

主动调焦式航空相机物镜光学设计及温度仿真分析

蓝公仆¹ 汪旋^{1,2} 梁伟¹ 高晓东¹ 马文礼¹

(¹ 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)
(² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 对流层内,环境温度随海拔高度的升高而降低。为了补偿温度变化对成像质量的影响,设计了主动调焦式航空相机物镜: $f=400$ mm、视场角 $2\omega=10^\circ$ 、 F 数为 8、波段 460~750 nm、总长 380 mm、后截距 150 mm;该物镜在常温常压下,调制传递函数(MTF) $f_{MT} \geq 0.52(70 \text{ lp/mm})$,接近衍射极限;各视场弥散斑均方根(RMS)直径大小约 3.6 μm ;该相机包括一调焦组,移动范围为 ± 5 mm,调焦组每移动 0.1 mm,焦平面约移动 0.026 mm。针对设计结果,随后进行了温度水平分析和温度梯度仿真。对于温度水平分析,在 $-60^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$ 下进行了稳态调焦分析,分析结果表明经调焦组主动调焦后,物镜成像质量与常温下相差不多,可成清晰像;于此同时,相机可在调焦完成后,在温度宽度为 $\pm 16^\circ\text{C}$ 的范围内保证像质。对于温度梯度仿真,人为地对各透镜单独设定温度场得到 20°C 轴向、径向温度梯度,有限元仿真及相应的计算结果表明,经主动式温度调焦后,在温度梯度情况下,相机物镜依然保证成像清晰。

关键词 遥感;航空相机;光学设计;有限元分析

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0322006

Optical Design and Thermal Analysis for the Active-Focusing Aerial Camera Objective

Lan Gongpu¹ Wang Xuan^{1,2} Liang Wei¹ Gao Xiaodong¹ Ma Wenli¹

(¹ Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)
(² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In the troposphere, the higher the altitude ascends, the lower the temperature is. To compensate the influence of the change of temperature upon the image quality, an active-focusing aerial camera objective is designed, for which f is 400 mm, field of view 2ω is 10° , F number is 8, wavelength range is 460~750 nm, total track is 380 mm and back focal length B_{FL} is 150 mm. This objective has perfect resolution, whose modulation transfer function f_{MT} is no less than 0.52 at 70 lp/mm and the root mean square (RMS) diameter of the spot is 3.6 μm . A focusing group is equipped in this objective whose motion range is ± 5 mm, and the 0.1 mm moving value is responsible for 0.026 mm in the image plane. The stationary thermal analysis and the temperature gradient emulation of the camera objective are presented subsequently. For the stationary thermal analysis, it is showed that after the active focusing, the aerial camera objective can obtain good image quality at the temperature range of $-60^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$. For the temperature gradient emulation, each lens' temperature gradient is set artificially which obtains the 20°C axial and radial temperature gradients respectively; the result of the emulation shows that the objective can obtain good image quality at the 20°C temperature gradient by active focusing.

Key words remote sensing; aerial camera; optical design; finite element analysis

OCIS codes 220.3620; 280.6780

收稿日期: 2011-09-05; 收到修改稿日期: 2011-10-13

基金项目: 中国科学院前沿课题基金(ck0308)资助课题。

作者简介: 蓝公仆(1982—),男,博士,主要从事光学设计、光电探测和航空相机等方面的研究。

E-mail: langongpu@yahoo.com.cn

1 引言

在中高空飞行平台上(对流层内),环境温度随海拔高度的升高而降低,海拔每升高 1 km 温度下降 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右^[1]。当飞机从地面飞至 7000 m 高空时,温度将下降 $42\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。而光学镜头对温度造成的折射率、间距和元件面形变化等非常敏感,成像质量会受到影响^[2]。

国内外许多机构对温度补偿技术,即无热化技术^[3~14]进行了研究,其原理为通过一定的补偿,使光学系统在一个较宽的温度范围内保持焦距不变或变化很小。目前的温度补偿技术主要有三类:被动式、主动式和混合补偿式。本文采用主动调焦式对航空相机物镜进行设计,并针对设计结果,在温度水平为 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下进行稳态调焦分析;在温度梯度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 轴向、径向温差对相机进行有限元分析及像质评价。

2 光学设计关键技术

为保证航空相机具备优良性能,在光学设计阶段就应考虑温度的影响。作者认为,中长焦航空相机光学设计的关键技术有以下两点:

1) 主动调焦技术:指光学系统对一定范围内的温度变化引起的像面离焦进行调节且保证像质清晰的技术。在设计时需设置多重结构对不同温度下的系统进行优化。

2) 调焦后温度适应技术:指在调焦后,相机仍能在一定的温度变化范围内成清晰像;或者在系统内部残存局部温度场的情况下,系统成像仍然清晰的技术。它能够保证环境变化时系统成像质量的稳定性、减少温控成本。在光学设计时,应主要注意:①玻璃材料线膨胀系数的选择;②采用“小像差互补”法。

3 光学系统设计结果

3.1 相机结构

图 1 为主动调焦式航空相机物镜结构^[15,16],其焦距 $f=400\text{ mm}$ 、视场角 $2\omega=10^{\circ}$ 、 F 数 8、波段 $460\sim 750\text{ nm}$ 、总长 380 mm 、后截距 150 mm 。其透镜 7 为调焦组^[17],移动范围为 $\pm 5\text{ mm}$ (符号“-”表示调焦组向左移动,“+”表示调焦组向右移动)。透镜 7 每移动 0.1 mm ,焦平面约移动 0.026 mm 。

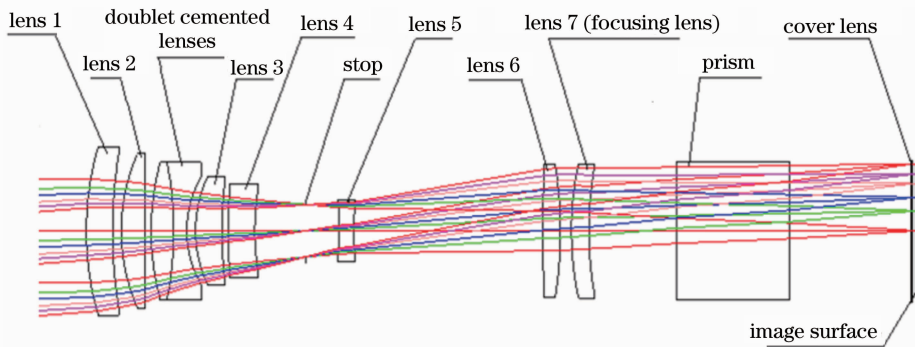


图 1 主动调焦式中长焦航空相机物镜光学结构图

Fig.1 2-D layout of the active focusing aerial camera objective with middle-long focal length

3.2 玻璃材料选择

玻璃材料的选择主要考虑玻璃材料的线膨胀系数(见表 1),其选用主要基于以下考虑:

1) 透镜 1 最先接触外界环境且最先发生热变形,因此应选择线膨胀系数最小的玻璃材料以保证其对温度变化的不敏感性。透镜 1(玻璃材料 1)的线膨胀系数为 $5.9\times 10^{-6}/\text{K}$ 。

2) 对于胶合镜来说,为防止因两种玻璃材料线膨胀系数的不匹配在温度变化时产生的内部应力致使胶合处面型变化甚至产生脱胶现象,双胶合透镜 1(玻璃材料 3)的线膨胀系数为 $6.5\times 10^{-6}/\text{K}$;双胶合

透镜 2(玻璃材料 4)的线膨胀系数为 $6.6\times 10^{-6}/\text{K}$ 。

3) 其它透镜玻璃材料的选用,在控制像差的前提下,应尽量选用线膨胀系数与结构件钛合金相近的,即在 $8.8\times 10^{-6}/\text{K}$ 左右。

3.3 初级相差

在初级像差中,球差是最基本的像差,其它像差(除了场曲和色差)均可用球差来表示。因此采用“小像差互补法”优化时,主要考虑控制各表面所贡献的球差绝对值为小量。采用“小像差互补法”的好处是:①环境发生变化时,各透镜因变形不一致性而引起的额外像差也为小量;②当透镜表面存在温度

梯度时,透镜表面不同环带处像差贡献量的不均匀性也为一个小量。③对公差的要求也大大降低。

透镜初级像差值如表 2 所示。从表中可以看出,球差绝对值最大的面为第 4 面、第 6 面、第 7 面和第 8 面。分别为-0.587162、0.442836、0.771238

和-0.372160。实际上,这些球差也不是很大,在允许的范围,经公差分析,对系统并无严重影响。作为补偿组的透镜 7,优化时控制其像差,保证了其位置发生变化后,引起的额外像差是个小量,即调焦前后像质变化不大。

表 1 透镜材料热学性能参数

Table 1 Thermal properties of the glass materials of the lens

Glass material	Young's modulus /MPa	Poisson ratio	Density /(kg/mm^3)	Thermal coefficient of expansion / ($1/^\circ\text{C}$)	Heat conductivity / (W/mm)	Heat Capacity /($\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$)
1	95000	0.259	4×10^{-6}	5.9×10^{-6}	8×10^{-4}	540
2	62000	0.232	2.45×10^{-6}	9.2×10^{-6}	9.25×10^{-4}	808
3	79000	0.239	3.08×10^{-6}	6.5×10^{-6}	8×10^{-4}	600
4	79000	0.251	3.2×10^{-6}	6.6×10^{-6}	8.1×10^{-4}	690
5	82000	0.206	2.51×10^{-6}	7.1×10^{-6}	1.114×10^{-3}	858
6	96000	0.26	3.53×10^{-6}	8.5×10^{-6}	9.9×10^{-4}	660
7	93000	0.262	3.37×10^{-6}	9.03×10^{-6}	9.6×10^{-4}	690
8	90000	0.243	2.92×10^{-6}	8.04×10^{-6}	1.04×10^{-3}	760
9	109000	0.288	4.41×10^{-6}	7.37×10^{-6}	7.9×10^{-4}	530
10	71000	0.224	2.59×10^{-6}	8.2×10^{-6}	9.5×10^{-4}	783
11	66000	0.225	2.5×10^{-6}	9.61×10^{-6}	1.04×10^{-3}	860

表 2 初级像差

Table 2 Primary aberrations

Surface	SA	TCO	TAS	SAS	PTB	DST	AX	LAT	PTZ
1	-0.238865	0.061027	-0.106386	-0.102921	-0.101189	0.008765	-1.496921	0.127482	-0.003464
2	-0.006252	-0.027227	0.024700	0.051049	0.064223	0.074105	0.354116	0.514054	0.002199
3	-0.166442	0.045055	-0.114830	-0.112120	-0.110765	0.010117	-0.332964	0.030044	-0.003792
4	-0.587162	1.723913	-1.685746	-0.560984	0.001396	0.549018	-0.290506	0.284309	0.000048
5	0.002783	-0.054242	0.264451	0.029489	-0.087991	-0.191607	0.030108	-0.195630	-0.003012
6	0.442836	-0.878047	0.585618	0.198734	0.005293	-0.131349	0.455719	-0.301197	0.000181
7	0.771238	-0.175008	0.243917	0.235092	0.230679	-0.017782	0.811377	-0.061372	0.007897
8	-0.372160	-0.036119	-0.172273	-0.171494	-0.171105	-0.005548	-0.378140	-0.012233	-0.005857
9	-0.032038	0.220500	-0.447743	-0.110502	0.058119	0.253509	-0.083191	0.190853	0.001990
10	0.131581	-0.591791	0.844197	0.252731	-0.043001	-0.378889	0.499642	-0.749050	-0.001472
11	-0.003050	-0.042911	-0.086769	0.047397	0.114480	0.222285	0.119025	0.558213	0.003919
Stop	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
13	0.070505	-0.300046	0.445356	0.161602	0.019725	-0.229240	0.326921	-0.463754	0.000675
14	0.004413	0.039293	0.222661	0.144922	0.106053	0.430083	0.201179	0.597036	0.003630
15	0.000004	-0.000798	0.043534	0.004813	-0.014547	-0.350354	0.005563	-0.404928	-0.000498
16	-0.033094	-0.005085	-0.062156	-0.061983	-0.061896	-0.003174	-0.195063	-0.009990	-0.002119
17	0.000074	0.007707	0.172679	-0.004759	-0.093479	-0.164371	-0.013525	-0.467108	-0.003200
18	-0.000317	0.015618	-0.174903	-0.003767	0.081801	0.061910	-0.023111	0.379852	0.002800
19	0.006372	0.024603	0.031663	0.010554	0.000000	-0.013583	0.033106	-0.042606	0.000000
20	-0.004002	0.015450	-0.019884	-0.006628	0.000000	0.008530	-0.020790	0.026756	0.000000
21	0.003311	-0.012783	0.016451	0.005484	0.000000	-0.007057	0.019857	-0.025555	0.000000
22	-0.003265	0.012607	-0.016225	-0.005408	0.000000	0.006960	-0.019583	0.025203	0.000000
Total	-0.013528	-0.007490	0.008310	0.001300	-0.002205	0.132327	0.002818	0.000378	-0.000075

3.4 常温常压下航空相机成像质量

如图 2 所示,在 70 lp/mm 时,各视场调制传递函数(MTF) $f_{MT} \geq 0.52$,接近衍射极限。从图 3 可以看出,各视场弥散斑均很圆,且大小相差不多,各视场均方根(RMS)直径大小约 3.6 μm 。

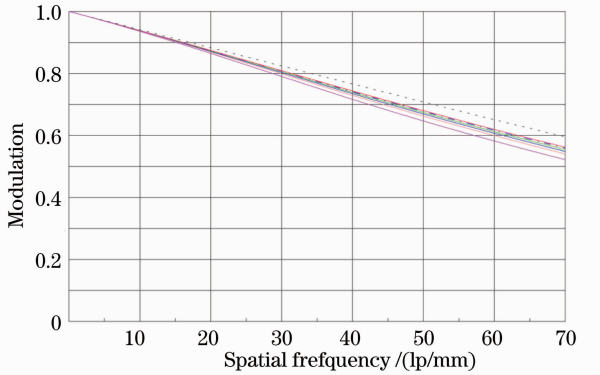


图 2 调制传递函数图

Fig. 2 Diagram of modulation transfer function

-60 $^{\circ}\text{C}$ 、0 $^{\circ}\text{C}$ 和 60 $^{\circ}\text{C}$ 后,调焦前的 MTF 下降的比较厉害,不能保证成像要求;调焦组(透镜 7)移动量分别为 1.40,0.35 和 -0.65 mm 以进行调焦,调焦后可成清晰像,如图 4(b),(d),(e)所示。

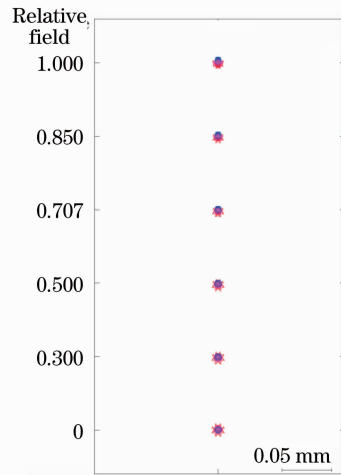


图 3 点列图

Fig. 3 Spot diagram

4 温度水平下,相机调焦前后像质分析

4.1 不同温度水平下,调焦前后像质变化

表 3 为温度在 -60 $^{\circ}\text{C}$ ~60 $^{\circ}\text{C}$ 变化时,透镜 7 的调焦量。图 4 为调焦前后的 MTF 对比图。从图 4(a),(c),(e)可以看出,当温度从 20 $^{\circ}\text{C}$ 变化至

表 3 不同温度下,调焦组的移动量

Table 3 Motion values of the focusing group to focus at different temperatures

Temperature / $^{\circ}\text{C}$	-60	0	20	60
Motion value / mm	1.40	0.35	0.00	-0.65

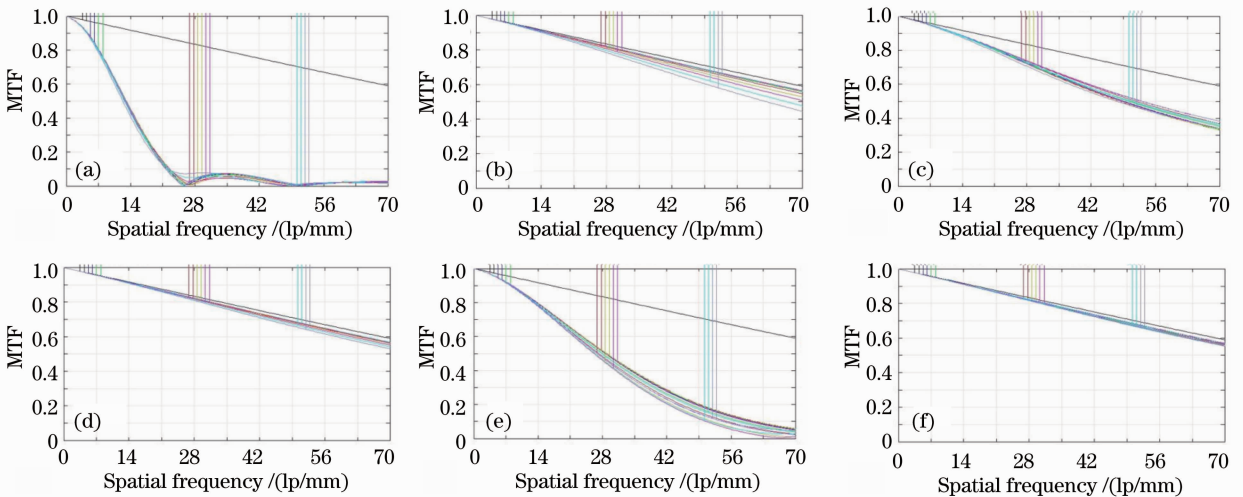


图 4 -60 $^{\circ}\text{C}$ ~60 $^{\circ}\text{C}$ 调焦前后 MTF 分析。(a)和(b)为-60 $^{\circ}\text{C}$ 调焦前后的 MTF 对比图;(c)和(d)为 0 $^{\circ}\text{C}$ 调焦前后的 MTF 对比图;(e)和(f)为 60 $^{\circ}\text{C}$ 调焦前后的 MTF 对比图

Fig. 4 MTF analysis before and after focusing at the temperature range of -60 $^{\circ}\text{C}$ ~60 $^{\circ}\text{C}$. (a) and (b) are the MTF contrast figures before and after focusing at -60 $^{\circ}\text{C}$; (c) and (d) are the MTF contrast figures before and after focusing at 0 $^{\circ}\text{C}$; (e) and (f) are the MTF contrast figures before and after focusing at 60 $^{\circ}\text{C}$

4.2 相机可适应温度范围

相机允许的离焦量小于 1/2 焦深,有公式

$$\delta = \frac{\Delta}{2} = 2F^2\lambda, \quad (1)$$

式中 δ 为 1/2 焦深, Δ 为相机焦深, F 为镜头相对孔径的倒数, λ 为工作波长。当相机 F 数为 8 时,取波长 $\lambda = 550 \text{ nm}$,半焦深 δ 为 0.070 mm。经模拟,在不存在温

度梯度时,相机可在调焦完成后且不再调焦的情况下,在温度宽度为 $\pm 16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内成像。表4为 $(20\pm 16)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内相机的离焦量,小于 0.070 mm (半

焦深)。图5(a)~(d)为 $(20\pm 16)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内不调焦时的像质分析, f_{MT} 均大于 $0.4(70\text{ lp/mm})$,可以保证其成清晰像的能力。

表4 在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 调焦后,不再调焦的情况下,相机在 $(20\pm 16)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内的离焦量

Table 4 Defocus values at $(20\pm 16)\text{ }^{\circ}\text{C}$ after focusing at $20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Temperature / $^{\circ}\text{C}$	4	12	20	28	36
Defocus value /mm	-0.070	-0.035	0	0.034	0.068

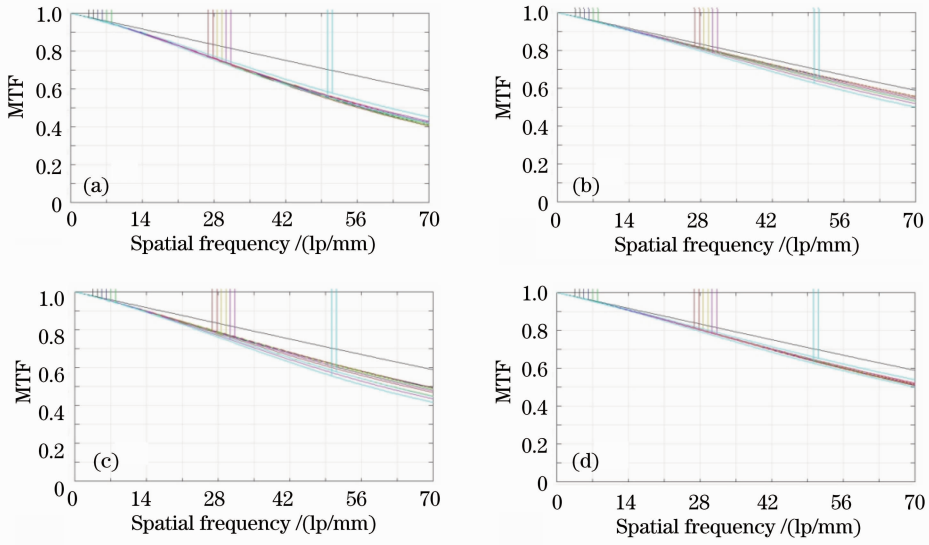


图5 在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 调焦后, $(20\pm 16)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围 MTF 图。(a) $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 MTF; (b) $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 MTF; (c) $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 MTF; (d) $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 MTF

Fig. 5 MTF figures at $(20\pm 16)\text{ }^{\circ}\text{C}$ after focusing at $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. (a) MTF at $4\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) MTF at $12\text{ }^{\circ}\text{C}$; (c) MTF at $28\text{ }^{\circ}\text{C}$; (d) MTF at $36\text{ }^{\circ}\text{C}$

5 温度梯度下航空相机物镜像质分析

在航空相机光学设计完成之后,而机械结构和热控系统尚未设计完成之时,为了仿真光学系统存在温度梯度情况下的成像质量,采用人为设定温度场的方法,对各个透镜单独设定温度场进行仿真。

5.1 温度梯度分布

当相机所处环境发生变化时,其内部将存在不均匀的温度场,反映在物镜上,即呈现出轴向、径向及周向上的温度梯度分布,对成像质量造成影响。

5.2 温度梯度仿真方法

与传统方法^[7~13](即仿真相机实际工作情况)相比,作者人为地对各透镜单独施加温度载荷进行仿真,得到面型的变化及中心距的变化,将变化值输入至光学设计软件进行像质评价。

1) 面型变化:①建模及划分单元格;②直接施加温度载荷,进行瞬态温度分析,得到所需温度分布;③根据温度分布得到应力分布,求出透镜表面变

形;④将表面变形转化成 Zernike 多项式。

2) 透镜厚度及间距:用所求厚度或间距两边平均温度进行计算,得到透镜厚度及间距变化值。

5.2.1 对各透镜单独建模及划分单元格

对每片透镜用三维绘图软件单独建立模型,输入至有限元分析软件之中,定义各透镜材料热力学性能参数,包括杨氏模量、泊松比、密度、线膨胀系数、热传导系数和比热容(见表1)。然后划分透镜模型单元网格,为了提取更准确的面型数据,在选用有限元分析软件的自动划分网格后,再选择“refine”将网格进一步细化。值得一提的是,因 Zernike 系数适用于圆形面型的表示,故棱镜1在建模时以圆柱形代之。

5.2.2 瞬态热分析

相机的温度梯度分布主要为轴向温度梯度分布和径向温度梯度分布(周向温度梯度可以忽略)。而对面型的不均匀变化产生影响的,主要是航空相机

的径向温度梯度分布。为了在相机透镜各面上均产生所需的径向温度梯度,采取直接施加温度载荷的方法。镜面温度梯度设置方法为:若所需径向温度分布为:透镜中心温度 t_1 、边缘温度 t_2 ($t_1 > t_2$),此时的径向温度梯度 $\Delta t = t_1 - t_2$,则为达到所需径向温度分布,可在有限元分析软件中设置环境温度为 t_3 , $t_3 > t_1$;并在透镜边缘直接施加温度载荷 t_2 ,此时中心温度等于环境温度 t_3 ,径向温度梯度 $t_3 - t_1 > \Delta t$ 。随着时间的变化,当中心温度从 t_3 升至 t_1 时,边缘温度仍为 t_2 ,此时径向温度为 $\Delta t = t_1 - t_2$,即为所需分布。

这样设置的好处是透镜表面上的温度带分布较为均匀。若一开始就将环境温度设置成 t_1 的话,则会造成透镜中心温度环带较宽、边缘温度环带较窄

的情况。

5.2.3 热应力分析

瞬态分析得到的温度分布作为面型分析的边界条件,即可解算镜面在径向温度梯度场下的变形状况。此时,可以得到各节点处初始坐标 (x_i, y_i, z_i) 和变形后坐标变化量 $(\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i)$ 。

5.2.4 将变形量转化成 Zernike 多项式

Zernike 多项式是 F. Zernike 在 1943 年构造的。Zernike 多项式是互为正交、线性无关的,且可以唯一的、归一化的描述系统圆形孔径前的波前边界;此外,Zernike 多项式很容易与 Seidel 像差项相对应,因此其理论清晰,便于理解。Zernike 多项式的极坐标表示为

$$Z(r, \theta) = A_{00} + \sum_{n=2}^k A_{n0} R_n^0(r) \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^n R_n^m(r) (A_{nm} \cos m\theta) + B_{nm} \sin m\theta, \quad (2)$$

式中

$$R_n^m(r) = \sum_{k=0}^{(n-m)/2} (-1)^k \frac{(n-k)!}{k! \left(\frac{n+m}{2} - k\right)! \left(\frac{n-m}{2} - k\right)!} r^{(n-2k)}, \quad (3)$$

设 $\omega(x, y)$ 为薄膜的数字表达式,用 Zernike 多项式拟合的形式为

$$\omega(x, y) = \sum_{i=2}^n \alpha_i \varphi_i = \alpha_0 \varphi_0 + \alpha_1 \varphi_1 + \alpha_2 \varphi_2 + \alpha_3 \varphi_3 + \dots + \alpha_n \varphi_n, \quad (4)$$

式中 φ_i 为多项式的第 i 项, α_i 为各项的系数因子。

在以 m 个节点表示的光学表面中,通过有限元计算得到的表面变形值为 ω_i ($i=1, 2, \dots, m$),将 (x_i, y_i, ω_i) 代入(4)式中即可得到矛盾方程组 ($m > n$):

$$\begin{cases} \alpha_0 \varphi_0 + \alpha_1 \varphi_1(x_0, y_0) + \alpha_2 \varphi_2(x_0, y_0) + \alpha_3 \varphi_3(x_0, y_0) + \dots + \alpha_n \varphi_n(x_0, y_0) = \omega_0 \\ \alpha_0 \varphi_0 + \alpha_1 \varphi_1(x_1, y_1) + \alpha_2 \varphi_2(x_1, y_1) + \alpha_3 \varphi_3(x_1, y_1) + \dots + \alpha_n \varphi_n(x_1, y_1) = \omega_0 \\ \dots \\ \alpha_0 \varphi_0 + \alpha_1 \varphi_1(x_m, y_m) + \alpha_2 \varphi_2(x_m, y_m) + \alpha_3 \varphi_3(x_m, y_m) + \dots + \alpha_n \varphi_n(x_m, y_m) = \omega_0 \end{cases}, \quad (5)$$

简记为

$$\mathbf{A}\boldsymbol{\phi} = \mathbf{W}, \quad (6)$$

式中 $\mathbf{A} = (\alpha_{ij})$ 为 $m \times n$ 矩阵, $\boldsymbol{\phi} = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n)^\top$, $\mathbf{W} = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)^\top$ 。矛盾(5)式一般不存在通常意义上的解,即对任何 n 维向量 $\boldsymbol{\phi}$, 一般

$$\mathbf{W} - \mathbf{A}\boldsymbol{\phi} \neq 0, \quad (7)$$

在设计转换结构时采用最小二乘法,最小二乘误差函数为

$$E = \sum (\omega_i - Z_i)^2, \quad (8)$$

$$Z_i = \sum \alpha_j \varphi_{ji}, \quad (9)$$

式中 α_j 为 Zernike 多项式的系数, φ_{ji} 为 Zernike 多项式, ω_i 为实际有限元计算所得到的变形值。将(9)

式代入(8)式,则

$$E = \sum (\omega_i - \sum \alpha_j \varphi_{ji})^2, \quad (10)$$

最小二乘法原理要求:当 $\frac{\partial E}{\partial \alpha_j} = 2 \sum (\omega_i - \sum \alpha_j \varphi_{ji}) \varphi_{ji} = 0$ 时可得到最优 Zernike 多项式系数。系数向量 $\{\mathbf{a}\}$ 可使用 Gauss 消去法进行求解:

$$[\mathbf{H}]\{\mathbf{a}\} = \{\mathbf{p}\}, \quad (11)$$

$$\{\mathbf{a}\} = [\mathbf{H}]^{-1} \{\mathbf{p}\}, \quad (12)$$

式中

$$p_j = \sum \omega_j \varphi_{ji}, \quad (13)$$

$$H_{jk} = \sum \varphi_{ji} \varphi_{ki}, \quad (14)$$

求出系数向量 $\{a\}$ 后,即可用 Zernike 多项式的线性组合表示镜面的面型,将 Zernike 多项式系数作为光学分析软件的输入文件,表示光学镜面在存在温度梯度时的变形,通过成像质量的对比以评估光学系统在存在温度梯度情况下的光学性能变化^[18,19]。

5.2.5 温度梯度引起中心距离变化计算

如图 6 所示,假定温度变化均匀,则透镜 1 前表面的中心温度 t_1 、后表面中心温度 t_2 ;透镜 2 前表面的中心温度 t_3 、后表面中心温度 t_4 ;透镜 1 后表面边缘温度为 t_5 ,透镜 2 前表面边缘温度为 t_6 ;透镜 1、透镜 2、结构件在温度为 t 时的中心距离分别为 d_1 、 d_2 、 d_3 ;透镜 1、透镜 2 在温度为 t 时口径分别为 D_1 、 D_2 ;透镜 1、透镜 2 和结构件的线膨胀系数分别为 α_1 、 α_2 、 α_3 。

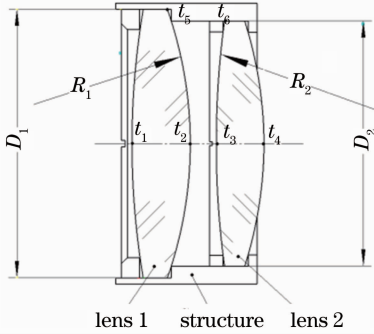


图 6 温度分布示意图

Fig. 6 Schematic of the temperature distribution

则透镜 1 中心距离为

$$d'_1 = d_1 + \alpha_1 \left(\frac{t_1 + t_2}{2} - t \right) d_1, \quad (15)$$

同样,透镜 2 中心距离为

$$d'_2 = d_2 + \alpha_2 \left(\frac{t_3 + t_4}{2} - t \right) d_2, \quad (16)$$

而透镜 1 与透镜 2 中间的间距可用下式求出:

$$d'_{1,2} = d'_3 + (d'_2 - \sqrt{d'^2_2 - D'^2_2})(R'_1 - \sqrt{R'^2_1 - D'^2_1}), \quad (17)$$

式中

$$d'_3 = d_3 \left[1 + \alpha_3 \left(\frac{t_5 + t_6}{2} - t \right) \right], \quad (18)$$

$$R'_1 = R_1 [1 + \alpha_1 (t_2 - t)], \quad (19)$$

$$R'_2 = R_2 [1 + \alpha_2 (t_3 - t)], \quad (20)$$

$$D'_1 = D_1 \left[1 + \alpha_1 \left(\frac{t_2 + t_6}{2} - t \right) \right], \quad (21)$$

$$D'_2 = D_2 \left[1 + \alpha_2 \left(\frac{t_3 + t_6}{2} - t \right) \right]. \quad (22)$$

5.3 玻璃材料折射率和阿贝常数的影响

值得一提的是,有限元分析法不能模拟玻璃材料折射率和阿贝常数的变化, Δn_d 和 ΔV_d 。因此,用光学设计软件进行模拟,得到玻璃材料折射率和阿贝常数的变化,并评价在此影响下的成像质量,如表 5 所示。

表 5 $\Delta t = 20^\circ\text{C}$ 时,折射率及阿贝常数的变化 Δn_d 、 ΔV_d 以及对 MTF 的影响 Δf_{MT}

Table 5 Δn_d , ΔV_d and Δf_{MT} when $\Delta t = 20^\circ\text{C}$

Position	$\Delta t = 20^\circ\text{C}$					
	Δn_d	4.6° meridional Δf_{MT}		ΔV_d	4.6° meridional Δf_{MT}	
		+ Δn_d	- Δn_d		+ ΔV_d	- ΔV_d
Lens 1	0.00000	0.00000	0.00000	-0.0014	0.0048	-0.0175
Lens 2	-0.00005	-0.0019	0.0012	-0.0001	0.0004	-0.0004
Double Cemented Lens 1	0.00004	-0.0025	0.0016	0.0001	0.0005	-0.0005
Double Cemented Lens 2	0.00006	0.0019	-0.0043	-0.0012	-0.0266	0.0045
Lens 3	0.00003	0.0001	-0.0001	-0.0012	0.0026	-0.0033
Lens 4	0.00000	0.00000	0.00000	-0.0017	-0.0066	0.0041
Lens 5	-0.00001	0.0000	0.0000	-0.0013	-0.0048	-0.0011
Lens 6	0.00003	0.0000	0.0000	-0.0017	-0.0072	0.0008
Lens 7	0.00006	0.0000	0.0000	-0.0014	-0.0008	0.0006

5.4 温度差 20°C 下的有限元仿真及像质评估

5.4.1 温度分布

径向温度分布要求:透镜边缘与透镜中心的温度差为 20°C ,边缘温度低,中心温度高。轴向温度分布要求:从窗口到 CCD 保护玻璃,各透镜温度差按 2°C 递增,轴向温度差总共 22°C 。相机温度设置如表 6 所示,温度分布如图 7(a)~(l) 所示。

5.4.2 面型变化

根据各透镜温度分布,解算出其相应的面型变化量,其面型变化如图 8(a)~(l) 所示。提取各节点变形前的坐标 (x, y, z) 与变形量 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$,根据 (2)~(14) 式将之拟合为 Zernike 系数,输入至光学设计软件中即可表示出相机透镜的面型变化。

表 6 温度差 20 °C 时的温度梯度分布设置

Table 6 Setting of the temperature gradient distribution in the temperature gradient range of 20 °C

Position	Cover lens	Lens 1	Lens 2	Double cemented lens 1	Double cemented lens 2	Lens 3
Temperature /°C	20~40	22~42	24~44	26~46	28~48	30~50
Position	Lens 4	Lens 5	Lens 6	Lens 7	Lens 1	CCD Cover lens
Temperature /°C	32~52	34~54	36~56	38~58	40~60	42~62

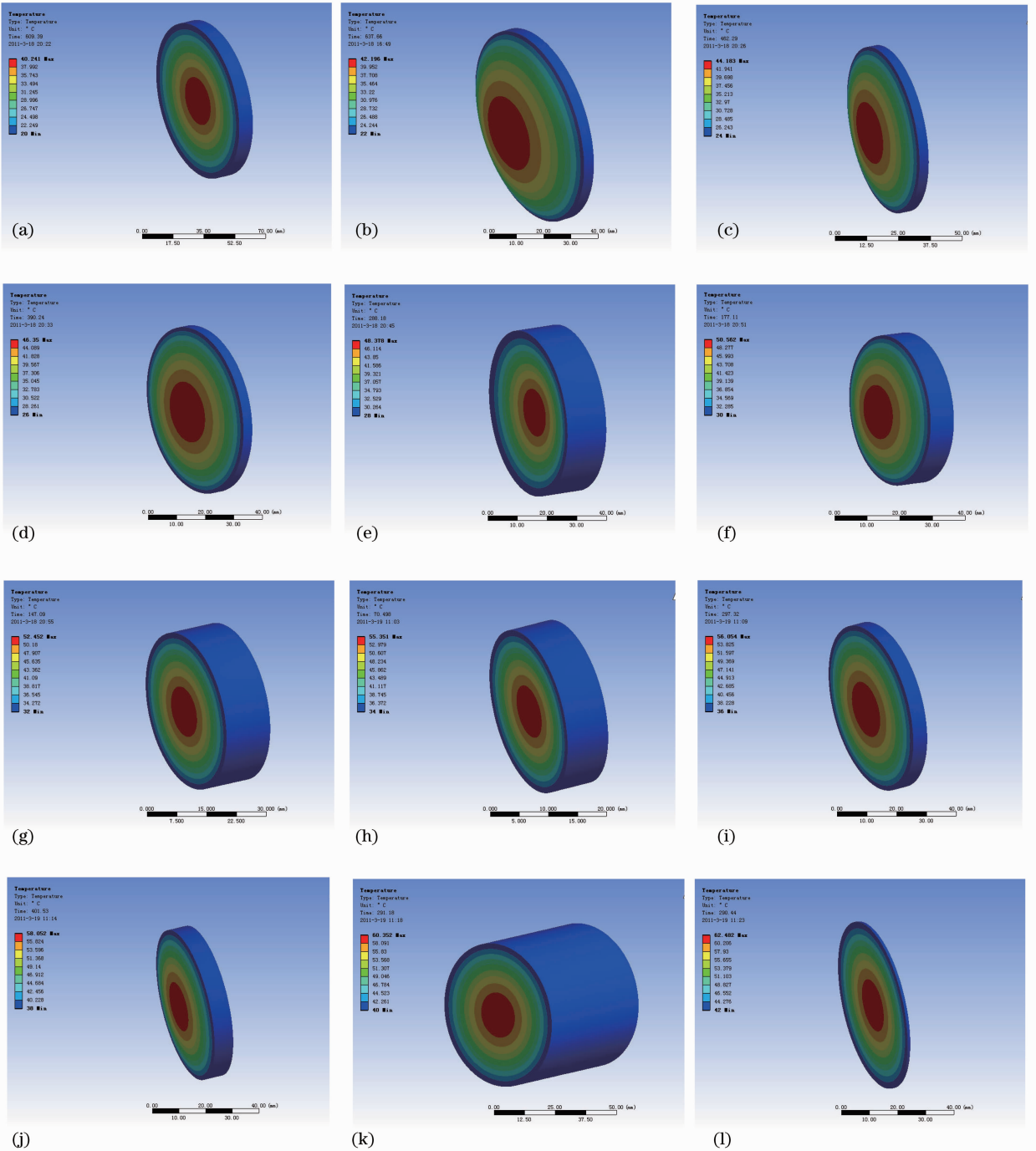


图 7 各透镜温度分布图。(a)前端透镜;(b)透镜 1;(c)透镜 2;(d)双胶合透镜 1;(e)双胶合透镜 2;(f)透镜 3;
(g)透镜 4;(h)透镜 5;(i)透镜 6;(j)透镜 7;(k)棱镜;(l) CCD 前端透镜

Fig. 7 Temperature distribution graphs of various lens. (a) cover lens; (b) lens 1; (c) lens 2; (d) double cemented lens 1; (e) double cemented lens 2; (f) lens 3; (g) lens 4; (h) lens 5; (i) lens 6; (j) lens 7; (k) prism; (l) CCD cover lens

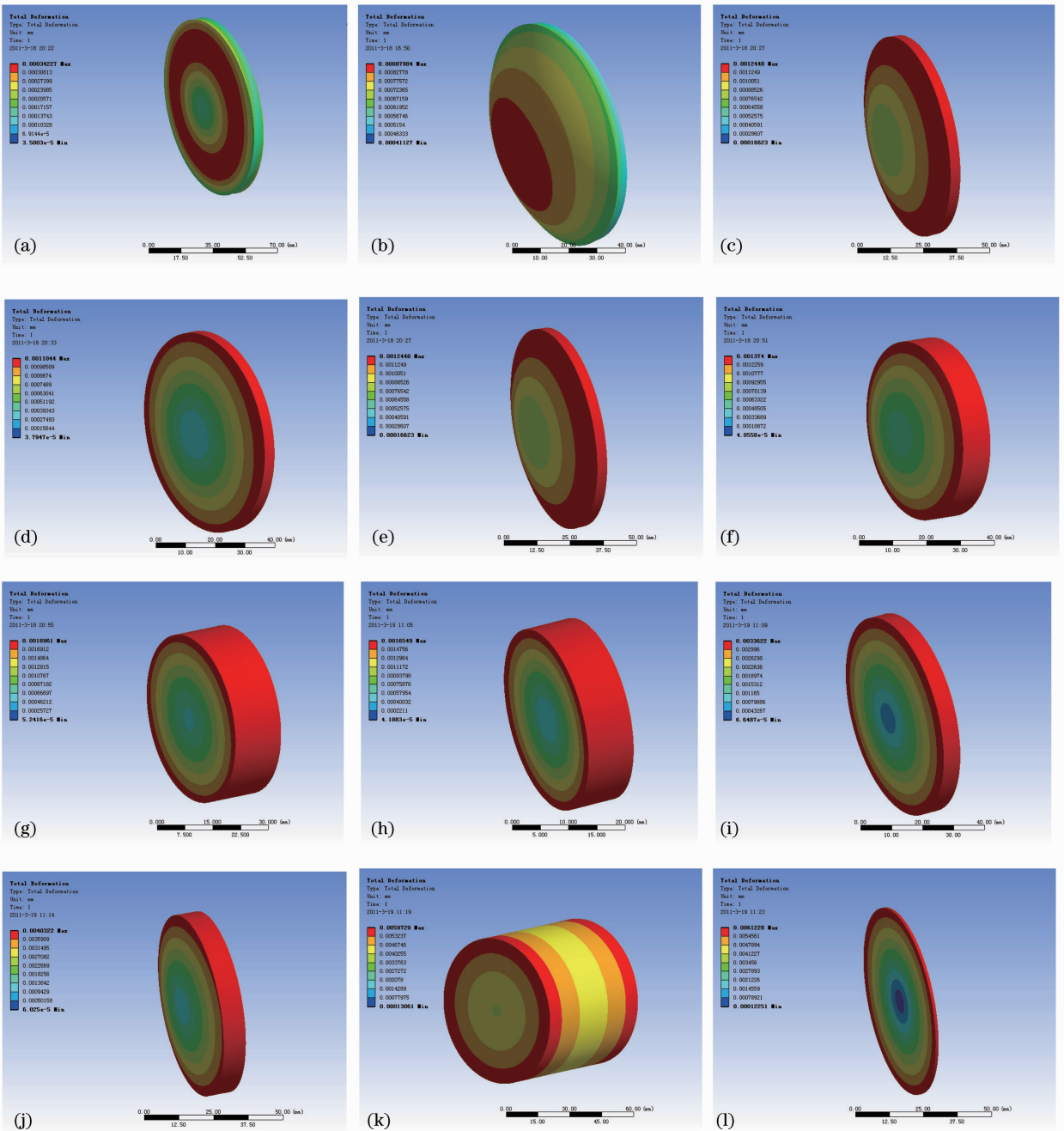


图 8 各透镜变形图。(a)前端透镜；(b)透镜 1；(c)透镜 2；(d)双胶合透镜 1；(e)双胶合透镜 2；(f)透镜 3；(g)透镜 4；(h)透镜 5；(i)透镜 6；(j)透镜 7；(k)棱镜；(l) CCD 前端透镜

Fig. 8 Deformation graphs of various lens. (a) cover lens; (b) lens 1; (c) lens 2; (d) double cemented lens 1; (e) double cemented lens 2; (f) lens 3; (g) lens 4; (h) lens 5; (i) lens 6; (j) lens 7; (k) prism; (l) CCD cover lens

5.4.3 中心距离变化

根据表 6 温度分布情况及(15)~(22)式,可算出透镜中心厚度及透镜间距值,如表 7 所示。

5.4.4 像质分析

将面型变形量(以 Zernike 多项式表示)及中心距变化量(表 6)代入光学设计软件中,根据其调制传递

函数的变化来对相机成像质量进行分析。图 9(a)表示的是温度梯度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,调焦前的 MTF 图像,此时离焦量为 -1.054 mm , f_{MT} 约为 $0.21(70\text{ lp/mm})$;图 9(b)表示的是温度梯度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,通过透镜 7(调焦组)调焦后的 MTF 图,透镜 7 调焦量为 0.404 mm , $f_{MT} \geq 0.52(70\text{ lp/mm})$,调焦后成清晰像。

表 7 20 ℃ 温差时各透镜的中心厚度变化量

Table 7 Central thickness of various lens at the temperature gradient range of 20 ℃

Position	Original central thickness (d)/mm	Temperature / ℃	Central thickness with temperature gradient (d')/mm	Position	Original central thickness (d)/mm	Temperature / ℃	Central thickness with temperature gradient (d') /mm
Cover lens	9.000	20	9.000	Stop	15.000	53	15.004
	10.000	41	10.002		Lens 5	7.000	34
Lens 1	12.000	22	12.000	Lens 6		86.626	55
	3.9750	43	3.976		8.000	36	8.001
Lens 2	10.709	24	10.709	Lens 7	5.000	57	5.002
	3.000	45	3.000		8.000	38	8.001
Double cemented lens 1	10.358	26	10.358	Prism	40.000	59	40.014
	6.000	28	6.000		52.000	40	52.009
Double cemented lens 2	6.000	28	6.000	CCD	55.320	61	55.340
	4.000	49	4.001		1.0000	42	1.000
Lens 3	12.000	30	12.001	Cover lens	1.680	63	1.680
	3.000	51	3.001				
Lens 4	12.0000	32	12.001				
	23.332	53	23.339				

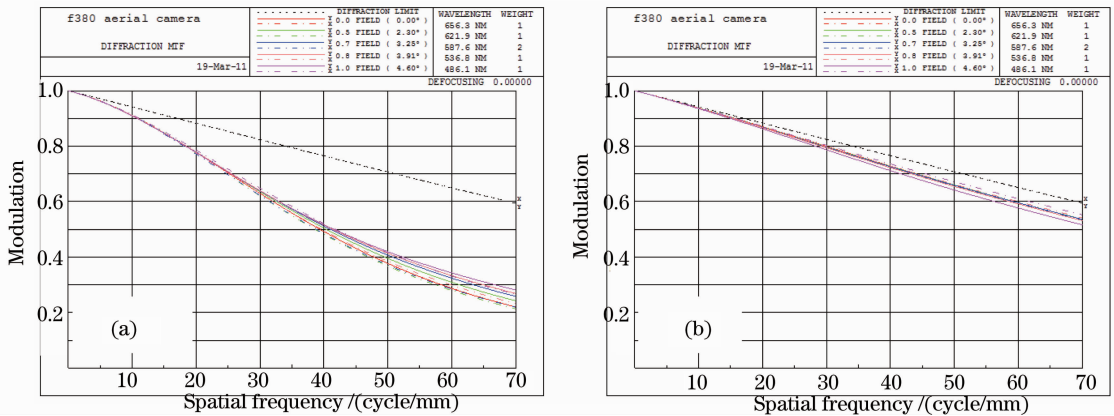


图 9 温度梯度 20 ℃ 时调焦前后的 MTF 对比图。(a) 调焦前；(b) 调焦后

Fig. 9 MTF contrast figures before and after focusing at the temperature gradient of 20 ℃. (a) Before focusing; (b) after focusing

6 结 论

补偿温度变化对成像质量的影响,本文首先提出了主动调焦式航空相机光学设计的关键技术:光学系统主动调焦能力和调焦后环境适应能力。根据关键技术,采用多重结构、小像差互补以及合理地选择玻璃材料设计出主动调焦式航空相机物镜,其参数为: $f=400$ mm、视场角 $2\omega=100^\circ$ 、 F 数 8、波段 460~750 nm、总长 380 mm、后截距 150 mm;该物镜在常温常压下 $f_{MT} \geq 0.52$ (70 lp/mm),接近衍射极限;各视场弥散斑 RMS 直径大小约为 3.6 μm ;该

相机包括一调焦组,移动范围为 ± 5 mm,调焦组每移动 0.1 mm,焦平面约移动 0.026 mm。针对光学设计结果,本文随后进行了温度水平分析和温度梯度仿真。1) 温度水平分析:结果表明在 $-60^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$ 下,经调焦组主动调焦后,物镜可成清晰像;于此同时,相机可在调焦完成后,在温度宽度为 $\pm 16^\circ\text{C}$ 的范围内保证像质。2) 温度梯度仿真:人为地对各透镜镜片单独设定温度场,径向温度 20°C ,透镜边缘比透镜中心温度低;轴向温度差总共 22°C ,从窗口到 CCD 保护玻璃,各透镜温度差按

2 ℃递增。通过有限元仿真,得到各透镜的面型变化量,将之拟合成 Zernike 多项式,与经计算所得的中心距离共同输入至光学设计软件中,分析像质。结果表明,经主动式温度调焦后,在温度梯度情况下,相机物镜依然保证成像清晰。

关于有限元仿真,在以后的工作中,若想更精确地获得有限元结果,可以设置周向温度差;且可以细化轴向温度梯度分布,以透镜表面(本文以透镜为单元)为单元设置轴向温度,以期得到更精确的结果。

后续研究工作为温控系统的设计。随后还需进行相机实际工作环境中,主动温控及主动调焦情况下的光-机-热仿真,分析相机各透镜温度分布及变形,并进行像质分析。

参 考 文 献

- Chen Donglin. The Aviation Summary[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008
陈东林. 航空概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008
- ZEMAX Development Corporation. ZEMAX Optical Design Program User's Guide[M/OL]. 2008.
http://202.120.223.162/Download/20100319194526_165072942040.pdf
- Jiao Mingyin. General conditions for thermal compensation in optical systems[J]. *J. Appl. Opt.*, 2006, **22**(3): 195~197
焦明印. 光学系统实现热补偿的通用条件[J]. *应用光学*, 2006, **22**(3): 195~197
- T. Yasuhisa, T. Toru. Expansion of an athermal chart into a multilens system with thick lenses spaced apart [J]. *Opt. Engng.*, 1996, **35**(10): 3001~3006
- Hu Yuxi, Zhou Shaoxiang. Design of athermal optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10): 1386~1391
胡玉禧, 周绍祥. 消热差光学系统设计[J]. *光学学报*, 2000, **20**(10): 1386~1391
- Liao Jingyu, Gao Xiaodong, Lan Gongpu *et al.*. Dynamic thermal/structural/optical analysis and design for aerial camera lens system[J]. *Opto-Electron. Engng.*, 2010, **37**(7): 36~40
廖靖宇, 高晓东, 蓝公仆 等. 航空相机物镜动态光机热分析与设计[J]. *光电工程*, 2010, **37**(7): 36~40
- When Jingyang. Research on Methods and Techniques of Optomechanical Integrated Analysis[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronics and Technology, 2008
温敬阳. 光机热集成分析方法与技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008
- B. Cullimore, T. Panczak, J. Baumann *et al.*. Integrated analysis of thermal/structural/optical system[J]. SAE 2002-01-2444, July 2002
- Shan Baozhong, Chen Entao, Lu Er *et al.*. Thermal/structure/optical integrated analysis of space cameras[J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2001, **9**(4): 377~381
单宝忠, 陈恩涛, 卢 铿 等. 空间光机热集成分析方法[J]. *光学精密工程*, 2001, **9**(4): 377~381
- J. Miller, M. Hatch, K. Green. Predicting performance of optical system undergoing thermal/mechanical loading using integrated thermal/structural/optical numerical methods [J]. *Opt. Engng.*, 1981, **20**(2): 166~174
- K. Doyle, V. Genberg, G. Michels. Integrated Optomechanical Analysis[M]. Washington: SPIE, 2002
- Liu Wanguang. TSO (Thermal/Mechanical/Optical) Integrated Analysis of Star Tracker[D]. Chengdu: The Institute of Optics and Electronics, 2009
刘文广. 星传感器的光机热集成分析研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2009
- Li Xianhui. Study on the Integrated Optomechanical Analysis Optical Surface Post-Process System [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanical and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2004
李贤辉. 光机集成有限元分析光学面行后处理研究与实现[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2004
- Gong Dun, Wang Hong, Tian Tiejun. Temperature effect on imaging performance of three-line CCD satellite camera and temperature indicators affirmed[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2017~2021
巩 盾, 王 红, 田铁印. 温度对星载相机的影响和温控指标的制定[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2017~2021
- Lan Gongpu, Liang Wei, Ma Wenli *et al.*. A focusing-able aerial camera; China, 201010121564.2[P]. 2010-10-12
蓝公仆, 梁 伟, 马文礼 等. 一种可调焦式航空相机: 中国, 201010121564.2[P]. 2010-10-12
- Li Yuyao, Tang Yong, Lin Zhaoheng *et al.*. Design of apochromatism objective lens of aerial camera based on large frame array CCD [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3183~3185
李玉瑶, 唐 勇, 林昭珩 等. 基于大面阵 CCD 的复消色差航空相机物镜设计[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3183~3185
- Zhou Jiufei, Zhai Linpei, Zhou Gang *et al.*. Autofocus method of aerial imaging device [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 105~108
周九飞, 翟林培, 周 刚 等. 航空成像设备自动调焦方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 105~108
- Shan Baozhong, Wang Shuyan, Niu Hanben *et al.*. Zernike polynomial fitting method and its application [J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2002, **10**(3): 318~323
单宝忠, 王淑岩, 牛憨笨 等. Zernike 多项式拟合方法及应用[J]. *光学精密工程*, 2002, **10**(3): 318~323
- Yan Jingzhou, Lei Fan, Zhou Bifang. Algorithms for wave front fitting using Zernike polynomial[J]. *Opt. & Precision Engng.*, 1997, **7**(5): 119~128
鄢静舟, 雷 凡, 周必方. 用 Zernike 多项式进行波面拟合的几种算法[J]. *光学精密工程*, 1997, **7**(5): 119~128

栏目编辑: 谢 婧