

文章编号:1004-4213(2010)s1-0101-4

一种 8 倍可见光变焦光学系统设计

范哲源,曹剑中,屈恩世,杨洪涛

(中国科学院西安光学精密机械研究所 飞行器光学成像与测量技术研究室,西安 710119)

摘 要:本文设计了一种焦距为 6.5~52 mm 的可见光变焦距光学系统,视场角为 6.6°~52°.设计中选取 5 个焦距位置进行了计算,采用负组变倍和正组补偿方式,实现连续变焦.设计结果表明其成像质量良好,其中 75 lp/mm 处的调制传递函数值均大于 0.6,弥散圆直径小于像元尺寸.最后采用插值拟合的方法进行了凸轮曲线的设计,该系统具有长度短,成像质量好,凸轮曲线平滑易于加工,工艺性好等优点.

关键词:变焦设计;像差;传递函数;凸轮曲线

中图分类号:O435

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb201039s1.0101

0 引言

变焦距光学系统可以实现焦距的连续变化并保持像面稳定,在变焦过程中保持良好的成像质量,且具有相对孔径基本不变的主要特点,已广泛应用于国民经济和国防的很多领域^[1].与定焦距镜头相比,变焦距镜头能在一定范围内迅速改变系统的焦距,使物像之间的倍率连续变化,产生定焦距镜头无法达到的良好的视觉效果^[2-3].可以在短焦距大视场状态下监测,在长焦距小视场下对目标进行定位分析,另外与换挡变倍光学系统相比,连续变焦距光学系统的优势主要在于在工作状态下,连续变焦过程中不丢失目标信息(换挡变倍光学系统变焦过程中会丢帧^[1-3]).本文设计了一种 8 倍连续变焦的光学系统,该系统能够满足航空相机前视要求,通过焦距连续变化,实现对不同视场目标成像,并给出了优化后的凸轮曲线.

1 设计原理

机械补偿变焦距系统的基本原理是利用系统中 2 个以上透镜组的移动来改变系统的组合焦距^[4],移动过程中需满足“物像交换原则”,使焦距在一定范围内连续改变时,其像面基本保持不动.即需要满足方程^[5]

$$\sum \frac{1-m_i^2}{m_i^2} f'_i dm_i = 0 \quad (1)$$

本文采用的变焦形式如图 1 所示,其中 ϕ_2 为变倍组, ϕ_3 为中间固定组, ϕ_4 为补偿组,此种形式的变焦运动应满足方程

$$(1-m_2^2)m_3^2m_4^2d_q + (1-m_4^2)d_\Delta = 0 \quad (2)$$

式中

$$d_q = \frac{f'_2}{m_2^2} dm_2 \quad (3)$$

$$d_\Delta = f'_4 dm_4 \quad (4)$$

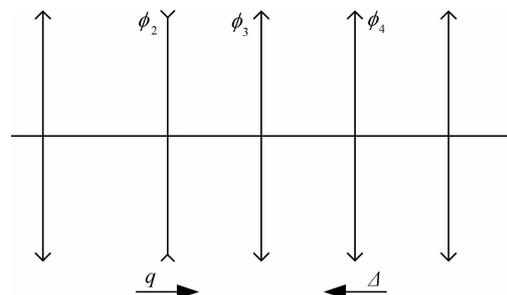


图 1 变焦形式示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the zoom system

将式(3)和(4)代入式(2)可知该种形式的变焦方程为

$$m_3^2 \frac{1-m_2^2}{m_2^2} f'_2 dm_2 + \frac{1-m_4^2}{m_4^2} f'_4 dm_4 = 0 \quad (5)$$

2 设计实例

现设计一焦距为 6.5~52 mm,系统 F 数为 4,靶面尺寸为 1/3 英寸 CCD 的可见光变焦距光学系统,其好处是由前组成像后的系统倍率经由固定组 ϕ_3 放大后传递给补偿组,有助于系统尺寸的减小,并且采用负组变倍,正组补偿系统也有助于系统轴向尺寸的减小,采用正组补偿的优点是前固定组焦距较长,口径较小,对系统产生的二级光谱最小,补偿曲线单调、平滑且变焦比增长快,初始位置选定为系统的长焦位置,本例中,归一化后前固定组焦距

第一作者:范哲源(1982-),男,工程师,硕士,主要研究方向为光学系统设计. Email: fzy@opt. ac. cn

收稿日期:2010-12-27;修回日期:2010-12-31

$f'_1=4.91$, 变倍组焦距 $f'_2=-1$, 中间固定组焦距为 $f'_3=3.87$, 补偿组焦距 $f'_4=1.12$, 后固定组焦距为 $f'_5=3.76$. 设计结果如图 2. 图 2 中给出了系统在焦

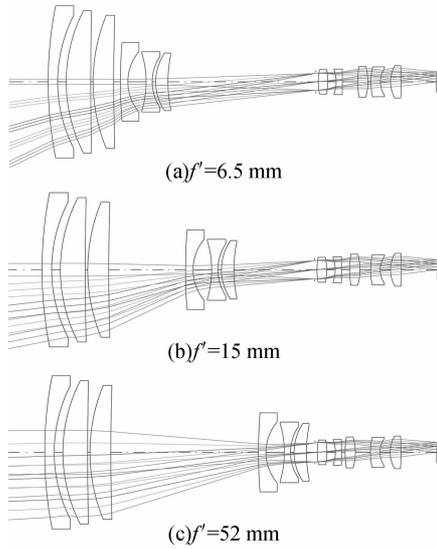


图 2 变焦系统结构

Fig. 2 Schematic diagram of the zoom system

距为 $f'=6.5, 15, 52$ mm 时的光学结构图. 系统从第一面顶点到像面总长为 115 mm, 所有透镜均为球面镜, 加工难度低, 系统的间隔参量如表 1, 其中最后一列为后截距(Back Focal Length, BFL).

表 1 间隔参量

Table 1 Interval parameters/mm

d_6	d_{12}	d_{17}	d_{19}	f'	BFL
2	43.80	4.59	0.89	6.5	10.44
22.34	23.46	2.39	3.08	15	10.46
31.55	14.25	1.07	4.41	25	10.46
34.49	11.31	0.7	4.78	30	10.46
43.30	2.5	1.04	4.43	52	10.45

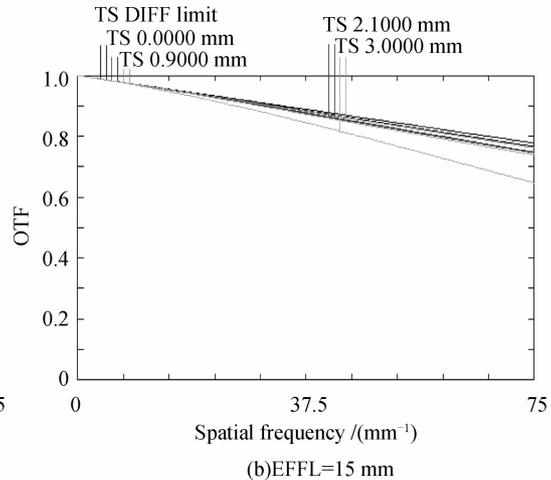
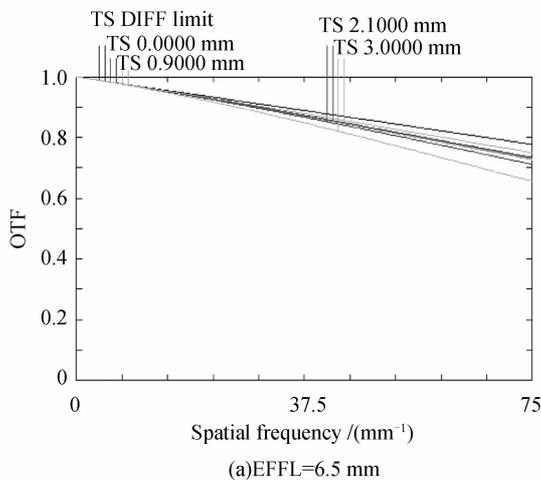
3 像差校正及像质评价

当光学系统中前固定组、变倍组、补偿组、后固定组的焦距及各组件之间长焦、短焦位置的间隔初步确定以后, 进入像差校正阶段, 分别对前固定组、变倍组、补偿组、后固定组进行优化, 然后将各部分连接起来总体优化. 由于第一辅助光线改变量的最大值发生在前固定组长焦位置, 因此用前固定组校正长焦位置的球差和正弦差; 第二辅助光线该变量的最大值发生在变倍组的短焦位置, 因此用变倍组来校正短焦位置的细光束像差, 利用后固定组校正短焦位置的轴上像差^[6]. 表 2 给出了系统中五个位置最大视场弥散圆直径的均方根值. 从表中可以看出, 系统长焦时最大视场弥散圆直径为 $4.2 \mu\text{m}$, 小于 CCD 像元尺寸. 图 3 给出了系统 4 个不同焦距(Effective Focal Length, EFFL)位置的传递函数曲线, CCD 像元尺寸为 $6.7 \mu\text{m}$, 奈奎斯特频率为 $F=74.6 \text{ lp/mm}$, 从图中可以看到, 系统在 75 lp/mm 的 MTF 值均大于 0.6, 从传函曲线可以看出, 系统各视场成像质量比较均匀, 接近衍射极限, 通过传递函数和弥散圆直径可以看出系统有比较理想的成像质量.

表 2 各变焦位置弥散斑直径的均方根值

Table 2 RMS of spot diameters

Focus	Field of view	Rms/ $(\times 10^{-2} \text{ mm})$
$f'=6.5 \text{ mm}$	1.0	0.29
$f'=15 \text{ mm}$	1.0	0.35
$f'=25 \text{ mm}$	1.0	0.28
$f'=30 \text{ mm}$	1.0	0.29
$f'=52 \text{ mm}$	1.0	0.42



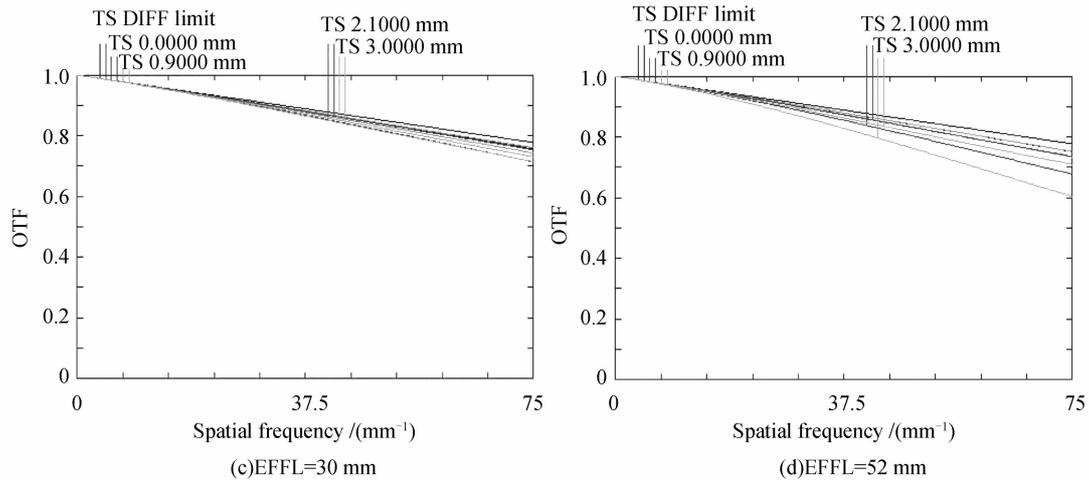


图3 系统四个不同焦距位置的传递函数

Fig. 3 MTF of the four different EFFLs

4 凸轮曲线设计

凸轮曲线的拟合以保证像面稳定,像质良好为条件,在运动组件的运动范围内插入一定的点.本设计中采取变倍组线性变化,补偿组在凸轮的带动下以一定步长做曲线运动,最后根据插入点的数据可以拟合出变倍组及补偿组的运动曲线方程,进行凸轮加工.此方法不需要经过复杂的公式推导出凸轮曲线,而是通过插值并优化的方法得出凸轮曲线^[7].

设计中选用了5个焦距位置对系统进行优化,其选择的焦距位置分别为 $f' = 6, 5, 15, 25, 30, 52$ mm.当优化后的系统成像质量达到要求时用 code v 编制一个小程序对系统的曲线加以控制优化.在变倍组和补偿组的运动行程中插入99个点,使变倍组在移动的同时有一个优化后的补偿组位置与之对应,并保证其变倍组为线性移动,补偿组间隔变化为非线性,使系统能够实现连续变倍的同时保证各位置的成像质量.编制程序为:

```
dez 1
frz sa
thc s12 0
thc s17 0
thc s19 0
cam
efl=10
oal s1..13=(oal s1..13)
inc (43.3-2.0)/98
lim 43.3
lis s6 s12 s17 s19
go
```

将得到的数据进行曲线拟合,得到如图4的凸

轮曲线.图中,纵坐标表示不同时刻的焦距值,横坐标表示为不同焦距时在光轴方向对应的变倍组与补偿组的间隔.曲线1表示为变倍组的移动曲线,曲线2为补偿组的移动运动曲线.从图中可以看出,凸轮曲线平滑,对得到的数据进行拟合可以得到凸轮曲线方程,进行机械加工.

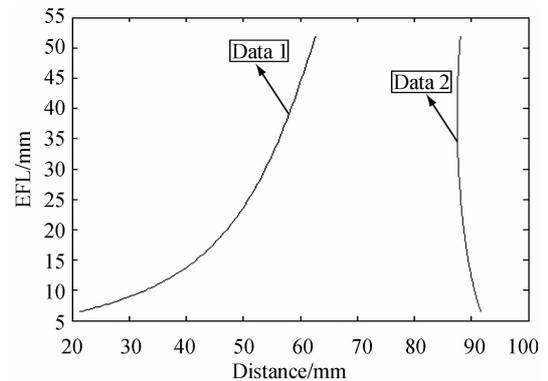


图4 凸轮曲线

Fig. 4 Curves of the zoom lens

5 结论

本文设计了一种高变倍的可见光变焦距光学系统,短焦时能对目标进行搜索,长焦时能对目标进行精确跟踪.设计中根据第一辅助光线及第二辅助光线在各组分上的变化情况校正了系统像差,系统中所有透镜均为球面透镜,加工难度小,系统总长短,最后用插值法进行凸轮曲线的拟合并对曲线进行优化,优化后的凸轮曲线可以保证像面稳定,凸轮曲线平滑,此方法不需要经过复杂的公式推导,且优化后各焦距位置成像质量良好.

参考文献

- [1] TIAN Hai-xia, YANG Jian-feng, MA Xiao-long. Design for visible video zoom optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(9):1797-1799.

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**(9):1797-1799.
- [2] YIN Na, MENG Qing-chao, QI Yan-long, *et al.* Middle infrared continuous zoom optical system [J]. *Infrared Technology*,2009,**31**(12):694-697.
尹娜,孟庆超,齐雁龙,等.中波红外连续变焦光学系统设计[J].红外技术,2009,**31**(12):694-697.
- [3] KUO C W, LIN C Y, HAN C Y. Dual field-of-view midwave infrared optical design and ather malization analysis [J]. *Applied Optics*,2010,**49**(19):3691-3700.
- [4] ZHANG Liang. Optical design for middle infrared zoom system [J]. *Journal of Applied Optics*,2006,**27**(1):32-34.
张良.中波红外变焦距系统的光学设计[J].应用光学,2006,**27**(1):32-34.
- [5] 陶纯堪.变焦距光学系统设计[M].北京:国防工业出版社,1988:33-39,140-153.
- [6] CHENG Ke, ZHOU Si-zhong, ZHANG Heng-jin. Design of a short focal-length zoom system [J]. *Acta Photonica Sinica*,2005,**34**(12):1825-1828.
程珂,周泗忠,张恒金.短焦距变焦物镜设计[J].光子学报,2005,**34**(12):1825-1828.
- [7] WANG Peng, ZHAO Wen-cai, HU Ming-yong *et al.* Design of catadioptric large aperature three group elements infrared zoom system [J]. *Acta Optica Sinica*,2002,**22**(5):577-581.
王鹏,赵文才,胡明勇等.折返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.

Design of an 8 Times Ratio Visible Zoom Optical System

FAN Zhe-yuan, CAO Jian-zhong, QU En-shi, YANG Hong-tao

(*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

Abstract: An example of $8\times$ ratio visible zoom system with mechanic compensator was designed. The focal length and angle of vision of the system were $6.5\sim 52$ mm and $6.6^\circ\sim 52^\circ$, respectively. The modulation transfer function(MTF) is above 0.6 within the whole focal range at spatial frequency of 75 lp/mm, and approaches the diffraction limit. RMS value of spot diameter was investigated. The cam curves after optimization was given. The system has the advantages of simple structure, high image quality, short zoom path and smooth zoom locus etc.

Key words: Zoom system design; Aberration; MTF; Cam curves