

文章编号: 1001-3806(2013)03-0404-05

高精度瞄准镜零位走动量检测研究

吕溥 韩国华 张艾莉 蒋显东

(中国兵器工业第二零八研究所, 北京 102202)

摘要: 为了解决高精度瞄准镜性能检测难点——检测各种环境试验条件下的零位走动量, 设计了基于 CCD 图像检测技术的测试系统, 该系统通过对高精度瞄准镜连接座上定位点试验前后位置测量, 获得定位点位置差量, 依据位置差量调整枪镜固定基座, 使瞄准镜的连接座上的定位点复原至试验前位置, 进而测量、计算出零位走动。通过对平行光管、CCD 光学系统焦距的计算和系统精度分析, 并经实际工程应用可知, 测量精度不大于 $2.16''$, 测量范围不小于 $4320''$, 达到检测指标要求。结果表明, 该测试系统检测方法正确可靠、检测精度高, 为高精度瞄具零位走动的检测提供了方法。

关键词: 测量与计量; 高精度瞄准镜; 定位 CCD 摄像系统; 分划 CCD 摄像系统; 零位走动

中图分类号: TH745 **文献标识码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.03.030

Study on measurement of sight-line alteration of high precision sighting telescopes

LÜ Pu, HAN Guo-hua, ZHANG Ai-li, JIANG Xian-dong

(No. 208 Research Institute of China Ordnance Industries, Beijing 102202, China)

Abstract: In order to solve the difficulty of the performance testing of high precision sighting telescope, i. e., testing its sight-line alteration under various environmental test conditions, a test system was designed based on CCD image test technology. Firstly, the position difference of the anchor was measured through measuring the positions of the connection seat anchor points before and after test. Secondly, according to this data, the fixing base of the precision sighting telescope was adjusted to make the connection seat anchor recover to the initial position. Finally, the alteration of the sight-line was measured and figured out. Based on an optical collimator, the focal length of the CCD optical system was measured and the system accuracy was analyzed. In practical engineering applications, the measurement error was less than $2.16''$ and measuring range was larger than $4320''$, which met the project requirements. The results show that the test method is accurate and reliable and detection precision is high. This test system offers a method for testing the sight-line alteration of high precision sighting telescopes.

Key words: measurement and metrology; high precision sighting telescope; positioning CCD camera system; graduation CCD camera system; sight-line alteration

引言

环境适应性是装备的重要质量特性。军用瞄具没有好的环境适应性就无法发挥作战效能^[1]。军用瞄具各种环境下零位走动量是步枪瞄准镜的重要指标, 零位走动量大小直接影响步枪系统的精度, 因此, 控制和检测步枪瞄准镜的零位走动量十分重要。

传统步枪瞄准镜与武器连接方式一般采用拆卸方便的皮卡或正定等连接方式, 此连接方式仅重复装卡引起的零位走动量大于 $10.8''$, 已不能满足高精度武器的精确射击要求。由于传统的检测设备采用连接座作为检测基准, 检测的零位走动量含重复装卡误差, 该误差已超出高精度瞄准镜零位走动量要求, 因此无法检测其零位走动。

本系统解决了高精度步枪瞄准镜的零位走动量参量测试问题。其设计关键是通过高精度步枪瞄准镜枪连接座定位点试验前后摄像分析比较, 调整高精度步枪瞄准镜固定基座使之保持测试基准不变。

作者简介: 吕溥 (1965-), 男, 高级工程师, 现从事光电瞄具和火控技术方面的研究。

E-mail: lupuzh@126.com

收稿日期: 2012-07-02; 收到修改稿日期: 2012-09-26

1 检测系统技术要求

高精度瞄准镜零位检测系统主要用于测量高精度步枪瞄准镜由于各种环境试验而引起的瞄准镜瞄准轴变化量。测量范围为 $\pm 2160''$ ，误差精度不大于 $2.16''$ ，应具有对测量数据进行报表、存储和查询等功能。

2 系统组成

本系统由硬件和软件组成，软件完成图像处理和数据分析；硬件由工作台、平行光管、3 个定位 CCD 摄像系统、6 维精密调整台、分划 CCD 摄像系统和计算机组成，结构简图见图 1。

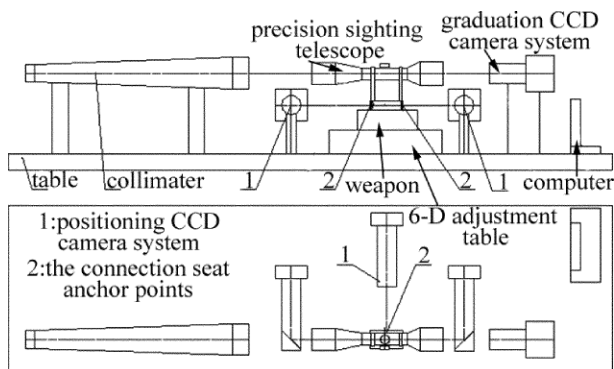


Fig. 1 Schematic diagram of testing gross structure

3 测试系统工作原理

在瞄具的使用中，由于环境因素导致分划板十字线与系统光轴偏离，这就是常见的零位走动量^[2]。

试验前，将高精度步枪瞄准镜同武器一起固定在 6 维调整台上，由定位 CCD 摄像系统上的枪用瞄准镜概略瞄准高精度步枪瞄准镜连接座上 3 个定位点，见图 1。定位 CCD 摄像系统采集 3 个定位点的图像，传送到计算机进行处理计算，采用定位点边缘图像曲线拟合及亚像素细分来标定 3 个定位点所处的位置，由分划 CCD 摄像系统采集平行光管的分划和高精度步枪瞄准镜分划图像，传送到计算机进行处理计算，采用分划边缘图像曲线拟合及亚像素细分来标定两个分划所处的位置，定位 CCD 摄像系统采集的 3 个定位点的图像即确定了检测基准轴；分划 CCD 摄像系统采集平行光管的分划和高精度步枪瞄准镜分划偏差。试验前，将这些检测数据存入计算机。

瞄准镜经环境（振动、冲击、跌落、射击和高温）试验后，将高精度步枪瞄准镜同武器一起固定在 6 维调整台上，由定位 CCD 摄像系统采集高精度步

枪瞄准镜连接座上 3 个定位点的图像，传送到计算机进行处理计算，进行图像曲线拟合及亚像素细分并标定 3 个定位点所处的位置，根据前后 3 个定位点所处的位置差异调整 6 维调整台，通过 CCD 监测比较，使 3 个定位点恢复到试验前测试位置，再通过分划 CCD 摄像系统检测瞄准镜分划与平行光管分划偏差，试验前后分划偏差之差即为零位走动量。

计算机先对系统进行标定，根据平行光管分划标尺长度，算出每个像素表示的密位值。读出试验前后产品分划板箭头和平行光管十字中心的坐标值（单位像素），算出其分别移动了多少像素，再换算成密位值。系统工作原理如图 2 所示。

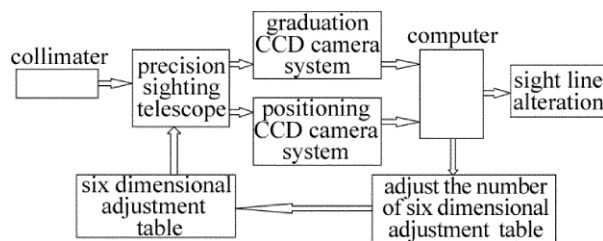


Fig. 2 Working principle scheme of system

定位点试验前后图像及叠加分析图像见图 3。

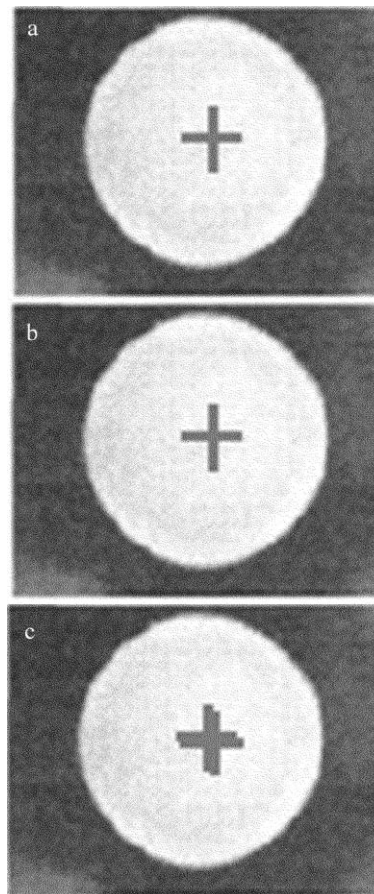


Fig. 3 Anchor point image

a—before test b—after test c—superposition

图3a是高精度步枪瞄准镜环境试验前检测系统获取的定位点图像;图3b是高精度步枪瞄准镜经过环境试验后重新装卡检测系统获取的定位点图像;图3c是高精度步枪瞄准镜经过环境试验前和试验后装卡未调整的定位点的图像合成叠加图像。

试验前后平行光管分划和瞄具分划的图像及试验前后合成的叠加分析图像见图4。图4a是高精度步枪瞄准镜环境试验前检测系统获得的平行光管分划和瞄具分划的合成叠加图像;图4b是高精度步枪瞄准镜环境试验后检测系统获得的平行光管分划和瞄具分划的合成叠加图像;图4c是高精度步枪瞄准镜经过环境试验前后合成叠加图像。

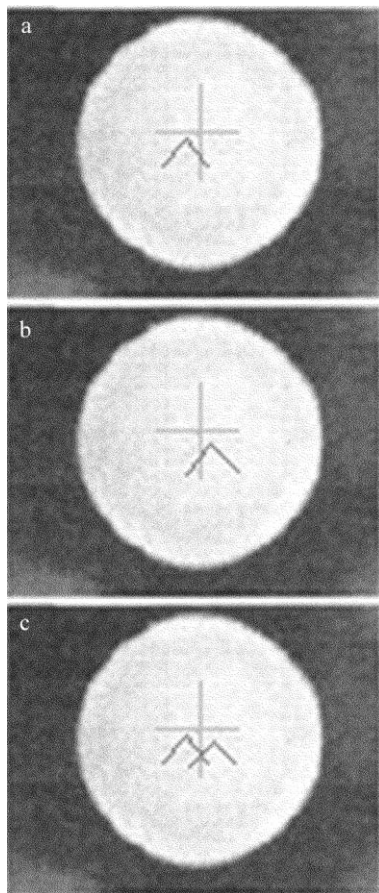


Fig. 4 Graduation image of collimator and sighting telescope before test , after test and of superposition

a—graduation image of collimator and sighting telescope before test b—graduation image of collimator and sighting telescope after test c—graduation image of collimator and sighting telescope of superposition

4 检测系统设计

本系统采用 CCD 光电检测技术,是非常有效的非接触检测手段,被广泛地应用于各种检测领域。与其它测量方法相比,测量更准确、使用更方便^[3]。

本文中将从成像系统设计、图像处理、精度分析及实验情况进行介绍。

4.1 系统成像系统设计

4.1.1 定位 CCD 物镜焦距和口径计算 一般瞄具与武器连接座长度大于 100mm,为了满足系统误差精度不大于 2.16"、定位精度不大于 1.08",定位 CCD 摄像系统必须能分辨目标两点的间距不大于 $100 \times 0.005 = 0.5 \mu\text{m}$,图像采用 2 维空间灰度矩确定边缘位置的亚像素细分方法。定位精度理论上可以达到 $1/20\text{pixel}$,考虑到系统中其它误差因素的影响,定位 CCD 摄像系统焦距按半个像素对应目标 $0.5 \mu\text{m}$ 计算,CCD 摄像系统采用 $4032\text{pixel} \times 3024\text{pixel}$ 、像元尺寸 $1.88 \mu\text{m}$ 的 CCD。

依据下列计算公式:

$$\beta_p = -d/(2 \times y) \quad (1)$$

$$f_p = -\beta_p \times l/(1 - \beta_p) \quad (2)$$

$$D_p = 144/\alpha_p \quad (3)$$

式中 f_p 为定位 CCD 物镜焦距; D_p 为定位 CCD 物镜有效口径; β_p 为定位 CCD 物镜放大倍率; d 为定位 CCD 像元尺寸 ($1.88 \mu\text{m}$,下同); y 为分辨两点的间距 ($0.5 \mu\text{m}$); l 为物距,因结构需要取为 1000mm; α_p 为定位 CCD 物镜分辨率,取系统定位精度为 1.08"。

计算得到: $\beta_p = -1.88$ $f_p = 625.78\text{mm}$ $D_p = 133.3\text{mm}$ 。

4.1.2 分划 CCD 物镜焦距、有效口径和视场角计算 一般高精狙击步枪瞄准镜放大倍率大于 4 倍,分划 CCD 物镜焦距只要能满足最小倍率 4 倍测量精度,就能满足系统测量精度要求,分划分辨精度取系统分辨率的 1/6 倍即 0.39",分划 CCD 摄像图像采用 2 维空间灰度矩确定边缘位置的亚像素细分方法。定位精度理论上可以达到 $1/20\text{pixel}$,考虑到系统中其它误差因素的影响,分划 CCD 摄像系统焦距按半个像素对应分划分辨精度 0.39"计算,CCD 摄像系统采用 $4032\text{pixel} \times 3024\text{pixel}$ 、像元尺寸为 $1.88 \mu\text{m}$ 的 CCD。

依据下列计算公式:

$$f_g = d/\left[2 \times \arctan\left(\frac{\alpha_g \times f_g}{3600}\right)\right] \quad (4)$$

$$D_g = 144/\arctan\left(\frac{d}{2 \times f_g}\right) \quad (5)$$

$$\omega = \arctan\left(\frac{N \times d}{2 \times f_g}\right) \times 3600 \quad (6)$$

式中 f_g 为分划 CCD 物镜焦距; D_g 为分划 CCD 物镜

有效口径; ω 为分划 CCD 物镜视场角; N 为像元高低方向的像素 (3024pixel); α_g 为分划分辨率 (0.39"); Γ_g 为高精狙击步枪瞄准镜放大倍率 取为 4 倍。

计算得: $f_g = 135\text{mm}$ $D_g = 104\text{mm}$ $\omega = 8683.2''$ 。

4.1.3 平行光管有效口径计算 平行光管物镜有效口径 $D_c = 144/\alpha$, 其中 α 为平行光管分辨率, 取系统定位精度的 1/3, 即 $0.72''$ 。

计算得: $D_c = 200\text{mm}$ 。根据计算, 选择直径为 200mm、焦距 $f_c = 2000\text{mm}$ 的平行光管能满足要求。

4.2 CCD 图像处理

为了获得清晰图像, 系统采用基于图像处理的自动调焦技术^[4]。为了提高算法的灵敏度和避免背景噪声的干扰, 评价函数采用梯度-均方差函数。其表达式为:

$$J = \left\{ \sum_{x=0}^m \sum_{y=0}^n [G(x, y) - \bar{G}(x, y)]^2 \right\}^{1/2} \quad (7)$$

式中 $G(x, y)$ 为图像 (x, y) 点对应的梯度值; $\bar{G}(x, y)$ 为整幅图像像素的梯度平均值。CCD 调焦流程图见图 5^[5]。

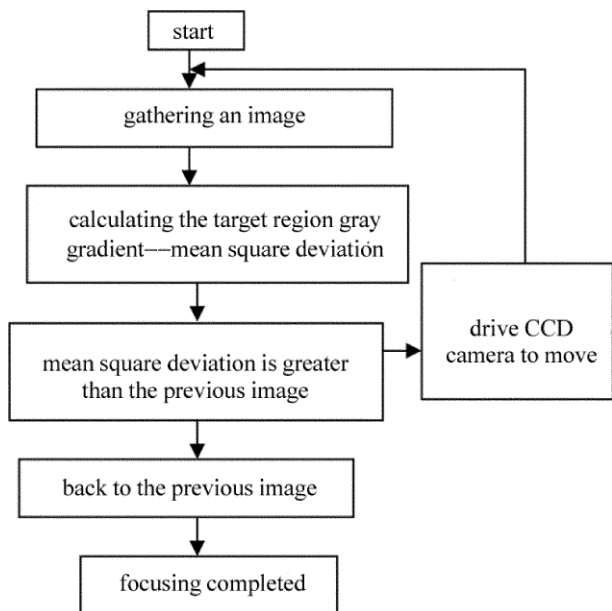


Fig.5 Automatic focusing flow chart

为了减少图像边缘对测试精度的影响, 把面阵 CCD 图像拟合成描述灰度分布的曲面, 其多项式如下:

$$G(x, y) = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^L a_{ij} x^{i-1} y^{j-1} \quad (8)$$

式中 K, L 分别为水平和垂直方向的多项式最高阶次, x, y 为像元的坐标, a_{ij} 为系数。

4.3 亚像素细分方法

按上述图像处理方法确定的边缘位置, 边缘的

定位精度最高只能达到一个像素水平, 因此必须采用亚像素细分方法来实现。亚像素细分方法是利用 2 维空间灰度矩来确定边缘的位置。该方法适用于任意尺寸的窗, 定位精度理论上可以达到 1/20pixel^[6], 系统精度按 0.2pixel 分析计算^[7]。

4.4 测试系统精度分析

根据测试系统工作原理可知, 测试系统误差是由系统复位误差和系统分划测量误差两部分组成。系统复位方面, 由于 6 维调整台是连续可调的, 通过仔细调整, 其误差可以消除, 剩余定位 CCD 摄像系统对定位点的图像边缘分辨误差, 平行光管标尺误差和试验后平行光管分划及高精度瞄准镜分划图像边缘分辨误差是系统分划测量误差主要成分。

(1) 试验前后定位 CCD 摄像系统对定位点的图像边缘分辨误差引起的测试误差 δ_1 和 δ_2 :

$$\delta_1 = \delta_2 = \arctan\left(\frac{m \times d}{\beta_p \times L}\right) \times 3600 \quad (9)$$

式中 m 为亚像素细分精度, 取为 0.2pixel; β_p 为定位 CCD 物镜放大倍率 (1.88 倍); L 为连接座长度, 取为 100mm; $d = 1.88\mu\text{m}$; $\delta_1 = \delta_2 = 0.41''$ 。

(2) 试验前后平行光管分划分辨误差引起的测试误差 δ_3 和 δ_4 :

$$\delta_3 = \delta_4 = \arctan\left(\frac{m \times d}{f_g}\right) \times \frac{3600}{\Gamma_g} \quad (10)$$

式中 f_g 为分划 CCD 物镜焦距 (135mm); Γ_g 为高精狙击步枪瞄准镜放大倍率, 取为 4 倍; $\delta_2 = 0.14''$ 。

(3) 试验前后高精度步枪瞄准镜分划分辨误差 δ_5 和 δ_6 :

$$\delta_5 = \delta_6 = \delta_4 = 0.14'' \quad (11)$$

(4) 平行光管标尺误差引起的测试误差:

$$\delta_7 = \arctan\left(\frac{\Delta s}{f_c}\right) \times \frac{\Delta s \times 3600}{l_s} \quad (12)$$

式中 l_s 为标尺长度 (4mm); Δs 为标尺长度误差 (0.005mm); f_c 为平行光管焦距 (2000mm); $\delta_7 = 0.000065''$ 。

代入以上数据, 故测试系统的总测试误差如下:

$$\delta = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2 + \delta_5^2 + \delta_6^2 + \delta_7^2} = 0.63'' \quad (13)$$

4.5 测试系统精度标定

将配有高精度瞄准镜的连接座的 0.5 秒经纬仪固定在武器上, 再固定在 6 维调整台上, 调节 6 维调整台使经纬仪光轴与平行光管光轴大致平行。由定位 CCD 摄像系统采集 3 个定位点的图像, 标定 3

个定位点的所处的位置,由分划 CCD 摄像系统测出平行光管分划和高精度步枪瞄准镜分划偏差。

取下 0.5 秒经纬仪与武器,调节 0.5 秒经纬仪一小角度,记下此角度,即 0.5 秒经纬仪的测量值,再与武器一起固定在 6 维调整台,调整 6 维调整台,使 3 个定位点恢复到上次测试位置,再通过分划

CCD 摄像系统测出平行光管分划和高精度步枪瞄准镜分划偏差,计算出调整前后平行光管分划和高精度步枪瞄准镜分划偏差之差,即为模拟瞄具的零位走动量^[8],零位走动量与经纬仪调节角数据,两个数据的差值即为标定误差。测试系统标定实验数据见表 1。经测量测试系统的测量范围为 8661.6"。

Table 1 Experimental data of demarcation of the testing system/(")

number of times	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
testing results of theodolite	1163.38	1163.81	1164.24	1165.54	1163.81	1164.02	1164.47	1163.59	1163.38	1164.02
testing results of the test system	1162.94	1163.59	1163.59	1165.11	1163.38	1163.59	1164.24	1163.38	1163.38	1163.81
difference	0.44	0.22	0.65	0.43	0.43	0.43	0.23	0.21	0.00	0.23

4.6 实验结果

对某型号高精度瞄准镜高温射击试验后重复测

量 10 次,低温射击试验后重复测量 10 次。

测试系统测试精度实验数据见表 2。

Table 2 Experimental data of testing precision of the testing system/(")

number of times	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
testing results of high temperature firing experiment	2.59	2.81	2.59	2.81	3.02	2.81	2.81	3.24	2.81	2.81
standard deviation σ						0.18				
testing results of low temperature firing experiment	3.67	3.46	3.67	3.46	3.67	3.88	3.46	3.67	3.67	3.24
standard deviation σ						0.17				

5 结论

利用上述构成的高精度瞄准镜零位检测系统,对高精度瞄准镜环境试验进行测试,参照美军 MIL-STD-810 标准和我国 GJB 5815-2006 轻武器光学瞄准镜定型试验方法,其测试数据可靠^[9],完全达到军方要求。

在各种环境试验的检测基础上,对高精度瞄准镜重要部件进行建模分析和优化,为高精度瞄准镜满足军用环境试验优化设计提供可靠依据。其测量精度不大于 2.16",测量范围不小于 4320",达到项目要求。

参考文献

[1] ZHU Y Ch. Introduction to environmental engineering products [M]. Beijing: Aviation Industry Press 2003: 65-69(in Chinese) .

[2] WANG Zh M. Targeting instrument principle and design [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press , 1996: 8-10 (in Chinese) .

[3] WANG Q Y. CCD application technology [M]. Tianjin: Tianjin University Press 2001: 173(in Chinese) .

[4] QU P ,LIN X R. An automatic focus system based on the image processing [J]. Application of Electronic Technology ,2002 ,28 (10) : 33-35(in Chinese) .

[5] YANG R N ,AN Zh Y ,SHI L X *et al.* Research on modem test system for graduation inclining and image inclining in optical sighting telescope [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument ,2008 ,29 (8) : 1731-1734(in Chinese) .

[6] WANG W ,ZAO H ,TAO W. Research and improvement of linear measurement method for automatic aiming system [J]. Process Automation Instrumentation 2006 27(5) : 33-35(in Chinese) .

[7] ZHOU Zh L ,WANG B. The method research for pinpoint laser spot location in the imaging laser detecting system [J]. Laser Technology 2008 32(3) : 248-251(in Chinese) .

[8] LÜ P ,HAN G H. Application of dual wedges in optical axis alignment for laser rangefinders [J]. Laser Technology 2012 36(2) : 151-153(in Chinese) .

[9] SHEN Y Ch ,HU B ,PANG D ,*et al.* GJB 5815-2006 The approval test methods of optical sight for small arms [S]. Beijing: General Armament Department Military Standardization Research Center 2006: 7-11(in Chinese) .