

便携式红外系统检测仪

曹海源, 孙斌, 韦尚方, 黎伟, 初华

(武汉军械士官学校光电技术研究所, 武汉 430075)

摘要: 针对红外系统检测设备的小型便携化需求, 分析了检测仪的基本组成及对其进行小型设计的重点部位, 分别从优化设计指标、采用离轴抛物面多次反射光路设计、选用硬铝作为镜片加工材质等方面对红外平行光管进行了优化设计, 有效减小了光路系统的体积, 减轻了平行光管的重量。采用紫铜辐射面、热电制冷器、散热片等构造了小型高效的黑体辐射源结构, 设计了温度控制驱动电路, 实现了小型轻量的面源黑体。所研制的检测仪整机重量小于 15 kg, 实现了小型便携, 并取得了理想的应用效果。

关键词: 红外检测; 平行光管; 黑体; 便携式

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)05-0080-04

Portable Test Equipment for Infrared Systems

CAO Hai-yuan, SUN Bin, WEI Shang-fang, LI Wei, CHU Hua

(Opto-Electronics Facility, Wuhan Ordnance Noncommissioned Officers School, Wuhan 430075, China)

Abstract: In light of the miniaturization and portability demand for test equipment of infrared system, the basic composition of test equipment was analyzed, as well as the key parts for miniature design. The design of infrared collimator was optimized by optimizing the design parameters, adopting the optical path design of off-axis parabolic multiple reflections, and selecting duralumin as the machining material of lens, which effectively reduces the volume of optical path system as well as the weight of infrared collimator. A small high-effective black-body radiation source structure was constructed by using red copper radiant surface, thermoelectric refrigerator, cooling fins, etc., and a temperature-controlled driving circuit was designed, realizing the small lightweight surface source black-body. Overall weight of the test equipment developed is less than 15 kg, which realizes the goal of miniaturization and portability with desired application effect.

Key words: infrared test; collimator; black-body; portability

0 引言

随着红外热成像技术的快速发展, 红外系统的应用领域由最初的军事侦察扩展到安防监视、医疗卫生、火灾监控等, 与人们的日常生活日益密切^[1-3]。相应地, 红外系统自身的性能检测问题也摆到了红外系统生产厂家及普通用户的面前。国外很早就开始注重红外系统检测设备的研究, 例如, 以色列 CI 公司在 20 世纪 90 年代就针对军用红外领域研制了基于基地级和中继级的各种检测设备, 主要有 METS-S 测试系统、ILET-90 系统等, 美国 SBIR 公司针对军用红外热像仪及光电探测跟

踪设备研制了 RTB-3000 光电测试系统^[4], 这些系统的平行光管都是基于非球面一次反射的常规光路, 体积较大。近年来, 为更好地满足军队野外使用需求, CI 公司研制出便携式的 ILET-97 系统交付空军使用。目前国内使用的大型光电测试系统, 由于其体积重量大、调试复杂, 只能在实验室内由专门技术人员操作使用, 不能满足便携测试要求, 在很大程度上限制了其应用范围。METS-S 系列设备长达 2.4 m, 重量约 500 kg, 只能置于专用场地定点使用, 无法携带到用户单位进行现场检测。随着红外产品的逐步普及, 现场检测的需求越来越多, 对便携式红外检测设备的需求也越来越紧迫。为此, 本文设计了一种小型便携的红外检测系统, 操作简单、携带方便, 以满足红外热像系统的现场检测需求。

1 检测仪总体分析与设计

被测红外系统由红外探测器、光学系统、信号处理

收稿日期: 2014-04-28

修回日期: 2015-01-15

基金项目: 国防重点实验室基金(1551438060404JB7201)

作者简介: 曹海源(1979—), 男, 湖北蕲春人, 硕士, 讲师, 研究方向为武器系统性能检测与故障诊断。

电路等部件组成,其综合性能指标是温度分辨率和空间分辨率,一般采用噪声等效温差(NETD)、最小可分辨温差(MRTD)、最小可探测温差(MDTT)等来表征^[5],此外还采用信噪比(SNR)、非均匀性(Non-uniformity)等指标来判断其电路性能。要实现对这些指标的检测,需要为红外系统提供一个模拟目标,通过靶标、温差控制器和平行光管来实现,另外需要采集红外系统的输出图像,进行图像处理算法和指标计算。因此,检测仪的构成如图 1 所示。

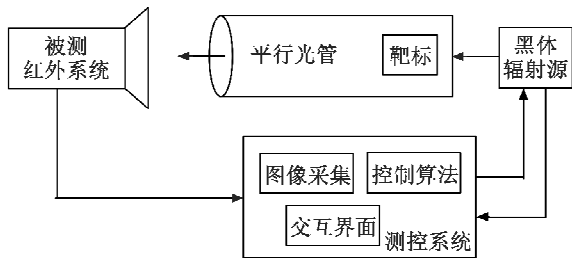


图 1 检测仪组成框图

Fig. 1 Structure of the test system

检测仪由红外平行光管、黑体辐射源和测控系统 3 部分组成。平行光管、靶标、黑体辐射源共同构成红外目标模拟器^[6],用于模拟无穷远处标准温差辐射源,辅助完成红外系统性能指标的检测。在制作安装时,靶标位于平行光管的焦平面处,黑体辐射源的辐射面与靶标面平行,距离靶标面约 15 mm;测控系统包括处理器、电源、视频采集卡和测控软件,通过性能指标测试算法完成相关红外指标的计算、同时提供显示及交互功能。

为实现便携,测控系统采用平板电脑的主板及机芯,可运行 Windows 操作系统,外壳采用自主加工,在提供通用系统软件平台的同时将体积、重量降至最小。图像处理和指标计算均由软件完成,对便携性无影响。因此,系统的便携性主要取决于平行光管、面源黑体两大部件。要实现整机的便携目标,主要需进行这两部分的小型便携化设计。

2 平行光管设计

2.1 设计指标优化

平行光管的通光口径及焦距是影响其长度和体积的关键因素。例如,有一款产品通光口径为 127 mm,焦距为 762 mm,其重量达 12 kg,长度约 1000 mm;另一款产品通光口径为 178 mm,焦距为 1016 mm,其重量增至 30 kg,长度约 1200 mm。通过对被测红外系统的统计分析,其红外镜头口径绝大部分在 120 mm 以内,因此,将检测仪平行光管的通光口径设计指标定为 120 mm,对于极个别红外镜头口径大于 120 mm 的系统,采用多次测量等方法总体衡量其性能指标。根据

光学系统的设计原则,为了提高系统的检测精度,一般要求检测系统的光阑指数 F 数值处于 5~8 之间,即焦距 f 与通光口径 D 的比值处于 5~8 之间,此处设计 F 数值为 6,因此设计红外平行光管的焦距为 720 mm。

2.2 光路设计优化

在通光口径和焦距一定的情况下,可以通过光路设计的优化来减小系统的体积。常规平行光管采用凹面镜一次反射设计,长度超过其焦距指标。离轴抛物面反射式光路由于无色差、口径适用范围大,越来越受到重视,并广泛应用于辐射校准、宽波段的目标模拟及检测等工程领域^[7]。本文采用离轴多次反射式光路设计,有效利用了系统空间,大幅压缩了平行光管长度,减少了系统的体积,而且通过优化设计,保证了像质,达到满意的效果,其缺点是由于采用了两个反射镜,且其间距较短,增加了光学调试的难度。准直光学系统如图 2 所示。

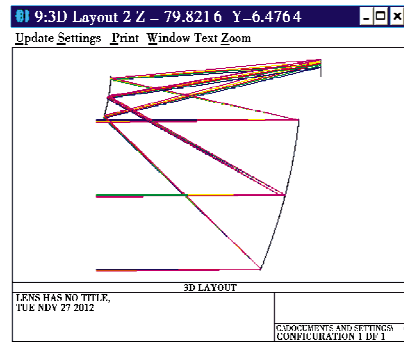


图 2 平行光管光学原理图

Fig. 2 Schematic diagram of collimator

光学系统由主、次两个反射镜组成。其中,主镜为离轴抛物面镜,次镜为双曲面凸镜,位于光学系统焦平面处的靶标图像先后经次镜、主镜两次反射后平行输出。与卡塞格林光路相比,离轴反射方式不存在中心遮拦,而且设计指标中可优化调整的变量多,便于控制视场大小和改善系统成像质量。根据平衡像差的需要,设计中需对次反射镜进行高次处理。轴对称二次曲面方程为

$$Z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} \quad (1)$$

式中:以曲面顶点为坐标原点; Z 为曲面上各点沿光轴方向坐标值; k 为二次曲面常量; r 为光线与曲面交点高度; c 为顶点曲率。对称回转高次非球面有偶次非球面、奇次非球面两类,本系统采用偶次非球面,其方程为

$$Z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + a_1r^2 + a_2r^4 + a_3r^6 + a_4r^8 + a_5r^{10} \quad (2)$$

通过主镜与次镜优化组合对球差得到较好校正,

为减小残余彗差及像散,对次镜面型分别进行4次、6次、8次、10次修剪,将主抛物面镜顶点曲率半径、主次镜间距、次镜高次系数等变量进行微调找到平衡点,使像质改善。此光学系统对波长8 μm,10 μm,12 μm的MTF曲线及点列图如图3所示,其调制传递函数已经接近衍射极限。

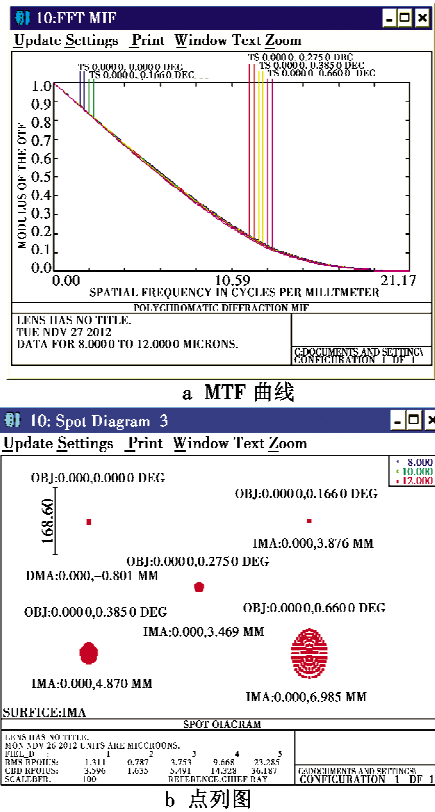


图3 光学系统仿真结果

Fig. 3 Simulation result of optical system

2.3 镜片加工优化

对于常规的光学系统,镜片均采用玻璃(K9 GB/T903-1987)来加工,在检测仪初样机的研制中,采用该材料加工离轴抛物镜,其重量达3.5 kg,为了实现轻量化,在正样机中采用硬铝(2A12-T4 GB/T3191-1998)材质,进行表面处理并镀制银反射膜,使主镜重量降到1.0 kg,极大地降低了光学系统的重量。

通过上述3个方面的优化设计,最终研制的平行光管如图4所示。



图4 离轴抛物面多反式平行光管实物

Fig. 4 Off-axis paraboloid multi-reflection collimator

实现指标:1) 通光口径为120 mm;2) 焦距为720 mm;3) 视场为1.1°;4) 分辨率为10";5) 尺寸为320 mm×210 mm×160 mm;6) 重量为4.3 kg。

科技文献查新检索表明,在同等口径、焦距条件下,该平行光管为目前国内外体积最小、重量最轻的红外平行光管装置。

3 小型面源黑体设计

黑体辐射源是实现红外热成像系统性能检测和定标的关键设备,其功能是在一定区域面积范围内,提供一个稳定、均匀的温度场,配合红外准直光学系统和红外靶标,为被测红外热像设备提供标准的测试目标源,完成MRTD,MDTD,NETD等指标测试和性能评估。黑体辐射源的温控精度对指标检测的精度起着决定性作用^[8]。目前市场上有成熟的黑体产品,但是某些产品对于一定辐射面积及温控精度,其体积、重量指标较大,不适用于便携式场合。本文根据空间、重量的限制,自主设计了体积小、重量轻的红外黑体辐射源,并实现了±0.05℃的温控精度。

3.1 面源黑体结构设计

面源黑体将电能转化为热能,并传导到黑体辐射面上,产生均匀精确的温度场。黑体辐射源可以采用单黑体和双黑体两种方案来实现^[9],从系统体积及便携式要求考虑,本文采用单辐射黑体方案,其结构设计主要由辐射面、隔热层、热电制冷器、散热器、风扇、温度传感器等组成,如图5所示。

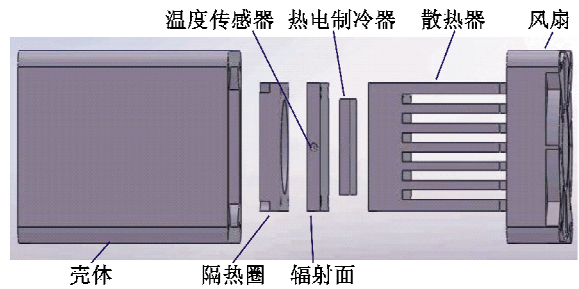


图5 黑体结构设计图

Fig. 5 Structure of black body

为达到热电能及时快速转换的目的,面源黑体必须具备良好的热传导特性,为保证高热容、高发射率,辐射面采用紫铜材料,并且要有一定的厚度,经过反复实验,最后确定采用4 mm的紫铜板,温度响应速度及控制精度可以达到指标要求。紫铜辐射面的中央位置留有孔,用于安装温度采集电阻。为了提高紫铜板发射面的辐射率,在黑体漆中加入热辐射率高达97%的炭黑材料,并且采用等离子喷涂工艺保证了高均匀性和高粘连强度。通过导热硅脂将热电制冷器的一面与辐射面粘合在一起,另一面与散热器粘合,散热器的

散热槽端安装风扇。壳体为整个电热传导系统提供一个相对稳定的热交换空间,以减少外界空气流动干扰。壳体的外端面开有辐射通孔,采用导热系数低的环氧树脂材料加工成隔热层,用于隔断外界与壳体内部的热交换,隔热层的中间开有通孔,提供热辐射通道。

3.2 驱动电路设计

驱动电路组成框如图6所示。

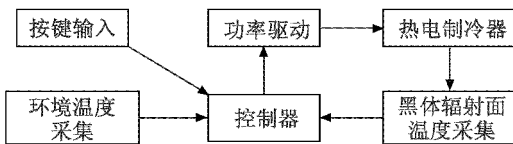


图6 黑体驱动电路组成框图

Fig. 6 Composition of black body driver circuit

驱动电路主要包括控制器、功率驱动、温度采集、热电机冷器等。其中,控制器是系统的核心,工作原理是:用户通过交互界面设定所需的辐射源温差,控制器有两路温度采集通道,A通道实时采集环境温度,B通道实时采集热辐射面的当前温度,控制器根据设定温差值、环境温度值、热辐射面温度值等信息通过PID控制算法,计算出当前的控制参数,控制功率驱动电路驱动电热能转换器件,实现制冷或加热,从而改变热辐射源的当前温度值。控制器在完成温度采集、控制的同时,还实时将当前温度数据传送到交互界面,用于显示。电热能转换器件采用热电机冷器(TEC),温度采集模块采用温度传感器(Pt100铂热电阻)和电桥实现,通过PID控制算法和牛顿迭代算法,实现辐射面与环境温差的高精度控制。研制出的红外黑体辐射装置经某计量测试中心的测试,其技术指标满足:1)温控精度为 $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$;2)差分温度范围为 $-12\sim+15\text{ }^{\circ}\text{C}$;3)辐射面发射率为97%;4)辐射面直径为30mm;5)外形尺寸为70mm \times 70mm \times 90mm;6)重量为0.8kg。

4 结论

要实现红外检测设备的小型便携,关键是进行红外平行光管与黑体辐射源的小型化设计。针对平行光管,分别从设计指标、光路、加工3个方面进行了优化设计。由于市场上现有的红外黑体重量、体积不能适应小型便携要求,本文根据系统特点自主设计开发了面源黑体的结构及驱动电路,研制的小型面源黑体嵌入到平行光管内部,而其驱动电路则嵌入至测控系统内部,构成完整的红外目标模拟器。最终研制的红外系统检测仪由红外目标模拟器与测控系统两个部件组成,其中目标模拟器尺寸为320mm \times 210mm \times 160mm,重量为5.1kg,测控系统尺寸为300mm \times 170mm \times 120mm,重量为4.9kg,整机装箱重量小于15kg,实现了小型便携的目标。

目前,该检测仪通过了各项测试,性能稳定可靠,可进行红外热像系统NETD,MRTD等多项关键指标的检测,由于其便携性好,特别适用于大型、难以拆卸的红外系统的在线性能测试。

参考文献

- [1] 袁继俊. 红外探测器发展述评[J]. 激光与红外, 2006, 36(12):1099-1102. (YUAN J J. Review of infrared detector development[J]. Laser & Infrared, 2006, 36(12):1099-1102.)
- [2] 李才平, 邹永星, 杨松龄. 基于微光与红外的夜视技术[J]. 国外电子元器件, 2006(2):72-75. (LI C P, ZOU Y X, YANG S L. Night vision technology based on low light level and infrared[J]. International Electronic Elements, 2006(2):72-75.)
- [3] 彭焕良. 红外焦平面热成像技术的发展[J]. 激光与红外, 2006, 36(s):776-780. (PENG H L. The development of the IRFPA thermal imaging technology[J]. Laser & Infrared, 2006, 36(s):776-780.)
- [4] 李颖文, 潘德彬, 刘爱东, 等. 通用红外测试系统的精度分析[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(s):272-274. (LI Y W, PAN D B, LIU A D, et al. Accuracy analysis of universal infrared test system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(s):272-274.)
- [5] 苏红雨, 张宪亮, 陈宇. 红外热像仪性能参数的评价[J]. 中国测试, 2010, 36(1):14-19. (SU H Y, ZHANG X L, CHEN Y. Characteristics evaluation of infrared thermal imaging system[J]. China Measurement & Test, 2010, 36(1):14-19.)
- [6] 田海雷, 汪岳峰, 张伟. 离轴抛物面反射式红外平行光管设计[J]. 红外技术, 2007, 29(12):701-703, 707. (TIAN H L, WANG Y F, ZHANG W. Design of the off-axis parabolic reflective infrared collimator[J]. Infrared Technology, 2007, 29(12):701-703, 707.)
- [7] 钱煜, 潘君骅. 离轴抛物面镜的单元加工技术[J]. 光学技术, 1998(3):47-48. (QIAN Y, PAN J H. Abaxial parabolic mirror unit-processing technique[J]. Optical Technology, 1998(3):47-48.)
- [8] 顾金良, 张海, 章萍. 红外成像目标模拟靶系统的研究[J]. 测控技术, 2004, 23(11):16-18. (GU J L, ZHANG H, ZHANG P. Study on the object simulation targets system with IR imaging[J]. Measurement & Control Technology, 2004, 23(11):16-18.)
- [9] 胡铁力, 李旭东, 傅建明, 等. 红外热像仪参数的双黑体测量装置[J]. 应用光学, 2006, 27(3):246-249. (HU T L, LI X D, FU J M, et al. Double-blackbody unit for measuring parameters of infrared cameras[J]. Applied Optical, 2006, 27(3):246-249.)