

文章编号: 0253-2239(2010)03-0872-04

切换变倍光学系统设计

王海涛 耿安兵 杨长城

(华中光电技术研究所武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430073)

摘要 切换变倍光学系统能实现系统两档/多档变倍, 根据切换变倍光学系统特性, 完成切换组元焦距与系统组元间隔、焦距、 F 数和系统变倍比之间关系理论研究, 在窄视场子系统中旋转切入“负-正”搭配透镜组实现宽视场(短焦)子系统, 同时要求该窄视场时, 视场变换透镜组元不挡光。通过设计中波切换变倍光学系统实例, 验证了所推导出的公式的可靠性。切换变倍系统能实现系统两档/三档变倍, 且视场间切换时间快, 窄视场子系统系统片数少、系统作用距离远, 符合系统搜索跟踪一体化需求。

关键词 光学设计; 切换变倍; 双视场; 视场切换

中图分类号 TN216 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103003.0872

Design of Rotate-in-Group Zoom Optical System

Wang Haitao Geng Anbing Yang Changcheng

(Huazhong Institute of Electro-Optics, Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan, Hubei 430073, China)

Abstract A rotate-in-group zoom optical system can realize dual/multiple field-of-view (FOV) switch, and according to its characteristics the relation of rotate-in-group lenses focus and system's lenses spacing, focus, F number and magnification factor is retrieved. Rapid switch is achieved for a rotate-in-group zoom optical system when a narrow FOV subsystem changes to a wide one after a rotate-in motion of two negative-positive separated lens groups. Meanwhile, in the wide field mode, the FOV switch lens group is located outside the active narrow-field ray-bundle without intersection. The derived formula is proved by the design of a focal plane array-based midwave infrared rotate-in-group zoom optical system. The designed system has rapid dual/triplex FOV switch, limited lens number for narrow FOV subsystem, and large operation range, and meets the requirement of infrared search and track.

Key words optical design; rotate-in-group zoom optics; dual field-of-view; field-of-view switch

1 引 言

红外搜索跟踪一体化系统一般具有两个或两个以上视场: 大视场搜索、小视场远程跟踪, 根据系统搜索/跟踪具体需求, 视场间快速互换^[1]。导弹、飞机等目标速度快, 如果切换时间不够快, 很有可能当系统从大视场切换到小视场时, 目标已经飞出小视场, 造成目标脱靶。常用的轴向移动变倍系统变倍时间受到变倍行程长、变倍组元口径和重量大、低温易卡滞等问题制约, 难以满足现代光电装备快速变倍要求, 对于大变倍比的光学系统更是如此。目前, 针对这一问题, 国外军方纷纷投入大量人力物力开展新的变倍形式研究, 各军事强国已经把能实现视

场间快速切换的变倍系统成功应用到各种高性能战斗机中。出于军事保密, 国外进行了技术封锁; 而国内也没有相关技术资料见诸报道。从 2008 年和 2009 年欧洲国际防务展获悉, 国外光电装备快速变倍系统一般具有三个视场, 中等视场为缺省视场, 搜索时切换到宽视场, 跟踪时切换到窄视场, 实现红外搜索和跟踪 (IRST) 一体化。如 SAGEM 公司生产的 EUROFLIR TM 光电吊舱采用的长波红外系统有 3 种可转化视场: 24° , 4.8° 和 1.5° ; Israel Aerospace Industries Ltd 研制的 MOSP 多用途光电吊舱长波红外视场: $24.5^\circ \times 18.4^\circ$, $7.2^\circ \times 5.4^\circ$ 和 $2^\circ \times 1.5^\circ$; 中波红外视场: $16.4^\circ \times 12.3^\circ$, $3.6^\circ \times 2.7^\circ$ 和 $0.9^\circ \times 0.7^\circ$ 。常

收稿日期: 2009-05-11; 收到修改稿日期: 2009-07-21

基金项目: 武汉光电国家实验室创新基金(P080013)资助课题。

作者简介: 王海涛(1980—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事光电仪器和光学设计等方面的研究。

E-mail: hbknight@hotmail.com

用的轴向移动变倍系统三档变倍通常需要“变倍组”和“补偿组”同时轴向移动,其光机设计比较复杂,不容易实现快速变倍。

从光电装备光学视场快速切换要求出发,根据切换变倍光学系统特性,完成切换组元焦距与系统组元间隔、焦距、 F 数和系统变倍比之间关系理论研究,通过在窄视场子系统中旋转切入“负-正”透镜组实现宽视场(短焦)子系统,同时要求窄视场时视场变换透镜组元不挡光,完成视场间能快速切换的切换变倍光学系统设计。切换变倍系统能实现系统两档/三档变倍,且视场间切换时间快(0.5 s 以内),窄

视场子系统系统片数少、系统透射率高,符合系统搜索跟踪一体化需求。

2 切换变倍光学系统

图 1 为某制冷型红外两档切换变倍光学系统示意图,窄视场(FOV)长焦子系统由 5 片透镜组成,宽视场短焦子系统通过在窄视场子系统中旋转切入“负-正”透镜组实现。窄视场子系统空档(少 2 片),其透过率明显比短焦系统高,符合实际使用要求,同时要求窄视场时视场变换透镜组不挡光。

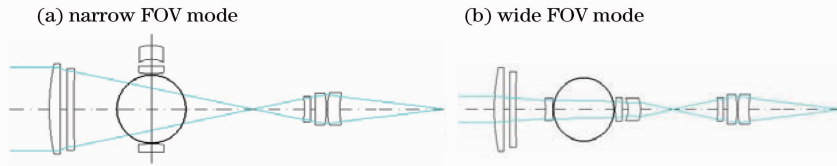


图 1 制冷型红外两档切换变倍光学系统示意图

Fig. 1 Cooled infrared rotating-in-group zoom system with dual FOV switch

如图 1 所示切换变倍系统,只需要透镜组元旋转 90° 就能实现两档变倍,时间很容易控制在 0.5 s 以内。以下就是根据切换变倍光学系统特性,研究两档变倍系统切换组元焦距与系统组元间隔、焦距和系统变倍比之间理论关系。在空档窄视场系统中旋转切入两种不同倍率的透镜组元即能实现系统三档变倍,视场间也能实现快速切换。

设切换两档变倍光学系统最大焦距 f_{\max} 和最小焦距 f_{\min} 之比 $M = f_{\max}/f_{\min}$,两档变倍光学 F 数相同,由 $F = f/D$ 得: $M = D_{\max}/D_{\min} = D_1/D_{1,2}$ 。如图 2 所示,透镜组 L_1, L_2, L_3 和 L_4 对应的焦距分别为 f_1, f_2, f_3, f_4 。长焦子系统由 L_1, L_4 透镜组组成;短焦子系统由 L_1, L_2, L_3, L_4 透镜组组成(其中 L_2, L_3 “负-正”搭配), L_2, L_3 切换切入到系统中。取 f_{\max} 时 L_1 直径为 D_1 , f_{\min} 时 L_1 直径为 $D_{1,2}$, L_1, L_2 间隔为 d_{12} , L_2, L_3 间隔为 d_{23} , 透镜组 L_1 焦点 F'_1, L_2 和

L_3 物距、像距以及系统焦点 F' , 如图 2 所示。

光学系统的焦距

$$f' = f_1 \beta_2 \beta_3 \beta_4. \quad (1)$$

假设 $\beta_4 = 1, L_4$ 透镜组光焦度为 0, 主要起像差校正等作用。

两档切换变倍焦距

$$\text{long focal: } f'_L = f_1 \beta_4 = f'_{\max}, \quad (2)$$

$$\text{short focal: } f'_S = f_1 \beta_2 \beta_3 \beta_4 = f_1 \beta_2 \beta_3 = f_{\min} = \frac{1}{M} f'_{\max}, \quad (3)$$

得切换变倍组横向放大率

$$\beta_2 \beta_3 = \frac{1}{M}, \quad (4)$$

如图 2, 根据三角形相似定理得

$$D_{3,2} = \frac{f_1 - d_{12} - d_{23}}{f_1} D_1, \quad (5)$$

$$D_{2,2} = \frac{f_1 - d_{12}}{f_1} D_{1,2} = \frac{f_1 - d_{12}}{f_1} \times \frac{D_1}{M}, \quad (6)$$

$$\frac{-L'_{2,2}}{-L'_{2,2} + d_{23}} = \frac{D_{2,2}}{D_{3,2}} = \frac{f_1 - d_{12}}{M \times (f_1 - d_{12} - d_{23})}, \quad (7)$$

这样可以得到

$$L'_{2,2} = - \frac{d_{23}(f_1 - d_{12})}{(M-1)(f_1 - d_{12}) - Md_{23}},$$

$$L_{2,2} = f_1 - d_{12},$$

$$L_{3,2} = -(-L'_{2,2} + d_{23}) =$$

$$- \frac{M \times (f_1 - d_{12} - d_{23})}{(M-1)(f_1 - d_{12}) - Md_{23}},$$

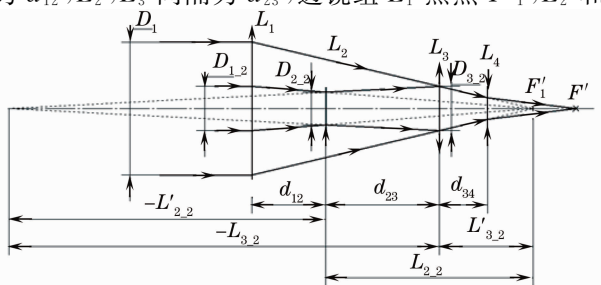


图 2 切换变倍物镜系统示意图

Fig. 2 Conceptual design of objective lenses of rotate-in-group zoom system

$$L'_{3,2} = f_1 - d_{12} - d_{23}.$$

由横向放大率 $\beta = \frac{L'}{L}$ 得^[2]

$$\beta_2 = \frac{L'_{2,2}}{L_{2,2}} = -\frac{d_{23}}{(M-1)(f_1 - d_{12}) - Md_{23}}, \quad (8)$$

$$\beta_3 = \frac{L'_{3,2}}{L_{3,2}} = -\frac{(M-1)(f_1 - d_{12}) - Md_{23}}{Md_{23}}. \quad (9)$$

这样即得

$$\beta_2\beta_3 = 1/M. \quad (10)$$

切换变倍组横向放大率 $\beta_2\beta_3$ 与(4)式一致,说明推导正确。

由高斯公式 $1/L' - 1/L = 1/f'$ 得^[2]

$$1/L'_{2,2} - 1/L_{2,2} = 1/f'_2, \quad (11)$$

代入切换变倍组中负组元 L_2 物距和像距后可得

$$f'_2 = -\frac{d_{23}(f_1 - d_{12})}{(M-1)(f_1 - d_{12}) - Md_{23}}, \quad (12)$$

$$\frac{1}{L'_{3,2}} - \frac{1}{L_{3,2}} = \frac{1}{f'_3}, \quad (13)$$

代入切换变倍组中正组元 L_3 物距和像距后可得

$$f'_3 = \frac{Md_{23}(f_1 - d_{12} - d_{23})}{(M-1)(f_1 - d_{12})}, \quad (14)$$

$$\frac{f'_2}{f'_3} = -\frac{(f_1 - d_{12})^2}{M(f_1 - d_{12} - d_{23})^2}, \quad (15)$$

$$F_2 = \frac{f'_2}{D_{2,2}} = -\frac{Md_{23}}{(M-1)(f_1 - d_{12} - d_{23})}F_1, \quad (16)$$

$$F_3 = \frac{f'_3}{D_{3,2}} = \frac{Md_{23}}{(M-1)(f_1 - d_{12})}F_1, \quad (17)$$

$$\frac{F_2}{F_3} = \frac{f_1 - d_{12}}{f_1 - d_{12} - d_{23}}. \quad (18)$$

推导结果表明:切换变倍组元的焦距与系统变倍比、切换组元间隔、 L_1 透镜组焦距等相关;变倍组元的 F 数与 L_1 透镜组 F 数成正比,与系统变倍比、切换组元间隔等相关。根据以上公式,实际初始设计阶段,可根据总体焦距、外形尺寸等初定 f_1, d_{12}, d_{23} , 计算出切入组两单元透镜焦距、直径、 F 数。必要时调整 f_1, d_{12}, d_{23} 使得 L_2, L_3 的焦距及 F 数分配合理,降低整个系统公差敏感度。

在设计过程中应当适当拉开 L_2 和 L_3 间隔,以

保证窄视场时视场变换透镜组元不挡光,同时要求在切换过程中,切换组元结构件不与前后透镜组元结构件干涉。

在上述两档变倍系统基础上,改变 L_2, L_3 组元焦距(f_2, f_3)和间隔(d_{12}, d_{23}, d_{34}),在原窄视场子系统中旋转切入不同倍率“负-正”变倍透镜组元,即能实现系统三档/多档切换变倍。

3 设计实例

设计要求:系统的观测波段为 $3.0 \sim 5.0 \mu\text{m}$,探测器为 320×240 制冷型,像元大小为 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$,两档切换变焦 $60/180 \text{ mm}$,相对孔径 $D/f=1/2$ 。

根根 f, F, D, M 和组元间隔关系,按照上述推导公式进行分配 f_1, d_{12}, d_{23} 和试算得到下列初始结构参数表 1,并在此基础上优化和像差平衡。

表 1 物镜系统光焦度分配

Table 1 Optical power distribution of objective system

Group	Focal length /mm	Diameter	F	Thickness /mm
L_1	233.73	90	2.6	59.21
L_2	-112.79	22.4	5	104.4
L_3	59.37	27	2.2	—
L_4	414.7	—	—	—

根据理想光学系统进行分配的光焦度在优化过程中进行适当放开,非理想的薄透镜和透镜组的分裂导致透镜组主面位置变化,其间隔要考虑到切换结构占用空间、长焦空档时切换的“负-正”两透镜组不挡光。适当进行光焦度分裂,特别是 L_1 和 L_4 透镜组的分裂,有利于降低系统公差敏感度、提高系统像质。通常制冷红外系统为减小光学系统径向尺寸,提高像面对比度,采用二次成像技术和 100% 冷光阑效率^[3,4],如图 3 所示初始结构示意图,在物镜系统后再加上一个二次成像透镜组元。设一次像面后透镜组放大倍率 -1 ,一次像面前光学子系统焦距为 $60/180 \text{ mm}$ 。

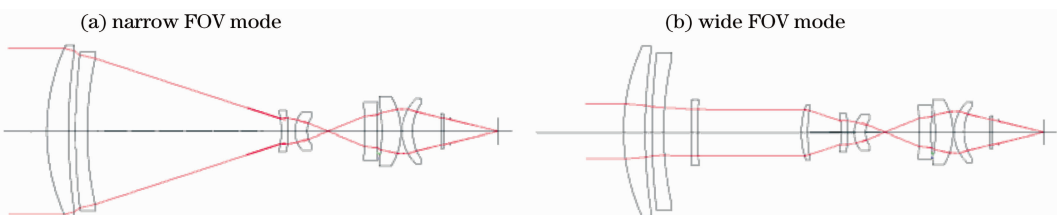


图 3 切换变倍系统示意图

Fig. 3 Schematic of rotate-in-group zoom system

通过对 L_1, L_4 透镜组分裂,正、负光焦度的搭配, G_e 和 S_e 等材料合理搭配,非球面的运用^[5],系统取得比较好的像质。切换变倍系统采用 7 片/9 片结构形式,系统公差对不敏感。

如图 4 所示,在 16 lp/mm 时全视场范围内调制传递函数达 0.7 以上,完全满足探测器要求。弥散圆直径均方根值(20 μm)在一个像元内;零件的加工公差、系统的装调误差等都得到比较好的控制,满足系统工程化需求^[6~10]。

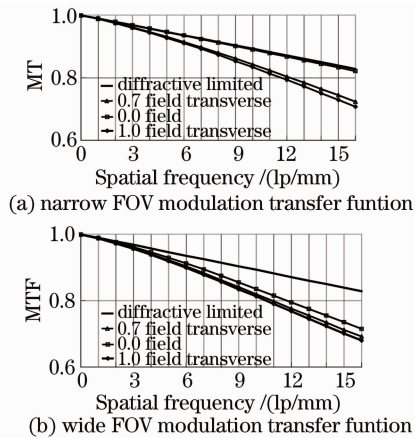


图 4 切换变倍系统传递函数

Fig. 4 MTF graph of rotate-in-group zoom optics

透镜组元 L_1, L_2, L_3 和 L_4 是否分裂,需要结合实际校正像差和降低系统公差敏感度的需要,如图 1 所示的中波制冷型 F_4 切换变倍系统,其中物镜系统只用到 L_1, L_2, L_3 三个透镜组元,把其中的 L_1 和 L_3 透镜组元分裂,长焦时空档,短焦时“负(1片)-正(2片)”透镜组元切入。

从以上的分析推导和设计实例可以看出,切换变倍系统具有以下特点:

- 1) 窄视场子系统(长焦)空档,系统片数少,系统透射率明显比短焦高,符合长焦远程跟踪需求;
- 2) 视场切换时间快,不容易脱靶;
- 3) 能实现系统三档/多档变倍,满足光电装备搜索跟踪一体化需求;
- 4) 切换变倍系统总长一般可以做到比轴向移动变倍系统短。

4 结 论

通过对切换变倍光学系统特性的剖析,详细推导切换变倍光学系统组元焦距 f 、直径 D 、 F 数、变倍比 M 和组元间隔间之间关系研究,并在此理论基础上进行中波制冷型 $f60/180 F_2$ 切换变倍光学系统实例验证,其原理同样适用于长波制冷切换变倍

光学系统、非制冷型红外切换变倍系统和其他类型切换变倍系统^[11,12],对切换变倍系统设计具有重要的指导意义。由于切换变倍系统窄视场子系统系统片数少、系统透射率高;视场间切换时间快(0.5 s 以内),克服了常用的轴向移动变倍系统视场切换造成目标易脱靶问题,必将得到广泛的应用。

参 考 文 献

- 1 Geoffrey M. Miller. Dual field-of-view tracking lens system[C]. *SPIE*, 2003, **4820**: 868~877
- 2 Zhang Yimo. *Applied Optics*[M]. Beijing: China Machine Press, 1982. 256~258
张以谟. *应用光学*[M]. 北京:机械工业出版社, 1982. 256~258
- 3 Leng Jiakai, Cui Qingfeng, Pei Xuedan *et al.*. Spherochromatism of hybrid diffractive-refractive apochromatic telescope objectives [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 981~987
冷家开, 崔庆丰, 裴雪丹等. 折衍射混合复消色差望远镜中的色球差[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 981~987
- 4 Hu Jiasheng. Introduction to Optical Engineering[M]. Dalian: Press of Dalian University of Technology, 2005. 557~565
胡家升. *光学工程导论*[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2005. 557~565
- 5 Xu Liang, Zhang Guoyu, Gao Yujun *et al.*. Design of 8 \times uncooled thermal infrared hybrid refractive-diffractive continuous zoom lenses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 478~481
徐亮, 张国玉, 高玉军等. 8 倍非制冷型红外折/衍射连续变焦系统设计[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 478~481
- 6 Gao Hongyun, Xiong Tao, Yang Changcheng. Middle infrared continuous zoom optical system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(7): 1038~1043
郭洪云, 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
- 7 Muhammad Nadeem Akram. Design of a dual field-of-view optical system for infra-red focal-plane arrays [C]. *SPIE*, 2002, **4767**: 13~23
- 8 Guo Yonghong, Shen Mangzuo, Lu Zukang. Athermal design for infrared diffractive/refractive optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10): 2392~2395
郭永红, 沈忙作, 陆祖康. 折/衍射红外光学系统的消热差设计[J]. *光学学报*, 2000, **20**(10): 2392~2395
- 9 Zhang Mingyi, Li Baoping, Wan Zhongnan *et al.*. Design of the switch-zoom dual-field-of-view infrared optical system with hybrid refractive-diffractive[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(5): 850~853
张明意, 李保平, 万中南等. 折/衍混合型两档变倍红外光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(5): 850~853
- 10 Han Ying, Wang Zhaoqi, Wu Huanbao. Diffractive/refractive two-position step-zoom optical system in 8~12 μm [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5): 886~889
韩莹, 王肇圻等. 紧凑型 8~12 波段折衍混合双位置两档变焦光学系统设计[J]. *光子学报*, 2004, **36**(5): 886~889
- 11 K. H. Lee Dual. Aperture optical system for infra-red camera chartered electro-optics Pte Ltd, Engineering department [C]. *SPIE*, 1999, **3898**: 115~121
- 12 Robert E. Aldrich. Three-element infrared optically compensated two-position zooms for commercial FLIRs [C]. *SPIE*, 1995, **2539**: 87~201
- 13 M. C. del la Fuente. A compact dual FOV objective for 3~5 μm waveband, Infrared Technology and Applications XXIII [C]. *SPIE*, 1997, **3061**: 348~355
- 14 Li Yong, Yang Changcheng, Li Shenghui. Design of infrared zoom system with rotating lens group [C]. *SPIE*, 2009, **6834**: 68343Y