

文章编号: 0253-2239(2008)08-1590-06

激光光束实时监测与自动准直系统设计

尉鹏飞^{1,2} 刘 军¹ 李晓芳¹ 陈晓伟¹ 刘 鹏¹ 李儒新¹ 徐至展¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 设计了一个激光光斑实时监测与光路自动准直装置,能够实时监测激光光斑并自动准直激光输出方向。基于透镜成像原理,使用 CCD 探测器获得光斑的二维成像,并根据两点确定一条直线原理和使用压电陶瓷电动调整架实现光路自动准直;监测控制程序采用虚拟仪器开发软件 Lab View 编写,可以实时监测激光光斑模式与光斑位置抖动情况,并进行反馈控制。经测试,设计装置的调整精度达 $0.5 \mu\text{rad}$,反馈控制频率约 1 Hz,完全可降低或消除抖动周期在 1 s 以上的光斑飘移。

关键词 光学设计; 实时监测; 自动准直; 程控

中图分类号 TP242; TP273.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082808.1590

Design of Laser Beam Real-Time Monitoring and Adaptive Collimation System

Wei Pengfei^{1,2} Liu Jun¹ Li Xiaofang¹ Chen Xiaowei¹ Liu Peng¹ Li Ruxin¹ Xu Zhizhan¹

(¹ State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of sciences, Shanghai 201800, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract A new device is developed for real-time monitoring of laser beam quality and adaptive collimating of laser beam direction. Based on lens imaging principle, the device is composed of one CCD camera for two-dimensional imaging of laser spot and two piezoelectrically driven mirrors to correct laser beam shift by the principle of two points exactly defining a line in space. The adaptive control is performed through a home-made computer program using Lab View software. The system can collimate the beam direction in a resolution of $0.5 \mu\text{rad}$ and 1 Hz adjusting frequency, and correct the laser spot shift of period above 1 s.

Key words optical system design; real-time monitoring; adaptive collimation; program control

1 引 言

在大型高功率激光核聚变装置中,如美国诺瓦装置(Nova)、日本激光-12(GEKKO-12),我国的“神光-III”装置等,为了确保振荡器发出的激光束能够稳定、精确地穿过预放大器、主放大器、倍频器、靶室,并精确地照射到微型靶丸上,均配置了光路自动准直系统。但在中小型高重复频率的激光装置中,

如超快飞秒激光装置,自动准直系统并不多见,但光束的空间指向稳定性对超快激光物理实验研究非常重要,如空心光纤脉冲自压缩^[1,2]、载波包络相位稳定^[2,3]、超快抽运探测^[4]等要求光束的空间指向在较长时间内保持稳定。然而由于环境温度变化引起镜架的热胀冷缩、实验仪器震动引起实验平台的震动以及空气的扰动等因素都会使激光光束的方向发生

收稿日期: 2007-11-12; **收到修改稿日期**: 2008-03-27

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KGCX-YW-417-2)、国家基金重点项目(2006CB806001)和上海市浦江人才计划项目(07pj14091)资助课题。

作者简介: 尉鹏飞(1981—),男,博士研究生,主要从事原子分子与激光强场相互作用等方面的研究。

E-mail: personinjoy@hotmail.com

导师简介: 李儒新(1969—),男,博士,博士生导师,从事强激光与物质相互作用等方面的研究。

E-mail: ruxinli@mail.shcnc.ac.cn

不同程度的偏移,特别是较复杂的激光系统,光路较长,影响更加明显。因此,自动准直装置对超快激光物理实验研究非常有用,可以提高实验研究的精度。

大型高功率激光装置由于重复频率低且激光脉冲能量大,自准直系统一般需要外加准直光源,并且由于系统庞大常需要使用两个 CCD 来分别测量光束的近场和远场位置^[5~9],使得其自准直装置结构复杂,反馈过程迟钝,而且自准直装置内镶在整个系统内部,独立性差、可移植性不强,不适合应用到更为常用的中小型激光系统上。本文针对更为常用的中小型的高重复频率激光系统,设计了一套新的光斑实时监测与光路自动准直装置,结构紧凑、调节简单,独立性和可移植性强——能够集成在一块 0.5 m^2 的实验平板上,可为超快激光物理实验研究提供实时的激光光斑模式并自动准直光束的空间指向。

2 光路准直原理及光学系统设计

系统设计主要实现两项功能:一是光斑监测,实时监测激光光斑模式与光斑空间指向的抖动;二是反馈控制,使得输出光束自动准直。

2.1 光路准直原理

光路自动准直系统是根据两点确定一条直线的原理来实现光路的自动调整准直。在激光核聚变等大型激光装置中,通常以近场和远场作为准直线的两点,一点取在光路像传递像面处(光学元件的几何中心),称为近场;另一点取在焦点处,相当于无穷远的位置,称为远场。在近场监视光束的平移,在远场监视光束的角移,然后通过光路中两块反射镜的配合调节纠正其角移和平移,使得经过两块反射镜后出射的光线和理想的光线方向重合,从而实现光路的准直^[5~9]。

设计用两个基准点取代近场点和远场点,两基准点均取在光学元件的几何中心,通过光学元件漏过的弱光或反射的少量分束光来监测光斑在两个基准点处的偏移,然后用偏移信号反馈控制光路上的两块反射镜,使光束恢复通过基准点,实现光路的复原,从而达到光路准直的目的^[10]。同以往大型装置的自准直系统相比,这种设计不需要外加准直光源,既简化了光路结构又不破坏原系统光路。具体而言,将光斑在基准点处的偏移分成 X 方向(水平方向)和 Y 方向(垂直方向)的偏离,通过电动反射调整镜的两维调节来纠正其 X 方向和 Y 方向的偏离。以水平面 X 方向为例,假设某时光路偏离了标准方向,如图 1(a),虚线为开始时的标准方向,实线为发生偏移后有待准直的光路, M_1 和 M_2 为电动反射调整镜, P_1 和 P_2 为光路中的两个基准点(元件几何中心), P'_1 和 P'_2 为 P_1 和 P_2 的像点, X_1 和 X_2 为光斑中心坐标 X 值, X'_1 和 X'_2 为 X_1 和 X_2 的像点,通过像点 X'_1 、 X'_2 和成像放大(缩小)倍数 M 计算出 X_1 、 X_2 点的实际偏离量分别为 $\Delta X_1 = (X'_1 - P'_1)/M$ 和 $\Delta X_2 = (X'_2 - P'_2)/M$ 。然后通过调节 M_1 使得光斑 X_1 重新回到 P_1 点,如图 1(b),光束需要校正的角度为 $\theta_{1x} = \Delta X_1/L_1$, L_1 为 M_1 点到 P_1 点距离,因此 M_1 需调整的角度为 $\theta'_{1x} = \theta_{1x}/2$;再调节 M_2 使得光斑 X_2 同时回到 P_2 点,如图 1(c),考虑到 M_1 的调节也会影 X_2 点的坐标偏移,调节 M_2 过程中还需要补偿 M_1 调节的影响,因此 M_2 需校正角度为 $\theta'_{2x} = [\Delta X_2 - (L_1 + L_2)\Delta X_1/L_1]/2L_2$, L_2 是 M_2 到 P_2 的距离。

同理纠正垂直面 Y 方向的偏离,使光束在 X 方向和 Y 方向都重新回到 P_1 、 P_2 点,这样过两个基准点后光路便实现了准直。

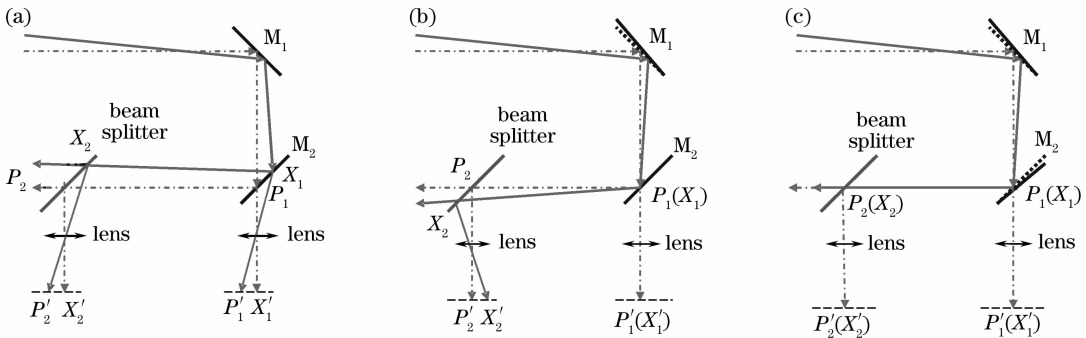


图 1 准直原理图。(a)光路偏离原始准直方向,(b)调节 M_1 使光路过 P_1 点,(c)再调节 M_2 使光路过 P_2 点

Fig. 1 Principle of collimation. (a) Laser beam shift, (b) let beam center pass point P_1 by tuning M_1 ,

(c) let beam center pass point P_2 by tuning M_2

2.2 光学系统结构设计

激光光斑实时监测与光路自动准直装置的光学系统结构如图 2 所示,在光路中利用反射镜 M_2 漏过的弱光和分束器反射的少量分束光将基准点 P_1 、 P_2 处的光斑通过透镜等比成像到 CCD 上,其图像通过图像采集卡传输到计算机进行检测。等比成像可以反映物光斑的真实大小和真实抖动情况,也可根据需要将光斑进行缩放成像,以适应 CCD 探测面积,计算处理光斑时再按缩放比例进行还原。反馈控制部分采用高精度的二维压电陶瓷电动镜架 M_1 和 M_2 来调整光路, P_1 点通过 M_1 来调节, P_2 点通过 M_2 来调节,其中 P_1 点到 P_2 点的间距决定了装置的稳定精度,为了保证足够的精度,距离越长越好,但有使用上的限制,该装置选取 M_1 到 P_1 的距离 $L_1=1\text{ m}$, M_2 到 P_2 的距离 $L_2=1\text{ m}$ 。此外,CCD 的像素大小、光斑大小、光斑测量与数据处理速度等都会影响系统的稳定精度,CCD 像素越小、光斑越大、处理速度越快,则光斑稳定精度越高。装置的压电陶瓷电动镜架通过驱动器来驱动,驱动器通过控制器与计算机相连,形成一个闭环循环。

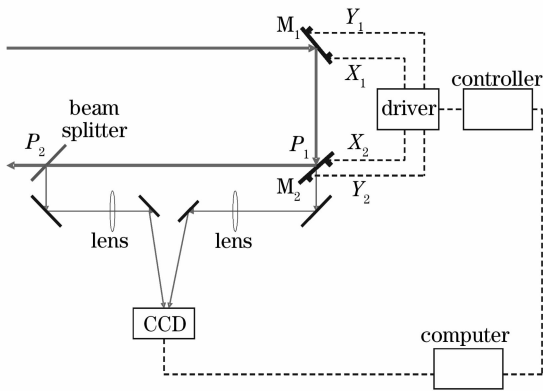


图 2 激光光斑实时监测与自动准直装置示意图

Fig. 2 Schematic of laser beam real-time monitoring and adaptive collimation device

本设计的操作流程如下:首先 CCD 采集两个基准点的激光光斑,通过图像采集卡将模拟图像信号转换为数字图像信号存储并显示在计算机中。控制程序一方面实时监测两个基准位置处的光斑模式与光斑抖动情况,另一方面计算两个光斑中心与设定的基准点的偏差量,再结合光路和电动调整架的驱动精度等参量计算出电动镜架需要调整的步数和方向,最后控制程序通过控制器向驱动器发出驱动指令驱动镜架,调整水平方向 X_1 、 X_2 和垂直方向 Y_1 、 Y_2 的偏移量,使得激光重新回到 P_1 和 P_2 两个基准点上,从而使光束自动准直。

3 监测控制程序编写

设计的控制程序采用虚拟仪器图形编程软件 LabView 来编写^[11,12]。程序分光斑采集、图像处理和反馈控制三个部分:

1) 光斑采集需要调用动态连接库来驱动图像采集卡。程序通过调用动态连接库的功能函数可以设置图像的亮度、位数、饱和度、色度、缓冲大小等。经过一系列参量初始化后,调用图像抓拍功能函数抓拍图像到缓存,即可将缓存区的光斑图像直接调入 LabView 的图形处理程序。

2) 图像处理包括滤掉杂散小光斑、强度阈值化、边沿平滑处理、光斑中心坐标计算、中心坐标偏移量计算等。在光斑采集,光斑数应为 2 个,但由于 CCD 测得的可能是其他地方的反射或者光斑本身带有小的杂散光斑而多于 2 个,因此在图像处理程序中,首先利用图像模块的去小光斑功能去除图像中可能存在的杂散小光斑,利用图像模块的阈值功能对采集到的激光光斑进行阈值化处理,阈值范围可以手动调节以获得最佳的光斑形状,然后利用图像模块的形态功能来平滑激光光斑的边缘,最后利用图像模块的光斑分析功能精确计算出光斑几何中心。计算得到的两个光斑中心坐标与设定的基准点坐标相减便得到两个光斑中心坐标的偏移值,再将中心坐标偏移值输入波形显示图中,实时监测光斑中心坐标的抖动情况。同时,将优化处理后的光斑图像也实时显示在界面上,以便更加直观地观测激光光斑模式。

3) 反馈控制采用了快速简单的直接校正算法,包括测量、比较和执行三部分。首先利用图像处理计算得到光斑中心几何位置,然后与基准位置相比较,得到需调整光束的偏移量,根据这一偏移量驱动压电陶瓷电动镜架直接完成光路调整。以 P_1 处 X 方向为例,假设光斑中心位置与基准点位置的偏移量为 ΔX_1 ,光束需要校正的角度为 θ_{1x} ,因此电动镜架 M_1 需调整的角度为 $\theta_{1x}/2$,而装置的压电陶瓷电动镜架在标准微调情况下单步的精度为 $\Delta L=30\text{ nm}$,镜架的长 $L_M=54\text{ mm}$,得出镜架需要驱动的步数为 $(\Delta X_1 L_M)/(2L_1 \Delta L)$,再将计算得到的调整步数和方向翻译成控制指令发送给驱动器,驱动器根据指令发送电信号驱动压电陶瓷电动镜架完成光路 X_1 方向调整的执行,同理再依次校正 Y_1 、 X_2 、 Y_2 回到基准位置,使得激光重新回到 P_1 和 P_2 两个基准点上,实现光束的自动准直。由于环境对光束指向扰动的多样性、复杂性和随机性,无法预测光束指

向抖动的趋势,加上从测量到执行具有一定的延迟,因此直接校正算法具有一定的滞后性,但相比“神光-Ⅱ”自准直系统的小步逼近算法,直接校正算法在中小型激光装置中具有应用优势,不仅算法简单,而且最大限度地提高了系统的反馈速度。

4 应用实例和测试结果

在实验室自行搭建的 1 kHz 飞秒激光系统上的空心光纤脉冲自压缩装置中,为了使激光束能精确稳定地穿过直径为 $200\ \mu\text{m}$ 的空心光纤,对激光系统输出光束的空间指向稳定性提出了很高的要求。本设计应用到此系统后,激光束能长时间稳定并精确地穿过后端的空心光纤,有效地提高了空心光纤的光谱展宽和能量耦合的稳定性,光路如图 3 所示。

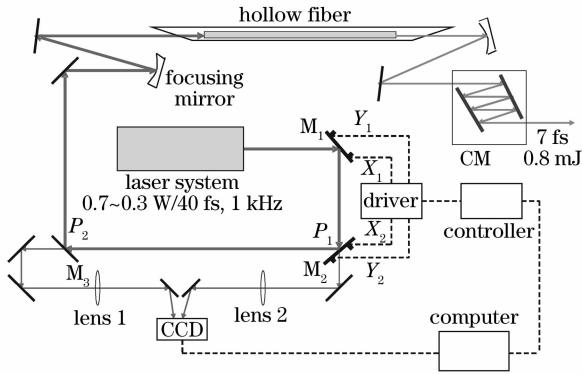


图 3 自准直系统光路图

Fig. 3 Optics of adaptive collimation system

激光光源是光谱物理公司生产的钛宝石再生放大激光系统,其输出的中心波长为 $800\ \text{nm}$,重复频率为 $1\ \text{kHz}$,输出脉冲半峰全宽为 $40\ \text{fs}$ 。装置的压电陶瓷电动镜架是美国新焦点公司的 iPico 产品,在标准微调情况下单步的精度为 $30\ \text{nm}$,镜架的长高均为 $54\ \text{mm}$,所以镜架的调整精度接近于 $0.5\ \mu\text{rad}$ 。摄像头的有效探测大小为 $7.95\ \text{mm} \times 6.45\ \text{mm}$,单个像素大小为 $8.6\ \mu\text{m} \times 8.3\ \mu\text{m}$,图像采集卡为大恒公司的 CG410 板卡。

图 4(a)是 CCD 监测到的两基准点处的原始激光光斑,图 4(b)是经过去杂散小光斑、去噪声、强度阈值化^[13]等处理后的优化光斑,可见能更加直观地观测激光光斑模式,便于光斑中心坐标的计算。

图 5 是反馈控制前后两基准点处光斑中心坐标位置抖动的情况,其中第 1 条对应 P_1 处水平方向 X_1 的抖动,第 2 条对应 P_1 处垂直方向 Y_1 的抖动,第 3 条对应 P_2 处水平方向 X_2 的抖动,第 4 条对应 P_2 处

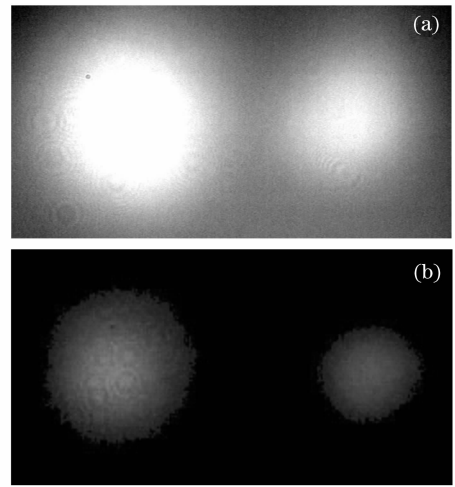


图 4 优化处理前(a)和后(b)的光斑

Fig. 4 Laser beam image before (a) and after (b) sharpening

垂直方向 Y_2 的抖动,实直线为基准线。从图 5(a)可见,水平方向 X 的抖动幅度达 $10\ \text{pixel}$ ($86\ \mu\text{m}$),而垂直方向 Y 的抖动幅度达 $30\ \text{pixel}$ ($249\ \mu\text{m}$),已超过空心光纤直径 $200\ \mu\text{m}$ 。而且垂直方向的抖动幅度明显大于水平方向的抖动,这是因为机械震动等因素引起的光学平台的震动主要为垂直方向。图 5(b)是反馈控制后的抖动情况,从图 5(b)可见,无论是水平方向还是垂直方向,光斑抖动基本控制在 $5\ \text{pixel}$ ($45\ \mu\text{m}$) 范围内,光束的空间指向得到明显的改善。从图 5(a)还可见,光斑的抖动由缓慢位移和快速振动组成,去掉快速振动后的缓慢位移变化如图中虚曲线所示,反馈控制后,缓慢位移变化被完全消除,从而保证了系统长时间运行不偏离基准线,如图 5(b)所示。慢变化主要由机械震动、空气扰动、镜架热胀冷缩等间接引起镜架轻微的移位,为长期累积行为,一般时间越长,偏离越厉害,无恢复性。快速振动主要由机械震动、空气扰动等直接引起镜架的震动或能量的抖动造成,为短期行为,具有可恢复性。

图 6 为在反馈控制前后 P_1 点在 X_1 方向的短时行为放大图,从图 6(a)中可见,快速振动的偏离和复位的时间在 $0.1 \sim 10\ \text{s}$ 之间,反馈控制能够有效降低快速振动的幅度,但无法完全消除,如图 6(b)所示。这是由于电机驱动器不能同时驱动 X_1, Y_1, X_2, Y_2 四路调整,需要 $X_1 \rightarrow Y_1 \rightarrow X_2 \rightarrow Y_2 \rightarrow X_1$ 逐个驱动,驱动周期约为 $1\ \text{s}$,因此小于 $1\ \text{s}$ 的振动无法消除,解决的途径是寻求响应速度更快或能同时驱动的电机驱动器替代。此外,CCD 作为反馈测量探测器,虽然可以直观地观测光斑模式,但其测量与处理速度也有一定的局限性,在设计中,CCD 采集和处

理速度为 0.1 s/frame , 因此要解决系统的高频干扰, 还可以通过外加准直光源(光束较小)与位敏传感器^[14]来提升系统的响应速度。这种传感器与 CCD

点阵式位置传感器相比, 具有响应时间快、分辨率高、以及不受入射光束和焦点偏离的影响等特点, 但不能直观地观测光斑模式。

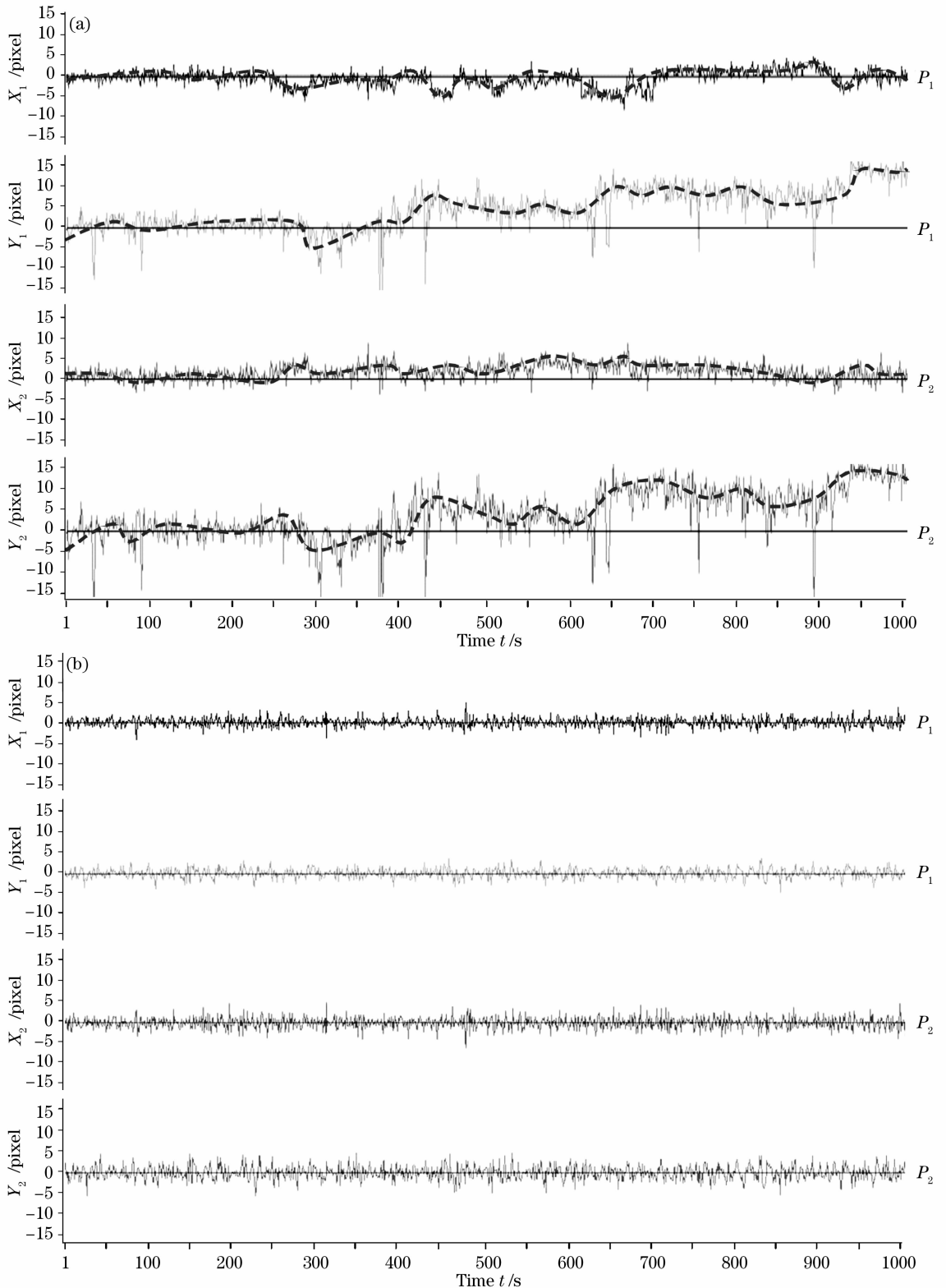


图 5 准直前(a)和后(b)光束的飘移

Fig. 5 Laser beam shift before (a) and after (b) collimation

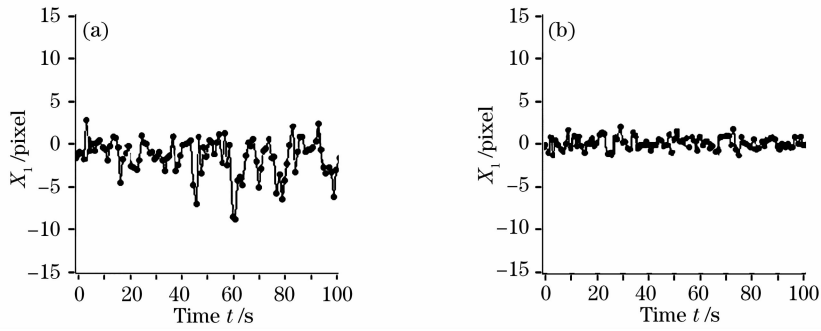


图 6 准直前(a)和后(b) P_1 点在 X 方向上的快速振动放大图

Fig. 6 Enlarged images of fast oscillation of P_1 in X axis. Before (a) and after (b) collimation

5 结 论

针对中小型高重复频率激光系统,设计了一套新的光斑实时监测与光路自动准直装置。利用两个基准点思想取代传统的近场远场设计思路,使得系统结构更加简单紧凑,可移植性强,适用范围广泛;使用虚拟仪器图形编程软件 LabView 编写监控程序,可以更加直观地实时监测光斑模式和光斑中心抖动情况并进行反馈控制。经测试,装置完全可降低或消除抖动周期 1 s 以上的光斑飘动。本设计对于超快激光物理实验研究有重大的促进作用,对于需要较高空间指向稳定性的高精度激光物理实验亦有重大使用价值,可以推广应用于更广泛的激光研究领域。

参 考 文 献

- 1 N. L. Wagner, E. A. Gibson, T. Popmintchev *et al.*. Self-compression of ultrashort pulses through ionization-induced spatiotemporal reshaping[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **97**(17): 173902-1~173902-4
- 2 E. Gagnon, I. Thomann, A. Paul *et al.*. Long-term carrier-envelope phase stability from a grating-based chirped pulse amplifier[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(12): 1866~1868
- 3 Peng Yan, Xu Han, Yang Xuan *et al.*. Generation of carrier-envelope-phase stabilized 6 fs ultrashort pulses and their application in high-order harmonic generation [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1486~1489
彭 滢, 徐 晗, 杨 旋 等. 载波包络相位稳定的 6 fs 超快强激光脉冲及其在高次谐波产生中的应用[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11): 1486~1489
- 4 R. Velotta, N. Hay, M. B. Mason *et al.*. High-order harmonic generation in aligned molecules[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001,

- 87(18): 183901-1~183901-4
- 5 S. J. Boege, E. S. Bliss, C. J. Choccol *et al.*. NIF pointing and centering systems and target alignment using a 351 nm laser source[C]. *Proc. SPIE*, 1997, **3047**: 248~258
- 6 F. R. Holdener, E. Ables, E. S. Bliss *et al.*. Beam control and diagnostic functions in the NIF transport spatial filter[C]. *Proc. SPIE*, 1997, **3047**: 692~699
- 7 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
- 8 Daizhong Liu, Fengnian Lu, Jinzhou Cao *et al.*. Design and application of a laser beam alignment system based on the imaging properties of a multi-pass amplifier[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(10): 601~604
- 9 E. S. Bliss, M. Feldman, C. S. Vann *et al.*. Laser chain alignment with low power local light sources[C]. *Proc. SPIE*, 1995, **2633**: 760~767
- 10 A. Stalmashonak, N. Zhavoronkov, I. V. Hertel *et al.*. Spatial control of femtosecond laser system output with submicroradian accuracy[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(6): 1271~1274
- 11 Cao Lingzhi, Cui Guangzhao, Wu Gang. *Modern Testing Technique and Virtual Instruments* [M]. Beijing: Beihang University Press, 2003. 151~168
曹玲芝, 崔光照, 吴 刚. 现代测试技术及虚拟仪器[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003. 151~168
- 12 Wang Yiping, Li Anmin, Yun Bin Feng *et al.*. Fiber Bragg grating sensor system based on virtual instrument and tunable laser technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1132~1135
汪弋平, 李安民, 恽斌峰 等. 基于虚拟仪器和可调谐激光技术的光纤光栅传感系统[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1132~1135
- 13 Lu Fengnian, Liu Daizhong, Xu Renfang *et al.*. Performance of image processing in beams automatic alignment system [J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(3): 335~337
吕凤年, 刘代中, 徐仁芳 等. 图像处理在光路自动准直系统中的应用[J]. *光学技术*, 2005, **31**(3): 335~337
- 14 Defeng Zheng, Xiangzhao Wang, Feng Tang. An improved method of angle measurement with a position sensitive detector [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7): 403~406