



激光光束管控中光瞳光轴自动准直技术的应用*

蒋志雄, 解平, 严伟

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川绵阳 621900)

摘要: 针对复杂光机系统设计中光瞳光轴位置的传递问题, 构建了光瞳光轴镜耦合控制的算法模型以及实施控制的解析公式。依据耦合控制流程, 阐述了解析公式中各系数的标定过程及其方法。同时通过搭建的试验光路, 验证了上述模型及解析公式的合理性。结合探测器靶面上解算出的光瞳光轴光斑中心, 通过光瞳光轴耦合镜各自两电机联动控制, 可单步内实现光瞳光轴的快速耦合。执行 3 次不同控制策略下的光瞳光轴耦合, 可使光瞳耦合精度达到近场光斑的 0.2%, 光轴耦合精度达到 $3 \mu\text{rad}$ 。

关键词: 光瞳光轴; 自动; 准直技术; 耦合控制; 质心

中图分类号: TN242

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230077

Application of automatic collimation technology for pupil and optical axis in laser beam control

Jiang Zhixiong, Xie Ping, Yan Wei

(Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: For the transfer of the pupil and optical axis position in the design of complex optical mechanical system, the algorithm model of coupling control of the pupil mirror and the optical axis mirror and the analytical formula for implementing control are constructed. Based on the coupling control process, the calibration process and method of each coefficient in the analytical formula are elaborated. At the same time, the rationality of the above model and the analytical formula is verified through the built test optical path. Combined with the calculated pupil and optical axis spot center on the target plane of the detector, the fast coupling of pupil and optical axis can be realized in one step through the linkage control of the two motors of the pupil and optical axis coupling mirrors. The pupil can achieve an accuracy of 0.2% of the near field spot and an accuracy of $3 \mu\text{rad}$ for the optical axis by performing three different control strategies for the pupil and optical axis coupling.

Key words: pupil and optical axis, automatic, collimation technique, coupling control, centroid

复杂光机系统一般由多个光学测试、光学参数校正、目标探测等单元组成, 确定主体光轴后, 一般希望入射或出射光能沿主体光轴传输, 但由于大多系统设计时, 组成单元处于不同光学平台上, 各自光轴受平台影响, 不同时刻下可能出现单元光轴与主体光轴偏差; 同时即使当组成单元处于同一光学平台上, 但由于受到本身的热变形、环境振动和空气扰动等因素影响^[1-3], 各自探测到的光瞳可能出现瞳移, 光轴出现轴差, 从而影响目标探测或激光经光路传输后到达指定的目标位置。为解决该问题, 一般通过在光路传输的过渡位置处设置耦合镜, 通过光瞳光轴耦合, 将不同位置处光瞳光轴光斑耦合至基准位置上, 确保光路传输的稳定性。

王梧成^[4]等提出通过四象限管来探测光轴轴差与光瞳瞳移, 根据探测值控制电动调整镜, 实现光瞳光轴耦合。何为^[5]等提出通过十字叉丝在 CCD 相机上的近远场成像, 识别两个叉丝像位置差, 来调节光路上两块平面反射镜耦合光瞳光轴。尉鹏飞^[6]等根据两点成一线的基本思想, 提出利用两基准点探测代替监测近远场光斑的设计, 根据两位置处探测的偏差值, 调节光路前后两面反射镜, 将偏移光路耦合至基准光路上。研究人员针对光路准直传输构建了不同的模型, 同时也在电动调整镜的控制上提出了不同方法。最常用的电动调整镜控制方法有两种, 即通过步进电机驱动调整镜来实现光路自动准直^[4,7-8], 或通过压电陶瓷驱动反射镜作为光束稳定元件^[6,9]。上述

* 收稿日期: 2023-04-06; 修订日期: 2023-05-20
联系方式: 蒋志雄, cocolayou@163.com.

1.3 耦合控制方法

通过探测器获取到导引光光瞳光轴偏差后,需要将偏差值解算成控制量施加给光路耦合镜,将光瞳光轴耦合至基准位置。一般根据耦合方式的不同,可以将耦合方法分成两类,即:逐步逼近式耦合与单步直达式耦合。逐步逼近式耦合是通过控制光瞳镜和光轴镜逐步逼近目标位置。具体过程为:光瞳镜和光轴镜每移动一个小量后,通过近场或远场探测值判断移动方向是否正确,若正确则继续该方向的调整,若不正确则反向调整^[18]。通过小步实施逐步逼近,直至光瞳光轴位置调整至允许范围内。该方法的优点是总能够到达指定位置,缺点是过程耗时较长,算法简单笨拙,不适合时效性要求高的系统。单步直达式耦合是通过近远场探测器获取光瞳瞳移量与光轴轴差值,并将光瞳光轴偏差值,通过控制参数方程解算出光路耦合镜的控制量,在一个循环内,光瞳镜与光轴镜各自电控器件同时运动,单步实现快速耦合。该方法的优点是耦合速度快,时效性高,缺点是对电控器件精度要求较高。

为确保光路快速耦合,本文基于单步直达式耦合方法,实现光瞳光轴的耦合控制。基于图1光瞳光轴耦合光路布置图,耦合控制通过提取的光瞳图像中心及光轴图像中心,控制光瞳镜与光轴镜 X 、 Y 向控制电机,控制流程如图2所示。

第一步标定,光瞳探测器探测光瞳中心,初始光瞳位置记为 (a_1, b_1) ,光瞳目标位置记为 (a_0, b_0) ;光轴探测器探测光轴中心,初始光轴位置记为 (c_1, d_1) ,光轴目标位置记为 (c_0, d_0) 。光轴镜标定:光轴镜 X 向控制电机运动步长 m ,对应光轴探测器探测光轴中心 X 向移动1个像素;光轴镜 Y 向控制电机运动步长 n ,对应光轴探测器探测光轴中心 Y 向移动1个像素;光轴探测器探测光轴中心 X 向坐标变化 k ,对应光瞳探测器探测光瞳中心 X 向移动1个像素;光轴探测器探测光轴中心 Y 向坐标变化 r ,对应光瞳探测器探测光瞳中心 Y 向移动1个像素。光瞳镜标定:光瞳镜 X 向控制电机运动步长 l ,对应光轴探测器探测光轴中心 X 向移动 p 个像素;光瞳镜 Y 向控制电机运动步长 1 ,对应光轴探测器探测光轴中心 Y 向移动 u 个像素;光瞳探测器探测光瞳中心针对光瞳镜标定做如下约定,即光瞳镜 X 向与 Y 向控制电机运动结束后,光轴镜均将光轴探测器探测光轴中心拉至光轴目标位置。如此得到光瞳镜 X 向控制电机运动步长 f ,对应光瞳探测器探测光瞳中心 X 向移动1个像素;光瞳镜 Y 向控制电机运动步长 g ,对应光瞳探测器探测光瞳中心 Y 向移动1个像素。

第二步光轴中心至目标位置,光轴镜 X 向控制电机运动步长记为 X_1 ;光轴镜 Y 向控制电机运动步长记为 Y_1 ;可表示为

$$X_1 = (c_1 - c_0) \cdot m \quad (6)$$

$$Y_1 = (d_1 - d_0) \cdot n \quad (7)$$

光轴中心至目标位置后,光瞳探测器探测光瞳中心 X 向坐标变为: $(c_1 - c_0)/k + a_1$;光瞳探测器探测光瞳中心 Y 向坐标变为: $(d_1 - d_0)/r + b_1$ 。

第三步光瞳镜运至目标位置,光瞳镜 X 向控制电机运动步长记为 X_2 ;光瞳镜 Y 向控制电机运动步长记为 Y_2 ;可表示为

$$X_2 = [(c_1 - c_0)/k + a_1 - a_0] \cdot f \quad (8)$$

$$Y_2 = [(d_1 - d_0)/r + b_1 - b_0] \cdot g \quad (9)$$

光轴镜运至目标位置,光轴镜 X 向控制电机运动步长记为 X_3 ;光轴镜 Y 向控制电机运动步长记为 Y_3 ;运动量为

$$X_3 = [(c_1 - c_0)/k + a_1 - a_0] \cdot f \cdot p \cdot m \quad (10)$$

$$Y_3 = [(d_1 - d_0)/r + b_1 - b_0] \cdot g \cdot u \cdot n \quad (11)$$

由此得到光轴镜的累计运动量,光轴镜 X 向控制电机累计运动步长记为 X_4 ;光轴镜 Y 向控制电机累计运动步长记为 Y_4 ,可表示为

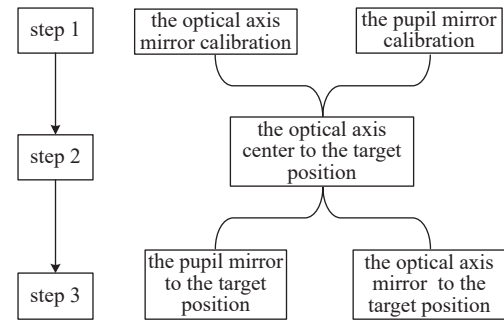


Fig. 2 Coupling control process of the pupil and the optical axis

图2 光瞳光轴耦合控制流程

$$X_4 = [(c_1 - c_0)/k + a_1 - a_0] \cdot f \cdot p \cdot m + (c_1 - c_0) \cdot m \quad (12)$$

$$Y_4 = [(d_1 - d_0)/r + b_1 - b_0] \cdot g \cdot u \cdot n + (d_1 - d_0) \cdot n \quad (13)$$

2 光瞳光轴全自动耦合测试试验

为了验证上述算法的合理性,在实验室设计了如下光路,基准光源发出 633 nm 准直光,光斑外径 120 mm,内径 38 mm,测量系统包含可见光光瞳光轴探测器,等效焦距为 5 m,图中 L_1 为 450 mm, L_2 为 320 mm, L_3 为 2750 mm。其中光瞳光轴探测器均选用四川雷得兴业信息科技有限公司生产的 D400MG 相机,像元尺寸 5.5 μm ,信噪比 40.5 dB,帧频 17 Hz,光瞳探测器有效靶面 2048 \times 2048,光轴探测器有效靶面 1024 \times 1024。

图 3 中使用的光瞳光轴镜如图 4 所示(红色箭头表示光路),为绵阳诺达佳工业控制技术有限公司生产的 DTJ-150 系列电调镜,电机型号为 Maxon DCX 747494,驱动器型号为 Elmo G-SOLWHI05/100SE,测量系统光瞳光轴探测器探测的光瞳光轴图像如图 5 所示。

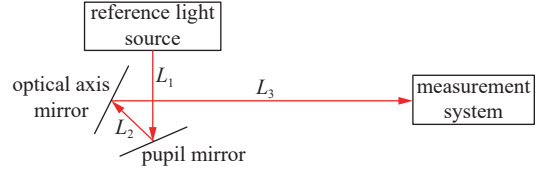


Fig. 3 Verifying test optical path

图 3 验证测试光路

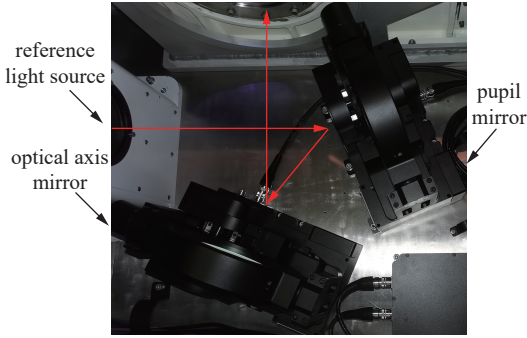


Fig. 4 The pupil and optical axis mirrors

图 4 光瞳光轴镜

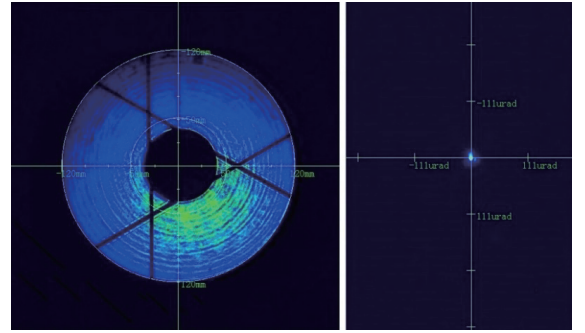


Fig. 5 The pupil and optical axis image

图 5 光瞳光轴图像

按式(8)、式(9)、式(12)与式(13),可得到如图 3 所示验证测试光路中,光瞳光轴镜耦合控制方程为

$$X_2 = [(c_1 - c_0)/32 + a_1 - a_0] \cdot 125 \quad (14)$$

$$Y_2 = [(d_1 - d_0)/32 + b_1 - b_0] \cdot 120 \quad (15)$$

$$X_4 = [(c_1 - c_0)/32 + a_1 - a_0] \cdot 125 \times 1.39 \times 0.72 + (c_1 - c_0) \cdot 0.72 \quad (16)$$

$$Y_4 = [(d_1 - d_0)/32 + b_1 - b_0] \cdot 120 \times 1.32 \times 0.76 + (d_1 - d_0) \cdot 0.76 \quad (17)$$

基于式(14)~式(17)耦合控制方程,按图 3 所示光路,分别模拟光瞳或光轴 X 向或 Y 向单项偏离目标位置时的耦合情况,其中光瞳目标位置坐标为 (1064,1022),光轴目标位置为 (512,512),均为探测器上像素坐标位置。通过上位机控制程序,给下位机耦合控制软件发送耦合控制指令,按式(14)~式(17)所述耦合控制方程,单步内光瞳光轴耦合镜各自 X 、 Y 向电机联动控制,实施光瞳光轴的快速耦合。测试数据如表 1~表 4 所示,表中 T_1 表示光瞳起始位置, P_1 表示耦合完成后光瞳位置, E_1 表示光瞳耦合偏差, T_2 表示光轴起始位置, P_2 表示耦合完成后光轴位置, E_2 表示光轴耦合偏差, M 表示耦合过程耗时。

从表 1 与表 2 中可看出,光瞳 X 向或 Y 向偏离目标位置后,耦合光瞳光轴,光瞳耦合精度不大于 0.97 mm,即不大于近场光斑的 0.81%,光轴耦合精度不大于 19.38 μrad 。

从表 3 与表 4 中可看出,光轴 X 向或 Y 向偏离目标位置后,耦合光瞳光轴,光轴耦合精度不大于 17.03 μrad ,光瞳耦合精度不大于 0.19 mm,即不大于近场光斑的 0.16%。

综合表 1~表 4 可看出,光瞳或光轴单方向偏离目标位置的耦合会相互影响,光瞳镜的耦合对光轴的耦合精度影响较大,而光轴镜的耦合对光瞳的耦合精度影响较小。故此若要提高光轴耦合精度,只需按式(6)~(7),控制光轴镜完成光轴的第二次耦合,经测试执行该步指令后,光轴耦合精度不大于 3 μrad ,光瞳耦合精度不大于近场光斑的 0.84%;若要同时提高光瞳光轴耦合精度,只需执行 3 次耦合过程,按式(14)~式(17)先后执行两次耦合,再按

表 1 光瞳 X 向偏离目标位置时耦合情况

Table 1 Coupling when the pupil deviates from the target position in X direction

T_1	P_1	E_1/mm	T_2	P_2	$E_2/\mu\text{rad}$	M/s
(1046.6,1022.2)	(1061.6,1020.2)	0.24	(511,511.8)	(513.5,516.5)	5.16	0.93
(1032.3,1021.8)	(1059.7,1019)	0.42	(509.6,512.1)	(514.2,521.6)	10.72	1.52
(1023.3,1022.2)	(1057.4,1019.3)	0.57	(512.6,511.1)	(514.6,523.8)	13.15	1.9
(1009.3,1022.5)	(1054.8,1020.1)	0.75	(512.4,512.1)	(515.3,526.5)	16.18	2.48
(999.4,1022.1)	(1052.2,1019.3)	0.97	(511.4,512.2)	(515.8,529.4)	19.38	2.89

表 2 光瞳 Y 向偏离目标位置时耦合情况

Table 2 Coupling when the pupil deviates from the target position in Y direction

T_1	P_1	E_1/mm	T_2	P_2	$E_2/\mu\text{rad}$	M/s
(1063.3,1012.7)	(1064.5,1018.6)	0.27	(512.4,511.4)	(507.8,512.4)	4.59	0.57
(1064,1002.8)	(1065.6,1016.5)	0.46	(514.5,510.3)	(501.8,513.6)	11.23	0.97
(1064.3,989.3)	(1066.3,1015.3)	0.57	(513.7,511)	(497.6,514.9)	15.98	1.51
(1064.2,972.5)	(1067.2,1013.6)	0.72	(513.3,510.1)	(496.8,516)	17.1	2.19
(1063.5,967.1)	(1067.8,1010.8)	0.95	(513.8,513.3)	(494.8,516.5)	19.34	2.4

表 3 光轴 X 向偏离目标位置时耦合情况

Table 3 Coupling when the optical axis deviates from the target position in X direction

T_1	P_1	E_1/mm	T_2	P_2	$E_2/\mu\text{rad}$	M/s
(1065.8,1020.9)	(1064.2,1021.7)	0.03	(412.1,509.8)	(509.9,511.8)	2.3	0.28
(1064.5,1021.7)	(1062.8,1021.2)	0.12	(306.6,511.1)	(516.6,513.2)	5.17	0.5
(1064.5,1021)	(1063.2,1020.4)	0.14	(205.5,508)	(519.5,510.8)	8.26	0.65
(1063.4,1021.1)	(1063.4,1020.5)	0.13	(111.6,505.3)	(523.7,514.1)	12.93	0.84
(1063.5,1021.4)	(1063.6,1020.2)	0.15	(8.6,507.8)	(527.4,513.6)	16.85	1

表 4 光轴 Y 向偏离目标位置时耦合情况

Table 4 Coupling when the optical axis deviates from the target position in Y direction

T_1	P_1	$E_1/(\text{mm})$	T_2	P_2	$E_2/\mu\text{rad}$	M/s
(1064.2,1021.9)	(1064.2,1019.9)	0.17	(513.5,409.2)	(511.6,514.6)	2.86	0.36
(1064.5,1021.9)	(1064.4,1019.6)	0.19	(513.1,302)	(509.5,506.8)	6.28	0.52
(1064.2,1022.2)	(1064.1,1020.1)	0.15	(513.3,213.9)	(508.4,503.6)	9.94	0.64
(1064.6,1024.3)	(1063.9,1020.3)	0.14	(512.6,113.5)	(509.1,498.8)	14.7	0.71
(1064.3,1024.5)	(1064.1,1020.6)	0.11	(508.4,10.2)	(508.7,496.7)	17.03	0.86

(6)~式(7)执行第 3 次耦合,经测试光瞳耦合精度不大于近场光斑的 0.2%,光轴耦合精度不大于 $3 \mu\text{rad}$ 。

3 结 论

本文基于复杂光机系统设计中,光瞳光轴的稳定传递,构建了光瞳光轴镜耦合控制的算法模型以及实施控制的解析公式,同时通过搭建的试验光路,对上述模型及解析公式进行了验证。结合光瞳光轴探测器靶面上,解算出的光瞳光轴光斑中心,通过光瞳光轴耦合镜各自两电机联动控制,可单步内实现光瞳光轴的快速耦合。为确保耦合精度,执行 3 次不同控制策略下的光瞳光轴耦合,光瞳耦合精度可达近场光斑的 0.2%,光轴耦合精度可达 $3 \mu\text{rad}$ 。该方法耦合速度快,精度高,对推动复杂光机系统设计,实现跨平台光路稳定传输具有积极的意义。

致 谢 感谢技术室领导对本课题的关心和指导,感谢课题组成员的支持。

参考文献:

- [1] 刘代中,徐仁芳,范滇元.激光聚变装置光束自动准直系统的研究进展[J].激光与光电子学进展,2004,41(2):1-5. (Liu Daizhong, Xu Renfang, Fan Dianyuan. Evolution of beam automatic alignment system in laser-fusion facility[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2004, 41(2): 1-5)

- [2] 吕凤年, 刘代中, 徐仁芳, 等. 图像处理在光路自动准直系统中的应用[J]. 光学技术, 2005, 31(3): 335-337. (Lv Fengnian, Liu Daizhong, Xu Renfang, et al. Performance of image processing in beams automatic alignment system[J]. Optical Technique, 2005, 31(3): 335-337)
- [3] 刘代中, 朱健强, 徐仁芳, 等. 4程放大光路自动准直系统研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(5): 582-586. (Liu Daizhong, Zhu Jianqiang, Xu Renfang, et al. Study of beams automatic alignment in four-pass amplifiers[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(5): 582-586)
- [4] 王梧成, 王剑雄, 吴恒显, 等. 大型激光系统光路的自动准直[J]. 中国激光, 1985, 12(9): 543-546,542. (Wang Wucheng, Wang Jianxiong, Wu Hengxian, et al. Auto-alignment of the optical path of a large laser system[J]. Chinese Journal of Lasers, 1985, 12(9): 543-546,542)
- [5] 何为, 陈庆浩, 徐仁芳, 等. 激光核聚变装置中基于像传递的激光自动准直技术研究[J]. 光学学报, 1999, 19(9): 1279-1283. (He Wei, Chen Qinghao, Xu Renfang, et al. Image transfer based automatic laser alignment technique for laser-fusion facility[J]. Acta Optica Sinica, 1999, 19(9): 1279-1283)
- [6] 尉鹏飞, 刘军, 李晓芳, 等. 激光光束实时监测与自动准直系统设计[J]. 光学学报, 2008, 28(8): 1590-1595. (Wei Pengfei, Liu Jun, Li Xiaofang, et al. Design of laser beam real-time monitoring and adaptive collimation system[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(8): 1590-1595)
- [7] 周维, 胡东霞, 赵军普, 等. 高功率固体激光器光路自动准直算法与流程优化[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 78-81. (Zhou Wei, Hu Dongxia, Zhao Junpu, et al. Optimizing on algorithm and flow of beam alignment in high power solid-state laser driver[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(1): 78-81)
- [8] Chen Zhifei, Yao Ke, Fan Chen, et al. Automated alignment research on off-axis eight-pass laser amplifier[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2021, 33: 091004.
- [9] 刘泽金, 舒柏宏, 王永仲, 等. 高能激光束自动对准和稳定系统的结构设计[J]. 光学技术, 1999(1): 19-20. (Liu Zejin, Shu Bohong, Wang Yongzhong, et al. Design for automatically aligning and stabilizing high energy laser beam[J]. Optical Technology, 1999(1): 19-20)
- [10] 唐冠群. 几种激光光斑中心定位算法的比较[J]. 北京机械工业学院学报, 2009, 24(1): 61-64. (Tang Guanqun. Analysis and comparison of several calculation methods of beam spot center[J]. Journal of Beijing Institute of Machinery, 2009, 24(1): 61-64)
- [11] 刘好龙, 侯文, 范亚龙, 等. 一种改进的激光光斑中心定位算法[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(1): 139-141. (Liu Haolong, Hou Wen, Fan Yalong, et al. An improved algorithm of laser spot center location[J]. Computer Measurement & Control, 2014, 22(1): 139-141)
- [12] 潘登, 李艳丽, 高东, 等. 基于椭圆拟合的多光斑/重叠光斑中心提取方法[J]. 光学学报, 2020, 40: 1410001. (Pan Deng, Li Yanli, Gao Dong, et al. Center extraction method of multiple and overlapping faculae based on ellipse fitting[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40: 1410001)
- [13] 张明富, 段梦琨, 马月辉. 基于Fisher准则的Otsu法在光斑中心定位中的应用[J]. 激光与红外, 2020, 50(5): 532-537. (Zhang Mingfu, Duan Mengkun, Ma Yuehui. Application of Otsu method based on Fisher criterion in spot center location[J]. Laser & Infrared, 2020, 50(5): 532-537)
- [14] 赵琦, 郝士琦, 张岱. 改进阈值分割的光斑中心定位方法[J]. 激光与红外, 2018, 48(5): 633-637. (Zhao Qi, Hao Shiqi, Zhang Dai. Location method of spot center based on improved threshold segmentation[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(5): 633-637)
- [15] 吴鹏飞, 王辉亮, 雷思琛, 等. 大气湍流环境下光斑中心定位算法研究[J]. 光子学报, 2022, 51: 0301002. (Wu Pengfei, Wang Huiliang, Lei Sichen, et al. Research on spot center localization algorithm in atmospheric turbulence environment[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51: 0301002)
- [16] 杨耀权, 施仁, 于希宁, 等. 用Hough变换提高激光光斑中心定位精度的算法[J]. 光学学报, 1999, 19(12): 1655-1660. (Yang Yaoquan, Shi Ren, Yu Xining, et al. An algorithm to raise the locating precision of laser spot center based on Hough transform[J]. Acta Optica Sinica, 1999, 19(12): 1655-1660)
- [17] 孔兵, 王昭, 谭玉山. 基于圆拟合的激光光斑中心检测算法[J]. 红外与激光工程, 2002, 31(3): 275-279. (Kong Bing, Wang Zhao, Tan Yushan. Algorithm of laser spot detection based on circle fitting[J]. Infrared and Laser Engineering, 2002, 31(3): 275-279)
- [18] 叶成樑, 尚建华, 贺岩. 光路自动准直系统研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54: 051201. (Ye Chengliang, Shang Jianhua, He Yan. Study of laser beam autocollimation system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54: 051201)