

可见光多波段激光合束系统设计

李高生^{1,2}, 徐新行^{1,2}, 安振杰³, 刘丽娜³, 韩旭东^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 核工业理化工程研究院, 天津 300180)

摘要:为了实现可见光波段不同波长多路激光的精密合束,设计了一套激光合束系统。通过长焦距镜头和高缩束倍率镜头配合大面阵光电探测器分别实现合束激光指向与位置的高精度、实时监测;通过高精度的角度调节平台和位置调节平台分别实现光束指向和位置监测误差的实时补偿。在完成光束指向、位置监测镜头的设计加工及精密装调后,获得位置监测装置的监测分辨率为0.054 mm,指向监测装置的监测分辨率为3.5 μrad ;在完成光束位置校正平台、指向校正二维摆镜、闭环控制系统合束流程的详细设计后,对合束系统的合束精度进行实验检测和误差分析。实验结果表明:合束系统短时间内针对稳定光束的合束精度为:指向6.17 μrad ,位置优于0.66 mm;长时间内针对缓慢漂移光束的合束精度为:指向18.46 μrad ,位置优于0.72 mm。因此,所设计的激光合束系统合束精度高,并且可及时对光束的漂移误差进行自动补偿,满足系统的应用要求。

关键词:可见光;激光合束;偏差监测;闭环控制;自动校正

中图分类号:TH741 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2023.03.017

Design of visible multi-band laser beam combining system

LI Gao-sheng^{1,2}, XU Xin-hang^{1,2}, AN Zhen-jie³, LIU Li-na³, HAN Xu-dong^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Research Institute of Physical and Chemical Engineering of Nuclear Industry, Tianjin 300180, China)

Abstract: A laser beam combining system is designed to realize the precision combining of multiple laser beams of different wavelengths in visible wavelengths. The long focal lens and high beam reduction lens with large surface array photodetectors are used to achieve high precision and real-time monitoring of the laser beam pointing and position. The high precision angle adjustment device and position adjustment device are used to achieve real-time compensation of the beam pointing and position monitoring errors. After completing the design, processing and precision tuning of the beam pointing and position monitoring lenses, the monitoring accuracy of the position monitoring device is 0.054 mm and that of the pointing monitoring device is 3.5 μrad ; after completing the detailed design of the beam position correction device, the pointing correction two-dimensional pendulum mirror and the beam combining process of the closed-loop control system, the beam combining accuracy of the combining system is experimentally tested and analyzed. The experimental results show that the pointing accuracy is 6.17 μrad and the position accuracy is better than

基金项目:吉林省科技发展计划项目(No. 20180520185JH)资助。

作者简介:李高生(1996-),男,硕士研究生,主要从事光束精密控制方面的研究。E-mail:ligaos182@163.com

通讯作者:徐新行(1983-),男,博士硕士研究生导师,主要从事光束控制、光电转台、光电编码器的研究。E-mail: xxh123321xxh@163.com

收稿日期:2022-05-07; **修订日期:**2022-08-03

0.66 mm for static beam in a short time;the pointing accuracy is 18.46 μrad and the position accuracy is better than 0.72 mm for dithered beam in a long time. The designed laser beam combining system not only has high beam combining accuracy ,but also can realize the automatic compensation of beam drift error in time, which will meet the application requirements of the system.

Keywords: visible laser;laser beam combining;deviation monitoring;close-loop controlling;automatic correction

1 引言

随着工业技术的发展,激光加工、激光通讯、激光有源干扰等领域对高功率、多波段激光的应用需求越来越旺盛,但是,单台激光器输出激光的波长和功率有限。如何获得具有高功率、宽波长的激光已成为国内外的一个重要科研问题^[1]。

激光合束技术种类较多,主要分为相干合束和非相干合束。相干合束得到的光束性能比较好,但是对合束激光单元的光谱、偏振及相位等特性均有严格要求,并且随着子光束单元的增加,系统复杂程度急剧上升,因此尚未得到较为广泛的应用^[2]。非相干合束又可以分为光谱合束、偏振合束、波长合束和空间合束。光谱合束可用于单元光束数量较多的光路合成,尽管合束功率明显提高,但是输出光束质量有待提高;偏振合束的效率,但主要针对单一波长不同偏振态光束工作;波长合束可以对较宽波段范围内多路不同波长的激光进行合成,合束效率受合束镜合束膜系的影响;空间合束简便易行、合束效率高,但是光束质量较差。针对不同的应用需求和环境条件,可以选择不同的合束方式进行激光合束^[3~6]。

为了实现多波段激光的精密合束及后续采用相应的调节平台对各路激光的漂移误差进行及时补偿,需要相应的监测装置对合束激光的指向及位置进行实时监测,用以为误差修正提供依据^[7],这对系统合束精度的提升具有非常重要的意义。哈尔滨工业大学提出了一种高精度激光光束准直系统,其是依据调整反射镜的平动来补偿光束的漂移^[8]。大连理工大学提出了一种带有压电陶瓷驱动器的二维角度调整架作为调整单元对激光进行角度偏差和位置偏差的补偿系统^[9]。长春光机所姜振华等人搭建了一种应用在 LPP-EUV 光源中的激光监测与控制系统,该系统应用两个二维摆镜进行光束的位置和角度校正,不仅控制系统复杂,而且光束波动大^[10]。本研究设计了一种带有合束激光指向偏差、位置偏差独立监测与独立校正的闭环控制系统,针

对长时间工作且存在缓慢漂移的光束进行自动校正。

2 设计要求与原理

根据合束激光的应用需求,确定合束系统的设计指标如表 1 所示。

表 1 激光合束系统整体设计要求

Tab.1 Design requirements for the laser beam combining system

No.	Items	Requirement
1	Wavelength/nm	400 ~ 900
2	Aperture/mm	≥Φ40
3	Height of beam/mm	180
4	Precision of angle/μrad	20
5	Positional accuracy/mm	1

本合束系统采用波长合束的方式。波长合束能够实现不同波长光束的合束,并且具有很好的扩展性^[11]。波长合束的原理如图 1 所示,利用合束膜对不同波长光束的透射及反射性能差异,从而进行光束的合成。

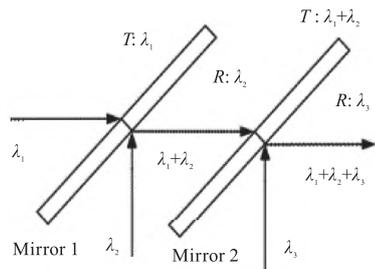
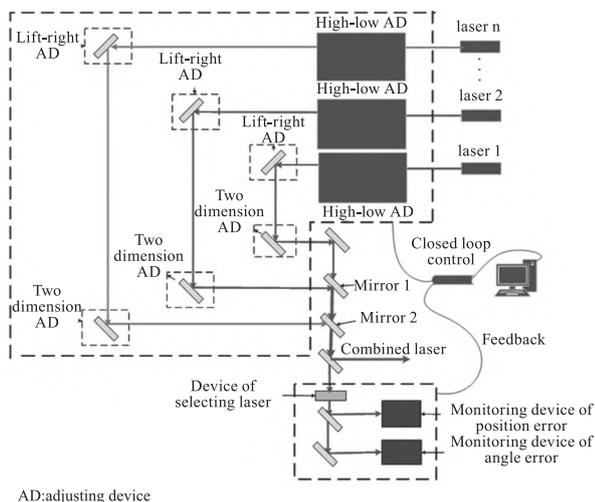


图 1 波长合束原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of wavelength combination principle

由于随着合束激光作用距离的增加,位置误差对合束激光的影响保持不变,而指向误差的影响随之放大,因此将光路的布局设计为:激光器发射的激光依次经过高低调节平台、左右调节平台和二维摆镜后,再进入合束镜片完成与基准光路的对准。之所以先位置校正、后指向校正,一方面是因为在合束激光应用时,光束指向的影响更为核心,另一方面,如此布局还有助于降低合束系统对位差调节平台全

行程运行精度的要求。最后,合束激光经由主导光
 镜反射进入下游应用系统,微量的漏光透过主导光
 镜作为监测光束进入监测装置。该方式不仅确保了
 下游应用系统获得合束激光的能量最大化,而且有
 利于保护监测装置不被强光损伤。合束系统的原理
 如图 2 所示。



AD:adjusting device

图 2 激光合束系统原理

Fig. 2 Principle for laser beam combining system

3 详细设计

3.1 光束监测装置

激光的合束精度采用位置偏差和指向偏差进行
 度量。指向偏差是光束方向相对基准方向的角度偏
 差,反映了光束相对基准的不平行度;位置偏差是指
 完成指向校正的光束与基准光路在同一截面上光斑
 中心之间的距离差值,反映了光束相对基准的不重
 合度。

监测装置主要是通过对人射光束在光电探测器
 上形成光斑位置的监测,来实现对光束的监测。位
 置监测示意图如图 3 所示,光束经过反射镜反射缩
 束系统后在探测器上形成光斑。由实际光束的位置
 偏差引起光斑在靶面上的偏移量 δ_1 、缩束系统的缩
 束倍率 K ,可获得位置偏差 P 的计算公式为^[12]:

$$P = \delta_1 \cdot K \tag{1}$$

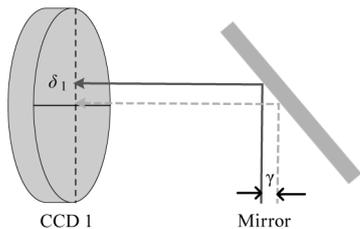


图 3 激光位置偏差监测原理

Fig. 3 Measuring principle of laser position error

指向偏差监测示意图如图 4 所示,当入射激光
 与理想光轴存在角度偏差时,光束经过透镜组后聚
 焦在位于焦平面位置的光电探测器上,形成一个较
 小的光斑,根据光斑在靶面上的偏移量 δ_2 、透镜组
 的焦距 L ,可获得指向偏差角度 α 的计算公式为:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{\delta_2}{L} \tag{2}$$

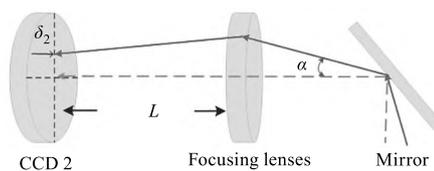


图 4 激光角度偏差监测原理

Fig. 4 Measuring principle of laser angle error

根据合束激光的工作波长及表 1 所列激光合束
 系统的整体设计要求,本系统选择大面阵的 CCD 作
 为图像传感器。所选用 CCD 相机的主要性能参数
 如表 2 所示。

表 2 所选择 CCD 相机性能参数表

Tab. 2 Industrial camera performance parameter table

No.	Items	Parameters
1	Pixel size/ μm^2	3.5×3.5
2	Pixel numbers	2448×2048
3	Frame rates/ $(f \cdot \text{s}^{-1})$	22
4	Response wavelength/nm	350 ~ 950

根据系统的应用需求及所选择探测器的相关参
 数,设计光束监测装置的有效通光口径为 $\Phi 60 \text{ mm}$,
 指向监测装置的焦距为 1000 mm,位置监测装置的
 缩束倍率为 15 倍;完成精密加工装调后,实物照片
 如图 5 所示。通过实验检测,获得光束指向监测装
 置的焦距 998 mm,计算获得指向监测装置的监测分
 辨率为 $3.5 \mu\text{rad}$;获得光束位置监测装置的缩束倍
 率为 15.4 倍,计算获得位置监测装置的监测分辨率
 为 0.054 mm。



图 5 激光监测装置

Fig. 5 Monitoring device of laser error

3.2 位置调节平台

本研究选用电动平移台带动光路中平面反射镜平移的方式实现光束的位置调节,为了确保光束在位置调节过程中,尽量减少对光束指向的影响,进而降低合束装置控制系统的复杂程度。因此,本课题结合系统的应用需求,要求调节平台的运动行程不小于 ±7.5 mm,全行程运行精度优于 ±5"。

3.2.1 左右位置微调节平台

光束的位置偏差主要包括左右位置偏差和高低位置偏差两部分。为了实现光束的左右位置调节及补偿光束由于激光器自身或环境变化引起的左右位置漂移,本研究设计了左右位置微调节平台,其调节原理如图 6(a)所示。当光束入射到与光束方向夹角为 45°的反射镜面时,只需控制反射镜的沿光束传播方向平移即可实现光束左右位置的微量调节。且根据光线的反射定律,可以确定光束的左右位置调节量与反射镜的平移距离相当。完成详细设计、加工及精密装调后,获得光束左右位置微调节平台的实物照片如图 6(b)所示。该装置采用大行程直线电机为平台移动提供直线动力,采用高精度直线导轨确保平台的运动精度,采用高分辨力直线位移传感器实时监测平台的位动位移,平面反射镜通过镜座安装于运动平台之上,并与平台运动方向成 45°夹角,最终由伺服控制系统控制包括平面反射镜在内的移动平台根据需要进行精确运动,实现光束左右位置的精确调节。

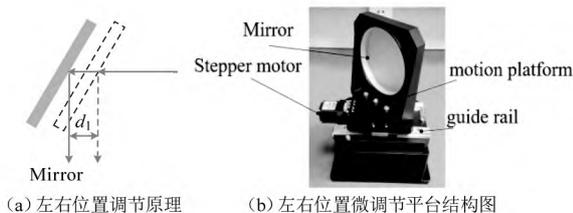


图 6 左右位置微调节装置原理和结构图
Fig. 6 Principle and structure of laser beam lift-right error adjusting device

实测左右位置平台的运动行程为 ±10.21 mm,采用 0.1"自准直仪对左右位置微调节平台的全行程运行精度的检测结果为:俯仰方向最大偏差为 2.2"、方位方向最大偏差为 3.3",满足系统应用需求。

3.2.2 高低位置微调节平台

与左右位置微调节平台不同,采用一维电动平移台带动平面反射镜来实现光束高低位置的调节,需要在上下方向折转光路,这将引起光束中心高度

的大幅度变化。为了实现光束在中心高度 180 mm 附近微量调节,本研究采用 4 片反射镜实现光路的上下折转及中心高度复位,其中出射端反射镜在一维电动平移台的驱动下前后平动,从而实现在不大幅度改变光束中心高度的前提下,通过改变入射光束在平移反射镜上入射点的位置,实现出射光束沿高低方向的微量位置调节,其技术原理如图 7(a)所示。在完成详细设计、加工及精密装调后,获得光束高低位置微调节平台的实物照片如图 7(b)所示。实测高低位置调节平台的运动行程为: ±10.13 mm,全行程运行精度为:俯仰方向最大偏差为 2.8"、方位方向最大偏差为 4.0",满足系统应用需求。

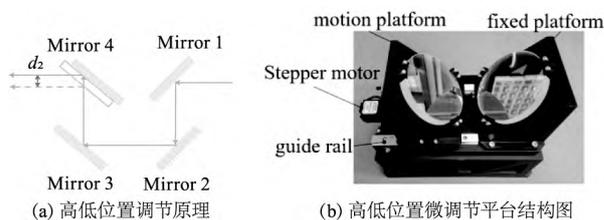


图 7 高低位置微调节装置原理和结构图
Fig. 7 Principle and structure of laser beam high-low error adjusting device

3.3 二维角度调节平台

二维摆镜是通过控制平面反射镜的姿态,进而精确控制光束传播方向的精密光学装置。本研究选用音圈电机驱动的两维摆镜来进行光束指向的精确调节。相比较压电陶瓷驱动器,音圈电机具有运动行程大、驱动电压低等优点,且对振动、冲击等工作环境具有较强的适应性^[13-18];选用四通道的电涡流传感器实时监测反射镜的位置并为闭环控制系统提供数据反馈;选用双轴柔性铰链实现摆镜运动部分与不动部分的柔性连接;控制系统采用速度环为内环、位置环为外环的双闭环控制方式,其原理如图 8 所示。

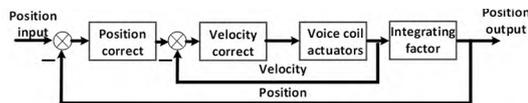


图 8 伺服控制系统示意图
Fig. 8 Diagram of servo control system

完成二维摆镜的精密加工、装调后,其实物照片如图 9 所示,实测该二维摆镜直径为 Φ 80 mm,最大摆角范围为 0 ~ ±6 mrad(X、Y 轴),方位方向的指向精度约为 2.4 μrad,俯仰方向的指向精度约为 4.4 μrad^[19]。对应于被校正光束的指向校正精度为:方向 4.8 μrad,俯仰 8.8 μrad,满足合束系统应用需求。

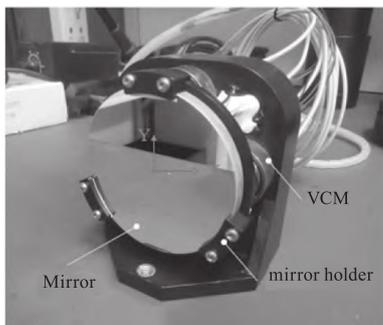


图 9 角度偏差补偿装置结构图

Fig. 9 Structure of laser beam angular error adjusting device

3.4 控制流程

在激光器及合束系统长时间工作过程中,由于环境温度变化、结构件应力释放等原因造成激光束缓慢漂移。为了确保合束激光长期工作时的合束精度,通过合束软件周期性地对各路光束的指向及位置进行自动校正,具体的控制流程如图 10 所示。

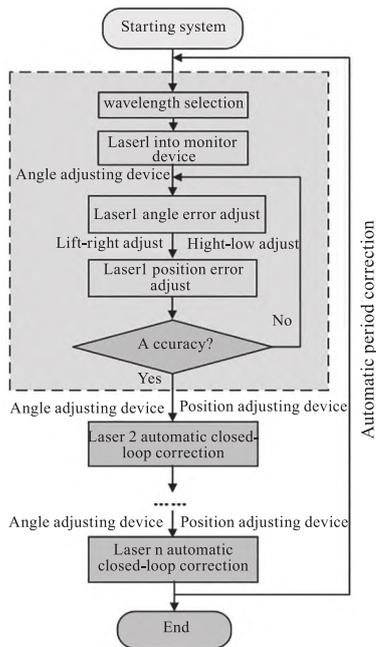


图 10 激光合束闭环控制及校正流程图

Fig. 10 Closed-loop laser beam control and calibration flow chart

首先调节监测光路进入监测装置,并使监测光斑大致处于监测装置的视场中心。然后,控制波长选通装置选择通过其中一路激光进行监测装置,而其它路光束全部被截止,进而获取该路光束相对于基准光路的位置偏差和角度偏差,并以此为依据控制该光路中的两维摆镜和左右、高低位置微调节平台进行角度和位置偏差的精密补偿,直到该路光束的角度偏差和位置偏差达到所设定的精度要求为止。当该路激光自动校正完成后,控制波长选通装置选择通过另一路激

光进行监测装置,采用同样的方法完成该路激光的自动合束,直至所有子光束的自动校正全部完成,视为完成一个校正周期。为了确保合束激光能够长时间地稳定工作在一定的精度范围内,可以根据实际光束的漂移情况,设定不同的校正周期,以实现各光束在长时间工作过程中地及时校正。

4 实验检测与分析

4.1 合束精度检测

室温条件下采用折叠光腔对合束系统的合束精度进行了实验检测,检测装置主要包括光学平台、激光光源(激光器 1 和激光器 2)、包含光束校正装置、光束监测装置、波长选通及衰减装置及主控计算机等的合束系统、分束镜,200 米折叠光腔等,图 11 所示为精度检测示意图。在折叠光腔的 100 米处及 200 米处分别有监测相机,用于获得光束在对应测量位置的中心坐标。

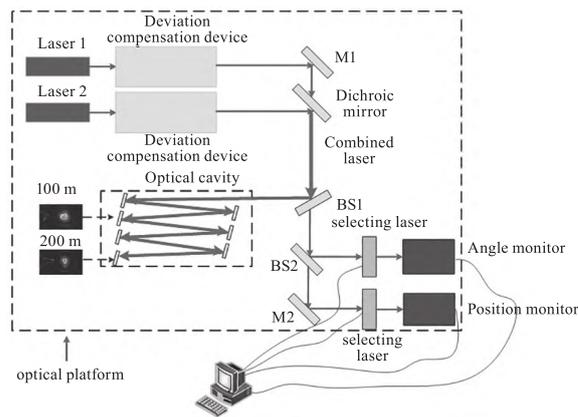


图 11 合束精度实验检测系统示意图

Fig. 11 Schematic diagram of beam combination accuracy test system

具体的检测过程如下:首先开启激光器及合束系统,由合束系统完成两路激光的精密合束,即指向监测装置和位置监测装置采集到的偏差数据均为 0,通过分束镜将合束激光导入折叠光腔。微调光腔反射镜的姿态,将监测光束均落在光腔反射镜上。然后关闭激光器 2 或遮挡光束 2,只保留光束 1 进入折叠光腔,由监测相机分别记录下光束 1 在 100 m 处和 200 m 处的光斑坐标。再关闭激光器 1 或遮挡光束 1,只保留光束 2 进入折叠光腔,并由监测相机分别记录下光束 2 在 100 m 处和 200 m 处的光斑坐标。经多次采集,最终获得光斑的坐标信息如图 12 所示,光束 1、光束 2 在 100 m 处的坐标分别为:(20. 6151 mm, 10. 2480 mm)、(19. 3445 mm,10. 4067 mm),光束 1、光束 2 在 200 m 处的坐标分别为:(15. 2795 mm,

14. 2418 mm)、(16. 9400 mm, 13. 3235 mm)。

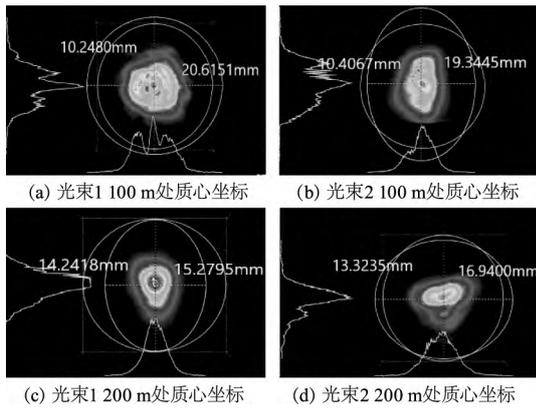


图 12 100 m 与 200 m 光腔处光束的质心坐标

Fig. 12 The coordinate of two beams at 100 m and 200 m

假设两光束的位置偏差为 γ , 角度偏差为 α , 根据两束激光在 100 m 处位置坐标可计算出光斑中心距离 AD , 同理可计算出在 200 m 处光斑中心距离 BC , 根据光路的近似几何关系^[19-20] 如图 13, 可知:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{BC - AD}{AB} \quad (3)$$

$$\gamma = AD - \frac{(BC - AD) OA}{AB} \quad (4)$$

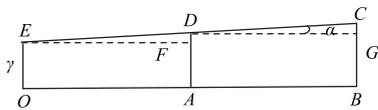


图 13 两束光几何关系简化图

Fig. 13 Simplified geometrical relation of two beams

经过计算, 两束激光的角度偏差为: $6.17 \mu\text{rad}$, 位置偏差为: 0.66 mm , 满足设计指标要求。

4.2 针对动态光束的合束精度检测

针对缓慢漂移的实光, 启动合束系统周期性的自动合束功能, 并对合束后的各路激光进行动态监测, 获得指向监测装置和位置监测装置的实际监测数据。由监测装置的监测分辨率分别计算出其中一路激光束相对于基准的角度偏差和位置偏差, 分别如图 14、15 所示。

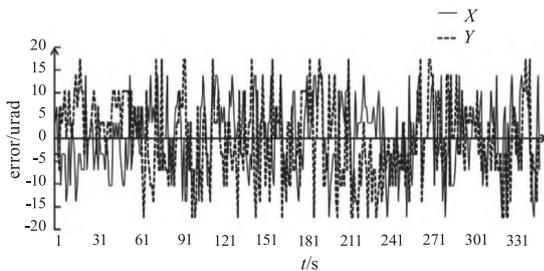


图 14 X-Y 方向角度偏差实时监测量

Fig. 14 Real-time measurement of angle error in X-Y direction

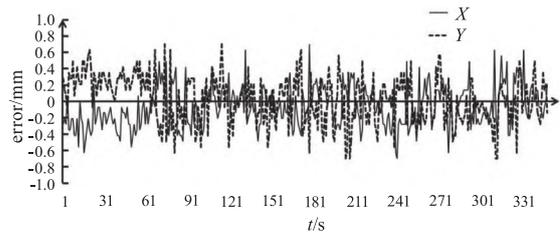


图 15 X-Y 方向位置偏差实时监测量

Fig. 15 Real-time measurement of position error in X-Y direction

最终获得到合束系统对动态激光周期性合束校正后的指向精度为 $18.46 \mu\text{rad}$, 位置精度为 0.72 mm , 满足系统的指标需求。对比无自动校正之前, 该路激光在同样长时间内由折叠光腔监测的漂移偏差(指向约为 $254.57 \mu\text{rad}$, 位置约为 3.55 mm) 可知: 该合束系统对缓慢漂移的激光束的自动校正效果明显。

5 结论

为了实现对可见光波段、多路激光束的精密合束, 本文从合束系统的应用需求出发, 详细设计了光束监测装置、位置校正装置、指向校正装置和闭环控制系统。其中, 监测装置采用长焦距的聚焦镜头、高倍率缩束镜头配合高分辨率、大面阵 CCD 探测器实现了系统对合束激光的高精度监测; 位置校正装置采用精密直线电机和精密导轨实现了系统对合束激光位置的精度校正; 两维摆镜采用音圈电机驱动、四通道电涡流传感器测量反馈实现了系统对合束激光指向的精密调节; 闭环控制系统在每个合束周期内采用先指向校正、后位置校正、再指向校正的策略, 对合束激光进行逐路精密校正, 确保了各路激光的长期稳定和高精度合束。实验结果表明: 所设计的激光合束系统针对长时间工作、缓慢漂移激光束的实际合束精度为: 指向约 $18.46 \mu\text{rad}$, 位置约 0.72 mm , 满足系统应用需求。同时, 本合束系统的成功研制, 也为其它需要精密合束的应用场合提供了一种技术参考。

参考文献:

[1] Chen Changbo. Design of beam monitoring device in multi-wavelength laser beam combining system [D]. Changchun: University of the Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)
陈昌博. 多波长激光合束系统中光束监测装置的设计 [D]. 长春: 中国科学院大学, 2020.

[2] Wang Lijun, Peng Hangyu, Zhang Jun. Advance on high power diode laser coupling [J]. Chinese Optics, 2015, 8 (04): 517 - 534. (in Chinese)
王立军, 彭航宇, 张俊. 大功率半导体激光合束进展

- [J]. 中国光学, 2015, 8(4): 517-534.
- [3] Lu Hongyu. The research on laser power synthesis technology based on semiconductor Laser [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2018. (in Chinese)
陆鸿宇. 基于半导体激光器的激光功率合成技术 [D]. 浙江: 杭州电子科技大学, 2018.
- [4] Cao Yuxuan, Shu shili, Sun Fangyuan, et al. Development of beam combining technology in mid-infrared semiconductor lasers (invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(10): 18-15. (in Chinese)
曹宇轩, 舒世立, 孙方圆, 等. 中红外半导体激光器合束技术研究进展 (特邀) [J]. 红外与激光工程, 2018, 47(10): 18-25.
- [5] Wang Lijun, Peng Hangyu, Zhang Jun. Advance on high power diode laser coupling [J]. Chinese Optics, 2015, 8(4): 517-534. (in Chinese)
王立军, 彭航宇, 张俊. 大功率半导体激光合束进展 [J]. 中国光学, 2015, 8(4): 517-534.
- [6] Wang Lijun, Peng Hangyu, Zhang Jun, et al. Development of beam combining of high power high brightness diode lasers [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(4): 8-17. (in Chinese)
王立军, 彭航宇, 张俊, 等. 高功率高亮度半导体激光器合束进展 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(4): 8-17.
- [7] Chen Changbo, Han Xudong, Xu Xinhang. Design of beam position monitoring device for laser beam combining system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 50(2): 204-210. (in Chinese)
陈昌博, 韩旭东, 徐新行. 用于激光合束系统的光束位置监测装置设计 [J]. 激光与红外, 2020, 50(2): 204-210.
- [8] Zhu Fan, Li Yingxian, Tan Jiubin. Design of high-accuracy laser beam collimation system [J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(4): 817-826. (in Chinese)
朱凡, 李颖先, 谭久彬. 高精度激光光束准直系统设计 [J]. 光学精密工程, 2020, 28(4): 817-826.
- [9] Yang Binhe, Cai Yindi, Wen Zhixiang, et al. Automatic compensation method for beam drift in long-distance laser measurement [J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(11): 2393-2402. (in Chinese)
杨滨赫, 蔡引娣, 文志祥, 等. 长距离激光测量中光束漂移的自动补偿 [J]. 光学精密工程, 2020, 28(11): 2393-2402.
- [10] Jiang Zhenhua, Wang Tingfeng, Guo Jin. Monitoring and controlling system for high power CO₂ laser in "LPP-EUV" light source [J]. Chinese Optics, 2013, 6(4): 544-550. (in Chinese)
姜振华, 王挺峰, 郭劲. "LPP-EUV" 光源中的高功率 CO₂ 激光监测与控制系统 [J]. 中国光学, 2013, 6(4): 544-550.
- [11] Zhang Fei, Xu Xinhang, Chen Changbo. Development of monitoring device for laser direction with small volume and long focus [J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(6): 1251-1259. (in Chinese)
张飞, 徐新行, 陈昌博. 小体积长焦距激光指向监测装置研制 [J]. 光学精密工程, 2021, 29(6): 1251-1259.
- [12] Liu Lishuang, Xia Runqiu, Lv Yong. Research situation of fast steering mirror in voice coil motor [J]. Laser Journal, 2020, 41(9): 1-7. (in Chinese)
刘力双, 夏润秋, 吕勇. 音圈电机快速控制反射镜研究现状 [J]. 激光杂志, 2020, 41(9): 1-7.
- [13] Yang L, Tong S F, Song Y S, et al. Design galvanometer position detection unit based on single detector compound axis tracking system [J]. SPIE, 2016, 1117(10): 1-8.
- [14] Dong Q R, Liu Y K, Zhang Y L, et al. Improved ADRC with ILC control of a CCD-based tracking loop for fast steering mirror system [J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(4): 6601314.
- [15] Xiong Z J, Li Q, Liu L, et al. Fast steering mirror and michelson interferometer based laser beam pointing and steering [C] // 2017 IEEE 8th International Conference on CIS & RAM, 2017: 815-819.
- [16] Lin M, Zhang X M, Sergej Fatikow. Design and analysis of a multi-notched flexure hinge for compliant mechanisms [J]. Precision Engineering, 2017, 48: 292-304.
- [17] Lü Siliang, Liu Jinguo, Zhou Huaide, et al. Design of control system for fast steering mirror of infrared detector based on satellite [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(9): 904005. (in Chinese)
吕世良, 刘金国, 周怀得, 等. 星载红外探测器快速反射镜控制系统设计 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(9): 904005.
- [18] Xu Xinhang, Wang Hengkun, Han Xudong, et al. Design of displacement sensor for fast steering mirror with small volume on airborne platform [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(9): 1937-1944. (in Chinese)
徐新行, 王恒坤, 韩旭东, 等. 机载小型化快速反射镜用微位移测量传感器设计 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(9): 1937-1944.
- [19] Peng Shuping, Chen Tao, Liu Tingxia, etc. Reflection process of fast-steering mirror of laser launching system [J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(2): 378-386. (in Chinese)
彭树萍, 陈涛, 刘廷霞, 等. 激光发射系统快速反射镜的光线反射过程 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(2): 378-386.
- [20] Xia Lei, Han Xudong, Shao Junfeng. Laser beam combination accuracy of wavelength multiplexing [J]. Chinese Optics, 2014, 7(5): 801-807. (in Chinese)
夏蕾, 韩旭东, 邵俊峰. 激光波长合束精度研究 [J]. 中国光学, 2014, 7(5): 801-807.