

文章编号:1001-5078(2015)01-0045-05

· 红外技术及应用 ·

红外成像跟踪系统作用距离等效测试方法与验证

申子卿,王德飞,楚振锋

(中国洛阳电子装备试验中心,河南 洛阳 471003)

摘要:考虑到大气环境条件、红外探测器的性能以及目标和背景热辐射特征等因素对红外成像跟踪系统作用距离的影响,针对红外成像跟踪系统作用距离的指标要求,在保证目标成像像素大小和目标与背景图像反差不变的情况下,提出了通过近距离小目标小温差等效替代的作用距离测试方法,并对等效测试的结果进行了远场动态试验验证,所得结果为红外成像跟踪系统的设计和作用距离评估提供了依据。

关键词:红外成像跟踪系统;作用距离;成像尺寸;测试方法

中图分类号:TN21 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2015.01.010

Equivalent testing method and verification of operating distance for infrared imaging and tracking system

SHEN Zi-qing, WANG De-fei, CHU Zhen-feng

(Luoyang Electronic Equipment Test Center China, Luoyang 471003, China)

Abstract: Considering the influence of the atmospheric conditions, the performance of infrared detector and thermal radiation characteristics of the targets and backgrounds on the operating distance of infrared imaging and tracking system, based on the specific qualification request of the operating distance of infrared imaging and tracking system, an equivalent testing method of the operating distance is presented when the pixel size of target image and the contrast of the target and the background is fixed. This method has the characteristics of close-distance, small-target and small-difference of temperature. Equivalent results are verified by dynamic testing of far field, which provide a fundamental basis for the design and operating distance evaluation of infrared imaging and tracking system.

Key words: IRIT; operating distance; image size; measurements

1 引言

作用距离是衡量红外成像跟踪系统性能的核心指标之一,对地面目标作用距离的远近直接影响到系统采集红外图像的像质,进而影响系统对目标的提取与识别。目前,红外成像跟踪系统对目标的探测、识别依靠操控人员的目视判断,目标探测识别的作用距离主要与目标辐射强度、大气透过率、系统探测灵敏度等因素有关,因此对红外成像跟踪系统作

用距离的测试是一个较为复杂的问题^[1]。

红外成像跟踪系统作用距离的指标要求是典型环境下的典型参数(即在一定的温度、湿度、能见度条件下能达到的指标参数)。由于受试验时间和环境等因素的限制,构建并按照典型环境要求进行红外成像跟踪系统性能的评估比较困难^[2]。本文提出一种基于目标成像像素大小和目标与背景图像反差不变的近距小目标小温差室内等效测试方法,

同时在远场试验环境条件下,对红外成像跟踪系统的作用距离进行了试验验证,实现对系统作用距离相对准确的全面评估。

2 实验室等效测试

红外成像跟踪系统接收目标辐射源的能量与其间的距离有关,在某一距离上接收到的目标辐射刚好能达到预期的使用效果,此距离就称为系统的作用距离^[3-4]。

2.1 等效测试理论分析

鉴于典型测试环境构造复杂,成本高,可首先通过近距小目标小温差的替代试验来检测。要用近距目标替代远距离目标试验,必须保证近距离处目标成像像素大小和目标与背景的图像反差不变,要实现对目标的识别和稳定跟踪,首先合作目标必须有一定的像素大小,根据折算得到近距离处目标成像的像素数不小于 4×4 ;其次,由于受大气传输的影响,近距离处要保证目标与背景的图像反差不变,必须减小目标与背景的温差,使热像仪镜头处得到的目标辐射照度增量不变。目标背景温差折算关系如下^[5-6]:

面辐射源在中心法线上的辐射照度有如下公式:

$$E = \frac{\tau_a S \sigma T^4}{\pi \cdot r^2} \quad (1)$$

式中, r 为辐射源到接收探测器的距离; E 为接收点的照度; S 为辐射源面积; T 为辐射源温度; τ_a 大气透过率。

假设被测目标位于远距离处,目标面积为 S_1 ,背景温度(目标初始温度)为 T_1 ,目标背景温差为 ΔT_1 ,目标距离为 r_1 ,大气透过率为 τ_{a1} ;被测目标位于近距离处,目标面积为 S_2 ,背景温度(目标初始温度)为 T_2 ,目标背景温差为 ΔT_2 ,目标距离为 r_2 ,大气透过率为 τ_{a2} 。

远距离时,红外成像跟踪系统热像仪镜头处得到的照度和照度增量为:

$$E_1 = \frac{\tau_{a1} S_1 \sigma T_1^4}{\pi \cdot r_1^2} \quad (2)$$

$$\Delta E_1 = \frac{\tau_{a1} S_1 \sigma}{\pi \cdot r_1^2} [(T_1 + \Delta T_1)^4 - T_1^4] \quad (3)$$

近距离时,红外成像跟踪系统热像仪镜头处得到的照度和照度增量为:

$$E_2 = \frac{\tau_{a2} S_2 \sigma T_2^4}{\pi \cdot r_2^2} \quad (4)$$

$$\Delta E_2 = \frac{\tau_{a2} S_2 \sigma}{\pi \cdot r_2^2} [(T_2 + \Delta T_2)^4 - T_2^4] \quad (5)$$

要使热像仪远近距离成像时目标与背景的图像反差不变,必须使镜头处得到的照度增量不变($\Delta E_1 = \Delta E_2$),于是有下式:

$$\begin{aligned} & \frac{\tau_{a1} S_1 \sigma}{\pi \cdot r_1^2} [(T_1 + \Delta T_1)^4 - T_1^4] \\ &= \frac{\tau_{a2} S_2 \sigma}{\pi \cdot r_2^2} [(T_2 + \Delta T_2)^4 - T_2^4] \end{aligned} \quad (6)$$

由于远近成像像素不变,即目标所占视场角不变,则有:

$$\frac{S_1}{r_1^2} = \frac{S_2}{r_2^2} \quad (7)$$

由式(6)和(7)可得:

$$\begin{aligned} & \tau_{a1} (T_1 + \Delta T_1)^4 - \tau_{a1} T_1^4 \\ &= \tau_{a2} (T_2 + \Delta T_2)^4 - \tau_{a2} T_2^4 \end{aligned} \quad (8)$$

式中, T_1 、 T_2 为同一背景温度。 τ_{a1} 、 τ_{a2} 、 ΔT_1 已知,通过公式(8)可求得近距离处目标背景温差 ΔT_2 。

2.2 等效测试方法

根据系统指标检测所需求的特定环境,在实验室内利用红外参数校准装置进行试验,以检测设备的作用距离。通过调整红外参数校准装置与合作目标的距离,使合作目标在红外参数校准装置焦平面上成像的像素数不小于 4×4 ;同时设定合作目标与实验室的环境温差为 ΔT_2 。因此在实验测试中如果合作目标靶的温度在不大于 $T_2 + \Delta T_2$ 条件下,系统能够稳定跟踪目标,说明该系统的作用距离达到15 km的指标要求。

具体测试过程如下:

- (1) 红外热像仪参数校准装置加电工作;
- (2) 红外成像跟踪系统加电工作,瞄准目标靶面,切换视场并调整焦距直至完全观测黑体目标靶面大小且成像清晰;
- (3) 手动控制中波红外成像跟踪系统锁定合作目标,切换跟踪模式使系统对合作目标靶面进入自动跟踪状态,观察系统对合作目标的跟踪稳定性;
- (4) 重复步骤(3),改变对系统的跟踪方式(如相关、边缘和形心),如果红外成像跟踪系统能稳定跟踪合作目标,则作用距离满足指标要求;
- (5) 测试结果显示,系统可以稳定跟踪目标,满

足作用距离指标要求。

3 远场试验测试

针对红外成像跟踪系统作用距离受较多因素影响,在开展实验室作用距离测试的基础上,还需通过空中动态测试来评估红外成像系统的作用距离,其优点是环境模拟逼真,测试数据可靠,评估结果可信,缺点是试验费用高,灵活性差。

根据现有平台,在红外成像跟踪系统对地面目标探测跟踪试验中,作用距离动态测试原理图如图1所示,地面上搭建一个红外分辨率合作目标靶,靶板上均匀安放辐射功率基本一致的辐射源,辐射源与环境的温差可以人为控制,红外成像跟踪系统安装在升空平台上,通过无线数据通信链路,升空平台按照既定航线飞行过程中,利用红外成像跟踪系统对靶板进行探测识别与跟踪,以地面操控人员识别和稳定跟踪合作目标靶板为准,通过通信链路记录下当时红外成像跟踪系统的GPS数据(包括经纬度和海拔高程)。根据靶板位置坐标和红外成像跟踪系统GPS的数据,计算红外成像跟踪系统的最大识别跟踪距离。

试验布局及航线设计如图2所示,红外合作目标架设在 $T(X_T, Y_T)$ 点,朝向正南正北方向。升空平台起飞后飞行 $H(\text{km})$ 到达A点(海拔900 m)后转向并悬停,操控红外成像跟踪系统迎头瞄准合作目标所在位置的大致方向,然后升空平台以匀速由A点向目标飞行,通过显控单元的视频图像场景人工

搜索目标,当发现目标后人工捕获并切换到自动跟踪模式,稳定跟踪时记录该帧图像对应时刻的平台位置 $G(X_g, Y_g)$ 。

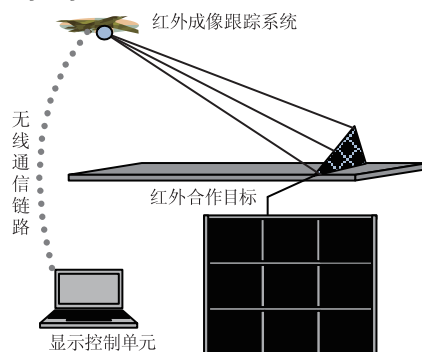


图1 作用距离测试原理图

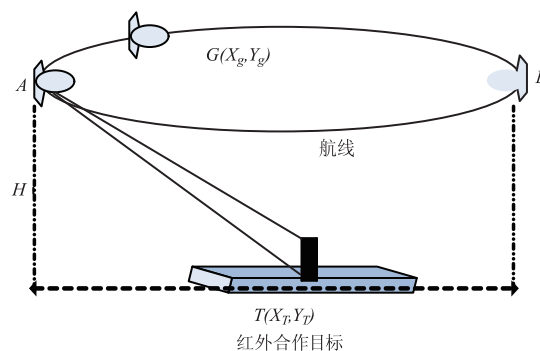


图2 试验布局及航线示意图

根据对红外成像跟踪系统作用距离的测试要求,选择满足条件的天气,控制升空平台不同航次的飞行高度和飞行速度,分别进行作用距离测试,记录下当时红外成像跟踪系统对地面合作目标靶识别并稳定跟踪时的位置信息。根据公式(9)进行计算,采取求平均值的方法得到可信度较高稳定跟踪距离:

$$R = \sqrt{[(X_g - X_T)^2 \times (1.852 \cdot \cos Y_g)^2 + (Y_g - Y_T)^2 \times 1.852^2] + (h - h_0)^2} \quad (9)$$

其中, X 、 Y 为各点的经纬度坐标; h 为平台海拔高度; h_0 为合作目标靶板位置的海拔高度(本次测试位置海拔为524 m,地球平均半径6371.004 km)。

选择试验测试过程中如图3所示的两个有代表性稳定跟踪架次,根据红外合作目标的位置(E 113.602535°, N 36.11899°)和表1提供的两次系统稳定跟踪时的平台位置数据。由公式(9)计算两次稳定跟踪的平均距离为12.495 km和12.466 km。考虑到试验验证时的大气能见度、环境温湿度及合作目标尺寸与指标要求的差别,采用公式(10)进行等效折算^[7-8]即可得到指标要求条件

下的稳定跟踪距离,经过折算得到的稳定跟踪距离不小于15 km,满足指标要求。



图3 系统稳定跟踪状态图像

$$\frac{L_{zb}}{L_{sc}} = \frac{A_{zb}\tau_{zb}M_{zb}\Delta T_{zb}}{A_{sc}\tau_{sc}M_{sc}\Delta T_{sc}}$$

(10)

其中, L 为稳定跟踪距离; A 为合作目标面积; τ 为大

气对红外波段的平均透过率; M 为合作目标的辐射
出射度; ΔT 为合作目标与环境的温差(下标 zb 为指
标规定条件; sc 为实测条件)。

表 1 系统稳定跟踪状态时平台特征参量

第一次稳定跟踪							
平台参量	系统时间	温度/℃	湿度/%	经度/(°)	纬度/(°)	UTC 时间	作用距离/km
1	0 : 0 : 31	19	37	113. 736721	36. 14793	8 : 38 : 40	12. 479
2	0 : 0 : 32	19	37	113. 736829	36. 147887	8 : 38 : 41	12. 489
3	0 : 0 : 33	19	37	113. 737005	36. 14776	8 : 38 : 42	12. 498
4	0 : 0 : 34	19	36	113. 73707	36. 14768	8 : 38 : 43	12. 502
5	0 : 0 : 35	19	37	113. 737118	36. 14759	8 : 38 : 44	12. 503
6	0 : 0 : 36	19	36	113. 737148	36. 147494	8 : 38 : 45	12. 503
7	0 : 0 : 37	19	36	113. 73716	36. 147394	8 : 38 : 46	12. 502
8	0 : 0 : 38	19	36	113. 737154	36. 147291	8 : 38 : 47	12. 498
9	0 : 0 : 39	19	37	113. 737131	36. 147188	8 : 38 : 48	12. 493
10	0 : 0 : 40	19	37	113. 737091	36. 147085	8 : 38 : 49	12. 481
平均作用距离/km							12. 495
第二次稳定跟踪							
平台参量	系统时间	温度/℃	湿度/%	经度/(°)	纬度/(°)	UTC 时间	作用距离/km
1	0 : 5 : 55	17	70	113. 737184	36. 147274	13 : 4 : 25	12. 500
2	0 : 5 : 56	17	70	113. 737173	36. 147164	13 : 4 : 26	12. 496
3	0 : 5 : 57	17	70	113. 737144	36. 147053	13 : 4 : 27	12. 491
4	0 : 5 : 58	17	70	113. 737101	36. 146943	13 : 4 : 28	12. 484
5	0 : 5 : 59	17	70	113. 73704	36. 146835	13 : 4 : 29	12. 476
6	0 : 6 : 00	17	70	113. 736965	36. 14673	13 : 4 : 30	12. 466
7	0 : 6 : 01	17	70	113. 736877	36. 146631	13 : 4 : 31	12. 456
8	0 : 6 : 02	17	70	113. 736775	36. 146538	13 : 4 : 32	12. 444
9	0 : 6 : 03	17	70	113. 736662	36. 146452	13 : 4 : 33	12. 432
10	0 : 6 : 04	17	70	113. 736538	36. 146373	13 : 4 : 34	12. 419
平均作用距离/km							12. 466

4 结束语

鉴于对红外成像跟踪系统作用距离测试相对复杂,本文提出了基于合作目标成像像素大小和目标与背景图像反差不变的近距小目标小温差等效测试方法,进行了实验室等效测试和远场动态试验测试。结果表明,等效测试方法能够对红外成像跟踪系统的作用距离进行较为准确的评估。

参考文献:

[1] Beier K, Gemperlein H. Simulation of infrared detection range at fog conditions for enhanced vision systems in civil aviation [J]. Aerospace Science and Technology, 2004 (8): 63 – 71.

[2] WANG Qi, ZHANG Jixu, CAO Yanxia. A study on action range test and evaluated method for infrared detector[J].

- Fire Control & Comm and Control, 2012, 37(7): 192 – 195. (in Chinese)
- 王琦, 张继旭, 曹艳霞. 红外探测系统作用距离试验与评估方法[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(7): 192 – 195.
- [3] XING Qianglin, HUANG Huiming, XIONG Rensheng. Detect-ability analyzing of IRFPA tracking system[J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(7): 893 – 896. (in Chinese)
- 邢强林, 黄惠明, 熊仁生. 红外成像探测系统作用距离分析方法研究[J]. 光子学报, 2004, 33(7): 893 – 896.
- [4] AN Chengbin, ZHANG Xining, CHEN Ying, et al. Calculation of function range of infrared imaging system[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(7): 716 – 719. (in Chinese)
- 安成斌, 张熙宁, 陈盈, 等. 红外成像系统作用距离计算[J]. 激光与红外, 2010, 40(7): 716 – 719.
- [5] ZHANG Jianqi, FANG Xiaoping. Infrared physics[M]. Xi'an: XDUP, 2004. (in Chinese)
- 张建奇, 方小平. 红外物理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.
- [6] WU Hanping. Research into theoretical calculation method on engineering of transmittance of infrared radiation through atmosphere[J]. Optics and Precision Engineering, 1998, 6(4): 35 – 43. (in Chinese)
- 吴晗平. 红外辐射大气透过率的工程理论计算方法研究[J]. 光学精密工程, 1998, 6(4): 35 – 43.
- [7] WU Hanping, YI Xinjian, YANG Kuntao. Active distance and its equivalent test for infrared search system[J]. Infrared Technology, 2004, 26(4): 1 – 5. (in Chinese)
- 吴晗平, 易新建, 杨坤涛. 红外搜索系统的作用距离及其等效检验[J]. 红外技术, 2004, 26(4): 1 – 5.
- [8] LI Yanxiao, HU Leili, CAI Meng. Research on performance measurement for infrared imaging systems[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(6): 449 – 454. (in Chinese)
- 李艳晓, 胡磊力, 蔡猛. 红外成像系统的性能测试方法研究[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(6): 449 – 454.