

单线阵 CCD 光电测试系统测量精度评估方法

倪晋平¹, 杨久琪¹, 贾兆辉², 陈丁¹, 李海¹

¹西安工业大学; ²西安应用光学研究所

摘要: 为了科学合理地评估单线阵 CCD 光电测试系统的性能, 提出一种测量精度的评估方法。首先, 分析激光光源与光学镜头主点沿水平方向的距离、投影板与光学镜头主点的竖直距离、光学镜头焦距三种光学结构参数对测量误差的影响; 然后, 讨论坐标测量误差随 x 和 y 坐标值变化而变化的趋势, 并推导误差公式。通过模拟实弹验证可知, 靶面为 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 时, 坐标 x 、 y 测量误差 Δx 、 Δy 的均值分别为 -5.6mm 和 15.2mm , 且 x 坐标测量误差的标准差 σ_x 为 4.5mm , y 坐标测量误差的标准差 σ_y 为 14.3mm 。模拟实弹试验结果与理论分析结果基本一致, 证明该评估方法正确可行。

关键词: 靶场测试; 弹丸命中坐标; 光电测试系统; 坐标测量

中图分类号: TG806; TH741; TJ012.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-7008.2019.03.029

Evaluation Method for Measurement Accuracy of Single Linear Array CCD-based Photoelectric Test System

Ni Jinping, Yang Jiuqi, Jia Zhaohui, Chen Ding, Li Hai

Abstract: To evaluate the performance of a single linear array CCD-based photoelectric test system scientifically and reasonably, a method for evaluating the accuracy of the hit coordinate measurement is proposed. First, the three principal parameters of the measurement accuracy, including the laser and the principal point of the lens on the horizontal direction, the vertical distance between the projection plate and the principal point of the lens, and the focal length of the lens, are analyzed. The trend of coordinate measurement errors with the change of x and y coordinate values are discussed, and the formulas of the measurement errors are deduced. Through the simulated projectile experiment in a $1\text{m} \times 1\text{m}$ target area, the mean values of x -coordinate and y -coordinate measurement errors Δx and Δy are -5.6mm and 15.2mm , respectively. The standard deviation of x -coordinate measurement error σ_x is 4.5mm , and that of y -coordinate measurement error σ_y is 14.3mm . The results are consistent with the theoretical analysis results, and it is proved that the evaluation method is correct and feasible.

Keywords: shooting range test; projectile hit coordinate; photoelectric test system; coordinate measurement

1 引言

目前, 常用的单管轻武器射击密集度测试方法有声波及超声波探测^[1]、雷达全弹道跟踪^[2-4]、红外探测^[5,6]、光幕阵列测试^[7-11]、双线阵 CCD 交汇光电测试^[12,13]等。随着半导体技术的发展, CCD 器件性能越来越优异, 成本也不断降低, 在靶场使用 CCD 来完成对各型单管轻武器的射击密集度测试也更加普遍。

双线阵 CCD 交汇光电测试系统是一种典型的射击密集度测量系统。近年来, 又出现了一种单线阵 CCD 光电测试系统^[14-16], 该系统有效测量靶面相对较窄, 仅需一台 CCD 图像采集装置配合一部激

光器光源即可实现测量, 具有结构紧凑、使用方便、测量精度高、成本较等优点。显然, 原先的测量精度评估法已不适用。本文提出一种针对单线阵 CCD 光电测试系统测量精度的评估方法, 研究了几种主要因素对测量精度的影响, 最终通过模拟实弹试验对理论分析和数字仿真结果进行验证, 证明了该评估方法的正确性及可行性。

2 测量原理

该系统由线阵 CCD 图像采集装置、波长 650nm 的扇形一字线激光光源、不锈钢材质投影板、高强度铝合金支撑结构、箱体以及计算机信号采集与数据处理系统组成。系统中光电探测部分的结构见图 1。图像采集装置与激光光源固定在箱体中, 激光光源安置在其一侧, 其发光点与光学镜头主点处于同一高度, 水平间距为固定值, 整个箱体放置于支撑结构上, 投影板在支撑结构顶部, 探测光幕会投射在投

基金项目: 陕西省自然科学基金研究计划 (2015JM5189); 陕西省教育厅重点实验室科研计划 (14JS035); 西安工业大学校长科研基金 (XAGDXJJ1001)

收稿日期: 2018 年 6 月

影板上。一字线激光光源形成具有一定厚度的扇形光幕,在空间上与图像采集装置视场基本重合。相对于系统结构与探测光幕,弹体尺寸较小,将弹体简化为质点,不考虑弹体本身尺寸及形状对测量的影响。

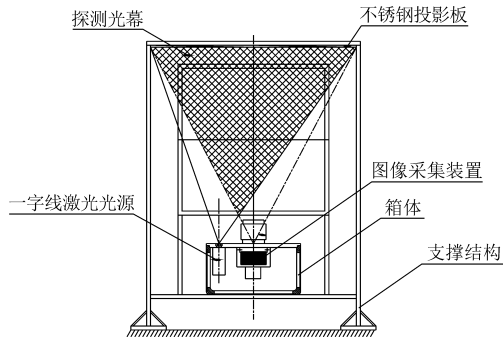


图1 单线阵 CCD 光电测量系统结构

弹体坐标测量原理见图2。当弹体M穿过探测光幕时,探测光幕会被弹体M遮挡,在投影板上留下投影N',N'被光学镜头成像到CCD像面上的点N'',弹体M直接被光学镜头成像到像面上点M'',直线MM''交投影板为点M'。由图可见,弹着点M即直线NN'与直线MM''交点,测得该点坐标便获得命中位置坐标。

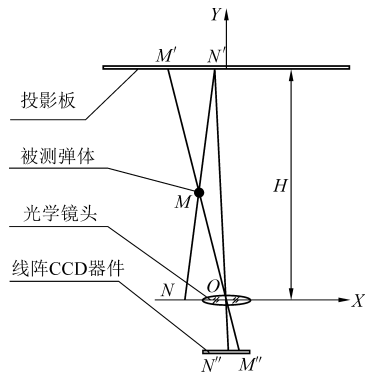


图2 弹体命中坐标测量原理

取图像采集装置的光学镜头主点O为原点并建立直角坐标系。光源在N点发出探测光幕,N点 $(x_N, 0)$ 为已知坐标,N'点坐标为 $(x_{N'}, H)$,N'点坐标可由其在像面上的N''点坐标 $(x_{N''}, -f)$ 通过计算机图像采集与数据处理确定。投影板高度H与镜头焦距f可直接测量得到,同时弹体M直接被镜头成像到像面上点M''坐标 $(x_{M''}, -f)$ 也可以通过图像采集得到。把N点坐标 $(x_N, 0)$ 、N'点坐标 $(x_{N'}, H)$ 、M''点坐标 $(x_{M''}, -f)$ 及O点坐标 $(0, 0)$ 代入两点式直线方程,得到直线NN'和M'M''的方程分别为

$$\frac{y}{H} = \frac{x - x_N}{x_{N'} - x_N} \quad (1)$$

$$\frac{y}{-f} = \frac{x}{x_{M''}} \quad (2)$$

两直线方程联立后解出x、y坐标值,即命中位置坐标 (x, y) 为

$$x = \frac{x_N x_{M''} H}{x_{M''} H + x_{N'} f - x_N f} \quad (3)$$

$$y = \frac{(-f) x_N H}{x_{M''} H + x_{N'} f - x_N f} \quad (4)$$

由成像关系可知, $x_{N''} = -x_{N'} \times \frac{H}{f}$,将其代入式(3)和式(4)得

$$x = \frac{x_N x_{M''} H}{x_{M''} H - x_{N'} H - x_N f} \quad (5)$$

$$y = \frac{(-f) x_N H}{x_{M''} H - x_{N'} H - x_N f} \quad (6)$$

3 系统精度评估

影响系统测量精度的因素主要有光学结构、电气特性、图像处理、外界环境等。经过处理与补偿,电气特性与图像处理可忽略;在室内或室外测试温度为环境温度、地面纵横风速均不超过4m/s、天气无降雨降雪、能见度良好的情况下,环境因素也可忽略^[17]。因此,本文只讨论光学结构对精度的影响。

分析测量公式可知,坐标x受 x_N 、 $x_{M''}$ 、H、 $x_{N'} f$ 5个自变量影响。对这5个自变量求偏导数,获得误差传递系数为

$$\frac{\partial x}{\partial x_N} = \frac{x_{M''}^2 H^2 - x_{M''} x_{N'} H^2}{(x_{M''} H - x_{N'} H - x_N f)^2} \quad (7)$$

$$\frac{\partial x}{\partial x_{M''}} = \frac{-x_{N'} x_N H^2 - x_N^2 H f}{(x_{M''} H - x_{N'} H - x_N f)^2} \quad (8)$$

$$\frac{\partial x}{\partial H} = \frac{-x_{M''} x_N^2 f}{(x_{M''} H - x_{N'} H - x_N f)^2} \quad (9)$$

$$\frac{\partial x}{\partial x_{N'}} = \frac{x_{M''} x_N H^2}{(x_{M''} H - x_{N'} H - x_N f)^2} \quad (10)$$

$$\frac{\partial x}{\partial f} = \frac{x_N^2 x_{M''} H}{(x_{M''} H - x_{N'} H - x_N f)^2} \quad (11)$$

同理,分析y坐标测量公式可知,y同样受上述5个自变量影响。故分别求偏导,获得误差传递系数为

$$\frac{\partial y}{\partial x_N} = \frac{x_{N'} H^2 f - x_{M''} H^2 f}{(x_{M''} H - x_{N'} H - x_N f)^2} \quad (12)$$

$$\frac{\partial y}{\partial x_{M''}} = \frac{x_N H^2 f}{(x_{M''} H - x_{N'} H - x_N f)^2} \quad (13)$$

$$\frac{\partial y}{\partial H} = \frac{x_N^2 f^2}{(x_{M''} H - x_{N'} H - x_N f)^2} \quad (14)$$

$$\frac{\partial y}{\partial x_{N'}} = \frac{-x_N H^2 f}{(x_{M''} H - x_{N'} H - x_N f)^2} \quad (15)$$

$$\frac{\partial y}{\partial f} = \frac{H^2 x_N x_{N'} - H^2 x_N x_{M'}}{(x_{M'} H - x_{N'} H - x_N f)^2} \quad (16)$$

根据误差传递公式可知,命中坐标 x 和 y 的测量误差标准差 σ_x 和 σ_y 为

$$\sigma_x^2 = \left(\frac{\partial x}{\partial x_N}\right)^2 \Delta x_N^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial x_{M'}}\right)^2 \Delta x_{M'}^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial H}\right)^2 \Delta H^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial x_{N'}}\right)^2 \Delta x_{N'}^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial f}\right)^2 \Delta f^2 \quad (17)$$

$$\sigma_y^2 = \left(\frac{\partial y}{\partial x_N}\right)^2 \Delta x_N^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_{M'}}\right)^2 \Delta x_{M'}^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial H}\right)^2 \Delta H^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_{N'}}\right)^2 \Delta x_{N'}^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial f}\right)^2 \Delta f^2 \quad (18)$$

命中坐标 x 和 y 的测量误差最大值 Δx_{\max} 和 Δy_{\max} 为

$$\Delta x_{\max} = \left| \frac{\partial x}{\partial x_N} \Delta x_N \right| + \left| \frac{\partial x}{\partial x_{M'}} \Delta x_{M'} \right| + \left| \frac{\partial x}{\partial H} \Delta H \right| + \left| \frac{\partial x}{\partial x_{N'}} \Delta x_{N'} \right| + \left| \frac{\partial x}{\partial f} \Delta f \right| \quad (19)$$

$$\Delta y_{\max} = \left| \frac{\partial y}{\partial x_N} \Delta x_N \right| + \left| \frac{\partial y}{\partial x_{M'}} \Delta x_{M'} \right| + \left| \frac{\partial y}{\partial H} \Delta H \right| + \left| \frac{\partial y}{\partial x_{N'}} \Delta x_{N'} \right| + \left| \frac{\partial y}{\partial f} \Delta f \right| \quad (20)$$

由系统坐标测量式(5)和式(6)、误差标准差式(17)和式(18)、测量误差最大值式(19)和式(20)分析可知,本系统测量误差受 $|x_N|$ 、 H 、 f 、命中坐标 (x, y) 四方面因素影响。

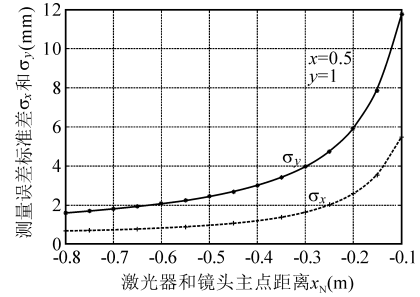
针对以上四方面因素,采用控制变量法,对坐标测量误差的标准差随一种因素变化来进行仿真,可获得每种因素对系统测量结果的影响。

命中坐标 x 、 y 误差标准差 σ_x 和 σ_y 随 $|x_N|$ 的变化趋势见图3。仿真时,固定其他自变量分别为 $x = 0.5$ 、 $y = 1$ 、 $H = 2.5$ 、 $f = 14$ mm。由图可得:当 H 、 f 、 (x, y) 为定值时, σ_x 和 σ_y 均随 $|x_N|$ 的变小而增大;当 $x_N = -0.15$ m 时, $\sigma_x \approx 3.5$ mm, $\sigma_y \approx 8$ mm;当 $x_N = 0.15$ m 时, $\sigma_x \approx 4.3$ mm, $\sigma_y \approx 8$ mm。

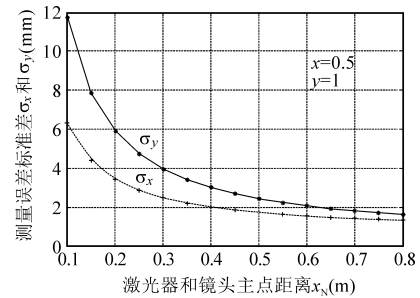
σ_x 和 σ_y 随 H 的变化趋势见图4。仿真时,固定其他变量分别为 $x = 0.5$ 、 $y = 1$ 、 $x_N = -0.15$ 、 $f = 14$ mm。由图可得:当 $|x_N|$ 、 f 、 (x, y) 为定值时, σ_x 和 σ_y 均随 H 的增大而增大。进一步分析可得: σ_x 受 H 值变化的影响小于 σ_y , 当 H 在 1–3 m 变化时, σ_x 在 4.0–4.5 mm 之间变化; σ_y 受 H 值变化的影响比 σ_x 大, 当 H 在 1–3 m 变化时, σ_y 在 6.8–8.2 mm 之间变化。

σ_x 和 σ_y 随 f 的变化趋势见图5。仿真时,固定其他变量分别为 $x = 0.5$ 、 $y = 1$ 、 $H = 2.5$ 、 $x_N = -0.15$ m。由图可得:当 $|x_N|$ 、 H 、 (x, y) 为定值时, σ_x 和 σ_y 随光学镜头焦距 f 的增大而减小;当焦距

$f = 14$ mm 时, $\sigma_x \approx 4.5$ mm, $\sigma_y \approx 7.9$ mm; 当焦距 $f = 50$ mm 时, $\sigma_x \approx 2.3$ mm, $\sigma_y \approx 4.5$ mm。



(a) x_N 为负值



(b) x_N 为正值

图3 系统标准差随 x_N 的变化趋势

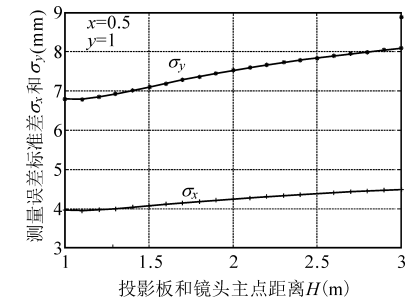


图4 系统标准差随 H 的变化趋势

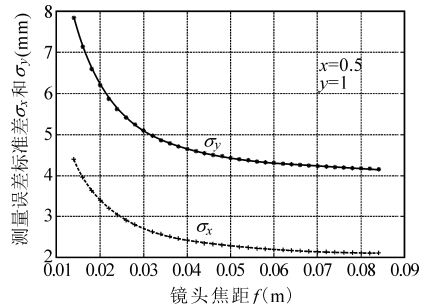


图5 系统标准差随 f 的变化趋势

系统 x 坐标误差标准差和误差随 x 和 y 坐标值的变化趋势分别见图6和图7,系统 y 坐标误差标准差和误差随 x 和 y 坐标值的变化趋势分别见图8和图9。

仿真时,固定 $x_N = -0.15$ m, $H = 2.5$ m, $f = 14$ mm。 x 坐标从 $-0.5 \sim +0.5$ 变化, y 坐标从 1–2 m 变化,而 $x_{M'}$ 和 $x_{N'}$ 随命中坐标 x 和 y 的变化而变

化。由式(5)和式(6)可得

$$x_{M''} = \frac{-fx}{y} \tag{21}$$

$$x_{N''} = \frac{(x_N - x)f}{y} - \frac{x_N f}{H} \tag{22}$$

采用高精度激光测距仪测量 $|x_N|$ 、 H 可以保证误差小于1mm,故本文对 Δx_N 和 ΔH 均取值为1mm。 $\Delta x_{N''}$ 和 $\Delta x_{M''}$ 为弹体在像面上的像点中心位置计算误差,根据所选器件像元大小及相应的图像采集处理算法, $\Delta x_{N''}$ 和 $\Delta x_{M''}$ 取值为0.01mm。 Δf 为镜头焦距误差,鉴于光学方法对光学镜头焦距进行测量精度可达0.1%,而系统采用的光学镜头焦距为14mm,故 Δf 取值为0.014mm。

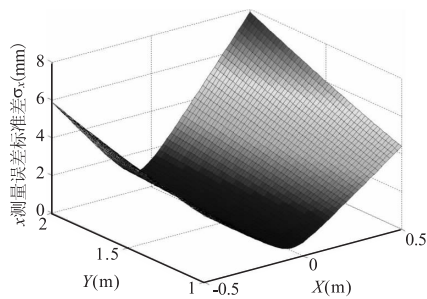


图6 x坐标误差标准差随命中坐标(x,y)变化趋势

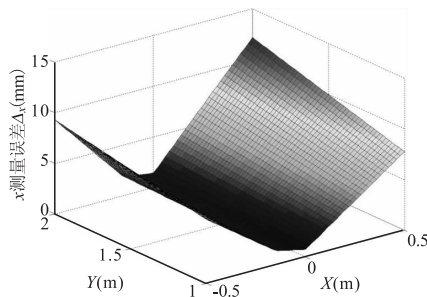


图7 x坐标误差随命中坐标(x,y)变化趋势

由图6、图7可得:固定其他变量并令x坐标从-0.5~0.5m变化、y坐标从1~2m变化,x坐标测量误差 Δx 、 σ_x 均与命中坐标(x,y)的变化有关。坐标x绝对值越大, Δx 与 σ_x 越大,y值越大, Δx 与 σ_x 也越大;当x绝对值小于0.5m、 $2m > y > 1m$ 时, $\Delta x < 13mm$, $\sigma_x < 8mm$ 。由图8、图9可得:y坐标误差

Δy 、 σ_y 的变化与x值无关,都随命中坐标y值的增大而增大;当 $2m > y > 1m$ 时, $\Delta y < 42mm$, $\sigma_y < 27mm$ 。

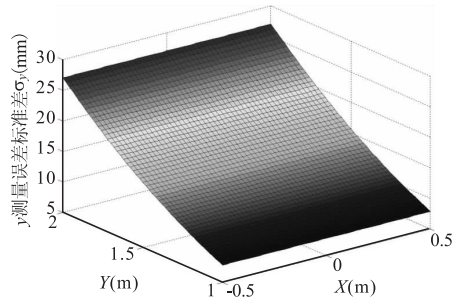


图8 y坐标误差标准差随命中坐标(x,y)变化趋势

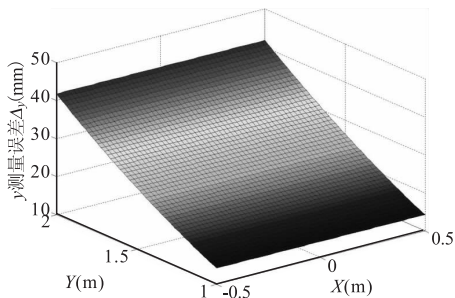


图9 y坐标误差随命中坐标(x,y)变化趋势

4 系统精度验证

在系统完成装配 $|x_N|$ 、 H 、 f 都已固定的情况下,对不同坐标(x,y)下系统误差变化进行试验验证。表1为实体靶与单线阵CCD光电测试系统分别进行试验的数据。表中像元 n_1 、 n_2 分别为弹体在投影板上的投影和弹体本身在像面上像点对应的中心像元,即原理图中点 N'' 、 M'' 对应的中心像元。

对每个弹体对应的两个像元 n_1 和 n_2 进行运算得到像元位置 $x_{N''}$ 和 $x_{M''}$,将其代入式(5)和式(6)最终得到每一发弹的着靶坐标,并将其与实体靶测得的坐标进行对比。由表1中试验数据可得, Δx 、 Δy 的均值分别为-5.6mm和15.2mm,而 σ_x 为4.5mm, σ_y 为14.3mm。根据不同精度等级设备要求,对比弹丸口径与误差,可最终判定出产品是否合格。

表1 实体靶与本系统试验数据对比

编号	实体靶坐标		影像中心像元		本系统测量坐标		测量误差	
	x_0 (mm)	y_0 (mm)	n_1	n_2	x_1 (mm)	y_1 (mm)	Δx (mm)	Δy (mm)
1	0	0	907	1005	2.3	-0.6	2.3	-0.6
2	-200	200	693	764	-199.1	203	0.9	3
3	100	-100	1032	1167	101.7	-111.8	1.7	-11.8
4	200	0	1175	1286	201.4	0.1	1.4	0.1
...
50	500	0	1588	1720	494.9	-9.7	-5.1	-9.7

坐标x,y测量误差 Δx 、 Δy 的均值 $\bar{\Delta x} = -5.6mm$, $\bar{\Delta y} = 15.2mm$

坐标x,y测量误差 Δx 、 Δy 的标准差 $\sigma_x = 4.5mm$, $\sigma_y = 14.3mm$

5 结语

本文提出一种单线阵 CCD 光电测试系统测量精度的评估方法,建立了光源与光学镜头主点水平间距 $|x_N|$ 、投影板高度 H 、光学镜头焦距 f 、命中坐标 (x, y) 四种因素与测量误差的数学模型。

通过对系统误差的分析、仿真和试验验证,结论如下:参数合理变化范围内, $|x_N|$ 越大,系统测量精度越高; H 对系统 x 和 y 坐标测量精度有不同影响, y 坐标测量误差随 H 的增大而增大, x 坐标测量误差受 H 变化的影响相对于 y 较小,为提高系统坐标测量精度, H 的设置越小越好; f 越大,系统测量误差越小;对于 (x, y) , x 绝对值越大, x 坐标误差越大, y 值越大, x 坐标误差越大,而 y 坐标误差与 x 值无关,随 y 值的增大而增大。

试验结果证实了该评估方法正确可行,对单线阵 CCD 光电测试系统的设计与改进有重要参考意义,系统优化设计已经列入下一步研究计划。

参考文献

- [1] 刘德耀,陈志菲,郭心伟,等. 基于声学传感网络的弹着点定位系统[J]. 弹道学报,2017,29(2):85-89.
- [2] 杜剑英,吴振国,郭文卓. 数字阵列体制在靶场弹道测量雷达中的应用[J]. 探测与控制学报,2017,39(4):67-71.
- [3] Khalil M, Rui X, Zha Q, et al. Projectile impact point prediction based on self-propelled artillery dynamics and doppler radar measurements[J]. Advances in Mechanical Engineering,2013(3):913.
- [4] Wu L, Xu F, Peng S, et al. A method for w-band doppler radar based in-bore projectile motion parameters extraction [C]//Asia-Pacific Microwave Conference. IEEE,2015:1-3.
- [5] 张宝辉,张俊举,常本康,等. 红外探测器对飞行弹丸探测距离的仿真研究[J]. 兵工学报,2012,33(11):1319-1323.
- [6] 张俊,刘荣忠,郭锐,等. 高速飞行弹箭目标表面动态热

辐射[J]. 航空动力学报,2017,32(2):289-297.

- [7] Li H. Research on a new photoelectric detection method to anti-muzzle's flame or light disturbance and projectile's information recognition in photoelectric detection target[J]. Optoelectronics and Advanced Materials - Rapid Communications,2014,8(7-8):653-658.
- [8] Zhao H, Zhao D E, Wang G. Photoelectric instrument of projectile muzzle velocity based on retro-reflective screen [C]//International Conference on Optics Photonics and Energy Engineering, IEEE,2010:146-149.
- [9] Li H, Lei Z, Wang Z, et al. Research object photoelectric characteristic and fire coordinate distributing probability in across screen system[J]. Journal of Nanoelectronics & Optoelectronics,2012,7(2):199-203.
- [10] 倪晋平. 光幕阵列测试技术与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2014.
- [11] 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.
- [12] Chen X, Tang J Y. A study of automatic calibration in dual linear-CCD camera intersection measuring system[J]. Advanced Materials Research,2012,571:219-223.
- [13] Ma W, Dong T, Tian H, et al. Line-scan CCD camera calibration in 2D coordinate measurement[J]. Optik,2014,125(17):4795-4798.
- [14] 董涛. 基于单线阵 CCD 相机的弹丸着靶坐标测量技术研究[D]. 西安:西安理工大学,2015.
- [15] Dong Tao, Hua Dengxin, Li Yan, et al. Measuring principle of vertical target density based on single linear array CCD camera[J]. Optik,2014,125:176-178.
- [16] 董涛,华灯鑫,李言,等. 一种单线阵 CCD 立靶系统参数标定方法[J]. 西安理工大学学报,2015,31(1):19-24.
- [17] GJB3196.18a-2005k, 枪弹实验方法. 第18部分:射击密集度[S]. 北京:国防科学技术工业委员会,2006.
第一作者:倪晋平,教授,西安工业大学光电工程学院,710021 西安市
First Author: Ni Jinping, Professor, School of Photoelectric Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China