

弹道双区截装置弹丸瞬时速度测试方法研究

李海 郑晨皓 赵平伟 倪晋平 武志超

Instantaneous velocity measurement method of projectile with double ballistic zone-block apparatus

LI Hai, ZHENG Chenhao, ZHAO Pingwei, NI Jinping, WU Zhichao

引用本文:

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. DOI: 10.5768/JAO202344.0303001

LI Hai, ZHENG Chenhao, ZHAO Pingwei, et al. Instantaneous velocity measurement method of projectile with double ballistic zone-block apparatus[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(3): 571–579. DOI: 10.5768/JAO202344.0303001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0303001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

通用工业相机的炸点瞬时位置测量模拟研究

Simulation research on instantaneous position measurement of explosion point of general industrial camera

应用光学. 2021, 42(5): 891–897 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0503003>

地面最小操纵速度试飞光电测试方法

Photoelectric test method for ground minimum control speed flight test

应用光学. 2021, 42(6): 1072–1079 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0603003>

基于双目序列图像的测距定位与自车速度估计

Localization and ego-velocity estimation for vehiclebased on binocular image sequences

应用光学. 2017, 38(5): 764–769 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0502004>

一种针对高速小目标的偏航角测算方法

Yaw angle calculation method for high-speed small target

应用光学. 2018, 39(3): 326–331 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0301005>

基于加速度反馈的上反稳瞄系统最优控制研究

Optimal control of upper anti-stabilization aiming system based on acceleration feedback

应用光学. 2021, 42(6): 997–1005 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0601008>

基于激光阴影照相系统的研究

Research on laser shadow photography system

应用光学. 2020, 41(2): 282–287 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0201008>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 03-0571-09

弹道双区截装置弹丸瞬时速度测试方法研究

李海, 郑晨皓, 赵平伟, 倪晋平, 武志超

(1. 西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021; 2. 西安机电信息技术研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 传统测试方法采用区截装置进行弹丸测速, 总是假设弹丸为匀速直线运动, 忽略了空气阻力等因素的影响。基于空气动力学及理论力学原理, 提出一种使用两套区截测速装置进行弹丸瞬时速度测试的方法。该方法通过两个相距一定距离的测速点的速度值, 计算测试过程中弹丸在测试区域飞行的速度衰减系数 B , 并通过 B 值计算得到测试区域附近弹道内任意点的瞬时速度。仿真分析表明, 该方法在 0.8 倍音速以内的相对测量误差小于 0.01%, 远低于 0.1% 的工程误差要求。弹弓、气枪和步枪实弹实验发现, 弹丸飞行速度在 0.8 倍音速以内或 1.2 倍音速以上的测试精度不低于所采用区截测速装置 0.1% 的精度, 验证了此方法的可行性。研究为弹道综合参数测试系统的设计和优化提供了新的思路和方法。

关键词: 区截测速系统; 空气阻力; 平均速度; 瞬时速度; 相对误差

中图分类号: TN206; E920

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0303001

Instantaneous velocity measurement method of projectile with double ballistic zone-block apparatus

LI Hai, ZHENG Chenhao, ZHAO Pingwei, NI Jinping, WU Zhichao

(1. Shaanxi Province Key Laboratory of Photoelectric Measurement and Instrument Technology, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China; 2. Xi'an Institute of Electromechanical Information Technology, Xi'an 710065, China)

Abstract: Using the traditional zone-block apparatus for the projectile velocity test, the air resistance is always ignored and the projectile is assumed to be moving in a straight line at a uniform speed. Based on the principles of aerodynamics and theoretical mechanics, a method for measuring the instantaneous velocity of projectiles using two sets of zone-block velocity measuring apparatus was proposed. The velocity attenuation coefficient B of the projectile flying in the test area was calculated by using the velocity values of two velocity measuring points separated from a certain distance. Then the instantaneous velocity of any point in the trajectory near the test area could be calculated from the B value. Simulation analyses show that the relative measurement error of this method within 0.8 times the speed of sound is less than 0.01%, which is much lower than the engineering error requirement of 0.1%. The slingshot, air gun and rifle live ammunition experiments find that the measurement accuracy of the projectile flight speed within 0.8 times or more than 1.2 times the speed of sound is not lower than the 0.1% accuracy of the zone-block apparatus, which verifies the feasibility of this method. The research provides new ideas and methods for the design and optimization of the ballistic comprehensive parameter measurement system.

Key words: zone-block velocity measuring system; air resistance; average speed; instantaneous speed; relative error

收稿日期: 2022-07-11; 修回日期: 2022-09-25

基金项目: 陕西省教育厅重点实验室项目 (20JS057)

作者简介: 李海 (1976—), 男, 博士, 主要从事兵器试验与测试技术, 以及光电测试与仪器研究。E-mail: 17829859185@139.com

引言

现代兵器在枪、炮、弹、药的研制和生产中,测量的主要参数包括弹丸飞行速度、飞行姿态、射击密集度、飞行时间等,其中弹丸飞行速度是评价装备性能的关键参数。在采用光幕阵列测量射击密集度^[1-3]和炸点位置时,速度测量精度还影响测量参数的测量精度。目前兵器试验场应用较多的非接触式区截测速装置有线圈靶、光幕靶、天幕靶等,上述装置测试原理简单,可靠性高。采用上述装置构建的区截测速系统中,测量结果是弹道上两个区截装置间的弹丸飞行平均速度,亦为两个装置中点处的瞬时速度。但如果以该速度为基准推算测量区域附近任意位置的瞬时速度,会造成较大的测量误差^[4-6]。例如,在近炸引信的研制试验和生产校验任务中,检验引信合格与否的一个重要标准是测量装有该引信的脱靶量。使用六光幕阵列天幕立靶进行弹丸空间炸点脱靶量参数测试,首先通过六光幕阵列测得空间弹道和弹丸速度,再利用炸点火焰探测器获得炸点爆炸时间,即可得到炸点在空间的三维坐标。该方法假设弹道为匀速直线,并未考虑弹丸在飞行过程中空气阻力对速度造成的影响。天幕立靶测得的速度值近似等效为两靶布放位置连线中心的瞬时速度,该中心点为天幕立靶测速点。实际测试中测速点和炸点通常相距较远,约20 m左右,使用天幕立靶测速点的瞬时速度等效炸点位置处的瞬时速度,将引起较大的脱靶量测试误差^[7-9]。同样,弹丸出炮口初速度通常使用天幕靶等区截测速装置测量,将测量结果修正后得到。沿弹道方向依次布设两台测速天幕靶,通过精确测量弹丸穿过天幕靶光幕的时间,再测量两靶间距后,计算得到两靶布放位置连线中心的弹丸瞬时速度,该中心点即为天幕靶测速点。然后再测量测速点到炮口的距离,通过对应的弹形系数、温湿度、西亚切常量、弹丸质量等多种参数计算弹丸的炮口初速度^[10-13]。修正算法中存在大量需要人工测量、查表近似的参数,不仅操作繁琐,而且会引入一定的误差^[14-16]。

本文考虑弹丸非匀速运动下,由于空气阻力造成弹丸速度衰减,于是提出采用两套区截测速装置精确测量一段弹道任意位置处的瞬时速度,期望达到减小瞬时速度测量误差的目的。

1 基于区截测速的弹丸瞬时速度测试原理

为了简化,限定弹丸形状为球形或者是旋转对称体,不涉及带尾翼的弹丸,或飞行过程中有脱离破片及形状为非对称的其他弹丸。弹丸在飞行过程中受空气阻力、重力等各种因素的影响,当弹道近似水平,俯仰角在正负5°以内时,可以忽略重力对弹丸速度的影响。当弹丸为标准球体或其迎风角度近似为零度时,仅存在空气阻力对弹丸速度的影响。此时由于目标的对称关系,法向力、俯仰力矩均为零,只有轴向力作用于弹体,则弹丸受到的空气阻力和瞬时速度的关系可表示为

$$F = ma = \frac{1}{2} \rho S C_x (Ma) v^2 \quad (1)$$

式中: F 为弹丸受到的空气阻力; m 为弹丸质量; a 为加速度; ρ 为空气密度; S 为弹丸圆柱部分最大横截面积; C_x 为迎风角度为零时的弹丸阻力系数; Ma 为马赫数,表示速度和音速的比值; v 为弹丸速度。某型标准弹丸阻力系数和马赫数的函数关系如图1所示,该曲线数据通常通过风洞实验获得。

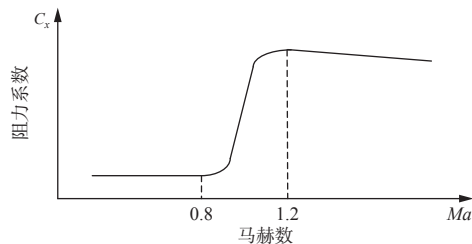


图1 阻力系数与马赫数的关系

Fig. 1 Relationship between resistance coefficient and mach number

由图1可知,当速度小于0.8倍音速时,阻力系数曲线为水平直线段,阻力系数近似于常数;而当速度大于0.8倍音速时,阻力系数可以表示为分段比例函数。本文首先研究速度小于0.8倍音速时的速度变化规律,此时弹丸在空气中飞行时受到的阻力即弹丸飞行的加速度和弹丸速度的平方成正比。而当弹丸速度高于1.2倍音速时,阻力系数曲线可以近似为斜率较小的直线。当测试区域不大时,弹丸速度变化较小,造成的阻力系数变化也很小,可以等效为常数。因此,本文研究的算法在弹丸速度高于1.2倍音速时依然适用,实验通过步枪弹的数据也验证了这一点。

因为在每次射击实验中,弹丸飞越测试区域的时间通常为几个到几十个微秒,在这段时间内空

气密度、弹丸圆柱部分最大横截面积、弹丸质量、弹丸阻力系数等参数几乎不变,可以等效为常数 B ,即 $B = \frac{1}{2m}\rho SC_x$,代入式(1)得 $\frac{dv}{dt} = Bv^2$,通过解方程可得:

$$B = \frac{1}{s_0} \ln\left(\frac{v_0}{v_1}\right) \quad (2)$$

$$v = \frac{1}{Bt + \frac{1}{v_0}} \quad (3)$$

$$S = \frac{1}{B} \ln\left(t + \frac{1}{Bv_0}\right) - \frac{1}{B} \ln\left(\frac{1}{Bv_0}\right) \quad (4)$$

$$v = \frac{v_0}{e^{SB}} \quad (5)$$

$$t = \frac{e^{SB} - 1}{Bv_0} \quad (6)$$

通过式(2)~式(6),就可以完成弹道某点瞬时速度测量,该测速点称为解算测速点。如图2所示,采用两套区截测速装置,依次沿弹道线布放,两套区截测速装置的测速点相距为 s_0 。第一套测量速度为 v_0 ,近似为测速点处的瞬时速度,称该测速点为第一测速点;第二套测量速度为 v_1 ,称其为第二测速点处的瞬时速度。 t 为弹丸从第一测速点飞行到解算测速点的时间, S 为第一测速点与解算测速点的间距, v 为弹丸飞越解算测速点时的瞬时速度。

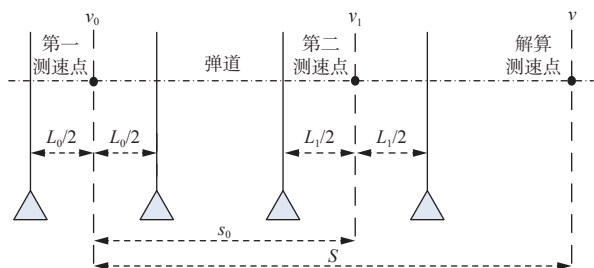


图2 双区截测速示意图

Fig. 2 Schematic diagram of double zone-block velocity measurement

首先,通过式(2)计算出参数 B , B 包含了阻力系数、空气密度、弹丸圆柱部分最大横截面积、弹丸质量等信息;然后,通过式(3),在确定参数 B 并已知第一测速点速度 v_0 的条件下,可以计算弹丸通过第一测速点 t 时间后的瞬时速度 v ;通过式(4),在确定参数 B 并已知第一测速点速度 v_0 的条件下,可以计算第一测速点与解算测速点间的距离 S ,即弹丸通过第一测速点后 t 时间的实时位置,

该公式可以用于精确测量空间炸点脱靶量参数;通过式(5),在确定参数 B 并已知第一测速点速度 v_0 的条件下,可以计算弹丸通过第一测速点后沿弹道线方向的距离 S 处弹丸的瞬时速度 v ,该公式可以测量弹丸的炮口初速度,和现有方法进行比较,不需查表确认参数,简化了测量过程,并且提高了测量速度和精度;最后通过式(6),在确定参数 B 并已知第一测速点速度 v_0 的条件下,可以计算弹丸从第一测速点开始沿弹道方向到距离 S 处的时间 t 。

2 单套区截装置测量瞬时速度误差分析

对速度衰减公式在区截测速原理中的应用进行误差分析。

1) 预设弹道垂直入射,第一个区截幕面位置固定,第二个区截幕面位置连续变化,测速点位置在第一和第二区截幕面之间连续变化,验证区截测速点的瞬时速度和平均速度的误差变化规律。

设弹道某一点为第一测速点,该位置的弹丸瞬时速度为 v_0 ,沿弹道方向距离第一测速点2 m处为区截第一幕面位置,区截第二幕面和第一测速点的距离变化区间为2 m~20 m。解算测速点和第一测速点的距离变化区间为2 m~10 m,设弹丸速度衰减系数 B 为0.001, v_0 为100 m/s。应用式(6)分别计算弹丸通过区截第一、二幕面的时间,通过过幕时间和两个幕面的距离可以计算两个幕面间的平均速度,又通过式(5)可以计算测速点处的瞬时速度。仿真结果如图3所示,速度误差为平均速度和瞬时速度之差的绝对值。

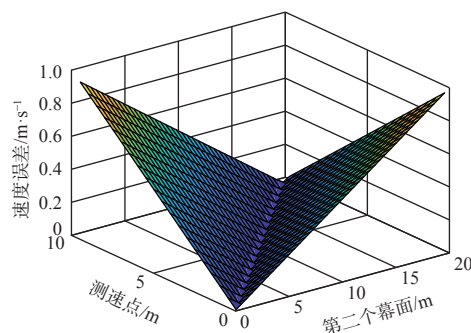


图3 测速点位置对误差的影响

Fig. 3 Influence of velocity measuring point position on errors

表1为图3中的误差数据列表,第二幕面位置变化的步进值为0.2 m,测速点位置变化的步进值

为 0.1 m。可以看出误差随距离为线性变化,并且在区截中心时出现最小值,该最小误差会随着区

截间距增加而变大,当间距为 4 m 时误差为 0.03×10^{-4} m/s,当间距为 8 m 时误差为 0.01×10^{-3} m/s。

表 1 测速点误差数据

Table 1 Error data of velocity measuring points

m/s

解算测速点变化量	第二幕面距离变化量							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.02×10^{-5}	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07
2	0.01	0.07×10^{-5}	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06
3	0.02	0.01	0.01×10^{-4}	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
4	0.03	0.02	0.01	0.03×10^{-4}	0.01	0.02	0.03	0.04
5	0.04	0.03	0.02	0.01	0.04×10^{-4}	0.01	0.02	0.03
6	0.05	0.04	0.03	0.02	0.01	0.06×10^{-4}	0.01	0.02
7	0.06	0.05	0.04	0.03	0.02	0.01	0.08×10^{-4}	0.01
8	0.07	0.06	0.05	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01×10^{-3}

2) 设区截测速幕面间距发生变化,解算测速点位置在第一和第二区截幕面的中心位置处,验证区截幕面间的平均速度和中心位置瞬时速度的误差随区截幕面间距变化的规律。

图 4 是区截幕面间距变化时速度误差的变化,表明区截幕面间的平均速度和中心位置瞬时速度的误差随区截距离的减小而减小。

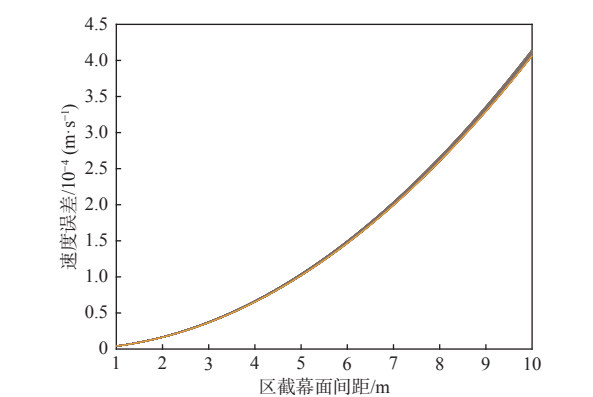


图 4 区截幕面间距对误差的影响

Fig. 4 Influence of interception plane spacing on errors

3) 设第一个区截幕面位置和第二个区截幕面位置均固定,测速点位置在第一和第二区截幕面的中心位置处,验证区截幕面间的平均速度和中心位置瞬时速度的误差随速度衰减系数 B 和第一测速点速度 v_0 变化的规律。

图 5 为当衰减系数 B 在 0.001~0.02 区间变化且 v_0 在 50~200 m/s 区间变化时产生的测量误差,误差值随 B 的增大或 v_0 的增大而增大。图 6 为该

过程的相对误差,该误差仅随 B 的增大而增大。表明区截幕面间的平均速度和中心位置瞬时速度的相对误差与弹丸速度大小无关,但 B 值越小该误差越小,表明 B 值不仅和速度衰减速度有关,而且和速度衰减后产生的误差有关。

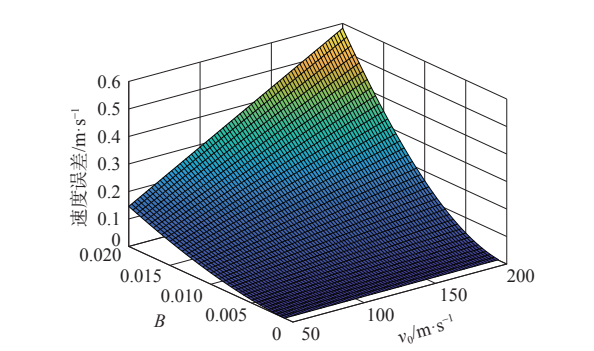


图 5 衰减系数 B 的误差

Fig. 5 Error of attenuation coefficient B

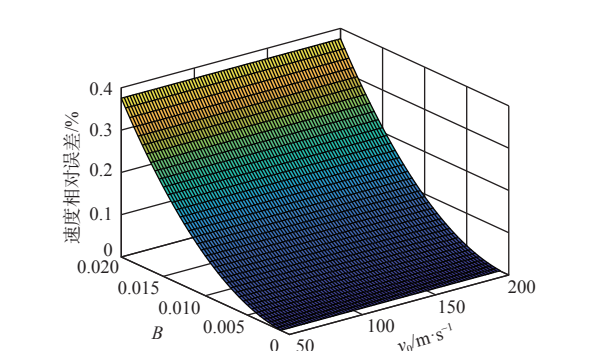


图 6 衰减系数 B 的相对误差

Fig. 6 Relative error of attenuation coefficient B

仿真结果表明,在 B 值不大、区截间距也不大的情况下,采用区截装置和本文建立的测试模型对测试区域某位置的瞬时速度进行测量是可行的,其精度可以接受。

3 双套区截装置测量瞬时速度误差分析

本节主要研究本文提出的双区截测试瞬时速度方法的测量误差。

1) 通过 v_0 和 B 的变化观察误差的变化规律。仿真条件: $s_0=3.0$ m, $S=4.0$ m, v_0 变化区间 50 m/s~200 m/s, v_0 最大误差 0.001 m/s, 距离测量最大误差 0.001 m, B 变化区间 0.001~0.02。

图7、图8分别是 v_0 和 B 变化时的速度误差和速度相对误差。图7表明误差随 B 和 v_0 的增大而增大,图8表明相对误差随 B 的增大而增大,随 v_0 的增大而减小。相对误差和 B 的变化规律近似线性, v_0 在 0~100 m/s 间相对误差变化较大,在 100 m/s~200 m/s 间的变化较小且近似线性,最大相对误差小于 0.004 5%。

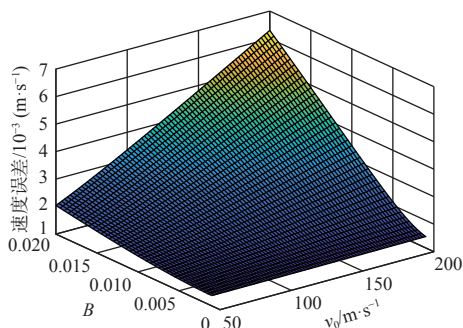


图7 速度误差

Fig. 7 Velocity error

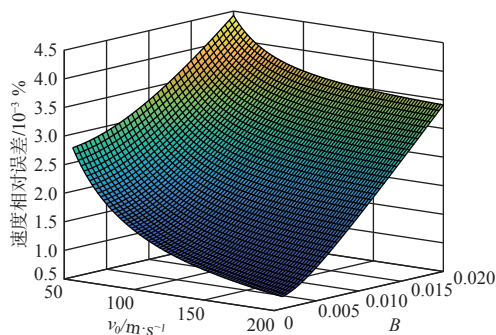


图8 速度相对误差

Fig. 8 Velocity relative error

2) 通过 v_0 和 S 的变化观察误差的变化规律。仿真条件: $s_0=3.0$ m, $B=0.01$, v_0 变化区间 50 m/s~200 m/s, S 变化区间-2 m~10 m。

图9、图10分别是 v_0 和 S 变化时的速度误差和速度相对误差。图9表明,速度的误差随着 S 和 v_0 的增大而增大;图10表明,速度的相对误差随着 S 的增大、 v_0 的减小而增大。误差在 1 m 附近存在最小值,最大相对误差不超过 0.01%。

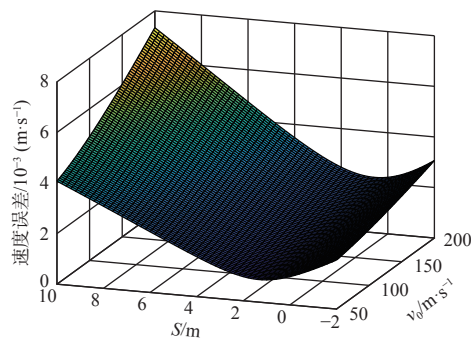


图9 速度误差

Fig. 9 Velocity error

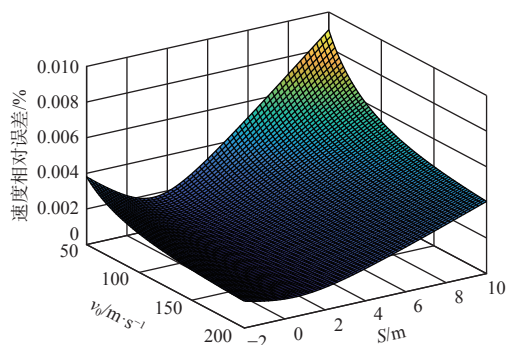


图10 速度相对误差

Fig. 10 Velocity relative error

上述误差仿真表明,在速度小于 0.8 倍音速时,最大相对误差小于 0.01%,满足测试精度要求,并说明了影响误差的各个因素及其方式和规律。

4 实弹试验验证

采用弹弓、气枪、步枪分组进行实弹射击实验。实验采用原像反射式激光光幕靶,形成区截光幕速度测试装置,使用专用数据采集设备进行信号采集和分析处理,得到弹丸过幕的精确时间。弹弓和气枪实验使用 4 个光幕,任意 2 个光幕均可构成一套区截测速装置。本实验采用光幕 1、2 形成第一套区截装置,光幕 1、3 形成第二套区截装置,第一测速点到第二测速点间距 s_0 为 375 mm,解算测速点设置为 2、3 光幕的中心位置,到第一测速点距离 S 为 750 mm,光幕布放如图 11 所示。

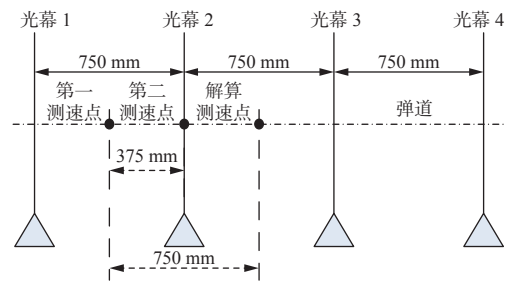


图 11 光幕布放示意图

Fig. 11 Schematic diagram of light curtain arrangement

图 12 为实验现场照片, 图 13 为弹丸过幕时间采集软件界面。通过弹丸过幕时间采集软件, 能采集有效弹丸信号, 从而获得过幕时间。

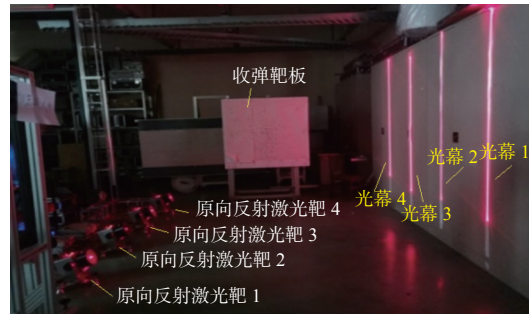


图 12 实验现场图

Fig. 12 Experimental site

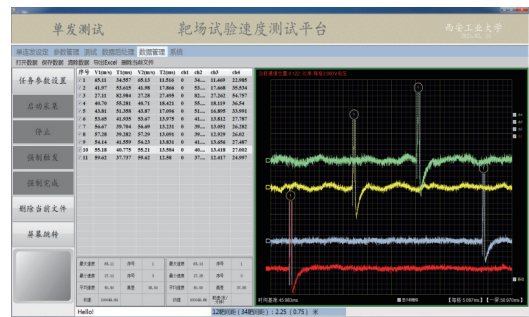


图 13 弹丸过幕时间采集软件界面

Fig. 13 Acquisition software interface of projectile passing time

应用式(2)和式(5), 分别计算衰减系数 B 和弹丸速度 v , 软件界面如图 14 所示。

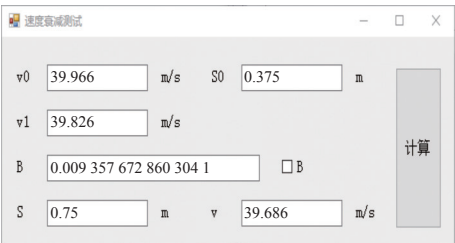


图 14 计算衰减系数和弹丸速度的软件界面

Fig. 14 Software interface for calculating attenuation coefficient and projectile velocity

填入 v_0 、 v_1 和 S_0 计算可得 B 值, 再填入 S 计算得到 v 。将 v 和同一测试点处单套区截装置测试得到的 v 进行比较, 得到测试误差数据如表 2~表 5 所示。表 2~表 5 分别给出了弹弓发射 6 mm 钢珠、弹弓发射 10 mm 泥丸、气枪发射 6 mm 钢珠、弹道枪发射 7.62 mm 弹丸四种试验条件下所得测试数据。

v_{1-2} 、 v_{1-3} 、 v_{2-3} 分别表示光幕 1、2 之间、光幕 1、3 之间以及光幕 2、3 之间测速点的实测速度; b_{12-13} 表示通过 v_{1-2} 、 v_{1-3} 计算所得的参数 B 值; v_t 为使用 v_{1-2} 和 B 值经过式(5)计算得到的 v_{2-3} 测速点位置的瞬时速度; 误差项为实测速度值 v_{2-3} 与计算得到的同一位置的瞬时速度 v_t 值之差; 相对误差项为误差项除以 v_{2-3} 的比值。

步枪试验测试时, 4 个光幕的布放如图 15 所示。将 4 次实验中的 B 值和相对误差进行统计分析, 如表 6 所示。

实弹实验均采用精度为 0.1% 的区截测速装置测量, 而实验数据中速度相对误差均远小于 0.1%, 表明该模型的测试精度不低于所采用的区

表 2 弹弓发射 6 mm 钢珠测试数据

Table 2 Test data of slingshot shooting 6 mm steel ball

序号	$v_{1-2}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$v_{1-3}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	b_{12-13}	$v_t/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$v_{2-3}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	误差/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	相对误差/%
1	39.966	39.826	0.009 362	39.686	39.687	0.000	-1.23×10^{-5}
2	46.978	46.812	0.009 421	46.647	46.648	-0.001	-1.25×10^{-5}
3	39.052	38.923	0.008 872	38.793	38.794	0.000	-1.11×10^{-5}
4	41.572	41.431	0.009 075	41.290	41.290	0.000	-1.15×10^{-5}
5	44.371	44.240	0.007 877	44.109	44.110	0.000	-8.68×10^{-6}
6	41.247	41.111	0.008 858	40.974	40.975	0.000	-1.1×10^{-5}
7	42.132	41.986	0.009 272	41.841	41.841	-0.001	-1.2×10^{-5}
8	42.522	42.380	0.008 905	42.239	42.239	0.000	-1.12×10^{-5}

表 3 弹弓发射 10 mm 泥丸测试数据

Table 3 Test data of slingshot shooting 10 mm mud pellet

序号	$v_{1-2}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$v_{1-3}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	b_{12-13}	$v_t/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$v_{2-3}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	误差/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	相对误差/ $10^{-5}\%$
1	42.450	42.213	0.014 901	41.978	41.979	-0.001	-3.09
2	27.511	27.394	0.011 371	27.277	27.278	0.000	-1.82
3	41.393	41.051	0.022 131	40.712	40.714	-0.003	-6.83
4	44.392	44.129	0.015 816	43.868	43.870	-0.002	-3.49
5	54.301	53.982	0.015 689	53.665	53.667	-0.002	-3.43
6	57.467	57.073	0.018 326	56.682	56.685	-0.003	-4.69
7	58.009	57.648	0.016 655	57.289	57.291	-0.002	-3.87
8	54.921	54.571	0.017 032	54.224	54.226	-0.002	-4.05

表 4 气枪发射 6 mm 钢珠测试数据

Table 4 Test data of air gun shooting 6 mm steel ball

序号	$v_{1-2}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$v_{1-3}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	b_{12-13}	$v_t/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$v_{2-3}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	误差/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	相对误差/ $10^{-5}\%$
1	189.251	188.584	0.009 404	187.921	187.923	-0.002	-1.24
2	154.607	154.004	0.010 424	153.403	153.406	-0.002	-1.52
3	146.456	145.758	0.012 728	145.064	145.068	-0.003	-2.27
4	150.784	150.150	0.011 235	149.519	149.522	-0.003	-1.77
5	148.839	148.207	0.011 354	147.577	147.580	-0.003	-1.8
6	143.349	142.884	0.008 651	142.422	142.423	-0.001	-1.05
7	136.190	135.685	0.009 908	135.182	135.184	-0.002	-1.38
8	126.753	126.220	0.011 243	125.689	125.691	-0.002	-1.77

表 5 步枪试验测试数据

Table 5 Test data of rifle

序号	$v_{1-2}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$v_{1-4}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	b_{12-14}	$v_t/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$v_{2-4}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	误差/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	相对误差/%
1	824.402	822.740	0.000 734	822.438	822.438	0.000	-4.86×10^{-7}
2	853.971	851.304	0.001 138	850.819	850.820	-0.001	-1.06×10^{-6}
3	855.432	854.213	0.000 519	853.992	853.992	0.000	-2.34×10^{-7}
4	839.631	837.155	0.001 074	836.706	836.707	-0.001	-8.37×10^{-7}
5	838.926	836.940	0.000 862	836.579	836.579	0.000	-5.98×10^{-7}
6	839.631	838.127	0.000 652	837.854	837.854	0.000	-3.58×10^{-7}
7	829.187	826.402	0.001 224	825.897	825.898	-0.001	-1.33×10^{-6}
8	838.223	835.756	0.001 072	835.308	835.308	-0.001	-9.58×10^{-7}

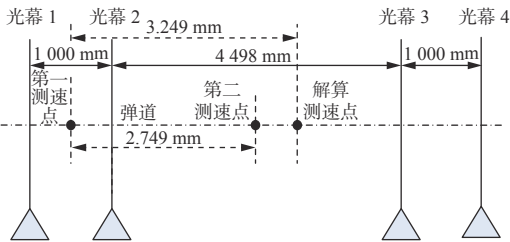


图 15 步枪实验光幕布置示意图

Fig. 15 Schematic diagram of light curtain arrangement of rifle experiment

截测速装置的 0.1% 精度。在同一组实验中(同类的弹丸、同样的发射条件) B 值标准差较小,而在不同组间 B 值均值差异较大。弹弓和气枪测试速度在 0.8 倍音速以内,步枪的测试速度在 1.2 倍音速以上,数据表明测试精度均高于 0.1%,因此本文所提方法在速度低于 0.8 倍音速和高于 1.2 倍音速时均能够满足常规弹丸速度测试需求。

表 6 测试统计数据

Table 6 Test statistics

测试模式	<i>B</i> 均值	<i>B</i> 标准差σ	速度相对误差均值/%	速度相对误差标准差σ/%
弹弓发射钢珠	0.008 955	0.000 490	-1.13×10^{-5}	1.2×10^{-6}
弹弓发射泥丸	0.016 490	0.003 055	-3.91×10^{-5}	1.44×10^{-5}
气枪发射钢珠	0.010 618	0.001 290	-1.6×10^{-5}	3.85×10^{-6}
步枪发射7.62 mm	0.000 909	0.000 255	-7.33×10^{-7}	3.77×10^{-7}

5 结论

提出了一种弹丸瞬时速度测量方法。通过采用双区截测速装置,得到 2 个测速点速度,依据该速度值计算得到包含空气密度、弹丸最大横截面积、弹丸质量、弹丸阻力系数等参数信息的弹丸速度衰减系数 *B*,使用 *B* 计算沿弹道方向距离第一测速点 *S* 处的弹丸瞬时速度,从而实现区截测试区域附近任意位置瞬时弹速高精度测量。通过理论仿真及对弹弓、气枪、步枪实弹实验,验证该方法具有较高的测量精度。该方法仅适用于速度在 0.8 倍音速以下或者 1.2 倍音速以上的飞行弹丸,当弹丸速度在音速附近时由于速度衰减系数变化过快且成非线性,无法等效为常数,因此不适用于本文模型。另外,应用该方法能够改良炮口初始速度的测试方法,并且能有效提高测试精度。同时,使用 *B* 值能够计算得到飞行弹丸经过测试点后 *t* 时间的空间位置,从而实现弹丸空间坐标的高精度测量,提高使用六光幕阵列天幕立靶测量空间炸点坐标的测试精度。研究结论适用于不考虑重力,且弹丸为理想球形,或其迎风角度近似为零度的情况。

参考文献:

[1] LI Hai, NI Jinping, YANG Xiaodong, et al. Test influence of screen thickness on double-N six-light-screen sky screen target[J]. *Open Physics*, 2022, 20(1): 1-8.

[2] 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.

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.

[3] 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.

[4] 柏超龙, 江剑, 赵传荣. 基于FPGA的反射式光幕测速系统[J]. *兵器装备工程学报*, 2018, 39(12): 231-235.

BAI Chaolong, JIANG Jian, ZHAO Chuanrong. Research on reflective light screen speed measurement system based on FPGA[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2018, 39(12): 231-235.

[5] 杨久琪, 董涛, 陈丁, 等. 基于主动光幕阵列静爆试验破片速度测量方法[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(1): 206-212.

YANG Jiuqi, DONG Tao, CHEN Ding, et al. Measurement method for fragment velocity based on active screen array in static detonation test[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(1): 206-212.

[6] 田会, 倪晋平, 焦明星. 抛物线弹道弹丸飞行参数测量模型与精度分析[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(1): 67-74.

TIAN Hui, NI Jinping, JIAO Mingxing. Projectile flying parameter measurement model of parabolic trajectory and precision analysis[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(1): 67-74.

[7] 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.

FENG Bin, NI Jinping, YANG Lei. Principle of measuring impacting position of vertical target of six-light-screens[J]. *Journal of Ballistics*, 2008, 20(1): 59-61.

[8] 倪晋平, 卢红伟, 董涛. 弹着点坐标的组合光幕阵列测量方法[J]. *弹道学报*, 2012, 24(1): 37-40.

NI Jinping, LU Hongwei, DONG Tao. Measurement method of impact location coordinate of flying projectile via combined screens array[J]. *Journal of Ballistics*, 2012, 24(1): 37-40.

[9] 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): 101-114.

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): 101-114.

- [10] 高丰佳, 董涛, 陈丁, 等. 三角阵列光电探测的双弹丸识别方法[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(11): 188-192.
GAO Fengjia, DONG Tao, CHEN Ding, et al. Identification method of double-projectile using triangle array photoelectric detection[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2019, 40(11): 188-192.
- [11] 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.
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.
- [12] 孙辉. 基于大地坐标的目标脱靶量交汇测量方法[J]. 光学技术, 2008, 34(2): 197-200.
SUN Hui. Method of intersection measurement for missing distance based on geodetic coordinate system[J]. *Optical Technique*, 2008, 34(2): 197-200.
- [13] 冯勇, 黄燕, 黄兵. 拟合弹道系数法进行弹道外推的研究[J]. 弹箭与制导学报, 2014, 34(2): 117-119.
FENG Yong, HUANG Yan, HUANG Bing. Trajectory extrapolation based on fitted ballistic coefficient[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2014, 34(2): 117-119.
- [14] 李翰山, 雷志勇, 王泽民, 等. 一种新型天幕交汇立靶精度测量系统[J]. 电光与控制, 2007, 14(5): 153-155.
LI Hanshan, LEI Zhiyong, WANG Zemin, et al. A new type of firing accuracy measurement system for cross sky screen[J]. *Electronics Optics and Control*, 2007, 14(5): 153-155.
- [15] 杨瞳, 王凡, 倪晋平, 等. 基于蒙特卡罗法的水下激光光幕探测性能研究[J]. 应用光学, 2019, 40(3): 454-460.
YANG Tong, WANG Fan, NI Jinping, et al. Detection performance of underwater laser light screen based on Monte Carlo method[J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(3): 454-460.
- [16] 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: 91.
LIU Shiping. Projectile velocity measurement and data processing[M]. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 1994: 91.