

双孔径红外变焦光学系统设计

赵 坤, 李升辉

(华中光电技术研究所-武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 为了解决红外变焦系统短焦部分冷反射严重的问题, 提出了一种双孔径设计方法, 设计了一种双孔径红外变焦光学系统。系统工作波段为中波 $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$, 焦距为 30/150/300 mm, $10\times$ 变倍比, 具有 100% 冷光阑效率。对双孔径系统的短焦部分和单孔径系统短焦部分的冷反射强度进行了对比分析, 双孔径系统的冷反射得到有效控制。双孔径红外变焦光学系统具有像质好、变倍比大、短焦冷反射小、结构紧凑的特点, 可使大变倍比的红外变焦光学系统在红外成像系统中得到广泛应用。

关键词: 红外变焦光学系统; 光学设计; 双孔径; 冷反射

中图分类号: O43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)11-2889-05

Optical design of dual aperture infrared zoom optical system

Zhao Kun, Li Shenghui

(Huazhong Institute Of Electro-Optics, Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan 430074, China)

Abstract: In this paper, the narcissus of short focal length system was analyzed. A method of dual aperture zoom system was propounded, and a dual aperture infrared optical system was designed. The focal length of this zoom system at $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$ was 30 mm、150 mm and 300 mm with a zoom ranger of 10:1, F-number of 4 and 100% cold efficiency. The narcissus between dual aperture and normal single aperture was analyzed and compared, and the narcissus of dual aperture can be controlled preferably. The dual aperture zoom system has good image quality, big zoom range, low narcissus of small focal lens and compact configuration, so it can be used in the high thermal imager widely.

Key words: infrared zoom optical system; optical design; dual aperture; narcissus

0 引 言

在现代军用光电装备中, 红外成像系统以其成像清晰、探测精度高、虚警率低、被动方式工作、不受电磁干扰等优势, 成为战场信息的重要来源, 在警戒搜索、跟踪识别等军用光电装备中得到了广泛的应用, 也使红外成像技术成为当前各国大力发展的重点之一^[1]。随着红外成像技术和光电装备的发展, 客

观上要求红外变焦光学系统要实现更大的视场和更大的变倍比^[2-7]。但是传统的制冷型红外变焦光学系统中, 短焦的焦距如果太短, 光线在主物镜上的折射角度就会很小, 导致其冷反射很难控制, 并给系统像差优化带来困难。

冷反射现象是含制冷探测器的红外成像系统的一种独特现象, 是一种由透镜折射面在探测器上所留下的反射像而形成的成像缺陷, 这种反射以及透

收稿日期: 2013-03-10; 修订日期: 2013-04-27

基金项目: 武汉光电国家实验室创新基金(P080013)

作者简介: 赵坤(1964-), 男, 研究员, 主要从事光电成像系统的研究工作。Email: Zhaokun717@yahoo.com.cn

镜之间的多次反射会造成探测器所接受的背景能量降低,从而在画面上形成一个黑斑。

为了有效降低短焦部分的冷反射,同时不降低系统成像性能,提出一种双孔径设计方法,即短焦和长焦分为两个孔径,短焦的前端主物镜和长焦的不共用,通过一个 45°反射镜把光路折转,短焦切换组是另一个 45°反射镜和一个透镜的方式,采用翻转变倍的机构实现变倍,同时和长焦系统共用后端部分。双孔径变焦光学系统避免了长焦、中焦和超短焦共用主物镜组带来的冷反射控制的设计难题,有效降低短焦系统的冷反射强度,并给长焦、中焦系统部分的像差优化提供有利因素,同时,系统实现了小型化紧凑化设计,其整体体积不大于单孔径的光学系统。

文中设计了工作波段为中波 3.7~4.8 μm、系统焦距为 30/150/300 mm 的 10×变倍比的双孔径三档切换变焦光学系统。

1 双孔径变焦光学系统理论分析

1.1 双孔径变焦光学系统理论模型

双孔径三档切换变焦光学系统的短焦部分,光路不通过长焦时的主物镜,而是用小主物镜+2个反射镜形成短焦的主物镜的结构形式,和长焦系统的其他透镜和反射镜一起组成短焦系统,而长焦和中焦系统则共用长焦时的主物镜。

双孔径三档切换变焦光学系统的短焦部分组成为:小主物镜+小反射镜 1+小反射镜 2+中继透镜+转像透镜。小主物镜为短焦单独用,小反射镜 1 起折转光路作用,小反射镜 2 和聚焦透镜组是旋转变倍组光学件,以上零件和长焦系统除主物镜外的其他零件一起组成短焦系统。双孔径三档变焦光学系统如图 1 所示。

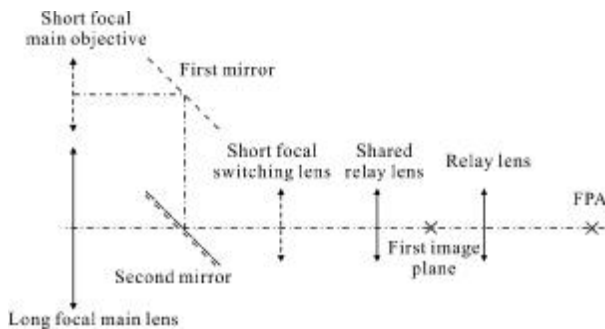


图1 双孔径红外光学系统原理图

Fig.1 Optical layout of dual aperture infrared zoom system

1.2 双孔径变焦光学系统设计要

光学系统应满足以下两个方程^[7]。

光焦度分配

$$\sum_{i=1}^n h_i \phi_i = \phi \quad (1)$$

消轴向色差

$$\Delta f_b^t = \left(\frac{1}{h_1 \phi}\right)^2 \sum (h_i^2 w_i \phi_i) = 0 \quad (2)$$

式中: h_i 为第一近轴光线在各透镜组的高度; ϕ_i 为各个透镜组的光焦度; ϕ 为系统的总光焦度; w_i 为每个光学元件的色散因子。

而对于双孔径三档变焦光学系统,由于长、中、短三档焦距所用的透镜组共用,故双孔径变焦光学系统的光焦度分配应满足以下公式。

短焦光焦度分配:

$$\sum_{i=1}^x h_i \phi_i + \sum_{i=x+1}^z h_i \phi_i + \sum_{i=z+1}^n h_i \phi_i = \phi_s \quad (3)$$

中焦光焦度分配:

$$\sum_{i=1}^y h_i \phi_i + \sum_{i=y+1}^z h_i \phi_i + \sum_{i=z+1}^n h_i \phi_i = \phi_m \quad (4)$$

长焦光焦度分配:

$$\sum_{i=1}^z h_i \phi_i + \sum_{i=z+1}^n h_i \phi_i = \phi_l \quad (5)$$

式中: $\sum_{i=1}^x h_i \phi_i$ 为短焦主物镜组光焦度; $\sum_{i=x+1}^z h_i \phi_i$ 为短焦切换组光焦度;

$\sum_{i=z+1}^n h_i \phi_i$ 为共用中继透镜组和后组转像透镜组光焦度;

$\sum_{i=1}^y h_i \phi_i$ 为中焦主物镜组光焦度;

$\sum_{i=y+1}^z h_i \phi_i$ 为中焦切换组光焦度;

$\sum_{i=1}^z h_i \phi_i$ 为长焦主物镜组光焦度;

1.3 冷反射分析

CODE V 中计算每个面冷反射的方法是,追迹一束光线,从探测器到该面,再从该面反射到冷屏,计算点列图上有多少光线通过冷屏口径,其中还要考虑往返过程中各个通光孔径对光线的切割。冷反射最为有效的两个分析数据是 YNI 值和 I/IBAR 值。YNI 为近轴光线投射高;I/IBAR 为近轴边缘光线入射角与近轴主光线入射角比值,两个数值都是越大,

此面产生的冷反射强度越弱。

对于制冷探测器用红外光学系统的冷反射效应,其背景能量影响一方面可以通过电路处理来消除,一方面在光学设计上进行冷反射分析和控制,对系统冷反射强的面进行控制,尽力降低其影响。但是由于系统的结构形式缺陷,造成短焦部分的冷反射强度较大,仅仅通过软件设计是难以发生质的改变,必要时需要通过更改系统结构形式。

2 双孔径系统设计实例

设计的系统参数如下。

(1) 系统工作波段:3.7~4.8 μm;(2) 系统组合焦距:30/150/300 mm;(3) F 数:4;(4) 变焦方式:切换变焦;(5) 结构形式:双孔径。

2.1 双孔径系统设计

系统组成:小主物镜+小反射镜 1+小反射镜 2+2 个聚焦透镜+共用中继透镜+后组转像透镜组+2 个反射镜组成短焦系统;大主物镜透镜组+中焦变倍透镜组+共用中继透镜+后组转像透镜组+2 个反射镜组成中焦系统;大主物镜透镜组+共用中继透镜+后组转像透镜组+2 个反射镜组成长焦系统。双孔径三档变焦光学系统如图 2~图 5 所示。

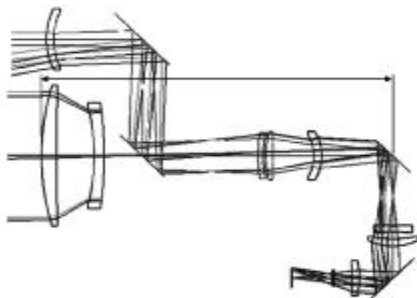


图 2 短焦系统图

Fig.2 Optical layout of short focus system

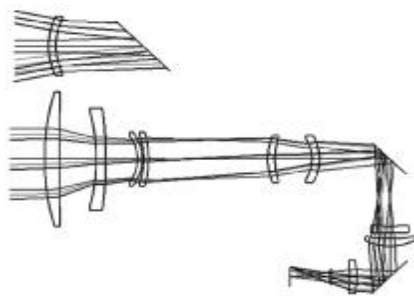


图 3 中焦系统图

Fig.3 Optical layout of middle focus system

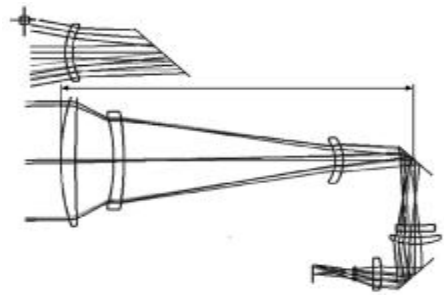


图 4 长焦系统图

Fig.4 Optical layout of long focus system

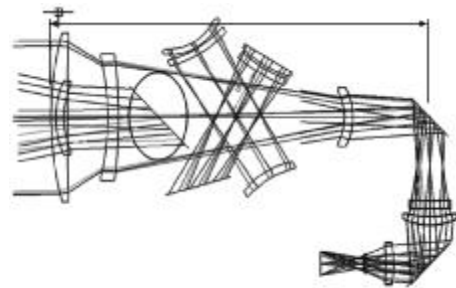


图 5 f300/150/30 三档变焦系统图

Fig.5 Optical layout of f 300/150/30 FOV zoom system

2.2 传统结构短焦系统设计

传统 3 档变焦方式的设计中,短焦时的冷反射严重,实际成像中经常产生严重的冷反射现象。为了对双孔径系统的短焦部分和传统短焦结构形式进行对比,文中同时设计了焦距 f 30 的传统短焦结构形式,系统图如图 6 所示。

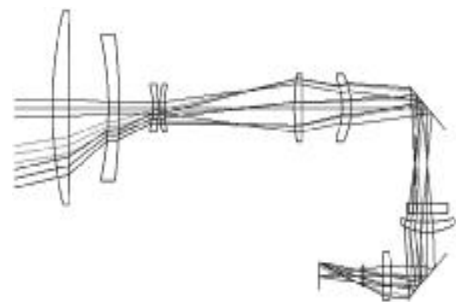


图 6 传统单孔径 f30 短焦系统图

Fig.6 Optical layout of normal single aperture system(f30)

2.3 双孔径系统和传统单孔径系统的冷反射对比

双孔径系统由于短焦部分独立于长焦系统,在主物镜和切换组部分可以单独设计,因此有了较大的设计自由度,同时,其自身特点也有利于冷反射强度的降低。以下对双孔径形式和传统结构形式两种结构形式分别进行了分析和对比。

表 1 和表 2 分别列出了双孔径短焦形式和短焦传统结构形式各个面的 YNI 值和 I/IBAR 值。其中标识(F)表示光线在前进时被切割,标识(R)表示光线在返回时被切割。

表 1 冷反射列表(双孔径短焦形式)

Tab.1 Narcissus parameters (dual aperture short focus)

Reflecting surface	Clipping aperture	YNI	I/IBAR	Narcissus full angle	Narcissus intensity ratio
1	30(R)	0.316 7	0.813	0.031 525	0.243 97
2	30(R)	0.466 2	0.515	0.018 860	0.087 33
7	15(R)	1.299 2	-1.144	0.017 920	0.078 84
8	15(R)	4.278 3	-2.116	0.005 454	0.007 30
9	15(R)	4.562 4	-2.117	0.005 114	0.006 42
10	15(R)	-1.679 1	7.245	0.013 941	0.047 72

表 2 冷反射列表(短焦传统结构形式)

Tab.2 Narcissus parameters (normal single aperture short focus)

Reflecting surface	Clipping aperture	YNI	I/IBAR	Narcissus full angle	Narcissus intensity ratio
1	29 (F)	0.096 2	0.525	0.255 092	1.000 00
2	29 (R)	-0.181 7	-0.099	0.067 266	0.069 89
3	29 (R)	-0.192 5	-0.121	0.081 396	0.102 31
4	29 (R)	-0.069 9	-0.066	0.146 090	0.329 18
5	29 (R)	-0.239 4	-0.196	0.117 160	0.211 85
6	29 (F)	0.289 2	1.204	0.255 092	1.000 00
7	14 (R)	0.578 5	-2.663	0.159 867	0.394 06
8	15 (R)	0.447 8	10.963	0.214 629	0.709 04
9	15 (R)	2.465 8	1.607	0.038 852	0.023 32
10	15 (R)	-1.586 1	-6.174	0.060 522	0.056 58

可以看出:双孔径短焦形式系统的各个面的 YNI 值都比短焦传统结构形式的 YNI 值要大,大部分的 I/IBAR 值也优于短焦传统结构形式。因此双孔径短焦形式的冷反射强度在设计上得到了有效控制。

对探测器靶面的冷反射像直径进行了分析,如

表 3 和表 4 所示。

表 3 双孔径短焦结构形式的冷反射像直径分析表

Tab.3 Narcissus parameters of diameter (dual aperture)

Lens surface	DISC of detector reflection/mm	Lens surface	OISC of detector reflection/mm
1	4.9	8	69.2
2	7.2	9	73.8
7	21.1	10	27.1

表 4 传统短焦结构形式的冷反射像直径分析表

Tab.4 Narcissus parameters of diameter (normal single aperture)

Lens surface	DISC of detector reflection/mm	Lens surface	OISC of detector reflection/mm
1	1.5	6	4.4
2	2.9	7	9.1
3	3.1	8	6.9
4	1.1	9	38.1
5	3.7	10	24.5

设计的传统变焦方式的三档切换光学系统中,在短焦 f30 时候,冷反射较严重,其中第 1 和 4 面最严重,特别是第一面的冷反射是难以接受的。根据分析,探测器靶面经过第 1 面反射的冷反射像都是较小的,实际成像上也容易产生严重冷反射现象。

新设计的双孔径短焦系统,短焦部分的主物镜和切入透镜的冷反射都得到较好控制,各个面的冷反射像直径都较大,探测器靶面经过第 1 面反射的冷反射像直径是 4.97 mm,相比传统短焦系统,在光学系统设计上对冷反射进行了较好的控制,实际成像效果上也有效减轻了系统短焦部分的冷反射现象。同时,双孔径短焦结构形式相比传统短焦结构形式少了 3 个透镜,仅增加了 1 个反射镜,因此能够产生冷反射的透镜面也减小了 5 个,也可以有效降低系统整体冷反射强度。因此,采用新结构形式方案,可以把短焦的焦距进一步做短,实现 10 \times 、15 \times 等大变倍比的切换变焦系统。

3 结 论

文中针对变焦系统中短焦部分冷反射强的特

点,提出了双孔径设计方法,设计了一种双孔径大变倍比红外变焦光学系统。在同样焦距条件下,对双孔径系统的短焦部分和传统短焦结构形式的冷反射强度进行了对比分析,得出双孔径系统的冷反射得到有效控制,其结构形式有利于冷反射强度的控制。双孔径大变倍比红外变焦光学系统具有变倍比大、短焦冷反射小、结构紧凑、变焦时间短的特点,可在红外成像系统中得到广泛应用,具有较好的使用前景。

参考文献:

- [1] Robert Fischer. Optical System Design [M]. 2nd ed. US: McGraw Hill Professional, 2008.
- [2] Arthur Cox. Optically compensated infrared zoom lens having a single movable lens carriage and no aspheric lenses: US, 7092150 B1[P]. 2006-08-15.
- [3] Iain A Neil. Variable magnification infrared objective lens assembly: US, 4632498[P]. 1986-12-30.
- [4] Robert E Aldrich. Three -element infrared optically compensated two -position zooms for commercial FLIRs[C]// SPIE, 1995, 2539: 87-107.
- [5] Hyun Sook Kim Chang Woo Kim Seok Min Hong, et al. Compact mid -wavelength infrared zoom camera with 20:1 zoom range and automatic athermalization [J]. Opt Eng, 2002, 41(7): 1661-1667.
- [6] Allen Mann. Infrared Optics and Zoom Lenses [M]. US: SPIE Press, 2000: 43-138.
- [7] Kanagawa Y, Wakabayashi S, Tajime T, et al. Expansion of an athermal chart into a multilens system with thick lenses spaced apart[J]. Opt Eng, 1996, 35(10): 3001-3006.