

doi:10.3788/gzxb20174609.0912004

# 基于白光 LED 和 LD 的准直测量比较

刘未华,冯其波

(北京交通大学 理学院 发光与光信息教育部重点实验室,北京 100044)

**摘 要:**为探究白光 LED 用于准直测量的可行性与优劣势,将其与 LD 的准直光束对比,进行功率和定位的长期稳定性以及不同空气扰动下的稳定性实验与分析.实验结果表明:在功率稳定性方面,LD 开机预热后功率才能趋于稳定,长时间工作会因激光器发热而受到影响,而白光 LED 无需预热便能长时间保持稳定;在定位稳定性方面,白光 LED 产热少,由其作为热源引起系统结构的漂移明显小于 LD;根据以空气中存在均匀温度梯度场为模型的理论分析和同一干扰下白光中不同波长成分的漂移量计算结果,发现在同样干扰下,波长越长,光束受影响程度越小,白光受影响略大于 LD,为不同波长不同强度光束的加权平均效果.最后,通过基准验证实验,比较两种准直光束对同一直线导轨直线度误差的测量结果,发现白光 LED 准直光束在传播过程中强度分布保持稳定.研究表明白光 LED 成本低、功率稳、发热少,适用于准直测量.

**关键词:**准直测量;稳定性;比较研究;发光二极管;半导体激光器

**中图分类号:**O439;O435.1

**文献标识码:**A

**文章编号:**1004-4213(2017)09-0912004-8

## Comparison on Collimation Measurement between White LED and LD

LIU Wei-hua, FENG Qi-bo

(Key Laboratory of Luminescence and Optical Information, Ministry of Education, School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** To research the feasibility, advantages and disadvantages of using white LED in collimation measurement, the comparison was conducted between collimated beams from a white LED and a LD, through comparative experiments of stability in intensity and positioning during a long-term work and the stability influenced by different air disturbance. The study found that the LD needs to preheat before working, and its intensity is unstable due to raising temperature inner the laser when working for long time, while the white LED beam can keep unchanged for long time without preheating. As a cool source, the white LED introduces less drift caused by deformation of mechanical structure resulting from heating. In research on influence of air disturbance, it shows that the white LED perfects not good as the LD. According to theoretical analysis on uniform temperature gradient field in air, and calculation results of beam drift with different wavelengths in white beam under the same disturbance, a beam with longer wavelength is less affected by disturbance. Thus the influence on the white beam is a weighted average of beams with different wavelengths and intensity, which is bigger than the influence on LD. Finally, the measurements of straightness errors of a linear guide using two collimated beams were conducted, which shows intensity distribution of the white LED beam keeps stable in propagation. Over all, the white LED has low cost, more stable intensity and less heating, and can be applied for collimation measurement.

**Key words:** Collimation measurement; Stability; Compare research; LED; LD

**OCIS Codes:** 120.4630; 010.7060; 060.3510; 080.2740

基金项目:国家自然科学基金国家重大科研仪器研制项目(No.51527806)资助

第一作者:刘未华(1991-),女,硕士研究生,主要研究方向为光电检测技术.Email:14121613@bjtu.edu.cn

导师(通讯作者):冯其波(1962-),男,教授,博士,主要研究方向为光电检测技术.Email:qbfeng@bjtu.edu.cn

收稿日期:2017-03-14;录用日期:2017-05-15

## 0 引言

在基于激光准直测量的方法或系统<sup>[1-4]</sup>中,要求准直光束中心连线为直线,且该直线不随时间和空间改变.然而,准直光束受机械结构不稳定、谐振腔因温度变化而变形、空气折射率变化等多种因素影响,产生漂移,严重影响系统测量精度.为此,研究者提出多种抑制或补偿光束漂移的方法,其中,基于单模光纤耦合激光<sup>[5-6]</sup>的准直方法能够在一定程度上抑制谐振腔变形引起的光线漂移,提高热稳定性并缩小测量头体积;基于反馈控制<sup>[7-8]</sup>的方法能够定量控制补偿量,但控制效果受限于控制系统的精度与稳定性;基于共路补偿<sup>[9-12]</sup>的方法因补偿效果良好而获得关注,然而由于难以严格保证测量光束与补偿光束共路,补偿效果受限.目前,能完全消除激光漂移影响的有效途径尚未见报道.

在准直测量领域,半导体激光器(Laser Diode, LD)因具有体积小、效率高、便于集成的优点,具有广泛运用.然而,LD存在升温明显且对温度敏感的缺陷<sup>[13]</sup>,难以适应更高精度的测量要求.相比之下,发光二极管(Light Emitting Diode, LED)是一种基于自发辐射发光的低成本冷光源,无阈值电流且无谐振腔结构.然而,利用LED来进行准直测量,目前鲜有相关研究.考虑到白光LED(w-LED)具有亮度高、寿命长的特点<sup>[14]</sup>,本文利用w-LED和LD进行多组对比实验,比较两种准直光束在功率和定位两方面的稳定性优劣以及受空气扰动影响的程度,并对相同空气扰动下二者的稳定性差异做出理论和实验分析.最后,将两种准直光束应用于同一直线导轨直线度误差的重复测量,以验证w-LED准直光束用于准直测量的可行性.

## 1 长期稳定性比较

由于国内外市场中w-LED品类繁多且无统一标准,相关技术类型和工艺水平可能会对各类w-LED的稳定性产生影响,受实验条件所限,研究难以涵盖各类w-LED.因此,选用具有代表性的CREE品牌下属XPE系列3W贴片作为研究对象.该w-LED贴片无温控、稳流设计,输出光束通过自聚焦透镜耦合进入单模光纤,再经显微物镜准直.对比LD选用的是Bluesky公司带有温控模块的单模光纤半导体激光器,波长为635 nm.光斑大小均为3 mm,CCD像元尺寸为 $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ .

### 1.1 功率稳定性

测量光束光功率的变化通常会对光电探测器测量分辨率造成影响.为比较两种光源输出光束的功率稳定性,搭建如图1所示的对比实验系统,实验中将CCD置于光源后0.2 m处,同时开启w-LED和LD,10 min后开始每隔3 min测量一组数据.

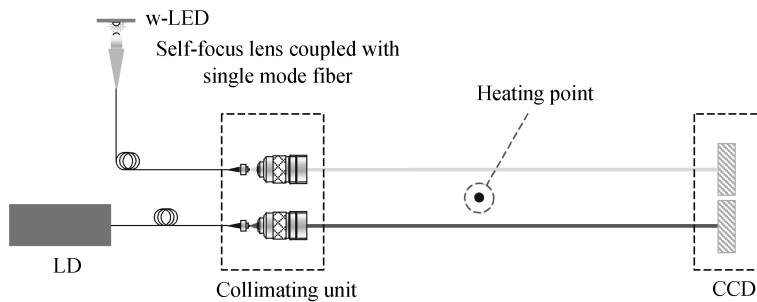


图1 w-LED与LD对比实验系统示意图

Fig.1 Comparative experiment system for w-LED and LD

图2为两种光束的归一化功率变化情况,可看出:LD自开机起功率变化较大,需预热30 min后逐渐趋于稳定,而w-LED只存在微小震荡;在长期使用过程中,LD输出功率呈下降趋势,而w-LED自开机起可长时间保持稳定.实际上,在长期使用过程中,LD内部温度升高,一方面会导致阈值电流升高从而引起激光输出功率降低,另一方面会使谐振腔变形导致光束漂移,从而引起光束与光纤耦合的效率改变.虽然实验所用LD带有温控模块,但温度造成的影响难以全部消除.相比之下,LED无阈值电流且无谐振结构,光功率可长时间保持稳定.另外,由于LED输出功率与电流成线性相关,而实验所用驱动电路未进行稳流设计,因此输出功率存在微小范围的抖动,如果增加稳流电路,w-LED的功率将得到进一步稳定.

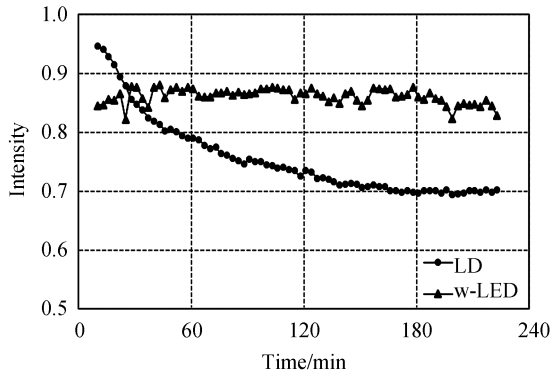


图2 w-LED和LD的长期功率稳定性  
Fig.2 Stability of intensity of w-LED and LD for long time

### 1.2 定位稳定性

为避免光斑定位受光强变化影响,采用基于自适应阈值<sup>[15]</sup>的灰度重心法<sup>[16]</sup>来进行光斑定位.图3为开机起3.5 h内光斑漂移结果.可知,在相同时间里,水平方向上LD和w-LED光斑分别漂移 $1.53\ \mu\text{m}$ 和 $0.78\ \mu\text{m}$ ,垂直方向上LD和w-LED光斑分别漂移 $4.33\ \mu\text{m}$ 和 $0.67\ \mu\text{m}$ .可以看出,两种光源在使用过程中均会因发热引起系统机械结构热胀冷缩,产生光束漂移,且LD作为热源造成的影响明显大于w-LED.

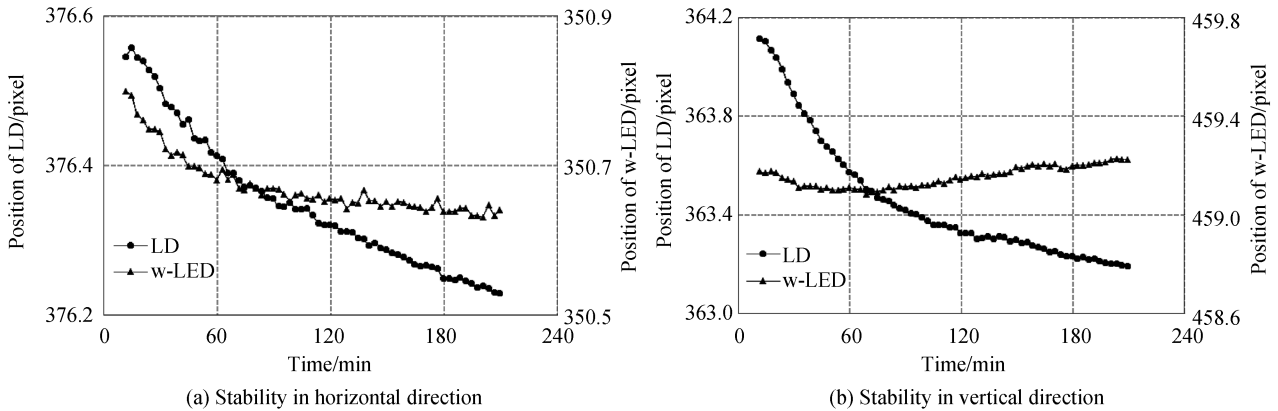
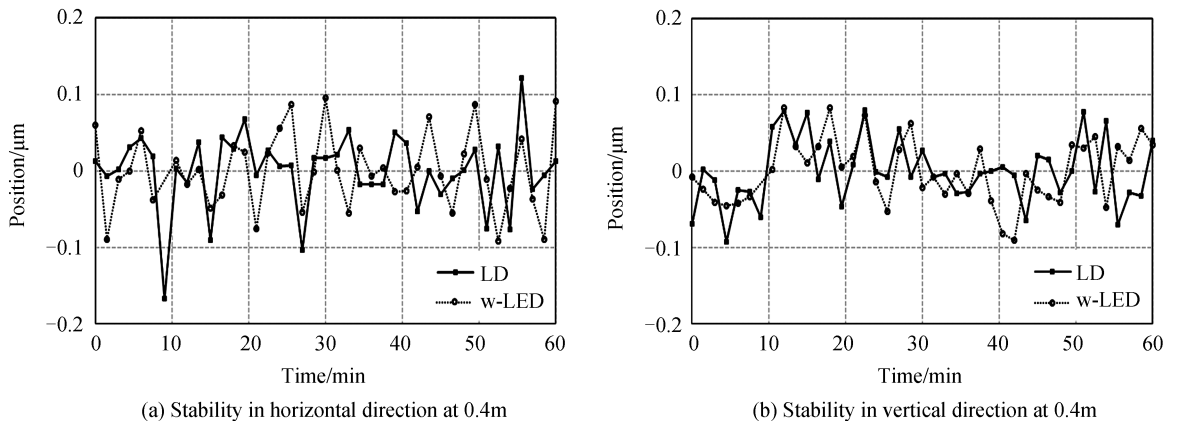


图3 w-LED和LD的长期定位稳定性  
Fig.3 Stability of position of w-LED and LD for long time

## 2 空气扰动的影响

### 2.1 比较实验

为验证空气扰动对w-LED和LD光斑定位稳定性的影响,进行3组稳定性对比实验:1)CCD距离光源0.4 m;2)CCD距离光源2.5 m;3)保持CCD距离光源2.5 m,在离光源1 m处放置一个 $400^\circ\text{C}$ 干扰热源,在图1中用虚线示意.为直观比较3种条件下实验结果,将数据平移至原点进行比较,结果如图4.



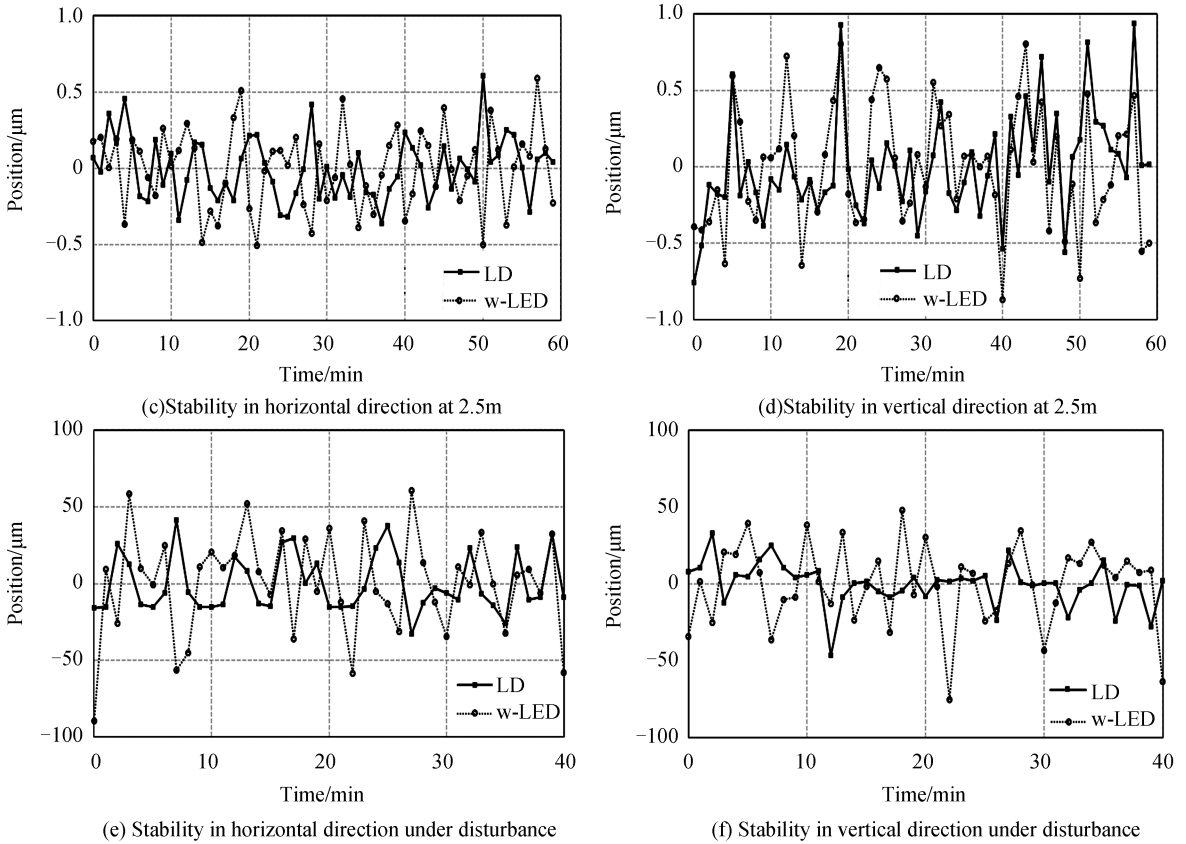


图 4 不同条件下 w-LED 和 LD 定位稳定性

Fig.4 Stability of position in different conditions of w-LED and LD

根据图 4 中数据,计算各自光斑位置变化标准偏差,结果见表 1.可以看出,在 0.4 m 处,空气扰动影响较小,两种准直光束稳定性相当;在 2.5 m 处,存在一定空气扰动影响,w-LED 准直光束稳定性略差;增加干扰热源时,两者稳定性差异较为明显,其中存在由干扰热源发热不均带来的偏差.

表 1 不同条件下定位标准偏差(单位:μm)

Table 1 Standard deviations of position in different conditions (unit: μm)

No.	LD-horizontal	w-LED-horizontal	LD-vertical	w-LED-vertical
1	0.049 8	0.050 2	0.043 0	0.042 2
2	0.201 8	0.260 8	0.340 9	0.399 2
3	18.623 9	33.123 0	4.258 0	8.039 7

## 2.2 实验分析

光束在空气中传播时,空气折射率受到温度、气压和湿度影响,分布不均且变化,对光束传播造成影响,其中温度为主要因素<sup>[17]</sup>.考虑到实验室或高精密机床车间环境相对封闭和稳定,因而以传播路径上仅存在垂直方向的均匀温度梯度场为模型进行分析.

如图 5,光束以一定入射角进入,在理想情况下,光束沿直线轨迹  $l_1$  到达 A 点;存在温度梯度场  $dT/dy$

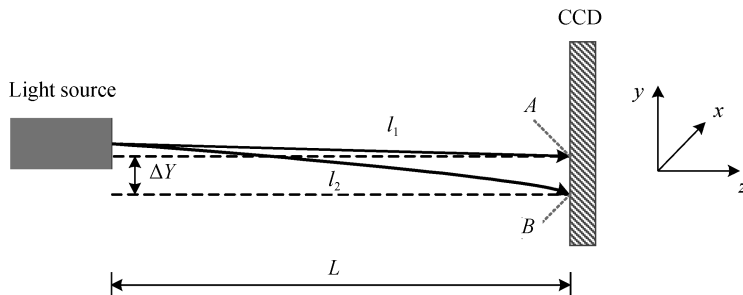


图 5 均匀温度梯度场下的光线弯曲

Fig.5 Light bending under uniform temperature gradient field

时,假设空气折射率自上而下逐渐增大,则光束发生弯曲,沿轨迹  $l_2$  传播至  $B$  点,表现为探测器接收面上光斑位置发生漂移.假设光束传播距离为  $L$ ,  $y$  方向上折射率梯度场  $dn/dy$ ,则光线弯曲量  $\Delta Y$  近似表示为<sup>[18]</sup>

$$\Delta Y = -(L^2/2) \times dn/dy \quad (1)$$

在可见光波段,空间某一点  $y$  处空气折射率  $n(y)$  可表示为<sup>[19]</sup>

$$n(y) = 1 + 77.6 \times 10^{-6} (1 + 7.52 \times 10^{-3} \lambda^{-2}) \frac{P(y)}{T(y)} \quad (2)$$

式中,  $\lambda$  为波长,单位为  $\mu\text{m}$ ,  $P(y)$  为  $y$  处压强,单位为 100 Pa,  $T(y)$  为  $y$  处温度,单位为 K.

由于气压梯度极小,故以常数  $P$  代替  $P(y)$ .考虑到对比实验中两光束经过的温度场几乎完全相同,因此,光线相对的弯曲量可简单表示为  $\Delta Y'$

$$\Delta Y' = \Delta Y/a = 1 + 7.52 \times 10^{-3} \lambda^{-2} \quad (3)$$

式中,  $a = 77.6 \times 10^{-6} \times \frac{L^2}{2} \times \frac{P}{T^2(y)} \times \frac{dT}{dy}$ .

则在同样的温度场条件下,光线弯曲量与波长的关系如图 6.

根据图 6 可以看出,对于经过同一均匀温度梯度场的不同波长光束,光线弯曲量  $\Delta Y$  与  $\lambda^2$  成反比,在探测器接收面上表现为波长越长,光斑漂移量越小,反之亦然.为进一步得到相同空气扰动对不同波长产生的实际影响效果,使用高强度热源对准直白光进行干扰并分别测量不同波长成分光束的稳定性.由于实验所用白光波长组成复杂,仅以红光(R)、绿光(G)、蓝光(B)三种波段区分.随机选取某一时刻采集图像,计算光斑阈值重心并绘制过重心强度分布曲线,以水平方向结果为例进行分析,如图 7,

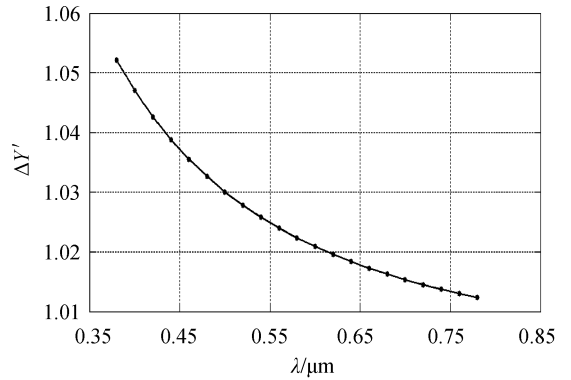


图 6 不同波长下的光线弯曲量  
Fig.6 Light bending of different wavelengths

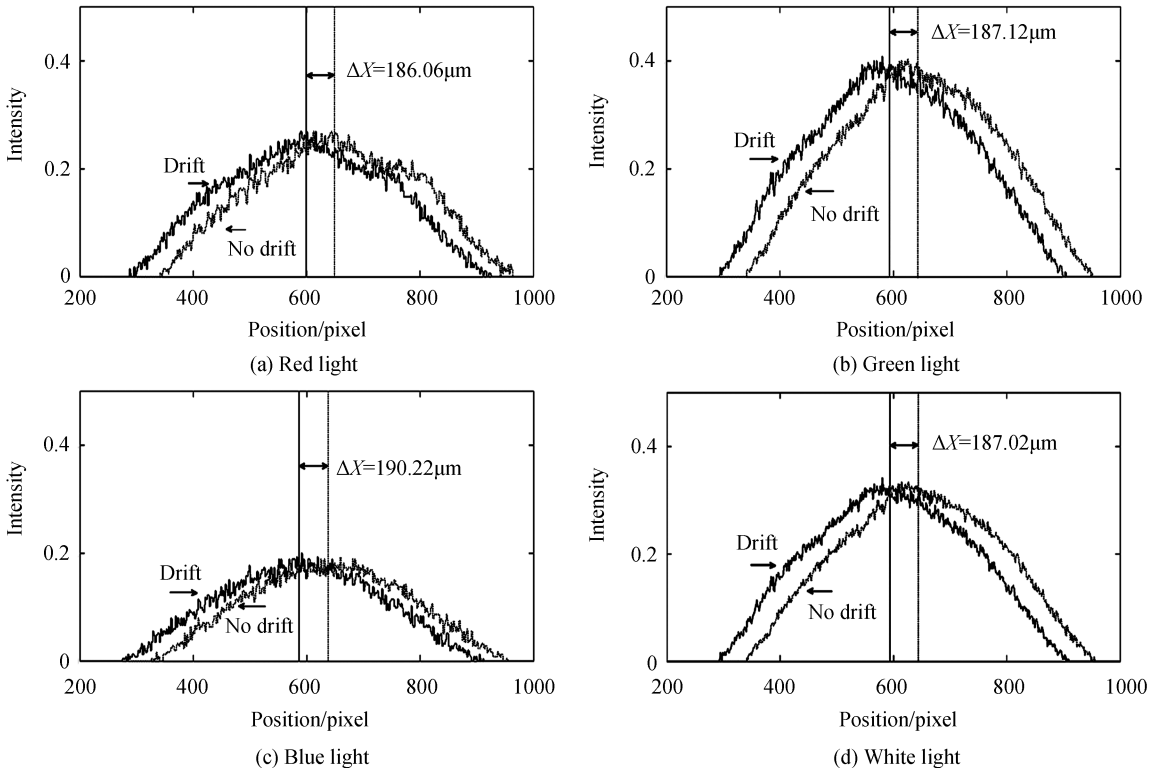


图 7 水平方向上过重心强度分布曲线  
Fig.7 Distribution curve of intensity through center of gravity in horizontal direction

其中,实曲线和虚曲线分别表示光斑在干扰情况下发生漂移后的光斑分布和在无干扰情况下的光斑分布,实直线和虚直线为对应光斑分布的重心位置。

根据图 7,在相同干扰下,RGB 三种光束分别发生漂移  $186.06 \mu\text{m}$ 、 $187.12 \mu\text{m}$ 、 $190.22 \mu\text{m}$ ,而混合白光光斑重心发生漂移  $187.02 \mu\text{m}$ 。可以看出,波长越短,光斑漂移量越大。而对于白光,不同波长成分受到影响程度不同,导致在探测器接收面上光斑分布发生变化,重心漂移表现为不同波长不同强度光束的加权平均效果。在图 4 不同条件下的定位稳定性对比实验中,所用 LD 波长为  $635 \text{ nm}$ ,对应 R 光,因而,在同样的干扰条件下,理论上其稳定性优于 w-LED,这与对比实验结果相符。

### 3 基准验证

为验证 w-LED 在传播过程中光斑分布是否变化,影响测量基准,将 LD 和 w-LED 先后对同一段长  $500 \text{ mm}$  的直线导轨的直线度误差进行 3 次重复测量,结果如图 8(a)~(d),其中实线表示 3 次测量结果,虚线表示 3 次测量结果之间的最大偏差。

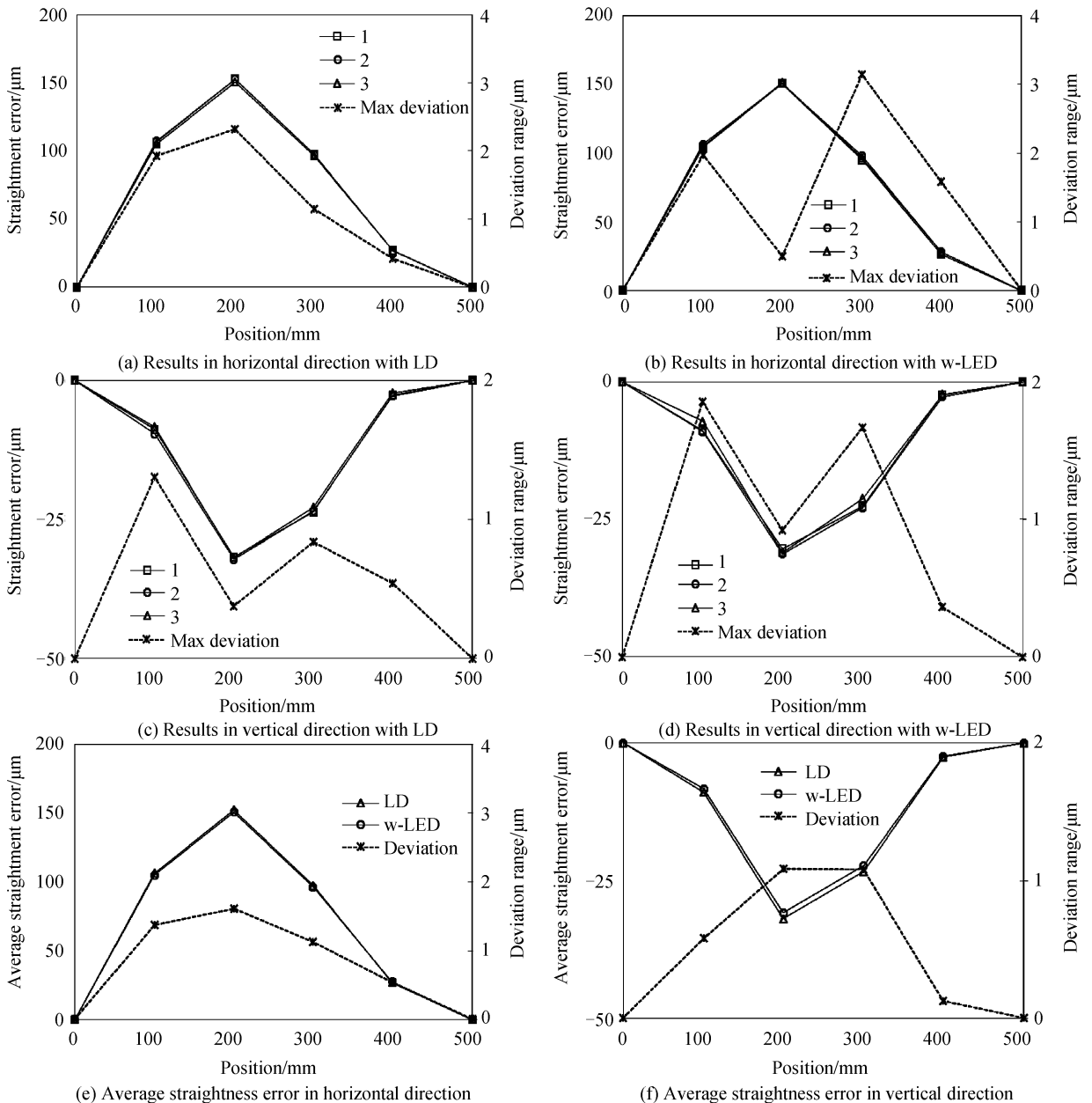


图 8 两种光源的对同一直线导轨直线度误差测量结果  
Fig.8 Straightness error of the same linear guide using w-LED and LD

根据图 8(a)~(d),在 3 次重复测量中,水平方向上 LD 和 w-LED 的 3 次测量结果的偏差范围为  $\pm 1.17 \mu\text{m}$  和  $\pm 1.57 \mu\text{m}$ ,垂直方向上 LD 和 w-LED 的 3 次测量结果偏差范围为  $\pm 0.65 \mu\text{m}$  和  $\pm 0.93 \mu\text{m}$ ,二者均具有良好的重复性.为比较两种测量是否一致,将重复测量结果取平均值进行比较,结果见图 8(e)~(f).可以看出,在两种测量结果偏差最大的 200 mm 位置处,水平方向上,LD 和 w-LED 平均直线度误差分别为  $152.33 \mu\text{m}$  和  $150.71 \mu\text{m}$ ,偏差仅为  $1.62 \mu\text{m}$ ;垂直方向上,LD 和 w-LED 平均直线度误差分别为  $-31.95 \mu\text{m}$  和  $-30.86 \mu\text{m}$ ,偏差仅为  $1.09 \mu\text{m}$ .因此,两种测量结果基本一致,其中的微小差异来源于准直光束与 CCD 平面存在不同的夹角偏差,以及导轨与导轨运动副之间存在的细小间隙.实验证明,w-LED 光束在传播过程中,光斑强度分布基本稳定不变,可作为测量基准.

## 4 结论

本文比较了 w-LED 和常用准直光源 LD 准直光束稳定性优劣以及受空气扰动影响的差异.研究发现:1)在功率稳定性方面,LD 开机预热 30 min 后功率方能趋于稳定,长时间使用时会因内部温度升高而受到影响,而 w-LED 开机后可长时间保持功率稳定,且可通过增加稳流电路控制进一步改善;2)在定位稳定性方面,在作为热源引起系统结构的漂移问题上,w-LED 带来的影响明显小于 LD;3)在相同的空气扰动下,w-LED 受到的影响略大于 LD,理论和实验分析表明波长越长,同样干扰条件下受影响程度越小,白光所受影响表现为不同波长不同强度光束的加权平均效果.最后,将两种准直光束应用于同一直线导轨直线度误差的重复测量,发现两种测量结果差异极小.可以看出,w-LED 光束在传播过程中,光斑强度分布基本稳定不变,可作为测量基准.

总体而言,与 LD 相比,w-LED 具有成本低、功率稳定、发热小等优势.在准直测量领域,除了因谱宽限制难以用于干涉测长,w-LED 可适用于大部分测量场合.然而,由于 w-LED 复杂波长组成,在准直测量的应用范围受限于工作距离.在后续研究中,将提高发散光与单模光纤之间耦合效率,以获得可用的单色 LED 准直光束输出,进一步提高 LED 准直测量的应用范围.

## 参考文献

- [1] KUANG Cui-fang, FENG Qi-bo, ZHANG Bin, *et al.* Study of the method for measuring four-degree-of-freedom geometric errors of a linear stage [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, **32**(9): 1266-1270.  
匡萃方, 冯其波, 张斌, 等. 直线导轨四自由度同时测量方法的研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(9): 1266-1270.
- [2] LIU C H, JYWE W Y, HSU C C, *et al.* Development of a laser-based high-precision six-degrees-of-freedom motion errors measuring system for linear stage[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, **76**(5): 055110
- [3] WANG W, KWEON S H, Hwang C S, *et al.* Development of an optical measuring system for integrated geometric errors of a three-axis miniaturized machine tool[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, **43**(7-8): 701-709.
- [4] FANG Chao, XIANG Yang. Design of centering system by using collimation and interference with two channels[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(10): 1180-1185.  
方超, 向阳. 双光路成像干涉定心系统设计[J]. *光子学报*, 2012, **41**(10): 1180-1185.
- [5] FAN K C, ZHAO Y. A laser straightness measurement system using optical fiber and modulation techniques[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2000, **40**(14): 2073-2081.
- [6] FENG Qi-bo, LIU Yi-zhen, ZHAN Bin, *et al.* A simple laser collimator based on single-mode fiber-coupled laser module [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2005, **26**(1): 28-31.  
冯其波, 刘依真, 张斌, 等. 基于半导体激光光纤组件的激光准直仪[J]. *仪器仪表学报*, 2005, **26**(1): 28-31.
- [7] SUZUKI T, TAKAHASHI T, SASAKI O. Disturbance-free phase-shifting laser diode interferometer using adaptive feedback control[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(29): 5561.
- [8] LI Jie-an, TAN Jiu-bin, CUI Ji-wen. Study on method of feedback compensation drift of collimation beam based on filter [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2013, **24**(2): 336-342.  
李结安, 谭久彬, 崔继文. 基于滤波的准直光束漂移反馈补偿方法研究[J]. *光电子·激光*, 2013, **24**(2): 336-342.
- [9] FENG Q, ZHANG B, CUI C, *et al.* Development of a simple system for simultaneously measuring 6DOF geometric motion errors of a linear guide[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(22): 25805-25819.
- [10] CUI C, FENG Q, 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): 6735-6748.
- [11] ZHU F, TAN J, CUI J. Common-path design criteria for laser datum based measurement of small angle deviations and laser autocollimation method in compliance with the criteria with high accuracy and stability[J]. *Optics Express*, 2013,

- 21**(9): 11391-11403.
- [12] CHEN B, XU B, YAN L, *et al.* Laser straightness interferometer system with rotational error compensation and simultaneous measurement of six degrees of freedom error parameters[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(7): 9052-9073.
- [13] SHAN Cheng-yu. Temperature's effect on semiconductor laser performance parameter [J]. *Jilin Normal University Journal*, 2003, **24**(4): 95-97.  
单成玉. 温度对半导体激光器性能参数的影响[J]. 吉林师范大学学报, 2003, **24**(4): 95-97.
- [14] ZHANG Hang, YU Xi, PAN Hao, *et al.* Calculation of correlated color temperature in optical simulations for white LEDs[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, **36**(5): 583-587.  
张航, 喻玺, 潘浩, 等. 白光 LED 光学仿真中的相关色温计算[J]. 发光学报, 2015, **36**(5): 583-587.
- [15] ZHUANG Zhe-min, ZHANG Cong-you, YANG Jin-yao, *et al.* Investigation on visual background extractor based on gray feature and adaptive threshold[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, **37**(2): 346-352.  
庄哲民, 章聪友, 杨金耀, 等. 基于灰度特征和自适应阈值的虚拟背景提取研究[J]. 电子与信息学报, 2015, **37**(2): 346-352.
- [16] GUO Yu-bo, YAO Yu, DI Xiao-guang. Improved sub-pixel algorithm[J]. *Opto-electronic Engineering*, 2006, **33**(10): 137-140.  
郭玉波, 姚郁, 迪晓光. 一种改进的亚像素算法[J]. 光电工程, 2006, **33**(10): 137-140.
- [17] CHI Feng, ZHU Yu, ZHANG Zhi-ping, *et al.* Environment compensation technologies in dual-frequency laser interferometer measurement system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(4): 190-196.  
池峰, 朱煜, 张志平, 等. 双频激光干涉测量中的环境补偿技术[J]. 中国激光, 2014, **41**(4): 190-196.
- [18] DANG Min, FENG Qi-bo. Methods of improving accuracy of laser collimation[J]. *Photon Technology*, 2006(4): 190-193.  
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.
- [19] ANDREWS L C, PHILLIPS R L. Laser beam propagation through random media[M]. Bellingham, Washington: SPIE press, 2005: 63-64.