

高变倍比变焦距系统设计

江 伦^{1,2} 黄 玮¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要 介绍了一种可实现高变倍比变焦的结构形式,该结构形式由变焦物镜组和变焦二次成像组两部分组成,系统的变倍比是前后两组变焦系统变倍比的乘积。系统中间像面处像面高度和数值孔径在变焦过程中可变,在短焦位置,中间像面高度大,数值孔径小;在长焦位置,中间像面高度小,数值孔径大,这种结构形式有利于系统的像差校正。与传统变焦距系统相比,该变焦距结构形式较容易实现高变倍比变焦。利用该结构形式设计了一套80倍制冷型长波红外变焦距系统,系统全焦距范围内调制传递函数(MTF)设计值在空间频率14 lp/mm处大于0.26,表明该结构形式可用于实现高变倍比变焦距系统。

关键词 光学设计;高变倍比;变焦二次成像;变焦系统

中图分类号 TH74 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1222006

Lens Design for Optical System of High Zoom Ratio

Jiang Lun^{1,2} Huang Wei¹

(¹ State Key Laboratory of Applied Optics, 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 A high zoom-ratio zoom structure type is introduced, which is composed of zoom imaging group and zoom reimaging group. The zoom ratio of system is the product of the two zoom groups. The size and numerical aperture of the intermediate image plane can be changed in the zoom process, when system is in short focal length position, the height of the immediate image is large while the numeric aperture is small. When system is in long focal length, the height of the immediate image is small while the numeric aperture is large. This will help to correct aberrations of image. Compared with the traditional zoom system, this type of zoom system structure is easier to obtain high zoom ratio. Using this structure a 80× cooled long-wave infrared zoom system is designed. The modulation transfer function (MTF) is above 0.26 in all focal length at the spatial frequency of 14 lp/mm. The result indicates that the structure can be used to achieve high zoom ratio zoom system.

Key words optical design; high zoom ratio; zoom re-imaging; zoom system

OCIS codes 220.4380; 110.3080; 220.3620

1 引 言

随着光学冷加工、多层膜、高精度机床加工和计算机自动设计等技术的发展,变焦距系统被广泛地应用于成像光学的各个领域^[1~5]。变焦距系统的广泛应用也让人们对变焦系统性能不断提出新的要求,如大的焦距范围,即高变倍比变焦距系统。高变倍比一直以来都是变焦距系统的发展趋势^[6],由于光学冷加工和镀膜技术的限制,早期的变焦距系统

镜片数目较少、一般只有两个运动组元,其变倍比较小^[7]。随着这两项技术的发展和高精度数控加工、计算机自动设计在变焦距系统中的应用,变焦距系统所用镜片数不断增加,这使得系统变倍比得以显著提高。在保证变焦系统成像质量的前提下为进一步提高系统变倍比,人们采用了引入非球面、使用特殊材料、使用可变可动光阑和多组元变焦等措施^[8~10]。

收稿日期: 2011-06-20; **收到修改稿日期**: 2011-07-21

作者简介: 江 伦(1984—),男,博士研究生,主要从事红外光学系统设计方面的研究。E-mail: jlciomp@163.com

导师简介: 黄 玮(1965—),男,博士,研究员,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: huangw@ciomp.ac.cn

这些措施只能在一定程度上提高系统变倍比,要继续提高系统变倍比难度较大。这主要由传统机械补偿变焦系统本身结构所决定:大变倍比意味着长焦时入瞳过大、前固定组口径较大像差难以校正;变倍组变焦过程中倍率变化范围太大导致各焦距位置像差难以同时校正;要解决这一问题,可以减小变倍组光焦度,但这会导致变倍组行程变长,系统体积增大,同时短焦时系统主光线在后组的投射高增大,后组体积变大,导致系统像差校正难度增加^[11]。

为克服传统变焦距的上述缺陷,美国 Iain A. Neil 等^[12,13]提出采用两个变焦组组合的新型变焦距结构形式,并利用该结构形式研制出变倍比为 300 倍的变焦镜头,而目前国内没有这种技术的相关报道。本文利用该结构形式设计了一套焦距 11~880mm、最大口径为 270 mm 的制冷型长波红外

变焦距系统,该系统采用全球面设计,没有采用衍射元件,在变焦过程中系统相对孔径恒定。介绍了该结构形式的设计思想,利用光学设计软件对该结构形式进行优化,给出了系统设计结果。

2 设计思想

图 1 为该结构的高斯光学系统示意图,该结构采用两组变焦系统 A 和 B,两者由一像面隔开,系统一共有 1,2,3,4 四个运动组元。在变焦过程中,前变焦组形成数值孔径和像高均变化的中间像面,后变焦组相当于变焦投影系统,以不同倍率将中间像面投影到像面上形成最终像面,整个系统变倍比是前后两变焦组的变倍比之积,从而获得传统变焦距难以达到的高变倍比。

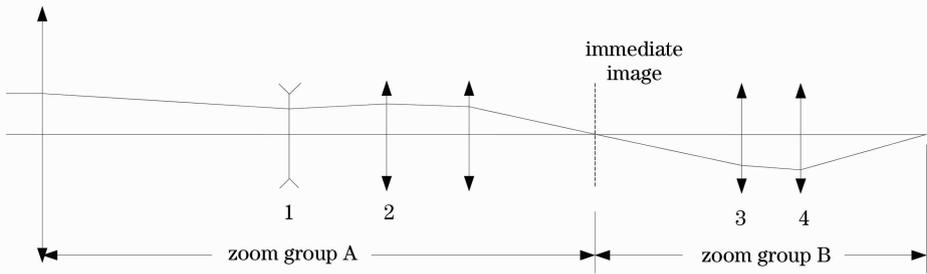


图 1 变焦结构的高斯光学系统示意图

Fig. 1 Diagram of Gaussian optical system of the zoom structure

这种变焦距结构形式在获得高倍比的同时也降低了系统校正像差的难度。系统在短焦位置时,后变焦组以小于 1 的投影倍率将中间像面投影到像面上,此时其物方数值孔径较小,像方数值孔径较大,此时前变焦组只需在小像方数值孔径下校正像差即可。系统在长焦位置时,前变焦组处于长焦位置,此时后组投影系统以大于 1 的投影倍率将中间像面投影到像面上,其物方数值孔径较大,这意味着前变焦组像方数值孔径较大,但此时中间像面像高较小。即前变焦组无需同时在大的中间像高和大数值孔径的情况下矫正像差,这导致前变焦组设计难度比具有相同变倍比的传统变焦系统小。对于后组投影变倍系统而言,其像差矫正亦较容易,投影倍率较小时,其物方视场较大,但物方数值孔径较小;投影倍率较大时,其物方数值孔径较大,但其物方视场较小。因此,无需同时在大物方视场和大物方数值孔径的情况下校正系统像差。

该结构形式的缺点是运动组元多,系统机械结构复杂,但随着高精度数控加工技术、装调技术的进

一步发展,在变焦距系统中普遍采用这种结构形式是有可能的。

3 设计实例

3.1 设计指标

根据上述设计思想,设计了一套制冷型长波红外变焦距系统,系统采用的探测器为 160 pixel×120 pixel 制冷红外探测器,探测器像元尺寸为 35 μm×35 μm。系统的主要设计指标要求如表 1 所示。

表 1 长波红外变焦距系统的设计指标

Table 1 Specifications of the long-wave infrared zoom optical system

Parameters	Specifications
Variable focal length /mm	11~880
<i>F</i> number	4
Largest aperture /mm	270
Wave band /μm	8~12
Full filed of view /(°)	0.45~35.2
Back focal length /mm	77.95
Total track /mm	880

3.2 初始结构参数确定

设计此类变焦距系统的关键之处在于给出合适的前后变焦组的变倍比,其设计依据是充分考虑前后变焦组的变倍能力、系统复杂程度、最大元件口径和系统总长等因素。基于前面提到的光学设计思想,前变焦组类似于传统的四组元变焦距光学系统,较容易实现大变倍比;而后组元变焦系统是二组元变倍投影系统,在保证系统结构紧凑和复杂程度较低的前提下,其变倍能力有限,一般为3~6倍,若其变倍比过大,则导致后变焦组设计难度增加而前变焦组的变倍能力没有充分利用,若其变倍比过小,则前变焦组变倍比过大,其像差校正难度增大,综合考虑,选取后变焦组变倍比为4,前变焦组变倍比为20。接下来确定后变焦组的投影倍率,为降低整个系统的设计难度,其短焦位置投影倍率 $0.25 < m_s < 1$,若 m_s 过小,则短焦位置中间像面高度较大,导致前变焦组视场角过大,前端元件口径较大,同时导致系统轴外像差校正难度增大;若 m_s 过大,则长焦位置中间像面数值孔径较大,前端元件口径过大。经权衡选取后组变焦系统短焦位置投影倍率 m_s 为0.5,则其投影倍率范围为0.5~2,前组焦距范围为

22~440 mm。

3.3 光学系统设计

前变焦组的设计类似于普通的20倍机械正组补偿变焦系统,通过变焦距设计理论^[14]选择合适的倍率段以及变焦组份的焦距,然后借助光学设计软件,将各组元按各自焦距单独优化,再将优化后的结果按各组元间隔组合,即得到初始变焦距结构,对其进行优化。所得到的设计结果像面高度和数值孔径恒定。为了和后变焦组组合得到像面高度和数值孔径恒定的系统,前变焦组需要设计成像面高度和数值孔径随焦距改变的系,表2给出系统5个焦距位置处前变焦组和后变焦投影组之间参数的对应关系。通过软件将前面优化结果的像面高度和像方数值孔径进行多种结构设置,再设置合理的优化函数通过软件优化,得到前变焦组初步的设计结果。图2为前变焦组3个焦距位置的系统结构图。

后变焦组可看作像高和像方数值孔径恒定的4倍变焦投影物镜,其物高和物方数值孔径随倍率改变。由于其变倍比较小,可以由结构类似的定焦投影物镜优化而来。图3为后变焦组3个投影倍率状态下的系统结构图。

表2 前变焦组和后变焦组之间参数的关系

Table 2 Relation between the front and back zoom group

Focal length of front zoom group /mm	Height of the immediate image /mm	F number of the immediate image	Projection magnification of back zoom group	F number of the image	System focal length /mm
22	7	8	0.5	4	11
210	4.67	5.33	0.75	4	157.5
300	3.5	4	1	4	300
356	2.8	3.2	1.25	4	445
440	1.75	2	2	4	880

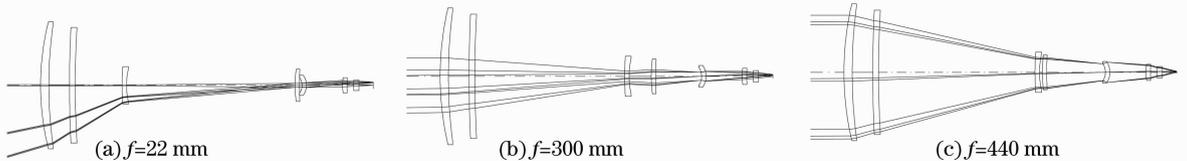


图2 前变焦组外形结构

Fig. 2 Layout of the front zoom group

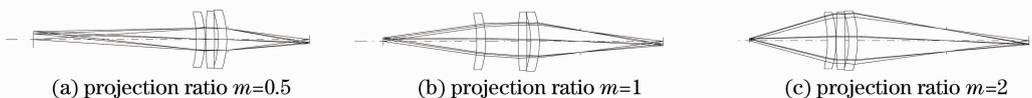


图3 后变焦组外形结构

Fig. 3 Layout of the back zoom group

3.4 设计结果与分析

将前变焦组和后变焦组组合后,设置合理的优化参数,得到整个系统优化结构如图 4 所示。

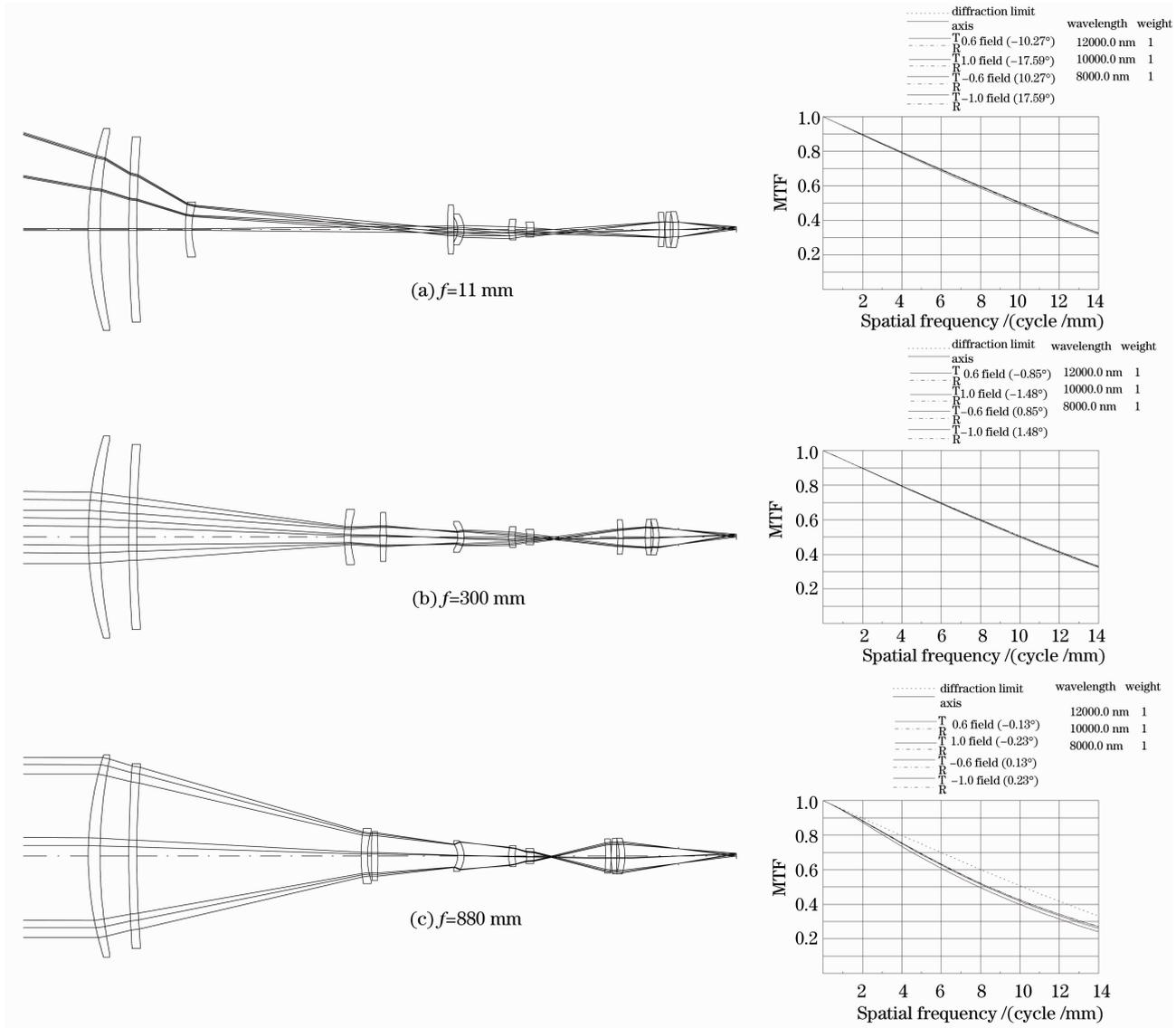


图 4 外形结构与对应的 MTF

Fig. 4 Layout and MTF of lens with three different focal lengths

系统一共 10 片透镜,其中前变焦组 7 片透镜,后变焦组 3 片透镜。前变焦组分为前固定组(透镜 1,2)、变倍组(透镜 3)、补偿组(透镜 4)、后固定组(透镜 5,6,7);后变焦组包括两个运动组元(透镜 8 和透镜 9,10)。前固定组采用锗和硒化锌组合便于校正系统长焦色差,除此之外,系统第 7 片和第 10 片也采用硒化锌材料。第 1 个运动组元为锗透镜,用来修正系统的轴向色差,同时帮助修正彗差和轴外像差。从图 4 中可以看出,系统通过前变焦组和后变焦组的同时移动来实现变焦。在变焦过程中,系统像面处相对孔径恒定为 $1/4$,像面位置不变,系统总长为 880 mm,处于长焦位置时第 1 片透镜通

光口径为 270 mm,整个系统所有透镜表面均为球面,没有引入非球面和衍射元件,大大降低了系统的加工难度和制造成本。

MTF 值能够全面地评价出光学系统的成像质量,既能够反映系统的分辨率,还可以反映出系统的对比度。图 4 给出了系统短焦、中焦和长焦时 MTF 值,系统在尼奎斯特频率 14 lp/mm 处(像素大小 $35 \mu\text{m}$),MTF 值大于 0.26。系统短焦像质较好,长焦像质稍差,主要原因是系统长焦距较长,二级光谱较大,可在系统中引入衍射元件来提高像质。

图 5 给出了系统各焦距位置上 4 个运动组元相对于像面的位置关系,各运动组元运动轨迹平滑无

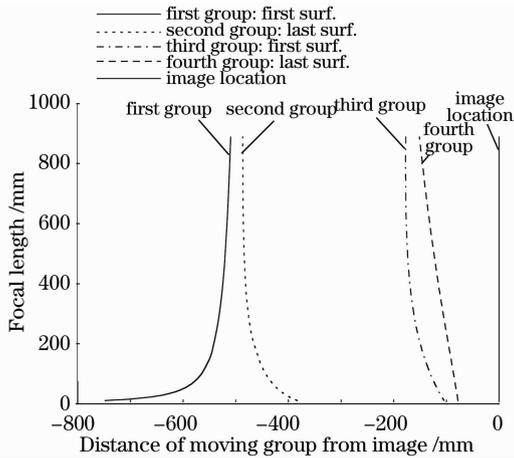


图 5 各运动组份位置与系统焦距的关系

Fig. 5 Distance of the moving group from image versus focal lengths

拐点,有利于系统凸轮曲线的加工。

红外光学材料具有很高的光热膨胀系数,温度变化会使元件的折射率、曲率、厚度和间隔发生变化,从而导致系统性能严重恶化,必须采取热补偿措施。本文采用机械补偿措施,选取第 6、7 片透镜作为温度补偿组,图 6 给出了系统短焦和长焦在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内的调焦曲线,以 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为基准,负符号代表温度补偿组远离探测器。系统长焦时温度调焦组移动范围为 $+0.74\sim -0.33\text{ mm}$,短焦位置时移动范围为 $+0.84\sim -0.3\text{ mm}$ 。经补偿后,系统 MTF 值在尼奎斯特频率 14 lp/mm 处均大于 0.23。表明系统能在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内对目标清晰成像。

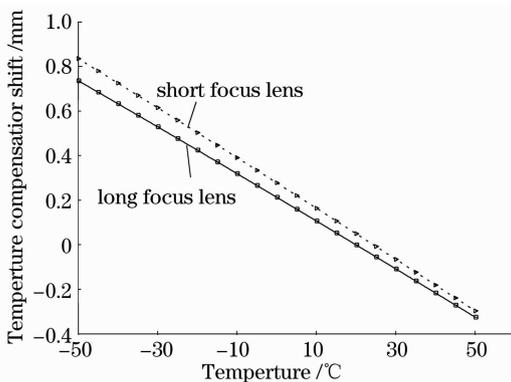


图 6 温度补偿曲线

Fig. 6 Temperature-compensation curves

4 结 论

本文介绍的变焦距结构形式可用于高变倍比变焦距光学系统的设计,该结构形式成功地应用于一套焦距为 $11\sim 880\text{ mm}$ 、最大口径为 270 mm 、工作

波段在长波红外的制冷型连续变焦光学系统的设计中。该结构形式采用 2 个变焦组份,中间用 1 个像面将两变焦组分隔开,变焦过程中有 4 组透镜运动。系统变倍比为前后变焦组变倍比的乘积;长焦位置时中间像面高度较小,数值孔径较大;短焦位置时中间像面高度较大,但数值孔径较小。这种结构安排有利于系统像差的校正,容易实现高变倍比变焦,为高变倍比变焦距系统发展提供了一种新的思路。

参 考 文 献

- Huang Ling. Lens Design of Two Kind of Zoom Optical System [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002. 1~8
黄 玲. 两种变焦距光学系统的设计研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2002. 1~8
- Wang Peng, Zhao Wencai, Hu Mingyong *et al.*. Design of catadioptric large aperture three group elements infrared zoom system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(5): 577~581
王 鹏, 赵文才, 胡明勇等. 折反式大口径三组元红外变焦距系统设计[J]. *光学学报*, 2002, **22**(5): 577~581
- Zhang Tingcheng, Wang Yongtian, Chang Jun *et al.*. Design of reflective zoom systems with 3 mirrors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 3034~3038
张庭成, 王涌天, 常 军等. 三反变焦系统设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 3034~3038
- Lu Qiang, Ji Yiqun, Shen Weimin *et al.*. Design of a fore continual zoom system with high speed[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2674~2679
陆 强, 季轶群, 沈为民等. 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
- Wang Haitao, Geng Anbing, Yang Changcheng *et al.*. Design of rotate-in-group zoom optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 872~875
王海涛, 耿安兵, 杨长城等. 切换变倍光学系统设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 872~875
- Wang Hong. Continues developed infrared zoom lens[J]. *Optics, Mechanics & Electronics Information*, 1997, **14**(7): 1~7
王 红. 不断发展的红外变焦透镜[J]. *光机电信息*, 1997, **14**(7): 1~7
- Zhang Wei. Study on Liquid Lens Technology and its Application in Micro Zoom Optical System [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences, 2009. 2~5
张 薇. 液体透镜技术及其在微形变焦距系统中的应用[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械与物理研究所, 2009. 2~5
- Ellis Betensky. Forty years of modern zoom lens design [C]. *SPIE*, 2005, **5865**: 38~45
- Hisayuki Masumoto. Development of zoom lenses for camera and technical topics [C]. *SPIE*, 1998, **3482**: 202~212
- J. Brian Caldwell. Tracking zoom lens developments via the patent literature [C]. *SPIE*, 2001, **4487**: 19~41
- Iain A. Neil. Compound zoom lenses [C]. *SPIE*, 2005, **5865**: 586507
- Neil, A. Iain. Zoom lens system [P]. US, 7224535 2005-07-29
- Betensky Ellis I., Caldwell James Brian, A. Neil Iain *et al.*. Zoom lens system [P]. US, 101622914 2004-02-05
- Tao Chuncan. Zoom Focus Optics System Design [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998
陶纯堪. 变焦距光学系统设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1988

栏目编辑: 谢 婧