

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108694

# 齿轮三维测量中线激光传感器位姿标定方法\*

石照耀, 孙衍强

(北京工业大学 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:**在齿轮三维测量中,传感器位姿标定的结果直接影响测量结果的准确性。本文提出了一种基于特征标准件的线激光传感器位姿标定方法,并设计了一款具有一定几何特征的标准件。该方法解耦了传感器与仪器之间的位姿关系,通过运动过程中传感器与标准件的几何关系计算传感器的三个姿态角并调整至标定零位,然后通过多次偏置求等区域均值的方法依次计算传感器3个位置量的偏置距离。在齿轮测量中心上进行验证实验,多次标定后被测齿轮的齿廓偏差动态测量重复性为 $3.94\ \mu\text{m}$ ,评价标准差小于 $0.3\ \mu\text{m}$ ,且评价结果与传统接触式测量结果的趋势一致。结果表明,基于特征标准件的线激光传感器位姿标定方法使得齿轮三维测量具有较好的测量重复性与准确性。

**关键词:** 齿轮测量; 齿轮测量仪器; 激光传感器; 位姿标定; 齿轮

**中图分类号:** TH71      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 460.40

## A position and attitude calibration method for the linear laser sensor in gear 3D measurement

Shi Zhaoyao, Sun Yanqiang

(Beijing Engineering Research Center of Precision Measurement Technology and Instruments,  
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** In the 3D measurement of gear, the position and attitude calibration of sensors directly affects the accuracy of measurement results. In this article, a position and attitude calibration method of the linear laser sensor is proposed, which is based on feature standard parts. And a standard part with certain geometric features is designed. This method decouples the position and attitude relationship between the sensor and the instrument. Through the geometric relationship between the sensor and the standard part during the movement, the three attitude angles of the sensor are calculated and adjusted to the calibrated zero position. Then, the offset distances of the three positions of the sensor are calculated through calculating equal region mean by multiple offsets. The verification experiment is implemented on the gear measuring center. After multiple calibration, the dynamic measurement repeatability of the tooth profile deviation of the measured gear is  $3.94\ \mu\text{m}$ . The evaluation standard deviation is less than  $0.3\ \mu\text{m}$ . The evaluation results are consistent with the traditional contact measurement results, which show that the position and attitude calibration method of linear laser sensor based on feature standard parts has good repeatability and accuracy for the 3D gear measurement.

**Keywords:** gear measurement; gear measuring instrument; laser sensor; position and attitude calibration; gear

## 0 引言

齿轮测量技术是齿轮质量评价的基础<sup>[1]</sup>,传统的齿轮测量以齿面上少量点、线测量为主,仅包含了复杂形状齿面的局部信息<sup>[2]</sup>。为获取完整的齿面三维形貌,光学测量技术在齿轮测量中逐渐得到应用<sup>[3]</sup>,包括线激光测

量<sup>[4]</sup>、点激光测量<sup>[5]</sup>、激光全息测量<sup>[6]</sup>、CT测量<sup>[7]</sup>等。其中,线激光测量是实现齿轮三维快速测量有效方法之一。线激光传感器主要配置在齿轮测量中心<sup>[8]</sup>、齿轮啮合检查仪<sup>[9]</sup>和齿轮单转台<sup>[10]</sup>测量仪上,前者较后两者更加灵活,适用于不同类型、不同尺寸、不同参数的齿轮测量,但齿轮测量中心结构复杂,存在多维运动,传感器与仪器之间的位姿关系直接影响齿轮的测量精度,其传感器的位

收稿日期:2021-10-11      Received Date: 2021-10-11

\* 基金项目:国家重点研发计划“制造基础技术与关键部件”专项项目(2018YFB2001400)资助

姿标定是线激光齿轮测量中的关键问题。

近年来,国内外对齿轮三维测量所做研究中<sup>[11-13]</sup>,传感器位姿的确定<sup>[14-19]</sup>是关注重点。文献[16]介绍了一种基于高度块的线激光传感器像素当量标定方法,适用于工业现场,标定精度不高。文献[17]提出了一种利用精密转台同时校准3个传感器六自由度的方法,用于测量平面、圆柱等几何形状时的传感器校准,没有应用于齿轮的三维测量。文献[18]基于线结构光传感器提出了云平台下的齿轮3D测量模型,传感器位姿的确定采用芯轴,其局限是传感器安装位置的可靠性有待提高。

为了确定线激光传感器在齿轮三维测量中的位姿,本文提出了一种基于特征标准件的线激光传感器位姿标定方法,并设计了一款具有一定几何特征的标准件,最后通过齿轮测量实验验证了该方法的有效性与可靠性。

## 1 齿轮三维测量模型

如图1所示,被测齿轮安装在仪器主轴上并随之回转,线激光传感器实时获取齿轮齿面的几何信息。

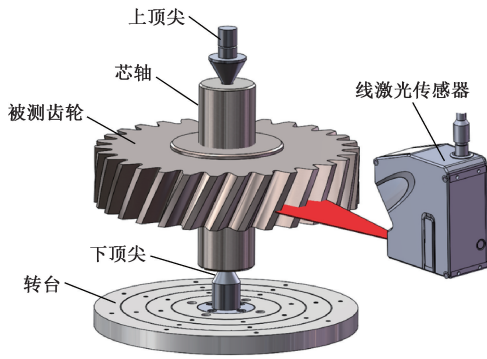


图1 齿轮三维测量模型

Fig. 1 The gear 3D measurement model

如图2所示,建立3个坐标系:机器坐标系 $\sigma_0$ : $(O_0 - x_0, y_0, z_0)$ 、传感器坐标系 $\sigma_s$ : $(O_s - x_s, y_s, z_s)$ 和齿轮坐标系 $\sigma_g$ : $(O_g - x_g, y_g, z_g)$ 。机器坐标系 $\sigma_0$ 和传感器坐标系 $\sigma_s$ 为固定坐标系;齿轮坐标系 $\sigma_g$ 与齿轮固连并随齿轮转动,为动坐标系。其中,齿轮坐标系的 $z_g$ 轴与齿轮轴线重合,其原点 $O_g$ 布置在齿宽的中点位置处;机器坐标系的 $z_0$ 轴和原点 $O_0$ 分别于齿轮坐标系 $z_g$ 轴和原点 $O_g$ 重合;传感器坐标系的 $x_s$ 轴与出射激光线重合,其原点 $O_s$ 位于出射激光线的中心位置,且平面 $x_s O_s y_s$ 与出射光平面共面。

传感器激光测线实时获取到被测齿轮齿面的几何信息 $D_l$ 为:

$$D_l = (x_l, z_l)^T \quad (1)$$

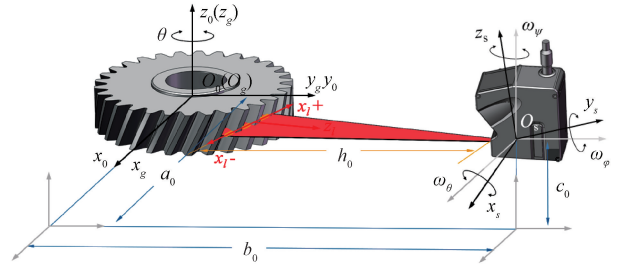


图2 坐标系的构建及映射关系

Fig. 2 Construction of the coordinate system and mapping relationship

在传感器坐标系 $\sigma_s$ 下,被测齿轮齿面可表示为:

$$D_s = \begin{pmatrix} -D_l \\ 0 \end{pmatrix} + {}^s T_l \quad (2)$$

其中, $D_s = (x_s, y_s, z_s)^T$ , ${}^s T_l = (0, h_0, z_s)^T$ , $h_0$ 为传感器的标称距离,传感器获取的几何信息数值在该位置上下变动。

将被测齿轮齿面转换到机器坐标系 $\sigma_0$ 下,可表示为:

$$D_0 = {}^0 R_s \cdot D_s + {}^0 T_s \quad (3)$$

其中,

$$D_0 = (x_0, y_0, z_0)^T$$

$${}^0 R_s = \begin{pmatrix} C_\psi C_\varphi - S_\psi S_\theta S_\varphi & -S_\psi C_\theta & C_\psi S_\varphi + S_\psi S_\theta C_\varphi \\ S_\psi C_\varphi + C_\psi S_\theta S_\varphi & C_\psi C_\theta & S_\psi S_\varphi - C_\psi S_\theta C_\varphi \\ -C_\theta S_\varphi & S_\theta & C_\theta C_\varphi \end{pmatrix}$$

$${}^0 T_s = (a_0, b_0, c_0)^T$$

式中: $\omega_\psi$ 、 $\omega_\theta$ 、 $\omega_\varphi$ 分别为传感器绕自身坐标系的偏摆角、俯仰角、滚转角; $a_0$ 、 $b_0$ 、 $c_0$ 分别为传感器沿齿轮切向、径向、轴向距离齿轮坐标系原点的偏置量。且 $C$ 、 $S$ 分别表示 $\cos(\ )$ 、 $\sin(\ )$ ,下标 $\psi$ 、 $\theta$ 、 $\varphi$ 分别表示角度 $\omega_\psi$ 、 $\omega_\theta$ 、 $\omega_\varphi$ ;比如 $C_\psi = \cos(\omega_\psi)$ 。

以上6个参数确定了线激光传感器在齿轮三维齿面测量中机器坐标系下的空间位姿。

将被测齿轮齿面转换到齿轮坐标系 $\sigma_g$ 下,可表示为:

$$D_g = {}^g R_0 \cdot D_0 \quad (4)$$

$$\text{其中, } D_g = (x_g, y_g, z_g)^T, {}^g R_0 = \begin{pmatrix} \cos\theta_0 & \sin\theta_0 & 0 \\ -\sin\theta_0 & \cos\theta_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$\theta_0$ 为被测齿轮随仪器主轴的回转角度。

因此,线激光传感器实测的被测齿轮三维齿面可表示为:

$$\begin{pmatrix} D_g \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^g R_0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} {}^0 R_s & {}^0 T_s \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -D_l \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + {}^s T_l \quad (5)$$

由式(5)可知,在齿轮三维齿面测量中,传感器的位姿参数将直接影响测量结果。

## 2 传感器位姿标定方法

### 2.1 标准件

为了确定线激光传感器的 6 个位姿参数,设计了具有一定几何特征的标准件,如图 3 所示。

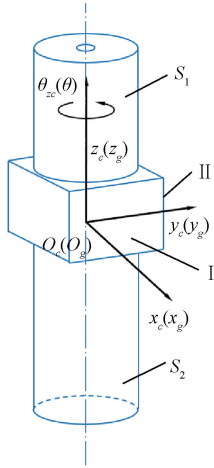


图 3 标准件

Fig. 3 Standard parts

该标准件由一个标准芯轴和一个长方体组成,标准芯轴被长方体分为上下两个轴段  $S_1$  和  $S_2$ ,且两轴段的同轴度和圆柱度不大于  $1\text{ }\mu\text{m}$ 。标定件坐标系  $\sigma_c: (O_c - x_c, y_c, z_c)$  与齿轮坐标系  $\sigma_g$  重合,长方体相邻两个平面 I 和 II 相互垂直且与标准芯轴的轴线平行,两平面 I 与 II 的垂直度不大于  $1\text{ }\mu\text{m}$ ,且两平面与标准芯轴轴线的平行度均不大于  $1\text{ }\mu\text{m}$ 。

### 2.2 标定流程

采用上述标准件进行线激光传感器的位姿标定,其流程如下:

#### 1) 装调标准件

调整标准件位置,使得平面 I 与机器坐标系  $\sigma_0$  的  $y_0$  轴平行;此时,平面 II 亦与  $x_0$  轴平行。

#### 2) 偏摆角 $\omega_\psi$ 的标定

移动线激光传感器使得测量激光平面照射在标准件平面 II 上,且处于传感器的有效测量范围内,如图 4 所示。

此时,传感器获取到被测平面 II 的一组测点  $L_0$ :

$$L_0 = (x_{0li}, z_{0li})^T, i = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

式中:  $N$  为传感器激光测线上测点个数。

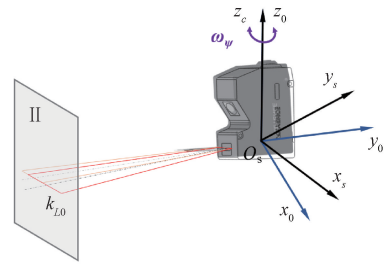


图 4 偏摆角  $\omega_\psi$  的标定

Fig. 4 Calibration of yaw angle  $\omega_\psi$

实时监测测点拟合的直线斜率  $k_{L0}$ ,并微调传感器的偏摆角  $\omega_\psi$ ,满足式(7)即停止。此时,传感器空间中绕  $z_g$  轴的偏转姿态已调整至标定零位。

$$|k_{L0}| \leq \Delta T_0 \quad (7)$$

式中:  $\Delta T_0$  为实测点拟合直线斜率误差的阈值,其阈值大小根据测量精度需求确定。

#### 3) 俯仰角 $\omega_\theta$ 的标定

如图 5 所示,将传感器沿  $y_0$  轴平移固定距离  $\Delta y_0$ ,并同步获取被测平面 II 的一组测点  $L_1$ :

$$L_1 = (x_{1li}, z_{1li})^T, i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

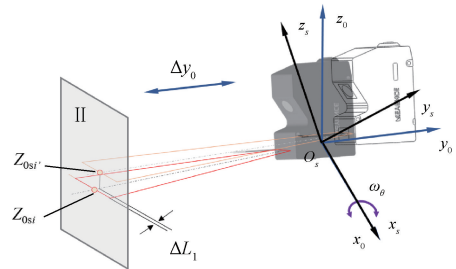


图 5 俯仰角  $\omega_\theta$  的标定

Fig. 5 Calibration of pitch angle  $\omega_\theta$

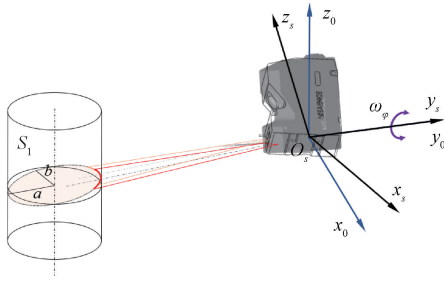
实时监测  $\Delta y_g$  与  $\Delta L_1$  的大小变化,并微调传感器的俯仰角  $\omega_\theta$ ,满足式(9)即停止。此时,传感器空间中绕  $x_g$  轴的偏转姿态已调整至标定零位。

$$|\Delta y_0 - \Delta L_1| \leq \Delta T_1 \quad (9)$$

式中:  $\Delta T_1$  为实测点沿  $y_0$  轴平移后差值的阈值,其阈值大小根据测量精度需求确定。

#### 4) 滚转角 $\omega_\varphi$ 的标定

将传感器沿  $z_0$  轴上移一段距离,使传感器测量激光束平面照射在标准件芯轴的  $S_1$  轴段上,且处于传感器的有效测量范围内,如图 6 所示。

图6 滚转角  $\omega_\varphi$  的标定Fig.6 Calibration of roll angle  $\omega_\varphi$ 

此时,传感器获取到被测标准件上标准芯轴  $S_1$  轴段的一组测点  $L_2$ :

$$L_2 = (x_{2li}, z_{2li})^T, i = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

上述测线为传感器测量光束平面与标准芯轴的  $S_1$  轴段相交的一段圆弧,根据最小代数距离准则<sup>[19]</sup>拟合椭圆基本参数作为初值进行最小几何距离<sup>[18]</sup>迭代拟合,搜寻较高精度的椭圆基本参数  $P(a_E, b_E, x_E, y_E, \psi_E)$  (其中  $a_E$  为长轴、 $b_E$  为短轴、 $(x_E, y_E)$  为中心坐标、 $\psi_E$  为倾斜角)。微调传感器滚转角  $\omega_\varphi$ ,同时观测拟合椭圆长轴  $a_E$  和短轴  $b_E$  的变化,满足式(14)即停止。此时,传感器空间中绕  $y_g$  轴的偏转姿态已调整至标定零位。

$$|a_E - b_E| \leq \Delta T_2 \quad (11)$$

式中:  $\Delta T_2$  为实测点拟合椭圆长短轴差值的阈值,其阈值大小根据测量精度需求确定。

### 5) 直线偏置 $a_0, b_0, c_0$ 的标定

线激光传感器 3 个直线位置的标定主要依赖于步骤 4) 标定完后传感器获取到圆弧测线的高点位置。

此时,传感器获取到被测标准件上芯轴  $S_1$  轴段的一组测点  $L_3$ :

$$L_3 = (x_{3li}, z_{3li})^T, i = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

如图 7(a) 所示,在测线中点  $N/2$  处向左偏置  $m_{\text{offset}}$ , 区域  $d_s$  内均值为:

$$X_L = \frac{1}{n_{ds}} \sum_i x_{3li} \quad (13)$$

式中:  $n_{ds}$  为区域  $d_s$  内测点个数。

从测线中点  $N/2$  处向右以  $d_s$  区域内均值偏历与  $X_L$  比较,满足式(15)便搜寻到  $X_L$  的对称点  $X_R$ 。

$$|X_L - X_R| \leq |X_L - X_R(i)| \quad (14)$$

如图 7(b) 所示,继续向左偏置多个位置,获得传感器在齿轮切向的偏置为  $a_0$ :

$$a_0 = \frac{\sum_{j=1}^n \left( X_{3\frac{N}{2}} - \left( X_{L(i)} + \frac{X_{R(i)} - X_{L(i)}}{2} \right) \right)}{n} \quad (15)$$

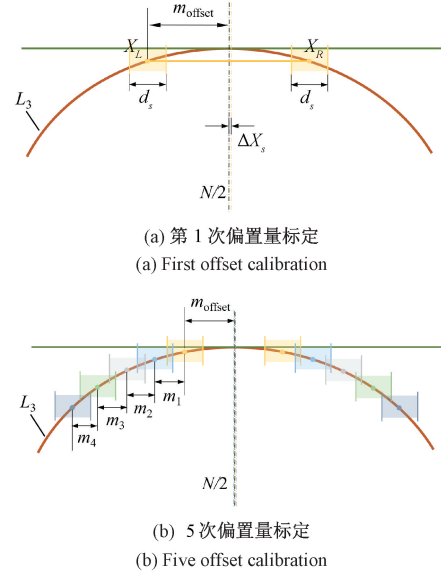


图7 传感器直线偏置量的标定

Fig.7 Calibration of sensor linear offset

式中:  $n$  为偏置次数。

传感器在齿轮切向的偏置  $a_0$  后的高点坐标为:

$$L_3^{\max} = (x_{3l}^{\max}, z_{3l}^{\max})^T \quad (16)$$

因此,传感器在齿轮径向的偏置为  $b_0$ :

$$b_0 = h_0 - z_{3l}^{\max} + r_c \quad (17)$$

式中:  $r_c$  为标准件上芯轴  $S_1$  轴段的半径。

由于  $z_0$  轴方向上需要多次移动测量以覆盖整个齿宽,该方向的初始偏置  $c_0$  可不作标定,当前位置取:

$$c_0 = 0 \quad (18)$$

## 3 验证实验

### 3.1 测量仪器

如图 8 所示,在齿轮测量中心上进行实验验证。线激光传感器通过微调平台安装在三维移动轴基座上,可实现传感器在空间内三维直线位置的移动。同时,微调平台可控制传感器空间中 3 个角度姿态的调整。标定件或被测齿轮安装在仪器主轴上,回转角度信号作为外部触发源同步触发传感器进行轮廓采集。

### 3.2 传感器位姿标定

线激光传感器选用基恩士 LJ-V7000 系列传感器,其标称距离  $h_0$  为 60 mm,宽度( $x_l$ )测量范围为 13.5~15 mm,高度( $z_l$ )测量范围为  $\pm 8$  mm 且重复精度 0.4  $\mu\text{m}$ 。

如图 9 所示,基于上述标准件,调整并标定传感器的位姿,其标定参数为:

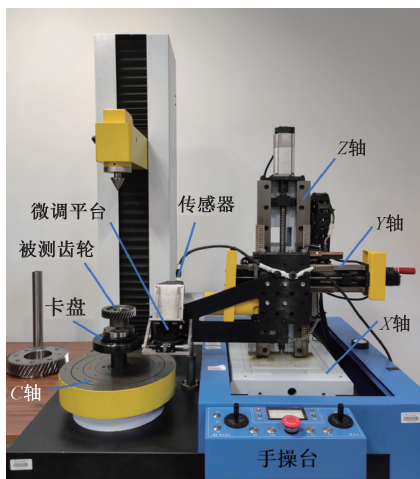


图 8 测量仪器

Fig. 8 Measurements instrument

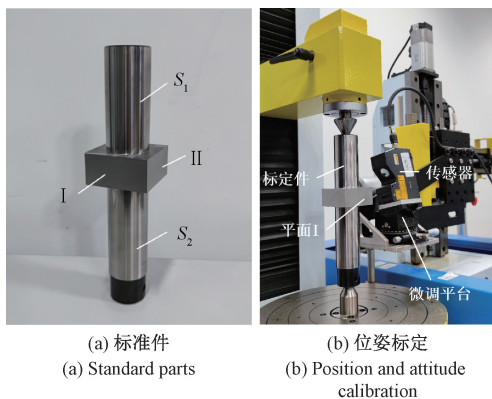


图 9 传感器位姿标定

Fig. 9 Position and attitude calibration of the sensor

$$\begin{cases} \omega_{\psi} = 0^{\circ} \\ \omega_{\theta} = 0^{\circ} \\ \omega_{\varphi} = 17.696^{\circ} \\ a_0 = 31.918 \text{ mm} \\ b_0 = 114.668 \text{ mm} \\ c_0 = 0 \text{ mm} \end{cases}$$

### 3.3 齿轮测量

如图 10 所示为被测齿轮,其齿轮参数见表 1。将被测齿轮安装在齿轮测量仪器上,由传感器出射的激光束扫描整个齿轮齿面。

如图 11 所示,根据式(5)得到被测齿轮齿面三维点云数据。

### 3.4 分析与讨论

以图 11 所示齿面数据作为样本,以齿廓分析为例,讨论其测量重复性并进行比对分析。



图 10 被测齿轮

Fig. 10 Tested gears

表 1 被测齿轮参数表

Table 1 Parameter table of the tested gear

| 被测齿轮参数   | 参数值       |
|----------|-----------|
| 齿数       | 56        |
| 模数/mm    | 2.25      |
| 压力角/°    | 20        |
| 基圆直径/mm  | 118.401 3 |
| 齿宽/mm    | 28        |
| 齿根圆直径/mm | 121.675   |
| 齿顶圆直径/mm | 131.800   |

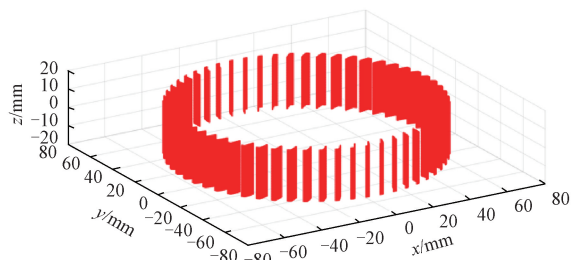


图 11 被测齿轮齿面的 3D 点云数据

Fig. 11 3D point cloud data of tested gear tooth surface

#### 1) 重复性分析

采用特征标准件对线激光传感器重复标定 5 次,并分别采集齿面数据。选取被测齿轮同一轮齿的同一截面,可获得测量齿廓数据的法向偏差值整体样本为:

$$Y_i(x) = \{y_1(x), y_2(x), y_3(x), y_4(x), y_5(x)\} \quad (19)$$

如图 12 所示,基于均值平移的动态测量重复性评定方法,将实测数据相对于整体样本均值做平移处理,得到一组新的数据样本:

$$Y'_i(x) = \{y_1(x) - \bar{y}_1, y_2(x) - \bar{y}_2, y_3(x) - \bar{y}_3, y_4(x) - \bar{y}_4, y_5(x) - \bar{y}_5\} \quad (20)$$

其中,

$$\bar{y}_i = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M y_i(x_j) \quad (21)$$

式中:  $M$  为每个数据样本的采样点数,  $M=800$ 。

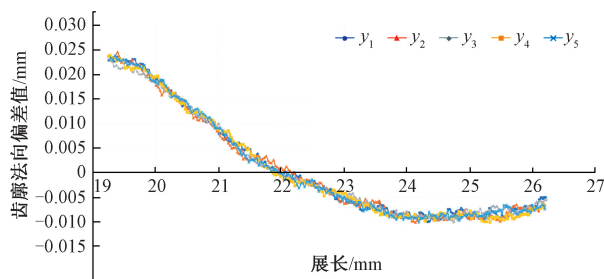


图 12 均值平移后的数据样本

Fig. 12 Data samples after mean shift

做均值平移后的数据样本由于测量次数较少,采用极差作为其测量重复性的评定结果。测量数据每个位置的极差。

$$w(x_j) = \max_{i=1}^5 Y'_i(x_j) - \min_{i=1}^5 Y'_i(x_j) \quad (22)$$

因此,在动态测量中取被测点数据中最大极差作为整个动态测量的重复性评定结果,为:

$$w = \max_{j=1}^M [w(x_j)] = 3.94 \mu\text{m} \quad (23)$$

## 2) 比对分析

如图 13 所示,选取被测齿轮第 29 齿左齿面为例,根据 ISO1328-1:2013 中的评价准则对齿轮齿面的齿廓进行评价分析。

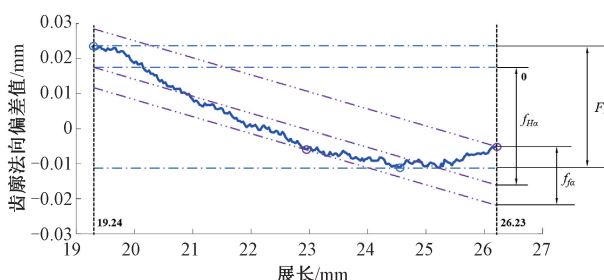


图 13 第 29 齿右齿面齿廓偏差

Fig. 13 Profile deviation of right tooth surface of the 29th tooth

根据计算,被测齿轮第 29 齿右齿面的齿廓偏差分别为:  $F_a=40.1 \mu\text{m}$ ;  $f_{pa}=16.8 \mu\text{m}$ ;  $f_{Hpa}=-37.1 \mu\text{m}$ 。

基于图 12 所述的齿廓测点的法向偏差,分析多次测量的重复性,如表 2 所示。由此可见,线激光传感器获取到齿廓信息的评价结果具有较好的一致性。

将被测齿轮安装在传统接触式齿轮测量中心 P26 主轴上进行测量和分析,其测量过程和评价结果如图 14 和 15 所示。

表 2 齿廓评价的重复性分析表

Table 2 Repeatability analysis table of tooth profile evaluation

| 测量项目      | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 参数值  |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| $F_a$     | 40.1  | 40.2  | 39.6  | 39.9  | 40.3  | 0.25 |
| $f_{pa}$  | 16.6  | 16.9  | 16.4  | 16.5  | 16.3  | 0.21 |
| $f_{Hpa}$ | -37.1 | -37.4 | -36.8 | -36.6 | -37.2 | 0.29 |

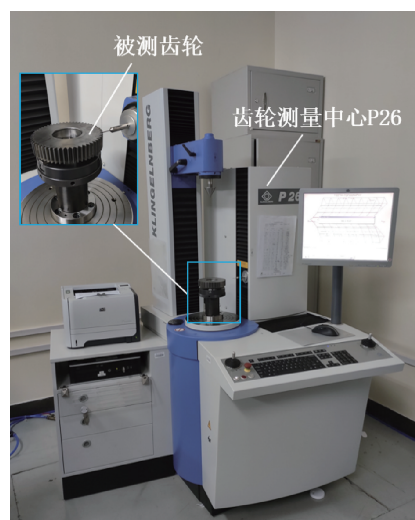


图 14 齿轮测量中心 P26

Fig. 14 Gear measuring center P26

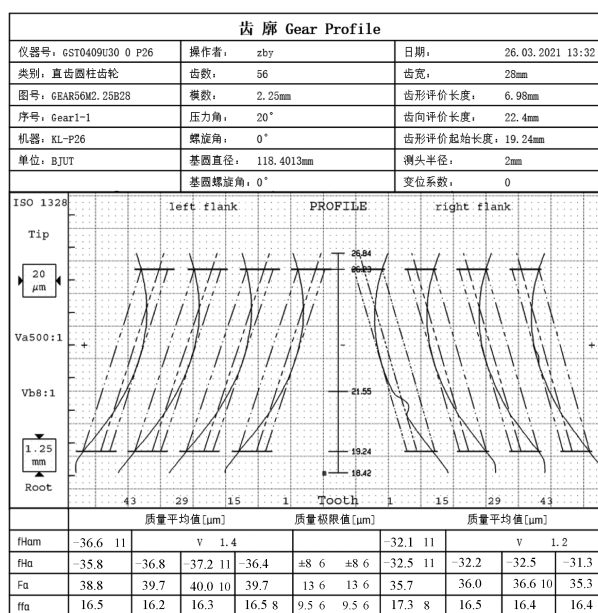


图 15 齿轮测量中心 P26 的测量与评价结果

Fig. 15 Measurement and evaluation results of gear measuring center P26

如图 16 所示, 图 16(a) 为传统接触式测量中心 P26 的测量结果曲线, 图 16(b) 本文测量的结果曲线, 曲线整体变化趋势基本一致, 但数值上还存在一定的偏差, 分析主要与以下因素有关: 1) P26 测量为接触式测量, 线激光传感器的测量很难提取到同一齿廓线; 2) P26 的接触式测头有较好的机械滤波功能, 线激光传感器获取到齿面的原始数据, 存在较多的齿面细节信息, 滤波器的选择会影响结果; 3) 线激光传感器的出射光平面与齿面夹角的变化影响测量结果, 比接触式法向测量结果较差一些。

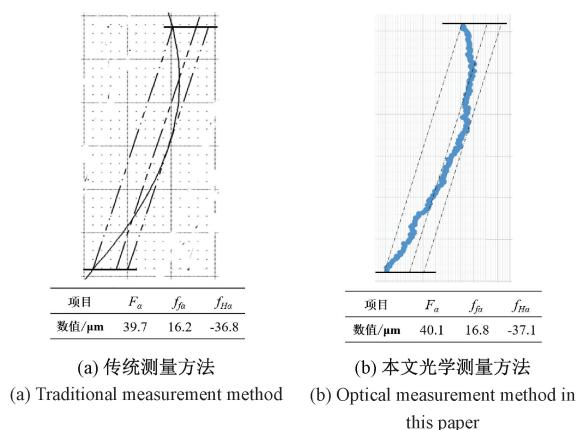


图 16 被测齿轮的测量结果与 P26 测量结果对比  
Fig. 16 Comparison between the measured results of the tested gear and P26

## 4 结 论

本文提出了一种在齿轮三维测量中基于特征标准件的线激光传感器位姿标定方法。该方法设计了一款由标准芯轴和长方体组成的特征标准件, 用于标定传感器在齿轮三维测量中的空间位姿 (3 个姿态角和 3 个位置量)。该方法解决了基于齿轮测量中心进行齿轮三维测量时线激光传感器位姿标定问题, 使得齿轮三维测量具有较好的测量重复性与准确性。对于线激光传感器的空间位姿参数在标定过程中仍存在一定的耦合关系, 微调机构及其标定精度需进一步提升。

## 参考文献

[1] 石照耀, 费业泰, 谢华锐. 齿轮测量技术 100 年一回顾与展望[J]. 中国工程科学, 2003, 9:13-17.  
SHI ZH Y, FEI Y T, XIE H K. 100 years of gear measurement technology-review and prospect [J]. China Engineering Science, 2003, 9:13-17.

[2] GOCH G, NI K, PENG Y, et al. Future gear metrology based on areal measurements and improved holistic evaluations [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2017, 66(1): 469-474.  
[3] GOLDFARB V, TRUBACHEV E, BARMINA N. Advanced gear engineering [M]. Mechanisms and Machine Science, Switzerland: Springer International Publishing, 2018.  
[4] PETERS J, GOCH G, GÜNTHER A. Helical gear measurement using structured light [C]. Proceedings of the XVI IMEKO World Congress, Wien, 2000:227-230.  
[5] CHRISTOF G, MARKUS F. Hybrid gear metrology with klingelnberg: An overview of tactile and optical gear metrology[J]. Gear Technology, 2021, 6: 26-27.  
[6] FUJIO H, KUBO A, SAITOH S, et al. Laser holographic measurement of tooth flank form of cylindrical involute gear [J]. 1994, 116(3):721-729.  
[7] KRUTH J P, BARTSCHER M, CARMIGNATO S, et al. Computed tomography for dimensional metrology [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2011, 60(2): 821-842.  
[8] WAGAJ P P, SHEPHERD E J, TANNER M. Measurement of toothed articles utilizing multiple sensor [P]. WO2018048872A1. 2018-03-15.  
[9] WAGAJ P P, BEERCK D C, SHEPHERD E J. Measurement of toothed articles on a composite machine tester platform utilizing a non-contact sensor; WO2019/083932A1 [P]. 2018-10-23.  
[10] LE N D, SAMSON G. Dispositif modulaire de mesure sans contact et systeme de mesure et de controle correspondant; FR3035207A1 (B1)[P]. 2016-10-21.  
[11] HARTIG F, STEIN M. 3d involute gear evaluation-part I: Workpiece coordinates [J]. Measurement, 2019, 134: 569-573.  
[12] LIN H, KELLER F, STEIN M. Influence and compensation of cmm geometric errors on 3d gear measurements [J]. Measurement, 2020, 151:107110.  
[13] AUERSWALD M M, FREYBERG A V, FISCHER A. Laser line triangulation for fast 3D measurements on large gears [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 100:2423-2433.  
[14] 张德福, 葛川, 李显凌, 等. 高精度位移传感器线性

度标定方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(5): 24-30.

ZHANG D F, GE CH, LI X L, et al. Linearity calibration method of the high-precision displacement sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(5): 24-30.

- [15] 张瑞峰, 舒子芸, 南刚雷. 一种新的线结构光标定方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(22): 82-89.

ZHANG R F, SHU Z Y, NAN G L. Calibration method for line-structured light [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(22): 82-89.

- [16] 代洁, 马骊群, 高廷, 等. 线激光位移传感器像素当量标定方法[J]. 计测技术, 2019, 39(6): 31-35.

DAI J, MA L Q, GAO T, et al. A method to calibrating CCD pixel equivalent of line laser scanning sensor in-site [J]. Metrology & Measurement Technology, 2019, 39(6): 31-35.

- [17] MORSE E, JAGANMOHAN P. 6 DOF calibration of profile sensor locations in an inspection station [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2020, 69(1): 465-468.

- [18] GUO X ZH, SHI ZH Y, YU B, et al. 3D measurement of gears based on a line structured light sensor [J]. Precision Engineering, 2020, 61: 160-169.

- [19] SHI ZH Y, WANG T, LIN J CH. A simultaneous calibration technique of the extrinsic and turntable for structured-light-sensor-integrated CNC system [J]. Optical and Lasers in Engineering, 2021, 138: 106451.

## 作者简介



石照耀(通信作者), 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、博士生导师、教育部长江学者特聘教授, 主要研究方向为精密测试技术和仪器、齿轮工程和精密减速器。

E-mail: shizhaoyao@bjut.edu.cn

**Shi Zhaoyao** (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Hefei University of Technology in 1984, M.Sc. degree from Shanxi Institute of Mechanical Engineering in 1988 and 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. He is a “Yangtze River Scholar” distinguished professor awarded by the Ministry of Education. His main research interests include precision measurement technology and instrument, gear engineering and precision reducer.



孙衍强, 2015 年于山东科技大学获得学士学位, 2018 年于北京工业大学获得硕士学位, 现为北京工业大学博士研究生, 主要研究方向为精密测试技术和仪器。

E-mail: syq\_90@163.com

**Sun Yanqiang** received his B.Sc. degree from Shandong University of Technology in 2015, and received his M.Sc. degree from Beijing University of Technology in 2018. He is currently a Ph.D. candidate at Beijing University of Technology. His main research interest includes precision measurement technology and instrument.