

原向反射式大面积三角形探测光幕灵敏度分布

段晨曦 孙忠辉 李海清 倪晋平 武志超

Sensitivity distribution of large-area triangular detection light screen with original reflection

DUAN Chenxi, SUN Zhonghui, LI Haiqing, NI Jinping, WU Zhichao

引用本文:

段晨曦, 孙忠辉, 李海清, 等. 原向反射式大面积三角形探测光幕灵敏度分布[J]. 应用光学, 2023, 44(1): 113–121. DOI: 10.5768/JAO202344.0103001

DUAN Chenxi, SUN Zhonghui, LI Haiqing, et al. Sensitivity distribution of large-area triangular detection light screen with original reflection[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(1): 113–121. DOI: 10.5768/JAO202344.0103001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0103001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大面积三角形探测光幕灵敏度空域分布分析

Spatial distribution of sensitivity of large-area triangular detection light screen

应用光学. 2021, 42(6): 956–962 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0601002>

基于原向反射式激光光幕厚度一致性研究

Study on thickness consistency of primary reflection laser screen

应用光学. 2019, 40(2): 233–240 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0201009>

激光三角法中工作角对系统灵敏度的影响

Effect of working angle on system sensitivity in laser triangulation

应用光学. 2017, 38(5): 826–830 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0507001>

目标辐射特性现场校准用大面积黑体辐射源技术研究

Research on technology of large area blackbody radiation source used in field calibration for target radiation characteristics

应用光学. 2021, 42(2): 292–298 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0203001>

一种快速三角形星图识别算法

Fast triangle star pattern recognition algorithm

应用光学. 2018, 39(1): 71–75 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0102005>

基于蒙特卡罗法的水下激光光幕探测性能研究

Detection performance of underwater laser light screen based on Monte Carlo method

应用光学. 2019, 40(3): 454–460 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0302008>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 01-0113-09

原向反射式大面积三角形探测光幕灵敏度分布

段晨曦¹, 孙忠辉², 李海清², 倪晋平¹, 武志超¹

(1. 西安工业大学 光电工程学院 陕西省光电测试与仪器技术重点实验室, 陕西 西安 710021;

2. 中国人民解放军 63853 部队, 吉林 白城 137001)

摘要: 分体式大靶面测试系统的探测光幕灵敏度直接影响飞行弹丸速度测量的精度。可在散布不大的情况下, 使用反射膜与激光器代替矩形大面积测试系统中的人工光源, 简化测试系统。对新建的三角形探测光幕的灵敏度进行了分析, 综合考虑激光器在不同传播距离处的光强度衰减、空间的非均匀性分布及反射膜逆反射系数和镜头离轴效应等因素, 采用数值仿真和实弹试验的方法, 将同一弹径的弹丸穿过光幕不同位置时的灵敏度等效到同一基准点进行归一化分析。结果显示, 镜头离轴效应对灵敏度影响最大, 激光器空间非均匀性分布影响最小。在 3.5 m×2 m (宽×高) 的直角三角形探测光幕区域进行实弹试验, 其结果与仿真结果一致, 距镜头越近, 灵敏度越高; 反之越低。研究结果可为类似原向反射式大面积探测光幕的工程设计提供参考。

关键词: 弹丸速度测量; 大面积探测光幕; 离轴效应; 光强度分布; 灵敏度分布

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0103001

Sensitivity distribution of large-area triangular detection light screen with original reflection

DUAN Chenxi¹, SUN Zhonghui², LI Haiqing², NI Jinping¹, WU Zhichao¹

(1. Shaanxi Province Key Laboratory of Photoelectric Measurement and Instrument Technology, School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;

2. No.63853 Unit of PLA, Baicheng 137001, China)

Abstract: The accuracy of the flying projectile speed measurement is directly affected by the detection light screen sensitivity of the split large-target test system. In the case of small dispersion, the artificial light source in the rectangular large-area test system can be replaced by a reflective film and a laser to simplify the test system. The sensitivity of the new triangular detection light screen was analyzed. The light intensity attenuation of lasers at different propagation distances, the non-uniform distribution in space, the retro-reflection coefficient of the reflective film and the off-axis effect of the lens were taken into account. The sensitivity of projectiles of the same diameter through different positions of the light screen was analyzed by equivalent normalization at the same reference point by using numerical simulation and firing test. The simulation results show that the sensitivity is most affected by the lens off-axis effect and least by the non-uniform distribution of the laser space. The firing test was carried out in the right-angled triangle detection light screen area of 3.5 m×2 m (width×height). The results are consistent with the simulation results, the closer the lens, the higher the sensitivity, and the lower the versa. The results can provide a reference for the engineering design of a large-area detection light screen similar to the reflection type.

收稿日期: 2022-04-27; 修回日期: 2022-05-24

基金项目: 国家自然科学基金 (61471289); 陕西省教育厅重点实验室项目 (20JS057);

作者简介: 段晨曦 (1996—), 男, 博士研究生, 主要从事光电测试技术研究。E-mail: cherokeedcx@126.com

通信作者: 倪晋平 (1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事兵器试验与测试技术、光电测试与仪器研究。E-mail: nijp6504@263.net

Key words: projectile velocity measurement; large-area detection light screen; off-axis effect; distribution of light intensity; sensitivity distribution

引言

在轻武器外弹道测试领域中,膛口初速是评估武器毁伤效能的重要参数,在研制和生产中,初速测量考虑到设备和人员的安全,以防备由于异常弹和散布大击中设备或者弹丸碎片反弹,大都采用探测面积大、易防护的测量设备。目前主要有3种初速非接触式测试方法:1)天幕靶^[1-3],采用光学镜头形成探测视场,称为镜头式接收装置。天幕靶依赖自然光,故无法在夜间和室内使用;2)光幕靶^[4-6],解决了全天候初速测量问题,测量精度高,但依赖阵列LED光源与光电接收器件成对使用,测试装置迎弹面存在框架,容易被击中,也很难做到2 m×2 m以上的大面积测试靶面;3)人工光源配接镜头式光幕探测器的分体式光幕^[7-8],能够满足大靶面的测试要求,因空间位置要求精确,但人工光源安装困难,维护不便。

为解决上述方法的不足,有研究者提出使用原向反射膜^[9-10]替代人工光源的原向反射式的光幕初速测试方法^[11-12],光幕的空间位置主要由发射光源一侧决定,不存在光源安装的繁琐,保留了大面积光幕的优点,但尚未对其光幕探测灵敏度进行分析。

本文构建原向反射式直角三角形光幕探测模型,分析灵敏度在光幕区域内的变化,综合考虑激光束光强度距离衰减^[13-15]、激光束光强度分布^[16-17]、反射膜的逆反射系数^[18]以及光学镜头离轴效应^[19]等因素,并建立原向反射式光幕探测灵敏度模型,得到直角三角形探测光幕内灵敏度分布规律,且重点关注主要射击区域内灵敏度均匀性。通过试验验证模型的合理性,研究结果可为实际中的工程设计或室内靶道的使用提供参考。

1 原向反射式三角形探测光幕原理及灵敏度模型

原向反射式直角三角形探测光幕主要由镜头式接收装置、激光器和原向反射膜组成。室内靶道的横截面一般为矩形,如图1所示。弹道两侧为墙壁,弹道右侧的墙壁放置原向反射膜,型号为3M公司8710,反射膜的发散角约为1°^[20-21];左侧墙壁放置镜头式接收装置,接收装置中装有狭缝光阑,约束视场为30°的扇形光幕,接收装置的光学

镜头一侧装有一字线激光器,距镜头的距离满足反射膜发散角以内。激光光束与镜头的视场重合,探测光幕是激光光束与镜头视场的交集。原向反射膜将激光器发出的激光束原向反射回镜头处,激光束经光学镜头汇聚,从而被后端的光电敏感元件接收。

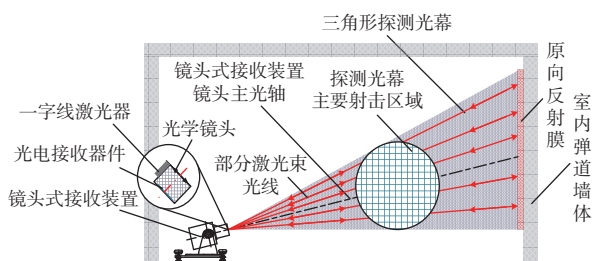


图1 原向反射式大面积三角形探测光幕结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of large-area triangular detection light screen with original reflection

关注的主要射击区域为三角形探测光幕中的圆形区域,其圆心在室内弹道地面的投影为弹道横截面的中心,弹道高度一般在1.1 m~1.2 m处,能覆盖弹丸散布的主要区域,如图1所示。若接收装置放置的地面距离弹道高度较远,可采用整体垫高的方法使圆形区域的圆心与弹道高度匹配。若将镜头式接收装置垫高至与弹道齐平,则探测光幕称为等腰三角形。本文的研究以直角三角形为主,其结论也可推广到等腰三角形。

当探测光幕中无飞行弹丸穿过时,接收装置中的光电转换器件接收的光能量固定不变,假设总光通量为 Φ ;当有弹丸穿过弹着点 (x, y) 时,光电转换器件接收到的光能量会发生变化,从而产生微弱变化的电信号,后续电路对该电信号进行放大等处理。一般情况下,探测光幕输出电压信号的幅值与光电转换器件接收的光通量相对变化量为线性关系,探测光幕的探测模型^[22]为

$$V(t) = \Delta\Phi(t)\varepsilon\gamma R > U \quad (1)$$

式中: V 为信号处理电路的输出电压; $\Delta\Phi$ 为弹丸遮挡住探测光幕内投影到镜头处的光通量; ε 为光电探测器的光照灵敏度; γ 为电路放大倍数; R 为电流电压转换电阻; U 为阈值电压。

假设弹丸长度始终大于光幕厚度,在镜头视场范围内,同一口径弹丸从不同位置 (x, y) 穿过光幕,在镜头处接收到的光通量的变化量为 $\Delta\Phi(x, y)$,定

义探测光幕区域最小光通量相对变化量为探测灵敏度 $\delta(x, y)$

$$\delta(x, y) = \frac{\Delta\Phi(x, y)}{\Phi} = \frac{\int_{\Omega} I(x, y) d\Omega}{\Phi} \quad (2)$$

式中: Ω 为弹丸穿过探测区域 (x, y) 时, 弹丸遮挡住的方位立体角 (圆心在镜头处); $I(x, y)$ 为在镜头处弹丸遮挡区域的光强度。

2 归一化数值仿真

采用数值仿真方法计算光幕不同位置的灵敏度变化, 将不同位置处的灵敏度与基准点的灵敏度数值相比进行归一化。光幕参数: 直角边为 $3.5 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ (宽 $\times$ 高) 的 30° 直角三角形; 采用 50 mm 定焦标准镜头; 选用波长为 650 nm 的激光器。假定激光器发出的一字线状激光束的光强度在垂直一字线方向上是均匀的。图 1 中圆形区域半径为 0.33 m , 圆心在 $(1.75 \text{ m}, 0.33 \text{ m})$ 处。坐标系的选择如图 2 所示, 以 G 点作为光强度归一化基准点, 将反射膜处光强度与其相比; O' 为主要射击区域的圆心位置作为灵敏度归一化基准点, 探测光幕内灵敏度与其相比。

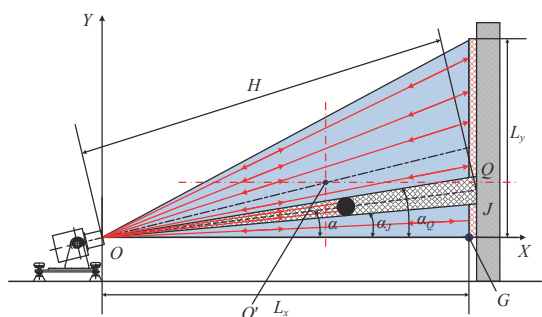


图 2 探测光幕光强度传播示意图

Fig. 2 Schematic diagram of light intensity propagation of detection light screen

2.1 弹丸穿过探测区域引起镜头处的光通量变化

弹丸穿过探测光幕遮挡住部分激光束, 如图 2 中 OJQ 区域所示, 该区域的光强度称为由飞行弹丸遮挡住的光强度。

激光器发出的光束强度在出口位置为 I_0 , 在探测光幕中传播, 经距离 H 传播至反射膜处, 距离衰减系数 τ_{dq} 将 I_0 衰减为 I_1 , 再经逆反射系数 τ_r 衰减为 I_2 , 反射后传播到镜头处, 2 次距离衰减系数 τ_{dh} 将 I_2 衰减为 I_3 , 则有

$$I_3 = I_0 \cdot \tau_{dq} \cdot \tau_r \cdot \tau_{dh} = I_1 \cdot \tau_r \cdot \tau_{dh} = I_2 \cdot \tau_{dh} \quad (3)$$

考虑镜头离轴效应和激光器光强度角度分布,

则探测光幕区域被弹丸遮挡住的光强度 I 为

$$I = I_3 \cdot \tau_j \cdot \tau_l \quad (4)$$

式中: τ_l 为镜头离轴效应系数; τ_j 为激光束光强度角度分布系数。

当探测光幕中有飞行弹丸从光幕内任意点 (x, y) 穿过时, 飞行弹丸的形心与水平方向上的夹角, 即探测区域与一字线方向平行的方位角 $\alpha(x, y)$ 为

$$\alpha = \arctan(y/x) \quad (5)$$

1) 反射前激光束光强度距离衰减变化规律

激光在近距离空气中传播时存在损失, 传播至反射膜处的距离为 $H(\alpha)$

$$H(\alpha) = \sqrt{L_x^2 + (L_x \cdot \tan(\alpha))^2} \quad (6)$$

通过实验得到激光束光强度随传播距离增加而减小的变化规律 $\tau_{dq}(\alpha)$ [23-24]

$$\tau_{dq}(\alpha) = 2.504 \times 10^{-12} \cdot H(\alpha)^3 - 2.476 \times 10^{-8} \cdot H(\alpha)^2 + 1.323 \times 10^{-6} \cdot H(\alpha) + 0.9999 \quad (7)$$

将反射膜处的激光束光强度距离衰减系数 τ_{dq} 带入仿真数值并进行归一化, 得到激光束光强度距离衰减系数变化曲线, 如图 3 中红色“加号”曲线所示。随着角度变大, 其对应的传播距离逐渐增加, τ_{dq} 呈现出逐渐减小的趋势。在反射膜处的投影数值标准差为 0.02 , 归一化极差为 5.1% 说明数值波动小, 距离衰减系数对光强度分布影响小。

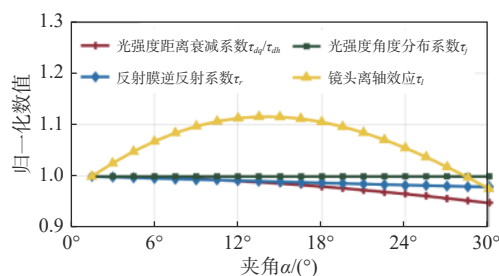


图 3 4 个影响因子变化曲线

Fig. 3 Change curves of four impact factors

激光束传播至反射膜处的光强度 $I_1(\alpha)$ 为

$$I_1(\alpha) = I_0 \cdot \tau_{dq}(\alpha) \quad (8)$$

2) 考虑逆反射系数下的激光束光强度分布规律
照射到反射膜上的光强度 I_1 与法线方向上有不同的入射角, 反射膜上就会有不同的逆反射系数, 由三角形法则可知, 上述入射角的物理含义与飞行弹丸的形心与水平方向上的夹角为 α 一致, 故反射膜逆反射分布系数 $\tau_r(\alpha)$ 为

$$\tau_r(\alpha) = 5.8 \times 10^{-8} \cdot \alpha^5 - 5.957 \times 10^{-6} \cdot \alpha^4 - 1.867 \times 10^{-4} \cdot \alpha^3 - 0.0013 \cdot \alpha^2 - 0.0272 \cdot \alpha + 0.6715 \quad (9)$$

对原向反射膜处的逆反射系数 τ_r , 带入仿真数值并进行归一化, 得到逆反射系数变化曲线, 如图3中蓝色“菱形”曲线所示。随着入射角增大时, τ_r 呈现出逐渐减小的趋势。数值标准差为0.01, 归一化极差为2.0%, 说明数值波动较小, 逆反射系数对光强度分布影响较小。

经过反射膜反射后的光强度 $I_2(\alpha)$ 为

$$I_2(\alpha) = \tau_r(\alpha) \cdot I_1(\alpha) = I_0 \cdot \tau_{dq}(\alpha) \cdot \tau_r(\alpha) \quad (10)$$

3) 反射后激光束光强度距离衰减变化规律

该过程与反射前激光束光强度距离衰减变化规律一致, 故不做重复分析, 反射后光强度距离衰减系数 $\tau_{dh}(\alpha)$ 为

$$\tau_{dh}(\alpha) = \tau_{dq}(\alpha) \quad (11)$$

经反射后, 受激光束光强度距离衰减系数影响的光强度 I_2 在镜头处汇聚为光强度 $I_3(\alpha)$

$$I_3(\alpha) = I_2(\alpha) \cdot \tau_{dh}(\alpha) = I_0 \cdot \tau_{dq}(\alpha) \cdot \tau_r(\alpha) \cdot \tau_{dh}(\alpha) \quad (12)$$

4) 激光束光强度角度分布规律

激光器在主光轴处的能量最强, 并随激光器与主光轴之间的夹角增大而减小^[22], 呈现高斯分布, 激光束光强度随角度分布系数 $\tau_j(\alpha)$ 为

$$\tau_j(\alpha) = e^{-\frac{(\pi(\alpha - \frac{\pi}{12}))^2}{1030 \cdot 3.2}} \quad (13)$$

将激光束光强角度分布系数 τ_j , 带入仿真数值并进行归一化, 得到光强角度分布系数变化曲线, 如图3绿色“方形”曲线所示。随着角度增大, τ_j 几乎不变。数值标准差为 2.0×10^{-5} , 归一化极差为0.07%, 说明数值波动非常小, 角度分布系数对光强度分布影响非常小, 在考虑光强度分布时可以忽略。

5) 镜头离轴效应

光学镜头确定视场内的光学参数后, 镜头会存在离轴效应 $\tau_l(\alpha)$ 为

$$\tau_l(\alpha) = \cos^4\left(\alpha - \frac{\pi}{12}\right) \quad (14)$$

将镜头离轴效应 τ_l 带入仿真数值并进行归一化, 得到镜头离轴效应系数变化曲线, 如图3黄色“三角形”曲线所示。随着角度增大, τ_l 呈现出先增大后减小的趋势, 最大值在反射膜处的镜头主光轴上取得。数值标准差为0.04, 归一化极差为13.97% 说明数值波动较大, 镜头离轴效应对光强度分布影响较大。

在图3中, 光强度距离衰减系数 τ_{dq}/τ_{dh} 与镜头离轴效应 τ_l 对光强度的分布影响较大, 而反射膜逆反射系数 τ_r 与光强度角度分布系数 τ_j 对光强度分

布影响较小。

同时考虑激光束角度分布系数与镜头离轴效应系数影响下, 镜头处汇聚的光强度 I_0 为

$$I_0(\alpha) = I_3(\alpha) \cdot \tau_j(\alpha) \cdot \tau_l(\alpha) = I_0 \cdot \tau_{dq}(\alpha) \cdot \tau_r(\alpha) \cdot \tau_{dh}(\alpha) \cdot \tau_j(\alpha) \cdot \tau_l(\alpha) \quad (15)$$

综合考虑以上因素, 带入仿真数值并进行归一化, 在反射膜处得到镜头处汇聚的光强度 I_0 变化曲线, 如图4所示, 探测光幕内投射到反射膜处的光强度随着角度的增, 光强度呈现先增大后减小的趋势。在反射膜处的投影数值标准差为0.07, 归一化极差为22.43%, 说明数值波动大, 光强度分布差异较大。

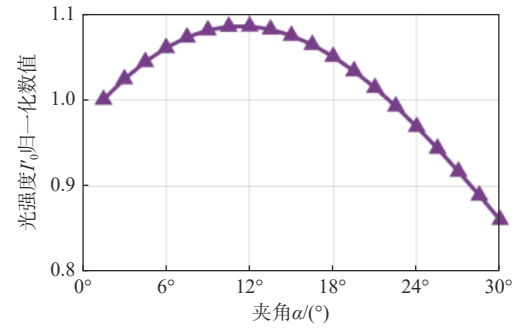


图4 投射到反射膜上在镜头处汇聚的光强度 I_0 变化曲线
Fig. 4 Change curve of light intensity I_0 projected onto reflective film converging at lens

2.2 探测区域内的探测灵敏度分布

假设图2中三角形 OJQ 下边界与上边界分别与 X 轴夹角为 α_J 、 α_Q , 有

$$\begin{cases} \alpha_J(x, y) = \arctan\left(\frac{y-d/2}{x}\right) \\ \alpha_Q(x, y) = \arctan\left(\frac{y+d/2}{x}\right) \end{cases} \quad (16)$$

飞行弹丸穿过探测光幕边缘处时, 其遮挡的光强度与在探测光幕内其他位置做相同处理。

不考虑反射膜发散角在探测光幕垂直方向的影响^[25], 则在弹丸遮挡住在镜头处的光通量 $\Delta\Phi(x, y)$ 为

$$\begin{aligned} \Delta\Phi(x, y) &= \int_{\Omega} I_0(x, y) d\Omega = \int_{\theta} \int_{\alpha_J(x, y)}^{\alpha_Q(x, y)} I_0(\alpha) d\alpha d\theta = \\ &= k_1 \cdot \int_{\alpha_J(x, y)}^{\alpha_Q(x, y)} I_0(\alpha) d\alpha, \quad \alpha(x, y) \end{aligned} \quad (17)$$

式中, θ 为与一字线方向相垂直的方位角, 当镜头参数与反射膜参数确定时, 该参数是确定且唯一的, 其中 $k_1 = \int_{\theta} 1 d\theta$, 被积分为数字1。

由于飞行弹丸长度始终大于探测光幕厚度, 且

当激光器选定后, 探测光幕内的总光强度为定值, 无论弹径多少, 灵敏度最大值总发生在弹丸遮住全部光线的位置, 我们定义主要射击区域圆心位置为整个探测光幕内的灵敏度参考基准 δ_{dd} , 归一化灵敏度 δ' 为

$$\delta'(x, y) = \frac{\delta(x, y)}{\delta_{dd}} = \frac{\Delta\Phi(x, y)/\Phi}{\Delta\Phi_{dd}/\Phi} = \frac{\int_{\Omega} I'_0(\alpha) d\Omega}{\int_{\Omega_{dd}} I_{dd} d\Omega} = k_1 \cdot k_2 \cdot \int_{\alpha_j(x, y)}^{\alpha_0(x, y)} I'_0(\alpha) d\alpha, \alpha(x, y) \quad (18)$$

式中: Ω_{dd} 为弹丸遮挡住探测光幕中投影到镜头处方位立体角; I_{dd} 为弹丸遮挡住激光器照射到反射膜上返回到镜头处被镜头接收的光强度。令 $k_2 = 1/\int_{\Omega_{dd}} I_{dd} d\theta$ 。当其他参数确定时, Ω_{dd} 、 I_{dd} 是确定且唯一的, 故 k_2 为定值。

综上所述, 当飞行弹丸在空间中穿过探测光幕某一位 (x, y) 时, 探测光幕灵敏度空域分布 $\delta'(x, y)$ 为

$$\delta'(x, y) = k_1 \cdot k_2 \cdot \int_{\alpha_j(x, y)}^{\alpha_0(x, y)} I'_0(x, y) d\alpha = k_1 \cdot k_2 \cdot \int_{\alpha_j(x, y)}^{\alpha_0(x, y)} \left(\frac{I_0 \cdot \tau_{dq}(\alpha) \cdot \tau_r(\alpha) \cdot \tau_{dh}(\alpha)}{\tau_j(\alpha) \cdot \tau_l(\alpha)} \right) d\alpha, \alpha(x, y) \quad (19)$$

探测光幕内的灵敏度分布不均匀, 为简化探测光幕灵敏度描述, 在探测光幕内选择如图 5 所示的特征线段, 研究探测灵敏度在上述特征线段上的分布情况, 图中 O 为镜头式接收装置镜头中心, DE 为反射膜。圆形区域为主要射击区域。

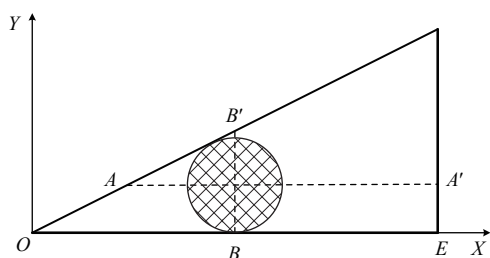
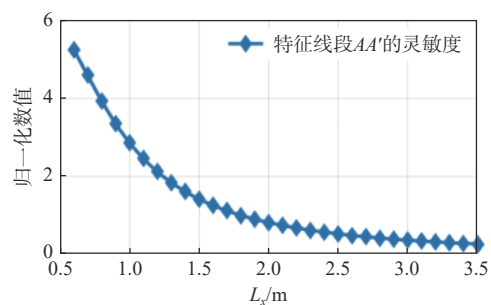


图 5 探测光幕特征选段选取示意图

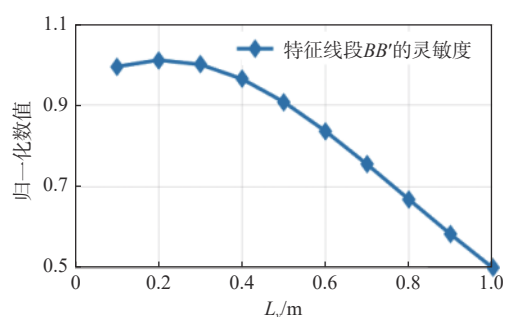
Fig. 5 Schematic diagram of selection of feature line segment for detection light screen

特征线段 AA' 上的灵敏度分布如图 6(a) 所示, 当飞行弹丸弹着点距离镜头水平距离越远, 探测光幕灵敏度会逐渐减小。特征线段 BB' 上的灵敏度分布如图 6(b) 所示, 因为镜头离轴效应, 当飞行弹丸弹着点距离镜头垂直高度越高, 探测光幕灵

敏度会先增大后减小, 变化曲线最大峰值处经过镜头主光轴。



(a) 特征线段 AA' 的灵敏度分布



(b) 特征线段 BB' 的灵敏度分布

图 6 特征线段上的灵敏度变化曲线

Fig. 6 Sensitivity change curve on feature line segments

三角形探测光幕区域的灵敏度分布如图 7 所示。仿真结果显示, 飞行弹丸穿过探测光幕时, 不同灵敏度等势线上, 距离镜头越远归一化数值越小。

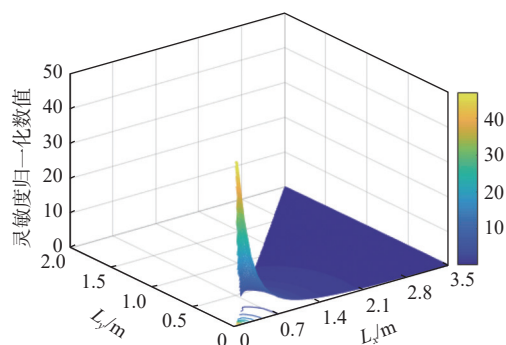


图 7 探测光幕灵敏度 δ' 空域分布

Fig. 7 Sensitivity δ' airspace distribution of detection light screen

图 8 为图 1 中探测光幕的主要射击区域灵敏度分布。弹丸穿过光幕位置距镜头越近, 灵敏度数值越大; 距镜头越远, 灵敏度数值越小, 且主要射击区域内灵敏度数值极差为 72.82%, 均值为 0.99, 标准差为 0.204 0。探测灵敏度与镜头式接收装置输出的模拟电压是正比例变化关系, 且模拟电压幅值差异不能大于 20%, 否则后续时延相

关算法无法准确算出弹丸穿过2个探测光幕的时间^[26]。

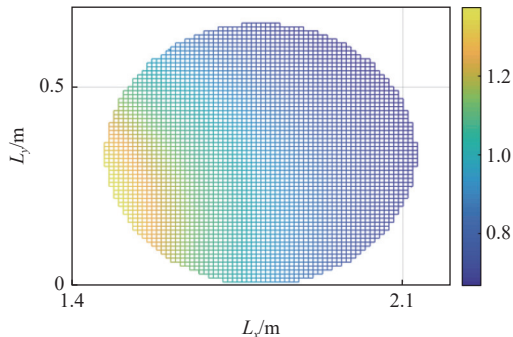


图8 主要射击区域灵敏度 δ' 分布

Fig. 8 Sensitivity δ' distribution in main firing area

3 实弹试验

在实验室中,组建3.5 m×2 m(宽×高)的直角三角形探测光幕。镜头式接收装置光学镜头的狭缝宽度 $b=0.3$ mm,镜头物距为 $l=3$ mm,镜头光圈16,采用7 mm钢珠进行实弹射击,且不影响测试结果的可信性。弹丸弹径 $d=7$ mm,弹丸长度 $L_d=7$ mm。试验过程中运用标线器与钢卷尺进行测试点位的标定,以确保射击时,能够准确找到目标点位。分别进行特征线段上及主要射击区域内灵敏度试验,2组试验分别进行,且在重合位置测量时,只进行一次试验;在不重合位置时,重新进行一组试验。

1) 特征线段上灵敏度实验

三角形探测区域中,过主要射击区域圆心,距镜头式接收装置1.75 m处的特征线段上进行不同高度上的探测灵敏度试验;距镜头式接收装置水平面高0.33 m处的特征线段上进行不同距离处的探测灵敏度试验。

记录不同特征线段上的灵敏度试验结果,如表1所示。

试验数据结果显示,在水平方向上,模拟电压幅值均随弹着点与镜头式接收装置镜头处的距离增大而减小;在垂直方向上,其模拟电压幅值变化趋势与水平方向上相同。

对实验结果做拟合处理,图9中“蓝色菱形”曲线为实验结果拟合曲线,其变化趋势与仿真结果基本一致。

图10中,因仿真结果的曲线并不平滑,故对其与试验结果均做拟合处理,结果显示2个拟合曲线的变化趋势基本一致。

表1 特征线段上模拟信号电压幅值数据结果

Table 1 Analog signal voltage amplitude data results on feature line segments V

竖直高度/m	水平距离/m				
	0.60	1.20	1.75	2.30	2.90
0.05	--	--	3.00	--	--
0.19	--	--	1.72	--	--
0.33	5.04	1.56	1.48	1.44	1.4
0.56	--	--	1.32	--	--
0.74	--	--	1.04	--	--

注:--为非特征线段上测试点。

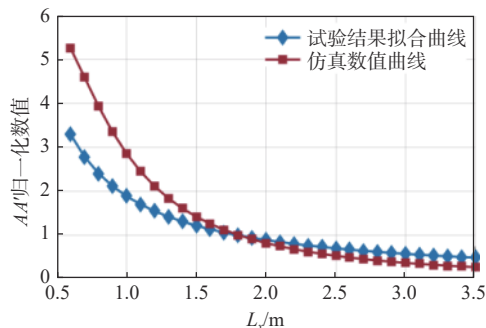


图9 AA'上归一化数值曲线

Fig. 9 Normalized numerical curve on AA'

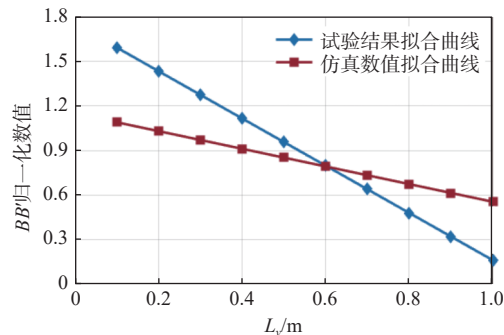


图10 BB'上归一化数值曲线

Fig. 10 Normalized numerical curve on BB'

2个特征线段上的结果趋势一致,但均出现不平行的情况,这是因为仿真数值与模拟信号数值幅值范围不一致造成的。

2) 主要射击区域内灵敏度实验

在三角形探测区域中心的主要射击区域,标定出圆心位置(1.75 m, 0.33 m),区域半径 r 为0.28 m。水平与竖直方向上以 $r/2$ 为单位,设置5个测试点,2个45°方向上均为水平与竖直方向上 $r/2$ 位置处测试点在45°方向上的投影,故主要射击区域内测试点位如图11所示。

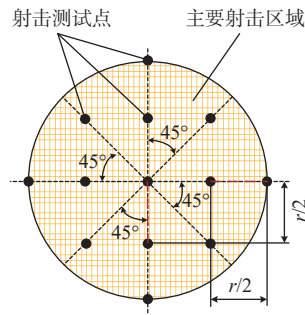


图 11 主要射击区域内射击测试点位示意图

Fig. 11 Schematic diagram of firing test point in main firing area

记录主要射击区域内的灵敏度试验结果,如表2所示。

表 2 主要射击区域模拟信号电压幅值数据
Table 2 Analog signal voltage amplitude data in main firing area

竖直高度/m	水平距离/m				
	1.47	1.61	1.75	1.89	2.03
0.01	--	--	3.00	--	--
0.19	--	2.16	1.72	1.64	--
0.33	1.56	1.48	1.48	1.44	1.4
0.56	--	1.36	1.32	0.84	--
0.74	--	--	1.04	--	--

注: --为主要射击区域外测试点。

数据结果显示,在主要射击区域对 13 个测试点进行射击实验,并将设计区域圆心作为归一化参考点,则模拟电压、极差与仿真结果相差较大为 145.95%,这是因为仿真数值与实弹射击的模拟信号幅值数值范围不一致导致的,并不影响射击区域内的整体性均匀度。均值为 1.06、标准差为 0.22 与仿真数值非常接近,故均匀性较好。对试验结果做可视化处理后,如图 12 所示,图形显示与

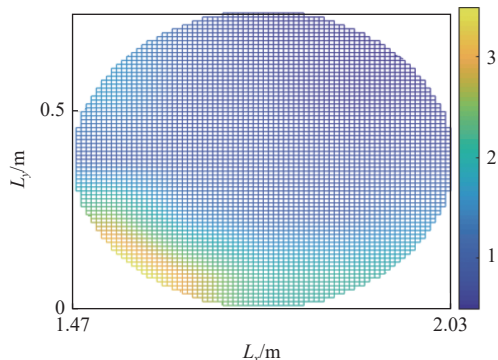


图 12 主要射击区域试验结果图

Fig. 12 Test results in main firing area

图 9 仿真结果相似,镜头式接收装置所输出的模拟电压信号在靠近镜头处幅值较大,远离镜头处幅值较小。

4 结论

针对镜头式接收装置配接激光光源与原向反射膜组成的直角三角形探测光幕,文中对 4 个影响因素进行了分析,并对探测光幕内的灵敏度进行了研究,得到整个探测区域内的灵敏度空间分布规律。结果表明:

1) 探测光幕区域内影响光强度的 4 个影响因素,影响最大的是镜头离轴效应 τ_l ,最小的是角度分布规律 τ_j ,在设计光幕或使用光幕时更加明确那些影响因子对结果影响大,有利于现场调试。

2) 探测光幕区域中的灵敏度等势线上,灵敏度分布随着镜头距离增加而减小,为在合适的区域进行射击确保后续模拟信号幅值不会出现饱和和过小的情况提供参考。

3) 在探测光幕内主要射击区域中灵敏度分布均匀性较好,符合射击区域的测试要求。

文中得到的研究方法为后续研究双镜头、三镜头拼接的大面积探测光幕的灵敏度分析提供了理论与试验基础,为其他探测光幕的设计与使用提供借鉴。

参考文献:

- [1] 田会,倪晋平,焦明星. 抛物线弹道弹丸飞行参数测量模型与精度分析[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(1): 67-74. TIAN Hui, NI Jinping, JIAO Mingxing. Projectile flying parameter measurement model of parabolic trajectory and precision analysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(1): 67-74.
- [2] TIAN H, NI J, JIAO M. Measurement model and algorithm for measuring flight parameter of parabolic trajectory by six-light-screen array[J]. Optik International Journal for Light and Electron Optics, 2015, 126(24): 5877-5880.
- [3] TIAN H, YUAN Y, NI J. Testability of six-intersection detection area measurement method based on photoelectric detection[J]. Optik International Journal for Light and Electron Optics, 2020, 216(4): 164963.
- [4] 蔡荣立,倪晋平,田会. 光幕靶技术研究进展[J]. 西安工业大学学报, 2013, 33(8): 603-610.

- CAI Rongli, NI Jinping, TIAN Hui. Progress of light screen technology research[J]. *Journal of Xi'an Technological University*, 2013, 33(8): 603-610.
- [5] LI H. Research on photoelectronics properties of array emitting diode and its light energy distribution in detection screen[J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, 125(3): 1096-1100.
- [6] CHU W, ZHANG B, LIU B, et al. An optoelectronic targeting system for measuring the distribution of projectile motion based on the subdivision of a light screen[J]. *Photonics*, 2019, 6(4): 126-126.
- [7] 田会, 倪晋平, 焦明星, 等. 镜头式光幕探测灵敏度分布规律研究[J]. *兵工学报*, 2016, 37(2): 325-331.
- TIAN Hui, NI Jinping, JIAO Mingxing, et al. Research on detection sensitivity distribution regularity of lens-light-screen[J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(2): 325-331.
- [8] TIAN H, YUAN Y, CHEN D. Improvement of the detection sensitivity uniformity of an indoor light screen array measurement system with large field of view angle using multi-lens splicing[J]. *Optik*, 2018, 181(C): 971-977.
- [9] WANG Shaomin, ZHAO Daomu, HUANG Fuquan. New type of retroreflective film formed by laser-generating glass beads[J]. *Optical Engineering*, 2002, 41(6): 1396-1399.
- [10] BURGESS G, SHORTIS M R, SCOTT P. Photographic assessment of retroreflective film properties[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011, 66(5): 743-750.
- [11] ZHAO Donge, ZHOU Hanchang, LIU Ji, et al. High-precision velocity measuring system for projectiles based on retroreflective laser screen[J]. *Optik*, 2013, 124(6): 544-548.
- [12] LIU J, ZHAO D, LI Y, et al. Optoelectronic system for measuring warhead fragments velocity[J]. *Journal of Physics Conference Series*, 2011, 276(1): 012136.
- [13] WOJTANOWSKI J, ZYGMUNT M, TRACZYK M, et al. Beam forming optic aberrations impact on maximum range of semiconductor laser based rangefinders[J]. *Opto-Electronics Review*, 2014, 22(3): 152-161.
- [14] LI G, LI L, SHEN H, et al. Quantitative evaluation of high repetition rate laser jamming effect on the pulsed laser rangefinder[J]. *Optik*, 2014, 125(10): 2450-2453.
- [15] MLYNCZAK J, KOPCZYNSKI K, MIERCZYK Z M, et al. Practical application of pulsed "eye-safe" microchip laser to laser rangefinders[J]. *Opto-Electronics Review*, 2013, 21(3): 332-337.
- [16] YURY A C, LUDMILA A R, FEDOROV M E. Enlargement of measuring zone in laser gauges without sacrificing measurement accuracy[J]. *Measurement*, 2018, 131: 647-653.
- [17] MA Zhibo, GOU Tongxin, ZHANG Tianyang, et al. Compact powell-lens-based low-coherence correlation interrogation system for fiber-optic fabry-perot sensors[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(4): 7102111.
- [18] 高丰佳, 董涛, 谭林秋, 等. 原向反射式大靶面光幕探测灵敏度分布特性[J]. *兵器装备工程学报*, 2021, 42(4): 238-243.
- GAO Fengjia, DONG Tao, TAN Linqiu, et al. Distribution characteristics of detection sensitivity of original reflection-based light screen with a large detection area[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2021, 42(4): 238-243.
- [19] LI L, BRYANT D, HEUGTEN V T, et al. Speed, optical power, and off-axis imaging improvement of refractive liquid crystal lenses[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(6): 1124-1131.
- [20] 李浩楠, 赵冬娥, 范小伊. 玻璃微珠原向反射屏发散特性研究[J]. *传感器与微系统*, 2019, 38(3): 14-16.
- LI Haonan, ZHAO Donge, FAN Xiaoyin. Study on divergence characteristics of glass microbeads from retroreflective screen[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2019, 38(3): 14-16.
- [21] 章晓眉, 赵冬娥, 丁江霞. 原向反射屏剩余发散角测试[J]. *应用光学*, 2011, 32(6): 1197-1201.
- ZHANG Xiaomei, ZHAO Donge, JING Jiangxia. Remained divergence angle test of scotchile retroreflector[J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(6): 1197-1201.
- [22] 魏建凯. 天幕靶灵敏度极限机理研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2012.
- WEI Jiankai. Study on sensitivity limit mechanism of sky screen [M]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2012.
- [23] 高芬, 开百胜, 倪晋平, 等. 室内大面积激光测速光幕光能均匀性研究[J]. *光学仪器*, 2012, 34(4): 6-10.
- GAO Fen, KAI Baisheng, NI Jinping, et al. Research on light energy uniformity of indoor large sensor area laser screen[J]. *Optical Instruments*, 2012, 34(4): 6-10.

- [24] 肖孟超, 姜耀亮, 檀慧明, 等. 激光标线器非球面柱透镜设计[J]. [红外与激光工程](#), 2007, 36(4): 518-520.
XIAO Mengchao, JIANG Yaoliang, TAN Huming, et al. Optical design of aspheric column lens of laser beam line generator[J]. [Infrared and Laser Engineering](#), 2007, 36(4): 518-520.
- [25] 倪晋平, 赵静远, 高芬, 等. 弧形光源镜头式光幕灵敏度分布研究[J]. [应用光学](#), 2013, 34(2): 295-299.
NI Jinping, ZHAO Jingyuan, GAO Fen, et al. Sensitivity analysis of arc light lens-style light screen[J]. [Journal of Applied Optics](#), 2013, 34(2): 295-299.
- [26] 董涛, 倪晋平, 马时亮. 基于天幕靶的弹丸飞行时间计算方法[J]. [探测与控制学报](#), 2007, 29(3): 29-33.
DONG Tao, NI Jinping, MA Shiliang. A method of computing the pill flying time based on sky screens[J]. [Journal of Detection & Control](#), 2007, 29(3): 29-33.