

# 滑块内滚道型面精度的倾斜测量

徐小韵<sup>1,2</sup>, 欧 屹<sup>1,2</sup>, 冯虎田<sup>1,2</sup>, 王 凯<sup>1,2</sup>, 王 瑞<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094;

<sup>2</sup>数控机床功能部件共性技术工业和信息化部重点实验室, 江苏 张家港 215600

**摘要** 为了实现滑块内滚道型面精度的快速准确测量,提出一种基于激光三角位移传感器倾斜测量的方法。对该方法的算法进行推理与验证,同时借助高精度圆棒进行实验验证。根据测量系统的特征与滑块内滚道的形状,建立相对应的模型。设计相应的算法,计算滑块内滚道的半径,并对测量过程中的误差来源进行标定补偿。在内滚道轮廓算法的基础上,计算滑块内滚道的轴线相对基准面的位置与平行度。介绍该方案的验证性实验并分析结果。实验结果表明:标准圆棒的测量精度为  $3.75\ \mu\text{m}$ ,标准差在  $2\ \mu\text{m}$  以内。实验结果满足  $5\ \mu\text{m}$  的测量精度要求,且该测量方式对标定件与待测件没有位姿要求,具备一定的推广性。

**关键词** 测量; 激光位移传感器; 型面精度测量; 椭圆拟合; 传感器偏角; 位姿

**中图分类号** TG839 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.1012005

## Tilt Measurement of Profile Accuracy of Slider Inner Raceway

Xu Xiaoyun<sup>1,2</sup>, Ou Yi<sup>1,2</sup>, Feng Hutian<sup>1,2</sup>, Wang Kai<sup>1,2</sup>, Wang Rui<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Ministry of Industry and Information Technology, General Technology of Functional Parts of Numerical Control Machine, Zhangjiagang, Jiangsu 215600, China

**Abstract** In order to realize accurate and fast measurement of the inner raceway surface accuracy of a slide block, a method of tilt measurement based on laser triangulation displacement sensor is proposed. The method is reasoned and verified, and the experiment is carried out by means of high precision round bar. According to the characteristics of measuring system and shape of inner raceway of the slider, the corresponding model is established. Relevant algorithm is used to calculate the radius of inner raceway of the slider, and the error source in the measurement process is calibrated and compensated. Then, on the basis of inner raceway contour algorithm, parallelism and position of the axis of slider internal raceway relative to the base plane are calculated. Finally, verification test of this scheme is introduced and the results are analyzed. The test results show that the measurement accuracy of the standard round bar is  $3.75\ \mu\text{m}$  and the standard deviation is less than  $2\ \mu\text{m}$ . The test results meet the requirements of measurement accuracy of  $5\ \mu\text{m}$ . Moreover, the measurement method does not have pose requirements for reference piece and part to be tested, so it has certain generalization performance.

**Key words** measurement; laser displacement sensor; profile accuracy measurement; ellipse fitting; sensor declination; pose

**OCIS codes** 120.3930; 280.3400; 150.4232; 200.4560

## 1 引 言

滚动直线导轨副是数控机床的重要功能部件,其性能对数控机床的整体性能及精度有重要影响。随着滚动直线导轨副的广泛使用,工业上对其精度要求越来越高,将导轨副的精度分配到各个组成构件上,已经

**收稿日期:** 2017-05-22; **收到修改稿日期:** 2017-06-12

**基金项目:** 国家重大科技专项(2016ZX04004007)

**作者简介:** 徐小韵(1993—),男,硕士研究生,主要从事形位公差检测 and 数据处理方面的研究。E-mail: luka\_xu@126.com

**导师简介:** 欧 屹(1982—),男,博士,讲师,主要从事数控机床功能部件设计、性能测试、失效机理分析等方面的研究。

E-mail: ouyi3281289@163.com(通信联系人)

成为一种必然趋势。滑块是滚动直线导轨副的重要构件,滑块内滚道的型面精度直接影响导轨副的使用性能和装配尺寸,目前针对滑块型面精度的研究也越来越多。而现阶段的滑块内滚道测量,通常为人工测量<sup>[1]</sup>。为了提高检测精度和效率,适应生产需要,有必要研制一台专用设备对滑块进行自动化检测。

在滑块精度检测仪器方面,传统的检测工具是1994年李桂民<sup>[2]</sup>设计的滚动直线导轨副滑块中径检测量具,此量具操作简便,但是只能抽样检测,无法满足目前工业需求。2015年,叶飞原等<sup>[3]</sup>研制出了滚动直线导轨副滑块精度检测仪,可以实现高速快捷检测,但是该检测仪采用接触式测量,无法得到滚道的轮廓,还对被测滑块和检测仪有一定程度的磨损。2017年,南京理工大学杜坤等<sup>[4]</sup>提出了一种倾斜测量滑块内滚道型面精度的方法,保持激光位移传感器测量方向与滑块内滚道轴线方向不垂直,采集内滚道数据,通过数据拟合得到内滚道型面精度。但该方案并未有效建模,算法推导方面只考虑滑块滚道相对于测量系统的安装位姿,并未考虑传感器光线方向与实验台运动方向之间的安装偏差以及测量架之间的角度标定;在实验方面,只通过一根标准圆柱进行测量,无法有效证明方案的可行性。

本文在杜坤等方案的基础上建立测量模型,推导测量算法,对可能存在的误差进行分析与补偿。借助高精度圆棒,通过多组交叉对比实验进行验证,同时测量标准滑块,分析实验结果,证明本方法的可行性。

## 2 滑块检测指标与测量方案

### 2.1 滑块检测指标

滚动直线导轨副通常由导轨、滑块、滚动体、滚动体反向器和滚动体保持器等组成。滚动体在滑块两端的反向器和滑块内部的回珠管道内做无限循环滚动,使滑块沿导轨方向运动时始终处于滚动接触状态,实现滑块在导轨上的高精度滚动直线运动。常规滚珠结构滑块形式如图1所示。

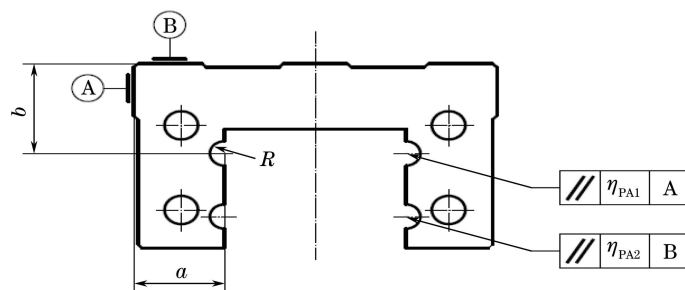


图1 滑块测量指标

Fig. 1 Measurement index of slider

在滑块主体上设计有4条内滚道,为保证装配后的导轨副性能和尺寸精度,滑块内滚道磨削加工需要控制的参数包括内滚道半径 $R$ ,内滚道到基准面A距离 $a$ 和到基准面B距离 $b$ 等。滑块的检测内容包括:1)滑块内滚道的半径 $R$ ;2)滑块内滚道相对基准面A和B的位置 $(a, b)$ ;3)滑块内滚道相对基准面A的平行度 $\eta_{PA1}$ 和相对基准面B的平行度 $\eta_{PA2}$ 。

### 2.2 整体测量方案

测量传感器均选用Keyence公司的超高速/高精度CMOS激光位移传感器(LK-5000系列)。其中传感器1、2、3、4的型号为LK-H020,传感器5、6的型号为LK-H050,这两种都属于聚焦光点型,光斑半径极小。

采用坐标测量与非接触式测量相结合的方式,测量滑块内滚道型面精度。如图2(a)所示,传感器1、2、3、4(1被遮挡)固定安装在测量架1上,测量架1沿Y轴方向运动。图2(b)为隐藏测量架1和2的传感器布局图。传感器1、2的激光垂直照射在滑块的侧面基准上,测量方向沿X轴方向,且激光点在Z轴方向上有一定间隙;传感器3、4的激光垂直照射在大面基准的两个平面上,测量方向沿Z轴方向。每个传感器沿着运动方向采集直线数据,滑块的侧面与大面各用两条直线度代替平面度表征,在坐标系中建立这两个平面。同时传感器5、6固定安装在测量架2上,采用倾斜安装的方式;测量架2沿Z轴方向运动,采集滑块内滚道某一斜截面的数据,通过相应的算法得到内滚道在该斜截面的半径与形心位置。再将传感器5、6沿Y轴正方形移一小段距离,测量下一段斜截面。对得到的一系列半径值进行处理,得到内滚道的半径值。同时对得

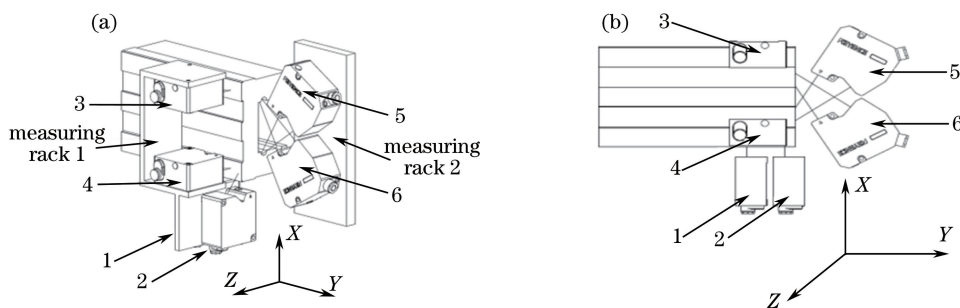


图 2 (a)传感器安装图;(b)传感器布局图

Fig. 2 Sensor installation diagram; (b) sensor layout

到的一系列形心位置,结合同一坐标系下侧面与大面基准所表示的平面,得到内滚道轴线相对基准面的位置与平行度。

### 3 内滚道检测算法

#### 3.1 测量模型的建立

以激光位移传感器 5 沿 Z 轴方向移动,测量滑块内滚道为例,建立测量模型。采用的激光传感器属于聚焦光点型,非常适用于精细物体的测量,光点直径在同类中最小。同时激光具有良好的直线性,可以将传感器测量光线看作是一条直线。传感器 5 所在的测量架 2 沿 Z 轴方向运动,运动平台拟采用气浮平台。气浮平台运动的直线度一般为 $\pm 0.4 \mu\text{m}/\text{m}$ ,满足精度要求,因此可以将传感器的运动也视为一条直线。理论上,传感器光线的射出方向与运动方向应当垂直,但这很难得到保证。由于光线的射出方向与运动方向的直线性很好,因此可以将传感器光线的行程视为由空间内两条相交直线形成的平面。

对于滑块内滚道轮廓,其本质为二分之一圆柱面,但对于整个测量过程来说,只有光斑落在圆柱面上所采集到的数据才有意义。为了便于模型建立,将其视为一个完整的圆柱面,并把问题简化为空间中一个随机平面与圆柱面相交所得的截面轮廓。

#### 3.2 测量模型的分析

圆柱面由半径  $R$ 、轴线所指方向  $A(dx_a, dy_a, dz_a)$  和轴线经过点  $P(x_p, y_p, z_p)$  表示。平面由平面法向量所指方向  $N(dx_n, dy_n, dz_n)$  和经过点  $Q(x_q, y_q, z_q)$  表示。圆柱面与平面的相交截面,共存在 3 种情况:1)当平面与圆柱面的轴线相平行时,交线为矩形;2)当平面与圆柱面的轴线不平行,但经过圆柱面的底面时,交线为被直线截断的椭圆,如图 3(a)所示;3)当平面与圆柱面的轴线不平行,且不经过圆柱面的底面时,交线为完整椭圆,如图 3(b)所示。符合实际测量情况的是第 3 种情况,其他 2 种情况不予考虑。

首先计算椭圆形心  $C$  的坐标,形心即为平面与圆柱面轴线的交点。轴线的参数方程( $t$  为方程变量)为

$$\begin{cases} x = x_p + t \cdot dx_a \\ y = y_p + t \cdot dy_a \\ z = z_p + t \cdot dz_a \end{cases} \quad (1)$$

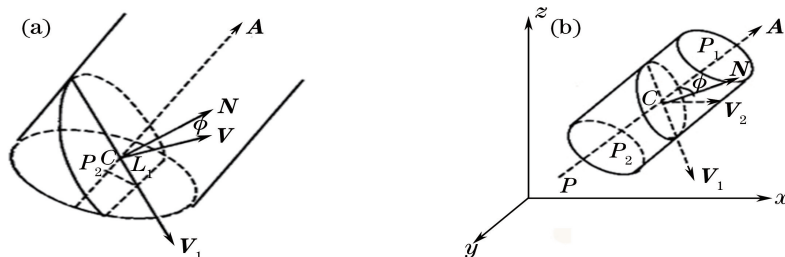


图 3 平面与圆柱面相交模型。(a)平面与圆柱的底面相交;(b)平面不经过圆柱底面

Fig. 3 Intersection model of plane and cylindrical surface. (a) Plane intersects the bottom of the cylinder; (b) plane does not pass through the bottom of the cylinder

代入平面方程

$$dx_n \cdot (x - x_q) + dy_n \cdot (y - y_q) + dz_n \cdot (z - z_q) = 0, \quad (2)$$

根据(2)式解出变量  $t$ , 再将  $t$  代入(1)式, 便可求出  $C$  点坐标  $(x_c, y_c, z_c)$ 。

椭圆的短轴为平面与过  $C$  点且和圆柱底面平行的圆的交线, 必与  $\mathbf{A}$  垂直, 故若  $|\mathbf{A} \times \mathbf{N}| \neq 0$ , 则短轴的方向向量  $\mathbf{V}_2$  可表示为

$$\mathbf{V}_2 = \mathbf{A} \times \mathbf{N}. \quad (3)$$

若  $|\mathbf{A} \times \mathbf{N}| = 0$ , 即平面的法向量与圆柱面的轴线方向向量平行, 此时平面垂直于该圆柱面, 相交得到一个圆。这不符合本方案倾斜测量的实际情况, 因此不予考虑。通过  $\mathbf{V}_2$  易求椭圆长轴方向的单位向量。

对于圆柱面与平面之间的位姿关系, 假设最初平面的法向量与圆柱面轴线的方向向量平行。现将圆柱面依次绕着  $x$  轴旋转  $\alpha_x$ ,  $y$  轴旋转  $\alpha_y$ ,  $z$  轴旋转  $\alpha_z$  (由于旋转顺序对最终位置有影响, 因此对旋转顺序进行规定)。根据文献[5]可知, 得到的椭圆短半轴  $a = R$ , 椭圆长半轴  $b = R / \cos \phi$ , 其中  $\phi$  为  $\mathbf{A}$  与  $\mathbf{N}$  的夹角。  $\phi$  可通过  $\alpha_x$  和  $\alpha_y$  表示为

$$\cos \phi = \sqrt{1 - \sin^2 \phi} = \sqrt{1 - \left( \frac{|\mathbf{N} \times \mathbf{A}|}{|\mathbf{N}| |\mathbf{A}|} \right)^2} = \cos \alpha_x \cdot \cos \alpha_y. \quad (4)$$

由上述结论可知, 决定椭圆长半轴  $b$  的因素只有  $R$  和  $\phi$ , 即与平面和圆柱面的相对位姿有关; 而短半轴  $a$  与所有因素都无关, 只取决于圆柱面的半径  $R$ 。

### 3.3 内滚道半径测量

通过 3.2 节的分析, 平面与圆柱面相交所得的轮廓是完整椭圆, 且椭圆的短半轴  $a$  等于该圆柱的半径  $R$ 。但是在实际测量过程中, 传感器光线的射出方向与传感器的运动方向之间的夹角, 并不是直角, 故存在安装偏差角  $\beta$ 。具体情况如图 4 所示, 在直角坐标系  $ox_2y_2$  中,  $x_2$  轴代表传感器的运动方向,  $y_2$  轴垂直于  $x_2$  轴。而在实际测量过程中, 数据点在斜坐标系  $ox_1y_1$  中采集,  $x_1$  轴即  $x_2$  轴,  $y_1$  轴代表传感器光线的射出方向, 其与  $y_2$  轴之间的夹角为安装偏差角  $\beta$ 。所以如果直接将测量所得的数据进行拟合, 无法得到准确的椭圆数据, 不能准确地反映内滚道的参数。

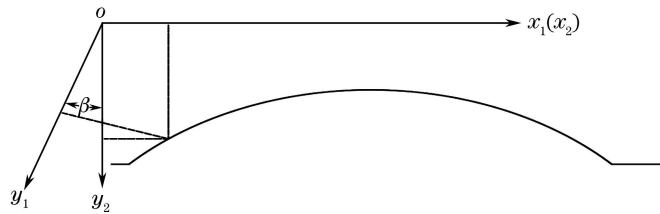


图 4 传感器安装偏角  $\beta$  示意图

Fig. 4 Diagram of sensor installation declination  $\beta$

对于斜坐标系下的实际坐标点  $(x_1, y_1)$ , 与直角坐标系下的理论坐标点  $(x_2, y_2)$  存在如下关系:

$$\begin{cases} x_2 = x_1 - y_1 \sin \beta \\ y_2 = y_1 \cos \beta \end{cases}. \quad (5)$$

实际测量时存在夹角  $\beta$ , 其值只与传感器光线的射出方向和气浮平台的运动方向有关, 这两个方向在测量过程中几乎是不变的, 因此  $\beta$  值在测量过程中也几乎不变。  $\beta$  值可预先知道参考值, 可以通过下述方法进行标定。

由于存在  $\beta$  角, 测量得到的实际短半轴  $a'$  与  $\beta$  角之间的关系颇为复杂, 无法利用表达式直接进行求解。但是对于工程性问题, 可以通过假设数据, 在相应的仿真计算软件中观察数据结果, 从而采取相对应的解决方式。

扫描标准圆柱, 实现  $\beta$  值的标定。对于位置固定的标准圆柱, 其位姿可以事先大致确定。以圆柱面半径  $R = 5 \text{ mm}$ ; 形心坐标  $(x_0, y_0)$  为  $(20 \text{ mm}, 4 \text{ mm})$ ;  $\alpha_x = 45^\circ$ ;  $\alpha_y = 5^\circ$ ;  $\alpha_z = 1^\circ$  为例。假设  $\beta = 2.5^\circ$ , 在 Matlab 中对  $\beta$  角在可能范围  $(0^\circ \sim 5^\circ)$  内以  $0.001^\circ$  进行循环, 对  $a'$  值进行椭圆拟合求解, 并扩大范围  $(-6^\circ \sim 10^\circ)$  求解, 观察求得的椭圆短半轴  $a'$  与  $\beta$  角之间的关系, 如图 5 所示。

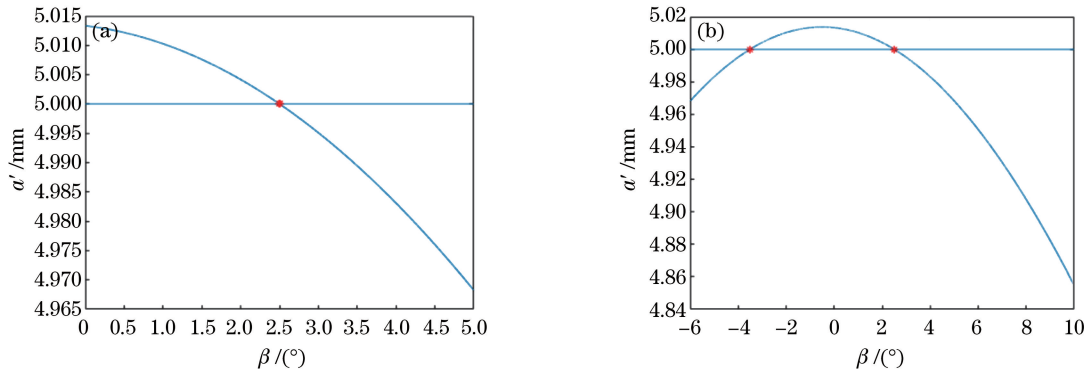


图 5  $a'$  与  $\beta$  角之间的关系。(a) 当  $\beta$  角在  $0^\circ$  到  $5^\circ$  之间; (b) 当  $\beta$  角在  $-6^\circ$  到  $10^\circ$  之间

Fig. 5 Relationship between  $a'$  and angle  $\beta$ . (a) When  $\beta$  is between  $0^\circ$  and  $5^\circ$ ; (b) when  $\beta$  is between  $-6^\circ$  and  $10^\circ$

$\beta$  角在可能范围 ( $0^\circ \sim 5^\circ$ ) 内变化时满足单调变化的关系, 可以求出唯一正确解, 如图 5(a) 所示。扩大  $\beta$  角的范围, 如图 5(b) 所示, 可计算得到  $\beta$  的两个可能解  $\beta_1 = -3.508^\circ, \beta_2 = 2.500^\circ$ , 则  $\Delta\beta = 6.008^\circ$ 。显然在已知参考值的情况下, 可以轻易排除错误  $\beta$  角, 正确标定传感器的安装偏角。

对于内滚道半径的测量, 需要先对传感器的安装偏差  $\beta$  值进行标定。而对测量坐标拟合所得的  $a'$  与  $\beta$  值之间的关系式过于复杂, 很难直接通过关系式求解。鉴于这是工程性问题, 可以对  $\beta$  值在可能范围内最小二乘拟合求解, 将得到的椭圆短半轴  $a'$  与  $R$  的标定值进行比较, 得到实际  $\beta$  值<sup>[6]</sup>。在仿真分析求取  $\beta$  值的过程中, 发现其可能存在两个取值, 其中一个即为实际  $\beta$  值。易根据参考值, 判断得到正确的  $\beta$  值。在标定出传感器的安装偏差后, 斜坐标系下可以转换为直角坐标系, 再对待测的滑块进行测量, 通过拟合得到斜截面的半径与形心位置。

### 3.4 内滚道轴线相对基准的位置测量

对于内滚道轴线的位置测量, 首先根据 3.3 节得到内滚道轴线上点的坐标, 再根据对滑块基准面的测量, 得到内滚道轴线的位置。对内滚道轴线上点的坐标求解, 就是将二维坐标转化为三维坐标的过程。对测量所得的斜坐标系下的  $(x_1, y_1)$  进行坐标系转换, 根据 (5) 式得到直角坐标系下的理论坐标  $(x_2, y_2)$ 。以滑块内滚道半径的测量系统建立坐标系  $x_w y_w z_w$ , 在该坐标系下的三维坐标值为

$$\begin{cases} x_w = x_2 \\ y_w = y_2 \sin \alpha_x \\ z_w = y_2 \cos \alpha_x \end{cases} \quad (6)$$

为了求出坐标系  $x_w y_w z_w$  下轴线上点的三维坐标值, 还需要得到  $\alpha_x$ , 即圆柱面轴线的方向向量由平面的法向量绕  $x$  轴旋转的角度。通过对圆棒进行标准安装, 保证  $\alpha_y \approx 0^\circ$ , 根据 (4) 式得到传感器光线的射出方向与运动方向的夹角为

$$\alpha_x \approx \phi = \arccos(a/b) \quad (7)$$

对于滑块基准面的测量系统, 建立相应的坐标系  $X_V Y_V Z_V$ ,  $X_V$  代表测量系统的运动方向, 必定与  $X_W$  方向存在夹角  $\theta$ , 且离原点位置越远影响越大, 因此需要对  $\theta$  角进行标定。

将一个垂直度精度高且两基准面平面度很好的矩形标准量块放置在待测位置, 使用测量架 1 和测量架 2 分别对其进行测量, 得到两组数据  $(x_a, y_a)$  和  $(x_b, y_b)$ 。分别对两组数据进行线性拟合, 得到标准量块两边的直线斜率  $k_1, k_2$ , 对该斜率通过反正切函数求得斜率对应的角度, 则可以对应得到  $X_V$  与  $X_W$  之间的夹角  $\theta$  的表达式:

$$\theta = 90^\circ + \arctan k_1 + \arctan k_2 \quad (8)$$

对于滑块基准面的测量系统, 其传感器光线并不是垂直照射在待测基准面表面。但是由于偏角很小, 且已经标定出  $X_V$  和  $X_W$  之间的夹角, 该误差不会累积产生, 因此不再另行标定。

在测量基准面的测量架 1 坐标系  $X_V Y_V Z_V$  中, 测量架 1 沿  $X_V$  轴方向移动,  $X_V$  方向的坐标由光栅尺读出;  $Y_V$  方向的距离由传感器示数决定;  $Z_V$  既可由安装时确定, 也可额外标定。通过该测量系统确定滑块侧

面基准与大面基准的平面表达式,借助  $X_V$  和  $X_W$  之间的夹角的标定,将滑块基准面测量所得的数据,转换至  $X_W Y_W Z_W$  坐标系中。通过最小二乘法拟合平面,求出侧面基准面的平面方程  $A_1 x + B_1 y + C_1 z + 1 = 0$  和大面基准面的平面方程  $A_2 x + B_2 y + C_2 z + 1 = 0$ 。而在倾斜测量坐标系  $X_W Y_W Z_W$  中,根据(6)式得到一系列形心坐标值  $(x_{ci}, y_{ci}, z_{ci})$ ,借助点到平面的距离公式,对轴线上的点到基准面的距离求平均值,即为内滚道轴线相对侧面基准和大面基准的位置  $a_1$  和  $b_1$ :

$$a_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|A_1 x_{ci} + B_1 y_{ci} + C_1 z_{ci} + 1|}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2}}, \quad (9)$$

$$b_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|A_2 x_{ci} + B_2 y_{ci} + C_2 z_{ci} + 1|}{\sqrt{A_2^2 + B_2^2 + C_2^2}}。 \quad (10)$$

### 3.5 内滚道轴线相对基准平行度测量

由 3.4 节可得到一系列形心坐标值  $(x_{ci}, y_{ci}, z_{ci})$ ,以及大面基准面的平面方程  $A_1 x + B_1 y + C_1 z + 1 = 0$  和侧面基准面的平面方程  $A_2 x + B_2 y + C_2 z + 1 = 0$ 。根据最小包容区域法的原则,“线对面”平行度误差表述为被测对象上的各测点  $(x_{ci}, y_{ci}, z_{ci})$  到基准平面距离的最大值、最小值之差<sup>[7]</sup>。则内滚道轴线相对侧面基准和大面基准的平行度  $\eta_{PA1}$  和  $\eta_{PA2}$  为

$$\eta_{PA1} = \max\left(\frac{|A_1 x_{ci} + B_1 y_{ci} + C_1 z_{ci} + 1|}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2}}\right) - \min\left(\frac{|A_1 x_{ci} + B_1 y_{ci} + C_1 z_{ci} + 1|}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2}}\right), \quad (11)$$

$$\eta_{PA2} = \max\left(\frac{|A_2 x_{ci} + B_2 y_{ci} + C_2 z_{ci} + 1|}{\sqrt{A_2^2 + B_2^2 + C_2^2}}\right) - \min\left(\frac{|A_2 x_{ci} + B_2 y_{ci} + C_2 z_{ci} + 1|}{\sqrt{A_2^2 + B_2^2 + C_2^2}}\right)。 \quad (12)$$

## 4 实验结果与分析

工程中将激光位移传感器倾斜安装,测量工件轮廓的方法暂无先例,因此另外设计专用工装,用于本次实验方案的验证。由于实验条件的限制,很难测量圆棒相对于基准的位置与平行度,但是可以进行半径测量及验证。如果测量结果满足实验预期,只要保证后续位置与平行度的算法无误,该方案便具备相应的可行性。

### 4.1 实验工装的设计

如图 6(a)所示,工装主要由主轴、V 形块、5 根标准圆棒、压块、传感器测量架等零件构成。主轴与 V 形块固连,由实验台的两个顶尖顶住主轴两端,固定安装在床身上。实验前通过改变顶尖处的旋转码盘,将主轴旋转,如图 6(b)所示,实现倾斜安装。

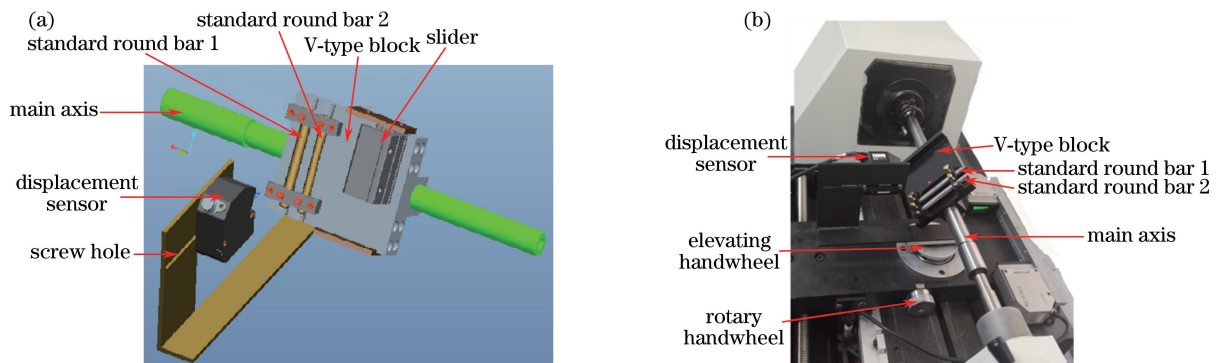


图 6 (a)工装装配图;(b)实验侧视图

Fig. 6 (a) Tooling assembly drawing; (b) side view of the test

V 形块上圆棒位置做成 V 型槽,保证定位精度,圆棒通过压块固定在 V 型块上。5 根圆棒的直径分别是 9.0,9.5,10.0,10.5,11.0 mm,方便多次交叉实验以证明算法的准确性。圆棒经过后续标定保证其高精度以获得有效的实验数据。实验对象本应该为标准半圆槽,但在工程中标准圆槽加工难度远超过外圆,因此直接采用外圆柱,以高精度圆柱为实验对象。同时实验结果由采集数据点拟合产生,因此理论上测量滑块内滚道或标准圆棒外轮廓,并没有差别。

### 4.2 测量系统的精度

运动平台采用大理石气浮平台,借助激光干涉仪测量气浮运动平台的行走跳动量,得到的垂直跳动量和水平跳动量如图 7 所示。

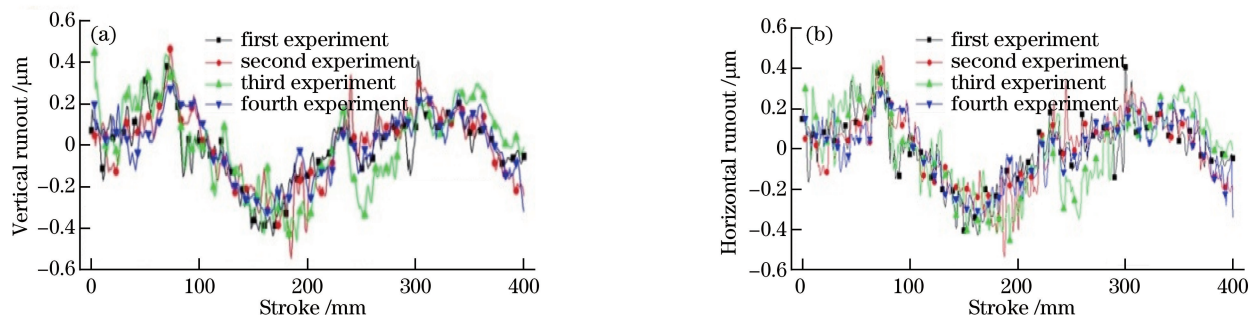


图 7 气浮平台跳动量测量结果。(a)垂直跳动量;(b)水平跳动量

Fig. 7 Results of runout of air flotation platform. (a) Vertical runout; (b) horizontal runout

测量得到的气浮运动平台水平跳动量为  $\pm 0.52 \mu\text{m}$ ,垂直跳动量为  $\pm 0.55 \mu\text{m}$ ,相对算法的精度要求  $5 \mu\text{m}$ ,气浮运动平台的行走跳动性能较好。

通过光栅尺采集横坐标数据,光栅尺的精度等级为  $\pm 0.5 \mu\text{m}$ ,也即任意  $1 \text{ m}$  距离内测量误差为  $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 。

通过激光位移传感器采集距离数据,采用 Keyence 的 LK-5000 系列,传感器传感器 5、6 为 LK-H050 感测头,线性精度为  $\pm 4 \mu\text{m}$ ,重复精度为  $0.025 \mu\text{m}$ 。

圆棒通过三坐标测量机进行标定,其直径的标定精度为  $2.0 \mu\text{m}$ ,圆柱度的标定精度为  $3.0 \mu\text{m}$ 。

### 4.3 实验数据的采集与处理

采用西门子数控系统控制气浮平台的运动,需要较多的点参与拟合以提高拟合精度,因此设置气浮平台以  $30 \text{ mm/min}$  匀速运动,安装在测量架上的传感器依次扫过两根圆棒。在工控机上利用 C++ 软件编写程序同时采集光栅尺与传感器的数值并保存。

根据聚类法,剔除明显的错误样本数据。将两根圆棒的数据区分并分类。将数据导入 Matlab 软件中,采用 3.3 节的算法进行计算,得到两根圆棒的安装偏角  $\beta_1$  和  $\beta_2$ ;将  $\beta_1$  角作为传感器安装偏角,计算得到第二根标准圆棒的半径误差值。

### 4.4 标准圆棒的交叉实验

取  $\beta$  参考值为  $0^\circ$  时,对待测的 4 根标准圆棒做交叉测量,每组实验测量 32 次,得到两根圆棒的安装偏角  $\beta_1$  和  $\beta_2$ ,并计算得到第二根圆棒的最大半径值  $R_{2\text{max}}$ ,最小半径值  $R_{2\text{min}}$ ,半径值的标准差  $\sigma$ ,以及测量结果与标定值的差值  $\Delta R$ ,如表 1 所示。

表 1 标准圆棒交叉实验的测量结果

Table 1 Measurement results of standard round bar cross test

$R_1/\text{mm}$	$R_2/\text{mm}$	$\beta_1/(\text{^\circ})$	$\beta_2/(\text{^\circ})$	$\Delta R_{2\text{max}}/\mu\text{m}$	$\Delta R_{2\text{min}}/\mu\text{m}$	$\sigma/\text{mm}$	$\Delta R/\mu\text{m}$
10.5	10	0.158	0.146	1.987	-1.991	1.940	-1.066
10	10.5	0.145	0.156	1.660	-1.435	1.314	-0.097
10.5	9	0.297	0.314	1.735	-1.624	1.894	-0.203
9	10.5	0.226	0.219	1.878	-4.685	1.833	-0.941
10.5	11	0.170	0.183	1.914	-1.782	1.647	-0.524
11	10.5	0.178	0.172	4.511	-0.471	1.431	1.331
10	11	0.346	0.169	3.000	-4.405	2.056	-0.468
11	10	0.211	0.224	-0.749	-3.169	0.620	-1.877
10	9	0.147	0.180	2.116	0.224	0.701	1.008
9	10	0.148	0.091	1.392	-1.130	0.960	0.634
11	9	0.163	0.170	1.456	-1.897	1.492	-0.588
9	11	0.200	0.212	0.990	-0.750	1.441	-1.446

分析表 1 可知,数据的稳定性主要与实验台运动的稳定性、标准圆棒的圆度与同轴度、运动速度、实验次数等因素有关。从实验结果来看,数据的稳定性尚可,数据的准确性在多次实验之后,最大的  $\Delta R$  平均偏差为  $1.877 \mu\text{m}$ 。由于这是半径的偏差,直径的测量精度为  $3.75 \mu\text{m}$ ,因此满足精度在  $5 \mu\text{m}$  以内的要求。同时这不是专用检测实验台,后续将根据该方案设计专用实验台,进一步提高测量结果的稳定性和准确性。

#### 4.5 传感器安装偏角 $\beta$ 的验证实验

根据 4.4 节实验的数据观察,圆棒直径为  $9 \text{ mm}$  和  $10 \text{ mm}$  的实验结果的稳定性和准确性都很好,因此选用这两根圆棒进行实验。通过实验台的旋转手轮,改变安装偏角  $\beta$  的参考值,观察安装偏角与参考值之间的偏差  $\Delta\beta_1$  和  $\Delta\beta_2$ ,并验证半径误差是否有明显变化。

分析表 2 可知,随着  $\beta$  角的变化,测量得到的  $\beta$  角也会随之变化, $\Delta\beta_1$  代表 $(\beta_1 - \beta)$ 的差, $\Delta\beta_2$  同理。因此可以看出, $\beta$  的变化并不会直接影响测量结果的稳定性和准确性,其变化很有可能是由于实验台本身的不稳定或者测量设备自带的误差而产生的。因此该结果表明当  $\beta$  变化时测量结果相对稳定,同时也验证了算法的正确性。

表 2 传感器安装偏角  $\beta$  验证实验的测量结果

Table 2 Measurement results of verification test of sensor installation angle  $\beta$

$\beta /(^{\circ})$	$\Delta\beta_1 /(^{\circ})$	$\Delta\beta_2 /(^{\circ})$	$\Delta R_{2\text{max}} / \mu\text{m}$	$\Delta R_{2\text{min}} / \mu\text{m}$	$\sigma / \mu\text{m}$	$\Delta R / \mu\text{m}$
0	0.148	0.131	1.392	-1.130	0.960	0.634
2	0.157	0.173	1.201	-2.064	1.394	-0.656
5	0.103	0.112	2.515	-2.925	1.621	-1.352
-3	0.168	0.156	0.087	-2.420	0.743	-1.374

#### 4.6 任意位姿的验证实验

本方案的优势之一在于待测圆柱物不需要考虑位姿,在任意摆放的情况下,只要保证测量过程中位置相对固定,即可得到精度范围内的尺寸。为了验证该理论成立,对之前固定在 V 型槽中的标准圆棒进行随意摆放。由于工装设计的限制,其  $\alpha_x$  很接近,但可以改变其  $\alpha_y$  与  $\alpha_z$ ,尽量保证其位姿没有相关性。

如图 8 中所示,通过强磁吸附铁石将两根标准圆棒吸附在光滑区域,且任意摆放位姿。当  $\beta$  参考值为  $0^{\circ}$  时,测量其安装偏角  $\beta_1$  和  $\beta_2$  与半径误差值  $\Delta R$ 。共进行 3 组实验,每组实验将相同的标准圆棒换个位姿摆放。同时将标准圆棒固定在 V 型槽中的实验数据作为第 0 组实验( $n=0$ ),对比任意位姿的实验结果,如表 3 所示。

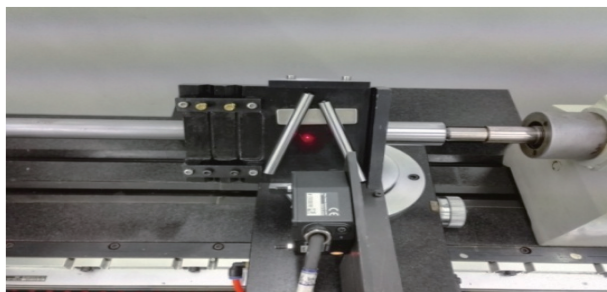


图 8 以任意位姿摆放的标准圆棒测量示意图

Fig. 8 Schematic of measuring standard round bar with arbitrary position

表 3 任意位姿验证实验的测量结果

Table 3 Measurement results of arbitrary pose verification tests

$n$	$\beta_1 /(^{\circ})$	$\beta_2 /(^{\circ})$	$\Delta R_{2\text{max}} / \mu\text{m}$	$\Delta R_{2\text{min}} / \mu\text{m}$	$\sigma / \mu\text{m}$	$\Delta R / \mu\text{m}$
0	0.148	0.131	1.392	-1.130	0.960	0.634
1	0.156	0.140	1.275	-1.278	1.127	0.556
2	0.141	0.152	1.547	-0.958	0.913	0.127
3	0.139	0.148	1.576	-0.965	0.632	0.392

分析表 3 可知,对于任意位姿摆放的标准圆棒,其测量结果与固定在 V 型槽中的圆棒测量结果无明显差异,证明该圆棒以任意位姿进行摆放,不影响测量结果。



### 4.7 滑块的实验

取某企业加工的标准滑块,先对其通过三维坐标测量机进行标定,再借助实验台进行实际测量。采用多个强磁吸铁石将滑块与 V 板紧密吸附,V 板被顶尖固定,与床身相连接,因此气浮平台的运动产生的振动对滑块几乎没有影响。

图 9(a)中传感器的偏角  $\beta$  以参考值  $0^\circ$  照射在滚道轮廓表面,基于三角反射测量原理的激光位移传感器,在测量滑块内滚道过程中,可能存在丢点的情况,这主要发生在滚道轮廓与平面的过渡处。如图 9(b)所示,在轮廓两端,反射光线不易被接收区域捕捉。如图 9(c)所示,旋转  $\beta$  角可以使激光入射方向同时旋转,很好地弥补数据点丢失的问题。以左端边缘处丢点为例,如图 10 将  $\beta$  角逐渐增加,可以弥补左侧过渡处缺省的数据。

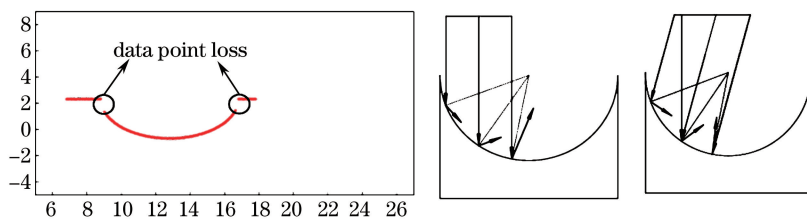


图 9 滑块测量的轮廓图像。(a) 丢点情况;(b)  $\beta=0^\circ$  时;(c)  $\beta>0^\circ$  时

Fig. 9 Measured contour image of slider. (a) Missing point; (b) when  $\beta=0^\circ$ ; (c) when  $\beta>0^\circ$

如图 10 所示,旋转传感器偏角  $\beta$ ,可以解决激光传感器测量孔径时两端数据丢点的问题。在实际测量时,选择正负  $\beta$  分别测量,并将数据进行有效叠加,这种方式可以有效地将滑块内滚道所有轮廓数据点采集完整<sup>[8]</sup>。



图 10 旋转  $\beta$  角时滑块的轮廓图像。(a)  $\beta=0^\circ$ ;(b)  $\beta=2^\circ$ ;(c)  $\beta=5^\circ$

Fig. 10 Slider contour image when rotating  $\beta$  angle. (a)  $\beta=0^\circ$ ; (b)  $\beta=2^\circ$ ; (c)  $\beta=5^\circ$

分析表 4 可知,滑块与圆棒的测量结果没有太多差异。同时旋转  $\beta$  角对测量结果没有太大影响,但是通过旋转  $\beta$  角,可以较为完整地展示滑块内滚道的轮廓形状,同时对滑块整个滚道进行完整测量。

表 4 旋转  $\beta$  角时滑块的测量结果

Table 4 Measurement results of slider when rotating  $\beta$  angle

$\beta / (^\circ)$	$\Delta\beta_1 / (^\circ)$	$\Delta\beta_2 / (^\circ)$	$\Delta R_{2\max} / \mu\text{m}$	$\Delta R_{2\min} / \mu\text{m}$	$\sigma / \mu\text{m}$	$\Delta R / \mu\text{m}$
0	0.189	0.169	1.884	0.378	1.044	1.042
2	0.158	0.182	1.235	-0.365	0.527	0.579
5	0.152	0.179	1.396	-0.258	0.752	0.774

### 4.8 误差分析

根据上述实验分析可知,该方案在测量结果的稳定性和准确性方面,还有改进的空间。除了实验台的精度和测量设备自身的误差外,在测量方法、数据采集和算法等方面,也存在一定的误差来源。

对于三角反射测量原理的激光位移传感器,标准的测量方法应是感测头垂直照射待测平面,而目前采取的方案为倾斜照射待测曲面。三角测量原理是通过光线的反射计算距离,因此当光线照射在曲面时<sup>[9]</sup>,光斑已不再是标准的圆形,会产生相应的误差<sup>[10-11]</sup>,同时倾斜测量也会产生相应的误差。

对于圆或椭圆的测量,理论上应以圆心或形心为轴,测量系统绕该轴旋转测量,在这种测量方式下采集的数据相对均匀。但由于实验条件的限制,采用的是直线测量,该测量方法采集的数据,存在两边数据量较少、中间数据量较多的问题。但是在拟合过程中,所有的点以相同权重参与拟合,因此会导致被测物中间对测量结果的影响远大于两边,该误差必须予以考虑。

椭圆弧的拟合算法有很多种,除了最常用的最小二乘法,还有 Hough 变换法、最小子集等方法。而其中最小二乘法简单易实现,但易受错误样本的影响,因此需要对错误样本进行剔除,并对最小二乘拟合方法进行改进与优化<sup>[12]</sup>。

## 5 结 论

针对现代工业检测精度高、速度快的要求,根据倾斜测量滑块内滚道型面精度的方案,通过坐标系之间的转换以及椭圆拟合,测量滑块内滚道相对基准的平行度、位置以及滚道半径。同时设计相应的工装,借助高精度的实验台和标准圆棒进行实验验证。实验结果表明,标准圆棒直径的测量精度为  $3.75\ \mu\text{m}$ ,满足  $5\ \mu\text{m}$  的测量精度要求,且其稳定性也有保证。与现有测量方式相比,该方案在速度、精度、直观性上都有绝对的优势,具有一定的推广性,可用于狭窄空间内精度速度要求较高的孔径或轴径测量。但本方案算法还有部分误差来源,还需后续结合现有算法进行改进,借助实验进行验证;同时还需根据方案设计相关实验台装置,实现滑块的快速准确测量。

## 参 考 文 献

- [1] Qu Z, Ye Z. Present situation and development of error calibration for linear motion guide[C]. IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology, 2010, 3: 29-33.
- [2] 李桂明. 测量滚动直线导轨副滑块的中径量具[J]. 机械制造, 1994(9): 21-22.
- [3] Ye Feiyuan, Zhang Yanhong, Yang Xuanzhao. Research and development of precision measuring instrument for the slider of linear rolling guideway[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2016(5): 109-111.  
叶飞原, 张艳红, 杨炫召. 滚动直线导轨副滑块精度检测仪的研制[J]. 制造技术与机床, 2016(5): 109-111.
- [4] Du Kun, Ou Yi, Feng Hutian, *et al.* Measurement method and scheme verification for profile accuracy of the slider of linear rolling guide[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(21): 238-247.  
杜坤, 欧屹, 冯虎田, 等. 滚动直线导轨副滑块内滚道型面精度检测方法 with 方案验证[J]. 振动与冲击, 2017, 36(21): 238-247.
- [5] Yang Xingqiang. The intersections of cylinder, circular cone with arbitrary plane in 3D space[J]. Journal of System Simulation, 2001(s2): 243-246.  
杨兴强. 三维空间中圆锥、圆柱和平面交线的绘制[J]. 系统仿真学报, 2001(s2): 243-246.
- [6] Wang Xiaolin, Xiong Xinhai, Zhang Gaofeng. The method of ellipse contour extraction based on least-squares and elliptic roundness error[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2008, 27(3): 294-298.  
王小林, 熊新海, 张高峰. 基于椭圆最小二乘法和圆度轮廓误差评定的椭圆提取方法[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2008, 27(3): 294-298.
- [7] Lin Xiang, You Guirong, Jiang Suyong, *et al.* Research and development of the evaluation flow for high-precision space parallel error[J]. Journal of Guiyang College (Natural Sciences), 2011, 6(3): 25-28.  
林翔, 游贵荣, 江速勇, 等. 空间平行度误差高精度评定程序研发[J]. 贵阳学院学报(自然科学版), 2011, 6(3): 25-28.
- [8] Liu Hengbiao, Liu Chenglin, Ge Jianmin. Laser dual-triangulation for groove profile[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(s1): s112006.  
刘恒彪, 刘成林, 葛剑敏. 沟槽轮廓的激光双三角测量[J]. 光学学报, 2013, 33(s1): s112006.
- [9] Li Bing, Sun Bin, Chen Lei, *et al.* Application of laser displacement sensor to free-form surface measurement[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(7): 1939-1947.  
李兵, 孙彬, 陈磊, 等. 激光位移传感器在自由曲面测量中的应用[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 1939-1947.
- [10] Yang Yaoquan, Shi Ren, Yu Xining, *et al.* An algorithm to raise the locating precision of laser spot center based on Hough transform[J]. Acta Optica Sinica, 1999, 19(12): 1655-1660.  
杨耀权, 施仁, 于希宁, 等. 用 Hough 变换提高激光光斑中心定位精度的算法[J]. 光学学报, 1999, 19(12): 1655-1660.
- [11] Ding Xiaokun, Liu Tiegeng, Song Dianyou. Impact of accuracy of laser spot quality in laser triangulation long-term continuous measuring based on PSD[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0208006.  
丁小昆, 刘铁根, 宋殿友. 激光光斑质量对基于 PSD 的激光三角法长时间连续测量精度的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0208006.
- [12] Wang Dan, Liao Yanbiao, Zhang Min. Analysis of precisions of parameters calculated by ellipse fitting in double beam interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0312002.  
王丹, 廖延彪, 张敏. 双光束干涉仪中椭圆拟合估算的参数精度研究[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0312002.