

文章编号 1004-924X(2010)07-1529-07

日盲紫外-可见光双光谱照相机系统

吴礼刚¹, 何文荣², 胡晋荪², 宋宝安¹, 杨 鸣¹, 聂秋华¹

(1. 宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211;

2. 宁波理工科技股份有限公司, 浙江 宁波, 315800)

摘要:为准确检测电晕放电的位置和强弱,考虑电晕放电会发出日盲紫外波段(240~280 nm)光,对这一波段的目标进行检测可以避免太阳光的干扰这一特点,研制了一种基于分光方式的日盲紫外-可见光双光谱照相机。设计了一种孔径为 68 mm、焦距为 180 mm 的高分辨率折反射结构的日盲紫外镜头,并设计了基于 TMS320DM642 的 DSP 芯片的图像处理电路。借助 DSP/BIOS 实时内核和 RF5 框架,实现了图像采集、图像输出显示、和压缩存储任务的调度,采用加权平均算法实现了图像融合。在阳光强烈的夏天对 90 m 处的汞灯紫外点光源和背景进行了野外成像实验,获得了较为清晰的紫外图像、可见光图像以及合成图像。此外,提出了相机的改进建议。

关键词:日盲紫外可见光双光谱照相机;折反射镜头;DM642;图像融合

中图分类号:TN23;TB853.9 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101807.1529

Solar blind UV and visible dual-spectral camera

WU Li-gang¹, HE Wen-rong², HU Jin-sun², SONG Bao-an¹, YANG Ming¹, NIN Qiu-hua¹

(1. College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Ningbo Ligong Online Monitoring Technology Co., Ltd., Ningbo 315800, China)

Abstract: As corona discharge emits the light of Solar Blind Ultraviolet (SBUV) from 240 to 280 nm, the corona sparks can avoid the interference of sunlight when an object is detected in the SBUV region. To detect the position and intensity of the corona spark precisely, a solar blind ultraviolet and visible camera based on the beam-split scheme developed by ourselves was introduced. Then, a high resolution catadioptric SBUV telescope with a large entrance pupil of 68 mm and a focus length of 180 mm was designed, and the circuit boards for image processing were given based on the DSP chip TMS320DM642. The DSP/BIOS and RF5 were used to schedule the acquisition, display, compression and store, and the weighted average algorithm was applied to image fusion. An experiment outdoor was carried out to take photos for the spot UV source of a mercury lamp and the background far from 90 m in a sunny hot summer day. As a result, the UV, visible, and fusion pictures are obtained clearly. Furthermore, some suggestions were put forward to improve the performance of the camera.

收稿日期:2009-09-11;**修订日期:**2009-11-10.

基金项目:浙江省教育厅资助项目(No. Y200804348);宁波市自然科学基金资助项目(No. 2010A610180);2010年浙江省公益性技术应用研究计划资助项目;宁波大学王宽诚幸福基金资助项目

Key words: solar blind ultraviolet and visible dual-spectral camera; catadioptric telescope; DM642; image fusion

1 引言

输电线路和变电站高压电力设备大多在大气环境下工作。随着设备自身绝缘性能的降低,或者表面污秽和湿度的增加,电力设备会产生电晕放电现象^[1-3]。电晕放电不仅会造成线路的功率损失,而且还能使空气发生化学反应,产生臭氧及氧化氮等产物,引起输电线路、电气设备的绝缘腐蚀和损坏。因此,及时准确地检测出电晕放电的位置和强弱对保证电力系统的可靠运行,减少人身事故和设备损坏有重要的意义。

电晕放电在可见光波段能量非常微弱,观测困难。但是电晕放电会发出日盲紫外波段(240~280 nm)的光^[4],而太阳光进入大气时 240~280 nm 的紫外光会被臭氧层吸收,因此在地面对日盲紫外波段的目标进行检测,即使晴朗的白天也可以避免太阳光的背景干扰,检测的准确度极高^[5]。不过,单独采用紫外探测器会因为缺少背景信息而无法定位。为此,采用双光谱检测系统对电晕进行探测及定位是较好的方法。基于这一原理,本文研制了一种日盲紫外-可见光双光谱照相机样机。设计了大孔径高分辨率折反射结构镜头,并给出了基于 TMS320DM642 的 DSP 芯片的图像处理电路,在 DM642 处理器的平台上,通过加权平均算法实现了紫外和可见图像的融合^[6-9]。

2 双光谱相机结构

分光方式的日盲紫外-可见双光谱照相机结构如图 1 所示。电晕放电的紫外光和背景光穿过紫外镜头和日盲紫外滤光片照射到紫外像增强器的光电阴极窗,激发出的光电子经过像增强器的增强,轰击到后端荧光屏上,产生可见光图像,再经过光锥耦合,照射到 CCD 像面上成像,构成双光谱相机的紫外光路。另一部分光经过反光镜 1 和反光镜 2 的两次反射,进入到可见光镜头,然后

在后端的 CCD 上成像,构成双光谱相机的可见光路。通过紫外成像光路获得的电晕紫外图像和通过可见光路获得的电晕紫外发生处的背景图像在双光路进行视场配准之后,可以实现紫外电晕和可见光背景的两路图像融合,从而准确地对电晕紫外的发生进行定位分析。

图 1 中,像增强器、光锥和 CCD 一起组成增强型 CCD,即 ICCD^[10-12]。为了满足可见光路的成像要求,在紫外镜头前端中央位置胶合一个 45°反光镜 1,在可见光镜头前方装配一个 45°反光镜 2,经过两次反射,电晕附近的背景即可以在可见光 CCD 上成像。

相机中采用真空干涉镀膜的日盲紫外滤光片,在 254 nm 处峰值透过率为 27.63%,3 dB 带宽为 12 nm,可见光(背景)透过率为 10^{-4} 数量级。像增强器采用 S20 多碱光阴极,其响应波段大致为 160~850 nm,因此像增强器能够响应日盲紫外波段的光。

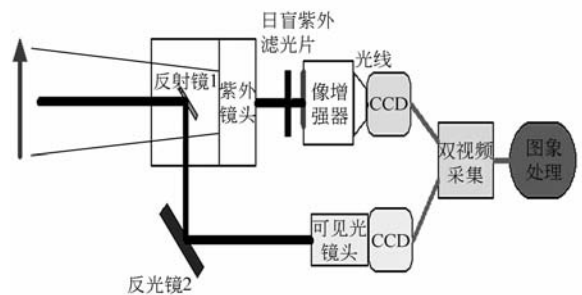


图 1 双光谱照相机结构

Fig. 1 Schematic of dual-spectral camera

3 紫外镜头设计

相机中采用了一种自制的大孔径高分辨率的折反射日盲紫外光学镜头,紫外镜头的光路仿真如图 2 所示,通过孔径光阑的光线穿过熔石英材料的一对正负透镜组,经过主反射镜以及次反射镜的反射,最后穿过校正镜和日盲紫外滤光片在像面上成像。正负透镜组构成的无光焦度组合,用于校正轴上像差和系统色差,并用来增大视场。

校正镜用来校正场曲。主反射镜是由 BK7 玻璃表面镀铝反射层然后镀上 MgF_2 保护膜构成的。在负透镜的第二个面上镀铝膜,然后镀上 MgF_2 保护膜,这样就构成了次反射镜,也就无需单独的元件来构成次反射镜,因此精简了结构。

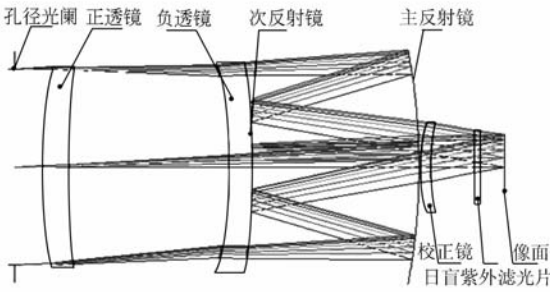


图 2 折反射日盲紫外镜头光路仿真

Fig. 2 Layout of catadioptric SBUV telescope

光学传递函数如图 3 所示,光学传递函数在 80 lp/mm 处不低于 0.5,而系统中像增强器分辨率也只有 54 lp/mm。因此,紫外镜头的分辨率很高。另外弥散圆半径计算结果如表 1 所示,表明即使在最大入射角 3.5° 时,弥散斑的均方根半径也只有 $3.664 \mu m$ (直径约为 $7.328 \mu m$),而所采用的 ICCD 的像敏元尺寸为 $8 \mu m$,因此满足系统分辨率的要求。此外,紫外镜头所有曲面都为球面,降低了加工难度和成本;镜头比传统的 Cassegrain 反射系统视场角大,达到 3.5° 。镜头技术参数如表 2 所示,孔径为 68 mm,远大于普通照相机镜头,因此通光量高,有助于提高系统灵敏度;镜头焦距为 180 mm,成像距离远; $f/\#$ 约为 2.6,分辨率较高。根据计算,相机可以探测到 90 m 处 4 mm 大小的物体。

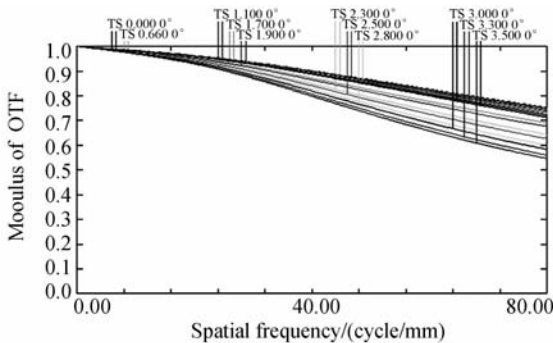


图 3 紫外镜头的光学传递函数

Fig. 3 OTF of catadioptric UV telescope

表 1 视场角与均方根半径

Tab. 1 Field angle and RMS

视场角/ $^\circ$	均方根半径/ μm
0	2.576
0.66	2.623
1.1	2.704
1.7	2.870
1.9	2.937
2.3	3.086
2.5	3.167
2.8	3.298
3.0	3.392
3.3	3.547
3.5	3.664

表 2 镜头技术参数

Tab. 2 Parameters of UV telescope

技术参数	数值
工作波段	240~280 nm
峰值波长	254 nm
焦距	180 mm
孔径	68 mm
视场角	$\pm 3.5^\circ$
成像距离	0.5 m- ∞

4 电路设计

基于 TI 公司 DSP 芯片 TMS320DM642 的照相机硬件电路原理图如图 4 所示。前端可见光路和紫外光路进入相应 CCD 后,出来的两路 PAL 制式视频信号分别经过视频解码芯片 TVP5150 转换为 ITU-BT. 656 格式的数字信号,由 DM642 以 4 : 2 : 2 格式进行采样,然后经过滤波、合成、压缩等处理后,从视频编码芯片 SAA7121 输出到液晶显示器上。中间配合人机界面接口,图像存储采用基于 44 针 IDE 接口的 8.8 cm(3.5 in)硬盘,配合 FAT32 实现视频/图像文件存储。电路板采用 6 层设计,以提高抗干扰性能。由于主芯片 DM642 已经运行在 600 MHz 的主频,外频也达到了 133 MHz,因此,设计中对关键信号(SDRAM 的 CLK、数据线、地址线等)需要做等长处理,并且加上终端匹配电阻。

DM642 有 3 个可配置的视频口(VP_0 、 VP_1 和 VP_2),每个视频口包括 A、B 两个通道,每个通

道有 5120 Byte 的采集/显示缓冲器。将 VP₀ 口设为输出口,可见图像和紫外图像分别由 VP_{1a}、VP_{2a}输入,处理后的图像由 VP₀ 口输出。

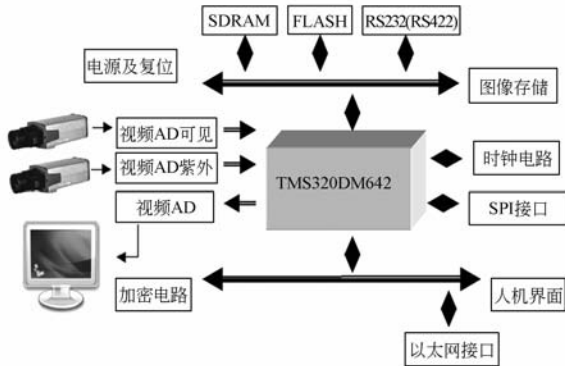


图 4 双光谱相机硬件电路原理图

Fig. 4 Hardware schematic of dual-spectral camera

5 软件及算法

两路 CCD 输出 PAL 制式的视频信号后,在后端通过基于 DM642 的图像处理板卡来完成相应的图像融合处理。在进入 DSP/BIOS 的调度

之前,程序初始化了处理器和系统板的初始化、RF5 模块的初始化、建立捕获和显示通道 3 个模块。实验采用了 RF5 框架,采用 SCOM 作为同步信号,程序设计使用了可见图像采集、紫外图像采集、图像输出显示及压缩存储共 4 个常规任务模块,和 1 个存储请求中断,DSP/BIOS 调度程序管理下的这几个任务系和中断如图 5 所示。

一般常用的融合算法包括:加权平均法、逻辑滤波法、多分辨塔式算法、小波变换法、卡尔曼算法等。加权平均法是一种最简单的图像融合方法,也就是对多幅原图像的对应像素点进行加权平均处理。设两个源图像 A 和 B,图像大小皆为 $M \times N$,融合后的图像为 C,设对应的像素点分别为 $A(m,n)$ 、 $B(m,n)$ 和 $C(m,n)$ 。则融合后图像中的像素点可以表示为:

$$C(m,n) = aA(m,n) + bB(m,n), \quad (1)$$

$$a + b = 1. \quad (2)$$

其中 a 和 b 分别为图像 A 和 B 对应像素的权重, m, n 分别为图像像素的行号和列号。实验中,采用加权平均算法,并且取 $a = 0.5, b = 0.5$ 。

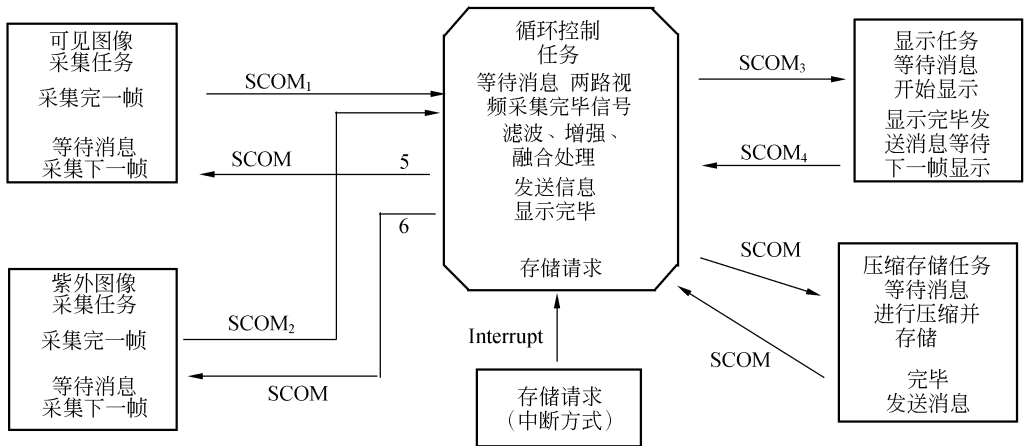


图 5 DSP/BIOS 调度程序管理下的任务系和中断

Fig. 5 Tasks and interruption under DSP/BIOS

6 成像实验

用低压汞灯作为模拟的紫外光源,它在 254 nm 有很强的辐射强度。将中心钻有 $\Phi 3.5$ mm 孔的不锈钢板安装在汞灯前面,使只有小孔透过

紫外光,其它紫外光都被钢板挡住,这样就构成了一个类似电晕火花的点光源。夏天在阳光直射的白天进行户外实验,成像距离为 90 m。双光谱照相机外内部结构如图 6 所示。获得的可见光图像如图 7,紫外图像如图 8,经过加权平均算法获得的合成图像如图 9。

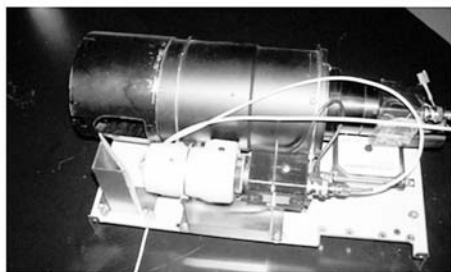


图6 双光谱照相机内部结构

Fig. 6 Inner structure of dual-spectral camera



图9 双光谱合成图像

Fig. 9 Dual-spectral image



图7 可见光光路图像

Fig. 7 Visible image



图8 紫外光路图像

Fig. 8 SBUV image

由于紫外滤光片背景抑制率不够(背景光透过率较高),及像增强器光电阴极对可见光的响应,造成图8中汽车等可见光背景图像可见。此外,太阳光在车身外壳光亮油漆表面形成两个明显的“聚光点”。但点亮的汞灯辐射的紫外光在图7可见光图像中看不出来,在图8的紫外光图像中非常明显。因紫外镜头和可见光镜头焦距的差异,紫外光路和可见光路放大倍率并不一致,所以

图7比图8画面中的景物明显要小。经画面尺寸比例判断,拍出来的紫外光斑直径为10 mm左右,显然比10 mm还小一些的亮点,相机也能够分辨出来,因此,实验表明,相机分辨率与设计结果是吻合的。

相机将所拍摄的图片存储到硬盘,图7至图9都是存储在8.8 cm/(3.5 in)硬盘中取出的图片。总体而言,各图像较为清晰,能够清楚地看出紫外电晕光源的图像,以及电晕光源发生的空间位置。

需要说明的是,在高压线杆塔下做成像实验时,抓拍不到输电线或绝缘子紫外电晕火花的图像。分析认为其主要原因有(1)输电线电晕紫外火花的强度远小于汞灯光源的紫外辐射强度,IC-CD的灵敏度不够;(2)系统对太阳光的背景干扰抑制不够完全。

7 结论

介绍了一种日盲紫外-可见双光谱照相机系统,设计了一种孔径为68 mm,焦距为180 mm的高分辨率折反射日盲紫外镜头,设计了基于DM642的系统硬件电路,并采用加权平均算法进行了图像合成。

在夏日阳光强烈的白天对90 m处的汞灯紫外光源及其背景进行了成像实验,在基于DM642的图像处理板上获得了可见光图像和日盲紫外图像,并且通过加权平均算法实现了两路图像的合成。合成的图像中,紫外电光源及其背景成像比较清楚。

尽管研制出了实验室样机,但是在高压杆塔

下面该系统仍然不能抓拍到真实的输电线或绝缘子电晕放电紫外火花,需要采用更高灵敏度的 ICCD,只对紫外光响应的像增强器和背景抑制率更高的滤光片(如化学滤光片等)来满足相机的设

计要求,并在后续工作中加以改进。

致谢:感谢宁波理工科技股份有限公司周方洁总经理,浙江大学光电系余飞鸿研究员对本项目的支持和帮助。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京:中国经济出版社, 2005.
LIU ZH Y. *Ultra High Voltage Electric Network* [M]. Beijing: China Economy Press, 2005. (in Chinese)
- [2] 刘军,李自田,姚鸣晖,等. 紫外相机在电晕检测中的应用研究[J]. 科学技术与工程,2007,7(7):1313-1315.
LIU J, LI Z T, YAO M H, *et al.*. Research of UV camera in corona discharge detection application [J]. *Science Technology and Engineering*, 2007, 7(7):1313-1315. (in Chinese)
- [3] 王欣,于晓,隋永新,等. 基于多小波的图像处理在电晕检测中的应用[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4):714-719.
WANG X, YU X, SUI Y X, *et al.*. Application of multiwavelet based image processing to corona detection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 714-719. (in Chinese)
- [4] 陈涛,何为,刘晓明,等. 高压输电线路紫外在线检测系统[J]. 电力系统自动化, 2005,29(7):88-92.
CHEN T, HE W, LIU X M, *et al.*. An on-line ultraviolet detecting system of EHV transmission lines [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2005, 29(7):88-92. (in Chinese)
- [5] 李雪,陈俊,何政,等. 两种结构 GaN 基太阳盲紫外探测器[J]. 激光与红外, 2006, 31(11): 1040-1042.
LI X, CHEN J, HE ZH, *et al.*. Solar-blind GaN-based UV detectors with two Structures [J]. *Laser & Infrared*, 2006, 31(11):1040-1042. (in Chinese)
- [6] 关澈,王延杰. CCD 相机实时自动调光系统 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(2):358-366.
GUAN CH, WANG Y J. Real-time auto light control system of CCD camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2):358-366. (in Chinese)
- [7] 陈升来,黄康卿,郭静寰. 基于整型提升小波变换的图像处理及 DSP 实现 [J]. 光学精密工程, 2006, 14(3):498-502.
CHEN SH L, HUANG L Q, GUO J H. Image processing based on integral lifting scheme and its implementation by DSP [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3):498-502. (in Chinese)
- [8] 张海峰,庞其昌,段颖妮,等. DSP/BIOS 在双光谱数字图像融合中的应用 [J]. 化工自动化及仪表, 2006, 33(4):40-43.
ZHANG H F, PANG Q CH, DUAN Y N. Application of DSP/BIOS in dual-spectrum digital image fusion [J]. *Control and Instruments in Chemical Industry*, 2006, 33(4):40-43. (in Chinese)
- [9] 王强,倪国强,李江涛,等. 使用 DSP/BIOS 开发 DM 642 图像融合系统驱动程序 [J]. 激光与红外, 2006, 36(11):1070-1074.
WANG Q, NI G Q, LI J T, *et al.*. Using DSP/BIOS in driver development of the image fusion system based on DM 642 [J]. *Laser and Infrared*, 2006, 36(11):1070-1074(in Chinese)
- [10] 赵玉环,闫丰,周跃,等. 紫外 ICCD 的辐射定标 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(9):1572-1576.
ZHAO Y H, YAN F, ZHOU Y, *et al.*. Radiometric calibration of ultraviolet ICCD detector [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(9):1572-1576. (in Chinese)
- [11] 王加朋,王淑荣,李福田,等. 空基紫外成像仪关键器件 ICCD 非均匀性校正技术[J]. 光学精密工程, 2007, 15(9):1353-1360.
WANG J P, WANG SH R, LI F T, *et al.*. Non-uniformity correction of key device ICCD in ultraviolet imager [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(9):1353-1360. (in Chinese)
- [12] 闫丰,于子江,于晓,等. 电晕探测紫外 ICCD 相机图像噪声分析与处理[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4):709-713.
YAN F, YU Z J, YU X, *et al.*. Noise analysis and processing of ultraviolet ICCD for corona detection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 709-713. (in Chinese)

作者简介:



何文荣(1980-),男,浙江宁波人,工程师,2004年于沈阳大学获得学士学位,主要从事嵌入式系统硬件和底层软件的开发研究。E-mail: kirby1980@163.com



胡晋荪(1940-),男,浙江宁波人,高级工程师,1965年于浙江大学获学士学位,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: hujinsun@hotmail.com



宋宝安(1980-)男,山西平遥人,讲师,2003年、2005年、2009年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事光电检测方面的研究。E-mail: songbaoan@nbu.edu.cn



杨鸣(1963-)男,浙江宁波人,研究员,1987年毕业于西北工业大学获硕士学位,主要从事嵌入式系统、自动控制、图像处理等方面的研究。E-mail: yangming@nbu.edu.cn



聂秋华(1954-)男,江西南昌人,教授,1982年、1985年于浙江大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光电检测、光纤通信、光纤无线电等方面的研究。E-mail: nieqihua@nbu.edu.cn

通信作者:



吴礼刚(1976-)男,湖北广水人,讲师,2003年于华中科技大学获得硕士学位,2006年于中国科学院上海技术物理研究所获得博士学位,2008年于浙江大学光学工程博士后流动站出站,从事主要从事光电检测及光电器件封装方面的研究。E-mail: wg21c@sina.com

●下期预告

轻武器光学瞄具的视差参数测试

于秋水^{1,2},安志勇¹,杨瑞宁³,梁爽¹,宋静怡⁴

(1. 长春理工大学光电工程学院,吉林长春130022; 2. 空军航空大学基础部,吉林长春130022; 3. 山东临沂师范学院,山东临沂27600; 4. 吉林大学电子科学与工程学院,吉林长春130012)

为了保证轻武器的瞄准精度,必须对轻武器光学瞄具的视差参数进行测试。在对传统的视差测量方法进行充分研究的基础上,提出了基于自动调焦技术的轻武器光学瞄具的视差参数测试方法。首先,介绍了自动调焦技术的工作原理及其系统组成框图。然后,根据轻武器瞄具性能指标的具体要求,结合自动调焦技术设计了一套轻武器瞄具的视差参数测试系统,并详细地介绍了被测瞄具在放入该测试系统之前的自动调焦过程和被测瞄具在放入该系统之后的自动调焦过程,最后,通过求取视度之差得到视差。根据轻武器瞄具光学系统的实际测试要求进行了5次测试实验,并对这5次实验数据进行了分析。结果表明:视差测试精度为 0.0296 m^{-1} ,达到了轻武器光学瞄具技术指标 $<0.1\text{ m}^{-1}$ 的要求,保证了测量精度。