

·光电系统·

## 消热差高清相机光学系统设计

刘海欧<sup>1</sup>, 郭宝录<sup>2</sup>

(1. 中国电子科技集团公司光电研究院, 天津 300000; 2. 空军驻锦州地区军事代表室, 辽宁 锦州 121000)

**摘要:** 光学仪器的工作环境温度变化范围大, 温度变化时光学元件的曲率、厚度和间隔都将发生变化, 同时光学材料的折射率和所在介质的折射率也将发生变化, 影响光学系统的成像质量。文中采用光学被动补偿方式, 针对 1 920×1 080 分辨率的高清可见光 CCD, 设计了焦距 12 mm,  $F$  数为 4, 视场角为 57.5°, 工作温度范围 -40 °C ~ +80 °C 的消热差光学系统。设计结果表明, 在整个工作温度范围内, 系统成像质量良好, MTF 接近衍射极限。

**关键词:** 光学设计; 消热差; 空间相机; 传递函数

中图分类号: O436.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2015)-05-0010-04

## Athermalized Optical System Design of Space High-definition Camera

LIU Hai-ou<sup>1</sup>, GUO Bao-lu<sup>2</sup>

(1. Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300000, China;  
2. Military Representative Office of Air Force in Jinzhou, Jinzhou 121000, China)

**Abstract:** Most aerospace optical instruments are expected to perform over a wide temperature range. The change in temperature will cause not only the change of the curvature of optical elements as well as the refractive index, but also the change of the defocus of the image surface and therefore the degradation of performance. Based on adopted optical compensation method and with 1 920×1 080 visible high-definition CCD, an athermalized optical system working at -40 °C ~ +80 °C is designed. The focal length of optical system is 12 mm, the  $F$  number is 4, and the field of view is 57.5°. The results show that the system has a good imaging quality and the modulation transfer function (MTF) for spatial frequency is closed to the diffraction limitation over the temperature range.

**Key words:** optical design; athermalized; aerospace camera; modulation transfer function (MTF)

特殊环境的光学仪器通常需要工作在恶劣的环境条件下, 其中环境温度的变化是对光学仪器的严峻考验之一。温度变化将导致光学系统结构参数、材料折射率的变化, 从而引起系统性能的下落。使光学系统在要求的温度范围内具有稳定的性能, 同时又不过多增加系统的体积、质量和成本, 使系统具有良好的可靠性, 对光学仪器的意义十分重大<sup>[1]</sup>。保证光学系统在较宽温度范围内正常工作的技术被称为消热差技术, 基于可见光高清 CCD (分辨率 1 920×1 080), 介绍了一种消热差光学系统

设计, 使系统在宽的温度范围内, MTF 始终接近衍射极限, 同时, 由于系统工作环境复杂, 设计中采取了相关的防护措施, 保证系统能够满足实际任务的要求。

### 1 消热差原理

无热化设计是为了保证光学系统在整个使用温度范围内都具有良好的成像质量, 根据仪器的特点和使用场合的不同, 消热差技术一般可分为

三类:机电主动式、机械被动式、光学被动式等方法<sup>[2-4]</sup>。光学被动式是结合光学材料热特性及机械材料的热特性,通过不同光机材料的组合来消除温度的影响,从而获得无热效果。由高斯公式可知, $m$ 个密接透镜组成的系统,由其成像性质可知<sup>[5-7]</sup>

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f'_{total}} \quad (1)$$

式中, $l'$ 、 $l$ 、 $f'_{total}$ 分别为像距、物距、系统的组合焦距。对于密接镜组有

$$\frac{1}{f'_{total}} = \sum_{i=1}^m \frac{1}{f'_i} \quad (2)$$

式中, $f'_i$ 为各透镜的焦距,由此得

$$\frac{1}{f'_{total}} = \frac{df'_{total}}{dT} = \sum_{i=1}^m \frac{1}{f'^2_i} \frac{df'_i}{dT} \quad (3)$$

整理得

$$x_{f_{total}} = \frac{1}{f'_{total}} \frac{df'_{total}}{dT} = \sum_{i=1}^m \frac{\phi_i}{\phi} x_{f_i} \quad (4)$$

式中, $x_{f_{total}}$ 、 $\phi_i$ 、 $\phi$ 分别为密接透镜组焦距的归一化变化率、镜组中各透镜的光焦度和系统的总光焦度。由上式可以看出,密接多透镜组焦距的归一化变化率实际上是各单透镜焦距的归一化变化率的加权组合,加权因子为其光焦度与全系统光焦度的比。这样就可以通过控制加权因子得到需要的焦距归一化变化率,使其满足消热差条件。对于非密接的分离式多透镜情况,其焦距的归一化变化率为

$$x_{f_{total}} = \left(\frac{1}{h_1\phi}\right)^2 \sum_{i=1}^m h_i^2 x_{f_i} \phi_i \quad (5)$$

由消热差条件可知,系统若需要完全消热差,需要严格满足以下三个条件

$$\sum_{i=1}^m h_i \phi_i = \phi \quad (6)$$

$$\left(\frac{1}{h_1\phi}\right)^2 \sum_{i=1}^m (h_i^2 C_i \phi_i) = 0 \quad (7)$$

$$x_{f_{total}} = \alpha_L \cdot L \quad (8)$$

即满足光焦度条件、消色差条件及光学系统总热差系数与壳体的线膨胀系数相同。式中, $h_1$ 、 $h_i$ 、 $C_i$ 分别为近轴光线在第一面的高度、近轴光线在第*i*个元件第一表面高度及第*i*个透镜的色差系数,单个折射元件的热差系数为

$$x_{f_i} = \alpha_g - \frac{1}{n-n_0} \left( \frac{dn}{dT} - n \frac{dn_0}{dT} \right) \quad (9)$$

式中, $\alpha_g$ 为材料的线膨胀系数; $dn/dT$ 为材料的折射率温度系数; $n$ 为透镜材料的线膨胀系数; $n_0$ 为环境介质的折射率。

## 2 设计参数及设计过程

根据任务要求,系统的设计参数如表1所示。

表1 设计参数

CCD尺寸	2/3 inch(1inch=25.4 mm)
CCD分辨率	1 920×1 080
像元尺寸	5.5 μm×5.5 μm
工作波段	0.48~0.65 μm
系统 <i>F</i> 数	4
系统焦距	12 mm
视场角	57.5°

设计能够实现光学被动式的消热差系统,主要需做以下三方面工作。

(1)确立实现光学温度被动补偿(即消热差)的条件;

(2)确定材料组合并选择有利于消热差的初始光焦度组合;

(3)根据消热差条件优化系统,保证式(6)~式(9)所需条件尽量满足,并确定最终结构参数。

根据以上分析,设计过程主要包括初始结构选取,确定材料组合,光焦度分配及像差平衡,消热差设计等几个部分。从实际使用环境方面考虑,仪器周围不存在高能激光,大功率发热部件,所以设计中主要考虑环境温度均匀变化的情况,认为光学元件各部分间不存在温度梯度。

## 3 设计结果及高低温工作成像质量分析

光学系统初始结构选型采用反摄远结构。该结构的优点是后工作距大,像方光线出射角小,可以达到像方远心或像方准远心,由于像面照度与视场中心照度按角度余弦的四次方衰减,所以反摄远结构有利于像面照度及像面照度均匀性的提高<sup>[8]</sup>。初始结构经优化后的二维图如图1所示。选择的玻璃材料牌号及折射率温度系数如表2所示。其常温下的传递函数如图2所示。CCD像元尺寸为5.5 μm,MTF截止频率计算至90 lp/mm,从图2中可以看出,在截止频率处,系统的MTF接近衍射极限,MTF不一致性小于0.1,成像质量良好。图3、图4给出了该结构在-40℃及+80℃常压下的MTF曲线。从图3、图4中可以看出,系统传递函数受温度影响很大,在高低温情况下MTF下降很快,

低温时轴上点 MTF 只有 0.1,对比度明显下降,系统需要进行无热化设计。

表2 透镜元件热学参数表

材料	HZF62	HQK3	HZF62	HZK9	HZF62	H1AF3	HZK9
线膨胀系数(10 <sup>-7</sup> /K)	68	96	68	66	68	86	66
-40 °C dn/dT	-0.8	-2.4	-0.8	1.8	-0.8	0.2	1.8
+80 °C dn/dT	0.4	-1.5	0.4	2.0	0.4	1.5	2.0

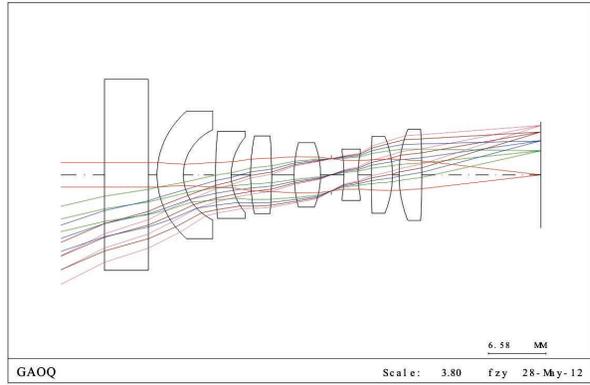


图1 光学系统二维图

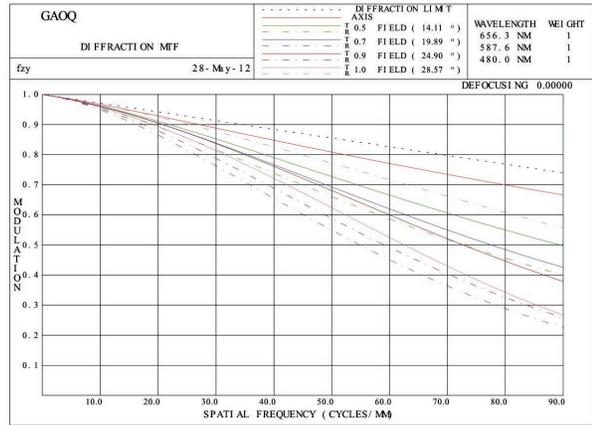


图4 光学系统+80 °C时成像 MTF 曲线

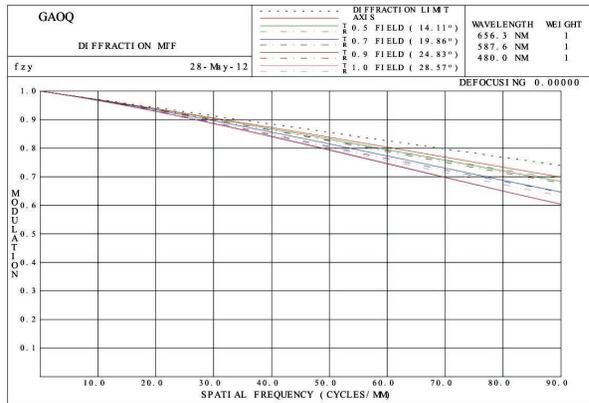


图2 光学系统常温下 MTF 曲线

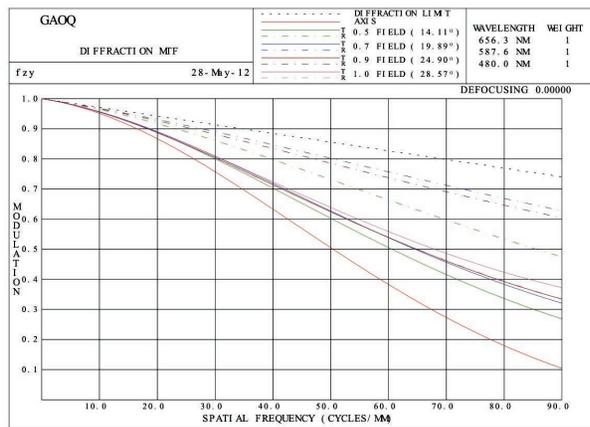


图3 光学系统-40 °C时成像 MTF 曲线

对系统近轴光线追迹后,得出近轴光线在各表面上的高度  $h_i$ ,利用式(6)~式(9)可计算出各透镜的热差系数及总热差系数。发现透镜1和透镜5对系统的热差系数及色差系数贡献较大,对系统进行重新优化时,主要控制近轴光线在透镜1和透镜5上的透射高度及控制透镜5的光焦度,在不过多改变其余元件光焦度的情况下使系统总色差系数及总热差系数尽量小,镜筒及隔圈采用2A12-T4硬铝材料,线膨胀系数为  $236 \times (10^{-7}/K)$ ,为了便于像差校正,保证系统成像质量,优化过程中系统总色差系数、总热差系数没有校正为零,系统最终各透镜元件的光焦度及色差系数如表3所示。

表3 各透镜元件光学参数

光焦度	-0.037 5	-0.054 6	0.042 6	0.074 9	-0.115 0	0.059 4	0.042 2
色差系数	0.051	0.015	0.051	0.017	0.051	0.024	0.017

优化后系统的二维图如图5所示。常温下的 MTF 曲线如图6所示。图7、图8给出了优化后系统在-40 °C和+80 °C常压条件下 MTF 曲线。从图7、图8可以看出,优化后的系统在高低温情况下成像质量变化较小,边缘视场 MTF 曲线优于 0.5,成像对比

度良好,且系统最终边缘主光线在像面上的入射角小于 $10^\circ$ ,像面照度均匀性优于95%,可以满足总体指标要求。

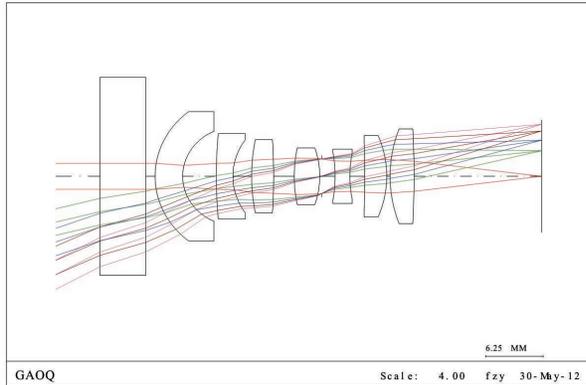


图5 无热化后光学系统二维图

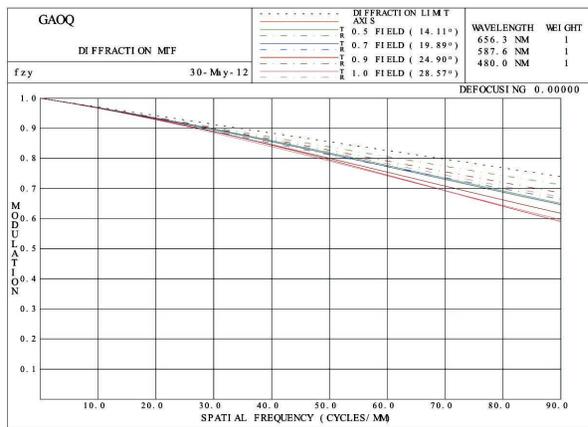


图6 无热化后光学系统常温下 MTF 曲线

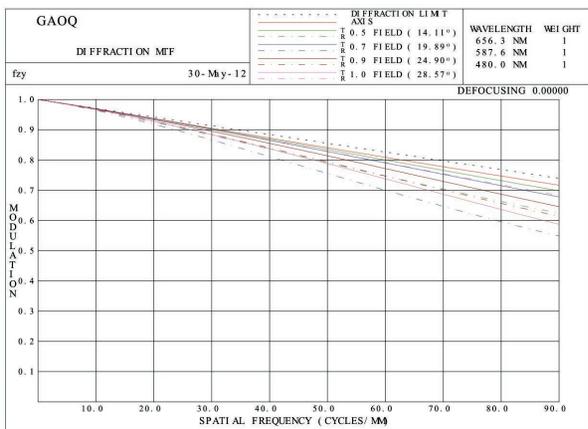


图7 无热化后系统 $-40^\circ\text{C}$ 时 MTF 曲线

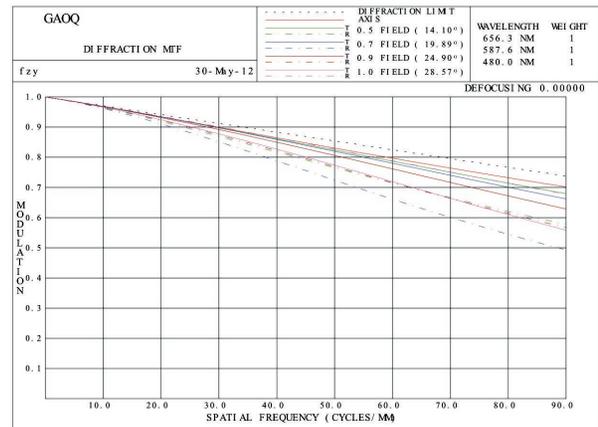


图8 无热化后系统 $80^\circ\text{C}$ 时 MTF 曲线

## 4 结 论

给出了一种可工作于宽温环境下的消热差高清光学系统的设计方法。通过采用光学被动消热差的方法,选取合适的玻璃组合及结构材料,消除了环境温度对光学系统的影响,优化后的光学系统在 $-40^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$ 范围内成像质量良好,MTF 接近衍射极限,不需要增加主动调焦装置就可以保证系统在一定的温度范围内性能稳定,可实现无热化。

## 参考文献

- [1] 胡玉禧,周绍祥,相里斌,等.消热差光学系统设计[J].光学学报,2000,20(10):1386-1391.
- [2] 刘健,郝云彩,常军,等.无热化星敏感器光学系统设计[J].北京理工大学学报,2010,30(2):223-226.
- [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.
- [4] 刘琳,沈为民,周建康.中波红外大相对孔径消热差光学系统的设计[J].中国激光,2010,37(3):675-679.
- [5] 汤天瑾.无热化大相对孔径星敏感器光学系统设计[J].航天返回与遥感,2011,32(3):36-42.
- [6] 曲贺盟,张新,王灵杰,等.大相对孔径紧凑型无热化红外光学系统设计[J].光学学报,2012,32(3):0322003-1-0322003-8.
- [7] 张鑫,贾宏光.大相对孔径红外消热差物镜设计[J].中国光学.2011,4(4):374-379.
- [8] 闫阿奇,祝青,曹剑中,等.用于航天的高分辨率大视场光学系统设计[J].光子学报,22008,37(10):1975-1977.
- [9] 闫阿奇,杨建峰,曹剑中,等.航天鱼眼相机光学系统设计的研究[J].光学学报,2011,31(10):1022004-1-1022004-4.