

红外两档变倍光学系统设计

李 刚, 张恒金

(中国科学院西安光学精密机械研究所 动目标实验室, 陕西 西安 710068)

摘要:与连续变焦光学系统相比, 红外两档变倍光学系统具有结构简单、成像质量好、装调容易等特点, 介绍了红外两档变倍光学系统的设计方法, 并举例设计了一种方案合理、成像质量好的红外两档变倍光学系统, 对光学系统的 0 视场、0.5 视场、0.71 视场、0.866 视场和 1 视场成像质量进行了分析, 给出了各个视场的分析结果, 同时分析了温度变化对光学系统的影响, 分析表明设计结果能够较好地满足实际工程需要。

关键词:红外光学系统; 两档变倍; 调制传递函数; 成像质量

中图分类号: O43; TN21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2006)04-0472-04

Design of the infrared switch-zoom optical system

LI Gang, ZHANG Heng-jin

(Dynamic Target Measure and Control Laboratory, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068, China)

Abstract: Compared with the continuous zoom system, infrared switch-zoom optical system had many advantages, such as simple structure, prefect imaging quality and easy fixing. In this paper, the design method was introduced. And an example was given. The analysis results for various fields were presented and the thermal effect on optical system was analyzed. The results show that the design is reasonable and the imaging quality is good.

Key words: Infrared optical system; Switch-zoom; MTF; Imaging quality

0 引 言

变焦(变倍)光学系统按照其变焦过程中焦距值是否连续变化可分为两类:一类为连续变焦,即通过透镜组轴向间隙的连续变化而改变系统焦距;另一类为非连续变焦(切换式变焦系统),即通过切换系统中的透镜组来改变焦距值,通常被使用的主要有两档变

倍和三档变倍,红外波段两档变倍最为常用。

红外连续变焦系统可以通过运动透镜组光学补偿线性移动或机械补偿非线性(凸轮曲线)移动来实现焦距变化且像面保持不变。设计上,在材料选择、冷屏匹配、镀膜等方面都有较大的困难,并且这类系统轴向尺寸长,前部透镜口径大,且轴外光束切割严重而造成渐晕和图像噪声;红外切换式变焦系统的特点

收稿日期:2005-08-10; 修订日期:2005-10-25

基金项目:国家国防科技基金支持项目

作者简介:李刚(1975-),男,吉林通化人,高级工程师,硕士,主要从事光学系统设计。Email:lg.lee@163.com

是长短焦透镜组总有一组位于光路中,而另一组在系统之外,此类系统切换时间短、装配调整简单、纵向尺寸紧凑、透镜组元之间空间尺寸大、透过率高,常用于军事目标跟踪成像系统中。因此,文中主要讨论红外两档变倍光学系统。

1 结构原理

红外两档变倍光学系统的设计原则与连续变焦系统^[1,2]类似,主要应满足变倍时长短焦像面位置保持不变,其次是成像质量好,相对口径大。

图1为红外两档变倍光学系统结构原理图。

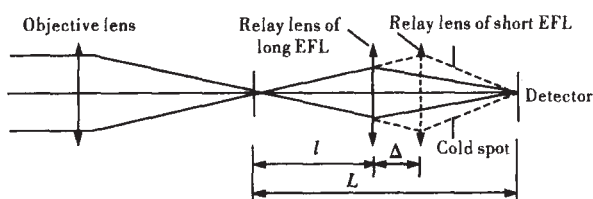


图1 光学系统结构原理图

Fig.1 Diagram of the structure of optical system

该系统由两组物镜组组成,前组物镜组(焦距 f_1')接收无穷远物体且成像在一次像面处,后组是一个投影镜组,它的作用是使系统的出瞳与热像仪的冷屏尽量重合,这样做的优点是使背景杂光、镜筒热辐射杂光不能入射到热像仪的靶面上,避免造成干扰,提高信噪比。如果整个系统要求倍率改变 K ,那么投影镜组的垂轴放大率也改变 K ,当投影镜组焦距 f_2' 、物距 l 、垂轴放大率 β 和投影镜组共轭距 L 的关系如下:

$$f_2' = \frac{-\beta L}{(1-\beta)^2} \quad (1)$$

$$l = -f_2' \left(1 - \frac{1}{\beta} \right) \quad (2)$$

当系统分别处于长焦和短焦位置时,利用公式(1)、(2)计算出的结果带入公式(3)~(6)即可求出其他高斯光学参数:

$$\Delta = l_{\text{长}} - l_{\text{短}} \quad (3)$$

$$K = \beta_{\text{长}} / \beta_{\text{短}} = f_1' / f_3' \quad (4)$$

$$f_{\text{长}}' = f_1' \beta_{\text{长}} \quad (5)$$

$$f_{\text{短}}' = f_1' \beta_{\text{短}} \quad (6)$$

式中: Δ 为投影系统从长焦位置移动到短焦位置的移

动量; K 为变焦倍率; $\beta_{\text{长}}$ 为长焦时投影镜组的垂轴放大率; $\beta_{\text{短}}$ 为短焦时投影镜组的垂轴放大率; f_1' 为前组物镜组焦距; $f_{\text{长}}'$ 为长焦时系统焦距值; $f_{\text{短}}'$ 为短焦时系统焦距值。

2 设计举例

光学系统的主要技术指标如下:

- (1) 工作波段 $3 \sim 5 \mu\text{m}$;
- (2) 焦距值 $f' = 400 \text{ mm}$ 、 200 mm ,两档变倍;
- (3) 探测器的像元数 320×240 ,像元尺寸 $30 \mu\text{m}$;
- (4) 视场 $2\omega = 1.72^\circ$ 、 3.44° ;
- (5) 相对口径 $D/f' = 1/4$;
- (6) 调焦范围 $250 \text{ m} \sim \infty$;
- (7) 冷屏到像面的光学间隔为 20 mm ;
- (8) 工作温度 $-30 \sim 50^\circ\text{C}$ 。

考虑到长焦时要有较好的像质(长焦距常被使用),按照非物像交换的原则来分配前组物镜和投影镜组的光焦度,这里前组物镜焦距值取 400 mm ,长焦时投影镜组放大率为 -1 倍、短焦时投影镜组放大率为 -0.5 倍。

初步考虑投影镜组共轭距 L 为 120 mm ,则利用公式(1)~(6)求得光学系统高斯光学参数见表1。

表1 系统高斯光学参数表

Tab.1 Gauss optical parameters of the system

f_{21}'/l mm	f_{22}'/l mm	L_l/mm	L_s/mm	Δ/mm	β_s	f_1'/mm	f_3'/l mm
30	26.67	-60	-80	20	-0.5 ^a	400	200

前组是主物镜系统,只用单片是不可能成完善像的,对于 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 的波段成像时,考虑用硅锗材料构成双分离透镜,球差和色差可得到很好的校正。

投影镜组采用红外材料硅-硅-锗-硅的四片组合系统。为满足系统由 $250 \text{ m} \sim \infty$ 的距离调焦、温度调焦和装调方便的要求,考虑将投影镜组设计为由两组焦距相等透镜组组成,中间置为平行光,见图2,由投影镜组前组 f_3' 左右移动实现调焦,而系统像面位置保持不变。

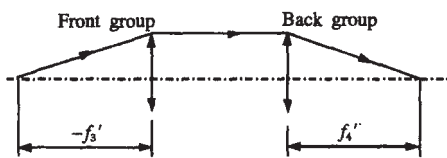


图 2 投影镜组示意图

Fig.2 Sketch of project lens groups

在进行像差校正时,前后组可独立分析和校正像差,然后使整个系统像差得到平衡。光阑放置在冷屏上,冷屏效率为 100%,并且控制第一个镜片的口径在长焦和短焦时大致相等,这样可以减少在短焦状态进入系统的杂光。

3 设计结果

使用美国 Focus 公司研制的 ZEMAX 光学辅助设计软件进行像差平衡并分别对长焦时的 0° 、 0.43° 、 0.61° 、 0.75° 和 0.86° 的视场以及短焦时 0° 、 0.86° 、 1.22° 、 1.5° 和 1.72° 的视场的成像进行了分析,长、短焦光学系统结构如图 3 和图 4 所示。

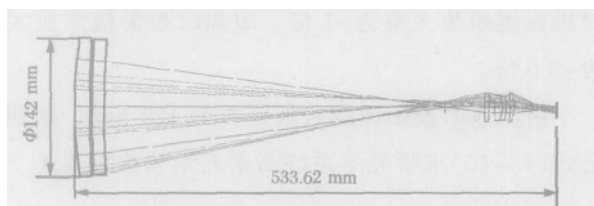


图 3 长焦系统结构示意图

Fig.3 Optical layout of long EFL

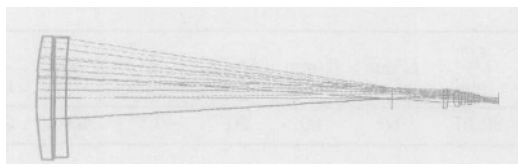


图 4 短焦系统结构示意图

Fig.4 Optical layout of short EFL

3.1 主要光学性能

长、短焦光学系统的主要光学性能为:

(1) 焦距

$$f_{\text{长}}' = 400.02 \text{ mm}, f_{\text{短}}' = 199.99 \text{ mm};$$

(2) 相对孔径

长焦相对孔径为 $1/4$ 、短焦相对孔径为 $1/4$;

(3) 视场

$$2\omega_{\text{长}} = 1.72^\circ, 2\omega_{\text{短}} = 3.44^\circ.$$

3.2 调制传递函数

图 5 和图 6 为系统分别处在长焦和短焦状态时的调制传递函数曲线图,从图中可以看出,系统在长焦和短焦状态时所有视场子午、弧矢的 MTF 都接近衍射极限。

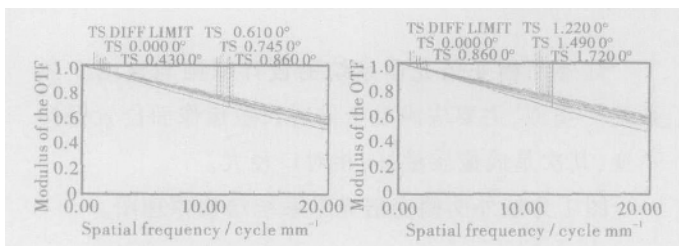


图 5 长焦调制传递函数曲线图 图 6 短焦调制传递函数曲线图

Fig.5 MTF curve of long EFL Fig.6 MTF curve of short EFL

3.3 SPT

图 7 和图 8 分别为系统为长、短焦时的点列图,各视场的 RMS 弥散半径。

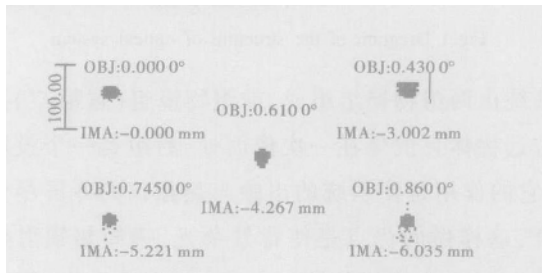


图 7 长焦点列图

Fig.7 Spot diagram of long EFL

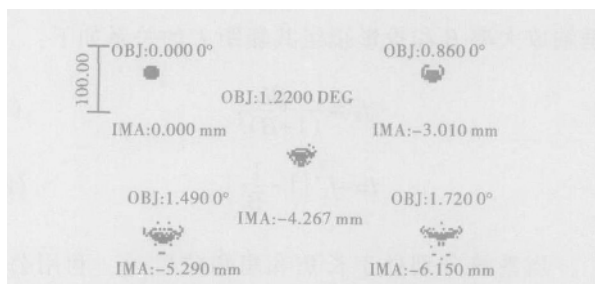


图 8 短焦点列图

Fig.8 Spot diagram of short EFL

4 温度变化对系统的影响

红外光学材料的折射率温度系数比普通的光学玻璃高两个数量级,因而温度的变化会对红外光学系统产生一定的影响。由于温度的影响,在室温下装配

调整的系统由于环境温度的改变而产生像面偏移。当该偏移量超过光学系统的焦深($F=4, \lambda_0=4\text{ }\mu\text{m}$ 的情况下其焦深为 0.256 mm)后,如不进行像面调整,像面偏移会造成光学系统的 MTF 下降及弥散斑的扩大。

像面偏移的分析计算考虑了 Si、Ge 材料的折射率温度系数及镜片安装材料(这里选用铸铝)的线膨胀系数的影响,以室温 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的设计像面为参考像面,不同环境温度下长焦和短焦系统像面偏移及调焦后的像差结果列于表 2 和表 3。

表 2 调焦后长焦系统温度变化对焦距和 MTF 的影响

Tab.2 Thermal effect of long EFL on focus length and MTF after refocus

$t/^{\circ}\text{C}$	f'/mm	MTF 20 lp mm ⁻¹	FOV		
			0ω	0.71ω	1ω
-30	399.53	t	0.57	0.54	0.41
		s	0.57	0.55	0.47
0	399.81	t	0.57	0.55	0.48
		s	0.57	0.57	0.51
20	400	t	0.57	0.54	0.5
		s	0.57	0.57	0.53
50	400.30	t	0.57	0.52	0.47
		s	0.57	0.57	0.56

表 3 调焦后短焦系统温度变化对焦距和 MTF 的影响

Tab.3 Thermal effect of short EFL on focus length and MTF after refocus

$t/^{\circ}\text{C}$	f'/mm	MTF 20 lp mm ⁻¹	FOV		
			0ω	0.71ω	1ω
-30	199.52	t	0.58	0.55	0.53
		s	0.58	0.55	0.47
0	199.79	t	0.58	0.55	0.53
		s	0.58	0.55	0.47
20	200	t	0.58	0.55	0.53
		s	0.58	0.55	0.47
50	200.32	t	0.58	0.56	0.53
		s	0.58	0.55	0.47

由以上数据可以看出,温度变化引起的像差变化在调焦后都在允许的范围内。

5 结束语

红外两档变倍光学系统具有结构简单、成像质量好、装调容易等特点,通过精心设计能够较好地满足实际的需要。

参考文献:

[1] LIU Xiao-min.High-rated high resolution zoom lens design[J].
Journal of Applied Optics(刘肖民.高倍率高分辨率变焦距镜头设计.应用光学),1993,14(4):5-11.

[2] LI Lin,WANG Yong-tian,ZHANG Li-qin,et al.An approach on the calculation of gaussian parameters of zoom lenses[J].Journal of Beijing Institute of Technology(李林,王涌天,张丽琴,等.变焦距物镜高斯光学参数的求解.北京理工大学学报),2003,23(4):424-427.

[3] LI Xiao-tong, HE Guo-xiong.Research of optimization design for zoom lens gaussian parameters[J].Journal of Zhejiang University (Engineering Science)(李晓彤,何国雄.变焦距系统高斯解优化的研究.浙江大学学报(工学版)),1993,27(1):122-128.

[4] ZHANG Bo,LI Lin,AN Lian -sheng,et al.Theory of equivalent magnification zoom lens with all lens elements movable[J].Optical Technology(张波,李林,安连生,等.等倍变焦全动型变焦物镜理论分析.光学技术),2001,27(3):226-228.

[5] WU Xiao-jing,SUN Chi-quan,MENG Jun-he.Relationship between athermalizing infrared optical system and zoom lens [J].Infrared and Laser Engineering(吴晓靖,孙赤全,孟军和.红外光学系统无热化设计与变焦距镜头的关系.红外与激光工程),2002,31(3):249-252.

[6] TAO Chun-kan.Zoom Focus Optics System Design[M].Beijing: National Defense Industry Press(陶纯堪.变焦距光学系统设计.北京:国防工业出版社),1988:7.

[7] LI Lin,AN Lian -sheng.Theory and Application of Computer Aided Optical Design Application [M].Beijing:National Defense Industry Press(李林,安连生.计算机辅助光学设计的理论与应用.北京:国防工业出版社),2002,4:158.

敬告读者

本刊现已开通在线投稿系统,请登陆本刊主页(<http://irla.vip.sina.com>)进行投稿。