



·激光数值仿真·

## 高速流场下凸台周围的气动光学效应\*

李 超, 王德恩, 袁 强, 邓学伟

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 针对高速流场下凸台周围的气动光学效应, 对不同马赫数下的三种凸台形状周围的流场进行仿真计算, 计算得到流场的密度变化, 计算了光线经流场传输后的光程差。仿真结果表明: 随马赫数增大, 光程差逐步增大; 同等条件下, 不同出射角度对应的光程差不同, 凸台存在强烈的尾流区域, 从而导致较大的光程差; 在马赫数达到跨音速时, 凸台顶端也会产生较大的光程差; 曲率较小的凸台结构对周围流场的影响较小。

**关键词:** 气动光学; 计算流体力学; 数值仿真; 光学窗口; 密度场; 光程差

中图分类号: O436

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.210319

## Aero-optical effect around turrets in high speed regime

Li Chao, Wang Deen, Yuan Qiang, Deng Xuewei

(Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** This study simulated the aero-optical effect around the turret at different Mach numbers for three turret designs, calculated the density distribution of the flow field and the optical path difference after transmission in the flow field. The optical path difference increases with the increase of Mach number. The optical distortion over the turret field-of-regard is dependent on the beam direction, and there is large optical distortion in wake area. When the speed reaches transonic, the top of the turret will also produce large optical distortion. For different turret designs, the smaller the curvature, the smaller the aero-optical effect.

**Key words:** aero-optics, computational fluid dynamics, simulation, optics window, density, optical path difference

机载光学系统被广泛应用于光学通信以及成像探测等领域。为了获得较大的视场范围, 机载光学系统的光学投射平台通常采用半球形凸台结构<sup>[1]</sup>。但当飞行器飞行速度较高时, 凸台形状结构会使其周围产生复杂的流场<sup>[2]</sup>, 导致出射窗口附近的气体密度发生变化, 从而导致光学畸变, 产生气动光学效应<sup>[3]</sup>。

随着国内外对机载光学系统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。Gordeyev 等人采用 Malley 探针探索了亚音速下湍流边界层的气动光学特性, 实验结果表明光学畸变与来流密度、速度的平方成正比<sup>[4]</sup>。Mathews 等人利用大涡数值模拟的方法, 对  $0.4Ma$  下的凸台周围流场进行模拟, 计算得到了整个转塔视场的光学畸变程度<sup>[5]</sup>。Coirier 等人通过分离涡算法 (Detached-Eddy Simulation) 对转塔周围的流场进行仿真计算, 发现在转塔尾部存在着大尺度的涡结构<sup>[6]</sup>。冯定华等人对凹窗周围的流场进行模拟, 得到凹窗产生的边界层是产生光学畸变的主要原因<sup>[7]</sup>。路大举等人对  $0.7Ma$  下凸台周围的气动光学效应进行研究, 指出发射方向在中轴线上天顶角  $40^\circ$  时, 气动光学效应引起的光学畸变最小<sup>[8]</sup>。吴琳等人仿真验证了高超声速湍流流场中高折射率区域是气动光学传输畸变的主要成因<sup>[9]</sup>。国内外已有大量有关凸台气动光学效应的研究报道<sup>[10-12]</sup>。但针对不同凸台形状在不同马赫数下的研究较少, 因此本文针对三种不同凸台形状在亚音速、跨音速以及超音速情况下的气动光学效应进行了研究, 结果表明光程差随着马赫数增大而增大; 在凸台尾部存在强烈的尾流区域导致较大的光程差; 曲率较小的凸台结构对周围流场的影响较小。

\* 收稿日期: 2021-12-14; 修订日期: 2022-02-28  
基金项目: 国家自然科学基金项目(61775199)  
联系方式: 李 超, lichao.52@foxmail.com。  
通信作者: 袁 强, qiangyuan.caep@caep.cn。

# 1 理论分析

## 1.1 气动模型

为研究不同凸台形状的气动光学效应, 构建了3种凸台结构进行流场计算, 3种结构均为半球光学窗口加圆柱形底座的结构, 其中圆柱形底座尺寸相同, 但半球形光学窗口的曲率不同。使用的3种凸台形状以及对比如图1所示, 圆柱形底座半径为0.25 m, 高度为0.1875 m, 其中凸台1半球结构高度为0.3 m, 曲率为 $4.8 \text{ m}^{-1}$ ; 凸台2半球结构高度为0.25 m, 曲率为 $4 \text{ m}^{-1}$ ; 凸台3半球结构高度为0.2 m, 曲率为 $3.9 \text{ m}^{-1}$ 。

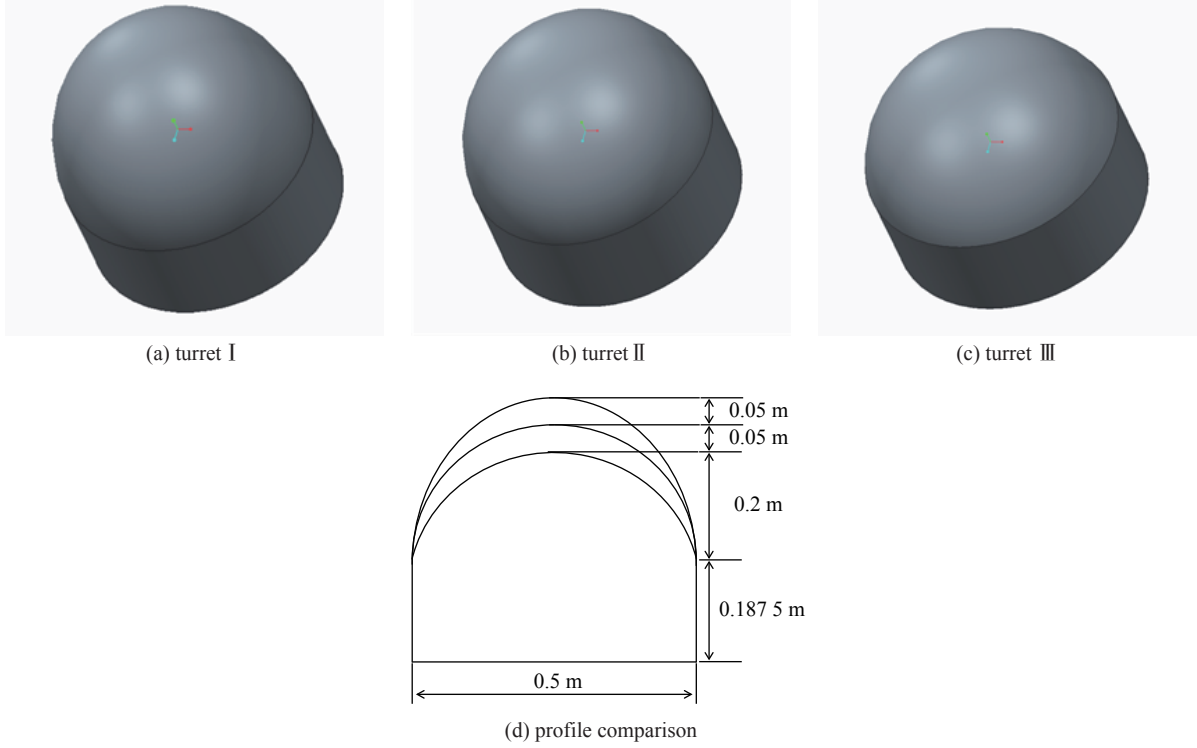


Fig. 1 Turret structures

图1 凸台结构示意图

使用 Computational Fluid Dynamics 对凸台周围流场进行仿真计算, 采用剪切应力输运  $k-\epsilon$  计算模型。为对应亚音速、跨音速及超音速的飞行条件, 设置飞行速度分别为  $0.4Ma$ ,  $0.8Ma$ ,  $1.5Ma$ 。流场计算区域如图2所示, 其中  $D=0.5 \text{ m}$ , 左侧为来流入口, 右侧为来流出口。流场总尺寸为  $7.5 \text{ m} \times 5.0 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ , 沿气流方向 ( $x$  轴) 尺寸为  $7.5 \text{ m}$ , 翼展方向 ( $y$  轴) 尺寸为  $5.0 \text{ m}$ , 高度 ( $z$  轴) 为  $2.5 \text{ m}$ 。

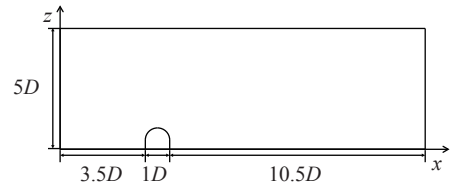


Fig. 2 Schematic of computational domain (span-wise view)

图2 流场域示意图(翼展方向视图)

## 1.2 传输模型

为研究光线经凸台流场传输后产生的畸变程度, 一般采用光程差作为评价标准<sup>[13]</sup>, 构建了光学传输模型计算整个光学窗口不同出射角度下的光程差。密度场与折射率场分布满足 Gladstone-Dale 关系

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

式中:  $K_{GD}$  为 Gladstone-Dale 常数;  $n$  为折射率;  $\rho$  为密度。

在该折射率场中, 沿着不同出射角度的光线路径对光程进行积分, 得到各个方向的光程

$$l(x, y) = \int_0^L n(x, y, z) dz \quad (2)$$

利用式(3)计算得到光线的光程差

$$\Delta l(x, y) = l(x, y) - l_0(x, y) \quad (3)$$

式中:  $x, y, z$  为光束的坐标;  $l_0$  为初始光程, 对应折射率为流场不受凸台影响时的分布情况。

## 2 仿真结果

### 2.1 流场计算结果

采用飞行速度为  $0.4Ma$ ,  $0.8Ma$ ,  $1.5Ma$  的条件进行仿真, 分别得到了 3 种凸台形状在不同飞行速度下周围流场的密度场分布。图 3、图 4 分别为各个飞行速度下不同凸台形状  $y=0$  及  $z=0.1875$  m 剖面的云图分布。

基于图 3 与图 4 进行分析, 可以看出在不同的飞行速度下, 凸台周围的流场结构不同。飞行速度为  $0.4Ma$  时,

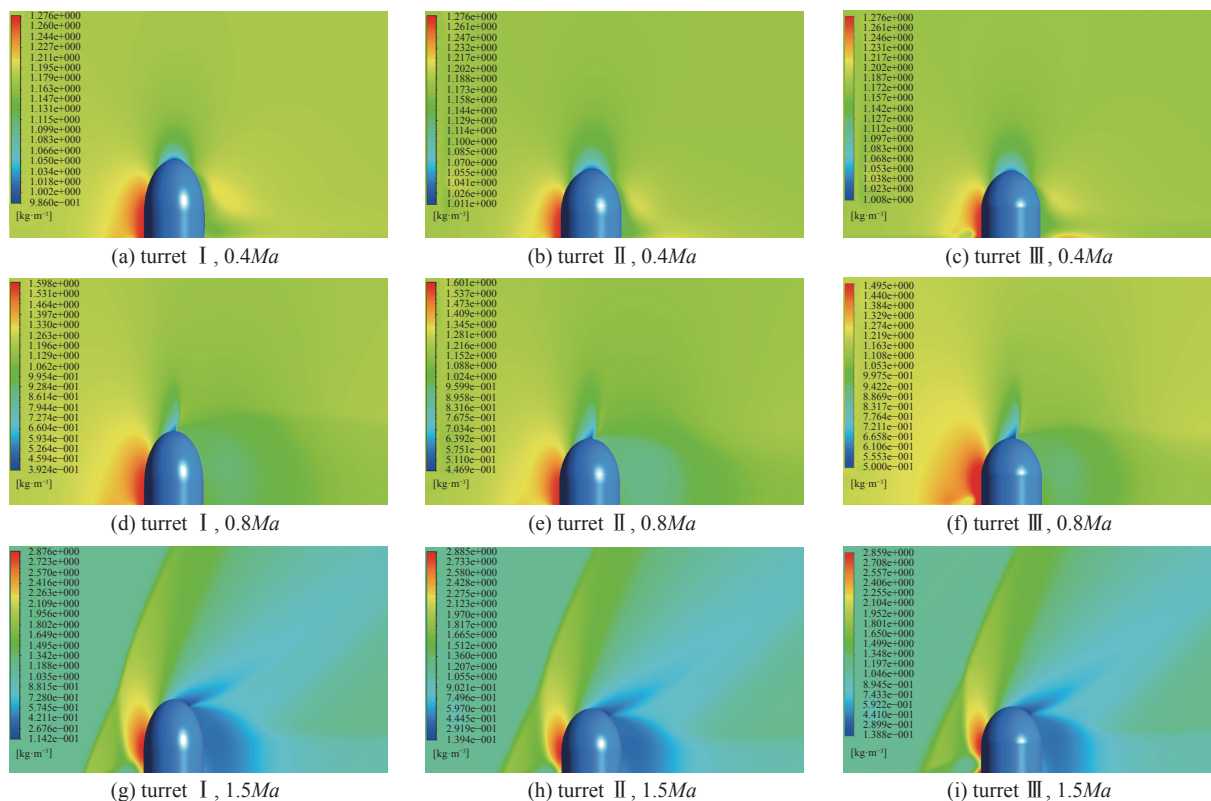


Fig. 3 Contours of density in a cutting plane where  $y=0$  at different flight speed

图 3 不同飞行速度下 3 种凸台形状周围流场的密度场分布 ( $y=0$  剖面)

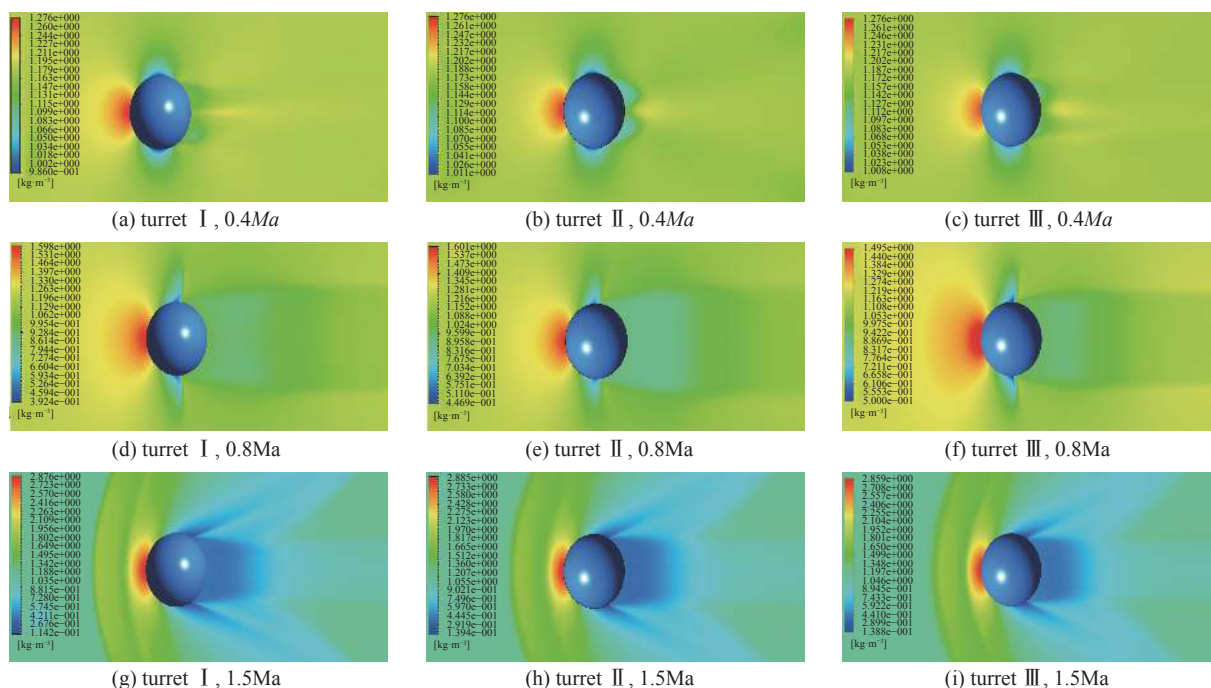


Fig. 4 Contours of density in a cutting plane where  $z=0.1875$  m at different flight speed

图 4 不同飞行速度下 3 种凸台形状周围流场的密度场分布 ( $z=0.1875$  m 剖面)

气流整体流动较为平稳;飞行速度为  $0.8Ma$  时,凸台顶端产生激波,并在背风面产生分离区域;飞行速度为  $1.5Ma$  时,顶端激波消失,背风面形成膨胀波以及分离区域。在凸台的迎风面,空气受到挤压,形成密度较大的区域,而在凸台顶端以及背风面,气流从壁上脱落,形成密度较小的区域。对比图 3 中不同飞行速度下的流场分布情况,发现随着马赫数的增加,产生密度变化的区域增大,在速度达到超音速时,在凸台迎风面形成面积较大的气流头罩结构,且背风面产生较大的密度梯度。分别对图 3、图 4 进行对比,可以看出在相同的马赫数下,凸台 1 因为曲率较大,导致气流在凸台迎风面的受压缩程度较大,背风面的气流脱落区域较大。凸台结构的不同曲率会导致周围流场的差异,曲率较小的凸台结构对周围流场的影响较小。

## 2.2 光学计算结果

根据凸台周围流场的密度分布,得到整个视场范围不同出射方向上光程及光程差。图 5 为光线出射方向的转角 (AZ) 与仰角 (EL) 示意图。图 6~图 8 给出了不同飞行速度下不同凸台形状整个视场范围内的光程差分布。

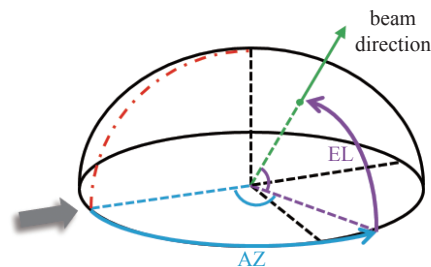


Fig. 5 Definition of beam viewing, where AZ is the azimuthal angle, EL is the elevation angle

图 5 光束出射方向示意图,其中 AZ 为转角,EL 为仰角

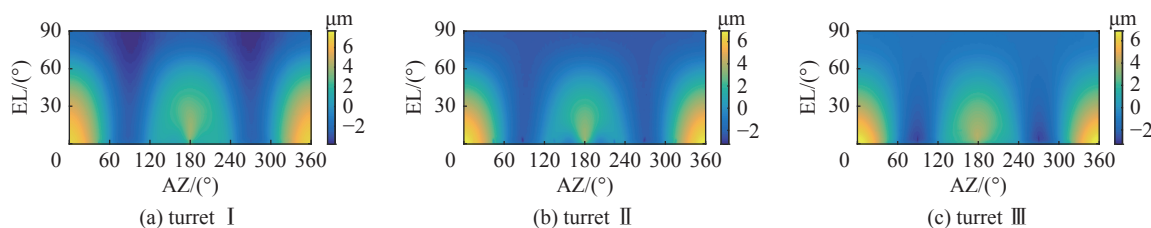


Fig. 6 Contours of optical path differences (OPDs) in the entire field of view at a flight speed of  $0.4Ma$

图 6 飞行速度为  $0.4Ma$  时,光程差分布示意图

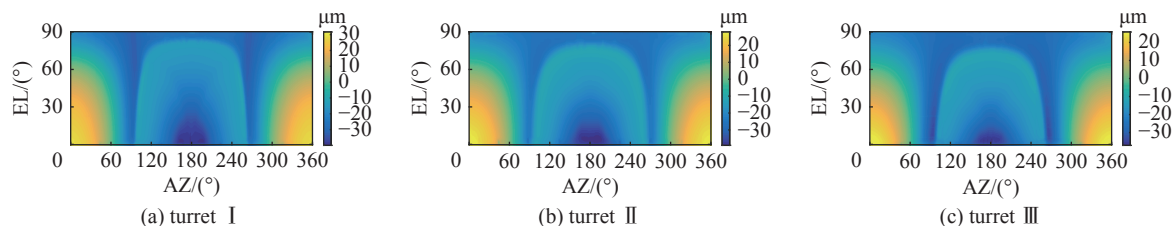


Fig. 7 Contours of OPDs in the entire field of view at a flight speed of  $0.8Ma$

图 7 飞行速度为  $0.8Ma$  时,光程差分布示意图

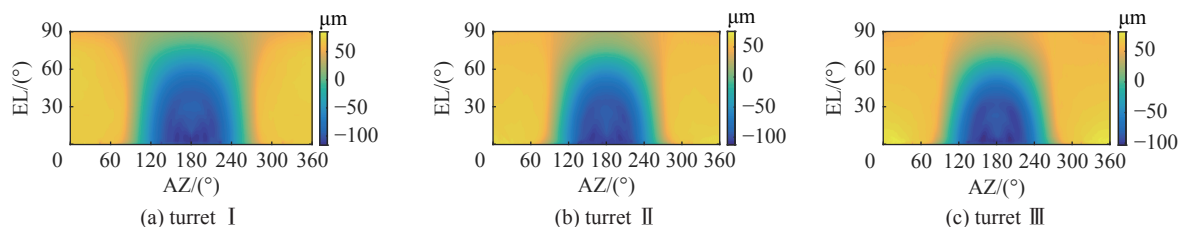


Fig. 8 Contours of OPDs in the entire field of view at a flight speed of  $1.5Ma$

图 8 飞行速度为  $1.5Ma$  时,光程差分布示意图

由图 6~图 8 可知,不同的出射角度所对应的光程不同,相对于初始光程,在凸台的迎风面 (AZ 为  $0^\circ \sim 70^\circ$ ,  $290^\circ \sim 360^\circ$  时),光程较大,在转塔背风面 (AZ 为  $110^\circ \sim 250^\circ$  时),光程较小。对比图 6(a)、图 7(a)、图 8(a),可以发现,对于相同的凸台形状,随着马赫数增大,光程差逐渐增加,且背风面的变化程度大于迎风面的变化程度。在  $0.4Ma$  时,迎风面光程差大于背风面光程差,随着马赫数增大到 1.5,背风面的光程差高于迎风面光程差。在  $0.8Ma$  时,凸台顶端 (AZ 约为  $90^\circ$  及  $270^\circ$  时)也会产生较大的光程差。

图 9 为半径为  $0.05\text{ m}$  的光波出射后,经过凸台周围流场的光程差分布情况。计算了不同飞行速度下,不同曲率凸台在出射角度为中轴线上  $45^\circ$  时的光程差,分别得到光程差的最小值、最大值以及平均值,如表 1、表 2 所示。



由表1可得,对于相同曲率凸台,随飞行速度的增加,光程差也逐渐增大;由表2可得,对于相同飞行条件,随凸台曲率减小,光程差也逐渐减小,即在一流场条件下,曲率较小的凸台对周围流场的影响较小。

### 3 结论

本文采用剪切应力输运  $k-\epsilon$  模型对不同马赫数下的3种不同形状凸台的周围流场进行仿真计算,得到凸台周围流场的密度分布情况,并对光程进行积分得到整个视场下的光场差分布情况。仿真结果表明,对同一种凸台结构来说,随着飞行速度的增大,凸台结构对其周围流场的影响越大,导致的光学畸变也越大,而凸台背风面受到的影响更为显著,当速度达到超音速时,背风面的光学畸变程度已经超过迎风面的光学畸变程度;在一流场条件下,不同的凸台结构对其周围流场产生的影响不同,曲率较大的窗口对周围流场的影响更大,导致更大的光学畸变。本项工作对机载凸台的造型设计具有一定的参考价值。

表1 不同飞行速度下的光程差 (turret II, 出射角度为中轴线上45°)

Table 1 OPDs at different flight speed (turret II, AZ: 0°, EL: 45°)

Ma	OPD(minimum)/ $\mu\text{m}$	OPD(maximum)/ $\mu\text{m}$	OPD(average)/ $\mu\text{m}$
0.4	0.123	0.843	0.472
0.8	1.573	4.406	3.011
1.5	23.560	26.606	25.345

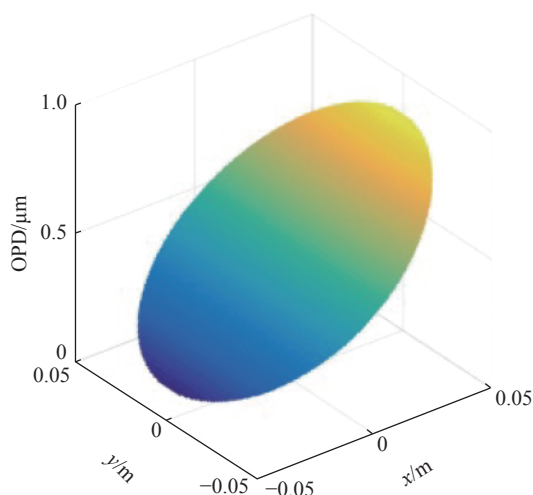


Fig. 9 OPDs at beam direction of 45° (turret II, 0.4Ma)  
图9 出射角度为中轴线上45°时,光程差计算结果 (turret II, 0.4Ma)

表2 不同凸台形状下的光程差 (出射角度为中轴线上45°, 飞行速度为0.8Ma)

Table 2 OPDs of different turret shapes (AZ: 0°, EL: 45°, 0.8Ma)

turret shape	OPD(minimum)/ $\mu\text{m}$	OPD(maximum)/ $\mu\text{m}$	OPD(average)/ $\mu\text{m}$
turret I	1.9320	4.6160	3.2908
turret II	1.5729	4.4058	3.0110
turret III	1.1186	4.1705	2.7100

### 参考文献:

- [1] Porter C, Gordeyev S, Zenk M, et al. Flight measurements of aero-optical distortions from a flat-windowed turret on the airborne aero-optics laboratory (AAOL)[C]//42nd AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference. 2011: 27-30.
- [2] Busse F H. Visualizing the dynamics of the onset of turbulence[J]. *Science*, 2004, 305(5690): 1574-1575.
- [3] Jumper E J, Fitzgerald E J. Recent advances in aero-optics[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2001, 37(3): 299-329.
- [4] Gordeyev S, Jumper E J, Ng T T, et al. Aero-optical characteristics of compressible, subsonic turbulent boundary layers[C]//34th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference. 2003.
- [5] Mathews E R, Wang Kan, Wang Meng, et al. LEs of an aero-optical turret flow at high Reynolds number[C]//54th AIAA Aerospace Sciences Meeting. 2016.
- [6] Coirier W J, Porter C, Barber J, et al. Aero-optical evaluation of notional turrets in subsonic, transonic and supersonic regimes[C]//45th AIAA Plasmadynamics & Lasers Conference. 2014.
- [7] 冯定华, 李桦, 肖飞, 等. 光学窗口凹腔流场的光学传输效应研究[J]. *光学学报*, 2012, 32: 0401004. (Feng Dinghua, Li Hua, Xiao Fei, et al. Study on optical transmission effect of optical window's cavity flow[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32: 0401004)
- [8] 路大举, 张凯, 董航, 等. 共形转塔气动光学效应时空特性研究(英文)[J]. *应用光学*, 2019, 40(6): 1022-1032. (Lu Daju, Zhang Kai, Dong Hang, et al. Space-time characteristics of aero-optical effect around conformal turrets[J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(6): 1022-1032)
- [9] 吴琳, 房建成, 杨照华. 高超声速湍流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. (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)
- [10] 蒋倩雯. 拉盖尔-高斯光束的气动光学效应[D]. 南京: 南京理工大学, 2017. (Jiang Qianwen. Aero-optical effects of Laguerre-Gaussian vortex beams[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017)
- [11] Jumper E J, Gordeyev S, Cavalieri D, et al. Airborne aero-optics laboratory-transonic (AAOL-T)[C]//53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting. 2015.
- [12] Wang Meng, Mani A, Gordeyev S. Physics and computation of aero-optics[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2012, 44(1): 299-321.
- [13] 邓诗涛. 变折射率介质中的光传输及像质评价[D]. 杭州: 浙江大学, 2008. (Deng Shitao. Image evaluation of the optical transmission through inhomogeneous medium[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008)