

文章编号: 1002-1582(2025)06-0698-06

终点弹道段大面积测速用天幕靶实现技术研究

廖上¹, 倪晋平^{1,2*}

(1. 西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710032)

(2. 陕西省光电测试与仪器技术重点实验室, 陕西 西安 710032)

摘 要: 针对终点弹道段弹丸散布区域大, 常规天幕靶存在有效测量靶面小、探测灵敏度不足等问题导致末速测量失效的情况, 提出采用不同焦距镜头的广角靶在两个位置点共面拼接大面积测速光幕的方法。分析单镜头天幕靶的镜头物距设定在不同弹道高度对探测灵敏度的影响, 推导相对灵敏度公式, 确定在随机弹道高度下天幕靶物距设置为无穷远, 则整体灵敏度随弹道高度变化趋势平缓, 并进行实弹验证。基于此, 研究以一定间距放置2台不同视场角的广角靶共面拼接大面积探测区域的方法, 并进行仿真分析。仿真结果表明, 针对30mm弹丸, 间隔22m放置视场角为66°和40°的广角靶, 可形成10m×10m的测速区域。研究可为天幕靶在终点弹道段使用提供一种工程方法。

关 键 词: 兵器试验; 外弹道测试; 天幕靶; 拼接光幕; 探测灵敏度

中图分类号: TJ012.3

文献标识码: A

Technical study on the realization of sky screen for large-area velocimetry in the terminal ballistic section

LIAO Shang¹, NI Jinping^{1,2*}

(1. School of Opto-electronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

(2. Shaanxi Province Key Laboratory of Photoelectric Measurement and Instrument, Xi'an 710021, China)

Abstract: In view of the large dispersion area of the projectile in the terminal ballistic section, and the failure of terminal velocity measurement due to issues such as small effective measurement area and insufficient detection sensitivity of conventional sky screen, a method is proposed to coplanarly splice a large-area velocimetry light screen by using wide-angle sky screen equipped with lenses of different focal lengths at two position. The influence of the lens object distance of a single-lens sky screen set to different ballistic heights on detection sensitivity is analyzed, the relative sensitivity formula is derived, and live-fire verification is carried out. It is found that when the object distance of the sky screen is set to infinity at a random ballistic height, the sensitivity of the overall area changes gently with the ballistic height. On this basis, a method of coplanarly splicing a large-area detection region by placing two wide-angle sky screens with different field angles at a certain interval is studied, and simulation analysis is done. Simulation results show that for a 30mm projectile, a velocity measurement area of 10m×10m can be formed by placing wide-angle sky screens with field angles of 66° and 40° at an interval of 22m. This study can provide an engineering approach for the use of sky-screen in the terminal ballistics segment.

Keywords: ordnance test; external ballistic test; sky screen; splicing light screen; detection sensitivity

收稿日期: 2025-05-16; 收到修改稿日期: 2025-08-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61471289)

作者简介: 廖上 (2001—), 女, 硕士研究生, 从事光电测试技术研究。1527549631@qq.com

倪晋平 (1965—), 男, 教授, 博士, 从事兵器试验与测试技术研究。

* 通讯作者: nijp6504@263.net

0 引言

常规天幕靶依据定距测时原理测量身管武器发射的弹丸初速,将多台天幕靶按照一定的距离和角度布放形成的六光幕天幕立靶也用于弹丸射击密集度测试^[1-4]。在初始弹道段,弹丸飞行姿态稳定,散布区域小,弹道高度变化范围不大,此时天幕靶镜头物距可根据预定弹道高度进行设定^[5],弹丸在光电探测器件上成像最清晰,得到的弹丸信号幅值相较于附近区域最大,因此试验前操作人员可依据弹道高度数值调节天幕靶物距。但在终点弹道段,弹丸飞行速度低,姿态稳定性差,导致弹丸在空间散布区域较大^[6-8],使用天幕靶测速时会存在以下问题:无法事先预知弹道准确高度进而设定镜头物距,天幕靶有效探测区域较小弹丸飞离视场导致无法有效探测。上述问题会引起天幕靶在终点弹道段无法可靠使用。

为构建大面积天幕靶探测光幕,有研究者在室内使用天幕靶配接人工光源^[9-11]来实现,并对其灵敏度分布进行了研究:倪晋平等^[12]研究了天幕靶配接弧形光源的扇形光幕灵敏度分布规律。袁云^[13]和段晨曦等^[14]对天幕靶配接L形光源的矩形光幕灵敏度进行了研究,前者通过改变矩形光幕不同位置LED的发光亮度对镜头边缘的灵敏度进行补偿,后者将弹丸遮挡引起光照度的变化投影到镜头处对矩形光幕的灵敏度空域分布进行了研究。上述天幕靶灵敏度模型均是在物距随弹道高度变化的前提下得到的。针对室外大面积探测光幕的构建,有学者提出多个镜头共面拼接形成广角天幕靶^[15],即通过使用多个相同焦距的镜头增大视场角来增加探测光幕面积。该方法构建的光幕幕形仍旧是以镜头主点为圆心的扇形,可有效增大距离镜头远处的探测光幕面积,但距镜头近处探测区域小,使用不便。在此基础上,若将两个不同镜头焦距的广角靶放置在具有一定间距的不同装置上以构建大面积探测光幕,既保证远处的探测区域较大,也保证近处有足够的探测区域。

本文首先分析几种典型物距下单镜头天幕靶探测灵敏度分布规律,然后选择适用于不同弹道高度的最优测量物距,按照“长焦镜头管远处,短焦镜头管近处”的原则,研究采用不同镜头焦距的广角靶拼接构建大面积探测区域的方法,并分析整体幕面内探测灵敏度分布规律,为天幕靶在终点弹道段测速的应用提供理论基础和工程实现经验,拓宽天幕靶的应用范围。

1 物距不变下单镜头天幕靶灵敏度分布

1.1 天幕靶工作原理

天幕靶主要由光学成像与光电转换模块、信号处理电路和机械支撑结构组成,其光学成像与光电转换模块包括光学透镜、狭缝光阑和光电探测器,其中狭缝光阑的尺寸限制了镜头汇聚后可到达光敏面的光,在空间形成一个具有一定厚度的扇形探测光幕^[1]。当弹丸穿过光幕时,弹丸遮挡部分光幕引起接收装置狭缝内的光通量发生变化,从而输出一个微弱的电信号,经信号处理电路放大、滤波输出模拟信号,当该模拟信号幅值大于阈值电压时,即可输出脉冲信号,该信号表征弹丸到达光幕所在位置的时刻信息;机械支撑结构可确保空间形成光幕的稳定性。天幕靶工作原理图见图1。

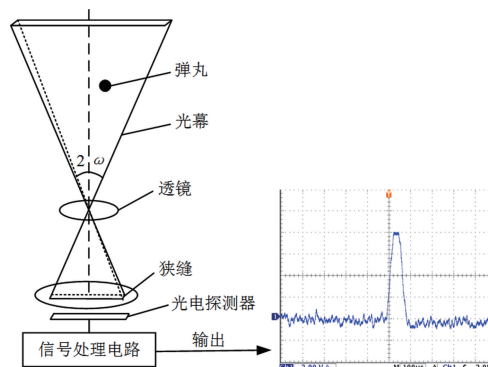


图1 天幕靶工作原理图

根据天幕靶工作原理,天幕靶输出幅值 V 与光电探测器接收到的光通量相对变化量 $\Delta\Phi$ 线性关系^[5]表示为

$$V(t) = \Delta\Phi(t)\epsilon\gamma R > U_t \quad (1)$$

式中, 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_t 为阈值电压。

1.2 物距不变下天幕靶灵敏度分布模型

当没有飞行弹丸穿过探测光幕时,探测光幕在接收装置狭缝内的总光通量 Φ 保持不变;有弹丸穿过光幕时,由于探测光幕幕面内不同弹道高度的横截面积不同,弹丸穿过光幕不同位置引起光电探测器接收到的光通量相对变化量 $\Delta\Phi$ 也会发生变化,则沿镜头主光轴方向某一弹道高度的探测光幕灵敏度 δ 为

$$\delta = \frac{\Delta\Phi}{\Phi} = \frac{E_0' \cdot S'}{E \cdot S} \quad (2)$$

式中, E_0' 为探测光幕在镜头主光轴方向某一弹道高度的光照度; S' 为弹丸穿过该位置时光幕被遮挡的截面积; E 为该弹道高度的平均光照度; S 为该弹道高度的光幕截面积。

根据式 (2), 天幕靶主光轴方向的任意两个不同弹道高度的相对灵敏度可用弹道高度处的弹丸截面积与光幕截面积之比来表示。天幕靶的狭缝光阑经镜头在空间形成具有一定厚度的探测光幕, 光幕形成原理图见图 2。

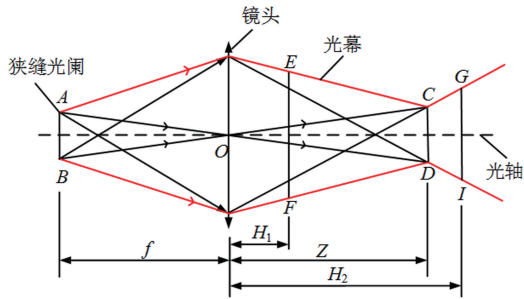


图 2 光幕形成原理图

设镜头焦距为 f , 通光口径为 D , 物距为 Z , 弹道高度为 H , 形成的探测光幕在不同高度处的幕厚公式^[16]为

$$B = \frac{|Z - H|}{Z} D + \frac{H}{f} b \tag{3}$$

式中, $D = f/F$, F 为光圈数; b 为狭缝宽度; B 为幕厚。

将式 (3) 代入相对探测灵敏度中, 可得主光轴方向的任意两个不同弹道高度的相对灵敏度

$$\delta_x = \begin{cases} \frac{d}{\left(\frac{|Z - H|}{Z} D + H \frac{a}{f}\right)}, l \geq B \\ \frac{ld}{\left(\frac{|Z - H|}{Z} D + H \frac{a}{f}\right) \left(\frac{|Z - H|}{Z} D + H \frac{b}{f}\right)}, l < B \end{cases} \tag{4}$$

式中, d 和 l 分别为弹径和弹长。

式 (4) 是弹丸从镜头主光轴上不同高度处穿过时的相对灵敏度对应关系。当弹着点与镜头主点连线同镜头主光轴夹角为 θ 时, 依据镜头边缘效应, 对应的相对灵敏度可表示为

$$\delta_{x-\theta} = \delta_x \cdot \cos^4 \theta \tag{5}$$

当夹角 θ 大于光幕视场角时, 则弹丸进入光幕盲区, 无法进行探测。

2 典型物距的灵敏度分布规律研究

2.1 模拟仿真

为寻找适合不同弹道高度的高灵敏度最优物距, 对几种典型物距的灵敏度分布比较分析。依据现有天幕靶的设计参数和常用弹丸尺寸, 设狭缝长度 $a = 30\text{mm}$, 狭缝宽度 $b = 0.4\text{mm}$, 镜头焦距

$f = 50\text{mm}$, 弹长 $l = 7\text{mm}$, 弹径 $d = 6.5\text{mm}$, 设定镜头物距为 1m 、 1.5m 、 ∞ 和物距等于弹道高度 4 种情况下的相对探测灵敏度与弹道高度的关系依据前述公式进行了仿真, 仿真结果如图 3 所示。

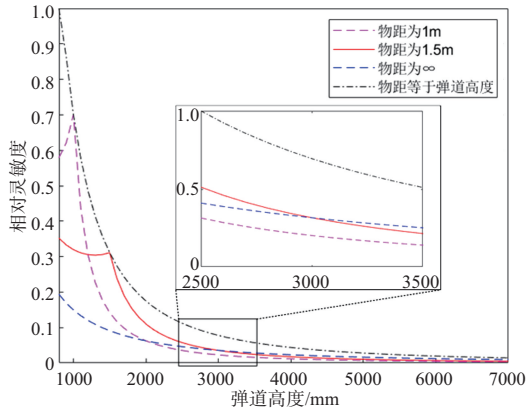


图 3 相对灵敏度与弹道高度的关系

由图 3 可以看出, 4 种情况下, 相对探测灵敏度整体都是随弹道高度的增加而降低的; 与物距固定不变相比, 物距等于弹道高度的灵敏度整体都是最高的; 在物距固定不变 3 种情况中, 物距无穷远灵敏度整体较低, 但整体灵敏度下降也最缓慢, 在弹道高度大于 3m 时其灵敏度比其他两种情况高。因此当弹丸散布区域较大, 且无法事先预知弹道高度时, 物距为 ∞ 时, 整体区域内相对探测灵敏度最优。

2.2 实弹试验验证

针对上述仿真结果, 使用 50mm 焦距镜头的 TM1101 型天幕靶对物距为 1m 、 ∞ 及物距等于弹道高度 3 种情况进行实弹试验验证, 采用天幕靶输出的信号幅值表示灵敏度大小。试验时, 使用照度计观察天空照度的变化, 尽量保证 3 种情况的同一弹道高度在同一照度下进行; 使用梯子的不同阶梯改变弹道高度。由于条件限制, 试验时最高的弹道高度为 2355mm 。物距为 1m 、物距为 ∞ 、物距等于弹道高度这三种情况的灵敏度测试结果见表 1, 三种情况的测试数据折线图如图 4 所示。

表 1 灵敏度测试结果

弹道高度/mm		635	985	1335	1685	2035	2355
幅值/V	物距 1m	7.72	4.28	1.8	1.14	0.9	0.7
	物距 ∞	4.52	2.6	1.64	1.1	0.9	0.7
	物距变化	8.44	4.28	1.96	1.4	1.06	0.78

比较图 3 和图 4, 测试结果和仿真结果变化趋势基本一致, 从而验证了物距不变下单镜头天幕靶灵敏度分布模型。后续拼接天幕靶探测光幕灵敏度分布将使用该模型公式, 故不再进行试验验证。

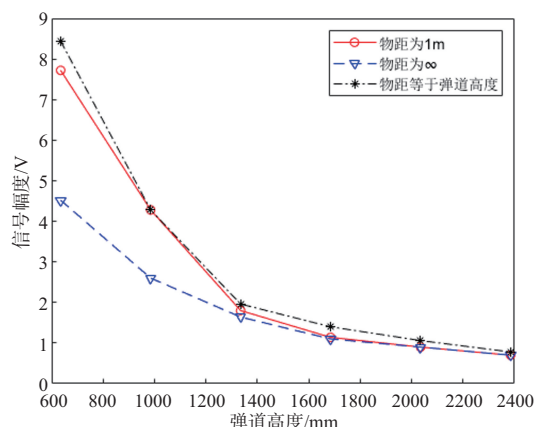


图4 三种固定物距下信号幅值与弹道高度的关系

比较上述三种情况, ∞ 物距近处和远处的灵敏度极差最小, 即离散程度最小, 故选择 ∞ 作为大面积探测用天幕靶物距。将 ∞ 代入相对灵敏度公式的物距 Z 中, 得到物距 ∞ 下的单镜头天幕靶探测光幕灵敏度分布公式

$$\delta_{\infty} = \begin{cases} \frac{d}{\left(D + H \frac{a}{f}\right)}, l \geq B \\ \frac{ld}{\left(D + H \frac{a}{f}\right)\left(D + H \frac{b}{f}\right)}, l < B \end{cases} \quad (6)$$

3 双点共面拼接大面积探测区域

镜头焦距 f 与视场角 2ω 、狭缝长度 a 有如下关系

$$\arctan \omega = \frac{a}{2f} \quad (7)$$

对确定的天幕靶放大电路与光电管, 根据式(6)得到物距 ∞ 下单镜头天幕靶的极限探测高度 $H_{\max}$, 表示为

$$H_{\max} = \frac{-f^2 \cdot (a+b)}{2abF} + \frac{f \cdot \sqrt{\frac{f^2 \cdot (a-b)^2}{F^2} + \frac{4abld}{\delta_{\min}}}}{2ab} \quad (8)$$

由式(7)和式(8)可知, 长焦镜头极限探测距离远但视场小, 短焦镜头视场大但极限探测距离近, 故综合两者优点, 与传统扇形天幕靶光幕相比, 采用不同镜头焦距的广角靶拼接的方法来构建非扇形天幕靶大面积探测光幕。

将针对常用的30mm弹丸以50mm和85mm焦距双镜头广角靶共面拼接10m $\times$ 10m探测区域为例, 分析大靶面探测光幕拼接方法, 给出2台广角靶所需倍弹径数、布放间距及倾斜角度, 并与单个双镜头广角天幕靶探测区域进行比较。

3.1 双点共面拼接探测光幕

在垂直弹道线的左右两侧不同位置, 间隔一定距离放置2台不同焦距的双镜头广角天幕靶, 共面拼接大面积探测区域的测速光幕, 幕面拼接示意图如图5所示。其中, 50mm焦距的双镜头广角靶负责目标圆域左下部分的探测, 85mm焦距的双镜头广角靶负责右上部分的探测。以 K 靶镜头的主点为原点, 建立直角坐标系。为方便计算, 将 K 靶镜头的倾斜角 θ_K (主光轴与 y 轴的夹角) 定为 45° 。图5中, 圆形区域为目标区域, M 和 N 为目标圆与靶 K 两条光幕直线边缘的两个切点, 靶 K 的弧线边缘过目标圆圆心 O , P 和 Q 为目标圆与靶 K 光幕弧线边缘的交点, T 为目标圆与靶 L 光幕直线边缘的切点, W 为目标圆与靶 L 光幕弧线边缘的切点。

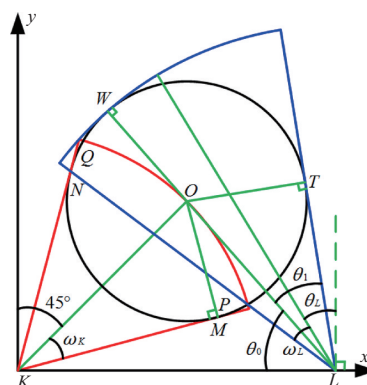


图5 双点共面拼接探测光幕示意图

若需得到10m $\times$ 10m的探测靶面, 则本方法的目标圆直径 D_0 需要达到14.2m。 K 、 L 两靶分别是50mm和85mm焦距的双镜头广角靶, 由式(7)可得到两个半视场角分别为 33° 和 20° 。根据图示几何关系得 OK 为13.1m, 目标圆圆心位置为(9.3m, 9.3m), 则 K 靶的极限探测距离需要大于13.1m, 对于30mm弹即437倍弹径。

联立目标圆与 K 光幕弧线的方程, 可得 P 点坐标为(12.7m, 3.1m)和 Q 点坐标为(3.1m, 12.7m)。设两靶 K 和 L 的间距为 m_0 , 由几何关系可知 m_0 需要满足

$$\theta_1 = \arcsin \frac{D_0}{2\sqrt{(m_0 - x_0)^2 + y_0^2}} \quad (9)$$

$$\theta_0 = \arctan \frac{y_0}{m_0 - x_0} \quad (10)$$

$$\theta_0 - \arctan \frac{y_P}{m_0 - x_P} + \theta_1 \leq 2\omega_L \quad (11)$$

$$\theta_0 - \arctan \frac{y_Q}{m_0 - x_Q} + \theta_1 \leq 2\omega_L \quad (12)$$

联立求解, 得 m_0 满足

$$m_0 \geq 24.6\text{m} \quad (13)$$

取 $m_0=25\text{m}$ 。由图 5 几何关系, L 靶的极限探测距离需要满足

$$LW = \sqrt{(m_0 - x_0)^2 + y_0^2} + 0.5D_0 \leq H_{L\max} \quad (14)$$

代入数值可解得

$$H_{L\max} \geq 25.35\text{m} \quad (15)$$

即 L 靶的极限探测距离需要大于 25.35m, 对于 30mm 弹即 845 倍弹径。

L 靶上镜头的倾斜角可表示为

$$\theta_L = \frac{\pi}{2} + \omega_L - \theta_1 - \theta_0 \quad (16)$$

代入数值可解得 θ_L 为 56.5° 。

分析式 (8), 针对 30mm 弹, 若以 K 靶探测灵敏度 437 倍弹径数为基础, 则 L 靶探测灵敏度为 689 倍弹径, 无法满足需求; 若以 L 靶探测灵敏度 845 倍弹径数为基础, 则 K 靶探测灵敏度为 529.7 倍弹径, 可满足需求。因此, K 靶探测灵敏度设定为 530 倍弹径, 则 L 靶设定为 846 倍弹径。

K 靶倍弹径数为 530, 即极限探测距离 OK 为 15.9m 则目标圆圆心位置为 (11.3m, 11.3m)。此时 P 点坐标为 (15m, 5.2m) 和 Q 点坐标为 (5.2m, 15m), 代入 (9) ~ (12) 式得 m_0 最小值约为 18.9m。 L 靶倍弹径数为 846, 即极限探测距离为 25.38m, 代入 (14) 式得 m_0 最大值为 25.67m。取 m_0 为 22m, 由式 (16) 计算得 L 靶上镜头的倾斜角为 36.3° 。根据几何关系得 OM 为 8.7m, 与目标圆半径差 1.7m, 该差值一半为 0.85m。上述参数不变, 将目标圆圆心位置分别向 x 负半轴方向及 y 负半轴方向移动 0.85m, 即此时目标圆圆心位置为 (10.45m, 10.45m), 可在近地面处形成较大探测区域, 满足终点弹道段测速需求。

使用的弹丸为 30mm 弹, 弹头长度为 100mm。双点共面拼接探测光幕是由 2 个广角靶的光幕拼接而成的, 故其整体的灵敏度是由 2 个光幕的灵敏度叠加而成。将构建光幕所需镜头参数代入式 (6), 并将各个光幕的灵敏度进行叠加, 得到所需光幕的灵敏度分布图, 如图 6 所示; 目标圆的归一化灵敏度分布图, 如图 7 所示。

由图 6 可以看出, 双点共面拼接探测光幕近似四边形, 较单镜头探测光幕距镜头近处面积增加, 更贴近现实应用需求; 由图 7 可知, 在目标圆域内, 两个光幕叠加部分、左下和右下部分灵敏度较高。在实际使用时, 为确保拼接光幕能对目标进行可靠探测, 根据式 (1), 可适当提高电路放大倍数以提高探测光幕灵敏度。

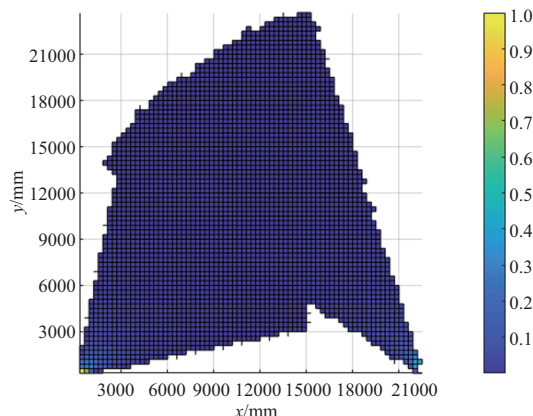


图 6 拼接探测光幕的归一化灵敏度分布图

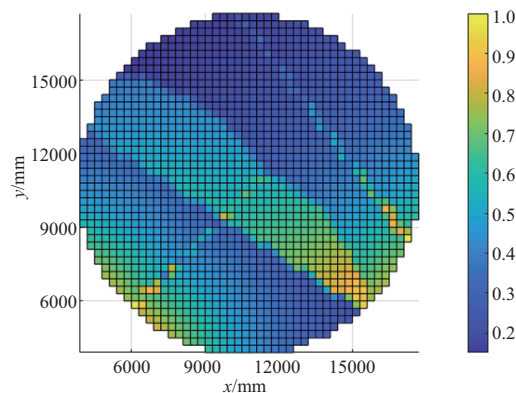


图 7 拼接目标圆的归一化灵敏度分布图

3.2 与广角天幕靶探测区域比较

双镜头广角天幕靶视场拼接示意图如图 8 所示, 采用 2 个相同焦距的镜头使探测光幕视场角变为单镜头天幕靶视场角的 2 倍, 其探测光幕仍旧是以镜头为圆心的扇形。本文是在使用广角天幕靶的基础上, 采用 2 台焦距不同的广角靶以一定间距倾斜摆放构建大面积探测光幕, 其探测光幕近似四边形, 更贴近实际使用。

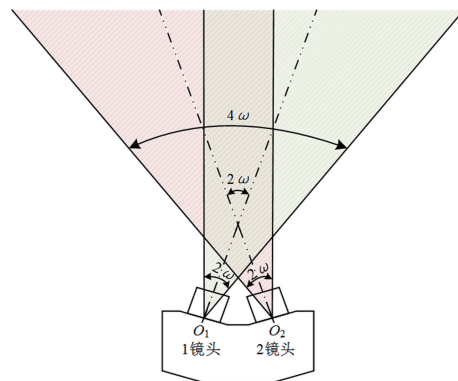


图 8 双镜头广角天幕靶视场拼接示意图

使用单个广角天幕靶构建目标圆直径 D_0 为 14.2m 的探测光幕, 若其镜头焦距为 50mm, 易得其目标圆圆心位置为 (0, 13.1m), 极限探测距离至少为 20.2m, 即 673 倍弹径。同理, 相较于本文方法, 使用 85mm 焦距镜头需要的极限探测距离也会

增加。

综上,相比单个双镜头广角天幕靶,构建同样大的靶面,本文双点共面拼接探测光幕的方法可使用倍弹径较小的广角靶构建大面积探测光幕。

4 结 论

本文分析了天幕靶在大面积探测区域下镜头物距设定值与相对探测灵敏度的关系,进行模拟仿真并试验验证,研究了 $10\text{m}\times 10\text{m}$ 大面积探测光幕的实现方法,形成的结论:

(1) 获得了天幕靶镜头物距设定值与天幕靶的相对探测灵敏度的数学关系,当物距设定为 ∞ 时,整个大面积探测区域内不同高度下弹丸过幕信号幅值极差不大,可用作天幕靶大面积探测用物距,并通过仿真分析和实弹试验进行了验证。

(2) 设计了不同镜头焦距的广角靶在两个位置点共面拼接大面积探测区域的实现方法,可在近地面处形成较大探测区域,满足终点弹道段测速需求。

(3) 论文研究的结果为天幕靶在终点弹道段测速的应用提供理论基础和工程实现经验。

参考文献:

- [1] 倪晋平,魏建凯.天幕靶技术研究进展[J].西安工业大学学报,2011,31(07):589—596.
Ni Jinping, Wei Jiankai. Advances in sky screen technology[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2011, 31(07):589—596.
- [2] Li Hanshan, Zhang Xiaoqian, Gao Junchai. Modeling and calculation method of target damage based on multi-attitude flying projectile in space intersection[J]. Optik, 2019, 180:648—656.
- [3] 于国栋,王春阳,冯江海,等.一体化光幕阵列测量误差分析与结构参数优化[J].光子学报,2023,52(06):291—301.
Yu Guodong, Wang Chunyang, Feng Jianghai, et al. Error analysis and parameters optimization of integrated light-screen array measurement[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(06):0612003.
- [4] 谭林秋,王佳,张杭,等.双N型六光幕阵列弹丸斜入射速度测量方法研究[J].弹箭与制导学报,2023,43(02):20—25.
Tan Linqiu, Wang Jia, Zhang Hang, et al. Research on the measurement method of oblique incidence velocity of projectile with double N-type six-screen array[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2023, 43(02):20—25.
- [5] 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 [D]. Xi'an:Xi'an Technological University, 2012.
- [6] Soles, Alexander M, Scott, et al. Event detection control system for operating a remote sensor or projectile system[P]. US 9081409. 2015.
- [7] 田会,倪晋平.九光幕阵列测量终点弹道弹丸飞行参数方法研究[J].仪器仪表学报,2018,39(05):17—23.
Tian Hui, Ni Jinping. Research on measuring method for terminal trajectory of the flying projectile parameters by nine-light-screens-array[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(05):17—23.
- [8] 杨子钰,陈丁,沈岭南.基于稀疏光电探测阵列的轻武器终点弹道关键参数测量[J].光子学报,2024,53(07):1—13.
Yang Ziyu, Chen Ding, Shen Lingnan. Measurement of key terminal ballistic parameters of small arms based on sparse distribution optoelectronic detection array[J]. Acta Photonica Sinica, 2024, 53(07):1—13.
- [9] 冯斌,杨敏,杨翠萍.天幕靶光源的设计[J].弹道学报,2005, (4):36—39.
Feng Bin, Yang Min, Yang Cuiping. Design of sky screen target light source[J]. Journal of Ballistics, 2005, 17(4):36—39.
- [10] 赵亮,王召巴,陈友兴.天幕靶人工光源的设计[J].山西电子技术,2011,18(4):12—13.
Zhao Liang, Wang Zhaoba, Chen Youxing. The design of artificial light sky screen[J]. Shanxi Electronic Technology, 2011, 18(4):12—13.
- [11] Li Hanshan, Zhang Xiaoqian, Zhang Xuewei, et al. Detection sensitivity correction calculation model and application of photoelectric detection target in four-screen intersection testing system[J]. Measurement, 2021, 177:109281.
- [12] 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.
- [13] 袁云.大靶面光幕探测灵敏度修正与光源状态监测技术研究[D].西安:西安工业大学,2018.
Yuan Yun. Research on sensitivity correction and light source condition monitoring of large target light curtain[D]. Xi'an:Xi'an Technological University, 2018.
- [14] 段晨曦,倪晋平,崔长青.L形光源大面积矩形探测光幕灵敏度空域分布分析[J].光学技术,2021,47(4):454—458.
Duan Chenxi, Ni Jinping, Cui Changqing. The analysis of sensitivity spatial distribution of large area rectangular detection light screen with L-shaped light source[J]. Optical Technique, 2021, 47(4):454—458.
- [15] 倪晋平,王铁岭,宋玉贵,等.XGK-04型广角天幕靶[J].光学技术,2006,32(5):787—789.
Ni Jinping, Wang Tieling, Song Yugui, et al. XGK-04 type wide-angle sky screen[J]. Optical Technique, 2006, 32(5):787—789.
- [16] 马静宜.光幕阵列光幕平面方程精确标定技术[D].西安:西安工业大学,2018.
Ma Jingyi. Study on the accurate calibration techniques of plane equation of sky screens array[D]. Xi'an:Xi'an Technological University, 2018.