

文章编号: 1672-8785(2024)06-0048-09

类 THAAD 导引头气动光学效应计算研究

江 涛 丁明松* 刘庆宗 李 鹏 傅杨奥骁 黄发霖

(中国空气动力研究与发展中心计算空气动力研究所, 四川 绵阳 621000)

摘 要: 针对类美国末段高空域防御(Terminal High Altitude Area Defense, THAAD)系统的红外导引头外形, 开展了气动光学效应计算分析, 并将其用于飞行器设计。利用国家数值风洞工程高速流场计算软件 NNW-HyFLOW, 考虑热化学非平衡效应和材料传热耦合效应, 对导引头典型状态的流场进行了模拟, 获得了流场的密度、温度、压力等参数和窗口的温度场参数。基于流场参数, 利用 HyFLOW 气动光学传输效应计算功能, 开展了红外光学传输成像计算; 利用 HyFLOW 气动光学辐射效应计算模块, 开展了流场和光学窗口的热辐射计算。计算结果表明, 类 THAAD 导引头在 30 km 以上飞行时, 流场和光学窗口基本不会影响目标信号的光学传输成像, 但流场和窗口的热辐射效应会对导引头识别目标造成影响。不过随着飞行高度的升高, 这种影响会减小。

关键词: 类 THAAD 导引头; 气动光学效应; 红外成像; 点扩展函数; 红外辐射

中图分类号: V19; O435.1 **文献标志码:** A

DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2024.06.006

Research on Aero-Optical Effect Calculation of THAAD-like Seeker

JIANG Tao, DING Ming-song*, LIU Qing-zong, LI Peng, FU Yang-aoxiao, HUANG Fa-lin

(Computational Aerodynamics Institute of CARDC, Mianyang 621000, China)

Abstract: The aerodynamic optical effect is calculated and analyzed for the shape of THAAD-like infrared seeker, and it is used in aircraft design. Considering the thermochemical non-equilibrium effect and the coupling effect of material heat transfer, high-speed flow calculation software NNW-HyFLOW is used to simulate the flow field in typical state of the seeker. The flow field parameters such as density, temperature and pressure and the temperature field parameters of the window are obtained. Based on the flow field parameters, the infrared optical transmission imaging calculation is carried out by using the aero-optical transmission effect calculation function in HyFLOW. The thermal radiation calculation of flow field and optical window is carried out by using the aero-optical radiation effect calculation module. The calculation results show that when the

收稿日期: 2024-01-02

作者简介: 江涛(1981-), 男, 陕西商南人, 高级工程师, 主要从事目标红外辐射特性与气动光学效应计算研究。

***通讯作者:** E-mail: 546680018@qq.com

THAAD-like seeker flies above 30 km, the flow field and optical window will not affect the optical transmission imaging of the target signal, but the thermal radiation effect of the flow field and window will affect the target recognition of the seeker. However, when the infrared seeker flies at a high altitude, the influence diminishes.

Key words: THAAD-like seeker; aero-optical effects; infrared imaging; point spread function; infrared radiation

0 引言

HTV-2 是美国高超声速技术试验飞行器, 美国空军正在研制的 AGM-183A 高超声速导弹采用了类似的外形, 其他国家的滑翔飞行器也具有类似的气动布局^[1-2]。红外成像制导精度高, 可以进行目标图像识别, 是大气层内高超声速飞行器防御精确打击的一种主要制导方式^[3], 但红外导引头在高速飞行时会产生气动光学效应, 导致制导精度下降。气动光学效应研究内容包括气动热效应、光学传输成像效应和热辐射效应以及气动光学效应校正技术、测试技术等^[3-7]。其中, 气动热效应会引起光学窗口外流场温度升高, 光学窗口温度升高甚至变形; 光学传输成像效应是指目标信号光线经过流场和窗口时会产生折射、波面畸变, 使得成像发生偏移、衰减、模糊等; 热辐射效应主要来自流场气体辐射和窗口辐射, 对目标信号产生干扰^[8-12]。

THAAD 采用红外末制导, 其导引头光学窗口(蓝宝石玻璃)的透光波段为 3~5 μm , 飞行速度最大马赫数接近 10, 飞行攻角为 $\pm 8^\circ$ ^[13]。经过二十多年的发展, THAAD 于 2008 年开始在美国本土批量生产和部署。2023 年 3 月, THAAD 在韩国完成部署工作, 并在当月底的两国军演中首次模拟拦截任务(X 波段雷达探测距离达 2000 km)。

与“眼泡式”、“凹坑式”等光学窗口形式不同, THAAD 导引头采用了独特的凸起平台侧窗。这种设计对气动光学效应的改善是决定其光学系统性能的关键, 另一方面也是类 HTV-2 飞行器设计所关心的内容。本文针对类 THAAD 导引头外形, 利用完全自主的国家数值风洞工程风雷高超数值模拟软件

NNW-HyFLOW 进行气动光学效应计算分析。基于流场模拟功能, 考虑真实气体效应和窗口材料传热耦合效应, 求解三维 NS 方程, 获得了导引头光学窗口外气体平均密度场、温度场以及窗口温度场; 利用气动光学计算功能进行光学传输成像效应和热辐射效应计算分析; 最后分析了类 THAAD 导引头气动光学效应对光学系统的影响。

1 流场及窗口温度场模拟方法

无量纲化的三维热化学非平衡 NS 方程为^[14-15]

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial z} = \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial F_v}{\partial x} + \frac{\partial G_v}{\partial y} + \frac{\partial H_v}{\partial z} \right) + W \quad (1)$$

采用全隐式对称 TVD 格式对式(1)进行差分离散; 粘性项采用中心差分格式。材料热传导无量纲化的能量传导方程为

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{1}{\text{Re}_{com}} = \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \quad (2)$$

式中, $\frac{1}{\text{Re}_{com}} = \frac{L_\infty^2}{a_\infty t_\infty}$, $a_\infty = \frac{\kappa_\infty}{\rho_\infty c_{p_\infty}}$ 。

计算采用 7 组分 (O_2 , N_2 , NO^+ , NO , O , N , e^-) 化学反应模型, 来流中 O_2 和 N_2 的质量分数分别是 0.233 和 0.767。考虑导引头内仪器的使用环境, 光学窗口内表面温度取 300 K。

2 光学传输计算方法

导引头高速飞行时, 光学窗口外流场气体的密度在时空上非均匀分布, 窗口也会受到气动加热, 使得流场和窗口的折射率在时空上非均匀变化。目标光学信号通过这些非均匀介质时, 光波相位和振幅发生变化, 使信号光波的传播方向改变且成像质量下降。图 1 所示为气

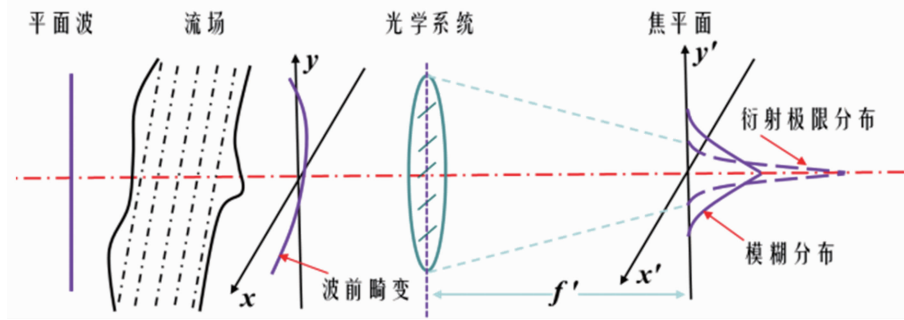


图1 气体流场光学传输成像效应模型

动光学效应模型^[5]。

红外探测器视场内流场气体和窗口的折射率分布是气动光学计算分析的关键。根据几何光学方法,对目标信号光线穿过流场进行追迹得到其传播路径,然后通过积分得到传输路径的光程差或相位差;根据波像差构建光瞳函数,并采用物理光学方法得到光学传输后的像面光波复振幅分布;经过傅里叶变换后得到点扩展函数和流场的光学传递特性^[5-7]。

2.1 气体介质的折射率

气体介质折射率与密度的本构关系为^[8-9]

$$n = 1 + K_{GD}\rho \quad (3)$$

式中, K_{GD} 为气体流场的 Gladstone-Dale 系数,其经验公式为

$$K_{GD} = 2.23 \times 10^{-4} \left(1 + \frac{7.52 \times 10^{-3}}{\lambda^2} \right) \quad (4)$$

2.2 光学窗口的折射率

光学窗口受气动加热后,其结构温度和应力的非均匀分布均会导致窗口折射率非均匀变化,即产生热光效应和弹光效应。折射率变化关系为^[5,8]

$$\Delta n = \beta \Delta T + (\partial n / \partial \sigma)_T \Delta \sigma \quad (5)$$

式中, β 是热光系数, ΔT 是温度变化量, $\Delta \sigma$ 是应变变化量。本文重点考虑气动加热引起的窗口材料温度变化对折射率及光学传输效应的影响。室温下单晶蓝宝石的折射率计算公式为^[16]

$$n_0^2 - 1 = \frac{1.4313493\lambda^2}{\lambda^2 - 0.0726631^2} + \frac{0.65054713\lambda^2}{\lambda^2 - 0.01193242^2} - \frac{5.3414021\lambda^2}{\lambda^2 - 18.028251^2} \quad (6)$$

2.3 光学传输计算

根据光程差定义,光线在流场经过光线追迹后的光程差为^[4-6]

$$OPD = K_{GD} \cdot \int_0^L \Delta \rho dl \quad (7)$$

式中, L 为光线追迹的积分路径, dl 为光线穿过流场的几何路径微元。由光程差可得到第 i 条光线的波像差:

$$\varphi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot OPD_i \quad (8)$$

由波像差得到光瞳函数:

$$U(x, y) = A(x, y)e^{i\varphi(x, y)} \quad (9)$$

式中, $A(x, y)$ 为波面振幅分布, $e^{i\varphi(x, y)}$ 为波面的相位分布。通过瞳函数的傅里叶变换得到像面振幅分布。光强与振幅平方成正比,点扩展函数为

$$PSF_M(x', y') = |U(x', y')|^2 = U(x', y') \cdot U^*(x', y') \quad (10)$$

像偏移可以用目标光线经过流场传输后在红外光学系统焦面上的成像中心位置相对于无流场影响时成像中心位置的偏差来评价,也可用像偏移相对于焦距产生的角偏差来评价。

3 热辐射效应计算方法

导引头光学探测系统接收到的热辐射噪声主要有四个辐射源:天空背景辐射、光学窗口外的高温流场辐射、光学窗口辐射、光学系统自身辐射。

对于光学窗口外流场高温气体辐射,可采用灰体加权等效的方法,也可采用带辐射模型来计算流场气体组分的辐射^[9-11]。对于光学窗口辐射,在早期工程上采用灰体计算方法。考

虑其红外透光性, 现在更多研究者认为整个窗口为辐射体^[12]。

本文研究高温流场气体的辐射和光学窗口的辐射。对于高温气体, 基于辐射传递方程, 采用窄带辐射计算模型计算热辐射。窗口辐射需要考虑其吸收, 因此运用半透明介质辐射传递理论来计算窗口的热辐射。

热力非平衡条件下的辐射传输方程为

$$\frac{dI_v}{d\ell} = k_v(S_v - I_v) \quad (11)$$

式中, ℓ 为辐射传输路径, I_v 为沿该路径的光谱辐射亮度, S_v 为源函数, k_v 为光谱吸收系数, ν 为频率。在热力学平衡条件下, 源函数就是黑体辐射亮度:

$$B_v = \frac{2h\nu^3/c^2}{e^{k\nu/kT} - 1} \quad (12)$$

由式(11)可得, 在热力学平衡条件下沿辐射路径 $\ell = \ell_1$ 处的辐射强度为

$$I_v(\tau_{v1}) = I_v(0)e^{-\tau_{v1}} + \int_0^{\tau_{v1}} B_v(r)e^{-(\tau_{v1}-\tau_v)} d\tau_v \quad (13)$$

式中, $d\tau_v$ 为光学厚度, $d\tau_v = k_v d\ell$ 。

对于光学窗口, 考虑窗口材料的吸收, 其辐射特性计算方法与高温气体一样。基于辐射传递方程, 按照光学计算网格, 沿传输路径积分得到热辐射。

4 计算结果分析

THAAD 导引头为双锥侧窗。为避开头部强激波区的影响并增加接收信号的范围, 其光学窗口为凸起的平台。头部半径为 22 mm, 总长度约为 340 mm, 底部直径为 210 mm, 侧窗锥角为 15° , 第一锥角为 18° 且长度为 150 mm, 第二锥角为 12° 且长度为 190 mm (见图 2)。

窗口材料为蓝宝石, 密度为 3980 kg/m^3 ; 25°C 时的导热系数为 $40 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, 1000°C 时的导热系数为 $10 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$; 25°C 时的比热容为 $750 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$, 1000°C 时的比热容为 $1256.1 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$; 吸收系数取 0.1 cm^{-1} , 透光率取 0.8。同时, 不同条件下生产的蓝宝石的性能参数在 $300\sim 600^\circ\text{C}$ 时出现最小值, 机械强度损

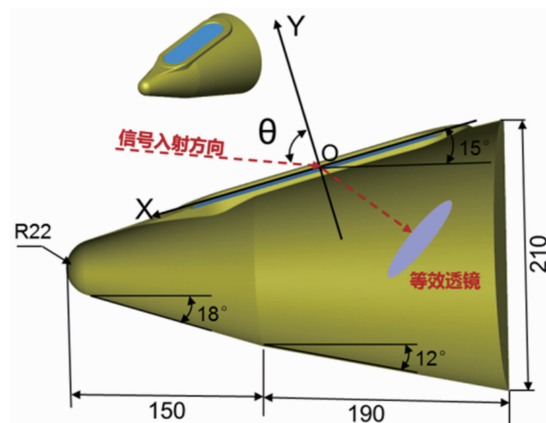


图 2 导引头外形及参数

失为 87%, 硬度下降 50% 以上。

图 3 和图 4 所示为流场的密度和温度云图。可以看出, 由于光学窗口的基座为凸台结构, 头部产生的激波与凸台处产生的激波交汇, 在凸台上方形成一处强激波。而且由于第一锥侧面切成平面和凸台结构, 激波压缩区分离, 在光学窗口附近产生密度较低的区域。随着高度的增加, 由于大气密度的降低, 光学窗口外流场压缩区内的密度也降低。攻角从 10° 到 -10° 时, 光学窗口由背风面转到迎风面, 其外流场压缩区更靠近窗口, 气体压缩更强烈。

图 5 所示为窗口中心线的温度分布。可以看出, 窗口外表面温度沿 X 方向(长度方向)降低, 沿 Y 方向(厚度方向)由外到内几乎呈线性降低。

图 6 所示为光学窗口温度和折射率, 图 7 所示为视线方向上的流场密度和折射率。可以看出, 窗口的折射率与温度相关, 折射率沿流动方向、厚度方向变小。由于温度场的对称性, 折射率也是左右对称的。窗口外流场的折射率与流场密度相关, 具有相似的特征。

图 8 所示为信号经过流场后的点扩展函数。可以看出, 图像沿 X 轴后移(即 X 正向)很小。图 9(a)所示为 30 km (本文计算的最低高度)时成像偏移随视角的变化情况。图 9(b)所示为高度为 30~55 km 且攻角为 0° 时的成像斯特尔比。可以看出, 在流场和窗口的作用

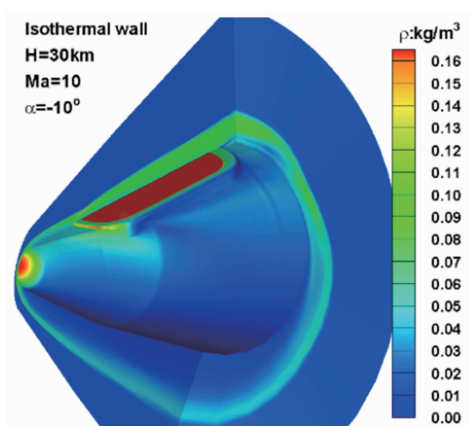
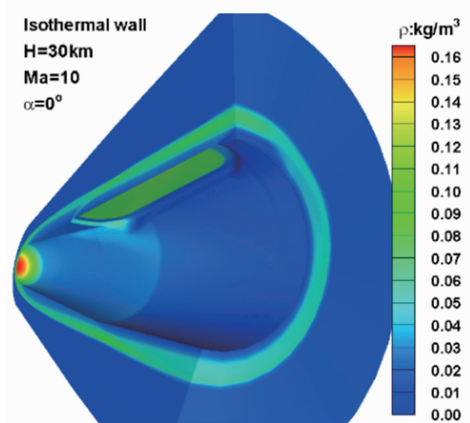
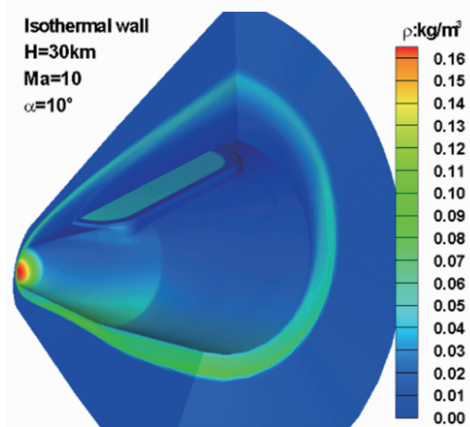
(a) -10° 攻角(b) 0° 攻角(c) 10° 攻角

图 3 不同攻角下的流场密度

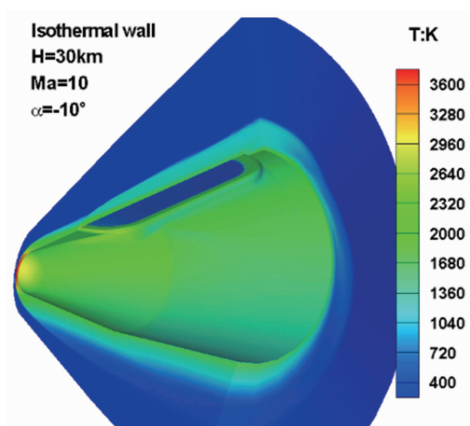
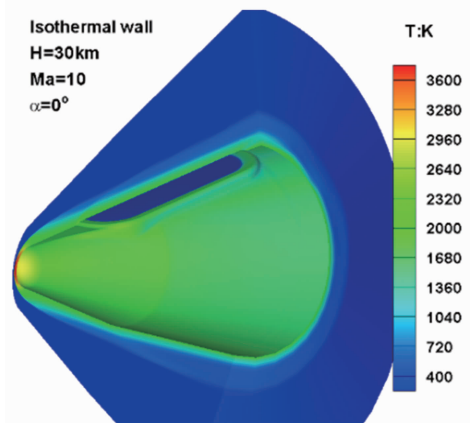
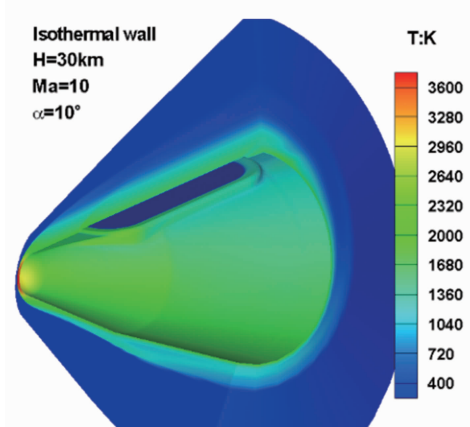
(a) -10° 攻角(b) 0° 攻角(c) 10° 攻角

图 4 不同攻角下的流场温度

下, 图像向前偏移(X轴负向), 但是这个值较小, 对成像几乎没有影响(探测器阵列单元尺寸一般在 $20\ \mu\text{m}$ 以上)。流场和窗口折射率的非均匀性导致图像产生一定程度的强度衰减, 会影响目标探测。但随着飞行高度的增加, 影响逐渐减小。

图 10 所示为流场和窗口入瞳前的辐射功率。可以看出, 受温度和气体组分的影响, 流场的辐射功率沿 X 方向减小, 30 km 时在 $10^{-12}\ \text{W}$ 量级; 窗口辐射功率与温度分布相似, 两边高且沿中心辐射功率较低, 48 km 时在 $10^{-10}\ \text{W}$ 量级。

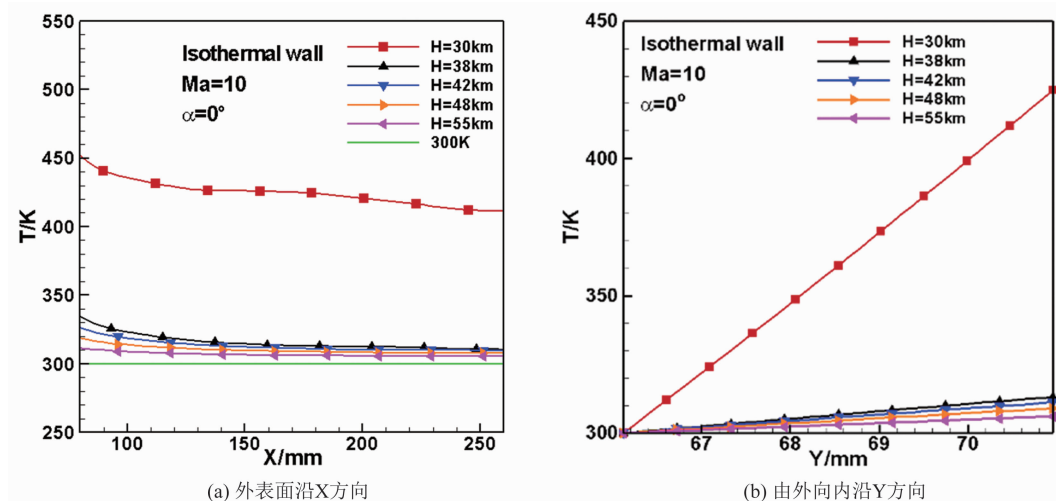


图 5 窗口温度分布

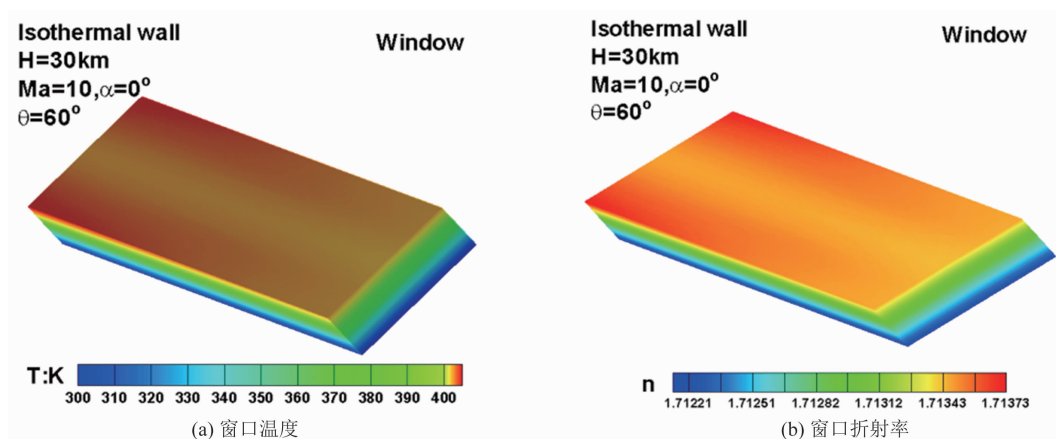


图 6 窗口温度和折射率

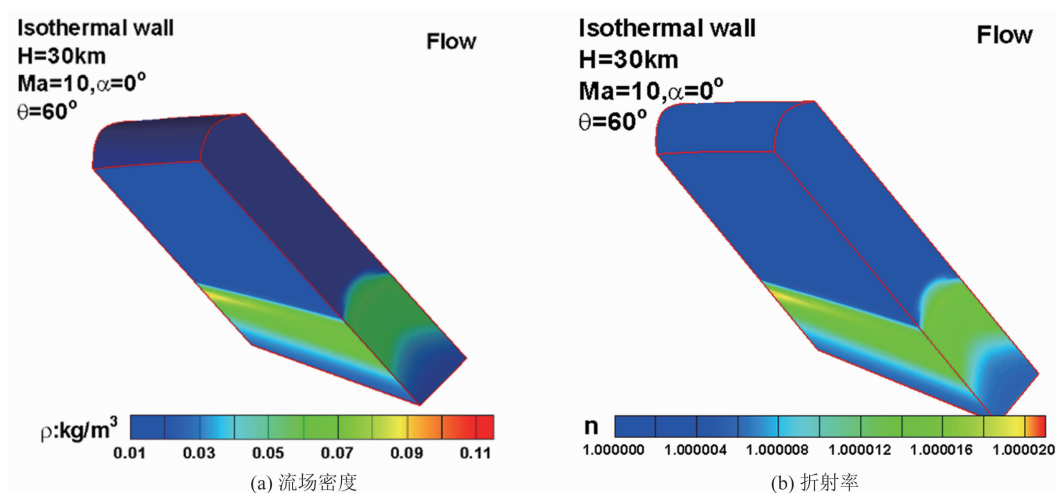


图 7 视线方向上的流场密度和折射率

根据文献[1-2], 类 HTV-2 滑翔体在中波红外波段($3.0 \sim 5.0 \mu m$)的辐射强度 I 为 10^4 W/sr 量级。考虑大气吸收(综合透过率为

80%)、蓝宝石的透过率(取 80%)并综合各种因素, 取目标辐射到达光学系统时剩 60%。根据立体角的定义 $\Omega = S/R^2$, 取光学窗口一个

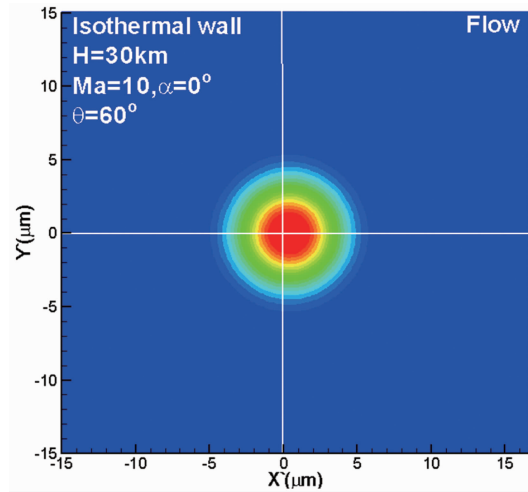


图 8 点扩展函数

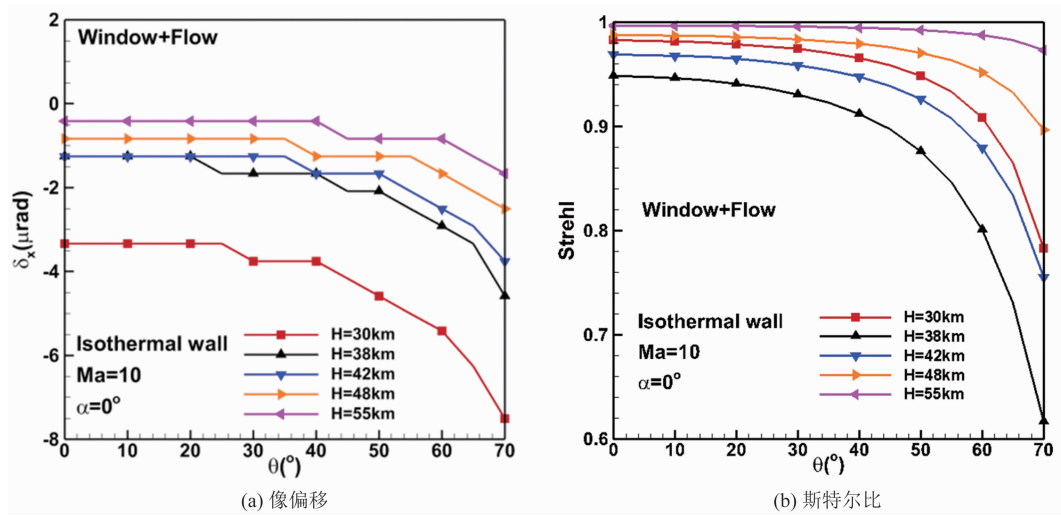


图 9 像偏移与斯特尔比

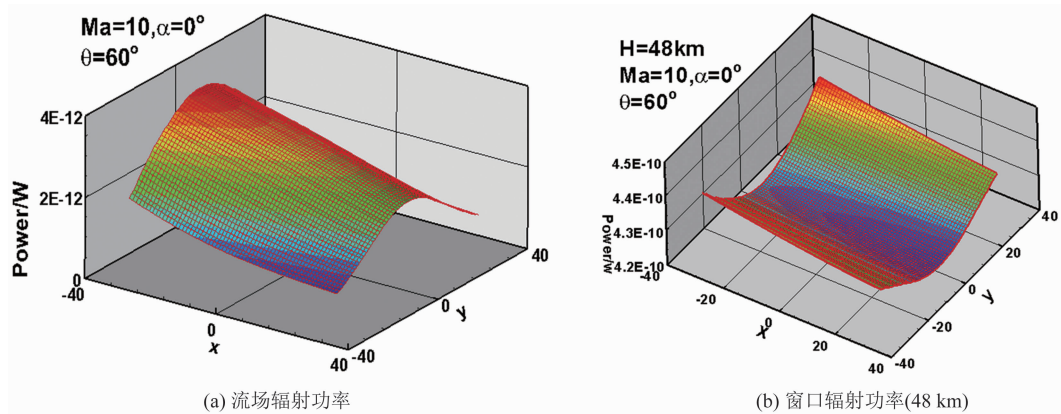


图 10 辐射功率

网格微元为 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$, R 为目标与导引头的距离(单位为 km)。统一单位后可得 $S = 10^{-12}\text{ km}^2$, $\Omega = 1/R^2 \times 10^{-12}\text{ sr}$ 。目标辐射传输

后经计算可得, 到达光学系统前的中波辐射功率为 $P = 6I/R^2 \times 10^{-13}\text{ W}$ 。若目标高度为 50 km , $I = 30000\text{ W/sr}$, 两者斜距 R 为 10 km ,

则 $P=1.8 \times 10^{-10}$ W。这与导引头在 48 km 高度时的窗口辐射功率是一个量级的。

从本项目的计算结果看, 攻角为 0° 且高度为 30 km 时, 窗口外流场的辐射功率在 10^{-12} W 量级, 蓝宝石窗口的中波红外辐射功率在 10^{-8} W 量级。随着高度的升高, 窗口外的流场辐射功率会减小, 蓝宝石窗口的辐射功率也减小, 48 km 时降为 10^{-10} W 量级。

流场辐射计算没有考虑大气中的 CO_2 、 CO 、 H_2O 等微量组分辐射。窗口内壁温度设定为 300 K, 而实际飞行时由于导引头壳体受气动加热, 热量会向内部传导, 实际温度会高于 300 K, 因此导引头实际的热辐射可能比本文的计算结果高。

根据以上分析可知, 类 THAAD 外形导引头流场和窗口对红外成像的影响较小, 而热辐射对光学系统识别目标产生干扰。但随着高度升高, 这种干扰会减弱, 更有利于 THAAD 导引头识别目标、提高精度。这与目前 THAAD 主要针对高空域目标的使用情况是一致的。

5 结束语

THAAD 主要针对弹道导弹, 通过预警系统以及导引头雷达系统计算出目标弹道并修正自身的姿态; 锁定目标后, 在碰撞前打开导引头保护罩, 红外寻的器开始工作, 进行最后的姿态修正并碰撞完成任务。本文对类 THAAD 导引头外形的气动光学效应分析表明, 在高空高速飞行时, 主要是热辐射效应对红外寻的产生干扰。因此, 根据 THAAD 的飞行特点, 结合本文分析对飞行设计提出以下两点建议:

一是改变飞行器自身的红外辐射特征。通过采用降低壁温的技术或壁面材料控制, 使得飞行器在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段的红外辐射强度减小, 而使红外导引头的信噪比降低, 无法识别目标或缩短探测距离。

二是长时间在 $30 \sim 50$ km 高度上机动飞行。为避免蓝宝石窗口在 600°C 以上失效以及窗口受到污染, THAAD 红外系统的工作时间

很短(一般为 $6 \sim 10$ s)。如果飞行器在 $30 \sim 50$ km 机动(平面蛇形机动、上下跳跃)飞行, 即使 THAAD 导引头避不开自身热辐射的干扰, 也能使其无法准确计算出目标弹道或延长识别时间。

致 谢

本文工作得到中国航天科技集团试验物理与计算数学国家重点实验室、国家数值风洞工程的大力支持, 在此表示感谢!

参考文献

- [1] 石卫波, 孙海浩, 于哲峰, 等. 类 HTV-2 高超声速滑翔飞行器的本体光辐射特性分析 [J]. 红外, 2022, 43(1): 26–34.
- [2] 杨霄, 牛青林, 贺志宏, 等. 类 HTV-2 高超声速滑翔飞行器红外辐射特征与可探测性分析 [J]. 光学学报, 2017, 37(12): 1204001.
- [3] 石安华, 石卫波, 张志刚, 等. 红外卫星对通用高超滑翔导弹的可探测性分析 [J]. 红外, 2021, 42(10): 1–8.
- [4] 江涛, 丁明松, 高铁锁, 等. 导引头高速流场及其对光线传输影响的数值模拟 [J]. 光学学报, 2012, 32(8): 1–6.
- [5] 张亚萍, 范志刚, 刘金强. 红外末制导中的气动光学效应分析 [J]. 激光与红外, 2006, 36(6): 487–490.
- [6] 殷兴良. 气动光学原理 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2003.
- [7] 江涛, 丁明松, 高铁锁, 等. 高速平均流场对红外成像影响的计算分析 [J]. 空气动力学学报, 2013, 31(6): 727–732.
- [8] 张郡. 气动热环境下平面窗口光传输建模及仿真 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [9] 安永泉, 赵剡. 梯度温度气体介质的热辐射传递特性研究 [J]. 红外与毫米波学报, 2011, 30(4): 366–371.
- [10] 安永泉, 赵剡. 红外成像中的气动热辐射效应机理 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1199–1204.
- [11] 杜磊, 赵剡. 高超声速激波辐射对红外成像系统的影响分析 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41

(2): 291–296.

- [12] 马毅飞, 赵文平. 窗口辐射对红外成像探测影响的研究 [J]. *系统工程与电子技术*, 2005, **27**(3): 427–430.
- [13] 李群章. 美国战区高空区域防御系统拦截导弹红外寻的技术分析 [J]. *红外与激光工程*, 1998, **27**(2): 25–28.
- [14] 董维中. 热化学非平衡效应对高超声速流动影响的数值计算与分析 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 1996.
- [15] 董维中, 丁明松, 高铁锁, 等. 热化学非平衡模型和表面温度对气动热计算影响分析 [J]. *空气动力学学报*, 2013, **31**(6): 692–698.
- [16] Kristie C, Gary P. On-Line Self-Calibrating Single Crystal Sapphire Optical Sensor Instrumentation for Accurate and Reliable Coal Gasifier Temperature Measurement [R]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute & State University, 2003.
- (上接第 25 页)
- [28] 毛思达. 后处理工艺对光学薄膜特性影响的研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2020.
- [29] Yurov V Y, Bolshakov A P, Fedorova I A. Control of Silicon Dioxide Etching Rate in Hydrogen Microwave Plasma by Addition of Oxygen [J]. *Applied Surface Science*, 2023, **39**(6): 155834.
- [30] Yasmin A E, Mohamed W A, Rifai M M. Fabrication, Characterization, and Corrosion Protection of Siloxane Coating on an Oxygen Plasma Pre-treated Silver-Copper Alloy [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2023, **32**(3): 8818–8830.
- [31] Zhang X Y, Yang Y. Deposition and Characterization of RP-ALD SiO_2 Thin Films with Different Oxygen Plasma Powers [J]. *Nanomaterials*, 2021, **11**(5): 1173.
- [32] 吴立宇, 李小强, 王斌, 等. 退火温度对 PECVD 法制备 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 光学薄膜性能的影响 [J]. *材料工程*, 2020, **48**(12): 75–81.