文章编号：1000-5773(2009)05-0395-06

用于毫米级弹丸速度测量的光电检测装置*

赵军卫，胡志云，赵新艳，张向荣，强希文，张天庆

（西北核技术研究所，陕西西安 710024）

摘要：为了满足二级轻气炮毫米级弹丸的测速需求，研制了一套利用激光光幕测量毫米级弹丸飞行速度的测试系统。采用光阑限光、光谱滤光和低阻滤波等复合抗干扰技术，解决了从强背景光中捕获快速变化的弱光扰动信号的技术问题，获得了较高的信噪比。在二级轻气炮上进行了直径为 4 mm 的球形金属弹丸测速实验，结果表明该装置的测量结果与线圈测速法实时监测结果的不一致性小于 2%，可以满足毫米级弹丸速度测量的要求。

关键词：速度测量；二级轻气炮；激光光幕；弹丸

中图分类号：O521.3；TN247 **文献标识码**：A

1 引 言

弹丸测速技术在兵器研制、等离子物理实验、冲击动力学、航空航天等领域有着广泛的应用前景[1-3]。常用的线圈测速法[4-5]只能测量金属弹丸，对于非导磁性弹丸则必须外贴磁性材料，这样可能改变弹丸在气炮中的飞行特性。激光光幕测速法具有非接触、响应速度快、分辨率高、对是否为金属弹丸无要求等优点，是目前较实用的弹丸测速技术之一。其中点状光束遮断法就成功地应用于一级轻气炮的速度测量[6]，但在应用于二级气炮时遇到了一些实际问题，如泄漏到弹丸前端的氢气发光会严重干扰光电信号，气炮发射时的冲击会使弹道偏离光路，尤其是对于小尺寸弹丸，这些问题就更加突出[7-8]。因此，有必要研制一套适应性好、空间测量范围大、抗干扰能力强的高精度光电测速系统，为材料在冲击载荷下的动态特性研究及相关工作的开展提供必要的技术支持。

基于此，我们设计了一种用于二级气炮毫米级弹丸速度测量的光电检测装置，该装置成功地解决了从强背景光中捕获快速变化的弱光扰动信号的技术问题。

2 测速原理

2.1 测速系统工作原理

激光光幕法测速原理（见图 1）：弹丸飞行时，依次遮断布置在弹道上的若干束（一般为 2 束或 3 束）平行激光，对应的光电探测器产生突变的电信号，由此测出遮光的时间间隔，再根据激光光幕间距，即可求出弹丸的飞行速度。测速公式为

$$v=\frac{s}{t} \tag{1}$$

式中：s 为两光幕之间的间距，t 为弹丸穿过两光幕的时间间隔。

本研究利用 532 nm 固体激光器产生两束片状激光光幕，光幕高度为 15 mm，厚度为 0.4 mm。

2.2 测速系统对光电检测部分的技术要求

图 2 为弹丸穿过激光光幕的示意图。图 2(a)中，光的方向是从里向外，光的能量平均分布在高度

* **收稿日期**：2009-02-11；**修回日期**：2009-02-27

作者简介：赵军卫(1969－)，男，硕士，高级工程师，主要从事光电检测与信号处理研究. E-mail：zhaojw0824@126.com

为 h 的光幕上，弹丸的行进方向为从左向右；图 2(b)中，光的方向为自上而下，光幕的厚度为 0.4 mm，弹丸的行进方向为从左向右。

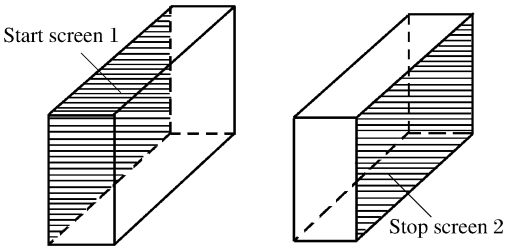


图 1 光幕测速的基本原理

Fig. 1 The basic principle of velocity measurement with the laser screens

2.2.1 信号强度的估算

如图 2(a)所示，假设光功率 P_0 均匀分布在高为 h 的光幕上，则当直径为 D 的球形弹丸穿过激光光幕时，弹丸遮挡的最大光功率与总光功率之比小于 D/h(对于直径为 D 的圆柱形弹丸，其比值为 D/h)。若光幕的出射光经会聚后全部被光电探测器接收，则弹丸在穿过光幕过程中探测器接收到的最大光功率变化 $\beta<D/h$。当 $D=1$ mm、$h=15$ mm 时，$\beta<1/15$，即需要在 P_0 的强背景下检测不超过 $P_0/15$ 的光功率变化。

2.2.2 响应速度的估算

为简便起见，首先针对直径和高度均为 1 mm 的圆柱形弹丸进行速度估算。如图 2(b)所示，从弹丸右边缘开始进入光幕到深入至光幕 0.4 mm(光幕厚度)，探测器接收到的光功率逐渐减小，减小速度由弹丸运动速度决定；从弹丸右边缘深入激光光幕 0.4 mm 到弹丸左边缘进入光幕，弹丸遮挡光功率基本保持不变，探测器接收的光功率也基本保持不变；从弹丸左边缘进入光幕到左边缘完全出光幕，弹丸遮挡的光功率逐渐减少，探测器接收到的光功率逐渐增多；当弹丸左边缘完全出光幕时，探测器接收到的光功率恢复到弹丸未穿过光幕时的水平，此时弹丸右边缘行进的距离为弹丸直径与光幕厚度之和。可以近似得到弹丸穿过光幕过程中光功率随时间变化的波形，如图 3 所示。其中：时间 $t_1\sim t_2$ 表示弹丸进入光幕的过程，$t_2\sim t_3$ 表示弹丸稳定穿过光幕的过程，$t_3\sim t_4$ 表示弹丸离开光幕的过程。

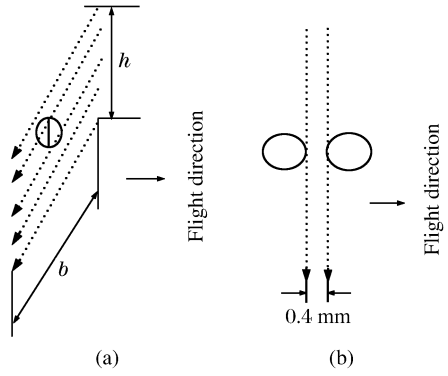


图 2 弹丸穿过光幕的示意图

Fig. 2 Sketch of the projectile penetrating into the laser screen

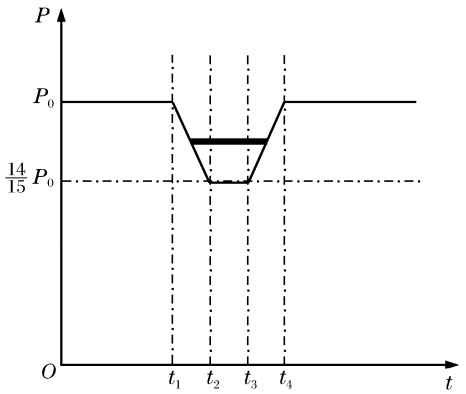


图 3 接收光功率的波形示意图

Fig. 3 Sketch of the received power

假设弹丸速度 $v=10$ km/s，光幕厚度 $d=0.4$ mm，弹丸直径 $D=1$ mm，则

波形前沿 $$t_{\mathrm{f}}=t_2-t_1=\frac{d}{v}=40\ \mathrm{ns} \tag{2}$$

顶部时间 $$t_{\mathrm{top}}=t_3-t_2=\frac{D-d}{v}=60\ \mathrm{ns} \tag{3}$$

波形后沿 $$t_{\mathrm{r}}=t_4-t_3=\frac{d}{v}=40\ \mathrm{ns} \tag{4}$$

波形底宽 $$t_{\mathrm{bottom}}=t_4-t_1=t_{\mathrm{f}}+t_{\mathrm{top}}+t_{\mathrm{r}}=140\ \mathrm{ns} \tag{5}$$

波形半高宽 $$t_{\mathrm{w}}=\frac{1}{2}(t_{\mathrm{top}}+t_{\mathrm{bottom}})=100\ \mathrm{ns} \tag{6}$$

对于直径为 1 mm 的球形弹丸,穿过光幕的时间较柱形弹丸的时间略长,而且在稳定穿越的过程中遮挡的光功率也并非不变,而是一个由少到多再由多到少的变化过程,在接收光信号上表现为:顶部时间可能减小,信号的前后沿将延长,信号的最高频率将降低,对光电检测电路的高频性能要求也相应降低。因此,为了准确测量直径 $D=1$ mm 的弹丸速度(约 10 km/s),测量装置必须具有足够快的响应速度,从而可以准确捕获前沿为 40 ns 的脉冲信号。

2.2.3　频率下限的估算

为了精确测量弹丸的速度,在测量过程中需要对被测信号进行必要的处理。一方面必须尽可能屏蔽外界的干扰,滤除不需要的低频成分;另一方面需要把信号中有用的高频成分放大到足够的幅度。滤除强背景和低频干扰是本研究亟需解决的难点。

干扰信号的主要因素有:光幕的功率起伏和分布的不均匀性,实验期间外部工频的干扰,实验时气炮的震动和冲击,弹丸周围尤其是弹丸绕前高温高压气体的发光[8]。根据经验,以上干扰源频率大多低于 5 kHz,只有弹丸绕前高温高压气体发光属于高频干扰,其发光时间在微秒量级,频率可达兆赫兹。但考虑到绕前气体发光时间短暂且向四面发散,通过狭缝光阑就可以大大限制其进入光电探测器;而且高温高压气体发光光谱的主要成分分布在较 532 nm 更长的黄光、红光和红外光波段,采用532 nm的窄带滤光片就可以较好地抑制这部分杂散光;因此,设定探测装置的频率响应下限为 5 kHz,即需要对频率低于 5 kHz 的信号进行衰减和抑制。

3　光电检测装置

3.1　光电检测装置的组成

图 4 为单路光电检测装置示意图。其中可调光阑为高 18 mm、宽度 0～5 mm 可调的狭缝,用于调节探测器的视场角,限制杂散光的摄入。Si-pin 光电探测器可通过光学调节架进行调节,确保会聚光斑完全被光敏面接收。穿过实验区的激光光幕分别经过可调光阑、窄带滤光片和会聚透镜,被 Si-pin 光电探测器接收,由光电转换与前置放大电路对光信号进行转换处理,产生的电压信号经过放大后由电缆传送至 30 m 外的示波器中。

整个测速装置至少包括两路图 4 所示的光电检测装置。

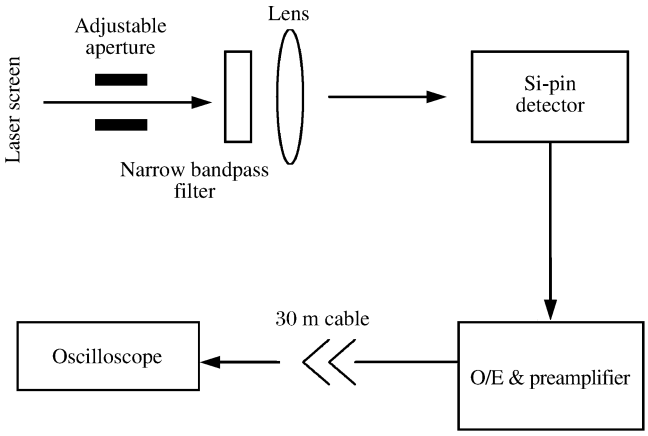


图 4　光电检测装置的组成示意图

Fig. 4　Schematic diagram of optoelectronic device

3.2　复合抗干扰措施

为了获得较高的信噪比,采取以下 3 方面措施来滤除干扰、降低噪声。

(1) 光阑限光。光幕穿过实验区后,采用特制的可调光阑对入射光进行限制。由于准直后的光幕具有非常好的方向性,因此采用宽度可调的狭缝可以最大限度地屏蔽弹丸绕前高温气体产生的杂散光,

同时又不影响被测光信号的接收。

(2) 光谱滤光。由于实验中采用的 Si-pin 光电探测器具有非常宽的光谱响应范围(300～1 100 nm),而待测光幕的光谱范围为(532±5) nm,为了最大限度地滤除具有其它光谱范围的干扰光,在每路光电探测器前设计了一套滤光片组,以实现窄带滤光的功能。经测试,滤光片组的中心波长为 532 nm,半高宽小于 20 nm,通带平均透过率大于 50%,截止带平均透过率小于 2%,实现了对通带范围以外的光谱成分的大幅度衰减和抑制,避免其进入测试光路。

(3) 频域低阻滤波。如前所述,毫米级弹丸高速穿过高为 15 mm 的光幕时会产生高速但强度较弱的光信号跳变,最快跳变沿可达 40 ns。而在弹丸穿过光幕前,探测器仅接收相对稳定的强背景光。为了最大限度地滤除信号中的低频成分,放大弹丸穿过光幕过程中的高速跳变,准确捕获两路激光信号的跳变沿,我们专门设计了一种具有低阻滤波功能的光电转换与前置放大器。

如图 5 所示,以放大器 U_1 为核心的、由点状虚线所框的部分为典型的互阻抗放大器。其中,光电探测器采用光敏面为 1 mm×1 mm 的 Si-pin 探测器,结电容 C_j 为 2.5 pF(反偏条件为 $V_-=-15$ V),响应时间小于 1 ns,从而确保对高速光信号的快速响应。Si-pin 探测器反向偏置,R_F 为反馈电阻,电容 C_F 用于高速工作时保持电路稳定和减少噪声。为了能够检测高速变化的光信号,要求 U_1 具有足够宽的带宽和压摆率。以放大器 U_2 为核心的、由虚线所框的部分为一个由同相积分器构成的低通滤波器,其作用是提取放大器 U_1 的输出信号 V_{O1} 中的低频分量,通过电阻 R_3 反馈回信号输入端,实现低阻滤波的功能。V_{O1} 中的高频分量经高速缓冲放大器 U_3 进行电流放大和阻抗匹配,以便驱动 30 m 以上的长电缆,使信号传至示波器,进而进行波形记录和数据处理。为了尽可能快地滤除低频分量,要求电阻 R_3 的阻值小于 R_F 阻值的 1/5。为了平衡积分器输入端的偏置电流,减小失调,要求 $R_1=R_2=R_F$ 、$C_1=C_2$。

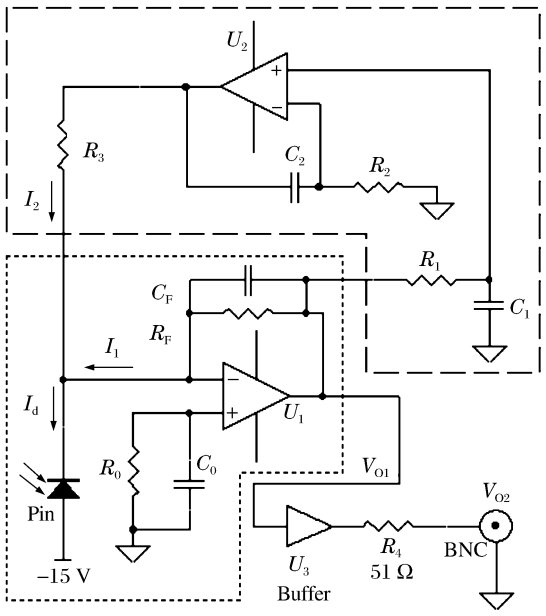


图 5 光电转换与前置放大电路原理图

Fig. 5 Schematic diagram of optical-electrical converter and preamplifier

光电检测电路的下限频率主要由积分器的极点频率决定。当 $R_0=R_1=R_2=R_F=1$ MΩ 时,下限频率可以表示为

$$f_{-3\,\mathrm{dB}}=\frac{1\ \mathrm{M\Omega}}{2\pi R_2C_2R_3} \tag{7}$$

光电检测电路的上限频率主要由互阻抗放大器的上限频率决定,可以表示为

$$\nu_{-3\,\mathrm{dB}}=\left[\frac{GBP}{2\pi(C_S+C_F)}\right]^{1/2} \tag{8}$$

式中:GBP 为运算放大器 U_1 的增益带宽积,C_S 为运算放大器 U_1 的共模输入电容、差模输入电容、光电探测器 pin 的结电容以及 U_1 反相输入端寄生电容的和,C_F 为跨接在反馈电阻 R_F 两端的电容。

当示波器的输入阻抗为 50 Ω 时,检测装置的输出电压为

$$V_{O2}=\frac{1}{2}V_{O1}=\frac{1}{2}I_1R_F \tag{9}$$

式中:V_{O1} 为运算放大器 U_1 的输出电压,I_1 为设计频带内接收到的光信号产生的光电流,R_F 为互阻抗放大器的反馈电阻。

经测试,光电转换与前置放大电路的通频带为 5 kHz～10 MHz,带内增益为 20 V/mW。

4　系统应用实验

4.1　实验准备

4.1.1　对光

由于轻气炮本身预留光窗尺寸的限制,实验时使用两束激光光幕进行测速。一方面,通过激光源的光幕调节,确保两束激光光幕在穿过气炮预留光窗时光束完全覆盖弹丸路径;另一方面,对光电探测器在光路上的前后位置进行初步调节,而后采用二维调节架对其进行精细调节,确保从气炮光窗输出的光束聚焦后完全会聚到两路光电探测器的光敏面上。

4.1.2　测距

实验前测量两束激光在实验区的间距,结果为 60.75 mm。

4.2　弹丸测速实验

实验采用直径为 4 mm 的金属弹丸,理论弹速约为 3 km/s,利用磁感应线圈测量装置进行实时监测。光幕法测速实验的记录波形如图 6 所示。从图中可以看出:波形的基线较平,主峰前没有明显的冲击波发光干扰;两路波形主峰后有尖峰毛刺,主要是由弹丸后的碎片遮光以及高温高压气体发光引起的。实验测得的弹丸速度为 2.77 km/s,与线圈测速法的实时监测结果 2.80 km/s 相比,两者的不一致性小于 2%。

图 7 为实验后的靶板照片。可以看出,除中心弹孔外,靶板四周还分布了一些小弹坑,证明确实存在一些碎片或颗粒穿过光幕后打到靶板上。

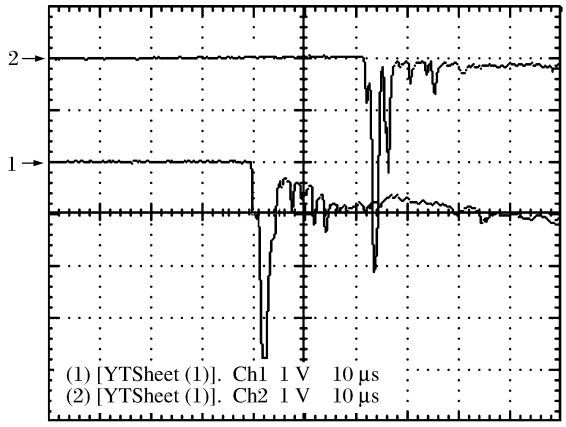


图 6　典型的测速波形

Fig. 6　Typical waveform of velocity measurement

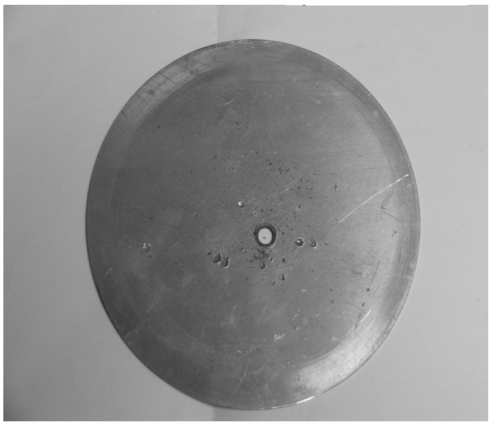


图 7　实验后弹丸的穿靶照片

Fig. 7　Picture of the target after the experiment

5　结　论

利用光阑限光、光谱滤光和低阻滤波技术,设计了一种具有较高信噪比的光电检测装置,实现了从强背景光中精确捕获快速变化弱光扰动信号的跳变沿。将该装置应用于毫米级弹丸激光光幕测速系统,对弹径 4 mm、弹速 3 km/s 的球形弹丸进行测速实验。结果表明,测速系统成功地测量了弹丸穿过两束光幕的时间间隔,测速结果与线圈测速法实时监测结果之间的不一致性小于 2%。因此,该光电检测装置可以满足毫米级弹丸的测速要求。同时,它也为其它需要从稳定强背景中捕获快速弱光信号的情况提供一定的参考。

References:

[1] Li L, Li B, Xiao Z G. Design of Speedometer for Projectile at High Speed [J]. China Nuclear Science and Technology Report, 1999, S2: 42-43. (in Chinese)
李 力, 李 波, 萧正贵. 高速弹丸测速仪的研制 [J]. 中国核科技报告, 1999, S2: 42-43.

[2] Peng Q X, Hu S L, Tan X X. Ruby Luminescence R-Line Shift under Shock Loading [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2000, 14(3): 209-213. (in Chinese)
彭其先, 胡绍楼, 谭显祥. 冲击载荷下红宝石荧光频移研究 [J]. 高压物理学报, 2000, 14(3): 209-213.

[3] Yang J Y. Simulation of Space Debris Hypervelocity Impact Using Two Stage Light Gas Gun [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2006, 23(1): 16-22. (in Chinese)
杨继运. 二级轻气炮模拟空间碎片超高速碰撞实验技术 [J]. 航天器环境工程, 2006, 23(1): 16-22.

[4] Wang T L, Ni J P. Progress in Two Kinds of Bullet Velocity Measurement [J]. Journal of Xi'an Institute of Technology, 1997, 3(1): 29-30. (in Chinese)
王铁岭, 倪晋平. 两种弹丸速度测试技术发展简述 [J]. 西安工业学院学报, 1997, 3(1): 29-30.

[5] Ni J P, Tian H, Jiang L Y. Design of Amplifying and Converting Circuit for Coil Target Signal [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2004, 18(4): 317-319. (in Chinese)
倪晋平, 田 会, 姜凌彦. 测速线圈靶信号放大与转换电路 [J]. 测试技术学报, 2004, 18(4): 317-319.

[6] Wang X, Wang W, Fu Q W. A System Utilizing Laser Diode for Gas-Gun Projectile Velocity Measurement [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2003, 17(1): 75-80. (in Chinese)
王 翔, 王 为, 傅秋卫. 用于一级轻气炮的弹速激光测量系统 [J]. 高压物理学报, 2003, 17(1): 75-80.

[7] Zhang D Z, Tang R D, Lin J D, et al. Development of a New Type Gas-Driven Two-Stage Light Gas Gun [J]. Acta Armament Arii, 2004, 25(1): 14-17. (in Chinese)
张德志, 唐润棣, 林俊德, 等. 新型气体驱动二级轻气炮研制 [J]. 兵工学报, 2004, 25(1): 14-17.

[8] Wang W, Wang X. Measurement of the Precursor Gas Accompanied with the Launch of Two-Stage Gas Gun [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2004, 18(1): 94-96. (in Chinese)
王 为, 王 翔. 二级轻气炮发射过程中前冲气体的初步研究 [J]. 高压物理学报, 2004, 18(1): 94-96.

An Optoelectronic Device for mm-Size Projectile Velocity Measurement

ZHAO Jun-Wei, HU Zhi-Yun, ZHAO Xin-Yan, ZHANG Xiang-Rong,
QIANG Xi-Wen, ZHANG Tian-Qing

(*Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an* 710024, *China*)

Abstract: A novel laser screen detection system was developed to measure the projectile's flight velocity in two-stage light gas-gun. By means of complex anti-jamming methods such as slit aperture limiting external stray light, narrow band spectrum filtering and low frequency notch filtering, the problem of detecting and catching the instantaneous weak disturbance signals from a bright background source was solved, and a high signal-noise ratio was achieved. A typical experiment of a spherical metal projectile with a diameter of 4 mm was performed in a two-stage light gas-gun. The results showed that the inconsistency in projectile's speed between this device and the coil for real-time monitoring is less than 2%, implying this device can meet the requirement of mm-size projectile's velocity measurement in two-stage light gas-gun.

Key words: velocity measurement; two-stage light gas-gun; laser screen; projectile