

多组全动型变焦系统新型设计

蔡 伟^{1,2} 张 鹰¹ 张 新¹ 伍雁雄¹ 张继真¹

¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光学系统先进制造技术中国科学院重点实验室, 吉林 长春 130033

² 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 为了寻找简单的多组全动型变焦系统的解算方法及降低全动型变焦距系统设计时对经验的过分依赖, 提出了一种全新的方法来计算系统组元的光焦度分配。以组元之间的间隔为初始量, 把组元的运动形式作为自由量, 通过计算公式求出满足间隔要求的光焦度分配和组元运动形式。该方法在一定程度上降低了变焦系统光焦度分配的难度, 更重要的是, 为探寻新的变焦运动方式提供了一种新的思路。在得到系统的光焦度分配之后又推导出一种求解系统组元移动曲线的简单方法。为了验证该方法的可行性, 设计了一个四组式全动型变焦系统。所设计系统优化后的光焦度分配值和计算的结果都很接近, 并且得到了组元的移动曲线, 从而验证了该方法的正确性。

关键词 光学设计; 变焦系统; 光焦度分配; 组元移动

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.0322008

New Method for All Movable Zoom Lens Design

Cai Wei^{1,2} Zhang Ying¹ Zhang Xin¹ Wu Yanxiong¹ Zhang Jizhen¹

¹ Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to get the simple computational formula for all movable zoom lens and reduce excessive dependence on designing experience of zoom lens, a new way to calculate optical-power distribution of zoom system is proposed. Taking the group spacing as initial parameter and the actions of components as independent variables, the corresponding optical-power distribution and actions of components which satisfy the constraint of group space is get. This method reduces the difficulty of optical-power distribution and it is more important it provides us with another way to find the new varifocal moving mode. After getting the power distribution, we also deduce a simple way to obtain actions of each component. In order to prove the feasibility of this method, a four movable component zoom lens is demonstrated and the calculation result agrees well with the optimized result.

Key words optical design; zoom system; optical power allocation; component action

OCIS codes 220.4830; 220.3620; 220.3630

1 引 言

近年来,随着变焦距光学系统光学设计理论的完善以及加工工艺的成熟,变焦距光学系统的种类日益丰富,成像质量逐渐提高,甚至可与定焦距系统相媲美,因此变焦在各种工作生活领域都有广泛的应用^[1]。多组全动型变焦系统无疑是变焦系统中的亮点,更是变焦系统中的难点。多组全动型变焦系

统的最大优点就是变焦系统的每个组元都可移动,这样便于实现系统的小型化,但是多组全动型变焦系统也是变焦系统里面的难点。日本的 Kazuo Tanaka 等专家曾利用高斯括号法对多组全动型变焦系统进行分析。Hayakawa^[2]曾在专利中设计出五组全动型变焦系统,该系统在满足指标要求前提下,大大减小了系统的结构尺寸。国内对变焦系统

收稿日期: 2011-08-05; **收到修改稿日期:** 2011-11-08

基金项目: 国家自然科学基金(091RIDS91)资助课题。

作者简介: 蔡 伟(1984—),男,博士研究生,主要从事变焦距系统设计方面的研究。E-mail: caiwei-1984@163.com

导师简介: 张 新(1968—),男,博士,研究员,主要从事成像、非成像光学系统的总体设计等方面的研究。

E-mail: optlab@ciomp.ac.cn

的研究起步稍晚一些,目前很难找到公开发表的多组全动型的设计实例。陶纯堪^[3]把放大倍率当作中间变量,推导出含有固定组元的多组运动型变焦系统的理论方程。该方法是在已知系统变倍补偿运动曲线的前提下运行的,并且在初始计算时需要根据经验对变倍补偿组元进行光焦度分配,这大大增加了在变焦系统设计过程中对经验的依赖性。目前国内对全动型变焦系统研究比较多的是北京理工大学,他们通过设置边界条件,利用序列二次规划算法求出满足条件的高斯解,并且通过焦距为 28~109 mm 单反相机镜头对理论进行了验证^[4~6]。这种方法可以求出比较合理的初始结构,在一定程度上降低了初始解的求解难度,但是其对探寻新的运动方式的局限性还是很大的,而且在计算过程中运算量也很大。

本文不同于传统的变焦系统的计算方式,通过各组元之间的距离来反推出系统各组元的光焦度及系统组元的运动形式。理论上可以求出满足任意给定值的光焦度分配和各组元的运动形式。这样既可以避免在光学设计时过分地依赖经验,又可以打破常规的设计思路。在求解出相应的光焦度分配之后便可求出各组元的移动曲线,然后通过组元的移动曲线来判别光焦度的分配是否合理,从而指导初始间隔的合理取值^[7]。

2 理论推导

为确定系统的光焦度值,需要知道两个变焦(zoom)位置的组元距离,及系统的后工作距离。G1,G2,⋯, Gm, Gn 分别表示组元 1,2,⋯, m, n, 计算过程中 zoom1 的参数意义如图 1 所示, zoom2 的位置参数意义与 zoom1 相同,不另作图,为方便区分,用相应的大写字母表示。其中 Φ_i 为组元 i 的光焦度; h_i 、 H_i 分别为组元 i 在不同焦距位置时的光线高度; d_{ij} 、 D_{ij} 分别为组元 i, j 在不同焦距位置时的主面间隔; u_i 、 U_i 分别为组元 i 的光线入射角; l_f 、 L_f 分别为不同焦距位置时的后工作距离。

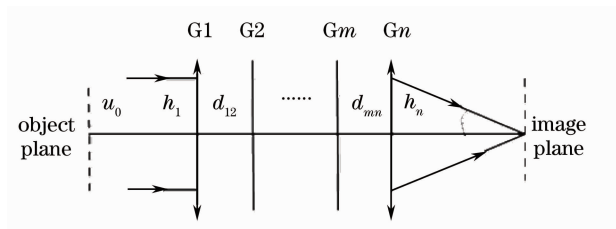


图 1 系统基本结构图

Fig. 1 Notation of zoom lens

2.1 四组式变焦系统光焦度分配推导

Zoom1	Zoom2	
$h_1 = h_0 - u_0 d_{01}$	$H_1 = H_0 - U_0 D_{01}$	
$u_1 = h_0 x + u_0$	$U_1 = H_0 x + U_0$	
$h_2 = h_1 - u_1 d_{12}$	$H_2 = H_1 - U_1 D_{12}$	
$h_4 = h_5 + u_4 l_f$	$H_4 = H_5 + U_4 L_f$	
$u_3 = u_4 - h_4 y$	$U_3 = U_4 - H_4 y$	
$h_3 = h_4 + u_3 d_{34}$	$H_3 = H_4 + U_3 D_{34}$	(1)
$u_2 = \frac{h_2 - h_3}{d_{23}}$	$U_2 = \frac{H_2 - H_3}{D_{23}}$	
$\Phi_2 = \frac{u_2 - u_1}{h_2}$	$\Phi_2 = \frac{U_2 - U_1}{H_2}$	
$\Phi_3 = \frac{u_3 - u_2}{h_3}$	$\Phi_3 = \frac{U_3 - U_2}{H_3}$	

设组元 G1 和 G4 的光焦度值分别为 x 和 y , 则由两个变焦位置的(1)式可将组元 G2 和 G3 的光焦度表示成 x 和 y 函数。

$$(\Phi_2)_0 = \frac{a_2 x + b_2 y + c_2}{d_2 x + e_2}, \quad (\Phi_2)_1 = \frac{A_2 x + B_2 y + C_2}{D_2 x + E_2},$$

$$(\Phi_3)_0 = \frac{a_3 x + b_3 y + c_3}{d_3 x + e_3}, \quad (\Phi_3)_1 = \frac{A_3 x + B_3 y + C_3}{D_3 x + E_3},$$

式中

$$a_2 = - \left(\frac{d_{12}}{d_{23}} + 1 \right) h_1$$

$$b_2 = \frac{d_{34}}{d_{23}} h_4$$

$$c_2 = \frac{h_1 - h_4 - d_{34} u_4}{d_{23}} - \left(\frac{d_{12}}{d_{23}} + 1 \right) u_0$$

$$d_2 = - h_1 d_{12}$$

$$e_2 = h_1 - u_0 d_{12}$$

$$A_2 = - \left(\frac{D_{12}}{D_{23}} + 1 \right) H_1$$

$$B_2 = \frac{D_{34}}{D_{23}} H_4$$

$$C_2 = \frac{H_1 - H_4 - D_{34} U_4}{D_{23}} - \left(\frac{D_{12}}{D_{23}} + 1 \right) U_0$$

$$D_2 = - H_1 D_{12}$$

$$E_2 = H_1 - U_0 D_{12}$$

$$a_3 = \frac{d_{12}}{d_{23}} h_1$$

$$b_3 = - \left(\frac{d_{34}}{d_{23}} + 1 \right) h_4$$

$$c_3 = \frac{h_4 - h_1 + u_4 d_{34} + d_{12} u_0}{d_{23}} + u_4$$

$$d_3 = - h_4 d_{34}$$

$$e_3 = h_4 + u_4 d_{34}$$

$$A_3 = \frac{D_{12}}{D_{23}} H_1$$

$$B_3 = - \left(\frac{D_{34}}{D_{23}} + 1 \right) H_4$$

$$C_3 = \frac{H_4 - H_1 + U_4 D_{34} + D_{12} U_0}{D_{23}} + U_4$$

$$D_3 = - H_4 D_{34}$$

$$E_3 = H_4 + U_4 D_{34}$$

在变焦过程中 G2 和 G3 的光焦度不变即

$$(\Phi_2)_0 = (\Phi_2)_1, \quad (2)$$

$$(\Phi_3)_0 = (\Phi_3)_1. \quad (3)$$

将(2)式和(3)式连立起来可到关于组元 G1 光焦度 x 的一元四次函数

$$k_1 x^4 + k_2 x^3 + k_3 x^2 + k_4 x + k_5 = 0. \quad (4)$$

由(1)~(4)式可以求出满足任意给定初始值的光焦度分配值,具体表达式为

$$\Phi_1 = x, \quad \Phi_2 = \frac{a_2 x + b_2 y + c_2}{d_2 x + e_2},$$

$$\Phi_3 = \frac{a_3 x + b_3 y + c_3}{d_3 x + e_3}, \quad \Phi_4 = y.$$

2.2 四组全动型变焦系统组元移动曲线分析

在一般的变焦系统中为了控制移动组元,常用的方法有三种:1)丝杠的方法;2)常用的凸轮形式;3)用精密的程序控制,但是不管用哪种方法都需要求出在焦距连续变化的同时移动组元的位置。利用上述方法得到光焦度分配之后又推导出了一套简单的求解移动组元位置的方法。

由(1)式可知。当从物方开始推导时可求解出任意焦距时 G3 的光线高度 h_{31} ,同理从像面位置开始推导时可得到解出任意焦距时 G3 的光线高度 h_{32} ,此时 $h_{31} = h_{32}$ 可得到如下方程(由于篇幅原因,推导过程就不详细列出,只将最终推导出的方程列出)

$$\frac{l_f + d_{34}(1 - l_f \Phi_4)}{2F^\#} = h_1 - d_{23} h_1 (\Phi_1 + \Phi_2) - d_{12} h_1 \Phi_1 + d_{12} d_{23} h_1 \Phi_1 \Phi_2. \quad (5)$$

同理可求出 G3 的物距 $l_{31} = l_{32}$,求得如下方程

$$\frac{f_2(f_1 - d_{12}) - d_{23}(f_1 + f_2 - d_{12})}{f_1 + f_2 - d_{12}} = \frac{f_3 \left[\frac{f_4 l_f + d_{34}(f_4 - l_f)}{f_4 - l_f} \right]}{f_3 - \left[\frac{f_4 l_f + d_{34}(f_4 - l_f)}{f_4 - l_f} \right]}. \quad (6)$$

又因为系统的焦距为 $F = f_1 m_2 m_3 m_4$ 可求得如下方程

$$F = f_1 \left(\frac{f_2}{f_1 + f_2 - d_{12}} \right) \times \left\{ \frac{f_3 - \left[\frac{f_4 l_f + d_{34}(f_4 - l_f)}{f_4 - l_f} \right]}{f_3} \right\} \left(\frac{f_4 - l_f}{f_4} \right), \quad (7)$$

式中 $F^\#$ 为系统的 F 数; l_f 为系统的后工作距离; F 为系统的整体焦距; f_m 为系统 G_m 的组元焦距; d_{mn} 为系统 G_m 和 G_n 之间的主面距离。

在多组全动型变焦系统中,像面固定不变,在不失一般性的前提下,可假设最后一个组元做线性变化,及 l_f 线性变化,这样在 l_f 、 F 线性变化的同时三个方程解三个未知数,即可求出在任意 l_f 和 F 前提下系统各移动组元的位置。

3 对四组全动型变焦系统进行分析

为了验证本文推论的正确性,作者阅读了大量文献^[8~20],并且最终用该方法设计了一个四组全动型变焦系统。在具体计算时作者先给定长焦和短焦时各个组元之间的间隔,根据本文所推导的公式可求出满足该给定间隔的各组元光焦度值,再根据中间要求组元的焦距及后截距及可求出各个中间焦距值的组元间隔,从而确定系统的初始结构参数。或者是假设任意两个焦距为一组,分别计算出满足该组要求的光焦度分配,然后再把所求的光焦度分配当作已知量取求其他组元的值,通过反复迭代也可以得到比较合理的初始解。所设计镜头具体参数

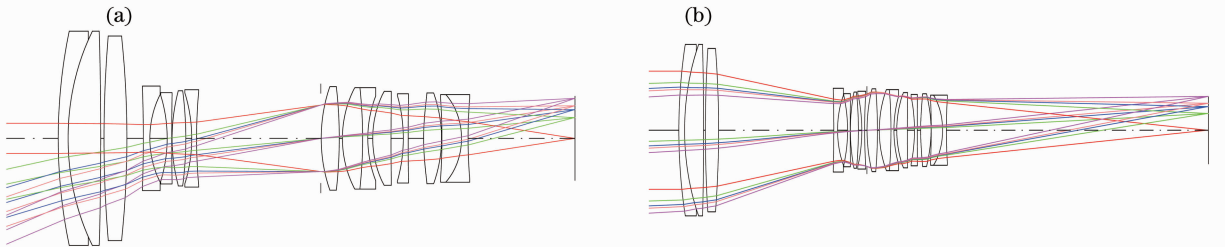


图 2 系统结构图。(a) $F=30$ mm; (b) $F=300$ mm

Fig. 2 Structure charts of the system. (a) $F=30$ mm; (b) $F=300$ mm

为焦距 $F = 30 \sim 300$ mm, F 数为 $3.5 \sim 6.5$, 视场 $2\omega = 40.27^\circ \sim 4.2^\circ$. 表 1, 2 分别为输入值、计算值和优化值。图 2~5 分别为系统结构图、组元移动曲线、系统像差曲线和调制传递函数(MTF)曲线。

表 1 输入的参数值

Table 1 Input parameters

Input parameters	d_{12}	d_{23}	d_{34}	l_f
Long focal length /mm	75	2	17	120
Short focal length /mm	15	25	25	50

表 2 计算值和优化后值对比

Table 1 Comparison between calculated and optimized values

	$F(G1)$	$F(G2)$	$F(G3)$	$F(G4)$
Calculated /mm	114.94	-16.30	33.83	81.03
Optimized /mm	144.92	-24.21	42.61	69.88

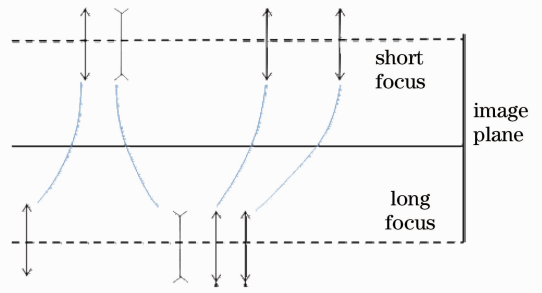


图 3 组元移动曲线

Fig. 3 Curves of component moving

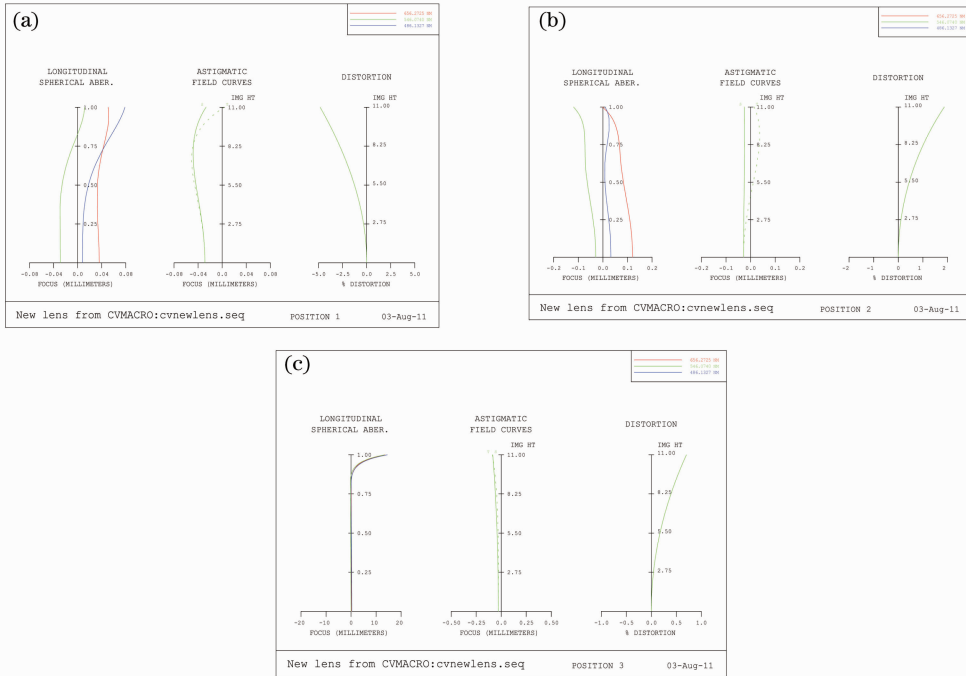


图 4 系统像差曲线。(a)短焦；(b)中焦；(c)长焦

Fig. 4 Aberration plot of the system. (a) Short focus; (b) middle focus; (c) long focus

4 结 论

本文提出一种计算光焦度分配非常简单而有效的方法。通过设定组元之间的间隔可以求解出系统的光焦度分配和系统不同的运动形式。同时,推导出的一组计算系统间隔的方程组,通过求解该线性方程组得到任意焦距下系统的组元间距,从而得到系统的移动曲线。

参 考 文 献

1 Zhao Shunlong, Wang Zhaoqi. Design of an ultralight and compact hybrid refractive-diffractive projection lens of head-

mounted projective displays [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 249~253
 赵顺龙, 王肇圻. 超轻小型投影式头盔显示系统折衍混合物镜设计[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2): 249~253
 2 S. Hayakawa. Zoom lens system; US, 7280286 B2[P]. 2007-10-09
 3 Tao Chuncan. Zoom Focus Optics System Design [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988
 陶纯勤. 变焦距光学系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988
 4 Wang Qi, Wu Qiang, Huang Huijie *et al.*. Gaussian optics of zoom lens with all lens elements movable[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(6): 830~834
 王 琦, 吴 强, 黄慧杰 等. 多组元全动型变焦距物镜高斯光学[J]. *光学学报*, 1999, **19**(6): 830~834

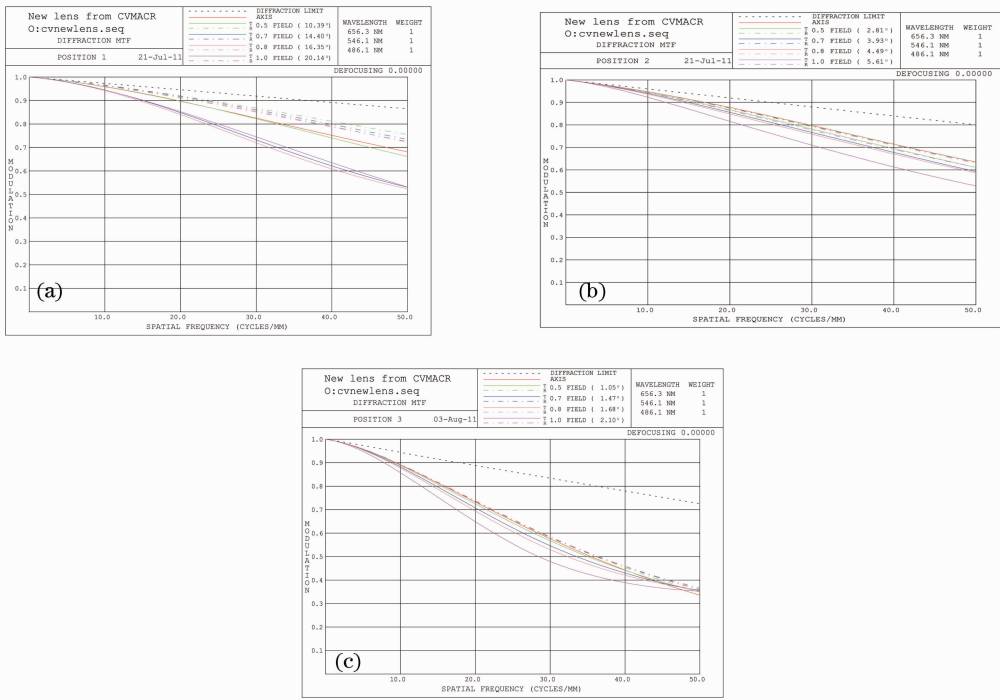


图 5 系统 MTF 曲线。(a)短焦；(b)中焦；(c)长焦

Fig. 5 MTF plot of the system. (a) Short focus; (b) middle focus; (c) long focus

5 Li Lin, Wang Yongtan, Zhang Liqin. An approach on the calculation of Gaussian parameters of zoom lenses [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2003, **23**(4): 424~427
 李 林, 王涌天, 张丽琴. 变焦距物镜高斯光学参数的求解[J]. *北京理工大学学报*, 2003, **23**(4): 424~427

6 Wang Qi, Wang Guangyu, Cheng Xuemin *et al.*. Gauss optics of zoom lenses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 983~988
 王 琦, 王光宇, 程雪岷 等. 变焦距镜头高斯光学设计的新方法[J]. *光学学报*, 2002, **22**(8): 983~988

7 Cai Wei, Zhang Xin, Feng Xiuheng *et al.*. Compensating modes for zoom system [J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2011, **19**(9): 2063~2071
 蔡 伟, 张 新, 冯秀恒 等. 变焦距系统的变倍补偿方式[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(9): 2063~2071

8 Li Xuyang, Li Yingcai, Ma Zhen *et al.*. Optical system design of space camera with large F number and long focal length[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2093~2097
 李旭阳, 李英才, 马 臻 等. 大 F 数长焦距空间相机光学系统设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2093~2097

9 He Yinghong, Ma Zhen, Zhao Baochang *et al.*. Optical system design of space sensor with two long focal length lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 3027~3033
 贺应红, 马 臻, 赵葆常 等. 实现两档长焦距的空间遥感光学系统设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 3027~3033

10 Lu Qiang, Ji Yiqun, Shen Weimin. Design of a fore continual zoom system with high speed[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2674~2679
 陆 强, 季轶群, 沈为民. 大相对孔径连续变焦前置物镜的光学设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2674~2679

11 Xu Weicai, Huang Wei. Innovated lens design for catadioptric zoom system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0622005

许伟才, 黄 玮. 新型折反射式连续变焦系统设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 0622005

12 Xu Liang, Zhang Guoyu, Gao Yujun *et al.*. Design of $8 \times$ uncooled thermal infrared hybrid refractive-diffractive continuous-zoom lenses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 478~481
 徐 亮, 张国玉, 高玉军 等. 8 倍非制冷型红外折/衍射连续变焦系统设计[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 478~481

13 Wang Chunyan, Wang Zhijian, Zhou Qingcai. Solving the cam curve of the compensating group about zoom lens using dynamic optical theory[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

14 L. Bergstein. General theory of optically compensated varifocal systems[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1958, **48**(3): 154~168

15 R. J. Pegis, W. G. Peck. First-order design theory for linearly compensated zoom systems[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1962, **52**(8): 905~909

16 T. H. Jamieson. Thin-lens theory of zoom systems[J]. *Optica Acta*, 1970, **17**(8): 565~584

17 K. Yamaji. Design of Zoom Lenses[M]. E. Wolf. *Progress in Optics* (Vol. 6). New York: North-Holland Publishing Company, 1967: 105~170

18 K. Tanaka. Paraxial analysis of mechanically compensated zoom lenses. 1: Four-component type[J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(12): 2174~2183

19 T. Kryszczyński. Paraxial determination of the general four-component zoom system with mechanical compensation [C]. *SPIE*, 1995, **2539**: 180~191

20 T. Ito. Zoom lens system [P]; US, 2005/0083584 A1[P]. 2005-4-21

栏目编辑: 谢 婧