

文章编号 1004-924X(2010)03-0630-08

控制大平面砂轮磨削面锥形误差提高齿轮螺旋线精度

凌四营¹, 王立鼎^{1,2}, 马 勇¹, 王晓东^{1,2}, 娄志峰¹

(1. 大连理工大学 精密特种加工及微系统教育部重点实验室, 辽宁 大连 116023;

2. 大连理工大学 微纳米技术及系统辽宁省重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘要: 为了研制高精度标准齿轮, 以 Y7125 磨齿机为例分析了大平面砂轮磨削面锥形误差对齿轮螺旋线偏差的影响。建立了磨削的几何模型, 推导出了影响量的数学表达式。理论分析结果显示, 砂轮与齿面有效接触宽度对齿轮螺旋线形状偏差的影响不大, 而随着被磨齿轮齿宽的加大, 对齿轮螺旋线形状偏差的影响系数会显著增大; 砂轮磨削面锥形误差使被磨齿轮螺旋线偏差曲线呈弧形, 且弧度从齿根到齿顶逐渐增大。最后通过一实例进行了误差测量、磨齿实验与偏差分析。研究表明, 控制大平面砂轮磨削面的锥形误差在 $2.7'$ 以内可满足加工 1 级螺旋线精度齿轮的加工要求。

关键词: 标准齿轮; 大平面砂轮; 磨削面; 锥形误差; 螺旋线偏差; 误差分析

中图分类号: TH132.41; TG61 **文献标识码:** A

Improvement of gear helix accuracy by controlling cone-shaped error of grinding face of flat faced wheel

LING Si-ying¹, WANG Li-ding^{1,2}, MA Yong¹,
WANG Xiao-dong^{1,2}, LOU Zhi-feng¹

(1. *Key Laboratory for Precision & Non-traditional Machining Micro System of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;*
2. *Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China*)

Abstract: In order to develop ultra precision master gears, this paper takes the Y7125 grinder as an example to analyze the effect of the cone-shaped error of grinding face on the helix deviations. It establishes a geometric model and derives the numeric expression of the effect. The theoretical results show that the minimum effective bearing width has a little effect on the form deviation of gear helix. However, as the increase of gear width, the effect of the cone-shaped error on the form deviation of gear helix will significantly increase. Moreover, the cone-shaped error can make the curve of gear helix deviation to be an arc-shape and the crowns of arc vary from the dedendum to the addendum. Finally, the error measurement, gear-grinding experiment and deviation analysis are conducted by an example. The results show that the ultra-precision gear can achieve the quality of 1 helix deviation by controlling the cone-shaped error of grinding face of flat faced wheel under $2.7'$.

收稿日期: 2009-05-26; 修订日期: 2009-09-07.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2008AA042506)

Key words: master gear; flat faced wheel; grinding face; cone-shaped error; helix deviation; error analysis

1 引言

我国齿轮行业总产值已跻身于世界前三位,仅次于美国和日本。但我国商用标准齿轮齿的最高制造精度仅达到 ISO 齿轮精度等级标准 (ISO1328-1:1995,下同) 中的 4-3 级,而德、美等发达国家基准级标准齿轮的制造精度已达到 2 级^[1-4]。基准级标准齿轮主要用于综合检验批量生产中的标准齿轮和标准蜗杆,校验齿轮测量仪等,具有重要的研究价值。因此,研制这样的高精度的标准齿轮,对于全面提升我国齿轮制造业的技术水平有重要的现实意义。

在众多的磨齿方法中,大平面砂轮磨齿虽然磨齿效率较低,但具有较高的磨齿精度。文献[5]论证了大平面砂轮磨齿机经过改装精化后,具有磨 2 级以上超精密齿轮的能力。齿轮精度等级标准^[6]规定了齿轮精度等级评定的 4 项必检项目,分别为齿距偏差(f_{pt})、齿距累积总偏差(F_p)、齿廓总偏差(F_o)和螺旋线总偏差(F_β),而大平面砂轮磨削面锥形误差(简称磨削面锥形误差,下同)对齿廓偏差和螺旋线偏差都有较大的影响。文献[7]通过实验观察到 CBN 砂轮一次修整后使用时间越长,砂轮工作面的外缘磨损越严重,对齿轮螺旋线产生的凹形偏差就越大,但是没有进行定量分析。基于研制基准级标准齿轮的需要,本文采用理论分析与实验验证相结合的方法,研究了大平面砂轮磨削面锥形误差对齿轮螺旋线偏差的影响,用于指导高精度齿轮磨齿实践。

2 大平面砂轮磨齿的工作原理

大平面砂轮磨齿是利用齿条与齿轮啮合的原理,以大平面砂轮的磨削面作为“假想齿条”的一个齿面,用展成法加工齿轮的。下面以国产 Y7125 型磨齿机来阐述大平面砂轮磨齿的工作过程。Y7125 的磨齿原理如图 1 所示。

大平面砂轮的磨削面相当于“假想齿条”的一个牙的侧面,它始终保持垂直方向。齿条的节线 W-W 是倾斜的,其倾角 α_{asm} 的大小可以根据渐开

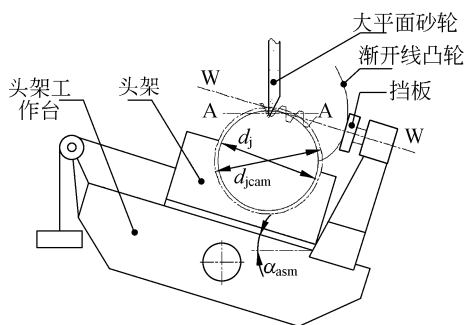


图 1 Y7125 的工作原理

Fig. 1 Work principle of Y7125

线凸轮基圆 d_{jcam} 的大小和被磨齿轮基圆 d_j 的大小进行调整。三者之间满足关系式

$$\cos \alpha_{asm} = \frac{d_j}{d_{jcam}} \quad (1)$$

磨齿时,砂轮的位置是固定不动的,为了形成磨削圆与节线 W-W 的纯滚动,被磨齿轮要同时做两个运动——绕自身轴线的旋转运动和沿与节线 W-W 平行方向的平移运动。节线倾斜的角度的调整是通过将头架工作台扳动一个 α_{asm} 角(头架安装角)来实现的。在 Y7125 磨齿机上,磨削节圆和节线 W-W 的纯滚动的关系是靠一个渐开线凸轮和挡板来实现的。挡板通过尾座固定到工作台上,并随它转动一个 α_{asm} 角,挡板的端面垂直于头架导轨方向。渐开线凸轮和被磨齿轮安装在同一根轴线上,并紧靠挡板的端面。当渐开线凸轮随外外套转动时,挡板就迫使装有凸轮和被磨齿轮的头架整体沿着倾斜 α_{asm} 的导轨滑动。在磨直齿轮时,只要按上式调整一个 α_{asm} 角就可以了;在磨螺旋圆柱齿轮时,还要将砂轮立柱在水平面 A-A 内转动一个被磨齿轮的基圆螺旋角 β 。

大平面砂轮的工作区域,实际上是靠近砂轮外缘的具有一定宽度的环面。为保证磨齿精度,大平面砂轮的工作环面必须具有较高的平面度。然而在砂轮的在线修整过程中,由于很难保证金刚石笔的修整方向与砂轮的旋转轴线完全垂直,致使砂轮的磨削面产生锥形误差。此外,砂轮和金刚石笔的接触刚度偏低、砂轮的修整速度不均匀等因素也会使砂轮的磨削面产生锥形误差,影响齿轮齿廓的加工精度。在 Y7125 实际工作过

程中,大平面砂轮磨削面被修整成内锥和外锥的情况较为常见,如图 2 所示。

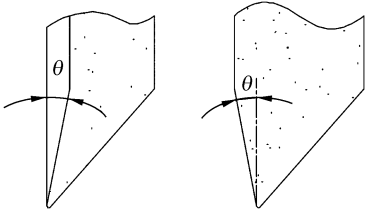


图 2 大平面砂轮磨削面的锥形误差

Fig. 2 Cone-shaped error of grinding face of big plan wheel

两种锥形误差的研究方法一样,下面就以外锥面为例,分析大平面砂轮磨削面锥形误差 θ 对被磨齿轮螺旋线偏差的影响。

3 锥形误差对螺旋线偏差的影响

3.1 大平面砂轮与齿面有效接触宽度的计算

大平面砂轮与齿面有效接触宽度是指能够磨出完整渐开线的前提下,砂轮与被磨齿轮有效接触宽度在砂轮工作平面上的投影。定义为 B (简称砂轮接触宽度,下同),它的计算如图 3 所示。

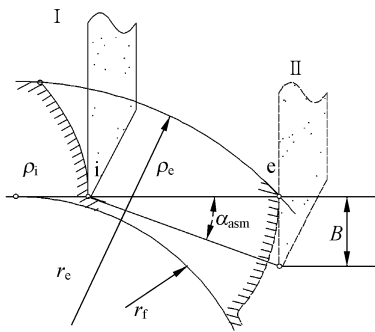


图 3 砂轮接触宽度的计算

Fig. 3 Calculation of minimum effective bearing width

机床的实际运动是砂轮工作面不动,齿轮一边转动,一边沿着与水平方向成 α_{asm} 角的头架导轨移动,以便形成展成运动。为了表示清晰起见,可令砂轮移动,齿轮仅作转动。砂轮在位置 I 时,砂轮磨削齿根处渐开线工作部分的最低点 i ,在位置 II 时,砂轮磨削齿顶的最高点 e 。这两个位置点曲率半径的差,即为齿轮与齿条啮合时的渐开

线的展成长度。按渐开线几何学可得:

$$\rho_e = \sqrt{r_e^2 - r_j^2} = \frac{m}{2} \sqrt{(z \sin \alpha)^2 + 4(z+1)}, \quad (2)$$

$$\rho_i = \sqrt{r_i^2 - r_j^2} = \frac{m}{2} \sqrt{(z \sin \alpha)^2 - 5z + 6.25}, \quad (3)$$

式中, r_e 为齿顶圆半径; r_i 为齿根圆半径; r_j 为齿根基圆半径; m 为被磨齿轮的模数; z 为被磨齿轮的齿数; α 为被磨齿轮分度圆的压力角; ρ_e 为磨削渐开线最高点时齿轮的曲率半径; ρ_i 为磨削渐开线最低点时的曲率半径。

由图 3 中的几何关系可得到砂轮接触宽度 B 的表达式:

$$B = (\rho_e - \rho_i) \tan \alpha_{asm}, \quad (4)$$

根据大平面砂轮的磨齿特点可知,被磨齿轮的齿根在齿宽方向上并非一条直线,而是在 $X-Y$ 平面上(见图 4)有一个 Δ 量,它的大小由砂轮的直径 D 和被磨齿轮的齿宽 b 决定,表达式如下:

$$\Delta = \frac{D}{2} - \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2}. \quad (5)$$

为了确保能磨出标准齿高的齿轮,大平面砂轮接触环宽度 B_i 至少为:

$$B_i = \begin{cases} B + \Delta & , r_j \leq r_f \\ B + \Delta + r_j - r_f & , r_j > r_f \end{cases}. \quad (6)$$

3.2 坐标系的建立

根据齿轮标准^[6]中的规定,螺旋线偏差包括 3 项:螺旋线形状偏差 ($f_{H\beta}$)、螺旋线倾斜偏差 ($f_{H\beta}$) 和螺旋线总偏差 (F_{β})。虽然这 3 项指标有各自不同的定义,但一般情况下,降低螺旋线形状偏差和螺旋线倾斜偏差可降低螺旋线总偏差。螺旋线偏差的计算方向均在渐开线的法向上进行,由于大平面砂轮工作过程中,齿轮的渐开面与砂轮的工作面相切,因此可以将被磨齿轮的螺旋线偏差折算到砂轮工作平面的法向上计算。假设大平面砂轮被修整成磨削面锥形误差为 θ 的外锥面砂轮,以砂轮的最低点为坐标原点,以被磨齿轮的齿宽方向为 X 轴,砂轮直径方向为 Y 轴,垂直于 $X-Y$ 平面的方向为 Z 轴,建立如图 4 所示的坐标系。

由图 4 可知,砂轮磨削面的几何方程为:

$$z = \tan \theta \left(\frac{D}{2} - \sqrt{x^2 + \left(\frac{D}{2} - y\right)^2} \right), \quad (7)$$

其中,研究区间为 $x \in [-b/2, b/2]$, $y \in [\Delta, \Delta + B]$ 。

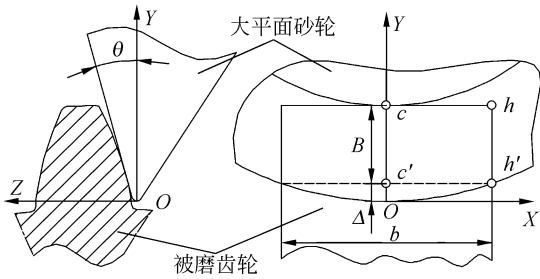


图 4 坐标系的建立

Fig. 4 Establishment of coordinate system

3.3 齿高中截面螺旋线偏差影响分析

设在磨齿过程中齿宽中截面偏离 Z 轴 k , 这时磨削面锥形误差不但对被磨齿轮产生螺旋线形状偏差, 还产生螺旋线倾斜偏差。这里选取齿高中中间截面的螺旋线偏差为考察对象, 建立如图 5 所示的坐标系。

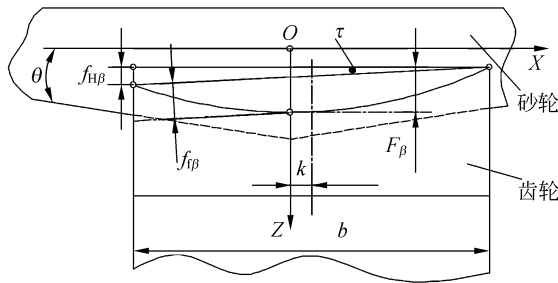


图 5 磨削面锥形误差对螺旋线偏差的影响

Fig. 5 Effect of cone-shaped error on helix deviation

选用直径 $D=400$ mm 的大平面砂轮, 则齿高中截面 Y 轴的坐标 y_0 为:

$$y_0 = \Delta + \frac{B}{2} = 200 - \sqrt{200^2 - (\frac{b}{2})^2} + \frac{B}{2}, \quad (8)$$

由图中的几何关系和螺旋线偏差的定义可知:

$$f_{H\beta} = z(\frac{b}{2} - k, y_0) - z(\frac{b}{2} + k, y_0), \quad (9)$$

$$F_\beta = z(0, y_0) - z(\frac{b}{2} + k, y_0), \quad (10)$$

螺旋线形状偏差可近似表示为:

$$f_{i\beta} \approx z(k, y_0) - f_{H\beta}/2 = z(k, y_0) - \frac{1}{2} [z(\frac{b}{2} - k, y_0) + z(\frac{b}{2} + k, y_0)]. \quad (11)$$

(1) 当 $k=0$ 时, 即齿宽中截面对齐 Z 轴, 此时理论上不产生螺旋线倾斜偏差。螺旋线形状偏

差等于螺旋线的总偏差。

定义与齿宽 b 和砂轮接触宽度 B 有关的影响系数 λ , 表达式如下:

$$\lambda = \frac{B}{2} \sqrt{200^2 - (\frac{b}{2})^2} + \sqrt{200^2 + B^2/4 - B \sqrt{200^2 - (\frac{b}{2})^2}}, \quad (12)$$

由式(10)可知:

$$F_\beta = \lambda \tan \theta. \quad (13)$$

显然, 磨削面锥形误差 θ 引起的螺旋线形状偏差与 $\tan \theta$ 和影响系数 λ 成正比。根据 Y7125 磨齿机的磨齿能力, 砂轮接触宽度 B 一般不超过 20 mm。因此可在区间 $b \in (0, 50)$, $B \in (0, 20)$ 的范围内研究影响系数 λ 随齿宽 b 和砂轮接触宽度 B 的变化规律如图 6 所示。

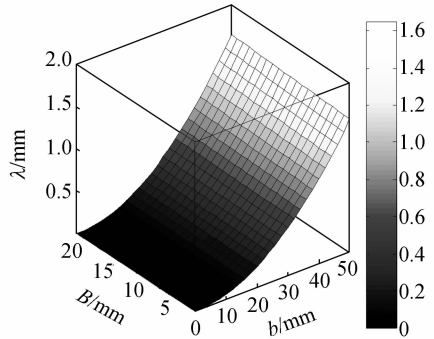


图 6 $k=0$ 时对螺旋线总偏差的影响系数

Fig. 6 Effect on total helix deviation with $k=0$

由图 6 可知, 砂轮接触宽度对齿轮螺旋线形状偏差的影响不大, 而随着齿宽的增大, 螺旋线形状偏差的影响会显著增大。因此, 在精密磨齿的过程中, 只要被磨齿轮的刚度足够, 同等条件下磨削齿宽小的齿轮对降低由磨削面锥形误差引起螺旋线总偏差是有利的。

(2) 当 $k \neq 0$ 时, 由式(8)可知, 磨削面锥形误差对齿轮螺旋线倾斜偏差不为 0。经过补偿后由磨削面锥形误差引起的螺旋线形状偏差和螺旋线总偏差都将发生变化, 因此我们只研究由 k 值引起的螺旋线倾斜偏差。

由上述分析可知, 砂轮接触宽度对螺旋线偏差的影响不大。我们取 $B=5$ mm, 显然 $k \in (0, b/2)$ 。定义由 k 和齿宽 b 有关的螺旋线倾斜偏差影响系数为 λ_β , 表达式如下:

$$\lambda_{\beta} = \sqrt{\left(\frac{b}{2} + k\right)^2 + \sqrt{200^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2 - \frac{B}{2}}} - \sqrt{\left(\frac{b}{2} - k\right)^2 + \sqrt{200^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2 - \frac{B}{2}}}, \quad (14)$$

由式(9)可知:

$$f_{H\beta} = \lambda_{\beta} \tan \theta. \quad (15)$$

在区间 $b \in (0, 50)$, $k \in (0, b/2)$ 内研究影响系数 λ_{β} 随 k 值和齿宽 b 的变化规律如图 7 所示。

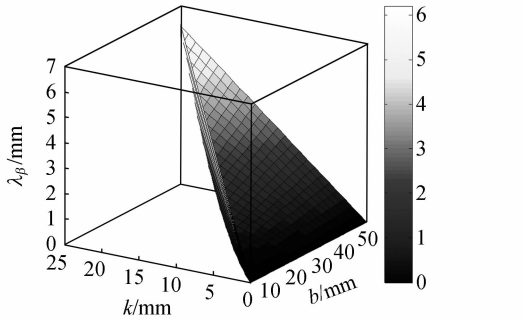


图 7 $k \neq 0$ 时对螺旋线倾斜偏差的影响

Fig. 7 Effect on total helix deviation with $k \neq 0$

由图 7 可知,磨削面锥形误差 θ 和 k 值引起的螺旋线倾斜偏差基本上随齿宽 b 和 k 值线性增加,且影响系数较大。在磨齿过程中,只要将齿宽中截面尽可能对齐 YZ 平面,并在同等条件下磨削齿宽小的齿轮可减小磨削面锥形误差引起的螺旋线倾斜偏差。

3.4 全齿高螺旋线偏差影响分析

砂轮磨削面的锥形误差对齿轮螺旋线偏差的影响从齿根到齿顶是逐渐变化的。假设齿轮严格对中,即 $k=0$, 齿轮螺旋线偏差总偏差可以表示为:

$$F_{\beta} = z(0, y) - z\left(\frac{b}{2}, y\right), \quad (16)$$

式中, $y \in [\Delta, \Delta + B]$ 。

以磨削 $m=2$ mm, $z=60$, $b=20$ mm 的齿轮, 选用 $d_{\text{cam}}=117$ mm 的渐开线凸轮为例, 根据式(1-6)可以计算出磨削全齿对应 y 的取值范围为 $[0.250 \sim 3.326$ mm]。定义全齿高螺旋线总偏差系数为 λ_t , 结合式(12)可知

$$\lambda_t = \sqrt{100 + (200 - y)^2} + y - 200, \quad (17)$$

式中, $y \in [0.250, 3.326]$ 。

利用 MATLAB 拟合工具箱可将数据拟合成

线性多项式^[8]:

$$\lambda_t = 0.00127y + 0.2498, \quad (18)$$

其中,拟合误差的均方差 $\text{RMSE} = 6.55 \times 10^{-6}$, 因此线性拟合带来的误差可以忽略。此时,螺旋线总偏差的表达式可以写成:

$$F_{\beta} = (0.00127y + 0.2498) \tan \theta. \quad (19)$$

全齿高螺旋线总偏差影响量随自变量 y 和锥形误差 θ 的变化关系如图 8 所示。

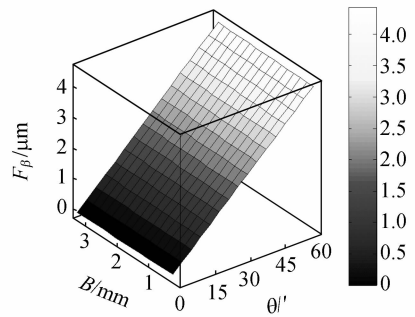


图 8 不同测量位置的偏差影响系数

Fig. 8 Deviations at different measuring positions

4 实验验证

砂轮磨削面的锥形误差主要由砂轮修整器金刚石笔的运动方向与砂轮回转中心不垂直所致, 因此可以近似用金刚石笔运动方向偏离砂轮回转轴线的角度 θ_0 来反映砂轮磨削面的锥形误差 θ , θ_0 的测量实物图如图 9 所示。

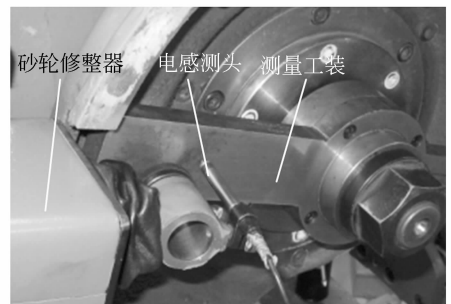


图 9 θ_0 的测量实物图

Fig. 9 Actual measurement of θ_0

测量工装的测量平面与其锥孔垂直, 固定到砂轮轴上后, 其平面即为砂轮回转轴线的法面。在测头沿砂轮修整方向移动 20 mm 的行程中, 电

感测微仪数值变化了约 0.07 mm,由此可知 θ_0 约为 $12'$ 。理论上它将使齿轮分度圆附件产生 $0.88 \mu\text{m}$ 的凹形螺旋线偏差。

在恒温室里,使用本课题组改装精化后的 Y7125 大平面砂轮磨齿机,对 2003 号的齿坯进行磨削实验,砂轮中截面对准齿宽的中截面,即 $k=0$ 。磨齿的主要参数如表 1 所示。

表 1 磨齿的主要参数

Tab.1 Main parameters of gear grinding

齿坯参数				
模数	齿数	压力角	螺旋角	齿宽
m/mm	z	$\alpha/(\text{°})$	$\beta/(\text{°})$	b/mm
2	60	20	0	20
机床参数				
砂轮电机	渐开线凸轮	头架安装角	头架摆动	分度盘
n_1/min	d_{cam}/mm	$\alpha_{\text{asm}}/(\text{°})$	次数/分	槽数
1 410	117	15.466	18	120
砂轮参数				
材料	直径	粒度	硬度	结合剂
	D/mm			
白刚玉	400	120	软 3	陶土

齿轮螺旋线偏差的测量是在课题组自主研发的基准级渐开线测量仪上进行的。该仪器证实具备测量 1 级精度的齿廓和 0° 角螺旋线的能力^[9]。螺旋线测量示意图如图 9 所示。

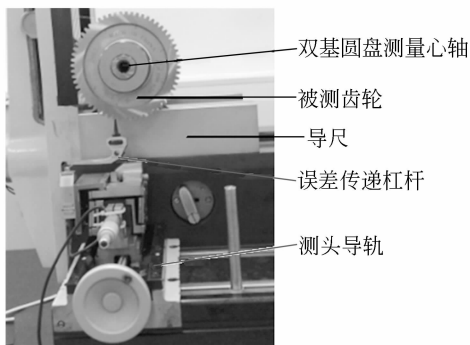


图 10 螺旋线偏差测量实物图

Fig. 10 Actual measurement of gear helix deviations

齿轮完全磨削后并经过较长时间的光整工序后卸下,然后在精密测量室进行温度平衡。室温 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 环境下在齿根、分度圆和齿顶 3 个

位置附近分别测量同一齿的螺旋线偏差(以右齿廓为例),测量结果如表 2 所示。

表 2 不同位置的螺旋线偏差测量结果

Tab.2 Measuring results at different positions

位置	齿根附近	分度圆附近	齿顶附近
螺旋线偏差曲线			
	$F_\beta=0.87 \mu\text{m}$	$F_\beta=1.34 \mu\text{m}$	$F_\beta=1.44 \mu\text{m}$
	$f_{i\beta}=0.76 \mu\text{m}$	$f_{i\beta}=1.22 \mu\text{m}$	$f_{i\beta}=1.34 \mu\text{m}$
偏差数值	$f_{H\beta}=0.25 \mu\text{m}$	$f_{H\beta}=0.32 \mu\text{m}$	$f_{H\beta}=0.41 \mu\text{m}$

由表 2 中的偏测量结果可知,齿轮螺旋线的偏差曲线成内凹的弧形,且弧度从齿根到齿顶有增大的趋势,只是齿顶附近的螺旋线偏差曲线中间部分的弧度不明显。由分度圆附件的偏差曲线可看出,螺旋线偏差曲线的凹度约为 $1 \mu\text{m}$,实验测量结果与理论分析结果吻合度达 80% 以上。

对于 1 级精度的超精密齿轮而言,允许其误差曲线有不超过 $0.2 \mu\text{m}$ 的弧度误差。理论计算金刚石笔运动方向偏离砂轮回转轴线法面的角度 θ_0 不应超过 $2.7'$ 。调整 θ_0 实测为 $2'$ 左右,精修砂轮后再进行一次磨齿实验与偏差测量。经对比发现,齿轮螺旋线偏差曲线的凹凸度误差基本消除,螺旋线总偏差 F_β 降到 $1 \mu\text{m}$ 左右,完全达到了 1 级螺旋线精度的要求。

5 结 论

本文全面分析了大平面砂轮磨削面锥形误差对齿轮螺旋线偏差的影响,并推导出了影响量的数学表达式。分析结果不但给出了解释螺旋线偏差曲线成弧形的原因,也给出了解释不同测量位置螺旋线偏差弧度不一致的原因。最后通过一

实例进行了误差测量、磨齿实验与偏差分析,实验测量结果与理论分析吻合度高达 80%。降低砂轮磨削面的锥形误差对减小齿轮螺旋线偏差曲线

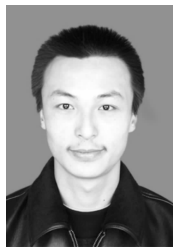
的弧度效果明显。研究结果表明:控制大平面砂轮磨削面的锥形误差在 $2.7'$ 以内可满足加工 1 级螺旋线精度的齿轮加工要求。

参考文献:

- [1] 俞仁楠. 小模数齿轮行业分析[C]. 中国齿轮专业协会年会,浙江诸暨:CGMA, 2007-10;34-38.
YU R N. Analysis of fine_gear industry Years proceedings of CGMA2007[C]. *Years of CGMA. Zhejiang Zhuji*:CGMA, 2007-10;34-38. (in Chinese)
- [2] 遇立基. CIMT'99 展出的数控齿轮加工机床[J]. 制造技术与机床,1999(12):6-7.
YU L J. CNC gear cutting machine exhibited in CIMT1999[J]. *Manufacturing Technology & Machine tool*, 1999(12):6-7. (in Chinese)
- [3] 张雪让. 从 CIMT2003 看国外螺纹磨床的发展[J]. 精密制造与自动化,2003,4(156):7-10.
ZHANG X R. Insight of the development of threaded worm grinder from CIMT2003[J]. *Precision Manufacturing & Automation*, 2003,4(156):7-10. (in Chinese)
- [4] STEVE BENN,张华坚. 顶级精度的齿轮磨削机床—GTG2 齿轮磨削中心[J]. 航空制造技术,2006(2):106-107.
BENN S,ZHANG H J. High_precision gear grinder-GTG2 gear grinding center [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2006(2):106-107. (in Chinese)
- [5] 王立鼎,凌四营,马勇,等. 精密、超精密齿轮的加工

- 方法[J]. 光学 精密工程,2009,17(2):321-325.
WANG L D, LING S Y, MA Y, *et al.*. Processing methods of precision and ultra-precision cylindrical involute gear[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(2):321-325. (in chinese)
- [6] ISO1328-1:1995, Cylindrical gears-ISO system of accuracy-Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to corresponding flanks of gear teeth[S].
- [7] HAIDAR M A, ISHIBASHI A, SONODAB K, *et al.*. Minimization of effect of CBN wheel wear on ground gear errors [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1999, 36: 607-626.
- [8] 求实科技. MATLAB 7.0 从入门到精通[M]. 北京:人民邮电出版社,2008.
QIU S K J. *From entry to the master of MATLAB 7.0*[M]. Beijing:Post & Telecom Press,2008. (in chinese)
- [9] 王立鼎,姜志峰,王晓东,等. 超精密渐开线齿形的测量方法[J]. 光学 精密工程,2006,14(6):980-1985.
WANG L D, LOU ZH F, WANG X D, *et al.*. Measuring methods of ultraprecision involute tooth profile[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(6):980-1985. (in Chinese)

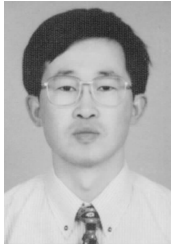
作者简介:



凌四营(1978—),男,山东日照人,博士研究生,2002 年于山东交通学院获得学士学位,2007 年于山东理工大学获得硕士学位,主要从事高精度标准齿轮及齿轮刀具制造技术的研究。E-mail: luckling168@163.com



马勇(1955—),男,辽宁大连人,副教授,1982 年于大连工学院获工学学士学位,1987 年于阜新矿业学院获工学硕士学位,主要从事精密加工与精密测试技术和超精密标准齿轮研制等方面的研究。E-mail:yongma@dlut.edu.cn



王晓东(1967—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,1989年于南京航空学院获得学士学位,1992年于哈尔滨船舶工程学院获硕士学位,1995年于哈尔滨工业大学获博士学位,主要从事微装配技术与系统、精密仪器设计与制造等方面的研究。E-mail: xdwang@dlut.edu.cn



娄志峰(1978—),男,黑龙江肇东人,博士,助理研究员,1999年、2008年分别于大连理工大学获学士、博士学位,主要从事精密机械,测试计量技术等方面的研究。E-mail: louzf@dlut.edu.cn

导师简介:



王立鼎(1934—),男,辽宁辽阳人,教授,博士生导师,中国科学院院士,1960年于吉林工业大学获得学士学位,主要从事超精密齿轮工艺与测试、精密机械设计 & 微纳米机械的研究。E-mail: wangld@dlut.edu.cn

●下期预告

表面等离子体激元透镜设计及其数值计算

史林兴¹,王莉¹,李华¹,汤炳书²

(1. 淮海工学院理学院,江苏连云港 222005;

2. 连云港师范高等专科学校物理系,江苏连云港 222006)

提出了一种新的表面等离子激元透镜的设计方案,即在两个亚波长小孔的外表面放置电介质光栅。利用遗传算法(genetic algorithm)研究了波导中表面等离子激元的色散关系,结果表明,通过调节亚波长小孔的宽度和介电常数可以有效地调控有效折射率,从而达到调控亚波长金属平板波导结构中表面等离子激元传播特性的目的。利用时域有限差分方法(FDTD),结合完美匹配层(PML)边界条件数值模拟了此结构中的光场分布,讨论了光栅周期数对成像特性的影响,以期获得对纳米聚焦效应物理机制的更深入的理解。结果显示:随着表面光栅数的增多,焦距和焦斑大小都在增加。光栅数从5增加至11时,焦距由 $1.715\ \mu\text{m}$ 增大至 $2.325\ \mu\text{m}$,焦斑大小由 $0.615\ \mu\text{m}$ 增大至 $1.715\ \mu\text{m}$ 。这一结构有可能被用做未来集成光路中的纳米聚焦器件。