

## 热成像系统测试技术

陈立学 杨斌

(西安应用光学研究所, 陕西, 西安, 710100)

TN216

**A 摘要** 系统地综述了热成像系统主要性能不确定的主、客观测试方法, 以及有关测试设备的校准、标定方法, 并分析了这些测试技术的理论依据。

**关键词** 热成像, 测试, 校准, 最小可分辨温差。

## 引言

热成像系统与其它成像系统一样, 其性能的综合量度有空间分辨率、灵敏度、正弦响应和动态范围等。由于热成像系统依赖的是目标背景温差成像, 其主要参数如最小可分辨温差 (*MRTD*)、噪声等效温差 (*NETD*) 和信号传递函数 (*SITF*) 等均由“温差”来规定, 其中 *MRTD* 这个概念既有空间分辨率的含义, 又包含了热灵敏度等因素, 并且容易掌握、直观可见, 所以得到广泛的应用, 被认为是综合评价热成像系统性能的首选参数。

由于热成像系统利用红外波段成像, 使得它有与可见光不同的测试方法和设备及其校准、标定措施, 它是光学、电视及图像处理等多学科的一门综合技术。

## 1 测试方法与设备

根据识别单一目标的 Johnson 判据<sup>[1]</sup>, 美国陆军夜视和光电实验室 (NVEOL), 在热观察系统静态性能模型中, 提出了采用一组大小不同的 4 条靶 (4-bar target) 作为 *MRTD* 的测试目标, 它能够较好地反映出不同空间频率条件下热成像系统的观察性能。4 条靶与测试 *MTF* 的狭缝靶、测试 *SITF*, *NPS* (噪声功率谱), *NETD* 的靶标和黑体热源一起构成热目标发生器, 通过离轴抛物面准直仪, 为在测系统提供一个视在无穷远的温差目标, 图 1 为基本测试系统框图。

1.1 主观测试 *MRTD*

所谓主观测试就是训练有素的观察者直接观察热成像系统的显示屏幕, 对具有给定空间频率的 4 条靶加一个大的温差, 然后以一定的梯度逐渐减小, 直到操作者判定不能分辨条靶的温差, 这个过程须以正温差和负温差在多个空间频率上重复进行, 直至给出整个 *MRTD* 曲线。采用这种方法, 在每个温差梯度上达到稳定需要几分钟时间, 因此要完成一个测试相当费时。为提高测试效率, 又先后出现了动态测试的 up and down<sup>[2]</sup> 和 ramp and hold<sup>[3]</sup> 测试方法。在这两种方法中用靶标温差的连续快速变化代替了原来的步进变化。up and down 方法观察者用提高和降低两个按钮控制靶标, 连续记录下温差变化情况, 进而可以计算出 *MRTD* 的平均值和标准偏差。ramp and hold 方法允许观察者在任一时刻只要按

一个按钮,就可以冻结温差,静态观察,以利于确认 *MRTD* 值.用 ramp and hold 方法观测的曲线如图 2 所示.

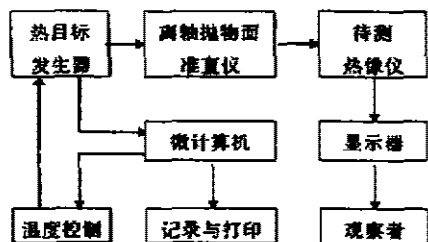


图 1 基本测试系统框图

Fig. 1 Basic experimental configurations

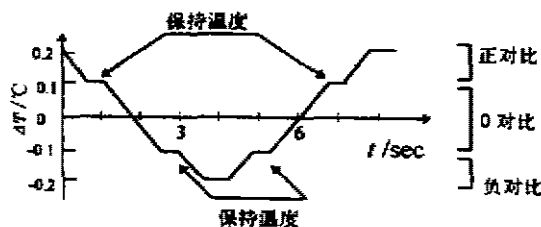


图 2 Ramp and hold 测试方法

Fig. 2 Ramp and hold measurement methods

## 1.2 客观测试 *MRTD*

热成像系统作为直接观察系统,其主观测试以其直观性和与使用的一致性很易为人们所接受.但它必然带有观察者个人的主观性,不可避免地受观察者操作时的状态影响,其结果有时存在高达 50% 的误差.要想取得相对客观的结果,就必须取多名观察者的平均结果,这显然不是一个可行的办法.另一方面,对于导航、跟踪、搜索等自动系统的热成像仪,显示器和观察者已不再是全系统所必需的部分.因此人们试图寻找一种对 *MRTD* 的客观测试方法.微机、数字化和图像处理技术的发展使得客观测试成为可能,但是如何使测试结果与人们已经普遍接受的 *MRTD* 这个主观概念统一起来却是困难的.首先要解决的问题就是要找到能模拟人眼观察性能的数学模型.

### 1.2.1 人眼的传递函数模型

人眼的传递模型一直是人们探索的课题,提出的模型有三种常被使用.

$$MTF_e(\nu) = \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{\nu}{\nu_m}}\right), \quad (1)$$

式(1)中  $\nu$  是空间频率,单位是(cyc/mrad),  $\nu_m$  是人眼 *MTF* 取得最大值时的空间频率,在人眼的物方,这个频率通常取  $\nu_{em} = 0.3 \text{ cyc/mrad}$ ,由成像系统前后的空间频率关系,  $\nu_m/\nu_{em} = FOV_o/FOV_i$ ,折算到热像系统物方,有:

$$\nu = \nu_{em} \frac{FOV_o}{FOV_i} = \frac{0.3}{FOV_i} \frac{1000 \cdot L}{d},$$

其中  $FOV_o$ (mrad)为系统物方视场,  $L$ (mm)为显示器尺寸,  $d$ (mm)为视距.这个模型曲线如图 3 中的曲线 a.它的特点是当空间频率为 0 时 *MTF* 也是 0.这种模型被 de Jong<sup>[4]</sup>首先在热成像测试中使用.尽管这代表了正弦波图形情况,但对方波图形是不精确的.

$$MTF_e(\nu) = \left(\frac{1}{1 + (\nu/\nu_c)^2}\right)^2, \quad (2)$$

式(2)中  $\nu_c$  是一个常量,对人眼物方取  $1.4 \text{ cyc/mrad}$ ,折算到热像系统物方为  $\nu_c = (1.4/FOV_o)(1000L/d)$ ,该模型曲线如图 3 中的曲线 b.它是由 Watanabe<sup>[5]</sup>等人提出来的,其特点

是当空间频率为 0 时  $MTF$  为 1, 更像一条通常的  $MTF$  曲线.

$$MTF_c(\nu) = \frac{k}{2} \left[ \sin^2 \left( \frac{\pi}{2} \sqrt[3]{\frac{\nu}{\nu_m}} \right) + \left( \frac{1}{1 + (\nu/\nu_c)^2} \right)^2 \right], \quad (3)$$

该模型曲线如图 3 中的曲线  $c$ , 它基本上是模型(1)和(2)的平均值乘上一个常数  $k$ , 以使  $MTF_c$  归一化, 这条曲线试图模拟方波图形对比灵敏度曲线. 它是由 Campbell<sup>[6]</sup>等人给出的. 3 个模型在  $MRTD$  客观测试中均获得与实际值较好的一致性, Williams<sup>[7]</sup>建议采用模型(3).

### 1.2.2 视频 $MTF$ 方法

视频  $MTF$  测试方法是由 G. M. Cuthbertson<sup>[8]</sup>等人先提出来的, 其设计思想是, 根据热成像系统的视频输出信号测量  $MTF$ 、 $SiTF$ 、 $NETD$  和  $NPS$ , 再用下述的数学模型, 通过计算机计算出  $MRTD$  值. 系统在热成像仪与显示器之间使用一个帧获取器 (frame grabber, 起扫描线选择和瞬态记忆作用) 截获有关的视频信号扫描线, 这些信号被送入微计算机处理成为所期望的性能参数. 测量  $MTF$  时, 热成像系统观察一个狭缝靶标, 截获的视频扫描线含有线扩展函数  $LSF$ , 计算机对其进行傅里叶变换即可得到  $MTF$ .  $SiTF$  由测量视频信号电平与一个圆孔靶温度间的关系来确定. 而均方根噪声  $N_{rms}$  用热成像系统观察一个大的均匀目标靶来测试.

$MRTD$  的计算模型为:

$$MRTD(\nu) = k NETD A B C / MTF_c(\nu), \quad (4)$$

其中  $MTF_c(\nu) = MTF_s(\nu) MTF_d(\nu) MTF_e(\nu), \quad (5)$

$$A^2 = \int NPS(s) MTF_s^2(s) MTF_d^2(s) ds / \int NPS(s) ds, \quad (6)$$

$$B^2 = FOV_v / R = FOV_h / R \cdot I, \quad (7)$$

$$C^2 = 1 / (V_f \cdot t_e), \quad (8)$$

$$NETD = N_{rms} / (d\nu/dT), \quad (9)$$

$$N_{rms}^2 = \int NPS(s) ds, \quad (10)$$

式中:  $MTF_s(\nu)$  为由视频信号测得的  $MTF$ ;  $MTF_d(\nu)$  为显示器的  $MTF$ , 可用显微光度计单独测量或使用标准值<sup>[9]</sup>;  $MTF_e(\nu)$  为人眼的  $MTF$ ;  $A^2$  为由于显示器和人眼带通限制使噪声减小的因子;  $NPS(s)$  为噪声功率谱;  $N_{rms}$  为均方根噪声;  $FOV_v$ 、 $FOV_h$  分别为热成像系统的垂直、水平视场;  $R$  为图像的扫描线数;  $I$  为图像的宽/高比;  $V_f$  为图像的帧速;  $t_e$  为人眼的积分时间;  $d\nu/dT$  为  $SiTF$  曲线的斜率.

### 1.2.3 4 条靶方法

这种测试方法是由英国皇家信号与雷达科学机构的 G. W. Edwards<sup>[10]</sup>提出来的, 测试系统与  $MTF$  方法基本相同. 前面叙述的主观测试过程实际上就是观察者眼脑结合, 在很低

信噪比条件下,从背景的平均强度中“看出”靶标的平均强度.这个过程实际上是显示区的靶标图案与人脑里的图案互相关的过程,一旦显示靶标的信噪比达到或者优于某一阈值门限,靶标即被“分辨”.4条靶测试方法正是基于这种思想设计的.首先帧获取器将模拟视频信号转换成8位(256灰度级)数字信号,并置于瞬态存储器中.计算机分析计算存储器中有关靶标区域的信噪比与我们给定的阈值门限相比较,即可得到 *MRTD* 值.对不同的空间频率重复此过程即可得到 *MRTD* 的变化曲线.

1.2.4 光度摄像机(photometric camera)方法

上述两种客观测试方法,都回避了系统显示部分的特性.尽管显示部分在有些系统中是不必要的,在需要的系统中显示部分的特性可单独测试得到,但是,在需要显示部分的系统中,还是一并测试来得直观可信.正是基于这种想法,英国 Sira 电光公司的 T. L. Williams<sup>[11~13]</sup>提出了光度摄像机的测试方法,测试系统如图4所示.其中的光度摄像机是一个专门的二维 CCD 阵列摄像机.用该摄像机直接观察热成像系统显示器上的靶标图像,摄像机的输出传递到配有帧存储器的计算机上,计算机控制光度摄像机来设置积分时间和调整列阵上的光照度.光照度的调整由控制含有多个中性密度滤光片回转轮的位置来完成. *MRTD* 的测量,就是确定当热成像系统显示器上显示的靶标图像具有规定的信噪比时目标背景间的误差.其中信号电平取靶标的对比度,而噪声取整个图像对比度波动的标准偏差.

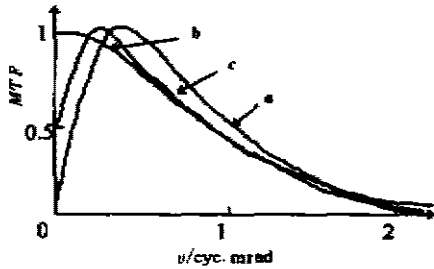


图3 人眼的 *MTF* 曲线  
Fig. 3 *MTF* curves for the eye

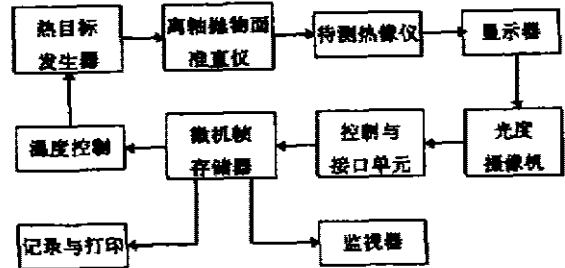


图4 光度摄像机客观 *MRTD* 测试系统  
Fig. 4 Objective *MRTD* system of photometric camera

2 测试设备的校准

为确保热成像系统的测试设备客观准确地反映在测系统的特性,需用辐射计经常对设备进行校准.辐射计大体上可分探测头部、扫描机构和电子处理单元三部分,其原理如图5所示.其中探测头部的结构原理一般是,外部待测靶标经过物镜成像在一个单元碲镉汞探测器上,反射式斩波器使探测器交替接收靶标和内部参考源的辐射信号.内部参考源与探测头部的环境温度保持一致,以便于校准靶标的目标背景温差.扫描系统主要部件是一个马达驱动的二维扫描的平面反射镜,用于扫描靶标,测试

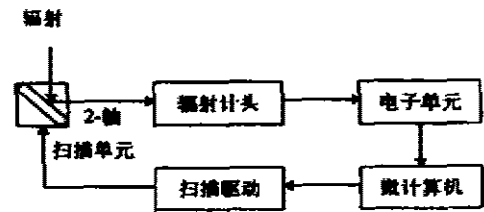


图5 辐射计系统  
Fig. 5 Radiometer system

温度均匀性和校准温差设置.在校准过程中,微机接收辐射计的 2 个信号,探测器信号  $S$  和参考源温度  $T_r$ ,探测信号由下式给出:

$$S = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} C \cdot R(\lambda) N_t(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda - \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} C' \cdot R(\lambda) N_r(\lambda) d\lambda, \quad (11)$$

式(11)中  $\lambda$  为波长; $R(\lambda)$  为探测器的光谱响应度; $N_t(\lambda)$  为靶标的光谱辐亮度; $N_r(\lambda)$  为参考源的光谱辐亮度; $\tau(\lambda)$  为物镜的透过率; $C$  和  $C'$  为校准常数.式(11)可改写成:

$$\int_{\lambda_2}^{\lambda_1} R(\lambda) N_t(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda = (S/C) + (C'/C) \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} R(\lambda) N_r(\lambda) d\lambda, \quad (12)$$

进而简化成:

$$A = S/C + (C'/C)B. \quad (13)$$

在计算机中预置辐出度与黑体温度对照表,查此表即可由参考源温度  $T_r$  得到  $B$  值,又可由式(13)计算出的  $A$  值查出靶标的温度.同样的方法可以测出靶标的辐亮度.典型辐射计(如 SR 5000)检测精度优于  $0.1^\circ\text{C}$ ,噪声等效温度为  $0.005^\circ\text{C}^{[3]}$ .

### 3 校准设备的标定

辐射计的响应度和长期稳定性最终需要由标准黑体定期标定.对于用作标准设备的面黑体,要求有高辐射系数、高均匀性和高稳定性.高发射率和高均匀性与辐射腔的几何形状直接相关,多年来,人们曾经尝试过球形、圆锥形、圆柱加外凸圆锥形,目前认为圆柱加内凸圆锥形(re-entrant cone)从加工到使用效果综合衡量比较好.好的面黑体的辐射系数可达 0.994 以上,均匀性可达  $0.01^\circ\text{C}$  (对于  $-5^\circ\text{C} < \Delta T < 5^\circ\text{C}$ ).为得到好的稳定性和控温精度,采用通液管加热或冷却辐射腔,埋入铂电阻温度计(PRT)监控温度,控温精度可以达到  $0.03^\circ\text{C}$ ,稳定性可达  $0.03^\circ\text{C}/\text{h}$ .

由于辐射计对辐射源温度和亮度的测量是一致的,因此我们只需标定其辐射温度就足够了.将辐射计对准黑体辐射腔,设定一个温度值(有的黑体可以直接设定辐射温度),其辐射温度  $T_r$  与设定(PRT 测出)的温度  $T$  的关系为<sup>[10]</sup>,

$$T_r = T\epsilon^{1/4} \quad (15)$$

调整辐射计的输出使其等于  $T_r$ ,即完成一个点的标定,设置其它温度重复此过程,即可完成全部标定.

### 参考文献

- 1 Johnson J. *Proceedings of the Image Intensifier Symposium*. Fort Belvoir, Virginia, U. S. Army Engineering Research Development Laboratories. 1958;21
- 2 Holst G C. *SPIE*, 1986, **685**, 2~5
- 3 Fourier R. *SPIE*, 1988, **940**, 117~124
- 4 de Jong A N, Bakker S J M. *SPIE*, 1988, **916**, 127~143
- 5 Watanabe A, Mori T, Nagata S, Hiwatashi K. *Vision Research*, 1968, **8**, 1245~1263

- 6 Campbell F W, Robson J G. *Journal Physiology*, 1968, **197**: 551
- 7 Holst G C, Taylor A R. *SPIE*, 1990, **1309**: 67~75
- 8 Mccracken W, Wajsfelner L. *SPIE*, 1986, **636**: 31
- 9 Williams T L. *SPIE*, 1985, **590**: 172~178
- 10 Edwards G W. *SPIE*, 1983, **467**: 47~54
- 11 Williams T L, Davidson N T, Wocial S. *SPIE*, 1985, **549**: 44~49
- 12 Williams T L, Davidson N T, Wocial S. *SPIE*, 1988, **916**: 127~143
- 13 Williams T L. *SPIE*, 1990, **1320**: 420~430
- 14 周书铨, *红外辐射测量基础*, 上海: 交通大学出版社, 1991: 158

## MEASUREMENT TECHNIQUES FOR THERMAL IMAGING SYSTEMS

Chen Lixue Yang Bin

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an, Shaanxi 710100, China)

**Abstract** The subjective and objective measurement methods and the test facilities concerned of thermal imaging systems were systematically summarized. The calibrating methods of the test facilities were expounded. The theoretical basic of the measurement technique was briefly analyzed.

**Key words** thermal imaging, measurement, calibration, MRTD.