

文章编号: 1672-8785(2023)08-0034-08

基于变焦双波段设计的便携式 红外目标模拟器

单金山¹ 施蕾蕾¹ 陶小凯²

(1. 华北光电技术研究所, 北京 100015;

2. 山东皓视光学科技有限公司, 山东 济南 250100)

摘 要: 随着红外成像设备在军用和民用领域的大量应用, 如何快速一致地判断红外成像设备的技术状态并分析和排除故障变得越来越迫切。提出一种基于变焦双波段的便携式红外目标模拟器, 通过高精度黑体($-10\sim 260^{\circ}\text{C}$ 温度可调、精度优于 0.01°C)、卡片插拔式靶标、3 倍连续变焦双波段投影结构设计来满足红外成像设备中波、长波及不同目标的检测需求。相比于其它模拟器, 该模拟器兼顾双波段, 提高了设备使用范围; 可更换靶标、变焦投影有利于兼顾不同红外成像设备不同距离目标的模拟检测需求。从各项检测试验结果来看, 该模拟器达到了预期的目标, 满足了实用化的模拟检测需求, 解决了成本过高的问题。

关键词: 红外目标模拟器; 红外成像检测; 双波段检测

中图分类号: TN4 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2023.08.005

Portable Infrared Target Simulator Based on Zoom Dual-Band Design

SHAN Jin-shan¹, SHI Lei-lei¹, TAO Xiao-kai²

(1. North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China;

2. Shandong Gloryvision Optical Technology Co., Ltd., Jinan 250100, China)

Abstract: With the wide application of infrared imaging equipment in military and civilian fields, how to judge the technical status of infrared imaging equipment quickly and consistently as well as analyze and solve problems becomes more and more urgent. In this paper, a portable infrared target simulator based on zoom dual-band is proposed. Through the design of high-precision blackbody (accuracy: better than 0.01°C during -10°C and 260°C), card insertion and pull-out target, and $3\times$ continuous zoom dual-band projection structure, the detection requirements of infrared imaging equipment are met. Compared with other simulators, the simulator takes into account two bands and improves the application range of the equipment. In addition, the replaceable target and zoom projection are conducive to taking into account the simulation detection requirements of different infrared imaging equipment at different distances. According to the test results, the expected goal is achieved, the practical simulation test demand is realized, and the problem of high cost is solved.

收稿日期: 2023-04-02

作者简介: 单金山(1985-), 男, 北京人, 工程师, 主要从事红外成像方面的研究。

E-mail: shanjinshan2008@sina.com

Key words: infrared target simulator; infrared imaging detection; dual-band detection

0 引言

由于红外成像设备具有全天候工作、远距离成像的特点,因此在战场侦察、火控制导、边海防等军用领域有着广泛的应用。近年来,随着国内红外焦平面探测器技术和产业发展的不断突破,红外成像设备在价格下降的同时性能不断提升,从而使得其在公共安全、森林防火、搜索救援等民用领域也有了大量的应用^[1-2]。

红外成像设备出厂时,一般使用红外整机测试系统对其进行评价和检测。在外场使用时,由于缺乏相应的红外整机测试系统,操作人员只能依靠经验对红外成像设备的技术状态进行大致评价,客观性和可信度不高。因此,随着红外成像设备在军事和民用领域的大量应用,如何方便、快速、一致地判断红外成像设备的技术状态并分析和排除故障变得越来越迫切。

文献[3]提出一种红外成像设备外场性能测试系统,其主要特点是一体化设计结构集成了黑体、靶轮、平行光管等主要组件,可在外场完成最小可分辨温差(Minimum Resolvable Temperature Difference, MRTD)、噪声等效温差(Noise Equivalent Temperature Difference, NETD)、调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)等红外成像设备主要技术指标的测试。

文献[4]提出的一种红外热成像静态目标特性仿真系统,主要组件包括黑体、仿真靶标及靶标轮、连续变焦平行光管、衰减系统等,可在实验室模拟战术指标,从而实现实验室战术指标仿真评估。

本文提出一种便携式红外目标模拟器的实现方案,通过对黑体辐射源及光学部分的计算和仿真来保证设计指标。方案实现后,对设备

各项指标及主要目标的模拟能力也进行了初步对比检测。结果表明,该方案能够满足要求,可在实验室、外场环境等各种使用场景下模拟不同距离的战术指标,方便快速地实现了红外成像设备战术指标仿真评价,为红外成像设备的性能评价和故障检测提供了依据。

1 系统组成

在设计本系统时总体考虑三方面内容:一是可完成红外成像设备在使用维护过程中的基本性能测试和比对,便于操作人员和维修人员对红外成像设备的技术状态进行初步确认。二是使用场景中运输、环境温度变化、风力、测试人员技术水平等影响。通过采用便携式一体化设计、环境适应性设计,简化使用操作来适应各种测试环境和降低对测试人员的要求。三是使用经济性。通过可扩展模块化设计来适应不同产品的测试需求。

如图1所示,便携式红外目标模拟器主要由靶标及靶标轮、黑体辐射源、中长波红外变焦镜头组成,其工作原理如下:黑体辐射源透射到点目标、线目标、车型目标及人员目标等不同种类的模拟目标靶标上;通过可连续变焦投影镜头对模拟目标靶标进行投影,同时调节黑体辐射源、投影镜头焦距,从而模拟不同距离、不同温差的目标^[5-6];该目标经红外成像设备成像后,通过观察模拟目标成像质量和效果来比较或判断红外成像设备的战术性能。在实现以上功能的同时,通过小型化、集成化设计来减小红外目标模拟器系统功耗、结构尺寸,使其适应性更广,从而满足便携性使用要求。

1.1 黑体辐射源

为满足黑体辐射源进行高精度高稳态温度控制调节功能,从而真实模拟不同温差目标的红外辐射,本设备采用双极性固态控温元件来

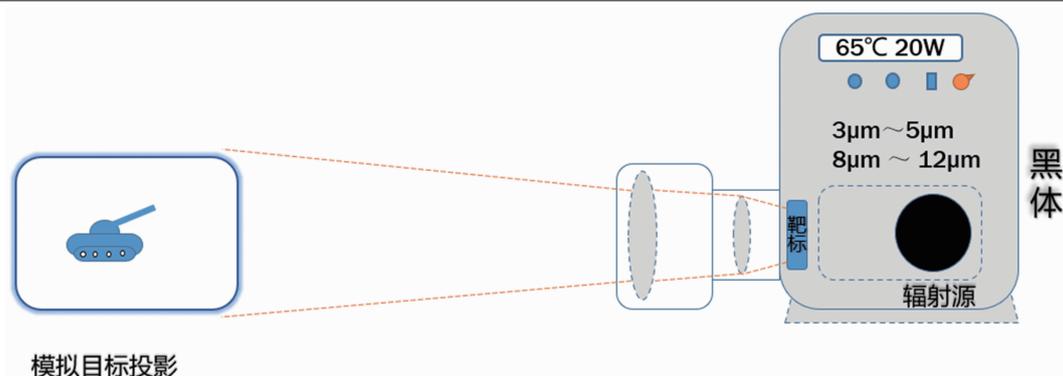


图 1 系统组成原理框图



图 2 典型目标模拟形状示意图

实现温度控制调节；采用微腔式结构设计来适应模拟靶标和变焦光学镜头的转接与使用^[7]；采用基于防盐雾防霉菌铝合金材料和不锈钢材料的高强度结构设计，在满足便携使用要求的同时具有一定的抗振抗冲击能力；采用低功耗、抗干扰的环境适应性设计来满足非实验室条件(无淋雨)下的长时间温度工作需求。

黑体辐射源的技术参数如下：温度调节范围为 $-10\sim 260^{\circ}\text{C}$ ；测温精度(分辨率)不大于 0.01°C (25°C 测试)；温度稳定性(10 s)的均方根值为 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ (25°C 测试)；辐射率不小于95%；工作温度范围为 $-10\sim 45^{\circ}\text{C}$ 。

1.2 靶标

考虑红外成像设备的使用场景，本设备的靶标主要包括人员、坦克、飞机等模拟目标，以完成红外成像设备对该类目标探测能力的仿真测试及比对。另外还增加四杆靶来进行 MRTD 和焦面一致性测试。对其测试结果进行分析，完成红外成像设备技术状态的确认和比较。通过增加圆孔靶来进行最小可探测温差(Minimum Detectable Temperature Difference, MDTD)测试以及红外成像设备远距离探测性

能比对。典型目标模拟形状轮廓如图 2 所示，其大小可根据被测红外成像设备的焦距等技术参数选配。

1.3 连续变焦平行光管

平行光管选用透射式连续变焦结构。在保证系统稳定性的同时对整个光路系统进行密封和加固设计，保证核心光源发射系统的工作状态，以适应运输振动、高低温环境等条件下的使用需求。

1.3.1 总体设计及角度控制

光束整形发射部分采用四镜组变焦方式进行光束整形匀化(见图 3)。前后固定组有利于保证光学系统内部的密封性，起到防尘防污染的作用；变倍组通过实现焦距的变化来达到改变倍率的目的；补偿组则保证光学系统不同焦距下焦点位置一致。

具体设计如下：

(1) 焦距设置为 $25\sim 75\text{ mm}$ ，实现不同发散角度的整形输出。

(2) 靶面直径为 20 mm ，模拟目标刻蚀范围为 18 mm ，配合黑体辐射源大小，保证模拟目标辐射均匀性。

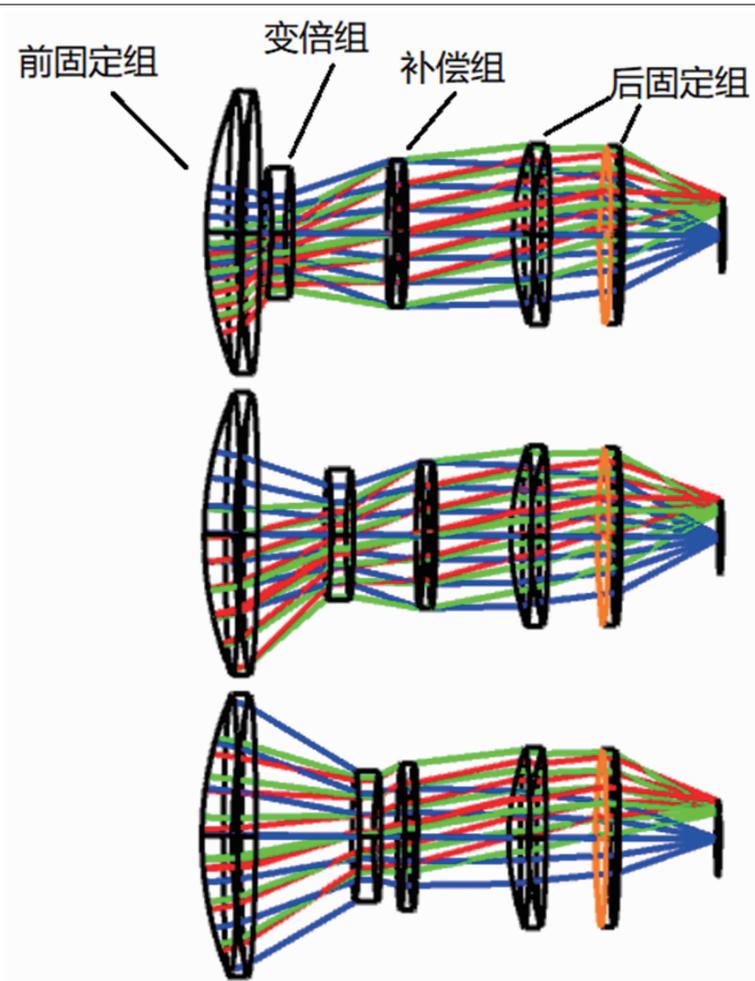


图 3 光学系统原理图

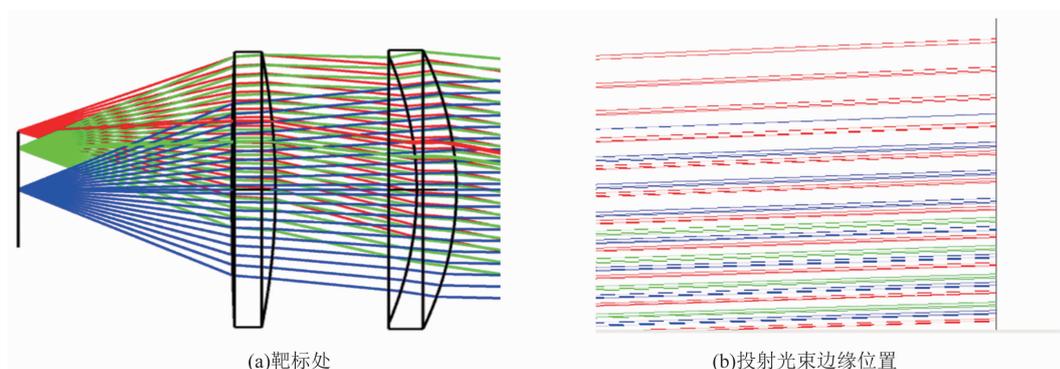


图 4 光线模拟仿真

(3) 变焦系统采用四镜组设计, 从而有效提高辐射能量的透过率。

(4) 前固定组实现光学系统的密封, 有利于提高环境适应性; 补偿组用于补偿焦距变化后的像面移动, 保证成像位置的一致性。

1.3.2 光束分布均匀性设计

光束分布不均匀主要有两个原因: 一是光

源本身的展宽, 二是靶标透光截面上光的分布不均。由于光源存在展宽, 光经过整形透镜照到远处时, 从发光面下面 -1 视场发出的光 (红色) 落到像面最上面, 0 视场 (蓝色) 和 1 视场 (绿色) 的光是照不到最上面的 (见图 4)。因此, 大部分光线集中在中心, 边缘有渐变的区域, 边界不清晰。

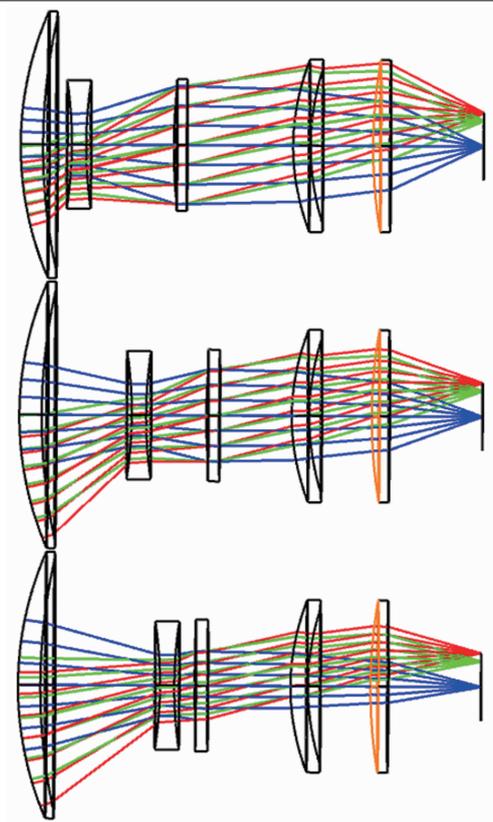


图 5 变焦透镜系统光路图

本设备采用边缘厚度更小的模拟靶标，以便提高辐射面的均匀度，进而提高目标边缘清晰度。

边界不锐利还有一个原因：从辐射源出射的光束是非均匀分布的，大部分能量集中在中心。这样的辐射源类似于高斯型。可以很明显地看出，边缘光线比中心光线要少，能量要弱。因此，需要在辐射源后面、靶标前面加入光阑，截掉边缘功率较低的辐射光线，同时起到控制辐射源束散角的作用。经过以上设计后，系统的目标辐射均匀度大于 85%。

1.3.3 发散角调节结构

为了避免在实际环境下测试时边缘光线强度减弱以及测试设备观察边界不清晰，实际发散角往往取得偏大一些，但仍在精度范围内。在实际调试过程中，可以通过调节变焦镜头的焦距曲线转动的位置来调节发散角的大小。镜头变焦透镜镜架部分都带有精细螺纹，可以控制变倍补偿透镜进行前后微调，将最小间距调节到微米级，最终实现优于 1 mrad 的发散角

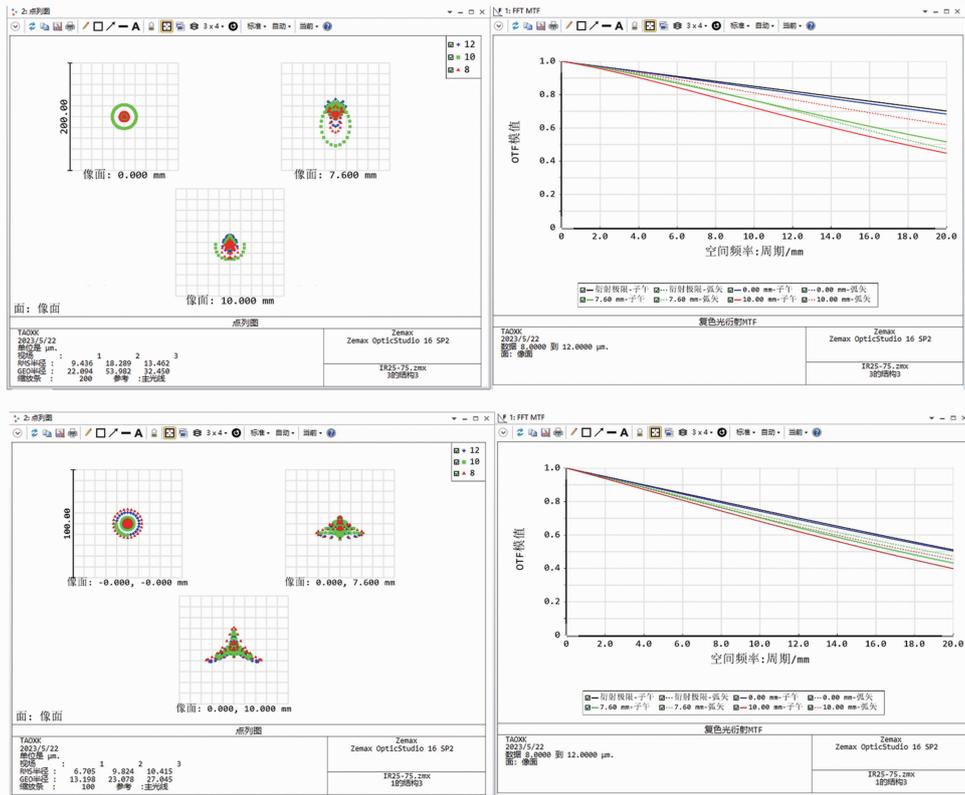
精度。

1.3.4 仿真分析

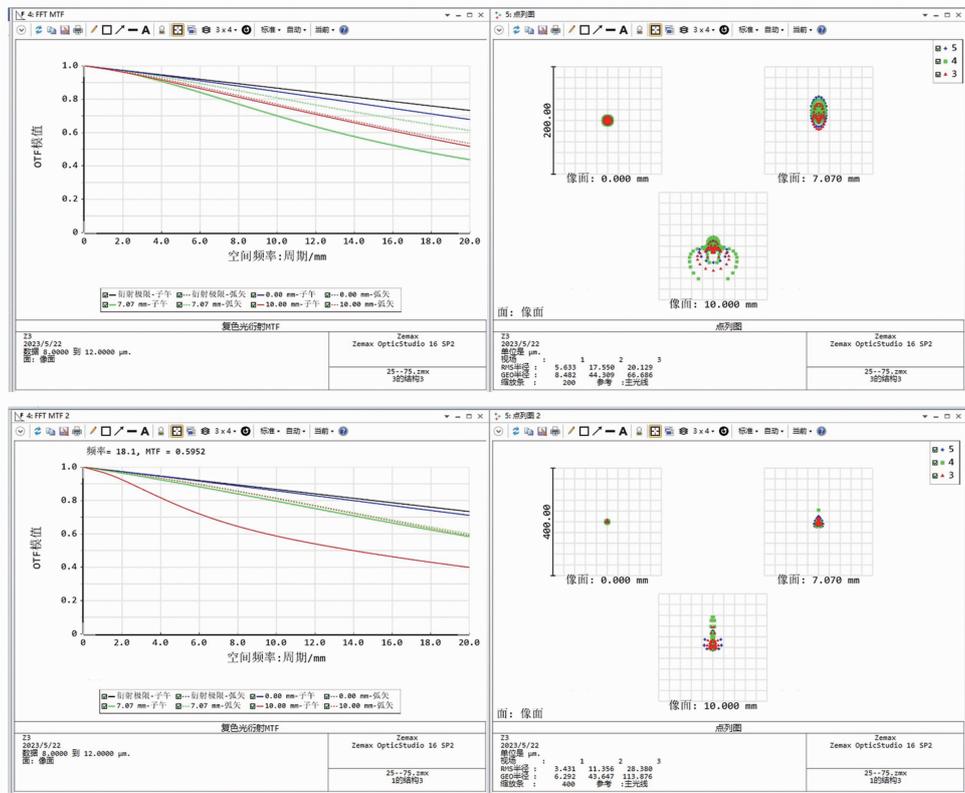
光学系统将 5 片四组变焦成像镜头作为初始结构参考。结合需达到的 20 mm 靶标靶面尺寸及中、长波段要求，通过仿真优化最终完成了镜片通用、变焦曲线及镜片间隔有所区别的光学系统设计。通过光学设计曲线取点和结构传动软件模拟，其发散角的控制精度小于 1 mrad。

首先对变焦透镜组进行像质分析。系统光路如图 5 所示。可以看出，光学系统为短粗型结构，总长度为 126 mm，变焦部分符合手动变焦抓握宽度。后固定组的前后间距也满足聚焦调节需求。MTF 结果和点列图如图 6 所示。

通过以上仿真和测试结果可以看出，空间频率为 20 mm 时 MTF 值达到 0.4 以上，即本光学系统可以满足 25 μm 像元分辨率下成像的要求。通常的四杆集成靶标最小的线形宽度为 0.09524 mm，可以完全满足靶标轮廓的分辨率要求。



(a)长波短、长焦仿真



(b)中波短、长焦仿真

图 6 变焦透镜组仿真的 MTF 结果及点列图



图 7 系统整机及镜头细节图

表 1 案例的测试结果

序号	测试目的	选用靶标	黑体温度	测试结果
1	验证红外成像设备对坦克的成像性能	坦克	1 K	边缘清晰, 成像良好
2	验证红外成像设备对人员的成像性能	人员	1 K	边缘清晰, 成像良好
3	测试红外成像设备的 MRTD	四杆靶	±0.5 K	优于 0.5 K

2 测试案例分析

如图 7 所示, 本设备包含黑体、靶标、连续变焦平行光管和固定三脚架。黑体上附有把手, 方便移动; 靶标的孔位固定方式便于插拔替换, 以实现针对不同目标的模拟测试; 连续变焦平行光管可实现不同距离及不同视场角度的模拟测试, 镜头磁吸滤波镜片用于切换所模拟目标的不同波段范围; 固定三脚架可以在一定的范围内进行高度调节, 从而方便测试设备与被测红外成像设备的光轴对准调节。

下面介绍红外目标模拟器的具体测试案例。测试环境如下: 室内温度为 26°C , 湿度为 58%。红外成像设备的技术参数如下: 焦距为 50 mm, F 数为 1, 制冷类型为非制冷。表 1 列出了该案例的测试结果。

图 8 为室内对远距离车型目标进行轮廓检测时的实物图。可以看出, 本设备通过对远距离目标进行轮廓效果的模拟, 并结合变焦与红外成像设备之间的距离调节, 可满足从像素级别的探测到全屏效果显示的模拟测试, 能够对红外成像光学系统探测、识别能力的一致性进行有效测试。



图 8 红外目标模拟器测试案例的实物图

3 结束语

相较于以前模拟器的单波段设计结构形式, 本文研究的双波段红外目标模拟器采用共用光学镜头, 同时通过更改光学系统镜片镀膜、结构间隙和变焦曲线使其适用于中、长波红外波段, 有效降低了成本, 并实现了检测模拟设备的整体结构最小化和适用范围最大化。通过仿真验证了双波段的可行性, 同时通过加工装调测试验证了双波段镜头在模拟辐射源方面的可实现性。本设备采用高精度黑体辐射源、不同模拟靶标和连续变焦双波段镜头, 实现了在较近距离条件下测试和验证远场目标,

从而满足了批量化设备远场效果的模拟、验证、测试和检验。该研究为批量化检验红外成像设备提供了有效的检测手段和方法。由于不同波段之间的切换模拟需要更换光学镜头,因此结构设计方面存在手拧不够快捷的缺陷。此外,由于镜头比黑体辐射源重,整体组装后的重心偏向靠前,因此在后续设计优化中可以考虑镜头的轻量化设计。同时,镜头与黑体部分的连接可以考虑快装结构设计,从而更加便于工厂或检测部门的快捷使用。

参考文献

- [1] 陈胜哲, 陈彪. 红外技术在军事上的应用 [J]. 光学技术, 2006, 32(S1): 581-583.
- [2] 刘新永, 蔡凤丽, 刘海. 红外技术的物理基础及其军事应用 [J]. 安徽电子信息职业技术学院学报, 2007, 6(3): 88-90.
- [3] 王真胜, 马飒飒, 宋伟. 红外热像仪外场性能测试系统 [J]. 兵工自动化, 2011, 30(11): 63-67.
- [4] 何文忠, 彭焕良. 红外热成像静态目标特性仿真系统 [J]. 激光与红外, 2005, 35(8): 573-576.
- [5] 王双进. 红外目标模拟器系统的研究与设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [6] 王海鹏. 基于 DMD 的红外目标模拟光学系统研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [7] 曹海源, 万强, 初华, 等. 小型高精度红外黑体辐射源的设计 [J]. 电光与控制, 2013, 20(12): 63-67.