

高马赫飞行器迎风面与攻角对光学窗口周围流场的影响分析

王乃祥,徐钰蕾,史磊,程志峰,姚园

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院航空光学成像与测量重点实验室,吉林 长春 130033;
2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 航空成像与测量技术研究部,吉林 长春 130033)

摘要: 为了提高高马赫飞行下光学窗口的光学性能,对比分析了基于气动光学效应三种飞行器模型不同攻角的马赫数场、密度场、温度场和压力场的流场结构及对光学性能的影响。首先,根据飞行器与来流的迎风面,建立了三种飞行器典型模型;继而,给出了 0° 、 5° 和 10° 攻角飞行工况;然后,建立了基于 Navier-Stokes 方程和湍流模型的三种攻角流场分布;最后,对比分析了宽平头体飞行器中三种攻角温度场作用下的光学系统传递函数。结果表明,马赫数场与密度场、温度场与压力场分别具有相似分布形式;相同飞行速度和攻角下,大迎风面的飞行器光学窗口周围温度与压力较小迎风面大;相同飞行器,较大攻角对应较大流场强度,攻角为 0° 、 5° 和 10° 时传递函数分别为 0.188,0.097 和 0.028。此分析结果可为高马赫飞行下光学窗口优化提供一定的理论依据。

关键词: 流场分析; 高马赫; 光学窗口; 气动光学

中图分类号: V19 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)04-1267-06

Analysis of the impact of windward and angle of attack to the flow field around the optical window on high Mach condition

Wang Naixiang, Xu Yulei, Shi Lei, Cheng Zhifeng, Yao Yuan

- (1. Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Research Department of Airborne Imaging and Measurement Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: To improve the optical performance of optical window on the condition of high Mach flying, the structures of flight number field, density field, temperature field and pressure field corresponding to three kinds of aircraft on the angle of attack conditions on 0° , 5° and 10° were provided and compared in this paper, as well as the influence to the optical properties of optical system. Firstly, three typical kinds of aircraft models were established based on the windward area of the aircraft head; secondly, the flight conditions on the angle of attack of 0° , 5° and 10° as well as the flight initial environment were provided; then, according to the Navier-Stokes equation and the turbulent model, the flow field distributions corresponding to the three kinds of aircraft model on the conditions of 0° , 5° and 10° were obtained and analyzed; finally, taking the optical system on the operating condition of the flat-head

收稿日期:2014-08-10; 修订日期:2014-09-12

基金项目:国防预研项目

作者简介:王乃祥(1985-),男,助理研究员,硕士,主要从事航空传感器方面的研究。Email:wangnaixiang1215@163.com

aircraft as an example, the Modulation Transfer Function(MTF) on the operating conditions of the three kinds of attack angle were compared and analyzed. By the analyzed results, the Mach field and the destiny field, the temperature field and press field have the same distribution respectively; in the same flight velocity and angle of attack, the optical window of the aircraft owning large windward side has larger temperature and press than the optical window of small windward side aircraft; being the same aircraft, the operating condition of larger angle of attack corresponds to large flow field around the optical window. When the angles of attack are 0° , 5° and 10° , the values of MTF are 0.188, 0.097 and 0.028, respectively. The work of this study may provide a theoretical basis for the optimization of optical window on the operating condition of high Mach.

Key words: flow field analysis; high Mach; optical window; aero-optical

0 引言

飞行器在大气中做超声速飞行时, 机身及光学窗口与来流相互作用形成了激波、膨胀波、湍流边界层等多种复杂的流场结构, 导致光学窗口周围密度场、压力场和温度场发生变化。密度场的变化导致了相应地折射率场在时间和空间上呈现出明显的不均匀性, 来自目标的光线穿过这样的折射率场时, 会产生光线偏折、相位畸变或者成像散焦。作用在窗口上的压力场和温度场的不均匀性使窗口两侧出现不均匀的压力梯度和温度梯度, 使光学窗口发生变形, 导致其折射率的改变。因此, 研究超声速光学窗口流场的流动机理, 探寻其气动光学效应和流场结构之间的内在关系, 并采取适当的控制方法降低气动光学影响、提高其光学性能, 是研究高速航空遥感成像工作中的关键问题之一。

近几十年, 国内外研究人员对光学窗口结构与周围流场展开工作^[1-10], 分别在流场^[1-2]、气动光学性能^[3]、光机热集成分析^[4-5, 7]等等方面进行研究, 以及关于气动光学模拟仿真^[1, 3]与试验^[1, 8-9]。上海交通大学的李波从流场的角度对气动光学展开了深入细致的机理研究, 并给出了流场气动光学的评价方法, 同时结合试验分析了光学窗口位置与外形对流场气动光学性能的影响, 很好的提高了高速飞行器气动外形一体化设计^[1]。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的丁亚林等人给出了高马赫飞行条件下光学窗口的数学模型, 包括窗口的温度模型、面型模型和折射率与温度的映射关系^[2]; 胡源^[5]、张洪文^[6]等人分别对高速飞行的临近空间飞行器气动光学与光学窗口结构设计进行了仿真分析。

文中结合实际问题分析了三种典型飞行器模型的高马赫速流场分布, 得到了在 0° 、 5° 和 10° 攻角的飞行器模型周围的流场机理分析, 并有实例给出了流场对光学系统成像质量的影响。对于开展高马赫飞行条件下光学窗口对遥感器成像质量影响分析具有重要研究意义, 同时也为提高航空遥感器成像质量所采取的必要校正措施提供理论依据。

1 问题描述

带有光学成像探测系统的飞行器在大气层内高速飞行时, 光学头罩与来流之间形成复杂的流场, 对光学成像探测系统造成热传导、热辐射和图像传输干扰, 引起目标图像的偏移、抖动和模糊, 这种效应被称为气动光学效应^[1], 如图 1 所示。除此之外, 飞行器在高马赫飞行时与来流的相互作用, 使得飞行器头部温度和压力升高且分布不均, 如图 2 所示。这种分布不均使得光学窗口承受着来自加速度、压力、热等因素的影响, 产生变形及温度梯度。当平面光波通过有温度梯度的光学窗口时会产生波面畸变, 将直接影响航空遥感器的成像质量, 降低分辨率^[4]。

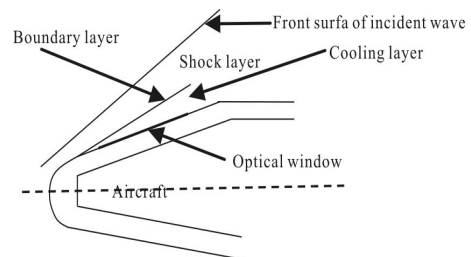


图 1 气动光学效应

Fig.1 Aero optical effect

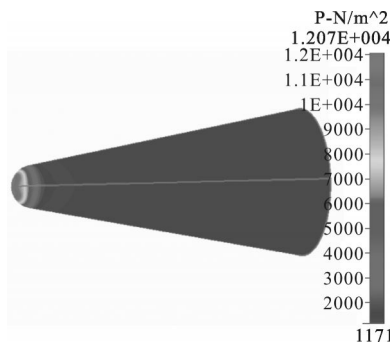


图 2 飞行器温度场分布

Fig.2 Temperature field distribution

因此,从机理上认清流场结构的变化规律,有助于减小环境对光学窗口的影响,最终提高高速飞行时光学系统的成像质量。

2 流体模型的建立

为了获得基于流场的气动光学分析方法,文中以高马赫飞行器为研究对象,针对流场分析,探索了飞行器高马赫飞行下流场的气动光学机理,按照飞行器头部与来流接触面积大小的原则,选取三种典型的飞行器前端三维模型(三维导弹头体模型、三维钝头体模型和三维钝头宽平体模型,如表 1 所示)进行高马赫流场分析。其中,导弹头体飞行器头部较尖,与来流接触面积最小;宽平头体接触面积最大。

表 1 三种典型飞行器三维模型

Tab.1 Typical 3D aircraft models

Name	Dimensional missile war head model	Dimensional blunt head model	Dimensional wide flat head model
Aircraft model			

高马赫飞行属于高雷诺数流动,涡粘性远远大于分子粘性。但是,在近壁面区域处分子粘性的影响占主导地位,高雷诺数模型就会失效。因此,在近壁面区域采用壁面函数,在剩下的区域采用高雷诺数模型。

$k-\epsilon$ 为两方程模型,它采用偏微分方程来处理湍动能 k 和湍动能耗散速度 ϵ 的输运。 k 和 ϵ 的输运

方程在这些单元中不是采用数值积分的形式,而是采用半经验公式将 k, ϵ 与摩擦速度 μ_τ 联系起来而得到的如公式(1)所示。

$$k = \frac{\mu_\tau^2}{\sqrt{C_\mu}}, \epsilon = \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{ky} \quad (1)$$

在飞行器绕流分析中,来流方向均与三种飞行器的头部正向反向,假设来流的初始压力为 1171 Pa,初始温度为 226.5 K,来流速度定为 3 Ma。气体模型采用理想气体模型,流动情况为湍流流动,采用 Favre 平均 Navier-Stokes 控制方程和 $k-\epsilon$ 湍流模型,如公式(2)所示。

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = P - \rho \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \epsilon) = C_{\epsilon 1} \frac{P \epsilon}{k} + C_{\epsilon 2} \frac{P \epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \\ P = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{2}{3} \frac{\partial u_m}{\partial x_m} \delta_{ij} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} k \frac{\partial u_m}{\partial x_m} \end{cases} \quad (2)$$

3 高马赫飞行下不同迎风面与攻角的流场分布

气动光学效应本质上是由于流场的折射率场不稳定而造成的,高速流场中的激波、膨胀波及它们与边界层的相互干扰形成复杂的流场结构,研究这些特征结构和气动光学效应的关系有利于完成高马赫飞行下光学窗口的设计^[1]。

超声速光学窗口的速度场有助于了解气动光学效应随时间的演化规律;密度场、压力场和温度场是影响窗口光学特性的三个因素,直接决定着光学系统的成像质量。为了更好的获得飞行器周围流场结构的变化情况,文中根据计算流体力学理论,针对导弹头体、宽平体和钝头体模型三种飞行器模型高马赫飞行下的工况,计算分析了攻角分别为 0°、5°和 10°的流场分布。

利用计算流体力学方法,确定出图 2 所示的飞行器周围流场分布。光学窗口位置安装在飞行器头部周围下表面,如图 3 所示,距头部最前端占飞行器头部总尺寸 3/4 左右的位置。流场结构分析的温度场和压力场分布形式如图 3(左)所示,马赫数场和密度场分布形式如图 3(右)所示。

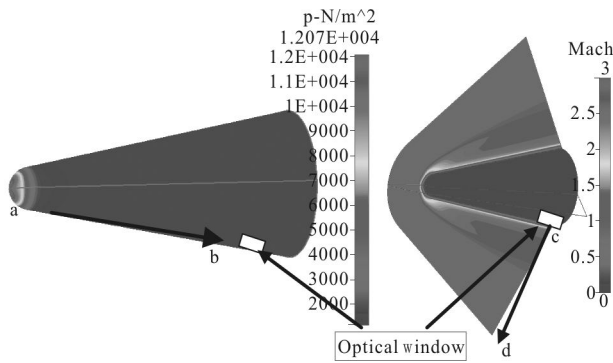


图 3 (左)温度场和(右)密度场

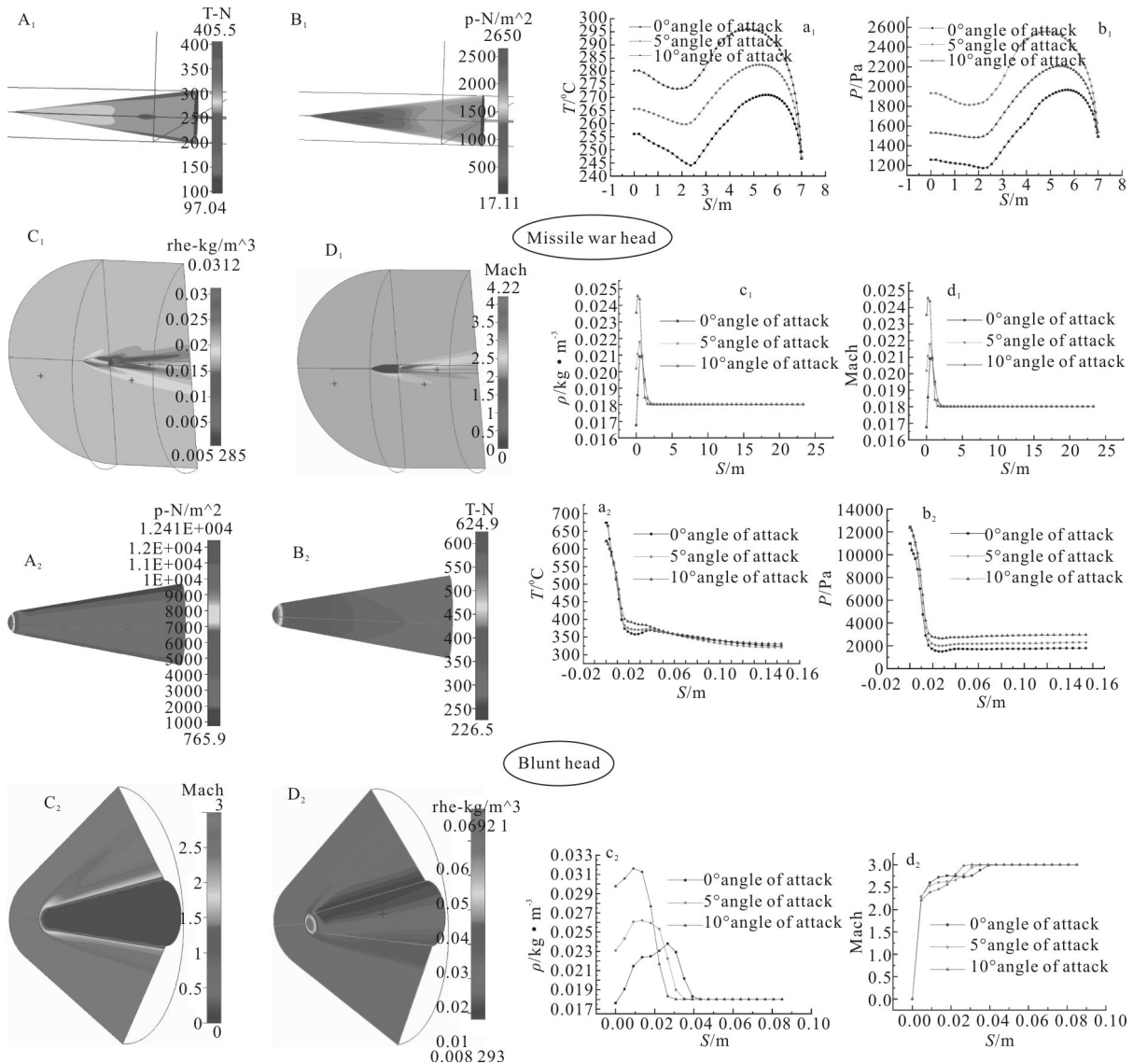
Fig.3 Temperature field(left) and density field(right)

文中给出了沿飞行器外表面通过窗口的脊线(a-b)对应的温度场和压力场,和窗口位置矢量方向(c-d)的马赫数场和密度场,如图 3 所示。三种模型

飞行器高马赫飞行下,攻角分别为 0°、5°和 10°的流场分布如图 4 所示。其中, A_i 、 B_i 、 C_i 、 D_i 分别表示温度场、压力场、密度场和马赫数场的分布形式; a_i 、 b_i 、 c_i 、 d_i 分别为温度场、压力场、密度场和马赫数场在 0°、5°和 10°攻角时光学窗口周围的数值分布; $i=1, 2, 3$ (1, 2, 3 分别表示飞行器模型为导弹头体、钝头体和宽平头体)。由图可知:

(1) 温度场和压力场分布趋势一致, 飞行器前段温度和压力最大, 并沿脊线方向减小且前段之后都相对平缓稳定; 光学窗口密度场沿矢量方向, 先是由一定值增大, 再快速下降, 之后到达平稳; 马赫数场沿矢量方向, 经过“快-慢-快”三段升高, 最后趋于稳定。

(2) 温度场、压力场和马赫数场随着攻角的增



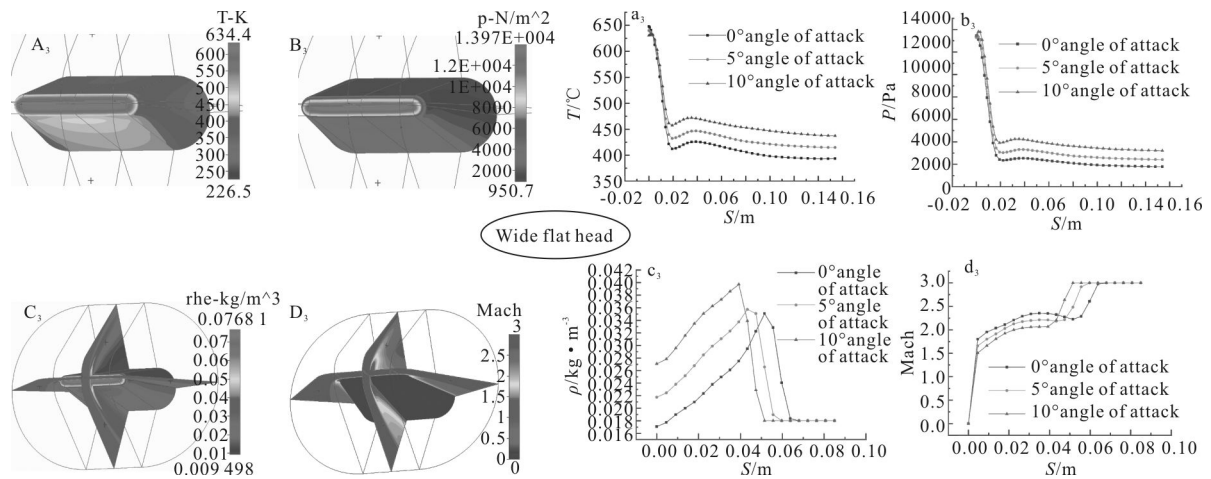


图 4 三种模型飞行器 0°、5°和 10°攻角时的流场分布

Fig.4 Field distribution of the three aircrafts on the conditions of 0°, 5° and 10° angle of attack

加,相同位置处的温度、压力和马赫数也同时变大。导弹头体飞行器温度场和压力场变化最大,对应的光学窗口周围密度场和马赫数场基本不变;宽平体和钝头体飞行器下,密度场变化受攻角影响明显,其他流场变化较小。

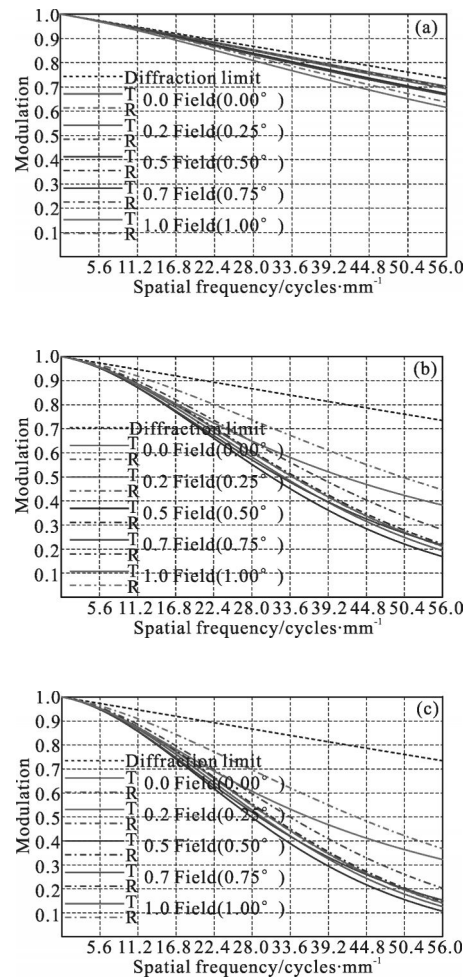
(3)钝头体和宽平体飞行器头部具有最大温度(650 °C)和压力(12 kPa),以及温度差(300 °C)和压力差(8 kPa)。

4 高马赫不同攻角下流场对光学性能影响的实例验证

以某光学系统为例,针对三维钝头宽平体模型探索流场结构变化对三维模型窗口光学特性的影响。飞行器作业工况假定为整个光学窗口置于平均温度为 226.5 K 的环境中,上表面对应光学窗口外表面,与飞行器机身相平,周边节点施加三个平动方向的自由度约束。

利用光机集成分析方法,根据窗口玻璃表面节点在周围流场加载前后的位移变化量,计算得到加载周围温度场加载前后的光学系统的传递函数对比图,如图 5 所示。表 2 为不同攻角下的光学系统成像质量参数,以传递函数值和光学系统像质 RMS 值作为成像质量评价指标。由图 5 和表 2 数据可知,理论设计结果传递函数(MTF)0.405,攻角为 0°、5°和 10°时传递函数分别为 0.188,0.097 和 0.028;像质 RMS 值分别对应为 0.175,0.196 和 0.237。利用 ZEMAX

光学设计软件进行像质评价,高马赫飞行时在窗口玻璃周围产生的流场综合作用影响光学系统的成像质量;且较大攻角,对应着较小的传递函数数值和较大光学系统像质 RMS 值。



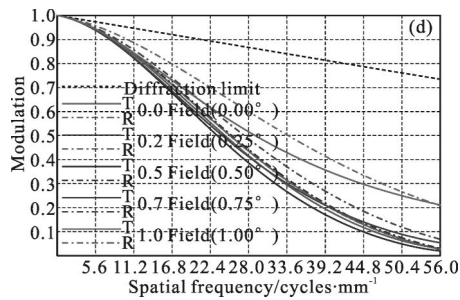


图5 光学系统理论设计结果与不同攻角下温度场加载后光学系统传递函数(MTF)对比

Fig.5 MTF comparison between the theoretical result and the analyzed result effected by the temperature field

表2 不同攻角下成像质量对比

Tab.2 Comparison of imaging quality on different angle of attack

Angle of attack	0°	5°	10°
Values of the MTF	0.188	0.097	0.028
RMS of the image quality	0.175	0.196	0.237

5 结论

根据超声速光学窗口流场的流动机理,获得了高马赫飞行 0° 、 5° 和 10° 攻角下钝头体、导弹头体和钝头宽平体型飞行器模型周围流场分布,并实例对比了不同攻角下流场(温度场)对光学系统性能的影响。分析结果表明,攻角变化和飞行器头部模型的变化都将对流场的分布产生明显的影响,随着攻角增大,窗口周围流场伴随着升温、升压,产生的流场对光学性能的影响也增大;宽平头体飞行器头部周围具有最大温差(300°C)和压力差(8 kPa)。从文中分析,得到了不同飞行器模型对应的流场分布结构,以及不同飞行攻角对流场结构幅度的影响情况,这将对优化光学窗口性能,提高光学系统的成像质量提供帮助。

参考文献:

[1] Li Bo. Investigation on the aero-optical characteristics of flow field around high speed vehicle and optical window

design[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2010. (in Chinese)

- [2] Ding Yalin, Zhong Chongliang, Fu Jinbao. Mathematical model of optical window under high-mach flight condition [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 747-751. (in Chinese)
- [3] Meng Lixin, Zhao Dingxuan, Zhang Lizhong. Boundary layer effect and compensation in airborne laser communication [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(12): 3232-3238. (in Chinese)
- [4] Li Yanwei, Zhang Hongwen, Zhan Lei, et al. Influence of high altitude environment on optical window in aerial remote sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 42(9): 1035-1039. (in Chinese)
- [5] Hu Yuan, Fu Yuegang, Jiang Huilin. The aero optics effect on near space laser communication optical system [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 36(1-2): 1-9.
- [6] Zhang Hongwen, Cao Guohua, Li Yanwei, et al. Thermal-optical evaluation to optical window of near space aerial remote sensor surrounding hypersonic [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 3958-3962. (in Chinese)
- [7] Guan Fengwei, Liu Ju, Yu Shanmeng. Space heat flux simulation and programmable load for thermal test of space optical remote sensor [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(6): 982-988. (in Chinese)
- [8] Yang Huabin, Chen Lihuan, Li Yi. Thermal design and verification of transmission filter for wide angle aurora imager [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(11): 3019-3027. (in Chinese)
- [9] Xu Minglin, Xie Peng. Design for optical window in space environment simulation system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(S): 30-35. (in Chinese)
- [10] Liu Xutang, Gao Yunguo, Shao Shuai. Design and test launch window for large-caliber multi-band high power laser system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(7): 1834-1841. (in Chinese)
- [11] Li Yanwei, Zhang Hongwen, Yuan Guoqin. Design of protector for altitude sub-assembled optical window [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(3): 664-669. (in Chinese)