

内齿轮刮齿刀修形设计及优化

苏进展, 王远庆, 魏刚, 杨羽, 常乐浩

(长安大学道路施工技术与装备教育部重点实验室, 710064, 西安)

摘要: 为了降低内齿轮刮齿的原理性误差,提出了一种刮齿刀修形设计新方法。从具有齿廓修形的齿条刀出发,结合变位渐开线斜齿轮的展成原理,推导了连续变位刮齿刀的齿面方程;联立刮齿刀齿面和前刀面方程,求解刮齿刀切削刃的数学表达式,根据双自由度包络理论和齐次坐标变换,建立内齿轮的刮齿模型,获得内齿轮齿面方程。算例表明,刮齿刀的变位方式、前角和螺旋角是造成原理性误差的主要影响因素;相比于公式法,基于修形齿条刀法的切削刃更接近于反向包络法的切削刃;建立以齿面偏差平方和最小为目标函数,通过优化齿条刀的齿廓修形系数,能够将齿面偏差最大值从 $18\text{ }\mu\text{m}$ 降低到 $3\text{ }\mu\text{m}$,有效地减小原理性误差。此研究可为刮齿刀设计提供一种更简单、精度更高的新方法。

关键词: 刮齿刀;内齿轮;齿廓修形;齿面偏差;切削刃

中图分类号: TH161 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202111016 **文章编号:** 0253-987X(2021)11-0147-07



OSID 码

Modification Design and Optimization of Internal Gear Skiving Tool

SU Jinzhan, WANG Yuanqing, WEI Gang, YANG Yu, CHANG Lehao

(Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment of MOE, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to reduce the principle error of a skiving tool in generation of internal gears, a new type of modified skiving tool is proposed. Starting from the rack cutter with profile modification, and combining with the principle of the generation of the shifting involute, the tooth surface equation of the continuous shifting skiving tool is derived, and the equations of the skiving tooth surface and rake surface are combined to obtain a mathematical expression of the cutting edge of skiving tool. A mathematical model of internal gear is established based on the double-DOF envelope theory and homogeneous coordinate transformation, then the tooth surface equation can be obtained consequently. A numerical example shows that the shifting mode, rake angle and helix angle of the skiving tool are the main factors causing the principle error. Compared with the formula method, the cutting edge of the new type of skiving tool profile based on the rack-cutter method is closer to the reversely-enveloped cutting edge, and the tooth surface deviation can be reduced by optimizing the profile modification coefficient of rack-cutter with the minimum square sum of tooth surface deviations as the objective function, and the maximum value of the tooth surface deviations can be reduced from $18\text{ }\mu\text{m}$ to $3\text{ }\mu\text{m}$, resulting in a obvious decrease of the principle error of skiving tool.

Keywords: skiving tool; internal gear; profile modification; tooth surface deviation; cutting edge

采用滚、插一体的强力刮齿是一种高效、高精度的齿轮加工技术,其生产效率是插齿的4~4.2倍,加工精度可达DIN7级,特别适合于非贯通、无退刀槽的内齿轮加工^[1-2]。近年来,国际上一些著名的齿轮公司都开发出先进的强力刮齿机床,例如 Gleason 公司的400/600PS、德国 Pittler PV 系列等,其配套的刮齿刀具与普通插齿刀在结构上十分相似,差别在于前刀面为空间平面且两侧刀刃不对称,以满足齿轮加工中连续滚切的工艺要求,从而形成原理性误差,增加刃磨的复杂性和制造成本。目前,国内外学者对刮齿技术的研究主要集中在刮齿原理和刮齿刀的设计上。毛世民等基于双自由度包络的理论,提出一种无误差刮齿刀切削刃的计算方法,并对刀具工作前角和后角进行了分析,引入一种改进的多边进给技术,减少刮削工具上凹边缘的磨损^[3-6];李佳等根据空间交错轴啮合理论,提出了一种无理论误差刃形的直齿刮齿刀具设计与制造方法,并构造了刮齿机床的结构模型,进行了加工试验^[7-8]。陈新春依据齿面形成原理,提出刮齿刀的数学模型,进行前、后刀面及前、后角设计。同时,提出刮齿刀齿廓修形及参数优化方法^[9]。Shih 等采用反向包络法计算无误差刀刃曲线,并用 B 样条拟合刀具齿面,再根据拟合曲面在多轴数控刃磨机上制造出无误差刮齿刀^[10]。郭二廓等计算了车齿刀切削刃,并进行了刀具结构设计,提出一种多刃形刮齿刀,并对螺旋刮齿刀进行了改进,该结构可以避免摩擦和干扰,并使切削负荷均匀化^[11-14]。尽管多刃形刀具的理论切削效率更高,但是其制造难度也十分大,很难实现量产。郭二廓等提出了一种用于加工渐开线齿形的锥齿刮齿刀刃形计算方法。之后针对强力刮齿技术中存在的单刃型刀具使用寿命短的问题,提出一种更为高效的新型锥形多刃刮齿刀具^[15-17]。Tsai 提出了一种基于共轭齿面重磨刮齿刀的方法^[18]。Osafune 等提出了一种用于内齿轮刮削的切削刃连续变化工作的评价方法^[19]。Schulze 等通过仿真分析刮齿运动的条件以及切屑形成机理,对工艺可靠性的影响进行了评估^[20]。Klocke 等研究了几何加工设置对刮齿切屑厚度及滑动速度的影响^[21]。Moriwaki 等对刮齿切削参数进行了详细的分析和设计^[22]。Uriu 等通过计算切削刀具参数对刮齿轴交角的有效性进行了研究^[23]。Vargas 等考虑局部前角对刮齿过程切削力进行了数值模拟^[24]。Onozuka 等提出了一种根据有效前角变化的影响来识别切削力系数的方法,并与实际测量力进行比较,将

误差控制在15%以内^[25]。

综上所述,国内外学者已掌握了刮齿原理,由于刮齿刀的几何结构和制造工艺的复杂性,使得高效率、高精度、低成本的刮齿刀设计与制造工艺逐步成为刮齿技术的关键。刮齿刀的切削刃是通过连续变位渐开线公式获得,称之为公式法,但是用该类型刀具加工的齿轮存在原理性误差。无误差刮齿刀设计方法是基于反向包络法,其基本原理为:从工件齿面出发,采用反向包络求出给定刃磨深度的刀刃曲线,再由一系列刀刃曲线拟合成刀具曲面;该方法计算过程复杂,刀具曲面拟合时会不可避免地产生误差,且刃磨工艺复杂,需要在多轴联动刃磨机上实现,因此在实际生产中应用较少。

首先,从齿条刀出发推导修形变位刮齿刀齿面,建立新型刮齿刀的实体模型,称之为修形齿条刀法;然后,比较由反向包络法、公式法和修形齿条刀法所建立的切削刃差异,通过修形优化减小由原理性误差造成的齿面偏差,为该新型刮齿刀的设计和开发奠定理论基础,同时也为基于刮齿技术的齿面修形提供新途径。所提出的新型修形刮齿刀是连续齿面,在刀具曲面的设计、制造工艺及刃磨等方面都容易实现。

1 刮齿原理

刮齿加工可视为刮齿刀与工件之间的滚插运动,即两者按照一定的滚比做滚切运动的同时,刀具沿着工件轴线做插削运动。图1为刮齿原理坐标系,表明了刀具和工件相对位置关系, S_1 为工件参考坐标系, S_{1s} 为工件动坐标系, S_2 为刀具参考坐标系, S_{2s} 为刀具动坐标系, Σ 为刮齿刀和工件的轴线交角, E 为中心距, ω_1 为工件角速度, ω_2 为刀具角速

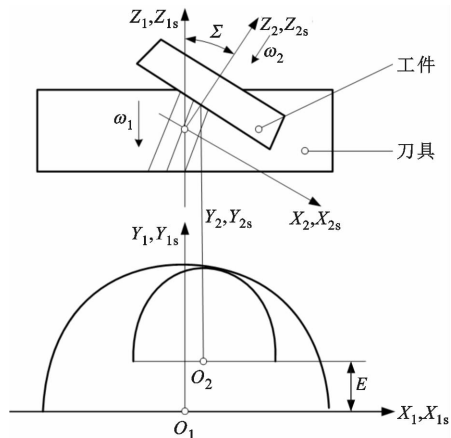


图1 刮齿原理坐标系

Fig. 1 Coordinate system of the gear skiving principle

度,且满足

$$\omega_1 = \frac{z_2}{z_1} \omega_2 - \frac{v_f}{p} \quad (1)$$

式中: z_1 、 z_2 分别为工件齿数和刮齿刀齿数; v_f 为加工时刀具沿着工件轴向的走刀速度; p 是螺旋参数。由上式可知,工件的角速度是由工件与刀具对滚的角速度和刀具轴向进给运动产生的附加转动角速度组成的。

2 刮齿刀设计

2.1 刮齿刀齿面

图 2 为修形齿条刀法向齿廓示意图,坐标系 S_t 是切削刃上的参考坐标系;坐标系 S_b 定义在齿条刀对称中心上, α 为齿形角, $a_m = \pi m_n / 4$ 为齿条刀槽宽一半, m_n 为齿轮法向模数。在 S_t 中,切削刃的位置矢量为 $\mathbf{r}_t(u_t, l_t) = [au_t^2 \quad u_t l_t \quad 1]^T$, a 为抛物线修形系数; u_t 为切削点 B 到原点 O_t 的距离; l_t 为齿条刀的齿向位置参数;齿条刀参考坐标系 S_b 和齿条刀动坐标系 S_c 之间的关系如图 2 所示。

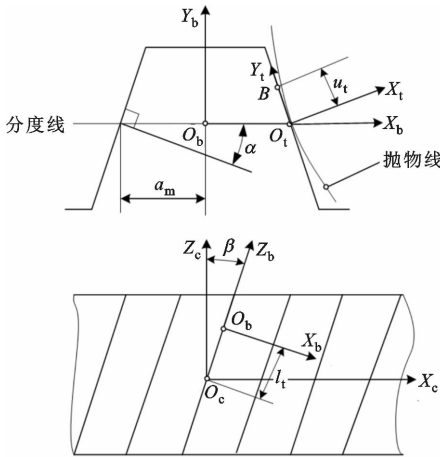


图 2 修形齿条刀法向齿廓

Fig. 2 Normal tooth profile of rack-cutter with modification

将坐标 S_t 变换到 S_c 中得到齿条刀动坐标系的位置矢量为

$$\mathbf{r}_c(u_t, l_t) = \mathbf{M}_{cb} \mathbf{M}_{bt} \mathbf{r}_t(u_t, l_t) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{M}_{bt}$ 为坐标系 S_t 到坐标系 S_b 的转换矩阵; $\mathbf{M}_{cb}$ 为坐标系 S_b 到坐标系 S_c 的转换矩阵; β 为齿轮螺旋角。进一步可推导出齿条刀的单位法向矢量为

$$\mathbf{n}_c(u_t, l_t) = \frac{\partial \mathbf{r}_c(u_t, l_t)}{\partial u_t} \times \frac{\partial \mathbf{r}_c(u_t, l_t)}{\partial l_t} \quad (3)$$

图 3 为齿条刀加工连续变位刮齿刀的坐标系, S_a 是刮齿刀的参考坐标系; S_s 是刮齿刀动坐标系;

齿条刀变位量 $x_{lt} m_n$ 中: x_{lt} 为不同齿向位置处的变位系数;变位系数 x_{lt} 可由下式计算

$$x_{lt} = x_0 \cos(\beta) - l_t \tan(\alpha_0 \cos(\beta)) / m_n \quad (4)$$

式中: x 为前刀面上的最大变位系数; α 为刮齿刀顶刃后角。

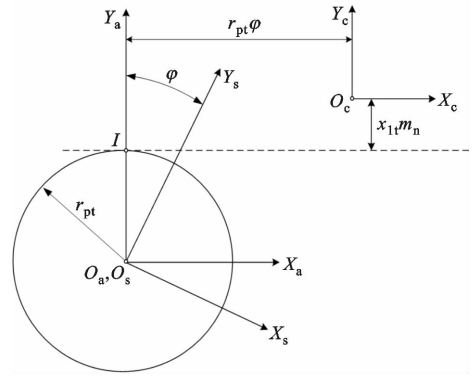


图 3 齿条刀加工连续变位刮齿刀的坐标系

Fig. 3 Coordinate system of rack-cutter for machining skiving tool in continuous shifting

由渐开线齿轮的展成原理可知,工件转动 φ , 对应的齿条沿着节线移动 $r_{pt} \varphi$, r_{pt} 为工件的节圆半径。由齿条刀推导刮齿刀的啮合条件为:齿条刀切削刃上的任一点与瞬心 I 的连线为该切削点的法向方向,即满足如下的空间直线方程

$$\frac{X_c - x_c}{n_{cx}} = \frac{Y_c - y_c}{n_{cy}} = \frac{Z_c - z_c}{n_{cz}} \quad (5)$$

式中: x_c, y_c, z_c 为 $\mathbf{r}_c$ 的坐标分量; n_{cx}, n_{cy}, n_{cz} 为 $\mathbf{n}_c$ 的坐标分量; X_c, Y_c, Z_c 为瞬心 I 在 S_c 中的坐标分量; $X_c = -r_{pt} \varphi, Y_c = -x_{lt} m_n$ 。可解得

$$\varphi = (x_c n_{cy} - y_c n_{cx}) / r_{pt} n_{cx} \quad (6)$$

通过式(6)消去工件转角 φ , 在 S_s 中刮齿刀齿面的位矢 $\mathbf{r}_s$ 和法矢 $\mathbf{n}_s$ 表示为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{r}_s(u_t, l_t) &= \mathbf{M}_{sc} \mathbf{r}_c(u_t, l_t) \\ \mathbf{n}_s(u_t, l_t) &= \mathbf{L}_{sc} \mathbf{n}_c(u_t, l_t) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{M}_{sc}$ 是 S_c 到 S_s 的转换矩阵; $\mathbf{L}_{sc}$ 是矩阵 $\mathbf{M}_{sc}$ 去掉最后一行和最后一列的矩阵。

2.2 切削刃方程

图 4 为刮齿刀结构示意图,与普通插齿刀的不同之处在于前刀面的定义上。刮齿刀前刀面是在前角 γ 的基础上,还绕着 Y 轴方向旋转螺旋角 β ,使得前刀面上的左右两侧切削刃出现不对称,切削刃在刀具端面上的投影不再是标准渐开线,从而形成了刮齿刀的原理性误差。

取前刀面顶刃中点 m 为参考点,则点 m 的位矢 $\mathbf{r}_m$ 及前刀面的法向量 $\mathbf{n}_m$ 可由下式确定

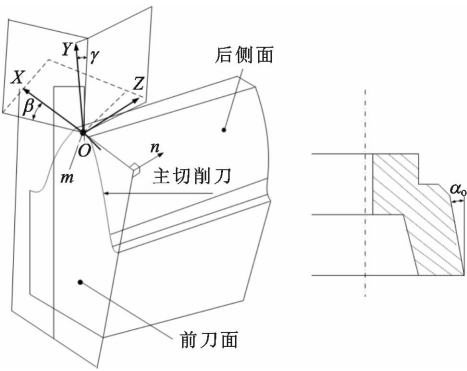


图 4 刮齿刀结构
Fig. 4 Structure of skiving tool

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{r}_m(u_t, l_t) = & \left[-\rho_{at}(z_{2s})\sin\theta \quad \rho_{at}(z_{2s})\cos\theta \quad z_{2s} \quad 1 \right]^T \\ \mathbf{n}_m = & \begin{bmatrix} -\sin\gamma\sin\theta - \cos\gamma\sin\beta\cos\theta \\ \cos\theta\sin\gamma - \cos\gamma\sin\beta\sin\theta \\ \cos\beta\cos\gamma \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} \rho_{at}(z_t) &= \frac{m_n z_t}{2\cos\beta_t} + m_n(1.25 + x_{lt}) \quad (9) \\ \theta &= 2\pi h/L_t \quad (10) \end{aligned}$$

式中： L_t 为刮齿刀的螺旋导程。切削刃是前刀面和刮齿刀齿面的交线，可表示为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{n}_m g(\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_m) &= 0 \\ x_s^2(u_t, l_t) + y_s^2(u_t, l_t) &= r^2 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中： x_s, y_s, z_s 分别为刮齿刀齿面的 3 个坐标分量； x_m, y_m, z_m 分别为前刀面上参考点的位矢坐标分量； r 为切削刃位置参数。切削刃的切矢 $\mathbf{t}_s$ ，可由刮齿刀齿面法矢 $\mathbf{n}_s$ 和前面刀法矢 $\mathbf{n}_m$ 得到

$$\mathbf{t}_s = \mathbf{n}_s(u_t, l_t) \times \mathbf{n}_m \quad (12)$$

3 刮齿加工

图 5 是刮齿加工的坐标系， φ_2 是刮齿刀的转角； φ_1 是工件转角； E 为中心距； v 为刀具沿着工件轴向的位移； Σ 为轴交角。

经过坐标变换，在工件动坐标系 S_1 中，内齿轮的位矢 $\mathbf{r}_1$ 和切矢 $\mathbf{t}_1$ 为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{r}_1(u_t, l_t, \varphi_2, v) &= \mathbf{M}_{12}(\varphi_1(\varphi_2), v) \mathbf{M}_{2s}(\varphi_2) \mathbf{r}_s(u_t, l_t) \\ \mathbf{t}_1(u_t, l_t, \varphi_2, v) &= \mathbf{M}_{12}(\varphi_1(\varphi_2), v) \mathbf{M}_{2s}(\varphi_2) \mathbf{t}_s(u_t, l_t) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中： $\mathbf{M}_{2s}$ 为 S_s 到 S_2 的转换矩阵； $\mathbf{M}_{12}$ 为 S_2 到 S_1 的转换矩阵；工件加工转角 $\varphi_1 = m_{21}\varphi_2 + 2\pi v/L_g$ ；滚比 $m_{21} = z_1/z_2$ ；工件导程 $L_g = \pi z_2 m_n / \sin\beta$ 。根据双自

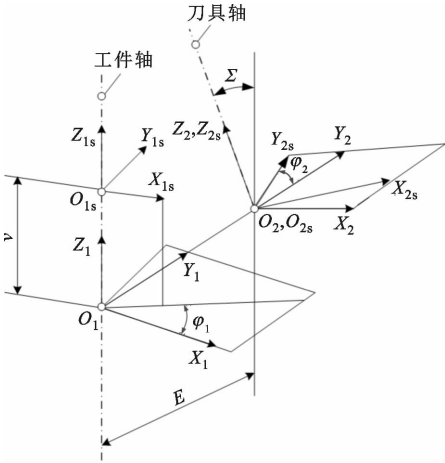


图 5 刮齿加工坐标系
Fig. 5 Coordinate system of gear skiving

由度包络原理，可得啮合方程^[3]

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{n}_1(u_t, l_t) &= \mathbf{t}_1(u_t, l_t) \times \mathbf{v} \\ \mathbf{n}_1(u_t, l_t)(\rho \mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_1 \times \mathbf{r}_1(u_t, l_t)) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中： $\mathbf{v}$ 为工件定系 S_1 下刮齿刀与工件齿轮的相对回转运动的速度； $\mathbf{k}_1$ 为 S_1 中 z_1 方向的单位向量。联立式(11)(13)和(14)组成的非线性方程组，求出内齿轮的齿面方程。

4 算 例

表 1 为刀具和工件齿轮的基本参数，联合求解式(7)(11)得到刮齿刀齿面和切削刃上点坐标，将坐标点导入 CATIA 中，采用逆向建模得到刮齿刀实体模型，如图 6 所示。

表 1 刮齿刀与内齿轮基本参数

Table 1 Basic parameters of skiving tool and internal gear

参数	数值	
	刮齿刀	内齿轮
压力角/(°)	20.00	20.00
模数/mm	2.00	2.00
齿数	31	57
齿宽/mm	10.00	20.00
螺旋角/(°)	15.00	5.00
最大变位系数	0.25	
顶刃后角/(°)	6.00	

图 7 为齿条刀法、公式法和反向包络法求得的前刀面切削刃曲线。采用反向包络法可计算得到无误差刀刃曲线^[8]，以通过此方法求得的刀刃曲线为基准比较齿条刀法和公式法的齿面偏差。由图 7 切削刃曲线的局部放大图可知，齿条刀法、公式法下

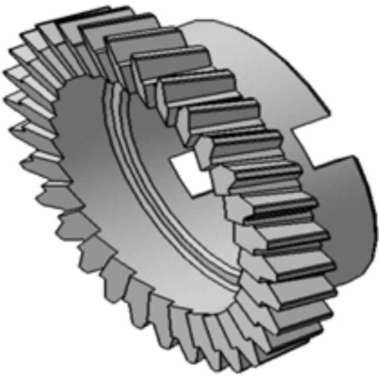


图 6 刮齿刀实体模型
Fig. 6 Solid model of skiving tool

计出的切削刃与无误差切削刃相比均有一定偏差,这也是导致加工时存在齿面偏差的主要原因。从图 7 可以看出,齿条刀法求得的刀刃曲线相比于公式法,更接近反向包络法得到的切削刃。在齿条刀法的基础上,建立以齿面偏差平方和最小为目标函数,取齿条刀的齿廓修形系数 a 为优化变量,采用一维黄金分割搜索法求解最佳修形系数。图 7 给出了修形后的刀刃曲线($a=0.001\ 2$)与原刀刃曲线的对比,由图 7 的局部放大图可知,修形后的刀刃曲线更逼近反向包络法下求得的刀刃曲线。

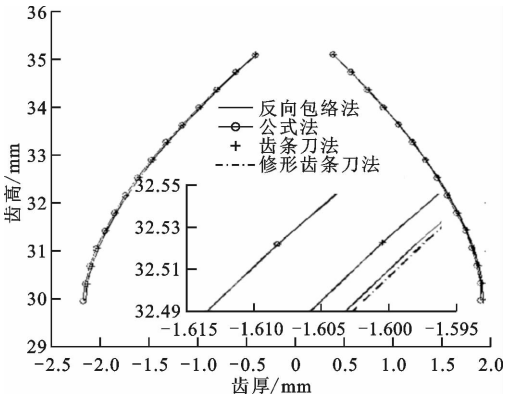


图 7 切削刃曲线比较
Fig. 7 Comparison of cutting edge curves

以反向包络求得的工件齿面作为基准齿面,分别用公式法和齿条刀法求出内齿轮齿面,并与基准齿面比较形成齿面偏差。图 8a 为公式法下求得的齿面偏差图,图 8b 为齿条刀法下求得的内齿轮齿面偏差图,由图 8 可见,两侧齿面偏差均呈不对称分布,公式法的偏差最大值为 $24\ \mu\text{m}$,齿条刀法的偏差最大值为 $18\ \mu\text{m}$,采用齿条刀法获得的齿面偏差较小,这与图 7 中切削刃曲线接近程度相对应。图 9 为修形优化后的齿面偏差,显然齿面偏差最大值从原来 $18\ \mu\text{m}$ 降低到了 $3\ \mu\text{m}$,但仍存在两侧误差分布

不均匀现象,这是由于刮齿刀的两侧切削刃不对称引起的。

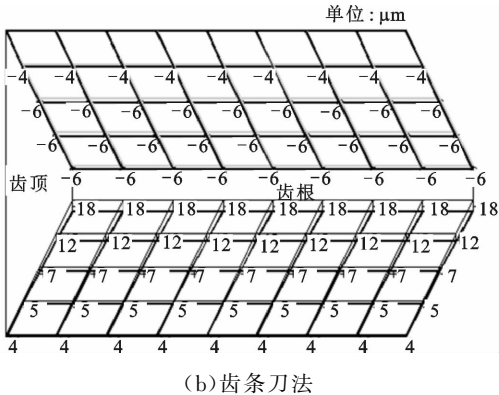
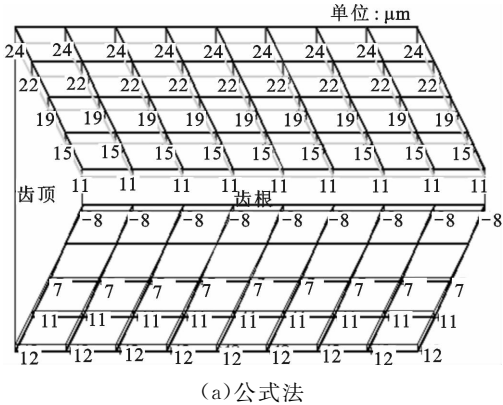


图 8 两种刮齿刀的齿面偏差
Fig. 8 Tooth surface deviations of two skiving tools

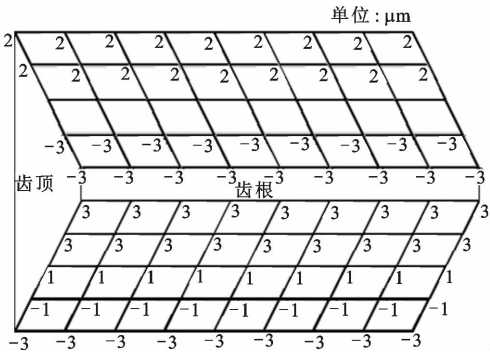


图 9 修形优化后的齿面偏差
Fig. 9 Tooth surface deviation after modification optimization

5 结 论

以反向包络法求得的切削刃作为无误差切削刃,将其与文中采用的修形齿条刀法、齿条刀法以及公式法求得的 3 种切削刃进行比较分析,得到如下结论:

(1)相比公式法,齿条刀法求得的切削刃更接近反向包络法的切削刃,且获得的齿面偏差最大值较

公式法降低了 $6\text{ }\mu\text{m}$,这是由于两者渐开线的变位方式不同引起的。

(2)通过优化齿条刀的齿廓修形系数,使得修形齿条刀法获得的齿面偏差最大值由修形前的 $18\text{ }\mu\text{m}$ 降低到了 $3\text{ }\mu\text{m}$,修形齿条刀法能够有效地降低齿面偏差。

(3)由于刮齿刀前刀面上的左右两侧切削刃不对称,切削刃在刀具端面上的投影不再是标准渐开线。限于抛物线齿廓修形对齿面修整能力和两侧刃具有相同的抛物线系数,因此仅从齿廓修形优化很难实现将两个齿面误差同时降低到很小甚至消除。进一步,若两侧采用不同的样条曲线修形,理论上能够同时完全消除齿面偏差,其实质类似于反向包络法,但增加刮齿刀制造成本。

参考文献:

- [1] Gardner Business Media Inc. What is power skiving? [J]. Modern Machine Shop, 2014, 87(4): 14.
- [2] STADTFELD H J. Power skiving of cylindrical gears on different machine platforms [J]. Gear Technology, 2014, 31(1): 52-62.
- [3] 毛世民. 车齿齿形分析 [J]. 机械传动, 2014, 38(10): 50-53.
MAO Shimin. Analysis of the skiving gear profile [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2014, 38(10): 50-53.
- [4] GUO Zheng, MAO Shimin, DU Xiaofeng, et al. Influences of tool setting errors on gear skiving accuracy [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(9): 3135-3143.
- [5] GUO Zheng, MAO Shimin, LIANG Huyan, et al. Research and improvement of the cutting performance of skiving tool [J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 120: 302-313.
- [6] 郭正. 车齿线面双自由度啮合原理及切削机理研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2020: 14-23.
- [7] 李佳, 娄本超, 陈新春. 基于自由曲面的刚齿刀结构设计 [J]. 机械工程学报, 2014, 50(17): 157-164.
LI Jia, LOU Benchao, CHEN Xinchun. Structural design of slice cutter based on free-form surface [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(17): 157-164.
- [8] 陈新春. 无理论刃形误差刚齿刀设计与制造基础研究 [D]. 天津: 天津大学, 2013: 30-42.
- [9] 陈新春. 圆柱齿轮刚齿技术研究 [D]. 天津: 天津大学, 2010: 22-46.
- [10] SHIH Y P, LI Yunjun. A novel method for producing

a conical skiving tool with error-free flank faces for internal gear manufacture [J]. Journal of Mechanical Design, 2018, 140(4): 043302.

- [11] GUO Erkuo, HONG Rongjing, HUANG Xiaodiao, et al. Research on the design of skiving tool for machining involute gears [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(12): 5107-5115.
- [12] GUO Erkuo, HONG Rongjing, HUANG Xiaodiao, et al. A correction method for power skiving of cylindrical gears lead modification [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015, 29(10): 4379-4386.
- [13] GUO Erkuo, REN Naifei, REN Xudong, et al. An efficient tapered tool having multiple blades for manufacturing cylindrical gears with power skiving [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102(9): 2823-2832.
- [14] GUO Erkuo, HONG Rongjing, HUANG Xiaodiao, et al. Research on the cutting mechanism of cylindrical gear power skiving [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79(1): 541-550.
- [15] 郭二廓, 洪荣晶, 黄筱调, 等. 数控强力刮齿加工锥齿刀刃形计算 [J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2015, 37(4): 57-62.
GUO Erkuo, HONG Rongjing, HUANG Xiaodiao, et al. Calculation of tapered skiving tool for power skiving process [J]. Journal of Nanjing University of Technology(Natural Science Edition), 2015, 37(4): 57-62.
- [16] 郭二廓, 任乃飞, 王杰, 等. 锥形多刃刮齿刀具切削成形过程仿真分析 [J]. 机械传动, 2019, 43(11): 116-120, 126.
GUO Erkuo, REN Naifei, WANG Jie, et al. Simulation analysis of the forming process of tapered multi-blade scraper tool [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2019, 43(11): 116-120, 126.
- [17] 郭二廓. 数控强力刮齿技术基础理论及应用研究 [D]. 南京: 南京工业大学, 2016: 47-50.
- [18] TSAI C Y. Mathematical model for design and analysis of power skiving tool for involute gear cutting [J]. Mechanism and Machine Theory, 2016, 101: 195-208.
- [19] OSAFUNE T, NAKAMURA M, IBA D, et al. Tooth geometry design of cylindrical skiving cutter for internal gears; an attempt to optimization [J]. The Proceedings of the Machine Design and Tribology Division Meeting in JSME, 2016, 2016. 16: B4-1.
- [20] SCHULZE V, KÜHLEWEIN C, AUTENRIETH H.

3D-FEM modeling of gear skiving to investigate kinematics and chip formation mechanisms [J]. Advanced Materials Research, 2011, 223: 46-55.

[21] KLOCKE F, BRECHER C, LÖPENHAUS C, et al. Technological and simulative analysis of power skiving [J]. Procedia CIRP, 2016, 50: 773-778.

[22] MORIWAKI I, OSAFUNE T, NAKAMURA M, et al. Cutting tool parameters of cylindrical skiving cutter with sharpening angle for internal gears [J]. Journal of Mechanical Design, 2017, 139(3): 033301.

[23] URIU K, OSAFUNE T, MURAKAMI T, et al. Effects of shaft angle on cutting tool parameters in internal gear skiving [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2017, 31(12): 5665-5673.

[24] VARGAS B, ZAPF M, KLOSE J, et al. Numerical modelling of cutting forces in gear skiving [J]. Procedia CIRP, 2019, 82: 455-460.

[25] ONOZUKA H, TAYAMA F, HUANG Yu, et al. Cutting force model for power skiving of internal gear [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 56(B): 1277-1285.

(编辑 武红江)

《西安交通大学学报》获三秦卓越科技期刊—领军期刊

根据省科协、省委宣传部、省教育厅、省科技厅《关于推进陕西省科技期刊深化改革高质量发展的意见》(陕科协发〔2020〕学字 14 号),通过公开申报、资格审查、专业评审和会议审定等程序,共遴选出三秦卓越科技期刊 23 种。其中,领军期刊 3 种,重点期刊 5 种,梯队期刊 15 种。《西安交通大学学报》获三秦卓越科技期刊—领军期刊。

序号	期刊	主办单位	类别
1	西安交通大学学报	西安交通大学	领军
2	稀有金属材料与工程	西北有色金属研究院	领军
3	药物分析学报(英文)	西安交通大学	领军
4	交通运输工程学报	长安大学	重点
5	交通运输工程学报(英文)	长安大学	重点
6	热力发电	西安热工研究院有限公司	重点
7	陕西师范大学学报(自然科学版)	陕西师范大学	重点
8	中国公路学报	中国公路学会	重点
9	干旱地区农业研究	西北农林科技大学	梯队
10	光子学报	中科院西安光机所	梯队
11	火炸药学报	中国兵工学会	梯队
12	机械科学与技术	西北工业大学	梯队
13	棉纺织技术	陕西省纺织科学研究院	梯队
14	水土保持学报	中科院水土保持研究所	梯队
15	西安电子科技大学学报	西安电子科技大学	梯队
16	西安工程大学学报	西安工程大学	梯队
17	西安交通大学学报(医学版)	西安交通大学	梯队
18	西安科技大学学报	西安科技大学	梯队
19	西北大学学报(自然科学版)	西北大学	梯队
20	西北工业大学学报	西北工业大学	梯队
21	西北农林科技大学学报(自然科学版)	西北农林科技大学	梯队
22	西北植物学报	西北农林科技大学	梯队
23	长安大学学报自然科学版	长安大学	梯队