

文章编号 1004-924X(2016)增-0109-08

## 高分辨力与高输出稳定性自准直系统设计

朱 凡<sup>1,2\*</sup>, 谭欣然<sup>2</sup>, 谭久彬<sup>2</sup>, 范志刚<sup>1</sup>

- (1. 哈尔滨工业大学 光学工程博士后流动站, 黑龙江 哈尔滨 150080;
2. 哈尔滨工业大学 超精密光电仪器工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 为了实现高分辨力与高输出稳定性的微小角度测量, 建立了一个光电自准直系统。该系统主要包括摄远物镜、光学放大以及漂移补偿单元。首先, 对摄远物镜的短结构、长焦距特性进行研究, 对该特性中的制约因素以及对结构参数变化的敏感程度进行分析, 并应用光学放大提高自准直中图像位移检测的分辨力。然后, 在高分辨力的基础上引入漂移补偿, 利用合作靶标分离出漂移量参考光束, 结合光束偏转单元对自准直过程中的漂移量进行闭环控制。最后, 对该自准直系统的分辨力和稳定性进行了测试。实验结果表明: 在 $\pm 30''$ 的测量范围内, 自准直系统的有效分辨力优于 $0.0005''$ , 两小时输出稳定性达到 $0.006''$ , 可以满足微小角度测量领域中的高分辨力与高输出稳定性的要求。

**关键词:** 角度测量; 自准直; 漂移补偿; 合作靶标

**中图分类号:** TH741.14; TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0109

## Design of high resolution and output stability autocollimation system

ZHU Fan<sup>1,2\*</sup>, TAN Xin-ran<sup>2</sup>, TAN Jiu-bin<sup>2</sup>, FAN Zhi-gang<sup>1</sup>

- (1. *Postdoctoral Research Station of Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;*
  2. *Center of Ultra-precision Optoelectronic Instrument Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)*
- \* *Corresponding author, E-mail: zf5016@126.com*

**Abstract:** To achieve precise and stable measurement of micro angles, a photoelectric auto-collimation system comprising telephoto objective lens, optical amplifier and shift compensator was established. Firstly, the short structure and long-focus features of the telephoto objective were researched, involving the restrictions and the sensitivity to the variation of structure parameters. The optical amplifier can improved the resolution of image displacement in the auto-collimation system. Then, the drift compensation was introduced based on high resolution. The drift reference beam extracted by the cooperative target, combined with beam steering mechanism was used in the closed-loop control of the drift. Finally, the resolution and stability of the auto-collimation system were tested. The results show that the valid resolution is higher than  $0.0005''$  and the output stability in two hours reaches  $0.006''$  within the  $\pm 30''$  measurement range, which can meet the requirements of high resolution and high output stability in the field of micro angle measurement.

收稿日期: 2016-05-31; 修订日期: 2016-06-12.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51405107)

**Key words:** angle measurement; auto-collimation; drift compensation; cooperative target

## 1 引言

自准直法是微小角度测量的重要手段,广泛应用于机械几何参量测量<sup>[1-2]</sup>、角度计量<sup>[3-4]</sup>、同步辐射光源反射镜及大型天文望远镜<sup>[5-8]</sup>等领域。随着这些领域的不断发展,自准直法微小角度的测量精度要求越来越高。目前,在数十角秒的测量范围内分辨力从 50 nrad(0.01")向 1 nrad(0.000 2")的方向发展<sup>[4-7]</sup>,输出稳定性在 15~24 h 内已经可以达到 0.45  $\mu$ rad(0.09")<sup>[8]</sup>。如何进一步提高分辨力和稳定性是自准直法微小角度测量中的关键技术问题。

根据自准直的原理,其测量分辨力由光电传感器对图像位移检测的分辨力与准直物镜焦距的比值决定。已经有分析指出,相对于增加准直物镜的焦距,提高图像位移分辨力是提高自准直分辨力更为有效的途径<sup>[9]</sup>。目前,已有许多不同种类的目标板与其对应的图像检测传感器相结合,用于自准直中的图像位移检测。例如,采用多狭缝与线阵 CCD 相结合,可以在  $\pm 150''$  的测量范围内获得 0.001" 的分辨力;采用 1D 或 2D 光栅结合面阵 CCD 可以在 1 314" 的测量范围内获得 0.1" 的分辨力<sup>[10]</sup>;采用光学编码器结合面阵 CCD 以及模式识别技术,可以在 1 512" 的测量范围内获得 0.01" 的分辨力,并且在 100 min 内具有 0.08" 的输出稳定性<sup>[11]</sup>。然而,自准直中所用的光电传感器通常为 QPD、PSD 或 CCD 等,这些器件对图像位移检测的分辨力已经接近极限,难以进一步突破。增加准直物镜的焦距会相应地增加自准直系统的体积,这给自准直法微小角度测量的灵活应用带来诸多不便。

另一方面,自准直中普遍存在输出结果漂移的问题。漂移主要来源于照明单元出射光束的方向和强度漂移、机械结构的热不稳定性以及传输路径中空气介质的不稳定性<sup>[12]</sup>。输出结果漂移的问题在高分辨力自准直系统中表现得尤为明显,并且往往使得分辨力的提高变得没有意义。解决该漂移问题的途径主要有采用高稳定照明单元、高热稳定性机械件及结构、以及引入漂移补偿方法等。在自准直中应用漂移补偿的难点在于需

要从漂移量与被测角度量的耦合结果中将二者相互分离以实现补偿。目前,采用合作靶标分离出参考光束进行漂移补偿的自准直装置,其 2 h 的输出稳定性能达到 0.020"<sup>[12]</sup>。

基于以上研究,本文结合长焦距与光学放大提高自准直系统的分辨力,进一步引入共光路漂移补偿方法,对高分辨力下输出结果的漂移进行实时补偿,以提高自准直系统的输出稳定性,实现高分辨力与高稳定性的微小角度测量。文中采用摄远物镜作为准直物镜,对其短结构、长焦距特性进行研究,分析该特性的制约因素以及对结构参数变化的敏感程度,并应用光学放大提高自准直中图像位移检测的分辨力;进而在高分辨力的基础上引入漂移补偿,利用合作靶标分离出漂移量参考光束,结合光束偏转单元对自准直过程中的漂移量进行闭环控制。实验证明,在提高分辨力的同时引入漂移补偿,能够实现自准直系统的高分辨力与高输出稳定性,从而满足微小角度测量的需求。

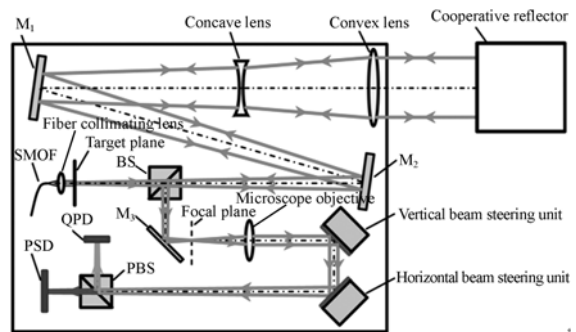


图 1 自准直系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of proposed autocollimation system

## 2 自准直系统的构成及其工作原理

本文设计的自准直系统的原理图如图 1 所示。由单模光纤(Single Mode Optical Fiber, SMOF)及其准直镜出射的激光束照明具有 150  $\mu$ m 圆孔光阑的目标平面。经过该圆孔光阑的光束透过分光棱镜(Beam Splitter, BS)后,由反射镜  $M_1$  和  $M_2$  做光路转折,再由负透镜和正透

镜组成的摄远物镜准直后出射。该准直光束投射至合作靶标,被分离为偏振态互相垂直的参考光束和测量光束。其中测量光束中耦合了光束的漂移量与合作靶标的角度偏转量,而参考光束对合作靶标的角度偏转不敏感,仅包含光束的漂移量。参考光束与测量光束共路返回,由摄远物镜会聚后经 BS 和反射镜  $M_3$  投射至焦平面。焦平面上参考光束与测量光束的图像由显微物镜进行放大,经过垂直方向和水平方向的光束偏转单元后由偏振分光棱镜(Polarized Beam Splitter, PBS)根据偏振态互相垂直的特征将二者分离,并分别由 QPD 和 PSD 接收。QPD 输出的漂移量信号反馈至垂直方向和水平方向的光束偏转单元,对参考光束和测量光束的漂移进行闭环控制,而接收测量光束的 PSD 的输出信号仅反映合作靶标的角度偏转量。

### 3 自准直系统中的单元设计

#### 3.1 摄远物镜的设计与分析

自准直系统中,增加准直物镜的焦距可以提高微角度测量的分辨力。摄远物镜具有短结构、长焦距的特点,适合作为自准直物镜用于自准直系统中,在有限的结构尺寸下获得远大于自身结构尺寸的焦距长度。

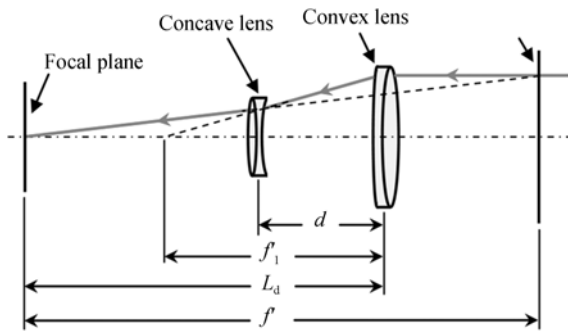


图 2 自摄远结构原理

Fig. 2 Principle of telephoto objective

摄远物镜的结构如图 2 所示,由正透镜在前、负透镜在后组成。正、负透镜之间的光学间隔  $d$  小于正透镜的焦距  $f_1'$ 。摄远物镜的焦距长度  $f'$  和结构尺寸  $L_d$  分别为:

$$f' = \frac{f_1' f_2'}{f_1' + f_2' - d}, L_d = \frac{f_1' f_2' + d(f_1' - d)}{f_1' + f_2' - d}, \quad (1)$$

其中:  $f_1'$  和  $f_2'$  分别为正、负透镜的焦距,  $d$  为正、负透镜之间的光学间隔。

远摄比  $c$  可以反映摄远物镜的结构长度相对于焦距长度的缩短程度,如式(2)所示。远摄比  $c$  的取值为  $0 \sim 1$ , 显然,在摄远物镜结构尺寸  $L_d$  受限的情况下,远摄比  $c$  越小则焦距长度  $f'$  越长。由于摄远物镜中正、负透镜之间的光学间隔  $d$  总小于正透镜的焦距  $f_1'$ , 因此远摄比  $c$  可以进一步简化为  $c > f_1' / f'$  的形式,即:

$$c = \frac{L_d}{f'} = 1 + d \left[ \frac{1}{f'} - \frac{1}{f_1'} \right] > \frac{f_1'}{f'}. \quad (2)$$

在自准直系统的设计中,通常是先根据分辨力的要求确定准直物镜的焦距,然后在已确定的焦距下使其具有最短的结构长度,即具有最小的远摄比  $c$ 。由式(2)可以看出,为减小远摄比  $c$ ,需要缩短正透镜的焦距  $f_1'$ 。而正透镜的孔径通常在  $30 \sim 50$  mm, 正透镜焦距的缩短将会给像差校正带来困难。综合考虑自准直系统的结构尺寸以及像差校正能力,这里设计摄远物镜的焦距为  $1\,920$  mm, 远摄比  $c$  为  $0.6$ , 摄远物镜的结构长度为  $1\,152$  mm。

分析摄远物镜中组合光组的焦距对正、负透镜焦距以及二者之间光学间隔变化的敏感程度,以确定摄远物镜在加工和装调过程中的影响因素。根据式(1)所示的摄远物镜焦距长度,分别对正、负透镜焦距  $f_1'$ ,  $f_2'$  以及光学间隔  $d$  求偏导数:

$$\frac{\partial f'}{\partial f_1'} = \frac{f_2' - f'}{f_1' + f_2' - d}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial f'}{\partial f_2'} = \frac{f_1' - f'}{f_1' + f_2' - d}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial f'}{\partial d} = \frac{f'}{f_1' + f_2' - d}. \quad (5)$$

将各参数值代入式(3),正、负透镜的焦距  $f_1'$ ,  $f_2'$  以及光学间隔  $d$  各自变化  $0.1$  mm 时,摄远物镜的焦距将分别变化  $4.5$ 、 $3$  和  $4$  mm, 说明摄远物镜对这些结构参数的变化比较敏感,这一点给摄远物镜的加工与装配带来了困难。摄远物镜焦距  $f'$  随这 3 个参数的变化曲线如图 3 所示。

#### 3.2 光学放大

自准直中,增大准直物镜焦距可以提高角度测量分辨力,但会受到结构尺寸的限制。对自准直中准直物镜焦面的图像位移进行放大,可以提

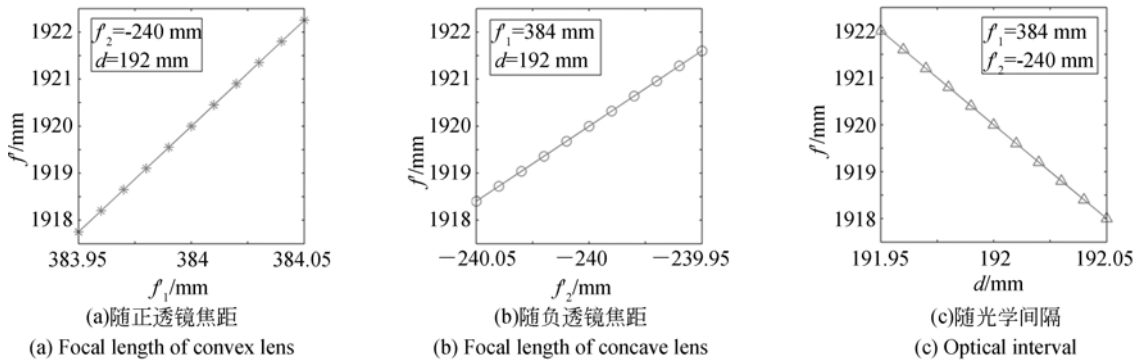


图 3 摄远物镜焦距随参数的变化关系

Fig. 3 Variation of focal length of telephoto with focal lengths of concave lens and convex lens and optical interval respectively

高自准直返回图像位移测量的分辨力,进而提高自准直角度测量的分辨力。图 4 为采用显微透镜进行光学放大的原理图。经显微透镜放大后的图像在像面的位移量  $\Delta y_1$  与准直物镜焦面图像的位移量  $\Delta y_0$  之间的关系为:

$$\Delta y_1 = k \times \Delta y_0, \quad (4)$$

其中  $k$  为显微透镜的放大倍数。

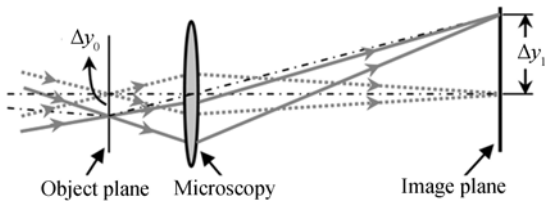


图 4 光学放大原理图

Fig. 4 Principle of optical enlargement

自准直系统在光电传感器的光敏面积一定的情况下,采用光学放大对返回图像位移进行放大的同时,传感器对图像位移的测量范围会以同样的比例减小,使得自准直角度测量范围相应减小。综合考虑自准直系统的角度测量分辨力和测量范围,选择放大倍数为 20 倍。采用显微物镜对图像位移进行放大时,需要将显微物镜与准直物镜相作为整体进行优化设计,显微物镜的像差校正是设计时的一个主要因素。并且,采用显微物镜对图像位移进行放大时,准直物镜的像差以及测量过程中的光束漂移也会被同样倍数放大,从而使得分辨力的提高变得没有意义。因此,光学放大法能够得到有效应用的前提是需要进行像差的整体优化,并且采用合适的措施对自准直中光束的

漂移量进行抑制或补偿。

### 3.3 漂移量的检测与补偿

#### 3.3.1 漂移量的分离与检测

共光路漂移补偿方法已被证明是减小自准直中输出结果漂移的有效途径<sup>[12]</sup>。两种不同形式的利用激光光束偏振特性的合作靶标可以用于自准直中的漂移补偿,如图 5 所示。自准直系统发出的准直激光光束入射至合作靶标,被合作靶标分离为偏振态互相垂直的参考光束和测量光束。其中参考光束对合作靶标的角度偏转不敏感,仅包含测量过程中的漂移量,而测量光束中包含了测量过程中的漂移量和合作靶标的角度偏转量。

参考光束和测量光束共光路返回至接收端后,由偏振分光镜根据二者的偏振态互相垂直的特征将二者分离后分别由 QPD 和 PSD 接收。

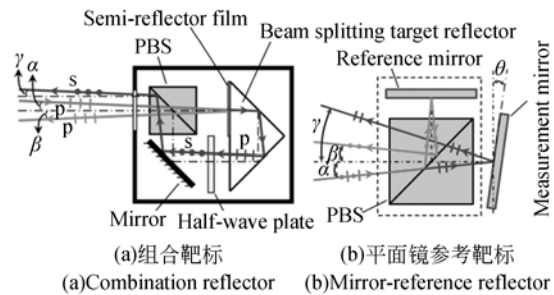


图 5 合作靶标原理图

Fig. 5 Principle of cooperative reflector

#### 3.3.2 漂移量的闭环控制

利用合作靶标分离出的参考光束和测量光束共光路传输至接收端后,QPD 接收参考光束得到

自准直过程中的漂移量,PSD 接收测量光束得到漂移量与合作靶标角度偏转量的耦合结果。通常利用 PSD 的输出减去 QPD 的输出后得到的结果作为合作靶标角度偏转量的测量结果。然而,由于 QPD 和 PSD 对光斑位置检测的原理不同,并且二者各自的电路中所用的电子元器件特性不一致,在实际测试中发现,直接相减后的结果中存在残余漂移量,特别在漂移量的幅度较大时该残余漂移量尤为明显。

由于 QPD 在中心位置处对光斑位移检测的灵敏度最高,可以根据 QPD 输出的自准直过程中的漂移量,采用光束偏转单元实时校正参考光束和测量光束的方向,使参考光束始终位于 QPD 的中心位置,同时也使得测量光束中的漂移量得到补偿,如图 6 所示。由于漂移量的频谱主要集中在 10 Hz 以内的低频区域,因此具有快速频率响应的光束偏转单元可以对漂移量进行实时闭环控制。参考光束被光束偏转单元实时闭环控制到 QPD 的中心位置后,闭环控制后的稳态误差低于 PSD 的输出分辨力,从而使得 PSD 的输出仅对应于合作靶标的角度偏转量。

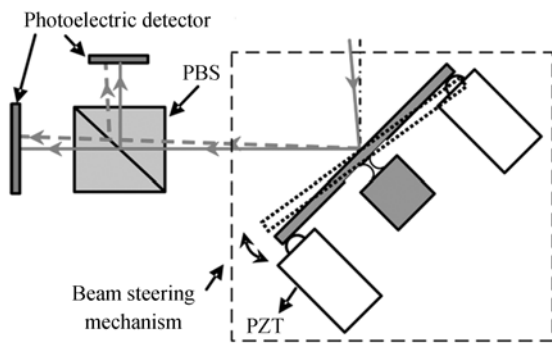


图 6 采用光束偏转单元进行补偿

Fig. 6 Drift compensation using beam steering mechanism

闭环控制系统的框图如图 7 所示。光斑正好位于 QPD 的中心时 QPD 电路的输出电压为 0, QPD 的输出信号与该中心位置作比较即得到参考光束的漂移量。该漂移量经过 PID 控制器运算后输出至高直流电压放大器,驱动压电陶瓷,压电陶瓷的输出驱动柔性光束偏转单元,对参考光束和测量光束的方向进行校正,从而实现对二者漂移量的同时校正。

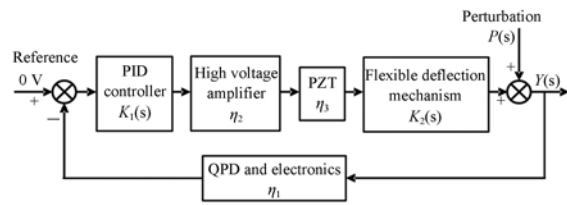


图 7 漂移量的闭环控制

Fig. 7 Closed-loop control of beam drift

## 4 测量实验与结果

### 4.1 自准直分辨力测试

根据图 1 建立自准直系统,并对其有效分辨力进行测试。图 8 为测试所用的实验装置。其中微角度发生装置采用压电陶瓷驱动的正切臂结构,正切臂的一端通过柔性铰链与基底连接,另一端采用压电陶瓷驱动器从左右两侧对称驱动,并通过电容传感器监测该正切臂驱动端的微位移量,同时结合正切臂的长度即可计算出角度偏转量。微角度发生装置的角度输出量与加载在压电陶瓷上的电压成正比,该测试系统中所使用的微角度发生装置的角度-电压系数为  $0.0033''/V$ 。微角度发生装置固定于精密气浮转台上,精密气浮转台的分辨力优于  $0.1''$ ,用于在自准直系统的测量范围内产生角度偏转。

双面反射镜固定于微角度发生装置的正切臂上,随正切臂做微角度偏转。双面反射镜的角度

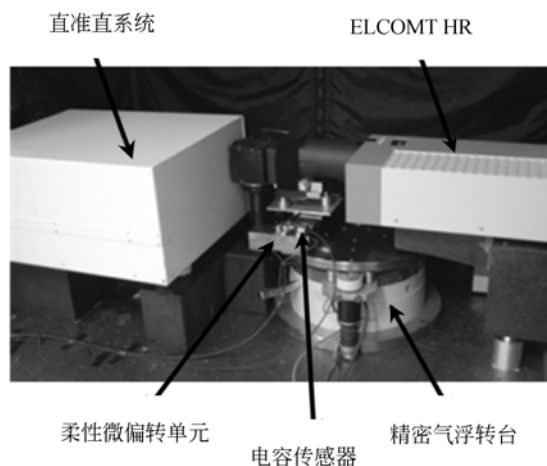


图 8 自准直有效分辨力测试

Fig. 8 Effective resolution test

偏转量同时由本文的自准直装置以及德国 Moller Wedel 公司的 Elcomat HR 型光电自准直仪进行检测,以作相互校验对比二者的分辨力指标。

通过控制压电陶瓷驱动器的输入电压,使微角度发生装置分别以  $0.0003''$ ,  $0.0005''$ ,  $0.0010''$ ,  $0.0030''$ ,  $0.0050''$  的小角度来回运动,其输出为方形波,同时读取本自准直装置与 Elcomat HR 型光电自准直仪的输出,对所获取的方形波的每一段数据取平均值作为结果输出。测得  $0.0030''$  和  $0.0005''$  时本自准直装置的输出和 Elcomat HR 型的输出如图 9 所示,分辨力测试结果如图 10 所示。从结果中可以看出,本自准直装置的有效分辨力优于  $0.0005''$ ,优于 Elcomat HR 型光电自准直仪的有效分辨力。

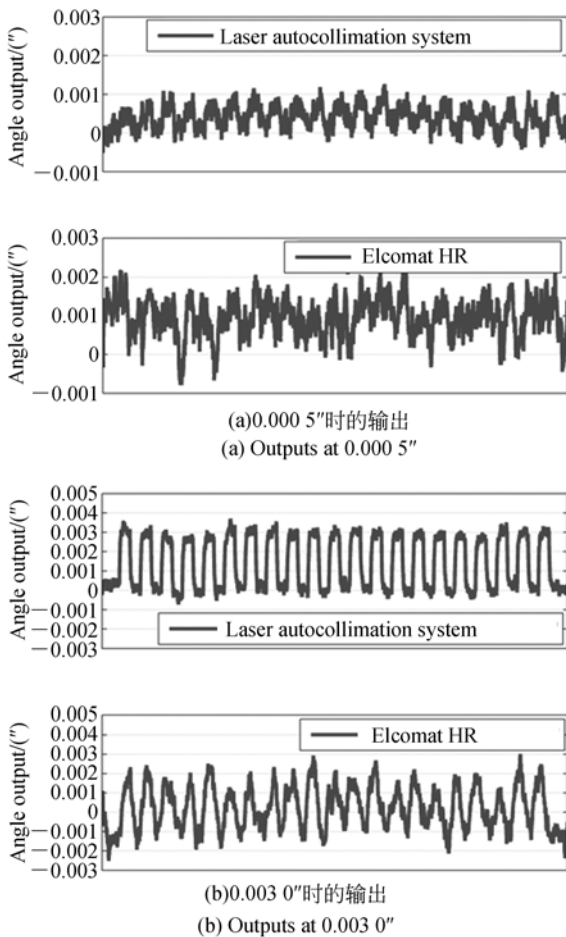


图 9 自准直装置与 Elcomat HR 的输出

Fig. 9 Outputs of autocollimation system and Elcomat HR

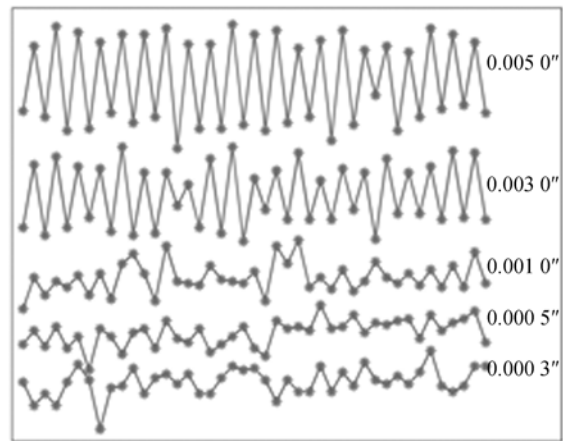
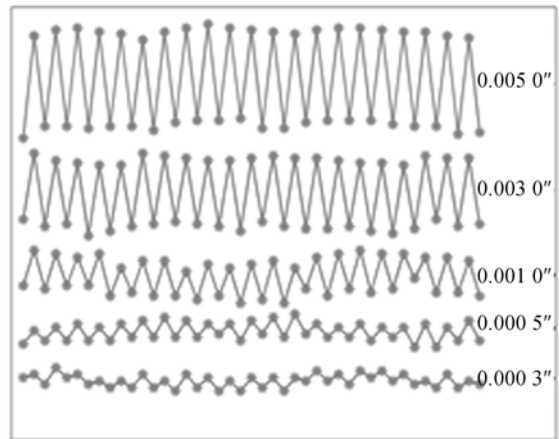


图 10 有效分辨力测试结果

Fig. 10 Results of effective resolution test

#### 4.2 输出稳定性测试

本文采用漂移补偿的目的是为了提高自准直系统在高分辨力下的输出稳定性。这里对本自准直系统在漂移量补偿前后的稳定性进行了测试,测试过程中双面反射镜固定于底座上,本自准直系统与 Elcomat HR 型自准直仪同时监测该双面反射镜的输出。

图 11 为没有采用漂移补偿时本自准直系统与 Elcomat HR 型自准直仪的 2 小时输出结果,不加漂移补偿时本自准直系统的输出存在明显的漂移,2 小时漂移量约为  $0.05''$ ,而 Elcomat HR 型自准直仪在  $x$  和  $y$  方向的漂移量分别在  $0.008''$

和  $0.014''$  以内。

图 12 为采用漂移补偿后本自准直系统与 Elcomat HR 型自准直仪的 2 小时输出结果。采用漂移补偿后本自准直系统的 2 小时输出稳定性提高到约为  $0.006''$ , 而 Elcomat HR 型自准直仪在  $x$  和  $y$  方向的漂移量分别在  $0.005''$  和  $0.011''$  以内。

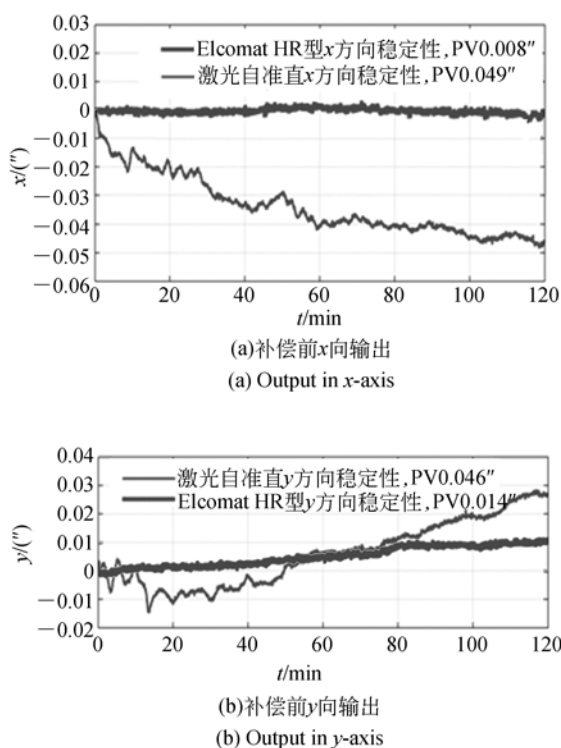


图 11 补偿前本装置与 Elcomat HR 型的 2 小时输出  
Fig. 11 Two hour output of autocollimation system and Elcomat HR before angular drift compensation

#### 参考文献:

- [1] KONYAKHIN A I, TIMOFEEV N A, KONYAKHIN A. Three-axis optic-electronic autocollimation system for the inspection of large-scale objects [J]. *SPIE*, 2013, 8788: 87882C-87882C-8.
- [2] KONYAKHIN A I, KOPYLOVA V T, KONYAKHIN I A. Optic-electronic autocollimation sensor for measurement of the three-axis angular deforma-

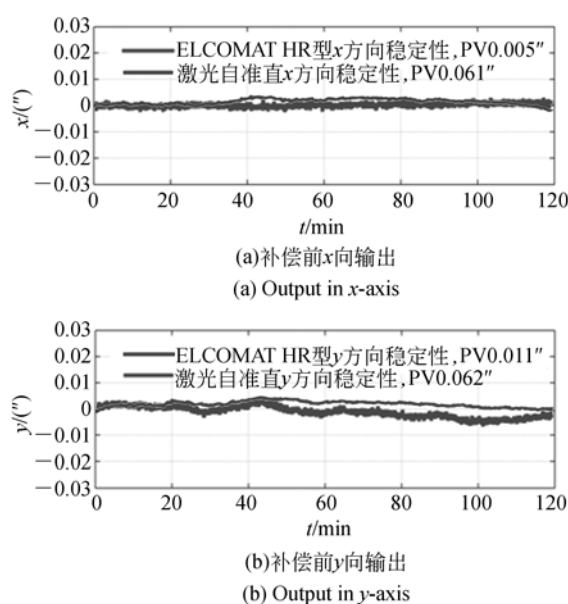


图 12 采用漂移补偿后本装置与 Elcomat HR 型输出  
Fig. 12 Two hour output of autocollimation system and Elcomat HR after angular drift compensation

## 5 结 论

本文根据目前微小角度测量中高分辨力、高输出稳定性的要求,采用长焦距结合光学放大提高自准直系统的分辨力,并在此基础上采用漂移补偿来提高自准直系统的输出稳定性。首先对该自准直系统的结构及主要单元模块进行了设计。最后,对该自准直系统的有效分辨力及输出稳定性进行了测试。实验结果表明:该自准直系统的有效分辨力优于  $0.0005''$ , 2 小时输出稳定性约为  $0.006''$ , 实现了自准直系统的高分辨力与高输出稳定性。

tion of industry objects [J]. *SPIE*, 2012, 8439: 84391N-84391N-7.

- [3] YANDAYAN T, GECKELER R D, SIEWERT F. Pushing the limits: latest developments in angle metrology for the inspection of ultra-precise synchrotron optics [J]. *SPIE*, 2014, 9206: 92060F-92060F-15.
- [4] JUST A, KRAUSE M, WITCKOPF R, *et al.*. Calibration of high-resolution electronic autocollimators against an angle comparator [J]. *Metrolo-*

- gia, 2003, 40(5): 288-294.
- [5] EHRET G, SCHULZ M, BAIER M, *et al.*. Optical measurement of absolute flatness with the deflectometric measurement systems at PTB [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2013, 425(15): 152016-152016-4.
- [6] GECKELER R D, JUST A, KRAUSE M, *et al.*. Autocollimators for deflectometry: Current status and future progress [J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment*, 2010, 616(2-3): 140-146.
- [7] SCHULZ M, EHRET G, KREN P. High accuracy flatness metrology within the european metrology research program [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2012, 710(710c): 37-41.
- [8] QIAN S, TAKACS P. Wave front-splitting phase shift beam splitter for pencil beam interferometer [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2003, 74(11): 4881-4884.
- [9] ZHU F, TAN J, CUI J. Beam splitting target reflector based compensation for angular drift of laser beam in laser autocollimation of measuring small angle deviations [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2013, 84(6), 065116-065116-8.
- [10] SUZUKI T, SASAKI O, GREIVENKAMP J E, *et al.*. Two-dimensional small-rotation-angle measurement using an imaging method [J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(4): 043604-1-7.
- [11] LEVITON D B. Ultrahigh resolution absolute Cartesian electronic autocollimator [J]. *SPIE*, 2003, 5190: 468-475.
- [12] 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.

#### 作者简介:



朱 凡(1986—),男,湖北随州人,博士后,助理研究员,2007年、2009年、2013年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事光电测量仪器方面的研究。E-mail: zf5016@126.com



谭久彬(1955—),男,黑龙江阿城人,教授,博士生导师,1982年、1987年、1991年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,现为哈尔滨工业大学超精密光电仪器工程研究所所长,主要从事超精密测量与仪器技术、超精密光机电一体化装备技术、超精密激光测量与探测技术等方面的研究。E-mail: jbtan@hit.edu.cn