

doi:10.3788/gzxb20154408.0812003

## 四光幕精度靶工程化模型及测量精度分析

高芬<sup>1</sup>, 曾祥伟<sup>2</sup>, 倪晋平<sup>1</sup>, 安莹<sup>1</sup>

(1 西安工业大学 光电工程学院, 西安 710072)

(2 黑龙江北方工具有限公司, 黑龙江 牡丹江 157013)

**摘要:**针对现有四光幕精度靶理想化结构模型及测量精度分析无法满足其工程化设计及发展需求的问题,构建了通用的四光幕精度靶工程化结构模型,推导了相应的坐标测量及误差传播公式,仿真分析了着靶位置、靶距、幕面夹角、靶面大小、弹丸斜入射角度等多参量对系统坐标测量精度的影响,得到了系列坐标测量误差分析数据.最后给出了一实际四光幕精度靶的结构及理论坐标测量误差估计.实弹射击表明,该系统在 1 m×1 m 有效靶面内的 X、Y 坐标测量误差均小于 2 mm,与理论仿真分析结果接近,验证了所提工程化测量模型的正确性,测量精度分析有效.研究结果可为实用型四光幕精度靶的设计及测量精度评估提供可靠参考.

**关键词:**测量;四光幕精度靶;建模;着靶坐标;精度分析;弹丸;光幕

**中图分类号:** TP202+.2; TJ012.3+6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4213(2015)08-0812003-7

## Modeling and Measurement Accuracy Analysis of Four-light-screen Optical Target

GAO Fen<sup>1</sup>, ZENG Xiang-wei<sup>2</sup>, NI Jin-ping<sup>1</sup>, AN Ying<sup>1</sup>

(1 School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

(2 Heilongjiang North tool Co. Ltd, Mu dan-jiang, Heilongjiang 157013, China)

**Abstract:** As the ideal structure model and accuracy analysis of existing four-light-screen optical target cannot meet the requirement of engineering design and development, a common engineering structure model was developed, and the measurement formulas and error transfer formulas were deduced. The influences of different parameters, such as the impact location, target distance, light-screen intersection angles and the size of sensor area, to the position measurement accuracy of system were analyzed through simulation. A series of position measurement error analysis data were acquired. The structure and theoretical error estimate results of a practical four-light-screen optical target were given. The live-fire testing result shows that the X and Y position measurement errors of this four-light-screen optical target system in a 1 m×1 m sensor area are less than 2 mm, which is close to the theoretical analysis result, and the result verified the correctness of the proposed engineering model and effectiveness of theoretical analysis. This research can provide useful reference for practical design and accuracy estimate of four-light-screen optical target.

**Key words:** Measurement; Four-light-screen optical target; Modeling; Impact location; Accuracy analysis; Projectile; Light screen

**OCIS Codes:** 120.4640; 250.0040; 000.4430

**基金项目:** 国家自然科学基金(No. 61471289)、陕西省科学技术研究发展计划(No. 2014K05-41)、陕西省教育厅科技项目(No. 2013JK1053)和西安工业大学“兵器光电测试技术与仪器”科研创新团队项目资助

**第一作者:** 高芬(1980—),女,讲师,博士,主要研究方向为光电测试技术及精密光学检测. Email: gaofen8128@163.com

**收稿日期:** 2015-03-06; **录用日期:** 2015-05-15

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

## 0 引言

在轻武器的研制和生产中,经常需要测试弹丸的速度和着靶坐标.为满足兵器外弹道参量测试领域不同测试需求,国内外已研究了多种非接触的弹丸着靶坐标测量系统和方法,如声学立靶<sup>[1]</sup>、CCD立靶<sup>[2-4]</sup>、光幕立靶<sup>[5-9]</sup>、天幕立靶<sup>[10-13]</sup>等.四光幕精度靶<sup>[5-6]</sup>是光幕立靶中最为基本的一种,该精度靶原理及结构简单,在弹丸斜入射角度较小的情况下可获得较高精度的测量结果,因而在实际靶场获得了较为广泛的应用,常用于室内靶道测试.现有四光幕精度靶多采用线阵列排布的发光二极管作为光源,线阵列排布的光电二极管作为接收,构成单个测试光幕,四个光幕按照一定的空间结构组成测试光幕阵列.光幕阵列的结构参量不同、弹丸斜入射角度不同,坐标测量的精度也将不同.因此探讨不同条件下四光幕精度靶的坐标测量精度问题对于实际四光幕精度靶的优化设计及误差估计极为重要.

目前对于四光幕精度靶的相关研究<sup>[5-6,14-16]</sup>都基于理想化模型.由于构成四光幕精度靶四个测试光幕的光源和接收装置均需占用一定空间结构,实际工程化设计中四个测试光幕不可能完全按理想结构模型布置.而且现有基于理想化结构的模型仅单一考虑确定靶面(1 m×1 m)及幕面空间结构下的测量精度分析<sup>[14-16]</sup>,已不能为不同测试需求下实用型四光幕精度靶结构的优化设计及系统坐标误差估计提供充分参考.本文构建通用的工程化结构模型,探讨着靶位置、幕面夹角、靶面大小、弹丸斜入射等多个参数的影响,开展较全面的测量精度分析.

## 1 测量模型及公式

### 1.1 理想测量模型及公式

图1为四光幕精度靶的理想结构模型,其在XOZ平面和YOZ平面上的投影视图分别如图2(a)、(b)所示.四个探测区域为矩形的光幕以特定的角度布置在六面体中,光幕I和光幕IV为垂直于水平面且相互平行的光幕,光幕I和光幕IV的距离(靶距)为S;光幕II为垂直于水平面且与光幕I、IV成一定水平夹角 $\alpha$ 的光幕;光幕III为与光幕I、IV成一定垂直夹角 $\beta$ 的光幕.设坐标原点O位于光幕I的中心,与结构相关的参量S、 $\alpha$ 和 $\beta$ 已知,假设弹丸沿预定弹道 $O_1O_2$ 穿过各光幕的位置依次为A、B、C、D,对应于测时仪记录的时刻依次为 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 、 $t_4$ , $t_1=0$ ,则弹丸穿过光幕I和光幕IV时的平均速度V可表示为

$$V = \frac{S}{t_4 - t_1} = \frac{S}{t_4} \quad (1)$$

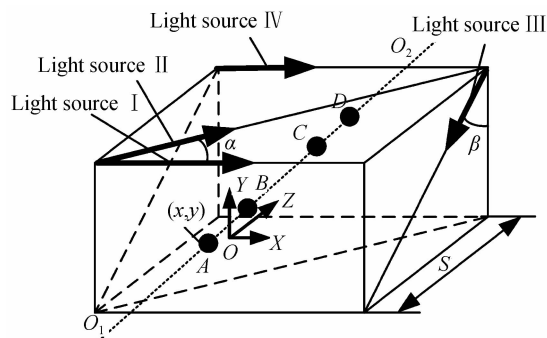


图1 四光幕精度靶的理想结构模型

Fig. 1 Ideal model of Four-light-screen Target

依据 $S$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 、 $t_4$ 的值,可计算得弹丸着靶坐标 $(x, y)$ 为

$$x = S \times \frac{t_2}{t_4} \times \cot \alpha - \frac{S}{2} \times \cot \alpha \quad (2)$$

$$y = \frac{S}{2} \times \cot \beta - S \cdot \frac{t_3}{t_4} \cdot \cot \beta \quad (3)$$

### 1.2 工程化测量模型及公式

如图2所示,理想情况下,II、III光幕与I、IV光幕相交且端面重合,考虑到实际工程化设计中构成各测量光幕的光源和接收装置均需占用一定结构空间,II、III光幕与I、IV光幕的端面不可能完全重合,这里结合四光幕精度靶的实际工程化结构,给出了如图3所示的通用的结构模型,图4(a)和4(b)分别为其在XOZ平面和YOZ平面上的投影视图.

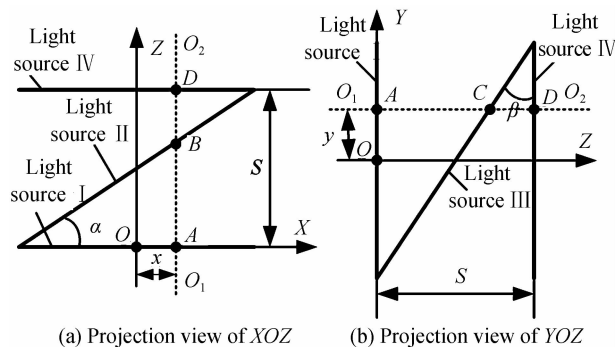


图2 理想结构模型投影视图

Fig. 2 Projection view of ideal structure model

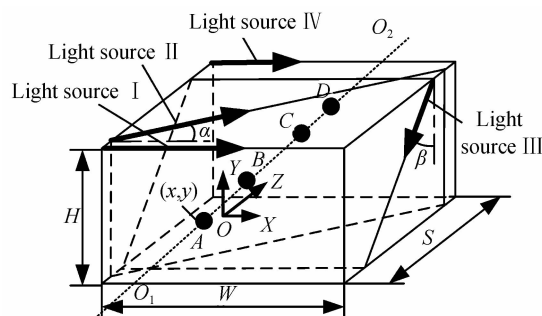


图3 四光幕精度靶工程化结构模型

Fig. 3 Engineering model of Four-light-screen Target

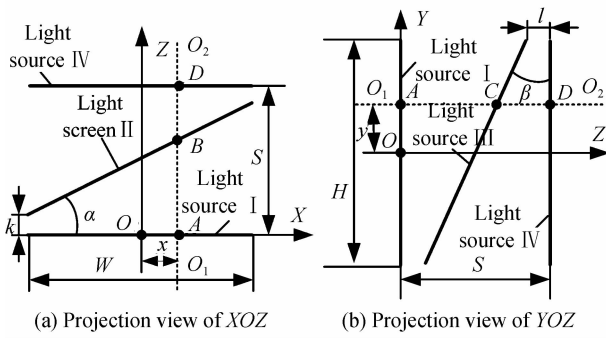


图4 工程化结构模型投影视图

Fig. 4 Projection view of Engineering structure model

如图4所示,坐标原点O同样设置于光幕I的中心,光幕II与X轴方向的夹角为 $\alpha$ 、光幕III与Y轴的夹角为 $\beta$ ,设光幕II相对光幕I沿Z向的偏离为 $k$ ,光幕III相对光幕IV沿Z向的偏离为 $l$ ,则依据三角关系可计算得四光幕精度靶的最大有效靶面 $W$ (宽) $\times H$ (高)为

$$W = (S - 2k) \cot \alpha \quad (4)$$

$$H = (S - 2l) \cot \beta \quad (5)$$

依据 $S, \alpha, \beta, k, l, t_1, t_2, t_3, t_4$ 的值,同样可计算得弹丸着靶坐标 $(x, y)$ 为

$$x = S \times \frac{t_2}{t_4} \times \cot \alpha - \frac{S}{2} \times \cot \alpha \quad (6)$$

$$y = \frac{S}{2} \times \cot \beta - S \cdot \frac{t_3}{t_4} \cdot \cot \beta \quad (7)$$

可见,在保证各光幕对称中心均处于同一直线(Z轴)的情况下,由工程化结构模型推导的坐标测量公式与理想情况下相同,坐标测量公式不受 $k, l$ 的影响.但在该工程化模型下, $k, l$ 取值不同对应的幕面夹角 $\alpha, \beta$ 的可能取值将不同,有效靶面也不同,由此导致靶面内的坐标测量精度也不同,下节将展开详细分析.

## 2 测量精度理论分析

### 2.1 误差传递公式推导

对式(6)和式(7)求全微分,得到误差传递公式,即

$$dX = \left| \left( \frac{t_2}{t_4} - \frac{1}{2} \right) \cdot \cot \alpha \cdot dS \right| + \left| S \cdot \frac{\cot \alpha}{t_4} \cdot dt_2 \right| + \left| S \cdot \frac{t_2}{t_4^2} \cdot \cot \alpha \cdot dt_4 \right| + \left| S \cdot \left( \frac{1}{2} - \frac{t_2}{t_4} \right) \cdot (\cot^2 \alpha + 1) \cdot d\alpha \right| \quad (8)$$

$$dY = \left| \left( \frac{1}{2} - \frac{t_3}{t_4} \right) \cdot \cot \beta \cdot dS \right| + \left| S \cdot \frac{\cot \beta}{t_4} \cdot dt_3 \right| + \left| S \cdot \frac{t_3}{t_4^2} \cdot \cot \beta \cdot dt_4 \right| + \left| S \cdot \left( \frac{t_3}{t_4} - \frac{1}{2} \right) \cdot (\cot^2 \beta + 1) \cdot d\beta \right| \quad (9)$$

从式(8)和式(9)可以看出,四光幕精度靶的坐标测量精度主要受其结构参量(如 $S, \alpha, \beta$ )、结构参量装调

或测量误差(如 $dS, d\alpha, d\beta$ )、测时误差(如 $dt_2, dt_3, dt_4$ )等的影响,且靶面内不同位置处的坐标测量精度也不同.此外,受四光幕精度靶测量原理限制,使用中要求弹丸垂直于靶面入射,当弹丸存在较大斜入射角时由式(6)和(7)计算出的坐标值与实际值之间将存在较大误差,对测量的影响不可忽略.

考虑到测时误差主要由测时仪所采用的晶振决定,晶振频率确定的情况下理论测时误差不变,下面重点探讨着靶位置、靶距及幕面夹角、靶面大小、弹丸斜入射角度对四光幕精度靶坐标测量误差的影响.

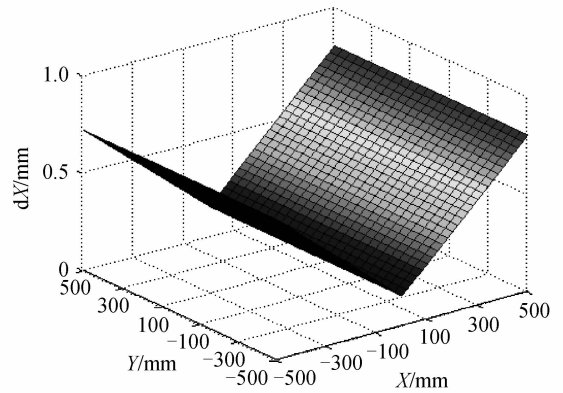
### 2.2 测量误差分析

假设入射弹丸弹速 $V=800$  m/s,测时系统理论测时误差 $dt_2=dt_3=dt_4=0.1$   $\mu$ s,进行不同条件下的坐标测量误差分析.

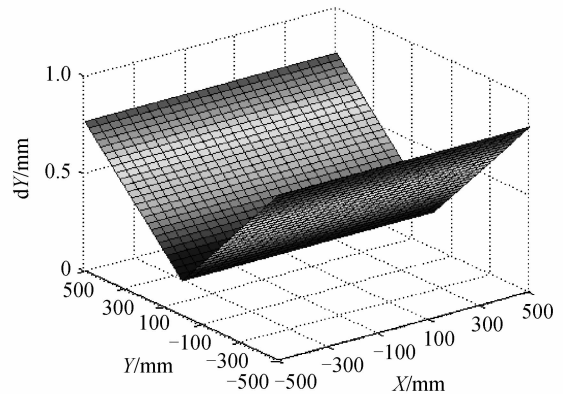
#### 2.2.1 不同着靶位置处的坐标测量误差分布

结合实际工程化设计,假设靶距 $S=1$  m,有效靶面 $W \times H$ 为 $1$  m $\times$  $1$  m,幕面偏离 $k=100$  mm, $l=(k+60)=160$  mm,各幕面的空间位置经精确标定后 $dS=0.5$  mm, $d\alpha=0.02^\circ, d\beta=0.02^\circ$ ,则由式(4)和式(5)可计算得 $\alpha=38.66^\circ, \beta=34.22^\circ$ ,仿真分析得靶面内的坐标测量误差分布如图5.

由图5(a)可知,X的坐标测量误差 $dX$ 与着靶位



(a) X position measurement error in different impact location



(b) Y position measurement error in different impact location

图5 坐标测量误差与着靶位置关系

Fig. 5 Position measurement errors in different impact location

置坐标  $Y$  无关, 仅与  $X$  坐标成  $V$  型分布关系, 中央误差最小, 离坐标原点越远,  $X$  的坐标测量误差越大. 由图 5(b) 可知,  $Y$  的坐标误差  $dY$  与着靶位置坐标  $X$  无关, 仅与  $Y$  同样成  $V$  型分布关系, 离坐标原点越远,  $Y$  坐标测量误差越大. 分析得在上述给定条件下  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  靶面内  $dX$ 、 $dY$  的最大值分别为  $0.80\text{ mm}$  和  $0.84\text{ mm}$ ,  $d\alpha$  和  $d\beta$  取值相同的情况下,  $Y$  坐标测量误差要稍大.

### 2.2.2 靶距及幕面夹角的影响

这里仍假设  $W \times H$  为  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ ,  $dS = 0.5\text{ mm}$ ,  $d\alpha = d\beta = 0.02^\circ$ ,  $k = 100\text{ mm}$ ,  $l = 160\text{ mm}$ , 若靶距  $S$  取值不同, 则对应计算的  $\alpha$  和  $\beta$  值将不同, 由此计算的坐标测量误差也将不同. 表 1 为靶距  $S$  取不同值时计算的幕面夹角及坐标测量误差极大值. 从表 1 中可以看出, 在相同有效靶面及结构参量误差下, 靶距越大, 计算得的幕面夹角越大, 相应的坐标测量误差越小.

表 1 不同靶距  $S$  下计算的坐标测量误差极大值  
Table 1 Maximum of position measurement error in different target distance  $S$

$S/\text{mm}$	600	800	1 000	1 200	1 400
$\alpha/^\circ$	21.80	30.96	38.66	45.00	50.19
$\beta/^\circ$	15.64	25.64	34.22	41.35	47.20
$\text{Max}(dX)/\text{mm}$	1.58	1.06	0.80	0.71	0.66
$\text{Max}(dY)/\text{mm}$	1.29	0.96	0.84	0.73	0.67

为分析幕面夹角  $\alpha$  的影响, 假设  $S = 1\text{ m}$ ,  $W \times H$  为  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ ,  $dS = 0.5\text{ mm}$ ,  $d\alpha = d\beta = 0.02^\circ$ , 在保持幕面偏离  $l = (k + 60)$  的情况下, 减小  $\alpha$  (即增大幕面偏离  $k$ ), 仿真分析得不同幕面夹角  $\alpha$  下,  $X$  坐标测量误差  $dX$  的极大值如图 6 所示, 随着幕面夹角  $\alpha$  的减小,  $dX$  的极大值接近呈线性增长,  $\alpha$  值越大, 相同  $X$  坐标处的误差  $dX$  越小.

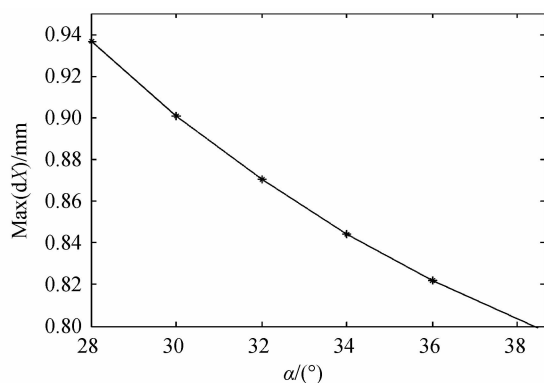


图 6 坐标测量误差  $dX$  的极大值随  $\alpha$  变化关系

Fig. 6 Maximum of X position measurement error  $dX$  vs.  $\alpha$

同理, 为分析幕面夹角  $\beta$  的影响, 假设  $S = 1\text{ m}$ ,  $W \times H$  为  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ ,  $dS = 0.5\text{ mm}$ ,  $d\alpha = d\beta = 0.02^\circ$ , 在  $\alpha = 38.66^\circ$  (幕面偏离  $k = 100\text{ mm}$  不变) 的情况下, 减小  $\beta$  值, 仿真分析得: 不同幕面夹角  $\beta$  下, 靶面内的  $X$  坐标测量误差极大值  $dX$  不变;  $Y$  坐标测量误差  $dY$  的极

大值随  $\beta$  的变化关系如图 7 所示, 随着幕面夹角  $\beta$  的减小,  $dY$  的极大值接近呈线性增长,  $\beta$  值越大, 相同  $Y$  坐标处的误差  $dY$  越小.

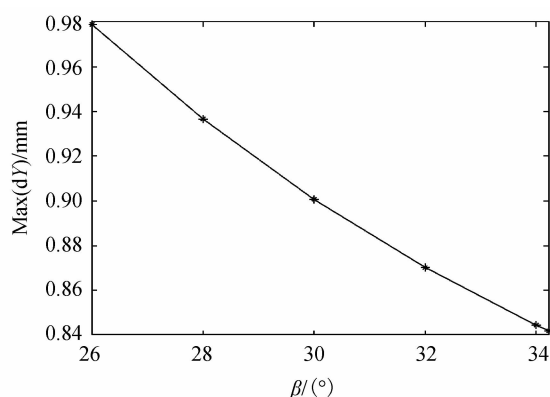


图 7 坐标测量误差  $dY$  的极大值随  $\beta$  变化关系

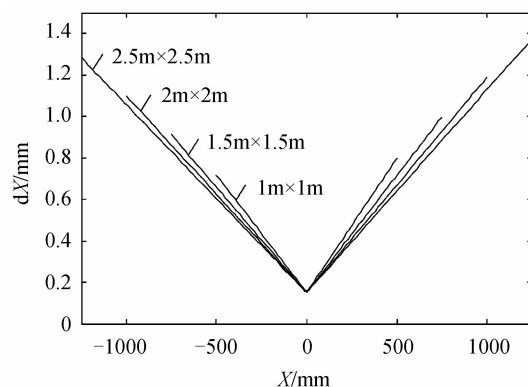
Fig. 7 Maximum of Y position measurement error  $dY$  vs.  $\alpha$

结合上述分析可知: 在靶面一定的情况下, 增大靶距及幕面夹角有利于提高四幕精度靶的坐标测量精度. 在实际工程化设计中, 在各靶体空间结构不产生干涉的情况下, 为提高测量精度, 可适当增大靶距, 在靶距确定的情况下, 幕面夹角应尽可能的大.

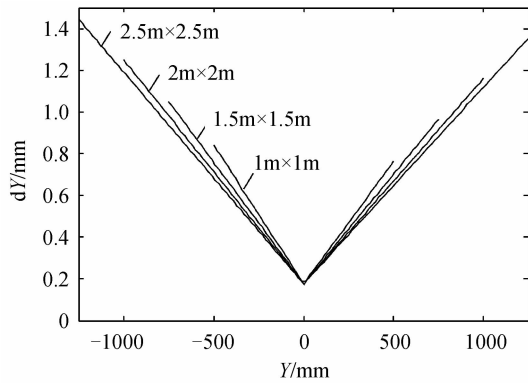
### 2.2.3 靶面大小的影响

同样假设  $k = 100\text{ mm}$ ,  $l = 160\text{ mm}$ ,  $\alpha = 38.66^\circ$ ,  $\beta = 34.22^\circ$ ,  $dS = 0.5\text{ mm}$ ,  $d\alpha = 0.02^\circ$ ,  $d\beta = 0.02^\circ$ , 对  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 、 $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 、 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$  和  $2.5\text{ m} \times 2.5\text{ m}$  靶面内的坐标测量误差进行仿真分析.

由 2.2.1 的分析可知,  $dX$  与着靶位置坐标  $Y$  无关,  $dY$  与着靶位置坐标  $X$  无关, 这里仅给出了坐标测量误差的二维分布比较结果, 图 8(a) 为不同靶面下  $dX$  随  $X$  坐标变化关系曲线, 8(b) 为不同靶面下  $dY$  随  $Y$  坐标变化关系曲线. 从图 8 可以看出: 不同靶面四光幕精度靶的坐标测量误差  $dX$  均与  $X$  坐标成近  $V$  型分布关系,  $dY$  均与  $Y$  坐标成近  $V$  型分布关系, 靶面越大, 坐标测量误差越大;  $dX$  在  $X$  取正向最大值 ( $X_{\text{max}}$ ) 时取得极大值,  $dY$  在  $Y$  取负向最大值 ( $-Y_{\text{max}}$ ) 时取得极大值. 仿真分析得该条件下  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 、 $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 、



(a) Changes of  $dX$  along with  $X$



(b) Changes of dY along with Y

图 8 不同靶面下坐标测量误差随坐标变化关系曲线

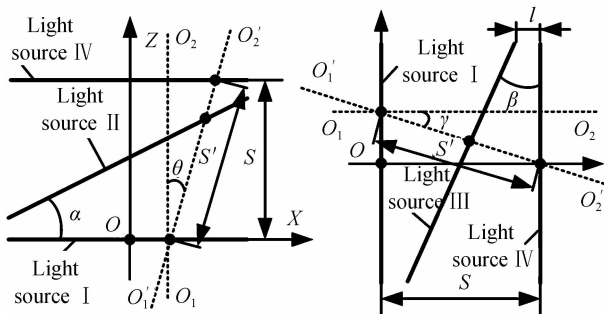
Fig. 8 Changes of position measurement errors along with impact location when in different sensor area

2 m×2 m和 2.5 m×2.5 m 靶面内最大 Y 坐标测量误差分别为 0.84 mm、1.05 mm、1.25 mm 和 1.44 mm.

### 2.2.4 弹丸斜入射角度的影响

上述公式推导及坐标测量误差的分析中均是假设弹丸垂直光幕 I 入射的情形,实际弹丸入射中不可避免地会存在一定斜入射角,该入射角的存在必然会引入一定误差.图 9(a)和图 9(b)分别为入射弹丸存在方位角  $\theta$  和俯仰角  $\gamma$  时的投影示意图,当弹丸存在斜入射角时,实际靶距  $S$  与理论靶距  $S'$  之间必将存在误差,若仍基于式(6)和(7)用理论靶距  $S$  计算得的坐标必然与实际坐标之间存在误差.

这里以方位角引入的坐标测量误差为例进行分析.如图 9(a)所示,假设入射弹丸弹速  $V=800$  m/s,靶距  $S=1$  m,有效靶面  $W \times H$  为  $1$  m× $1$  m,幕面偏离  $k=100$  mm,仿真分析得斜入射方位角  $\theta$  取  $0.03^\circ$  时,不同 X 坐标处的坐标测量误差如图 10 所示.图 11 为斜入射方位角  $\theta$  在  $0.01^\circ \sim 0.1^\circ$  之间取值时,仿真计算得引入的 X 坐标测量误差极值.



(a) Error caused by azimuth  $\theta$  (b) Error caused by pitch angle  $\gamma$

图 9 弹丸斜入射引入误差示意图

Fig. 9 Schematic of error caused by oblique incidence

由图 10 和图 11 可知,弹丸斜入射对坐标测量的影响极大,仅  $\theta=0.03^\circ$  的斜入射方位角即可使得引入的 X 坐标测量误差的极值达到 0.50 mm,引入的误差与 X 坐标接近呈线性增长,离水平夹角  $\alpha$  的顶点越远

误差越大.可见,为使由弹丸斜入射引入的 X 和 Y 坐标测量误差不超过 1 mm,则弹丸的俯仰和方位角均需控制在  $0.06^\circ$  以内.

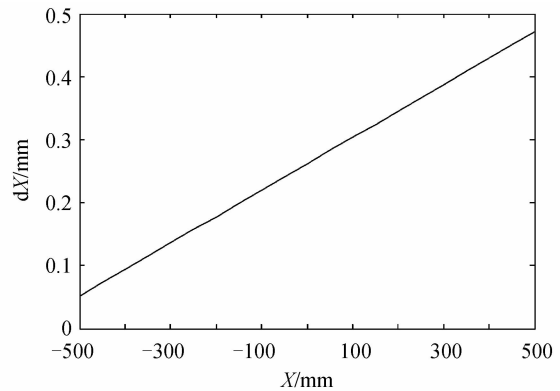


图 10 方位角引入的 X 坐标测量误差 ( $\theta=0.03^\circ$ )

Fig. 10 X position measurement error caused by azimuth angle

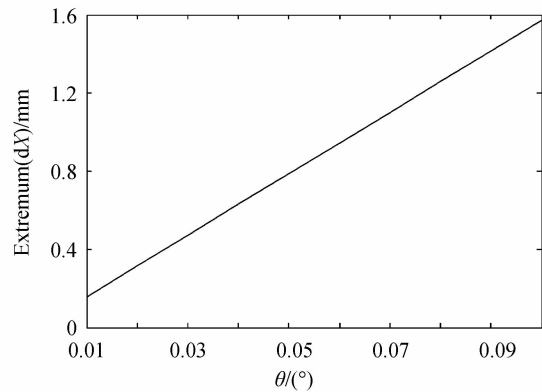


图 11 不同方位角引入的 X 坐标测量误差极值

Fig. 11 Extremum value of X position measurement error caused by different azimuth angle

## 3 工程化系统及测量精度估计

图 12 为一实际工程化四光幕精度靶的主体结构——四光幕探测阵列,该结构中光源 I~IV 与接收 I~IV 一一配对构成四个探测光幕,单个探测光幕均由分别固定于靶架左右两侧的光源和接收部件构成,各光源和接收部件的上下两端均设置有点状指示激光器,用于光源与接收的精确对准及幕面位置的精确标定,光幕 IV 外侧靶上还设置有纸板靶安装孔位,用于精度比对试验.该精度靶的靶距为 1 100 mm,设置的安全靶面为  $1.4$  m× $1.3$  m,中央  $1$  m× $1$  m 为实际有效测试靶面,  $k=100$  mm,  $l=160$  mm,  $\alpha=32.74^\circ$ ,  $\beta=30.96^\circ$ ,利用文献[17]的结构调校及参量测量方法对各光幕进行精确调校和测量,装调精度可达:  $dS=0.5$  mm,  $d\alpha=0.02^\circ$ ,  $d\beta=0.05^\circ$ . 系统采用四通道数据采集仪采集弹丸过幕时刻,信号采集频率为 20 MHz,则时间测量误差不大于  $0.1 \mu\text{s}$ . 假设入射弹丸弹速  $V=800$  m/s,基于上述参量,利用前面的分析方法,可

仿真分析得系统坐标测量误差分布如图 13 所示,中央 1 m×1 m 范围内的 X 坐标测量误差不超过 0.83 mm, Y 坐标测量误差不超过 1.38 mm. 考虑 0.03° 以内的方位和俯仰斜入射角,则中央 1 m×1 m 范围内 X、Y 坐标测量误差最大值分别为 1.29 mm 和 1.82 mm,均不超过 2 mm.

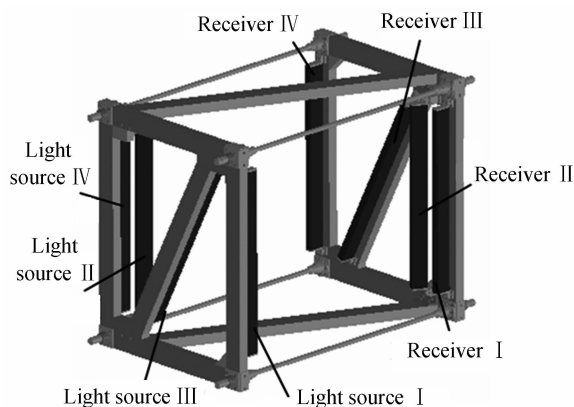
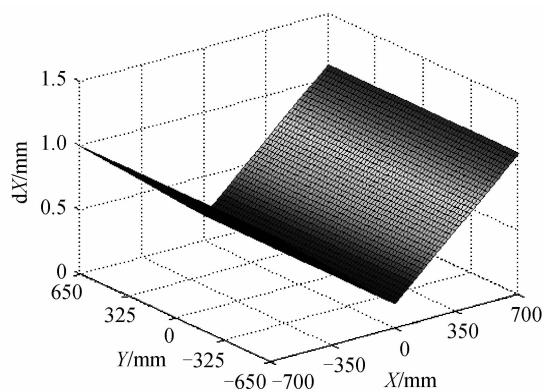
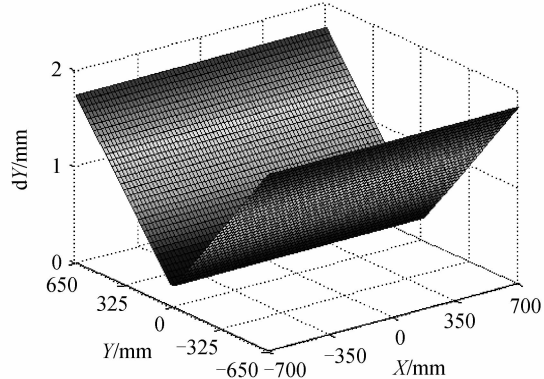


图 12 实际工程化系统探测主体结构

Fig. 12 Main structure of a practical Four-light-screen target



(a) dX in different impact location



(b) dY in different impact location

图 13 实际系统坐标测量误差分布

Fig. 13 Position measurement error distribution of a practical Four-light-screen target system

为验证上述四光幕精度靶工程化模型的正确性及系统的实际坐标测量精度,在某靶场 250 m 靶道内使用弹道枪进行 7.62 mm 弹的实弹射击比对试验,枪口距离精度靶 200 m,初始状态枪口距地面的高度

1.5 m,射击三组,每组 10 发,表 2 给出了其中一组测试数据.经与纸板靶测量结果进行比对,三组测量中系统的坐标测量误差  $\Delta X$ 、 $\Delta Y$  均不超过 2 mm,与理论分析结果接近.

表 2 四光幕精度靶与纸板靶比对测量结果 (7.62 mm 枪弹)

Table 2 Comparing measurement results of Four-light-screen target and cardboard target (7.62 mm projectile)

Results of Four- No. light-screen	Results of target ( $x_c, y_c$ )/mm	Results of cardboard target ( $x_z, y_z$ )/mm	difference $\Delta x = x_c -$ $x_z$ /mm	difference $\Delta y = y_c -$ $y_z$ /mm
1	-29.53, 81.59	-29.5, 80.0	-0.03	1.59
2	-38.72, 109.74	-38.5, 108.5	-0.22	1.24
3	11.72, 60.92	12.5, 60.5	-0.78	0.42
4	8.36, 57.30	8.5, 56.5	-0.14	0.8
5	-70.50, 62.34	-69.5, 61.0	-1.00	1.34
6	-87.29, 101.98	-86.5, 100.0	-0.79	1.98
7	-9.44, 78.74	-9.0, 78.0	-0.44	0.74
8	-15.50, 45.03	-15.0, 44.0	-0.50	1.03
9	-49.07, 66.64	-48.0, 65.0	-1.07	1.64
10	-13.46, 77.47	-12.5, 75.5	-0.96	1.97

需要指出的是,比对试验中常用手工测试纸靶上弹孔位置,不可避免地会存在一定测量误差,且实际弹丸射击时必然会存在的一定散布,进而引入一定随机性斜入射误差,因此无法获得与 2.2.1 节分析中完全一致的坐标测量误差分布结果,但分析得实际误差的极值接近理论分析的极值.

## 4 结论

本文构建了四光幕精度靶的工程化测量模型,基于该模型探讨了不同参量对其坐标测量精度的影响,结果表明:

1) 工程化设计中需考虑结构参量  $k, l$  ( $k$  为光幕 II 相对光幕 I 沿 Z 向的偏离,  $l$  为光幕 III 相对光幕 IV 沿 Z 向的偏离);在保证各光幕对称中心均处于同一直线 (Z 轴) 的情况下,由工程化结构模型推导的坐标测量公式与理想情况下相同,仅测量精度受  $k, l$  影响;

2) X (或 Y) 的坐标测量误差均与其本身的位置坐标成 V 型分布关系,中央误差最小,离坐标原点越远,误差越大;

3) 在靶面一定的情况下,增大靶距及幕面夹角有利于提高四幕精度靶的坐标测量精度;

4) 弹丸斜入射对坐标测量的影响极大,为使由弹丸斜入射引入的 X 和 Y 坐标测量误差不超过 1 mm,弹丸的俯仰和方位角均需控制在 0.06° 以内.

## 参考文献

- [1] MCCARTHY B D, REGAN B J. Position measuring apparatus and method; USA, 4885725[P]. Dec. 5, 1989.
- [2] LI Hua, LEI Lei, CHANG He-min, et al. Research on capture rate of the 4×4 m<sup>2</sup> CCD measurement system[J].

- Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6): 1238-1241.  
李华, 雷蕾, 常何民, 等. CCD立靶对暗弱高速飞行弹丸的捕获研究[J]. 光子学报, 2008, **37**(6): 1238-1241.
- [3] LI Han-shan, LEI Zhi-yong. Measurement of space burst location for projectile base on photography[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(2): 329-336.  
李翰山, 雷志勇. 基于摄像法测量弹丸的空间炸点位置[J]. 光学精密工程, 2012, **20**(2): 329-336.
- [4] DONG Tao, HUA Deng-xin, LI Yan, *et al.* Method for measuring dispersion of three projectiles impacting simultaneously. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(11): 1329-1333.  
董涛, 华灯鑫, 李言, 等. 用于三发弹丸同时着靶的密集度测量方法[J]. 光子学报, 2013, **42**(11): 1329-1333.
- [5] HPI. High Pressure Instrumentation-Ballistic measurement [EB/OL]. [2015-3-8]. [http://www.hpi-gmbh.com/redesign/products\\_10.htm](http://www.hpi-gmbh.com/redesign/products_10.htm).
- [6] NI Jin-ping, CUI Chang-qing, TIAN Hui, *et al.* Four screens target measuring system and calibration with paper target sheet [J]. *Journal of Xi'an Institute of Technology*, 2004, **24**(4): 319-322.  
倪晋平, 崔长青, 田会, 等. 四光幕交汇立靶测试系统及纸靶校准方法[J]. 西安工业学院学报, 2004, **24**(4): 319-322.
- [7] NI Jin-ping, YANG Lei, TIAN Hui. Measurement principle for two kinds of six-light-screen array composed by a large area light screen[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(2): 6-11, 20.  
倪晋平, 杨雷, 田会. 基于大靶面光幕靶的两类六光幕阵列测量原理[J]. 光电工程, 2008, **35**(2): 6-11, 20.
- [8] WEI Hong-qiang, WANG Jing-song, FENG Jin-liang, *et al.* Measurement method for velocity of warhead fragments based on laser screen[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, **29**(10): 2225-2229.  
韦宏强, 王劲松, 冯进良, 等. 基于激光靶的战斗部破片群速度测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2008, **29**(10): 2225-2229.
- [9] NI Jin-ping, LU Hong-wei, TAI Hui. Research on a method of measuring the impact location dispersion of double barrel cannon based on the seven-light-screen array [J]. *Acta Armamentarii*. 2013, **34**(4): 398-405.  
倪晋平, 卢红伟, 田会. 七光幕阵列测试双管武器立靶密集度方法研究[J]. 兵工学报, 2013, **34**(4): 398-405.
- [10] MSI Instruments PLC. Optical target 570[EB/OL]. [2015-3-8]. <http://www.msinstruments.co.uk/wp-content/>.
- [11] LI Han-shan, LEI Zhi-yong, WANG Ze-min. Analysis of two types of vertical target measurement system measuring sky-screens across screen[J]. *Journal of Ballistics*, 2010, **22**(1): 29-32, 36.  
李翰山, 雷志勇, 王泽民. 两种天幕靶光幕交汇立靶测量系统分析[J]. 弹道学报, 2010, **22**(1): 29-32, 36.
- [12] SONG Yu-gui, NI Jin-ping, WANG Tie-ling, *et al.* Principle of six screens target measuring system for bullet location and its error analysis [J]. *Journal of Xi'an Institute of Technology*, 2007, **27**(1): 19-23.  
宋玉贵, 倪晋平, 王铁岭, 等. 多光幕交汇法测量目标飞行坐标的原理与精度分析[J]. 西安工业大学学报, 2007, **27**(1): 19-23.
- [13] LI Han-shan, LEI Zhi-yong. Measurement of projectile burst coordinates by using multi-screen optical method and its error analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0212003.  
李翰山, 雷志勇. 多幕光学法测量弹丸炸点坐标及误差分析[J]. 光学学报, 2012, **32**(2): 0212003.
- [14] LIU Qun-hua, Shi Huan-fang, YAN Bing-xian, *et al.* The infrared light screen system and accuracy analysis[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(11): 1409-1411.  
刘群华, 施浣芳, 阎秉先, 等. 红外光幕靶测速系统和精度分析[J]. 光子学报, 2004, **33**(11): 1409-1411.
- [15] LIU Qun-hua, SHI Huan-fan, YAN Bing-xian, *et al.* Infrared photoelectric target accuracy analysis [J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(6): 758-760.  
刘群华, 施浣芳, 阎秉先, 等. 红外密集度光电立靶精度分析[J]. 光学技术, 2004, **30**(6): 758-760.
- [16] TAIN Hui. Study on measurement technology with six-light-screen array [D]. Xi'an: Xi'an technological university, 2007.  
田会. 六幕光幕靶测试技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2007.
- [17] AN Ying, NI Jin-ping, FENG Bin, *et al.* Structure installation and parameter measurement method of four-light screen target: CN, 102192682 A[P]. 2011-09-21.  
安莹, 倪晋平, 冯斌, 等. 四光幕精度靶结构装调与参数测量方法: CN, 102192682 A[P]. 2011-09-21.