

一种测试零位走动量的新方法

肖瑞兵, 李林, 李彦生, 王贵全, 于振龙, 王乔方, 李晓斌

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 针对热像仪光轴稳定性及瞄准精度的高精度战术指标要求, 提出了一种测试零位走动量的新方法。通过对零位走动量常规测试方法的分析研究, 总结出了影响测试零位走动量的主要不确定度, 新方法基于计算机图像视觉分析技术, 采用特殊的软件算法, 将来自热像仪的图像信息进行分析处理, 建立热像仪光学视场与电视场之间的等效换算关系, 最终精确计算出目标点的零位走动量。

关键词: 热像仪; 光轴稳定性; 零位走动量

中图分类号: TP274 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2017)02-0178-06

A New Method to Measure the Zero Position offset

XIAO Ruibing, LI Lin, LI Yansheng, WANG Guiquan, YU Zhenlong, WANG Qiaofang, LI Xiaobin

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: According to the requirement of the high precision tactical index for the stability of the optical axis and the accuracy of the assembly, a new method to measure the zero position offset of the camera is proposed. Through the analysis and research of zero position offset with conventional test methods, the main factors that impact the zero position offset test are summed up. New methods are based on computer vision and image analysis technology, using the advanced software algorithms to analyze thermal imager image information and build a equivalent relationship between thermal imager optical field of view (FOV) and television field. Finally, the point target of zero position offset is calculated accurately.

Key words: thermal imager, stability of optical axis, zero position offset

0 引言

热像仪零位走动量是表征热像仪在各种环境条件下(如高低温、冲击振动)保持光轴稳定的一种能力, 是热像仪瞄准非常重要的指标。光电系统由于其结构的复杂性, 如果在使用过程中, 其光轴发生偏差^[1], 偏差太大将严重影响武器系统的瞄准性能。所以, 目前瞄准用的热成像器具均要求有很高的光轴稳定精度, 评定光轴稳定性的指标就是零位走动量^[2]。

军用红外热像仪的光轴稳定性, 一般要求小视场光轴稳定性误差应小于 ± 0.08 mrad, 甚至有的项目要求达到 ± 0.04 mrad, 这是一个对热像仪非常高的指标, 为了满足战术指标要求, 必须研建高精度的测试系统或采用新方法^[3]。

零位走动量检测系统是在前期摸索过程中搭建起来的, 所以检测精度比较低, 由于武器系统对热像仪的瞄准精度提出了越来越高的要求, 现有的检

测设备已无法满足研制和生产需求, 必须开展零位走动量测试精度提高的工艺技术研究^[4], 为研建新的测试系统打好基础, 解决检测工艺瓶颈问题。

1 常规方法的简介及分析

目前, 测试热像仪零位走动量的常规方法是: 利用红外准直仪模拟无穷远目标(一般是点目标); 使用光学自准仪保证观瞄系统机械复位(环境实验前与环境实验后), 即光学自准仪起到一个测试基准的作用; 将高精度二维转台置于高低温箱体中(被测热像仪置于高低温箱中), 并使高低温箱体在红外准直仪与光学自准仪之间, 高精度二维转台测量环前与环后热像仪光轴偏移的偏差量。测试系统的典型配置有: 红外准直系统、高精度二维转台、高低温箱体、光学自准仪、监视器、系统电源。常规测试系统示意图如图1所示。

收稿日期: 2016-06-15; 修订日期: 2016-01-08.

作者简介: 肖瑞兵(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为红外测试技术。E-mail: 610656371@qq.com.

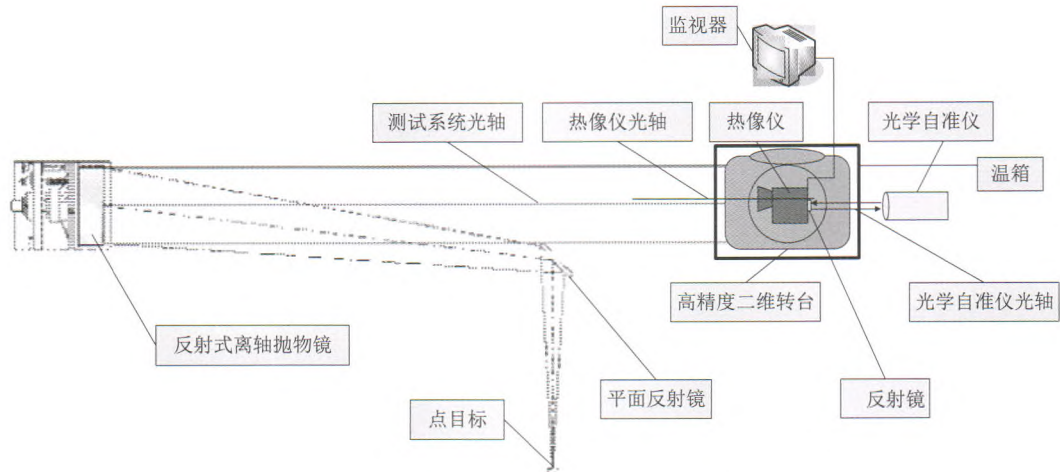


图 1 零位走动量常规测试系统布置图

Fig.1 Layout diagram of zero position walking momentum test system

通过对常规方法的分析发现存在如下的问题：

1.1 主观因素大，影响测试精度的因素较多

常规方法的测试精度主要依靠高精度二维转台精度、目标点的大小、目视对齐程度来保证的。目前，我们普遍采用的高精度二维转台的精度是 3"。

目标点大小直接影响着目视对齐的精度，因此尽量将目标点做小，但由于受热像仪性能的制约，既要兼顾热像仪能够探测到目标点，也要保证目标点尽量小，目标点不可能做到与分划线等宽，这增加了操作者在对齐时的难度。另外目标点与热像仪分划中心的对齐操作是通过人眼目视观察进行的，不同操作者对齐的效果不尽相同。同一操作者环境试验前及环境试验后的对齐也没有一个量化的标准，受操作者主观影响较大。

1.2 测试过程必须使用热像仪分划中心作为对齐参照点，单点测量难

常规方法必须使用热像仪分划作为对齐参照点，环境实验前必须将热像仪分划移动到视场中心，并记录分划坐标；环境实验后，还需检查分划是否移位了；此方法只能做一次单点测量。

目前大部分热像仪分划形状都是分段分划，且分划中心都有点分划，目视可以方便地对齐。但也有部分产品，分划与一般产品的不相同，分划中心是空心的，没有中心点分划。对于这样形状的分划，需人为估计，将热像仪中的目标点像对齐分划中心，更是增添了测试过程的不确定度。

1.3 测试效率低

常规测试方法要求：某一产品进行零位测试时，这套测试系统就被占用，直到该台产品环境试验后测试完成才被释放。大部分产品的零位测试均是常规试验项目；同一时段，如果产品种类少，目

前的测试系统数量还能应对；如果同一时段，产品种类多、集中交付时，测试系统数量就很难应付了。为了更精确地描述常规方法的精度问题，我们对其进行了系统不确定分析。

1.4 测量不确定度分析

国际测量组织采用“测量不确定度”作为一个测量参数的准确度的衡量，测量不确定度表述和最好值的接近程度，通过估计测量结果离散度的标准差来衡量测量质量，不确定度一般用测量过程的数学模型和传递规则来评估。在常规零位走动量测试方法中，主要的测量不确定度分析如下^[5]：

1) 测试人员恢复点目标像引入的不确定度

首先，分析测试人员在进行热像仪目标点像与分划线恢复到原来相对位置关系的过程中引入的不确定度，它包括两个方面的因素，一个方面的因素是对热像仪的调节引起的，如焦距、亮度、对比度的调节，另一个方面是观察者的对准误差引起的。点目标像不可能是一个理想的点，总有一定的尺寸，观察者站在不同的观测位置进行对准总难免引入测试的不确定度。测试人员对点目标像的对准（相对位置的恢复）引入的不确定度通过多次测量来考量，采用 A 类不确定度评定方法：

$$\text{统计标准偏差: } \sigma_{ix} = 1.49'' , \sigma_{iy} = 1.41''$$

测量不确定度：

$$u_1 = \sqrt{u_{ix}^2 + u_{iy}^2} = 2.05'' \quad (1)$$

测试结果如表 1 所示。

表 1 多次数据测量所得不确定度

Table1 Measurement results of point target image

x	-2"	-1"	2"	1"	2"	0"	1"	-1"
y	2"	0"	0"	-2"	1"	2"	-1"	1"

2) 测试转台引入的不确定度

选用的二维转台在水平方向的标准偏差约为2", 在竖直方向上的标准偏差约为3"。由此可知转台的不确定度为:

$$u_2 = \sqrt{2^2 + 3^2} = 3.61'' \quad (2)$$

3) 测试环境影响引入的不确定度

测试环境的影响主要包括温湿度的变化、环境的振动(包括地基振动和声振动)、测试人员在活动过程引起的大气扰动影响及其他应力形变, 这些影响因素一方面将造成红外平行光管的光轴微小变化, 另一方面, 将影响到作为基准的自准直经纬仪的光学平台发生变化, 从而给测试带来了误差, 根据目前的试验条件分析, 前者的偏差极限为: ±0.1", 后者的偏差极限为±0.5"。假设测试环境带来的偏差为均匀分布, 故不确定度分别为:

$$u_{3i} = 0.1/\sqrt{3} = 0.058'' \quad (3)$$

$$u_{3j} = 0.5/\sqrt{3} = 0.289'' \quad (4)$$

合成不确定度为:

$$u_3 = \sqrt{u_{3i}^2 + u_{3j}^2} = 0.29'' \quad (5)$$

正常情况下, 可以满足上述要求, 若无法满足上述要求则认为不具备测试的环境条件, 如在试验过程中, 光电自准直仪及其基座被触碰, 可能导致光电自准直仪的光轴发生很大的偏差, 则试验作废。

4) 红外平行光管出射光束的不平行性引入的不确定度

因小孔径光阑位于红外准直系统焦面上的误差为±2 mm, 根据牛顿公式, 以红外准直系统焦距为2 m, 计算的物方距离为:

$$l = 2^2/0.002 = 2000 \text{ m}$$

由于采用机械辅助光学法定位, 产品在转台上沿垂直于平行光管轴线的平面移动的极限误差为2 mm, 此时, 平行光管出射光束不平行性引起的最大误差为Δ:

$$\Delta = \arctan(l/\text{rad}) \quad (6)$$

红外平行光管出射光束的不平行性引起的测试不确定度按均匀分布计算得:

$$u_4 = 0.206/\sqrt{3} = 0.12'' \quad (7)$$

5) 高低温试验对工艺反射镜的影响引入的不确定度

平面反射镜作为工艺反射镜, 对自准直经纬仪的成像质量起着决定性作用, 通常, 平面反射镜的反射面质量用光圈数来表示, 它表征了反射镜偏离

理想平面的程度, 该数值用激光干涉仪来测量, 它由半径偏差、像散和局部偏差组成。本分析主要考虑经纬仪两次对准的位置偏移量引起的反射自准直像的偏差, 从而引入测量的不确定性^[6]。由于平面反射镜不可能是理想的平面, 所以, 平面反射镜平面度引起的偏差Δ可以用下式来计算:

$$\Delta = \arctan(d/R) \quad (8)$$

式中: d为平面反射镜的偏移量, 直径为30 mm平面反射镜, 按照高低温试验前后自准直经纬仪对准时, 反射点最大偏移量不超过2 mm来计算; $R = D^2/8h$, D=30 mm为平面镜直径, h为平面反射镜的面形偏差, $h = N\lambda/2$, N=2 (N为光圈数, 按照极限值N=2计算, λ=632.8 nm为测试波长)。

则极限偏差为:

$$\Delta = \arctan(d/R) = 2.33'' \quad (9)$$

测量按均匀分布计算, 不确定度为:

$$u_5 = 2.33/\sqrt{3} = 1.35'' \quad (10)$$

6) 光学自准直仪测量偏差引入的不确定度

按照自准直经纬仪说明书和校准报告, 所用的自准直仪测试精度为1", 若测量按均匀分布计算, 则其不确定度为:

$$u_6 = 1/\sqrt{3} = 0.58'' \quad (11)$$

最终合成的不确定度如下所示:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2} \quad (12)$$

则 $u_c = 4.41''$ 。

2 新的测试系统方案简介

根据前面的分析可知, 引入测量不确定度最大的是测角用的数显转台以及测量人员对目标点的对准误差, 如何降低两者的测量误差: 一种方法是采购高精度的测量转台, 另一种方法是不用数显转台来测量, 而用图像分析的方法来测量零位走动量, 根据这个思想, 本文以热像仪的十字分划线为基准, 用图像采集分析的方法来测量零位走动量。

测试零位走动量的新方法是基于计算机图像视觉分析技术, 采用先进的软件算法, 将来自热像仪的图像信息进行分析处理, 建立热像仪光学视场与电视场之间的等效换算关系, 精确计算出目标点的微小角位移(即: 零位走动量)的测量方法。

测试系统配置: 红外准直系统(含点目标)、高低温箱体、光电自准直仪、可调节支架、计算机及分析软件、及系统电源。新测试系统示意图如图2

所示。

靶标（即点目标）位于准直仪的焦面上，模拟无穷远目标，使被测热像仪接收到近似于无穷远目标的平行光束。热像仪放在高低温箱体中，调整热像仪的位置使点目标经过热像仪所成的像点处于热像仪的分划中心并锁定位置，再调整光电自准直仪的位置使其十字分划经热像仪后表面平面反射镜所成的像位于光电自准直仪的分划中心并锁定位置。图像采集卡实时采集热像仪光轴随温度偏移的图像并进行计算处理得到光轴零位走动量的数据。

2.1 目标像点的抽象化

采用高分辨率图像采集卡，将热像仪视频进行实时采集，建立像素空间坐标系，目标像点在坐标参照系中的位置就被明确定义。如图 3 所示。

由于目标像点是有大小的，本文采用了相关算法，将有大小的目标像点抽象为坐标系中的一个点（这个点类似目标像点的“质心”，没有大小），且计算出“质心”点的坐标（用重心法来计算），即完成

目标像点的抽象化，如图 4 所示。

2.2 目标像点微位移的计算

在新方法中，零位走动量测试就是计算目标像点“质心”环前与环后的相对位移量，若目标像点位移前后的“质心”像素灰度坐标值为 (x_0, y_0) 与 (x_1, y_1) ，如图 5 所示。

光轴偏移具体计算方法如下例所示：若某热像仪窄视场为 $1.2^\circ \times 0.9^\circ$ ，所采用的图像采集卡分辨率为 768×576 。设每个像元的空间张角为 α ：

$$\alpha = 1.2 \times 3600 / 768 = 5.63'' \quad (13)$$

若目标像点偏移前后的“质心”像素坐标之差为 $(\Delta x, \Delta y)$ ，则光轴的偏移量 L 为：

$$L = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (14)$$

那么零位走动量即 θ 就为：

$$\theta = L \cdot \alpha \quad (15)$$

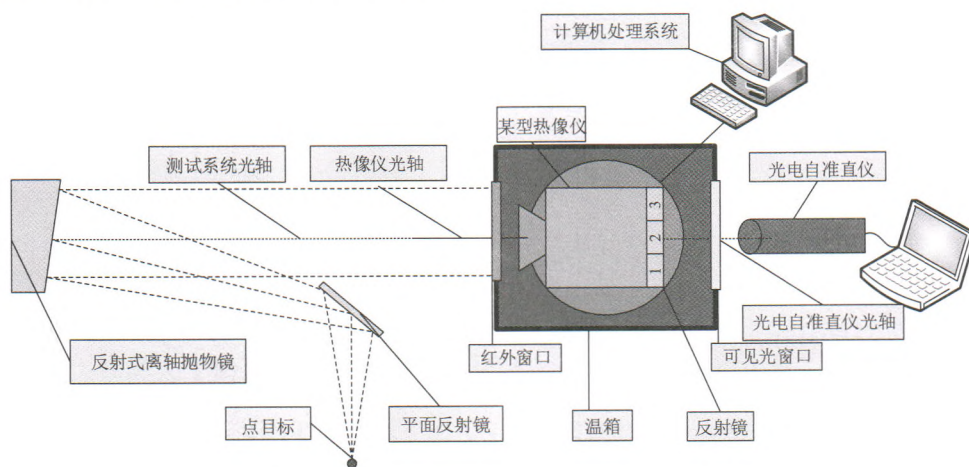


图 2 零位走动量新测试系统布置图

Fig.2 The new layout diagram of zero position walking momentum test system

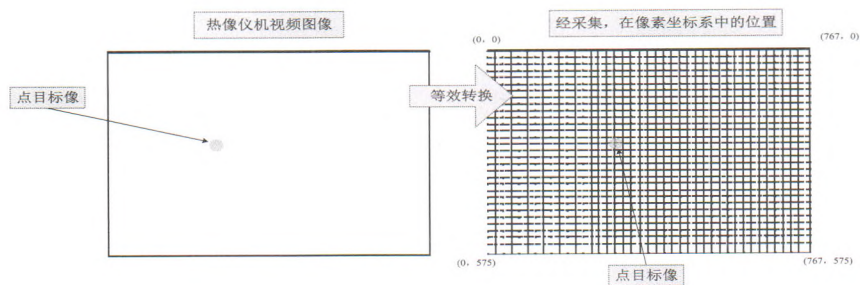


图 3 图像等效转换示意图

Fig.3 Schematic diagram of image equivalent transformation

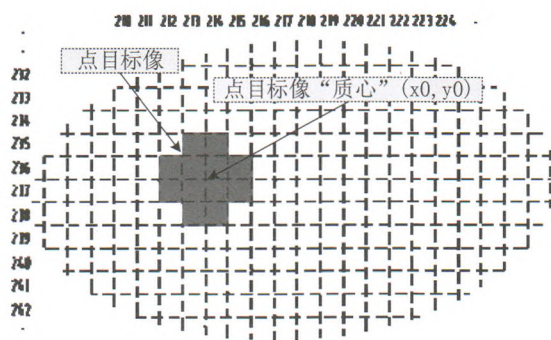


图 4 点目标像的抽象 Fig.4 The abstraction of point target image

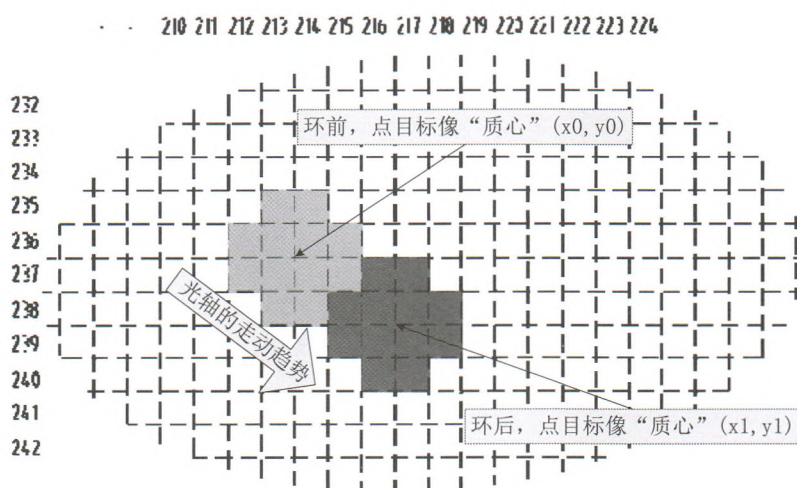


图 5 单一点目标像位移量计算 Fig.5 Calculation of single point target image displacement

2.3 新方法的测试不确定度分析

新方法的测试不确定度主要由下面几个因素构成：①测试人员恢复点目标像引入的不确定度；②测试环境的影响引入的不确定度；③红外平行光管出射光束的不平行性引入的不确定度；④高低温试验对工艺反射镜的影响引入的不确定度（包括产品复位过程中引入的不确定度）；⑤光电自准直仪测量误差引入的不确定度；⑥图像采集误差引入的不确定度。

在此，前 4 个的不确定度大致和常规测试方法的不确定度相同，在这里我们只分析后两者的不确定度。

1) 光电自准直仪测量误差引入的不确定度

按照光电自准直仪的参数指标，所用的自准直仪测试精度为 $0.2''$ ，若测量按均匀分布计算，则其不确定度为：

$$u_5 = 0.2 / \sqrt{3} = 0.12'' \quad (16)$$

2) 图像采集误差引入的不确定度

以 XX 热像仪产品为例，其采用的是制冷型的 320×256 焦平面探测器，窄视场为 $1.2^\circ \times 0.9^\circ$ ，零

位走动的指标小于或等于 $8.24''$ 。图像采集卡决定采用北京嘉恒中自图像技术有限公司的 M50B，根据厂家提供的参数，最大的采集分辨率为 768×576 ，点阵扰动小于 2 ns ，为 10 位数字输出，即输出灰度等级为 $0 \sim 1023$ 。PAL 制视频信号的行频为 15.625 kHz ，则采集卡的时钟频率应大于 500 MHz ， $15.625 \text{ kHz} / 500 \text{ MHz} = 0.00003$ ，由此我们可以认为采集卡对于视频信号行与行之间的采集不会出现扰动。扰动会出现在行中的像素点的采集过程中，PAL 制视频信号一行的时间为 $64 \mu\text{s}$ ，其中消隐时间为 $12 \mu\text{s}$ ，有效信号的时间为 $52 \mu\text{s}$ ， $52 \mu\text{s} / 768 \approx 67.71 \text{ ns}$ ，即采集一个有效像素点的时间为 67.71 ns 。 $2 \text{ ns} / 67.71 \text{ ns} \approx 0.03$ ，即点阵扰动会带来 3% 的误差。现在来分析采集卡的灰度等级输出会带来的误差，设采集卡的灰度输出可能存在 1 个灰度等级的误差（因为输出灰度等级在 $0 \sim 1023$ 之间以 1 为最小变化单位连续变化）；在实际测量过程中，作为目标靶点一般都要比周围的点亮得多，表现在灰度值上，目标靶点的灰度值要比周围点的灰度值大得多，本文以 $716 (1023 \times 70\% \approx 716)$ 作为是否为目标点的标

准；设现在的靶点目标刚好为一个像素，灰度值为 V ，坐标为 (x,y) ，1 个灰度等级的误差在质心计算中带来的 x 方向误差为 $\frac{|x-x(v\pm 1)/v|}{x} = 1/v$ ，同样 y 方向误差为 $\frac{|y-y(v\pm 1)/v|}{y} = 1/v$ ，当目标点为多个

像素点时可得到相同的结果。此处的 v 值最小应为 716，则 $1/v$ 最大值为 0.0014。水平方向单位像素对应的视场角为 $1.2^\circ/768 = 5.625''$ ，垂直方向单位像素对应的视场角为 $0.9^\circ/576 = 5.625''$ 。由点阵扰动及灰度等级输出在水平方向带来的误差为 $(0.03 + 0.0014) \times 5.625 \approx 0.18''$ ，灰度等级输出在垂直方向带来的误差为 $0.0014 \times 5.625 \approx 0.008''$ ，合成的不确定度为：

$$u_6 = \sqrt{0.18^2 + 0.008^2} = 0.18'' \quad (17)$$

最终整个新方法的合成不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2} \quad (18)$$

最终得到：

$$u_c = 2.48''$$

对比传统的测试方法，改进后的测试方法不确定度下降了 $1.93''$ ，高低温试验前后零位走动量测试不确定度由原来的 $4.41''$ 降低到了 $2.48''$ 。

3 结论

本论文通过对传统光轴偏移测试方法研究及分析，提出了一种新的测试方法，该测试方法的优点是：①通过图像采集，建立像素相对位置坐标，进行目标点抽象“质心”化，可准确地获得目标像点的位置坐标，并可实时记录位置坐标，操作简便，减少了测试人员目视对齐和测试转台精度有限引入的不确定度，在减少设备误差、人为误差的基础上提高了测试精度，并解决了单台测试占用测试设备过多，时间过长，测试效率低下的问题，满足了红外热像仪零位走动测试数据准确、可靠、数据重复性强等测试要求。②新方法在原有测试设备上，去除二维数显转台，仅需要一个图像采集装置和后端

分析计算程序就可实现，不增加测试设备硬件投入，成本小，效率高。总之，新方法的应用实现了红外热像仪零位走动量的精确测试，实现了基于机器视觉的分析测试功能，有效控制了热像仪的瞄准质量，并提供了可靠、准确的参数数据，满足了红外成像产品产业化、市场化、军事化的发展需求。经一段时间的实际应用验证表明，该方法具有稳定、可靠、精度高、工作效率高的特点。

参考文献：

- [1] 高有堂, 邱亚峰, 田思, 等. 振动试验条件下微光瞄准镜零位位移机理分析[J]. 兵工学报, 2008, 29(9): 1074-1077.
GAO Youtang, QIU Yafeng, TIAN Si, et al. Mechanism analysis of zero displacement movement of LII sight device based on vibration experimental condition[J]. *Acta Armamentarii*, 2008, 29(9): 1047-1077.
- [2] 吕溥, 韩国华, 张艾莉, 等. 高精度瞄准镜零位走动量检测研究[J]. 激光技术, 2013(3): 404-408.
LV Pu, HAN Guohua, ZHANG Aili, et al. Study on measurement of sight-line alteration of high precision sighting telescopes[J]. *Jiguang JISHU Laser Technology*, 2013(3): 404-408.
- [3] 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.
WANG Jinsong, AN Zhiyong, LI Hailan. Research on the measuring method to the IR aiming sight's sight line alteration of reflection type collimator[J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(11): 1422-1425.
- [4] 蔡毅, 王岭雪. 红外成像技术中的 9 个问题[J]. 红外技术, 2013, 35(11): 671-682.
CAI YI, WANG Lingxue. Nine issues associated with infrared imaging technology[J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(11): 671-682.
- [5] 梁妍, 石利霞, 赵峰. 光学瞄具零位走动量测试系统研究[J]. 长春理工大学学报, 2008(3): 30-32.
LIANG Yan, SHI Lixia, ZHAO Feng. The zero position walking momentum testing system research for optic aiming device[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2008(3): 30-32.
- [6] 马宏, 王金波. 误差理论与仪器精度[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2007: 44-58.
MA Hong, WANG Jingbo. *Error Theory and Instrument Precision*[M]. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 2007: 44-58.