文章编号 2095-1531(2014)02-0315-05

5 倍变焦距光学系统小型化设计

王 红*,田铁印
(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)

摘要:为了完成飞行器导引头目标识别与探测任务,以短焦距、大视场进行搜索并确认目标,以长焦距、小视场进行高精度目标识别。通过选择正组补偿的机械补偿法,采用 3 种普通光学材料,在长焦距位置,将前固定组、变倍组的组合设计为远摄型,使得系统结构紧凑,满足导引头小型化的要求。利用 CODE V 光学设计软件,优化设计了焦距为 30 ~ 150 mm,视场角为 12.90°×10.25°~2.59°×2.07°,筒长仅为 174 mm 的变焦距光学系统,得到成像质量优良的设计结果。各焦距、全视场平均传递函数值在 50 lp/mm 时为 0.695,测试结果为 0.562,满足系统的性能要求。

关 键 词:小型化;变焦距;光学系统设计;传递函数
中图分类号:V248.3 **文献标识码**:A doi:10.3788/CO.20140702.0315

Miniature design of 5 × zoom optical system

WANG Hong*, TIAN Tie-yin
(*Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology*, *Changchun Institute of Optics*, *Fine Mechanics and Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Changchun* 130033, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*:*wanghong@ciomp.ac.cn*

Abstract: In order to complete recognition and detection tasks of the aircraft seeker, a high precision, miniaturization of the zoom optical system is designed. Targets are searched and identified at short focal length, wide field, and recognized at long focal length, narrow field. The mechanical compensation method is selected using three kinds of common optical materials. At the location of the long focal length, combinatorial design of the front group and the zoom group can make the system compact, and meet seeker miniaturization requirements. The zoom optical system with optimization focal length about 12.90° × 10.25° ~ 2.59° × 2.07° and lene tube length only 174 mm is designed by using the CODE V optical design software. For the each focal length and each field of view, the average MTF is 0.695, and tested result is 0.562 at 50 lp/mm, which can meet performance requirements of the system.

Key words: miniature; zoom lens; optical system design; Modulation Transfer Function(MTF)

收稿日期:2013-12-21;**修订日期**:2014-02-23
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60507003)

1 引 言

电视成像系统可实现对空中运动目标的自动跟踪与测量,目标通过光学系统成像于 CCD 靶面上,是跟踪和测量飞行目标的主要手段之一。为保证跟踪目标的距离和精度,采用长焦距、小视场;为保证目标的捕获和观察,采用短焦距、大视场。如果采用定焦距光学系统,则很难满足使用要求;采用两档或三档切换的光学系统,在换档变焦时,易丢失目标。因此,为了满足对近距离目标的快速捕获及对远距离目标的精确跟瞄与监视,在动基座上探测、识别动态目标,需要采用连续变焦距光学系统。该变焦距镜头利用其短焦距、大视场实现对目标的捕获;通过连续变倍,在长焦距实现对目标的高精度跟踪[1-6]。

近年来,随着变焦距光学系统设计理论及设计软件的完善,以及加工工艺的日臻成熟,变焦距的设计更加丰富,成像质量更为优良,广泛应用于国防、军事和人们生活的各个领域[7]。

飞行器导引头连续变焦距系统的设计比较复杂,要求在确保探测性能的基础上,使系统结构尽量小型化、轻量化。对变焦距镜头的体积和重量要求越来越苛刻,以满足空间有限尺寸的要求,因此在保证成像质量的前提下,变焦距光学系统的小型化设计是必要的。

本文首先根据技术指标要求,采用机械补偿法设计变焦距光学系统,选择合适的光学材料及各组元光焦度的合理匹配,在长焦位置,选取远摄结构的前固定组实现变焦系统小型化,最后应用 CODE V 软件优化设计,在确保变倍组、补偿组移动准确,满足高斯光学系统各焦距位置严格齐焦的前提下,得到成像质量优良的变焦距小型化设计结果。加工、装调后,光学系统的测试结果验证了设计的准确性、合理性。

2 主要技术指标

为了提高彩色连续变焦距的探测与识别目标的能力,需要选择小像元尺寸的探测器,以更好地满足远距离目标探测和识别。在满足性能、外形尺寸和数据传输接口的同时,还要求满足彩色、数字图像输出、帧频及曝光时间可调等具体要求。选定高动态范围 CMOS 探测器,像元数为 1 280 pixel×1 024 pixel,像素尺寸为 5.3 μm。主要设计指标要求如表 1 所示。

表 1 光学系统设计参数

Tab.1 Parameters of optical system

参数名称	数值
工作波段/μm	0.486 1~0.656 3
焦距/mm	30~150
变焦倍率	5
相对孔径	1/4

3 光学系统设计

3.1 结构型式确定

连续变焦距系统可分为光学补偿、双组联动及全动、机械补偿 4 种结构。

(1)对于光学补偿方式实现的变焦,只有几个特定位置的像差得到校正,不适用于高精度制导要求的变焦系统;

(2)双组联动系统长度较短,像质较好,但机械结构比较复杂,精度控制难度较大;

(3)全动系统比双组联动系统更为复杂,对于系统结构长度要求特别苛刻时,具有很大的优势;

(4)机械补偿系统可以通过精密凸轮带动运动组元进行准确移动,可有效防止像面移动,实现连续变焦,各焦距位置像质良好。

机械补偿分为正组补偿和负组补偿两种形式。对于两个移动组元的机械补偿法变焦镜头,正组补偿和负组补偿两种结构型式相比较,若变倍组焦距相同,主要有如下不同之处:

(1)正组补偿结构细而长,负组补偿结构粗而短。

(2)负组补偿的光学系统二级光谱和光阑球

差比正组补偿大。

考虑到镜头通光口径小的要求,该变焦距系统采用机械补偿法中的正组补偿型式。

3.2　小型化考虑

减小变倍组和补偿组的焦距是实现光学系统小型化的有效手段。但变倍组和补偿组焦距的减小是有一定限度的,其受到高级像差增大的限制。

当长焦时设计为远摄型,通过增加前固定组与变倍组之间的距离(相当于正光焦度的前组与负光焦度的后组之间的距离适当增大)减小远摄比,这样在保证各组元相对孔径不变的前提下,缩短变倍组和补偿组的焦距,在缩短导程和补偿量的同时,降低后固定组的入射光线高度,缩短后工作距离,实现变焦系统的小型化。

通过高斯光学求解前固定组、变倍组和补偿组的焦距及各组之间的间隔,考虑到变焦距光学系统小型化的要求,经过反复计算和比较,最终确定的各组焦距如下:前固定组焦距为 92.438 mm;变倍组焦距为 −15.897 mm;补偿组焦距为 23.420 mm;导程为 20.394 mm,补偿量为 13.104 mm。

3.3　像差的校正

保证各个焦距位置像质满足成像的要求难度较大。通过分析、比较多种像差校正方案,筛选多种玻璃材料,确定选择 LAK2、ZK9 和 ZF6 普通材料。

考虑利用前固定组和变倍组校正长焦距的像差,使之接近短焦距;利用变倍组校正了短焦距轴外细光束像差,利用补偿组校正中焦距的轴上点像差,使长、中、短焦距像差相等,利用后固定组相补偿。

应用 CODE V 进行变焦距结组优化设计,需要保证凸轮曲线的连续与光滑及各焦距位置的严格齐焦,各个焦距位置的像差均得以校正,满足使用要求。光学系统结构如图 1 所示。光学系统的口径为 37.5 mm,光学筒长为 145 mm,满足技术指标要求,实现了光学系统小型化。

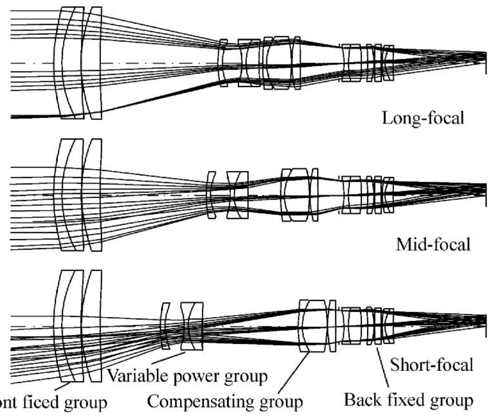


图 1　不同焦距位置的光学系统结构图

Fig. 1　Optical configuration diagram of in different zoom position

3.4　成像质量评价

表 2 为光学系统各焦距的传递函数值,其传递函数曲线如图 2 ~4 所示。

表 2　光学系统各焦距的传递函数值

Tab. 2　MTF values at each focal of zoom camera　　(频率:50 lp/mm)

EFL/mm	Fields			
	0ω	0.5ω	0.7ω	1.0ω
150	0.579	0.585	0.570	0.524
130	0.675	0.645	0.634	0.603
110	0.721	0.692	0.670	0.654
90	0.749	0.732	0.715	0.688
70	0.765	0.761	0.756	0.698
50	0.774	0.772	0.768	0.733
30	0.782	0.773	0.747	0.670

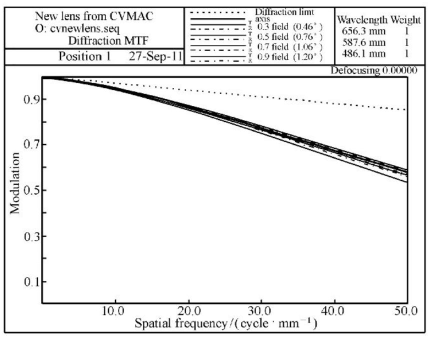


图 2　长焦距各视场传递函数曲线

Fig. 2　MTF curves of optical system at long-focal

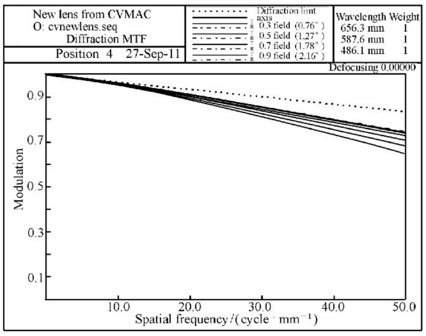


图3 中焦距各视场传递函数曲线

Fig. 3 MTF curves of optical system at mid-focal

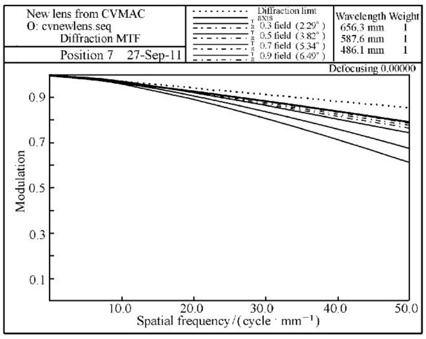


图4 短焦距各视场传递函数曲线

Fig. 4 MTF curves of optical system at short-focal

可见光学系统的成像质量优良,各焦距、各视场的传递函数平均值在50 lp/mm时为0.695,满足性能指标要求。

4 测试结果

光学系统完成加工、装调后进行传递函数测量。采用Optikos Corporation成像分析系统进行光学系统传递函数的测量,得到的实测结果如表3所示。测试结果表明,变焦距光学系统在各焦距、各视场的平均传递函数为0.562(频率:50 lp/mm),满足成像质量要求。

表3 变焦距光学系统传递函数实测结果(频率:50 lp/mm)

Tab. 3 MTF tested results of zoom lens (frequency:50 lp/mm)

EFL/mm	Fields			
	0ω	0.5ω	0.7ω	1.0ω
150	0.470	0.474	0.459	0.422
130	0.547	0.522	0.514	0.486
110	0.585	0.559	0.542	0.527
90	0.607	0.591	0.576	0.553
70	0.619	0.613	0.609	0.563
50	0.626	0.623	0.621	0.591
30	0.633	0.624	0.604	0.541

5 结 论

用于导引头的高精度连续变焦距系统的小型化设计,比一般变焦距光学系统设计的难度大。本文采用机械补偿法设计的变焦距光学系统,综合考虑了加工、装调等方面的要求,长焦距位置采用远摄型前固定组、变倍组组合的型式,采用3种普通光学材料设计得到小型化连续变焦距光学系统,加工装调完成后光学系统的测试结果优良,满足技术指标要求。目前已通过飞行试验验证,具有较强的工程实用性。

参考文献:

[1] 田海霞,杨建峰,马小龙. 可见光变焦距电视光学系统设计[J]. 光子学报,2008,37:1797-1799.
TIAN H X,YANG J F,MA X L. Optical system design of visible zoom camera[J]. *Acta Photonica Sinica*,2008. 37:1797-1799. (in Chinese)

[2] 王平,张葆,程志峰,等. 变焦距镜头凸轮结构优化设计[J]. 光学 精密工程,2010,18(4):893-898.
WANG P,ZHANG B,CHENG ZH F,*et al.*. Optical design of cam structure of zoom lens[J]. *Opt. Precision Eng.*,2010,18(4):893-898. (in Chinese)

[3] 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.
CAI W,ZHANG X,FENG X H,*et al.*. Compensating mode for zoom system[J]. *Opt. Precision Eng.*,2011,19(9):2063-2071. (in Chinese)

[4] 郜烘云,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 CH CH. Middle infrared continuous zoom optical system[J]. *Opt. Precision Eng.*,2007,15(7):1038-1043. (in Chinese)

[5] 左保军,况耀武. 红外/激光双模导引头的光学系统[J]. 红外与激光工程,2009,38(3):495-499.
ZUO B J,KUANG Y W. Optical design of the IR/laser dual-mode seeker[J]. *Infrared and Laser Eng.*,2009,38(3):495-499. (in Chinese)

[6] 赵学颜. 变焦距跟踪测量的应用[J]. 装备指挥技术学院学报,2000,2:9-12.
ZHAO X Y. Application for changing focal length in the process of tracking measurement[J]. *J. Institute of Command and Technology*,2000,2:9-12. (in Chinese)

[7] 赵阳,巩岩,胡宜宁. 变焦距光学系统降低公差灵敏度的方法[J]. 光电工程,2009,36(7):121-125.
ZHAO Y,GONG Y,HU Y N. Method of tolerance sensitivity reduction of zoom optical system[J]. *Opto-Electronic Eng.*,2009,36(7):121-125.

[8] FISCHER R E. *Optical System Design*[M]. New York:McGraw-HILL,Inc,2000.

[9] SMITH W J. *Modern Optical Engineering:The Design of the Optical System*[M]. New York:McGraw-HILL,Inc,1990.

[10] 张晓辉,韩昌元,潘玉龙. 传输型CCD相机综合像质评价方法的研究[J]. 红外与激光工程,2008,37(4):697-701.
ZHANG X H,HAN C Y,PAN Y L. Evaluation of general image quality of transfer optical remote sensing CCD camera[J]. *Infrared and Laser Eng.*,2008,37(4):697-701. (in Chinese)

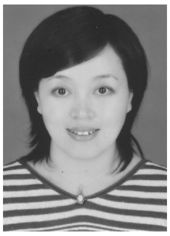
[11] 史光辉. 长焦距大视场折反射系统的光学设计[J]. 光学学报,1991,11(7):651-655.
SHI G H. Optical design of catadioptric lenses with long focal length and wide field of view[J]. *Acta Optica Sinica*,1991,11(7):651-655. (in Chinese)

[12] 李零印,王一凡,王骥. 靶场光学测量中的变焦距光学系统[J]. 中国光学,2011,4(3):240-246.
LI L Y,WANG Y F,WANG J. Varifocal optical system to optical measurement of shooting range[J]. *Chinese Optics*,2011,4(3):240-246. (in Chinese)

[13] 徐亮,赵建科,周艳,等. 长焦距、大视场空间观测相机光学系统设计[J]. 光学与光电技术,2010,8(6):64-66.
XU L,ZHAO J K,ZHOU Y,*et al.*. Optical design of the space observation camera with long focal length and wide field of view[J]. *Optics Optoelectronic Technology*,2010,8(6):64-66. (in Chinese)

[14] 杨振刚,陈海清. 红外光学系统焦距测量的研究[J]. 光学与光电技术,2011,9(6):33-35.
YANG ZH G,CHEN H Q. Infrared optic systems focus measurement[J]. *Optics Optoelectronic Technology*,2011,9(6):33-35. (in Chinese)

作者简介:



王 红(1968—),女,吉林长春人,博士,研究员,主要从事光学遥感器与大型光电经纬仪方面的研究。E-mail:wanghong@ciomp.ac.cn

田铁印(1967—),男,吉林长春人,研究员,主要从事环境适应性好、高精度新型光学系统设计、热光学分析、杂光分析以及计算机辅助装调等方面的研究。E-mail:tiantieyin@ciomp.ac.cn