

基于后置式投影亮分划系统的零位走动量分析

杨海金 卞臻臻 高雪军 司振龙 郝芳 袁玉芬 詹江 高赫 李娜

Analysis of variational momentum of zero position based on rear mounted reticle with projected brightness system

YANG Haijin, BIAN Zhenzhen, GAO Xuejun, SI Zhenlong, HAO Fang, YUAN Yufen, ZHAN Jiang, GAO He, LI Na

引用本文:

杨海金, 卞臻臻, 高雪军, 等. 基于后置式投影亮分划系统的零位走动量分析[J]. 应用光学, 2025, 46(1): 55–61. DOI: 10.5768/JAO202546.0101004

YANG Haijin, BIAN Zhenzhen, GAO Xuejun, et al. Analysis of variational momentum of zero position based on rear mounted reticle with projected brightness system[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(1): 55–61. DOI: 10.5768/JAO202546.0101004

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0101004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

微光夜视器件划代方法初探

Preliminary study on distinguishment method of low-level-light night vision devices

应用光学. 2021, 42(6): 1092–1101 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0604001>

用于观察瞄准镜的截止滤光片设计和制备

Design and preparation of cut-off filter for observation scope

应用光学. 2022, 43(2): 221–227 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0201006>

基于超宽带反射超表面产生太赫兹轨道角动量

Terahertz orbital angular momentum generation based on ultra-wideband reflective metasurface

应用光学. 2024, 45(2): 282–291 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0201002>

基于图像分割和局部亮度调整的微光图像颜色传递算法

Low-light image color transfer algorithm based on image segmentation and local brightness adjustment

应用光学. 2020, 41(2): 309–317 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0202004>

高精度光纤陀螺零位误差的磁温特性研究

Research on magnetic temperature characteristics of zero error on high precision fiber-optic gyro

应用光学. 2020, 41(1): 220–227 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0108001>

超低亮度测量技术研究

Study on measurement technology of ultra-low brightness

应用光学. 2022, 43(4): 701–706 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0403002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 01-0055-07

引用格式: 杨海金, 卞臻臻, 高雪军, 等. 基于后置式投影亮分划系统的零位走动量分析 [J]. 应用光学, 2025, 46(1): 55-61.

YANG Haijin, BIAN Zhenzhen, GAO Xuejun, et al. Analysis of variational momentum of zero position based on rear mounted reticle with projected brightness system[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(1): 55-61.



在线阅读

基于后置式投影亮分划系统的零位走动量分析

杨海金¹, 卞臻臻¹, 高雪军¹, 司振龙¹, 郝芳¹, 袁玉芬², 詹江¹, 高赫¹, 李娜¹

(1. 江苏北方湖光光电有限公司, 江苏 无锡 214194; 2. 陆军装备部驻南京地区军代局驻无锡地区军代室, 江苏 无锡 214035)

摘要: 针对后置式投影亮分划光学系统在某型微光镜中应用时出现零位走动量超差问题, 通过分析该类微光瞄准镜的零位稳定性机理以及开展冲击试验, 发现零位走动量超差的主要原因是射击过程中光学系统组合棱镜发生转动, 采取将组合棱镜外形尺寸和安装尺寸公差优化方法, 使二者间隙小于 0.02 mm, 最终微光镜的零位走动量 (Δd) 小于 0.26 mil, 满足系统技术指标规定 $\Delta d \leq 0.7$ mil 要求。给出了同类瞄准镜在设计 and 生产中对零位走动量控制的关键点及问题解决方案, 为提高瞄准镜零位稳定性提供了有效分析依据。

关键词: 后置式投影亮分划; 零位走动量; 冲击试验; 微光瞄准镜

中图分类号: TN206; TH745

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0101004

Analysis of variational momentum of zero position based on rear mounted reticle with projected brightness system

YANG Haijin¹, BIAN Zhenzhen¹, GAO Xuejun¹, SI Zhenlong¹, HAO Fang¹,
YUAN Yufen², ZHAN Jiang¹, GAO He¹, LI Na¹

(1. Jiangsu North Huguang Opto-Electronics Co., Ltd., Wuxi 214194, China; 2. Army Equipment Department in Nanjing Military Bureau in Wuxi District Military Office, Wuxi 214035, China)

Abstract: Aiming at the variational momentum of the zero position overshoot problem when rear mounted reticle with projected brightness was applied in a certain type of low-light-level (LLL) sight mirror, the zero stability mechanism of this kind of LLL sight mirror was analyzed. The impact test shows that the main reason for the variational momentum of the zero position overshoot is the rotation of the combined prism in the optical system during shooting. The overall size and mounting size tolerances of the combined prism were optimized, the gap between the two sizes was less than 0.02 mm, and the variational momentum of the zero position (Δd) of the LLL sight mirror was less than 0.26 mil, meeting the requirements of $\Delta d \leq 0.7$ mil specified in the system technical specifications. The key points and solutions of variational momentum of the zero position control in design and production of similar scope were given, which provided an effective analysis basis for improving the zero stability of the scope.

Key words: rear mounted reticle with projected brightness; variational momentum of zero position; impact test; low-light-level sight mirror

引言

根据现代战争模式的需求, 夜间作战装备的稳

定性和可靠性已成为重要质量特性^[1-2]。微光瞄准镜是枪械系统及夜间执行任务必不可少的观瞄装

收稿日期: 2024-02-22; 修回日期: 2024-03-27

基金项目: 某工程项目

作者简介: 杨海金 (1981—), 男, 硕士, 研究员, 主要从事光电技术研究和光电产品研发。E-mail: 121047059@qq.com

通信作者: 卞臻臻 (1990—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事光电产品研发。E-mail: 873498914@qq.com

备,所有枪械系统远距离、或特殊条件下的精确打击均依赖各种瞄准镜,国外已将光电瞄准镜作为轻武器系统的标准配套器材^[3-4]。国内随着夜视装备的发展,夜视瞄准镜已成为主要的单兵夜间瞄准器材之一^[5-6]。其中,瞄准镜的零位走动量是最重要的技术指标之一,其稳定性直接影响实弹射击精度和射击稳定性^[7-9]。零位稳定性技术也是各类观瞄装备的关键技术,优良的零位稳定性是保证战士对瞄准镜“放心用”的前提^[10-11]。

后置式投影亮分划系统与传统前置分划系统、近贴式分划系统和暗分划系统相比,具有视差小、校枪精度高、调校机构简单、环境适应性强等特点^[12]。文中针对后置式投影分划光学系统在某瞄准镜应用中出现的零位走动量超差问题进行分析,通过冲击试验验证定位问题原因,提出改进措施,为该类光学系统以后在强冲击环境中的应用提供了零位稳定性控制方法和参考依据。

1 后置式投影亮分划光学系统

微光瞄准镜属直视瞄准光学系统,其分划形式根据分划板在像增强器的位置分为前置分划和后置分划,即置于光阴极面处为前置分划,置于阳极面(荧光屏)处为后置分划,且根据分划的亮、暗分为暗分划和亮分划^[13-14]。微光瞄准系统常见的分划形式如图1所示。

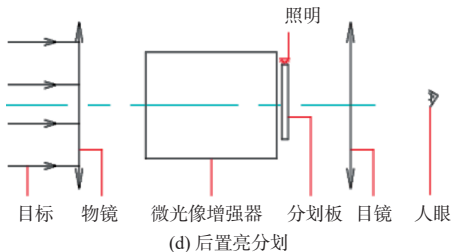
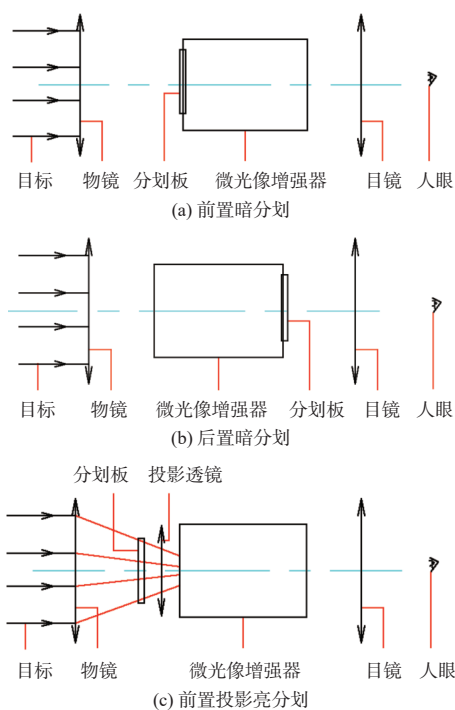


图1 微光瞄准系统分划形式

Fig. 1 Common division forms of LLL aiming systems

由于亮分划系统有更好的环境适应性,所以微光瞄准镜中暗分划的使用已经不多见了,且投影亮分划光学系统能够很好地提高分划精度、消除视差。图2为一种后置式投影亮分划光学系统,将置于像增强器荧光屏后方45°方向的分划线利用单色发光管照亮后,通过光学投影方式与目标像形成共轭关系,在目镜中可同时观察到目标像和分划像,并且采用组合棱镜实现光学投影。

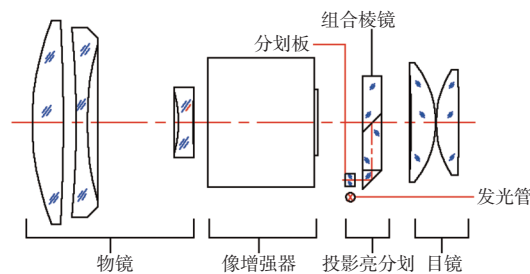


图2 投影光学系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of projection optical system

图2所示光学结构可以将系统视差轻松调校至小于1',甚至可实现零视差,大幅提高瞄准精度;同时分划板直径可大幅减小至小于 $\phi 3$ mm,使得分划调节机构空间需求明显减小,实现内调节,产品重量大幅减轻,且分划调节精度可实现小于每档0.25 mil。亮分划可设置为人眼敏感的高亮可见光光谱,区别于夜间目标色,提高对比度,还可以根据环境照度高低调节分划亮度,大幅提高瞄准镜的环境适应性。

2 零位走动量分析

2.1 试验现象

瞄准镜在开展研制阶段寿命考核试验中,需在常温、高温和低温环境下按特定比例进行规定数量的实弹射击,在此过程中,重点考核瞄准镜的强度和零位稳定性。某型瞄准镜在寿命试验时零位走动量数据如表1所示。表1中实际射弹数为11500

发,最大零位走动量为 2.72 mil。试验过程中零位走动量数据变化趋势见后边图 7 所示。

表 1 零位走动量测试数据

Table 1 Test data of variational momentum of zero position

序号	试验阶段	零位走动量 $\Delta d(x,y)/\text{mil}$	判定结果
1	初始零位	(0,0)	试验前标定值
2	常温射击1 500发	(0.30,-0.36)	合格
3	常温射击1 500发	(0.85,-0.81)	超差
4	常温射击1 500发	(1.97,-0.92)	超差
5	高温射击3 000发	(2.72,-1.88)	超差
6	低温射击2 500发	(2.55,-1.86)	超差
7	常温射击1 500发	(2.66,-1.80)	超差

2.2 机理及原因分析

基于投影式后置亮分划光学系统的微光瞄准镜主要由物镜、镜身(含微光像增强器和电源)、分划调节机构、目镜和连接接口组成,如图 3 所示。

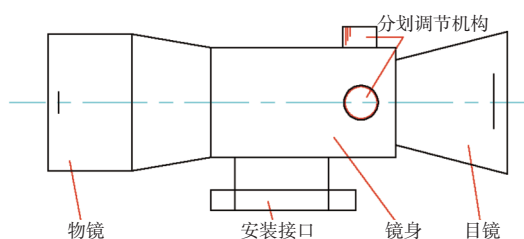


图 3 微光瞄准镜构成示意图

Fig. 3 Schematic diagram of composition of low-light-level sight mirror

零位走动量 Δd 作为瞄准镜系统指标,影响因素较多,主要有^[15-16]:

- 1) 连接处松动或走动产生误差(Δd_1),如物镜和镜身连接处出现明显晃动、连接接口与镜身出现松动、分划调节机构(图 4 所示)松动;
- 2) 光学件走动产生误差(Δd_2),如分划板、物镜透镜、棱镜松动;
- 3) 结构件损坏变形产生误差(Δd_3),如镜身龟裂、连接接口变形或龟裂;
- 4) 活动机构间隙产生误差(Δd_4),如分划调节机构间隙过大;
- 5) 微光增强器件损坏或松动产生误差(Δd_5)。

误差引起的零位走动量具有随机性,通常采用方差计算其极大值,可按式(2)得到瞄准镜的零位走动量 Δd :

$$\Delta d = \sqrt{\Delta d_1^2 + \Delta d_2^2 + \Delta d_3^2 + \Delta d_4^2 + \Delta d_5^2} \quad (1)$$

通过对故障样机检查分析,未出现连接松动、结构件损坏变形以及微光增强器件损坏或松动现象,则 Δd_1 、 Δd_3 、 Δd_5 均为 0。为满足系统分划调节功能,分划板的运动利用传统消间隙机构(见图 4)实现,弹簧拉力符合要求,不存在间隙,而且试验中未出现视差超差和分辨率下降等现象,因此,分划板活动机构未引起零位走动。为满足物距调焦功能,物镜与本体间必需有运动间隙,测量活动机构间隙 D_1 为 0.015 mm,通过成像关系式(2)计算 Δd_4 为

$$\Delta d_4 = \arctg(D_1/f') \quad (2)$$

式中,物镜焦距 f' 为 100 mm,计算出 Δd_4 为 0.14 mil,远小于 2.72 mil。因此,系统存在光学件走动产生误差 Δd_2 。

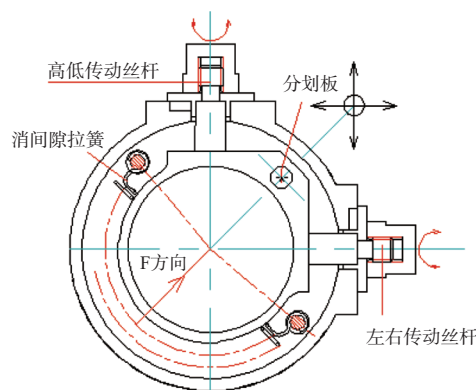


图 4 分划调节机构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of dividing adjustment mechanism

对表 1 试验数据进行分析,发现零位走动的方向是一致的,且在高温射击试验后达到极值后趋于稳定,可以断定系统内影响零位的光学元件出现走动,产生误差(Δd_2)。组合棱镜工作原理与实测尺寸如图 5 所示。从图 5(a)可看出,组合棱镜是后置式投影分划系统中的重要组成,分划板刻线和目标像通过组合棱镜形成光学共轭关系,利用目镜可同时观察到清晰的目标和分划刻线,实现观察、瞄准。图 5(b)所示为组合棱镜和安装棱镜框实物实测数据,组合棱镜外形尺寸为 35.50 mm,安装框尺寸为 35.70 mm,二者之间最大间隙为 0.20 mm。当组合棱镜压圈发生微量松动时,在强冲击环境下组合棱镜会克服摩擦力和压紧力,在 X(水平)方向、Y(高低)方向发生 $0.28(=0.2 \text{ mm}/0.707) \text{ mm}$

位移,或者发生转动,使得组合棱镜与分划板出现相对运动,导致零位偏离初始位置、视差和图像质量(清晰度、分辨率)未发生变化,Z(轴向)方向未出现明显走动。分划板在X、Y方位上每调整1 mil时,按式(3)可换算移动距离 ΔX :

$$\Delta X = \tan 0.06^\circ \cdot f' = 0.104 \text{ mm} \quad (3)$$

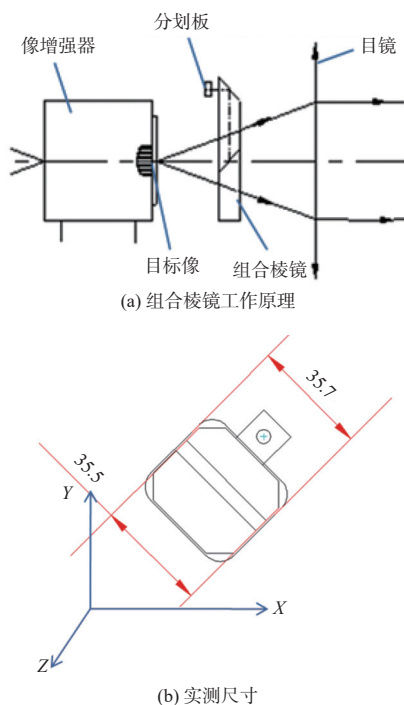


图5 组合棱镜工作原理与实测尺寸(单位:mm)

Fig. 5 Working principle and measured dimensions of combination prisms

经过计算可知,组合棱镜与安装框之间0.28 mm间隙引起瞄准镜零位走动量的极大值为 $\Delta d_2=2.912$ mil,根据式(1)可得, $\Delta d=2.723$ mil,计算数据与试验数据高度吻合。因此,该类光学系统中组合棱镜固定的稳定性和安装框的间隙是零位走动量超差的主要原因,不论是设计、加工还是装调等均需严格控制。

3 试验验证

为了监控零位变化过程,采用单次冲击方式,参考某型步枪垂直向冲击加速度值,将冲击台设备的加速度值设定为 $1\,100\text{ g}\pm 200\text{ g}$,作用时间6 ms,使用的零位仪测试精度为0.01 mil。冲击试验示意图如图6所示。其中,图6(a)为光轴方向冲击试验,图6(b)为垂直于光轴方向的冲击试验,图6(c)为零位走动量测试示意图。

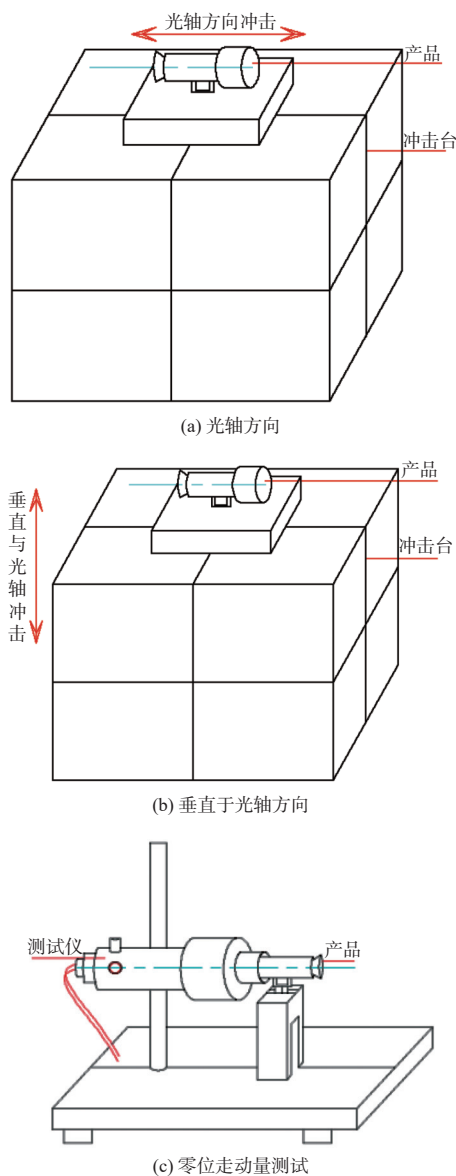


图6 冲击试验示意图

Fig. 6 Schematic diagram of impact test

1) 将故障样机平行于冲击方向安装,冲击方向为光轴方向,每组冲击10次,冲击试验结果如表2所示。从表2可知,光轴方向冲击时零位走动量最大值为0.1 mil,表明零位走动量敏感走动,元件在光轴方向无明显位移。

表2 水平方向冲击试验后零位走动情况

Table 2 Zero position movement after horizontal impact test

编号	冲击次数	初始零位 (x,y)	冲击后零位 (x,y)	零位走动量 $\Delta d(x,y)$
1	10	(1.0,-0.1)	(1.0,-0.15)	(0,-0.05)
2	10	(1.0,-0.15)	(1.1,-0.1)	(0.1,0.05)
3	10	(1.1,-0.1)	(1.02,-0.1)	(-0.08,0)
4	10	(1.02,-0.1)	(1.0,0)	(-0.02,0.1)
5	10	(1.0,0)	(1.04,-0.1)	(0.04,-0.1)

2) 将故障样机垂直于冲击方向安装, 冲击试验结果如表 3 所示。从表 3 可知, 在垂直于光轴方向上冲击(每组冲击 10 次), 零位向右下方走动, 待 3 组冲击之后基本趋于稳定, 稳定后的零位位置与初始零位相比, 零位走动量极限值为(2.7,-2.5); 再垂直向下冲击时, 零位向左上方走动, 待 4 组冲击之后趋于稳定, 稳定后的零位位置与初始零位相比, 零位走动量极限值为(-2.5,2.6)。经过多组次冲击后, 零位走动出现规律性, 垂直向上冲击时零位向右下方走动, 达到 2.7 mil 左右后趋于稳定; 反方向垂直向下冲击时, 零位向左上方走动, 达到 2.5 mil 左右后依然趋于稳定, 基本回到冲击初始零位位置。

表 3 高低向冲击试验后零位走动情况

Table 3 Zero position movement after high-low impact test

编号	冲击方向	冲击次数	初始零位 (x,y)	冲击后零位 (x,y)	零位走动量 $\Delta d(x,y)$
1	↑	10	(1.0,-0.4)	(3.6,-2.3)	(2.8,-2.3)
2	↑	10	(3.6,-2.3)	(3.8,-2.3)	(0.2,-0.3)
3	↑	10	(3.8,-2.3)	(3.7,-2.9)	(0.0,1)
4	↑	10	(3.7,-2.9)	(3.7,-2.7)	(0.2,-0.3)
5	↑	10	(3.7,-2.7)	(3.7,-2.9)	(0.0,1)
6	↓	10	(3.7,-2.9)	(3.8,-2.7)	(-0.6,0.4)
7	↓	10	(3.8,-2.7)	(2.3,-0.3)	(-1.5,2.4)
8	↓	10	(2.3,-0.3)	(1.2,0.3)	(-1.1,0.6)
9	↓	10	(1.2,0.3)	(1.6,0.3)	(0.4,0)
10	↓	10	(1.6,0.3)	(1.5,0.4)	(-0.1,0.1)
11	↓	10	(1.5,0.4)	(1.2,-0.3)	(-0.1,-0.1)

3) 将问题样机的组合棱镜拆下, 对棱镜与安装面侧面进行消除间隙处理, 使其间隙小于 0.02 mm, 同时对支撑角点胶固化, 并重新安装, 保证棱镜无相对自由度运动。待胶干后进行高低向冲击试验, 冲击试验条件与前述一致, 试验结果如表 4 所示。从表 4 可知, 零位走动量最大值为 0.2 mil, 零位超差现象已经不存在。

表 4 棱镜固化重新安装后试验结果

Table 4 Test results after prism solidification and reinstallation

编号	冲击方向	冲击次数	初始零位 (x,y)	冲击后零位 (x,y)	零位走动量 $\Delta d(x,y)$
1	↑	10	(0,1.1)	(0.2,1.1)	(0.2,0)
2	↑	10	(0.2,1.1)	(0.2,1.1)	(0,0)
3	↑	10	(0.2,1.1)	(0.2,1.1)	(0.1,0.1)
4	↓	10	(0.2,1.1)	(0,1.0)	(-0.2,-0.1)
5	↓	10	(0,1.0)	(0,1.0)	(0,0)
6	↓	10	(0,1.0)	(0,1.0)	(-0.1,0)

4) 对优化并固化后的样机重新开展实弹寿命考核试验, 射弹量 1 0000 发, 试验结果如表 5 所示。从表 5 可知, 经历常温、高温、低温各阶段试验后, 零位稳定性满足指标要求。

表 5 零位走动量测试数据

Table 5 Test data of variational momentum of zero position

序号	试验阶段	零位走动量 $\Delta d(x,y)$ /mil	判定结果
1	初始零位	(0,0)	试验前标定值
2	常温射击1500发	(0.10,-0.22)	合格
3	常温射击1500发	(-0.10,-0.08)	合格
4	高温射击3000发	(0.12,0.26)	合格
5	低温射击2500发	(-0.16,-0.10)	合格
6	常温射击1500发	(0.12,0.20)	合格

5) 零位走动量变化趋势如图 7 所示。图 7 中, 曲线①是故障样机在寿命考核试验中零位走动量变化趋势; 曲线②和③是验证试验中垂直于光轴方向向下和向上冲击时零位走动量变化趋势, 可以看出, 零位走动量出现规律性超差现象, 符合零位敏感元件位移判断准则; 曲线④是重新固化后的零位走动量变化趋势; 曲线⑤是重新开展寿命试验后的结果。从曲线④和曲线⑤可以看出, 零位走动量超差问题已经解决。

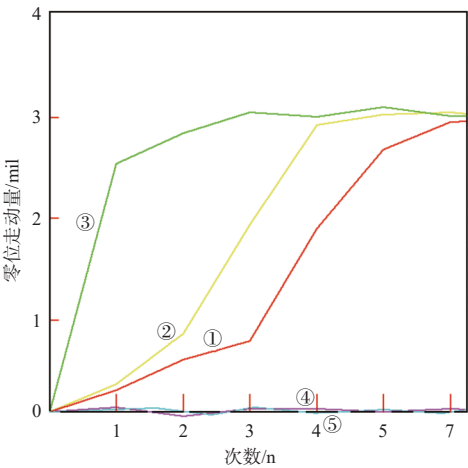


图 7 零位走动量变化趋势

Fig. 7 Trend of variational momentum of zero position

4 结论

通过对投影式后置分划式故障瞄准镜零位走动量超差问题进行分析验证, 采取有效措施解决了故障, 能够满足系统零位走动量为 0.7 mil 的要

求。该类瞄准镜零位走动量稳定性的关键点是控制组合棱镜在光路系统中的稳定性,在系统设计时必须保证组合棱镜与安装座垂直于轴向的间隙小于 0.02 mm,轴向压紧结构需要设计防松结构,安装时支撑点采用点胶固化等措施,加工时设置关键尺寸进行控制,保证批量生产的质量一致性。另外,通过此次分析验证可知,与光轴方向平行的冲击模拟试验不能完全模拟枪械射击的真实状态,产品在科研阶段应对垂直于光轴方向的分量进行抗冲击设计和试验验证,并收集相关数据,为后续建立仿真模型提供支撑。

参考文献:

- [1] 孙向东,戴泓源,梁勇,等.基于无坐力炮复合身管上瞄准镜座的系统可靠性研究[J].兵器装备工程学报,2023,44(10):39-44.
SUN Xiangdong, DAI Hongyuan, LIANG Yong, et al. Research of system reliability based on sight mount on composite barrel of recoilless gun[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44(10): 39-44.
- [2] 郭晖,向世明,田民强.微光夜视技术发展动态评述[J].红外技术,2013,35(2):63-68.
GUO Hui, XIANG Shiming, TIAN Minqiang. Review on the development trends of low light night vision technology[J]. Infrared Technology, 2013, 35(2): 63-68.
- [3] 张卓.光电瞄具快速校准与修正方法研究[D].长沙:国防科技大学,2022.
ZHANG Zhuo. Study on fast calibration and correction method of photoelectric sighting[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2022.
- [4] 张远健,马冬林,朱大略,等.一种手持式微光夜视瞄准镜光学系统设计[J].光电技术应用,2021,36(4):14-19.
ZHANG Yuanjian, MA Donglin, ZHU Dalu, et al. Optical system design of handheld low-light level night vision sight[J]. Electro-Optic Technology Application, 2021, 36(4): 14-19.
- [5] 蔡毅.典型单兵作战场景与夜视镜[J].红外技术,2022,22(4):315-327.
CAI Yi. Typical individual combat scenarios and night vision goggles[J]. Infrared Technology, 2022, 22(4): 315-327.
- [6] 解琪,赵俊成,董再天,等.便携式微光夜视仪分辨率测试系统设计方法[J].应用光学,2022,43(6):1124-1129.
XIE Qi, ZHAO Juncheng, DONG Zaitian, et al. Design method of resolution test system for portable low-level light night-vision device[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(6): 1124-1129.
- [7] 周海宪.综合机载微光夜视仪[J].应用光学,2001,22(4):17-22.
ZHOU Haixian. Integrated on-board low light level night vision system[J]. Journal of Applied Optics, 2001, 22(4): 17-22.
- [8] 戴晓雨.瞄准镜零位的在线检测[D].南京:南京理工大学,2021.
DAI Xiaoyu. Online detection of the zero position of rifle-scope[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021.
- [9] 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.
WANG Ying, WANG Jinsong, CUI Shibao, et al. Study of high precision zero point momentum detection technology for white and shimmer light sight[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(8): 1481-1486.
- [10] 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,2013,37(3):404-408.
LYU Pu, HAN Guohua, ZHANG Aili, et al. Study on measurement of sight-line alteration of high precision sighting telescopes[J]. Laser Technology, 2013, 37(3): 404-408.
- [11] 梁妍.枪用瞄具零位走动量测试系统研究[D].长春:长春理工大学,2008.
LIANG Yan. The research on testing variational momentum system of the zero position for gun aiming device[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2008.
- [12] 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 line alteration of reflection type collimator[J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(11): 1422-1425.
- [13] 郑志福.红外瞄准镜零位校正仪[D].南京:南京理工大学,2014.
ZHENG Zhifu. Infrared sight zero correction instrument[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
- [14] 郝芳,张平,杨海金,等.浅析光纤倒像器固有误差对应

- 用的影响[J]. [应用光学](#), 2022, 43(6): 1153-1157.
- HAO Fang, ZHANG Ping, YANG Haijin, et al. Influence of inherent error of fiber-optic image inverter on application[J]. [Journal of Applied Optics](#), 2022, 43(6): 1153-1157.
- [15] 徐志刚, 赵媛媛, 周亮. 高精瞄具重复装卡误差测量[J]. [激光与光电子学进展](#), 2019, 56(2): 102-106.
- XU Zhigang, ZHAO Yuanyuan, ZHOU Liang. Repeated loading error measurement of high-precision optical sight[J]. [Laser & Optoelectronics Progress](#), 2019, 56(2): 102-106.
- [16] 梁旭. 数字化白光零位仪研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2018.
- LIANG Xu. Research on digital white-light zero-position meter[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018.