

·光学设计·

一种红外镜头的被动式无热补偿设计

陈德富, 李相军, 朱敏

(东北电子技术研究所, 辽宁 锦州 121000)

摘要:探讨了温度变化导致光学系统像面离焦的原理,介绍了目前国内外典型的消热方法,分析了光学系统被动式无热补偿的优势,推导了实现热补偿需要满足的无热化方程组。提出一种光学和机械相结合的无热补偿方法,采取该方案补偿后的光学镜头在环境温度发生变化时像面与传递函数保持相对稳定,即光学系统基本实现无热化,这对红外镜头的无热化设计具有重要意义。

关键词:热补偿;无热化设计;膨胀系数

中图分类号:TN216

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2011)03-0021-03

Design of Passive Athermal Compensation of Infrared Lens

CHEN De-fu, LI Xiang-jun, ZHU Min

(Northeast Research Institute of Electronics Technology, Jinzhou 121000, China)

Abstract: The principle which can cause the defocus of the image surface is discussed. The domestic and foreign athermalisation methods are introduced, the advantages of passive athermal compensation of the optical system are analyzed, athermal equations of thermal compensation are derived. An athermal compensation method which combines the optics with the machinery is proposed. Using this method, the optical lens and the transfer function can keep relative stability, when the environment temperature changes, that is, the athermalization of optical system is basically realized, it is significant for athermal design of infrared optical system.

Key words: thermal compensation; athermal design; expansion coefficient

光学系统中的光学器件在温度发生变化时,其曲率、厚度和间隔将发生变化,同时元件材料的折射率也发生改变,从而导致系统性能急剧下降,其中最主要的问题是离焦和图像质量的降低。研究如何使红外光学系统在一个较大的温度范围内保持良好的成像质量,同时不使用调节机构,使其具有尺寸小、质量轻、结构简单、光轴稳定和可靠性高等优点,对红外光学设备的研究具有重要的意义。

1 典型的消热方法

目前国内外红外光学系统消热技术分为主动

消热和被动消热两类,被动消热又分为机械被动式消热和光学被动式消热2种方法^[1],一般可分为以下3种形式:(1)机械(电子)主动式消热;(2)机械被动式消热;(3)光学被动式消热。

1.1 机械(电子)主动消热

利用温度传感器自动探测温度,将探测到的温度信息传给处理器,由处理器实时计算出温度变化引起的像面位移,再由电机驱动消热元件到达正确的位置。在实际中,主动消热方法需要准确求解温度与像面位移的关系,同时需要使用电机等辅助模块,而且需要提供外部电源。虽然容易实现,但增

收稿日期:2011-04-27

基金项目:国家部委基金

作者简介:陈德富(1969-),男,高级工程师,研究方向为电子设备结构设计。

加了系统尺寸和质量,并且调节精度要求高,容易出现因光轴晃动而带来瞄准误差^[2]。

1.2 机械被动消热

这种方法是利用消热机构中不同膨胀系数的机械元件以可靠方式进行自然膨胀和收缩来获得运动。靠这种运动调整轴上一个透镜或透镜组的位置来对温度变化引起的像漂移进行补偿和重新聚焦。这种方法能可靠执行消热,如:采用高膨胀的塑性材料或液体,形状记忆感应圈等,这些方法都引入透镜组直接或间接的运动。

1.3 光学被动消热

利用光学材料热特性之间的差异,通过不同特性材料的组合来消除温度的影响,在较大温度范围内保持焦距、像面和像质稳定。红外光学材料很多,它们的热光系数都不同。光学被动消热将选择合适的材料结合在一起补偿热离焦。光学被动式消热不引入运动元件,不需要供电,具有尺寸小、质量轻、结构简单、光轴稳定、可靠性高等优点^[3]。

2 设计实例

一般情况下,镜头在工作状态不具备进行人为干预和重新调焦的条件,本红外光学镜头的设计采用机械被动消热与光学被动消热相结合的消热方法。

2.1 设计原理

推导均匀温度场中薄透镜系统的位置热差 $\Delta l'_{th}$ 和倍率色差 $\Delta y'_{th}$ 表达式为

$$\Delta l'_{th} = -\frac{1}{n'_k u'_k} \sum_{i=1}^{k+1} (h^2 \varphi T + u^2 \Delta d) \quad (1)$$

$$\Delta y'_{th} = -\frac{1}{n'_k u'_k} \sum_{i=1}^{k+1} (h h_\rho + u u_\rho \Delta d) \quad (2)$$

式中, k 表示透镜个数; n'_k 、 n'_k 为系统像方折射率和像方孔径角; h 、 h_ρ 指轴上、轴外近轴光线在各透镜上的高度; Δd 为相邻透镜间距的热改变量; u 为透镜物方孔径角; φ 为透镜光焦距; T 为透镜初级位置热差系数。

由式(1)、式(2)可以看出,两种热差均由光学热差系数和机械热差系数组成,所以无热化过程就

是使光学热差和机械热差相互补偿的过程,而光学热差又可以通过选择不同 T 值的透镜组合加以改变,使之与机械热差相匹配。因此,无热化的关键在于选取合适的光学材料和结构材料组合。

进行无热化设计时必须满足光焦距、校正色差和消热差的要求,即系统需满足如下的无热化方程组

$$\sum_{i=1}^j h_i \varphi_i = \varphi \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^j h_i^2 \varphi_i / \nu_i = 0 \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^j h_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial T} + \alpha_n \varphi = 0 \quad (5)$$

式中, h_i 为第一近轴光线在各镜组的高度; φ_i 、 ν_i 分别为各镜组的光焦距及阿贝常数; α_n 为镜筒支架的线膨胀系数。通过求解无热化方程组,选定材料确定光焦距分配以后,在保持光焦距基本不变条件下经过像差实现系统无热化。

2.2 红外镜头的设计

2.2.1 光学材料的选择

目前国内适用于热成像的红外光学材料主要有以下几种:锗、硅、硫化锌(HP)、硫化锌(CVD)、硒化锌、AMTIR。通过求解消热差方程组可获得多种结构形式和材料组合,在这种情况下,需要对所用光学材料进行合适的选择^[4]。

耐潮级别小的光学材料,其CaO含量高,化学性质不稳定,因此不予以采用。

正负透镜阿贝数相差大。根据像差理论,对色差的校正应采取不同色散值的玻璃组合的形式,所采用光学材料阿贝数相差悬殊,则优化过程中的色差比较容易校正^[5]。

应用玻璃消热图进行辅助选择。对3片以下透镜组进行材料选择时,可以应用玻璃消热图,获取尽可能大的材料三角形^[6],实现透镜光焦距最小。

按照设计指标,结合以上理论,通过先求解上述方程组,在得出系统相应初始结构和材料选择的基础上,再利用CODE V进行了详细的优化设计,系统由4个透镜组成,图1为光学系统结构图,图2为光学系统三维结构图。

2.2.2 结构材料的选择

通过对AL7075(热膨胀系数236e-7)、Invar36

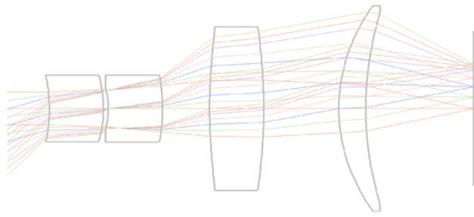


图1 光学系统结构图

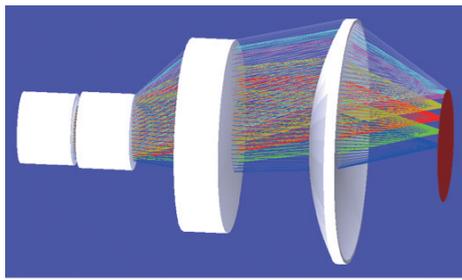


图2 光学系统三维结构图

钢钢(热膨胀系数 $15e-7$)、1015 低碳钢 ($119e-7$) 和 SS440 马氏体不锈钢(热膨胀系数 $101e-7$) 作为镜头结构材料的仿真分析,以各视场传递函数在 20 lp/mm 均大于 0.3 为判别依据,下面为几种材料的比较情况:

(1) 采用钢钢情况下 MTF 曲线最为稳定,在 20 lp/mm 处获得的 MTF 值最高,然而这种材料价格高、加工难度相对较大。

(2) 比较马氏体不锈钢和奥氏体不锈钢材料,在 20 lp/mm 处,采用马氏体不锈钢材料可以获得更高的传递函数值,各视场对应传函曲线分布较为集中。

(3) 1015 低碳钢的作用效果与 SS440 马氏体不锈钢相近,但是需要指出的是由于数据所限,1015 低碳钢采用的热膨胀系数为 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 下作用值,而 SS440 的热膨胀系数则在 $0\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内作用值,故而在分析可靠程度上,SS440 马氏体不锈钢要优于低碳钢。

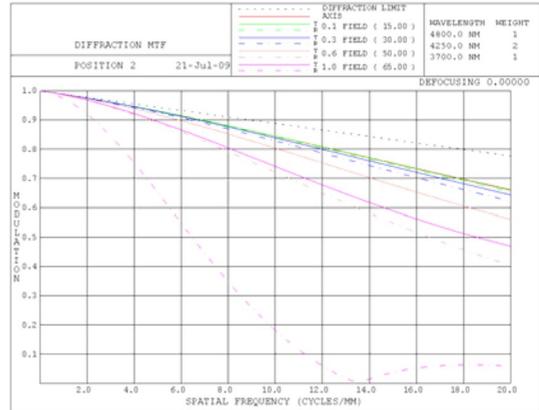
综上,在满足成像质量和制造成本要求的情况下,SS440 马氏体不锈钢可以作为结构材料使用。

2.2.3 光学设计和无热化分析

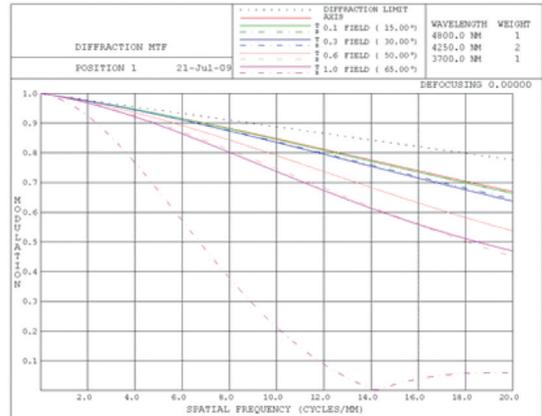
评价光学系统无热化程度首先应考虑系统像面在温度变化时的移动量,在设计温度指标范围内像面发生漂移的最大值为 $0.3\text{ }\mu\text{m}$,这说明该系统经消热以后,在使用温度范围内基本保证了实际成像面位置不改变。

红外镜头要求像斑能量为高斯分布,80%能量集中于不超过2个像素范围内。消热以后的光学系统在各温度下满足能量集中度的要求。

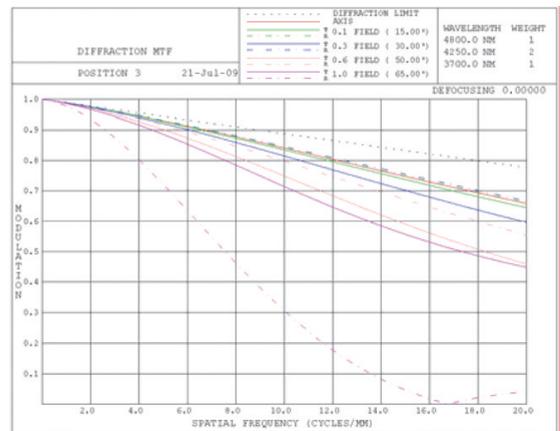
以上数据显示,该消热系统在各参考温度下,各视场光斑满足成像均匀性的要求;分析结果显示各温度下传递函数与参考温度基本一致。图3给出在几个典型温度条件下传递函数曲线,可以看到在



(a) 温度1传递函数曲线



(b) 温度2传递函数曲线



(c) 温度3传递函数曲线

图3 各温度下系统MTF曲线

(下转第34页)

- [C]//Proc 3rd EPVSEC, 1980: 866-870.
- [9] A S Grove, D J Fitzgerald. Surface effects on p-n junctions: Characteristics of surface space-charge regions under non-equilibrium conditions [J]. Solid-State Electronics, 1966, 9:783-806.
- [10] D J Fitzgerald, A S Grove. Surface recombination in semiconductors [J]. Surface Science, 1968, 9(2):347-369.
- [11] R B M Girisch, R P Mertens, R F De Keersmaecker. Determination of Si-SiO₂ interface recombination parameters using a gate-controlled point-junction diode under illumination [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1988, 35(2):203-222.
- [12] B Kuhlmann, A G Aberle, R Hezel, Proceedings of the 13th European PVSEC [C]//UK: Nice, France Stephens Bredford, 1995: 1209.
- [13] G Agostinelli, P Vitanov, Z Alexieva, et al. Surface passivation of silicon by means of negative charge dielectrics [C]//Proceedings of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Paris, France, 2004: 132-134.
- [14] G Agostinelli, A Delabie, P Vitanov, et al. Very low surface recombination velocities on p-type silicon wafers passivated with a dielectric with fixed negative charge [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2006, 90 (18-19):3438-3443.
- [15] B Hoex, S B S Heil, E Langereis, et al. Ultra low surface recombination of c-Si substrates passivated by plasma-assisted atomic layer deposited Al₂O₃[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89:042112.
- [16] R Hezel, K Jaeger. Low-Temperature Surface Passivation of Silicon for Solar Cells [J]. J. Electrochem, 1989, 136:518.
- [17] A G Aberle, S Glunz, W Warta. Impact of illumination level and oxide parameters on Shockley - Read - Hall recombination at the Si-SiO₂ interface[J]. J.Appl.Phys., 1992, 71:4422.
- [18] R Hezel, R Schorner. Plasma Si Nitride—A promising dielectric to achieve high - quality silicon MIS/IL solar cells [J]. J. Appl. Phys., 1981, 52:3076.
- [19] I Martin, M Vetter, M Garin, et al. Crystalline silicon surface passivation with amorphous SiC_x:H films deposited by plasma-enhanced chemical-vapor deposition [J]. J. Appl. Phys., 2005, 98:114912.
- [20] M J Kerr, A Cuevas. Recombination at the interface between silicon and stoichiometric plasma silicon nitride [J]. Semicond. Sci. Technol., 2002, 17:166.
- [21] M J Kerr, A Cuevas. Very low bulk and surface recombination in oxidized silicon wafers [J]. Semicond. Sci. Technol., 2002, 17:35.

(上接第23页)

不同温度下镜头传递函数曲线基本一致。综合分析以上结果,认为该系统在工作温度范围内实现了良好消热。

3 结 论

从理论上分析探讨了温度变化对光学系统的影响,并给出设计实例。通过消热差方程组的求解获得多种初始结构和材料组合,在此基础上依据材料选取原则进行取舍,使得温度变化时透镜热常量导致的离焦正好和镜筒材料的热膨胀系数导致的像面移动相一致,在一定温度范围内获得无热化光学系统,镜头成像质量满足技术指标要求,装调后的光学镜头已通过温度测试。

参考文献

- [1] 李婕,张志明,冯生荣.弹载红外光学系统被动消热技术[J].红外技术,2005(3):196-201.
- [2] 吴晓靖,孟军和.红外光学系统无热化设计的途径[J].红外与激光工程,2003(6):6-11.
- [3] Hu Yuxi, Zhou Shaoxiang, Xiang Libin, et al. Design of athermal optical system[J].Acta Optica Sinica, 2000, 20(10).
- [4] 冯生荣,李凯.红外光学系统的热效应[J].红外技术, 1990, 12(2):6-11.
- [5] 刘健,郝云彩,常军,等.无热化星敏器光学系统设计[J].北京理工大学学报,2010(2):24-27.
- [6] Tamagaway Y, Tajime T. Dual-band optical system with a projective athermal chart: design [J].Appl Opt, 1997,36 (1):297-301.