

文章编号: 1673-9469 (2018) 01-0099-04

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.01.022

## 基于 ANSYSWorkbench 等基圆锥齿轮静力学分析

何昕<sup>1,2</sup>, 曹雪梅<sup>1</sup>, 翟保尊<sup>2</sup>, 杨博会<sup>1</sup>

(1.河南科技大学机电工程学院, 河南洛阳 471003; 2.黄河水利职业技术学院机械工程学院, 河南开封 475000)

**摘要:** 使用有限元前处理软件 HyperMesh 对锥齿轮进行网格划分; 通过 ANSYSWorkbench 有限元软件对齿轮进行静力学分析, 得到了在载荷作用之下齿轮副啮合时的静态力学特性, 以及齿轮副啮合过程中的齿面接触应力分布以及改变情况。通过进行齿轮副虚拟滚检对齿轮的接触效果进行分析得到齿轮副的接触情况, 与静力学分析得到的齿面接触应力分布图区域基本一致, 进一步验证了静力学分析的正确性。

**关键词:** 等基圆锥齿轮; 网格划分; 静力学分析; 虚拟滚检

**中图分类号:** TH132.4

**文献标识码:** A

## Statics analysis of equal base circle bevel gear based on ANSYSWorkbench

HE Xin<sup>1,2</sup>, CAO Xuemei<sup>1</sup>, ZHAI Baozun<sup>2</sup>, YANG Bohui<sup>1</sup>

(1.College of Mechanical Engineering, Henan University of Science and Technology, Henan Luoyang 471003; 2.School of Mechanical&Electrical Engineering, yellow river conservancy technical institute, Kaifeng Henna 475000)

**Abstract:** Gear's grids are divided by using finite element pre-processing software Hypermesh, and ANSYSWorkbench is applied to analyze gear's meshing static contact mechanical features. Based on the tooth flank static contact mechanical analysis, we worked out cone gear's stress change and stress deformation finally. The contact performance of gear is analyzed by invented rolling test, which is consistent with flank static contact mechanical analysis, it's further verified the correctness of the static analysis.

**Key words:** Equal base circle bevel gear; Dividing grid; Flank static contact mechanical analyse; Invented rolling test

锥齿轮在航天航空、海洋轮船等大型机械中应用广泛, 在加工锥齿轮的时候会受到技术水平的约束, 所以以往使用指状铣刀仿形法来加工生产锥齿轮<sup>[1]</sup>。然而锥齿轮从外锥距到内锥距上的齿廓形状是变化的, 在加工理论上存在着误差, 这样加工出来的齿面载荷分布不均, 齿轮的寿命也很短<sup>[2]</sup>。日本的酒井高男提出大型锥齿轮利用数控加工的想法, 仅就加工误差做了探讨, 对齿面啮合问题没有进一步分析。文献[3]提出了指状铣刀数控加工实现这种等基圆齿轮的想法, 等基圆锥齿轮区别于以往曲线锥齿轮, 其任意锥距处的当量齿轮基圆半径相等, 通过试切实验验证了数控加工这种齿轮有效可行。

文献[4]提出盘刀数控仿形精加工等基圆曲线齿锥齿轮。齿面接触应力关系到齿轮寿命和安全, 为使齿轮在工作中可靠、稳定、满足强度要求, 对齿轮进行静力学齿面接触应力分析。精确的等基圆锥齿轮有限元模型是分析齿面啮合性能和承载能力的关键。有限元分析的基础是构建合理的几何模型, 等基圆锥齿轮的齿面是较为复杂的曲面几何, 加工原理以及方法十分冗杂。基于此, 本文通过建立齿轮精确的三维模型作为有限元分析的几何模型使用。有限元前处理软件 HyperMesh 具备强大的有限元前处理功能, 使用 HyperMesh 对锥齿轮进行网格划分可以得到精确的六面体八节点网格单元, 通过

收稿日期: 2017-09-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51675161)

作者简介: 何昕(1989-), 男, 河南开封人, 硕士, 主要研究方向为机械传动、CAD/CAE。

ANSYSWorkbench 有限元软件静力学分析模块分析了在载荷作用之下齿轮副啮合时的静态力学特性,得到了整个齿轮副啮合过程中的齿面接触应力分布以及改变情况。

## 1 等基圆齿锥齿轮基本概念

等基圆曲线齿锥齿轮是一种新型的锥齿轮,在加工中控制指状铣刀和被加工轮坯之间运动,令被加工出来的锥齿轮在变化的锥距中当量齿轮基圆半径保持恒定不变,从而使加工出来的齿轮齿廓形状也保持不变,可用成形刀具较为精确地加工齿轮。在外锥距  $R_e$  处的当量齿轮的基圆半径  $r_{vb}$  和任意锥距  $R_i$  处当量齿轮基圆半径  $r_i$  是相等的,其特征为

$$\begin{aligned} r_{vb} &= r_i \\ r_{vb} &= \frac{zm_{te} \cos \alpha_n}{2 \cos \delta \cos^2 \beta_e} \\ r_i &= \frac{zm_{ti} \cos \alpha_n}{2 \cos \delta \cos^2 \beta_i} \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $z$ —齿轮齿数;  $\beta_i$ —锥距为  $R_i$  处齿线的螺旋角;  $\beta_e$ —在外锥距  $R_e$  处的齿线螺旋角;  $\alpha_n$ —法面压力角;  $m_{ti}$ —锥距  $R_i$  处的当量齿轮模数;  $m_{te}$ —外锥距  $R_e$  处端面模数。

根据式(1),得到等基圆锥齿轮的螺旋角  $\beta_i$  和  $R_i$  锥距之间的关系方程:

$$\begin{aligned} \beta_i &= \arctg\left(\sqrt{\frac{1-K\psi_R}{K\psi_R}}\right) \\ K &= \cos^2 \beta_e \end{aligned} \quad (2)$$

式中的  $\psi_R$  是锥距系数,其公式为

$$\psi_R = \frac{R_i}{R_e} \quad (3)$$

即满足式(3)螺旋角和锥距的数学关系的齿轮为等基圆锥齿轮。

## 2 有限元分析模型建立

### 2.1 齿轮副三维模型几何处理

有限元分析的基础是构建合理的几何模型,本课题所研究的等基圆锥齿轮的齿面是较为复杂的曲面几何,加工原理以及方法十分冗杂。基于此,通过 MATLAB 对等基圆锥齿轮的齿面方程进行数值计算,以齿数 15/23 的齿轮副为例进行建模分析,齿轮副参数如表 1 示。

表 1 齿轮基本几何参数

Tab.1 Operating parameters

齿轮副参数	数值
小轮齿数 $z_1$	15
大轮齿数 $z_2$	23
模数 $m$	12
齿宽 $B$	40
大端螺旋角 $\beta$	$6^\circ$
轴交角 $\gamma$	$90^\circ$

求解出来精确的齿面离散点坐标后导入 UG 生成齿面片模型,继而在 UG 中建立出等基圆锥齿轮精确三维实体模型<sup>[5-8]</sup>,如图 1 所示。

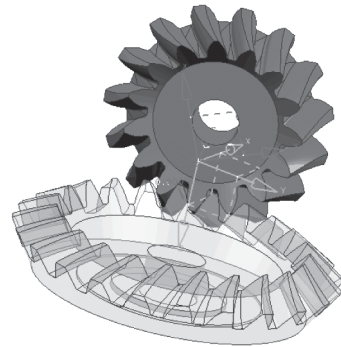


图 1 齿轮副的装配图

Fig.1 Assembly diagram of the gear

给两啮合的齿面一个距离的约束,两齿面之间距离为红丹粉色素层的厚度。对被动轮的透明度调高后会在相接触齿面上显示出接触阴影,观察齿轮副在运动过程中的接触效果(图 2),用于后续静力学分析提供对比依据。

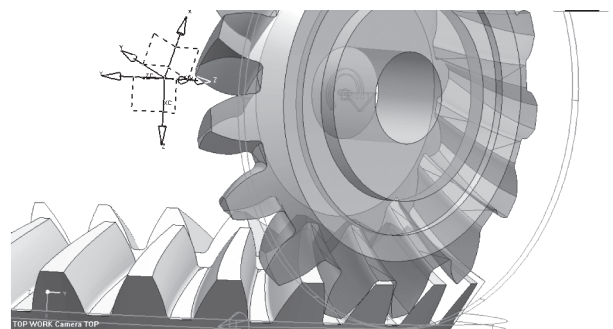


图 2 运动仿真实接触区情况

Fig.2 Contact zone with motion simulation

为了简化在 ANSYSWorkbench 中的计算量,对齿轮副进行几何剖分,大轮保留 7 个齿,小轮保留五个齿,如图 3 所示。

通过在 HyperMesh 对齿轮副三维模型单齿进行几何剖分,实现网格精度和数量的控制。首先对网格质量要求较高轮齿部分进行端面剖分,其次对网

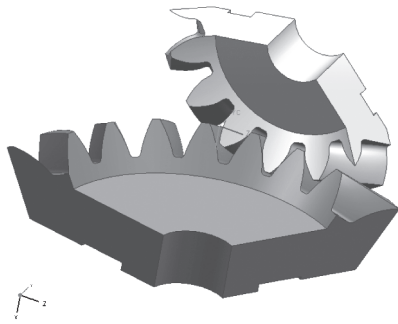


图 3 几何剖分示意图

Fig.3 Geometric subdivision graph

格质量要求不是太高的轮体部分进行剖分。剖分后进行网格划分<sup>[9-11]</sup>，如图 4 所示。

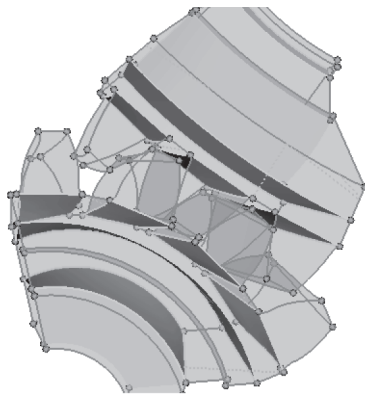


图 4 剖分示意图

Fig.4 Subdivision graph

### 2.2 HyperMesh 中网格划分

齿轮进行有限元分析中划分网格是很重要的一步，只有建立高精度的有限元网格模型分析得到的数值分析才会准确，结果会趋近于实际情况。等基圆锥齿轮齿面扭曲大，根据分析精度的要求，来选择网格的组成、单元类型、网格密度以及单元数量。

首先，单元类型选择六面体八节点单元(图 5)；选取刚体材料，弹性模量 210 000 Pa；材料密度 7 900 kg/m<sup>3</sup>；泊松比 0.3；网格单元个数：大轮 30 597，小轮 36 018；节点个数共计 74 547。根据划分网格的要求和原则，在完成几何模型必要处理

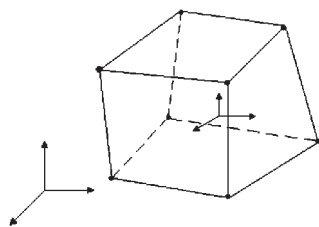


图 5 实体单元 SOLID45

Fig.5 Solid 45

之后，利用 HyperMesh 实现网格精确控制，首先在对要求网格质量较高的齿面接触部位上进行网格细化，其次划好齿的大端面网格之后由大端向小端进行扫略。等基圆锥齿轮副有限元网格模型见图 6。

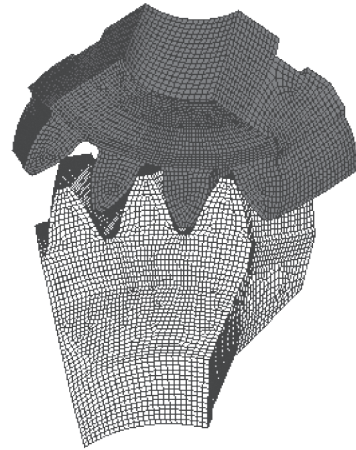


图 6 齿轮网格模型

Fig.6 Finite element model of the gear

### 2.3 有限元静力学分析

齿面接触应力关系到齿轮寿命和安全，为使齿轮在工作中可靠、稳定、满足强度要求，对齿轮进行静力学齿面接触应力分析。将 HyperMesh 中做好的网格模型导入 Workbench 中，使用 ANSYSWorkbench 静力学分析模块，选择小轮的凸面作为目标面和大轮的凹面作为接触面生成五个接触对，接触类型为摩擦接触，摩擦系数 0.2；创建转动副连接关系并施加自由度约束，对大轮进行全约束，同时对小轮仅给 Z 向的旋转自由度；载荷设置：锥齿轮大轮为从动轮，锥齿轮小轮为主动轮，大轮轴孔添加 150 N·m 转动扭矩，给小轮一个转动角度，如图 7 所示。

图 8 为齿轮副从单齿啮合到双齿啮合过程中应力变形情况，由于齿面刚进入啮合，接触面积小，此时应力变形较大，最大应力变形在齿轮齿顶刚进入啮合的位置，当齿轮副从单齿到双齿啮合时应力

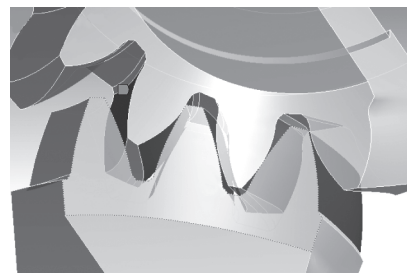


图 7 齿轮接触对生成

Fig.7 Teeth contact mesh model

变形逐渐减小。

通过分析等基圆齿轮应力分布图,可以看出齿轮在进入啮合时,由于齿轮的弹性变形将产生干涉和冲击,在齿轮齿面中心应力变形最大。在单齿啮合时齿面接触最大等效应力 3 483.8 MPa,双齿啮合时齿面应力逐渐变小为 1 637.5 MPa。这些应力集中造成齿轮寿命减短。通过分析齿轮受力变化,有效避免应力集中,提高齿轮使用寿命,啮合时齿轮副应力分布和齿面接触应力分布图如图 9 所示。

### 3 结论

1) 结合 HyperMesh 和 ANSYSWorkbench 对齿



图 8 锥齿轮副齿面接触应力变形  
Fig.8 Deformation of gear contact stresses

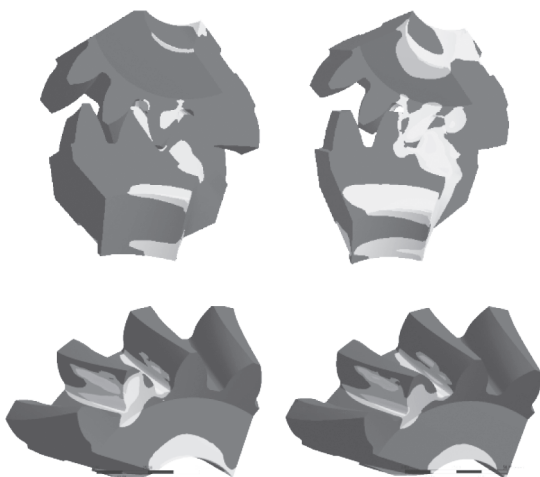


图 9 齿轮齿面接触应力分布云图  
Fig.9 Variation of contact stresses during the cycle of meshing

轮副进行静力学分析,提高了分析结论的精确性,提高了有限元分析的效率。

2) 虚拟滚检结果和 ANSYSWorkbench 静力学分析得到的齿面接触应力分布图区域基本一致,接触区域在齿面中心位置,接触区域长度约占整个齿面的二分之一。

#### 参考文献:

- [1] 张静, 杨宏斌, 邓效忠, 等. 我国锥齿轮技术的现状和发展动向 [J]. 河南科技大学学报, 2003, 24(1): 40-43.
- [2] WANG Fulin, YI Chuanyun, WANG Tao, et al. A generating method for digital gear tooth surfaces[J]. Int Adv Manuf Technol, 2006(28): 474-485.
- [3] GONG Y P, DING S C, CAI C Y. Analysis of Tooth form Error of Equal Base Circle Bevel Gear[J]. Journal of Mechanical Engineering of China: English Edition, 1996, 18(1): 52-54.
- [4] WANG Bin, FAN M X, SUN Xun. Cutter position calculation of machining equal base circle bevel gears with a pot-shaped milling cutter[J]. International Journal of Advance Manufacturing Technology, 2016(87): 2625-2637.
- [5] GONG Y P, DING S C, CAI C Y. Analysis of Tooth form Error of Equal Base Circle Bevel Gear[J]. Journal of Mechanical Engineering of China: English Edition, 1996, 18(1): 52-54.
- [6] 穆立茂. 利用 UG 实现直齿圆锥齿轮的三维造型 [J]. 机械, 2001, 31(10): 24-26.
- [7] 姜海军. 基于 UG 的直齿圆锥齿轮三维建模研究 [J]. 煤矿机械, 2005(7): 74-76.
- [8] 陈霞, 夏巨谔, 胡国安. 基于 UG 的直齿锥齿轮的精确建模 [J]. 中国机械工程, 2006(17): 107-109.
- [9] 蓝尧, 杨良勇, 罗昌贤. 基于 ANSYSWORKBENCH 的齿轮接触应力分析 [J]. 中国新技术新产品, 2011(15): 1.
- [10] 赵葵, 刘海岷, 雷海胜, 等. 基于 ANSYS Workbench 的蜗杆斜齿轮静力学仿真 [J]. 武汉工业学院学报, 2012 (1): 28-31.
- [11] 唐进元, 刘艳平. 直齿面齿轮加载啮合有限元仿真分析 [J]. 机械工程学报, 2012 (5): 124-131.

(责任编辑 王利君)