

高温窗口作用下红外导引头性能建模与评估

柴国贝, 赵晓宁, 刘 玮, 鲍文卓, 谢晓阳, 李 强

(中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

摘 要: 高超声速飞行器的高温窗口会对红外导引头成像性能产生严重影响。为了定量分析高温窗口效应, 通过红外导引头信号响应特性和高温热辐射特性耦合的方法, 建立了高温窗口作用下的红外导引头成像量化表征模型, 并利用典型红外导引头系统高温窗口实验对该模型进行验证。基于量化表征模型, 结合外场试验获取的船海辐射数据, 实现了多种温度窗口作用下红外导引头成像结果计算, 并对高温窗口作用下的红外导引头成像性能进行评估分析。分析结果表明: 当窗口温度超过 250 °C 时, 肉眼基本无法通过图像分辨船只; 当窗口温度超过 300 °C 时, 基本无法通过导引头识别算法实现目标的分辨和跟踪。

关键词: 高温窗口; 响应特性; 成像性能; 红外导引头

中图分类号: TP216 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0904003

Modeling and evaluation of infrared seeker in high temperature window

Chai Guobei, Zhao Xiaoning, Liu Wei, Bao Wenzhuo, Xie Xiaoyang, Li Qiang

(China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: The high temperature window of a hypersonic vehicle can have a severe impact on the imaging performance of the infrared seeker. In order to quantitatively analyze the high temperature window effect, the imaging and quantitative characterization model of the infrared seeker in high temperature window was established through the coupling of the signal response characteristics of the infrared seeker and the high temperature thermal radiation characteristics. The quantitative characterization model was verified by high temperature window experiment of typical infrared seeker system. Based on the quantitative characterization model, combined with the ship radiation data obtained from the external field test, the imaging results of the infrared seeker under various temperature windows were calculated, and the imaging performance of the infrared seeker under the high-temperature window was evaluated. The analysis results indicate that when the window temperature exceeds 250 °C, the naked eye can hardly distinguish the ship through the image; when the window temperature exceeds 300 °C, the target resolution and tracking cannot be achieved by the seeker recognition algorithm.

Key words: high temperature window; response characteristics; imaging performance; infrared seeker

收稿日期: 2019-04-05; 修订日期: 2019-05-03

作者简介: 柴国贝(1988-), 男, 工程师, 博士, 主要从事目标特性建模与仿真方面的研究。Email: chaiguobei@sina.com

0 引言

当高超音速飞行器在大气层内飞行时, 由于复杂气动力热环境会严重降低红外导引头可靠性, 从而无法实现飞行末段的制导功能^[1-3]。为了降低高速飞行对红外导引头产生极端影响, 高超声速飞行器上一般会设计针对红外导引头的保护装置^[4], 在飞行的初段和中段抵消极端飞行环境中的力热影响, 在飞行末段抛出保护装置实现红外导引头对目标的探测成像。最常见的红外导引头保护装置是类球锥形的整流罩, 但是由于多模复合需求、结构约束等原因, 红外导引头会非对称的放置在飞行器侧面, 这种情况下导引头窗口会设计成平面, 在飞行初段和中段由飞行器侧体共形整流罩实现防隔热, 飞行末段通过抛罩露出红外导引头的平面窗口实现探测成像。抛罩后, 由于飞行器速度快、近地面空气密度大、平面窗口为非流体形状等因素, 平面窗口区域会产生较强的气动热效应并引起温度快速上升, 导致窗口内侧的红外导引头对目标的探测识别性能降低。

为了实现飞行器总体的优化设计, 有必要分析多工况条件下高温窗口对红外导引头成像结果, 评估高温窗口作用下红外导引头性能。

针对高超音速飞行器导引头的高温窗口特性, 国内外开展了一系列研究工作, 归纳起来主要是两方面: (1) 材料固有属性分析^[5-8]。主要集中在窗口材料的强度、硬度、熔点、折射率、热导率和耐腐蚀性等特性分析; (2) 窗口辐射特性分析^[9-11]。主要集中在透过率、热辐射值等辐射特性仿真建模、数据获取和分析。上述的研究工作都集中于窗口自身特性, 由于窗口是导引头系统的一部分, 目标辐射透过窗口后会经过探测器成像, 窗口的高温特性直接影响的是成像性能, 因此不能将窗口独立于红外导引头进行研究, 有必要基于高温窗口与红外导引头的耦合特性开展导引头性能分析。

针对上述问题, 文中分析红外导引头系统信号响应特性和高温窗口热辐射特性, 依据高温窗口作用红外导引头的动态响应耦合特性机理, 建立高温窗口作用下的红外导引头成像量化表征模型, 并基于实测反演船海辐射数据, 实现高温窗口效应下红外导引头成像计算, 基于计算结果开展导引头性能分析。

1 高温窗口作用红外导引头工作机理分析

为了建立高温窗口作用下的导引头成像量化表征模型, 有必要对高温效应下红外导引头工作机理及高温窗口热辐射特性进行分析。

1.1 红外导引头系统信号响应特性分析

为了研究高温窗口效应下红外导引头工作机理, 需首先基于光电转换原理对红外成像原理进行分析, 其中, 光电转换原理可以由响应函数进行描述^[12]。依据红外成像系统光电转换原理, 系统入瞳辐射亮度 L_{in} 经探测器及增益放大后产生的电压 V 及图像灰度 C 可以表示为:

$$V = G_{cir} \frac{A_o A_d}{f_{sys}^2 (1+M)^2} \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \tau_{win}(\lambda) R(\lambda) L_{in}(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

$$C = (2^n - 1) / (V_m - V_m) (V - V_m) \quad (2)$$

式中: G_{cir} 表示信号增益, 与探测器积分时间、电路放大倍数等系统参数相关; $R(\lambda)$ 表示探测元的响应率; λ_1 和 λ_2 表示探测元响应光谱范围; $\tau_{win}(\lambda)$ 表示窗口辐射透过率; A_o 表示系统的孔径面积; A_d 表示探测器面元的面积; L_{in} 为到达红外窗口外表面的辐射亮度; f_{sys} 表示光学系统的焦距; M 表示光学系统放大率; 系统的 A/D 转换器位数为 n , 电压信号量化范围为 $V_m \sim V_m$ 。

结合系统噪声和饱和度等因素影响, 系统“辐射-图像灰度”响应函数结果呈“S”型, 如图 1 所示。图中 L_M 和 L_m 分别表示探测元恰好饱和和信噪比为 1 时的入瞳辐射亮度, 对应红外图像灰度最大值 C_M 和最小值 C_m 。

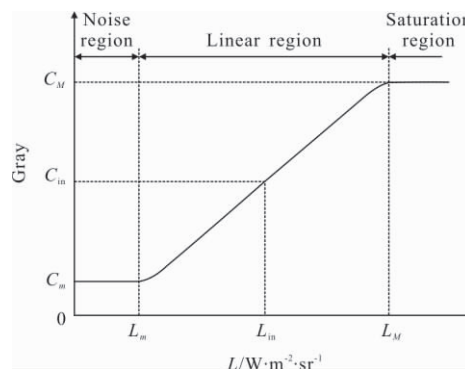


图 1 系统响应函数曲线

Fig.1 Curve of system response function

当入瞳辐射亮度 $L_m \leq L_{in} \leq L_M$ 时, 系统进入线性工作区, 信号响应函数斜率 k 可以表示为:

$$k = \frac{C_M - C_m}{L_M - L_m} \quad (3)$$

对 L_{in} 成像灰度可表示为:

$$C_{in} = k(L_{in} - L_m) + C_m \quad (4)$$

当入瞳辐射亮度 $L_{in} \leq L_m$ 时, L_{in} 被噪声淹没, 无法正常成像; 当入瞳辐射亮度 $L_{in} \geq L_M$ 时, L_{in} 对应的探测元进入饱和区, 系统增益将产生变化。

1.2 高温窗口热辐射特性分析

依据辐射传输方程, 导引头红外窗口的热辐射传输过程^[13]为目标辐射经过红外窗口透过及辐射叠加, 进入传感系统, 因此, 进入传感系统的辐射包括经窗口透射的目标场景辐射和窗口的自身辐射。红外窗口内表面的辐射亮度可以表示为:

$$L_{tot}(T_{win}, \lambda) = L_{in}\tau_{win}(T_{win}, \lambda) + L_{win}(T_{win}, \lambda) \quad (5)$$

式中: $L_{tot}(T_{win}, \lambda)$ 为窗口内表面辐射亮度; $\tau_{win}(T_{win}, \lambda)$ 为窗口温度为 T_{win} 时波长为 λ 的辐射透过率; $L_{win}(T_{win}, \lambda)$ 为温度为 T_{win} 的窗口在波长 λ 的辐射亮度。

依据实测结果可知^[11], 选取 5 mm 厚的蓝宝石玻璃, 3.7~4.8 μm 波段的辐射透过率 τ_{win} 和辐射亮度 L_{win} 如表 1 所示。

表 1 蓝宝石平板窗口的热辐射特性实测结果

Tab.1 Measured characteristics data of sapphire flat window

$T_{win}/^\circ\text{C}$	τ_{win}	L_{win}
100	0.999 2	0.198 7
150	0.996 2	0.840 2
200	0.987 1	2.168 6
250	0.972 5	5.435 1
300	0.943 6	11.089 0
350	0.901 5	20.799 0

拟合实测数据, 结果如图 2 所示。

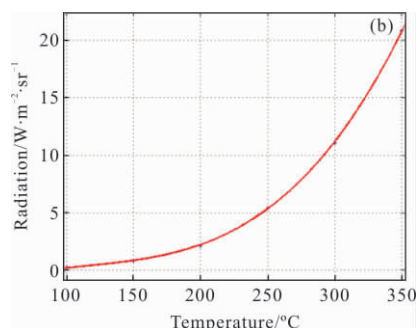
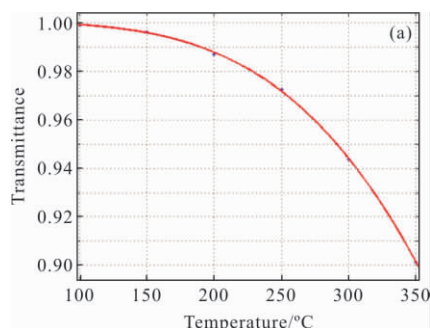


图 2 蓝宝石窗口不同温度下透过率(a)和辐射亮度(b)

Fig.2 Transmittance(a) and thermal radiation(b) characteristics of sapphire material

依据图 2 可以看出, 在窗口温度 100 $^\circ\text{C}$ 以下时, 透过率和辐射亮度影响基本可以忽略。随着窗口温度的升高, 窗口的辐射透过率不断降低, 同时窗口自身辐射亮度不断升高, 目标与场景的辐射占比不断降低, 由此导致目标的信噪比不断降低。

1.3 高温窗口作用红外导引头动态响应机理分析

由于导引头系统的动态增益自动控制, 当窗口受高温影响时, 高温引起的辐射变化增加了系统响应范围, 导致系统增益降低, 进入传感系统的最大辐射 L_M' 增大 ($L_M' > L_M$)。由于灰度范围和基底噪声不变, 因此, 导引头的线性工作区的斜率变小, 可以表示为:

$$k' = (C_M - C_m) / (L_M' - L_m) \quad (6)$$

此时, L_{in} 变为 $L_{tot}(T_{win}, \lambda)$, 灰度可表示为:

$$C_{in}' = k' [L_{tot}(T_{win}, \lambda) - L_m] + C_m \quad (7)$$

通过上述分析可知, 当窗口受热后系统的增益会降低, 系统“辐射-图像灰度”响应线性工作区范围斜率变小, 等量辐射差 ΔL 会因为斜率降低而导致响应的灰度差减小 ($\Delta C > \Delta C'$), 即目标与场景的对比度减小(图 3)。

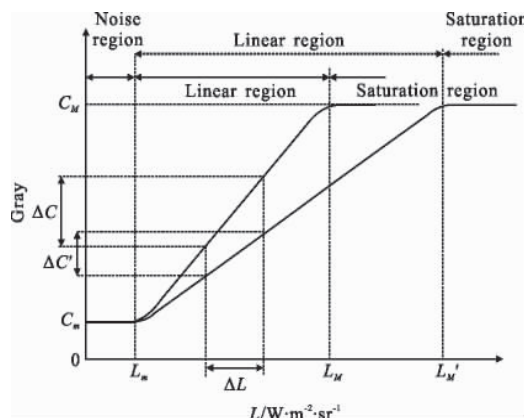


图 3 高温窗口作用下系统响应曲线

Fig.3 Curve of system response function in high temperature window

2 红外导引头的高温窗口效应量化表征及验证

通过第 1 节分析可知, 高温窗口作用红外导引头特征变化不仅与高温窗口的辐射特性相关, 而且与系统光电响应特性、系统动态范围和增益等因素密切相关。为了定量描述红外导引头的高温窗口效应, 本节综合考虑上述因素, 建立高温窗口作用下的导引头成像量化表征模型, 并利用高温窗口实验对模型进行了初步验证。

2.1 高温窗口效应量化表征模型构建

为了构建定量模型, 假设场景的辐射亮度范围为 $[L_{\text{Max}}, L_{\text{min}}]$, 场景中局部辐射为 $L(i, j)$, 电压量化范围为 $[V_M, V_m]$, 红外导引头系统的增益 G_{cir} 为 n 个档位自动增益 (G_1, G_2, \dots, G_n) , 因此系统输出的电压和灰度可以表示为:

$$V(i, j) = G_{\text{cir}} \frac{A_s A_d}{f_{\text{sys}}^2 (1+M)^2} \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} R(\lambda) [L(i, j, \lambda) \tau_{\text{win}}(T_{\text{win}}, \lambda) + L_{\text{win}}(T_{\text{win}}, \lambda)] d\lambda \quad (8)$$

$$G_{\text{ray}}(i, j) = \frac{2^n - 1}{V_M - V_m} V(i, j) \quad (9)$$

当窗口温度持续升高, 将有部分区域的灰度 G_{ray} 达到饱和, 此时, 传感系统的入射辐射最大值比当前增益响应辐射范围最大值 L_M 高, 即 $L_{\text{Max}} \tau_{\text{win}}(T_{\text{win}}, \lambda) + L_{\text{win}}(T_{\text{win}}, \lambda) \geq L_M$, 系统增益自动向下调整, 直至满足 $L_{\text{Max}} \tau_{\text{win}}(T_{\text{win}}, \lambda) + L_{\text{win}}(T_{\text{win}}, \lambda) \leq L_M'$ 。此时, 电压和灰度分别为:

$$V'(i, j) = G_{\text{cir}}' \frac{A_s A_d}{f_{\text{sys}}^2 (1+M)^2} \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} R(\lambda) [L(i, j, \lambda) \tau_{\text{win}}(T_{\text{win}}, \lambda) + L_{\text{win}}(T_{\text{win}}, \lambda)] d\lambda \quad (10)$$

$$G_{\text{ray}}'(i, j) = \frac{2^n - 1}{V_M - V_m} V'(i, j) \quad (11)$$

以上述理论为基础, 可以计算出自动增益倍数和探测器单元的电压灰度值即红外输出图像, 完成对导引头实测数据进行高温窗口效应添加, 支撑高温环境下导引头成像性能分析工作。

2.2 高温窗口效应量化表征模型验证

针对 2.1 节量化表征模型, 选取典型红外导引头系统开展基于高温窗口实验的模型验证。实验步骤如下:

- (1) 设置红外导引头的 4 个增益档位 G_1, G_2, G_3, G_4 ;
- (2) 设置黑体温度 T_{black} ;
- (3) 将红外窗口均匀加热至 T_{win} 温度;
- (4) 将窗口放置保温、点测窗口温度, 将黑体和红外导引头装置分别置于平板窗口两侧;
- (5) 窗口缓慢降温, 期间红外导引头对黑体持续成像, 存储成像数据并记录点测温度。

对实验结果、模型计算结果进行归一化、曲线拟合处理, 如图 4 所示。

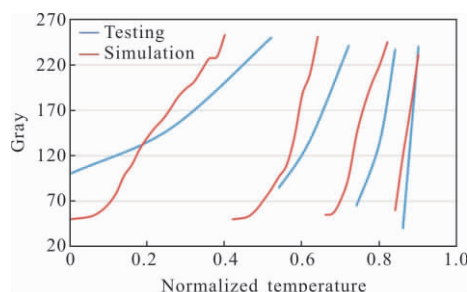


图 4 实测与模型结果对比

Fig.4 Comparison of testing and simulation

由图 4 可以看出:(1) 实测与模型计算的结果拟合曲线变化趋势相同: 针对固定温度 T_{black} 的黑体, 随着窗口温度升高, 黑体成像灰度逐渐变大, 当灰度近似饱和时, 增益自动调小, 灰度瞬间降低, 随后往复;(2) 实测曲线与模型结果曲线在分布区间和斜率等方面有较大差异, 这是因为在降温过程中视场区域降温不均匀引起的增益变化滞后以及探测非均匀响应导致的。

3 高温窗口效应下导引头成像结果与分析

为进一步研究高温窗口效应对红外导引头成像性能的影响, 根据上述高温窗口作用下的导引头成像量化表征模型, 采集了典型海面船只目标红外特性数据, 实现了高温窗口效应下红外导引头成像结果的仿真计算, 并基于计算结果定量分析了高温窗口效应对红外导引头成像性能影响。

3.1 红外目标辐射数据采集试验

为了获取高温窗口效应下导引头成像结果数据, 开展高温窗口数据对导引头成像性能的分析工作, 文中首先设计了目标与场景的辐射数据采集试验。试验使用的红外热像仪为北京长峰科技公司产品, 外形如图 5 所示, 参数如表 2 所示。本试验的热

像仪为固定增益,在数据采集期间增益不发生变化。



图 5 试验用的中波红外热像仪
Fig.5 MWIR imager used in the field experiment

表 2 中波红外成像仪参数

Tab.2 Parameters of MWIR imager

Parameter	Value
Wavelength/ μm	3.7-4.8
Refrigeration mode	Stirling cryocooler
Field of view/ $^\circ$	13.75 \times 11
Pixel	320 \times 256
Pixel size/ μm^2	30 \times 30
Focal length/mm	170
Gain	9 000
F#	2
Bits per pixel/bits	8

此外,对热像仪光谱响应度进行归一化处理,结果如图 6 所示。

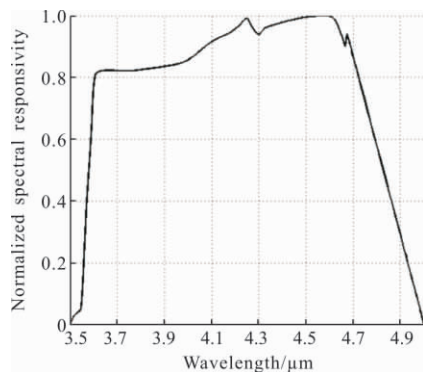


图 6 归一化光谱响应率
Fig.6 Normalized spectral responsivity

数据采集试验热像仪与场景关系如图 7 所示,试验以高台为观察平台,以船只为目标,海洋为观察背景,其中,观测点位置为东经 120.345 677 $^\circ$ 、北纬 36.047 573 $^\circ$,观察平台高 104 m,海上船目标长为 43 m,距观察点水平距离约 650 m。试验气象环境参数如表 3 所示。

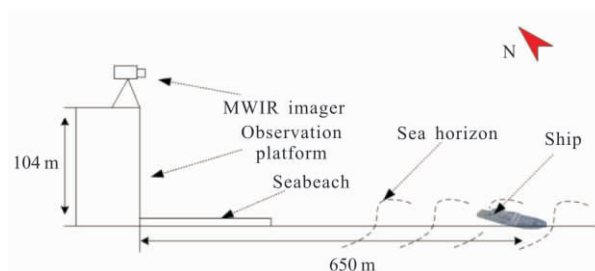


图 7 数据采集试验位置关系示意图
Fig.7 Position relationship of the external field

表 3 气象环境参数

Tab.3 Parameters of meteorological enviroment

Parameter	Value
Date	July 21
Time	5 pm
Weather	Sunny
Environment temperature/ $^\circ\text{C}$	29
Wind speed/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	7.5
Humidity	70%

通过本次试验,获取海上船目标的红外图像如图 8 所示。

通过热像仪定标可以拟合“灰度-辐射亮度”曲线,实现对采集数据的辐射反演^[13],完成高温窗口效应下成像结果计算的场景辐射数据生成。



图 8 试验采集数据结果
Fig.8 Experimental data

3.2 高温窗口效应下导引头成像计算

为了定量研究高温窗口效应对导引头成像性能

的影响,本节基于实测反演的场景辐射数据,对高温窗口下导引头成像结果进行了仿真计算。

首先,依据表 2 和图 6 预设仿真红外成像系统参数,并将固定增益设置为自动变增益,自动变增益档位对应的增益系数值如表 4 所示。

表 4 自动增益档位对应的自动增益系数值

Tab.4 Automatic gain coefficient corresponding to automatic gain grades

Gain grades	Gain coefficient
G_1	9 000
G_2	8 000
G_3	7 000
G_4	6 000
G_5	5 000
G_6	4 000
G_7	3 000
G_8	2 000
G_9	1 000

其次,依据第 2 章的红外导引头的高温窗口量化表征模型,对不同温度蓝宝石窗口下的红外导引头成像结果进行了计算,得到结果如图 9 所示。

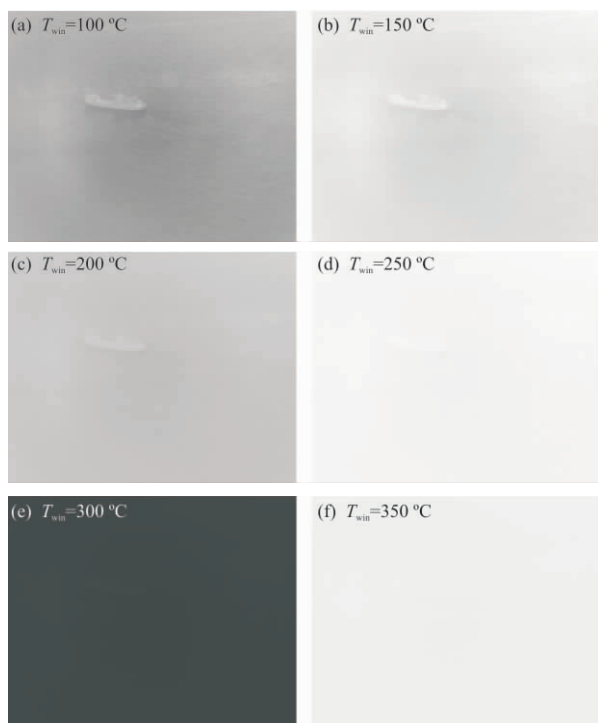


图 9 不同窗口温度下红外成像结果

Fig.9 Infrared imaging results at different window temperatures

从导引头输出图像结果可以看出,随着窗口温度升高,红外系统的增益系数不断降低,船只目标与海面背景的对比度不断降低,当窗口温度 $T_{win}=250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,肉眼基本无法在图像中分辨船只目标。由此可以推断,高温窗口效应将严重影响导引头性能。

3.3 高温窗口效应下红外导引头性能分析

为了进一步定量分析高温窗口对红外导引头的性能影响,本节利用导引头成像结果,对船只目标与海面灰度差进行了计算,结果如图 10 所示。

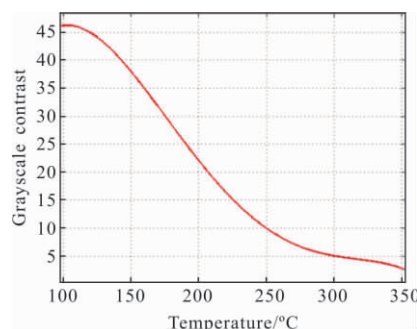


图 10 不同窗口温度下船海对比度

Fig.10 Grayscale contrast between ship and sea at different window temperatures

从计算结果得出,高温窗口效应对导引头性能影响很大,主要有:(1)当窗口温度超过 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,随着温度升高,船海灰度差快速降低,目标分辨难度快速升高;(2)当窗口温度超过 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,船海灰度差小于肉眼最小可分辨灰度差 10,肉眼基本无法分辨船只;(3)当窗口温度超过 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,船海灰度差小于识别算法最小可分辨灰度差 5,基于红外图像的目标识别算法基本无法分辨船只,此时无法依靠导引头实现目标分辨和跟踪。

4 结 论

文中提出了信号响应特性和高温热辐射特性耦合的红外导引头成像量化表征方法,解决了高超环境下窗口特性与导引头成像性能研究独立的问题,实现了高超声速飞行器高温窗口作用下红外导引头性能预测评估。

文中首先建立了高温窗口作用下的红外导引头成像量化表征模型,并验证了模型的有效性;其次,针对评估需求,基于实测反演船海辐射数据,实现了高温窗口效应下红外导引头成像计算,最后基于计

算结果对窗口在不同加热程度下导引头性能进行了分析,分析结果表明:当窗口温度超过 250 ℃时,肉眼基本无法通过图像分辨船只;当窗口温度超过 300 ℃时,基本无法通过导引头识别算法实现目标分辨和跟踪。

文中提出的量化表征模型可广泛用于红外成像系统论证、设计与优化,为高温窗口对红外成像性能影响评估提供支撑。

参考文献:

- [1] Niu Q, Gao P, Yuan Z, et al. Numerical analysis of thermal radiation noise of shock layer over an infrared optical dome at near-ground altitudes [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 97: 74–84.
- [2] Deep S, Jagadeesh G. Aerothermodynamic effects of controlled heat release within the hypersonic shock layer around a large angle blunt cone[J]. *Physics of Fluids*, 2018, 30(10): 106103.
- [3] Wang Yahui, Wang Qiang, Gao Lei, et al. Aero-thermo-radiation of a hy-personic vehicle [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1399–1403. (in Chinese)
王亚辉, 王强, 高磊, 等. 高超声速飞行器气动热辐射特性 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(6): 1399–1403.
- [4] Niu Q, Gao P, Yuan Z, et al. Numerical analysis of thermal radiation noise of shock layer over an infrared optical dome at near-ground altitudes [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 97: 74–84.
- [5] Zhou T. Precision molding of microstructures on chalcogenide glass for infrared optics [J]. *Micro and Nano Fabrication Technology*, 2018: 1–26.
- [6] Zhang Xingde, Liu Lin, Li Ronggang. IR optical window for airborne photoelectric equipments [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4): 601–606. (in Chinese)
张兴德, 刘琳, 李荣刚. 机载光电设备红外窗口技术[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 601–606.
- [7] Donegan B E, Greendyke R, Ravichandran R, et al. Experimental analysis of the interaction of carbon and silicon ablation products in expanding hypersonic flows [C]//22nd AIAA International Space Planes and Hypersonics Systems and Technologies Conference. 2018: 5325.
- [8] Liu X, Zhu J, Han J. Numerical and experimental investigation on thermal shock failure of Y_2O_3 -coated CVD ZnS infrared windows[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 124: 124–130.
- [9] Liu Li, Meng Weihua, Pan Guoqing. Modeling and analysis of infrared radiation from the dome flying at supersonic speed [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1193–1198. (in Chinese)
刘立, 孟卫华, 潘国庆. 超音速飞行环境中光学头罩热辐射建模与分析 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1193–1198.
- [10] Wang Y, Wang Q, Zhang B, et al. Evaluation of thermo-radiation characteristics of IR windows in hypersonic vehicles [C]//Selected Papers from Conferences of the Photoelectronic Technology Committee of the Chinese Society of Astronautics 2014, Part II. International Society for Optics and Photonics, 2015, 9522: 95220R.
- [11] Wang Y H, Wang Q, Zhang B C, et al. Measurement of thermo-radiation characteristics of IR window materials [J]. *Advanced Materials Research*, 2015, 1083: 104.
- [12] Zhang X, Li H. Research on target capture probability calculation model of composite photoelectric detection imaging sensor system[J]. *Optik*, 2018, 166: 161–168.
- [13] Modest M F. Radiative Heat Transfer [M]. New York: Academic Press, 2013.
- [14] Chatterjee R S, Singh N, Thapa S, et al. Retrieval of land surface temperature (LST) from landsat TM6 and TIRS data by single channel radiative transfer algorithm using satellite and ground-based inputs [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, 58: 264–277.