



宽光谱可见-短波红外成像光学系统设计

宣斌 赵泽宇 罗曜伟 魏群 朱倚娴 王亚军

Design of optical system for wide-spectrum visible-short wave infrared imaging

Xuan Bin, Zhao Zeyu, Luo Yaowei, Wei Qun, Zhu Yixian, Wang Yajun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20220638>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

可见光全天时遥感相机光学系统设计

Optical system design of remote sensing camera with visible light all-day

红外与激光工程. 2020, 49(1): 0114003 <https://doi.org/10.3788/IRLA202049.0114003>

可见-近红外无热化连续变焦光学系统设计

Design of visible-near infrared athermal continuous zoom optical system

红外与激光工程. 2021, 50(9): 20210090 <https://doi.org/10.3788/IRLA20210090>

紧凑型双视场可见光镜头设计

Design of compact dual-field lens for visible light

红外与激光工程. 2021, 50(8): 20210042 <https://doi.org/10.3788/IRLA20210042>

紧凑型红外成像光谱仪光学设计

Optical design of compact infrared imaging spectrometer

红外与激光工程. 2018, 47(4): 418001 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0418001>

同轴偏视场共孔径面阵成像光学系统设计

Design of common aperture coaxial field-bias optical system used in area array imaging sensor

红外与激光工程. 2018, 47(7): 718004 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0718004>

宽光谱实入瞳远心中继光学系统设计

Design of telecentric relay optical system with broadband and real entrance pupil

红外与激光工程. 2021, 50(10): 20210091 <https://doi.org/10.3788/IRLA20210091>

宽光谱可见-短波红外成像光学系统设计

宣 斌¹, 赵泽宇², 罗曜伟³, 魏 群³, 朱倚娴¹, 王亚军^{4*}

- (1. 南通大学 机械工程学院, 江苏 南通 226019;
2. 西安交通大学 电子与信息学部, 陕西 西安 710049;
3. 南京华群光电技术有限公司, 江苏 南京 210000;
4. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

摘 要: 针对目前的红外成像光学系统在机器视觉工业检测领域难以同时实现成像质量好和结构紧凑设计的问题, 提出了一种宽光谱可见-短波红外成像光学系统的设计方法。运用光学设计软件 ZEMAX 设计了一种适用于可见光和短波红外的红外成像光学系统。该系统由 7 组 10 片透镜组成, 利用多组双胶合透镜来消色差, 在第 15 个面使用非球面提高成像质量, 最后对系统的成像质量进行研究。设计结果表明: 该系统的工作波长为 0.4~1.7 μm , 全长为 79.6 mm, F 数为 2.8, 焦距为 25.7 mm, 畸变小于 1.4%, 调制传递函数值在奈奎斯特频率 100 lp/mm 处均大于 0.4, 接近衍射极限, 成像质量良好。该系统可以对光滑表面的装配件进行缺陷检测, 具有结构简单、易于加工装调的优点, 有助于高效地完成机器视觉检测。

关键词: 宽谱段; 光学设计; 可见光成像; 红外成像; 机器视觉

中图分类号: O435 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220638

0 引 言

近年来, 随着红外探测器技术及其加工工艺的发展与完善, 红外光学系统在机器视觉领域的应用日益广泛, 可见光和短波红外是目前较为常用的光电成像波段^[1-2]。可见光成像是建立在人类视觉范围内, 在可见光波段研究物体的反射和辐射。可见光成像系统获得的图像细节丰富、成像性能稳定、可以实时传输与信息处理, 具有较高的灵敏度和分辨力^[3]。但可见光成像系统依赖于自然照明, 在一些光照较差的情况下成像质量较差。人们将波长在 0.75~1000 μm 之间的电磁辐射认定为红外光^[4]。短波红外通常是指波长在 1~2.5 μm 范围的电磁波, 介于可见光和中波红外之间。短波红外主要来自于地物目标反射环境中的红外辐射, 具有较强的抗干扰能力, 兼具隐蔽性好、不受光照条件限制的优点。但红外成像系统存在空间分辨率低、对比度弱、立体感差和信噪比低的缺点。

因此, 在光照条件差的情况下利用红外光成像实现对目标的观测, 弥补可见光在差光照条件下的缺陷; 在光照条件好的情况下利用可见光成像实现对目标的高分辨率观测, 同时利用红外光获取目标更详细的信息^[5]。

2015 年, 吴玲玲^[6]等设计了一款谱段为 0.75~1.0 μm 的近红外成像光学系统, 该光学系统采用改进型的双高斯结构, 视场角 $\pm 15^\circ$ 。但该系统工作波段较窄, 无法在可见光波段和短波红外波段下工作。2022 年, 曹一青^[7]等设计了一款谱段为 0.4~0.7 μm 的双远心工业镜头, 该光学系统由 10 片折射透镜组成, 工作距为 100 mm, 具有高分辨率和低畸变的特点。但只能实现可见光波段的成像, 在夜晚等情况下无法对目标实现有效观测。

文中结合机器视觉工程应用需要, 使用光学设计软件 ZEMAX 设计了一种宽光谱可见-短波红外成像

收稿日期: 2022-09-08; 修订日期: 2023-01-23

基金项目: 国家自然科学基金 (61903204)

作者简介: 宣斌, 男, 副研究员, 博士, 主要从事精密光学加工和检测方面的研究。

通讯作者: 王亚军, 女, 副研究员, 硕士, 主要从事图书情报方面的研究。

光学系统。该系统由 7 组 10 片透镜组成, 全长为 79.6 mm, 结构紧凑。系统仅采用了 H-LAF54、CAF2、H-K9 L 三种普通的光学玻璃材料, 并通过使用多组双胶合透镜来降低像差。工作波段在 0.4~1.7 μm , 该系统可实现在光照条件差的情况下仍然能够对检测样品的清晰成像。

1 光学系统选型

1.1 光学系统结构选型

光学系统结构的选择与该系统的应用场景密切相关, 在机器视觉领域中, 短波红外波段的成像系统往往具有大视场、小畸变和成像质量稳定的特点。合理地选择光学系统结构能够降低设计的复杂度。常用的光学系统结构分折射系统、反射系统、混合系统三类, 不同的光学系统结构各有优劣^[8]。

(1) 折射式光学系统结构。折射式系统通过透过光经折射后进行观察, 是光学结构选型中较为广泛使用的形式。按照常规的加工、装调手段即可达到精度的要求, 具有像质稳定、杂光小、元件透过率高的特点^[9]。但折射式系统容易产生像差, 在可用于宽谱段下的透射材料种类相对有限。典型的折射式光学结构如图 1 所示。

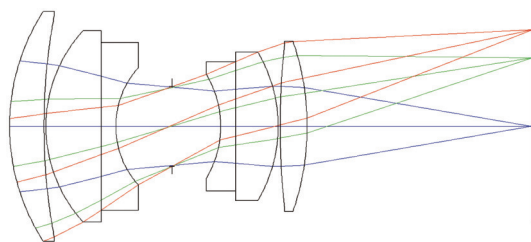
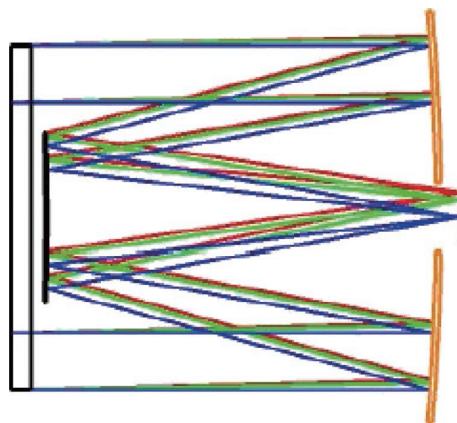


图 1 折射式光学系统结构

Fig.1 Reflective optical system structure

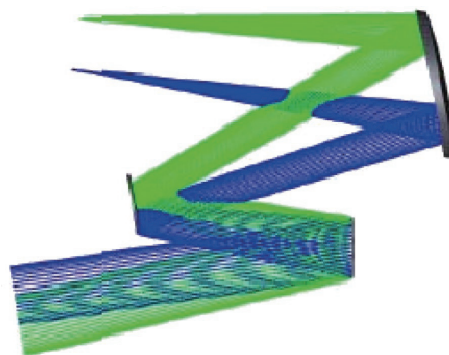
(2) 反射式光学系统结构。反射式系统通过反射附件, 用反射光来观察, 广泛应用于红外热成像领域中。具有无色差、工作波段宽、易于实现无热化等特点。但反射结构增加了光学系统体积, 同轴反射系统的中心遮拦造成了光通量的损失, 降低了系统的调制传递函数和信噪比; 离轴反射系统解决了遮拦问题, 但给系统装调造成困难^[9]。典型的两种反射式光学系统结构如图 2 所示。

(3) 折反射式光学系统结构。折反射式光学系统



(a) 共轴式光学系统示意图

(a) Schematic diagram of coaxial optical system



(b) 离轴式光学系统示意图

(b) Schematic diagram of off-axis optical system

图 2 反射式光学系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of a reflective optical system

是将折射式和反射式的特点相结合设计, 来实现实际工程的需要。综合了不同光学系统结构的优点, 能够降低光学系统结构复杂性和像差校正的难度。但其中非球面的反射镜加工难度大, 成本高, 稳定性差, 而且非球面和衍射元件的精细结构增加了相机加工装调的难度。典型的折反射式光学系统结构如图 3 所示。

综上所述, 针对文中的宽光谱可见-短波红外成像光学系统作为机器视觉检测的工业镜头, 应尽量满足轻量化和大视场的设计要求, 同时还要保持较高的

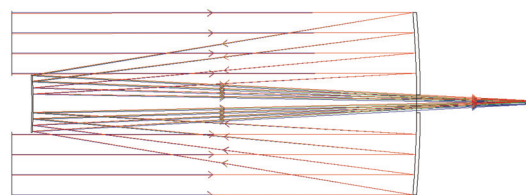


图 3 折反射式光学系统结构

Fig.3 Catadioptric optical system structure

光通量。反射式结构的轴外像差校正困难,视场难以做大;折反式结构次镜形成中心遮拦,并随着视场和相对孔径的增大,遮拦比迅速增加,使成像对比度、分辨率及探测能力下降。无论是考虑成像性能还是性价比,折射式系统都是本例大视场、低畸变、结构紧凑的理想选择。

1.2 非球面面型参数的求解

非球面光学元件是指面形由多项高次方程决定、面形上各点的半径均不相同的光学元件^[10]。虽然非球面的加工制造比较困难,但具有明显的消除单色像差的效果,在机器视觉检测的工业镜头中也应用的越来越广泛。

常规非球面的定义方程如下:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k^2)c^2r^2}} + Ar^4 + Br^6 + Cr^8 + Dr^{10} + \dots \quad (1)$$

式中: c 为非球面顶点的曲率半径; A 、 B 、 C 、 D 分别为 4 阶、6 阶、8 阶、10 阶的非球面系数; k 为非球面系数; $k > 0$ 表示扁平椭球面, $k = 0$ 表示球面, $-1 < k < 0$ 表示椭球面, $k = -1$ 表示抛物面, $k < -1$ 表示双曲面。在使用 ZEMAX 进行优化的过程中,可以将非球面高次项系数设置为优化的变量,能够进一步降低系统的像差,从而获得更高质量的成像效果。

非球面与球面相比有很大的优势:非球面可以提高系统的相对口径比,扩大视场角,在提高光束质量的同时透镜数比球面构成的少,镜头的形状小型化,可减轻系统质量等^[10]。

2 系统光学设计

2.1 镜头总体设计指标及初始结构确定

一个光学系统的设计一般分为以下几步: (1) 确定光学系统的结构参数; (2) 利用 PW 方法求解初始结构参数或选择已有相应的初始结构参数; (3) 像差校正; (4) 像质评价; (5) 确定各光学元件的公差; (6) 绘制光学系统图和光学组件零件图^[11]。

根据实际应用的情况,宽光谱可见-短波红外成像光学系统结构设计中主要考虑的参数有:透镜材料、工作波段、焦距、 F 数、视场角、系统总长等。通过对宽谱段红外成像系统参数的分析,最终光学系统选择折射式结构,采用分辨率为 2 448 pixel×2 048 pixel

的 CMOS 面阵探测器,像元大小为 3.45 μm ,靶面尺寸为 2/3 in (1 in=2.54 cm),镜头在 0~50 $^{\circ}\text{C}$ 工作温度范围内具有稳定的光学性能和良好的成像质量。光学系统性能参数如表 1 所示。

表 1 光学系统性能参数

Tab.1 Optical system performance parameters

Parameter	Value
Wavelength/ μm	0.4-1.7
Focal length/mm	25.7
Field of view 2ω	9.3
F number	2.8
Total length of system/mm	79.6

一个好的初始结构能够使像差在校正过程迅速收敛,光学设计中第一个关键步骤就是如何选择合适的初始结构,如果已知光学系统的结构参数等信息,则可以通过对光学系统进行光线追迹、计算像差和成像质量的评价。当光学系统较为简单时,根据相关的初始系统设计指标,利用赛德尔像差理论建立像差平衡方程和 PW 法来求解初始结构。随着计算机辅助优化技术的发展,现代光学设计软件中内置了大量的光学系统模型,当光学系统较为复杂时,根据焦距、相对孔径等参数就可以对比出与初始系统设计指标相近的初始结构^[12],此次设计查询了相关专利,采用第二种方法来确定系统的初始结构。

2.2 像差校正及优化评价

系统初始结构确定后,最终得到成像性能好的系统,需要经过后续反复像差校正过程,同时也需要对其结构进一步优化,具体的优化设计过程如下。

根据表 1 给出的光学设计指标,通过改变镜头诸面的面型参数改变透镜的厚度及透镜之间的间隔,通过更换透镜材料来使得镜头的像差逐步减小。在光学设计软件 ZEMAX 中设置透镜的曲率半径和厚度、系统焦距和长度、透镜间距等参数为变量,采用 ZEMAX 默认的优化评价函数,只添加一阶光学参数限制,采用变量从少到多、阶数从低到高的方式渐进优化。在每一步优化完成后,观察每次优化后系统各类像差的变化情况,增加对系统成像性能贡献较大像差项操作数的权重系数,对其有针对性地进行优化,判断是否需要继续增加优化变量,最终设计出满足系统各项指标的光学系统。

优化完成后的宽光谱可见-短波红外成像光学系统结构如图 4 所示。系统可对可见光和短波红外波段进行成像,采用 7 组共 10 片透镜,光阑位于第

4 片透镜的后表面,第 10 片透镜的前表面采用非球面。系统总长为 79.6 mm,入瞳直径为 9.9 mm, F 数为 2.8。

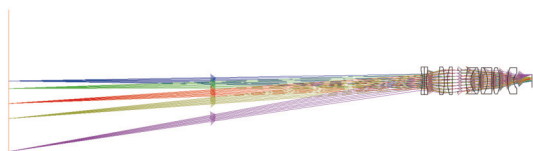


图 4 光学系统结构图

Fig.4 Optical system structure diagram

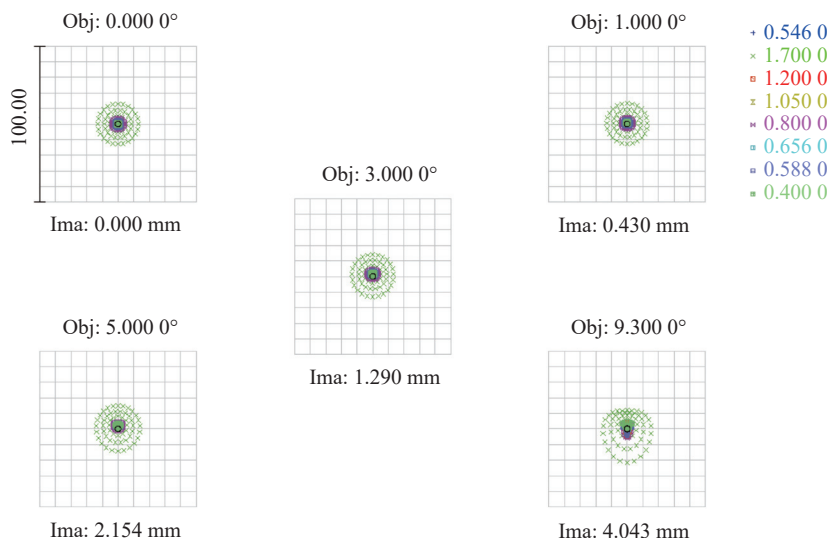


图 5 光学系统点列图

Fig.5 Optical system spot diagram

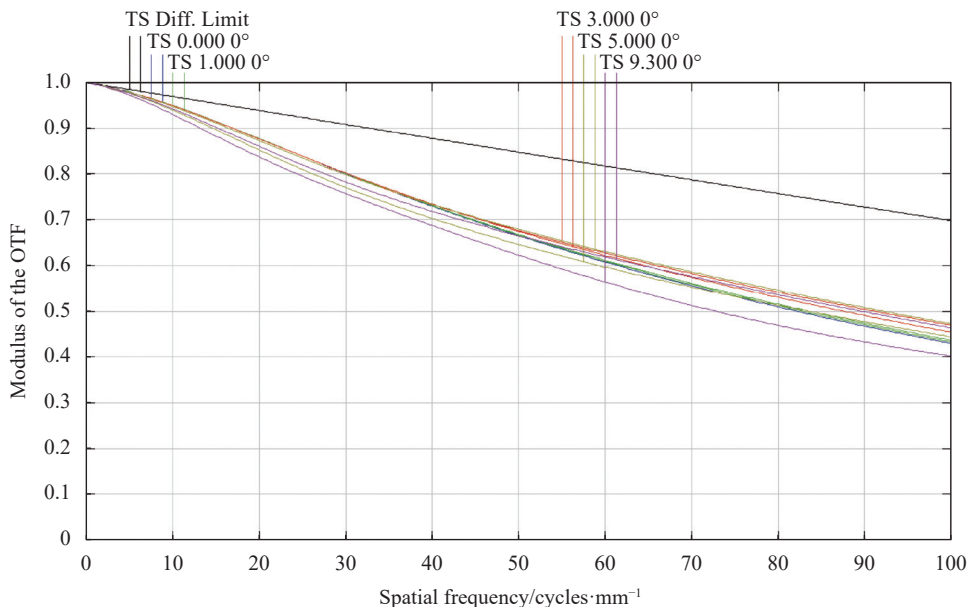


图 6 调制传递函数曲线

Fig.6 Modulation transfer function curve

制函数曲线, 光学传递函数是目前被公认的最能充分反映系统实际成像质量的评价指标。在奈奎斯特频率 100 lp/mm 时, 各视场的 MTF 值均高于 0.4, 接近衍射极限, 成像质量良好。

图 7 所示为宽光谱可见-短波红外成像系统的像散、场曲和畸变曲线。从图中可以看出, 其最大像散和场曲为 0.1 mm, 最大畸变为 1.4%, 数值非常小, 满足系统设计对场曲和畸变的要求。

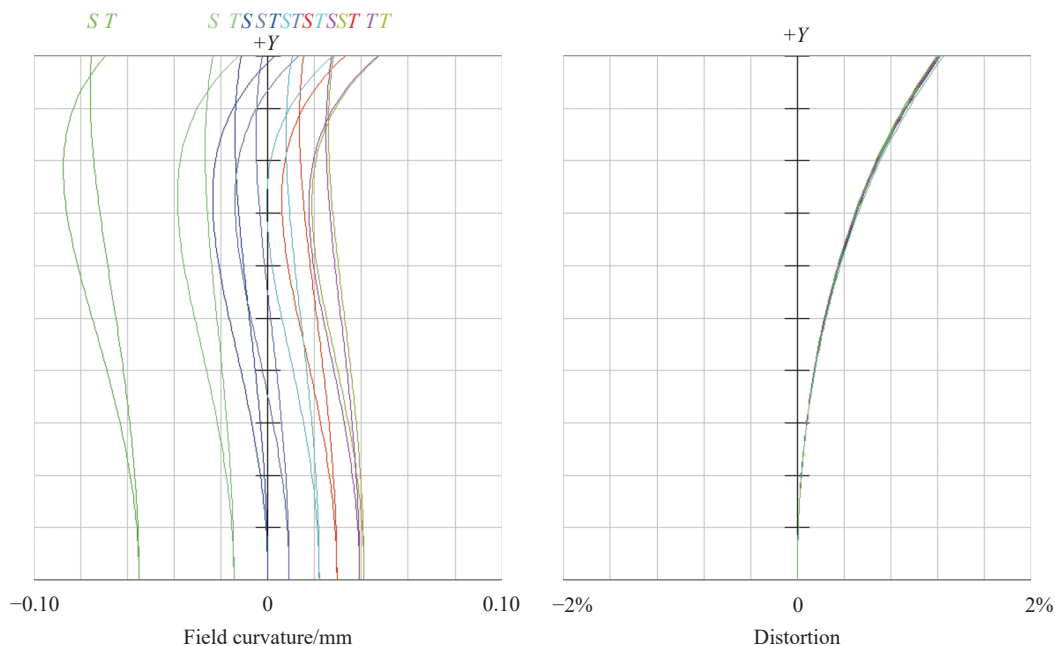


图 7 像散、场曲及畸变曲线

Fig.7 Astigmatism, field curvature and distortion curves

3 可行性分析

3.1 公差分析

系统设计完成后需要对其进行公差分析, 把实际加工、装调时所产生的相关误差考虑进去, 给予一定的公差分量^[13]。在该系统的公差分析过程中, 需要给所有光学元件分配合理的公差, 使光学探测系统的探测性能达到要求, 并使光学元件的成本、装配和校准的成本达到最低, 从而使整个系统的性能达到最优^[14]。

按照经验及实际工艺水平, 先给出较为宽松的各参量公差预定值, 对设计结果进行公差分析, 找出特别敏感的公差, 对其进行重新分配。图 8 所示为预设公差值。

以衍射 MTF 平均为评价标准进行系统的公差分析, 图 9 为进行 100 次蒙特卡洛分析的 MTF 曲线图, 表 2 为进行公差优化后的蒙特卡洛分析结果。分析

表明: 在 100 lp/mm 时, MTF 的名义值为 0.559, 最佳 0.554, 最差 0.333, 平均 0.481, 标准偏差 0.052; 90% 的镜头 $MTF \geq 0.410$, 50% 的镜头 $MTF \geq 0.427$, 10% 的镜头 $MTF \geq 0.540$ 。由此可以看出, MTF 在所给公差下满足技术指标要求。

表面公差		元件公差		折射率公差	
<input checked="" type="checkbox"/> 半径	微米: 0.013	<input checked="" type="checkbox"/> X 偏心	0.013		
<input type="checkbox"/> 厚度	微米: 0.013	<input checked="" type="checkbox"/> Y 偏心	0.013		
<input checked="" type="checkbox"/> X 偏心	微米: 0.013	<input checked="" type="checkbox"/> 倾斜 X 轴	角度: 0.013		
<input checked="" type="checkbox"/> Y 偏心	微米: 0.013	<input checked="" type="checkbox"/> 倾斜 Y 轴	角度: 0.013		
<input checked="" type="checkbox"/> X 倾斜	微米: 0.013				
<input type="checkbox"/> Y 倾斜	微米: 0.013				
<input checked="" type="checkbox"/> S + A 不规则度	微米: 0.013				
<input type="checkbox"/> Zernike 不规则度	微米: 0.013				
	条纹: 0.200000	<input checked="" type="checkbox"/> 折射率	0.001000		
	条纹: 0.200000	<input checked="" type="checkbox"/> Abbe %	1.000000		
其它控制					
起始行:	1	<input checked="" type="checkbox"/> 使用后焦补偿			
测试波长:	0.6328				
起始面:	1	终止面:	19		
<input type="button" value="确定"/> <input type="button" value="取消"/> <input type="button" value="保存"/> <input type="button" value="载入"/> <input type="button" value="重置"/> <input type="button" value="帮助"/>					

图 8 预设公差值

Fig.8 Preset tolerance values

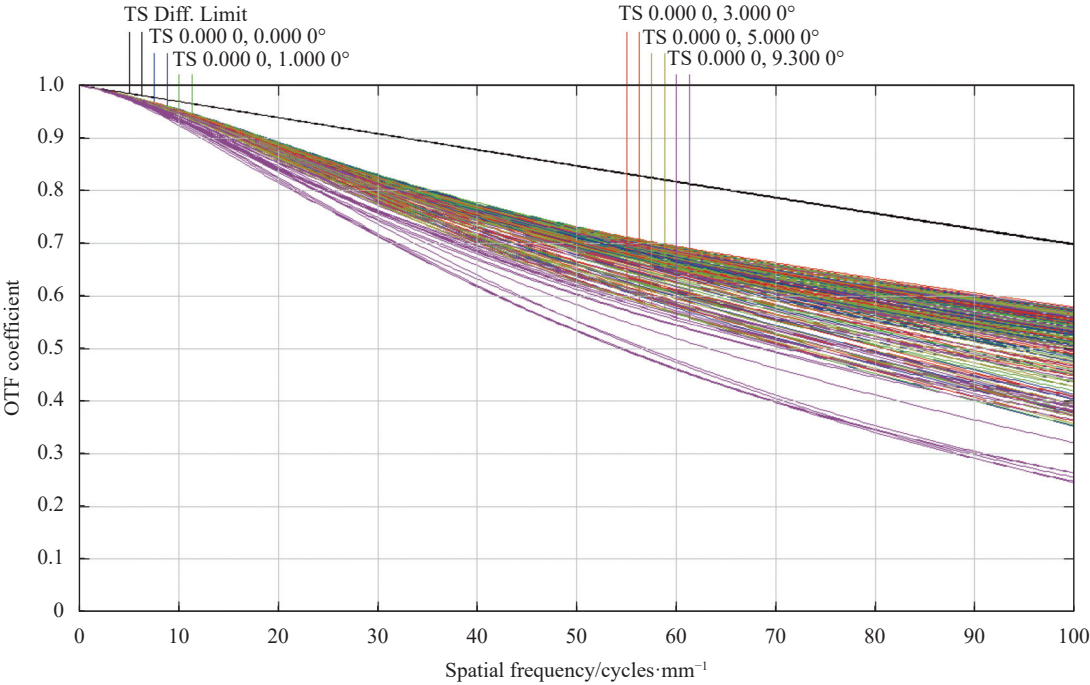


图 9 蒙特卡洛分析 MTF 曲线图
Fig.9 MTF curve of Monte Carlo analysis

表 2 蒙特卡洛分析结果
Tab.2 Monte Carlo analysis results

Analysis item	Result	Trial
Best	0.553 733 13	-
Worst	0.332 685 05	97
Mean	0.480 631 74	20
Standard deviation	0.052 099 53	-
Compensator statistics	-	-
Change in back focus	-	-
Minimum	-0.060 978	-
Maximum	0.060 626	-
Mean	-0.000 021	-
Standard deviation	0.023 908	-
90%	≥0.408 031 81	-
50%	≥0.490 294 20	-
10%	≥0.539 641 55	-

3.2 实验论证

在实际检测过程中, 整个系统由光源、镜头、相机、图像处理单元、图像处理软件和输出单元等组成。为进一步验证所设计的光学系统的成像性能, 经过在实验室的成像观察对比如图 10 所示。第一幅对比: 图 10 (b1) 是农产品通过可见光波段的相机拍摄的效果, 图 10 (a1) 是在短波红外相机下的效果, 农产品内部的瘀伤能被短波红外穿透表皮探测到, 而这在

人眼是看不到的。这是由于当水果在碰伤时细胞壁会破裂, 该区域的水分含量更高, 瘀伤中的水几乎都是黑色的, 因为它在 1 450~1 900 nm 都有很强的吸附性, 这种吸附性使得通过 SWIR 成像能在成像的物体图像中清晰看到瘀伤。第二幅对比: 图 10 (b2) 是在可见波长上不透明的塑料, 图 10 (a2) 是在 SWIR 范围内变成半透明的塑料, SWIR 这种光穿透塑料的能力为检测密封塑料容器内的产品体积提供了新的方法。

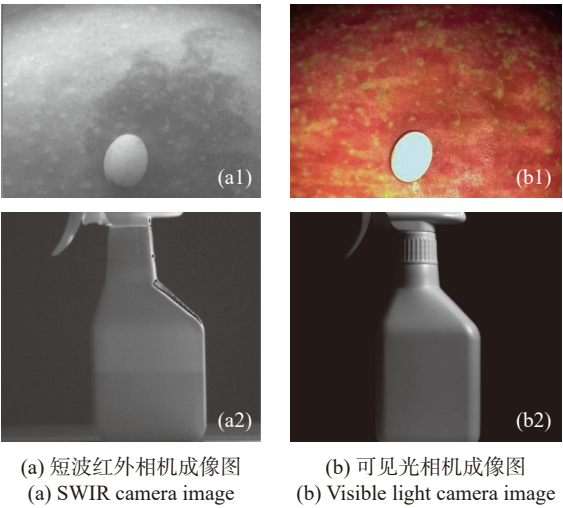


图 10 短波红外-可见光成像对比图
Fig.10 SWIR-visible imaging comparison diagram

4 结 论

随着机器视觉对复合图像信息需求的增长,现代光学成像技术必然向可见光近红外波段之外扩展,短波红外因其媲美可见光的分辨率和独特的光学性能在未来将得到更加广泛的应用。文中设计了一种能够在 0.4~1.7 μm 波段下工作的宽光谱可见-短波红外成像系统,该系统由 7 组 10 片透镜组成,调制传递函数在奈奎斯特频率 100 lp/mm 处均大于 0.4,系统 F 数为 2.8,畸变小于 1.4%,各种像差都得到了较好的校正和平衡,具有较好的成像性能。所讨论的方法对今后设计类似的光学系统具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] Wang Huaiyi, Gao Jun. Analysis and development on aerospace infrared optical remote sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1999, 28(2): 1-6. (in Chinese)
- [2] Ma Zhanpeng, Xue Yaoke, Shen Yang, et al. Design and realization of visible/LWIR dual-color common aperture optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(5): 0511002. (in Chinese)
- [3] Wang Meng. Design of UV lens industrial detection based on machine vision [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2019. (in Chinese)
- [4] Krogmann D, Tholl H D. Infrared micro-optics technologies [C]//SPIE, 2004, 5406: 121-132.
- [5] Ma Zixuan. Design of wide-spectrum visible-infrared integrated optical system[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021. (in Chinese)
- [6] Wu Lingling, Zhang Huan, Chen Jing. Design of near infrared optical system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(2): 183-187. (in Chinese)
- [7] Cao Yiqing. Design of double telecentric lens using machine vision system [J]. *Infrared Technology*, 2022, 44(2): 140-144. (in Chinese)
- [8] Shi Lili. Research on optical system design of space remote sensing camera[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)
- [9] Li Hongzhuang, Zhao Yongzhi, Wang Guoqiang, et al. Design of refractive optical system with large relative aperture and long focal length [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 2954-2958. (in Chinese)
- [10] Gou Zhiyong, Wang Jiang, Wang Chu, et al. The summary of aspheric optical design technology [J]. *Laser Journal*, 2006, 27(3): 1-2. (in Chinese)
- [11] Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering Optics[M]. Beijing: Beijing Machinery Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [12] Wang Wei. Optical system design and imaging quality evaluation of multi-band short-wave infrared camera [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021. (in Chinese)
- [13] Zhang Xinting, Kang Lei, Ding Hongchang, et al. Industrial lens design of aspheric double telecentric based on machine vision [J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(2): 230-234. (in Chinese)
- [14] Zhang Kaipeng. Design and tolerance analysis of large aperture optical systems [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)

Design of optical system for wide-spectrum visible-short wave infrared imaging

Xuan Bin¹, Zhao Zeyu², Luo Yaowei³, Wei Qun³, Zhu Yixian¹, Wang Yajun^{4*}

(1. School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China;

2. Faculty of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. Nanjing Huaopt Technology CO. LTD, Nanjing 210000, China;

4. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract:

Objective The industrial lens for machine vision inspection needs not only to meet the design requirements of lightweight and large field of view, but also have high luminous flux. In this paper, based on the needs of machine vision engineering applications, an optical system for wide-spectrum visible-short wave infrared imaging is designed using the optical design software ZEMAX. The Wide spectrum visible-short wave infrared imaging

system can operate in the band of 0.4-1.7 μm . The system is composed of 7 groups of 10 lenses. The MTF value is greater than 0.4 at the Nyquist frequency of 100 lp/mm. The F number of the system is 2.8, and the distortion is less than 1.4%. All kinds of aberrations have been well corrected and balanced. And the system has good imaging performance. It has certain reference value for the design of similar optical systems.

Methods The optical system structures are usually divided into refractive system, reflective system and hybrid system. Different optical system structures have their own advantages and disadvantages. According to the imaging performance of the system and the cost-performance ratio in industrial applications, the refractive system can meet the requirements of large field of view, low distortion and compact structure. The refractive system is used to observe through refraction of transmitted light, so it is widely used in optical structure selection. At the time, by using the conventional processing and adjustment methods, it can meet the accuracy requirements. It has the characteristics of stable image quality, small stray light and high element transmittance.

Results and Discussions According to the actual needs of industrial testing, the main parameters to be considered in the structural design of the wide-spectrum visible-short wave infrared imaging optical system are lens material, working band, focal length, F number, field angle, total length of the system, etc. Based on the analysis of the parameters of the wide-band infrared imaging system, the resolution CMOS area array detector is 2448×2048 . The pixel size is 3.45 μm . The target size is 2/3 inch (1 inch=2.54 cm), and the lens has stable optical performance and good imaging quality in the operating temperature range of 0-50 $^{\circ}\text{C}$. After the initial structure of the system is determined, the design structure is further optimized using subsequent repeated aberration correction. The optimized wide-spectrum visible-short wave infrared imaging optical system is composed of 7 groups of lenses, and the number of the lenses is 10. The diaphragm is located on the rear surface of the fourth lens, and the front surface of the tenth lens is aspheric. The total length of the system is 79.6 mm, the diameter of the entrance pupil is 9.9 mm, and the F -number is 2.8. It can image in the visible light and short-wave infrared bands. After testing, the point array of the system's field of view is very close to the Airy spot, which is close to the diffraction limit, and meets the imaging requirements. The maximum astigmatism and field curvature of the system is 0.1 mm, and the maximum distortion is 1.4%, which meets the requirements of the system design for field curvature and distortion. The systematic tolerance is analysed based on diffraction MTF average. According to the experience and actual technological level, firstly, relatively loose tolerance preset value of each parameter is given, and then the tolerance analysis is carried out based on the design results, finally the particularly sensitive tolerance is found out and the tolerance is reallocated. Through Monte Carlo analysis of MTF, the results show that at 100 lp/mm, the nominal value of MTF is 0.559, the best value is 0.554, the worst value is 0.333, the average value is 0.481, and the standard deviation is 0.052, the MTF of 90% of the lens ≥ 0.410 , the MTF of 50% of the lens ≥ 0.427 , and the MTF of 10% of the lens ≥ 0.540 . Based on the results, the MTF can meet the technical index requirements under the given tolerance. In order to better prove the performance of the optical system, the bruises in the interior of agricultural products are taken with a visible light band camera and a short-wave infrared camera respectively, which proved that the bruises can be clearly seen in the object image of this wavelength by SWIR imaging. The ability of SWIR to penetrate plastic was proved by shooting through plastic bottles. The experiment proves that the system has good detection effect in industrial detection.

Conclusions With the increasing demand of machine vision for composite image information, the modern optical imaging technology will expand beyond the visible and near-infrared bands. Short-wave infrared will be more widely used in the future because of its resolution comparable to visible light and unique optical performance.

Key words: broad spectrum; optical design; visible light imaging; infrared imaging; machine vision

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (61903204)