

基于变形镜的三反射离轴变焦物镜设计

程洪涛

(上海大学机电工程与自动化学院精密机械工程系, 上海 200072)

摘要 通过引入两个变形镜来实现三反射离轴变焦系统的焦距改变,应用矩阵光学分析光学系统一阶属性得到控制反射镜面光焦度的方程。结合三反离轴变焦系统结构特点并应用平面对称光学像差理论推出变焦过程中消球差、零阶像散、零阶彗差的条件;同时根据 Scheimpflug 条件消除物像面倾斜引入的拱形畸变;最后阐述了一种新的全反射离轴变焦物镜的设计,结果表明最大均方根弥散斑半径变化范围为 $5.4791 \sim 11.117 \mu\text{m}$ 时,满足变焦物镜技术要求,设计原理和方法为进一步应用变形镜设计变焦系统提供了有益的探索。

关键词 光学设计;变形镜;全反射;离轴;变焦

中图分类号 TB33 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.1222002

Design of Three-Mirror Non-Coaxial Zoom Objective Based on Deformable Mirror

Cheng Hongtao

(Department of Precise Mechanical Engineering, School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract The optical zoom of three-mirror non-coaxial system is reached by introducing two deformable mirrors. The matrix optics is employed to analyze the first order characteristic of optical system and obtain system focusing formula. Combining the features of non-coaxial zoom system and aberration theories of plane-symmetric optical system, the conditions of removing the spherical aberration, the constant astigmatism, the constant coma are deduced. Meanwhile, the arched distortion produced by tilt image is eliminated according the Scheimpflug condition. Finally, a new design of all-reflection non-coaxial zoom objective is presented. The results indicate that maximum root-mean-square radius is from $5.4791 \mu\text{m}$ to $11.117 \mu\text{m}$, which satisfies the zoom objective lens specification. The design principles and methods provide a good quest for further making use of deformable mirror to design zoom system.

Key words optical design; deformable mirror; all-reflective; non-coaxial; zoom system

OCIS codes 220.1010; 220.4830; 230.4040

1 引言

地对空间观测光学系统经历了从折射式到反射式,从同轴光学系统到离轴光学系统的发展阶段,折射光学系统受光学材料的限制,很难做到完全没有色差的大口径和轻量化设计;反射式中心遮拦的存在影响了成像的像质。离轴光学系统是一种光学元件的光轴与光学元件的机械中心并不重合的光学系统,其不存在中心遮拦,而且可以优化的变量多,增大光学系统视场的同时极大地改善了系统成像质

量。全反射光学系统已经在天文观测中有重要的应用,近来全反射变焦的概念被提出^[1-5],特别是全反射离轴变焦系统具有无中心遮拦、能量利用率高、像面质量好等重要优点。目前,利用变形反射镜设计光学系统已经被提出^[6-11],其中中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所主导建设的国家大科学工程 LAMOST 利用主动光学变形镜技术产生了常规不能实现的反射式施密特望远光学系统,反射施密特改正板应用既有控制拼镜面的共面,又有控

收稿日期: 2013-07-01; **收到修改稿日期:** 2013-07-23

基金项目: 国家自然科学基金(11274223)、上海市教委创新基金(12ZZ088)

作者简介: 程洪涛(1983—),男,讲师,博士研究生,主要从事光学系统设计和变焦光学等方面的研究。

E-mail: poyanglao@126.com

制单块薄镜面的非球面面形的主动光学新技术。它将两种主动光学技术集于一身,不仅用于校正望远镜的安装误差、加工误差和重力变形,更主要的是用于校正球面主镜的球差,达到施密特望远镜具有的大视场。中国科学院光电技术研究所周虹等^[10]研究的双压电片变形反射镜作为波前校正器具有结构简单、变形量大、成本低及制造周期短的优点,能代替传统分立式变形镜降低自适应光学系统的成本;后来周虹等^[11]又设计和制造了针对自适应光学视网膜成像系统的双压电片变形反射镜,并进行了一系列的性能分析,在实际系统中获得了人眼视网膜血管和视细胞层的成像结果。改变反射镜的曲率半径来调节光学元件光焦度应用在变焦系统中有以下优点:1)光学系统紧凑;2)像差稳定和变焦速度快。这种变焦原理是基于变形反射镜的,其最大优点是能够提供额外的自由度给光学设计者;光学系统能够更紧凑,使用的系统器件少且不需要移动。少的移动能够增强光学系统的稳健性,这就意味着不用昂贵的精密机械执行机构且系统稳健性较好。

当前全反射变焦系统主要的研究工作是利用反射镜间的移动来达到变焦目的,国内张庭成等^[12]讨论了一种基于赛德尔像差理论的机械补偿型三反变焦系统的设计方法;冯俐铜等^[13]针对透射式红外变焦光学系统结构复杂,无热化设计较难等问题,提出全反射式红外变焦光学系统设计;闫佩佩等^[14]提出了反射变焦系统初始结构的确定方法,对初级像差方程进行了约束优化,得到了满足要求的部分共轴系统初始结构参数;董伟辉等^[6]在光学系统中加入两个或多个可变光学元件,保持光学元件位置不变,通过微调装置改变这些可变光学元件的焦距使得整个光学系统的有效焦距发生变化。

本文主要开展了基于变形镜的全反射离轴变焦

光学系统的一阶光学分析,同时针对其像差特点根据平面对称像差理论进行研究,最后利用 Code V 软件优化出一组成像质量较为理想的全反射离轴变焦光学系统。

2 三反射离轴光学系统变焦一阶光学设计

一阶光学设计是对全反射离轴变焦光学系统布局讨论分析。三反射离轴变焦系统结构如图 1 所示,其中主镜和三镜的光焦度可以改变,次镜光焦度不变,它们之间的间隔也不变。为了达到变焦目的,在此分析主镜和三镜的光焦度变化方程并得到总的光焦度方程,为数学上描述方便,忽略离轴和折叠,其简化模型如图 2 所示,假定长度值从光线的传播方向自左向右时为正,反之为负。

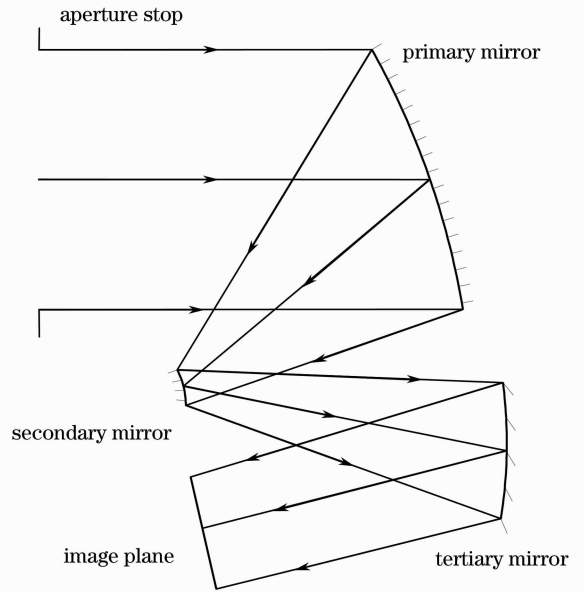


图 1 三反射离轴变焦系统结构图

Fig. 1 Three-mirror non-coaxial zoom system structure

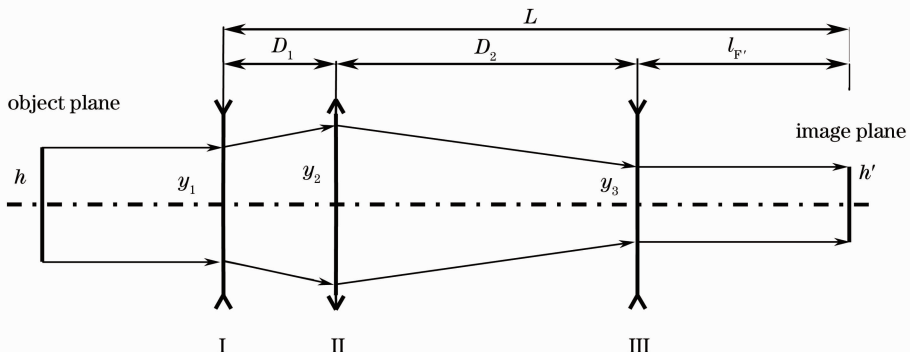


图 2 三反射离轴光学系统简化模型

Fig. 2 Three-mirror non-coaxial optical system simplified model

图2中I、II、III分别对应于主镜、次镜、三镜，其光焦度分别表示为 ϕ_p, ϕ_s, ϕ_t ，I和II之间的距离为 D_1 ，II和III之间的距离为 D_2 ，系统总长为 L ，光线在I、II、III的高度为 y_1, y_2, y_3 ， h 是系统物高， h' 是系统像高；I、II、III折射过程可用矩阵形式表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_I &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\phi_p & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_{II} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\phi_s & 1 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{R}_{III} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\phi_t & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (1)$$

它们之间间距的平移矩阵表示为

$$\mathbf{T}_I = \begin{bmatrix} 1 & D_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T}_{II} = \begin{bmatrix} 1 & D_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

则图2的系统矩阵可以表示为

$$\mathbf{S} = \mathbf{R}_{III} \mathbf{T}_{II} \mathbf{R}_{II} \mathbf{T}_I \mathbf{R}_I, \quad (3)$$

也就是

$$\phi = -c = -D_1 D_2 \phi_p \phi_s \phi_t - (D_1 + D_2) \phi_p \phi_t - (D_1 \phi_p + D_2 \phi_t) \phi_s + (\phi_p + \phi_s + \phi_t). \quad (6)$$

由于物体位于无穷远处时，像位于后焦平面上，其后焦距 l_F 位置公式可表示为

$$l_F = \frac{a}{\phi} = \frac{D_1 D_2 \phi_p \phi_s - (D_1 + D_2) \phi_p - D_2 \phi_s + 1}{-D_1 D_2 \phi_p \phi_s \phi_t - (D_1 + D_2) \phi_p \phi_t - (D_1 \phi_p + D_2 \phi_t) \phi_s + (\phi_p + \phi_s + \phi_t)}. \quad (7)$$

由于变焦系统各反射镜间的距离固定不变，考虑通过改变主镜I和三镜III的曲率半径，三反变焦系统的光焦度发生改变来达到变焦目的。根据变焦光学系统要求，像面位置 l_F 要保持不变，因此(7)式的数值变化量要小，也就是说需要仔细选择分子和分母，让它们非常接近同时变化。从图2中可以得到

$$l_F = L - D_1 - D_2. \quad (8)$$

从(7)式和(8)式可以得到系统后焦距为常数。一般地，由于是改变系统总的光焦度来达到变焦，因此总的光焦度 ϕ 和后焦距 l_F 是已知的，需要得出主镜I和三镜III的光焦度变化方程。由(6)式和(7)式可以得到

$$\phi_p = \frac{1 + D_2 \phi_s - \phi l_F}{D_1 + D_2 - D_1 D_2 \phi_s}, \quad (9)$$

$$\phi_t = \frac{D_2 - \phi^{-1} + l_F + D_1 [1 - \phi_2 (D_2 + l_F)]}{l_F (D_1 + D_2 - D_1 D_2 \phi_2)}. \quad (10)$$

(7)式是三反变焦系统中最基本的约束方程，主镜I和三镜III的光焦度变化必须保持后焦距不变。(9)式和(10)式是主镜I和三镜III的光焦度变化控制方程。变焦系统放大率的定义为

$$m = \frac{h'}{h}. \quad (11)$$

从图2中可以得到系统的放大率也可以写成

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\phi_t & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & D_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\phi_s & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & D_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\phi_p & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

展开(4)式三反射变焦系统矩阵

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中

$$a = D_1 D_2 \phi_p \phi_s - (D_1 + D_2) \phi_p - D_2 \phi_s + 1,$$

$$b = D_1 + D_2 - D_1 D_2 \phi_s,$$

$$c = D_1 D_2 \phi_p \phi_s \phi_t + (D_1 + D_2) \phi_p \phi_t + (D_1 \phi_p + D_2 \phi_t) \phi_s - (\phi_p + \phi_s + \phi_t),$$

$$d = D_1 D_2 \phi_p \phi_s - (D_1 + D_2) \phi_t - D_1 \phi_s + 1.$$

从(5)式可得到，系统总光焦度 ϕ 为

$$m = \frac{y_3}{y_1}, \quad (12)$$

根据光线追迹方程得到

$$y_3 = [1 - \phi_p (D_1 + D_2) - (1 - \phi_p D_1) \phi_s D_2] y_1. \quad (13)$$

联合(12)式和(13)式得到

$$m = 1 - \phi_p (D_1 + D_2) - (1 - \phi_p D_1) \phi_s D_2. \quad (14)$$

从(14)式可以发现系统放大率与三镜III的光焦度无关。以上讨论了三反射离轴变焦光学系统简化模型的一阶光学设计中的重要变量 ϕ_p, ϕ_t 的变化控制方程。

3 三反射离轴光学系统变焦过程中的像差平衡

离轴光学系统是平面对称光学系统。在平面对称光学系统中，光学元件如反射镜或透镜可以倾斜，这样提供了一个额外的自由度设计三反光学系统。三反离轴光学系统是典型的平面对称光学系统，且视场光线是倾斜入射，因此基于轴对称光学系统发展的赛德尔像差理论由于其自身的局限性不能够应用在离轴三反变焦设计和讨论中。Sasian^[15]扩展了基于轴对称光学系统的波像差理论进而发展了平面对称光学系统的像差理论，建立了以光学系统为参

数函数的像差系数,本节正是以此为出发点来讨论三反离轴系统变焦过程中的像差平衡。为了描述平面对称系统,以类光轴光线(OAR)为参考光线,其作用与轴对称光学系统中的光轴一样,类光轴线定义为经过孔径光阑中心、视场中心和光瞳中心的光线,如图3所示。图3中 I, I' 分别表示 OAR 与光学表面的入射角和出射角。 θ, θ' 分别为物平面和像平面与场矢量的夹角。光学系统的对称平面称为子午平面,垂直子午平面且包含 OAR 的平面称为弧矢平面。弧矢平面不是物理意义上的平面,它是每个面自身方向改变的一系列组面,和 OAR 变化一致。与应用赛德尔像差理论研究轴对称光学系统一样,为了计算三反离轴变焦系统的像差系数,必须追踪主光线和场光线如图4所示。光线高度在 OAR

上为正,光线逆时针旋转到 OAR,倾角为正。 H, H' 为物高和像高, u, \bar{u} 为场光线和主光线的倾角, y, \bar{y} 为场光线和主光线在光学表面的高度, R 为曲率半径。与轴对称波像差理论推导一样,以 OAR 为类光轴扩展得到平面对称光学像差系数。

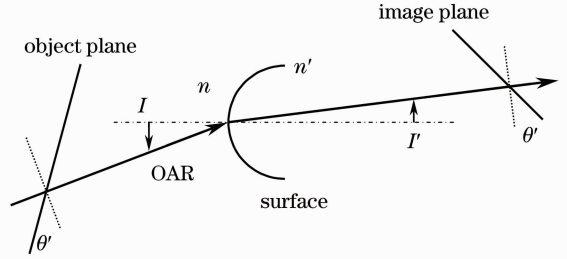


图3 平面对称系统类光轴相关参数几何图解
Fig. 3 Geometry illustration about the OAR and other relevant parameters of plane symmetric system

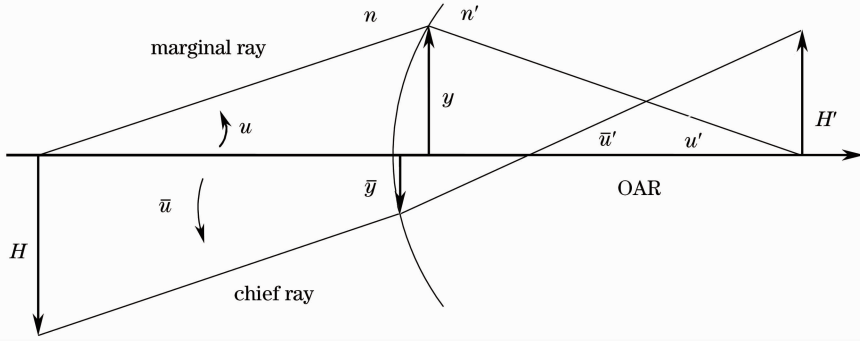


图4 弧矢平面上近轴光线追迹几何图解
Fig. 4 Paraxial ray height and slope on the sagittal plane

由于反射镜的倾斜,三反离轴系统产生严重的球差、彗差、像散,较难控制;根据平面对称光学系统像差理论,分析其球差、零阶像散、零阶彗差对像面质量的影响,表达式为^[4]

$$W_{04000} = (S_I)_p + (S_I)_s + (S_I)_t, \quad (15)$$

$$W_{02002} = (J_I)_p + (J_I)_s + (J_I)_t, \quad (16)$$

$$W_{03001} = (J_{II})_p + (J_{II})_s + (J_{II})_t, \quad (17)$$

式中 $S_I = \frac{1}{8}A^2 x \Delta \left(\frac{u}{n} \right)$, $J_I = -\frac{1}{2}Ax \sin^2 I \cdot \Delta u$,

$J_{II} = -\frac{1}{2}Ax \sin I \cdot \Delta u$, $A = u + \frac{x \cos I}{R}$, $\Delta u = u' - u$.

p, s, t 分别表示第主镜、次镜、三镜。对于单个球面反射镜倾斜入射光焦度定义为

$$\phi = \frac{n' \cos I' - n \cos I}{R}. \quad (18)$$

对于反射镜 $n=1$ 和 $n'=-1$, $I=-I'$, 因此可以简化成

$$\phi = \frac{-2 \cos I}{R}. \quad (19)$$

从图6可以得出

$$\Delta u \approx \frac{2y}{R}, \quad (20)$$

那么

$$S_I = \frac{y^4 \phi^3}{32} \sec[I(\sec^2 I + 1)^2], \quad (21)$$

$$J_I = \frac{y^3 \phi^2}{4} \tan^2 I (1 + \cos I), \quad (22)$$

$$J_{II} = \frac{y^3 \phi^2}{4} \tan I \sec[I(1 + \cos I)]. \quad (23)$$

将(21)~(23)式代入(15)~(17)式可以得到 $W_{04000}, W_{02002}, W_{03001}$, 其是建立在光学元件是球面的基础上进行光线追迹的,通过计算离轴每个面的像差可以得到球差、零阶像散和零阶彗差的像差系数,因此当三反离轴变焦系统主、次、三镜光焦度确定,(15)~(17)式像平面联立得到 I_1, I_2, I_3 可以达到消球差、零阶像散、零阶彗差的目的。三反离轴变焦系统中物像平面对场矢量倾角分别为 θ, θ' , 如果需要完全消除其引起的拱形畸变依据 Scheimpflug 条件^[16], θ, θ' 关系为

$$\bar{u}'_3 \tan \theta' - \bar{u}_1 \tan \theta = 0, \quad (24)$$

$$\bar{u}'_3 \tan \theta' - \bar{u}_1 \tan \theta = 0. \quad (25)$$

通过以上分析得到三反离轴变焦系统的消球差、消零阶彗差、消零阶像散的 I_1 、 I_2 、 I_3 条件方程。同时指出离轴变焦系统需要满足 Scheimpflug 条件从而消除拱形畸变。

4 设计实例

本例是基于 Schiefspiegler 型式^[17]使用凹面的主镜、凸面的次镜和抛物面的第三反射镜。对于三反射离轴系统,应用非球面是惯例而不是特例,因此应用二次曲面参数和高次变形参数平衡像差,变焦系统中包含两个高次变形镜和一个非变形反射镜,其初始结构设计基于文献[18]的研究理论,主镜和次镜的变形方程是基于(9)式和(10)式进行计算机

离轴计算得到的,在消离轴球差、零阶彗差、零阶像散的条件下,得到主、次、三镜倾斜角初值,根据(24)式和(25)式得到消拱形畸变条件下物像面的倾角,应用 Code V 对此系统优化;通过优化出高次非球面参数使物镜离轴像差校正良好。图 5 是三反变焦系统光线近焦、中焦、远焦追迹图,系统中心波长为 550 nm,变倍比是 2.3347,表 1 是光学系统结构参数,表 2 是设计结果参数指标。其中 K 是二次曲线常数, A_4 、 A_6 、 A_8 为偶次高阶项系数。最后通过点列图图 6 评估设计结果,最大均方根(RMS)弥散斑半径变化范围为 5.4791~11.117 μm 时满足电荷耦合元件技术要求。从图 7 可知变焦系统在(a)、(b)、(c)三情况下,光线在成像面的离焦变化微弱,在 20 μm 之内,斜率随视场变化较小,说明场曲可控。因此此设计实例符合光学系统要求。

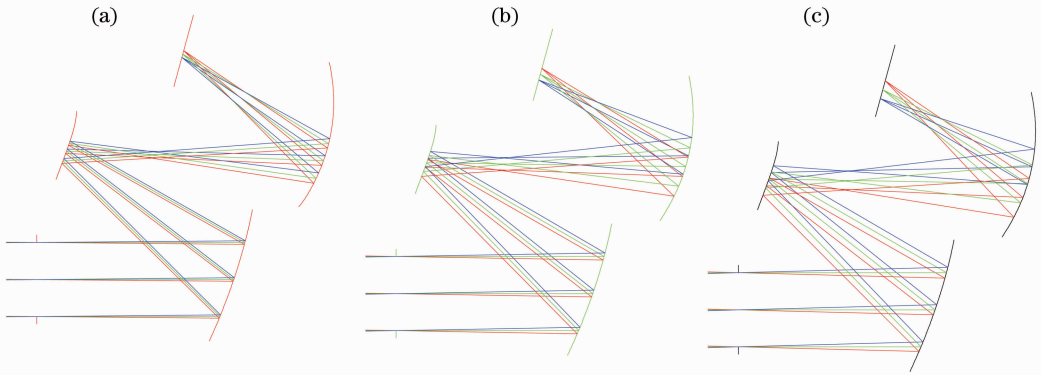


图 5 三反变焦系统光线追迹图。(a)近焦;(b)中焦;(c)远焦

Fig. 5 Ray tracings of three-mirror zoom system. (a) Wide angle; (b) mid-zoom; (c) tele-zoom

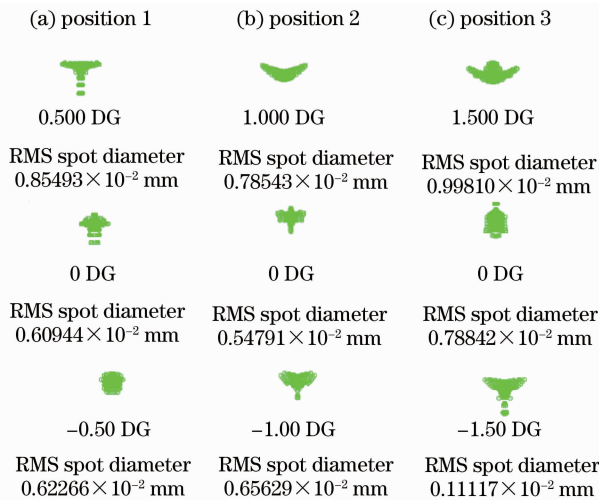


图 6 点列图。(a)近焦;(b)中焦;(c)远焦

Fig. 6 Spot diagrams. (a) Wide angle; (b) mid-zoom; (c) tele-zoom

表 1 光学系统结构参数
Table 1 Optical lens parameters

	Radius of curvature R /mm		
	Wide angle	Mid-zoom	Tele-zoom
Mirror 1 (DM)	-54.81636	-55.3610	-55.8268
Mirror 2		-8.4143	
Mirror 3 (DM)	-23.374	-23.8987	-23.7114

表 2 非球面镜参数
Table 2 Parameters of aspheric lens

	k	A_4	A_6	A_8	
Mirror 1 (DM)	1	-1.3220	7.4584×10^{-8}	-1.2177×10^{-10}	4.11×10^{-14}
	2	-1.4242	-3.4221×10^{-7}	1.8487×10^{-10}	-6.3955×10^{-14}
	3	-1.4248	-4.3924×10^{-7}	2.8967×10^{-10}	-1.0078×10^{-13}
Mirror 2	-5.8405	6.6832×10^{-5}	-9.4456×10^{-7}	5.0697×10^{-9}	
Mirror 3 (DM)	1	2.2698	3.5525×10^{-5}	-2.4394×10^{-8}	1.2232×10^{-9}
	2	-1.244	-6.9851×10^{-7}	-7.1816×10^{-8}	3.2956×10^{-10}
	3	-2.6166	-1.2303×10^{-5}	-6.0289×10^{-8}	2.9634×10^{-10}
Alpha tilt /($^{\circ}$)					
Mirror 1 (DM)	5.4721				
Mirror 2	-5.6728				
Mirror 3 (DM)	-11.9785				
Image plane	-20.6848				
Y decenter /mm					
Mirror 1 (DM)	-7.4753				
Mirror 2	-0.5575				
Mirror 3 (DM)	-5.6294				
Image plane	5.8069				
Distances /mm					
Mirror 1~mirror 2	-24.7796				
Mirror 2~mirror 3	34.2883				
Mirror 3~detector	-20.4448				

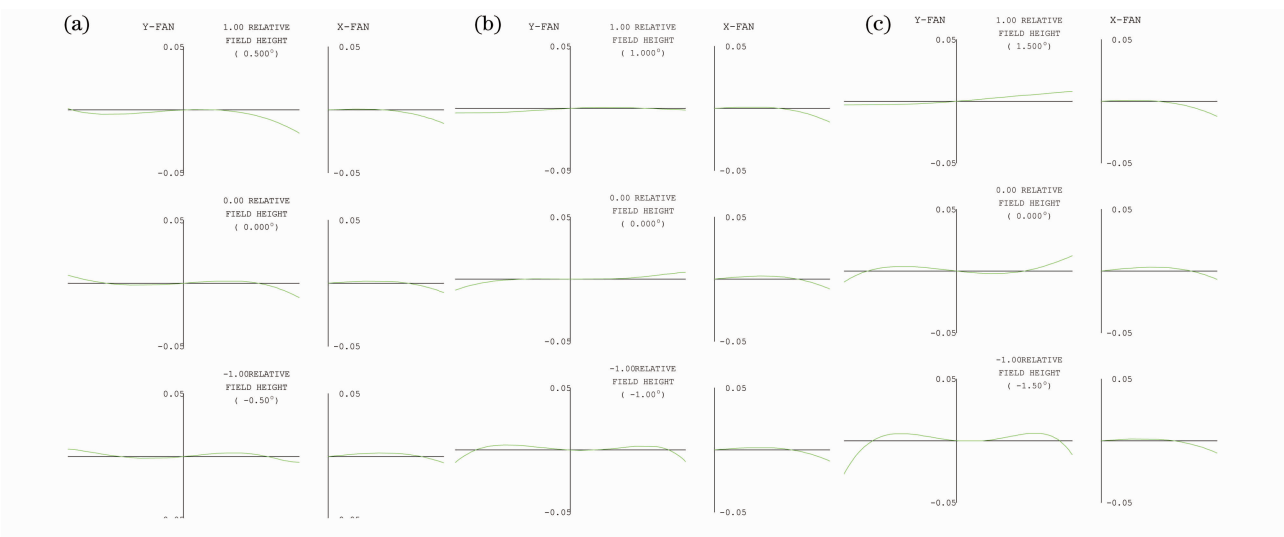


图 7 光线像差曲线(单位:毫米)。(a)近焦;(b)中焦;(c)远焦

Fig. 7 Ray aberration curves (unit: mm). (a) Wide angle; (b) mid-zoom; (c) tele-zoom

表 3 设计结果总结

Table 3 Summary of design results

Optical parameters	Wide angle	Mid-zoom	Tele-zoom
Focal length /mm	54.7380	81.9690	127.7984
Field of view /($^{\circ}$)	0.5×0.5	1×1	1.5×1.5
F number	5.4738	8.1969	12.7798
Overall length /mm	39.5087	39.5087	39.5087

5 结 论

提出应用变形镜设计连续变焦全反射离轴物镜光学系统。反射变焦系统由于无色差,因此其设计适用在很宽的光谱段应用。基于 Code V 进行光学软件仿真,设计实例达到光学技术要求,其像质质量对于大多数成像系统应用是足够的。设计实例中尽管大的变形镜还没有商业化,但是提供了一个新的全反射离轴物镜光学系统设计概念,证明了在狭小空间中实现变焦是可行的。本文发展了新的变焦原理模型,同时展示了这种光学变焦模式在实际的光学系统中是可以期待的。

参 考 文 献

- 1 L G Cook. Continuous Zoom All-Reflective Optical System [P]. US 4993818, 1991.
- 2 R B Johnson. Unobscured reflective zoom systems [C]. International Society for Optics and Photonics, 1995. 218~225.
- 3 J Chang, Y Wang, T Zhang, *et al.*. All-reflective zoom systems for infrared optics [C]. International Society for Optics and Photonics, 2007. 63421Q.
- 4 A Mann, R B Johnson. Design and analysis of a compact wide-field unobscured zoom mirror system [C]. International Society for Optics and Photonics, 1997: 97-107.
- 5 T Nakano, Y Tamagawa. Configuration of an off-axis three-mirror system focused on compactness and brightness [J]. Appl Opt, 2005, 44(5): 776-783.
- 6 Dong Weihui, Xie Yongjun, Li Enling. Design of coaxial catadioptric zoom system using deformable mirrors [J]. J Appl Opt, 2010, 31(6): 893-897.
董伟辉, 谢永军, 李恩玲. 利用镜面形变实现共轴折反射式变焦光学系统设计[J]. 应用光学, 2010, 31(6): 893-897.
- 7 B K Gibson. Liquid mirror telescopes-history [J]. Journal of the Royal Astronomical Society of Canada, 1991, 85: 158-171.
- 8 O Cugat, S Basrour, C Divoux, *et al.*. Deformable magnetic mirror for adaptive optics: technological aspects [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2001, 89(1): 1-9.
- 9 Lin Xudong, Liu Xinyue, Wang Jianli, *et al.*. Development and performance test of the 961-element deformable mirror [J]. Acta

Optica Sinica, 2013, 33(6): 0601001.

林旭东, 刘欣悦, 王建立, 等. 961 单元变形镜研制及性能测试 [J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0601001.

10 Zhou Hong, Ning Yu, Guan Chunlin, *et al.*. Design and fabrication of prototype for bimorph deformable mirrors[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(6): 1437-1442.

周虹, 宁禹, 官春林, 等. 双压电片变形反射镜样镜的设计与研制[J]. 光学学报, 2009, 29(6): 1437-1442.

11 Zhou Hong, Guan Chunlin, Dai Yun. Bimorph deformable mirrors for adaptive optics of human retinal imaging system [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0211001.

周虹, 官春林, 戴云. 用于自适应光学视网膜成像系统的双压电片变形反射镜[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0211001.

12 Zhang Tingcheng, Wang Yongtian, Chang Jun, *et al.*. Design of reflective zoom systems with 3 mirrors [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10): 3034-3038.

张庭成, 王涌天, 常军, 等. 三反变焦系统设计[J]. 光学学报, 2010, 30(10): 3034-3038.

13 Feng Litong, Meng Junhe, Zhang Zhen, *et al.*. Design of all-reflective zoom IR optical systems [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(10): 2749-2752.

冯俐铜, 孟军合, 张振, 等. 全反射式红外变焦光学系统设计 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(10): 2749-2752.

14 Yan Peipei, Fan Xuewu. New design of an off-axis reflective zoom optical system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(6): 1581-1586.

闫佩佩, 樊学武. 新型离轴反射式变焦光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(6): 1581-1586.

15 J M Sasian. How to approach the design of a bilateral symmetric optical system [J]. Optical Engineering, 1994, 33(6): 2045-2061.

16 Warren J Smith. Modern Optical Engineering [M]. Zhou Haixian Transl.. Beijing: Chemical Industry Press, 2011. 51-52.

沃伦·史密斯. 现代光学工程[M]. 周海宪译. 北京: 化学工业出版社, 2011. 51-52.

17 R A Buchroeder. Tilted-component telescopes. Part I: theory [J]. Appl Opt, 1970, 9(9): 2169-2171.

18 Cheng Hongtao. Design and research of the large astronomical coaxial three-mirror telescope system [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0522002.

程洪涛. 共轴大型天文三反望远镜的设计研究[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0522002.

栏目编辑: 张腾