

doi:10.3788/gzxb20144312.1212001

弹丸穿过梯形光幕过幕时刻提取算法研究

田会^{1,2},倪晋平¹,焦明星²

(1 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院,西安 710048)

(2 西安工业大学 陕西省光电测试与仪器技术重点实验室,西安 710032)

摘 要:针对传统幕中触发时刻提取方法未考虑光幕幕厚分布不均匀而引入的测量误差,提出了一种弹丸以一定角度穿过光幕厚度呈倒梯形分布光幕的过幕时刻提取方法.通过分析光幕的空间分布,推导了相应的计算公式将弹尾到达光幕厚度中心面的时刻与弹丸穿过整个光幕时间的比值转换为中心面所在位置与弹丸在光幕中飞行距离的比值,利用迭代算法提取出弹尾到达光幕中心面的时刻,并计算出弹丸的外弹道飞行参数.实弹射击表明,算法在一定范围内可将六光幕阵列天幕立靶测量误差减小 1mm.

关键词:光电探测;六光幕阵列;信号处理;外弹道飞行参数;梯形光幕;时刻提取;着靶坐标

中图分类号:TJ012.3+6,TP206+.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-4213(2014)12-1212001-5

Moment Acquisition Algorithm of a Projectile Passing Through a Trapezoidal Screen

TIAN Hui^{1,2}, NI Jin-ping¹, JIAO Ming-xing²

(1 School of Mechanical Instrumental Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, 710048, China)

(2 Shaanxi Province Key Lab of Photoelectric Measurement and Instrument Technology, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

Abstract: A modified moment acquisition method of projectile going through a trapezoidal screen in certain angle was put forward, for mid-screen trigger has not taken measuring error caused by the screen's uneven thickness distribution into consideration in tradition. Firstly, the ratio of the position for the central plane and the distance for the projectile flight in the screen was calculated, then converted the ratio to the moment for the projectile trail arriving at the screen thickness' central plane and the time for the projectile going through the whole screen. Furthermore, using the iterative algorithm extracts the moment of the projectile trail arriving at the central plane, thus the space-time parameters of the projectile was calculated at the same time. The method was verified by the real projectile tests, and the results show that it has the capability to reduce 1mm measuring error of the six-light-screen array sky screen in certain range.

Key words: Photoelectric detection; Six-light-screen array; Signal processing; Flight parameter of external ballistics; Trapezoidal screen; Moment acquisition; Impacting coordinate

OCIS Codes: 120.4630; 250.4745; 120.4640; 120.4800; 250.0040

0 引言

弹丸飞行速度与空中预定位置的着靶坐标是衡量武器效能的核心指标,是兵器试验过程中的必测参数.

基于光电转换原理的光幕探测传感器由于具有非接触测试、响应速度快、体积小、灵敏度高和可靠性好等优点,已在外弹道参数测试领域得到广泛应用^[1-5].天幕靶^[6]是一种典型的光幕探测传感器,光电探测器件

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61471289, 61205135)、陕西省教育厅科研计划项目(No. 2013JK0957)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:田会(1980—),男,博士研究生,副教授,主要研究方向为兵器外弹道参数光电测试与信号处理. Email: tianh80@126.com

导 师:倪晋平(1965—),男,博士,教授,主要研究方向为兵器靶场试验与测试技术. Email: jpn@263.net

焦明星(1962—),男,博士,教授,主要研究方向为激光技术及器件、激光传感与测量技术. Email: jiaomx@xaut.edu.cn

收稿日期:2013-05-07; **录用日期:**2013-07-16

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

通过狭缝光阑和光学镜头在空间形成具有一定视场角度和一定厚度的扇形探测光幕. 在空间按照预定位置和角度布放六个光幕, 可构建六光幕阵列天幕立靶测量系统能实时测量弹丸飞行速度、着靶坐标和飞行速度方向角度^[7], 该系统的测量准确度取决于光幕阵列的空间结构参数测量准确度和弹丸穿过光幕阵列的时刻提取准确度. 文献[8]提出了光幕阵列空间结构参数的标定与反演方法; 弹丸穿过光幕阵列的时间测量准确度主要依赖于从弹丸穿过光幕时输出信号中时刻提取准确度. 文献[9-11]提出了弹丸过幕时刻提取算法, 均是将光幕的厚度理想化为均匀分布, 未考虑天幕靶光幕厚度呈倒梯形分布的实际情况. 当弹丸穿过倾斜的梯形光幕时, 由于弹丸过幕轨迹与光幕厚度中心面存在一定的角度, 现有过幕时刻提取算法存在误差. 为了提高天幕立靶的测量准确度, 本文提出一种弹丸穿过倾斜梯形光幕的时刻提取迭代算法, 降低了由于光幕厚度不均匀带来的弹丸过幕时刻测量误差.

1 梯形光幕过幕时刻信息提取误差

光幕面空间结构参数的标定过程是以六个光幕的厚度中心面作为测量基准计算得到的空间结构角度^[12], 因此需准确测量出弹丸上的特征位置点到达六个中心面的时刻, 由于弹丸尾部较为陡峭且易于标识, 通常被选作特征位置点. 飞行弹丸穿过光幕时, 输出具有一定时间宽度的过幕信号, 从中提取弹尾到达中心面的时刻作为特征时刻点, 该时刻点通常称为幕中触发时刻点. 现有过幕时刻信息提取方法大多将空间光幕简化为厚度均匀的幕面, 且弹丸长度大于或等于光幕厚度. 当弹尾到达中心面的瞬时, 弹丸遮挡的进入光电探测器件的光通量的变化量为最大遮光量的一半. 由于交流信号处理电路输出的过幕信号幅值与光能量的改变量在一定范围内呈线性关系, 因此幕中触发时刻对应的信号幅值为整个过幕信号中峰值的一半, 文献[11]对弹丸穿过光幕的整个过程进行了详细的说明.

当形成探测光幕的镜头焦距一定时, 狭缝光阑的长度决定了光幕的探测视场角度, 光阑的宽度决定了光幕的厚度. 由于光学镜头的放大作用, 光幕的厚度随着与镜头间距离的增大而逐渐变厚, 呈倒梯形分布. 由光学成像原理可知, 光幕幕厚 d 的计算公式为

$$d = (L/f - 1) \cdot b \quad (1)$$

式中 L 为过幕点与镜头的距离, b 为狭缝的宽度, f 为物镜焦距.

图 1 为弹丸穿过不同倾斜角度的梯形厚度光幕过程, 其中线段 AB 为弹道线与光幕的交线, 是弹丸在光幕中的实际飞行路径, C 点为弹道线与光幕厚度中心面的交点, D 点为线段 AB 的中心位置点, 当弹丸垂直

穿过光幕时, C 点与 D 点重合. 传统幕中触发时刻信息提取方法是采用半峰值触发法, 对应的弹丸过幕时刻是弹尾运动到 D 点的时刻. 当弹丸垂直穿过梯形光幕时, 如图 1(a), 提取的弹丸过幕时刻就是弹尾到达光幕厚度中心面的时刻. 当弹丸垂直铅锤面穿过倾斜的梯形光幕时, 如图 1(b), 原有幕中触发法计算得到的弹丸过幕时刻对应的位置 D 点与弹尾实际到达中心面的位置 C 点存在偏差, 从而带来一定的过幕时刻点提取误差, 即

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{V} \quad (2)$$

式中 Δs 为 C 点与 D 点的距离, 并随着光幕厚度的增加而增加.

在天幕立靶测量系统中, 由于弹道线与 6 个探测光幕均存在空间夹角, 因此采用现有方法会带来时间测量误差, 且随着弹道高度的增加, 误差逐渐增大.

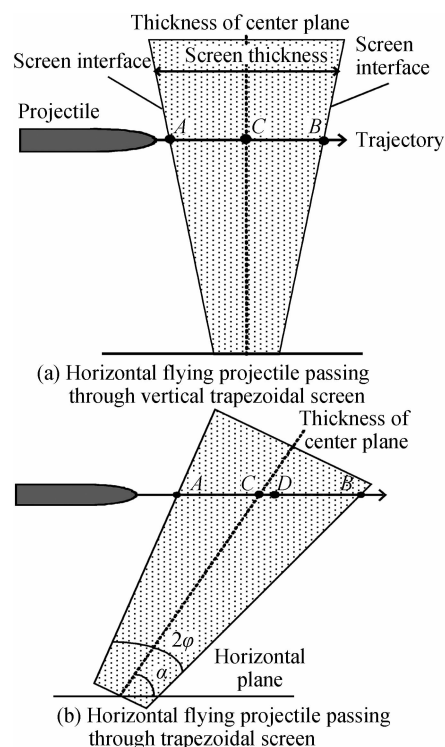


图 1 弹丸穿过不同角度梯形光幕示意图
Fig. 1 Schematic diagram of projectile passing through trapezoidal screen

2 梯形光幕时刻信息提取方法

为了修正现有过幕时刻提取算法在弹丸穿过倾斜光幕时带来的时间测量误差, 将光幕的厚度和空间位置角度引入梯形光幕过幕时刻信息提取算法中. 依据实际工程经验, 假设弹丸长度大于或等于光幕厚度, 且弹丸在光幕中飞行时间不大于 $300 \mu\text{s}$, 可认定弹丸在光幕内按匀速直线弹道飞行. 将弹尾到达光幕中心面的时刻与弹丸穿过整个光幕时间的比值转换为中心面

所在位置与弹丸在光幕中飞行距离的比值.考虑到弹丸的外形为近似圆柱体,弹丸穿过光幕的过程中信号处理电路输出的过幕信号幅值的变化率等效于弹尾在光幕中的位置与弹丸在光幕中飞行距离的比值,因此可将弹尾达到中心面的时刻转换为信号幅值与峰值的比值.

2.1 存在俯仰角时过幕时刻信息提取算法

弹丸飞行速度的俯仰角是速度矢量与水平面的夹角,图1(b)中,假定弹道线与水平面平行,也即俯仰角为0.设O点为光幕厚度方向两个边界线的交点(图中未画出),光幕厚度方向角度 $\angle AOB=2\varphi$,可由狭缝光阑的宽度与镜头焦距计算得到;光幕厚度中心面与水平面夹角 α ,可采用光学方法精确测量得到.当光幕沿弹道方向倾斜时 $\alpha>0$,反之 $\alpha<0$.

在 $\triangle ACO$ 中

$$\frac{AC}{\sin \varphi} = \frac{AO}{\sin \alpha} \quad (3)$$

在 $\triangle AOB$ 中

$$\frac{AB}{\sin 2\varphi} = \frac{AO}{\sin (\alpha - \varphi)} \quad (4)$$

式(3)与式(4)联立求解,计算出比例系数 k_1 .

$$k_1 = \frac{AC}{AB} = \frac{\sin (\alpha - \varphi)}{2 \sin \alpha \cos \varphi} = \frac{\sin (\alpha - \varphi)}{\sin (\alpha + \varphi) + \sin (\alpha - \varphi)} \quad (5)$$

当飞行弹丸具有俯仰角 θ 时(若弹丸向上飞行时 $\theta>0$,反之 $\theta<0$).首先分析 $\theta>0$ 的情况,由图2可推导出:

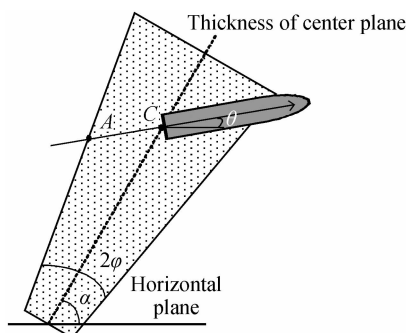


图2 任意角度飞行弹丸穿过倾斜梯形光幕

Fig.2 Projectile passing through declining trapezoidal screen at random angle

在 $\triangle ACO$ 中,

$$\frac{AC}{\sin \varphi} = \frac{AO}{\sin (\alpha - \theta)} \quad (6)$$

在 $\triangle AOB$ 中,

$$\frac{AB}{\sin 2\varphi} = \frac{AO}{\sin (\alpha - \theta - \varphi)} \quad (7)$$

式(6)与式(7)联立求解,计算出比例系数 k_2 ,

$$k_2 = \frac{AC}{AB} = \frac{\sin (\alpha - \theta - \varphi)}{2 \sin (\alpha - \theta) \cos \varphi} = \frac{\sin (\alpha - \theta - \varphi)}{\sin (\alpha - \theta + \varphi) + \sin (\alpha - \theta - \varphi)} \quad (8)$$

系数 k_1 与 k_2 不随弹丸穿过光幕位置高度的变化而变化,仅与光幕倾斜角度和弹丸入射角度相关.

将式(6)~(8)引入过幕信号分析算法中,可准确计算出弹尾到达光幕中心面的时刻.具体步骤为:

1)利用高速数据采集装置采集弹丸穿过光幕阵列时输出的6路过靶幕信号,利用曲线拟合的方法分别得到每路信号的函数表达式为

$$u_i = f(t_i) \quad (i \text{ 为光幕序号}, i=1,2 \cdots 6) \quad (9)$$

2)假定弹道线与水平面平行,以光幕1输出信号 u_1 为例,确定过幕信号的峰值电压 $u_{1-\max}$.依据光幕1的厚度方向角度和倾斜角度,由式(5)计算出系数 k_1 ,根据式(10)计算出弹尾到达中心面对应的信号幅值 $u_{1-\text{mid}-1}$.

$$u_{1-\text{mid}-1} = k_1 \cdot u_{1-\max} \quad (10)$$

3)弹尾离开光幕的过程对应过幕信号幅值下降的过程,根据式(11)计算出 $u_{1-\text{mid}-1}$ 对应的时刻值 t_{1-1} .

$$t_{1-1} = f^{-1}(u_{1-\text{mid}-1}) \quad (t_{1-1} > t_{1-\max}) \quad (11)$$

式中, $t_{1-\max}$ 为 $u_{1-\max}$ 对应的时刻值.

4)参照步骤2)与3),分别计算出弹丸穿过其余5个光幕的时刻值 $t_{i-1} \quad (i=2,3 \cdots 6)$.

5)将计算出的6个时刻值和布靶参数带入天幕立靶测试系统俯仰角测量公式中^[13],计算出飞行弹丸速度方向俯仰角的近似值 θ' ;

6)将 θ' 近似为 θ 带入式(8),计算出每个光幕对应的比例系数 k_2 ,根据式(12)和式(13)计算出每个光幕新的幕中触发信号幅值 $u_{i-\text{mid}-2}$ 和对应的时刻值 $t_{i-2} \quad (i=1,2 \cdots 6)$.

$$u_{i-\text{mid}-2} = k_{2i} \cdot u_{i-\max} \quad (12)$$

$$t_{i-2} = f^{-1}(u_{i-\text{mid}-2}) \quad (13)$$

7)重复步骤5)和6),进行迭代运算,将每次计算出的新 k_{2i} 替换掉原值.当 $|t_{i-j} - t_{i-(j-1)}| < 0.1 \mu\text{s}$ 时(j 为迭代次数),即可认为计算出的数值接近真值,也即为弹尾到达光幕中心面的时刻值.依据6个时刻值便可准确计算出弹丸飞行参数.

依据六光幕阵列测量公式的误差仿真计算可知,当时间测量误差小于 $0.1 \mu\text{s}$ 时,由时间测量误差引起的弹丸飞行参数测量误差已可忽略不计^[14].

图3为过幕时刻信息计算方法示意图,其中采样

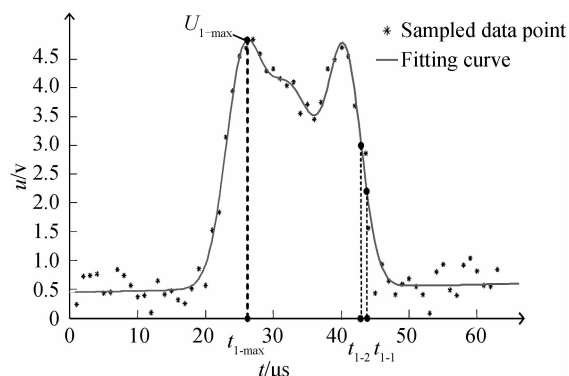


图3 过幕时刻信息计算方法示意图

Fig.3 Chart of moment acquisition method

数据点是采集装置按照 1 MHz 采样率采集的气枪弹穿过光幕时的信号波形,拟合曲线是利用 4 次高斯公式拟合得到的函数曲线^[15].

当弹丸向下飞行时($\theta < 0$),分析几何关系,将负角度 θ 带入上述计算公式仍然适用.

2.2 方位角对过幕时刻信息提取的影响

弹丸飞行速度的方位角是速度矢量在水平面上的投影与预定弹道线的夹角.由于光幕厚度在平行于水平面的截面上的形状为矩形,且矩形的中心对称线为光幕厚度中心面的截面线.当弹丸以一定的方位角穿过光幕时,弹道线与光幕交线的中点始终位于中心面的截面线上,也即 C 点始终是线段 AB 的中点,如图 4 所示,因此方位角对过幕时刻信息提取无影响.

3 试验验证

为了验证研究算法的有效性,对采集的弹丸过幕信号按照传统幕中触发时刻信息提取方法和本论文研究的梯形光幕过幕时刻信息提取方法分别进行计算,得到弹丸的时空位置信息,并与木板靶上的弹孔坐标进行比对.试验采用 7.62 mm 步枪弹和 30 mm 航弹分别进行实弹射击,两台三光幕天幕靶的靶距 $S =$

5 215 mm;木板靶置于截止靶后方, $l = 6 700$ mm.试验过程中,每射击一发,人工在木板靶上标识该发弹丸的序号.试验结束后,以第一发弹丸作为基准,人工利用钢板尺测出木板靶上每个弹孔的(z, y)坐标,并与天幕立靶测量的坐标进行比较.表 1 为部分试验数据,其中天幕立靶-1 的数据为采用传统时刻信息提取方法计算得到的数据,天幕立靶-2 的数据为采用本文方法计算得到的数据,坐标差值-1 为天幕立靶-1 与木板靶数据的差值,坐标差值-2 为天幕立靶-2 与木板靶数据的差值.

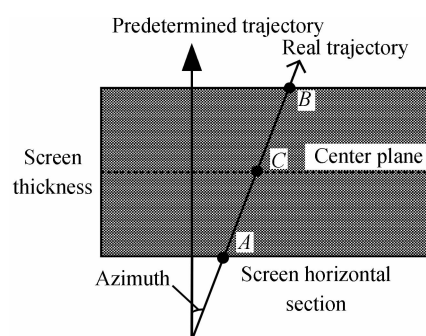


图 4 方位角对过幕时刻信息提取的影响
Fig. 4 Affect of azimuth for moment acquisition

表 1 实弹射击试验数据
Table 1 The data of real projectile test

NO.	Caliber/ mm	Coordinate of wooden target		Coordinate of sky screen target-1		Coordinate of sky screen target-2		Coordinate difference-1		Coordinate difference-2	
		z /mm	y /mm	z /mm	y /mm	z /mm	y /mm	z /mm	y /mm	z /mm	y /mm
1	7.62	-299	-76	-295.2	-72.6	-296.9	-73.5	3.8	3.4	2.1	2.5
2	7.62	-323	193	-326.6	196.7	-325.0	194.9	-3.6	3.7	-2	1.9
3	7.62	-265	-436	-267.0	-433.0	-266.7	-433.2	-2.0	3.0	-1.7	2.8
4	7.62	477	129	480.6	133.1	479.2	131.1	3.6	4.1	2.2	2.1
5	7.62	283	-357	279.8	-355.2	280.0	-355.4	-3.2	1.8	-3	1.6
6	30	-174	167	-168.2	163.1	-169.6	163.6	5.8	-3.9	4.4	-3.4
7	30	-217	365	-221.3	360.5	-219.7	362.1	-4.3	-4.5	-2.7	-2.9
8	30	-300	324	-304.7	319.1	-303.5	320.4	-4.7	-4.9	-3.5	-3.6
9	30	-407	265	-403.2	267.8	-404.1	266.5	3.8	2.8	2.9	1.5
10	30	603	112	600.3	114.4	601.2	114.0	-2.7	2.4	-1.8	2.0

结果分析:与木板靶测量数据进行比较,采用梯形光幕过幕时刻信息提取方法计算的弹丸着靶坐标准确度相比传统幕中触发时刻提取方法具有一定的提高,特别是随着弹道线高度的增加,该方法的有效性愈加明显.

4 结论

本文提出天幕立靶测试系统过幕时刻信息提取方法,可准确计算出弹丸尾部到达光幕厚度中心面的时

刻,提高六光幕天幕立靶的测量准确度,与半峰值时刻信息提取方法相比,具有以下优点:

1)天幕靶光幕(或者称为镜头式光幕)厚度在空域沿高度方向上呈倒梯形分布,更接近光幕的空间实际状态;

2)依据光幕的空间位置参数和飞行弹丸的俯仰角,利用过幕时刻信息提取迭代算法计算出弹尾到达梯形光幕厚度中心面时刻.

参考文献

- [1] GAUTHIER Jr L R, DRWRY Jr D G, BRUNNER L. Method for detecting projectile impact location and velocity vector[P]. US Patent, 7 197 197 B2, 2007. 3
- [2] LIAM H. Method and apparatus for detecting a launch position of a projectile [P]. US Patent, 8 454 691 B2, 2013. 5
- [3] 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.
- [4] DONG Tao, HUA Deng-xin, LI Yan, *et al.* Method for measuring dispersion of three projectiles impacting simultaneously[J]. *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] LI Hua, LEI Lei, CHANG He-min, *et al.* Research on Capture Rate of the $4 \times 4\text{m}^2$ 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.
- [6] 倪晋平. 光幕阵列测试技术及应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2014.
- [7] NI Jin-ping, WANG Tie-ling, SONG Yu-gui, *et al.* Electro-optical Sensors for Measuring the Motion Parameters of Flying Objects[C]. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA 2007): 428201.
- [8] 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:中国, ZL 2011 1 0099209. 4[P]. 2013-06-19.
- [9] MUSAYEV E. Optoelectronic methods and devices for measuring bullet velocity [J]. *Measurement Techniques*, 2006, **49**(3): 270-275.
- [10] KALONIA R C, MITRA G, KUMAR A, *et al.* Laser-based projectile speed measurement system [J]. *Optical Engineering*, 2007, **46**(4): 044303.
- [11] NI Jin-ping, TIAN Hui. A study on method for acquiring moment on which a projectile going through a light screens [J]. *Optical Technique*. 2008, **34**(1): 141-144.
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, **34**(1): 141-144.
- [12] WU Yang, WU Zhi-chao, NI Jin-ping. Method for detecting sky screen spatial position in flying projectile velocity measurement[J]. *Journal of Applied Optics*. 2014, **35** (1): 100-105.
仵阳,武志超,倪晋平.测速天幕靶幕面空间位置检测方法[J]. 应用光学, 2014, **35**(1): 100-105.
- [13] NI Jin-ping, YANG Lei, TIAN Hui. Measurement principle for two kinds of six-light-screen array composed by large area light screen [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(2): 6-11.
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.
- [14] 卢红伟. 阵列炮管实时测速技术研究[D]. 西安工业大学硕士学位论文, 2012.
- [15] TIAN Hui, NI Jin-ping, LI Ya-sheng. Digital signal processing algorithm for velocity measurement optical screen[J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, **33**(3): 542-547.
田会,倪晋平,李亚胜.测速光幕靶用数字信号处理算法[J]. 应用光学, 2012, **33**(3): 542-547.