

## 基于快速反射镜的光束指向性偏差矫正系统

任行飞, 范晋伟\*, 潘日, 孙锐

北京工业大学材料与制造学部数控精密加工技术研究所, 北京 100124

**摘要** 激光具备优异的相干性、方向性和高能量,被广泛应用于激光通信、激光制导、高能武器和精密加工等领域。然而,激光器本身和外部环境等因素会造成光束指向不稳定,严重降低了通信、制导和加工的精度。因此,构建了一种基于快速反射镜的光束指向性偏差矫正系统,并对光束指向性偏差矫正过程进行建模。重点构建了由位置敏感探测器的位置偏差信号到快速反射镜的矫正角度的控制模型。建立的控制模型可以实现对光束指向性偏差的检测和预测,并调整快速反射镜的姿态,以矫正光束指向性偏差,提高光束指向稳定性。通过实验验证了构建的系统和模型的性能。结果表明,依据构建的系统和模型校正后的光束在 X 方向和 Y 方向上的指向性偏差分别减少了 78.08% 和 70.28%,光束指向稳定性显著提升。

**关键词** 光学设计; 激光束传输; 光路建模; 光束指向性偏差; 快速反射镜; 位置敏感探测器

**中图分类号** O439 **文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL221459

## 1 引言

激光光束具有强度高、单色性能好、相干性好、方向性好等优点,因此被广泛应用于卫星通信、高能激光系统、半导体制造和检测、激光精密加工、光学数据存储等领域<sup>[1-3]</sup>。然而,激光器内部温度的不均匀、部件的像差、光学系统的抖动、外部环境的变化、机械部件的弹性变形等都会给激光光束带来指向性偏差,限制了激光应用中的通信精度和加工精度等<sup>[4]</sup>。此外,在光学系统中光束指向性偏差会造成光束难以以点的方式聚焦到成像面,且光束焦点会偏离理想位置,降低成像质量<sup>[5]</sup>。

在激光器中采用热膨胀系数低的材料、给激光器加载冷却系统、采用变形镜矫正光束波面畸变和减小振动等方式可以有效地提升光束指向精度<sup>[6]</sup>。但以上方式只能矫正由激光器造成的光束指向性偏差,且矫正能力有限,难以满足高精度通信、加工和光学系统对指向性精度的需求。

采用专门的光束指向性偏差矫正系统是一种提升光束指向稳定性的有效方式。虽然在部分激光器中包含了光束指向性偏差矫正系统,但因尺寸限制,其对光束指向性偏差的矫正能力也有限,且无法对由其他光学系统和外部环境造成的光束指向性偏差进行矫正。为光学系统配备外部光束指向性偏差矫正系统是目前实现光束指向性偏差矫正的有效方式。

主流的光束指向性偏差矫正系统分为非机械式和

机械式。非机械式指向性偏差矫正系统是通过改变透明介质的折射率实现对光束的偏转,常用的方法有液晶移相和声光偏转等方式<sup>[7-8]</sup>。机械式光束指向性偏差矫正系统可以通过控制反射镜的姿态来实现对光束指向性偏差的矫正<sup>[9]</sup>。常用的反射镜有旋转双棱镜和快速反射镜(FSM)。采用旋转双棱镜的系统具有更为紧凑的结构,允许其在更小的范围内工作<sup>[10-11]</sup>。快速反射镜在光束指向性偏差矫正中的使用更为广泛。快速反射镜具有优异的动态性能,使其能够对光束指向性偏差进行快速的矫正<sup>[12-15]</sup>。目前基于快速反射镜的光束指向性偏差矫正系统是最为成熟且有效的,其性能早已得到验证。

但目前所构建的光束指向性偏差矫正系统多采用 Z 形光束路径<sup>[12,16-18]</sup>,会改变原始光束的传播方向,且通常都是针对特定设备而设计,难以扩展到其他设备。为此,本研究构建一种 U 形光束路径的光束指向性偏差矫正系统,不改变光束的原始方向,更容易扩展到光学系统中。本文对 U 形光束指向性偏差矫正系统的结构和原理进行了介绍,基于几何光学构建了光束指向性偏差检测模型和快速反射镜控制模型,并通过实验验证了所构建的系统对光束指向性偏差的矫正性能。

## 2 光束指向性偏差矫正系统原理与结构

指向性偏差矫正系统主要由三个部分组成:检测

收稿日期: 2022-11-28; 修回日期: 2023-01-16; 录用日期: 2023-02-27; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 2021 年产业技术基础公共服务平台项目(2021-0171-1-1)、国家重点研发计划(2018YFB1107502)

通信作者: \*jwfan@bjut.edu.cn

器、控制器和执行器。检测器是系统的测量反馈部件,它实时检测光束在光敏表面的位置偏移并将结果传送给控制器。控制器是系统的核心,它接收检测器检测到的位置偏移信息,并根据内部控制策略计算光束反射器矫正后的姿态。光束反射器在系统中充当执行器,根据控制信号调整姿态,以实现光束指向性偏差的矫正,提高光束指向稳定性。

设计的光束指向性偏差矫正系统的结构如图 1 所示。针对光束指向性偏差的检测,常用的探测器为四象限探测器和位置敏感探测器(PSD)<sup>[12,19-23]</sup>。鉴于 PSD 具有精度高、反应快等优点,选择两个 PSD 作为检测器<sup>[24]</sup>。当光束存在指向性偏差时,光束会偏离 PSD 的中心,导致 PSD 的四个输出电流发

生变化。根据电流信号可以得到光束质心的确切位置。快速反射镜是具有低惯性和高响应速度的理想执行器,所以本系统将其用作执行器。一般来说,激光光束具有四项指向性偏差,包括两个位移偏差和两个角度偏差。由于一个快速反射镜通常只能实现对两项指向性偏差的矫正,因此在光束指向性偏差矫正系统中需要两个快速反射镜。计算机被用作控制器,其主要功能是根据两个 PSD 的位置偏差信号得到 FSM 矫正后的姿态。此外,还采用了一个非均匀分光器(BS)将一小部分光束从主光束中分离到检测系统中,以避免探测器对主光束产生影响。另一个均匀分束器将光束均匀地分成两束,分别传递到两个 PSD。

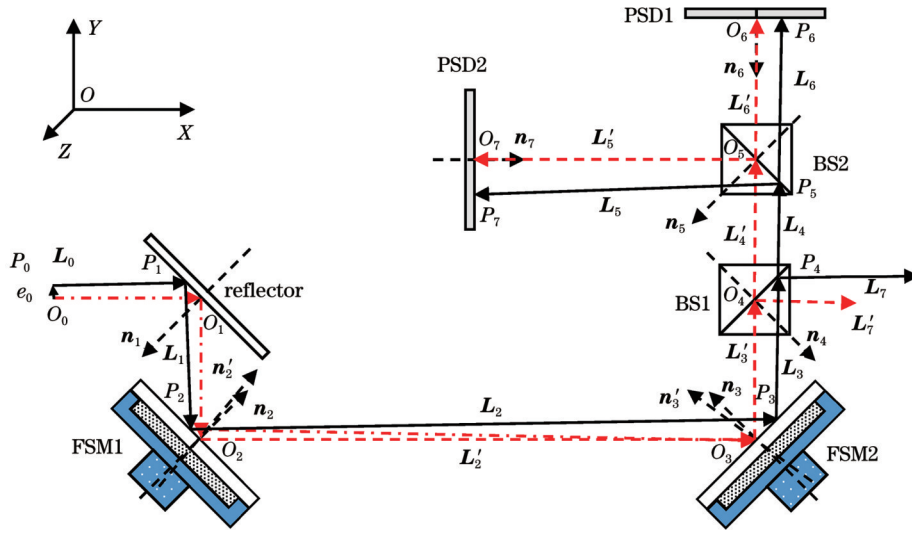


图 1 光束指向性偏差矫正系统示意图

Fig. 1 Schematic of beam pointing deviation correction system

图 1 中的黑色实线表示具有四项指向性偏差的原始光束,光束偏离了 PSD1 和 PSD2 的中心。控制器从探测器得到位置偏差信号后,控制两个 FSM 转动以实现光束指向性偏差的矫正。FSM1 绕其自身的 X 轴和 Z 轴旋转,保证光束到达 FSM2 的中心点,从而消除光束的位移偏差。FSM2 绕其自身的 X 轴和 Z 轴旋转,保证光束通过 BS1 的中心,从而消除光束的角度偏差。矫正后的光束没有指向性偏差,并回到 PSD1 和 PSD2 的中心。同时,离开系统的光束(L<sub>7</sub>)也没有指向性偏差。图 1 中的红色虚线代表矫正后的光束路径。

### 3 光束指向性偏差矫正模型

调整 FSM 的姿态是实现光束指向性偏差矫正的核心问题。采用 PID 控制是较为常用的一种方式,但是光束指向性偏差矫正系统是一个复杂的多输入多输出耦合系统,难以获得合适的 PID 参数以实现光束指向性偏差的矫正。通过对光束指向性矫正系统进行分析,建立光束指向性偏差矫正模型也是一种有效的方式,且数学模型的建立能更加有效地反映光束指向

性偏差的矫正过程<sup>[10,25]</sup>。

#### 3.1 光束指向性偏差模型

光束指向性偏差包含了光束源点的位移偏差和光束指向的角度偏差。需要依据光束在 PSD1 和 PSD2 上的位置偏差实现对实际光束的源点 P<sub>0</sub> 和方向矢量 L<sub>0</sub> 的检测,并获得四项指向性偏差。图 2 显示了检测光束指向偏差的检测器的基本原理。两个 PSD 是垂直排列的。由于 O<sub>6</sub> 和 O<sub>7</sub> 是已知的,根据 PSD 的位置偏差信号,可以得到光束与 PSD 的交点(P<sub>6</sub> 和 P<sub>7</sub>)。忽略分束器对光路的轻微影响,P<sub>5</sub>、P<sub>6</sub> 和 P<sub>7</sub> 之间的关系为

$$\begin{cases} y_5 - y_7 = x_6 - x_5 \\ x_5 - x_7 = y_6 - y_5 \\ x_5 + y_5 = C \\ z_7 - z_5 = z_6 - z_5 \\ x_5 - x_7 = y_6 - y_5 \end{cases}, \quad (1)$$

式中:C 为常数,且 C = O<sub>5x</sub> + O<sub>5y</sub>, O<sub>5x</sub> 和 O<sub>5y</sub> 为 BS2 的中心点坐标。

通过对式(1)进行求解可以得到 P<sub>5</sub> 的位置为

$$\begin{cases} x_5 = (x_6 x_7 + y_6 y_7 - y_6 C) / (x_6 + x_7 - y_6 + y_7 - C) \\ y_5 = [C(x_6 + x_7 + y_7 - C) - (x_6 x_7 + y_6 y_7)] / (x_6 + x_7 - y_6 + y_7 - C) \\ z_5 = [z_6(x_5 - x_7) + z_7(y_5 - y_6)] / (x_5 - y_7 + y_5 - y_6) \end{cases} \quad (2)$$

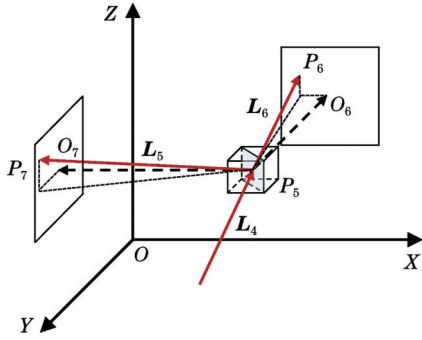


图 2 探测器的原理示意图  
Fig. 2 Schematic of principle of detector

根据  $P_5$  和  $P_6$ , 进入探测器的原始光束的单位方向矢量可以表示为

$$\mathbf{L}_4 = \mathbf{L}_6 = \overrightarrow{P_5 P_6} / |\overrightarrow{P_5 P_6}| \quad (3)$$

当反射平面的姿态已知时, 反射光和入射光的单位方向矢量之间的关系可以表示为

$$\mathbf{L}_{i+1} = \mathbf{L}_i - 2\mathbf{L}_i \mathbf{n}_i \mathbf{n}_i^T, \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{L}_i$  为入射光束的单位方向矢量;  $\mathbf{n}_i$  为反射面的单位法向量;  $\mathbf{L}_{i+1}$  为反射光束的单位方向矢量。

依据式 (4) 对光路进行分析可以得到原始光束的单位方向矢量为

$$\mathbf{L}_0 = \mathbf{L}_3 - 2\mathbf{L}_3 \mathbf{N}_3 \mathbf{N}_3^T - 2(\mathbf{L}_3 - 2\mathbf{L}_3 \mathbf{N}_3 \mathbf{N}_3^T) \mathbf{N}_2 \mathbf{N}_2^T - 2[\mathbf{L}_3 - 2\mathbf{L}_3 \mathbf{N}_3 \mathbf{N}_3^T - 2(\mathbf{L}_3 - 2\mathbf{L}_3 \mathbf{N}_3 \mathbf{N}_3^T) \mathbf{N}_2 \mathbf{N}_2^T] \mathbf{N}_1 \mathbf{N}_1^T, \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{N}_1$ ,  $\mathbf{N}_2$  和  $\mathbf{N}_3$  分别是反射镜、FSM1 和 FSM2 矫正后的单位法向量, 可以分别表示为

$$\mathbf{N}_1 = \mathbf{n}_1 = [-1/\sqrt{2} \quad -1/\sqrt{2} \quad 0]^T, \quad (6)$$

$$\mathbf{N}_2 = {}^2\mathbf{T}^{-1} \mathbf{R}_2 {}^2\mathbf{T} \mathbf{n}_2, \quad (7)$$

$$\mathbf{N}_3 = {}^3\mathbf{T}^{-1} \mathbf{R}_3 {}^3\mathbf{T} \mathbf{n}_3, \quad (8)$$

$$\mathbf{L}_3 = \mathbf{L}_4 = \mathbf{L}_6, \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{n}_1$ ,  $\mathbf{n}_2$  和  $\mathbf{n}_3$  分别为反射镜、FSM1 和 FSM2 的原始单位法向量;  ${}^2\mathbf{T}$  和  ${}^3\mathbf{T}$  分别代表从空间坐标系到 FSM1 和 FSM2 坐标系的转换矩阵;  $\mathbf{R}_2$  和  $\mathbf{R}_3$  分别是 FSM1 和 FSM2 在其坐标系中的旋转矩阵。

FSM1 和 FSM2 的坐标系分别是通过将原空间坐标系顺时针旋转  $45^\circ$  和  $-45^\circ$  得到的。 ${}^2\mathbf{T}$  和  ${}^3\mathbf{T}$  可表示为

$${}^2\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} & 0 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$${}^3\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 0 \\ -1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

$\mathbf{R}_2$  和  $\mathbf{R}_3$  可以表示为

$$\mathbf{R}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_2 & -\sin \alpha_2 \\ 0 & \sin \alpha_2 & \cos \alpha_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma_2 & -\sin \gamma_2 & 0 \\ \sin \gamma_2 & \cos \gamma_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\mathbf{R}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_3 & -\sin \alpha_3 \\ 0 & \sin \alpha_3 & \cos \alpha_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma_3 & -\sin \gamma_3 & 0 \\ \sin \gamma_3 & \cos \gamma_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

式中:  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ ,  $\gamma_2$  和  $\gamma_3$  分别是 FSM1 和 FSM2 绕其 X 轴和 Z 轴的旋转角, 反映了两个 FSM 的实时姿态信息。

各元件的中心位置和初始单位法向量如表 1 所示。激光的中心位置和初始单位法向量分别代表理想光束的起点位置和初始单位方向矢量。

表 1 各组件的初始姿态

Table 1 Original attitude of each component

Optical element	Laser	Reflector	FSM1	FSM2	BS1	BS2	PSD1	PSD2
$O_{ix}$ /mm	-100	0	0	200	200	200	200	100
$O_{iy}$ /mm	50	50	0	0	50	100	150	100
$O_{iz}$ /mm	0	0	0	0	0	0	0	0
$n_{ix}$	1	$-1/\sqrt{2}$	$-1/\sqrt{2}$	$-1/\sqrt{2}$	$1/\sqrt{2}$	$-1/\sqrt{2}$	1	0
$n_{iy}$	0	$-1/\sqrt{2}$	$1/\sqrt{2}$	$1/\sqrt{2}$	$-1/\sqrt{2}$	$-1/\sqrt{2}$	0	-1
$n_{iz}$	0	0	0	0	0	0	0	0

光束的两个角度偏差可以由原始光束的单位方向矢量得到。有角度偏差的光束可以看作是理想光束绕

Y 轴和 Z 轴旋转的结果, 这个旋转过程可以表示为

$$\mathbf{L}_0 = \mathbf{R}_0 \mathbf{L}, \quad (14)$$

式中:  $\mathbf{L} = [1 \ 0 \ 0]^T$ , 表示理想光束的初始单位方向矢量;  $\mathbf{R}_0$  是从  $\mathbf{L}$  到  $\mathbf{L}_0$  的旋转矩阵, 可以表示为

$$\mathbf{R}_0 = \begin{bmatrix} \cos \epsilon_y & 0 & \sin \epsilon_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \epsilon_y & 0 & \cos \epsilon_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \epsilon_z & -\sin \epsilon_z & 0 \\ \sin \epsilon_z & \cos \epsilon_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

通过求解式(5)和式(14), 可以得到原始光束的两个角度偏差为

$$\epsilon_y = -\arcsin\left(L_{0z}/\sqrt{1-L_{0y}^2}\right), \quad (16)$$

$$\epsilon_z = \arcsin(L_{0y}), \quad (17)$$

式中:  $L_{0y}$  和  $L_{0z}$  分别代表  $\mathbf{L}_0$  在 Y 方向和 Z 方向上的分量。

通过求解光束与每个光学元件的交点可以获得原

始光束的两个位移偏差。基于光路反射的几何关系, 可以得到光束与每个光学元件的交点为

$$P_i = \frac{(O_i - P_{i+1})\mathbf{N}_i^T}{\mathbf{L}_i \mathbf{N}_i^T} \mathbf{L}_i + P_{i+1}, \quad (18)$$

式中:  $P_{i+1}$  是入射光束上的一个点;  $\mathbf{L}_i$  代表入射光束的单位方向矢量;  $O_i$  是反射面上的一个点;  $\mathbf{N}_i$  代表反射平面的单位法向量。

根据式(18)对光路进行分析, 可以得到原始光束的起点位置:

$$P_0 = \frac{(O_0 - P_1)\mathbf{N}_0^T}{\mathbf{L}_0 \mathbf{N}_0^T} \mathbf{L}_0 + P_1, \quad (19)$$

式中:  $P_1$  是原始光束和反射器的交点,

$$P_1 = \frac{\left\{ O_1 - \frac{\left[ O_2 - \frac{(O_3 - P_5)\mathbf{N}_3^T}{\mathbf{L}_3 \mathbf{N}_3^T} \mathbf{L}_3 - P_5 \right] \mathbf{N}_2^T}{\mathbf{L}_2 \mathbf{N}_2^T} \mathbf{L}_2 - \frac{(O_3 - P_5)\mathbf{N}_3^T}{\mathbf{L}_3 \mathbf{N}_3^T} \mathbf{L}_3 - P_5 \right\} \mathbf{N}_1^T}{\mathbf{L}_1 \mathbf{N}_1^T} \mathbf{L}_1 + \frac{\left[ O_2 - \frac{(O_3 - P_5)\mathbf{N}_3^T}{\mathbf{L}_3 \mathbf{N}_3^T} \mathbf{L}_3 - P_5 \right] \mathbf{N}_2^T}{\mathbf{L}_2 \mathbf{N}_2^T} \mathbf{L}_2 + \frac{(O_3 - P_5)\mathbf{N}_3^T}{\mathbf{L}_3 \mathbf{N}_3^T} \mathbf{L}_3 + P_5, \quad (20)$$

式中:  $\mathbf{L}_1, \mathbf{L}_2$  和  $\mathbf{L}_3$  可以由式(4)得到。

通过比较得到  $P_0$  与理想的光束起点位置 ( $O_0$ ), 进而可以得到原始光束的两个位移偏差为

$$\delta_y = P_{0y} - O_{0y}, \quad (21)$$

$$\delta_z = P_{0z} - O_{0z}, \quad (22)$$

式中:  $P_{0y}$  和  $P_{0z}$  分别代表  $P_0$  在 Y 轴和 Z 轴方向上的分量。

到目前为止, 根据两个 PSD 检测到的位置偏差信号和 FSM 的姿态信息, 可以得到原始光束的姿态和四个指向性偏差。为了简化描述, 用模型  $\mathbf{F}_1$  表示上述对原始光束姿态的求解过程, 用模型  $\mathbf{F}_2$  表示对原始光束的四个指向性偏差的求解过程, 即

$$[P_0 \ \mathbf{L}_0] = \mathbf{F}_1(P_6 \ P_7 \ \alpha_2 \ \gamma_2 \ \alpha_3 \ \gamma_3), \quad (23)$$

$$[\epsilon_y \ \epsilon_z \ \delta_y \ \delta_z] = \mathbf{F}_2(P_6 \ P_7 \ \alpha_2 \ \gamma_2 \ \alpha_3 \ \gamma_3), \quad (24)$$

式中:  $P_6$  和  $P_7$  代表两个 PSD 检测到的光束中心的位置。

### 3.2 快速反射镜姿态矫正模型

FSM1 的姿态矫正旨在使光束与 FSM2 的反射表面的交点固定在  $O_3$ , 从而校正原始光束的两个位移偏差。在对 FSM1 进行姿态矫正后, FSM1 的单位法向量从  $\mathbf{n}_2$  变为  $\mathbf{n}'_2$ , 光束的单位方向矢量从  $\mathbf{L}_2$  变为  $\mathbf{L}'_2$ 。根据式(4), 可以得到以下关系:

$$\mathbf{L}'_2 = \mathbf{L}_2 - 2\mathbf{L}_2 \mathbf{n}'_2 \mathbf{n}_2^T = (O_3 - P_2) / |O_3 - P_2|, \quad (25)$$

式中:  $P_2$  的计算式为

$$P_2 = \frac{(O_2 - P_1)\mathbf{n}'_2}{\mathbf{L}_1 \mathbf{n}'_2} \mathbf{L}_1 + P_1. \quad (26)$$

结合式(25)和式(26), 可以得到  $P_3, \mathbf{n}'_2$  和  $\mathbf{L}'_2$ 。因此, FSM1 的姿态被确定。

因为  $\mathbf{n}'_2$  是通过将 FSM1 的初始法向量绕其 X 轴和 Z 轴旋转而得到的, 所以可以得到

$$\mathbf{n}'_2 = {}_0^2\mathbf{T}^{-1} \mathbf{R}_2 {}_0^2\mathbf{T} \mathbf{n}_2. \quad (27)$$

通过对  $\mathbf{R}_2$  中的  $\alpha_2$  和  $\gamma_2$  的求解, 可以得到 FSM1 的绝对控制角:

$$\alpha_2 = \pm \arccos \left[ \frac{(n'_{2x} + n'_{2y}) / \sqrt{2 - (n_{2x} - n_{2y})^2 / \sqrt{2}}}{\sqrt{2}} \right], \quad (28)$$

$$\gamma_2 = -\arcsin \left[ \frac{(n'_{2x} - n'_{2y}) / \sqrt{2}}{\sqrt{2}} \right], \quad (29)$$

式中:  $n'_{2x}$  和  $n'_{2y}$  分别代表  $\mathbf{n}'_2$  在 X 轴和 Y 轴方向上的分量。

$\alpha_2$  的正负需要依据  $\mathbf{n}'_{2z}$  来判断, 当  $\mathbf{n}'_{2z}$  为正时  $\alpha_2$  为负。

FSM2 姿态调整的目的是为了消除原始光束的角度偏差。由 FSM1 矫正的光束与 FSM2 相交于  $O_3$ , 没有位移偏差。由 FSM2 矫正的光束被准确地反射到 BS1 的中心, 消除反射光束的角度偏差。FSM2 的修正单位法向量 ( $\mathbf{n}'_3$ ) 为

$$\mathbf{L}'_3 = \mathbf{L}'_2 - 2\mathbf{L}'_2 \mathbf{n}'_3 \mathbf{n}_3^T = (O_4 - O_3) / |O_4 - O_3|. \quad (30)$$

同样地, 由于  $\mathbf{n}'_3$  是其初始法向量围绕 FSM2 的 X 轴和 Z 轴旋转得到的, 因此可以得到

$$\mathbf{n}'_3 = {}_0^3\mathbf{T}^{-1} \mathbf{R}_3 {}_0^3\mathbf{T} \mathbf{n}_3. \quad (31)$$

通过对  $\mathbf{R}_3$  中的  $\alpha_3$  和  $\gamma_3$  的求解, 可以得到 FSM2 的绝对控制角:

$$\alpha_3 = \pm \arccos \left[ \frac{(n'_{3x} - n'_{3y}) / \sqrt{2 - (n'_{3x} + n'_{3y})^2 / \sqrt{2}}}{\sqrt{2}} \right], \quad (32)$$

$$\gamma_3 = -\arcsin \left[ \frac{(n'_{3x} - n'_{3y}) / \sqrt{2}}{\sqrt{2}} \right], \quad (33)$$

式中:  $n'_{3x}$  和  $n'_{3y}$  分别代表  $\mathbf{n}'_3$  在 X 轴和 Y 轴方向上的分量。

$\alpha_3$  的正负依据  $\mathbf{n}'_{3z}$  判断, 当  $\mathbf{n}'_{3z}$  为正时  $\alpha_3$  为负, 反之则  $\alpha_3$  为正。

为了描述方便, FSM 控制角的求解过程用模型  $\mathbf{G}$  表示:

$$[\alpha_2 \quad \gamma_2 \quad \alpha_3 \quad \gamma_3] = \mathbf{G}(P_0 \quad \mathbf{L}_0). \quad (34)$$

根据 PSD 检测到的光束偏差信号, 控制器利用模型  $\mathbf{F}_1$  获得原始光束的姿态, 然后利用模型  $\mathbf{G}$  获得 FSM 的矫正姿态, 对光束指向性偏差进行矫正, 达到提升光束指向稳定性的目的。

## 4 光束指向稳定性预测控制模型

尽管可以利用建立的模型  $\mathbf{F}_1$  和模型  $\mathbf{G}$  对光束指向性偏差进行矫正, 但对于超快激光器来说, 其计算效率是不够的。在模型  $\mathbf{G}$  中对 FSM 的控制角的求解需要较长的时间, 导致 FSM 的姿态调整滞后, 对光束指向稳定性的提升效果不理想。此外, FSM 也难以在一个脉冲周期内实现姿态的调整。因此, 进一步提出了光束指向稳定性预测控制模型。

该模型主要解决对 FSM 的姿态矫正的滞后问题, 以提高对光束指向性偏差的矫正能力。该模型有两个改进: 一是对光束指向性偏差进行超前预测, 快速求解 FSM 的姿态控制角; 二是不再依据原始光束的姿态求解 FSM 的姿态控制角, 而是建立一个光束指向性偏差预测模型, 依据预测模型来求解 FSM 的姿态控制角。此外, 绕过了模型  $\mathbf{G}$  中对方程的求解, 建立一个由光束指向性偏差到 FSM 控制角的映射模型。通过这种方式可以很大程度上提高对控制角度的求解效率, 有效提高对光束指向性偏差的矫正性能。

### 4.1 光束指向性偏差预测模型

对于连续激光器, 可以通过对光束指向性偏差的实时监测来矫正光束指向性偏差, 而在脉冲激光器中, 只能测量单个脉冲的偏差。单个脉冲的持续时间非常短, 很难在单个脉冲的持续时间内实现对光束指向性偏差的矫正。另外, 前一个脉冲的指向性偏差只能作为后续脉冲矫正的参考, 且随机性较大, 不能通过前一个脉冲实现对后续脉冲的精准矫正。针对这个问题, 有人提出了平均偏差矫正法<sup>[26]</sup>。

平均偏差矫正法认为当脉冲激光以高频率重复时, 激光脉冲之间的偏差不是完全孤立的, 而是具有一定的规律。此外, 脉冲可以分为包含一定脉冲数量的脉冲段(由多个相邻的脉冲组成), 较大的偏差只会出现在脉冲段之间。动态平均偏差可以用来表示脉冲激

光的位移和角度偏差。动态平均偏差可以表示为

$$\hat{s}(k) = \frac{1}{n} \sum_{j=a}^{n+a-1} s(k-j), \quad k = n+a+1, \dots, m, \quad (35)$$

式中:  $m$  代表每个脉冲段中包含的脉冲数;  $a$  代表预测的提前量;  $\hat{s}(k)$  表示预测得到的第  $k$  个脉冲的指向性偏差;  $n$  代表预测所依据的脉冲数。

预测提前量需要根据所采用的激光器的频率、控制器的计算性能和 FSM 的动态性能来确定。较小的提前量可能不足以解决 FSM 的姿态矫正滞后问题。然而, 当采用较大的提前量时, 光束指向偏差的预测精度会下降。因此, 在实验中需要调整预测提前量以获得更好的矫正效果。简洁起见, 采用模型  $\mathbf{P}$  描述四个光束指向性偏差的预测:

$$[\hat{\delta}_y \quad \hat{\delta}_z \quad \hat{\epsilon}_y \quad \hat{\epsilon}_z] = \mathbf{P}(\delta_y \quad \delta_z \quad \epsilon_y \quad \epsilon_z). \quad (36)$$

预测模型允许控制器依据检测到的光束指向性偏差提前预测后续的光束的指向性偏差, 为 FSM 的姿态矫正提供足够的时间。

### 4.2 快速反射镜控制角映射模型

求解模型  $\mathbf{G}$  中的  $\mathbf{n}'_2$  和  $\mathbf{n}'_3$  的解析解是困难的, 而通过迭代的方式获得  $\mathbf{n}'_2$  和  $\mathbf{n}'_3$  的数值解需要大量的时间。在 FSM 的控制角和光束指向性偏差之间建立一个映射模型, 可能是避免求解过程中的迭代和减少求解时间的有效方法。

本研究采用多项式来建立快速反射镜控制角映射模型。首先, 在 FSM 保持原始姿态的情况下, 由 PSD 收集光束偏差信号, 利用 3.1 节中建立的  $\mathbf{F}_1$  和  $\mathbf{F}_2$ , 可以计算出原始光束的姿态和四个指向性偏差。然后, 使用 3.2 节建立的模型  $\mathbf{G}$  可以得到 FSM 的绝对控制角。之后利用得到的数据拟合获得快速反射镜控制角映射模型。应收集尽可能多的数据以确保模型的准确性。在本研究中建立的模型为

$$[\alpha_2 \quad \gamma_2 \quad \alpha_3 \quad \gamma_3] = \mathbf{N} \begin{bmatrix} \hat{\delta}_y & \hat{\delta}_z & \hat{\epsilon}_y & \hat{\epsilon}_z & 1 \end{bmatrix}^T, \quad (37)$$

式中:

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} 0 & -3.536 & 1.061 & 0 & 0 \\ -2.502 & 0.002 & 0 & -0.75 & 0.001 \\ 0.001 & 3.533 & -0.353 & 0 & -0.001 \\ -2.501 & -0.001 & -0.001 & -0.25 & 0 \end{bmatrix}^{\circ}. \quad (38)$$

使用建立的映射模型来计算 FSM 的控制角可以避免求解模型  $\mathbf{G}$  中的方程, 从而有效地提高控制器的性能。此外, 数据的采集和映射模型的建立都是在光束指向矫正之前完成的, 不会增加光束指向矫正的时间。

采用光束指向性偏差预测模型和快速反射镜控制角映射模型可以显著提高系统的光束指向偏差矫正性能。光束指向性偏差预测模型可以为 FSM 的修正姿态的求解和姿态的调整提供足够的时间, 快速反射镜

控制角映射模型可以显著提高对 FSM 修正姿态的求解效率。

### 5 实验与结果讨论

为了验证光束指向性稳定系统的性能,在一个皮秒激光加工平台上进行实验。简化的实验光路如图 3 所示。所采用的激光器为 Coherent 生产的波长为 1064 nm 的皮秒激光器(Hyper Rapid),该激光器可以实现对碳纤维复合材料等难加工材料的精密加工,并有效降低热影响区的宽度。采用的 PSD 是 TEM 生产的 PSD2D,其对于光束位置的检测误差小于 1 μm。采用的 FSM 为 TEM 生产的 Aligna 40,这款 FSM 采用了微步进电机和压电陶瓷进行驱动,扫描范围为

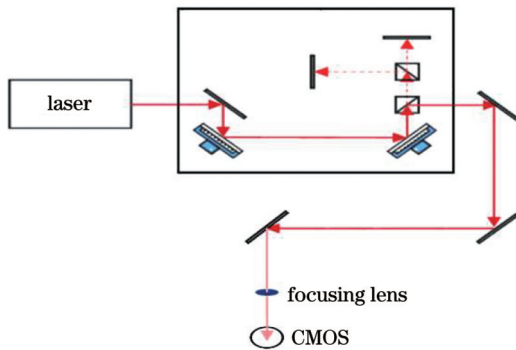


图 3 实验示意图

Fig. 3 Experiment diagram

±8°,且反馈误差小于 1 μrad。矫正后的光束依次通过三个反射镜,最后被焦距为 128 mm 的聚焦透镜聚焦到 DataRay 生产的 CMOS 光束质量分析仪 (WinCamD-LCM-1)上。采用光束质量分析仪自带的动态噪声和基线矫正软件,对于光束中心的检测误差小于 0.1 μm。每个部件都应尽可能准确地安装,因为它们对系统的性能有很大影响。此外,在实验过程中采用了较低的激光功率(1.5 W),以防止对 CMOS 光束质量分析仪造成损坏。

对于重复频率高达兆赫兹量级的超快激光,实现对单脉冲激光的光束指向性偏差的检测也是很困难的。由于超快激光的脉冲频率往往远高于光束指向性偏差的频率,可以忽略 PSD 一个采样周期内单个激光脉冲的光束指向性偏差的变化,并依据 PSD 采样得到的位置偏差来矫正光束。考虑到 FSM 的闭环带宽(5 kHz)和计算机的计算效率,将 PSD 的采样频率设置为 2 kHz。CMOS 光束质量分析仪虽然具有较高的采样频率,但其自带的软件的最大帧率仅为 60 Hz,因此无法实现对每个脉冲激光的指向性的分析,只能对采样的激光脉冲进行分析。

#### 5.1 光束指向性偏差预测模型性能分析

根据实验期间获得的部分 PSD 信号,将使用模型  $F_2$  计算的光束指向性偏差和使用模型  $P$  预测得到的光束指向性偏差进行比较,部分结果如图 4 所示。

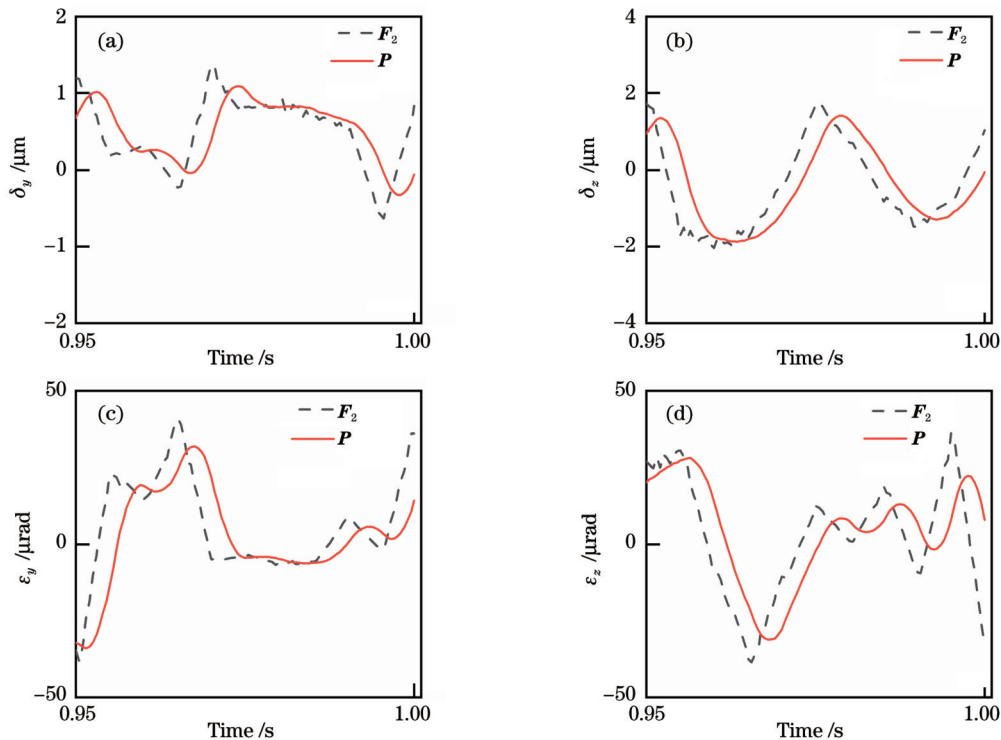


图 4 原始光束的指向性偏差预测结果。(a)  $\delta_y$ ; (b)  $\delta_z$ ; (c)  $\epsilon_y$ ; (d)  $\epsilon_z$

Fig. 4 Prediction results for incident laser pointing deviations. (a)  $\delta_y$ ; (b)  $\delta_z$ ; (c)  $\epsilon_y$ ; (d)  $\epsilon_z$

如图 4 所示,预测结果与计算得到的实际指向性偏差高度一致,说明模型具有较高的预测精度。可以

发现,预测的偏差比实际的偏差更平滑。这主要是因为模型  $P$  可以过滤掉偏差信号中的高频部分。此外,

对预测偏差和实际偏差进行更详细的比较发现,每个预测的指向性偏差都有轻微的滞后。当指向性偏差增加时,预测的偏差通常比实际偏差更小;当指向性偏差减少时,预测的偏差通常比实际的偏差要大。但总的来说,建立的光束指向性偏差预测模型具有较高的预测精度。

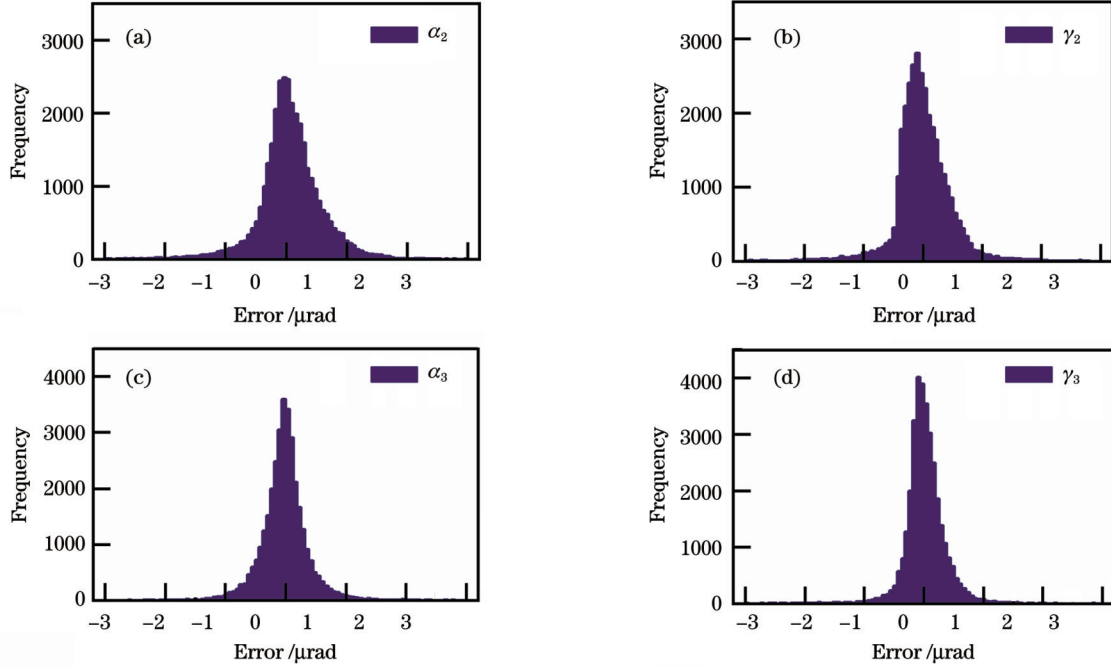


图 5 控制角映射模型计算误差分布。(a)  $\alpha_2$ ; (b)  $\gamma_2$ ; (c)  $\alpha_3$ ; (d)  $\gamma_3$

Fig. 5 Error distributions of control angles calculated using mapping model. (a)  $\alpha_2$ ; (b)  $\gamma_2$ ; (c)  $\alpha_3$ ; (d)  $\gamma_3$

由图 5 可见,与 FSM 的精确控制角相比,用映射模型得到的控制角的误差大部分都在  $1 \mu\text{rad}$  以内。在本实验中,FSM1 绕 X 轴和 Z 轴的旋转角大多在  $-40 \sim 40 \mu\text{rad}$  之间,FSM2 的旋转角在  $-20 \sim 20 \mu\text{rad}$  之间,因此  $1 \mu\text{rad}$  的角度偏差是可以接受的。由以上分析可以发现所建立的映射模型具有较高的准确性,可以代替模型  $G$  来计算 FSM 的控制角。此外,使用映射模型计算 FSM 控制角可以避免模型  $G$  中的大量运算,提高系统的响应性能。

### 5.3 光束指向性稳定系统性能分析

光束焦点相对于设定的加工点的偏移可以准确地反映出光束指向稳定性对加工精度的影响。光束指向稳定性越好,偏移量就越小。图 6 显示了在采用和未采用光束指向稳定系统的情况下,CMOS 检测到的光束位置偏移 ( $\delta_{ox}$  和  $\delta_{oy}$ )。

如图 6 所示,当光束指向性稳定系统工作时,光束指向稳定性明显改善;当光束指向性稳定系统关闭时,光束指向稳定性又下降了。此外,原始光束的焦点在 X 轴和 Y 轴上具有明显的固定偏移,而矫正后的光束的焦点不存在固定偏移。这主要是因为光束指向性偏差由静态和动态偏差两部分组成,构建的系统几乎能将静态偏差完全矫正。图 7 显示了对矫正前后的光束

### 5.2 映射模型性能分析

基于原始激光器的指向性偏差,将使用 4.2 中开发的快速反射镜控制角映射模型得到的 FSM 控制角与使用 3.2 中开发的模型  $G$  得到的 FSM 控制角进行了比较,以后者为基准,得到每个控制角的映射模型计算误差分布如图 5 所示。

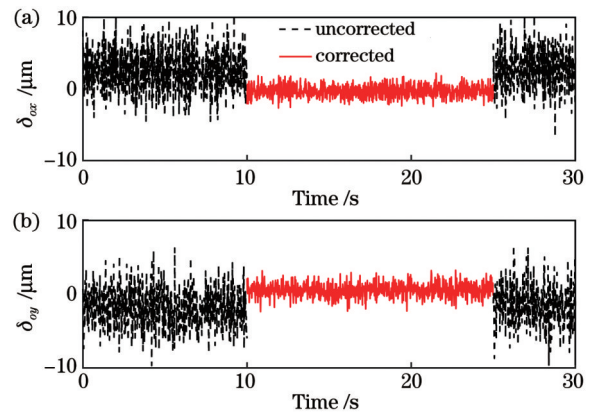


图 6 CMOS 检测到的位置偏移。(a)  $\delta_{ox}$ ; (b)  $\delta_{oy}$

Fig. 6 Position offsets detected by CMOS. (a)  $\delta_{ox}$ ; (b)  $\delta_{oy}$

焦点偏移的具体分析。

图 7 显示了光束矫正前后  $\delta_{ox}$  和  $\delta_{oy}$  的分布情况。可以发现,  $\delta_{ox}$  和  $\delta_{oy}$  在矫正前后都呈现高斯分布,而且  $\delta_{ox}$  和  $\delta_{oy}$  在矫正后都更加集中。当没有采用光束指向性稳定系统时,  $\delta_{ox}$  的平均值为  $2.69 \mu\text{m}$ ,而当采用了光束指向性稳定系统后,  $\delta_{ox}$  的平均值下降到  $-0.30 \mu\text{m}$ 。类似地,  $\delta_{oy}$  的平均值也从  $-1.82 \mu\text{m}$  变为了  $0.51 \mu\text{m}$ 。  $\delta_{ox}$  和  $\delta_{oy}$  的平均值可以认为是光束焦点的固定偏移,它反映了原始光束指向性偏差中的固定偏差。因此,

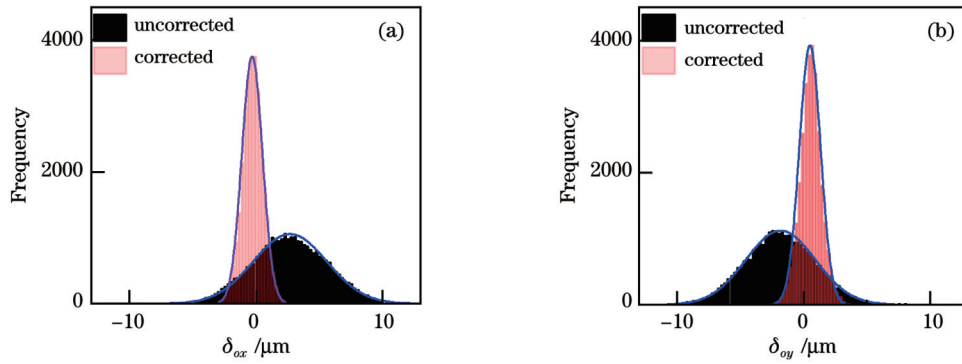


图 7 矫正前后光束焦点偏移分布。(a)  $\delta_{ox}$ ; (b)  $\delta_{oy}$

Fig. 7 Beam focus shift distributions before and after correction. (a)  $\delta_{ox}$ ; (b)  $\delta_{oy}$

比较矫正前后  $\delta_{ox}$  和  $\delta_{oy}$  的平均值可以得出结论, 光束指向性稳定系统能够显著减少原始光束指向偏差中的固定偏差。

$\delta_{ox}$  和  $\delta_{oy}$  的标准差分别从 2.90 和 2.74 降低到了 0.81 和 0.84。标准差可以代表光束指向性的动态稳定性。标准差越小, 光束的动态稳定性越好。对  $\delta_{ox}$  和  $\delta_{oy}$  分布的分析也可以说明系统在稳定光束指向性方面起到了明显的积极作用。此外, 引入以下公式来定量分析光束指向稳定性<sup>[27]</sup>:

$$\Delta\theta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left( \frac{\delta_j}{f} \right)^2}, \quad (39)$$

式中:  $\delta_j$  为第  $j$  个位置偏移;  $f$  为聚焦镜头的焦距;  $N$  为测量的位置偏移数据的总量。

未矫正的光束在  $X$  方向和  $Y$  方向的指向稳定性分别为  $30.93 \mu\text{rad}$  和  $25.71 \mu\text{rad}$ 。相比之下, 矫正后的光束在  $X$  方向和  $Y$  方向的指向稳定性为  $6.78 \mu\text{rad}$  和  $7.64 \mu\text{rad}$ , 分别改善了 78.08% 和 70.28%。尽管矫正后的光束的指向稳定性得到了极大的改善, 但仍有少量的指向偏差存在。这主要是因为光束指向性偏差预测模型和快速反射镜控制角映射模型都有一定的误差, 所以得到的 FSM 控制角并不能完全纠正光束指向性偏差。此外, 系统采用开环控制, 没有增加反馈控制, 各元器件的安装误差均会降低对指向性偏差的矫正精度。尽管如此, 结果仍然能够表明所建立的光束指向性稳定系统可以有效地提升光束指向稳定性。

## 6 结 论

本文为激光加工设备设计了一个光束指向性稳定系统, 并对光束指向性偏差的矫正过程进行建模。建立的光束指向性偏差预测模型具有较高的预测精度, 快速反射镜控制角映射模型的精度也可以得到保证。采用建立的系统使得光束在  $X$  方向和  $Y$  方向上的指向性偏差分别减少 78.08% 和 70.28%, 有效地提高了光束的指向稳定性。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang F R, Han J F, Ruan P. Beam pointing analysis and a novel coarse pointing assembly design in space laser communication[J]. *Optik*, 2019, 189: 130-147.
- [2] 邹婧. 高性能激光精密加工系统设计[J]. *现代制造技术与装备*, 2019(3): 41-42.  
Wu J. Design of high performance laser precision machining system [J]. *Modern Manufacturing Technology and Equipment*, 2019(3): 41-42.
- [3] Li Y F, Hu J, Liu W, et al. High period frequency LIPSS emerging on 304 stainless steel under the irradiation of femtosecond laser double-pulse trains[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(12): 123801.
- [4] Gong K L, Xu J, Zhang L, et al. High power pulse laser reflection sequence combination with a fast steering mirror[J]. *Chinese Physics Letters*, 2019, 36(7): 074204.
- [5] 范国滨. 光束稳定与振动控制的光机电一体化系统研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2004.  
Fan G B. Light-beam stability and vibration control of optomechanics systems[D]. Xi'an: Xidian University, 2004.
- [6] 黄忠伦. 基于 He-Ne 激光光束漂移的误差检测[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2005.  
Huang Z L. Error detection based on He-Ne laser beam drift[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [7] Harriman J, Serati S, Stockley J. Comparison of transmissive and reflective spatial light modulators for optical manipulation applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5930: 605-614.
- [8] 陈雷, 佟高峰, 齐芹, 等. 声光偏转器在定向激光通信跟踪单元的应用技术研究[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2013, 36(S1): 16-19, 23.  
Chen L, Tong S F, Qi Q, et al. Technology research of acousto-optic deflector used in fine tracking unit of directional laser communication[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 36(S1): 16-19, 23.
- [9] Wang L, Liu X L, Wang C Y. Line-of-sight kinematics modeling and correction for precision pointing systems based on a two-axis fast steering mirror[J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(8): 084110.
- [10] Chang Y H, Liu C S, Cheng C C. Design and characterisation of a fast steering mirror compensation system based on double Porro prisms by a screw-ray tracing method[J]. *Sensors*, 2018, 18(11): 4046.
- [11] Liu Y D, Gao C Q, Qi X Q. Field rotation and polarization properties of the Porro prism[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2009, 26(5): 1157-1160.
- [12] Chang H, Ge W Q, Wang H C, et al. Laser beam pointing stabilization control through disturbance classification[J]. *Sensors*,



- 2021, 21(6): 1946.
- [13] Lu Y F, Fan D P, Zhang Z Y. Theoretical and experimental determination of bandwidth for a two-axis fast steering mirror[J]. *Optik*, 2013, 124(16): 2443-2449.
- [14] 邱赛, 盛磊, 高世杰, 等. 激光通信旋转双棱镜系统误差对指向精度的影响[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(6): 1281-1290. Qiu S, Sheng L, Gao S J, et al. Influence of laser communication Risley prism system error on pointing accuracy[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(6): 1281-1290.
- [15] 周子夜, 冯忠毅, 黄林海, 等. 紧凑型压电式高性能快反镜结构设计[J]. *中国激光*, 2021, 48(13): 1305002. Zhou Z Y, Feng Z Y, Huang L H, et al. Structure design of compact piezoelectric fast steering mirror with high performance[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(13): 1305002.
- [16] Wang J, Huang L H, Hou L Y, et al. The beam delivery modeling and error sources analysis of beam stabilization system for lithography[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 9046: 90460S.
- [17] Zhang K, Chen F, Yang G L, et al. Precise measurement for beam pointing stability of high power repetition rate TEA CO<sub>2</sub> laser [J]. *Optik*, 2017, 131: 892-898.
- [18] 李鑫鹏, 于德洋, 潘其坤, 等. 极紫外光刻光源系统光束指向稳定性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(17): 1714004. Li X P, Yu D Y, Pan Q K, et al. Beam pointing stability of extreme ultraviolet lithography light source system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(17): 1714004.
- [19] Zhou Q K, Ben-Tzvi P, Fan D P, et al. Design of fast steering mirror systems for precision laser beams steering[C]//2008 International Workshop on Robotic and Sensors Environments, October 17-18, 2008, Ottawa, ON, Canada. New York: IEEE Press, 2008: 144-149.
- [20] 邱雄, 王仕成, 刘志国, 等. 激光导引头四象限探测器测角精度的建模研究[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(7): 20190453. Qiu X, Wang S C, Liu Z G, et al. Modeling research on angle measurement accuracy of four-quadrant detector of laser seeker[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(7): 20190453.
- [21] Wang X, Su X Q, Liu G Z, et al. Laser beam jitter control of the link in free space optical communication systems[J]. *Optics Express*, 2021, 29(25): 41582-41599.
- [22] 张兴亮, 王威, 吴佳彬. 激光通信系统中快速反射镜控制技术的研究[J]. *半导体光电*, 2021, 42(2): 289-294, 300. Zhang X L, Wang W, Wu J B. Research on fast steering mirror control technology of laser communication system[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2021, 42(2): 289-294, 300.
- [23] 杨红伟, 杜益冕, 吕立冬, 等. 基于差分成像的激光光束指向性控制[J]. *中国激光*, 2021, 48(17): 1705002. Yang H W, Du Y M, Lü L D, et al. Laser beam pointing control based on differential dual-view imaging[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(17): 1705002.
- [24] Genoud G, Wojda F, Burza M, et al. Active control of the pointing of a multi-terawatt laser[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2011, 82(3): 033102.
- [25] Chen Y T, Huang Y S, Liu C S. An optical sensor for measuring the position and slanting direction of flat surfaces[J]. *Sensors*, 2016, 16(7): 1061.
- [26] 张丽霞, 林妩媚, 廖志杰, 等. 校正激光光束指向漂移的算法研究[J]. *激光技术*, 2012, 36(3): 386-389. Zhang L X, Lin W M, Liao Z J, et al. Research of algorithm to correct direction drifts of laser beam[J]. *Laser Technology*, 2012, 36(3): 386-389.
- [27] Ding L, Li S S, Lu Z W, et al. Analysis of the beam-pointing stability in the high power laser system[J]. *Optik*, 2016, 127(15): 6056-6061.

## Beam Pointing Deviation Correction System Based on Fast Steering Mirrors

Ren Xingfei, Fan Jinwei\*, Pan Ri, Sun Kun

*Institute of CNC Precision Machining Technology, Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*

### Abstract

**Objective** Laser technology has gained widespread applications in various fields, such as communication, guidance, and precision machining. However, the accuracy of these applications is often compromised by beam pointing instability caused by uneven internal laser temperature and external environmental changes. Traditional methods of improving beam pointing stability, including using materials with low thermal expansion coefficients, adopting cooling systems and deformation mirrors, and reducing vibration, have proven to be limited in their effectiveness. More advanced lasers have internal beam pointing correction systems, but their performance is limited by their size, and they cannot correct pointing deviations caused by external factors. In view of these limitations, the use of an external beam pointing deviation correction system has emerged as a promising solution. The beam pointing deviation correction system based on fast steering mirrors (FSMs) is considered to be the most mature and effective approach. However, the Z-shaped beam path commonly used in these systems changes the propagation direction of the original beam, resulting in poor expansion performance. In this paper, we present a U-shaped beam pointing deviation correction system based on FSMs that does not change the original beam propagation direction. The system is modeled using geometric optics, including the mapping model from FSMs to four-term beam pointing deviations and the FSMs control model. To further enhance the system's performance, we propose a predictive control model, simplifying the model operation and improving the system responsiveness. Our results demonstrate that the constructed system exhibits excellent beam pointing deviation correction performance.

**Methods** The beam pointing deviation correction system consists of three main components: detector, controller, and actuator. The detector consists of a uniform beam splitter and two vertically distributed high-accuracy position-sensitive detectors (PSDs). The non-uniform beam splitter diverts a small portion of the beam from the main beam into the detector, where deviations in the beam's position from the center of the PSDs can be detected and used to determine beam pointing deviations. The controller is a computer that

implements four distinct models: a beam pointing deviation detection model, a FSM attitude control model, a beam pointing deviation prediction model, and a simplified FSM attitude control model. The beam pointing deviation detection model calculates the four beam pointing deviations from the position deviations of PSDs. The FSM attitude control model determines the control angles of the FSMs from the four beam pointing deviations to realize the correction of beam pointing deviations. The latter two models, i.e., the beam pointing deviation prediction model and the simplified FSM attitude control model, are constructed to achieve predictive correction of the beam pointing deviation. The beam pointing deviation prediction model is based on the mean deviation correction method and predicts future beam pointing deviations, while the simplified FSM attitude control model has a simpler operation and can rapidly obtain the control angle of the FSMs. The FSMs act as actuators, adjusting their attitude based on control signals to correct the beam pointing deviations and improve the beam pointing stability.

**Results and Discussions** The constructed beam pointing deviation prediction model has a slight lag in the prediction of beam pointing deviations, but it still has a high accuracy and can filter the high-frequency signals in the pointing deviations (Fig. 4). Therefore, the attitude of the corrected FSMs can be calculated based on the predicted pointing deviations. The simplified FSM attitude control model has a reliable accuracy (Fig. 5). The error between the FSMs' control angles obtained from the simplified model and the results calculated based on geometrical optics is within  $1 \mu\text{rad}$ . Therefore, the simplified model can be used to correct the beam pointing deviations. The experiments show that the constructed beam pointing deviation detection model and FSM attitude control model also have high accuracy. The beam pointing deviation correction system can effectively reduce the beam pointing deviations. Although the beam pointing deviations are not completely corrected due to the open-loop control without additional feedback, the errors of the beam pointing deviations in  $X$  and  $Y$  directions are reduced by 78.08% and 70.28%, respectively.

**Conclusions** A U-shaped beam pointing deviation correction system is designed, and a beam pointing deviation model and a FSM attitude control model are constructed based on geometric optics. Two PSDs are used to detect the beam pointing deviations, and two FSMs are used to correct the beam pointing deviations. A predictive beam pointing deviation correction model is proposed. A beam pointing deviation prediction model based on the average deviation correction method is constructed to correct the attitudes of FSMs based on the predicted beam pointing deviations rather than the real-time detections. The calculation of the control angles of the FSMs is simplified. A mapping model is constructed to calculate the control angle, which avoids solving the control angle in the original FSM attitude control model and effectively improves the response performance of the system. At last, experiments demonstrate that the developed system and model can effectively reduce the beam pointing deviations. The pointing deviations of the beam are reduced by 78.08% and 70.28% in the  $X$  and  $Y$  directions, respectively.

**Key words** optical design; laser beam transmission; optical path modeling; beam pointing deviation; fast steering mirror; position-sensitive detector