

飞秒激光跟踪仪跟踪光路的优化设计与分析

劳达宝^{1,2*}, 崔成君¹, 王国民¹, 周维虎^{1,2}

¹中国科学院光电研究院, 北京 100094;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 基于光学系统对跟踪探测的影响, 结合仪器功能, 提出了一种基于胶合透镜减小跟踪偏移量的方法, 实现了对飞秒激光跟踪仪跟踪光路的优化; 改进了准直扩束光路, 细化了光学系统, 分析了优化后光学系统在接收功率和杂光方面对跟踪探测的影响机理。基于优化的光学系统设计, 搭建实验系统进行了探测实验。实验结果表明, 补偿后的跟踪探测精度可达 $3\ \mu\text{m}$, 这满足仪器精密跟踪要求。

关键词 测量; 光路优化; 激光跟踪; 位置灵敏探测器激光跟踪仪; 杂散光

中图分类号 TP212.14; TH702

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0304005

Optimal Design and Analysis of Tracking Optical Paths in Femtosecond Laser Tracker

Lao Dabao^{1,2*}, Cui Chengjun¹, Wang Guomin¹, Zhou Weihu^{1,2}

¹Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Based on the analysis of the influence of optical system on tracking detection and combined with the instrumental functions, a smart method based on glued lens is proposed to reduce tracking offsets. The tracking optical path in the femtosecond laser tracker is optimized. At the same time, the optical path for collimation and expanding is improved, and the optical system is refined. The influence mechanism of receiving laser power and stray light in the optimized optical system on tracking detection is analyzed in detail. Based on the optimal design of the optical system, the experimental system is established and the detection experiment is conducted. The research results show that the tracking detection accuracy can reach $3\ \mu\text{m}$ after compensation, which meets the precision tracking requirements of instruments.

Key words measurement; optical path optimization; laser tracking; position sensitive device laser tracker; stray light

OCIS codes 120.1880; 100.4999

1 引 言

随着智能制造的快速发展, 装备智能制造过程对大尺寸动态测量技术的要求越来越高。激光跟踪仪是一种典型的具有快速跟踪功能的高精度坐标测量仪器, 具有响应快、精度高、量程大等特点, 被广泛应用于航空、航天、船舶和机器人等大型装备制造领域^[1-3]。传统激光跟踪仪通常采用激光干涉与相位

式测距的组合测距方式, 利用干涉仪高精度测量和相位式绝对测距的特性, 解决高精度测量和激光跟踪断光续接不可同时兼顾的技术难题。在断光续接过程中跟踪仪的测距精度将会损失, 通常需要采用较复杂的算法或操作流程弥补测距精度损失。飞秒激光跟踪仪与传统跟踪仪的区别主要在于测距部分采用飞秒激光频率梳为光源, 可从根本上解决长期困扰测距领域的技术瓶颈^[4]。激光跟踪是跟踪仪与

收稿日期: 2018-10-10; **修回日期:** 2018-11-13; **录用日期:** 2018-12-04

基金项目: 国家重点研发计划重大科学仪器设备开发专项(2017YFF0107300)、中科院重点部署项目(KFZD-SW-415-1)、中科院装备研制项目(YZ201618)、国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ120022)

* **E-mail:** laodabao@aoe.ac.cn

其他大尺寸测量仪器有所区别的独特功能,在以机器人为主体的智能制造过程中,激光跟踪仪作为机器人末端位置的实时跟踪和测量设备,是一种非常适用于现场测量的仪器^[5-6]。因此,快速精确跟踪是激光跟踪仪必须解决的核心技术之一^[7]。

为了实现飞秒激光跟踪仪的跟踪功能,需要提出一种解决跟踪脱靶量的精确激光探测技术,而仪器光学系统和探测电路是保证探测精度的两大部分,本文重点探讨光学系统对跟踪探测的影响,实现跟踪光路的优化设计,以确保跟踪脱靶量的高精度探测。

针对跟踪仪跟踪光学系统,本课题组^[8-9]研究了一种飞秒激光跟踪仪光学系统,该系统采用了大量光束调节、分光器件,实现了对目标的快速跟踪,跟踪速度可达到 3 m/s。但在静态测量时跟踪指向不稳定,主要是因为跟踪探测精度不足。造成探测精度不足的主要原因是光学系统中采用了准直扩束系统,激光束回光时也经过扩束系统,从而对空间目标偏移造成的脱靶量也进行了缩束,降低了脱靶量探测的灵敏度。天津大学张亚娟等^[10]研究了一种单站式结构跟踪仪坐标测量系统,跟踪速度可达 0.5 m/s。上述研究并未深入研究光学系统对跟踪探测器的影响,以至于未能优化光学系统,提高探测精度。

本文通过详细分析仪器光学系统对跟踪探测精度的影响,提出优化的跟踪光路,为实现高精度高效跟踪的光学系统设计提供理论与技术基础。

2 飞秒激光跟踪仪光学系统

飞秒激光跟踪仪光学系统包含跟踪、相位测距、飞秒测距和合束准直等几个部分,光路简图如图 1 所示,其中 PIN 为光电探测器。跟踪仪工作过程包括跟踪和测量两部分,跟踪时以半导体激光作为跟踪指示光源,光束经过合束、准直后经由安装在二维转台上的跟踪反射镜照射到目标反射靶球。当跟踪激光照射到反射靶球中心时,反射光原路返回到跟踪探测器即位置灵敏探测器(PSD)的零点;当反射靶球移动时,跟踪光偏移后返回,但回光会偏离 PSD 零点,通过探测跟踪光斑的脱靶量,结合此时由相位测距模块测得的粗略测量距离,由脱靶量和距离换算得出的脱靶量角度值,根据事先标定的脱靶量角度与二维转台的转换关系,控制跟踪反射镜转动使得跟踪光指向反射靶球中心,直到 PSD 输出值为零,即实现了跟踪功能。测量时,记录跟踪光照

射到反射靶球中心时的水平和垂直角度,同时进行飞秒激光测距,由水平、垂直角度和距离值计算靶球中心的坐标,完成实时精确测量。

由上述跟踪测量原理可知,跟踪角度脱靶量偏差可由 PSD 探测的脱靶量与工作距离的比值求得,所以跟踪性能主要取决于 PSD 探测和测距模块的性能。一方面,工作距离数值远大于 PSD 探测的脱靶量,所以距离精度对角度脱靶量精度影响较小,但对测量速度要求较高,因此采用单测尺相位式测距法;另一方面,角度脱靶量测量精度主要取决于 PSD 脱靶量的探测精度,因此需要提高脱靶量探测精度。为使光路简化,尽量减少仪器内部的激光光源,跟踪激光光源和相位测距光源采用同一个半导体激光光源,光学系统中各光学元件会产生杂散光,对脱靶量探测精度产生影响。

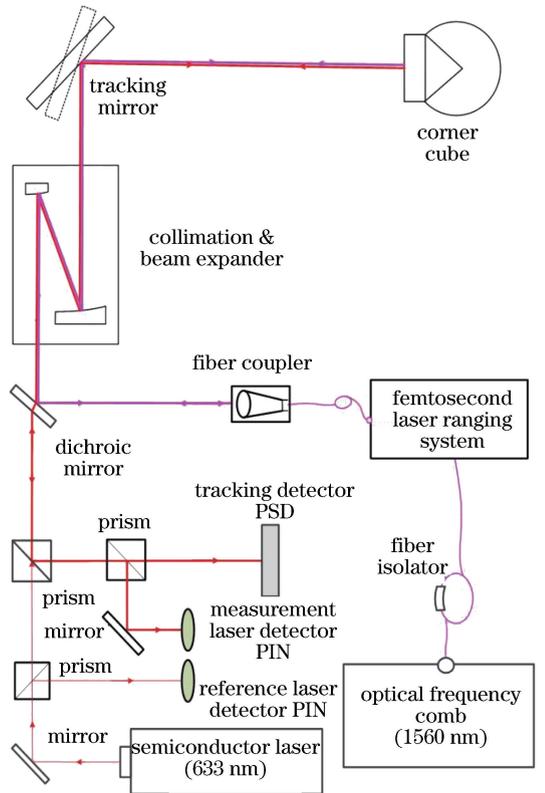


图 1 飞秒激光跟踪仪光学系统简图
Fig. 1 Diagram of optical system in femtosecond laser tracker

3 跟踪仪杂光对跟踪探测的影响

PSD 具有灵敏度高、瞬态响应特性好、光谱响应范围宽、可靠性高、处理电路简单及光敏面内无盲区等优点^[11]。入射光在 PSD 上激发出光生载流子从而产生电流,光生电流的大小与光斑的大小无关,只和

光斑能量中心在器件上的位置有关系,因此 PSD 能够直接探测到入射激光光斑的能量中心位置。PSD 探测光斑位置的工作原理如图 2 所示。

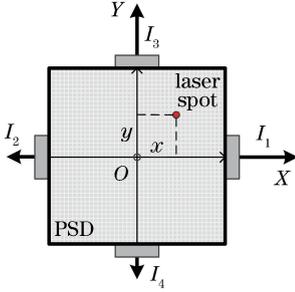


图 2 PSD 工作原理

Fig. 2 Working principle of PSD

PSD 器件光敏面的几何长度为 l , 器件四周均匀对称分布了 4 个电极, 分别导出光生电流 I_1 、 I_2 、

I_3 、 I_4 , 靠近入射光斑的电极导出的光生电流较大, 反之电流较小。以 PSD 的几何中心为坐标原点建立坐标系 $O-XY$, 当入射光斑与 PSD 的几何零点 O 重合时, 光生电流 $I_1 = I_2, I_3 = I_4$, 此时 PSD 输出坐标为 $(0, 0)$; 当入射激光光斑位于原点以外的位置时, 其光斑坐标 (x, y) 可表示为

$$\begin{cases} x = \frac{l}{2} \cdot \frac{I_1 + I_3 - (I_2 + I_4)}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} \\ y = \frac{l}{2} \cdot \frac{I_2 + I_3 - (I_1 + I_4)}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} \end{cases} \quad (1)$$

当测量光路中存在杂光时, 杂光也会在 PSD 上造成响应, 这时 PSD 输出的信号是测量光与杂光共同作用的结果, 即(1)式中的每项电流中都有一个杂光干扰作用的分量。此时, PSD 输出的坐标 (X, Y) 可表示为

$$\begin{cases} X = \frac{l}{2} \cdot \frac{(I_{c1} + I_{b1}) + (I_{c3} + I_{b3}) - [(I_{c2} + I_{b2}) + (I_{c4} + I_{b4})]}{(I_{c1} + I_{b1}) + (I_{c3} + I_{b3}) + (I_{c2} + I_{b2}) + (I_{c4} + I_{b4})} \\ Y = \frac{l}{2} \cdot \frac{(I_{c2} + I_{b2}) + (I_{c3} + I_{b3}) - [(I_{c1} + I_{b1}) + (I_{c4} + I_{b4})]}{(I_{c1} + I_{b1}) + (I_{c3} + I_{b3}) + (I_{c2} + I_{b2}) + (I_{c4} + I_{b4})} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $I_{c1}, I_{c2}, I_{c3}, I_{c4}$ 为测量光单独作用时 PSD 输出的电流强度; $I_{b1}, I_{b2}, I_{b3}, I_{b4}$ 为杂光单独作用时 PSD 输出的电流强度。令 I_c 为测量光单独作用时 PSD 输出的总电流值, I_b 为杂光单独作用时 PSD 输出的总电流值, 且 $K = I_b / I_c$ 。由于 PSD 输出的总电流值与入射激光强度成正比, 所以系数 K 是测量光与杂光的光强之比。由(2)式可推出:

$$\begin{cases} X = \left(\frac{1}{K+1}\right) \cdot x_c + \left(\frac{K}{K+1}\right) \cdot x_b \\ Y = \left(\frac{1}{K+1}\right) \cdot y_c + \left(\frac{K}{K+1}\right) \cdot y_b \end{cases} \quad (3)$$

式中: x_c, y_c 为测量光单独作用时, PSD 输出的坐标位置; x_b, y_b 为杂光单独作用时 PSD 输出的坐标位置。由(3)式可知, 当测量光和杂光共同作用于 PSD 上时, 由 PSD 输出电流算出的位置坐标是上述两个光单独作用时的内插值。经分析, 有杂光共同作用于 PSD 上时的位置坐标比测量光单独作用于 PSD 上时的位置坐标更靠近探测器几何中心。因为光学系统的杂光主要来自于内部光学元件表面的初次反射, 且该反射杂光到达 PSD 上时, 光斑位于 PSD 的几何中心。此时杂光光强分布的几何中心与 PSD 几何中心重合, 因此各电极输出电流强度相等, 即 $x_b = y_b = 0$ 。则(3)式可简化为

$$\begin{cases} X = \left(\frac{1}{K+1}\right) \cdot x_c \\ Y = \left(\frac{1}{K+1}\right) \cdot y_c \end{cases} \quad (4)$$

即光学系统内部杂光对 PSD 探测器位置输出的影响误差可根据(4)式进行计算。不同杂光强度对 PSD 位置输出的影响的仿真结果如图 3 所示, 随着杂光相对测量误差的增大, PSD 输出位置误差也相应变大。

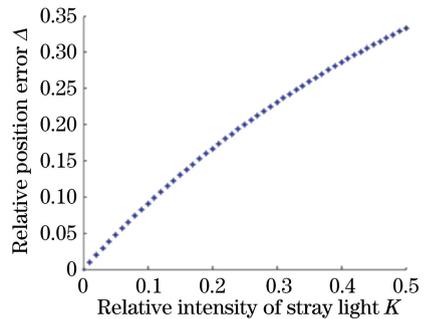


图 3 杂光引起的 PSD 相对测量误差

Fig. 3 Relative measurement error of PSD caused by stray light

综上所述可知, 减少 PSD 位置测量误差的关键在于如何提高测量光光强的信噪比, 而最根本的办法是尽量去除杂光。本研究实验系统所涉及的杂光主要来自于光学元件表面的反射, 其波长与测量

光的波长相同,所以无法通过光学滤波法进行消除。要消除杂光的影响,需要对光学系统进行优化,并减少垂直折射表面光学元件的使用。

4 光学系统优化设计

飞秒激光跟踪仪光学系统具有光源波长差别大、系统功能多、分光复杂和光学能量利用率高等特点,光学系统初步设计具有以下问题:离轴反射式扩束系统产生像差造成光斑形状不均匀,影响跟踪脱靶量探测精度,且体积较大;光学系统中分光器件较多,影响功率利用率;系统器件杂散光较多,影响 PSD 探测精度,降低测距信噪比。

针对上述问题,对跟踪仪光学系统进行优化。

首先,扩束准直系统对光束质量影响较大,需要对扩束准直系统进行优化设计^[12]。跟踪光束和飞秒测距光束采取不同的准直方式:对于半导体激光光束采用光纤准直的方式进行准直;对飞秒激光光束,通过在光路中加入同轴透射式扩束镜的方式进行准直;以半导体激光发出的光束为基准,通过调节飞秒测距光路中的双光楔进行合束。其次,将相位测距光路全部改用 1/2 波片(HWP)加偏振分束器(PBS)的方式进行分光。最后,对合成光路中的双光楔及窗口玻璃进行小角度倾斜,使光楔的两侧表面与激光光轴均不垂直,双光楔的小角度倾斜并不影响它的正常使用。优化后的光学系统的总体光路如图 4 所示,其中 QWP 为 1/4 波片。

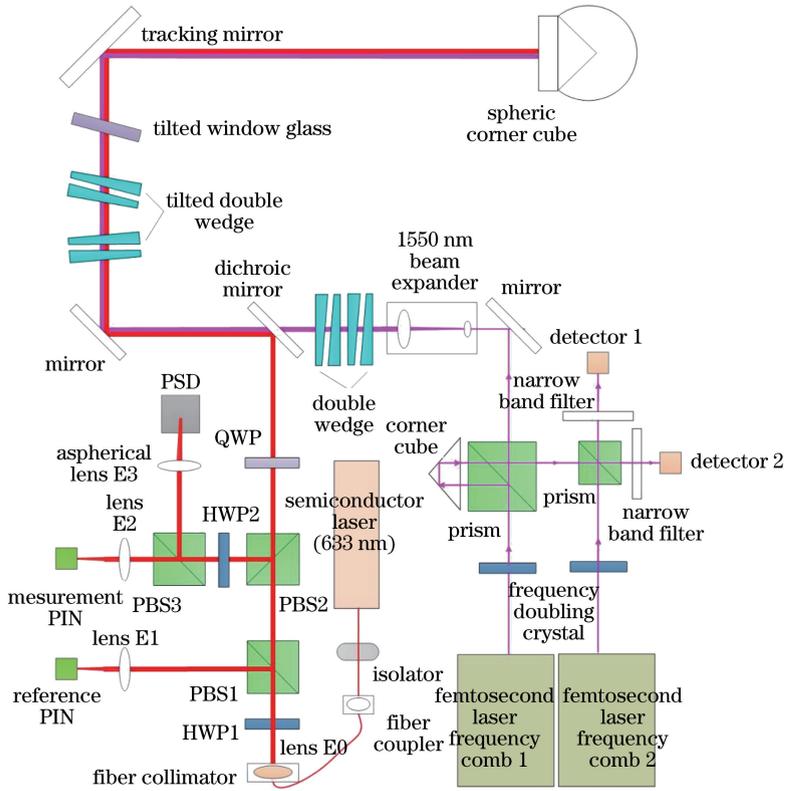


图 4 飞秒激光跟踪仪总体光路示意图

Fig. 4 Diagram of overall optical system in femtosecond laser tracker

在跟踪脱靶量探测方面,系统通过 PSD 探测返回激光的脱靶量来对目标进行跟踪,然而由于 PSD 自身结构尺寸的限制,它不能直接接收返回的扩束激光,需要进行缩束后方可进行探测。对于初步设计的光路结构,PSD 位于扩束系统的缩束端,最终接收的是返回激光经扩束系统缩放后的光斑大小及偏移量,所以在 PSD 的前端不需要加任何光学元件即可探测;但是在优化后的光路系统中,经光纤准直镜出射的激光已具有扩束准直效果,所以出射光路中无需添

加其他扩束装置,也就不存在能使返回激光光斑及偏移量缩小的装置;在这种情况下,PSD 无法正常工作,所以要在 PSD 的接收端加入缩束装置。采用单透镜对返回激光的光斑大小及偏移量进行缩放,入射激光光束经透镜变换后的束腰位置 z_2 可表示为

$$z_2 = f \left[1 - \frac{\left(1 - \frac{z_1}{f}\right)}{\left(1 - \frac{z_1}{f}\right)^2 + \left(\frac{\pi \omega_{01}^2}{\lambda f}\right)^2} \right], \quad (5)$$

式中: z_1 为入射激光光束理想的束腰位置, ω_{01} 为入

射激光光束的束腰半径, f 为透镜的焦距, λ 为激光波长。对于光纤准直后的激光光束, $z_1 \rightarrow \infty$, 此时, 入射激光光束与几何光束具有相同的性质。图 5 所示为 PSD 经理想单透镜会聚探测的原理, 入射激光光束经理想单透镜会聚后的缩放比 β 为

$$\beta = \frac{h}{y_0} = \frac{\Delta h}{\Delta y} = \frac{f}{f - L_0}, \quad (6)$$

式中: L_0 为 PSD 与透镜之间的距离, h 为入射激光的边缘高度, y_0 为 PSD 上的光斑的半径。由 (6) 式可知, 通过选取不同焦距大小的透镜和调整 PSD 与透镜间的距离可获得不同的缩放比。

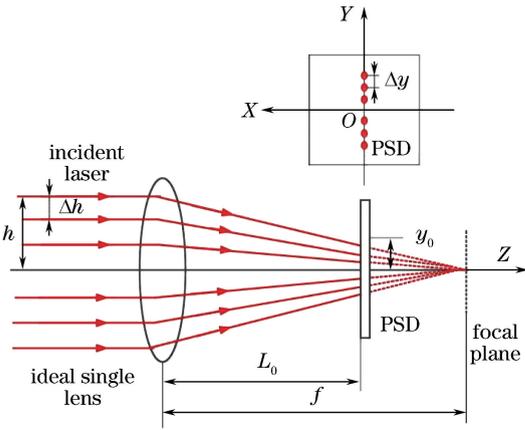


图 5 PSD 经理想单透镜会聚探测示意图
Fig. 5 Detection principle of PSD based on focusing by ideal single lens

5 光路优化分析

5.1 优化后功率分析

功率分配是跟踪仪光学系统的重要工作内容, 分配的合理性影响系统的跟踪探测和测量性能, 因此需对进入探测器的激光经过的光学元件进行分析, 并进行详细的功率分析。优化后的光路系统采用 1/2 波片加 PBS 的方式进行分光, 根据 1/2 波片的工作原理, 入射线偏振光经 1/2 波片出射后仍为线偏振光, 只是光矢量方向发生了改变; 当入射光矢量与 1/2 波片的快轴夹角为 α 时, 通过晶体后的出射光矢量方向向着晶体快轴方向旋转 2α 。经 1/2 波片出射的光矢量在通过 PBS 时, 其光矢量被分成两部分。其中, p 方向振动的光矢量将全部透射, 而 s 方向振动的光矢量将全部反射。则可通过旋转 1/2 波片的快轴方向, 确定进入 PBS 前的光矢量中 p 方向和 s 方向的振幅比, 从而获得特定比例的分光效果。

如图 4 所示, 经光纤准直后出射的激光光束, 由 1/2 波片 HWP1 和 PBS1 进行分光, 其中反射光进入相位测距参考光探测器中作为参考信号被保留; 透射光经 PBS2 和 1/4 波片转换成圆偏振光后由跟踪反射镜出射; 经被测目标反射后, 返回的测量光再次通过 1/4 波片和 PBS2 时, 圆偏振光被转换成 s 方向振动的线偏振光, 此时入射到 PBS2 上的测量光将全部反射; 最后通过 HWP2 和 PBS3 进行分光; 将一部分测量光引进相位测距测量光探测器中, 作为测量信号, 与参考信号进行混合解算测量出被测目标的距离; 将另一部分测量光引进 PSD 中, 用来实现对被测目标的跟踪。

设经光纤准直后的出射激光光束沿 Z 轴正方向传播, X 轴正方向垂直纸面向外, Y 轴正方向为满足右手定律的方向。此时, 从光纤出射的光矢量的琼斯矢量^[13-14]可表示为 $\mathbf{E}_0 = A_0 \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix}$, 式中 A_0 为 s 光的幅值, α 为光矢量振动方向与 x 轴所成的夹角。根据光矢量传播路径, 最终在参考光探测器、测量光探测器和 PSD 上接收的光矢量 \mathbf{E}_1 、 \mathbf{E}_2 、 \mathbf{E}_3 分别可表示为

$$\begin{cases} \mathbf{E}_1 = k_1 \cdot \mathbf{G}_{s1} \cdot \mathbf{G}_{1/2\theta_1} \cdot \mathbf{E}_0 \\ \mathbf{E}_2 = k_2 \cdot \mathbf{G}_{p3} \cdot \mathbf{G}_{1/2\theta_2} \cdot \mathbf{G}_{s2} \cdot \mathbf{G}_{1/4} \cdot \mathbf{G}_{1/4} \cdot \mathbf{G}_{p2} \cdot \mathbf{G}_{p1} \cdot \mathbf{G}_{1/2\theta_1} \cdot \mathbf{E}_0 \\ \mathbf{E}_3 = k_3 \cdot \mathbf{G}_{s3} \cdot \mathbf{G}_{1/2\theta_2} \cdot \mathbf{G}_{s2} \cdot \mathbf{G}_{1/4} \cdot \mathbf{G}_{1/4} \cdot \mathbf{G}_{p2} \cdot \mathbf{G}_{p1} \cdot \mathbf{G}_{1/2\theta_1} \cdot \mathbf{E}_0, \end{cases} \quad (7)$$

式中: k_1 、 k_2 、 k_3 分别为光矢量经过不同路径到达探测器上时在传播过程中的衰减系数; $\mathbf{G}_{1/2\theta_1}$ 和 $\mathbf{G}_{1/2\theta_2}$ 为 1/2 波片的琼斯矩阵; $\mathbf{G}_{1/4}$ 为 1/4 波片的琼斯矩阵; \mathbf{G}_{p1} 、 \mathbf{G}_{s1} 、 \mathbf{G}_{p2} 、 \mathbf{G}_{s2} 、 \mathbf{G}_{p3} 、 \mathbf{G}_{s3} 分别为 PBS 1~3 在 p 方向和 s 方向的琼斯矩阵, 各光学元件的琼斯矩阵可简化为

$$\begin{cases} \mathbf{G}_{p1} = \mathbf{G}_{p2} = \mathbf{G}_{p3} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \\ \mathbf{G}_{s1} = \mathbf{G}_{s2} = \mathbf{G}_{s3} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\ \mathbf{G}_{1/2\theta_1} = \begin{pmatrix} \cos 2\theta_1 & \sin 2\theta_1 \\ \sin 2\theta_1 & -\cos 2\theta_1 \end{pmatrix}, \\ \mathbf{G}_{1/2\theta_2} = \begin{pmatrix} \cos 2\theta_2 & \sin 2\theta_2 \\ \sin 2\theta_2 & -\cos 2\theta_2 \end{pmatrix} \\ \mathbf{G}_{1/4} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1+i & 1-i \\ 1-i & 1+i \end{pmatrix} \end{cases} \quad (8)$$

将(8)式代入(7)式可得:

$$\begin{cases} \mathbf{E}_1 = k_1 \cdot A_0 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \cos(2\theta_1 - \alpha) \end{bmatrix} \\ \mathbf{E}_2 = k_2 \cdot A_0 \cdot \begin{bmatrix} \sin 2\theta_2 \cdot \cos(2\theta_1 - \alpha) \\ 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{E}_3 = k_3 \cdot A_0 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -\cos 2\theta_2 \cdot \cos(2\theta_1 - \alpha) \end{bmatrix} \end{cases}, \quad (9)$$

结合激光强度计算公式,光纤准直输出激光光束在相位测距参考光探测器、相位测距测量光探测器及 PSD 上接收的光强分别为

$$\begin{cases} I_1 = \mathbf{E}_1^2 = k_1^2 \cdot A_0^2 \cdot \cos^2(2\theta_1 - \alpha) \\ I_2 = \mathbf{E}_2^2 = k_2^2 \cdot A_0^2 \cdot \sin^2(2\theta_2) \cdot \cos^2(2\theta_1 - \alpha) \\ I_3 = \mathbf{E}_3^2 = k_3^2 \cdot A_0^2 \cdot \cos^2(2\theta_2) \cdot \cos^2(2\theta_1 - \alpha) \end{cases} \quad (10)$$

5.2 优化后杂光分析

除环境光外,光学系统的杂光主要来源于系统内部光学元件的反射和折射^[15]。在优化后的跟踪仪光路结构中,光学元件垂直表面反射主要分布在 PBS 和波片上,如图 6 所示。

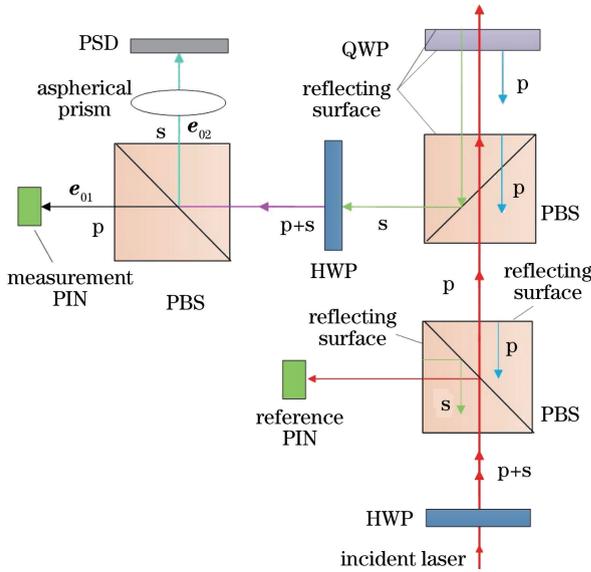


图 6 优化后光路中的杂光分布

Fig. 6 Stray light distribution in optimized optical path

入射激光经 1/2 波片出射后,光矢量被分为 p 方向振动和 s 方向振动两个部分^[16]。当光束进入 PBS 进行分光时,会在 PBS 的垂直表面发生一次反射,由于 PBS 分光的特点,反射面反射的光将全部返回到入射光路中,所以 PBS 垂直表面反射不会引起内部的杂光,同理 1/2 波片也是。此时唯一产生杂光的表面是 1/4 波片的出射表面,这是由于 1/4

波片的出射表面反射的光会经过 1/4 波片,反射光的偏振态发生了改变,使得返回杂光经过 PBS 后将会全部反射,并最终进入测量光探测器和 PSD 中引起测量误差。返回杂光在测量光探测器和 PSD 上光矢量的琼斯矢量可表示为

$$\begin{cases} \mathbf{e}_{01} = k_0 \cdot A_0 \cdot \begin{bmatrix} \sin(2\theta_2) \cdot \cos(2\theta_1 - \alpha) \\ 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{e}_{02} = k_0 \cdot A_0 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -\cos(2\theta_2) \cdot \cos(2\theta_1 - \alpha) \end{bmatrix} \end{cases}, \quad (11)$$

式中: k_0 为 1/4 波片垂直表面的衰减系数。

6 实 验

为了验证跟踪光学系统的性能,搭建了如图 7 所示的测试光路,用于开展 PSD 精度测试实验。图中,将 PSD 及探测光路安装在飞秒激光跟踪仪中,从跟踪仪发出激光照射到靶球上。将反射靶球放置于精密位移台上,沿着 X 和 Y 两个方向移动靶球(移动间隔为 0.5 mm),记录 PSD 测量数据;同时在位移台上架设激光干涉仪测量反射镜,由于干涉仪给出精确位移量,干涉仪测量精度可达到亚微米量级,可用于标定和补偿 PSD 测量值。采用焦距为 100 mm 的非球面透镜进行缩束性能测试,PSD 探测靶面与透镜之间的距离为 70 mm。

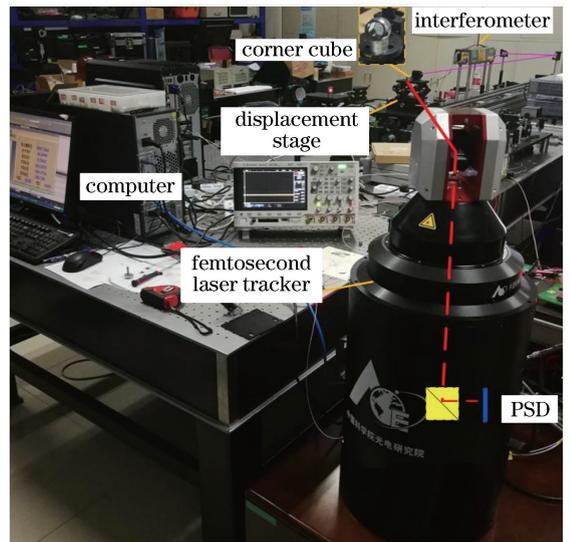


图 7 PSD 探测精度测试实验

Fig. 7 Test experiment of PSD detection accuracy

不同靶球偏移量对应的 PSD 位置输出坐标数据如表 1 所示。 i 和 j 分别为精密位移台沿 X 和 Y 两个方向的移动次数, d_{xi} 和 d_{yi} 分别为精密位移台每次移动时靶球在 X 和 Y 方向的坐标, P_{xi} 和 P_{yi} 为

PSD 沿 X 方向每次移动时的测量数据, P_{Xi} 和 P_{Yj} 为 PSD 沿 Y 方向每次移动时的测量数据。由结果可知,

靶球的偏移量与 PSD 的位置输出坐标保持着良好的线性关系, 所以该方法可以应用于跟踪测量系统。

表 1 不同靶球偏移量下 PSD 的输出坐标

Table 1 Coordinate relationship of PSD output of different target ball off-target amount

i	d_{Xi}/mm	P_{Xi}/mm	P_{Yi}/mm	j	d_{Yj}/mm	P_{Xj}/mm	P_{Yj}/mm
0	-3.5	-0.024	-2.286	0	-3.5	-2.470	-0.062
1	-3.0	-0.026	-1.954	1	-3.0	-2.126	-0.061
2	-2.5	-0.025	-1.621	2	-2.5	-1.778	-0.060
3	-2.0	-0.024	-1.292	3	-2.0	-1.431	-0.058
4	-1.5	-0.022	-0.959	4	-1.5	-1.083	-0.052
5	-1.0	-0.024	-0.626	5	-1.0	-0.734	-0.052
6	-0.5	-0.021	-0.297	6	-0.5	-0.386	-0.050
7	0.0	-0.024	0.032	7	0.0	-0.041	-0.058
8	0.5	-0.020	0.364	8	0.5	0.304	-0.052
9	1.0	-0.024	0.694	9	1.0	0.648	-0.054
10	1.5	-0.027	1.023	10	1.5	0.993	-0.052
11	2.0	-0.023	1.356	11	2.0	1.338	-0.060
12	2.5	-0.026	1.688	12	2.5	1.685	-0.051
13	3.0	-0.022	2.017	13	3.0	2.030	-0.058
14	3.5	-0.019	2.346	14	3.5	2.378	-0.054

由于光路的折射, 靶球水平移动时会引起 PSD 沿 Y 轴方向的坐标变化, 靶球垂直移动时会引起 PSD 沿 X 轴方向的坐标变化, 所以需要进行坐标系配准。此外, 光路和电子电路对 PSD 输出结果具有放大作用, 需要根据实测结果进行比例系数标定。根据表 1 的原始数据, 可得到平均比例系数 $k_X = 1.5118, k_Y = 1.4438$ 。

令靶球移动位移量为 Δd_{Xi} 和 Δd_{Yj} :

$$\begin{cases} \Delta d_{Xi} = |d_{Xi} - d_{X(i-1)}| \\ \Delta d_{Yj} = |d_{Yj} - d_{Y(j-1)}| \end{cases}, \quad (11)$$

则 PSD 探测位移量 ΔP_{Xi} 和 ΔP_{Yj} 可表示为

$$\begin{cases} \Delta P_{Xi} = \sqrt{[P_{Xi} - P_{X(i-1)}]^2 + [P_{Yi} - P_{Y(i-1)}]^2} \\ \Delta P_{Yj} = \sqrt{[P_{Xj} - P_{X(j-1)}]^2 + [P_{Yj} - P_{Y(j-1)}]^2} \end{cases}. \quad (12)$$

式中: $i > 0, j > 0$ 。

从而, PSD 探测误差 $\Delta X_i, \Delta Y_j$ 可表示为

$$\begin{cases} \Delta X_i = \Delta d_{Xi} - k_X \times \Delta P_{Xi} \\ \Delta Y_j = \Delta d_{Yj} - k_Y \times \Delta P_{Yj} \end{cases}. \quad (13)$$

根据标定结果, 重新进行比对测试, 获取测量数据, 靶球和干涉仪反射镜每一步位移量 $\Delta d_{Xi} = \Delta d_{Yj} = 0.5 \text{ mm}$, 结合 (11)~(13) 式, 计算 X 和 Y 两个方向上位移误差, 得到 PSD 靶面两个方向上位移误差曲线如图 8 所示, 探测精度在 $3 \mu\text{m}$ 以内。

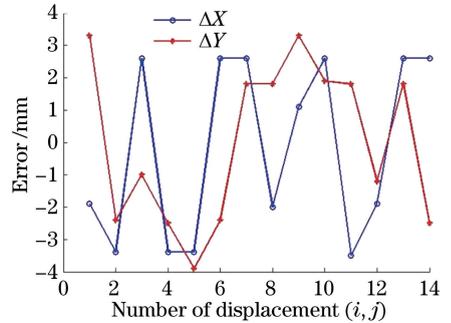


图 8 PSD 探测误差曲线

Fig. 8 Detection errorcurve of PSD

7 结 论

探讨了飞秒激光跟踪仪跟踪光路设计所需考虑的问题, 重点分析了光学系统对跟踪探测的影响, 在 PSD 探测光路和系统准直扩束等方面对光路系统进行了优化设计, 分析了优化后光路的功率和杂光对 PSD 探测性能的影响规律。搭建了测试光路, 进行了 PSD 探测精度测试, 在实验室环境光干扰情况下, 比对精度可达 $3 \mu\text{m}$, 满足飞秒激光跟踪仪跟踪的需求。

参 考 文 献

[1] Nie H B. Research on key technologies of precision metrology for large-scale equipments based on laser

- tracker[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017: 1-9.
 聂海滨. 基于激光跟踪仪的大型设备精密测量关键技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017: 1-9.
- [2] Liu L, Chen X D, Xiong L, *et al.* Angle error investigation in laser tracker testing large aspheric mirrors [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43 (11): 1104003.
 刘力, 陈新东, 熊玲, 等. 大口径非球面镜检测中激光跟踪仪测角误差研究 [J]. 中国激光, 2016, 43 (11): 1104003.
- [3] Wendt K, Franke M, Härtig F. Measuring large 3D structures using four portable tracking laser interferometers [J]. Measurement, 2012, 45 (10): 2339-2345.
- [4] Hu K, Li Y, Ji R Y, *et al.* Distance measurement of femtosecond laser in new type femtosecond laser tracker [J]. Instrument Technique and Sensor, 2015 (6): 28-30.
 胡坤, 黎尧, 纪荣祎, 等. 新型飞秒激光跟踪仪中飞秒激光测距研究 [J]. 仪表技术与传感器, 2015(6): 28-30.
- [5] He H N, Huang L S. Progress in the performance test of industrial robots [J]. Journal of China Jiliang University, 2017, 28(2): 133-140, 168.
 贺惠农, 黄连生. 工业机器人整机性能测试进展 [J]. 中国计量大学学报, 2017, 28(2): 133-140, 168.
- [6] Zhao D, Dong C L, Guo H, *et al.* Kinematic calibration based on the multicollinearity diagnosis of a 6-DOF polishing hybrid robot using a laser tracker [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018: 1-13.
- [7] Dong D F, Zhou W H, Ji R Y, *et al.* Design of precise tracking system of laser tracker [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(2): 309-318.
 董登峰, 周维虎, 纪荣祎, 等. 激光跟踪仪精密跟踪系统的设计 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(2): 309-318.
- [8] Cui C J. Research on key technologies of optical system of femtosecond laser tracking measurement system [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2017: 50-57.
 崔成君. 飞秒激光跟踪测量光学系统关键技术研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2017: 50-57.
- [9] Cui C J, Lao D B, Dong D F, *et al.* Calibration method for initial position of miss distance in femtosecond laser tracker [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(1): 0117001.
 崔成君, 劳达宝, 董登峰, 等. 飞秒激光跟踪仪跟踪脱靶量零位标定方法 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(1): 0117001.
- [10] Zhang Y J, Qiu Z R, Li X H, *et al.* Laser tracking coordinate measurement system based on PSD [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2011, 30 (7): 116-119.
 张亚娟, 裘祖荣, 李杏华, 等. 基于 PSD 的激光跟踪坐标测量系统 [J]. 传感器与微系统, 2011, 30(7): 116-119.
- [11] Duan J, Sun X Y, Zhou N, *et al.* Applications research to PSD in the laser displacement detecting system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36 (z1): 549-552.
 段洁, 孙向阳, 周娜, 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(z1): 549-552.
- [12] Liu Q H, Feng G Y, Deng G L, *et al.* Theoretical and experimental studies on influence of collimation error on beam quality factor measurement [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(9): 0905001.
 刘亲厚, 冯国英, 邓国亮, 等. 准直误差对光束质量因子测量影响的理论与实验研究 [J]. 中国激光, 2017, 44(9): 0905001.
- [13] Mu Y J, Li R, Wan Y, *et al.* Stray light analysis and suppression for spaceborne lidar system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 0510005.
 穆永吉, 李蕊, 万渊, 等. 星载激光雷达系统杂散光分析与抑制 [J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0510005.
- [14] Yu D Y, Tan H Y. Engineering optics [M]. Beijing: China Machine Press, 2011: 494-499.
 郁道银, 谈恒英. 工程光学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 494-499.
- [15] Zhang Y Y, Guo Y, Ren Y J, *et al.* Study of drift error and its compensation method in absolute distance measurement by optical frequency scanning interferometry [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37 (12): 1212001.
 张雅雅, 郭寅, 任永杰, 等. 光频扫描干涉绝对测距漂移误差与补偿方法研究 [J]. 光学学报, 2017, 37 (12): 1212001.
- [16] Chen H F, Tang L, Sun Y Q, *et al.* Zemax simulation based energy analysis of optical system for laser tracking measurement [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(7): 0704009.
 陈洪芳, 汤亮, 孙衍强, 等. 基于 Zemax 仿真的激光追踪测量光学系统能量分析 [J]. 中国激光, 2018, 45(7): 0704009.