

# 高精瞄具重复装卡误差测量

徐志刚<sup>1</sup>, 赵媛媛<sup>2\*</sup>, 周亮<sup>3</sup>

<sup>1</sup>吉林东光精密机械厂, 吉林 长春 130021;

<sup>2</sup>长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

<sup>3</sup>陆军装甲兵军事代表局驻长春地区军事代表室, 吉林 长春 130023

**摘要** 零位走动量是衡量瞄具稳定性的重要指标之一。由于普通瞄具对零位走动量要求较低, 在测量其零位走动量时往往忽略了瞄具的重复装卡误差对零位走动量的影响, 但在高精度瞄具的零位走动量的测量中, 重复装卡误差是不能忽略的。基于自准直原理, 设计了一套自动消除重复装卡误差的装置。该装置由半反半透镜的自动贴合装置及光电自准直仪组成。以压力传感器配合压电陶瓷(PZT)微位移器件形成一个微动微调闭环反馈系统, 实现对半反半透镜姿态的实时调整, 确保半反半透镜与瞄具物镜的端面完全贴合。经实验验证, 该装置在 5° 测量范围内可达到 2" 的测量精度, 足以满足对高精瞄具零位重复装卡误差的测量要求。

**关键词** 测量; 重复装卡误差; 零位走动量; 自准直仪; 白光瞄具

中图分类号 E939

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.021201

## Repeated Loading Error Measurement of High-Precision Optical Sight

Xu Zhigang<sup>1</sup>, Zhao Yuanyuan<sup>2\*</sup>, Zhou Liang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Jilin Dongguang Precision Machinery Factory, Changchun, Jilin 130021, China;

<sup>2</sup>School of Electro-Optical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>3</sup>Military Representative Bureau of Army Armored Forces, Military Representative Office in Changchun District, Changchun, Jilin 130023, China

**Abstract** Zero walking amount is one of the important indicators to evaluate the stability of sight. However, when the zero walking amount is measured, the influence of the repeated loading error of sight on the zero walking amount is usually neglected, because the ordinary sight has a low requirement of zero walking. In contrast, in the zero walking amount measurement of a high-precision sight, the repeated loading error cannot be ignored. Based on the principle of self-collimator, a device for automatically eliminating the repeated loading errors is designed, which consists of an automatic laminating device with a semi-reflecting and semi-transmitting and an electro-optical autocollimator. In addition, a pressure sensor is combined with a piezoelectric ceramic transducer (PZT) micro-displacement device to form a micro-motion fine-tuning closed-loop feedback system and the real-time adjustment of the pose of the semi-reflecting and semi-transmitting is realized. Thus the semi-reflecting and semi-transmitting and the end surface of the objective lens are completely fitted. It has been verified by experiments that the device can be used to achieve a measurement accuracy of 2" in the 5° measurement range, which is sufficient to meet the measurement requirements of zero-level reloading errors for a high-precision sight.

**Key words** measurement; repeated loading error; zero walking force; self-collimator; white sight

**OCIS codes** 120.4640; 100.4550

收稿日期: 2018-05-21; 修回日期: 2018-07-17; 录用日期: 2018-07-26

基金项目: 吉林省重点研发项目(20180201025GX)

\* E-mail: 1792166418@qq.com

# 1 引言

瞄具是辅助枪械进行精确射击的重要装置,与枪械进行适配时,需调节分划板位置来保证瞄准点与弹着点相一致<sup>[1-3]</sup>。在长时间的射击和运输过程中,瞄具会不断承受外界的冲击和震动,导致瞄具分划板锁紧机构松动,瞄准基点失位,出现零位走动的情况<sup>[4-5]</sup>。零位走动量严重影响射击的准确度和稳定性<sup>[6]</sup>,因此对瞄具零位走动量进行测量是十分必要的。2012年,中国兵器工业第208研究所的谢斌提出了一种基于CCD图像检测技术的方法,该方法通过获取实验前后连接座的定位点差量并反复调节瞄准镜使其回到初始位置来测量其零位走动量<sup>[7]</sup>。2015年,长春理工大学的李延风设计了一种相机姿态自适应修正新算法,建立了相机姿态修正模型,并将其应用于零位走动量测量<sup>[8]</sup>。这些测量方法,大多通过实验前后瞄具分划线在成像器件上的位置变化来对零位走动量进行测量,但忽略了因瞄具重复

装卡引入的误差,这部分误差对于高精瞄具零位走动量的测量是致命的<sup>[9-10]</sup>。

本文提出一种利用自准直仪配合半反半透镜来测量瞄具重复装卡误差的方法,设计了微调对准和闭环反馈的贴合装置,以确保半反半透镜的空间姿态与被测瞄具相一致,从而精确地测量出重复装卡误差。

## 2 测量原理

实验前高精度瞄具零位走动量测量原理如图1所示,射击实验前瞄具物镜 $L_1$ 中心与分划板 $R_1$ 中心连线 $O_1O_c$ 、瞄具机械轴 $O_1O_2$ 和光轴 $ll'$ 3轴重合,自准直仪分划板 $R_0$ 的中心点 $F$ 经半反半透镜 $H_1$ 透射后成像在CCD像面 $S_1$ 上,形成像点 $F''$ 。瞄具分划中心点 $O_c$ 在CCD像面的像点 $O'_c$ 与 $F''$ 重合。点 $F$ 经半反半透镜 $H_1$ 反射再经自准直仪半反半透镜 $H_0$ 透射后成像在自准直仪的CCD像面 $S_0$ 上,形成像点 $F'$ 。

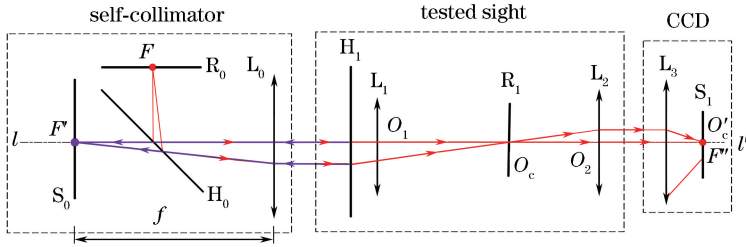


图1 实验前高精度瞄具零位走动量测量原理图

Fig. 1 Schematic of zero walking amount of high-precision sight before test

实验后高精度瞄具零位走动量测量原理如图2所示,在经历射击实验后瞄具重新安装到夹具上时,机械镜筒轴线 $O_1O_2$ 相对 $ll'$ 产生 $\alpha$ 的偏角, $O_1O_c$ 相对 $O_1O_2$ 产生 $\alpha \approx y/2f$ 的偏转角(实际应为两个维度,图2中仅对一个维度进行描述), $O'_c$ 相对 $F''$ 产生一定的偏移<sup>[10-11]</sup>。传统的测量方法通过测量点 $F$ 在自准直仪的CCD像面( $S_0$ )上 $F'$ 的偏移量 $y$ 来计

算零位走动量。所测得的零位走动量 $\theta$ 包括因二次装卡而引入的误差 $\alpha$ ,并非纯粹的零位走动量 $\beta$ 。

利用光电自准直仪配合半反半透镜片来对重复装卡误差 $\alpha$ 进行测量。在瞄具经过重复装卡后,像点 $F'$ 发生一定的偏移量 $y$ 。由图2中关系可知 $\tan 2\alpha = y/f$ ,则 $\alpha \approx y/2f$ ,由 $\beta = \theta - \alpha$ ,即可得到纯粹的零位走动量 $\beta$ 。

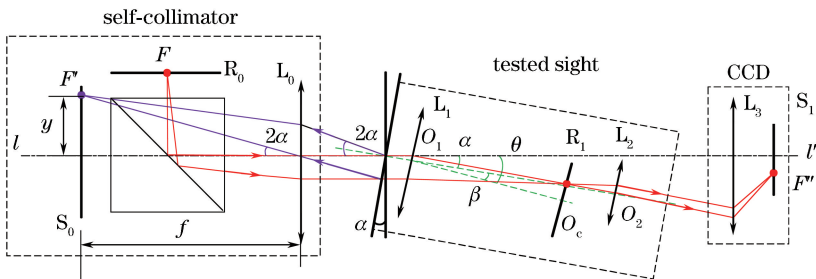


图2 实验后高精度瞄具零位走动量测量原理图

Fig. 2 Schematic of zero walking amount measurement of high-precision sight after test

### 3 贴合装置的设计

半反半透镜配合自准直仪测量重复装卡误差的测量精度很大程度上取决于半反半透镜与被测瞄具的物镜端面的贴合程度。只有当瞄具端面与半反半透镜保持完全贴合时,由自准直所测得的半反半透镜的角度偏移量才能真实反映瞄具因二次装卡而引入的误差。

为实现被测瞄具与半反半透镜组件的紧密贴合,设计了一套搭载有半反半透镜的对准装置,如图3所示,对准机构共分为前后3层。第2层由对准板承载着的半反半透镜和3个成120°均匀分布的刀口组成。半反半透镜将自准直仪发出的平行光一分为二:反射光成像在自准直仪的分划板上,用来测量物镜端面的偏角;透射光进入被测瞄具成像在瞄具分划板上,用来提供观瞄基准,最后凭借3个刀口来实现瞄具物镜端面与对准板灵敏、准确的贴合。第2层搭载着3个成120°均匀分布的微力传感器,配合6个弹簧以“三顶三拉”来保证微力传感器与对准板的稳定接触。3个微力传感器能够灵敏地感测刀口对对准板的作用力。第3层为整个贴合机构的基准,安装有万向轴承和压电陶瓷(PZT)微位移器件,通过手动旋转PZT对刀口的姿态进行粗调,通过电控PZT实现亚微米级的精调,最终达到在垂直光轴平面内姿态的精密调整。在整个贴合机构的上端连接有直线导轨,通过电机带动直线导轨进行大范围的前后位移。

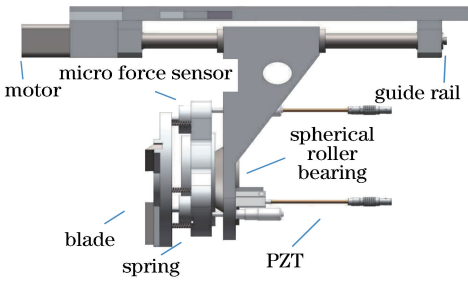


图3 贴合装置三维结构图

Fig. 3 Structural diagram of three-dimensional laminating device

当瞄具前端面与对准板进行接触时,瞄具前端面会对刀口形成的平面产生作用力,如图4所示, $G$ 为瞄具对刀口形成平面的等效作用力, $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$ 为均匀分布在托盘上的微力传感器显示的数值。当力 $G$ 所作用的点 $n$ 与对准板的质心 $O$ 相重合时,瞄具前端面会与刀口形成的平面完全贴合。对位于 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 点的微力传感器进行受力分析,如图4所示。以对准板的中心为坐标系原点, $G_2$ 、 $G_3$ 连线的垂直

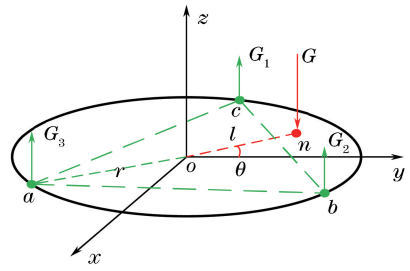


图4 托盘受力示意图

Fig. 4 Schematic of force on tray

平分线为 $x$ 轴, $G_2$ 、 $G_3$ 连线方向为 $y$ 轴,垂直于托盘平面向上为 $z$ 轴,建立直角坐标系。 $r$ 为力 $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$ 到原点的距离, $l$ 为力 $G$ 作用点 $n$ 到对准板质心 $O$ 的距离, $\theta$ 为 $no$ 与 $y$ 轴正方向的夹角。根据力的平衡方程可知:

$$G_1 + G_2 + G_3 = G, \quad (1)$$

$$G_2 r \cos 30^\circ - G l \cos \theta = G_3 r \cos 30^\circ, \quad (2)$$

$$G_1 r - G l \sin \theta = G_2 r \sin 30^\circ + G_3 r \sin 30^\circ, \quad (3)$$

得

$$\begin{cases} G_1 = \frac{Gr + 2Gl \sin \theta}{3r} \\ G_2 = \frac{Gr - Gl \sin \theta + \sqrt{3}Gl \cos \theta}{3r} \\ G_3 = \frac{Gr - Gl \sin \theta - \sqrt{3}Gl \cos \theta}{3r} \end{cases} \quad (4)$$

当 $l=0$ ,力 $G$ 作用于托盘的中心 $o$ 点时, $G_1 = G_2 = G_3$ ,3个刀口与瞄具物镜端面均匀贴合,即可认定瞄具和对准板完成对准。整个贴合对准过程如图5所示。

### 4 实验

实验装置如图6所示,首先将被测瞄具安装到四维调整架上(可绕 $x$ 、 $y$ 和 $z$ 轴进行旋转,沿 $x$ 轴进行平移),调节挂壁的位置使自准直仪、对准装置和瞄具处于同一高度。锁定自准直仪的位置,调节微力传感器端的拉簧,使3个传感器的初始值相等作为测量零位基准。调节自准直仪光源的亮度,使得在CCD像面上看到的分划刻线足够清晰。

为评价微动对准装置的测量精度,首先进行重复性贴合实验。保证瞄具始终处于同一位置(避免因瞄具本身位置的变动而在贴合端引入误差),驱动电机使微动对准贴合模块前后移动,配合微力传感器调整PZT进行重复贴合,每隔10 min进行一次,共计进行10次实验( $I_x$ :自准直仪水平方向的读数; $I_y$ :自准直仪垂直方向的读数)。由表1中的实验数

表 1 重复贴合实验数据

Table 1 Test data of repeated laminating

Number of experiments	$I_x$	$I_y$
1	5°36'10.5"	6°22'16.8"
2	5°36'10.8"	6°22'16.1"
3	5°36'10.4"	6°22'16.5"
4	5°36'10.6"	6°22'17.2"
5	5°36'10.9"	6°22'16.6"
6	5°36'11.2"	6°22'16.9"
7	5°36'10.9"	6°22'17.1"
8	5°36'11.0"	6°22'16.8"
9	5°36'10.9"	6°22'16.7"
10	5°36'11.1"	6°22'16.4"
Average	5°36'10.83"	6°22'16.71"
Standard deviation	0.2452"	0.3113"

表 2 绕  $x$  轴的线性实验数据

Table 2 Linear test data for rotating about  $x$ -axis

Number of experiments	$D_x$	$D_y$	$I_x$	$I_y$
0	-2°30'00"	0°00'00"	-2°29'28"	0°00'00"
1	-2°00'00"	0°00'00"	-2°00'03"	0°00'01"
2	-1°30'00"	0°00'00"	-1°30'04"	0°00'00"
3	-1°00'00"	0°00'00"	-1°00'02"	0°00'02"
4	0°30'00"	0°00'00"	0°29'57"	0°00'00"
5	0°00'00"	0°00'00"	0°00'04"	0°00'03"
6	0°30'00"	0°00'00"	0°30'02"	0°00'01"
7	1°00'00"	0°00'00"	1°00'04"	0°00'02"
8	1°30'00"	0°00'00"	1°29'58"	0°00'03"
9	2°00'00"	0°00'00"	1°59'59"	0°00'01"
10	2°30'00"	0°00'00"	2°30'02"	0°00'02"
$\Delta$	30"	0"	28.7"	1.4"
Standard deviation				1.910"

表 3 绕  $y$  轴旋转的线性实验数据

Table 3 Linear test data for rotating about  $y$ -axis

Number of experiments	$D_x$	$D_y$	$I_x$	$I_y$
0	0°00'00"	-2°30'00"	0°00'01"	-2°30'02"
1	0°00'00"	-2°00'00"	0°00'02"	-2°00'03"
2	0°00'00"	-1°30'00"	0°00'00"	-1°30'01"
3	0°00'00"	-1°00'00"	0°00'02"	-1°00'02"
4	0°00'00"	-0°30'00"	0°00'01"	-0°29'58"
5	0°00'00"	0°00'00"	0°00'00"	0°00'02"
6	0°00'00"	0°30'00"	0°00'03"	0°30'01"
7	0°00'00"	1°00'00"	0°00'01"	1°00'02"
8	0°00'00"	1°30'00"	0°00'02"	1°30'01"
9	0°00'00"	2°00'00"	0°00'00"	2°00'02"
10	0°00'00"	2°30'00"	0°00'01"	2°29'29"
$\Delta$	0"	30"	1.3"	29"
Standard deviation				1.640"

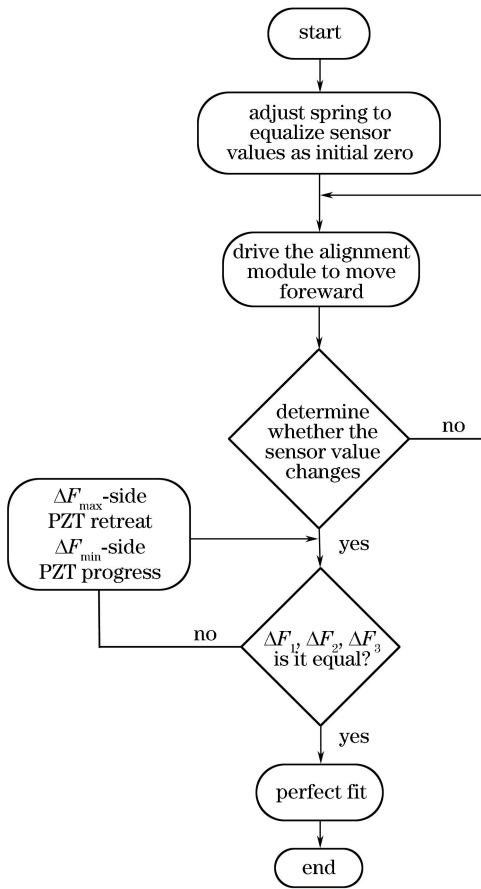


图 5 贴合装置控制流程图

Fig. 5 Flow chart of control of laminating device

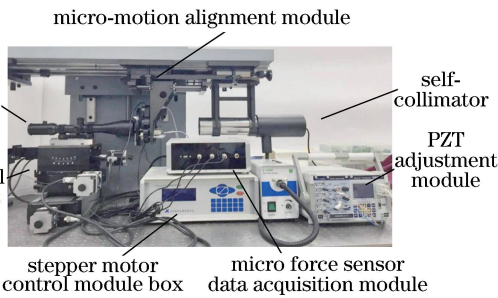


图 6 实验装置图

Fig. 6 Experimental setup

据可知,微动对准模块在水平和竖直方向重复贴合的标准偏差均小于 1"。

接下来对贴合装置的水平 and 竖直方向分别做一线性测量实验,在水平和垂直的方向上以每次 30' 的增量调节调整架,同时对准模块进行贴合,共进行 10 次实验。以调整架在  $x$ 、 $y$  轴方向上的调整值  $D_x$  和  $D_y$  作为理论真值,将自准直仪的读数  $I_x$ 、 $I_y$  与调整架显示的读数进行比较,来评判系统的精度。其中  $\Delta$  为平均增量。实验数据如表 2、表 3 所示。

实验结果表明,调整架在  $x$ 、 $y$  维度所做的增量的标准差分别为  $1.910''$  和  $1.640''$ 。均在  $2''$  之内。说明所设计的贴合装置可以精确地消除重复装卡误差。该装置大大提高了瞄准镜的测量精度。

## 5 结 论

提出一种利用自准直仪配合半反半透镜来测量瞄具重复装卡误差的方法。为了使半反半透镜能精确地反映瞄具的装卡位置变化,设计了一套由 3 个均匀分布的 PZT 和微力传感器组成的闭环反馈对准贴合调节系统,根据微力传感器显示的数值来对对准板的姿态进行修正,以保证瞄具物镜端面与对准板高精度贴合。搭建了实验平台,对整个对准贴合系统进行了重复性实验,重复性实验最大偏差小于  $1''$ ;并进行了以  $30'$  为步长的线性测量实验,平均偏差小于  $2''$ 。实验结果表明,运用此种方法可精确地对重复装卡误差进行测量,从而可得到瞄具的纯粹零位走动量。

## 参 考 文 献

- [1] Liang X, Wang J S, Zhou X Y. Electronic subdivision reading method of zero measuring instrument and its implementation [J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(12): 2423-2428.  
梁旭, 王劲松, 周旭阳. 零位仪的电子细分读数方法及实现[J]. *兵工学报*, 2017, 38(12): 2423-2428.
- [2] Wang Y, Wang J S, Cui S B, *et al.* Research on zero-moving detection technology for high-precision white and low-light sights[J]. *Acta Armamentarii*, 2015, 36(8): 1481-1486.  
王莹, 王劲松, 崔士宝, 等. 高精度白光与微光瞄具零位走动量检测技术研究[J]. *兵工学报*, 2015, 36(8): 1481-1486.
- [3] Zheng Z F. Infrared sight zero calibration instrument [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.  
郑志福. 红外瞄准镜零位校正仪[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- [4] Wen B, Li Y L, Zeng Y H, *et al.* Research on baseline detection system for portable infrared sights [J]. *Laser and Infrared*, 2010, 40(12): 1330-1332.  
温彬, 李永亮, 曾佑洪, 等. 便携式红外瞄准镜瞄准基线检测系统研究[J]. *激光与红外*, 2010, 40(12): 1330-1332.
- [5] Guo F. Development of modern comprehensive test system for basic performance parameters of white light sights[D]. Jinan: University of Jinan, 2016.  
郭峰. 白光瞄具基本性能参数现代综合测试系统的开发[D]. 济南: 济南大学, 2016.
- [6] Wang J S, An Z Y, Li H L. Research on measurement method of zero walking force of infrared sight with reflective collimator [J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(11): 1422-1425.  
王劲松, 安志勇, 李海兰. 反射式平行光管的红外瞄具零位走动量测量方法研究[J]. *兵工学报*, 2010, 31(11): 1422-1425.
- [7] Xie B. Research on the zero walking force test system of infrared sights [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010.  
谢斌. 红外瞄具零位走动量测试系统研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2010.
- [8] Li Y F, An Z Y, Li D N, *et al.* Measurement of zero walking force of infrared sight with camera attitude correction model [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(9): 0908003.  
李延风, 安志勇, 李丹妮, 等. 相机姿态校正模型的红外瞄具零位走动量测量[J]. *中国激光*, 2014, 41(9): 0908003.
- [9] Li Y F, An Z Y, Wang J S, *et al.* Zero-moving detection system for infrared sights based on machine vision [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 30(11): 1112003.  
李延风, 安志勇, 王劲松, 等. 基于机器视觉的红外瞄具零位走动量检测系统[J]. *光学学报*, 2014, 34(11): 1112003.
- [10] Wang C J. Research on high-resolution aiming baseline change measurement system for white light sight [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011.  
王偲姣. 白光瞄具高分辨率瞄准基线变化量测量系统研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2011.
- [11] Li Y H, Guo Y K. Modern precision instrument design [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.  
李玉和, 郭阳宽. 现代精密仪器设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [12] Mao Y T. Error theory and accuracy analysis [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1982.  
毛英泰. 误差理论与精度分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.