

微光像增强器光晕消失时间测试方法

吴梦雪 钱芸生 王璐子 杨淑宁 张琴

Test method for halo disappearance time of low-level-light image intensifier

WU Mengxue, QIAN Yunsheng, WANG Luzi, YANG Shuning, ZHANG Qin

引用本文:

吴梦雪, 钱芸生, 王璐子, 等. 微光像增强器光晕消失时间测试方法[J]. 应用光学, 2024, 45(3): 652–658. DOI: 10.5768/JAO202445.0304001

WU Mengxue, QIAN Yunsheng, WANG Luzi, et al. Test method for halo disappearance time of low-level-light image intensifier[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(3): 652–658. DOI: 10.5768/JAO202445.0304001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0304001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

微光像增强器积分灵敏度单次测量误差分析

Single test error analysis for integral sensitivity of low-light-level image intensifier

应用光学. 2020, 41(4): 791–795 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0404001>

基于P31荧光粉的像增强器余辉测量方法研究

Research on afterglow measurement method of image intensifier based on P31 phosphor powder

应用光学. 2020, 41(4): 796–800 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0404002>

紫外像增强器辐射灵敏度测量系统

Measurement system of radiation sensitivity for UV image intensifier

应用光学. 2020, 41(3): 548–552 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0303001>

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>

四通道微光偏振实时成像光学系统设计

Optical system design of four-channel low light level polarization imaging

应用光学. 2019, 40(2): 334–341 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0205005>

天幕立靶探测光幕响应时间一致性测量方法研究

Measurement method of response time consistency for sky screens vertical target

应用光学. 2019, 40(3): 483–488 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0303005>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 03-0652-07

微光像增强器光晕消失时间测试方法

吴梦雪¹, 钱芸生¹, 王璐子¹, 杨淑宁², 张 琴²

(1. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094; 2. 微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘 要: 光晕 (halo) 效应对微光像增强器探测的应用造成了不利影响且不可避免。微光像增强器的光晕消失时间缺乏测试方法, 因此提出了基于数字目视的光晕消失时间测试系统。该系统通过开关电源给 LED 光源提供频率为 25 Hz、占空比可调的脉冲信号, 利用高帧率相机连续采集 1 500 张像增强器经直径为 3.5 mm 小孔后的图像, 其中包含若干个完整的明暗周期。通过重复计算标准差, 去除偏离平均值的周期序列来优化周期信息, 获得亮暗周期内光源熄灭的图片索引, 同理可获得光晕消失的图片数量, 从而计算得到光晕消失时间。编号为 GZ318118A 的像增强器光晕消失时间为 3.33 ms。测试结果表明, 测量装置的重复性为 0.863%, 可以对光晕消失时间进行有效测试。

关键词: 光学器件测量; 光晕消失时间; 微光像增强器; 光晕直径

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0304001

Test method for halo disappearance time of low-level-light image intensifier

WU Mengxue¹, QIAN Yunsheng¹, WANG Luzi¹, YANG Shuning², ZHANG Qin²

(1. School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Key Laboratory of Low-Light-Level Night Vision Technology, Xi'an 710065, China)

Abstract: The halo effect has a negative impact on the application of detection of low-level-light image intensifier, and it is unavoidable. The method for testing the halo disappearance time of low-level-light image intensifier is lacking. To address this, a halo disappearance time test system based on digital vision was proposed. The system provided a pulse signal with a frequency of 25 Hz and an adjustable duty cycle to the LED light source through a switching power supply. 1 500 images of the image intensifier passing through a small hole with a diameter of 3.5 mm were captured by a high frame rate camera, including several complete light and dark cycles. The period information was optimized by repeatedly calculating the standard deviation to remove the periodic sequence that deviated from the average value, and the image index where the light source was turned off in the light and dark period was obtained. Similarly, the number of pictures where the halo disappeared could be obtained, thereby calculating the disappearance time of the halo. The halo disappearance time of image intensifier is 3.33 ms with the serial number GZ318118A. The test results show that the repeatability of the measuring device is 0.863%, which can effectively test the disappearance time of the halo.

Key words: optical device measurement; halo disappearance time; low-level-light image intensifier; halo diameter

收稿日期: 2023-05-17; 修回日期: 2023-07-31

基金项目: 国防基础科研计划 (JCKY2018208B016)

作者简介: 吴梦雪 (1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事微光成像器件测试技术研究。E-mail: wmxddb@163.com

通信作者: 钱芸生 (1968—), 男, 博士, 教授, 主要从事光电成像器件、系统与相关测试技术研究。Email: yshqian@njut.edu.cn

引言

微光像增强器是一种电子光学成像系统。由光电阴极、微通道板(microchannel plate, MCP)和荧光屏组成^[1]。当通过微光(low light level, LLL)夜视像增强器观察到明亮的光源时,目镜中的光源图像可能会被“光晕”包围^[2],在目前的技术条件下,光晕是环境中普遍存在的特征。夜视系统的光晕效果是由微光像增强器内部结构影响产生的,与场景的空间布局不直接相关^[3]。由于相机的非线性饱和特性,光晕图像的中心明显变白变宽,而人眼可能看不到这种现象^[4]。在微光像增强器的成像过程中,由于噪声的影响使荧光屏上光斑图像的周围伴有光晕现象,并且电子在输运过程中的横向扩散导致光晕的分布远大于微光像增强器的点扩散函数,称此现象为微光像增强器的Halo效应。光晕的消失时间和直径大小也包含了微光像增强器和光源的更多有用信息,显然,Halo现象对微光像增强器探测与识别目标的能力造成了不利影响。一些单位也在积极研究一种防光晕阴极玻璃窗材料^[5],但就目前的工艺与技术水平而言,Halo效应不可避免。目前,微光像增强器的余辉时间测试技术成熟,测试精度可达纳秒级别^[6],但与余辉时间测试不同,光晕消失过程不仅是荧光屏亮度的下降,同时光晕直径的缩小也需要关注,所以可用相机代替人眼测试光晕消失时间。

2015年,王洪刚通过实验测试开展了前近贴脉冲电压对三代微光像增强器Halo效应的影响研究^[7]。2016年,郭冰涛等人研究了夜视系统输出图像中光晕尺寸和灰度分布与系统参数之间的关系,建立了系统光晕效应的定量化表征模型^[8]。关于微光像增强器光晕效应的现象学的报道和描述较多,而公开文献中关于光晕效应的检验数据却相对较少。

针对目前光晕消失时间测试的空缺,本文提出了基于数字目视的光晕消失时间测试方案,利用开关电源产生明暗闪烁的光源信号,结合高帧率的相机将光晕的消失过程以图片形式记录。利用Visual Studio软件开发平台,对采集到的图片进行图像处理及对各仪器实现程序控制。设计了一套基于数字目视的光晕特征分析和光晕消失时间测试系统,并对该测试系统进行了实验,验证了该测

试系统的可行性。

1 测试系统组成及工作原理

光晕相关参数的测试系统主要由LED光源、开关电源、积分球均匀光系统、3.5 mm小孔、缩小10倍准直透镜显微成像系统、低照度高响应相机、消失时间测试暗箱、工控计算机组成。图1为光晕消失时间测试装置原理框图,图2为光晕消失时间测试系统实物图。

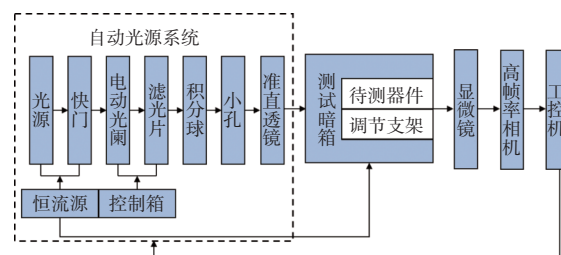


图1 测量装置原理框图

Fig. 1 Schematic block diagram of measuring device



图2 微光像增强器光晕消失时间测试系统实物图

Fig. 2 Physical picture of test system for halo disappearance time of low-level-light image intensifier

工控计算机通过控制开关电源产生周期为25 Hz、电流为500 mA、占空比可调的信号给LED光源供电^[9],光束通过调节光强度的光阑、均匀光的积分球和固定尺寸的小孔后传递至像增强器,同时稳压电源用于给像增强器整管提供3 V的工作电压(高压电源给像增强器裸管提供工作高压),像增强器的荧光屏上产生光晕图像,上位机采集经显

显微镜放大的光晕图像。经过图像处理、数据分析等过程,最终在上位机计算出待测微光像增强器的光晕直径和光晕消失时间。

2 硬件系统搭建

2.1 光源模块

光源模块由 LED 光源、开关电源、滤光片、积分球和小孔组成。24 V 稳压电源给开关电源供电,上位机通过 RS485 串口与开关电源通信,控制开关电源的工作模式,输出频率为 25 Hz、电流为 500 mA、占空比可调的信号源给 LED 光源供电。为了防止相机在像增强器屏幕上采集光晕图像时的饱和,光源组件应产生具有一定照明的均匀光斑,积分球确保输入光斑均匀,光斑照明可以由积分球入口处的滤光片和光阑调节,可以将光照控制在 10^{-2} lx~10 lx 之间^[10]。小孔的直径为 3.5 mm,为确保光晕边缘光滑,小孔是通过光刻技术制造的。

2.2 基于数字目视的图像采集模块

图像采集系统由缩小准直透镜、显微镜和高帧率相机组成,用数字目视代替人眼观察。在积分球后附加缩小 10 倍的共轭对称透镜,小孔直径变成 0.35 mm。相机采用的是 Hamamatsu 生产的 C11440-42U 型高帧率相机。当分析测量光晕灰度和光晕直径等特征时,相机的开窗大小是 2 048×2 048 像素,先把开关电源输出信号的占空比设置为 100%,光源恒定,工控机控制相机采集一张分辨率为 2 048×2 048 像素的图片。当测量光晕消失时间时,把开关电源输出信号的占空比设置为 50%,相机通过显微镜后连续采集 1 500 张分辨率为 128×128 像素的图片。

3 测试实验

3.1 测试软件界面

为方便实现对各个仪器的程控目的,荧光屏快速余辉时间测试系统选用的软件平台是基于 Visual Studio 2013 开发环境,利用 MFC(microsoft foundation classes)编写而成的。通过 MFC 程序设计,实现了在 1 个操作界面内完成设备控制、图像采集、光晕消失时间数据处理、测试结果显示、测试设置、测试结果保存等功能,其流程图如图 3 所示。

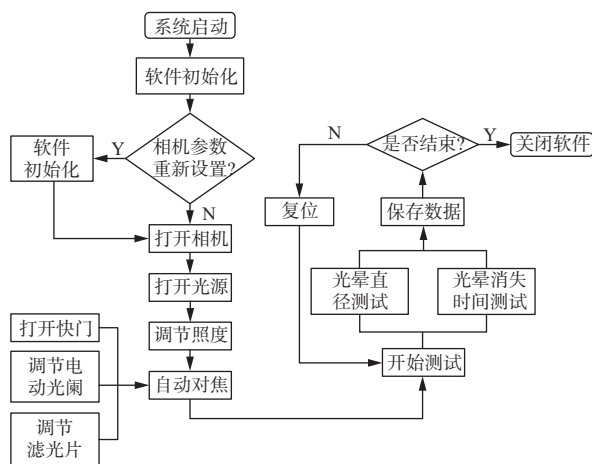


图 3 微光像增强器光晕消失时间测试系统流程图

Fig. 3 Flow chart of test system for halo disappearance time of low-level-light image intensifier

3.2 光晕直径测量方法

为了获得经此系统放大后的像素大小,首先采集未经过微光像增强器的输入光斑图像,用 Matlab 打开该图像,确定小孔的起始像素位置索引,得到 0.35 mm 小孔成像的像素数量为 108,所以测试仪器放大后的像素大小为 3.24 μm 。

通过上位机控制开关电源将输出信号的占空比调至 100%,将微光像增强器置于不透光的遮光套筒中,附加 3 V 的工作电压,获得光晕的灰度图像。图 4 为拍摄得到的微光像增强器 GZ318118A 的目标图像,中心亮斑是边缘不规则圆形。再由相机采集微光像增强器荧光屏上的光晕图像,并保存为 bmp 格式^[11]。



图 4 相机采集 0.35 mm 输入光斑的光晕图像

Fig. 4 Halo image for 0.35 mm input light-spot collected by camera

为了提取光晕信息,预先对目标图片进行二值化(阈值是目标图像的平均强度),二值化后的光晕图像如图 5 所示。

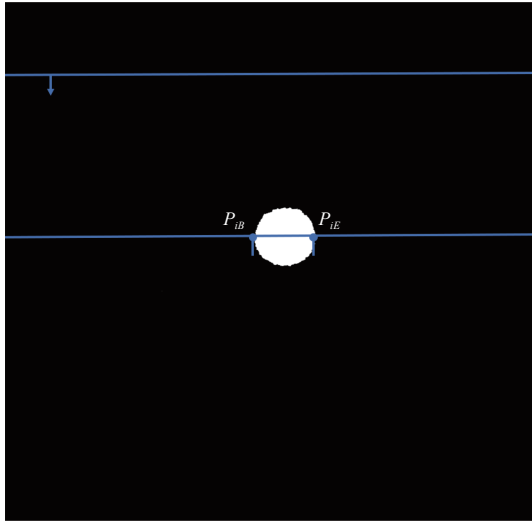


图5 行扫描示意图

Fig. 5 Schematic image of row scanning

二值化后的中心圆斑是边缘不规则圆形,若使用 OpenCV 库^[12-13]中霍夫圆检测函数识别圆准确性不高,不适用于重复测试,所以本文采用逐行灰度统计的方法来确定圆心坐标和直径尺寸。设圆点 C 的坐标为 (C_x, C_y) , 先确定每行像素起始像素位置的索引, 设第 i 行的中心亮斑的左侧边界 P_{iB} 点的坐标为 (P_{iBx}, P_{iBy}) , 右侧边界 P_{iE} 点的坐标为 (P_{iEx}, P_{iEy}) , 再统计每行中心亮斑的白像素个数, 设第 i 行的白像素个数为 $N_i (1 \leq i \leq 2048)$ 。

将每行中心亮斑的白像素个数与上下行相比, 直到搜寻到某一行中心亮斑的白像素数 $N_i > N_{i-1}$ 且 $N_i > N_{i+1}$, 此行的白像素数最大, 则此行为圆心所在行, 圆心的坐标和直径如式(1)所示:

$$\begin{cases} C_x = \frac{1}{2}(P_{iBx} + P_{iEx}) \\ C_y = i \\ C_d = (P_{iEx} - P_{iBx}) \times 3.24 \end{cases} \quad (1)$$

3.3 光晕消失时间测试方法

上位机控制开关电源将 LED 灯的闪烁频率设置为 25 Hz, 占空比为 50%, 在一个周期内, LED 灯亮的时间为 20 ms, 灯暗的时间为 20 ms。为了提高测试精度, 相机连续采集 1 500 张图片, 其中包含多个明暗周期, 此时相机的开窗设置为 128×128 像素, 帧率为 1 562 帧/s。

1) 确定光源熄灭位置

相机在高帧率采集图片的情况下, 实时帧率会在 1 562 帧/s 上下浮动。为了确定光源熄灭瞬间的图片索引和采集图像时的实时帧率, 在 LED 光源明暗变化的条件下, 相机采集 1 500 张微光像增强器光晕变化图像。图 6 是从微光像增强器 GZ318-

118A 的 1 500 张变化图像中截取的一部分, 包含一个完整的亮暗周期, 第 413 张图片微光像增强器被点亮, 在第 443~448 张图片内光晕逐渐消失, 到第 472 张图片一个明暗周期结束。

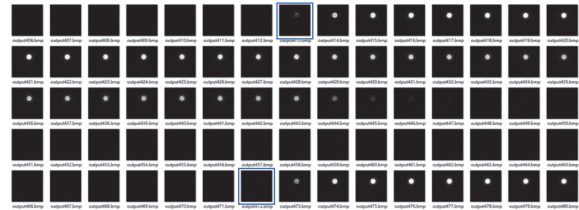


图6 包含完整周期示意图

Fig. 6 Schematic diagram with complete cycle

将采集到的灰度图像二值化(阈值是目标图像的平均强度), 据图像的明暗变化将 1 500 张图片提取 N 个明暗周期, 每个周期包括 T_{nl} 张亮图像和 T_{nd} 张暗图像。计算得出 N 个周期的亮图像数量平均值为 μ_n , 亮图像数量的标准差为 D_n , 推导得式(2):

$$\begin{cases} \mu_n = \sum_{n=1}^{n=N} T_{nl} \div N \\ D_n = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{n=N} (T_{nl} - \mu_n)^2}{N}} \end{cases} \quad (2)$$

N 个周期的标准差 μ_n 较大, 无法作为准确的周期信息, 因而去除一个亮图像数量与 μ_n 相差最大的周期, 重新求剩下 $N-1$ 个周期的亮图像数量的标准差。重复以上操作, 直至剩下 M 个周期的标准差 D_n 稳定 (< 0.5), 此时剩下 M 个周期内亮图像数量在 30 左右, 符合占空比 50% 的事实^[14-15], 剩下的 M 个周期中亮图像的平均值 μ_m 即为光源熄灭瞬间的图像位置索引, 即一个周期的开始位置索引为 0, 光源熄灭瞬间的位置索引为 μ_m 。同理可得一个周期的图片总数为 T_n , 则每张图片的时间间隔 T_s (单位是 ms) 为

$$T_s = \frac{1}{\frac{25}{T_n}} \times 1000 \quad (3)$$

2) 计算光晕消失时间

在光源熄灭后, 微光像增强器荧光屏上的光斑不会立即消失, 需要计算出在光晕熄灭后光晕消失的图像数量来计算光晕消失时间。对 M 个明暗周期依次计算, 根据上述 3.2 节确定圆心的方法, 选取一个亮图像圆心 5×5 范围中的 25 个像素, 获得灰度平均值 G_{ave} , 将其作为原始亮图像的灰度

值,并记录光源熄灭后每张图像的光斑灰度平均值,即从第 μ_m 张图片开始向后计算每张图像的光斑灰度平均值,直至光斑消失(因为图像存在噪点,所以当 G_{ave} 降为 $10\% \times G_{ave}$ 时即可认为光斑消失),光斑消失的图像如图 7 所示。根据上述方法求得一个周期的图片数量 T_n 为 60, μ_m 为 29,即光源在第 1 315 张图片熄灭,在第 1 320 张图片光斑灰度平均值低于 $10\% \times G_{ave}$,则在此明暗周期内,光晕消失的图片数为 5。结合光晕消失时灰度变小同时伴随着光晕直径缩小的特点,计算了从第 1 315 张~1 320 张图片的光晕直径大小,分别是 0.41 mm、0.39 mm、0.31 mm、0.21 mm、0.16 mm、0.11 mm。可以得出,在第 1 317 张图片时光晕直径缩减到 0.35 mm 以下,且后面的光晕图像已不是完整的圆形,而是由一些相对集中的亮点组成,此时小孔已不存在 Halo 现象。

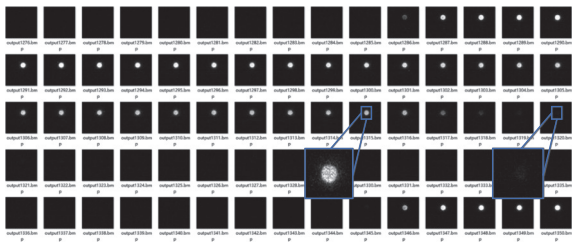


图 7 光晕灰度变化示意图

Fig. 7 Schematic diagram of halo grayscale change

对 M 个周期重复操作,得到 M 组光晕消失的图片数,用同样的方法求出光晕消失图片数量的标准差,去除偏离平均值的周期,直至剩下的 k 个周期光晕消失的图片数量稳定,则剩下 k 个周期光晕消失的图片数平均值为 μ_k ,光晕消失时间 t_{dis} 的公式如下:

$$t_{dis} = T_s \times \mu_k \quad (4)$$

重复性是评价测试系统性能的重要指标,其计算方法如下:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (5)$$

$$\delta = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100\%$$

式中: δ 为重复性; σ 为标准差; \bar{x} 是 n 次测试的平均值; x_i 是第 i 次测得的数据。

在照度为 1.95×10^{-1} lx 的情况下,取 4 只像增强器,管号分别为 GZ318118A、CN4824ES、GZ318118A2 和 GN4824ES。求 10 次光晕消失时间,结果如表 1 所示。

表 1 4 只像增强器光晕消失时间测量结果

Table 1 Measurement results of halo disappearance time of four image intensifiers

测试次数	管号 GZ318118A	管号 CN4824ES	管号 GZ318118A2	管号 GN4824ES
1	3.33	4.00	3.28	4.52
2	3.33	4.00	3.28	4.52
3	3.33	3.93	3.28	4.52
4	3.33	3.93	3.28	4.52
5	3.39	3.93	3.28	4.59
6	3.39	3.93	3.28	4.59
7	3.33	4.00	3.23	4.59
8	3.33	4.00	3.23	4.59
9	3.33	4.00	3.23	4.52
10	3.33	4.00	3.23	4.52

由表 1 结合式(5)可知,前 2 只微光像增强器 10 次测试的相对误差分别是 1.8% 和 1.7%,测试重复性分别是 0.718% 和 0.863%。横向对比得,不同管型的光晕消失时间也不同,原因可能是像增强器阴极材料的不同,在光电转换特性上存在一些差异,较高的载流子迁移率和较低的载流子噪声,有助于减少信号的扩散和损失,从而减小光晕产生的直径范围。同时在三代像增强器中引入了二代像增强器没有的离子阻挡膜技术,可能会造成光晕消失时间不同。

4 测试结果与分析

4.1 光晕直径随照度的变化

调节光阑尺寸改变阴极照度 E ,对像增强器荧光屏上的光晕直径大小进行测试。选取 2 只编号分别是 CN4824CS 和 GZ318118A 的微光像增强器,在不同照度条件下,将光晕直径尺寸的数据绘制成图 8。因为光阑尺寸不是连续可调,所以图 8 中横坐标所选的 4 个照度分别是 1.05×10^{-2} lx、 1.95×10^{-1} lx、1.31 lx、10.14 lx。

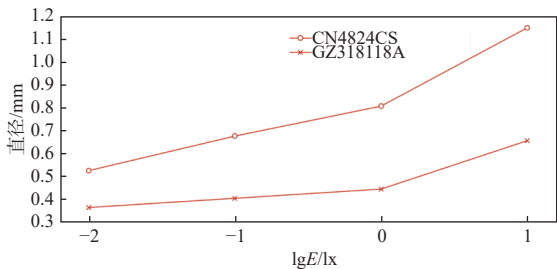


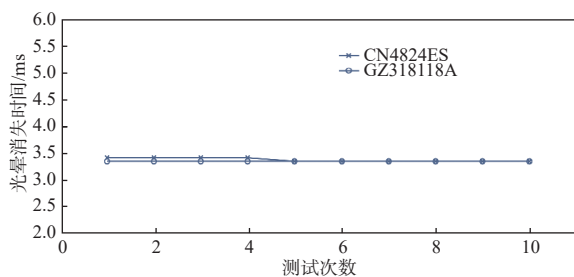
图 8 不同照度下光晕直径大小示意图

Fig. 8 Schematic diagram of halo diameter under different illuminance

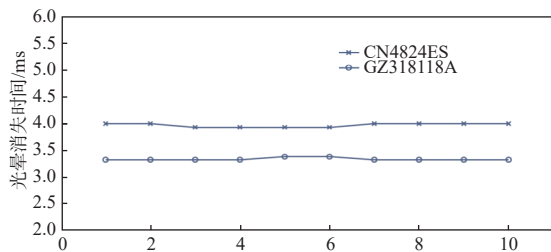
由图 8 可得, 随着入射到阴极照度的增加, 荧光屏上的光晕直径也在增大, 照度范围在 10^{-2} lx ~ 1 lx 量级内, 光晕直径大小与照度对数值近似呈线性增长; 但当照度大于 1 lx 量级时, 随着照度的增大, 光晕直径增大的系数也变大, 远大于照度范围在 10^{-2} lx ~ 1 lx 量级时的增大系数。编号 CN4824CS 的微光像增强器的光晕直径尺寸大于编号 GZ318118A 的微光像增强器的光晕直径尺寸, 且在不同照度情况下, 光晕直径尺寸差别都较大。

4.2 光晕消失时间的测试稳定性分析

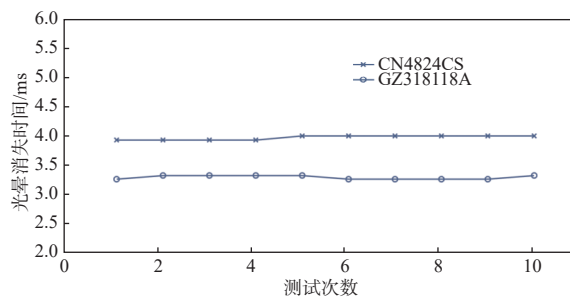
为了考察所提出方法的测试重复性^[16], 分别对 2 只微光像增强器在不同照度情况下的光晕消失时间测量 10 次, 照度范围的量级是 10^{-2} lx ~ 10^{-1} lx, 对应的 4 个照度分别是 1.05×10^{-2} lx、 1.95×10^{-1} lx、1.31 lx、10.14 lx。将每只微光像增强器在不同照度条件下的测试结果进行对比, 如图 9 所示。相同的微光像增强器在同样的照度条件下, 光晕消失时间的差值小于 0.1 ms, 相同的微光像增强器在不同照度条件下, 随着照度增大, GZ318118A 号微光像增强器的光晕消失时间为 3.3 ms, 在小于 0.1 ms 的范围内浮动; CN4824CS 号微光像增强器在照度为 1.05×10^{-2} lx 的光晕消失时间小于其他照度条件下的光晕消失时间, 原因可能是照度增加光晕直径增宽, 则光晕消失时间也会变大, 差值约为 0.6 ms。证明本测试系统的测试结果具有良好的区分性, 测试可重复性高, 具有良好的稳定性。



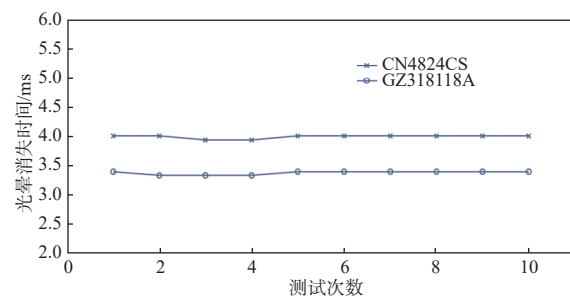
(a) 照度为 1.05×10^{-2} lx



(b) 照度为 1.95×10^{-1} lx



(c) 照度为 1.31 lx



(d) 照度为 10.14 lx

图 9 2 只微光像增强器在 4 种不同照度下的 10 次测试结果对比图

Fig. 9 Comparison diagram of 10 test results of two image intensifiers under 4 different illuminance

5 结论

针对目前缺乏光晕消失时间测试方法的问题, 本文提出了一种基于数字目视的光晕消失时间测试方法, 实现了光晕消失图像高速采集、存储、处理、光晕消失时间计算、光晕消失过程可视化等多项功能。将开关电源的输出频率设置为 25 Hz、占空比设置为 50%, 调整滤光片轮将光源照度设置为 1.95×10^{-1} lx, 给微光像增强器供 3 V 的工作电压。在此工作条件下, 对微光像增强器的光晕消失时间连续测量 20 次, 其最大相对测量误差为 1.802%, 测量重复性达到 0.863%。证实了该测试系统具有良好的稳定性, 从而为微光像增强器的光晕消失时间提供了一种有效测试手段。此外, 可重复性实验证实, 该方法的测量结果与主观评价结果基本保持一致且稳定性更好。

参考文献:

- [1] 李晓峰, 何雁彬, 常乐, 等. 超二代与三代像增强器性能的比较研究[J]. 红外技术, 2022, 44(8): 764-777.
LI Xiaofeng, HE Yanbin, CHANG Le, et al. Performance comparison between super second generation and third generation image intensifiers[J]. *Infrared Technology*,

- 2022, 44(8): 764-777.
- [2] THOMAS P J, ALLISON R S, CARR P, et al. Physical modeling and characterization of the halo phenomenon in night vision goggles[C]//SPIE Proceedings, Helmet-and Head-Mounted Displays X: Technologies and Applications. Orlando, Florida, USA: SPIE, 2005: 21-31.
- [3] ZACHER J E, BRANDWOOD T, THOMAS P, et al. Effects of image intensifier halo on perceived layout[C]//SPIE Proceedings, Head-and Helmet-Mounted Displays XII: Design and Applications. Orlando, USA: SPIE, 2007: 65570U-1-65570U-12.
- [4] LING R, FENG S, HUI G, et al. Analysis of image intensifiers halo effect with curve fitting and separation method[C]// 2012 International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEE 2012). Shanghai, China: Springer, 2012: 1109-1116.
- [5] 吕学良. 高灵敏度长寿命防光晕阴极玻璃窗及批产技术[J]. 中国建材, 2016, 65(8): 80-81.
- LYU Xueliang. High-sensitivity and long-life halo-proof cathode glass window and batch production technology[J]. China Building Materials, 2016, 65(8): 80-81.
- [6] 卢杰, 常乐, 陈益新, 等. 微光像增强器纳秒级荧光屏余辉时间测试系统[J]. 应用光学, 2022, 43(6): 1130-1137.
- LU Jie, CHANG Le, CHEN Yixin, et al. Development of afterglow time test system for nanosecond fluorescent screen of low-level-light image intensifier[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(6): 1130-1137.
- [7] 王洪刚. 像增强器的电子输运与噪声特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- WANG Honggang. Research on the electron transport and noise characteristics of image intensifiers[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015.
- [8] 郭冰涛, 张卫国, 王健军, 等. 微光夜视系统光晕效应定量表征与建模方法[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(11): 119001.
- GUO Bingtao, ZHANG Weiguo, WANG Jianjun, et al. Modeling and simulation of halo effect of night vision system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28(11): 119001.
- [9] CHRISTOPHE P B. Switch-mode power supplies[M]. New York: McGraw-Hill Education, 2014: 2-3.
- [10] 朱世聪, 李金沙, 王俊, 等. 一种微光像增强器信噪比和光晕自动测试系统及测试方法: CN113432838B[P]. 2022-08-09.
- ZHU Shicong, LI Jinsha, WANG Jun, et al. System and method for automatically testing signal-to-noise ratio and halo of low-light image intensifier: CN113432838B[P]. 2022-08-09
- [11] CUI D X, REN L, CHANG B K, et al. Halo performance on low light level image intensifiers[C]//SPIE Proceedings, PIAGENG 2013: Image Processing and Photonics for Agricultural Engineering. Sanya, China: SPIE, 2013: 876108-1-5.
- [12] GU Y R, LU Y F, YANG H G, et al. Concentric circle detection method based on minimum enveloping circle and ellipse fitting[C]//2019 IEEE 10th International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS). Beijing, China: IEEE, 2019: 523-527.
- [13] 钟华勇, 叶建生, 何高清. 基于OpenCV的圆心坐标定位的优化设计[J]. 制造技术与机床, 2021(5): 110-115.
- ZHONG Huayong, YE Jiansheng, HE Gaoqing. Optimization design of center coordinates location based on OpenCV[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2021(5): 110-115.
- [14] 郝拉娣, 于化东. 标准差与标准误[J]. 编辑学报, 2005, 17(2): 116-118.
- HAO Ladi, YU Huadong. Standard deviation and standard error of arithmetic mean[J]. Acta Editologica, 2005, 17(2): 116-118.
- [15] MOLINA-GÓMEZ F, BULLA-CRUZ L A, DARGHAN CONTRERAS A E. A novel approach for the control of grain size distributions based on variance analysis[J]. Construction and Building Materials, 2021, 285: 122748.
- [16] 王璐子, 钱芸生, 孙默涵, 等. 基于条纹变化特征的像增强器分辨率客观评价[J]. 光子学报, 2022, 51(3): 0304003.
- WANG Luzi, QIAN Yunsheng, SUN Mohan, et al. Objective evaluation of the resolution of image intensifier based on stripe variation features[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(3): 0304003.