文章编号:1002-2082(2011)06-1212-05

离轴三反红外双波段景象模拟器光学系统设计

杨 乐[1,2],孙 强[1],郭邦辉[1]

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;
2. 中国科学院研究生院,北京 100049)

摘 要:针对红外双波段成像系统性能测试与评估的应用需求,设计了 3 μm～5 μm 和 8 μm～12 μm 红外双波段视景仿真用离轴三反光学系统。在共轴三反光学系统成像理论基础上,分析了孔径光栏远离主镜的离轴三反系统像差特性,研究了大出瞳距、大相对孔径条件下离轴三反光学系统的结构设计和像差平衡方法。系统焦距为 330 mm,$F\#$ 为 3,视场为 6°×4.5°,出瞳距为 750 mm,在空间频率 10 lp/mm 处,中波红外 MTF>0.65,长波红外 MTF>0.4,接近衍射极限。具有大视场、大出瞳距、高分辨率、结构紧凑等特点。

关键词:红外仿真;景象投影;三反射镜系统;光学设计

中图分类号:TN21 **文献标志码**:A **doi**:10.5768/JAO201132.0606001

Optical design of off-axis three-mirror system for infrared dual-band scene simulator

YANG Le[1,2], SUN Qiang[1], GUO Bang-hui[1]

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS, Changchun 130033, China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: To meet the requirements of infrared dual-band imaging system performance testing and evaluation applications, an off-axis three-mirror system operating at 3μm ～ 5μm and 8μm ～ 12μm band was designed for infrared dual-band scene simulator. The aberration characteristics of off-axis three-mirror system with aperture departing far from the primary mirror were analyzed based on the coaxial three-mirror imaging theory, the design methods of the optical structure and aberration balance of the off-axis three-mirror with large eye relief and large relative aperture were discussed. The focal length of the system is 255 mm with $F\#$ 3, the field of view is 6° × 4.5°, the eye relief is 750 mm, the image quality of the system approaches the diffraction limit with MTF>0.65 for long-wave infrared band and MTF> 0.4 for mid-wave infrared band at 10lp/mm spatial frequency. The system is characterized by large field of view, large eye relief, high resolution and compact structure.

Key words: infrared simulation; scene projection; three-mirror system; lens design

引言

随着红外成像技术的发展,传统的单波段红外成像系统逐渐向双波段复合式系统发展。红外双波段成像系统不仅克服了单一波段信息量不足的弊端,提高了对目标的搜索和识别能力,同时也增强了系统的抗干扰能力,在光电对抗、真伪识别和反隐身侦查等领域具有独特优势,成为国内外红外领域的研究热点[1-2]。为了有效地提高红外双

收稿日期:2011-03-30; **修回日期**:2011-04-20
基金项目:国家自然科学基金(60977001)
作者简介:杨乐(1985－),男,湖北随州人,博士研究生,主要从事红外光学设计和数字信号处理工作。
E-mail: yangle352@163.com

波段成像系统的整体性能,必须对其各项指标进行准确的测试和评估。外场测试虽然能直接地检验系统的全面性能,但是也受到测试环境变化和测试条件控制等问题的局限。红外景象模拟器能在工作波段内模拟真实目标和背景的红外辐射,供红外成像系统进行探测和识别,进而对系统的捕获概率、跟踪精度及抗干扰能力等各项性能进行测试,为系统的研发提供可重复、可控的试验条件。这种仿真测试已成为红外检测的有效手段和性能仿真的主要趋势[3]。然而,现有的红外景象模拟器[4-6]受光学系统的限制,光谱范围通常局限在单一波段,且存在着分辨率低、视场小、出瞳距短、体积大等问题,无法用于红外双波段成像系统的性能测试,其技术指标也难以与当前红外仿真与测试领域高精度、小型化、轻量化的发展趋势相适应。透射式光学系统要在横跨 2 个波段的光谱范围内校正色差,必须依靠特殊的色散材料[7]或采用分光光路[8],造成系统结构复杂、成像质量差,色散材料物理稳定性的不足也降低了系统的可靠性。虽然可以考虑采用衍射元件来满足色差校正的要求[9],但会降低光能利用效率,而且在实际使用中,主衍射级次衍射效率的下降,以及其他衍射级次的出射光成为杂散光,都将降低系统对比度和信噪比,导致成像质量的下降。本文利用反射式光学系统在红外波段所具有的高反射率、无色差、材料选择简单、温度和环境适应性强等特点,设计了 3 μm～5 μm 和 8 μm～12 μm 离轴三反红外双波段景象模拟器光学系统。

1　设计思想

1.1　系统分析

红外景象投影光学系统是红外景象模拟器与待测设备的光信息接口,将目标靶置于投影镜头的像面,经投影镜头准直投射到被测系统的入瞳处,由待测设备接收,进而对待测设备性能进行测试。投影系统出瞳与被测系统入瞳衔接,以有效利用辐射能量和避免不必要的杂散光进入被测系统视场。为保证误差容限,可要求投影系统出瞳稍大于被测系统入瞳。由于仿真器固定在三轴转台上,为避免发生碰撞,出瞳位置往往要求远离仿真系统。同时,与普通离轴三反光学系统相比,红外景象模拟器需要在横、纵 2 个维度上具有较大视场,且要求具有较高的空间分辨率,以提高景象模拟的真实性。投影系统焦距由目标靶的尺寸和投影系统视场确定。根据测试要求,确定光学系统性能指标如表 1 所示。

表 1　光学设计参数

Table 1　Optical design parameters

性能指标	设计参数
波段/μm	3 ～5,8 ～12
焦距/mm	330
F 数	3
视场/(°)	6×4.5
出瞳直径/mm	110
出瞳距/mm	750
角分辨率/mrad	0.1, 0.25

1.2　像差分析和光学设计

三反射镜光学系统的初始结构如图 1 所示,图中 M_1、M_2、M_3 分别为主镜、次镜和三镜。三面反射镜的光焦度依次为正-负-正,采用此种光焦度分配,理论上不仅可以完善校正各主要像差,而且还可以在大相对孔径条件下最大限度的节省空间[10]。主镜和次镜形成中间像面 I,再经三镜成像到系统像面 I',构成二次成像结构。利用二次成像使主光线在次镜的入射高降低,在压缩系统径向尺寸的同时,也有利于场曲、像散的校正,通过在中间像面处设置视场光栏还可以有效地抑制系统的杂散光。

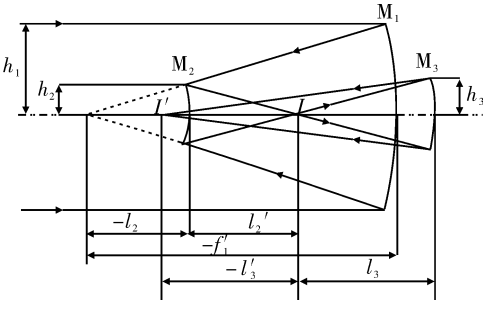


图 1　三反射镜光学系统示意图

Fig. 1　Schematic of three-mirror system

在焦距一定的条件下,共轴三反射系统有 7 个自由度:次镜相对于主镜的遮拦比 α_1,三镜相对于次镜的遮拦比 α_2,次镜的放大率 β_1,三镜的放大率 β_2,还有 3 个面的二次曲面系数 $-e_1^2$、$-e_2^2$、$-e_3^2$。设 d_1,d_2 分别为主镜与次镜、次镜与第三镜间的距离,d_3 为后截距,令 f' 为系统焦距,利用高斯光学理论,可得到系统的结构参数:

$$\begin{cases} d_1 = \dfrac{1-\alpha_1}{\beta_1\beta_2}f' \\ d_2 = \dfrac{\alpha_1(1-\alpha_2)}{\beta_2}f' \\ d_3 = \alpha_1\alpha_2 f' \end{cases} \tag{1}$$

设 r_1、r_2、r_3 分别为主镜、次镜和三镜的半径,则有:

$$\begin{cases} r_1 = \dfrac{2}{\beta_1\beta_2}f' \\ r_2 = \dfrac{2\alpha_1}{\beta_2(1+\beta_1)}f' \\ r_3 = \dfrac{2\alpha_1\alpha_2}{1+\beta_2}f' \end{cases} \tag{2}$$

据此,可建立大量不同结构的三反射镜系统,但真正可取的是那些结构紧凑、中心遮拦小、焦面位置合理、并有利于杂散光抑制的那些解。三镜系统的独立变量共有 7 个,而主要像差只有球差、彗差、像散和场曲 4 个,所以还有 3 个独立变量可用来作出某些限定。在仿真测试中,目标靶被置于像面处,应留出足够的后截距以布置目标靶驱动电路和消杂光光栏,而主镜和次镜间距 d_1 的选择则应综合考虑主镜的相对孔径和后工作距等多方面因素。当后工作距确定后,若 d_1 取值过小,则在维持一定的 $\beta_1 \cdot \beta_2$ 值不太大的情况下,势必需要增大 α_1 值,为避免中心遮挡增大,则需要提高主镜的相对孔径,使像差难以平衡,也增大了设计和加工难度。反之,则后工作距要求难以保证。根据光学设计参数,本设计中后工作距 d_3 取 230 mm,d_1 取 160 mm,$\beta_1 \cdot \beta_2$ 取 1.2 有合理解,利用高斯光学理论,并根据平像场条件 $1/r_1+1/r_3=1/r_2$ 解出 4 个轮廓尺寸系数,再根据系统要求的球差 S_1、彗差 S_2、像散 S_3,求出 3 个反射镜的二次非球面系数 $-e_1^2$、$-e_2^2$、$-e_3^2$。至此,系统的结构参数就全部确定了。

在求出初始结构参数后,建立共轴三反系统。根据仿真测试要求,将孔径光栏设在主镜之前,调整位置以达到指标要求。受孔径光栏远离系统主面的影响,主光线位置偏向镜面边缘,由此也引起像差特性的改变。保持系统中各反射镜的光焦度和间隔不变,仅改变孔径光栏与主镜距离,则初级像差方程组中 P,W 不变,由轴上物点发出经过孔径边缘的第一辅助光线在各面入射高 h 也不变,而由视场边缘的轴外点发出经过孔径光栏中心的第二辅助光线入射高 hz 改变,由初级像差理论可知,此时光学系统的球差不变,而彗差、像散通常都将增大,场曲则近似为一个与透镜组结构无关的常数。如果对球差完善校正,则彗差和像散也不受光栏位置影响。设孔径光栏远离系统时,主光线入射高由 y 变为 y',则各初级像差系数变化为[11]

$$\begin{cases} S_{\mathrm{I}}^* = S_{\mathrm{I}} \\ S_{\mathrm{II}}^* = S_{\mathrm{II}} + \dfrac{y'}{y}S_{\mathrm{I}} \\ S_{\mathrm{III}}^* = S_{\mathrm{III}} + 2\dfrac{y'}{y}S_{\mathrm{II}} + (\dfrac{y'}{y})^2 S_{\mathrm{I}} \\ S_{\mathrm{IV}}^* = S_{\mathrm{IV}} \\ S_{\mathrm{V}}^* = S_{\mathrm{V}} + \dfrac{y'}{y}(3S_{\mathrm{III}} + S_{\mathrm{IV}}) + 3(\dfrac{y'}{y})^2 S_{\mathrm{II}} + (\dfrac{y'}{y})^3 S_{\mathrm{I}} \end{cases} \tag{3}$$

反射镜的离轴和倾斜对彗差、像散和场曲的高次项都有影响,尤其是引入轴向彗差和双极点像散。通过镜面弯曲的 3 个变量来校正球差和像散,通过调整各镜的间距来校正场曲。在完善校正离轴三反系统球差和场曲的基础上,再调整三镜的倾斜来平衡次镜离轴量引入的像散,利用次镜的 4 次非球面项消除高级彗差,在保证焦距为定值的条件下,对系统的结构参数进行优化,使整个系统无遮拦并且成像质量达到衍射极限。

2 设计结果和分析

系统工作在 3 μm~5 μm 和 8 μm~12 μm 红外双波段,焦距 330 mm,F # 为 3,视场为 6°×4.5°,出瞳距为 750 mm,光学设计结果如图 2 所示。主镜和次镜形成中间像面,三镜将中间像成像于最终像面。光学系统封装尺寸为 252 mm×295 mm×160 mm(长×宽×高),结构紧凑。主镜和三镜为标准二次曲面,考虑到加工难度,仅在次镜使用了高次非球面。

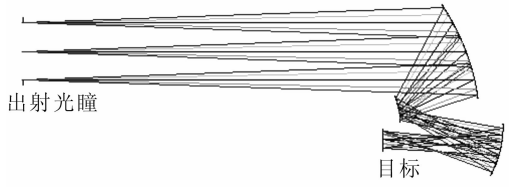
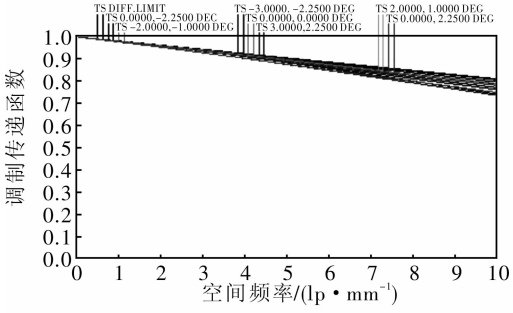


图 2 离轴三反仿真器光路图

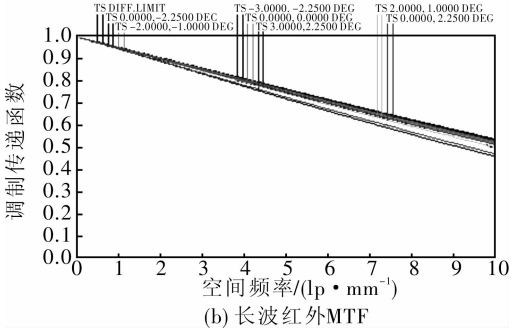
Fig. 2 Optical layout of off-axis three-mirror simulator

光学系统性能的调制传递函数曲线和点列图分别如图 3 和图 4 所示。从调制传递函数曲线可

以看出,在 10 lp/mm 处,系统在 3 μm～5 μm 波段 MTF 值高于 0.7,在 8 μm～12 μm 波段 MTF 值高于 0.45,接近衍射极限。点列图中(0,0)、(0,1)、(0,－1)、(1,1)和(－1,－1)视场的光斑 RMS 直径分别为 20 μm,28 μm,18 μm、26 μm 和 27 μm。图中黑圈为 4 μm 波长对应的艾里斑。系统在整个波段和视场内成像质量接近衍射极限,而且结构合理,无遮拦。



(a) 中波红外MTF



(b) 长波红外MTF

图 3　系统的调制传递函数曲线

Fig. 3　MTF curves of system

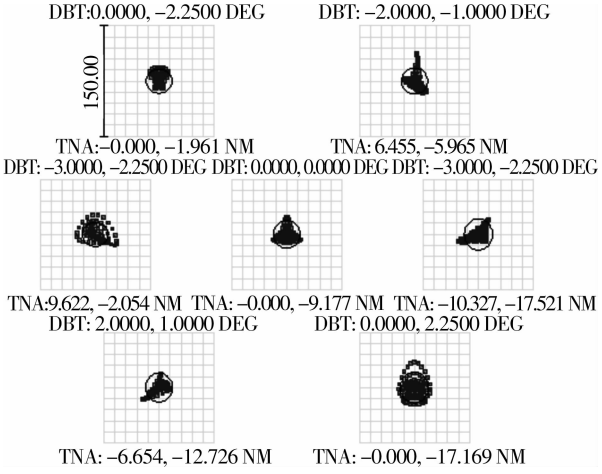


图 4　系统的点列图

Fig. 4　Spot diagram of the system

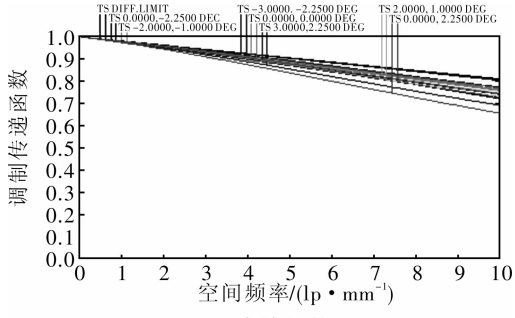
由于加工和装校的难度,离轴三反光学系统的性能受到加工和装校误差水平的限制很大。为此,对系统的公差进行灵敏度分析,并将该条件作为一个约束量来对离轴三反系统进行优化,进而确定各元件的加工及装调公差要求,如表 2 所示,其中,X_m、Y_m、Z_m 为线位移公差,X_R、Y_R 为角位移公差,P-V 和 RMS 分别为面型峰谷值公差和均方根公差。

表 2　镜头加工装调公差要求

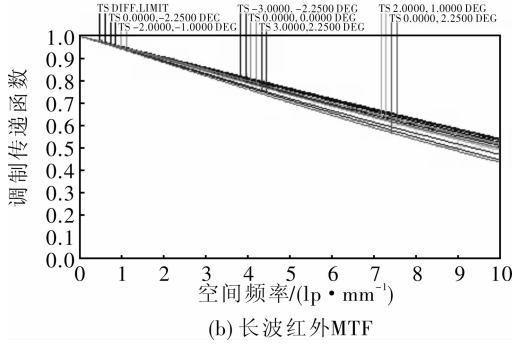
Table 2　Tolerance of manufacture and installation

表面	线位移/mm			角位移/(′)		面型/μm	
	X_m	Y_m	Z_m	X_R	Y_R	P-V	RMS
1	0.2	0.2	0.2	2	2	3.3	0.2
2	0.1	0.1	0.2	3.2	3.2	3.3	0.2
3	0.2	0.2	0.3	1.8	1.8	3.3	0.2

由上表可见,系统具有较宽的加工和装调公差。取面型和位移参数的最大允许公差,并以移动像面作为装调时的补偿量,在 10 lp/mm 处,系统在 3 μm～5 μm 波段 MTF 值高于 0.65,在 8 μm～12 μm 波段 MTF 值高于 0.4,MTF 曲线图如图 5 所示。可见,在此情况下,系统依然具有较高的成像质量。



(a) 中波红外MTF



(b) 长波红外MTF

图 5　最大允许公差下系统的调制传递函数曲线

Fig. 5　MTF curves of system under the maximum tolerance

在保证后工作距要求的前提下,适当增大主镜与次镜间隔,有利于高级球差的校正,进而对彗差和像散的校正都将产生积极影响,但会使系统

的体积和质量有所增加。由于系统相对孔径较大,且在横、纵2个维度上具有较大视场,在保证加工精度的前提下,通过优化主镜和三镜非球面系数的高次项,增加设计的自由度,还可进一步提高系统性能。

3 结论

红外景象模拟技术是红外仿真与测试的关键技术,受光学系统限制,传统的红外景象模拟器无法满足红外双波段成像系统的测试需求,其分辨率、视场、出瞳距等性能指标也难以达到当前仿真与测试的技术要求。利用离轴三反光学系统无色差、无遮挡、自由变量多等特性,设计了红外双波段景象模拟器光学系统,具有双波段、大出瞳距、大视场、高分辨率、结构紧凑等特点,解决了大出瞳距、大相对孔径条件下离轴三反光学系统的结构设计和像差平衡问题。既可以满足红外双波段成像系统的测试需求,又可以替代传统单波段红外景象模拟器。随着离轴三反射镜加工和装校工艺的不断完善,可以预见,该系统将在红外仿真与测试领域广泛使用。

参考文献:

[1] CHRZANOWSKI K, BIELECKIZ, SZULIM M. Comparison of temperature resolution of single-band, dual-band, and multiband infrared systems[J]. Applied Optics,1999,38(3):2820-2823.

[2] SMITH D J, GUPTA N. Data collection with a dual-band infrared hyperspectral imager[J]. SPIE, 2005, 5881:588106-1-6.

[3] SAYLOR D A,BEASLEY D B, BRASELTON B, et al. Current status of IR scene projection at the U. S. Army Aviation and Missile Command [J]. SPIE, 2006,4366: 147-157.

[4] SHI Wei-min, COUTURE M E. Long wave infrared zoom projector thermal analysis and compensation [J]. Optical Engineering, 2000,39(10): 2705-2714.

[5] 贾辛,廖志杰,邢廷文, 等. 基于DMD的动态红外场景投影光学系统设计[J]. 红外与激光工程,2008,37(4): 692-696.
JIA Xin,LIAO Zhi-jie,XING Ting-wen. Optical system design of dynamic infrared scene projector based on digital-micro-mirror device[J]. Infrared and Laser Engineering,2008,37(4): 692-696(in Chinese with an English abstract)

[6] 常虹,范志刚. 基于DMD的红外双波段景象投影光学系统设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007,39(5): 838-840.
CHANG Hong, FAN Zhi-gang. Optical system design of DMD-based dual-band infrared scene projection[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007,39(5): 838-840. (in Chinese with an English abstract)

[7] TAMAGAWA Y, TAJIME T. Dual-band optical systems with a projective athermal chart[J]. Applied Optics,1997,36(1):297-231.

[8] CATANZAROB ,DOMBROWSKI M, HENDRIXSON J. Design of dual-band SWIR/MWIR and MWIR/LWIR imagers[J]. SPIE,2004,5406:829-835.

[9] 林福跳, 刘朝晖. 中波红外折衍光学系统消热差设计与杂光分析[J]. 应用光学,2010,31(5):833-837.
LIN Fu-tiao, LIU Zhao-hui. MWIR refractive /diffractive hybrid athermal optical system and its stray light analysis[J]. Journal of Applied Optics, 2010,31(5):833-837. (in Chinese with an English abstract)

[10] ROGERSJ R. Techniques and tools for obtaining symmetrical performance from tilted-component systems [J]. Optical Engineering, 2000,39(7): 1776-1787.

[11] 张以谟. 应用光学[M]. 3版. 北京:电子工业出版社,2008.
ZHANG Yi-mo. Applied optics [M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. (in Chinese)