

基于四象限探测器的激光稳定集成化系统设计

仇浩¹, 刘晓杰^{1*}, 刘书钢²

(1.江苏理工学院,江苏常州 213001;2.锐光凯奇(镇江)光电科技有限公司,江苏镇江 212004)

摘要:为了提高激光光斑中心的定位精度,实现激光稳定输出的功能,提出了基于四象限探测器的激光稳定集成化系统。首先,根据四象限探测器的工作原理,对四象限探测器上光斑的中心位置和偏差量进行理论计算和分析,然后融合计算机信号处理技术和控制技术对四象限探测器信号进行闭环控制,并将四象限探测器和光学元器件集成在多轴笼式结构中,完成了激光稳定集成化系统设计。多次实验数据结果表明:该系统能100%完成对光斑中心的定位,稳定性达到94.74%,3次实验误差的差值最大为2.422 μm 。

关键词:集成化;激光稳定集成化系统;四象限探测器;中心定位

中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2022)06-0044-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.06.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Design of laser stabilization integrated system based on four-quadrant detector

QIU Hao¹, LIU Xiaojie^{1*}, LIU Shugang²

(1. Jiangsu University of Technology, Changzhou Jiangsu 213001, China;

2. RayCage(Zhenjiang) Photoelectric Technology Co. Ltd., Zhenjiang Jiangsu 212004, China)

Abstract: In order to improve the positioning accuracy of the laser spot center and realize the function of laser stabilization output, this paper proposes the laser stabilization integrated system based on four-quadrant detector. First, according to the working principle of the four-quadrant detector, theoretical calculates and analyzes the center position and deviation of spot on the four quadrant detector, then, combines the computer signal processing technology and control technology, closed-loop control of the four-quadrant detector signal acquisition device and integration of the four-quadrant detector and optical components in a multi-axis cage structure, completed the design of the laser stabilization integrated system. experimental data result for many times show that the system can 100% complete the positioning of the spot center and the stability can reach 94.74%, the maximum difference of the experimental error is 2.422 μm .

Key words: integration, laser stabilization integrated system, four-quadrant detector, center positioning

0 引言

随着技术的不断迭代和发展,各领域对于检测技术的要求和标准不断提高,则高精密仪器必不可少。光学激光在精密检测中应用较多,但在激光器使用过

收稿日期:2022-01-05。

作者简介:仇浩(1997—),男,江苏扬州人,硕士研究生,主要研究方向为电机控制及光学应用。拥有丰富的光学系统搭建经验,参加完成校级创新项目,如自动对焦显微镜的光学系统搭建和软件调试,蛋白质复合物中的蛋白质特异性结构的高精度单分子定位显微镜等并发表多篇专利。

* **通信作者:**刘晓杰(1978—),男,博士,教授,主要研究方向为嵌入式系统应用,智能信息处理与传输。



程中,光源出射的激光会受到机械安装误差、振动或者环境温度影响发生肉眼无法辨别的偏移,这些偏移对精密检测结果会产生很大影响,所以激光中心稳定的检测定位和补偿技术很重要。在检测方法上,长安大学的吴佳敏^[1]使用电荷耦合器件(CCD)作为探测器,研究CCD中混合光斑的3种典型光强分布模型并提出基于混合光斑主光斑的中心定位方法,能实现不同高度路面的检测,但是该方法使用CCD相机存在成本高、定位复杂的问题。四象限探测器是激光稳定集成化系统关键部件,其主要优点是位置分辨率高,处理电路简单和位置检测精度高。LIU J S等人^[2]研究了一种基于四象限探测器的高斯拟合算法,并将其应用于

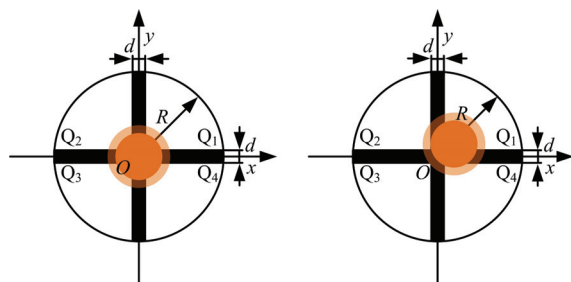
光纤定位过程中,以提高光斑中心的计算精度,但该算法定位过程较缓慢。BARNA A 等人^[3]针对高功率 Krf 激光系统,通过监测输出光束的焦点位置获得电信号,激活电机驱动的反射镜来实现对光束方向的控制,实现了稳定的高强度聚焦,但是系统的部件尺寸大,集成化程度不高。另外,想要通过四象限探测器来实现激光稳定输出,将光信号转化为电信号的检测手段必不可少,最常用的方法是点位精度检测方法^[4-5]。一些研究人员开发了能够提高四象限探测器点位精度的定位算法^[6-7],但是忽略了安装探测器、光学元件和电动台造成的误差。秦立存等人^[8]对传统定位算法进行了分析,针对在高斯光斑模型下定位算法的不足,结合标准正态分布的特点,对高斯光斑模型下的定位算法进行了合理的改进,但仅提高了定位光斑中心的精度而并未补偿偏移的光斑至原位。

本文在以上研究的基础上,采用独特的多轴笼式结构,确保四象限探测器、光学元器件和激光器在一个系统中,完成激光稳定集成化系统的简化设计。

1 设计原理

1.1 四象限探测器的工作原理

四象限探测器是由 4 个 1/4 圆的单独光电二极管组合成的 1 个圆形探测器。当入射光点落入四象限探测器光敏面的不同位置时(如图 1 所示),各象限会输出不同大小的电信号,通过处理 4 个象限输出的电信号,可以确定光敏面上入射光点的质心位置。



(a) 光点入射方向与光敏面垂直 (b) 光斑出现左右偏移或俯仰角变化

图 1 光点位置检测

图 1 中, Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 为 4 个象限区域, 将 4 个象限区域探测到的光信号转化为电流信号分别为 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 。 R 为四象限探测器的半径, d 为 4 个光电二极管之间存在的死区宽度。若光斑质量理想且入射方向与光敏面垂直, 如图 1(a) 所示, 则

$$(I_2 + I_3) - (I_1 + I_4) = 0 \quad (1)$$

$$(I_3 + I_4) - (I_1 + I_2) = 0 \quad (2)$$

若光斑出现左右偏移或者俯仰角度发生变化, 如图 1(b) 所示, 则

$$(I_2 + I_3) - (I_1 + I_4) \neq 0 \quad (3)$$

$$(I_3 + I_4) - (I_1 + I_2) \neq 0 \quad (4)$$

由于四象限探测器存在死区, 若激光光斑大小接近于死区的宽度大小, 光斑的有效强度将会损失 7~8 dB, 光斑越小, 损失的强度会更高, 直至完全陷入死区。同时, 光斑的大小也不能过大, 过大或者是超过四象限探测器的实际范围则不能准确实时反应当前光斑的情况。使用四象限探测器时, 需对光斑的大小进行扩束或缩束处理, 使光斑的大小尽量为 1~7 mm, 可以有效地将光斑光强的损失减少至 1 dB 以下。

1.2 四象限探测器的中心定位算法

采用四象限探测器检测光斑中心位置时, 根据四象限探测器坐标轴线与测量系统基准的安装角度, 有不同的定位算法, 最常用的 2 种是加减算法和对角线算法。当四象限探测器的坐标轴线与测量系统基准线成 0° 时, 采用加减算法; 当四象限探测器的坐标轴线与测量系统基准线成 45° 时, 采用对角线算法, 如图 2 所示。

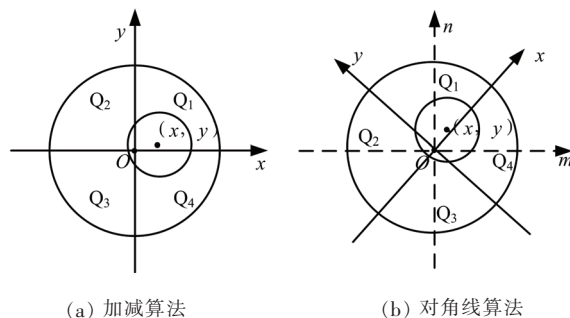


图 2 中心定位算法

图 2 中, 四象限探测器的坐标系为 xOy , 测量系统的坐标系为 mOn , 光斑的中心坐标为 (x, y) 。因为光斑照射在 4 个象限上由光转换的电流十分微弱, 故探测器内部对电流做电流转电压的处理和放大信号处理, I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 经过放大处理后分别为 U_1 、 U_2 、 U_3 、 U_4 , 放大的增益是 μ , 则

$$U_i = \mu I_i, i=1, 2, 3, 4 \quad (5)$$

同时, 四象限探测器各个象限产生的电流和照射在其表面的光斑面积 S_i 成正比, 光斑面积 S_i 越大电流越大, 设比例系数为 k , 则

$$I_i = k \cdot S_i \quad (6)$$

将式(6)代入式(5), 得

$$U_i = \mu k \cdot S_i \quad (7)$$

仇浩, 刘晓杰, 刘书钢: 基于四象限探测器的激光稳定集成化系统设计

设四象限探测器 2 个方向的偏移量为 D_{B-T} 、 D_{L-R} , 图 2(a) 中, 四象限探测器坐标轴线与测量系统基准的安装角度成 0° , 根据加减算法原理, 则有

$$D_{B-T} = \frac{(U_2+U_3)-(U_1+U_4)}{U_1+U_2+U_3+U_4} = \frac{(S_2+S_3)-(S_1+S_4)}{S_1+S_2+S_3+S_4} \quad (8)$$

$$D_{L-R} = \frac{(U_3+U_4)-(U_1+U_2)}{U_1+U_2+U_3+U_4} = \frac{(S_2+S_3)-(S_1+S_4)}{S_1+S_2+S_3+S_4} \quad (9)$$

图 2(b) 中, 四象限探测器坐标轴线与测量系统基准的安装角度成 45° , 则采用对角线算法原理得

$$D_{B-T} = \frac{U_3-U_1}{U_1+U_2+U_3+U_4} = \frac{S_3-S_1}{S_1+S_2+S_3+S_4} \quad (10)$$

$$D_{L-R} = \frac{U_2-U_4}{U_1+U_2+U_3+U_4} = \frac{S_2-S_4}{S_1+S_2+S_3+S_4} \quad (11)$$

1.3 四象限探测器信号处理及常态测试

本文设计、安装四象限探测器时, 采用四象限探测器坐标轴线与测量系统基准成 0° 的安装方式。利用加减算法来处理四象限探测器捕捉到的信号, 将经过引脚处理的信号输出为 V_{B-T} 、 V_{L-R} , 并将所有信号做相加处理得出总和信号, 输出为 V_{SUM} 。信号处理原理图如图 3 所示。

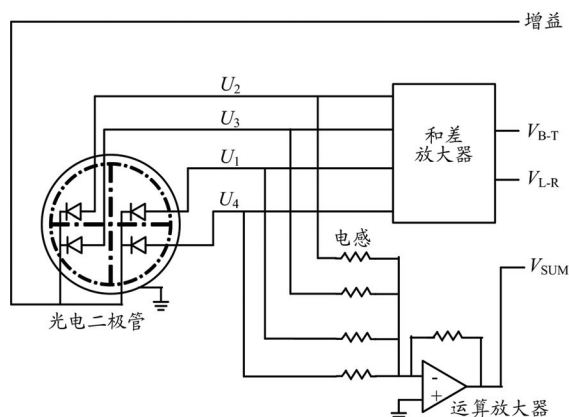


图 3 信号处理原理图

从文献[9-12]可知, 温度的变化对光斑大小存在一定影响(温度越低、光斑越大), 同一温度不同视场光斑大小基本一致, 不影响四象限探测器的使用, 在常温 20° 左右光斑大小变化量约为 2%。因此, 本文在室温为 20° 的条件下测试四象限探测器对于不同波长 (400 nm、500 nm、600 nm、700 nm、800 nm、900 nm、1000 nm、1100 nm) 光的响应度, 测试结果如图 4 所示。可以看出, 四象限探测器对 600~1000 nm 范围内波长的激光响应度较高。

2 激光稳定集成化系统设计

激光稳定集成化系统的电机运动是一个随机运

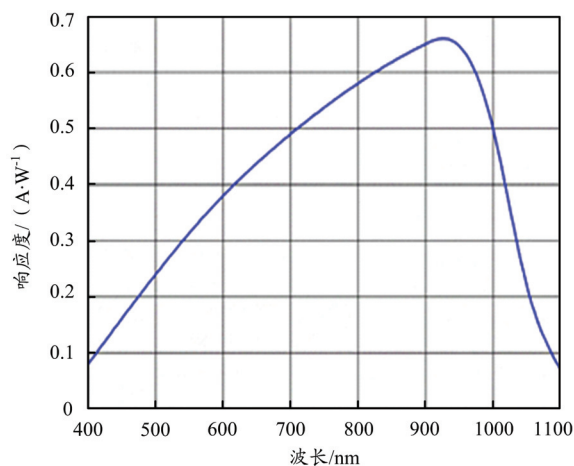


图 4 光谱响应度

动过程, 会出现出射激光产生不规则和随机运动产生干扰的情况。因此, 照射在四象限上的光斑需要经过运动补偿, 使光斑一直保持在中心位置。这对系统的动态性能和响应速度要求很高。本文采用 ATmega328P-PU 芯片作为数字信号处理电路的核心, 通过 16 位数/模转换器 ADS1115 进行数/模转换; 采用 2 个 VEXTA 公司的 PMM33BH2 步进电机作为移动单位, 一个用作补偿电机, 一个用作干扰电机。四象限探测器将偏差的数值信号发送给上位机, 上位机根据信号偏差量的大小, 实时驱动电机补偿偏差量。本文设计的激光稳定集成化系统原理框图如图 5 所示。激光器发射的激光经过反射镜和分束镜反射后, 光点到达固定的四象限探测器, 由四象限探测器输出反馈补偿信号来控制补偿电机实现稳定输出激光的功能。

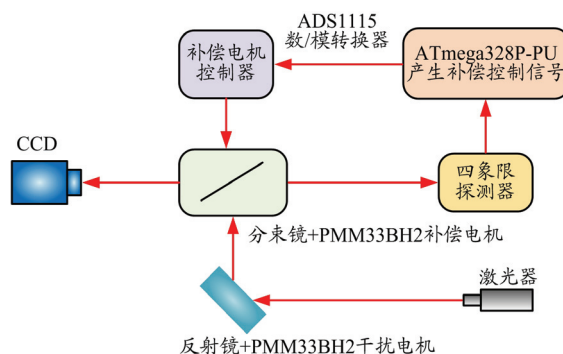


图 5 激光稳定集成化系统原理框图

干扰电机和补偿电机移动方向间的关系如图 6 所示, 干扰电机左移, 补偿电机向上移相应的距离。为便于观察干扰电机和补偿电机移动后光点的位移情况, 在分束镜和四象限探测器之间再加一个分束镜, 如图 7 所示。由第一个分束镜透射出的光点为干扰移

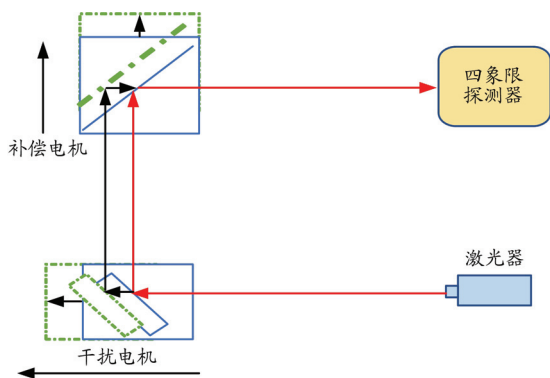


图6 干扰电机和补偿电机移动方向间的关系

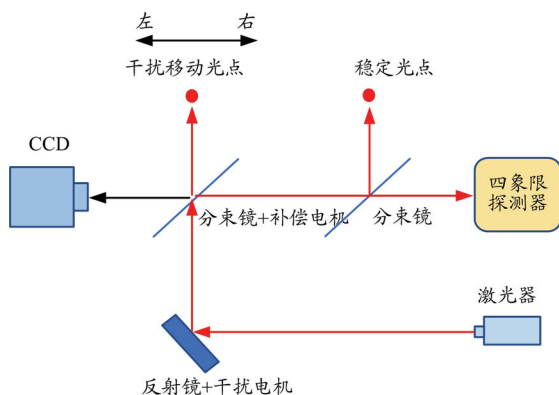


图7 加入分束镜后的光路图

动光点,由第二个分束镜反射出的光点为经闭环控制后的稳定光点。

3 实验验证及数据分析

为实现四象限探测器在激光稳定集成化系统中的应用,本文利用现有的多轴笼式结构作为整体框架基础,再加入微旋转台、反射镜、四象限探测器、激光器、分束镜和步进电机。四象限探测器使用德国QP50-6SD2探测器;激光器是功率为1.34 mW,波长为660 nm,半径为2 mm的可见红光激光器;采用TOSHIBA公司的TCD1304线阵CCD来记录光斑的位移量。实验装置安装在300 mm×300 mm的光学面包板上,如图8所示。

在静态时,光束通过反射镜和分束镜的反射照射在四象限探测器的4个光敏区。将与反射镜固定连接的步进电机(干扰电机)作为干扰源,让其按同轴不同方向、不同步长随机运行,经反射镜全反射的光束也随机位移。此时,固定不动的分束镜反射在四象限探测器上的光点发生偏移,四象限探测器的输出信号 V_{L-R} 将光信号转化为电信号传送到控制器,驱动与分束镜连接的步进电机(补偿电机),将光点重新移到四象限探

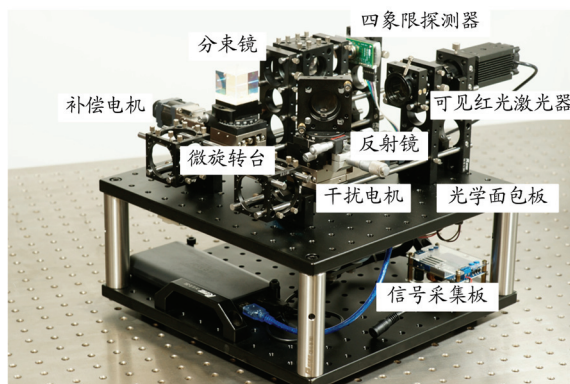


图8 实验装置图

测器的中心位置。由于四象限探测器在第一、第四象限时输出信号 V_{L-R} 为负值信号,故采用反相放大器将输出信号 V_{L-R} 转为正信号并用 V_R 和 V_L 分别表示光点在二、三象限和一、四象限的值,若光点不在各自对应的象限, V_R 和 V_L 则为零。因干扰电机一直不断改变位置,为了保证补偿的实时性,补偿电机采用爬山算法来实现输出光点的稳定,爬山算法流程图如图9所示。

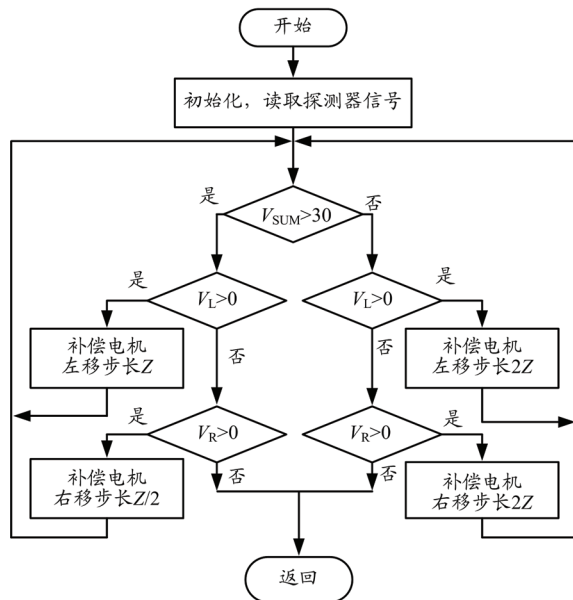


图9 爬山算法流程图

当光斑在四象限探测器边缘时,保持补偿电机不动,控制干扰电机在静态的情况下从中心向两侧方向以 $50\text{ }\mu\text{m}$ 为步长各移动9次为一组,采集完后重新归零,共采集3次。TCD1304线阵CCD记录光斑的位移量。同时,上位机采集处理传感器信号,计算偏移量 D_{L-R} 、 D_{B-T} 。由于线阵CCD收集的信息是光斑的光强分布信息,所以使用它采集光斑移动前后的图像。此外,TCD1304线阵CCD横坐标的一个像素点值为 $8\text{ }\mu\text{m}$,可用于Matlab软件分析光强分布图时的坐标标定。使

仇浩, 刘晓杰, 刘书钢: 基于四象限探测器的激光稳定集成化系统设计

用 Matlab 提取光强分布图曲线的峰值点, 通过对图像进行预处理、定位、提取和计算得到精确的光斑偏移量。作为对照, 本文采用悬挂激光器的方法照射四象限探测器, 其它测试条件相同。实验得到的数据如表 1 所示。

表 1 实验结果

电机位移 / μm	第一次光斑 偏移量/ μm	第二次光斑 偏移量/ μm	第三次光斑 偏移量/ μm	悬挂式方法 偏移量/ μm
-450	-451.4761	-451.6123	-443.7773	-429.8343
-400	-395.7007	-396.2301	-396.0225	-360.9756
-350	-355.0011	-355.5865	-355.2971	-369.1179
-300	-304.4535	-304.8831	-303.8855	-321.9512
-250	-247.5861	-247.0285	-247.7996	-272.5261
-200	-194.6561	-195.0485	-194.7066	-234.1463
-150	-155.6698	-155.1175	-155.1462	-136.3641
-100	-97.9700	-98.4024	-98.5162	-39.0244
-50	-48.4169	-48.7069	-48.6684	-10.8831
0	0.2347	0.4795	0.4397	3.7561
50	48.0508	48.0057	48.0788	40.3316
100	97.6791	101.8343	102.3641	68.2927
150	145.4929	145.5442	145.7772	134.3641
200	203.9582	204.1179	204.4158	186.3415
250	253.1646	252.832	252.5261	263.2228
300	300.6518	299.8232	299.5381	312.1951
350	354.8636	347.6042	347.2202	338.4619
400	402.4295	401.9519	401.6148	380.4878
450	441.3553	443.7773	442.5383	429.0357

由表 1 可知, 采用本文的系统, 3 次实验都完成了对光斑的中心定位。随着电机不断位移, 在 $-450 \sim 400 \mu\text{m}$ 内光斑的偏移量最大误差为 $5.6698 \mu\text{m}$, 在 $450 \mu\text{m}$ 处光斑的偏移量最大误差为 $8.6447 \mu\text{m}$ 。比较 3 次实验数据发现, 在电机的位移量为 $450 \mu\text{m}$ 时的误差值陡然增大, 产生较大误差的原因是 $450 \mu\text{m}$ 处光斑一部分光超过四象限探测器的边缘范围, 导致光斑在四象限探测器上分布不均匀。而采用悬挂激光器的方法测得偏移量的最大误差达到了 $60.9756 \mu\text{m}$, 这是因为该方法中固定激光器的俯仰角度和水平方向都存在着极大地偏差, 导致得到的数据非常不稳定。

3 次实验误差对比如图 10 所示。3 次实验中, 在

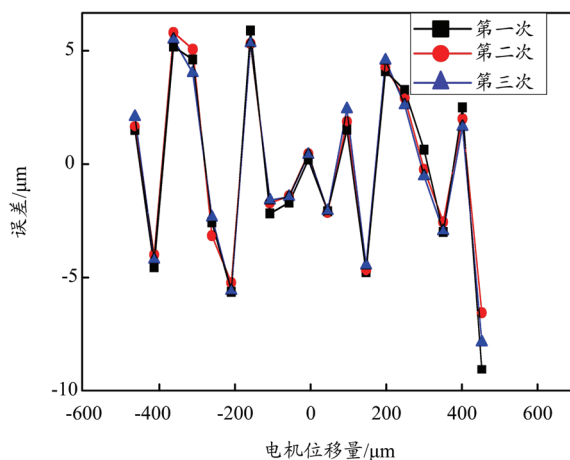


图 10 3 次实验误差对比

$-450 \sim 400 \mu\text{m}$ 内, 误差间的差值在 $0.0028 \sim 0.8736 \mu\text{m}$ 之间。在 $450 \mu\text{m}$ 处 (即光斑有部分偏离四象限探测器), 3 次实验误差的差值最大为 $2.422 \mu\text{m}$, 系统的稳定性为 94.74% , 稳定性表现很好。

偏移量 D_{L-R} 、 D_{B-T} 的大小与四象限探测器 4 个象限的电压总和有关, 由于有自然光的影响, 导致电压总和偏大, 而 V_{L-R} 与 V_{B-T} 大小不变, 所以 D_{L-R} 、 D_{B-T} 偏小。虽然 D_{L-R} 、 D_{B-T} 偏小, 但其与电机位移量的线性关系几乎不变。偏移量 D_{L-R} 、 D_{B-T} 和电机位移量的关系如图 11 所示。可以看出, D_{L-R} 与位移量成正比, D_{B-T} 几乎保持水平状态, 这也进一步体现了系统的稳定性。

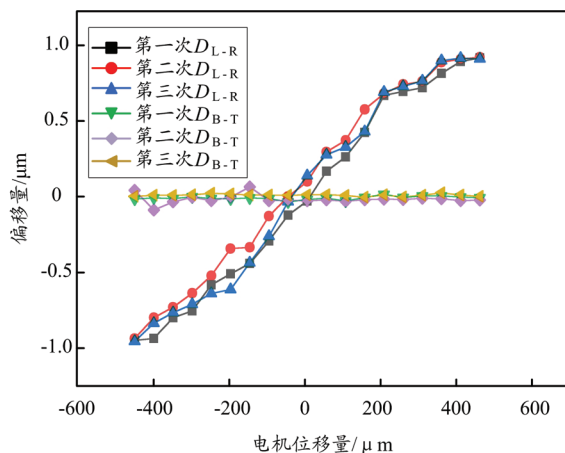


图 11 3 次实验中位移量与偏移量的关系

在四象限探测器中心位置 $450 \mu\text{m}$ 、 $-450 \mu\text{m}$ 处测得光斑回归中心的速度分别为 0.23 s 、 0.25 s , 100% 完成了对光斑的中心补偿, 因此, 激光稳定集成化系统具有响应速度快的特点。

4 结束语

本文采用独特的集成化方法将激光器、光学元件

和四象限探测器集成到一起, 在硬件上进一步减小了因为激光器或者四象限探测器的机械安装误差而导致光斑中心偏移; 融合计算机信号处理技术和控制技术, 通过对四象限信号采集装置的闭环控制, 实现了对激光稳定集成化系统的简化设计; 利用 Matlab 软件对光强分布图进行对比分析。实验测试数据结果表明: 根据四象限探测器采集到的信号, 本文采用爬山算法能够实时准确地补偿光斑的偏离量, 使得偏差程度在 $5.6689\ \mu\text{m}$ 以内, 激光稳定性很好。

本文设计的系统具有实时出射稳定激光、响应速度快和精度高的特点, 未来将进一步分析控制系统的控制鲁棒性, 以设计出速度更快, 更精准的控制。

参考文献:

- [1] 吴佳敏. CCD 中激光混合光斑的中心定位算法研究 [D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [2] LIU J S, ZHOU H, ZHANG M L, et al. Optical fiber positioning based on four-quadrant detector with Gaussian fitting method [J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2017, 17(7): 117–122.
- [3] BARNA A, FÖLDES I, BOHUS J, et al. Active stabilization of the beam pointing of a high-power KrF laser system[J]. Metrology and Measurement Systems, 2015, 22(1): 165–172.
- [4] ZHANG W, GUO W, ZHANG C, et al. An improved method for spot position detection of a laser tracking and positioning system based on a four-quadrant detector [J]. Sensors, 2019, 19(21): 4722–1–4722–18.
- [5] GAO S, LIU H, ZHANG H, et al. Improve the detection range of semi-active laser guidance system by temperature compensation of four-quadrant pin detector [J]. Sensors, 2019, 19(10): 2284–1–2284–13.
- [6] GAO Q, MENG X, QIAN W, et al. Research on correction algorithm of laser positioning system based on four quadrant detector [C]//Fourth Seminar on Novel Optoelectronic Detection Technology and Application, October 24–26, 2017, Nanjing, China. Bellingham: SPIE, 2018: 1065–1070.
- [7] BERTILSSON K, DUBARIC E, THUNGSTRÖM G, et al. Simulation of a low atmospheric-noise modified four-quadrant position sensitive detector [J]. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, 2001(1): 183–187.
- [8] 秦立存, 贺伟. 基于四象限探测器的激光光斑中心定位算法[J]. 应用激光, 2021, 41(3): 561–568.
- [9] 陈云善, 吴佳彬, 王景源, 等. 改进的激光光斑位置分辨率模型[J]. 中国激光, 2019, 46(9): 176–182.
- [10] 王之哲, 陈勇国, 陈思, 等. 四象限探测器测试方法 [J]. 中国测试, 2019, 45(2): 1–6.
- [11] CHONGBIN X, XIAOMING N, RONG H, et al. The effect of spot size on quality factor of laser doppler velocimeter [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1748(6): 062037–1–062037–9.
- [12] LU X, XV Y, WANG W, et al. Experimental study of the effect of light source spot size on measure error of PSD [J]. International Journal of Manufacturing Research, 2019, 14(1): 1–14.