

文章编号: 0258-7025(2008)10-1500-05

一种共光路自动对准系统

潘高峰^{1,2} 张景旭² 陈娟³

(¹ 中国科学院研究生院, 北京 100039; ² 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)
³ 长春工业大学电气与电子工程学院, 吉林 长春 130033

摘要 强激光发射装置和光电跟踪系统中, 光学器件多, 光路复杂, 光学机械零件位置的相对移动会使光轴平行度偏离, 为此提出一种共光路自动对准系统。基于对准原理, 利用激光发射光路, 建立上、下行基准光束, 使之分别与系统轴系、出射激光平行, 并且通过自准直 CCD 测角仪测出上、下行光路的角偏差值, 控制信号驱动快速控制反射镜, 使快速控制反射镜两轴转动到角偏差为零值, 实现发射激光与一级扩束系统对准及一级扩束系统与跟瞄系统之间的精密自动对准。实验结果表明, 对准后的光轴平行度为 $5.21''$, 快速控制反射镜的闭环精度不大于 $5''$ 。

关键词 激光器; 强激光器; 自动对准; CCD 测角仪; 快速控制反射镜

中图分类号 TN 242 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083510.1500

Common Path Auto-Alignment System

Pan Gaofeng^{1,2} Zhang Jingxu² Chen Juan³

¹ Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China
² Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
³ College of Electrical and Electronic Engineering,
Changchun University of Technology, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract Because of the complicated optic path and many optical components, relative shift of the optic mechanical parts can cause easily optic-axis parallelism departure the normal direction in high power laser launch equipment and multi-axial photoelectric tracking system. Therefore a real time auto-alignment system is proposed. Based on the alignment principle, up and down datum beam is built and paralleled with the axes of the system and the output laser separately by using the path of emitting laser. By using the CCD auto-collimator to measure the angle error of up and down path, signal is controlled to drive the fast steering mirror until the angle error of the two axes is zero. The alignment between emitting laser and the first beam expanding system and the fine alignment between the first beam expanding system and tracking and pointing system can be realized. Experimental results show that optical-axis parallelism is $5.21''$, and the accuracy of close-loop of fast steering mirror is smaller than $5''$.

Key words lasers; high power laser; auto-alignment; CCD collimator; fast steering mirror

1 引言

随着激光技术在光电对抗中应用的日益广泛, 功率的不断提高, 系统中使用的光学器件也越来越多。对于 CO₂ 强激光器, 其激光功率密度很大, 结构复杂, 并且跟踪瞄准架和 CO₂ 激光器分别位于不同方舱内, 两者之间需精密对准, 达到角秒级。光轴的

平行度是光电经纬仪和 CO₂ 激光发射装置等多光轴光电设备的一个重要参数。在 CO₂ 激光发射装置中, 光电系统轴系与激光发射光轴的平行度是保证主激光束沿跟踪测量轴精确发射到跟踪目标上的关键。因此, 为了确保系统每次运行时, 从激光器发出的激光束能够稳定、精确地通过光学器件传输出去, 实现

收稿日期: 2008-01-07; 收到修改稿日期: 2008-01-21

作者简介: 潘高峰(1980—), 男, 山东人, 博士研究生, 主要从事大功率激光自动对准技术方面的研究。

E-mail: gaofengpgf@tom.com

导师简介: 张景旭(1964—), 男, 吉林人, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电探测技术方面的研究。

E-mail: Zhangjx@ciomp.ac.cn

CO₂ 发射激光与一级扩束系统对准及一级扩束系统与跟瞄发射系统光轴之间的精密对准,是一个需要迫切解决的问题。光束的自动对准系统相对手工调整而言,能够在较短的时间内,实现激光光束的偏移在装置允许的误差范围内。自动对准系统已成为大型高功率激光装置必不可少的组成部分^[1~6]。

2 对准原理

一个已调整好的激光系统,器件的位置均已固定,但由于温度变化、反射镜机械结构蠕变、光学反射镜的热畸变、支撑框架微振动、振荡器输出光束方向漂移和其他随机因素的影响,造成光束偏离原定光路^[7]。因此在激光装置发射前需要重新校正。光路自动对准的任务是通过逐段检测光束位置和方向误差,调整反射镜的位置,使光束恢复到原定光路上。逐段由前向后依次调整,直至靶点。

激光自准直仪发出的准直光束对跟踪架的方位轴和俯仰轴进行平行度检测,自准直仪发出平行光束投射到反射镜上,该反射镜将其光束反射回自准直仪。如果反射镜与光轴垂直,则光束将反射回接收器的中心;如果反射镜倾斜一个角度 α ,则其反射光将以角度 2α 反射回来。通过测量自准直图像在 x 轴及 y 轴上的位移可以测得反射镜的角度变化。反射镜的角位移 α 与准直物镜的焦距 f 及反射像在接收器上的位移量 S 的数学关系为

$$S = f \tan(2\alpha), \quad (1)$$

当 α 较小时,该数学关系可近似为

$$\alpha = (1/2) \arctan(S/f) \approx S/2f. \quad (2)$$

当测出 S 后,根据(2)式可以计算出反射镜的偏转角大小,并且可以由反射回来的像的位置推导出反射镜的偏转方向。反射回来的光点由 CCD 接收,旋转方位轴、俯仰轴,使反射光点在 CCD 靶面上不动,即准直光束和方位轴及俯仰轴达到平行。

激光器出射的激光通过一级扩束系统,引入跟踪架,再通过设置在跟踪架内的导光折转光路,传输至卡塞格伦式光学系统发射出去。激光光路中引起光轴偏离的因素很多,都可归结为光轴的失调,也就是假定所有光学器件固定不动,但入射的光束发生了角移和平移,即光束的入射角度和位置发生了偏移。为保证引入到一级扩束装置的激光入射方向和跟踪架激光发射光轴方向严格平行,光轴的失调可通过在俯仰和方位两个转角方向上安装的两套直线光栅编码器检测,完成二维角位置检测。反馈至计算机控制系统,控制一块二维快速伺服反射镜,对激

光的入射方向作精确调整,保证两者的精密实时对准关系。对准系统原理如图 1 所示。

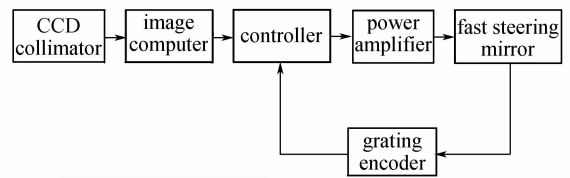


图 1 对准系统原理图

Fig. 1 Sketch of alignment system

3 共光路自动对准系统

3.1 自动对准系统组成

波长为 $10.6 \mu\text{m}$ 的高功率 CO₂ 激光束为不可见光,功率密度大,缺乏合适的传感器进行直接测量,必须另外建立可见光作为基准,让它与竖轴、水平轴平行。通过建立上、下行自准直光路基准,使基准光束通过主激光的传输路径分别与出射激光和跟踪架的轴系平行。

在方位轴的中间位置放置 45° 小反射镜,镀上分光膜,下行准直仪发出的激光经小反射镜到达上行准直仪,由自准直 CCD 测角仪接收,通过调整使二者自准,如图 2 所示。

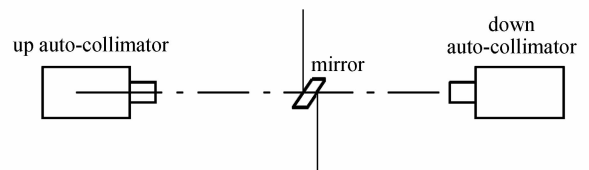


图 2 上下行光路自对准

Fig. 2 Auto-alignment of the up and down path

3.1.1 上行光路

由上行激光自准直 CCD 测角仪发出一束激光,经小反射镜到达方位环形镜,转动方位轴,光线被反射回到上行准直仪,由 CCD 接收。经过调整方位环形镜转动一周光点的位置位于 CCD 靶面的中心,即可认为对准光与方位轴同轴,同轴度为角秒级。如果返回的光点偏离 CCD 靶面的中心,则需调整图 3 中小反射镜和反射镜 1 的位置,直至返回的光点位于 CCD 靶面的中心,然后转动方位轴到初始位置。为使上行光路能够继续上行,以调整与俯仰轴平行,方位环形镜光线可通过方位环形镜上的小孔到达高低环形镜,转动方位轴,光线可被反射回到上行准直仪,由 CCD 接收,转动高低轴,使转动时光点成像在 CCD 靶面的中心,否则,需调整反射镜 2 和反射镜 3 直至光点成像在 CCD 靶面的中心。即可认为上行

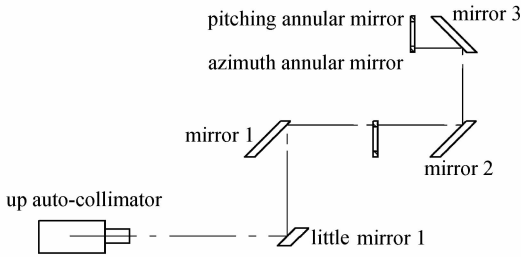


图 3 上行光路布局图

Fig. 3 Sketch of the upward path

对准光与水平轴同轴,精度为角秒级,从而上行对准光与整个系统同轴。

3.1.2 下行光路

在 CO₂ 激光器谐振腔输出镜侧板上,放置 CCD 测角仪,由下行激光自准直 CCD 测角仪发出激光束,经快速控制反射镜由 CCD 测角仪接收,使其法线方向与 CO₂ 激光器输出镜内表面法线平行度为角秒级,原理如图 4 所示。

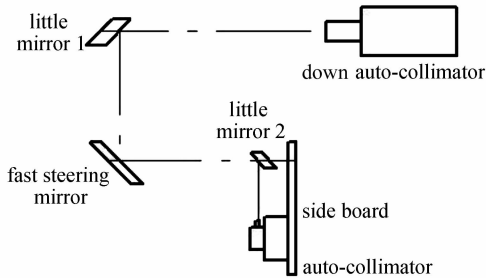


图 4 下行光路布局图

Fig. 4 Sketch of the downward path

3.2 共光路自动对准的实现

跟踪瞄准架内的光学系统一般由机械结构外加 706 硅橡胶加固,稳定性比较好,因此上、下行自准直仪自准后,上行光路的平行度一般不易变化。而 CO₂ 激光器位于不同方舱内,运输激光系统的车辆到达工作地点由三点液压支腿升起,恢复原车体的弹性变形状态,但仍有少量不可能完全恢复,同时受振动等因素的影响,会产生少量的偏差。因此激光系统每次在外场运行之前,均需进行对准检测,以保证主激光束和跟踪系统的光轴保持平行。当下行激光自准直仪发出的光束被激光器出口的自准直仪测出角偏差时,由图像处理计算机根据自准直仪测出的角偏差值,利用光栅编码器测角、测速,控制信号驱动一级扩束光路中的二维可调快速控制反射镜控制电路,使快速控制反射镜两轴转动到角偏差为零值,实现动态自动对准。

3.3 对准精度评价方法

对图像进行预处理,包括去噪场和二值化等,在

此基础上进行相应的处理来计算图像的中心。图像中心的检测方法主要有质心法、相关法和霍夫(Hough)变换。考虑到系统返回光斑形状不均匀、计算时间和复杂程度等原因,不能满足光束快速对准要求,因此采用基于最小二乘法的拟合算法^[8]来检测图像中心,提取图像的边缘点,检测图像的中心位置,进行图像判读,记录图像中心在 CCD 上的脱靶量。

3.3.1 图像中心检测

最小二乘法是最简单的方法求得不可知的真值,而令误差平方之和为最小。设圆心为 (A, B) , 半径为 R , 则圆的曲线方程为

$$R^2 = (x - A)^2 + (y - B)^2, \quad (3)$$

样本集 $(X_i, Y_i), i \in (1, 2, 3, \dots, N)$ 中点到圆心的距离为 d_i

$$d_i^2 = (X_i - A)^2 + (Y_i - B)^2, \quad (4)$$

点 (X_i, Y_i) 到圆边缘的距离的平方与半径平方的差为

$$\delta_i = d_i^2 - R^2 = (X_i - A)^2 + (Y_i - B)^2 - R^2, \quad (5)$$

令 $Q(a, b, c)$ 为 δ_i 的平方和

$$Q(a, b, c) = \sum \delta_i^2 = \sum [(X_i - A)^2 + (Y_i - B)^2 - R^2]^2, \quad (6)$$

由最小二乘法得

$$\frac{Q(a, b, c)}{\partial A} = \frac{Q(a, b, c)}{\partial B} = \frac{Q(a, b, c)}{\partial R} = 0, \quad (7)$$

可解得

$$A = \frac{HD - EG}{-2(CG - D^2)},$$

$$B = \frac{HC - ED}{-2(D^2 - CG)},$$

$$R =$$

$$\sqrt{A^2 + B^2 - \frac{\sum (X_i^2 + Y_i^2) - 2A \sum X_i - 2B \sum Y_i}{N}}, \quad (8)$$

其中

$$C = N \sum X_i^2 - \sum X_i \sum Y_i,$$

$$D = N \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i,$$

$$E = N \sum X_i^2 + N \sum X_i Y_i^2 - \sum (X_i^2 + Y_i^2) \sum X_i,$$

$$G = N \sum Y_i^2 - \sum Y_i \sum Y_i,$$

$$H = N \sum X_i^2 Y_i + N \sum Y_i^2 - \sum (X_i^2 + Y_i^2) \sum Y_i.$$

3.3.2 图像判读

对图像进行视频判读,得出 x, y 方向上的变形量,并将结果记录下来,视频判读原理如图 5 所示,以 CCD 靶面中心位置为原点建立直角坐标系,设 A 点为目标的像点,它偏离坐标原点的量称为脱靶量,计作 $(\Delta x, \Delta y)$ 。

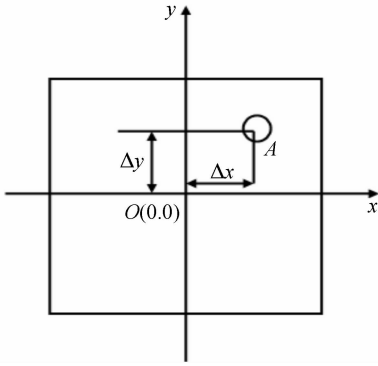


图 5 CCD 脱靶量判读原理图

Fig. 5 Sketch of CCD miss distance

当平面反射镜与光轴不垂直时,假设夹角为 α ,则返程光线与经纬仪光轴有 2α 夹角,成像在 CCD 靶面上,其光点中心距原点距离为 $2\alpha \times f'$ (f' 为 CCD 成像物镜焦距),通过 CCD 像元计数,可以求出这一距离,进而解出 α 角,即可判断出基准光束和系统的方位轴和俯仰轴的平行度。

4 相关实验

在室温下,对对准方案进行了试验,通过旋转方位轴,利用编码器记录旋转角度。每旋转 12° 记录一组自准直仪 CCD 靶面上测得的图像脱靶量,共 30 组数据。同时根据编码器和脱靶量之间的对应关系,得出方位轴旋转角度和对准平行度之间的对应关系,如图 6 所示。

旋转方位轴至初始位置,转动俯仰轴,利用编码

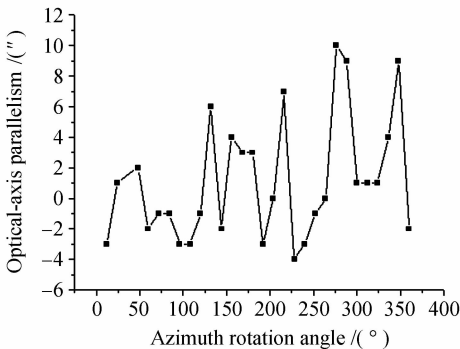


图 6 方位轴对准平行度

Fig. 6 Alignment parallelism of azimuth

器记录旋转角度。每旋转 6° 记录一组自准直仪 CCD 靶面上测得的图像脱靶量,共 30 组数据。得到俯仰轴旋转角度和对准平行度之间的对应关系,如图 7 所示。

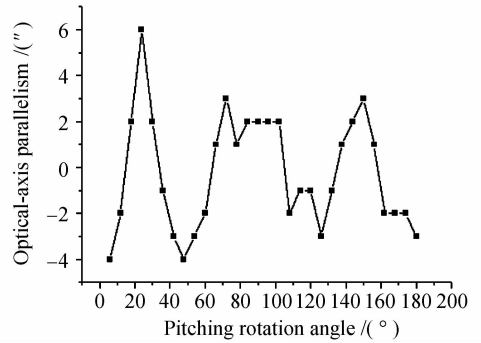


图 7 俯仰轴对准平行度

Fig. 7 Alignment parallelism of pitching

根据贝塞耳(Bessel)公式

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \delta_i^2}{n-1}}, \tag{9}$$

式中 δ_i 为残余误差。将图 6,7 中的数据代入(9)式中进行误差处理,求得方位轴平行度的标准偏差

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{\sum \delta_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{408}{30-1}} = 3.75'', \tag{10}$$

俯仰轴平行度的标准偏差

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{\sum \delta_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{182}{30-1}} = 2.51''. \tag{11}$$

为了检测本方法的对准精度,激光系统自动对准后,在室内常温下进行强激光光轴对准精度的测量试验。在反射镜 3 的镜座后放置热敏纸,转动跟踪架的方位轴和俯仰轴,CO₂ 强激光器在重复频率为 100 Hz 时连续打 10 次单脉冲激光,测得 10 组强激光系统的光轴对准精度的实验数据,如图 8 所示。

根据贝塞耳公式进行数据误差处理,得对准精度的标准偏差

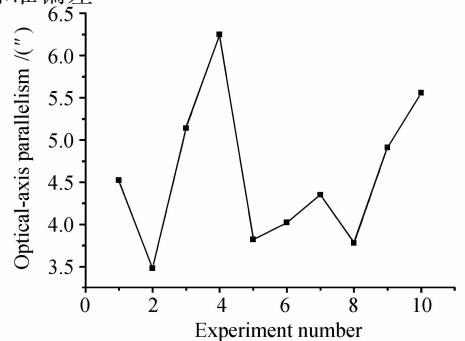


图 8 系统对准平行度

Fig. 8 Alignment parallelism of system

$$\sigma_3 = \sqrt{\frac{\sum \delta_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{245}{10-1}} = 5.21''。 \quad (12)$$

采用自动对准系统后,上行光路和方位轴、俯仰轴的对准平行度分别为3.75"和2.51",强激光系统的光轴对准精度为5.21",达到了预定的调整要求。

5 结 论

根据光学设备长期使用后会造光学机械零件位置的相对移动,使光轴平行度偏离正常的技术指标,提出共光路自动对准的方法。通过建立上、下基准光束,利用反射镜的边缘部分,分别和跟踪系统轴系、出射激光达到高精度的平行,实现检测光路和激光传输光路的共光路自动对准,且在实验平台上顺利实现,获得了满意的结果。经过实验验证,强激光系统的光轴对准精度为5.21"。同时,对准控制系统可实时接收图像处理计算机给出的下行自准直 CCD 脱靶量数据,控制快速反射镜进行高频小摆幅运动,进行精确控制激光发射和接收光轴的方向,对光束整体倾斜方向进行实时校正,闭环精度不大于5"。有效地实现了发射激光与一级扩束系统对准及一级扩束系统与跟瞄发射系统光轴之间的精密自动对准。

参 考 文 献

1 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

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

2 D. J. Eaton, A. R. Gayhart. High speed pointing control system [C]. *SPIE*, 1992, **1697**:251~260

3 H. Kroha. Laser-alignment system with transparent silicon strip sensors and its applications [J]. *Nuclear Physics B*, 1997, **54**(3)(Suppl.):80~85

4 Daizhong Liu, Renfang Xu, Dianyuan Fan. Design and performance of a video-based laser beam automatic alignment system [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(2):92~94

5 Chen Qinghao, Xu Renfang, Peng Zengyun *et al.*. Automatic optical alignment for laser-fusion facility [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(5):531~535

陈庆浩,徐仁芳,彭增云等. 用于激光核聚变装置的光路自动准直[J]. *光学学报*, 1995, **15**(5):531~535

6 Pan Gaofeng, Zhang Jingxu. Study on the system of beam alignment and measurement for high power laser [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, **27**(6)(Suppl.):247~248

潘高峰,张景旭. 强激光器光路对准检测系统研究[J]. *仪器仪表学报*, 2006, **27**(6)(增刊):247~248

7 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

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

8 Ao Lei, Tan Jiubin, Cui Jiwen *et al.*. Fast and precise center location for circle target of CCD laser autocollimator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2):253~258

敖磊,谭久彬,崔继文等. 一种快速高精度激光 CCD 自准直仪圆目标中心的定位方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2):253~258