏移量两个装配尺寸的参数化，以体现齿轮副的装配不确定性。其中，齿轮副的装配不确定性是指实际安装位置与理论设计位置间的差异的随机性。中心距的不确定性是指齿轮副在比理论中心距更小或更大的中心距下工作，而端面偏移本质上是轴向错位，端面偏移量的不确定性是指主动齿轮的中心面与从动齿轮中心面沿齿宽方向的轴向距离的不确定性。

**步骤3：**梳理齿轮副相关的随机变量，主要包括载荷参数、材料参数及装配尺寸参数，并建立随机变量的概率不确定性表征模型；

进一步地，共计考虑齿轮副相关的7个随机变量。所考虑的载荷参数指齿轮副的负载转矩*M*，材料参数指齿轮材料的杨氏模量YM、泊松比PR、密度D和接触疲劳强度（即许用接触应力ACS），装配参数指主动轮与从动轮的中心距CD和两者间的端面偏移量FO。

进一步地，采用正态概率分布量化表征随机变量的不确定性。具体地，对于载荷参数和材料参数，以其名义取值作为相应正态概率分布的均值，以0.05的变异系数确定相应正态分布的标准差。

**步骤4：**基于随机变量的概率不确定性表征模型进行随机抽样，生成一个含有不少于500组随机样本的样本池，并开展各组随机样本下的有限元仿真以提取各组样本下的最大接触应力；

具体地，每组随机样本由负载转矩、杨氏模量、泊松比、密度、许用接触应力、中心距和端面偏移量七个参数的样本点构成，第*i*组随机样本可表示为。

**步骤5：**基于蒙特卡洛仿真评估齿轮的接触疲劳强度可靠度。

具体地，考虑到式（2）所示的可靠性模型的求解相对复杂，故采用蒙特卡洛仿真的方法评估齿轮的接触疲劳强度可靠度，如式（6）所示。



其中，表示样本池中的第*i*个样本，为功能函数的指示函数，当时，否则。

具体实施案例：

以一对圆柱齿轮副作为分析对象，基于图1所示的方法流程，应用本发明提出的一种考虑装配不确定性的齿轮接触疲劳强度可靠性仿真评估方法开展该对齿轮副的可靠性评估。本实施案例主要包括以下内容：

（1）齿轮接触疲劳强度功能函数及可靠性模型的建立

基于齿轮的齿面最大接触应力和许用接触应力，建立表征齿轮接触疲劳强度的功能函数，进而建立表征齿轮接触疲劳强度的可靠性模型。具体地，所述表征齿轮接触疲劳强度的功能函数如式（7）所示：



其中， 指齿面的最大接触应力,  指许用接触应力，是指影响齿轮功能函数的*n*维相互独立的随机变量。当时齿轮处于安全状态，当时齿轮处于失效状态。

同时，所述表征齿轮接触疲劳强度的可靠性模型如式（8）所示：



其中，表示齿轮的接触疲劳可靠度，表示功能函数大于零的概率，表示功能函数不大于零的概率，表示随机变量的联合概率密度函数，表示概率分布参数矩阵。

（2）齿轮副参数化三维装配模型及有限元模型的建立

1）齿轮零件的三维建模。根据表1所示的齿轮副的设计参数，基于Solidworks软件建立齿轮的三维模型如图2所示。

2）齿轮副的参数化三维装配模型。在使用Solidworks软件开展齿轮副的装配时，对齿轮副中的装配参数即中心距和端面偏移量进行参数化建模以表征齿轮副的装配不确定性。具体地，齿轮副的装配不确定性是指实际安装位置与理论设计位置间的偏差的随机性。其中，中心距的不确定性是指齿轮副在比理论中心距更小或更大的中心距下工作，中心距误差示意图如图3所示。端面偏移本质上是轴向错位，齿面偏移量的不确定性是指主动齿轮的中心面与从动齿轮中心面沿齿宽方向的轴向距离的随机性，考虑到本实施案例的研究对象为等齿宽圆柱齿轮副，故端面偏移误差可表示为如图4所示。

表 1 齿轮副的设计参数

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | 小齿轮 | 大齿轮 |
| 齿数 | 22 | 34 |
| 模数 (mm) | 2 | 2 |
| 压力角 (°) | 20 | 20 |
| 齿宽 (mm) | 30 | 30 |
| 精度等级 | IT6 | |

3）网格划分。采用扫掠法对圆柱齿轮副进行网格划分，并对啮合齿面进行局部网格细化以提高计算精度，网格划分结果如图5所示。

4）载荷及约束条件的加载。对从动大齿轮的内圆柱面进行全约束，允许主动小齿轮的周向旋转，并约束其轴向运动和径向平移的自由度，并在小齿轮上施加力矩作为驱动力矩。此外，对啮合齿的齿面施加接触约束，确保它们在整个运动过程中保持一致和适当的接触条件。该对圆柱齿轮副的载荷及约束条件如图6所示。

（3）圆柱齿轮副随机变量的概率不确定性建模

具体地，共计考虑齿轮副相关的三类不确定性参数，具体包括载荷参数、材料参数和装配参数。所考虑的载荷参数指齿轮副的负载转矩*M*，材料参数指齿轮材料的杨氏模量YM、泊松比PR、密度D和接触疲劳强度（即许用接触应力ACS），装配参数指主动轮与从动轮的中心距CD和两者间的端面偏移量FO。

进一步地，采用正态概率分布量化表征随机变量的不确定性。具体地，对于载荷参数和材料参数，以其名义取值作为相应正态概率分布的均值，以0.05的变异系数确定相应正态分布的标准差。对于装配尺寸参数中的中心距参数，以理论中心距作为相应正态概率分布的均值。同时，根据齿轮的精度等级和理论中心距确定相对应的中心距极限偏差，基于中心距的极限偏差确定中心距的取值上限和取值下限，根据正态分布的6sigma原则确定中心距参数所对应正态分布的标准差，即。对于装配参数中的端面偏移量，以设计偏移量0作为相应正态概率分布的均值，基于工程经验确定相应正态分布的标准差。所建立的七个随机变量的不确定性表征模型如表 2所示。

表 2 齿轮副随机变量的不确定性表征模型

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 随机变量 | 单位 | 概率分布 | 均值 | 标准差 |
| 材料参数 | 杨氏模量 | GPa | 正态分布 | 200 | 10 |
| 泊松比 | / | 正态分布 | 0.3 | 0.015 |
| 密度 | kg/m3 | 正态分布 | 7850 | 392.5 |
| 许用接触应力 | MPa | 正态分布 | 175 | 8.75 |
| 装配参数 | 中心距 | mm | 正态分布 | 56 | 0.0077 |
| 端面偏移量 | mm | 正态分布 | 0 | 0.008 |
| 载荷参数 | 转矩 | N·m | 正态分布 | 60 | 3 |

（4）基于随机变量的概率不确定性表征模型进行随机抽样，生成一个含有500组随机样本的样本池，并开展各组随机样本下的有限元仿真以提取各组样本下的最大接触应力；

具体地，每组随机样本由负载转矩、杨氏模量、泊松比、密度、许用接触应力、中心距和端面偏移量七个参数的样本点构成，第*i*组随机样本可表示为。

（5）基于蒙特卡洛仿真的齿轮接触疲劳强度可靠度评估

具体地，考虑到式（8）所示的可靠性模型的直接求解相对复杂，故采用蒙特卡洛仿真的方法评估齿轮的接触疲劳强度可靠度，如式（9）所示。



其中，表示样本池中的第*i*个样本，为功能函数的指示函数，当时，否则。

经计算，当同时考虑材料参数、载荷参数和装配参数所对应七个随机变量的不确定性时，齿轮的接触疲劳强度可靠度为0.821，而仅考虑材料参数和载荷参数所对应五个随机变量的不确定性时，齿轮的接触疲劳强度为0.913。上述可靠性评估结果表明，忽视装配不确定性会显著地影响齿轮接触疲劳强度可靠性的评估结果。因此，对于齿轮的可靠性评估，在考虑材料参数和载荷参数的不确定性的同时，也需充分重视装配参数的不确定性，以更准确地指导齿轮的可靠性设计与优化。