

文章编号 1004-924X(2011)09-2063-09

## 变焦距系统的变倍补偿方式

蔡伟<sup>1,2</sup>, 张新<sup>1\*</sup>, 冯秀恒<sup>1</sup>, 王灵杰<sup>1</sup>, 张建萍<sup>1</sup>, 何锋赞<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**为了寻找新的变倍补偿方式并降低设计变焦距系统时对经验的过分依赖,提出了一种光焦度分配及变焦补偿方法。首先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。这种方法在一定程度上降低了变焦系统光焦度分配的难度,同时为探寻新的变焦运动方式提供了新的思路。为了验证该方法的可行性,以三组式变焦系统为例,在同一指标下得到了4种不同的变焦运动方式。比较几种运动形式后认为三组全动型变焦方式为最优变焦方式。计算结果表明,得到的4种变焦方式的计算结果和优化后的结果都很接近,验证了该方法的准确性。

**关键词:**光学设计;光焦度分配;变焦系统;三组式变焦

**中图分类号:** TN216; TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111909.2063

## Compensating modes for zoom system

CAI Wei<sup>1,2</sup>, ZHANG Xin<sup>1\*</sup>, FENG Xiu-heng<sup>1</sup>, WANG Ling-jie<sup>1</sup>,  
ZHANG Jian-ping<sup>1</sup>, HE Feng-yun<sup>1</sup>

(1. *Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*  
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: optlab@ciomp.ac.cn*

**Abstract:** In order to arrive a new compensation mode that reduces the dependence on design experience for a zoom lens, a way for power allocation and compensation is proposed. Taking the group space as initial parameters, we can determine the corresponding power allocation and actions of each component. This method helps to reduce the difficulty of power allocation and provides different ways to find the new compensation mode. In order to test the feasibility of this method, we use a three-component zoom lens for the same target with four different moving modes. The experiment results indicate that an all-movable mode is the optimum mode and theoretical results approach this optimum.

**Key words:** optical design; power allocation; zoom system; three-component zoom system

## 1 引言

近年来,随着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,其应用涉及各种领域,设计和加工都受到相关人员的极大关注<sup>[1-4]</sup>。在变焦系统的设计过程中,高斯光学参数的求解直接影响最后的成像质量,早期的研究工作已利用高斯括号和连分数法给出了光学补偿法全补偿点分布与系统高斯参数之间的关系<sup>[5-7]</sup>,对机械补偿变焦系统也有很全面的资料介绍<sup>[8]</sup>。常规的变焦系统可划分为:正组补偿、负组补偿、双组联动及多组联动或多组全动形式。不管设计哪种变焦系统,解系统的初始结构时都要先确定系统的光焦度分配。而在求变焦系统过程中,系统各组元光焦度的分配一直被认为是求解初始结构的重点和难点。能否合理地进行光焦度分配直接决定了所设计系统是否合理。现在绝大部分光学设计者在设计变焦系统时都是根据多年的经验在既定的运动形式下进行光焦度取值,这对于传统的正组补偿和负组补偿等简单形式的变焦系统来说是可行的,但是多组元运动或者全动型变焦系统都很难依靠经验对各组元进行光焦度分配,而且这种方法不利于探寻新的组元移动方式。本文突破了传统的变焦系统的计算方式,提出通过各组元之间的距离来反推出系统各组元光焦度的方法。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,该方法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,不仅适合传统的正组补偿、负组补偿,也适合复杂的多组运动形式甚至是多组全动形式,对寻找新的变焦运动方式很有益处。

## 2 理论推导

为确定系统的光焦度值,需要知道两个 Zoom 位置的组元间距,及系统的后工作距离,把计算公式的推导分为三组式和四组式进行<sup>[9-11]</sup>。计算过程中参数的意义见图 1。

### 2.1 三组式变焦系统

设组元  $G_1$  和  $G_3$  的光焦度值分别为  $x$  和  $y$ ,

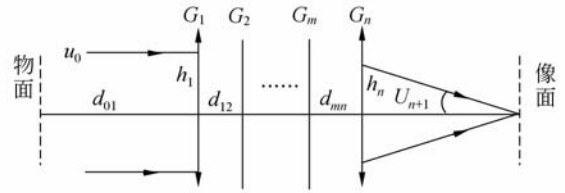


图 1 变焦系统示意图

Fig. 1 Notation of zoom lens

则由两个变焦位置的方程式(1)可将  $G_2$  组元的光焦度表示成  $x$  和  $y$  函数。在两个不同的变焦位置时  $G_2$  的光焦度不变,因此整理可得式(2)。

Zoom 1	Zoom 2
$u_1 = u_0' = h_1 \phi_1 + u_0$	$U_1 = U_0' = H_1 \phi_1 + U_0$
$h_1 = h_0 - u_1 d_{01}$	$H_1 = H_0 - U_1 D_{01}$
$u_2 = u_1' = h_1 \phi_1 + u_1$	$U_2 = U_1' = H_1 \phi_1 + U_1$
$h_2 = h_1 - u_2 d_{12}$	$H_2 = H_1 - U_2 D_{12}$
$u_3 = u_2' = h_2 \phi_2 + u_2$	$U_3 = U_2' = H_2 \phi_2 + U_2$
$h_3 = h_2 - u_3 d_{23}$	$H_3 = H_2 - U_3 D_{23}$
$u_4 = u_3' = u_3 + h_3 \phi_3$	$U_4 = U_3' = U_3 + H_3 \phi_3$
$h_4 = h_3 - u_3' d_{34}$	$H_4 = H_3 - U_3' D_{34}$
$\Phi_2 = \frac{u_3 - u_2}{h_2}$	$\Phi_2 = \frac{U_3 - U_2}{H_2}$

$$P(x, y) = p_1 x^2 + p_2 x + p_3 xy + p_4 y + p_5 = 0, \quad (2)$$

其中  $p_1, p_2, p_3, p_4, p_5$  是关于  $h_2, u_i', l_{fi}', d_{i+1}$  的函数。

另外由薄透镜之间的传递公式可得到  $x$  和  $y$  的另一关系式如式(3):

$$y = \frac{d_{12} \cdot h_1 \cdot x + u_3' \cdot d_{23} + h_3 - h_1}{d_{23} \cdot h_3}, \quad (3)$$

由式(2)和式(3)即可得到满足任意给定初始间距和系统总焦距的光焦度分配值。

### 2.2 三组式变焦系统的换根问题

在变焦过程中,当系统的变倍组的放大倍率越过  $-1$  时,为了使系统不出现断点,需要考虑换根问题。假设用上述理论已求得 3 个组元之间的光焦度。假设组元  $G_2$  为变倍组(组元  $G_1$  运动,  $G_2$  不动的情况可等效为,组元  $G_1$  不动,  $G_2$  向相反的方向运动),取长焦和短焦分别为 Zoom 1 和 Zoom 2,计算出组元  $G_2$  在两个 Zoom 位置的放大倍率。

如果  $m_{2l} < -1$ , 且  $m_{2s} > -1$ , 即变倍组越过  $-1$  倍时则需要考虑换根问题。

换根的条件如下<sup>[4]</sup>:

$$\begin{cases} m_2 = \frac{f_2'}{f_2 + f_1 - d_{12}} = -1 \\ m_3 = \frac{f_3'}{f_3 + \frac{f_2'}{f_2 + f_1 - d_{12}} \cdot (f_1 - d_{12}) - d_{23}} = -1 \end{cases}$$

即可求出满足换根条件的组元之间的间隔

$$\begin{cases} d_{12} = 2 \cdot f_2 + f_1 \\ d_{23} = 2 \cdot (f_2 + f_3) \end{cases}$$

式中  $m$  为系统组元的垂轴放大倍率,  $d$  为系统组元的主面间隔。求出满足换根条件的组元之间的间隔, 然后在这个组元间距的基础上再进行组元间隔取值, 即可避免变焦过程中出现断裂现象。

### 2.3 四组式变焦系统

设组元  $G_1$  和  $G_4$  的光焦度分别为  $x$  和  $y$ 。

$$\begin{cases} (\Phi_2)_0 = \frac{a_2x + b_2y + c_2}{d_2x + e_2} & (\Phi_2)_1 = \frac{A_2x + B_2y + C_2}{D_2x + E_2} \\ (\Phi_3)_0 = \frac{a_3x + b_3y + c_3}{d_3x + e_3} & (\Phi_3)_1 = \frac{A_3x + B_3y + C_3}{D_3x + E_3} \end{cases}$$

其中  $a, b, c, d, A, B, C, D$  是关于  $h_i, u_i', l_{fi}', d_{i+1}$  的函数。同理, 将  $G_2$  和  $G_3$  的光焦度表示成  $x$  和  $y$  的函数, 得到下式

$$P(x, y) = p_1x^2 + p_2x + p_3xy + p_4y + p_5 = 0, \quad (4)$$

$$Q(x, y) = q_1x^2 + q_2x + q_3xy + q_4y + q_5 = 0, \quad (5)$$

其中  $p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, q_1, q_2, q_3, q_4, q_5$  是关于  $h_i, u_i', l_{fi}', d_{i+1}$  的函数。

由式(4)和(5)可以求出满足任意给定初始值的光焦度分配值, 具体表达式如下:

$$\begin{cases} \Phi_1 = x & \Phi_2 = \frac{a_2x + b_2y + c_2}{d_2x + e_2} \\ \Phi_3 = \frac{a_3x + b_3y + c_3}{d_3x + e_3} & \Phi_4 = y \end{cases}$$

### 2.4 多组式变焦系统

多组式变焦系统和三组式, 四组式的计算方法是一样的, 三组式和四组式是设第一个组元和最后一个组元的光焦度为  $x, y$ , 五组式变焦系统则可以设第一组元和最后两组元别为  $x, y, z$ , 这样同样可以得到 3 个高次方程组, 同样可以解出不同的运动方式的解。但是多组式变焦系统在求解时比较复杂, 因为这些高次方程组会产生很多根, 并产生很多种运动方式, 因此在对每组根进行

取舍时需要根据实际情况, 得到满足条件的运动方式和高斯解。

## 3 三组式变焦系统的分析

为了验证本文推论的正确性, 作者通过不同的取值得到了三组式变焦系统的 4 种运动形式, 为了使本计算结果更具有说服力, 对这 4 种不同运动形式都取一样的指标参数(焦距:  $F = 50 \sim 200$  mm,  $F\# : 4 \sim 5.6$ , 视场:  $2\omega = 40 \sim 10^\circ$ ), 而且各组元所采用的结构形式也是基本一致的。在具体计算时, 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即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。

### 3.1 运动方式一

在变焦过程中组元  $G_2$  固定不变, 组元  $G_1$  和  $G_3$  之间独立运动, 实现变焦和相互补偿像面, 从而实现系统的连续变焦。系统的结构图和运动方式如图 2, 图 3 所示。所设计光学系统基本参数如表 1 所示。

表 1 运动方式一的计算结果

Tab. 1 Results of moving mode 1

参数	计算值	优化后的值
$F(G_1)$	131.578 9	159
$F(G_2)$	-27.657	-33.261
$F(G_3)$	32.051 3	33.961 1
$d_{12}$ (长焦)	70	77.615 4
$d_{23}$ (长焦)	5	-3.367 4
$L_f$ (长焦)	105	96.413 9
$d_{12}$ (中焦)	48.262 4	46.232 6
$d_{23}$ (中焦)	14.756 3	13.367 4
$L_f$ (中焦)	90	77.555 1
$d_{12}$ (短焦)	20	13.115 4
$d_{23}$ (短焦)	30	22.774 9
$L_f$ (短焦)	75	70.189 9

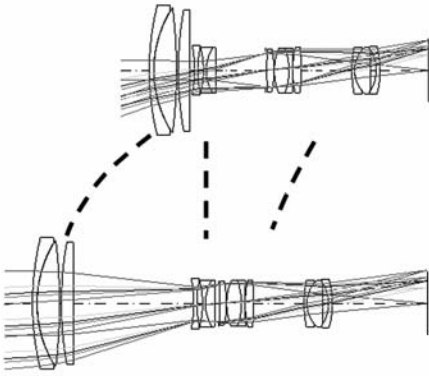
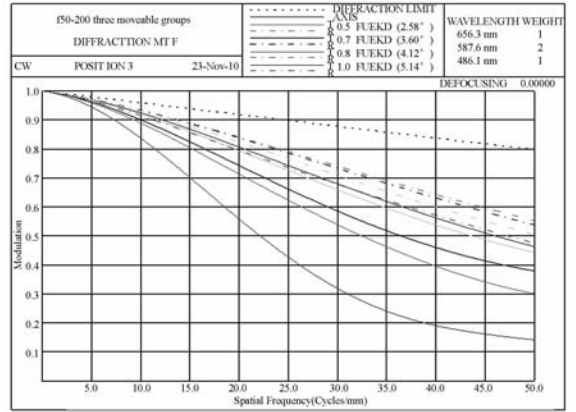


图 2 系统的结构图及运动方式

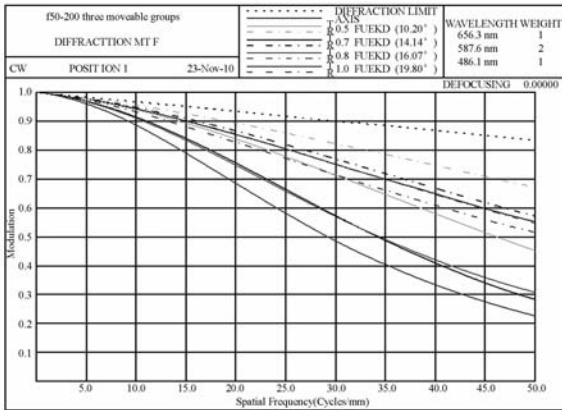
Fig. 2 Structure chart and moving mode of system



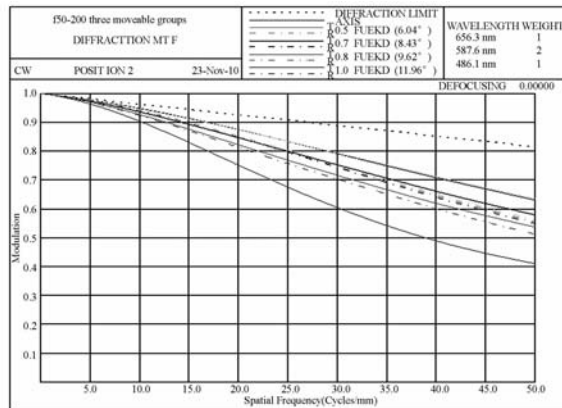
(c)  $F=200$  mm

图 3 系统的 MTF 和像差曲线

Fig. 3 MTF and aberration plot for system



(a)  $F=50$  mm



(b)  $F=85$  mm

### 3.2 运动方式二

在变焦过程中组元  $G_3$  固定不变, 组元  $G_1$  和  $G_2$  在变焦过程中独立运动, 实现变焦和相互补偿像面。所设计光学系统基本参数如表 2 所示, 结构形式及传递函数如图 4, 图 5 所示。

表 2 运动方式二的计算结果

Tab. 2 Results of moving mode 2

参数	计算值	优化后的值
$F(G_1)$	151.515 2	156.935 0
$F(G_2)$	-35.362	-39.255 7
$F(G_3)$	44.052 9	46.959 4
$d_{12}$ (长焦)	90	90.911 6
$d_{23}$ (长焦)	7.5	4.259 1
$L_f$ (长焦)	88	86.863 9
$d_{12}$ (中焦)	63.521 1	56.061 2
$d_{23}$ (中焦)	29.995 9	37.991 6
$L_f$ (中焦)	88	86.838 7
$d_{12}$ (短焦)	12	12.811 6
$d_{23}$ (短焦)	38	48.174 0
$L_f$ (短焦)	88	86.933 9

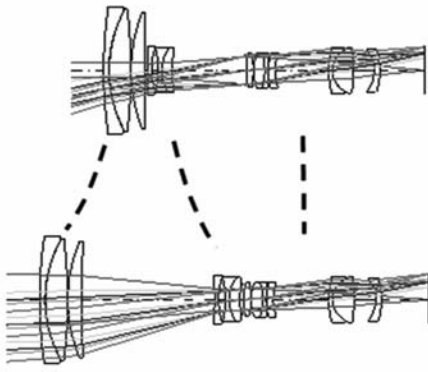
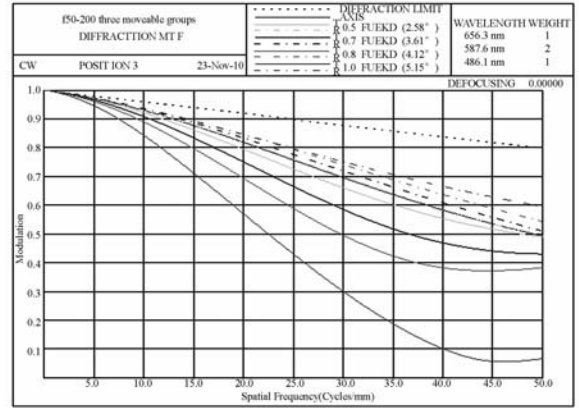


图 4 系统的结构图及运动方式

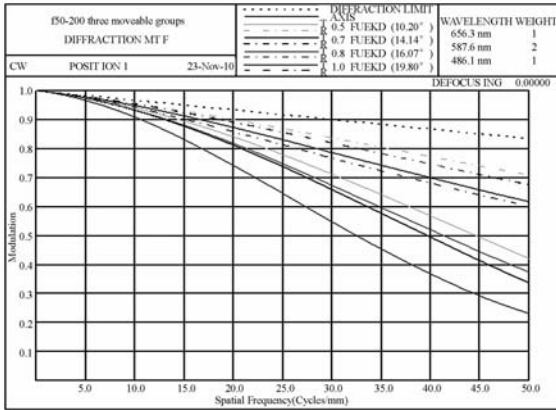
Fig. 4 Structure chart and moving mode of system



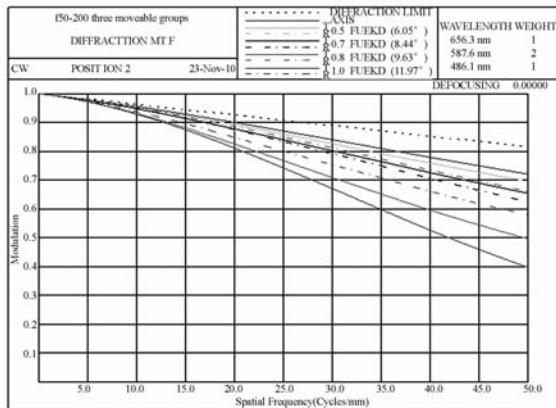
(c)  $F=200$  mm

图 5 系统的 MTF 和像差曲线

Fig. 5 MTF and aberration plot for system



(a)  $F=50$  mm



(b)  $F=85$  mm

### 3.3 运动方式三

在变焦过程中组元  $G_1$  固定不变,组元  $G_2$  和  $G_3$  在变焦过程中独立运动,实现变焦和相互补偿像面,从而实现系统的连续变焦。所设计光学系统基本参数如表 3 所示,结构形式及传递函数如图 6,图 7 所示。

表 3 运动方式三的计算结果

Tab. 3 Results of moving mode 3

结果 e 参数	计算值	优化后的值
$F(G_1)$	151.215 2	141.192 3
$F(G_2)$	-44.332 3	-50.692 5
$F(G_3)$	53.191 5	50.398 2
$d_{12}$ (长焦)	65	45.918
$d_{23}$ (长焦)	5	-17.479 2
$L_f$ (长焦)	120	113.181 9
$d_{12}$ (中焦)	55.649 9	27.865 8
$d_{23}$ (中焦)	40.053 4	22.668 9
$L_f$ (中焦)	94	90.091 0
$d_{12}$ (短焦)	15	6.624 5
$d_{23}$ (短焦)	75	55.081 8
$L_f$ (短焦)	90	79.928 2

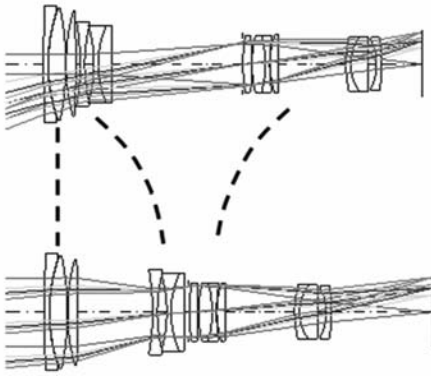
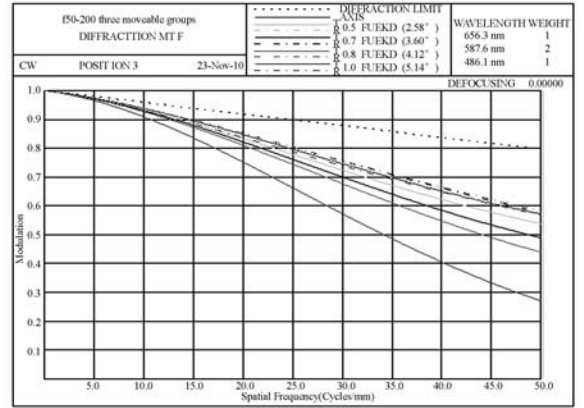


图 6 系统的结构图及运动方式

Fig. 6 Structure chart and moving mode of system



(c)  $F=200$  mm

图 7 系统的 MTF 和像差曲线

Fig. 7 MTF and aberration plot for system

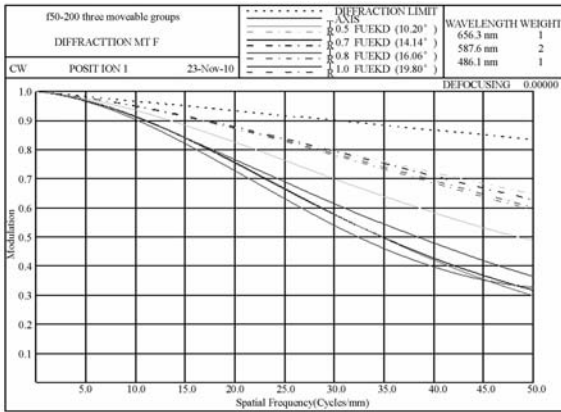
### 3.4 运动方式四

在变焦过程中组元  $G_1$ 、 $G_2$  和  $G_3$  独立运动，实现变焦和相互补偿像面，从而实现系统的连续变焦。所设计光学系统基本参数列表和结构如表 4 所示，结构形式及传递函数如图 8, 图 9 所示。表 5 为几种形式之间参数的比较，可以看出三组元全动型的运动方式是这几种方式中最优的。

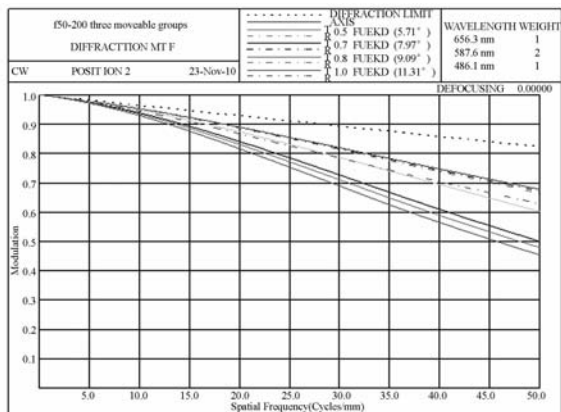
表 4 运动方式四的计算结果

Tab. 4 Results of moving mode 4

参数	计算值	优化后的值
$F(G_1)$	140.845 1	140.021 6
$F(G_2)$	-42.206 8	-41.333 6
$F(G_3)$	53.206 8	41.674 4
$d_{12}$ (长焦)	70	56.898 4
$d_{23}$ (长焦)	5	-12
$L_f$ (长焦)	105	101.856 9
$d_{12}$ (中焦)	48.262 4	36.51
$d_{23}$ (中焦)	14.756 3	18.131 3
$L_f$ (中焦)	90	79.930 8
$d_{12}$ (短焦)	18	13.51
$d_{23}$ (短焦)	40	36.547 4
$L_f$ (短焦)	90	72.341 3



(a)  $F=50$  mm



(b)  $F=85$  mm

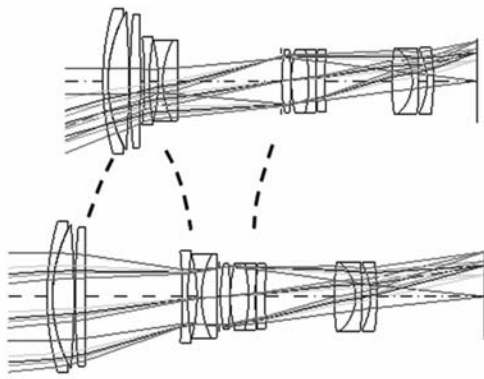
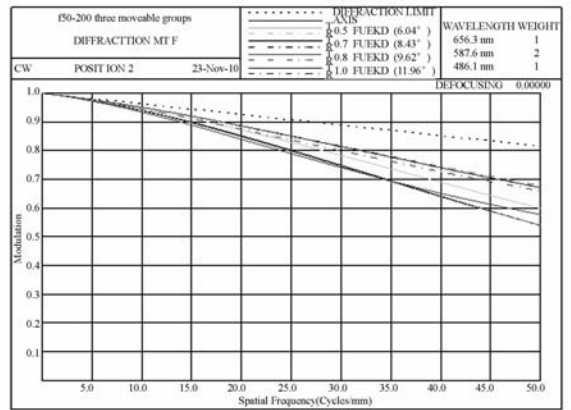
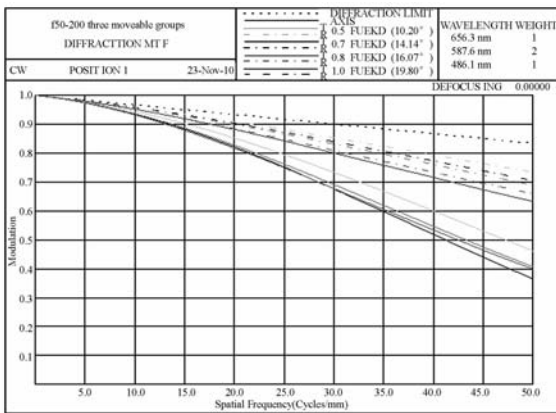


图 8 系统的结构图及运动方式

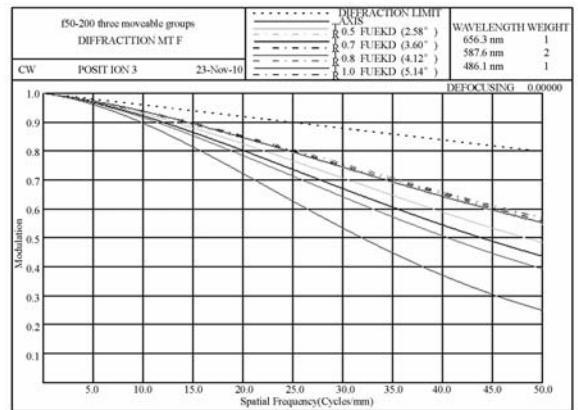
Fig. 8 Structure chart and moving mode of system



(b)  $F=85$  mm



(a)  $F=50$  mm



(c)  $F=200$  mm

图 9 系统的 MTF 和像差曲线

Fig. 9 MTF and aberration plots for system

表 5 四种形式的对比

Tab. 5 Contrast of four different modes

运动方式	系统总长(mm)		前片口径 (mm)	后工作距离(mm)		成像质量	综合
	长焦	短焦		长焦	短焦		
1	155.12	223.80	35.07	96.413 9	70.189 9	一般	一般
2	200	235.014 4	44.22	86.863 9	86.933 9	一般	一般
3	215	215	29.31	113.181 9	79.928 2	较好	较好
4	180.745 8	205	29.46	101.856 9	72.341 6	较好	最好

## 4 结 论

阐述了一种简单有效的计算光焦度方法,该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。在同一指标

下,可以通过该方法计算出不同的光焦度分配形式以及不同的变焦移动形式,从而通过比较选取满足不同要求的结果。通过几种形式的对比可以看出,三组元全动型的运动方式是这几种方式中最优的,在同一指标下,三组全动型可以在实现高

像质的同时更容易实现系统的小型化。同理在四组式甚至是多组式中,也可以尝试多组全动型的

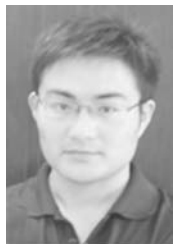
运动方式,这将为实现系统的小型化起到重要的作用。

### 参考文献:

- [1] 郜洪云,熊涛,杨长城. 中波红外连续变焦光学系统[J]. 光学精密工程,2007,15(7):1038-1043.
- GAO H Y, XIONG T, YANG C C. Middle infrared continuous zoom optical system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(7): 1038-1043. (in Chinese)
- [2] 孙强,王肇圻,李凤友,等. 红外 3.2~4.5  $\mu\text{m}$  短折衍射望远镜系统的见热差设计[J]. 光学精密工程,2001,10(2):121-124.
- SUN Q, WANG ZH Q, LI F Y, *et al.*. Design on the thermal infrared diffractive/refractive optical system in 3.2~4.5  $\mu\text{m}$  [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(2): 121-124. (in Chinese)
- [3] 李锐钢,郑立功,薛栋林,等. 大口径高次、离轴非球面干涉测量中投影畸变的标定方法[J]. 光学精密工程,2006,14(4):533-538.
- LI R G, ZHENG L G, XUE D L, *et al.*. Calibration method for projection distortion in interferometric testing high order and off-axis aspheric surface with big aperture [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 533-538. (in Chinese)
- [4] 薛栋林,郑立功,王淑平,等. 离轴二次非球面补偿检验计算机辅助调整技术研究[J]. 光学精密工程,2006,14(3):380-385.

- XUE D L, ZHENG L G, WANG SH P, *et al.*. Research on off-axis conic asphere null testing using computer-aided alignment method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 380-385. (in Chinese)
- [5] BERGSTEIN L. General theory of optically compensated varifocal systems [J]. 1958, 48(3): 154-171.
- [6] PECK W G. First-order design theory for linearly compensated zoom systems [J]. *OSA*, 1962, 52(8): 905-911.
- [7] JAMSON T H. Thin 2 lens theory of zoom systems [J]. *OSA*, 1970, 17(8): 565-584.
- [8] 陶纯勤. 变焦距光学系统 [M]. 北京:国防工业出版社.
- TAO CH K. *Zoom Optical System Design* [M]. Beijing: Defense Industry Publishing House.
- [9] YAMAJI K. Design of zoom lenses [J]. *Progress in Optics*, 1967, 6: 105-170.
- [10] TANAKA K., paraxial analysis of mechanically compensated zoom lenses 1: Four-component type [J]. *Applied Optics*, 1982, 21(12): 2174-2183.
- [11] TADEUSZ K R. paraxial determination of the general four-component zoom system with mechanical compensation [J]. *SPIE*, 1995, 2539: 180-191.

### 作者简介:



蔡伟(1984—),男,江苏徐州人,博士研究生,主要从事光学系统设计的研究。E-mail: caiwei-1984@163.com



冯秀恒(1938—),男,吉林长春人,高级工程师。



**王灵杰**(1979—),男,江苏金坛人,助理研究员,2002年于天津大学获得学士学位,2007年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事现代光学技术及红外光电系统性能的研究。E-mail: wanglingjie@126.com



**张建萍**(1974—),女,黑龙江佳木斯人,副研究员,1998年于长春光机学院获得学士学位,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: zhangjp-yey@163.com



**何锋贇**(1978—),男,浙江丽水人,副研究员,2000年于北京理工大学获得学士学位,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: hefy\_78@163.com

#### 导师简介:



**张 新**(1968—),男,吉林人,研究员,博士生导师,1991年于清华大学获得学士学位,1994年、2005年于中科院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位,现为中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室副主任,主要从事成像、非成像光学系统总体设计方面的研究。E-mail: optlab@ciomp.ac.cn

(本栏目编辑:严 寒)

#### ●下期预告

## 镀膜光纤探针近场捕获的数值与实验

刘炳辉<sup>1,2</sup>,杨立军<sup>2</sup>,王 扬<sup>2</sup>

(1 哈尔滨工业大学 机器人技术与系统国家重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150001;

2 哈尔滨工业大学 机电工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

为提高近场捕获的能力与灵活性,本文从理论与实验的角度研究了一种利用镀膜光纤探针对纳米微粒进行近场捕获的方法。采用麦克斯韦应力张量和三维时域有限差分方法建立了近场中纳米微粒的作用力模型,通过光阱力与其他作用力的比较讨论了近场捕获的稳定性,并根据各轴向光阱力的分布情况分析了纳米微粒的捕获尺寸与捕获位置。实验结果表明,只有当微粒尺寸小于探针孔径时才存在捕获效果,探针尖端不同位置出现不同捕获过程,在光阱力的作用下微粒最终被捕获至孔径边缘并形成圆状分布。结合纳米定位与检测方法,设计了全光纤低损耗的光纤探针近场捕获系统,并对120 nm的聚苯乙烯微粒进行了捕获实验。结果表明,采用极低的激光功率能把粒径为激光波长1/7的纳米微粒捕获至光纤探针尖端,并形成内径与探针孔径一致的圆环状分布。