

文章编号 1004-924X(2007)10-1489-06

轴向温差对空间遥感器光学系统成像质量的影响

王 红, 田铁印

(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:利用有限元分析计算了轴向温差对主、次镜面形的影响,对光学系统成像质量进行了评价。用 PATRAN 软件建立有限元模型,用 NASTRAN/NT 有限元分析软件完成温度场的分析计算。用 Zernike 多项式曲面拟合系数表示轴向温差对主、次镜面形的影响,通过 ZEMAX 软件分析对光学系统成像质量的影响,实现了热分析与光学分析的接口。结果表明:轴向温差不仅使光学系统产生像面位移—离焦,而且将产生各种像差,降低光学系统的成像质量,所以在调焦的同时,必须采取温控措施。最后给出了轴向温差具体的温控指标,主镜的轴向温差为 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,次镜为 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,主、次镜之间为 $3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

关键词:空间遥感器;轴向温差;光学系统;像质;热光学分析

中图分类号:TH703;TP732 **文献标识码:**A

Effect of axial temperature difference on imaging quality of space remote sensor optical system

WANG Hong, TIAN Tie-yin

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

Abstract: The Finite Element Analysis(FEA) method is used in thermal analysis on axial temperature difference effects on the imaging quality of space remote sensor optical system, and deformations of Primary Mirror(PM) surface and Second Mirror(SM) surface. The FEA model was set up by PATRAN software, and temperature distribution calculation was completed by NASTRAN/NT software. The thermal elasticity deformations of main surfaces were expressed in Zernike polynomial and the analysis results were computed by ZEMAX optical design software to carry out the interface between the thermal analysis and the optical analysis. The results show that the axial temperature difference not only brings the defocus, but also effects on the image quality of the optical system. So temperature control is needed in focusing. Finally, this paper suggests that the axial temperature difference requirement of the PM is $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, the SM is $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, and between PM and SM is $3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Key words: space remote sensor; axial temperature difference; optical system; image quality; thermal-optical analysis

收稿日期:2007-02-13;修订日期:2007-07-13.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 06XX1SA062)

1 引言

热光学分析是综合传热学、结构力学和光学等多个学科对光学仪器的光机系统进行数值分析,获得热光学性能变化的过程。为了保证光学系统在一定的温度条件下满足成像质量的要求,需要通过理论计算、数值仿真和实验等方法,研究遥感器光学系统在不同空间热环境条件下的温度场分布、热弹性变形及对光学系统成像质量的影响,最后提出遥感器正常工作所需要的温度水平指标、各种温差要求及对周围环境的要求。

对遥感器光学系统进行热光学分析,是了解遥感器在轨运行过程中光学性能的必要手段,其目的是为了研究和寻求提高长寿命对地观测遥感器光机结构的热稳定性与热控方法,使其在恶劣的空间环境下具有更可靠的光学性能。热光学分析反映了空间遥感器光学系统的性能与其热环境的相互关系,为进一步开展热设计提供了方向和目标。

由于空间遥感器是长寿命对地观测卫星的主要有效载荷,卫星的轨道寿命与任务性质决定了遥感器必须在严酷的空间环境下具有可靠的光学性能,本研究的热分析是通过光学系统进行传热学分析和结构力学分析,得到热致温度场和位移场变化,最后通过光学分析得到热致光学性能变化。

空间遥感器的光学系统位于舱内,舱内的热环境与周围的物体同时存在着热辐射、热传导和对流等形式的热交换。它与周围物质有的接触,有的非接触,因为有各种形式的热源,且其功率大小、分布和工作模式的变化构成了不同区域及同一区域不同时刻、不同的温度场分布。整个遥感器光学系统稳、瞬态温度场的分析计算是热分析的重要步骤之一。瞬态温度场的分布是对 5D 场的描述,稳态温度场的分布是对 4D 场的描述。实际上,瞬态温度场经过一定时间的热交换后,会逐步达到平衡。所以,本文将运用温度瞬态变化的最终结果近似代替稳态值。

Steven E. Forman 等人将主镜的热变形通过 Zernike 多项式拟合与全息干涉图相比进行研究^[1],认为材料导热率大(如铝)的主镜热变形主要的影响是离焦,轴向温差容易引起初级像差;

Pierre Y. Bely 等人在对 10 m 空间望远镜主镜结构分析和热分析中^[2],对主镜轻量化的三点支撑双拱型结构做了详细描述,运用 SSPTA(热分析)、NASTRAN(有限元分析)和 ACCOSV(光学分析)等软件研究了主镜的热特性,并在 10 m 直径的主镜背面加上 400 个主动控制的激励器,用于补偿温度变化导致的面形误差,分析表明轴向温差比径向温差对光学系统成像质量的影响更严重。

本文对轴向温差对遥感器光学系统成像质量的影响进行了热光学分析和计算,提出了各种轴向温差的指标要求。

2 轴向温差的定义

图 1 所示的卡塞格林式光学系统由主镜、次镜和校正镜组成。将轴向温差分为光学元件自身的轴向温差和主、次镜轴向温差两种形式,分析轴向温差对空间遥感器光学系统成像质量的影响。

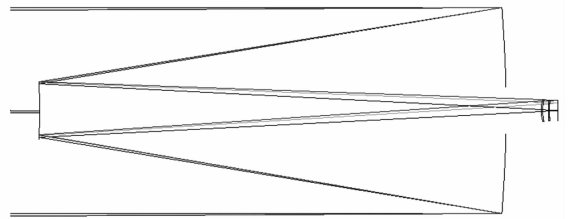


图 1 空间遥感器光学系统图

Fig. 1 Optical system of space remote sensor

2.1 光学元件自身轴向温差

光学元件自身轴向温差指光学元件的两个表

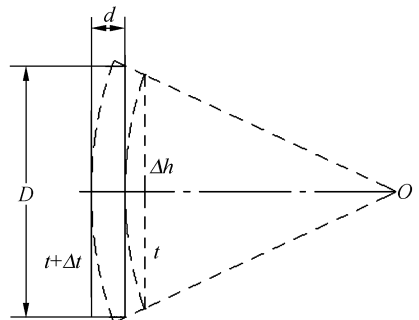


图 2 等效平板玻璃

Fig. 2 Equivalent flat glass

面之间的温度差。对主、次镜而言,自身前后表面存在轴向温差时,将其等效成一平板玻璃^[3]。如图 2 所示。

设平板玻璃通光口径为 D ,厚度为 d ,线膨胀系数为 α ,右边的温度为 t ,左边的温度为 $t + \Delta t$ 。此时,玻璃的厚度中形成固定的温度梯度。当温度从右表面 t 增加到左表面 $t + \Delta t$ 后,平板玻璃将趋于弯曲,成为图 2 虚线所示的形状。则有:

$$\Delta D = D \cdot \alpha \cdot \Delta t, \tag{1}$$

$$R = d / \alpha \cdot \Delta t, \tag{2}$$

$$\Delta h = D^2 \cdot \alpha \cdot \Delta t / 8d, \tag{3}$$

式中, ΔD 为左右表面的基本圆直径差, R 为平板弯曲为圆盘的曲率半径, Δh 为矢高增量。对于球面反射镜,当焦距为 f 时,其镜面总矢高为:

$$h = D^2 / 16f, \tag{4}$$

那么,对应于矢高增量 Δh 的焦距改变量为:

$$\Delta f = -2f^2 \cdot \alpha \cdot \Delta t / d. \tag{5}$$

2.2 主、次镜轴向温差

主、次镜轴向温差指主、次镜之间沿光轴方向的温度差。当考虑遥感器舱壁热传导、热辐射及内部热源作用时,系统温度将沿光轴方向逐步升高。前面的两支架之间的温度变化较为平缓,后面由于电机发热,使温度陡然升高,在两支架及镜筒连接处由于温度的传递存在较大的温度差。一般地,主镜离内部热源及支架近,它的温度受热源及舱壁影响较大,次镜离内部热源及舱壁远,它的温度受环境影响较小。

3 有限元模型的建立

遥感器光学系统的光焦度主要由主、次镜来承担,它们是整个光学系统中重要的光学元件,而且主、次镜距离内部热源和支架很近,所以其温度受热源及舱壁温度的影响较大。同时,主、次镜均为较大口径的反射镜,当存在各种温差时,面形将发生变化,产生局部误差,在引入倾斜和离焦的同时,产生像散、彗差等像差,使得光学系统的成像质量下降,降低遥感器的分辨率。

空间遥感器光学系统的主、次镜均为非球面(双曲面),经过公差分配得到温度对其面形精度要求:PV 值为 $\lambda/10$,RMS 值为 $\lambda/40$ 。

光学系统的光学和机械结构主要包括:主镜、次镜、主镜室、中筒、支撑杆、次镜座、遮光镜筒等。

根据光机系统结构及主、次镜的设计参数,采用 PATRAN 软件建立有限元模型, NAS-TRAN/NT 有限元分析软件完成温度场的分布计算。图 3、4 和图 5 分别为建立的遥感器光机系统、主镜和次镜的有限元模型。

光机系统共有节点 12 108 个,单元 8 643 个,支架采用的是壳单元,镜筒采用的是六面体单元。

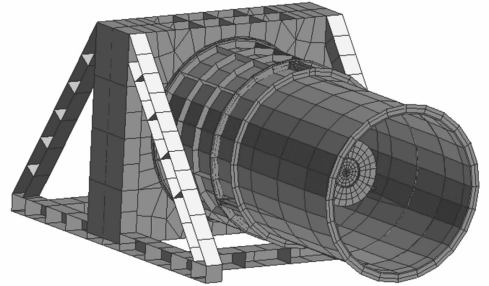
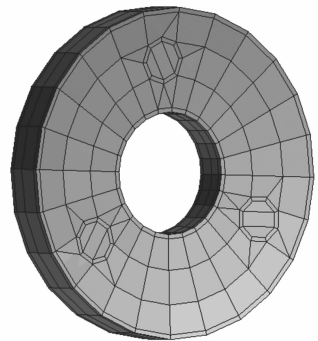


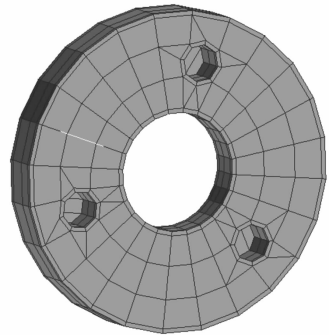
图 3 光机系统有限元模型

Fig. 3 FEA model of optical-mechanical system



(a) 主镜正面有限元模型

(a) FEA model of PM (obverse)



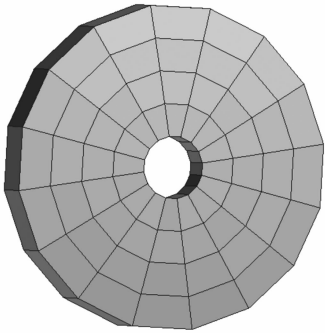
(b) 主镜背面有限元模型

(b) FEA model of PM (inverse)

图 4 主镜的有限元模型

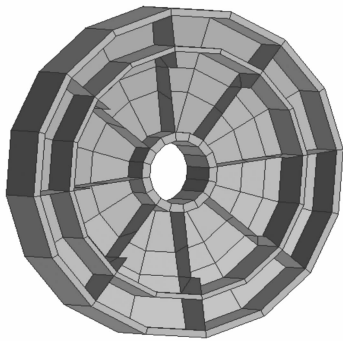
Fig. 4 FEA model of PM

主镜共有节点 900 个,单元 597 个,采用的是六面体单元;次镜共有节点 296 个,单元 168 个,采用的是壳单元、三角形板传导单元和六面体单元。



(a) 次镜正面有限元模型

(a) FEA model of SM (obverse)



(b) 次镜背面有限元模型

(b) FEA model of SM (inverse)

图 5 次镜的有限元模型

Fig. 5 FEA model of SM

4 轴向温差对光学系统的影响

根据有限元分析结果,采取标准球面方程拟合^[4]计算轴向温差对主、次镜间隔及主、次镜面形精度的影响,将轴向温差对主、次镜面形的影响以 Zernike 多项式曲面拟合系数表示,利用 ZEM-

AX 软件分析轴向温差对光学系统成像质量的影响,实现热分析与光学分析的接口。

4.1 主次镜面形公差要求

当参考波面半径 l_c 选取适当时, $\bar{w} = 0$, 则中心点亮度比 S 只与 w^2 有关,即中心点亮度比 S 只与波像差的平方平均值有关。

$$S = 1 - k^2 w^2, \quad (6)$$

当 $S = 0.8$ 时, $k^2 w^2 = 0.2$

$$w^2 = \frac{0.2}{k^2} = \frac{0.2}{(2\pi/\lambda)^2} = \frac{\lambda^2}{200}. \quad (7)$$

均方根值波像差 $\sigma = \sqrt{w^2} = 0.07 \lambda$ 。可见,当中心点亮度比 $S \geq 0.8$ 时,光学系统的均方根波像差 $\sigma \leq 0.07 \lambda$,这是对理想光学系统的波像差容限。为了实现整个光学系统的均方根波像差的要求,对于本文所研究的空间遥感器光学系统,轴向对的主、次镜的面形误差的 RMS 值要求 $< \lambda/40$, PV 值要求 $< \lambda/10$ 。

4.2 主、次镜光学元件自身的轴向温差

由式(3)、(5)可见,当反射镜两面存在轴向温差时,其曲率半径和焦距将发生变化。如果各点的温差一致,那么曲率变化一致。这种变化不大时,一般不会影响光学系统的成像质量。但遥感器在工作状态时,主、次镜所处的环境使其前、后表面不同程度地存在温差的不均匀性,从而使这种曲率变化在镜面上各点不一致。即使其不一致性很小,也将导致光学系统较为显著的像散。

由于反射镜口径越大,温差越大,对像质影响越大;相对厚度比 d/D 越大,膨胀系数越小,温差越小,对像质影响越小。反射镜采用了低膨胀系数的碳化硅材料,相对厚度比为 0.16,可以通过相应的热控手段来满足光学系统对轴向温差的要求。

分析主、次镜前后表面之间的轴向温差对其面形和光学系统成像质量的影响,结果如表 1~表 4 所示。

表 1 主镜轴向温差的热光学分析结果(背面比正面高)

Tab. 1 Thermal-optical analysis results of axial temperature difference of PM
(inverse temperature is higher than obverse temperature)

轴向温差	面形的变化(单位: λ)		光学系统的传递函数 MTF(38.5 lp/mm)			像面离焦量 (单位: mm)
	PV	RMS	0 视场	0.71 视场	1.0 视场	
0.6 $^{\circ}\text{C}$	0.06	0.017	0.608	0.568	0.562	-0.687
0.8 $^{\circ}\text{C}$	0.08	0.022	0.538	0.517	0.513	-0.913
1.0 $^{\circ}\text{C}$	0.11	0.028	0.464	0.462	0.449	-1.138

表 2 主镜轴向温差的热光学分析结果(正面比背面高)

Tab.2 Thermal-optical analysis results of axial temperature difference of PM
(obverse temperature is higher than inverse temperature)

轴向温差	面形的变化(单位: λ)		光学系统的传递函数 MTF(38.5 lp/mm)			像面离焦量 (单位:mm)
	PV	RMS	0 视场	0.71 视场	1.0 视场	
0.6 $^{\circ}\text{C}$	0.06	0.017	0.670	0.576	0.569	0.651
0.8 $^{\circ}\text{C}$	0.08	0.022	0.613	0.526	0.522	0.871
1.0 $^{\circ}\text{C}$	0.11	0.028	0.542	0.477	0.459	1.091

表 3 次镜轴向温差的热光学分析结果(背面比正面高)

Tab.3 Thermal-optical analysis results of axial temperature difference of SM
(inverse temperature is higher than obverse temperature)

轴向温差	面形的变化(单位: λ)		光学系统的传递函数 MTF(38.5 lp/mm)			像面离焦量 (单位:mm)
	PV	RMS	0 视场	0.71 视场	1.0 视场	
1.0 $^{\circ}\text{C}$	0.10	0.020	0.625	0.605	0.595	-0.022
2.0 $^{\circ}\text{C}$	0.20	0.040	0.440	0.423	0.409	-0.058
3.0 $^{\circ}\text{C}$	0.30	0.060	0.411	0.392	0.371	-0.093
4.0 $^{\circ}\text{C}$	0.40	0.080	0.354	0.292	0.288	-0.129
5.0 $^{\circ}\text{C}$	0.50	0.100	0.303	0.229	0.229	-0.165

表 4 次镜轴向温差的热光学分析结果(正面比背面高)

Tab.4 Thermal-optical analysis results of axial temperature difference of SM
(obverse temperature is higher than inverse temperature)

轴向温差	面形的变化(单位: λ)		光学系统的传递函数 MTF(38.5 lp/mm)			像面离焦量 (单位:mm)
	PV	RMS	0 视场	0.71 视场	1.0 视场	
1.0 $^{\circ}\text{C}$	0.11	0.021	0.630	0.583	0.529	0.040
2.0 $^{\circ}\text{C}$	0.22	0.042	0.455	0.416	0.382	0.066
3.0 $^{\circ}\text{C}$	0.33	0.063	0.424	0.404	0.390	0.092
4.0 $^{\circ}\text{C}$	0.44	0.084	0.432	0.392	0.366	0.118
5.0 $^{\circ}\text{C}$	0.55	0.105	0.367	0.321	0.295	0.144

从上面各表的计算结果可见:

(1)主、次镜自身存在轴向温差时,产生的主要像差是离焦和球差,其次是 X 向倾斜和像散。主、次镜前后表面温差符号相反时,产生的像差大小相等,符号相反。

(2)无论主、次镜的前面温度比背面温度是高还是低,满足面形和光学系统成像质量的轴向温差要求是一致的。对于主镜,其轴向温差要求为 0.8 $^{\circ}\text{C}$;对于次镜,其轴向温差要求为 1.0 $^{\circ}\text{C}$ 。

4.3 主、次镜之间存在轴向温差

主、次镜之间存在轴向温差时,主要影响的是主、次镜之间距离。当考虑遥感器舱壁热传导、热辐射及内部热源作用时,系统温度沿光轴方向逐

渐升高。前面两支架之间的温度变化较为平缓,后面由于电机发热使温度陡然升高,在两支架及镜筒连接处由于温度的传递存在较大的温差。主镜离内部热源及支架近,它的温度受热源及舱壁影响较大,次镜离内部热源及舱壁远,它的温度受环境影响较小。主、次镜之间的轴向温差,一方面使主、次镜本身面形发生变化,另一方面主、次镜之间的距离产生变化,最终导致整个光学系统的焦面位置和成像质量发生变化。表 5~表 6 为主、次镜之间存在轴向温差时的分析结果。

从上面各表的计算结果可见:

(1)无论是主镜比次镜温度高,还是次镜比主镜温度高,满足面形和光学系统成像质量轴向温

表 5 主、次镜轴向温差的热光学分析结果(主镜比次镜高)

Tab. 5 Thermal-optical analysis results of axial temperature difference between PM and SM
(PM temperature is higher than SM temperature)

轴向温差	光学参数(单位:mm)			光学系统的传递函数 MTF(38.5 lp/mm)			像面离焦量 (单位:mm)
	主镜半径	次镜半径	主、次镜间隔	0 视场	0.7 视场	1.0 视场	
1 ℃	-2 005.000 6	-1 494.787 9	700.000 0	0.722	0.688	0.645	-0.531
2 ℃	-2 005.005 3	-1 494.788 3	700.000 1	0.656	0.636	0.60	-0.741
3 ℃	-2 005.010 1	-1 494.788 9	700.000 2	0.554	0.543	0.518	-0.951
4 ℃	-2 005.024 4	-1 494.789 6	700.000 2	0.448	0.446	0.431	-1.160

表 6 主、次镜轴向温差的热光学分析结果(主镜比次镜低)

Tab. 6 Thermal-optical analysis results of axial temperature difference between PM and SM
(PM temperature is lower than SM temperature)

轴向温差	光学参数(单位:mm)			光学系统的传递函数 MTF(38.5 lp/mm)			像面离焦量 (单位:mm)
	主镜半径	次镜半径	主、次镜间隔	0 视场	0.7 视场	1.0 视场	
1 ℃	-2 004.995 6	-1 494.811 1	700.000 1	0.722	0.687	0.645	-0.311
2 ℃	-2 004.995 3	-1 494.834 5	700.000 2	0.661	0.641	0.609	-0.328
3 ℃	-2 004.995 1	-1 494.858 0	700.000 4	0.577	0.573	0.550	-0.345
4 ℃	-2 004.994 9	-1 494.881 5	700.000 5	0.514	0.503	0.492	-0.363

差要求的均为 3.0 ℃。

(2)从像面离焦及光学系统的传递函数看,主镜对温度变化的影响要比次镜敏感得多。

5 结 论

对轴向温差对空间传感器光学系统及主、次

镜的影响进行了有限元分析,计算了轴向温差对主、次镜面形的影响,对光学系统成像质量进行了评价。认为轴向温差不仅使光学系统产生像面位移—离焦,而且将产生各种像差,降低光学系统的成像质量,所以在调焦的同时,必须采取温控措施。最后,提出了轴向温差具体的温控指标要求。

参考文献:

- [1] FORMAN S E, SULTANA J A. Evaluation of mirror thermal distortion from temperature measurements [J]. *SPIE*, 1990, 1303: 65-77.
- [2] BELY P Y. Space Ten-Meter Telescope (STMT) structural and thermal feasibility study of the primary mirror [J]. *SPIE*, 1987, 751: 29-36.
- [3] 伍凡. 温度对大型光学镜子质量的影响 [J]. *光学工程*, 1986, 4: 24-29.
WU F. Temperature effect of large optical mirror [J]. *Optical Engineering*, 1986, 4: 24-29. (in chinese)
- [4] 吴清文. 镜面面形误差的曲面方程处理方法 [J]. *光学 精密工程*, 1998, 6(6): 56-60.
WU Q W. Curve surface equation methods about mirror surface error [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1998, 6(6): 56-60. (in chinese)
- [5] SMITH W J. *Modern Optical Engineering: the Design of the Optical System* [M]. (Second Edition) McGraw-HILL, Inc, 1990.

作者简介:王 红(1968—),女,吉林长春人,博士,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员,主要从事航天相机及大型光电经纬仪光学系统的研究与设计。E-mail: wanghong@ciomp.ac.cn