

高速弹丸测量的激光触发装置可靠性分析

周彤¹ 顾金良¹ 刘静宝² 罗红斌¹

(1. 南京理工大学瞬态物理国家重点实验室 南京 210014; 2. 北重集团火炮研究院 包头 014033)

摘要:介绍了高速弹丸测量的激光触发装置的工作原理,从变压器二次侧值的设计、激光光源的稳定性和放大电路滤波3个方面对高速弹丸测量的激光触发装置工作可靠性进行了具体的分析。在分析基础上结合多次实验结果,指出了造成激光触发装置工作不稳定的根本原因,并且根据这些原因提出了相应的解决方法,最终结果通过了实验验证和分析,实验结果表明经过相应调整后的激光触发装置可以稳定可靠的工作,并可以为其他的测试设备提供稳定可靠的触发信号。

关键词:高速弹丸;二次侧值;激光光源;放大电路;稳定性

中图分类号: TM93 TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

Reliability analysis of high-speed projectiles measured laser triggering device

Zhou Tong¹ Gu Jinliang¹ Liu Jingbao² Luo Hong'e¹

(1. National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210014, China;

2. Northern Heavy Industries Group artillery Research Institute, Baotou 014033, China)

Abstract: This paper introduces the working principle of laser high speed projectile measurement triggering device, analysis of the reliability of the trigger device for laser high-speed projectile measurement from three aspects, the design of two lateral values of the transformer, the stability of the laser light source and the filter of the amplifier circuit. On the basis of the analysis, combined with the results of many experiments, points out the basic reason for the instability of the laser trigger device, and puts forward the corresponding solution. The final results are verified by experiments. The experimental results show that the corresponding adjusted laser trigger device can work stably and reliably, and can provide a stable and reliable trigger signal for other test equipment.

Keywords: high speed projectile; two lateral values; laser light source; amplifier circuit; stability

1 引言

弹丸参数是衡量武器性能的重要指标,在兵器研究过程中需要对弹丸参数进行测试。比如对于弹丸速度的测量,需要用到速度测试系统,在速度测试系统中需要触发装置捕捉弹丸信息,提供触发信号。目前常用的测试装置主要有两类,第一类是接触式的,主要有网靶、锡箔靶。锡箔靶和网靶都是接触式的测试装置,每次测试都会损坏靶面,增加了测试的时间和工作量,它们最大的缺点是会改变弹丸飞行的姿态。第二类是非接触式的,主要有天幕靶、光幕靶^[1-2]。天幕靶有效靶面较大,必须要求以天空作为背景,给室内使用带来很大困难。光幕靶是一种自带光源的触发装置,应用范围广,操作起来方便,光源发射端与光电转换接收端相对放置,不受场地和外界光照影响^[3]。

由于光幕靶自身的优点,因此被广泛应用在弹丸测试中。但现有的光幕靶适用的弹速往往在2000 m/s以下,不能适用于高速弹丸的测量,比如电磁轨道炮。本文中的触发装置本质是光幕靶,它可以实现高速弹丸的检测,为其他测试设备提供触发信号。在弹丸参数测试过程中,为了保证实验的顺利进行,触发装置的可靠性非常重要,本文主要对触发装置的可靠性进行了分析,指出造成触发装置工作不稳定的因素及解决方法。

2 触发装置的基本原理

目前使用的光幕靶,其光源和接收器件都是分开的,要想保证测试精度,就会在安装调试过程中会造成很大的困难。当设计完成之后,光幕靶的靶面面积就固定下来,不能调节使用。如果需要更大或更小面积的靶面就需要

收稿日期:2016-07

重新设计,使用起来不灵活。大面积的光幕靶体积往往很大,而且造价高,对电路的设计也提出了很高的要求^[4-5]。本文中的触发装置根据目前使用的光幕靶提出了一个新的实现方法,实现了收发一体化,并且其响应快、可靠性高,可以应用于高速弹丸的检测,靶面面积可以根据需要调节^[6]。触发装置的基本原理图如图1所示,主要由激光二极管(光源)、光电二极管(接收器件)、柱面镜、原向反射屏和后续的光电转换电路、放大电路、信号处理电路组成。

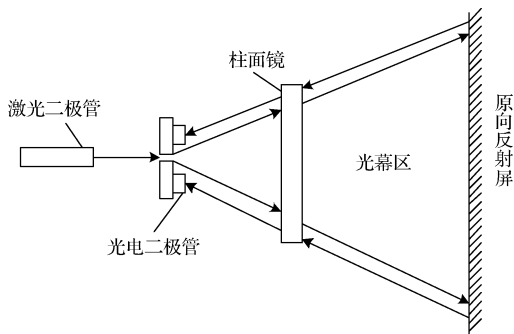


图1 触发装置基本原理

触发装置中使用的光源为激光二极管,它具有能量高、发射距离远、方向性好等优点。水平方向上能量非常集中,发散角小、单色性好、波长频段集中,垂直发散角可以根据实际需要选择。虽然激光二极管水平发散角小,但随着距离的增加,发出的光在水平方向上会越来越宽,需要将其转换为厚度均匀的平行光幕。柱面镜具有把点光源转换为线光源的特点,触发装置中利用柱面镜将激光二极管发出的光转换为平行扇形光幕。原向反射屏是由微玻璃珠涂敷在压敏胶膜上,再粘贴到平板上构成,它将激光二极管发出的光原向反射回去,并通过柱面镜由光电二极管接收。当弹丸穿过光幕时,光电二极管接收到的光通量发生变化,产生一个变化的光电流,经过光电转换电路、放大电路和信号处理电路形成脉冲触发信号^[7]。

激光二极管、光电二极管、柱面镜和后续的光电转换电路、放大电路、信号处理电路组成了触发装置,将它们做在同一个机械外壳内。触发装置与原向反射屏垂直放置,两者之间的距离可以根据实际需要调节,提高了触发装置的使用灵活性。触发装置利用原向反射屏解决了传统光幕靶发射光源和接收器件的分离,减小了光幕靶的成本,使触发装置安装操作简单,扩大了光幕靶的应用范围。触发装置放大后的光电压信号和脉冲触发信号如图2所示,图2中1通道为弹丸穿过光幕后的放大信号,2通道是信号处理后的脉冲触发信号。

3 触发装置的可靠性分析

由图2可知,触发装置可以实现弹丸的检测,但当触发装置长时间工作之后,会出现误触发的现象,稳定性不好。如果在弹丸测试实验过程中,触发装置出现持续性的

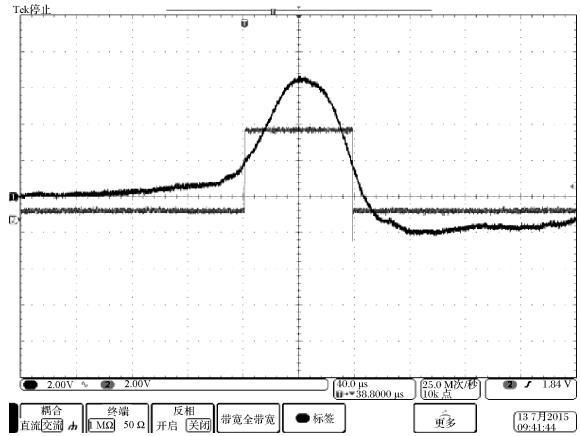


图2 触发装置放大后光电压信号和脉冲触发信号

误触发,将会导致整个测试系统无法工作。为了保证实验顺利进行,这就对触发装置的稳定性提出了很高的要求^[8]。经过对触发装置的反复试验和分析,决定触发装置工作是否稳定的因素主要是变压器二次侧值的设计、光源的稳定性和放大电路滤波,下面进行逐一分析。

3.1 变压器二次侧值的设计

变压器的作用是把市电转换为触发装置中所需要的交流电,即变压器二次侧交流电。触发装置中共需要4路交流电源,其中一路为恒流源供电,恒流源的作用是驱动激光二极管工作;其他3路为直流电源供电,直流电源有 $\pm 12\text{ V}$ 和 $+5\text{ V}$,它们为放大电路和光电二极管供电。触发装置中选用LM338和7805/7812/7912分别作为恒流源芯片和直流稳压芯片,在长时间工作条件下,它们自身功耗会产生大量的热量,导致触发装置的温度过高,从而使触发装置工作不稳定。

在实际设计中,除了采取一些散热措施外,更重要的是从源头上解决发热的问题。若变压器输出功率过大,将会有多余的电能被稳压芯片消耗掉,并以热能的形式散出去,导致触发装置长时间工作后温度过高;若变压器功率不够,当市电电压发生波动时,可能会导致稳压电源芯片输入电压不够,不能满足最小的输入输出压差值,导致触发装置不能稳定的工作^[9-11]。所以在变压器的设计中要根据每一路上的功率要求确定变压器的输出功率,既保证每一路上的功耗降到最低,又满足功率需求,从而保证触发装置稳定、长时间工作。

7805/7812/7912三端集成稳压器输入输出压差要求最小为 2 V ,LM338输入与输出之间的压差为 3 V 至 35 V 。为了保证足够的压差余量,同时也要考虑到市电电压的波动,比如在某一时间段内,由于大功率设备的工作而导致电压偏低,所以在设计直流电源和变压器时,除了根据理论计算,还要考虑到实际的工作情况,保证触发装置能够稳定可靠的工作。

触发装置中选取集成稳压芯片最小压差为 4 V ,即7805最小输入是 9 V ,7812和7912最小输入是 16 V ;

LM338 最小压差是 5 V, 即 LM338 输入端最小电压为 6.25 V。由单相桥式整流电路及电容滤波关系式可知:

$$U_o \approx 1.2U \quad (1)$$

式中: U 为单相桥式整流电路输入端交流电有效值, U_o 为单相桥式整流电路输出端经电容滤波后的电压值。由式(1)可以计算得出变压器二次侧输出交流电压的理论有效值如表 1 中第 4 行所示, 实际设计中对变压器二次侧理论电压做了微调, 变压器二次侧电压实际设计值如表 2 中第 1 列所示。

表 1 变压器二次侧输出交流电压的理论有效值

三端集成稳压器	LM338	7805	7812	7912
稳压器输出端电压/V	1.25	5	12	12
稳压器输入端设计电压/V	6.25	9	16	16
变压器二次侧理论电压/V	5.2	7.5	13.3	13.3

表 2 列出了变压器的最终工作值, 为了保证触发装置能够适用于多设备同时工作的复杂环境, 主要考虑到多设备同时工作时会把市电电压拉低, 特别是系统中大功率设备工作时, 会导致变压器输入端电压偏低。若触发装置的直流电源设计没有电压余量的话, 当市电电压偏低时, 触发装置将不能正常工作。表 2 列出了当变压器输入 200 V、220 V 和 230 V 时, 变压器二次侧实际电压和稳压器输入端实际电压。由表中数据可知, 当市电电压为 200 V 时, 即比正常电压低 10% 时, 稳压器输入端实际电压满足输入输出的压差要求。表明触发装置的电源设计具有较强的抗市电波动的能力, 消除了因电源不稳带来的影响, 从电源端保证了触发装置工作的稳定性和可靠性。

表 2 变压器二次侧设计电压及稳压器工作情况

变压器二次侧 设计电压/V	变压器二次侧 实际电压/V			稳压器输入端 实际电压/V			
	200	220	230	200	220	230	
LM338	5.5	5.21	5.75	6.04	5.05	5.74	6.12
7805	7.5	7.08	7.79	8.16	8.33	9.26	9.76
7812	13.5	12.24	13.48	14.1	14.13	15.69	16.55
7912	13.5	12.33	13.5	14.19	15.02	16.61	17.53

3.2 光源稳定性

触发装置产生的信号是由光电二极管产生的, 而光电二极管产生的信号是由光源决定的, 所以光源稳定性决定着触发装置的稳定性。光源的稳定主要包括两个方面: 1) 恒流源的稳定, 在恒流源的设计中要保证恒流源输出恒定

的电流, 不能有波动; 2) 激光二极管的光束特性。激光二极管发出的光为高斯光束, 即在水平和垂直方向各有一个发散角, 其大小不同, 如图 3 所示。



图 3 激光二极管光束示意

激光二极管的光束强度分布也不均匀, 中间强, 两边弱, 激光束以极高的频率发射光, 再由反射屏反射回来, 光束的传播会发生一些不确定的变化, 特别是光束边缘的光。由于触发装置中光电二极管的灵敏度极高, 即使光束反射回来发生微小的变化, 也会产生相应的变化, 表现为频率极高的光电流信号, 通过光电转换电路、放大电路后如图 4 所示。图 4 中 1 通道为放大后的光电流信号, 由图可知该信号频率极高, 幅值已超过 6 V, 大于信号处理电路的比较电压值, 触发装置已有触发信号产生, 所以要对信号进行滤波, 将高频信号滤除, 滤除后的信号如图 5 所示。

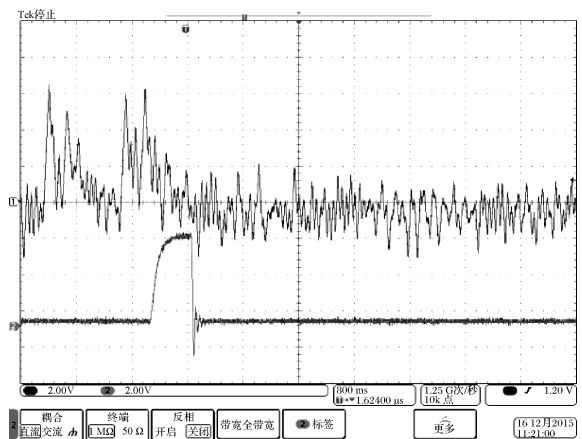


图 4 光电流放大信号未经滤波的波形

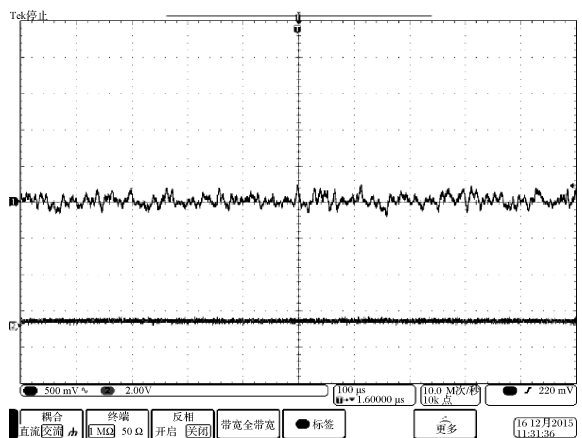


图 5 光电流放大信号滤波后的波形

3.3 放大电路滤波

光源稳定性中分析了光源产生的高频信号以及带来的影响,所以在要放大电路中滤波。在放大电路中利用运算放大器的有源低通滤波,它可以将高频信号滤除,保证放大后的信号连续光滑上升,防止脉冲触发信号产生震荡,其滤波原理如图6所示。

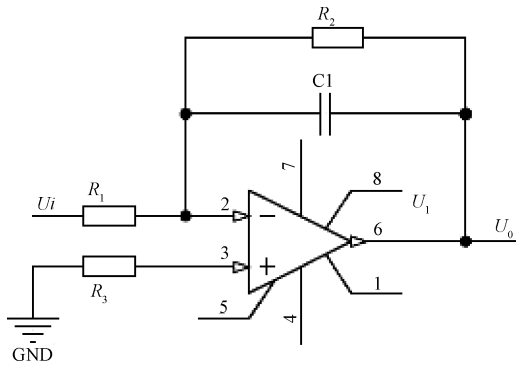


图6 有源低通滤波器原理

设输入电压 U_i 为某一频率的正弦电压,则可用相量表示,由反向比例电路可知:

$$\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{R_2/j\omega C_1}{1/j\omega C_1 + R_2/R_1} = -\frac{R_2/R_1}{1 + j\omega R_2 C_1} = -\frac{R_2/R_1}{1 + j\omega/\omega_0} \quad (2)$$

式中: $\omega_0 = 1/R_2 C_1$ 称为截止频率,即 $f = 1/2\pi R_2 C_1$ 。该电路的传递函数为:

$$|T(j\omega)| = \frac{U_o(j\omega)}{U_i(j\omega)} = -\frac{R_2/R_1}{1 + j\omega/\omega_0} \quad (3)$$

其模为:

$$|T(j\omega)| = \frac{|A_{uf}|}{\sqrt{1 + (\omega/\omega_0)^2}} \quad (4)$$

式中: $A_{uf} = R_2/R_1$,幅频特性如图7所示。

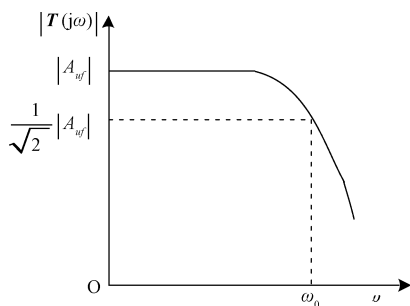


图7 有源低通滤波器带宽

由图可知,该电路的带宽为 $0 \sim \omega_0$,可以滤除高频信号。当放大电路电阻值确定后,根据 $f = 1/2\pi R_2 C_1$ 计算 C_1 的值, C_1 的选取既要保证电路的带宽要求,又要滤除高频信号,保证放大后的模拟信号连续光滑上升,防止整形后的脉冲信号出现震荡的现象^[12-13]。经过低通滤波后的光电流放大后的信号如图5所示,其幅值小于500mv(触

发装置设计要求静态光电流信号放大后小于500mv),而且频率也大大降低了。

4 实验

实验于北京某兵器研究所室内靶道进行,使用12发12.7口径子弹进行高速弹丸阴影式照相实验,实验中第一照相站测得的照片如图8、图9所示。

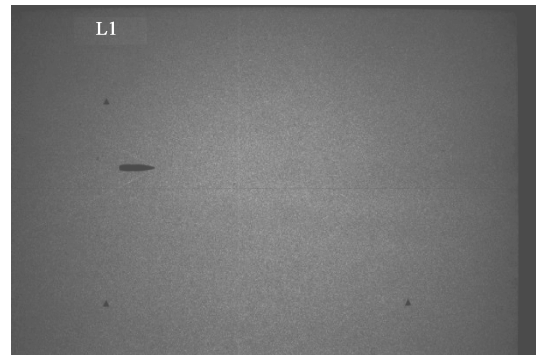


图8 12.7口径弹丸单次闪光

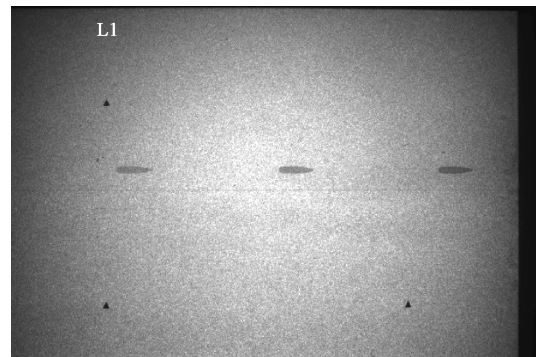


图9 12.7口径弹丸3次闪光

实验表明,触发装置有效地捕捉到弹丸即将进入阴影式照相机视场的信号,在此之后给进行单次和3次闪光照相提供可靠的触发信号,捕获到3次弹丸飞过视场的图像。从图中左上角“L1”可知此站是测试的第一站,距离枪炮口最近,也最容易受到炮口焰焰影响,但是通过实验结果图像分析,激光触发装置仍然可以稳定工作,具有较好的抗干扰性。结果表明,通过对激光触发装置可靠性进行合理的分析和调试后的触发器完全可以作为稳定触发源为后续设备提供可靠的触发信号,并且可以连续工作数小时,为长时间的测试工作提供保障。

5 结论

本文介绍了高速弹丸测量的激光触发装置的工作原理,重点分析了其可靠性,通过对变压器二次侧值、激光器光源稳定性和滤波电路3个方面进行分析和测试,指出了影响触发装置稳定性的原因和应对措施。最终在室内靶道进行多次试验,实验结果表明,该触发装置稳定性好,可

以长时间稳定工作,为测试设备提供可靠的触发信号。

参考文献

- [1] 石林. 收发一体化光幕靶测试技术研究[D]. 西安:西安工业大学, 2010.
- [2] 倪晋平, 魏建凯. 天幕靶技术研究进展[J]. 西安工业大学学报, 2011, 29(7):589-596.
- [3] NI J P, TIAN H. A recognizing circuits design for measuring projectile velocity with the sky screen [J]. ISTM/2005 6th International Symposium on Test and measurement, 2005(9): 8247-8250.
- [4] 李豪杰. 光幕靶探测光幕光能及性能研究[J]. 电子科技, 2013, 26(3):75-77.
- [5] 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(8): 603-610.
- [6] 李虎. 反射式光电测速系统研究[D]. 南京:南京理工大学, 2014.
- [7] 王立婷. 光电检测电路的设计及实验研究[D]. 长春:吉林大学, 2007.

- [8] ZHENG B, ZUO Z L, HOU W. Velocity correction and measurement uncertainty analysis of light screen velocity measuring method [J]. Journal of China Ordnance, 2012(4):236-239.
- [9] 付文莉. 直流稳压电源整流电路工作原理浅述[J]. 科技创新与应用, 2013(13):147-148.
- [10] 赵永涛. 线性直流稳压电源常见故障分析及维修[J]. 中国测试, 2012(增刊1):70-72, 76.
- [11] 魏爽. 便携式激光测尘仪测控系统设计研究[D]. 长春:长春理工大学, 2012.
- [12] 陈小宇, 刘佐牙. 激光回波小信号宽带放大器设计[J]. 电子测量技术, 2015, 38(10):109-112.
- [13] 秦曾煌, 姜三勇. 电工学(下册)[M]. 北京:高等教育出版社, 2010.

作者简介

周彤, 南京理工大学硕士研究生, 主要研究方向为电子科学测量技术、仪器仪表测试。
E-mail: zhoutong_njust@126.com

(上接第15页)

- [6] GAO J SH, DENG L W, SONG SH M. Fractional order nonsingular terminal sliding mode control for flexible spacecraft attitude tracking[J]. Instrumentation, 2016, 3(1): 21-29.
- [7] 高超, 钱伟. 广域时滞电力系统控制器的优化算法及其应用[J]. 电子测量技术, 2016, 39(5): 70-74.
- [8] 王慧, 张晓曼, 宋宇宁. MATLAB求解电液伺服阀的流量特性曲线[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(8): 1236-1244.
- [9] 方辉. 基于LMI的两轮自平衡机器人控制器设计[J]. 黑龙江科技大学学报, 2015, 25(3): 340-342.
- [10] 方辉. 线性矩阵不等式的 H_∞ 跟踪控制器设计方法[J]. 黑龙江科技大学学报, 2016, 26(1):85-88.
- [11] FU M, XIE L. The sector bound approach to quantized feedback control [J]. IEEE Transactions on Au-

tomatic Control, 2005, 50(11): 1698-1711.

- [12] HUIJUN G, TONGWEN C. A new approach to quantized feedback control systems [J]. Automatica, 2008(44): 534-542.
- [13] 程权成, 常晓恒. T-S模糊系统非脆弱跟踪控制器设计[J]. 电子设计工程, 2014, 22(17):1-4.
- [14] 郭全民, 雷蓓蓓. 半主动悬架PID控制的研究和优化[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(4):60-63.

作者简介

方辉, 1980年出生, 实验师, 硕士, 主要研究方向为非线性系统控制。
E-mail: chengquancheng@163.com

程权成, 1989年出生, 见习助教, 硕士, 主要研究方向为控制理论与算法。