

临近空间超声速航空遥感器光学窗口热光学评价

张洪文^{1,2}, 曹国华¹, 李延伟², 张继超²

(1. 长春理工大学机电工程学院, 吉林 长春 130025;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 为提高航空遥感器光学窗口的光学性能, 对处于临近空间超声速飞行状态下熔石英材料的光学窗口进行了热光学评价。分析了光学窗口所处的飞行环境, 根据空气动力学原理, 计算了平均对流换热系数与马赫数的关系。根据热流密度, 模拟了光学窗口温度场分布; 计算了内外表面温差所引起的光程差; 并分析了光学窗口热变形对航空遥感器光学系统传递函数的影响。分析结果表明: 由热变形带来的光学窗口光程差 $PV=130.5\text{ nm}$, 满足光学设计要求 ($PV \leq 1/4\lambda$)。此研究结果可为光学窗口系统设计提供必要依据。

关键词: 热光学; 空气动力学; 光学窗口; 气动热

中图分类号: TB73 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)12-3958-05

Thermal-optical evaluation to optical window of near space aerial remote sensor surrounding hypersonic

Zhang Hongwen^{1,2}, Cao Guohua¹, Li Yanwei², Zhang Jichao²

(1. College of Mechanical and Electric Engineering Changchun University of Science and Technology, Changchun 130025, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to improve the optical performance of optical window in aerial remote sensor, thermal-optical evaluation to fused silica optical window surrounding hypersonic was analyzed. The flight environment of optical window was analyzed. Based on the theory of aerodynamics, the relation between convection heat transfer coefficient and mach number was calculated. The temperature distributing of optical window was simulated by heat flux density, the optical path difference caused by the temperature difference between the inner and outer surfaces was calculated, and the influence of thermal deformation of the optical window on optical transfer function was analyzed. The study result shows that the optical path difference caused by thermal deformation of the optical window is 130.5 nm, which is under $1/4\lambda$. The simulation result meets the requirements of the optical design. The above result discussed in this paper can be used as a reference for other optical window designs.

Key words: thermal optics; aerodynamics; optical window; aerodynamic heat

收稿日期: 2014-04-05; 修订日期: 2014-05-15

基金项目: 国防预研项目

作者简介: 张洪文(1974-), 男, 研究员, 主要从事航空遥感器方面的研究。Email: zhw_sohu@sina.com

0 引言

临近空间^[1]一般指距海平面 20~100 km,普通航空器飞行空间与卫星轨道空间之间的空域;主要包括大部分大气平流层、全部中间层和部分热层区域。其中平流层中水蒸气极少,通常没有雨、雪、雾等天气现象,也没有垂直对流,只有方向稳定的水平对流。因此,平流层是良好的临近空间平台飞行和长期驻留的空域。近年来,随着军事需求的牵引和科学技术不断发展,国内外对临近空间 20~30 km 高度范围内的飞行器开展了广泛的研究,主要有平流层飞艇、平流层无人机、高速飞行器等多种临近空间飞行器。而航空遥感器作为临近空间飞行器的有效载荷之一,也逐渐在高分辨率、宽覆盖及实时传输等方面得到进一步的发展。

光学窗口是航空遥感器中用于隔离内部光学系统与外部环境的一种透明界面,通常采用具有零光焦度的平行平板玻璃,装载于飞行器的外表面,航摄时直接暴露在飞行环境中^[2-3]。从飞行实践中可知,当马赫数 $1.3 \leq Ma \leq 5.0$ 时,称为超声速飞行,此时光学窗口与气流之间会发生强烈的相互作用,产生气动热,直接成为光学窗口的热载荷,导致光学窗口温度急剧升高,在窗口内外表面产生温度梯度,使光学窗口产生热变形和热应力,造成气动光学效应,从而影响到航空遥感器的分辨率及成像质量。

文中针对某临近空间飞行器中的航空遥感器光学窗口,分析了 20~30 km 临近空间的大气环境,根据纵掠平壁理论,计算了平均对流换热系数与马赫数的关系;然后利用 TMG 软件仿真了光学窗口的温度分布,计算出光学窗口的热变形及热应力;最后将得到的变形结果进行 Zernike 多项式拟合,去除刚体位移,计算出光学窗口的面型值及热变形对光学系统传递函数的影响。

1 外部热环境

航空遥感器外部热环境与大气的温度、压力、密度、动力黏度及飞行马赫数等因素有关。

1.1 大气环境^[4]

依据美国标准大气可知,在临近空间空域(20~30 km)内,由于高浓度的臭氧吸收大量的空间紫外

线使气温随海拔高度的上升而有所增加,如图 1 所示;但大气密度、压力随高度的增加而逐渐减小。表 1 为不同高度时大气环境各参数数值。

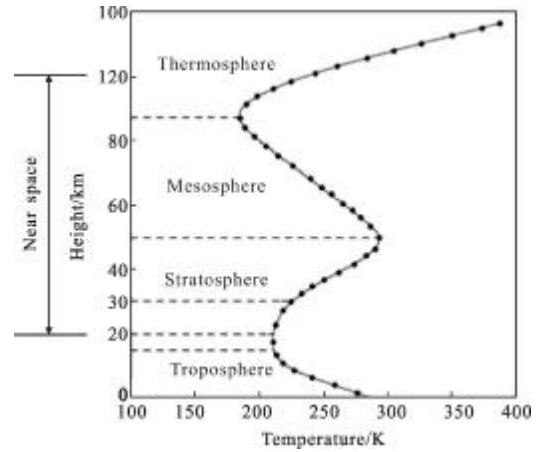


图 1 温度随高度变化图
Fig.1 Temperature vs height

表 1 大气环境条件

Tab.1 Atmosphere conditions

Parameters	Height/km			
	20	24	28	30
Temperature/K	216.65	220.65	224.65	226.65
Density/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	0.088	0.046	0.024	0.018
Pressure/ 10^4 Pa	0.547	0.293	0.159	0.117
Dynamic viscosity coefficient/ 10^{-5} Pa·s	1.421	1.444	1.465	1.476

1.2 平均对流换热系数^[5]

航摄时,光学窗口直接暴露在外界大气中,此时光学窗口与外界空气的换热形式属于流体外掠物体时的强迫对流传热类型,可按纵掠平壁理论计算光学窗口的平均对流传热系数。

雷诺数是用于判断边界层状态的重要参数。雷诺数越大,空气黏性的作用越小;雷诺数越小,黏性的作用越大。

大气中的声速与温度的关系为:

$$c=20\sqrt{T} \quad (1)$$

航空飞行器的飞行速度为:

$$v=Ma \cdot c \quad (2)$$

式中:Ma 为航空飞行器马赫数。

飞行雷诺数为:

$$Re = \rho v l / \mu \tag{3}$$

式中： l 为光学窗口的特征尺寸； μ 为动力粘度。

将公式(1)、(2)带入公式(3)中，可得雷诺数：

$$Re = 20 \rho l \sqrt{T} Ma / \mu \tag{4}$$

将相关数值带入公式(4)，得到雷诺数与马赫数的关系曲线如图 2 所示。

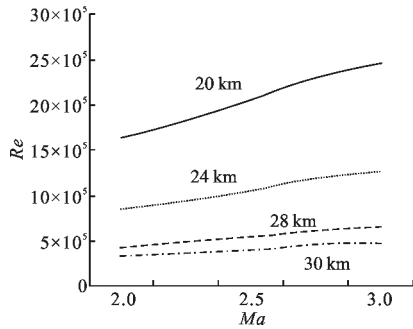


图 2 飞行雷诺数与马赫数的关系

Fig.2 Reynolds number vs Mach number

由图 2 可知，随着马赫数的不断增大，雷诺数逐渐增大；且飞行高度越高，雷诺数越小，主要原因是空气越来越稀薄，大气密度越来越小。依据外掠平板情况下发生紊流的判据 $Re > 5 \times 10^5$ ，可知空气流经光学窗口的边界层前部为层流，后部为湍流。依据边界层理论，光学窗口与外界空气发生强迫对流，光学窗口外表面的平均对流换热系数计算公式为：

$$h = 0.037 \frac{\lambda'}{l} (Re^{0.8} - 23\,500) Pr^{1/3} \tag{5}$$

式中： Pr 为普朗特数，取 $Pr = 0.76$ ； λ' 为空气导热系数，取 $\lambda' = 0.02 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。将相关数值带入公式(5)，得到平均对流换热系数与马赫数的关系曲线如图 3 所示。

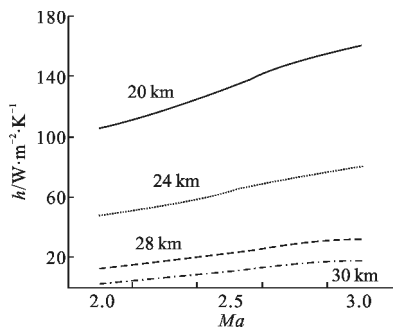


图 3 平均对流换热系数与马赫数的关系

Fig.3 Convection heat transfer coefficient vs Mach number

由图 3 可知，光学窗口外表面的平均对流换热

系数随着马赫数的增大而增大；且飞行高度越低，数值越大。在典型飞行高度为 30 km，马赫数为 3 时，光学窗口外表面的平均对流换热系数为 $18.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

2 光学窗口温度场计算

光学窗口采用具有结构简单、尺寸小及重量轻等优点的单层窗口结构形式，如图 4 所示。窗口玻璃 (450 mm × 340 mm × 20 mm) 采用了密度小、线膨胀系数小，温度适应性强的熔石英材料，四周由耐高温的橡胶圈包裹，最后用压板将窗口玻璃固定在钛合金材料的窗口框架上。

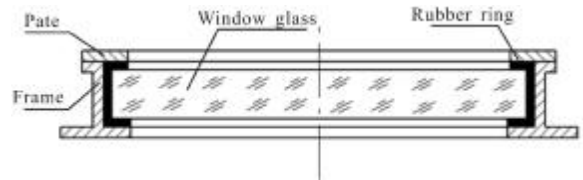


图 4 光学窗口结构

Fig.4 Structure of optical window

2.1 热边界条件

在典型飞行高度为 30 km，马赫数为 3 时，光学窗口所处的环境温度为 226.65 K，此时光学窗口外表面的平均对流换热系数为 $18.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ；当光学窗口的厚度 b 与平均对流换热系数 h 的比值均远小于 1 时，可以忽略窗口玻璃在同一厚度时的温度差异，仅认为存在厚度方向上的温度梯度。假定初始时光学窗口内外表面温度一致，均为 226.65 K；光学窗口外表面周围空气温度由气动热产生的热流密度所确定，具体温度变化情况如图 5 所示。

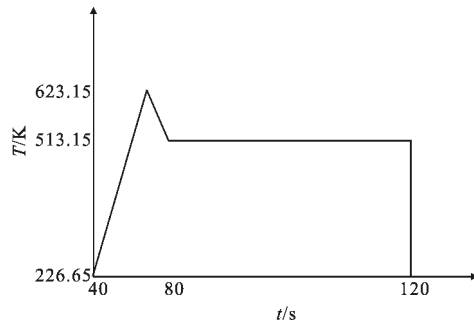


图 5 空气温度随时间的变化情况

Fig.5 Relation between air temperature and time

2.2 温度场计算^[6]

将确定的热边界条件带入有限元模型进行仿真

计算,得出窗口玻璃内外表面温度变化情况,如图6所示。光学窗口内外表面的最大温差发生在 80 s 时,其温度分布如图 7 所示。

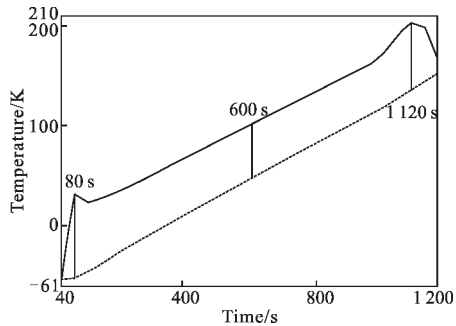


图 6 窗口玻璃内、外表面温度变化图

Fig.6 Temperature curves of inside and outside of optical window

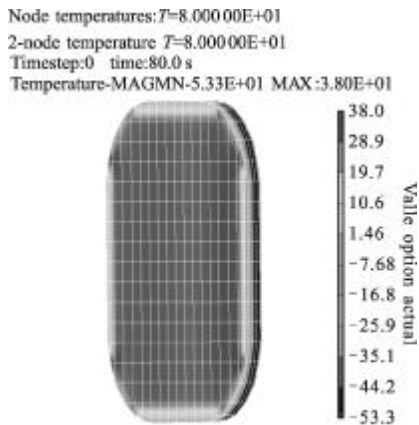


图 7 80 s 时的温度分布

Fig.7 Temperature distribution in 80 s

由分析结果可知,光学窗口外表面温度可达 437 K,内外表面的温差随着时间的增加而逐渐增大,最大为 90 K;然后趋于恒定,保持在 55 K;最后又增大到 70 K。

3 热光学分析

热光学分析涉及光、机、热等领域,属于光机热一体化分析,主要包括遥感器模型建立、温度场计算、热弹性分析、Zernike 多项式拟合以及光学分析计算等。由于目前常用的光学设计软件如 CodeV 和 Zemax 等,还不能直接接收有限元计算结果作为输入值,必须做相应的转换。目前大多数转化接口程序都采用了 Zernike 多项式作为基底函数进行曲面拟合的方法,然后将 Zernike 多项式系数代入到光学分析软件中进行成像质量分析^[7-10]。

3.1 面形计算

以最大温差(90 K)作为热分析的工况,计算出窗口玻璃的热变形云图如图 8 所示。由图 8 可知:窗口玻璃由于受热载荷作用由平面变成曲面,且向外凸起。

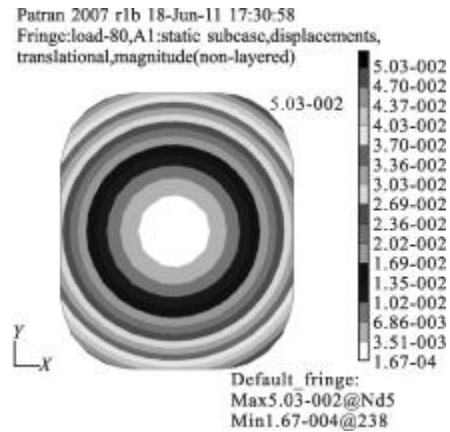


图 8 热变形云图

Fig.8 Thermal deformation cloud chart

根据窗口玻璃变形的仿真结果,计算各仿真点的光程差数值,拟合窗口玻璃外表面的 Zernike 多项式,求出 Zernike 多项式系数(表 2),去除刚体位移,计算出光学窗口的面形值 $PV=130.5 \text{ nm}$,满足 $PV \leq 1/4\lambda$ 的光学设计要求($\lambda=632.8 \text{ nm}$)。

表 2 Zernike 多项式系数

Tab.2 Multinomial coefficient of Zernike

Number of items	Condition of maximum temperature difference
Item 4	0.145490E-01
Item 5	-0.355111E-03
Item 6	0.332076E-08
Item 7	-0.297057E-04
Item 8	0.138692E-07
Item 9	0.872653E-03

3.2 热变形对光学传递函数的影响

将窗口玻璃热变形引起的波面变形数据赋值到光学系统中(图 9)进行计算,得到波面变形前后的光学传递函数值如表 3 所示。

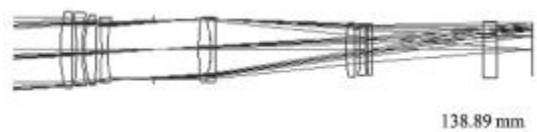


图 9 光学系统图

Fig.9 Optical system

表 3 波面变形前后的传递函数值比较

Tab.3 Value of optical transfer function before and after wavefront deformation

Field	MTF@63lp/mm(best image plane)	
	Before deformation	After deformation
0 ω	0.521	0.520
1 ω	0.379	0.375

由表 3 可知:在 63 lp/mm(最佳像面处),由光学窗口变形导致光学系统传递函数下降值较小,光学系统经离焦后像质无明显变化。

4 结论

针对临近空间超声速航空遥感器光学窗口,分析了临近空间的热环境,根据空气动力学原理,计算了平均对流换热系数与马赫数的关系,得到了平均对流换热系统随着马赫数的增大而增大的结论。根据热流密度,利用 I-DEAS TMG 软件仿真出光学窗口的瞬态温度场分布,计算了光学窗口的最大温差,实现了对临近空间超声速光学窗口的热光学评价。分析结果表明:由热变形带来的光学窗口光程差为 130.5 nm,满足光学设计要求($PV \leq 1/4\lambda$),对光学系统的传递函数影响较小。

参考文献:

- [1] Wu Xuefeng, Ding Yalin, Wu Qingwen. Thermal design for near space optical remote sensor [J]. Opt Precision Eng, 2010, 18(5): 1159-1165. (in Chinese)
吴雪峰,丁亚林,吴清文. 临近空间光学遥感器热设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(5): 1159-1165.
- [2] Li Yanwei, Zhang Hongwen, Zhan Lei, et al. Influence of high altitude environment on optical window in aerial remote sensor[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(9): 1035-1039. (in Chinese)
李延伟,张洪文,詹磊,等. 高空环境对航空遥感器光学窗口的影响[J]. 激光与红外, 2012, 42(9): 1035-1039.
- [3] Zhang Hongwen, Cao Guohua, Li Yanwei, et al. Influence of three section type optical window on imaging quality of aerial camera [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(6): 1623-1627. (in Chinese)
张洪文,曹国华,李延伟,等. 三折式光学窗口对航空相机成像的影响[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(6): 1623-1627.
- [4] Liu Weiyi. Thermal design and analysis for the opto-mechanical structure of a high-resolution aerial camera [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)
刘伟毅. 高分辨率航空相机光机结构的热设计及热分析[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012.
- [5] Li Yanwei, Yang Hongbo, Cheng Zhifeng, et al. Thermal/structural/optical integrated design for optical window in aerial remote sensor [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(8): 2102-2106. (in Chinese)
李延伟,杨洪波,程志峰,等. 航空遥感器光学窗口光机热一体化设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2102-2106.
- [6] Li Ming. The research of precision thermal control technology for a CCD mapping camera [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese)
黎明. 测绘相机精密热控制技术研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2010.
- [7] Cullimore B, Panczak T, Baumann J, et al. Integrated analysis of thermal structural-optical-systems [Z]. USA: Society of Automotive Engineers, 2002.
- [8] Zhao Lixin. Thermal-optical evaluation to optical windows of space camera[J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18(10): 1440-1444. (in Chinese)
赵立新. 空间相机光学窗口的热光学评价 [J]. 光学学报, 1998, 18(10): 1440-1444.
- [9] Li Ming, Wu Qingwen, Yu Fei. Optimization of optical window glass thickness based on the thermal optical analysis [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(1): 210-213. (in Chinese)
黎明,吴清文,余飞. 基于热光学分析的光学窗口玻璃厚度的优化[J]. 光学学报, 2010, 30(1): 210-213.
- [10] Ding Yanwei, Han Shuangli, Li Jihui. Analysis for thermo-optical sensitivity of space optical window[J]. Opt-Electronic Engineering, 2002, 29(3): 15-18. (in Chinese)
丁延卫,韩双丽,李积慧. 空间光学窗口的热光学灵敏度分析[J]. 光电工程, 2002, 29(3): 15-18.