

红外目标模拟器光学系统设计

宋延松^{1,2} 杨建峰¹ 赵意意^{1,2} 闫兴涛¹ 马小龙¹

¹中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为简化红外目标模拟器结构,提出了一种新型共光路红外目标模拟器方案,基于此方案设计了一款结构紧凑型双通道红外投影系统,系统视场角为 $\pm 3^\circ$,工作波段为 $3\sim 5\ \mu\text{m}$,入瞳距为550 mm,焦距为220 mm, F 数为3.67。通过分析以往红外目标模拟器结构相对复杂的原因,以及干扰目标模拟器的结构形式对共光路设计的影响,提出了一种利用黑体/摆镜组合作为干扰目标源的双通道共光路解决方案,简化了系统结构。并从理论上分析了摆镜对系统性能的影响,证明了此方案的可行性。设计结果表明,主目标通道各视场在16 lp/mm处调制传递函数值均优于0.5,两通道各视场弥散斑均方根半径均小于 $18\ \mu\text{m}$ 、畸变均小于1%。通过调焦,该系统能满足 $-10\ \text{C}\sim 40\ \text{C}$ 工作环境下的使用要求。

关键词 光学设计;红外目标模拟器;双通道;黑体;摆镜

中图分类号 TH741.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0422007

Optical System Design for Infrared Target Simulator

Song Yansong^{1,2} Yang Jianfeng¹ Zhao Yiyi^{1,2} Yan Xingtao¹ Ma Xiaolong¹

¹*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China*

²*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract A new common-path scheme for infrared target simulator is proposed in order to simplify the structure of infrared target simulator. Based on this scheme, a dual-channel infrared projection system with compacted structure is designed. The optical system is characterized by the system field angle of $\pm 3^\circ$, the spectral band of $3\sim 5\ \mu\text{m}$, the entrance pupil distance of 550 mm, the focal length of 220 mm and the F number of 3.67. After analyzing the reason why the structure of the previous infrared target simulator is complex and the influence of different forms of interference target simulator structure on the design of common-path system, a good solution is given with combination of blackbody source and scanning mirror as interference target source. Through theoretical study of the influence of scanning mirror on the system performance, the feasibility of this scheme is proved. The results show that the modulation transfer function of the main target channel is better than 0.5 at the field of 16lp/mm, the root mean square (RMS) radius of each channel is less than $18\ \mu\text{m}$, and the distortion is less than 1%. The system can meet the requirements of minus $10\ \text{C}$ to $40\ \text{C}$ working environment by focusing.

Key words optical design; infrared target simulator; dual-channel; blackbody; scanning mirror

OCIS codes 080.2740; 080.3620; 110.3080

1 引 言

红外成像制导技术探测手段隐蔽、抗干扰能力强,被广泛应用于现代武器制导领域。红外半实物仿真技术是检验红外制导武器抗干扰能力、目标识别能力的重要实验室工具^[1]。采用仿真技术可以使导弹飞行试验的次数减少30%~50%,研制经费节省10%~40%,研制周期缩短30%~40%^[2]。在仿真阶段,使用红外目标模拟器对真实作战环境中的目标、背景、干扰源等红外场景的红外辐射特性进行等效模拟,模拟结果被用

收稿日期: 2014-10-11; 收到修改稿日期: 2014-12-11

国家自然科学基金: 国家863计划(2010AA122203)

作者简介: 宋延松(1990—),男,博士研究生,主要从事成像光学设计方面的研究。E-mail: syansong@163.com

导师简介: 杨建峰(1968—),男,研究员,博士生导师,主要从事空间光学、成像光谱等方面研究。E-mail: yangjf@opt.ac.cn

于红外导引头接收。其模拟红外场景的质量,决定着整套系统仿真结果的价值。

红外目标模拟器在组成上包括两个子模拟器:主目标模拟器及干扰目标模拟器。其中主目标模拟器用于模拟导引头的锁定目标(飞机等)以及此目标所处环境的红外特性,干扰目标模拟器用于模拟锁定目标所释放的干扰源(饵弹等)的红外特性。通常两个子模拟器的投影系统各自独立,并通过合束系统实现共出瞳投影,因此,文献[3]研究的一种基于变焦系统的红外成像目标模拟器、文献[4]的基于数字微镜器件(DMD)设计的一种消热差的红外目标模拟器投影光学系统等,在使用过程中都要求搭配独立的干扰目标模拟器。两个子模拟器投影系统分别单独设计,降低了设计难度,但整套目标模拟器结构复杂,装配精度要求高,无法满足小型化需求。为简化模拟器结构,文献[5-6]中主目标/干扰目标模拟器共用同一光学系统,设计了双通道红外目标模拟器,但两系统均采用DMD或金属氧化物半导体(MOS)电阻阵红外图像产生源作为干扰目标源。DMD需要额外的照明光路,会增加模拟器的尺寸和成本;国产MOS电阻阵最高等效黑体温度约400℃左右^[7],无法模拟更高温度的干扰,另外电阻阵也存在体积大的问题。因此仅仅共光路设计并不能有效简化红外目标模拟器。

应实际需要,要求将红外目标模拟器的体积控制在400 mm×300 mm×250 mm以内,为此,本文提出一种利用黑体/摆镜组合模拟干扰目标、MOS电阻阵模拟主目标的双通道共光路红外目标模拟器方案。黑体/摆镜组合结构简单、模拟温度高,能够有效弥补利用DMD、MOS电阻阵模拟干扰目标时存在的不足。依据此方案设计了一款适用于中波红外的双通道红外目标模拟器投影系统,设计结果表明,该系统成像质量良好,结构紧凑,达到了简化系统的目的。

2 光学系统方案及系统参数计算

2.1 光学系统方案

使用两套投影系统是造成目标模拟器结构复杂的主要原因,所以要简化结构,必须实现主目标、干扰目标模拟器的共光路设计。而干扰目标投影系统的结构形式会直接影响共光路设计,有必要对其进行讨论。目前报道的点源干扰目标投影系统主要有两种结构形式^[8],如图1所示。

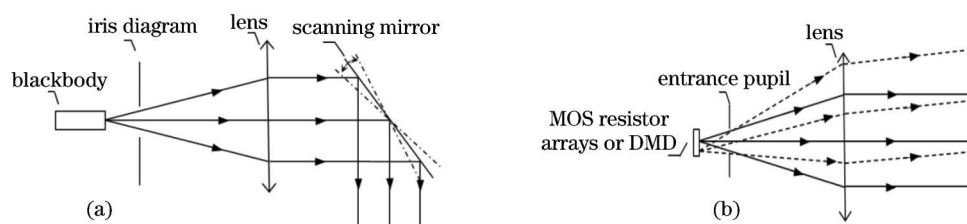


图1 干扰目标投影系统结构图。(a)黑体源模拟;(b)MOS电阻阵或DMD模拟

Fig.1 Layout of interference target projection system. (a) Blackbody source; (b) MOS resistor array or DMD

图1(a)采用黑体模拟干扰目标,通过摆动摆镜来改变干扰目标在红外场景内的行进方向、行进速度和位置。由图可知,摆镜处于投影镜头的像方空间,若共光路设计,主目标投影系统会共享此摆镜,摆镜的摆动必然会使主目标发生偏移,最终导致主目标通道像质恶化,因此图1(a)结构不适用于主目标、干扰目标模拟器的共光路设计。图1(b)结构采用MOS电阻阵或DMD来模拟干扰目标,干扰目标的移动不再需要摆镜,从而解决了采用图1(a)结构进行共光路设计时摆镜的干扰问题。但正如引言中所述,电阻阵质量大、模拟温度低,微透镜阵列器件需额外照明光路,因此,虽然图1(b)结构可实现主目标、干扰目标模拟器的共光路设计,但不能够简化系统。

为解决以上矛盾,提出一种新型主目标/干扰目标共光路设计方案,此方案应用黑体/摆镜组合来模拟干扰目标,如图2所示。采用黑体作为干扰目标源,且摆镜处于镜头物方空间,有效解决了图1(a)无法共光路设计、图1(b)干扰目标源结构复杂、模拟温度低的问题。

利用图2结构进行共光路设计,系统会出现主目标/干扰目标通道、摆镜摆动角度两种不同性质的多重结构。只有消除其中一维多重结构,才能对系统进行优化设计。摆镜摆动时,干扰目标运动到不同位置,等效于扩大了干扰通道的视场,因此可以通过扩大干扰通道视场的方法消除摆镜摆动这一维多重结构,如图3(a)所

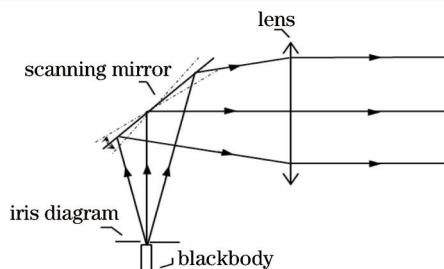


图2 基于黑体/摆镜的干扰目标通道光路示意图

Fig.2 Schematic of optical path of interference target channel based on blackbody source and scanning mirror

示:摆镜位置不动,其摆角为 0° 和 θ 分别用像平面 A 、 B 两点代表,且两点处于同一平面。利用此方法后,可利用光学软件对系统进行优化设计。但系统在实际工作时的光路与设计时并不相同,见图3(b),摆镜由起始位置摆动 θ 后,黑体的镜像由 A' 移动到 B' ,两点并不在同一平面,而是存在一个轴向位移,即各个视场产生不同程度的离焦。

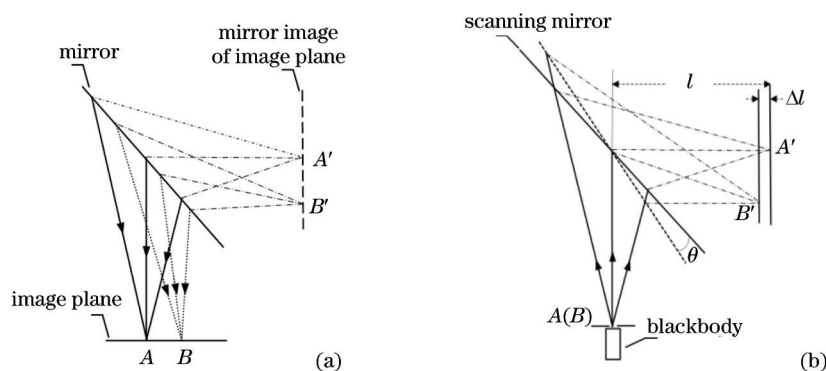


图3 干扰目标通道光路示意图。(a)优化设计阶段;(b)实际工作阶段

Fig.3 Schematic of interference target channel optical path. (a) In optimization design;(b) in practical work

假设摆镜中心距离 A' 的距离为 l ,摆镜最大摆动角度为 θ ,摆镜在起始位置时其法线与光轴夹角为 α ,则对应最大离焦量为

$$\Delta l = l \sin 2\alpha - l \sin(2\alpha - 2\theta), \quad (1)$$

光学系统的焦深计算公式为:

$$\Delta = \pm 2\lambda(F/\#)^2. \quad (2)$$

离焦量小于光学系统焦深时不会影响到光学系统性能,因此可以控制摆镜距黑体的距离 l 使离焦量小于系统焦深,从而解决摆镜摆动对系统实际工作性能的影响。综上可知,本方案在简化系统的同时,优化设计可行。

2.2 光学系统参数计算

红外投影系统需要与导引头相匹配,导引头参数如表1所示。

表1 导引头光学系统参数

Table 1 Optical parameters of seeker

Parameter	Value
Entrance pupil diameter	60 mm
Field of view	$\pm 3^\circ$
Wavelength	3~5 μm

为满足光瞳匹配及系统装配,投影系统的出瞳距、出瞳口径、工作波段、视场 2ω 分别定为550 mm、60 mm、3~5 μm 和 $\pm 3^\circ$ 。

该方案采用256×256 MOS电阻阵列作为主目标辐射源,阵列单元尺寸为65 μm ×65 μm 。电阻阵的斜边全高度为

$$H = 256 \times 65 \times \sqrt{2} \approx 23.53 \text{ mm.} \quad (3)$$

根据投影系统的视场和电阻阵全高度,计算出主目标通道投影系统的焦距为

$$f' = \frac{H}{2 \tan \omega} = \frac{23.53}{2 \times \tan 3^\circ} \approx 224.49 \text{ mm.} \quad (4)$$

为保证 MOS 电阻阵具有 $\pm 3^\circ$ 的投影视场,将投影系统的焦距适当缩小,定为 220 mm。采用主目标/干扰目标共光路设计,若干扰目标通道与主目标通道焦距不相等,那么两通道共用的透镜曲率会增加额外约束,导致优化解空间减小,为避免此情况,设定两通道系统参数相同,如表 2 所示。

表 2 系统参数

Table 2 Performance parameters of system

Parameter	Value
Wavelength	3~5 μm
Field of view	$\pm 3^\circ$
Effective focal length	220 mm
Entrance pupil diameter	60 mm
Entrance pupil distance	550 mm

3 光学系统设计

3.1 结构选择

主目标/干扰目标通过平面合束镜共用同一光学系统,根据使用的波长选用硅作为合束镜材料,通过表面镀膜来控制主目标辐射与干扰目标辐射的透射率。合束镜是一块平行平板,它引起的像差如图 4 所示。其中, u_p 表示平行平板相对于光轴的倾斜角度, u 表示入射光线相对于光轴的倾斜角度, t 表示平行平板的厚度,平行平板的折射率和阿贝数分别用 n 和 ν 表示。

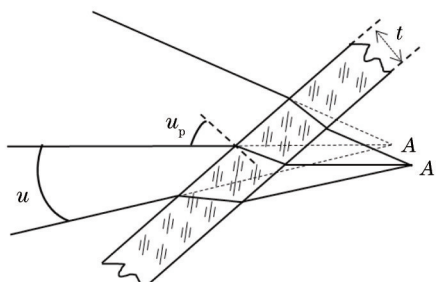


图 4 平面耦合镜引入像差示意图

Fig.4 Layout of beam combiner aberration

由图 4 可知,平面合束镜会使原光线交点发生横向和纵向的偏移,引起像差。与入射光线角度 u 有关的三级球差(f_{sc})、三级彗差(f_{cc})分别为

$$f_{sc} = \frac{tu^2(n^2 - 1)}{2n^3}, \quad (5)$$

$$f_{cc} = \frac{tu^2u_p(n^2 - 1)}{2n^3}. \quad (6)$$

由(5)式和(6)式可知,三级球差、三级彗差是倾斜角 u 的二次函数,把平行平板放置在会聚或发散光束中,系统球差、彗差迅速增大,增加系统优化难度,因此合束镜应该应用在平行光路或接近平行的光路中。为此,本投影系统前置镜组采用望远型结构。望远系统有伽利略和开普勒两种典型结构。因红外材料昂贵,应尽量减小镜片口径,但伽利略型采用正光焦度物镜、负光焦度目镜结构,物镜、目镜距离相对较近,不能有效缩小后聚焦系统的镜片口径。为此本方案的前置无焦系统采用开普勒结构,如图 5 所示。主目标、干扰目标辐射经过聚焦镜组整形为平行光,通过合束镜后,共用前置开普勒无焦系统。为提高照度均匀性,设计时控制系统处于像方远心^[9]。

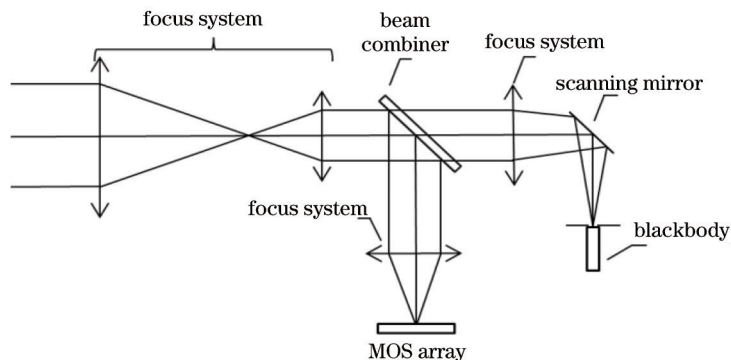


图5 双通道红外投影系统结构示意图

Fig.5 Schematic of dual-channel infrared projection optical system

3.2 各通道焦距计算

图6为前置望远系统的光路,其中 D_0 为入瞳口径, 2ω 为全视场角, L_z 为入瞳距离,则望远物镜的口径为

$$D_1 = 2L_z \tan \omega + D_0, \quad (7)$$

望远系统放大率为 β ,则缩束后的透镜口径为

$$D_2 = D_0/\beta + \tan |L_z - f'_1 - f'_2|. \quad (8)$$

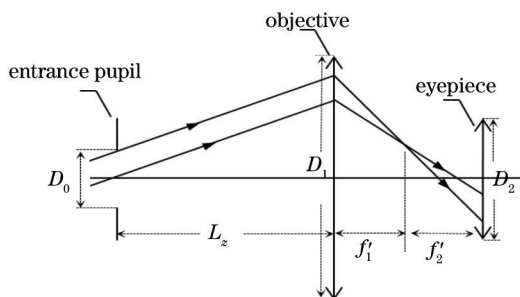


图6 望远系统光路图

Fig.6 Ray paths of telescope system

依据系统参数, $L_z=550\text{ mm}$, $\omega=3^\circ$, $D_0=60\text{ mm}$,可得物镜的口径 $D_1=117.6\text{ mm}$ 。经计算,将望远系统放大率定为1.5, $f'_1=150\text{ mm}$, $f'_2=100\text{ mm}$ 时,能够将物镜后的镜组口径压缩到40 mm左右,并且不会过度增加物镜光焦度,因此将其作为望远系统的系统参数。

根据几何光学,有:

$$f' = \beta f'_b, \quad (9)$$

式中 f' 为总焦距, β 为望远系统放大率, f'_b 为后聚焦镜焦距。将参数代入得 $f'_b=146.67\text{ mm}$ 。

3.3 黑体与摆镜的距离计算

由于投影系统半视场角为 3° ,根据平面镜反转特性^[10],摆镜的最大摆动角度 $\theta=1.5^\circ$,摆镜的放置角度 $\alpha=45^\circ$,因此最大离焦量为

$$\Delta l = 1.37 \times 10^{-3} l. \quad (10)$$

由系统参数可知, $F/\# = 3.67$,波长 λ 的范围为 $3\sim 5\ \mu\text{m}$,光学系统的焦深为 $\Delta = \pm 0.08\text{ mm}$ 。

为消除摆镜摆动的影响,应满足 $\Delta l < \Delta$,根据此关系,推算出 l 的取值范围为 $l < 58.85\text{ mm}$ 。考虑到要给黑体预留调整空间, l 取 50 mm 。

3.4 设计结果

计算得出系统的高斯解后,选择合适的透镜进行替代,就可得到系统的初始结构,利用Zemax软件进行优化可得到最终的设计结果,如图7所示。本设计采用硅和锗两种材料,共8片透镜,全部采用球面设计。其中前4片透镜构成开普勒望远系统,起到压缩口径的作用。为缩短系统总长,望远系统物镜采用摄远型结

构。主目标/干扰目标光路的各视场的主光线接近平行到达辐射源,构成像方远心系统,提高了画幅内的照度均匀性。

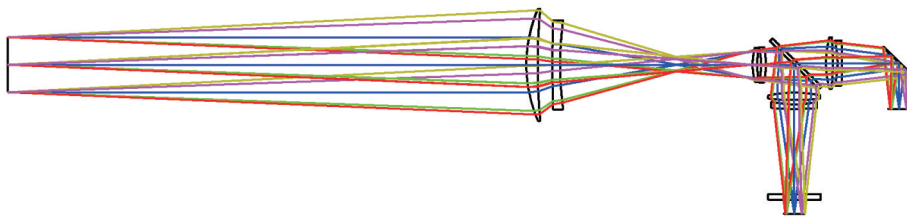


图 7 光学系统结构图

Fig.7 Layout of optical system structure

4 性能评价

4.1 像质评价

图 8 为主目标通道光学系统的调制传递函数(MTF)曲线。系统在 16 lp/mm 处的 MTF 值均大于 0.5,说明该系统具有良好的成像质量。因干扰目标是点源干扰,故不考虑其 MTF 曲线。

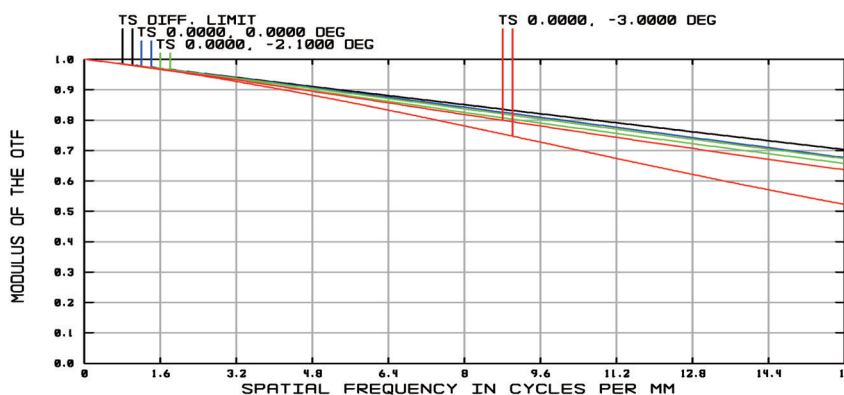


图 8 目标通道光学系统传递函数曲线

Fig.8 MTF curves of target optical system

图 9(a)、(b)分别为主目标、干扰目标通道光学系统点列图。两通道各视场的弥散斑均方根半径均小于 $18 \mu\text{m}$,远小于电阻阵单元尺寸,各视场会聚光线情况良好。

图 10(a)、(b)分别为主目标/干扰目标通道光学系统畸变图。由图可知,两通道光学系统的畸变值均小于 1%。

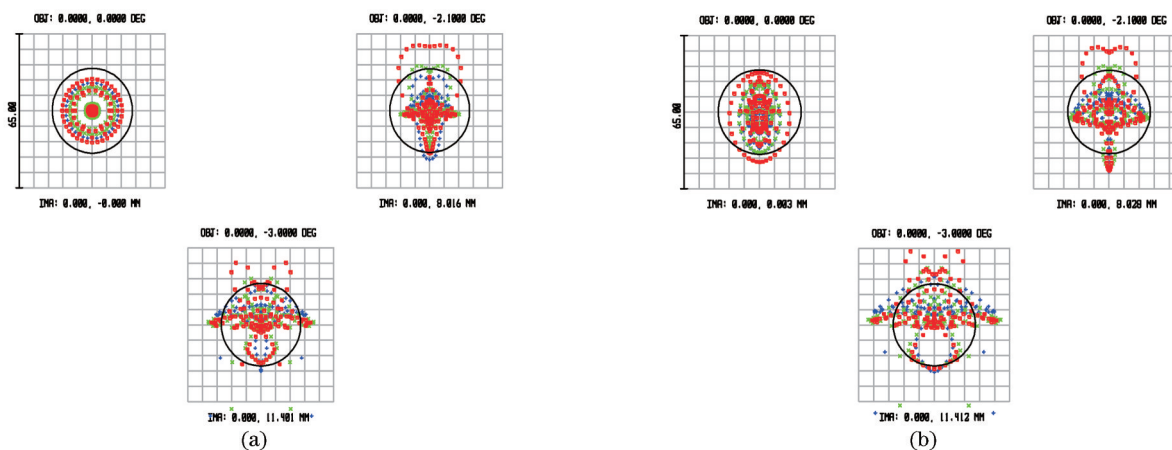


图 9 点列图。(a)目标通道光学系统;(b)干扰通道光学系统

Fig.9 Spot diagram. (a) Target optical system; (b) interference target optical system

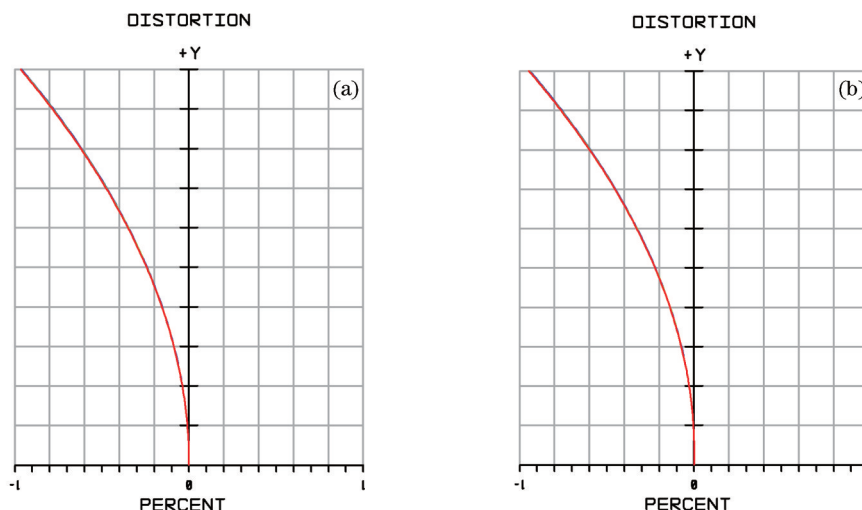


图 10 系统畸变。(a)主目标通道;(b)干扰目标通道

Fig.10 Distortion of system. (a) Main target; (b) interference target

4.2 热性能分析

由于透镜曲率、厚度以及机械部件随着温度变化热胀冷缩,因此需要对系统进行热性能分析。由图 7 可知,光学系统最后一个镜面距离电阻阵、黑体 110 mm,因此系统工作温度受电阻阵、黑体辐射的影响并不大,系统的温度变化主要取决于工作环境。经过分析,选取望远系统目镜作为调焦部件,能有效消除温度变化对系统性能的影响。该选择有两个优点,一是两个通道只需一个调焦机构,结构简单;二是望远物镜、目镜之间空间充足,适宜安装机械运动部件。表 3 是机械部件采用钛合金材料时,不同温度下系统的离焦量以及望远目镜的移动量(光学系统的工作环境温度变化约为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$)。

表 3 不同温度下负透镜的移动量

Table 3 Amount of movement of eyepiece at different temperatures

Temperature / $^{\circ}\text{C}$	Defocus /mm	Movement /mm
-10	0.56	0.34
20	0	0
40	0.40	0.24

5 结 论

提出了一种新型红外模拟器共光路设计方案,通过对摆镜的分析证明了采用摆镜和黑体组合作为干扰源的设计方案有效可行。以此为基础设计了一款双通道像方远心的红外投影系统。该系统实现了红外目标、红外干扰共光路投影,简化了传统红外目标模拟器装置,系统体积能够有效控制在 $400\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times 250\text{ mm}$ 以内。且该系统全部采用球面镜,镜片数目少,在节约加工成本的同时,保持了高透射率。像方远心结构的设计,有效提高了像面照度的均匀性。经分析,该系统主目标通道传递函数接近衍射极限,干扰目标通道弥散斑均方根半径接近衍射极限,具有良好的成像性能。

参 考 文 献

- 1 Gao Hui, Zhao Songqing. Exploration of applications of IR image simulator [J]. Infrared Technology, 2014, 36(5): 409-414.
高 辉, 赵松庆. 红外成像目标模拟器的应用探索[J]. 红外技术, 2014, 36(5): 409-414.
- 2 Ma Lihua, Qiao Weidong, Zhao Shanghong, *et al.*. Infrared seeker hardware in the loop simulation and target simulator [J]. Computer Simulation, 2007, 24(6): 42-44.
马丽华, 乔卫东, 赵尚弘, 等. 红外制导半实物仿真及目标模拟器研究[J]. 计算机仿真, 2007, 24(6): 42-44.
- 3 Wang Zhile, Zhang Wei. Study of IR imaging target simulator based on zoom system [J]. Optical Technique, 2004, 30(4): 420-422.
王治乐, 张 伟. 基于变焦系统的红外成像目标模拟器研究[J]. 光学技术, 2004, 30(4): 420-422.

- 4 Qiao Yang, Xu Xiping, Gu Yiwen, *et al.*. Design of athermalized projection optical system for infrared target simulator [J]. *Acta Armamentarii*, 2013, 34(4): 431-436.
乔 杨, 徐熙平, 辜义文, 等. 消热差的红外目标模拟器投影光学系统设计[J]. *兵工学报*, 2013, 34(4): 431-436.
- 5 Pan Hongtao, Zuo Baojun. Dual-channel infrared projection system design with large entrance pupil distance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(3): 505-508.
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): 505-508.
- 6 Zheng Yawei, Qiang Hua, Guo Yunping, *et al.*. Design and analysis of dual-channel infrared projection optical system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(2): 391-394.
郑雅卫, 强 华, 郭云萍, 等. 双通道红外投影系统的分析与设计[J]. *应用光学*, 2012, 33(2): 391-394.
- 7 Ma Bin, Cheng Zhengxi, Zhai Houming, *et al.*. Development of domestic resistive arrays technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(12): 2314-2322.
马 斌, 程正喜, 翟厚明, 等. 国产电阻阵列技术的发展趋势[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(12): 2314-2322.
- 8 Cai Benrui, Feng Jiangqiong. A novel infrared target simulator [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2012, 32(8): 815-817.
蔡本睿, 冯江琼. 红外点源目标模拟器[J]. *北京理工大学学报*, 2012, 32(8): 815-817.
- 9 Qu Enshi, Zhang Hengjin, Cao Jianzhong, *et al.*. Discussion of illuminance formula in optical design [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(7): 1364-1368.
屈恩世, 张恒金, 曹剑中, 等. 对光学设计中照度计算公式的讨论[J]. *光学学报*, 2008, 28(7): 1364-1368.
- 10 Yu Daoying, Tan Hengying. *Engineering Optics*[M]. Beijing: Press of Mechanical Industry, 2005. 40-41.
郁道银, 谈恒英. *工程光学*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005. 40-41.

栏目编辑: 韩 峰