

## 基于 Zemax 的探测激光气动光学畸变快速仿真

郑勇辉<sup>1</sup>, 孙华燕<sup>1</sup>, 赵延仲<sup>1</sup>, 张令军<sup>2</sup>

(1. 装备学院 光电装备系, 北京 101416; 2. 北京指挥控制中心, 北京 100093)

**摘要:** 基于猫眼效应的激光主动探测技术在防空反导作战中具有广阔的应用前景, 而飞机、导弹等目标的气动绕流场对入射和反射光的畸变效应研究是回波特性的分析的重要内容。针对探测激光“猫眼”镜头传输和双重气动流场传输这一复杂物理过程, 提出了一种基于 Zemax 的气动光学畸变快速仿真计算方法。首先利用有限元思想, 根据折射率梯度对气动绕流场进行分层, 再由标准二次曲面、偶次非球面和 Zernike 相位曲面对各层空间曲面进行拟合, 进而建立多个不同折射率的 Zemax 透镜组模型, 加入成像光学镜头模型即可建立光束入射和散射传输全过程的 Zemax 模型。以某型号导弹模型为例开展了气动流场计算和 Zemax 光传输畸变计算, 并与光线追迹计算结果进行了比较, 证实了此快速计算方法的可行性。

**关键词:** 激光探测; 气动光学; 快速仿真; 光线追迹

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)S-0080-06

## Fast aero-optical distortion simulation of the detection laser based on Zemax

Zheng Yonghui<sup>1</sup>, Sun Huayan<sup>1</sup>, Zhao Yanzhong<sup>1</sup>, Zhang Lingjun<sup>2</sup>

(1. Department of Photoelectric Equipment, Equipment Academy, Beijing 101416, China;

2. Beijing Aerospace Command and Control Center, Beijing 100093, China)

**Abstract:** The cat-eye effect based active laser detection technique has a broad prospect in antimissile and air defense field, while the distortion effect on the incident and reflected waves caused by aerodynamic flow field around the planes and missiles is an important part of the echo wave characteristic analysis. Facing the complicated physical process of the laser waves in the cat-eye lenses and aerodynamic flow field both in the incidence and reflection propagation, a Zemax based aero-optical distortion calculation method was proposed. Firstly, based on finite element theory, the aero-optical flow field was divided into multiple layers according to the refractive index gradient. Secondly, curve surface fitting of the interfaces between the layers was done with standard, even asphere and Zernike polynomial surface, then a multilayer lens group model with different refractive index was established in Zemax, and the whole incidence and reflection Zemax model was accomplished with imaging optical system added in. Take a typical missile model as the example, the computational fluid dynamics and optical propagation

收稿日期: 2015-10-05; 修订日期: 2015-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(61302183)

作者简介: 郑勇辉(1987-), 男, 博士生, 主要从事激光主动探测、光电信息处理方面的研究。Email: yonghui1987@163.com

导师简介: 孙华燕(1963-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事激光主动探测、光电信息处理等方面的研究。Email: shy221528@vip.sina.com

distortion simulation in Zemax were performed, the feasibility of this method was validated after comparing with the analytical results of ray tracing.

**Key words:** laser detection; aero-optic; fast simulation; ray tracing

## 0 引言

光学导引头、光电吊舱等光电侦查设备对入射光具有极强的原路反射特性,称为猫眼效应,利用猫眼效应可以大大提高激光对此类目标的探测捕获能力<sup>[1-2]</sup>,然而当其在大气中高速飞行时,周围的气体密度变化会对入射和反射光束产生较强的气动光学畸变<sup>[3-6]</sup>。气动光学效应涵盖了流体力学和光学传输两方面内容,由于解析计算和试验测试成本极高,模拟仿真成为气动光学研究的重要手段。近年来,基于计算流体力学商业软件的流场仿真计算迅速发展,解决了流体力学仿真难题,光学传输仿真研究方面,在激光主动探测条件下,光束传输由复杂目标镜头和双重气动流场传输组成,使得快速仿真计算变得更加必要,然而针对气动流场光学传输的快速仿真计算方法研究较少,已见诸报道的光畸变传输仿真计算方法有以下三种。

第一,基于规则化流场数据的光传输畸变仿真方法。洛克希德公司<sup>[7]</sup>开发了一套用于计算红外导引头气动光学特性的仿真软件 LAMBDA,并已成功应用于 ARROW、THAAD 和 ENDO LEAP 项目,其实质是在气动流场数据进行规则化插值的基础上,在空间入射方向上对流场折射率积分出相应的光程差,进而计算导引头成像畸变效应。这是最为传统的方法,可仿真得到入射光束在气动流场中的畸变特性,其缺点在于无法对畸变光束的猫眼逆向传输过程进行计算;第二,基于 Zemax 楔形透镜层的光传输仿真计算方法。L. F. DeSandre<sup>[8]</sup>于 1999 年利用 Zemax 进行了导引头三维绕流场的光线追迹计算,根据气动绕流场密度等高线图,对特定入射角度上的气动流场用多层楔形透镜进行折射率、厚度、斜率以及曲率近似,再用特定焦距的理想透镜为导引头光学系统进行近似,实现了基于 Zemax 的流场和光学系统光传输计算,然而楔形透镜层仅能模拟某一特定入射角度上的气动流场,且 Zemax 建模精度不高,光束的猫眼传输过程没有考虑。第三,基于 SigFit 的光传

输仿真计算方法。麻省理工的林肯实验室<sup>[9]</sup>利用新型仿真计算软件 Sigfit 实现了一种气动光学的集成仿真计算方法,将计算流体力学软件 ANSYS Fluent 和 OVERFLOW 的流场数据输出为 CGNS 格式导入到 SigFit 软件中,并进行特定方向上的光传输光程差计算。SigFit 具有便捷的流场光传输计算能力,然而其实质上是对第一种方法的快速和便捷计算,无法对畸变光束的猫眼传输和两次流场传输进行快速统一仿真计算。

上述方法均未将光束的气动流场传输和光学镜头传输进行统一建模,光束入射方向发生改变后还需再次进行建模,计算效率较低。为解决这一问题,文中提出基于 Zemax 的光学传输畸变效应快速仿真计算方法,在绕流场计算与插值的基础上,通过分层和三维面型拟合将三维流场在 Zemax 建立多层透镜模型,再加入导引头光学镜头模型,即可实现流场和猫眼传输全过程光学畸变特性的 Zemax 快速计算。

## 1 流场 Zemax 建模方法

导引头等前视型目标平均气动流场密度分布规则,层与层之间折射率递进特征明显,利用有限元方法,可以将其近似为多个薄层,只需在 Zemax 中依次为每一薄层进行面型、厚度和折射率建模,即可实现气动流场建模。Zemax 中自带多种面型函数,且可直接对各参数赋值,十分便于建立多透镜层模型,为实现复杂流场界面层的高精度面型拟合,文中选取标准二次曲面、2~16 阶偶次非球面和 1~37 项 Zernike 相位曲面这三项函数进行拟合。拟合面型的统一表达式如下:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^8 \alpha_i r^{2i} + \sum_{i=1}^{37} A_i Z_i(r, \varphi) \quad (1)$$

式中: $c$ 为曲率; $k$ 为圆锥系数; $r$ 、 $z$ 分别为曲面上的径向坐标和水平坐标; $Z_i(r, \varphi)$ 为*i*阶 Zernike 曲面; $\alpha_i$ 、 $A_i$ 分别为第*i*阶偶次面和 Zernike 面的拟合系数。拟合时,首先进行标准面拟合,再对残差部分进行 2~16 阶的偶次非球面拟合,最后用 Zernike 多项式

拟合剩余误差,具体如下:

首先按照公式(1)中右边第一项进行标准面拟合,对其进行变换:

$$z+z\sqrt{1-(1+k)c^2r^2}=cr^2 \quad (2)$$

两边开方得:

$$(1+k)c^2r^2z^2-2cr^2z+c^2r^4=0 \quad (3)$$

两边同除以  $c^2$ :

$$(1+k)r^2z^2-\frac{2}{c}r^2z=-r^4 \quad (4)$$

代入  $n$  个已知点的坐标  $(r_k, z_k)$ ,并化为矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} r_1^2 z_1^2 & r_1^2 z_1 & r_1^2 \\ r_2^2 z_2^2 & r_2^2 z_2 & r_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ r_n^2 z_n^2 & r_n^2 z_n & r_n^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1+k \\ -\frac{2}{c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_1^4 \\ -r_2^4 \\ \vdots \\ -r_n^4 \end{bmatrix} \Rightarrow M \begin{bmatrix} 1+k \\ -\frac{2}{c} \end{bmatrix} = N \quad (5)$$

利用最小二乘法,对参数  $c$  和  $k$  进行计算:

$$\begin{bmatrix} 1+k \\ -\frac{2}{c} \end{bmatrix} = (M^T M)^{-1} M^T N \quad (6)$$

其次,对残差曲面按照公式(1)中右边第二项进行偶次非球面拟合,经多项式展开,得到如下矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} r_1^2 & r_1^4 & \cdots & r_1^{16} \\ r_2^2 & r_2^4 & \cdots & r_2^{16} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_n^2 & r_n^4 & \cdots & r_n^{16} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta z_1 \\ \Delta z_2 \\ \vdots \\ \Delta z_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中:  $\Delta z$  为标准面拟合后的残差,系数  $\alpha_i$  同样利用最小二乘法求得。

其次,对最后的残差部分进行 Zernike 曲面拟合,同样可得到 Zernike 拟合矩阵如下:

$$\begin{bmatrix} Z_1(r_1, \varphi_1) & Z_2(r_1, \varphi_1) & \cdots & Z_{37}(r_1, \varphi_1) \\ Z_1(r_2, \varphi_2) & Z_2(r_2, \varphi_2) & \cdots & Z_{37}(r_2, \varphi_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_1(r_n, \varphi_n) & Z_2(r_n, \varphi_n) & \cdots & Z_{37}(r_n, \varphi_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_{37} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta' z_1 \\ \Delta' z_2 \\ \vdots \\ \Delta' z_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中:  $\Delta' z$  为标准面和偶次非球面拟合后的残差, Zernike 多项式在此不再给出。需要说明的是, Zernike 多项式通常在已知有限离散点上不正交,使得公式(8)的最小二乘求解出现病态,这就需要通过 Householder 变换将式中的系数矩阵正交化处理,具体过程见参考文献[10]。

至此,通过上述方法实现了基于 Zemax 的流场透镜组建模,光束的流场传输问题转化为了透镜组光传输问题,引言中已指出,光畸变传输包含了流场传输和光学镜头传输两部分,因此还需对导引头、光电吊舱等目标的光学镜头进行 Zemax 建模,由于气动流场通常位于导引头或吊舱的周围,可直接将猫眼镜头模型置于流场透镜组之后,即可开展光束的畸变传输计算。

另外,透镜层数的选择还应同时考虑到建模精度,这是由于计算得到的流场数据点有限,分层数过多时透镜边界曲面的提取精度将难以保证。

## 2 算例分析

### 2.1 目标模型与 CFD 计算

以某型号导弹为例进行建模,3D 模型和网格划分结果分别如图 1 和图 2 所示,弹体长 2.5 m,弹径 300 mm,翼展 700 mm。网格划分由 Gambit 完成,共计 108 万个单元网格。

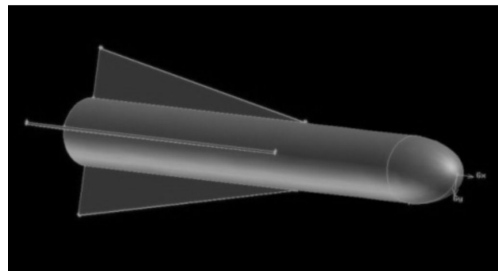


图 1 导弹 3D 模型

Fig.1 3D missile model

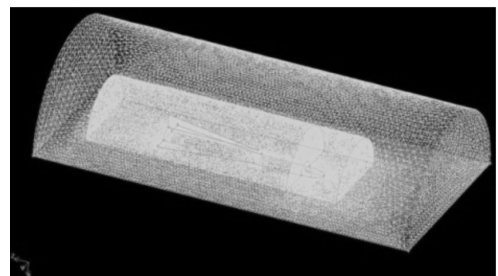


图 2 导弹网格划分

Fig.2 Computational grid of the missile

采用 ANSYS Fluent 软件进行计算流体力学计算,选取稳态雷诺平均的 NS 模型,依据标准大气表设定相应大气边界条件,设定弹体飞行高度为 5 km,对马赫数 0.5、0.8 和 1.2 三种条件进行了计算。

### 2.2 Zemax 建模与传输计算

用 20 层薄透镜进行流场建模, 导引头光学系统选取 25°视场的双高斯场镜, 流场分布和 Zemax 镜片组模型分别见图 3 和图 4。可以看出, 同等条件下, 流场密度梯度随马赫数增大而增大, 然而流场层厚度则不然, 从薄到厚依次是 1.2 Ma、0.5 Ma 和 0.8 Ma。

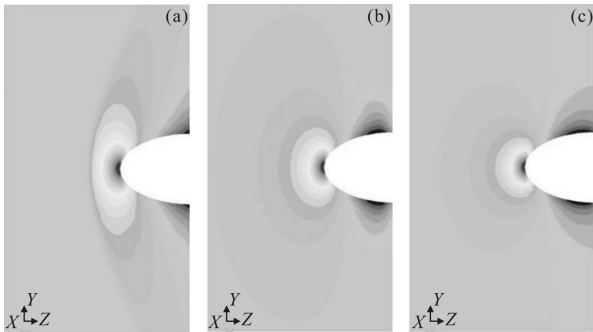


图 3 马赫数分别为 1.2(a)、0.8(b)、0.5(c)下的导引头绕流场大气密度场

Fig.3 Distribution of the density field near the warhead at a Mach number of 1.2 (a), 0.8 (b) and 0.5 (c)

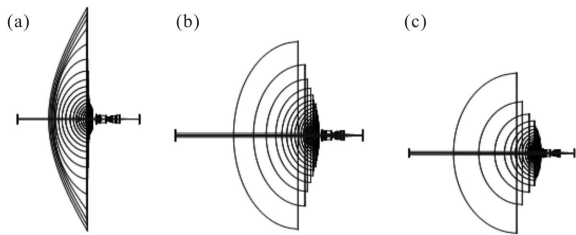


图 4 Zemax 模型

Fig.4 Lens model in Zemax

为验证 Zemax 模型精度, 利用流场光线追迹数值计算了平面光束正直入射经过气动流场后在导引头入瞳处的光程差, 并与 Zemax 结果进行比较。其中数值计算方法的计算过程, 首先对仿真得到的折射率场数据沿光入射方向进行规则化差值, 再求解该条件下的光传输光程差, 数值计算精度与空间折射率场的插值密度相关, 为获得高精度计算结果, 文中空间折射率场插值成分辨率为 0.5 mm 的标准数据场。光程差计算公式如下:

$$OPD(x, y) = \int_0^l n(x, y, z) dz - \langle \int_0^l n(x, y, z) dz \rangle \quad (9)$$

式中:  $n$  为折射率场;  $l$  为流场传输距离;  $\langle \rangle$  表示在光束孔径截面上的平均。数值计算与 Zemax 仿真结果对比如图 5 所示, 其中光波波长为 532 nm, 光束直径 20 mm。图(a1)、(b1)和(c1)分别为马赫数 0.5、0.8 和 1.2 条件下 Zemax 仿真得到的气动光程差, (a2)、(b2)和(c2)为该结果与数值计算结果的差值。误差(a2)、(b2)和(c2)的的均方根值分别为 3.1 nm、24 nm 和 30 nm, 均小于数值计算结果的 2%。

另外, 利用此模型仿真计算了光束经镜头焦平面反射后再次经过光学系统和气动流场后的光畸变特性, 其典型的分布规律如图 6 所示, 结果表明, 气动流场对回波光强的分布影响在近场表现的并不明显, 光束入射角是影响回波光强分布的主要因素, 气动流场对猫眼有效入射角范围影响较小, 由于光学系统镜片光阑的遮挡作用, 有效猫眼回波随着入射角的增大而逐渐减少, 增大至半视场时, 将不会出现

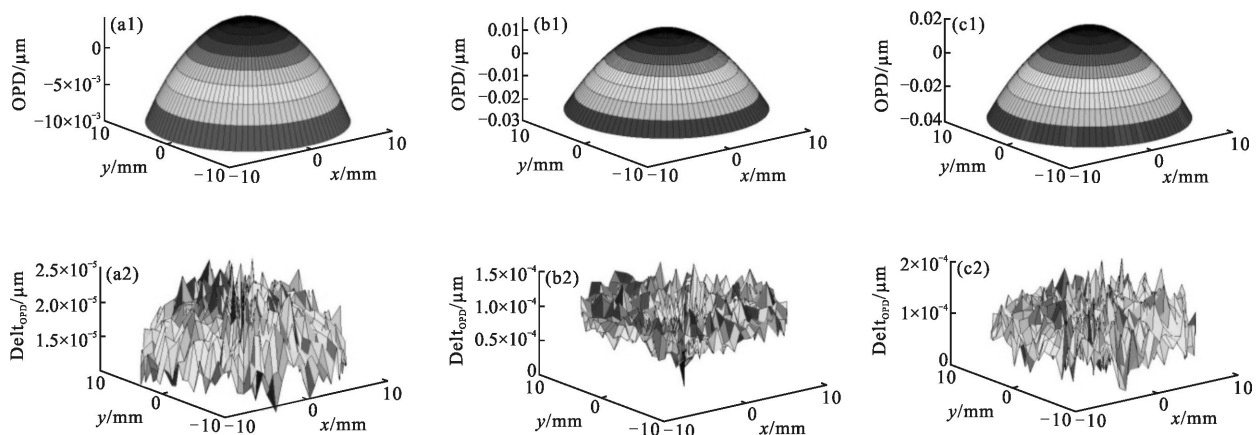


图 5 气动流场对入射光束的畸变波前

Fig.5 Distorted wavefront of the incident laser beams affected by aerodynamic flow field

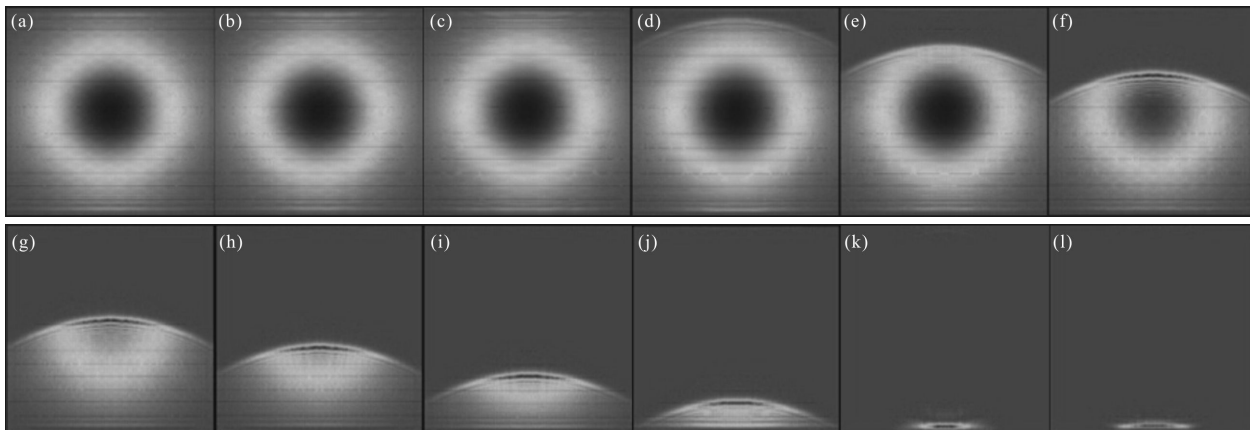


图 6 回波光强随入射角  $\theta$  的变化,  $\theta$  从上到下为  $0.5^\circ$  递增至  $6^\circ$ , 间隔为  $0.5^\circ$ ,  $Ma=1.2$ , 光束直径  $0\text{ mm}$ ,  $532\text{ nm}$

Fig.6 Intensity of cat-eye echo waves with a variable of incident angle  $\theta$ .  $\theta$  increases from  $0.5^\circ$  to  $6^\circ$  with a step of  $0.5^\circ$ , the Mach number is 1.2, the wavelength of the laser beam is  $532\text{ nm}$ , and the diameter is  $20\text{ mm}$

猫眼回波,另外,各光阑对光束的衍射效应也在光强分布中得到了体现。

回波光程差均方根值( $OPD_{\text{rms}}$ )随激光入射角的变化如图 7 所示,可以看出, $OPD_{\text{rms}}$  随着飞行马赫数的增大而增大,马赫数 0.5 和 0.8 条件下  $OPD_{\text{rms}}$  随入射角度的变化趋势大致相同,首先随着入射角度的增大缓缓降低,而后由于系统光阑遮挡畸变效应的增强,导致  $OPD_{\text{rms}}$  的值又会出现一个峰值。马赫数 1.2 条件下, $OPD_{\text{rms}}$  首先随入射角增大而变大,这是由于激波层流场光程差包含的离焦项多,低马赫流场光程差包含的倾斜项多,而光束在原路返回过程中,倾斜项相互抵消,而离焦项变倍造成的;另外在大入射角条件下  $OPD_{\text{rms}}$  出现较大的起伏,这反映了有效孔径光阑范围内的流场光畸变项出现了较大的变化。

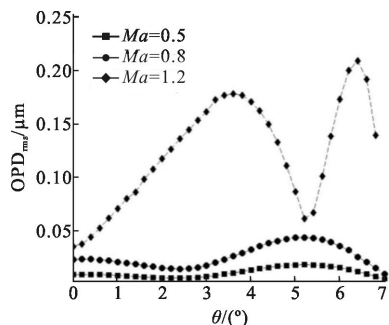


图 7 猫眼回波光束  $OPD_{\text{rms}}$  随光束入射角的变化

Fig.7  $OPD_{\text{rms}}$  of cat-eye echo waves with variable incident angle  $\theta$

### 2.3 算法适用性分析

为研究 Zemax 建模对不同流场结构的适用性,

以攻击角  $5^\circ$  为例进行了计算,其他条件不变,马赫数为 1.2、0.8 和 0.5 条件下的导引头绕流场分布和 Zemax 建模结果分别如图 8 和图 9 所示,经过计算,光程差解析计算结果与 Zemax 仿真结果误差依旧低于 2%。可见文中方法对存在攻击角的平均气动流场依然适用。

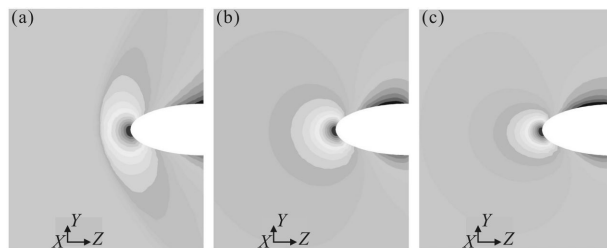


图 8 攻击角  $5^\circ$ , 马赫数为 1.2(a)、0.8(b)和 0.5(c)时的导引头平均绕流场分布

Fig.8 Distribution of the density field at an attack angle of  $5^\circ$  at Mach number 1.2(a), 0.8(b) and 0.5(c)

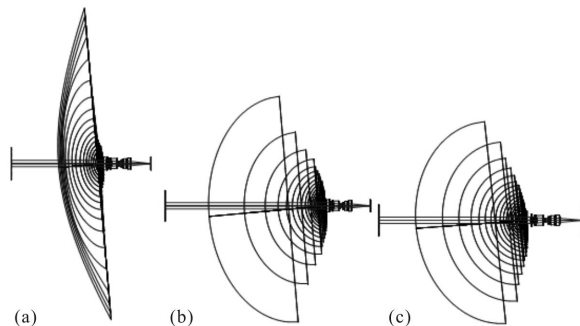


图 9 Zemax 建模

Fig.9 Lens model in Zemax

### 2.4 计算速度分析

已证明基于 Zemax 建模的平均气动光学效应计

算方法可获得与解析计算十分接近的结果,其优势在于利用 Zemax 的光线传输计算能力进行快速光畸变计算和分析。对于文中导弹算例,单次流场数据的导出、插值、曲面拟合处理,在计算机上 (Intel(R) Core(TM) i7-4790@3.6 GHz, 64 bit) 的运行时间只需几分钟;在导引头光学系统的 Zemax 建模和优化完成的基础上,只需人工输入气动流场的 Zemax 透镜模型数据,即可快速进行光束入射、反射全过程中各种入射条件下的光畸变计算,计算速度优于前面提到的方法。

### 3 结 论

文中开展了激光探测应用背景下的导引头平均气动流场对猫眼反射光的畸变效应研究,提出了一种基于 Zemax 的快速计算方法,既能精确模拟气动流场的畸变效应,又能计算光束在光学系统中的传输畸变效应,适用于对导弹等前视型绕流场气动光畸变进行快速计算。对某导弹模型进行了 CFD 计算和 Zemax 建模分析,快速得到了探测光束在流场传输中的畸变特性。结果表明,气动流场对回波探测激光的畸变  $OPD_{rms}$  在几十纳米量级,跨音速时激波层的出现会大大加重光畸变。

文中方法和结果对目标探测激光的平均畸变效应研究具有一定的参考价值,然而没有考虑瞬时流场,一方面是由于瞬时流场的空间分布不如平均流场规则,采用文中方法对其进行 Zemax 建模时,曲面拟合误差相对变大;另一方面若要仿真得到流场的湍流特性还需要对多个瞬时场进行建模仿真,快速仿真计算这一优势将不再明显。

### 参考文献:

- [1] Zhao Yanzhong, Sun Huayan, Song Fenghua, et al. Propagation properties of oblique and off-axial gaussian beams passing through cat-eye optical lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(9): 2552-2556. (in Chinese)
- [2] 赵延伸, 孙华燕, 宋丰华, 等. 倾斜离轴高斯光束通过猫眼光学镜头的传输特性[J]. *光学学报*, 2009, 29(9): 2552-2556.
- [2] Zhao Yanzhong, Sun Huayan, Zheng Yonghui. An approximate analytical propagation formula for Gaussian beams through a cat-eye optical lens under large incidence angle condition[J]. *Chin Phys Lett*, 2011, 28(7): 074101.
- [3] 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. (in Chinese)
- [3] 吴琳, 房建成, 杨照化. 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.
- [4] Juan M Ceniceros, David A Nahrstedt, Y-C Hsia, et al. Wind tunnel validation of a CFD-based aero-optics model [C]//AIAA, 2007-4011.
- [5] Yin Kexin, Jiang Huilin. Evaluations on aero-optic effects of subsonic airborne electro-optical system [J]. *Chinese Optics Letters*, 2006(10): 435-438.
- [6] Edwin Mathews, Kan Wang, Meng Wang, et al. LES analysis of hemisphere-on-cylinder turret aero-optics [C]//AIAA, 2014-0323.
- [7] Gierloff J J, Robertson S J, Bouska D H. Computer analysis of aero-optic Effects [C]//AIAA SDIO Annual Interceptor Technology Conference, 1992-2794.
- [8] DeSandre L F. Optical performance analysis of standard missile block IV a seeker[R]. ADA390366, 1999.
- [9] Mark Bury, Keith Doyle, Thomas Sebastian, et al, An integrated method for aero-optical analysis[C]//AIAA, 2013-0286.
- [10] Cao Zhenglin, Liao Wenhe, Shen Jianxin. A new algorithm for human eye's wave-front aberration fitting with Zernike polynomial [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(2): 308-314. (in Chinese)
- [10] 曹正林, 廖文和, 沈建新. Zernike 多项式拟合人眼波前像差的一种新算法[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(2): 308-314.