

文章编号:1002-2082(2019)03-0483-06

# 天幕立靶探测光幕响应时间一致性测量方法研究

田亚男,田 会,袁 云

(西安工业大学 光电工程学院,陕西 西安 710021)

**摘 要:**为验证弹丸穿过天幕立靶时6个光幕响应时间是否一致,以提高测试设备测速精度,提出了一种用于检测天幕立靶光幕响应时间一致性的测量方法,设计了一种基于该测量方法的模拟弹丸过幕信号源测试装置。该装置调用存储在ROM中的弹丸轮廓数据,经DA转换控制两路光源间隔亮暗变化一次,用于模拟弹丸依次穿过探测光幕所遮挡的光能量变化。利用信号采集与处理仪同步采集两路输出信号时间间隔,与装置设定时间间隔的差值比较完成测试。测试结果表明:输出两路信号的时间间隔与设定时间间隔间的差值均小于 $1\ \mu\text{s}$ ,满足6个光幕响应时间一致性技术指标要求,该测试装置及测量方法可用于天幕立靶光幕响应时间一致性测量。

**关键词:**兵器靶场测试;天幕立靶;响应时间一致性;弹丸轮廓提取;光源亮度控制

中图分类号:TJ06

文献标志码:A

DOI:10.5768/JAO201940.0303005

## Measurement method of response time consistency for sky screens vertical target

TIAN Ya'nan, TIAN Hui, YUAN Yun

(School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** In order to verify whether the response time of 6 light screens is consistent while the projectile passing through the sky screens vertical target, and to improve the velocity measurement accuracy of test equipment, a measurement method for detecting the response time consistency of sky screens vertical target was proposed, and a test device based on this method of signal source for simulating projectile over-screen was designed. The device controls the two light source intervals to change lightly and darkly by digital-analog(DA) conversion, by calling the projectile contour data stored in the ROM, which is used to simulate the instantaneous change of light energy while projectile passing through the light screen. The test was completed by comparing the difference value between the time interval of two output signals collected synchronously by the signal acquisition and processing instrument with the delay time interval by the device. The test results show that the difference value between the output signal time and the set delay time is both less than  $1\ \mu\text{s}$ , which satisfies the technical requirements of the response time consistency of 6 light screens, the test device and the measurement method can be used for the measurement of response time consistency for the sky screens vertical target.

**Key words:** weapon range testing; sky screens vertical target; response time consistency; projectile contour extract; light source brightness control

收稿日期:2018-09-13; 修回日期:2018-10-16

基金项目:国家自然科学基金(60972005);国防科工局基础预研项目(JSJL2017208B009);陕西省教育厅重点实验室项目资助(17JS050)

作者简介:田亚男(1993—),女,在读硕士,主要从事光电信号处理与测试研究。E-mail:1959909797@qq.com

通信作者:田会(1980—),男,博士,副教授,主要从事兵器外弹道参数光电测试与信号处理研究。E-mail:tianh80@126.com

## 引言

六光幕阵列式天幕立靶<sup>[1-3]</sup>是身管武器外弹道飞行参数测试的主要设备,其测试数据的准确性对武器的研制、生产和交验至关重要。六光幕阵列式天幕立靶利用光幕探测原理在空间按一定角度与距离形成6个探测光幕,飞行弹丸依次穿过6个光幕时,遮挡了对应光电探测器件所接收到的光能量,探测器件将变化的光信号转化为微弱的电信号,经信号处理电路输出6路过幕信号,每个信号代表弹丸穿过对应光幕的时刻信息,结合结构参数及靶距,利用计算公式可得到弹丸飞行参数<sup>[4-5]</sup>。因探测光幕中存在探测器件的响应时间和信号处理电路响应延迟,弹丸穿过光幕的时刻与输出信号的时刻存在偏差<sup>[6]</sup>,也称之为光幕响应时间。由于器件参数的分散性,导致不同光幕的响应时间存在差异,当不同光幕间的响应时间偏差较大时,会直接影响系统的测量精度<sup>[7-9]</sup>。目前针对光幕探测类仪器的响应时间测量方法,主要采用负脉冲电信号或正弦电信号控制光源亮暗变化来模拟弹丸穿过光幕时产生的光能量变化过程,对比预定时间亮灭的小光源与测时仪间的读数差值测量光幕响应时间差异<sup>[10-12]</sup>,该方法未考虑弹丸实际外围轮廓与光幕输出的弹丸过幕模拟信号的对应关系,易导致信号饱和,引起测时误差。实弹测试中,弹丸穿过天幕立靶时输出的波形模拟信号包含弹丸轮廓信息及过幕时间信息,与弹丸外围轮廓相似,可依据广义相关算法精确计算两路信号的时间。为解决上述问题,本文在光幕探测类仪器响应时间测量方法的基础上,设计了一种尽量真实模拟弹丸穿过光幕时探测器件上接收光能量变化的测试装置,实现天幕立靶6个探测光幕响应时间一致性测量,为评判其测量精度提供技术依据。

## 1 光幕响应时间一致性测量方法

光幕响应时间一致性测量方法示意图如图1所示,模拟弹丸过幕信号源以天幕立靶中探测器件响应光谱范围内稳定发光的点光源作为弹丸过幕时光能量变化的信息载体,通过输出两路具有延时特性的驱动电信号,两路驱动电信号相同,与实弹过幕模拟信号相反,包含常规弹形轮廓特征及过幕时间信息,分别控制基准点光源1与测试点光源2的发光亮度,使两路点光源按照设定的时间间隔由亮逐渐变暗再变亮。将基准点光源1放置在天幕立靶光幕 $G_1$ 探测视场内的镜头中心轴线上;测试点光源2依次放置在天幕立靶光幕 $G_i$ (2、

3、4、5、6)探测视场内的镜头中心轴线上,两路点光源均与镜头间隔一定距离。通过设定两路点光源亮度变化的时间间隔 $T$ ,控制两路点光源亮度分别变化一次,天幕立靶中对应光幕接收到变化的光能量,经信号处理电路后输出对应的过靶信号,天幕立靶测速系统中的信号采集与处理仪直接采集每个光幕输出的过靶信号,利用广义相关算法,计算出光幕 $G_1$ 与光幕 $G_i$ (2、3、4、5、6)输出模拟信号的时间间隔 $T_{i-1}$ ,与模拟弹丸过幕信号源中置入的两路信号间的时间间隔 $T$ 进行比较,若5组 $T_{i-1}$ 与 $T$ 的相差时间均小于 $1\mu\text{s}$ ,可验证6个光幕响应时间一致满足技术指标要求。

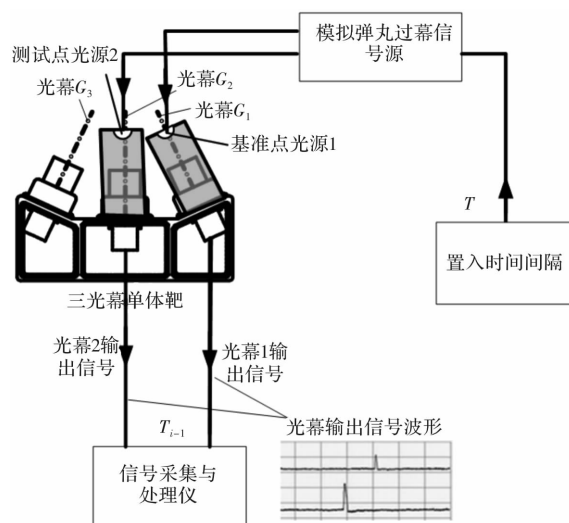


图1 光幕响应时间一致性测量方法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of measurement method of light screens response time consistency

在该测量方法中,模拟弹丸过幕信号源为核心测试装置,其输出的电信号直接驱动点光源模拟弹丸过幕时探测器接收到的光能量变化过程。如图2所示,通过图像处理准确获取各种常规测试弹丸的外围轮廓数据,将其量化后导入ROM存储器,通过寻址调用存储数据送入DA转换器,输出的模拟信号经驱动电路后控制两路光源按照设定的时序实现亮度变化。

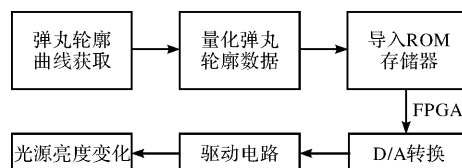


图2 模拟弹丸过幕信号源设计思路

Fig. 2 Design idea of signal source for simulating projectile over-screen

## 2 弹丸轮廓曲线获取

为了准确获取弹丸轮廓曲线,可利用面阵相机采集不同类型的弹丸图像,通过图像处理算法获取各弹丸的外围轮廓数据,利用最小二乘法拟合出弹丸轮廓曲线,图3为外围轮廓曲线获取具体算法流程图。

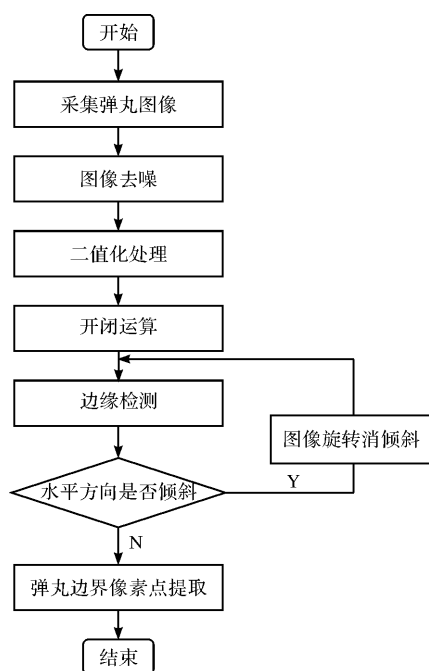


图3 弹丸图像处理流程图

Fig. 3 Flow chart of projectile image processing

以常用的 7.62 mm 弹丸为处理目标进行说明,其边缘检测得到的图像如图4所示。

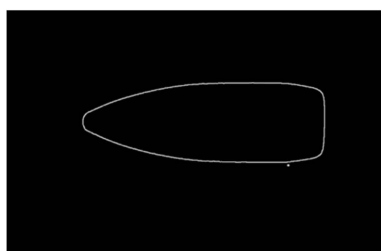


图4 弹丸边缘检测图

Fig. 4 Detection diagram of projectile edge

在图像采集环节因无法保证弹丸完全平行于水平面,需对采集弹丸图像的边界像素点坐标进行拟合,依据拟合图像的对称轴直线斜率(弹丸为对称图像)反算出采集弹丸图像关于水平方向的倾斜角度,对其进行旋转消倾斜处理后,再重新提取弹丸边界像素点坐标,以保证弹丸轮廓曲线拟合精度。由于弹丸关于弹轴对称,只需对弹丸半轮廓曲线进行拟合,最终确定的以弹尖为坐标圆点的弹丸轮廓曲线多项式为

$$Y(x)=0.000\ 408\ 5x^2-0.362\ 1x-$$

$$19.16\ x\in[0,661]\quad(1)$$

式中: $x$ 为弹丸轮廓在水平方向上的像素点坐标; $Y$ 为弹丸轮廓在垂直方向上的像素点坐标。

## 3 模拟弹丸过幕信号源设计与实现

模拟弹丸过幕信号源的核心是对点光源进行调光,控制光源发光亮度,使其按照不同弹丸过幕时所遮挡的光能量变化。图5为模拟弹丸过幕信号源的系统硬件结构图,整个硬件系统以FPGA为核心控制模块,配合调光电路及外围供电模块、参数置入电路、显示电路、弹形选择电路实现,FPGA可通过程序控制将事先存储在ROM中的弹丸轮廓数据读出,控制调光电路中DA的输出电压值,以改变点光源的工作电流实现调光。

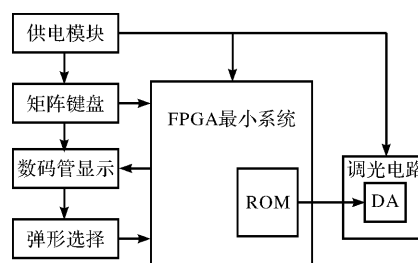


图5 系统硬件结构图

Fig. 5 Structure diagram of system hardware circuit

### 3.1 弹丸轮廓数据的产生与存储

依据FPGA系统中ROM存储器以数字形式存储和读取数据的特性,需将获取的弹丸轮廓曲线转换为对应的波形幅度数据量后进行存储调用。首先对弹丸轮廓曲线进行定间隔抽样,抽样值采用归一化算法进行量化,其量化值与1 023的乘积即为弹形轮廓数据对应的波形幅度数据量,数据范围在0~1 023之间,由数模转换芯片的转换位数确定,不同波形幅度数据量对应不同输出电压。利用Matlab将生成的波形幅度数据量转换为Quartus II软件可以读写的Mif初始化波形文件,调用宏功能模块LPM-ROM,设定位宽、字节深度完成各ROM存储器中的数据存储,测试时可由地址发生器产生的地址对ROM存储器寻址,依次取出存储数据送至DA转换后,输出对应的模拟弹丸过幕输出波形。

### 3.2 LED调光电路设计

针对实弹过幕时间短、光幕触发速度快等测试需求,模拟弹丸过幕信号源选用易驱动、发光稳定、响应速率快的发光二极管(LED)作为光信号源。由



## 4 试验验证

为验证设计测试装置的可行性与稳定性,对模拟弹丸过幕信号源配合示波器进行功能测试。图8为模拟7.62 mm弹过幕的LED控制信号波形信号图,其中两路波形的延时时间设置为500.0  $\mu\text{s}$ ,调试结果表明,输出波形及两路信号延时间隔均与设定波形和时间相吻合,电路工作正常可靠。

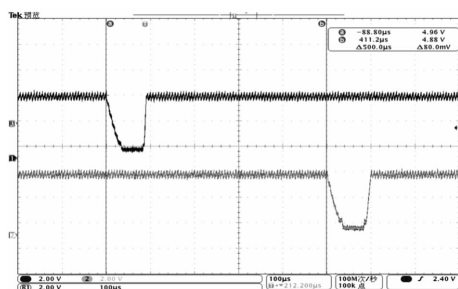


图8 7.62 mm弹测试波形图

Fig. 8 Test waveform diagram of 7.62 mm projectile

基于上述室内模拟验证基础,使用所设计的模拟弹丸过幕信号源测试装置验证天幕立靶6个探测光幕的响应时间一致性,按照文中所述方法进行试验,其中弹丸过幕信号输出的两路波形信号的延时间隔分别设置为500.0  $\mu\text{s}$ 和1 000.0  $\mu\text{s}$ 进行两组测试试验,信号采集与处理仪记录幕面1与其余5个幕面的输出过幕信号时间间隔,表1中所示的测试结果为多次试验求取的平均值。

表1 6个光幕响应时间一致性测量数据

Table 1 Test data of response time consistency of 6 light screens

组号	序号	设定延时 间隔/ $\mu\text{s}$	信号采集与 处理仪/ $\mu\text{s}$	差值/ $\mu\text{s}$
第1组	1	500.0	499.8	0.2
	2		499.9	0.1
	3		499.8	0.2
	4		499.7	0.3
	5		499.9	0.1
第2组	1	1 000.0	999.9	0.1
	2		999.8	0.2
	3		999.8	0.2
	4		999.8	0.2
	5		999.7	0.3

测试结果表明,输出两路信号时间间隔与设定时间间隔差值均小于1  $\mu\text{s}$ ,满足天幕立靶0.1%的测试精度下对响应时间的精度要求,验证了天幕立靶的6个光幕响应时间一致。

## 5 结论

本文针对天幕立靶中6个光幕的响应时间一致性测量问题,设计了一种高精度模拟弹丸过幕信号源测试装置及配套的测量方法,其结论如下:

1) 依据实弹过幕输出信号特性,通过图像处理,准确获取各种常规测试弹形的外围轮廓数据,将其量化后导入ROM存储器,完成常规弹形轮廓数据库建立;

2) 通过调用存储在ROM中的弹丸轮廓数据,改变调光电路中DA输出电压值,以控制LED的工作电流实现光源亮度调节,模拟弹丸穿过光幕时的光能量变化;

3) 经试验验证,6个光幕响应时间一致性测量误差小于1  $\mu\text{s}$ ,设计测量方法及测试装置能够应用于天幕立靶光幕响应时间一致性测量。

## 参考文献:

- [1] DONG Tao, NI Jinping. Measurement principle of six-light-screen vertical target based on sky screen[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(5): 913-916.  
董涛,倪晋平. 基于天幕靶的六光幕立靶测量原理[J]. 应用光学, 2011, 32(5): 913-916.
- [2] 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.  
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.
- [3] 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.  
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.
- [4] LI Hanshan, GAO Junchai, WANG Zemin. Object location fire precision test technology by using intersecting photoelectric detection target [J]. Optik, 2014, 125(3): 1325-1329.
- [5] FENG Bin, WU Zhichao. Two measuring algorithms for projectiles impact point coordinates based on sky screens vertical target[J]. Ordnance Industry Automation, 2013, 32(11): 63-66.  
冯斌,武志超. 基于天幕立靶的两种弹着点坐标测量算法[J]. 兵工自动化, 2013, 32(11): 63-66.
- [6] TIAN Hui, WEI Xin. Measuring method of detecting sensitivity and response time of optical-screen

- target[J]. Tool Engineering, 2017, 51(9): 128-131.
- 田会, 魏鑫. 光幕靶探测灵敏度与响应时间测量方法[J]. 工具技术, 2017, 51(9): 128-131.
- [7] WU Yang, WU Zhichao, NI Jinping. Method for detecting sky screen spatial position in flying projectile velocity measurement[J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(01): 100-105.
- 仵阳, 武志超, 倪晋平. 测速天幕靶幕面空间位置检测方法[J]. 应用光学, 2014, 35(01): 100-105.
- [8] TIAN Hui, NI Jinping, JIAO Mingxing. Moment acquisition algorithm of a projectile passing through a trapezoidal screen[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(12): 1-5.
- 田会, 倪晋平, 焦明星. 弹丸穿过梯形光幕过幕时刻提取算法研究[J]. 光子学报, 2014, 43(12): 1-5.
- [9] NI Jinping, YANG Lei. Method for measuring velocity of warhead fragments based on photoelectric detection[J]. Journal of Xi'an Institute of Technology, 2007, 3(4): 275-280.
- [10] WU Yang. Study on the calibration device and theoretical method of sky screen used in measuring velocity of flying projectile[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2014.
- 伍阳. 测速天幕靶检定装置与检定方法[D]. 西安: 西安工业大学, 2014.
- [11] HAN Rubing, CHEN Hualiang, TIAN Hui, et al. Study on method for detecting response time and high-speed response performance of sky-screen[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2017, 37(5): 351-356.
- 韩茹冰, 陈化良, 田会, 等. 天幕靶响应时间及高射速响应性能测试方法研究[J]. 西安工业大学学报, 2017, 37(5): 351-356.
- [12] SUN Zhonghui, TIAN Hui, ZHAO Yuyan, et al. Design realization of circuits to detect the response time consistency of sky screen[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2013, 33(10): 790-794.
- 孙忠辉, 田会, 赵玉艳, 等. 天幕靶响应时间一致性检测电路设计实现[J]. 西安工业大学学报, 2013, 33(10): 790-794.
- [13] FENG Yong, YANG Xu. Design for white light LED constant current controllable driving system[J]. Electrical switch, 2008, 46(4): 29-31.
- 冯勇, 杨旭. 白光 LED 可控恒流源驱动系统设计[J]. 电气开关, 2008, 46(4): 29-31.
- [14] HUANG Zhanhua, HUA Qiang, LONG Ningbo, et al. Research on sophisticated optical signal source[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2015, 13(1): 17-21.
- 黄战华, 华强, 龙宁波, 等. 用于光电检测的高精度任意波形光信号源技术研究[J]. 光学与光电技术, 2015, 13(1): 17-21.
- [15] WEI Xin, TIAN Hui, NI Jinping. Feature moment acquisition correction algorithm of a projectile passing through incline trapezoidal screen[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2018, 16(2): 26-32.
- 魏鑫, 田会, 倪晋平. 弹丸穿过倾斜梯形光幕特征时刻修正算法研究[J]. 光学与光电技术, 2018, 16(2): 26-32.