

文章编号: 1004-4353(2014)01-0063-04

# 齿轮滚刀优化及其仿真

孟清<sup>1</sup>, 申金丹<sup>2</sup>, 廉哲满<sup>1\*</sup>

( 1. 延边大学工学院 机械工程系, 吉林 延吉 133002; 2. 延边大学 科技处, 吉林 延吉 133002 )

**摘要:** 针对齿根弯曲应力过大易造成齿根折断现象的发生, 利用 ANSYS 对仿真得到的齿轮进行有限元分析, 得出了滚刀顶刃圆角半径、齿根过渡曲线的曲率和齿根最大弯曲应力之间的关系. 在此基础上, 对滚刀的顶刃圆角进行优化, 得到了最佳圆角半径. 优化验证表明, 该优化方法效果良好, 可有助于减小齿轮齿根最大弯曲应力, 延长齿轮的使用寿命.

**关键词:** 齿轮; 顶刃圆角; 优化; 弯曲应力

**中图分类号:** TH164      **文献标识码:** A

## The optimization and simulation of gear cutter

MENG Qing<sup>1</sup>, SHEN Jindan<sup>2</sup>, LIAN Zheman<sup>1\*</sup>

( 1. *Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, Yanbian University, Yanji 133002, China*; 2. *Department of Science and Technology, Yanbian University, Yanji 133002, China* )

**Abstract:** Aiming at the tooth root fracture phenomena because the tooth root bending stress is too large, the ANSYS software was used to do finite element analysis for the gear which came from the simulation. The relationship among hob top edge radius, the curvature of gear tooth root transition curve and the maximum bending stress was achieved. On this basis, the gear hob top edge arc fillet was optimized and obtained the best fillet radius. It turns out that the optimization effect is rather good. The optimization method in this paper is helpful to reduce the maximum bending stress on gear tooth root, and prolong the service life of the gear.

**Key words:** gear; top edge arc fillet; optimization; bending stress

齿轮传动是机械传动中最重要的传动之一. 齿轮的使用寿命往往决定着产品的使用寿命. 工作中齿根处应力过大而造成的齿轮轮齿折断是齿轮的主要破坏形式之一<sup>[1]</sup>. 研究<sup>[2]</sup>表明, 齿根处的最大应力与齿根过渡曲线的形状有关, 而齿根过渡曲线的形状又与齿轮加工刀具顶刃圆角半径有关. 在齿轮生产中, 对齿轮加工刀具顶刃圆角半径通常不做严格规定, 一般取 0.25 m~0.3 m<sup>[3]</sup> (m 为被加工齿轮的模数). 为优化齿轮设计, 王亮等<sup>[4]</sup>通过 ANSYS 软件对齿轮进行了有限元分析, 并提出了对齿轮结构的改进方案; 芮井中等<sup>[2]</sup>提出了一种有效地描述齿根过渡曲线形状的参数化方法, 对以获得齿根最小弯曲应力为目标的齿根过渡曲线进行了优化. 由于滚刀具有高精度、高效率等优点<sup>[5]</sup>, 目前成为最广泛使用的一种齿轮加工刀具. 为了改善滚刀齿根受力情况, 本文以普通滚刀为例对其顶刃圆角进行优化, 以延长齿轮使用寿命.

### 1 齿轮加工仿真系统

#### 1.1 齿轮加工仿真系统的开发

以 Visual Basic 6.0 为开发工具对 AutoCAD 2004 进行二次开发, 以此实现齿轮加工仿真. 仿真的思想是将实际加工过程进行离散化, 离散后

收稿日期: 2013-10-09

\* 通信作者: 廉哲满(1964—), 男, 博士, 教授, 研究方向为机械 CAD/CAM 及仿真技术.

的每个单元采用布尔运算完成材料的去除工作,然后将所有单元整合为一体,形成连续的切削加工过程.滚齿采用范成法加工原理,并且将滚刀切削齿坯的过程按齿条切削齿坯的过程处理<sup>[6]</sup>.由于滚刀结构复杂,其仿真效率较低,所以采用结构简单的齿条代替滚刀,以提高仿真效率和精度.仿真加工时,齿条与齿坯做范成运动,即齿条水平移动速度等于齿坯节圆旋转线速度.图 1 和图 2 分别为齿轮加工仿真系统界面和齿轮加工仿真过程.

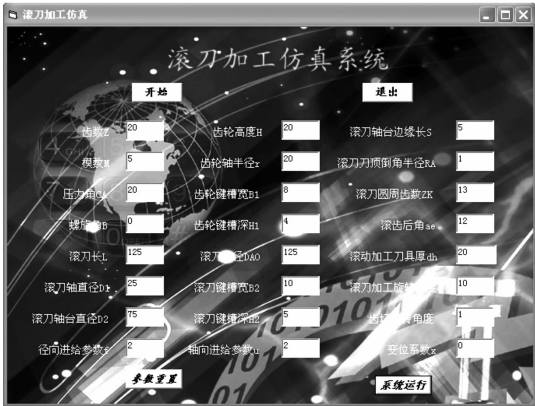


图 1 齿轮滚刀加工仿真系统界面

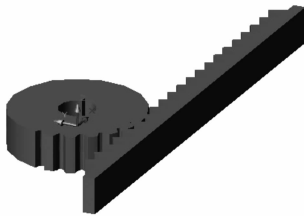


图 2 齿轮加工仿真过程

1.2 齿齿轮加工仿真系统的校验

为了验证仿真系统的加工效果,将被加工齿轮齿廓与标准齿轮齿廓进行对比分析.轮模数是决定齿轮齿廓和齿轮各个尺寸的重要参数,本文选用 3 组齿轮进行对比,其模数分别为 2、5 和 8,齿数均为 20,齿轮齿廓对比图如图 3 所示.图中曲率较大的齿根过渡曲线是用 Pro/E 创建的标准齿轮齿廓,其曲率半径按国家规定取为 0.38 m<sup>[7]</sup>,曲率较小的是仿真系统加工出的齿轮齿廓.从图 3 可以看出,理论齿廓与标准齿廓几乎完全重合,但各组齿轮齿廓的齿根过渡曲线不重合,这表明本文仿真系统的仿真效果良好.齿根过渡曲线不重合的原因在于标准齿轮的齿根过渡曲线为圆弧,而利用范成法加工出来的齿轮齿根过渡曲线为延伸渐开线的等距曲线<sup>[7]</sup>.



图 3 齿廓对比图

2 滚刀顶刃圆角半径、齿根过渡曲线与齿根受力情况之间的关系

2.1 滚刀顶刃圆角半径与齿根过渡曲线之间的关系

延伸渐开线的等距曲线的变化比较复杂,如果通过数学表达式进行比较,其计算量会很大,所以本文采用比较直观的方法,即通过将齿廓重叠来比较各齿轮的齿根过渡曲线.当其他参数相同,刀具顶刃圆角分别为 0.5、1.0、1.5 mm 时,仿真出来的齿根过渡曲线分别为图 4 所示的 1、2、3 号曲线,其中右图是左图齿根过渡曲线的局部放大图.从图中可以看出,齿轮中 1、2、3 号齿根过渡曲线的曲率越来越小,也就是说滚刀圆角半径越大,加工出的齿根过渡曲线曲率越小.

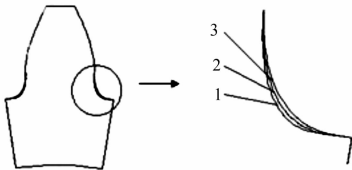


图 4 齿根过渡曲线对比

2.2 齿根过渡曲线与齿根受力情况之间的关系

用 ANSYS 中的 Workbench 模块分别对 3 个齿轮进行受力分析.为了便于观察,Pro/E 建模后分别从 3 个齿轮中截取 1 个齿进行分析.齿轮材料为 45 号钢,其弹性模量  $E=2.05 \times 10^{11}$  MPa,泊松比  $\mu=0.3$ ,密度  $\rho=7\,800$  g/mm<sup>3</sup>,其约束条件加在左右两个截面上,力添加到齿顶处一块很小的面上,力的大小按下列条件计算:齿轮转速  $n=1\,470$  r/min,传动功率  $p=18$  kW,计算得到切向力  $F_t=2\,338.78$  N,法向力  $F_r=851.25$  N,其分别加在  $x$  和  $y$  方向.应力分布图如图 5 所示,其中图 a、b、c 的齿根过渡曲线分别对应图 4 中的 1、2、3 号曲线.从图中可以看出,应力主要集中在齿根部位,呈深色部分.另外,图中显示的最大应力

分别为  $\sigma_1 = 91.571 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_2 = 81.72 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_3 = 77.556 \text{ MPa}$ , 这说明随着齿根曲率的减小, 齿根部位最大应力在减小。

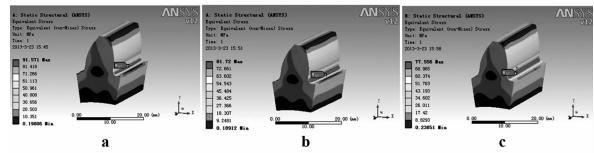


图 5 齿轮单个齿应力分布对比图

综上所述, 齿轮加工刀具的顶刃圆角越大, 齿根过度曲线的曲率越小; 齿根过渡曲线的曲率越小, 齿根部位的最大应力越小。也就是说, 齿轮加工刀具的顶刃圆角半径越大, 齿根部位的最大应力就越小。

3 滚刀顶刃圆角优化及其效果验证

3.1 滚刀顶刃圆角优化

虽然刀具顶刃圆角越大越好, 但要加工出正确的齿轮还必须满足两个条件: ① 齿轮的有效渐开线要足够长, 以保证齿轮在啮合时不发生干涉; ② 刀具的齿顶高应符合标准, 以保证被加工齿轮的齿根圆尺寸符合标准。要加工出足够长的渐开线长度就得保证刀具与齿轮啮合最低点的啮合半径小于被加工齿轮与其配对齿轮啮合最低点的啮合半径。

齿条刀具与被加工齿轮的啮合图如图 6 所示, 图中  $D$  点是最低啮合点,  $CD$  是啮合线。设  $BD = x$ ,  $z$  为齿轮齿数,  $k = 3.1416r/2z$ ,  $\alpha$  为被加工齿轮的压力角,  $r$  为被加工齿轮的分圆半径,  $R$  为刀具与齿轮啮合的最低点啮合半径, 则由图 6 中的几何关系可求得:

$$R = \sqrt{(r \cos \alpha + k \sin \alpha - x / \cos \alpha)^2 + (r \sin \alpha - k \cos \alpha)^2}. \tag{1}$$

被加工齿轮与其配对齿轮(这里选用配对齿轮齿数为 40)啮合图如图 7 所示。图中  $r_1$  和  $r_2$  分别为齿轮 1 和齿轮 2 的节圆半径,  $r_{b1}$  和  $r_{b2}$  分别为齿轮 1 和齿轮 2 的基圆半径,  $a$  为两齿轮的中心距,  $m$  为齿轮模数,  $\alpha$  为齿轮节圆压力角,  $\alpha_{a2}$  为齿轮 2 的齿顶圆压力角,  $z_1$  和  $z_2$  分别为齿轮 1 和齿轮 2 的齿数,  $r_k$  为被加工齿轮与其配对齿轮啮合时最低点的啮合半径。

$$\alpha_{a2} = \arccos(r_{b2}/r_{a2}) = \arccos(z_2 \cos \alpha / (z_2 + 2h_a^*)), \tag{2}$$

$$r_k = \sqrt{r_{b1}^2 + (a \sin \alpha - r_{a2} \sin \alpha_{a2})^2}. \tag{3}$$

由于  $R \leq r_k$ , 解得

$$x \geq (r \cos \alpha + k \sin \alpha) - \sqrt{r_{b1}^2 + (a \sin \alpha - r_{a2} \sin \alpha_{a2})^2 - (r \sin \alpha - k \cos \alpha)^2}. \tag{4}$$

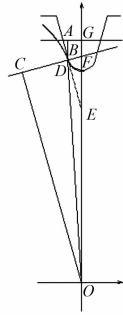


图 6 刀具与被加工齿轮的啮合图

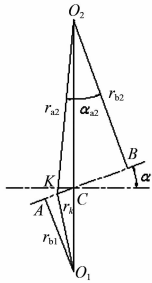


图 7 被加工齿轮与其配对齿轮的啮合图

刀具截面图如图 8 所示。图中  $r_d$  为刀具顶刃圆角半径,  $h$  为刀具的齿顶高, 由几何关系可得

$$r_d = (h - x) / (1 - \sin \alpha). \tag{5}$$

由(5)式可以看出,  $x$  取值越小,  $r_d$  越大。加工过程中为了保证正确的齿根圆尺寸, 需要保证刀具的齿顶高  $h$  符合标准值, 所以当  $x$  取最小值时,  $r_d$  能否取到最大值, 还需做进一步讨论。

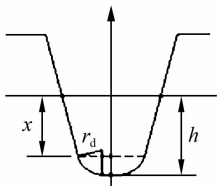


图 8 刀具截面图

刀具设计过程中可能出现 3 种情况(见图 9): ①  $x_{\min}$  加圆弧高度比  $h$  小, 切出的齿根圆偏大; ②  $x_{\min}$  加圆弧高度等于  $h$ , 即最理想情况; ③  $x_{\min}$  加圆弧高度比  $h$  大, 切出的齿根圆偏小。第 1 种情

况首先要保证刀齿齿顶高等于  $h$ , 第 3 种情况首先要保证  $x$  取值不小于  $x_{\min}$ . 对图 9b 进行几何求解, 可解得  $x_{\min}$  的临界值为

$$x_{\min} = h(1 + \sin \alpha) - k \cos \alpha. \quad (6)$$

综上所述, 当  $x_{\min} \leq h(1 + \sin \alpha) - k \cos \alpha$  时, 滚刀顶弧可用单圆弧,  $r_d$  最优解为

$$r_d = (k \cos \alpha - h \sin \alpha) / (1 - \sin \alpha).$$

当  $h(1 + \sin \alpha) - k \cos \alpha \leq x_{\min} < h$  时, 滚刀顶弧用双圆弧,  $r_d$  最优解为  $r_d = (h - x_{\min}) / (1 - \sin \alpha)$ . 如果  $x_{\min} \geq h$ , 说明设计出现错误, 或者需要考虑设计变位齿轮.

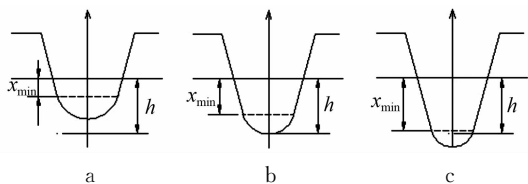


图 9 滚刀顶刃可能出现的 3 种情况

### 3.2 优化效果验证

通过编程将上述优化过程植入仿真系统, 在系统界面输入相应的参数后, 系统会自动对加工进行优化, 并将此刀具加工出来的齿轮导入到 ANSYS 的 Workbench 模块中进行有限元分析. 将该分析结果与前面几组未优化的分析结果进行对比, 即可验证优化效果. 同上, 被检测齿轮模数为 5, 齿数为 20, 其配对齿轮齿数选为 40, 分析结果如图 10 所示. 优化后滚刀加工出的齿轮齿根部位的最大应力  $\sigma = 71.476$  MPa, 较之前有较大幅度地提高, 说明优化效果较好.

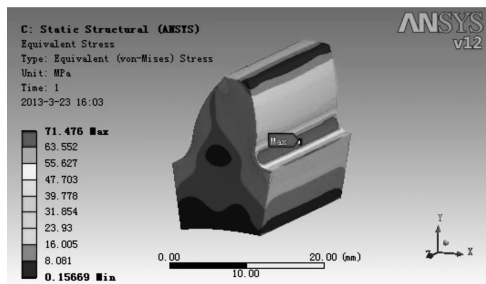


图 10 优化后的齿轮应力分布图

### 3.3 干涉检测

优化后的齿轮能否正常工作, 还需要在工作状态下对啮合的齿轮进行干涉检测. 检测方法是将被加工齿轮及其配对齿轮导入 Pro/E 中, 用运动仿真模块对两个齿轮进行啮合运动仿真. 与此

同时, 利用运动仿真模块中的干涉检查功能对啮合齿轮进行干涉检测. 如果齿轮啮合时出现干涉现象, 则仿真中会出现干涉条纹, 如果无干涉现象则齿轮将正常运行. 图 11 是将两个齿轮中心距缩短 1 mm 后的检测图, 图 12 是两个齿轮正常啮合状态下的检测图. 检测结果显示: 两个齿轮在啮合过程中未出现干涉现象, 说明优化过程合理.

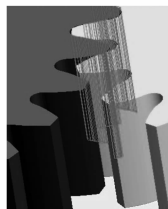


图 11 运动干涉图



图 12 正常运动图

## 4 结束语

本文首先以 Visual Basic 6.0 为开发工具对 AutoCAD 2004 进行二次开发, 完成了齿轮加工仿真, 并验证了该仿真系统具有良好的仿真效果. 在此基础上, 对滚刀顶刃圆角半径、齿根过渡曲线与齿根受力情况之间的关系进行了研究, 结果表明齿轮加工刀具的顶刃圆角半径越大, 齿根部位的最大应力就越小. 最后以滚刀顶刃圆角半径最大化为优化目标, 利用齿轮加工的两个必要条件对滚刀顶刃圆角半径进行了优化计算, 并对其优化结果及运动干涉进行了检测. 结果表明, 本文提出的优化方法效果良好, 可有助于减小齿轮齿根最大弯曲应力, 延长齿轮的使用寿命.

## 参考文献:

- [1] 濮梁贵, 纪名刚. 机械设计[M]. 8 版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 187.
- [2] 芮井中, 吴学志. 齿根过渡曲线优化方法研究[J]. 机械传动, 2010, 34(2): 38-40.
- [3] 袁哲俊, 刘华明, 唐宜胜. 齿轮刀具设计[M]. 北京: 新时代出版社, 1983: 261.
- [4] 王亮, 王展旭, 杨眉. 基于 ANSYS 的渐开线直齿圆柱齿轮有限元分析及改进方法[J]. 现代制造工程, 2008(4): 66-68.
- [5] 杨选文, 余功炎, 文卫无. 滚刀设计发展趋势的分析[J]. 汽车工艺与材料, 2007(6): 39.
- [6] 丁彩虹, 杨向萍. 滚齿加工过程的计算机模拟系统设计[J]. 机械与电子, 2003(2): 51.
- [7] 庄中. 齿顶整圆滚刀的应用和设计[J]. 汽车工艺与材料, 2005(8): 22-25.