

三反射主动变焦系统设计*

沈本兰¹⁾ 常军^{1)†} 王希¹⁾ 牛亚军¹⁾ 冯树龙²⁾

1)(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

2)(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130022)

(2013年12月20日收到; 2014年4月5日收到修改稿)

空间光学系统在对深空探测、监视、威胁侦测和对地高分辨率侦查等应用中, 不仅需要能同时获得高分辨率和宽视场范围的变焦系统, 还需要体积小、重量轻、低能耗及快速调焦的系统, 传统机械变焦系统因需要复杂精确的机械运动控制而存在诸多问题. 因而, 基于主动光学理论, 将主动光学元件应用到成像系统中, 提出了通过某个或某几个光学元件的曲率半径变化实现系统焦距变化的理论. 根据初级像差理论和系统的外形尺寸, 研究了系统主动变焦原理, 确定了初级像差方程组的约束条件, 求解共轴主动变焦系统的初始结构参数, 借助 ZEMAX 软件进行优化设计, 设计了一个由静止的主镜、曲率半径作为变量的次镜和三镜、无光焦度的平面镜组成的三反射主动变焦系统. 由于该共轴三反射主动变焦系统存在两次遮光, 会影响系统像面能量的接收, 因此, 指出对共轴系统进行无遮拦离轴优化设计的必要性, 讨论了离轴系统设计理论, 并设计了离轴三反射主动变焦系统.

关键词: 主动变焦, 初级像差, 三反射镜, 光学设计**PACS:** 42.15.-i, 42.15.Dp, 42.15.Ed, 42.15.Fr**DOI:** 10.7498/aps.63.144201

1 引言

20世纪80年代初, 国内外多个科研机构开始进行主动变焦系统的研究, 并提出了各自的结构形式. 与传统机械变焦系统相比, 主动变焦系统是通过其中某个或某几个元件光焦度的改变实现整个系统焦距的变化, 因而不要求复杂而精确的机械运动控制, 从而能够解决系统调焦速度、外形尺寸、机械移动部件、总体重量及功耗等方面的问题. 主动变焦系统研究的关键在于曲率半径变化的光学元件的选择, 随着有关液晶空间光调制器、液体透镜及变形镜方面技术的发展^[1-4], 为新型的主动变焦方式提供了可能性. 2004年, 美国桑迪亚国家实验室的 Wick 和 Martinez^[5] 提出在系统中加入液晶空间光调制器(liquid crystal spatial light modulators, LC SLMs)或变形镜(deformable mirrors,

DMs)作为光焦度可变的主动光学元件, 无需移动元件的位置而实现变焦. 此后, Wick等^[6]提出了一种由5个反射镜组成的主动变焦系统, 其中两片为静电驱动的微机械变形薄膜反射镜(micromachined deformable membrane mirrors, MDMMs), 其余三片为静止反射镜. 2009年, Seidl等^[7]利用两片变形镜, 设计了一种四反射主动变焦系统的结构形式. 在国内, Hu等^[8]利用变形镜, 设计了在任意视场角变焦的主动变焦光学系统. 目前, 已有越来越多的研究机构开始进行主动变焦系统的研究.

本文进行了主动变焦系统的研究. 从系统变焦理论与初级像差理论出发, 通过采用更多自由度的非球面反射镜来校正系统高阶像差, 设计了一个主镜静止不变、其中两片反射镜的曲率半径可变、一片是无光焦度平面镜的共轴三反射主动变焦系统; 并采用压电陶瓷类变形镜作为系统中曲率半径变化的反射镜, 变形镜面型的变化是通过由驱动电压

* 教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号: 2012cx01017)和北京理工大学科技创新计划重大项目培育专项计划(批准号: 22050205)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: bitchang@bit.edu.cn

控制的多个驱动器的伸缩来实现. 考虑到加工装调难度的问题, 基于矢量像差理论^[9], 进行系统的无遮拦结构设计时, 尽量减少倾斜元件个数. 设计结果表明, 该系统能够在焦距变化时保证像面的稳定. 本文研究结果将满足空间科学领域中减轻空间系统的载荷质量、减小空间系统的体积、降低其功耗要求, 满足宽视场、高覆盖率及灵活调焦的要求, 对空间光学系统的研究具有重要的推动作用.

2 主动变焦系统理论研究

2.1 系统的一阶特性

为了实现系统的主动变焦, 本文选择三反射镜的结构形式, 如图1所示, 由正光焦度 M_1 , 负光焦度 M_2 和正光焦度 M_3 组成的结构, 三个反射镜的光焦度分别为 $\varphi_1, \varphi_{2i}, \varphi_{3i}$, 其垂轴放大率分别为

$\beta_1, \beta_{2i}, \beta_{3i}$, 其中 $\varphi_1 > 0, \varphi_{2i} < 0, \varphi_{3i} > 0, i$ 表示系统的第 i 个焦距状态; F' 为系统的焦点, d_1, d_2 为反射镜间的间距; l'_3 为系统的后截距. 在系统变焦过程中, 反射镜 M_2 与 M_3 面型的曲率半径是变化的, M_2 实现系统变焦, 同时 M_3 补偿系统变焦引起像面位置 l'_{3i} 的变化.

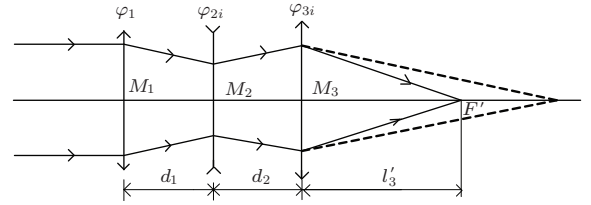


图1 共轴三反射主动变焦系统结构图

根据近轴成像理论, 三反射镜光学系统的光线追迹用矩阵光学的 2×2 矩阵来表示, 推导可得系统的组合焦距与后截距分别为

$$F'_i = -\frac{1}{-\varphi_{3i} - (-\varphi_{3i} * d_2 + 1) * \varphi_{2i} - ((-\varphi_{3i} - (-\varphi_{3i} * d_2 + 1) * \varphi_{2i}) * d_1 - \varphi_{3i} * d_2 + 1) * \varphi_1}, \quad (1)$$

$$l'_{3i} = F'_i(1 - d_2 * \varphi_{2i} - ((1 - d_2 * \varphi_{2i}) * d_1 + d_2) * \varphi_1). \quad (2)$$

主动变焦系统中, 光学元件的间隔 d_1, d_2 , 主镜光焦度 φ_1 与像面位置 $l'_{3i} = a$ (a 为常数) 均保持不变, $\varphi_{2i}, \varphi_{3i}$ 在不同焦距状态时, 具有不同的数值. 根据初级像差理论, 系统具有不同焦距值时, 系统的各个赛德尔像差系数的解析表达式为

$$S_{ki} = S_{ki}(f'_1, f'_{2i}, f'_{3i}, \beta_{2i}, \beta_{3i}), \quad (3)$$

其中, $k = 1, 2, 3, 4$ 表示球差 S_{1i} 、彗差 S_{2i} 、像散 S_{3i} 和场曲 S_{4i} .

2.2 矢量像差理论

在旋转对称的共轴系统中, 采用极坐标赛德尔多项式的矢量表达式来描述第 j 面的三阶波像差^[10], 则有

$$\begin{aligned} W_j(\mathbf{H}, \boldsymbol{\rho}) = & W_{040j}(\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}) + W_{131j}(\mathbf{H} \cdot \boldsymbol{\rho})(\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}) \\ & + W_{222j}(\mathbf{H} \cdot \boldsymbol{\rho})^2 \\ & + W_{220j}(\mathbf{H} \cdot \mathbf{H})(\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}) \\ & + W_{311j}(\mathbf{H} \cdot \mathbf{H})(\mathbf{H} \cdot \boldsymbol{\rho}), \end{aligned} \quad (4)$$

其中, \mathbf{H} 是归一化的场点高度, $\boldsymbol{\rho}$ 是出瞳处归一化的孔径高度. 共轴系统的波像差是各个光学表面的

波像差之和, 若系统共有 n 个表面, 则有

$$W = \sum_{j=1}^n W_j. \quad (5)$$

在非旋转对称的离轴系统中, 第 j 面的波像差中心并不在像平面中心 $\mathbf{H} = 0$ 位置处, 相对于像面中心, 它存在着一个偏移矢量 $\boldsymbol{\sigma}_j$, 其第 j 面的三阶波像差的赛德尔多项式矢量表达式中引入偏移矢量 $\boldsymbol{\sigma}_j$ 后表示为^[9]

$$\begin{aligned} W_j(\mathbf{H}, \boldsymbol{\rho}) = & W_{040j}(\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}) \\ & + W_{131j}[(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j) \cdot \boldsymbol{\rho}](\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}) \\ & + W_{222j}[(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j) \cdot \boldsymbol{\rho}]^2 \\ & + W_{220j}[(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j) \cdot (\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j)](\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}) \\ & + W_{311j}[(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j) \cdot (\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j)] \\ & \times [(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j) \cdot \boldsymbol{\rho}]. \end{aligned} \quad (6)$$

离轴系统的波像差则有:

$$\begin{aligned} W = & \sum_{j=1}^n W_j \\ = & \sum_{j=1}^n W_{040j}(\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \sum_{j=1}^n W_{131j}[(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j) \cdot \boldsymbol{\rho}](\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}) \\
 & + \sum_{j=1}^n W_{222j}[(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j) \cdot \boldsymbol{\rho}]^2 \\
 & + \sum_{j=1}^n W_{220j}[(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j) \cdot (\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j)](\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho})_j \\
 & + \sum_{j=1}^n W_{311j}[(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j) \cdot (\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j)] \\
 & \times [(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j) \cdot \boldsymbol{\rho}]. \tag{7}
 \end{aligned}$$

通过赛德尔多项式矢量形式表示的系统波像差分析可知, 离轴系统的彗差中心不与像面中心重合, 并且像散出现两个零点. 因此, 为了解决共轴系统的遮拦问题, 将系统中光学元件进行离轴时, 要考虑降低离轴系统的波像差, 就需要使得彗差中心与像散的两个零点连线中心在每个位置处始终保持重合, 从而确定各个元件的偏心和倾斜量.

3 设计实例

3.1 共轴系统设计

根据上述共轴主动变焦系统理论, 设计了一个变焦比为3的主动变焦系统, 其焦距分别为15, 30, 45, 入瞳直径5 mm, 视场范围 0.94° — 2.8° , 波长范围从可见光波段到3—5 μm 红外波段. 在可见光波段, 选择使用像元尺寸为3.75 μm 的探测器; 红外波段, 选择使用像元尺寸为30 μm 的探测器. 根据系统设计理论, 则有方程组:

$$\left\{ \begin{aligned}
 & F'_1 = 15 \text{ mm} \\
 & F'_2 = 30 \text{ mm} \\
 & F'_3 = 45 \text{ mm} \\
 & f'_{3i}[f'_{2i} * (f'_1 - d_1) - d_2 * (f'_1 - d_1 - f'_{2i})] \\
 & = a * [f'_{2i} * (f'_1 - d_1) - (d_3 + f'_{3i}) \\
 & * (f'_1 - d_1 - f'_{2i})] \quad (a \text{ 是常数}) \\
 & S_{ki} = S_{ki}(f'_1, f'_{2i}, f'_{3i}, \beta_{2i}, \beta_{3i}) \\
 & \varphi_1 > 0 \\
 & \varphi_{2i} < 0 \\
 & \varphi_{3i} > 0
 \end{aligned} \right. \tag{8}$$

求解方程组, 将得到系统的初始结构参数. 为了校正系统像差, 需要进行优化设计. 根据非球面的初级像差理论, 可知单个非球面只能校正除了场曲以外的一种初级像差, 在系统中适当的位置引入非球面, 可以增加系统的设计自由度, 从而能够得到更好的优化结果. 设计结果如表1, 系统结构图及其在可见光波段、3—5 μm 红外波段成像质量评价如图2—图4所示.

3.2 离轴系统设计

为了进一步提高系统的应用性, 需要考虑中心遮拦和扩大视场的问题, 提出了视场偏离、元件偏心倾斜的一种系统结构形式. 基于矢量像差理论, 设置系统中主镜和次镜合适的偏心和倾斜量、平面镜和三镜合适的偏心量, 优化设计得到离轴系统的设计结果如表2, 系统结构图及在可见光波段、3—5 μm 红外波段成像质量评价如图5、图6和图7所示.

表1 共轴三反主动变焦系统结构参数

	半径 r/mm	间隔 d/mm	Conic 系数	4 th	6 th	8 th	10 th
主镜	31.88	-11.11	-0.78	0	0	0	0
次镜	-22.78		-74.90	0	-2.131×10^{-4}	4.891×10^{-5}	-3.492×10^{-6}
	-14.5	30.11	-0.71	0	0	0	0
	-13.04		9.203		6.550×10^{-4}	-5.266×10^{-6}	3.933×10^{-6}
平面镜	Infinity	-17.40					
三镜	27.52		-0.17	0	0	0	0
	25.87	21.18	-0.27	0	0	0	0
	24.49	-0.88	0	0	0	0	

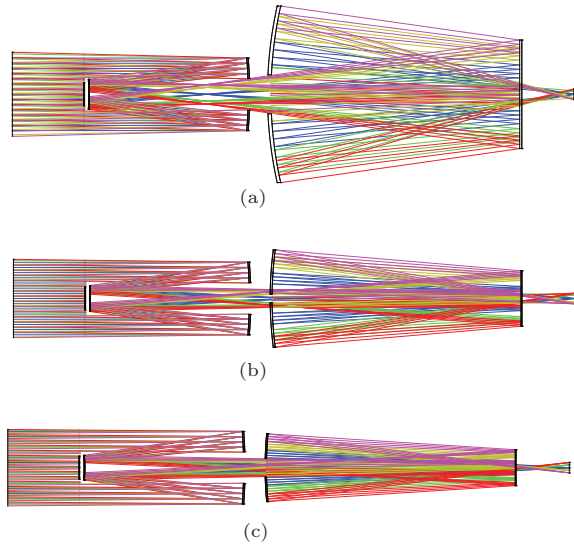


图2 (网刊彩色) 共轴三反主动变焦系统结构图 (a) $f'_1 = 15$ mm; (b) $f'_2 = 30$ mm; (c) $f'_3 = 45$ mm

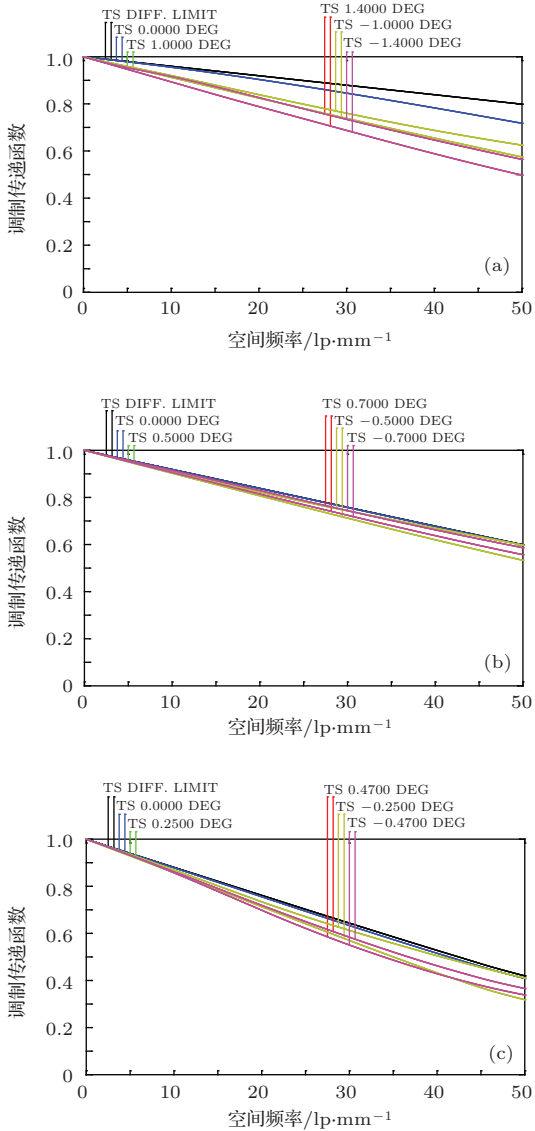


图3 (网刊彩色) 可见波段系统调制传递函数 (MTF) (a) $f'_1 = 15$ mm; (b) $f'_2 = 30$ mm; (c) $f'_3 = 45$ mm

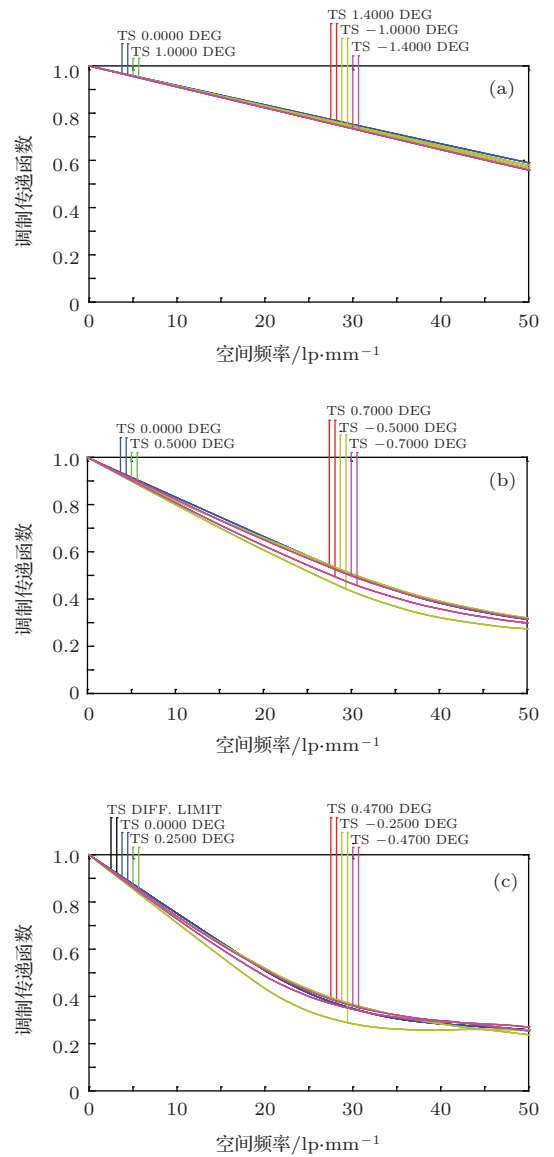


图4 (网刊彩色) 3—5 μ m 红外波段系统 MTF (a) $f'_1 = 15$ mm; (b) $f'_2 = 30$ mm; (c) $f'_3 = 45$ mm

通过比较可知, 离轴主动变焦系统中, 去除了遮拦, 并且可见波段和红外波段分别在 50 lp/mm 与 15 lp/mm 时, 系统成像质量基本满足 MTF 大于 0.3 的要求, 但是在可见波段长焦、红外波段长焦的 MTF 较差. 虽然离轴系统解决了遮拦和视场问题, 但是系统中偏心、倾斜的非球面光学元件没有共同的对称轴, 在一定程度上给系统的加工、装调带来了困难. 因此, 考虑到系统的加工、装调问题, 在共轴系统设计过程中, 只有次镜使用了高次非球面, 而主镜和三镜选择使用二次曲面; 在离轴系统设计中, 主镜和次镜具有倾斜、偏心量, 而平面镜和三镜只有偏心量, 且三镜也采用了高次非球面. 然而, 随着光学加工、装调技术的发展, 非球面的加工、离轴系统的装调将取得新的进展.

表2 离轴三反主动变焦系统结构参数

	半径 r/mm	间隔 d/mm	Conic 系数	非球面高次项	偏心量 y/mm	倾斜量 $x/(\text{°})$	视场/ (°)	系统 $F\#$
主镜	33.11	-11.16	1.62	2 th	3	6		
次镜	-30.20		13.20	10 th				
	-17.80	31.00	-2.68	10 th	2	7	28	3
	-15.74		0.81	10 th				6
平面镜	Infinity	-18.10	0	0	18	0	14.6	9
三镜	27.86		-1.30	10 th			9.6	
	29.38	29.26	-2.75	10 th	8	0		
	29.26		-3.41	10 th				

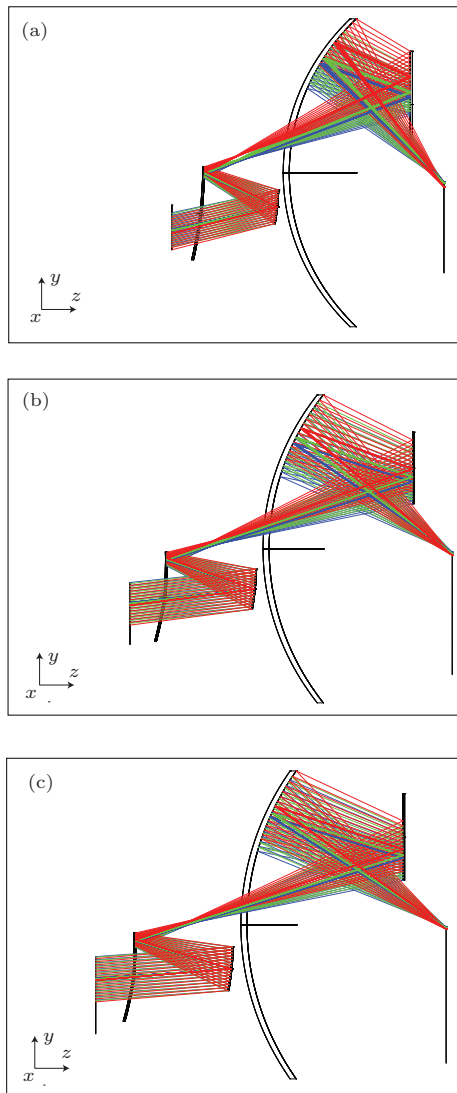


图5 (网刊彩色) 离轴三反主动变焦系统结构图 (a) $f'_1 = 15 \text{ mm}$; (b) $f'_2 = 30 \text{ mm}$; (c) $f'_3 = 45 \text{ mm}$

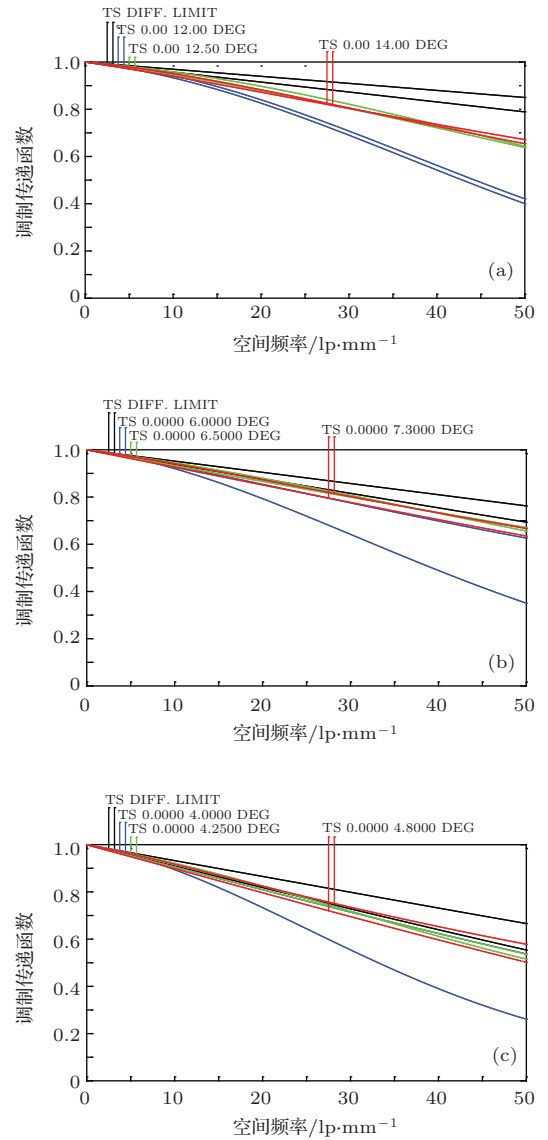


图6 (网刊彩色) 可见波段系统 MTF (a) $f'_1 = 15 \text{ mm}$; (b) $f'_2 = 30 \text{ mm}$; (c) $f'_3 = 45 \text{ mm}$

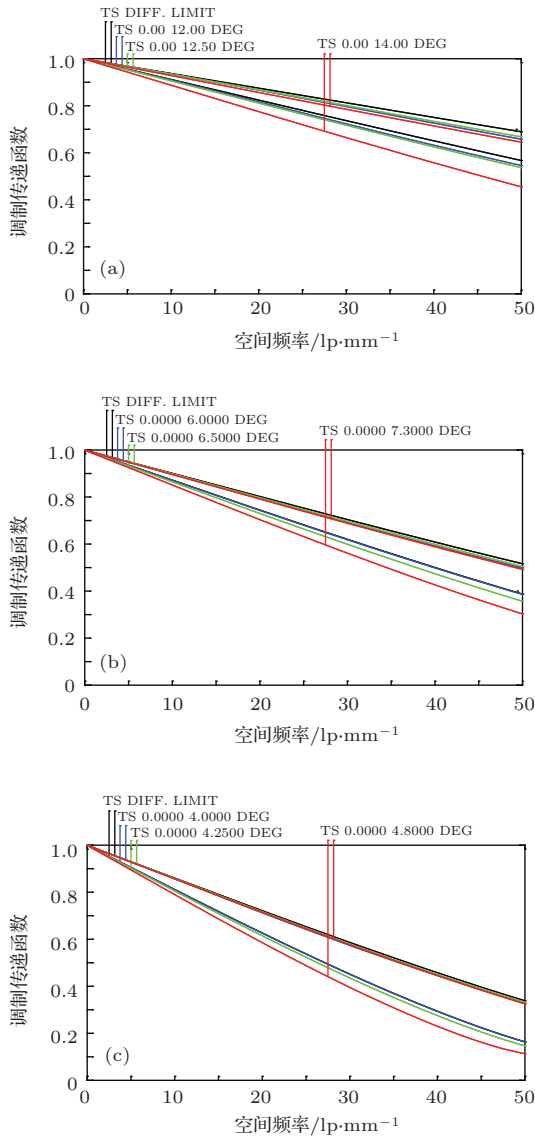


图7 (网刊彩色) 3—5 μm 红外波段系统 MTF (a) $f_1 = 15$ mm; (b) $f_2 = 30$ mm; (c) $f_3 = 45$ mm

4 结 论

本文进行了三反射主动变焦系统设计方法的研究, 推导了系统一阶特性光学参数的求解公式,

根据赛德尔像差理论、矢量像差理论以及非球面的初级像差理论, 进行了系统的优化设计. 系统设计实例的分析结果表明了通过系统中某个或某几个光学元件曲率半径的变化实现系统变焦方案的可行性, 同时验证了三反射主动变焦系统设计方法的有效性. 另外, 将共轴变焦系统与离轴系统设计结果进行对比, 指出了离轴主动变焦系统研究的重要性.

参考文献

- [1] Restaino, Wick D V, Martinez T, Payne D M, Gilbreath G C 2004 *Proceedings of SPIE* Bellingham, WA, October 20, 2004 p5491
- [2] Dong W H, Xie Y J, Li E L 2010 *Appl. Opt.* **31** 893 (in Chinese) [董伟辉, 谢永军, 李恩玲 2010 *应用光学* **31** 893]
- [3] Zhang Y 2012 *Ph. D. Dissertation* (Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [张鹰 2012 博士学位论文 (长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所)]
- [4] Jungwirth M E L, Wick D V, Dereniak E L 2012 *Opt. Eng.* **51** 083001
- [5] Wick D V, Martinez T 2004 *Opt. Eng.* **43** 8
- [6] Wick D V, Martinez T, Payne D M, Sweatt W C, Restaino S R 2005 *Proc. of SPIE* Bellingham, WA June 22, 2005 p151
- [7] Seidl K, Knobbe J, Gröger H 2009 *Appl. Opt.* **48** 4097
- [8] Hu S L, Zhao X, Dong W H, Xie Y J 2011 *Opt. Eng.* **50** 113001
- [9] Shi G W 2011 *Ph. D. Dissertation* (Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [史广维 2011 博士学位论文 (长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所)]
- [10] Yang X J, Wang Z Q, Mu G G, Fu R L 2005 *Acta Photon. Sin.* **34** 1658 (in Chinese) [杨新军, 王肇圻, 母国光, 傅汝康 2005 *光子学报* **34** 1658]

Design of the active zoom system with three-mirror*

Shen Ben-Lan¹⁾ Chang Jun^{1)†} Wang Xi¹⁾ Niu Ya-Jun¹⁾ Feng Shu-Long²⁾

1) (School of Opto-Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

2) (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

(Received 20 December 2013; revised manuscript received 5 April 2014)

Abstract

In the applications of deep-space exploration, surveillance, threat detection and high resolution investigation on the ground, space optical systems need not only both the high resolution and width of view zoom system, but also the small size, light weight, low power and fast focusing system. As the traditional mechanical zoom system requires complex and precision mechanical motion, many problems are usually caused. Thus, based on active optics, the active optical elements are applied to the imaging system, and it is proposed that the optical element curvature radius should be variable to realize the transition among the different focal lengths. According to third-order aberration theory and dimension calculation of optical system requirement, the active zoom theory is studied, and the third-order aberration equation constraints are confirmed. Then the initial construction parameters of coaxial active zoom system are achieved by solving the equations. The system is optimized with using the optical design software ZEMAX. The system consists of the static primary mirror, the secondary and third mirror with the variable curvature radius, and the plane mirror with zero-power. As two times the light is obscured by the elements in the coaxial active zoom system, the amount of the energy on the image plane will be affected. For this reason, it is proposed that the unobstructed off-axis optimization should be necessary to the coaxial system. The off-axis system design theory is studied and the off-axis active zoom system is designed.

Keywords: active zoom, third-order aberrations, three mirrors, optical design

PACS: 42.15.-i, 42.15.Dp, 42.15.Ed, 42.15.Fr

DOI: 10.7498/aps.63.144201

* Project supported by the Program for New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education of China (Grant No. 2012cx01017), the Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology, Beijing Institute of Technology, China (Grant No. 22050205).

† Corresponding author. E-mail: bitchang@bit.edu.cn