文章编号:1002-2082(2011)01-0133-05

双视场红外变焦镜头的无热化研究

邓 键，童卫红，安晓强，王 茜
(西南技术物理研究所，四川 成都 610041)

摘 要：研究了双视场红外变焦系统的光学被动消热差技术，通过理论分析温度变化对变焦光学系统性能的影响，推导出被动消热差公式。将热离焦和热色差作为两种附加的初级像差引入像差平衡关系式，可通过常规光学系统消像差的4种途径：分配光焦度、有效匹配光学材料、改变透镜形状和引入非球面实现全被动补偿。在此基础上建立了一个通用模型，该系统有6片透镜、一个非球面，在－45℃～＋55℃温度范围内的2个视场均具有较好的像质、冷反射和较宽松的公差特性。在该模型中适当引入衍射元件，可减少镜片，提高光学性能。

关键词：红外变焦光学系统；光学补偿；无热化；光学设计
中图分类号：TN202 **文献标志码**：A

Athermalization of infrared zoom system

DENG Jian，TONG Wei-hong，AN Xiao-qiang，WANG Qian
(Southernwest Institute of Technical Physics，Cheng Du 610041，China)

Abstract：Passive athermalization technology of infrared zoom optical system is studied. Athermalization relationship was deduced and the condition expression for zoom system athermalization was obtained. Defocusing and chromatic aberration caused by thermal change can be taken as two kinds of primary aberrations，and can be eliminated with a passive athermalization system. There are four ways to implement athermalization in conventional systems，appropriate focal power arrangement，proper match of optical material，change of lens surface shape，and use of aspherical elements. A dual field of view (FOV) infrared zoom optical model was built，which had 6 lenses and one aspherical surface. It achieved good image quality in the range of －45℃～＋55℃ in both FOV，with low Narcissus and less stringent tolerance requirement. Diffraction surface can be easily introduced in this model，which reduces the number of lens used and improve optical performance.

Key words：infrared zoom optical system；optical compensate；athermalization；optical design

引言

红外材料具有较大的温度系数，温度变化时折射率和阿贝系数将发生较大变化，加之镜筒的热胀冷缩，这些将影响光学系统的成像性能。无热化设计要求在使用温度范围内保证光学系统的正常工作，主要有3种方法：光学被动式、机电主动式和机械被动式[1]。机电主动式和机械被动式主要通过微电机、温度位置传感器和控制电路以及镜筒材料的匹配等非光学手段来补偿温度变化对系统的影响，系统复杂，且有滞后效应。目前研究主要集中在光学被动消热差技术，即通过光学、镜筒材料和镜面参数的合理匹配，完成对温度变化的补偿。本文从

收稿日期：2010-07-05； **修回日期**：2010-10-11
作者简介：邓键(1976－)，男，重庆人，工程师，博士，主要从事光学系统的设计、装调和检测工作。
E-mail：warhorse99@sina.com

光学初级像差理论角度分析说明了光学被动消热差的原理和途径,并建立了一个通用模型。

1　透镜的消热差条件

理想透镜消热差形成完善像的条件可由下式得出[2]:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n} h_i\varphi_i = \varphi \\ \sum_{i=1}^{n} \frac{\varphi_i}{v_i} = 0 \\ \sum \frac{\frac{\mathrm{d}\varphi_i}{\mathrm{d}T}v_i - \frac{\mathrm{d}v_i}{\mathrm{d}T}\varphi_i}{(v_i)^2} = 0 \\ \sum_{i=1}^{n} \frac{\mathrm{d}\varphi_i}{\mathrm{d}T} = \alpha_L L \end{cases} \tag{1}$$

对比一般光学系统,(1)式增加了热差引起的热离焦和热色散的消除公式,在求解初始结构时需要匹配镜筒材料(线膨胀系数 α_L)和光学材料的相关参数(线膨胀系数和温度系数 $\mathrm{d}n/\mathrm{d}T$ 引起的焦距变化 $\frac{\mathrm{d}\varphi_i}{\mathrm{d}T}$ 和热色散 $\frac{\mathrm{d}v_i}{\mathrm{d}T}$),光学设计中热离焦和热色差应与常规光学系统的球差、慧差、像散、场曲、畸变、位置色差、倍率色差等7种初级像差的消除条件一起考虑,作为9种初级像差一起求解。

在一般使用波段(中波3.7 μm～4.8 μm或长波7.7 μm～10.3 μm)和温度范围(－30℃～70℃),$\mathrm{d}n/\mathrm{d}T$ 变化较小,认为光学设计软件如ZEMAX是线性变化,温度影响主要为热离焦。实际使用中也证明其非线性度引起的变化较小,对像质的影响不大。但在较宽波段和温度范围内的实测数据表明:$d\mathrm{n}/d\mathrm{T}$ 并不随温度呈线性变化,设计较短谱段和具有较大镜间隔时,温度变化可能引起较大的热色差和热二级光谱。CODE V软件则直接给出了对应波长的 $\mathrm{d}n/\mathrm{d}T$。但是,不同公司不同批次的材料,$\mathrm{d}n/\mathrm{d}T$ 的非线性度往往不一致,在设计高质量镜头时需要特别注意。

2　红外变焦系统消热差条件

被动消热差像差设计过程中的难点是校正变焦系统的9种初级像差平衡问题。

按照光学系统像差的艾里判据,消热差的误差 Δl_T 应控制使最大波像差小于四分之一波长,即 Δl_T 应与系统的焦深相同:

$$\Delta l_T \leqslant 2\lambda(f/\#)^2 \tag{2}$$

由于光学补偿的非连续变焦系统不能完全补偿像面移动,其完全补偿点的个数 n 与透镜组的个数 m 有一定关系[3]:$m=n-1$,需要在补偿点附近使光程差满足焦深。

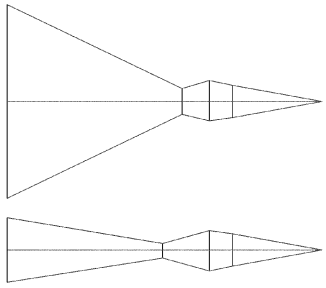


图1　双视场光学系统

Fig. 1　Dual FOV system

对于如图1所示的双视场系统,可分为前固定组、变倍组和后固定组,根据光学补偿高斯光学计算公式,合成焦距及像面偏移量可定义如下[3]:

$$\begin{aligned} f'(z) &= f_1'\beta_1\beta_2 = \frac{f_1'f_2'f_3'}{-z^2+b_1z+b_2} \\ b_2 &= \Delta_{12}\Delta_{23} - f_2'^2 \\ b_1 &= \Delta_{23} - \Delta_{12} \end{aligned} \tag{3}$$

式中:f' 为前固定组焦距;f_2' 为变倍组焦距;f_3' 为后固定组焦距;$f'(z)$ 为变倍组移动距离 z 后的合成焦距;β_1' 为变倍组的垂轴放大率;β_2' 为后固定组的垂轴放大率;z 为变倍组的移动距离;Δ_{12} 为前固定组与变倍组的间隔;Δ_{23} 为变倍组与后固定组的间隔。则像方合成焦点 F' 离开 F_3' 的距离为

$$x_3'(x) = \frac{(\Delta_{12}+z)f_3'^2}{-z^2+b_1z+b_2} \tag{4}$$

对(4)式的温度 T 求导,可得:

$$\frac{\mathrm{d}x_3'}{\mathrm{d}T} = \frac{(\frac{\mathrm{d}\Delta_{12}}{\mathrm{d}T}+\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}T})f_3'^2 + 2(\Delta_{12}+z)\frac{\mathrm{d}f_3'}{\mathrm{d}T}}{(-z^2+b_1z+b_2)} - \frac{(\Delta_{12}+z)f_3'^2}{(-z^2+b_1z+b_2)^2}\left(\frac{\mathrm{d}b_2}{\mathrm{d}T} - 2\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}T} + z\frac{\mathrm{d}b_1}{\mathrm{d}T} + b_1\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}T}\right) \tag{5}$$

则像面漂移量:

$$\delta x' = \left[x_3'(z) + \frac{\mathrm{d}x_3'}{\mathrm{d}T}\right] - x_3'(0) \tag{6}$$

由(5)式可知,各组透镜需要独立消除7种初级像差和热离焦、热色差,并适当残留一些像差,同时考虑镜筒材料的特性,在变倍过程通过分配Δ_{12}、f_3'、z和b_1、b_2作为系统变量予以消除。

3　双视场无热设计实例

在以上理论分析基础上建立了一个设计模型,主要针对双视场中波红外(3.7 μm～4.8 μm)的一次成像系统,焦面为9.6 mm×7.68 mm,F#2.6,像元尺寸30 μm×30 μm,焦距54 mm/157 mm,变倍比约为2.88×,冷屏效率在2个视场都达到了100%,镜筒材料为普通铝合金。该模型采用了Si、Ge和ZnS三种材料。其中前固定组为两片式,承担主要的光焦度。正透镜采用Si材料,其较高的折射率和较低的色散有利于像差校正,且较Ge材料低的dn/dT使镜组对温度的影响不至于过于敏感;负透镜为Ge,其折射率和阿贝系数高于Si,在系统中可起到类似可见光系统中火石玻璃的作用,消除色差,并平衡轴上像差;同时,其较大的dn/dT也可降低正透镜dn/dT造成的热离焦的影响。后固定组采用了Si、Ge和ZnS的组合,其中ZnS因较小的阿贝系数和dn/dT,主要起校正系统色差和平衡残余热差的作用,也可使用材料特性与之类似的ZnSe;变倍组为负透镜,需要较小的色散,采用Ge或Si均可,但需要补偿前后固定组残余的热离焦,故选择dn/dT较大的Ge,材料参数如表1所示。

表1　材料参数

Table 1　material parameter

材料	n	阿贝系数ν	dn/dT/(e-7)	TCE/(e-6)
Si	3.425 24	679	～159－170	3.9
Ge	4.023 45	228	～420	6.1
ZnS	2.252 47	198	～42	7.5

设计中,各组镜头分别校正了7种初级像差,热差则根据镜筒长度予以平衡,并通过全系统匹配予以整合。最后,在后固定组使用了一个非球面,校正残余像差和热差。设计完成后,系统总长约110 mm,口径80 mm。系统在较宽的温度范围内均表现出较好的光学性能。图2为光路图,图3为不同温度下的MTF曲线。

该模型同样适合采用衍射元件(目前主要是二元光学面)的系统。二元光学面具有消色差和消热差的特性,其原理在很多文献中皆有论述[4]。在该模型中,补偿热差和色差的透镜都可由二元光学面代替。

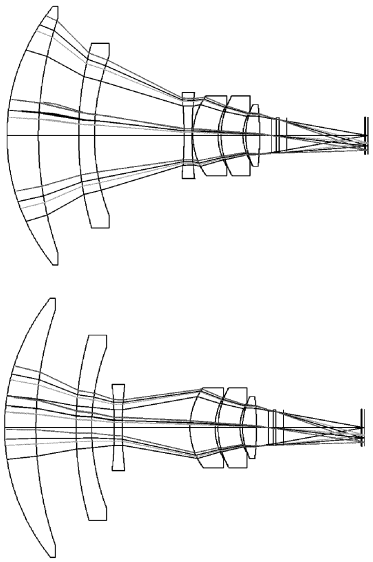
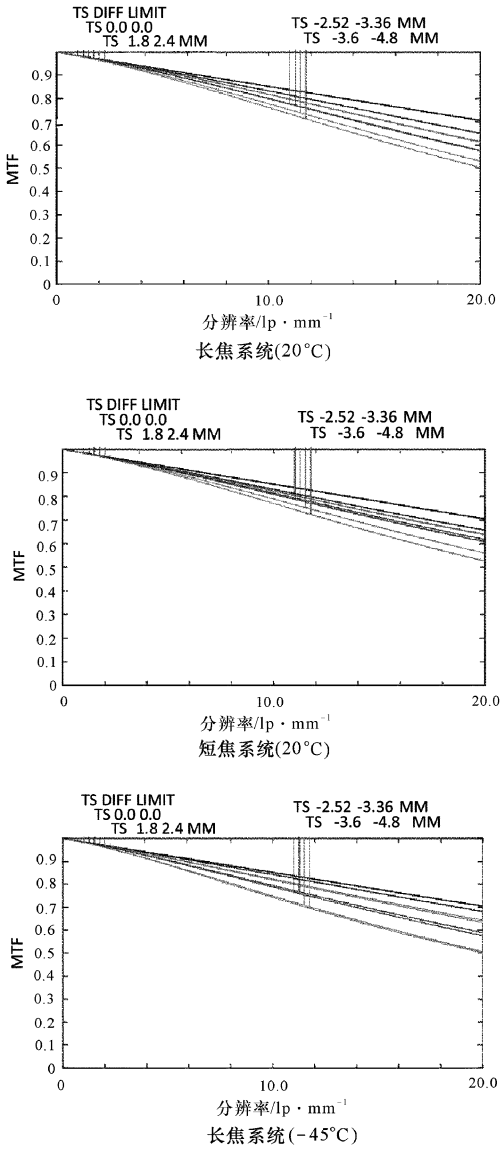


图2　变焦系统光路

Fig. 2　Zoom optical system layout



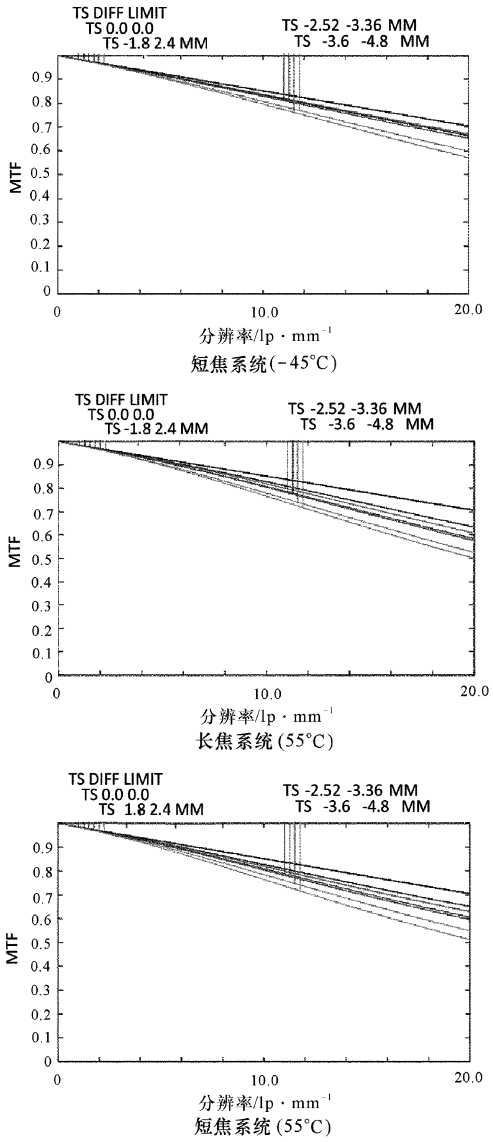


图3　不同温度下变焦系统的MTF曲线

Fig. 3　Zoom system MTF curves in different temperatures

在上述系统基础上,在前固定组Si的第2面(凹面)采用二元光学面,代替实现Ge透镜的功能,能够减小一片透镜,降低系统质量和体积。为避免在Si透镜上加工的困难,可在变倍组的Ge透镜第一面上使用衍射面,仍然可以起到前固定组中Ge负透镜的功能,如图4所示。类似地,该模型后固定组的ZnS的功能也可以被其前面的Si正透镜凹面所加的衍射面代替,则此时全系统只需4片透镜,Si和Ge两种材料。但衍射元件应考虑加工和成本,消热差和色差的能力不能无限放大,且衍射效率仅在其中心波长较高,对于全波段,能量损失较大。根据一些实测报告,一个衍射面相当于两片透镜的光能损失[5],而且在Si透镜上较难加工。

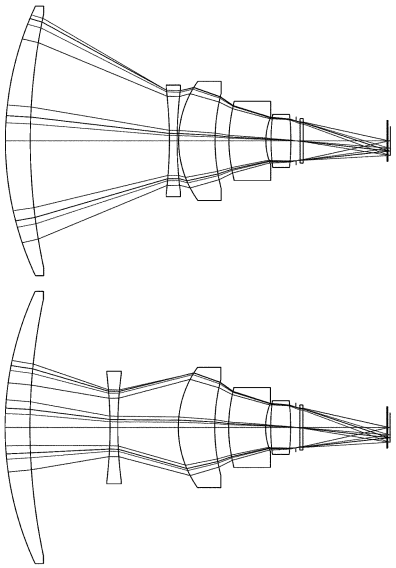


图4　采用一个衍射面的系统

Fig. 4　Zoom system with one diffraction surface

4　结束语

本文通过分析热差对光学系统光学参数的影响,将热离焦和热色差等效作为两种初级像差,建立了一个能平衡初级像差和热差的中波双视场变焦模型,通过对理想透镜初始结构参数的选定、光焦度分配、光学材料的匹配、透镜形状的确定和非球面的引入,实现了变焦系统的消热差设计。最后通过一系列设计实例表明该方法获得的双视场变焦光学系统无论采用传统光学材料还是作为折衍混合系统,在全温度范围内均可实现光学被动消热差,表明该设计方法可应用于类似光学系统的求解与研制。

参考文献:

[1]　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,2003,32(6),572-576.
WU Xiao-jing, MENG Jun-he. Approach of athermalizing infrared optical systems[J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(6), 572-576. (in Chinese with an English abstract)

[2]　RAYCES L, LEBICH L. Thermal compensation of infrared achromatic objectives with three optical materials[J]. SPIE, 1990, 1354: 752-759.

[3]　王之江,顾培森.实用光学技术手册[M].北京:机械工业出版社,2006.
WANG Zhi-jiang, Gu Pei-sen. Journal of optical technology handbook [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2006. (in Chinese)

[4] COX J A. Application of diffractive optics to infrared imagers[J]. SPIE,1995,2552:304-312.

[5] 焦明印. 衍射光学元件在红外成像系统中的应用[J]. 应用光学,2000,21(6):17-20.
JIAO Ming-yin. The application of diffractve optical elements in IR imaging systems [J]. Journal of Applied Optics, 2000,21(6):17-20. (in Chinese with an English abstract)

慕尼黑上海激光、光电展　携六大专业展区,齐演尖端技术

每年一度的慕尼黑上海激光、光电展将于2011年3月15～17日在上海新国际博览中心E3,E4馆再次上演。本届展会将汇集行业精英、专家智囊团和科研学者,探讨激光、光学行业的最新发展及其在工业、半导体、测试测量、教育科研等领域的应用。

作为2011年新春过后的第一个激光、光电行业的顶级盛会,慕尼黑上海激光、光电展除保留传统的激光加工设备和激光器两大优势展区外,还将继上一届的成功经验继续展示光学和光学制造专区,除此之外,更与中国邮电器材集团公司和中国图像图形学学会机器视觉专业委员会强强联手,分别打造全新的"光信息与通信技术主题馆"和"机器视觉展览主题馆"。六大展区的全新开辟必将使慕尼黑上海激光、光电展成为更佳的商务平台、推进产业链的上下游,将中国激光、光电行业推向下一个辉煌!

＊激光加工设备展区(E3、E4 **馆**)

全球激光产业的迅速发展,涉及到材料加工的领域已经开始大规模地步入"光加工"时代。在国家深化装备制造业和国际产业转移的带动下,我国激光设备购置投资增长率在未来5～10年内将维系20%的水平,激光设备业的需求仍保持高速增长。本届展会E3、E4馆的激光加工设备展区将呈现具有一定规模的激光加工产业群,行业巨头通快、罗芬、TECNISCO、大族、伊欧、华工、楚天、法利莱、华日精密、瑞通、天弘等都将一一亮相。

＊光学和光学制造展区(E4 **馆**):

自2010年展会设立光学展区以来,多家光学企业表现出了极大的热情。展区将覆盖光学材料,光学元器件及光学加工检测设备在内的各种产品与技术。在展会同期,由慕尼黑国际博览集团和上海光机所共同主办的"2011光学设计与制造专题研讨会",也将汇集来自国内外科研单位、高校院所、企业用户等各方面的专家和学者,就光学加工与制造专题展开探讨。

东骏、西物、嘉光、教学、西光、爱特蒙特、世纪桑尼、卓立汉光、福晶、晶九、优光、华光、纳乐科思等皆将在明春3月在上海竞技。

＊机器视觉展区(E3 **馆**):

针对华东地区是我国的重要工业基地,也是机器视觉行业最重要市场之一的特点。在本届展会上,中国图像图形学学会机器视觉专业委员会与德国慕尼黑国际博览集团(MMI)将协立打造"机器视觉展览专区(Vision China Shanghai)",展出板卡、工业相机、光源、智能相机、图像处理系统、机器视觉集成系统、机器视觉配件等产品,旨在推广机器视觉技术、宣传机器视觉产品、促进中国机器视觉市场的发展。

＊激光器和光导发光元件展区(E4 **馆**)

激光器展区始终是慕尼黑上海激光、光电展的最抢眼的展区。从2006首届展会至今,国内外激光厂商都不遗余力的推出新技术新产品,带动行业革新,淘汰落后技术及企业,为行业注入新的活力。随着经济危机影响逐渐消退强势反弹,全球激光技术飞速革新,中国市场的表现更为强烈。基于行业内领先的激光器厂商如罗芬(Rofin-Sinar)、相干(Coherent)、Newport、IPG、锐科、PRC、华北光电、凌云、国科世纪、长春新产业等公司领先登陆,国内外企业群星汇集,在本届展会的E4馆带来更多的创新、应用和信息。

＊测量测试技术(E4 **馆**):

在国内和国外在测试产品和测试技术上的差距还非常大的背景下,慕尼黑上海激光、光电展特别开辟了"测量测试技术"专区,领军企业PI、海洋光学、必达泰克、爱万提斯等将引领国内测试产品的前进希望。

＊光信息与通信技术展区(E3 **馆**)

在全球光通信市场快速增长的情况下,中国光通信系统设备企业、光器件制造商在全球的地位都快速提升。借助信息通信技术在社会各领域飞速发展的大势所趋。"光信息与通信技术主题馆"将展出光通信系统设备、光纤、光纤器件及设备、光通信器件、测试测量设备及行业应用解决方案。是继北京国际信息通信展览会之后云集国内外光通讯与通信企业的又一大盛会,北京凌云、JDSU、莱尼、Oclaro、易飞扬、Thorlab、长飞、瞬渺光电等国内外企业也将盛装出席。

作为国内领先的激光、光电行业的优秀展会,2011年的慕尼黑上海激光、光电展涵盖了完整产业链的上下游,为全行业提供一个全新的展示、交流与贸易的国际化平台,必将备受瞩目,创造始无前例的辉煌!

>> 更多企业介绍和新品集锦,请访问www.laserchina.net

>> 观众预登记 www.laserchina.net

观众预登记现已开通,即刻到www.laserchina.net进行观众预登记,便可免除现场排队,提前获得胸卡,免费获得会刊一本,更有机会获得Leica数码相机、Philips数码相框、盛大锦书电子书、豪华野餐包、激光笔、U盘等缤纷好礼!

媒体联系:慕尼黑展览(上海)有限公司　王燕鸣

电话:021-20205500＊833　**传真**:021-20205688、021-20205699

邮箱:wang.yanming@mmi-shanghai.com