

飞秒激光跟踪仪跟踪脱靶量零位标定方法

崔成君¹, 劳达宝², 董登峰², 高 强³, 周维虎^{1,2}

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022; 2. 中国科学院光电研究院, 北京 100094;
3. 北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100192)

摘要:飞秒激光跟踪仪通过 PSD 探测脱靶量实现目标跟踪, 脱靶量零位是跟踪激光指向反射靶球的中心时反射激光在 PSD 上输出的光斑位置, 跟踪时以脱靶量零位作为基准计算目标脱靶量, 因此如何准确标定脱靶量零位是仪器实现精确测量的前提。文中在分析角反射器特性的基础上, 结合仪器自身特点提出了一种基于角反射器的飞秒激光跟踪仪跟踪脱靶量零位标定方法。分析了脱靶量零位误差对仪器指向精度的影响; 建立了跟踪脱靶量标定误差模型; 根据仪器结构设计和轴系几何误差对脱靶量零位标定方法进行了仿真, 结果显示, 其误差小于 $17.8 \mu\text{m}$, 当目标距离仪器 10 m 时, 仪器的指向误差小于 $1.1''$, 该结果对系统误差补偿模型建立奠定了基础。最后, 基于实际装置对仪器的脱靶量零位进行了标定, 为后续仪器的动态测量提供了跟踪基准。

关键词: 飞秒激光跟踪仪; 角反射器; 跟踪脱靶量零位; 指向误差

中图分类号: TH74 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0117001

Calibration method for initial position of miss distance in femtosecond laser tracker

Cui Chengjun¹, Lao Dabao², Dong Dengfeng², Gao Qiang³, Zhou Weihu^{1,2}

(1. College of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 3. School of Instrument Science and Opto
Electronics Engineering Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: A femtosecond laser tracker achieves target tracking through detection of miss distance via a PSD. The location of reflected laser spot on PSD when tracking laser exactly points to center of the retro-reflector, named initial position of miss distance, was the benchmark of miss distance calculation. So it was important to precisely calibrate initial position of miss distance in order to achieve high accurate measurement. A calibration method for initial position of PSD based on the retro-reflector feature analysis was presented in this paper. First, the error factors that may impact miss distance calibration were analyzed, and the mathematic model was established. Then, according to the laser

收稿日期: 2016-05-10; 修订日期: 2016-06-20

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项 (No.11YQ120022)

作者简介: 崔成君 (1988-), 男, 博士生, 主要从事光电精密测量方面的研究工作。Email: ccj408@126.com

导师简介: 周维虎 (1962-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事光电系统总体设计与集成测试、飞秒激光测量、光电精密测量、大尺寸几何量测量方面的研究工作。Email: zhouweihu@aoe.ac.cn

tracker's structure design and the geometric errors of axes, the calibration method for the initial position was simulated. Results show that the calibration error was limited below 17.8 μm, which means when the retro-reflector was placed at a distance of 10 m from the tracker, the laser tracker's pointing error was limited below 1.1". These results can be helpful in further error compensation model. At last the proposed calibration method of initial position of miss distance was applied to the self-developed femtosecond laser tracker, and provides the benchmark for further dynamic measurement.

Key words: femtosecond laser tracker; retro-reflector; initial position of miss distance; pointing error

0 引言

飞秒激光跟踪仪用于超大尺寸空间几何测量及动态轨迹测量,它具有测量功能多、测量精度高、测量速度快、量程大、可现场测量等特点,是大型科学工程和大型高端装备制造中急需的测量设备^[1-4]。

飞秒激光跟踪仪通过探测目标靶球反射的激光实现目标的跟踪与测量。位置敏感探测器(PSD)作为仪器的跟踪探测器具有响应速度快、无盲点、分辨率高等优点^[5-6]。当仪器对目标进行动态测量时通过PSD探测目标脱靶量实现对目标跟踪,仪器的跟踪脱靶量零位是指当出射激光对准目标靶球时,由靶球中心反射的激光在 PSD 上形成的光斑位置,而跟踪的实质就是以脱靶量零位为基准将目标脱靶量校正为零的过程^[7]。所以脱靶量零位的确定是实现目标动态测量的前提,它的误差直接影响仪器的跟踪指向精度,并最终影响坐标测量精度。目前国内有关科研机构都对激光跟踪测量系统开展了较为深入的研究,2011年,陈文磊对激光跟踪仪控制系统进行了研究,分析了影响跟踪仪跟踪效果的主要因素^[8];2012年,张亚娟对单站式激光跟踪坐标测量系统进行了研究^[9],分析了跟踪过程中控制系统的对准误差对测距和测角精度的影响;然而上述研究都没有考虑跟踪脱靶量零位误差对激光跟踪测量系统指向精度及测量精度的影响。

文中基于国家重大科学仪器设备开发专项“新型飞秒激光跟踪仪研发”项目,对仪器跟踪脱靶量零位标定展开了深入研究。

1 坐标测量原理

飞秒激光跟踪仪的工作原理如下:首先在被测目标点上安置一个目标反射靶球,然后将仪器发出

的激光光束瞄准靶球,当目标带着靶球一起移动时,仪器出射激光光束始终对准目标靶球中心,通过测量仪器到目标靶球的距离和角度来确定目标空间位置。如图 1 所示为飞秒激光跟踪仪的绝对坐标系,其中 X 轴表示仪器水平轴方向;Z 轴表示仪器竖轴方向;O 为仪器水平轴与竖轴的交点。当已知被测目标 P 与仪器间的距离 L 和水平角 H、垂直角 V 时,可根据公式(1)~(3)计算 P 点的空间坐标。

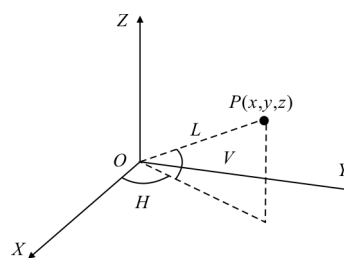


图 1 目标空间坐标测量原理图

Fig.1 Schematic diagram of spatial coordinate measurement

$$x=L \cdot \cos V \cdot \cos H \quad (1)$$

$$y=L \cdot \cos V \cdot \sin H \quad (2)$$

$$z=L \cdot \sin V \quad (3)$$

由上述公式可知,仪器的坐标测量精度主要与测距精度和测角精度有关。然而实际影响测距和测角精度的因素有很多,文中主要分析跟踪脱靶量零位误差对仪器测角精度的影响。

当仪器对目标进行动态跟踪时,在 PSD 上形成的脱靶量始终围绕着脱靶量零点而发生偏移。如图 2 所示,当仪器的跟踪激光光轴与目标靶球中心存在微小偏移量 Δx、Δy 时,仪器的指向误差可表示为:

$$\Delta H = \frac{\Delta x}{L} \quad (4)$$

$$\Delta V = \frac{\Delta y}{L} \quad (5)$$

式中:L 为仪器水平轴与竖轴交点到目标靶球的距离。

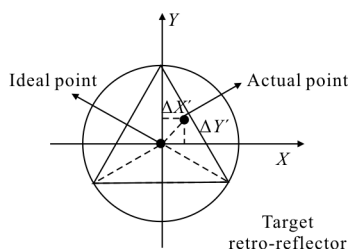


图 2 激光器指向误差

Fig.2 Laser tracker's pointing error

2 角反射器特性分析

角反射器是由 3 个互相正交的平面反射镜拼接而成,顶点即为球的球心,其实物图如图 3 所示。



图 3 角反射器实物图

Fig.3 Photo of retro-reflector

由于角反射镜的 3 个反射面分布在空间,所以文中采用矢量形式的反射定律对光束的传播进行分析。如图 4 所示,入射光束依次经过反射面 AOB 、 BOC 、 AOC 后出射,其中 D 、 H 点为入射光束和出射光束分别在角反射器底面上的交点; E 、 F 、 G 分别为光束在反射面 AOB 、 BOC 、 AOC 上的交点。

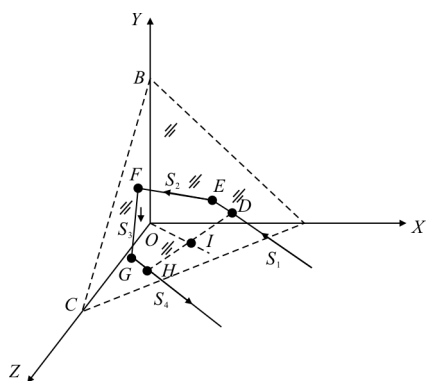


图 4 角反射镜光线传播示意图

Fig.4 Schematic diagram of light path on retro-reflector

假设入射光束的单位矢量为 $S_1=(m,n,p)$,根据矢量形式的反射定律就有:

$$S_2=S_1-2N_1(N_1,S_1) \quad (6)$$

$$S_3=S_2-2N_2(N_2,S_2) \quad (7)$$

$$S_4=S_3-2N_3(N_3,S_3) \quad (8)$$

式中: N_1 、 N_2 、 N_3 分别为角反射器反射平面 AOB 、 BOC 、 AOC 的单位法向量,理想情况下分别与 X 、 Y 、 Z 轴重合。则根据公式(6)~(8)可算出出射光束 S_4 矢量表达式为:

$$S_4=(-m,-n,-p) \quad (9)$$

由公式(9)可知,入射光束经角反射镜反射后的出射光束与入射光束平行且方向相反。

由于光束在角反射器中的传播过程为直线传播过程,所以文中通过空间直线方程来分析经角反射器反射后光束平移特性。设 D 点坐标为 (x_0,y_0,z_0) ,则过 D 点的入射光束的直线方程可表示为:

$$\frac{x-x_0}{m} = \frac{y-y_0}{n} = \frac{z-z_0}{p} = t \quad (10)$$

设角反射器底面 ABC 的方程为:

$$x+y+z=a \quad (11)$$

根据公式(10)~(11)即可算出,入射光束依次经角反射器反射面 AOB 、 BOC 、 AOC 反射后与底面 ABC 的交点 H 的坐标为 $(-x_0 + \frac{2a}{m+n+p} \cdot m, -y_0 + \frac{2a}{m+n+p} \cdot n, -z_0 + \frac{2a}{m+n+p} \cdot p)$ 。

如图 4 所示, I 为直线段 DE 的中点,则矢量 \vec{OI} 可表示为:

$$\vec{OI} = \left(\frac{a}{m+n+p} \cdot m, \frac{a}{m+n+p} \cdot n, \frac{a}{m+n+p} \cdot p \right) \quad (12)$$

由公式(12)可知,矢量平行于入射光线。由于点 I 在直线 DH 上,所以点 O 、 I 、 D 、 H 共面,即入射光束经角反射器反射后的出射光束与入射光束和角反射器顶点处于同一平面上,且入射光束与出射光束的位置相对于它们在角反射器底面交点连线的中点和角反射器顶点的连线所对称。

上述分析是角反射镜处理理想情况下,然而实际角反射器在制作过程中肯定存在加工误差,其误差主要有两个方面:一是 3 个直角反射面相交的顶点与球心间的距离误差即球心距误差;二是 3 个反射面间的直角误差^[10]。由于球心距误差不影响其反射特性,所以文中主要讨论角反射器直角面误差对入射光束反射特性的影响。

当角反射器的两个反射面间存在直角误差时,

设直角误差分别为 δ_{12} 、 δ_{13} 、 δ_{23} 。如图 5 所示,建立直角坐标系,并取反射面 1 与 YOZ 平面重合,入射光束依次经过反射面 AOB 、 BOC 、 AOC 后出射。此时反射面 AOB 、 BOC 对应的单位法向量 N_1 、 N_2 可表示为:

$$N_1=(1, 0, 0) \quad (13)$$

$$N_2=(\sin\delta_{12}, \cos\delta_{12}, 0) \quad (14)$$

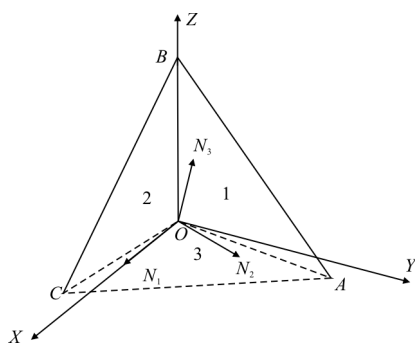


图 5 角反射器直角误差模型
Fig.5 Right angle error model of retro-reflector

反射面 AOC 的单位法向量 N_3 可以通过如下公式进行计算。

$$N_1 \cdot N_3 = \cos\left(\frac{\pi}{2} - \delta_{13}\right) \quad (15)$$

$$N_2 \cdot N_3 = \cos\left(\frac{\pi}{2} - \delta_{23}\right) \quad (16)$$

$$N_{3x}^2 + N_{3y}^2 + N_{3z}^2 = 1 \quad (17)$$

式中: N_{3x} 、 N_{3y} 、 N_{3z} 为单位法向量 N_3 在 X 、 Y 、 Z 轴上的余弦分量。当 $\delta_{12}=\delta_{13}=\delta_{23}=\delta$ 时,由于直角误差 δ 为角秒量级,所以可以用弧度值代替 \sin 和 \cos 值,得出 $\sin\delta \approx \delta$ 、 $\cos\delta \approx 1$ 。去掉三阶以上的误差后,上述单位法向量可简化为:

$$N_1=(1, 0, 0) \quad (18)$$

$$N_2=(\delta, 1, 0) \quad (19)$$

$$N_3=(\delta, \delta, 1) \quad (20)$$

当入射光束的单位矢量 $S_1=\left(\frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}}\right)$ 时,由公式(6)~(8)即可算出出射光束 S_4 矢量表达式。

$$S_4 = \begin{pmatrix} 2\sqrt{3}\delta^2 - \frac{4}{3}\sqrt{3}\delta - \frac{\sqrt{3}}{3}, \frac{4\sqrt{3}}{3}\delta^2 - \frac{\sqrt{3}}{3}, \frac{4\sqrt{3}}{3}\delta - \frac{\sqrt{3}}{3} \end{pmatrix} \quad (21)$$

根据空间两条直线的夹角公式即可算出入射光束与出射光束的夹角 $\Delta\theta$ 满足如下公式:

$$\cos(\pi - \Delta\theta) = \frac{S_1 \cdot S_4}{|S_1||S_4|} = \frac{10\delta^2 - 3}{\sqrt{36\delta^2 + 9}} \quad (22)$$

由公式(22)可知,垂直底面 ABC 入射的光束经角反射镜反射后与入射光束具有 $\Delta\theta$ 的角度偏移量。

3 脱靶量零位标定原理

飞秒激光跟踪仪简化光路结构如图 6 所示。半导体激光器和飞秒激光器发出的两束激光分别经分光镜反射和透射后进行合束。合束后的混合光束经扩束镜和跟踪反射镜后入射到目标靶球。靶球将入射激光光束沿原路返回,经分光镜反射后的一部分激光光束入射到 PSD 探测器上,用于实现跟踪;经分光镜透射后的另一部分激光光束返回到测距系统,用于实现测距。

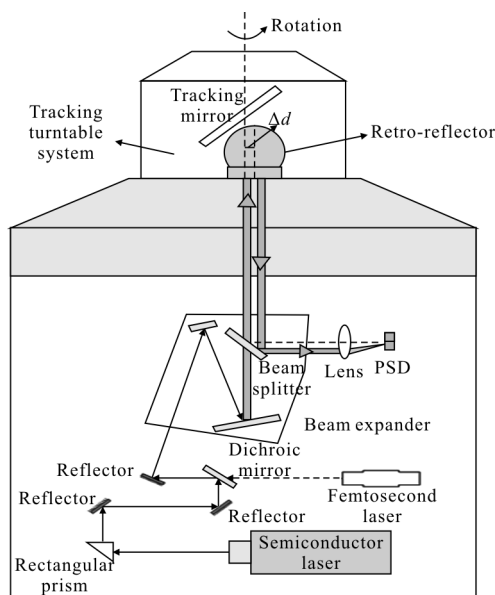


图 6 跟踪脱靶量零位标定原理图
Fig.6 Schematic diagram of initial position calibration of miss distance

文中基于飞秒激光跟踪仪的外部结构特点采用角反射器对仪器跟踪脱靶量零位进行标定。如图 6 所示,把角反射器置于跟踪转台上端并将通光口朝下对准仪器出射激光光束。角反射器将出射激光光束平行返回,经分光镜反射后由聚焦透镜聚焦到 PSD 上。旋转跟踪转台竖轴,在 PSD 上观测激光光斑的移动轨迹,当角反射器的球心位置不在跟踪转台竖轴上时,激光光斑在 PSD 上的移动轨迹为一个圆,且半径 r 为:

$$r = \frac{2 \cdot \Delta d}{\beta} \quad (23)$$

式中： Δd 为角反射器球心到跟踪转台竖轴的垂直距离； β 为聚焦透镜的会聚倍率。由公式(23)可知，角反射器的球心与跟踪转台竖轴间的垂直距离越小，光斑轨迹半径越小，当角反射器的球心刚好位于跟踪转台竖轴上时 r 为零，即出射激光光束刚好入射到角反射器的中心，所以 PSD 上激光光斑轨迹的圆心即为仪器跟踪脱靶量零点。

4 标定误差分析

根据角反射器特性，当角反射器存在直角误差时垂直角反射器底面入射的光束经角反射器反射后出射光束与入射光束的角度偏移量为 $\Delta\theta$ ，如图 7 所示。

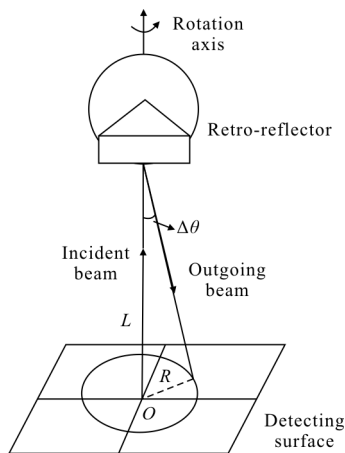


图 7 旋转角反射器误差模型

Fig.7 Rotation angle error model of retro-reflector

当角反射器球心位于旋转轴且入射光束与旋转轴重合时，随旋转轴水平旋转，其出射光束也随着旋转，并在垂直于旋转轴的探测面上投影光斑轨迹为圆。此时光斑轨迹半径可表示为：

$$R = \Delta\theta \cdot L \quad (24)$$

式中： L 为探测面到角反射器间的距离。

由于探测面上光斑轨迹的圆心与入射光束经理想角反射器反射后在探测面上的投影点重合，所以仪器跟踪脱靶量零位的标定与角反射器直角误差无关。又因为分光镜与聚焦透镜的安装误差只影响 PSD 上会聚激光光斑的输出位置是否位于 PSD 的几何中心，所以跟踪脱靶量零位的标定误差主要与出射激光光束和仪器竖轴间的偏移误差有关。

如图 8 所示为仪器跟踪脱靶量零位标定误差模

型，以角反射器底面为 XOY 平面，仪器旋转竖轴为 Z 轴建立直角坐标系。设激光光束与旋转竖轴倾斜角度为 $\Delta\varphi$ ，水平方位为 H_1 ；与旋转竖轴平移量为 d ，水平方位为 H_2 。则激光光束在角反射器底面上的投影偏移量可表示为：

$$D_{x11} = L_1 \cdot \tan\Delta\varphi \cdot \cos H_1 \quad (25)$$

$$D_{y11} = -L_1 \cdot \tan\Delta\varphi \cdot \sin H_1 \quad (26)$$

$$D_{x21} = d \cdot \cos H_2 \quad (27)$$

$$D_{y21} = -d \cdot \sin H_2 \quad (28)$$

式中： D_{x11} 、 D_{y11} 为入射激光光束倾斜量在角反射器底面的偏移量； D_{x21} 、 D_{y21} 为入射激光光束平移量在角反射器底面的偏移量。

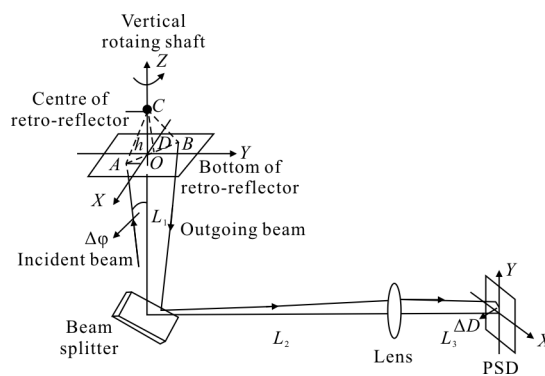


图 8 跟踪脱靶量零位标定误差模型

Fig.8 Error model of initial position calibration of miss distance

由角反射器特性可知，入射激光光束和出射激光光束与角反射器底面的交点 A 、 B 和角反射器顶点 C 处于同一平面，且直线段 $AD = DB$ ，所以入射激光光束经角反射器反射后出射激光光束在角反射器底面的偏移量可表示为：

$$D_{x12} = (L_1 + 2h) \cdot \tan\Delta\varphi \cdot \cos(H_1 + \pi) \quad (29)$$

$$D_{y12} = -(L_1 + 2h) \cdot \tan\Delta\varphi \cdot \sin(H_1 + \pi) \quad (30)$$

$$D_{x22} = d \cdot \cos(H_2 + \pi) \quad (31)$$

$$D_{y22} = -d \cdot \sin(H_2 + \pi) \quad (32)$$

式中： h 为角反射器顶点到底面的距离； D_{x12} 、 D_{y12} 为出射激光光束倾斜量在角反射器底面的偏移量； D_{x22} 、 D_{y22} 为出射激光光束平移量在角反射器底面的偏移量。根据图 8 中的几何关系可以算出经角反射器反射后的激光光束返回到 PSD 上时对应的偏移量为：

$$D_{x13} = \left(\frac{f - L_3}{f} K + f \right) \cdot \tan\Delta\varphi \cdot \cos(H_1 + \pi) \quad (33)$$

$$D_{y13} = - \left(\frac{f - L_3}{f} K + f \right) \cdot \tan\Delta\varphi \cdot \sin(H_1 + \pi) \quad (34)$$

$$D_{x23} = \frac{f-L_3}{f} \cdot d \cdot \cos(H_2+\pi) \quad (35)$$

$$D_{y23} = -\frac{f-L_3}{f} \cdot d \cdot \sin(H_2+\pi) \quad (36)$$

式中： $K=2L_1+2h+L_2-f$ ； f 为聚焦透镜的焦距； D_{x13} 、 D_{y13} 为激光光束倾斜量在 PSD 上的偏移量； D_{x23} 、 D_{y23} 为激光光束平移量在 PSD 上的偏移量。则在 PSD 上跟踪脱靶量零位标定误差可表示为：

$$\Delta D = \sqrt{(D_{x13}+D_{x23})^2 + (D_{y13}+D_{y23})^2} \quad (37)$$

将公式(35)带入公式(4)可得，飞秒激光跟踪仪跟踪脱靶量零位误差引起的仪器指向误差为：

$$\Delta\phi = \frac{\Delta D \cdot \beta}{L} \quad (38)$$

式中： L 为仪器水平轴和垂直轴交点到目标靶球的距离； β 为聚焦透镜的聚焦倍率。由公式(38)可知，当仪器的脱靶量误差一定时，仪器的指向误差会随着距离 L 的增加而减小。然而飞秒激光跟踪仪常使用的工作范围是 10~15 m，所以文中着重分析目标距离 10 m 以上时仪器的指向精度。

5 仿真与实验

5.1 ZEMAX 仿真

文中根据仪器的实际结构分布及轴系几何标定误差采用 ZEMAX 软件对跟踪脱靶量零位标定方法进行仿真，其具体参数如表 1 所示。

表 1 跟踪脱靶量零位标定系统 ZEMAX 模拟参数

Tab.1 ZEMAX simulation parameters of initial position calibration system of miss distance

Structure size	Calibration error
Translation error between optic axis and vertical axis $\Delta d/\mu\text{m}$	26.1
Tilt error between optic axis and vertical axis $\Delta\phi/(\text{''})$	3.4
L_1/mm	248.5
L_2/mm	67.5
L_3/mm	21.8
f/mm	30.7

将上述参数输入到 ZEMAX 非序列中，对脱靶量零位标定系统进行建模，光源采用高斯激光光束。由于在实际标定过程不能保证角反射器球心刚好位

于旋转轴上，且角反射器球心与竖轴间的横向偏移不影响脱靶量零位的标定精度，所以考虑实际情况将角反射器球心对于旋转轴偏移 1 mm 进行建模。以 45° 为单位旋转竖轴一周取 8 个均匀分布位置，在探测器上记录角反射器在这 8 个位置时返回的激光光斑的位置。则仿真结果如图 9 所示，其中图(a)为 $\Delta d_y = -26.1 \mu\text{m}$ ； $\Delta\phi_x = -3.4''$ ，(b) 为 $\Delta d_y = -26.1 \mu\text{m}$ ； $\Delta\phi_y = -3.4''$ ，(c) 为 $\Delta d_y = -26.1 \mu\text{m}$ ； $\Delta\phi_x = 3.4''$ ，(d) 为 $\Delta d_y = -26.1 \mu\text{m}$ ； $\Delta\phi_y = 3.4''$ 分别表示激光光轴与竖轴的不同偏移状态时，经角反射器反射后在探测器上形成的光斑轨迹。

通过计算求取图 9 中激光光斑轨迹的圆心与探测器几何中心间的距离分别为 17.5、17.8、17.2、17.1 μm 。将上述计算的结果带入公式(38)可得出，当目标距离仪器 10 m 时，仪器指向误差小于 1.1''。为了满足飞

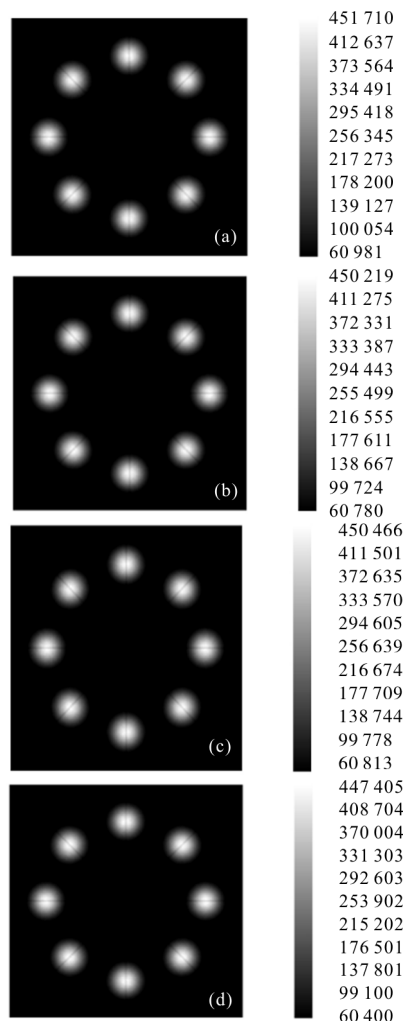


图 9 PSD 探测器上激光光斑轨迹
Fig.9 Facula traces on PSD detector

秒激光跟踪仪的测量精度单靠外部结构设计及装调精度是不够的,还需要对系统进行误差补偿,文中分析的结果同时对系统误差补偿模型建立提供了有效数据。

5.2 标定实验

飞秒激光跟踪仪跟踪脱靶量零位标定实验装置如图 10 所示。

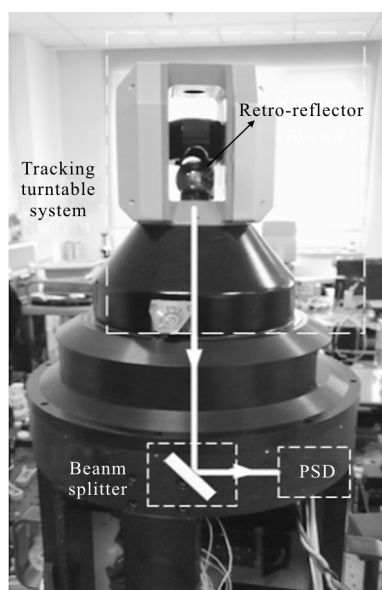


图 10 飞秒激光跟踪仪跟踪脱靶量零位标定实物图

Fig.10 Initial position calibration model in femtosecond laser tracker

将角反射器放置在如图所示的位置,并旋转跟踪转台的竖轴,在 PSD 上观测激光光斑的输出位置,经三次测量后的结果如表 2 所示。

表 2 PSD 探测器上激光光斑输出位置

Tab.2 Output position of facula on PSD detector

No.	First group/ $X \cdot mm^{-1}$		Second group/ $X \cdot mm^{-1}$		Third group/ $X \cdot mm^{-1}$	
1	-0.26	0.008	-0.256	0.008	-0.252	0.01
2	-0.296	0.019	-0.294	0.016	-0.3	0.023
3	-0.319	0.053	-0.318	0.067	-0.321	0.061
4	-0.307	0.099	-0.304	0.104	-0.309	0.099
5	-0.264	0.119	-0.263	0.118	-0.264	0.12
6	-0.217	0.105	-0.221	0.104	-0.221	0.11
7	-0.2	0.063	-0.204	0.064	-0.202	0.066
8	-0.222	0.024	-0.22	0.029	-0.221	0.025

将上述测量点通过 MATLAB 进行曲线拟合并求取的轨迹圆心位置即为仪器的跟踪脱靶量零位,经多组测量取平均后脱靶量零点在 PSD 上输出的坐标值为(-0.261 mm, 0.061 mm)。由于存在机械加工误差及安装偏差,所以即使仪器的脱靶量零位标定误差为零时,在 PSD 上的输出坐标也并不与 PSD 几何中心重合,而对于跟踪本身来说也不需要脱靶量零位与 PSD 几何中心重合。只是由于 PSD 光斑位置输出是非线性的,所以为了减小 PSD 的输出误差对仪器测量精度的影响要尽量保证脱靶量零位与 PSD 几何中心重合,所以该方法同时也可以用来检测 PSD 探测器的安装误差。

6 结论

文中研究了一种基于旋转角反射器的飞秒激光跟踪仪跟踪脱靶量零位的快速标定方法,分析了脱靶量零位误差对仪器指向精度的影响;根据空间光束的矢量反射定律建立了入射光束经角反射器反射后的数学模型;分析了带有直角误差的角反射器对脱靶量零位标定精度的影响,并建立了脱靶量零位标定误差模型;结合仪器结构与轴系几何误差对脱靶量零位标定方法进行了软件仿真,结果显示仪器的脱靶量标定误差小于 $17.8 \mu m$,该结果对系统误差补偿模型建立奠定了基础。最后在轴系几何误差标定的基础上完成了仪器跟踪脱靶量零位的标定,为后续仪器的动态测量提供了跟踪基准。

参考文献:

[1] Zhou Weihu, Cui Huirong, Ding Jinbin, et al. Assembly measurement technique for space based telescope system based on laser tracker system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S):250-252. (in Chinese)
周维虎, 崔惠绒, 丁金滨, 等. 基于激光跟踪仪的天基望远镜安装测量技术[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(S): 250-252.

[2] Yang Zhen, He Lei. Establishing high-precision subminiature ranging network based on laser tracker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S): 137-140. (in Chinese)
杨振, 贺磊. 利用激光跟踪仪建立高精度微型测边网[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(S): 137-140.

[3] Li Yingwei, Li Ming, Zhang Liang, et al. Technology of laser tracker and its application in subway train's testing[J].

- Machinery Design and Manufacture*, 2007, 7: 98–100. (in Chinese)
李迎伟, 李明, 张靓, 等. 激光跟踪测量技术在地铁检测中的应用[J]. 机械设计与制造, 2007, 7: 98–100.
- [4] Klaus Wendt, Matthias Franke, Frank Hartig. Measuring large 3D structures using four portable tracking laser interferometers[J]. *Measurement*, 2012, 45: 2339–2345.
- [5] Duan Jie, Sun Xiangyang, Cai Jinghai, et al. Applications research to PSD in the laser displacement detecting system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S): 281–284. (in Chinese)
段洁, 孙向阳, 蔡敬海, 等. PSD 在激光位移检测系统中的应用研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(S): 281–284.
- [6] Shang Qiufang, Li Yonggang, Yang Huiyu, et al. Research and application on PSD used in zero tracking[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2012, 32 (4): 14–17. (in Chinese)
商秋芳, 李永刚, 杨慧宇, 等. PSD 用于零位跟踪的研究及应用[J]. 宇航计测技术, 2012, 32(4): 14–17.
- [7] Dong Dengfeng, Zhou Weihu, Ji Rongyi, et al. Design of precise tracking system of laser tracker [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(2): 309–318. (in Chinese)
董登峰, 周维虎, 纪荣祎, 等. 激光跟踪仪精密跟踪系统研究与设计[J]. 光学精密工程, 2016, 24(2): 309–318.
- [8] Chen Wenlei. Research on control system of laser tracking system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011. (in Chinese)
陈文磊. 激光跟踪仪控制系统研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.
- [9] Zhang Yajuan. Stand alone laser tracking system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese)
张亚娟. 单站式激光跟踪坐标测量系统研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [10] Yang Yuchuan, Luo Hui. Backward diffractive characteristics analysis of cube–corner prism by ZEMAX [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(3): 491–495. (in Chinese)
杨雨川, 罗晖. 角锥棱镜后向衍射特性的 ZEMAX 分析[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(3): 491–495.