

## 通用工业相机的炸点瞬时位置测量模拟研究

黄战华 张光 曹雨生 张晗笑 申苜弘

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

HUANG Zhanhua, ZHANG Guang, CAO Yusheng, ZHANG Hanxiao, SHEN Muhong

引用本文:

黄战华, 张光, 曹雨生, 等. 通用工业相机的炸点瞬时位置测量模拟研究[J]. 应用光学, 2021, 42(5): 891–897. DOI: 10.5768/JAO202142.0503003

HUANG Zhanhua, ZHANG Guang, CAO Yusheng, et al. Simulation research on instantaneous position measurement of explosion point of general industrial camera[J].

Journal of Applied Optics, 2021, 42(5): 891–897. DOI: 10.5768/JAO202142.0503003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0503003>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 双目立体视觉技术在结构试验中的应用

Application of binocular stereo vision technology in structural test

应用光学. 2018, 39(6): 821–826 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0601008>

#### 可见近红外波段光谱辐射采集系统的设计与应用

Design and application of visible–near infrared band spectral radiation acquisition system

应用光学. 2019, 40(4): 557–562 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0401005>

#### 放疗3D剂量验证系统中光场相机点扩散函数获取

Point spread function acquisition of light field camera in 3D dose verification system for radiotherapy

应用光学. 2021, 42(1): 43–48 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0101007>

#### FBG传感器在空腔爆炸压力测量中的应用研究

Application research of FBG sensors used in cavity explosion for pressure measurement

应用光学. 2019, 40(2): 300–305 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0203004>

#### 基于单目视觉的矩形靶面弹着点测量

Measurement of impact point of rectangular target surface based on monocular vision

应用光学. 2021, 42(1): 131–136 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0103006>

#### 头盔显示器视差自动测量中眼位点的自动对准

Alignment automation of observation point in automatic measurement on parallax of helmet mounted display

应用光学. 2019, 40(1): 39–44 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0101007>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2021) 05-0891-07

# 通用工业相机的炸点瞬时位置测量模拟研究

黄战华<sup>1</sup>, 张光<sup>1</sup>, 曹雨生<sup>1</sup>, 张晗笑<sup>1</sup>, 申苜弘<sup>1</sup>

(1. 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

**摘要:**为解决当前已有炸点空间位置探测系统存在的结构复杂、成本昂贵的问题,进行了基于通用工业相机的炸点瞬时位置测量的模拟研究,设计了LED瞬态闪光单元,通过光电传感器探测LED产生的光信号并转换为电信号。经过信号处理,根据信号的幅值控制2台普通工业相机同时曝光进行抓拍,然后对采集的图像进行数字图像处理,获取2幅图像中爆炸光斑中心的位置坐标,再结合2个相机之间的相对位置关系,最终解算出炸点的空间位置坐标。实验结果表明:在距离测量系统24 m、32 m、48 m处,最大误差绝对值在水平 $X$ 方向为127 mm,在竖直 $Y$ 方向为68 mm,在深度 $Z$ 方向为279 mm。系统具有响应速度快、精度高、成本低等优点,满足系统探测要求。

**关键词:**炸点空间位置;光电传感器;普通工业相机;信号处理;数字图像处理

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202142.0503003

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

HUANG Zhanhua<sup>1</sup>, ZHANG Guang<sup>1</sup>, CAO Yusheng<sup>1</sup>, ZHANG Hanxiao<sup>1</sup>, SHEN Muhong<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Opto-electronics Information Technology (Ministry of Education), School of Precision Instruments and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** In order to solve the problems that the structure of existing explosion point spatial location detection system was complex and the cost was expensive, a simulation research was carried out which was on instantaneous position measurement of explosion point based on the general industrial camera. The LED transient flash unit was designed, and the photoelectric sensor detected the light signal generated by the LED and converted it into an electrical signal. After signal processing, the two general industrial cameras were controlled to expose and capture at the same time according to the signal amplitude. The collected images were digitally processed to obtain the position coordinates of center of explosion spot in two images, and then combined with the relative position relationship between two cameras, the spatial location coordinates of explosion point were finally calculated. The experimental results show that at 24 m, 32 m, and 48 m from the measuring system, the absolute maximum error in the horizontal direction  $X$  is 127 mm, in the vertical direction  $Y$  is 68 mm, and in the depth direction  $Z$  is 279 mm. The system has the advantages of fast response speed, high precision, low cost, and etc, which meet the requirements of system detection.

**Key words:** spatial location of explosion point; photoelectric sensor; general industrial camera; signal processing; digital image processing

## 引言

模拟测试是生产各种新型武器系统的关键一

环<sup>[1]</sup>。对于火炮弹丸,其何时起爆由引信决定<sup>[2]</sup>,因此对炸点空间位置测量技术的研究有利于提高引

收稿日期: 2021-03-04; 修回日期: 2021-06-07

基金项目: 国防科技创新特区 (H86300KX)

作者简介: 黄战华 (1965—),男,博士,教授,主要从事光电子信息、图像处理与模式识别、计算机应用与控制等技术和理论方面的研究。E-mail: zhanghua@tju.edu.cn

信技术,进一步提高打击准确度。炸点坐标测量分为地面炸点坐标测量和空中炸点坐标测量<sup>[3]</sup>。早期,对炸点位置测量一般采用人工观察法,该方法随机误差大且安全性差,因此需要研制新型光电测试系统<sup>[4-6]</sup>。对于当前已存在的测量系统,成本高而且容易受到测量环境的限制<sup>[7]</sup>。炸点空间坐标探测常用的测量方法有激光测距测高仪<sup>[8]</sup>、激光光电法<sup>[9]</sup>、多光幕交汇测量法<sup>[10]</sup>以及声学测量法<sup>[11-12]</sup>等。

由于炮弹速度非常快,并且其火光维持的时间只有几毫秒,因此具有高速性和瞬时性。相机一般分为卷帘快门<sup>[13]</sup>和全局快门<sup>[14]</sup>两种相机,全局快门的曝光时间更短,适合拍摄速度较大物体;而卷帘式快门帧速更高,但会出现“果冻现象”和“晃动现象”。由于高速相机价格昂贵,所以进行了基于通用工业相机的炸点瞬时位置测量的模拟研究。

## 1 测量原理

2个相机中心之间的距离远小于测量距离,因此可以把2个相机的光轴看成是近似平行的。测量原理主要是基于双目平行光轴测量模型,如图1。左右2个相机相对位置固定,并同时曝光,再根据目标在左右图像中的坐标,即可获取目标的空间坐标。图中 $H_S$ 表示2个相机的间距, $L_T$ 表示炸点到相机的深度距离,炸点在左右相机的测量角为 $\beta_L$ 和 $\beta_R$ ,约定光轴左侧为负,光轴右侧为正,炸点对两相机测量单元的张角为 $\theta_T$ ,则 $\theta_T$ 与 $\beta_L$ 和 $\beta_R$ 的关系为(1):

$$\theta_T = \beta_L - \beta_R \quad (1)$$

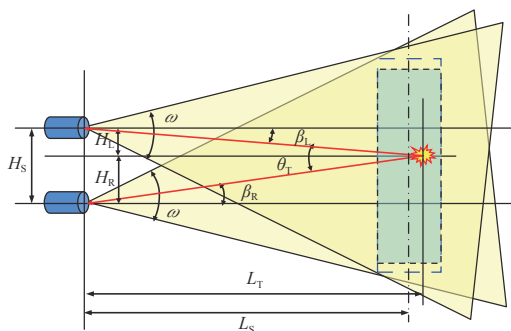


图1 平行光轴测距模型

Fig. 1 Parallel optical axis ranging model

根据图1,有关系(2)式和(3)式:

$$\tan \beta_L = \frac{x_L}{F} = -\frac{H_L}{L_T} \quad (2)$$

$$\tan \beta_R = \frac{x_R}{F} = -\frac{H_R}{L_T} \quad (3)$$

$H_S$ 与 $L_T$ 的关系为(4)式:

$$H_S = H_L + H_R = L_T(-\tan \beta_L + \tan \beta_R) \quad (4)$$

由(2)、(3)、(4)式可得(5)式,即炸点到2个相机连线的深度距离 $L_T$ 也是炸点沿Z方向坐标。

$$Z = L_T = \frac{H_S \times F}{x_R - x_L} \quad (5)$$

根据(2)、(3)和(5)式可以得出(6)、(7)式:

$$H_R = L_T \times \tan \beta_R = \frac{H_S \times x_R}{x_R - x_L} \quad (6)$$

$$H_L = -L_T \times \tan \beta_L = \frac{H_S \times x_L}{x_R - x_L} \quad (7)$$

根据物像关系分别得到炸点沿X、Y方向的坐标,即(8)式与(9)式:

$$X = \frac{X' \times L_T}{F} = H_S \times \frac{x_R + x_L}{2(x_R - x_L)} \quad (8)$$

$$Y = \frac{Y' \times L_T}{F} = H_S \times \frac{y_R + y_L}{2(x_R - x_L)} \quad (9)$$

式中: $H_S$ 已知; $(x_L, y_L)$ 与 $(x_R, y_R)$ 是炸点在左右图像中位置坐标; $(X, Y, Z)$ 即为炸点空间位置坐标。

## 2 实现方案

系统主要由瞬态闪光单元、探测传感单元和信号处理单元组成。瞬态闪光单元通过短脉冲控制器驱动LED按固定频率亮灭来模拟弹丸的爆炸发光,探测传感单元用于捕捉产生的光信号,通过信号处理单元,触发相机曝光采集。

### 2.1 瞬态闪光单元

该单元包含4个LED灯,均匀分布在直径1.2m的圆周上,各LED的相对位置固定,其距离变化小于0.5mm,满足精度要求。系统时钟周期在16ms~48ms可调,当CLK信号由低变高,LED的驱动电平也由低变高,时序如图2所示。发光时间需依据探测视场内的背景光强度以及测量的深度距离而定,本系统中,每个LED的持续发光的时间为2ms。

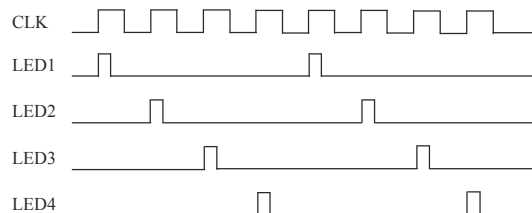


图2 闪光控制器时序图

Fig. 2 Timing diagram of flash controller

## 2.2 闪光信号起始探测传感单元

系统采用感光面大小为 $(10 \times 10)$  mm的硅光敏二极管, 光谱响应范围为300 nm至1 000 nm, 并在二极管前方增加光学透镜, 使炸点闪光信号汇聚到感光面, 使其能够触发相机采集图像。信号处理过程如图3所示: 光敏二极管将光信号转为电信号, 再将电流信号VINZ经AD862转换为电压信号VOS; 然后将VOS进行滤波放大, 得到输出信号VOUT。

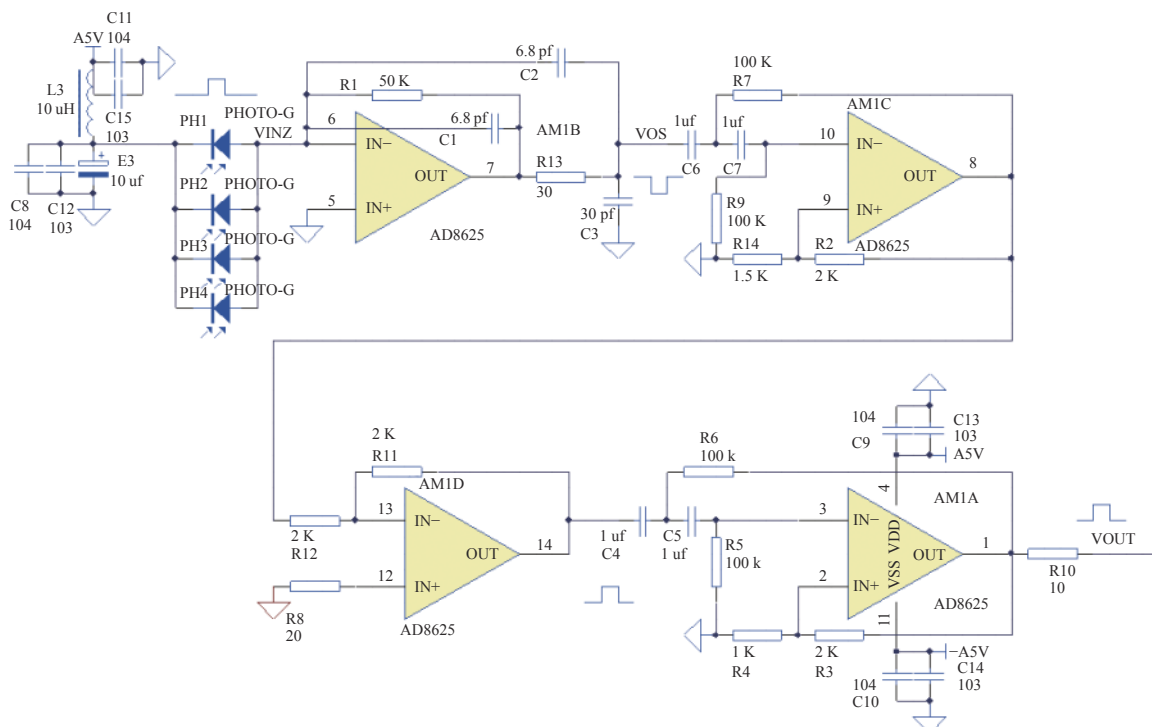


图3 光电探测模块电路图

Fig. 3 Circuit diagram of photoelectric detection module

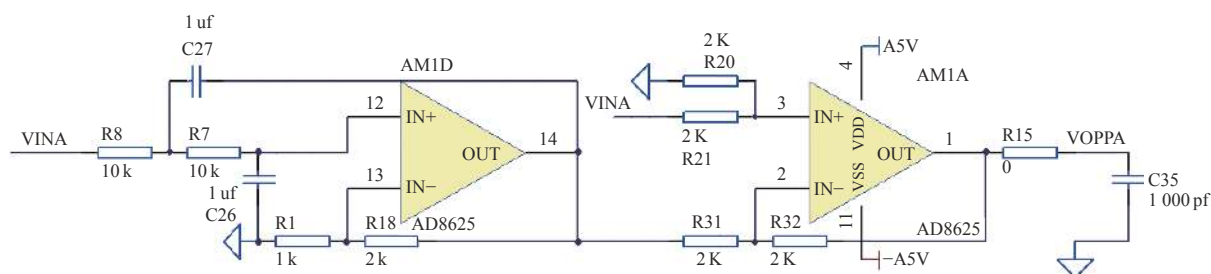


图4 减法电路图

Fig. 4 Subtraction circuit diagram

## 3 实验与数据分析

为保证测量的准确性与可靠性, 进行了系统前置实验。爆炸信号属于高频信号, 而测量环境中信号为低频信号, 因此需通过滤波电路对有效信

## 2.3 相机曝光时序控制

将VOUT信号传至减法电路模块即图4中VINA信号, 将背景光信号滤掉并放大, 得到有效信号VOPPA。VOPPA信号分为两路相同的信号: 一部分进入比较器, 与启动阈值VREFS比较, 确定是否开始积分充电; 一部分进入积分控制电路, 经过ADG787之后, 输出信号VPPSA, 通过AD8625得到信号VOJFA, 进入比较器再与曝光停止阈值VREFE比较, 确定是否停止曝光, 如图5所示。

号进行提取, 防止误触发或不触发相机曝光。图6所示为调整参数之后噪声与有效信号的幅值。

### 3.1 光斑提取

首先对图7所示原始图像进行中值滤波, 滤除

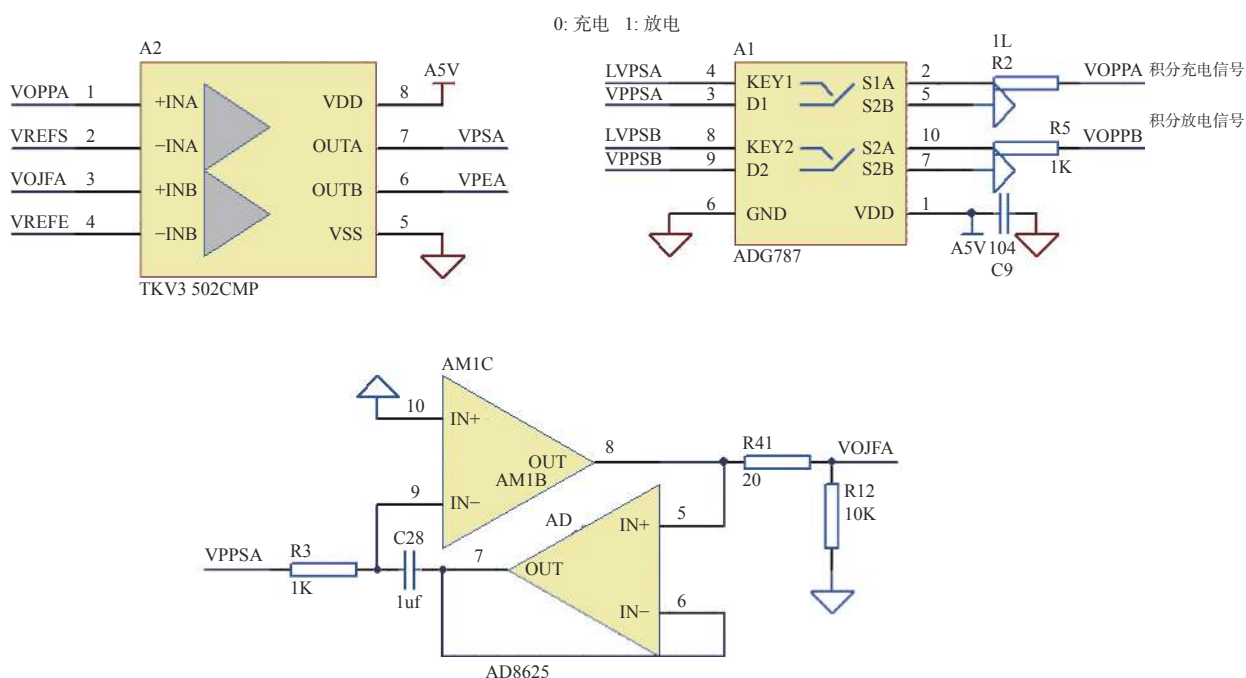


图 5 相机曝光控制电路图

Fig. 5 Circuit diagram of camera exposure control



图 6 调整之后噪声与爆炸信号的幅值

Fig. 6 Amplitude of noise and explosion signal after adjustment

固有的椒盐噪声,得到图 8;然后进行二值化处理,滤除视场内其他光源背景的干扰,获得图 9;接着

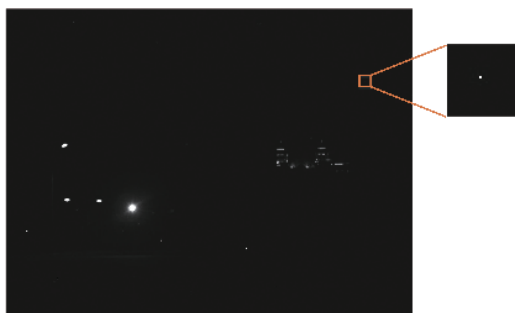


图 7 原始图像

Fig. 7 Original image

通过腐蚀和膨胀技术获取炸点光斑的掩码,分别如图 10、图 11、图 12 所示。

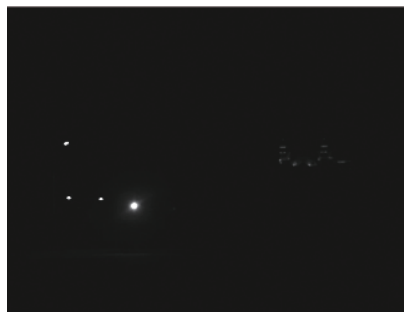


图 8 中值滤波后的图像

Fig. 8 Image after median filtering



图 9 二值化后图像

Fig. 9 Image after binarization

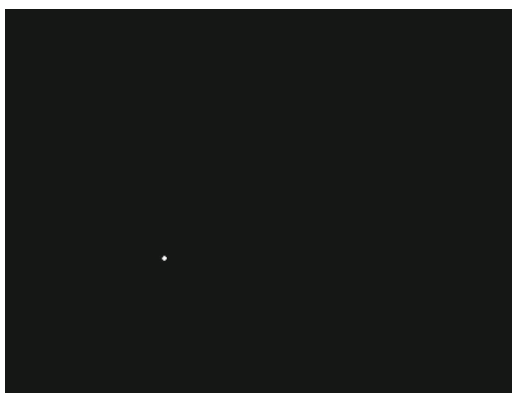


图 10 腐蚀后图像

Fig. 10 Image after corrosion



图 11 膨胀后图像

Fig. 11 Image after expansion

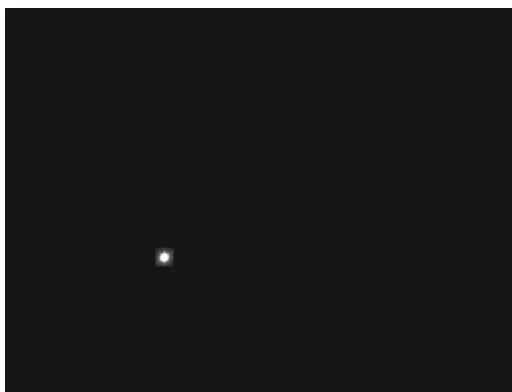


图 12 光斑掩码图像

Fig. 12 Spot mask image

### 3.2 光斑中心定位

由于爆炸光信号形状任意,且光能量分布不均,因此光斑质心与几何中心会产生偏移。该系统采用平方加权灰度重心法<sup>[15]</sup>对图 12 中的光斑进行中心定位。计算公式为(10)式和(11)式,式中:  $(x,y)$  为图像中对应像素点的实际尺寸坐标;  $f(x,y)$  表示对应位置的灰度值;  $M \times N$  表示区

域大小;  $x_c$  与  $y_c$  为光斑中心横纵坐标。

$$x_c = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N x f^2(x,y)}{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f^2(x,y)} \quad (10)$$

$$y_c = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N y f^2(x,y)}{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f^2(x,y)} \quad (11)$$

### 3.3 数据分析

以 2 个相机之间连线的中点作为参考零点,将目标分别沿深度方向  $Z$  置于距离探测系统 24 m、32 m、48 m 处,在水平方向  $X$  范围  $-8\text{ m} \sim 8\text{ m}$  内以 2 m 距离为间隔设置测量点,在竖直方向  $Y$  保持 0.4 mm 不变。在 24 m、32 mm、48 mm 处,炸点坐标  $(X,Y,Z)$  测量结果分别如表 1、2、3 所示。

表 1 24 m 处测量结果

Table 1 Measurement results at 24 m mm

| Led位置  | $x_R$    | $y_R$    | $x_L$    | $y_L$    | $X$    | $Y$ | $Z$    |
|--------|----------|----------|----------|----------|--------|-----|--------|
| -8 000 | 4.312 9  | -0.215 9 | 3.719 2  | -0.214 3 | -811 7 | 434 | 24 255 |
| -6 000 | 3.312 1  | -0.217 5 | 2.718 1  | -0.219 4 | -609 1 | 441 | 24 242 |
| -4 000 | 2.315 7  | -0.215 2 | 1.720 1  | -0.218 6 | -406 6 | 437 | 24 177 |
| -2 000 | 1.335 3  | -0.211 7 | 0.738 7  | -0.214 3 | -208 6 | 428 | 24 137 |
| 0      | 0.314 4  | -0.216 8 | -0.284 5 | -0.218 1 | -30    | 436 | 24 044 |
| 2 000  | -0.728 5 | -0.221 4 | -1.324 1 | -0.223 2 | 206 8  | 448 | 24 177 |
| 4 000  | -1.729 4 | -0.225 2 | -2.324 1 | -0.226 3 | 409 0  | 456 | 24 214 |
| 6 000  | -2.705 5 | -0.228 5 | -3.298 6 | -0.219 5 | 607 4  | 453 | 24 279 |
| 8 000  | -3.695 9 | -0.227 8 | -4.289 7 | -0.227 4 | 806 9  | 460 | 24 251 |

表 2 32 m 处测量结果

Table 2 Measurement results at 32 m mm

| Led位置  | $x_R$    | $y_R$    | $x_L$    | $y_L$    | $X$    | $Y$ | $Z$    |
|--------|----------|----------|----------|----------|--------|-----|--------|
| -8 000 | 3.242 4  | -0.169 8 | 2.795 8  | -0.167 9 | -8 112 | 454 | 32 244 |
| -6 000 | 2.492 6  | -0.167 3 | 2.045 5  | -0.165 2 | -6 090 | 446 | 32 208 |
| -4 000 | 1.746 9  | -0.165 6 | 1.299 2  | -0.164 9 | -4 082 | 443 | 32 164 |
| -2 000 | 0.995 5  | -0.166 2 | 0.547 7  | -0.167 8 | -2 068 | 448 | 32 157 |
| 0      | 0.236 2  | -0.158 8 | -0.213 2 | -0.160 2 | -31    | 426 | 32 042 |
| 2 000  | -0.543 1 | -0.162 1 | -0.990 8 | -0.164 1 | 2 056  | 437 | 32 164 |
| 4 000  | -1.303 1 | -0.165 3 | -1.750 5 | -0.166 1 | 4 095  | 444 | 32 186 |
| 6 000  | -2.048 0 | -0.166 8 | -2.495 1 | -0.167 1 | 6 097  | 448 | 32 208 |
| 8 000  | -2.799 3 | -0.168 1 | -3.245 8 | -0.169 2 | 8 123  | 453 | 32 251 |

根据公式(12)、(13)、(14),式中下标 th 表示理论值,ac 表示测量值,在 3 个不同深度距离,分别对  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  计算误差绝对值。

$$\Delta X = |X_{th} - X_{ac}| \quad (12)$$

表 3 48 m 处测量结果

| Table 3 Measurement results at 48 m mm |          |          |          |          |        |            |     |
|----------------------------------------|----------|----------|----------|----------|--------|------------|-----|
| Led位置                                  | $x_R$    | $y_R$    | $x_L$    | $y_L$    | $X$    | $Y$        | $Z$ |
| -8 000                                 | 2.168 1  | -0.107 5 | 1.869 6  | -0.108 8 | -8 116 | 435 48 241 |     |
| -6 000                                 | 1.667 2  | -0.104 8 | 1.368 6  | -0.106 9 | -6 100 | 425 48 225 |     |
| -4 000                                 | 1.165 9  | -0.110 2 | 0.867 2  | -0.109 8 | -4 084 | 442 48 209 |     |
| -2 000                                 | 0.662 8  | -0.111 2 | 0.363 7  | -0.112 1 | -2 059 | 448 48 144 |     |
| 0                                      | 0.155 1  | -0.107 2 | -0.144 2 | -0.109 8 | -22    | 435 48 112 |     |
| 2 000                                  | -0.354 4 | -0.109 4 | -0.653 4 | -0.109 2 | 2 022  | 439 48 161 |     |
| 4 000                                  | -0.863 4 | -0.112 9 | -1.162 2 | -0.114 5 | 4 067  | 457 48 193 |     |
| 6 000                                  | -1.367 3 | -0.116 1 | -1.665 7 | -0.116 6 | 6 098  | 468 48 257 |     |
| 8 000                                  | -1.871 2 | -0.115 4 | -2.169 5 | -0.115 2 | 8 127  | 464 48 274 |     |

$$\Delta Y = |Y_{th} - Y_{ac}| \quad (13)$$

$$\Delta Z = |Z_{th} - Z_{ac}| \quad (14)$$

综上所述,最大误差绝对值:在深度距离 24 m 处, $X$ 方向为 117 mm, $Y$ 方向为 59 mm, $Z$ 方向为 279 mm;在 32 m 处, $X$ 方向为 123 mm, $Y$ 方向为 54 mm, $Z$ 方向为 251 mm;在 48 m 处, $X$ 方向为 127 mm, $Y$ 方向为 68 mm, $Z$ 方向为 274 mm。

## 4 结论

本文对炸点空间位置的探测进行了模拟研究,提出了一种基于光电传感器和普通工业相机的炸点空间位置探测系统,最终实验结果表明该系统满足探测精度要求,具有重要的实际应用价值,但是对于实际弹丸炸点的空间位置测量还需进一步实验。

### 参考文献:

- [1] 刘天立,于晓艳.武器装备研制项目进度影响因素研究[J]. *项目管理技术*, 2019, 17(5): 71-75.  
LIU Tianli, YU Xiaoyan. Research on the factors affecting the schedule of weapon equipment development project[J]. *Project Management Technology*, 2019, 17(5): 71-75.
- [2] 吕培森.弹丸近地炸点高度测试技术研究[D].西安:西安工业大学, 2012.  
LYU Peisen. Study on the height measurement of the burst projectile in ground proximity[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2012.
- [3] 陈绍钦.三维炸点的声定位技术研究[D].西安:西安工业大学, 2012.  
CHEN Shaoqin. Study on acoustic detection of targets about three-dimensional burst point[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2012.
- [4] 赵芮.声学炸点测量系统研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2016.  
ZHAO Rui. Research on acoustic measurement system of burst-point[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [5] 冯松.炸点测量系统末端弹道跟踪控制技术[D].西安:西安电子科技大学, 2014.  
FENG Song. Terminal trajectory tracking control technology for bombing point measurement system[D]. Xi'an: Xidian University, 2014.
- [6] 高根伟.基于无线传感网络的炸点声定位技术研究[D].太原:中北大学, 2016.  
GAO Genwei. Study on burst point localization technique based on wireless sensor network[D]. Taiyuan: North University of China, 2016.
- [7] 靳田保,郝晓剑,周汉昌.双CCD交汇测量高速弹丸落点坐标设计研究[J]. *电子测试*, 2011(6): 54-56.  
JIN Tianbao, HAO Xiaojian, ZHOU Hanchang. Study of measure high-speed projectile impact point coordinates by dual CCD[J]. *Electronic Test*, 2011(6): 54-56.
- [8] 陈露,高志山,袁群,等.星载激光测高仪距离参数地面标定方法[J]. *中国光学*, 2019, 12(4): 897-905.  
CHEN Lu, GAO Zhishan, YUAN Qun, et al. Ground calibration method for distance parameters of satellite-borne laser altimeter[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(4): 897-905.
- [9] 孙超,王亮.激光成像技术在高度测量中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2007(1): 192-196.  
SUN Chao, WANG Liang. Application of laser imaging technology to height measurement[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007(1): 192-196.
- [10] 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): 136-142.  
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): 136-142.
- [11] 王雨时.以空中炸点声光信号测估高射弹丸的阻力特性[J]. *弹箭与制导学报*, 2007(4): 176-177.  
WANG Yushi. Measuring and estimating of anticraft projectile's resistance feature by light and echo of explosion of projectile in air[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2007(4): 176-177.

- 
- [ 12 ] 王威. 空中炸点声定位系统研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- WANG Wei. Research on acoustic positioning system of air burst[D]. Nanjing: Nanjing University Of Science And Technology, 2018.
- [ 13 ] Cahyadi W A, Kim Y H, Chung Y H. Dual camera-based split shutter for high-rate and long-distance optical camera communications[J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(11): 110504.
- [ 14 ] Yangfan Z, Zhongxiang C, Qi Q, et al. A high speed 1000 fps CMOS image sensor with low noise global shutter pixels[J]. *Science China(Information Sciences)*, 2014(4): 235-242.
- [ 15 ] 闫东方. 角偶棱镜自动识别技术研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2014.
- YAN Dongfang. The automatic identification technology of corner prism[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2014.