

阵列式激光靶影响因素分析

陈友兴¹ 侯锦亮¹ 赵 辉² 岳秀芳³

¹中北大学电子测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051

²三七五厂, 辽宁 辽阳 111002

³山西省长治市潞安煤基清洁能源有限责任公司, 山西 长治 046204

摘要 激光光幕靶是弹丸测速的主要设备之一, 针对阵列式点状激光靶的测速要求, 研究了系统调试和测量过程中的影响因素。根据阵列式点状激光靶的测速原理, 通过实验分析了负载电阻、光照距离、光照角度、发射角等因素对单路接收信号(负载电压)的影响; 根据弹丸过靶时遮挡激光光束对光强变化情况, 建立了相应的数学模型, 并以此得到了不同压差下计时的相对误差, 分析了光幕均匀性对整个测速系统的影响。理论建模和实验分析为阵列式点状激光靶的结构设计和在测速系统中的应用提供了理论依据和参考。

关键词 激光光学; 影响因素; 光幕均匀性; 阵列式激光靶

中图分类号 O439; TJ306; TP212

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0514002

Analysis of Influence Factors of Array Laser-Screen

Chen Youxing¹ Hou Jinliang¹ Zhao Hui² Yue Xiufang³

¹National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China,
Taiyuan, Shanxi 030051, China

²375 Factory, Liaoyang, Liaoning 111002, China

³Shanxi Lu'An Coal-Based Clean Energy Co, Ltd, Changzhi, Shanxi 046204, China

Abstract Laser-screen is one of the main equipments for measuring projectile-velocity, aiming at the test requirements of dot array laser-screen, the influences on the process of system debugging and measurement are studied. According to the principle of velocimetry, the influences of load resistance, illumination distance, illumination angle and angle of emission on received signals are analyzed. While the pellet passes through the device, the ideal mathematical model is established based on the actual situation of receiving component, and the relative error under different dropout voltages of timing is obtained to analyze the influence of the uniformity of the screen on the whole velocity-measuring system. The theoretical modeling and experimental analysis provide the theoretical basis and reference, for the structure design and the application of dot array laser-screen in the velocity-measuring system.

Key words laser optics; influence factors; uniformity of the screen; dot array laser-screen

OCIS codes 140.3290; 040.1880; 250.4745; 120.1880

1 引 言

弹丸飞行速度是衡量火炮特性、弹药特性和弹道特性的一个重要指标^[1-3]。在靶场中常常需要对弹丸的飞行速度进行测试。光幕靶具有测试精度高、可靠性好等特点, 是现阶段测量弹丸速度的主要设备之一^[4], 本文以点状阵列式光幕靶为研究对象, 根据其测速原理及结构, 分析各因素对接收信号的影响, 为高精度阵列式激光靶的设计提供了理论依据。

2 阵列式激光靶的工作原理及结构

光幕靶结构如图1所示, 光幕靶测速系统由起始靶和停止靶两个光幕靶以及计时仪组成, 光幕靶由一对

收稿日期: 2014-12-19; 收到修改稿日期: 2015-01-13

作者简介: 陈友兴(1979—), 男, 博士, 副教授, 主要从事信号处理方面的研究。E-mail: chenyouxing@nuc.edu.cn

发射靶和接收靶组成。具体工作原理如下:发射靶产生光强分布相对均匀的光幕,接收靶将接收到的光信号转换为电信号,并进行处理;当弹丸飞过光幕时,弹丸遮挡了部分光幕,导致接收到的光通量发生变化,经接收部分转换处理,产生一个脉冲信号;计时仪计算两靶(起始靶和停止靶)产生的脉冲信号的时间差,得出弹丸飞过两个光幕之间的时间间隔 t ,在已知两靶之间的距离 s 的情况下,即可计算出弹丸的速度:

$$v = s/t . \quad (1)$$

点状阵列式激光靶是光幕靶的一种,其结构如图2所示,以阵列式点状激光器为发射光源,每个激光器发射出的点状激光光斑由对应的光电二极管接收。与普通光幕靶相比,此种结构不仅可以无限延伸靶面大小,而且,除了可以测得弹丸的飞行速度外,还能精准地测出弹丸飞行时的坐标信息。

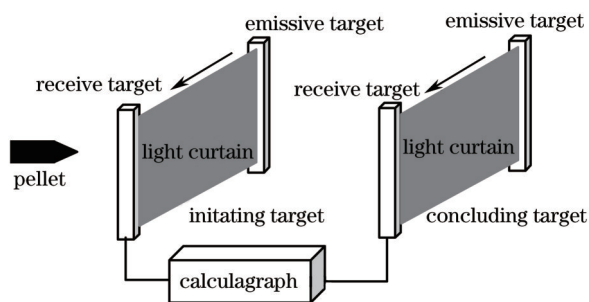


图1 光幕靶测速原理

Fig.1 Principle of velocity measurement by light-screen

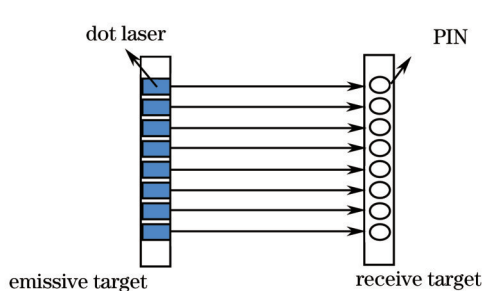


图2 阵列式激光靶结构

Fig.2 Structure of the dot array laser-screen

点状阵列式激光靶的接收电路如图3所示,激光器产生的激光束由对应的光电二极管电路接收并将光信号转换为电压信号,当目标通过时,由于遮挡造成部分光电二极管接收的光通量发生变化,从而引起输出电压信号的变化。设定一定的阈值电压,低于阈值电压时电压信号转为脉冲信号,便可触发计时仪工作。本文采用波长为 650 nm 的点状焦距可调激光器作为发射光源,高灵敏度 PIN 型硅光二极管作为接收器件。依照阵列式激光靶的基本接收电路,在电源电压一定时,选用不同阻值的负载,改变不同的照射条件,根据负载电压变化来研究各因素对激光靶的影响。

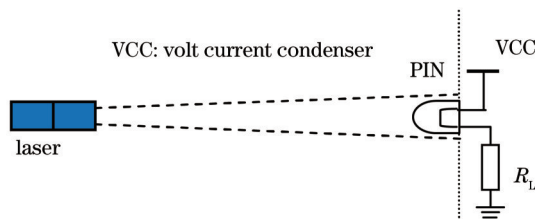


图3 阵列式激光靶基本接收电路

Fig.3 Receiving circuit of the dot array laser-screen

3 负载对接收信号的影响

点状阵列式激光靶接收电路的基本输入电路图如图4(a)所示, V_{cc} 是反向偏置电压, R_L 是负载电阻,流过负载电阻的电流为 I ,它与输入光照强度 E 成正比,输出信号即负载 R_L 两端的电压为 U_0 。对此电路可列出回路方程:

$$V_{cc} = V(I) + I \times R_L , \quad (2)$$

式中 $V(I)$ 为光电二极管两端电压,是非线性函数,利用图解法^[5]可知,如图4(b)所示,在伏安特性上画出负载线 $V_{cc} - I \times R_L$,其斜率为 $-1/R_L$,即通过 V_{cc} 和 V_{cc}/R_L 的直线。若光照强度为 E_0 ,在伏安特性曲线图中对应于 E_0 的曲线与负载线的交点 Q 则为输入电路的静态工作点。当输入光照强度由 E_0 变为 $E_0 \pm \Delta E$ 时,在负载电阻 R_L 上会产生 $\pm \Delta V$ 的电压信号输出和 $\pm \Delta I$ 的电流信号输出。通过图4(b)可以得到:当偏置电压 V_{cc} 不变时,随着负载电阻 R_L 的减小,输出信号电流增大,输出信号电压减小。因此,若要提高输出信号电压,应增大 R_L 。

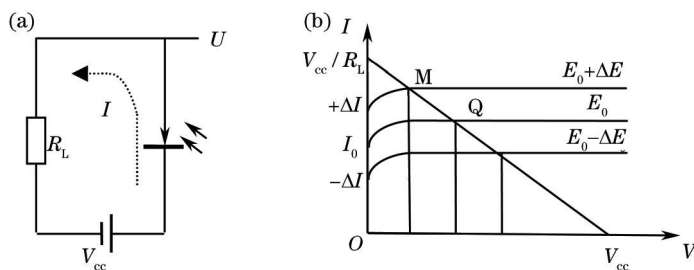


图4 光电二极管输入电路的图解法分。(a) 电路图; (b) 图解法

Fig.4 Graphical method of photodiode input circuit. (a) Basic circuit; (b) graphic method

采用图3的基本接收电路进行实验,当电源电压取3.3 V时,所得负载电压和电阻的实验数据如图5所示。从图中可以看出,当光照强度一定时,随着负载电阻的增大,电压值近似成线性变化,但当负载阻值大于60 kΩ时,负载电压则处于3.75 V的饱和状态,电压值不再增加(负载两端电压值大于电源电压,这是由于二极管自身的反向电流所引起的^[6]),此时输出信号波形已发生畸变,信号随光照强度的变化成非线性状态。在测速时,为保证光幕靶系统的正常工作和尽可能提高计时精度,接收电压则需最大,且电压值不能处于饱和状态,所以电阻值应选择50~60 kΩ。

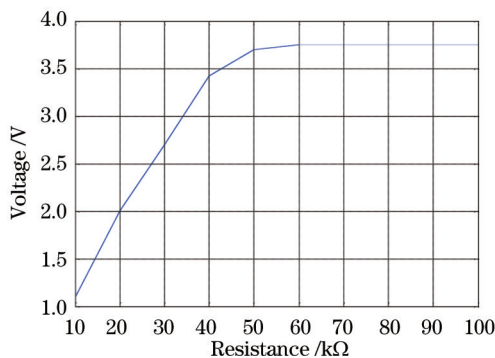


图5 负载阻值对接收信号的影响

Fig.5 Influence of load resistance on the receiving signal

4 光照参数对接收信号的影响

4.1 接收信号电压模型建立

由于PIN型光电二极管光照大小与其电流变化呈线性关系,故接收信号的幅值与光照强度呈一定的线性关系。另外,点状激光光源光强比较集中,在相对很小的光电二极管接受面处的光能量分布比较均匀。鉴于以上两点,可以认为接收信号的电压值被光电二极管接受面的面积均匀分配。如图6所示,假设光电二极管受光面接收光强均匀为一圆形区域,整个区域的初始电压为 u_0 ,当弹丸通过时相当于一个矩形块逐渐遮挡这一圆形区域而引起电压变化,电压最终由 u_0 变为0。设圆形区域即光电二极管的半径为 r ,弹丸的飞行速度为 v ,因弹丸仅影响电压为0时持续的时间,相同弹丸下通过的时间相同,为了简化模型,设弹丸长为 $2r$,与圆形区域直径恰好相同。弹丸(矩形框)与圆形区域交集的面积为整个接收电压下降的部分,所以弹丸经过光电二极管所对应的圆形区域 t 时刻的电压值为

$$u = u_0 - \frac{\int_0^x 2\sqrt{r^2 - (x-r)^2} dx}{\pi r^2} \cdot u_0 \quad (0 \leq t \leq 2r/v). \quad (3)$$

当 $2r/v \leq t \leq 4r/v$ 时,其电压变化趋势与 $0 \leq t \leq 2r/v$ 对称,式中 $x = vt$ 。当 $t=0$ 时,矩形框的AB端处于坐标原点处,与 y 轴重合。在实际中,由于阵列式光幕靶每处光幕不可能达到完全一致,往往会出现起始靶与停止靶的初始电压 u_0 不一致的情况。图7为在不同 u_0 值,同一弹丸经过光电二极管时的电压值,假设曲线1为起始靶信号,曲线2为停止靶信号,计时仪在计算两靶脉冲信号时间差时一般采用阈值电压进行触发。从

图中可以看出当光幕靶系统阈值电压^[7]确定时,若起始靶与停止靶接收信号的初始电压 u_0 有一定的幅值差,整个系统便会产生计时误差 Δt 。

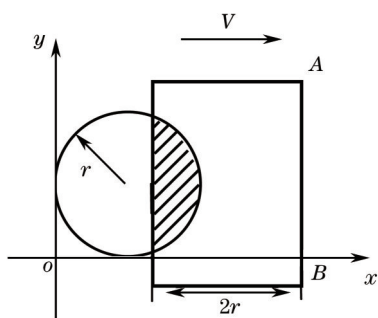


图6 模型示意图

Fig.6 Schematic drawing of the model

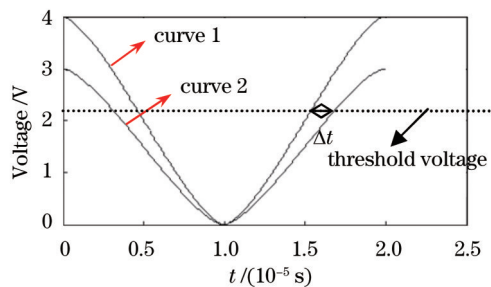


图7 信号仿真图

Fig.7 Map of simulation of the signal

4.2 接收信号幅值差的相对误差

当 $r=2.5$ mm时,根据模型计算得到了不同弹速、不同压差下(与电压 3.75 V 的压差),阈值电压取 1.7 V 时所对应的计时相对误差。计时相对误差 δ 计算公式为

$$\delta = \frac{\Delta t}{s/v} \quad (4)$$

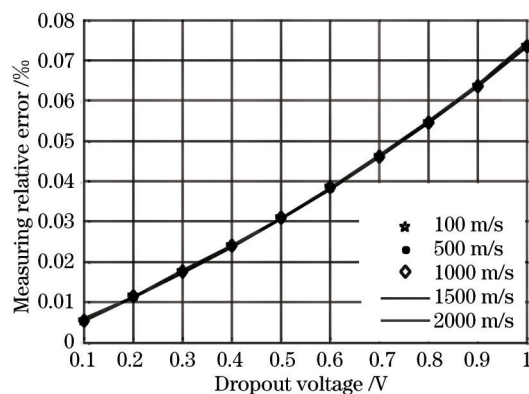


图8 不同弹速下电压差引起的测时相对误差

Fig.8 Measuring relative error caused by the dropout voltage under different projectile velocities

由(4)式和图8可以看出,不同弹速下计时相对误差与弹丸速度无关只与压差有关,随着压差的增大,相对误差随之增大,且成比例关系。表1为不同压差下的计时相对误差。

表1 不同压差下的计时相对误差

Table 1 Relative error of timing under different dropout voltages

$\Delta U/V$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$\delta/\%$	0.0056	0.0113	0.0176	0.0240	0.0308	0.0383	0.0462	0.0546	0.0636	0.0737

4.3 不同光照条件对接收信号的影响

在测试中,制作阵列式激光靶测速系统时,由于人为因素和制作条件的局限,难免会造成光幕的不均匀,对接收信号产生一定的影响,从而影响测试的精度。

4.3.1 光斑大小(发射角)对接收信号的影响

在实际中,往往会选择不同的发散角来满足设计要求,但发散角越大,激光光能量衰减可能就越大^[8],所以发散角的大小在一定程度下会影响接收信号的大小。

如图9所示,用激光器照射到光电二极管位置处的光斑大小 d 来衡量发射角对接收信号的影响。实验数据显示,激光光斑(发射角)越小,接收信号幅值越大,当激光光斑大小大于 25 mm 时接收信号值开始呈线性下降趋势。所以若在保证接收信号幅值不受影响,尽量选择发射角较小的激光器作为发射光源。

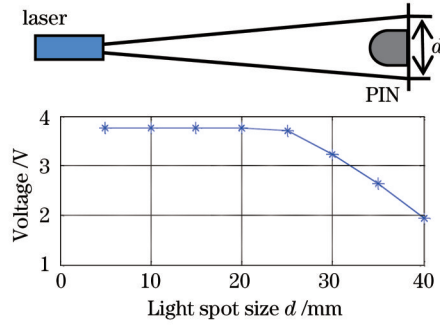


图9 不同光斑大小下的接收信号幅值

Fig.9 Received signals under different light spot sizes

4.3.2 入射角对接收信号的影响

在实际测量时,布靶误差往往会使发射光路与接收面不垂直而产生一定的夹角^[9-10]。如图10所示,设激光束与接受面法向量上的夹角为 α ,随着 α 增大,接收信号逐渐减小,在激光垂直照射光电二极管时,其接收信号最大,为3.75 V。 α 在 $0^\circ\sim 10^\circ$ 范围内时信号减小幅度较小,这与光电二极管的光照接收特性有关。在实际测量时误差角度一般会在 5° 范围内,其接收信号下降为0.1 V左右,所以角度会造成的计时误差大约为0.0056%,此误差可以忽略不计。

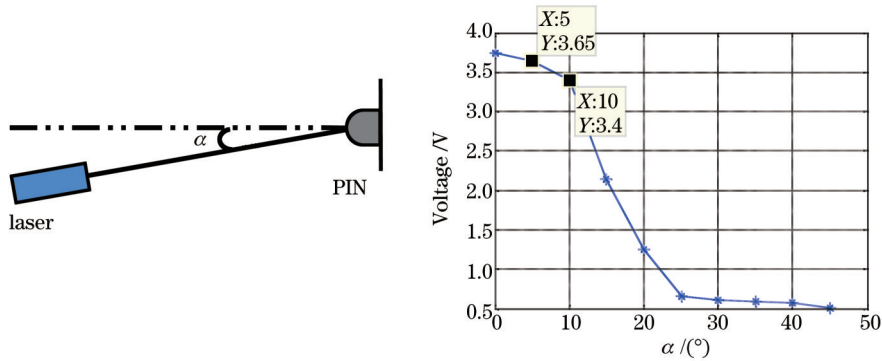


图10 不同照射角度下的接收信号幅值

Fig.10 Received signals under different irradiation angles

4.3.3 照射距离对接收信号的影响

图11为不同照射距离下接收信号幅值的实验示意图和数据,其中图11(a)为发散角不变的情况,图11(b)为发散角改变而接收面光斑大小不变的情况。激光器与光电二极管距离为80~150 cm,实验过程中每隔5 cm对接收信号的幅值进行一次测量。从实验数据可以看出,光照距离对接收信号的影响主要体现在距离变化而引起的接受面光斑大小变化的影响,在不改变发散角的情况下,光照距离小于120 cm时,接收信号保

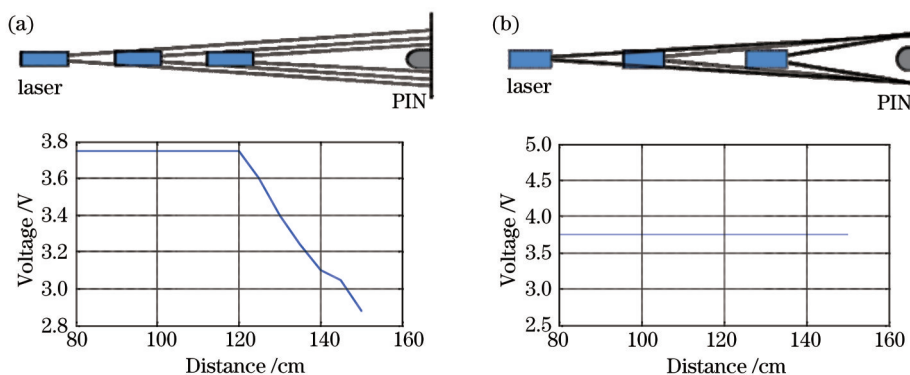


图11 不同照射距离下的接收信号幅值。(a) 激光发射角不变; (b) 接收光斑大小不变

Fig.11 Received signals under different irradiation distances. (a) Angle of laser is constant; (b) area of receiving beam spot is constant

持不变,但光照距离大于 120 cm 时(此时光斑大于 25 mm),接收信号会随着距离的增大而减小。当光斑保持 25 mm 不变时,光照距离为 80~150 cm 时,接收信号幅值不会受到影响。所以在制作大靶面的光幕靶时尽量减小发散角的大小,从而减小距离对接收信号幅值的影响。

5 结 论

本文针对阵列式光幕靶,根据其测速基本原理及构造,对其接收电路进行了详细的分析。制定了合理的实验方案,分析了负载电阻对接收信号的影响。建立了弹丸过靶时的理想数学模型,将光照影响转化成了接收信号幅值的影响,利用接收信号幅值说明光照不均匀而引起的计时误差,从而得出了不同幅值差下的计时相对误差。最后实验分析了发散角、光照角度和光照距离对接收信号的影响。

参 考 文 献

- 1 Li Hanshan, Lei Zhiyong. 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.
- 2 Ma Suodong, Zhu Rihong, Li Jianxin, *et al.*. A multi-view measurement system for three-dimensional surface distribution of transient moving target[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(12): 3091-3097.
马锁东,朱日宏,李建欣,等.瞬时飞行目标三维面形的多视角测量系统[J].中国激光,2010,37(12):3091-3097.
- 3 Chai Min, Yu Hui, Song Weihong, *et al.*. Joint positing method for data fusion of photo-electric theodolite and radar[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1212002.
柴敏,余慧,宋卫红,等.光学无线电测量信息融合定位方法[J].光学学报,2012,32(12):1212002.
- 4 Cai Rongli, Ni Jinping, Tian Hui. Progress of light screen technology research[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2013, 33(8): 603-610.
蔡荣立,倪晋平,田会.光幕靶技术研究进展[J].西安工业大学学报,2013,33(8):603-610.
- 5 Miao Jiadin, Xu Wenjuan, Mou Tongsheng. Photoelectric Technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1995: 131-139.
缪家鼎,徐文娟,牟同升.光电技术[M].杭州:浙江大学出版社,1995:131-139.
- 6 Zeng Guangyu, Zhang Zhiwei, Zhang Cunlin. Photoelectric detection Technology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, Beijing jiaotong University Press, 2005: 55-57.
曾光宇,张志伟,张存林.光电检测技术[M].北京:清华大学出版社,北京交通大学出版社,2005:55-57.
- 7 Huang Zhanhua, Zeng Lei, Cai Huaiyu, *et al.*. Impact of the laser beam on light screen velocity measuring system[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(7): 1669-1671.
黄战华,曾磊,蔡怀宇,等.激光光束对光幕系统的影响[J].传感技术学报,2007,20(7):1669-1671.
- 8 Wang Yanping, Wang Qianqian, Ma Chong. Factors affecting the accurate measurement of laser beam width with CCD camera[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0208002.
王艳萍,王茜茜,马冲.影响基于CCD相机激光光束宽度精确测量的因素[J].中国激光,2014,41(2):0208002.
- 9 Zhang Shengtao, Gao Wenhong, Zhao Pengfei, *et al.*. Laser speckle reduction due to angular diversity introduced by 2D laser diode array[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0102005.
张圣涛,高文宏,赵鹏飞,等.激光阵列光源角度多样性抑制散斑方法[J].中国激光,2013,40(1):0102005.
- 10 Liu Qunhua, Shi Huanfang, Yan Bingxian, *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.

栏目编辑:张雁