

引用格式: LI Jing, SUN Zhonghui, NI Jinping, et al. Method of Calibrating Target Distance Using Dual Zone-block Light Screen Velocity Measuring Device[J]. Acta Photonica Sinica, 2024, 53(2):0212004

李敬,孙忠辉,倪晋平,等.采用双区截光幕测速装置标定靶距的方法[J].光子学报,2024,53(2):0212004

采用双区截光幕测速装置标定靶距的方法

李敬¹,孙忠辉²,倪晋平^{1,3},田会¹

(1 西安工业大学 光电工程学院, 西安 710021)

(2 中国人民解放军 63853 部队, 白城 137001)

(3 陕西省光电测试与仪器技术重点实验室, 西安 710021)

摘要:针对短靶距测速光幕靶的靶距无法直接测量的问题,提出一种采用双区截光幕测速装置标定靶距的方法。在测得弹道上两点速度后,依据弹道方程推导了飞行弹丸在两点间任意时刻的瞬时速度计算式;依据弹丸穿过标定用测速装置和被标定光幕靶的时间序列,给出了靶距标定公式。在弹丸飞行速度一定的情况下,分析标定用光幕靶的靶距和布放间距对标定误差的影响,并进行了实弹射击试验。试验结果表明,标定用光幕靶的靶距、布放间距及弹丸飞行速度在一定条件下,标定相对误差为 0.8%,所提方法能够用来标定各种原理的使用级区截测速传感器的靶距。

关键词:速度测量;光幕靶;标定;阻力参数;误差传递

中图分类号:TJ012.3

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20245302.0212004

0 引言

在身管武器、弹药的研制生产中,初速试验是校验产品性能的必要环节^[1-3]。测速光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^[4-5],广泛应用于各种靶场弹丸初速试验中。初速试验一般采用定距测时的区截测速方法^[6-7],常规的测速系统中测时误差一定,一般小于 0.2 μs 。靶距测量误差是影响测速误差的主要因素^[8-9],目前针对大于 1 m 的长靶距光幕靶多采用直接测量方法,如钢直尺或激光测距仪^[10],靶距测量误差一般为 0.5 mm。根据测速误差传递公式^[11],在速度不大于 1 000 m/s 时,测速相对误差不大于 1%。针对结构紧凑、双光幕靶距固定且小于 200 mm 的一体化光幕靶,采用上述直接测量方法,靶距相对误差大于 2.5%,测速相对误差必然大于 2.5%,不满足实际测速要求,必须研究一种高精度的靶距标定方法,使靶距测量误差远小于 0.2 mm。

针对不同原理的测速装置的靶距标定,文献[12]利用单区截测速装置与被标定光幕靶测量弹道上同一点飞行速度,依据速度测量公式实现靶距标定,靶距标定相对误差为 2.7%。文献[13]利用相机获取线圈靶图像,通过图像处理得到线圈靶中心与图像中心的相对位置,从而计算靶距,靶距标定相对误差为 1.3%。文献[14]为解决激光光幕测速系统中因光电响应一致性不同引入的靶距标定误差问题,从光幕侧面对弹丸穿过光幕时刻进行高速成像,计算弹丸与光幕的相对位置,校准测速系统的靶距,靶距标定相对误差为 1%,但标定系统复杂,作为使用级装置成本高。文献[15]提出一种天幕靶测速系统靶距参数标定方法,配合经纬仪、精密光学仪器等实现靶距为 3 000 m 的标定,靶距标定不确定度为 1.4 mm,然而该方法很难用于一体化光幕靶。文献[16]利用螺纹测长原理与光电转换方式相结合的方法,设计了双缝光幕靶专用靶距标定装置,具有较高的标定精度,但该方法仅适用弹底触发模式,对标定装置的设计精度要求较高,且存在较大的靶距读取误差。上述文献采用不同方法实现了不同原理的测速传感器的靶距标定,但针对双光幕或三光幕的短靶距一体化光幕靶,目前还没有可靠有效的解决方法。

基金项目:国家自然科学基金(No. 61471289)

第一作者:李敬, zyqinglj@163.com

通讯作者:倪晋平, nijp6504@263.com

收稿日期:2023-07-20;录用日期:2023-10-23

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

针对小于 200 mm 的短靶距测速光幕靶的靶距测量,利用已知靶距的两套光幕靶测量弹道两点的平均速度,推导被标定光幕靶的靶距标定计算公式,分析标定误差影响规律,实现被标定光幕靶的靶距相对误差在 0.5‰~0.9‰ 之间。

1 靶距标定方法

1.1 单区截光幕测速装置标定方法

单区截光幕测速系统^[9]包含两个光幕探测器,光幕探测器主要包括发射装置和接收装置,两者在空间中共同形成一个隐形的探测光幕。弹丸穿过探测光幕时,接收装置中光电探测器因接收的光能量改变,产生微弱变化的光电流信号,经信号处理后输出弹丸过幕信号,该信号能够反映弹丸的形状特征及过幕时间信息。两个探测光幕的间距为 S ,即靶距,弹丸穿过两个探测光幕的飞行时间为 T ,如图 1。根据区截测速原理^[17],弹丸在靶距 S 上的平均飞行速度 \bar{v} 可表示为

$$\bar{v} = \frac{S}{T} \quad (1)$$

根据运动方程,弹丸在一定距离内的平均速度 \bar{v} 与飞行时间中点 O' 的瞬时速度 $v_{O'}$ 相等^[18]。式(1)中假设弹丸作匀速运动,弹丸在靶距 S 内的平均飞行速度与靶距中点 O 的瞬时速度相等。

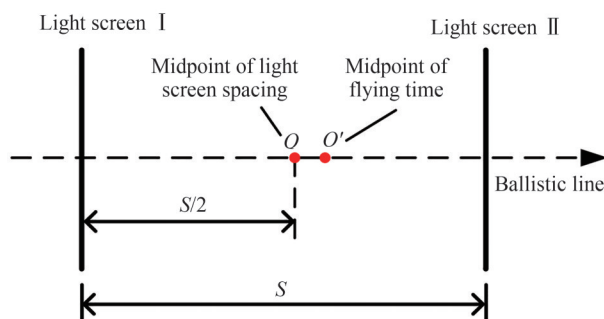


图 1 单区截测速示意

Fig. 1 Schematic of velocity measurement by single zone-block device

在单区截光幕测速装置标定靶距的方法(简称单区截标定方法)中,仍认为弹丸做匀速直线运动。光幕 I 和光幕 II 构成标定用光幕靶,光幕 G 和 H 构成被标定光幕靶,四个光幕相互平行,且要求两者的靶距中点严格重合,这在工程上很难实现,因而存在较大的标定误差。被标定光幕靶的靶距为 S' ,弹丸穿过被标定光幕靶的时间为 T' ,靶距标定示意如图 2。两套光幕靶测量同一发弹丸在同一点 O 处的飞行速度,测得的速度相等,则有^[12]

$$\frac{S}{T} = \frac{S'}{T'} \quad (2)$$

单区截靶距标定公式为

$$S' = \frac{T' \cdot S}{T} \quad (3)$$

实际上,飞行弹丸受空气阻力、自身重力等因素影响,弹丸飞行速度不是恒量^[19]。当弹丸以非匀速运动,弹丸运动速度随飞行时间增加而减小,点 O 与点 O' 的弹道位置不重合,如图 1 所示,则 \bar{v} 与 $v_{O'}$ 之间存在速度差^[20]。根据弹道方程,以平均速度代替瞬时速度产生的速度差^[18] Δv_e 可表示为

$$\Delta v_e = \left| \frac{R \cdot \bar{v} \cdot T/2}{\text{sh}(R \cdot \bar{v} \cdot T/2)} - 1 \right| \cdot \bar{v} \quad (4)$$

式中,sh 为双曲正弦函数, R 为弹丸阻力参数,与空气密度、弹丸最大横截面积、弹丸质量、阻力系数有关。显然,靶距越大,速度差越大。在非匀速运动下,式(2)不严格成立,以式(3)计算的靶距存在较大误差。

针对标定用光幕靶,在靶距较小的水平弹道测速中,不考虑重力对弹丸飞行速度的影响。弹丸测速误差包括靶距测量误差 ΔS 、测时误差 ΔT 及以平均速度代替靶距中点瞬时速度产生的误差 Δv_e ,测速总相对误差

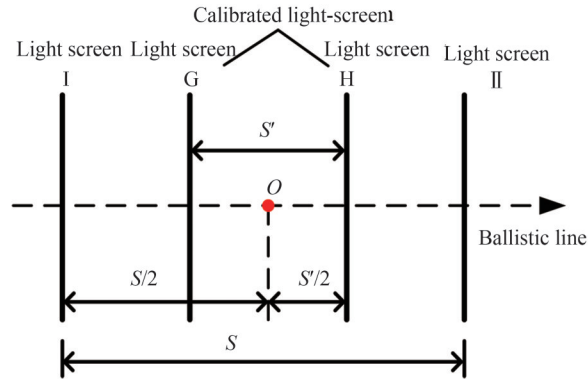


图2 单区截标定示意

Fig. 2 Schematic of calibration by single zone-block device

差^[18] δv 满足

$$\delta v = \left| \frac{\Delta T}{T} \right| + \left| \frac{\Delta S}{S} \right| + \left| \frac{\Delta v_e}{\bar{v}} \right| \quad (5)$$

当测速相对误差限定时,对式(5)进行等效变换,得到标定用光幕靶最小靶距计算公式为

$$S \geq \frac{\bar{v} \cdot \Delta T + \Delta S}{\delta v - \left| \frac{\Delta v_e}{\bar{v}} \right|} \quad (6)$$

在限定测速相对误差下,弹丸飞行速度越大,最小靶距越大,反之越小。

1.2 双区截光幕测速装置标定方法

本文提出采用双区截光幕测速装置实现靶距标定,相比单区截测速装置标定方法,双区截光幕测速装置标定靶距的方法(简称双区截标定方法)采用了两个单区截测速装置,光幕 I 和光幕 II 构成单区截测速装置 1,光幕 III 和光幕 IV 构成单区截测速装置 2。为便于分析,文中将两套单区截测速装置的靶距均取值为 d ,实际上两者靶距可以不同。四个光幕相互平行且垂直于弹道线,弹道线与四个光幕的交点分别为 A、B、C、D,点 E 和点 F 分别为测速装置 1 和 2 的靶距中点,两个靶距中点的距离为 x ,点 M 和点 N 分别为弹丸穿过测速装置 1 和 2 的时间中点位置,点 P 为两套单区截测速装置间任意位置,双区截测速原理如图 3。两套单区截测速装置分别测得弹丸在点 A、B 间的平均速度 $v_{AB} = v_M$ 和点 C、D 间的平均速度 $v_{CD} = v_N$,根据弹道方程计算弹丸阻力参数,解算弹丸在两套单区截测速装置间任意时刻的瞬时速度^[20]。

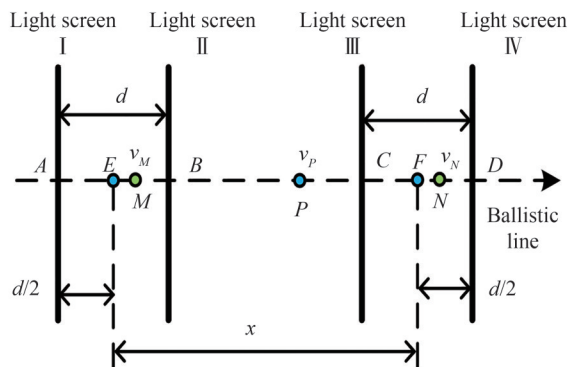


图3 双区截测速示意

Fig. 3 Schematic of velocity measurement by dual zone-block device

弹丸速度从 v_M 变化到 v_N 的过程中,飞行距离等效为靶距中点 E 和 F 的距离 x ,弹丸通过点 M 后任意时刻 t 下弹丸瞬时速度 v_P 可表示为

$$v_p(t) = \frac{1}{\frac{1}{x} \ln\left(\frac{v_M}{v_N}\right) \cdot t + \frac{1}{v_M}} \quad (7)$$

弹道上两点的瞬时速度和两点之间的距离确定时,由式(7)可计算出任意时刻下弹丸瞬时飞行速度,则可解算弹丸在限定靶距的时间中点处的瞬时速度,即弹丸在限定靶距内的平均速度。根据该原理,将被标定光幕靶放置在两套单区截测速装置间任意位置处,光幕Ⅱ和光幕Ⅲ间距为 L ,点 Q 为弹丸穿过光幕 G 和的 H 时间中点位置,其瞬时速度为 v_Q ,飞行弹丸依次穿过光幕Ⅰ、Ⅱ、 G 、 H 、Ⅲ、Ⅳ,过幕时刻分别为 t_1 、 t_2 、 t_G 、 t_H 、 t_3 、 t_4 ,双区截标定示意如图4。

以弹丸穿过光幕Ⅰ时刻为起始时刻,弹丸速度从 v_M 变化到 v_Q 所用时间 T_1 为

$$T_1 = \frac{t_{GH}}{2} + t_{1G} - \frac{t_{12}}{2} \quad (8)$$

式中, $t_{GH} = t_H - t_G$, $t_{1G} = t_G - t_1$, $t_{12} = t_2 - t_1$ 。

将式(8)带入式(7)计算弹丸穿过点 Q 的瞬时速度 v_Q ,则靶距 S_{GH} 为

$$S_{GH} = v_{GH} \cdot t_{GH} = v_Q \cdot t_{GH} = \frac{t_{GH}}{\frac{1}{L+d} \cdot \ln\left(\frac{t_{34}}{t_{12}}\right) \cdot \left(\frac{t_{GH}}{2} + t_{1G} - \frac{t_{12}}{2}\right) + \frac{1}{v_M}} \quad (9)$$

式中, $t_{34} = t_4 - t_3$ 。

靶距 S_{GH} 与弹丸过幕时间、标定用光幕靶布放间距 L 和标定靶距 d 有关,事先确定 L 和 d 的大小,结合弹丸穿过标定用光幕靶和被标定光幕靶的时间序列,通过式(9)计算被标定靶距。与单区截标定方法相比,被标定光幕靶在标定测速装置之间布放位置没有严格要求,不会因位置误差带来标定误差。

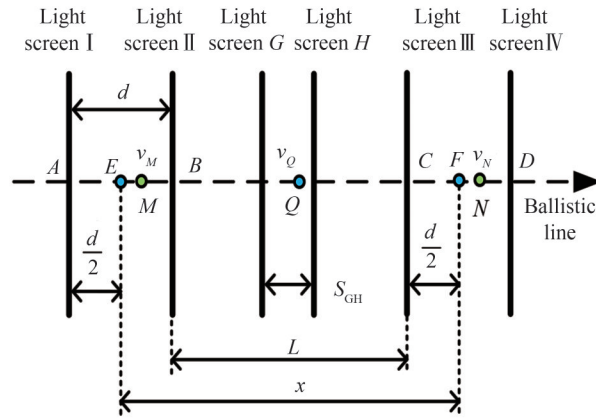


图4 双区截标定示意

Fig. 4 Schematic of calibration by dual zone-block device

2 标定误差分析

根据误差传递公式,对式(9)求全微分得

$$|\Delta S_{GH}| = v_{GH}^2 \cdot (|f_1 \cdot \Delta t_{GH}| + |t_{GH} \cdot f_1 \cdot \Delta t_{12}| + |t_{GH} \cdot f_3 \cdot \Delta t_{34}| + |R \cdot t_{GH} \Delta t_{1G}| + |t_{GH} \cdot f_4 \cdot \Delta d| + |t_{GH} \cdot f_5 \cdot \Delta L|) \quad (10)$$

式中, $T_1 = \frac{t_{GH}}{2} + t_{1G} - \frac{t_{12}}{2}$, $R = \frac{1}{L+d} \cdot \ln\left(\frac{t_{34}}{t_{12}}\right)$, $v_{GH} = \frac{1}{R \cdot T_1 + \frac{1}{v_M}}$, $f_1 = R \cdot \left(t_{1G} - \frac{t_{12}}{2}\right) + \frac{t_{12}}{d}$, $f_2 = \frac{1}{d} -$

$$\frac{T_1}{(L+d) \cdot t_{12}} - \frac{R}{2}, f_3 = \frac{t_{34}}{L+d}, f_4 = \frac{R \cdot T_1}{L+d} + \frac{t_{12}}{d^2}, f_5 = \frac{R \cdot T_1}{L+d}.$$

当标定用光幕靶的靶距 d 和布放间距 L 确定时,弹丸飞行速度越大,标定误差越大,且呈抛物线变化趋势。

2.1 标定用光幕靶的靶距 d 对标定误差的影响

标定用光幕靶测速中,靶距 d 取值在一定范围内,才能保证测速精度。假设弹丸速度为 150 m/s,标定靶距测量误差为 0.5 mm,时间测量误差为 0.2 μ s,若测速相对误差要求不大于 1‰,根据式(6),计算得标定用光幕靶的靶距 $d \geq 530$ mm。

当弹丸飞行速度为 150 m/s,布放间距 $L=1$ m, d 取值范围为 0.56~2.0 m 时,标定误差随标定用光幕靶的靶距 d 的变化曲线如图 5。

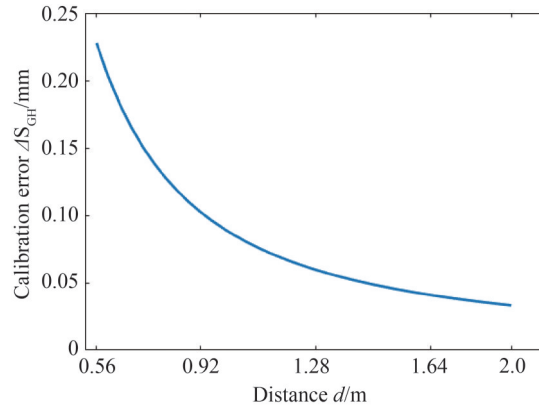


图 5 ΔS_{GH} 随 d 的变化曲线

Fig. 5 Curve of ΔS_{GH} as a function of d

弹丸速度和布放间距 L 一定时,靶距 d 越大,标定误差越小,反之越大。在实际工程中,对同一类型弹丸,在限定靶距范围内增大 d ,能够减小标定误差。

2.2 标定用光幕靶的布放间距 L 对标定误差的影响

若标定用光幕靶测速误差不大于 1‰,标定用光幕靶的靶距 $d=1$ m。布放间距一定时,不同弹丸速度下,标定误差不同。当弹丸飞行速度分别为 150 m/s、400 m/s 和 700 m/s,布放间距 L 的变化范围为 0.6~2.0 m 时,标定误差 ΔS_{GH} 随布放间距 L 的变化曲线如图 6。

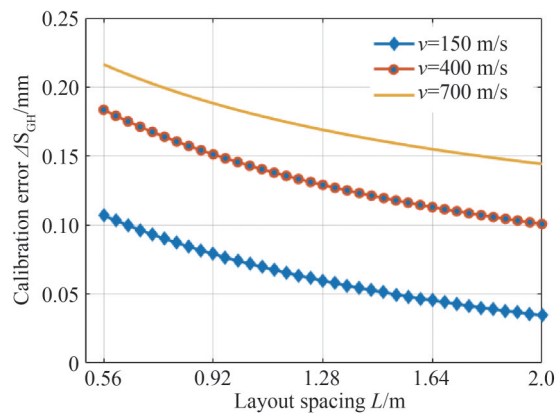


图 6 ΔS_{GH} 随 L 的变化曲线

Fig. 6 Curve of ΔS_{GH} as a function of L

弹丸速度和标定用光幕靶的靶距 d 确定时,增大布放间距 L ,标定误差减小;同一布放间距下,弹丸飞行速度越大,靶距标定误差越大。弹丸飞行速度增大,靶距 d 不变,则标定用光幕靶的测速误差增大,由式(7)计算的弹丸瞬时速度误差较大,导致靶距标定误差增大。

根据上述分析,标定用光幕靶测速误差确定时,对同一类型弹丸,增大布放间距 L 和标定用光幕靶的靶距 d ,标定误差减小;弹丸飞行速度增大时,依据最小靶距计算公式,需增大靶距 d ,使标定用光幕靶的测速误差满足测速精度要求,同时增大布放间距 L ,减小标定误差。当弹丸速度为 150 m/s 时,若要求标定误差

不大于 0.06 mm, 则标定靶距和布放间距最小值均不小于 1 280 mm。

3 试验与结果分析

采用未知靶距的三光幕靶进行标定试验, 相比双光幕靶, 三光幕靶多一个光幕 K , 靶距标定原理相同, 靶距设计值为 75 mm。光幕 I 与光幕 II 构成第一套标定用光幕靶, 光幕 III 和光幕 IV 构成第二套标定用光幕靶, 靶距均为 1 237 mm, 光幕 II 和光幕 III 间距为 1 996 mm, 三光幕靶为被标定装置, 放置在光幕 II 和光幕 III 之间任意位置处, 所有光幕相互平行且垂直于弹道线。以弹丸穿过光幕 I 的时刻为起始时刻, 数据采集仪 ①和②分别采集弹丸穿过标定用光幕靶和三光幕靶的波形信号, 获取弹丸过幕时间序列, 图 7 为试验布置示意, 试验现场如图 8。根据式(5)计算标定用光幕靶的靶距测相对误差为 0.4%, 测速相对误差为 0.4%。

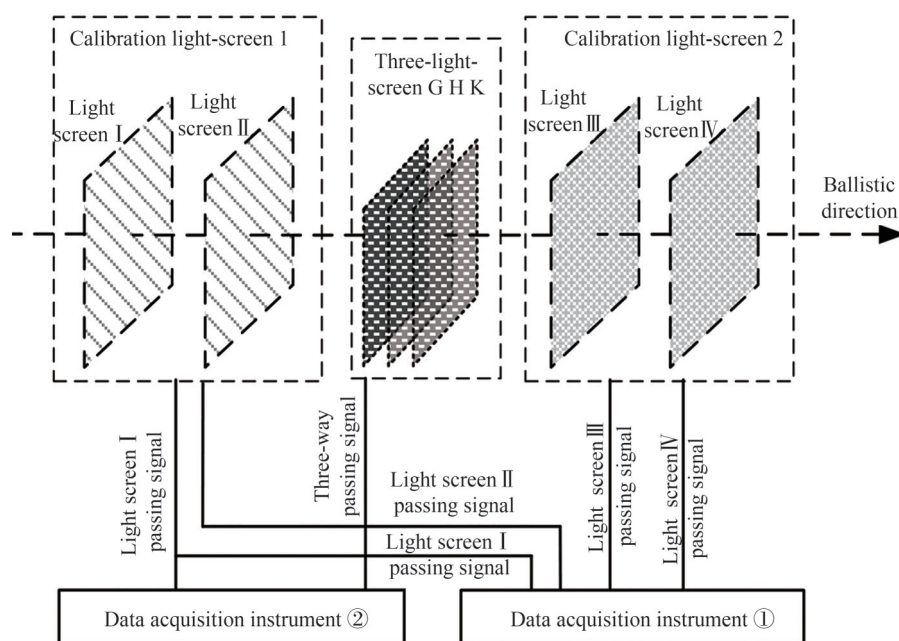


图 7 试验布置示意

Fig. 7 Schematic of test layout

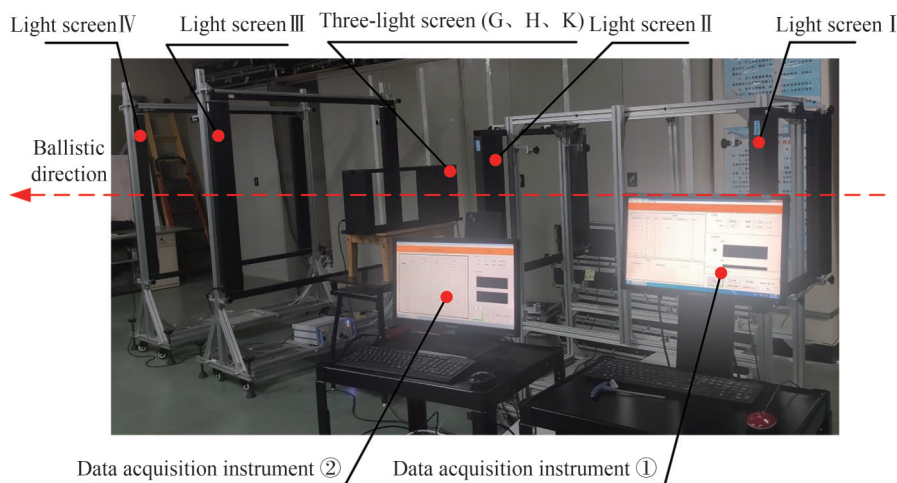


图 8 基于双区截装置的标定试验现场

Fig. 8 Test site of calibration with dual zone-block device

3.1 单区截标定试验

在单区截标定试验中, 利用投线仪调整标定用光幕靶和三光幕靶的水平 and 铅垂基准, 并将三光幕靶放置在光幕 II 和光幕 III 中间位置处(三光幕靶中心刻线与光幕 II、III 的距离中点近似重合)。以光幕 II 和光幕

III测得的速度 v_{23} 作为弹丸穿过三光幕靶的飞行速度,数据采集仪②获取弹丸穿过三光幕靶的时间 t_{GH} 和 t_{HK} ,由式(3)计算靶距 S_{GH1} 和 S_{HK1} 。单区截标定结果如表1。

表1 单区截标定结果
Table 1 Results of calibration by single zone-block device

Firing sequence	$v_{23}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$t_{GH}/\mu\text{s}$	$t_{HK}/\mu\text{s}$	S_{GH1}/mm	S_{HK1}/mm
1	117.13	638.6	638.6	74.80	74.80
2	154.60	485.6	483.6	75.07	74.76
3	164.91	454.0	454.0	74.87	74.87
4	169.84	440.8	441.6	74.86	75.00
5	166.29	449.8	450.6	74.80	74.93
Average value				74.88	74.87

采用单区截标定方法获取的靶距平均值 $\overline{S_{GH1}}$ 和 $\overline{S_{HK1}}$ 分别为74.88 mm和74.87 mm,标定相对误差分别为1.6‰和1.7‰。

根据表1中弹丸的飞行时间和标定结果,计算弹丸穿过三光幕靶的飞行速度 v_{GK1} ,计算结果如表2,表中 $\Delta v_{GK1} = v_{GK1} - v_{23}, \delta v_{GK1} = \Delta v_{GK1} / v_{23}$ 。

表2 单区截标定方法测速结果
Table 2 Results of velocity measurement used single zone-block calibration method

Firing sequence	$v_{23}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_{GK1}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\Delta v_{GK1}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\delta v_{GK1}/(\%)$
1	117.13	117.02	0.11	0.95
2	154.60	154.24	0.36	2.31
3	164.91	164.69	0.22	1.31
4	169.84	169.58	0.25	1.50
5	166.29	166.01	0.28	1.69
Average value			0.22	1.55

采用单区截标定方法得到的靶距进行测速,弹丸速度偏差均值为0.22 m/s,测速相对误差均值大于1‰,不满足测速误差要求。

3.2 双区截标定试验

采用双区截标定方法时,重新进行一组试验,数据采集仪①和②获取弹丸穿过标定用光幕靶和三光幕靶的时间序列,时间结果如表3。

表3 弹丸过幕时间序列
Table 3 Times value sequence of projectile pass through screen

Firing sequence	$t_{12}/\mu\text{s}$	$t_{34}/\mu\text{s}$	$t_{1G}/\mu\text{s}$	$t_{1H}/\mu\text{s}$	$t'_{GH}/\mu\text{s}$	$t'_{HK}/\mu\text{s}$
1	862 2	881 6	153 23	158 52	528.6	528.6
2	127 79	130 44	227 05	234 88	782.4	782.6
3	883 9	903 5	157 06	162 49	541.6	541.8
4	100 14	102 28	177 95	184 09	613.4	613.6
5	808 9	826 9	143 76	148 71	495.8	496.0

将表3中弹丸过幕时间带入式(9)计算靶距 S_{GH2} 和 S_{HK2} , ΔS_1 和 ΔS_2 为标定误差计算结果,双区截标定结果如表4。

相比单区截标定方法得到的靶距值,采用双区截标定方法获取的靶距平均值 $\overline{S_{GH2}}$ 和 $\overline{S_{HK2}}$ 均为74.98 mm,标定误差为0.06 mm,标定相对误差为0.8‰,与标定用光幕靶的靶距测量相对误差接近。

根据表1中弹丸过幕时间和表4中标定结果,计算弹丸穿过三光幕靶的飞行速度 v_{GK2} ,计算结果如表5。

表5中测速结果与表2中采用单区截标定方法的测速结果相比,双区截标定方法的速度偏差均值为

表4 双区截标定结果

Table 4 Results of calibration by dual zone-block device

Firing sequence	S_{GH2}/mm	S_{HK2}/mm	$\Delta S_1/\text{mm}$	$\Delta S_2/\text{mm}$
1	75.00	74.96	0.06	0.06
2	74.97	75.01	0.05	0.05
3	74.97	74.96	0.06	0.06
4	74.98	74.97	0.06	0.06
5	74.99	74.99	0.06	0.06
Average value	74.98	74.98	0.06	0.06

表5 双区截标定方法测速结果

Table 5 Results of velocity measurement used dual zone-block calibration method

Firing sequence	$v_{23}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_{GK2}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\Delta v_{GK2}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\delta v_{GK2}/(\%)$
1	117.13	117.21	0.08	0.66
2	154.60	154.49	0.11	0.70
3	164.91	164.96	0.05	0.30
4	169.84	169.86	0.02	0.12
5	166.29	166.28	0.01	0.07
Average value			0.05	0.37

0.05 m/s,测速相对误差均值为0.37%,测速相对误差更小,且与标定用光幕靶的测速相对误差接近;表4中靶距标定结果与表1中采用单区截标定方法得到的靶距相比,标定相对误差更小,表明采用双区截光幕测速装置标定靶距的方法是可行的。

4 结论

为提高靶距小于200 mm的短靶距光幕靶的靶距标定精度,提出一种采用双区截测速装置标定靶距的方法,该方法对被标定光幕靶的布放位置无严格要求。根据弹道方程,研究了以平均速度代替靶距中点瞬时速度产生的测速误差,推导了两套标定用光幕靶测速点间任意时刻的瞬时速度计算公式,给出了采用双区截测速装置的靶距标定方法原理及靶距标定公式,分析了标定用光幕靶的靶距和布放间距对标定误差的影响规律。理论分析与试验结果表明:1)在标定用光幕靶测速相对误差和弹丸飞行速度确定下,标定误差随标定用光幕靶的靶距 d 和布放间距 L 增大而减小;标定用光幕靶的测速相对误差小于1%,弹丸速度为150 m/s, $d=L=1.2$ m时,标定误差为0.07 mm。2)标定用光幕靶的靶距 d 和布放间距 L 确定时,标定误差随弹丸飞行速度增大而增大;3)在三光幕靶的靶距标定试验中,采用双区截标定方法得到的靶距为74.98 mm,标定相对误差为0.8%,与标定用光幕靶的靶距测量相对误差接近,比单区截标定方法标定精度高。

本文提出的双区截光幕测速装置标定靶距的方法,比现有单区截光幕测速装置标定靶距的方法的标定精度高,同时不要求被标定光幕靶精确布放,为一体化短靶距光幕靶的靶距标定提供了一种标定手段,可以用来标定各种测速原理的使用级的区截测速用传感器的靶距。

参考文献

- [1] LI Hanshan, ZHANG Xiaoqian. Flight parameter calculation method of multi-projectiles using temporal and spatial information constraint[J]. Defence Technology, 2023, 19: 63-75.
- [2] HU Jiang, ZHAO Yadong, QIAN Jia, et al. Velocity radar applied in the research of muzzle velocity measurement and system correction method of naval gun[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1982(1): 012145.
- [3] TAN Linqiu, WANG Jia, ZHANG Hang, et al. Research on the measurement method of oblique incidence velocity of projectile with double n-type six-screen array[J]. Journal of Missile and Guidance, 2023, 43(2): 20-25.
谭林秋,王佳,张杭,等.双N型六光幕阵列弹丸斜入射速度测量方法研究[J].弹箭与制导学报, 2023, 43(2): 20-25.
- [4] LI Hai, NI Jinping, YANG Xiaodong, et al. Analysis of the structure and properties of triangular composite light-screen targets[J]. Open Physics, 2021, 19(1): 583-589.
- [5] CAO Jianjian, LI Hanshan, ZHANG Xiaoqian. Multi-target identification method for dual-plane detection based on data fusion and correlation analysis[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2022, 64(8): 1354-1363.

- [6] LI Hanshan, LI Ming, MA Yaling, et al. A variational mode decomposition projectile signal processing algorithm of infrared sky screen velocity measurement system and detection mathematical model of detection screen[J]. *Optik*, 2023, 287:171077.
- [7] CAI Rongli, TAN Linqiu, CHEN Rui, et al. Analysis of velocity measurement for transonic projectiles in indoor long ballistic range[J]. *Mobile Information Systems*, 2022, 2022:6299093.
- [8] ZHANG Xiaolu, LI Hairong, DING Yi. Research on distance determination of accuracy timing correction fuse based on geomagnetic meter[J]. *Journal of Arms Equipment Engineering*, 2021, 42(2):44-46, 107.
张小禄,李海蓉,丁毅.地磁计转数定时修正引信的定距精度研究[J]. *兵器装备工程学报*, 2021, 42(2):44-46, 107.
- [9] Ni Jinping. Technology and application of measurement of the light screen array[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.
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.
- [10] ZHAO Jingyuan. The high-precision measurement technology of distance of small area light screen [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2013.
赵静远.小靶面光幕靶距高精度测量技术[D].西安:西安工业大学, 2013.
- [11] LU Xiaofei, YI Chenglong, ZOU Weike, et al. Measurement method and error analysis of fragment velocity of light screen target [J]. *Modern Defense Technology*, 2021, 49(1):84-90.
禄晓飞,易成龙,邹卫科,等.光幕靶破片速度测量方法及误差分析[J]. *现代防御技术*, 2021, 49(1):84-90.
- [12] YANG Weihua, GAO Fengjia, NI Jinping, et al. Target distance calibration method of intercepting speed measuring device[J]. *Mechanical Engineer*, 2020, (11):59-61, 64.
杨卫华,高丰佳,倪晋平,等.一种短靶距区截测速装置靶距标定方法[J]. *机械工程师*, 2020, (11):59-61, 64.
- [13] ZHANG Shaobo. The time and target distance calibration technique for muzzle velocity measuring [D]. Shanxi: North Central University, 2016.
张少波.炮口初速测量的时间与靶距标定技术研究[D].山西:中北大学, 2016.
- [14] CHU Wenbo, ZHAO Dongge, LIU Baowei, et al. Research on target deviation measurement of projectile based on shadow imaging method in laser screen velocity measuring system[J]. *Sensors*, 2020, 20(2):554.
- [15] WU Zhichao, ZHANG Xiuli. On-sate calibration method of target distance of the sky screen target velocity measuring system[J]. *Optik*, 2018, 178(2019):483-487.
- [16] AN Ying, NI Jinping, GAO Fen, et al. Accurate measurement method and device for target distance of double-slit light curtain target [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2007, 27(6):515-518.
安莹,倪晋平,高芬,等.双缝光幕靶的靶距精确测量方法和装置[J]. *西安工业大学学报*, 2007, 27(6):515-518.
- [17] CHEN Rui, CAI Rongli, JI Bowen. Projectile flight parameters measurement method based on the spatial distribution of light-screen thickness[J]. *Measurement*, 2022, 195:111143.
- [18] LIU Shiping. Projectile velocity measurement and data processing [M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 1994.
刘世平.弹丸速度测量与数据处理[M].北京:兵器工业出版社, 1994.
- [19] LIU Guan, SUN Hao, YIN Likui, et al. Analysis of external ballistic characteristics of fragmentation based on mass ballistic equations[J]. *Journal of Ballistics*, 2021, 33(3):32-36.
刘官,孙浩,印立魁,等.基于质点弹道方程的破片外弹道特性分析[J]. *弹道学报*, 2021, 33(3):32-36.
- [20] LI Hai, ZHENG Chenhao, ZHAO Pingwei, et al. Instantaneous velocity measurement method of projectile with double ballistic zone-block apparatus[J]. *Applied Optics*, 2023, 44(3):571-579.
李海,郑晨皓,赵平伟,等.弹道双区截装置弹丸瞬时速度测试方法研究[J]. *应用光学*, 2023, 44(3):571-579.

Method of Calibrating Target Distance Using Dual Zone-block Light Screen Velocity Measuring Device

LI Jing¹, SUN Zhonghui², NI Jinping^{1,3}, TIAN Hui¹

(1 School of Opto-electronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

(2 Chinese People's Liberation Army 63853 Unit, Baicheng 137001, China)

(3 Shaanxi Province Key Laboratory of Photoelectric Measurement and Instrument Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: Light screen is a photoelectric test equipment that adopts the principle of measuring the flying time in a fixed distance, commonly used to measure the flying velocity of projectile which also known as the initial velocity of projectile near the muzzle. For the same diameter projectile, distance measurement

error is the main factor affecting the velocity measurement error when timing error is determined. Direct measurement methods such as steel rules and laser range finders are used to measure long target distance greater than 1 m in light screen, and measurement error of distance is generally 0.5 mm, the relative error of distance is not more than 0.5‰, which has little impact on the relation error of velocity measurement. For light screen of short target distance with target distance less than 200 mm, the above method is still used to measure distance, and the distance relative error is greater than 2.5‰, then the relative error of velocity measurement exceeds 2.5‰, which does not meet the requirements of the actual velocity measurement. In this paper, a target distance calibration method using the dual zone-block velocity measuring device is proposed, which consists of two sets of calibration light screens with the same principle. The target distances of the two sets of light-screen are consistent and much larger than the distances of calibrated light screens. Based on the transmission formula of velocity measurement error, a calculation method of minimum calibration distance under the determination of that error is given. Two sets of light screen are utilized for calibration to measure the velocity of the flying projectile at two points on the ballistic separated by a fixed distance. Combined with the distance between two points, the resistance parameters of projectile and instantaneous velocity at any time between two points are developed based on the ballistic equation. Based on the fact that the average velocity within a certain distance is equal to the instantaneous velocity at the midpoint of projectile flying time within that distance, considering the time sequence of projectile passing through calibration light screen and the calibrated light screen, the distance calibration formula of calibrated light screen is given, and the calibration error calculation formula is derived. The influence of calibration distance and layout spacing in dual zone-block device on the calibration error is analyzed when projectile's flying velocity is determined. If projectile velocity is constant, the calibration error decreases with the increase of calibration distance and layout spacing. Furthermore, when the calibration distance and layout spacing are fixed, the larger the projectile flying velocity, the greater the calibration error. Taking the target calibration test of three light screen as an example, the single zone-block calibration test and the dual zone-block calibration test are carried out, in which the calibration distance is 1 237 mm and the layout spacing is 1 996 mm. When the projectile velocity is 150 m/s, the calibration relation error of single zone-block device and dual zone-block device are 1.6‰ and 0.8‰, respectively. The velocity measurement is carried out with calibration results of dual zone-block, and the relation error of velocity measurement is 0.37‰, which meets the requirements of velocity measurement. We proposes a calibration method for dual zone-block screen velocity measuring device, which indirectly measures the target distance of light screen with unknown distance by using the calibration light screen with known long target distance. Meanwhile, the calibration method proposed can be used to calibrate the target distance of sensors for zone-block velocity measurement on various principles and usage level.

Key words: Velocity measurement; Light screen; Calibration; Resistance parameter; Error transmission

OCIS Codes: 120.7250; 280.7250; 230.5160; 000.2158