

引用格式:陈晓梅,刘长江,杜保林.一种长波标准成像镜头仿真设计[J].电光与控制,2018,25(8):98-100,105. CHEN X M, LIU C J, DU B L. Design of a long-wave standard imaging lens[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(8):98-100, 105.

一种长波标准成像镜头仿真设计

陈晓梅¹, 刘长江², 杜保林¹

(1. 中国航空工业集团公司洛阳光电设备研究所,河南 洛阳 471000;

2. 中国人民解放军装甲兵学院,安徽 蚌埠 233050)

摘要:长波红外探测器是机载红外搜索跟踪系统(IRST)的核心传感器,其成像质量的优劣直接决定了IRST的目标检出等关键技术指标,最终影响IRST的红外探测距离。设计了一套长波标准成像镜头,焦距150 mm,系统总长210 mm,调制传递函数达到衍射极限,畸变小于2%,在红外探测器筛选或验收过程中能够准确定量地评价其成像质量。

关键词:红外搜索跟踪系统;成像镜头;成像质量

中图分类号:V271.4 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2018.08.020

Design of a Long-Wave Standard Imaging Lens

CHEN Xiao-mei¹, LIU Chang-jiang², DU Bao-lin¹

(1. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China;

2. Armored Force Institute, Bengbu 233050, China)

Abstract: The long-wave infrared detector is the key sensor of the airborne Infrared Search and Tracking (IRST) system, and its imaging performance directly determines the key parameters of IRST, including the target detection, and finally affects the infrared detecting distance of IRST. A long-wave standard imaging lens is designed to evaluate the imaging performance of the long-wave infrared detector with a focal length of 150 mm and a total length of 210 mm. The distortion rate of it is less than 2%, and the Modulation Transfer Function (MTF) is up to the diffraction limits. The imaging lens can accurately and quantitatively evaluate the imaging quality of the infrared detector during the screening and checking process.

Key words: IRST system; imaging lens; imaging quality

0 引言

制冷型红外探测器技术取得的最新进展已使之广泛用于军事用途。长波红外探测器作为IRST的重要传感器,目前主要依靠国外进口。由于制冷型长波红外探测器应用领域的特殊性,高性能的长波红外探测器对我国仍属禁运商品,工业级的探测器质量参差不齐,通常需要经严格筛选才能得到性能稳定的产品。在探测器筛选和验收过程中,需要有成像镜头配合其成像,才能方便地对其噪声等效温差(NETD)、最小可分辨温差(MRTD)、调制传递函数(MTF)等性能指标进行检测。但是如果选择的F数和视场不匹配,或者透过率、传函等指标无标称值的成像镜头作为探测器的验收辅助设备,则最终无法定量评价探测器自身的

性能。本文设计了一套长波标准成像镜头,用于F数为2和视场小于6°的探测器筛选和验收。

1 指标要求

长波标准成像镜头的指标要求如下:工作波段7.7~9.5 μm ,中心波长8.5 μm ,探测器像元大小24 μm ,视场 $5.9^\circ \times 4.7^\circ$,F/#2,MTF空间频率为21 lp/mm时,轴上MTF>0.6,全视场MTF>0.5(理论值),视场畸变2%,弥散斑小于15 μm (80%能量),全视场内单像元能量汇聚度不低于60%,透过率大于80%,后截距大于6 mm,温度适应性为-45~+70 $^\circ\text{C}$ 。

2 光学系统设计

光学系统采用透射式结构,包含中间像面,为二次成像,共用7片红外光学材料。光学系统采用3个非球面,1个二元光学元件,该二元元件以锗为加工基底,并在设计过程中确保可加工性。系统焦距为150 mm,光学后截距大于12 mm。为校正中间像面引入大角度

收稿日期:2017-07-07

修回日期:2017-12-17

作者简介:陈晓梅(1968—),女,江苏徐州人,学士,工程师,研究方向为光电探测系统仿真与测试技术。

折转的光学透镜,其中,光学最大口径为 80 mm,光学总长为 210 mm(含成像面)。设计中保证光学系统光阑和探测器冷屏重合,确保冷光阑效率 100%^[1]。

图 1 为长波红外光学系统光路图。

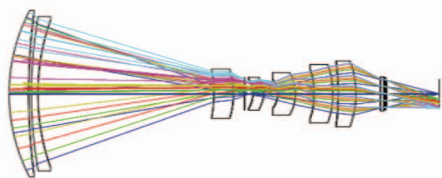


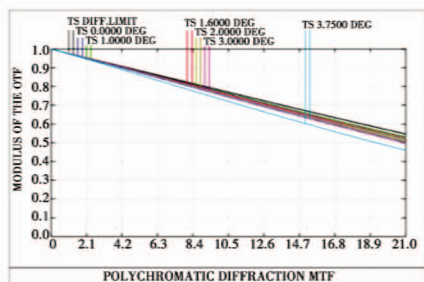
图 1 长波红外光学系统光路图

Fig. 1 Light path of long-wave infrared optical system

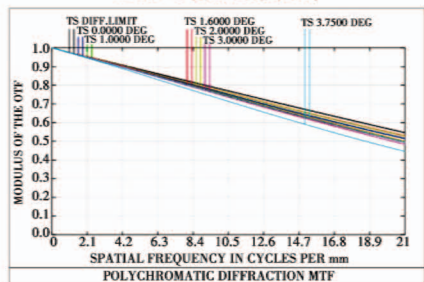
3 光学系统仿真分析

3.1 光学像质分析

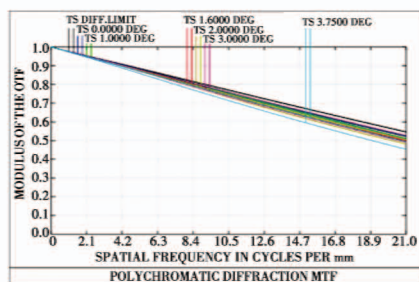
根据长波探测器参数,光学传递函数奈奎斯特频率为 21 lp/mm,整个光学视场内传递函数接近衍射极限,0.7 视场以内奈奎斯特频率处 MTF 大于 0.5,0.7 视场以外奈奎斯特频率处 MTF 大于 0.45,见图 2a。镜筒材料采用铝,透镜选用的材料为锗(Ge)、硒化锌(ZnSe)、硫化锌(ZnS)以及 AMTIR1,通过材料热特性之间的差异配合来消除无热化的影响,达到无热化要求。图 2b 为 -45 ℃ 下光学系统的传递函数,全视场内奈奎斯特频率处 MTF 大于 0.44,与常温相比略有下降。图 2c 为 70 ℃ 下光学系统的传递函数,全视场内奈奎斯特频率处 MTF 大于 0.45,与常温相比基本不变。系统弥散斑小于衍射极限艾里斑,RMS 弥散斑半径小于 9 μm^[2],如图 3a 所示。图 3b 和图 3c 为 -45 ℃ 和 70 ℃ 下光学系统的点列图,与常温情况下相比,各个视场的点列图均在艾里斑范围以内,RMS 弥散斑半径小于 13 μm^[3-10]。



a 20 ℃ 传递函数曲线



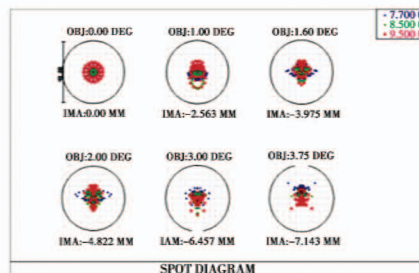
b -45 ℃ 传递函数曲线



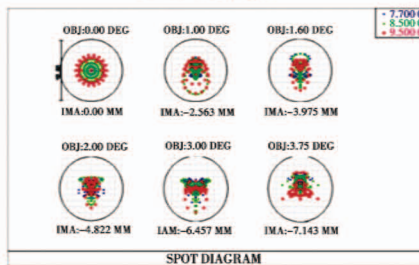
c 70 ℃ 传递函数曲线

图 2 光学系统的 MTF

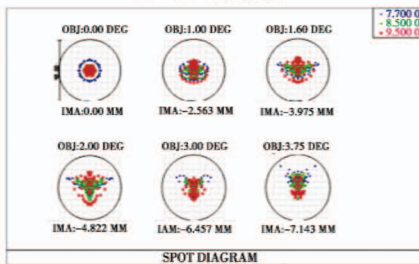
Fig. 2 The MTF of the optical system



a 20 ℃ 弥散斑



b -45 ℃ 弥散斑



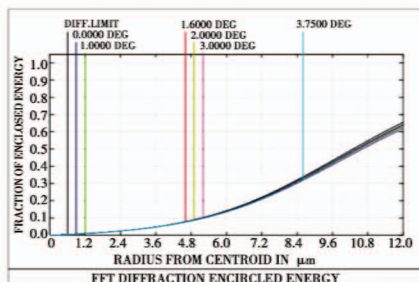
c 70 ℃ 弥散斑

图 3 弥散斑

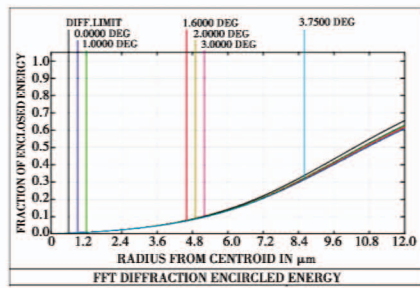
Fig. 3 The spot diagram

3.2 能量分布

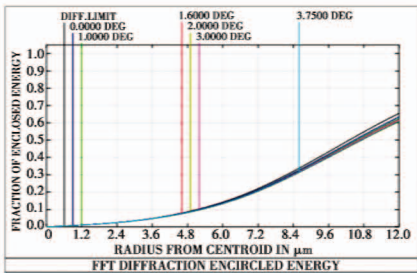
采用包围圆能量进行分析,图 4 所示为常温以及低温和高温 3 种条件下的包围圆能量。



a 20 ℃ 能量分布



b -45 °C 能量分布



c 70 °C 能量分布

图 4 能量分布

Fig. 4 The FFT diffraction encircled energy

从图 4 可知,在 24 μm 范围内,常温条件下,弥散圆能量全视场内接近衍射极限,大于 60%;另外两种温度条件下,弥散圆能量全视场内均接近衍射极限,大于 60%。

3.3 透过率计算

光学透镜共 7 片,每片透过率达到 98%,第一片透镜镀硬质防护膜,透过率为 95%,则光学系统的透过率 τ 为 84.1%。

3.4 二元光学面

图 5 所示为二元光学面的相位曲线和刻槽分布分布曲线。

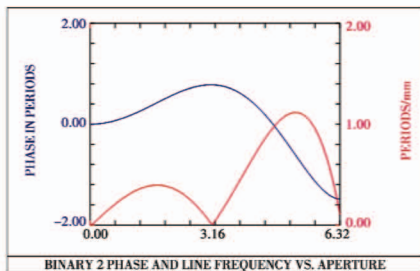


图 5 二元光学面的相位曲线和刻槽分布曲线

Fig. 5 Phase and groove pattern of the binary optical surface

为进行大范围无热化设计,系统中采用了一片二元光学元件,基底材料为锗,是目前金刚石车削最容易加工的材料。可以看出,二元光学面的最大周期小于 1.2 mm,满足可加工性要求,具备生产条件。

3.5 畸变

图 6 为光学系统的畸变图,由图可知,光学系统的畸变小于 2%。

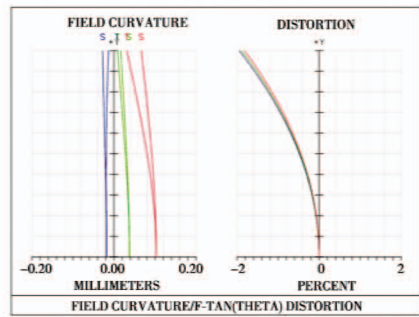


图 6 长波光学镜头畸变图

Fig. 6 The distortion of the long-wave optical lens

3.6 像面照度分布

像面照度分布如图 7 所示。相对照度在最大视场处可以达到 86%,整体像面内照度分布均匀。

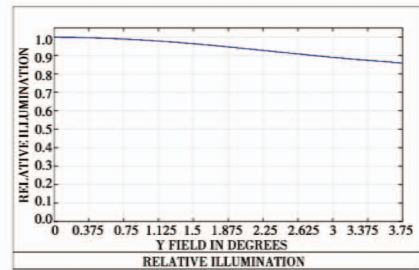


图 7 像面不同视场对应的相对照度曲线

Fig. 7 The relative illumination of imaging at different FOVs

4 公差分配和分析

对要加工的光学系统进行了公差分析,确保设计出的光学系统可以在合理的公差分配下达到满足要求的像质。常用公差量值见表 1。

表 1 常用公差量值情况表

Table 1 The tolerance values mm

类型	公差值		
	宽松	正常	严格
表面偏心	0.05	0.02	0.01
表面倾斜	0.05	0.02	0.01
面形光圈	3~5	2	1
局部面形光圈	1	0.5	0.1
元件偏心	0.05	0.02	0.01
元件倾斜	0.05	0.02	0.01

根据光学加工工艺的技术水平,对光学表面的偏心、倾斜公差给定为 0.02 mm,光学表面的全局光圈优于 2 个光圈,局部光圈优于 0.5 个光圈;光学元件偏心、倾斜给定为 0.02 的条件下,通过光学软件的蒙特卡罗公差方法进行分析,分析结果表明,长波红外光学系统的加工可以达到轴上视场奈奎斯特频率处 MTF 大于 0.45,0.7 以外视场 MTF 大于 0.4。

5 结论

采用二次成像透射式光学系统结构形式,进行了

(下转第 105 页)

当优化步长为 $\Delta r = 3, \Delta \theta = 0.1, \Delta z = 3$ 时, 优化布局容积率基本处于 70% 左右, 因为是阶梯状, 所以 Z 方向的重心值绝对值比较大, 但是还比较稳定。国内外没有类似的研究结果可以比较, 但从统计结果来看, 布局算法稳定, 无论从布局容积率、重心变化和布局时间来看均远远优于手工布局。

5 结论

实现有约束处理的自动化布局设计, 主要是面向飞机早期的概念设计阶段, 面对的布局问题较抽象, 因此将模型简化为可以处理的三维布局问题。本文针对飞机设备舱三维布局设计, 利用约束物体对应布局空间大小、约束的重要性、约束处理的难度来建立约束的优先级, 控制布局的有序性, 在过程中可以保证大部分约束的实现, 通过分组分类的待布局物体预处理技术, 保证了有约束布局的重心、容积率和较高布局效率, 从而验证了约束模型和布局方法的有效性。

参考文献

- [1] 刘景发, 高泽旭, 龙羽正, 等. 求解带动不平衡约束的卫星舱布局问题的启发式算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(8): 1232-1239.
- [2] 崔宗泰, 徐止政, 滕弘飞, 等. 旋转多段舱组件布局优化方法[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(3): 705-713.
- [3] GRIGNON P M, FADEL G M. A GA based configuration design optimization method [J]. Journal of Mechanical Design, 2004, 126: 6-15.
- [4] 孙伟, 韩晓建. 基于模拟退火算法的布局优化技术研究[J]. 机械技术史及机械设计, 2008(00): 360-364.
- [5] 张妙. 求解卫星舱布局问题的分治混合算法[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2016.
- [6] 王远辉, 王秀坤, 滕弘飞. 对立扰动协同差分进化算法及其在卫星舱布局的应用[J]. 大连理工大学学报, 2010, 50(6): 931-936.
- [7] 何琨, 黄文奇. 求解长方体 Packing 问题的高效算法[J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(s1): 7-10.
- [8] 王金敏, 王世宇, 王多, 等. 布局调度问题的聚合算法[J]. 天津大学学报, 2002, 35(4): 477-481.
- [9] 王征, 孙明鹏, 戴国忠, 等. 虚拟家居设计系统中基于约束的三维布局[J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(30): 108-111.
- [10] 吴涛, 高福运, 白跃伟, 等. 用三维几何约束构建概念化设计阶段的三维布局[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2003, 15(7): 907-912.

(上接第 100 页)

长波标准镜头的设计与像质分析, 开展了光学系统设计及评估、弥散斑分析等关键参数分析, 结果表明设计满足指标要求。

参考文献

- [1] 罗金平, 王合龙, 刘欣, 等. 二次成像光学被动无热化设计[J]. 电光与控制, 2012, 19(4): 85-88.
- [2] 李林. 现代光学设计方法[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009: 235-241.
- [3] 陈建发, 王合龙, 刘欣. 中波红外光学系统光学被动无热化设计[J]. 电光与控制, 2013, 20(12): 88-91.
- [4] 汪京. 无热化设计的紧凑型长波折反式光学系统[J]. 电光与控制, 2013, 20(4): 60-62, 91.
- [5] 王学新, 焦明印. 红外光学系统无热化设计方法的研究[J]. 应用光学, 2009, 30(1): 129-133.
- [6] LI W H, LIU Z H, MU Y, et al. Modeling and research of a space-based spacecraft infrared detection system [J]. Applied Optics, 2017, 56(9): 2428-2433.
- [7] ZHANG W F, LIANG J, REN L Y. Real-time image haze removal using an aperture-division polarimetric camera [J]. Applied Optics, 2017, 56(4): 942-947.
- [8] YU W B, JIANG J, ZHANG G J. Multiexposure imaging and parameter optimization for intensified star trackers [J]. Applied Optics, 2016, 55(36): 10187-10197.
- [9] WERELEY S, ZHANG Y X, KHOR J W, et al. Single-acquisition wide-field superresolution for telescopes [J]. Applied Optics, 2016, 55(35): 10025-10029.
- [10] ZHENG B, WANG X D, HUANG J T. Selective visual attention based clutter metric with human visual system adaptability [J]. Applied Optics, 2016, 55(27): 7700-7706.