

文章编号:1002-2082(2012)02-0391-04

双通道红外投影光学系统的分析和设计

郑雅卫¹, 强 华¹, 郭云萍², 高教波¹, 王 军¹, 李俊娜¹, 高泽东¹, 吴文利¹

(1. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065;

2. 西安北方光电科技防务有限公司, 陕西 西安 710043)

摘 要:分析了双通道投影系统光路,介绍了准直投影光学系统的设计。此投影系统由目标源和干扰源2个通道组成,2个通道共用一个光学系统。光学系统采用二次成像结构来满足外形及质量的要求,在光学系统的最后一面和焦平面之间插入分束镜来引入目标源通道,并通过减小分束镜的厚度来控制干扰源通道的像差。光学系统工作波段为 $8\ \mu\text{m}\sim 12\ \mu\text{m}$,焦距315.69 mm,视场 8.5° ,入瞳距900 mm,最后的像质表明此光学系统能够满足使用要求。

关键词:投影系统;准直投影光学系统;分束镜;二次成像结构

中图分类号:TN21

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201233.0206002

Design and analysis of dual-channel infrared projection optical system

ZHENG Ya-wei¹, QIANG Hua¹, GUO Yun-ping², GAO Jiao-bo¹, WANG Jun¹,
LI Jun-na¹, GAO Ze-dong¹, WU Wen-li¹

(1. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China;

2. Xi'an North Electro-optics Science and Technology Defense Co., LTD, Xi'an 710043, China)

Abstract: This paper analyzes ray paths of the dual-channel projection system and introduces the design of the projection collimator optics. The projection system consists of a target source generator and an inference source generator sharing the same optics. The optics uses a re-imaging configuration to meet the packaging requirement. The beam splitter is located between the last surface and the focal plane of the optics to combine the target source channel. By reducing the thickness of the beam splitter, the aberration of the optics in the inference source channel is reduced. The optics collimates the output from an infrared source in the $8\ \mu\text{m}\sim 12\ \mu\text{m}$ wave-band and enables an imaging system with 8.5° field of view to be tested. The effective focal length of the optics is 315.69 mm and the entrance pupil relief is 900 mm. The obtained performance shows the optics meet the requirements of the projection system.

Key words: projection system; projection collimator optics; beam splitter; re-imaging configuration

引言

随着红外技术的发展,具有发现、识别、跟踪功能的红外导引头变得更加复杂,对于导引头性能的测试评估也变得更加重要和困难。目前红外投影系统与飞行模拟转台集成的红外成像制导仿真装置^[1]越来越多地应用于红外导引头的测试,

这不仅能减少野外试验的费用,而且能对导引头的性能进行全面、精确的测量。红外投影系统是红外半实物仿真装置中关键的分系统,一般由图像源、准直光学系统、主控计算机、控制电子箱等部分组成,主要用于实验室,为红外导引头提供与真实作战环境等效的目标和背景的红外辐射特

收稿日期:2011-09-22; 修回日期:2011-11-03

作者简介:郑雅卫(1969—),女,陕西西安人,高级工程师,主要从事光电系统评估与仿真技术的研究工作。

E-mail:zhkate@163.com

征。本文重点讨论双通道红外投影系统光路^[2-4]以及准直光学系统的设计。

1 投影系统光路

双通道红外投影系统包括两路红外点源通道:通道1模拟目标由远逼近的运动,通道2模拟干扰点在视场内横向及远近复合运动。通道1和通道2的光束经分束镜合成后由光学系统投射出去,模拟无穷远处的目标和干扰。

根据投影系统的工作方式,2个通道可采用各自独立的准直光学系统,也可共用同一个光学系统。图1(a)是一种光学系统各自独立的双通道投影系统^[5],其目标源和干扰源通过各自的准直光学系统,然后再经反射镜和分束镜合成一个光路,这种结构光学系统各自独立,视场和焦距不必兼顾2个通道,但2个红外镜头使投影系统横向尺寸增大,成本高。

本设计中2个通道共用一个光学系统^[6],在光学系统的最后一片透镜和目标源之间利用分束镜引入目标源光路,如图1(b)所示。目标源通道的光束被分束镜反射,干扰源通道的光束透过分束镜,二者经分束镜合成一个光路后通过同一个准直光学系统。

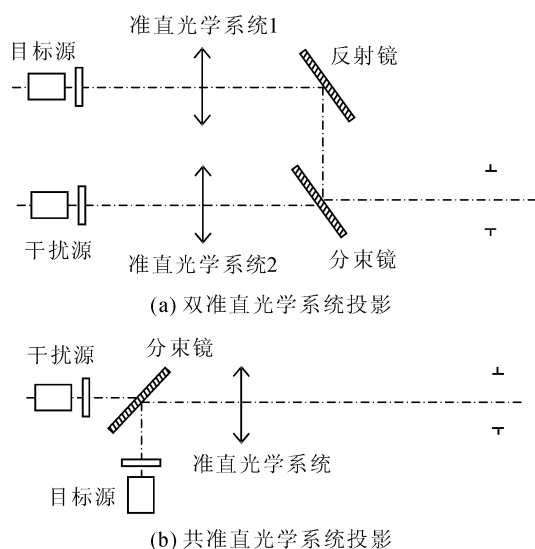


图1 投影系统光路

Fig. 1 Ray paths of projection system

2 光学系统设计

根据投影系统结构的要求、投影系统与转台的接口尺寸以及红外导引头测试的需要确定了以下设计指标^[7-8](按光路追迹方向):

工作波段/ μm 8~12

焦距/mm	315.65
视场/ $^{\circ}$	8.5
入瞳直径/mm	100
入瞳距离/mm	900

由设计指标可知,准直光学系统的入瞳应位于透镜组前一定距离处,以保证模拟器光学系统与红外导引头光学系统光瞳的衔接。由于受入瞳距离的约束,第一片透镜口径必然很大,根据入瞳距离、入瞳直径以及视场的关系计算得到其通光口径约为233.76 mm。控制光栏运动的电机需要有安装和运动的空间,这样要求光学系统必须有较长的后截距,但长的后截距会造成最后一片透镜的口径也很大,整个光学系统质量大,材料也难以保证。使用二次成像结构,压缩光束,使第二组物镜的口径减小,虽然整个系统透镜片数增多,但质量减轻,后截距也易于满足要求。

如图2所示,在二次成像结构中,物镜组1对无限远物距成像,它接收无穷远的物体产生一个中间像;物镜组2对有限远物距成像,它将中间像以一定比例成像在变化的光栏处。系统孔径光栏位于物镜组1前900 mm处,光栏的大小为100 mm。物镜组1的焦距越长,越有利于像差的校正,但会增加系统总长,物镜组2的放大倍率小,总长小、焦距短,但不利于像差的校正,因此在设计过程中,应合理分配两组的光焦度并确定物镜组2的放大倍率。在本设计中,物镜组1焦距取 $f_1 = 315 \text{ mm}$,物镜组2焦距取 $f_2 = 100 \text{ mm}$,放大倍率取 $\beta = -1$ 。在 $8 \mu\text{m} \sim 12 \mu\text{m}$ 波段,为了更好地校正色差,前组物镜可采用锗与硒化锌或硫化锌材料的多片组合^[9],后组物镜采用锗与锗或硒化锌材料的多片组合。

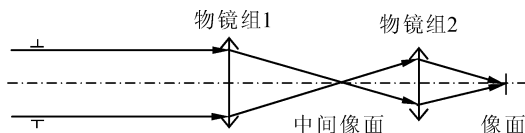


图2 二次成像透镜组示意图

Fig. 2 Schematic diagram of re-imaging lens groups

在设计过程中,物镜组1和物镜组2先单独优化,然后再组合校正像差,组合时应注意物镜组1与物镜组2之间光瞳的匹配。另一方面在保证像质的前提下,可以调整物镜组1的空气间隔来控制硫化锌或硒化锌透镜的外形尺寸,保证可以得到相应尺寸的红外玻璃材料。为了进一步校正像差,在优化过程中还可引入非球面,由于物镜组1

透镜的口径较大,不利于非球面的加工和检测,因此非球面最好加在物镜组 2 中。

在图 1(b)所示的光路中,如果分束镜以 45° 角插入会聚光束中^[10],在反射方向不会引起像差的变化,而在透射方向,由于光学系统不再旋转对称,分束镜会在光学系统轴上产生慧差、像散及垂轴色差等视场像差。像散可以通过加另一个分束镜来补偿,也可以在倾斜平板上加工特殊面形来代替平行平板。第一种方法要求足够的空间,第二种方法在工艺上比较难实现。由像差分析得到,在系统中由分束镜产生的像散会引起系统弥散圆的变化,分束镜越厚,存在的像散越大,弥散圆越大。如果在保证加工精度的前提下,通过适当减薄分束镜的厚度来减小由分束镜带来的像差,可极大地简化光学系统的设计。

3 设计结果及分析

物镜组 1 采用锗-硫化锌-锗 3 片透镜组合消色差,物镜组 2 则采用 4 片锗透镜,将两组物镜组各自初步优化后组合计算,在优化计算过程中,控制硫化锌透镜的厚度,并在第 2 片透镜的第 2 面引入一个二次非球面进一步校正像差,最终的光学系统如图 3 所示。系统第一片锗透镜外形尺寸最大,通光孔径为 236.5 mm,中心厚度为 23 mm,第二片硫化锌透镜通光孔径为 127.7 mm,中心厚度为 9 mm。系统的主要光学性能如下:

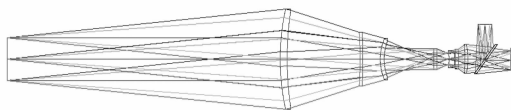


图 3 光学系统结构图

Fig. 3 Layout of optics

焦距/mm	315.69
视场/(°)	8.5
入瞳直径/mm	100
入瞳距离/mm	900
后截距/mm	137.95

以上性能参数不仅保证了红外导引头测试的能量和视场,还满足了红外导引头与投影系统在飞行模拟转台上安装的需要。

3.1 弥散圆

在本系统设计中直接将分束镜以 45° 角置于光路中,分束镜没有参与透镜组的优化,在反射方向的目标源通道光学系统像质不发生变化,弥散

圆如图 4 所示,而在透射方向的干扰源通道,分束镜使光学系统像质变差。

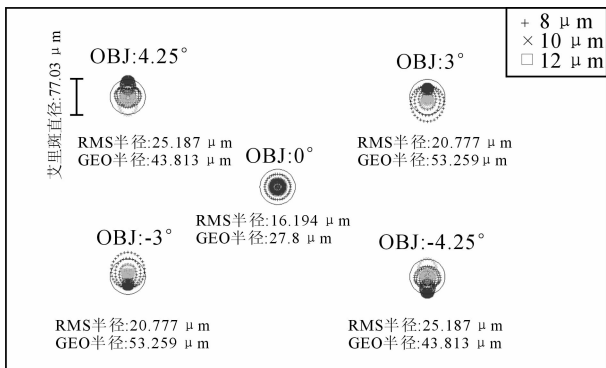


图 4 目标源通道光学系统点列图

Fig. 4 Spot diagram of target optics

由像差理论^[10]可知,光学系统的像质受到几何像差和衍射的影响。如果系统几何像差引起的弥散圆直径远大于衍射引起的艾里斑直径,像质主要受几何像差影响。反之,如果弥散圆直径比艾里斑直径小得多,像质主要受衍射影响。如果弥散圆直径与艾里斑直径近似相同,像质受几何像差和衍射共同影响。图 4 表明,光学系统在目标源通道的像质更多地受到艾里斑影响,而艾里斑的大小取决于系统的中心波长和 F 数等光学特性参数,因此通过控制分束镜厚度使干扰源通道弥散圆大小与艾里斑大小接近,艾里斑虽略有衰减,但对像质不会产生严重影响。

表 1 为光学系统的均方根弥散圆直径随厚度变化的情况。根据系统的光学特性参数可以计算得到系统的艾里斑直径为 0.077 mm,根据表 1 的数据,使分束镜厚度在 4 mm 以下,就可以使系统 0.7 视场以内的均方根弥散圆直径接近或小于艾里斑直径。考虑分束镜加工的面形精度,选择分束镜厚度为 3.5 mm,光学系统均方根弥散圆如图 5 所示。图 5 表明在 0.7 视场以内,系统的均方根弥散圆直径均在 $69.45 \mu\text{m}$ 以内,略小于艾里斑直径。

表 1 均方根弥散圆直径随分束镜厚度的变化值

Table 1 RMS blur diameter as a function of the thickness of beam splitter

视场	不同厚度下的 RMS 弥散圆直径/mm		
	5 mm	4 mm	3 mm
-1.0	0.08	0.071	0.062
-0.7	0.079	0.07	0.059
0	0.085	0.07	0.057
0.7	0.094	0.077	0.062
1.0	0.116	0.096	0.081

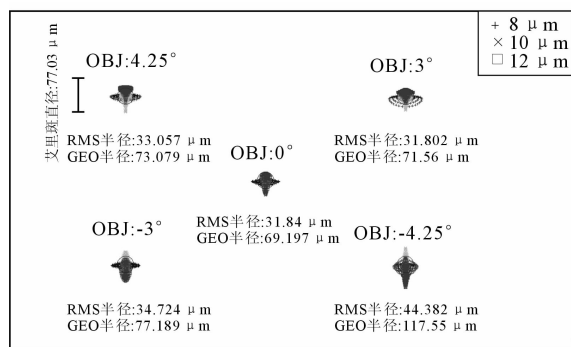


图5 干扰源通道光学系统点列图

Fig. 5 Spot diagram of inference optics

3.2 调制传递函数

光学系统在目标源通道和干扰源通道的调制传递函数曲线如图6和图7所示。根据艾里斑直径可以计算得到系统的分辨率为7 lp/mm,图6、图7表明在7 lp/mm处,目标源通道全视场MTF大于0.52,干扰源通道全视场MTF大于0.37,满足投影系统的使用要求。

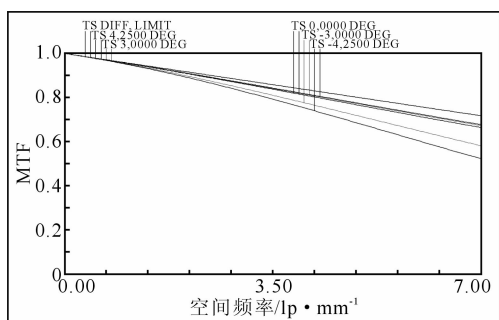


图6 目标源通道光学系统传递函数

Fig. 6 Modulation transfer function of target optics

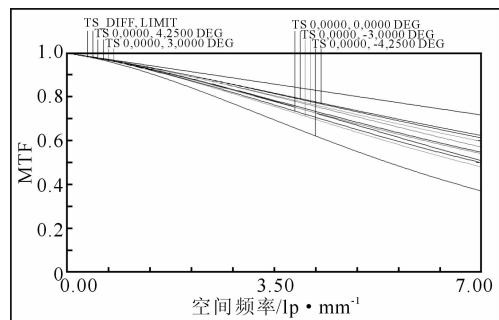


图7 干扰源通道光学系统传递函数

Fig. 7 Modulation transfer function of inference optics

4 结论

本文介绍的准直投影光学系统可以同时满足双通道投影系统目标源和干扰源通道的使用要求,该光学系统采用二次成像结构,物镜组2的口径被压缩至75 mm以内,系统质量减轻至6.6 kg,

分束镜厚度减薄至3.5 mm,从而减少了通道的像差,简化光学系统结构的同时使光学系统的像质满足了投影系统的使用要求。采用该光学系统的双通道投影系统,实现了红外目标和干扰的复合运动,达到了理想的效果。

参考文献:

- [1] SAYLOR D A, BEASLEY D B. Current status of scene projection army aviation and missile command[J]. SPIE, 2001, 4366: 147-148.
- [2] 王治乐, 戴景民, 杨迪. 红外仿真变焦光学系统设计[J]. 应用光学, 2008, 29(6): 936-937.
WANG Zhi-le, DAI Jing-min, YANG Di. Optical design of zoom lenses in IR HWIL simulation system[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(6): 936-937. (in Chinese with an English abstract)
- [3] ZHENG Ya-wei, GAO Jiao-bo, WANG Jun, et al. The optical system for dynamic scene simulation[J]. SPIE, 2005, 5638: 338-339.
- [4] ZHENG Ya-wei, GAO Jiao-bo, WANG Jun, et al. Scene simulation optics in testing of dual-field angle infrared imager[J]. SPIE, 2007, 6834: 68343X-1-68343X-2.
- [5] BEN-DAVID E, CABIB D. IR simulation of missile closing on a moving textured object with a textured background and EO countermeasure[J]. SPIE, 1992, 1687: 513-517.
- [6] 潘洪涛, 左保军. 大入瞳距双通道红外投影系统设计[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(3): 506-507.
PAN Hong-tao, ZUO Bao-jun. Dual-channel infrared projection system design with large entrance pupil distance[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(3): 506-507. (in Chinese with an English abstract)
- [7] 虞红. 目标/星空背景光学特性仿真方法研究[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(4): 470-471.
YU Hong. Optical characteristics simulation approach of target/stars background[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(3): 470-471. (in Chinese with an English abstract)
- [8] 丁旭明, 熊望娥, 於崇真, 等. 红外耦合光学系统设计[J]. 应用光学, 2006, 27(5): 400-410.
DING Xu-ming, XIONG Wang-er, YU Chong-zhen, et al. Optical design of coupling system[J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(5): 400-410. (in Chinese with an English abstract)
- [9] WOLFE W L. Infrared design example[M]. Washington: SPIE Press, 1999.
- [10] FISHCHER R E, TADIC-GALEB B. Optical system design[M]. Washington: SPIE Press, 2000.