

# 激光准直测量中的光漂补偿方法

翟玉生<sup>1\*</sup>, 柳文龙<sup>2</sup>, 王新杰<sup>2</sup>, 谢泽铨<sup>1</sup>, 闫赛赛<sup>1</sup>, 郭逸航<sup>1</sup>

<sup>1</sup>郑州轻工业大学物理与电子工程学院, 河南 郑州 450002;

<sup>2</sup>郑州轻工业学院机电工程学院, 河南 郑州 450002

**摘要** 以二维位移测量为应用实例,在对光漂的产生机制及特性进行分析的基础上,提出了一种差分补偿和共路补偿相结合的光漂补偿方案,并对所采用的两种补偿方法进行了详细分析及实验验证。实验结果表明,对于光线角度漂移和总漂移,差分补偿法分别可以实现 35.2%和 54.4%的补偿效果,共路补偿法对光线总漂移可以实现 42.2%的补偿效果。研究结果可为解决激光准直测量中光漂补偿这一共性问题提供技术支持。

**关键词** 测量; 激光准直技术; 光线漂移; 补偿

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.071203

## Methods for Laser Beam Drift Compensation in Laser Alignment Measurement

Zhai Yusheng<sup>1\*</sup>, Liu Wenlong<sup>2</sup>, Wang Xinjie<sup>2</sup>, Xie Zehua<sup>1</sup>, Yan Saisai<sup>1</sup>, Guo Yihang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Physics and Electronic Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou, Henan 450002, China;

<sup>2</sup>Mechanical and Electrical Engineering Institute, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou, Henan 450002, China

**Abstract** With the two-dimensional displacement measurement as an application example and based on the analysis of the generation mechanism and characteristics of laser beam drifts, a method for laser beam drift compensation is proposed by the combination of differential compensation with the common path compensation. In addition, these two compensation methods are analyzed in detail and verified by experiments. The experimental results show that, the compensation effects of the angular drift and total drift of the beam for the differential compensation method are 35.2% and 54.4%, respectively. In contrast, the compensation effect of the total drift of the beam for the common path compensation method is 42.2%. The research results can provide a technical support for solving the common problem of beam drift compensation in laser alignment measurement.

**Key words** measurement; laser alignment technology; beam drift; compensation

**OCIS codes** 120.4630; 120.1680; 120.4820

## 1 引言

激光准直光束具有良好的指向性,常被作为测量基准应用于精密测量、精准定位等领域,但激光束在出射以及传播过程中常会产生光线漂移,影响了激光准直测量的精度。激光光线漂移问题<sup>[1-2]</sup>是高

精度激光准直测量<sup>[3-4]</sup>应用中一个关键的共性问题,由于引起激光光线漂移的因素众多,光线漂移的性质也不同,因此如何根据主要影响因素有针对性地设计光漂补偿模型,从而获得有效的光漂补偿方法,成为了高精度激光准直测量中的难点。针对光线漂移问题,国内外有很多基于不同思路和技术手段的

收稿日期: 2018-09-29; 修回日期: 2018-10-16; 录用日期: 2018-10-24

基金项目: 国家自然科学基金河南省联合项目(U1304507)、河南省自然科学基金(182300410189)、河南省科技发展计划(172102210552,182102310732)

\* E-mail: hf\_sy@sohu.com

研究<sup>[5-11]</sup>,各具特点;但是,目前激光准直测量应用中采用的光漂补偿方案大多存在方法单一、难以兼顾不同特性的光漂、补偿效果不够理想的问题,而且很多方法特异性强,系统性分析较少,尤其是针对不同性质光漂的补偿验证分析较少,影响了其通用性和可借鉴性。本文以二维位移测量为应用实例,在对光漂不同产生机制及特性进行分析的基础上,提出了一种二维位移测量方案,并对所采用的差分补偿和共路补偿两种光漂补偿方法进行了详细分析及实验验证。

## 2 激光光线漂移特性

从激光光线漂移的产生机制来看,主要包括:

1) 受激光器自身温度梯度以及材料不均匀性等因素的影响,激光器谐振腔两反射镜相对位置会发生变化,使得激光器输出的光束发生漂移;2) 固定激光器的机械装置的不稳定性及一些连接部件之间的蠕变,导致激光光线缓慢漂移;3) 大气气流的随机变化、大气中温度梯度和压力梯度等光线传输中的环境因素,均会造成激光光线漂移,如气流、温差、气压等会导致空气密度分布发生变化,对光线传输来说,等效于存在光疏媒质和光密媒质的变化,当激光光束在其中传输时,由于存在不同传播媒质界面的折射,从而产生光线漂移。

在以上由不同原因造成的光线漂移中,激光器自身引起的光线漂移和激光器固定装置引起的机械漂移具有一个相同的特性,即其对于整个光路中的不同光线具有相同的影响,是一种完全相关的共模信号。然而,光线传输过程中由环境因素引起的光线漂移,因为环境影响在空间上的非同一性,对于光路中的不同光线来说,光线漂移信号是不完全相关的,因此更加难以处理,也是研究的重点。

激光光线漂移在体现形式上可分为光线的平行漂移与角度漂移。基于光线传输过程中环境因素引起光线漂移的物理机制,可以建立相应的激光光线平行漂移和角度漂移的简化模型。

光线平行漂移模型如图 1(a)所示。设空气折射率为  $n_0$ ,环境扰动所引起的空气折射率变化可以等效于折射率为  $n_1$  的等厚度介质层,当存在环境扰动时,光线经折射率为  $n_1$  的等厚度介质层后发生了光线的平行漂移。

光线角度漂移模型如图 1(b)所示。设空气折射率为  $n_0$ ,环境扰动所引起的空气折射率变化可以等效于折射率为  $n_1$  的不等厚(楔形)介质层,当存在

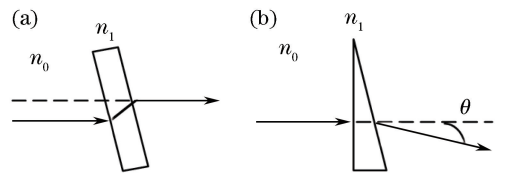


图 1 环境因素引起光线漂移示意图。(a) 平漂模型;  
(b) 角漂模型

Fig. 1 Schematic of beam drifts caused by environmental factors. (a) Parallel drift model; (b) angular drift model  
环境扰动时,光线经折射率为  $n_1$  的楔形介质层后发生了光线的角度漂移。

实际上,空气扰动因素对于光线漂移的影响要复杂得多,空气扰动只是激光光线漂移的成因之一,多种因素间的耦合将进一步增加激光光线漂移的复杂性。

激光准直测量以激光光束指向为基准,基于光电位置敏感探测器的光斑位置检测而实现<sup>[12-14]</sup>,光信号需要转换为电信号接收处理;因此,了解激光光线漂移信号的频谱特性<sup>[15-16]</sup>,对于高精度光电测量系统设计而言至关重要。为此,针对空气扰动所致光线漂移信号进行频谱特性及相关分析。

空气扰动所致光线漂移的测量采用如图 2 所示的光路。除了光电位敏探测器 QD1 以外,其余光路部分密闭,空气扰动所致光线漂移只反应到 QD1 上。经分光镜 BS1 分束后的光束  $I_1$  和光束  $I_2$ ,其光程相等,光电位敏探测器 QD2 和 QD1 规格型号批次相同,两者同步采集的光斑位置信号求差后,作为空气扰动所致的光线漂移信号。

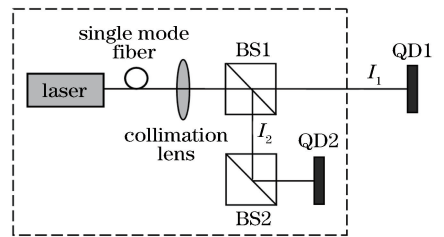


图 2 空气扰动引起光线漂移的测量原理  
Fig. 2 Measurement principle of beam drift caused by air disturbance

除了分析光漂信号功率谱,本文还针对常用的两种信号处理方法进行分析:一种是低通滤波处理,另一种是对每 30 个采样数据进行均值处理。

实际测量应用中的待测量大多属于缓变量,即主要是低频成分。如图 3(a)所示,空气扰动产生的光漂信号也主要集中在低频部分。如图 3(b)所示,在进行信号处理前,光斑位置变化为  $-2 \sim$

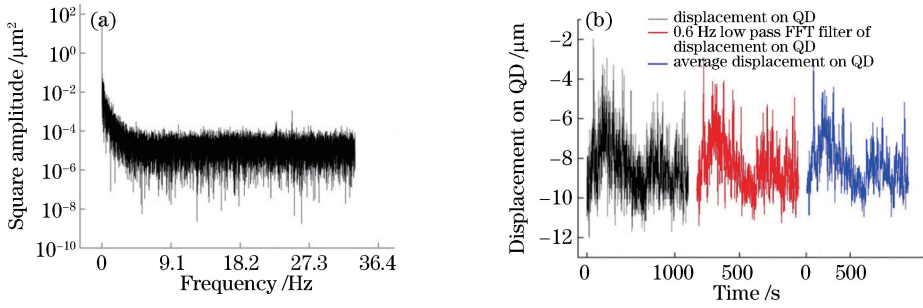


图 3 空气扰动引起光线漂移信号的频谱特性。(a)信号功率谱;(b)信号处理结果

Fig. 3 Spectral characteristics of beam drift caused by air disturbance. (a) Signal power spectrum; (b) signal processing result

-12  $\mu\text{m}$ ,最大变化量为 10  $\mu\text{m}$ ;在进行频率为 0.6 Hz的低通滤波处理后,光斑位置变化为-3~-11.4  $\mu\text{m}$ ,最大变化量为 8.4  $\mu\text{m}$ ;30次均值处理后,光斑位置变化为-2.8~11  $\mu\text{m}$ ,最大位移变化量为 7.8  $\mu\text{m}$ 。显然,对于以低频为主的空气扰动产生的光漂信号,通过低通滤波和均值法进行处理的效果不甚明显。

### 3 激光光线漂移补偿

基于对激光光线漂移来源、产生机制、表现形式以及频谱特性的分析,设计激光二维位移测量中的光漂补偿系统,并对其进行实验验证和分析。

#### 3.1 激光二维位移测量方法

从信号处理的角度,采用低通滤波和均值法可以有效减小中高频噪声的影响,而对于像空气扰动产生的这种是以低频为主的光漂信号,如前所述,其处理效果不佳。针对此类光漂信号,需要结合针对性设计的光路结构,进行光漂补偿,以减小其对测量精度的影响。

带有光漂补偿的激光二维位移测量光路如图 4 所示。整个光路包括固定单元和移动单元两部分。移动单元,即作为测量敏感元件的角锥棱镜 RR,若其发生  $x$  和  $y$  方向的位移,由角锥棱镜特性可知,测量光束  $I_1$  在四象限位敏探测器 QD1 上的光斑将发生二倍的位移。光束  $I_2$  以及 QD2、PSD2 和 PSD1 三个位敏探测器对应光路可分别用于不同类型的光漂补偿。

#### 3.2 差分补偿结构

激光准直测量系统大多采用光电位置敏感探测器,根据其工作原理,光源选择时主要考虑光束的光强分布均匀性及空间稳定性。采用单模光纤耦合激光器可以改善光束质量,抑制光源自身产生的光束

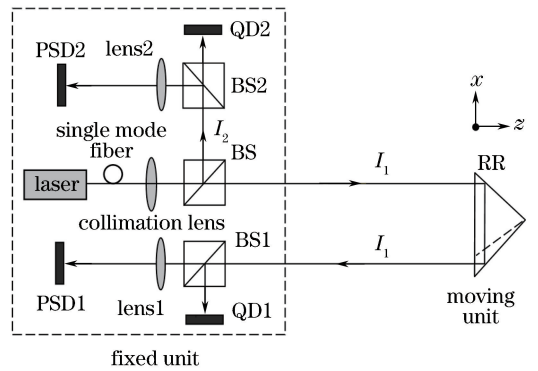


图 4 带有光漂补偿的激光二维位移测量原理

Fig. 4 Measurement principle of two-dimensional displacement with laser beam drift compensation

漂移,大大提高光束的空间稳定性。但是,对于精密测量,尤其是远距离测量,光源自身光漂对测量的影响依然很大,不可忽视。

光源及其机械支撑结构引起的光线漂移,对于整个系统光路是相同的,属于完全相关的共模信号,差分处理可以起到很好的补偿效果。

如图 4 所示,激光准直出射后,经 BS 分束为光束  $I_1$  和光束  $I_2$ ,光束  $I_1$  作为测量光束,光束  $I_2$  作为补偿光束,用于补偿光源及其机械支撑结构等引起的共模信号性质的光漂影响。在 QD2 与 BS 距离不大的情况下,光源部分的光线平漂可直接通过 QD2 与 QD1 的差分处理实现补偿;光源部分的光线角漂可通过 PSD2 结合对应光路测得,其乘以测量光束  $I_1$  到达 QD1 的光程后,与 QD1 差分处理即可实现完全补偿。

除了光源及其机械支撑结构引起的光线漂移,差分补偿结构也可用于补偿光线传输过程中引入的光线漂移。为测试验证其补偿效果,设计如图 5 所示的差分补偿光路。

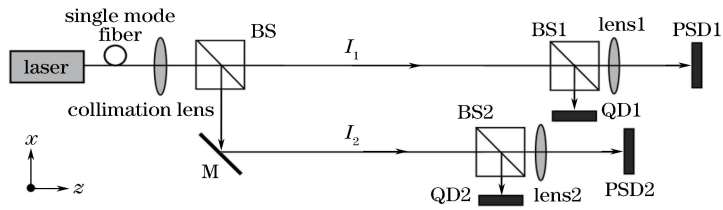


图 5 差分补偿光路

Fig. 5 Optical path for differential compensation

激光经单模光纤耦合并准直后出射,由 BS 分为  $I_1$  和  $I_2$  两束,光束  $I_1$  作为测量光束,光束  $I_2$  作为补偿光束,两束光分别经 BS1 和 BS2 分束后,由对应的 QD 和 PSD 测出各自的光线平行漂移和角度漂移。

在实验室条件下,激光器预热 30 min 后进行数据采集,采集时间 20 min。通过对两个 PSD 探测器采集到的数据进行差分处理后,得到如图 6 所示的对角度漂移的差分补偿实验结果。补偿前探测器 PSD1 测得数据的波动幅度约为  $5.09''$ ,通过 PSD2 的差分补偿后,数据的波动幅度约为  $3.30''$ ,减小了 35.2%。

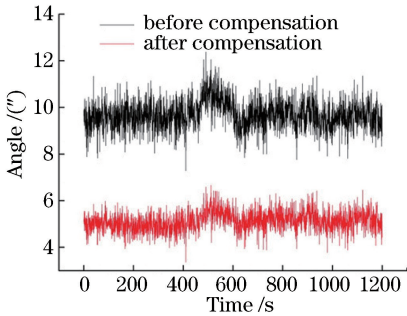


图 6 差分结构对角漂的补偿结果

Fig. 6 Result of angular drift compensation by differential structure

同样地,通过对两个 QD 探测器采集到的数据进行差分处理,得到如图 7 所示的对光线角漂和平漂总的差分补偿实验结果。可以看出,补偿前探测器 QD1 测得数据的波动幅度约为  $1.58 \mu\text{m}$ ,通过 QD2 的差分补偿后,数据的波动幅度约为  $0.72 \mu\text{m}$ ,减小了 54.4%。

由上述系列实验结果可以看出,差分结构对于测量光传输过程中产生的光漂具有一定的补偿效果,但从实验结果以及实验光路也可以看出存在的问题:虽然补偿光束与测量光束离得很近,但由于补偿光束与测量光束并不是同一光路,当光传输路径上存在梯度较大或范围尺度较小的扰动时,补偿光束并不能准确获得测量光线的光漂信息,补偿效果不佳。

### 3.3 共路补偿结构

针对差分补偿方法中补偿光束与测量光束并不

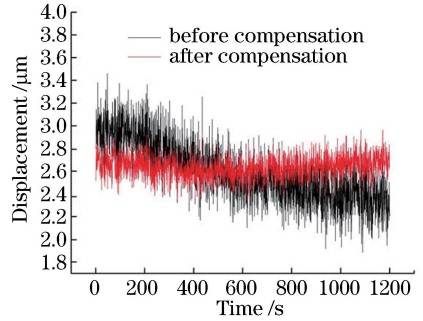


图 7 差分结构对光漂总的补偿效果

Fig. 7 Compensation effect of total drift by differential structure

是同一光路所导致的补偿效果受限的问题,共路补偿方法<sup>[17-18]</sup>是激光准直测量领域的研究热点之一。简言之,共路光线漂移补偿方法就是使补偿光路与测量光路完全共路,从而提高补偿效果。

如图 4 所示,测量光束  $I_1$  经 BS1 分束为两束,一束到达 QD1 用于二维位移的测量,另一束作为共路补偿光束,用于补偿测量光束传输过程中产生的光漂影响。为测验其补偿效果,简化设计了如图 8 所示的共路补偿实验光路。光路中的 PSD 可测得测量光束的角度漂移,其以一定数学关系结合测量光束到达 QD 的光程,可以实现对 QD 测得值的补偿。

在实验室条件下,激光器预热 30 min 后采集数据,采集时间为 20 min。通过将两个探测器采集到的数据代入共路补偿模型中进行处理,得到如图 9 所示的针对光线角度漂移的共路补偿实验结果。补偿前探测器 QD 测得数据的波动幅度约为  $3.48 \mu\text{m}$ ,通过引入 PSD 的共路补偿后,数据的波动幅度约为  $2.01 \mu\text{m}$ ,减小了 42.2%。

通过上述实验结果可以看出,共路补偿对于光漂具有一定的补偿效果。但从实验结果以及实验光路也可以看出,对于光线角度漂移,其引起的测量误差与扰动点位置有关。如何处理扰动位置估算以及多个扰动同时存在的情况,是进一步提高共路补偿效果的关键。



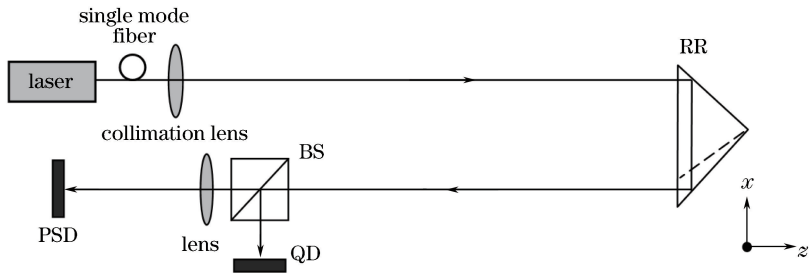


图8 共路补偿结构

Fig. 8 Common path compensation structure

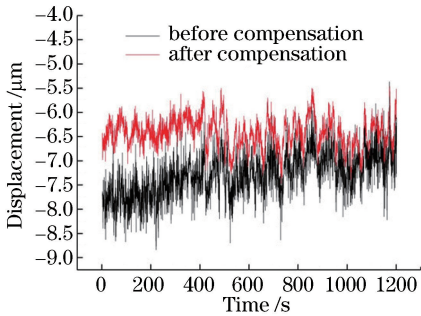


图9 共路结构对角度漂移的补偿效果

Fig. 9 Compensation effect of angular drift by common path structure

## 4 结 论

针对激光准直测量应用中如何有效消除和补偿光线漂移对测量精度影响的问题进行研究。通过建立光漂的简化物理模型以及引入频谱分析等手段,对光漂的产生机制及特性进行了详细分析。在此基础上,以二维位移测量为应用实例,提出了一种差分补偿和共路补偿相结合的光漂补偿方案,并对所采用的两种光漂补偿方法进行了详细分析及实验验证,实验结果表明,对于光线角度漂移和总漂移,差分补偿法分别可以实现 35.2% 和 54.4% 的补偿效果,共路补偿法对总漂移可以实现 42.2% 的补偿效果。

差分补偿与共路补偿在处理不同类型光漂的影响时,各有优势和不足。在激光准直测量的实际应用中,通过分析确定主要光漂成分和特性,有针对性地设计两种补偿方法相结合的光路结构,结合光电信号处理系统,可以很好地消除和补偿光线漂移的影响。

## 参 考 文 献

[1] Rao R Z, Wang S P, Liu X C, *et al.* Experimental study of spot dancing of laser beam in a turbulent

atmosphere[J]. Chinese Journal of Lasers, 2000, 27(11): 1011-1015.

饶瑞中, 王世鹏, 刘晓春, 等. 湍流大气中激光束漂移的实验研究[J]. 中国激光, 2000, 27(11): 1011-1015.

[2] Zhao Q, Zhong M, Lü B D. Experimental study about laser beam wander in atmosphere[J]. Laser Technology, 2010, 34(4): 532-534.

赵琦, 钟鸣, 吕百达. 大气激光束漂移的实验研究[J]. 激光技术, 2010, 34(4): 532-534.

[3] Yang Y, Wu R, Sun M Y, *et al.* Collimation optical system with light filed coupling of high-power lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(8): 0805001.

杨野, 郭融, 孙明营, 等. 高功率激光光场耦合的准直光学系统[J]. 中国激光, 2018, 45(8): 0805001.

[4] Ye C L, Shang J H, He Y. Study of laser beam autocollimation system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(5): 051201.

叶成樑, 尚建华, 贺岩. 光路自动准直系统研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(5): 051201.

[5] Zhai Y S, Geng L J, Li Y, *et al.* Survey of laser beam drift compensation methods[J]. Laser Journal, 2015, 36(9): 1-4.

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.

[6] Feng Q B, Liu Y Z, Zhang B, *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] Zhang X B, Zhao B, Li Z. A collimating tracking and positioning laser system with non-diffracting beams and Moire fringe technology[J]. Laser Technology, 2001, 25(2): 118-121.

张新宝, 赵斌, 李柱. 无衍射光莫尔条纹准直、跟踪

- 和定位系统的研制[J]. 激光技术, 2001, 25(2): 118-121.
- [8] 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.
- [9] Hu X H, Yang B X. Research on semiconductor laser collimator and its laser beam drift compensation [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2007, 5(3): 25-27.  
胡新和, 杨博雄. 半导体激光准直仪及其激光束漂移补偿研究[J]. 光学与光电技术, 2007, 5(3): 25-27.
- [10] Huang X D, Yu W B, Tan J B. Study on real-time compensation method for laser drift in 2D displacement measurement [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2014, 25(2): 299-304.  
黄向东, 于文波, 谭久彬. 二维位移测量中激光漂移实时补偿方法研究[J]. 光电子 • 激光, 2014, 25(2): 299-304.
- [11] Zhai Y S, Feng Q B, Zhang B. A simple roll measurement method based on a rectangular-prism [J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(4): 839-843.
- [12] Yang S L, Su Y B, He J T, *et al.* Study of measurement accuracy of position sensitive detectors [J]. Laser Technology, 2014, 38(6): 830-834.  
杨淑连, 宿元斌, 何建廷, 等. 位置敏感探测器测量准确度的研究[J]. 激光技术, 2014, 38(6): 830-834.
- [13] Cheng Z, Dong D F, Zhou W H, *et al.* High precision laser position detecting system based on position sensitive device[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(8): 081202.  
程智, 董登峰, 周维虎, 等. 基于位置敏感器件的高精度激光位置检测系统[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(8): 081202.
- [14] Chen H F, Sun Y Q, Wang Y W, *et al.* High-precision laser tracking measurement method and experimental study[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(1): 0104003.  
陈洪芳, 孙衍强, 王亚韦, 等. 高精度激光追踪测量方法及实验研究[J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0104003.
- [15] Li J A, Tan J B, Cui J W. 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.
- [16] Zhai Y S, Jiang L J, Wang X J, *et al.* High-precision displacement measurement method based on laser modulation [J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(2): 230-234.  
翟玉生, 蒋留杰, 王新杰, 等. 一种基于激光调制的高精度位移测量方法[J]. 应用光学, 2018, 39(2): 230-234.
- [17] You F L, Feng Q B, Zhang B, *et al.* A new method for measuring laser beam straightness error based on common-path compensation [J]. Optoelectronics Letters, 2009, 5(5): 383-386.
- [18] Feng Q B, Zhang B, Cui C X, *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.