

小型弹载连续变焦电视摄像机

张博 周宇 胡丹 常伟军 杨子建 于跃 张智

Miniature missile-borne continuous zoom television camera

ZHANG Bo, ZHOU Yu, HU Dan, CHANG Weijun, YANG Zijian, YU Yue, ZHANG Zhi

引用本文:

张博, 周宇, 胡丹, 等. 小型弹载连续变焦电视摄像机[J]. 应用光学, 2025, 46(5): 996–1002. DOI: 10.5768/JAO202546.0501006

ZHANG Bo, ZHOU Yu, HU Dan, et al. Miniature missile-borne continuous zoom television camera[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(5): 996–1002. DOI: 10.5768/JAO202546.0501006

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0501006>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

潜望镜连续变焦光学系统设计

Design of continuous zoom optical system for periscope

应用光学. 2018, 39(2): 192–195 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0201006>

高变倍比中波制冷型连续变焦光学系统设计

Design of cooled MWIR continuous zooming optical system with high zoom ratio

应用光学. 2019, 40(6): 998–1003 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0601011>

可见光电视摄像机整机MTF测量装置及方法

Measurement device and method of MTF for visible TV camera

应用光学. 2020, 41(1): 134–139 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0103001>

紧凑型大变倍比中波红外连续变焦光学系统设计

Compact MWIR continuous zoom optical system with large zoom range

应用光学. 2019, 40(1): 33–38 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0101006>

车载综合观瞄系统的设计与实现

Design and implementation of vehicle-borne integrated sighting system

应用光学. 2021, 42(3): 383–391 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0301002>

基于摄像机的多投影屏幕激光笔跟随演示方法

Demonstration method of laser pointer for multiple projection-screens based on camera

应用光学. 2017, 38(1): 126–130 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0107002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 05-0996-07

引用格式: 张博, 周宇, 胡丹, 等. 小型弹载连续变焦电视摄像机[J]. 应用光学, 2025, 46(5): 996-1002.

ZHANG Bo, ZHOU Yu, HU Dan, et al. Miniature missile-borne continuous zoom television camera[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(5): 996-1002.



在线阅读

小型弹载连续变焦电视摄像机

张博¹, 周宇², 胡丹³, 常伟军¹, 杨子建¹, 于跃¹, 张智¹

(1. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065; 2. 陆军试验训练基地一区, 广东 东莞 523879;

3. 军事科学院战争研究院, 北京 100091)

摘要: 针对小型巡飞弹载平台探测与识别要求, 研制了一款小型连续变焦电视摄像机, 使用CODE V对5倍连续变焦光学系统进行设计与优化, 从多个维度对其成像性能进行评价, 仿真计算其探测识别距离, 并通过试验加以验证。设计的样机实物质量290 g, 对其开展了冲击振动试验。试验结果表明: 经历100 g、8 ms半正弦波冲击后, 弹载小型连续变焦电视摄像机全程光轴一致性优于0.15 mrad。

关键词: 连续变焦; 电视摄像机; 冲击; 光轴一致性

中图分类号: TN202

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0501006

Miniature missile-borne continuous zoom television camera

ZHANG Bo¹, ZHOU Yu², HU Dan³, CHANG Weijun¹, YANG Zijian¹, YU Yue¹, ZHANG Zhi¹

(1. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China; 2. Zone 1 of Army Test and Training Base, Dongguan 523879, China; 3. War Research Institute, Academy of Military Sciences, Beijing 100091, China)

Abstract: A miniature continuous zoom TV camera was developed to meet the detection and recognition requirements of small cruise-mounted platforms. The 5× continuous zoom optical system was designed and optimized by using CODE V. Its imaging performance was evaluated from multiple dimensions, and its detection and recognition distance was simulated and verified by experiments. The physical weight of the prototype was 290 g, and the impact vibration test was carried out on it. The test results show that, after 100 g and 8 ms half-sine wave impact, the whole optical axis consistency of miniature missile-borne continuous zoom TV camera is better than 0.15 mrad.

Key words: continuous zoom; TV camera; impact; optical axis consistency

引言

巡飞武器系统集成了无人机与炮弹、导弹的先进性能, 能长时间在预定区域上空巡飞, 并能根据需要快速完成目标锁定、攻击和评估, 可有效提高火力打击速度和效能。随着战争信息化趋势的发展, 精确制导武器的使用量不断加大, 利用小型化、低成本精确制导武器替代部分较大型、高价值

精确制导武器已经成为一种发展趋势^[1-4]。作为巡飞弹的“眼睛”, 适应各类巡飞弹或者侦察无人机的光电产品至关重要。小型巡飞弹导引头若要实现远距离的探测、识别, 则需要解决远距离探测与小体积、小质量之间存在的冲突, 以及强冲击条件下光轴稳定性与一致性的问题^[5-7], 因此, 需要突破传统设计, 实现小型化与良好的光轴一致性^[8], 以

收稿日期: 2024-04-26; 修回日期: 2024-08-26

基金项目: 国防科技创新特区项目

第一作者: 张博, E-mail: 648367537@qq.com

通信作者: 胡丹, E-mail: 1197746859@qq.com

支撑技术发展。

1 指标要求

可见光电视由连续变焦光学镜头、互补金属氧化物半导体(CMOS)组件及通信单元组成。外界景物经光学镜头后在 CMOS 靶面成像, 通信单元接收系统变焦指令, 启动光学镜头中的电机组, 通过齿轮驱动曲线套筒带动前固定组、变倍组、补偿组、后固定组按光学要求的规律运动, 从而改变光学系统焦距, 实现对目标大视场观察及小视场识别。具体技术指标要求如下:

1) 作用距离

对 4 m×6 m 目标, 10 km 能见度条件下, 探测距离≥4 km, 识别距离≥3 km。

2) 视场

视场在 4.74°×2.67°~24.9°×14.16°范围内连续可变。

3) 相对孔径

$D/f^{\#}$ 优于 1/4.25。

4) 波段

系统波段为 0.4 μm~0.7 μm。

5) 变焦全过程光轴跳动

变焦过程中光轴跳动不大于 0.15 mrad。

6) 冲击

半正弦波, 100 g/11 ms(横轴、纵轴), 100 g/11 ms(垂直方向)。

依据小型弹载光电侦察设备的需求, 选用四组元变焦光学结构, 压缩轴向长度尺寸, 控制入瞳位置位于前固定端, 控制径向尺寸, 减少轴向减晕量, 充分保证光能量、成像质量和长度尺寸, 实现小型化设计^[9-13]。采用大尺寸、高分辨率数字 CMOS 器件, 搭配高性能滤光膜系滤光片, 提高系统的信噪比和探测能力, 实现大动态范围、高信噪比成像。搭配使用钛合金、铝合金材料, 尽量减轻镜头重量。控制相机模块横截面积不超过机芯模块横截面积, 优化电器电路设计, 简化印制电路板(PCB)数量, 实现轻量化设计。控制曲线套筒的加工精度和滑块与光杆的装配间隙, 使用橡胶垫圈和密封胶软连接设计, 减少装夹应力对光学零部件的影响, 保证光轴的稳定性^[14-15]。

2 光机系统设计与分析

2.1 光学系统设计结果

为了使空间尺寸小型化, 选取四组元光学系

统, 包括前固定组、变倍组、补偿组、后固定组。系统焦距范围 15 mm~80 mm, $F^{\#}=4.25$, 最大口径 $D=\Phi 31$ mm, 系统总长 $L_{OAL}=78$ mm, 共由 10 组透镜与 1 块滤光片组成, 光学元件总质量 35 g。系统光路如图 1 所示。

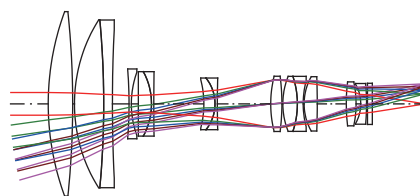


图 1 可见光电视光学系统结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of visible-light TV optical system

2.2 透过率计算

利用公式(1)计算光学系统的透过率:

$$\tau = \tau_1^{n_1} \times \tau_2^{n_2} \times \tau_3^{n_3} \quad (1)$$

式中: τ 为总透过率; $\tau_1=99\%$, 为与空气接触面的平均透过率; $n_1=22$, 为空气玻璃介质接触面数; $\tau_2=99.2\%$, 为由平均吸收系数计算出的光学材料透过率; $n_2=3.18$ cm, 为材料总厚度; $\tau_3=95\%$, 为滤光镜透过率; $n_3=2$, 为滤光膜层数。

由式(1)计算出光学系统的透过率为

$$\tau = 0.99^{22} \times 0.992^{3.18} \times 0.95^2 = 70.5\%$$

利用 CODE V 软件“透射分析”命令对系统不同波长、不同视场下的透过率进行仿真计算, 计算结果如表 1 所示。综合考虑不同材料的吸收系数差异, 表 1 中仿真结果与上述公式计算结果一致。

表 1 透过率仿真计算结果

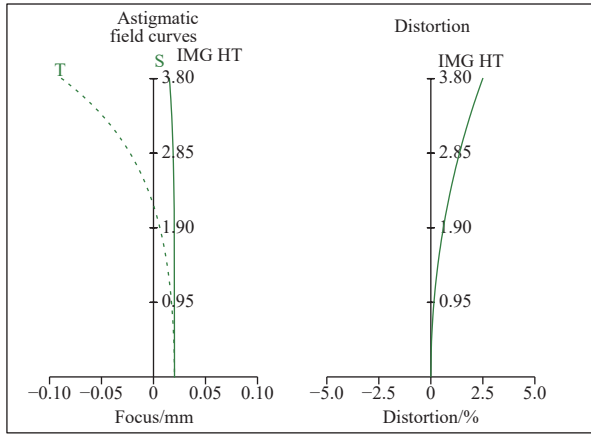
Table 1 Transmittance simulation calculation results

视场/(°)	不同波长透过率/%			平均透过率/%
	656.3 nm	587.6 nm	486.1 nm	
0	74.65	79.31	63.98	74.31
7.28	74.43	79.26	64.53	74.37
10.32	74.16	79.14	65.03	74.37
12.64	73.81	78.95	65.45	74.29
14.61	73.37	78.65	65.78	74.11

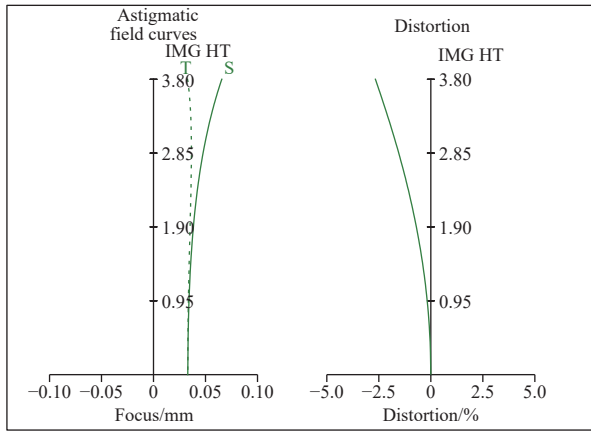
2.3 成像质量评价

光学系统的成像质量评价主要从以下 6 个方面开展: 场曲及畸变、光学系统传递函数(MTF)、能量集中度、垂轴色差、小视场二维图像仿真, 具体评价结果如图 2~图 6 所示。从图 2~图 6 可以看出, 变焦全程系统全视场畸变小于 3%, MTF 值>0.25

@70 lp/mm, 垂轴色差<0.05 mm。通过对像质进行仿真计算, 光学系统性能满足清晰成像要求。



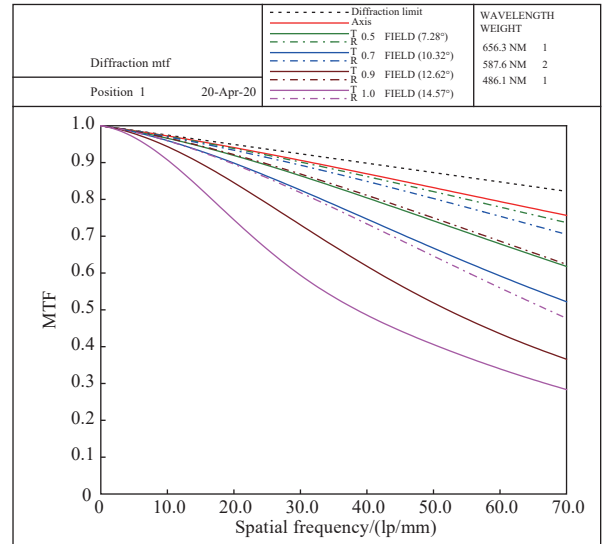
(a) 长焦



(b) 短焦

图 2 长焦和短焦位置处场曲及畸变

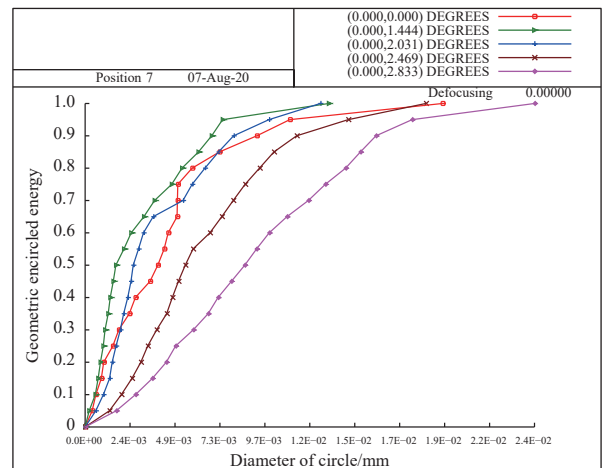
Fig. 2 Field curvature and distortion at long and short focal positions



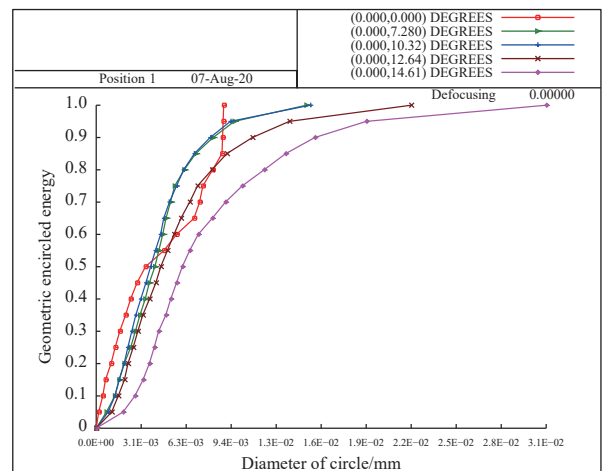
(b) 短焦

图 3 长焦和短焦 MTF 曲线

Fig. 3 MTF curves at long and short focal positions



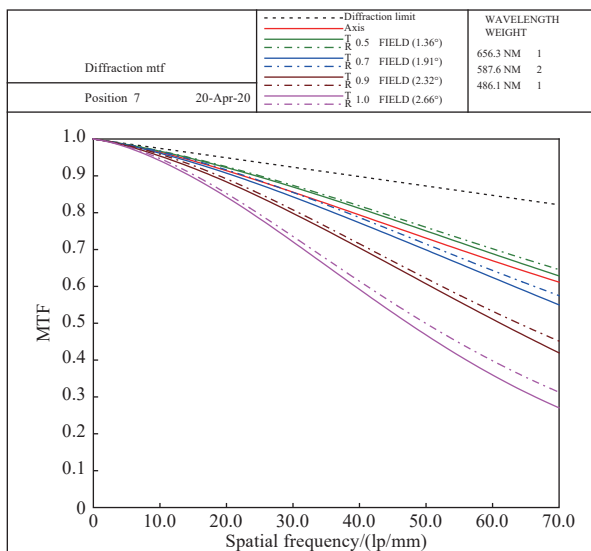
(a) 长焦



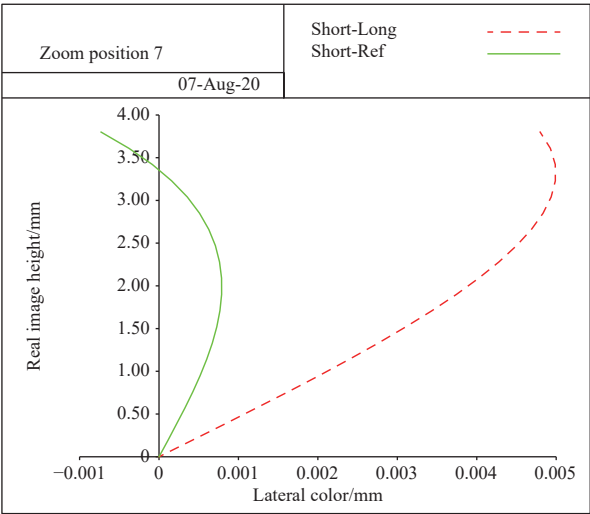
(b) 短焦

图 4 能量集中度

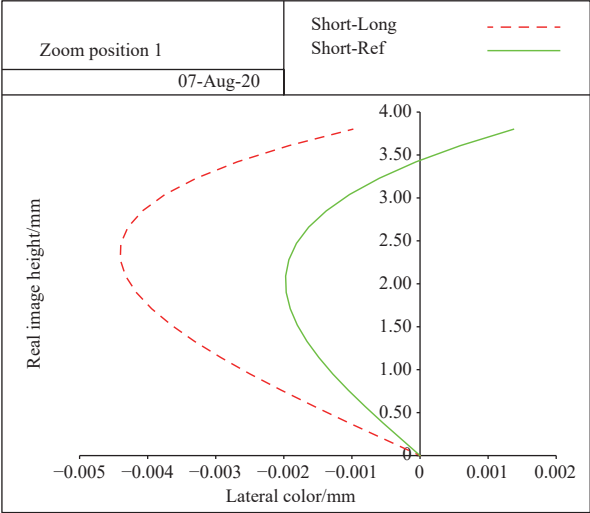
Fig. 4 Energy concentration



(a) 长焦



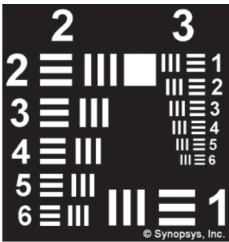
(a) 长焦



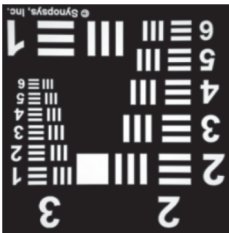
(b) 短焦

图 5 垂轴色差

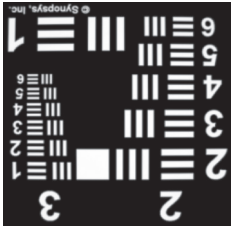
Fig. 5 Chromatic aberration of vertical axis



(a) 原始输入



(b) 长焦仿真结果



(c) 短焦仿真结果

图 6 二维图像仿真

Fig. 6 2D image simulation

2.4 像面一致性分析

像面一致性主要考虑光学系统各个焦段的焦深公共冗余量,通过分析 7 个焦段位置的焦深情况,给出系统的像面一致性的定量分析结果。系统在 7 个典型位置处的像面位置数据如表 2 和图 7 所示。对比表 2 中数据可知,像面误差在 2.5×10^{-5} mm 以内,设计结果显示中像面一致性良好。

表 2 像面位置

Table 2 Location of image plane mm			
位置	d	Δ	后截距
1	10.963 525 128 789 9	-0.055 529 054 712 476 0	10.907 996 074 077
2	10.928 339 468 850 0	-0.020 343 263 077 352 7	10.907 996 205 773
3	10.897 599 334 131 6	0.010 403 787 290 392 6	10.908 003 121 422
4	10.881 633 851 499 3	0.026 379 007 744 301 2	10.908 012 859 244
5	10.883 105 052 052 9	0.024 909 337 616 042 4	10.908 014 389 669
6	10.902 079 843 185 6	0.005 935 901 121 672 0	10.908 015 744 307
7	10.963 003 004 815 6	-0.054 984 811 092 231 3	10.908 018 193 723

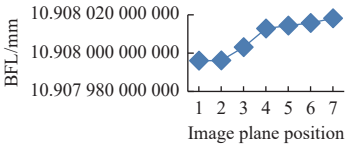


图 7 不同位置后截距位置

Fig. 7 Rear intercept positions at different positions

2.5 结构设计

在变焦镜头中,驱动机构是机械结构的核心组件,电机负责提供动能,执行结构则将此动能通过运动形式的转换传递给移动组元。作为动能提供者,电机的运动输出形式有两种,即旋转运动和直线运动。由于在变焦镜头中,移动组元在变焦过程中作往复直线运动,若选用旋转电机驱动,则需采用适当的执行机构将回转运动变为直线运动;若选用直线电机驱动,则可直接将动能传递到移动组元上,即实现“零传动”,提高了动能利用率。对于旋转电机为驱动部件的变焦凸轮曲线套筒机构而言,在过去的应用实践中已经证明了其有效性和可靠性。因此,选用旋转电机提供动能,曲线

套筒为动力传动件的驱动形式。电视摄像机整体尺寸在体积 119.6 mm×45.6 mm×55.7 mm 包络之内,如图 8 所示。

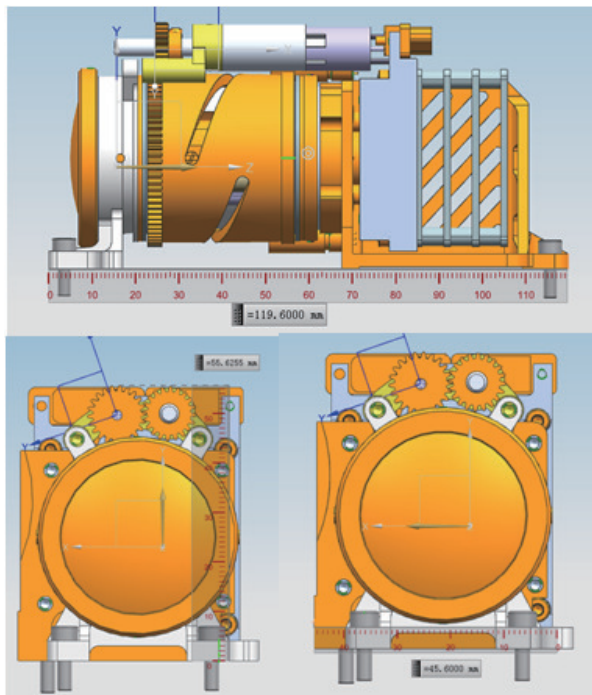


图 8 变焦系统包络尺寸图

Fig. 8 Envelope dimension diagram of zoom system

通过使用钛合金、铝合金材料,在保证成像质量的前提下,尽量减轻镜头质量。控制相机模块横截面积不超过机芯模块横截面积,优化电器电路设计,简化 PCB 板数量,进一步减轻重量。镜头光机设计使用橡胶垫圈和密封胶软连接设计,减少装夹应力对光学零部件的影响,从而兼顾镜头的无应力装调和全密封设计。在抗力学环境设计方面,针对体积大、质量大的元器件,焊接后使用环氧树脂胶多点固封,电路板布板时将质量较大的元器件尽量靠近安装孔处放置,最终得到的样机质量为 290 g,如图 9 所示。

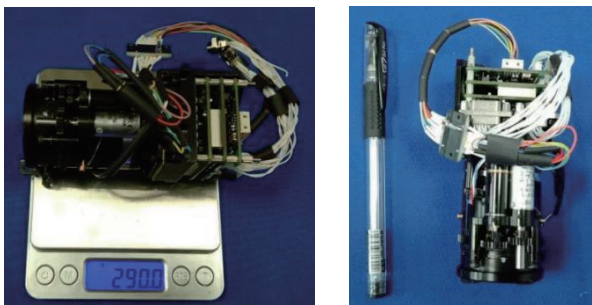


图 9 样机实物图

Fig. 9 Physical object of TV camera

2.6 冲击振动对光轴的影响

在冲击振动试验台上对设计的小型连续变焦电视进行振动与冲击试验。实验过程中变焦电视与台体刚性连接,经 3 个方向各 1 个小时的振幅 0.91 mm、15 Hz~33 Hz 双振幅正弦振动,加速度 2 g、33 Hz~500 Hz 等加速度正弦振动及 100 g、8 ms 半正弦波冲击后,检测其变焦全程光轴一致性,如图 10 所示。从图 10 可以看出,变焦电视变焦全程光轴一致性优于 0.15 mrad。



(a) 小视场光轴



(b) 小视场变为大视场后的光轴



(c) 大视场变为小视场后的光轴

图 10 冲击振动试验后的光轴测试结果

Fig. 10 Optical axis test results after impact vibration test

3 作用距离分析与验证

3.1 作用距离分析

1) 从能量角度评估

环境照度 200 lx, 物面反射率 0.3, 探测器靶面能量>0.01 lx(对应曲线数值大于 0)即可识别,作用距离分析曲线如图 11 所示。从图 11 中可知,不同能见度下探测器响应能量均能满足探测 4 km、识别 3 km 的要求。

2) 从对比度角度评估

目标背景固有对比度为 0.33, 经大气吸收、散射后对比度曲线如图 12 所示。

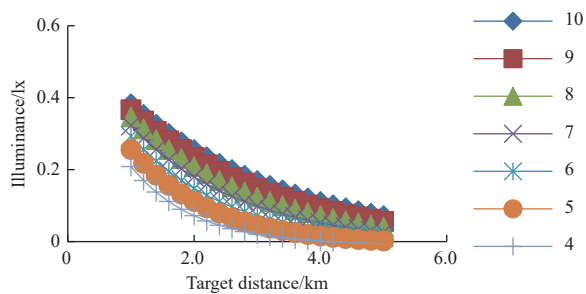


图 11 作用距离分析曲线(能量)

Fig. 11 Detection distance analysis curves (energy)

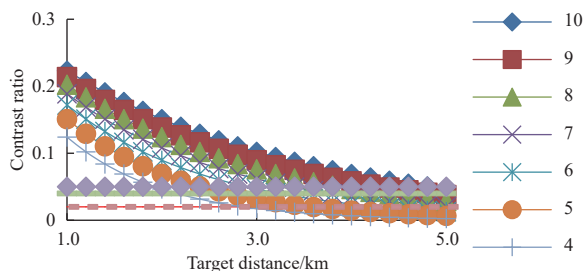


图 12 作用距离分析曲线(对比度)

Fig. 12 Detection distance analysis curves (contrast ratio)

以探测、识别对比度大于 2% 的要求评价: 能见度 6 km 以上, 探测距离 4 km、识别距离 3 km; 能见度 5 km 时, 探测距离 3.5 km、识别距离 3 km; 能见度 4 km 时, 探测距离 2.6 km、识别距离 2.6 km。

以探测对比度大于 5%、识别对比度大于 4% 的要求评价: 能见度 8 km 以上, 探测距离 4 km、识别距离 3 km; 能见度 7 km 时, 探测距离 3.8 km、识别距离 3 km; 能见度 6 km 时, 探测距离 3.2 km、识别距离 2.8 km; 能见度 5 km 时, 探测距离 2.7 km、识别距离 2.4 km; 能见度 4 km 时, 探测距离 2.1 km、识别距离 1.8 km。探测识别作用距离分析结果如表 3 所示。

表 3 探测识别作用距离分析结果(对比度)

Table 3 Detection distance analysis results (contrast ratio)

能见度/km	作用距离/km(对比度指标/%)	
	探测	识别
8	4.0(5)	3.0(4)
7	3.8(5)	3.0(4)
6	3.2(5)	2.8(4)
	4.0(2)	3.0(2)
5	2.7(5)	2.4(4)
	3.5(2)	3.0(2)
4	2.1(5)	1.8(4)
	2.6(2)	2.6(2)

3.2 作用距离试验

在能见度大于 10 km 晴朗天气条件下, 对 3 km 远处建筑物目标进行观察, 成像效果如图 13 所示。从图 13 可以看出, 整体图像清楚、细节清晰, 满足系统探测识别要求。



图 13 相机图像

Fig. 13 Camera image

3.3 挂飞试验

该小型连续变焦电视搭载射程 280 km 制导火箭实弹开展空对地目标搜索与识别试验。经火箭弹发射及分离过程冲击后, 系统成像清晰、稳定, 变焦全程光轴一致性良好, 顺利完成空对地目标搜索与识别, 成像效果如图 14 所示, 显示各项试验结果均满足指标与系统使用要求。



图 14 挂飞实验图像

Fig. 14 Image in practice

4 结论

本文主要从光学系统设计、综合性能评估、作用距离分析、冲击振动试验等方面对所研制的小型弹载连续变焦电视摄像机进行了评价。摄像机整体质量不超过 300 g, 可实现 5 倍连续变焦, 在 10 km 能见度下对目标识别距离不小于 3 km, 经 100 g、8 ms 半正弦波冲击后, 全程光轴一致性优于 0.15 mrad。实际挂飞实验过程中成像清晰、稳定, 满足总体性能要求, 对后续弹载光电产品设计研发具有一定的指导意义。

参考文献:

[1] 张从泾, 白文华, 郑红生. 智能化弹药巡飞弹最新发展

- 概述及展望[J]. [国防制造技术](#), 2021(1): 3-7.
- ZHANG Congjing, BAI Wenhua, ZHENG Hongsheng. Overview and prospect of the latest development of intelligent ammunition cruiser[J]. [Defense Manufacturing Technology](#), 2021(1): 3-7.
- [2] 欧继洲, 黄波. 巡飞弹在陆上无人作战体系中的应用初探[J]. [飞航导弹](#), 2019(5): 20-24.
- OU Jizhou, HUANG Bo. Preliminary exploration of the application of cruise missiles in land unmanned combat systems[J]. [Aerodynamic Missile Journal](#), 2019(5): 20-24.
- [3] 李超, 李浩, 苏号然. 国外小型巡飞弹发展分析及其预警系统应对策略研究[J]. [空天防御](#), 2023, 6(3): 58-65.
- LI Chao, LI Hao, SU Haoran. Analysis of the development of foreign small loitering munitions and their early warning system response strategy[J]. [Air & Space Defense](#), 2023, 6(3): 58-65.
- [4] 张婷婷, 杨学军. 基于强化学习的城市场景下巡飞弹自主协同饱和攻击方法[J]. [指挥与控制学报](#), 2023, 9(4): 457-468.
- ZHANG Tingting, YANG Xuejun. Autonomous coordination saturation attacks method for loitering munitions in urban scenarios based on reinforcement learning[J]. [Journal of Command and Control](#), 2023, 9(4): 457-468.
- [5] 李世永, 钱立志, 王志刚. 弹载侦察系统抗过载技术研究[J]. [弹道学报](#), 2005, 17(3): 31-35.
- LI Shiyong, QIAN Lizhi, WANG Zhigang. The research of cannon - carried reconnaissance system resisted high over loading technology[J]. [Journal of Ballistics](#), 2005, 17(3): 31-35.
- [6] 田海霞. 一种可见光变焦距电视光学系统研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2008.
- TIAN Haixia. One of visible video zoom system research[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Meachanics, 2008.
- [7] 马爱秋, 杨朋利, 白钊. 提高变焦电视光轴稳定性的装调工艺技术研究[J]. [应用光学](#), 2016, 37(4): 602-606.
- MA Aiqiu, YANG Pengli, BAI Zhao. Assembling and adjusting technique for improving optical axis stabilization of zoom TV [J]. [Journal of Applied Optics](#), 2016, 37(4): 602-606.
- [8] 常伟军, 晁格平, 腾国奇. 紧凑型连续大变倍比枪瞄镜光学系统设计[J]. [应用光学](#), 2021, 42(3): 423-428.
- CHANG Weijun, CHAO Geping, TENG Guoqi. Design of compact continuous high zoom - ratio gun sighting telescope optical system [J]. [Journal of Applied Optics](#), 2021, 42(3): 423-428.
- [9] 张坤, 曲正, 钟兴. 30 倍轻小型变焦光学系统设计[J]. [光学精密工程](#), 2022, 30(11): 1263-1271.
- ZHANG Kun, QU Zheng, ZHONG Xing. Design of 30[×] zoom optical system with light weight and compact size[J]. [Optics and Precision Engineering](#), 2022, 30(11): 1263-1271.
- [10] 张存武. 变焦距光学系统设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2006.
- ZHANG Cunwu. Design of zooming optical system[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2006.
- [11] 张健, 罗天娇, 罗春华. 30 mm~300 mm 轻型变焦物镜光学系统设计[J]. [应用光学](#), 2019, 40(1): 51-57.
- ZHANG Jian, LUO Tianjiao, LUO Chunhua. Optical system design of 30 mm~300 mm light weight zoom objective[J]. [Journal of Applied Optics](#), 2019, 40(1): 51-57.
- [12] JO S H, PARK S C. Design and analysis of an 8[×] four group zoom system using focus tunable lenses[J]. [Optics Express](#), 2018, 26(10): 13370-13382.
- [13] VELLA A, LI H, ZHAO Y, et al. Design study for a 16[×] zoom lens system for visible surveillance camera[C]. California: SPIE, 2015: 95800L-1-8.
- [14] 王谭, 袁屹杰, 吴英春. 连续变焦镜头凸轮曲线压力升角优化研究[J]. [电光与控制](#), 2021, 28(1): 61-65.
- WANG Tan, YUAN Yijie, WU Yingchun. Pressure angle optimization for cam curve of continuous zoom lens[J]. [Electronics Optics & Control](#), 2021, 28(1): 61-65.
- [15] 陈鑫, 付跃刚. 变焦系统凸轮曲线的优化设计[J]. [应用光学](#), 2008, 19(1): 45-47.
- CHEN Xin, FU Yuegang. Optimal design of cam curve of zoom system[J]. [Journal of Applied Optics](#), 2008, 19(1): 45-47.