

文章编号: 0253-2239(2004)03-373-5

漂移量反馈控制式激光准直方法*

赵维谦 谭久彬 马洪文 邹丽敏

(哈尔滨工业大学超精密光电仪器工程研究所, 哈尔滨 150001)

摘要: 提出一种集光纤准直与光束漂移量反馈控制准直技术于一体的激光光束准直方法,它是在单模光纤对激光器出射光束漂移量进行初级准直的基础上,进一步对光束的漂移量进行反馈控制,进而提高出射光束的方向稳定性。准直系统中利用漂移量分离光路和光电检测系统对光束的平漂量和角漂量进行了分离检测,并各自构成相应的光束空间平漂量反馈控制系统和光束空间角漂量反馈控制系统,减小了平漂量和角漂量反馈控制中的相互耦合。引入单模光纤使激光器与光束漂移量反馈控制准直系统相隔离,减小了激光管热源温度变化等因素对准直系统的影响,同时还便于准直系统使用中的安装布置。上述方法的应用,提高了准直精度及准直效率。实验表明目前该方法准直精度可达 0.7×10^{-7} rad。

关键词: 物理光学; 激光准直; 光束漂移; 单模光束; 激光基准; 纳米控制

中图分类号: TH706 文献标识码: A

Laser Collimation Method Based on the Drift Feedback Control

Zhao Weiqian Tan Jiubin Mao Hongwen Zou Limin

(*Institute of Ultra-Precision Optical & Electronic Instrument Engineering,*
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

(Received 3 June 2003; revised 29 September 2003)

Abstract: A new laser beam collimation method that combines fiber collimation technique with laser beam drift feedback control is investigated. In this method, the laser beam drift is initially collimated by passing through a single-mode fiber, then it is collimated further by a feedback control system for the purpose of improving the direction stabilization of the laser beam. In this feedback system, the displacement drift and angle drift are not only measured respectively using a drift separation optical system and a drift photoelectric measurement system, but also each of them has a corresponding independent feedback control system to restrain itself, at the same time the coupling between them is decreased. Due to the single-mode fiber is used, the laser system is far from the beam drift feedback control system. So the temperature effect from the laser source on the collimation system is decreased and the collimation system can be easily arranged. By applying these techniques, the collimation precision and efficiency are improved and experimental results show the collimation precision for the laser beam drift can reach 0.7×10^{-7} rad.

Key words: physical optics; laser collimation; light beam drift; single-mode fiber; laser datum; control system with nanometer resolution

1 引 言

激光光束由于其良好的单一方向性、高亮度及

高稳定性等优点,常被作为测量基准广泛应用于超精密加工设备及测量设备中^[1,2]。但激光器出射的激光束在传播过程中常会产生漂移,主要表现为激光束的平漂、角漂及随机漂移,其量级一般在 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ rad,这一弱点限制了激光光束准直精度的进一步提高,影响了其在实际中的应用。造成激光光束漂移的主要原因有:1)激光器谐振腔的温

* 国家自然科学基金(50075020)与哈工大校基金(HIT-200126)资助课题。

E-mail: zwq669@hit.edu.cn; lvshai5271@sina.com

收稿日期:2003-6-03;收到修改稿日期:2003-09-29

度变形;2)光束传播途径的空气折射率不均匀及其随机变化(大气湍流等造成)等^[3]。为了提高激光光束的方向稳定性,国内外学者针对不同的使用情况,提出了诸多光束准直方法,一类是在长距离激光准直系统中,采用波带片、相位板、双缝等^[4~7]产生的干涉和衍射条纹的空间连线作为基准线,利用它们对漂移量不敏感这一特点,来达到准直的目的,典型方法有相位板衍射准直法、双光束补偿准直法等^[3,4],此类方法准直精度一般在 10^{-6} rad 量级左右。另一类是在超精密加工设备及测量设备中常用的激光准直技术,如激光方向稳定法和单模光纤准直法等^[1,2],此类方法尽管准直距离短,但其准直精度要求高,因而技术难度大。通常此类短距离激光准直系统所处的环境较好,造成光束漂移的原因主要是激光器谐振腔的温度变形。

基于上述情况,本文依据目前我们承担的“国家基准型圆柱度测量仪器”的实际需求,提出将单模光纤准直和漂移量反馈控制相结合的“光纤及光束漂移量反馈控制准直技术”,主要抑制由激光器谐振腔的温度变形引起的基准光束的漂移,进而提高“国家基准型圆柱度仪”的直线运动精度^[8]。

2 漂移量反馈控制光纤准直法

激光束经光纤耦合器进入单模光纤出射后,光纤出射端相当于二次光源。激光器出射光束的漂移量主要影响单模光纤的耦合效率,出射光束的方向稳定性则主要取决于光纤出射端在空间的稳定性,保证光纤出射端的稳定性则可提高出射光束的方向稳定性,即实现了激光束单模光纤初级准直。漂移量反馈控制激光光纤准直法是在单模光纤进行初级准直的基础上,进一步采用光束漂移量反馈控制准直法以提高其出射光束的方向稳定性。准直过程中,它将光束漂移量中的平漂量和角漂量进行分离检测,并用相应的反馈控制机构进行反馈调整,来抑制光束的漂移量,继而达到出射光束的准直目的。激光光束漂移中,光束角漂量与准直距离有关,光束平漂量与准直距离无关,应用漂移量反馈控制准直时,如何将平漂量和角漂量进行分离检测,并进行相应的漂移量反馈控制是提高准直精度和效率的关键所在。

2.1 漂移量分离检测

光束角漂量分离检测法见图 1,将四象限探测器(QPD)光敏面中心位于聚焦物镜的焦点处,如

图 1(a)所示。

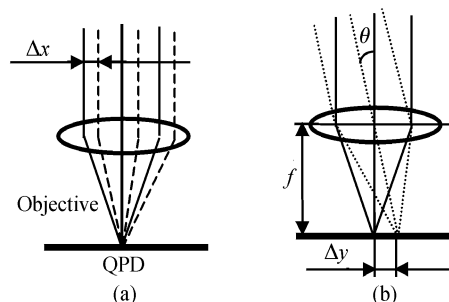


Fig. 1 Measurement for angle drift of the laser

当光束产生平漂量 Δx 时,由于入射光束平行于光轴经聚焦物镜后仍聚于焦点上,四象限探测器对光束的平漂量不敏感。当光束产生角漂即相对光轴以 θ 角入射时,光束聚焦于聚焦物镜的焦平面上并发生偏移,见图 1(b),偏移四象限探测器的中心位置量为: $\Delta y = \theta \times f$ 。其中, θ 为光束角漂量, Δy 为光束焦点偏移四象限探测器中心位置, f 为聚焦物镜焦距。显然,选取较大的焦距 f ,可增加四象限探测器对角漂量的探测能力。实际中光束角漂量是一个空间量,可分解为相互垂直的 x 向角漂 θ_x 和 y 向角漂 θ_y , 即

$$\theta_x = \Delta x / f, \quad \theta_y = \Delta y / f. \quad (1)$$

光束平漂量分离检测法见图 2,在动态调整开始时,转角反射镜首先依据四象限探测器 2(QPD2)检测的光束角漂量,进行反馈调整,来抑制光束的角漂。分光镜 BS1 位于转角反射镜之后,其反射到四象限探测器 1(QPD1)上的光束角漂量也同样得到抑制,光束角漂被抑制的越小,四象限探测器 2 接受的信号中所含角度漂移量的成分就越小,此时四象限探测器 1(QPD1)检测到的值主要为激光束的平漂量,这样就基本上实现了激光束平漂量和角漂量的分离检测。

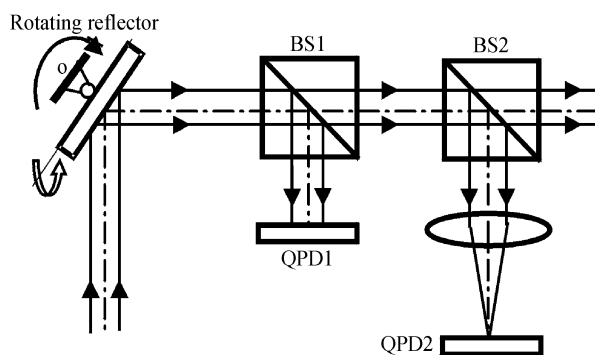


Fig. 2 Measurement for displacement drift of the laser.

QPD: Quadrantal photodiode, BS: Beam splitter

2.2 平移镜平移特性

光束平移调整见图 3,当光束进入平移镜(两平行平面镜组成)出射时,依据反射定律其出射角始终与入射角一致,即平移镜并不改变光束的方向角。

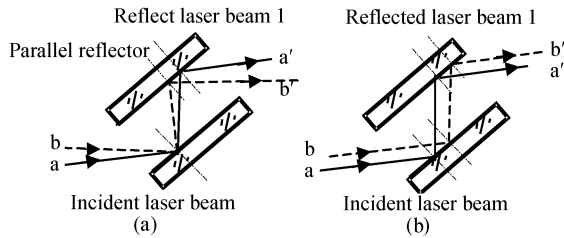


Fig. 3 Laser beam adjusting characteristics of the parallel movement mirror

如图 3(b)所示,当入射光束产生平移时,其出射光线同样亦产生相应的平移。这种特性确保了用平移镜对光束进行平移调整时,对光束角漂量不产生影响,避免了光束平漂量反馈控制和角漂量反馈控制之间的相互耦合。

光束平漂量大小计算见图 4,设光束初始入射角为 $(90^\circ - \theta)$,镜长为 L ,两平行平面镜间距为 h 。

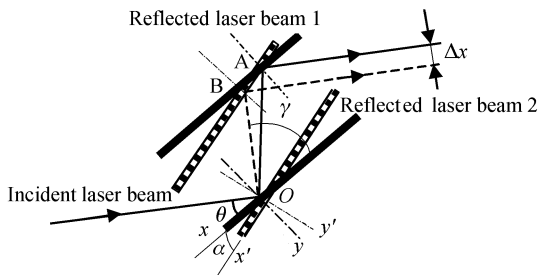


Fig. 4 Adjustment capability of the parallel movement mirror

当平移镜绕过 O 点且垂直于入射面的 Z 轴转过 α 角(因 α 很小,可认为转动前后入射光束基本不变)时,镜面转动后的入射角为 $(\theta + \alpha)$,以转动前镜面与入射面交线为 x 轴,过 O 点的镜面法线为 y 轴,入射点为坐标原点 O ,则 A 点坐标为 $(h \cot \theta, h)$,且有 $h \cot \theta < L$ 。设平移镜转动后,坐标系为 $x'Oy'$,则 B 点在 $x'Oy'$ (坐标系的坐标为 $[h \cot(\theta + \alpha), h]$)。 B 点在 xOy 坐标系和 $x'Oy'$ 的关系为

$$\begin{cases} x_B = x'_B \cos \alpha - y'_B \sin \alpha, \\ y_B = x'_B \sin \alpha + y'_B \cos \alpha, \end{cases}$$

则 B 点在 xOy 坐标系中的坐标为

$$\begin{cases} x_B = h \cot(\theta + \alpha) \cos \alpha - h \sin \alpha, \\ y_B = h \cot(\theta + \alpha) \sin \alpha + h \cos \alpha \end{cases}$$

由于 α 为小值,且 θ 远大于 α ,则上式化简为

$$\begin{cases} x_B \approx h \cot \theta - h \cdot \alpha, \\ y_B \approx h \cot \theta \cdot \alpha + h. \end{cases}$$

在 xOy 坐标系内过 A 点的出射光束 1 的方程为

$$x(\tan \theta) + y - 2h = 0,$$

则光束的偏移量大小为 B 点到出射光束 1 的距离,其值为

$$d = \frac{|\tan \theta(h \tan \theta - h \alpha) + h \tan \theta \cdot \alpha + h - 2h|}{\sqrt{\tan^2 \theta + 1}} \approx \left| h \frac{\cos 2\theta}{\sin \theta} \alpha \right|.$$

显然,当初始入射角 θ (实际中 $\arctan(h/L) < \theta < 45^\circ$)和间距 h 确定后,偏移量 Δx 可修正为

$$\Delta x \approx \frac{\cos 2\theta}{\sin \theta} h \cdot \alpha. \quad (2)$$

如图 5 所示,过入射点 o 且垂直于平移镜作截面图。由于 β 较小,当平移镜绕 o 点转动 β 角时,平移补偿镜偏转前后的光束入射点基本不变。

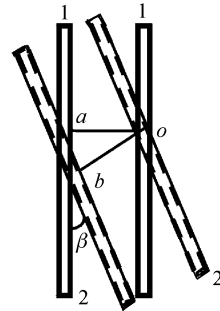


Fig. 5 Section of the parallel movement mirror

平移补偿镜处在 1-1 位置时,出射光线位于垂直于纸面过法线 oa 的平面内,当平移镜偏转 β 到 2-2 位置时,出射光线将位于垂直于纸面且过法线 ob 的平面内,出射光束的偏移量(相对于平移镜未偏移时)为 b 点相对于 a 点的偏移位置。

上下平移量为

$$\Delta y = h \cdot \sin \beta \approx h \cdot \beta,$$

左右平移量为

$$\Delta x = h \cdot (1 - \cos \beta) \approx$$

$$2h \cdot \sin^2 \left(\frac{\beta}{2} \right) = \frac{1}{2} h \beta^2 \approx 0.$$

依据图 4、图 5 方式对平移镜进行平移控制时,其出射光束可完成任意方向平动,其大小为

$$\Delta x \approx \frac{\cos 2\theta}{\sin \theta} h \cdot \alpha, \quad \Delta y = h \cdot \beta. \quad (3)$$

2.3 转角反射镜转角特性

如图 6(a)所示,当反射镜绕入射面内的 o 点由 oA 面转过 β 角到 oB 面时,反射光束将从 oc 转向 ob ,

其偏移角 γ_x 为: $\gamma_x = 2\beta$ 。如图 6(b)所示,当反射镜绕入射面与反射镜镜面的交线 AA 轴转动 δ 角时,法线将从 on 转向 om ,其出射光线也将从 aoc 面内的 oc 光束转向 aob 面内的 ob 光束,其转角为 $\gamma_y = 2\delta$ (注 δ 角很小),则空间二维转角公式如(4)式所示:

$$\gamma_x = 2\beta, \quad \gamma_y = 2\delta. \quad (4)$$

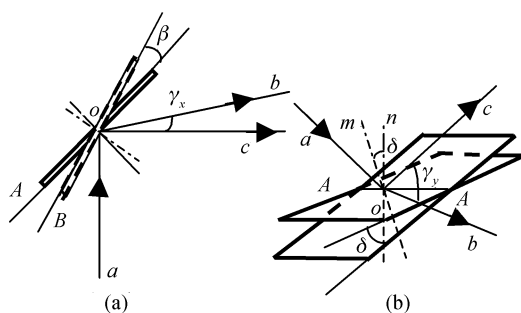


Fig. 6 Adjustment capability of the rotating angle reflector

光束在空间上的角漂总可以分解为沿光束传播方向的两个相互垂直的角漂移分量,这样通过反射镜依据(4)式,在图 6(a)和图 6(b)两相互垂直方向的相应转动,就可实现出射光束的空间角控制。

3 漂移量光纤反馈控制准直系统构成

漂移量反馈控制光纤准直系统构成见图 7,激光器出射的光束经光纤耦合器 1 进入单模光纤、准直镜头 1 进行初级准直后变为平行光射向平移光镜,平移光镜出射的光经转角反射镜射向分光镜 1 (BS1)和分光镜 2 (BS2),BS1 反射的光照射在四象限探测器 QPD1 中心上用于探测光束的平漂,BS2 反射的光经聚焦物镜聚焦在四象限探测器 QPD2 中心,QPD2 位于聚焦物镜的焦平面上,用于探测光束的角漂移量。准直过程中,计算机首先依据 QPD1 检测出的激光束的空间二维角漂分量[其大

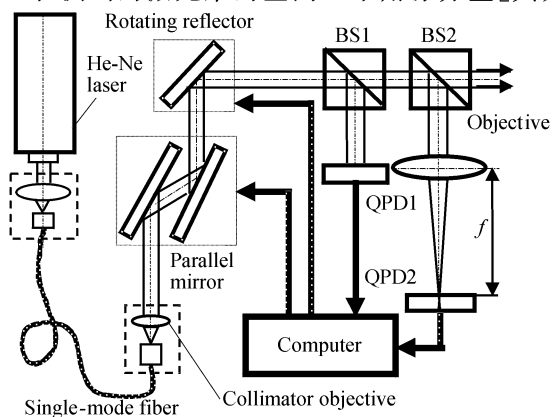


Fig. 7 Feedback adjustment laser collimator

小可由(1)式确定],来控制二维驱动机构转动角度反射镜使激光束向角漂减小的方向转动,来减小激光束的角度漂移。QPD2 探测的值主要体现为激光光束的平漂量,其大小可以通过控制二维平移反馈控制机构来抑制。光束漂移量反馈控制准直系统中,QPD1 和光束空间平漂量控制机构构成光束空间平漂量反馈控制系统,实时控制光束的空间平漂量。QPD2 和转角反射镜构成光束空间平漂量反馈控制系统,实时控制光束的空间角漂量。在光束实时反馈控制准直过程中,激光束的空间平漂量及角漂量实现了分离检测并各自形成实时反馈控制,减小了激光束控制过程中的相互耦合,提高了光束空间平漂量控制精度和准直效率。

准直系统中,四象限探测器探测器选用日本滨松公司产的 S1557 型号,其十字交叉分隔线的线宽为 $10 \mu\text{m}$ 。为减小十字交叉分隔线对检测电路精度的影响,同时提高系统的分辨力,激光器选用美国 JDS Uniphase 公司生产的 1145P 型号,其出射功率高达 35 mW 。单模光纤选用美国 Melles Griot 公司生产的型号为 05FDS207 的单模保偏光纤传输系统,它将耦合系统、光纤及准直系统集成于一体,耦合后出射光束的效率高达 65% ,出射光束的直径为 $\phi 0.7 \text{ mm}$ 光斑的圆度优于 95% ,出射点稳定度优于 $1 \mu\text{rad}/^\circ\text{C}$ 。压电陶瓷驱动器选用中国科学院成都光电所的可伸缩压电陶瓷驱动器,伸缩范围为 $-6 \mu\text{m} \sim +6 \mu\text{m}$,将其与自行研制的四路压电驱动电源及二维驱动机构相配,角度反射镜控制分辨力



Fig. 8 The photo of the laser collimation system. 1: single-mode fiber; 2: beam two-dimensional moving system; 3: fiber coupling system; 4: parallel movement mirror; 5: the measurement for displacement drift; 7: rotating angle reflector; 8: beam two-dimensional rotating system

达 2×10^{-8} rad,有效调整范围达 20×10^{-6} rad.平移控制镜分辨力达3 nm,控制范围达2000 nm,聚焦透镜的焦距选用 $f=150$ mm,信号采集及控制卡采用研华 PCL813B.光束漂移量反馈控制系统实物图如图 8 所示,整个系统主要由以下几部分组成:1)单模光纤初级准直系统;2)由空间光束平移镜机构、光束平漂量检测系统和光束空间平动正交驱动系统构成的光束空间平漂量实时调控系统;3)由光束转角镜、光束空间角漂量检测系统和光束空间转角正交驱动系统构成的光束空间角漂量实时调控系统等.整个系统由计算机协调控制和实时处理.

4 实验测试

在离出射光束准直距离为 500 mm 处,用高精度四象限光电池对其光束垂直方向和水平方向漂移量进行监测,来对其准直效果进行测试.测试时间为 900 s(15 min),共采集 40000 个点,将检测的垂直方向和水平方向漂移量位移值转化为角度值,实验数据见图 9 和图 10.

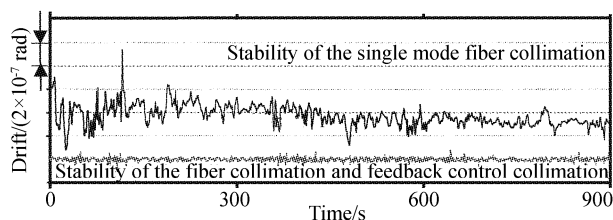


Fig. 9 Drift measurement along the horizontal orientation

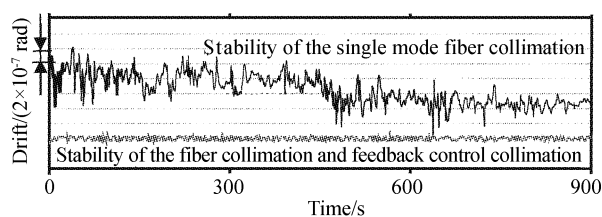


Fig. 10 Drift measurement along the vertical orientation

激光束经单模光纤准直后出射光束在水平方向达到约 0.8×10^{-6} rad的准直精度,垂直方向达到约 0.6×10^{-6} rad的准直精度.光束经单模光纤准直再经漂移量反馈控制后,水平方向达到约 0.6×10^{-7} rad的准直精度,垂直方向达到约 0.5×10^{-7} rad的准直精度.从实验看出,经过光束

漂移量反馈控制补偿后,光束的漂移量明显得到抑制,准直精度显著提高.

结论 基于单模光纤初级准直后的漂移量反馈控制准直方法具有以下显著优点:1)光波经单模光纤准直,其出射光波不受输入光波模式或位置的影响,初步抑制了激光器引起的光束角漂和平漂的影响,降低了对激光器质量本身的严要求;2)光束平漂量及角漂量进行了分离检测和各自反馈实时控制,减小了平漂量和角漂量补偿调整中的相互耦合;3)单模光纤将激光器与准直系统相隔离,减小了激光管热源对后续准直系统的影响,便于使用中的安装布置.实验表明该方法的空间准直精度(垂直与水平两方向合成)可达 0.7×10^{-7} rad.

参 考 文 献

- 1 Wan De'an. *The Technology of High Accuracy Measurement Using Laser Beam as a Straight* (激光准直高精度测量技术). Beijing: National Defence Industry Press, 1999. 2~12 (in Chinese)
- 2 Zhou Jianmin, Bai Suping. The application of laser beam in error autorectification of machine tool working table. *J. Changchun Institute of Optical and Fine Mechanics* (长春光学精密机械学院学报), 2001, **24**(1):28~30 (in Chinese)
- 3 Fang Zhongyan, Yin Chunyong, Yin Chunyong et al.. Study on high accuracy laser alignment technique. *Aviation Measurement Technique* (航空计测技术), 1997, **17**(1): 3~8 (in Chinese)
- 4 Hao Qun, Li Dacheng, Wang Yongtian. High-accuracy long distance alignment using single-mode optical fiber and phase plate. *Opt. & Laser Technol.*, 2002, **34**(4):287~292
- 5 Li Yan, Meng Xiangwang, Zhang enyao. A new-type measuring instrument on coaxiality of the holes in large-size workpiece based on laser scanning. *Laser & Infrared* (激光与红外), 2000, **30**(5):280~282 (in Chinese)
- 6 Ganesan A R, Venkateswarlu P. Laser beam collimation using Talbot interferometry. *Appl. Opt.*, 1993, **32**: 2918~2920
- 7 Mehta D S, Kandpal H C. A simple method for testing laser beam collimation. *Opt. & Laser Technol.*, 1997, **29**(8): 469~473
- 8 Zhao Weiqian. *Key Measurement Technique for Ultra-precision Discontinuous Cylindrical Form* (超精密非连续圆柱轮廓测量关键技术). Doctorial Degree dissertation. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2003. 31~38 (in Chinese)