

# 基于激光位移传感器的面角度测量技术研究\*

彭希锋, 陈爽, 李海星, 熊朝晖

(中国工程物理研究院计量测试中心 绵阳 621200)

**摘要:**针对面角度现场测试需求,利用激光位移传感器的漫反射测量特性,搭建了面角度非接触测量装置,提出了一种结合三坐标测量机和位置敏感探测器对激光位移传感器进行空间坐标化标定的方法,从而构建出精确的面角度测量模型;采用蒙特卡洛法对面角度非接触测量装置的不确定度进行评定,在 $\pm 25^\circ$ 测量范围内其结果为 $U = 0.044^\circ \sim 0.046^\circ (k = 2)$ ;通过性能验证试验、重复性试验和稳定性试验对装置的性能指标进行考核,在 $\pm 25^\circ$ 测量范围内其绝对测量示值误差不超过 $0.036^\circ$ ,重复性不超过 $0.004^\circ$ ,稳定性不超过 $0.021^\circ$ ;实验结果表明该基于激光位移传感器的面角度非接触测量装置准确可靠,具备开展面角度现场测试应用的前景。

**关键词:**面角度;激光位移传感器;非接触测量

中图分类号: TH74 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4020

## Study on the plane angle measurement technology based on laser displacement sensors

Peng Xifeng, Chen Shuang, Li Haixing, Xiong Zhaohui

(Metrology and Testing Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621200, China)

**Abstract:** Aiming at the plane angle in-site measurement requirement, a non-contact measuring device for plane angle is developed based on the diffuse reflection measurement features of the laser displacement sensors. The spatial coordinate calibration method of the laser displacement sensors are proposed that combines the coordinate measuring machine and position sensitive detector, an accurate measurement model for plane angle is constructed. The Monte Carlo method is used to evaluate the uncertainty of the plane angle non-contact measurement device, and the result is  $U = 0.044^\circ \sim 0.046^\circ (k = 2)$  for the angle measurement range of  $\pm 25^\circ$ . The performance verification test, repeatability test and stability test were performed to examine the specifications of the non-contact measurement device. The results show that the absolute indication error, repeatability and stability of the device are less than  $0.036^\circ$ ,  $0.004^\circ$  and  $0.021^\circ$  respectively in the measurement range of  $\pm 25^\circ$ . The test results demonstrate that the non-contact measurement device for plane angle based on laser displacement sensors is accurate, reliable and has the application prospect for the in-site measurement of plane angle.

**Keywords:** plane angle; laser displacement sensor; non-contact measurement

## 0 引言

面角度测量是角度测量中最常见的形式之一,然而圆光栅、自准直仪、水平仪、倾角传感器等传统的面角度测量方式具有很多的局限性。如圆光栅要求必须安装在匹配的机械旋转轴上<sup>[1]</sup>;自准直仪和水平仪要求被测面为水平或垂直状态且通常仅限于小角度测量<sup>[2,3]</sup>;倾角传

感器要求安装时需将测量方向与旋转方向相同方可获得精确的测量值<sup>[4]</sup>。随着生产效率的提高,在测试现场对角度执行机构进行原位测量愈发成为一种趋势<sup>[5]</sup>,现场测试工况的复杂性对面角度测量技术提出了挑战。

面角度非接触测量成为了解决角度现场测量需求最有潜力的技术之一。目前,国内外对面角度的非接触测量技术研究较多<sup>[6-15]</sup>,其中具有较好应用前景的技术主要有激光非接触测角技术和基于视觉测量的测角技术。

基于视觉测量的测角技术测量原理主要是通过双目或多目视觉系统采集并重建出被测物体表面特征点的三维空间坐标,然后由特征点坐标参数计算相应的角度变化量<sup>[6,8,10,12,14]</sup>。该类方法具有测量范围大、使用灵活等优点。但是,视觉系统在使用中视场容易受遮挡;通过图像提取特征点重建物体表面特征时容易丢失信息,引入额外的测量误差;而且视觉测量技术测量准确度低是目前普遍存在的问题,因此,该类技术仍有不少局限性待解决。在激光非接触测角技术上,张辰旸<sup>[11]</sup>采用激光发生装置和四象限探测器开发了激光动态目标跟踪测角装置,可实现角度的高准确度测量,但该装置要求反射面必须具备镜面反射能力,入射光路要求与反射面垂直,且仅限于小角度测量;Sun J. H. 等人<sup>[15]</sup>提出了利用激光位移传感器的漫反射特性进行角度测量的方法,提高了激光非接触测角技术的通用性,但该方法采用摄像机视觉技术对测量模型进行标定,角度测量准确性较差且要求反射面面积大,尚无法满足实际的现场应用需求。

本文针对面角度现场测试需求,利用激光位移传感器的漫反射测量特性,搭建面角度非接触测量装置,提出一种结合三坐标测量机和位置敏感探测器对激光位移传感器进行空间坐标化标定方法,构建出精确的面角度测量模型;采用蒙特卡洛法对面角度非接触测量装置的不确定度进行评定,然后分别通过性能验证试验、重复性试验和稳定性试验对装置的性能指标进行考核。结果显示,该基于激光位移传感器的面角度非接触测量装置准确可靠,具备开展面角度现场测量应用的前景。

## 1 面角度的测量模型

### 1.1 激光位移传感器的位移测量原理

激光位移传感器的位移测量原理如图1所示,激光由激光器发出后,经透镜聚焦照射在测量点 $P$ 上,漫反射光线经过感光透镜聚焦照射在一维感光元件 $P'$ 上,两者之间通过传感器标定的几何比例关系可以得到相对于光轴参考点 $O_L$ 的一维位移值 $\delta$ <sup>[15]</sup>。

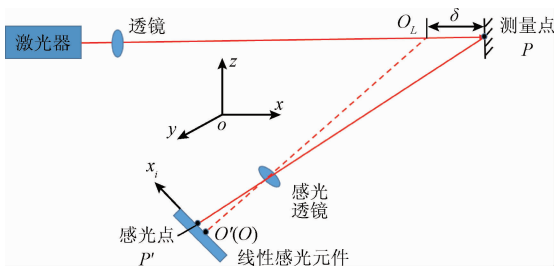


图1 基于激光位移传感器的位移测量原理

Fig.1 The displacement measurement principle based on laser displacement sensors

### 1.2 基于激光位移传感器的面角度非接触测量模型

基于激光位移传感器的面角度非接触测量原理如图2所示,激光位移传感器产生的三束不同激光入射到起始平面,所形成的3个激光光斑点分别为 $A_1$ 、 $B_1$ 、 $C_1$ 。当平面绕旋转轴旋转一定的角度后,3个光斑点沿着入射光轴平移,并在新的平面位置形成新的激光光斑点 $A_2$ 、 $B_2$ 、 $C_2$ 。因此,平面旋转的角度即为三角形 $\Delta A_1 B_1 C_1$ 与三角形 $\Delta A_2 B_2 C_2$ 的法向量夹角:

$$\theta = \arccos \frac{\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_2}{|\mathbf{n}_1| |\mathbf{n}_2|} \quad (1)$$

式中: $\theta$ 为平面的旋转角, $\mathbf{n}_1$ 为起始三角形 $\Delta A_1 B_1 C_1$ 的法向量, $\mathbf{n}_2$ 为旋转后三角形 $\Delta A_2 B_2 C_2$ 的法向量。

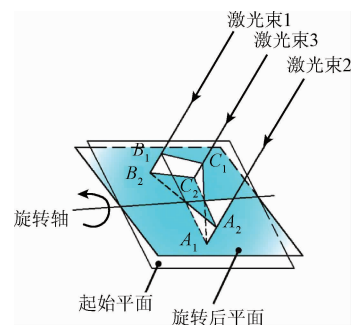


图2 基于激光位移传感器的面角度非接触测量原理

Fig.2 The non-contact measurement principle for plane angle based on laser displacement sensors

从图2可以看出,要实现面角度的测量,需要获得激光光斑点的空间坐标,从而通过3个激光光斑点的坐标确定平面法向量。对于激光位移传感器而言,其基于三角漫反射的技术原理使其测量结果仅能获得一维的位移值,因此,为了实现式(1)的测量模型,需要将激光位移传感器的一维位移转换为空间三维坐标,即位移空间坐标化,然后才能计算出旋转前后平面的法向量。

## 2 激光位移传感器的空间坐标化标定原理

### 2.1 三坐标测量机的坐标测量原理

在进行激光位移传感器的空间坐标化时需要使用到三坐标测量机(coordinate measuring machine, CMM)和位置敏感探测传感器(position sensitive detector, PSD)作为硬件为激光位移传感器光轴提供坐标映射。

CMM的坐标测量机构如图3所示, $X$ 导轨、 $Y$ 导轨和 $Z$ 导轨构成固定直角坐标系 $O-XYZ$ ,每个导轨上安装有能够提供精确位移值的光栅尺,综合3个导轨光栅尺的位移值即可获得测头的空间坐标值。

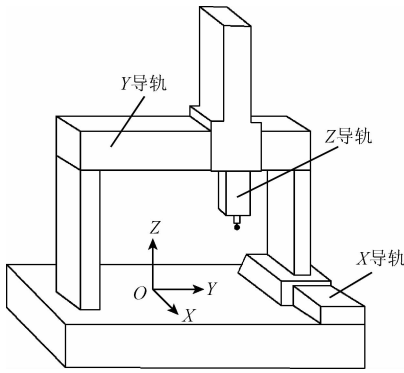


图 3 三坐标测量机结构

Fig. 3 Structure of coordinate measuring machine

### 2.2 位置敏感探测器的坐标测量原理

PSD 是基于横向光电效应工作的光电器件,当其表面被光斑照射时,PSD 的输出电极会随光斑在 PSD 表面位置变化输出不同大小电流,其灵敏度非常高,用来探测光斑二维坐标位置<sup>[17]</sup>。如图 4 所示,以二维枕形 PSD 为例,当激光照射在 PSD 光敏面上时,PSD 探测器 4 个输出电极会分别不同的电流值,此时光斑的 PSD 上的二维位置可分别用式(2)、(3)计算出来<sup>[18]</sup>。

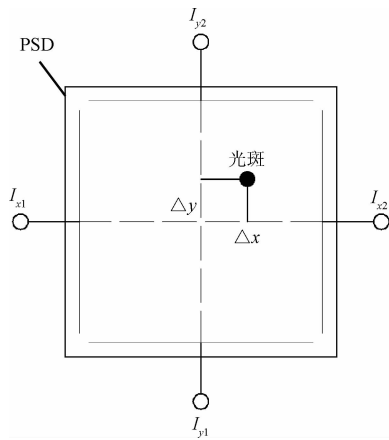


图 4 PSD 坐标测量原理

Fig. 4 The coordinate measurement principle based on position sensitive detector

$$\Delta x = \frac{(I_{x2} + I_{y1}) - (I_{x1} + I_{y2})}{I_{x1} + I_{x2} + I_{y1} + I_{y2}} \times \frac{L}{2} \quad (2)$$

$$\Delta y = \frac{(I_{x2} + I_{y2}) - (I_{x1} + I_{y1})}{I_{x1} + I_{x2} + I_{y1} + I_{y2}} \times \frac{L}{2} \quad (3)$$

式中:  $I_{x1}$ 、 $I_{x2}$  分别为光斑照射在 PSD 表面时,PSD 横向输出电极两端的输出电流值;  $I_{y1}$ 、 $I_{y2}$  分别为光斑照射在 PSD 表面时,PSD 纵向输出电极两端的输出电流值,  $L$  为正方形 PSD 的边长。

### 2.3 激光位移传感器空间坐标化标定方法

激光位移传感器空间坐标化标定方法如图 5 所示,将 PSD 安装在 CMM 的测头上,  $O$ - $XYZ$  为 CMM 的直角坐标系,让激光 1 在截面 1 的位置照射在 PSD 表面上的  $A$  点,记录当前 CMM 测量机测头的三维坐标位置,即为激光 1 在截面 1 的三维坐标点。然后分别平移坐标测量机,让激光 2 和激光 3 分别照射在 PSD 表面上的  $A$  点,记录相应位置 CMM 测量机测头的三维坐标作为两束激光在截面 1 上的空间坐标点。重复上述操作,获得激光 1、激光 2、激光 3 在其他截面上的坐标点集,通过这些坐标点集可以根据空间最小二乘直线拟合方法<sup>[19]</sup>计算出各激光位移传感器光轴的空间直线方程。

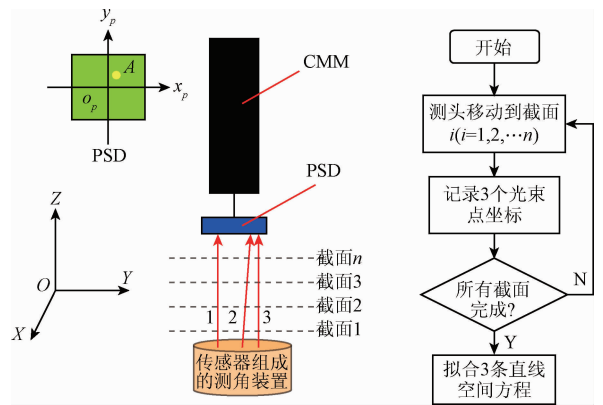


图 5 激光位移传感器空间坐标化标定原理

Fig. 5 The spatial coordinate calibration principle for laser displacement sensors

### 3 面角度测量模型的求解

假设通过图 5 方法拟合出来的激光光轴方程为:

$$\begin{cases} x = a + dt \\ y = b + et \\ z = c + ft \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$ 、 $f$  分别为激光光束空间直线方程的系数,  $t$  为光束空间直线方程的参比变量。

将式(4)改为向量形式:

$$\mathbf{X} = \mathbf{A} + \mathbf{B}t \quad (5)$$

$$\text{式中: } \mathbf{X} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} d \\ e \\ f \end{bmatrix}.$$

所以图 5 中的 3 条空间直线方程为:

$$\begin{cases} \mathbf{X}^1 = \mathbf{A}_1 + \mathbf{B}_1 t^1 \\ \mathbf{X}^2 = \mathbf{A}_2 + \mathbf{B}_2 t^2 \\ \mathbf{X}^3 = \mathbf{A}_3 + \mathbf{B}_3 t^3 \end{cases} \quad (6)$$

从式(6)可以看出,各光束的实时空间坐标向量  $\mathbf{X}_i^1$ 、 $\mathbf{X}_i^2$ 、 $\mathbf{X}_i^3$  由参比变量  $t_i^1$ 、 $t_i^2$ 、 $t_i^3$  ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ) 确定。参比变量  $t$  在不同时刻的值可由一维位移值  $\delta$  确定。在图1中,假设测量点从参考点  $O_L$  移动到点  $P$ ,位移值为  $\delta$ ,由式(5)的空间直线方程可得:

$$(\mathbf{X}_p - \mathbf{X}_{o_L})^T (\mathbf{X}_p - \mathbf{X}_{o_L}) = \mathbf{B}_\Delta^T \mathbf{B}_\Delta (t_p - t_{o_L})^2 = \delta^2 \quad (7)$$

其中,  $\mathbf{B}_\Delta = [d \ e \ f]^T$ , 从而有:

$$(t_p - t_{o_L}) = \delta / (\mathbf{B}_\Delta^T \mathbf{B}_\Delta)^{1/2} \quad (8)$$

式中:  $O_L$  点为激光位移传感器的位移参考点,在该点的位移值为0,通过式(4)在拟合空间直线方程后将  $O_L$  点的空间坐标回代可获得  $t_{o_L}$ 。将各光束直线在各时刻的位移  $\delta$  代入式(7)可获得参比变量  $t_p$ ,然后再代入式(6)可得到对应时刻的空间坐标向量。

仍以图5为例,面  $\square B_1 A_1 C_1$  的法向量可以通过光束直线上  $B_1$ 、 $A_1$ 、 $C_1$  3点的空间坐标代入空间平面方程式(9)中求出。

$$px + qy + kz + 1 = 0 \quad (9)$$

面  $\square B_1 A_1 C_1$  的法向量  $\mathbf{n}_1$  可表示为:

$$\mathbf{n}_1 = \begin{bmatrix} p_1 \\ q_1 \\ k_1 \end{bmatrix} = ([\mathbf{X}_{B_1}, \mathbf{X}_{A_1}, \mathbf{X}_{C_1}]^T)^{-1} \mathbf{E} \quad (10)$$

$$\text{式中: } \mathbf{X}_{B_1} = \begin{bmatrix} x_{B_1} \\ y_{B_1} \\ z_{B_1} \end{bmatrix}, \mathbf{X}_{A_1} = \begin{bmatrix} x_{A_1} \\ y_{A_1} \\ z_{A_1} \end{bmatrix}, \mathbf{X}_{C_1} = \begin{bmatrix} x_{C_1} \\ y_{C_1} \\ z_{C_1} \end{bmatrix}, \mathbf{E} = \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix}。$$

同理,可得面  $\square B_2 A_2 C_2$  的法向量  $\mathbf{n}_2$ :

$$\mathbf{n}_2 = \begin{bmatrix} p_2 \\ q_2 \\ k_2 \end{bmatrix} = ([\mathbf{X}_{B_2}, \mathbf{X}_{A_2}, \mathbf{X}_{C_2}]^T)^{-1} \mathbf{E} \quad (11)$$

$$\text{式中: } \mathbf{X}_{B_2} = \begin{bmatrix} x_{B_2} \\ y_{B_2} \\ z_{B_2} \end{bmatrix}, \mathbf{X}_{A_2} = \begin{bmatrix} x_{A_2} \\ y_{A_2} \\ z_{A_2} \end{bmatrix}, \mathbf{X}_{C_2} = \begin{bmatrix} x_{C_2} \\ y_{C_2} \\ z_{C_2} \end{bmatrix}, \mathbf{E} =$$

$$\begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix}。$$

所以由式(1)可得测量角度为:

$$\theta = \arccos \left[ \frac{p_1 p_2 + q_1 q_2 + k_1 k_2}{\sqrt{(p_1^2 + q_1^2 + k_1^2)(p_2^2 + q_2^2 + k_2^2)}} \right] \quad (12)$$

由式(4)~(12)可以发现构建的角度测量模型与  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$ 、 $f$ 、 $t_{o_L}$  这些参数有关。因此,此处定义各激光器坐标化参数矩阵  $\mathbf{g} = [a, b, c, d, e, f, t_{o_L}]$ , 则可将测量角度的模型可写成:

$$\theta = f(\mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2, \mathbf{g}_3, \delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta'_1, \delta'_2, \delta'_3) \quad (13)$$

式中:  $\mathbf{g}_1$ 、 $\mathbf{g}_2$ 、 $\mathbf{g}_3$  分别为激光器1、激光器2、激光器3的坐标化参数矩阵,  $\delta_1$ 、 $\delta_2$ 、 $\delta_3$  分别为激光器1、激光器2、激光器3在起始平面相对于参考点的位移值,  $\delta'_1$ 、 $\delta'_2$ 、 $\delta'_3$  分别为激光器1、激光器2、激光器3在旋转后的平面相对于参考点的位移值。

## 4 实验研究

### 4.1 激光位移传感器空间坐标化标定实验

图5所示的标定系统主要由三坐标测量机、PSD传感器组成,标定现场如图6所示。本实验使用的三坐标测量机型号为PMMC-700P(品牌:Leitz;空间坐标测量误差:  $\pm(0.6 + L/600)$   $\mu\text{m}$ ),空间位置坐标重复性不超过  $0.4 \mu\text{m}$ 。使用的PSD型号为DRX-2DPSD-D01(品牌:深圳达瑞鑫),其光斑中心探测重复性不超过  $5 \mu\text{m}$ 。角度测量装置测头主要由3个型号为LK-H082的激光位移传感器(品牌:Keyence)组成,其位移测量线性度为  $\pm 0.02\%$  F.S(full scale,表示满量程)。

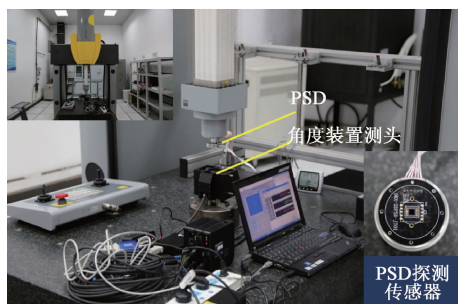


图6 激光位移传感器坐标化标定现场

Fig. 6 Photo of the coordinate calibration for laser displacement sensors

标定的方法如图5所示,本实验标定的截面数共37,将每个标定截面获得的空间坐标点进行空间直线最小二乘拟合,可以获得角度装置测头上3个激光位移传感器的坐标化参数矩阵  $\mathbf{g}_1$ 、 $\mathbf{g}_2$ 、 $\mathbf{g}_3$ 。为了表征坐标化标定的质量,分别计算各标定坐标点至拟合的空间最小二乘直线距离,取所有计算距离的最大值作为空间直线性误差。鉴于光传播的直线性,可以认为空间直线性误差越小,空间坐标化标定质量越高。

激光位移传感器空间坐标化标定实验的结果如表1所示,从空间最小二乘直线拟合结果来看,3个激光位移标定偏离拟合直线的最大距离分别为  $0.0040$ 、 $0.0038$ 、 $0.0031$  mm。

表 1 激光位移传感器空间坐标化标定实验结果

Table 1 Experiment results of the spatial coordinate calibration for laser displacement sensors

传感器编号	坐标化参数矩阵	线性误差/mm
LDS1	$g_1 = [544.679\ 7, 600.566\ 3, 0, 0.002\ 1, 0.002\ 6, 1, 166.100\ 1]$	0.004 0
LDS2	$g_2 = [499.385\ 0, 630.994\ 2, 0, 0.004\ 2, 0.001\ 1, 1, 166.233\ 0]$	0.003 8
LDS3	$g_3 = [471.491\ 2, 601.746\ 2, 0, 0.003\ 3, 0.002\ 9, 1, 166.229\ 3]$	0.003 1

4.2 面角度非接触测量不确定度分析

测量不确定度已经成为表征测量能力和测量仪器性能的重要参数之一,此处按照国家计量技术规范对开发的基于激光位移传感器的面角度非接触测量装置进行不确定分析,以分析结果作为表征面角度非接触测量方法的性能指标。

由式(4)~(13)可知,在角度  $\theta$  的测量不确定度影响因素中,与测量结果有关的因素主要有空间坐标标定点的测量误差  $\sigma_1$ 、参考点参比变量  $t_o$  的标定误差  $\sigma_2$ 、激光位移传感器位移误差  $\sigma_3$ 。因此,面角度非接触测量装置的不确定度来源也主要为上述参数。由于测量模型明显地非线性,无法使用传统的 GUM 方法来进行不确定度的评定<sup>[20-21]</sup>。此处依据 JJF 1059.2-2012《用蒙特卡洛法评定测量不确定度》<sup>[20]</sup>的指导来对面角度非接触测量装置不确定进行分析。分析时,蒙特卡洛随机抽样

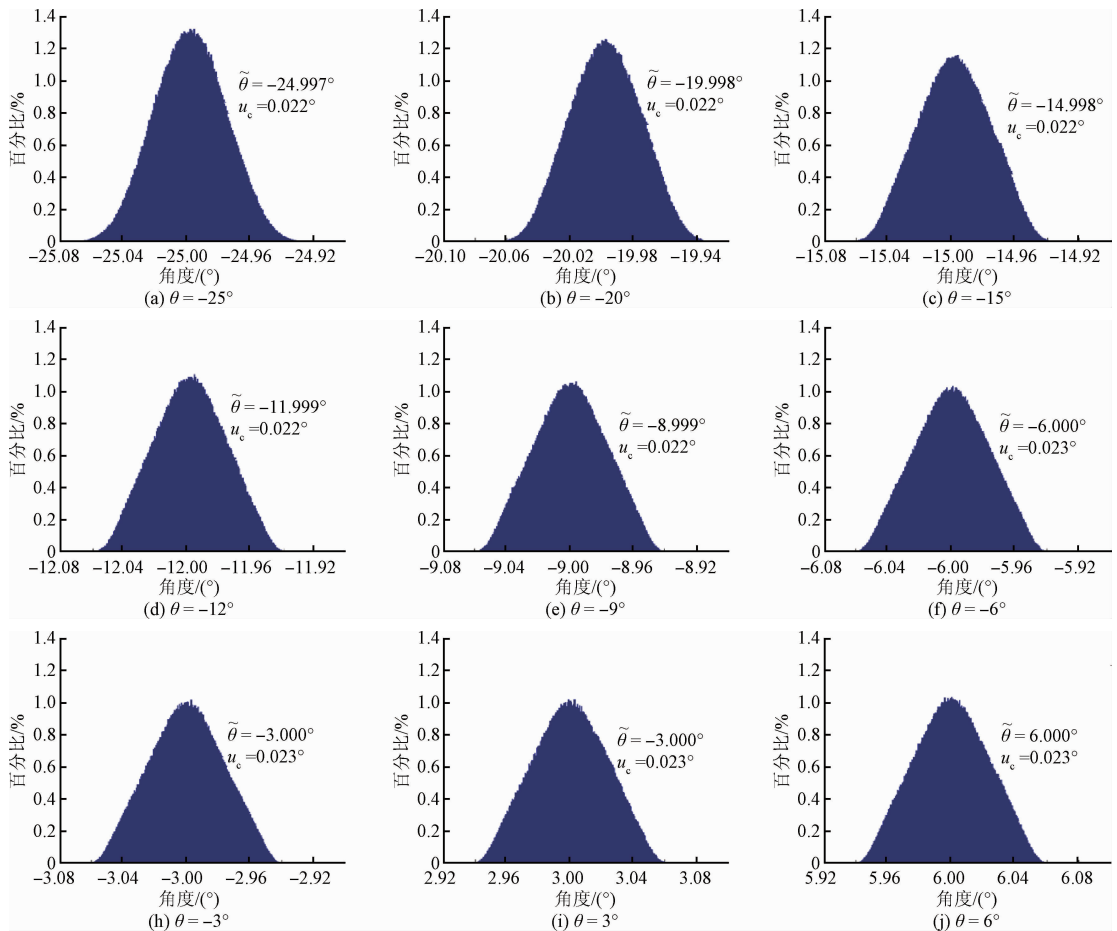
的次数  $M = 1 \times 10^6$  次,根据图 6 各仪器的组成和指标分析,随机抽样时各面角度非接触测量装置不确定度来源的误差分布如表 2 所示。

表 2 各不确定度来源的误差分布

Table 2 Error distribution of various uncertainty sources

不确定度来源	误差分布
$\sigma_1$	正态分布, $N(0, 0.005^2)$
$\sigma_2$	均匀分布, $R(-0.066, +0.066)$
$\sigma_3$	均匀分布, $R(-0.023, +0.023)$

不确定度分析在  $-25^\circ \sim 25^\circ$  进行,各不确定度来源的随机抽样在测量模型式(13)上的传播计算在软件 MATLAB 7.8.0 上进行,各标称角度值计算分析的结果如图 7 所示。



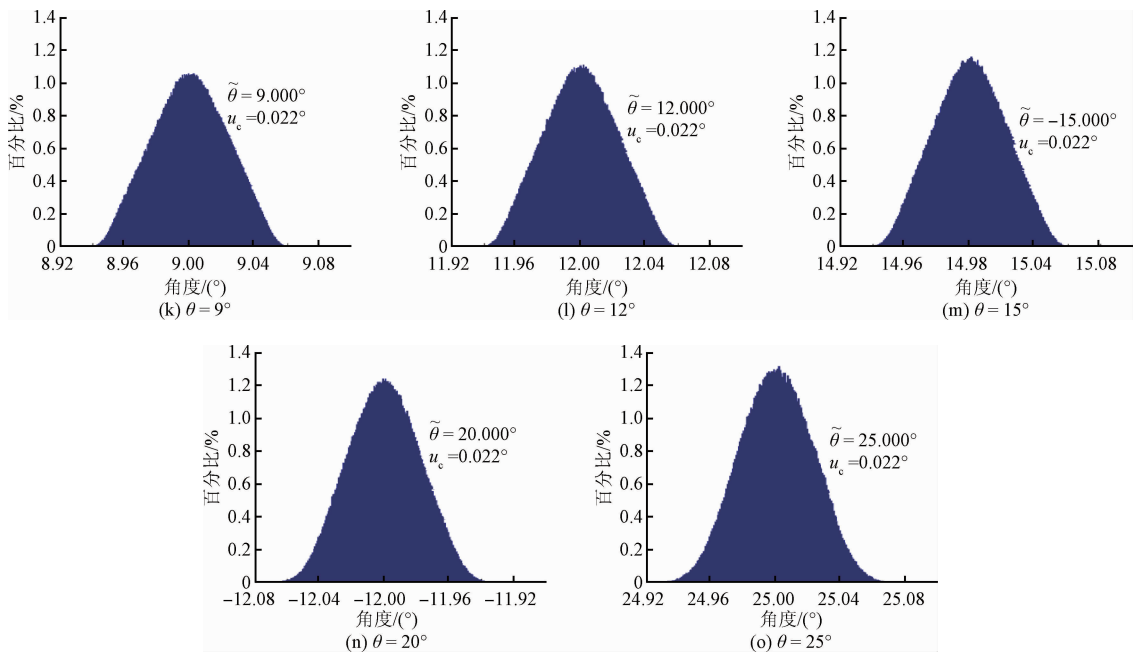


图7 不确定度分析结果

Fig. 7 Uncertainty analysis results

从图7可以看出,本文的面角度非接触测量方法在 $-25^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 测量结果的蒙特卡洛估计值 $\tilde{\theta}$ 与标称值 $\theta$ 基本一致,测量结果的离散特性服从正态分布,测量结果的标准不确定度 $u_c$ 为 $0.022^{\circ} \sim 0.023^{\circ}$ ,取包含因子 $k=2$ ,则95%置信区间内的测量装置扩展不确定度 $U=0.044^{\circ} \sim 0.046^{\circ} (k=2)$ 。

#### 4.3 不同反射物的面角度测量性能验证实验

为了确保图7中的性能指标准确可靠,此处依据GJB 2749A-2009《军事计量测量标准建立与保持通用要求》<sup>[22]</sup>,采用传递比较法进行空间角度计量检测装置的性能验证,其通过判据为:

$$|y - y_0| \leq \sqrt{U^2 + U_0^2} \quad (14)$$

式中: $y$ 为被验证测量标准给出的测量结果, $y_0$ 为高一等级测量标准给出的测量结果, $U$ 为被验证测量标准的扩展不确定度, $U_0$ 为高一等级测量标准的扩展不确定度。

验证时使用的高一级测量标准为RPI DP300角度精密转台,其最大分度间隔误差为 $1.5'' (U=0.5'', k=2)$ 。非接触角度测量装置的测试对象反射面分别为氧化铝陶瓷反射板和黑色大理石平面两种,具体如图8所示。试验时,将被测对象安装在转台上,控制转台转动,每间隔 $3^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 分别读出转台和面角度非接触测量装置的角度读数,其中氧化铝陶瓷在 $\pm 25^{\circ}$ 范围内进行实验,大理石平面由于反射面较小,在 $\pm 15^{\circ}$ 范围内进行实验。

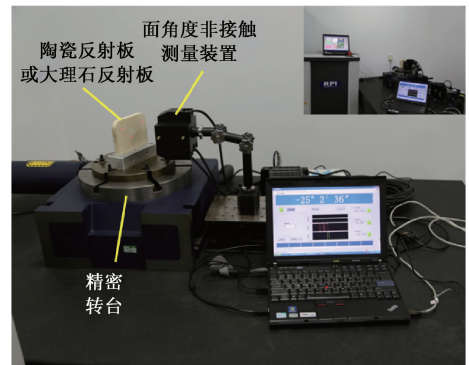


图8 被测对象为氧化铝陶瓷实验现场

Fig. 8 Photo of the test scene for alumina ceramics

实验结果分别如表3和4所示,表3所示为在氧化铝陶瓷反射面上的性能验证试验结果,在 $\pm 25^{\circ}$ 测量范围内,面角度非接触测量装置的绝对示值误差为 $(0.002^{\circ} \sim 0.034^{\circ})$ ,满足判据式(14);表4所示为在大理石反射面上的性能验证试验结果,在 $\pm 15^{\circ}$ 测量范围内,面角度非接触测量装置的绝对示值误差为 $(0.002^{\circ} \sim 0.036^{\circ})$ ,同样满足判据式(14)。上述两种反射物表面上的性能验证实验结果表明本文基于激光位移传感器开发的面角度非接触测量装置在 $\pm 25^{\circ}$ 范围内的测量结果不确定度能够达到 $U=0.044^{\circ} \sim 0.046^{\circ} (k=2)$ 的性能水平。

表 3 氧化铝陶瓷反射面的性能验证实验结果

Table 3 Performance verification experiment results of alumina ceramic reflection surface

$y_0/(\circ)$	$y/(\circ)$	$ y - y_0 /(\circ)$	本装置的不确定度 $U/(\circ), k=2$	精密转台的不确定度 $U_0/(\circ), k=2$	$\sqrt{U^2 + U_0^2}$
25	-25.023	0.023	0.044		0.044
-20	-20.006	0.006	0.043		0.043
-15	-15.023	0.023	0.044		0.044
-12	-12.023	0.023	0.044		0.044
-9	-9.012	0.012	0.045		0.045
-6	-6.002	0.002	0.045		0.045
-3	-3.009	0.009	0.046		0.046
3	3.005	0.005	0.046	0.000 1	0.046
6	6.015	0.015	0.045		0.045
9	9.016	0.016	0.044		0.044
12	12.017	0.017	0.044		0.044
15	15.028	0.028	0.044		0.044
20	20.033	0.033	0.043		0.043
25	25.034	0.034	0.044		0.044

表 4 大理石反射面的性能验证实验结果

Table 4 Performance verification experiment results for grotte reflection surface

$y_0/(\circ)$	$y/(\circ)$	$ y - y_0 /(\circ)$	本装置的不确定度 $U/(\circ), k=2$	精密转台的不确定度 $U_0/(\circ), k=2$	$\sqrt{U^2 + U_0^2}$
-15	-15.015	0.015	0.044		0.044
-12	-12.022	0.022	0.044		0.044
-9	-9.015	0.015	0.045		0.045
-6	-6.023	0.023	0.045		0.045
-3	-3.006	0.006	0.046		0.046
3	2.998	0.002	0.046	0.000 1	0.046
6	6.010	0.010	0.045		0.045
9	9.014	0.014	0.044		0.044
12	12.021	0.021	0.044		0.044
15	15.036	0.036	0.044		0.044

4.4 面角度测量重复性实验

将反射面设置为氧化铝陶瓷,让面角度非接触测量装置在精密转台的角度位置分别为  $\pm 25^\circ$ 、 $\pm 20^\circ$ 、 $\pm 15^\circ$ 、 $\pm 12^\circ$ 、 $\pm 9^\circ$ 、 $\pm 6^\circ$ 、 $\pm 3^\circ$  时进行测量,重复测量 10 次,按贝塞尔公式<sup>[19]</sup>计算各个位置的测量重复性,结果如图 9 所示。

从图 9 可以看出,在  $\pm 25^\circ$  的测量范围内,面角度非接触测量装置的测量重复性最小值和最大值分别为  $0.001^\circ$  和  $0.004^\circ$ 。

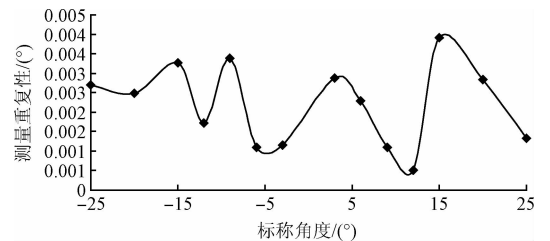


图 9 各角度位置的测量重复性

Fig. 9 Measurement repeatability at different angles

#### 4.5 面角度测量稳定性试验

将反射面设置为氧化铝陶瓷,其他设置与4.3节相同,让面角度非接触测量装置在精密转台的角度位置分别为 $\pm 25^\circ$ 、 $\pm 20^\circ$ 、 $\pm 15^\circ$ 、 $\pm 12^\circ$ 、 $\pm 9^\circ$ 、 $\pm 6^\circ$ 、 $\pm 3^\circ$ 时进行测量,每隔7d进行一组测量,每组重复测量6次,取6次测得值的平均值作为该组的测量结果,共进行6组测量。最后将各个角度位置的6组测量结果按式(15)计算面角度非接触测量装置的稳定性<sup>[22]</sup>:

$$s_m = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\bar{x}_j - \bar{x}_m)^2}{m-1}} \quad (15)$$

式中: $s_m$  稳定性计算结果; $\bar{x}_j$  为第 $j$ 组测量结果, $j=1,2,\dots,6$ ; $\bar{x}_m$  为 $m$ 组测量结果的算术平均值; $m$  为测量组数, $m=1,2,\dots,6$ 。

稳定性试验的结果如图11所示,从图11可以看出,在 $\pm 25^\circ$ 的测量范围内,面角度非接触测量装置的测量稳定性最小值和最大值分别为 $0.004^\circ$ 和 $0.021^\circ$ ,远小于面角度非接触测量装置的测量结果不确定度 $U$ 。根据GJB 2749A-2009《军事计量测量标准建立与保持通用要求》<sup>[22]</sup>,当 $s_m \leq U$ 时,测量装置具备良好的稳定性性能。

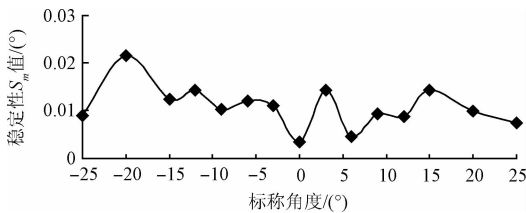


图10 各角度位置的测量稳定性

Fig. 10 Measurement stability at different angles

## 5 结 论

利用激光位移传感器的漫反射测量特性,搭建面角度非接触测量装置,提出了一种结合三坐标测量机和位置敏感探测器对激光位移传感器进行空间坐标化的方法,构建出精确的面角度测量模型;采用蒙特卡洛法对面角度非接触测量装置的不确定度进行评定,基于激光位移传感器的面角度非接触测量装置不确定度 $U=0.044^\circ \sim 0.046^\circ$  ( $k=2$ )。然后分别通过性能验证试验、重复性试验和稳定性试验对装置的性能指标进行考核。在 $\pm 25^\circ$ 测量范围内依据GJB 2749A-2009《军事计量测量标准建立与保持通用要求》<sup>[20]</sup>,采用传递比较法对面角度非接触测量装置进行了性能验证,结果符合要求,测量范围内的重复性最小和最大值分别 $0.001^\circ$ 和 $0.004^\circ$ ,稳定性最小和最大值分别为 $0.004^\circ$ 和 $0.021^\circ$ 。上述结果表明该基于激光位移传感器的面角度非接触测量装置准确可

靠,具备开展面角度现场测量应用的前景。

## 参考文献

- [1] 徐毓娴,白立芬,于水,等. 圆光栅测量齿轮传动系统回转精度[J]. 机械传动,2000, 24(1):23-24.  
XU Y X, BAI L F, YU SH, et al. The measurement of the gear transmission error using circle grating [J]. Mechanical Transmission, 2000, 24(1): 23-24.
- [2] HUANG Y G, LIN Y CH, WANG W, et al. Laser autocollimation measurement of small angle based on cross correlation [J]. Nanotechnology and Precision Engineering,2016, 8(2):120-125.
- [3] YU Y, XIE H Y, WANG J, et al. Deflection measurement using wireless inclination sensors for bridge[C]. Proceedings of International Conference on Intelligent Control and Information Processing, 2010: 487-492.
- [4] 曹建安,张乐平,吴昊,等. 采用倾角传感器实现空间旋转角度测量的解析方法研究[J]. 西安交通大学学报,2013, 47(10):109-114.  
CAO J AN, ZHANG L P, WU H, et al. Analytical approach for measurement of spatial angle with inclination sensor[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(10): 109-114.
- [5] 王晓初,刘为文. 大型弯管机弯管角度在线测量的研究与设计[J]. 工艺与检测,2014, (1):118-120.  
WANG X CH, LIU W W. Research and design of online measuring bend angle in the large-scale bending machine[J]. Technology and Test, 2014, 47(10): 109-114.
- [6] LI W M, JIN J, LI X F, et al. Method of rotation angle measurement in machine vision based on calibration pattern with spot array [J]. Applied Optics, 2010, 49(6):1001-1006.
- [7] MASROOR I, GHAZANFAR H. Michelson interferometer for precision angle measurement [J]. Applied Optics, 1999, 38(1):113-120.
- [8] 徐东亮,刘辉. 基于计算机视觉的缠绕角度检测系统[J]. 机电工程,2008, 25(8):50-52.  
XU D L, LIU H. Research of winding angle detection system based on computer vision [J]. Mechanical and Electrical Engineering Magazine, 2008, 25(8): 50-52.
- [9] 魏焕东,华建文,代作晓,等. 空间傅里叶光谱仪高精度大范围动态测角技术[J]. 光电工程,2009(10): 47-50.  
WEI H D, HUA J W, DAI Z X, et al. Dynamic misalignment detecting technology in space borne fourier transform spectrometer [J]. Opto Electronic Engineering, 2009, 36(10): 47-50.



- [10] 郭继平,李阿蒙,于冀平,等. 双目立体视觉动态角度测量方法[J]. 中国测试,2015, 41(7):21-24.  
GUO J P, LI A M, YU J P, et al. Dynamic angle measurement method based on stereo vision[J]. China Measurement and Test, 2015, 41(7): 21-24.
- [11] 张辰昉. 激光动态目标跟踪角度测量技术研究[D]. 西安:中国科学院大学,2014.  
ZHANG CH Y. Study on measurement of laser active target tracking angel [D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [12] SUZUKI T, GREIVENKAMP J, ENDO T, et al. Two-dimensional small rotation angle measurement using an imaging method [J]. Optical Engineering, 2006, 45(4): 043604-1-043604-7.
- [13] ZHOU R B, XIE T B. Measurement for non-straightness and muzzle angle of artillery barrel based on laser collimation technology [C]. Proceedings of the Third International Symposium on Instrumentation Science and Technology, 2004:753-757.
- [14] LEE J J, HO H N, LEE J H. A vision-based dynamic rotational angle measurement system for large civil structures [J]. Sensors, 2012, 12(6): 7326-7336.
- [15] SUN J H, ZHANG J, LIU ZH, et al. High-dynamic angle measurement based on laser displacement sensors[J]. Applied Optics, 2013, 52(23): 5676-5685.
- [16] 张国雄. 坐标测量技术新进展[J]. 航空精密制造技术,2008, 44(3):16-19.  
ZHANG G X. Progress of coordinate measuring [J]. Aviation Precision Manufacturing technology, 2008, 44(3): 16-19.
- [17] 张晓芳,俞信,蒋诚志,等. 位置敏感探测器 PSD 特性的试验研究 [J]. 仪器仪表学报,2003, 24(4): 250-252.  
ZHANG X F, YU X, JIANG CH ZH, et al. The experimental study on PSD [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003, 24(4): 250-252.
- [18] 潘文博. 激光二维微角度测量系统研究[D]. 杭州:浙江大学,2016.  
PAN W B. Research on Two-dimensional laser micro-angle measuring system [D]. Hangzhou: University of Zhejiang, 2016.
- [19] 姚宜斌,黄书华,孔建,等. 空间直线拟合的整体最小二乘算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2014, 39(5):571-574.  
YAO Y B, HUANG SH H, KONG J, et al. Total least square algorithm for fitting spatial straight lines [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(5): 571-574.
- [20] JJF 1059. 2-2012 用蒙特卡洛法评定测量不确定度[S]. 北京:中国质检出版社,2012.  
JJF 1059. 2-2012 Monte carlo method for evaluation of measurement uncertainty [S]. Beijing: China Zhijian Publishing House, 2012.
- [21] 陈怀艳,曹芸,韩洁. 基于蒙特卡罗法的测量不确定度评定[J]. 电子测量与仪器学报,2011, 25(4): 301-308.  
CHEN H Y, CAO Y, HAN J. Evaluation of uncertainty in measurement based on Monte Carlo method [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2011, 25(4): 301-308.
- [22] GJB 2749A-2009 军事计量测量标准建立与保持通用要求[S]. 北京:中国质检出版社,2009.  
GJB 2749A-2009 General requirement of establishment and conservation of measurement standard for military metrology[S]. Beijing: China Zhijian Publishing House, 2009.

## 作者简介



**彭希锋**,2009 年于武汉大学获得学士学位,2014 年于西安交通大学获得硕士学位,现为中国工程物理研究院计量测试中心工程师,主要研究方向为几何量精密测试技术。  
E-mail:pxf33@163.com

**Peng Xifeng** received his B. Sc. degree from Wuhan University in 2009, and received his M. Sc. degree from Xi'an Jiaotong University in 2014. Currently, he is an engineer in Metrology and Testing Center, CAEP. His main research interest is precision geometric quantity measurement technology.



**陈爽**,分别在 2010 年和 2013 年于重庆大学获得学士学位和硕士学位,现为中国工程物理研究院计量测试中心工程师,主要研究方向为几何量精密测试技术。  
E-mail:151831441@qq.com

**Chen Shuang** received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Chongqing University in 2010 and 2013, respectively. Currently, he is an engineer in Metrology and Testing Center, CAEP. His main research interest is precision geometric quantity measurement technology.