

文章编号: 1000-8055(2008)09-1718-06

调整参数误差对齿面接触质量的影响

唐进元, 卢延峰, 周 超

(中南大学 现代复杂装备设计与极端制造教育部重点实验室, 机电工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 从齿面接触分析(Tooth contact analysis, TCA)内含的啮合信息分析机床调整参数误差对齿面接触质量的影响, 研究机床调整参数误差与螺旋锥齿轮齿面接触分析之间的关联规律. 以 SGM(螺旋锥齿轮, 大轮展成法, 小轮变型法加工)调整卡加工的弧齿锥齿轮副为研究对象, 分析得到各个调整参数误差引起的齿面接触质量的变化规律. 在此基础上, 确定对齿面接触质量有较大影响的机床调整参数.

关 键 词: 齿面接触分析; 机床调整参数误差; 弧齿锥齿轮

中图分类号: TH132. 4

文献标识码: A

Effect of machine tool adjustment parameter errors on spiral bevel gears tooth contact quality

TANG Jin-yuan, LU Yan-feng, ZHOU Chao

(Key Laboratory of Modern Complex Equipment Design and Manufacturing,
Ministry of Education, School of Mechanical and Electrical Engineering,
Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Based on the meshing information of the tooth contact analysis (TCA), the influence on the tooth contact quality caused by the machine tool adjustment parameter errors was studied. The effect law between the machine tool adjustment parameter errors and the spiral bevel gears tooth contact was researched. The researched object is a pair of spiral bevel gears processed by SGM (spiral bevel gears, generated, modified roll) adjustment card. The laws of the tooth contact quality caused by the machine tool adjustment parameter errors were obtained. Based on the results, the machine tool adjustment parameters which have great influence on the tooth contact quality are confirmed.

Key words: tooth contact analysis; machine tool adjustment parameter errors;
spiral bevel gear

齿面接触分析(Tooth contact analysis, TCA)是设计螺旋锥齿轮和检验齿轮接触质量的重要方法与手段^[1-4], 国内外学者对此进行了较深入的研究. 但在锥齿轮的加工过程中, 由于切齿调整计算的近似性、热变形误差、机床安装误差以及机床动态变形误差等因素的影响, 使得实际加工锥齿轮的机床调整参数与设计的机床调整参数相

比较存在一定误差, 因此造成实际加工生产出的齿轮接触分析结果与理论 TCA 分析结果之间有一定误差存在. 为达到设计的齿面接触质量要求, 需要对机床调整参数进行反调. 由于螺旋锥齿轮设计、制造的复杂性, 目前对于机床调整参数的反调缺乏深入的理论认识, 反调工作多凭经验; 国内外学者对机床调整参数对齿面接触质量的研

收稿日期: 2007-08-09; 修订日期: 2007-12-17

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划 2005CB724100)

作者简介: 唐进元(1962-), 男, 湖南永州人, 教授, 主要研究方向为复杂曲面数字化设计与制造.

究不够,李丽霞^[4]等人的研究仅限于机床调整参数对弧齿锥齿轮大轮的齿面形状的影响规律分析.国外学者只有 Simon V^[5]对机床调整参数对接触质量的影响进行研究,他主要研究在理论安装条件下机床加工调整参数对接触质量的影响,即机床加工调整参数改变后仍按照理论的安装位置进行安装接触.国内尚未发现研究机床调整参数对螺旋锥齿轮齿面接触质量的影响规律的文章.

本文从 TCA 的所内含的啮合信息出发,基于 TCA 的分析方法,研究机床调整参数误差对齿面接触质量的影响,得到机床调整参数误差的与齿面接触质量之间的定性关联规律.

1 含机床调整参数误差的齿面 TCA 接触分析

弧齿锥齿轮副是按点接触啮合原理加工制造的,小轮按大轮失配原理加工而成,其理论齿面方程的建立方法在文献[6-7]中有详细叙述,本文不再赘述.设无机床调整参数误差的大轮、小轮齿面方程可分别写为

$$\begin{cases} x_b = x_b(k_b, t_{q_b}, b) \\ y_b = y_b(k_b, t_{q_b}, b) \\ z_b = z_b(k_b, t_{q_b}, b) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x_s = x_s(k_s, t_{q_s}, b_s) \\ y_s = y_s(k_s, t_{q_s}, b_s) \\ z_s = z_s(k_s, t_{q_s}, b_s) \end{cases} \quad (2)$$

式中 t_{q_b}, b 是弧齿锥齿轮大轮齿面方程参变量,加工大轮的机床调整参数为 $k_b = [r_{02}, S_2, q_{22}, E_2, XB_2, X_2, i_{02}, c_{t_2}, c_2]$; t_{q_s}, b_s 是小轮齿面方程参变量,加工小轮的机床调整参数为 $k_s = [r_{01}, S_1, q_{21}, E_1, XB_1, X_1, i_{01}, c_{t_1}, c_1]$. 各机床调整参数意义以大轮为例说明如下: r_{02} 是刀盘半径, S_2 是径向刀位, q_{22} 是角向刀位, E_2 是垂直轮位, XB_2 是床位, X_2 是轴向轮位, i_{02} 是滚比, c_{t_2} 是轮坯安装角, c_2 是刀具齿形角. 小轮调整参数意义与大轮类似.

当机床调整参数存在误差时,它偏离理论设计值,设偏离设计值的机床调整参数为 $k_{s\text{误差}} = [r'_{01}, S'_1, q'_{21}, E'_1, XB'_1, X'_1, i'_{01}, c'_{t_1}, c'_1]$, 其中 $r'_{01}, S'_1, q'_{21}, E'_1, XB'_1, X'_1, i'_{01}, c'_{t_1}, c'_1$ 分别是有误差的刀盘半径、径向刀位、角向刀位、垂直轮位、床位、轴向轮位、滚比、轮坯安装角、刀具齿形角,有误差的各机床调整参数可用式(3)表示

$$\begin{cases} r'_{01} = r_{01} + \Delta r_{01} \\ S'_1 = S_1 + \Delta S_1 \\ q'_{21} = q_{21} + \Delta q_{21} \\ E'_1 = E_1 + \Delta E_1 \\ XB'_1 = XB_1 + \Delta XB_1 \\ X'_1 = X_1 + \Delta X_1 \\ i'_{01} = i_{01} + \Delta i_{01} \\ c'_{t_1} = c_{t_1} + \Delta c_{t_1} \\ c'_1 = c_1 + \Delta c_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中 $\Delta r_{01}, \Delta S_1, \Delta q_{21}, \Delta E_1, \Delta XB_1, \Delta X_1, \Delta i_{01}, \Delta c_{t_1}, \Delta c_1$ 为偏离理论设计值的各机床调整参数误差量, $\Delta r_{01}, \Delta S_1, \Delta q_{21}, \Delta E_1, \Delta XB_1, \Delta X_1, \Delta i_{01}, \Delta c_{t_1}, \Delta c_1$ 的求取,可用三坐标测量机或齿轮测量机对齿面误差进行检测,然后通过差曲面的方法间接获得;鉴于国外文献[5]中的研究方法是采用人为给定的小误差扰动进行研究,对各个机床调整参数之间的关系没作考虑,本文的研究不涉及齿面误差检测和差曲面反求,因此研究过程中同样采用人为设定微小机床调整参数误差值的方法进行分析研究.

有机床调整参数误差的小轮齿面方程为

$$\begin{cases} x_{1\text{误差}} = x_1(k_{s\text{误差}}, t_{q_s}, b_s) \\ y_{1\text{误差}} = y_1(k_{s\text{误差}}, t_{q_s}, b_s) \\ z_{1\text{误差}} = z_1(k_{s\text{误差}}, t_{q_s}, b_s) \end{cases} \quad (4)$$

在实际的加工过程中,由于一般不修正大轮的齿面,只修正与大轮相配对的小轮齿面.因此本文中机床调整误差主要考虑存在于小轮加工过程中.

大轮齿面方程建立于坐标系 $\sigma = \{O; i, j, k\}$ 下, p_2 是大轮轴线;小轮齿面方程建立于坐标系 $\sigma = \{O; i_1, j_1, k_1\}$ 下, p_1 是小轮轴线.把加工好的大轮、小轮按照设计要求,即图1,装配在一起,两轮轴线之间的夹角是轴交角 η . j 和 j_1 是平行的, i 和 i_1, k 和 k_1 之间有一个夹角 $\Delta = \eta - \delta_{M1} - \delta_{M2}$; δ_{M2}, δ_{M1} 分别是小轮和大轮的轮坯安装角.因此在进行齿面分析之前,需要将大轮小轮的坐标系统一于大轮坐标系 $\sigma = \{O; i, j, k\}$ 下.由图1所示.

大轮、小轮坐标系之间的转换关系是

$$\begin{cases} i_i = \cos \Delta i - \sin \Delta k \\ j_1 = j \\ k_1 = \sin \Delta i - \cos \Delta k \end{cases} \quad (5)$$

然后根据啮合原理可知:大小轮在接触点处具有相同的矢径和法向,即

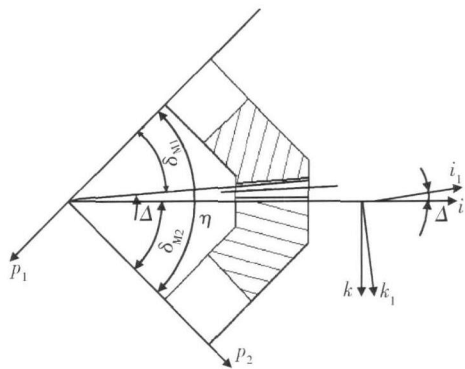


图 1 螺旋锥齿轮副安装图
Fig.1 Assembling figure of spiral gears pair

$$\begin{cases} x_b = x_s \\ y_b = y_s \\ z_b = z_s \\ N_2 = N_1 \end{cases} \quad (6)$$

以方程(4)为条件,指定初始点的位置参数,解非线性方程组(4)即得出两齿面接触过程中所有的接触点位置;将其连接在一起就构成了齿面接触轨迹图.传动误差曲线图的作法在文献[6-7]中有详细叙述,本文就不在赘述.

2 TCA 所内含的接触质量信息

综合文献[1-3]经分析可得出 TCA 所能反映出的接触质量信息如下:

1) 动态性能:它主要由几何传动误差曲线波动幅值决定,波动幅值愈大,振动愈大.加载后的传动误差的幅值与几何传动误差有关,当几何传动误差幅值较大时,轻载传动误差波动大,而重载时变形补偿作用使波动减小;反之,当几何传动误差幅值较小时,轻载振动小,重载时传动误差波动增大.

2) 传动误差曲线的形状、幅值与齿面接触特性及印痕有密切的内在关系.当几何传动误差曲线向上弯曲或呈 S 形时,齿面产生桥式接触,伴随严重的振动;各齿对传动误差曲线不连续时,产生边缘接触.因此,理想的几何传动误差曲线应向下弯曲、齿对间连续且两下端尽量对称,此时产生边缘接触的可能性相对小.传统上理想的几何传动误差曲线呈抛物线形状,它的幅值反映了接触印痕在接触路径方向上相对于制造和安装误差的敏感性.

3) 齿轮重合度:齿轮重合度于其动态性能有显著的影响,设计重合度由设计几何传动误差曲线下段宽度与设计周期之比决定.增加传动误差

曲线的横向宽度就可以获得更高的重合度.

4) 齿面上接触路径较长则有利于增加齿轮的重合度,但是会造成一定程度的对角接触.针对不同的工况,对接触轨迹的形式要求也不近相同.接触区半径要达到设计要求,一般占到齿面宽的 30 %左右.

根据几何传动误差所能表现的信息,实际加工中,若对接触质量不满意,则需要对小轮的加工参数进行调整.

3 接触质量与机床调整误差关联规律分析及讨论

根据 TCA 算法,将无机床调整参数误差的大轮齿面与具有误差的小轮齿面进行接触分析.对于任意给定的一对弧齿锥齿轮,机床调整误差对齿面接触分析的规律应该是相似的,下面以一对弧齿锥齿轮为例,齿轮副 SGM 调整卡加工参数以及齿轮副设计参数如表 1 和表 2 所示.

表 1 齿轮加工调整参数
Table 1 Processing adjustment parameters of spiral gears

加工参数	小轮	大轮
砂轮半径 r/mm	145.923	152.4
砂轮外刃角 $\alpha_0/(\circ)$	18.75	18.75
砂轮内刃角 $\alpha/(\circ)$	21.25	21.25
砂轮顶宽 b_s/mm	1.651	3.81
径向刀位 S_2/mm	154.127	146.886
刀倾角 $i/(\circ)$	0	0
刀转角 $j/(\circ)$	0	0
垂直轮位 E_{02}/mm	- 1.463	0
轮坯安装角 $c_2/(\circ)$	42.728	42.728
床位 XB_2/mm	4.374	- 0.000 1
水平轮位 X_2/mm	- 6.446	0
角向刀位 $q_2/(\circ)$	55.706	54.093
滚比 i_0	1.364 853	1.413 102

图 2~图 6 中,‘o’、虚线表示负向误差扰动结果.实线表示无误差扰动结果.‘+’、点划线号表示正向误差扰动结果.

从上述各单项机床调整参数误差对齿面接触轨迹和传动误差曲线的影响结果来分析,可知:

1) 对齿面接触轨迹方向影响较大的因素有:滚比误差、径向刀位误差、齿形角误差;其中滚比误差和齿形角误差的正向误差扰动会使接触轨迹线绕接触中点逆时针转动,其负向误差扰动会使接触轨迹线顺时针转动,见图 3,图 5.而径向刀位正向误差值会使接触轨迹线绕齿面中点顺时针转

动,负向误差则产生逆时针转动,见图 4。其他机床调整参数对接触轨迹线的影响就很小甚至没有,见图 2、图 6。根据本文第 2 节可知,改变接触区轨迹的方向使得接触轨迹增长可以很大程度上提高齿轮的重合度,使得齿面的接触动态性能提高。相反改变接触区轨迹方向使得接触轨迹减短就可以降低齿面接触的对角化程度。

表 2 齿轮设计参数

Table 2 Design parameters of spiral gears

设计参数	小轮	大轮
齿数 z	37	37
模数 m	-	8
齿面宽 b/mm	63	63
压力角 $\alpha/(\circ)$	20	-
轴交角 $\eta/(\circ)$	90	-
齿顶高 h_t/mm	6.8	6.80
齿根高 h_b/mm	8.3	8.30
全齿高 h/mm	15.1	15.10
节锥角 $\delta/(\circ)$	45	45
面锥角 $\delta_s/(\circ)$	47.267	47.267
根锥角 $\delta_r/(\circ)$	42.733	42.733
齿根角 $\theta/(\circ)$	2.267	2.267
旋向	左旋	右旋

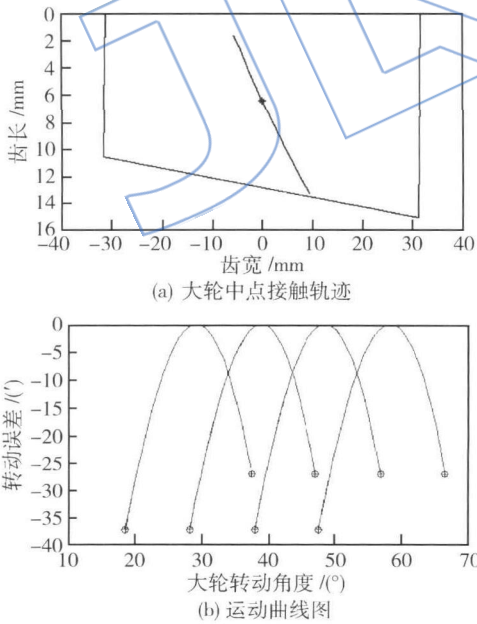


图 2 垂直轮位、角向刀位、刀盘半径、轴向轮位、床位误差影响下的接触轨迹图和传动误差曲线

Fig.2 Function of transmission error and contact track line influenced by error of work offset , angular distance , cutter radius , distance of machine center to cross point and sliding base setting

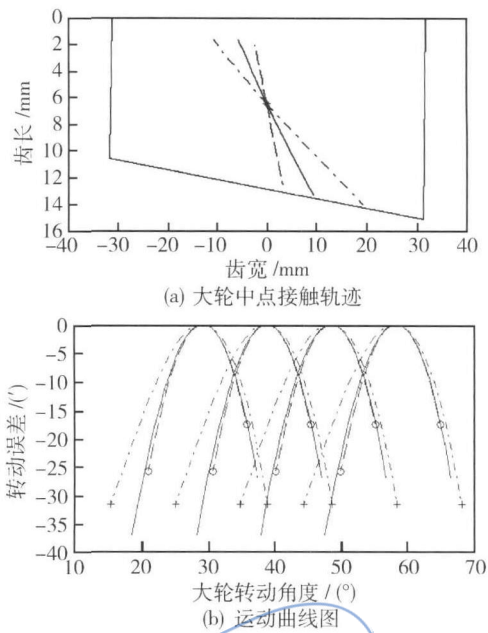


图 3 滚比误差影响下的接触轨迹图和传动误差曲线图

Fig.3 Function of transmission error and contact track line influenced by rolling ratio error

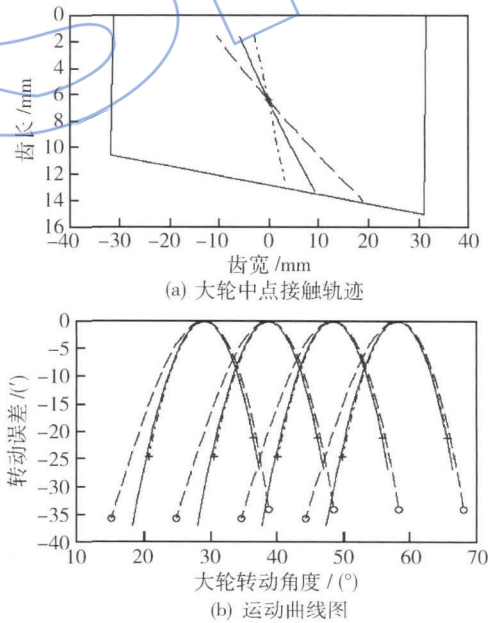


图 4 径向刀位误差影响下的接触轨迹图和传动误差曲线图

Fig.4 Function of transmission error and contact track line influenced by radius distance error

2) 对齿面传动误差曲线影响较大的因素有: 滚比误差、径向刀位误差、齿形角误差、轮坯安装角误差。前三种因素相对于其他机床调整参数而言对接触轨迹线产生了很大的影响,因此使得接触轨迹线比无误差扰动情况下接触路径有很大

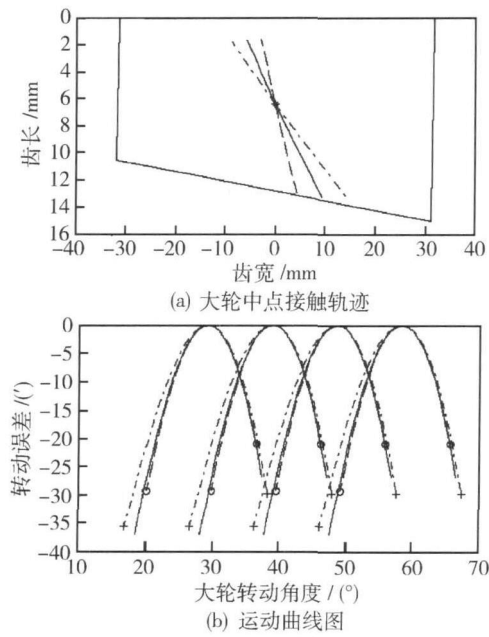


图 5 齿形角误差影响下的接触轨迹图和传动误差曲线图

Fig. 5 Function of transmission error and contact track line influenced by cutter blade angle error

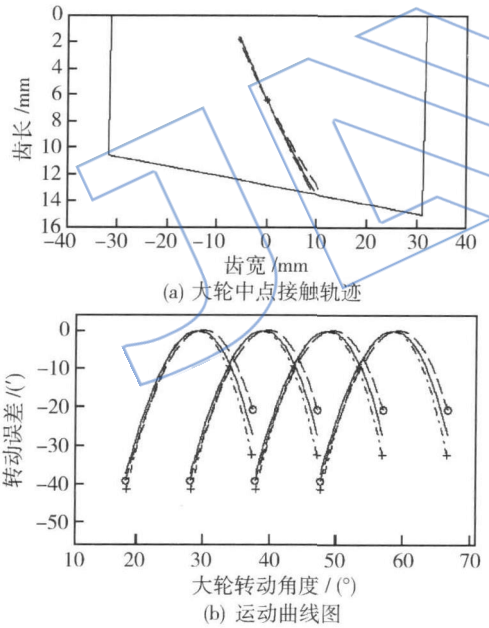


图 6 轮坯安装角误差影响下的接触轨迹图和传动误差曲线图

Fig. 6 Function of transmission error and contact track line influenced by machine root angle error

的变化,因此也导致传动误差曲线发生了很大的变化.其中滚比和齿形角的正向误差均使得传动误差曲线的抛物线开口增大,曲线的几何对称性增强,曲线的横向宽度增加,见图 3、图 5. 根据本文第 2 节以及文献可知,正向误差使得齿面接触

表 3 各机床调整参数误差对接触区半径的影响
Table 3 Contact radius changes influenced by machine tools' adjustment parameter errors

误差扰动条件	误差扰动方向	接触区最大接触半径/mm	平均接触半径值/mm	接触半径方差值/mm
无误差条件		8.959 3	8.731 7	0.032 4
垂直轮位 ΔE_1	负向	8.834 4	8.627 5	0.027 4
	正向	9.091 3	8.841 5	0.038 2
滚比 Δi_{01}	负向	9.342 3	9.277 1	0.003 9
	正向	8.987 9	8.236 6	0.225 7
角向刀位 Δq_{21}	负向	8.959 3	8.731 7	0.032 4
	正向	8.959 3	8.731 7	0.032 4
刀盘半径 Δr_{01}	负向	8.773 3	8.574 1	0.026 4
	正向	9.156 1	8.898 3	0.039 5
径向刀位 ΔS_1	负向	9.171 4	8.391 4	0.247 8
	正向	9.141 2	9.061 8	0.004 8
床位 ΔX_{B1}	负向	9.091 7	8.843 8	0.037 1
	正向	8.831 9	8.623 8	0.029 0
轴向轮位 ΔX_1	负向	8.956 0	8.729 4	0.032 2
	正向	8.962 6	8.734 1	0.032 6
轮坯安装角 Δc_{r1}	负向	9.113 6	8.821 6	0.042 5
	正向	9.212 3	8.980 2	0.038 6
刀具齿形角 Δc_1	负向	8.861 2	8.742 3	0.011 1
	正向	9.507 5	8.717 0	0.240 8

的动态性能得到提高,重载情况下的波动减小;而其负向误差均使得传动误差曲线的抛物线开口有所减小,曲线的对称性变化较小,但其幅值有明显减小使得轻载情况下的波动减小;轮坯安装角误差使得传动误差曲线在齿面中点附近处传动误差值出现正值,这说明轮坯安装角误差使得小齿轮齿面修形不理想的结果,见图 6. 因此轮坯安装角度误差应尽量避免. 而其他几种机床调整参数的误差对传动误差曲线影响均很小,见图 2 所示.

3) 对齿面的接触区半径影响较大的因素有: 由表 3 分析可知,除角向刀位误差、刀具齿形角误差以及轴向轮位之外,其余 6 种机床调整参数对接触区半径均有较大影响. 6 种因素中影响最大的是滚比误差,径向刀位误差,轮坯安装角误差,刀盘半径误差,床位误差,垂直轮位误差. 因此可

在实际的反调加工过程中可以综合利用这些因素的影响人为的改变加床调整值,从而达到得到设计的接触区宽度的加工调整参数值。

4) 对接触轨迹线以及传动误差曲线的影响,正负向误差扰动相比较而言,滚比误差和齿形角误差的正向误差影响要比负向误差影响大。从图3和图5可知,相比较于负向误差,正向误差引起的接触轨迹转动角度较大;正向误差对传动误差曲线的开口程度影响较大。由图4比较可知,径向刀位的负向误差比正向误差的影响大。

4 结 论

通过本文的研究,从TCA结果所能反映出的啮合信息分析,得到机床调整参数误差对齿面接触质量的影响规律,并确定出其中影响较大的机床调整参数;分析可知,滚比误差、径向刀位误差、刀具齿形角误差这三个因素对接触区的影响相比较于其他机床调整参数误差影响较大,因此要在加工过程中严格的进行控制。滚比误差和径向刀位误差的控制可以通过提高机床运动的精度,使得刀具的运动的定位准确即可控制住这两种误差。刀具齿形角误差则必须不断的对刀具进行定时定量的修形以保证刀具齿形角正确。另外为避免轮坯安装角度误差,应采用具有更高精度的回转B轴,或在轮坯安装后,对轮坯安装角进行误差补偿后再进行加工。

参考文献:

[1] Falah B. Experimented and numerical investigation of the

meshing cycle and contact ratio in spiral bevel gears [J]. Mechanism and Machine Theory, 1998, 33(12): 21-38.

[2] 方宗德. 高速弧齿锥齿轮动态质量优化[J]. 航空学报, 2001, 22(1): 15-18.

FANG Zongde. Optimization of dynamic meshing behavior of high speed spiral bevel gears[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2001, 22(1): 15-18. (in Chinese)

[3] 邓效忠. 高重合度弧齿锥齿轮的设计理论和实验研究[D]. 西安:西北工业大学, 2002.

DENG Xiaozhong. Design theory and experiment research on spiral bevel gears with high contact ratio[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2002. (in Chinese)

[4] 李丽霞. 机床调整误差对弧齿锥齿轮大轮齿面形状影响规律的研究[J]. 机械传动, 2006, 30(4): 13-16.

LI Lixia. Study on the influence of adjustment error of machine tool to the surface of the spiral bevel gear[J]. Mechanical Transmission, 2006, 30(4): 13-16. (in Chinese)

[5] Simon V. Computer simulation of tooth contact analysis of mismatched spiral bevel gears[J]. Mechanism and Machine Theory, 2007, 42(3): 365-381.

[6] 曾韬. 螺旋锥齿轮设计与加工[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 1989.

ZENG Tao. Design and processing of the spiral bevel gear [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology. 1989. (in Chinese)

[7] 郑昌启. 弧齿锥齿轮和准双曲面齿轮[M]. 北京:机械工业出版社, 1988.

ZHENG Changqi. Spiral bevel gear and hypoid gear [M]. Beijing: Mechanical Industry Publishing Company, 1988. (in Chinese)