

空间 CCD 相机光学窗口在轨热稳定性分析

牛晓明 吴清文

(中国科学院长春光学精密机械研究所 长春 130022)

摘要 计算了空间 CCD 相机光学窗口在满足面形要求下所允许的温度水平及温度梯度的变化范围,进行了窗口在空间热环境载荷作用下的瞬态温度场及稳态温度场的响应仿真,通过对计算结果的分析对窗口采取了相应的热控措施,取得了较好的热控效果。

关键词 光学窗口 热分析 有限元法

1 引言

空间 CCD 相机为对地观测光学成像系统,它的光学窗口安装在光学镜筒的前端,地物辐射经光学窗口进入相机的光学系统并成像在 CCD 焦平面上,由于窗口直接暴露于空间,它的外面是复杂的空间环境,在轨道运行期间将受到交变的空间外热流的辐射、空间热沉的辐射、各种宇宙射线的辐射、空间环境的污染等,因此,空间相机的光学窗口起着减小外部空间热环境对相机的影响,以及透可见光、反红外和防污染等作用,由此可见窗口的质量将直接影响相机的最终成像质量。窗口的运行轨道为太阳同步轨道,姿态为对地定向,地球可近似为 250K 的黑体,空间热沉近似为 3K 的黑体辐射^[1],因此窗口在轨运行期间将不断地向空间辐射热量,这样必然造成窗口温度的下降并产生温度梯度,使窗口玻璃折射率发生变化并产生面形误差,影响光线的透射并最终影响相机的成像质量。由于窗口与空间热环境的换热方式主要为辐射,因此,窗口材料表面的热物性如太阳吸收率、红外发射率等对窗口的温度水平和温度梯度的分布起着决定性的作用,根据这一特性,采用先进的镀膜技术,可以改善窗口表面的热物性,调节窗口与空间环境的能量交换,进而达到改变窗口表面的温度水平和温度梯度的目的,配合其它热控措施,使 CCD 相机的光学窗口满足要求。

2 窗口热分析模型的建立

为了解窗口的热响应情况是否满足要求并进一步研究窗口的热特性,需建立窗口的热

分析模型, 本文采用有限元法进行数值分析, 建立热分析和结构分析的有限元模型, 本文采用统一的模型。

2.1 有限元模型的建立

空间相机窗口的通光口径为 200mm, 厚度为 15mm, 材料为熔石英, 窗口框架材料为铝合金, 有限元模型的划分及温度场分布和热变形的计算采用 PA TRAN 软件进行, 采用三维体单元建立窗口玻璃和窗口框架的有限元模型, 共划分为单元 430 个, 节点 580 个, 有限元模型见图 1。

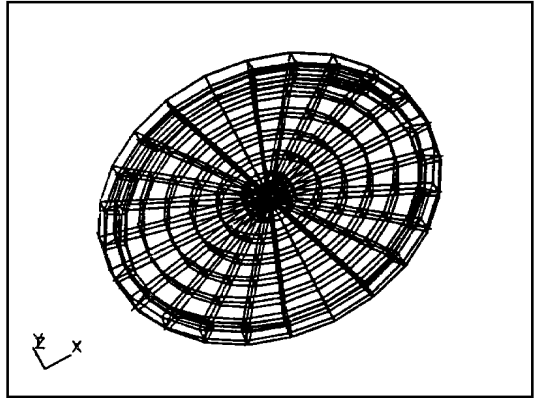


Fig 1 Finite element model

2.2 窗口的空间热环境和热计算的工况

窗口所受空间热载荷主要有太阳辐照、地球反照、地球红外辐射和空间热沉的影响等, 根据计算得到窗口在轨运行期间表面入射外热流瞬态变化曲线见图 2, 对于相机镜头对窗口的辐射和传导的影响, 本文暂不考虑。

- 瞬态工况: 考核窗口在轨运行期间特别是进入地球阴影区时窗口的瞬态温度分布。

- 稳态工况: 在轨道平均外热流的作用下考核窗口达到热平衡时的温度梯度分布。

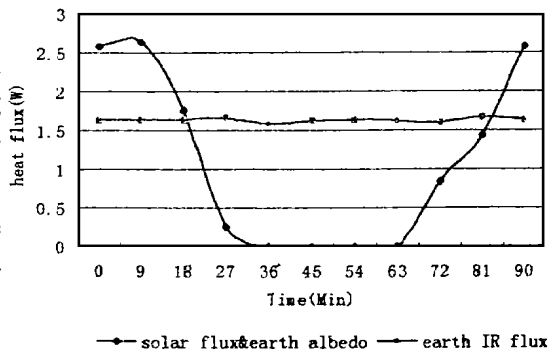


Fig 2 Space heat flux of window

3 窗口的温度要求

窗口温度指标的计算是进一步对窗口的热稳定性进行评价的前提条件, 是窗口热设计和热控是否达满足要求的判别标准, 根据光学系统提出的技术指标, 窗口的面形变化应满足 PV 值小于 $1/4\lambda$ RMS 值小于 $1/14\lambda$ 。窗口的温度分布较为复杂, 为便于分析, 温度指标的计算分两种情况: 窗口温度水平和温度梯度, 即窗口整体的温度波动和窗口轴向和径向的温度梯度应满足的变化范围, 由于窗口厚度相对较薄, 因此只计算窗口径向温度梯度对窗口面形的影响, 经计算可知窗口温度水平的变化应小于 1°C , 即窗口的温度变化范围应保持在 $18 \pm 1^\circ\text{C}$ 。窗口温度梯度的计算分两种情况: 窗口边缘的温度高于中心的温度和窗口边缘的温度低于中心的温度, 计算时分别在窗口的边缘和中心加不同的节点温度载荷, 然后进行稳态温度场的计算, 将得到的温度结果做为边界条件代入结构分析模型进行热变形求解, 得到窗口面形变化随径向温差的变化曲线如图 3、图 4 所示。由图 3、图 4 可见, 当边缘温度高于中心温度时, 窗口的径向温差允许值可达 0.5°C , 而边缘温度低于中心温度时, 温差可达 2°C , 根据这一结果, 在窗口热设计时, 应尽量使窗口边缘的温度接近或低于中心的温度, 以减小窗口的面形变化。

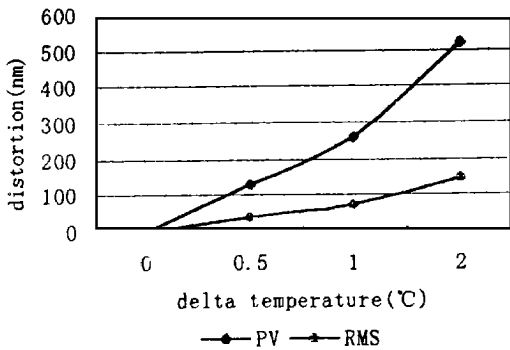


Fig 3 Wave front error of window

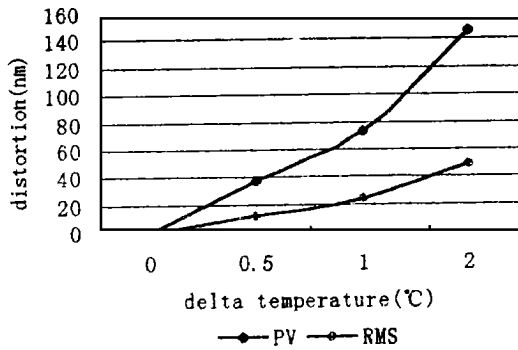


Fig 4 Wave front error of window

4 窗口在轨温度响应仿真结果

经过计算, 得到窗口在轨最大及最小温度瞬态分布曲线见图 5, 窗口的稳态温度分布见图 6, 窗口在轨一周的热量变化曲线见图 7。

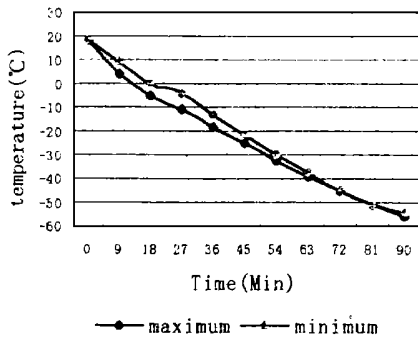


Fig 5 Temperature variation

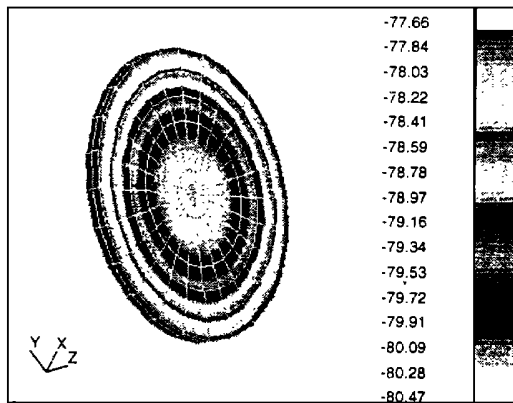


Fig 6 Temperature distribution

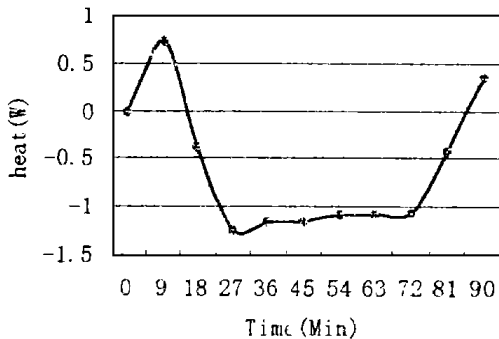


Fig 7 Heat losses of window

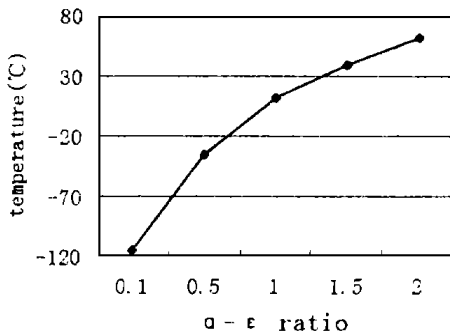


Fig 8 Temperature vs α/ϵ

由图 5~ 图 7 可见,窗口在轨运行期间尤其是在进入阴影区后产生了一定的热量流失,造成较大的温度梯度和温度水平的变化,大大超出了温度指标的要求,为此应采取热控措施对窗口进行温度补偿,以加强窗口的温度稳定性。

5 窗口的热控

由于宇宙空间空气稀薄,不存在空气自然对流,对于窗口来说,它主要是通过辐射和传导的方式进行换热,为了研究空间热环境对窗口的影响,将窗口近似看为等温体,它的辐射表面和空间热流的入射表面为窗口的外表面,可得热平衡方程:

$$\alpha q_s + \epsilon q_e - \epsilon A (\sigma T_w^4 - \sigma T_h^4) = m c_p \frac{dT}{dT} \tag{1}$$

- 其中: α —— 窗口表面的太阳吸收率
- ϵ —— 窗口表面红外发射率
- q_s —— 窗口受到的太阳幅照和地球返照热流
- q_e —— 窗口受到的地球红外幅照热流
- A —— 窗口外表面的面积
- σ —— 玻耳兹曼常数 ($5.67 \times 10^{-14} \text{W}/(\text{mm}^2 \cdot \text{K}^4)$)
- m —— 窗口质量
- c_p —— 窗口比热
- T_w —— 窗口温度
- T_h —— 热沉温度(3K)

当方程(1)右端为 0 时,方程(1)化为方程(2),即窗口稳态热平衡方程:

$$\alpha q_s + \epsilon q_e - \epsilon A (\sigma T_w^4 - \sigma T_h^4) = 0 \tag{2}$$

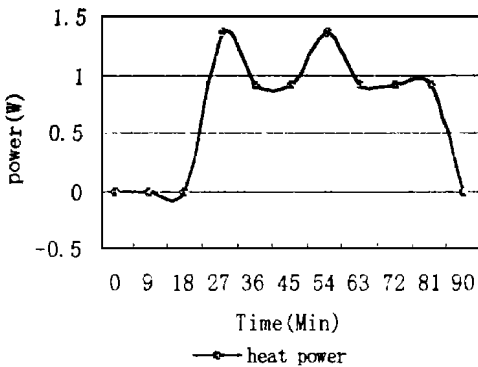


Fig 9 Heat up power

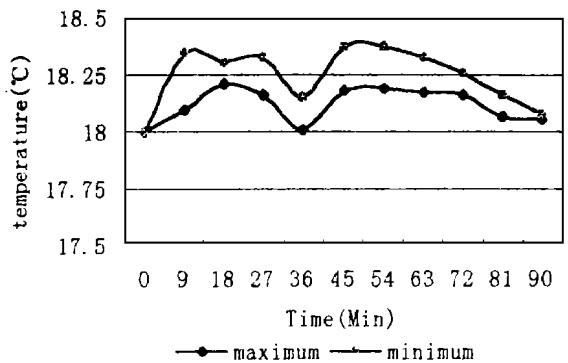


Fig 10 Temperature variation after thermal control

由方程(2)可见,窗口表面的太阳吸收率和红外发射率的高低对窗口平衡时的温度水平起着重要的调节作用,通过计算得到不同的吸收-发射比时窗口的平衡温度曲线见图 8。为了减

小窗口的漏热和由此而产生的温度波动和温度梯度, 采取在窗口表面镀 ITO 透明导电膜的方法, 该膜具有较高的导电率和在可见光区高度透明、在紫外光区强烈吸收、在红外光区强烈反射的光学特性, 由于相机的光谱范围主要在可见光区, 因此, 使用该膜具有三个作用: 一, 有利于相机充分在可见光波段进行观测; 二, 它的吸收- 发射率比为 $1(\alpha \approx 1/\epsilon \approx 1)$, 有助于减小窗口的漏热量, 由图 8 可见, 此时窗口的温度水平接近温度要求; 三, 利用 ITO 膜的良好导电性在窗口进入阴影区时对其通电加热来对窗口进行少量的温度补偿, 通过计算, 得到窗口的加热功率曲线见图 9, 窗口热控后瞬态温度分布曲线见图 10, 稳态温度场分布见图 11。

在窗口热设计时, 为了确保热控方案的高可靠性, 应充分考虑到可能出现的影响温度分布的各种因素, 在设计时留出余量。对于 ITO 膜来说, 它的发射率、吸收率与膜的厚度有关, 由于受现有加工、工艺条件的限制, 以及在轨运行过程中受空间环境的污染等的影响, 都将使 ϵ (发生变化, 考虑到极端情况, ITO 膜的发射率可增加到 0.4, 此时窗口的温度水平和温度梯度都将发生变化, 这就要求相应加大加热功率, 经过计算得到此时窗口的漏热量及加热功率变化曲线见图 12, 加热前后温度对比曲线见图 13。

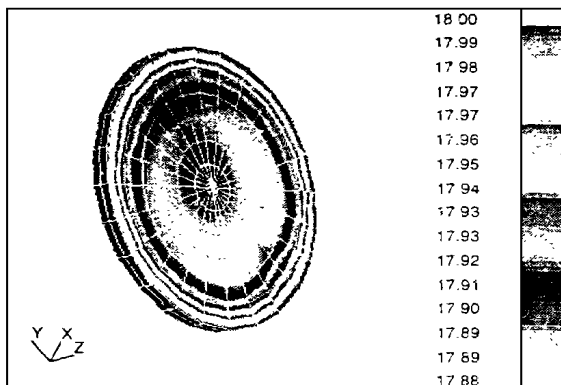


Fig 11 Temperature distribution after thermal control

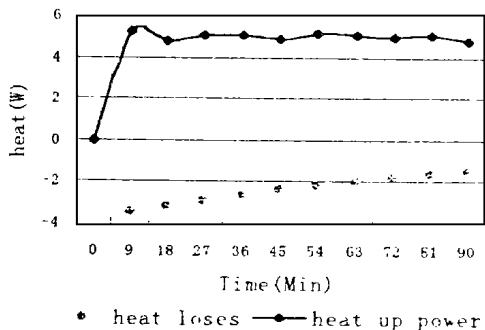


Fig 12 Heat variation

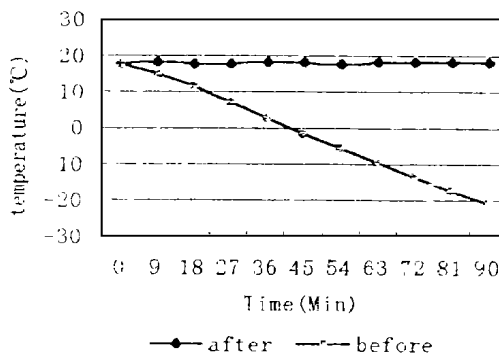


Fig 13 Temperature variation

6 结 论

本文利用有限元法计算了窗口的温度梯度和温度水平的允许变化范围, 进行了在轨期间的热响应仿真, 根据计算结果对窗口采取了热控措施, 由图 9、图 10、图 11 可见, 在窗口镀 ITO 膜以后, 只需加很小的加热功率, 就可使窗口的温度梯度和温度水平的变化大大降低, 并达到温度指标的要求。考虑到可能出现的极端情况, 计算了相应的加热功率, 由图 12、13 可见取了较好的效果。通过本文的分析, 为进一步实施窗口的热设计和热控提供了科学的依据。

参 考 文 献

- 1 闵桂荣. 卫星热控制技术. 北京: 宇航出版社, 1991. 34~ 35
- 2 牛晓明, 卢镔. 空间光学系统的热分析. 光学精密工程, 1996(6): 54~ 60

The Analysis of On-orbit Thermal Stability for Optical Window of Space CCD-camera

NIU Xiaoming, WU Qingwen

*(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)*

Abstract

The thermal requirement of the optical window are calculated in this paper by FEM, the on-orbit thermal properties and thermal response of the window under space thermal environment are analyzed, after the thermal control methods are taken, the temperature distribution and temperature variation of the window are much improved.

Key words: Optical window, Thermal analysis, FEM

牛晓明 男, 1968 年生, 1990 年毕业于北京理工大学, 1995 年毕业于长春光机所研究生部, 获硕士学位, 现主要从事空间光学仪器 CAD/CAE 工作。