

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311057

# 考虑安装误差的 ZC1 蜗杆螺旋线偏差评定方法\*

汤洁<sup>1,2</sup>, 王嘉伟<sup>1,2</sup>, 石照耀<sup>1,2</sup>

(1. 北京工业大学材料与制造学部 北京 100124; 2. 北京市精密测控技术与仪器工程技术研究中心 北京 100124)

**摘要:**安装误差对齿轮测量中心的测量结果影响较大。针对其中 ZC1 蜗杆螺旋线偏差评定问题,在齿轮测量中心 ZC1 蜗杆螺旋线测量原理基础上,分析了安装误差对蜗杆测量的影响机理,建立了安装误差修正模型,并依据螺旋线偏差定义建立了基于安装误差修正的 ZC1 蜗杆螺旋线偏差评定方法。在齿轮测量中心上对 ZC1 蜗杆开展了螺旋线偏差测量试验,得到初始安装状态和安装误差条件下的螺旋线偏差评定结果,对比初始安装状态,安装误差修正前后多次测量结果之间的最大差异由 76.2  $\mu\text{m}$  降为 4.2  $\mu\text{m}$ 。提出的 ZC1 蜗杆螺旋线偏差评定方法可有效减小齿轮测量中心测量过程中安装误差对螺旋线偏差测量结果的影响。

**关键词:** ZC1 蜗杆;安装误差;螺旋线偏差;评定方法;齿轮测量中心

**中图分类号:** TH71 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

## Evaluation method of helix deviations for ZC1 worm considering installation errors

Tang Jie<sup>1,2</sup>, Wang Jiawei<sup>1,2</sup>, Shi Zhaoyao<sup>1,2</sup>

(1. Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Beijing Engineering Research Center of Precision Measurement Technology and Instruments, Beijing 100124, China)

**Abstract:** The installation errors have great influence on the measurement results of gear measurement center (GMC). Focused on the problem of the ZC1 worm helix deviations evaluation method, based on the measurement principle of ZC1 worm helix in GMC, the influence mechanism of installation errors on worm measurement is analyzed. The installation error correction model is formulated, and the evaluation method of ZC1 worm helix deviations based on installation error correction is established according to the definition of helix deviations. The measurement of ZC1 worm helix deviations is implemented on the GMC, and the helix deviations evaluation results are obtained under the installation conditions. The maximum difference between the measurement results before and after the installation error correction is reduced from 76.2  $\mu\text{m}$  to 4.2  $\mu\text{m}$ . The ZC1 worm helix deviation evaluation method proposed can effectively eliminate the influence of installation errors on the helix deviations measurement results during the measurement of GMC.

**Keywords:** ZC1 worm; installation errors; helix deviation; evaluation; gear measurement center

## 0 引言

圆柱蜗杆是一种重要的传动元件,一般分为两类,包括普通圆柱蜗杆和圆弧圆柱蜗杆(ZC型)。普通圆柱蜗杆有阿基米德圆柱蜗杆(ZA型)、法向直廓型圆柱蜗杆(ZN型)、渐开线圆柱蜗杆(ZI型)、锥面包络圆柱蜗杆(ZK型)4种。按 GB/T 10089 规定,圆弧圆柱蜗杆有

3种形式,分别为圆环面包络圆柱蜗杆(ZC1)、圆环面圆柱蜗杆(ZC2)和轴向圆弧齿圆柱蜗杆(ZC3)。蜗杆精度影响整机性能,需要对其进行测量<sup>[1-3]</sup>。本文以 ZC1 蜗杆为例,ZC2 和 ZC3 蜗杆测量与其类同。

蜗轮蜗杆啮合过程中,齿宽方向上的接触精度由螺旋线偏差来表征。而测量过程中存在安装误差,会影响蜗杆螺旋线偏差的测量结果。针对蜗杆及齿轮类零件测量中的安装误差问题有很多相关研究。

收稿日期:2023-02-16 Received Date: 2023-02-16

\* 基金项目:国家重点研发计划子课题(2017YFF0204804)项目资助

Han 等<sup>[4]</sup>提出了一种偏心允许值在一定范围内的齿轮安装偏心补偿模型,对齿廓偏差进行了测量。Fang 等<sup>[5]</sup>分析了齿轮测量机上下顶尖不对正情况,通过修正测量点坐标来修正安装偏心误差。Liu 等<sup>[6]</sup>针对齿距偏差测量过程中斜齿轮中心轴线与齿轮测量中心轴线不重合,提出了测量结果中倾斜角度误差补偿方法。宋承志<sup>[7]</sup>建立了大齿轮有顶尖和无顶尖两种安装误差补偿模型,进行了大齿轮在安装误差下的齿廓偏差的补偿。黄喆等<sup>[8]</sup>针对安装误差的校准和标定问题,利用三点位姿转换算法求取姿态角理论值,再结合角度测量值建立误差补偿矩阵,对姿态参数进行修正。Yin 等<sup>[9]</sup>在齿轮测量中心齿轮齿廓偏差测量不确定度分析过程中,把工件安装误差作为误差源之一,并将其分为安装偏心大小和安装偏心角度。Ling 等<sup>[10-11]</sup>研究了芯轴在上下顶尖存在安装误差和圆柱齿轮在芯轴上存在安装误差两种情况对螺旋线偏差测量结果的影响规律。Tang 等<sup>[12]</sup>分析了齿轮测量过程中安装偏心误差和安装偏摆误差的影响机理,建立了考虑安装误差的齿廓偏差和齿距偏差的评定方法,实现了未精确定位情况下齿轮齿廓偏差和齿距偏差的测量,为本文安装误差修正模型的建立奠定了基础。

以上大多研究针对圆柱齿轮的齿廓偏差、齿距偏差或螺旋线偏差的测量和评定,研究安装误差对其影响,而少有针对圆柱蜗杆的螺旋线偏差测量的相关研究。下面将针对齿轮测量中心 ZC1 蜗杆测量中安装误差影响下的螺旋线偏差评定问题,通过蜗杆轴截面测量点建立函数获取安装误差参数,将安装误差影响下的螺旋线测量点通过坐标变换修正到工件坐标下,再进行误差评定得到螺旋线偏差测量结果。

## 1 齿轮测量中心 ZC1 蜗杆螺旋线测量原理

齿轮测量中心 ZC1 蜗杆螺旋线测量原理如下:由蜗杆上下轴截面测量得到安装误差参数;测头运动轨迹为设计螺旋线,测量实际螺旋线坐标数值;按基于安装误差修正的 ZC1 蜗杆螺旋线偏差评定方法,将实际螺旋线坐标数值与设计螺旋线坐标数值进行比较,得到螺旋线偏差测量结果。测量原理如图 1 所示。

齿轮测量中心 ZC1 蜗杆螺旋线偏差测量流程如下:被测蜗杆安装在上下顶尖;测头置于蜗杆上下两端获取轴截面测量点,分析得到安装误差参数;再将测头置于待测齿槽中,靠近蜗杆底部分度圆轴截面处,主轴旋转的同时测头沿蜗杆 Z 轴向上运动,使得测头运动轨迹为设计螺旋线迹线;测量螺旋线获取测量点坐标数值和测头偏移量,得到螺旋线采样点坐标数值 $(X_i, Y_i, Z_i, \theta_i)$ ;通过基于安装误差修正的螺旋线偏差评定方法得到螺旋线偏差测量结果。

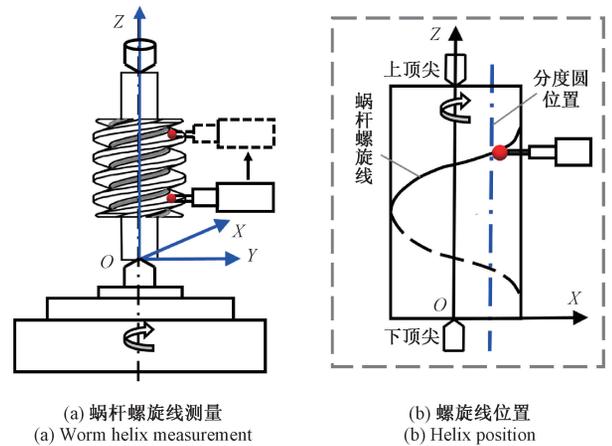


图 1 齿轮测量中心蜗杆螺旋线测量原理

Fig. 1 Helix measurement principle for worm on gear measurement center

## 2 基于安装误差修正的 ZC1 蜗杆螺旋线偏差评定方法

考虑安装误差的 ZC1 蜗杆螺旋线偏差评定方法如下:已知齿轮测量中心被测蜗杆上下两个轴截面测量点及其螺旋线测量值。分析安装误差的影响机理,建立安装误差修正模型,通过对蜗杆上下两个轴截面测量点拟合得到蜗杆安装误差参数,包括偏摆角和偏心坐标。基于蜗杆安装参数建立工件坐标系,将机器坐标系下的螺旋线测量值变换得到安装误差修正后的螺旋线测量值。在工件坐标系计算各螺旋线测量点在实际转角下的 Z 轴理论坐标值。依据螺旋线偏差定义得到安装误差修正后的 ZC1 蜗杆螺旋线偏差评定结果。其评定流程如图 2 所示。

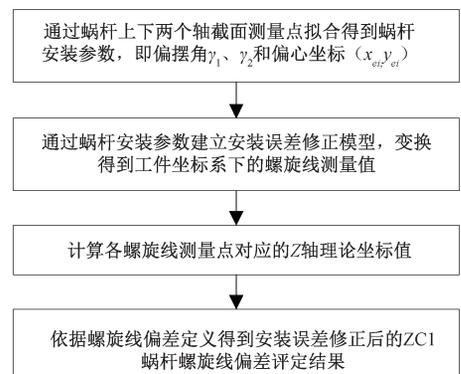


图 2 基于安装误差修正的螺旋线偏差评定流程  
Fig. 2 Helix deviations evaluation process based on installation errors correction

2.1 安装误差修正模型

ZC1蜗杆测量时的安装状态如图3所示。测量中ZC1蜗杆安装误差分为安装偏心误差和安装偏摆误差。安装偏心误差为蜗杆几何中心轴线与测量仪器中心轴线不重合,在 $XOY$ 平面有微小偏移量 $e$ 。安装偏摆误差是指在蜗杆安装过程中,蜗杆几何中心轴与测量仪器回转轴产生倾斜而造成的角度偏差。偏摆角度和偏心位置共同影响螺旋线偏差的测量结果。

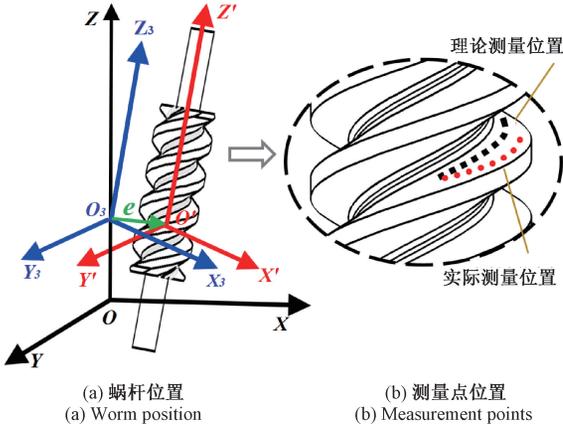


图3 蜗杆安装状态

Fig. 3 Installation status of worm

为便于安装误差分析,建立机器坐标系 $O - XYZ$ ,坐标点记为 $(X, Y, Z)$ ;以被测蜗杆的几何中心 $O'$ 为原点,被测蜗杆的几何中心轴为 $Z'$ ,建立工件坐标系 $O' - X'Y'Z'$ ,坐标点记为 $(X', Y', Z')$ 。为了消除安装误差对ZC1蜗杆测量的影响,建立安装误差修正模型,将机器坐标系下的蜗杆螺旋线测量坐标数值变换到工件坐标系下,在工件坐标系中对ZC1蜗杆螺旋线偏差进行评定,蜗杆安装误差坐标系关系如图4所示。

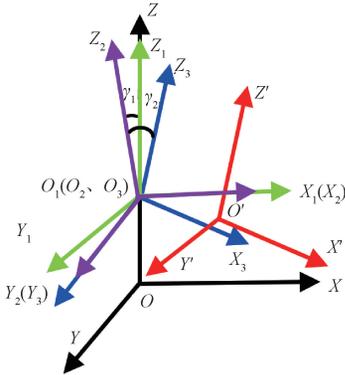


图4 安装误差各坐标系

Fig. 4 Installation error coordinates

为使机器坐标系变换到工件坐标系,首先把机器坐标系向上平移到ZC1蜗杆的各螺旋线测量点的Z轴高

度上,平移后的坐标系记为 $O_1 - X_1Y_1Z_1$ ,变换关系如下:

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -Z_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{A}$ 为坐标系 $O - XYZ$ 变换到坐标系 $O_1 - X_1Y_1Z_1$ 的平移矩阵; $Z_i$ 为机器坐标系下的蜗杆测量点高度值,单位为mm。

将 $O_1 - X_1Y_1Z_1$ 绕轴 $X_1$ 正向顺时针旋转 $\gamma_1$ (rad),旋转后的坐标系记为 $O_2 - X_2Y_2Z_2$ , $Z_2$ 与 $Z'$ 共面。变换关系如下:

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_x \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma_1 & \sin\gamma_1 & 0 \\ 0 & -\sin\gamma_1 & \cos\gamma_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{M}_x$ 为坐标系 $O_1 - X_1Y_1Z_1$ 变换到坐标系 $O_2 - X_2Y_2Z_2$ 的旋转矩阵, $\gamma_1$ 为坐标系 $O_1 - X_1Y_1Z_1$ 绕轴 $X_1$ 旋转的角度。

再将坐标系 $O_2 - X_2Y_2Z_2$ 绕 $Y_2$ 负向顺时针旋转 $\gamma_2$ (rad),旋转后的坐标系记为 $O_3 - X_3Y_3Z_3$ ,此时 $Z_3$ 轴与工件坐标系 $O' - X'Y'Z'$ 的 $Z'$ 轴平行,变换关系如下:

$$\begin{bmatrix} X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_y \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\gamma_2 & 0 & \sin\gamma_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\gamma_2 & 0 & \cos\gamma_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $\mathbf{M}_y$ 为坐标系 $O_2 - X_2Y_2Z_2$ 变换到坐标系 $O_3 - X_3Y_3Z_3$ 的旋转矩阵, $\gamma_2$ 为坐标系 $O_2 - X_2Y_2Z_2$ 绕 $Y_2$ 旋转的角度。

通过式(2)和(3)旋转变换,修正了蜗杆因倾斜造成的偏摆。再将坐标系 $O_3 - X_3Y_3Z_3$ 按照偏心坐标 $e(x_{ei}, y_{ei})$ 平移到工件坐标系 $O' - X'Y'Z'$ 下,变换关系如下:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{B} \begin{bmatrix} X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_{ei} \\ 0 & 1 & 0 & -y_{ei} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, $\mathbf{B}$ 为坐标系 $O_3 - X_3Y_3Z_3$ 变换到工件坐标系 $O' - X'Y'Z'$ 的平移矩阵。

通过以上变换,建立了基于安装误差修正的坐标变换模型,如式(5)所示,由机器坐标系下的螺旋线测量数据 $(X, Y, Z)$ 得到工件坐标系下的螺旋线测量数据 $(X', Y', Z')$ 。

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{M}_y \cdot \mathbf{M}_x \cdot \mathbf{A} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

### 2.2 安装误差参数求解

安装误差参数求解方法如下:对蜗杆上下两个轴截面测量得到轴截面点的坐标  $(X_i, Y_i)$  用最小二乘拟合得到上下轴截面圆心坐标,再得到蜗杆几何中心轴线方程,代入螺旋线各测量点  $Z$  轴坐标求得各点安装误差参数,即偏心坐标  $(x_{ei}, y_{ei})$  和偏摆角度  $\gamma_1, \gamma_2$ 。

蜗杆轴截面测量如图 5 所示,  $z_b, z_c$  分别为上、下轴截面在  $Z$  轴坐标数值。蜗杆轴截面用圆方程  $x^2 + y^2 + ax + by + c = 0$ , 通过最小二乘拟合,代入轴截面点的坐标  $(X_i, Y_i)$  得到参数  $a, b, c$ , 则圆心坐标为  $(-a/2, -b/2)$ 。

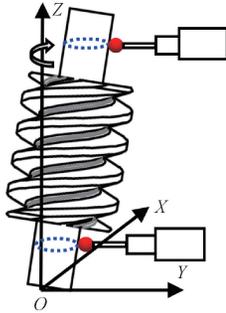


图 5 蜗杆上下两个轴截面的测量

Fig. 5 Measurement of the upper and lower worm shaft sections

用上述方法得到蜗杆上、下轴截面圆心为  $B(x_b, y_b, z_b), C(x_c, y_c, z_c)$ , 过两点建立蜗杆几何中心轴线方程如下:

$$\frac{X - x_b}{x_c - x_b} = \frac{Y - y_b}{y_c - y_b} = \frac{Z - z_b}{z_c - z_b} \quad (6)$$

将螺旋线各测量点的  $Z$  轴坐标代入式 (6) 中, 可求得各螺旋线测量点的偏心坐标  $(x_{ei}, y_{ei})$  为:

$$\begin{cases} x_{ei} = \frac{(Z_i - z_b)(x_c - x_b)}{z_c - z_b} + x_b \\ y_{ei} = \frac{(Z_i - z_b)(y_c - y_b)}{z_c - z_b} + y_b \end{cases} \quad (7)$$

偏摆角度为:

$$\gamma_1 = \arccos \frac{x_b - x_c}{\sqrt{(x_b - x_c)^2 + ((y_b - y_c)^2)}} \quad (8)$$

$$\gamma_2 = \arccos \frac{z_b - z_c}{\sqrt{(x_b - x_c)^2 + ((y_b - y_c)^2 + (z_b - z_c)^2)}} \quad (9)$$

### 2.3 螺旋线偏差评定

标准 ISO 1328-1:2013<sup>[13]</sup>、GB/T 10095.1-2022<sup>[14]</sup> 将螺旋线偏差定义为实际螺旋线偏离设计螺旋线的值。在实际工程测量中,蜗杆螺旋线偏差沿蜗杆轴线方向进行评定。

标准 GB/T10089—1988<sup>[15]</sup> 中定义了蜗杆螺旋线偏差和一转螺旋线偏差,评定曲线如图 6 所示。螺旋线偏差指的是在蜗杆轮齿的工作齿宽范围(两端不完整齿部分除外)内,蜗杆分度圆柱面上,包容实际螺旋线的最近两条设计螺旋线间的法向距离;一转螺旋线偏差指的是在蜗杆轮齿的一转范围内,蜗杆分度圆柱面上,包容实际螺旋线的最近两条设计螺旋线间的法向距离。如需按照标准 GB/T10089—1988 评定可将轴向评定结果乘以导程角的余弦值得到法向值。

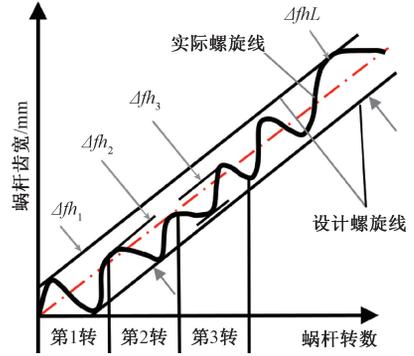


图 6 螺旋线偏差评定曲线<sup>[15]</sup>

Fig. 6 Helix deviation evaluation curve<sup>[15]</sup>

在工件坐标系  $O' - X'Y'Z'$  下对 ZC1 蜗杆的螺旋线偏差进行评定,需要确定基于安装误差修正的测量点对应的理论坐标值。如图 7 所示,受到安装误差的影响,实际螺旋线测量点并不在蜗杆分度圆半径  $r_1$  上,各螺旋线测量点所在半径  $r_i$  可能不同,需要计算其修正的  $Z$  向坐标。

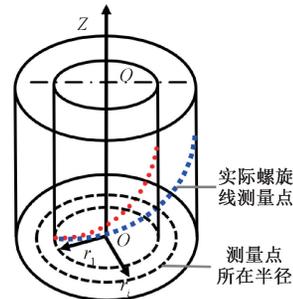


图 7 螺旋线测量点

Fig. 7 Helix measurement points

根据坐标变换后的螺旋线数据点  $(X'_i, Y'_i, Z'_i)$ , 投影到  $XOY$  平面,得到其实际转角  $\theta_i$ :

$$\theta_i = \arctan \left( \frac{X'_i}{Y'_i} \right) \quad (10)$$

如图 8 所示,各测量点相对于前一个测量点的转角差  $\Delta\theta_i$  为:

$$\Delta\theta_i = \theta_i - \theta_{i-1} \quad (11)$$

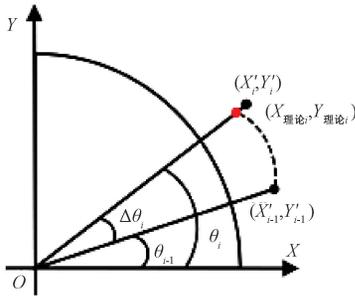


图 8 测量点转角

Fig. 8 Measuring point rotation angle

根据前一个数据点  $(X'_{i-1}, Y'_{i-1}, Z'_{i-1})$  的 Z 轴高度值得到下个测量点的理论坐标值:

$$Z_{理论i} = Z'_{i-1} + p \cdot \Delta\theta_i \quad (12)$$

式中:  $p = \frac{P_z}{2\pi}$ ,  $P_z$  为蜗杆导程, 单位为 mm。

则测量点  $(X'_i, Y'_i, Z'_i)$  的螺旋线偏差为:

$$\Delta f_{z(i)} = Z'_i - Z_{理论i} \quad (13)$$

得到测量点的螺旋线偏差值的集合:

$$E_i = \Delta f_{z(i)} \quad (14)$$

则 ZC1 蜗杆的一转螺旋线偏差为:

$$\Delta f_{h轴} = \max(E_i) - \min(E_i) \quad (15)$$

ZC1 蜗杆的螺旋线偏差为:

$$\Delta f_{hL轴} = \max(\Delta f_{h轴}) \quad (16)$$

计算得到的螺旋线偏差值为轴向值, 如按标准 GB/T

10089—1988 评定为法向值, 换算如下:

$$\Delta f_h = \Delta f_{h轴} \cos\gamma \quad (17)$$

$$\Delta f_{hL} = \Delta f_{hL轴} \cos\gamma \quad (18)$$

式中:  $\gamma$  为导程角。

### 3 螺旋线偏差测量试验

蜗杆螺旋线偏差测量试验在 JA80 型齿轮测量中心上进行, 如图 9 所示, 该仪器螺旋线测量精度为  $2 \mu\text{m}$ 、示值变动性为  $1 \mu\text{m}$ 。被测 ZC1 蜗杆基本参数为: 模数 6 mm、齿数 6、齿宽 60 mm。

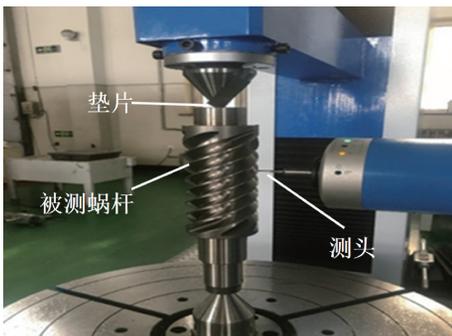


图 9 齿轮测量中心蜗杆测量

Fig. 9 Worm measurement on gear measurement center

针对被测蜗杆的不同安装误差状态, 进行了初始状态试验和 6 组安装误差试验。初始状态定义为仪器校准后对蜗杆进行螺旋线测量, 该状态下认为蜗杆安装误差较小接近于 0。另外 6 组在有安装误差的条件下对 ZC1 蜗杆进行螺旋线测量试验, 每组均进行 5 次重复性试验。通过在上顶尖垫入垫片, 引入安装偏摆误差; 通过在上下顶尖垫入垫片, 引入安装偏摆误差和安装偏心误差, 安装误差具体试验条件如表 1 所示。

表 1 安装误差试验条件

Table 1 Installation error conditions

组序	上顶尖垫片厚度/mm	下顶尖垫片厚度/mm	安装误差状态
第 1 组	0.03	0	偏摆
第 2 组	0.05	0	偏摆
第 3 组	0.08	0	偏摆
第 4 组	0.03	0.03	偏心、偏摆
第 5 组	0.05	0.05	偏心、偏摆
第 6 组	0.08	0.08	偏心、偏摆

在 6 组引入安装误差的试验中, 测量蜗杆上下轴截面获得安装偏摆角度和安装偏心坐标, 表 2 为蜗杆上端轴截面部分测量数据; 在齿轮测量中心对被测蜗杆上齿面螺旋线进行测量, 采样间隔约为 0.2 mm, 测球半径为 3 mm, 每条螺旋线采样点数为 300 个。表 3 所示为部分原始螺旋线测量数据。

表 2 蜗杆上端轴截面部分测量数据

Table 2 Part of measurement data of the upper shaft section

测量点	X/mm	Y/mm	Z/mm
1	-24.203 5	-0.001 6	370.000 0
2	-24.200 0	-0.211 1	370.000 0
3	-24.195 7	-0.423 9	370.000 0
⋮	⋮	⋮	⋮
718	-24.200 8	0.633 7	370.000 0
719	-24.205 5	0.422 5	370.000 0
720	-24.208 2	0.211 2	370.000 0

表 3 部分螺旋线测量数据

Table 3 Part of helix measurement data

测量点	X/mm	Y/mm	Z/mm	$\theta/(^\circ)$
1	0	28.350 0	222.545 0	-56 129.0
2	0	28.350 0	222.748 0	-56 129.8
3	0	28.350 0	222.947 0	-56 130.4
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
298	0	28.350 0	281.950 0	-56 318.3
299	0	28.350 0	282.151 0	-56 318.9
300	0	28.350 0	282.349 0	-56 319.5

以蜗杆上齿面第1条螺旋线测量数据为例,不同安装状态下实际测量的ZC1蜗杆螺旋线曲线如图10所示。不进行安装误差的修正,直接对蜗杆上齿面6条螺旋线测量数据进行评定,得到螺旋线偏差评定结果如表4所示,单位为 $\mu\text{m}$ 。根据提出的基于安装误差修正的螺旋线评定方法对上述6条螺旋线测量数据进行评定,得到螺旋线偏差评定结果如表5所示,单位为 $\mu\text{m}$ 。从表4可以看出不同的安装状态对螺旋线偏差测量结果的影响较大。经过安装误差修正后的螺旋线偏差评定结果明显减小。

表5 安装误差修正后的螺旋线偏差

Table 5 Helix deviations considering the installation errors correction

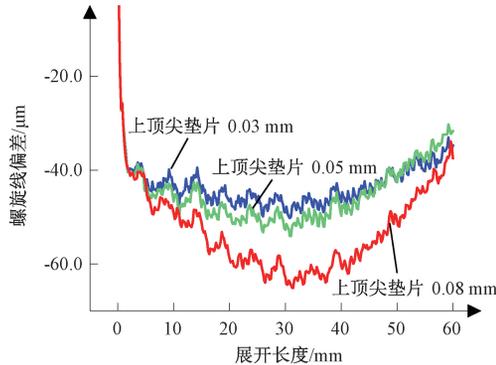
组序	头数					
	1	2	3	4	5	6
第1组	8.3	7.4	8.0	7.4	7.1	7.6
第2组	8.3	8.0	8.0	8.1	7.9	7.9
第3组	7.3	7.5	7.7	7.1	7.4	7.1
第4组	9.2	8.5	8.9	8.8	9.5	8.7
第5组	8.1	7.3	7.7	8.4	8.6	8.7
第6组	8.2	8.2	8.4	8.0	8.1	8.4

初始状态试验中,在同一台齿轮测量中心经仪器校准后对该ZC1蜗杆同一上齿面进行螺旋线测量,经过五次测量取平均值,得到的仪器评定结果如表6所示,图11为初始状态下测量得到的齿轮测量中心评定报告。

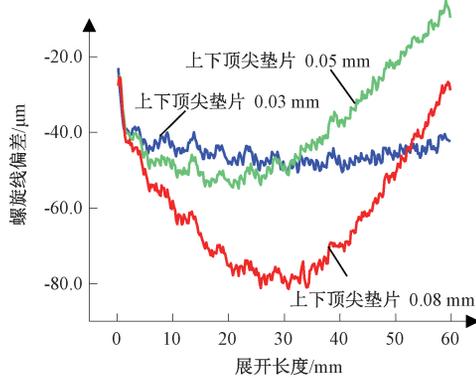
表6 初始状态齿轮测量中心评定结果

Table 6 Results of gear measurement center at initial condition

齿数	1	2	3	4	5	6
评定结果/ $\mu\text{m}$	7.2	8.0	6.5	6.8	7.1	4.5



(a) 偏摆状态  
(a) Deflection state



(b) 偏心、偏摆状态  
(b) Eccentricity and yaw state

图10 不同安装状态下螺旋线曲线

Fig. 10 Helix curve under different installation conditions

表4 未处理安装误差的ZC1蜗杆螺旋线偏差

Table 4 Helix deviations of the ZC1 worm without considering the installation errors

组序	头数					
	1	2	3	4	5	6
第1组	19.3	24.9	22.9	16.3	24.7	22.6
第2组	23.5	29.5	29.3	19.8	33.8	34.9
第3组	29.1	46.3	41.2	25.5	47.9	45.2
第4组	17.0	21.9	16.2	18.1	28.2	20.4
第5组	47.1	40.2	54.9	42.4	43.8	63.3
第6组	49.6	73.3	75.3	42.2	76.3	80.7

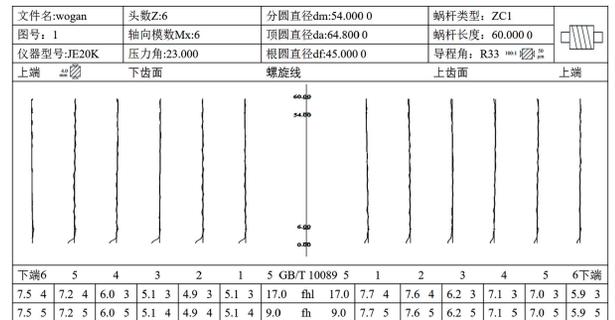


图11 齿轮测量中心评定报告

Fig. 11 Gear measurement center evaluation report

同一条螺旋线在未处理安装误差的评定结果和经过提出的方法处理后的评定结果,与齿轮测量中心初始状态下的螺旋线偏差评定结果对比,以第3组安装状态下的蜗杆上齿面第1条螺旋线试验为例的曲线如图12。六组不同安装状态结果对比如表7所示,其中,  $\max1(\Delta)$  为同一条螺旋线在不考虑安装误差与齿轮测量中心初始状态下螺旋线偏差测量结果的差异的最大值,  $\max2(\Delta)$  为同一条螺旋线在安装误差修正后与齿轮测量中心初始状态下螺旋线偏差测量结果的差异的最大值,单位为 $\mu\text{m}$ 。

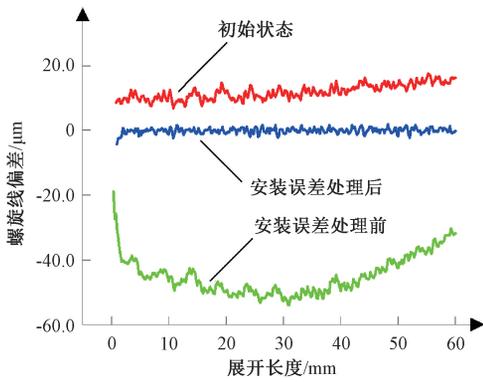


图 12 第 3 组与初始状态的螺旋线曲线

Fig. 12 Helix curve for 3<sup>rd</sup> group and initial condition

对于模数为 6 mm,齿数为 6,齿宽为 60 mm 的 ZC1 蜗杆上齿面的螺旋线偏差结果如表 7 所示,不进行安装误差修正的螺旋线偏差测量结果与初始状态下的结果相比,最大误差为 76.2 μm;用提出的基于安装误差修正的 ZC1 蜗杆螺旋线偏差评定方法得到的螺旋线偏差与初始状态下的结果相比,最大误差为 4.2 μm,精度评定等级均为 5 级。试验结果表明,提出的基于安装误差修正的 ZC1 蜗杆螺旋线偏差评定方法可修正安装误差对螺旋线偏差测量结果的影响。

表 7 螺旋线偏差结果对比

Table 7 Comparison of helix deviations

组序	头数	1	2	3	4	5	6
第 1 组	max1(Δ)/μm	12.1	16.9	16.4	9.5	17.6	18.1
	max2(Δ)/μm	1.1	-0.6	1.5	0.6	0	3.1
第 2 组	max1(Δ)/μm	16.3	21.5	22.8	13	26.7	30.4
	max2(Δ)/μm	1.1	0	1.5	1.3	0.8	3.4
第 3 组	max1(Δ)/μm	21.9	38.3	34.7	18.7	40.8	40.7
	max2(Δ)/μm	0.1	-0.5	1.2	0.3	0.3	2.6
第 4 组	max1(Δ)/μm	9.8	13.9	9.7	11.3	21.1	15.9
	max2(Δ)/μm	2.0	0.5	2.4	2	2.4	4.2
第 5 组	max1(Δ)/μm	39.9	32.2	48.4	35.6	36.7	58.8
	max2(Δ)/μm	0.9	-0.7	1.2	1.6	1.5	4.2
第 6 组	max1(Δ)/μm	42.4	65.3	68.8	35.4	69.2	76.2
	max2(Δ)/μm	1.0	0.2	1.9	1.2	1.0	3.9

## 4 结 论

蜗杆在齿轮测量中心上进行测量时,由于存在安装误差,会影响蜗杆测量结果。本文对安装误差影响下的 ZC1 蜗杆螺旋线偏差评定方法进行研究。分析了安装偏

心、偏摆误差对蜗杆螺旋线测量的影响机理,建立了安装误差修正模型。通过测量蜗杆轴截面求解安装误差参数,将安装误差影响下的测量点变换到工件坐标系下,并根据螺旋线偏差定义建立了 ZC1 蜗杆螺旋线偏差评定方法。

在 JA80 型齿轮测量中心上开展了测量试验,安装不准确对蜗杆螺旋线测量结果影响较大,未经过安装误差处理,相对于初始状态齿轮测量中心测量结果的最大误差为 76.2 μm。经安装误差处理后的螺旋线偏差测量结果明显减小,且与初始状态下的测量结果的最大误差为 4.2 μm,前后评定等级均为 5 级。试验结果表明在齿轮测量中心上测量 ZC1 蜗杆螺旋线时,安装误差的存在对蜗杆精度测量结果影响较大;提出的基于安装误差修正的 ZC1 蜗杆螺旋线偏差评定方法可减小安装误差对齿轮测量中心螺旋线偏差测量结果的影响。本文方法对圆柱蜗杆通过上下顶尖安装的坐标测量中的具有安装误差修正功能的螺旋线偏差评定具有一定的参考意义。

## 参考文献

[ 1 ] 石照耀,叶勇,丁毅,等. 圆弧圆柱蜗杆的齿廓测量与参数反求[J]. 工具技术,1999,33(1):33-36.  
SHI ZH Y, YE Y, DING Y, et al. Profile measurement & reverse solution of parameters of ZC worm [ J ]. Tool Engineering, 1999,33(1):33-36.

[ 2 ] 全国齿轮标准化技术委员会. 圆柱蜗杆、蜗轮精度: GB/T 10089—2018[S]. 北京:中国标准出版社,2018:6-10.  
National Gear Standardization Technical Committee. Accuracy of cylindrical worm and worm wheel: GB/T 10089—2018 [ S ]. Beijing: China Standards Press, 2018:6-10.

[ 3 ] 朱志强,汤洁,石照耀,等. 齿轮测量中心 ZC 蜗杆齿廓偏差测量方法[J]. 仪器仪表学报,2020,41(12):56-65.  
ZHU ZH Q, TANG J, SHI ZH Y, et al. Measurement method for tooth profile deviations of ZC worm in gear measuring center [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020,41(12):56-65.

[ 4 ] HAN L F, TANG W Y, WANG J, et al. Measurement of involute profile with small clamping eccentricity in a gear measuring center [ J ]. Journal of Mechanical Engineering, 2013,59(4):269-278.

[ 5 ] FANG S P, ZHU X D, YANG P CH, et al. Analysis and compensation method for installation error in measuring gear tooth flank with laser interferometry[J]. Optical Engineering. 2014, 53(8): 84111.

[ 6 ] LIU Y SH, FANG S P, WANG H Y, et al. Compensation method for the alignment angle error in

- pitch deviation measurement[J]. Measurement Science and Technology, 2016,27(5):55006.
- [7] 宋承志. 大型齿轮测量中心齿轮安装误差补偿技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014;25-37.  
SONG CH ZH. Research on gear installation error compensation technology of large gear measuring center[D]. Harbin; Harbin Institute of Technology, 2014;25-37.
- [8] 黄喆,沈小玲,张历,等. 面向双相机标靶的倾斜仪安装误差补偿方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(7):152-159.  
HUANG ZH, SHEN X L, ZHANG L, et al. Compensation method for installation error of inclinometer with dual-camera target [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36 ( 7 ): 152-159.
- [9] YIN P L, HAN F B, WANG J H, et al. Influence of module on measurement uncertainty of gear tooth profile deviation on gear measuring center [J]. Measurement, 2021, 182;109688.
- [10] LING S Y, LI J, YU D Q, et al. Influence law of installation errors on helix deviation of spur gear artifact[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(9):2367-2376.
- [11] LING S Y, LING M, KONG Y M, et al. Development of a novel instrument for measuring helix deviations of spur gear artefact to submicron accuracy [J]. Measurement Science and Technology, 2020, 31;065001.
- [12] TANG J, WEI J J, SHI ZH Y. An evaluation method of gear profile deviations based on the consideration of installation errors [J]. Measurement, 2019, 146; 806-814.
- [13] International Organization for Standardization. Cylindrical gears-ISO system of flank tolerance classification—Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to flanks of gear teeth; ISO 1328-1[S]. Switzerland: ISO, 2013;9-17.
- [14] 国家标准化管理委员会. 圆柱齿轮 ISO 齿面公差分级制 第 1 部分: 齿面偏差的定义和允许值; GB/T 10095.1[S]. 北京:中国标准出版社, 2022;7-15.  
Standardization Administration of the P. R. C. Cylindrical gears-ISO system of flank tolerance classification—

Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to flanks of gear teeth; GB/T 10095.1[S]. Beijing: China Standards Press, 2022;7-15.

- [15] 中华人民共和国国家标准. 圆柱蜗杆、蜗轮精度; GB/T 10089[S]. 北京:中国标准出版社,1988;1-11.  
National Standard of the P. R. C. Accuracy of cylindrical worm and worm wheel; GB/T 10089[S]. Beijing: China Standards Press, 1988;1-11.

## 作者简介



汤洁(通信作者),1998年于东南大学获得学士学位,2009年于北京工业大学获得博士学位,现为北京工业大学副教授,主要研究方向为精密测试技术与仪器。

E-mail: tangjie@bjut.edu.cn

**Tang Jie** (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Southeast University in 1998, and received her Ph. D. degree from Beijing University of Technology in 2009. She is currently an associate professor at Beijing University of Technology. Her main research interests include precision testing techniques and instruments.



王嘉伟,2020年于唐山学院获得学士学位,现为北京工业大学硕士研究生,主要研究方向为精密测试技术及仪器。

E-mail: 840670660@qq.com

**Wang Jiawei** received her B. Sc. degree from Tangshan College in 2020. She is currently a postgraduate at Beijing University of Technology. Her main research interests include precision testing techniques and instruments.



石照耀,1984年于合肥工业大学获得学士学位,1988年于陕西机械学院获得硕士学位,2001年于合肥工业大学获得博士学位,现为北京工业大学教授、博导,主要研究方向为精密测试技术及仪器。

E-mail: shizhaoyao@bjut.edu.cn

**Shi Zhaoyao** received B. Sc. degree from Hefei University of Technology in 1984, received M. Sc. degree from Shanxi Institute of Mechanical Engineering in 1988, and received Ph. D. degree from Hefei University of Technology in 2001. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at Beijing University of Technology. His main research interests include precision engineering and instruments.