

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.07.027

刀倾全展成准双曲面齿轮的切齿设计

王 星¹, 方宗德¹, 王 磊², 李声晋¹

(1.西北工业大学 机电学院, 西安 710072; 2.西安交通大学 高端制造装备协同创新中心, 西安 710054)

摘 要:为提高准双曲面齿轮的啮合性能,对刀倾全展成(HGT)准双曲面齿轮进行切齿设计研究.以局部综合法(Local Synthesis)为基础,并依据格里森准双曲面齿轮的加工原理,得到满足一定啮合性能的加工参数,并采用该参数对齿轮副进行轮齿接触分析(TCA).从齿面印痕和传动误差曲线可以看出,齿轮副重合度大,传动平稳,可通过调整局部控制参数来改变齿轮的啮合性能,验证了切齿设计的正确性.该方法可通过对设计参考点及其领域内的啮合条件进行预控,达到对齿面啮合质量的控制.

关键词: HGT 加工方法; 准双曲面齿轮; 局部综合法; 加工参数; 轮齿接触分析

中图分类号: TH132.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2016)07-0163-06

Machine-tool settings design for HGT hypoid gear drives

WANG Xing¹, FANG Zongde¹, WANG Lei², LI Shengjin¹

(1.School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2.Collaborative Innovation Center of High-End Manufacturing Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China)

Abstract: To obtain high quality gear, the machine-tool settings design is studied for HGT hypoid gears. Using local synthesis method as the basis, and based on the machining principle of Gleason hypoid gear, the machine-tool settings are obtained which can satisfy certain meshing performance, and then the tooth contact analysis is done. From the contact pattern and transmission error curve we can see that the gear pairs has big coincidence degree and stable transmission, and its meshing performance can change through the adjustment of local control parameters, so the correctness of the machine-tool settings design is verified. This method can get the optimal machine-tool settings through pre-controlling the meshing condition of the design reference point, and it has a significance for designing high precision hypoid gears.

Keywords: Hypoid Generated Tilt processing method; hypoid gears; local synthesis method; machine-tool settings; tooth contact analysis

准双曲面齿轮被广泛用作汽车主减速器齿轮,由于小、大轮之间偏置距的存在,可有效增加汽车的平稳性或者越野性,因此,对准双曲面齿轮进行研究更具有普遍意义.

国内外一些学者对对准双曲面齿轮的设计、制造和加工进行了研究^[1-5].Kawasaki 等^[6]分别采用解析和实验方法研究了大型摆线齿螺旋锥齿轮的齿面接触模式.Park 等^[7]提出了一种准双曲面齿轮表面磨损的近似计算方法.Mohammadpour 等^[8]对不同准双曲面齿轮在大负荷下的非牛顿混合弹流动力学进行了分析.Takeda 等^[9]对准双曲面齿轮的啮合性

能进行了分析,并通过实验测量了传动误差.Simon^[10]针对面滚式准双曲面齿轮提出了一种优化方法,用来系统地定义刀盘参数和机床加工参数.

准双曲面齿轮的啮合质量需要通过正确的切齿参数的调整来实现.基于局部综合法^[11-12]的切齿设计可以满足以上要求.杨宏斌等^[13]研究了基于局部综合法的刀倾半展成(HFT)法加工高齿准双曲面齿轮的切齿参数设计,从文献中可以看出,该方法很难控制接触迹线为直线,导致齿轮副对安装误差的敏感性较大.刀倾全展成(HGT)方法,大轮采用双面刀盘展成加工,虽然加工效率没有成形法高,但是齿面曲率特性好,能更好地控制齿轮的啮合性能,因此,本文对 HGT 准双曲面齿轮进行研究.方宗德等^[14]通过局部综合法对 HGT 准双曲面齿轮的优化切齿设计进行了前期理论探索,并没有通过算例给以定

收稿日期: 2015-03-31

基金项目: 国家自然科学基金(51375384;51175423;51205310)

作者简介: 王 星(1982—),女,博士研究生;

方宗德(1948—),男,教授,博士生导师

通信作者: 方宗德, fauto@nwpu.edu.cn

$$\mathbf{r}_g = \begin{bmatrix} (r_{c2} - S_g \sin \alpha_2) \cos \theta_g \\ (r_{c2} - S_g \sin \alpha_2) \sin \theta_g \\ -S_g \cos \alpha_2 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{n}_g = \begin{bmatrix} -\cos \alpha_2 \cos \theta_g \\ -\cos \alpha_2 \sin \theta_g \\ \sin \alpha_2 \end{bmatrix}.$$

式中: r_{c2} 、 S_g 、 α_2 和 θ_g 分别表示大轮内刀刀尖半径、刀盘锥面参数、刀盘齿形角和刀盘转角。

所以,大轮刀盘切削锥面的主方向表示为

$$\mathbf{e}_s^{(g)} = \left(\frac{\partial \mathbf{r}_g}{\partial \theta_g} \right) / \left(\left| \frac{\partial \mathbf{r}_g}{\partial \theta_g} \right| \right) = \begin{bmatrix} -\sin \theta_g \\ \cos \theta_g \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{e}_q^{(g)} = \left(\frac{\partial \mathbf{r}_g}{\partial S_g} \right) / \left(\left| \frac{\partial \mathbf{r}_g}{\partial S_g} \right| \right) = \begin{bmatrix} -\sin \alpha_2 \cos \theta_g \\ -\sin \alpha_2 \sin \theta_g \\ -\cos \alpha_2 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

$$\mathbf{M}_{c2g} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_2 \cos \phi_g & \cos \gamma_2 \sin \phi_g & \sin \gamma_2 \\ -\sin \phi_g & \cos \phi_g & 0 \\ -\sin \gamma_2 \cos \phi_g & -\sin \gamma_2 \sin \phi_g & \cos \gamma_2 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

将式(5)代入文献[1]中线接触公式,可得机床坐标系中大轮齿面参考点 M 处的主方向 $\mathbf{e}_{hc2}^{(2)}$ 和 $\mathbf{e}_{fc2}^{(2)}$,以及主曲率 $k_{fc2}^{(2)}$ 和 $k_{hc2}^{(2)}$,其中,上标“2”表示大轮齿面 Σ_2 的主方向和主曲率。

同理,将式(4)和(5)变换到大轮坐标系中,可得到大轮齿面参考点 M 处的位矢 $\mathbf{r}_2$ 、法矢 $\mathbf{n}_2$ 、主方向 $\mathbf{e}_f^{(2)}$ 、 $\mathbf{e}_h^{(2)}$ 和主曲率 $k_f^{(2)}$ 、 $k_h^{(2)}$:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_2 &= \mathbf{M}_{2c2} \mathbf{r}_{c2}, & \mathbf{n}_2 &= \mathbf{L}_{2c2} \mathbf{n}_{c2}, \\ \mathbf{e}_f^{(2)} &= \mathbf{L}_{2c2} \mathbf{e}_{fc2}^{(g)}, & \mathbf{e}_h^{(2)} &= \mathbf{L}_{2c2} \mathbf{e}_{hc2}^{(g)}, \\ k_f^{(2)} &= k_{fc2}^{(g)}, & k_h^{(2)} &= k_{hc2}^{(g)}. \end{aligned}$$

式中: $\mathbf{M}_{2c2}$ 为机床坐标系到大轮坐标系的转换矩阵, $\mathbf{L}_{2c2}$ 为 $\mathbf{M}_{2c2}$ 的旋转矩阵. $\mathbf{M}_{2c2}$ 可表示如下:

$$\mathbf{M}_{2c2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_{g2} \\ 0 & \cos \phi_2 & -\sin \phi_2 & 0 \\ 0 & \sin \phi_2 & \cos \phi_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

然后,再变换到啮合坐标系,得到啮合坐标系中大轮齿面参考点处的位矢 $\mathbf{r}_h^{(2)}$ 、法矢 $\mathbf{n}_h^{(2)}$ 、主方向 $\mathbf{e}_I^{(2)}$ 、 $\mathbf{e}_{II}^{(2)}$ 和主曲率 $k_I^{(2)}$ 、 $k_{II}^{(2)}$:

$$\begin{cases} \mathbf{r}_h^{(2)} = \mathbf{M}_{h2} \mathbf{r}_2, \\ \mathbf{n}_h^{(2)} = \mathbf{L}_{h2} \mathbf{n}_2, \end{cases} \quad (6)$$

相应的大轮刀盘切削锥面的主曲率表示为

$$k_s^{(g)} = \cos \alpha_2 / (r_{c2} - S_g \sin \alpha_2), \quad k_q^{(g)} = 0. \quad (3)$$

啮合坐标系见文献[15]中图3所示.在参考点 M ,齿轮副的瞬时传动比等于理论值(两齿轮的齿数比),因此大轮和小轮在参考点的啮合转角 $\psi_2^{(M)}$ 可通过啮合方程求出.将式(1)~(3)经过坐标变换到机床坐标系:

$$\begin{cases} \mathbf{r}_{c2} = \mathbf{M}_{c2g} \mathbf{r}_g, \\ \mathbf{n}_{c2} = \mathbf{L}_{c2g} \mathbf{n}_g. \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \mathbf{e}_{sc2}^{(g)} = \mathbf{L}_{c2g} \mathbf{e}_s^{(g)}, \\ \mathbf{e}_{qc2}^{(g)} = \mathbf{L}_{c2g} \mathbf{e}_q^{(g)}, \\ k_{sc2}^{(g)} = k_s^{(g)}, \\ k_{qc2}^{(g)} = k_q^{(g)}. \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{r}_{c2}$ 、 $\mathbf{n}_{c2}$ 分别为机床坐标系中大轮齿面参考点 M 处的位矢和法矢; $\mathbf{M}_{c2g}$ 为刀盘坐标系到机床坐标系的转换矩阵; $\mathbf{L}_{c2g}$ 为 $\mathbf{M}_{c2g}$ 的旋转矩阵. $\mathbf{M}_{c2g}$ 可表示如下:

$$\begin{aligned} & \cos \gamma_2 (H_2 \cos \phi_g + V_2 \sin \phi_g) - X_{b2} \sin \gamma_2 \\ & - H_2 \sin \phi_g + V_2 \cos \phi_g \\ & - \sin \gamma_2 (H_2 \cos \phi_g + V_2 \sin \phi_g) - X_{b2} \cos \gamma_2 \\ & 1 \end{aligned}$$

$$\begin{cases} \mathbf{e}_I^{(2)} = \mathbf{L}_{h2} \mathbf{e}_f^{(2)}, \\ \mathbf{e}_{II}^{(2)} = \mathbf{L}_{h2} \mathbf{e}_h^{(2)}, \\ k_I^{(2)} = k_f^{(2)}, \\ k_{II}^{(2)} = k_h^{(2)}. \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{M}_{h2}$ 为大轮坐标系到啮合坐标系的转换矩阵, $\mathbf{L}_{h2}$ 为 $\mathbf{M}_{h2}$ 的旋转矩阵. $\mathbf{M}_{h2}$ 可表示如下:

$$\mathbf{M}_{h2} = \begin{bmatrix} \cos \eta & \sin \eta \sin \psi_2^{(M)} & \sin \eta \cos \psi_2^{(M)} & -\cos \eta \\ 0 & \cos \psi_2^{(M)} & -\sin \psi_2^{(M)} & E \\ -\sin \eta & \cos \eta \sin \psi_2^{(M)} & \cos \eta \cos \psi_2^{(M)} & \sin \eta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

式中: η 、 E 分别为大、小轮的轴夹角和偏置距。

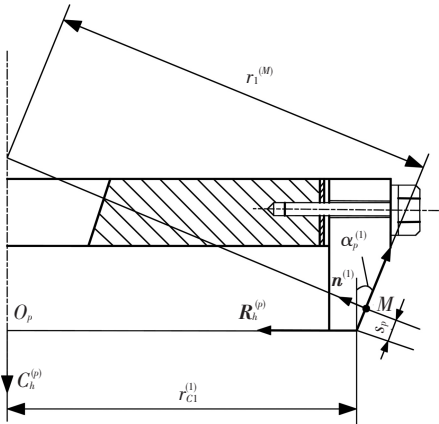
3 确定小轮加工参数

预置传动比函数的一阶导数 m'_{21} 、接触迹线与齿根夹角 η_2 和接触椭圆长半轴长度 a ,将式(6)和(7)代入文献[1]中点接触齿面间主方向和主曲率的关系公式,可由大轮参考点 M 处的主方向和主曲率计算出参考点 M 处小轮齿面的主方向 $\mathbf{e}_I^{(1)}$ 、 $\mathbf{e}_{II}^{(1)}$ 和主曲率 $k_I^{(1)}$ 、 $k_{II}^{(1)}$ 以及小轮和大轮第一主方向之间的夹角 $\sigma^{(12)}$ 。

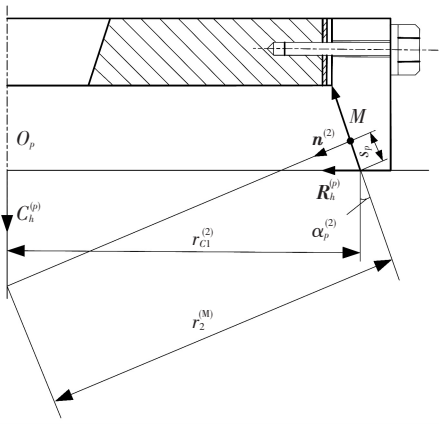
由线接触条件可得相应小轮刀盘锥面的主曲率 $k_I^{(p)}$ 和 $k_{II}^{(p)}$ 、主方向 $\mathbf{e}_I^{(p)}$ 和 $\mathbf{e}_{II}^{(p)}$ 以及刀盘锥面和小轮齿面第一主方向的夹角 $\sigma^{(p1)}$. 小轮单面刀盘外刀和内

刀法截面示意图如图 2(a)和图 2(b)所示,图中 $r_1^{(M)}$ 和 $r_2^{(M)}$ 分别为外刀和内刀参考点 M 处的曲率半径, S_p 为小轮刀盘锥面参数, $r_{cl}^{(1)}$ 和 $r_{cl}^{(2)}$ 分别为小轮刀盘外刀和内刀的刀尖半径, $C_h^{(p)}$ 为刀盘轴线的单位矢量, $n^{(1)}$ 和 $n^{(2)}$ 分别为外刀和内刀参考点 M 处的法矢,由此可计算出刀盘刀顶平面中心位置矢量 $R_h^{(p)}$.

$C_h^{(p)} = -e_1^{(F)} \cdot \cos \alpha_1 - n_h^{(1)} \cdot \sin \alpha_1$,
 $R_h^{(p)} = r_h^{(1)} - e_1^{(F)} \cdot (S_p + r_{cl}^{(1)} \sin \alpha_1) + n_h^{(1)} \cdot r_{cl}^{(1)} \sin \alpha_1$.
式中: S_p 为小轮刀盘锥面参数; $r_h^{(1)}$ 、 $n_h^{(1)}$ 为啮合坐标系中小轮的位矢和法矢,且 $r_h^{(1)} = r_h^{(2)}$, $n_h^{(1)} = n_h^{(2)}$.



(a) 外刀



(b) 内刀

图 2 小轮单面刀盘法截面示意图

小轮切齿参数设计坐标系如图 3 所示.图中 $O_h - X_h Y_h Z_h$ 为啮合坐标系, $O_{cl} - X_{cl} Y_{cl} Z_{cl}$ 为机床坐标系, $O_p - X_p Y_p Z_p$ 为小轮刀盘坐标系, O_1 为小轮的坐标原点, O_p 为小轮的刀盘中心, ϕ_h (为给定值)为小轮初始加工转角, M 为参考点, γ_1 (为给定值)为小轮机床安装角.将 $r_h^{(2)}$ 、 $n_h^{(2)}$ 、 $C_h^{(p)}$ 、 $R_h^{(p)}$ 和 $e_{q1}^{(p)}$ 、 $e_{q11}^{(p)}$ 变换到坐标系 $O_q - X_q Y_q Z_q$ 中,得到 $r_q^{(1)} = r_q^{(2)}$, $n_q^{(1)} = n_q^{(2)}$,以及 $C_q^{(p)}$ 、 $R_q^{(p)}$ 、 $e_{q1}^{(p)}$ 和 $e_{q11}^{(p)}$.坐标变换矩阵 M_{qh} 表示如下:

$$M_{qh} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_1 & \sin \phi_1 \sin \phi_h & \sin \gamma_1 \cos \phi_h & 0 \\ 0 & \cos \phi_h & -\sin \phi_h & 0 \\ \sin \gamma_1 & \cos \gamma_1 \sin \phi_h & \cos \gamma_1 \cos \phi_h & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

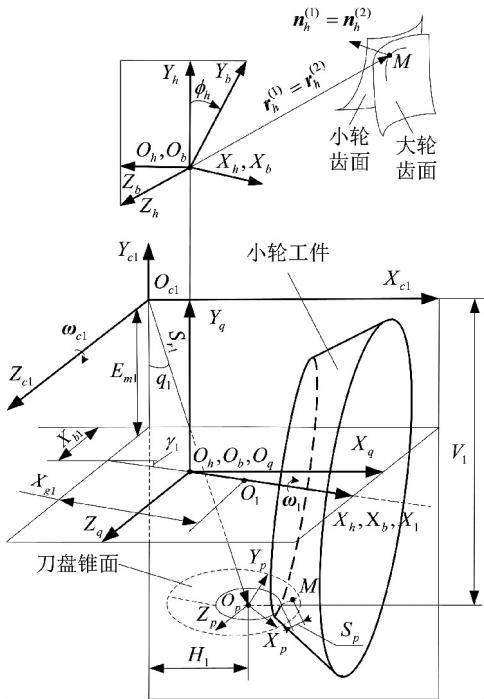


图 3 小轮切齿参数设计坐标系

将 $r_q^{(1)}$ 、 $n_q^{(1)}$ 、 $C_q^{(p)}$ 、 $R_q^{(p)}$ 、 $e_{q1}^{(p)}$ 和 $e_{q11}^{(p)}$ 变换到机床坐标系 $O_{cl} - X_{cl} Y_{cl} Z_{cl}$ 中,得到 $r_{cl}^{(1)}$ 、 $n_{cl}^{(1)}$ 、 $C_{cl}^{(p)}$ 、 $R_{cl}^{(p)}$ 、 $e_{cl1}^{(p)}$ 和 $e_{cl11}^{(p)}$.坐标变换矩阵 M_{clq} 可表示如下:

$$M_{clq} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_{g1} \cos \gamma_1 \\ 0 & 1 & 0 & -E_{m1} \\ 0 & 0 & 1 & X_{g1} \sin \gamma_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

小轮和产形轮的啮合方程为

$$v^{(p1)} \cdot n_{cl}^{(1)} = 0, \tag{8}$$

式中: $v^{(p1)}$ 为小轮产形轮和小轮的相对速度; $n_{cl}^{(1)}$ 为参考点 M 处的法矢.

联合文献[1]中基本方程组和式(8)以及 $r_{cl}^{(1)}$ 、 $n_{cl}^{(1)}$ 、 $C_{cl}^{(p)}$ 、 $R_{cl}^{(p)}$ 、 $e_{q1}^{(p)}$ 以及 $e_{q11}^{(p)}$,将以上过程编制成计算机程序,可得到轴向轮位 X_{g1} 、垂直轮位 E_{m1} 和滚比 C_{r1} ,由于篇幅限制,这里不再展开说明.

$R_{cl}^{(p)}$ 可表示为

$$R_{cl}^{(p)} = [R_{clx}^{(p)} \quad R_{cly}^{(p)} \quad R_{clz}^{(p)}],$$

所以,根据图 3,小轮的水平刀位 H_1 、垂直刀位 V_1 、床位 X_{b1} 、径向刀位 S_{r1} 和角向刀位 q_1 为

$$\begin{aligned} H_1 &= R_{clx}^{(p)}, \\ V_1 &= R_{cly}^{(p)}, \\ X_{b1} &= R_{clz}^{(p)}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{r1} &= \sqrt{H_1^2 + V_1^2}, \\ q_1 &= \sin^{-1}(V_1/H_1). \end{aligned}$$

另外,小轮的刀倾角 i 和刀转角 j 可由刀盘轴线的单位矢量

$$C_q^{(p)} = \begin{bmatrix} C_{qx}^{(p)} & C_{qy}^{(p)} & C_{qz}^{(p)} \end{bmatrix}$$

求得:

$$i = \sin^{-1}(\sqrt{(C_{qx}^{(p)})^2 + (C_{qy}^{(p)})^2}),$$
$$j = \tan^{-1}(-C_{qy}^{(p)}/C_{qx}^{(p)}).$$

这样,小轮的加工参数可完全确定.

4 算例验证

用以上方法对一对 HGT 准双曲面齿轮副进行切齿参数设计,轮坯参数见表 1,切齿参数见表 2 中算例 1

(小轮采用单面法加工,这里仅列出小轮凹面的加工参数),齿面方程推导见文献[16],TCA^[16]分析结果见图 4.局部控制参数为接触迹线与齿根夹角为 35°,传动误差曲线斜率为-0.000 4,瞬时接触椭圆长轴占齿宽比例为 0.3,参考点齿宽方向控制参数 Δx = 3 mm,参考点齿高方向控制参数 Δy = 2 mm,改变参考点的位置,令 Δx = 3,Δy = 2,即令齿面印痕向大端和齿顶移动,此时大轮切齿参数不变,小轮切齿参数见表 2 中算例 2,TCA 分析结果见图 5.

表 1 轮坯参数

轮坯参数	齿数	齿宽/mm	中点锥距/mm	节锥角/(°)	齿顶角/(°)	齿根角/(°)	节锥顶点到交叉点距离/mm
大轮	39	63	190.938	77.292	0.487	3.272	3.029
小轮	7	68	180.343	12.496	3.220	0.481	-7.183

轮坯参数	面锥顶点到交叉点距离/mm	根锥顶点到交叉点距离/mm	中点螺旋角/(°)	中点齿顶高/mm	中点齿根高/mm	轴交角/(°)	偏置距/mm
大轮	3.248	-0.735	34.409	1.844	14.519	90	35
小轮	0.876	-19.311	45	12.341	4.022		

表 2 切齿参数

切齿参数	刀盘齿形角/(°)	刀尖半径/mm	刀盘半径/mm	刀顶距/mm	刀倾角/(°)	刀转角/(°)	垂直刀位/mm
大轮	22.500		152.400	6.350			125.734
小轮 算例 1	14.000	165.257			5.314	320.028	-109.948
(凹面) 算例 2	14.000	161.566			5.892	316.570	-101.167

切齿参数	水平刀位/mm	垂直轮位/mm	轴向轮位/mm	床位/mm	轮坯安装角/(°)	滚比
大轮	104.506	0	-3.029	3.595	74.019	0.978
小轮 算例 1	45.831	-4.921	0.485	-39.209	-4.000	0.234
(凹面) 算例 2	49.219	-8.284	-6.166	-37.729	-4.000	0.249

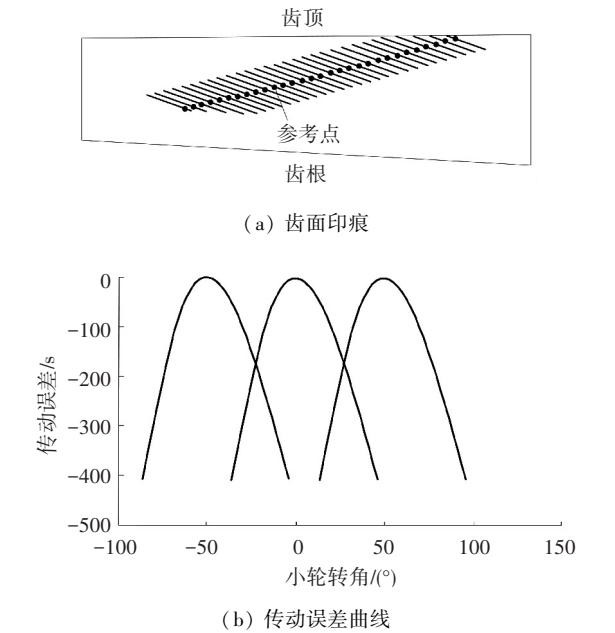


图 4 算例 1 的 TCA 分析结果

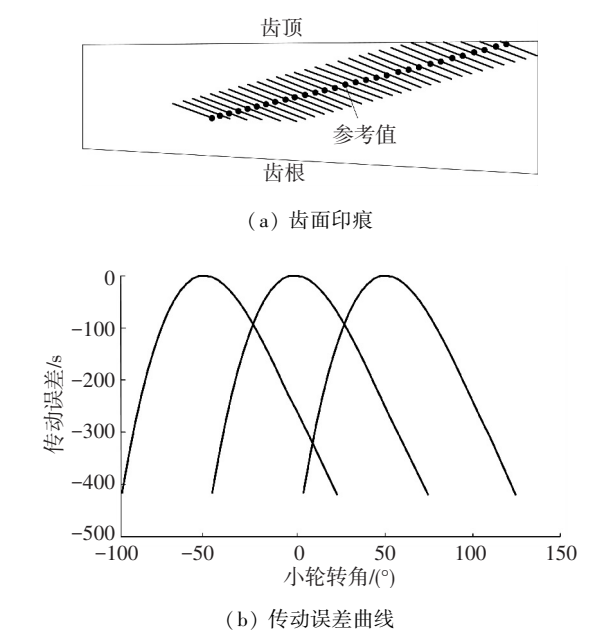


图 5 算例 2 的 TCA 分析结果

由图 4 可以看出,接触迹线接近直线,可避免边缘接触和轮齿齿顶、齿根的应力集中;传动误差幅值较大,且没有出现边缘接触,避免了轮齿传动的振动与冲击,使齿轮传动平稳。

由图 5 可知,当参考点位置改变后,齿面印痕也相应随之改变,且接触迹线同样接近直线;传动误差对称并且幅值较大。同理,可通过改变其他局部控制参数得到不同的切齿参数,进而得到不同的齿面印痕和传动误差曲线。

以上分析结果,验证了切齿参数设计的正确性。

5 结 论

1) HGT 准双曲面齿轮大轮采用展成法加工,齿面曲率特性好,能有效改善齿轮的啮合性能,这一点是成形法所不具备的;小轮采用刀倾法加工,可简化刀具规格,使操作调整相对简单,这一点又优于变学法。因此,本文的研究为挖掘目前常见的加工方法,或探索新的加工方法,获得高性能的准双曲面齿轮提供了方法和保证。

2) 确定改善啮合和切触状态的切齿参数是齿轮研究的主要课题,本文以局部综合法为基础,对 HGT 准双曲面齿轮进行了切齿参数设计,通过控制参考点的一阶和二阶接触参数,达到了对齿面啮合性能的控制。该研究为高精度 HGT 准双曲面齿轮的设计与加工提供了有效工具。

3) 本文的设计方法保证了齿面接触迹线为直线,可降低对安装误差的敏感性;且保证了接触迹线与齿根有较小的夹角,增大了齿轮副的重合度,使齿轮运转平稳。验证了本文切齿设计方法的正确性。

参考文献

- [1] LITVIN F L. Gear geometry and applied theory [M]. Second edition. New York: Cambridge University Press, 2004: 604-623.
- [2] FAN Q. Tooth surface error correction for face-hobbed hypoid gears [J]. Journal of Mechanical Design, 2010, 132(1): 011004.
- [3] FAN Q. Optimization of face cone element for spiral bevel and hypoid gears [J]. Journal of Mechanical Design, 2011, 133(9): 091002.
- [4] SIMON V V. Advanced manufacture of spiral bevel gears on CNC hypoid generating machine [J]. Journal of Mechanical Design, 2010, 132(3): 031001.
- [5] SIMON V V. Generation of hypoid gears on CNC hypoid generator [J]. Journal of Mechanical Design, 2011, 133(12): 121003.
- [6] KAWASAKI K, TSUJI I. Analytical and experimental tooth contact pattern of large-sized spiral bevel gears in cyclo-paloid system [J]. Journal of Mechanical Design, 2010, 132(4): 041004.
- [7] PARK D, KOLIVAND M, KAHRAMAN A. An approximate method to predict surface wear of hypoid gears using surface interpolation [J]. Mechanism and Machine Theory, 2014, 71: 64-78.
- [8] MOHAMMADPOUR M, THEODOSSIADES S, RAHNEJAT H, et al. Non-Newtonian mixed elastohydrodynamics of differential hypoid gears at high loads [J]. Meccanica, 2014, 49(5): 1115-1138.
- [9] TAKEDA R, KOMORI M, NISHINO T, et al. Performance analysis of generated hypoid gear based on measured tooth flank form data [J]. Mechanism and Machine Theory, 2014, 72: 1-16.
- [10] SIMON V V. Optimization of face-hobbed hypoid gears [J]. Mechanism and Machine Theory, 2014, 77: 164-181.
- [11] LITVIN F L, ZHANG Y. Local synthesis and tooth contact analysis of face-milled spiral bevel gears [R]. Chicago: University of Illinois, 1991: 16-39.
- [12] 张华, 邓效忠. 基于局部综合的非零变位弧齿锥齿轮切齿仿真 [J]. 农业机械学报, 2007, 38(5): 204-206.
- [13] 杨宏斌, 范明, 周彦伟, 等. 高齿准双曲面齿轮的研究 [J]. 中国机械工程, 2000, 11(8): 897-900.
- [14] 方宗德, 杨宏斌. 准双曲面齿轮的优化切齿设计 [J]. 汽车工程, 1998, 20(5): 302-307.
- [15] 王星, 方宗德, 李声晋. HGT 准双曲面齿轮传动的轮齿接触分析 [J]. 西北工业大学学报, 2014, 32(3): 475-480.

(编辑 杨 波)