

温度和应力动态变化对球形头罩的光传输影响

黄选平, 许东, 包实秋, 谭晓颂

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要: 高速飞行器在大气层中飞行, 光学头罩与来流相互作用, 其温度和应力应变在飞行过程中会动态变化, 引起头罩材料折射率的改变, 进而影响光线传输。文中在对飞行过程中球形头罩温度和应力应变动态模拟的基础上, 计算随时间变化的折射率场, 并利用光线追迹方法计算光线通过头罩出射面的光程差, 通过光学评价方法以及图像退化仿真直观得出其对头罩光传输的影响。结果表明, 头罩温度和应变变化对光传输的影响较大, 并且随着飞行速度的提高变得更为严重。

关键词: 气动光学; 光线追迹; 折射率场; 球形头罩

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)06-1818-05

Optical transmission effects of spherical dome by temperature and stress dynamic changing

Huang Xuanping, Xu Dong, Bao Shiqiu, Tan Xiaosong

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: While high-speed aircraft are flying in the atmosphere, its optical-hood frictions with stream. The dome's temperature and strain would change with the flight time going, which influences optical transmission because of the variation of the refractive index. The optical dome temperatures and stress-strain conditions varying in the guidance process for different time periods were analyzed. By the method of ray tracing, OPD was calculated, and the result of optical transmission effect through optical image quality and image quality degradation was given. And the result shows that both temperature and speed of aircraft can influence optical transmission heavily.

Key words: aero-optics; ray tracing; refractive index field; spherical dome

收稿日期: 2014-10-05; 修订日期: 2014-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(61378077)

作者简介: 黄选平(1988-), 女, 硕士生, 主要从事气动光学头罩与流场光传输仿真方面的研究。Email: hxp_study@sina.com

导师简介: 许东(1973-), 男, 副教授, 博士, 主要从事成像制导、气动光学、模式识别方面的研究。

0 引言

带有光学成像探测制导系统的飞行器在大气层内高速飞行,其光学头罩与来流之间相互作用,头罩温度急剧升高并产生应力应变,引起严重的气动光学效应^[1]。在此过程中,入射光线受到头罩非均匀温度和应力应变场的影响,出射波面发生畸变,对成像探测系统造成光传输干扰,使目标图像的出现模糊现象,严重影响探测结果。

目前,对于光学头罩光传输的研究主要是围绕光学头罩受热后的材料变化分析上^[2-3]。对于头罩温度和应力应变动态变化对光传输的影响问题研究较少。文中针对这一问题,在头罩温度和应力应变的数值模拟结果的基础上,通过分析整个飞行过程不同时段球形头罩温度和应力等参数的变化情况,采用光线追迹方法,对头罩的光传输影响规律进行了分析。

1 光学头罩流-热-固耦合分析

飞行器在高速飞行时,头罩的气动加热为持续的非稳态过程。在数值模拟中,一方面,光学头罩的结构和材料的热物性,将直接影响流场的演化过程;另一方面,高温高速流场也直接作用于光学窗口,两者耦合作用,使窗口的温度场和应力场发生变化,产生应力应变^[4]。

为保证流场同头罩之间的气动对流换热过程,头罩内部传热主要以辐射、传导和对流方式传递。在直角坐标系中,温度分布的基本方程为:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_r \quad (1)$$

式中: ρ 为头罩材料密度; C_p 为头罩材料比热容; k_x 、 k_y 、 k_z 分别为材料在方向 x 、 y 、 z 的热导率; $Q_r = q_{rw} + q_{re} + q_{rc}$, q_{rw} 为材料表面对外环流的辐射热; q_{re} 为周围环流温度对头罩辐射热; q_{rc} 为头罩内部的辐射热。

在飞行过程中,头罩与来流摩擦生热并受到气流的压力,温度的变化引起形状的变化,产生应变:

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon\}_E + \{\varepsilon\}_{\Delta T} \quad (2)$$

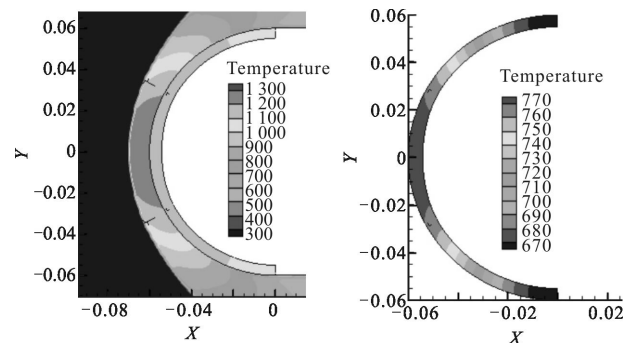
式中: $\{\varepsilon\}$ 为总的应变,由受力与热膨胀两部分组成; $\{\varepsilon\}_E$ 为弹性应变; $\{\varepsilon\}_{\Delta T}$ 为热应变。弹性应变与应力之间满足:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\}_E \quad (3)$$

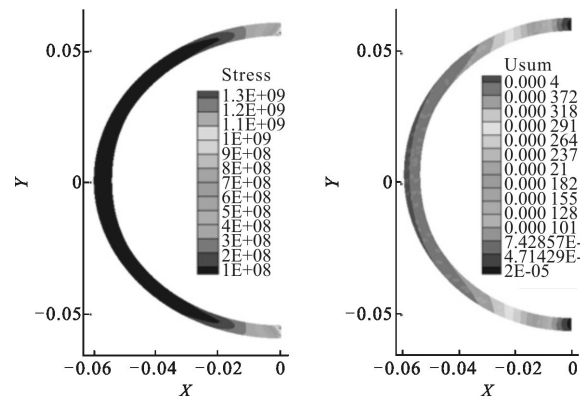
式中: $[D]$ 为关于三维空间的弹性系数阵列。因此可得到应力与总的应变之间的关系^[5]:

$$\{\sigma\} = [D](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon\}_{\Delta T}) \quad (4)$$

文中利用 ANSYS 软件对高超声速飞行器的球形头罩进行了流热固耦合分析仿真,所得结果如图1所示。从图中可以看出,热量自发的由温度高的外部向内部传递,直至达到最终的稳定状态。在飞行过程中,头罩的温度分布并不均匀,且呈现中间高四周低。由于头罩的安装方式以及来流的压力作用,头罩的应力主要集中在边缘,顶部则较小。头罩的形变分布于温度分布相一致。



(a) 流场与头罩温度耦合情况 (b) 头罩的温度分布
(a) Temperature of coupled flow field and dome (b) Dome temperature distribution



(c) 头罩的应力分布 (d) 头罩的形变分布
(c) Dome stress distribution (d) Dome deformation distribution

图1 制导过程中头罩的温度、应力以及形变分布情况

Fig.1 Dome temperature, stress and strain distribution during guidance

2 头罩中的光传输过程

2.1 头罩的折射率场计算

气动热环境下的光学窗口由于受到非均匀的温

度场和应力场的影响,材料的密度和极化率发生改变,进而引起折射率的变化。主要表现为热光效应和弹光效应^[6]。在温度和应力应变作用下,光学头罩的折射率可以描述为:

$$n=n_0+\frac{\partial n}{\partial T}\Delta T+\frac{\partial n}{\partial \sigma}\Delta \sigma \quad (5)$$

式中: n_0 为窗口材料的标准折射率; $\frac{\partial n}{\partial T}$ 为热光系数; ΔT 为窗口温度的变化量; $\frac{\partial n}{\partial \sigma}$ 为弹光系数矩阵; $\Delta \sigma$ 为应力的变化量。

公式(5)中的第二项即由温度变化引起的折射率改变,随着温度上升,窗口材料的密度随着膨胀而减小,极化率随着电子跃迁的频率上升而增加,此过程称为热光效应。第三项即由应力应变的作用引起窗口材料的光学性质改变,主要是指折射率发生变化,此过程称为弹光效应。

2.2 光线追迹法

头罩由于受到非均匀温度和应力应变场的影响,其折射率情况复杂且呈不规则分布,无法求得光线在头罩中沿曲线传播的解析解。根据这一情况,文中通过数值方法插值计算光线传播方程进行光线追迹^[7]:

$$\frac{d}{ds}\left(n\frac{dr}{ds}\right)=\nabla n \quad (6)$$

式中: s 为光线传播路径上的弧长; r 为光线矢径; n 为折射率; ∇n 为折射率梯度。

求解光线方程常用的方法有:欧拉法,泰勒法,Runge-Kutta法。其中Runge-Kutta法的精度较高,运算量较少^[8]。文中采用经典四阶Runge-Kutta法作为追踪方法。

对公式(6)引入外推参量 $dt=ds/n$,将传播方程写为:

$$\frac{d^2r}{dt^2}=\frac{1}{2}\nabla n^2 \quad (7)$$

进一步可以转化为一阶方程组处理:

$$\begin{cases} \frac{dr}{dt}=T \\ \frac{dT}{dt}=ng\nabla n \end{cases} \quad (8)$$

运用经典Runge-Kutta法,转化为三维的形式:

$$\begin{cases} r_1=r_0+\frac{t}{6}(K_1+2K_2+2K_3+K_4) \\ T_1=T_0+\frac{t}{6}(L_1+2L_2+2L_3+L_4) \end{cases} \quad (9)$$

式中: K 与 L 为关于折射率与折射率梯度的矩阵。通过给定初始位置 r_0 和光线方向 T_0 可以计算得出该步末端的位置 r_1 和方向 T_1 ,并以此作为下一步追迹的初始条件,逐步跟踪直至完成整个过程。

2.3 光学评价函数

利用光线追迹法可以获得头罩出射面的光程差 OPD_i :

$$OPD_i=\sum_i(n_i l_i-OPD_0) \quad (10)$$

式中: n_i 为每一步的折射率; l_i 为可变步长; OPD_0 为主光线的光程。

相应的波相差 $\phi_i(x,y)$ 可表示为:

$$\phi_i(x,y)=\frac{2\pi}{\lambda}OPD_i \quad (11)$$

光源发出的球面波经光学系统后在出瞳处的光瞳函数表示为:

$$P(x,y)=\begin{cases} A(x,y)e^{j\phi(x,y)} & \text{光瞳内} \\ 0 & \text{光瞳外} \end{cases} \quad (12)$$

假设出瞳面光能均匀分布,并且方便计算,取 $A(x,y)\equiv 1$,点扩散函数可表示为:

$$PSF(x,y)=\left|\int\int P(x',y')e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(xx'+yy')}dx'dy'\right|^2 \quad (13)$$

通过点扩散函数,能够直观地得出物空间对应的像空间分布^[9]。

3 仿真结果及分析

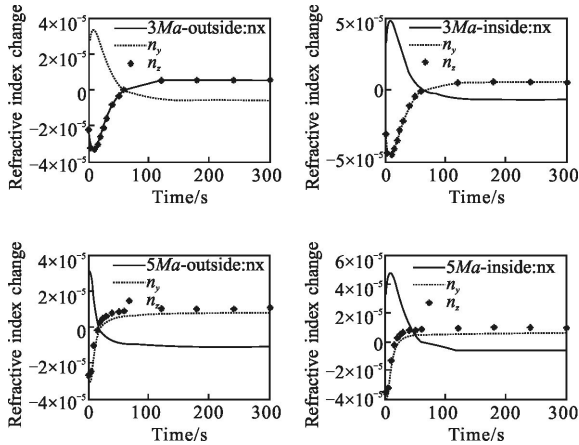
选取巡航状态下飞行器飞行高度为20 km,攻角为 0° ,头罩结构为半球形,头罩厚度为5 mm,舱内环境温度为318 K,飞行速度分别为3 Ma和5 Ma的算例。计算中所用到的材料物理特性参数在表1中给出。

表1 头罩各项光学特性参数及输入参数

Tab.1 Optical parameters of dome and some input parameters

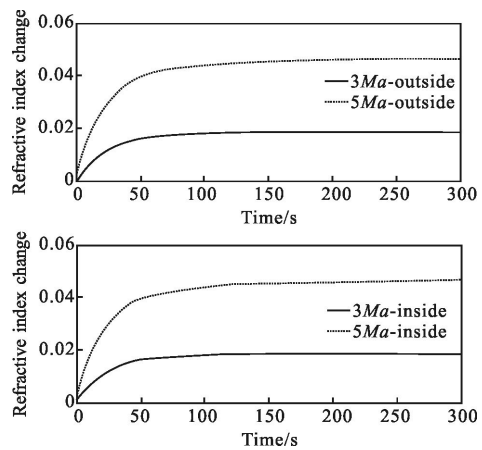
Material	Initial refractive index	Elastic-optic constant	Thermo-optic constant	Elastic modulus
ZnS	2.3505	$P_{11}=0.091$	$4.98\times 10^{-5}/^\circ\text{C}$	82.5 GPa
Poisson ratio	Wave length	$P_{12}=-0.01$	Shear modulus	Time
0.32	8 μm	$P_{44}=0.75$	31.2 GPa	300 s

图2给出了头罩内外侧中心点在巡航状态下的不同时刻由弹光效应和热光效应引起的折射率的变化情况。可见弹光效应对主轴方向折射率的改变量不足热光效应引起的改变量的1%。



(a) 弹光效应引起的三个主轴方向折射率变化

(a) Refractive index change of primary axis caused by elastic light effect



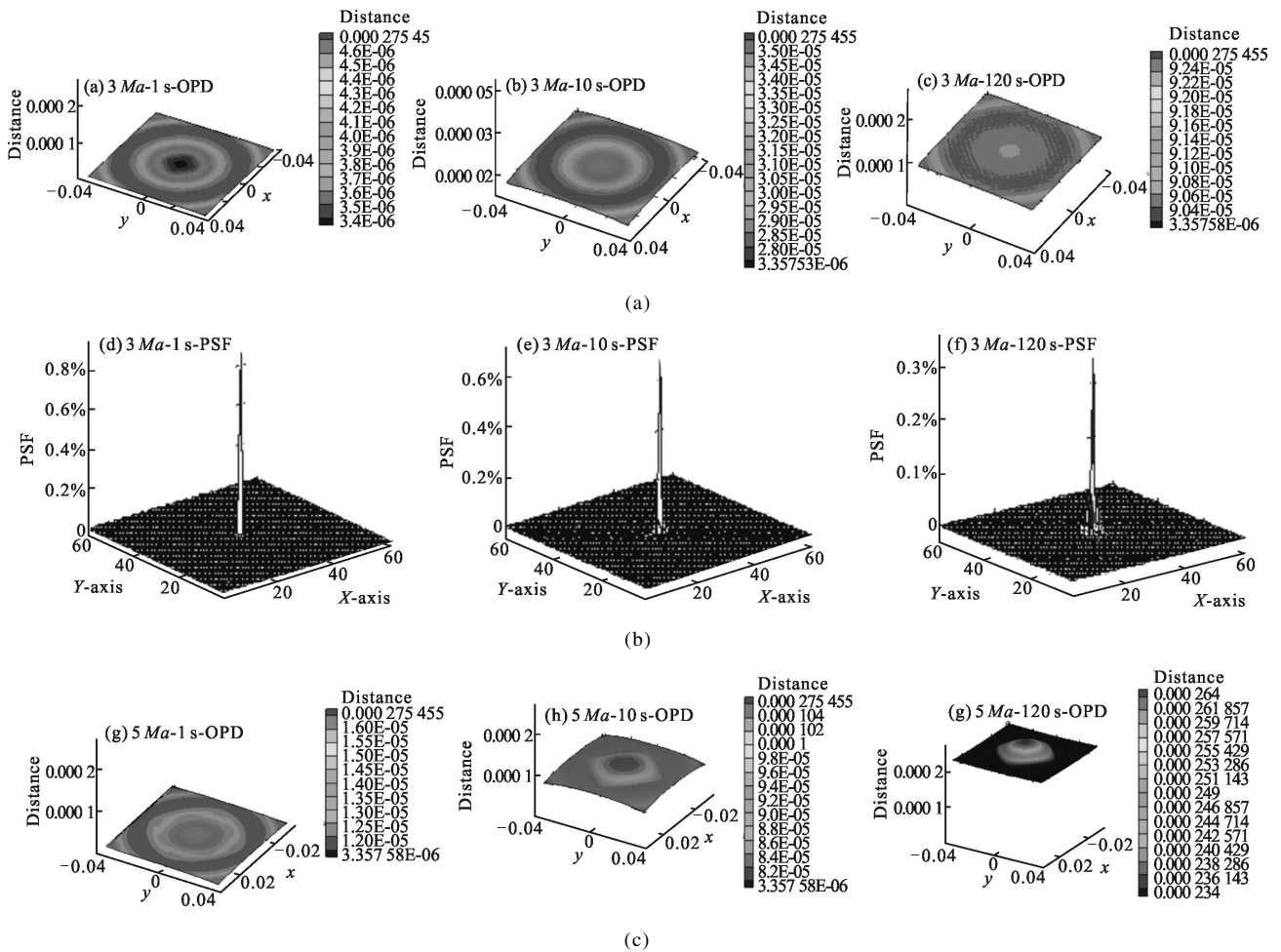
(b) 热光效应引起的折射率变化

(b) Refractive index change caused by thermo-optic effect

图2 弹光效应与热光效应引起的折射率变化

Fig.2 Refractive index change caused by elastic light effect and thermo-optic effect

利用光线追迹法可以得到头罩内表面出射光线的光程差,进而得到由头罩引起的点扩散函数,结果如图3所示。由图可知,光程差随着飞行时间和飞行



(c)

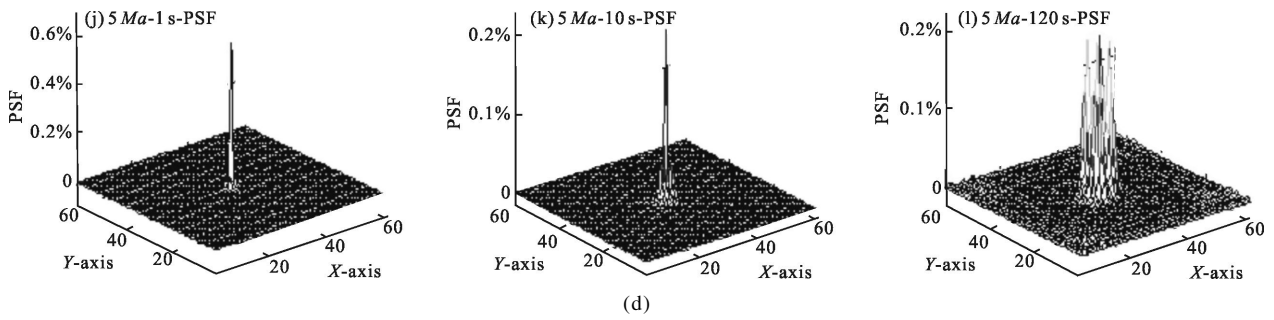
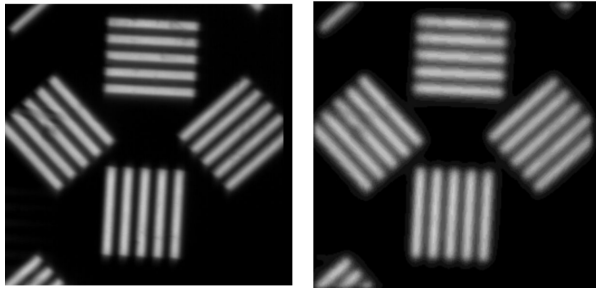


图3 不同飞行条件下气动光学头罩的光程差和点扩散函数情况

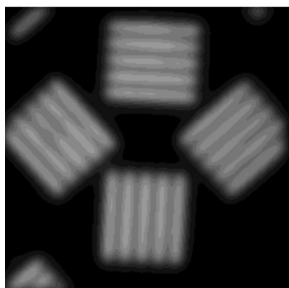
Fig.3 OPD and the PSF of aero-optical hood under different flight conditions

速度增加而增大,点扩散函数会逐渐出现次峰,表明其对成像影响逐渐增大。

图4给出了相应的图像退化仿真结果。当飞行速度为 $3Ma$ 时,图像已经出现模糊,当飞行速度达到 $5Ma$ 时,靶标形状已经难以辨认,说明畸变较大。



(a) 未发生畸变的靶标图 (b) $3Ma-120s$ 发生畸变的靶标图
(a) Original picture without distortion (b) Distorted picture in 120 s with $3Ma$



(c) $5Ma-120s$ 发生畸变的靶标图
(c) Distorted picture in 120 s with $5Ma$

图4 不同飞行速度下图像退化畸变图

Fig.4 Distortion image degradation under different flight speed

4 结论

文中分析了高速飞行器在飞行过程中光学头罩的温度和应力应变动态变化对光传输的影响问题。根据仿真分析结果可得到以下结论:

(1) 随着飞行时间增加,头罩的温度和应力应变产生的光传输畸变逐渐增加。

(2) 随着飞行速度增大,头罩的温度急剧上升,温度对折射率的影响进一步加大,进而产生更为严重的光传输畸变。

文中的研究结果对分析高超声速飞行器光学头罩气动光学效应及其校正问题具有重要的意义。

参考文献:

- [1] Yin Xieliang. Pneumatic Optics [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2003. (in Chinese)
- [2] Fan Zhigang, Xiao Haosu, Li Hui. Numerical simulation for optical transmission of aero-optical dome [J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(2): 189-194. (in Chinese)
- [3] Fan Zhigang, Xiao Haosu, Gao Yuqiang. Characteristics analysis of high-speed aircraft optical dome in aerodynamic heating environment[J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30(3): 361-365. (in Chinese)
- [4] Cruseiel G T, Hull L D. Theoretical method for calculating aerodynamics characteristics of spherically blunted cones[C]// AIAA, 1968: 68-674.
- [5] Zhang Zhenjun, Cao Zhiguo, Wang Wenwu. Effects of hypersonic vehicle's optical dome on infrared imaging [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(9): 1-7. (in Chinese)
- [6] Liu Li, Meng Weihua, Pan Guoqing. Modeling and analysis of infrared radiation from the dome flying at supersonic speed [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1193-1197. (in Chinese)
- [7] Feng Dinghua, Pan Sha, Tian Zhengyu, 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)
- [8] Yan Qingjin. Numerical Analysis [M]. Beijing: Beihang University Press, 2006. (in Chinese)
- [9] Fan Zhigang, Xiao Haosu, Li Hui, et al. Analysis of optical transmission through high speed aircraft optical dome in aerodynamic thermal environment[J]. *Aero Weaponry*, 2010, 5: 59-64. (in Chinese)