

〈系统与设计〉

一种折反二次成像式长波无热化光学系统设计

项建胜¹, 潘国庆^{1,2}, 张运强^{1,2}

(1. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009; 2. 航空制导武器航空科技重点实验室, 河南 洛阳 471009)

摘要: 介绍了一种长波无热化光学系统, 利用反射元件与折射元件光热效应相抵消的原理, 实现了无热化设计。反射系统采用卡式结构形成一次像点, 折射系统将一次像点最终成像在焦平面上。该系统在不采用衍射元件下实现了良好的无热化效果。

关键词: 折反系统; 二次成像; 无热化光学系统

中图分类号: V443⁺.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2012)11-0644-04

The Design of Catadioptric and Reimaged LWIR Athermalization System

XIANG Jian-sheng¹, PAN Guo-qing^{1,2}, ZHANG Yun-qiang^{1,2}

(1. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China;

2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Airborne Guided Weapons, Luoyang 471009, China)

Abstract: A LWIR athermalization system is introduced. The athermalization design is realized by using the opto-thermal expansion coefficient difference of reflective and refractive elements. The first image plane is focused by Cassegrain system, and final image plane is focused by the refractive system. This optical system realizes athermalization without diffractive element.

Key words: catadioptric system, reimaged system, athermalization optical system

0 引言

红外光学系统相比于可见光系统除了其工作波段差异巨大外, 另外一个明显的差别为红外系统受温度影响相比于可见光系统敏感得多。这主要是由于红外系统所使用的透镜材料多为单晶硅、单晶锗等, 这些材料的 dn/dt (折射率温度系数, 表征了材料折射率随温度的变化) 相比于可见光玻璃材料要大得多^[1], 单晶锗 dn/dt 高达 400×10^{-6} , 而可见光常用的玻璃材料 K9 的 dn/dt 仅为 5×10^{-6} 。因此对于红外光学系统设计必须要考虑温度变化对系统成像质量的影响, 实现无热化设计^[2]。

1 设计原理

本文采用一种被动无热化设计方法, 使得光学系统能够自适应温度的变化, 无需其他调整机构。其具体设计原理为该光学系统采用二次成像式光路, 第一

次成像系统采用反射式结构, 第二次成像系统采用折射式结构。利用这两个系统在温度变化时光热特性相反的特点, 实现被动无热化设计。以温度升高情况下举例来讲原理如图 1 所示。通过合理分配两个系统的光焦度使得两个系统引起的像面偏移抵消以及选择合适反射镜基底材料, 可以使两者引起的像面偏移量抵消, 达到良好的无热化效果。

具体工作原理如图 2 所示, 入射光线通过主反射镜、次反射镜形成一次像点, 一次像点经过后面的折射系统形成二次像面。下面以系统环境温度处于高温为例说明系统无热化的实现原理。当温度升高时, 主反射镜受热膨胀曲率半径增大, 形成的一次像点相比于常温朝向场镜移动 (图 2 中虚线形成的像点), 对于后续折射系统而言物距减小, 根据牛顿公式可知像距必然增大, 如图 1 所示, 也就是说温度升高反射系统使系统焦距变长; 而对于后面的折射系统而言由于红外材料 dn/dt 较高, 温度升高折射系统使系统焦距

变短。这样就可以利用反射、折射系统热效应相反的特性,使系统满足无热化设计要求。具体理论计算见方案设计。

笔者经过多个方案设计发现使用这种消热差的方法必须遵循一下两个前提条件。一为第二次成像系统(折射式系统)的热差要尽可能的小,尽量不要使用 dn/dt 很高的材料,如单晶锗、单晶硅等。这主要是由于第一次成像单元的反射式系统热差补偿能力较低;二为为了使反射系统的热补偿效果提高,主反射镜材料一般选用热膨胀系数较高的金属材料(常用的为铝合金材料),因此在方案实施中需要仔细考虑主反射镜的安装方式,使主反射镜能够自由膨胀收缩,尽量减小或避免其受外力的影响(机械镜筒、粘结胶等)。

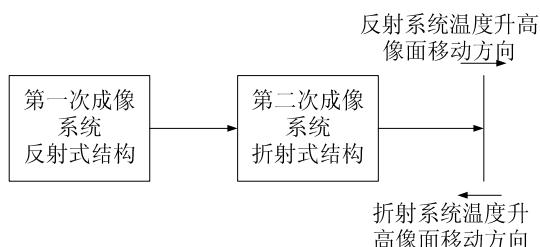


图1 被动无热化设计原理

Fig.1 The design of athermalization

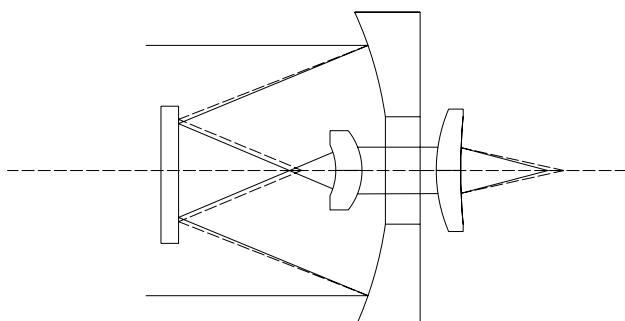


图2 系统工作原理图

Fig.2 The athermalization optical system

2 设计方案

根据上述无热化设计原理,设计出了一套长波无热化光学系统。该系统具有工作波段宽、相对孔径大等特点。具体设计要求如表1所示。

表1 无热化光学系统指标要求

Table 1 The requirements of athermalization optical system

工作波段	8~13 μm
视场	±2°
焦距	100 mm
F/#	1
遮拦比	<0.4
探测器类型	非制冷长波探测器

根据上述无热化设计原理来进行系统设计。首先建立初始结构,在初始结构中关键是对反射系统的初步设计,在设计中主反射镜材料选用铝合金,面型选择非球面主要是校正球差,次反射镜材料选择热膨胀系数极低的材料,本方案选用石英材料,为了尽量使系统简单易于装调,次反射镜定为平面反射镜这样次反射镜仅起到折转光路的作用。后面的折射系统初始结构选择尽可能简单,根据像差校正的难易程度适当的增减透镜,折射系统的放大倍率初始为-1倍;其次在建立好初始结构后,进行初步的像差计算及优化,得到一个像质较好的结构;接着进行无热化效果仿真,如果不满足要求则需要根据近轴计算公式进行计算对系统进行适当调整。具体计算原理如下,我们记主反射镜曲率半径为 r ,其基地材料的热膨胀系数为 α_1 ,镜筒热膨胀系数为 α_2 ,主次反射镜间距为 L ,后续折射系统的焦距为 f ,一次像点对后续折射系统为物点,记物距为 L_1 ,像距为 L_2 。根据近轴光学公式以及物像成像公式进行以下计算。

当温度变化时首先计算一次像点的变化距离,对后续折射系统而言也就是物距的变化量

$\Delta L_1 = \frac{r\alpha_1 - L\alpha_2}{2}\Delta t$, 公式中忽略了次反射镜的热效应,主要是由于次反射镜为平面反射镜且为石英材料,热膨胀系数极低。

对于后续折射系统满足 $\frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_1} = \frac{1}{f}$,当温度变化后物距变化了 ΔL_1 ,后续折射系统的焦距变化了 Δf ,则新的像距 L_2' 根据物像成像公式计算为 $L_2' = \frac{(f + \Delta f)(L_1 + \Delta L_1)}{L_1 + \Delta L_1 - f - \Delta f}$ 。

为了实现无热化效果需满足 $L_2' = L_2$,则可以计算出 Δf 与 ΔL_1 的关系为 $\Delta f = \frac{f^2 \Delta L_1}{L_1^2 + L_1 \Delta L_1 - f \Delta L_1}$,将 $\Delta L_1 = \frac{r\alpha_1 - L\alpha_2}{2}\Delta t$ 代入上式中可以得出 $\Delta f = \frac{f^2(r\alpha_1 - 2L\alpha_2)\Delta t}{L_1^2 + (L_1 - f)(r\alpha_1 - 2L\alpha_2)\Delta t}$ 。

通过上述计算得出系统要满足无热化要求温度变化后反射系统与折射系统的近轴解关系式,这样当无热化效果不满足要求时通过适当调整主反射镜、镜筒材料或折射系统的材料搭配等方法,通过多次迭代可以使系统满足无热化要求。

整个设计流程图如图3所示。

该系统由两部分组成,光线首先通过反射系统形成一次像点,然后通过折射放大系统最终成像在探测

器焦平面上。反射系统由一高精度非球面铝合金反射镜（主反射镜）与石英平面反射镜组成，其中铝合金反射镜主要起校正像差以及抵消折射系统热差的作用，石英平面反射镜主要起折转光路的作用；折射系统由五片红外透镜组成，前两片透镜为场镜组，主要作用为缩小后续透镜口径，后三片透镜组成校正组件，主要作用为校正像差。

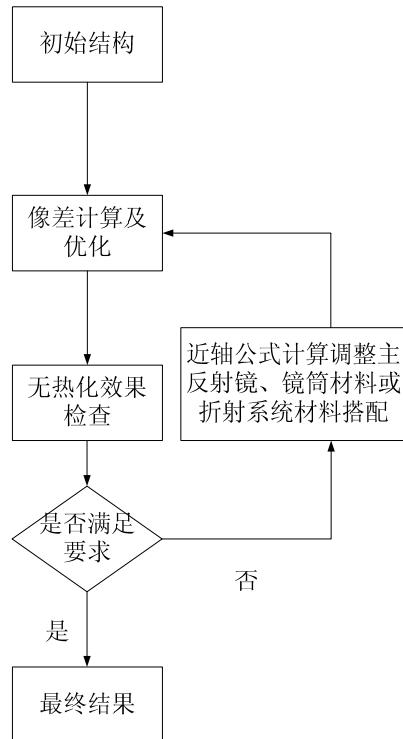


Fig.3 The design flow chart

设计出的系统如图4所示。

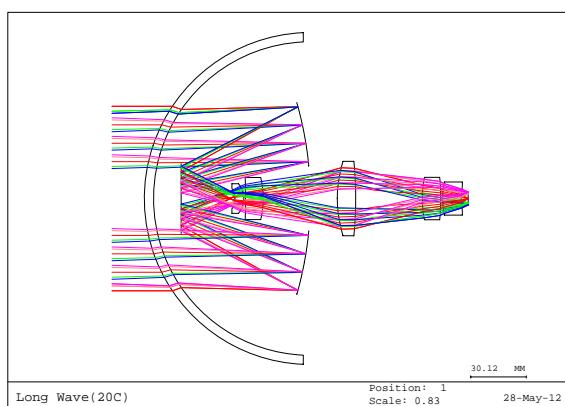


图4 光学系统光路图

Fig.4 Optical path of the system

3 像质评价

系统在 $-45^{\circ}\text{C} \sim +70^{\circ}\text{C}$ 范围内 MTF 设计指标如图 5、6、7 所示。可以看出系统不同视场的 MTF 设计值均接近衍射极限，且不同温度下均具有良好的成

像质量。

系统畸变得到了很好的校正，最大畸变为 0.2%，如图 8 所示。

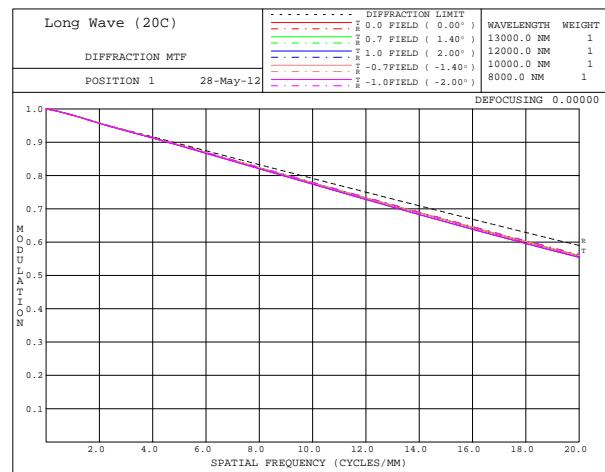


图5 系统在 20°C 下 MTF

Fig.5 MTF at 20°C

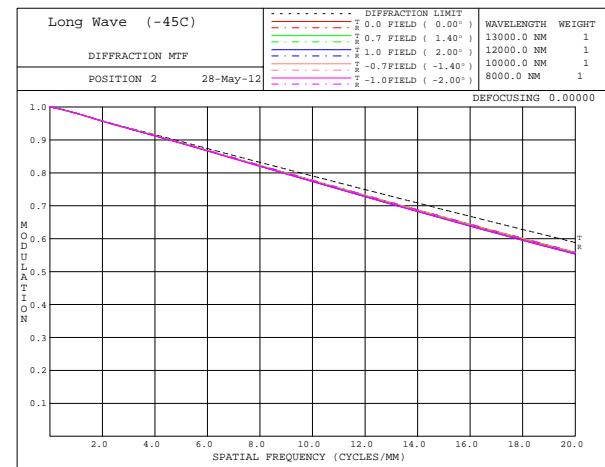


图6 系统在 -45°C 下 MTF

Fig.6 MTF at -45°C

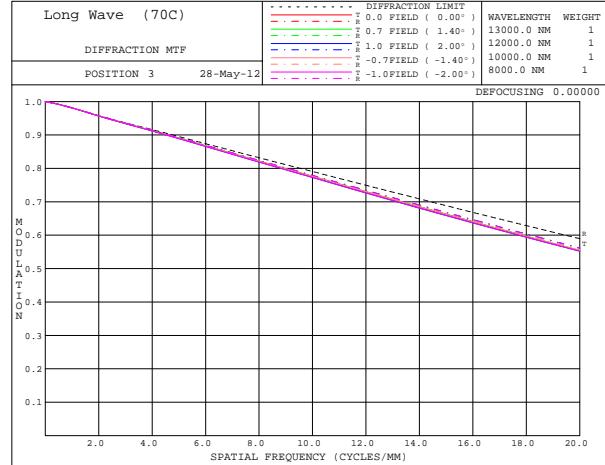


图7 系统在 70°C 下 MTF

Fig.7 MTF at 70°C

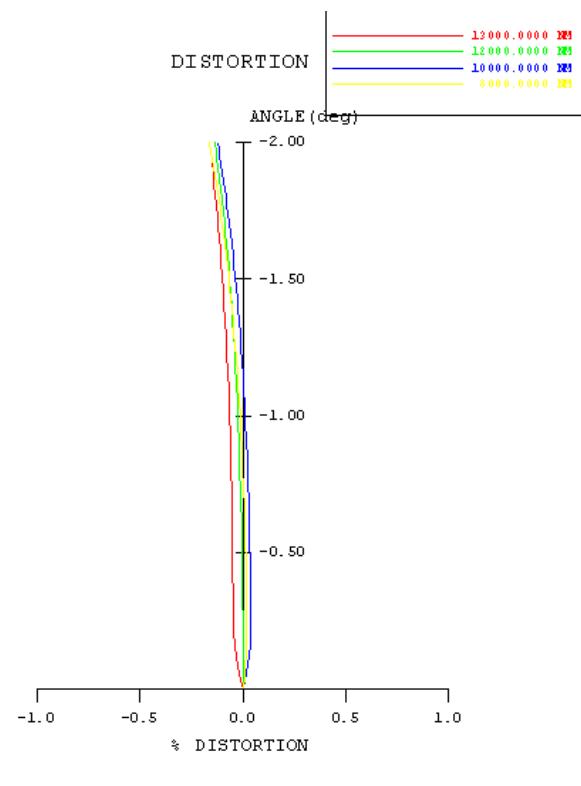


图 8 系统畸变

Fig.8 The system distortion

系统在各个温度点下的焦距以及离焦量如表2所示。系统焦深为 ± 0.02 mm, 温度变化时离焦量均在焦深以内。

表 2 系统不同温度下焦距及离焦量

Table 2 The optical focal length and defocus of different temperatures

	20°C	-45°C	70°C
焦距	100	100.05	99.97
离焦量	0	0.007	0.005

不同温度下系统点列图如图9、10、11所示。可以看出系统在不同温度下成像良好。

4 结论

目前红外光学系统实现无热化设计多使用衍射元件^[3], 但衍射元件地加工与检测技术目前还不是特别成熟, 而且衍射元件容易引起衍射杂光问题。本文通过利用反射、折射元件光热特性的差别实现无热化设计, 可避免使用衍射元件。文中的设计方法对于小视场系统的无热化设计具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] Robert E.Fischer, Biljana Tadic-Galeb. *Optical System Design*[M]. New York, McGraw-Hill 2004. 250-254.
- [2] 陈吕吉, 冯生荣. 一种紧凑的红外消热差光学系统[J]. 红外技术, 2007, 29(4): 203-205.
- [3] 杨长城, 李升辉. 中波红外光学系统无热化设计[J]. 光学与光电技术, 2006, 4(6): 29-31.

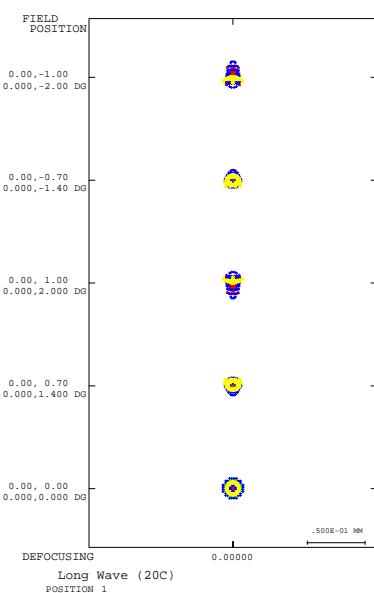


图 9 20°C点列图

Fig.9 Spot diagram at 20°C

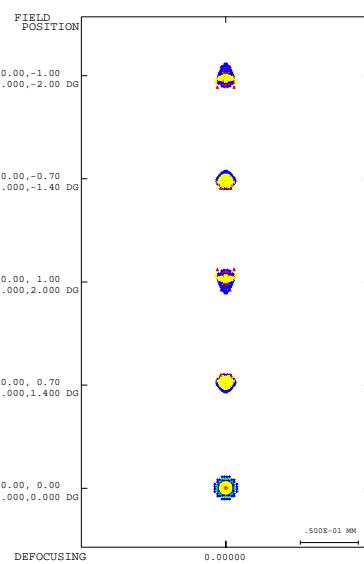


图 10 -45°C点列图

Fig.10 Spot diagram at -45°C

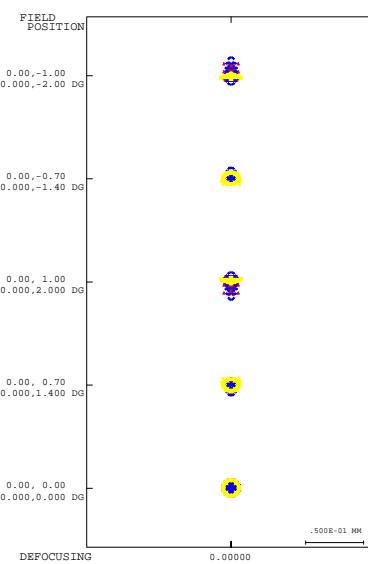


图 11 70°C点列图

Fig.11 Spot diagram at 70°C