

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.11.017

红外热像仪外场性能测试系统

王真胜¹, 马飒飒², 宋伟³

(1. 北京军区军械雷达修理所, 北京 100042; 2. 总装军械技术研究所, 石家庄 050000;
3. 河北科技大学管理学院, 石家庄 050013)

摘要: 为了满足部队外场条件下进行红外热像仪技术性能检测的设备需求, 设计一套红外热像仪外场性能测试系统。在现有几种典型的检测系统的产品基础上, 通过等效条带图案的方法, 预测热成像系统在多种概率下的可探测、识别和认清距离的数学模型, 确定各种红外装备的检测修正因子, 得到测试参数精确性能指标, 并设计了红外热像仪外场性能测试系统的总体设计方案及实现的方法。实测数据分析表明: 该测试系统在结构设计上有一定的创造性, 可满足部队维修保障需求, 具有应用价值。

关键词: 红外热像仪; 外场测试; 最小可分辨温差; 温度补偿

中图分类号: TJ06 **文献标志码:** A

Research on Performance Test System in Outfield of Thermal Infrared Imager

Wang Zhensheng¹, Ma Sasa², Song Wei³

(1. Ordnance Radar Repairment Place of Beijing Military, Beijing 100042, China;
2. Ordnance Technology Research Institute, Shijiazhuang 050000, China;
3. Management College, Hebei Science & Technology University, Shijiazhuang 050013, China)

Abstract: In order to meet the need of outfield thermal infrared imager performance test equipments in military, a set of the outfield of thermal infrared imager performance test system is designed. Based on several current typical test system product, through the equivalent band patterns method, the detection of thermal imaging system is predicted under various probability, the model of recognize the distance is distinguished, the detection and correction factors of various infrared equipments are determined, the accurate parameters in performance test are gotten, overall design scheme and implementation method is designed. Analysis the measured data show: the test system has certain creativity in structure design, which can meet the need of military equipments repair and guarantee and has application value.

Keywords: thermal infrared imager; outfield test; the minimum resolvable temperature difference; temperature compensation

0 引言

随着红外热成像技术的发展, 由于红外热像仪设备能全天候工作且具有较强的目标探测能力, 在战场侦察、战场监控、火控及制导系统中得到大量应用。目前我军红外热像仪装备以承制方保障的模式为主, 维修保障的周期长、费用高且很难做到及时、准确的保障。基层级和中继级修理机构受到检测手段的限制, 不能对红外设备进行性能检测和深度维修, 导致该类装备仅限于更换外围功能组件的简单修理, 而故障组件由于维修手段及地域的限制, 无法及时得到修理, 部分红外热像仪长期处于待修状态, 严重影响了装备的完好率及战斗力。基地级进行红外热像仪性能检测一般采取实验室评价的方法, 实验室检测系统功能全面, 适用于多种热成像

系统; 但实验室检测系统设备庞大, 装调复杂, 光路开放, 对微环境要求严格, 检测过程比较繁琐, 对测试人员能力要求高。

由于没有适合部队外场使用的检测设备及方法, 部队技术人员只能凭借经验判断红外热像仪的性能, 往往由于经验不足和气候环境的影响导致对热像仪的性能评估可信度较低, 装备的维修质量缺乏评判依据。因此, 笔者针对这种情况, 对部队外场条件下进行红外热像仪技术性能检测的设备需求进行研究。

1 红外热像仪性能测试系统简介

红外热像仪自诞生至今已有近一个世纪的发展历程, 从最初的光机扫描式成像发展到如今的凝视型成像, 红外热像仪的成像质量及性能参数的提高

收稿日期: 2011-07-15; 修回日期: 2011-08-29

基金项目: 通保科研项目(装通[2009]115号)

作者简介: 王真胜(1969—), 男, 贵州人, 学士, 高级工程师, 从事通用雷达装备维修保障研究。

是热成像技术进步的最好证明。对热像仪的探测、分辨能力、精度、工作波段等性能的评价指标主要包括: 信号传递函数(signal transfer function, SiTF)、调制传递函数(modulation transfer function, MTF)、噪声等效温差(noise equivalent temperature difference, NETD)、最小可探测温差(maximum dimensionless temperature difference, MDTD)和最小可分辨温差(minimum resolvable temperature difference, MRTD)等。

目前, 常见的红外热像仪测试设备主要来自一些欧美国家厂商, 如美国的 SBIR 公司、EOI 公司、以色列的 CI-Systems 公司、波兰的 Inframet 公司等。SBIR 公司对红外、可见光成像等性能参数的测试技术一直处于领先地位, 黑体、平行光管、目标靶盘、温控器、测试软件等产品占据国际市场; 其民用/商用红外测试产品主要包括 STC 系列平行光管, 14000 系列的目标投射器(包含平行光管、黑体及多种靶标)、300 系列目标靶轮、IRWindows 测试软件等, 如图 1。

EOI 公司是生产成像系统测试仪的专业公司, 其产品包括积分球、黑体、平行光管、目标靶盘、高精度温控器、光谱仪等测试器材。EOI 公司主要研发实验室用的测试设备, 除单件测试器材外, 也提供用于成像系统性能测试的完整解决方案, 如用于可见光及红外的 66566 型可见/红外测试站等。



图 1 SBIR公司的军用红外测试系统

以色列CI-Systems公司有30多年的红外测试设备生产经验, 其产品主要有黑体、靶标、激光测试器、红外外场测试系统、光谱仪、导弹告警系统测试器等。

CI提供的用于外场的红外测试系统包括IR CFT(Compact Field Tester紧凑型外场红外测试仪, 如图2(a))和O-Level多传感器系统测试仪(如图2(b))。

CFT为减小体积采用了透射式平行光管, 并将光管、黑体和靶标设计为一体, 大大提高了其便携性, 该系列口径125 mm的测试仪长度为500 mm, 质量仅为4.8 kg。

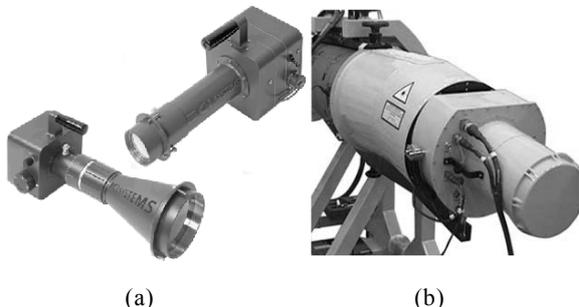


图 2 CI-Systems公司的外场红外测试仪

2 红外热像仪外场性能测试系统设计

2.1 总体设计

部队维修过程中对热像仪整机的性能测试指标参数主要包括最小可分辨温差(MRTD)或最小可探测温差(MDTD)等。用于外场的热像仪性能测试系统采用模块化设计以减小体积, 方便携带; 提供自动化测试软件以降低对使用人员专业知识以及操作技能的要求。综合考虑测试需求、测试环境、操作人员等因素, 红外热像仪外场性能测试设备的系统设计过程重点考虑如下问题: 外场测试系统对于便携性、机动性的要求; 运输震动对于测试系统的影响; 外场测试环境温度、湿度、日照、风力等变化对于测试系统精度的影响等。

针对上述关键问题, 确立设计原则及解决方法如下:

- 1) 模块化设计方法满足测试系统外场便携性要求;
- 2) 透射式红外平行光管设计解决外场运输对于测试系统的影响问题;
- 3) 高精度的温度补偿系统解决外场环境温度变化对于测试系统精度的影响问题;
- 4) 提供自动化测试软件以降低对使用人员专业知识以及操作技能的要求。

2.2 硬件设计

如图 3, 根据热像仪性能测试系统中各部分的作用, 测试系统分为平行光管、黑体、温控器(黑体控制器)、靶标及靶轮和计算机等功能模块。

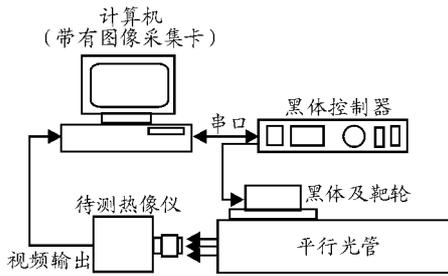


图 3 红外热像仪测试系统结构图

由于采用黑体、靶轮、平行光管分体设计的测试系统通常体积较大,并且在拆卸后再装配时往往需要繁琐的调试过程,因此在本系统方案中将上述 3 部分进行一体化结构设计,以减小体积并避免繁琐的调试。其设计结构如图 4。前端采用透射式的红外平行光管。多目标电动靶轮位于平行光管与黑体之间,能够产生标准 4 条带图样、圆形、方形以及窄缝等 4 种相对标准的目标;各种靶标均有不同的频率,并根据空间频率不同做成多组图案以供不同的装备检测使用。该设计密封性好,且对于热像仪的最小成像距离没有限制,在增加有限重量的前提下克服了 Inframet-LAFT 测试系统的无平行光管设计存在的缺陷;且相对于常用的离轴式平行光管,透射式平行光管的结构更加稳固,镜片位置不易发生变动,具有较好的抗震性。

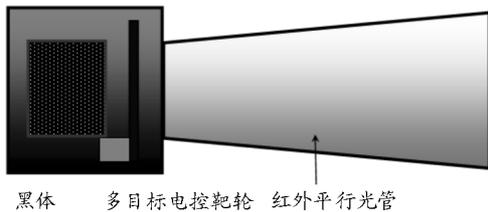


图 4 靶标系统结构简图

温度屏蔽罩连接在待测热像仪设备与测试系统之间,确保光路不受风、光等因素影响热循环干扰测试,满足外场测试的精度要求。黑体控制器(温控器)由于电源及散热的限制,体积较大,因此将其作为独立模块与黑体分置。工控机固定在特制的具有防潮、防震功能的机箱中,使用加固显示器和防水键盘,以达到外场测试环境要求;为图像采集卡、串口卡(用于计算机与温控器以及电动靶轮控制器)等预留 4 个 PCI 插槽。采用了高采样精度 10 bit 的高速 AD 图像采集卡获取图像数据,以满足采测试数据精度要求。

为方便外场使用,计算机、黑体控制器以及电源均被固定放置于同一机柜中,其结构示意图如图 5,显示器与键盘在运输时可合起放置于机柜中,使用时则可通过导轨抽出,工控机、黑体控制器、靶标控制器、电源等被固定于下方并。机柜采用双层壳体,在壳体之间安装减震设备,进一步增强设备的抗震性能。

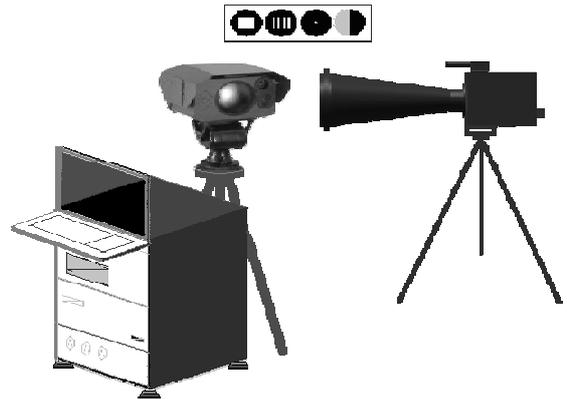


图 5 外场测试系统组成示意图

根据设计方案,该测试系统的基本配置是:核心的测试部件采用定制的高精度黑体辐射源,配合设计的多目标电控靶轮的形式作为测试目标源,配有 MRTD 测试用 4 条带靶 2 个、MDTD 测试用针孔靶 1 个、MTF 测试用狭缝靶 1 个、SiTF 测试用正方形靶 1 个。

温度控制器配合高精度黑体辐射源工作,为系统测试目标提供稳定精度的温度信息:温度分辨率为 0.01 °C、控温精度(温差)为 0.05 °C。

数据处理及控制采用高性能工业控制计算机系统配置为:CPU≥2 GHz,内存≥2 G,硬盘≥60 GB(采用固态硬盘系统),接口为 4 个 PCI 接口(半长)。

2.3 透射式红外平行光管设计

为了解决外场测试震动环境对于测试系统的影响,设计采用透射式红外平行光管解决外场震动环境对于测试系统的影响。透射式平行光管可以较好的解决反射式平行光管无法解决的防水、抗震、体积偏大,重量偏重的问题(见图 6)。特别是创造性地在透射式平行光管的设计中增加了自动调焦装置,使性能测试系统通用化的同时将测试操作自动化,降低了对测试人员的要求。



图 6 透射式平行光管设计外形图

2.4 高精度温度补偿系统设计

透射式平行光管焦距较长，在温度变化过程中会发生系统焦点偏移，造成系统测试性能下降，因此外场测试环境温度变化对于测试系统精度的影响不可忽视。针对透射式平行光管工作特性，在系统设计中增加了高精度的温度补偿系统，以提高测试系统的温度适应性，其工作原理如图 7。



图 7 温度补偿原理图

2.5 测试参数算法设计^[1]

2.5.1 SiTF 测试算法

信号传递函数通过输出探测器输出电压和目标温度的比值曲线，得到热像仪的增益、线性及动态范围及饱和点，可直接反映热像仪的响应能力。SiTF 参数自动测试过程中，首先通过图像采集卡获得目标与背景在一定已知温差 (ΔT) 下的图像，再将图像中背景与目标的灰度值转换为对应的电压值 V_B 与 V_T ，则电压差与温差的比值即

$$SiTF_{\Delta T} = \frac{V_T - V_B}{\Delta T} \quad (1)$$

式 (1) 为此温差下的信号传递函数。通过调节靶标温度，获得其他温差下的 SiTF 值，正温差和负温差均需进行测量。

2.5.2 NETD 测试算法

噪声等效温差是指图像信噪比为 1 时的目标与背景温差。NETD 通常在零信号条件下测出噪声的均方根电压值，再通过 SiTF 转换为相应的温差值。因此在测试 NETD 之前通常需先测出对热像仪的 SiTF，之后通过对多帧连续图像的处理得到与时间

相关的三维噪声。

在 NVESD 所提出的三维噪声模型中，凝视型热像仪的 NETD 可以近似为三维噪声中 7 个分量中的瞬态像素噪声 N_{rvh} 。

2.5.3 MTF 测试算法

调制传递函数体现了成像系统的频率特性即其重现场景的能力。理论上，成像系统能够表现出的最高频率为系统的截止频率即奈奎斯特频率。

MTF 自动测试时，首先要采集多帧热像仪拍摄的刀口靶图像进行平均以降低其高频噪声，通过插值得到其边缘扩展函数 (ESF)，再通过求导变换得到线扩展函数 (LSF)，最后通过快速傅里叶变换及归一化得到 MTF^[2]。

2.5.4 MRTD 测试算法

最小可分辨温差是观察者可以分辨出的不同空间频率的 4 条带目标与背景之间的最小温差，是综合评价热成像系统温度分辨力和空间分辨力的重要参数。

手动测试 MRTD 首先要测出一定频率下热像仪能够探测的最小正温差 dT_f^+ 和负温差 dT_f^- 。手动测试某频率下 MRTD 值表示为：

$$MRTD_f = \left(\frac{dT_f^+ - dT_f^-}{2} \right) Trans \quad (2)$$

式中 $Trans$ 为系统的透射率。

MRTD 估算值的经典表达式为：

$$MRTD_{CLASSICAL}(f) \approx k_1 \frac{NETD}{MTF_{PERCEIVED}(f)} \sqrt{\beta_1 + \dots + \frac{\langle \sigma_n^2 \rangle}{\langle \sigma_{TWH}^2 \rangle} \beta_n} \quad (3)$$

其中： $MTF_{PERCEIVED}$ 为成像系统、显示器以及人眼 MTF 的积； β_n 表示人眼对噪声量 σ_n / σ_{TWH} 的滤波因子； k_1 为一常数。应用 $NETD / MTF$ 方法自动测试 MRTD 的计算方法为：

$$AMRTD(f) = k(f) \frac{NETD}{MTF_{SYS}(f)} \quad (4)$$

其中，校正参数为：

$$k(f) = \frac{k_1}{MTF_{MONITOR}(f) MTF_{EYE}(f)} \sqrt{\beta_1 + \dots + \frac{\langle \sigma_n^2 \rangle}{\langle \sigma_{TWH}^2 \rangle} \beta_n} \quad (5)$$

校正参数与装备的类型有关，MRTD 的自动测试在已知型号装备 $k(f)$ 参数的基础上直接计算。

自动测试的过程如图 8。



图 8 MRTD自动测试过程

2.5.5 MDTD 测试算法

最小可探测温差是指观察者能够分辨出一定空间频率下的方形或圆形目标与背景的最小温差, 是评价红外热成像系统的一个重要参数, 它既反映了热灵敏度特性, 也反映了系统的空间分辨力。其自动测量除靶标不同外, 数据处理采用与 MRTD 测试类似的方法。

表 1 试验 1 测试数据对比表

评价指标	装备出厂数据	实验室评估		外场评估	
		人工	自动	人工	自动
SITF/(mV/°C)	330		317		318
NETD/(mK)	20		22		22
MRTD/(mK)	10	11.5	11	12	11
测试结论		合格	合格	合格	合格

试验 2: 以某车载红外设备在室外进行试验, 经外场测试确定红外设备性能不合格后, 将设备从武器平台上拆下, 送实验室进行进一步的确认。

室外环境: 温度为 27 °C, 湿度为 80%, 气压为 100 kPa, 风力为 3 级, 日光斜射。

实验室环境: 温度为 25 °C, 湿度为 70%, 气压

表 2 试验 2 测试数据对比表

评价指标	装备出厂数据	实验室评估		外场评估	
		人工	自动	人工	自动
SITF/(mV/°C)	350		385		385
NETD/(mK)	25		27		27
MRTD/(mK)	20	35	38	38	38
测试结论		不合格	不合格	不合格	不合格

4 结束语

红外热像仪外场性能测试系统基于静态性能模型的热成像系统作用距离模型, 在考虑气象条件、目标特征和路径的条件下, 通过等效条带图案的方法, 预测热成像系统在多种概率下的可探测、识别和认清距离的数学模型, 反映对应的热成像系统在外场条件下对典型目标的实际观察效果, 确定各种红外装备的检测修正因子, 得到测试参数精确性能

3 应用案例分析

应用该测试设备对 2 种典型红外热像仪装备进行了验证试验。

测试设备: 在实验室使用 SIRA 热像仪评价系统、在外场使用红外热像仪性能外场测试系统。

试验 1: 以某型手持红外热像仪分别在室内和室外进行对比试验。

测试方法: 人工测试、自动测试。

实验室环境: 温度为 25 °C, 湿度为 70%, 气压为 98 kPa, 无风, 面积 150 m²。

室外环境: 温度为 29 °C, 湿度为 85%, 气压为 98 kPa, 风力为 2 级, 日光斜射。

测试结果如表 1。

为 98 kPa, 无风, 面积为 150 m²。

测试结果如下表 2。

试验验证表明: 红外热像仪外场性能测试系统的测试结果与实验室的 SIRA 热像仪评价系统的测试结果相比偏差在合理范围, 能够满足对红外热像仪进行性能评估的要求。

指标。具体测试案例及数据对比分析表明, 该测试系统可基本满足部队对红外热像仪的维修保障测试需求。

参考文献:

[1] 白廷柱, 金伟其. 光电成像原理与技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.
 [2] 李行善. 自动测试系统集成技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.