

高速航空遥感器的双层光学窗口设计研究

徐钰蕾 王乃祥 许永森

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

摘要 航空遥感器在高速飞行时,由于光学窗口玻璃与大气间的摩擦会产生大量热,致使光学窗口玻璃在热载荷作用下发生变形,光束通过时会发生偏折、产生光程差等问题,导致航空遥感器的光学系统成像受到影响。为了更好地抑制这种影响,介绍了双层光学窗口的结构,并结合实例验证,对比分析了同等厚度下单、双层光学窗口的光学性能。根据窗口结构给出了在满足外界作业环境下,圆形和矩形窗口厚度的确定方法及不同窗口安装方式对厚度的影响;分析了在压力和温度的影响下,窗口玻璃的变形情况,并结合载机飞行工况对双层窗口进行了热变形分析;结合实际光学系统,验证了双层窗口的光学性能,并和同等厚度的单层窗口进行对比。分析结果表明,在航空遥感器高速飞行条件下,与同等厚度的单层窗口相比,双层窗口玻璃的径向温差和轴向温差更小;针对所研究的光学系统,双层光学窗口玻璃热变形后引起的光学系统离焦量更小,并且对光学系统调制传递函数(MTF)的影响更小,空间频率在0~65 cycle/mm范围内不低于0.3,且在65 cycle/mm时MTF的相对下降量不超过10%,即双层光学窗口的引入使光学系统在不用调焦的情况下就可以满足使用要求。对双层光学窗口的分析研究也可以为其他航空光学窗口设计提供参考。

关键词 光学设计;光学窗口;双层窗口;高速航空遥感器;热光学分析

中图分类号 V416.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0122007

Design Analysis of Double Optical Window of High Speed Aerial Remote Sensor

Xu Yulei Wang Naixiang Xu Yongsen

Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract On the operation of high-speed flight, a large amount of heat is produced due to the friction between the optical window glass and the atmosphere, by which the optical window glass deforms. Then, as light pass though the deformed window, problems as bending and difference of optical path are presented, which affect the optical system imaging of aerial remote sensor. In order to restrain the influence, the structure of the double optical window is investigated, and the optical performance of the monolayer and double optical window is analyzed. According to the window structure, methods determining the thickness of circular and rectangular window are provided on the outside working environment as well as the influence of different window installation of thickness. The deformation of optical window on the influence of pressure and temperature is analyzed, and thermal deformation analysis of the double window is also investigated combined with the flight condition. The optical property of double window is verified and compared with the equivalent thickness of the monolayer window. Analysis results show that under the condition of airborne remote sensing device speed, the radial temperature difference and axial temperature difference of double window glass are smaller than those of the monolayer window with the same thickness. For the studied optical system, the coke quantity of double optical window glass caused by hot deformation is smaller and the effect to the modulation transfer function (MTF) of optical system is weaker. The

收稿日期: 2014-07-15; 收到修改稿日期: 2014-08-17

基金项目: 国家林业公益性资助项目(201204515)

作者简介: 徐钰蕾(1984—),女,博士,助理研究员,主要从事航空遥感器振动测试、分析与设计方面的研究。

E-mail: yuleixu@ciomp.ac.cn

influence of the spatial frequency ranging from 0 to 65 cycle/mm is no less than 0.3 and the relative decline of MTF is no more than 10% with spatial frequency 65 cycle/mm. The optical system of the double optical window can satisfy the use requirement in the case of without focusing. The analysis study of double optical window can be referenced in the domain of designing the optical window of aerial remote sensor.

Key words optical design; optical window; double optical window; high speed aerial remote sensor; thermal optics analysis

OCIS codes 220.4830; 110.6820; 350.6090

1 引 言

光学窗口是连接内部成像载荷和外部环境的遥感器重要组成结构。可通过所希望的辐射光,并且最小程度地影响透射光强和光学系统的成像质量。光学窗口可隔离污染物和湿气,承受一定压力差。光学窗口将会伴随着热变形畸变、内外压力差、密封措施以及窗口前的空气折射率等多个方面的问题。而对这些问题的处理,将直接反映在内部成像载荷的成像质量上。因此,合适的光学窗口结构形式是航空遥感器设计中不可忽视的问题。

光学窗口前气流变化、窗口两侧的压力差都会给光学系统增加离焦量。由于外部环境的作用,光学窗口在压力差和温度的共同作用下,产生较大变形,这将导致光程差和窗口透射率的变化。关于这些问题的研究,国内外学者取得了大量成果^[1-8],但上述研究主要集中在单层窗口的力、热等载荷作用下的光学性能评价上,而关于新型双层光学窗口^[9-10]的相关研究则较少。

为了获得双层窗口对光学系统成像性能的影响,本文根据具体实例进行了分析。给出了双层光学窗口的结构组成,并根据窗口形状与固定方式建立了窗口厚度与窗口玻璃属性的关系;理论分析了环境变化对光学窗口的变形影响,并给出窗口玻璃材料的选择方法及常用窗口材料;根据载机飞行实测得到的高速环境工况对双层光学窗口进行加载,获得了双层光学窗口内外玻璃的温度场分布(轴向温度与径向温度)及热变形情况;结合实例,比较分析了同等厚度的单、双层光学窗口对光学系统的光学性能影响。

2 问题描述

双层光学窗口,由内外两块玻璃、镜框和必要的压圈等组成。内外两块玻璃一般采取相同厚度,实际工作中都伴随着压力和温度的共同作用。在高空飞行时,外层玻璃与外界大气直接接触,外层玻璃的外表面会产生较大温升;两层玻璃都承受着不同压力差。作业环境不同,窗口内外的压差也有较大差异。无人作业时,载荷作业舱内环境为自然状态,窗口承受的压差只来源于飞行时窗外气流的作用,压差较小(几百帕至几千帕)。载人作业时,舱内需有提供呼吸环境,窗口内外压差基本为一个大气压(1.01×10^5 Pa)。

针对以上问题分析,给出的解决方案如图1所示。建立UG结构模型,利用HyperMesh建立结构分析的有限元模型,再通过I-DEAS TMG热分析软件依据给定的热流数据对窗口结构进行热辐射和热传导分析,得到窗口玻璃结构随着时间变化的温度分布情况,选定动力巡航阶段,即相机的工作状态下的窗口玻璃温度分布,通过Patran/Nastran有限元分析软件计算出窗口玻璃结构在温度载荷作用下引起的光学元件镜面变形量,并以泽尼克多项式为接口拟合镜面位移,将计算出的泽尼克拟合系数代入光学分析软件CODE-V中进行

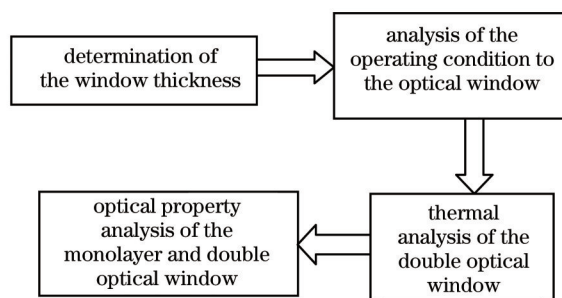


图1 工作流程图

Fig.1 Work flow chart

行光学分析,对系统的光学调制传递函数(MTF)进行评价,评估环境热载荷对系统光学性能的影响。

3 光学窗口厚度的确定

外界环境的作用使得窗口承受温度与压力的影响,窗口的厚度既要保证足够的强度应对作业工况,又要避免过大的厚度导致光束通过时过大的会聚或者发散现象。

窗口需要足够的强度来承受外界环境的作用,当塑性变形时不会产生过大变形而导致成像质量过低,甚至窗口破裂。光学窗口的厚度可根据玻璃材料属性和实际承受压差确定,如(1)式和(2)式所示^[4,9-10][(1)式为圆形窗口厚度,(2)式为矩形窗口厚度]:

$$h = \frac{d}{2} \left[\frac{3\Delta p(3+u)F}{8\sigma_F} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

$$h = b \left[\frac{3\Delta p}{4\sigma_F [1+2(b/l)^3]} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

式中 h 、 b 、 Δp 、 σ_F 、 l 、 u 、 F_s 、 d 分别代表光学窗口的最小厚度、窗口宽度、窗口内外表面压力差、材料折断应力、窗口长度、泊松比、安全系数、窗口直径。

圆形光学窗口厚度确定中,泊松比是窗口玻璃材料的固有属性,可用常数代替,令 $k = \frac{3(3+u)}{8}$, 则(1)式和(2)式可变为

$$\frac{d}{h} = 2 \left[\frac{\sigma_F}{k\Delta p F_s} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

不同的窗口固定方式将直接影响着实际作业中窗口横向应变与纵向应变的比值,表现在(3)式中常数 k 的取值不同,其中 k 为含有泊松比的参数。图2为两种窗口固定方式,图2(b)为窗口周边人造橡胶固定,横向应变没有束缚,常数 k 可取值 1.25;图2(a)为机械压圈夹持固定,在温度等外部环境作用下横向应变降低,对应的常数 k 取值为 0.75。经分析,压圈固定方式对应的窗口厚度较小,为周边橡胶固定时的 0.775 倍。

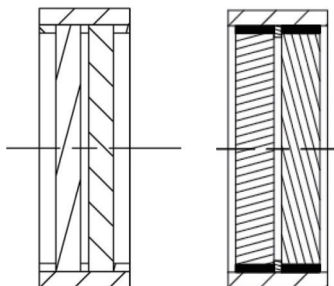


图2 双层窗口固定结构方式

Fig.2 Fixed structure of the double windows

4 环境变化对光学窗口的影响分析

遥感器成像系统工作环境中,由于窗口内外表面压力差以及温度梯度的作用,使得光学窗口产生变形。窗口玻璃结构四周均采用胶材料与窗口边框结构相连,胶材料的弹性模量与窗口玻璃和框架相比要小得多,因此分析中假设使窗口玻璃处于自由状态来进行近似处理。压力差作用下,作用于窗口外表面的压力 P_2 大于内表面压力 P_1 时,变形方向指向窗口内侧;外表面压力 P_2 小于内表面压力 P_1 时,变形方向指向窗口外侧,如图3所示。温度梯度作用导致窗口内外表面形成温度场,根据窗口结构可分为轴向和径向两种温度场,如图3和图4所示。轴向温度场导致的窗口变形与压力差的作用相同,变形方向指向温度场小的那一侧。当光学窗口径向产生温度梯度分布时,窗口的面型和曲率半径发生改变,中心温度低于边缘温度时,产

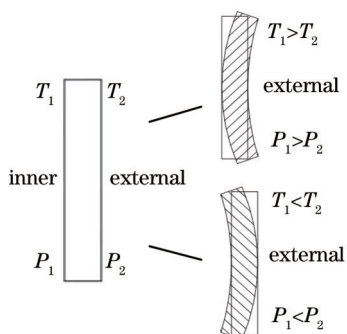


图3 轴向温差和压力差引起的窗口变形

Fig.3 Window deformation caused by the axial temperature difference and pressure difference

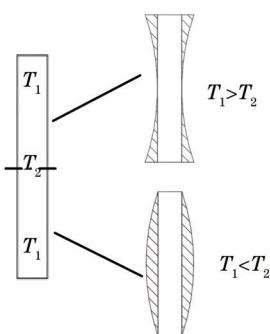


图4 径向温差引起的窗口变形

Fig.4 Window deformation caused by the radial temperature difference

生翘边,如图4所示;中心温度高于边缘温度时,产生塌边,这种温度效应成为边缘效应^[2]。

双层窗口的两层玻璃内外表面压力差和温度梯度不同,对应的变形程度也有差异。双层窗口外表面、窗口之间以及窗口内部温度和压力递增或递减。窗口间的空间作为缓冲,一定程度减小了单层窗口的流场差异幅度。研究的航空遥感器光学窗口,由于无密封要求,因此可以不必考虑压差的影响。

表1 窗口玻璃材料属性

Table 1 Material properties of the window glass

Material	Elastic modulus / MPa	Density /(kg/m ³)	Specific heat capacity / (J/kg·°C)	Linear expansion coefficient / (10 ⁻⁶ /°C)	Thermal conductivity/[W/(m·K)]	Thermal distortion coefficient / (m/W)
K9	80	2530	858	3.5	1.2	2.92
Fused silica	75	2200	787	0.55	1.4	0.39

基于上述分析的工况,窗口玻璃材料需要抵御温差导致的窗口轴向和径向变形。因此,材料选择依据有:1)定义线膨胀系数与热导率之比,即材料的热畸变参数,轴向温度梯度引起畸变时,热畸变参数应尽可能小;2)存在边缘效应时,马克苏托夫给出了经验公式: $\phi = Eq/\alpha, q = \lambda/(cp)$,式中 ϕ 、 E 、 q 、 α 、 λ 、 c 、 ρ 分别代表材料减小边缘效应的参数、材料的弹性模量、导温率、线膨胀系数、热导率、比热容、密度。 ϕ 越小,表示材料在减小边缘效应方面对镜面越有利。为了减少镜面的边缘效应,应选择导温率较高的材料,是由于当其他条件不变时,导温率高的材料镜面两点间的温差最小^[1-2]。

文中分析的光学窗口工作环境对应着较大的轴向温度梯度和一定的径向温度梯度,因此,窗口材料选取应该对热畸变参数和减小边缘效应的参数 ϕ 综合进行考虑。表1为常用的透镜材料参数,综合对比后选定熔石英为研究分析对象。

5 双层光学窗口温度场及热变形分析

文中窗口分析对应的温度载荷,是遥感器作业环境为海拔25 km时,高空高马赫飞行时获得的实测热流数据。载机的工作状态分为动力上升段、动力巡航段和无动力返回段。窗口尺寸为:单层窗口为340 mm×406 mm×23 mm,双层窗口单层尺寸为340 mm×406 mm×11.5 mm。

利用有限元分析软件建立窗口玻璃结构分析有限元模型,如图5所示,采用六面体实体单元进行划分,网格划分过程中采用手动划分网格形式,以保证实时检查网格质量,对质量不良的网格进行手动调整修改。

图5中窗口玻璃结构网格共有单元1392个,节点2290个,赋予材料和单元属性后的窗口玻璃网格单元的重量与实际航空遥感器光学窗口的重量相差不到1%。

利用I-DEAS TMG热分析软件,根据总体单位给出的热流数据,建立窗口玻璃的热分析边界条件,周围大气环境温度均为-20 °C,通过热辐射和热传导分析确定每层窗口玻璃内、外表面的温度随时间的变化分布,选取动力巡航阶段,即航空相机的工作状态下的窗口玻璃温度分布进行热变形分析。

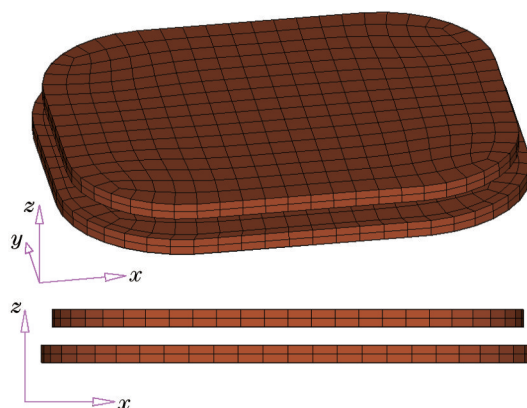


图5 光学窗口有限元模型

Fig.5 Finite element model of the optical window

经过对窗口的热分析,可获得每层光学窗口的内外表面在载机的整个工作状态的温度变化,双层窗口玻璃和单层窗口玻璃的内外表面中心点温度随时间变化曲线如图6所示。由图6可知,图6(a)中双层窗口外层玻璃的内、外表面温差在动力上升段逐渐增大,最大为90℃;在动力巡航段基本保持恒定,约为24℃;无动力返回段温差又增大,约为31℃,选取动力巡航阶段中间时刻600s时的温度分布情况进行具体分析。图6(b)中双层窗口内层玻璃的内、外表面温差随时间逐渐增大,选取分析时刻600s时的温差约为14℃,图6(c)中单层窗口玻璃内、外表面温差在动力上升段逐渐增大,最大为130℃;在动力巡航段保持恒定,为55℃;无动力返回段温差又增大,为70℃。

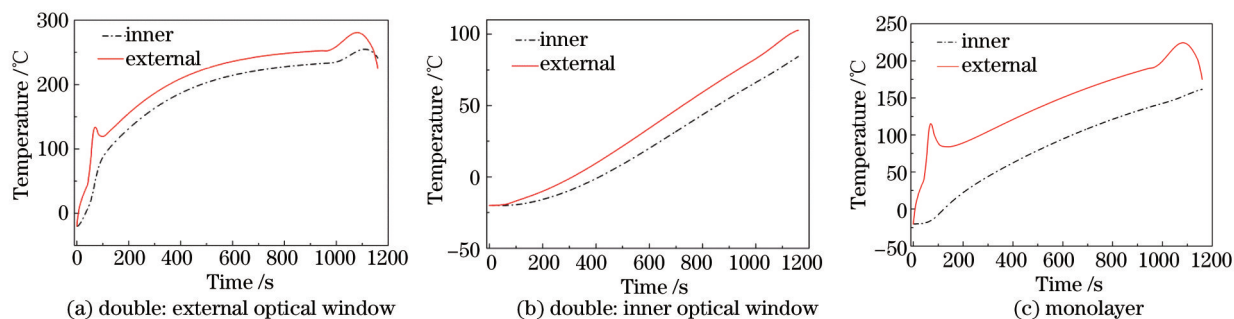


图6 双、单层窗口表面中心点温度随时间变化曲线

Fig.6 Change curves of the center temperature of the double and monolayer window surface over time

此工况作业中,光学窗口变形所受的温度影响包括轴向温差和径向温差。因此,给出了每层窗口的轴向及径向温差,并对比分析。在载机的整个工作状态中,动力巡航段为相机成像时段,为主要分析温差对相机成像质量影响的阶段,并选取600s时进行分析。经计算,在工作循环中600s对应的摄像段,双层窗口玻璃的外、内两层窗口玻璃和单层窗口玻璃的径向温度分布和轴向温度分布分别如图7和图8所示。由图7可知,双层窗口的外层窗口玻璃外表面的径向温度为206℃~236℃,径向温差约为30℃;双层窗口的外层窗口玻璃内表面的径向温度为199℃~225℃,径向温差约为26℃;双层窗口的内层窗口玻璃外表面的径向温度为8.18℃~34.6℃,径向温差约为26.42℃;双层窗口的内层窗口玻璃内表面的径向温度为5.24℃~22.9℃,径向温差约为17.66℃;单层窗口的外表面的径向温度为98.3℃~150℃,径向温差约为51.7℃;单层窗口的内表面的径向温度为63.6℃~98.3℃,径向温差约为34.7℃。由图8可知,双层窗口的外层窗口玻璃轴向温度由214℃升高到236℃,轴向温差约为22℃;双层窗口的内层窗口玻璃轴向温度由19.9℃升高到34.6℃,轴向温差约为14.7℃;单层窗口玻璃轴向温度由89.6℃升高到150℃,轴向温差约为60.4℃。

由对比分析可知,高速遥感器光学窗口为传统的单层窗口玻璃时,其径向温差和轴向温差明显较大,而双层窗口玻璃情况下,每层窗口玻璃的径向温差和轴向温差均可以大幅降低。

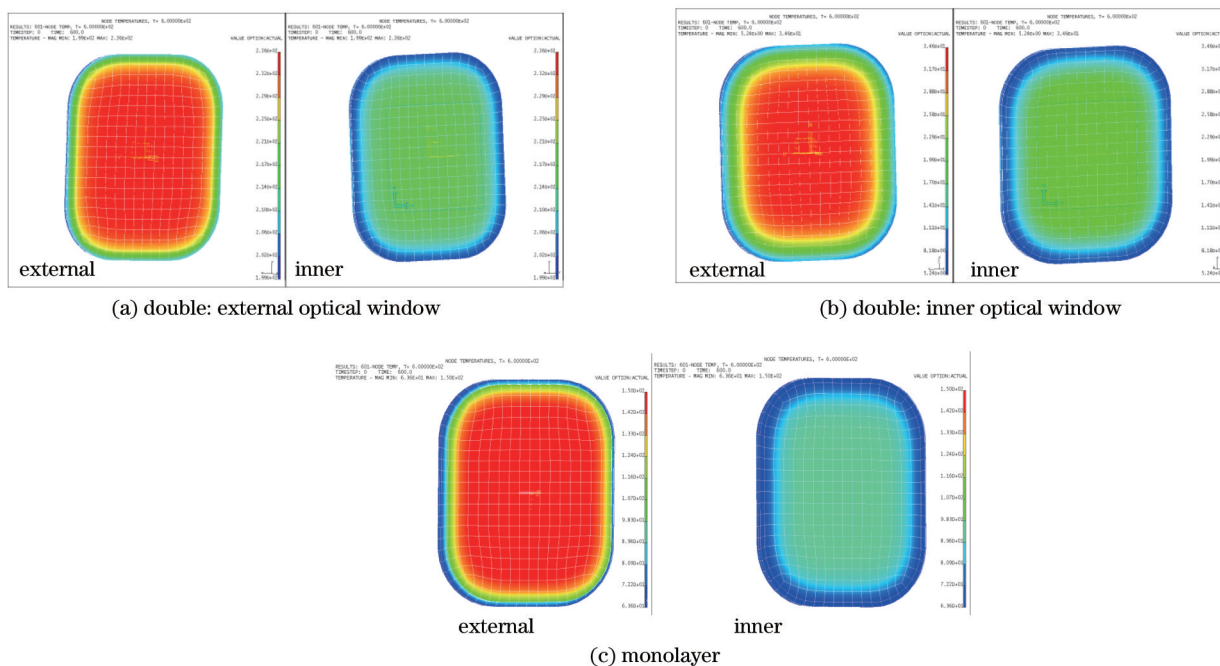


图 7 600 s 时刻双、单层光学窗口径向温度分布

Fig.7 Radial temperature distribution of the double and monolayer optical window at 600 s

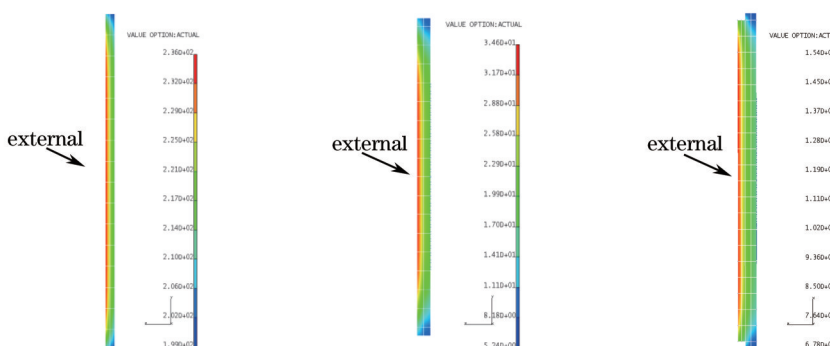


图 8 600 s 时刻双、单层光学窗口轴向温度分布

Fig.8 Axial temperature distribution of the double and monolayer optical window at 600 s

在轴向温差和径向温差的共同作用下,光学窗口将产生热变形如图 9 所示。由图可知,变形量由中心向边界逐渐增大,且基本关于窗口中心对称。变形分析结果与理论趋势相吻合,双层窗口的外层窗口最大变形量为 0.0403 mm,内层窗口最大变形量为 0.0143 mm,单层窗口的最大变形量为 0.0345 mm。

6 同等厚度单、双层光学窗口的光学性能评价

利用有限元分析软件计算得到的窗口玻璃在指定温度场和边界条件作用下的变形量,即窗口玻璃表面节点的位移变化;再以泽尼克多项式为接口拟合镜面变形,然后将计算出的泽尼克拟合系数带入光学分析软件 CODE V 中,进行分析,评估出温度场对光学窗口的光学性能的影响。

航空遥感光学系统的入瞳直径为 200 mm,相对孔径为 6.3,工作波段为 480~710 nm,光学元件材料采用 K9、ZF7、TF3、ZK10,设计的光学系统加工装调后的 MTF 在空间频率在 0~65 cycle/mm 范围内不低于 0.34,对比分析了同等厚度下的单、双层窗口对应的 MTF 值,图 10 为带入波像差影响前的 MTF 曲线。

温度载荷的影响使得光学窗口变形,导致像面离焦和 MTF 的下降,图 11 为热载荷作用下单层光学窗口情况时的 MTF 曲线。由图 11 分析可知,单层光学窗口成像后的像面离焦量为 -0.17mm,MTF 下降最大值约为 0.34,相对下降量高达 95%,不符合成像要求。经过调焦,单层光学窗口下的光学系统 MTF 如图 12 所示,

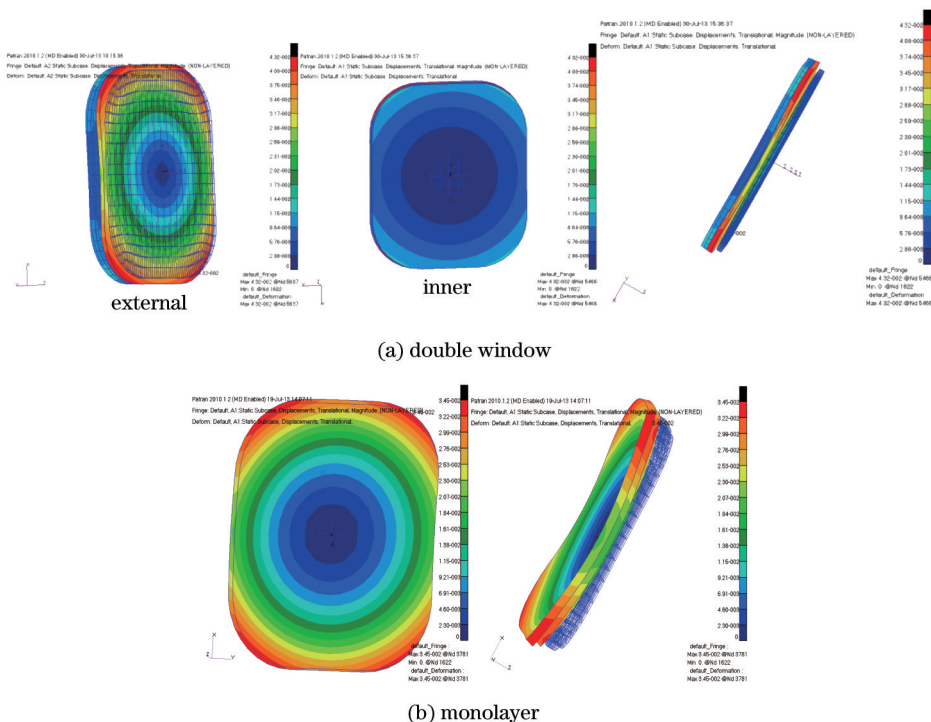


图9 双、单层光学窗口热变形

Fig.9 Thermal distortion of the double and monolayer optical window

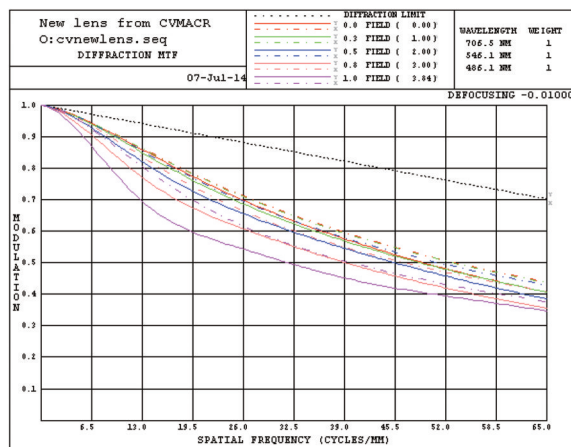


图10 理想 MTF 曲线

Fig.10 Ideal MTF curves

MTF有较大改善,提高到0.307,与设计MTF的相对下降量约为14%。

图13分别为间隔为10 mm和20 mm的双层光学窗口对应的MTF曲线,两组双层光学窗口下光学系统对应的离焦量分别约为-0.01 mm和-0.02 mm,两组双层光学窗口下光学系统对应的MTF值在65 cycle/mm情况下分别约为0.325和0.315,相对下降量分别约为6%和9%。10 mm间距的光学窗口玻璃窗口热变形后需要的调焦量更小。未经调焦,双层光学窗口已达到了调焦后的单层光学窗口对应的MTF值,满足成像要求。

表2为双层光学窗口不同视场角下的MTF值和像质均方根(RMS)值。对比分析可知,随着光学窗口玻璃的厚度增大,中心视场处的光学系统像质RMS值减小,边缘视场处的光学系统像质RMS值增大;大视场角的光学系统MTF值降低。

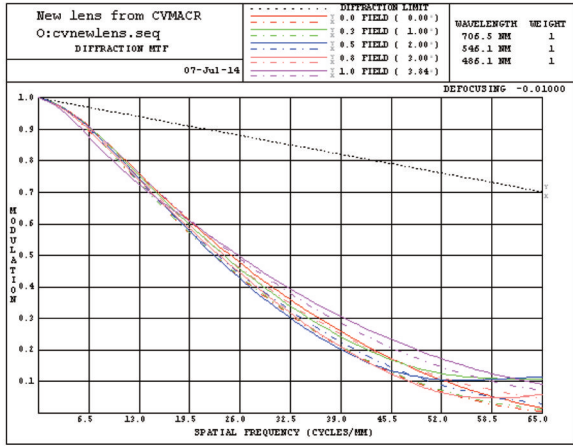


图 11 单层光学窗口光学系统 MTF

Fig.11 Optical system MTF of the monolayer optical window

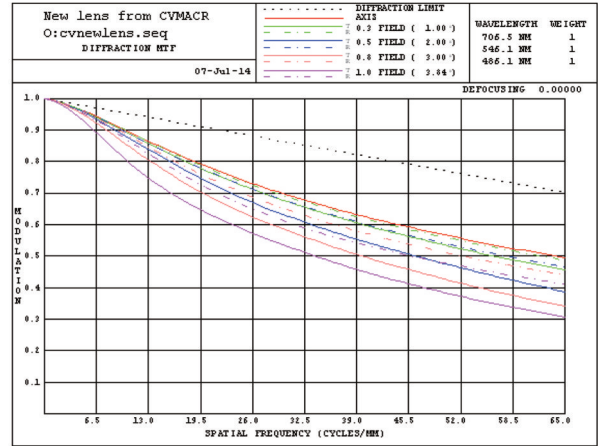
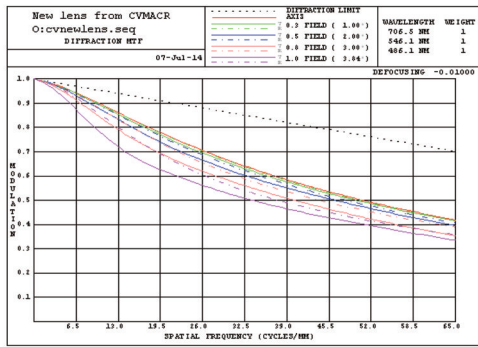
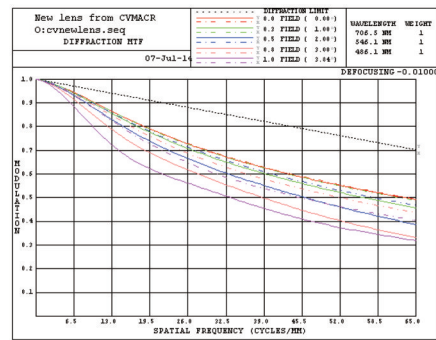


图 12 调焦后的单层光学窗口光学系统 MTF

Fig.12 Optical system MTF of the monolayer optical window after focusing



(a) MTF of the 10 mm-space double optical window



(b) MTF of the 20 mm-space double optical window

图 13 双层光学窗口光学系统 MTF

Fig.13 Optical system MTF of the double optical window

表 2 单、双层光学窗口 MTF 值和 RMS 值对比

Table 2 Values of the MTF and RMS of the monolayer and double optical window

MTF value comparison before and after thermal deformation						Optical system RMS					
Viewing angle	0°	1°	2°	3°	3.84°	0°	1°	2°	3°	3.84°	
Without introducing the thermal deformation	Initial	R0.496	R0.487	R0.466	R0.450	R0.411	0.0973	0.1194	0.1645	0.2020	0.2406
	23 mm (monolayer)	X0.423	X0.416	X0.399	X0.381	X0.369	0.1073	0.1382	0.2052	0.2822	0.3501
		Y0.455	Y0.402	Y0.317	Y0.310	Y0.307					
After introducing the thermal deformation	10 mm-space (double)	X0.486	X0.480	X0.459	X0.430	X0.399	0.1009	0.1260	0.1785	0.2245	0.2603
		Y0.490	Y0.450	Y0.374	Y0.328	Y0.315					
	20 mm-space (double)	X0.487	X0.481	X0.460	X0.431	X0.399	0.1013	0.1259	0.1772	0.2208	0.2550
		Y0.491	Y0.452	Y0.378	Y0.341	Y0.325					

7 结 论

对载机高速飞行工况下的航空遥感器双层光学窗口进行了热光学分析,并对比了同等厚度下单、双层

窗口玻璃设计时,高温条件对光学系统 MTF 及像质 RMS 的影响。

由分析结果可知,相较于单层光学窗口,双层光学窗口轴向温差和径向温差均大幅降低,摄像段(如 600 s 时刻)的轴向温差和径向温差分别可降低高达 63.6%和 42.0%;相较于单层光学窗口,在同样热载荷的作用下双层光学窗口对应的光学系统像质 RMS 值较小,在不需要调焦的情况下,MTF 值就基本符合要求;小间距的双层光学窗口玻璃,引入窗口热变形后需要的调焦量较小。

通过对双层光学窗口的分析,获得了双层光学窗口内外层玻璃的温度分布及热变形情况,为下一步进行的关于战机高速飞行环境下光学窗口的实验提供了理论依据。

参 考 文 献

- 1 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.
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.
- 2 Shi Jinfeng, Wu Qingwen, Zhang Jianping, *et al.*. Thermal-optical analysis for optical window of high-altitude and high-speed aerial camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 210-213.
石进峰,吴清文,张建萍,等. 高空高速航空相机光学窗口的热光学分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 210-213.
- 3 Luo Chuanwei, Chang Weijun, Qiang Hua, *et al.*. Analysis of aerodynamic pressure loading for supersonic aircraft optical window [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011,40(4):664-667.
罗传伟,常伟军,强 华,等. 超音速飞行器光学窗口气动压力载荷分析[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(4): 664-667.
- 4 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): 2012-2106.
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): 2012-2106.
- 5 Li Yanwei, Zhang Hongwen, Yuan Guoqin, *et al.*. Design of protector for altitude sub-assembled Optical window [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(3): 664-669.
李延伟,张洪文,远国勤,等. 高空分段拼装式光学窗口防护装置的设计[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(3): 664-669.
- 6 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.
丁亚林,仲崇亮,付金宝. 高马赫飞行条件下光学窗口数学模型的建立[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(3): 747-751.
- 7 Wang Wei, Dong Jihong, Meng Qingyu. Current status and developing tendency of visible spectral remote sensing camera for mars observation [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2): 208-214.
王 维,董吉洪,孟庆宇. 火星探测可见光遥感相机的发展现状与趋势[J]. *中国光学*, 2014, 7(2): 208-214.
- 8 Yang Weifan, Xu Shuyan, Cao Xiaotao. Design of scanning control system for space optical remote sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(2): 397-405.
杨维帆,徐抒言,曹小涛,等. 空间光学遥感器扫描控制系统设计[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(2): 397-405.
- 9 E R Fuller Jr, S W Freiman, J B Quinn, *et al.*. Fracture mechanics approach to the design of glass aircraft windows: a case study [C]. *SPIE*, 1994, 2286: 419-430.
- 10 John W Pepi. Fail-safe design of an all BK-7 glass aircraft window [C]. *SPIE*, 1994, 2286: 431-443.

栏目编辑: 韩 峰