

·光电系统·

半球空域长波红外成像光学系统设计

孙宏宇, 卢鑫

(中国电子科技集团公司光电研究院, 天津 300000)

摘要:介绍了一种半球空域成像长波红外光学系统的设计。该光学系统采用二次成像结构,有效的压缩了光学系统的径向尺寸。由于该光学系统视场较大,因此采用了 $F-\theta$ 的“非相似”成像方式。利用ZEMAX软件进行了优化设计,合理解决了像面照度均匀性和大视场轴外像差的问题。同时对该光学系统进行了分析评价并给出光学系统的传递函数曲线、点列图等设计结果。该光学系统仅使用六片光学元件,采用两个非球面,全视场角和相对孔径分别为 184° 和 $1/1.93$,全视场内的传递函数值在 20 lp/mm 处达到 0.45 以上,像质优良。光学系统总长为 71 mm ,最大直径 30 mm ,光学元件质量仅为 45 g ,光学系统体积小、质量轻,可适用于多种平台。

关键词:半球空域;长波红外;光学系统设计

中图分类号:TN216

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2015)-05-0017-05

Design of Hemisphere Airspace LWIR Imaging Optical System

SUN Hong-yu, LU Xin

(Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300000, China)

Abstract: A hemisphere long wavelength infrared (LWIR) imaging optical system design is introduced. The secondary imaging structure is adopted in the system to compress the radial size of the system effectively. For wider field of view of the system, $F-\theta$ dissimilarity imaging mode is adopted. Optimization design is carried by using ZEMAX software, so the problems such as image illumination uniformity and wide field of view off-axis aberration are solved. At the same time the system is analyzed and evaluated and design results such as transfer function curves and spot diagram are presented. Only 6 pieces of optical components and 2 pieces of aspheric surface are used in the system. The full field of view and relative aperture is 184° and $1/1.93$ respectively, the transfer function value in full field of view is more than 0.45 at 20 lp/mm , and good image quality is got. The total length and the longest diameter of the system are 71 mm and 30 mm respectively, the weight of the optical components is only 45 g . The optical system has small volume and light weight, which is suitable for a variety of platforms.

Key words: hemisphere airspace; long wavelength infrared (LWIR); optical system design

近年来,随着红外加工业及半导体行业的发展,使得红外系统的应用越来越广泛。相比于可见光成像系统,红外成像系统具备夜间成像、非接触测量等优良的性能,尤其在军事上越来越受到青睐,已经成为现代战争中不可缺少的一部分。

为实现在较大空域获取目标信息,目前红外成像系统多采用旋转/步进扫描方式或多个成像系统拼接方式来实现功能^[1-3]。旋转/步进扫描方式如果

要完成对较大空域的目标信息的获取,需要进行连续扫描,极大的耗费时间,对信息获取的实时性降低,而且只能覆盖一定的空间范围。多成像系统拼接方式,采用了多个成像系统,每个成像系统有一定的成像视场,通过多路的拼接,可实现对所需的空域成像,此种方式造成系统体积、质量、功耗的增加,同时考虑红外系统光学元件、探测器的成本,成本较难控制,另外多路图像的拼接对软件、硬件的

收稿日期:2015-08-26

作者简介:孙宏宇(1984-),男,河北承德人,硕士,工程师,研究方向为光机系统光学设计。

开发难度也相应的提高,造成多路成像系统拼接方式成本造价极高。

设计了一种可用于边境安防、安全监视、森林火情等实时监控的半球空域长波红外成像光学系统,该光学系统工作波段为7.7~10.3 μm ,焦距为2.35 mm,相对孔径为1/1.93,全视场角可达184°。该光学系统由六片光学元件组成,采用了两个非球面,结构紧凑,像面均匀性好,全视场内照度在0.9以上;各个视场成像质量好,采用了法国Sofradir公司研制的384×288长波红外HgCdTe制冷型探测器,考虑到冷光阑匹配,通过对透镜形式的合理选择及透镜之间的合理搭配,采用了二次成像结构方式,缩小透镜的径向口径,此结构方式简单,环境适应性强。该红外成像系统体积小、质量轻,可随身携带或应用于小型无人机载平台,以便快速、便捷地获取到所感兴趣空域的全景信息。

1 指标计算及设计思想

光学系统结构形式可分为透射式、反射式、折反射式三种形式。由于光学系统视场较大,因此采用透射式结构形式,其优点是可实现较大视场、像质较好,可在较大视场下保证优良的成像质量,在保证成像质量的前提下,系统结构简单,有较高的光能利用率。

对于红外光学系统,制冷探测器内部冷光阑(cold shield)应作为光学系统的光阑,为实现冷光阑100%效率,减少光学系统的杂散辐射,提高光学系统的成像质量,设计时需要保证光学系统出瞳与探测器冷光阑相匹配。综合考虑光学系统结构形式,采用了二次成像透射式结构方式,这样可将光学系统入瞳尽量前移,在实现冷光阑100%效率的同时,可减少光学系统的径向尺寸。二次成像光学系统一次像面前前组承担主要的光焦度,一次像面后后组主要负担二次成像,并完成残余像差的平衡。

由于采用的探测器为制冷型红外探测器,如何减小系统的冷反射是设计中需重点考虑的问题。冷反射是制冷红外系统普遍存在的一种现象,与可见光系统不同,在红外系统中,每个镜框或镜筒都是辐射源,通过光学零件的非工作表面反射进入红外探测器中,如果这种全视场的分布不均匀,将在成像时产生灰度梯度,由于多数情况下中心的灰度低于边缘的灰度,成像系统出现中心黑、边缘亮的

现象,这种现象可认为是背景噪声,在成像时叠加在目标图像上,当冷反射较为严重时可严重影响图像质量。因此,在设计时需要冷反射效应进行重点分析和评估。为减少系统的冷反射现象发生,在提高光学元件的透过率外,在设计时考虑将后组光学元件靠近探测器表面采用凸面设计,以提高后组光学系统中每个光学元件表面的YNI值(YNI直接反应对光学系统的冷反射的贡献)^[4-5]。

由于此光学系统视场较大($2\omega=184^\circ$),按照传统的正切几何关系计算光学系统焦距不适用于此类光学系统,利用 $F-\theta$ 的“非相似”成像近似关系,可以计算出光学系统的焦距,如式(1)所示。

$$y=f'\theta \quad (1)$$

式中, y 为探测器的半像高,取值为3.6 mm; f' 为光学系统焦距; θ 为光学系统半视场角,取值为 92° 。

根据以上数据,可计算出光学系统的有效焦距为2.24 mm。

对于光学系统而言,其像面上边缘视场与中心视场照度关系为

$$E'=E_0 K_a \cos^4 \omega' \quad (2)$$

式中, E' 为边缘视场照度; E_0 为中心视场像面照度; K_a 为边缘视场渐晕系数; ω' 为像方半视场角。

在实际应用中,当像方半视场角为 45° 时。在不考虑 K_a 的情况下,边缘视场像面照度为中心视场的25%,随着像方视场角的增大,边缘视场像面照度急剧下降。这种像面照度的不一致性会影响系统的成像性能。

从式中可以看出,可以通过两种形式提高边缘视场像面照度值。一种形式是减少 ω' ,即为较为经典的像方远心结构;另一种形式通过光瞳像差,引入边缘视场的负渐晕系数,从而在边缘视场 $|K_a|>1$ 减小像面照度的不均匀性。由于制冷型红外探测器的限制, ω' 为一定值,因此不能采取像方远心结构,只能通过大视场轴外的光瞳像差引入负的渐晕系数,提高光学系统轴外视场的像面照度值。

2 设计结果与性能分析

根据以上的设计指标计算和设计分析,首先由高斯光学和初级像差理论,确定光学系统的初始结构;然后,通过合理设置限制条件,在Zemax光学设计软件程序中进行多次优化和像质评价。最终设

计后的红外系统采用六片光学元件,头片采用了负光焦度 Ge 镜,可以有效的压缩光束的入射角度,在后组成像组中,引入了一片 ZnSe 镜,从而更好的校正系统的色差。同时在一次像面前的透镜的后表面和探测器光阑前透镜的后表面采用了非球面,以便更好的校正光学系统的球差和轴外像差,同时考虑加工的便利性,对非球面的失高进行了相应的优化。最终设计的红外光学系统参数如表 1 所示。光学系统二维图如图 1 所示。三维图如图 2(注:为便于显示,在头片镜片前增加一虚拟表面)所示。

表 1 光学系统设计参数

参数	值
波长/ μm	7.7~10.3
F 数	1.93
焦距/mm	2.54
像素大小/ μm	25 \times 25
图像大小/mm	9.6 \times 7.2
视场/ $^\circ$	184
光学系统长度/mm	71
最大直径/mm	30
质量/g	40

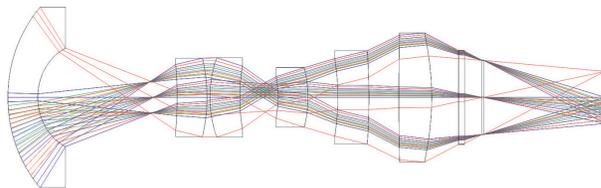


图 1 光学系统二维图

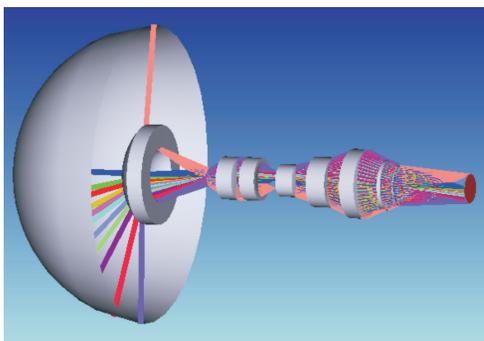


图 2 光学系统三维图

利用 Zemax 程序,对设计结果进行像质评价。成像系统的传递函数表征了成像系统对不同

空间层次的目标的成像能力。其中,低频表征轮廓,中频表征层次,高频表征分辨能力,在一般成像系统中,传递函数应大于 0.2。评价成像系统的传递函数,应综合考虑光学镜头的截止频率、探测器的奈奎斯特频率、以及处理电路的传递函数等。其中处理电路造成传递函数下降经验值为 0.95;探测器的奈奎斯特频率为采用像素化的探测器可记录的最大空间频率,为 $1/(2 \times \text{单像素大小})$,以 1 p/mm 为单位;光学系统的截止频率为 $1/(\lambda \times F/\#)$,以 1 p/mm 为单位。根据实际情况,采用的探测器单像素的尺寸为 $25 \mu\text{m}$,可计算出其奈奎斯特频率为 20 lp/mm ;同时可计算出光学系统的截止频率为 55 lp/mm (参考波长为 $9 \mu\text{m}$),因此综合以 20 lp/mm 来评价光学系统成像质量的优劣。设计后的光学系统在 20 lp/mm 处的传递函数曲线如图 3 所示。从图 3 中可以看出,系统各个视场的传递函数值较一致,接近衍射极限,传递函数最小值为 0.45,说明光学系统成像质量良好。

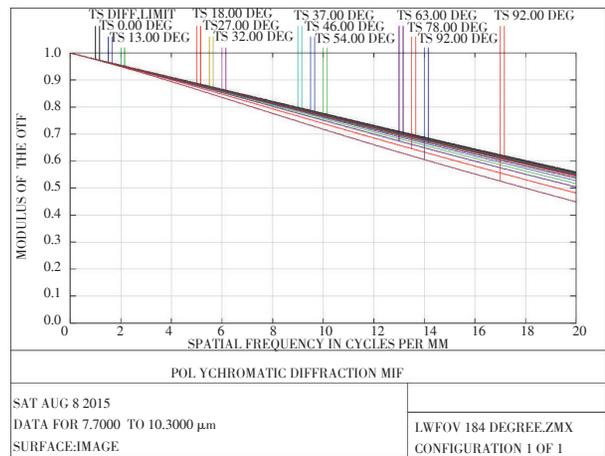


图 3 光学系统传递函数曲线(20 lp/mm)

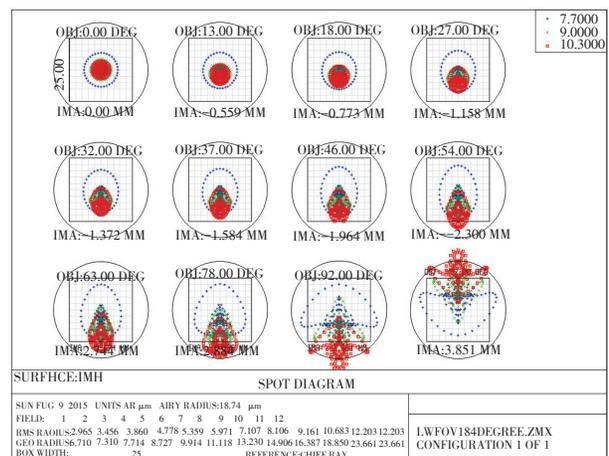


图 4 光学系统点列图

图4给出了光学系统各个视场的点列图。从图4中可以看出,各个视场的光斑都在艾里斑以内,而且各个视场光斑RMS半径都在单像素以内,说明光学系统成像质量优良。满足红外制冷探测器的基本需求。

图5是探测器像面上的照度均匀度曲线,横坐标是视场角,纵坐标是像面上的相对照度。从图5中可见像面上最大照度为中心视场,即 $E_0=1$,最小照度出现在边缘视场,即 $E_{92}=0.939$,可见,在探测器像面上可以获得很好的照度均匀性。

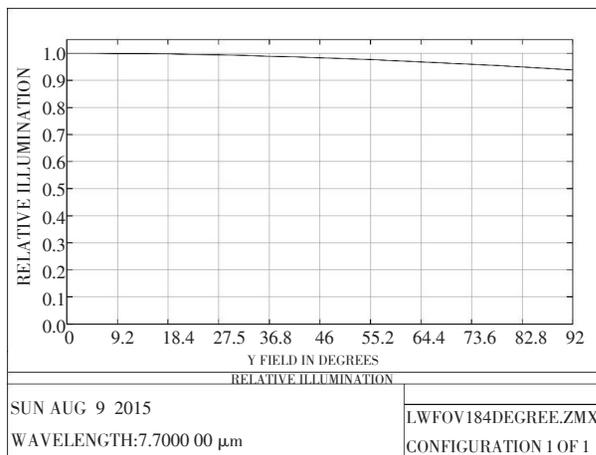


图5 光学系统像面照度曲线

图6是光学系统畸变曲线图。在以传统畸变曲线评价光学系统畸变时,可见较难衡量畸变,在超过 90° 时,畸变为无穷大。在以 $F-\theta$ 畸变曲线评价时,从曲线图中可以看出,在最大视场(92°)时,偏离线性曲线2.65%,按经验值,偏离不超过5%即可保证记录数据的真实性以及后续图像处理的准确性。

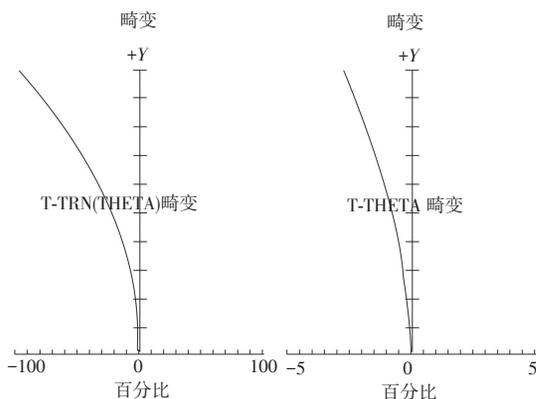


图6 光学系统畸变图(左)与光学系统 $F-\theta$ 畸变图(右)

在冷反射分析中YNI是一个重要的考察参数,其中, Y 是边缘光线高度, N 是表面折射率, I 是边缘光线 Y 对应的入射角度。通常当 $|YNI| \geq 1$ 时,表明该面对冷反射的贡献可以忽略。当YNI数值较小时,该表面可能会产生冷反射。表2给出了系统的YNI数值。从表中可以看出,表面1、2、3、5的YNI值较小,可通过方向光线追迹,将光学系统倒置,以探测器作为光源,将系统第1、2、3、5面分别设置为反射面,从最终的反向光线追迹结果来看,造成的冷反射影响可以忽略。

表2 冷反射分析

表面	YNI
1	0.22
2	0.27
3	0.32
4	-0.84
5	0.26
6	-0.81
7	0.42
8	0.41
9	0.79
10	1.72
11	3.00
12	-3.37

3 结论

给出了一种半球空域长波红外成像光学系统的设计思想、设计指标、设计结果和像质评价。设计中采用两种材料校正系统色差,应用非球面校正系统球差和系统的轴外像差,提高了系统成像质量,系统的传递函数曲线接近衍射极限,说明系统具备良好的成像性能;同时分析了系统的冷反射,给出了各个光学元件表面的冷反射数据,同时进行了光学反向追迹,验证光学表面的冷反射对光学系统是否有影响;采用二次成像的方式使系统达到100%冷光栏效率的匹配,同时有效压缩系统的径向尺寸,光学系统总长为71 mm,最大直径为30 mm,体积小,结构紧凑,满足小型化要求,能够广泛应用于单兵携带及小型机载平台用于安防、监视等。

参考文献

[1] 李德栋,谢晓方,张龙杰,等.国外全向凝视光电系统发展现状与趋势[J].激光与红外,2014,44(11):1183-1187.
 [2] 王健,张振海,李科杰,等.全景视觉系统发展与应用[J].计算机测量与控制,2014,22(6):1664-1666.
 [3] 王永仲.鱼镜头光学[M].北京:科学出版社,2006.
 [4] 张良.凝视型红外光学系统中的冷反射现象[J].红外与激光工程,2006,35:8-11.
 [5] 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.

[6] 陈潇,杨建峰,马小龙.长波红外大视场大相对孔径光学系统设计[J].应用光学,2010,31(1):350-353.
 [7] 梁久伟,罗春华,杨铭.用于监控系统的鱼镜头光学设计[J].光学技术,2011,37(6):691-694.
 [8] 李宏壮,张振铎,刘欣悦,等.一款宽光谱鱼镜头的设计[J].光子学报,2014,41(11):1312-1315.
 [9] 阎阿奇,杨建峰,曹剑中,等.航天鱼眼相机光学系统设计的研究[J].光学学报,2011,31(10):102-200.
 [10] 刘英,王靖,曲锋,等.广角f- θ 静态红外地平仪镜头的光学设计[J].光学精密工程,2010,18(6):1243-1428.

(上接第16页)

表2 跟踪角度测量结果(单位:度)

日期		3.12					6.1				11.4			
时间		7:30	9:30	11:30	17:00	6:00	9:00	12:00	19:00	7:30	11:30	15:00	17:00	
标准值	高度角	16.56	38.70	52.15	10.60	12.13	48.89	78.10	0.69	9.04	40.02	24.54	3.26	
	方位角	74.22	51.15	12.26	-78.9	108.5	85.23	-0.00	-116	64.4	9.45	-48.5	-68.7	
测量值	高度角	16.6	38.6	52.2	10.6	12.2	48.9	78.1	0.8	9.1	40.0	24.6	3.3	
	方位角	74.2	51.1	12.3	-79.0	108.5	85.3	-0.00	-116	64.4	9.5	-48.5	-68.7	

上述结果表明,所提出的基于光敏电阻的高精度自动跟日系统,在早晚光线弱、正午光线强、长期运行情况下均可实现稳定、高精度跟踪。

4 结 论

当前太阳能利用的发展主要受到经济性的制约^[6],限制了其市场竞争力,所设计的基于光敏电阻的高精度自动跟日系统,以光敏电阻作为感光器件,在成本远低于光电三极管等其他感光器件的情况下实现了0.1°的高精度跟踪,满足了光伏产业的跟踪误差角小于0.3°要求^[7],提高了市场竞争能力,可广泛用于太阳能聚光发电、太阳能热发电、太阳光照明等太阳能利用装置中^[8-9]。

参考文献

[1] 宁铎.免跟踪透射式太阳聚光器的设计[J].光子学报,

2008,37(11):2284-2287.
 [2] 朱瑞,卢振武.基于非成像原理设计的太阳能聚光镜[J].光子学报,2009,38(9):1-5.
 [3] 赵燕.传感器原理及应用[M].北京:北京大学出版社,2012:100-120.
 [4] 王国安.太阳高度角和日出日落时刻太阳方位角一年变化范围的计算[J].气象与环境科学,2007,30:161-163.
 [5] 朱翔.地理[M].长沙:湖南教育出版社,2004.
 [6] 高峰.太阳能开发利用的现状与发展趋势[J].科技前沿与学术评论,2012,23(4):35-40.
 [7] 宁铎,吴涛,黄建兵,等.聚光型粗细调互补阳光信号采集器的研制[J].光子学报,2011,40(6):878-882.
 [8] 宁铎,王红鑫,孟惠,等.一种用于地下室照明的阳光输送机[P].中国,201210087099.X.[2012-3-28].2013.
 [9] 宁铎,王红鑫,孟惠,等.透射式太阳光隧道直接照明的装置[P].中国,201210086376.X.[2012-8-1].2013.