

无热化旋转双光楔共形光学系统设计

虞林瑶, 魏 群, 张天翼, 姜湖海, 贾宏光

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要: 针对共形光学系统中因大倾斜、大偏心带来的像差校正困难以及双框架结构带来的体积大、结构不紧凑的问题, 采用了由 Wossermann-Wolf 方程确定的固定校正透镜与 Zernike 旋转双光楔相结合的结构, 通过两个光楔沿光轴方向相对转动实现对不同关联视场(FOR)像差的校正, 使得系统结构更加紧凑, 并且更好地校正了共形光学系统的像差。设计了焦距 $f=90$ mm、口径 $D=48$ mm、波长 $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$ 的共形光学系统, 关联视场为 $\pm 42^\circ$, 瞬时视场角为 $\pm 2.44^\circ$, 利用二元衍射元件实现光学被动消热差, 结果表明, 在 $-20\sim 60^\circ\text{C}$ 内各个视场的光学传递函数在 $17\ \text{lp/mm}$ 处大于 0.45 , 成像质量优良。

关键词: 共形光学; 双光楔; 折反系统; Wossermann-Wolf 方程; 衍射元件; 消热差

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)02-0528-07

Design of athermal conformal optical system based on rotated phase plates

Yu Linyao, Wei Qun, Zhang Tianyi, Jiang Huhai, Jia Hongguang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: According to the large aberration of conformal optical system caused by the large slope and eccentric, the rotation double Zernike phase plates were combined with fixed corrector based on Wossermann-Wolf equation. The aberration of optical system in different field of regard (FOR) was effectively corrected by rotating the two plates. It can both improve the image quality and make the structure more compact. An optical system with $f=90$ mm, diameter $D=48$ mm, wavelength $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$, field of regard (FOR) $\pm 42^\circ$, instant view angle $\pm 2.44^\circ$ was designed. The results show that each field of optical transfer function is close to the diffraction limit. An optical passive athermal infrared conformal system is realized by using DOE elements. During $-20\sim 60^\circ\text{C}$ the merit transmitting function in each FOR is more than 0.45 at $17\ \text{lp/mm}$. The image quality performs well.

Key words: conformal optics; dual-phase plates; catadioptric; Wossermann-wolf equation; DOE; athermal

收稿日期: 2013-06-05; 修订日期: 2013-07-10

基金项目: 装备预研基金(51301060207)

作者简介: 虞林瑶(1987-), 男, 研究实习员, 硕士, 主要从事红外光学系统设计方面的研究。Email: yulinyao87@163.com

0 引言

目前,传统的飞行器整流罩一般为球形,后面成像光学系统设计也较为简单,但其缺点也较为明显,高速飞行时的大阻力会严重影响飞行速度和航程,另外气动加热产生的热障也会对目标的识别产生影响。共形飞行器整流罩采用的是流线型曲面,能很好地克服上述缺点,但由于共形窗口曲率随关联视场变化,使得各个视场的像差的都不同,增加了成像光学系统设计的难度^[1]。

为了消除像差随视场(FOR)变化带来的影响,获得好的成像质量,主要有三种处理方法。第一种是通过在整流罩和成像系统之间加入多片固定校正透镜来实现整流罩像差的矫正^[2];这种结构不同关联视场的切换是通过俯仰、偏航的双框架结构实现的,但是此种结构的缺点是双框架结构体积较大,关联视场角受到限制;第二种是采用可变形的反射镜来矫正,随着关联视场的变化反射镜的表面形状可以相应改变来达到校正像差的目的^[3];第三种是采用旋转的Zernike光楔结构,它是通过双光楔沿轴向的转动实现不同关联视场的切换,优点是控制的机械结构体积小,甚至可以放入整流罩内部,使得整个光机系统结构紧凑,具有很好的应用前景,但是引入的双光楔在大视场角时会产生很大的畸变,为了消除畸变,使得后面成像光学系统复杂^[4]。北京理工大学的李岩等人分析了Zernike旋转双光楔的像差校正能力,对Zernike旋转双光楔结构的共形光学系统整机的成像性能还有待进一步分析^[5]。

另外,由于工作于红外波段的光学材料的折射率随温度变化显著,同时光学元件的曲率和厚度,零件的间隔都会发生变化,使得红外光学系统产生较大的热离焦,成像质量严重下降,因此必须对红外系统进行一定温度范围内的消热差分析。

文中采用旋转双光楔与固定校正片相结合的方式,其中固定校正片不仅可以校正整流罩产生的像散和慧差,还可以平衡双光楔产生的畸变,减轻后面成像部分像差校正的压力,降低系统复杂度。设计了焦距 $f=90\text{ mm}$ 的中波红外共形光学系统,成像系统采用固体式折反结构,结构简单、紧凑,实现了100%冷阑效率,各个关联视场像质接近衍射极限,并且通

过合理的材料选择以及分配光焦度,同时配合衍射光学元件实现光学被动消热。

1 旋转双光楔模型

旋转双光楔是由两个相距很近的光楔构成,光楔的折射率为 n ,折射角为 α ,两者中心与视轴线重合。根据现有理论^[5],两个光楔主平面相互平行放置(如图1所示),起始位置如图1(a)所示,此时出射光线平行光轴方向;当两光楔沿光轴反向各自转动 β 时,如图1(b)所示,光线通过两个光楔后的近似偏转角为:

$$\varphi \approx 2(n-1)\alpha\sin\beta \quad (1)$$

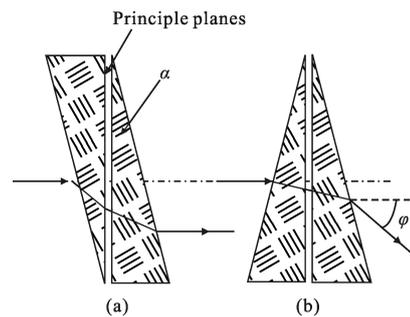


图1 旋转双光楔结构示意图

Fig.1 Configuration of dual-rotated phase plates

偏转角 φ 与光学系统的关联视场相对应,如果要获得更大的关联视场,可以通过选取折射率更大的光学材料和增大光楔折射角来实现。

另外,根据两个光楔的转动方式不一样时,产生偏转的光线的轨迹也不一样:

(1) 当只有一个光楔沿视轴转动 360° 时,光线的轨迹是一个过视轴中心的圆;(2) 当两个光楔同时沿相反方向转动 β 时,此时光线的轨迹为一条过视轴中心的直线;(3) 当两个光楔沿相同方向一起转动 β 时,光线轨迹为以视轴中心为圆心的圆。

于是通过控制光楔的轴向转动就可以实现关联视场内各点的扫描。这样沿单轴的转动可以使得系统的结构更加紧凑。通过双光楔的转动方式来控制关联视场,同时也可以对不同关联视场的像差进行校正。

通过双光楔的转动方式来控制关联视场,同时通过在双光楔互相平行的内表面蚀刻Zernike表面来平衡共形整流罩产生的像差,也可以对不同关联视场的像差进行校正^[6]。Zernike多项式的数学表达式为:

$$R_n^m(\rho) = \frac{1}{\left[\frac{n-m}{2} \right]! \rho^m \left[(\rho^2)^{\frac{n+m}{2}} (\rho^2-1)^{\frac{n-m}{2}} \right]} \left[\frac{d}{d(\rho^2)} \right]^{\frac{n-m}{2}} \quad (2)$$

式中: m, n 为整数, $n-m \geq 0$ 为偶数; ρ 为出瞳处归一化半径。设计中使用 Zernike 多项式展开的 Z5~Z9 项, 各项的名称如表 1 所示。

表 1 Z5~Z9 项 Zernike 多项式表达式
Tab.1 Zernike polynomial of Z5~Z9

Item	Name	Zernike polynomial
Z5	Astigmatism	$r^2 \cos(\theta)$
Z6	Astigmatism	$r^2 \sin(\theta)$
Z7	Coma	$(3r^3-2r) \cos(\theta)$
Z8	Coma	$(3r^3-2r) \sin(\theta)$
Z9	Third order sphere	$6r^4-6r^2+1$

2 Worssmann-Wolf 固定校正透镜

利用扩展的 Worssmann-Wolf 微分方程组可以求解消球差并满足特定正弦条件的非球面曲面, 光路图如图 2 所示。Worssmann-Wolf 微分方程组的表达式为^[7-8]:

$$\frac{dz_1}{df} = \left[\frac{N_1 R_z - N_0 R \cos U_0}{N_1 R_y - N_0 R \sin U_0} + \tan U_0 \right]^{-1} \left(\frac{dh_1}{df} + z_1 \frac{d \tan U_0}{df} \right) \quad (3)$$

$$\frac{dz_2}{df} = \left[\frac{N_1 R_z - N_2 R \cos U_2}{N_1 R_y - N_2 R \sin U_2} + \tan U_2 \right]^{-1} \left(\frac{dh_2}{df} + z_2 \frac{d \tan U_2}{df} \right) \quad (4)$$

式中: $y_1 = h_1 + z_1 \tan U_0$; $y_2 = h_2 + z_2 \tan U_2$; $R_y = y_2 - y_1$; $R_z = d - z_1 + z_2$; $R = \sqrt{R_y^2 + R_z^2}$ 。

方程组的边界条件为: $z_1 = z_2 = 0$, $t_1 = t_2 = 0$

同时应该满足正弦条件: $\sin U_1 / \sin U_0 = C$ 为常数, 或者 $h_2 / h_0 = C'$ 为常数。

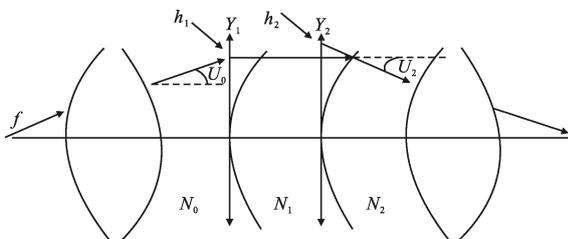


图 2 光学系统光线传播示意图

Fig.2 Rays propagating through the optical system

通过给定入射光线的信息和出射光线的信息, 利用数值的方法(如 Runge-Kutta 法)求解公式(3)、(4)构成的微分方程组, 然后进行拟合, 可以得到矫正片的初始面型方程, 带入 Zemax 软件进一步优化可以获得更好的校正效果。而入射光线的信息可以通过追迹平行光线通过面型已知的椭球形的整流罩获得, 出射光线可以设置为平行光束。利用 MATLAB 软件编制了相应的求解程序, 只需输入整流罩的内外曲线方程和结构参数可以得到一组经过拟合的非球面曲线方程。

3 衍射光学设计

为了使系统在缩小和简化结构的同时能够很好地消单色像差和色差, 采用了二元衍射光学元件。普通光学元件产生的色差是由元件本身选用的材料决定的, 而衍射元件的色差是由元件表面的微结构引起的, 与基底材料无关, 其等效阿贝常数 v^D 和部分色散 P^D 推导如下。

对于衍射光学元件, 色散公式可以表示为^[8]:

$$f = \frac{\lambda_0}{m\lambda} f_0 \quad (5)$$

式中: f_0 为设计波长 λ_0 的焦距; m 为衍射级次(通常取 $m=1$); f 为元件在波长为 λ 下的焦距。

对比普通光学元件的焦距公式, 将衍射元件的焦距表示成含有等效折射率的表达式:

$$f = \frac{1}{(n^{\text{eff}} - 1)C_0} \quad (6)$$

式中: C_0 为表面曲率; n^{eff} 为衍射元件的等效折射率。

由公式(5)、(6)以及阿贝常数和相对色散的定义式可得衍射元件等效的阿贝常数和相对色散为:

$$V^{\text{eff}} = \frac{n_2^{\text{eff}} - 1}{n_1^{\text{eff}} - n_3^{\text{eff}}} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_3} \quad (7)$$

$$P^{\text{eff}} = \frac{n_1^{\text{eff}} - n_2^{\text{eff}}}{n_1^{\text{eff}} - n_3^{\text{eff}}} = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_3} \quad (8)$$

式中: λ_1, λ_3 为需要消色差的两个波长; λ_2 为中心波长。对 3.7~4.8 μm 的中波红外, 其阿贝数和部分色散分别为 $V^{\text{eff}} = -4$, $P^{\text{eff}} = 0.5$, 所以衍射元件具有与普通元件相反的较大的色散。由于衍射元件具有特殊的色散特性, 利用它就可以对光学系统的单色像差和色差进行很好的校正, 而且它受温度影响小, 由它承担主要的消色差功能, 再合理地分配各个表面的光

焦度就可实现消热差^[19-10]。

4 设计实例与分析

4.1 设计指标

该系统用于导弹导引头前视红外系统,根据总体要求,系统采用 $F/1.86$ 、 320×256 pixel,像元尺寸为 $30 \mu\text{m}$ 的中波红外制冷型探测器,采用旋转双光楔的方式实现关联视场的改变以及像差的校正。光学系统参数如表 2 所示。

表 2 光学系统参数

Tab.2 Parameters of optics system

Parameter	Value
Wave/ μm	3.7-4.8
Focal length/mm	90
View $2\omega/(\circ)$	4.88
Field of regard $2\varphi/(\circ)$	84
F#-1.87	1/1.86
Temperature/ $\circ\text{C}$	-20-60

根据上述设计原则和指标要求,总的设计过程可以分成两部分完成:第一部分为整流罩、校正片和双光楔结构,后接理想透镜,通过求解校正片曲面方程以及软件优化,使得由整流罩对不同关联视场引起的像差降低到最低;第二部分为成像系统,可以单独设计 $f=90 \text{ mm}$,视场 $2\omega=4.88^\circ$ 中波红外折反二次成像系统,满足一定的遮拦比以及 100%冷阑效率;最后将两部分组合在一起,进行最终软件优化,使得各个关联视场的 MTF 在 17 lp/mm 处达到 0.45 以上,获得优良的成像质量。

4.2 校正片及光楔系统

该共形光学系统中,整流罩采用的 MgF_2 材料,内外表面均为椭球面,长径比为 1:1。针对旋转双光楔系统,为了满足关联视场 $2\varphi=84^\circ$ 的要求,根据公式(1),选取折射率较大的 Ge 作为光楔的材料,光楔的夹角为 7° 。校正透镜也采用易加工的 Ge,利用 Wossmann-Wolf 微分方程求解得到面型的初步拟合结果,带入到 Zemax 软件中加入焦距为 90 mm 的理想透镜成像,经过进一步优化得到如图 3

所示的结构,添加校正片前后系统的像散和慧差变化曲线如图 4、图 5 所示,系统的像散和慧差得到初步校正。

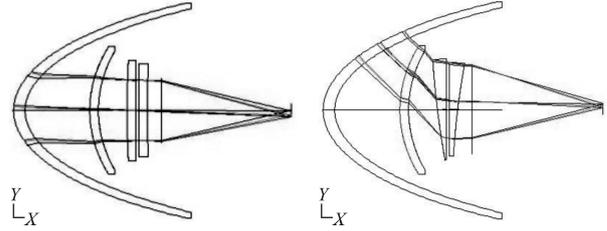


图 3 0° 视场时光路结构和 42° 视场时的光路结构

Fig.3 Optical system of 0° and 42° look of angle

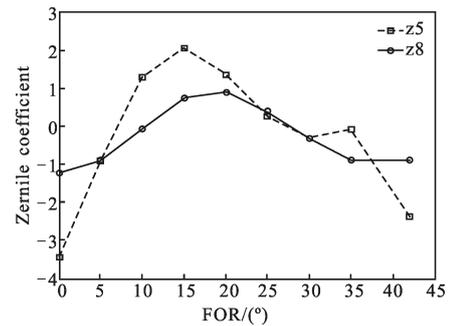


图 4 加入校正片前 Z5 和 Z8 随视场变化曲线

Fig.4 Curves of Z5 and Z8 before inserting corrector

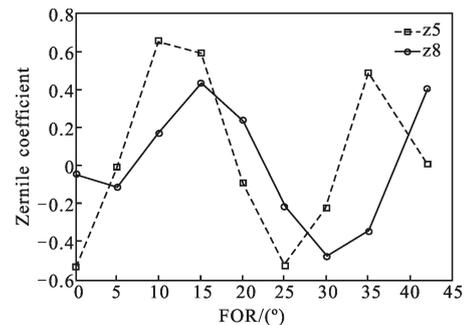


图 5 加入校正片后的 Z5 和 Z8 项随视场变化曲线

Fig.5 Curve of Z5 and Z8 after inserting corrector

4.3 折反二次成像系统

对成像系统的设计,指标要求为波段 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$,口径 48 mm , $F/1.86$,实现 100%冷光阑效率。文中采用了折反式二次成像系统,通过对透镜前后表面进行加工,两侧均镀上内反射膜,从而将主次镜集成在一个透镜前后表面构成一体式的双反射结构,如图 6 所示。这种结构的优点是使得安装时只需对透镜进行固定即可,免去了支架结构,在极大地简化了光学

系统结构的同时增加了系统的通光量, 增强了成像的稳定性^[11]。

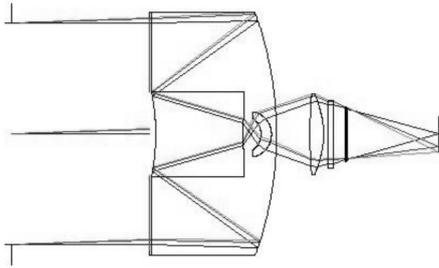


图 6 一体式折反成像系统结构示意图
Fig.6 Integer structure imaging system

通过分析常用的中波材料的 optical 特性和热特性, 如表 3 所示, 选取在温度范围内离焦最小的组合, 使用 Si、Ge 和 ZnSe 的组合实现消热目的。最后整个成像系统由三片透镜组成, 第一片为双反射式结构的透镜, 采用的材料是 Ge; 第二片透镜为场镜, 采用的材料是 Si; 第三片透镜 ZnSe, 前表面使用了二元衍射元件, 不仅很好地消除了系统的色差, 而且降低了系统消热差的难度; 后面接着的是探测器的窗口。系统的传递函数如图 7 所示, 成像质量接近衍射极限。

表 3 常见中波材料的 optical 特性和热特性
Tab.3 Optical and thermal properties of MIR material available

Material	n	dn/dt	Xf
Si	3.425	150×10^6	-58.02×10^6
Ge	4.024	396×10^6	-125.1×10^6
ZnSe	2.433	2.406×10^6	-34.81×10^6

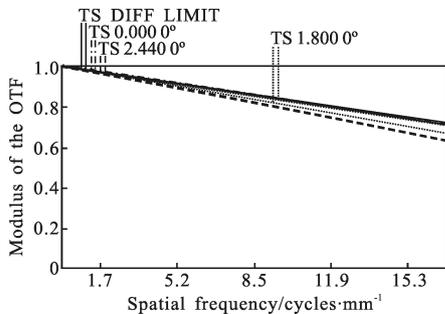


图 7 成像系统光学传递函数
Fig.7 MTF of imaging system

4.4 共形成像系统

将光楔校正片系统和折反二次成像系统结合起来, 删去理想透镜, 通过软件进一步优化可以得到如图 8 所示的最终的光学系统图, 系统总长 201 mm。由于篇幅限制选取了 0°、20°、42° 关联视场, 其中 20° 时各视场的光学传递函数和点斑图如图 9~图 11 所示, 可以看到各个视场的光学传递函数均达到 0.45 以上, RMS 点斑图都小于 20 μm , 表明系统成像质量良好, 接近衍射极限。Zernike 像差系数 Z5 和 Z8 随 FOR 变化曲线如图 12 所示, 从图中可以看出慧差和像散得到很好校正。

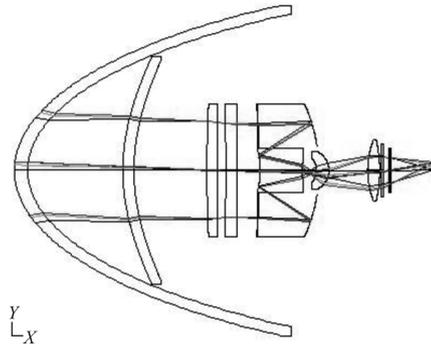


图 8 基于 Zernike 旋转光楔的共形光学系统
Fig.8 Conformal system based on dual-rotated phase plates

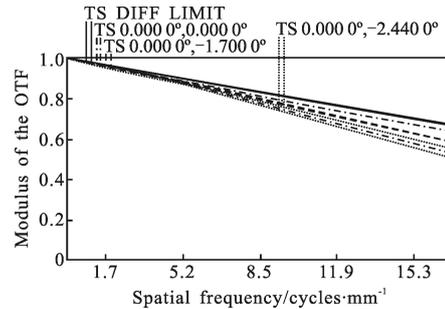


图 9 0° 视场时的光学传递函数和点斑图
Fig.9 MTF and spot diagram of 0° FOR

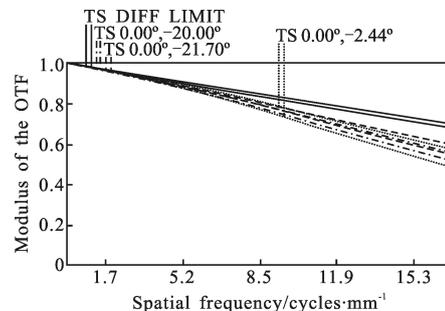


图 10 20° 视场时的光学传递函数
Fig.10 MTF diagram of 20° FOR

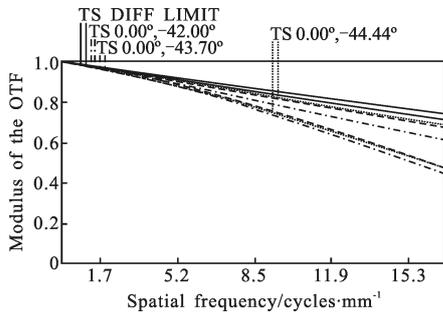


图 11 42°视场时的光学传递函数

Fig.11 MTF diagram of 42°FOR

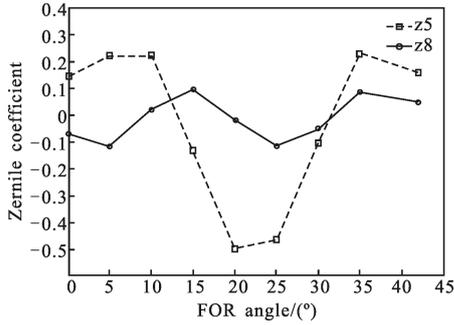


图 12 系统最终 z5 和 z8 项随视场变化曲线

Fig.12 Curve of z5 and z9 versus FOR

4.5 系统消热差分析

由于共形光学系统在不同关联视场的像差不一样的特点,消热差时需要分别分析各个关联视场的像差随温度的变化情况,因此在进行无热化分析时需分析 $M \times N$ 个组态,其中 M 为光学系统分析时选取的关联视场个数, N 为选取的不同温度的个数。通常为了保证分析的精确性, M 、 N 选取大于等于 3, 热分析时至少有 9 个组态,这导致共形光学系统的热分析一般都比较复杂,速度慢。分析时温度选取了 -20°C 、 20°C 和 60°C , 关联视场选取了 0° 、 20° 和 42° 。通过采用二元衍射面以及合理地分配光学系统各个表面的光焦度,使得系统在 $-20\sim 60^\circ\text{C}$ 实现无热化,其中各个关联视场的不同温度下的 MTF 曲线如图 13~15 所示。

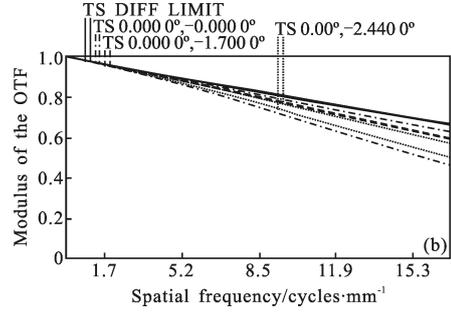
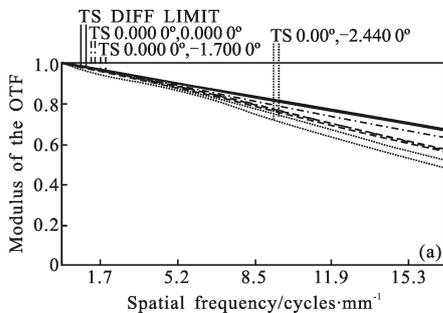


图 13 0°视场时-20℃和60℃的光学传递函数曲线

Fig.13 MTF diagram of 0° FOR in -20℃ and 60℃

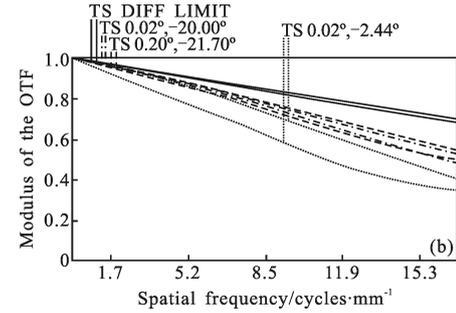
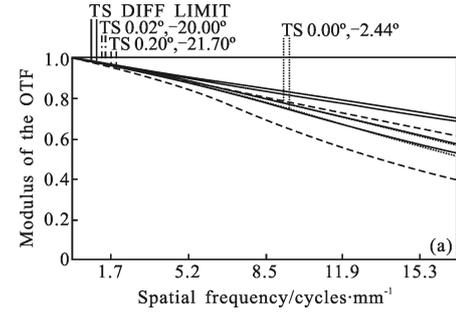


图 14 20°视场时-20℃和60℃的光学传递函数曲线

Fig.14 MTF diagram of 20° FOR in -20℃ and 60℃

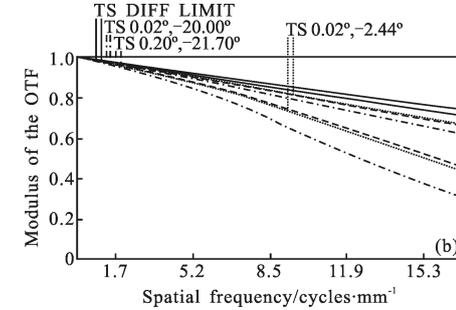
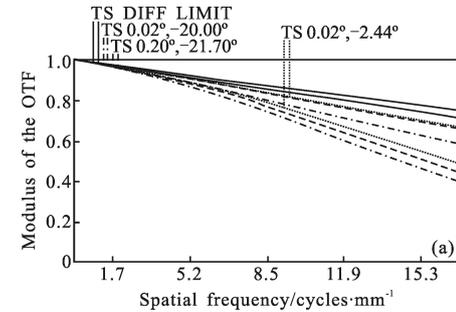


图 15 42°视场时-20℃和60℃的光学传递函数曲线

Fig.15 MTF diagram of 42° FOR in -20℃ and 60℃

5 结 论

设计了一种基于 Zernike 旋转双光楔和固定校正片结合的红外共形光学系统, 分析了具有稳定成像系统的共形光学的像差情况, 通过两片光楔的相对旋转使关联视场达到 $\pm 42^\circ$, 采用沿光轴方向旋转光楔结构, 使得整个光机系统的体积更小, 结构更加紧凑, 同时通过高次非球面固定校正片对像差进行了很好的校正, 在 17 lp/mm 处, 各个视场的光学传递函数均达 0.45 以上, 接近衍射极限, 在 $-20\sim 60^\circ\text{C}$ 实现无热化, 具有实际的加工应用前景。

参 考 文 献:

- [1] Shannon R R. Overview of conformal optics[C]//SPIE, 1999, 3705: 180-188.
- [2] Scott W Sparrold. Arch corrector for conformal optical systems, part of the SPIE conference on window and dome technologies and materials VI Orlando [C]//SPIE, 1999, 3705: 289-293.
- [3] Knapp, David J, James P, et al. Conformal optics risk reduction demonstration[C]//SPIE, 2001, 4375: 146-153.
- [4] Mills J P, Sparrold S W, Mitchell T A, et al. Conformal dome correction with counter-rotating phase plates [J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(7): 1822-1829. (in Chinese)
- [5] Li Yan, Li Lin, Huang Yifan, et al. Conformal optical design using counter-rotating wedges and Zernike polynomials [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37 (9): 1788-1792. (in Chinese)
李岩, 李林, 黄一帆, 等. 基于反转光楔和泽尼克多项式的共形光学设计[J]. 光子学报. 2008, 37(9): 1788-1792.
- [6] Wei Zhongchao, Xiong Yanwei, Mo Wei, et al. Analysis for refractive property of rotary dual-wedge prism system and 2-D scanning trace [J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30 (6): 939-943. (in Chinese)
韦中超, 熊言威, 莫玮, 等. 旋转双光楔折射特性与二维扫描轨迹的分析[J]. 应用光学, 2009, 30(6): 939-943.
- [7] Li Dongxi, Lu Zhenwu, Sun Qiang, et al. A research of conformal optical system based on Wassermann-Wolf equations[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(10): 5766-5771. (in Chinese)
李东熙, 卢振武, 孙强, 等. 基于 Wassermann-Wolf 方程的共形光学系统设计研究 [J]. 物理学报, 2007, 56(10): 5766-5771.
- [8] Li Dongxi, Lu Zhenwu, Sun Qiang, et al. Design of conformal optical system based on real ray tracing[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5): 834-838. (in Chinese)
李东熙, 卢振武, 孙强, 等. 基于实际光线追迹的共形光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(5): 834-838.
- [9] Xu Liang, Zhao Jianke, Zhou Yan, et al. Design of 8× dual field of view zoom and large relative aperture infrared hybrid refractive-diffractive system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2173-2177. (in Chinese)
徐亮, 赵建科, 周艳, 等. 8 倍双视场大相对孔径红外折/衍射系统设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2173-2177.
- [10] Chen Xiao, Yang Jianfeng, Ma Xiaolong, et al. Athermalization design of wide temperature range for hybrid refractive/diffractive infrared objective[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 79-82. (in Chinese)
陈潇, 杨建峰, 马小龙, 等. 折/衍混合红外物镜超宽温度消热差设计[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(1): 79-82.
- [11] Fu Xuenong, Chen Xiaojuan, Wu Wenkai, et al. Design of large aperture mirror support and its stability [J]. *Opt Precision Eng*, 2008, 16(2): 179-184. (in Chinese)
傅学农, 陈晓娟, 吴文凯, 等. 大口径反射镜组件设计及稳定性研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16(2): 179-184.