



# 高速飞行器气动光学效应\*

田立丰<sup>1,2</sup>, 杨东霖<sup>1</sup>, 黄开诱<sup>1</sup>

1. 中山大学航空航天学院, 广东 深圳 518107
2. 深圳市智能微小卫星星座技术与应用重点实验室, 广东 深圳 518107

**摘要:** 采用数值模拟、计算光学方法和理论, 对超声速飞行器流场进行数值模拟研究, 获取不同飞行高度和攻角下光学窗口上方流场的密度分布, 根据 Gladstone-Dale 关系得到光学窗口上方的折射率场, 利用光线追迹法计算流场光程差分布情况。对流场光程差的分布情况进行分析, 可以得出结论: 随着飞行高度的增加, 气动光学效应逐渐减弱; 随着攻角的增大, 气动光学效应逐渐增强。

**关键词:** 气动光学; 飞行高度; 攻角; 光程差

**中图分类号:** O436 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2025)01-0257-08

## Aero-optical effects of supersonic vehicles

TIAN Lifeng<sup>1,2</sup>, YANG Donglin<sup>1</sup>, HUANG Kaiyou<sup>1</sup>

1. School of Aeronautics and Astronautics, Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China
2. Shenzhen Key Laboratory of Intelligent Microsatellite Constellation, Shenzhen 518107, China

**Abstract:** In this paper, numerical simulation methods, computational optical methods and theories are used to study the flow field of supersonic aircraft. The density distribution of the flow field above the optical window at different flight heights and angles of attack is obtained. And the refractive index field above the optical window according to the Gladstone-Dale relationship is obtained, the optical path difference distribution of the flow field is calculated by using the ray tracing method. Through the analysis on the distribution of the optical path difference of the parallel beam through the flow field, it can be concluded that the aerodynamic optical effect gradually weakens with the increase of the flight altitude. With the increase of the angle of attack, the aerodynamic optical effect is gradually enhanced.

**Key words:** aero-optics; flight altitude; angle of attack; optical path difference

气动光学效应是高速飞行器流场折射率非均匀分布引起的光学畸变现象。这些畸变包括偏折、抖动、模糊等, 会对于飞行器的成像制导精度产生严重影响。因此, 对超声速飞行器气动光学效应的研究十分重要。

随着各种飞行器对信息获取精确性和实效性的依赖程度大幅度提高(孙喜万等, 2020), 光学成

像探测技术和高速飞行结合的利用技术已经成为了各种飞行器发展的趋势。光学成像制导飞行器在大气层内高速飞行时, 高速气流穿过飞行器头部激波后, 温度、密度和压强急剧上升, 速度下降。同时, 由于气体黏性导致气流与飞行器表面摩擦产生大量热量, 在这些因素的共同作用下, 光学窗口上方产生了复杂的热响应, 来自目标的

\* 收稿日期: 2024-05-31

录用日期: 2024-06-18

网络首发日期: 2024-07-24

基金项目: 深圳市科技计划(ZDSYS20210623091808026)

作者简介: 田立丰(1979年生), 男; 研究方向: 实验空气动力学; E-mail: tianlf5@mail.sysu.edu.cn

全文阅读



ZR20240183

光线通过这样的流场后会产生光程差,给头罩内的光学成像探测系统带来气动热辐射噪声,从而导致成像系统中目标位置发生畸变、抖动、模糊和能量衰减,影响成像精度,导致气动光学效应(史可天等,2019;邢占等,2022)。

随着国内外对超声速飞行器周围流场研究的深入,人们对气动光学效应的认识逐渐加深。Banakh et al.(2015)计算了流场中光线通过激波的平均强度和偏折程度,得到光线通过激波后的方向与最初给定的传播方向的偏差仅取决于所形成激波的高度,并且随着高度的增加,激波对光线传输的影响减小。Hao et al.(2013)利用 Fluent 提供的 Spalart-Allmaras 模型研究了不同圆顶形状和不同攻角光学窗口周围流场的密度分布,通过光线追迹法对流场的光线传输进行模拟,得到了光学系统的成像质量受光学窗口形状和攻角的影响。Guo et al.(2016)采用基于 Boltzmann 方程的 Monte Carlo 直接模拟进行流动计算,运用光线追迹法模拟光束在光学窗口上非均匀流场的传输,得到了成像位移、相位偏差和斯特雷尔比(SR)随飞行高度和光学入射角的变化。Xiao et al.(2010)利用 ANSYS 模拟了球形穹顶的空气动力学加热,并结合 MATLAB 模拟了气动热环境下光束通过光学穹顶的传输。

Liu et al.(2017)利用 Ansys 对三维侧窗的气动光学效应进行了数值模拟与分析,得出了图像质量与飞行高度、波长和焦距之间的关系。Jiang et al.(2012,2013)分析了光线传输受马赫数、攻角和飞行高度等因素的影响程度,认为当飞行高度不超过 30 km 时,气动光学效应对光学成像产生明显影响;Xu et al.(2012)的研究认为,光学系统的成像偏移与飞行器的飞行高度、攻角和马赫数等因素并无直接联系,而是这些因素使飞行器外围流场密度值发生了改变,进而导致光线在传播的过程中发生偏折,进而导致了光学系统的成像偏移。Hui et al.(2019)分析了半球形光学头罩受气动光学效应影响的程度及其与飞行高度之间的联系。认为在其余影响因素都相同的条件下,光学系统的成像偏移受气动光学效应的影响程度随飞行高度的增加逐渐减弱。殷兴良(2003)指出在相同马赫

数的情况下,图像的偏移程度会随着飞行器飞行高度的增加而减小。Liang et al.(2022)研究了飞行高度对气动光学效应成像偏差的影响,随着飞行高度的增加,成像偏差逐渐减小,成像偏差斜率增大,趋于平坦且接近于零。Yang et al.(2023)提出一种基于光子 Monte Carlo 模拟的气动光学效应分析方法,从光子统计的角度解释气动光学效应的畸变特性,用于分析不同高度和速度下航空光学效应的畸变。仿真结果表明,随着飞行高度的降低和速度的提高,航空光学效应的畸变加剧,能量损失更加严重。

许亮等(2023)通过对比研究钝头飞行器不同飞行高度对  $0^\circ\sim 15^\circ$  攻角气动光学成像偏移的影响,得出光线传播路径折射率的分布随飞行高度的增加逐渐变得平缓,成像的偏移程度也会减弱。Yang et al.(2022)利用 ICEM 建立飞行器模型,并利用 Fluent 模拟不同飞行高度和飞行速度下的大气密度分布,然后利用几何光学原理对光线进行跟踪,推导光线透射的角度偏差,最后分析不同飞行高度和飞行速度对光线大气折射导航的影响。结果表明,超音速飞行器产生的气动光学效应与飞行高度和飞行速度有关。王乃祥等(2015)探究了攻角的变化对光学系统性能的影响,研究结果显示:飞行器窗口周围的流场对光学系统成像偏移的影响随着攻角的增大逐渐增大。

本文以光学窗口在尾部且具有遮光筒的飞行器为研究对象。与光学窗口位于头部的飞行器相比,光学窗口在尾部且具有遮光筒的飞行器尾部激波较弱,入射光线受激波影响较小,更有利于光线的传播,而且遮光筒的存在也会在一定程度上减小飞行器外部流场对光学窗口的影响。本文主要研究了飞行速度为  $Ma = 3$ ,飞行高度为 15、20 和 25 km 的飞行器在  $0^\circ$ 、 $3^\circ$  和  $5^\circ$  攻角条件下的外围流场,分析了时间平均流场对红外波 400 nm 光线传输的影响。

## 1 计算设置

### 1.1 模型及参数设置

本文的研究对象为图 1 所示的锥-柱外形的飞行器,遮光筒及成像系统位于飞行器尾部,成像



图1 模型示意图

Fig. 1 Model diagram

系统位于遮光筒内, 遮光筒轴线与飞行器轴线夹角为  $60^\circ$ 。

数值模拟采用密度基稳态求解器, 飞行器窗口侧的三维半模结构网格如图2所示。采用隐式解法, 湍流模型使用两方程  $k-\omega$  SST 模型, 流体选用理想气体模型, 且不考虑重力影响, 压力及温度根据飞行高度进行设置。

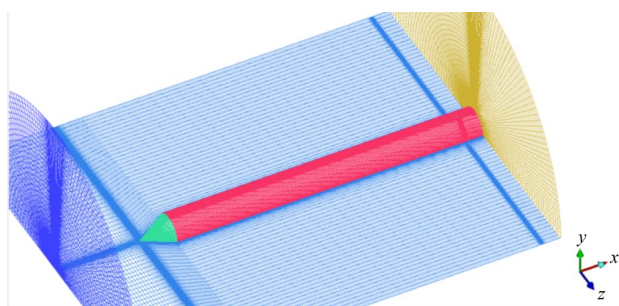


图2 网格划分

Fig. 2 Grid diagram

## 1.2 网格无关性验证

在进行数值模拟之前, 需要先验证本文所采用网格的无关性, 即数值模拟结果不受计算网格数量的显著影响, 以便保证结果的可靠性。

选取的网格总量分别为 126 万(网格1)、237 万(网格2)和 750 万(网格3)的三组网格进行无关性验证。使用三组网格分别对飞行高度为 15 km、飞行速度为  $Ma = 3$  且攻角为  $0^\circ$  时的飞行器外流场进行数值模拟, 计算参数设置相同。以遮光筒前端某一条网格线上的流场密度值为对比参数, 对三组模拟结果进行比较, 如图3所示。在网格总量从 126 万增加到 237 万的过程中, 该网格线上的流场密度值最大偏差为 0.87%; 在网格总量从 237 万增加到 750 万的过程中, 该网格线上的流场密度值

最大偏差为 0.56%, 可以在满足计算精度要求的前提下, 尽可能地提高计算效率。

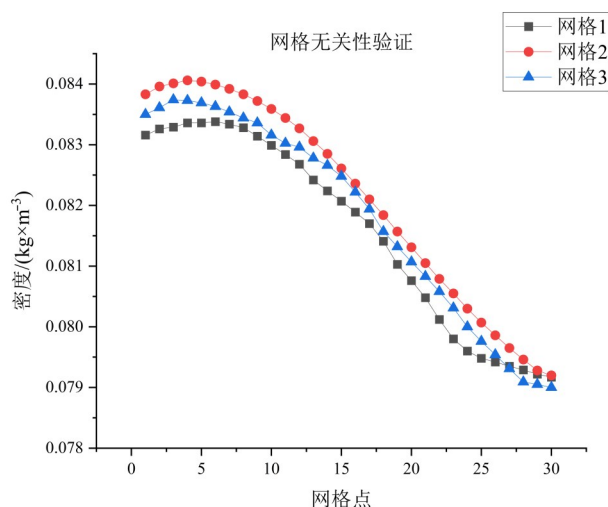


图3 网格无关性验证

Fig. 3 Grid independence verification

## 1.3 气动光学参数

光线追迹法是一种用于模拟光在光学系统中传播的方法, 它基于光线的几何光学原理, 通过追踪光线在系统中的传播路径, 来模拟光学系统的成像效果和光学性能。

本文采用基于流场网格的光线追迹法, 光线被视为直线或光线段, 沿着传播方向以一定的速度前进, 直到与下一层网格相交, 网格间折射率分布均匀。当光线与下一层网格相交时, 根据当前网格与下一层网格折射率的大小关系, 计算光线的折射方向, 并继续追踪光线的传播。通过追踪大量光线, 可以模拟出光学系统的成像效果, 包括成像位置、焦距、畸变等光学特性。

光程(OPL)是光线在介质中传播所经过的路径长度。折射率  $n$  沿  $z$  方向变化, 则光程定义为

$$OPL(x, y, t) = \int_{s_1}^{s_2} n(x, y, z, t) dz$$

式中密度场与折射率场分布满足 Gladstone-Dale 关系  $n = 1 + \rho K_{GD}$ 。在实际应用中, 通常采用光程差(OPD)作为光学系统成像质量的评价标准(邓诗涛, 2008), OPD 定义为

$$OPD(x, y, t) = OPL(x, y, t) - \overline{OPL(x, y, t)}.$$

## 2 流场及气动光学效应

首先, 数值模拟飞行器在不同高度, 不同攻角条件下的流场密度分布数据; 其次, 运用 Gladstone-Dale 关系得到飞行器外围流场的折射率分布数据; 最后, 基于光线追迹法得到光线穿过飞行器外围流场产生的光程差, 分析光程差随飞

行高度和攻角的变化规律。

### 2.1 飞行器外围流场的密度分布

对飞行器外围流场进行数值模拟, 结果如图 4~6 所示。从图中可观察到, 飞行器周围的流体密度随飞行高度的增加逐渐减小, 但流场结构基本没有发生变化, 激波前来流区域, 密度分布比较均匀, 当来流经过激波后, 密度明显上升。从 $0^\circ$

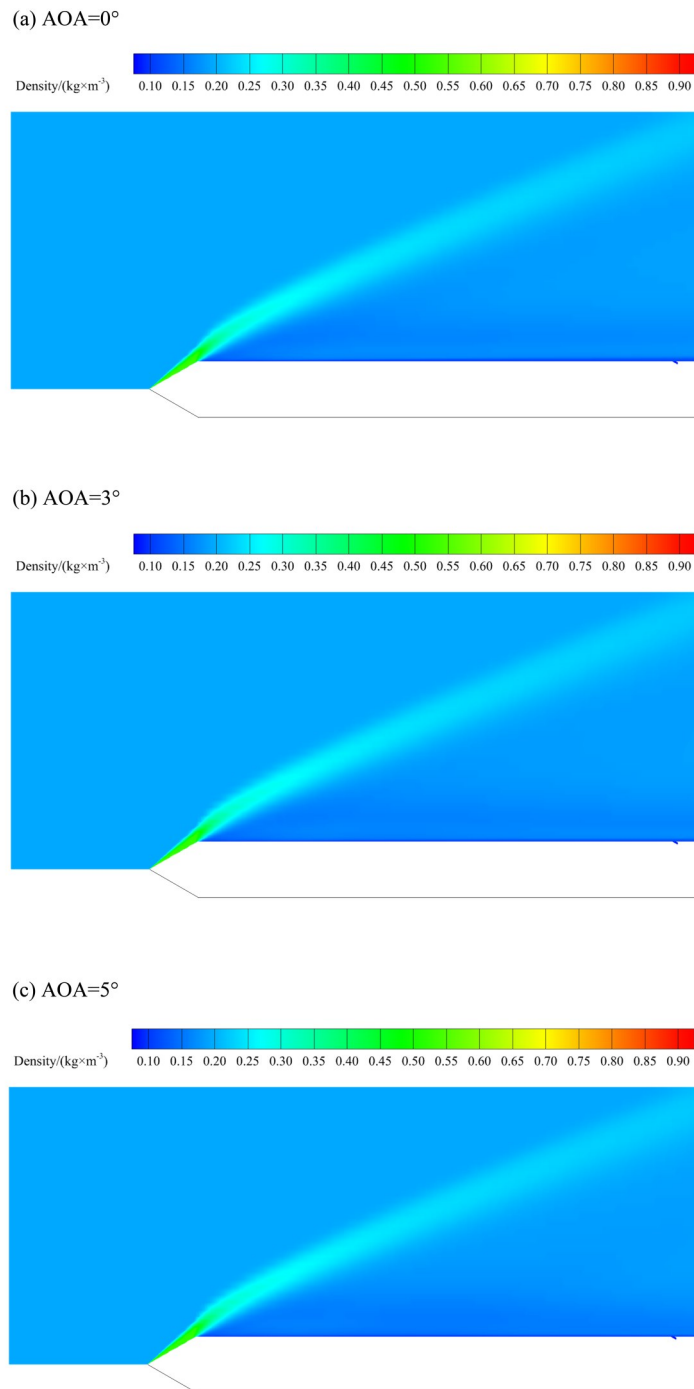


图4 飞行器窗口对称面流场密度分布( $H = 15$  km)

Fig. 4 Density distribution of flow field on the symmetry plane of aircraft window ( $H = 15$  km)

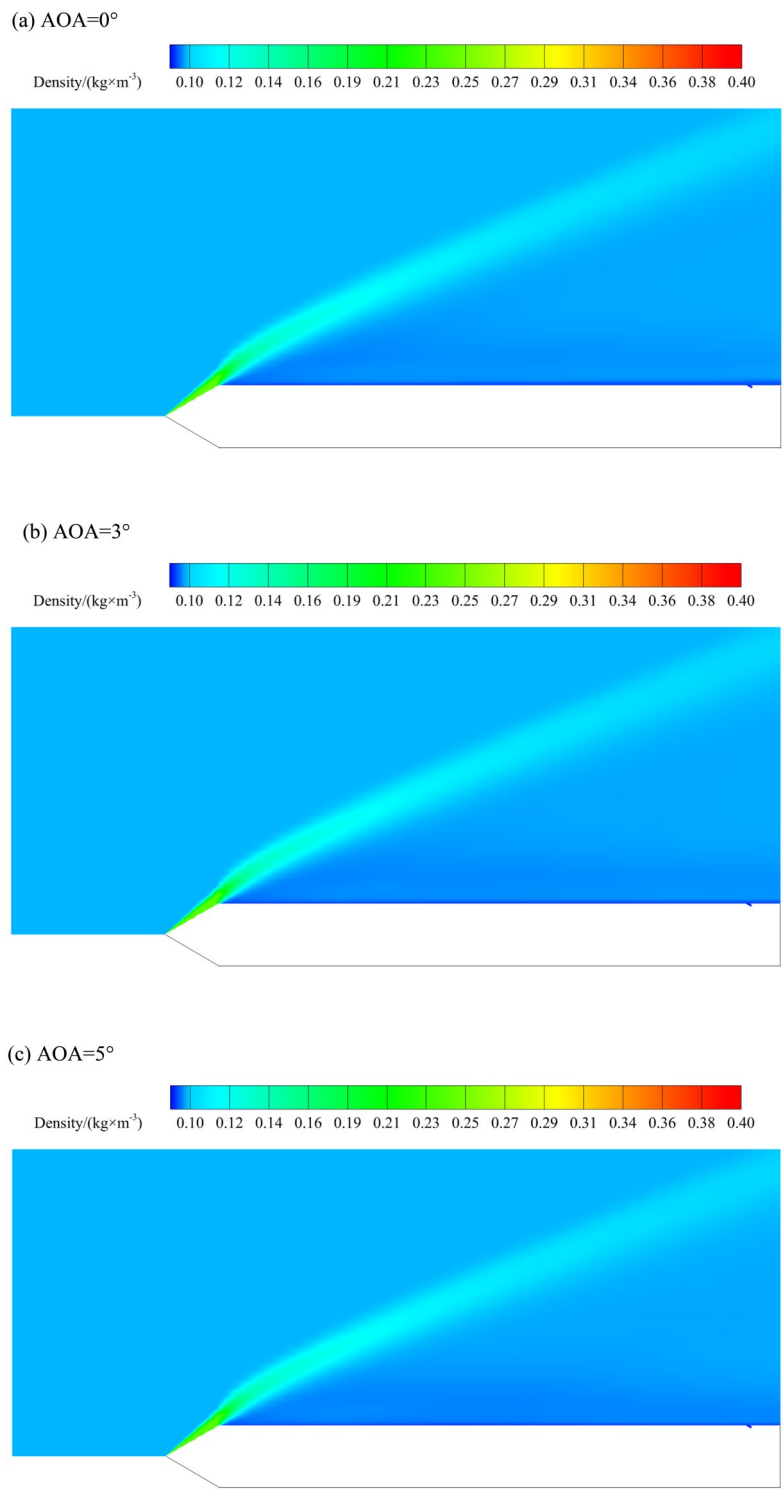


图 5 飞行器窗口对称面流场密度分布( $H = 20 \text{ km}$ )

Fig. 5 Density distribution of flow field on the symmetry plane of aircraft window ( $H = 20 \text{ km}$ )

→ 3° → 5° 攻角的变化过程中, 飞行器流场截面的非均匀流场厚度逐渐增加, 同时激波对气流的压缩效应逐渐减弱。

## 2.2 光程差

基于飞行器时间平均流场的密度分布, 运用 Gladstone-Dale 关系, 得到飞行器时间平均流场的

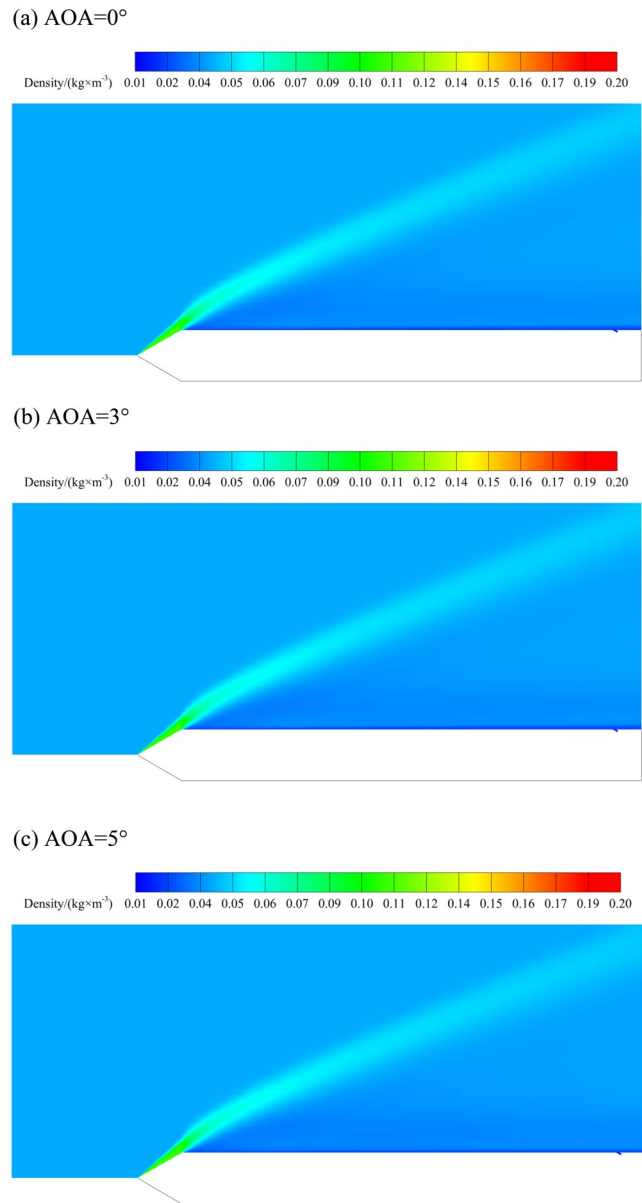


图6 飞行器窗口对称面流场密度分布( $H = 25 \text{ km}$ )

Fig. 6 Density distribution of flow field on the symmetry plane of aircraft window ( $H = 25 \text{ km}$ )

折射率分布, 并通过光线追迹法计算得到光线穿过飞行器外围流场后产生的光程差。

图 7~9 为平行光束通过流场后的 OPD 分布。由于具有遮光筒且光线窗口位于飞行器尾部, 与同样飞行工况的头窗或侧窗飞行器相比, 平行光束穿过流场产生的光程差有一定程度的下降。随着飞行高度的增加, 大气逐渐稀薄, 流场密度不断减小; 根据 Gladstone-Dale 关系, 流场的折射率也会不断减小, 并且光线传播路径上的折射率分布会越均匀。因此, 在保持攻角大小不变的条件

下, 成像偏移程度会随着飞行高度的增加逐渐减小, 气动光学效应逐渐减弱; 在保持飞行高度不变的条件下, 成像偏移程度会随着攻角的增大逐渐增大, 气动光学效应逐渐增强。而且, 低高度和大攻角会导致成像偏移出现较大的变化。

### 3 结 论

本文通过计算出飞行器的外围流场密度值和进入光学窗口平行光束的光程差分布, 得到了高度和攻角对气动光学成像偏移的影响。主要结论如下:

- 1) 随着飞行高度的增加, 流场密度会逐渐减

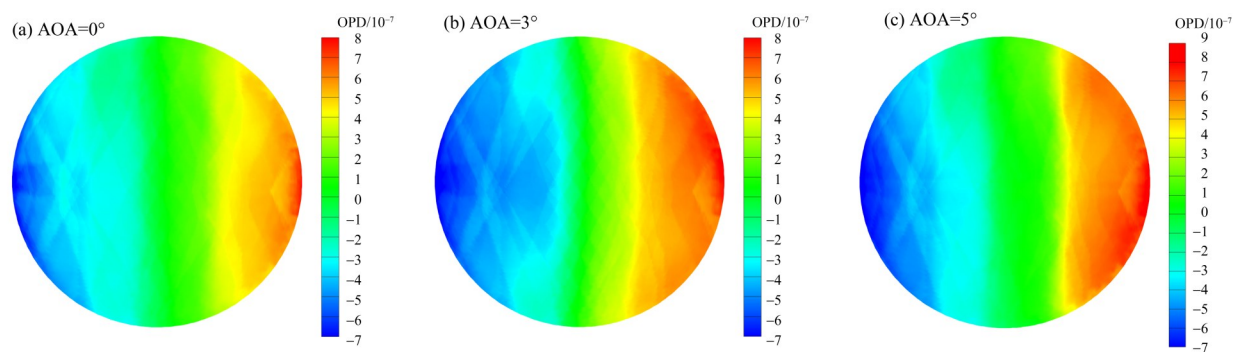


图 7 OPD 分布( $H = 15 \text{ km}$ )  
Fig. 7 OPD distribution ( $H = 15 \text{ km}$ )

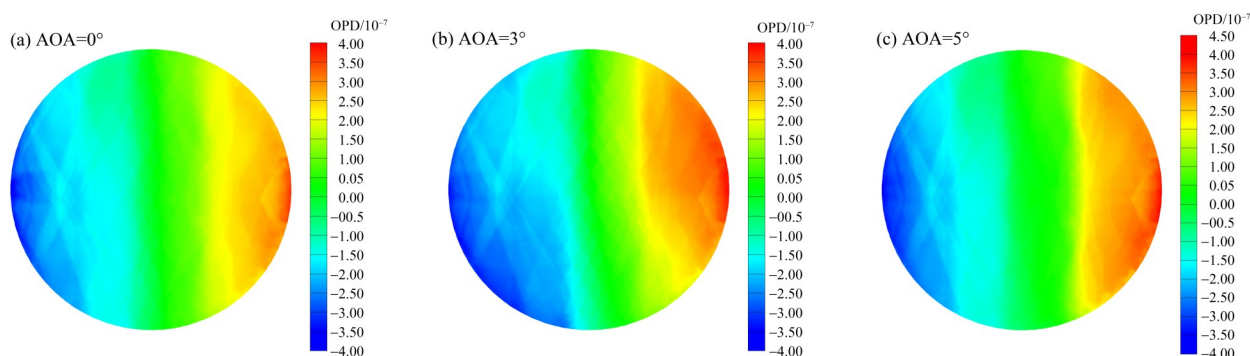


图 8 OPD 分布( $H = 20 \text{ km}$ )  
Fig. 8 OPD distribution ( $H = 20 \text{ km}$ )

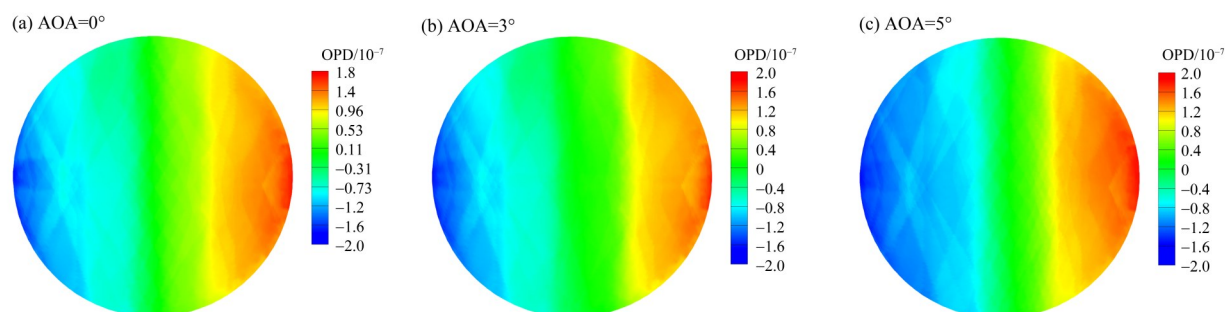


图 9 OPD 分布( $H = 25 \text{ km}$ )  
Fig. 9 OPD distribution ( $H = 25 \text{ km}$ )

小, 光线传播路径上的折射率分布也会逐渐均匀, 气动光学效应逐渐减弱。

2) 随着攻角的增大, 气动光学效应逐渐增

强, 并且光学窗口放置在飞行器尾部和设置遮光筒在一定程度上有助于抑制气动光学效应。

参考文献:

邓诗涛, 2008. 变折射率介质中的光传输及像质评价[D]. 杭州: 浙江大学.  
 史可天, 马汉东, 2019. 计算气动光学研究进展[J]. 空气动力学学报, 37(2): 186-192.  
 孙喜万, 刘伟, 2020. 气动光学效应研究进展[J]. 力学进展, 50(1): 249-309.  
 王乃祥, 徐钰蕾, 史磊, 等, 2015. 高马赫飞行器迎面与攻角对光学窗口周围流场的影响分析[J]. 红外与激光工程,

- 44(4):1267-1272.
- 邢占,陈晓依,彭志勇,等,2022.红外气动光学效应研究进展与思考(特邀)[J].红外与激光工程,51(4):108-124.
- 许亮,王鹿洋,万自明,等,2023.不同高度对 $0^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 攻角气动光学成像偏移的影响[J].红外与激光工程,52(5):347-355.
- 殷兴良,2003.气动光学原理[M].北京:中国宇航出版社.
- 江涛,丁明松,高铁锁,等,2013.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,31(6):727-732.
- BANAKH V A, SUKHAREV A A, FALITS A V, 2015. Optical beam distortions induced by a shock wave [J]. Appl Opt, 54(8): 2023-2031.
- GUO G, LIU H, ZHANG B, 2016. Aero-optical effects of an optical seeker with a supersonic jet for hypersonic vehicles in near space[J]. Appl Opt, 55(17): 4741-4751.
- HAO C, CHEN S, ZHANG W, et al, 2013. Comprehensive analysis of imaging quality degradation of an airborne optical system for aerodynamic flow field around the optical window[J]. Appl Opt, 52(33): 7889-7898.
- HUI W, SHOUQIAN C, HUAJUN D, et al, 2019. Influence of altitude on aero-optic imaging quality degradation of the hemispherical optical dome [J]. Appl Opt, 58(2): 274-282.
- JIANG T, DING M S, GAO T S, 2012. Numerical simulation of IR seeker high-speed flow field and its influence on ray transmission [J]. Acta Opt Sin, 32(8): 1-5.
- JIANG T, DING M S, GAO T S, et al, 2013. Computation and analysis of IR imaging impacted by the high-speed flow-field[J]. Chin J Aeronaut, 31(6): 727-732.
- LIANG X, ZI YE Z, TAO W, et al, 2022. Numerical study on aero-optical imaging deviations of vehicles at different altitudes[J]. Optoelectron Lett, 18(2): 97-102.
- LIU Y, LIU M, HUI M, et al, 2017. Numerical simulation and analysis of aero-optical effect of the 3D side window [C]//Laser Communication and Propagation through the Atmosphere and Oceans VI. San Diego, USA: SPIE, 10408: 266-274.
- XIAO H, FAN Z, 2010. Imaging quality evaluation of aerodynamically heated optical dome using ray tracing [J]. Appl Opt, 49(27): 5049-5058.
- XU L, CAI Y, 2012. Imaging deviation through non-uniform flow fields around high-speed flying vehicles [J]. Optik, 123(13): 1177-1182.
- YANG Y, SONG N, 2022. Research on the influence of aero-optical effects on starlight atmospheric refraction navigation under supersonic conditions [J]. Front Appl Math Stat, 8: 1081286.
- YANG B, YU H, LIU C, et al, 2023. An aero-optical effect analysis method in hypersonic turbulence based on photon Monte Carlo simulation [J]. Photonics, 10(2): 172.

(责任编辑 王海蓉)