

长距离激光测量中光束漂移的自动补偿

杨滨赫, 蔡引娣, 文志祥, 凌四营, 范光照

引用本文:

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 Bin-he, CAI Yin-di, WEN Zhi-xiang, et al. Automatic compensation method for beam drift in long-distance laser measurement[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(11): 2393–2402.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/OPE.20202811.2393>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高精度激光光束准直系统设计

Design of high-accuracy laser beam collimation system

光学精密工程. 2020, 28(4): 817–826 <https://doi.org/10.3788/OPE.20202804.0817>

厚度测量中对射激光束共线性视觉检测

Vision detection for laser beam collinearity in thickness measurement

光学精密工程. 2020, 28(8): 1690–1699 <https://doi.org/10.3788/OPE.20202808.1690>

高分辨力与高输出稳定性自准直系统设计

Design of high resolution and output stability autocollimation system

光学精密工程. 2016, 24(10s): 109–116 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162413.0109>

高斯型扰动对光纤高能连续激光致Al/Ti合金热损伤特性的影响

Influence of Gaussian jitter on thermal damage in aluminum and titanium alloys included by high-power CW fiber laser

光学精密工程. 2016, 24(10s): 41–49 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162413.0041>

PBS对零差激光干涉仪非线性误差的影响

Effect of PBSs on nonlinearity in a homodyne interferometer

光学精密工程. 2016, 24(10s): 190–196 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162413.0190>

文章编号 1004-924X(2020)11-2393-10

长距离激光测量中光束漂移的自动补偿

杨滨赫, 蔡引娣*, 文志祥, 凌四营, 范光照
(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为了提高半导体激光器的光束稳定性, 减少长距离测量中激光光束的漂移, 本文设计了基于 BP 神经网络结合 PID 控制 (BPNN-PID) 的双反射镜激光器光束漂移自动补偿系统。在该系统中, 将两个四象限光电探测器分别置于测量近端和测量远端, 作为激光光束漂移的测量单元; 用两个带有压电陶瓷致动器 (PZT) 的二维角度调整架作为激光光束方向的调整单元。建立了激光光束漂移量与调整单元角度变化的模型, 并根据测量单元的输出, 通过 BPNN-PID 方法反馈控制调整单元的角度, 从而自动补偿激光光束漂移。实验结果表明: 使用该激光器光束漂移补偿方法, 在 15 min 时间内, 用于测量直线度误差和角度误差的激光测量系统的稳定性在测量距离 1 m 处, 分别从未控制时的 $\pm 9 \mu\text{m}$ 和 $\pm 5''$ 提高到了 $\pm 3 \mu\text{m}$ 和 $\pm 1.5''$ 。

关键词: 激光测量; 长距离测量; 半导体激光器; 光束漂移; BP 神经网络结合 PID 控制

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20202811.2393

Automatic compensation method for beam drift in long-distance laser measurement

YANG Bin-he, CAI Yin-di*, WEN Zhi-xiang, LING Si-ying, FAN Kuang-chao

(College of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

* Corresponding author, E-mail: caiyd@dlut.edu.cn

Abstract: To improve the stability of LDs and reduce the laser beam drift in long-distance measurement, a BPNN-PID-based dual-mirror laser-beam drift compensation method was proposed. Two four-quadrant photodetectors, which were placed at the near and far ends of the measurement position, were employed to measure the laser beam drifts. Two 2D precision-angle mirror mounts integrated with two piezoelectric actuators were used to adjust the propagation direction of the laser beam. A model relating the laser beam drift and the angular variation of the angle mirror mounts was established. The angular variation was then fed back with the proposed BPNN-PID method based on the output of the laser beam drift detector, from which the laser beam drift can be automatically compensated. It was verified that the signal stabilities of a laser measurement system that was used for measuring the straightness and angular errors of linear stages improved from $\pm 9 \mu\text{m}$ and $\pm 5''$ without laser-beam drift compensation to $\pm 3 \mu\text{m}$ and $\pm 1.5''$ with laser-beam drift compensation over 15 minutes.

Key words: laser measurement; long-distance measurements; laser diode; beam drift; BPNN-PID

收稿日期: 2020-07-01; 修订日期: 2020-08-17.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51905078); 国家重点研发计划项目“制造基础技术与关键部件”重点专项 (No. 2018YFB2001400); 国家重点研发计划资助项目 (No. 2017YFF0204800)

1 引言

随着科技的发展,半导体激光器被广泛应用于精密测量中。理论上,半导体激光器射出的激光是一条直线,而实际上激光并非一条直线,存在激光光束漂移。这将影响以半导体激光器为光源的激光测量系统的测量精度,特别是其长距离测量精度。因此,消除或补偿激光光束漂移是提高激光测量系统测量精度的关键。

激光光束漂移可分为平漂和角漂。引起光束漂移的原因主要有:激光器自身谐振腔热变形、外部固定装置缓慢机械位移和空气各介质折射率不同或大气扰动^[1]。目前,抑制或补偿激光光束漂移的方法主要有单模光纤法^[2-3]、对称双光束法^[4-6]、干涉/衍射法^[7-8]和共光路补偿法^[9]等。单模光纤法将激光器出射的光束耦合进单模光纤中,并使用准直镜将光纤输出的激光器出射光束整形为准直光束。但是,光纤耦合装置的稳定性会影响输出光束的稳定。对称双光束法通过不同反射次数产生两束平行光,当激光存在漂移时两束平行光由于反射次数不同产生对称的漂移,使其对称中心线不变,从而减少激光漂移。但是,这种方法的光路结构复杂,难以调整。干涉/衍射法利用激光干涉衍射图样对相位板后光束平漂不敏感的特性减少激光光束平漂对测量的影响。但是,这种方法并未补偿激光光束的平漂,无法减少角漂对测量的影响,因此应用上有较大局限。共光路补偿法使测量光束和参考光束经过相同的路径,用光束测量信号与参考光束信号的偏差来被动地补偿由光束漂移引起的误差,进而提高测量精度。然而,该系统只能补偿角漂,不能补偿平漂。

哈尔滨工业大学^[10]提出了一种以平动式反射镜作为调整元件的主动式激光光束漂移补偿系统。本课题组^[11-13]设计了一种带有压电陶瓷致动器(PZT)的二维角度调整架,作为调整单元对激光器的角漂进行自动补偿。以上方式能实现激光光束漂移的高精度补偿。但是,均补偿的是测量近端的光束漂移量,无法实现远距离上激光光束漂移的补偿。同时,本课题组设计的补偿系统^[11-13]在有效补偿角漂的同时,还会引起激光器光束的平行偏移。

本文提出了一种基于双反射镜的激光光束漂移自动补偿方法,用于自动补偿长距离激光测量中的激光光束漂移对测量精度的影响。设计了基于双反射镜的激光漂移补偿装置,使用 2 个四象限光电探测器对激光光束漂移进行测量。通过基于 BPNN 的 PID 闭环控制方法驱动 PZT,以改变双反射镜的角度,从而改变激光光束的出射位置和角度,最终实现长距离下激光光束漂移的自动补偿。所设计的系统体积小,可集成到任意激光测量系统中,用于激光器的光束漂移补偿。

2 原理

2.1 激光光束漂移测量原理

本文提出的基于双反射镜的激光光束漂移自动补偿系统,可以同时补偿激光器产生的平漂和角漂,其补偿原理如图 1 所示。

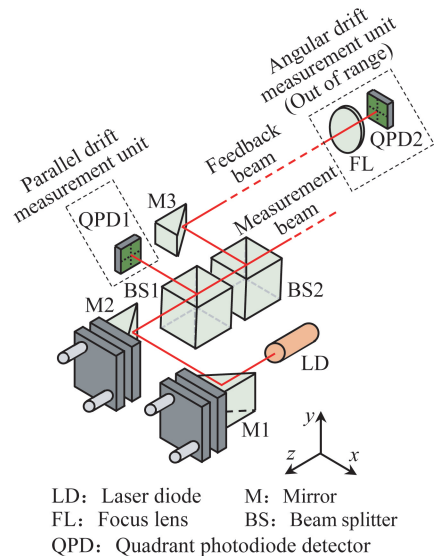


图 1 基于双反射镜的激光光束漂移补偿原理

Fig. 1 Principle for laser beam drift control based on dual mirrors

半导体激光器 LD 射出的光经过两个直角反射镜(M1, M2)反射后,被分光棱镜 BS1 分成两束光。反射光入射到平漂测量单元用于测量激光的平漂,透射光被 BS2 分成两束光。BS2 的透射光用于激光测量系统,其反射光经过直角反射镜 M3 反射后入射到角漂测量单元用于测量激光的角漂。平漂测量单元由四象限光电探测器 QPD1 组成。角漂测量单元由聚焦透镜 FL 和 QPD2 组

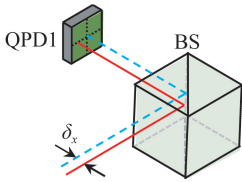
成,且 QPD2 位于 FL 的焦平面处。

激光器平漂的测量是基于激光准直原理,如图 2 所示。当激光器存在平漂时,激光光斑在 QPD1 上的位置会发生偏移。偏移量即为激光器在 X 和 Y 方向的平漂量 δ_x, δ_y ,可由下式计算得到:

$$\delta_x = k_x \frac{(i_1 + i_4) - (i_2 + i_3)}{i_1 + i_2 + i_3 + i_4}, \quad (1)$$

$$\delta_y = k_y \frac{(i_1 + i_2) - (i_3 + i_4)}{i_1 + i_2 + i_3 + i_4}, \quad (2)$$

其中: k_x, k_y 为 QPD1 的灵敏度, i_1, i_2, i_3, i_4 为 QPD1 四个象限的电流值。



BS: Beam splitter; QPD: Quadrant photodiode detector

图 2 激光平漂测量原理

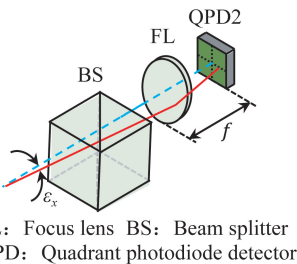
Fig. 2 Measuring principle of laser parallel drift

激光器发出的光束经过 FL 后,汇聚到位于其焦平面处的 QPD2 上。当激光器存在平漂时, QPD2 上的光斑并不会发生变化;当激光器存在角漂时, QPD2 上的光斑会随之发生偏移,如图 3 所示。偏移量即为激光器在 X 和 Y 方向的角漂 ϵ_x, ϵ_y ,可由下式计算得到:

$$\epsilon_x = \frac{\Delta x_{QPD2}}{f} = \frac{k_{ex}}{f} \frac{(i'_1 + i'_4) - (i'_2 + i'_3)}{i'_1 + i'_2 + i'_3 + i'_4}, \quad (3)$$

$$\epsilon_y = \frac{\Delta y_{QPD2}}{f} = \frac{k_{ey}}{f} \frac{(i'_1 + i'_2) - (i'_3 + i'_4)}{i'_1 + i'_2 + i'_3 + i'_4}, \quad (4)$$

其中: k_{ex}, k_{ey} 为 QPD2 的灵敏度, f 为 FL 的焦距, i'_1, i'_2, i'_3, i'_4 为 QPD2 四个象限的电流。



FL: Focus lens BS: Beam splitter QPD: Quadrant photodiode detector

图 3 激光角漂测量原理

Fig. 3 Measuring principle of laser angular drift

2.2 双反射镜瞬时旋转中心变化对 QPD 示数的影响

理论上,直角反射镜应该始终围绕一个旋转中心旋转。该旋转中心为直角反射镜旋转前光线的入射点 I 。但是,由于二维角度调整架结构的影响,当二维角度调整架发生角度变化时,粘贴在其上的直角反射镜的瞬时旋转中心会发生变化,即旋转中心变为 A 点,如图 4 所示。旋转中心的变化将影响激光光线在直角反射镜上的反射位置,使激光产生一定的偏移 x' 。因此,需要分析双反射镜的旋转中心变化对光线偏移的影响。

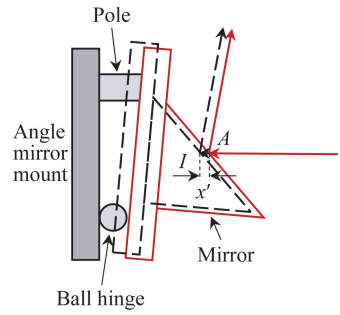


图 4 二维角度调整架结构导致直角反射镜旋转中心变化
Fig. 4 Rotation center shift of mirror caused by two-dimensional angle steering mechanism

2.2.1 直角反射镜 M1 瞬时旋转中心同时变化对 QPD 示数的影响

设二维角度调整架上端的支杆与下端球铰的距离为 L_1 , M1 的直角边长为 D_1 。光线沿水平方向入射至 M1 上发生反射,入射点 M 为理想旋转中心。当二维角度调整架上端的支杆伸长 Δ_1 时,即 M1 旋转角度 β_1 ,如图 5 所示,此时的旋转中心变成 P 点,其与理想旋转中心的横向和纵向偏移量均为 Δx_1 。

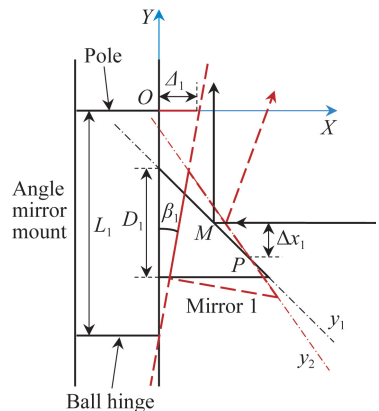


图 5 直角反射镜 M1 旋转中心变化
Fig. 5 Rotation center shift of mirror 1

以 O 为原点建立平面坐标系 XOY , 如图 5 所示。根据图中的几何关系, $M1$ 初始状态下镜面 y_1 和旋转后镜面 y_2 可分别表示为:

$$y_1 = -x + \frac{D_1 - L_1}{2}, \quad (5)$$

$$y_2 = \frac{D_1 + L_1}{2} \cos \beta_1 - L_1 +$$

$$\left(\frac{D_1 + L_1}{2} \sin \beta_1 - x \right) \tan \left(\frac{\pi}{4} + \beta_1 \right). \quad (6)$$

联立上式, 可求得旋转中心 P 点纵坐标为:

$$y_p = - \frac{(D_1 + L_1) \sin \beta_1 \tan \left(\frac{\pi}{4} + \beta_1 \right)}{2 \left[1 - \tan \left(\frac{\pi}{4} + \beta_1 \right) \right]} +$$

$$\frac{(D_1 + L_1) \cos \beta_1 - 2L_1}{2 \left[1 - \tan \left(\frac{\pi}{4} + \beta_1 \right) \right]} - \frac{(D_1 - L_1) \tan \left(\frac{\pi}{4} + \beta_1 \right)}{2 \left[1 - \tan \left(\frac{\pi}{4} + \beta_1 \right) \right]}. \quad (7)$$

理想旋转中心 M 点的纵坐标为:

$$y_M = - \frac{L_1}{2}. \quad (8)$$

因此, 瞬时旋转中心偏移量 Δx_1 可表示为:

$$\Delta x_1 = - \frac{(D_1 + L_1) \sin \beta_1 \tan \left(\frac{\pi}{4} + \beta_1 \right)}{2 \left[1 - \tan \left(\frac{\pi}{4} + \beta_1 \right) \right]} + \frac{(D_1 + L_1) \cos \beta_1 - 2L_1}{2 \left[1 - \tan \left(\frac{\pi}{4} + \beta_1 \right) \right]} - \frac{(D_1 - L_1) \tan \left(\frac{\pi}{4} + \beta_1 \right)}{2 \left[1 - \tan \left(\frac{\pi}{4} + \beta_1 \right) \right]} + \frac{L_1}{2}, \quad (9)$$

其中: D_1 为 $M1$ 的直角边长, L_1 为球铰与支杆的距离, β_1 为 $M1$ 的旋转角度。

故 $M1$ 瞬时旋转中心变化会使 QPD1 的示数产生 Δx_1 的偏移。根据自准直原理, $M1$ 瞬时旋转中心变化对 QPD2 的示数无影响。

2.2.2 直角反射镜 $M2$ 瞬时旋转中心变化对 QPD 示数的影响

设二维角度调整架上端的支杆与下端球铰的距离为 L_2 , $M2$ 的直角边长为 D_2 。光线沿水平方向入射至 $M2$ 上发生反射, 入射点 N 为理想旋转中心。当二维角度调整架上端的支杆伸长 Δ_2 时, 即 $M2$ 旋转角度 β_2 , 如图 6 所示, 此时的旋转中心变成 Q 点, 其与理想旋转中心的横向和纵向偏移量均为 Δx_2 。

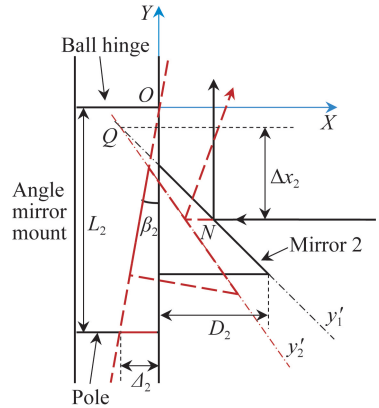


图 6 直角反射镜 $M2$ 旋转中心变化
Fig. 6 Rotation center shift of mirror 2

以 O 为原点建立平面坐标系 XOY , 如图 6 所示。根据图中的几何关系, $M2$ 初始状态下镜面 y'_1 和旋转后镜面 y'_2 可分别表示为:

$$y'_1 = -x + \frac{D_2 - L_2}{2}, \quad (10)$$

$$y'_2 = \frac{D_2 - L_2}{2} \cos \beta_2 +$$

$$\left(\frac{D_2 - L_2}{2} \sin \beta_2 - x \right) \tan \left(\frac{\pi}{4} + \beta_2 \right). \quad (11)$$

联立上式, 可求得旋转中心 Q 点纵坐标为:

$$y_Q = - \frac{(D_2 - L_2) \cos \beta_2}{2 \left[1 - \tan \left(\frac{\pi}{4} + \beta_2 \right) \right]} - \frac{(D_2 - L_2) (\sin \beta_2 - 1) \tan \left(\frac{\pi}{4} + \beta_2 \right)}{2 \left[1 - \tan \left(\frac{\pi}{4} + \beta_2 \right) \right]}. \quad (12)$$

理想旋转中心 N 点的纵坐标为:

$$y_N = - \frac{L_2}{2}. \quad (13)$$

因此, 瞬时旋转中心偏移量 Δx_2 可表示为:

$$\Delta x_2 = \frac{L_2}{2} - \frac{(D_2 - L_2) \cos \beta_2}{2 \left[1 - \tan \left(\frac{\pi}{4} + \beta_2 \right) \right]} - \frac{(D_2 - L_2) (\sin \beta_2 - 1) \tan \left(\frac{\pi}{4} + \beta_2 \right)}{2 \left[1 - \tan \left(\frac{\pi}{4} + \beta_2 \right) \right]}, \quad (14)$$

其中: D_2 为 $M2$ 的直角边长, L_2 为球铰与支杆的距离, β_2 为 $M2$ 的旋转角度。

故 $M2$ 瞬时旋转中心变化会使 QPD1 的示数产生 Δx_2 的偏移。根据自准直原理, $M2$ 瞬时旋转中心变化对 QPD2 的示数无影响。

2.2.3 直角反射镜 M1, M2 瞬时旋转中心同时变化对 QPD 示数的影响

根据激光自准直原理可知,激光器出射的激光角度不受 M1, M2 旋转中心偏移量的影响,故 QPD2 的示数 θ_{x_2} 可表示为:

$$\theta_{x_2} = 2(\beta_2 - \beta_1), \quad (15)$$

其中 β_1 和 β_2 分别为 M1 和 M2 的旋转角度。

由图 7 中的几何关系可得,受 M1 和 M2 瞬时旋转中心同时变化的影响, QPD1 示数 x'_1 可表示为:

$$x'_1 = l_{M_1 \cdot M_2} \tan(2\beta_1) + l_{M_2 \cdot QPD1} \tan(2\beta_2) - \frac{\Delta x_1 \sin \beta_1 \cos(2\beta_1) \sin\left(\frac{\pi}{4} + \beta_2\right)}{\sin \frac{\pi}{4} \sin\left(\frac{\pi}{4} + \beta_1\right) \sin\left(\frac{\pi}{4} - \beta_2 - 2\beta_1\right)} + \frac{\Delta x_2 \sin \beta_2 \cos 2(2\beta_1 + \beta_2)}{\sin \frac{\pi}{4} \cos 2(\beta_1 + \beta_2) \sin\left(\frac{\pi}{4} + \beta_2 - 2\beta_1\right)}, \quad (16)$$

其中: $l_{M_1 \cdot M_2}$ 为 M1, M2 理想旋转中心的距离, $l_{M_2 \cdot QPD1}$ 为 M2 理想旋转中心到 QPD1 的光程, $\Delta x_1, \Delta x_2$ 分别为 M1, M2 瞬时旋转中心的偏移量。

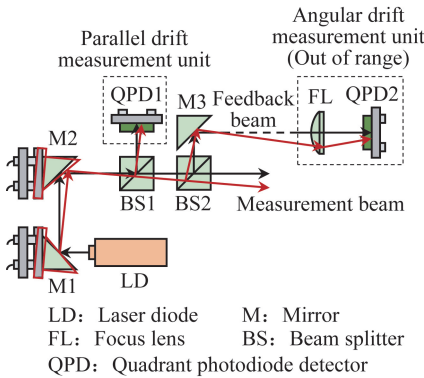


图 7 M1, M2 角度偏转对 QPD1, QPD2 示数的影响

Fig. 7 Effect of M1, M2 angular deflection on indication of QPD1, QPD2

在 Zemax 软件中建立模型,其中 $L=20$ mm, $D=10$ mm, $l_{M_1 \cdot M_2}=12$ mm, $l_{M_2 \cdot QPD1}=15$ mm, 将式(16)分为 3 部分进行分析,即:

$$x' = a + b + c, \quad (17)$$

其中: $a = l_{M_1 \cdot M_2} \tan(2\beta_1) + l_{M_2 \cdot QPD1} \tan(2\beta_2)$,

$$b = \frac{\Delta x_1 \sin \beta_1 \cos(2\beta_1) \sin\left(\frac{\pi}{4} + \beta_2\right)}{\sin \frac{\pi}{4} \sin\left(\frac{\pi}{4} + \beta_1\right) \sin\left(\frac{\pi}{4} - \beta_2 - 2\beta_1\right)},$$

$$c = \frac{\Delta x_2 \sin \beta_2 \cos 2(2\beta_1 + \beta_2)}{\sin \frac{\pi}{4} \cos 2(\beta_1 + \beta_2) \sin\left(\frac{\pi}{4} + \beta_2 - 2\beta_1\right)}.$$

分析结果如表 1 所示,由表中数据可知, b, c 与 a 相差两个数量级,因此公式中 b, c 可以忽略不计。

表 1 M1, M2 瞬时旋转中心同时变化对激光光束偏移量的影响

Tab. 1 Influence of instantaneous rotation center of M1 and M2 on shift of laser beam

$\beta_1 / (^\circ)$	$\beta_2 / (^\circ)$	a / mm	b / mm	c / mm
0.2	0.3	0.240 9	0.003 5	0.002 7
0.3	0.5	0.387 4	0.004 6	0.005 6
0.5	0.5	0.471 3	0.005 2	0.005 4
0.5	0.2	0.314 2	0.004 1	0.005 1

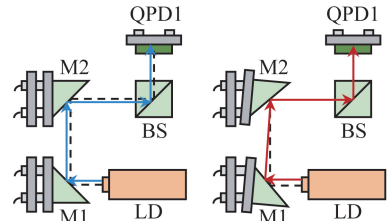
QPD1 示数简化为:

$$x' = l_{M_1 \cdot M_2} \tan(2\beta_1) + l_{M_2 \cdot QPD1} \tan(2\beta_2). \quad (18)$$

2.3 双反射镜激光光束漂移补偿原理

激光器光束平漂补偿原理如图 8 所示。当激光器发射的激光存在平漂 Δx 时, M1 和 M2 转动相同角度 $\Delta\theta_{x_1}$, 使 M2 的反射光线产生 Δx 的偏移。转动角度 $\Delta\theta_{x_1}$ 与平漂 Δx 的关系如下:

$$\Delta x = l_{M_1 \cdot M_2} \cdot \sin(2\Delta\theta_{x_1}) + x' = l_{M_1 \cdot M_2} \cdot \sin(2\Delta\theta_{x_1}) + (l_{M_1 \cdot M_2} + l_{M_2 \cdot QPD1}) \tan(2\Delta\theta_{x_1}). \quad (19)$$



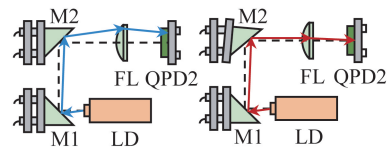
LD: Laser diode M: Mirror
BS: Beam splitter QPD: Quadrant photodiode detector

图 8 激光光束平漂补偿原理

Fig. 8 Principle for laser beam parallel drift control

激光器光束角漂补偿原理如图 9 所示。当激光器发射的激光存在角漂 $\Delta\theta_x$ 时, M2 转动角度 $\Delta\theta_{x_2}$ 使出射光转动 $\Delta\theta_x$ 的角度。转动角度 $\Delta\theta_{x_2}$ 与角漂 $\Delta\theta_x$ 的关系如下:

$$\Delta\theta_x = 2\Delta\theta_{x_2}. \quad (20)$$



LD: Laser diode M: Mirror
FL: Focus lens QPD: Quadrant photodiode detector

图 9 激光光束角漂补偿原理

Fig. 9 Principle for laser beam angular drift control

3 激光光束漂移补偿的实现

3.1 激光光束漂移反馈系统

激光光束漂移反馈系统的工作流程如图 10 所示。当系统的平漂测量单元和角漂测量单元测量到激光光束漂移时, QPD1 和 QPD2 将激光光束漂移转换为电流信号, 经 I/V 转换和放大后传输到计算机。在计算机中通过 PID 控制得到 PZT 的变化量, 并发送到 PZT 驱动器以改变二维角度调整架的角度, 实现激光光束漂移的补偿。

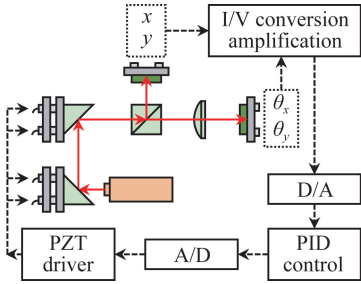


图 10 反馈系统的工作流程

Fig. 10 Workflow of feedback system

实验采用 PZT 实现对二维角度调整架的微小角度调整, PZT 型号为 AL1.65 × 1.65 × 5D-4F。集成 PZT 的二维角度调整架设计原理详见参考文献[11]。

设 PZT 变化量为 Δl , 因此由 PZT 变化引起的二维角度调整架和直角反射镜的角度变化量 $\Delta\theta$ 为:

$$\Delta\theta = \arctan \frac{\Delta l}{L}, \quad (21)$$

其中 L 为 PZT 与球铰的距离。因此, PZT 变化量 Δl 与激光光束漂移量 Δx 和 $\Delta\theta_x$ 的关系可表示为:

$$\Delta x = l_{M_1} \cdot M_2 \cdot \sin 2 \left(\arctan \frac{\Delta l}{L} \right) + (l_{M_1} \cdot M_2 + l_{M_2} \cdot QPD_1) \tan 2 \left(\arctan \frac{\Delta l}{L} \right), \quad (22)$$

$$\Delta\theta_x = 2 \arctan \frac{\Delta l}{L}. \quad (23)$$

3.2 BPNN-PID 控制系统

BPNN 具有信息的分布式存储以及自组织自学习的功能, 在处理多输入、非线性、耦合复杂的对象有广泛的应用。因此, 将 PID 控制算法与 BPNN 相结合, 设计了基于 LabVIEW 的 BPNN-PID 控制系统。

经典 PID 控制采用增量式 PID 控制算法进行闭环控制, 增量式 PID 控制算法如下:

$$u(t) = u(t-1) + k_p [e(t) - e(t-1)] + k_i e(t) + k_d [e(t) - 2e(t-1) + e(t-2)]. \quad (24)$$

BPNN 结构包括输入层、隐含层和输出层, 本研究中网络结构为 3-5-3 结构。

隐含层神经元和输出层神经元的激活函数为:

$$f(x) = \tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}. \quad (25)$$

式(26)为 BPNN 的代价函数:

$$E = \frac{1}{2} \sum (y - y')^2, \quad (26)$$

其中: y 为输出层第 j 个神经元的输出值, y' 为输出层第 j 个神经元的理想输出值。

传统 BPNN 采用梯度下降法求解最小值, 存在训练时间较长、易陷入局部最小值等问题。因此, 本文采用了附加动量项的方法对 BPNN 进行改进, 提高了 BPNN 的训练速度, 减少了 BPNN 陷入局部最小值的可能。

其中, 输出层与隐含层的权值调整量为:

$$\Delta v_{kj}(t) = \eta \delta_k O_j(t) + \alpha \Delta v_{kj}(t-1). \quad (27)$$

隐含层与输入层的权值调整量为:

$$\Delta \omega_{ji}(t) = \eta \delta_j O_i(t) + \alpha \Delta \omega_{ji}(t-1), \quad (28)$$

其中: η 是学习率, α 为动量系数; δ_k 为输出层和隐含层连接的输出误差, δ_j 为隐含层和输入层连接的输出误差。

BPNN-PID 控制系统流程如图 11 所示, 具体步骤如下:

- (1) 确定 BPNN 结构, 即输入层、隐含层的节点个数, 并对权值、学习率等参数进行设置;
- (2) 使用训练样本对权值进行训练并更新权值;
- (3) 训练完成后使用测试样本进行测试, 得到测试误差;
- (4) 若测试误差大于期望误差, 则返回(1); 若测试误差小于期望误差, 则进入(5);
- (5) 通过训练完成的 BPNN 对实时输入进行计算, 得到实时更新的 PID 参数;
- (6) 使用实时更新的 PID 参数对系统进行控制, 得到控制误差;

(7)若控制误差大于期望误差,则返回(1);若控制误差小于期望误差,则继续控制。

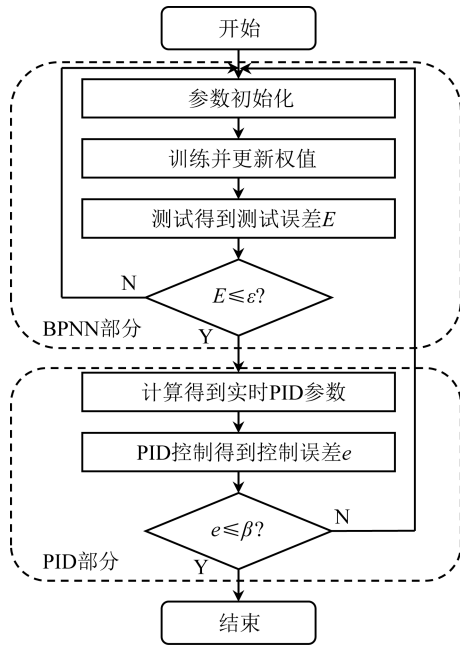


图 11 BPNN-PID 控制系统流程

Fig. 11 Program flowchart of BPNN-PID control system

设置 BPNN-PID 控制系统的学习率 $\eta = 0.01$, 动量系数 $\alpha = 0.2$, 初始值为 $[-1, 1]$ 内的随机数。训练样本包括控制阶段样本和稳定阶段样本, 数量为 18 318, 测试样本数量为 1 500。训练后测试结果的期望误差 ϵ 设置为 0.000 1, 仿真控制结果的期望误差 β 设置为 $\pm 1 \mu\text{m}$ 和 $\pm 1''$ 。

4 实验结果与分析

根据图 1 所示的激光光束漂移自动补偿系统原理, 搭建了激光光束漂移自动补偿系统实验装置, 如图 12 所示。半导体激光器选用西安华科光电有限公司的 DA635 型半导体激光器。四象限光电探测器选用德国 First Sensor 公司的 QP5. 8-6-TO5 型四象限光电探测器。激光器、角度调整元件、BS1 和 QPD1 固定在近端, FL1 和 QPD2 固定在远端, 远端和近端的距离为 1.2 m。BS3, FL2, QPD3 和 QPD4 固定在导轨上作为检测单元, 用于检测所设计的激光光束漂移自动补偿系统的控制效果。

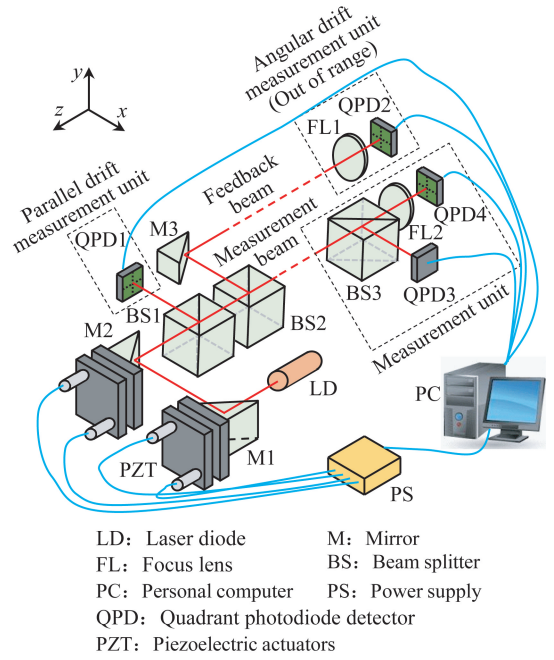


图 12 激光光束漂移补偿系统示意图

Fig. 12 Schematic diagram of laser beam drift control system

4.1 标定实验

首先, 对 QPD1 灵敏度进行标定, 标定结果如图 13 所示。QPD1X 方向 (k_{x_1}) 和 Y 方向 (k_{y_1}) 的灵敏度分别为 $-2 424.98 \mu\text{m}/\text{V}$ 和 $1 638.42 \mu\text{m}/\text{V}$ 。

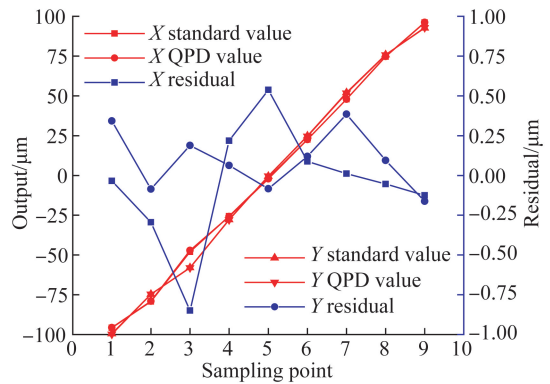


图 13 QPD1 标定结果

Fig. 13 Calibration result of QPD1

其次, 对 QPD2 灵敏度进行标定, 标定结果如图 14。QPD2X 方向 (k_{x_2}) 和 Y 方向 (k_{y_2}) 的灵敏度分别为 $-1 306.22 (")/\text{V}$ 和 $1 055.29 (")/\text{V}$ 。

由图 13 和图 14 可知, QPD1 和 QPD2 在 $\pm 100 \mu\text{m}$ 和 $\pm 100''$ 量程内, 标定残差均小于 $\pm 1 \mu\text{m}$ 和 $\pm 1''$ 。

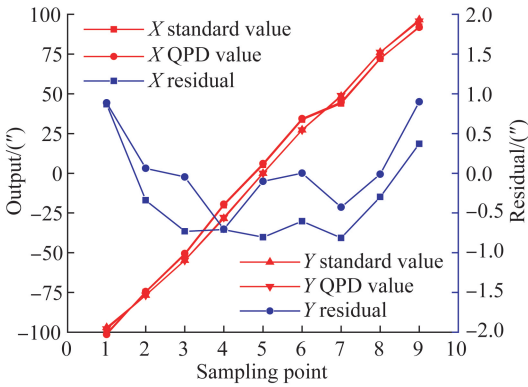
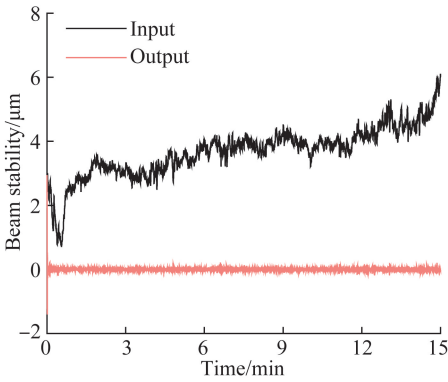


图 14 QPD2 标定结果

Fig. 14 Calibration result of QPD2

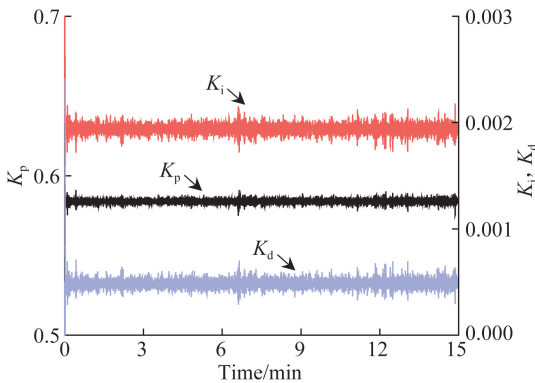
4.2 BPNN-PID 控制系统仿真实验

对所设计的 BPNN-PID 控制系统进行仿真测试。仿真信号为实验系统采集得到的稳定性数据。图 15(a)为控制系统输入的仿真信号和经过控制系统控制后的输出信号,图 15(b)为控制系统输出的实时 PID 参数。



(a) 仿真控制结果

(a) Simulation control results



(b) 仿真 PID 输出

(b) Simulation PID output

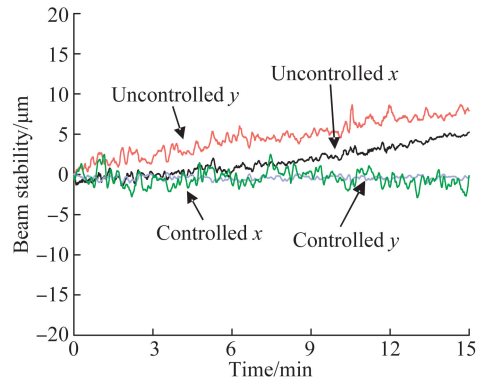
图 15 BPNN-PID 控制系统仿真结果

Fig. 15 Simulation results of BPNN-PID control system

由控制结果图 15 可知,经过 BPNN-PID 控制系统闭环反馈控制后的信号可以稳定在 0 附近。因此,所设计的 BPNN-PID 控制系统有效且控制效果良好。

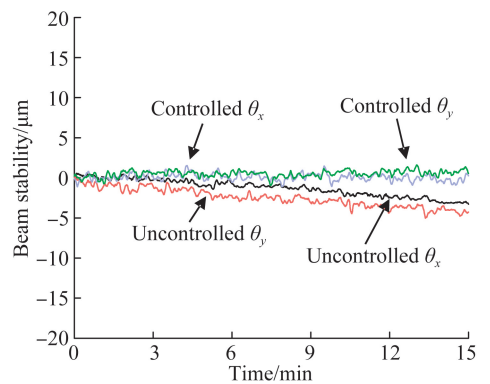
4.3 激光光束漂移自动补偿系统测试结果

在搭建好的激光光束漂移补偿系统上进行测试。检测单元距近端光程 1 m,设置系统的采样频率为 20 Hz。通过采集检测单元 QPD3 的示数 x, y 作为激光光束平漂的测试结果,采集 QPD4 的示数 θ_x 和 θ_y 作为激光光束角漂的测试结果。在激光光束漂移自动补偿系统未开启时采集了 15 min 的补偿前稳定性数据,随后开启激光光束漂移自动补偿系统对激光光束漂移进行补偿,并采集了 15 min 的补偿后稳定性数据。测试结果如图 16 所示。



(a) 补偿前后 QPD3 示数

(a) QPD3 output with/without control



(b) 补偿前后 QPD4 示数

(b) QPD4 output with/without control

图 16 检测单元示数

Fig. 16 Output of measurement units

由以上结果可知,在光程 1 m 的位置处使用所设计的激光光束漂移补偿系统对激光光束进行控制后,在 15 min 内,半导体激光器出射光线的平漂从 $\pm 9 \mu\text{m}$ 补偿到了 $\pm 3 \mu\text{m}$ 内,角漂从 $\pm 5''$ 补偿到了 $\pm 1.5''$ 内。因此,该方法能够提高 1 m 内半导体激光光束的稳定性,减小长距离下的激光光束漂移。需要注意的是,补偿后激光光束仍然在小范围内波动。其主要原因有:系统的稳定性,特别是二维角度调整架的稳定性,会影响光束漂移抑制的效果;光束漂移抑制系统的反馈时间也会影响光束漂移的抑制效果;在长期反复使用过程中,PZT 的灵敏度会受到使用次数、实验环境等的影响。在未来的研究中,要解决上述问题对基于双反射镜的激光光束漂移自动补偿系统的影响,以便更好地控制激光光束漂移。

参考文献:

- [1] 党敏,冯其波.提高激光准直精度的途径[J].光子技术,2006(4):190-193,211.
DANG M, FENG Q B. Methods of improving accuracy of laser collimation[J]. *Photon Technology*, 2006(4): 190-193, 211. (in Chinese)
- [2] 王文轅,文建湘,庞拂飞,等.飞秒激光制备的全单模光纤法布里-珀罗干涉高温传感器[J].中国激光,2012,39(10):85-89.
WANG W Y, WEN J X, PANG F F, *et al.*. All single-mode fiber Fabry-Pérot interferometric high temperature sensor fabricated with femtosecond laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(10): 85-89. (in Chinese)
- [3] 翟玉生,耿利杰,李阳,等.激光光线漂移补偿方法综述[J].激光杂志,2015,36(9):1-4.
ZHAI Y SH, GENG L J, LI Y, *et al.*. Survey of laser beam drift compensation methods[J]. *Laser Journal*, 2015, 36(9): 1-4. (in Chinese)
- [4] YANDAYAN T, AKGÖZ S A, HAITJEMA H. A novel technique for calibration of polygon angles with non-integer subdivision of indexing table[J]. *Precision Engineering*, 2002, 26(4): 412-424.
- [5] CUI C X, FENG Q B, ZHANG B, *et al.*. System for simultaneously measuring 6DOF geometric motion errors using a polarization maintaining fiber-coupled dual-frequency laser[J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 6735.

5 结 论

本文针对长距离下激光光束漂移难以补偿的问题,提出了一种基于双反射镜的激光光束漂移自动补偿方法,实现了长距离下激光光束漂移的补偿。首先,介绍了激光光束漂移补偿原理和 BPNN-PID 控制系统流程,然后搭建了实验装置对补偿效果进行测试。实验结果表明:所设计的激光光束漂移自动补偿系统在 15 min, 1 m 的量程内能够将激光的平漂从 $\pm 9 \mu\text{m}$ 补偿到 $\pm 3 \mu\text{m}$,角漂从 $\pm 5''$ 补偿到 $\pm 1.5''$ 。该系统能够在长距离下较好地稳定半导体激光器的激光光束,减少激光光束漂移,实现长距离下激光光束漂移的补偿,提高半导体激光器的稳定性。

- [6] BURKHART S C, BLISS E, DI N P, *et al.*. National Ignition Facility system alignment[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(8):1136-1157.
- [7] 粟敬钦,郭永康,韦辉,等.一种可用于光学准直的新型波带片[J].中国激光,1998,25(2):3-5.
LI J Q, GUO Y K, WEI H, *et al.*. A new wave plate that can be used for optical collimation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1998, 25(2):3-5. (in Chinese)
- [8] 郝群.位相板衍射准直研究[J].计量学报,2001,22(3):185-188.
HAO Q. Study of phase plate alignment in large-scale measurement[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2001, 22(3): 185-188. (in Chinese)
- [9] 由凤玲,冯其波,张斌.基于共路光线漂移补偿的直线度测量[J].光学精密工程,2011,19(3):515-519.
YOU F L, FENG Q B, ZHANG B. Straightness error measurement based on common-path compensation for laser beam drift[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(3): 515-519. (in Chinese)
- [10] 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]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(4): 817-826. (in Chinese)
- [11] HUANG Y B, FAN K C, SUN W, *et al.*. Low cost, compact 4-DOF measurement system with active compensation of beam angular drift error[J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 17185.
- [12] CAI Y D, YANG B H, FAN K C. Robust roll angular error measurement system for precision machines

[J]. *Optics Express*, 2019, 27(6): 8027-8036.

- [13] CAI Y D, SANG Q, LOU Z F, *et al.*. Error analysis and compensation of a laser measurement

system for simultaneously measuring five-degree-of-freedom error motions of linear stages[J]. *Sensors*, 2019, 19(18): 3833.

作者简介:



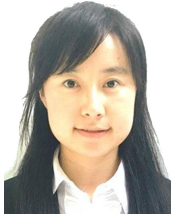
杨滨赫(1995—),男,辽宁沈阳人,硕士研究生,2017年于大连理工大学获得学士学位,主要从事光学测量的研究。
E-mail: 18840825425@163.com

导师简介:



范光照(1950—),男,中国台湾人,教授,1972年于中国台湾大学获得学士学位,1976年于纽约州立大学获得硕士学位,1984年于曼彻斯特科技大学获得博士学位,主要从事机床误差测量与补偿、三坐标测量机研制等的研究。
E-mail: fan@dlut.edu.cn

通讯作者:



蔡引娣(1988—),女,甘肃人,副教授,2010年于兰州理工大学获得学士学位,2012年于重庆大学获得硕士学位,2017年于日本东北大学获得博士学位,主要从事基于激光测量原理的几何运动误差测量和误差补偿的研究。
E-mail: caiyd@dlut.edu.cn