

引用格式:谢飞,周德召,胡磊力,等.红外搜索跟踪系统探测距离缩比测试方法[J].电光与控制,2019,26(4):86-90. XIE F, ZHOU D Z, HU L L, et al. A method for testing detection range ofIRST with scale model[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(4):86-90.

红外搜索跟踪系统探测距离缩比测试方法

谢飞^{1,2}, 周德召^{1,2}, 胡磊力^{1,2}, 杜保林¹

(1. 中国航空工业集团公司洛阳光电设备研究所,河南 洛阳 471000;
2. 光电控制技术重点实验室,河南 洛阳 471000)

摘要: 红外探测距离作为红外搜索跟踪系统(IRST)的重要技术指标,如何便捷地对红外探测距离进行精确测试成为影响红外搜索跟踪系统(IRST)研制的关键环节。分析了现有的红外探测距离测试的外场试飞存在的优缺点,提出了红外探测距离的缩比探测方法。该方法利用缩比探测的原理,引入真实大气路径和真实场景,通过精确控制模拟辐射源的辐射能量来实现红外搜索跟踪系统(IRST)红外探测距离测量,针对近地面大气透过率复杂多变的特点,引入了大气透过率校正因子对近地面大气透过率进行校正,经过A,B两型红外搜索跟踪系统(IRST)的试验验证,测得的红外探测距离与真实试飞数据最大误差为12%,且相对于外场试飞,极大地缩短了研制周期,降低了研制费用。

关键词: 红外搜索跟踪系统; 红外探测距离; 缩比探测; 大气透过率; 比例校正

中图分类号: TN429 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.04.017

A Method for Testing Detection Range of IRST with Scale Model

XIE Fei^{1,2}, ZHOU De-zhao^{1,2}, HU Lei-li^{1,2}, DU Bao-lin¹

(1. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China;
2. Science and Technology on Electro-Optic Control Laboratory, Luoyang 471000, China)

Abstract: The infrared detection range is an important indicator of the Infrared Searching and Tracking (IRST) system. How to quickly and accurately measure the infrared detection range has become a key part of IRST development. This paper analyzes the advantages and disadvantages of the current measuring method in the flight test, and proposes a new method to test the infrared detection range. This method uses the principle of contraction detection to introduce the real atmospheric path and real infrared scenes. The measurement of the infrared detection range is realized by accurately controlling the energy from a simulated radiating source. In view of the complicated and variable atmospheric transmittance near the ground, the correction factor of atmospheric transmittance is introduced to calibrate the atmospheric transmittance near the ground. Tests for two IRST systems of Type A and Type B were carried out. The maximum error between the measured infrared detection range and the flight test data was 12%. Compared with flight tests, this method greatly shortens the development cycle and reduces the development costs.

Key words: IRST; infrared detection range; contraction detection; atmospheric transmittance; proportional correction

0 引言

红外搜索跟踪系统(IRST)^[1-2]凭借其极高的角度分辨率,与具有极高距离分辨率的雷达相互配合,可对飞行目标进行更加平稳、精确的跟踪,极大地缩短目标

航迹的判定时间,从而可对威胁做出迅速有效的反应,降低损失风险,因此IRST一直都是各国的军事研究热点之一。作为IRST的关键指标,在IRST的研制过程中,红外探测距离的考核一般都是按照既定的试飞大纲采用试飞的方式进行,而试飞需要在专门的试飞场地进行,且装配调试场地与试飞场地之间存在着较远的距离。这就带来一个问题,IRST在装配调试的过程中,需要多轮次的完善和迭代来确保自身功能、性能满

收稿日期:2018-04-25

修回日期:2018-12-10

作者简介:谢飞(1984—),男,河南洛阳人,硕士,工程师,研究方向为液晶显示。

足设计指标要求,如果在IRST的装配调试过程中不能及时地调试和纠正问题,就会将问题推延到试飞中发现,增加试飞架次,势必会造成产品研发周期的延长,制造成本的增加,不利于产品的装备。因此有必要开展对IRST红外探测距离测试方法的研究,从而能够在装配调试过程中实现探测距离的精确测试。

1 红外探测原理

典型IRST系统组成如图1所示。

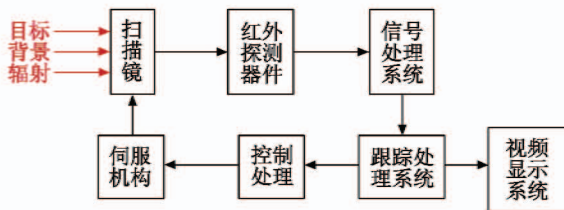


图1 典型IRST系统组成图

Fig.1 Composition of typical IRST system

IRST主要是依据目标(飞机、导弹等热源)的热辐射来完成对目标的探测、定位和跟踪。IRST系统的典型工作原理是:红外探测器部件经由伺服机构控制的扫描镜从指定的视场中接收目标和背景红外辐射,产生相应的温度分布图像并送入信号处理系统,经过必要的图像修正和滤波后,对单帧图像进行目标与背景的分割;跟踪处理系统接收许多可能的目标,然后与之前的检测结果进行关联,以便测试它们是否构成运动目标轨迹;若确定是目标运动轨迹,则在屏幕上显示结果,进而根据火力控制系统的需要进行必要的操作。由于目标(飞机、导弹等)距离IRST较远,相对于IRST张角很小,因此目标可视为点目标(除特别说明外,文中目标均为点目标),常用的点目标红外作用距离经验公式^[3]为

$$R = \left[\frac{\pi D_0^2 D^* J \tau \tau_0 \eta}{4F(\varepsilon A_d \Delta f)^{1/2} R_{s,N}} \right]^{1/2} \quad (1)$$

式中: D_0 为光学系统通光口径; J 为点目标辐射强度; τ 为大气透过率; τ_0 为光学系统透过率; η 为能量利用效率; F 为电子学系统噪声系数; ε 为面元填充效率; A_d 为探测器单元面积; $\Delta f = \frac{1}{2\tau_d}$,为电子学系统带宽; τ_d 为探测器驻留时间; $R_{s,N}$ 为信噪比。

2 探测距离测试技术

2.1 试飞测试

外场试飞一般把IRST安装在载机平台,目标机和载机之间按照一定的高差、飞行速度、进入角度进行目标的探测和跟踪,图2为试飞考核示意图。

由式(1)可知,相对于某IRST来说,在选择的光

学系统与电子器件确定的条件下,影响到红外探测距离的因素为目标辐射强度 J 、大气透过率 τ 。

根据高空飞机辐射特性测试研究,现有的飞机辐射特性测试精度在30%左右,而透过率测试一般采用美国的LOWTRAN或者MODTRAN测试软件进行,国内开展相应的高空大气透过率特性测试研究较晚^[4-5],文献资料表明,由于LOWTRAN或者MODTRAN测试软件采用美国大气标准,因此相对于国内特定区域特定条件下的大气透过率局部误差较大。由飞机辐射特性测试精度、大气透过率测试精度可知,即使作为红外探测距离考核标准的试飞测试,严格意义上并不是一个可以严格定量的测试标准,且在不同的气象条件下,大气透过率以及目标飞机的辐射强度都是实时变化的,而对于这种变化目前尚无有效手段加以测试和修正,这也反映在实际试飞中,红外探测距离的试飞结果是波动起伏的,红外探测距离的均方根误差很大。

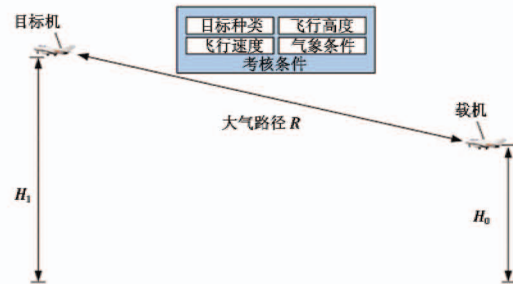


图2 试飞考核示意图

Fig.2 Diagram of test flight

2.2 缩比测试

2.2.1 缩比原理

由式(1)可知,一般情况下,对于某特定IRST,除大气透过率 τ (与探测距离 R 相关)、目标辐射强度 J 为变量外,其他参数为固定数值,可以定义为常数,式(1)转化为

$$R = A * [J\tau]^{1/2} \quad (2)$$

式中, A 为常数, $A = \left[\frac{\pi D_0^2 D^* \tau_0 \eta}{4F(\varepsilon A_d \Delta f)^{1/2} R_{s,N}} \right]^{1/2}$ 。

则由式(2)可得, R 正比于 $[J\tau]^{1/2}$,而 R 又与 τ 存在一个近似于反比的关系,特定气象条件、距离确定情况下,红外特定波段 τ 的值为固定值,通过实际测量或者利用LOWTRAN或MODTRAN软件仿真计算可得。

由式(2)可知,不同距离 R_1, R_2 条件下对应不同的 $J\tau$ 值,则有

$$R_1 = A * [J_1 \tau_1]^{1/2} \quad (3)$$

$$R_2 = A * [J_2 \tau_2]^{1/2} \quad (4)$$

则

$$R_1 = R_2 \frac{[J_1 \tau_1]^{1/2}}{[J_2 \tau_2]^{1/2}} \quad (5)$$

由式(5)可知,在点目标辐射强度 J_1, J_2 , 探测距离 R_2 和 R_1 路径大气透过率 τ_2 已知的情况下,可以通过式(5)迭代计算试飞考核条件下探测距离 R_1 是否满足战技指标要求,即将试飞环境条件下的红外探测距离考核,转化成 IRST 在近地面大气路径 R_2 条件下对红外模拟目标源探测能力的缩比考核。

具体的操作是在缩比试验环境条件下,在特定的气象条件下,通过精确控制红外模拟目标源的模拟辐射强度 J_2 ,使 IRST 刚好实现特定检测概率下对目标的检出,进而通过式(5)获得试飞环境条件下红外探测距离 R_1 ,将耗费大量人力、物力及时间的试飞考核转化成更为便捷的缩比试验环境考核。

2.2.2 精度考核

根据式(5)可知,影响红外探测距离缩比考核精度的主要因素是缩比探测试验红外模拟目标源的辐射强度 J_2 和大气透过率 τ_2 的测试误差:1) 红外模拟目标源的辐射强度 J_2 可以精确控制,为保证精度,采用光谱辐射计进行校准,也可以在试验的过程中直接进行实时测试;2) 最主要的影响因素是大气透过率,根据大气传输理论,大气透过率与传输路径的长短、大气组分、大气吸收、散射等诸多因素相关,如何精确获取大气透过率成为一个难题,目前国内尚无开展试飞过程大气路径透过率等相关研究报道,有关高空大气透过率的计算一般参考 LOWTRAN 或者 MODTRAN 软件,低空大气尤其是近地面大气,受海拔、植被、水汽及局部天气等多种因素影响,更加多变,因此需要进行相应的校正来保证大气透过率数据的准确性。

3 缩比探测试验研究

依据上述缩比探测原理,完成红外缩比探测试验环境的搭建,如图3所示,在高塔1的三轴转台上安装 IRST,高塔2的二轴转台上安装红外模拟目标源,利用高塔1和高塔2之间4.1 km的近地面真实大气路径来实现缩比探测环境的搭建,通过设置高塔1上三轴转台运动曲线,可以实现 IRST 不同姿态条件下对模拟点目标的缩比探测。

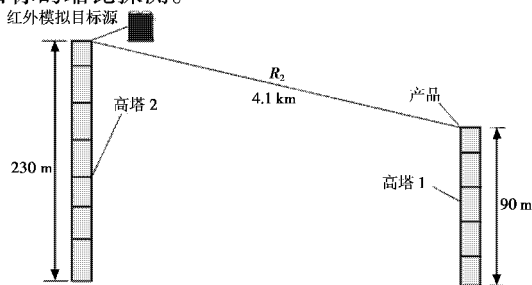


图3 缩比探测环境示意图

Fig. 3 Settings of contraction detection

红外模拟目标源选择法国 HGH 公司货架产品 DCN1000L12 高精度黑体,黑体面源尺寸为 300 mm × 300 mm,控温精度为 0.01 °C,温度范围为 [-40 °C, 150 °C],采用液冷的方式实现温度调节,升降温速率不小于 15 °C/min。

3.1 红外模拟目标源辐射标定

由于不同产品对红外模拟目标源的探测条件不同,所要求的辐射强度也不同,因此要根据实际的试验进行设置,也需要对红外模拟目标源的辐射能量进行精确标定,本文利用现有的以色列 CI 公司 SR5000N 进行辐射能量的实时精确标定。

3.2 近地面大气透过率比例校正

近地面大气由于受地物环境影响较大,与理论的仿真计算存在一定的偏差,可以用光谱辐射计测试一定路径内的大气透过率,然后与 MODTRAN 软件仿真计算得到的大气透过率相对比,即可得出此条件下的大气透过率校正系数,在后续缩比试验过程中,可以直接根据天气状况,利用 MODTRAN 软件计算透过率,然后乘以该校正系数得到近地面实际大气透过率^[6-7],近地面大气透过率测试原理如图4所示。

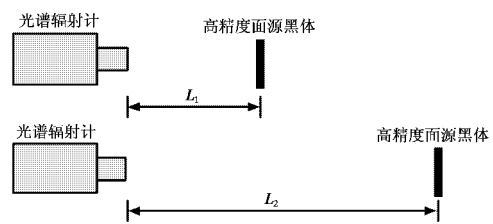


图4 大气透过率测试

Fig. 4 Test of atmospheric transmittance

近地面大气透过率测试是分别用光谱辐射计测量该大气路径起点 L_1 和终点 L_2 处 IRST 响应波段内的光谱辐射亮度,光谱辐射亮度的比值即为该大气路径 $(L_2 - L_1)$ 的大气透过率,利用 MODTRAN 仿真计算该路径条件下的大气透过率,由此获得该条件下近地面大气路径透过率修正因子,进而提高红外探测距离缩比试验的精度。

3.3 缩比探测试验

开展了 A, B 两型 IRST 的缩比探测试验。

按照图4所示近地面大气透过率测试原理开展大气透过率测试,光谱辐射计 SR5000N 使用 SR200 高温腔式黑体标定后,对正前方 DCN1000L12 黑体进行测量,DCN1000L12 黑体设置温度为 50 °C,经过多次测量,测试的 DCN1000L12 黑体等效辐射平均温度为 50.1 °C,最大测试温度偏差为 0.5 °C,温度测量精度为 1%,辐射能量测试精度为 0.84%,测试精度能够满足需求。

SR5000N 光谱辐射计选择 0.3 mrad 视场,虽然理

论上能够实现 1000 m 距离处 DCN1000L12 黑体辐射亮度测试,但是由于面源黑体供电、体积及重量等原因,且为了保证测试的准确性兼顾操作的便捷性,选择在 SR5000N 正前方 $L_2 = 400$ m 处放置面源黑体,SR5000N 光谱辐射计放置于实验室二层平台上,距离 400 m 处光谱辐射计覆盖的尺寸为 $\phi 120$ mm,完全在 DCN1000 L12 黑体辐射面积(300 mm × 300 mm)内部,能够保证测试的准确性。

由于光谱辐射计的有效测试距离在 3 m 以外,为保证测试精度选择距离为 $L_1 = 5$ m,则实际测量的大气路径长度为 $L_2 - L_1 = 395$ m,为消除大气路径辐射的影响,采用 2 组温度(45 °C, 65 °C)进行黑体的辐射亮度测试,当前大气能见度 15 km,湿度 60%,环境温度 25 °C,海拔高度 135 m 左右,利用 MODTRAN4.0 计算理论大气透过率 τ_{20} ,计算不同波段的校正因子 K ,试验结果如表 1 所示。

表 1 大气透过率测试(8 ~ 12 μm)

Table 1 Atmospheric transmittance of 8 ~ 12 μm

序号	黑体温度/ °C	5 m 黑体辐射亮度 ($\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$)	400 m 黑体辐射亮度 ($\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$)	透过率	MODTRAN4.0 计算透过率	校正因子 K
1	45	2.2917	1.4589	0.6995	0.7579	0.923
2	65	3.1355	2.6651			

引入近地面大气透过率校正因子 K ,则缩比探测算式(5)转化为

$$R_1 = R_2 \frac{[J_1 \tau_1]^{1/2}}{[J_2 K \tau_{20}]^{1/2}} \quad (6)$$

按照图 3 所示缩比探测试验环境开展 IRST 红外探测距离缩比探测试验,试验热像如图 5 所示。

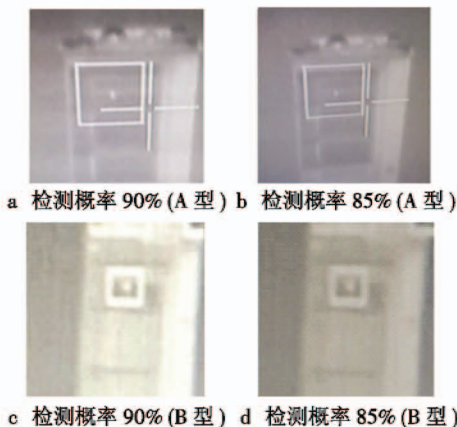


图 5 A/B 型 IRST 探测热像

Fig.5 Infrared image of IRST of Type A and B

A 型 IRST 通过精确调节红外模拟目标源辐射能量,获得在不同检出概率(90%, 85%)条件下的热像,如图 5a、图 5b 所示。

B 型 IRST 同样通过精确调节红外模拟目标源辐射能量,获得在不同检出概率(90%, 85%)条件下的

热像,如图 5c、图 5d 所示。

计算不同检出概率条件下的辐射能量 J_2 ,利用 MODTRAN4.0 计算当前路径(4.1 km)大气透过率,并将不同波段大气透过率校正因子 K 代入式(6)进行该条件下探测能力评估。

红外模拟目标源辐射强度测试数据如表 2 所示。

表 2 红外模拟目标源辐射数据记录表

Table 2 Radiation data of the simulated infrared radiating source

IRST	检出概率/%	辐射强度/ $(\text{W}\cdot\text{sr}^{-1})$	波段/ μm
A 型	90	0.2930	8 ~ 12
	85	0.2217	8 ~ 12
B 型	90	0.3617	8 ~ 12
	85	0.2693	8 ~ 12

根据式(6)计算对应的产品探测距离,如表 3 所示,其中的试飞距离为类似气象条件下多架次试飞数据统计平均值。

表 3 IRST 探测距离记录表

Table 3 Detection range of IRST

IRST	检出概率/ %	辐射强度 ($\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$)	计算距离/ km	试飞距离/ km	误差/%
A 型	90	0.2930	30.56	34.46	-11.32
	85	0.2217	34.50	37.35	-7.63
B 型	90	0.3617	28.05	31.80	-12.00
	85	0.2693	31.95	34.50	-7.39

经过初步分析,造成误差的主要原因在于缩比探测环境红外模拟目标源背景为近地面低空背景^[8],与实际试飞条件下的深空背景存在辐射差异。一般试飞条件下,背景为深空背景,相对于目标辐射强度(从几十瓦每球面度到上千瓦每球面度),背景辐射可忽略不计,而在缩比探测环境下,红外模拟目标源背景为近地面低空背景,相对于红外模拟目标源,背景辐射不能忽略不计,本文采用 MODTRAN 软件对近地面低空背景辐射进行了计算,由于近地面低空背景辐射受近地面天气状况影响较大,因此近地面低空背景辐射与计算值有偏差。

虽然本文大气透过率的校正采用设置高精度黑体双温度(45 °C, 65 °C)的方法消除了路径辐射的影响,但是由于近地面大气路径辐射受近地面天气因素影响较大,在缩比探测试验开展过程中难以对路径辐射进行实测校正,只是采用 MODTRAN 对 4.1 km 路径进行了路径辐射,因此存在误差。

综合以上误差因素,造成利用缩比探测试验测得的 IRST 探测距离低于实际的外场试飞距离。

4 总结

本文介绍了一种用于评估 IRST 红外探测距离的

缩比测试方法(该方法仅适用于点目标),相对于外场试飞法,引入了真实的大气路径和场景,并且能够根据试验当天的天气状况,对大气路径的透过率进行校正,对已有红外探测距离试飞数据的 A,B 两型IRST 开展了探测距离缩比试验,测试最大误差在 12%,利用该试验方法可以开展IRST 红外探测距离类比考核与评估,能够及早暴露外场试验的一些问题,降低成本和风险,缩短产品研发周期。针对构成测试误差的因素,接下来将开展大气背景辐射、路径辐射测试工作研究,将大气透过率的修正与大气背景辐射、路径辐射的修正相结合,开展不同天气条件下大气背景辐射测量和IRST 缩比探测试验工作研究,进一步提高IRST 红外探测距离缩比探测试验精度。

参 考 文 献

- [1] 刘忠领,于振红,李立仁,等. 红外搜索跟踪系统的研究现状与发展趋势[J]. 现代防御技术,2014,42(2): 95-101.
- [2] 杨百剑,万欣. 新一代机载红外搜索跟踪系统技术发展分析[J]. 激光与红外,2011,41(9):961-964.
- [3] 小哈德逊 R D. 红外系统原理[M].《红外系统原理》翻译组,译.北京:国防工业出版社,1975.
- [4] 刘俊池,李洪文,王建立,等. 中波红外整层大气透过率测量及误差分析[J]. 光学精密工程,2015,23(6): 1547-1557.
- [5] 刘丹丹,黄印博,魏合理,等. 我国典型地区大气透过率的计算分析[J]. 大气与环境光学学报,2013,8(4): 262-270.
- [6] 杨词银,张建萍,曹立华. 基于实时标校的目标红外辐射测量新方法[J]. 红外与毫米波学报,2011,30(3): 284-288.
- [7] 郭汉洲,郭立红,杨词银,等. 基于大气程辐射比例修正的红外辐射特性测量[J]. 激光与红外,2017,47(2):198-202.
- [8] 王东,赵威,陈勇,等. 天空背景红外辐射亮度测量及其对目标探测的影响分析[J]. 红外技术,2015,37(9):774-777.
- (上接第 65 页)
- [66] 张慧,徐晖,王雪莹,等. 一种基于椭圆随机超曲面模型的群目标高斯混合 PHD 滤波器[J]. 光学学报,2013,33(9):0904001-1-0904001-10.
- [67] 刘祖鹏,刘艳君. 基于星-凸形 RHM 的扩展目标跟踪算法[J]. 电光与控制,2017,24(9):72-76,82.
- [68] 李翠芸,林锦鹏,姬红兵. 一种基于椭圆 RHM 的扩展目标 Gamma 高斯混合 CPHD 滤波器[J]. 控制与决策,2015,30(9):1551-1558.
- [69] CHEN V C, LI F, HO S S, et al. Analysis of micro-Doppler signatures [J]. IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, 2003, 150(4):271-276.
- [70] 陈行勇,黎湘,郭桂蓉,等. 微进动弹道导弹目标雷达特征提取[J]. 电子与信息学报,2006,28(4):643-646.
- [71] ZHAO M M, ZHANG Q, LUO Y, et al. Micromotion feature extraction and distinguishing of space group targets [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017, 14(2):174-178.
- [72] 张群,何其芳,罗迎. 基于贝塞尔函数基信号分解的微动群目标特征提取方法[J]. 电子与信息学报,2016,38(12):3056-3062.
- [73] KANUNGO T, MOUNT D M, NETANYAHU N S, et al. An efficient k-means clustering algorithm: analysis and implementation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(7):881-892.
- [74] HOFFMAN J R, MAHLER R P S. Multitarget miss distance via optimal assignment[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 2004, 34(3):327-336.
- [75] RUAN Y, WILLETT P. The turbo PMHT [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2004, 40(4):1388-1398.