

位置敏感探测器对激光追踪测量系统的影响

陈洪芳*, 汤亮, 张爽, 孙若水, 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 提出了一种分析位置敏感探测器(PSD)对激光追踪测量系统性能影响的方法,分析了 PSD 的测量原理,建立了激光追踪测量系统中的 PSD 测量模型。利用 Matlab/Simulink 软件搭建了激光追踪测量系统的仿真模型,仿真分析了 PSD 的位移电压转换系数对激光追踪测量系统性能的影响。仿真结果表明,当位移电压转换系数 α_p 为 1000 m/V 时,PSD 的响应时间较短,激光追踪测量系统动态响应的超调量低、稳定时间短、动态超调误差小。实验结果表明, α_p 越大,PSD 光电转换电路输出的电压误差越大,对激光追踪测量系统性能的影响也越大。当 $\alpha_p = 1000$ m/V 时,PSD 光电转换电路输出电压的误差最低,稳定时间最短。

关键词 测量与计量; 激光追踪测量系统; 位置敏感探测器; 位移电压转换系数; 跟踪性能

中图分类号 TH71

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1104001

Effects of Position Sensitive Detector on Laser Tracing Measurement System

Chen Hongfang*, Tang Liang, Zhang Shuang, Sun Ruoshui, Sun Yanqiang

Beijing Engineering Research Center of Precision Measurement Technology and Instruments,

Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract In the study, a method to analyze the effect of position sensitive detector (PSD) on the performance of laser tracing measurement system is proposed. The PSD measurement principle is analyzed, and the PSD measurement model is established in the laser tracing measurement system. A simulation model of the laser tracking measurement system is built using Matlab/Simulink software, and the influence of the displacement voltage conversion coefficient of PSD on the performance of the laser tracing measurement system is simulated and analyzed. Simulation results show that when the displacement voltage conversion coefficient α_p is 1000 m/V, the response time of PSD is short, the overshoot of the dynamic response of the laser tracing measurement system is low, the stability time is short, and the dynamic overshoot error is small. Experimental results show that the greater the α_p , the greater the voltage error output by the PSD photoelectric conversion circuit, and the greater the impact on the performance of the laser tracing measurement system. When $\alpha_p = 1000$ m/V, the error of the output voltage of the PSD photoelectric conversion circuit is the lowest, and the stabilization time is the shortest.

Key words measurement and metrology; laser tracing measurement system; position sensitive detector; displacement voltage conversion coefficient; tracking performance

OCIS codes 120.1880; 120.3180; 120.4630; 120.4820

1 引言

自激光追踪测量系统研制以来,面向现场的坐标系统——激光追踪仪解决了坐标测量机标定效率和精度提高难度大的问题^[1-2]。激光追踪测量系统中基准球的设计,使空间距离的测量精度得到了大幅提高,可实现对三坐标测量机、机床和加工中心的

校准^[3-5]。激光追踪测量系统利用位置敏感探测器(PSD)检测由猫眼移动引起的反射光束和入射光束偏移量,通过电机控制万向节式回转轴系,使光束保持对目标镜的跟踪。

PSD 是一种高精度二维位移传感器,可实现对空间目标快速、高精度、平稳的跟踪测量。Nikulin 等^[6]基于 Lyapunov 函数研制了自适应跟踪控制系

收稿日期: 2020-04-13; 修回日期: 2020-06-07; 录用日期: 2020-06-23

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB2001400)、北京市自然科学基金(3182005)

* E-mail: chf0302@126.com

统,结合 PSD 实现了全局稳定、鲁棒性强的跟踪控制性能。林心龙等^[7]提出了一种基于永磁同步电动机(PMSM)矢量控制原理及空间矢量脉冲宽度调制(SVPWM)算法的精密伺服系统建模方法,实现了激光跟踪测量系统的高性能跟踪控制测量。Gao 等^[8]通过 PSD 光敏面的光斑中心位置计算得到目标镜相对运动的位移和角度,设计了六自由度的 PSD 标定测试系统。

目前关于 PSD 对激光追踪测量系统跟踪性能的影响研究较少。因此,本文建立了基于 PSD 的测量模型以及激光追踪测量系统伺服控制模型,仿真分析了 PSD 性能对激光追踪测量伺服控制系统的影响规律,并进行了实验研究。

2 位置敏感探测器的测量原理

PSD 是一种基于非均匀半导体横向光电效应且对入射光位置敏感的光电器件。其探测的信号大小与入射光的分布情况无关,只与入射光的能量重心位置有关^[9-13]。PSD 可进行连续的位置检测,且其光敏面没有离散量化分割,不存在死区,在任何区域都可以进行光斑位置的测量^[14-19]。PSD 具有的特点^[20-24]:1)位置分辨率高;2)响应速度快;3)信号处理相对简单;4)对光源、光学系统的要求不高;5)光谱响应较宽;6)可测量光敏面上入射光斑能量的中心位置,同时也能检测光强。

PSD 的原理图如图 1 所示,设 PSD 的中心为坐标原点 O ,根据右手定则,建立 $O-xy$ 直角坐标系, x 轴方向为水平方向, y 轴方向为垂直方向。 $P(x_0, y_0)$ 为照射到 PSD 上的入射光斑能量中心点,以该点为中心建立 $P-x'y'$ 直角坐标系, x' 轴方向为水平方向,且 x' 轴与 x 轴平行; y' 轴方向为垂

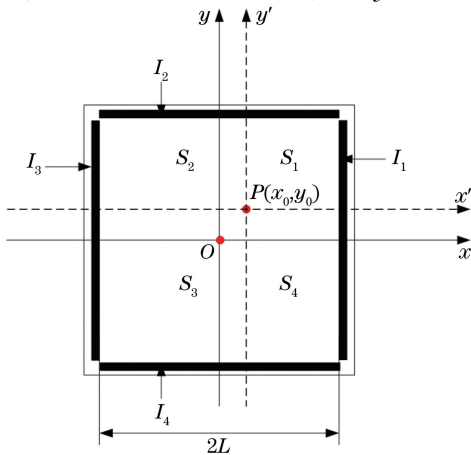


图 1 PSD 的测量原理图

Fig. 1 Measuring principle of PSD

直方向,且 y' 轴与 y 轴平行。 $P-x'y'$ 直角坐标系将 PSD 接收面分成四个区域,面积分别为 S_1, S_2, S_3, S_4 。四个电极的长度均为 $2L, I_1 \sim I_4$ 分别为四个电极输出的电流。

根据 Lucovsky 方程^[25-29],当 PSD 完全反向偏置时,稳态电势的分布可表示为

$$\nabla^2 U(x, y) = -\frac{\rho_R}{\omega_R} I_s(x, y), \quad (1)$$

式中, $U(x, y)$ 为电势, ∇^2 为拉普拉斯算子, ρ_R 为电阻率, ω_R 为 PN 结的厚度, $I_s(x, y)$ 为激光照射到 PSD 上产生的光电流,与光照强度成正比。

PSD 上每个电极的电流可表示为^[30-33]

$$I_i = \frac{\rho_R}{\omega_R} \int_{p=p_i} \left. \frac{\partial U(x, y)}{\partial p} \right|_{p=p_i} dl_i, \quad i=1, 2, 3, 4, \quad (2)$$

式中, p_i 为每个电极的法向方向, l_i 为电极的长度。

入射光照射到 PSD 上光斑中心坐标的归一化可表示为

$$\hat{x}(x_0, y_0) = K \frac{(I_1 + I_4) - (I_2 + I_3)}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4}, \quad (3)$$

$$\hat{y}(x_0, y_0) = K \frac{(I_1 + I_2) - (I_3 + I_4)}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4}, \quad (4)$$

式中, K 为线性常数,可根据 PSD 的型号确定误差补偿系数。当入射光斑的能量中心与 PSD 光敏面的中心不重合时,有

$$S_1 = (L - x_0)(L - y_0), \quad (5)$$

$$S_2 = (L + x_0)(L - y_0), \quad (6)$$

$$S_3 = (L + x_0)(L + y_0), \quad (7)$$

$$S_4 = (L - x_0)(L + y_0). \quad (8)$$

PSD 的光敏面面积可表示为

$$S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 = (2L)^2. \quad (9)$$

由于光敏面表面的薄层电阻线性均匀一致,其载流子的移动符合欧姆定律,四个电流分量 I_1, I_2, I_3, I_4 分别流经 S_1, S_2, S_3, S_4 后到达四个电极。入射到 PSD 光敏面的光斑能量中心的相对位置坐标可表示为

$$\hat{x}(x_0, y_0) = \frac{(S_1 + S_4) - (S_2 + S_3)}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4} = \frac{x_0}{L}, \quad (10)$$

$$\hat{y}(x_0, y_0) = \frac{(S_1 + S_2) - (S_3 + S_4)}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4} = \frac{y_0}{L}. \quad (11)$$

综上所述,得到光斑能量中心在 PSD 上的坐标为

$$x_0 = K \cdot L \cdot \frac{(I_1 + I_4) - (I_2 + I_3)}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} = K \cdot L \cdot \frac{I_x}{I_s}, \quad (12)$$

$$y_0 = K \cdot L \cdot \frac{(I_1 + I_2) - (I_3 + I_4)}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} = K \cdot L \cdot \frac{I_y}{I_s}, \quad (13)$$

式中, I_s 为激光照射到 PSD 上产生的光电流, I_x 为在 PSD 的 x 方向产生的光电流, I_y 为在 PSD 的 y 方向产生的光电流。

3 激光追踪测量系统中 PSD 测量模型

激光追踪测量系统利用 PSD 进行跟踪控制的原理如图 2 所示。由激光器发出的线偏振光经过偏振分光镜(PBS)后,光矢量平行于入射面的 p 偏振光被透射,将经四分之一波片 QWP1 得到的圆偏振光作为参考光束;参考光束经 PBS 后,光矢量垂直于入射面的 s 偏振光被反射后经 QWP2 得到圆偏振光;经透镜(lens)聚焦后,入射到标准球,反射后再次经过 QWP2 得到 p 偏振光;p 偏振光经 PBS 透射后,经过 QWP3 得到圆偏振光。跟踪光路如图 2 中的虚线框部分,圆偏振光经追踪光路的光分镜(BS)透射后被猫眼反射,再次经过 BS 后的反射光被 PSD 接收。将光电信号处理后的信号反馈给电机,实现跟踪控制。再次经过 BS 被透射的光经 QWP3 得到 s 偏振光,经 PBS 被反射,将经 QWP1 后得到的圆偏振光作为测量光束。参考光束和测量光束进入激光追踪测量光学系统的干涉光路形成激

激光追踪测量系统

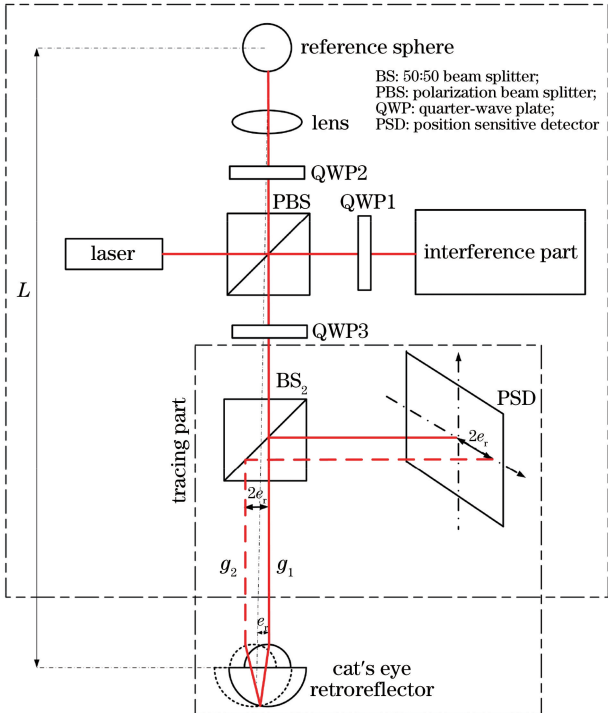


图 2 激光跟踪测量系统的原理

Fig. 2 Principle of laser tracing measurement system

光干涉测量信号。

测量光 g_1 入射到猫眼中心时,经猫眼后按原路反射。反射光 g_2 经分光镜 BS_2 反射后入射到 PSD 的中心。此时,PSD 光电处理电路输出的信号幅值为零。设猫眼运动的相对位移为 e_r ,经猫眼反射后的出射光束与入射光束不重合。反射到 PSD 上的光束偏离 PSD 中心的距离为 $2e_r$ 。此时 PSD 的光电处理电路有输出信号。设 e_{rx} 为量 e_r 在 x 方向的投影, e_{ry} 为 e_r 在 y 方向的投影,则 PSD 上的光斑能量中心坐标 x_0 和 y_0 分别为

$$x_0 = 2e_{rx}, \quad (14)$$

$$y_0 = 2e_{ry}. \quad (15)$$

PSD 在 x 和 y 方向输出的电流分别为^[34]

$$I_x = (I_1 + I_4) - (I_2 + I_3) = 2 \cdot x_0 \cdot D \cdot G, \quad (16)$$

$$I_y = (I_1 + I_2) - (I_3 + I_4) = 2 \cdot y_0 \cdot D \cdot G, \quad (17)$$

式中, D 为光斑直径, $G = \frac{4I_s}{\pi D^2}$ 为光电转换系数,单位为 A/m^2 。将 PSD 在 x 和 y 方向输出的电流转化成电压,并通过低通滤波器后,得到

$$u_x = \frac{k_e}{\tau_{op} \cdot s + 1} \cdot I_x = \frac{k_e}{\tau_{op} \cdot s + 1} \cdot \frac{16 \cdot I_s}{\pi D} \cdot e_{rx}, \quad (18)$$

$$u_y = \frac{k_e}{\tau_{op} \cdot s + 1} \cdot I_y = \frac{k_e}{\tau_{op} \cdot s + 1} \cdot \frac{16 \cdot I_s}{\pi D} \cdot e_{ry}, \quad (19)$$

式中, k_e 为电流电压转换系数,由 PSD 的分流层电阻以及负载电阻的总和决定, s 为一变量, τ_{op} 为低通滤波的时间常数,实验取 $\tau_{op} = 0.001$ s,主要作用是滤除外界杂散光的影响。

位移电压转换系数可表示为

$$\alpha_p = \frac{16 \cdot I_s}{\pi D} \cdot k_e. \quad (20)$$

PSD 的传递函数 $P(s)$ 为输出电压与位置偏差的比值,可表示为

$$P(s) = \frac{U(s)}{D(s)} = \frac{\alpha_p}{\tau_{op} \cdot s + 1}, \quad (21)$$

式中, $U(s)$ 为 PSD 光电转换电路的输出电压, $D(s)$ 为猫眼的入射光与反射光之间的偏移距离。

4 PSD 对激光追踪测量系统跟踪性能的影响

激光追踪测量系统是一个位置随动系统,光

学系统是激光追踪测量系统的随动部分,猫眼是主动部分。当猫眼静止时,被猫眼反射的光束经光学系统后入射到 PSD 上的光斑能量中心与光敏面的中心重合。当猫眼移动时,被猫眼反射的光束经光学系统后入射到 PSD 上的光斑能量中心与

光敏面的中心不重合。经图 3 所示的三环控制系统后,控制电机带动激光追踪测量光学系统运动,保证从光学系统出射的光入射到猫眼中心,实现系统的跟踪测量^[35-42],其中+, - 分别表示正反馈和负反馈。

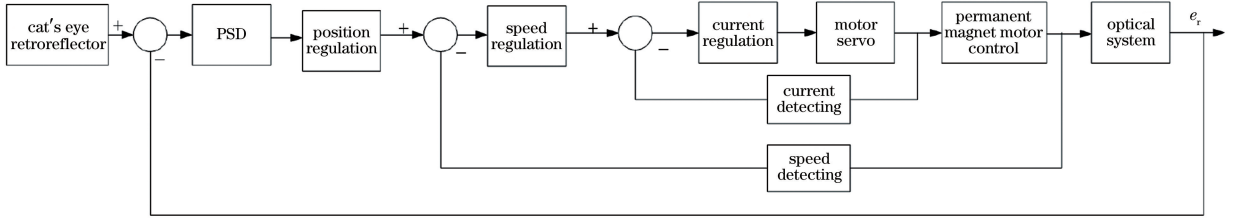


图 3 激光追踪测量伺服控制系统的原理图

Fig. 3 Schematic diagram of the servo control system of the laser tracing measurements system

激光追踪测量系统的伺服控制系统采用电流-速度-位置三环控制。电流环用于减小转矩的波动、提高系统刚性,以加快系统响应。速度环可抑制系统的干扰、减小直流电动机的惯性、改善系统的线性度。位置环采用位置自动控制方式,在指定时刻

将被控对象的位置自动控制在预先给定的目标位置,使控制后的位置与目标位置保持在偏差范围内。图 4 为在 Matlab/Simulink 仿真环境下搭建的激光追踪测量精密伺服控制系统模型。

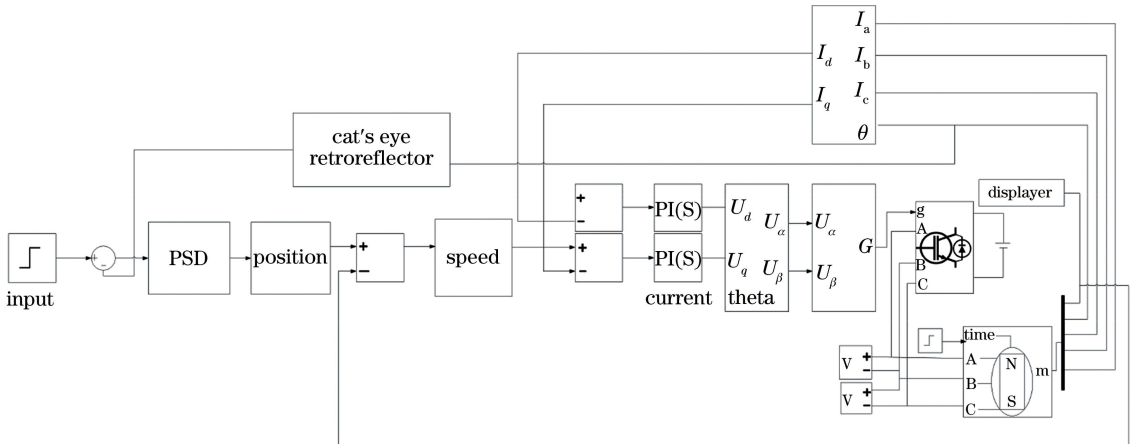


图 4 激光追踪测量伺服控制系统的仿真模型

Fig. 4 Simulation model of the precision servo control system of the laser tracing measurement system

为了分析 PSD 对激光追踪测量系统跟踪性能的影响,将激光追踪测量系统中的 PSD 测量模型嵌入激光追踪测量精密伺服控制模型中进行仿真分析。由于系统的动态性能是一个多参数、多调节算法的复杂函数。因此,搭建的仿真模型是根据激光追踪测量系统的动力学方程建立的,且保证系统动态精度特性的各项精度指标均处于理想条件,仿真模型的电机参数如表 1 所示。利用电流-速度-位置的三环控制系统搭建了激光追踪测量精密伺服控制系统。控制系统采用比例-积分-微分(PID)控制器。PID 控制器根据系统的误差,利用比例、积分、微分计算出控制量进行控制。其中, P 表示比例控制系统的响应快速性,可快速作用于输出; I 表示积

分控制系统的准确性,可消除过去的累积误差; D 表示微分控制系统的稳定性,具有超前控制作用。在比例控制中,控制器的输出与输入误差信号成比例关系。在积分控制中,控制器的输出与输入误差信号的积分成正比关系。在微分控制中,控制器的输出与输入误差信号的微分(即误差的变化率)成正比关系, P 、 I 、 D 分别为比例、积分、微分对应的数值。电流环通过提取电机的三相电流 I_a, I_b, I_c , 经过 Clark 与 Park 变换后得到 I_q, I_d , 分别计算其与电机两个虚拟轴(d 轴和 q 轴)上设定值 I_{q_ref}, I_{d_ref} 的误差;然后将 q 轴的电流误差代入 q 轴电流 PI 环,计算得到 V_q , 将 d 轴的电流误差代入 d 轴电流 PI 环,计算得到 V_d ;经 Park 逆变换与 SVPWM 算

法将 V_q, V_d 转换为 V_a, V_b, V_c 输入到电机三相上。由经验参数与仿真实验测试, 确定电流环 d 轴 PI 控制器参数: $P=8, I=10$, q 轴 PI 控制器参数: $P=20, I=50$ 。速度环是在电流环模型的基础上建立, 通过提取电机转子角速度后计算出电机速度 ω 与设定值 ω_{ref} 的误差并代入速度 PI 环, 将计算结果作为电流环的输入。通过经验参数与仿真实验测试, 确定速度环 PI 控制器参数: $P=1, I=0.5$ 。位置环在速度环与电流环的基础上建立, 根据 PSD 的测量模型, 将计算结果作为速度环的输入。根据三个闭环模拟激光跟踪测量精密伺服控制系统, 利用系统对阶跃信号的动态响应, 研究 PSD 的位移电压转换系数对伺服控制系统的影响。

表 1 仿真模型的电机参数

Table 1 Motor parameters of the simulation model

Motor	Parameter
Rated speed $n / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	60
Phase inductance L / mH	1.8
Stator resistor R / Ω	1.4
Rated torque $T_L / (\text{N} \cdot \text{m})$	28
Number of pole pairs p	4
Moment of inertia $J / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.215

根据(20)式可知, 入射到 PSD 的光斑位置、入射光强、PSD 的分流层电阻以及负载电阻的总和共同决定了位移电压转换系数 α_p 的大小。图 5 为 PSD 在不同的 α_p 下, 仿真得到的阶跃响应曲线。可以发现, 当 α_p 从 1800 m/V 变化到 1000 m/V 时, 系统响应曲线的超调量 σ 从 57% 下降到 16%, 响应时间从 0.300 s 下降到 0.125 s; 当 α_p 从 1000 m/V 变化到 200 m/V 时, σ 从 16% 上升到 61%, 响应时间从 0.125 s 上升到 1.300 s; 当位移电压转换系数 α_p 为 1000 m/V 时, 系统响应曲线的超调量最低, 响应时间最短。

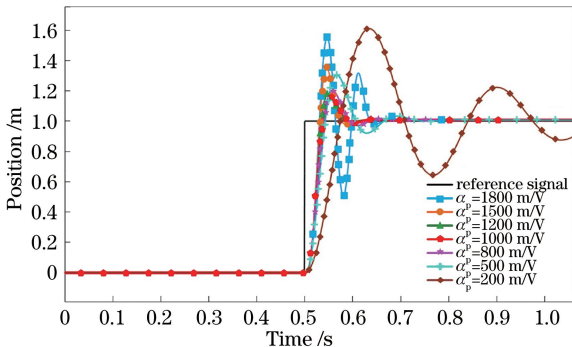


图 5 PSD 在不同 α_p 下的阶跃响应曲线

Fig. 5 Step response curves of PSD under different α_p

图 6 为 PSD 在不同 α_p 下对应的跟踪误差曲线, 可以发现, 当位移电压转换系数 $\alpha_p = 100$ m/V 时, 系统的动态超调误差为 16%, 系统动态响应曲线的超调量最低, 稳定时间最短, 响应的系统动态超调误差最小, 可实现精准的跟踪测量。

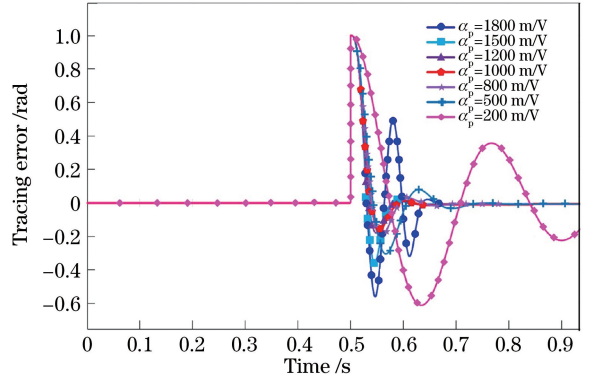


图 6 PSD 在不同 α_p 的跟踪误差曲线

Fig. 6 Tracing error curves of the PSD under different α_p

图 7 为猫眼在不同运动速度时系统的阶跃响应曲线, 可以发现, 当 $\alpha_p = 1000$ m/V, 猫眼的运动速度从 0.2 m/s 增加到 1.3 m/s 时, σ 从 40% 下降到 10%, 响应时间从 0.200 s 下降到 0.100 s。猫眼的运动速度从 1.3 m/s 增加到 2.5 m/s 时, σ 从 10% 增加到 50%, 响应时间从 0.100 s 增加到 0.625 s。当位移电压转换系数 α_p 为 1000 m/V, 且猫眼的运动速度在 0.3~2.4 m/s 时, σ 最低, 响应时间最短。

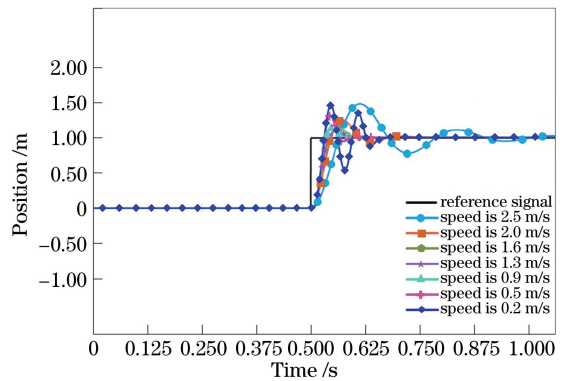


图 7 猫眼反射镜不同运动速度下的阶跃响应曲线

Fig. 7 Step response curves of cat's eye retroreflector at different moving speeds

图 8 为猫眼在不同运动速度时系统的跟踪误差曲线, 可以发现, 当 $\alpha_p = 1000$ m/V, 猫眼的运动速度在 0.3~2.4 m/s 时, σ 小于 40%, 此时系统的跟踪性能最好。

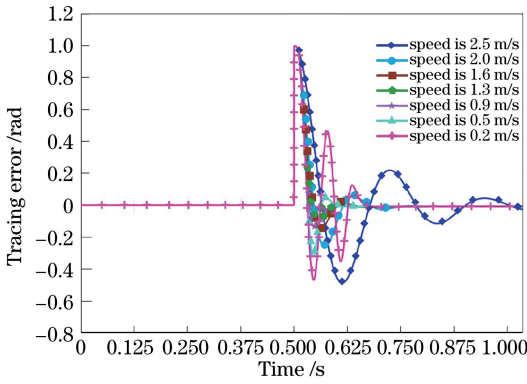


图 8 猫眼反射镜不同运动速度下的跟踪误差曲线图
Fig. 8 Tracing error curves of cat's eye retroreflector at different moving speeds

5 实验分析

由于实验条件的限制,无法分析 PSD 的 α_p 对激光追踪测量系统跟踪性能影响。但激光追踪测量系统的跟踪性能体现在 PSD 输出电压的准确性和光电转换电路响应的快速性。为了进一步验证 PSD 对激光追踪测量系统跟踪性能的影响,分析了 PSD 的 α_p 对光电转换电路输出电压和光电转换电路响应时间的影响。

5.1 PSD 位移电压转换系数对光电转换电路输出电压的影响

根据(20)式可知, α_p 会影响 PSD 输出电压的准确性,图 9 为测量光电转换电路输出电压的实验装置。其中,光源为 SIOS-SP 2000D 激光干涉仪,将 PSD(日本 HAMAMATSU 公司;S5991)固定在精密定位平台(Physik Instrumente 公司;P-561.3CD)上,激光干涉仪固定在光学平台上,激光干涉仪、五角棱镜共轴。SIOS-SP 2000D 发出的激光束经五角棱镜反射后,入射到 PSD 上,PSD 的相关参数如表

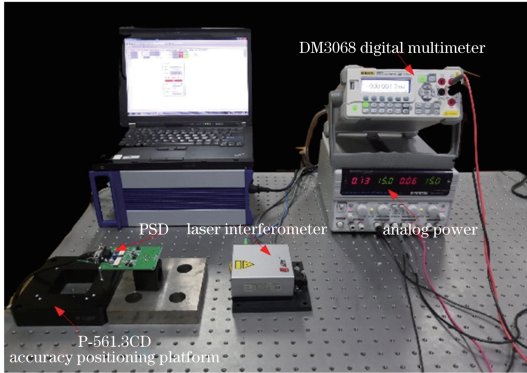


图 9 测量光电转换电路输出电压的实验装置

Fig. 9 Experimental device for measuring output voltage of photoelectric conversion circuit

2 所示。输出的电压信号经 PSD 光电转换电路处理后用数字万用表测量,精密定位平台沿平行光轴和垂直光轴的方向反复移动,利用 DM3068 Digital Multimeter 测量得到反映光斑能量中心位置坐标的电压值 u_x 和 u_y 。

表 2 PSD 的性能参数

Table 2 Electrical and optical characteristics

Parameter	Value
Large photosensitive area / (mm×mm)	9×9
Spectral response range /nm	320~1100
Peak sensitivity wavelength /nm	960
Photosensitivity / (A·W ⁻¹)	0.38
Position detection error /μm	±150
Saturation photocurrent /μA	500
Dark current /nA	1~50
Rise time /μs	2
Terminal capacitance /pF	500~1000
Position resolution /μm	1.5

根据 α_p 的大小可得到与入射光斑能量中心位移变化量对应的输出电压 u_x 和 u_y ,利用 PSD 内部的除法电路进行增益调节,可设置不同的 α_p ,利用精密定位平台可以实现 PSD 入射光的定量偏移。实验过程中,精密定位平台分别沿光轴方向和垂直光轴方向以 10 μm 的步长移动 10 次得到 u_x 和 u_y 。利用多次测量取平均值的方法得到不同 α_p 对应的 u_x 和 u_y 的测量误差 Δu_x 和 Δu_y ,如表 3 所示。

表 3 不同 α_p 下 PSD 光电转换电路输出电压值的误差

Table 3 Errors of output voltage values of PSD photoelectric conversion circuit under different α_p

$\alpha_p / (\text{m} \cdot \text{V}^{-1})$	$\Delta u_x / \text{mV}$	$\Delta u_y / \text{mV}$
500	0.061	0.639
1000	0.129	0.266
1500	0.214	0.639
2000	0.363	1.508

从表 2 可以发现,测量得到的 u_x 和 u_y 越不准确,对激光追踪测量系统跟踪性能的影响越大。且 α_p 越大,PSD 光电转换电路输出电压的误差越大,对跟踪性能影响越大。当位移电压转换系数 α_p 为 1000 m/V 时,PSD 光电转换电路输出电压值的误差最小。

5.2 PSD 位移电压转换系数对光电转换电路响应时间的影响

PSD 的响应时间可表示为 $T = rc(2L)^2 / (2\pi^2)$,其中, r 为分流层(p 层)的方块电阻, c 为单位面积的电容, $2L$ 为 PSD 的电极长度。图 10 为测

量光电转换电路响应时间的实验装置,其中,光源为XL80 激光干涉仪,PSD 固定在三坐标测量机(海克斯康公司:GLOBAL PERFORMANC)上。XL80 激光干涉仪固定在三脚架上,激光干涉仪、五角棱镜共轴。激光干涉仪发出的激光束经五角棱镜反射后,入射到 PSD 上。首先设置 PSD 的 α_p ,然后用示波器测量经 PSD 光电转换电路处理后输出的电压信号。三坐标测量机沿光轴方向以 100 mm/s 的速度移动 3.661 mm,相应 PSD 的入射光偏移 3.661 mm,用示波器记录 PSD 光电转换电路输出的电压曲线。

图 11 为 α_p 分别为 500,1000,1500,2000 m/V 时的实验结果图,可以发现,当 α_p 从 2000 m/V 变化到 1000 m/V 时,PSD 的响应时间从 161.8 ms 下降到 147.8 ms,下降了 8.65%。当位移电压转换系数 α_p 从 1000 m/V 变化到 500 m/V 时,PSD 的响应时间从 147.8 ms 上升到 153.8 ms,上升了 4.06%。实验结果表明, $\alpha_p=1000$ m/V 时,PSD 光电转换电路的响应时间最快,与仿真结果一致。

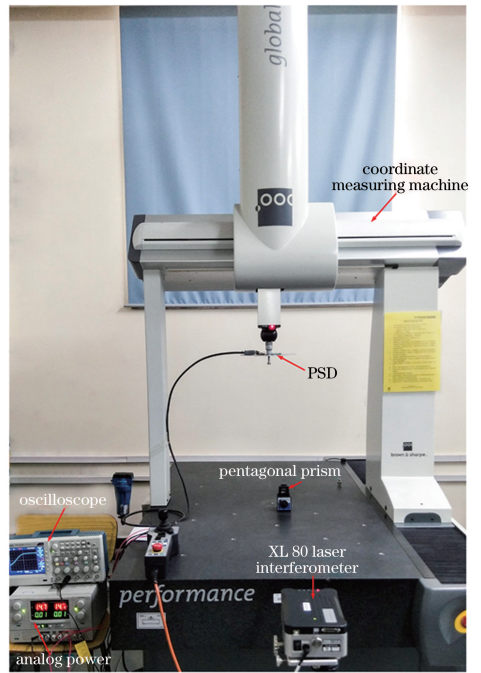


图 10 测量光电转换电路响应时间的实验装置
Fig. 10 Experimental setup for measuring response time of photoelectric conversion circuit

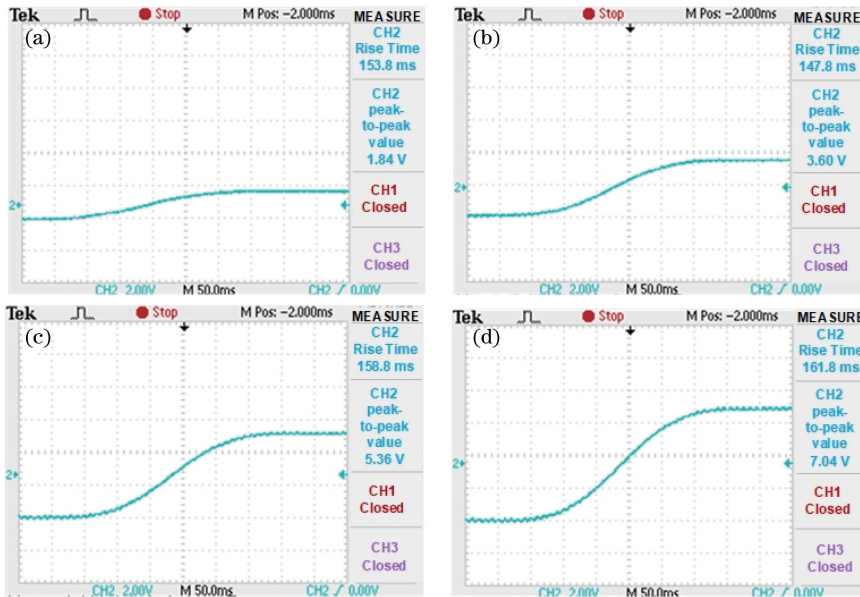


图 11 不同 α_p 下 PSD 光电转换电路的响应时间。(a) $\alpha_p=500$ m/V;(b) $\alpha_p=1000$ m/V;
(c) $\alpha_p=1500$ m/V;(d) $\alpha_p=2000$ m/V

Fig. 11 Response time of PSD photoelectric conversion circuit under different α_p .
(a) $\alpha_p=500$ m/V; (b) $\alpha_p=1000$ m/V; (c) $\alpha_p=1500$ m/V; (d) $\alpha_p=2000$ m/V

6 结 论

分析了 PSD 的测量原理以及 PSD 对激光追踪测量系统跟踪性能的影响,仿真和实验结果表明,PSD 的 α_p 对光电转换电路的输出电压和响应时间

有显著影响。 α_p 越大,PSD 光电转换电路输出的电压误差越大,对激光追踪测量系统跟踪性能影响也越大。当 $\alpha_p=1000$ m/V 时,激光追踪测量系统动态响应曲线的超调量最低、稳定时间短、PSD 光电转换电路的响应时间最快,这表明选择合适的 PSD

光电位移转换系数可以有效提高激光追踪测量系统的跟踪性能。本研究为提高激光追踪测量系统的跟踪性能奠定了理论基础,对激光追踪测量系统的精度提升、可靠性评估具有重要的理论指导意义。

参 考 文 献

- [1] Fan B X. Research on high performance total station and its application in dynamic measurement [D]. Zhengzhou: The PLA Information Engineering University, 2004.
范百兴. 高性能全站仪的研究及其在动态测量中的应用[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2004.
- [2] Fan B X. Research and realization of high precision coordinate measurement technology of laser tracker [D]. Zhengzhou: The PLA Information Engineering University, 2013.
范百兴. 激光跟踪仪高精度坐标测量技术研究与实现[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2013.
- [3] Wang W, Zhu J G, Lin J R. Calibration of a stereoscopic system without traditional distortion models [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(9): 093104.
- [4] He W, Cui M H, Song D D, et al. Collinear autocorrelation measurement of ultrashort laser pulse based on Michelson interferometer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(12): 1204001.
何伟, 崔明焕, 宋迪迪, 等. 基于迈克耳孙干涉仪的共线自相关超短光脉冲测量[J]. *中国激光*, 2018, 45(12): 1204001.
- [5] Meng J J, Yu J, Mo Z Q, et al. Laser spot illuminance measurement method based on scattering imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(7): 0712004.
孟晶晶, 余锦, 貂泽强, 等. 激光光斑照度的散射成像测量方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(7): 0712004.
- [6] Nikulin V V, Bouzoubaa M, Skormin V A, et al. Lyapunov-based decentralized adaptive control for laser beam tracking systems [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, 39(4): 1191-1200.
- [7] Lin X L, Dong D F, Zhou W H. Modeling and simulation of precision servo system for laser tracker [J]. *Computer Simulation*, 2014, 31(10): 20-24.
林心龙, 董登峰, 周维虎. 激光跟踪仪精密伺服系统建模及仿真研究[J]. *计算机仿真*, 2014, 31(10): 20-24.
- [8] Gao Y E, Liu W, Lü S M, et al. Six-degree-of-freedom displacement and angle measurement system based on two-dimensional position-sensitive detector [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(12): 2930-2939.
- [9] Chen H, Zhu J G, Xue B. Impact of rough surface scattering characteristics to measurement accuracy of laser displacement sensor based on position sensitive detector [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(8): 0808003.
陈浩, 郝继贵, 薛彬. 粗糙表面散射特性对基于PSD的激光位移传感器测量精度的影响[J]. *中国激光*, 2013, 40(8): 0808003.
- [10] Dutta A K, Hatanaka Y. An analysis for the assessment of position distortion for fast excitation in two-dimensional position-sensitive devices (PSDs) [J]. *Solid-State Electronics*, 1991, 34(8): 875-882.
- [11] Qi H, Ruan L M, Wang S G, et al. Application of multi-phase particle swarm optimization technique to retrieve the particle size distribution [J]. *Chinese Optics Letters*, 2008, 6(5): 346.
- [12] Wang T, Shi X E, Zhao X, et al. Study of space four-quadrant active positioning technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(6): 0606001.
王潼, 史雪儿, 赵馨, 等. 空间四象限主动定位技术研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(6): 0606001.
- [13] Lee E J, Park Y, Kim C S, et al. Detection sensitivity of the optical beam deflection method characterized with the optical spot size on the detector [J]. *Current Applied Physics*, 2010, 10(3): 834-837.
- [14] Li G C, Fang Y M, Ji R Y, et al. High-precision laser tracking system based on two-dimensional galvanometers and position sensitive detectors [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(7): 0704007.
李桂存, 方亚秒, 纪荣祚, 等. 基于二维振镜与位置灵敏探测器的高精度激光跟踪系统[J]. *中国激光*, 2019, 46(7): 0704007.
- [15] Yuan H X, He A Z, Li Z H, et al. Additional position error of PSD caused by diffraction of light source [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(1): 118-126.
袁红星, 贺安之, 李振华, 等. 指示光源衍射所引起的位置敏感探测器附加定位误差探讨[J]. *光学学报*, 2000, 20(1): 118-126.
- [16] 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.
- [17] Hu C, Wang X J, Song B. High-performance position-sensitive detector based on the lateral photoelectrical effect of two-dimensional materials

- [18] Yan C C, Liu J, Yang H M, et al. Measurement accuracy research of position sensitive detector in ATP system[J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(5): 524-531.
颜超超, 刘瑾, 杨海马, 等. ATP跟瞄系统中位置敏感探测器测量精度研究[J]. *激光与红外*, 2015, 45(5): 524-531.
- [19] Liu Z Y, Zhang J, Deng F M. Research of on-line monitoring of rail distance system based on position sensitive detector[J]. *Laser Technology*, 2020, 44(2): 183-189.
刘子英, 张靖, 邓芳明. 基于位置敏感探测器的轨距在线监测系统研究[J]. *激光技术*, 2020, 44(2): 183-189.
- [20] Bartek M, Wang X, Wendy A, et al. Estimation of subcellular particle size histograms with electron microscopy for prediction of optical scattering in breast tissue[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2006, 11(6): 064007.
- [21] Hoyo J D, Choi H, Burge J H, et al. Experimental power spectral density analysis for mid-to high-spatial frequency surface error control[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(18): 5258-5267.
- [22] Ding X K, Liu T G, Song D Y. Impact of accuracy of laser spot quality in laser triangulation long-term continuous measuring based on PSD[J]. *Chinese Journal of 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.
- [23] Wu J B, Chen Y S, Gao S J, et al. Improved measurement accuracy of spot position on an InGaAs quadrant detector[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(27): 8049-8054.
- [24] Cui S, Soh Y C. Linearity indices and linearity improvement of 2-D tetralateral position-sensitive detector[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2010, 57(9): 2310-2316.
- [25] Teng Y K, Hao Y M, Fu S F, et al. Calibration technology of visual measurement system based on position sensitive detector [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(8): 081202.
滕玉坤, 郝颖明, 付双飞, 等. 基于位置敏感器件的视觉测量系统标定技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(8): 081202.
- [26] Cui S, Soh Y C. The effect of spot size on linearity improvement of tetra-lateral position sensitive detector[C]//Numerical Simulation of Optoelectronic Devices, September 6-9, 2010, Atlanta, GA, USA. New York: IEEE, 2010: 103-104.
- [27] Liu X Y, Shen J, Thomas J C, et al. Multiangle dynamic light scattering analysis using angular intensity weighting determined by iterative recursion [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(7): 846-854.
- [28] Creath K. Revisiting PSD analysis of circularly symmetric surfaces [C] // *Optical Design and Fabrication 2017 (Freeform, IODC, OFT)*, July 9-13, 2017, Denver, Colorado. Washington, D. C. : OSA, 2017: OW2B.3.
- [29] Wang G H, Shum P, Xu G L, et al. Position detection improvement of position sensitive detector (PSD) by using analog and digital signal processing [C] // *2007 6th International Conference on Information, Communications & Signal Processing*, December 10-13, 2007, Singapore, Singapore. New York: IEEE, 2007: 1-4.
- [30] Lucovsky G. Photoeffects in nonuniformly irradiated p-n junctions[J]. *Journal of Applied Physics*, 1960, 31(6): 1088-1095.
- [31] Andersson H A, Bertilsson K, Thungstrom G, et al. Processing and characterization of a MOS-type tetra lateral position sensitive detector with indium tin oxide gate contact[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008, 8(10): 1704-1709.
- [32] Woltring H J. Single- and dual-axis lateral photodetectors of rectangular shape [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1975, 22(8): 581-590.
- [33] Zhu J G, Chen H, Xue B. Wavelet optimization method of laser displacement sensor based on position sensitive detector [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(3): 0308003.
郝继贵, 陈浩, 薛彬. 基于位置敏感探测器的激光位移传感器小波优化方法[J]. *中国激光*, 2013, 40(3): 0308003.
- [34] Li X H. Design of a laser tracking system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2003.
李杏华. 激光跟踪系统的设计[D]. 天津: 天津大学, 2003.
- [35] Zhang L H, Yang Y, Xia W B, et al. Linearity of quadrant avalanche photodiode in laser tracking system[J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, 7(8): 728-731.
- [36] Manojlovic L M, Barbaric Z P. Optimization of optical receiver parameters for pulsed laser-tracking systems[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, 58(3): 681-690.
- [37] Li S M, Zhang Y Q. Annular facula detection and error compensation of four-quadrant photoelectric detector in space laser communication [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(11): 1106005.

- 李生民, 张圆清. 空间激光通信中四象限光电探测器环形光斑检测及误差补偿[J]. 中国激光, 2017, 44(11): 1106005.
- [38] Teoh P L, Shirinzadeh B, Foong C W, et al. The measurement uncertainties in the laser interferometry-based sensing and tracking technique [J]. Measurement, 2002, 32(2): 135-150.
- [39] Lao D B, Cui C J, Wang G M, et al. Optimal design and analysis of tracking optical paths in femtosecond laser tracker[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0304005.
- 劳达宝, 崔成君, 王国民, 等. 飞秒激光跟踪仪跟踪光路的优化设计与分析[J]. 中国激光, 2019, 46(3): 0304005.
- [40] Donati S, Chen C Y, Yang C C. Uncertainty of positioning and displacement measurements in quantum and thermal regimes[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(5): 1658-1665.
- [41] Ju Y L, Yu X, Chang Z Z, et al. Investigating of closed loop in laser tracing and aiming at moving target[J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 29(s1): 642-644.
- 鞠有伦, 于欣, 常泽洲, 等. 运动目标激光跟踪瞄准中的闭环研究[J]. 中国激光, 2002, 29(s1): 642-644.
- [42] Wang W H, Yan Z Z, Zhang J F, et al. High-performance position-sensitive detector based on graphene-silicon heterojunction[J]. Optica, 2018, 5(1): 27-31.