

具有转像功能的变焦目镜光学系统设计

罗春华¹, 张明磊^{1*}, 刘顺瑞¹, 丛京洲², 罗天娇³

¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

² 舜宇光学科技(集团)有限公司, 浙江 宁波 315400;

³ 长春理工大学光电信息学院光电科学分院, 吉林 长春 130114

摘要 在一些环境比较恶劣的情况下,需要密封使用的变倍望远镜,经常会将转像及变焦集成到目镜上,这样更有利于整体进行密封设计。因此设计了一种在可见光波段具有实像面转像变焦目镜的方案。通过对目镜初始结构的分析,高斯光学的计算,运用 Zemax 软件对选定结构进行优化设计,得到三组元 4 倍变焦目镜。目镜在变焦时入瞳的位置保持不变,出瞳位置的变化在 3 mm 之内。传递函数曲线、畸变和倍率色差均符合目视光学系统的设计要求。根据动态光学理论,用 Matlab 软件设计了凸轮曲线,使得变焦的过程中像面比较稳定,调焦平滑。虽然目镜结构略显复杂,但光学镜片均采用球面,降低了整体目镜的成本,而且便于加工装配。

关键词 光学设计; 变焦目镜; 三组元; 凸轮曲线

中图分类号 TN202

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.032201

Design of Zoom Eyepiece Optical System with Reversed Image Function

Luo Chunhua¹, Zhang Minglei¹, Liu Shunrui¹, Cong Jingzhou², Luo Tianjiao³

¹ School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

² Sunny Optical Technology (Group) Co., LTD, Ningbo, Zhejiang 315400, China;

³ Opto Electronics Branch, College of Optical and Electronical Information, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130114, China

Abstract In some cases of harsh environment, we need to seal zoom telescope in use, and the functions of reversed image and zoom are often integrated into the eyepiece. Which is more conducive to the overall seal design. Therefore, a scheme of the zoom eyepiece of the reversed real image plane in the visible light band is designed. Through the analysis of the initial structure of the eyepiece and the calculation of Gaussian optics, the selected structure is optimized by Zemax software to obtain the zoom eyepiece with three-group and 4×zoom. The position of the entrance pupil keeps constant when the eyepiece is zooming and the exit pupil position changes within 3 mm. The transfer function curve, distortion and chromatic difference of magnification are consistent with the design requirements of the visual optical system. According to the dynamic optical theory, the cam curve is designed with Matlab software, which makes the image plane relatively stable and the focusing smooth in the process of zooming. Although the eyepiece structure is slightly complex, but the optical lenses are spherical, which reduces the overall cost of the eyepiece and makes it easy to process the assembly.

Key words optical design; zoom eyepiece; three-group; cam curve

OCIS codes 220.2740; 040.3060

收稿日期: 2017-09-25; 收到修改稿日期: 2017-10-16

基金项目: 国家自然科学基金(61705018)

作者简介: 罗春华(1963—),女,本科,副研究员,硕士生导师,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: lch@cust.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: 597468392@qq.com

1 引言

变焦望远系统在观察目标时,通常是小倍率捕捉到目标,然后大倍率仔细观察,在整个过程可以进行连续观察^[1]。开普勒式望远系统中的物镜、转像系统、目镜中任何一部分连续变焦即可实现系统的变倍。物镜变焦结构比较复杂,通常物镜光学元件的表面光洁度的要求要高于目镜,从而用物镜变焦会增加系统的装调难度和光学元件的加工难度。在一些恶劣环境下使用开普勒式望远镜时,震动很容易会改变望远镜棱镜的相对位置。并且由于环境的因素,需要使整个系统成为一体,便于望远镜的封装。变焦目镜具有大视场角、镜目距长、重量轻等优点,可以较好地解决上述问题。

1985年,顾培森等^[2]叙述了高斯光学计算变焦目镜的方法;2011年,姚林等^[3]设计了三组元变倍比为1.85倍的长出瞳距的变焦目镜;2011年,崔占刚等^[4]设计了正组变倍负组补偿的三组元三倍变焦目镜;以上研究的正焦距三组元变焦目镜在整个焦距范围内都是虚像面。望远系统的目镜在变焦过程中,目镜的视场角不变,目镜的像高会随着焦距的改变而改变,不可避免地要引起渐晕,

因此以上设计的变焦目镜不能满足使用要求。而负焦距变焦目镜具有实焦面,设置视场光阑后可有效解决渐晕问题^[4]。本文研究了一种结构简单,且既能倒像又能够变焦的目镜光学系统。首先对变焦光学系统进行了分析研究,然后利用ZEMAX软件对光学系统进行了设计及优化,设计过程中同时考虑与物镜的衔接问题,得出符合要求的结构及光学数据。

2 设计思路

2.1 目镜结构的选取

在综合考虑当前的光学加工、检测、装调的可行性后^[5],本文设计的变焦目镜由前固定组、变倍组和补偿组三组元构成,变倍组和补偿组也起到转像作用,原理如图1所示。与常规的变焦物镜相比,其省去了后固定组,使得整个系统更加紧凑、轻便。普通变焦物镜在变焦过程中相对孔径基本不变,但变焦目镜设计时考虑到人眼的瞳孔直径为2~5 mm,因为目镜系统是倒置设计的,那么人眼瞳孔作为入瞳最大直径设置为5 mm,因此长焦时目镜相对孔径可以适当减小,相应地,也减小了整个系统的体积,降低了设计难度^[6]。

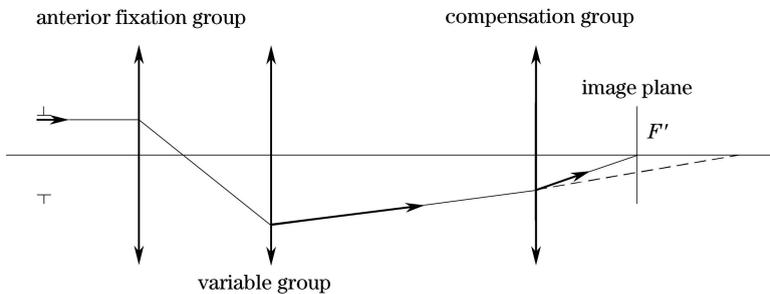


图1 负焦距三组元4倍变焦目镜

Fig. 1 Zoom eyepiece of negative focal length three-group and 4× zoom

光焦度的分配决定了目镜的出瞳距离大小,以及绘制像差校正和凸轮曲线的难易程度。变焦目镜的光焦度分配在前固定组、变倍组和补偿组三组元上。变倍组和补偿组的光焦度对出瞳距的长短起到限定作用。当变倍组的光焦度的绝对值小于补偿组的光焦度的绝对值时,出瞳距会增大,此时像差相应地也会增大。光焦度在三组元的分配,可以理解为光线在这三组元上的偏转程度。如果在某个组元上的偏转角度过大,校正像差存在一定的难度。从光学零件加工方面考虑,如某一组元的光焦度分配过大,对应的光学元件的曲率半径会相对较小,光学元件的局部光圈和光圈的公差要求也会更加严格,因

此会增加光学元件的加工难度和加工成本。

望远系统在变焦过程中目镜的视场角不变,而物镜的视场角是变化的。可在接目镜的像方焦平面处放置视场光阑^[2]。目镜进行变焦的过程中,要保证物面与像面位置不动。目镜的入瞳位置在变焦的过程中也要保证不变,使望远系统物镜的出瞳与目镜入瞳进行衔接。目镜在短焦、中焦、长焦的入瞳位置要保持不变,就需要将出瞳位置设置为变化量^[3]。在整个变焦的过程中,出瞳位置的变化量也不宜过大,否则将不便于人眼观察,本设计的变焦目镜出瞳位置在整个焦距变化过程中变化范围在3 mm之内。

2.2 高斯光学计算

变焦目镜的变焦过程,与常规的变焦系统理论上并无太大区别。可以用微分的形式来表示目镜变焦的过程,变倍组为了使目镜焦距产生变化而进行轴向移动 q ,此时变倍组的垂轴放大倍率 m_2 可以表示为:

$$m_2 = \frac{1}{1/m_{2L} + q/f'_2}, \quad (1)$$

式中 f'_2 为变倍组的焦距, m_{2L} 为变倍组长焦时的垂轴放大倍率。

变倍组和补偿组所构成的全微分方程 $U(m_2, m_3)$ 可以表示为:

$$U(m_2, m_3) = f'_2 \left(\frac{1}{m_2} + m_2 \right) + f'_3 \left(\frac{1}{m_3} + m_3 \right) = C, \quad (2)$$

式中 m_3 为补偿组的垂轴放大率(当变倍组的垂轴放大率为 m_2 时), C 为常数。

将初始位置定为长焦 $m_2 = m_{2L}$ 、 $m_3 = m_{3L}$ 代入(2)式可得到:

$$f'_2 \left(\frac{1}{m_{2L}} + m_{2L} \right) + f'_3 \left(\frac{1}{m_{3L}} + m_{3L} \right) = C, \quad (3)$$

式中 m_{3L} 为补偿组长焦时的垂轴放大倍率。

(2)式与(3)式相减可得:

$$m_3^2 - bm_3 + 1 = 0, \quad (4)$$

$$b = -\frac{f'_2}{f'_3} \left(\frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_{2L}} + m_2 - m_{2L} \right) + \left(\frac{1}{m_{3L}} + m_{3L} \right), \quad (5)$$

式中 f'_3 为补偿组的焦距。

解得(4)式中 m_3 的两个根分别为:

$$\begin{cases} m_{31} = \frac{b + \sqrt{b^2 - 4}}{2} \\ m_{32} = \frac{b - \sqrt{b^2 - 4}}{2} \end{cases}. \quad (6)$$

补偿组为了补偿由变倍组的移动而引起的物像共轭距的变化,也要对应地做出一些轴向移动,使两组元在任何瞬间的微分改变量相加为零,目镜在变焦的整个过程中始终保持物面与像面稳定。变倍组移动 q ,对应的补偿组的移动量 Δ_1 或 Δ_2 分别为:

$$\begin{cases} \Delta_1 = f'_3 (m_{31} - m_{3L}) \\ \Delta_2 = f'_3 (m_{32} - m_{3L}) \end{cases}, \quad (7)$$

从而求出变倍组与补偿组的运动轨迹^[7]。当焦距由

长焦向短焦变倍时,需要注意变倍组与补偿组的间距,避免变倍组与补偿组相撞。

3 变焦目镜设计与结果分析

变焦目镜的参数要求如表1所示。

表1 变焦镜头的技术参数

Table 1 Specifications of zoom lens

Parameter	Specification
Zoom ratio	4×
Focal length range /mm	-10($f/4$)-40 ($f/8$)
Wavelength band /nm	486-656
Full field of view /($^\circ$)	48
Entrance pupil diameter /mm	2.5-5
Distance of exit pupil /mm	>14

根据以上设计指标,结合 Zemax 设计软件对系统的初始结构进行优化设计,对选定的初始结构设置为三组多重结构,通过移动变倍组和补偿组来改变各光组之间的光学间隔来达到变焦的目的。用 EFFL 操作数来控制三个多重结构的焦距达到长、中、短焦的设计指标。变焦系统是具有可变焦距,但物与像的位置固定不变的光学系统^[8],用 TTHI 操作数分别控制三个多重结构的第二面到像面的距离为 184.5 mm,实际长焦、中焦、短焦对应的第二面到像面的实际距离分别为 184.552, 184.461, 184.542 mm。目镜是反向设计的,所以设计过程中的入瞳为实际系统的出瞳。将入瞳的位置用操作数在多重结构的第一个面上用 THIC 操作数设为变量,用 EXPP 操作数来分别控制长焦、中焦、短焦的出瞳位置,长焦、中焦、短焦对应的出瞳位置分别为 -70.056, -69.983, -69.983 mm。优化后发现在长焦时的子午场曲较大,通过 FCGT 操作数对系统长焦时的场曲进行优化。然后通过 MTFA 对轴上点的传递函数,用 MTFT、MTFS 控制轴外子午和弧矢方向的传递函数对系统的像质进一步优化。最终得到的焦距分别是 -39.94, -24.94, -10.03 mm 的变焦目镜结构如图 2~4 所示。

调制传递函数(MTF)反映光学系统对物体不同频率成分信息的传递能力,是一种评价光学系统成像质量的重要方法^[9]。图 5 和图 6 分别表示长焦和短焦的 MTF 曲线,在 100 lp/mm 时长焦和短焦轴上 MTF 均大于 0.2,0.707 视场 MTF 均大于 0.1,满足目视系统的像质要求。

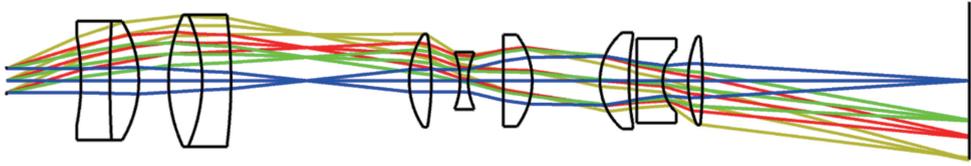


图 2 长焦系统结构图

Fig. 2 Structure diagram of long focal length system

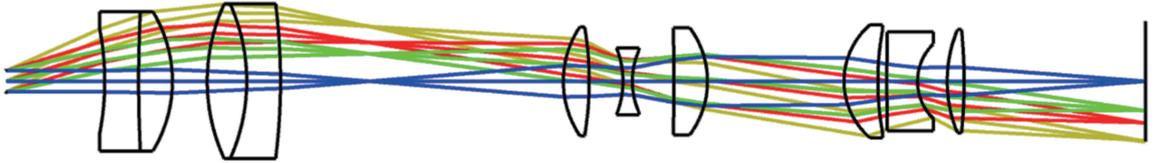


图 3 中焦系统结构图

Fig. 3 Structure diagram of medium focal length system

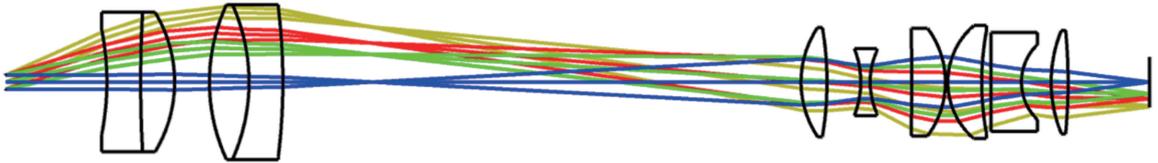


图 4 短焦系统结构图

Fig. 4 Structure diagram of short focal length system

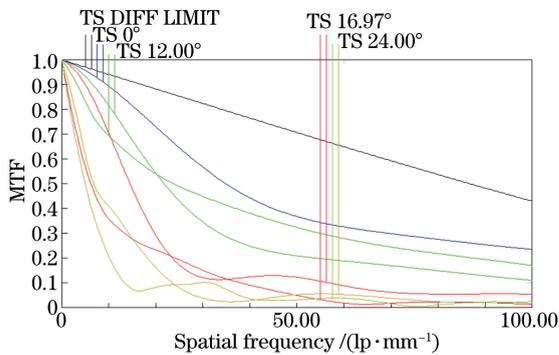


图 5 长焦时的 MTF 曲线

Fig. 5 MTF curve of long focal length

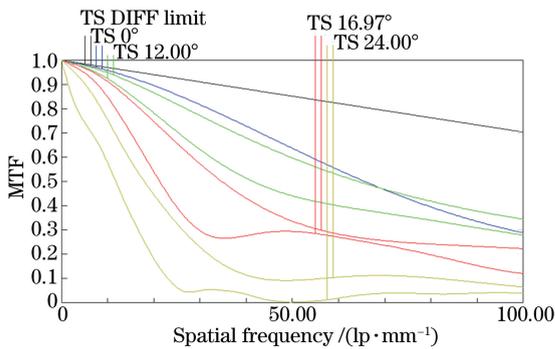


图 6 短焦时的 MTF 曲线

Fig. 6 MTF curve of short focal length

出长焦和短焦时的畸变均小于 7%，表明像面没有产生较大形变，对人眼观察基本无影响。图 9 和图 10 是长焦和短焦时的倍率色差曲线，可以看出在长焦时最大视场的倍率色差最大在 20 μm 以内，短焦的倍率色差在 10 μm 以内，人眼看不出明显色边。

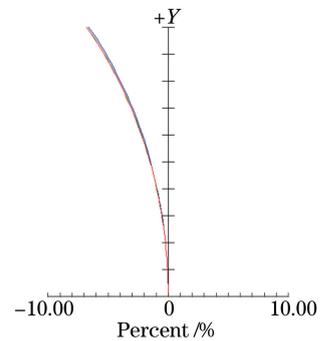


图 7 长焦时的畸变

Fig. 7 Distortion of long focal length

4 凸轮曲线的设计

机械补偿的变焦光学系统中，合理的凸轮曲线可以有效保证像面稳定性，避免变焦过程卡死、损坏凸轮曲线等问题。凸轮曲线的设计一般有两种方法，其一是采用多点拟合的方法。但其计算量较大而且拟合曲线不能使所有位置都稳定成像。其二是

图 7 和图 8 为长焦和短焦时的畸变图，可以看

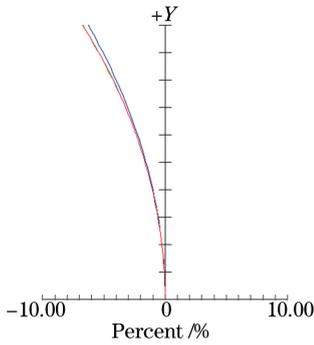


图 8 短焦时的畸变

Fig. 8 Distortion of short focal length

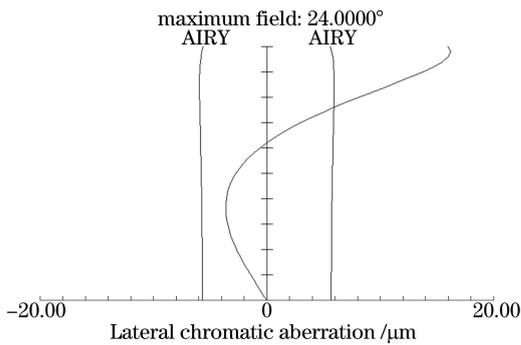


图 9 长焦时倍率色差曲线

Fig. 9 Lateral chromatic aberration of long focal length

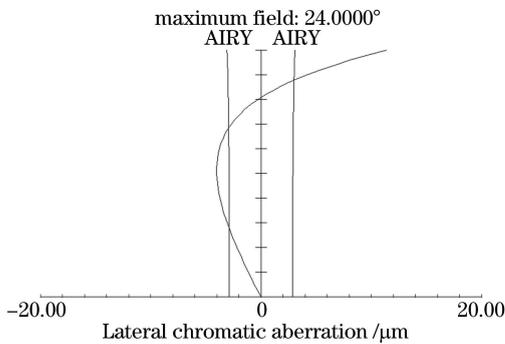


图 10 短焦时倍率色差曲线

Fig. 10 Lateral chromatic aberration of short focal length

运用适当的方程来计算出相应的曲线,本设计所使用的凸轮曲线绘制方法是基于动态光学一维稳像系统,动态光学主要研究光学系统中的物像关系、光学空间、光学元件之间的内在关系^[10]。采用动态光学推导出的公式可以表示为:

$$A = (f'_1 - m_2 q) m_2, \quad (8)$$

$$B = m_1 m_2 q^2 + [f'_2 (1 - m_2^2) m_1 - f'_1 (1 - m_1^2) m_2] q - f'_1 f'_2 (1 - m_2^2), \quad (9)$$

$$D = m_2^2 f'_2 [m_1 q - f'_1 (1 - m_1^2)] q, \quad (10)$$

$$\Delta = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AD}}{2A}, \quad (11)$$

然后利用 Matlab 软件进行凸轮曲线的绘制。

运用 Matlab 软件对(8)~(11)式进行编程,并且将变倍组的移动方式设置成直线运动,可得出变倍组与补偿组的运动曲线如图 11 所示。从图 11 中可以观察到变倍组和补偿组在整个变焦过程中平滑顺畅,变倍组做直线移动,补偿组做曲线运动。

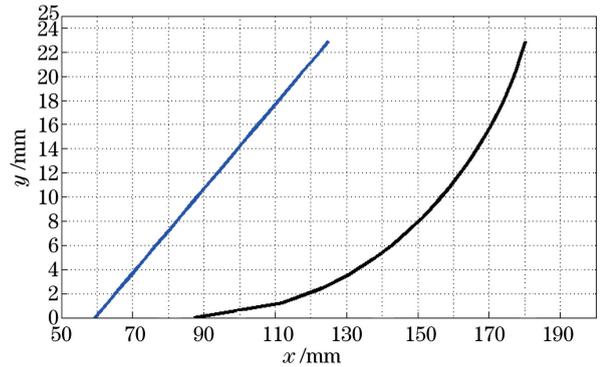


图 11 变倍组与补偿组的变化关系曲线

Fig. 11 Zoom group versus compensation group

5 结 论

本文设计的三组元变焦目镜光学系统,具有实焦点并同时实现转像及 4 倍变焦的功能。通过合理分配系统光焦度,有效校正系统像差,而且系统结构紧凑。最终设计的变焦目镜焦距为 $-39.94 \sim -10.03$ mm,全视场 48° ,出瞳直径为 $2.5 \sim 5$ mm,出瞳距离为 $17.87 \sim 15.47$ mm。系统在长焦和短焦时轴上传递函数在 100 lps/mm 时大于 0.2 , 0.707 视场大于 0.1 ,畸变和倍率色差曲线符合人眼观察的要求。计算并绘制的凸轮曲线能够保持像面稳定。光学系统结构简单,易于加工,成像质量较好,具有一定的实用价值。

参 考 文 献

- [1] Cui Z G, Luo C H, Tang J D. Design of zoom eyepiece optical system for 8-24 mm and drawing of its cam curve[J]. Optical Technology, 2011, 37(6): 695-698.
崔占刚, 罗春华, 汤金丹. 三组元变焦目镜的光学设计及其凸轮曲线的绘制[J]. 光学技术, 2011, 37(6): 695-698.
- [2] Gu P S, Chen W. Zoom eyepiece optical design[J]. Optical Instruments, 1985, 7(4): 48-51.
顾培森, 陈尉. 变焦距目镜光学设计[J]. 光学仪器, 1985, 7(4): 48-51.

- [3] Yao L, Xiang Y, Huo X X, *et al.* Optical design of three-group telescope zoom eyepiece [J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(2): 226-229.
姚林, 向阳, 霍肖鑫, 等. 三组元变焦目镜光学设计 [J]. *应用光学*, 2011, 32(2): 226-229.
- [4] Yang R X. Optical design of telescope zoom eyepieces [J]. *Optical Technology*, 1992(6): 19-25.
杨荣仙. 变倍目镜光学设计 [J]. *光学技术*, 1992(6): 19-25.
- [5] Wang Y Q, Liu W Q, Fu H Y, *et al.* Optical design of space detailed survey camera in the middle or high orbit [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(1): 0116001.
王蕴琦, 刘伟奇, 付瀚毅, 等. 中高轨道空间详查相机光学设计 [J]. *中国激光*, 2016, 43(1): 0116001.
- [6] Zhang Y M. *Applied optics* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008.
张以谟. *应用光学* [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [7] Tao C K. *Zoom optical system design* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988.
陶纯堪. *变焦距光学系统设计* [M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.
- [8] Cheng H T, Guo S J, Lü J, *et al.* Research development trends of zoom system with variable focal power device [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(8): 080007.
程洪涛, 郭世俊, 吕杰, 等. 可调光焦度器件的变焦光学系统研究发展趋势 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(8): 080007.
- [9] Cao C, Liao Z Y, Bai Y, *et al.* A new compound zoom optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 1108001.
操超, 廖志远, 白瑜, 等. 一种新型复合变焦光学系统 [J]. *光学学报*, 2017, 37(11): 1108001.
- [10] Wang C Y, Wang Z J, Zhou Q C. 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.