

红外热像仪噪声等效温差工程化测试方法

初 华, 万 强, 黎 伟, 曹海源, 杨 雪, 韦尚方, 米朝伟

(武汉军械士官学校 光电技术研究所, 湖北 武汉 430075)

摘 要:针对噪声等效温差(NETD)工程化测试要求,设计一套可对 NETD 自动测试的系统和办法。该系统采用离轴非球面折叠光路,设计出口径 120 mm,焦距 720 mm 的平行光管,大幅减少系统体积。采用热电制冷器 TEC 作为黑体的电控加热和制冷源,实现温控精度 0.05 °C 的黑体辐射。通过改进的测试算法,测试时间只需要 5 s 左右,大幅提高检测效率。经与 CI 测试系统对比测试,结果表明:NETD 测量一致性好,准确度高,具有工程化应用价值。

关键词:噪声等效温差;工程化测试;黑体;离轴非球面

中图分类号:TN24 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2016.12.012

Engineering measurement method of NETD for thermal infrared imager

CHU Hua, WAN Qiang, LI Wei, CAO Hai-yuan, YANG Xue, WEI Shang-fang, MI Chao-wei
(Opto-Electronics Facility, Wuhan Ordnance Non-Commissioned Officers Academy, Wuhan 430075, China)

Abstract: For the requirements of NETD measurement in engineering, an automatically testing method and system for NETD are designed. This system uses off-axis aspheric two-double light route. A collimator with 120 mm aperture and 720 mm focus is designed, which can reduce the volume of system. Black body uses TEC as source for heating and refrigerating. Temperature control precision reaches 0.05 °C. Testing time is only 5 s by improving algorithm, which can improve the detection efficiency. Compared with CI system, the consistency and precision of NETD measurement are good. This system has an application value in engineering.

Key words: NETD; engineering test; black body; off-axis asphere

1 引 言

噪声等效温差(NETD)是红外热像仪静态性能的主要参数之一,客观反映热像仪对目标温度的探测灵敏度。NETD 的实验室测试方法很多,并且有专用的检测设备,如美国的 SBIR、波兰的 Inframmat、法国的 HGH、以色列 CI-Systems 等公司生产的红外热成像性能测试系统,都具备 NETD 的测试功能,但上述公司的测试系统体积重量庞大,测试时间长,只适用于实验室内专项测试,对于已经批量生产或列

装的红外热像装备,操作过于繁琐,适用性不强,尤其是野外环境下的平台类红外分系统,拆卸安装都很复杂,不可能在实验室环境下进行 NETD 的测试。因此,迫切需要一种工程化的测试系统及方法,满足野外便携式的检测需要。

针对红外热像仪 NETD 测试方法问题,国内各大科研机构及院所都有相关报道^[1-8]。文献[1]构建 NETD 测试数学模型及影响 NETD 测试的主要因素,并没有提出具体的测试方法。文献[2]分析

作者简介:初 华(1985 -)男,硕士,讲师,主要研究方向为激光器驱动电源,智能控制等领域。E-mail: chuhua666@126.com

收稿日期:2016-03-28; **修订日期:**2016-05-04

NETD 理论测试方法及图像处理对 NETD 测试的影响,并没有提出具体设计光路及图像处理算法。文献[3]只分析了 NETD 的测试原理及测试结果分析,并没有给出具体的测试系统。文献[4]给出了一种简化计算 NETD 的方法,但缺少与实验室检测设备的测试数据比较。这些研究大都基于理论模型,缺少具体应用分析,且为了使模型准确,其具体的实现过程将会非常复杂,工程化意义不大。

文中提出了一种 NETD 工程化测量方法,从系统光学设计到黑体设计,再到软件算法处理等方面,详细阐述 NETD 的测量方法,并与以色列 CI 测试系统的测试结果相比对,验证测量方法的可行性和准确性。

2 光学系统设计

平行光管采用离轴非球面折叠式光路设计,主要由主反射镜和次反射镜组成,主、次反射镜都采用离轴非球面镜,如图 1 所示。为满足绝大多数红外热像装备的测试需要,主镜的通光口径设计为 120 mm,次镜的通光口径为 43 mm。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,同时考虑到大多数红外热像仪的口径在 120 mm 左右,因此设计红外模拟器焦距 $f = F\# \times D = 720$ mm。该光路相对于离轴式牛顿系统及卡塞格林系统,将次镜平面反射镜改为双曲面镜,在焦距一定的前提下可以进一步减小系统体积,将主镜、次镜进行离轴设计,解决光场中心遮拦的问题,从而实现平行光管的小型化及轻量化。

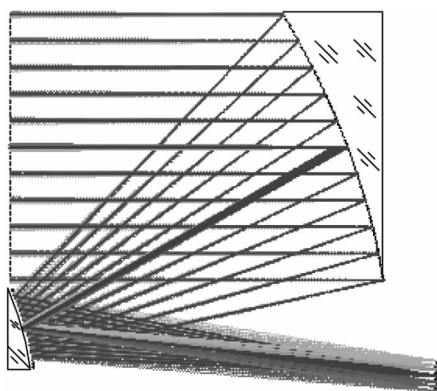


图1 平行光管光学系统

Fig. 1 Optical system of collimator

主反射镜的曲面方程为:

$$Z = \frac{H^2}{R[1 + \sqrt{1 - (1 + K)(H/R)^2}]}$$

其中, Z 为曲面上各点沿光轴方向坐标; R 为曲率半径; K 为二次曲面常量; $H = \sqrt{x^2 + y^2}$ 。

次反射镜为偶次离轴非球面,其曲面方程为:

$$Z = \frac{H^2}{R[1 + \sqrt{1 - (1 + K)(H/R)^2}]} + AH^4 + BH^6$$

主镜与次镜优化组合可以对球差进行校正,但残余慧差、像散较大,因此需要对次镜面型进行多次修剪优化。在优化之初,先把主抛物面镜顶点曲率半径、主次镜间距、次镜高次系数作为变量,优化使像质得到改善,多次优化以后,再对 4 次、6 次系数进行人为的微调找到平衡点,再次优化,最后达到满意的效果。通过光学设计软件对系统光路进行模拟仿真,此光学系统对波长 8 μm 、10 μm 、12 μm 的 MTF 曲线如图 2 所示,可以看出其调制传递函数 MTF 已经接近衍射极限,系统成像质量很好。

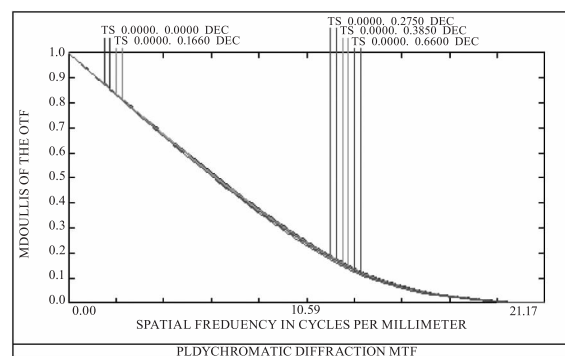


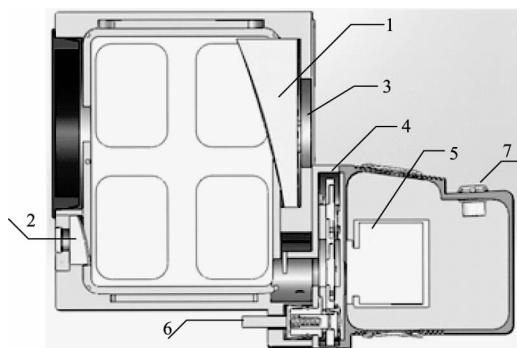
图2 系统 MTF 曲线图

Fig. 2 Graph of system MTF

3 机械结构设计

系统主要由主、次反射镜及相关连接座、黑体、靶盘、拉手等组成。图 3 所示为系统机械结构剖面图。

主离轴非球面反射镜与主镜连接座连接,采用固定螺丝将主镜连接座固定在壳体侧面,通过调整主镜连接座固定螺丝可以调节主离轴非球面反射镜的倾斜角度。次反射镜与次镜连接座连接,高度在主离轴非球面反射镜以下,通过调整次镜连接座固定螺丝可以调节次离轴非球面反射镜的倾斜角度。红外波长光束经黑体产生,通过靶标后产生特定形状的红外光束,先后经次反射镜、主反射镜两次反射后从平行光输出孔输出,模拟无穷远处红外目标源。



1 - 主反射镜; 2 - 次反射镜; 3 - 主镜连接座;
4 - 靶轮(其上有丝杆靶、半月靶、方霸等靶标,
满足红外不同指标的检测); 5 - 小型黑体;
6 - 把手,(拉开可旋转靶盘,选择靶标,弹回固定靶轮,
不再旋转); 7 - 电缆接口(负责供电和通信)

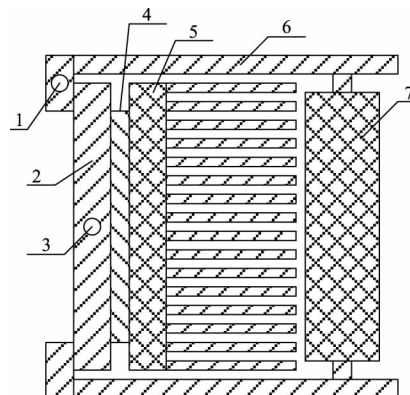
图3 机械结构剖面图

Fig. 3 Mechanical diagram of system

4 黑体设计

黑体采用热电制冷器 TEC 作为电控加热和制冷源,采用具有一定厚度的高热容紫铜作为辐射体,

涂有高辐射率材料的辐射面,配合散热器和风扇,构成结构简单、体积小、重量轻的黑体,可实现正负温差控制,生成温差可控的红外辐射源。黑体示意图如图4所示。



1 - 环境温度热敏电阻安装孔; 2 - 热容紫铜辐射面;
3 - 辐射面温度热敏电阻安装孔; 4 - TEC;
5 - 散热器; 6 - 安装壳体; 7 - 风扇

图4 黑体结构图

Fig. 4 Mechanical diagram of black body

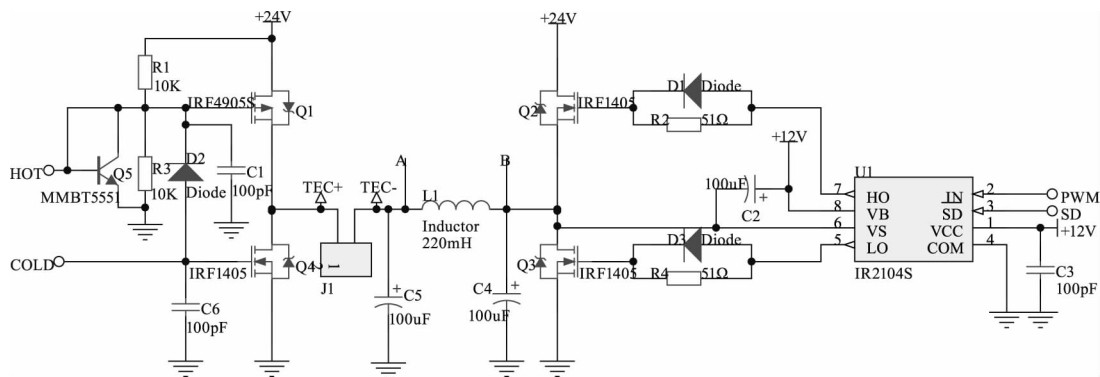


图5 黑体温控电路图

Fig. 5 Temperature control circuit of black body

黑体控制电路采用 H 桥电路, MOS 管 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 构成桥式电路的主回路,如图5所示。加热和制冷控制分别由 HOT 端子和 COLD 端子控制,比如需要加热时, HOT 给高电平信号, COLD 给低电平信号, Q_1 完全打开, Q_4 完全关闭, 电流从 TEC + 端流向 TEC - 端, Q_2 、 Q_3 为 PWM 控制的对称开关管, 即 Q_2 开通时 Q_3 关闭, Q_3 开通时 Q_2 关闭, 开关时间由 PWM 占空比决定。当需要制冷时, HOT 给低电平信号, COLD 给高电平信号, Q_1 完全关闭, Q_4 完全打开, 电流从 TEC - 端流向 TEC + 端, 电感 L_1 电流从 B 端流向 A 端。随着 Q_2 、 Q_3 的开关, TEC 作为负载, 构成了一个降压变换器 (buck 变换器)。设

PWM 波的周期为 T_s , 且 $T_s = t_{on} + t_{off}$, 即 Q_2 开通时间为 t_{on} , Q_3 关断时间为 t_{off} 。设输入电压为 U_i (图中为 24V), TEC 负载端电压为 U_o , 当 Q_2 在导通时间 t_{on} 内打开时, 电流从电感 L_1 的 B 端流向 A 端, 当 Q_2 在关断时间 t_{off} 内关断时, Q_3 打开, 由于电感电流不能突变, 电流方向仍从电感 L_1 的 B 端流向 A 端, 只要电感足够大, 就可在 Q_2 关断 Q_3 打开的时间内形成回路, 使 TEC 内电流不变, 保证足够的制冷量。由于稳态工况下电感电压 U_L 必然周期性重复, 并且在一个周期内 ($T_s = t_{on} + t_{off}$) 积分结果为 0, 因此:

$$\int_0^{t_{on}} U_L dt + \int_{t_{on}}^{T_s} U_L dt = 0$$

在忽略开关管 Q_2 、 Q_3 电压降的情况下, $U_L = U_i - U_o$, 因此可求出 $(U_i - U_o)t_{on} = U_o(T_s - t_{on})$, 用占空比表示为 $\frac{U_o}{U_i} = \frac{t_{on}}{T_s} = D$, 即 $U_o = DU_i$, 因此只要改变 PWM 波的占空比, 即可改变 TEC 的电压, 继而改变流过 TEC 的电流, 达到控制 TEC 发热量或制冷量的目的。

图 6 所示为辐射面温差控制在 2°C 时的实际温度变化曲线图, 采用的测量设备为精度 0.01°C 的红外非接触式温度计, 每隔 1 s 记录一次辐射面的温度。从图中可以看出, 温度控制偏差幅度最大只有 0.05°C , 稳定度达到 97.5% 。

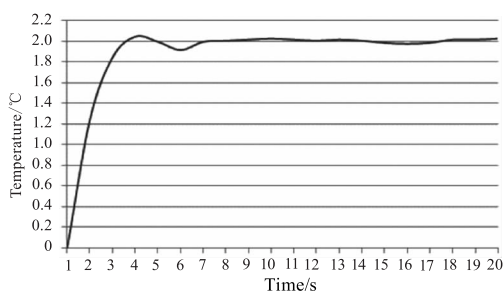


图 6 温度变化曲线图

Fig. 6 Curve graph of temperature variation

5 NETD 测试方法

噪声等效温差 (NETD) 定义是在视场中产生的输出信号值等于噪声均方根值时, 目标和背景之间的温度差, 也就是系统能够识别的最小信号值。即:

$$\text{NETD} = \frac{\Delta T}{V_S/V_N}$$

其中, V_N 为噪声均方根; V_S 为背景温度与目标温度之差为 ΔT 时, 热像仪输出电压信号的变化量。设目标像元平均值 (时间和空间求平均) 为 V_B , 背景像元平均值为 V_G , 则 $V_S = V_B - V_G$, 如图 7 所示。

以色列 CI 检测系统的测试方法是, 通过手动方式, 分别选择一块信号区和背景区, 求出 V_B 和 V_G , 为了计算噪声均方根 V_N , 需要再选择任意一块背景区或信号区, 这样就使检测时间变长, 测量一次 NETD 平均需要 5 min 左右。为了满足工程化测试需要, 对测试方法进行了改进, 改进后测量一次 NETD 平均需要 0.5 min 左右, 大大减少了测试时间, 提高检测效率。具体方法是, 在屏幕上自左上至右下选择一块区域, 该区域必须包含信号区和

背景区, 如图 7 所示的自 A 点到 B 点的矩形区域, 记下 A、B 两点坐标, 通过水平 Sobel 算子对矩形区域进行空间滤波得到方形靶的水平边缘, 水平 Sobel 算子为:

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

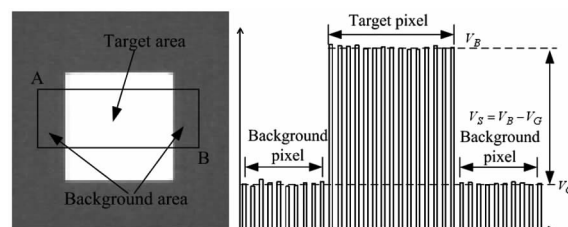


图 7 目标/背景信号示意图

Fig. 7 Diagram of target and background signal

通过边缘识别, 可以确定信号区和背景区的分界线, 以其中的背景区计算噪声均方根 V_N 。噪声包括时间噪声和空间噪声。先利用边缘识别出的背景区域计算空间噪声 V_{RMS} , 设 1 帧图像中背景区域共有 N 个像元, 信号区共有 M 个像元。

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (V_i - \bar{V})^2}$$

其中, V_i 为每个像元的灰度值, $\bar{V} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i$ 。对每帧图像都计算空间噪声, 设共采集 x 张图像, 因此可计算噪声均方根为 $V_N = \frac{1}{x} \sum_{i=1}^x V_{RMS}$ 。实际测试过程中, 为提高测试效率, 减少计算机计算时间, x 一般选择为 64, 即一次采集 64 张图像。

利用边缘识别的区域, 计算信号区和背景区的灰度值 V_B 和 V_G , $V_B = \frac{1}{x \times M} \sum V_i$, $V_G = \frac{1}{x \times N} \sum V_i$, 计算得到 $V_S = V_B - V_G$ 。

代入公式 $\text{NETD} = \frac{\Delta T}{V_S/V_N}$, 可以计算出 NETD 的值。采用此种方法可以快速计算 NETD, 由于采用计算机边缘识别, 省却了人工操作, 在工程上尤其是产品批量检测方面, 大幅提高检测效率。

6 试验验证

试验中以某型号的红外热像仪为被测对象, 与以色列 CI 检测系统在同样的测试条件下进行比对, 测试结果如图 8 所示。从图中可以看出, 测量结果与 CI 测试结果基本一致, 且稳定性很好。

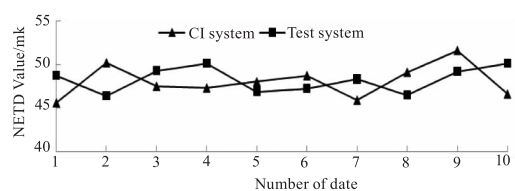


图8 对比测试结果

Fig. 8 Result of contrast test

7 小 结

以红外热像仪噪声等效温差的工程化测试为研究目标,对系统光路、机械结构、黑体以及 NETD 测试方法进行了阐述,最后与 CI 测试系统的测试结果进行了对比。从测试结果可以看出,NETD 测量一致性好,准确度高,测量速度快,测量一次所用时间只需要 5 s,大大提高了测试效率,能够满足工程化测试需要。与 CI 测试系统相比,该系统体积小,重量轻,便于携带,可以应用于野外测量,具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] WAN Ying, QI Meng. Method of TIS's auto NETD-measuring[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(6): 134 - 136. (in Chinese)
万英,祁蒙. 热成像系统 NETD 自动测量方法研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(6): 134 - 136.
- [2] AN Chengbin, WAN Ying. Analysis of NETD test for thermal imaging system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(6): 414 - 417. (in Chinese)
安成斌,万英. 热成像系统的 NETD 测试分析[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(6): 414 - 417.
- [3] QUAN Qingke, QIU Zhenan, CUI Zhixin. A method for testing IR imaging system NETD based on digital image[J]. Electronics Optics & Control, 2013, 20(9): 102 - 104. (in Chinese)
权清科,仇振安,崔志新. 红外成像系统噪声等效温差数字图像测试方法[J]. 电光与控制, 2013, 20(9): 102 - 104.
- [4] ZHONG Wenhui, LI Wenshu, ZHOU Qibo. NETD auto-measuring of focal-plane thermal imaging systems[J]. Laser & Infrared, 2006, 36(7): 565 - 567. (in Chinese)
钟文辉,李文书,周起勃. 焦平面热像仪 NETD 参数的自动测量[J]. 激光与红外, 2006, 36(7): 565 - 567.
- [5] ZHANG Cheng, LI Chunming. Research on NETD test of infrared imaging systems[J]. Journal of Dali University, 2009, 8(4): 37 - 39. (in Chinese)
张成,李春明. 红外热成像系统噪声等效温差测试研究[J]. 大理学院学报, 2009, 8(4): 37 - 39.
- [6] LEI Ping, WU Wenhua, ZHU Qi. Analysis and experiment of testing method for infrared detector and imager[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(9): 1017 - 1020. (in Chinese)
雷萍,吴文华,朱祺. 热成像设备测试方法的实验及分析[J]. 激光与红外, 2013, 43(9): 1017 - 1020.
- [7] HU Mingpeng, LI Hongzhuang, MA Dongmei. NETD test for the staring thermal imaging system[J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(8): 15 - 19. (in Chinese)
胡明鹏,李宏壮,马冬梅. 凝视型红外光电系统噪声等效温差测量[J]. 光电工程, 2007, 34(8): 15 - 19.
- [8] WAN Qiang, CHU Hua, ZHANG Jing. Research on testability indexes for infrared imaging equipment health management[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(2): 191 - 195. (in Chinese)
万强,初华,张晶. 面向红外热像装备健康管理的可测性指标研究[J]. 激光与红外, 2016, 46(2): 191 - 195.