

基于高速摄影图像的轻气炮弹速测量研究

赵奇峰, 李 进, 李运良, 张向荣, 朱玉荣, 谭书舜

(西北核技术研究所, 西安 710024)

摘要: 目前对轻气炮弹丸测量的方法通常采用磁测速、激光遮断测速两种方法, 这两种方法受到弹丸材质、尺寸、弹前激波等影响时易导致测量结果失效; 针对此类问题, 提出了一种可靠性更高的基于高速摄影图像模板匹配的轻气炮弹丸速度测量方法; 利用高速摄影相机、辅助光源、刻度标尺等组成高速弹丸摄影系统, 设置高速弹丸拍摄方案, 得到轻气炮弹丸在观察室运动过程的高速摄影结果; 采用弹丸目标模板匹配的方法对摄影结果进行计算, 得到弹丸运动过程中的位置信息从而得到弹丸速度; 将计算结果与激光遮断测速方法得到的速度值进行了对比, 满足试验要求, 证明了该方法既能可独立作为轻气炮发射弹丸测速手段, 也可为现有测试手段提供有效校核。

关键词: 轻气炮弹丸; 测速; 高速摄影; 模板匹配

Study on Velocity Measurement of Light Gas projectile Based on High Speed Photographic Images

ZHAO Qifeng, LI Jin, LI Yunliang, ZHANG Xiangrong, ZHU Yurong, TAN Shushun

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

Abstract: At present, magnetic velocimetry and laser blocking velocimetry are commonly used in the measurement of light gas projectile. These methods are affected by the projectile material, size and shock wave before the projectile, which leads to the failure of the measurement results. To solve this problem, a more reliable method for measuring the velocity of light-gas projectile based on the matching of high-speed photographic image template is proposed. High-speed projectile photography system is made up of high-speed camera, auxiliary light source and scale ruler, and high-speed projectile shooting scheme is set up to obtain the high-speed photography results of light-gas projectile moving in the observation room. The target template matching method is used to calculate the photographic results, and the position information during the projectile movement is obtained to obtain the projectile velocity. The results are compared with those obtained by laser blocking velocity measurement method and meet the test requirements. It is proved that the method can be used independently as a means of measuring the velocity of light gas gun projectile and can provide an effective check for existing test segments.

Keywords: light gas projectile; high speed photographic; speed measurement; template matching

0 引言

众所周知, 轻气炮是依靠压缩气体膨胀做功发射弹丸的身管射击设备。它是研究冲击压缩下材料和结构的动态特性、状态方程以及物理特性和化学特性常用的一种冲击加载设备。轻气炮分为一级轻气炮和多级轻气炮, 二级轻气炮作为多级轻气炮的一种, 可获得 2~7 km/s 的弹速^[1-2]。轻气炮对弹丸形状、材料、质量和尺寸有较宽的适用范围, 而且在相同发射参数前提下, 发射速度具有良好的可重复性, 在轻气炮实验中, 弹丸的速度是确定材料特性、冲击效果等的重要参数, 因此精确测量弹速十分重要。因为实验加载速度高, 弹丸尺寸和质量小, 因此弹速测量既是重点也是难点。轻气炮弹速测量的方式随着轻气炮发射技术的发展而不断更新, 测速方式主要包括磁测速、激光测速和电刷探针测速等。文献 [1] 中介绍了磁性测速方式的

测量原理和测速方式。文献 [2] 介绍了用于三级轻气炮的弹速测量方法, 针对弹前激波的发光的影响增加了弹道消波装置, 以减少其对激光测速系统的干扰。目前实验室重要利用激光测速和磁测速两种手段测量轻气炮弹速, 由于两种手段在测量中存在的问题, 无法保证每发试验都可以获得精准弹速。

目前, 随着高速摄影技术的迅速发展, 高速摄影机作为一种用于工程与技术科学基础学科的分析仪器, 已经被广泛应用于各类工程试验中。文献 [3] 介绍了利用高速摄影机计算火炮弹丸脱靶量得方法。文献 [4] 介绍了高速摄影技术在观测水中射流运动、着靶和侵入靶板等多方面中的应用。文献 [5] 采用高速摄影法对弹丸出炮口的时间参数测试方法进行研究。目前, 高速摄影机已在轻气炮试验领域中得到广泛应用, 它是针对高速和超高速飞行弹丸的

收稿日期: 2021-03-11; 修回日期: 2021-05-13。

基金项目: 国家自然科学基金(11872318)。

作者简介: 赵奇峰(1983-), 女, 黑龙江大庆人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事超高速测量方向的研究。

引用格式: 赵奇峰, 李 进, 李运良, 等. 基于高速摄影图像的轻气炮弹速测量研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(11): 132-136.

弹道性能、空间飞行姿态、速度等参数的一种重要的非接触测量手段, 本文提出了一种基于图像处理测量高速弹丸速度的方法, 该方法稳定性强, 精度高, 可以弥补实验室现有激光测速和磁测速的不足, 在现有手段失效的情况下可以精确的获得弹速, 为提高工作效率, 节约试验成本提供技术保障。

1 轻气炮弹丸测速常用方法基本原理及特点分析

二级轻气炮结构主要包括气室、泵管和发射管等^[6]。其工作原理是: 泵管抽真空后注入一定轻质气体, 高压气室内气体膨胀, 推动活塞向前运动绝热压缩泵管内的轻质气体, 气压超过膜片承受能力, 膜片破裂, 气体推动弹丸向前运动, 弹丸以较高的速度飞出炮口, 进入靶箱撞击目标。如图 1 所示。目前, 对于轻气炮弹丸的速度确定一般采用磁测速和激光测速两种方法。

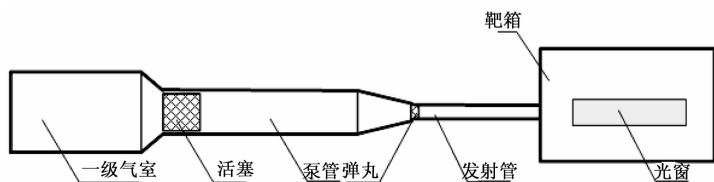


图 1 二级轻气炮原理图

1.1 磁测速

由法拉第电磁感应定律知, 当闭合导体回路中磁通量发生变化时, 回路中会产生阻止其磁通量变化的感应电动势, 该感应电动势的大小正比于磁通量对时间的变化率, 即:

$$E = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

式中, E 为感应电动势, Φ 为磁通量, t 为时间。

基于这一基本原理, 弹丸磁测速技术一般有两种思路。一种是采用磁飞行体法, 顾名思义, 将磁体携带在弹丸中, 在其飞行路径上布置多路感应线圈, 当弹丸依次穿过各线圈时分别产生电磁感应信号, 测量各信号之间的时差和各线圈之间的距离, 即可求得弹丸飞行速度, 如图 2 所示。

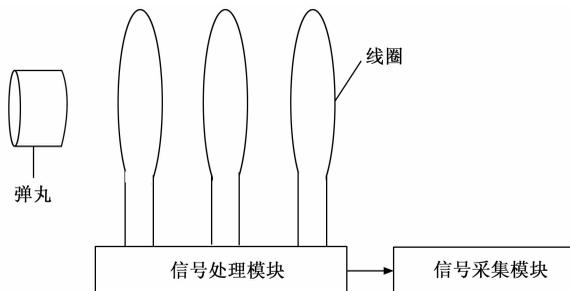


图 2 磁测速原理图

虽然磁飞行体法原理简单, 但该方法测弹速也有许多缺点, 弹丸携带感应磁体, 增加了弹丸架构的复杂性, 整体强度发生了很大变化, 同时重量增加导致难以提高弹丸发射速度。携带磁体的弹丸使碰撞实验中的冲击波系复杂化, 给后续实验数据的分析带来困难。同时, 飞行磁体的

磁滞滞后效应成为了时间判读误差的主要来源。

因此, 在二级轻气炮中通常使用结构简单、经济性好的磁感应测速法作为测量弹丸速度的主要方法。为得到感应磁场, 该方法要求弹丸材料必须是导体材料, 并且当弹丸体积必须足够大, 感生电流的磁场变化才能引起原磁场的明显变化, 才能得到测速结果。在大口径二级轻气炮上, 大口径的磁环在高压气体作用下很容易破裂, 消耗很大。

1.2 激光测速

激光光束遮断法测速原理: 弹丸飞行过程中, 将排列在弹道上的两束或三束平行激光依次遮断, 激光光源对应的接收光敏管因光照信号变化产生电信号, 从而测量出弹丸遮光的时间间隔, 再根据精确测量的激光间距, 可求出弹丸的出口速度, 原理图如图 3 所示。该方法的测速公式为:

$$v = s/t \quad (2)$$

式中, s 为两探头间距; t 为两探头信号的时间差。

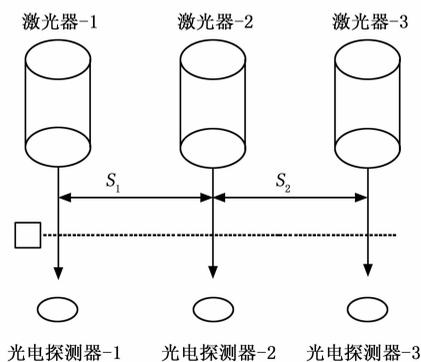


图 3 激光测速原理图

激光光束遮断法是目前应用十分广泛的激光测速技术, 其中点状光束遮断法普遍应用于多级轻气炮的弹丸速度测量中^[7]。但是, 在二级气炮的应用时会遇到了一些问题严重的影响了测速的稳定性。泄漏到弹丸前端的氢气产生的激波或炮管中的烟尘会严重干扰光电管的信号, 气炮发射时的整个炮身震动也会使光路产生偏离, 弹丸尺寸越小, 问题越突出。在轻气炮发射试验中, 不能保证利用该测速方式获得弹丸的精准速度。

2 图像测速方法系统构建及试验设置

2.1 系统构建

图像测速方法系统主要包括高速摄影机 (Phantom V2512)、镜头、光源及向应的三脚架、云台、线缆等组成。辅助设备包括刻度尺、刻度尺夹具、光源、触发源等。试验中的图像数据由采集卡进行转换并传输给摄影机控制计算机, 控制计算机实时显示采集图像画面, 并可以存储记录数据方便后续进行处理。

相机的主要技术性能指标如下:

最高拍摄速率: 200 000 帧/秒;

最小曝光时间: 1 μ s;

满画幅尺寸: 1 280 \times 800 像素;

图像深度: 12 位;

触发方式：触发点可控（前/后触发记录）；IBAT；软件触发；OCC 触发；硬件触发（BNC）；Burst 模式。

2.2 试验流程设置

利用图像测速方法进行弹速测量，在试验前的试验流程设置是后期弹速计算非常关键的环节。试验设置决定了能否高质量的拍摄到运动目标，对后期利用图像处理算法计算弹速的精确性影响很大。试验布置示意图如图 4 所示。轻气炮发射试验准备过程中，首先在靶箱位置布设一台高速摄像机，视场正对轻气炮靶箱视窗，再根据试验需求，对关键参数进行设置。

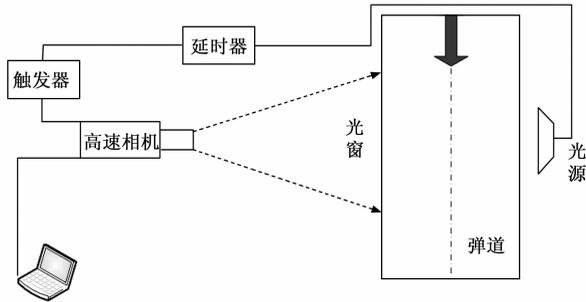


图 4 试验设置示意图

镜头焦距是指高速摄影机镜头的光学中学到成像平面的距离^[8]。试验前，根据试验现场情况对镜头焦距进行设置，焦距越小，图像画幅分辨率越低，从而导致有效图像尺寸精度越低；焦距越大，则所摄有效区域面积越小，最终导致不能拍摄弹丸的全部运动轨迹。在试验中调节镜头对焦的方法：利用设计好的标尺夹具将标尺放置在弹道线，手动调节焦距观察刻度尺上的刻度直至清晰为止，同时拍摄照片保存为后期基准，如图 5 所示。

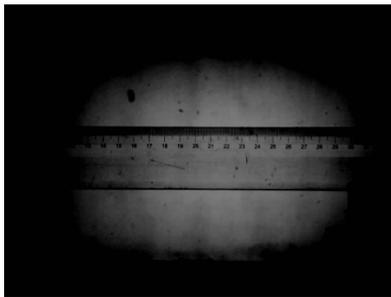


图 5 试验基准拍摄

高速摄影机的拍摄速率是重要的性能指标之一。试验中采用 Phantom V2512 的高速摄影相机的拍摄速率可达 20 万帧。拍摄速率高，图像像素低。拍摄速率太低则无法拍到弹丸运动过程。通过预估弹速和视图中可视距离测量可以选择合适的拍摄速率，以确保能够记录 2 帧以上的弹丸在弹道运动的过程。式 (3) 为帧数计算公式^[9]：

$$N = f \cdot \frac{L}{v_p} \quad (3)$$

式中， N 为弹道区间内有效帧数， f 为帧频， L 为视图中可视距离， v_p 为弹丸的速度。

在对超高速运动弹丸拍摄时，曝光时间设置是一项非常重要的参数，曝光时间长，弹丸会形成严重拖尾；曝光时间短，图像亮度低，需要配合光源使用。对相机光圈进行设置，此时应考虑超高速发射过程中形成的弹前激波造成的自发光现象，应将光圈调小，以免发生图像过饱和现象^[10]。

调整好以上参数后，调整相机的其它参数和触发形式。其它参数的设置主要包括、曝光时间、ROI 及延时控制^[11-13]。此时高速摄影机设置完成，应保持其所有参数不变至试验结束。根据试验需求在靶箱内放置靶目标，至此可以关闭靶箱盖，试验准备结束。

2.3 触发设置

高速摄影机拍摄过程中，通常因曝光时间小，导致图像亮度不足，导致目标和背景难以分辨。因此试验中会选择点亮光源为拍摄补光。利用高速摄影机记录光源点亮的全过程，并记录光源亮度足够的时间。在试验时选择利用激光遮断信号同时触发相机及光源，因为光源应考虑弹丸轨迹拍摄的时间在光源光线较好的时间内，则利用公式 (4) 设置延时 Δt ：

$$\Delta t = \Delta t_1 - \Delta t_2 - \Delta t_3 \quad (4)$$

式中，弹丸从光源触发点到运动至视场的时间差 Δt_1 （根据预估弹速计算得到），触发信号传输到延时器时间差 Δt_2 （测量得到），光源从触发时刻到亮度较好时间差 Δt_3 （测量得到）。

3 算法实现与结果分析

3.1 算法原理

基于模板匹配算法的意思即判断在一幅图像中是否存在特定已知的图像。模板匹配算法通常有以下几个步骤：1) 对原图（待搜索图）选择确认；2) 选择模板，以一幅与原图中某一图案有着相同尺寸和方向的小图像为模板；3) 计算，通过一定的算法在图中找出目标，确定其坐标位置。这种算法和一般图像处理方法一样，通常将原图像和模板图像转换为二维矩阵，将模板图在原图像上依照一定的方式依次滑动覆盖，每一次滑动覆盖都会将模板图与被覆盖的区域进行相关计算，每次计算都会得到一个不同的匹配结果。不同的模板匹配算法有不同的函数评价标准，根据匹配结果值来判断是否找到最为相似的区域，即匹配是否成功^[14-18]。

本文中利用高速摄影图像的信息对弹丸目标进行表征，通过这些特征对目标对象或目标所在局部区域建立数学模型，继而由匹配跟踪的方法来实现对目标的识别。该方法过程简单，不需要提取图像特征而直接匹配。由于弹丸在出炮管运动过程中旋转、尺度变化等变化较小，因此可以得到很好的效果。试验原理如图 3 所示，设 $f(x, y)$ 是原图（待搜索图）， $w(x, y)$ 是大小为 $m \times n$ 的弹丸模板图。模板匹配的目的是在原 $f(x, y)$ 中找到与模板图 w 最为相似的区域，在图 6 中的深色的区域表明找到了匹配值最大的待匹配的目标。

其中，模板与待搜索图的相关可表示为式 (5)^[19]：

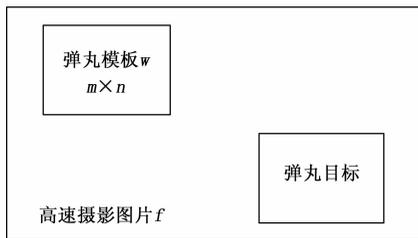


图 6 模板匹配原理图

$$c(x, y) = \sum_s \sum_t w(s, t) f(x + s, y + t) \quad (5)$$

互相关度用来度量目标模板与待搜索图子区域的相同性, 可表示为公式 (6):

$$r(x, y) = \frac{\sum_s \sum_t w(s, t) f(x + s, y + t)}{\left\{ \sum_s \sum_t [w(s, t)]^2 \sum_s \sum_t [f(x + s, y + t)]^2 \right\}^{1/2}} \quad (6)$$

$r(x, y)$ 越大, 意味着目标模板与待搜索图子区域越接近, $r(x, y)$ 越小则差异越大。

在试验室 57/10 二级轻气炮上开展两次发射试验, 弹丸形状为长杆弹丸, 质量 1.67 g, 采用激光系统和高速摄影机系统同时进行弹速测量。试验流程严格按照图像测速进行设置。高速摄影机的帧频选择 80 000 帧/秒, 即两幅图片时间间隔为 12.5 μs; 曝光时间为 1 μs, 图像尺寸为 512 × 384 像素。试验均拍摄到 4 帧以上弹丸在弹道上运动的清晰图像。选取两幅清晰的高速摄影图片为基础进行算法实现, 选取的高速摄影图片如图 7 所示。

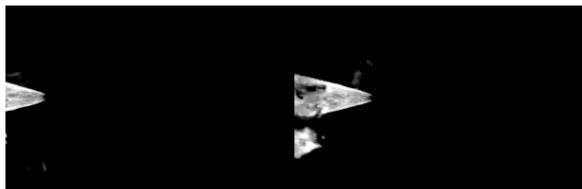


图 7 高速摄影图片

算法实现分为两个步骤, 模板匹配以及速度计算。首先加载高速摄影图像作为带搜索图, 将带搜索图二值化处理, 使图像数据量为减小, 同时更清晰凸显出目标的轮廓。以其为基础提取弹丸目标作为模板, 在待搜索高速摄影图像中选取弹丸目标作为模板的好处是考虑高速发射的环境因素对目标的影响, 更有利于后续模板匹配。将待搜索图和弹丸模板进行相关匹配, 以相关系数最大的为最终匹配目标, 图 8, 图 9 为两次试验的匹配结果。通过模板得到目标所在两幅图的坐标位置 x_1 和 x_2 。根据试验前期设立基准得到单位长度与像素之间的比例尺 a , m/pix, 从而从图像中目标的位置映射至弹丸在弹道的实际位置。利用公式 (7) 得到弹丸速度:

$$v = (x_2 - x_1)a/\Delta t \quad (7)$$

3.2 结果分析

利用本文算法, 经过两次试验得到的图像测速结果与



(a) 原始图像



(b) 模板图像



(c) 匹配图像

图 8 试验 1 算法实现



(a) 原始图像



(b) 模板图像



(c) 匹配图像

图 9 试验 2 算法实现

激光测速得到的结果相比对, 见表 1, 相对误差均小于 0.05 km/s, 吻合良好, 证明了该算法的准确性和可靠性。

表 1 试验结果对比

试验编号	测试速度(km/s)		
	激光测速速度	高速摄影速度	相对速度差
试验 1	2.53	2.51	0.02
试验 2	3.12	3.09	0.03

4 结束语

本文从系统组成、试验设置、算法实现等多个方面分析讨论了高速摄影技术在二级轻气炮弹丸测速中的使用, 详细阐述了试验前流程设置及注意事项, 参试人员须通过预估弹速和实测距离得到高速摄影机帧频, 同时通过基准拍摄确定焦距等其他参数。对于光源设置应保证弹丸在弹道运动过程在光源亮度较好的时间段。试验流程的设置决定了测试结果是否精确可靠,

经过实验证明, 利用高速摄影图像及图像匹配算法可以快速准确的得到高速弹丸运动速度, 与激光测速系统测得结果相对比, 吻合良好, 进一步验证了高速摄影测速的可行性。同时高速摄影测速在超高速发射时能够弥补激光测速受激波影响测速结果干扰较大的不足, 也能够满足测量非金属弹丸速度的要求。对于间接测量速度方式, 主要误差源自位置的不确定和时间的不确定^[20], 对于高速摄影来说, 对相机拍摄位置进行精细控制调节, 标尺的设立都可以尽可能减小位置不确定度。由于高速摄影曝光时间的限制, 速度越快导致高速摄影图片中弹丸拖尾现象越严重, 给目标匹配带来一定困难, 这也影响测量因素的主要原因之一。下一步, 可以重点解决高速摄影图片质量不高的弹丸定位问题。

参考文献:

- [1] 王金贵. 气体炮原理及技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1997: 161-163.
- [2] 李进, 李运良, 钱秉文, 等. 用于三级轻气炮弹速测量的改进型激光测速系统 [J]. 兵工学报, 2017, 38 (s1): 146-149.
- [3] 唐孝容, 高宁, 郝建中, 等. 高速摄影技术在常规战斗部实验中的应用 [J]. 弹箭与制导学报, 2010, 31 (3): 105-106.
- [4] 汪斌, 张光升, 高宁, 等. 高速摄影技术在水下爆炸气泡脉动研究中的应用 [J]. 含能材料, 2010, 28 (1): 102-106.
- [5] 王宝元, 钞红晓, 邵小军, 等. 弹丸出炮口时间测试方法研究 [J]. 兵工学报, 2012, 33 (6): 736-740.
- [6] 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.
- [7] 王翔, 王为, 傅秋卫. 用于一级轻气炮的弹速激光测量系

(上接第 131 页)

参考文献:

- [1] 姜家纬. 地(舰)空导弹测试设备设计思想与原则 [J]. 现代防御技术, 2006, 34 (5): 45-53.
- [2] 熊威. 导弹测试技术智能化发展展望 [J]. 现代防御技术, 2019, 37 (10): 224-226.
- [3] 邵云峰, 彭涛. 工业智能化背景下导弹测试技术的发展思考 [J]. 现代防御技术, 2017 (4): 157-161.
- [4] 蒋汉诚, 邓可. 空空导弹工作原理系列丛书(第 9 册)空空导弹地面设备设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [5] 张冬青, 李东兵, 王蕾. 导弹智能化技术初探 [J]. 飞航导弹, 2008 (8): 21-25.
- [6] 张志峰. 导弹模拟器通用开发平台研制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 10-25.
- [7] 谢丰波. 基于 PCIE 物理层 IP 核的串行 RapidIO 实现 [D]. 长沙: 国防科学技术大学研究生院, 2013: 4-15.
- [8] TEXAS Instruments. TMS320C645x Serial Rapid IO (SRIO) User's Guide [EB/OL]. [2006-03]. <http://www.ti.com>, [2021-09-03].
- [9] ISO/IEC DIS 18372. RapidIO Interconnect Specification Rev 2.1 [S].
- [10] 张娟, 苏海冰, 吴钦章. 基于多处理器的高速 RapidIO

- 统 [J]. 高压物理学报, 2003, 17 (1): 75-80.
- [8] 焦志刚, 杜宁, 范龙刚, 等. 弹丸脱靶量及速度测量的高速摄影试验 [J]. 火力与指挥控制, 2017, 42 (11): 191-194.
- [9] 刘泽庆, 张玉荣, 赵建新. 基于数字摄影测量的靶场高速摄影测速方法 [J]. 弹道学报, 2015, 27 (4): 47-51.
- [10] 刘华宁, 郑宇, 李文彬. 基于高速摄影技术的速度测量方法 [J]. 兵工自动化, 2014, 33 (11): 71-74.
- [11] 徐锐, 杨国来, 陈强, 等. 高速摄影技术在火炮运动学分析中的测试误差研究 [J]. 南京理工大学学报, 2015, 39 (5): 523-530.
- [12] 盛德兵, 周志卫, 张建. 高速摄影运动分析系统测量误差研究 [J]. 科技视界, 2013 (1): 57.
- [13] 田原嫫, 黄合成, 谭庆昌, 等. 摄像机镜头畸变的研究 [J]. 计算机工程与应用, 2009, 45 (26): 49-52.
- [14] 拉斐尔·C·冈萨雷斯, 理查德·E·伍兹. 数字图像处理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2017: 562-565.
- [15] SCHWEITZER H, BELL J W, WU F. Very fast template matching [J]. Computer Vision, 2002, 2353: 2224-2230.
- [16] 王卫辉, 侯宽耀, 王云峰. 图像识别技术在光电自动定向系统中的应用 [J]. 计算机测量与控制, 2005, 13 (9): 985-987.
- [17] 侯一凡, 唐永鹤, 邢帅. 基于 FPGA 的实时模板匹配系统设计 [J]. 信息工程大学学报, 2019, 20 (1): 43-46.
- [18] 欧克寅, 傅建平, 张培林. 基于图像匹配技术的火炮反后坐装置动态测试方法 [J]. 火炮发射与控制学报, 2008, 4: 111-114.
- [19] 闫增成, 宋路. 基于模板匹配与线性预测的目标跟踪算法 [J]. 吉林大学学报(信息科版), 2015, 33 (5): 544-549.
- [20] 牛颖蓓. 电磁轨道炮速度测量方法研究 [J]. 火炮发射与控制学报, 2012 (4): 87-90.
- [11] 唐李红. 5Gbps 高速串行接口电路的研究与设计 [D]. 长沙: 国防科学技术大学研究生院, 2009: 2-25.
- [12] 顾彬彬, 彭涛, 邵云峰, 等. 智能适配技术的导弹通用测试设备优化设计 [J]. 现代防御技术, 2016, 44 (3): 171-178.
- [13] 见其拓. 某导弹便携式通用测试系统研制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014: 2-23.
- [14] 舒志兴. RapidIO 高速接口物理编码子层的设计与验证 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015: 2-18.
- [15] ALTHAM J M, STABLER J, SPOFFORD B, et al. ATE and TPS management [C] //AUTOTESTCON, 2011 IEEE, 2011: 1-7.
- [16] 郑士汉. 导弹综合保障系统研制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011: 3-19.
- [17] 杜里, 张其善. 电子装备自动测试系统发展综述 [J]. 计算机测量与控制, 2009 (6): 1019-1021.
- [18] 李静. 一种嵌入式高速通信系统设计与实现 [J]. 电子设计工程, 2021, 29 (15): 120-123.
- [19] 于进勇, 吴晓男, 卢建华. 自动测试系统通用适配器研究 [J]. 仪表技术, 2012 (2): 5-15.
- [20] 胡林, 莫翠琼, 韩英永. 自动测试系统通用接口适配器设计 [J]. 四川兵工学报, 2013, 34 (3): 86-88.