

可见光波段多路激光合束及闭环校正技术研究

徐新行 李高生 谢兵 韩旭东

Multi-channel laser beam combining and closed-loop correction technology in visible light band

XU Xin-hang, LI Gao-sheng, XIE Bing, HAN Xu-dong

引用本文:

徐新行, 李高生, 谢兵, 韩旭东. 可见光波段多路激光合束及闭环校正技术研究[J]. *中国光学*, 2024, 17(2): 342–353. doi: 10.37188/CO.2023–0077

XU Xin-hang, LI Gao-sheng, XIE Bing, HAN Xu-dong. Multi-channel laser beam combining and closed-loop correction technology in visible light band[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(2): 342-353. doi: 10.37188/CO.2023-0077

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2023–0077>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

激光合束光学系统气体热效应影响分析

Influence of gas thermal effect on beam combination system

中国光学 (中英文). 2018, 11(1): 108 <https://doi.org/10.3788/CO.20181101.0108>

板条激光器光束质量控制技术研究进展

Progress on beam quality control technology of slab lasers

中国光学 (中英文). 2019, 12(4): 767 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0767>

基于正解过程的Risley棱镜光束指向控制精度分析

Analysis of beam steering control precision for Risley prisms based on forward solution

中国光学 (中英文). 2017, 10(4): 507 <https://doi.org/10.3788/CO.20171004.0507>

高度方向性多光束有机激光

High directional multi-beam organic laser

中国光学 (中英文). 2018, 11(4): 576 <https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0576>

高精度连续变倍率激光扩束系统设计

Design of laser beam expansion systems with high precision and continuous variable ratios

中国光学 (中英文). 2019, 12(3): 693 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0693>

复合式无遮拦激光扩束器的设计

Design of a composite laser beam expander without obscuration

中国光学 (中英文). 2018, 11(4): 582 <https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0582>

文章编号 2097-1842(2024)02-0342-12

可见光波段多路激光合束及闭环校正技术研究

徐新行^{1*}, 李高生^{1,2}, 谢兵³, 韩旭东¹

- (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. 中航凯迈(上海)红外科技有限公司, 上海 201306;
3. 中国人民解放军 32031 部队, 河南 开封 475000)

摘要: 为了实现可见光波段多路不同波长激光的周期性闭环校正, 设计了一种具有光束指向和位置偏差独立监测与调节的激光合束系统。首先, 根据系统的应用需求, 提出了合束系统的设计指标与整体合束方案。然后, 在合束方案的基础上, 建立了合束系统的光束控制模型, 并通过数值仿真得到了合束系统光束控制的解算方法。闭环合束系统通过光束指向和位置监测装置分别实现合束激光指向偏差与位置偏差的独立监测, 并根据监测结果进行光束调节装置控制量的解算; 进而通过两维摆镜和一维平移台分别实现光束指向和位置偏差的独立高效调节。最后, 采用两路不同波长的激光束, 配合光束监测与调节装置, 搭建了闭环合束模拟实验平台, 对周期性闭环合束系统的合束效果进行了验证。实验结果表明: 在长时间的工作过程中, 两路激光均实现了与基准光路的精密合束, 合束指向精度优于 $\pm 7 \mu\text{rad}$, 位置精度优于 $\pm 0.84 \text{ mm}$ 。本研究所组建的激光合束系统不仅具有合束精度高、校正速度快、光路扩展性强的优势, 而且可实现激光束的周期性闭环校正, 能够有效保证合束激光的长期工作稳定性。

关键词: 激光合束; 光束监测; 光束控制; 指向偏差; 位置偏差

中图分类号: TP394.1

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2023-0077

Multi-channel laser beam combining and closed-loop correction technology in visible light band

XU Xin-hang^{1*}, LI Gao-sheng^{1,2}, XIE Bing³, HAN Xu-dong¹

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. AVIC CAMA (Shanghai) Infrared Technology Co. Ltd, Shanghai 201306, China;
3. 32031 Unit of PLA, Kaifeng 475000, China)

* Corresponding author, E-mail: xxh123321xxh@163.com

Abstract: To achieve periodic closed-loop correction of multiple lasers with different wavelengths in the visible wavelength band, a laser beam combining system is designed. This system involves independent monitoring and adjusting of beam pointing and position deviation. First, according to the application requirements of the system, the design indexes of the beam combining system and the overall beam combining scheme are

收稿日期: 2023-05-04; 修订日期: 2023-06-08

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

Supported by Science and Technology Development Plan Funded Projects of Jilin Province (No. 20180520185JH)

proposed. Then, based on the overall beam combining scheme, we establish the beam control model for the beam combining system. Through numerical simulation experiments, we obtain the solution method for beam control of the beam combining system. The closed-loop beam combining system realizes independent monitoring of the unit beam's pointing and position deviation through the respective beam pointing and position monitoring device. The monitoring results are then used to calculate the control quantity of the beam adjusting device. The independent and efficient adjustment of beam pointing and position deviation is achieved using a two-dimensional swing mirror and a one-dimensional platform, respectively. Finally, a closed-loop beam combining simulation experimental system with beam monitoring and adjustment device is built using two laser beams of different wavelengths. The periodic closed-loop beam combining system is verified to have an effective beam combining effect. The experimental results demonstrate that over an extended operational period, both lasers achieve precise beam combining with the reference optical path. Furthermore, the beam combining pointing accuracy is better than $\pm 7 \mu\text{rad}$, and the positioning accuracy is better than $\pm 0.84 \text{ mm}$. The laser beam combining system developed in this study boast high beam combining accuracy, a fast correction speed, and excellent augmentability for multiple laser beams. Besides, it can accomplish periodic closed-loop beam combining of laser beams, ensuring long-term working stability of the combined laser.

Key words: laser beam combining; beam monitoring; beam control; beam direction deviation; beam positional deviation

1 引言

随着光电侦察及光电制导技术应用波段的不断拓宽,对光电对抗系统的工作波段提出了新的要求。尽管近年来多波长一体化激光器技术取得了一定的突破,但功率水平尚难满足工程应用的需要。因此,采用多台激光器通过合束的办法,实现多波长、大功率激光的共轴输出,仍是光电对抗系统最常用的技术手段之一^[1]。

激光合束的方法主要可分为:相干合束和非相干合束^[2]。相干合束能够获得较高的光束质量,但对参与合束的单元光束的光谱、偏振及相位等特性要求严格,因此在材料加工、光电对抗等工程应用领域尚未得到广泛的应用。非相干合束又可以分为光谱合束、非相干偏振合束、波长合束和空间合束等^[3-5]。根据合束系统的应用需求和工作特点,本研究采用波长合束对多路可见光波段激光进行精密合成。波长合束不仅能够实现不同波长激光的合束,并且具有很好的扩展性^[6]。

为了实现多路激光的精密合束,需要对参与合束的各单元光束进行准直控制,以实现其与合束基准的空间位置重合。最常见的激光准直控制是:采用手动调节光路中反射镜的方法来改变光

束的指向。该方法简单易行,但调节精度及效率较低,无法满足现阶段大多数激光合束系统的应用需求。与之相对的,采用光束准直控制系统对光束的指向和位置偏差进行校正,不仅能使光束控制精度大幅提高,而且显著提升了光束控制的效率和稳定性。哈尔滨工业大学提出了一种高精度激光准直系统。其通过控制光路中不同空间姿态反射镜的平动来实现光束指向和位置偏差的校正^[7],该系统能够实现 10^{-2} 微弧度数量级的光束控制精度,但光路布置较为复杂,大幅增加了光机装调的难度。大连理工大学提出了一种采用两台压电陶瓷驱动的两维角度调整架作为光束调整装置,对激光的指向和位置偏差进行补偿的光束准直系统^[8]。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所设计了一种应用在 LPP-EUV 光源中的激光监测与控制系统。该系统应用两套两维摆镜对激光束的位置和指向进行调节^[9]。在上述系统中,由于光束位置偏差的调节占用大量摆镜的行程,因此光束角度的调节范围被大幅度压缩。本研究为了实现多路激光的精准合束,提出了一种激光指向与位置偏差独立监测、独立校正的周期性闭环控制系统,不仅提升了合束装置的校正范围,而且降低了控制系统的解耦负担。

2 设计要求与原理

根据合束系统下游对合束激光的应用需求,确定了合束系统的设计指标,如表 1 所示。

表 1 激光合束系统设计要求

Tab. 1 Design requirements for beam combining system

Items	Requirement
Wavelength/nm	400 ~ 900
Aperture/mm	$\geq \Phi 40$
Precision of direction/ μrad	± 20
Precision of positional/mm	± 1
Direction correction range/ μrad	$\theta_x \geq \pm 600; \theta_y \geq \pm 600$
Positional correction range/mm	$\geq \pm 7.5$

在合束激光的远距离传输过程中,各单元光束的位置偏差相对稳定,指向偏差则随着激光作用距离的增加而变大^[10]。鉴于此,本研究将光路布局为:各激光器发射的激光依次经过高低位置调节装置、左右位置调节装置和两维摆镜装置校正后,通过合束镜完成其与基准光路的合成。如此布局有助于降低合束系统对位置偏差调节装置运行精度的要求。

在合束激光远距离应用时,光束指向是核心要素,而且对光束位置偏差进行准确监测的前提是光束为平行光或近似平行光。因此,确定合束系统调节光束偏差的合理次序为:首先进行光束

指向偏差的初步调节,然后进行光束位置偏差的调节,最后再次进行光束指向偏差的调节。即首先由指向监测装置采集到光斑图像后反馈给计算机控制系统,进而计算出光束的角度偏差量,随后控制两维摆镜来对光束的指向偏差进行初步调节。当指向偏差调节完成后,计算机控制系统根据位置监测装置采集到的光斑图像计算出光束的位置偏差量,随后控制高低位置调节装置和左右位置调节装置对光束的高低、左右位置偏差进行调节。最后,再次由控制系统控制两维摆镜对由于高低、左右位置调节装置的运行产生的光束指向偏差进行再次调节,最终完成光束指向偏差与位置偏差的精确校正。其中,光束监测装置向光束调节装置反馈监测数据,逐路组成控制闭环,进行实现合束激光的周期性闭环校正。

在合束系统的光束监测方面,采用分光镜将光束分为高功率的输出光束和低功率监测光束,这对光电探测器起到保护作用的同时,避免了监测光路对输出主光路的干扰。由于多路合束激光采用同一套监测装置进行监测,因此,为了确保被监测光束不被其它光束干扰,在监测光路中配备了必要的波长选通装置。该装置的主要功能是:带动不同波长的滤光片在监测光路中依次切入或切出,以实现某特定波长光束的选择通过(其它波长的光束全部被截止),最终在探测器上成像,完成对该波长激光束的监测。激光合束系统布局如图 1 所示,其中 High-low AD 表示高低位置调节装置, Left-right AD 表示左右位置调节装置。

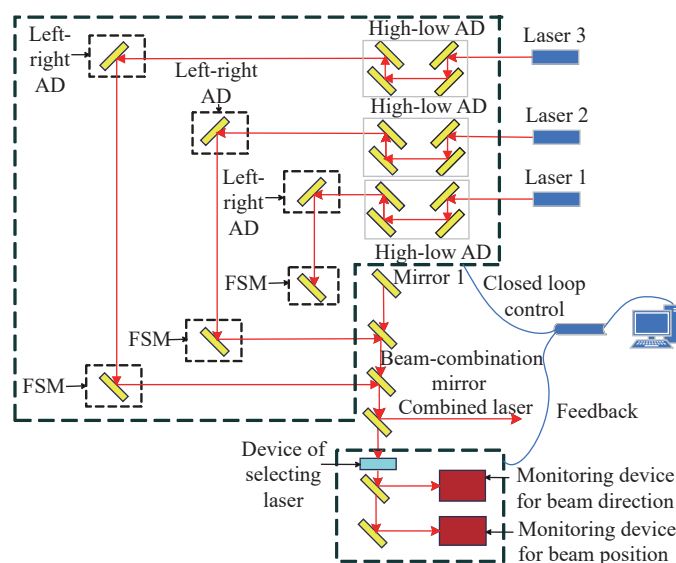


图 1 激光合束及闭环校正系统整体布局

Fig. 1 Overall layout of laser beam combining and closed-loop correction system

3 合束系统光束控制模型

3.1 光束指向调节模型的建立

光束指向调节模型是本合束系统中光束指向控制的重点之一。根据合束系统光路的空间布局及光束的传播规律, 建立光束指向调节模型是实现多路激光精密合束的基础。

本研究采用两维摆镜对光束指向偏差进行调节, 基于两维摆镜构建光束指向调节分析模型^[11-13]。根据矢量形式的反射定律, 在已知平面镜法线单位矢量和入射光线矢量的条件下, 可以方便地计算出反射光线矢量, 公式如下:

$$\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} \cos\theta + 2P_x^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} & -P_z \sin\theta + 2P_x P_y \sin^2 \frac{\theta}{2} & P_y \sin\theta + 2P_x P_z \sin^2 \frac{\theta}{2} \\ P_z \sin\theta + 2P_x P_y \sin^2 \frac{\theta}{2} & \cos\theta + 2P_y^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} & -P_x \sin\theta + 2P_y P_z \sin^2 \frac{\theta}{2} \\ -P_y \sin\theta + 2P_x P_z \sin^2 \frac{\theta}{2} & P_x \sin\theta + 2P_y P_z \sin^2 \frac{\theta}{2} & \cos\theta + 2P_z^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

为了研究两维摆镜对光束指向的调节效果, 如图2所示, 建立空间直角坐标系 $o-xyz$, x 轴表示两维摆镜的方位轴, h 轴表示两维摆镜的俯仰轴, n 为镜面法线。两维摆镜在初始状态时俯仰轴 h 与 y 轴正方向夹角为 45° 。

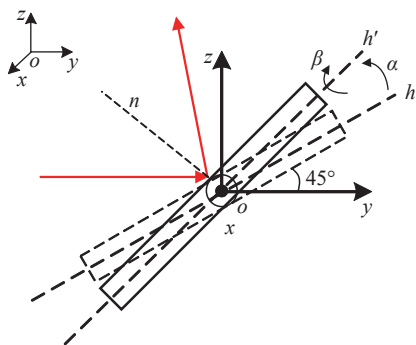


图2 两维摆镜光束指向调节示意图

Fig. 2 Schematic diagram of beam pointing adjustment by two-dimensional oscillating mirror

由图2中的位置关系可知: 两维摆镜初始状态法线单位矢量 n 和俯仰轴单位矢量 h , 分别如式(4)、式(5)所示。

$$\mathbf{n} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix}^T, \quad (4)$$

$$\mathbf{R}' = [\mathbf{I} - 2\mathbf{N}(\mathbf{N})^T] \mathbf{R}, \quad (1)$$

式中, \mathbf{R} 为入射光线矢量, \mathbf{R}' 为反射光线矢量, \mathbf{N} 为镜面法线的单位矢量, \mathbf{I} 为三阶单位矩阵。

由于摆镜镜面法线矢量将随摆镜的转动而发生位置改变, 为了能够求解出任意角度下摆镜的反射光线矢量, 需要建立镜面法线单位矢量绕轴转动的求解公式。根据文献^[14-15]可知, 单位矢量 \mathbf{A} 绕单位轴 \mathbf{P} 转动 θ 角的求解公式为:

$$\begin{pmatrix} A'_x \\ A'_y \\ A'_z \end{pmatrix} = \mathbf{Z}_{(P,\theta)} \begin{pmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{pmatrix}, \quad (2)$$

其中作用矩阵 \mathbf{Z} 如式(3)所示。

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix}^T. \quad (5)$$

在进行光束指向偏差调节过程中, 假设摆镜先绕 x 轴进行方位偏差的调节, 转动角度为 α ; 随后绕俯仰轴 h' 进行俯仰偏差的调节, 转动角度为 β 。根据式(3)可得矢量绕方位轴 x 旋转 α 角后的作用矩阵。进一步地, 两维摆镜绕方位轴旋转 α 角后的单位法线矢量 n' 和俯仰轴矢量 h' 可分别通过式(6)、式(7)计算求得。

$$\mathbf{n}' = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{\sqrt{2}}{2}(\cos\alpha + \sin\alpha) & \frac{\sqrt{2}}{2}(\cos\alpha - \sin\alpha) \end{bmatrix}^T, \quad (6)$$

$$\mathbf{h}' = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\sqrt{2}}{2}(\cos\alpha - \sin\alpha) & \frac{\sqrt{2}}{2}(\cos\alpha + \sin\alpha) \end{bmatrix}^T. \quad (7)$$

将式(7)按式(3)作用矩阵变换可得两维摆镜的法线矢量绕俯仰轴 h' 旋转 β 时的作用矩阵 $\mathbf{Z}_{(h',\beta)}$ 。综上所述, 两维摆镜的单位法线矢量经过方位与俯仰旋转后的矢量 $n_{(\alpha,\beta)}$ 便可通过式(8)求解,

$$\mathbf{n}_{(\alpha,\beta)} = \mathbf{Z}_{(h',\beta)} \mathbf{n}'. \quad (8)$$

再将 $n_{(\alpha,\beta)}$ 代入式(1)即可得出两维摆镜的反射作用矩阵 $\mathbf{M}(\alpha,\beta)$ 为:

$$M(\alpha, \beta) = \begin{pmatrix} 1 - 2\sin^2\beta & \sqrt{2}(\cos\alpha + \sin\alpha)\cos\beta\sin\beta & -\sqrt{2}(\cos\alpha - \sin\alpha)\cos\beta\sin\beta \\ \sqrt{2}(\cos\alpha + \sin\alpha)\cos\beta\sin\beta & 1 - (\cos\alpha + \sin\alpha)^2\cos^2\beta & (\cos\alpha + \sin\alpha)(\cos\alpha - \sin\alpha)\cos^2\beta \\ -\sqrt{2}(\cos\alpha - \sin\alpha)\cos\beta\sin\beta & (\cos\alpha + \sin\alpha)(\cos\alpha - \sin\alpha)\cos^2\beta & 1 - (\cos\alpha - \sin\alpha)^2\cos^2\beta \end{pmatrix}. \quad (9)$$

在本研究的合束系统中,以光束指向监测装置光学系统的光心为原点 o ,光轴为 z 轴,光线传播方向为 z 轴正向,垂直于光学平台向上为 x 轴正向,建立右手直角坐标系 $o-xyz$,与之相对应的两维摆镜所在坐标系为 $o'-x'y'z'$,如图 3 所示。在坐标系 $o'-x'y'z'$ 中,摆镜的反射矩阵 $M(\alpha, \beta)$ 可表示为式 (9)。

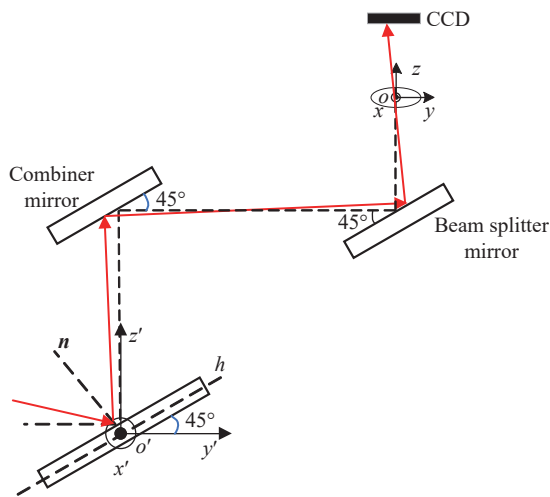


图 3 光束指向调节示意图

Fig. 3 Schematic diagram of beam pointing adjustment

根据光束指向监测装置监测到的图像数据计算获得系统输出光束矢量的方向向量 R_0 ,在坐标系 $o'-x'y'z'$ 中,根据初始两维摆镜反射矩阵 $M(0,0)$ 可得摆镜的入射光束矢量 R_1 :

$$R_1 = M_{(0,0)}R_0. \quad (10)$$

由于在本研究的合束系统中,先进行光束指向偏差的调节,后进行位置偏差的调节,所以在求解出 R_1 的条件下,求当两维摆镜方位和俯仰偏转量 α, β 为何值时,系统输出光束方向向量 R_2 的指向偏差最小,即准直于 xoy 平面的问题,将成为一个两维优化问题。设 R_2 为 $(x_2 \ y_2 \ z_2)^T$,则优化目标函数为:

$$\text{Min} \left(\frac{x_2^2}{z_2} + \frac{y_2^2}{z_2} \right), (z_2 > 0), \quad (11)$$

$$\text{s.t. } R_2 = M_{(\alpha,\beta)}M_{(0,0)}R_0 (a \leq \alpha, \beta \leq b)$$

其中 a 和 b 为摆镜偏转范围的边界值。对于该优化问题,在 Matlab 中使用非线性规划求解函数 `Fmincon` 的内点法可方便地进行求解,但由于该算法计算用时较长,无法满足合束系统对光束控制的时间要求。通过对优化求解的仿真数据进行分析 and 拟合来构建摆镜控制量与光束指向偏差的近似函数关系。根据上述求解方法定义了一个双输入、双输出的求解函数模块以建立仿真程序。其中输入参数为光束指向监测装置中监测到的指向偏差,包括方位偏差 δ_y 和俯仰偏差 δ_x 。输出参数为两维摆镜的方位控制量 α 和俯仰控制量 β 。通过上述仿真模型进行多次仿真计算,获得实验数据,如表 2 所示。

表 2 指向调节仿真实验数据 (单位: μrad)

Tab. 2 Pointing adjustment simulation experiment data

方位偏差 δ_y	俯仰偏差 δ_x	方位控制量 α	俯仰控制量 β	δ_y 与 2α 差值	δ_x 与 $\sqrt{2}\beta$ 差值
-1500	0	-749.886	0	-0.228	0
-1000	0	-499.992	0	-0.016	0
-500	0	-249.959	0	-0.082	0
500	0	249.958	0	0.084	0
1000	0	499.922	0	0.156	0
1500	0	749.886	0	0.228	0
0	-1500	0	-1060.652	0	-0.012
0	-1000	0	-707.099	0	-0.011
0	-500	0	-353.546	0	-0.010
0	0	0	0	0	0
0	500	0	353.546	0	0.010
0	1000	0	707.099	0	0.011
0	1500	0	1060.652	0	0.011
250	250	124.982	176.790	0.036	-0.019
500	500	249.930	353.630	0.140	-0.108
1000	1000	499.740	707.450	0.520	-0.485

由表 2 中的实验数据可知,当单元光束俯仰偏差为零时,摆镜方位控制量随单元光束方位偏

差变化具有较明显的线性关系; 而当单元光束方位偏差为零时, 两维摆镜俯仰控制量随单元光束俯仰偏差同样具有明显的线性关系。单元光束方位偏差与摆镜方位控制量 2 倍比较误差以及单元光束俯仰偏差与摆镜俯仰控制量 $\sqrt{2}$ 倍比较误差均为 0 或接近于 0, 因此, 在误差允许范围内, 获得两维摆镜控制量与光束指向偏差的近似函数关系为:

$$\alpha = \frac{\delta_y}{2}, \quad (12)$$

$$\beta = \frac{\sqrt{2}\delta_x}{2}. \quad (13)$$

合束系统通过光束指向监测装置获得单元光束的指向偏差, 继由式 (12)、式 (13) 快速求解出两维摆镜的控制量, 最终实现对光束指向偏差的高效、准确校正。

3.2 光束左右位置调节模型的建立

在本研究中, 光束调节装置的各个反射镜、合束镜、分束镜以及导光镜等与合束基准的夹角均为 45° 。如图 4 所示, 当光束以 45° 夹角入射到平面反射镜时, 平面反射镜沿入射光束方向平移的距离 h_0 与反射光束的平移距离 h_1 相等。由于在完成单元光束指向偏差的调节后, 两维摆镜相对于初始位置发生了转动, 且摆镜上游的入射光束与基准光束仍旧存在偏差, 因此位置调节装置反射镜的平动控制量将不严格等于系统输出光束位置的平移量。为了评估两维摆镜的转动以及摆镜上游光束入射角度偏差对位置调节的影响, 需要建立位置调节仿真模型。

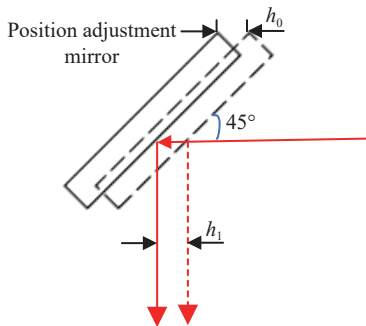


图 4 光束位置调节原理示意图
Fig. 4 Principle diagram of beam position adjustment

图 5 为合束系统中光束左右位置调节的原理示意图。已知左右位置调节反射镜的初始位置位

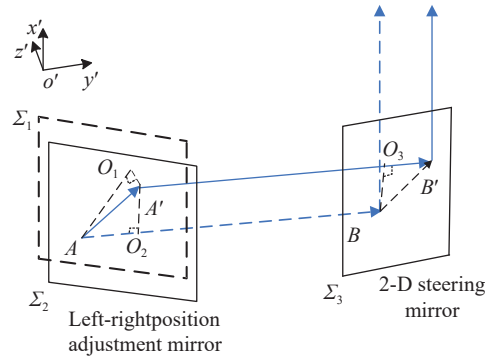


图 5 光束左右位置调节示意图
Fig. 5 Schematic diagram of beam left and right position adjustment

于平面 Σ_1 处, 平面 Σ_1 的法向量为 \mathbf{n}_1 , \mathbf{n}_1 与 y' 轴正向夹角为 45° , 对应的反射矩阵为 \mathbf{M}_1 。左右位置调节反射镜平移一段距离后位于平面 Σ_2 处, 平面 Σ_2 的法向量为 \mathbf{n}_2 , 对应的反射矩阵为 \mathbf{M}_2 , 且 $\mathbf{M}_1 = \mathbf{M}_2$ 。A 为入射光束与平面 Σ_1 的交点, 对应的反射镜平移前的反射光束传输矢量为 \mathbf{R}_{AB} , A' 为入射光束与平面 Σ_2 的交点, 对应的反射镜平移后的反射光束传输矢量为 $\mathbf{R}_{A'B'}$ 。左右位置调节反射镜沿 z' 轴负方向平移距离为 $|O_1A'|$ 。设左右位置调节反射镜入射光束的传输矢量为 $\mathbf{R}_{AA'}$, $\mathbf{R}_{AA'}$ 与左右位置调节反射镜运动方向 O_1A' 的夹角为 φ_{11} , $\mathbf{R}_{AA'}$ 与反射光束 \mathbf{R}_{AB} 的夹角为 φ_{12} 。设平面 $ABB'A'$ 的单位法向量为 $\mathbf{n}_{ABB'A'}$, 两维摆镜所在平面 Σ_3 的单位法向量为 \mathbf{n}_3 , 对应的反射矩阵为 \mathbf{M}_3 。设向量 BB' 的单位向量为 $\mathbf{n}_{BB'}$, 模长为 $|BB'|$, 向量 $\mathbf{n}_{BB'}$ 与向量 \mathbf{R}_{AB} 的夹角为 φ_{13} 。设单元光束在进行指向偏差调节前对应输出光束的方向向量为 \mathbf{R}_0 , 根据各反射镜所在平面的位置关系以及光线的传播规律, 可知:

$$\mathbf{n}_{BB'} = \frac{(\mathbf{n}_{ABB'A'} \times \mathbf{n}_3)}{\|\mathbf{n}_{ABB'A'} \times \mathbf{n}_3\|_2}, \quad (14)$$

$$|BB'| = \frac{|O_1A'| \sin \varphi_{12}}{\cos \varphi_{11} \sin \varphi_{13}}, \quad (15)$$

设 $\mathbf{n}_{BB'x'}$, $\mathbf{n}_{BB'y'}$ 为单位向量 $\mathbf{n}_{BB'}$ 在 x', y' 坐标轴上的分量, 由合束方案可知在完成单元光束的指向调节后再进行光束的位置调节, 因此经过左右位置调节后光束在 CCD 探测器上光斑位置坐标的变化量 Δx 和 Δy 的计算公式为:

$$\Delta x = |BB'| \mathbf{n}_{BB'x'}, \quad (16)$$

$$\Delta y = |BB'|n_{BB'y} \quad (17)$$

为了得到左右位置调节装置中平动反射镜控制量与系统输出光束左右位置变化量之间的对应关系,在 Matlab 中进行了仿真实验。实验中定义合束校正前输出光束的指向偏差为合束系统指向校正范围指标(600 μrad)的 2.5 倍,此时对应的两

维摆镜偏转量分别为 $\alpha=750 \mu\text{rad}$, $\beta=1061 \mu\text{rad}$ 。根据上述求解方法定义了一个单输入、双输出的函数模块以建立仿真模型,其中输入参数为左右位置调节装置反射镜的控制量,输出参数为合束系统输出光束在高低和左右两个方向的坐标变化量 Δx 和 Δy 。通过上述模型进行仿真计算,获得实验数据如表 3 所示。

表 3 左右位置调节仿真实验数据
Tab. 3 Simulation experiment data of left and right position adjustment

输入输出参数	数值							
左右控制量(mm)	0.1	1	2	3	4	6	8	10
坐标变化量 $\Delta x(\mu\text{m})$	0.224	2.249	3.699	5.249	6.598	7.499	8.899	10.512
坐标变化量 $\Delta y(\text{mm})$	0.099	0.999	1.997	2.995	3.994	5.991	7.988	9.985

由表 3 的仿真结果可知,左右位置调节反射镜的控制量与系统输出光束在左右方向上的位置坐标变化量 Δy 近似相等。当调节反射镜的控制量不超过 10 mm 时误差小于 15 μm ,且控制量越小,二者的误差越小。此外,在合束系统需求的左右位置调节范围内($\pm 7.5 \text{ mm}$),在高低方向上引入的位置坐标变化量小于 9 μm 。

本研究设计了左右位置调节装置,主要由运动镜座、反射镜、直线电机、精密导轨、位移传感器和基座等组成。当光束入射到与光束方向夹角为 45° 的反射镜面时,控制反射镜沿光束传播方向平移即可实现光束左右位置的微量调节。如图 6 所示为光束左右位置调节装置的实物照片^[16]。

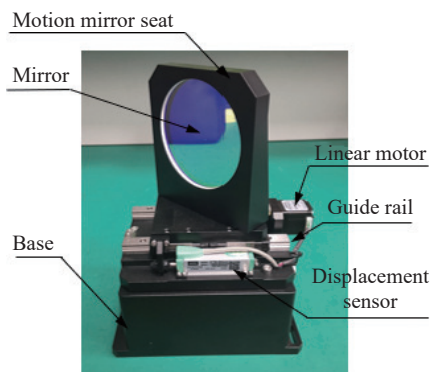


图 6 左右位置调节装置实物
Fig. 6 Physical photo of left-right adjusting device

3.3 光束高低位置调节模型的建立

图 7 为合束系统中光束高低位置调节的原理示意图。

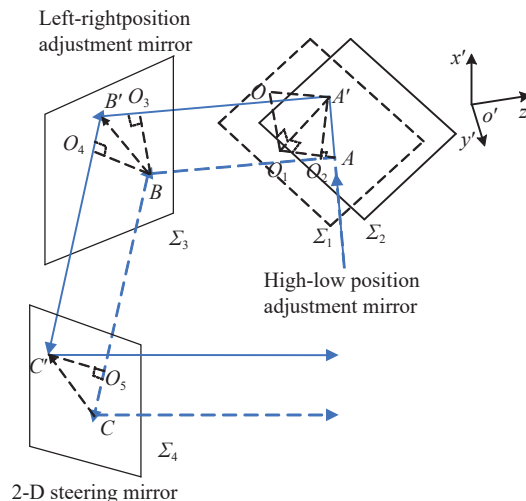


图 7 光束高低位置调节示意图
Fig. 7 Schematic diagram of beam high and low position adjustment

设平面 Σ_1 为高低位置调节反射镜初始位置所在平面,平面 Σ_2 为平面 Σ_1 沿矢量 OA' 平移 $|OA'|$ 距离后所在的平面位置,入射光束分别与平面 Σ_1 交于点 A ,与平面 Σ_2 交于点 A' 。过 A' 点作平面 Σ_1 的法线交于 O_1 点。由于向量 O_1A' 为平面 Σ_1 的法向量,因此向量 O_1A' 垂直于 O_1O 、 O_1A 。过 A' 点作 AB 的垂线,垂足为 O_2 。设高低位置调节反射镜平移前后平面 Σ_1 、 Σ_2 的法向量分别为 n_1 、 n_2 , n_1 、 n_2 与 z' 轴正向夹角为 -135° ,平移前后镜面的法向量不变,因此 $n_1=n_2$ 。设平面 Σ_2 的反射矩阵为 M_2 ,高低位置调节反射镜的入射光束的方向向量为 $R_{AA'}$ 。设 n_1 与高低位置调节反射镜运动方向 OA' 的夹角为 φ_{21} , n_1 与 $R_{AA'}$ 夹角为 φ_{22} ,

$R_{AA'}$ 与 R_{AB} 的夹角为 φ_{23} 。设 CC' 的单位向量为 $n_{CC'}$ 。设左右位置调节反射镜平面 Σ_3 的法向量为 n_3 ,反射矩阵为 M_3 ,两维摆镜的法向量为 n_4 ,反射矩阵为 M_4 , R_{AB} 与 $R_{BB'}$ 的夹角为 φ_{24} , $R_{BB'}$ 与 BC 的夹角为 φ_{25} , $n_{CC'}$ 与 BC 的夹角为 φ_{26} 。过 B 点作 $A'B'$ 的垂线,垂足为 O_3 ,过 B 点作 $B'C'$ 的垂线,垂足为 O_4 ,过 C' 点作 BC 的垂线,垂足为 O_5 。设单元光束在进行指向偏差调节前对应输出光束的方向向量为 R_0 ,根据各个反射镜的位置关系和光线的传播规律可知:

$$n_{CC'} = \frac{n_{CBB'C'} \times n_4}{\|n_{CBB'C'} \times n_4\|_2} \quad (18)$$

设 $n_{CC'x}$ 、 $n_{CC'y}$ 为单位向量 $n_{CC'}$ 在 x' 、 y' 坐标轴上的分量,则经过高低位置调节后系统输出光

束的光斑位置坐标的变化量 Δx 和 Δy 的计算公式如下:

$$\Delta x = \frac{|A'O| \sin \varphi_{23} \sin \varphi_{25}}{\cos \varphi_{21} \cos \varphi_{22} \sin \varphi_{24} \sin \varphi_{26}} n_{CC'x} \quad (19)$$

$$\Delta y = \frac{|A'O| \sin \varphi_{23} \sin \varphi_{25}}{\cos \varphi_{21} \cos \varphi_{22} \sin \varphi_{24} \sin \varphi_{26}} n_{CC'y} \quad (20)$$

与左右位置调节仿真实验相同,为了得到高低位置调节装置中平动反射镜的控制量与系统输出光束在高低方向上坐标变化量之间的对应关系,通过 Matlab 再次进行仿真实验。其中,输入参数为高低位置调节装置反射镜的控制量,输出参数为合束系统输出光束在高低和左右两个方向的坐标变化量 Δx 和 Δy ,最终获得仿真实验数据如表4所示。

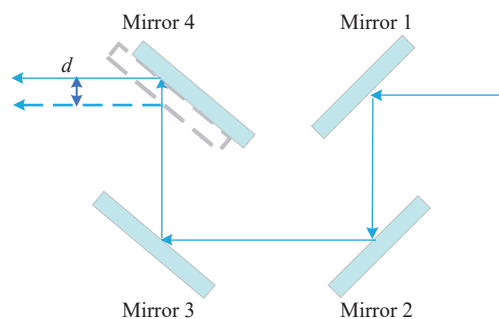
表4 高低位置调节仿真实验数据

Tab. 4 Simulated experimental data for high and low position adjustment

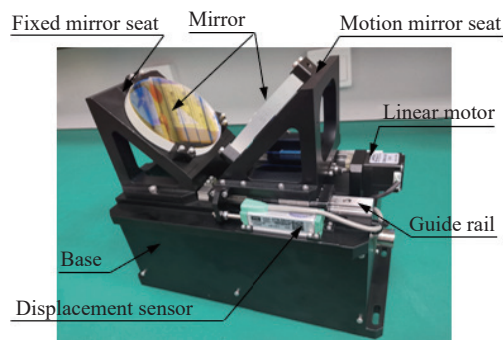
调节参数	数值								
高低位置控制量(mm)	0.1	1	2	3	4	6	8	10	
坐标变化量 Δx (mm)	0.100	1.002	2.002	3.004	4.005	6.009	8.011	10.017	
坐标变化量 Δy (μm)	-0.300	-3.124	-6.125	-9.253	-9.527	-10.836	-11.259	-12.452	

由表4的仿真结果可知,高低位置调节反射镜的控制量与系统输出光束在高低方向上的位置坐标变化量 Δx 近似相等。当调节反射镜的控制量不超过10 mm时误差小于 $17 \mu\text{m}$,且随着控制量的减少,二者的误差逐渐减小。此外,在合束系统需求的高低位置调节范围内($\pm 7.5 \text{ mm}$),由于高低位置的调节而引入的左右位置变化量小于 $12 \mu\text{m}$ 。通过对比可知:在同等条件下,左右位置调节所引起的高低位置偏差 $9 \mu\text{m}$ 小于高低位置调节引起的左右位置偏差 $12 \mu\text{m}$,因此,本研究合束系统采用先高低位置调节、后左右位置调节的技术方案。如此以来,由高低位置调节而引入的左右位置偏差可通过下游的左右位置调节进行消除。

为了实现光束在基准高度附近的调节,本研究采用4片反射镜实现光路的折转及复位,其中出射端反射镜4在电动平移台的驱动下能够前后平移,从而通过改变入射光束在平移反射镜4上入射点的位置,实现出射光束沿高低方向的位置调节,其原理如图8(a)所示^[17]。完成高低位置调节装置各组件的加工装调后,其实物组成如图8(b)所示。



(a) High-low position adjustment principle



(b) High-low position adjustment device

图8 高低位置调节装置原理和实物

Fig. 8 Principle and physical map of beam high-low position adjusting device

4 闭环合束系统实验验证与误差分析

为了验证所设计闭环合束系统长时间工作的闭环合束精度,采用两路不同波长的激光进行模拟合束实验。实验系统主要由:激光器、光束监测单元、光束调节单元、主控计算机、分束镜、合束镜、导光镜等组成,其中,光源部分由两台不同波长的可见光激光器组成;光束监测单元主要由光束指向监测装置和光束位置监测装置组成,分别用于合束激光指向与位置的独立监测;光束调节单元主要由两套高低位置调节装置、两套左右位置调节装置和两套二维摆镜组成,分别用于两路激光束位置和指向的精确调节,系统组成如图 9 所示。

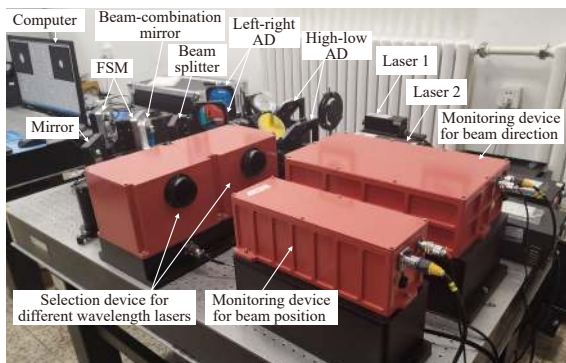


图 9 合束系统模拟实验装置

Fig. 9 Simulation experiment setup of beam combining system

具体的实验步骤如下:首先完成两路激光束及光学元件的初始调节,使激光光斑大致位于光学元件工作表面的中心,位置、指向监测装置的监测光斑大致位于其视场中心。然后,选取其中一路光束的当前状态作为基准光路,并由监测装置分别测出第二路激光束与基准光路的偏差,反馈给主控计算机。继而由主控计算机控制二维摆镜进行该光束指向的初次校正;再控制高低位置调节装置、左右位置调节装置进行该光束的位置校正;最后再次控制二维摆镜完成该光束指向的最终校正。在合束系统长时间的工作过程中,被选作基准光路的激光束的位置及指向也会受各种原因的影响发生改变,因此,在一个闭环合束周期内,采用同样的合束流程对该光束进行闭环校正,从而完成两路激光束的精密合束。为了确保系统长时间工作过程中的稳定合束精度,主控计算机

按照固定的闭环合束周期(如:2 min),周期性地对两束激光进行闭环校正。

通过对模拟实验系统连续的监测,记录合束系统各装置的工作状态及合束效果,系统采集数据如图 10~图 13 所示。可知:在整个模拟实验过程中,各装置运行正常,两路激光均实现了与基准的精密合束,合束指向精度优于 $\pm 7 \mu\text{rad}$,位置精度优于 $\pm 0.84 \text{ mm}$ 。非周期性闭环合束状态下,系统各光束与基准的偏差(指向偏差约为 $\pm 170 \mu\text{rad}$,位置偏差约为 $\pm 4 \text{ mm}$)的对比结果表明本研究所设计的激光合束系统合理可行,对光束的校正效果明显,不仅实现了角秒级的合束精度,而且可有效保证系统长时间工作的合束稳定性。

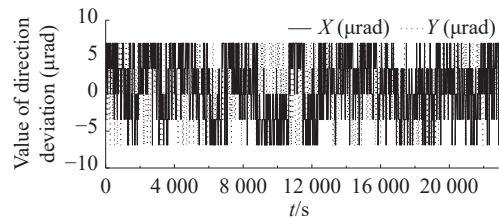


图 10 光束 1 周期性闭环合束指向偏差实时监测数据
Fig. 10 Real-time monitoring data of beam 1 periodically closed-loop beam pointing deviation

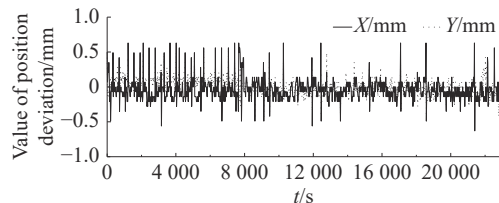


图 11 光束 1 周期性闭环合束位置偏差实时监测数据
Fig. 11 Real-time monitoring data of beam 1 periodically closed-loop beam combining position deviation

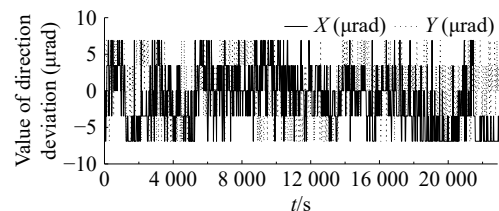


图 12 光束 2 周期性闭环合束指向偏差实时监测数据
Fig. 12 Real-time monitoring data of beam 2 periodic closed-loop beam combining pointing deviation

由于合束系统在封闭环境内工作,所以气流波动、空气尘埃等对其的影响可以忽略,因此合束系统的主要误差来源包括:光束监测装置的监

测误差和光束调节装置的调节误差两部分。采用如图 14 所示的检测方法对光束指向监测装置和光束位置监测装置的监测精度进行检测。即经过摆镜校正后的光束分别进入指向监测装置和位置监测装置, 同时记录上位机中采集到的光斑质心位置坐标的最大跳动值, 并结合监测装置像元分辨率即可计算出监测装置的监测精度。实测指向监测装置的监测精度(δ_1)为 3.46 μrad , 位置监测装置的监测精度(h_1)为 0.11 mm。

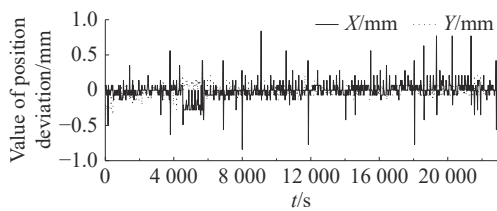


图 13 光束 2 周期性闭环合束位置偏差实时监测数据
Fig. 13 Real-time monitoring data of beam 2 periodic closed-loop beam combining position deviation

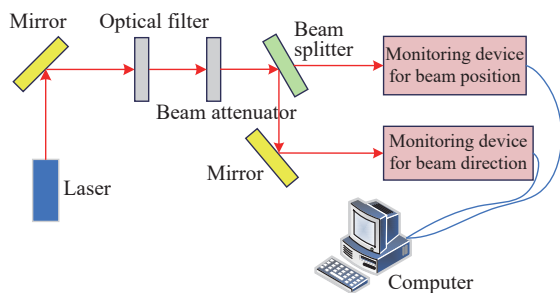


图 14 监测装置监测精度实验检测
Fig. 14 Monitoring accuracy test for monitoring device

在本研究中光束调节部分的光路示意如图 15 所示, 其中 α_1 为高低位置调节引入的指向误差, α_2 为左右位置调节引入的指向误差, α_3 为光束指向调节所引入的指向误差。

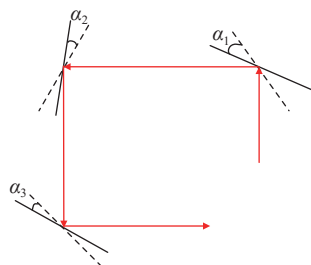


图 15 合束系统光束调节部分的光路图
Fig. 15 Optical path diagram of the beam adjustment section of the beam combining system

由本研究的合束方案可知, 光束位置调节装置位于光束指向调节装置的上游, 因此光束位置调节过程中所产生的指向误差 α_1 和 α_2 可以被指向调节装置补偿。因此, 每路激光由光束调节装置引入的最大指向误差将由光束指向调节装置的精度所决定。本研究所采用二维摆镜的指向误差(δ_2)为 4.4 μrad , 根据式 (20) 计算可得合束系统的指向误差(δ)为 9.46 μrad ^[18]。

$$\delta = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2} \quad (21)$$

在位置合束误差方面, 主要的误差来源于位置调节装置的平移误差和位置监测装置的监测误差。光束位置调节装置采用电动平移台进行驱动, 因此电动平移台的平移精度将直接影响光束位置偏差的调节精度。本研究中由电动平移台的直线位移精度引入的位置合束误差(h_2)约为 0.01 mm。根据式 (21) 计算可得合束系统的位置误差(H)为 0.11 mm。

$$H = \sqrt{h_1^2 + h_2^2} \quad (22)$$

5 结 论

为了实现可见光波段多路激光的周期性闭环合束, 本研究提出了光束指向与位置独立监测、独立校正的技术方案, 并在此基础上建立了光束调节的控制解算模型, 进而获得了光束指向调节装置控制量与光束指向偏差之间的近似函数关系, 以及光束位置调节装置控制量与光束位置偏差之间的对应关系。为了进一步验证本研究合束方案的可行性与合束效果, 搭建了闭环合束模拟实验装置。实验结果表明: 所设计合束系统能够有效实现多路激光的周期性闭环合束, 且对光束的校正效果明显。两路激光合束的指向精度优于 $\pm 7 \mu\text{rad}$, 位置精度优于 $\pm 0.84 \text{ mm}$ 。与传统双摆镜调节方案的合束系统相比, 具有调节范围大、控制策略简单、工作可靠性强等突出优点, 并且能够很方便地扩展至更多路激光的精密闭环合束。本研究的相关技术将为其他多波长高能激光合束系统的研制提供技术支撑和参考。

参考文献:

[1] 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(中国科学院长春光学精密机械

- 与物理研究所), 2020.
- CHEN CH B. *Design of beam monitoring device in multi-wavelength laser beam combining system*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)
- [2] 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.
- WANG L J, PENG H Y, ZHANG J. Advance on high power diode laser coupling[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(4): 517-534. (in Chinese)
- [3] 陆鸿宇. 基于半导体激光器的激光功率合成技术[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2018.
- LU H Y. *The research on laser power synthesis technology based on semiconductor laser*[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2018. (in Chinese)
- [4] 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): 1003002.
- CAO Y X, SHU SH L, SUN F Y, *et al.*. Development of beam combining technology in mid-infrared semiconductor lasers(invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(10): 1003002. (in Chinese)
- [5] 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.
- WANG L J, PENG H Y, ZHANG J, *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)
- [6] 张俊, 彭航宇, 刘云, 等. 三波长合束高亮度半导体激光光源[J]. *中国激光*, 2013, 40(4): 65-70.
- ZHANG J, PENG H Y, LIU Y, *et al.*. High brightness diode laser source based on three-wavelength multiplexing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(4): 65-70. (in Chinese)
- [7] 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.
- ZHU F, LI Y X, TAN J B. Design of high-accuracy laser beam collimation system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(4): 817-826. (in Chinese)
- [8] 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.
- YANG B H, CAI Y D, WEN ZH X, *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)
- [9] 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.
- JIANG ZH H, WANG T F, GUO J. Monitoring and controlling system for high power CO₂ laser in “LPP-EUV” light source[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(4): 544-550. (in Chinese)
- [10] 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.
- ZHANG F, XU X H, CHEN CH B. 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)
- [11] 刘力双, 夏润秋, 吕勇, 等. 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.
- LIU L SH, XIA R Q, LV Y, *et al.*. Research situation of fast steering mirror driven by voice coil motor[J]. *Laser Journal*, 2020, 41(9): 1-7. (in Chinese)
- [12] 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.
- [13] 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): 0904005.
- LV SH L, LIU J G, ZHOU H D, *et al.*. Design of control system for fast steering mirror of infrared detector based on satellite[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(9): 0904005. (in Chinese)
- [14] 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.
- PENG SH P, CHEN T, LIU T X, *et al.*. Reflection process of fast-steering mirror of laser launching system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(2): 378-386. (in Chinese)
- [15] 贾国伟, 侯良科, 洪普. 反射式二维快速控制反射镜的像旋模型研究[J]. *光学与光电技术*, 2021, 19(4): 86-92.
- JIA G W, HOU L K, HONG P. Research on model of image rotation of reflective two-dimensional fast-steering mirror[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2021, 19(4): 86-92. (in Chinese)
- [16] 李高生, 徐新行, 安振杰, 等. 可见光多波段激光合束系统设计[J]. *激光与红外*, 2023, 53(2): 282-288.
- LI G SH, XU X H, AN ZH J, *et al.*. Design of visible multi-band laser beam combining system[J]. *Laser & Infrared*, 2023, 53(2): 282-288. (in Chinese)

- [17] 徐新行, 李莹. 可见光电视用高精度小体积调焦平台的设计[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(6): 1526-1533.
XU X H, LI Y. Design of focusing mechanism with high precision and small volume for visible light television system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(6): 1526-1533. (in Chinese)
- [18] 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.
XIA L, HAN X D, SHAO J F. Laser beam combination accuracy of wavelength multiplexing[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(5): 801-807. (in Chinese)

作者简介:



徐新行(1983—), 男, 河南周口人, 博士, 副研究员, 2015年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要从事光束控制、光电转台及光电编码器的研究工作。E-mail: xxh123321xxh@163.com



李高生(1996—), 男, 河南项城人, 硕士, 2023年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位, 主要从事光学加工和激光合束系统的研究。E-mail: ligaos182@163.com