

文章编号:1007-2780(2019)01-0039-08

机载折反式光学系统的无热化设计

廖劲峰^{1,2}, 丁亚林^{1*}, 姚 园¹

(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033;

2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为了消除在实际飞行过程中温度变化对机载折反式光学系统成像质量的影响,对该系统的光学元件、机械结构等部分进行热分析,实现机载折反式光学系统的无热化设计。首先,根据透镜的光焦度公式推导透镜的光焦度温度函数,列出透镜组的消热差方程。接着,在考虑支撑结构的影响时引入轴向放大率,以此表现折反式系统部分元件间隔变化对系统焦距影响大的特点。最后,结合前两者确定完整的消热差方程来指导无热化设计。仿真结果表明,工作在 486~656 nm 波段,焦距为 1 850 mm 的机载折反式可见光光学系统在 0~40 °C 之间成像良好,调制传递函数下降不到 0.1。

关键词:无热化设计;折反式光学系统;轴向放大率;可见光波段

中图分类号:TH74 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20193401.0039

Athermalization design of airborne mirror-lens optical system

LIAO Jin-feng^{1,2}, DING Ya-lin^{1*}, YAO Yuan¹

(1. *Key Laboratory of Airborne Optical Image and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: In order to eliminate the influence of temperature change on the imaging quality of the airborne mirror-lens optical system during the actual flight, thermal analysis of the optical components and mechanical structures of the system was carried out to realize the athermal design of the airborne mirror-lens optical system. First, the power temperature function of the lens was derived from the power formula of the lens, and the athermal equation of the lens group was listed. Then, the axial magnification was introduced when considering the influence of the support structure, so as to show that the variation of the component spacing of the mirror-lens system had a great influence on the focal length of the system. Finally, the complete athermal equation was determined in conjunction with the former two to guide the athermal design. The simulation results show that the airborne mirror-lens visible optics system with a focal length of 1 850 mm works well in the 486~656 nm band between 0~40 °C, and the modulation transfer function decreases by less than 0.1.

Key words: athermalization design; mirror-lens optical system; axial magnification; visible light

收稿日期:2018-08-20;修订日期:2018-11-12.

* 通信联系人, E-mail:dingyl_1964@126.com

1 引言

一般情况下设计一个光学系统,其使用条件都是常温常压。但是对于机载光学系统而言,随着飞行高度的爬升,光学系统所处的环境条件与地面相差极大,尤其是温度的变化对成像质量的影响尤为明显。因为温度变化会引起介质的折射率变化,会导致光学系统中光学元件的厚度、元件之间的空气间隔以及各折射面和反射面面型发生变化^[1-3]。随着航空相机获得高质量成像的需要,机载光学系统的消热差技术也得到了很大的发展。

早在 20 世纪 30 年代,Perry 等^[4]人阐述了温度变化对光学系统的影响,提出了无热设计的概念;后来 Tamagawa 等人^[5]采用无热图实现多透镜系统的无热化设计;Behrmann 等人采用衍射元件的方法,利用衍射元件负的色散系数和独特的温度特性实现消热差设计^[6]。光学系统的无热化技术通常可以分为 3 大类^[7]:机械被动式无热技术、机电主动式无热技术和光学被动式无热技术。光学被动式无热技术相对其他两种热补偿技术,具有结构相对简单、成本低和稳定可靠等优点^[8-10]。

本文针对某机载折反式可见光光学系统在实际测试中成像质量不佳的情况,基于折反系统的特点,主要采用光学被动式无热技术对此系统进行优化。通过光学设计软件仿真,验证其在温度变化的情况下能获得较好的成像质量。

2 温度变化对成像的影响因素

光学被动式无热技术主要是利用系统各光学元件之间不同的热特性,通过不同的光学材料之间的相互补偿,以达到消热差的目的。而系统获得高质量成像的要求是系统成像面与接收器处于同一位置。因此,分析可能会对系统像面位置造成影响的系统元件与支撑材料就尤为重要。

2.1 光学元件的影响

透镜的光焦度公式为:

$$\Phi = \frac{1}{f'} = \frac{(n-1)(n(r_2 - r_1) + (n-1)d)}{nr_1r_2}, \quad (1)$$

式中: Φ 为透镜的光焦度; f' 为单透镜的焦距; r_1 和 r_2 分别为透镜第一面和第二面的曲率半径; n 为透镜的折射率; d 为透镜的厚度。在分析温度对透镜焦距的影响时,需要将式(1)对温度求导,但是求导结果太过复杂,不利于影响因素的分析,所以我们希望用薄透镜系统代替厚透镜系统。为此,单独选择一块透镜进行讨论,透镜的 $r_1 = 161.951 \text{ mm}$, $r_2 = -165.72 \text{ mm}$, $d = 16.5 \text{ mm}$,玻璃材料为 K9。该透镜在 20°C 时焦距为 161.38678 ,薄透镜公式计算的焦距为 158.61935 ;在 40°C 时透镜的焦距为 161.39677 ,薄透镜公式计算的焦距为 158.6287 。 $\Delta f'$ 分别为 0.00999 与 0.00935 ,误差值约为变化值的 $1/15$,因此用薄透镜的光焦度公式代替完整的透镜光焦度公式来简化模型进行热分析是可行的。

令 $d=0$,则薄透镜的光焦度公式为:

$$\Phi = \frac{1}{f'} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right), \quad (2)$$

将式(2)对温度求导可得:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial T} = -\frac{1}{f'^2} \frac{\partial f'}{\partial T} = \frac{\partial n}{\partial T} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) + (n-1) \left(-\frac{1}{r_1^2} \frac{\partial r_1}{\partial T} + \frac{1}{r_2^2} \frac{\partial r_2}{\partial T}\right), \quad (3)$$

式中 $\frac{\partial n}{\partial T}$ 是透镜材料折射率的温度系数; $\frac{1}{r_1} \frac{\partial r_1}{\partial T} =$

$\frac{1}{r_2} \frac{\partial r_2}{\partial T}$ 是透镜材料的线膨胀系数,令其等于 α ,则

式(3)可以化简为:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial T} = \left(\frac{1}{n-1} \frac{\partial n}{\partial T} - \alpha\right) \Phi, \quad (4)$$

由式(3)可以看出,变化的温度通过改变透镜的折射率,表面的曲率半径来改变透镜的焦距。

值得注意的是,在仿真过程中需要分清所用的温度折射率系数是玻璃材料的相对折射率的温度折射率系数还是绝对折射率的温度折射率系数。当采用玻璃材料相对折射率的温度折射率系数进行分析时,式(4)得到的结果是完全正确的。如果采用玻璃绝对折射率的温度折射率系数进行分析,则实际温度变化时透镜的折射率应为:

$$n' = \frac{n' + \frac{\partial n'}{\partial T} \Delta T}{n_0 + \frac{\partial n_0}{\partial T} \Delta T}, \quad (5)$$

其中: $n' = n \cdot n_0$ 为透镜的绝对折射率, $\frac{\partial n'}{\partial T}$ 为透

镜绝对折射率的温度折射率系数, n 为透镜的相对折射率, n_0 为空气折射率, $\frac{\partial n_0}{\partial T}$ 为空气的温度折射率系数。因此薄透镜的焦距公式可写为:

$$\Phi = \left(\frac{n'}{n_0} - 1 \right) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right), \quad (6)$$

同理对上式求导并化简可得:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial T} = \Phi \left(\frac{1}{n' - n_0} \frac{\partial n'}{\partial T} - \alpha \right) - \Phi \frac{n'}{n_0(n' - n_0)} \frac{\partial n_0}{\partial T}, \quad (7)$$

将 $n' = n \cdot n_0$ 带入其中并化简可得:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial T} = \Phi \left(\frac{1}{(n-1)n_0} \frac{\partial n'}{\partial T} - \alpha - \frac{n}{(n-1)n_0} \frac{\partial n_0}{\partial T} \right), \quad (8)$$

令

$$\theta = \frac{1}{(n-1)n_0} \frac{\partial n'}{\partial T} - \alpha - \frac{n}{(n-1)n_0} \frac{\partial n_0}{\partial T}, \quad (9)$$

则式(8)可化为:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial T} = \theta \Phi, \quad (10)$$

在分析时一定要分清所使用的温度折射率系数, 否则计算出来的 $\frac{\partial \Phi}{\partial T}$ 会有较大偏差, 更严重的, 某些材料的透镜会出现计算值与实际值向相反的方向变化的情况, 对设计结果造成影响。对于机载光学系统而言, 第二种分析方法显然更为合适, 因为高空中的空气折射率不仅受温度影响还受大气压强的影响, 而相对折射率的温度折射率系数在测量时通常没有考虑压强变化对空气折射率的影响。而在用绝对折射率的温度折射率系数分析时, 可以将飞行高度所对应的温度和大气压强列出, 耦合温度和大气压强对空气折射率的影响, 得出一个与实际飞行环境更接近的空气温度折射率系数。

对于折反系统中的反射镜, 其光焦度公式为^[11]:

$$\Phi = -\frac{2n}{r}, \quad (11)$$

式中: r 为反射镜的曲率半径, n 为反射镜所处空间的折射率。因为空气的折射率约等于 1, 将式(11)对温度求导并化简可得:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial T} = -\Phi \alpha, \quad (12)$$

因为反射镜的入射光线和出射光线在同一空间, 所以反射镜焦距几乎不受空气折射率的影响, 只与反射镜的面型相关。所以不用考虑空气折射率的变化对反射镜焦距变化的影响。

对于多透镜组成的光学系统, 设光学系统由 n 个折射面组成, 如图 1 所示, 对于任意面 k , 由单个折射面的物像关系式知:

$$\frac{n_{k+1}}{l'_k} - \frac{n_k}{l_k} = \frac{n_{k+1} - n_k}{r_k}, \quad (13)$$

式中: n_k 和 n_{k+1} 分别为第 k 个面前和第 k 个面后介质的折射率; l_k 和 l'_k 分别为第 k 个面的物距和像距; r_k 表示第 k 个折射面的半径。将式(13)对温度求导可得:

$$\begin{aligned} \frac{n_{k+1}}{l'^2_k} \frac{\partial l'_k}{\partial T} - \frac{n_k}{l^2_k} \frac{\partial l_k}{\partial T} &= \frac{(n_{k+1} - n_k)}{r_k^2} \frac{\partial r_k}{\partial T} + \\ &\left(\frac{l}{l'_k} - \frac{1}{r_k} \right) \frac{\partial n_{k+1}}{\partial T} - \left(\frac{1}{l_k} - \frac{1}{r_k} \right) \frac{\partial n_k}{\partial T} \end{aligned}, \quad (14)$$

将式(14)从第 1 面到第 n 面展开, 左右两边相加, 由于对任意面 k 满足 $l_{k+1} = l'_k - d_k$, 并且 $\partial l'_1 / \partial T = 0$ (平行光入射), 则简化可得:

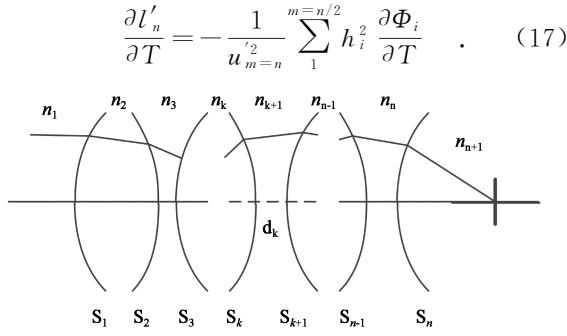
$$\begin{aligned} \frac{\partial l'_n}{\partial T} &= \frac{1}{n_{n+1} u_{n+1}^2} \sum_1^i h_k^2 \left[\frac{(n_{k+1} - n_k)}{r_k^2} \frac{\partial r_k}{\partial T} + \right. \\ &\left. \left(\frac{l}{l'_k} - \frac{1}{r_k} \right) \frac{\partial n_{k+1}}{\partial T} - \left(\frac{1}{l_k} - \frac{1}{r_k} \right) \frac{\partial n_k}{\partial T} \right] - \\ &\frac{1}{n_{n+1} u_{n+1}^2} \sum_2^i n_k u_k^2 \frac{\partial d_k}{\partial T}, \end{aligned} \quad (15)$$

式中: $u_k = \frac{h_k}{l_k}$ 是第 k 个面后第一主光线与光轴的夹角; d_k 为第 k 个面与第 $k+1$ 个面间的厚度; l'_n 为像距^[12]。

式(15)是系统像距随温度变化的方程, 对处于空气介质中的折射光学系统, 每 2 个面与其中间的材料相结合组成一个透镜, 其两边的折射率为空气, 暂时忽略空气折射率的变化, 将式(15)进一步化简可得:

$$\frac{\partial l'_n}{\partial T} = -\frac{1}{u_{m=n}^2} \sum_1^{m=n/2} h_i^2 \frac{\partial \Phi_i}{\partial T} - \frac{1}{u_{m=n}^2} \sum_1^{m=n/2} u_i^2 d_i \alpha_i, \quad (16)$$

式中: m 为组成折射系统透镜的个数; h_i 表示光线在第 i 个透镜的投射高度; α_i 表示第 i 和 $i+1$ 个透镜间的材料线膨胀系数。设透镜间材料的热膨胀为 0, 则系统透镜随温度变化对像距的影响为:

图 1 由 n 个面组成的折射光学系统示意图Fig.1 Refractive optical system made of n optical surfaces

对多光组组成的光学系统,设光学系统由 i 个光组组成,如图 2 所示,由三角关系可得系统出射光线与光轴的夹角为:

$$u'_i = \frac{h_1}{f'} \quad (18)$$

式中: h_1 为第一近轴光线在第一面的入射高度, f' 为系统的焦距。

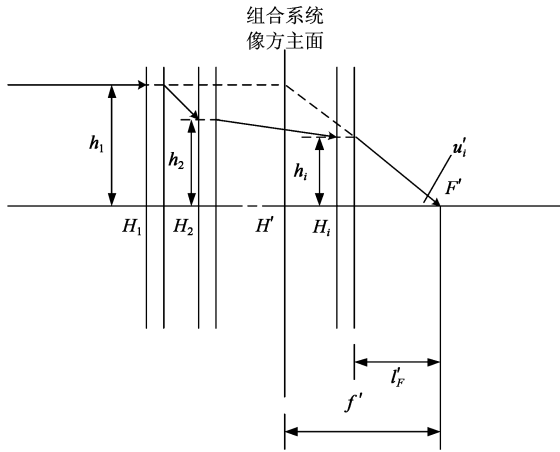


图 2 多光组组合光线示意图

Fig.2 Ray of multibeam combination

结合式(17)与式(18)可以得到,最终系统光学元件随温度变化对像距的影响为:

$$\frac{\partial l'_n}{\partial T} = -\frac{f'^2}{h_1^2} \sum h_i^2 \frac{\partial \Phi_i}{\partial T} \quad (19)$$

2.2 支撑材料的影响

多数文献认为,镜筒材料对焦距的影响量可以粗略地等同于筒长乘以线膨胀系数,这对于大多数的折射式光学系统而言是可行的。但是一些折反式光学系统不同,尤其是长焦距的折反式光学系统,其对成像起主要作用的是反射镜部分,反射镜之间的间隔变化对焦距的影响量要远大于间

隔的变化量。如图 3 所示的反射系统简图,平行光线入射第一面反射镜,成像在 O 点, O 点作为第二面反射镜的物点,成像到 A 点。如果两反射镜的间距 L 变化了 ΔL ,则相当于第二面反射镜的物点 O 移动了 ΔL 的距离,由高斯公式可知,最终像点 A 移动的距离与第二面反射镜的放大倍率相关,而不是约为 ΔL 。

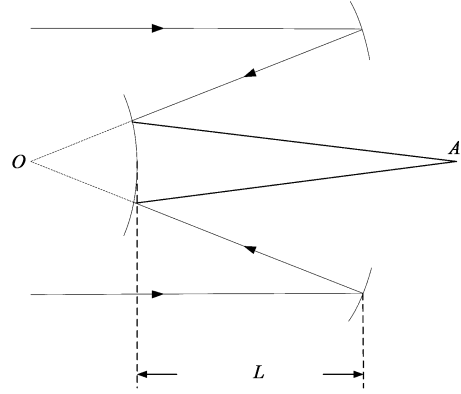


图 3 反射系统简图

Fig.3 Diagram of reflective system

因此,针对这一特点引入轴向放大率 β ,其定义为系统各元件之间间隔改变所引起的系统后截距变化量与间隔变化量的比值,系统的后截距为系统最后一个面到系统像面的距离。光学元件之间间隔的变化对系统后截距的影响量为:

$$\Delta l'_F = \sum_i \alpha_i (\beta_i + \Delta \beta_i) L_i \quad (20)$$

式中: α_i 为支撑材料的线膨胀系数, β_i 为各元件间隔的轴向放大率, $\Delta \beta_i$ 为温度变化所引起的轴向放大率变化, L_i 为各元件之间的间隔长度。软件仿真结果表明,单位温度变化下, $\Delta \beta_i$ 不足 β_i 的 $1/100$,因此在指导设计时 $\Delta \beta_i$ 可忽略不计。

实际优化过程中需要注意的是,光学元件的间隔不完全等同于连接两元件的机械材料长度。如图 4 所示,是用机械材料连接的光学元件的两个面,两元件之间的间隔为 L ,而连接两元件的镜筒长度为 L_1 ,温度变化时两元件间隔的变化量为 $\Delta L' = \Delta L_1 - \Delta d_1 - \Delta d_2$ 而不是简单的 $\Delta L = L \cdot \alpha \cdot \Delta T$ 。当 L 远大于 d_1, d_2 时, $\Delta L \approx \Delta L'$; 当 L 与 d_1, d_2 数值相近时,就需要完整讨论,可根据 L 与 d_1 和 d_2 的数量级关系来决定是否进行简化计算。

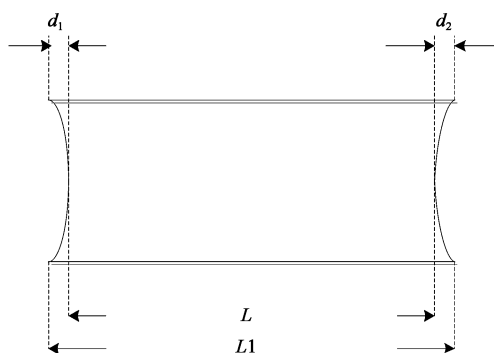


图4 镜片连接示意图

Fig.4 Lens connection

3 无热化设计

某机载折反式可见光光学系统的结构图如图5所示,系统焦距 $f' = 1\,850\text{ mm}$,像方 F 数为6,全视场 $2\omega = 2^\circ$,反射镜材料为碳化硅,镜筒材料为钛合金,要求在 $0 \sim 40^\circ\text{C}$ 的温度范围内调制传递函数不低于0.3。

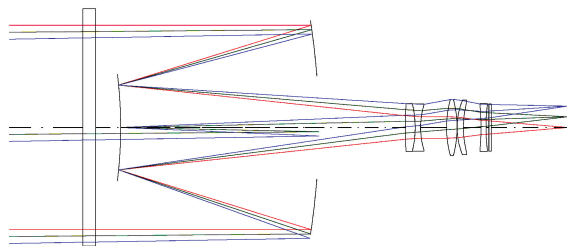


图5 系统原结构图

Fig.5 System structure

此时系统在 $0 \sim 40^\circ\text{C}$ 的光学传递函数图如图6所示,从图中可以看出,系统在 20°C 时成像质量良好,调制传递函数曲线接近衍射极限,在变化了 20°C 之后,调制传递函数急剧下降,成像质量变得非常差。

由式(10)、(12)、(19)可知,本系统的光学元件对系统后截距的影响为:

$$\frac{\partial L'_F}{\partial T} = -f'^2 \left(\frac{1}{h_1^2} \sum_{i=1}^2 h_i^2 (-\alpha_i \Phi_i) + \frac{1}{h_1^2} \sum_{i=3}^8 h_i^2 \theta_i \Phi_i \right), \quad (21)$$

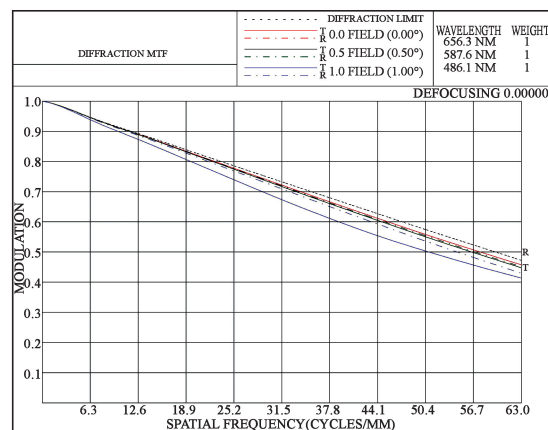
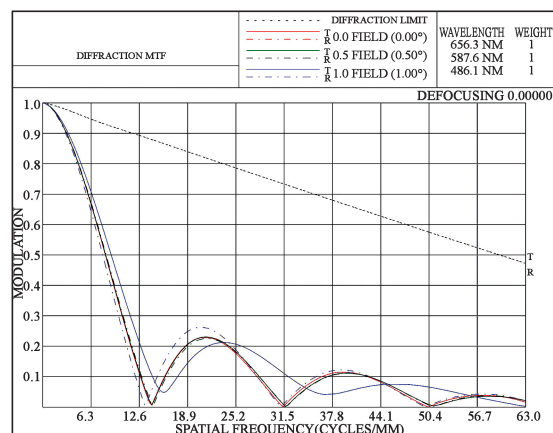
要使成像质量最佳,需要系统的焦面与接收面重合,结合式(20),本系统的消热差条件为:

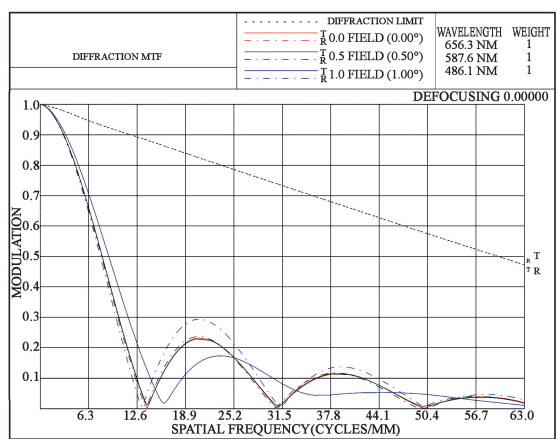
$$-f'^2 \left(\frac{1}{h_1^2} \sum_{i=1}^2 h_i^2 (-\alpha_i \Phi_i) + \right.$$

$$\left. \frac{1}{h_1^2} \sum_{i=3}^8 h_i^2 \theta_i \Phi_i \right) + \sum_i \alpha_i \beta_i L_i = \alpha_m L_m, \quad (22)$$

式中: α 均为材料的线膨胀系数, β_i 为各光学元件间隔的轴向放大率, L_i 为各光学元件之间的间距, L_m 为后截距的长度。

根据式(22)的消热差方程,将系统的参数全部带入其中。在优化时将各因素的影响程度从大到小排列,按从大到小的顺序依次调整。计算结果表明改变玻璃材料对系统焦距的影响不如改变镜筒材料对系统焦距的影响大。使用钛合金作为镜筒材料时,镜筒的膨胀引起的像距变化量大于光学元件变化引起的像距变化量。比钛合金的线膨胀系数小的材料,我们想到了殷钢(invar)和碳纤维,但是殷钢重量太大不利于工程应用,而碳纤维重量轻且线膨胀系数因方向不同而呈现负的和正的线膨胀系数。为了减小其影响效果,将轴向

(a) 20°C 时系统的调制传递函数(a) MTF at 20°C (b) 0°C 时系统的调制传递函数(b) MTF at 0°C



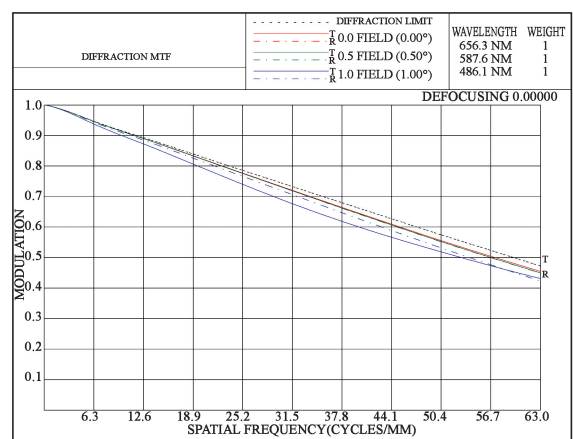
(c) 40 °C 时系统的调制传递函数
(c) MTF at 40 °C

图 6 原系统的调制传递函数
Fig.6 MTF before optimization

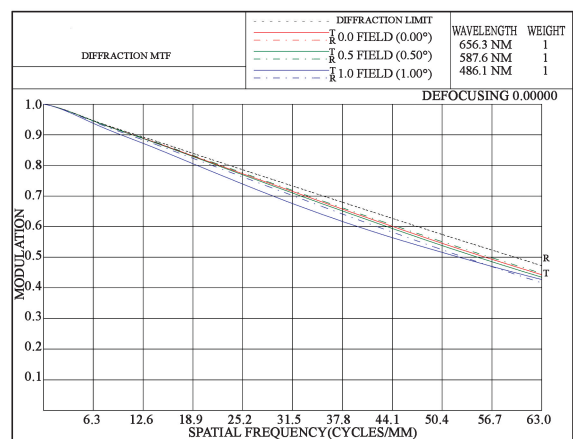
放大率大的两反射镜之间的镜筒和第二面反射镜到透镜之间的镜筒材料更换为某型号的碳纤维，其某一方向的线膨胀系数约为 $5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。此时计算结果与软件仿真结果都显示镜筒材料的膨胀对系统焦距的影响还是更大一些，此时我们可以将剩余的口径镜筒材料更换为殷钢，因为剩余部分系统的口径较小，使用的材料也不多，重量增加不太大，得到了一个相对较好的支撑结构。

在选定好支撑结构之后，开始通过更改玻璃组合来弥补剩余的热差。在选择玻璃时，尽量选择相同的玻璃系，因为同系的玻璃折射率较为接近，阿贝数也变化不大，可以在保证系统参数变化不大的情况下改变消热差系数。将透镜的曲率半径、厚度和透镜之间的间隔也设为变量，从光焦度最大的玻璃入手，根据消热差方程选择玻璃材料，让光学设计软件自动优化，判断优化结果，如不够好则将优化后的数据带入消热差方程，继续选择玻璃材料。如此反复调整和优化，直至得到最优解。最后将本系统透镜部分的第三块玻璃 K9 更换为 HK5，第五块玻璃 ZF3 更换为 HZF6，并适当调整其他透镜的曲率半径和间距可得无热化设计结果。

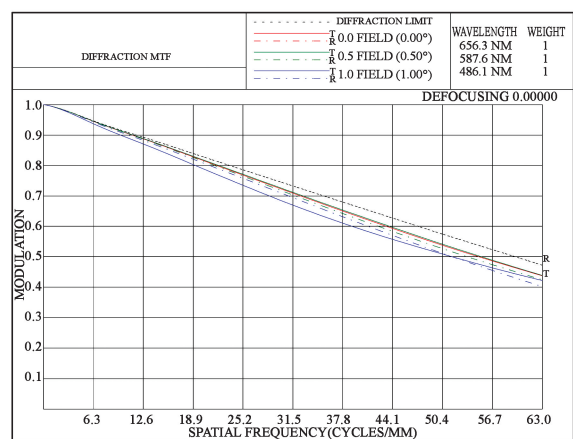
优化之后的系统的传递函数曲线如图 7 所示。从图 7 可以看出经过我们优化的系统，在 0~40 °C 的温度范围内，成像质量良好，具有很好的消热差能力，光学传递函数曲线下降不到 0.1，完全满足设计要求中的大于 0.3。



(a) 20 °C 时系统的调制传递函数
(a) MTF at 20 °C



(b) 0 °C 时系统的调制传递函数
(b) MTF at 0 °C



(c) 40 °C 时系统的调制传递函数
(c) MTF at 40 °C

图 7 优化后系统的调制传递函数
Fig.7 MTF after optimization

4 结 论

本文根据航空相机希望获得更高分辨率图像的要求,提出了一种机载折反式可见光光学系统的光学被动式无热设计。通过分析温度变化时系统的光学元件与支撑材料对系统焦距的影响,针对折反式系统的特点,引入了元件间隔的轴向放

大率这一概念,合理地体现了折反系统部分光学元件之间间隔变化对系统焦距影响大的事实。以此建立了消热差方程来指导完成无热化设计。软件仿真结果表明,工作在 486~656 nm 波段,焦距为 1 850 mm 的机载折反式可见光光学系统,在 0~40 °C 的温度范围内,系统光学传递函数曲线下降不到 0.1,满足成像要求。

参 考 文 献:

- [1] 沈宏海,王国华,丁金伟,等. 主动补偿无热化技术在机载红外光学系统中的应用[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(3): 593-601.
SHEN H H, WANG G H, DING J W, *et al.* Application of active-athermal compensation to airborne IR optical systems[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(3): 593-601. (in Chinese)
- [2] 卢意红,邓强. 红外光学系统无热化设计研究[J]. 红外, 2012, 33(5): 32-35.
LU Y H, DENG Q. Study of design of athermalizing infrared optical system [J]. *Infrared*, 2012, 33(5): 32-35. (in Chinese)
- [3] 孙金霞,刘建卓,孙强,等. 折/衍混合消热差共形光学系统的设计[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(4): 792-797.
SUN J X, LIU J Z, SUN Q, *et al.* Athermal design for hybrid refractive/diffractive conformal optical system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(4): 792-797. (in Chinese)
- [4] 王学新,焦明印. 红外光学系统无热化设计方法的研究[J]. 应用光学, 2009, 30(1): 129-133.
WANG X X, JIAO M Y. Athermalization design for infrared optical systems [J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30(1): 129-133. (in Chinese)
- [5] YASUHISA T, TAJIME T. Expansion of anathermal chart into a multilens system with thick lenses spaced apart [J]. *Opt. Eng.*, 1996, 35(10): 3001-3006.
- [6] BEHRMANN G P, BOWEN J. Influence of temperature on diffractive lens performance [J]. *Appl Opt.*, 1993, 32(14): 2483-2489.
- [7] 钱义先,贾远林,梁伟,等. 航空 CCD 相机可见光光学系统消热差设计[J]. 光子学报, 2009, 38(9): 2279-2282.
QIAN Y X, JIA Y L, LIANG W, *et al.* Athermal design for visible optical system on aerial CCD camera [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(9): 2279-2282. (in Chinese)
- [8] 申碧云,高明. 红外光学系统被动式无热化设计方法[J]. 电光与控制, 2012, 19(6): 70-73, 78.
SHEN B Y, GAO M. Passive optical athermalization design for infrared optical system [J]. *Electronics Optics & Control*, 2012, 19(6): 70-73, 78. (in Chinese)
- [9] 张卓,蔡猛. 双波段红外光学系统无热化设计[J]. 电光与控制, 2015, 22(5): 63-67.
ZHANG Z, CAI M. Athermalization design of dual-wavelength infrared optical system [J]. *Electronics Optics & Control*, 2015, 22(5): 63-67. (in Chinese)
- [10] 孙宏宇. 紧凑型折/衍混合中波红外无热化成像光学系统[J]. 光电技术应用, 2016, 31(3): 20-24.
SUN H Y. Compact Refractive and Diffractive Hybrid MWIR Athermalizing Optical Imaging System[J]. *Electro-optic Technology Application*, 2016, 31(3): 20-24. (in Chinese)
- [11] 石顺祥,王学思,刘劲松. 物理光学与应用光学[M]. 2 版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008.
SHI S X, WANG X E, LIU J S. *Physical Optics and Applied Optics* [M]. 2nd ed. Xi'an: Xidian University Press, 2008. (in Chinese)
- [12] 王学新,焦明印. 光学被动式和机电式组合消热差方法的研究[J]. 应用光学, 2010, 31(3): 354-359.
WANG X X, JIAO M Y. Combination of optical passive and mechanical-electrical athermalisation [J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(3): 354-359 (in Chinese).

作者简介:



廖劲峰(1995—),男,四川富顺人,硕士研究生,2016 年于哈尔滨工业大学(威海)获得学士学位,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: liao_jin_feng@163.com



丁亚林(1964—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1994 年于东北大学获得硕士学位,主要研究方向为航空遥感成像。主要从事航空相机总体设计方面的研究。E-mail: dingyl_1964@126.com