

文章编号:1000-8055(2012)06-1424-08

基于圆弧刀廓的端面滚切锥齿轮啮合接触分析

聂少武¹, 邓效忠², 李天兴¹, 张 华², 邓 静¹

(1. 西北工业大学 机电学院, 西安 710072;

2. 河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471003)

摘 要: 为改善端面滚切法加工的锥齿轮齿面接触质量, 基于奥利康锥齿轮全展成加工方法, 对直线刀廓圆弧修形及齿面啮合接触分析进行了研究. 首先对圆弧刀廓进行了几何设计, 推导出了刀齿切削刃方程. 在建立锥齿轮端面滚切加工数学模型的基础上, 推导出了被加工齿轮理论齿面方程. 研究了刀廓圆弧修形对齿面形状的影响, 利用数值方法计算出了齿面修形量. 建立了考虑安装误差的齿轮副滚切数学模型, 推导出了齿面接触分析简化算法. 最后对采用圆弧刀廓加工的一对奥利康锥齿轮进行了啮合分析, 结果表明, 选取合理的圆弧刀廓半径对齿面修形可以降低边缘接触风险, 降低对安装误差的敏感性, 改善内对角接触, 此外还可以实现对两齿面接触区进行独立修正.

关 键 词: 端面滚切法; 圆弧刀廓; 齿面方程; 齿面修形量; 齿面接触分析

中图分类号: TH132.4

文献标志码: A

Tooth meshing contact analysis for bevel gears by face hobbing method based on arc blade profile

NIE Shao-wu¹, DENG Xiao-zhong², LI Tian-xing¹, ZHANG Hua², DENG Jing¹

(1. School of Mechanical Engineering,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. School of Mechatronics Engineering,

Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan 471003, China)

Abstract: In order to improve tooth contact quality of bevel gears by face hobbing method, the straight-line blade profile modified with arc profile and tooth meshing analysis was studied based on generating method of Oerlikon bevel gears. Firstly, the arc blade profile geometry was designed, and the arc blade edge equation was derived. On the basis of mathematical model of bevel gears by face hobbing method, the theoretical tooth surface equation of processed gear was derived. The effect of blade profile modified with arc shape on tooth surface was studied, and the modified quantity of tooth flank was calculated by the use of numerical method. The mathematical model of gears testing with alignment errors was established, and the simplified algorithm of tooth contact analysis was derived. Finally, making tooth contact analysis for Oerlikon bevel gears processed with arc blade profile, the results demonstrate that modifying tooth surface with arc blade profile by selecting appropriate

收稿日期: 2011-07-08

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20120704.1152.201206.1424_031.html

基金项目: 国家自然科学基金(50675061)

作者简介: 聂少武(1983—), 男, 河南洛阳人, 博士生, 主要从事螺旋锥齿轮设计与加工方向的研究.

E-mail: nieshaowu@126.com

通讯作者: 邓效忠(1957—), 男, 河南洛阳人, 教授、博士生导师, 主要从事机械传动理论及先进制造技术研究.

E-mail: dxz01@163.com

radius not only can reduce risk to edge contact, lower sensitive to alignment errors, and improve bias-in contact quality, but also can revise contact areas for two tooth surfaces, respectively.

Key words: face hobbing method; arc blade profile; tooth surface equation; tooth flank modified quantity; tooth contact analysis

螺旋锥齿轮主要分为格里森制和奥利康制,分别采用端面铣削法和端面滚切法加工。奥利康锥齿轮采用端面滚切法加工,不仅生产效率高、劳动强度低、易于干切削,而且在噪声、强度和传动平稳性上相对格里森制具有一定优势^[1],所以目前在国内外受到广泛关注。近年来,一些文献针对端面滚切法加工的奥利康锥齿轮,对其加工原理、数学模型、啮合分析以及齿面变形等进行了很有价值的研究^[2-16],这对奥利康锥齿轮技术的发展起到了极大的促进作用。随着端面滚切加工技术的普及,奥利康锥齿轮必将在汽车、机床、航空航天等领域得到广泛的应用。

传统的奥利康锥齿轮副可以采用同一产形轮展成,加工出来的配对齿面理论上完全共轲,在加工方法上采用双面法加工,一次安装粗精切一次完成。尽管这种加工方法有诸多优点,但是与此时也产生了一些缺陷:一是完全共轲的齿轮副在有安装误差的情况下,会产生偏载,导致边缘接触;二是大小轮都采用双面法加工,相对格里森制而言,齿面接触区不易单独控制。

为了改善端面滚切法加工的锥齿轮齿面啮合质量,增加齿面接触区修正的灵活性,本文以奥利康锥齿轮全展成法为研究对象,对直线刀廓进行了圆弧修形设计,对采用圆弧刀廓加工的奥利康锥齿轮进行了啮合接触分析。结果表明:将内刀和外刀刀廓设计成圆弧形,通过控制圆弧刀廓曲率半径可以实现对两齿面接触区的独立修正,并且被加工齿轮齿面得到修形,相配齿面成局部共轲,接触质量得到一定改善。

1 圆弧刀廓几何设计

奥利康锥齿轮加工刀具较为复杂,刀齿切削刃传统上普遍采用直线刀刃。随着近年来数控磨刀技术的发展,奥利康刀具修形技术在专用磨刀机上得到了实现。目前,国外对奥利康刀具修形主要采用圆弧修形技术,即将刀齿切削刃设计成圆弧形,通过控制圆弧刀刃曲率半径来实现齿廓修形。但是国内尚未见文献及资料对此修形方法

进行详细研究和报道。此外,刀具圆弧修形相对其它修形方法易于在现有数控磨刀机上实现。鉴于此,本文对奥利康刀具刀廓圆弧修形方法进行了研究。

图1为奥利康锥齿轮刀盘数学模型。奥利康刀盘刀齿切削刃在刀盘端面上的投影面不过刀盘中心,而是与一偏置圆相切。奥利康锥齿轮刀盘主要参数都在该投影面内、刀齿节点处度量。图中,以刀盘中心 O_{el} 为原点,过刀齿节点 P_0 建立与刀盘固连的坐标系 $S_{el}(X_{el}, Y_{el}, Z_{el})$ 。在刀齿投影面、刀齿节点 P_0 处建立与刀齿固连的坐标系 $S_c(X_c, Y_c, Z_c)$ 。图中 E 点为刀齿切削刃投影线与偏置圆相切点, $\angle EP_0O_{el} = \delta_0$,为刀齿方向角。 $r_0 = P_0O_{el}$ 为刀齿名义半径。

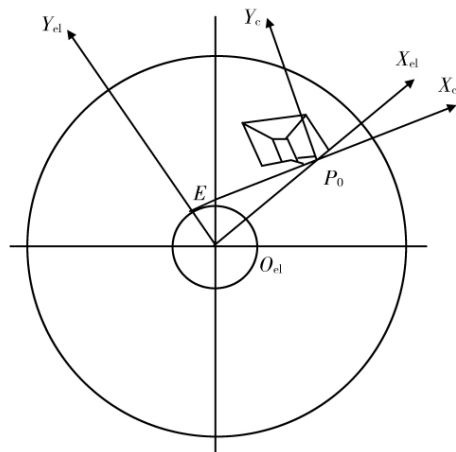


图1 刀盘模型

Fig. 1 Head-cutter model

图2为刀齿坐标系 $S_c(X_c, Y_c, Z_c)$ 中刀齿切削刃几何形状。图中直线部分代表内外刀直线刀刃,圆弧部分为新设计的内外刀圆弧刀刃。齿厚不修正时,内外刀齿节点在名义节点 P_0 处重合,当修正齿厚时,内外刀切削刃切向半径发生变化,内刀和外刀刀齿节点分别移至 P_2 和 P_1 点。为保证刀齿节点处齿轮参数不变,假定 P_2 点和 P_1 点为内外刀圆弧刀刃与直线刀刃的切点。为保证齿面形成中凸鼓形齿,圆弧中心位置如图2中所示。分别在 P_2 点和 P_1 点处建立内刀和外刀辅助坐标

系 $S_t(X_t, Y_t, Z_t)$ 和 $S_a(X_a, Y_a, Z_a)$, 在该坐标系中

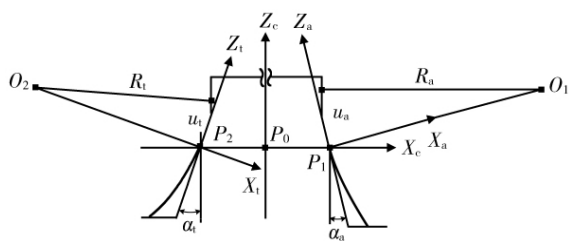


图2 圆弧刀廓几何

Fig. 2 Arc blade profile geometry

$$\mathbf{r}_c(u) = \begin{bmatrix} \pm R_i \left[\left(1 - \cos \frac{u_i}{R_i}\right) \cos \alpha_i - \sin \frac{u_i}{R_i} \sin \alpha_i \right] + dr_{0i} \\ 0 \\ R_i \left[\left(1 - \cos \frac{u_i}{R_i}\right) \sin \alpha_i + \sin \frac{u_i}{R_i} \cos \alpha_i \right] \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中双符号, 对外刀取上, 对内刀取下。

将刀齿切削刃方程由 $S_c \rightarrow S_{e1}$ 进行坐标转换, 可得到刀盘坐标系中圆弧刀廓切削刃方程

$$\mathbf{r}_{e1}(u) = \begin{bmatrix} \cos \delta_{0i} & \sin \delta_{0i} & 0 & r_0 \\ -\sin \delta_{0i} & \cos \delta_{0i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{r}_c(u) \quad (2)$$

2 理论齿面方程推导

图3为奥利康锥齿轮全展成加工数学模型。

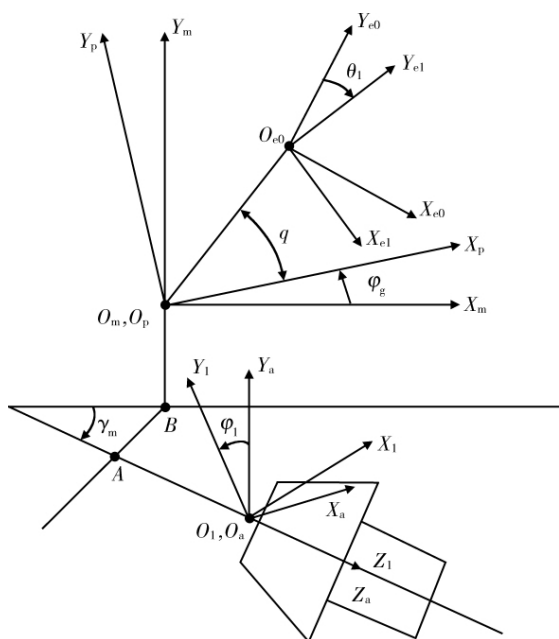


图3 端面滚切加工数学模型

Fig. 3 Mathematical model for face hobbing method

可以确立圆弧刀廓方程. α_t 和 α_a 分别为内刀和外刀齿形角, R_t 和 R_a 分别为内刀和外刀圆弧刀廓曲率半径. 根据对凸面和凹面接触区以及修形量的不同要求, 内刀和外刀圆弧刀廓曲率半径可取不相同的值. u_t 和 u_a 分别为内刀和外刀圆弧刀廓上任一点至 P_2 点和 P_1 点的弧长. 令 $dr_{0t} = P_0 P_2$, $dr_{0a} = P_0 P_1$, 分别为内刀和外刀切向半径修正量。

令 $i=t, a$ 分别表示内刀和外刀, 由图2可以得到刀齿坐标系 S_c 中圆弧刀廓切削刃方程

当刀盘顺时针转动时, 与刀盘固连的坐标系 $S_{e1}(X_{e1}, Y_{e1}, Z_{e1})$ 相对刀盘初始位置坐标系 $S_{e0}(X_{e0}, Y_{e0}, Z_{e0})$ 偏离 θ 角. 在刀盘自转的同时, 刀盘绕产形轮轴线顺时针公转 θ_p 角, 这里 $\theta_p = i_{p0} \theta$, 其中 i_{p0} 为产形轮与刀盘速比. 此时刀盘中心相对产形轮的角度 $q = q_0 - \theta_p$, q_0 为初始刀位角. 产生展成运动后, 产形轮坐标系 $S_p(X_p, Y_p, Z_p)$ 随摇台逆时针转动 φ_g 角, 被加工工件坐标系 $S_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 相对辅助坐标系 $S_a(X_a, Y_a, Z_a)$ 逆时针转动 φ_1 角. 由加工原理可知, $\varphi_1 = m_{p1} \varphi_g$, 其中 m_{p1} 为滚比. 图中 $O_m B = E_m$ 为垂直轮位, $AB = X_b$ 为床位修正量, $O_1 A = X_g$ 为水平轮位修正量, O_1 点为节锥顶点, γ_m 为轮坯安装角。

由坐标变换可得到圆弧齿廓产形轮齿面方程

$$\mathbf{r}_p(u, \theta) = M_{pe0} M_{e0e1} \mathbf{r}_{e1}(u) \quad (3)$$

式(3)中 u, θ 为齿面参数; M_{pe0}, M_{e0e1} 为坐标系 $S_{e1} \rightarrow S_p$ 之间的坐标变换矩阵。

令

$$\begin{cases} \mathbf{e}_u = (\partial \mathbf{r}_p / \partial u) / |\partial \mathbf{r}_p / \partial u| \\ \mathbf{e}_\theta = (\partial \mathbf{r}_p / \partial \theta) / |\partial \mathbf{r}_p / \partial \theta| \end{cases}$$

则产形轮齿面单位法矢可表示为

$$\mathbf{n}_p = \mathbf{e}_u \times \mathbf{e}_\theta \quad (4)$$

此外, 在产形轮与工件展成过程中有啮合方程成立

$$\Phi(u, \theta, \varphi_g) = \mathbf{n}_m \cdot \mathbf{v}_m^{p1} = 0 \quad (5)$$

对式(5)求解可得 $\varphi_g = \varphi_g(u, \theta)$. 经坐标变换可得到用参数 u, θ 表示的理论齿面方程

$$\begin{cases} \mathbf{r}_1(u, \theta) = M_{1a} M_{am} M_{mp} \mathbf{r}_p \\ \mathbf{n}_1(u, \theta) = L_{1a} L_{am} L_{mp} \mathbf{n}_p \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中 M_{1a}, M_{am}, M_{mp} 为坐标系 $S_m \rightarrow S_1$ 之间的坐标转换矩阵, L_{1a}, L_{am}, L_{mp} 分别为矩阵 M_{1a}, M_{am}, M_{mp} 中删去最后一列和最后一行得到的矩阵。

3 齿面修形量计算

传统的奥利康锥齿轮齿面为完全共轭接触, 依据齿厚要求对内外刀齿切向半径修正后, 两共轭齿面在齿长方向形成一定鼓形量, 齿长方向齿面失配。当把直线刀刃设计成圆弧刀刃后, 在齿廓方向齿面被修成中凸的鼓形齿, 配对齿面将成局部共轭接触, 齿廓方向齿面也发生失配。图4为齿面齿廓方向鼓形修正示意图, 图中虚线部分为圆弧刀刃加工出来的鼓形齿面, 实线部分为直线刀刃切削形成的齿面。

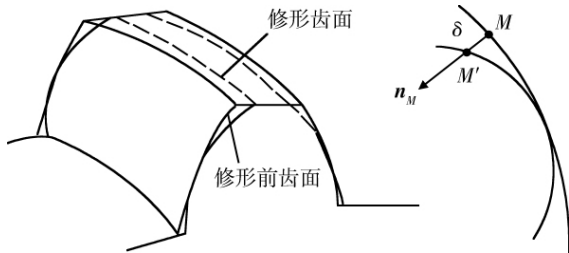


图4 齿廓鼓形修正

Fig. 4 Tooth profile crown modification

设 M 点为刀刃修形前齿面上一点, 且假定 M 点坐标及对应齿面参数 u, θ 已知, n_M 为 M 点单位法矢, M' 点为与 M 点对应的齿廓修形后鼓形齿面上一点, 且位于单位法矢 n_M 上, 令 $\delta = MM'$, 称为齿面修形量。

设 M 点坐标为 (x_M, y_M, z_M) , M' 点坐标为 $(x_{M'}, y_{M'}, z_{M'})$, M 点单位法矢为 (n_{xm}, n_{ym}, n_{zm}) , 则 M 点坐标可表示为

$$\begin{cases} x_{M'} = x_M + \delta \cdot n_{xm} \\ y_{M'} = y_M + \delta \cdot n_{ym} \\ z_{M'} = z_M + \delta \cdot n_{zm} \end{cases} \quad (7)$$

刀刃修形后, 鼓形齿面上任一点的坐标可参数化表示为 $(x(u, \theta), y(u, \theta), z(u, \theta))$, 令

$$\begin{cases} x(u, \theta) = x_{M'} \\ y(u, \theta) = y_{M'} \\ z(u, \theta) = z_{M'} \end{cases} \quad (8)$$

式(8)构成了一个含有参数 u, θ, δ 的非线性方程组, 采用牛顿拉菲森数值算法对其求解, 可计算出齿面鼓形修形量 δ 。

4 齿面啮合仿真

为了能够更全面地分析齿面接触情况, 本文建立了计及安装误差的奥利康锥齿轮副啮合滚切数学模型, 如图5所示。

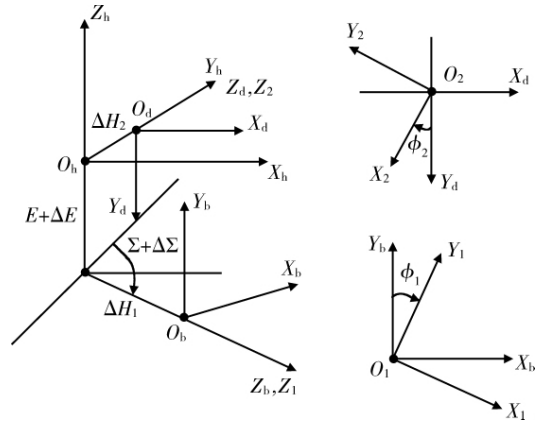


图5 齿轮啮合数学模型

Fig. 5 Mathematical model for gears meshing

图5中坐标系 $S_1 (X_1, Y_1, Z_1)$ 和坐标系 $S_2 (X_2, Y_2, Z_2)$ 分别为与齿轮1和齿轮2固连的工件坐标系, 啮合过程中随齿轮转动, 且转角分别为 ϕ_1 和 ϕ_2 。坐标系 $S_h (X_h, Y_h, Z_h)$ 为固定安装坐标系, 坐标系 $S_d (X_d, Y_d, Z_d)$ 和 $S_b (X_b, Y_b, Z_b)$ 为辅助坐标系, E 为齿轮1相对齿轮2的偏置距, ΔE 为垂直方向齿轮副安装误差, ΔH_1 和 ΔH_2 分别为齿轮1和齿轮2轴向安装误差, Σ 为轴交角, $\Delta \Sigma$ 为轴交角误差。

假设齿轮1和齿轮2齿面方程分别为 $r_1(u_1, \theta_1)$ 和 $r_2(u_2, \theta_2)$, 单位法矢分别为 $n_1(u_1, \theta_1)$ 和 $n_2(u_2, \theta_2)$ 。将其转换到固定坐标系 S_h 中, 可得

$$\begin{cases} r_{h1}(u_1, \theta_1, \phi_1) = M_{hb} M_{b1} r_1(u_1, \theta_1) \\ r_{h2}(u_2, \theta_2, \phi_2) = M_{hd} M_{d2} r_2(u_2, \theta_2) \\ n_{h1}(u_1, \theta_1, \phi_1) = L_{hb} L_{b1} n_1(u_1, \theta_1) \\ n_{h2}(u_2, \theta_2, \phi_2) = L_{hd} L_{d2} n_2(u_2, \theta_2) \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中 $M_{hb}, M_{b1}, M_{hd}, M_{d2}$ 分别为对应坐标系之间的转换矩阵, $L_{hb}, L_{b1}, L_{hd}, L_{d2}$ 分别为 $M_{hb}, M_{b1}, M_{hd}, M_{d2}$ 删去最后一行和最后一列得到的矩阵。

齿轮副在啮合过程中, 在任一啮合点处, 两齿面应有相同的径矢和单位法矢, 据此可构建出齿轮啮合分析方程组

$$\begin{cases} r_{h1}(u_1, \theta_1, \phi_1) = r_{h2}(u_2, \theta_2, \phi_2) \\ n_{h1}(u_1, \theta_1, \phi_1) = n_{h2}(u_2, \theta_2, \phi_2) \end{cases} \quad (10)$$

式(10)为含有6个未知参数的非线性方程组, 可

得 5 个相互独立的标量方程. 一般来说, 非线性方程组的求解收敛性与稳定性与方程组的维数和初值选取关系很大, 为了能使式(10)有稳定精确的收敛解, 同时又减少计算工作量, 需要将其进一步简化.

由 $n_{h1}(u_1, \theta_1, \phi_1) = n_{h2}(u_2, \theta_2, \phi_2)$ 可得

$$\begin{aligned} \phi_1(u_1, \theta_1, u_2, \theta_2) = \\ \arcsin\{C_1 \cos[\arctan(A_1/B_1)]/B_1\} - \\ \arctan(A_1/B_1) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \phi_2(u_1, \theta_1, u_2, \theta_2) = \\ \arcsin\{C_2 \cos[\arctan(A_2/B_2)]/B_2\} - \\ \arctan(A_2/B_2) \end{aligned} \quad (12)$$

式中

$$\begin{aligned} A_1 &= n_{1x} \sin(\Sigma + \Delta\Sigma), \\ B_1 &= n_{1y} \sin(\Sigma + \Delta\Sigma), \\ C_1 &= n_{2z} - n_{1z} \cos(\Sigma + \Delta\Sigma), \\ A_2 &= -n_{2x}, B_2 = n_{2y}, \\ C_2 &= -n_{1x} \sin\phi_1 + n_{1y} \cos\phi_1 \end{aligned}$$

其中 n_{1x}, n_{1y}, n_{1z} 和 n_{2x}, n_{2y}, n_{2z} 分别为单位法矢 $n_1(u_1, \theta_1)$ 和 $n_2(u_2, \theta_2)$ 三个坐标分量.

将式(11)和式(12)代入式(10), 消去参数 ϕ_1 和 ϕ_2 , 非线性方程组可简化为

$$r_{h1}(u_1, \theta_1) = r_{h2}(u_2, \theta_2) \quad (13)$$

式(13)含有 4 个未知数, 可得 3 个相互独立的标量方程, 给定 u_2 值和其余三个参数初值, 求解可得齿面参数的最终精确解. 变动 u_2 可得到齿面参数的一系列解, 代入齿面方程可得到齿面接触迹线. 根据相配齿面主曲率与主方向之间的关系可得到两齿面在公切面上瞬时接触椭圆^[17].

传动误差定义为

$$\begin{aligned} \Delta\phi_2 = \\ (\phi_2 - \phi_2^{(0)}) - (\phi_1 - \phi_1^{(0)}) \times (N_1/N_2) \end{aligned} \quad (14)$$

式中 ϕ_1 和 ϕ_2 分别为齿轮 1 和齿轮 2 在啮合过程中的转角, $\phi_1^{(0)}$ 和 $\phi_2^{(0)}$ 为参考点处啮合初始转角, N_1 和 N_2 为齿数. 将接触迹线上一系列点对应 ϕ_1 和 ϕ_2 代入式(14)可得到传动误差数值.

5 实验验证

本文以一对采用圆弧刀廓加工的奥利康锥齿轮副为例, 对其修形齿面进行了计算仿真和啮合接触分析. 其中大轮加工刀具刀齿仍采用直线刀刃, 小轮加工刀具内刀和外刀刀刃设计为圆弧形状. 表 1 为齿轮副几何参数, 表 2 为刀具参数和切齿加工参数.

表 1 奥利康锥齿轮几何参数

Table 1 Geometric parameters of Oerlikon bevel gears

名称	小轮	大轮
齿数	18	27
旋向	左旋	右旋
轴夹角/(°)	90	
偏置距/mm	0	
参考点法向模数/mm	8.3114	
参考点螺旋角/(°)	33	
压力角/(°)	20	
齿宽/mm	48	
全齿高/mm	18.001	
齿顶高/mm	10.54	5.88
参考点节圆半径/mm	178.3591	267.5387
节锥角/(°)	33.6901	56.3099

表 2 刀具参数和加工参数

Table 2 Cutter parameters and processing parameters

名称	小轮	大轮
刀组数	5	
刀齿方向角/(°)	11.9969	
内刀切向半径/mm	85.3569	87.0109
外刀切向半径/mm	90.6431	88.9891
内刀圆弧刀刃半径/mm	500	
外刀圆弧刀刃半径/mm	600	
刀具齿形角/(°)	20	
径向刀位/mm	155.6314	155.4520
角向刀位/(°)	-32.9874	32.9874
安装角/(°)	33.69	56.31
垂直轮位/mm	0	0
轮位修正量/mm	0	0
床位修正量/mm	0	0
滚比	1.802776	1.201850

图 6 为小轮齿面修形量计算仿真图形. 图中细实线网格对应直线刀刃加工齿面, 粗实线网格对应圆弧刀刃修形齿面. 从图 6 可以看出, 当把小轮刀齿切削刃设计成圆弧刀廓后, 小轮齿面齿廓方向得到了修形, 变成了中凸的鼓形齿. 当选取外

刀圆弧刀廓曲率半径 R_a 为 600 mm 时,计算得到小轮凹面齿顶处最大修形量为 0.0465 mm,齿根处最大修形量为 0.0232 mm. 当取内刀圆弧刀廓曲率半径 R_t 为 500 mm 时,计算得到小轮凸面齿顶处最大修形量为 0.0571 mm,齿根处最大修形量为 0.0334 mm.

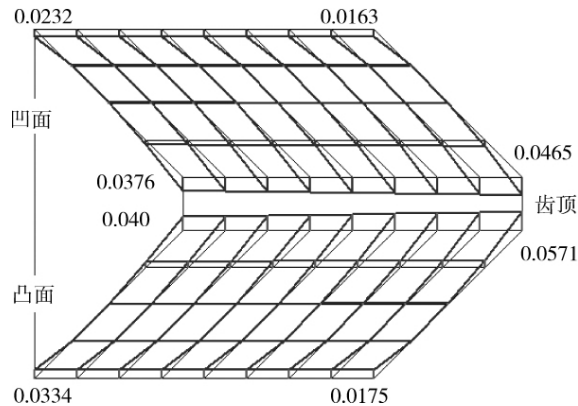


图6 齿面修形仿真(单位:mm)

Fig. 6 Simulation of tooth flank modification
(unit:mm)

通过齿面修形计算仿真可以建立起圆弧刀廓曲率半径与齿面修形量之间的映射关系,从而可通过对齿面修形量进行评价,来判断圆弧刀廓曲率半径的选取是否合理. 这为圆弧刀廓曲率半径的初步选取提供了一定的理论参考.

图7为加工的奥利康锥齿轮副滚检实验.



图7 奥利康锥齿轮副滚检

Fig. 7 Testing of Oerlikon bevel gears

图8和图9分别为理论安装位置下大轮凸面接触区仿真图形和实际接触印痕.

图10和图11分别为理论安装位置下大轮凹面接触区仿真图形和实际接触印痕.

本算例中齿轮副要求热处理前轻载下工作齿

面(大轮凸面,小轮凹面)接触区位于齿面中部,非工作面接触区靠近大端,并呈一定内对角. 由图8~图11可以看出,计算机仿真出的接触区与实际滚检接触印痕基本一致,符合生产加工中对接触区的要求.

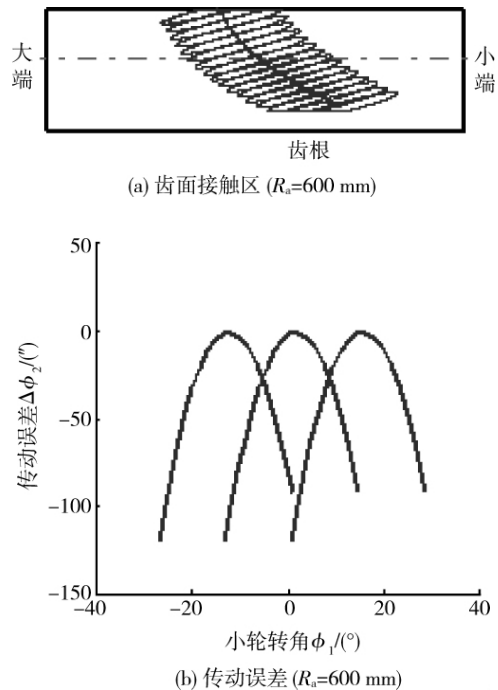


图8 大轮凸面接触区仿真

Fig. 8 Tooth contact simulation for gear convex

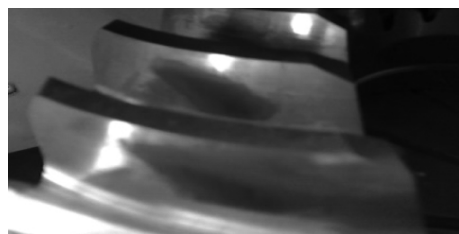


图9 大轮凸面实际接触印痕

Fig. 9 Real contact pattern for gear convex

由图8(b)和图10(b)可以看出,当采用圆弧刀廓对齿面进行修形加工,可以得到开口向下且连续相互交叉的抛物线形状传动误差,这表明齿面齿廓方向得到了修形,配对齿面变成局部共轭接触. 这种传动误差曲线在一定程度上可降低边缘接触的风险以及对安装误差的敏感性^[18].

改变小轮刀具圆弧刀廓曲率半径,分别令 $R_a=900$ mm和 $R_t=1000$ mm,可得到与之相对应的大轮凸面和大轮凹面接触印痕,如图12所示.

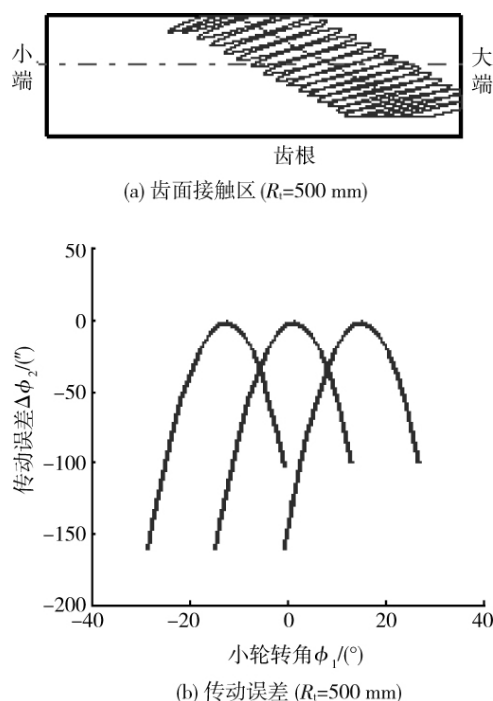


图10 大轮凹面接触区仿真

Fig. 10 Tooth contact simulation for gear concave

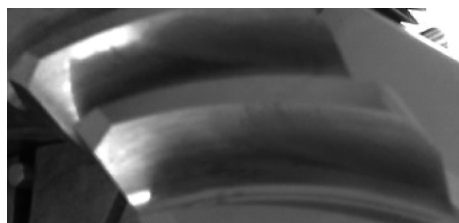


图11 大轮凹面实际接触印痕

Fig. 11 Real contact pattern for gear concave

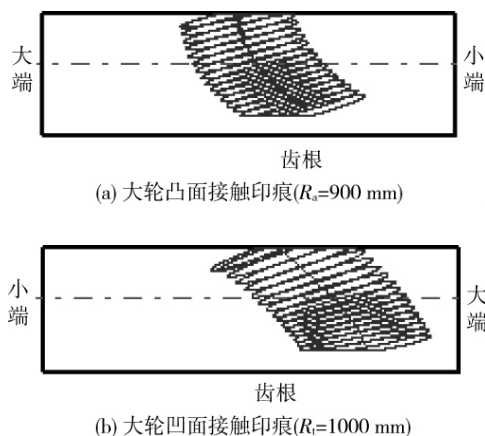


图12 大轮齿面接触区仿真

Fig. 12 Tooth contact simulation for gear

对比图12、图8和图10可知,当圆弧刀廓曲率半径减小时,齿面接触迹线变倾斜,齿面重合度增加,接触椭圆半径也有所减小.这表明,圆弧刀廓曲率半径的变化对齿面重合度和内对角接触质量有影响.这意味着在接触区修正时,通过选取合理的圆弧刀廓曲率半径可以提高齿面重合度,并在一定程度上改善内对角接触.

此外由图12、图8和图10还可以看出,在不改变机床调整参数的情况下,对内外刀取不同的圆弧刀廓曲率半径,可以在工作面与非工作面上分别得到不同形状的接触区.这意味着在对奥利康锥齿轮两齿面接触区修正时,可以采用对内外刀廓同时修形的方法,通过控制内外刀圆弧刀廓曲率半径来实现对两齿面接触区的单独修正,这样增加了齿面修正的灵活性.

限于篇幅,本文只给出了理论安装位置下圆弧刀廓对齿面接触质量影响的分析结果,考虑安装误差的情况分析方法与此类似,本文不再赘述.

6 结 论

1) 研究了奥利康锥齿轮刀具圆弧刀廓几何设计方法,在建立端面滚切加工数学模型及含安装误差的齿面滚检数学模型基础上,分析了刀廓圆弧修形对齿面啮合质量的影响,这为奥利康锥齿轮齿面接触区修正提供了理论指导.

2) 啮合分析结果表明:选取合理的圆弧刀廓曲率半径对奥利康锥齿轮齿面进行修形,在一定程度上可以避免边缘接触,降低齿轮副对安装误差的敏感性,可以增加齿面重合度,改善内对角接触,还可以实现对两齿面接触区的独立修正.

3) 啮合滚检实验表明,计算机仿真接触区与实际滚检接触印痕基本一致,从而验证了本文刀廓圆弧修形方法的有效性和齿面啮合分析方法的正确性.

4) 鉴于当前奥利康刀具刃磨技术研究与加工现状,本文主要研究了刀齿圆弧刀廓修形对齿面接触质量的影响,刀廓的其他修形技术尚需进一步研究,这可作为后续研究工作的重要内容.

参考文献:

- [1] 吴乃云. 延伸外摆线等高齿的设计及应用[J]. 汽车工艺与材料, 2008(2): 49-51.
- WU Naiyun. Design and application of extended epicycloid equal height spiral bevel gear[J]. Automobile Technology and Material, 2008(2): 49-51. (in Chinese)

- [2] Fong Z H. Mathematical model of universal hypoid generator with supplemental kinematic flank correction motions [J]. Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, 2000, 122(1): 136-142.
- [3] 吴联银, 魏洪钦, 王小椿. 延伸外摆线锥齿轮的成形原理及齿面结构研究 [J]. 西安交通大学学报, 2001, 35(1): 43-46.
WU Lianyin, WEI Hongqin, WANG Xiaochun. Analysis of the forming principle and the differential structure of extended epicycloids bevel gear tooth surface [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2001, 35(1): 43-46. (in Chinese)
- [4] 李海涛, 魏文军. 摆线齿锥齿轮齿面接触区的计算机辅助分析 [J]. 中国农业大学学报, 2004, 9(5): 45-50.
LI Haitao, WEI Wenjun. Computer aided analysis for contact pattern of prolate epicycloids bevel and hypoid gears [J]. Journal of China Agricultural University, 2004, 9(5): 45-50. (in Chinese)
- [5] Fan Q. Computerized modeling and simulation of spiral bevel and hypoid gears manufactured by gleason face hobbing process [J]. Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, 2006, 128(6): 1315-1327.
- [6] Fan Q. Kinematical simulation of face hobbing indexing and tooth surface generation of spiral bevel and hypoid gears [J]. Gear Technology, 2006, 23(1): 30-38.
- [7] Shih Y P, Fong Z H, Lin G C Y. Mathematical model for a universal face hobbing hypoid gear generator [J]. Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, 2007, 129(1): 38-47.
- [8] Fan Q. Enhanced algorithms of contact simulation for hypoid gear drives produced by face-milling and face-hobbing processes [J]. Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, 2007, 129(1): 31-37.
- [9] Shih Y P, Fong Z H. Flank modification methodology for face-hobbing hypoid gears based on ease-off topography [J]. Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, 2007, 129(12): 1294-1302.
- [10] Vimercati M. Mathematical model for tooth surfaces representation of face-hobbed hypoid gears and its application to contact analysis and stress calculation [J]. Mechanism and Machine Theory, 2007, 42(6): 668-690.
- [11] Shih Y P, Fong Z H. Flank correction for spiral bevel and hypoid gears on a six-axis CNC hypoid generator [J]. Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, 2008, 130(6): 0626041-06260411.
- [12] Nishino T. Computerized modeling and loaded tooth contact analysis of hypoid gears manufactured by face hobbing Process [J]. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 2009, 3(3): 224-235.
- [13] 聂少武, 邓效忠, 李天兴. 奥利康准双曲面齿轮的理论齿面推导及仿真 [J]. 机械传动, 2009, 33(2): 20-22.
NIE Shaowu, DENG Xiaozhong, LI Tianxing. Theoretical tooth surface deduction and simulation of Oerlikon hypoid gears [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2009, 33(2): 20-22. (in Chinese)
- [14] Kolivand M, Kahraman A. A load distribution model for hypoid gears using ease-off topography and shell theory [J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44(10): 1848-1865.
- [15] Shih Y P. A novel ease-off flank modification methodology for spiral bevel and hypoid gears [J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45(8): 1108-1124.
- [16] Fan Q. Tooth surface error correction for face-hobbed hypoid gears [J]. Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, 2010, 132(1): 0110041-0110048.
- [17] 董学朱. 摆线齿锥齿轮及准双曲面齿轮设计与制造 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [18] Litvin F L. Gear geometry and applied theory [M]. Englewood Cliffs, N J: Prentice Hall, 1994.