

弧齿锥齿轮齿面拓扑修形及加工参数计算

聂少武¹, 邓 静², 邓效忠³, 张 华¹, 曹雪梅¹, 李聚波¹

- (1. 河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471003;
2. 西北工业大学 机电学院, 西安 710072;
3. 河南科技大学 机械装备先进制造河南省协同创新中心, 河南 洛阳 471003)

摘 要: 为了能够实现对齿面啮合性能的灵活控制, 针对弧齿锥齿轮小轮提出一种齿面拓扑修形方法, 即借助二阶曲面对齿面偏差拓扑的近似表达, 将齿面拓扑修形分解为 5 个方向: 螺旋角修正、压力角修正、齿长曲率修正、齿廓曲率修正及齿面挠率修正, 通过改变 5 个方向的修形系数对小轮齿面拓扑结构进行自由控制。在此基础上, 建立齿面偏差与机床加工参数之间的修正数学模型, 通过构建敏感性矩阵并采用最小二乘法求解, 反求出获得修形齿面的小轮加工参数, 以便指导加工。以一对弧齿锥齿轮副为例进行修形啮合分析, 仿真结果表明: 选取齿长曲率修形系数为 0.0001, 齿廓曲率修形系数为 0.0005, 齿面挠率修形系数为 0.0003, 对齿面进行拓扑修形后传动误差幅值为 $-25.60''$, 接触迹线倾斜角度变为 54.7° , 相比原始结果啮合性能得到改善。滚检接触区与理论仿真结果一致, 验证了修形方法的有效性。

关 键 词: 弧齿锥齿轮; 齿面拓扑修形; 啮合分析; 加工参数计算; 参数修正模型
中图分类号: V23; TH132.4 **文献标志码:** A

Tooth surface topology modification and processing parameters calculation for spiral bevel gears

NIE Shaowu¹, DENG Jing², DENG Xiaozhong³, ZHANG Hua¹,
CAO Xuemei¹, LI Jubo¹

- (1. School of Mechatronics Engineering,
Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan 471003, China;
2. School of Mechanical Engineering,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
3. Advanced Manufacturing Machinery and
Equipment in Henan Province Collaborative Innovation Center,
Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan 471003, China)

Abstract: In order to control tooth meshing performance freely, a kind of tooth surface topology modification method for pinion was proposed. By means of second-order surface approximation for tooth surface deviations, the tooth surface topology modification can be divided into five parts: spiral angle correction, pressure angle correction, lengthwise curvature correction, profile curvature correction and longitudinal twist correction, by changing five

收稿日期: 2015-11-25

基金项目: 国家自然科学基金(51475141, 51405135); 河南省高等学校重点科研项目计划(16A460032);
河南科技大学博士科研启动基金

作者简介: 聂少武(1983—), 男, 讲师, 博士, 主要从事螺旋锥齿轮设计与加工技术研究。

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

引用格式: 聂少武, 邓静, 邓效忠, 等. 弧齿锥齿轮齿面拓扑修形及加工参数计算[J]. 航空动力学报, 2017, 32(8): 2009-2016. NIE Shaowu, DENG Jing, DENG Xiaozhong, et al. Tooth surface topology modification and processing parameters calculation for spiral bevel gears[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(8): 2009-2016.

modification factors the pinion tooth surface topology can be controlled freely. On this basis, the modified model between tooth surface deviations and processing parameters correction was established, and the pinion processing parameters allowing to acquire modified tooth surface can be calculated by constructing sensitivity matrix and least squares method. The meshing analysis for a pair of spiral bevel gears was carried out. The results demonstrate that by selecting lengthwise curvature modification factor 0.0001, profile curvature modification factor 0.0005, longitudinal twist modification factor 0.0003, the transmission error magnitude is changed to $-25.60''$, and the contact path orientation is changed to 54.7° after tooth surface topology modification, and the meshing performance is improved compared with initial result. The rolling test result agrees well with simulation result, verifying the effectiveness of modification method.

Key words: spiral bevel gear; tooth surface topology modification; meshing analysis; processing parameters calculation; parameters correction model

由于受安装误差或齿面变形等因素的影响,弧齿锥齿轮实际啮合性能往往会偏离设计要求,从而产生振动和噪声。因此为了改善齿面的实际啮合质量,往往需要对齿面进行修形。齿面修形技术作为一种有效手段,在弧齿锥齿轮设计和加工中得到广泛应用,国内外学者围绕弧齿锥齿轮齿面修形技术也进行了一些相关研究。

传统齿面修形方法是通过改变刀具切削刃形状或改变切齿运动关系来实现,如刘万春等提出采用抛物线刀刃对弧齿锥齿轮齿廓进行修形^[1],聂少武等针对摆线锥齿轮研究了通过采用圆弧刀廓实现齿廓修形^[2]。张华等针对数控铣齿机提出采用变性病实现弧齿锥齿轮齿长方向修形^[3]。刘光磊等针对弧齿锥齿轮数控磨齿加工,研究变性病加工对齿面啮合性能的修正优化^[4]。这两种修形方法主要是实现对齿面的齿廓修形和齿长修形,并不能实现对齿面的任意修形,并且需要曲线刀刃和有变性病运动的机床才能够实现,修形方法受到一定限制。

近年来,部分学者针对齿轮齿面修形的研究逐渐转向为对齿面拓扑结构的控制^[5-7]。如苏进展等研究了弧齿锥齿轮齿面高精度修形方法,通过预置重合度、对称抛物线传动误差及接触椭圆参数构建小轮目标齿面,从而实现对小轮齿面的修正^[8]。曹雪梅等针对航空弧齿锥齿轮研究了高阶传动误差齿面的拓扑结构设计方法^[9]。Shih提出了基于Ease off的弧齿锥齿轮齿面拓扑修形方法,通过预设啮合性能构建小轮修形齿面^[10]。这种齿面拓扑修形方法可以实现对接触区及传动误差的预控,是一种齿面的主动设计方法。

本文在上述研究基础上针对弧齿锥齿轮提出

了一种齿面拓扑修形方法,即将齿面拓扑修形分解为5个方向:螺旋角修正、压力角修正、齿长曲率修正、齿廓曲率修正及齿面挠率修正,通过主动改变5个方向的修形系数直接对小轮齿面拓扑结构进行全面自由控制,从而可以根据需要灵活改变齿面的啮合性能。本文提出的齿面修形方法相对目前的修形方法,可直接对齿面进行任意自由修形(包括一阶修形和二阶修形),并且易于实现齿面修形过程与齿面啮合仿真之间的可视化,修形过程灵活直观,易于应用生产实践。

1 齿面拓扑修形方法

根据小轮的原始加工参数及切齿数学模型,可以推导出小轮齿面方程,将其定义为:小轮的原始齿面 Σ_1 ,对应的矢量方程为 $r_1(u_1, \theta_1)$,单位法矢为 $n_1(u_1, \theta_1)$;对小轮原始齿面进行修形,修形后的齿面定义为修形齿面 Σ_2 ,对应的矢量方程为 $r_2(u_1, \theta_1)$ 。小轮修形齿面 Σ_2 与原始齿面 Σ_1 之间的齿面偏差可表示为

$$\Delta\delta(u_1, \theta_1) = [r_2(u_1, \theta_1) - r_1(u_1, \theta_1)] \cdot n_1(u_1, \theta_1) \tag{1}$$

式(1)是一个误差曲面方程,泰勒展开后可以用二阶曲面近似表示^[11-12]

$$\Delta\delta = a_0 + a_1X + a_2Y + a_3X^2 + a_4Y^2 + a_5XY \tag{2}$$

式中 X 为齿长方向, Y 为齿高方向。

将式(2)进行数学图形化表示,构建出的图形定义为齿面修形拓扑图,如图1所示,规定方向由空间指向齿面实体,修正量为正值,反之为负值。各阶系数对应的物理意义如下: a_0 为常数项,对

应齿厚偏差,消除两个齿面间隙后,常数项为 0; a_1 为螺旋角修形系数,修正齿长方向接触区位置; a_2 为压力角修形系数,修正齿高方向接触区位置; a_3 为齿长曲率修形系数,修正齿长方向接触区长短; a_4 为齿廓曲率修形系数,修正齿高方向接触区宽窄; a_5 为齿面挠率修形系数,修正齿面接触区的对角程度。

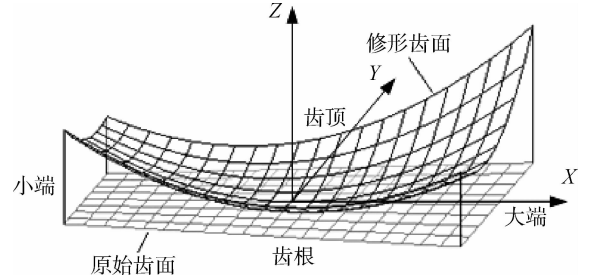


图 1 齿面修形拓扑图

Fig. 1 Tooth surface modification topology

通过对二阶曲面多项式中各阶系数的预控及组合,可以构建各种形状的齿面修形拓扑图,其中常见的典型二阶修形拓扑图如图 2 所示。

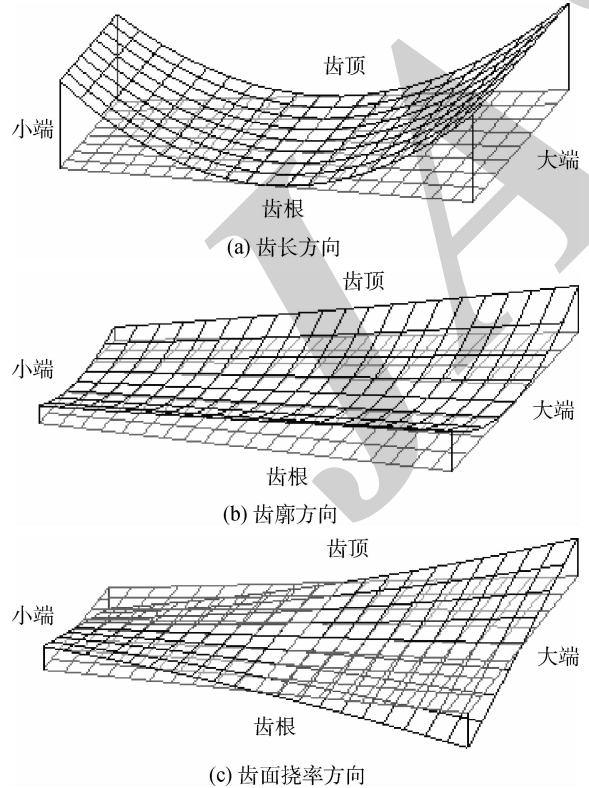


图 2 齿面二阶修形拓扑图

Fig. 2 Tooth surface second-order modification topology

齿面修形拓扑图对应差曲面 $\Delta\Sigma$,各节点数值对应齿面修形量,将该差曲面与小轮原始齿面叠加,便可得到小轮修形齿面,即 $\Sigma_2 = \Sigma_1 + \Delta\Sigma$ 。结

合式(1)和式(2),可以得出小轮修形齿面方程

$$\mathbf{r}_2(u_1, \theta_1) = \mathbf{r}_1(u_1, \theta_1) + \Delta\delta \cdot \mathbf{n}_1(u_1, \theta_1) \quad (3)$$

在实际计算中,我们往往将小轮原始齿面离散化,求解出小轮原始齿面上的网格数据,然后通过式(2)构建出小轮齿面网格节点修形量,最后将各个网格节点对应的齿面修形量在小轮原始齿面的法向上叠加便可以得到小轮修形齿面 Σ_2 的网格坐标数据。

2 加工参数反求计算

构建出的小轮修形齿面 Σ_2 为离散点齿面,要想在铣齿机上加工出该齿面,就需要对小轮原始加工参数进行修正,计算出能够获得该修形齿面的加工参数。

2.1 原始齿面与修形齿面之间偏差计算

小轮原始齿面 Σ_1 与修形齿面 Σ_2 之间的位置关系如图 3 所示。图 3 中 M 点为齿面网格中点, M_2 点为修形齿面 Σ_2 上一网格节点,令其坐标为 (x_2, y_2, z_2) , M_1 点为小轮原始齿面 Σ_1 上与 M_2 点相对应的网格节点,令其坐标为 (x_1, y_1, z_1) , $\mathbf{n}_{M_1}$ 为小轮原始齿面在 M_1 点的单位法矢,令其数值为 $(n_{x_1}, n_{y_1}, n_{z_1})$ 。由前文修形齿面的构建方法可知, M_1 点与 M_2 点的连线与单位法向 $\mathbf{n}_{M_1}$ 重合,因此 $\Delta\epsilon = |M_1M_2|$ 即为小轮原始齿面与修形齿面在节点 M_1 处的齿面偏差。

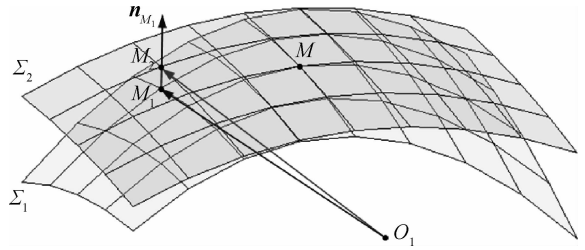


图 3 小轮原始齿面与修形齿面之间偏差

Fig. 3 Deviations between pinion original tooth surface and modified tooth surface

由图 3 可得齿面偏差 $\Delta\epsilon$ 为

$$\Delta\epsilon = (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1) \cdot (n_{x_1}, n_{y_1}, n_{z_1})^T \quad (4)$$

2.2 小轮加工参数的反求

小轮修形齿面与原始齿面之差为

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1(u_1, \theta_1; \phi_j) \quad (5)$$

式中 $\phi_j (j=1 \sim k)$ 为加工参数, k 为加工参数的个数。

对式(5)微分、点乘小轮原始齿面的单位法矢 $\mathbf{n}_1$ 可得^[13-14]

$$\delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{n}_1 = - \left(\frac{\partial \mathbf{r}_1}{\partial u_1} \delta u_1 + \frac{\partial \mathbf{r}_1}{\partial \theta_1} \delta \theta_1 + \frac{\partial \mathbf{r}_1}{\partial \phi_1} \delta \phi_1 + \dots + \frac{\partial \mathbf{r}_1}{\partial \psi_k} \delta \psi_k \right) \cdot \mathbf{n}_1 \tag{6}$$

由于单位法矢 $\mathbf{n}_1$ 与 $\frac{\partial \mathbf{r}_1}{\partial u_1}$ 和 $\frac{\partial \mathbf{r}_1}{\partial \theta_1}$ 垂直, 所以式(6)简化为

$$\delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{n}_1 = - \left(\frac{\partial \mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{n}_1}{\partial \phi_1} \delta \phi_1 + \frac{\partial \mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{n}_1}{\partial \psi_2} \delta \psi_2 + \dots + \frac{\partial \mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{n}_1}{\partial \psi_k} \delta \psi_k \right) \tag{7}$$

式中, 等式左边 $\delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{n}_1$ 为小轮修形齿面与原始齿面之间的齿面偏差, 用 $\Delta \epsilon = \delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{n}_1$ 表示; 对于小轮原始齿面, 当第 k 个加工参数发生微小变化时, 小轮原始齿面将产生误差, 等式右边 $\frac{\partial \mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{n}_1}{\partial \psi_k}$ 即表示该误差对第 k 个加工参数微小变化的敏感系数。

令 $\Delta \lambda = \delta \mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{n}_1$, 则第 k 个加工参数对应的敏感系数 η_k 可近似用差分表示

$$\eta_k \approx \Delta \lambda_k / \Delta \psi_k \tag{8}$$

假如齿面上有 m 个网格节点, 则 m 个网格节点对应的齿面偏差可用矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta \epsilon_1 \\ \Delta \epsilon_2 \\ \Delta \epsilon_3 \\ \vdots \\ \Delta \epsilon_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_{11} & \eta_{21} & \eta_{31} & \cdots & \eta_{k1} \\ \eta_{12} & \eta_{22} & \eta_{32} & \cdots & \eta_{k2} \\ \eta_{13} & \eta_{23} & \eta_{33} & \cdots & \eta_{k3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \eta_{1m} & \eta_{2m} & \eta_{3m} & \cdots & \eta_{km} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \psi_1 \\ \Delta \psi_2 \\ \Delta \psi_3 \\ \vdots \\ \Delta \psi_k \end{bmatrix} \tag{9}$$

式中 $\Delta \epsilon_m$ 为小轮修形齿面与原始齿面在第 m 个

网格节点的齿面偏差, η_{km} 为第 k 个加工参数对应的敏感系数, $\Delta \psi_k$ 为第 k 个加工参数的修正量。

式(9)为齿面偏差与加工参数之间的修正数学模型, 可以简化为

$$\begin{aligned} \{\Delta \epsilon_i\} &= \mathbf{S}_{ij} \{\Delta \psi_j\} \\ (i &= 1, \dots, m; j = 1, \dots, k) \end{aligned} \tag{10}$$

式(10)中机床加工参数数目小于齿面网格点个数, 是一个超定方程组, 常用最小二乘法^[15-18]求解

$$\{\Delta \psi_j\} = (\mathbf{S}_{ij}^T \mathbf{S}_{ij})^{-1} \mathbf{S}_{ij}^T \{\Delta \epsilon_i\} \tag{11}$$

3 拓扑修形计算流程

利用本文提出的齿面拓扑修形方法来改变齿面的啮合性能, 拓扑修形计算流程如图 4 所示。由图 4 可以看出修形过程为: 首先根据要求初步设定齿面拓扑修形系数, 根据齿面接触分析 TCA 结果对修形效果作出评判, 如果修形效果达不到预期要求, 通过调整修形系数再次进行修形, 最终使齿面啮合性能符合要求。这个修形过程可能需要反复, 但可以通过编制齿面拓扑修形软件(如图 5 所示)来实现, 通过将齿面修形过程和 TCA 技术相结合, 建立修形拓扑图与齿面啮合仿真结果的可视化。通过改变修形系数, 观察 TCA 分析结果, 可以获得拓扑修形系数改变对齿面啮合性能的影响规律(限于篇幅, 本文只给出规律, 不作论证): ①齿长曲率修形系数增大会使接触区变短; ②齿廓曲率修形系数增大会增大传动误差幅值, 同时增大内对角接触; ③齿面挠率修形系数增大可增加内对角趋势。依据该规律可以为修形系数的调整方向(即增大或减小)提供指导。

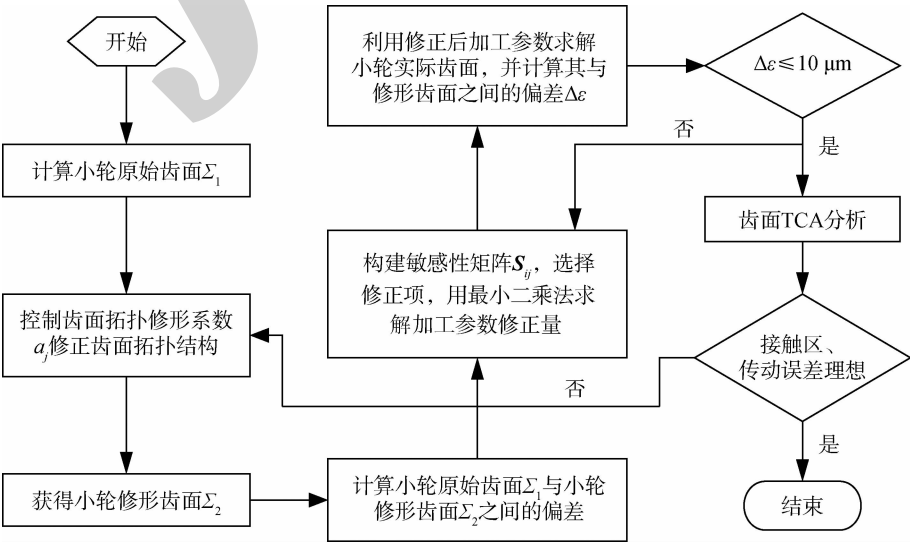


图 4 拓扑修形计算流程

Fig. 4 Flow chart of topology modification and calculation

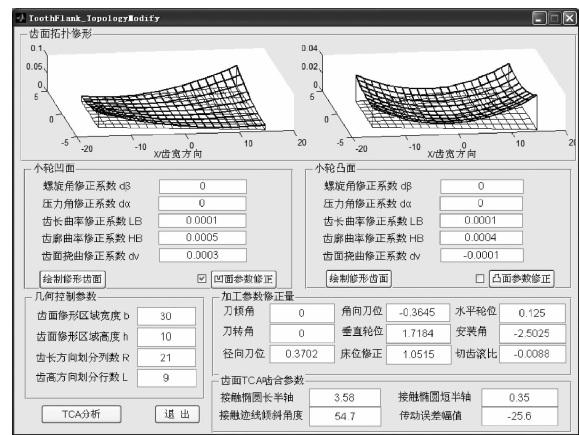


图 5 齿面拓扑修形软件

Fig. 5 Tooth surface topology modification software

4 算例分析

以 1 对弧齿锥齿轮为例,对其工作面(小轮凹面和大轮凸面)进行了齿面拓扑修形和啮合分析。表 1 为齿轮副几何参数。表 2 为原始切齿加工参数。

表 1 几何参数

Table 1 Geometric parameters		
参数	小轮	大轮
齿数	18	27
旋向	左旋	右旋
轴夹角/(°)	90	
节圆模数/mm	7	
参考点螺旋角/(°)	35	
压力角/(°)	20	
齿宽/mm	36	
全齿高/mm	13.216	
齿顶高/mm	7.35	4.55
大端节圆直径/mm	126	189
节锥角/(°)	33.69	56.31
面锥角/(°)	38.0534	59.2666
根锥角/(°)	30.7334	51.9466

表 2 加工参数

Table 2 Processing parameters		
参数	小轮(凹面)	大轮(凸面)
刀盘半径/mm	113.076	112.65
刀具齿形角/(°)	-18	22
径向刀位/mm	100.4193	98.26313
角向刀位/(°)	74.77162	72.33375
安装角/(°)	30.0295	52.6494
垂直轮位/mm	3.48838	0
轴向轮位/mm	-2.425936	0
床位/mm	1.214	0
滚比	1.803158	1.199398

图 6 为原始参数齿面啮合分析结果,其中图 6(a)为齿面接触印痕,图 6(b)为传动误差曲线。由图 6 啮合分析结果可以看出,齿面原始接触区内对角趋势较弱,这样的接触区在传动中可能会引起较大的噪声,因此为了改善原始齿面啮合性能,需要增大内对角接触。

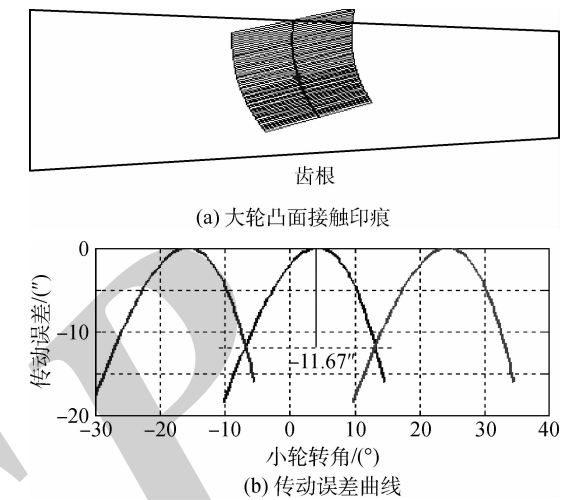


图 6 原始齿面啮合分析结果

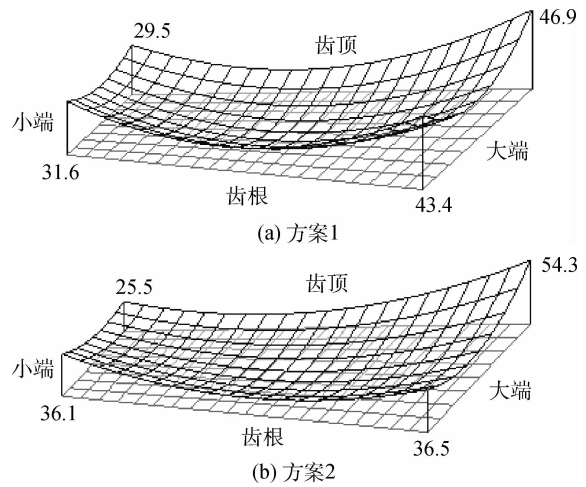
Fig. 6 Meshing analysis for original tooth surfaces

依据前文拓扑修形系数对啮合性能的影响规律,本文给出了 3 组修形方案,表 3 给出了 3 组修形方案对应的修形系数。

表 3 齿面拓扑修形系数

Table 3 Tooth surface topology modification factors					
方案	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
1	0	0	0.0001	0.0010	0
2	0	0	0.0001	0.0010	0.0001
3	0	0	0.0001	0.0005	0.0003

图 7 给出了 3 组修形方案对应的齿面修形拓扑图。表 4 给出了 3 组修形方案对应的小轮加工参数修正量。



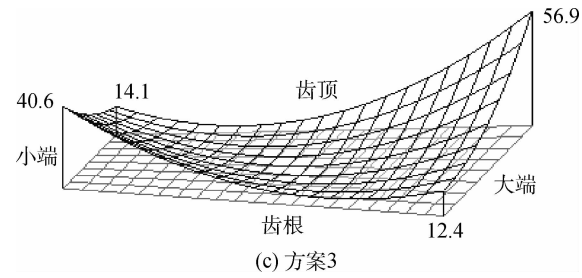


图 7 3 组齿面修形拓扑图(单位: μm)
Fig. 7 Three groups tooth surface modification topology (unit: μm)

表 4 小轮加工参数修正量			
Table 4 Pinion processing parameters correction			
参数	方案 1	方案 2	方案 3
径向刀位/mm	-2.6478	-1.9290	0.3702
角向刀位/(°)	1.8576	1.9965	-0.3645
垂直轮位/mm	-0.6441	0.1696	1.7184
床位/mm	4.2566	3.7675	1.0515
轴向轮位/mm	-0.6298	-0.3467	0.1250
安装角/(°)	-2.4888	-2.7405	-2.5025
滚比	-0.0519	-0.0434	-0.0088

图 8 给出了 3 种方案加工参数修正后小轮齿面与修形齿面之间的偏差。

由图 8 可以看出,对于 3 组修形方案,小轮加工参数修正后,获得的小轮实际齿面与修形齿面

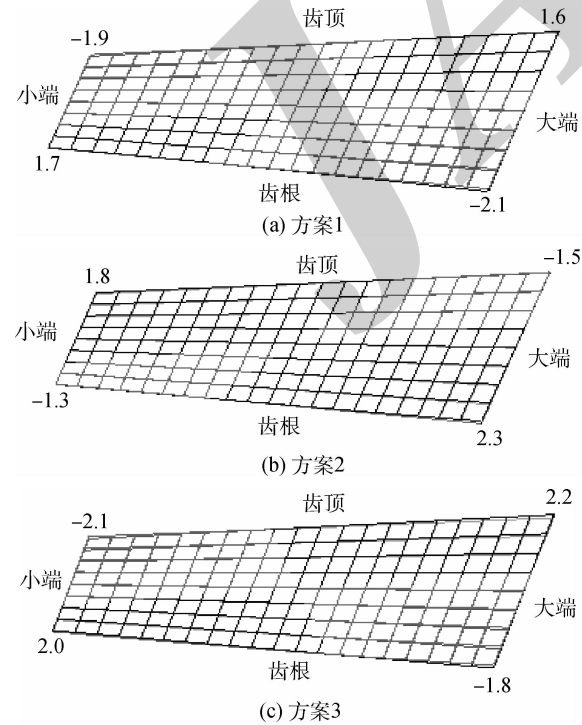


图 8 3 组加工参数修正后齿面偏差(单位: μm)
Fig. 8 Three groups tooth surface errors after parameters correction(unit: μm)

之间的偏差都小于 $10\text{ }\mu\text{m}$,这表明加工参数修正后小轮实际齿面与修形齿面一致。

图 9~图 11 给出了 3 组修形方案对应的齿面啮合分析结果。表 5 给出了 3 组修形方案对应的 TCA 分析啮合参数。

结合表 3、表 5、图 7、图 9~图 11,首先可以看出:通过改变修形系数,小轮的齿面拓扑结构发生了改变,齿面的啮合性能也随之发生改变。这表明利用本文提出的齿面拓扑修形方法来改变齿面的啮合性能是有效的。

同时,结合表 5 和图 9~图 11 修形啮合分析结果还可以看出:按照方案 1 设定的修形系数对齿面双向修形,齿面接触区内对角趋势增强,但是传动误差幅值偏大;按照方案 2 适当增加了齿面挠率修正,齿面接触区内对角趋势再次增加,但是

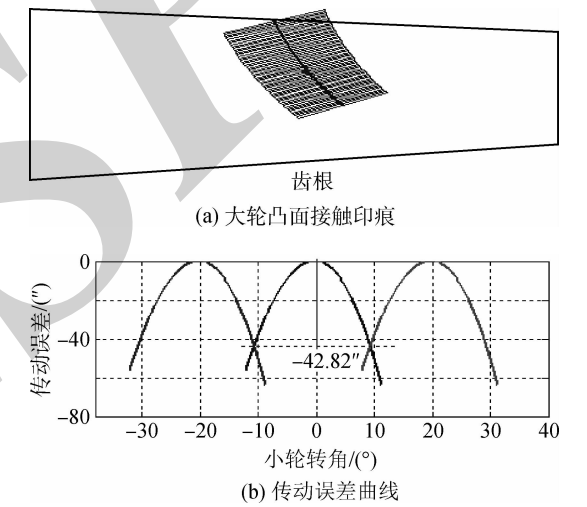


图 9 方案 1 齿面啮合分析结果
Fig. 9 Tooth surface meshing analysis for scheme 1

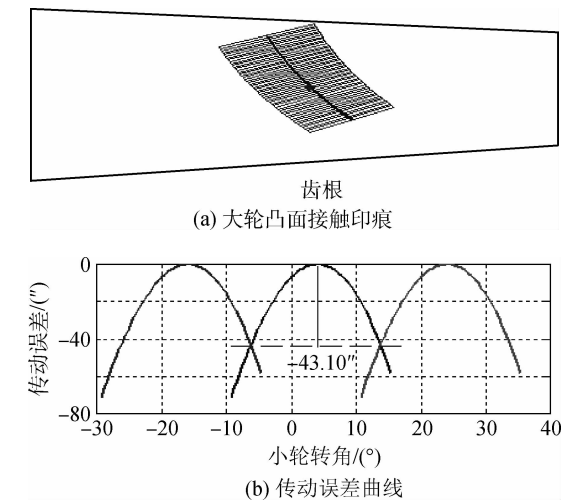


图 10 方案 2 齿面啮合分析结果
Fig. 10 Tooth surface meshing analysis for scheme 2

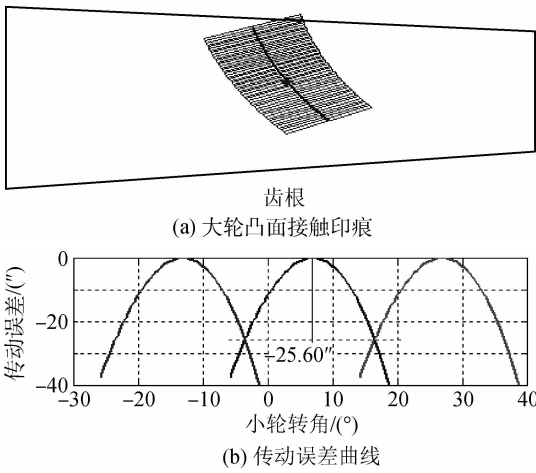


图 11 方案 3 齿面啮合分析结果

Fig. 11 Tooth surface meshing analysis for scheme 3

表 5 齿面接触分析啮合参数

方案	传动误差幅值/($^{\circ}$)	接触迹线倾斜角度/($^{\circ}$)	接触椭圆半轴长度/mm
原始	-11.67	77.8	4.56
1	-42.82	60.5	3.78
2	-43.10	51.2	3.52
3	-25.60	54.7	3.58

传动误差幅值依然偏大;在方案 2 基础上,方案 3 适当减小了齿廓修形系数,同时适当增大齿面挠率修形系数,与修形方案 2 啮合效果相比,传动误差幅值明显减小,但是接触区内对角趋势基本没有受到削弱。按照方案 3 修形得到的齿面啮合性能比较符合现在的工程要求,因此修形方案 3 相对合理。3 种修形方案的啮合分析结果表明:通过合理的控制齿面拓扑修形系数对齿面进行修形,齿面的啮合性能可以得到有效改善。

此外为了验证修形方法的正确性,进行了切齿及滚检实验。图 12 为切齿实验。图 13 为原始

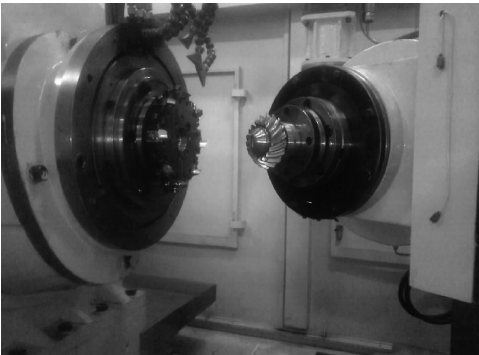


图 12 切齿实验

Fig. 12 Gear processing

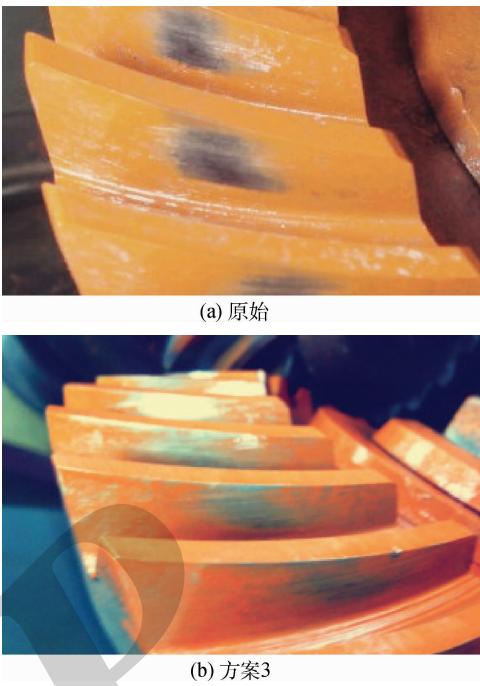


图 13 大轮滚检接触区

Fig. 13 Tooth contact area for gear

滚检接触区和修形方案 3 对应的滚检接触区。

对比图 13(a)和图 6(a)、图 13(b)和图 11(a)可以看出,滚检接触区与 TCA 仿真结果基本一致。同时对比图 13(a)和图 13(b)可知,采用方案 3 对小轮原始齿面修形,修形后接触区相对原始接触区变倾斜,接触区长半轴长度变短,这与表 5 中啮合参数变化趋势一致,由此可知本文提出的齿面修形方法是正确可行的。

5 结 论

- 1) 本文针对弧齿锥齿轮提出了一种新的齿面拓扑修形方法,通过改变 5 个方向的齿面修形系数可以任意控制齿面拓扑结构,从而可以根据需要改变齿面的啮合性能。
- 2) 本文提出的齿面拓扑修形方法易于建立齿面修形过程与 TCA 仿真之间的可视化,可以直观的观察齿面修形效果,该方法可以方便地指导实际切齿加工。
- 3) 算例分析和切齿实验验证了本文提出的齿面拓扑修形方法的有效性与其可行性,该方法也可应用于其他齿轮的齿面修形。

参考文献:

[1] 刘万春,刘光磊. 基于抛物线刀刃的弧齿锥齿轮齿面啮合分析[J]. 机械与电子,2008(7):13-15.

LIU Wanchun, LIU Guanglei. Contact analysis of spiral

- bevel gears based on parabolic blades[J]. Machinery and Electronics, 2008(7): 13-15. (in Chinese)
- [2] 聂少武, 邓效忠, 李天兴, 等. 基于圆弧刀廓的端面滚切锥齿轮啮合接触分析[J]. 航空动力学报, 2012, 27(6): 1424-1431.
- NIE Shaowu, DENG Xiaozhong, LI Tianxing, et al. Tooth meshing contact analysis for bevel gears by face hobbing method based on arc blade profile [J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(6): 1424-1431. (in Chinese)
- [3] 张华, 邓效忠. 四轴数控螺旋锥齿轮铣齿机变学法铣齿研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(14): 1652-1655.
- ZHANG Hua, DENG Xiaozhong. Modified roll method study on 4 axis CNC spiral bevel gear machine[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(14): 1652-1655. (in Chinese)
- [4] 刘光磊, 樊红卫. 航空弧齿锥齿轮磨削齿面的主动优化设计[J]. 西北工业大学学报, 2011, 29(3): 394-399.
- LIU Guanglei, FAN Hongwei. A better active design for optimizing grinding parameters of aviation spiral bevel gears[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2011, 29(3): 394-399. (in Chinese)
- [5] 彭先龙, 胡锡文, 方宗德. 构造拓扑修形齿面的面齿轮传动主动设计[J]. 航空动力学报, 2014, 29(5): 1216-1222.
- PENG Xianlong, HU Xiwen, FANG Zongde. Active design of face gear drive for modifying ease-off topology flank[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(5): 1216-1222. (in Chinese)
- [6] 蒋进科, 方宗德, 苏进展. 拓扑修形斜齿轮的数控成形磨齿加工[J]. 华南理工大学学报, 2014, 42(4): 97-104.
- JIANG Jinke, FANG Zongde, SU Jinzhan. CNC grinding machining of topologically modified helical gear[J]. Journal of South China University of Technology, 2014, 42(4): 97-104. (in Chinese)
- [7] 苏进展, 方宗德. 弧齿锥齿轮低敏感性修形[J]. 航空动力学报, 2012, 27(8): 1896-1901.
- SU Jinzhan, FANG Zongde. Low sensitivity modification for spiral bevel gears [J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(8): 1896-1901. (in Chinese)
- [8] 苏进展, 贺朝霞. 弧齿锥齿轮齿面的高精度修形方法[J]. 华南理工大学学报, 2014, 42(4): 91-96.
- SU Jinzhan, HE Zhaoxia. High-precision modification of tooth surface for spiral bevel gears[J]. Journal of South China University of Technology, 2014, 42(4): 91-96. (in Chinese)
- [9] 曹雪梅, 邓效忠, 聂少武. 基于共轭齿面修正的航空弧齿锥齿轮高阶传动误差齿面拓扑结构设计[J]. 航空动力学报, 2015, 30(1): 195-200.
- CAO Xuemei, DENG Xiaozhong, NIE Shaowu. Ease-off flank topography design for aviation spiral bevel gears with higher-order transmission errors by modification of conjugate flank[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(1): 195-200. (in Chinese)
- [10] 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.
- [11] 樊奇, 德福·让·格里森专家制造系统(GEMS)开创弧齿锥齿轮及双曲面齿轮数字化制造新纪元 [J]. 产品与技术, 2005(4): 87-93.
- FAN Qi, DAFOE R. Gleason expert manufacturing system (GEMS) opens a new era for digitized manufacturing of spiral bevel and hypoid gears[J]. Products and Technology, 2005(4): 87-93. (in Chinese)
- [12] 徐忠四, 付胜. 差曲面及其在螺旋锥齿轮拓扑误差评定中的应用[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2006(5): 39-42.
- XU Zhongsi, FU Sheng. Difference surface and application on topography deviation characterization of the spiral bevel gear[J]. Modular Machine Tool and Automatic Manufacturing Technique, 2006(5): 39-42. (in Chinese)
- [13] 李敬财, 王太勇, 范胜波, 等. 基于数字化制造的螺旋锥齿轮齿面误差修正[J]. 农业机械学报, 2008, 39(5): 174-177.
- LI Jingcai, WANG Taiyong, FAN Shengbo, et al. Error corrections of spiral bevel gear tooth surface based on digitized manufacturing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(5): 174-177. (in Chinese)
- [14] 陈书涵, 严宏志. 基于刀倾法的螺旋锥齿轮齿面误差修正算法研究[J]. 中国机械工程, 2011, 22(9): 1080-1084.
- CHEN Shuhan, YAN Hongzhi. Research on tooth surface deviation correction algorithm of spiral bevel gear based on tilting method[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(9): 1080-1084. (in Chinese)
- [15] 唐进元, 聂吉安, 王智全. 螺旋锥齿轮 HFT 法加工的反调修正方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(6): 2142-2149.
- TANG Jinyuan, NIE Jinan, WANG Zhiquan. Reverse correction of spiral bevel gear HFT method [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(6): 2142-2149. (in Chinese)
- [16] SHIH Y P, FONG Z H. Flank modification methodology for face-hobbing hypoid gears based on ease-off topography[J]. Journal of Mechanical Design, 2007, 129(12): 1294-1302.
- [17] 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, 2008, 130(6): 06260401-06260411.
- [18] ARTONI A, GABICINI M, KOLIVAND M. Ease-off based compensation of tooth surface deviations for spiral bevel and hypoid gears; only the pinion needs corrections[J]. Mechanism and Machine Theory, 2013, 61(3): 84-101.