

基于单目激光数字摄影系统的高速目标测试算法优化

姚强强*, 贾养育, 武江鹏, 闫振纲, 乔明军, 贺翮

西安现代控制技术研究所, 陕西 西安 710065

摘要 为了提高超高速物体运动速度的测量精度, 在分析高速摄影系统测试过程的基础上, 加入校正量 δ 对传统计算模型进行优化。结合优化前、后的两种模型, 在不同速度区间、校正量 δ 、相机和反射屏距离 h_z 等条件下, 对运动物体的理论弹道和实际弹道的速度进行仿真。分析可知所提模型对于高速、超高速物体的运动速度模型具有很好的修正效果, 且对于运动速度越快的模型修正效果越好; 并对距离与测量误差间的关系进行研究, 得到当 h_z 值大于 30 m 时, 相对偏差小于 1%。外场测试结果与建立的计算模型和仿真模型均相符。

关键词 几何光学; 速度测量学; 超高速摄影; 弹道线; 图像处理

中图分类号 TJ06

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1708001

Optimization of High Speed Target Test Algorithm Based on Monocular Laser Digital Photography System

Yao Qiangqiang*, Jia Yangyu, Wu Jiangpeng, Yan Zhengang, Qiao Mingjun, He Xuan

Xi'an Modern Control Technology Research Institute, Xi'an, Shaanxi 710065, China

Abstract To improve the measurement accuracy of objects moving at ultrahigh speeds, a correction amount δ is added to optimize the traditional calculation model based on analyzing the test process of a high speed photography system. Combining the two models before and after optimization, the theoretical and actual trajectory velocities of moving objects are simulated under different speed intervals, correction amount δ , distance between camera reflection screen h_z , and other important parameters. The analysis shows that the proposed model exhibits accurately corrected movements of high speed and ultrahigh speed objects, and the correction effect improved with the increasing model speed. Analyzing the relationship between the distance and the measurement error reveals that when the h_z value is greater than 30 m, the relative deviation is less than 1%. The field test results are consistent with the proposed calculation model and simulation model.

Key words geometric optics; velocimetry; ultrahigh speed photography; ballistic line; image processing

OCIS codes 080.1753; 100.2000; 110.1758

1 引 言

近年来, 数字高速相机借助于自身布设简单、与目标非接触等独特优势, 在高速运动目标的测试方面发挥着重要作用。但运动目标以数千米每秒的超高速运行, 其在燃烧和爆炸等瞬态过程中, 由于运动速度过快会造成拖影严重, 若压缩曝光时间会出现图像亮度过低, 难以识别^[1-2]。在烟雾和火光等复杂的条件下, 对于高速运动物体的瞬态速度、尺寸和姿态角等参数的测量, 不足之处就暴露的很明显。在此条件下, 激光数字高速摄影系统应运而生, 其借助激光的高亮度和高透过率在压缩曝光时间至微秒级

的同时, 具有足够的亮度满足拍摄需求, 这是目前抗火光能力最强的瞬态摄影系统^[3-4]。

随着测试需求的广泛化, 目标物体的速度从百米每秒向千米每秒, 甚至向万米每秒递增, 这对高速摄影系统提出了更高的要求。使用双目激光数字成像系统测试超高速目标的过程中, 出现一些难以解决的问题, 如双目同步的精度不够, 引起目标测量偏差太大; 狭小空间内, 设备难以布设; 瞬态过程中进行拍摄, 匹配困难等^[5-8]。单目激光数字高速摄影系统以其独有的优势重回人们视野。

本文使用单目激光数字高速摄影系统, 首先对计算过程进行分析, 引入校正量 δ 来修正计算模型,

收稿日期: 2020-03-18; 修回日期: 2020-05-09; 录用日期: 2020-05-29

* E-mail: yaoqiangqiang123@163.com

在不同的速度区间、校正量 δ 、相机和反射屏距离 h_z 等条件下,对运动物体的理论弹道和实际弹道的速度进行仿真;并且对距离与误差之间的关系进行研究,分析最佳距离;最后通过实验对模型进行验证。建立的模型对高速、超高速运动物体的精确测量有一定的理论指导作用;所提的测试方法对产品的前期设计,及后期的运动修正均有指导作用。

2 理论计算

2.1 原计算模型

目前,使用单目激光高速摄影系统计算目标的运动速度常采用像素点法^[9],计算模型如图 1 所示。假设在 T_0 时刻图像中运动物体的位置为 S_0, T_1

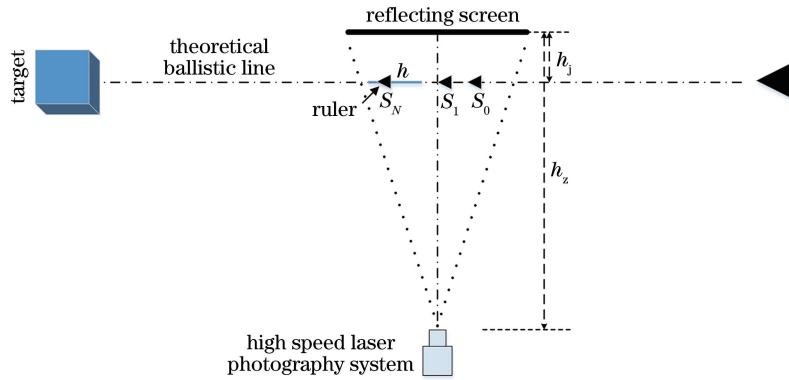


图 1 原计算模型

Fig. 1 Original computational model

2.2 修正模型

事实上,实际弹道线的弹道与理论弹道线不一致,因此计算结果存在偏差。对于低速运动目标,其偏差较小,但对于数千米每秒或者更高速度的运动目标,其偏差巨大,这对产品的模型修正和瞬时状态的调整均有不可忽视的影响。

在原计算模型的基础上重新调整计算模型,修正后的计算模型如图 2 所示。假设在 T_0 时刻图像中运动物体的位置为 L_0, T_1 时刻图像中运动物体的位置为 L_1 ,实际弹道线与理论弹道线的距离(校正量)为 δ 。调整在反射屏的位置放置已知长度为 h_r 的标尺,借助于标定图像计算 L_b, L_0 与 L_1 之间的像素个数为 m ,则运动物体在反射屏上投影的速度为

$$V_y = \frac{m \times L_b}{T_1 - T_0} \quad (3)$$

对 N 帧图像中物体的运动速度 V_1, V_2, \dots, V_N 取平均值,可获得投影的平均速度,表达式为

$$\bar{V}_{y,N} = \frac{V_1 + V_2 + \dots + V_N}{N - 1} \quad (4)$$

时刻图像中运动物体的位置为 S_1, T_N 时刻图像中运动物体的位置为 S_N 。在理论弹道线的位置放置已知长度为 h 的标尺,借助标定图像计算测试图像中与每个像素对应的目标长度 L_b, S_0 与 S_1 之间的像素个数为 n ,反射屏与相机的距离为 h_z ,理论弹道线与反射屏的距离为 h_j ,则运动物体的飞行速度为

$$V_p = \frac{n \times L_b}{T_1 - T_0} \quad (1)$$

对 N 帧图像中物体的运动速度 V_1, V_2, \dots, V_N 取平均值,可获得运动目标的平均速度,表达式为

$$\bar{V}_{p,N} = \frac{V_1 + V_2 + \dots + V_N}{N - 1} \quad (2)$$

原计算模型中,理论弹道线处运动物体的速度为

$$V_L = \frac{(h_z - h_j) \times V_y}{h_z} = \frac{m \times L_b \times (h_z - h_j)}{h_z \times (T_1 - T_0)} \quad (5)$$

在修正模型中加入校正量 δ ,真实弹道线处运动物体的速度为

$$V_s = \frac{m \times L_b \times (h_z - h_j + \delta)}{h_z \times (T_1 - T_0)} \quad (6)$$

假设理论弹道线的函数为 $f_L(x, y, t)$,实际弹道线的函数为 $f_s(x, y, t)$,将目标物体运动的初始点作为坐标原点,如图 3 所示,其中 h_x 为理论弹道线与实际单导线的距离。在特定时刻 t_i 的理论弹道线 L_i 点的坐标 (x_L, y_L) 为 $f_L(x, y, t_i)$ 的解,实际弹道线 S_i 点的坐标 (x_s, y_s) 为 $f_s(x, y, t_i)$ 的解。则特定时刻 t_i 的校正量可表示为

$$\delta_{t_i} = |f_s - f_L| = \sqrt{(x_s - x_L)^2 + (y_s - y_L)^2} \quad (7)$$

将(7)式代入(6)式,可以得到

$$V_s = \frac{m \times L_b \times [h_z - h_j + \sqrt{(x_s - x_L)^2 + (y_s - y_L)^2}]}{h_z \times (T_1 - T_0)} \quad (8)$$

对 N 帧图像中物体的运动速度 V_1, V_2, \dots, V_N 取平均值, 可获得运动目标的平均速度, 表达式为

$$\bar{V}_{p,N} = \frac{V_1 + V_2 + \dots + V_N}{N - 1} \quad (9)$$

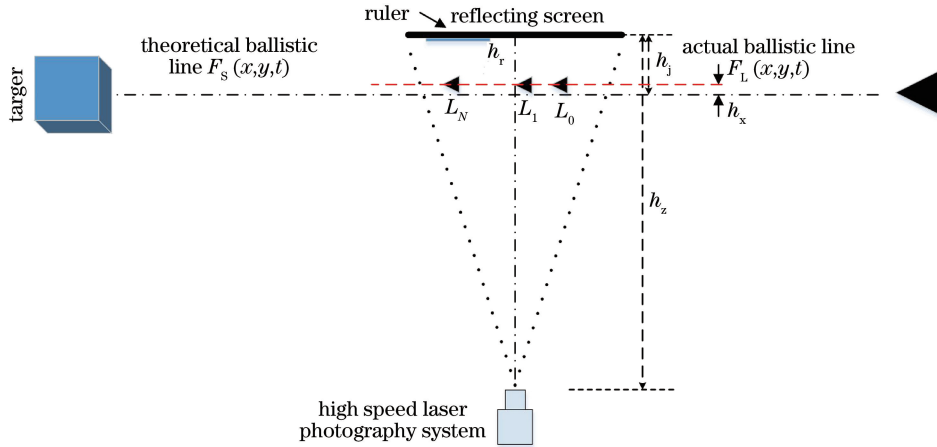


图 2 修正后的计算模型

Fig. 2 Revised calculation model

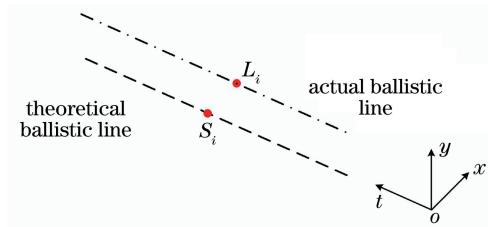


图 3 弹道线的偏差示意图

Fig. 3 Schematic of trajectory line deviation

3 仿真分析

在分析高速运动物体的实际飞行过程的基础上, 对弹道线的修正模型进行仿真分析。仿真条件: 反射屏与相机的距离 h_z 为 10.45 m, 理论弹道线与反射屏的距离 h_j 为 1.45 m, 反射屏上放置的标尺长度 h_r 为 0.3 m, 与每个像素对应的目标长度 L_b 为 0.0012 m。

3.1 相同校正量 δ , 理论弹道速度 V_L 与修正弹道速度 V_s 在不同帧频下的关系

当 $\delta = 0.3$ m 时, 高速飞行物体在不同帧频下 V_L 和 V_s 的变化情况, 如图 4 所示。从图 4 可以看到, 当 $N = 125$ frame 时, $V_L = 1291.87$ m/s, $V_s = 1334.94$ m/s, 两者差值为 43.07 m/s; 当 $N = 300$ frame 时, $V_L = 3100.48$ m/s, $V_s = 3203.83$ m/s, 两者差值为 103.35 m/s; 当 $N = 500$ frame 时, $V_L = 5167.46$ m/s, $V_s = 5339.71$ m/s, 两者差值为 172.25 m/s。分析可知

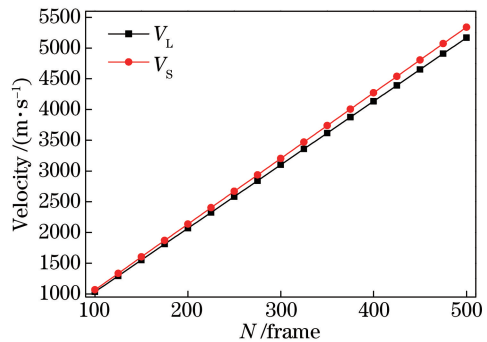


图 4 高速飞行物体在不同帧频下 V_L 和 V_s 的变化情况

Fig. 4 Changes of V_L and V_s of high speed flying objects at different frames

随着帧频 N 的增加, V_L 和 V_s 值都随之增加, 但两者差值也随之增加。

3.2 相同理论弹道速度 V_L , 不同校正量 δ , 修正弹道速度 V_s 的变化情况

V_L 值分别为 1033.49, 1291.87, 1705.26, 2066.99 m/s, $0.1 \text{ m} \leq \delta \leq 1.2$ m, 对 V_s 进行仿真, 仿真结果如图 5 所示。从图 5 可以看到, 当 $V_L = 1033.49$ m/s 时, 随着 δ 值的增加, V_s 值从 1044.98 m/s 增大到 1171.29 m/s; 当 $V_L = 1291.87$ m/s 时, 随着 δ 值的增加, V_s 值从 1306.22 m/s 增大到 1464.11 m/s; 当 $V_L = 1705.26$ m/s 时, 随着 δ 值的增加, V_s 值从 1724.21 m/s 增大到 1932.63 m/s; 当 $V_L =$

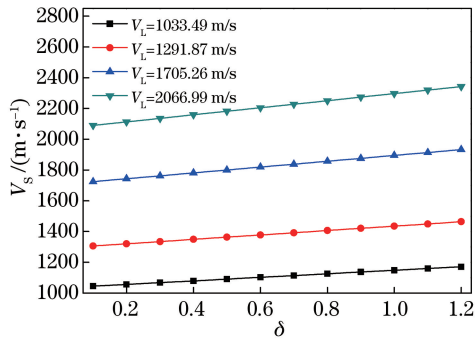


图 5 在不同 V_L 值的情况下, V_s 与 δ 的变化关系曲线
Fig. 5 Variation curves of V_s and δ under different values of V_L

2066.99 m/s 时,随着 δ 值的增加, V_s 值从 2089.95 m/s 增大到 2342.58 m/s。分析可知在相同 V_L 值的情况下,随着 δ 值的增大, V_s 值也逐渐增大,且两者之间的校正量增大;在相同 δ 值的情况下,随着 V_s 的增大, V_L 值也逐渐增大,且两者之间的校正量逐步增大。

3.3 相同理论弹道速度 V_L 、不同校正量 δ 和反射屏与相机的距离 h_z ,修正弹道速度 V_s 的变化情况

δ 值分别为 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 m, V_L 为固定值, $10\text{ m} \leq h_z \leq 50\text{ m}$, 对 V_s 进行仿真, 仿真结果如图 6 所示。从图 6 可以看到, 当 $\delta=0.3\text{ m}$ 时, 随着 h_z 值的增加, V_s 值从 1752.30 m/s 增加到 1934.46 m/s; 当 $\delta=0.6\text{ m}$ 时, 随着 h_z 值的增加, V_s 值从 1811.70 m/s 增加到 1946.34 m/s; 当 $\delta=0.9\text{ m}$ 时, 随着 h_z 值的增加, V_s 从 1871.10 m/s 增加到 1958.22 m/s; 当 $\delta=1.2\text{ m}$ 时, 随着 h_z 值的增加, V_s 从 1930.50 m/s 增加到 1970.10 m/s。分析可知在相同 δ 值的情况下, 随着 h_z 值的增加, V_s 逐步增加且增加趋势变缓, 且与 V_L 之间的差值逐渐

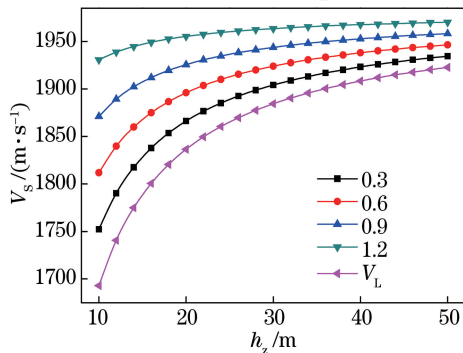


图 6 在不同 V_L 值的情况下, V_s 与 h_z 的变化关系曲线
Fig. 6 Variation curves of V_s and h_z under different values of V_L

减小; h_z 值大于 30 m 后, 速度差值趋于稳定。

3.4 相同校正量 δ 、不同理论弹道速度 V_L 和反射屏与相机的距离 h_z , V_L 与修正弹道速度 V_s 的关系

当 δ 取 0.3 m 时, h_z 与 V_L 、 V_s 的关系曲线如图 7 所示。从图 7 可以看到, 对于运动速度为 1000 m/s 运动速度段间的飞行物体, 随着 h_z 值的增加, V_L 与 V_s 的差值从 36.0 m/s 下降到 7.2 m/s; 对于运动速度为 2500 m/s 运动速度段间的飞行物体, 随着 h_z 值的增加, V_L 与 V_s 的差值从 81.0 m/s 下降到 16.2 m/s; 对于运动速度为 4000 m/s 运动速度段间的飞行物体, 随着 h_z 值的增加, V_L 与 V_s 的差值从 135.0 m/s 下降到 27.0 m/s; 对于运动速度为 5500 m/s 运动速度段间的飞行物体, 随着 h_z 值的增加, V_L 与 V_s 的差值从 180.0 m/s 下降到 36.0 m/s; 不同速度段的相对偏差均从 3.51% 下降到 0.62%, 当 h_z 值大于 30 m 时, 相对偏差小于 1%。分析可知对于不同速度的飞行物体, 随着 h_z 值的增加, V_L 与 V_s 的差值逐渐减少, 当 h_z 值大于 30 m 时, 相对偏差小于 1%。

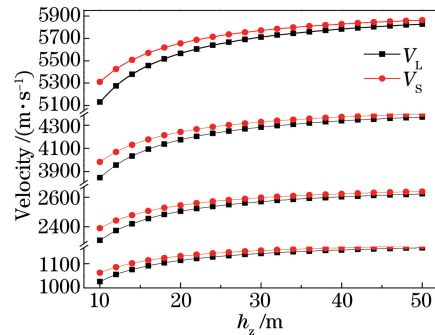


图 7 在相同 δ 的情况下, V_L 和 V_s 与 h_z 的关系曲线
Fig. 7 Variation curves of V_L , V_s and h_z with same δ

4 实验设计

实验将运动速度约为 1700 m/s 的飞行物体作为测试对象。整个实验系统包括启动靶、网靶 1、网靶 2 和激光数字高速摄影系统, 其中高速摄影系统包括相机、脉冲激光光源、同步控制器、计算机、反射屏及相应防护设备。在弹道线的垂直方向上布设高速摄影系统, 弹道线上依次布设启动靶、网靶 1 和网靶 2, 在网靶 1 和网靶 2 之间布设高速摄影系统反射屏, 具体实验现场的布设情况如图 8 所示。

布场阶段, 完成相机标定、视场调整、现场设备位置的标定、设备间联调及各个设备防护工作等。准备阶段, 首先对现场设备进行位置标定, 具体操

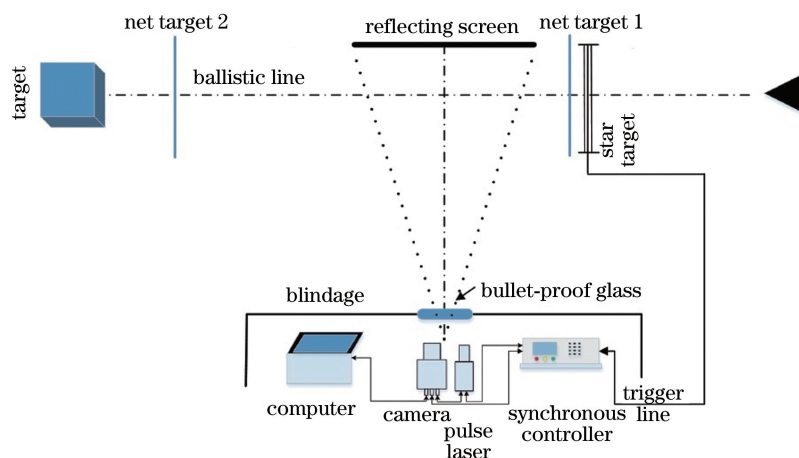


图 8 实验现场布置图

Fig. 8 Experimental site layout

作:首先在发射位使用激光指示器照射靶标的中心十字,在启动靶、网靶 1 和网靶 2 上进行理论弹道线标记;测量启动靶到网靶 1 的距离,网靶 1 到网靶 2 的距离;测量相机到反射屏的距离、反射屏到理论弹道线的距离,求解理论弹道线的函数为 $f_L(x, y, t)$,

绘制理论弹道线的轨迹。实验结束后,测量网靶 1 和网靶 2 上的弹孔位置,利用高速摄影系统拍摄物体在空中的飞行过程,求解实际弹道线的函数为 $f_S(x, y, t)$,重绘实际弹道线的轨迹。对多次实验结果进行统计,结果如表 1 所示。

表 1 实验结果统计

Table 1 Statistics of experimental results

No.	h_z/m	δ /m	$V_L/(m \cdot s^{-1})$	$V_S/(m \cdot s^{-1})$	No.	h_z/m	δ /m	$V_L/(m \cdot s^{-1})$	$V_S/(m \cdot s^{-1})$
1	21.00	0.17	1761.50	1777.03	9	13.17	0.17	1865.70	1892.29
2	20.52	0.13	1727.53	1739.08	10	12.22	0.41	1889.81	1961.82
3	20.52	0.34	1689.44	1719.49	11	15.31	0.37	1899.74	1952.51
4	17.77	0.03	1814.89	1818.29	12	16.09	0.37	1764.70	1811.27
5	17.26	0.17	1781.17	1800.84	13	16.16	0.45	1847.88	1907.24
6	12.26	0.20	1733.65	1767.44	14	15.52	0.11	1828.52	1842.40
7	13.59	0.07	1753.98	1764.19	15	15.30	0.50	1754.80	1818.52
8	13.50	0.44	1859.01	1929.16	16	15.30	0.12	1603.14	1616.73

对每次实验结果进行统计、弹道轨迹的重建、目标实际速度的测量等,统计每次实验的 V_L, V_S, h_z 以及 δ ,结果如图 9 所示。从图 9 可以看到,在相同的实验次数下,不同 δ 值的情况下, V_L 与 V_S 的偏差量不同; δ 值越大,两者的偏差量越大; δ 值越小,两者的偏差量越小,这种变化趋势与第 3 节仿真结果相吻合。同时当固定 δ 和 h_z 值时,实验结果与仿真数据相吻合。

结合理论和仿真结果分析可知: δ 与实际弹道轨迹和理论弹道轨迹的偏离量有关且呈正相关,例如当实际弹道轨迹和理论弹道轨迹的偏差量较大时,需要较大的 δ 值;当实际弹道轨迹和理论弹道轨迹的偏差量较小时,则需要较小的 δ 值。对于 δ 值的选取以实验中测得的偏差量作为参考值,同时可以进行经验性调整。

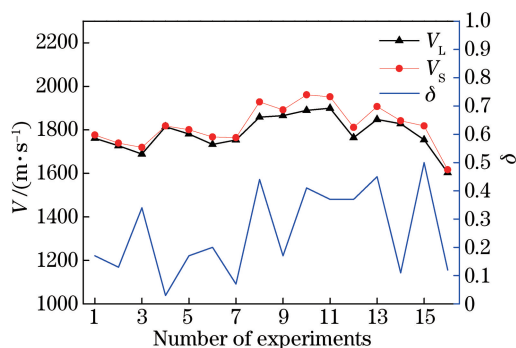


图 9 多次实验结果数据分析图

Fig. 9 Data analysis chart of multiple test results

5 结 论

在系统地分析高速摄影系统测试过程中的结果与真值存在偏差的基础上,加入 δ 对传统计算模型

进行修正;结合不同速度区间、校正量和靶距的条件仿真模型,对距离与误差关系进行深入研究,提出并分析最佳距离;最后结合外场实验对计算模型和仿真模型进行验证。实验结果与计算结果和仿真结果均相符。采用前后网靶的形式重建弹道轨迹,验证相关理论模型和仿真模型,但对于实际工程可能遇到狭小和密闭等复杂的测试环境,可以通过添加辅助相机等其他相关测试设备来进行。

参 考 文 献

- [1] Sun W, He X Y, Zheng X. Three-dimensional displacement measurement based on single CCD camera[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 29(9): 1723-1729.
孙伟, 何小元, 郑翔. 基于单摄像机的三维位移测试方法[J]. 光学学报, 2008, 29(9): 1723-1729.
- [2] Zong S G, Wang J G, Wang H H. Image measure of characters of cavitation bubble by optical breakdown [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(8): 2197-2202.
宗思光, 王江安, 王辉华. 光击穿液体空泡特性的高速图像测量[J]. 光学学报, 2009, 29(8): 2197-2202.
- [3] Yang L Y, Xu P, Gao X T, et al. Digital laser high-speed photography system and its application in photomechanical tests with blast loading [J]. Science & Technology Review, 2014, 32(32): 17-21.
杨立云, 许鹏, 高祥涛, 等. 数字激光高速摄影系统及其在爆炸光测力学实验中的应用[J]. 科技导报, 2014, 32(32): 17-21.
- [4] Wang R, Sun W P, Li H B. Application of laser high-speed photography based on area-array CCD to ballistic test [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2009, 29(5): 197-199.
王瑞, 孙卫平, 李红兵. 基于面阵 CCD 的激光高速摄影技术在弹道测试中的应用[J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29(5): 197-199.
- [5] Liu Z Q, Zhang Y R, Zhao J X, et al. High-speed photography velocity measurement in range based on digital photogrammetry [J]. Journal of Ballistics, 2015, 27(4): 47-51.
刘泽庆, 张玉荣, 赵建新, 等. 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.
- [6] Chen J, Su J J, Liu J, et al. Fragment the space coordinate testing system based on active lighting double camera intersection method [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(7): 173-176, 187.
陈君, 苏健军, 刘吉, 等. 主动照明双相机交汇法破片空间坐标测试系统研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(7): 173-176, 187.
- [7] Wang B Y, Wang Z, Qi Y L, et al. Research on pre-chamber jet ignition based on rapid compression machine[J]. Transactions of Csice, 2018, 36(4): 297-304.
王博远, 王志, 齐运亮, 等. 基于快速压缩机的预燃室式射流点火试验[J]. 内燃机学报, 2018, 36(4): 297-304.
- [8] Wang H S, Li J. Design of laser target control system based on frame synchronization technology [J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2016(16): 104-105.
王宏松, 李杰. 基于帧同步技术的激光打靶控制系统设计[J]. 电子技术与软件工程, 2016(16): 104-105.
- [9] Liu H N, Zheng Y, Li W B, et al. Velocity measurement method of projectiles based on high-speed photography technology[J]. Ordnance Industry Automation, 2014, 33(11): 71-74.
刘华宁, 郑宇, 李文彬, 等. 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.