文章编号:1001-5078(2025)04-0526-07

·激光应用技术 ·

# 激光天幕靶探测灵敏度分析与试验

毕 鑫<sup>1</sup>,李 敬<sup>1</sup>,党华昱<sup>1</sup>,罗 浩<sup>1</sup>,王雪琪<sup>1</sup>,田 会<sup>1,2</sup>
(1. 西安工业大学 光电工程学院,陕西 西安 710032;
2. 西安工业大学 陕西省光电测试与仪器技术重点实验室,陕西 西安 710021)

摘 要:针对常规测速天幕靶在自然光照低或夜间无法使用的不足,研究了可全天候使用的激 光天幕靶。激光天幕靶的探测灵敏度与弹丸过幕信号的电压幅值呈线性关系,该参数直接决 定了其性能及测速精度。根据激光天幕靶的工作机理及光度学理论,分析了影响探测灵敏度 的主要因素,推导了弹丸从探测光幕内不同位置处穿过时反射的光功率的计算公式,仿真分析 了探测光幕内不同位置的过幕信号幅值的变化规律。通过7 mm 钢珠实弹射击试验,采集的 幕面内不同位置的过幕信号幅值变化规律与理论分析结果基本一致。研究的灵敏度数学模型 为激光天幕靶在试验现场的使用与后续性能提升提供技术参考。

关键词:武器试验与测试;探测灵敏度;光电探测;激光天幕靶;弹丸速度测量

中图分类号:TJ02;TN249 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2025.04.007

## Analysis and testing of detection sensitivity for a laser sky screen

BI Xin<sup>1</sup>, LI Jing<sup>1</sup>, DANG Hua-yu<sup>1</sup>, LUO Hao<sup>1</sup>, WANG Xue-qi<sup>1</sup>, TIAN Hui<sup>1,2</sup>

(1. School of Opto-electronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China;

2. Shaanxi Province Key Laboratory of Photoelectric Measurement and Instrument Technology,

Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

**Abstract**: Aiming at the shortcomings of the conventional sky screen that cannot be used in low natural light or at night, a lase sky screen with all-weather operation is investigated in this paper. The detection sensitivity of the laser sky screen is directly proportional to the voltage amplitude of the projectile signal, which ultimately determines its performance and the accuracy of velocity measurements. Drawing upon the mechanism of the laser sky screen and photometric theory, the main factors affecting the detection sensitivity are analyzed, the calculation formula of the reflected luminous power when a projectile passes through different positions within the detection light screen, and the changing rules of the signal amplitude of different positions within the detected light screen are simulated and analyzed. Through the shooting test with 7 mm steel balls, the distribution of the signal amplitudes at different locations within the screen aligns well with the predicted results. This research establishes a mathematical model for sensitivity in the context of laser sky screen applications in testing fields, providing a technical reference for ongoing performance enhancements. **Keywords**: shooting range; detection sensitivity; photoelectric detection; laser sky screen; velocity measurement of projectile

基金项目:陕西省自然科学基础研究计划项目(No. 2023-JC-QN-0679)资助。

作者简介:毕 鑫(1999-),女,硕士研究生,主要研究方向为动态目标探测与处理。E-mail:bxin12@163.com

通讯作者:田 会(1980-),男,教授,主要研究方向主要研究方向为兵器试验与测试,动态目标光电探测与信号处理。 E-mail:tianhui@xatu.edu.cn

收稿日期:2024-07-24;修订日期:2024-09-18

#### 527

#### 1 引 言

在身管武器、弹药的研制生产中,飞行弹丸初速 试验是校验枪炮弹药等产品性能的必要环节<sup>[1-2]</sup>。 测速天幕靶具有测速精度高、抗干扰能力强、可靠性 好、非接触测量等特点,已广泛应用于各种靶场弹丸 初速试验[3]。传统天幕靶以自然光为探测光源,弹 丸穿过光幕时输出的过幕信号幅值与探测器件收到 的光能量大小密切相关,当自然光照不足或夜间,弹 丸过幕时引起的光通量的相对变化量极小,天幕靶 无法输出过幕脉冲信号,导致试验失效<sup>[4]</sup>。针对该 问题,研究者研制了激光天幕靶也称主动天幕靶,该 仪器以激光为主动照明光源,通过探测弹丸反射的 激光能量,有效输出过幕脉冲信号,弥补了自然光照 不足时无法探测的缺陷。天幕靶的有效探测区域和 测速精度主要由探测灵敏度决定,文献[5]研究了 可定量预测非接触式光电探测系统的灵敏度与最大 探测高度的模型: 文献 [6] 将天幕靶极限探测距离 与弹丸直径之比定义为探测灵敏度,分析了探测光 幕的探测性能,但未对探测光幕内的灵敏度分布规 律进行研究;文献[7]研究了弹丸飞行高度、弹丸尺 寸、光幕厚度的等因素对光幕探测灵敏度的影响。 上述文献均是针对常规天幕靶探测灵敏度进行分 析,目前针对激光天幕靶的探测灵敏度尚无研究报 道,其变化规律与常规天幕靶探测灵敏度相似但不 同,需要进行深入研究,拓宽天幕靶的应用领域。

本文研究激光天幕靶探测灵敏度分布规律,分 析弹丸穿过探测光幕时弹体反射并被光电探测器件 接收到的光功率的变化规律,推导出弹丸过幕信号 幅值的计算公式,获得了幕面内不同位置的灵敏度 分布规律。研究的方法有利于提高激光天幕靶的测 量精度,为激光天幕靶在兵器试验现场使用提供技 术支持。

#### 2 激光天幕靶工作机理分析

常规天幕靶利用光学镜头、狭缝光阑和光电探测 器件接收自然光,在空中形成扇形探测光幕。飞行弹 丸穿过探测光幕时,遮挡了部分进入光电探测器件的 光能量,引起光电探测器件输出的光电流发生变化, 通过交流信号放大电路进行放大后,输出弹丸过幕模 拟信号,当模拟信号幅值大于阈值触发电压时,可通 过阈值触发电路转换为脉冲信号,当弹丸离开光幕 后,信号恢复为常态。如图1(a)所示,其中1通道为 过幕模拟信号,可以看出噪声的峰峰值为1V,设置电路阈值为2V,当过幕模拟信号幅值大于2V时,阈值触发电路输出2通道对应的脉冲信号。该信号表征了弹丸到达光幕所在位置的时刻,沿弹道线间隔一定距离放置2台天幕靶,采用定距测时法,通过电子测时仪测量2台天幕靶输出的脉冲信号时间间隔,结合靶距实时计算出弹丸飞行速度<sup>[8]</sup>。当室外光能量较弱或夜间,弹丸穿过光幕时引起的到达光电探测器件的光通量相对变化量较弱,输出过幕模拟信号幅值极低,未达到触发阈值,无法输出脉冲信号,如图1(b)所示,导致天幕靶无法正常使用<sup>[9]</sup>。



图1 激光天幕靶输出信号波形图

Fig. 1 Waveform diagram of the output signal of the laser sky screen

激光天幕靶是在常规天幕靶的基础上,增加一 字线半导体红外激光器作为主动照明光源,形成激 光光幕,激光光幕与探测光幕相互重合。飞行弹丸 从探测光幕面穿过时,弹体表面反射部分激光能量 进入光学镜头,光电探测器件接收到的光能量瞬时 增加,输出的光电流发生变化<sup>[10-11]</sup>,经过信号处理 电路进行放大后输出弹丸过幕模拟信号,过幕模拟 信号幅值达到触发阈值时,触发电路输出脉冲信号, 图 2 为激光天幕靶工作原理示意图。



图2 激光天幕靶工作原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of working principle of laser sky screen

在实时响应电路中为了确保触发脉冲信号的可 靠性和有效性,要求弹丸过幕模拟信号的信噪比在 6 dB 以上,也即过幕模拟信号幅值大于处理电路静 态噪声的2倍<sup>[5,12-14]</sup>。由于不同位置镜头成像差异 和激光能量分布不均匀等因素的影响,弹丸从光幕 面内不同位置穿过时,输出的模拟信号幅值会有较 大差异,为了提高激光天幕靶测速试验的有效性和 可靠性,需研究弹丸从幕面内不同位置穿过时,输出 的过幕模拟信号幅值,该幅值与天幕靶的灵敏度呈 线性对应关系。通过分析影响激光天幕靶输出的过 幕模拟信号幅值的各种因素,建立对应的数学模型, 计算弹丸从幕面内不同位置穿过时输出的过幕模拟 信号幅值变化规律,研究激光天幕靶探测灵敏度分 布规律,为试验现场快速确定激光天幕靶的有效探 测区域提供技术支撑。

3 激光天幕靶探测灵敏度影响因素分析与探测 模型

3.1 探测灵敏度影响因素分析

激光天幕靶通常用于室外靶场弹速测试,所处环 境存在大雾天气、灰尘天气等情况,在工作过程中,激 光器发射线激光,先经过一段距离到达弹丸表面、再 由弹丸表面反射回光学镜头,在这个过程中,激光能 量经过了三个衰减,分别是:试验环境中大气衰减、弹 丸反射过程中的镜面反射衰减和漫反射衰减<sup>[15]</sup>。

对于激光天幕靶采用波长 940 nm 的激光,当弹 道高度为 5 m 时,激光在大气中的透过率约为 99.96%,即使激光从发射到反射回镜头,光程为两倍 的弹道高度,激光在大气能量的衰减仍小于0.1%<sup>[16]</sup>。 因此,在激光能量的大气衰减可以忽略不计。

影响激光天幕靶过幕模拟信号幅值的因素如图 3 所示,主要包括镜头通光孔径、弹丸直径、弹丸过 幕位置、激光器功率、信号处理电路的性能、光电探 测器件响应特性和感光面积。





依据后向散射式光幕探测原理<sup>[17]</sup>可知,弹丸过 幕信号幅值 *U* 计算公式为:

$$U = \varepsilon \cdot R \cdot G \cdot P_L \tag{1}$$

式中, $\varepsilon$ 为光电探测器件响应度;R为放大电路部分的反馈电阻;G为放大电路的放大倍数;PL为光电探测器件接收到的弹丸激光功率,其中 $\varepsilon$ ,R,G为信号处理电路的固定参数,因此只需要分析反射到光学探测器件接收到的后向散射激光功率 $P_L$ 即可。

3.2 探测灵敏度模型

激光天幕靶在光机结构设计时,使激光光源发 光点与光学镜头主点位于同一高度,且两者水平方 向的距离很短。试验时,激光器和镜头中心存在一 定的距离,且激光光源的发光视场角和探测光幕视 场角不一致,二者幕面重合的区域是有效探测区域。

由于弹丸长度大于激光光幕厚度,所以可将光 幕面看为平面,如图4所示,假设弹丸任意入射点为 *E*,弹丸入射点*E*到激光发光点*P*的距离为*R*<sub>1</sub>,与激 光发光光轴的夹角为α,弹丸入射点*E*到镜头主点 的距离为*R*<sub>2</sub>,与镜头光轴的夹角为β。





假设激光发射功率为 $P_0$ ,激光照射到弹丸上功率为 $P_1$ 可由公式表示:

$$P_1 = \tau \cdot \frac{d}{\theta R_1} \cdot P_0 \tag{2}$$

式中, $\tau$ 为光学系统透过率; $\theta$ 为激光光源发散角;d为弹丸直径。

弹丸的最外层材质一般采用铜,其表面对激光 光幕的反射介于镜面反射和漫反射之间,弹丸表面 反射近似满足作朗伯反射定律,反射的激光能量与 cos β成正比<sup>[18]</sup>,则弹丸穿过激光光幕时,经过反射 衰减后反射至镜头的功率 P<sub>2</sub> 为:

$$P_{2} = \frac{\cos\beta}{\pi}\rho P_{1} = \frac{\cos\beta}{\pi}\rho\tau \frac{d}{\theta R_{1}}P_{0} = \frac{\cos\beta}{\pi\theta R_{1}}\rho d\tau P_{0}$$
(3)

式中, ρ 为弹丸表面漫反射率; β 为镜头垂直方向与 表面入射方向的夹角。

根据光电探测原理,光电探测器件接收能量 E 为:

$$E = \frac{\phi \cdot I \cdot A \cdot C}{4\pi r^2} \tag{4}$$

式中, $\phi$ 为光通量;I为光通量密度;A为光电探测器 件的有效感光面积;C为镜头通光面积;r为光源到 接收点的距离,光电探测器件接收到能量功率 $P_3$ 为:

 $P_3 = \lambda \cdot e_1 \cdot e_2 \cdot P_2$  (5) 式中, λ 为透镜接收能量率,  $e_1$  为镜头光谱透过率,  $e_2$  为滤光片光谱透过率,由式(4),(5)可推导出:

$$\lambda = \frac{D^2 A}{4R_2^2} \tag{6}$$

$$P_{3} = \frac{DA}{4R_{2}^{2}} \times e_{1} \times e_{2} \times \frac{\cos\beta}{\pi\theta R_{1}} \tau d\rho P_{0}$$
$$= \frac{D^{2}A\cos\beta}{4\pi\theta R_{2}^{2}R_{1}} e_{1}e_{2}\tau d\rho P_{0}$$
(7)

当忽略光能量在光学元件上传递的微量损耗, 弹丸过幕时到达光电探测器件上的后向散射光功率 *P<sub>L</sub>*即光电探测器件接收到激光功率 *P*<sub>3</sub>,弹丸过幕 信号幅值 *U* 为:

$$U = \varepsilon \cdot R \cdot G \cdot P_{L}$$
  
=  $\varepsilon \cdot R \cdot G \frac{D^{2}A\cos\beta}{4\pi\theta R_{2}^{2}R_{1}} e_{1}e_{2}\tau d\rho P_{0}$  (8)

将光幕面看作平面,以镜头主点O为原点,以光 幕视场方向为x轴,竖直方向为y轴,建立平面坐标 系,如图5所示,更加直观的表示探测幕面的不同位 置。设激光光幕左右边缘在 xOy 平面的边界线为  $l_{PL}$ 、 $l_{PR}$ ,镜头视场左右边界线为 $l_{OL}$ 、 $l_{OR}$ 。



#### 图 5 激光天幕靶探测区域直角坐标系

Fig. 5 Rectangular coordinate system of laser sky detection area

在探测区域直角坐标系下,弹丸入射点为 E(x<sub>E</sub>,y<sub>E</sub>)时,弹丸过幕信号幅值U为:

$$U = \frac{\varepsilon R G D^2 A e_1 e_2 \tau d\rho P_0}{4\pi\theta} \cdot$$

$$\frac{y_E}{(x_E^2 + y_E^2)^{\frac{3}{2}} \left[ (x_P - x_E)^2 + y_E^2 \right]^{\frac{1}{2}}}$$
(9)

### 4 仿真与试验验证

4.1 仿真分析

依据现有激光天幕靶的技术状态,设计仿真 参数:探测视场角度为 30°,镜头通光孔径 30 mm, 透光率 0.95,滤光片透过率为 0.75;一字线激光 器的空间立体角度为 30°,激光发光功率 2 W,激 光器与镜头主点的间距为 0.1 m;光电探测器件响 应度为 0.6 W/A,有效面积 A 为 0.015 m<sup>2</sup>,信号处 理电路偏置电阻 51 kΩ;弹丸直径为 7 mm,表面反 射率  $\rho$  为 0.6。在上述仿真条件下,在图 4 所示坐 标系下,取水平射击范围  $x \in [-1 m, 1 m]$ ,弹道高 度  $y \in [1.5 m, 5 m]$ ,对弹丸过幕信号幅值式(9) 进行仿真,计算有效探测视场内不同位置的过幕 信号幅值分布规律,对探测光幕内的信号幅值进 行归一化计算,可更直观地展示变化规律,如图 6 所示。

在探测光幕区域内,随弹道高度增加,弹丸过幕 信号幅值迅速减小,当弹道高度大于3m时,信号幅 值衰减速度变平缓。同一弹道高度下,信号幅值的 最大值在激光器和镜头主点之间。

为了进一步描述弹丸穿过探测光幕内不同位置的 信号幅值变化规律,在探测光幕内选取4条特征线段 MN、A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>、A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>,其中线段 MN 与 *y* 轴平行, M 点坐标为(0.05,1.5),N 点坐标为(0.05,5);线段 A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>、A<sub>3</sub>B<sub>3</sub> 在探测光幕左右边缘内,与 *x* 轴平 行,弹道高度分别为2 m、3 m 和4 m,如图7 所示。



图 6 弹丸过幕信号幅值分布图







仿真条件不变,对4条特征线段依次进行仿真, 结果如图8和图9所示。



图 8 同一水平位置个同弾道局度上弾丸信号幅值囲线图 Fig. 8 Amplitude curve of projectile signal at the same horizontal position and different ballistic heights



line segments with different ballistic heights

在图 8 中,水平射击距离一定时,弹丸信号幅值 随弹道高度增加而减小,x = 0.05 m 时,弹丸过幕信 号在弹道高度 y = 1.5 处,信号幅值最大。

在图 9 中,在一定 x 取值范围内,在激光光幕和 探测视场交点附近,弹丸信号幅值取最大值,在该位 置两侧,信号幅值逐渐减小。弹道高度越低,信号幅 值随 x 变化越明显,反之,信号幅值衰减速度降低。 4.2 试验验证

为了验证研究的探测灵敏度模型,采用实验室 现有 TMZ-1103 型激光天幕靶进行实弹射击试验, 试验现场如图 10 所示。采用 7 mm 气枪在不同弹 道高度下以及弹道高度为 2 m 时不同水平射击位置 下进行多次试验,试验数据如表 1 所示。



图 10 试验现场图 Fig. 10 Experimental site diagram

经试验,弹道高度为2m时,不同水平射击位置 处,弹丸信号幅值相近,即同一弹道高度下激光天幕 靶的探测灵敏度是基本一致的,不同弹道高度下多 次试验后信号幅值的散点分布图及拟合曲线如图 11 所示。

### 表1 不同高度下试验数据

Tab. 1 Experimental data at different heights

弹道高度/m	平均信号幅值/V
1.5	12. 43
1.75	10. 85
2	8. 52
2. 25	6. 85
2. 5	5. 43
3	3.46
4	1. 72
4.5	0. 95





Fig. 11 Scatter distribution diagram of signal amplitude in live fire test

在1.5~2m区域信号幅值比理论计算值小,是 因为信号处理电路中运放芯片的供电电压为 ±12V,电路输出信号在11V左右达到饱和状态。 图中表明,同一水平射击位置,弹丸信号幅值随弹道 高度增加而减小,且实测数据的变化趋势与仿真结 果基本一致,验证了文中论文研究的激光天幕靶探 测灵敏度模型的有效性和可行性。

5 结 论

本文依据激光天幕靶工作原理和光度学理论, 推导了弹丸穿过探测光幕时弹体自身反射并进入光 电探测器接收的光功率和弹丸过幕信号幅值计算公 式,仿真计算了激光天幕靶探测灵敏度分布规律,得 到的结论有:

 1)依据激光天幕靶工作机理,分析影响探测灵 敏度的各个因素,建立激光天幕靶探测灵敏度数学 模型,依据弹丸穿过探测光幕时输出的弹丸过幕信 号幅值,表征光幕探测灵敏度;

2)分析弹丸从不同位置穿过时,弹体自身反射 并被光电探测器件接收到的光功率,依据光幕探测 机理,推导出激光天幕靶弹丸过幕信号幅值数学表 达式;

3) 对测量公式进行仿真分析,当激光功率和弹丸直径一定时,过幕信号幅值随射击高度增加而减小,同一射击高度下,激光器和镜头之间信号幅值最高,两侧逐渐降低;

4)在幕面内不同位置进行实弹射击,采集过幕 信号幅值与仿真分析一致,验证了研究的测量模型 的有效性,研究结果为后续改善激光天幕靶的探测 性能提供依据。

#### 参考文献:

- [1] Tan Zhengguang, Yao Xintao, Li Hairong. Analysis of influencing factors on speed accuracy of muzzle speed metering device[J]. Journal of Artillery Launch and Control, 2020,41(4):59-62. (in Chinese)
  谭争光,姚新涛,李海蓉. 炮口测速装置测速精度影响
  因素分析[J]. 火炮发射\与控制学报,2020,41(4): 59-62.
- [2] Wang Changming. Practical ballistics [M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 1994. (in Chinese)
  王昌明. 实用弹道学 [M]. 北京: 兵器工业出版 社,1994.
- [3] Li Hanshan, Zhang Xiaoqian, Zhang Xuewei, et al. A line laser detection screen design and projectile echopower calculation in detection screen area[J]. Defence Technology, 2022, 18(8):1405-1415.
- [4] Tian Hui, Ni Jinping, Jiao Mingxing, et al. Research on detection sensitivity distribution regularity of lens-lightscreen[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(2):325 - 331. (in Chinese)

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.

- [5] Fan Wang, Hui Tian, Gao You, et al. Limit detection sensitivity sensitivity analysis and maximum detection height prediction of photoelectric detection target[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2023, 164:2-3. (in Chinese) 王凡,田会,高优,等. 光电探测目标极限探测灵敏度 分析及最大探测高度预测[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2023, 164:2-3.
- [6] Li Hanshan, Wang Zemin, Gao Junchai, et al. Analysis

and calculation object detection capture rate in multi-skyscreens across measurement system[J]. Optik, 2013, 124 (20):4369-4373. (in Chinese)

李翰山,王泽民,高俊柴,等.分析与计算测量系统多 天幕靶目标检测捕获率[J].光学,2013,124(20): 4369-4373.

- [7] Lu Liping, Zhang Xiaoqian, Guan Hui, et al. Optical performance analysis and sensitivity modeling method for sky screens[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021,42(8):164 169. (in Chinese)
  卢莉萍,张晓倩,管辉,等. 天幕靶光学探测性能分析
  与灵敏度建模型方法[J]. 兵器装备工程学报,2021, 42(8):164 169.
- [8] Ni Jinping, Tian Hui. Research on Moment Information extraction method for light curtain testing [J]. Optical Technique, 2008, (1):141-144,148. (in Chinese) 倪晋平,田会. 用于光幕测试的时刻信息提取方法研 究[J]. 光学技术,2008, (1):141-144,148.
- [9] 倪晋平, 董涛, 田会, 等. 全天候测速天幕靶: CN201010245624.1[P].2011-08-03.
- [10] Xü Lijun, Zhang Xihe, Cai Hongxing, et al. Research on spetal responsivityof detector under irradiation by infrared laser[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(11):1166 - 1169. (in Chinese)

徐立君,张喜和,蔡红星,等. 红外激光辐照下光电探 测器光谱响应度的研究[J]. 激光与红外,2009,39 (11):1166-1169.

- [11] Lei Ting, He Wei. Study on muzzle flame infrared trigger with high sensitivity and small field angle[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(6):683 688. (in Chinese)
  雷挺, 贺伟. 高灵敏度、小视场角炮口焰红外触发器的研究[J]. 激光与红外, 2015, 45(6):683 688.
- [12] Yuan Yun, Tian Hui. Analysis and correction of sensitivity for large target detection area[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(6):617004. (in Chinese) 袁云,田会. 大靶面探测光幕灵敏度分析与修正[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(6):617004.

- [13] Wei Jiankai, Ni Jinping. Sky screen sensitivity inversion algorithm[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2012, 26(1):18-23. (in Chinese)
  魏建凯,倪晋平. 天幕靶灵敏度反演算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(1):18-23.
- [14] Gao Feng, Yang Cunliang, He Weiwei, et al. Design and implementation of photoelectric receive circuit for high sensitivity, large dynamic range [J]. Laser & Infrared, 2020,50(1):101-106. (in Chinese)
  高峰,杨存亮,贺伟炜,等. 高灵敏度、大动态范围光电 接收电路设计与实现[J]. 激光与红外,2020,50(1): 101-106.
- [15] Guo Qinpeng, Zhao Shanghon, Shi Le, et al. Study on propagation characteristics of laser beam through the near space[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(12):1188-1191. (in Chinese)
  郭钦朋,赵尚弘,石磊,等. 激光在临近空间中的传输 特性研究[J]. 激光与红外, 2008, 38(12): 1188-1191.
- [16] Li Jinzhen. Optical manual [M]. Xi'an; Shaanxi Science and Technology Press, 2010. (in Chinese)
  李景镇. 光学手册 [M]. 西安:陕西科学技术出版 社, 2010.
- [17] Yang Jiuqi, Dong Tao, Chen Ding, et al. Method for measuring fragment velocity in static explosion test based on active light screen array[J]. Laser & Infrared, 2020, 49 (1):0113003. (in Chinese)
  杨久琪,董涛,陈丁,等. 基于主动光幕阵列静爆试验 破片速度测量方法[J]. 红外与激光工程, 2020, 49 (1):0113003.
- [18] Wang Shicheng, Zhang Jinsheng, Gao Zhijie, et al. Accurate laser attenuation model in the simulation laboratory environment for laser-guided weapons[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(2):238-241. (in Chinese) 王仕成,张金生,高智杰,等.激光制导武器仿真实验 室环境中的精确激光衰减模型[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(2):238-241.