

文章编号 1004-924X(2017)09-2367-10

安装误差对直齿标准齿轮螺旋线偏差的影响规律

凌四营^{1*}, 李军², 于佃清³, 王坤², 王晓东^{1,2}, 王立鼎^{1,2}

- (1. 大连理工大学精密特种加工教育部重点实验室, 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;
3. 辽宁省计量科学研究院, 辽宁沈阳 110004)

摘要:在齿轮螺旋线的实际测量过程中,不同轮齿的螺旋线倾斜偏差经常会出现较大差异。为提高齿轮螺旋线偏差的测量精度,分别研究了芯轴和齿轮安装误差对齿轮螺旋线偏差的影响规律。首先分别建立了芯轴安装偏心 and 倾斜误差及齿轮安装偏心和偏摆误差对齿轮螺旋线形状偏差和倾斜偏差影响的数学模型,然后制作了平垫圈(1#、4#)和楔角误差分别 5.5 $\mu\text{m}/45\text{ mm}$ (2#)和 11.9 $\mu\text{m}/45\text{ mm}$ (3#)的楔形垫圈,用于进行齿轮螺旋线偏差的精密测试实验。得到如下结果:采用 2# 楔形垫圈时,螺旋线倾斜偏差 $f_{H\beta}$ 的最大值与理论模型相差 0.17 μm ,相对误差为 7%;采用 3# 楔形垫圈时,螺旋线倾斜偏差 $f_{H\beta}$ 的最大值与理论模型相差 0.06 μm ,相对误差为 1%;而两次试验中齿轮螺旋线的形状偏差 f_{β} 基本不变。实验结果表明:齿轮安装偏摆误差对螺旋线偏差的实测结果与理论值基本吻合,从而验证了所建数学模型的准确性。依据本文所建螺旋线的数学模型,得到通过调整齿轮安装偏摆误差补偿各齿轮螺旋线倾斜偏差差异的误差补偿方法。本文研究对于研制高精度标准齿轮具有重要研究意义。

关键词:标准齿轮;螺旋线偏差;安装误差;精密测量

中图分类号: TG806; TG86 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172509.2367

Influence law of installation errors on helix deviation of spur gear artifact

LING Si-ying^{1*}, LI Jun², YU Dian-qing³, WANG Kun², WANG Xiao-dong^{1,2}, WANG Li-ding^{1,2}

- (1. Key Laboratory for Precision & Non-traditional Machining of 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;
 3. Liaoning Research Institute of Metrology, Shenyang 110004, China)
- * Corresponding author, E-mail: luckling168@163.com

Abstract: In the measurement practice of gear helix deviation, there is phenomenon that big difference often appears between helix deviations for different gear teeth. In order to improve the measurement accuracy of gear helix deviation, influence laws of installation error of mandrel and gear on gear helix deviation were respectively researched. Firstly, mathematical models of influences of mandrel

收稿日期: 2017-03-28; 修订日期: 2017-06-02.

基金项目: 国家自然科学基金地区联合项目(No. U1508211); 国家自然科学基金创新研究群体项目(No. 51621064); 中央高校基本科研业务资助项目(No. DUT17JC15)

installation eccentricity and tilt error as well as gear installation eccentricity and deflection error on gear helix deviation were respectively established. Then precision test experiment of gear helix deviation was conducted by using manufactured flat washer (1 #, 4 #) and tilt washers with tilt errors respectively of $5.5 \mu\text{m}/45 \text{ mm}$ (2 #) and $11.9 \mu\text{m}/45 \text{ mm}$ (3 #). The following result was achieved: the difference of maximum for helix slope deviation $f_{H\beta}$ and theoretical model was $0.17 \mu\text{m}$ and relative error was 7% to adopt 2 # tilt washer; the difference of maximum for helix slope deviation $f_{H\beta}$ and theoretical model was $0.06 \mu\text{m}$ and relative error was 1% to adopt 3 # tilt washer; while shape deviation f_{β} of gear helix was basically fixed in the two tests. Experimental result indicates that measured result of deflection error of gear installation on helix deviation is basically the same as theoretical value to verify accuracy of established mathematical model. Error compensation method of compensating helix slope deviation difference through adjusting deflection error of gear installation according to established mathematical model is proposed, which is of important research meaning to develop high precision gear artifact.

Key words: gear artifact; helix deviation; installation error; precision measurement

1 引言

齿轮是需求数量很大的关键基础零部件,几乎在国民经济的各个领域均有应用。目前,齿轮的生产制造在中国已成为机械基础件中规模最大的行业。在过去的 30 年间,我国齿轮行业经历了快速发展,平均增速达到 18%。2016 年全国齿轮行业的产值达到 2 300 亿元左右,居世界第一位^[1]。我国标准齿轮检定规程 JJG 1008-2006 中规定:标准齿轮的精度等级是根据单个齿距偏差 f_{pt} 、齿距累积总偏差 F_p 、齿廓总偏差 F_α 、螺旋线总偏差 F_β 和径向跳动 F_r 5 个项目的检定结果综合确定的^[2]。其中,齿轮的螺旋线总偏差 F_β 是齿轮国家标准 GB/T 10095.1-2008 中的必检项目之一^[3],也是齿轮国际标准 ISO 1328-1:2013(E)中的默认检查项目之一^[4]。螺旋线偏差是指在端面基圆切线方向上测得的实际螺旋线偏离设计螺旋线的量,其中包括螺旋线总偏差 F_β 、螺旋线形状偏差 f_{β} 和螺旋线倾斜偏差 $f_{H\beta}$ 。

大连理工大学高精度齿轮研究室对 1 级精度标准齿轮的齿廓偏差、齿距偏差和径向跳动进行了深入研究^[5-12],并取得了国际领先的研究成果。由于齿轮安装偏摆误差对齿距和齿廓的影响较小,因而研究过程中忽略了安装偏摆误差对齿轮螺旋线偏差的影响。

齿轮螺旋线偏差影响齿轮承载的均匀性以及传动的平稳性,从而影响齿轮的传动精度及使用

寿命。因此提高螺旋线偏差的检测精度具有重要意义^[12]。齿轮齿面是复杂的空间渐开线螺旋面,以齿廓、螺旋线和齿距测量为基础的分析式测量是目前的主要测量方式,其主要分为电子展成法和坐标测量法^[13-16]。

目前,国内外用于测量精密齿轮的测量仪器主要有三坐标测量机和齿轮测量仪^[17-18]。齿轮测量仪一般采用连续几何法测量,通过展成运动使测头走一条理论的齿轮轮廓线,测头测量时产生的数值即为理论轮廓线与实际轮廓线之间的偏差^[1]。但在实际测试过程中,常出现齿距、齿廓和径跳精度指标达到要求,而螺旋线偏差超差的现象。图 1 为 Klingelnberg 齿轮测量仪的检测报告。由图 1 可知,1 齿和 13 齿左齿面的螺旋线倾斜偏差相差了 $3.3 \mu\text{m}$,致使齿轮的精度等级下降了 2 个等级;1 齿和 13 齿右齿面的螺旋线倾斜偏差相差了 $2.3 \mu\text{m}$,致使齿轮精度下降了 1 个等级。

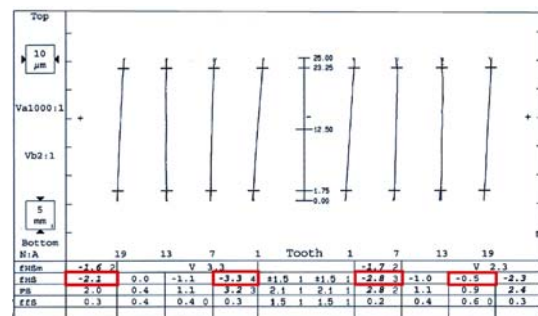


图 1 螺旋线偏差检测报告

Fig. 1 A test report of gear helix deviation

在齿轮螺旋线偏差测试过程中,除了测量仪器的系统误差外,齿轮安装误差对测量结果的影响也较大。为了研究该影响,在国家标准 GB/T 10095.1-2008 中以模数 $m=4$ 、分度圆直径 $d=120$ mm、齿宽 $b=25$ mm 的 1 级精度标准齿轮为例进行测量。结果显示:螺旋线总偏差的国家标准公差要求达到 $2.1 \mu\text{m}$,螺旋线形状偏差和倾斜偏差的公差要求为 $1.5 \mu\text{m}$ 。由此可知,在齿轮测试过程中安装误差造成的影响不容忽视。本文通过分析安装误差对齿轮螺旋线偏差的影响,探讨了针对齿轮各齿面螺旋线倾斜偏差差异的误差补偿方法,旨在提高齿轮螺旋线偏差的测量精度。

2 芯轴安装误差分析

2.1 齿轮芯轴安装偏心对螺旋线偏差的影响

螺旋线偏差是指在端面基圆切线方向上测得的实际螺旋线偏离设计螺旋线的量,我国标准齿轮检定规程 JJG 1008-2006 中规定在不同方向测量的螺旋线偏差均要换算到基圆方向上^[2]。而通常螺旋线的测量位置均在齿轮的分度圆处。因此,如果芯轴存在安装偏心,则会导致螺旋线的实际测量位置偏离分度圆位置,从而使螺旋线的测量方向发生变化,进而影响到齿轮螺旋线偏差的大小。

当齿轮的实际安装中心偏离了理论安装中心时,将导致测点位置偏离理论分度圆处的测量位置。如图 2 所示,以齿轮中心为坐标原点 O ,以测杆的方向为 X 轴建立直角坐标系。可将安装偏心误差分解到 X 和 Y 方向上。设 Y 方向与测头的示值方向同向,在该方向上误差对螺旋线偏差的测量没有影响;而 X 方向上的误差会导致测点位置偏离分度圆,测点处的压力角相对于分度圆处的压力角将发生改变,此时将分度圆切线方向上的值换算到基圆切线方向上会发生变化。在芯轴安装存在偏心时,每一个轮齿的测点位置都不相同,设第一个轮齿在 X 方向上的偏心量为 0 ,其偏心量的变化符合正弦曲线。设偏离起点位置的角度为 θ ,则实际每个位置的偏心量为 $e \cdot \sin \theta$ 。如图 2 所示,渐开线的曲率半径计算公式:

$$\rho_k = r_k \sin \alpha_k, \quad (1)$$

式中: r_k 表示渐开线上点到圆心的距离, α_k 表示该点处的压力角。得出标准齿轮在分度圆处曲率

半径计算公式为:

$$\rho = \frac{mz \sin \alpha}{2}, \quad (2)$$

式中: m 为齿轮模数, z 为齿数, α 为分度圆处压力角。由于测点位置在 X 方向上的变化所导致的测头在示值方向(Y 方向)上的变化将对螺旋线总偏差产生影响,根据几何关系近似可得该方向上的误差对螺旋线总偏差的影响大小为:

$$\Delta F_\beta \approx \rho - \sqrt{\rho^2 - (e \cdot \sin \theta)^2}. \quad (3)$$

以表 1 中的标准齿轮参数为例,当 $\theta=90^\circ$ 或 270° 时,其实际偏心量最大,假设偏心量 $e=10 \mu\text{m}$,带入公式(3)得到 $\Delta F_\beta \approx 0.024 \mu\text{m}$ 。可见,芯轴安装偏心误差对螺旋线总偏差的影响较小,相对误差约为 0.2% 。此值远小于试件对应的 1 级螺旋线总偏差的公差值($2.1 \mu\text{m}$)。因此,可以忽略偏心误差对直齿标准齿轮螺旋线偏差的影响。

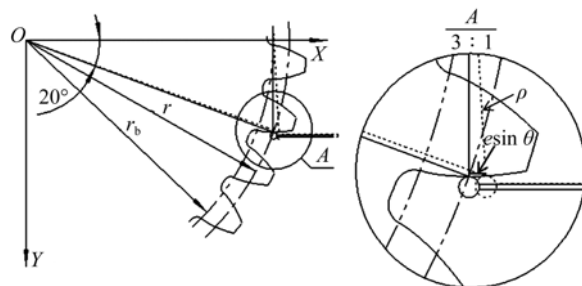


图 2 测点位置对测量结果的影响

Fig.2 Effect of measuring point position on measurement results

表 1 标准齿轮参数

Tab.1 Parameters of standard gear

齿数(z)	模数(m)	压力角(α)	齿宽(b)	螺旋角(β)
30	4 mm	20°	25 mm	0°

2.2 齿轮芯轴安装倾斜对螺旋线偏差的影响

无论是以外圆定位还是以顶尖孔定位,齿轮芯轴和定位面的制造精度及技术工人的操作水平都会造成齿轮的安装倾斜。当以双顶尖定位时,两顶尖的同轴度误差会导致芯轴在安装后产生倾斜。按照平行四边形法则可以将倾斜方向分解为两个方向。由于在两个方向上的倾斜偏差对螺旋线偏差的影响程度不同,因此需要分别对两个方向进行分析。图 3 为双顶尖定位方式在两个不同方向发生倾斜的示意图。

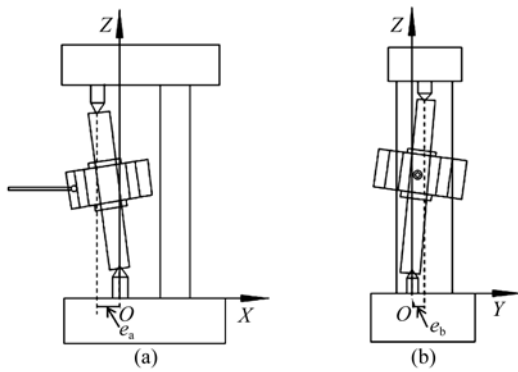


图 3 双顶尖定位时芯轴在两个方向倾斜示意图
Fig. 3 Mandrel inclination schematic when mandrel under double top positioning

以下顶尖为原点建立空间直角坐标系,图 3 (a)表示由于顶尖的同轴度误差导致齿轮芯轴在 XOZ 平面内发生倾斜。将该倾斜方向记为 D_1 , 称其为误差非敏感方向,图中两线之间的距离记为 e_a 。测头沿着 Z 轴上下运动,此时测头实际测量轨迹与理论螺旋线测量轨迹偏离一个角度,产生原始测量误差。在测量过程中,若只考虑芯轴安装倾斜的影响,齿轮每转过一个轮齿时测点在齿面上的测量轨迹相对于上一个轮齿测点的测量轨迹不发生变化,故只需分析任意一个轮齿的螺旋线偏差即可。将芯轴的安装倾斜误差 e_a 换算为测量齿宽方向上的角度误差,记为 γ 。取齿轮齿宽中间 80% 的长度作为评价区间,用 L_β 表示。图 4 为某一轮齿理论螺旋线与实际测量的螺旋线之间的偏离示意图。

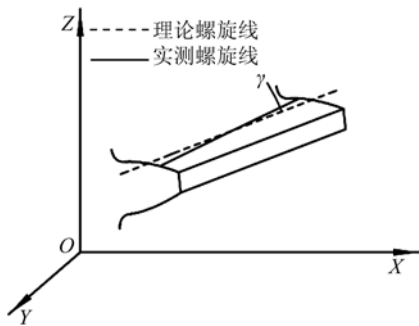


图 4 理论螺旋线与实际测量螺旋线偏离示意图
Fig. 4 Schematic of actual measured helix deviated from theoretical helix

利用渐开线曲率半径的计算公式计算评价区间 L_β 内偏移 $L_\beta \cdot \tan \gamma$ 产生的螺旋线倾斜偏差的变化量 $\Delta f_{H\beta}$ 。类似式(3),由于理论螺旋线测量

轨迹始终在分度圆上,取分度圆处的曲率半径 ρ 计算偏移量所对应的倾斜偏差的变化,得出:

$$\Delta f_{H\beta} \approx \rho - \sqrt{\rho^2 - (L_\beta \cdot \tan \gamma)^2}. \quad (4)$$

由式(4)知,评价区间 L_β 固定不变时, $\Delta f_{H\beta}$ 关于角度误差 γ 单调递增。采用国家标准中关于螺旋线偏差的评价方法进行分析,此时螺旋线总偏差的变化量约等于螺旋线倾斜偏差的变化量,即 $\Delta F_\beta \approx \Delta f_{H\beta}$ 。非敏感方向上的倾斜偏差主要对螺旋线总偏差和螺旋线倾斜偏差产生影响,对螺旋线形状偏差的影响可忽略。

以表 1 中的齿轮参数为例,设评价区间 $L_\beta = 20$ mm。以误差 γ 为横坐标,螺旋线倾斜偏差变化量 $\Delta f_{H\beta}$ 为纵坐标,用 Matlab 绘制 $\Delta f_{H\beta}$ 随 γ 的变化,如图 5 所示。

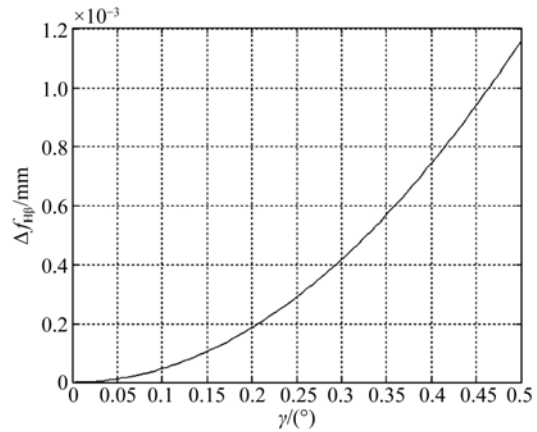


图 5 角度误差对螺旋线倾斜偏差的影响
Fig. 5 Influence of angle error on helix slope deviation

取不同的角度误差值 γ 代入公式(4),计算得到表 2。

表 2 角度误差 γ 对螺旋线倾斜偏差的影响
Tab. 2 Effect of angle error (γ) on gear helix deviation

$\gamma / (^\circ)$	L_β / mm	$\Delta F_\beta / \mu\text{m}$	$\Delta f_{H\beta} / \mu\text{m}$	$\Delta f_{H\beta} / \mu\text{m}$
1	20	3.97	0.29	3.97
0.5	20	0.74	0.06	0.74
0.1	20	0.03	0	0.03

由表 2 可知,图 3(a)中所示的倾斜误差对测量结果影响较小,调整 e_a 的取值使角度误差小于 0.1° 时就可以使其对测量结果基本不产生影响。

图 3(b)图表示顶尖同轴度误差导致齿轮芯

轴安装时在 YOZ 平面内发生倾斜,将该方向记为 D_2 ,称为误差敏感方向,图中两线之间的距离记为 e_b 。此时,测点实际运动轨迹与理论螺旋线将发生倾斜,该方向上产生的倾斜误差与测头示值方向相同,对测量结果影响显著。该方向上的倾斜误差不会导致测点运动轨迹偏离分度圆位置,故该误差不会影响到螺旋线形状偏差,只影响螺旋线总偏差和螺旋线倾斜偏差。齿轮芯轴在两顶尖之间存在倾斜时,芯轴的旋转不会改变测点位置的倾斜角度,所以安装误差对每一个轮齿的影响相同,可任取某一轮齿的螺旋线做误差分析。

将安装误差 e_b 转换为轮齿在评价区间 L_β 内的角度误差,记为 η_0 。测头沿测量轨迹运动,实际的测点轨迹与齿宽方向存在的角度误差即为 η ,该方向上的角度误差造成的误差以 1:1 的关系反映到测量结果中。此时 $\Delta F_\beta = \Delta f_{H\beta} = L_\beta \cdot \tan \eta_0$ 。取不同的 η 值得到螺旋线偏差变化量如表 3 所示。

表 3 安装误差引起的角度误差 η 对螺旋线倾斜偏差的影响

Tab.3 Effect of angle error (η) caused by installation error on gear helix deviation

$\eta/(\circ)$	L_β/mm	$\Delta f_{H\beta}/\mu\text{m}$	$\Delta f_{\text{H}\beta}/\mu\text{m}$	$\Delta F_\beta/\mu\text{m}$
0.1	20	34.91	0	34.91
0.05	20	17.45	0	17.45
0.01	20	3.49	0	3.49
0.001	20	0.35	0	0.35

可见,敏感方向上的角度误差对测量结果影响较大,在该方向上通过保证 e_b 的大小使得倾斜角度 η 的值小于 $0.001^\circ(3.6'')$ 时,对测量结果的影响达到 $0.35 \mu\text{m}$ 。

3 齿轮在芯轴上的安装误差

3.1 齿轮在芯轴上安装偏心的影响

当齿轮在芯轴上存在安装偏心时,在位置固定之后与芯轴整体安装偏心相同,故齿轮安装偏心与芯轴安装偏心作用效果相同。随着齿轮的转

$$\epsilon = L_\beta \cdot \tan \varphi \cdot \sin[(i-1) \cdot \theta] + [\rho - \sqrt{\rho^2 - (L_\beta \cdot \tan \varphi)^2}] \cdot \cos[(i-1) \cdot \theta]. \quad (5)$$

对于齿数为 z 的标准圆柱直齿轮而言,则 $\theta = 360^\circ/z$,代入公式(5)得到:

$$\epsilon = L_\beta \cdot \tan \varphi \cdot \sin[(i-1) \cdot 360^\circ/z] + [\rho - \sqrt{\rho^2 - (L_\beta \cdot \tan \varphi)^2}] \cdot \cos[(i-1) \cdot 360^\circ/z], \quad (6)$$

式中: i 的取值范围是 $1 \sim z$ 。

对于表 1 中的齿轮参数,设评价区间 $L_\beta =$

动,偏心量呈正弦函数规律变化,对应的误差也会相应变化。

3.2 齿轮在芯轴上安装倾斜的影响

齿轮在芯轴上安装倾斜和芯轴整体发生倾斜对测量结果的影响效果不同。在芯轴整体发生安装偏心时,每旋转一个角度不会造成测点相对于轮齿表面的位置发生变化;但是当齿轮定位面与芯轴定位台面之间存在安装倾斜误差时,测量过程中每旋转一个角度,测点的相对位置都会随之发生变化,其对测量结果的影响不断变化。

如图 6 所示,假设齿轮在芯轴上存在一个倾斜角度,记为 φ ,每测量一个轮齿,旋转的角度为 θ ,则测量第 i 个齿时旋转的角度相对于第一个轮齿为 $(i-1) \cdot \theta$ 。

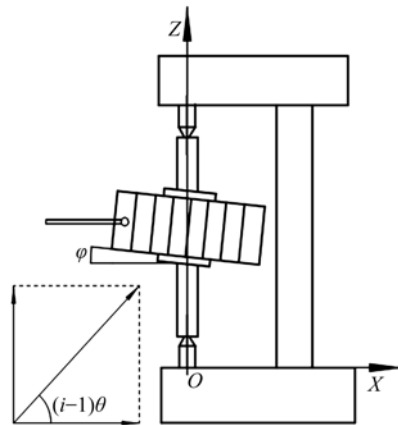


图 6 齿轮在芯轴上安装倾斜示意图

Fig.6 Schematic of installation tilt of gear to mandrel

将安装偏心误差分解到误差敏感方向 D_1 和非敏感方向 D_2 上。当 $i=1$ 时,在 D_2 上产生的误差为零,随着齿轮的旋转,误差在 D_1 方向上的分量呈正弦函数变化;当齿轮旋转约 90° 后,其在 D_1 方向上的误差几乎为零,此时, D_1 方向上的误差恰好与 D_2 方向上的误差相差 $\pi/2$ 个相位角,误差在 D_1 方向上相当于呈余弦函数变化;通过分析 D_1 和 D_2 方向上的误差,结合误差在两个方向上的变化规律,得出如下公式:

20 mm,以 φ 和 i 作为自变量,螺旋线倾斜偏差 ϵ 为因变量,应用 Matlab 绘制图形,如图 7 所示。

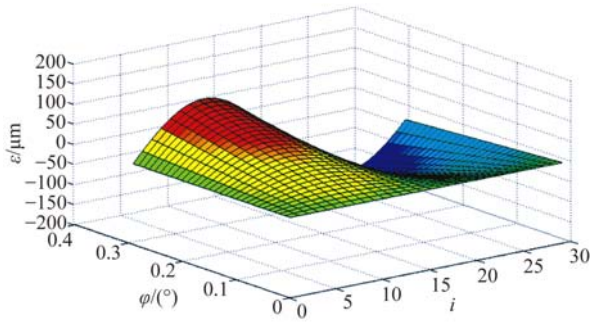


图 7 误差变化规律图
Fig. 7 Error variation diagram

由图 7 可知,角度误差 φ 不变时,随着齿序 i 的增加,螺旋线倾斜偏差呈正弦函数变化;且随着角度误差的变大,误差变化趋势更加显著。

考虑到正余弦函数的特性,根据式(5)和式(6)可以得出当 $[(i-1) \cdot 360/z] \in (\pi/2, \pi) \cup (3\pi/2, 2\pi)$ 时,敏感方向上的误差与非敏感方向上的误差可以相互抵消。所以在该区间内存在极大值和极小值。由于螺旋线倾斜偏差 ϵ 与角度误差 φ 的变化线性相关,故只需对测量齿序 i 求偏导就可以判断出 ϵ 出现极大值和极小值的位置。

设 $t = (i-1) \cdot 360/z$, 则:

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} = L_{\beta} \cdot \tan \varphi \cdot \cos(t) - [\rho - \sqrt{\rho^2 - (L_{\beta} \cdot \tan \varphi)^2}] \cdot \sin(t) \quad (7)$$

令 $\frac{\partial \epsilon}{\partial t} = 0$, 得出:

$$t = \arctan \frac{L_{\beta} \cdot \tan \varphi}{\rho - \sqrt{\rho^2 - (L_{\beta} \cdot \tan \varphi)^2}} \quad (8)$$

对于具有不同参数的标准直齿轮,将参数代入式(8),并将 i 值进行圆整便可以求出螺旋倾斜偏差最大和最小的轮齿位置。

4 实验

4.1 实验准备

在实际测量螺旋线时,为研究齿轮的安装误差对螺旋线偏差产生的影响,以表 1 中的渐开线圆柱直齿轮参数为例。由理论分析知,齿轮安装偏心误差对螺旋线偏差影响较小,本实验主要验证齿轮安装倾斜误差对螺旋线偏差的影响。因

此,本文通过手工研磨的方式制造出一组存在不同楔角误差的垫圈,4 种垫圈参数如表 4 所示。采用精度为 $0.1 \mu\text{m}$ 的光学扭簧比较仪测量出端面的楔角误差;采用精度为 40 nm 的相位移动式激光干涉仪(L-0450)测量垫圈端面的平面度误差,如图 8 所示。



图 8 垫圈楔角误差和平面度的精密测试装置

Fig. 8 Precision measurement devices of wedge angle error and flatness

表 4 垫圈参数

Tab. 4 Parameters of washers

编号	楔角误差	PV 值/ μm	干涉图
1	$<0.1 \mu\text{m}$	0.16	
2	$5.5 \mu\text{m}$	0.21	—
3	$11.9 \mu\text{m}$	0.25	
4	$<0.1 \mu\text{m}$ 45 mm	0.19	—

在齿轮与芯轴之间加装由 G5 级球制作的、具有微量过盈量的密珠轴套,以减小齿轮在芯轴上的安装偏心误差。同时为改善齿轮在楔形垫圈的作用下发生倾斜时的受力状况,移除密珠轴套均布六球室中与楔形垫圈偏摆方向一致(如图 9 中的 Y 方向)的对称两球室里的球。这样,在锁紧螺母和楔形垫圈的作用下,齿轮的安装偏摆方向与垫圈楔角方向基本保持一致。

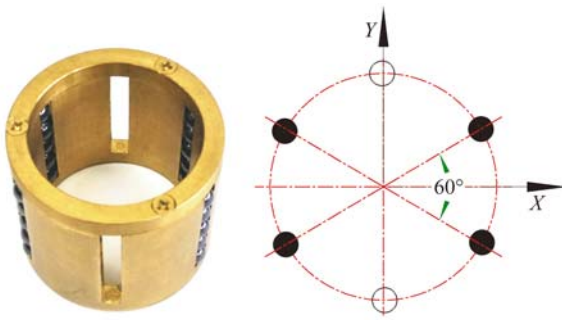


图9 特制定位密珠轴套

Fig.9 A special positioning multi-ball sleeve

齿轮测量前,将待测齿轮安装在芯轴上(如图10所示)。

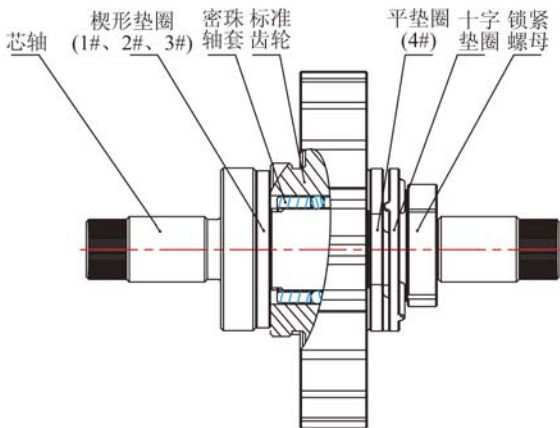


图10 齿轮在芯轴上的安装示意图

Fig.10 Schematic diagram of gear installation on mandrel

芯轴安装时要求定位端面与轴线之间的垂直度 $\leq 1 \mu\text{m}$,芯轴外侧两轴段的直径偏差 $\leq 1 \mu\text{m}$ 。在测量齿轮时,利用测头测量外侧两轴段,得到偏心误差,并对测量结果进行补偿,以消除芯轴安装偏心对螺旋线偏差的影响。

4.2 实验过程

实验在室温 $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, 相对空气湿度为 40%~50%的辽宁省计量研究院的恒温室中进行。

分别采用平垫圈(1#)和楔形垫圈(2#、3#)将齿轮安装到芯轴上,使其产生不同的偏摆误差;然后采用 Klingelberg P40 齿轮测量中心对 3 种偏摆状态下齿轮螺旋线偏差进行精密测量,测量实物图如图 11 所示。



图11 齿轮螺旋线偏差的精密测量

Fig.11 Precision measurement of gear helix deviation

采用 1# 垫圈(楔角误差 $< 0.1 \mu\text{m}$)得到的齿轮螺旋线偏差的检测报告如图 12 所示。

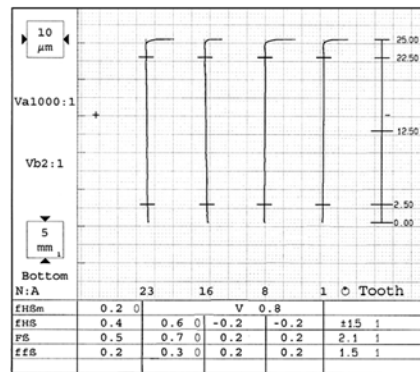


图12 采用1#垫圈得到的螺旋线偏差检测报告

Fig.12 Test report of helix deviation with flat washer(No. 1)

采用 2# 垫圈(楔角误差: $5.5 \mu\text{m}/45 \text{ mm}$)得到的齿轮螺旋线偏差的检测报告如图 13 所示。

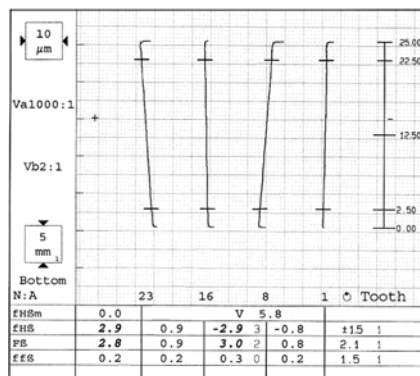


图13 采用2#垫圈得到的螺旋线偏差检测报告

Fig.13 Test report of helix deviation with tilt washer (No. 2)

采用 3# 垫圈(楔角误差为 $11.9 \mu\text{m}/45 \text{ mm}$)得到的齿轮螺旋线偏差的检测报告,如图 14 所示。

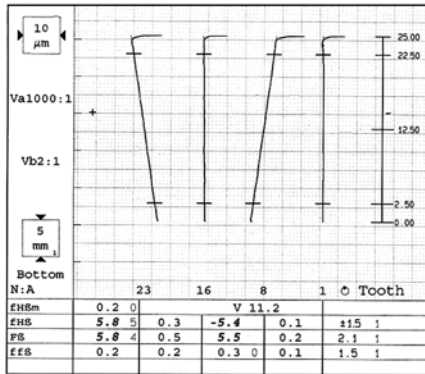


图 14 采用 3# 垫圈得到的螺旋线偏差检测报告

Fig. 14 Test report of helix deviation with tilt wahser (No. 3)

5 实验结果分析与讨论

为消除齿轮芯轴定位台面与轴线之间的垂直度误差,采用相对法对实验结果进行数据分析。将 1# 平垫圈作为参考垫圈,对比分析 2#、3# 垫圈作用下的螺旋线形状偏差和螺旋线倾斜偏差。实验结果表明,2#、3# 垫圈作用下的螺旋线形状偏差相对于 1# 垫圈的结果上下浮动最大为 $0.1 \mu\text{m}$ 。考虑到仪器本身的重复性误差,实验结果基本与理论分析相吻合,即齿轮安装倾斜误差对螺旋线形状偏差的影响可以忽略。在测量的 4 个轮齿中,1 齿与 16 齿相位相差 180° ,8 齿与 23 齿相位相差 180° ,相当于在敏感方向 D_1 和非敏感方向 D_2 两个方向上分别做了两次试验,对比分析螺旋线倾斜偏差的变化。取 2#、3# 垫圈相对于 1# 平垫圈的差值作为分析数据,理论值与实际值均指在相对的倾斜误差条件下得到的螺旋线倾斜偏差的变化值,此举是为了消除偏摆误差外的系统误差对实验结果的影响。得到的结果如表 5 所示。

讨论:在误差敏感方向上(D_1)采用 2# 楔形垫圈,螺旋线倾斜偏差 $f_{H\beta}$ 的最大值与理论模型相差 $0.17 \mu\text{m}$,相对误差为 7%;采用 3# 楔形垫圈,螺旋线倾斜偏差 $f_{H\beta}$ 的最大值与理论模型相差 $0.06 \mu\text{m}$,相对误差为 1%。在误差非敏感方向上(D_2)采用 2# 楔形垫圈,螺旋线倾斜偏差 $f_{H\beta}$ 的最大值与理论值相差 $0.15 \mu\text{m}$;采用 3# 楔形垫圈时,螺旋线倾斜偏差 $f_{H\beta}$ 的最大值与理论值相

差 $0.44 \mu\text{m}$ 。在 D_2 方向上误差相对较大的原因是斜楔角误差的相位误差在该方向比较敏感。表中数据表明楔角误差的变化对齿轮螺旋线形状偏差 $f_{H\beta}$ 的影响基本不变。实验结果表明:齿轮安装偏摆误差对螺旋线偏差的实测结果与理论值基本吻合,从而验证了所建数学模型的准确性。

表 5 实验结果对比分析

Tab. 5 Comparative analysis of experimental results

实验项目	误差方向		
	非敏感方向	敏感方向	
2#-1#	理论值/ μm	0.25	2.43
	实际值/ μm	0.4	2.6
	差值/ μm	0.15	0.17
	相对值	—	7%
3#-1#	理论值/ μm	0.54	5.26
	实际值/ μm	0.1	5.2
	差值/ μm	0.44	0.06
	相对值	—	1%

注:2#-1# 表示实验 2# 和实验 1# 的相对值;3#-1# 表示实验 3# 和实验 1# 的相对值。

经过分析知,导致实验结果与理论值发生微小偏差的原因有:测试仪器存在系统误差和重复性误差;测试仪器分辨率(仅为 $0.1 \mu\text{m}$)的限制;垫圈在安装过程中会存在 10° 以内的相位误差,该误差对非敏感方向影响较大;操作者的测量水平;测量环境因素的影响等。

6 结论

本文建立了齿轮安装误差对螺旋线偏差影响的数学模型。通过理论分析可得,齿轮安装偏心对螺旋线偏差的影响约为 0.2%,基本可以忽略不计;在误差非敏感方向上,芯轴倾斜误差 γ 小于 0.1° 时对齿轮螺旋线倾斜偏差基本不产生影响;在误差敏感方向上齿轮偏摆误差对齿轮螺旋线倾斜偏差的影响较大。在此基础上,采用楔形垫圈进行螺旋线倾斜偏差的验证试验。在误差敏感方向上采用 $5.5 \mu\text{m}/45 \text{ mm}$ 的楔形垫圈,螺旋线倾斜偏差 $f_{H\beta}$ 的最大值与理论值相差 $0.17 \mu\text{m}$,相对误差为 7%;采用 $11.9 \mu\text{m}/45 \text{ mm}$ 楔形垫圈,螺

螺旋线倾斜偏差 $f_{H\beta}$ 的最大值与理论值相差 $0.06 \mu\text{m}$, 相对误差为 1%。实验结果表明: 齿轮安装偏摆误差对螺旋线偏差的实测结果与理论值基本吻合, 从而验证了所建数学模型的准确性。

参考文献:

- [1] 石照耀, 王声堂. 齿轮行业将迎来第四次机遇[N]. 中国工业报, 2017-02-21. (第 006 版).
SHI ZH Y, WNG SH T. Gear industry will meet the fourth opportunity [N]. *China Industry News*, 2017-02-21. (006)(in Chinese)
- [2] JJG-1008-2006, 标准齿轮[S].
JJG-1008-2006, *Master Gears* [S]. (in Chinese)
- [3] GB/T 10095.1-2008, 圆柱齿轮精度制—第 1 部分: 轮齿同侧齿面的检验[S].
GB/T 10095.1-2008, cylindrical gears-system of accuracy-Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to corresponding flanks of gear teeth [S]. (in Chinese)
- [4] ISO1328-1:2013, Cylindrical gears-ISO system of flank tolerance classification-Part 1:Definitions and allowable values of deviations relevant to flanks of gear teeth. [S].
- [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] 凌四营, 王立鼎, 李克洪, 等. 基于 1 级精度基准标准齿轮的超精密加工工艺[J]. 光学精密工程, 2011, 19(7):1596-1604.
LING S Y, WANG L D, LI K H, *et al.*. Ultra-precision gear-grinding processing based on class 1 master gear [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7):1596-1604. (in Chinese)
- [7] LOU Z F, LING S Y, HE H Z, *et al.*. A kind of multi-step method for measuring pitch deviation of gear [J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23(11):115002.
- [8] LING S Y, LOU Z F, WANG L D, *et al.*. Optimal forming principle and grinding experiment of the ultra-precision involute profile [J]. *J. Engineering Manufacture*, 2013, 227(B3):375-382.
- [9] LING S Y, ZHANG B, ZHANG J, *et al.*. Two gear-grinding techniques to improve pitch deviations of ultra-precision gears [J]. *J. Engineering Manufacture*, 2015, 229(11):1955-1962.
- [10] LING S Y, LOU Z F, LIU Q, *et al.*. The periodical translocation gear-grinding technique to improve the indexing accuracy of ultra-precision gears [J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 941-944:2134-2139.
- [11] LOU Z F, HE H Z, GUO B Y, *et al.*. Two-step method for measuring gear pitch deviation [C]. *8th International Symposium on Precision Engineering Measurements and Instrument (ISPEM)*, 2012, Aug. 08-11.
- [12] GOCH G. GearMetrology [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2003, 52(2):659-695.
- [13] 林虎, 石照耀, 薛梓, 等. 基于正交距离回归齿面的齿轮误差评定[J]. 光学精密工程, 2015, 23(11):3192-3199.
LIN H, SHI Z Y, XUE Z, *et al.*. Evaluation of gear errors based on orthogonal distance regression gear profile [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(11):3192-3199. (in Chinese)
- [14] HARTIG F, LIN H, KNIEL K, *et al.*. Standard conforming involute gear metrology using an articulated arm coordinate measuring system [J]. *Measurement Science & Technology*, 2012, 23(10):105011.
- [15] 石照耀, 费业泰, 谢华鲲. 齿轮测量技术 100 年——回顾与展望[J]. 中国工程科学, 2003, 5(9):13-17.
SHI ZH Y, FEI Y T, XIE H K. 100 years of gear measurement technology-review & prospect [J]. *Engineering Science*, 2003, 5(9):13-17. (in Chinese)
- [16] 宋远, 叶寒, 涂海宁. 运动误差对齿轮螺旋线偏差测量的影响[J]. 机械设计与制造, 2013(7):129-130+133.
SONG Y, YE H, TU H N. The influence about motion error on gear helix deviation measurement [J]. *Mechanical Design and Manufacturing*,

依据本文所建螺旋线影响因素的数学模型, 得到通过调整齿轮安装偏摆误差来补偿螺旋线倾斜偏差差异的误差补偿方法, 这对研制高精度标准齿轮具有重要研究意义。

2013(7):129-130+133. (in Chinese)

- [17] LOTZE W, HAERTIG F. 3D gear measurement by CMM [C]. *5th International Conference and Exhibition on Laser Metrology, CMM and Machine Tool Performance*(LANDAMAP 2001).

- [18] GAO C H, CHENG K, WEBB D. Investigation on sampling size optimization in gear tooth surface measurement using a CMM [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2004, 24(7):599-606.

作者简介:



凌四营(1978—),男,山东日照人,副教授,硕士生导师,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,2013年于大连理工大学获得博士学位,主要从事精密机械设计、超精密磨齿工艺与测试技术等方面的研究。E-mail: luckling168@163.com



李 军(1993—),男,安徽滁州人,大连理工大学硕士研究生,2015年于南通大学获得学士学位,主要从事齿轮测量仪器的设计与测试技术等方面的研究。E-mail:speed-force@foxmail.com