

热环境条件下红外窗口气动光学传输效应实验研究

马昊军, 王国林, 陈德江, 张 军, 刘丽萍, 罗 杰

(中国空气动力研究与发展中心超高速空气动力研究所, 四川 绵阳 621000)

摘 要: 红外窗口导致的气动光学效应将对高速导弹的红外成像制导产生重要影响, 文中在等离子体射流中对二维尖劈模型中的石英窗口进行加热, 测量了一定射流条件下红外窗口表面温度分布和热流分布; 利用径向剪切干涉技术, 测量了气动加热条件下红外窗口引起的传输光束波面相位的变化, 获得了点扩散函数和斯特列尔比的变化。实验结果表明: 热环境下的红外窗口导致传输光束的远场强度发生衰减, 能量分布发生扩散, 光束的会聚性显著降低。

关键词: 气动光学; 波面相位; 点扩散函数; 斯特列尔比

中图分类号: V411; TN211 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0904001

Experimental study on aero-optical transmission effect of infrared window in aerothermal environment

Ma Haojun, Wang Guolin, Chen Dejiang, Zhang Jun, Liu Liping, Luo Jie

(Hypervelocity Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: Aero-optical effect caused by infrared window in aerothermal environment has a serious effect on infrared imaging detector of high-speed missile. Experimental study on this effect which was carried through in plasma wind tunnel was represented in the paper. The surface temperature and heat flux of infrared window were measured in the experiment. Wavefront phase of light through the infrared window was measured with a radial shearing interferometer. The changes of point spread function and Strehl ratio with duration of heat were obtained. It is validated that infrared windows result in intensity attenuation and energy distribution disperse for light beam in far-field.

Key words: aero-optics; wavefront phase; point spread function; Strehl ratio

收稿日期: 2017-01-10; 修订日期: 2017-02-20

基金项目: 国防武器装备预研基金(514130303)

作者简介: 马昊军(1982-), 男, 助理研究员, 主要从事气动热与热防护试验技术方面的研究。Email: mahaojun82@163.com

0 引言

红外成像制导技术是导弹精确制导的重要发展方向,而气动光学效应是制约大气层内高速、超高速导弹采用红外成像制导技术的关键。所谓“气动光学效应”,是指高速导弹在大气层内飞行时,其头罩与高速气流之间发生剧烈的相互作用,使红外探测窗口周围的气体密度、温度、压力甚至化学组分均发生较大的变化,对导弹的成像探测系统形成热辐射干扰和图像传输干扰,导致目标图像偏移、抖动、模糊等,干扰严重时会使探测器无法跟踪目标而失去作用的一种机理^[1-2]。气动光学效应是一个非常复杂的物理过程,在忽略自由大气湍流脉动影响的情况下,气动光学效应主要是由飞行器头部的弓形激波、激波与红外窗口之间的高温湍流气体以及红外窗口三方面的因素造成的。

在气动光学效应中,红外窗口的热辐射效应和光学传输效应是气动光学效应的重要组成部分。红外窗口的光学传输效应是指:当光束穿过热环境下红外窗口时,由于窗口材料在热环境下发生变形,并且其内部的应力变化和温度梯度导致折射率的梯度分布,使得光束的相位发生畸变,光束强度衰减,能量发生扩散,导致探测器焦平面上的成像发生变化^[3]。

针对红外窗口引起的光学传输效应, Bob Villett 等人利用静态加热技术对红外窗口进行加热,利用光束阵列测量了热变形之后的红外窗口前后表面不同位置对光束的反射,及变形之后的红外窗口导致的成像的失真和位移^[4];美国阿诺德工程研究中心(AEDC)在高超音速风洞 C 中建立了测试特定条件下红外窗口应力引起的光学畸变测试技术,并和理论计算结果进行了对比^[5];G. W. Sutton 对红外窗口热环境下的变形以及由此引起的瞄准误差进行了理论上的分析^[6],并分析了未冷却的窗口的热应力分布和辐射效应的影响^[7]。

哈尔滨工业大学的张亚萍等人研究了热环境条件下窗口材料折射率与温度场和应力场的关系,并结合有限元分析和光线追迹法,对红外窗口不同温度下传输光束的波面畸变和点扩散函数分别进行了数值模拟^[8];哈尔滨工业大学范志刚等人采用数值分析的方法研究了气动热环境下高速飞行器光学窗口对光传输特性的影响^[8-11]。

文中主要针对热环境条件下红外窗口引发的气动光学效应开展了实验研究工作。利用一定流场参数的等离子射流对红外窗口进行加热,获得了窗口材料表面的温度分布和热流分布,测试了红外激光穿过窗口之后的波面相位变化。

1 实验设备和条件

文中的实验工作是在 60 kW 高频等离子体风洞上采用亚音速平板试验技术完成的,喷管直径为 72 mm。等离子体风洞的运行状态为:气体流量 7.0 g/s,射流温度 2 000 K,射流驻点压力 23 025 Pa。

实验装置如图 1 所示,将红外窗口固定在二维尖劈模型内,红外窗口材料为石英玻璃(直径为 52 mm,厚度为 5 mm),窗口表面低于尖劈表面 5 mm,窗口表面和尖劈表面均平行于气流方向。二维尖劈模型的另一侧通光孔有较长的延伸,防止气流从另一侧进入尖劈模型内部对石英窗口背面产生影响。

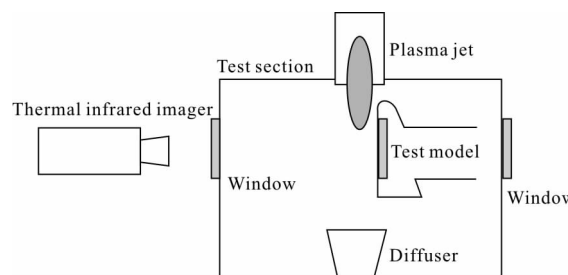


图 1 红外窗口表面温度测量示意图

Fig.1 Schematic diagram of surface temperature measurement for infrared window

2 红外窗口表面参数测量

2.1 红外窗口表面热流测量

采用薄壁量热法测量石英窗口表面的热流分布。热流校测模型采用不锈钢材料,与石英窗口尺寸相同,采用镍铬-镍硅热电偶测量温度变化,测量点分布如图 2 所示,图中气流方向沿着图中测点 1 到测点 3 的方向,测点 2 和测点 4 对称分布,测点 1 和测点 3 对称分布。

模型表面热流由下式计算:

$$q = \rho c \delta \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

式中: ρ 为薄壁材料的密度; c 为薄壁材料的比热容; δ 为薄壁材料的厚度; T 为热电偶测量得到的温度。由于热电偶布置于校测模型背面,且公式(1)忽略了

薄壁的径向热传导损失,因此采用公式(1)计算升温速率时,热电偶测量数据选取壁厚温度响应时间和薄壁纵向导热响应时间之间的数据。各个测试点的热流测试结果如表 1 所示。

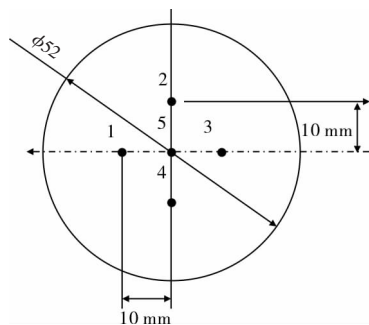


图 2 热流测量点示意图

Fig.2 Measurement points of heat flux

表 1 窗口表面各点的热流

Tab.1 Heat flux of each measurement point of window

Measurement points	1	2	3	4	5
Heat flux/kW·m ⁻²	8.1	10.5	13.3	10.3	11.6

2.2 红外窗口表面温度测量

红外窗口在其红外透射波段是一种半透明体材料,其表面和内部的红外辐射会叠加在一起。因此,采用光学非接触式温度测量方法对其温度进行测量时,需要避开其透波波段。对于石英玻璃,文中采用工作波段为 8~12 μm 的红外热像仪对其表面温度进行测量,测试系统的布置如图 1 所示。

首先,利用黑体炉对风洞实验段侧面 ZnSe 观察窗的透过率进行标定。将一定温度的黑体炉置于风洞实验段,其红外辐射穿过 ZnSe 观察窗进入红外热像仪,使用红外热像仪测量其温度。已知黑体炉的实际温度,在红外热像仪中设定 ZnSe 观察窗的透过率,使仪器测量温度与黑体炉显示温度一致,即可得到 ZnSe 观察窗在热像仪工作波段的透过率。已知待测石英玻璃在此波段的发射率为 0.94,在红外热像仪中设定观察窗透过率和石英玻璃发射率,即可得到石英窗口表面的温度分布。

实验中对模型总的加热时间为 360 s,在此过程中模型窗口表面温度持续升高,最大温度达到 397 °C,图 3 为石英窗口加热 50 s 和 250 s 的表面

温度分布。可见,在高温气流的作用下石英窗口表面产生了一定的温度梯度,较高的温度区域产生在窗口中心偏向流场下游的位置,这是由于玻璃表面低于二维尖劈表面导致的。

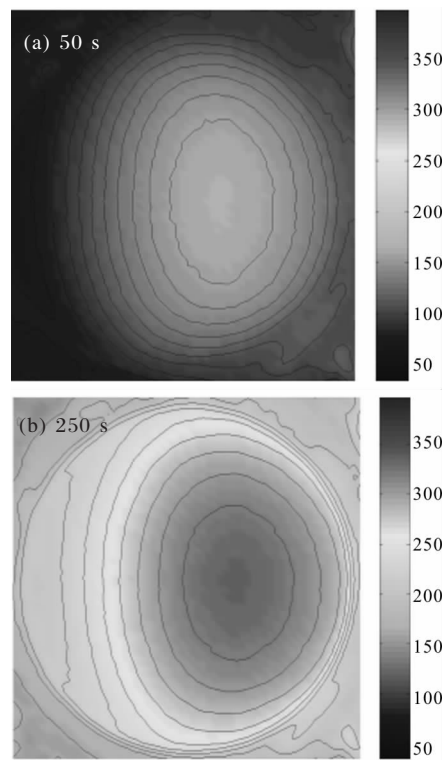


图 3 石英窗口表面温度分布

Fig.3 Surface temperature distribution of quartz window

3 传输光束波面相位测量

3.1 测量原理和步骤

实验测试光路如图 4 所示。红外脉冲激光器发出的光束经过扩束之后进入实验段,穿过模型框架上的石英窗口,进入径向剪切干涉仪。试验中主要光学系统均布置在光学平台上以有效隔离振动。

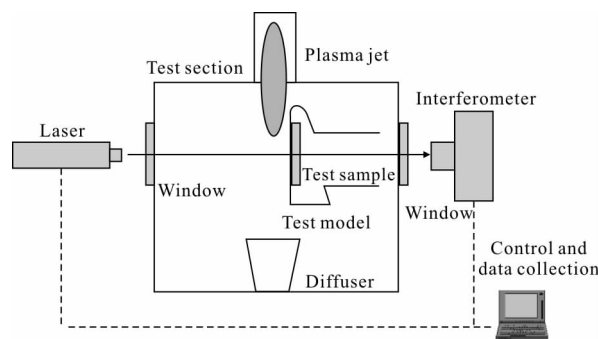


图 4 波面相位测试光路布置

Fig.4 Optical path layout of wavefront phase

通过径向剪切干涉仪中的 CMOS 相机采集干涉图像, 采用同步控制系统保证 CMOS 相机快门时序与脉冲激光器触发时序的一致。通过对 CMOS 相机记录的干涉图像的处理, 获取光束的瞬态波面相位。

该研究中使用的径向剪切干涉仪^[12]主要特点有: 发生干涉的两路光共光路, 对震动很不敏感, 测量精度高, 适合于工厂车间等环境的现场; 无需专门的参考面, 结构简单, 由单幅干涉图即可进行波面检测, 只需要一次测试就可以获得整个二维的波面分布, 相比传统的哈特曼-夏克传感器的分辨率更高。因此其在瞬态、实时的波面检测中有较大的优势。

实验时, 首先测量无等离子体射流条件下光束穿过未加热的石英窗口后的波面相位, 以此作为参考波面相位。然后, 开启风洞, 建立稳定的等离子体射流, 对石英窗口持续加热, 测量光束穿过石英窗口后的波面相位, 扣除参考波面相位, 获得石英窗口导致的光束波面相位畸变。

3.2 波面畸变分布

实验中首先对窗口加热 90 s, 然后风洞停车让模型自然冷却 50 s, 利用径向剪切干涉仪记录整个过程中的干涉条纹图。干涉条纹图经过进一步的处理以恢复其所记录的波面相位信息^[12-14], 扣除参考波面相位, 得到石英窗口在等离子体射流加热条件下光束波面相位的畸变量。图 5 为石英窗口加热后的波面畸变, 图中 x 轴负方向为气流方向, 可见: 流场下游方向的红外窗口导致的传输光束畸变最大。

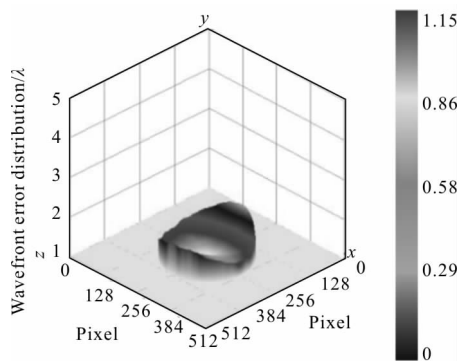


图 5 波面畸变分布

Fig.5 Wavefront error distribution

3.3 波面畸变特征

表征波面的两个基本参数是其波峰-波谷值 (Peak-valley Value, PV) 和波面误差均方根值 (Root Mean-square Value, RMS)。PV 值和 RMS 值都很好地描述了整个波面相位的统计特性, 从而可以较好地描述光束经过石英窗口之后的波面畸变情况^[15]。

图 6 为实验中光束波面的波峰-波谷变化曲线, 图 7 为波面误差均方根值的变化曲线, 其中前 20 组数据为模型加热过程中测量的, 后 10 组数据为风洞停车后模型自然冷却过程中测量的, 图中波面畸变的单位为波长 λ 。由窗口表面温度的测量结果可知, 在 90 s 的加热时间内窗口表面温度是持续升高的。可见: 随着窗口温度的升高, 窗口发生变形, 内部折射率梯度发生变化, 导致光束波面畸变的波峰-波谷值和误差均方根值不断增大; 当等离子体射流停止后, 窗口进入自然冷却过程, 窗口导致的光束波面畸变相应参数不断减小; 有等离子体射流时, 光束波面畸变的波峰-波谷值和误差均方根值均有一定的波动, 说明等离子体射流流场同样导致了光束波面相位的畸变; 风洞停车后, 石英窗口降温过程中仅有窗

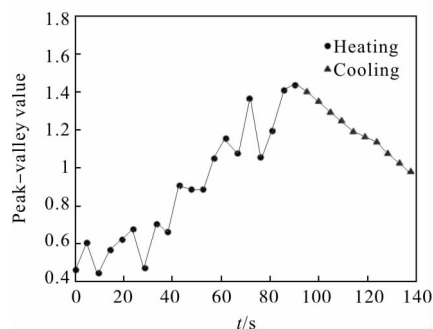


图 6 波面波峰-波谷值的变化曲线

Fig.6 Curve of peak-valley value change of wavefront

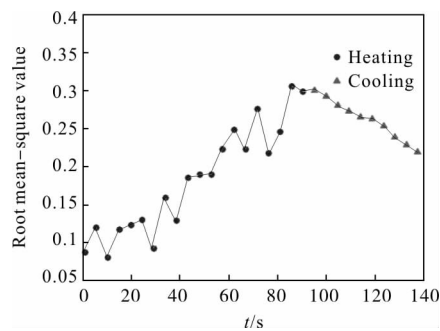


图 7 波面误差的均方根值变化曲线

Fig.7 Curve of root mean-square value change of wavefront error

口自身导致波面相位的变化。

3.4 点扩散函数和斯特列尔比

红外窗口导致的传输光束波面畸变将影响导弹红外探测器靶面上像点的品质,因此在实验室条件下对这一影响进行测量和评估是十分重要的。通常用点扩散函数(Point Spread Function)来衡量实际光学系统聚焦的质量或像强度的衰减。所谓点扩散函数就是光学系统对于无限远的点光源所成像的强度分布。如果光波波面存在误差,就会使远场聚焦光斑的强度重新分布。当波面误差较小时,远场成像光斑的峰值强度减小,光能扩散范围增大;当波面误差较大时,远场成像光斑的强度分布发生结构性变化,光束的聚焦严重失调,成像光斑模糊不清。

对于无限远的点光源,在光学系统最后成像透镜焦平面上形成的点像就是点扩散函数。在傅里叶光学理论中,光学系统对于无限远的物体成像相当于远场衍射光斑(远场衍射是指衍射孔径与像平面之间的距离 $z \gg (d^2/\lambda)$, d 为衍射孔径的直径)。在实际应用中,点扩散函数与远场衍射光斑有时是混用的,因此可以利用远场衍射理论来计算点扩散函数。

光束经过光瞳平面的近场光场分布可表示为^[15-16]:

$$U(x,y)=A(x,y)\exp\left[\frac{2\pi i}{\lambda}\phi(x,y)\right] \quad (2)$$

式中: $A(x,y)$ 和 $\phi(x,y)$ 分别为近场光场振幅分布和波面相位分布($\phi(x,y)$ 是波面与参考波面的相位差,对于理想波面 $\phi(x,y)=0$)。

远场衍射光场分布可表示为^[15-16]:

$$U(u,v)=\int_{-a/2}^{a/2}\int_{-b/2}^{b/2}U(x,y)\exp\left[-\frac{2\pi i}{\lambda}(xu+yv)\right]dxdy \quad (3)$$

式中: u,v 为远场角。设距离光瞳平面 z 处远场像平面上一点的坐标为 (x',y') ,则 $u=x'/z,v=y'/z$; a,b 为近场成像的像平面尺寸(该实验中,即剪切干涉仪成像 CCD 的尺寸)。公式(3)是 $U(x,y)$ 关于 (u,v) 的傅里叶变换,则点扩散函数定义为:

$$P(u,v)=|U(u,v)|^2 \quad (4)$$

根据以上关系,得到初始时刻和窗口加热 42 s 的点扩散函数如图 8 所示,可见光束的远场成像发生了扩散,光束的会聚性降低。

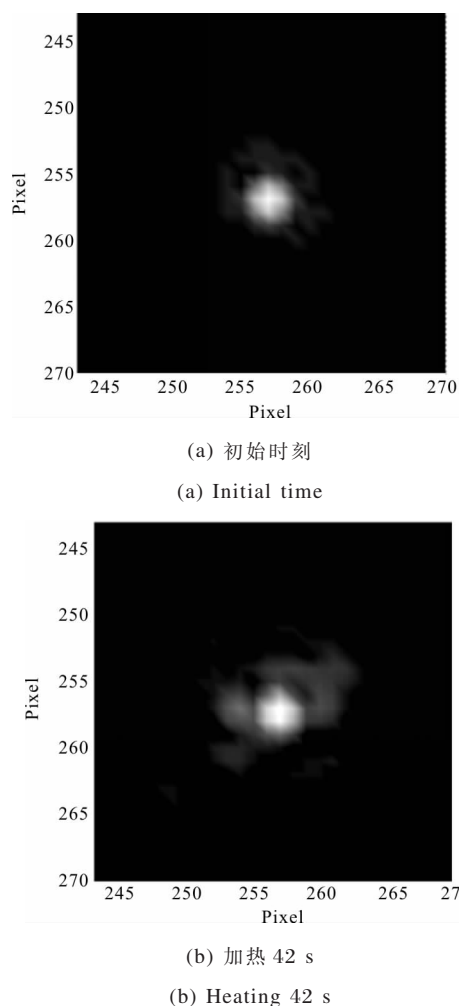


图 8 不同时刻的点扩散函数
Fig.8 Point spread function at different time

在光学系统中,通常用斯特列尔比(Strehl Ratio)作为远场成像像点分辨率的一种判据。设点光源经过一个有像差光学系统后,像平面最大强度为 I ,经过一个无像差光学系统后像平面最大强度为 I_0 ,则斯特列尔比可以表示为:

$$S_R = \frac{I}{I_0} = \frac{\left| \iint A(x,y)\exp[i\phi(x,y)]dxdy \right|^2}{\left| \iint A(x,y)dxdy \right|^2} \quad (5)$$

由前文可知,点扩散函数就是远场衍射光场的光强分布。因此,斯特列尔比可以表示为有像差时点扩散函数的最大值与无像差时理想点扩散函数最大值的比值:

$$S_R = P_{\max} / P_{\max}^{\text{ideal}} \quad (6)$$

文中的实验中,热环境下石英窗口导致的斯特列尔比的变化如图 9 所示,图中的两部分数据分别表示了窗口加热和自然冷却过程中斯特列尔比的变化,可见:窗口加热过程中斯特列尔比不断降低,随着窗片表面温度的升高,光束经过窗口之后的中心亮度降低;覆盖窗口的等离子体流场也会引起斯特列尔比的变化,并导致加热过程中斯特列尔比的波动较大;窗口开始冷却后斯特列尔比又开始升高。

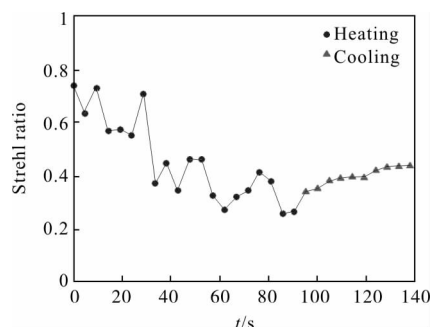


图 9 斯特列尔比变化曲线

Fig.9 Curve of Strehl ratio change

4 结 论

文中在风洞等离子体射流环境中对红外窗口进行了加热,采用红外热像仪测试了一定热流条件下红外窗口的表面温度分布,采用径向剪切干涉测试技术开展了气动光学传输效应实验研究,对热环境下红外窗口对传输光束的影响进行了测试和分析。可以得出以下结论:红外窗口在热环境下的变形和折射率分布变化导致传输光束的波面相位发生畸变;通过点扩散函数和斯特列尔比的变化可以看到,热环境下的红外窗口导致传输光束的远场强度发生衰减,能量分布发生扩散,光束的会聚性显著降低。

致谢

感谢中国航天科工集团公司二院二部费锦东研究员和浙江大学杨甬英教授在测试仪器及数据处理方面的帮助。

参考文献:

[1] Yin Xingliang. Principle of Aerooptics [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2003. (in Chinese)
殷兴良. 气动光学原理[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2003.

[2] Li Guichun. Aerooptics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. (in Chinese)

李桂春. 气动光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.

[3] Zhang Yaping, Fan Zhigang, Liu Jinqiang. Study on aero-optical effect in the terminal infrared guidance [J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(6): 487-490. (in Chinese)
张亚萍, 范志刚, 刘金强. 红外末制导中的气动光学效应分析[J]. 激光与红外, 2006, 36(6): 487-490.

[4] Bob Villett, Jack Grossman, Tom Smith, et al. Experimental investigation of the effects of thermal gradients on optical transmission through sapphire windows [C]//The 2nd Annual AIAA BMDO Interceptor Technology Conference, 1993.

[5] Havener G, Stepanek C. Aero-optics testing capabilities at AEDC [C]//The 30th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 1992.

[6] Sutton G W. Parametric study of optical distortion due to window heating [C]//Proceedings of the SPIE, 1997, 3151: 131-137.

[7] Sutton G W, Trolrier J, Carlson D R, et al. Thermal stresses and radiation of an uncooled optical dome due to transient aerodynamic heating [C]//The 30th AIAA Thermophysics Conference, 1995: 19-22.

[8] Fan Zhigang, Fei Yangwei, Zhang Yaping, et al. The analytical method of optical transmission in aero circumstance window [J]. *Journal of Astronautics*, 2007, 28(4): 1016-1019. (in Chinese)
范志刚, 裴扬威, 张亚萍, 等. 气动环境下窗口光传输的分析方法[J]. 宇航学报, 2007, 28(4): 1016-1019.

[9] Fan Zhigang, Zhang Yaping, Fei Yangwei, et al. Numerical simulation of optical transmission through high speed aircraft optical window in aerodynamic thermal environment [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007, 26(5): 396-400. (in Chinese)
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): 396-400.

[10] 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)
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.

[11] 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)

Chinese)

范志刚, 肖昊苏, 李辉. 气动光学头罩光传输数值仿真[J]. 应用光学, 2011, 32(2): 189-194.

- [12] Liu Dong, Yang Yongying, Xia Zuotang, et al. Measurement of transient near-infrared laser pulse wavefront with high precision by radial shearing interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26 (9): 1372-1376. (in Chinese)
- 刘东, 杨甬英, 夏佐堂, 等. 近红外瞬态脉冲波前高精度干涉检测技术[J]. 光学学报, 2006, 26(9): 1372-1376.
- [13] Mitsuo Takeda, Hideki Ina, Seiji Kobayashi. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry [J]. *J Opt Soc Am*, 1982, 72(1): 156-160.
- [14] Yang Yongying. Study of real-time wavefront measurement technology for transient laser [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002. (in Chinese)
- 杨甬英. 可用于瞬态激光波前畸变实时检测技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
- [15] William Yanta, Charles Sprin, John Lafferty, et al. Near- and farfield measurements of aero-optical effects due to propagation through hypersonic flows [C]//AIAA 2000-2357, 31st Plasmadynamics and Lasers Conference, 2000.