

doi:10.3788/gzxb20144310.1022004

圆周式无遮拦三反射镜光学系统设计

朱浩, 崔庆丰, 朴明旭, 赵春竹

(长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

摘 要:为满足无遮拦三反射镜光学系统体积小、光学性能高的发展需求,提出了一种圆周式三反光学系统.以近轴矩阵法求解的共轴三反系统为初始结构,在保证各二次曲面反射镜的焦点依次衔接的条件下,将各元件适当地倾斜偏心使系统无遮拦,并使系统的光路折叠在三个反射镜所围成的区域内,减小了系统体积.使用子午面对称的 Zernike 多项式曲面校正系统像差,提高成像质量.设计的非致冷长波红外光学系统焦距为 310 mm, F 数为 1.55, 视场为 $1.774^\circ \times 1.331^\circ$. 各视场的调制传递函数在 Nyquist 频率 (20 lp/mm) 处均高于 0.52.

关键词: 光学设计; 反射系统; 成像系统; 离轴三反; 自由曲面

中图分类号: TB133

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)10-1022004-6

Design of Circular Unobscured Three-mirror Optical Systems

ZHU Hao, CUI Qing-feng, PIAO Ming-xu, ZHAO Chun-zhu

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

Abstract: In order to meet the demand that unobscured three-mirror optical systems should be small volume with excellent optical performance, a circular three-mirror optical system was proposed. A coaxial three-mirror system is calculated by the paraxial matrix as a starting point. With the condition that the focal point of each conic mirror is placed to coincide successively, elements in the system are tilted and decentered properly to make the system unobscured and to fold the optical path in the region surrounded by three mirrors to reduce the system volume. Zernike polynomial surfaces which are symmetric about tangential plane are used to correct aberrations and to improve the image quality. An uncooled long wave infrared optical system is designed at focal length 310mm, F -number 1.55 with field of view $1.774^\circ \times 1.331^\circ$. The modulation transfer function of this system is above 0.52 all over the field of view at the Nyquist frequency of 20 line pairs per millimeter.

Key words: Optical design; Reflective systems; Imaging systems; Off-axis three-mirror; Freeform surfaces

OCIS Codes: 220.2740; 080.4035; 080.4225; 110.3080

0 引言

在众多反射式结构中,离轴三反射镜系统由于其无中心遮拦、系统像差校正能力强等特点成为反射式系统研究的热点^[1-8].传统的离轴三反光学系统以 Cook^[9]所提出的结构最具代表性.随着使用要求的提高,人们希望光学系统的体积更小、性能更高.而对于仅使用球面或旋转对称非球面的离轴三反系统来说,

体积和性能始终是相互制约的两个方面.为了在保证光学系统性能的同时缩小体积,人们开始在离轴三反系统中加入折叠镜^[10],或者在含有中间像面的离轴三反系统中加入场镜来折叠光路^[11].增加反射镜虽然可以减小系统的体积,增加系统校正像差的自由度,但系统的制造成本及装调复杂程度也随之增加.另外,对于含有场镜的光学系统来说,由于场镜位于中间像面附近,光学系统的像质对其表面瑕疵十分敏感,所以必须

基金项目:国家重大科技专项(No. 51-H34D01-8358-13/16)资助

第一作者:朱浩(1988-),男,博士研究生,主要研究方向为光学设计. Email: zhuhao0602126@sina.com

导师(通讯作者):崔庆丰(1954-),男,教授,博导,主要研究方向为光学设计和衍射光学等. Email: qf_cui@163.com

收稿日期:2014-02-21;录用日期:2014-04-11

<http://www.photon.ac.cn>

严格保证场镜的表面质量,这也势必增加制造周期和成本.随着光学元件制造和检测技术的进步,自由曲面元件被应用到光学系统中. Fuerschbach 等^[12]提出了一种使用自由曲面的无遮拦三反射镜光学系统.与传统的使用球面、非球面作为反射镜的系统相比,使用自由曲面可以有效地校正光学系统的轴外像差,增加系统的视场和相对孔径,提高系统的性能.对于长焦距低 F 数红外光学系统来说,折射式系统面临着优质大口径材料不易获得、色差校正难度大以及热稳定设计复杂等问题,这使得无遮拦三反射镜结构对此类红外系统设计更有吸引力.

本文提出了一种圆周式无遮拦三反射镜光学系统的设计方法,设计了一种长焦距低 F 数非致冷长波红外光学系统.采用近轴矩阵法求出共轴系统作为初始结构,经初步优化后,在保证各二次曲面反射镜焦点依次衔接的条件下,将各元件适当地倾斜偏心,折叠光路并使系统无遮拦.使用 Zernike 多项式曲面校正像差,提高系统成像质量.所设计的系统三个反射镜为圆周式分布,光路折叠在由三个反射镜所围成的区域内,有效地利用了空间,缩小了系统体积;所使用的多项式曲

面关于子午平面对称,在保证成像质量满足使用要求的同时,降低了其制造难度.

1 设计方法

离轴三反光学系统可以在共轴三反光学系统的基础上离轴优化得到.首先建立一个合理的共轴三反光学系统.具有三个光学元件的共轴系统可以用近轴 ABCD 矩阵表示^[13-14],每个光学元件可以表示为

$$\mathbf{E}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -p_1 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{E}_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -p_2 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{E}_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -p_3 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中 $p_i (i=1, 2, 3)$ 为各元件的光焦度.各元件的间隔可以表示为

$$\mathbf{S}_1 = \begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{S}_2 = \begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中 d_1, d_2 为各元件顶点之间的间隔.

整个光学系统的近轴矩阵 \mathbf{M} 为各矩阵按相反顺序相乘,即

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \mathbf{E}_3 \cdot \mathbf{S}_2 \cdot \mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{E}_1 \quad (3)$$

带入整理得

$$\begin{cases} A = 1 - d_2 p + d_1 d_2 p_1 p_2 - d_1 p_1 - d_2 p_1 \\ B = d_1 - d_1 d_2 p_2 + d_2 \\ C = -p_1 - p_2 - p_3 + d_2 p_2 p_3 + d_1 p_1 p_2 + d_1 p_1 p_3 + d_2 p_1 p_3 - d_1 d_2 p_1 p_2 p_3 \\ D = 1 - d_1 p_2 - d_1 p_3 - d_2 p_3 + d_1 d_2 p_2 p_3 \end{cases} \quad (4)$$

系统的有效焦距 f' 为

$$f' = -\frac{1}{C} = \frac{1}{p_1 + p_2 + p_3 - d_2 p_2 p_3 - d_1 p_1 p_2 - d_1 p_1 p_3 - d_2 p_1 p_3 + d_1 d_2 p_1 p_2 p_3} \quad (5)$$

系统的后截距,即第三个元件到像面的距离 t 为

$$t = -\frac{A}{C} = f' A = f' (1 - d_2 p_2 + d_1 d_2 p_1 p_2 - d_1 p_1 - d_2 p_1) \quad (6)$$

为了在计算过程中直接控制后截距,将前两个元件设计成一个无中间像的望远系统,这样该系统的后截距就是第三个元件的焦距.因此前两个元件的光焦度和他们之间的间隔满足

$$d_1 = \frac{1}{p_1} + \frac{1}{p_2} \quad (7)$$

由式(5)、(6)、(7)可得

$$t = \frac{1}{p_3} \quad (8)$$

$$f' = -\frac{p_2}{p_1 p_3} \quad (9)$$

为了校正匹兹万场曲,应使各元件光焦度之和为零,即

$$p_1 + p_2 + p_3 = 0 \quad (10)$$

由式(8)、(9)、(10)可得第一、第二元件的光焦度与系统焦距 f' 及后截距 t 的关系为

$$p_1 = \frac{1}{f' - t} \quad (11)$$

$$p_2 = \left[t \left(\frac{t}{f'} - 1 \right) \right]^{-1} \quad (12)$$

将式(11)、(12)带入式(7)中,得到第一、第二反射镜的间隔 d_1 与总焦距 f' 及后截距 t 的关系为

$$d_1 = \frac{1}{f'} (f' - t)^2 \quad (13)$$

选取适当的后截距 t ,再结合系统焦距 f' 就可以计算得到 d_1 及各元件光焦度 p_i .在选取后截距时,首先应使 $|p_i|$ 尽量地小,这样有利于增大各反射面的曲率半径;其次在保证后截距足够长的同时尽量减小系统的总长, d_2 仅改变第三反射镜的位置,而与各元件光焦度无关,故可以从减小系统总长的角度选取.

已知抛物面反射镜对它的焦点和无限远轴上点满足等光程条件,椭球面反射镜、双曲面反射镜对它们的

两个焦点满足等光程条件,即二次曲面反射镜会将其中一个点完善成像于另外一点.利用这一性质,将三个反射镜都设计为二次曲面,且使各反射镜的焦点相互衔接,即第二反射镜的一个焦点与第一反射镜的焦点重合,另一个焦点与第三反射镜的一个焦点重合,第三反射镜的另一个焦点就是像面的中心,这样 0° 视场将会是一个无像差点.在将各反射镜离轴的过程中,始终保持各反射镜焦点相互衔接,这样在光学系统离轴之后仍可以保证 0° 视场像点是无像差的,这会加快光学系统后续优化的收敛速度,更容易得到一个较好的结果.因此将第一反射镜固定为抛物面,优化第二、第三反射镜的二次曲面系数和反射镜之间的间隔,然后在保持各反射镜焦点相互衔接的条件下将各元件离轴,得到一个无遮拦的反射系统作为进一步优化设计的初始结构.

2 设计实例

设计了一个焦距 310 mm, F 数为 1.55, 工作波段为 $8\sim 14\ \mu\text{m}$, 视场 $2X\times 2Y$ 为 $1.774^\circ\times 1.331^\circ$ 的无遮拦三反射镜光学系统.所采用的探测器像元尺寸为 $25\ \mu\text{m}\times 25\ \mu\text{m}$, 有效像素 384×288 , 有效幅面 $9.6\ \text{mm}\times 7.2\ \text{mm}$, 尼奎斯特频率 $20\ \text{lp/mm}$.

共轴系统中各反射镜的焦距 f_i ($i=1,2,3$) 及 d_1 与后截距 t 的关系见图 1.为了保证有足够长的后截距以及较大的 $|f_3|$, $|t|$ 应取较大的值.由图 1 可知,当 $t < -310$ 时, $|f_i|$ ($i=1,2,3$) 随着 $|t|$ 的增加而增加.但 $|t|$ 越大, $|d_1|$ 就越大,系统的总长也越长.综合考虑各反射镜的焦距和系统总长,初步选取 $t = -450$ 构建共轴光学系统,然后在此基础上优化,将各反射镜变为二次曲面并使各焦点依次衔接.

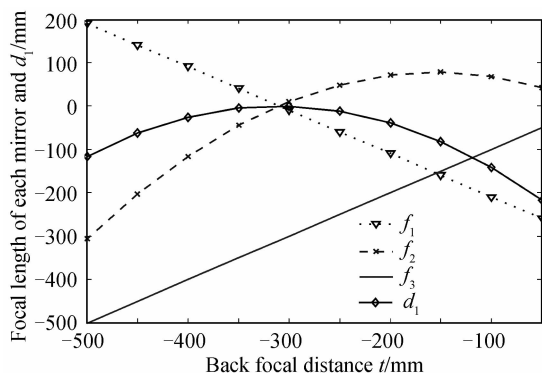


图 1 各反射镜焦距及 d_1 与后截距 t 的关系

Fig. 1 Relationship between the focal length of each mirror, d_1 and back focal length t

在保证各反射镜焦点相互衔接的条件下进行离轴.在离轴的过程中,第一反射镜为抛物面,仅偏心不倾斜,保持其对称轴与 0° 视场光线平行.第二反射镜为椭球面,一个焦点与第一反射镜的焦点 A 重合, 0° 视场

光线经过第一、第二反射镜反射后汇聚于第二反射镜的另一个焦点 B 处.第三反射镜为双曲面,一个焦点与第二反射镜的焦点 B 重合, 0° 视场光线经第三反射镜反射后到达其另一个焦点在 C 处,即像面位置.第二反射镜的顶点与 A, B 在同一直线上,第三反射镜的顶点与 B, C 在同一直线上,直线 AB 和 BC 分别是第二、第三反射镜的对称轴.将 A, B 分别作为第二反射镜和第三反射镜的旋转中心,调整第二、第三反射镜的旋转角度,使 0° 视场主光线经第三反射镜反射后穿过第一、第二反射镜的中间位置,到达像点 C .离轴后的光学系统如图 2.

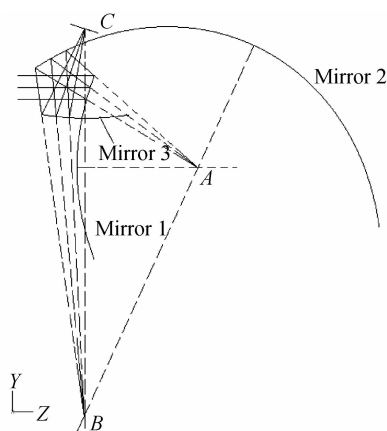


图 2 离轴反射系统的初始结构

Fig. 2 Initial configuration of the off-axis reflective system

当离轴光学系统构建完成后,逐渐增加视场和入瞳直径以达到设计要求,将各反射面转换为偶次非球面,提高系统的像质.调整各反射镜的倾斜偏心量及相互之间的间隔,保证光学系统无遮拦.随着视场和入瞳直径的增加,系统的像质始终难以达到设计要求.此时需要系统中引入更多的自由度来校正像差,所以考虑在系统中使用自由曲面.自由曲面的描述方程并不唯一,常用的有 XY 多项式、Zernike 多项式和高斯多项式等.由于 Zernike 多项式在单位圆内是正交的,各项系数之间不相互干扰,不会出现高次项与低次项抵消的情况,并且 Zernike 多项式已经在光学元件加工和干涉检测中得到了应用,直接用 Zernike 多项式表示自由曲面可以使描述面型的数据在设计、加工、检测过程中无损传递^[15].因此,本设计选用 Zernike 多项式来描述自由曲面.

Zernike 多项式曲面的方程为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{j=1}^{66} C_{j+1} Z_j \quad (14)$$

式中 z 为曲面的矢高, k 为二次曲面系数, c 为顶点处曲率半径, r 为径向半径; Z_j 为 Zernike 多项式的第 j 项, C_{j+1} 为 Z_j 的系数.

为了简化系统的加工装调难度,在设计的过程中始终保持整个系统关于子午面对称.各反射镜都只在

子午面即 YZ 平面内倾斜和偏心. 当系统引入自由曲面时, 为保证自由曲面也关于子午面对称, 在直角坐标系下 Zernike 多项式中所有含 x 奇次方项的 Z_j , 其系数要固定为 0. 例如表 1 中 Z_2 、 Z_6 、 Z_7 、 Z_8 的系数要固定为零, 其余项的系数则可以作为变量校正误差. 在优化设计的过程中, 从低次项开始逐渐将多项式的系数作为变量进行优化.

表 1 Zernike 多项式的部分项
Table 1 Some terms of Zernike polynomial

Term	Polynomial
Z_1	1
Z_2	x
Z_3	y
Z_4	$x^2 - y^2$
Z_5	$-1 + 2(x^2 + y^2)$
Z_6	$2xy$
Z_7	$x^3 - 3xy^2$
Z_8	$-2x + 3x(x^2 + y^2)$
Z_9	$-2y + 3y(x^2 + y^2)$

3 设计结果

光学系统结构如图 3. 第一反射镜为 10 阶偶次非球面, 第二、第三反射镜为 Zernike 多项式曲面. 孔径光阑位于第一反射镜的前方.

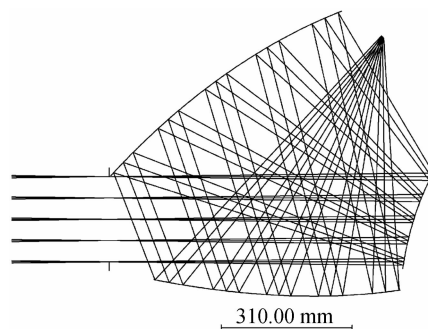
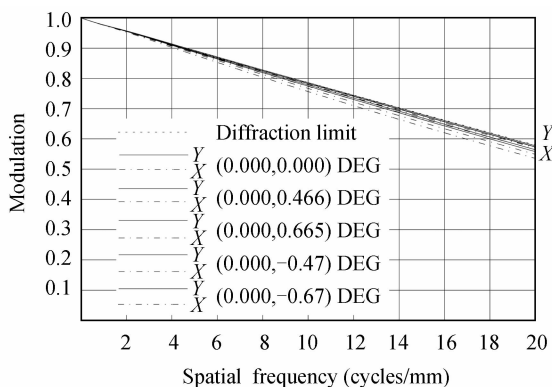


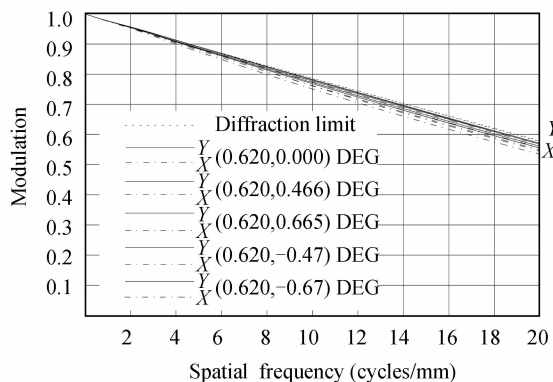
图 3 光学系统结构

Fig. 3 Optical system layout

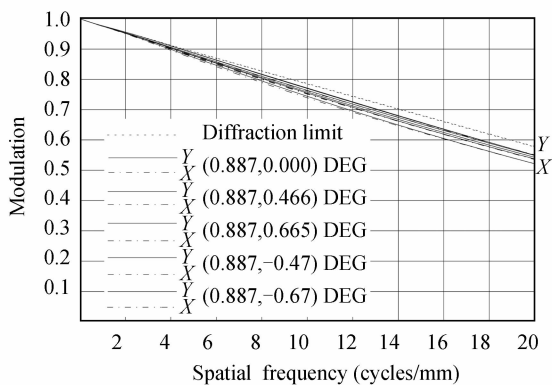
光学系统的调制传递函数曲线如图 4. 由于该系统关于 YZ 面对称, 所以取关于子午面对称的半个视场就可以评价整体的成像质量. 评价系统成像质量的视场点为: $(0^\circ, 0^\circ)$, $(0^\circ, \pm 0.466^\circ)$, $(0^\circ, \pm 0.665^\circ)$, $(0.620^\circ, 0^\circ)$, $(0.620, \pm 0.466^\circ)$, $(0.620^\circ, \pm 0.665^\circ)$, $(0.887^\circ, 0^\circ)$, $(0.887^\circ, \pm 0.466^\circ)$, $(0.887^\circ, \pm 0.665^\circ)$. 该光学系统全视场范围内 MTF 在 20lp/mm 处高于 0.52, 0.7 视场之内成像质量接近衍射极限. 光学系统的畸变如图 4(d) 所示. 该系统子午方向畸变占主要地位, 最大畸变出现在 X 方向最大视场处, $(0.887^\circ, \pm 0.133^\circ)$ 处为 0.32%, $(-0.887^\circ, \pm 0.133^\circ)$ 处为 -0.32%.



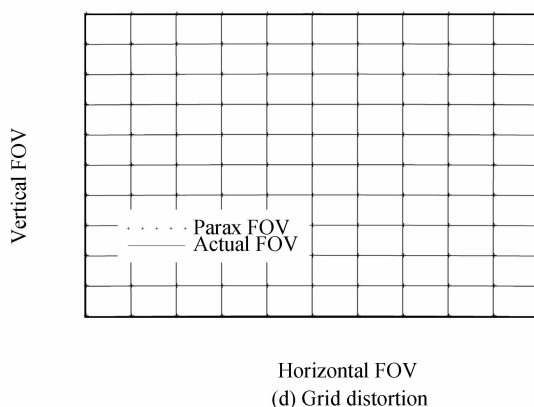
(a) MTF curves for central field of view



(b) MTF curves for 0.7 field of view



(c) MTF curves for maximum field of view



(d) Grid distortion

图 4 光学系统的 MTF 曲线和网格畸变

Fig. 4 MTF curves and grid distortion

以孔径光阑中心点为全局坐标原点, 系统的结构参数列于表 2 中. 第一反射镜的非球面系数及第二、第

三反射镜的 Zernike 多项式系数分别列于表 3 和表 4 中.

表 2 光学系统结构参数
Table 2 Configuration parameters of the system

	Radius/mm	Surface type	Vertex coordinate			Rotation angle (degree)
			X	Y	Z	
Stop	—	—	0.0	0.0	0.0	0.0
Mirror 1	842.8969	Even asphere	0.0	-241.974	685.000	0.0
Mirror 2	640.6002	Zernike polynomial	0.0	797.540	1042.513	-85.422
Mirror 3	-888.3558	Zernike polynomial	0.0	-138.568	916.387	-73.366
Image	—	—	0.0	244.061	827.301	-135.395

表 3 第一反射镜的非球面系数
Table 3 Asphere surface coefficients of Mirror 1

Coefficient	Conic	4 th order	6 th order	8 th order	10 th order
Magnitude	0.246385	-3.42210E-10	8.06019E-15	-4.31593E-20	1.45590E-25

表 4 第二、第三反射镜的 Zernike 多项式系数
Table 4 Zernike coefficients of Mirror 2 and Mirror 3

	Coefficient	Magnitude	Coefficient	Magnitude	Coefficient	Magnitude	Coefficient	Magnitude
Zernike coefficients of Mirror 2	k	-1.1216E+00	C_5	-1.0989E-01	C_6	-3.1711E+02	C_{10}	-2.2512E+02
	C_{11}	-3.0974E+01	C_{12}	5.5161E+01	C_{13}	1.0306E+02	C_{14}	-5.7952E+01
	C_{20}	-4.9302E+01	C_{21}	2.1025E+01	C_{22}	2.9793E+01	C_{23}	2.6804E+00
	C_{24}	1.3868E+01	C_{25}	1.6417E+01	C_{26}	-2.7619E+00	C_{35}	3.7064E+00
	C_{36}	9.0203E+00	C_{37}	5.4436E+00	C_{38}	-9.8464E-01	C_{39}	-1.2608E+00
	C_{40}	-1.9160E-01	C_{41}	-1.0968E-0	Normalizing radius: 1.0000E+03			
Zernike coefficients of Mirror 3	k	-2.1845E+00	C_5	-2.1928E+01	C_6	2.1754E+01	C_{10}	5.3546E+00
	C_{11}	-1.1067E+01	C_{12}	-2.3949E-01	C_{13}	-2.7493E+00	C_{14}	-1.6499E+00
	C_{20}	-1.5221E-01	C_{21}	3.3356E-02	C_{22}	-2.1972E+00	C_{23}	1.0910E+00
	C_{24}	-5.3557E-02	C_{25}	2.9395E-01	C_{26}	9.6288E-02	C_{35}	6.7665E-02
	C_{36}	1.1270E-04	C_{37}	1.7067E-01	C_{38}	4.9484E-03	C_{39}	6.2461E-03
	C_{40}	5.5875E-04	C_{41}	3.4853E-03	Normalizing radius: 5.5000E+02			

4 结论

提出了一种圆周式无遮拦三反射镜光学系统设计方法,采用近轴矩阵法求解共轴三反系统作为初始结构,在保证各二次曲面反射镜焦点依次衔接的条件下将各元件倾斜偏心,折叠光路并使系统无遮拦.在系统中使用 Zernike 多项式曲面作为反射镜校正像差,实现了高质量成像.由设计实例可以看出,系统的光路折叠在由三个反射镜所围成的区域内,结构紧凑;整个系统以及各多项式曲面反射镜关于子午面对称;在成像质量满足使用要求的同时,降低了系统装调和光学元件加工的难度.本文为其他波段以及双波段、多波段紧凑型无遮拦三反射镜系统的设计提供了参考.

参考文献

- [1] JURANEK H J, SAND R, SCHWEIZER J, *et al.* Off-axis telescopes-the future generation of Earth observation telescopes[C]. SPIE, 1998, **3439**:104-115.
- [2] TANIKAWA K, OKAMURA T, JKUDO J, *et al.* Six band multispectral sensor using off-axis three-mirror reflective optics [J]. *Optical Engineering*, 2000, **39**(10):2781-2788.
- [3] BU Jiang-ping, TIAN Wei-jian, YANG Xiao-jun, *et al.* A novel design of off-axis three-mirror reflective optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(4):608-610.
卜江萍,田维坚,杨小君,等.一种新型离轴三反式光学系统的设计[J]. *光子学报*, 2006, **35**(4):608-610.
- [4] LIANG Min-yong, LIAO Ning-fang, FENG Ji, *et al.* Design and optimization of three cylindrical reflectors optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7):1359-1363.
梁敏勇,廖宁放,冯洁,等.三反射式柱面光学系统设计及优化 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(7):1359-1363.
- [5] LI Huan, XIANG Yang. Design of 10°FOV telecentric off-axis three-mirror anastigmatic telescope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(9):2256-2259.
李欢,向阳. 10°远心离轴三反消像散望远镜系统的光学设计 [J]. *光子学报*, 2009, **38**(9):2256-2259.
- [6] ZHAO Wen-cai. Design of improved off-axis TMS optical systems [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(12):2837-2843.
赵文才.改进的离轴三反光学系统的设计 [J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(12):2837-2843.
- [7] CHEN Wei, XUE Chuang. Design of wide field-of-view off-axis three-mirror telescope for imaging spectrometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(8):950-955.
陈伟,薛闯.用于成像光谱仪的宽视场离轴三反望远镜设计 [J]. *光子学报*, 2013, **42**(8):950-955.
- [8] GUO Yong-xiang, LI Ying-cai, LÜ Bao-bin, *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.
- [9] COOK L G. Three mirror anastigmatic optical system: US, 4265510[P]. 1981-05-05.

- [10] RODGERS J M. Catoptric optical system including concave and convex reflectors;US,5309276[P]. 1994-05-03.
- [11] COOK L G. Compact four-mirror anastigmat telescope; US, 6767103[P]. 2004-06-27.
- [12] FUERSCHBACH K,ROLLAND J P,and THOMPSON K P. A new family of optical systems employing φ -polynomial surfaces[J]. *Optics Express*,2011,**19**(22):21919-21928.
- [13] SEIDL K,KNOBBE J and GRÜGER H. Design of an all-reflective unobscured optical-power zoom objective [J]. *Applied Optics*,2009,**48**(21):4097-4107.
- [14] LIN Jing,CUI Qing-feng,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.
- [15] ZHANG Xin,ZHENG Li-gong, HE Xin, *et al.* Design and fabrication of imaging optical systems with freeform surfaces [C]. SPIE,2012.**8486**:848607.