

文章编号:1002-2082(2011)02-0189-06

气动光学头罩光传输数值仿真

范志刚,肖昊苏,李 辉

(哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要:气动热环境下光学头罩由于受气动热效应作用,其形状和光学性质都将发生改变,从而影响头罩内的光传输。建立气动光学头罩有限元分析模型,根据热光效应和弹光效应理论,对头罩的折射率场进行数值计算,采用四阶龙格-库塔法编制光线追迹程序对气动光学头罩内红外辐射光线传输进行了数值仿真,得到了头罩光学系统出射波面波像差和调制传递函数。研究结果表明:气动热环境下热光效应对光学头罩光传输的影响远比弹光效应大,且气动光学头罩成像质量受到气动热效应的影响严重下降,为了提高高速飞行器的制导精度,不能忽视气动热对头罩光传输的影响。

关键词:气动光学;红外光学头罩;光线追迹

中图分类号:TN206; O435.1

文献标志码:A

Numerical simulation for optical transmission of aero-optical dome

FAN Zhi-gang, XIAO Hao-su, LI Hui

(Research Centre for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Since the shape and optical properties of a aero-optical dome change as the dome is subjected to aerodynamic heating, the optical transmission of the dome is affected. A finite element analysis model of the dome was established to numerically compute its refractive index distribution based on the theories of thermo-optical and elastic-optical effects. The optical transmission of infrared radiation through the dome was numerically simulated using the ray tracing program based on the fourth order Runge-Kutta algorithm. Two kinds of imaging quality evaluation parameters were presented, wave aberration of the exit pupil and MTF. The research results show that the thermo-optical effect has a much greater influence on optical transmission through the dome compared with the elasto-optical effect and the imaging quality of the dome is seriously affected due to aerodynamic heating. Therefore, the effect exerted by aerodynamic heating on the optical transmission of the dome can not be neglected for improving the guidance precision of missiles.

Key words: aero-optics; infrared optical dome; ray tracing

引言

当带有成像探测系统的高速飞行器在大气层内高空飞行时,其周围形成激波、湍流边界层等复

杂流场结构,当目标的红外光线通过流场时,由于流场密度变化的非均匀性、随机性,飞行器的成像探测系统将接受到失真的目标图像,这种现象被

收稿日期:2010-10-09; 修回日期:2010-11-08

基金项目:航空科学基金实验室类(01)资助项目(20080177003)

作者简介:范志刚(1966—),男,黑龙江哈尔滨人,博士后,哈尔滨工业大学空间光学工程研究中心教授,主要从事气动光学、光电检测方面的研究工作。E-mail:fzg@hit.edu.cn

称为气动光学效应^[1]。

从实验、理论和数值仿真3个方面研究气动热对气动光学流场、窗口和头罩的影响一直是气动光学研究领域的热点^[2-4]。陈澄等研究了气动光学传输效应中层流流场光学传输分量的计算方法,得到了层流流场引起的像偏移和像模糊^[2]。张亚萍等利用侧窗窗口规则有限元网格,研究了气动热环境下光线经过侧窗传输后的光程差^[3]。但是他们的研究方法不适用于气动光学头罩,因为头罩边界不规则。

目前关于气动光学效应的研究大都集中在气动光学头罩窗口材料和高速流场的气动光学效应等方面^[5-6],研究气动光学头罩光传输效应的学者尚不多。本文采用四阶龙格-库塔法编制光线追迹程序仿真了气动光学头罩内的光传输,结合物理光学方法得到了气动光学头罩的像质评价参量,通过分析像质评价参量,将有助于进一步了解气动热对头罩光传输的影响。

1 光学头罩气动热环境分析

气动热环境下光学头罩由于受热不均会产生热应力,原本均匀分布的折射率场会因温度梯度和热应力的存在而发生不均匀分布,不均匀的程度与头罩的温度分布和内部应力有关。为了对气动热环境下头罩中传输的光线进行追迹,就必须对头罩的折射率场进行研究。

1.1 温度对头罩折射率场分布影响

温度对头罩折射率的影响主要体现为热光效应,热光效应是指温度作用直接导致折射率变化。气动热环境下头罩由于与来流剧烈摩擦,其温度在很短的时间内可以上升到几千摄氏度。因为头罩的温度场分布不均匀,所以受热光效应的影响头罩的折射率场分布也是不均匀的。如图1所示,采用不规则网格对头罩折射率场进行划分,设每

个网格内温度和折射率为常量。

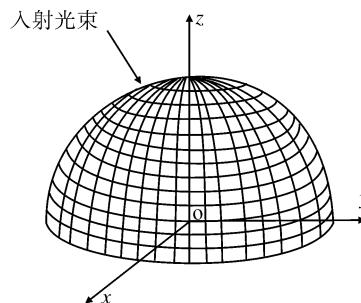


图1 头罩折射率场非规则网格

Fig.1 Irregular refractive index grids of the dome

头罩折射率场非均匀网格中第*i*个网格的折射率 $n_i(\lambda, T)$ 可以表示为^[7-8]

$$n_i(\lambda, T) = n_i(\lambda, T_0) + \frac{\partial n_i(\lambda, T)}{\partial T} \Delta T(x, y, z) \quad (1)$$

式中: $n_i(\lambda, T_0)$ 是第*i*个网格在参考温度 T_0 的折射率; $\frac{\partial n_i(\lambda, T)}{\partial T}$ 是热光系数; ΔT 是第*i*个网格温度变化量。

1.2 应力对头罩折射率场分布影响

应力对头罩折射率的影响主要体现在弹光效应。弹光效应是指应力应变使头罩材料极化率改变,介电系数相应变化,导致折射率变化。头罩由蓝宝石单轴晶体制成,蓝宝石单晶属于三方晶系。主轴坐标系下三方晶系的折射率椭球为旋转椭球体:

$$B_1 x_1^2 + b_2 x_2^2 + B_3 x_3^2 = 1 \quad (2)$$

式中: B_1, B_2 和 B_3 分别是三方晶系逆介电张量的对角线分量,且 B_1, B_2 和 B_3 可分别表示为

$$\begin{aligned} B_1 &= B_2 = n_e^{-2} \\ B_3 &= n_o^{-2} \end{aligned} \quad (3)$$

由三方晶系的弹光系数矩阵可以写出^[9]:

$$\Delta B = \begin{bmatrix} B_1' - B_1 \\ B_2' - B_2 \\ B_3' - B_3 \\ \Delta B_4 \\ \Delta B_5 \\ \Delta B_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} & 0 & 0 \\ P_{12} & P_{11} & P_{13} & -P_{14} & 0 & 0 \\ P_{31} & P_{13} & P_{33} & 0 & 0 & 0 \\ P_{41} & -P_{41} & 0 & P_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{44} & P_{41} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{14} & 0.5(P_{11} - P_{12}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $P_{11}, P_{12}, P_{13}, P_{14}, P_{31}, P_{33}, P_{41}$ 和 P_{44} 分别是三方晶系的应变弹光系数; $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}$ 和 γ_{xy} 分别是沿不同主轴方向的应变。

综合(2)式~(4)式可知,当蓝宝石单晶受到应力应变作用时,折射率椭球不再是旋转椭球,且主轴方向发生改变,体不再是单轴晶体,而是变

为双轴晶体,为了简化,只考虑 3 个主轴方向的折射率的变化,变化后的 3 个主轴方向的折射率 n_1' , n_2' 和 n_3' 分别为

$$\begin{aligned} n_1' &= (B_1')^{-1/2} = (n_e^{-2} + P_{11}\epsilon_x + P_{12}\epsilon_y + P_{13}\epsilon_z + P_{14}\gamma_{yz})^{-1/2} \approx n_e - 0.5n_e^3(P_{11}\epsilon_x + P_{12}\epsilon_y + P_{13}\epsilon_z + P_{14}\gamma_{yz}) \\ n_2' &= (B_2')^{-1/2} = (n_e^{-2} + P_{12}\epsilon_x + P_{11}\epsilon_y + P_{13}\epsilon_z - P_{14}\gamma_{yz})^{-1/2} \approx n_e - 0.5n_e^3(P_{12}\epsilon_x + P_{11}\epsilon_y + P_{13}\epsilon_z - P_{14}\gamma_{yz}) \\ n_3' &= (B_3')^{-1/2} = (n_o^{-2} + P_{13}\epsilon_x + P_{13}\epsilon_y + P_{33}\epsilon_z)^{-1/2} \approx n_o - 0.5n_o^3(P_{31}\epsilon_x + P_{13}\epsilon_y + P_{33}\epsilon_z) \end{aligned} \quad (5)$$

2 头罩光传输机理分析

采用四阶-龙格库塔法编制光线追迹程序对头罩光传输进行了仿真。如图 2 所示,由于头罩折射率网格划分是不规则的,在三维离散空间内,已知距离光线轨迹点 $P(x, y, z)$ 最近的折射率网格 8 个节点的折射率 $n_i (i=1, 2, \dots, 8)$, 要求解网格内光线轨迹点 $P(x, y, z)$ 的折射率 n_p , 设点 P 到 8 个节点 (x_i, y_i, z_i) 的距离为 d_i , 采用距离加权平均插值方法可表示为^[10]

$$n_p = \frac{\sum_{i=1}^8 (n_i \prod_{j=1, j \neq i}^8 d_j)}{\sum_{i=1}^8 (\prod_{j=1, j \neq i}^8 d_j)} \quad (6)$$

$$d_i = ((x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2)^{1/2}$$

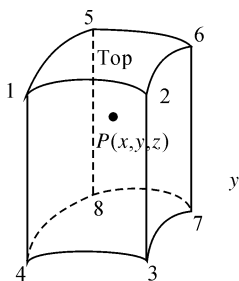


图 2 网格插值示意图

Fig. 2 Schematic of grid interpolation

2.1 最小二乘法拟合头罩形变表面

头罩表面存在形变,而研究过程中只能得到头罩表面离散点坐标值,因此在对头罩表面传输的光线进行追迹时必须对头罩表面进行曲面拟合。图 3 说明了在划分网格之后,在头罩表面进行光线追迹的情况。

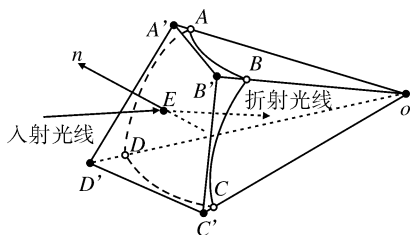


图 3 头罩表面光线追迹示意图

Fig. 3 Schematic of ray tracing on dome surface

由图 3 所示, A' , B' , C' 和 D' 点表示入射光线与形变头罩表面交点 E 所在的表面网格的 4 个节点; A , B , C 和 D 表示未发生形变时该表面网格对应的 4 个节点;根据 A' , B' , C' 和 D' 4 个变形点的坐标,采用最小二乘法可拟合得到经过这 4 个变形点的平面的法向量 n , 然后根据菲涅尔定律可求得折射光线矢量。

2.2 头罩光学评价函数

由光线追迹得到的光程 OPD_i 为

$$OPD_i = \sum_i n_i \Delta l \quad (7)$$

假设主光线的光程为 OPD_o , 则整个出瞳的波像差为

$$W(x, y) = \sum_i \frac{2\pi}{\lambda} (OPD_i - OPD_o) \quad (8)$$

光瞳函数为^[2]

$$A(x, y) = a(x, y) \exp[jW(x, y)] \quad (9)$$

式中: $a(x, y)$ 是波面的振幅分布; $\exp[jW(x, y)]$ 是波面的相位分布

高速飞行器红外成像和探测制导系统对目标成像一般满足远场近似条件,根据惠更斯原理,瞳函数为 $A(x, y)$ 的波面,在像面上形成的振幅分布为^[2]

$$U(x', y') = \iint A(x, y) \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda f} (xx' + yy')\right) \times dx dy \quad (10)$$

由上式可知,像面的振幅分布为光瞳函数的傅里叶变换。因光强正比于振幅的平方,所以点扩散函数(PSF)为^[2]

$$PSF_M(x', y') = |U(x', y')|^2 \quad (11)$$

对点扩散函数进行傅里叶变换可得头罩光学传递函数(OTF),取光学传递函数的模可以得到头罩光学系统调制传递函数(MTF)。

3 头罩光传输数值仿真

3.1 头罩折射率场分析

头罩材料采用蓝宝石单晶,其光学特性参数为:

常温常态 o 光折射率 $n_o=1.6770$ (波长 $4\text{ }\mu\text{m}$),e 光折射率 $n_e=1.6670$ (波长 $4\text{ }\mu\text{m}$),o 光热光系数 $dn_o/dT=1.175\times 10^{-5}\text{ K}^{-1}$,e 光热光系数 $dn_e/dT=1.240\times 10^{-5}\text{ K}^{-1}$,弹光系数 $P_{11}=0.2,P_{12}=0.078,P_{14}=0.03,P_{33}=0.252,P_{41}=0.02,P_{44}=0.09$ 。物理特性参数为:导热系数 $K_{\text{para}}=51\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, $K_{\text{perp}}=28\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (para 表示沿光轴方向,perp 表示垂直于光轴方向);头罩内表面对流系数 $h=10\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$;杨氏模量 $E_{\text{para}}=335\text{ GPa},E_{\text{perp}}=460\text{ GPa}$;密度 $\rho=3\text{ }970\text{ kg/m}^3$;比热容 $P=419\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$;泊松比 $\gamma=0.25$;剪切模量 $G=148.1\text{ GPa}$;热膨胀系数 $\alpha_{\text{para}}=6.5\times 10^{-6}\text{ K}^{-1},\alpha_{\text{perp}}=$

$5.1\times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$;头罩外侧气动热流分布不均匀,且气动热流密度的变化范围为 $1.20\times 10^5\text{ W/m}^2\sim 1.01\times 10^3\text{ W/m}^2$;头罩外侧气压约为 1 MPa ,内侧气压约为 0.1 MPa ,头罩初始温度 $T_0=300\text{ K}$,应力分析参考温度 $T_{\text{ref}}=300\text{ K}$,头罩工作时间 15 s ,时间步长 0.5 s 。采用 Ansys 软件进行直接耦合分析,得到头罩有限元模型节点温度、热应力和热应变,根据热光效应和弹光效应原理,计算得到了头罩的折射率场分布。

以头罩外表面中心点折射率随工作时间的改变量为例,分析热光效应和弹光效应对头罩折射率场分布的影响。不同工作时刻头罩外表面中心点折射率改变量如表 1 所示。

表 1 不同工作时刻头罩外表面中心点折射率改变量

Tab 1 Refractive index variations of the center on the outside surface of the dome at different working times

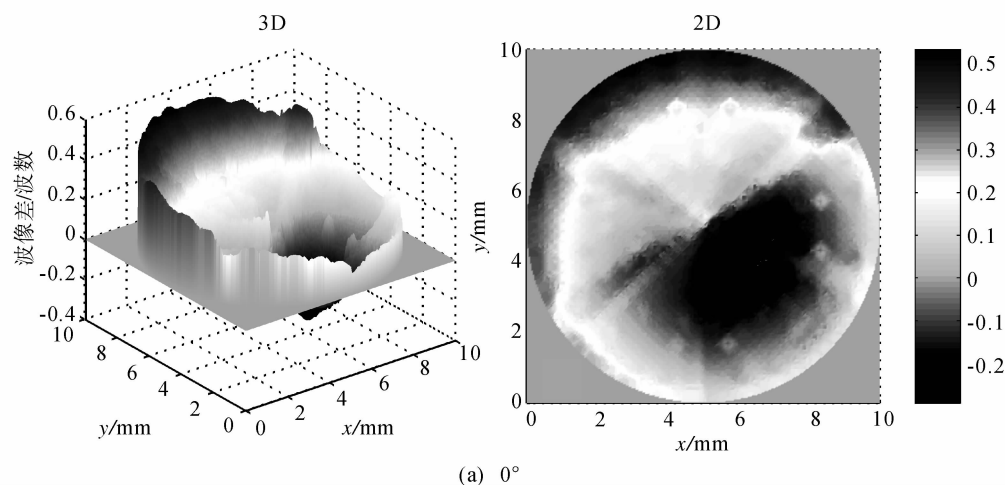
时间/s	3	6	9	12	15
Δn_o	4.53×10^{-5}	1.73×10^{-4}	3.83×10^{-4}	6.76×10^{-4}	1.05×10^{-3}
Δn_e	4.78×10^{-5}	1.83×10^{-4}	4.05×10^{-4}	7.13×10^{-4}	1.11×10^{-3}
Δn_2	2.94×10^{-6}	7.47×10^{-6}	1.34×10^{-5}	2.13×10^{-5}	3.11×10^{-5}
Δn_3	7.91×10^{-7}	-1.13×10^{-6}	-5.47×10^{-6}	-1.24×10^{-5}	-2.20×10^{-5}
Δn_1	6.31×10^{-7}	2.30×10^{-6}	4.86×10^{-6}	8.47×10^{-6}	1.33×10^{-5}

由表 1 可知,在 15 s 的工作时间内,热光效应使得头罩外表面中心点 o 光折射率改变量 Δn_o 为 1.05×10^{-3} ,e 光折射率的改变量 Δn_e 为 1.11×10^{-3} ;弹光效应使得头罩外表面中心点三个主轴方向的折射率改变量 Δn_1 , Δn_2 和 Δn_3 分别为 1.33×10^{-5} , 3.11×10^{-5} 和 -2.20×10^{-5} 。弹光效应引起的主轴方向折射率改变量最大值(Δn_2)仅为热光效应引起的折射率改变量最小值(Δn_e)的 2.96% ,气动热环境下热光效应对头罩折射率

场的影响远比弹光效应大,因此热光效应对头罩光传输的影响也远比弹光效应大。

3.1 头罩光传输分析

设头罩光学系统入瞳直径 D 为 30 mm ,出瞳直径 D' 为 10 mm ,光学系统焦距 f 为 100 mm ,工作波段 λ 为 $4\text{ }\mu\text{m}$,探测器像元长与宽均为 $50\text{ }\mu\text{m}$ 。入射角分别为 0° , 1.27° 和 1.8° 时, 15 s 后气动光学头罩出射畸变波面的波像差和调制传递函数分别如图 4 和图 5 所示。



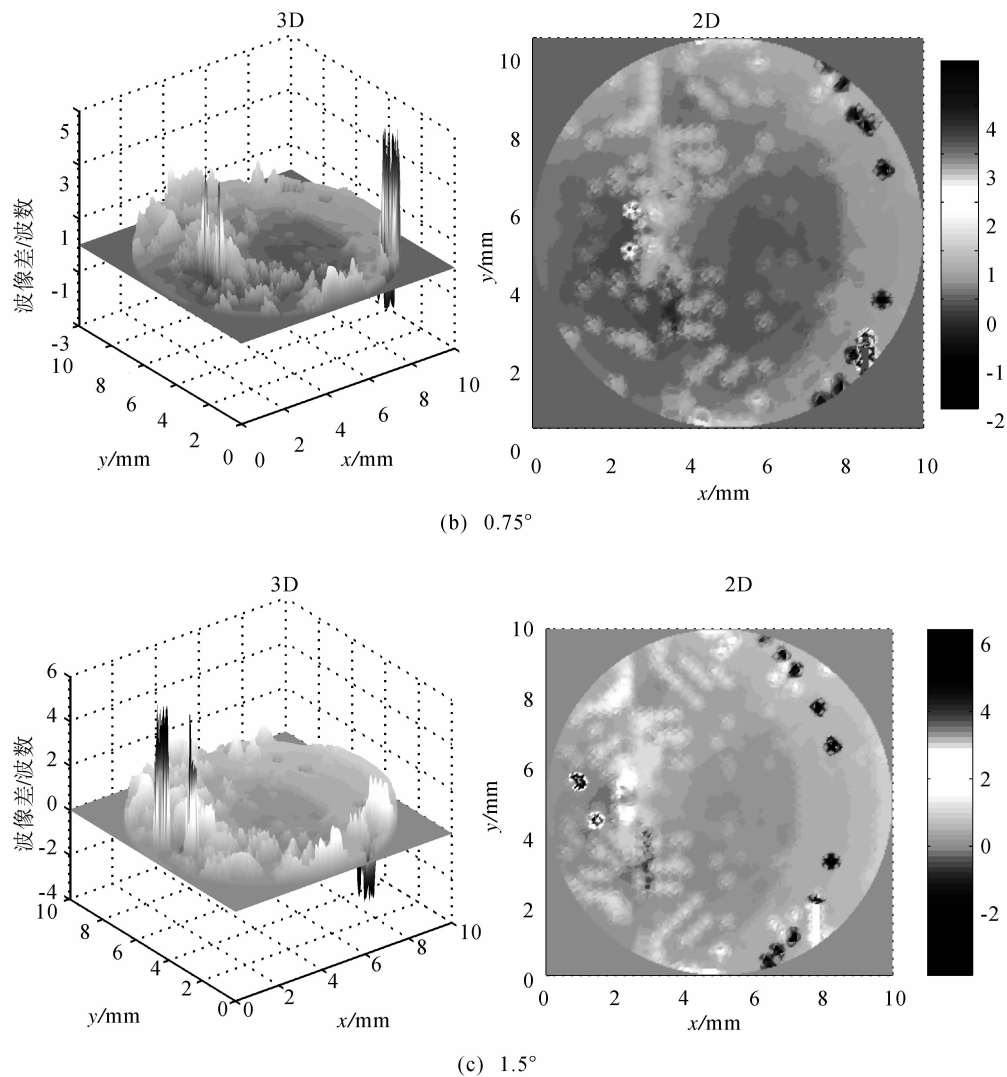


图 4 气动光学头罩在不同入射角度下出射波面波像差

Fig. 4 Wave aberration results of the aero-optical dome at different incident angles

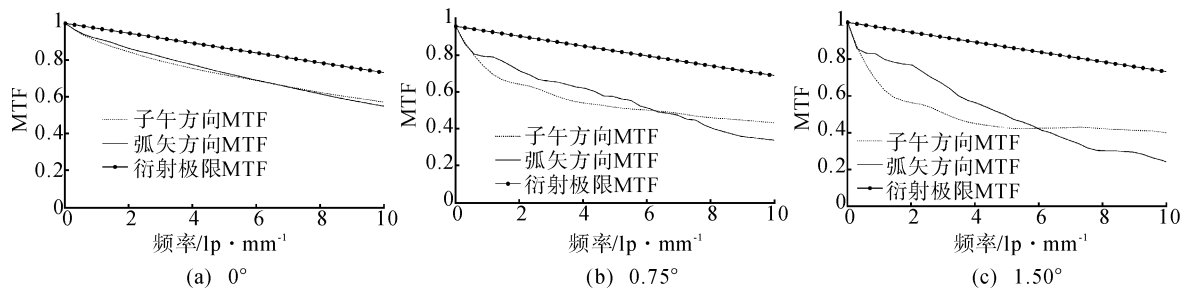


图 5 气动光学头罩在不同入射角度下的调制传递函数

Fig. 5 MTF results of the aero-optical dome at different incident angles

由图 4 可知,随入射角度增加,出射波面的波像差不断增加,调整头罩内探测器的位置以使探测器接收更多近轴光线,可以有效地减少出射波面的波像差^[11];出射波面波像差在出瞳边缘出现了不连续,这可能与头罩折射率网格密度有关。

对于头罩折射率梯度较大的区域内的光线追迹,头罩折射率网格密度可能不够。由图 5 可知,与衍射极限情况下的调制传递函数相比,气动光学头罩的调制传递函数出现了极大地下降。因此气动光学头罩的成像质量受到气动热效应的影响而下

降,为了提高高速飞行器的制导精度,就不能忽视气动光学头罩的光传输效应。

4 结论

采用四阶龙格-库塔法编制光线追迹程序对气动光学头罩内的光传输进行了仿真。根据光线追迹结果,结合物理光学方法得到了不同入射角度下气动光学头罩出射畸变波面波像差和调制传递函数等像质评价参量。分析气动热环境下头罩光学系统像质评价参量可深入了解气动热对头罩光学系统成像质量的影响机理,最终将有助于进一步提高高速飞行器的制导精度。

由于本文中气动光学头罩光传输数值仿真模型是在简化条件下得出的,和实际工程应用相比还存在一定的差距。实际工程条件:如气体电离、高温、不同化学组分以及真实气体等条件下的大涡模拟方程^[3],光波与流场和头罩的相互作用理论还有待于深入研究,数值仿真模型还需要进一步完善。

参考文献:

- [1] 殷兴良. 气动光学原理[M]. 北京:中国宇航出版社,2003.
YIN Xing-liang. Principle of aero-optical[M]. Beijing:China Astronautic Publishing House,2003. (in Chinese)
- [2] 陈澄,费锦东. 侧窗头罩高速层流流场光学传输效应数值模拟[J]. 红外与激光工程,2005,34(5):548-552.
CHEN Cheng, FEI Jin-dong. Numerical simulation on the optical transmission distortions throughout the laminar flow field[J]. Infrared and Laser Engineering, 2005,34(5):548-552. (in Chinese with an English abstract)
- [3] 范志刚,张亚萍,裴扬威,等. 气动热环境下高速飞行器光学窗口光传输数值仿真研究[J]. 红外与毫米波学报,2007,26(5):396-399
FAN Zhi-gang, ZHANG Ya-ping, PEI Yang-wei, et al. Numerical simulation of optical transmission through high speed aircraft optical window in aerodynamic thermal environment[J]. J. Infrared Millim Waves, 2007, 26(5):396-399. (in Chinese with an English abstract)
- [4] 范志刚,肖昊苏,高豫强. 气动热环境下高速飞行器光学头罩特性分析[J]. 应用光学,2009,30(3):361-365.
FAN Zhi-gang, XIAO Hao-su, GAO Yu-qiang. Characteristics analysis of high-speed aircraft optical dome in aerodynamic heating environment[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(3): 361-365. (in Chinese with an English abstract)
- [5] 赵剡,张洪酥. 基于光学传递函数的气动光学效应计算方法[J]. 红外与激光工程,2008,37(s):668-672.
ZHAO Yan, ZHANG Hao-su. Aero-optical effects calculation based on the optical transfer function[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(s):668-672. (in Chinese with an English abstract)
- [6] 张义广,杨军,李小丹. 光学整流罩的热学性能评价工程试验[J]. 红外与激光工程,2008,37(s):556-559.
ZHANG Yi-guang, YANG Jun, LI Xiao-dan. Thermal property assessment experiment of the optic dome[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(s):556-559. (in Chinese with an English abstract)
- [7] 罗传伟,焦明印. 光学系统折射率温度效应的模拟计算[J]. 应用光学,2008,29(2):235-238.
LUO Chuan-wei, JIAO Ming-yin. Simulated calculation for effect of temperature on refractive index in optical system[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(2):235-238. (in Chinese with an English abstract)
- [8] 焦明印. 光学系统实现热补偿的通用条件[J]. 应用光学,2006,27(3):195-197.
JIAO Ming-yin. General conditions for thermal compensation in optical system[J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(3):195-197. (in Chinese with an English abstract)
- [9] 邢进华,钱斌,冯金福,等. 白光干涉技术测量晶体的弹光效应[J]. 激光杂志,2004,25(3):32-33.
XING Jin-hua, QIAN Bin, FENG Jin-fu, et al. Measurement of the elasto-optical effect of crystal using white light interferometer[J]. Laser Journal, 2004, 25(3): 32-33. (in Chinese with an English abstract)
- [10] 冯定华,潘沙,田正雨,等. 任意折射率的三维离散空间光线追迹方法研究[J]. 光学学报,2010,30(3):696-701.
FENG Ding-hua, PAN Sha, TIAN Zheng-yu, et al. Research on ray tracing method in 3D discrete space with discretionary refraction index[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(3): 696-701. (in Chinese with an English abstract)
- [11] WANG T, ZHAO Y, XU D, et al. Numerical study of evaluating the optical quality of supersonic flow fields[J]. Applied Optics, 2007, 46(23): 5545-5551.