

高精度激光追踪测量方法及实验研究

陈洪芳, 孙衍强, 王亚韦, 石照耀, 宋辉旭

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 为满足现代工业各领域对高精度、大测量范围、实时性测量的要求, 提出一种高精度激光追踪测量方法, 来实现对随动目标的精密追踪测量。基于四象限探测器的激光追踪测量系统可实时地测量入射激光光斑相对于四象限探测器中心的偏移量, 利用响应速度快的伺服电机、可编程多轴运动控制器(PMAC)的运动控制卡构建闭环控制系统, 实现高精度快速激光追踪测量。实验结果表明, 所提出的高精度激光追踪测量方法实时性好、测量精度高; 当在激光光斑距离四象限探测器中心 $\pm 1000 \mu\text{m}$ 范围内追踪测量时, 光斑偏移量误差为 $31.2 \mu\text{m}$, 激光光斑返回四象限探测器中心的平均时间为 0.259 ms 。

关键词 测量; 激光追踪测量; 光斑偏移量; 闭环控制; 高精度测量

中图分类号 TH71

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0104003

High-Precision Laser Tracking Measurement Method and Experimental Study

Chen Hongfang, Sun Yanqiang, Wang Yawei, Shi Zhaoyao, Song Huixu

Beijing Engineering Research Center of Precision Measurement Technology and Instruments, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract In this paper, a high-precision laser tracking measurement method is proposed in order to meet the requirements of high measurement accuracy, large measurement range and real-time measurement in every filed of modern industry, which realizes precise tracking measurement of follow-up target. The laser tracking measurement system based on the four-quadrant detector can measure the incident laser spot offset that is relative to the center of the four-quadrant detector in real time. A fast response servo motor and the motion control card of programmable multi-axes controller (PMAC) are applied to build the closed-loop control system, which achieves high precision and fast laser tracking measurement. The experimental results show that the high-precision laser tracking measurement method proposed in this paper has good real-time performance and high measurement accuracy. When the tracking measurement of laser spot is within $\pm 1000 \mu\text{m}$ away from the center of the four-quadrant detector, the error of spot offset is about $31.2 \mu\text{m}$, and the average time of the laser spot returning the center of four-quadrant detector is 0.259 ms .

Key words measurement; laser tracking measurement; spot offset; closed-loop control; high-precision measurement

OCIS codes 120.6085; 250.0040; 250.3140; 080.2720

1 引 言

随着现代工业技术的发展, 大型工件检测、计算机辅助设计(CAD)对比测量、机器人校准等领域对测量的精度、范围以及实时性等方面提出了更高的要求, 激光精密跟踪测量技术发挥着越来越重要的

作用^[1-2]。基于激光跟踪测量技术有两种测量工具: 激光跟踪仪和激光追踪仪。激光跟踪测量属于被动跟踪, 是被动地跟踪目标靶镜进行测量; 而激光追踪测量属于主动追踪, 测量过程中要对目标靶镜进行路径规划, 实现对目标靶镜的主动追踪。激光追踪测量的效率更高, 其测量系统要求控制系统具备快

收稿日期: 2017-08-29; 收到修改稿日期: 2017-09-13

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ17053904)、国家自然科学基金(50805003)

作者简介: 陈洪芳(1980—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事精密测量技术与仪器、激光干涉测量与信号处理方面的研究。E-mail: hfchen@bjut.edu.cn

速响应能力、高稳定性、强稳健性,以实现激光追踪系统在俯仰、偏摆两个方向上实时调整激光光束能始终对准目标靶镜。

自 1985 年美国国家标准技术研究所(NIST)的 Lau 等^[3-13]提出基于球坐标法的五自由度激光跟踪测量系统以来,国内外许多学者都对激光跟踪控制系统进行了深入研究。美国 Nikulin 等^[6]基于 Lyapunov 函数的自适应控制技术研发了强稳健性、高稳定性的跟踪控制器,可同时获取方位角和激光束的仰角位置,但是出现故障时系统容易产生误操作而影响其稳定性。天津大学张国雄等^[5]研制了多路激光跟踪干涉柔性坐标测量系统,李杏华^[7]设计了模拟式、数字式跟踪控制系统测量空间中目标点的空间坐标,但是整个系统以个人电脑(PC)为中心,使得系统灵活性较差,另外 Windows 操作系统的非实时性不利于跟踪系统的实时控制。中国科学院光电研究院周维虎等^[10]提出了三闭环控制结构和复合跟踪控制策略,集成了创新了测量系统,但是由于方位跟踪系统的驱动负载大并且存在导线随机拖拽与阻滞现象,由此限制了系统的灵活性。

本文提出一种高精度激光追踪测量方法,由可编程多轴运动控制器(PMAC)的运动控制卡控制伺

服电机运转,可实现对随动目标的精密追踪及控制信号的实时传送,控制卡操作方便、灵活,同时也避免了上位机传递控制信号实时性差的问题。最后,进行了相关实验研究,测试系统的跟踪性能。

2 激光追踪测量原理

激光追踪测量的控制系统是一个位置随动的闭环控制系统,当目标靶镜随机移动时,经由目标靶镜反射的激光光斑位置会发生变化,同时引起激光干涉系统光程差的变化。激光光斑位置的变化由四象限探测器感知,光程差的变化由激光干涉测量系统感知,通过数据采集系统将测量得到的激光光斑位置变化数据和光程差变化数据传送至控制器进行运算和分析,得到运动目标靶镜的实时位置。激光追踪控制系统原理框图如图 1 所示。在追踪测量过程中,由于受到激光干涉测距、目标反射镜与小巧型光机结构等的约束,对追踪测量控制系统的响应速度、控制精度要求均较高。激光追踪测量系统基于四象限探测器进行激光束偏移量的精密探测,采用响应速度快的伺服电机以及 PMAC 运动控制卡构建闭环控制策略,尽可能提升电机的响应速度,以缩短运算时间和保证同步性,确保激光追踪测量系统对被测目标的快速、高精度跟踪测量^[14-17]。

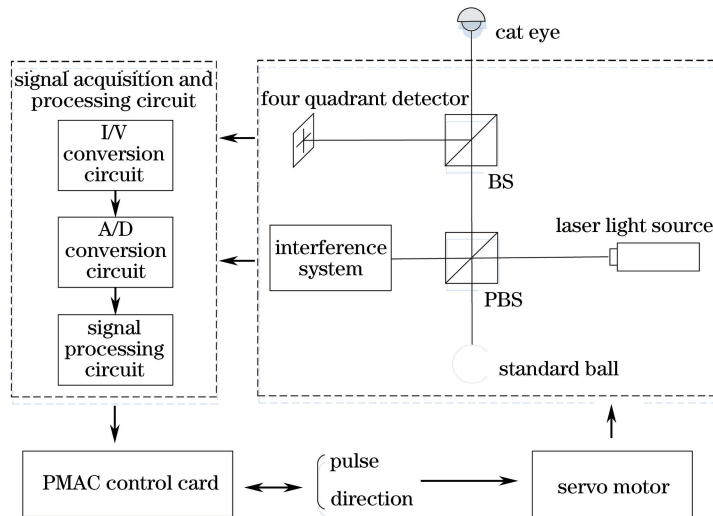


图 1 激光追踪测量系统原理框图

Fig. 1 Principle block diagram of laser tracking measurement system

3 高精度激光追踪测量方法

3.1 激光光束偏移量测量

采用四象限探测器来测量激光光束的偏移量。当激光光束照射在四象限探测器中心时,探测器的 4 个象限上接收到的光强相同,此时激光光束中心

与四象限探测器中心的偏移量为零。当激光光束中心相对四象限探测器中心产生偏移时,探测器的 4 个象限由于光能量的不同而产生不同的光电流信号,通过对光电流幅度的计算,即可确定入射激光光束中心相对四象限探测器中心的偏移量,为追踪测量系统的精密追踪控制提供关键数据^[18-24]。

当激光光束照射到四象限探测器中心时,四象限探测器的每个象限输出的电流信号幅值相等,即 $I_1=I_2=I_3=I_4$,此时水平偏差信号 K_X 与垂直偏差信号 K_Y 均为零,如图 2(a)所示。当目标靶镜移动时,四象限探测器接收到的激光光束中心会偏离探测器中心,如图 2(b)所示。设激光光束照射到四象限探测器的每个象限的投影面积分别为 S_1, S_2, S_3, S_4 ,每个象限对应的输出电流信号幅值分别为 I_1, I_2, I_3, I_4 ,每个象限对应的各路电流经放大后的输出电压信号幅值分别为 U_1, U_2, U_3, U_4 。四象限探测器的水平与垂直方向的偏差信号与激光光束在 4 个象限的投影面积差成正比,则归一化的水平与垂直方向的偏差信号可表示为

$$K_X = \frac{I_1 + I_4 - I_2 - I_3}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} = \frac{S_1 + S_4 - S_2 - S_3}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4} = \frac{U_1 + U_4 - U_2 - U_3}{U_1 + U_2 + U_3 + U_4}, \quad (1)$$

$$K_Y = \frac{I_1 + I_2 - I_3 - I_4}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} = \frac{S_1 + S_2 - S_3 - S_4}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4} = \frac{U_1 + U_2 - U_3 - U_4}{U_1 + U_2 + U_3 + U_4}。 \quad (2)$$

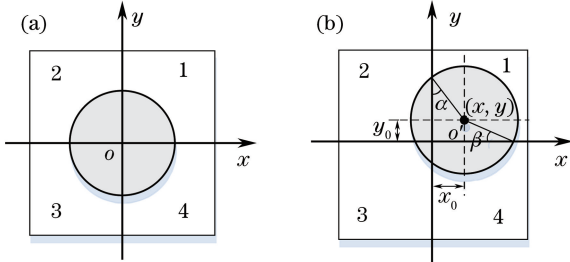


图 2 (a)激光光束中心在四象限探测器中心;
(b)激光光束中心偏离四象限探测器中心

Fig. 2 (a) Center of laser beam at the center of four quadrant detector; (b) center of laser beam deviates from the center of four quadrant detector

假设激光光束半径为 r ,当光束中心偏移到 (x, y) 位置时,则有

$$S_1 + S_4 - S_2 - S_3 = \frac{1}{2}(\pi + 2\alpha)r^2 - \frac{1}{2}(\pi - 2\alpha)r^2 + 2x\sqrt{r^2 - x^2} = 2r^2 \arcsin\left(\frac{x}{r}\right) + 2x\sqrt{r^2 - x^2}, \quad (3)$$

同理,有

$$S_1 + S_2 - S_3 - S_4 = 2r^2 \arcsin\left(\frac{y}{r}\right) + 2y\sqrt{r^2 - y^2}。 \quad (4)$$

又因为 $S_1 + S_2 + S_3 + S_4 = \pi r^2$,可得到四象限探测器输出的偏差信号与探测器坐标系中激光光束偏移量的关系为

$$\begin{bmatrix} K_X \\ K_Y \end{bmatrix} = \frac{2}{\pi} \begin{bmatrix} \arcsin\left(\frac{x}{r}\right) + \left(\frac{x}{r}\right)\sqrt{1 - \left(\frac{x}{r}\right)^2} \\ \arcsin\left(\frac{y}{r}\right) + \left(\frac{y}{r}\right)\sqrt{1 - \left(\frac{y}{r}\right)^2} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

(5)式为超越函数方程,直接求解激光光斑偏移量过程复杂。由于激光光斑中心偏离坐标原点的距离均远小于光斑半径,对(5)式取泰勒一级展开式得

$$\begin{bmatrix} K_X \\ K_Y \end{bmatrix} \approx \frac{2}{\pi} \begin{bmatrix} \frac{x}{r} \\ \frac{y}{r} \end{bmatrix}。 \quad (6)$$

在激光追踪测量系统中,激光光束半径 r 已知,水平偏差信号 K_X 与垂直偏差信号 K_Y 均可由四象限探测器的信号处理电路获得,因此可求得一组激光光束中心在四象限探测器坐标系的位置坐标近似值 (x_0, y_0) ,则有

$$\begin{bmatrix} K_X \\ K_Y \end{bmatrix} = \frac{2}{\pi} \begin{bmatrix} \arcsin\left(\frac{x_0}{r}\right) + \left(\frac{x_0}{r}\right)\sqrt{1 - \left(\frac{x_0}{r}\right)^2} + 2\frac{\sqrt{r^2 - x_0^2}}{r^2}\Delta x - \frac{x_0}{r^2\sqrt{r^2 - x_0^2}}(\Delta x)^2 \\ \arcsin\left(\frac{y_0}{r}\right) + \left(\frac{y_0}{r}\right)\sqrt{1 - \left(\frac{y_0}{r}\right)^2} + 2\frac{\sqrt{r^2 - y_0^2}}{r^2}\Delta y - \frac{y_0}{r^2\sqrt{r^2 - y_0^2}}(\Delta y)^2 \end{bmatrix}。 \quad (7)$$

根据(6)~(7)式,可得到激光光束中心坐标水平方向的修正值 Δx 和垂直方向的修正值 Δy 。那么,激光光束中心在当前位置的准确坐标 (x, y) 为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}。 \quad (8)$$

基于激光光束中心当前位置的准确坐标,可实现控制激光追踪测量控制系统中的电机运动,进而控制激光干涉测量系统实现测量光束追踪运动的目标靶镜。

3.2 激光追踪测量控制系统电机建模

追踪伺服控制是高精度激光追踪测量系统的关

键,其控制性能直接影响激光追踪测量系统的追踪速度与精度。为了实现高精度追踪测量,追踪测量系统中伺服电机选用响应速度快、低速运行平稳、启动电压低、回转精度高的闭环控制电机,可以实现追踪测量过程中频繁启停操作。

忽略电机磁路饱和、磁滞和涡流影响,定子绕组三相对称、均匀,建立固定于转子的参考坐标系,取磁极轴线为 d 轴,顺着旋转方向超前 90° 为 q 轴,以 a 相绕组轴线为参考轴线, d 轴与参考轴之间的夹角为 θ 。在 dq 旋转坐标系中电机的数学方程为

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin \theta & \sin(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) \\ \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$T_e = \frac{3p_n [\varphi_d i_d - (L_q - L_d) i_q i_d]}{2}, \quad (11)$$

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - B\omega_r - T_L, \quad (12)$$

式中, u_a, u_b, u_c 为三相定子绕组的电压; i_a, i_b, i_c 为三相定子绕组的电流; u_d, u_q 为 d, q 轴定子电压; i_d, i_q 为 d, q 轴定子电流; φ_d 为 d 轴定子电感; p_n 为极对数; ω_r 为转子角速度; J 为转动惯量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$); B 为粘滞摩擦系数; T_L 为负载转矩,即输出转矩 ($\text{N} \cdot \text{m}$); T_e 为电磁转矩 ($\text{N} \cdot \text{m}$)。

基于以上激光追踪测量控制系统的电机模型,得到追踪测量控制系统水平轴电机和垂直轴电机转动惯量^[25]。为保证激光追踪仪不发生“伪追踪”干涉且能随动目标的追踪,电机在一次加减速中的移

动距离不大于 1 mm,得到电机运动的最大角速度为 $\omega_{\max} = 1.25 \text{ rad/s}$ 。

3.3 高精度激光追踪测量控制策略

高精度激光追踪测量控制系统基于 PMAC 运动控制卡,采用内部级联方式实现力位控制,如图 3 所示,其中 ECT 为编码器转换表。跟随运动电机的 X, Y 轴作实际轴,模拟量信号输入作虚拟轴,实际轴和虚拟轴同时由 PMAC 运动控制卡控制。两个轴由积分模块链接作为系统的内环,实际轴与虚拟轴分别采用不同的比例积分微分 (PID) 算法,用于提高系统刚性和加快系统响应,同时抑制系统的干扰、减小伺服电机的惯性和改善系统线性度。位置追踪作外环,可逐步减小激光光斑的偏移量,保证系统的跟随性能。

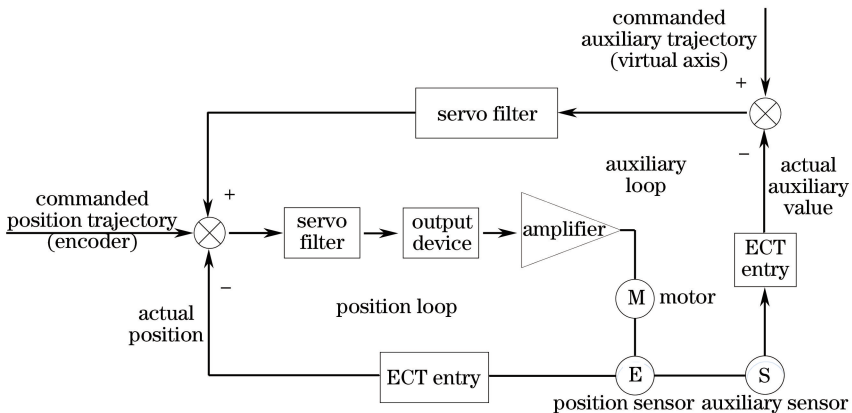


图 3 激光追踪控制系统框图

Fig. 3 Block diagram of laser tracking control system

为了使电机可以快速准确地移动到目标位置,需调节 PID 伺服算法参数以获得所需位置的响应,调节流程如图 4 所示。通过设置合适的 I 参数变量可有效提高系统刚性,并加快系统响应。在现有机

械结构条件下,虚拟轴和实际轴的有效配合,提高了系统的稳定性能。

假设随动目标上猫眼反射镜与标准球的距离为 b ,并沿水平方向运动一个位移量 d 。此时光束不再

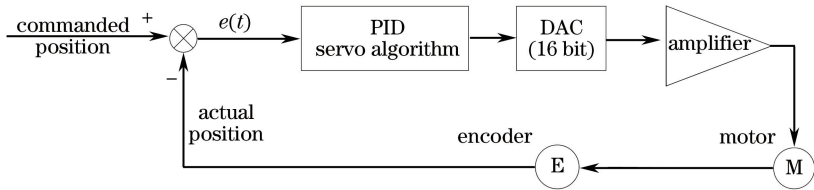


图 4 PID 伺服调节流程图

Fig. 4 Flow chart of PID servo regulation

从猫眼的中心入射,被猫眼反射的光束与入射光束不重合,两者相距位移 $2d$;此偏离光束经过分光镜反射后入射到四象限探测器上,此时光斑偏离中心 $2d$,如图 5 所示。若要实现激光追踪测量,需控制电机带动激光头转动角度 β ,并满足 $\tan \beta = d/b$ 。根据激光头旋转角度得到电机转角与转速,实现对随动目标的激光追踪^[26]。

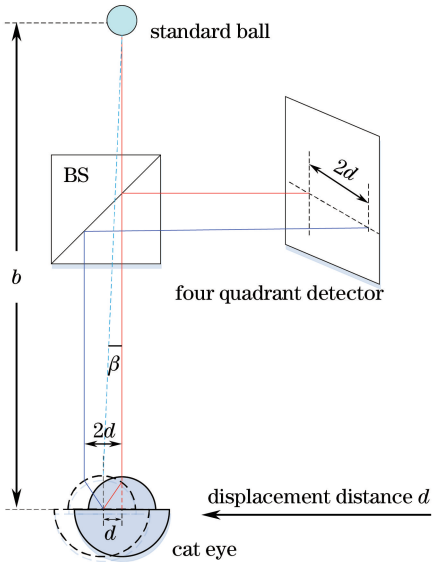


图 5 追踪控制示意图

Fig. 5 Schematic diagram of tracking control

伺服电机旋转一周输出的脉冲数为 10000,减速器的减速比为 1:160,则激光头转动 β 角时电机转动输出脉冲数为

$$n = \frac{\arctan \frac{d}{b}}{2\pi} \times 10000 \times 160. \quad (13)$$

4 实 验

4.1 激光光束偏移量测量实验

激光光束偏移量测量实验装置如图 6 所示,激光器为成都工具研究所有限公司生产的单频激光器,其耦合输出功率大约为 0.8 mW,激光光斑半径为 1 mm。四象限探测器光敏面面积为 $9 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$,感光灵敏度的典型值为 0.6 A/W,上升时间

为 $2 \mu\text{s}$ 。将四象限探测器电路板固定在三维滑台上,可实现对四象限探测器 X 和 Y 方向的直线运动控制。实验过程中,先调节激光器,使其激光束入射到四象限探测器中心位置,此时四象限探测器输出的偏差信号为零。控制三维滑台使四象限探测器以 $250 \mu\text{m}$ 步距由中心位置向两侧移动,由上位机通过信号采集卡记录光斑偏移量数据,实验测量数据如图 7 所示。四象限探测器的位移量与系统坐标系下光斑偏移量间的误差值与光斑距离四象限探测器中心的距离有关。在 $\pm 1000 \mu\text{m}$ 范围内,光斑偏移量误差为 $31.2 \mu\text{m}$;在 $\pm 2500 \mu\text{m}$ 范围内,光斑偏移量误差为 $77.5 \mu\text{m}$ 。



图 6 光斑偏移量测量实验装置图

Fig. 6 Experimental graph of spot offset measurement

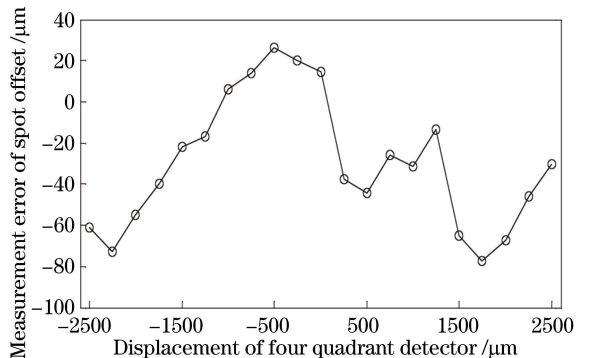


图 7 光斑偏移量测量误差折线图

Fig. 7 Line chart of measurement errors of spot offset

在 $\pm 1000 \mu\text{m}$ 以外的范围,光斑偏移量的测量误差增大是因为这一区域处于四象限探测器线性区域的边缘,超出了探测器的高精密测量范围。同时,随着背景光所占比例的增大,四象限探测器的检测范围

和检测灵敏度也有所降低,根据(1)~(2)式,背景光的存在很大程度上增大了分母 $S_1 + S_2 + S_3 + S_4$,但对于分子 $S_1 + S_4 - S_2 - S_3$ 、 $S_1 + S_2 - S_3 - S_4$ 几乎没有影响,这在一定程度上减小了水平偏差信号 K_x 与垂直偏差信号 K_y ,从而缩小了量程范围。

4.2 激光追踪测量实验

图 8 所示为激光追踪测量控制系统机械结构装置图,猫眼作为随动目标,经螺旋微动平台安装在距离激光追踪仪器样机回转中心 1.2 m 处的直线导轨上,控制螺旋微动平台,使猫眼沿直线导轨以 $200 \mu\text{m}$ 为步距匀速移动。移动完成后,激光追踪测量控制系统执行自动追踪运动,当激光光斑回到四象限探测器中心时,记录控制系统的追踪时间,实验测量数据如图 9 所示。根据激光追踪测量控制系统

实验的测量数据,可以看到:猫眼反射镜作为随动目标移动时,该系统执行自动追踪控制激光光斑回到四象限探测器中心的平均时间为 0.259 ms ,方差为 $\sigma^2 = 9.349 \times 10^{-8}$ 。

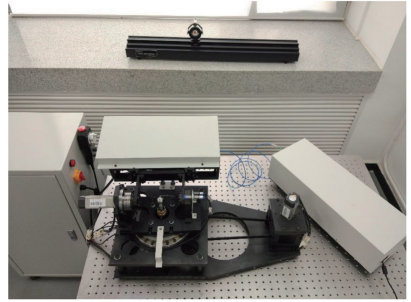


图 8 追踪测量实验装置图

Fig. 8 Experimental device of tracking measurement

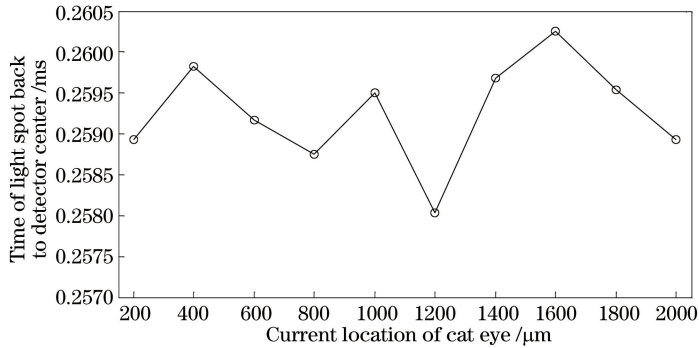


图 9 追踪测量实验数据折线图

Fig. 9 Line chart of tracking measurement experimental data

5 结 论

本文提出一种高精度激光追踪测量方法,以实现随动目标的精密追踪测量。基于四象限探测器的激光追踪测量系统以实际轴和虚拟轴的控制作为内环进行 PID 调节,位置跟随作为外环保证系统追踪性能及测量精度。两环一体的反馈控制闭环提升了电机的响应速度,缩短了运算时间,保证了同步性。实验结果表明,所提出的高精度激光追踪测量方法测量实时性好、精度高,适用于精密追踪仪器的设计研究。

参 考 文 献

[1] Liu J Y, Yang J Q, Dong D F. Design of optoelectronic tracking servo control system for laser tracker[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2015, 34(8): 64-67.
刘娇月, 杨聚庆, 董登峰. 激光跟踪仪光电跟踪伺服控制系统设计[J]. 实验室研究与探索. 2015, 34

(8): 64-67.
[2] Zhou G F, Li X X, Li D S, et al. Large-scale compact range on-site alignment based on laser tracker measurement network [J]. Measurement, 2015, 68: 143-154.
[3] Lau K, Hocken R, Haynes L. Robot performance measurements using automatic laser tracking techniques [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 1985, 2(3/4): 227-236.
[4] Bal G, Bekiroglu E, Demirbas S, et al. Fuzzy logic based DSP controlled servo position control for ultrasonic motor [J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45(20): 3139-3153.
[5] Zhang G X, Lin Y B, Li X H. Four-beam laser tracking interferometer system for three-dimensional coordinate measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(9): 1030-1036.
张国雄, 林永兵, 李杏华, 等. 四路激光跟踪干涉三维坐标测量系统[J]. 光学学报, 2003, 23(9): 1030-1036.
[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] Li X H. Design of 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.
- [8] Chen X. Laser tracking system design[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
陈曦. 激光跟踪系统设计[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [9] Zhou C Y. Design of laser tracking control system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
周春艳. 激光跟踪控制系统的设计[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [10] Zhang Z L, Zhou W H, Lao D B, *et al.* Research and development of the laser tracker measurement system[C]. SPIE, 2013, 8759: 87593Z.
- [11] Bai Y, Zhuang H Q, Zhang Z S. Fuzzy logic control to suppress noises and coupling effects in a laser tracking system[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2005, 13(1): 113-121.
- [12] Beerer M J, Yoon H, Agrawal B N. Practical adaptive filter controls for precision beam pointing and tracking with jitter attenuation [J]. Control Engineering Practice, 2013, 21(1): 122-133.
- [13] Wai R J, Chang J M. Intelligent control of induction servo motor drive via wavelet neural network [J]. Electric Power System Research, 2002, 61(1): 67-76.
- [14] Wang W N, Su Y C, Ren G Y. Research on the dynamic characteristics of laser tracker[J]. Journal of Metrology, 2007, 28(1): 34-36.
王为农, 苏永昌, 任国营. 激光跟踪仪的动态特性研究[J]. 计量学报, 2007, 28(1): 34-36.
- [15] Lucy R F, Peters C J, McGann E J, *et al.* Precision laser automatic tracking system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 1966, 3(12): 22-31.
Lucy R F, Peters C J, McGann E J, *et al.* 精密激光自动跟踪系统 [J]. 激光与光电子学进展, 1966, 3(12): 22-31.
- [16] Ju Y L, Yu X, Chang Z Z, *et al.* Investigating of closed loop in laser tracing and aiming at moving target[J]. Chinese J 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.
- [17] 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.
- [18] Lin Y B, Zhang G X, Li Z, *et al.* Optimal measuring zone and system self-calibration of four-beam laser tracking system for coordinate measurement [J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(11): 1006-1010.
林永兵, 张国雄, 李真, 等. 四路激光跟踪测量系统最佳测量区域和系统自标定 [J]. 中国激光, 2002, 29(11): 1006-1010.
- [19] Yang Y C, Guan X W, Tan B T, *et al.* Effects on high-precision tracking on active illumination laser [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(s1): s101004.
杨雨川, 关小伟, 谭碧涛, 等. 主动照明激光对高精跟踪的影响分析 [J]. 光学学报, 2014, 34(s1): s101004.
- [20] Zhou P S, Lu R S, Zhou W H, *et al.* Measurement system for laser tracker's target-missing quantity based on four-quadrant detector [J]. Electro-Optic Technology Application, 2014, 29(1): 75-79.
周培松, 卢荣胜, 周维虎, 等. 四象限探测器用于激光跟踪仪目标脱靶量测量 [J]. 光电技术应用, 2014, 29(1): 75-79.
- [21] Li R Z, Huang J B, Qin S Q. Measuring the response coherence between four quadrants of quadrant photo detector [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006, 19(6): 2610-2612.
李日忠, 黄俊斌, 秦石乔. 四象限光电探测器象限间一致性测量方法 [J]. 传感技术学报, 2006, 19(6): 2610-2612.
- [22] Guo S Z, Xu J C, Chen J X. Improved transcendental function general algorithm [J]. Computer Engineering, 2012, 38(15): 31-34.
郭绍忠, 许瑾晨, 陈建勋. 一种改进的超越函数通用算法 [J]. 计算机工程, 2012, 38(15): 31-34.
- [23] Zhang H, Chen Y S, Geng T W, *et al.* Study on main factors affecting position detection accuracy of four-quadrant detector [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(12): 1217002.
张辉, 陈云善, 耿天文, 等. 四象限探测器位置检测精度的主要影响因素研究 [J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1217002.
- [24] Gu Y, Tong S F, Song Y S, *et al.* Performance research on four-quadrant detector in communications and tracking compound mode [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(s1): s114002.
谷野, 佟首峰, 宋延嵩, 等. 四象限探测器在通信与跟踪复用模式下的性能研究 [J]. 中国激光, 2015, 42(s1): s114002.
- [25] Shu Z B. AC servo motion control system [M].

Beijing: Tsinghua University Press, 2006.

舒志兵. 交流伺服运动控制系统[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.

[26] Yan Z S, Lin W H, Liu C H. Measurement of the

thermal elongation of high speed spindles in real time using a cat's eye reflector based optical sensor [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2015, 221: 154-160.