

引用格式:杨旭,赵泉,潘枝峰,等. 红外搜索跟踪系统探测距离地面测量与评估方法[J]. 电光与控制,2017,24(9):69-71,94. YANG X, ZHAO Q, PAN Z F, et al. A method for ground measurement and evaluation ofIRST detection distance[J]. Electronics Optics & Control, 2017, 24(9):69-71, 94.

红外搜索跟踪系统探测距离地面测量与评估方法

杨旭, 赵泉, 潘枝峰, 潘旭辉

(中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000)

摘要: 红外搜索跟踪系统(IRST)是一种光电成像探测设备,广泛应用于机载平台。介绍了一种适用于实验室内评估IRST目标探测距离指标的工程实践方法:将考核条件转换为目标辐射照度,利用灵敏度测量系统精确模拟目标辐射出射度,将IRST探测距离的评估有效转换为目标探测灵敏度的测量。在实验室内对多款IRST产品在相同条件下完成测量,通过类比分析完成了目标探测距离的评估,试验方法简便又高效。

关键词: 红外搜索跟踪系统; 辐射照度; 灵敏度; 测量系统; 类比分析; 探测距离

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2017.09.015

A Method for Ground Measurement and Evaluation of IRST Detection Distance

YANG Xu, ZHAO Quan, PAN Zhi-feng, PAN Xu-hui

(Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China)

Abstract: Infrared Search and Track (IRST) system is an optical imaging detection equipment used widely onboard the aircrafts. A method for evaluating the detection distance of IRST system is presented here, which is adaptive for use in the lab. Taking the target irradiance as the index, and by using a measurement system to accurately simulate the target irradiance, the evaluation of IRST detecting distance is transformed into the measurement of target detection sensitivity. We made test to multiple IRST products in the lab under the same conditions, and carried out the evaluation to the detecting distance through analogy analysis. The result shows that the method is simple and efficient.

Key words: infrared search and track system; irradiance; sensitivity; measurement system; analogy analysis; detection distance

0 引言

红外搜索跟踪系统(IRST)采用被动探测方式工作,具有角精度高、搜索视距远、可全天候工作和隐蔽性好等特点。由于IRST实施大范围区域搜索探查时搜索速度快、探测灵敏度高^[1-2],能够胜任对海上、空中及水面等目标的警戒任务,是雷达理想的辅助和替代设备,因此广泛应用于机载平台^[3-5]。

目前,IRST探测距离可达近百公里,在交付用户前多试装于应用平台并依照考核条件开展对特定目标的探测试验,直接测量探测距离指标。而在产品研发或检测时,往往不具备实体目标和远程路径等测试条

件,因此在实验室如何有效评估目标探测距离是IRST产品研发中面临的重要问题^[6]。

1 探测距离与灵敏度的转换

考核IRST探测距离时均规定有考核条件,其主要包括观测目标种类、运动速度、运行高度和气象条件等,利用专用软件可完成目标自身辐射强度和路径大气透过率的计算,再结合探测距离就可计算出目标辐射出射度^[7]。所计算的目标辐射出射度即是在规定条件下IRST接收到的目标辐射照度^[8],也就是满足考核条件时IRST应具备的最低探测灵敏度,这样对IRST探测距离的评定就转换为对其探测灵敏度的测量,考核条件、目标辐射出射度和IRST探测灵敏度三者之间的转换关系如图1所示。

设计灵敏度测量系统模拟辐射出射度可调节的无穷远目标的辐射,如图2所示。该系统主要包括标准

收稿日期:2016-09-30

修回日期:2017-07-03

作者简介:杨旭(1984—),男,辽宁沈阳人,硕士生,研究方向为光电传感器系统性能仿真与测试。

黑体、孔径光阑、长焦平行光管和扇形光阑。其中:黑体作为定标源提供辐射量精确可控的全光谱热辐射;孔径光阑可提供多组尺度的通光圆孔,用于调节目标尺度和辐射通量;长焦平行光管用于将黑体和孔径光阑形成的点目标转换为无穷远目标,并对外投射均匀的热辐射;而扇形光阑具备精准的旋转角度,通过调节可设定长焦平行光管能量通过比率,整个系统通过多项参数设定可精确模拟所需的目标辐射出射度。

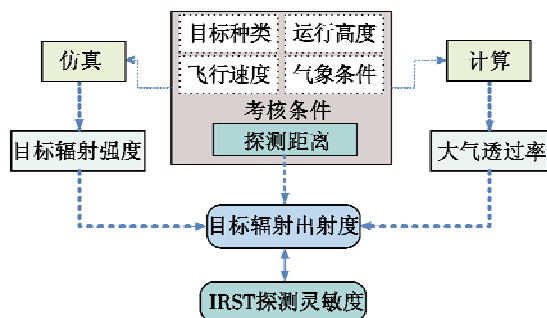


图1 考核条件、目标辐射出射度和探测灵敏度转换关系

Fig. 1 Transformation relation of evaluation conditions, radiant exitance and detective sensitivity



图2 灵敏度测量系统组成示意图

Fig. 2 Composition of measurement system for sensitivities

2 灵敏度测试原理

2.1 测量系统辐射出射度计算

灵敏度测量系统利用黑体作为标准辐射源,所模拟的辐射出射度为

$$S_b = \frac{\varepsilon_k A \tau \sigma (T^4 - T_e^4) D^2}{4f^2} \quad (1)$$

式中: S_b 为灵敏度测量系统的辐射出射度; ε_k 为黑体的辐射系数; A 为扇形光阑透光比例; τ 为平行光管透过率; σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数; T 为黑体绝对温度; T_e 为环境温度; D 为孔径光阑孔直径; f 为平行光管焦距。

2.2 波段内辐射计算

已知黑体辐射普朗克^[9]公式为

$$W_{b\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \times \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (2)$$

式中: $W_{b\lambda}$ 为单位波长的光谱辐射通量密度, λ 为波长; h 为普朗克常数; c 为光速; k 为波尔兹曼常数。

温度 T 的黑体在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段的辐射通量密度为

$$W_\lambda(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W_{b\lambda}(\lambda, T) d\lambda \quad (3)$$

从零到无穷大的波长范围内积分普朗克公式,得到全波段辐射通量密度,即为斯蒂芬-波尔兹曼定律^[8]

$$W = \sigma T^4 \quad (4)$$

式中, W 为辐射通量密度。

结合上述公式计算温度 T 的黑体在波段 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 的辐射出射度占全光谱辐射出射度的比值 B 为

$$B = \frac{W_\lambda(T)}{\sigma T^4} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W_\lambda(\lambda, T) d\lambda}{\sigma T^4} \quad (5)$$

由于IRST具备波段选择范围,因此在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 工作波段内,灵敏度测量系统所模拟的辐射出射度 S 为

$$S = S_b \times B \quad (6)$$

2.3 IRST目标探测距离计算

任何温度的物体均存在热辐射,目标向空间辐射的能量经过大气路径传输后被IRST的光学窗口接收,若IRST能够响应如此微弱的能量,则可实现对目标信息的测量。目标辐射强度、路径条件和IRST产品的目标探测灵敏度之间的关系为

$$S' = \tau_{(\lambda, R)} J / R^2 \quad (7)$$

式中: S' 为IRST所探测目标的辐射照度; $\tau_{(\lambda, R)}$ 为路径内的大气透光率; J 为目标辐射强度; R 为目标探测距离。

3 试验方法

3.1 基本测量方法

测量时,将IRST与灵敏度测量系统固定,使IRST的光学窗口完全处于测量系统的辐射孔径内。预先设定好黑体温度和孔径光阑,在长焦平行光管入瞳处安装扇形光阑,调节扇形光阑的透光比例改变所模拟出射的辐射通量密度,直至IRST对目标探测状态降低到规定的探测概率时为止,探测概率即有效探测的机率,可在固定时间内查看IRST输出的画面,计算有效探测目标次数与总扫描周期数的比值,此时,灵敏度测量系统所模拟的辐射出射度 S 恰好使得IRST处于临界探测状态,即 $S' = S$,将其代入式(7)可计算出IRST对特定目标的最大探测距离为

$$R = \sqrt{\frac{\tau_{(\lambda, R)} \times J}{S}} \quad (8)$$

依照上述方法进行实验室IRST测试,所需的参数多、计算量大且操作复杂,同时过程参量“大气透过率”和“目标辐射强度”依赖仿真计算软件,其精度对探测距离评估结果影响较大,工程计算中一般应留有20%以上的余量。

3.2 类比测量评估方法

当已掌握某IRST在实际考核条件下的探测距离指标后,可开展类比测量用于评估新型产品,选取不同IRST进行作用距离对比可知

$$\frac{R_1}{R_2} = \sqrt{\frac{\tau_{(\lambda,R)1} \times J_1 \times S_2}{\tau_{(\lambda,R)2} \times J_2 \times S_1}} = \sqrt{\frac{\tau_{(\lambda,R)1} \cdot J_1 \times S_{b2} \cdot B_2}{\tau_{(\lambda,R)2} \cdot J_2 \times S_{b1} \cdot B_1}} \quad (9)$$

由式(1)可知,测量系统的固有参数如 $\varepsilon_h, \tau, \sigma, f$ 可消去,而 S_{b1}, S_{b2}, B_1 和 B_2 与试验时的参数设定有关,一般情况下,影响评估结果的试验变量包括扇形光阑透光比例、黑体温度、环境温度和孔径光阑孔直径等,因此将式(1)代入式(9),简化后可得

$$R_1 = \sqrt{\frac{\tau_{(\lambda,R)1} \cdot J_1 \cdot B_2 \cdot A_2 \cdot (T_2^4 - T_4^4) \cdot D_2^2}{\tau_{(\lambda,R)2} \cdot J_2 \cdot B_1 \cdot A_1 \cdot (T_1^4 - T_3^4) \cdot D_1^2}} \cdot R_2 \quad (10)$$

进一步,在类比测量时,可对灵敏度测量系统设定相同的孔径光阑孔直径和黑体温度,则式(10)进一步简化为

$$R_1 = \sqrt{\frac{\tau_{(\lambda,R)1} \cdot J_1 \cdot B_2 \cdot A_2}{\tau_{(\lambda,R)2} \cdot J_2 \cdot B_1 \cdot A_1}} \cdot R_2 \quad (11)$$

此时,试验中只需针对“扇形光阑透光比例”进行调节和测试即可。这样不仅简化了试验操作,大幅降低计算复杂度,且所获得结果更加直观,同时将利用相同算法或者工具软件仿真计算的大气透过率和目标辐射强度进行对比,也在一定程度上降低了误差,进一步提高了测量与评估精度。

4 测量数据及结果

在实验室分别对4款IRST产品进行探测灵敏度测量,其中,A型和B型为待测新品,其他两型为已完成性能鉴定的产品。

4.1 测试试验 I

将待测IRST与X型IRST产品进行目标迎头探测灵敏度类比测量,测试时,设定灵敏度测量系统的黑体温度为35℃、光阑孔径为0.5mm,调节扇形光阑透光比直至IRST达到规定的检测概率时为止,测量结果如表1所示。

表1 试验 I 灵敏度测试结果

Table 1 Measurement result of irradiance by test I

受试产品	环境温度/℃	黑体温度/℃	光阑孔径/mm	扇形光阑透光比/%	工作波段	波段辐射出射度比/%	探测概率/%
A型	20.6	35	0.5	11.5	7.4~9.2	12.2	91
B型	20.6	35	0.5	9	3.1~4.4	2.83	91
X型	20.3	35	0.5	11.5	7.9~10.5	17.75	88

4.2 测试试验 II

将待测IRST与Y型IRST产品进行目标尾后探测灵敏度类比测量,测试时设定测量系统的黑体温度为100℃,试验结果如表2所示。

表2 试验 II 灵敏度测试结果

Table 2 Measurement result of irradiance by test II

受试产品	环境温度/℃	黑体温度/℃	光阑孔径/mm	扇形光阑透光比/%	工作波段	波段辐射出射度比/%	探测概率/%
A型	20.2	100	0.3	10	7.4~9.2	13.77	91
B型	20.2	100	0.3	8.8	3.1~4.4	9.12	91
Y型	20	100	1	7	3.9~5.7	6.8	85

4.3 测量结果与分析

4.3.1 不同波段产品探测性能对比分析

首先待测IRST在中长波波段的目标探测性能进行对比分析。对于迎头探测状态,参照式(11),依照表1的测量结果,对A型和B型的中长波探测距离进行对比,即 $R_A/R_B = 1.06$,可见,对于同一目标迎头时A型IRST产品优于Y型IRST产品。

对于尾后探测状态,依照表2结果,对A型和B型的中长波探测距离进行对比,即 $R'_A/R'_B = 0.8$,可见对于目标尾后状态,A型明显小于B型。

综上所述得出结论:迎头探测目标时选择A型IRST产品,而尾后探测目标时选择B型IRST产品更加有效。

4.3.2 探测距离评估

已知在相应考核条件下,X型IRST的目标迎头探测距离可达15km,利用表1的测量结果,参照式(10),计算A型IRST产品的目标迎头探测距离 R_M 为17.2km。

已知在相应的考核条件下,Y型IRST的目标尾后探测距离可达22km,利用表2的测量结果,计算B型IRST产品的目标尾后探测距离 R_{Bm} 为54.8km。

5 结论

本文介绍了一种适用于评估IRST目标探测距离指标的工程实践方法,在实验室内利用灵敏度测量系统,在相同条件下将新型IRST与已完成性能鉴定的IRST产品完成类比测量,通过分析可快速给出目标探测距离结果,试验简便、高效。借鉴本文的测量方法,不仅加快IRST产品的研发效率,也有助于技术状态改进并降低试飞、试航等试验风险。

参考文献

- [1] 宋丰华. 现代空间光电系统及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2004.
- [2] 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.

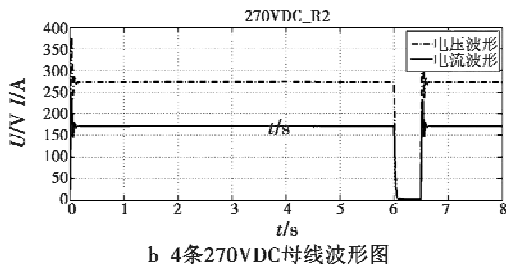


图 11 故障状态下 230VAC 和 270VDC 母线电压电流波形图

Fig. 11 Voltage and current of 230VAC and 270VDC bus during fault process

当 $t=6$ s 时, VFSG_R2 也故障。系统只剩 1 台主发电机工作, 系统处于紧急状态, 此时控制 2 台 ASG 起动, 给右侧系统供电。图 10 中, R1_BT B 和 R2_BT B 闭合信号表明, 此时系统中 ASG_L 给 230VAC_R1 母线供电, ASG_R 给 230VAC_R2 母线供电。R3_BT B 在此时从闭合状态变为断开是因为 ASG_L 和 ASG_R 之间不能并联供电, 必须断开联结着 230VAC_R1 和 230VAC_R2 的断路器 R3_BT B。

以上仿真结果表明, 所构建的多电飞机变速变频系统在多电源运行的情况下, 能够判定不同的发电机故障情况, 做出准确的决策并通过网络重构实现电源切换, 恢复设备供电, 保证了系统的供电可靠性。

4 结束语

本文所构建的仿真模型作为综合性的整体仿真模型, 体现了多电飞机变速变频系统的特点。算例分析表明, 建立的综合仿真模型能够很好地模拟多电飞机变速变频系统的稳态和负荷干扰运行状态, 并能应对不同的发电机故障情况做出正确的电源切换策略, 在满足飞机电能质量要求的基础上, 完整地展现多电飞机电力系统的运行过程, 为后续多电飞机电力系统故障诊断和安全性分析提供了很好的仿真工具。

参考文献

[1] 刘建英, 任仁良. 飞机电源系统[M]. 北京: 中国民航出版社, 2012.

- [2] 黄茜汀. 飞机电源系统的建模与仿真研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- [3] 王薛洲, 张晓斌, 潘获. 飞机三级发电机的建模与仿真[J]. 计算机仿真, 2013, 30(4): 59-62.
- [4] 薛梦娇, 李玉忍, 梁波. 飞机交流励磁变速恒频发电系统的建模与仿真[J]. 计算机仿真, 2013, 30(7): 49-54.
- [5] 唐虹, 黄茜汀, 唐万忠, 等. 基于 Simulink 的飞机电源系统建模与仿真[J]. 电网技术, 2007, 31(19): 87-90.
- [6] WU T, BOZHKO S V, ASHER G M, et al. A fast dynamic phasor model of autotransformer rectifier unit for more electric aircraft[C]//Industrial Electronics, 35th Annual Conference of IEEE, 2009: 2531-2536.
- [7] GRIFFO A, WANG J B. Modeling and stability analysis of hybrid power systems for the more electric aircraft [J]. Electric Power Systems Research, 2012, 82(1): 59-67.
- [8] EID A, EL-KISHKY H, ABDEL-SALAM M, et al. Modeling and characterization of an aircraft electric power system with a fuel cell-equipped APU paralleled at main AC bus [C]//Power Modulator and High Voltage Conference, 2010: 891-904.
- [9] EID A, EL-KISHKY H, ABDEL-SALAM M, et al. Modeling and characterization of an aircraft electric power system with a fuel cell-equipped APU connected at HVDC bus [C]//Power Modulator and High Voltage Conference, 2010: 639-642.
- [10] 秦海鸿, 严仰光. 多电飞机的电气系统[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015.
- [11] HAN L, WANG J, HOWE D. State-space average modelling of 6-and 12-pulse diode rectifiers [C]//European Conference on Power Electronics and Applications, 2007: 1-10.
- [12] 谢小威. 飞机变压整流器的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [13] XIA X. Dynamic power distribution management for all electric aircraft [D]. Cranfield: Cranfield University, 2011.
- [14] Department of Defense Interface Standard. MIL-STD-704F Aircraft electric power characteristic [S]. [s. l.]: DOD, 2004.

(上接第 71 页)

[3] 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.

[4] 申洋, 唐明文. 机载红外搜索跟踪系统 (IRST) 综述[J]. 红外技术, 2003, 25(1): 13-18.

[5] 张延坤, 王旭. 美国机载红外搜索与跟踪系统的发展[J]. 舰船电子工程, 2008, 28(6): 40-43.

[6] 潘明杰, 连续, 张红刚. 红外搜索跟踪系统探测距离估算方法[J]. 电光与控制, 2012, 19(9): 47-49.

[7] 陈衡. 红外物理学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.

[8] 杨宜合, 岳敏. 红外系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.

[9] 《红外系统原理》翻译组. 红外系统原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1975.