

文章编号: 1672-8785(2019)03-0011-05

测试数据在红外目标作用距离分析中的应用

贺元兴¹ 郑 志¹ 司文涛² 张浩元²

(1. 国防大学联合作战学院, 河北 石家庄 050084;

2. 中国人民解放军 95859 部队, 甘肃 酒泉 735018)

摘 要: 从理论上建立了目标红外特性动态测试数据与目标作用距离计算的关联模型, 并给出了基于测试数据预测作用距离的一般性方法。作为应用, 依托外场地基大口径红外测量系统对某型目标的红外辐射特性进行了动态测试, 获得了目标迎头和尾后两个方向上的红外辐射特性以及传输路径上的大气透过率数据, 预测了不同口径红外系统的作用距离并对计算结果进行了分析。本文方法为基于目标真实测试数据的作用距离预测研究提供了思路。

关键词: 红外; 作用距离; 测试数据; 迎头; 尾后

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2019.03.003

Application of Test Data in Analysis of Infrared Target Operating Range

HE Yuan-xing¹, ZHENG Zhi¹, SI Wen-tao², ZHANG Hao-yuan²

(1. College of Joint Operations, National Defense University, Shijiazhuang 050084, China;

2. No. 95859 Unit of PLA, Jiuquan 735018, China)

Abstract: A correlation model between dynamic test data of infrared characteristics of target and calculation of target operating distance is established theoretically, and a general method of predicting operating distance based on test data is given. As an application, the infrared radiation characteristics of a certain target are dynamically tested by the ground-based large-aperture infrared measurement system in the outfield. The infrared radiation characteristics of the target in both the front and rear directions and the atmospheric transmittance along the tracking path are obtained. The operating distances of different-aperture infrared systems are predicted, and the calculation results are analyzed. The method given here provides a way for researching the prediction of operating distance based on real test data of the target.

Key words: infrared; operating distance; test data; head; rear

0 引言

由于具有作用距离远以及受天气影响相对较小等突出优点, 红外探测技术在现代光电跟

踪测量设备上有着广泛的应用^[1-5]。外场地基光电经纬仪大都配备了红外电视系统, 其作用距离作为系统的一项核心指标, 在某种程度上

收稿日期: 2019-02-24

作者简介: 贺元兴(1984-), 男, 甘肃环县人, 博士, 讲师, 主要从事靶场测量技术研究。

E-mail: yuanxing-he@163.com。

反映了光电经纬仪对远距离点源目标(如敌方导弹、飞机等)的综合探测能力和水平。目前,系统研制方及使用者对红外作用距离的预测分析主要以建模仿真为主^[6-9],而且对其中影响作用距离的目标特性及大气传输等重要参数也大多采用经验公式和理论模型算得。但由于缺乏实际真实数据的有效支撑,作用距离预测结果的可靠性不高,指导性不强。因此,本文建立了一套将红外系统实测数据同目标作用距离计算进行关联的理论模型,并提供了将目标特性测试数据与大气测量数据用于作用距离估算的一般性方法。作为模型应用,依托外场地基大口径红外测量系统对某型目标的红外辐射特性进行了动态测试,获得了目标迎头和尾后两个方向上的中波、长波红外辐射强度值以及传输路径上的大气透过率数据,预测并分析了四种不同口径红外系统的作用距离,从而为目标跟踪策略的制定提供依据。本文方法为探索研究目标真实动态特性测试数据在作用距离预测分析上的应用提供了思路和参考。

1 动态测试数据与作用距离的联立建模

根据红外辐射传输理论,并假定红外测量系统在探测目标时仅受探测器噪声所限,红外系统的目标探测信噪比满足^[1]:

$$V_s/V_n = \frac{A_0 \tau_0}{R^2} \frac{D^*}{(\Delta f \cdot A_d)^{1/2}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_\lambda \tau_{atm}(\lambda) \rho(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

式中, A_0 为红外系统的有效光学孔径面积; τ_0 为系统在响应波段 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 内光谱透过率的最大值; R 为目标斜距; D^* 为探测器的比探测率; A_d 为探测器单个像元的面积; Δf 为探测器的等效噪声带宽, $\Delta f = \pi/(4t_d)$, 其中 t_d 为探测器的积分时间; I_λ 为目标光谱辐射强度; $\tau_{atm}(\lambda)$ 为大气光谱透过率; $\rho(\lambda)$ 为系统归一化的光谱响应函数,即光学系统的相对光谱透过率函数与红外探测器的相对光谱响应函数的乘积。

对于配置制冷型红外焦平面阵列探测器的红外系统来讲,建立红外系统对入射辐射

与输出灰度间的定标方程时,系统测量的目标红外辐射亮度 L_t 分布满足式(2):

$$G \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [L_t(\lambda) \tau_{atm}(\lambda) + L_{path}(\lambda)] \rho(\lambda) d\lambda + B = U \quad (2)$$

式中, G 和 B 分别为系统定标增益和背景偏置系数; $L_{path}(\lambda)$ 为路径光谱辐亮度。

目标通常由具有不同辐射特征的若干部位组成。面阵探测器的单个像元对应于目标相应的局部区域,所以目标总辐射强度可表示为

$$I(\lambda) = \sum_i L_t(\lambda) A_s \quad (3)$$

式中, A_s 为探测器第 i 个像元所对应的目标投影面积。

将式(2)和式(3)代入式(1),经整理后可得:

$$\begin{aligned} \sum_i A_s \cdot \left(\frac{U - B - G \cdot L_{path}}{G} \right) \\ = \frac{R^2 \cdot \text{SNR} \cdot (\Delta f \cdot A_d)^{1/2}}{A_0 \tau_0 D^*} \end{aligned} \quad (4)$$

设大气背景辐射为 L_{back} , 目标图像的景灰度值为 h_B , 则背景偏置 B 可由系统定标方程算得:

$$B = h_B - G \cdot L_{back} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4),并令 $K = (V_s/V_n) \cdot f^2 \cdot (\Delta f/A_d)^{1/2} / (A_0 \tau_0 D^*)$, 则

$$\frac{1}{G} (\sum_i^{N_1} h_i - N_1 \cdot h_B) + M(L_{back} - L_{path}) = K \quad (6)$$

式中, N_1 为目标区域的像元数; h_i 为目标区域的图像灰度分布; M 为目标覆盖的像元数; f 为系统的有效焦距; K 为红外系统的固有参数,由光学系统、探测器以及信号处理等因素决定。当红外测量系统及参数配置给定后, K 值便唯一确定。

式(6)的左边项为距离 R 的减函数,不妨将其设为 $f(R)$ 。随着目标距离的增加,目标在面阵探测器的像面上形成点目标图像。由于大气程辐射近似于背景辐射,此时忽略 $M(L_{back} - L_{path})$ 项,则 $f(R)$ 可简化为

$$f(R) = \frac{1}{G} (\sum_{i=1}^{N_i} h_i - N_1 h_B) \quad (7)$$

红外系统观测远距离目标的最大作用距离 R_{max} 是指信噪比 V_s/V_n 取系统所允许的最小探测信噪比时, 函数 $f(R)$ 与 K 值交点所对应的 R 值。此时, K 值取最小值 K_{min} , 如图 1 所示。

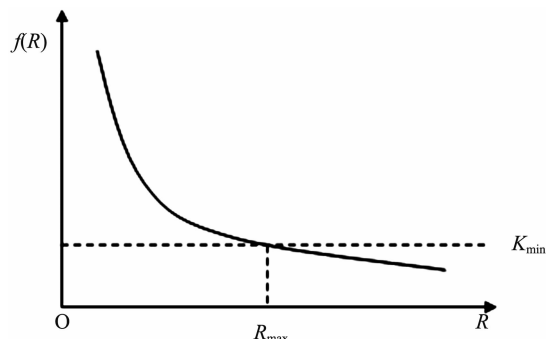


图 1 红外系统作用距离的示意图

在分析红外系统对目标迎头或尾后方向的作用距离时, 大多不会通过实际跟踪测量目标来计算作用距离, 而是结合红外系统参数、大气及目标等先验信息对作用距离进行事前评估。此时, 需要事先对 f 函数进行计算。根据目标特性测试理论, 点源目标辐射强度 I_{target} 可由式(8)近似计算:

$$I_{target} = \frac{A_d}{G \cdot \tau_{weighted} \cdot M_s} \cdot [\sum_{i=1}^{N_i} h_i - N_1 h_B] \quad (8)$$

式中, M_s 为红外系统的放大率, $M_s = f/R$; $\tau_{weighted}$ 为大气加权传输系数。工程计算时, $\tau_{weighted}$ 采用大气平均透过率来近似取值。这里, 函数 f 可由式(9)计算:

$$f(R) = \bar{\tau}_{atm} \cdot \frac{I_{target}}{R^2} \left(\frac{f^2}{A_d} \right) \quad (9)$$

目标的辐射强度与其飞行高度、速度以及发动机工作状态等直接相关。在不考虑红外系

统光谱响应线型函数加权影响的情况下, 辐射强度为目标自身的固有属性, 不依赖于红外系统。目标迎头或尾后方向上的辐射强度可通过用地基大口径红外系统对远距离目标进行跟踪测量来获得。大气平均透过率可通过用激光雷达、太阳辐射计和地面气象站等大气测量仪器实时采集大气数据, 然后由大气传输计算软件(如 CART)计算得到。至此, 利用式(9)就可以计算出函数 f 随距离 R 的变化曲线, 其与 K_{min} 值的交点所对应的 R 坐标即为在当前环境状态条件下对指定目标的作用距离。

2 计算结果及分析

依托地基大口径红外测量系统对某型目标的红外辐射特性进行了测试。测试过程包括红外辐射定标、大气参数测量以及目标红外图像采集等环节。测试数据作为基础数据用于目标红外特性的事后判读和计算。对于目标远距离探测来讲, 通常关注目标迎头和尾后两个方向上的作用距离, 而目标在迎头和尾后方向给定某一角域内的平均辐射强度值更能反映目标被探测到的概率大小。对目标迎头和尾后方向上的测试数据进行了事后处理和统计。表 1 列出了目标迎头和尾后方向 $\pm 30^\circ$ 方位视向角域内的平均辐射强度测试结果。

根据该型目标的动态特性测试结果, 对 4 种不同口径红外跟踪测量系统的作用距离进行了计算和分析。参数取值如下: 红外系统的 $F/\#$ 数为 2, 光学透过率 τ_0 为 0.6; 焦平面面阵探测器的像元尺寸为 $30 \mu\text{m}$; 可探测最小信噪比 $(V_s/V_n)_{min}$ 为 8; 探测器的积分时间 t_d 为 3 ms (中波) 和 0.5 ms (长波); 中波红外探测

表 1 目标迎头和尾后方向上的平均辐射强度($\pm 30^\circ$)

目标测量方向	中波红外($3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$)		长波红外($8 \sim 9.2 \mu\text{m}$)	
	平均飞行高度/m	平均辐射强度/(W/sr)	平均飞行高度/m	平均辐射强度/(W/sr)
迎头	4000	0.2239	4000	3.3282
尾后	5000	15.3190	5000	5.2562

波段为 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$, 长波红外探测波段为 $8 \sim 9.2 \mu\text{m}$; 比探测度 D^* 为 $3 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ (中波) 和 $1 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ (长波); 大气透过率是基于动态特性测试中实时采集的大气数据由 CART 软件计算得到的。图 2 所示为目标迎头方向上 4 种不同红外跟踪测量系统的 f 函数随距离 R 的变化曲线。其中, 红外系统的口径分别取 800 mm、600 mm、450 mm 和 200 mm。从图 2 中可以看出, 红外系统的作用距离随光学口径呈正相关变化。口径为 800 mm 的中波和长波红外系统对该目标迎头方向的作用距离分别为 83 km 和 114 km; 口径为 200 mm 的中波和长波红外系统对该目标

迎头方向的作用距离分别为 30 km 和 44 km。结果表明, 长波红外系统对目标迎头方向的作用距离要优于中波红外系统。

图 3 所示为目标尾后方向上不同红外跟踪测量系统的 f 函数随距离 R 的变化曲线(红外系统的口径取值同图 2)。可以看出, 红外系统的作用距离随光学口径呈正相关变化。口径为 800 mm 的中波和长波红外系统对该目标尾后方向的作用距离分别为 237 km 和 139 km; 口径为 200 mm 的中波和长波红外系统对该目标尾后方向的作用距离分别为 128 km 和 55 km。结果表明, 中波红外系统对目标尾后方向的作用距离要优于长波红外系统。

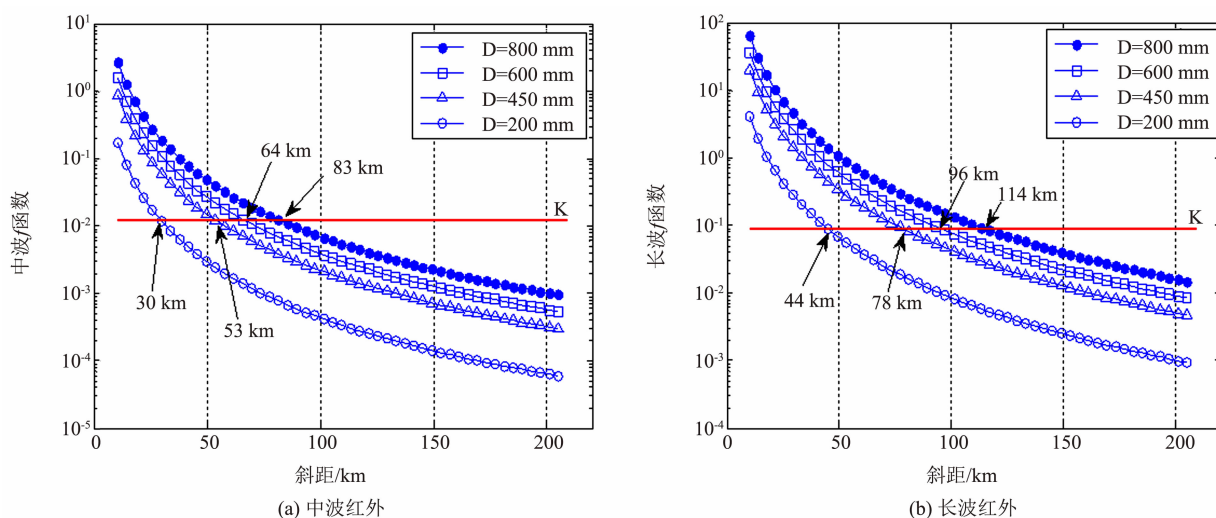


图 2 目标迎头方向上 f 函数随目标斜距的变化曲线

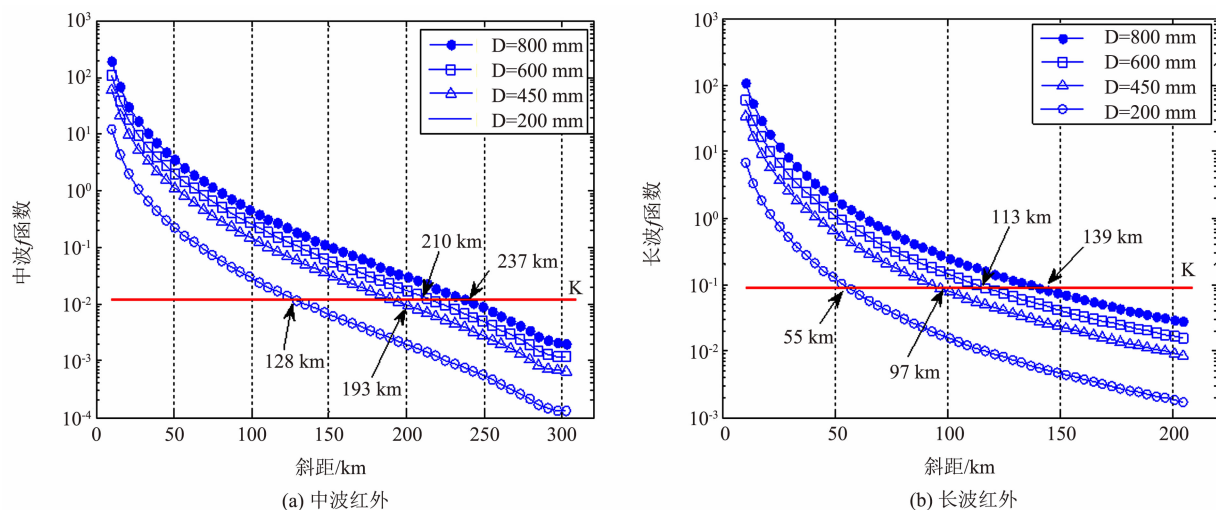


图 3 目标尾后方向上 f 函数随斜距的变化曲线

3 结束语

作为光电跟踪测量系统的一项核心指标, 作用距离反映了系统对远距离点源目标的探测能力。本文建立了一套将目标红外特性动态测试数据同目标作用距离计算进行关联的理论模型, 并给出了将目标特性测试数据及大气测量数据用于计算作用距离的一般性方法。作为方法应用, 采用外场地基红外特性测量设备对某型目标的红外辐射特性进行了动态测试, 获得了目标迎头和尾后两个方向上的中波、长波红外辐射强度值以及传输路径上的大气透过率数据, 预测了四种不同口径红外系统的作用距离并对计算结果进行了分析。本文方法为目标真实测试数据在作用距离预测分析上的应用提供了思路。

参考文献

- [1] 小哈得逊 R D. 红外系统原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1975.

- [2] 刘刚, 张丹. 红外成像制导图像处理技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [3] 李航. 中波红外目标探测装置关键技术研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- [4] 王涛. 复杂空间环境下红外弱小目标高可靠检测方法研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- [5] 田棋杰, 李周, 常松涛, 等. 高温小目标红外辐射特性测量方法 [J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1012004.
- [6] 常勇, 薛丰廷. 地基红外探测系统的作用距离研究 [J]. 红外, 2009, 30(8): 14-17.
- [7] 周金伟, 李吉成, 石志广, 等. 高超声速飞行器红外可探测性能研究 [J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0504001.
- [8] 邢强林, 黄惠明, 熊仁生, 等. 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.
- [9] 王莹莹, 张永顺, 何革. 基于对比度的红外探测系统对巡航导弹作用距离分析 [J]. 电光与控制, 2011, 18(5): 19-22.

(上接第 10 页)

参考文献

- [1] 周浩, 陈立祥, 李吉浩. 国产化微波元器件应用验证的方法及应用 [J]. 现代雷达, 2012, 34(1): 58-61.

- [2] 任仁, 吴礼刚, 王小坤, 等. 碲镉汞红外探测器高低温循环特性研究 [J]. 激光与红外, 2007, 37(9): 941-943.
- [3] Maropoulos P G, Ceglarek D. Design Verification and Validation in Product Lifecycle [J]. CIRP Ann Manuf Technol, 2010, 59(2): 740-759.