

像方扫描机制的红外成像制导光学系统设计

孙露露^{1,2}, 刘春华², 张鹏², 潘枝峰², 陈建发^{1,2}

(1. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471009;

2. 中国航空工业集团公司洛阳光电设备研究所, 河南 洛阳 471009)

摘要: 提出了一种新型的像方扫描机制的红外成像制导光学系统设计构型。该扫描系统体积小、结构简单, 具有大视场搜索和小视场分辨的特点。设计了一个红外光学系统实例, 工作波段为 3.7~4.8 μm , 焦距为 80 mm, 扫描视场为 $\pm 15^\circ$, 瞬时视场为 5° 。系统全视场 MTF 在 17 lp/mm 处均大于 0.5, 点斑均方根直径小于 30 μm , 满足光学系统的成像要求。

关键词: 像方扫描; 红外成像制导; 光学系统设计; 像质评价

中图分类号: V271.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)02-0065-04

Infrared Optical System Design for Imaging Guidance of Image Space Scanning

SUN Lu-lu^{1,2}, LIU Chun-hua², ZHANG Peng², PAN Zhi-feng², CHEN Jian-fa^{1,2}

(1. Science and Technology on Electro-Optical Control Laboratory, Luoyang 471009, China;

2. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471009, China)

Abstract: A new kind of infrared optical system for imaging guidance of image space scanning is described. The scanning system has the advantages of small size and simple structure, wide FOV for searching and narrow FOV for distinguishing. An infrared optical system was designed. The system has an operating waveband of 3.7~4.8 μm , an effective focal length of 80 mm, the total scanning FOV of $\pm 15^\circ$ and instantaneous FOV of 5° . The MTF is higher than 0.5 at the spatial frequency of 17 lp/mm across the full FOV. The RMS spot diameter is less than 30 μm . The specifications can meet the requirements of the optical systems.

Key words: image space scanning; infrared imaging guidance; optical system design; image evaluation

0 引言

近年来,随着红外成像技术的不断成熟和工程化、实用化发展,红外成像制导已成为精确制导技术研究领域的新热点^[1]。红外成像制导利用红外成像探测原理进行目标探测,实现对目标检测、识别与跟踪^[2-3],具有抗干扰能力强、隐蔽性好、制导精度高和全天候工作的优点^[4]。

光学系统按是否有扫描机构分为扫描型和非扫描型。受像差和材质等的影响,非扫描型红外光学系统一般不能同时满足大视场和大的探测距离要求,而达

到这两点的系统往往结构复杂、尺寸大,不能满足制导系统的小型化、轻量化要求^[5-6]。所以,本文采用扫描型红外光学系统,实现用小的瞬时视场与空间扫描相结合。目前,成像制导系统常用的扫描方式主要有 45° 旋转扫描反射镜扫描、平面镜摆动扫描、光学望远镜系统整体扫描等。 45° 旋转扫描反射镜是目前最成熟的一种二维扫描方式,扫描镜的尺寸小,机械性能稳定性较好,但其会引入像的旋转,从而无法在焦平面探测器上形成稳定的像,致使其无法在多元探测器中使用;平面摆镜摆动扫描可以提高扫描效率,但会造成扫描镜的尺寸加大,而且也存在像旋问题;光学望远镜系统整体扫描不会产生像的旋转,没有色差,焦平面平坦,但它的转动惯量较大,且结构复杂,设计校准比较困难^[7-8]。因此,本文在二次成像的基础上提出了像方搜索扫描机制的光学成像系统设计构型。

收稿日期:2013-04-19

修回日期:2013-05-15

作者简介:孙露露(1989—),男,江西新干人,硕士生,研究方向为红外光学系统设计。

1 像方扫描原理

像方搜索扫描技术原理如图1所示。根据二次成像原理把光学系统划分为前后两组光学镜组,前组固定,为固定组,对大视场的目标和背景成一次像;后组为扫描组,围绕一次像面的球心进行旋转运动,扫描前组的成像面,实现搜索功能。由于一次像面是球面且探测器焦平面阵列位于球心,所以二次像面倾斜不会引入额外像差。显然,基于此种构型的扫描组尺寸小,空间利用率高。将系统的出瞳和冷光阑重合,可以达到100%的冷光阑效率。

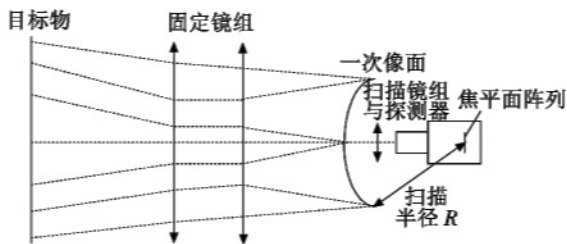


图1 像方扫描原理图

Fig.1 The principle of image space scanning

首先设计一个具有大视场的物镜组,优化场曲,使物镜组所成的一次像面为固定曲率半径的球面(允许一次像具有一定的像差);然后,加入中继镜组,并在多重结构下对一次像面进行二次成像。优化时,必须保证扫描组系统总长固定,并等于物镜组所成一次像面的曲率半径 R 。为使后置扫描镜组的尺寸尽可能小,减小转动惯量,应控制 R 的大小。

2 实例设计

2.1 光学系统设计指标

设计一个系统,性能参数如表1所示。

表1 光学系统参数

Table 1 Parameters of the optical system

Parameter	Specification
Effective focal length/mm	80
F/#	3
Work wavelength/ μm	3.7~4.8
TFOV/($^\circ$)	± 15
IFOV/($^\circ$)	5
Overall length/mm	≤ 140
MTF	$> 0.5@17 \text{ lp/mm}$
Resolution	256×256
Pixel size/ μm	30

2.2 设计实例

根据上述系统指标,光学系统采用Si、Ge、ZnS 3种材料,不同视场的光学系统结构如图2所示,优化后的镜头结构参数如表2所示。为了实现后置系统扫描成像,在一次成像面处插入虚拟面11,并对其进行基

本偏心设置。该系统总长140 mm,由8片透镜组成。大尺寸透镜组1~5为固定镜组,小尺寸透镜组6~8及红外制冷探测器绕着一次像面进行旋转扫描。为了消除高级像差,减少镜片使用数量,提高系统透过率,系统使用了4个非球面,非球面系数如表3所示。

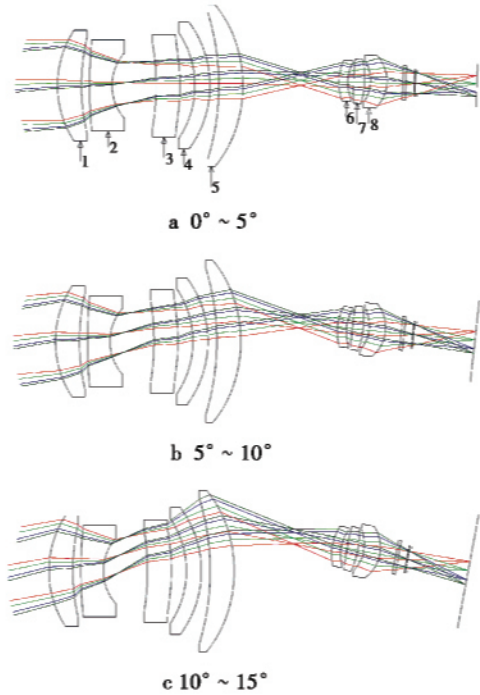


图2 光学系统结构图

Fig.2 Configuration of the optical system

表2 镜头结构参数

Table 2 Parameters of lens configuration

表面编号	面型	Y半径/mm	厚度/mm	玻璃
1	球面	33.54479	8	Si
2	球面	70.903	2.67403	
3	球面	161.13257	7.7926	ZnS
4	非球面	16.55721	14.52359	
5	球面	-84.59143	8	Si
6	非球面	-62.34028	5	
7	球面	-30.78683	5	Ge
8	球面	-34.96857	2.9268	
9	球面	-81.35242	8	Si
10	非球面	-45.31881	18.043	
11	球面	∞	13.9579	
12	非球面	16.308	3	Ge
13	球面	13.61277	2	
14	球面	155.5439	3.55116	Si
15	球面	-28.9837	2	
16	球面	-12.27504	5.5	ZnS
17	球面	-12.36646	5.24594	
18	球面	∞	1	Si
19	球面	∞	2.875	
20	球面	∞	0.3	Ge
21	球面	∞	0.57	
光阑	球面	∞	20	

表 3 非球面系数
Table 3 Asphere coefficient

表面编号	A4	A6	A8
4	5.11071	1.13194	4.88186
6	6.74577	7.13857	2.03173
10	-4.5756	-5.65681	-4.54409
12	-3.62365	-1.38651	-6.11353

3 像质评价

3.1 光学传递函数

光学传递函数是光学系统的重要评价手段,图 3 所示为系统在不同扫描视场的 MTF 图,在特征频率 (17 lp/mm) 处的 MTF 值都大于 0.5,接近衍射极限。

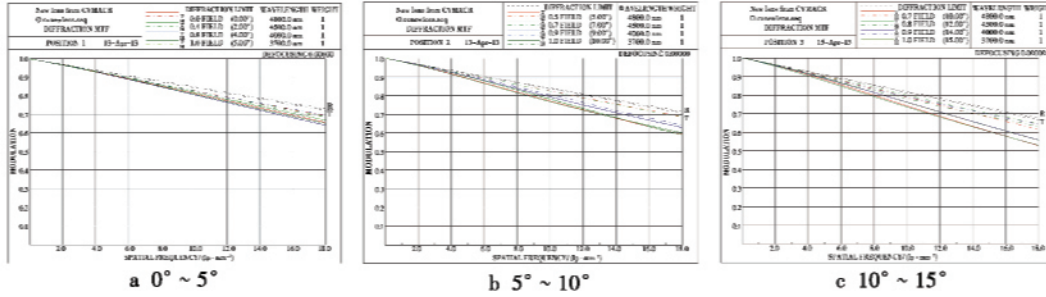


图 3 MTF 曲线图

Fig. 3 The MTF curves

3.2 弥散斑

表 4 为光学系统的弥散斑。

表 4 光学系统的弥散斑

Table 4 Spot diameter of the optical system

视场角/(°)	0	2	5	7	10	12	15
RMS/ μm	16.8	16.9	17	16.8	21.8	17.4	18.7

从表中可以看出,全视场最大弥散斑直径为 21.8 μm , 小于系统艾里斑物理直径,也小于 1 个探测器像元尺寸(30 μm)。

3.3 能量分布曲线

图 4 所示为系统不同视场的能量分布曲线,在一个像元内能量集中度大于 70%,满足设计要求。

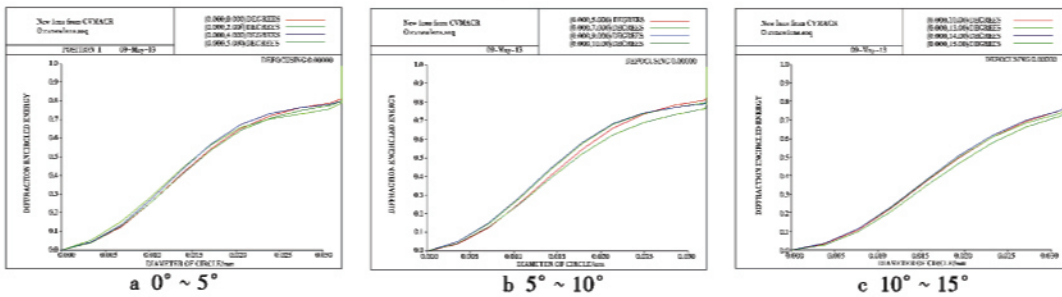


图 4 能量分布曲线

Fig. 4 Encircled energy plot

3.4 光线像差曲线

图 5 所示为全视场范围内光线像差曲线,系统高

级像差得到了较好的校正,满足实际使用要求。

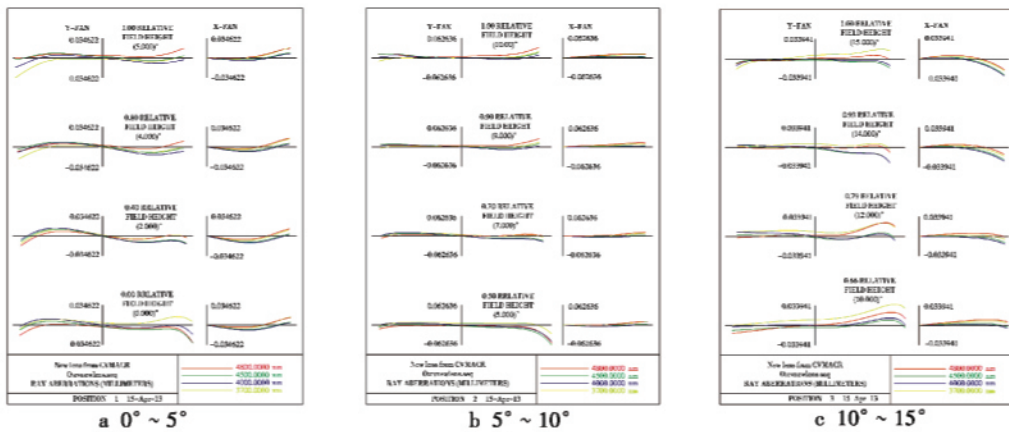


图 5 光线像差曲线

Fig. 5 The aberration plot

3.5 系统冷反射分析

冷反射现象是红外热成像系统中制冷的探测器通过前面的光学表面反射而探测到自身的像形成的^[9]。冷反射通常在图像中形成一个黑点,从而使系统成像质量下降,所以控制冷反射是设计红外成像系统的一个重要指标。

YNI 和 I/IBAR 这两个量可以反映冷反射对系统的影响。其中:YNI 主要综合反映冷反射的大小,值越大,产生的冷反射越弱;I/IBAR 反映冷反射随视场的变化情况,I/IBAR 大于 1 表明冷反射几乎不随视场的变化而变化,可以通过电路的非均匀校正来消除^[10-11]。在设计过程中,通过在一定范围内优化系统光学零件曲率半径使得 YNI 大于 1,可以减小冷像对系统的影响。表 5 为优化后系统在 0°~5°视场时的冷反射分析数据,由此可知,冷反射对系统无影响。分别对其他视场的冷反射数据进行分析,也得到了同样的结论。

表 5 冷反射分析数据

Table 5 The data analysis for narcissus

Reflecting surface	YNI	I/IBAR	Narcissus full angle/rad	Narcissus Intensity ratio
1	5.2680	-12.856	0.028890	0.00647
2	-4.6163	-1.873	0.035232	0.00963
3	-4.7916	-2.027	0.0533565	0.00874
4	2.4506	2.637	0.058236	0.02630
5	-1.0751	-1.247	0.144330	0.16133
6	-1.6065	-2.79	0.089599	0.06224
7	-1.6767	-4.670	0.082880	0.05326
8	-1.5435	-4.613	0.089367	0.06192
9	-1.000	-2.272	0.138478	0.14853
10	-1.7866	5.526	0.070705	0.03877
12	1.6207	-1.707	0.138636	0.14887
13	1.8164	-2.054	0.144777	0.16233
14	1.4000	-7.979	0.278733	0.59885
15	-1.000	-0.484	0.143217	0.15886
16	-1.5991	-0.666	0.116905	0.10591

4 结论

文中讨论的像方搜索扫描光学系统在结构上和系统方法上均有所创新,可以简化伺服机构,具有径向尺寸小、质量轻、结构紧凑等优点,可广泛应用于具有小型化要求的制导武器系统。实现共形设计可解决超音速武器系统的精确制导难题。

参考文献

[1] 杨争,周伟,徐惠忠. 红外成像系统在军事领域的应用前景[J]. 红外与激光工程,2008,37(s):691-694.
YANG Z, ZHOU W, XU H Z. Forecast of IR imaging sys-

tem applied in military field[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(s):691-694.

- [2] 黄培康,袁起,朱振福,等. 光学精确制导技术的发展现状与展望[J]. 红外与激光工程,2007,36(s):1-6.
HUANG P K, YUAN Q, ZHU Z F, et al. Development status and prospect of optical precision guidance technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(s):1-6.
- [3] BARENZ J, BAUMANN R, THOLL H D. Eyesafe imaging LADAR/infrared seeker technologies[C]//Proceedings of SPIE, 2005:51-60.
- [4] 赵超,杨号. 红外制导的发展趋势及其关键技术[J]. 电光与控制,2008,15(5):48-53.
ZHAO C, YANG H. A survey on development trends and key technologies of infrared guidance systems[J]. Electronics Optics & Control, 2008, 15(5):48-53.
- [5] 惠彬,裴云天,李景镇. 空间红外光学系统综述[J]. 光学仪器,2007,29(4):90-94.
HUI B, PEI Y T, LI J Z. A survey for infrared space optical systems[J]. Optical Instruments, 2007, 29(4):90-94.
- [6] ANTOINE L. The optical very largearray[C]//SPIE, 1986:323-332.
- [7] 惠彬,李景镇,黄虹宾,等. 45°二维扫描镜扫描轴系特性分析[J]. 红外技术,2006,28(9):508-511.
HUI B, LI J Z, HUANG H B, et al. Optical analysis of space two-axis scanning mirror[J]. Infrared Technology, 2006, 28(9):508-511.
- [8] 乔明霞,曾威. 长波红外双视场扫描型光学系统[J]. 电光与控制,2013,20(3):77-80.
QIAO M X, ZENG W. A long-wave infrared dual-FOV scanning optical system[J]. Electronics Optics & Control, 2013, 20(3):77-80.
- [9] SCHERR L M, ORLANDO H J, HALL J T, et al. Narcissus considerations in optical designs for infrared staring arrays[C]//SPIE, 1996:442-452.
- [10] 江伦. 大变倍比长焦距中波红外连续变焦距系统研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2012.
JIANG L. The research of large zoom ratio long focal length MWIR zoom optical system[D]. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Academy of Science, China, 2012.
- [11] 杨正,屈恩世,曹剑中,等. 对凝视红外热成像冷反射现象的研究[J]. 激光与红外,2008,38(1):35-38.
YANG Z, QU E S, CAO J Z, et al. The narcissus study in the optical system for the infrared staring arrays[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(1):35-38.