

无遮拦三反射镜变形光学系统设计

朱 浩 崔庆丰 朴明旭

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要 变形光学系统在 X 方向和 Y 方向有不同的焦距, 物方视场的纵横比不再受探测器光接收面形状限制, 可以在一个方向上扩大视场或提高目标分辨率而不影响另外一个方向。研究了无遮拦三反射镜变形光学系统的设计方法, 利用 Zernike 像差分析方法分析变形系统的像差特点, 使用具有双曲率的 Biconic Zernike 曲面作为反射面校正系统像差。设计了一个 X 方向焦距 f_x 为 100 mm, Y 方向焦距 f_y 为 150 mm, F 数为 2, 视场为 $3.3^\circ \times 1.65^\circ$ 的致冷型中波红外光学系统。探测器的纵横比为 4:3, 物方视场纵横比为 2:1。该系统全视场范围内的调制传递函数在奈奎斯特频率处 (33 lp/mm) 高于 0.61。三个反射面及整个光学系统均关于 YZ 平面对称。设计结果表明, 该系统能够改变物方视场的纵横比, 增大了 X 方向的视场, 结构紧凑, 成像质量良好。

关键词 光学设计; 变形系统; 离轴三反; 自由曲面

中图分类号 TB133 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1222005

Design of Unobscured Three-Mirror Anamorphic Optical Systems

Zhu Hao Cui Qingfeng Piao Mingxu

(Department of Optical Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin, 130022, China)

Abstract Anamorphic optical systems have different focal lengths in X and Y direction, objective field of view (FOV) aspect ratio will not be restrained by detector aspect ratio, so it can enlarge the FOV or improve the target resolution in one direction while not affecting another direction. Design method of unobscured three mirror anamorphic optical systems is studied. Zernike aberration analytical method is used to analyze the aberration characteristics. Biconic Zernike surfaces of double curvature is used to correct the aberrations. A cooled mid-wave infrared optical system is designed at focal length in X direction of $f_x = 100$ mm, focal length in Y direction of $f_y = 150$ mm, F number of 2 with FOV of $3.3^\circ \times 1.65^\circ$. The aspect ratio of the detector is 4:3 and the aspect ratio of the objective FOV is 2:1. The modulation transfer function of this system is above 0.61 all over the FOV at the Nyquist frequency of 33 lp/mm. Each reflective surface and the whole system are symmetric about the YZ plane. The result shows that this system can change the aspect ratio in objective FOV and enlarge the FOV in X direction with compact structure and favorable image quality.

Key words optical design; anamorphic system; off-axis three-mirror; free-form surfaces

OCIS codes 220.2740; 080.4035; 080.4225; 110.3080

1 引 言

变形光学系统在两个互相垂直的平面内具有不同的焦距, 因此该系统在这两个平面内具有不同的放大倍率, 所成的像是一个变形像, 变形比为两个焦距的比值。由于这种系统物方视场和像平面的纵横

比不再一致, 物方视场不再完全受像面尺寸的限制。1929 年 Henri Chrétien^[1] 率先提出了一种使用柱面透镜的变形系统并将其用作坦克的观察镜。美国二十世纪福克斯公司首先将这一技术应用于宽银幕电影拍摄中, 使用变形镜头将 2.35:1 的全景式画面压

收稿日期: 2014-06-17; **收到修改稿日期**: 2014-07-03

基金项目: 国家重大科技专项“高分专项”(51-H34D01-8358-13/16)

作者简介: 朱 浩(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事光学设计方面的研究。E-mail: zhuhaoo602126@sina.com

导师简介: 崔庆丰(1954—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光学设计和衍射光学等方面的研究。

E-mail: qf_cui@163.com(通信联系人)

缩到 1.33:1 的 35 mm 胶片上。影片放映时同样加上一个变形镜头使画面还原,这样既不改变胶片规格,又扩大了人们的视野。此后,人们将变形系统应用于激光束整形、广角镜头、成像光谱仪以及 3D 显示技术当中^[2-6]。

J M Howard 等^[7]研究了使用变形非球面作为反射面的无遮拦三反射镜变形系统的设计方法,分析了系统的成像质量与变形比及 F 数的关系。Howard 指出,对于 F 数小于 5 的无遮拦三反射镜系统,为了使成像系统质量良好,应使变形比 $f_y : f_x$ 小于 1,即相对于非变形系统扩展 Y 方向视场。由于系统中各反射镜和探测器沿 Y 方向顺次排列,增加 Y 方向的视场意味着可能需要增加反射镜的倾斜偏心量,或者增加反射镜之间的间隔来避免相互遮拦,这会增加系统的体积,也会使系统像差校正困难。在实际应用当中,扩展 X 方向视场更有意义。

考虑到无遮拦三反射镜结构在遥感系统设计上的独特优势^[8-11],本文研究了一种无遮拦三反射镜变形光学系统的设计方法,并设计了一个致冷型中波红外变形系统。利用 Zernike 像差分析方法分析了变形系统的像差特性,使用具有双曲率半径的 Biconic Zernike 曲面作为反射面校正系统像差,提高了系统成像质量,克服了使用变形非球面的三反射镜变形系统在小 F 数时变形比 $f_y : f_x$ 小于 1 才能获得较好成像质量的缺点。所设计的系统增大了物方视场的纵横比,扩大了 X 方向视场,结构紧凑,成像质量良好。

2 变形光学系统的焦距与视场及地元分辨率的关系

当遥感相机的光学系统分辨率满足使用要求时,其地元分辨率(GSD)由光电传感器的像元尺寸、轨道高度及光学系统的焦距决定,即

$$S_{\text{GSD}} = \frac{a \times H}{f}, \quad (1)$$

式中 S_{GSD} 为地元分辨率, H 为轨道高度, f 为光学系统焦距, a 为探测器的像元尺寸。相机的地面覆盖宽度 W 可以表示为

$$W = 2 \times H \times \tan \omega, \quad (2)$$

式中 ω 为半视场角,并且

$$\tan \omega = \frac{L}{2f}, \quad (3)$$

式中 L 为探测器的边长。

用 L_x/L_y 表示探测器的纵横比,用 W_x/W_y 表示

物方视场纵横比。在非变形光学系统中,物方视场纵横比与探测器的纵横比相同,两个方向的地元分辨率也是一致的。而变形系统在两个方向上具有不同的焦距,能够根据需要改变物方视场纵横比,所得的图像经过图像处理可还原为非变形状态下的比例。

假定光学系统的 Y 方向与飞行器飞行的方向一致, X 方向与飞行方向垂直。为了扩大 X 方向的视场,增加地面覆盖宽度 W_x ,可以适当减小 X 方向焦距,降低 X 方向的地元分辨率来实现。而 Y 方向的焦距则可以从满足地元分辨率的角度来选取。这样分别确定 X 方向和 Y 方向的焦距,可以在不影响 Y 方向地元分辨率情况下,满足扩大 X 方向视场的要求。

3 离轴变形系统像差分析方法

对于离轴变形系统来说,整个系统只具有平面对称性,分析旋转对称系统像差特性的赛德像差系数、Ray fan 等方法不再适合分析这类系统。点列图、调制传递函数(MTF)虽然可以评价系统的成像质量,但无法直接判断出系统中各像差的特点。考虑到共形光学系统设计中已经广泛利用 Zernike 像差分析方法来分析共形头罩的像差特性^[12-13],同样采用这种方法分析离轴变形系统的像差,指导光学设计。

在一个光学系统中,由出瞳发出的波前代表了该系统的成像特性。由于 Zernike 多项式在单位圆内是正交的,各项系数之间不会相互干扰,并且多项式中的每一项都有清晰的物理意义,这使得 Zernike 多项式成为分析波前像差的有力工具。利用 Zernike 多项式对波前进行拟合,即可分析光学系统的成像质量。Zernike 多项式的部分项以及相对应的像差如表 1 所示。

表 1 Zernike 多项式部分项及相应像差

Table 1 Some Zernike polynomial terms and the corresponding aberrations

Term	Zernike Polynomial	Aberration name
Z1	1	Piston
Z2	$\rho \cos \theta$	Y tilt
Z3	$\rho \sin \theta$	X tilt
Z4	$2\rho^2 - 1$	Focus
Z5	$\rho^2 \cos 2\theta$	X astigmatism
Z6	$\rho^2 \sin 2\theta$	Y astigmatism
Z7	$(3\rho^3 - 2\rho) \cos \theta$	X coma
Z8	$(3\rho^3 - 2\rho) \sin \theta$	Y coma
Z9	$6\rho^4 - 6\rho^2 + 1$	Spherical

4 变形比为 1.5 的变形光学系统设计

设计了一个 Y 方向焦距 f_y 为 150 mm, X 方向焦距 f_x 为 100 mm, 变形比 $f_y:f_x$ 为 1.5 的中波红外致冷型无遮拦三反射镜光学系统。系统的 F 数为 2, Y 方向入瞳直径为 75 mm, X 方向入瞳直径为

50 mm, 工作波段 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 。选用的探测器像元数为 $384\ \text{pixel}\times 288\ \text{pixel}$, 像元尺寸为 $15\ \mu\text{m}$, 奈奎斯特频率 $33\ \text{lp/mm}$, 全视场 $2X\times 2Y$ 为 $3.3^\circ\times 1.65^\circ$ 。探测器的纵横比为 4:3, 物方视场纵横比为 2:1。光学系统结构如图 1 所示。

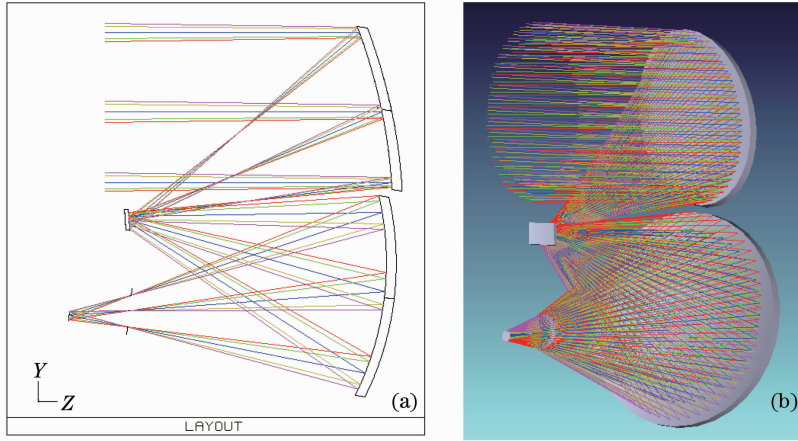


图 1 光学系统结构图。(a) YZ 平面内的二维结构图；(b) 三维结构图
Fig. 1 Optical system layout. (a) 2D layout in YZ plane; (b) 3D layout

4.1 初始结构的建立及像差特性分析

在专利结构中^[14]选取一个具有实出瞳的非变形无遮拦三反射镜光学系统。将各反射面转换成双曲率圆锥面, 这样每个反射镜在其子午平面内和弧

矢平面内的曲率半径就变成了独立变量。在优化评价函数中逐步改变系统在 X 方向和 Y 方向焦距的目标值, 优化各反射镜的曲率半径, 同时将圆锥面系数作为变量优化像质至焦距满足设计要求, 将此

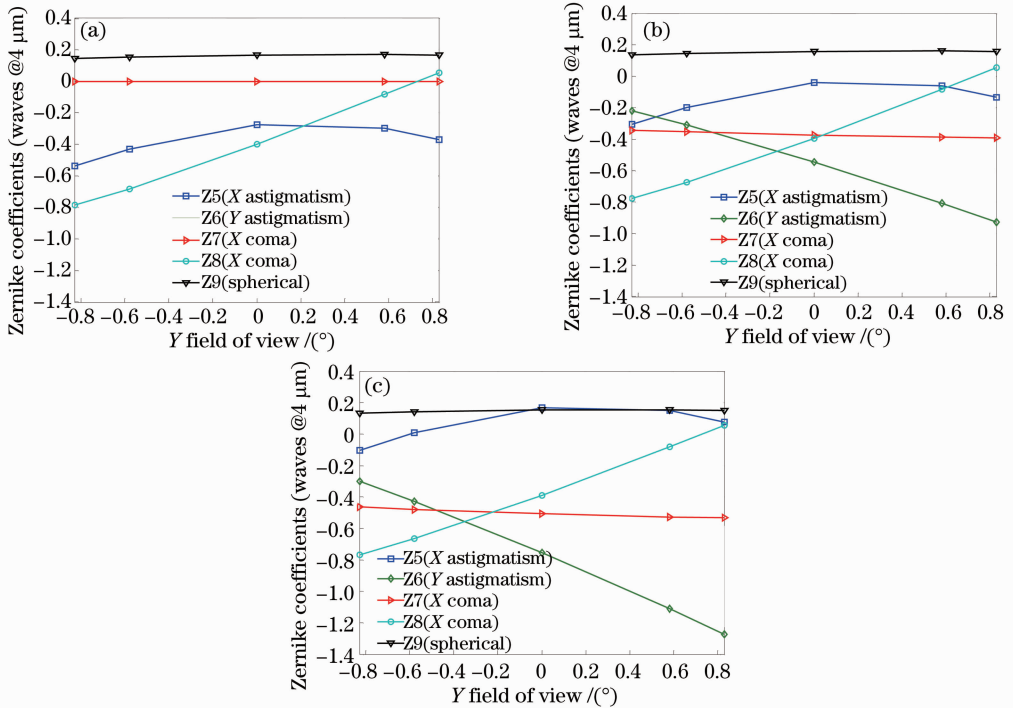


图 2 初始结构的 Zernike 像差系数曲线。(a) X 方向 0 视场像差曲线；(b) X 方向 0.7 视场像差曲线；(c) X 方向边缘视场像差曲线

Fig. 2 Zernike aberration curves of the starting point. (a) Aberration curves of 0 FOV in X direction; (b) aberration curves of 0.7 FOV in X direction; (c) aberration curves of edge FOV in X direction

系统作为初始结构。由于该系统关于子午面对称,因此选取关于子午面对称的半个视场分析系统像差。该系统各视场的 Zernike 像差特性如图 2 所示。

由图 2(a)可以看出,子午平面内 X 方向像散(Z_5)在整个 Y 方向视场内变化平缓,并有对称特征; Y 方向像散(Z_6)和 X 方向彗差(Z_7)在整个 Y 视场范围内为 0; Y 方向彗差(Z_8)随视场成线性变化,球差(Z_9)则基本保持不变,并且在另外两个 X 方向采样视场中也具有这一特点。对于对称平面以外,即子午面以外的视场,由图 2(b)、(c)可知, X 方向像散(Z_5)与子午面内的特征相同,大小与 X 方向视场有关; Y 方向像散(Z_6)随 Y 视场成线性变化,且随 X 方向视场的增加而幅度增大; X 方向彗差(Z_7)与球

差(Z_9)一样不随 Y 视场改变,但 Z_7 的大小随着 X 方向视场的增加而增大; Y 方向彗差(Z_8)在三个 X 方向采样视场中变化趋势和大小基本相同。

由上述分析可知,子午平面内影响成像质量的主要是 X 方向像散(Z_5)和 Y 方向彗差(Z_8),子午平面外的视场中 Y 方向像散(Z_6)、 Y 方向彗差(Z_8)随 Y 方向视场线性变化,球差(Z_9)以及 X 方向彗差(Z_7)在 Y 方向视场内为常量。

4.2 使用 Biconic Zernike 曲面校正像差

在上述初始结构的基础上,需要更多的变量来校正像差。以往的设计中大多采用变形非球面来校正系统像差^[2,7],其矢高方程为

$$z = \frac{c_x x^2 + c_y y^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k_x) c_x^2 x^2 - (1 + k_y) c_y^2 y^2}} + AR[(1 - AP)x^2 + (1 + AP)y^2]^2 + BR[(1 - BP)x^2 + (1 + BP)y^2]^3 + CR[(1 - CP)x^2 + (1 + CP)y^2]^4 + DR[(1 - DP)x^2 + (1 + DP)y^2]^5. \quad (4)$$

由(4)式可知,变形非球面最高为一个关于 x 和 y 的 10 次方程,但方程的变量却只有 12 个,即两个曲率 c_x, c_y ,两个圆锥曲面系数 k_x, k_y ,4 个旋转对称系数 AR, BR, CR, DR ,以及 4 个非旋转对称系数 AP, BP, CP, DP ,并且同一级次的 x^i 和 y^i 的系数相互影响,例如 x^4 和 y^4 的系数都与 AR, AP 有关,这就限制了其像差校正能力。

选用另外一种具有双曲率的面型——Biconic Zernike 曲面作为反射面,其矢高方程为

$$z = \frac{c_x x^2 + c_y y^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k_x) c_x^2 x^2 - (1 + k_y) c_y^2 y^2}} + \sum_{i=1}^{16} \alpha_i x^i + \sum_{i=1}^{16} \beta_i y^i + \sum_{i=1}^N A_i Z_i(\rho, \varphi), \quad (5)$$

式中 c_x, c_y, k_x, k_y 分别为曲面在 X 方向和 Y 方向的曲率及圆锥曲面系数, α_i, β_i 分别为 x^i, y^i 的系数, $Z_i(\rho, \varphi)$ 为极坐标下的标准 Zernike 多项式的各项。由于极坐标与直角坐标之间有相应的变换关系,整个矢高表达式可以看作是直角坐标系下关于 x 和 y 的方程。与变形非球面相比,当变形非球面的矢高方程为 10 次时,全部的变量为 12 个。而对于 Biconic Zernike 曲面,即使其方程仅取含有 x, y 偶次方的项,即保证 Biconic Zernike 曲面与变形非球面一样具有双平面对称性,当其矢高方程为 6 次时,变量就有 16 个,并且 x^i 与 y^i 的系数互不影响,这提升了像差校正能力。

由低次到高次逐渐将 x^i, y^i 的系数以及同一级次的 Zernike 多项式的系数作为变量,优化像质。同时,为了简化反射镜的面型结构,仅将矢高方程中含有 x, y 偶次方的项作为变量,其余项的系数固定为零,保持每个反射镜都关于其子午平面和弧矢平面对称。

经优化,当各反射镜的矢高方程均为 8 次多项式时,再增加方程的高阶偶次项对系统的成像质量几乎没有影响。此时系统的 MTF 曲线和点列图如图 3 所示。可以看出,该系统 MTF 曲线比较分散,尤其是边缘视场更为明显。各视场的弥散斑半径较大,边缘视场的几何弥散斑半径超过了艾里斑的 2 倍。红外光学系统通常要求成像质量接近衍射极限,该系统的像质仍需要进一步提升。

图 4 为该系各视场的 Zernike 像差特性。相比于初始结构,该系统的主要像差明显减小。初始结构中 Y 方向视场成线性关系的 Y 方向彗差(Z_8)具有二次曲线的特征; X 方向彗差(Z_7)则与 Y 方向视场成线性的关系。由图 4(b)、(c)可以看出, Y 方向像散(Z_6)与 Y 方向视场之间仍有明显的线性关系,并且在 $-Y$ 方向边缘视场处其幅值最大。与此相对应的,在图 3 中可以看出 $(1.65^\circ, -0.83^\circ)$ 视场子午方向成像质量最差。此时限制系统成像质量的为 Y 方向像散。

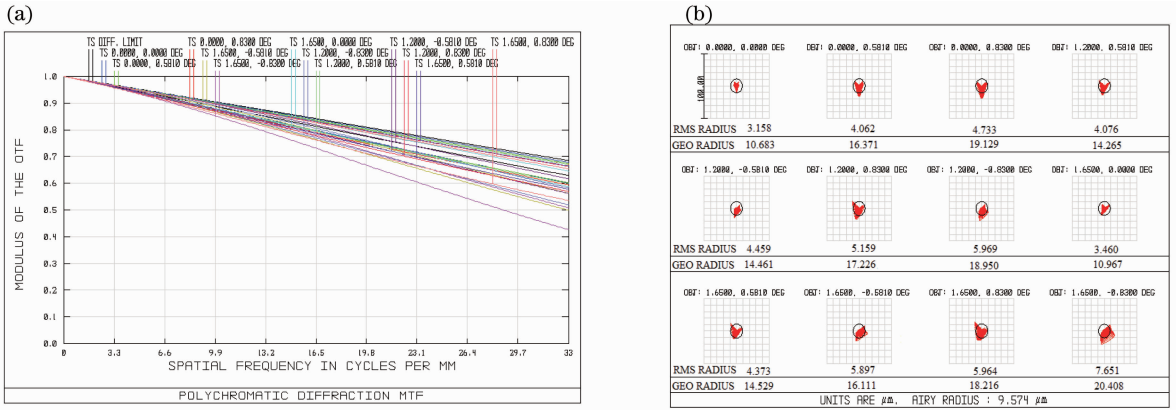


图 3 (a)光学系统 MTF 曲线；(b)点列图

Fig. 3 (a) MTF curves of the optical system; (b) spot diagram

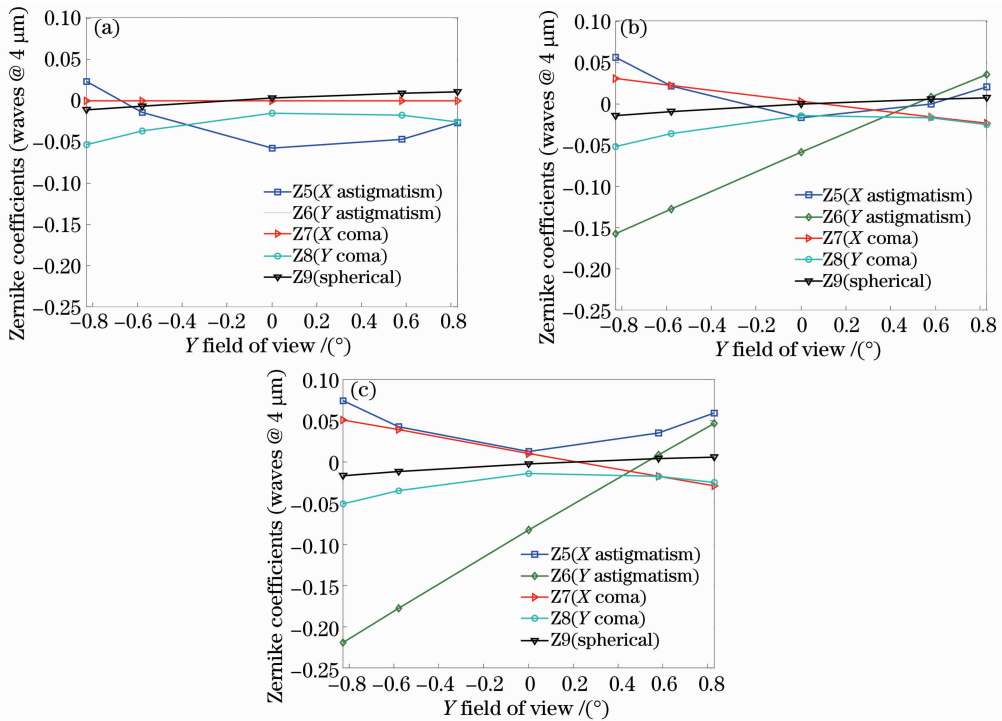


图 4 Zernike 像差系数曲线。(a) X 方向 0 视场像差曲线；(b) X 方向 0.7 视场像差曲线；(c) X 方向边缘视场像差曲线

Fig. 4 Zernike aberration curves. (a) Aberration curves of 0 FOV in X direction; (b) aberration curves of 0.7 FOV in X direction; (c) aberration curves of edge FOV in X direction

在本设计中各反射镜在子午面内倾斜偏心，虽然每个反射镜整体上是双平面对称的，但有效工作部分仅关于子午面对称，在 Y 方向已经不再有对称性。因此考虑将反射面矢高方程中含有 y 奇次方的项作为变量，来增加对 Y 方向像散的校正能力。在优化的过程中调整各反射镜的位置，保证系统无遮拦。

5 设计结果及像质评价

光学系统结构如图 1 所示。三个反射镜的矢高

方程均为 8 次方程，其中第一、第三反射镜方程中只含有 x、y 的偶次方项，第二反射镜的方程中含有 y 的奇次方项。第一、第三反射镜与第二反射镜沿 Z 轴方向的距离相近，系统结构紧凑，无遮拦。结构参数列于表 2 中。

光学系统各视场的 MTF 曲线和点列图见图 5。由于边缘视场(1.65°, -0.83°)处 Y 方向像散有最大的残余像差，该视场在 33 lp/mm 处 MTF 值最低，子午、弧矢方向 MTF 分别为 0.614、0.610，其余视场 MTF 均高于 0.625，接近衍射极限。

表 2 光学系统结构参数

Table 2 Configuration parameters of the optical system

	X radius /mm	Y radius /mm	Vertex coordinate			Rotation angle /($^{\circ}$)
			X	Y	Z	
REF Surface	--	--	0	0	0	0
Mirror 1	-233.603	-233.048	0	-5.438	140.0	10.279
Mirror 2	-260.002	-153.864	0	-4.989	10.593	7.133
Mirror 3	-152.658	-148.605	0	-5.702	139.704	6.767
Stop	--	--	0	-12.426	10.426	7.053
Image surface	--	--	0	-14.889	-19.608	0.756

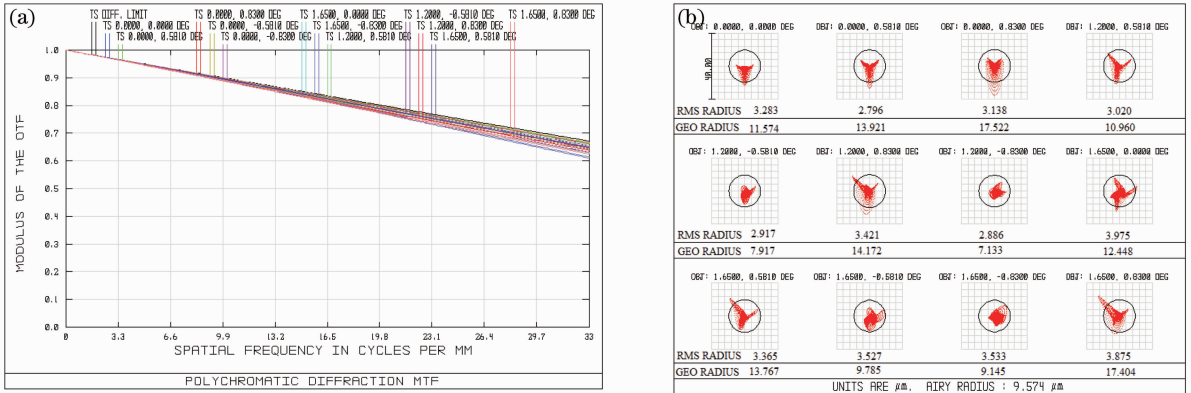


图 5 (a) 光学系统的 MTF 曲线；(b) 点列图

Fig. 5 (a) MTF curves of the optical system; (b) spot diagram

图 6 为光学系统的网格畸变。该系统在优化设计的过程中并未对畸变单独约束。系统畸变变化平缓,并且在图中表现为左右对称,即系统中关于子午平面对称的视场点有相同的畸变,可以通过图像处理的方法校正。最大畸变出现在边缘视场(-1.65° , 0.83°)和(1.65° , 0.83°)处,其值为 3.03%。

图 7 为光学系统成像模拟图,其中图 7(a)为源图像,由一个长宽比为 2:1 的白色矩形和一个内接圆构成,矩形 4 个边的线条宽度相同;图 7(b)为源图像经光学系统成像后的模拟图,可以看出水平方向图像压缩,圆形变成椭圆形。以椭圆的中心为坐标原点,沿水平方向和垂直方向测量矩形的长和宽,

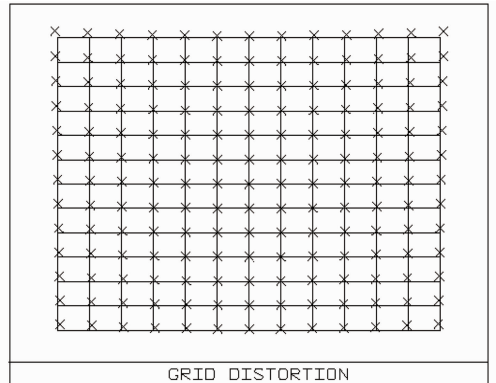


图 6 网格畸变

Fig. 6 Grid distortion

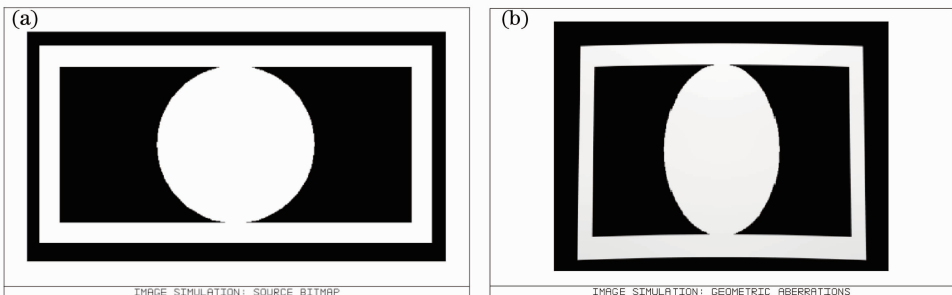


图 7 光学系统成像模拟。(a) 源图像；(b) 模拟图像

Fig. 7 Imaging simulation of the optical system. (a) Source image; (b) simulated image

结果表明矩形的长宽比为 1.33, 与理论设计值(4:3)相符。

6 结 论

提出了一种无遮拦三反射镜变形系统的设计方法。利用 Zernike 像差分析方法分析变形系统的像差特点, 使用 Biconic Zernike 曲面代替变形非球面, 在不增加曲面方程次数的条件下增加了校正像差的变量, 能够更好的校正系统像差, 提高成像质量。设计了一个探测器横纵比为 4:3, 物方视场横纵比为 2:1 的致冷中波红外变形系统。该系统增大了 X 方向的视场, 结构紧凑, 成像质量良好。

参 考 文 献

- 1 Henri Chrétien. Anamorphic Lens System and Method of Making the Same [P]. U. S. Patent, 1962892, 1929.
- 2 R A Frady. Line Projector Lens [P]. U. S. Patent, 5283694, 1994.
- 3 R Hirose. Anamorphic Lens System [P]. U. S. Patent, 3924933, 1975.
- 4 J P Rolland, A Rapaport, M W Krueger. Design of an anamorphic fish-eye lens [C]. SPIE, 1998, 3482: 274—277.
- 5 R C Swanson, T S Moon, C W Smith, *et al.*. Anamorphic imaging spectrometer [C]. SPIE, 2008, 6940: 694010.
- 6 K Matsumoto, T Honda. Research of 3D display using anamorphic optics [C]. SPIE, 1997, 3012: 199—207.
- 7 J M Howard, B D Stone. Anamorphic imaging with three mirrors; a survey [C]. SPIE, 2010, 7652: 76520K.
- 8 Liu Xiaomei, Xiang Yang. Design of telecentric off-axis three-mirror system of imaging spectrometer with wide field-of-view [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(6): 0622004.
刘晓梅, 向阳. 宽视场成像光谱仪前置远心离轴三反光学系统设计[J]. 光学学报, 2011, 31(6): 0622004.
- 9 Guo Yongxiang, Li Yingcai, Lü Baobin, *et al.*. Design of new-style unobscured three-mirror optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(4): 1144—1147.
郭永祥, 李英才, 吕保斌, 等. 一种新型无遮拦三反射光学系统研究[J]. 光学学报, 2010, 30(4): 1144—1147.
- 10 Zhang Xiaolong, Liu Ying, Sun Qiang, *et al.*. Design of hybrid refractive and reflective optical system of long-wave infrared region imaging spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1122005.
张晓龙, 刘英, 孙强, 等. 折/反混合式长波红外成像光谱仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1122005.
- 11 Lin Jing, Cui Qingfeng, Zhu Hao. Research of broad width off-axis three mirror optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0722002.
林晶, 崔庆丰, 朱浩. 宽幅离轴三反光学系统研究[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0722002.
- 12 B G Crowther, D B McKenney, J P Mills. Aberrations of optical domes [C]. SPIE, 1998, 3482: 48—61.
- 13 Y M Liu, J Ma, H P Ma, *et al.*. Zernike aberration characteristics of precision conformal optical windows [C]. SPIE, 2010, 7544: 75443W.
- 14 L G Cook. Method and Apparatus for Receiving Optical Signals [P]. U. S. Patent, 4834517, 1989.

栏目编辑: 韩 峰