

## Using Optical Zoom to Improve the Resolution of Photoelectric Collimator

ZHANG Junjie<sup>1,2</sup>, LI Zhengyang<sup>2</sup>, YE Shenghua<sup>1\*</sup>

(1. State Key Lab of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China; )  
(2. Beijing Aerospace Institute for Metrology and Measurement Technology, Beijing 100076, China)

**Abstract:** The effective way to improve the accuracy of the autocollimator is to improve the resolution. The optical zoom is added in the optical path of collimator in order to effectively improve the resolution. The collimation image and the displacement are amplified by using the method. A prototype is developed. The smallest indicating value of the autocollimator is 0.001". The resolution is less than 0.005" including indication beating. The indication error is ±0.01" in the measure scale of ±10". The indication error is ±0.02" in full measurement scale of ±50". The resolution of autocollimator can be effectively improved by adding optical zoom in the optical path of collimator. The method can be applied in both static and dynamic digital autocollimators.

**Key words:** small-angle measurement; high resolution; optical zoom; autocollimation technology

EEACC:7320P

doi:10.3969/j.issn.1004-1699.2011.01.011

## 采用光学放大提高光电自准直仪的分辨力

张俊杰<sup>1,2</sup>, 李政阳<sup>2</sup>, 叶声华<sup>1\*</sup>

(1. 天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072; )  
(2. 北京航天计量测试技术研究所, 北京 100076)

**摘要:** 要提高自准直仪的准确度, 首先要提高分辨力。为了能有效地提高分辨力, 采用了在自准直仪光路中加入放大光路, 对自准直像及其位移量进行放大的方法。通过样机研制, 自准直仪的最小显示值达 0.001", 含示值跳动量的分辨力小于 0.005", 在 ±10" 测量范围内的示值误差为 ±0.01", 在 ±50" 全量程的示值误差为 ±0.02"。自准直光路中增加光学放大环节, 能有效地提高自准直仪的分辨力, 而且对静态和动态数字式自准直仪都能适用。

**关键词:** 小角度测量; 高分辨力; 光学放大; 自准直技术

中图分类号: TB922

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2011)01-0050-03

精密光机工程的发展对测角精度要求越来越高<sup>[1-5]</sup>, 因此对光电自准直仪准确度的要求也越来越高<sup>[6-8]</sup>, 而要提高自准直仪的准确度, 首先要提高分辨力<sup>[9-12]</sup>。采用在自准直光路中增加光学放大环节的方法能大幅度提高分辨力, 自准直仪的外形尺寸又不显著增加, 而且对静态和动态数字式的自准直仪都能适用。

### 1 光学放大原理

按自准直原理, CCD 自准直仪的分辨力为:

$$\Delta\alpha = \frac{\Delta t \cdot \rho''}{2 \cdot N \cdot f'} \quad (1)$$

式中  $\Delta\alpha$  为自准直仪的分辨力, 单位为角秒,  $\Delta t$  为 CCD 相邻像元的间距, 单位为 mm,  $N$  为 CCD 信号

的软件细分数,  $f'$  为准直物镜的焦距, 单位为 mm,  $\rho''$  为转换系数,  $\rho = 206\ 265$ 。

要提高分辨力即减小  $\Delta\alpha$ , 需提高自准直像位移量的测量分辨力, 包括减小  $\Delta t$  和增大  $N$ , 或增大焦距  $f'$ , 但是减小  $\Delta t$  受元件限制, 增大  $N$  会加剧示值跳动, 增加  $f'$  会使自准直仪长度增大, 因此提高的幅度都不大。

把返回光形成的自准直像先用显微物镜放大, 再由 CCD 转变为电信号。如图 1, O 为自准直像, 也是显微物镜的物面, O' 为 O 经显微物镜所成的像, 当自准直像 O 位移  $t$  时, 像 O' 相应的位移量为  $t'$ ,  $t' = kt$ , 可测出的最小位移  $dt$  为:

$$dt = \frac{\Delta t}{k}, k = \frac{v}{u} \quad (2)$$

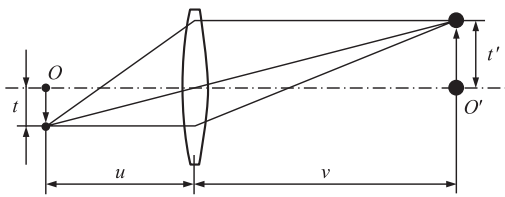


图 1 光学放大原理图

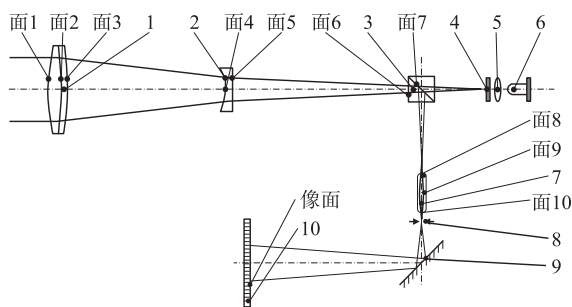
式中  $k$  为显微物镜的放大倍数,  $v$  为物距,  $u$  为像距, 即显微物镜把自准直像的大小放大  $k$  倍的同时把其位移量也放大了  $k$  倍。代入式, 加光学放大后分辨力公式为:

$$\Delta\alpha = \frac{\Delta t \cdot \rho''}{2 \cdot N \cdot f' \cdot k} \quad (3)$$

由式(3)可测出的最小角  $\Delta\alpha$  是式的  $1/k$  倍, 从而大幅度提高了分辨力。为便于分析, 可看作  $kf'$  为当量焦距, 增加光学放大后, 相当于准直物镜的焦距增大了  $k$  倍。

## 2 光学系统

光学系统见图 2, 由准直光路与显微物镜放大光路两部分组成, 准直物镜为望远型物镜, 其像面与显微物镜的物面重合。显微物镜的孔径光阑设置在后焦点处, 构成物方远心光路以消减自准直像离焦产生的误差, 并使显微物镜的入瞳与准直物镜的出瞳位置重合。放大光路采用折叠式设计以缩小系统的轴向尺寸。光学系统参数见表 1。



1. 准直物镜前组 2. 准直物镜后组 3. 分光棱镜 4. 准直分划板 5. 光源聚光镜 6. 发光二极管 7. 显微物镜 8. 光阑 9. 反光镜 10. 线阵 CCD

图 2 光学系统图

表 1 光学系统参数

| 表面 | 半径/mm    | 厚度/mm  | 半口径/mm |
|----|----------|--------|--------|
| 物面 | 无限       | 无限     | 无限     |
| 1  | 181.52   | 9.00   | 26     |
| 2  | -188.36  | 3.60   | 26     |
| 3  | -627.964 | 197.26 | 26     |
| 4  | -154.90  | 4.79   | 10     |
| 5  | 440.00   | 380.00 | 10     |
| 6  | 无限       | 10.00  | 5      |
| 7  | 无限       | 25.00  | 5      |
| 8  | 9.00     | 3.86   | 2      |
| 9  | 2.792    | 5.13   | 2      |
| 10 | -5.757   | 221.57 | 2      |

整个光学系统像差的点列图见图 3, 传递函数图见图 4, 已接近衍射极限, 全系统的畸变小于 0.01%, 曲线见图 5。

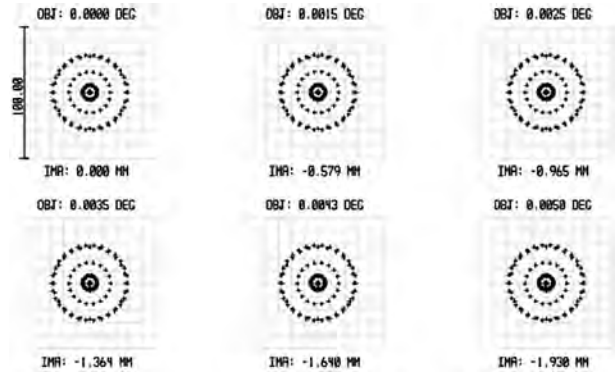


图 3 系统点列图

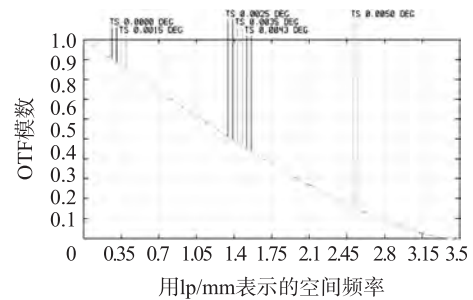


图 4 传递函数图

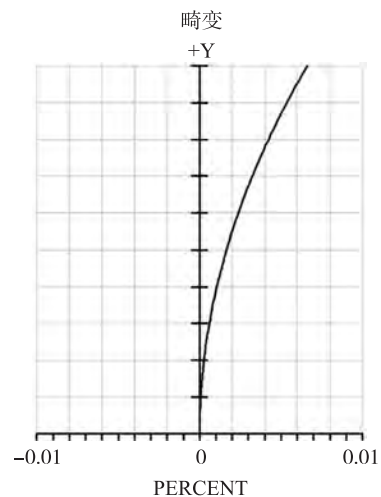


图 5 畸变曲线图

CCD 像元间隔  $\Delta t = 0.008 \text{ mm}$ , 软件细分数  $N = 32$ , 物镜焦距  $f' = 1100 \text{ mm}$ , 显微物镜光学放大倍数  $k = 20$ , 则最小显示值为

$$\Delta\alpha = \frac{0.008 \times 206265}{2 \times 1100 \times 32 \times 20} \approx 0.001'' \quad (4)$$

## 3 实验效果

研制的样机最小显示值为  $0.001''$ , 包含示值跳动量在内, 分辨力  $< 0.005''$ , 用臂长为  $400 \text{ mm}$  的正

弦臂式激光小角度校准装置检测结果,补偿前的示值误差在 $\pm 50''$ 全量程范围内为 $+0.097''$ 和 $-0.050''$ ,表达了设计和工艺的质量,补偿后的示值误差在 $\pm 10''$ 测量范围内为 $+0.005''$ 和 $-0.007''$ , $\pm 50''$ 全量程内为 $+0.019''$ 和 $-0.017''$ ,说明了提高分辨率对提高准确度的重要作用。

## 4 结论

在自准直光路中,对返回光形成的自准直像增加光学放大环节,能有效地提高测角分辨率,使最小显示值为 $0.001''$ ,从而保证了自准直仪达到高准确度,示值误差在 $\pm 10''$ 测量范围内为 $\pm 0.01''$ , $\pm 50''$ 全量程为 $\pm 0.02''$ 。而且这种方法对静态和动态数字式的自准直仪都能选用。当放大光路采取折叠式设计时,自准直仪的长度尺寸可以不增加,仅增加宽度或高度尺寸,但是增加光学放大环节后,对同样光敏面长度的线阵 CCD 自准直仪的测量范围将相应减少。

## 参考文献:

- [1] 高超,王滢泉,陈桂村. 基于经纬仪的感应同步器测角精度检测方法研究[J]. 传感技术学报,2008,21(5):865-868.
- [2] 孙方金. 角度计量,宇航计测技术[J]. 1999,19(02):22-24.
- [3] 胡玉禧,安连生. 应用光学[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2002.
- [4] Zhou Lili,Gindi Gene. Collimator Optimization in SPECT Based on a Joint Detection and Localization Task[J]. Physics in Medicine and Biology,2009,54(14):4423-4437.
- [5] Loss Leandro A,Bebis George,Parvin Bahram. Tunable Tensor Voting for Regularizing Punctate Patterns of Membrane-Bound Protein Signals [C]//2009 IEEE International Symposium on Biomedical Imaging:From Nano to Macro,2009:1378-1381.
- [6] Yang Lin,Cui Tiangang,Chen Bo. Imaging Performance and Test of Extreme Ultraviolet Telescope [C]//The International Society for Optical Engineering,2009,7437.
- [7] Kurugol Sila,Dy Jennifer G,Rajadhyaksha Milind,et al. Localizing the Dermis/Epidermis Boundary in Reflectance Confocal Microscopy Images with a Hybrid Classification Algorithm [C]//2009 IEEE International Symposium on Biomedical Imaging:From Nano to Macro,2009:1322-1325.
- [8] Ehret G,Pilarski F,Bergmann D,et al. A new High-Aperture 193 nm Microscope for the Traceable Dimensional Characterization of Micro- and Nanostructures [J]. Measurement Science and Technology,2009,20(8).
- [9] Heilemann Mike, Van De Linde Sebastian, Mukherjee Anindita, et al. Super-Resolution Imaging with Small Organic Fluorophores [J]. Angewandte Chemie-International Edition, 2009, 48 ( 37 ): 6903 -6908.
- [10] Park No-Cheol,Rhim Yoon-Chul,Park Kyoung-Su,et al. Improvement of Optical Resolution and Mechanical Robustness for Near-Field Recording System [C]//2009 Optical Data Storage Topical Meeting, ODS 2009,2009:46-48.
- [11] Li Jianliang,Li Xiaohai,Lugg Robert,et al. Kenel Count Reduction in Model Based Optical Proximity Correction Process Models [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2009, 48 ( 62 ): 06FA051 -06FA055.
- [12] Takeda Hiroyuki, Milanfar Peyman, Protter Matan, et al. Super-Resolution Without Explicit Subpixel Motion Estimation [J]. IEEE Transactions on Image Processing,2009,18(9):1958-1975.



张俊杰(1982-),男,山西省原平市人,天津大学与北京航天计量测试技术研究所合作培养博士生,主要研究方向为自准直测量技术与图像处理方面的研究,Joonjay@Gmail.com;



叶声华(1934-),男,测试计量技术及仪器专家。1934年6月11日出生于湖北省沙市。1956年华中工学院本科毕业,1962年天津大学研究生毕业。精密测试技术及仪器国家重点实验室首任主任,现任天津大学精密仪器系教授、博导、测试计量技术及仪器国家重点学科学术带头人,一直工作在激光及光电测量技术科研第一线,取得了多项重大成果。