

引用格式: 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(6):0612003

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(6):0612003

一体化光幕阵列测量误差分析与结构参数优化

于国栋¹,王春阳¹,冯江海¹,张月¹,刘晓辰¹,李忠琦¹,程志远²

(1 中国人民解放军 63869 部队,白城 137001)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所 光电跟踪与测量研究室,西安 710119)

摘要:针对一体化六光幕阵列测量模型,提取模型中光幕结构参数,在 MATLAB 中建立模型进行仿真,逐一分析各结构参数影响下的对弹丸飞行速度和坐标测量误差的影响规律,给出结构参数优化方法。基于优化的结构参数典型值得到了 1 m×1 m 矩形靶面范围内弹丸飞行速度和坐标的测量误差分布。实弹试验表明弹丸飞行参数测量与仿真分析具有一致性,横坐标测量误差不超过 3.1 mm,纵坐标测量误差不超过 4.8 mm,速度测量误差小于 1.1 m/s。该结果可为光幕阵列测量设备的工程设计提供理论依据,也可为提高身管武器弹丸飞行参数测量精度提供参考。

关键词:光幕阵列;测试精度;仿真分析;参数优化

中图分类号: TJ012.3+6

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20235206.0612003

0 引言

随着身管武器的发展,速射武器得到越来越广泛的应用,为了对该类武器性能进行评价,需实现高射频的连发测量,测量设备一般采取非接触式测量原理实现^[1-2]。常见的测量原理主要包括:声学原理^[3]、图像原理^[4]及光幕阵列原理^[5]等。声学原理基于激波传感器构成测量阵列,它仅能测量超音速弹丸且相近的连发弹丸容易相互干扰^[6];图像原理多采用 CCD 交会的方式构成探测幕面,对穿过的弹丸进行拍摄后解算弹丸坐标^[7],如需测量弹丸飞行速度则需要两个及以上的探测幕面,且成本较高;光幕阵列原理多采用光敏传感器接收人工光源或天空背景光形成探测幕面^[8],多个探测幕面按照指定形式排列成光幕阵列,通过光幕阵列结构参数和弹丸到达各光幕的时间解算弹丸飞行速度,该原理由于响应时间短、测速范围广及成本低廉等优点,已在靶场测试领域得到广泛应用。

为了提高光幕阵列测量的精度,国内外学者根据光幕阵列测量原理,主要将影响精度的因素分为光幕阵列测量模型、弹丸过幕时刻测量精度以及光幕空间结构失真三类。不同形式的光幕阵列测量参数不同^[9-10],以六光幕阵列测量模型为例主要包括双 N 形、双 V 形以及双平行形阵列等,不同测量模型对各类弹丸飞行参数的测量精度均有所差异,这是由于不同模型下各飞行参数的解算原理决定的^[11-12];弹丸过幕时刻测量精度在当前电子技术发展的水平下,主要受到过幕时刻提取算法的影响,如光幕空间形状产生变形情况下各光幕时刻提取一致性的补偿^[13];光幕空间结构失真包含光幕空间结构被准确获取和光幕空间结构在测量现场的复现,前者一般在光幕阵列测量设备设计和生产后,在实验室进行精确标定获取^[14],而后者则考虑靶场比较恶劣条件对光幕测量设备中光幕结构形变的影响^[15]。目前越来越多的研究将分体式光幕阵列测量模型转换为一体化测量模型^[16],这样既可减少测量模型中的参数,也便于现场使用。针对一体化光幕阵列测量模型中各结构参数对弹丸飞行参数测量误差影响的分析,不但有利于身管武器性能测试中的精度评估,也可为一体化光幕阵列的工程设计和结构优化提供技术依据。

基金项目:国家自然科学基金(No. 61875257)

第一作者:于国栋, 425707961@126.com

通讯作者:王春阳, daya9527@126.com

收稿日期:2022-10-25;录用日期:2023-02-07

<http://www.photon.ac.cn>

1 一体化光幕阵列测量模型及参数

光幕阵列法测量的基本原理是在外弹道上截取数米左右的区间(区截弹道),并在区截弹道内按照规定形式布置若干个光幕构成光幕阵列,通过压缩弹丸穿过各光幕的信号提取弹丸到达各光幕面的时间,再结合已知的光幕空间结构参数(简称结构参数),解算弹丸的飞行参数。

以传统的双N型六光幕阵列天幕立靶为例,分为前靶和后靶,即通过固定在靶体上的镜头、光阑及传感器等,由两个分立的靶体分别形成两个单N形光幕阵列。这样以来前靶和后靶之间的距离可以根据测量需求随意设置,但是每次测量前都需要经过布靶,即需要将前靶和后靶摆放在指定位置后对它们进行对调平、对正校准,并测量靶距、高低差等作为测量模型中的参数。因此,分体式光幕阵列天幕立靶的缺点在于它不但增加了布靶工作量,还给测量模型中引入了更多的可变参数,若这些参数在测量现场难以精确获取,则可能带来较大的测量误差。

将前靶和后靶固定在一个底座上并预先完成对准及高低差矫正等工作,这样在现场测量时仅需将其布放后调平,不仅便于使用且对测量模型中的部分参数实现了固化,保障了设备的稳定性和精度。一体化光幕阵列测量模型如图1。

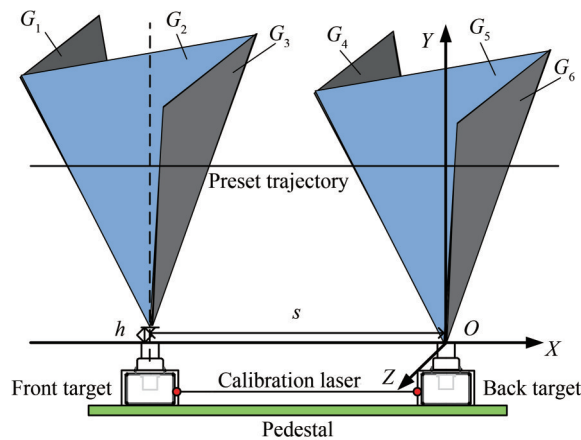


图1 一体化六光幕阵列测量模型
Fig.1 The integrated six light screen array measurement model

一体化光幕阵列测量模型中,前靶和后靶经调校后固定在底座上与底座相对关系保持不变,经调校使得两者仅沿弹道方向分开一定距离且相互平行,分开的距离记为靶距 s 。在靶体上方空间形成呈双N形排列的六个光幕,依次记做 G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_4 、 G_5 、 G_6 ,光幕之间的角度固定称为光幕夹角。取水平弹道方向为X轴方向,竖直向上为Y轴方向建立直角坐标系,光幕面在坐标系内的投影如图2。

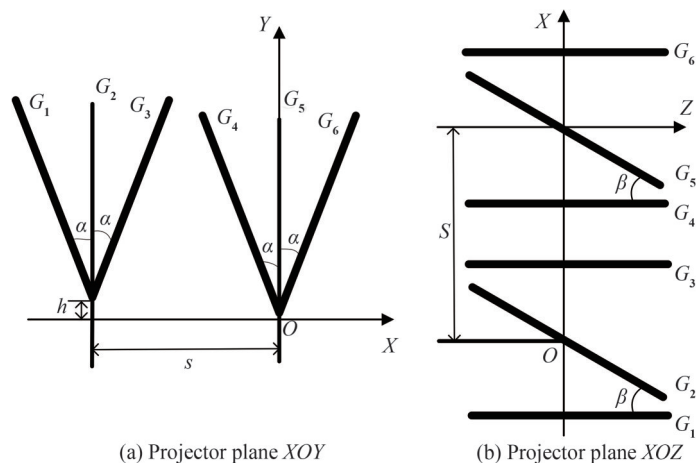


图2 双N形六光幕投影
Fig.2 The double N-shaped six light screen projection

图2(a)为光幕面在 XOY 面内的投影,其中 α 为光幕面竖直角,图2(b)为光幕面在 XOZ 面内的投影,其中 β 为光幕面水平角,统称为光幕角度参数。

飞行的弹丸依次穿过六个光幕得到一组过幕信号,对过幕信号进行压缩后可提取得到一组时刻序列 $t_1 \sim t_6$,表示弹丸到达各光幕的时刻。利用时刻序列与6个待测参数 $[x, y, z, v_x, v_y, v_z]$ (分别表示沿三个轴向的速度和在光幕内的空间坐标)建立时空对应关系,匀速弹道模型下弹丸时空关系可表示为

$$\begin{cases} x_i = x_1 + v_x \cdot (t_i - t_1) \\ y_i = y_1 + v_y \cdot (t_i - t_1) \\ z_i = z_1 + v_z \cdot (t_i - t_1) \end{cases} \quad (1)$$

式中, t_i 表示弹丸到达光幕 i 的时刻。将其带入光幕结构参数表示的各光幕空间位置,测得的弹丸飞行参数为

$$X = M^{-1} \cdot N \quad (2)$$

式中,

$$X = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}, M = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \cdot t_1 & \sin \alpha \cdot t_1 & 0 \\ \cos \beta & 0 & \sin \beta & \cos \beta \cdot t_2 & 0 & \sin \beta \cdot t_2 \\ \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \cdot t_3 & -\sin \alpha \cdot t_3 & 0 \\ \cos \alpha & \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \cdot t_4 & \sin \alpha \cdot t_4 & 0 \\ \cos \beta & 0 & \sin \beta & \cos \beta \cdot t_5 & 0 & \sin \beta \cdot t_5 \\ \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \cdot t_6 & -\sin \alpha \cdot t_6 & 0 \end{bmatrix}, N = \begin{bmatrix} -s \cdot \cos \alpha + h \cdot \sin \alpha \\ -s \cdot \cos \beta \\ -s \cdot \cos \alpha - h \cdot \sin \alpha \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

一体化测量模型公式中,调校可使得高度差 h 为零,测量模型更为简化。

2 待优化参数及误差传播公式

光幕阵列用于弹丸飞行参数测量,获取的测量结果 $[x, y, z, v_x, v_y, v_z]$ 中主要被测参数包括:弹丸空间横坐标 z 和纵坐标 y ,以及弹丸沿三个轴向的飞行速度矢量和 v ,对应式(2)中 $[v_x, v_y, v_z]$ 速度沿坐标轴方向分量的矢量和。这些参数的测量结果可简化为

$$\begin{cases} z = f_z(\alpha, \beta, s, h, t_i) \\ y = f_y(\alpha, \beta, s, h, t_i) \\ v = f_v(\alpha, \beta, s, h, t_i) \end{cases} \quad i = 1, 2, 3, \dots, 6 \quad (3)$$

式中, $t_i (i=1, 2, 3, \dots, 6)$ 表示弹丸到达六个光幕的时间序列。

经分析可知,测量模型中的过程参数主要包括:光幕空间角度参数 α 和 β 、靶距 s 、高度差 h 以及过幕时间序列 t_i 。由于这些参数均参与了弹丸飞行参数的解算,因此它们直接影响测量结果的精度,理论上对它们的取值进行优化对一体化光幕设计具有重要作用。其中过幕时间序列 t_i 的获取由光幕阵列中的光电传感器特性及过幕信号提取算法决定,与一体化测量模型设计参数无关,因此主要讨论光幕空间角度参数 α 和 β 、靶距 s 、高度差 h 。

根据测量模型和误差理论,在光幕测量模型下其他测量参数不变的条件下,仅考虑光幕角度参数 α 和 β 引起的测量偏差,推导误差传播公式,结果分别为

$$\begin{cases} \delta z = \frac{\partial f_z(\alpha, \beta, s, h, t_i)}{\partial \alpha} \cdot \delta \alpha \\ \delta y = \frac{\partial f_y(\alpha, \beta, s, h, t_i)}{\partial \alpha} \cdot \delta \alpha \\ \delta v = \frac{\partial f_v(\alpha, \beta, s, h, t_i)}{\partial \alpha} \cdot \delta \alpha \end{cases} \quad i = 1, 2, 3, \dots, 6 \quad (4)$$

$$\begin{cases} \delta z = \frac{\partial f_z(\alpha, \beta, s, h, t_i)}{\partial \beta} \cdot \delta \beta \\ \delta y = \frac{\partial f_y(\alpha, \beta, s, h, t_i)}{\partial \beta} \cdot \delta \beta \\ \delta v = \frac{\partial f_v(\alpha, \beta, s, h, t_i)}{\partial \beta} \cdot \delta \beta \end{cases} \quad i = 1, 2, 3, \dots, 6 \quad (5)$$

同理,根据测量模型和误差理论,在光幕测量模型下其他测量参数不变的条件下,仅考虑靶距 s 和高度差 h 引起的测量偏差,推导误差传播公式,结果分别为

$$\begin{cases} \delta z = \frac{\partial f_z(\alpha, \beta, s, h, t_i)}{\partial s} \cdot \delta s \\ \delta y = \frac{\partial f_y(\alpha, \beta, s, h, t_i)}{\partial s} \cdot \delta s \\ \delta v = \frac{\partial f_v(\alpha, \beta, s, h, t_i)}{\partial s} \cdot \delta s \end{cases} \quad i = 1, 2, 3, \dots, 6 \quad (6)$$

$$\begin{cases} \delta z = \frac{\partial f_z(\alpha, \beta, s, h, t_i)}{\partial h} \cdot \delta h \\ \delta y = \frac{\partial f_y(\alpha, \beta, s, h, t_i)}{\partial h} \cdot \delta h \\ \delta v = \frac{\partial f_v(\alpha, \beta, s, h, t_i)}{\partial h} \cdot \delta h \end{cases} \quad i = 1, 2, 3, \dots, 6 \quad (7)$$

基于上述误差传播公式理论基础,分别针对不同设计参数影响下的一体化光幕阵列测量模型误差进行分析,获取不同设计参数对光幕阵列测量误差的影响规律。

3 仿真分析

根据理论分析结果在MATLAB中进行仿真分析,一方面建立一体化光幕阵列测量模型,模型中的待优化参数取值覆盖设计中可能取值的变化区间。另一方面,除了待优化参数外对一体化光幕阵列测量模型测量误差的影响因素还包括弹丸穿过光幕的时刻序列的获取精度以及弹丸自身的飞行参数特性。其中弹丸过幕时刻序列的获取精度由光幕阵列中的光电传感器特性及过幕信号提取算法决定,弹丸自身飞行参数特性则包括弹丸的着靶位置、飞行速度等相关参数。

为了使仿真分析结果更贴近当前一体化光幕阵列测量的真实结果,参考光幕阵列测试技术水平的发展现状,对仿真中的各项必需参数设计如下:一体化双N型光幕阵列测量模型中,一般认为第一个光幕 G_1 为起始光幕面,即认为时刻 $t_1=0$,其余时刻相对于 t_1 获取,取所有幕面时间获取误差均为 $\delta t=0.5 \mu\text{s}$;结构参数角度可采用双经纬仪空间标定技术标定光幕夹角^[14],取光幕角度设计典型值 $\alpha=\beta=25^\circ$,实际光幕角度加工误差 $\delta\alpha=\delta\beta=0.01^\circ$;靶距典型值 $s=2 \text{ m}$,实际靶距加工误差 $\delta s=2 \text{ mm}$;前后靶高度差设计典型值 $h=0 \text{ mm}$,实际高度差加工误差 $\delta h=2 \text{ mm}$ 。取图1所示坐标 YOZ 平面内对称分布的 $1000 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ 矩形为靶面。弹丸飞行参数特性中,弹丸的预设弹道线位于靶体上方 1 m 位置穿过靶面中心,取弹丸速度与预设弹道线方向一致,弹丸速度 $v=720 \text{ m/s}$ 。

3.1 光幕角度参数优化

考虑光幕面竖直角度 α ,使其在可能的设计范围 $10^\circ \leq \alpha \leq 80^\circ$ 内连续变化,其余仿真条件不变,分别得到一体化光幕阵列测量模型下弹丸横坐标、纵坐标及速度矢量和的测量误差仿真结果,如图3。

由图3可知,在光幕面竖直角度 α 的取值从 10° 逐渐增大至 80° 的过程中:弹丸横坐标测量误差恒为 0.95 mm ,该值由竖直角度 α 以外的其他因素引起, α 的取值对弹丸横坐标测量误差不产生影响;弹丸纵坐标测量误差呈递减趋势,由初始最大值 1.45 mm 逐渐减小至 0.05 mm , α 的取值的增大有助于减小靶面中心纵坐标测量误差,且在 α 由 10° 增加至 20° 的过程中误差减小趋势显著,在 α 由 20° 增加至 80° 的过程中误差减小趋势逐渐减弱;弹丸速度测量误差恒为 377.09 mm/s ,该值由竖直角度 α 以外的其他因素引起, α 的取值对弹丸速度测量误差不产生影响。

考虑光幕面水平角度 β ,使其在可能的设计范围 $10^\circ \leq \beta \leq 80^\circ$ 内连续变化,其余仿真条件不变,分别得到一体化光幕阵列测量模型下弹丸横坐标、纵坐标及速度矢量和的测量误差仿真结果,如图4。

由图4可知,在光幕面水平角度 β 的取值从 10° 逐渐增大至 80° 的过程中:弹丸横坐标测量误差呈递减趋势,由初始最大值 2.50 mm 逐渐减小至 0.08 mm , β 的取值的增大有助于减小靶面中心横坐标测量误差,且在 β 由 10° 增加至 20° 的过程中误差减小趋势显著,在 β 由 20° 增加至 80° 的过程中误差减小趋势逐渐减弱;弹丸

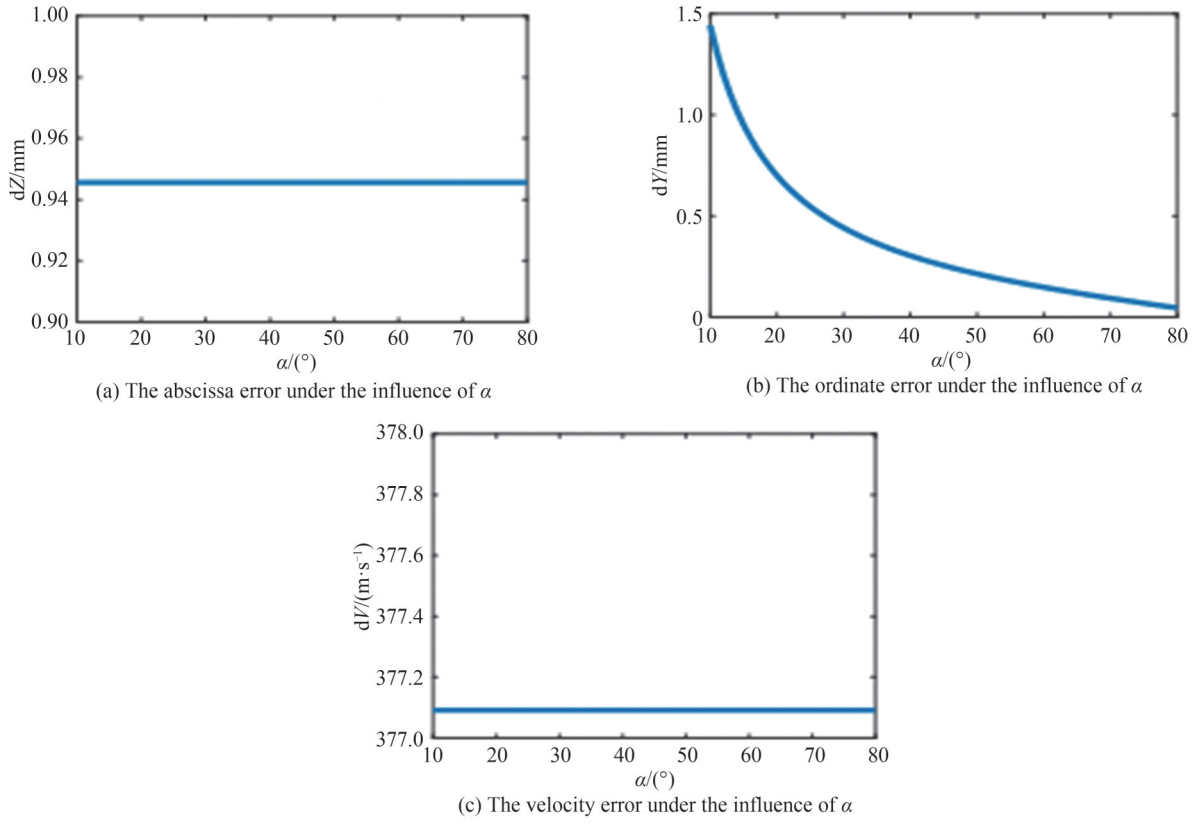


图3 光幕面垂直角度 α 影响下的测量误差
Fig. 3 Measurement error under the influence of horizontal angle α

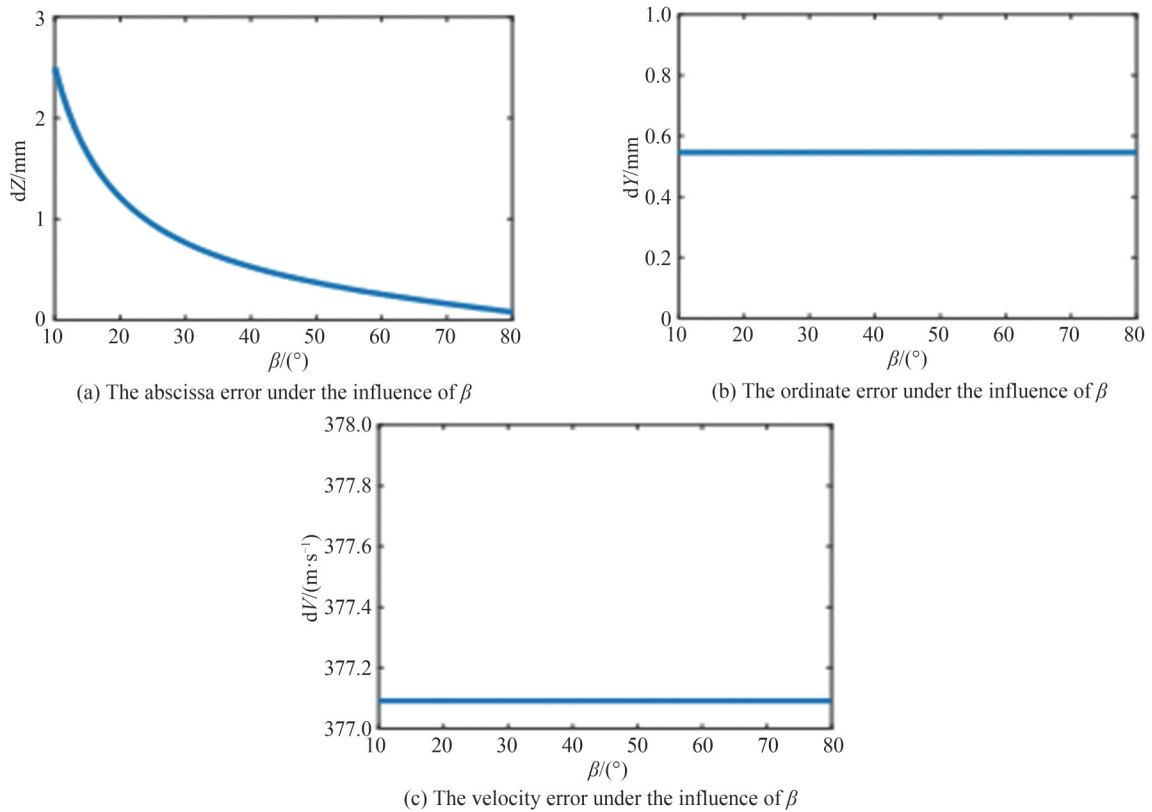


图4 光幕面水平角度 β 影响下的测量误差
Fig. 4 Measurement error under the influence of vertical angle β

纵坐标测量误差恒为 0.55 mm, 该值由水平角度 β 以外的其他因素引起, β 的取值对弹丸纵坐标测量误差不产生影响; 弹丸速度测量误差恒为 377.09 mm/s, 该值由水平角度 β 以外的其他因素引起, β 的取值对弹丸速度测量误差不产生影响。

对仿真结果进行分析, 无论是光幕垂直角度还是光幕水平角度, 均符合取值越大越有利于降低测量误差, 但仍需关注的是光幕面角度取值过大将直接减小光幕在空间覆盖的范围, 即缩小有效探测区域, 因此一体化光幕设计中应对测量误差和探测范围等因素综合考虑。根据图 3 和图 4 的仿真分析结果, 光幕角度从 10° 增至 20° 过程中测量误差减小趋势非常明显, 在 20° 增至 30° 过程中减小趋势逐渐减弱, 在 30° 之后减小的误差绝对量则较为有限, 因此光幕垂直角度 α 和水平角度 β 在设计中取值范围选取 $20^\circ \sim 30^\circ$ 较为合适。

3.2 靶距参数优化

考虑前靶和后靶沿预设弹道方向的布放距离 s , 其取值直接影响一体化光幕阵列的测量精度和外形长度, 在其与仿真条件不变的情况下, 取靶距 s 由 100 mm 逐渐增大至 3 000 mm 进行仿真, 得到一体化光幕阵列测量模型下弹丸横坐标、纵坐标及速度矢量和的测量误差仿真结果, 如图 5。

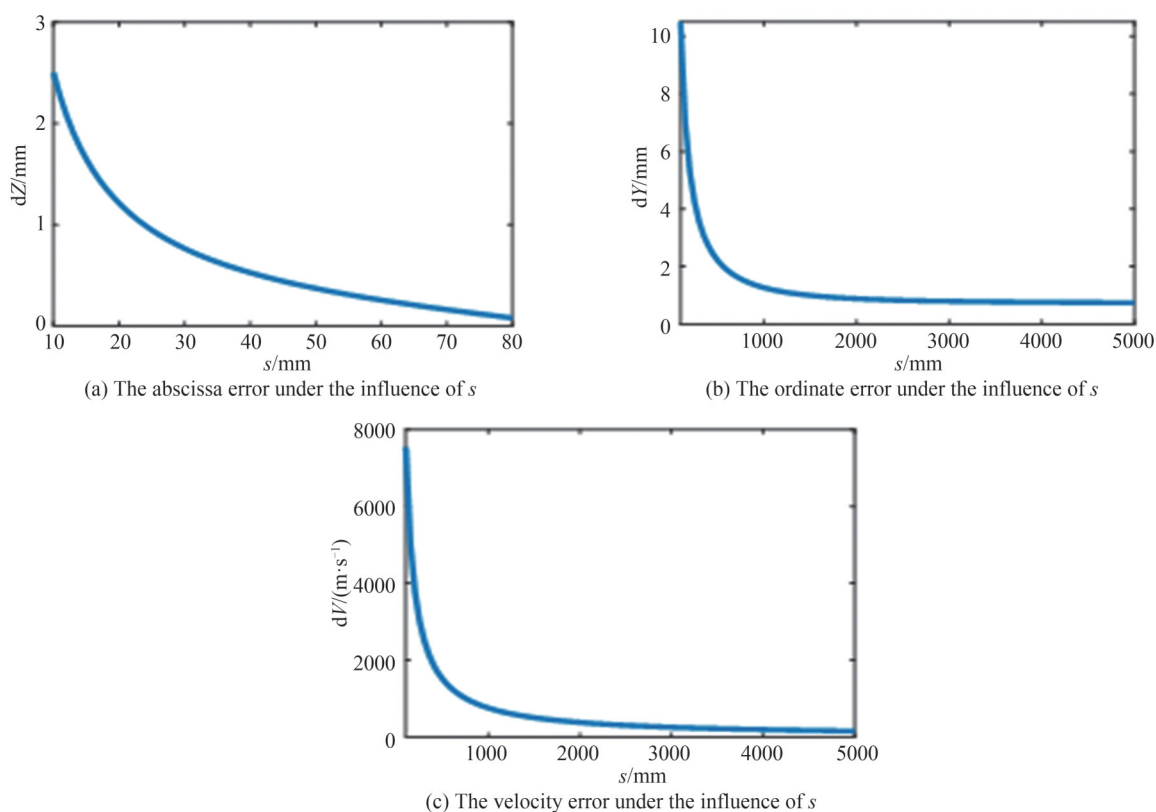


图 5 靶距 s 影响下的测量误差

Fig.5 Measurement error under the influence of target distance s

由图 5 可知, 在靶距 s 从 100 mm 逐渐增大至 5 000 mm 的过程中: 弹丸横坐标测量误差呈递减趋势, 由初始最大值 3.26 mm 逐渐减小至 0.95 mm, s 的取值的增大有助于减小靶面中心横坐标测量误差, 且在 s 由 100 mm 增加至 1 500 mm 的过程中误差减小趋势显著, 在 s 由 1 500 mm 增加至 5 000 mm 的过程中误差减小趋势逐渐减弱; 弹丸纵坐标测量误差呈递减趋势, 由初始最大值 10.50 mm 逐渐减小至 0.74 mm, s 的取值的增大有助于减小靶面中心纵坐标测量误差, 且在 s 由 100 mm 增加至 1 500 mm 的过程中误差减小趋势显著, 在 s 由 1 500 mm 增加至 5 000 mm 的过程中误差减小趋势逐渐减弱; 弹丸速度测量误差呈递减趋势, 在 s 由 100 mm 增加至 1 000 mm 的过程中误差减小趋势极为显著, 当 s 增至 1 000 mm 时速度测量误差已由初始误差极大值 7 541.81 mm/s 减小至 754.18 mm/s; 在 s 由 1 000 mm 增至 3 000 mm 的过程中, 速度测量误差由 754.18 mm/s 减小至 251.39 mm/s; 曲线末段 s 由 3 000 mm 增至 5 000 mm 的过程中速度测量误差仅从 251.39 mm/s 减小至 150.84 mm/s, 即靶距 s 的增大对速度减小速度测量误差的作用逐渐减弱。

对仿真结果进行分析,靶距 s 的增大对弹丸横、纵坐标及速度的测量误差影响规律基本一致,增大靶距 s 有利于减小弹丸飞行参数测量误差,但过大的靶距会使光幕阵列外形过长,不利于现场使用和布放,也需使用较长的线缆对前靶和后靶进行连接,因此一体化光幕设计中应对上述因素综合考虑。根据图 5 所示仿真结果选择靶距 s 为 1 500 mm 至 2 500 mm 较为合适。若因某些场合特殊需求需提高弹丸飞行参数测量精度,仍可考虑继续增大靶距 s 以减小弹丸横、纵坐标尤其是飞行速度的测量误差。

3.3 高度差参数优化

考虑前靶与后靶沿水平高度布放差距 h ,当前靶高于后靶时 h 为正值,当前靶低于后靶时 h 为负值。选取其在合理的设计范围 $-200 \text{ mm} \leq h \leq 200 \text{ mm}$ 内连续变化,其余仿真条件不变,分别得到一体化光幕阵列测量模型下弹丸横坐标、纵坐标及速度矢量和仿真结果,如图 6。

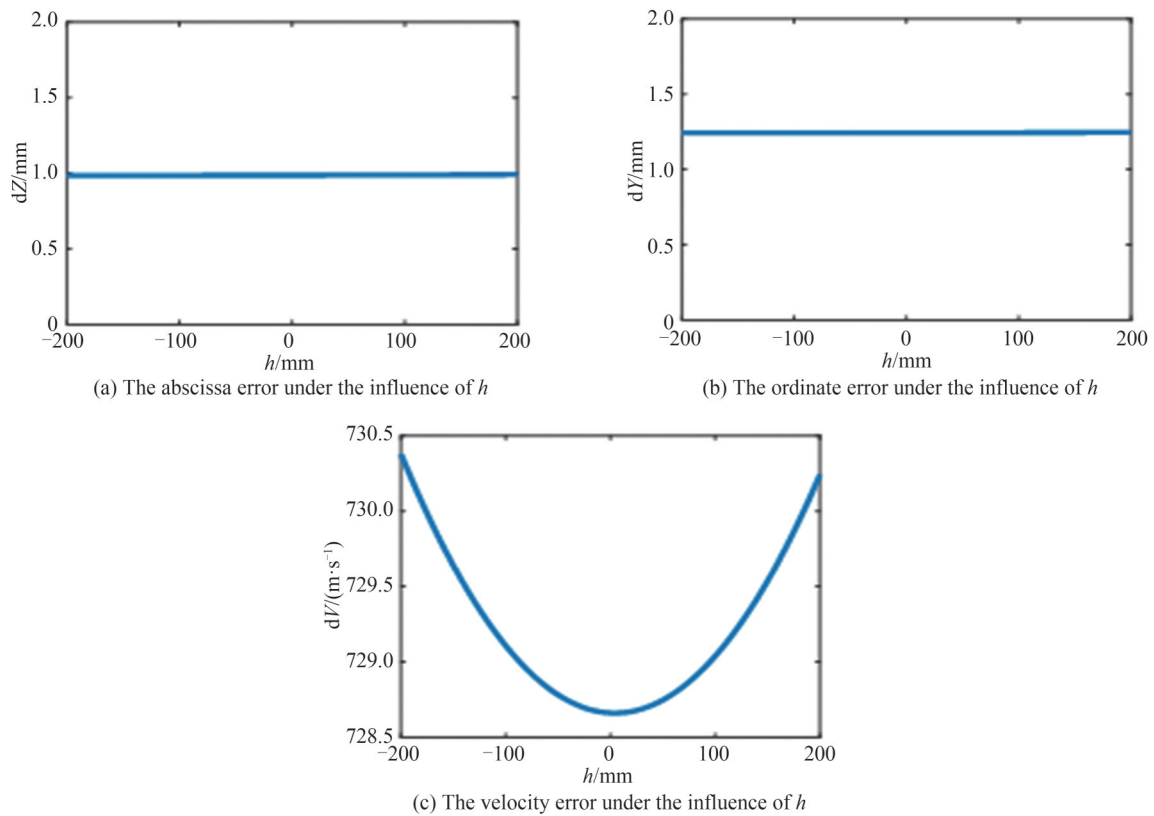


图 6 高度差 h 影响下的测量误差

Fig.6 Measurement error under the influence of height difference h

由图 6 可知,在高度差 h 的取值从 -200 mm 逐渐增至 200 mm 的过程中:弹丸横坐标测量误差恒为 1.00 mm ,该值由高度差 h 以外的其他因素引起, h 的取值对弹丸横坐标测量误差不产生影响;弹丸纵坐标测量误差恒为 1.24 mm ,该值由高度差 h 以外的其他因素引起, h 的取值对弹丸纵坐标测量误差不产生影响;弹丸速度测量误差呈先减少后增大趋势,且在 $h=0 \text{ mm}$ 附近达到最小值 728.66 mm/s 。

对仿真结果进行分析,一体化光幕阵列设计中取前靶与后靶高度差 $h=0 \text{ mm}$ 有助于减小弹丸飞行速度测量误差。

3.4 靶面测量误差分布

根据一体化光幕阵列各项参数的仿真分析结果,优化设计的测量模型参数选取:光幕竖直角度 α 和水平角度 β 均为 25° ,前靶与后靶靶距 s 为 $2 000 \text{ mm}$,高度差 $h=0 \text{ mm}$,并考虑所有幕面时间获取误差均为 $\delta t=0.5 \mu\text{s}$,实际光幕角度加工误差 $\delta\alpha=\delta\beta=0.01^\circ$,实际靶距加工误差 $\delta s=2 \text{ mm}$ 。根据图 1 所示测量坐标系,在光幕交汇点左右方向选取横坐标为 $[-500 \text{ mm}, 500 \text{ mm}]$,在光幕交汇点镜头上方选取纵坐标为 $[800 \text{ mm}, 1 800 \text{ mm}]$,形成 $1 000 \text{ mm} \times 1 000 \text{ mm}$ 的矩形靶面,对弹丸飞行横坐标、纵坐标及弹丸飞行速度进行综合误差仿真分析,结果如图 7。

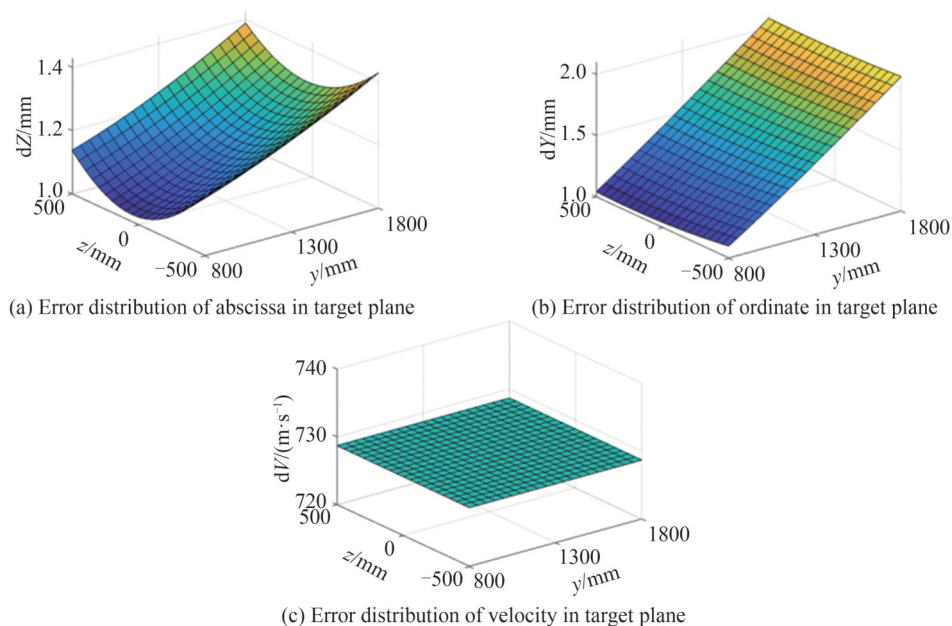


图7 靶面内测量误差分布
Fig.7 Measurement error distribution in target plane

由图7可知,在优化的一体化光幕阵列结构参数测量模型下,选定的矩形靶面内弹丸飞行横坐标测量误差在靶面下方中心区域时最小,主要随横坐标绝对值的增大沿靶面横坐标方向向两侧呈增大趋势,并随纵坐标的增大而增大,横坐标测量误差不超过1.50 mm。弹丸飞行纵坐标测量误差在靶面下方区域时最小,主要随纵坐标的增大而增大,且纵坐标测量误差不超过2.10 mm。弹丸飞行速度在矩形靶面内基本呈均匀分布,测量误差为728.70 mm/s。

4 实弹试验及数据

针对一体化六光幕阵列进行实弹射击试验,将双N形六光幕阵列天幕立靶固定在底座之上并调整前靶和后靶状态使其相互平行,通过激光测距仪确定调整后的前靶与后靶靶距 $s=2\text{ m}$, $h=0\text{ m}$ 。双N形六光幕阵列光幕空间角度设计值参考仿真优化结果取 25° ,由于存在机械加工误差,在试验前通过平面拟合的方法对光幕角度精确标定,结果为 $\alpha=24.94^\circ$, $\beta=24.61^\circ$ 。

在一体化光幕阵列后放置一个纸板靶,对比光幕阵列测量坐标和纸板靶上弹孔坐标之间的偏差,实现弹丸坐标测量误差比对。在预设弹道上与一体化光幕阵列一起放置一套激光测速靶专门用于弹丸飞行速度测量,实现弹丸飞行速度测量误差比对。对 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 矩形靶面进行10次射击,得到的实弹试验坐标测量和速度测量数据分别如表1和表2。

表1 实弹试验坐标测量数据
Table 1 Coordinate measurement data of live fire test

No.	Light screen target		Cardboard target		Coordinate error	
	Abcissa/mm	Ordinate/mm	Abcissa/mm	Ordinate/mm	Abcissa/mm	Ordinate/mm
1	-347.7	1 395.0	-349.6	1 393.2	1.9	1.8
2	155.6	1 339.6	152.7	1 337.6	2.9	2.0
3	-24.4	990.7	-22.8	989.8	-1.6	0.9
4	-368.8	1 526.5	-367.1	1 529.7	-1.7	-3.2
5	313.7	1 487.9	314.7	1 491.3	-1.0	-3.4
6	487.5	1 331.0	490.5	1 333.2	-3.0	-2.2
7	-16.1	1 535.6	-18.1	1 539.3	2.0	-3.7
8	178.6	894.3	179.2	895.1	-0.6	-0.8
9	-493.4	1 580.7	-490.3	1 585.5	-3.1	-4.8
10	-234.0	1 583.0	-235.9	1 586.8	1.9	-3.8

表2 实弹试验速度测量数据
Table 2 Velocity measurement data of live fire test

No.	Light screen target/(m·s ⁻¹)	Laser target/(m·s ⁻¹)	Velocity error/(m·s ⁻¹)
1	185.7	184.9	0.8
2	181.9	182.5	-0.6
3	182.8	183.6	-0.8
4	190.8	189.8	1
5	184.2	183.1	1.1
6	196.8	197.7	-0.9
7	187.4	186.9	0.5
8	179.6	180.4	-0.8
9	186.3	187	-0.7
10	164	163	1

由于实弹试验在室外进行,还引入了环境因素等的影响,因此得到的测量误差略大于仿真结果。根据表1和表2所示的试验数据,弹丸横坐标测量误差不超过3.1 mm,纵坐标测量误差不超过4.8 mm,速度测量误差不超过1.1 m/s,且误差在靶面内的整体分布与仿真基本一致。

5 结论

针对六光幕阵列测量模型参数复杂、现场布置繁琐、误差因素较多的问题,研究一体化光幕阵列测量模型,精简测量模型参数数量,提取一体化光幕阵列测量模型中结构相关的设计参数,分析其对弹丸飞行参数的影响机理,通过仿真得到各参数影响下的弹丸飞行参数测量误差影响规律,主要包括:1)幕面垂直角度 α 主要影响弹丸纵坐标测量误差,随 α 的增大弹丸飞行纵坐标测量误差减小且减小趋势逐渐减弱;幕面水平角度 β 主要影响弹丸横坐标测量误差,随 β 的增大弹丸飞行横坐标测量误差减小且减小趋势逐渐减弱,两者影响规律类似,由于光幕空间结构中角度增大将减小有效靶面探测区域,选择优化后的光幕垂直角度 α 和水平角度 β 为 $20^\circ\sim 30^\circ$ 较为合适。2)前靶与后靶距离 s 对弹丸横、纵坐标及速度的测量误差均有影响,随 s 的增大弹丸飞行参数测量误差逐渐减小且减小趋势逐渐减弱,由于过大的靶距不利于运输、现场布置和使用,选择优化后的靶距 s 为1.5~2.5 m较为合适;前靶与后靶高度差 h 主要影响弹丸速度测量误差,速度测量误差呈先减少后增大趋势,选择优化后的高度差 $h=0$ mm较为合适。3)根据各参数影响下的弹丸飞行参数误差分布规律,为一体化光幕阵列测量模型中各参数赋予典型值并仿真分析1 000 mm×1 000 mm靶面内的误差分布,结果显示弹丸横坐标测量误差不大于1.50 mm,纵坐标测量误差不大于2.10 mm,速度测量误差不大于728.70 mm/s。4)针对分析结果进行实弹试验,由于外场环境因素的影响,试验得到的测量误差略大于仿真结果,弹丸横坐标测量误差不超过3.1 mm,纵坐标测量误差不超过4.8 mm,速度测量误差不超过1.1 m/s。研究结果可为六光幕阵列测量设备的工程设计提供理论依据,也可为提高身管武器弹丸飞行参数测量精度提供参考。

参考文献

- [1] HALL L. Method and apparatus for detecting a launch position of a projectile:US,08451691B2[P]. 2013-05-28.
- [2] FEDARAVIUS A, RAKAUSKAS S, SURVILA A, et al. External ballistics simplified model of the "RT-400" rocket aerial target[J]. Problems of Mechatronics Armament Aviation Safety Engineering, 2018, 9(1):9-22.
- [3] SEDUNOV A, SUTIN A, SALLOUM H, et al. Passive acoustic localization of small aircraft [C]. Proceedings of Meetings on Acoustics, Acoustical Society of America, 2015.
- [4] WEI Fei, LI Hanshan, ZHANG Xiaoqian. Projectile position calculation model of linear laser assisted area array CCD optical imaging [J]. Laser & Infrared, 2022, 52 (2):176-181.
魏飞, 李翰山, 张晓倩. 线激光辅助面阵 CCD 光学成像弹丸位置解算模型[J]. 激光与红外, 2022, 52 (2):176-181.
- [5] 倪晋平. 光幕阵列测试技术与应用 [M]. 北京:国防工业出版社,2014:151-172.
- [6] LIU Deyao, CHEN Zhifei, GUO Xinwei, et al. Measurement system for projectile impact-points based on acoustic sensor network[J]. Journal of Ballistics, 2017,29(2): 85-89.
- [7] DONG Tao, DU Wangqiang, LI Hai. Error analysis on measuring system of vertical target with single-linear array CCD

- camera and dual-laser [J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(2):240-245.
- 董涛,杜王强,李海.单线阵CCD相机双激光器立靶测量系统误差分析[J].应用光学,2018,39(2):240-245.
- [8] TIAN Hui, NI Jinping. Research on the measurement of the integrated structure four-combined-screen array [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(2):320-326.
- 田会,倪晋平.一体化结构四组合光幕阵列测量研究[J].仪器仪表学报,2014,35(2):320-326.
- [9] GAO Fen, ZENG Xiangwei, NI Jinping, et al. Modeling and measurement accuracy analysis of four-light-screen optical target [J]. Acta Photonica Sinica. 2015,44(8):0812003.
- 高芬,曾祥伟,倪晋平,等.四光幕精度靶工程化模型及测量精度分析[J].光子学报,2015,44(8):0812003.
- [10] 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(5): 17-23.
- 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(5):17-23.
- [11] CHEN Rui, NI Jinping, CHEN Ding. Error comparison and analysis of sixlight-screen vertical target under different light-screen-array model[C].SPIE , 2018:108460A.
- [12] HU Jihan, GAO Fen, NI Jinping. Modeling and measurement accuracy analysis of six-light-screen optical target based on plane equation [J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(7): 0712003.
- 扈冀晗,高芬,倪晋平.基于平面方程的六光幕精度靶工程化建模及精度分析[J].光子学报,2020,49(7): 0712003.
- [13] TIAN Hui, NI Jinping, JIAO Mingxing. Moment acquisition algorithm of a projectile passing through a trapezoidal screen [J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(12):120-124.
- 田会,倪晋平,焦明星.弹丸穿过梯形光幕过幕时刻提取算法研究[J].光子学报,2014,43(12):120-124.
- [14] CHEN Rui, NI Jinping. Calibration method of light-screen plane equation of sky screen vertical target [J]. International Journal for Light and Electron Optics, 2018, 155: 276-284.
- [15] CHEN Rui, NI Jinping, LIU Jinlong. Uncertainty analysis of coordinate measurement of six-light-screen array sky screen vertical target based on engineering model [J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(3):612-620.
- 陈瑞,倪晋平,刘金龙.基于工程模型的六光幕阵列天幕立靶弹头坐标测量不确定度评定方法研究[J].兵工学报,2019, 40(3):612-620.
- [16] CHEN Rui, JI Bowen, CHEN Ding, et al. Optimization method of integrated light-screen array with external parameters based on genetic algorithm[J]. Wireless Communications & Mobile Computing, 2021, 2021:2953827.

Error Analysis and Parameters Optimization of Integrated Light-screen Array Measurement

YU Guodong¹, WANG Chunyang¹, FENG Jianghai¹, ZHANG Yue¹, LIU Xiaochen¹,
LI Zhongqi¹, CHENG Zhiyuan²

(1 63869 Chinese People's Liberation Army troops, Baicheng 137001, China)

(2 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: Due to the advantages of fast response, multiple factors metering and easy implementation, the measurement method of light-screen array has been widely used in the measurement of external ballistic flight parameters of barrel rapid-fire weapons. Compared with the separated light-screen array, the integrated light-screen array measurement model has the advantages of simplified parameters, simple model and easy to use. Aiming at the integrated light-screen array measurement model, the structure-related design parameters of the integrated light-screen array measurement model are extracted and the error propagation formula is derived to analyze the influence of different parameters on the measurement error of the projectile flight parameters. Then the simulation model is established in MATLAB according to the analysis result, and the influence law of the vertical angle α , the horizontal angle β , the target distance s and the height difference h on the flight velocity and coordinate measurement errors of the projectile is analyzed. The simulation results show that the vertical angle α mainly affect the projectile ordinate measuring error. and with the increase of α , the ordinate measuring error decreases and the decreasing trend gradually weakens. The horizontal angle β mainly affect the projectile abscissa measuring error, and with the increase of β , the abscissa measuring error decreases and the decreasing trend gradually weakens. The ordinate measuring error, abscissa measuring error and velocity measuring error of the projectile are all

affected by the target distance s . The measurement errors gradually decrease with the increase of s and the decreasing trend is gradually weakened. Then the optimization method of structural parameters is given. By increasing angle of light screen structure, the effective target surface detection area will be reduced, and the value range of the optimized vertical angle α and horizontal angle β is from 20° to 30° . Since large target distance is not conducive to transportation, field layout and use, it is more appropriate to choose an optimized target distance s range of 1.5~2.5 m and the height difference is 0 m. According to the error distribution law of projectile flight parameters under the influence of various parameters, typical values are assigned to each parameter in the optimized integrated light-screen array measurement model that the distance between front target and back target $s=2$ m, height difference $h=0$ m. The accurate angles of the light-screen are obtained by the calibration experiment using the method of plane fitting that vertical angle $\alpha=24.94^\circ$ and horizontal angle $\beta=24.61^\circ$. Then the measurement error distribution of projectile velocity and coordinates in the range of $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ rectangular target surface are obtained. The results showed that the measurement error of the projectile is no more than 1.50 mm in horizontal coordinate and no more than 2.10 mm in vertical coordinate. The velocity measurement error is not large, which is 728.70 mm/s. Finally, the live verification test is carried out. Due to the influence of external field environmental factors, the measurement error obtained by the test is slightly larger than the simulation result. The live test results show that the measurement of projectile flight parameters is consistent with the simulation analysis. The maximum error of abscissa measurement is not more than 3.1 mm, the maximum error of ordinate measurement is not more than 4.8 mm, and the maximum error of velocity measurement is not more than 1.1 m/s. The results of the method presented in this paper can provide theoretical basis for the measurement error analysis and theoretical support for the engineering design of light-screen array measurement equipment, and also provide a reference for improving the flight parameter measurement accuracy of barrel weapon projectile.

Key words: Light-screen array; Measuring accuracy; Simulation; Parameter optimization

OCIS Codes: 120.4800; 140.3290; 080.1238; 140.7270