

文章编号: 0253-2239(2010)10-3034-05

## 三反变焦系统设计

张庭成 王涌天 常 军 M. M. Talha

(北京理工大学光电工程系, 北京 100081)

**摘要** 主要介绍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。这种方法的优点在于,通过对初级像差方程组进行约束优化,可以得到满足要求的部分初始结构参数,设计实例的结果表明了这种方法的可行性。同时指出了上述方法的局限性以及进行无遮拦反射变焦系统设计的必要性,并做了新的设计理论探讨,给出了去除系统遮拦同时矫正像差的方法。

**关键词** 光学设计;机械补偿;三反射镜变焦距系统;初级像差理论;结构参数;无遮拦

**中图分类号** O435.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103010.3034

## Design of Reflective Zoom Systems with 3 Mirrors

Zhang Tingcheng Wang Yongtian Chang Jun M. M. Talha

(Department of Optoelectronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract** A method based on the 3rd-order aberration theory is described for the design of mechanically compensated reflective zoom systems with 3 mirrors. By constrained optimization of a set of Seidel aberration coefficient functions, the initial construction parameters of the optical system can be achieved, and the design results prove the feasibility of this method. The limitation of the above method and the necessity of the design of reflective systems without obscuration are also pointed out. A new design theory is explored which could eliminate obscuration and correct aberrations at the same time.

**Key words** optical design; mechanical compensation; zoom system with 3 mirrors; Seidel aberration theory; construction parameters; without obscuration

### 1 引 言

1980年初,波音公司开发了第一代多谱段反射变焦望远镜<sup>[1]</sup>。与折射式变焦系统相比,反射变焦系统具有重量轻、易于大型化、光能透射率高、热稳定性好、无色差和成像谱段宽等优点<sup>[2~4]</sup>,因而越来越受到关注。目前,一些反射变焦系统的专利已经问世<sup>[5,6]</sup>。此类系统可以同时实现目标的搜索和定位,在卫星对地探测和天文观测等方面具有较广阔的应用空间<sup>[7,8]</sup>。

本文给出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。虽然根据赛德尔像差理论可以提供部分好的初始设计结构参数<sup>[9]</sup>,但是由于遮拦的影响,发展新的离轴矢量像差理论具

有更重要的实用意义。所以本文提出一种能够对离轴反射变焦系统进行像差校正的新方法。文章的最后通过对比,说明了新理论的必要性。

### 2 三反变焦系统的赛德尔像差系数

为了实现机械补偿型,可以选择次镜作为变倍组(做线性运动),选择三镜作为补偿组(做非线性运动),那么它们的合成共轭距始终是一个常数<sup>[10,11]</sup>:

$$L_1 = \left(\frac{1}{\beta_{21}} - \beta_{21}\right)f'_2 + \left(\frac{1}{\beta_{31}} - \beta_{31}\right)f'_3, \quad (1)$$

$$L_i = \left(\frac{1}{\beta_{2i}} - \beta_{2i}\right)f'_2 + \left(\frac{1}{\beta_{3i}} - \beta_{3i}\right)f'_3, \quad i = 2, \dots, k \quad (2)$$

收稿日期: 2009-12-21; 收到修改稿日期: 2010-01-26

基金项目: 教育部长江学者和创新团队发展计划项目(IRT0606)资助课题。

作者简介: 张庭成(1982—),男,博士研究生,主要从事成像光学系统设计方面的研究。E-mail: tczhang1217@gmail.com

导师简介: 王涌天(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事光学设计、虚拟现实等方面的研究。

E-mail: wyt@bit.edu.cn

式中  $k$  表示共有  $k$  个位置,  $\beta_{2i}, \beta_{3i}$  为系统在第  $i$  个位置时次镜和三镜的垂轴放大率。为了和(1),(2)式保持一致,在进行赛德尔像差系数解析表达式推导的过程中,可以选择  $f'_1, f'_2, f'_3, \beta_{2i}, \beta_{3i}$  作为自变量。具体过程如下:

1) 根据(3)式将各个镜子之间的间隔表示为  $f'_1, f'_2, f'_3, \beta_{2i}, \beta_{3i}$  的函数:

$$\begin{cases} d_{12i} = f'_1(1 - \beta_{1i}) - f'_2\left(1 - \frac{1}{\beta_{2i}}\right), \\ d_{23i} = f'_2(1 - \beta_{2i}) - f'_3\left(1 - \frac{1}{\beta_{3i}}\right); \end{cases} \quad (3)$$

2) 对第一和第二辅助光线进行逐面的傍轴追迹<sup>[12]</sup>, 取得它们在各个面上的投射高、入射角和出射角等高斯参数的解析表达式;

3) 在已得到的高斯参数解析表达式的基础上, 推导出系统在不同焦距状态下, 各个面的像差特性参数  $P, W$ <sup>[13]</sup>;

4) 根据初级像差的定义和性质, 最终推导出系统在不同焦距值下, 由  $f'_1, f'_2, f'_3, \beta_{2i}, \beta_{3i}$  表示的各个赛德尔像差系数的解析表达式:

$$\begin{cases} S_{1i} = S_{1i}(f_1, f_2, f_3, \beta_{2i}, \beta_{3i}), \\ S_{2i} = S_{2i}(f_1, f_2, f_3, \beta_{2i}, \beta_{3i}), \\ S_{3i} = S_{3i}(f_1, f_2, f_3, \beta_{2i}, \beta_{3i}), \\ S_{4i} = S_{4i}(f_1, f_2, f_3, \beta_{2i}, \beta_{3i}). \end{cases} \quad (4)$$

此时, 系统在各个位置的焦距值可以表示为<sup>[14]</sup>

$$F_i = f'_1 \beta_{2i} \beta_{3i}. \quad (5)$$

### 3 设计实例

举例设计一个三反变焦系统, 入瞳直径为 40 mm, 焦距范围是 150 ~ 450 mm, 视场角从  $0.78^\circ \sim 0.26^\circ$ , 成像波段为 3000 ~ 5000 nm。要求系

统在各个焦距值下都能够接近衍射极限。在计算系统的初始结构时, 先选取 150, 300 和 450 mm 三个位置, 同时加入对这些位置的初级像差的校正; 而且, 为了达到机械补偿的要求, 系统必须满足(2)式, 得到如下的方程组:

$$\begin{cases} F_1 = 150, \\ F_2 = 300, \\ F_3 = 450, \\ L_3 = L_1, \\ L_2 = L_1, \\ S_{1i} = S_{1i}(f_1, f_2, f_3, \beta_{2i}, \beta_{3i}) = 0, \\ S_{2i} = S_{2i}(f_1, f_2, f_3, \beta_{2i}, \beta_{3i}) = 0, \\ S_{3i} = S_{3i}(f_1, f_2, f_3, \beta_{2i}, \beta_{3i}) = 0, \\ S_{4i} = S_{4i}(f_1, f_2, f_3, \beta_{2i}, \beta_{3i}) = 0. \end{cases}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (6)$$

同时, 为了使求解的结构参数具有物理意义, 对初始位置加入以下约束:

$$\frac{-d_{(1,2)1}}{d_{(2,3)1}} = 0.3, \quad d_{(2,3)1} > 0, \quad (7)$$

式中  $d_{(1,2)1}, d_{(2,3)1}$  分别为系统在短焦距时主镜和次镜以及次镜和三镜之间的间隔。由于(6)式中的未知数的个数往往小于方程的个数, 而且在(7)式的约束下, 该方程组一般没有精确解, 所以需要通过优化的方法来计算。同时, 还需要对求得的结果作进一步的优化。在优化的过程中, 将所有镜子的半径和间隔设置为变量。另外, 为了更好的平衡系统的高阶像差, 可以将各个镜子设置为非球面, 在非球面系数只使用到第 10 阶。优化后得到的结果如表 1 所示, 其结构图和各个焦距值下在 15 lp/mm 处的调制传递函数(MTF)如图 1 和图 2 所示。

表 1 共轴三反变焦系统结构参数

Table 1 Parameters of centered reflective zoom system with 3 mirrors

Mirror	Radius /mm	Aspherical coefficients					Separation /mm
		Conic	4 <sup>th</sup>	6 <sup>th</sup>	8 <sup>th</sup>	10 <sup>th</sup>	
M1	-188.0076	-0.9812	$1.4666 \times 10^{-9}$	$-1.36696 \times 10^{-12}$	$6.7698 \times 10^{-14}$	$-1.2049 \times 10^{-16}$	-75.3751
							-74.4370
							-74.1062
M2	-43.4751	-1.0692	0	0	0	0	236.0238
							239.7922
							244.0713
M3	-87.5538	-0.4093	$8.3159 \times 10^{-9}$	$-3.6030 \times 10^{-11}$	$2.0011 \times 10^{-15}$	$-7.6633 \times 10^{-15}$	244.0713

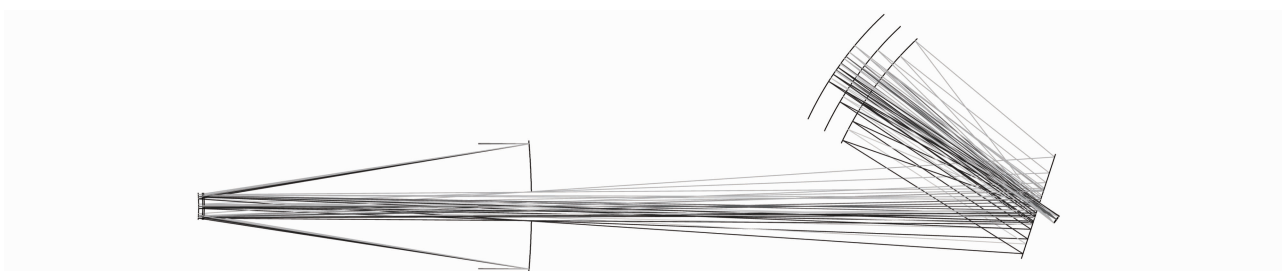


图 1 共轴反射变焦系统结构图

Fig. 1 Layout of coaxial reflective zoom system

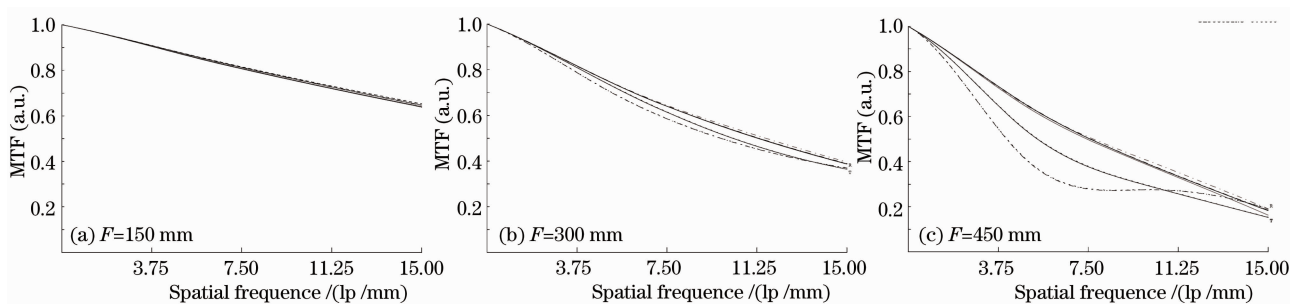


图 2 共轴反射变焦系统在各个焦距值下的 MTF

Fig. 2 MTF curves of coaxial reflective zoom system for different focal length

#### 4 无遮拦三反变焦系统

由于遮拦的存在,共轴反射变焦系统的视场难以进一步增大,所以为了增大系统的视场必需采用离轴的结构形式,以消除遮拦。在进行离轴系统设计时,一个有效的方法是使用矢量像差理论<sup>[15]</sup>。根据该理论,在离轴系统中,彗差的中心并不在像面的中心,而且像散会出现两个零点,如图 3 所示。

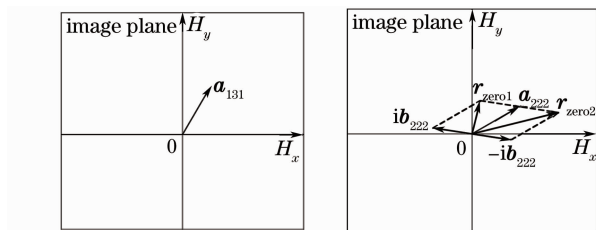


图 3 彗差的中心和像散的两个零点

Fig. 3 Center of coma and two nodes of astigmatism

为了消除遮拦,同时降低离轴反射变焦系统的波像差,应使得系统的彗差中心和两个像散零点连线的中心在各个位置处一直保持重合,如图 4 所示。由于彗差的中心和像散两个零点的位置都是各个光学表面的偏心和倾斜的函数,这就对各个镜子的偏心和倾斜的设置提出了要求。所以,进行离轴反射变焦系统设计的关键在于如何确定各个镜子的偏心和倾斜。

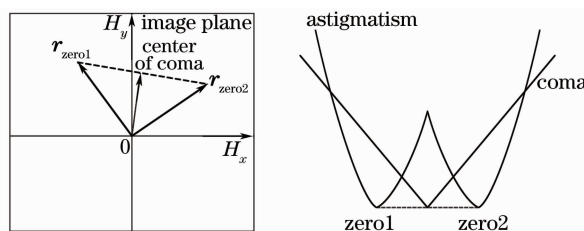


图 4 彗差和像散的校正

Fig. 4 Correction of coma and astigmatism

这里给出一个应用矢量像差理论的离轴反射变焦光学系统的设计结果,如表 2 所示,其结构图如图 5 所示。与前面的系统作一比较。系统的入瞳直径为 37.5 mm,焦距范围是 150~600 mm,视场角从  $2^\circ \times 2^\circ$  到  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ,成像波段为 3000~5000 nm。并且系统在各个焦距值下,在空间频率 15 lp/mm 处都能够达到或接近衍射极限。

通过比较可以得出结论:由于去除了遮拦,系统有了更大的视场角,且系统的 MTF 有明显的提高,如图 6 所示。

离轴非球面没有共同的曲率中心,给加工非球面带来了困难。但是,随着光学加工工艺的发展,国内外在非球面加工方面也有成功的经验<sup>[16]</sup>。

表 2 离轴三反变焦系统的结构参数  
Table 2 Parameters of off-axis reflective zoom system with 3 mirrors

Mirror	Radius /mm	Aspherical coefficients					Separation /mm
		Conic	4 <sup>th</sup>	6 <sup>th</sup>	8 <sup>th</sup>	10 <sup>th</sup>	
Stop	Infinity			0			500
M1	-335.191	1.132	$7.138 \times 10^{-10}$	$-8.780 \times 10^{-13}$	$1.322 \times 10^{-16}$	$-8.790 \times 10^{-21}$	-170.511 -161.685 -157.878
M2	-29.7622	-7.405	$2.697 \times 10^{-7}$	$-7.587 \times 10^{-13}$	$-3.492 \times 10^{-15}$	$2.078 \times 10^{-19}$	195.335 206.812
M3	-204.497	-0.035	$4.647 \times 10^{-11}$	$-2.111 \times 10^{-15}$	$-4.345 \times 10^{-20}$	$6.736 \times 10^{-24}$	212.546

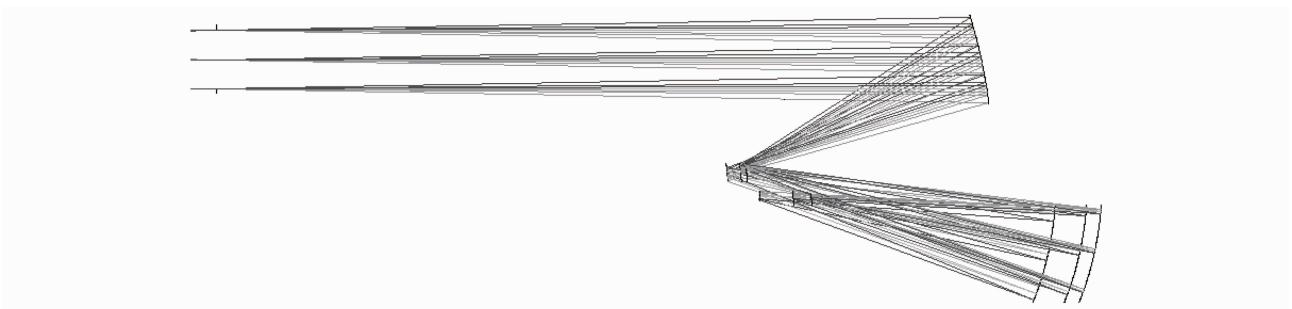


图 5 离轴反射变焦系统结构图

Fig. 5 Layout of off-axis reflective zoom system

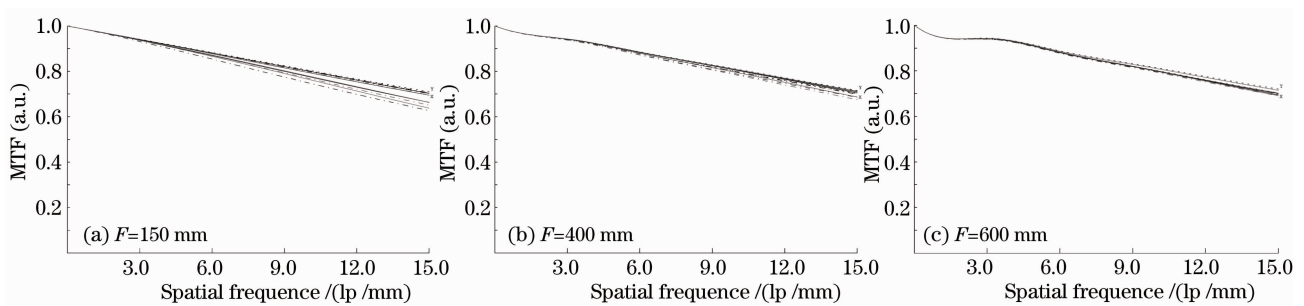


图 6 离轴反射变焦系统在各个焦距值下的 MTF

Fig. 6 MTF curves of off-axis reflective zoom system for different focal length

## 5 结 论

对机械补偿型三反变焦系统的设计方法进行了初步研究。通过等式代换,建立了赛德尔像差系数和系统各个子镜的焦距以及垂轴放大率之间的关系。在加入适当的约束条件以后,就可以通过优化求解的方法得到部分系统的初始结构,相应的设计实例的结果表明了该方法的有效性。最后通过对比离轴变焦系统和共轴系统的设计结果,指出了设计离轴变焦系统的必要性。

## 参 考 文 献

- 1 R. B. Johnson, J. B. Hadaway, T. A. Burleson *et al.*. All-reflective four-element zoom telescope: design and analysis [C]. *SPIE*, 1990, **1354**: 669~675
- 2 Liu Lin. Study of Designing Long Focal Length Reflective Telescope with 3 Mirrors [D]. Suzhou: Soochow University, 2002. 1~2  
刘琳. 长焦距三反射式望远镜设计研究 [D]. 苏州: 苏州大学, 2002. 1~2
- 3 J. M. Rodgers. Four-mirror compact afocal telescope with dual exit pupil [C]. International Optical Design Conference, 2006, **6342**: 3421
- 4 P. G. Hannan, M. E. Wilson. Optical design of two-mirror widefield cameras for large telescopes [C]. *SPIE*, 1993, **1945**: 443~452

- 5 B. Tatian. All-reflective zoom optical imaging system. US Patent: 6333811, 2001
- 6 T. Tanaka. Reflecting type of zoom lens. US Patent: 6639729, 2003
- 7 Dong Bing, Yu Xin. On-orbit position error correction of segmented primary mirror of high-resolution space telescope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 55~59  
董 冰, 俞 信. 高分辨率空间望远镜分块主镜位置误差的在轨校正[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 55~59
- 8 Zhang Xiaofang, Dong Bing, Huang Yifan *et al.*. Simulation research on wavefront sensing and correction algorithms for segmented space telescope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 7~11  
张晓芳, 董 冰, 黄一帆等. 分块式空间望远镜波前传感及控制方法的仿真研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 7~11
- 9 G. G. Slyusarev. Aberration and Optical Design Theory [M]. Bristol: Adam Hilger, 1984
- 10 Jun Chang, Yongtian Wang, Tingcheng Zhang *et al.*. All reflective zoom systems for infrared optics [J]. *SPIE-OSA*, 2006, **6342**: 63421Q-1~9
- 11 Wang Chunyan, Wang Zhijian, Zhou Qingcai. The application of the theory about image stabilization in calculating image motion on space remote sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 891~894  
王春艳, 王志坚, 周庆才. 应用动态光学理论求解变焦光学系统补偿组凸轮曲线[J]. *光学学报*, 2006, **26**(6): 891~894
- 12 W. J. Smith. Modern Optical Engineering [M]. New York: McGraw-Hill Professional, 2007. 31~36
- 13 Yuan Xucang. Optical Design [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988. 84  
袁旭沧. 光学设计[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1988. 84
- 14 An Liansheng. Applied Optics [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2002. 202  
安连生. 应用光学[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2002. 202
- 15 R. A. Buchroeder. Tilted Component Optical Systems [D]. Arizona: University of Arizona, 1976
- 16 Huang Zhengzhi. Making and testing off-axis aspherical surface [J]. *Optical Technique*, 1995, **1**: 11~14  
黄正之. 离轴非球面的加工与检测[J]. *光学技术*, 1995, **1**: 11~14