

基于 PRO/E 与 LS-DYNA 的齿轮副动态接触分析*

李顺德,冯广斌,孙华刚

(军械工程学院 军械技术研究所,石家庄 050000)

摘要:利用 PRO/E 软件构建了精确啮合齿轮副模型,采用动力学有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 分析了齿轮动态接触问题,并使用 LS-PREPOST 后处理器观察了 LS-DYNA 的计算结果.结果表明,计算结果清晰地反映了齿轮在不同啮合位置时齿面的接触应力、齿根应力、应变等的变化情况.该方法克服了二维接触与静态接触分析的缺点与不足,可为三维齿轮动力学接触分析提供新的方法.

关键词:PRO/E;齿轮;动态接触;啮合;LS-DYNA

中图分类号:TH132.41

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2009)10-0068-03

对于齿轮副的啮合接触,传统的理论分析方法建立在弹性力学基础之上,其接触强度计算以两平行圆柱体对压的赫兹公式为基础^[1].近年来,由于有限元法具有快速、准确、可靠、灵活的优点,故其已在国内外的齿轮设计和计算中得到了广泛应用.因此,利用有限元法处理齿轮接触的非线性问题是进行齿轮分析的核心和关键^[2].

目前,大多数有限元法基于二维接触或三维静态接触.虽然通过齿轮静态接触分析可求出轮齿处于不同啮合位置的接触压力、应力及其分布,但需要进行多次重复计算,且不能完全反映齿轮传动过程的动态特性,因此具有一定的局限性;而采用 LS-DYNA 动态分析则可以在一次求解过程中,计算齿轮在不同啮合位置处的应力及其变化趋势.

为此,本研究主要应用 PRO/E 软件进行齿轮的精确建模和啮合齿轮副构建,并通过软件间的无缝接口,将已建好的齿轮啮合模型导入 LS-DYNA 中,从而建立有限元模型,同时采用动力学有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 从动力学角度对齿轮动态接触问题进行仿真分析.

1 有限元理论分析^[3]

齿轮的瞬时接触区形状与压力分布是典型的接触非线性问题,因此,对圆柱齿轮进行有限元分析时,首先要对齿轮系统力学模型进行离散化处理.

将 2 个弹性接触体 A_1 、 A_2 分离成 2 个独立物体,根据弹性有限元理论,可写出他们各自的有限元基本方程:

$$\begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R_1 \\ R_2 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中: $[k_1]$ 、 $[k_2]$ 为弹性体 A_1 、 A_2 的刚度矩阵; $\{u_1\}$ 、 $\{u_2\}$ 为弹性体 A_1 、 A_2 的节点位移向量; $\{R_1\}$ 、 $\{R_2\}$ 为接触内力; $\{p_1\}$ 、 $\{p_2\}$ 为外载荷.其中 $[k]$ 、 $\{p\}$ 已知,并设 A_1 、 A_2 在接触面上的接触对分别为 i^1 、 i^2 ($i=1, 2, \dots, n$).由于刚度阵是非奇异的,故可求得接触对的柔度方程:

$$\{u_i^1\} = \sum_{j=1}^n [C_{ij}^1] \{R_j^1\} + \sum_{k=1}^n [C_{ik}^1] \{p_k^1\} \quad (2)$$

$$\{u_i^2\} = \sum_{j=1}^n [C_{ij}^2] \{R_j^2\} + \sum_{k=1}^n [C_{ik}^2] \{p_k^2\}$$

式中: i, j, k 为节点号; $\{R_j^1\}$ 为接触点 j 的接触内力; $\{p_k^1\}$ 为节点 k 的外力; $[C_{ik}^1]$ 为弹性体上由 j 点的单位力引发的接触点 i 的柔度值; $\sum_{k=1}^n [C_{ik}^1] \{p_k^1\}$ 为弹性体上由外力引发的接触点 i 的位移.

根据接触条件,可得接触对的接触边界

$$\{u_i^2\} = \{u_i^1\} + \{0\} \quad (3)$$

将式(2)代入式(3),并满足

$$\{R_j^2\} = -\{R_j^1\} = \{R_j\}$$

整理可得

$$\sum_{i=1}^n [C_{ij}^1] \{R_j\} + \sum_{i=1}^n [C_{ij}^2] \{R_j\} = \sum_{i=1}^n [C_{ik}^1] \{p_k^1\} - \sum_{i=1}^n [C_{ik}^2] \{p_k^2\} + \{0\} \quad (4)$$

式中:自由边界 $R_j=0$.

当在 A_1 上施加外部转矩 T_p 时,则

$$\sum_{i=1}^n R_i r_i = T_p \quad (5)$$

外载位移与接触节点的转角关系为

* 收稿日期:2009-08-25

作者简介:李顺德(1983—),男,河北保定人,硕士研究生,主要从事齿轮系统动态仿真研究.

$$k = \begin{pmatrix} i \\ r_j \end{pmatrix} n_i \quad (6)$$

式中: i 为接触节点的转动角; n_i 为接触节点的单位法矢量。

将式(4)~(6)合并简化可得到接触方程

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1j} & \dots & C_{1n} & r_1^1 & r_1^2 \\ \dots & \dots \\ C_{i1} & C_{i2} & \dots & C_{ij} & \dots & C_{in} & r_i^1 & r_i^2 \\ \dots & \dots \\ C_{n1} & C_{n2} & \dots & C_{ni} & \dots & C_{nn} & r_n^1 & r_n^2 \\ r_1^1 & r_2^1 & \dots & r_j^1 & \dots & r_n^1 & 0 & 0 \\ r_1^2 & r_2^2 & \dots & r_j^2 & \dots & r_n^2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} R_1 \\ \dots \\ R_i \\ \dots \\ R_n \\ 1 \\ 2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 2 \\ 1 \\ \dots \\ 2 \\ i \\ \dots \\ 2 \\ n \\ T_p^1 \\ T_p^2 \end{Bmatrix}$$

用对称方程组的 Cholesky 分解法进行求解,次迭代求解时根据接触状态剔除最大负接触内力的接触点对,形成新的柔度子矩阵,循环迭代求解,直到所有接触点都满足接触条件式以及所有接触内力大于或等于为止。

2 有限元模型的建立

由于接触问题是一种高度非线性行为,故建立合理的模型非常重要,且有限元计算结果的好坏在很大程度上取决于所建立的有限元模型。但 ANSYS 却不便对复杂曲面进行建模。

随着 PRO/E 与 ANSYS 接口技术的不断成熟,可以利用 PRO/E 软件进行齿轮的快速、简洁建模,以及构建齿轮副,然后将建好模型导入 ANSYS 软件,从而可节省大量的时间、精力^[4]。具体步骤可见文献[5]。

该对齿轮材料采用 20CrMoH,材料参数为:弹性模量为 2.1×10^8 kPa (Mn/mm²),泊松比为 0.3,密度为 7.84×10^{-6} kg/mm³。以上材料参数单位是 ANSYS 中的计算单位。

考虑到齿轮结构较复杂,对计算机性能要求较高,故可对齿轮进行智能网格(SmartSize)划分。划分中,可利用实体模型线段长度、曲率进行自行最佳网格化,同时在应力集中的地方使网格加密 1 倍,最后再用 SHELL163 单元选择刚体材料在齿轮内圈划分网格,并将其定义为刚性体。对于 SHELL163 薄壳刚性体单元,设置材料属性时需要设置其平动和旋转约束参数。这里将 2 个啮合齿轮均设为 TranslationalConstraint (约束 X, Y, Z 位移)和 RotationalConstraint (约束 X, Y 轴向上的旋转)。划分完成后的啮合齿轮副接触分析有限元模型如图 1 所示。

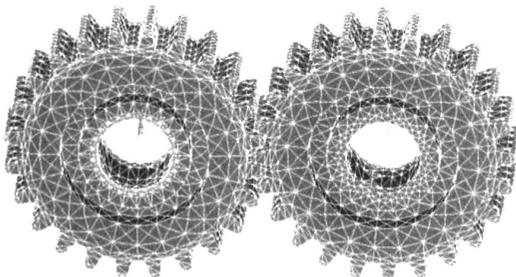


图 1 划分网格后有限元模型

3 定义 PART、接触对

LS-DYNA 中主要有 3 种基本接触类型,可求解各种柔体对柔体、柔体对刚体、刚体对刚体等接触问题。只要定义可能接触表面、接触类型以及与接触有关的一些参数,在程序计算中就能保证接触界面不发生穿透,并在接触界面相对运动时考虑到摩擦力的作用^[6]。

对于齿轮啮合接触情况类似于梁间的接触形式,由于齿轮啮合的复杂性,并不能预先知道其确切位置,因此可根据对以上接触类型适合的接触情况分析以及在对齿轮啮合动态接触情况探索的基础上,在齿轮啮合传动的接触定义中,选择面面接触中比较常用的自动接触方式(ASTS)来定义接触对。

同时,设置静摩擦系数为 0.3,动摩擦系数为 0.25,其他参数均采用默认设置。然后接触面和目标面分别选择主动齿轮和被动齿轮(PART号分别为 1、2)

4 定义局部加载坐标系、施加负载

对啮合齿轮副的各自轴心分别建立局部坐标系 11、12。因为在齿轮啮合接触分析时,如果不定义局部加载坐标系,施加的约束和负载将在全局坐标系中作用,从而导致分析错误,或无法进行分析。在定义好局部坐标系后,根据齿轮啮合受载情况,对齿轮内圈刚体施加受驱动转矩、受阻转矩,如图 2、图 3 所示。

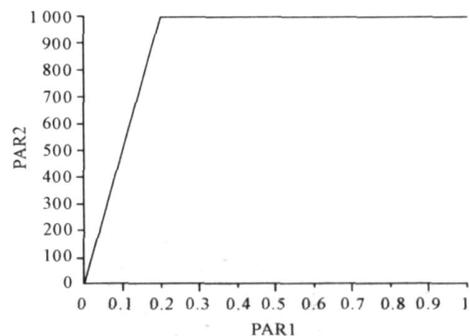


图 2 主动轮驱动转矩

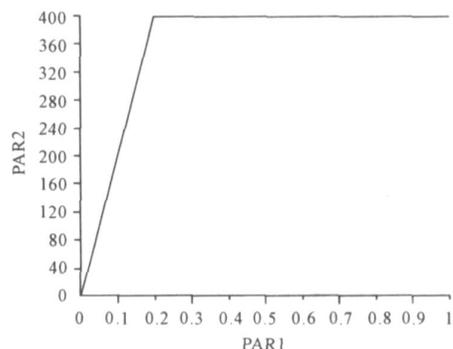


图 3 从动轮受阻转矩

5 分析求解

当建立好有限元模型(即完成单元、实常数、材料性质以及有限元网格划分),完成接触界面定义、约束、载荷和初始条件设定后,还需要设置一些求解控制参数。其基本内容包括以下几个方面:计算时间控制(包括设置终止时间、控制时间步、子循环等)、输出文件控制(二进制输入文件、格式化输出文件、积分点控制、输出频率控制等)、质量缩放、子循环、缺省控制(CPU控制、沙漏控制和体积黏性控制)。

本文中,计算时间设置为 $0.5 \mu\text{s}$,结果输出文件的输出步数设置为1 000~10 000步,采用缺省值;时间历程文件的输出步数一般采用默认值。

6 结果分析

动态仿真结束后,使用LS-PREPOST后处理器来观察LS-DYNA的计算结果。LS-PREPOST是LSTC公司专门为LS-DYNA求解器开发的后处理器,他能提供快速的后处理功能,如计算结果的图形、动画显示与输出、结果数据的图示与分析等。可方便地查看各节点、单元在任何时间的应力、应变、位移、速度和加速度结果。此外,还可以曲线的形式得到模拟结果,使模拟结果更加直观。

图4、图5为某时刻齿轮单、双齿接触应力云图,图6、图7为主、从动齿轮齿面应力云图。由图可知,实际得到的动态应力分布与力学分析一致。应力比较大的地方主要集中在接触处和齿根附近,而且应力影响区只在接触齿对1、2个齿附近;对于远离接触处,应力为零,这一点也符合弹性力学中的圣维南定律。

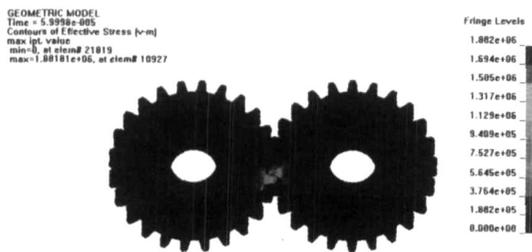


图4 单对齿啮合应力云图

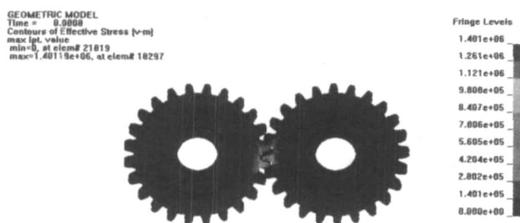


图5 双齿啮合应力云图



图6 主动齿轮应力云图



图7 从动齿轮应力云图

图8为常啮合齿轮齿根有效应力随时间的变化曲线,从曲线可以直观地看出,齿根有效应力随着齿轮的运转存在脉冲性,并且由于齿侧间隙等因素的存在,导致应力值出现了波动,这对齿轮的破坏是非常严重的。同时分析结果还清楚地显示出了轮齿从频繁啮合冲击到稳定啮合传动的变化过程,由此可以看出分析结果更接近于真实啮合状况。

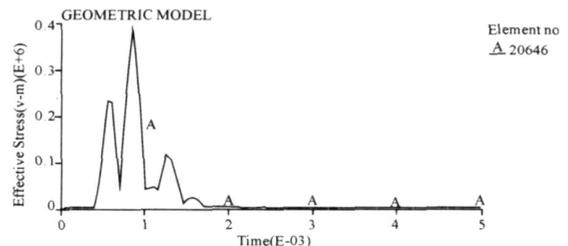


图8 齿根某单元有效应力随时间变化曲线

7 结束语

详细介绍了基于PRO/E和ANSYS/LS-DYNA软件的齿轮副传动动态接触强度分析过程,提出了分析过程中的注意事项,克服了二维接触与静态接触分析的缺点与不足,为以后三维齿轮动力学接触分析提供了新的方法。

通过采用PRO/E参数化特征建模方法,可得到齿轮副三维精确模型;采用ANSYS/LS-DYNA软件可对齿轮副三维动力学进行实时接触仿真分析;通过LS-PREPOST后处理器可以方便、快捷、直观地观察三维接触有限元齿轮轮齿啮合过程中齿面接触强度、变形以及压力分布情况。

利用有限元和相关有限元分析软件能有效地对直齿轮进行模拟仿真,从而可减少实验费用,为齿轮的动态设计、优化设计和可靠性设计打下新的基础。(下转第86页)

修策略对比如表 1 所示. 显然, 在平均寿命时对产品进行维修的故障风险较大, 因此对于具有安全性或任务性故障后果的产品来说是不合适的.

表 1 维修策略比较

| 维修策略 | 策略一 | 策略二 |
|--------|-----|-------|
| 检查间隔/h | 408 | 850 |
| 故障风险 | 0.1 | 0.941 |

2) 等风险决策

采用等检查间隔的方式对产品进行检查, 检查间隔 $t = 40$ h, 根据式(8)可分别画出产品在不同风险度水平 $r = 0.05, 0.1, 0.2$ 下, 综合退化量与工作时间的关系曲线, 并以此为依据开展维修决策: 若 t 时刻检查得到产品的综合退化量处在规定风险水平曲线以下, 表明产品故障风险符合要求, 可以继续运行; 若检查得到的综合退化量处于规定曲线之上, 则表明此刻产品运行风险超过规定要求, 应立即进行维修(如图 2 所示).

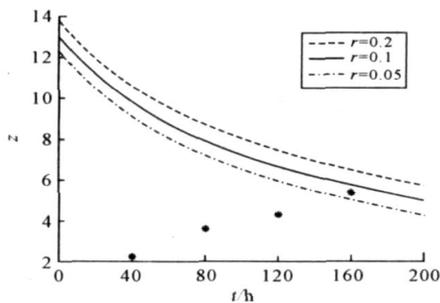


图 2 等检查间隔故障风险决策

3 结论

本文中运用比例风险模型建立了系统状态数据与故

障率的关系, 并利用故障率进行了基于故障风险的状态检查决策. 算例分析表明, 该决策模型能够反映机械产品故障率随工作时间及退化程度增加而增大的实际情况. 对于已经工作到某一时刻的产品, 通过检查确定退化程度, 能够确定其在要求的故障风险下的维修间隔期; 同时, 在采用等检查间隔的情况下, 可以进行动态的等故障风险维修决策. 模型可以用于具有安全性或任务性故障后果的机械产品的维修决策.

参考文献:

- [1] 张耀辉, 郭金茂, 徐宗昌. 基于故障风险的状态维修检测间隔期的确定[J]. 中国机械工程, 2008, 19(5): 555 - 558.
- [2] 王辉, 范秀敏, 严隽琪. 考虑机会维修的等风险预防性维修策略优化[J]. 机械设计与研究, 2003, 19(3): 51 - 55.
- [3] 陈旭华. 基于多状态信息的维修模型及其应用研究[D]. 石家庄: 军械工程学院, 2008.
- [4] 张秀斌, 王广伟, 郭波. 应用比例故障模型进行基于状态的视情维修决策[J]. 可靠性与环境适应性理论研究, 2002(4): 19 - 21.
- [5] Huitian Lu, William J. Kolarik, et al. Real-Time Performance Reliability Prediction[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2001(50): 353 - 357.
- [6] Susan Lu, Yu-Chen Tu, Huitian Lu. Predictive Condition-based Maintenance for Continuously Deteriorating Systems[J]. Quality and Reliability Engineering International, 2007(23): 71 - 81.
- [7] 曹晋华, 程侃. 可行性数学引论(修订版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

(上接第 70 页)

参考文献:

- [1] Johnson KL. 接触力学[M]. 徐秉业, 译. 北京: 高等教育出版社, 1992.
- [2] 杨生华. 有限元法在计算根应力和轮齿变形中的应用[J]. 煤矿机电, 1998(6): 8 - 10.
- [3] 庞晓琛. 基于 ANSYS 的齿轮接触问题研究[J]. 起重运输机械, 2008(6): 23 - 27.
- [4] 杨显宏. Pro/E 在机械结构分析中的应用[J]. 兵工自动化, 2006(2): 40 - 41.
- [5] 朱新涛. PRO/ENGINEER Wildfire 3.0 中文版在工程中的应用: 汽车变速器设计 - 应用设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [6] 何涛, 杨竞, 金鑫, 等. ANSYS 10.0/LS-DYNA 非线性有限元分析实例指导教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.