

引用格式: HU Ji-han, GAO Fen, NI Jin-ping. 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

# 基于平面方程的六光幕精度靶工程化建模及精度分析

扈冀晗,高芬,倪晋平

(西安工业大学 光电工程学院, 西安 710032)

**摘 要:**针对传统几何法在六光幕精度靶测量模型解算及精度分析中因取近似结构参数而引入误差的问题,提出了基于平面方程的精确解算及精度分析法.依据工程实际,构建了高通用性的六光幕精度靶工程化测量模型及误差传递模型,系统地仿真比较了两类六幕结构中靶距及靶距误差、斜幕角度及角度误差、光源和接收对准误差等多误差源对弹丸速度及着靶坐标测量结果的影响,获得了一系列探测靶面内的测量误差分布数据,并结合实际给出了一个可满足坐标测量误差小于 3 mm,相对测速误差小于 0.3% 指标的工程设计实例.研究结果可为六光幕精度靶的工程化设计与精度评估提供可靠的理论基础及数据参考.

**关键词:**测量;光幕;六光幕精度靶;建模;精度分析

**中图分类号:** TP202+.2; TJ012.3+6

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20204907.0712003

## Modeling and Measurement Accuracy Analysis of Six-light-screen Optical Target Based on Plane Equation

HU Ji-han, GAO Fen, NI Jin-ping

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

**Abstract:** As a series of structural approximation need to be used in traditional geometry method, the model solving and accuracy analyzing of six-light-screen optical target based on this method are inaccurate. Here, a more accurate modeling and accuracy analyzing method based on plane equation was developed and a highly versatile engineering model and error transfer formula for six-light-screen optical target were deduced. Measurement accuracy decline caused by target distance and its error, light-screen tilt angle and its error, alignment error of light source and receiver, etc. were analyzed and compared under two kind of classical six-screen structural model. Sets of position and velocity measurement error distribution data and graphics in effective sensor area were acquired. A practical engineering layout of six-light-screen optical target with position measurement error less than 3 mm, and relative velocity measurement error less than 0.3% was proposed. This research can provide useful theoretical basis and data reference for practical design and accuracy estimation of six-light-screen optical target.

**Key words:** Measurement; Light screen; Six-light-screen optical target; Modeling; Accuracy analysis

**OCIS Codes:** 120.4610; 250.0040; 000.4430

**基金项目:**国家自然科学基金(No.61471289),国防科工局技术基础科研项目(No.JSJL2016208B005),陕西省科技厅基础科研计划项目(No.2019JM-601),陕西省科技厅重点产业创新链项目(No.2018ZDCXL-GY-08-02-01)

**第一作者:**扈冀晗(1993—),男,硕士研究生,主要研究方向为靶场光电测试技术. Email: 289240112@qq.com

**导师:**高芬(1980—),女,副教授,博士,主要研究方向为光学与光电测试技术. Email: gaofen8128@163.com

**收稿日期:**2020-02-07; **录用日期:**2020-04-30

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

## 0 引言

弹丸飞行速度和着靶坐标的测量在武器研发和生产中都有着非常重要的现实意义.为满足不同外场试验条件下不同弹丸的测试需求,国内外已研究出了多种非接触式测试设备,如声学立靶<sup>[1-2]</sup>、线阵 CCD 交汇立靶<sup>[3-5]</sup>、六幕天幕立靶<sup>[6-7]</sup>、四光幕和六光幕精度靶<sup>[8-11]</sup>等.其中,四光幕精度靶可同时测量弹丸的飞行速度和着靶坐标,但受其原理限制,在弹丸斜入射时测量误差较大<sup>[11]</sup>.六光幕精度靶是在四光幕精度靶基础上发展而来的,通过在四幕基础上增加两个斜幕,构成了六光幕交汇的测试光幕阵,一次射击即可实现任意斜入射弹丸飞行速度、飞行方向和着靶坐标的多参数测量,还可全天候使用,相较于其他室内靶道测试设备而言具有更大的优势及更广阔的应用前景.

六光幕精度靶的幕形结构、测量公式、测量误差源及精度等的探讨是六光幕精度靶研制的理论基础.依据工程设计实际,构建不同结构参数及误差影响下的真实测量模型,进行多种结构、多种误差影响下的测量误差估计和比对,对于实用型六光幕精度靶的优化设计极为重要.目前国内学者已开展了一些相关研究<sup>[10,12-16]</sup>,提出了“双平行”和“双V”两类六光幕幕形结构<sup>[12]</sup>,推导了相关测量公式<sup>[10,13-14]</sup>,并探讨了靶距、斜幕角度等基本结构参量对测量结果的影响<sup>[10,15-16]</sup>.现有这些研究多基于理想化结构模型,并利用几何法进行测量参数的解算.该几何法解算中均默认各对平行光幕(或相对成V形的光幕)与水平或铅垂面的夹角一致,且幕面本身不存在变形.但实际工程中,受机械加工及装调误差的影响,各幕面的空间位置相对于理论设计位置将不可避免会存在偏差,各对光幕不可能完全平行或呈相同夹角布置,且受光源与接收对准误差的影响,单个幕面本身也必然出现变形.因此,基于传统几何法测量模型,利用近似结构参数解算得到的测量结果将不够准确,基于几何法测量模型下的精度分析也不够完善.

为此,本课题组提出基于平面方程的六光幕精度靶解算及精度分析方法,该方法通过分别构建六个幕面的三维空间平面方程进行测量参数的解算,各幕面相对独立,且无绝对平行和成角度要求,更贴近实际,还可单独考虑各幕面误差源及影响,更有利于分析各类误差对测量的综合影响.

## 1 六光幕阵列测量模型的建立

### 1.1 六光幕阵列构成及测量原理

六光幕精度常采用线阵排布的发光二极管(LED)作为光源,采用线阵列排布的光电二极管作为接收,两者相互对准,配合接收装置中两道狭缝光阑对光源入射光束的限制作用,构成单个薄的矩形探测光幕,如图1(a)所示.六个探测光幕按一定的空间结构布置,组成测试光幕阵列.当飞行弹丸依次穿过六个探测光幕时,各光幕上接收器件所接收到的总光能量会发生变化,输出相应的弹丸过幕信号,经数据采集及处理,可得到弹丸穿过六个光幕的时刻,再依据测量公式即可计算出弹丸的飞行参数,包括弹丸着靶坐标、飞行速度、俯仰角和方位角.

依据六个光幕在空间排布结构的不同,可将六光幕阵列结构分为“双平行”和“双V”形两种,图1(b)给出了一种双V形六光幕精度靶探测主体实际结构.

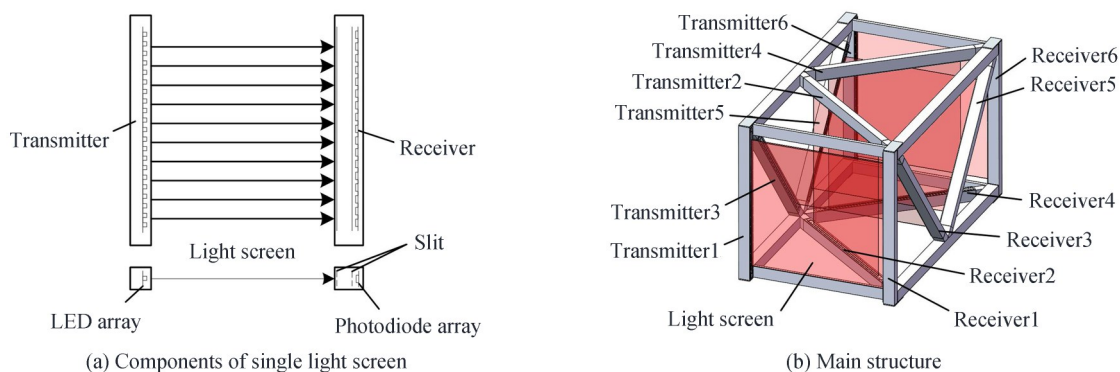


图1 六光幕阵列构成  
Fig. 1 Structure of a six-light-screen target

## 1.2 理想化结构模型及几何法解算

六光幕阵列的理想化模型如图2所示, $P_1\sim P_6$ 表示6个光幕,在图2(a)所示的“双平行”结构中, $P_1$ 和 $P_6$ 相互平行且垂直于水平面, $P_1$ 和 $P_6$ 之间的距离 $S$ 即为靶距; $P_2$ 、 $P_4$ 和 $P_3$ 、 $P_5$ 为两对倾斜的平行光幕, $P_2$ 、 $P_4$ 垂直 $XOZ$ 平面且相对 $P_1$ 、 $P_6$ 幕的倾斜角度均为 $\alpha$ , $P_3$ 与 $P_5$ 垂直 $XOY$ 平面且相对 $P_1$ 、 $P_6$ 幕的倾斜角度均为 $\beta$ .图2(b)所示“双V”形六光幕阵列与“双平行”结构的主要区别在于倾斜光幕 $P_2$ 与 $P_4$ 、 $P_3$ 与 $P_5$ 相对设置成V形.

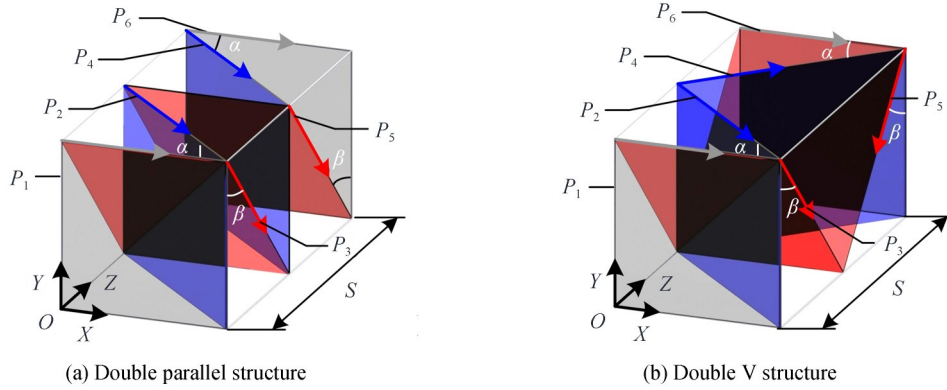


图2 两种典型六光幕精度靶的理想化结构模型  
Fig. 2 Two typical ideal model of six-light-screen target

目前常用的测量模型的解算方法为空间解析几何法,以图2(a)所示的双平行结构为例,若已知靶距为 $S$ ,斜幕 $P_2$ 、 $P_4$ 倾斜角均为 $\alpha$ ,斜幕 $P_3$ 、 $P_5$ 倾斜角均为 $\beta$ ,弹丸经过各光幕的时间为 $t_1\sim t_6$ ,则求解弹丸入射坐标 $x$ 、 $y$ ,速度 $v$ ,俯仰角 $\theta$ ,方向角 $\gamma$ 的公式为

$$x = \frac{S}{4} \cot \alpha - \frac{S \times (t_2 - t_1) \times \cos(\alpha - \gamma)}{(t_6 - t_1) \times \cos \gamma \times \sin \alpha} \quad (1)$$

$$y = \frac{S}{4} \cot \beta - \frac{S \times (t_3 - t_1) \times \cos(\beta - \theta)}{(t_6 - t_1) \times \cos \theta \times \sin \beta} \quad (2)$$

$$v = \frac{S}{(t_6 - t_1) \times \cos \gamma \times \cos \theta} \quad (3)$$

$$\theta = \arctan \left[ \frac{t_5 + t_3 - t_6}{(t_5 - t_3) \tan \beta} \cos \gamma \right] \quad (4)$$

$$\gamma = \arctan \left[ \frac{t_4 + t_2 - t_6}{(t_4 - t_2) \tan \alpha} \right] \quad (5)$$

从上面的分析可以看出,此种空间解析几何法计算简洁、高效,但受幕面空间结构假设的限制较大(如双平行结构中即要求 $P_1$ 和 $P_6$ 幕相互平行且垂直于水平面, $P_2$ 和 $P_4$ 幕垂直 $XOZ$ 平面且相对 $P_1$ 、 $P_6$ 幕的倾斜角度均为 $\alpha$ , $P_3$ 与 $P_5$ 垂直 $XOY$ 平面且相对 $P_1$ 、 $P_6$ 幕的倾斜角度均为 $\beta$ ),对幕面的位置精度要求较高,当实际幕形结构与假设的理想化结构存在偏差时容易引入较大误差,且因解算模型中变量较少,不利于建立完善的误差分析模型.

## 1.3 基于平面方程法的工程化建模及解算

在实际工程中,受光源与接收结构占用空间及装调误差的影响,各实际幕面不可能于理想位置相交,且一定存在随机的空间位移和旋转.为尽量完善地反映各误差源和设计参数对测量结果的影响,需要一种能独立分析各幕面,并将各工程参数转换为各幕面变量的方法.

平面方程法求解与几何法相比,不受各幕面空间结构假设的限制,可通过构建六个独立的空间平面,借助标定结构参数拟合得的六个平面结果进行精确解算,有利于提高装调效率及解算精度;同时,由于各幕面表达式独立且包含幕面的四个空间位置参数,也有利于单独分析单个幕面参数变化对测量结果的影响.本文基于平面方程法,以一双V型六光幕精度靶为例,建立了如图3(a)所示的通用工程化结构模型和如图3(b)所示的通用幕面模型.

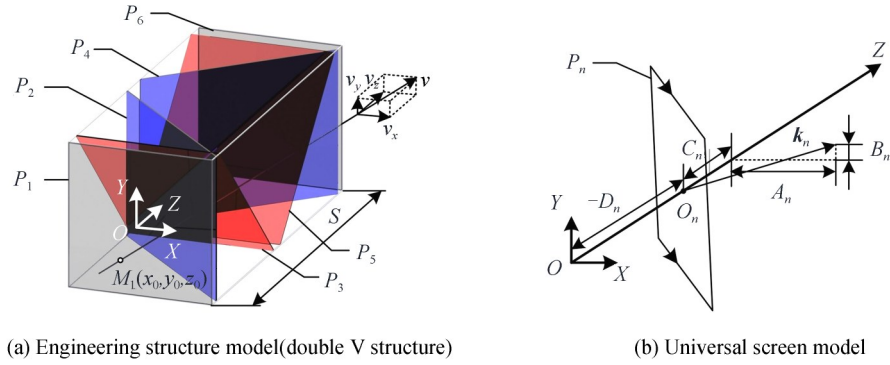


图3 六光幕精度靶工程化结构模型及幕面模型  
Fig. 3 Engineering structure model and screen model of six-screen target

如图3(a)所示,  $P_1 \sim P_6$ 为六个光幕面,以光幕  $P_1$ 作为  $XOY$ 平面(即测量坐标基准平面),坐标原点  $O$ 位于其有效探测幕面中心, $Z$ 轴为垂直于  $XOY$ 平面的理想弹道入射方向, $O_n$ 为各光幕  $P_n$ 与  $Z$ 轴的交点, $k_n(A_n, B_n, C_n)$ 为  $P_n$ 的法向量, $n$ 的取值为  $1 \sim 6$ .对光幕  $P_n$ 而言,其对应的平面方程中, $-D_n$ 为该幕与  $Z$ 轴交点的  $Z$ 坐标, $A_n, B_n, C_n$ 分别为该幕法向量  $k_n$ 的  $X$ 轴、 $Y$ 轴、 $Z$ 轴分量.在光幕面确定的情况下,其法向量  $k_n$ 的各分量必然呈一固定比例关系,为便于分析与计算,在本模型中  $C_n$ 取固定值1.此时, $A_n$ 可直接反映幕面与  $YOZ$ 平面的夹角、 $B_n$ 可直接反映幕面与  $XOZ$ 平面的夹角、 $-D_n$ 可直接反映幕面与  $Z$ 轴交点的位置.由此即可得到六光幕精度靶  $P_1 \sim P_6$ 幕面的平面方程为

$$\begin{cases} z = 0 \\ A_2x + B_2y + C_2z + D_2 = 0 \\ A_3x + B_3y + C_3z + D_3 = 0 \\ A_4x + B_4y + C_4z + D_4 = 0 \\ A_5x + B_5y + C_5z + D_5 = 0 \\ A_6x + B_6y + C_6z + D_6 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

设弹丸经过测量区域时的轨迹为一条空间直线  $M$ ,设弹丸过光幕  $P_1$ 时的坐标为  $M_1(x_0, y_0, z_0)$ ,其速度  $v$ 在三个坐标轴方向的速度分量为  $v_x, v_y, v_z$ ,过  $P_n$ 幕面的时刻为  $t_n(n=1 \sim 6)$ ,故有弹丸过  $P_n$ 幕面时的点  $M_n$ 坐标  $(x_n, y_n, z_n)$ 的参数方程为

$$\begin{cases} x_n = x_0 + v_x t_n \\ y_n = y_0 + v_y t_n \\ z_n = z_0 + v_z t_n \end{cases} \quad (7)$$

$P_1$ 幕面为  $XOY$ 平面,故  $z_0=0$ ,联立式(6),即可得到

$$\begin{cases} z = 0 \\ A_2x_0 + A_2v_x t_2 + B_2y_0 + B_2v_y t_2 + C_2v_z t_2 + D_2 = 0 \\ A_3x_0 + A_3v_x t_3 + B_3y_0 + B_3v_y t_3 + C_3v_z t_3 + D_3 = 0 \\ A_4x_0 + A_4v_x t_4 + B_4y_0 + B_4v_y t_4 + C_4v_z t_4 + D_4 = 0 \\ A_5x_0 + A_5v_x t_5 + B_5y_0 + B_5v_y t_5 + C_5v_z t_5 + D_5 = 0 \\ A_6x_0 + A_6v_x t_6 + B_6y_0 + B_6v_y t_6 + C_6v_z t_6 + D_6 = 0 \end{cases} \quad (8)$$

在六光幕阵列结构参数已知的情况下,幕面方程中各参数  $A_n, B_n, C_n, D_n$ 已知,弹丸过幕时刻  $t_1 \sim t_6$ 可通过数据采集系统记录,联立解方程组式(8)即可得到着靶坐标  $x_0, y_0$ 和速度  $v_x, v_y, v_z$ 的解.这一方法亦可用于任意布置的多个测量光幕的建模及解算.

#### 1.4 误差模型及传递公式

理想情况下,各光幕按设计值排布,构成各光幕平面的光源和接收共面,实际因加工和装调误差的存在,光源和接收的连接机构相对于理想位置的空间位移会导致单个光幕出现偏离,进而存在靶距误差、光幕倾斜角误差,以及光源与接收不平行、不共面的对准误差等.本文在对六光幕精度靶的误差进行建模及仿真

分析时,先基于设计阶段的理想幕面参数建立基本平面方程,再将各误差转化为幕面参数变化量,结合各待测量的含参解,分析幕面各个参数及其变化量对测量结果的影响.下面以图2(a)中光幕 $P_5$ 为例推导各幕面对应的误差传递公式.

首先分析倾角误差的影响.如图4(a)所示,将光幕 $P_5$ 的光源和接收简化为 $J_1K_1$ 、 $J_2K_2$ 两条线段,将与之相连的四个纵向连杆简化为 $l_1 \sim l_4$ 四条线段,四个线段相互平行且水平、垂直距离分别为 $W$ 、 $H$ .光源和接收通过 $J_1$ 、 $K_1$ 、 $J_2$ 、 $K_2$ 四处连接机构安装于纵向连杆 $l_1 \sim l_4$ 上.在误差传递模型中,可通过对各定位点实际位置 $J_1'$ 、 $K_1'$ 、 $J_2'$ 、 $K_2'$ 相对理想位置的偏移推算光源和接收对应线段 $J_1'K_1'$ 、 $J_2'K_2'$ 相对于理想状态的变化,进而分析光幕 $P_5$ 的幕面参数变化量.如图4(b)所示,若 $J_2'$ 和 $K_2'$ 两点在 $Z$ 轴和 $Y$ 轴上的位置偏移分别为 $\Delta z_{d5}$ 、 $\Delta y_{d5}$ 和 $\Delta z_{u5}$ 、 $\Delta y_{u5}$ ,导致接收线段 $J_2'K_2'$ 出现转动,从而引起幕面倾角 $\beta$ 和幕面方程参数 $B_5$ 的变化量分别为 $\Delta\beta_5$ 和 $\Delta B_5$ ,则有

$$\Delta\beta = \arctan\left(\frac{\Delta z_{u5} - \Delta z_{d5} + H \tan\beta}{\Delta y_{u5} - \Delta y_{d5} + H}\right) - \beta \quad (9)$$

$$\Delta B_5 = \frac{\Delta z_{u5} - \Delta z_{d5} + H \tan\beta}{\Delta y_{u5} - \Delta y_{d5} + H} - B_5 \quad (10)$$

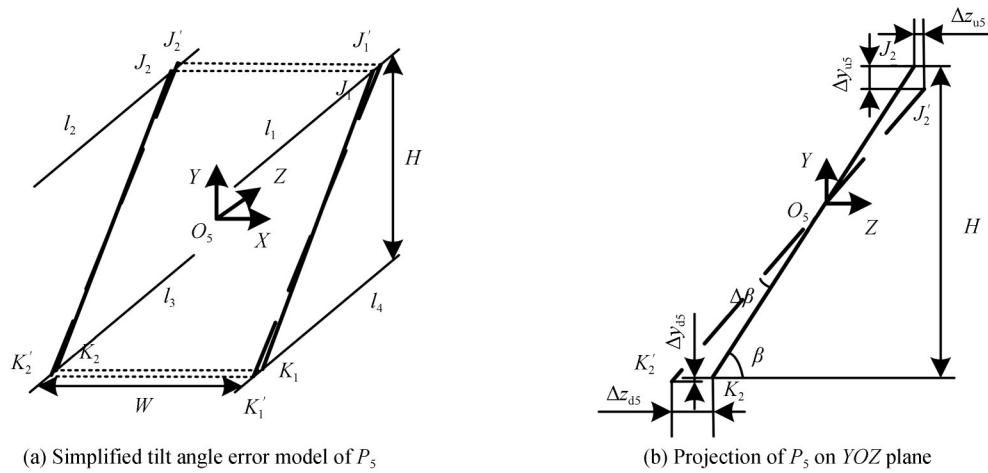


图4 光幕倾角误差模型

Fig. 4 Light screen tilt angle error model

其次分析对准误差的影响.理想状态下,各光幕的光源与接收完全对准,如图5(a)所示.实际装调误差的存在使得光源与接收无法做到完全对准,会导致幕面 $P_5$ 与 $YOZ$ 平面不再垂直,其与 $Z$ 轴交点的位置产生变化,如图5(b)所示.设光源和接收距离为 $W$ ,对准误差 $\Delta m$ 导致幕面 $P_5$ 与 $YOZ$ 平面的夹角变化量及其对

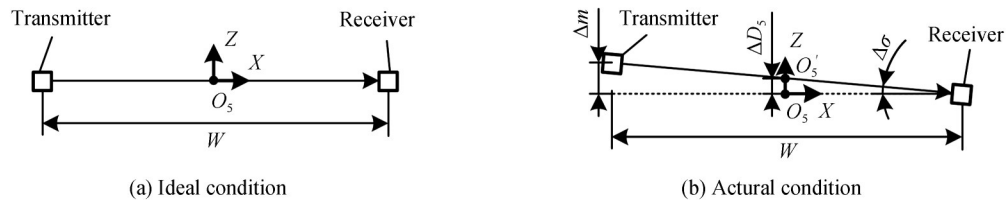


图5 光幕对准误差模型(视角垂直于幕面)

Fig. 5 Light screen alignment error model

应的幕面方程参数变化量分别为 $\Delta\sigma_5$ 、 $\Delta A_5$ , $P_5$ 与 $Z$ 轴交点的位置变化量为 $\Delta D_5$ ,则有

$$\Delta\sigma_5 = \arctan\left(\frac{\Delta m_5}{W}\right) \quad (11)$$

$$\Delta A_5 = \frac{\Delta m}{W} \quad (12)$$

$$\Delta D_5 = \frac{\Delta m}{2} \quad (13)$$

将上述误差模型中各误差对幕面  $P_5$  的影响代入其幕面方程,得到含误差量的实际测量方程为

$$\left(A_5 + \frac{\Delta m}{W}\right)(x_0 + v_x t_5) + \left(\frac{\Delta z_{u5} - \Delta z_{d5} + H \tan \beta}{\Delta y_{u5} - \Delta y_{d5} + H}\right)(y_0 + v_y t_5) + v_z t_5 + \left(D_5 + \frac{\Delta m}{2}\right) = 0 \quad (14)$$

同理可得其他幕面的含误差量测量方程,其中  $P_3$ 、 $P_5$  的含误差量实际测量方程通式为

$$\left(A_n + \frac{\Delta m}{W}\right)(x_0 + v_x t_n) + \left(\frac{\Delta z_{un} - \Delta z_{dn} + H \tan \beta}{\Delta y_{un} - \Delta y_{dn} + H}\right)(y_0 + v_y t_n) + v_z t_n + \left(D_n + \frac{\Delta m}{2}\right) = 0 \quad (15)$$

$P_2$ 、 $P_4$  的含误差量实际测量方程通式为

$$\left(\frac{\Delta z_{un} - \Delta z_{dn} + W \tan \alpha}{\Delta x_{un} - \Delta x_{dn} + W}\right)(x_0 + v_x t_n) + \left(B_5 + \frac{\Delta m}{H}\right)(y_0 + v_y t_n) + v_z t_n + \left(D_n + \frac{\Delta m}{2}\right) = 0 \quad (16)$$

垂直幕面  $P_1$ 、 $P_6$  实际测量方程通式为

$$\left(\frac{\Delta m}{W}\right)(x_0 + v_x t_n) + \left(\frac{\Delta z_{un} - \Delta z_{dn}}{\Delta y_{un} - \Delta y_{dn} + H}\right)(y_0 + v_y t_n) + v_z t_n + \left(D_n + \frac{\Delta m}{2} + \Delta S\right) = 0 \quad (17)$$

式中,  $\Delta x_{un}$ 、 $\Delta y_{un}$ 、 $\Delta z_{un}$  与  $\Delta x_{dn}$ 、 $\Delta y_{dn}$ 、 $\Delta z_{dn}$  为光源和接收两端定位点的安装位置误差,  $\Delta m$  为对准误差,  $\Delta S$  为  $P_1$ 、 $P_6$  间距误差,  $A_n$ 、 $B_n$ 、 $C_n$ 、 $D_n$  为各幕原始参数,  $\alpha$ 、 $\beta$  为各斜幕初始设计角,  $t_n$  为弹丸经过各幕的时刻. 通过仿真弹丸通过各实际幕面的过程, 结合实际测量方程中各误差源对系统中被测弹丸各被测量的关系即可得到误差值对系统测量结果的影响.

通过以上方法, 可以将六光幕精度靶系统中的结构参数和常见误差转换为具体的幕面方程参数进行分析, 且此方法在弹道-幕面方程组有解的情况下不受具体幕面布置方式和弹道方向、速度限制, 具有广泛的适用性.

## 2 两种幕形结构下的精度分析及比较

六光幕精度靶的测时精度取决于所用数据采集系统自身的采样率和弹形信号算法提取精度, 在不更换测时系统的情况下, 理论测时误差不会发生变化. 因此, 本文仅分析比较双 V 和双平行两种幕形下, 结构参数及其误差对测量结果造成的影响. 为便于分析, 这里依据可能的六光幕精度靶工程化结构, 给出了其在  $XOZ$  和  $YOZ$  平面内的幕面投影, 分别如图 6(a) 和 6(b) 所示, 此处是以“双平行”结构为例给出幕面投影结构, “双 V 型”结构的幕面投影仅需修改图中光幕  $P_4$ 、 $P_5$  倾斜方向即可.

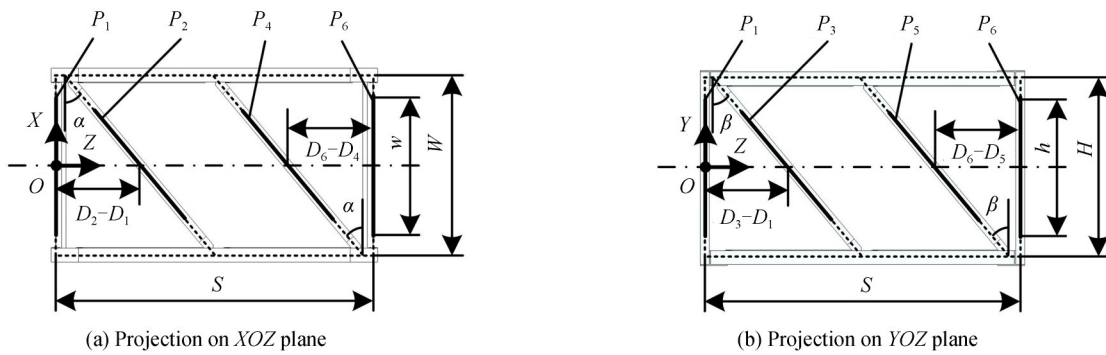


图 6 六光幕精度靶工程化结构的幕面投影示意图(双平行结构)

Fig. 6 Projection view of six-light-screen engineering model (double parallel structure)

设定一工程化六光幕精度靶的初始结构参数为: 靶距  $S=2.4$  m, 有效靶面  $w \times h=1$  m  $\times$  1 m, 外框尺寸  $W \times H=1.5$  m  $\times$  1.5 m, 斜幕倾斜角  $\alpha=\beta=37^\circ$ , 光幕  $P_2$ 、 $P_3$  与光幕  $P_1$  的中心距离  $D_2-D_1$ 、 $D_3-D_1$  均为 700 mm, 光幕  $P_4$ 、 $P_5$  与  $P_6$  的中心距离  $D_6-D_4$ 、 $D_6-D_5$  均为 700 mm, 弹丸入射速度分量为  $v_z=800$  m/s、 $v_x=50$  m/s、 $v_y=50$  m/s, 合速度  $v=803.12$  m/s. 基于以上结构参数构建各光幕平面方程, 结合式(15)~(17)所示含误差量测量模型, 进行各结构参数变化, 以及多误差源及大小变化下的坐标及速度测量误差分析.

## 2.1 靶距及靶距误差的影响

### 2.1.1 靶距误差的影响

经标定后最大靶距误差 $\Delta S$ 一般不超过1 mm,这里取 $\Delta S=1$  mm,仿真分析得到双平行和双V两种幕形结构下靶距误差 $\Delta S$ 引入的着靶坐标测量误差 $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 分布如图7所示,引入的速度测量误差 $\Delta v$ 分布如图8所示.其中,图7(a)、7(c)分别给出了双平行结构下靶面内的坐标测量误差分布;图7(b)、7(d)分别给出了双V形结构下靶面内的坐标测量误差分布.

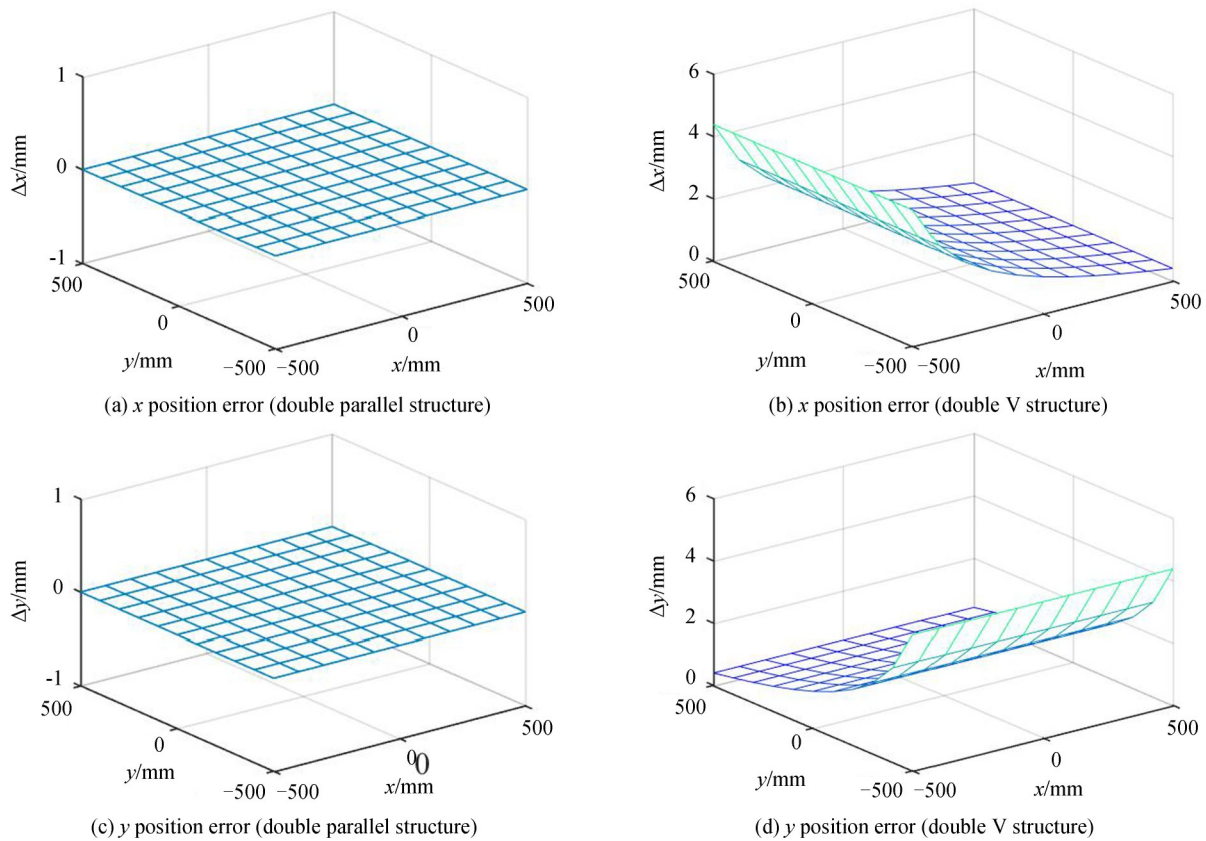


图7 靶距误差对着靶坐标测量误差的影响( $\Delta S=1$  mm)

Fig. 7 Position measurement error caused by target distance error in different impact location

从图7(a)、(c)中可以看出,对双平行结构而言,在结构参量和靶距误差不变时,弹丸入射坐标的测量误差不受靶距误差影响,其原因在于双平行结构下,光幕 $P_1$ 和四个倾斜幕面 $P_2 \sim P_5$ 的结构布置不变时,着靶坐标的解 $x_0$ 、 $y_0$ 出现特解情况,使光幕 $P_6$ 的参数变化对其结果不造成影响.从图7(b)、(d)可以看出,对双V型结构而言,靶距误差对坐标测量的影响明显,且弹丸入射点越靠近双V形结构的斜幕夹角区域(即V形底部),坐标测量误差受靶距误差影响越大;在上述结构参数下,1 mm的靶距误差所造成的靶面内最大的X、Y坐标测量误差值同为4.383 2 mm.可见,同等结构参数下及靶距误差下,双平行幕形结构的坐标测量误差受靶距误差的影响较小.

对比图6(a)、(b),结合待测量 $x_0$ 、 $y_0$ 在此布局下的含参解结构和图7(a)、(c),图7(b)、(d)仿真结果可以发现, $x_0$ 、 $v_x$ 与 $y_0$ 、 $v_y$ 的含参解模型与仿真结果相对于平面 $x+y=0$ 对称,即 $y_0$ 相关的误差分析结果可直接通过交换 $x_0$ 相关分析结果的X、Y坐标轴布置得到.为节省篇幅后文省略入射点纵坐标 $y_0$ 相关的分析图形.

从图8(a)中可以看出,对双平行结构而言,靶距误差引入的速度测量误差 $\Delta v$ 不随弹丸入射位置的变化而变化,即在整个靶面内各处的速度测量误差 $\Delta v$ 相同,1 mm靶距误差所造成的入射速度测量误差为0.708 8 m/s,其对应的相对测速误差为0.088%;从图8(b)中可以看出,对双V形结构而言,越靠近斜幕夹角区域,速度测量误差受靶距误差影响也越大,在入射位置同时接近两组斜幕的夹角区域时,速度测量误差受靶距误差影响最大,1 mm靶距误差所造成的入射速度测量误差为4.210 0 m/s,其对应的相对测速误差为0.52%.可见,

同等结构参数及靶距误差下,双平行幕形结构的速度测量误差受靶距误差的影响小.

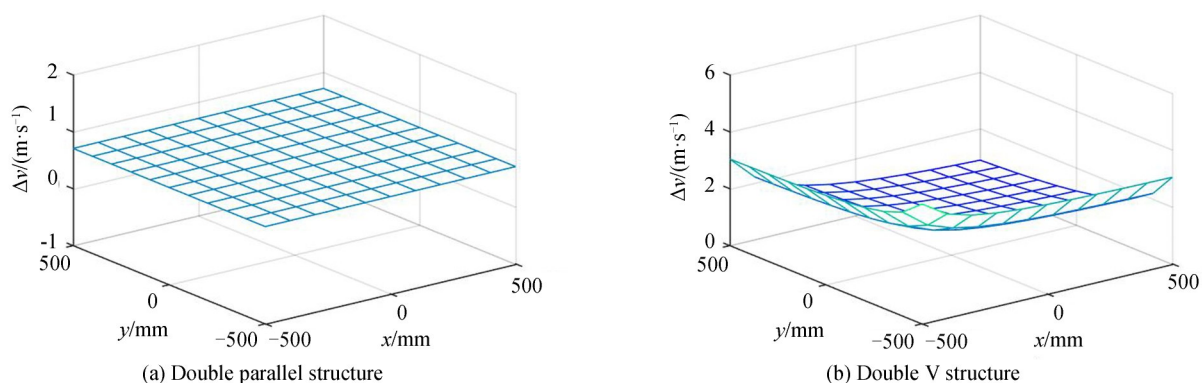


图8 靶距误差对速度测量误差的影响( $\Delta S=1$  mm)

Fig. 8 Velocity measurement error caused by target distance error ( $\Delta S=1$  mm)

为进一步分析两种幕形结构中,相同靶距下靶距误差大小对测量的影响,取入射位置为 $(-500, -500)$ ,即测量误差最大的入射位置,结构参量不变,仿真得两种幕形结构下不同靶距误差大小对坐标和速度测量误差最大值的影响如图9所示.

从图9(a)中可以看出,对于双V形结构而言,靶距误差越大,相应的引入的坐标测量误差极大值也越大,且坐标测量误差的极大值随靶距误差的增长呈线性关系.从图9(b)中可以看出,两种幕形结构下,靶距误差越大,速度测量误差极大值也越大,且同样呈线性增长关系;相同靶距误差下,双V形结构中的测量误差要远大于双平行结构.

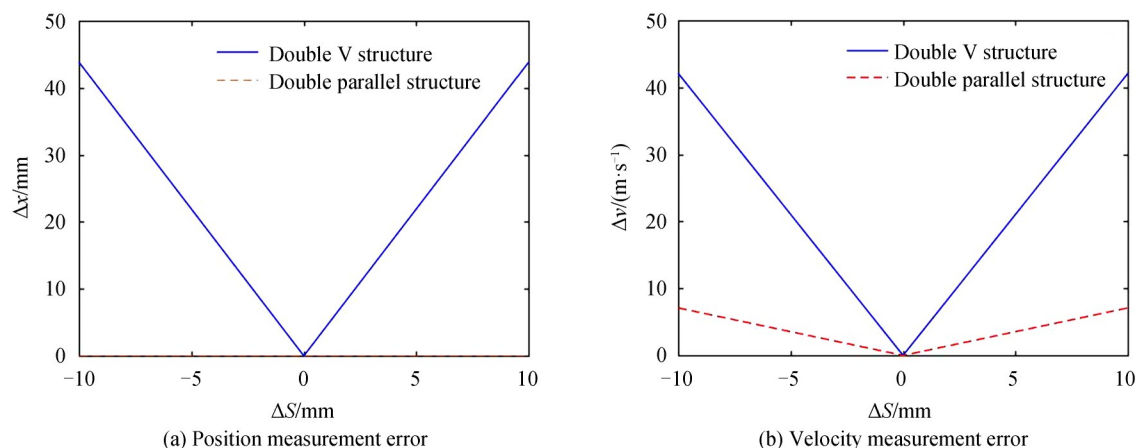


图9 不同靶距误差引入的坐标和速度测量误差极大值

Fig.9 Maximum position and velocity measurement error caused by different target distance error

### 2.1.2 靶距的影响

为进一步比较两种幕形结构中靶距误差相同情况下,不同靶距值对测量的影响,取入射位置为 $(-500, -500)$ ,靶距误差不变(取 $\Delta S=1$  mm),仿真得靶距值大小对坐标和速度测量误差极大值的影响分别如图10和图11所示.从图10和图11可以看出,随着靶距增大,两种幕形结构下的坐标和速度测量误差均逐渐降低.

综合上述分析可知,在其他参数不变的情况下,增大靶距有利于提高着靶坐标和飞行速度的测量精度;双平行结构的测量误差分布平均,且整体测量精度受靶距误差影响较小;双V型结构在弹丸入射位置接近斜幕夹角区域时误差较高,且整体测量精度受靶距误差影响较大.在实际设计中,应优先选用双平行结构,并在满足技术指标要求的情况下尽量增大靶距.



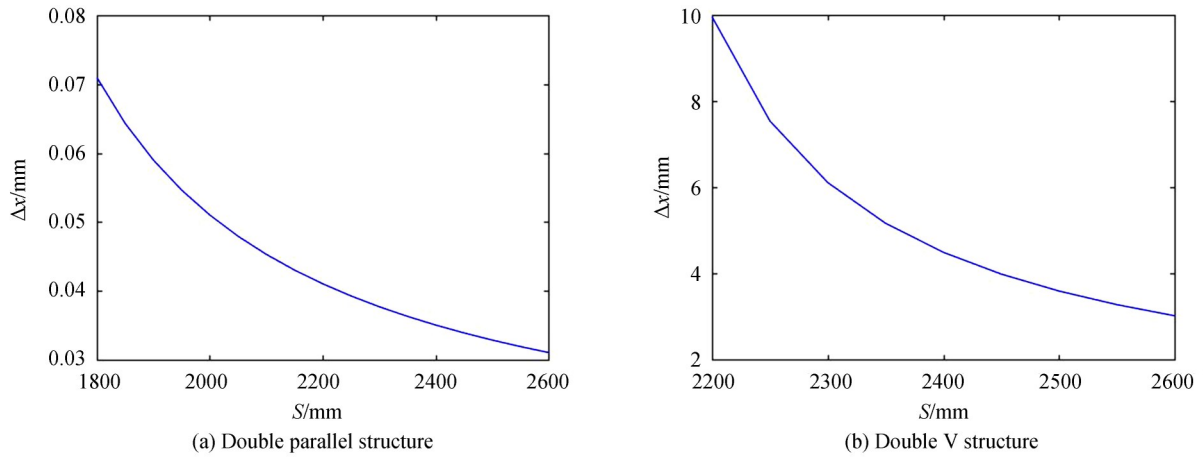


图 10 靶距设计值所对应的着靶坐标测量误差最大值( $\Delta S=1\text{ mm}$ )  
 Fig. 10 Maximum position measurement error caused by different target distance( $\Delta S=1\text{ mm}$ )

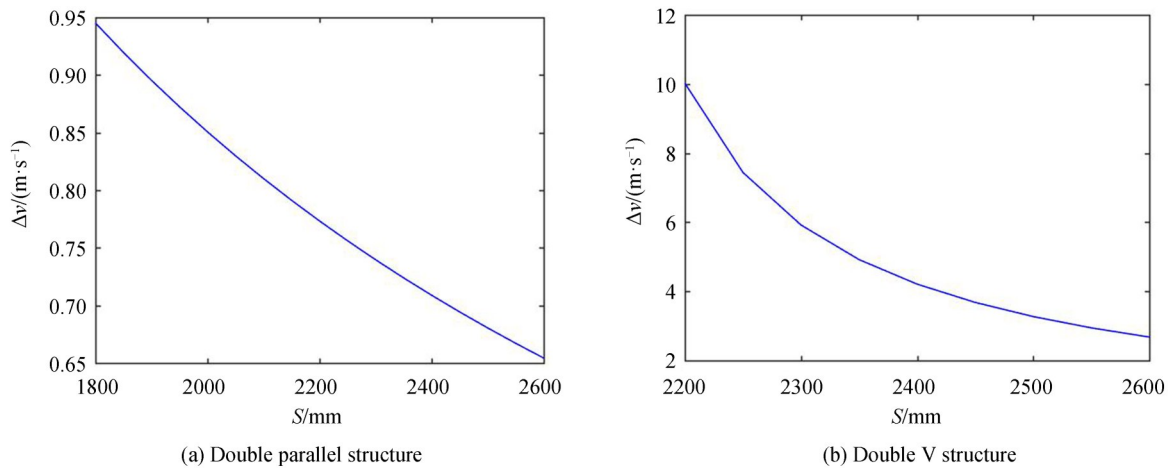


图 11 靶距设计值所对应的入射速度测量误差最大值( $\Delta S=1\text{ mm}$ )  
 Fig. 11 Maximum velocity measurement error caused by different target distance( $\Delta S=1\text{ mm}$ )

## 2.2 斜幕倾角及倾角误差的影响

### 2.2.1 斜幕倾角误差的影响

考虑到经标定后各幕面定位误差一般不会超过 1 mm,依据本文所给出的结构参数可计算得所造成的最大幕面倾角误差约为  $0.04^\circ$ ,这里取  $\Delta\alpha=0.05^\circ, \Delta\beta=0.05^\circ$ ,进行斜幕倾斜角误差对测量的影响分析.图 12 和图 13 分别为双平行和双 V 两种幕形结构下倾角误差引入的坐标测量误差分布和速度测量误差分布.

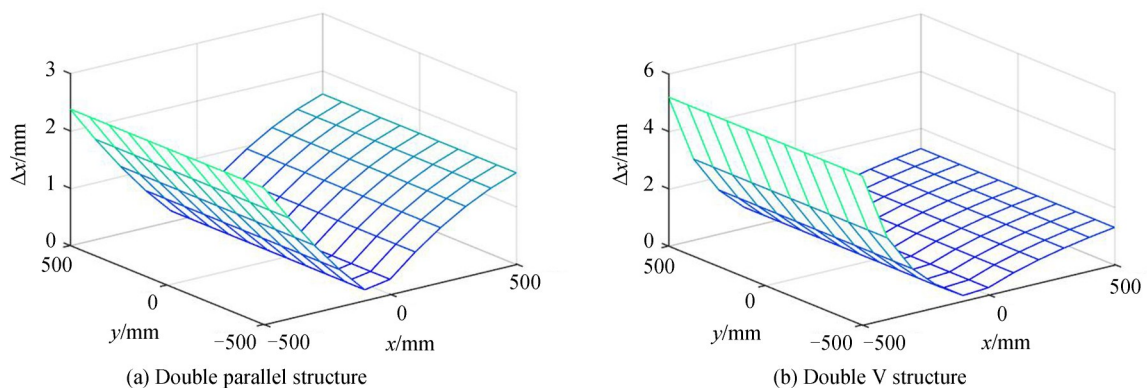
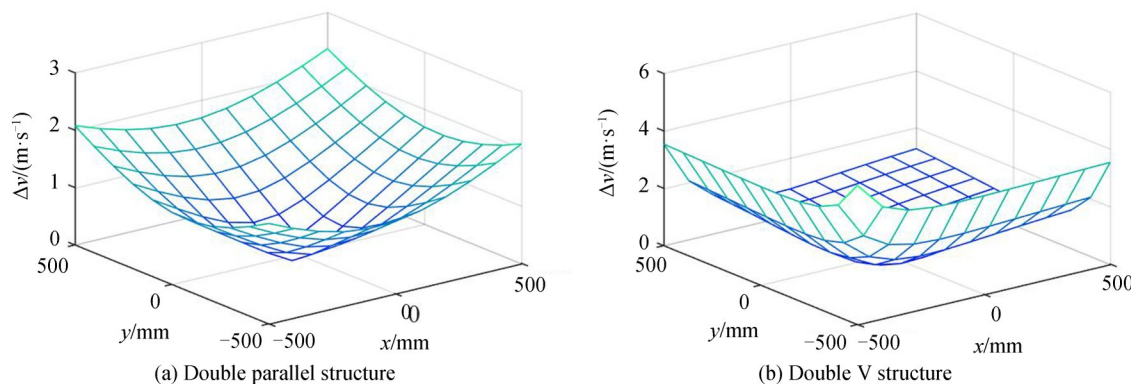


图 12 角度误差对着靶坐标测量误差的影响( $\Delta\alpha=0.05^\circ$ )  
 Fig. 12 Position measurement error caused by light-screen tilt angle error in different impact location( $\Delta\alpha=0.05^\circ$ )

图 13 角度误差对飞行速度测量误差的影响( $\Delta\alpha=0.05^\circ, \Delta\beta=0.05^\circ$ )Fig. 13 Velocity measurement error caused by light-screen tilt angle error in different impact location ( $\Delta\alpha=0.05^\circ, \Delta\beta=0.05^\circ$ )

对比图 12 和图 13 中两种结构下的测量误差分布结果可以看出,在结构参量和倾角误差相同时,双平行结构中引入的坐标测量误差和速度测量误差的最大值均较小,着靶位置离幕面中心越远,测量误差越大;双 V 形结构中引入的坐标和速度测量误差的最大误差值均较大,尤其在接近两斜幕夹角区域时的整体误差最大,且离斜幕夹角顶点越远,误差越小.取  $\Delta\alpha=0.05^\circ, \Delta\beta=0.05^\circ$  时,双平行结构下引入的坐标测量误差最大值为 2.379 8 mm,入射速度测量误差最大值为 2.363 9 m/s,其对应的相对测速误差为 0.29%;双 V 结构下引入的坐标测量误差最大值为 5.194 2 mm,入射速度测量误差最大值为 4.843 6 m/s,其对应的相对测速误差为 0.60%.

为进一步分析比较两种幕形结构中,相同斜幕角度下,斜幕角度误差大小变化对测量的影响,取入射位置为  $(-500, -500)$ ,即测量误差最大的入射位置,分析角度误差大小对坐标测量误差和速度测量误差的影响如图 14 所示.

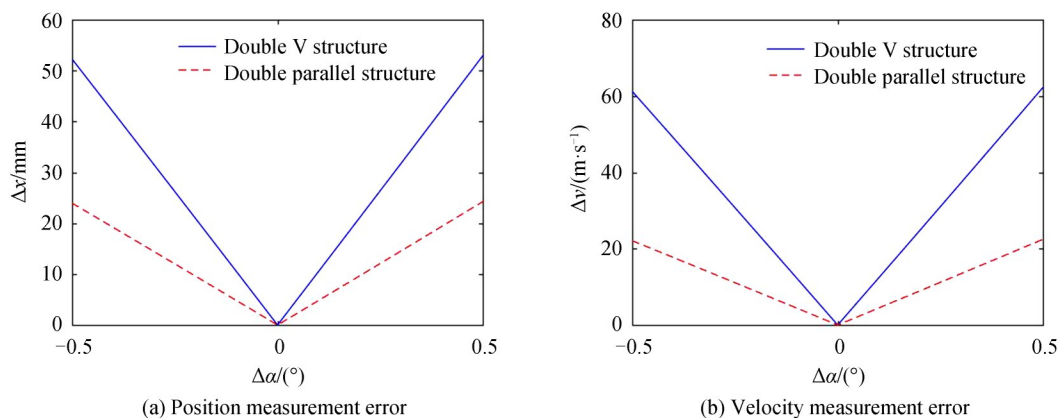


图 14 斜幕角度误差所引入的测量误差最大值

Fig. 14 Maximum position and velocity measurement error caused by different tilt angle error

从图 14 可以看出,两种幕形结构下,斜幕倾斜角度误差越大,相应的坐标测量误差和速度测量误差极大值越大,且均随斜幕角度误差呈线性增长关系;相同斜幕角度误差下,双 V 形结构的测量误差远大于双平行结构.

### 2.2.2 斜幕倾角大小的影响

取入射位置为  $(-500, -500)$ ,斜幕角度误差  $\Delta\alpha=0.05^\circ, \Delta\beta=0.05^\circ$  不变,各斜幕中心点位置不变,仿真分析不同斜幕倾斜角度下坐标和速度测量误差如图 15~16 所示.从图中可以看出,双平行结构中,当倾斜角为  $39^\circ$  左右时,斜幕角度误差对坐标测量误差的影响最小,斜幕倾斜角度为  $45^\circ$  左右时,角度误差对飞行速度测量结果的影响最小;双 V 型结构中,相同斜幕角度误差下,着靶坐标和飞行速度测量误差随斜幕倾斜角度值的增大而越大,也即斜幕角度越小,误差越小.

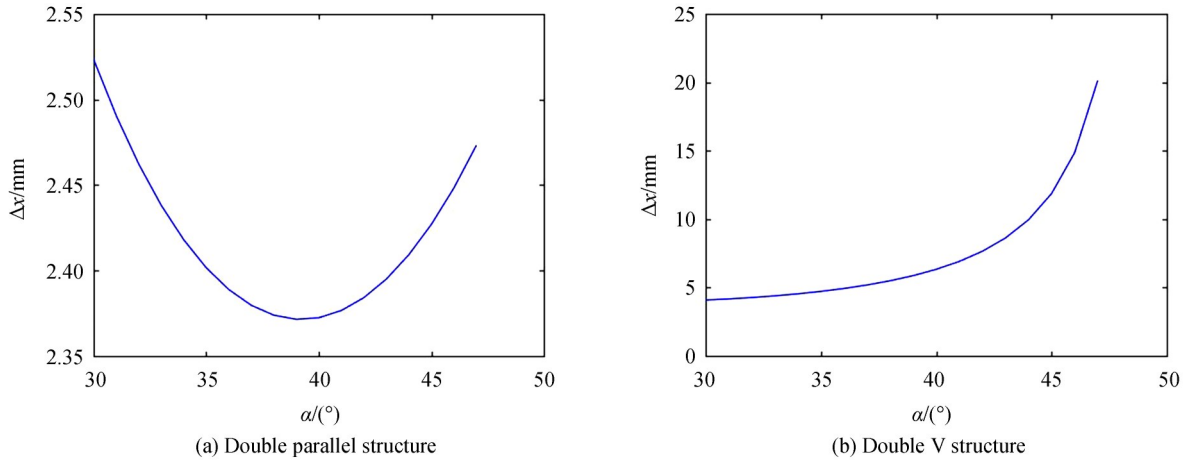

 图15 结构角设计值所对应的着靶坐标测量误差最大值( $\Delta\alpha=0.05^\circ, \Delta\beta=0.05^\circ$ )

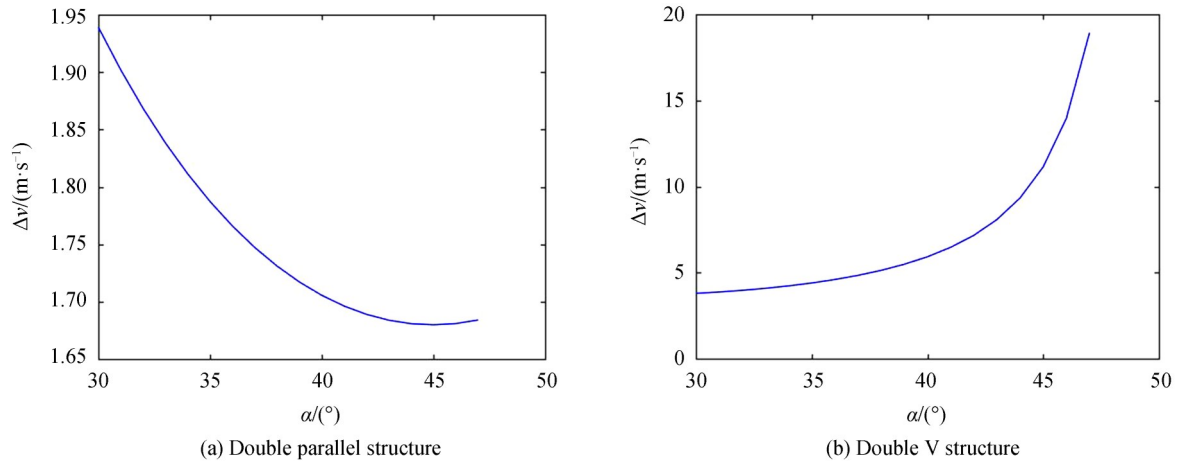
 Fig.15 Maximum position measurement error caused by different tilt angle( $\Delta\alpha=0.05^\circ, \Delta\beta=0.05^\circ$ )

 图16 不同斜幕角度取值下对应的速度测量误差最大值( $\Delta\alpha=0.05^\circ, \Delta\beta=0.05^\circ$ )

 Fig.16 Maximum velocity measurement error caused by different tilt angle( $\Delta\alpha=0.05^\circ, \Delta\beta=0.05^\circ$ )

综合上述分析可知,在其他参数不变的情况下,双平行结构的斜幕设计角度在 $39^\circ\sim 45^\circ$ 之间取值为宜,实际可根据对速度和着靶坐标测量精度的不同需求进行合理分配;若采用双V型结构,斜幕设计角度应尽量减小.

### 2.3 光幕对准误差的影响

在安装与调整过程中光源和接收主要通过光源和接收中内置的光幕指示激光进行辅助对准,幕面的对准精度一般不低于 $1\text{ mm}$ ,取 $\Delta m=1\text{ mm}$ ,仿真得该对准误差引入的坐标和速度测量误差分布如图17和图18所示.

对比图17(a)、(b)可以看出,在结构参量和对准误差不变时,双V形结构的误差较高,双平行结构的坐标测量误差随着入射位置接近光源区域幕面变形最大处而增大,双V形结构的坐标测量误差随着入射位置接近两倾斜光幕夹角区域(即V形底部)幕面变形最大处而明显增加.双平行结构下因对准误差引入的坐标测量误差最大误差值为 $1.5482\text{ mm}$ ,双V形结构下因对准误差引入的坐标测量误差最大误差值为 $7.4643\text{ mm}$ .对比图18(a)、(b)可以看出,对双平行结构而言,越接近有效测量区域顶点,速度测量误差越大,最大值为 $0.5073\text{ m/s}$ ,其对应的相对测速误差为 $0.06\%$ ;对双V形结构而言,越接近双V形结构的斜幕夹角区域幕面变形最大处,速度测量误差越大,最大值为 $4.9100\text{ m/s}$ ,其对应的相对测速误差为 $0.61\%$ .

为进一步分析两种幕形结构中,不同对准误差大小对测量的影响,取入射位置为 $(-500, 500)$ ,即测量误差最大的入射位置,结构参量不变,分析对准误差中 $\Delta m$ 对坐标和合速度的测量误差影响如图19所示.可

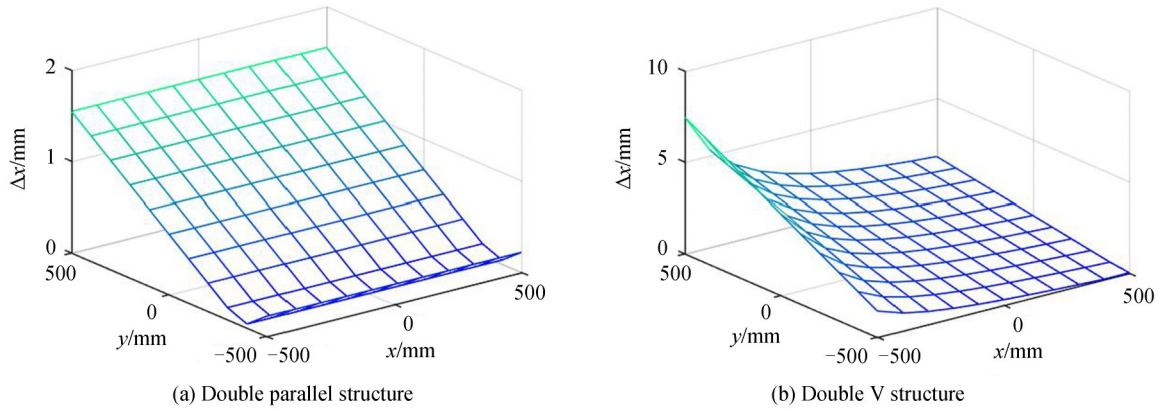


图 17 对准误差对着靶坐标测量误差的影响( $\Delta m=1\text{ mm}$ )  
 Fig. 17 Position measurement error caused by alignment error in different impact location( $\Delta m=1\text{ mm}$ )

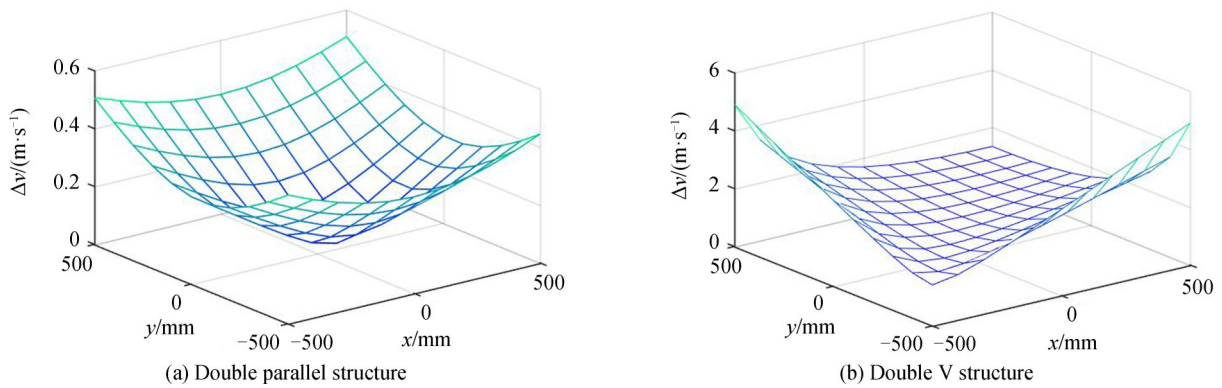


图 18 对准误差对飞行速度测量误差的影响( $\Delta m=1\text{ mm}$ )  
 Fig. 18 Velocity measurement error caused by alignment error in different impact location( $\Delta m=1\text{ mm}$ )

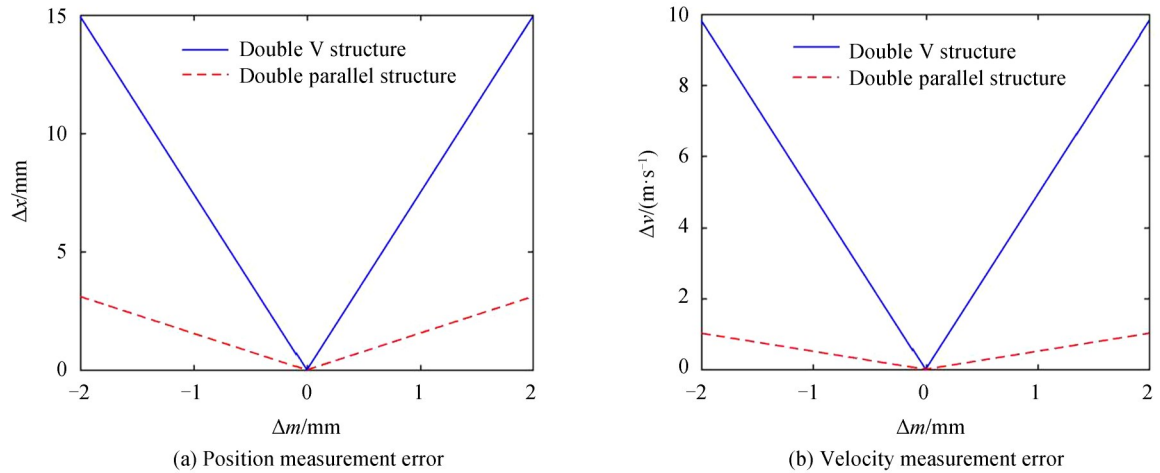


图 19 对准误差所对应的测量误差最大值  
 Fig. 19 Maximum position and velocity measurement error caused by different alignment error

可以看出,两种幕形结构下,对准误差越大,相应的坐标和速度测量误差最大值越大,且均随对准误差呈线性增长关系;相同对准误差下,双V形结构的测量误差远大于双平行结构。

### 3 工程实例分析

依据图1(b)结构,采用图2(a)所示双平行幕面布置,在上述分析基础上,设计一双平行布局六光幕精度

靶工程结构,其基本参数为:靶距 $S=2.4$  m,有效靶面 $w \times h=1$  m $\times$ 1 m,外框尺寸 $W \times H=1.6$  m $\times$ 1.6 m,斜幕倾斜角 $\alpha, \beta=41^\circ$ ,光幕 $P_2, P_3$ 与光幕 $P_1$ 的中心距离 $D_2-D_1, D_3-D_1$ 均为700 mm,光幕 $P_4, P_5$ 与 $P_6$ 的中心距离 $D_6-D_4, D_6-D_5$ 均为700 mm. 此处取其加工及装调过程所能控制的最大靶距误差 $\Delta S=0.5$  mm,各安装位置于 $X, Y$ 轴上最大偏移量为0.5 mm,于 $Z$ 轴上最大偏移量为0.5 mm,各光幕使用内置点激光器进行对准的精度 $\Delta m=1$  mm.

此处对弹丸的两种典型入射状态下的测量精度进行预估,弹丸速度 $v=800$  m/s. 如图20所示,弹丸飞行的俯仰、方向角为 $+1^\circ$ ,从有效靶面的不同位置入射时,有效靶面内坐标测量误差最大值为1.999 6 mm,速度测量误差最大值为0.748 8 m/s,所对应的相对测速误差为0.09%. 如图21所示,弹丸从第一幕有效幕面中心处以最大 $\pm 12^\circ$ 的方向、俯仰角入射时有效靶面内坐标测量误差最大值为0.575 2 mm,速度测量误差最大值为0.696 1 m/s,所对应的相对测速误差为0.09%. 以上各分析结果均可满足3 mm的坐标测量误差指标和0.3%的相对测速误差指标.

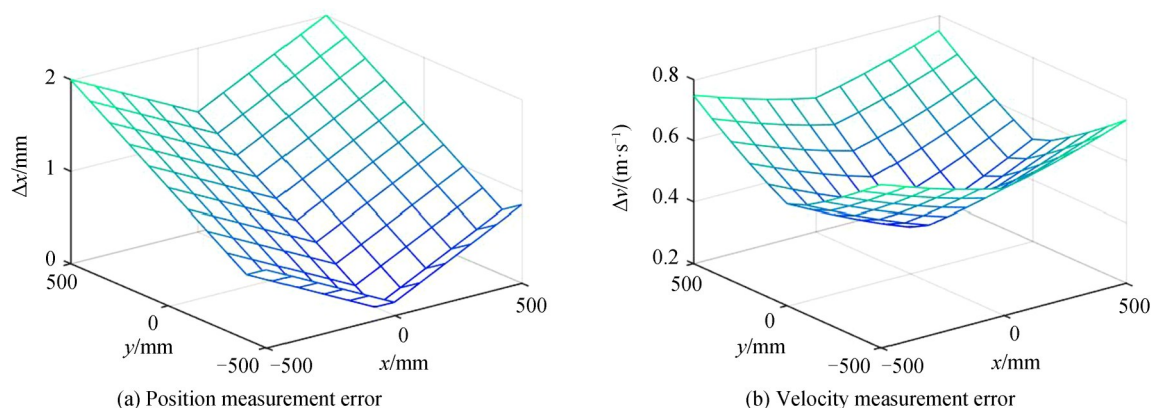


图20 不同入射位置下有效靶面内的测量误差分布( $\gamma=+1^\circ, \theta=+1^\circ$ )  
Fig. 20 Measurement error in different impact location( $\gamma=+1^\circ, \theta=+1^\circ$ )

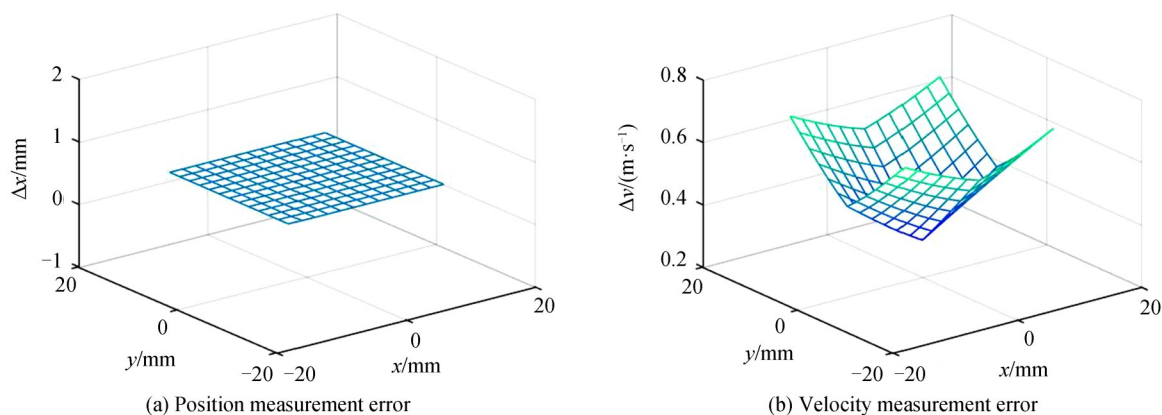


图21 同一入射位置下不同入射角度下的测量误差分布( $x_0=0, y_0=0$ )  
Fig. 21 Measurement error in different impact angle( $x_0=0, y_0=0$ )

## 4 结论

本文基于平面方程法构建了六光幕精度靶的工程化结构模型、解算方法及误差分析模型,基于上述模型仿真分析比较了“双平行”和“双V”两种不同幕形结构下不同参量对六光幕精度靶着靶坐标和飞行速度测量精度的影响,结果表明:1)同等靶距、斜幕结构参数及误差影响下,双平行结构的测量精度明显高于双V型结构;2)增加设计靶距有利于提高系统整体测量精度;3)双平行结构下,为降低测量误差,斜幕角度取 $39^\circ \sim 45^\circ$ 为宜;本文研究成果可为满足既定参数指标要求的六光幕精度靶结构参数及误差许可范围的确定提供理论指导,文中最后给出了一六光幕精度靶幕面布局,精度预估结果显示这一布局在既定条件下的理论精度

可以满足指标需求.但需要指出的是,实际六光幕精度靶装调完成后,一般还需借助高精度的标定技术对实际幕面空间位置进行精确标定,以获得更高精度的测量结果,这部分工作将另文进行探讨.

### 参考文献

- [1] LEE H S, WON J S, PARK K S, *et al.* Acoustic target impact point identification system[C]. 2017 4th International Conference on Systems and Informatics, ICSAI 2017:1071-1075.
- [2] 闵想.基于TDOA的声学立靶自动报靶方法研究[D].南京:南京理工大学,2014.
- [3] WANG Miao, LI Hua. Capturing of CCD vertical target measurement system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(6): 1539-1542.  
王苗,李华.CCD立靶测量系统目标捕获性能研究[J].光子学报,2009,**38**(6):1539-1542.
- [4] LI Hua, LEI Lei, CHANG He-min, *et al.* Research on capture rate of the 4×4m<sup>2</sup> CCD Measurement System[J].*Acta Photonica Sinica*,2008, **37**(6):1238-1241.  
李华,雷蕾,常何民,李国富.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.
- [5] WANG Yan, YUAN Feng, CHEN Wei. High precision pose calculation of space target based on three linear array CCD [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, **38**(5): 207-215.  
王艳,袁峰,姜宏,陈伟.基于三线阵CCD空间目标的高精度位姿解算[J].光学学报,2018,**38**(5):207-215.
- [6] TIAN Hui, NI Jin-ping, JIAO Ming-xing. 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.
- [7] CHEN Rui, NI Jin-ping, LIU Jin-long. 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.
- [8] HPI.B472 Precision light screen[EB/OL].[2019-9-29].<https://www.hpi-gmbh.com/index.php/standard-ballistic/product/view/2/12>.
- [9] TIAN Hui, NI Jin-ping. 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.
- [10] FENG Bin, NI Jin-ping, YANG Lei. Principle of measuring impacting position of vertical target of six-light-screens[J]. *Journal of Ballistics*, 2008, **20**(1): 59-61.  
冯斌,倪晋平,杨雷.六光幕结构立靶坐标测量原理[J].弹道学报,2008,**20**(1):59-61.
- [11] GAO Fen, ZENG Xiang-wei, NI Jin-ping, *et al.* Modeling and measurement accuracy analysis of four-light-screen optical target[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(8): 33-39.  
高芬,曾祥伟,倪晋平,安莹.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):33-39.
- [12] NI Jin-ping, TIAN Hui. The principle of measuring position of bullet at any direction incidence[J]. *Optical Technique*, 2006,**32**(4):889-891.  
倪晋平,田会.斜入射弹丸着靶位置立靶测量原理[J].光学技术,2006,**32**(4):493-495.
- [13] 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.
- [14] FENG Bin, SHI Hui-xia, KANG Zhi-qiang. Study of the bullet position measuring model with six light screens[C]. SPIE, 2011.
- [15] CHEN Rui. NI Jin-ping, HU Xu. Measurement accuracy analysis of double-v shaped six-light-screen array [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, **43**(1): 24-29.  
陈瑞,倪晋平,胡旭.双V型六光幕阵列测试精度分析[J].光电工程,2016,**43**(1):24-29.
- [16] TIAN Hui. Research on the flight parameters measurement method for projectiles with variable velocity curvilinear trajectory using light-screen array[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2016.  
田会.基于光幕阵列的变速曲线弹道弹丸飞行参数测量方法研究[D].西安:西安理工大学,2016.

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China(No.61471289), Basic Technology Research Project of National Defense Science and Engineering Bureau(No.JSJL2016208B005), Basic Scientific Research Project of the Science and Technology Department of Shaanxi Province(No.2019JM-601), Key Industry Innovation Chain Project of Science and Technology Department of Shaanxi Province (No.2018ZDCXL-GY-08-02-01)