

斜齿轮成形磨削齿向修形齿面模型构造与误差评价

汪中厚 宋小明 何伟铭 李刚 朱文敏 耿直

上海理工大学,上海,200093

摘要: 砂轮磨削带齿向修形的斜齿轮时,砂轮与齿轮之间的接触线时刻发生变化,其附加运动会使齿向一面产生“修形扭曲”,为此,提出一种高精度建立齿向修形齿面的方法。根据齿向修形原理,推导出成形磨齿的实际接触线方程;通过改变中心距的值,沿齿向得到多组接触线,使用 NURBS 曲面拟合,得到齿向修形齿面;对影响齿面精度的主要因素齿廓偏差和螺旋线偏差进行分析并提出误差评价模型。以鼓形修形斜齿轮为例,介绍齿向修形齿面构造全过程。磨齿实验验证了模型的准确性以及齿向修形齿面构造的高精度性。

关键词: 成形磨削;斜齿轮;修形扭曲;齿面误差

中图分类号: TG61

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2015.21.001

Tooth Surface Model Construction and Error Evaluation for Tooth-trace Modification of Helical Gear by Form Grinding

Wang Zhonghou Song Xiaoming He Weiming Li Gang Zhu Wenmin Geng Zhi
University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093

Abstract: When grinding of helical gears with tooth to tooth, contact lines changed all the time, the additional movement caused the tooth to produce “distortions of modification”. Based on the facts, this paper presented a high precision establishment method of tooth flank. Firstly, the actual contact line equation of form grinding was derived by the principles of tooth to tooth. Secondly, changing the center distance values, getting multiple sets of contact line along the tooth and NURBS surface fitting was used to get tooth flank of tooth surface. Thirdly, studying the main factors affecting the accuracy of tooth surface deviation of tooth profile and helix deviation and the evaluation model of tooth errors was proposed. Then, in a longitudinal case study of drum-shaped tooth helical gear, the tooth flank of the entire process was described. Finally, by grinding experiments the accuracy of error prediction and high accuracy of tooth surface were verified.

Key words: form grinding; helical gear; distortions of mending; tooth surface error

0 引言

齿向修形可以较好地改善齿面啮合状态,有效防止边缘接触,减小振动和噪声,延长齿轮的工作寿命^[1-2]。目前,几乎所有的高速、重载、薄壁结构的精密齿轮都需要进行拓扑修形。

研究拓扑修形齿轮中的齿向修形具有重要的意义。梁锡昌等^[3]利用现有磨齿机的运动轴,提出了三种附加运动,分别为线性径向进给、齿轮转角补偿及轴向进给补偿。周玉山等^[4]提出了一种改进的截线式计算方法。郭二廓等^[5]、汪中厚等^[6]对接触线的形态进行了优化。李国龙等^[7]采用单一的附加径向运动对斜齿轮进行拓扑修形,提出一种减小磨削误差的砂轮廓形优化方法,该方法只是针对砂轮截形的优化,并未考虑砂轮与齿轮接触线的实际状态。

在数控成形磨削斜齿轮齿向修形过程中,砂轮与齿轮之间的接触线是一条空间曲线,仅由理论的空间接触线包络所得到的磨削齿面并不能满足高精度的磨齿修形加工^[8]。为此,本文以附加径向运动成形磨削为研究对象,首先,根据齿向修形原理,推导出成形磨齿的实际接触线方程;其次,通过改变中心距的值,沿齿向得到多组接触线,使用 NURBS 曲面拟合,得到齿向修形齿面;再次,对影响齿面精度的主要因素齿廓偏差和螺旋线偏差进行分析并提出误差评价模型。然后,以齿向鼓形修形斜齿轮为例,介绍修形齿面构造全过程。最后,经磨齿实验验证了模型的准确性以及齿向修形齿面构造的高精度性。

1 成形磨齿齿向修形分析

1.1 附加中心距运动齿向修形分析

如图 1 所示,在齿轮齿顶投影图上建立鼓形曲线设计坐标系 $O_1y_1z_1$,坐标原点 O_1 取在齿宽

收稿日期: 2015-01-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075279);上海市教委重点学科建设项目(J50503);上海市教委科研创新重点项目(10ZZ92)

的中点位置, O_2 为鼓形圆心, δ 为最大鼓形量, R 为鼓形半径, b 为齿宽, 对于齿廓上的一点 M , 设其鼓形量 δ_z 沿齿向的坐标值为 l_z 。

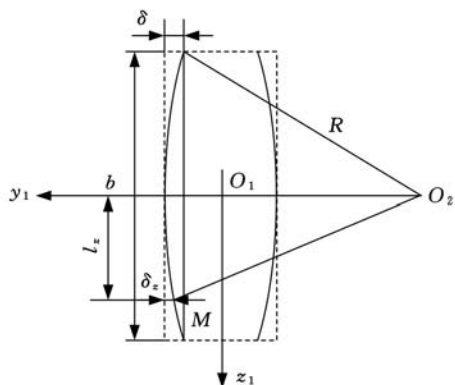


图 1 鼓形曲线设计坐标系

由图 1 所示关系可以得到鼓形半径为

$$R = \delta/2 + b^2/(8\delta) \quad (1)$$

由此得到鼓形修形中心距变动量为

$$\left. \begin{aligned} \delta_z &= R - \sqrt{R^2 - l_z^2} \\ a_x &= \frac{\delta_z \cos\beta_b}{\sin\alpha_n} \\ l_z &= |p\theta - b/2| \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, p 为齿轮螺旋参数; β_b 为基圆螺旋角; α_n 为法向压力角。

因此齿轮转过单位角度, 砂轮沿齿轮径向移动量为

$$\delta_x = \frac{da_x}{d\theta} = \frac{p(p\theta - b/2)\cos\beta_b}{\sqrt{R^2 - (p\theta - b/2)^2} \sin\alpha_n} \quad (3)$$

式中, θ 为齿轮转过的角度。

1.2 坐标系及其变化关系

为了便于分析研究, 建立图 2 所示的坐标系。坐标系 $OXYZ$ 与机床静止部件固定连接, 为空间固定坐标系; 在齿轮上建立坐标系 $O_g X_g Y_g Z_g$, 其中 Z_g 轴与齿轮轴线重合; 在砂轮上建立坐标系 $O_w X_w Y_w Z_w$, 其中 Z_w 轴与砂轮轴线重合; a_x 为齿向修形时的中心距改变量; 齿轮轴线和砂轮轴线的最短距离为中心距 a , 两轴线的夹角即为砂轮安装角 Σ 。

下面采用四阶齐次矩阵建立坐标系之间的变换关系。将空间任意点 $S(x_g, y_g, z_g)$ 在 $O_g X_g Y_g Z_g$ 、 $OXYZ$ 、 $O_w X_w Y_w Z_w$ 内的矢量分别用 r_g 、 r 、 r_w 表示, 则 S 点从 $O_g X_g Y_g Z_g$ 到 $OXYZ$ 的坐标变化关系为

$$r = M_\theta r_g \quad (4)$$

$$M_\theta = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & p\theta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

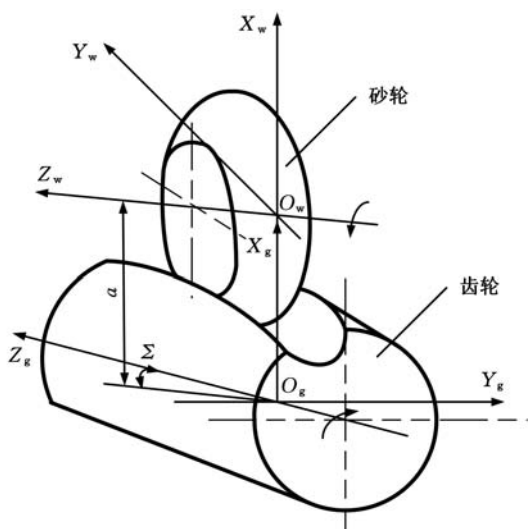


图 2 斜齿轮成形磨削坐标系

$$r = (x, y, z, 1)^T$$

$$r_g = (x_g, y_g, z_g, 1)^T$$

从 $OXYZ$ 到 $O_w X_w Y_w Z_w$ 的坐标变化关系为

$$r_w = M_\Sigma r \quad (5)$$

$$M_\Sigma = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & a - a_x \\ 0 & -\cos\Sigma & -\sin\Sigma & 0 \\ 0 & -\sin\Sigma & \cos\Sigma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$r_w = (x_w, y_w, z_w, 1)^T$$

由式(1)、式(2)可得

$$r_w = M_\Sigma M_\theta r_g \quad (6)$$

即

$$\left. \begin{aligned} x_w &= -x_g \cos\theta + y_g \sin\theta + a - a_x \\ y_w &= -x_g \sin\theta \cos\Sigma - y_g \cos\theta \cos\Sigma - z_g \sin\Sigma - p\theta \sin\Sigma \\ z_w &= -x_g \sin\theta \sin\Sigma - y_g \cos\theta \sin\Sigma + z_g \cos\Sigma + p\theta \cos\Sigma \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式(7)即为对应砂轮上点的坐标。

2 磨齿实际接触线计算

2.1 砂轮截形计算

成形法磨削斜齿轮时, 通过斜齿轮端面形状以及砂轮安装参数求出砂轮与齿轮之间的接触线, 满足接触线方程^[9]

$$z_g n_x + a n_y \cot\Sigma + (a - x_g + p \cot\Sigma) n_z = 0 \quad (8)$$

式中, (n_x, n_y, n_z) 为斜齿轮螺旋面上点的法向量。

将接触线绕砂轮轴线旋转投影到砂轮截面即可得到成形砂轮截面:

$$\left. \begin{aligned} R_w &= \sqrt{x_w^2 + y_w^2} = m(\mu) \\ Z_w &= z_w = g(\mu) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中, μ 为齿轮端面压力角。

最终砂轮截面可由压力角函数 $m(\mu)$ 和 $g(\mu)$ 来表示。

2.2 齿向修形实际接触线

任意给定斜齿轮端面上一点 $S(x_g, y_g, 0)$, 即可由式(7) 和啮合关系求出砂轮回转面上与 S 点对应的磨削接触点 $P(x_w, y_w, z_w)$, P 点组成的曲线就是磨削过程中砂轮与斜齿轮的实际接触线。

如图 3 所示, 砂轮的轴向截面是平面曲线, 该曲线在砂轮坐标系 $O_w X_w Z_w$ 中可表示为

$$\left. \begin{aligned} x &= m(\mu) \\ y &= 0 \\ z &= g(\mu) \end{aligned} \right\} \quad (10) \quad \text{图 3 砂轮轴向截面曲线}$$

将轴截面绕 $O_w Z_w$ 轴转动, 即可形成砂轮回转面:

$$\mathbf{r}_w(\mu, \phi) = (x_w, y_w, z_w)^T = \begin{bmatrix} m(\mu) \cos \phi \\ m(\mu) \sin \phi \\ g(\mu) \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, ϕ 为砂轮转过的角度。

砂轮回转面的法向量可表示为

$$\mathbf{N}_w(\mu, \phi) = \frac{\partial \mathbf{r}_w}{\partial \mu} \times \frac{\partial \mathbf{r}_w}{\partial \phi} = \begin{bmatrix} -\frac{dg(\mu)}{d\mu} m(\mu) \cos \phi \\ -\frac{dg(\mu)}{d\mu} m(\mu) \sin \phi \\ \frac{dm(\mu)}{d\mu} m(\mu) \end{bmatrix} \quad (12)$$

在砂轮坐标系 $O_w X_w Y_w Z_w$ 中砂轮和齿轮的相对速度 \mathbf{V}_r^w 为

$$\mathbf{V}_r^w = \mathbf{V}_w^w - \mathbf{V}_g^w \quad (13)$$

$$\mathbf{V}_w^w = (\delta_x, 0, 0)^T$$

其中, \mathbf{V}_w^w 为砂轮上 P 点在坐标系 $O_w X_w Y_w Z_w$ 中的速度; \mathbf{V}_g^w 为齿轮上与 P 点相接触的 S 点在坐标系 $O_w X_w Y_w Z_w$ 中的速度, \mathbf{V}_g^w 可表示为

$$\mathbf{V}_g^w = \boldsymbol{\omega}^w \times \mathbf{r}_w + \mathbf{L} \times \boldsymbol{\omega}^w + p \boldsymbol{\omega}^w \quad (14)$$

$$\boldsymbol{\omega}^w = (0, -\sin \Sigma, \cos \Sigma)^T$$

$$\mathbf{L} = (a - a_x, 0, 0)^T$$

式中, $\boldsymbol{\omega}^w$ 为齿轮在 $O_w X_w Y_w Z_w$ 中的角速度。

根据砂轮与齿轮的啮合条件式^[10]

$$\mathbf{N}_w \cdot \mathbf{V}_r^w = 0 \quad (15)$$

联立式(12) ~ 式(15), 化简后可得

$$X_1 \cos \phi + X_2 \sin \phi + X_3 = 0 \quad (16)$$

$$X_1 = \frac{dg(\mu)}{d\mu} g(\mu) \sin \Sigma + \frac{dg(\mu)}{d\mu} \delta_x + \frac{dm(\mu)}{d\mu} m(\mu) \sin \Sigma$$

$$X_2 = \frac{dg(\mu)}{d\mu} (a - a_x) \cos \Sigma + \frac{dg(\mu)}{d\mu} p \sin \Sigma$$

$$X_3 = \frac{dm(\mu)}{d\mu} p \cos \Sigma - \frac{dm(\mu)}{d\mu} (a - a_x) \sin \Sigma$$

通过迭代法可以求出

$$\phi = \phi(\mu) \quad (17)$$

由式(6) 得 $\mathbf{r}_g = (\mathbf{M}_g \mathbf{M}_\theta)^{-1} \mathbf{r}_w(\mu, \phi)$, 最后可得实际接触线上点的坐标为

$$\left. \begin{aligned} x_g &= -m(\mu) \cos \phi + a - a_x \\ y_g &= -m(\mu) \sin \phi \cos \Sigma - g(\mu) \sin \Sigma \\ z_g &= -m(\mu) \sin \phi \sin \Sigma + g(\mu) \cos \Sigma \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

2.3 实际接触线上点的采集

结合上述实际接触线上点的求解过程可知, 式(18) 是一个关于 μ, θ 和 ϕ 的超越方程, 不易求得解析解。结合等误差算法和牛顿迭代法^[11], 遍历定义域内参数 $\mu_i \in [\mu_0, \mu_n]$, 将初值 θ_i 和 ϕ_i 代入式(18) 进行迭代计算, 直至满足精度要求为止。

将齿宽等分为 n 份, 通过式(2) 求得每个等分点处的鼓形量、中心距变动量以及对应的中心距, 便可得到若干条接触线上点的坐标。 n 越大, 得到的接触线越多。

综上即可生成图 4 所示的点阵, 其中 m 为每条接触线上离散点的个数, n 为齿宽方向接触线的数目。

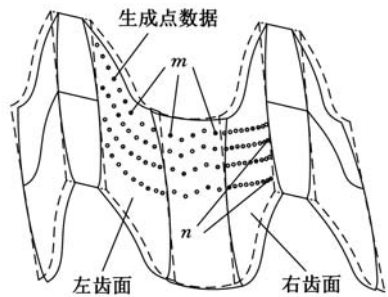


图 4 生成点阵

本文提出的接触线上点的采集方法, 可以嵌入 CNC 成形磨数控软件的接触线绘制模块中, 由软件自动计算生成点的坐标, 生成的接触线及砂轮截形如图 5、图 6 所示。

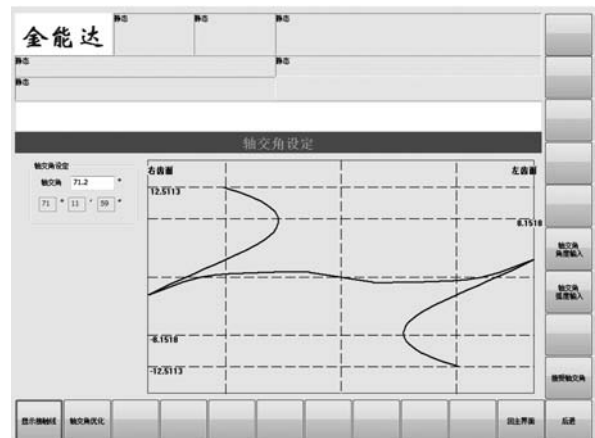


图 5 软件实现接触线绘制

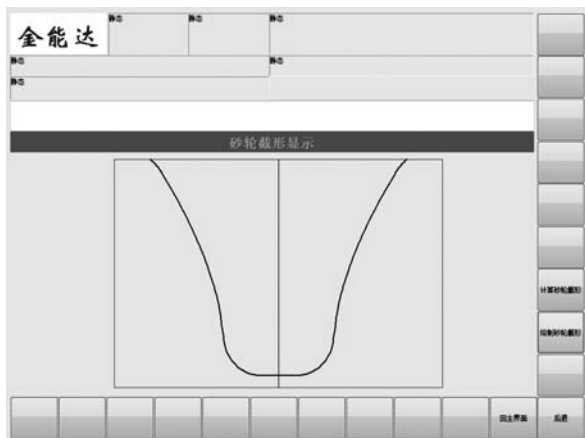


图 6 软件实现砂轮截形绘制

3 修形齿面构造及误差评价

3.1 基于 NURBS 的修形齿向齿面构造

本文采用自主研发的磨齿机软件,自动生成齿面上的离散数据,将生成的齿面坐标作为节点,完成双三次 NURBS 曲面拟合,构建出渐开线斜齿轮的修形齿面模型。

本文采用 B 样条插值曲面拟合齿面数据点的方法,构建齿面模型。B 样条曲面的拟合求解包括以下两个过程:①反算过程,求解拟合曲面的控制点;②正算过程,求解拟合后曲面上任意点的坐标值。采用上述方法^[12]便可构造出修形斜齿轮齿面模型。

3.2 修形齿面误差评价模型

为检验齿面拟合效果,需要将软件生成点拟合齿面与设计齿面进行对比。磨削开始时,砂轮总是先与斜齿轮齿槽一侧齿面接触,随后再与两侧齿面同时接触,磨削结束时,先是一侧齿面与砂轮脱离接触,随后另一侧再脱离砂轮,总存在接触线不完整现象^[6]。因此,本文取齿宽方向 80%^[7]的数据进行齿面评价。

影响齿面接触精度的主要因素有螺旋线偏差和齿廓偏差。

(1)螺旋线偏差模型。将构造好的修形齿面模型用假想的斜齿轮分度圆柱面切割,齿槽两侧左右齿面上与分度圆相交的线即为实际螺旋线。实际螺旋线与理论螺旋线的法向差值即为螺旋线偏差。

(2)齿廓偏差模型。将构造好的修形齿面模型绕齿轮轴旋转,使得实际齿形与标准渐开线斜齿轮(斜齿轮理论模型)齿形于渐开线起始圆处重合,则旋转后的曲线与标准渐开线之间的法向距离即为齿廓偏差。

4 拟合实例及精度检验

4.1 拟合实例

本文选取渐开线斜齿轮进行齿面构造,具体参数见表 1。

表 1 斜齿轮基本参数

齿数 z	19
模数 m_n (mm)	5
压力角 α ($^\circ$)	20
螺旋角 β ($^\circ$)	20
变位系数 x_n	0
齿顶圆直径 d_a (mm)	111.097
齿根圆直径 d_f (mm)	88.597
渐开线终止圆直径 d_{an} (mm)	94.6
渐开线起始圆直径 d_{af} (mm)	110
齿轮宽度 b (mm)	70
齿向修形量 δ (mm)	0.02
砂轮安装角 Σ ($^\circ$)	71.2528

将表 1 中数据输入自主研发的磨齿机软件中,沿接触线方向生成 141 个点,沿齿宽方向生成 81 个点,即生成 81 条接触线,按照 3.1 节的齿面拟合方法,拟合后的齿面如图 7、图 8 所示。

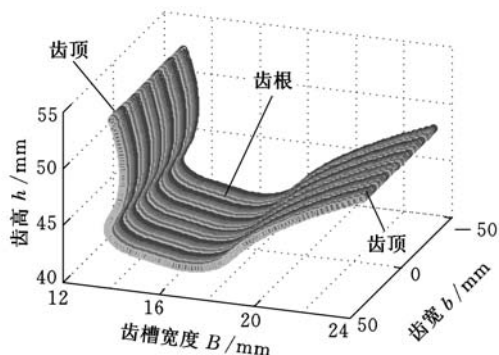


图 7 齿向修形齿面拟合图

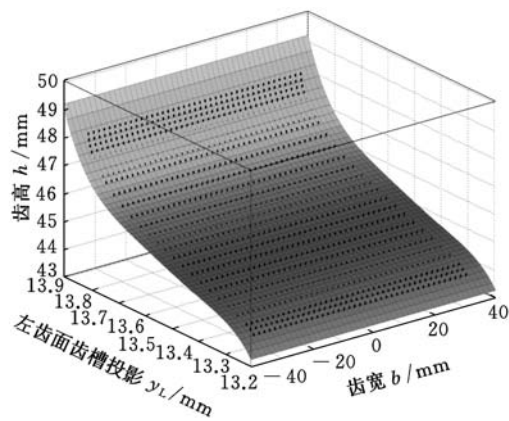
4.2 误差评价模型

为全面评价基于 NURBS 曲面构造的齿向修形斜齿轮齿面的误差,采用 3.2 节构造的误差评价模型,得到螺旋线偏差、齿廓偏差如图 9~图 11 所示。图 9 中,设计修形量为沿齿宽方向计算的理論修形量,实际修形量为实际加工过程中的修形量。

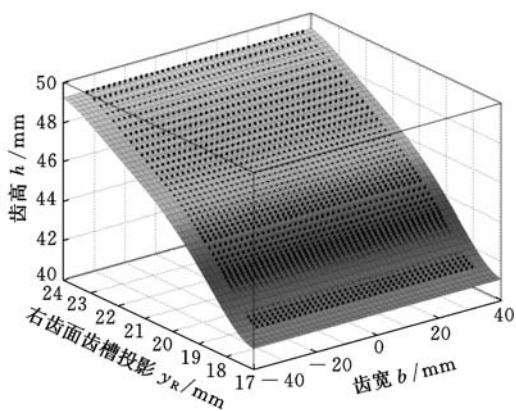
由图 10 可知,采用成形法磨削齿轮时,受齿向修形影响,左齿面发生“扭曲”现象,其最大扭曲量为 $5.222 \mu\text{m}$ (图 10b)。由图 11 可知,受齿向修形影响,齿轮修形渐开线段齿形最大误差值为 $0.6975 \mu\text{m}$ 。

4.3 误差补偿模型

在不产生磨削干涉条件^[13]下,本文对砂轮

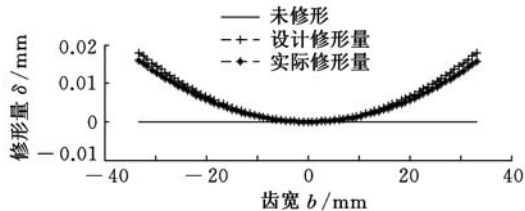


(a) 左齿面

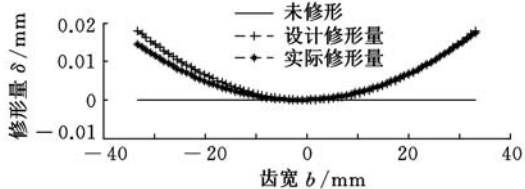


(b) 右齿面

图 8 齿向修形齿面



(a) 右齿面修形量

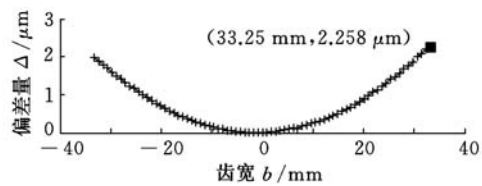


(b) 左齿面修形量

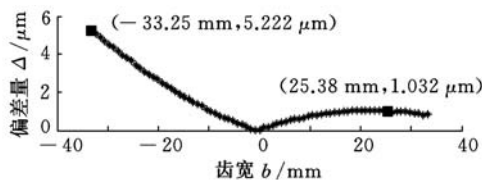
图 9 螺旋线修形量图

安装角等间距取值,得到齿面最大修形误差(齿向误差)随砂轮安装角的变化曲线,如图 12 所示。得到最优的砂轮安装角 $\Sigma = 71.858^\circ$,则其对应的螺旋线偏差,齿廓偏差如图 13、图 14 所示。

由图 14 可知,优化砂轮安装角后,左齿面发生“扭曲”现象减小,其最大扭曲量为 $1.785 \mu\text{m}$ (图 14b)。由图 15 可知,优化后,齿轮修形渐开线段齿形最大误差值为 $0.4074 \mu\text{m}$ 。

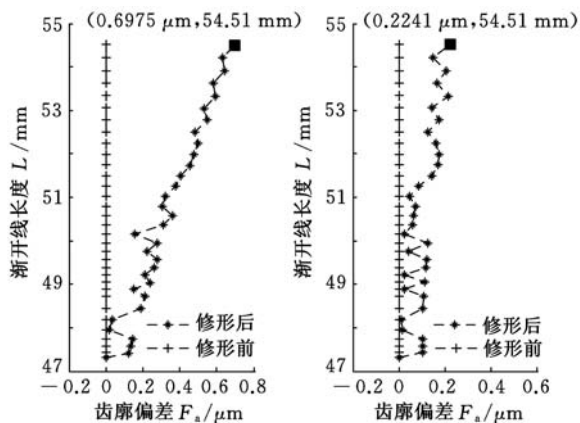


(a) 右齿面偏差量



(b) 左齿面偏差量

图 10 螺旋线偏差图



(a) 右齿面

(b) 左齿面

图 11 齿廓偏差图

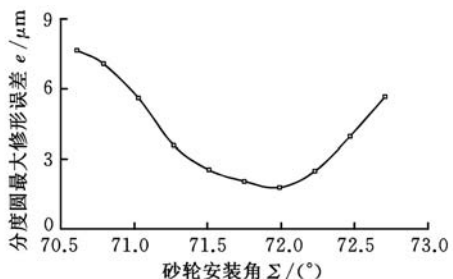
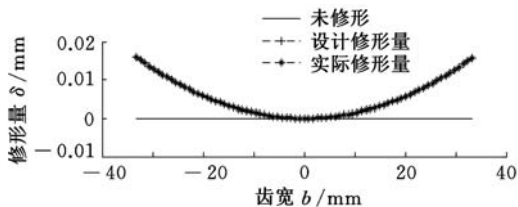
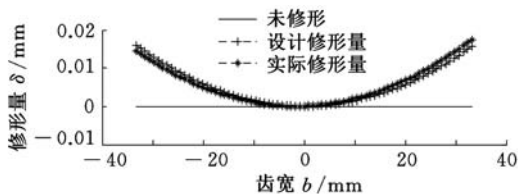


图 12 最大修形误差随砂轮安装角变化关系

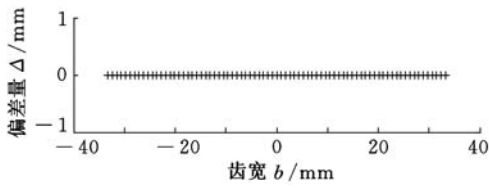


(a) 右齿面修形量

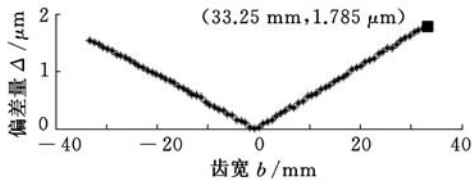


(b) 左齿面修形量

图 13 螺旋线修形量图(优化后)

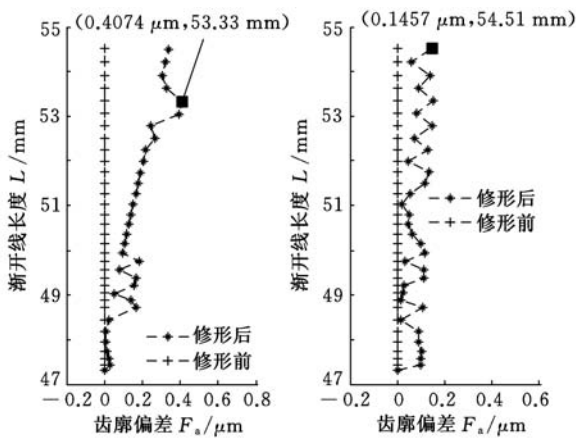


(a) 右齿面偏差量



(b) 左齿面偏差量

图 14 螺旋线偏差图(优化后)



(a) 右齿面

(b) 左齿面

图 15 齿廓偏差图(优化后)

5 磨削实验

本文磨齿加工实验采用自主研发的多功能成形磨削机床^[14],被加工齿轮及机床如图 16 所示。针对表 1 所列斜齿轮参数,结合实际加工要求对接触线进行优化,确定砂轮安装角,然后编制数控加工程序完成砂轮的自动修整和齿轮的精密磨削。完成磨齿加工实验后采用齿轮测量仪进行检测。

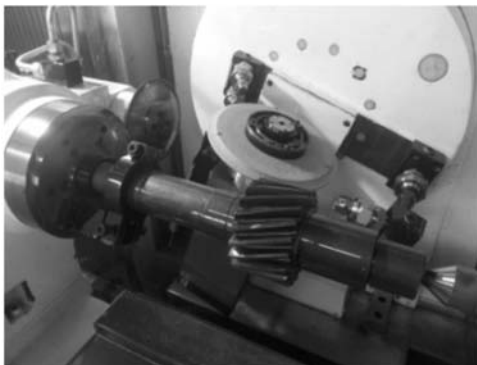


图 16 L300G 成形磨削实验台

优化前齿形齿向如图 17 所示,加工后齿轮齿形精度已达到 4 级,齿向方面,由于鼓形修形缘故,右齿面齿向呈“鼓形”分布,左齿面出现了较大的“修形扭曲”,与预测“修形扭曲”相近。

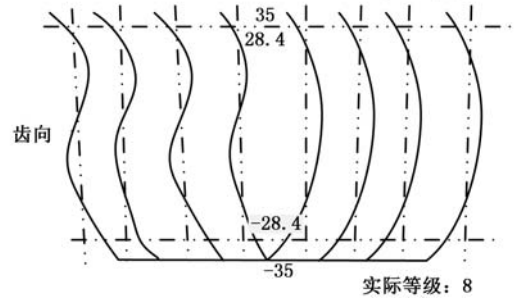
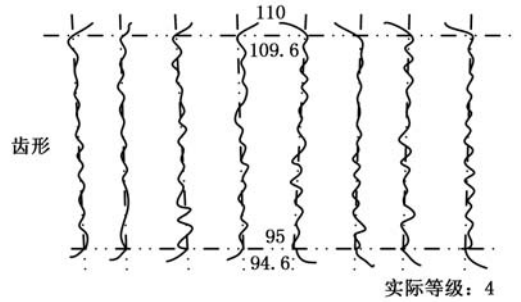


图 17 优化前齿形齿向

优化后齿形齿向如图 18 所示,齿形精度进一步提高,齿向方面,“修形扭曲”得以消除,修形误差进一步减小。

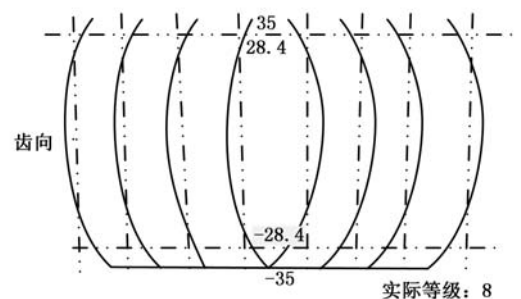
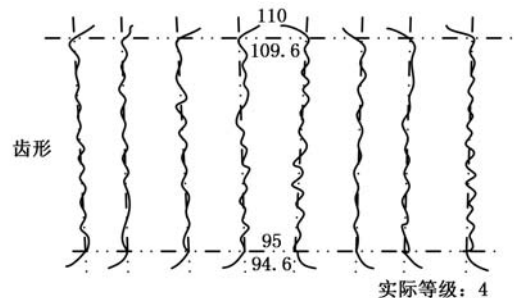


图 18 优化后齿形齿向

6 结语

根据齿向修形的特点,结合啮合关系,得到了砂轮与齿轮实际接触线计算方法;构造了齿向修形斜齿轮齿面模型,并进行了齿面误差预测与补偿;通过计算实例和磨齿实验,验证了齿面误差预测与补偿模型的准确性,以及齿向修形齿面构造

的高精度性。研究结果可为后续进行齿廓与齿向综合修形研究提供参考。

参考文献:

- [1] Youichi K, Noriteru N, Yasuhiko O, et al. Tooth Trace Modification Processing of Helix Gear by Form Grinding Method[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, 1995, 61: 4088-4093.
- [2] Youichi K, Noriteru N, Yasuhiko O, et al. Tooth Flank Modification Processing of Helical Gears by Form Grinding Method[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, 1999, 65: 4458-4463.
- [3] 梁锡昌, 邵明, 吉野英弘, 等. 齿轮及其刀具制造的研究[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2001.
- [4] 周玉山, 邵明. 粉末冶金齿轮磨具成形磨齿砂轮的廓形计算方法[J]. 机械工程学报, 2005, 41(1): 162-165.
Zhou Yushan, Shao Ming. Form Grinding Technology for the Mold of Powder Metallurgy Gears[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(1): 162-165.
- [5] 郭二廓, 黄筱调, 袁鸿, 等. 斜齿轮成形磨削接触线优化研究[J]. 机械科学与技术, 2012, 31(8): 1320-1324.
Guo Erkuo, Huang Xiaotiao, Yuan Hong, et al. Optimization of Contact Line for Form Grinding of Involute Helical Gears[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012, 31(8): 1320-1324.
- [6] 汪中厚, 朱文敏, 李刚, 等. 基于神经网络的修形斜齿轮成形磨削中的接触线优化方法[J]. 中国机械工程, 2014, 25(12): 1665-1671.
Wang Zhonghou, Zhu Wenmin, Li Gang, et al. Optimization of Contact Line for Form-grinding Modified Helical Gears Based on Neural Network[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(12): 1665-1671.
- [7] 李国龙, 李先广, 刘飞, 等. 拓扑修形齿轮附加径向运动成形磨削中的砂轮廓型优化方法[J]. 机械工程学报, 2008, 47(11): 155-162.
Li Guolong, Li Xianguang, Liu Fei, et al. Method of Profile Optimization of a Form Grinding Wheel

for Grinding with Additional Radial Motion of Topologically Modified Gear[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 47(11): 155-162.

- [8] 郭二廓, 黄筱调, 袁鸿, 等. 基于提高成形磨削效率和精度的接触线优化[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(1): 67-74.
Guo Erkuo, Huang Xiaotiao, Yuan Hong, et al. Contact Line Optimization for Improving Efficiency and Precision of Form Grinding[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(1): 67-74.
- [9] 方成刚, 葛海燕, 洪荣晶. 砂轮偏心对单侧成形磨齿齿形误差的影响分析[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(11): 2509-2514.
Fang Chenggang, Ge Haiyan, Hong Rongjing. Effect of Grinding Wheel Eccentricity on Unilateral Gear Form Grinding Profile Error[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(11): 2509-2514.
- [10] 李特文. 齿轮几何学与应用理论[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2008.
- [11] 李儒荀. 刀具设计原理与计算[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1985.
- [12] 高嘉伟. 自由曲面空间结构集合及拓扑形态创构[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [13] 方成刚, 黄筱调, 郭二廓, 等. 基于砂轮姿态优化的修形齿轮成形磨削刀路规划[J]. 南京工业大学学报, 2013, 35(5): 87-93.
Fang Chenggang, Huang Xiaotiao, Guo Erkuo, et al. Tool Path Planning for Lead Modification of Form Grinding Based on Wheel Configuration Optimization[J]. Journal of Nanjing University of Technology, 2013, 35(5): 87-93.
- [14] 陈敢, 汪中厚, 王锦华, 等. 多功能成型磨削机床: 中国, CN201210253987.9[P]. 2012-10-17.

(编辑 苏卫国)

作者简介: 汪中厚, 男, 1963年生。上海理工大学机械工程学院教授。主要研究方向为齿轮动态力学性能仿真、三维复杂曲面测量技术、CAE及其应用。发表论文70余篇。宋小明(通信作者), 男, 1988年生。上海理工大学机械工程学院硕士研究生。何伟铭, 男, 1962年生。日本中央大学理工学部研究员, 上海理工大学机械工程学院副教授。李刚, 男, 1986年生。上海理工大学机械工程学院博士研究生。朱文敏, 男, 1992年生。上海理工大学机械工程学院硕士研究生。耿直, 男, 1990年生。上海理工大学机械工程学院硕士研究生。