

基于偏转平移光路的激光束方位自动校准方法及系统

陈志峰 黎达宇 吴卓麒 钟永贤 谢龙豪 邓荣标

广州大学物理与电子工程学院, 广东 广州 510006

摘要 提出了一种基于偏转平移光路的激光束方位校准方法,采用转动与平动相结合的控制机构对激光束进行反馈偏移调节,以实现光路的自动校准及光束方位的稳定性控制。采用两个探测器对光束的方向和位置进行检测,通过简单的校准光路设计,在水平和垂直方向上实现了对光束角度偏移和平行偏移的反馈式分离调节,避免了调节过程中不同偏移量之间的耦合影响。引入的平行偏移控制对光传输距离不敏感,因而有利于提高调节的稳定性和精确性。进一步介绍了基于该方法搭建的光束校准系统,实验结果表明该系统能够实现预期的校准效果。

关键词 光学设计; 光束校准; 偏转平移; 激光束方位; 反馈偏移调节

中图分类号 O439 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0722003

Automatic Calibration Method and System of Laser Beam Orientation Based on Deflection and Translation of Optical Paths

Chen Zhifeng Li Dayu Wu Zhuoqi Zhong Yongxian Xie Longhao Deng Rongbiao

School of Physics and Electronic Engineering, Guangzhou University,

Guangzhou, Guangdong 510006, China

Abstract A new method of laser beam orientation calibration based on deflection and translation of optical path is proposed. In order to realize automatic calibration of optical path and stable control of laser beam orientation, a control mechanism with a combination of rotation and translation is adopted to carry out feedback deviation adjustment of laser beams. Two detectors are used to measure the direction and position of laser beams. Via a simple design of optical path calibration, the independent feedback adjustment of angular deviation and parallel deviation along the horizontal and vertical directions can be realized, and the coupling among different deviation in the adjustment process can be avoided. The introduced parallel deviation control is not sensitive to propagation distance, and therefore it is beneficial to enhancing the adjustment stability and accuracy. Moreover, the laser beam orientation calibration system based on this method is set up. The experimental results show that with this system the expected calibration effect can be achieved.

Key words optical design; beam calibration; deflection and translation; laser beam orientation; feedback deviation adjustment

OCIS codes 220.4830; 120.1680; 120.4570

1 引 言

激光由于具有良好的相干性、单色性、方向性以及高强度等特点,被广泛应用于工业测量、加工以及前沿科学等众多领域。长距离传输或精密测量等方面的应用通常对激光束的指向稳定性要求很高。如脉冲载波包络相位控制^[1]、时间分辨磁光克尔光谱^[2]等,均要求激光束在较长时间范围内具有高稳定性。但由于激光器谐振腔受温度形变、传输路径上光学元件的不稳定性以及各种环境扰动因素的影响^[3],激光束存在微量的方位变化,包括方向(角度)偏移和位置(平行)偏移^[4]。偏移量较大时,会影响后端系统的工作稳定性。此外,在实际工作中需要在不同的工作环境下重新恢复光学系统的光路,对于复杂的光学系统,精确的光路恢

收稿日期: 2016-01-26; 收到修改稿日期: 2016-03-17

基金项目: 国家自然科学基金(11204044, 11404071)、国家级大学生创新训练项目(2014111078016)、广东省自然科学基金(2014A030313523)、广州大学教学研究项目(JY201445)

作者简介: 陈志峰(1982—),男,博士,讲师,主要从事超快光电子学与技术方面的研究。E-mail: chenzzf@gzhu.edu.cn

复非常困难。因此,方便、精确的光束校准方法在激光技术应用领域有着重要意义。

在光束偏移量控制或抑制方面,国内外学者提出了很多方法,主要包括干涉/衍射法^[5-6]、单模光纤法^[7]和反馈控制法^[4,8-9]。前两类方法一般只用于提高光束的指向稳定性,其中干涉/衍射法利用的是条纹线而非入射光束本身,单模光纤法对光源有选择性,这些特点限制了这两类方法的应用范围。而结合光电检测技术与光束偏移调节技术的反馈控制法,既可用于提高光束的指向稳定性,又可用于光路的校准恢复。一般来说,不同的应用对调节精度和调节范围有不同的要求。在偏移检测和校准光路设计上,以往一些方法采用单一目标检测^[10],不能实现光束方向与位置的完全检测和恢复。有学者提出利用透镜聚焦和平行镜对光束的平行偏移量进行分离检测和调节^[4,8],这种方法可实现光束方位的稳定性控制,但其机械调整仍属于角度调节,精度的调节依赖于压电陶瓷驱动的高精度调节机构。李耀等^[9]研究的激光自动准直系统,采用两个 CMOS 传感器对激光的空间方位进行探测,可以达到很高的调节速度和精度,但该系统欠缺对水平、竖直偏移量控制的具体光路设计。本文提出了一种基于简单的偏转平移光路的激光束方位校准方法,采用转动与平动相结合的控制机构,对光束在水平、竖直方向上的角度偏移和平行偏移进行分离调节和动态校准,并介绍了基于该方法的校准系统。

2 校准光路及方法

一般而言,完全确定光束的位置需要两个目标物,而完全记录光束的位置和方向并在其发生偏移后实施恢复,则需要两个探测器^[9]。由于光学系统中各种不可控因素,例如激光器谐振腔温度形变、传输路径上光学元件的不稳定性等,所引起的激光束的偏移可分为角度偏移和平行偏移^[4]。虽然角度偏移量一般较小(如谐振腔温度形变所致的角度偏移量一般小于毫弧度量级),但其影响会随传输距离的增大而增大,而平行偏移量不会随传输距离变化。因此设计了如下校准光路,该光路基于双探测器以及简单的调节机构和光路,可实现角度偏移和平行偏移的二维分离控制。

校准光路的实验原理图如图 1 所示,即光路俯视图(X - Y 平面图)。光阑 $D1$ 、 $D2$ 可以确定后端光学系统所要求的精确光束位置,即光束校准的特定目标方位。 $M1 \sim M4$ 为反射镜,其中 $M2$ 和 $M4$ 安装在电控机构上。 W 为楔形分光片,光束通过 W 时,反射出两束较弱的光,分别进入探测器 $C1$ 和 $C2$,滤光片 F 用于调节进入探测器的光强。 W 至 $C1$ 、 $C2$ 的反射距离不同,因此落在 $C1$ 、 $C2$ 上的光斑位置确定时,出射光束的方位即被确定。光束调节过程中, $C1$ 和 $C2$ 各自记录光斑信息,并传给控制器。控制器通过计算分析光斑位置来判断光束偏移信息,并控制 $M2$ 和 $M4$ 进行反馈调节。

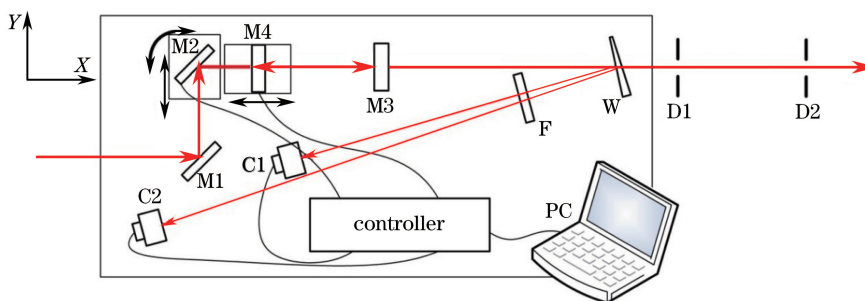


图 1 实验原理图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

为了实现角度偏移和平行偏移的二维分离控制,将光束在 $M2 \sim M4$ 间反射传输的光路进行了特殊设计。 $M2 \sim M4$ 的光路侧视图(X - Z 平面图)如图 2 所示。光束在水平面内入射,经固定反射镜 $M1$ 水平反射后入射到 $M2$ 。 $M2$ 由电控机构带动,可在水平面(X - Y 平面)内转动并可沿 Y 方向平移,即反射光仍然在水平面内。转动 $M2$ 可调节光束的水平偏转角度,平移 $M2$ 可使光束在水平面内平移。随后,光束经由固定反射镜 $M3$ 反射后入射到 $M4$,最后水平出射。 $M3$ 和 $M4$ 的反射只改变光束的高度,不改变光束在水平面内的位置(图 1),其反射角的大小影响竖直方向平行偏移量的调节精度。 $M4$ 由电控机构带动,可在竖直面(X - Z 平面)内转动且可沿 X 方向平移。因此转动 $M4$ 可调节光束竖直方向的偏转角度,平移 $M4$ 可使光束在竖直面内平移。该设计简单实现了对水平面及竖直面内的角度偏移和平行偏移的独立调节,避免了调节过程中不

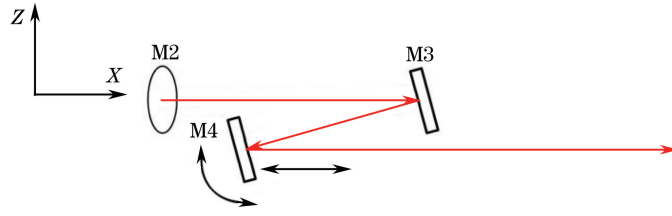


图 2 M2~M4 的光路侧视图

Fig. 2 Side view of light path from M2 to M4

同偏移量之间的耦合影响。因为光束的平行偏移对光传输距离不敏感,平移控制的引入有利于提高调节的稳定性和精确性。注意到出射光束高度低于入射光束高度,如需要可通过加入平行镜等方法提高出射光束高度。

根据 C1、C2 获得的光斑位置可判断光束的偏移信息。对于微小的角度偏移,设 C1、C2 上光斑中心相对于目标位置的水平偏离量分别为 Δx_1 、 Δx_2 , 竖直偏离量分别为 Δy_1 、 Δy_2 , W 到 C1、C2 的距离差为 d , 则光束在水平方向和竖直方向上的角度偏移量分别为

$$\Delta\theta_x \approx (\Delta x_2 - \Delta x_1)/d, \quad (1)$$

$$\Delta\theta_y \approx (\Delta y_2 - \Delta y_1)/d, \quad (2)$$

水平方向和竖直方向上的平行偏移量分别为

$$\Delta s_x = (\Delta x_1 + \Delta x_2)/2, \quad (3)$$

$$\Delta s_y = (\Delta y_1 + \Delta y_2)/2. \quad (4)$$

对于光束角度偏移量的校准,通过实时检测 $\Delta\theta_x$ 和 $\Delta\theta_y$, 反馈控制 M2 和 M4 的转动,可分别使 $\Delta\theta_x$ 和 $\Delta\theta_y$ 降至最小值(主要取决于调节机构的角度调节精度)。而对于平行偏移量的校准,通过实时检测 Δs_x 和 Δs_y , 反馈控制 M2 和 M4 的平移,可分别使 Δs_x 和 Δs_y 降至最小值(主要取决于调节机构的平移调节精度),此时认为光束被调节至目标方位。实际应用中,应根据 D1、D2 所确定的后端光学系统对光束方位精度的要求设计调节机构的调节精度。

3 系统设计

基于上述方法,设计搭建了激光束方位校准系统,系统构成如图 1 所示。考虑到校准系统主要用于抑制由激光器谐振腔温度变化造成的光束方位偏移及实现实验光路的快速恢复,对快速响应没有要求,为了提高探测精度以及系统的扩展性^[9],C1 和 C2 均采用 1280 pixel×1024 pixel 的 CMOS 图像传感器。考虑后端实验系统对光束精度的需求,要求校准系统出射光束的角度偏移量小于 5×10^{-5} rad, 平行偏移量小于 20 μm 。因此 M2 和 M4 的控制机构采用通用的步进电机和电控平移台,步进电机的角度分辨率约为 1.2×10^{-5} rad, 电控平移台的分辨率为 1 μm 。对于调节精度要求更高的应用,可置换分辨率更高的器件。控制器是基于单片机(STM32, STMicroelectronics 公司, 瑞士)自行开发的,可读取 C1 和 C2 采集的光斑图像数据,采用一阶矩法计算光斑的中心位置^[10-11]:

$$\bar{x} = \frac{\sum_i I(x_i, y_i) x_i}{\sum_i I(x_i, y_i)}, \quad (5)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_i I(x_i, y_i) y_i}{\sum_i I(x_i, y_i)}, \quad (6)$$

式中 (x_i, y_i) 为任意像元的位置坐标, $I(x_i, y_i)$ 为该像元获得的光强度值。偏移量 $\Delta x = \bar{x} - x_0$, $\Delta y = \bar{y} - y_0$, 目标位置 (x_0, y_0) 可以根据后端系统需要初设给定,也可以手动设置。根据(1)~(4)式可计算得到角度偏移量和平行偏移量。利用控制器分别驱动步进电机和电控平移台,进而控制 M2 和 M4 的转

动和平移,对光束在水平面和竖直面上的角度偏转和平行偏移分别进行调节,调节步幅与当前偏移量大小相关。循环进行实时检测和反馈调节,直至 $\Delta\theta_x$ 和 $\Delta\theta_y$ 、 Δs_x 和 Δs_y 降至最小或低于误差上限。

控制器与上位机(PC)实时通信,利用 C# 语言编写的上位机控制程序可以监测光斑与偏移信息、设置硬件参数以及人工控制校准过程。考虑到较多应用场合中环境光噪声及探测器椒盐噪声对光斑信息的探测分析有一定影响,上位机中设置了小波去噪程序。需要时控制器将原始光斑图像信息传给上位机,程序通过稀疏主成分分析得到小波滤波器组(置换光源或实验环境后进行),对原始图像进行小波变换及阈值化处理后,上位机程序对去噪优化后的图像进行计算得到偏移信息并回传到控制器。这种优化处理只改善光斑图像质量,对原光斑特征并无影响。

4 实验测试

在系统后端距离分光片 W 约 1100 mm 处放置 CMOS 图像传感器 C3(1280 pixel \times 1024 pixel,像素元尺寸为 3.6 μm),用于监测该处的光斑偏移量。测试激光在该处的光斑直径约为 500 μm 。每次测试前,均使激光束对准目标位置(x_{10}, y_{10})和(x_{20}, y_{20})(分别对应 C1 和 C2),定义此时 C3 上的光斑偏移量为零。对光束引入随机的水平方向偏移后,启动系统校准光束,C3 上检测到的水平及竖直光斑偏移量随时间的变化分别如图 3(a)、(b)所示。由图可见,光斑中心的水平坐标在经过一段调节过程后向零偏移位置逼近,并最终稳定在零偏移附近;光斑中心的竖直坐标在校准过程中基本无变化。这表明光束的水平偏移调节与竖直偏移调节之间的独立性,图 3(a)中的水平偏移调节主要来自 M2 的受控转动与平移。

对光束引入随机的水平偏移和竖直偏移,校准过程中水平及竖直方向的光斑偏移量变化分别如图 4(a)、(b)所示。用于监测的探测器 C3 放置于光束出射远点,C3 上的水平和竖直偏移被调节为零,表明由(x_{10}, y_{10})和(x_{20}, y_{20})确定的光束方位被恢复。引入的水平偏移量与竖直偏移量大小不同,但两者调节过程相似,均经历了一个快过程和一个慢过程,这是由于 M2 和 M4 的偏转和平移步幅被设置为与实时偏移量大小相关。受限于所采用的运动控制机构的精度,C3 上获得的光斑中心位置精度约为 15 μm ,调节速度较慢是由于在偏移检测中采用了图像采集和图像处理。

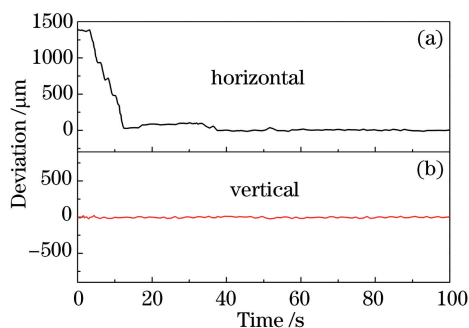


图 3 水平偏移光束的校准过程。(a) 光斑的水平方向位置变化;(b) 光斑的竖直方向位置变化

Fig. 3 Calibration process of optical beams with horizontal deviation. (a) Horizontal position variation of optical spot; (b) vertical position variation of optical spot

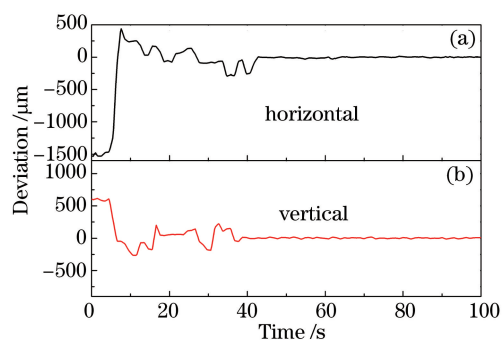


图 4 二维偏移光束的校准过程。(a) 光斑的水平方向位置变化;(b) 光斑的竖直方向位置变化

Fig. 4 Calibration process of optical beams with two-dimensional deviation. (a) Horizontal position variation of optical spot; (b) vertical position variation of optical spot

5 结 论

提出了一种基于偏转平移光路的激光束方位校准方法,在采用两个探测器对光束的方向与位置进行检测的基础上,通过简单的光路设计,结合转动与平动的控制方式,在水平、竖直方向上实现了对光束角度偏移和平行偏移的分离反馈调节。该方法避免了调节过程中不同偏移量之间的耦合影响,而引入的平行偏移控制对光传输距离不敏感,因而有利于提高调节的稳定性和精确性。同时基于该方法设计搭建了光束校准系统,实验结果表明该系统能够实现预期的光束方位校准效果。

参 考 文 献

- 1 Gagnon E, Thomann I, Paul A, *et al.*. Long-term carrier-envelope phase stability from a grating-based, chirped pulse amplifier[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(12): 1866-1868.
- 2 Chen Z F, Li S F, Lai T S. Laser-induced transient strengthening of coupling in L^{10} -FePt/FeNi exchange-spring film[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2015, 48(14): 145002.
- 3 Fang Zhongyan, Yin Chunyong, Liang Jinwen. Study on high accuracy laser alignment technique[J]. *Aviation Metrology & Measurement Technique*, 1997, 17(1): 3-6.
方仲彦, 殷纯永, 梁晋文. 高精度激光准直技术的研究[J]. *航空计测技术*, 1997, 17(1): 3-6.
- 4 Zhao Weiqian, Tan Jiubin, Ma Hongwen, *et al.*. Laser collimation method based on the drift feedback control[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(3): 373-377.
赵维谦, 谭久彬, 马洪文, 等. 漂移量反馈控制式激光准直方法[J]. *光学学报*, 2004, 24(3): 373-377.
- 5 Hao Q, Li D C, Wang Y T. High-accuracy long distance alignment using single-mode optical fiber and phase plate[J]. *Optics & Laser Technology*, 2002, 34(4): 287-292.
- 6 Luo D, Kuang C F, Hao X, *et al.*. High-precision laser alignment technique based on spiral phase plate[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(7): 944-949.
- 7 Feng Q B, Zhang B, Kuang C F. A straightness measurement system using a single-mode fiber-coupled laser module[J]. *Optics & Laser Technology*, 2004, 36(4): 279-283.
- 8 Zhao W Q, Tan J B, Qiu L R, *et al.*. Enhancing laser beam directional stability by single-mode optical fiber and feedback control of drifts[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, 76(3): 036101.
- 9 Li Yao, Wang Ding, Guo Xiaoyang, *et al.*. Fast and accurate laser beam automatic alignment system based on CMOS sensor[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(9): 0916002.
李 耀, 王 丁, 郭晓杨, 等. 基于 CMOS 传感器的高速高精度激光光束自动准直系统[J]. *中国激光*, 2013, 40(9): 0916002.
- 10 Wang Chunyang, Li Jinshi. Detection of laser spot drift[J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, 28(2): 205-208.
王春阳, 李金石. 激光光斑漂移的检测[J]. *应用光学*, 2007, 28(2): 205-208.
- 11 Zeng Peiyang, Liu Daizhong, Peng Zengyun, *et al.*. Research of auto-alignment system based on ethernet[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(3): 0302009.
曾沛颖, 刘代中, 彭增云, 等. 基于以太网的自动准直系统研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(3): 0302009.