

# 红外导引头高速流场及其对光线传输影响的数值模拟

江 涛<sup>1</sup> 丁明松<sup>1</sup> 高铁锁<sup>1</sup> 董维中<sup>1</sup> 方艺忠<sup>2</sup> 彭程远<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 中国空气动力研究与发展中心, 四川 绵阳 621000  
<sup>2</sup> 试验物理与计算数学国家级重点实验室, 北京 100076)

**摘要** 研究红外光线经过高速流场时由于折射产生的瞄视误差(BSE),对于红外末制导拦截弹的命中精度有重要意义。考虑高温真实气体效应,求解热化学非平衡 Navier-Stokes (N-S)方程得到导引头的流场,采用光线追迹的方法,对红外光线经过流场后到达导引头光学窗口的瞄视误差进行了计算分析,研究了光线入射角、飞行马赫数、攻角、高度及红外导引头外形对瞄视误差的影响。

**关键词** 气动光学;光学窗口;高速流场;光线追迹;瞄视误差

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.0801002

## Numerical Simulation of IR Seeker High-Speed Flow Field and Its Influence on Ray Transmission

Jiang Tao<sup>1</sup> Ding Mingsong<sup>1</sup> Gao Tiesuo<sup>1</sup> Dong Weizhong<sup>1</sup>  
Fang Yizhong<sup>2</sup> Peng Chengyuan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang, Sichuan 621000, China  
<sup>2</sup> State Key Laboratory of Experimental Physics and Computational Mathematics,  
Beijing 100076, China

**Abstract** Study on the bore-sight error (BSE) induced by high-speed flow-field is important for the hit precision of a hit-to-kill interceptor with infrared ray (IR) terminal homing system. Based on the flow-field by solving the thermal-chemistry non-equilibrium Navier-Stokes (N-S) equation, the ray-tracing method is used to calculate the BSE of ray transmission through the flow field outside the optical window. The impact factors of BSE are considered, including incidence angle, Mach number, attack angle, altitude and the IR seeker shape.

**Key words** aero-optics; optical window; high-speed flow field; ray tracing; bore-sight error

**OCIS codes** 000.4430; 030.7060; 080.2710; 080.2720

## 1 引 言

插入水中的筷子看上去变弯了,是因为光线经过折射率不同的介质时发生折射现象,导致视线偏差。同样,红外末制导拦截弹高速飞行过程中,目标红外信号经过包覆光学窗口的激波区时,由于未被压缩的大气和强烈压缩的激波区气体折射率不同,使光线产生偏折,产生瞄视误差(BSE)<sup>[1,2]</sup>。

美国的爱国者、战区高空区域防御(THAAD)等防空系统拦截弹采用的是直接碰撞杀伤武器,对精度要求很高。例如 500  $\mu\text{rad}$  的瞄视误差在 10 km

探测距离时将会有约 5 m 的误差,这个误差大于一般的直接碰撞杀伤武器的尺寸。因此,一方面需要在拦截弹导引头设计时,考虑各种因素减小飞行过程中产生的瞄视误差,一方面在飞行时需要进行适当的飞行弹道修正,以达到精确命中拦截目标。

国外在研制高速拦截弹时一直就很重视气动光学效应的研究,在 20 世纪 80 年代开展过大量的实验和计算<sup>[1~3]</sup>,包括瞄视误差、光学成像等。国内近些年在高速流场对光学成像的影响以及图像复原算法等方面开展了大量的工作,而研究流场对光线折

收稿日期: 2012-02-28; 收到修改稿日期: 2012-03-27

作者简介: 江 涛(1981—),男,硕士,助理研究员,主要从事气动物理计算方面的研究。

E-mail: fengqiaoren999@163.com

射产生的瞄视误差却不多<sup>[2~8]</sup>。

本文考虑高温气体效应,求解三维热化学非平衡 Navier-Stokes (N-S) 方程得到导引头高速流场,采用光线追迹方法,对红外光线穿过高速流场时折射产生的瞄视误差进行了计算,分析了影响瞄视误差的因素,可以为拦截弹飞行控制系统设计提供参考,以提高拦截弹的命中率。

## 2 流场计算方法

气动光学效应光线传输计算的关键前提是需要计算光学窗口外流场的气体密度,从而计算流场介质的折射率。流场计算控制方程是三维热化学非平衡 N-S 方程,其无量纲化形式如下:

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

式中  $Q$  为守恒变量,  $F, G, H$  分别为直角坐标系下各方向上的对流通量矢量,  $F_v, G_v, H_v$  为各方向的粘性通量项,  $W$  为化学反应和振动能量源项矢量,  $Re$  为雷诺数。

湍流模型采用  $k-\omega$  两方程湍流模型,不需要到壁面的距离,计算公式相对简单,在靠近壁面的地方没有  $k-\epsilon$  模型那么强的刚性。 $k-\omega$  模型两方程无量纲守恒形式为<sup>[7]</sup>

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\rho k}{\rho \omega} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\rho k u_i}{\rho \omega u_i} \right) = \frac{1}{Re} \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu_k \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \left[ \begin{array}{c} \frac{P_k}{Re_\infty} - D_k \\ \frac{P_\omega}{Re_\infty} - D_\omega + D_c \end{array} \right], \quad (2)$$

式中  $\rho$  为密度,  $u_i$  为速度,  $\omega$  为湍动能耗散项,  $k$  为湍动能,  $\mu_k$  和  $\mu_\omega$  为等效粘性系数,  $P_k$  和  $P_\omega$  为生成项,  $D_k$  和  $D_\omega$  为破坏项,  $D_c$  为交叉耗散项,下标  $i = 1, 2, 3$ , 分别表示  $x, y, z$  三个方向。

方程采用全隐式的对称型 TVD 格式进行差分离散,粘性项用中心差分格式离散<sup>[5]</sup>。采用 7 组分 ( $O_2, N_2, NO^+, NO, O, N, e^-$ ) 化学反应模型与 Kok 的 TNT  $k-\omega$  湍流模型<sup>[9,10]</sup>。

## 3 光学计算方法

得到流场的密度后,计算流场气体的折射率。对于已知密度的气体介质,可以利用 Gladstone-

Dale 折射率定律<sup>[11]</sup>:

$$n = 1 + K_{GD} \rho, \quad (2)$$

式中  $K_{GD}$  为 Gladstone-Dale 系数,其经验公式为

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

式中  $\lambda$  为入射光波的波长(单位为  $\mu m$ ),  $K_{GD}$  的单位为  $m^3/kg$ 。

根据几何光学原理,采用光线追迹的方法,对光线在光学窗口外高速流场的传输进行计算。

图 1 为二维平面光线传输模型示意图。设网格节点 1-1 对应的折射率为  $n_{11}$ , 网格节点  $i-j$  对应的折射率为  $n_{ij}$ ; 1-1 节点与 1-2 节点间的界面以上的折射率取  $n_{11}$ , 界面下网格内的折射率取  $n_{21}$ 。设光线初始入射角为  $\beta_1$ , 通过节点 1-1 后折射角为  $\beta_2$ , 第  $k$  次 ( $R$  为光线传播方向折变次数) 折射时对应折射角为  $\beta_k$ , 第  $k$  个折变点处对应的坐标为  $P_n$ , 没有经过流场折射的光线将到达  $P_0$ 。在网格点 1-1 处,由折射定律 (Snell 定律) 得到关系式:

$$n_{21} \sin \beta_2 = n_{11} \sin \beta_1. \quad (4)$$

沿着光线在流场中的传输逐层计算,最后到达光学窗口时,光线入射角与经过流场之前的入射角之差就是流场导致的瞄视误差。

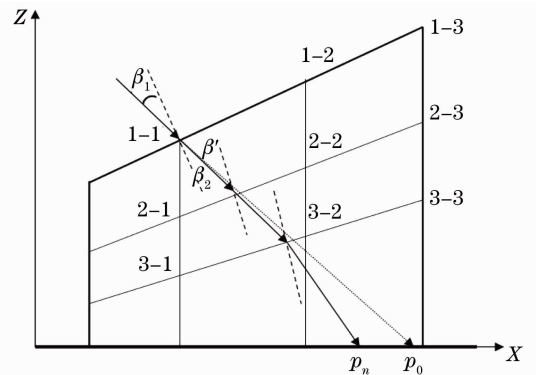


图 1 计算流体力学(CFD)网格中光线传输模型示意图

Fig. 1 Ray-transmission model in CFD grid

## 4 计算结果分析

流场计算来流条件:  $O_2$  和  $N_2$  的质量分数分别是 0.233 和 0.767, 壁面空气组分条件为完全非催化条件, 等温壁  $T_w = 300$  K。光学计算中, 入射光波长  $\lambda = 3 \mu m$ , 光线的入射角  $\theta$  定义为入射光线与光学窗口法线的夹角, 范围为  $0^\circ \sim 80^\circ$ , 瞄视误差用  $\Delta\theta$  表示。

本文主要计算了凹坑型侧窗外流场对光线传输的影响, 也计算了平面型侧窗作为比较。图 2 为两

种外形导引头的密度云图,高度  $H$  为 10 km,攻角  $\alpha$  为  $0^\circ$ ,马赫数  $Ma_\infty$  为 14。受外形的影响,光学窗口附近的流场出现了低密度区,两种外形光学窗口外

流场受压缩的高密度区域宽度差不多,但平窗外流场在压缩区的密度比凹窗小一些。

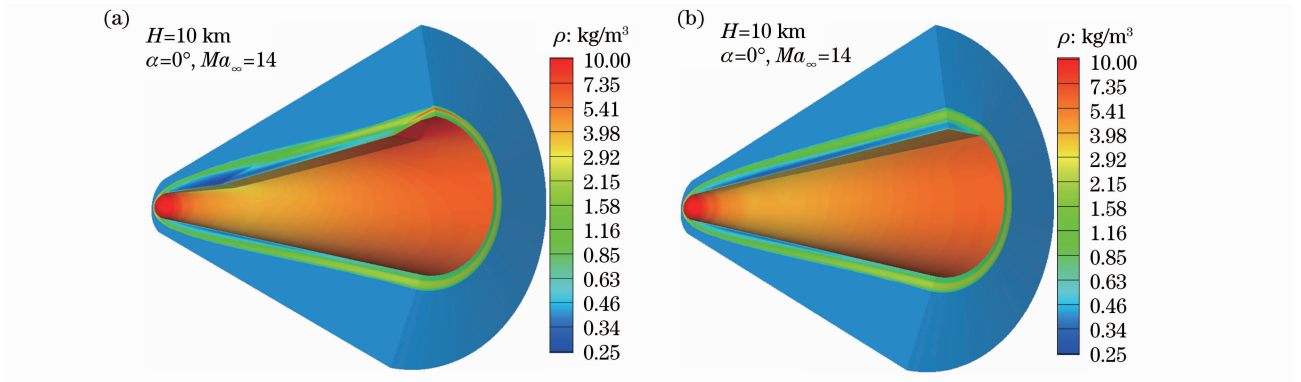


图 2 导引头流场密度

Fig. 2 Density of the flow field of the seeker

在气动光学问题的数值模拟中,需要对流场结果向光学计算网格转换。图 3 给出了光学计算网格在 CFD 网格中的示意图,光学计算网格与光学窗口平行的面取  $64\text{ mm} \times 64\text{ mm}$  的网格,根据光线入射角度,以光学窗口为基准面,在光线入射方向上基于 CFD 网格插值,生成光学计算网格,并把流场的

CFD 结果向光学计算网格进行插值转换。另外,图 3 也给出了入射角为  $60^\circ$  时的密度转换结果。

图 4 给出了高度为 10 km、马赫数为 8,光线入射角为  $60^\circ$  时,光学计算场的密度和折射率云图。由于折射率与密度紧密相关,所以流场的折射率分布特征与密度的分布相似。

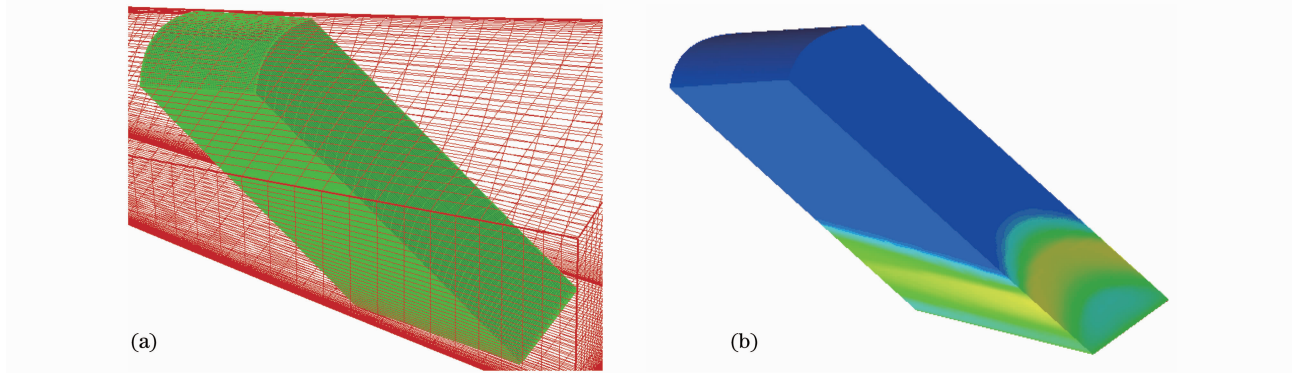


图 3 光学计算网格

Fig. 3 Grid of optical computation

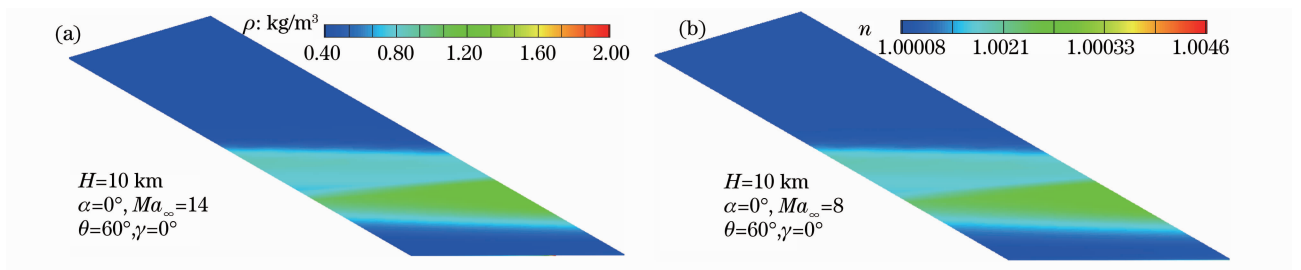
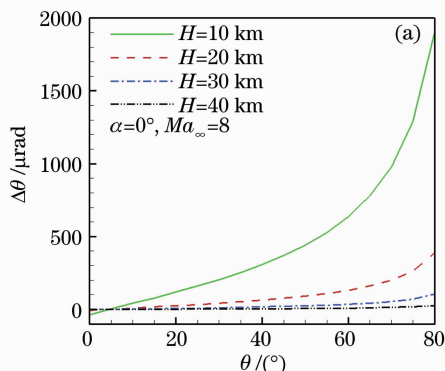


图 4 光学窗口外流场的密度和折射率云图

Fig. 4 Density and refractive index of flow field outside the optical window

图 5 分别为马赫数为 8 和 14 的流场引起的瞄视误差随入射角的变化情况。可以看到,随着高度升高,大气的密度降低,导致对瞄视误差影响减小;同时,高度相同时,马赫数增大,激波区密度增大,导致瞄视误差增大。

图 6 给出了不同攻角的流场引起的瞄视误差随着入射角的变化情况,高度为 10 km,马赫数为 8。瞄视误差与介质的折射率相关,即与密度密切相关。因此,随着攻角增大,光学窗口从迎风面转到背风面,强激波区远离光学窗口,激波区密度降低,引起



的瞄视误差减小;随着入射角的增大,入射光线经过的流场越靠近头部强激波区,即高密度区,流场导致的瞄视误差增大。

图 7 给出了凹坑型和平面型光学窗口导引头在相同飞行条件下的流场引起的瞄视误差随入射角的变化情况,高度为 10 km,马赫数为 8,攻角为  $0^\circ$ 。可以看到,由于外形对流场激波区的影响,平窗导引头流场导致的瞄视误差比凹窗的要小,入射角越大,差别越大。从图 4 也可以看出,两种外形的流场气体密度在靠近头部的差别大。

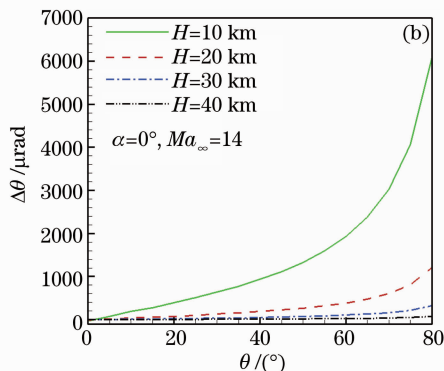


图 5 不同高度流场的瞄视误差

Fig. 5 BSE of flow field with different altitudes

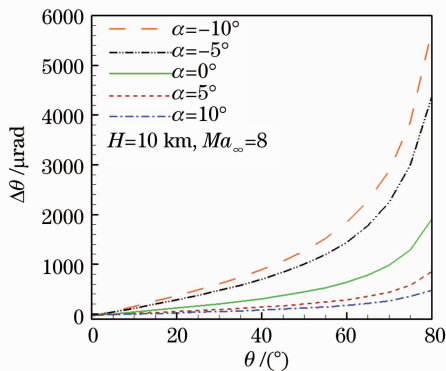


图 6 不同攻角流场的瞄视误差

Fig. 6 BSE of flow field with different attack angles

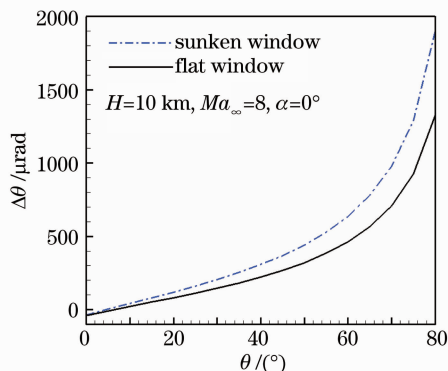


图 7 凹坑型和平面型窗口的瞄视误差

Fig. 7 BSE of sunken window and flat window

## 5 结 论

带有光学成像系统的高速飞行器,由于气体的强烈压缩导致了激波区的密度增大,而气体的折射率与流场的密度密切相关,流动的复杂性导致了气体介质的非均匀性分布,光线经过光学窗口外流场由于折射产生瞄视误差。通过计算分析,得到:

- 1) 随着入射角的增大,光线穿过区越靠近头部的高密度激波区,导致的瞄视误差越大;
- 2) 同一飞行状态下,随着攻角增大,侧窗一面的激波距离窗口越远,气体压缩越弱,产生的瞄视误

差越小;

- 3) 飞行马赫数增大,激波区压缩越强烈,密度增大,瞄视误差也增大;
- 4) 随着飞行高度的升高,大气密度降低,瞄视误差也随着减小;
- 5) 侧窗外形对瞄视误差产生较大的影响。

## 参 考 文 献

1 L. F. DeSandre. Optical Performance Analysis of Standard Missile Block IV a Seeker [R]. California: Naval Air Warfare Center Report, 1999

- 2 Yin Xingliang. Principle of Aero-Optics [M]. Beijing: China Astronautics Press, 2003. 1~7  
殷兴良. 气动光学原理[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2003. 1~7
- 3 Wan Ziming, Chen Dingchang, Yin Xingliang. Analysis of key problems to endo-atmospheric KKV [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 1999, **21**(10): 1~5  
万自明, 陈定昌, 殷兴良. 大气层内飞行的 KKV 关键技术分析综述 [J]. 系统工程与电子技术, 1999, **21**(10): 1~5
- 4 Liu Jian, Li Shumin, Jin Gang. Ray tracing in outer fluid field of blunted cone flyer [J]. *J. Applied Optics*, 2006, **29**(6): 863~866  
柳 建, 李树民, 金 钢 等. 细光束在钝锥体外流场中的追迹 [J]. 应用光学, 2006, **29**(6): 863~866
- 5 Chen Yong. Study of Numerical Simulation Technology for Aero-Optical Effects [D]. Mianyang: China Aerodynamics Research and Development Center, 2006. 5~12  
陈 勇. 气动光学效应的数值模拟方法研究[D]. 绵阳: 中国空气动力研究与发展中心, 2006. 5~12
- 6 Yang Wenxia, Cai Chao, Ding Mingyue *et al.*. Characterization of aero-optic effects and restoration of aero-optical degraded image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 347~352  
杨文霞, 蔡 超, 丁明跃 等. 气动光学效应分析与气动模糊图像复原 [J]. 光学学报, 2009, **29**(2): 347~352
- 7 Xu Dong, Liu Haowei, Wu Lin *et al.*. High order singular value decomposition applied in aero-optical effects analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3367~3372  
许 东, 刘浩伟, 吴 琳 等. 高阶奇异值分解在气动光学效应分析中的应用 [J]. 光学学报, 2010, **30**(12): 3367~3372
- 8 Wu Lin, Fang Jiancheng, Yang Zhaohua. Study on aero-optical distortion simulation of high refraction index gradient regions in hypersonic turbulent flow [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 2952~2957  
吴 琳, 房建成, 杨照华. 高超声速湍流场高折射率梯度区域气动光学畸变仿真研究 [J]. 光学学报, 2009, **29**(11): 2952~2957
- 9 J. C. Kok. Resolving the Dependence on Free-Stream Values for the k-omega Turbulence Model [M]. NLR-TP-99295, 1999
- 10 Dong Weizhong. Numerical Simulation and Analysis of Thermochemical Nonequilibrium Effect at Hypersonic Flow [D]. Beijing: University of Aeronautics and Astronauts, 1996  
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
- 11 Zhao Yan, Wang Tao, Xu Dong *et al.*. CFD grids-based transmission model of the rays propagating through the hypersonic flow field [J]. *Acta Armamentarii*, 2008, **29**(3): 282~286  
赵 剡, 王 涛, 许 东 等. 基于计算流体力学网格的高超声速流场光传输建模研究 [J]. 兵工学报, 2008, **29**(3): 282~286

栏目编辑: 韩 峰