

基于 Q-type 非球面的双波段红外光学系统设计

贾孟, 薛常喜*

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 设计了一个可同时在 3~5 μm 中波红外(MWIR)和 8~11 μm 长波红外(LWIR)成像的非制冷双波段红外光学系统。该系统由 4 片透镜组成,有效焦距为 21 mm, F 数为 2.6,其中第 4 表面为 Q-type 非球面,透镜材料采用 Ge 和 $\text{Ge}_{10}\text{As}_{10}\text{Se}_{50}$ 硫系玻璃,对系统进行优化设计使之达到无热化效果。设计结果显示此系统在 -40~60 $^{\circ}\text{C}$ 范围内成像质量良好,调制传递函数接近衍射极限。在设计参数和初始结构相同的情况下,设计了一个包含偶次非球面的光学系统,并对这两种光学系统进行比较分析。结果表明:Q-type 非球面在光学系统设计过程中具有较大优势,其校正像差的能力更强,面形与最佳拟合球面的偏离量更小,有利于提高加工精度和效率。

关键词 光学设计; 红外光学系统; Q-type 非球面; 双波段

中图分类号 O439; TN216

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1022001

Design of Dual-Band Infrared Optical System with Q-type Asphere

Jia Meng, Xue Changxi*

*School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China*

Abstract We design an uncooled dual-band infrared optical system whose operating wavelengths include 3-5- μm mid-wave infrared and 8-11- μm long-wave infrared wavelengths. The effective focal length of this system is 21 mm, and the F -number is 2.6. The system comprises four lenses fabricated with germanium and chalcogenide glass ($\text{Ge}_{10}\text{As}_{10}\text{Se}_{50}$), and the fourth surface is a Q-type asphere. The system is optimized to achieve athermal effect. The design result shows excellent image quality in the temperature range of -40-60 $^{\circ}\text{C}$; additionally, the modulation transfer function is close to the diffraction limit. We design an optical system with an even asphere and the same initial parameters and structure. By comparing, we find that the Q-type asphere has more advantages in optical system design: its stronger ability to correct aberration and smaller deviation from the best-fit sphere are conducive to improving fabrication accuracy and efficiency.

Key words optical design; infrared optical system; Q-type asphere; dual-band

OCIS codes 220.2740; 080.4225; 260.3060; 220.1250

1 引 言

与可见光系统相比,红外光学系统具有较高的隐密性、较强的目标识别性和抗干扰性能,在大雾、烟尘等恶劣环境下具有良好的穿透能力^[1]。因为红外单波段成像系统获取的信息有限,且物体在中波红外和长波红外波段表现出不同的特性,所以可以利用双波段红外成像来获取更多的信息^[2-3],从而提高对目标的探测精度。

由于能更好地校正像差,简化系统结构,非球面在光学系统中得到了越来越广泛的应用。随着超精

密加工与检测技术的快速发展,包括 Q-type 非球面在内的各类非球面的高精度加工与检测已成为可能^[4]。相比于其他类型的非球面,Q-type 非球面在光学系统设计、加工和检测等方面具有一定优势,一经提出就受到了研究人员的重视。目前针对 Q-type 非球面的光学系统设计主要集中在全景环带^[5]、照相机镜头^[6]等可见光波段光学系统和 193 nm 紫外光刻物镜系统^[7],在红外光学系统中还未见到相关应用。

本文采用 Q-type 非球面设计了一个非制冷双波段红外光学系统,该系统全视场(FOV)为 30 $^{\circ}$,由

收稿日期: 2019-04-10; 修回日期: 2019-05-19; 录用日期: 2019-06-03

基金项目: 吉林省重点科技研发项目(20180201030GX)

* E-mail: xc272479@sina.com

4片透镜组成,仅采用Ge和IG4硫系玻璃这两种红外材料,结构简单紧凑,在Nyquist空间频率为20 lp/mm处的中、长波段的调制传递函数(MTF)值分别高于0.5和0.3,接近衍射极限,全视场畸变小于2%,能够在-40~60 °C的温度范围内稳定成像。

2 基本原理

2.1 Q-type 非球面

传统的幂级数非球面数学表达式采用幂级数附加多项式的形式表示与最接近球面的偏离量,是光学设计加工领域最常用的非球面表征形式之一,可写为

$$Z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{m=0}^M a_m r^{2m+2}, \quad (1)$$

式中: Z 为非球面的矢高; c 为非球面顶点处的曲率; r 为透镜的孔径半径; k 为圆锥系数; a_m 为各高阶项系数; M 为附加多项式的项数。若 M 值足够大,这种表示方法可以近似描述任意的对称面形^[8]。但是对于一个确定形状的曲面,当拟合项数超过10项时,与之相关的Gram矩阵就容易出现病态,导致面形表征失败。

为了解决上述问题,美国的Forbes等^[9-10]提出了一种新的非球面数学描述方式,即Q-type函数多项式,共包括 Q_{con} 和 Q_{bfs} 两种形式。 Q_{con} 型函数多项式是在二次曲面的基础上附加新型多项式,其矢高表达式为

$$z(\rho) = \frac{c\rho^2}{1 + \sqrt{1 - \epsilon c^2\rho^2}} + u^4 \sum_{m=0}^M a_m Q_m^{\text{con}}(u^2); \quad (2)$$

Q_{bfs} 型函数多项式则定义了一个偏离最接近球面的非球面,其矢高表达式为

$$z(\rho) = \frac{c_{\text{bfs}}\rho^2}{1 + \sqrt{1 - c_{\text{bfs}}^2\rho^2}} + \frac{u^2(1-u^2)}{\sqrt{1 - c_{\text{bfs}}^2\rho_{\text{max}}^2}u^2} \sum_{m=0}^M a_m Q_m^{\text{bfs}}(u^2), \quad (3)$$

式中: c_{bfs} 为最佳拟合球面的曲率半径; ρ 为表面通光半口径; ρ_{max} 为最大通光半口径; $u = \rho/\rho_{\text{max}}$; $\epsilon = 1 + c_{\text{con}}$, c_{con} 为所表示非球面的最接近二次曲面半径; $Q_m^{\text{con}}(u^2)$ 和 $Q_m^{\text{bfs}}(u^2)$ 分别为以 a_m 为系数的正交化 m 阶Jacobi多项式基底,可以避免幂级次非球面在进行优化计算时各多项式系数之间的相互干扰和精度丢失,提高光学系统的优化效率。

2.2 红外光学系统消热差、消色差的原理

要使双波段红外系统消热差和消色差,在一定

温度范围内具有良好的性能,设计时必须同时满足光焦度、校正色差和消热差的要求^[11-12]。若无热化系统由 i 片单透镜组成,则

$$\begin{cases} \frac{1}{h_1} \sum_i (h_i \cdot \varphi_i) = \varphi \\ \frac{1}{h_1^2} \sum_i \left(h_i \cdot \frac{\partial \varphi_i}{\partial T} \right) = \frac{1}{h_1^2} \sum_i (h_i \cdot \theta_i \cdot \varphi_i) = 0, \\ \frac{1}{h_1^2} \sum_i \left(h_i \cdot \frac{\partial \varphi_i}{\partial \lambda} \right) = \frac{1}{h_1^2} \sum_i (h_i \cdot \omega_i \cdot \varphi_i) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: h_1 为近轴光线在系统第1片镜面的入射高度; h_i 为近轴光线在系统第 i 个透镜的入射高度; φ_i 、 θ_i 、 ω_i 分别为第 i 个透镜组的光焦度、消热差系数和消色差系数。

3 双波段红外光学系统设计

3.1 设计参数

本研究选择型号为FILRTAU2的非制冷双色红外焦平面探测器^[13],其阵列规格为320 pixel×320 pixel,单个像元的大小为25 μm×25 μm,通过计算求得探测器的接收面积和系统的有效焦距。在综合考虑探测器的传递函数特性和红外光学系统成像特性后,要求系统能够在-40~60 °C的温度范围内稳定成像。系统的主要设计参数如表1所示。

表1 系统的主要设计参数

Table 1 Main design parameters of optical system

Parameter	Value
Wave band /μm	3-5 & 8-11
Effective focal length /mm	21
Filed of view /°	30
F number	2.6
Temperature range /°C	-40-60
MTF@20 (lp/mm)	>0.5@MWIR >0.3@LWIR
Distortion	<2%
Detector specification /(pixel×pixel)	320×320
Pixel size /(μm×μm)	25×25

与可见光波段可供选择的材料相比,适用于红外光学系统的材料种类要少得多,在中波、长波段同时具有较高透过率的材料则更少。在两个设计波段内,Ge具有较高的透过率,折射率高且随温度、波长的变化较小;硫系玻璃具有较高的透过率以

及较低的折射率、热光系数和色散性能,可同其他红外材料配合使用,从而应用于需校正色差、无热化的红外光学系统中^[14]。经过筛选后,采用折射率较高的 Ge 和德国 Vitron 公司生产的折射率温度系数 (dn/dt , TCRI) 较低的 IG4 硫系玻璃这两种材料,它们的主要性能参数如表 2 所示。二者都可通过超精密单点金刚石车床切削加工,其中 IG4 硫系玻璃透镜也可精密模压成型,制备难度低,可加工性较强。

表 2 两种红外材料的主要性能参数

Table 2 Main property parameters of two infrared materials

Material	Refractive index		TCRI @ 10 $\mu\text{m}/\text{K}^{-1}$	Spectral range / μm
	$\lambda = 4 \mu\text{m}$	$\lambda = 10 \mu\text{m}$		
Ge	4.0243	4.0032	0.000396	2.0-17
IG4	2.6220	2.6090	0.000020	0.8-14

3.2 设计结果与像质评价

由于初始系统结构全部为球面,经过分析 Zemax 赛德尔像差图以及对比在各表面引入 Q-type 非球面优化设计后的像质,最终确定将第 2 透镜的后表面设为 Q_{con} 型非球面,其附加多项式项数为 6 项。系统结构如图 1 所示,共包含 4 片透镜,总

长度不超过 70 mm,镜筒材料选用机械加工性能较好的铝合金^[15],其膨胀系数为 $23.6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

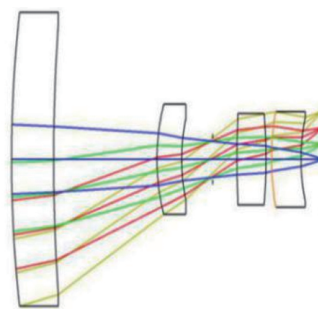


图 1 系统结构图

Fig. 1 Optical layout of system

点列图法是衡量光学系统成像质量的一个重要方式,图 2 给出了 $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ 环境下的点列图。图 2(a) 显示 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段最大弥散斑均方根(RMS)半径为 $9.404 \mu\text{m}$,小于 $12.67 \mu\text{m}$ 的艾里斑半径;图 2(b) 显示 $8 \sim 11 \mu\text{m}$ 波段最大弥散斑均方根半径为 $9.923 \mu\text{m}$,小于 $30.1 \mu\text{m}$ 的艾里斑半径。低温、常温和高温环境下各视场的弥散斑均方根半径如表 3 所示,均小于探测器的一个像元尺寸 ($25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$),满足红外双波段探测器的基本要求。

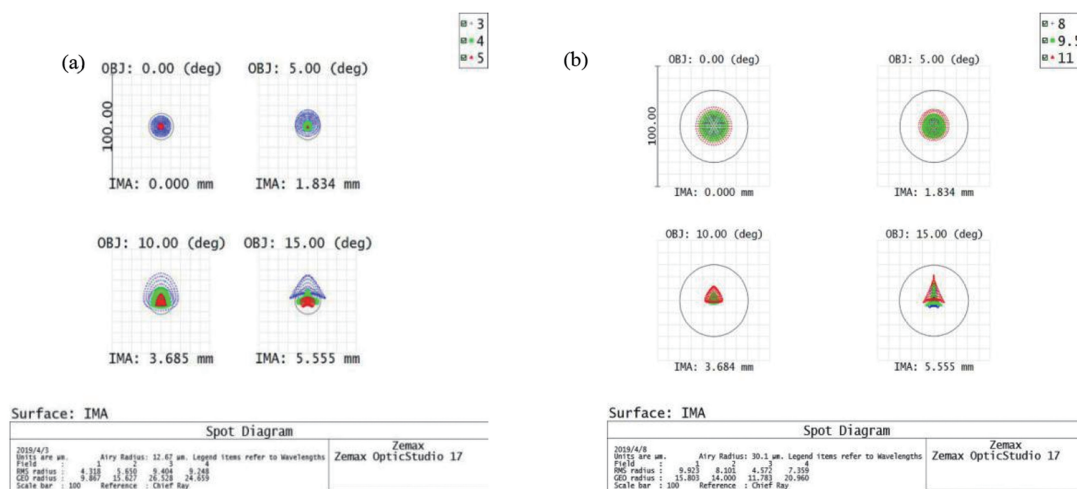


图 2 系统点列图。(a)中波红外波段;(b)长波红外波段

Fig. 2 Spot diagrams of optical system. (a) MWIR; (b) LWIR

表 3 Q-type 非球面光学系统的弥散斑均方根半径

Table 3 RMS radius of optical system with Q-type asphere

FOV / ($^\circ$)	RMS in MWIR / μm			RMS in LWIR / μm		
	$-40 \text{ } ^\circ\text{C}$	$20 \text{ } ^\circ\text{C}$	$60 \text{ } ^\circ\text{C}$	$-40 \text{ } ^\circ\text{C}$	$20 \text{ } ^\circ\text{C}$	$60 \text{ } ^\circ\text{C}$
0	5.672	4.318	6.985	12.468	9.923	5.768
5	4.863	5.650	8.741	11.498	8.101	4.023
10	5.741	9.404	12.079	9.238	4.572	3.399
15	7.646	9.248	11.624	10.982	7.359	5.612

图 3 为常温 20 °C 环境下系统的场曲畸变曲线,可以看出,中波红外波段下场曲和畸变的最大值分别为-0.0835 mm 和 1.11%,长波红外波段下场曲和畸变的最大值分别为-0.0960 mm 和 1.16%。两波段下系统的场曲均小于 0.1 mm,畸变小于 2%,满足设计要求。

Q-type 非球面光学系统在-40~60 °C 温度范围内的调制传递函数曲线如图 4 所示,在同一像面位置对两波段成像进行分析,图 4(a)、(b)、(c)分别

为系统在中波红外波段、不同温度下的调制传递函数曲线,图 4(d)、(e)、(f)分别为系统在长波红外波段、不同温度下的调制传递函数曲线。由图 4 可知,在 Nyquist 空间频率为 20 lp/mm 处,各温度下中波红外波段的调制传递函数值大于 0.5,长波段的调制传递函数值大于 0.3,接近衍射极限,在低温和高温环境下系统的调制传递函数曲线略有下降,但仍满足设计要求,被动消热差设计取得了良好的效果^[16]。

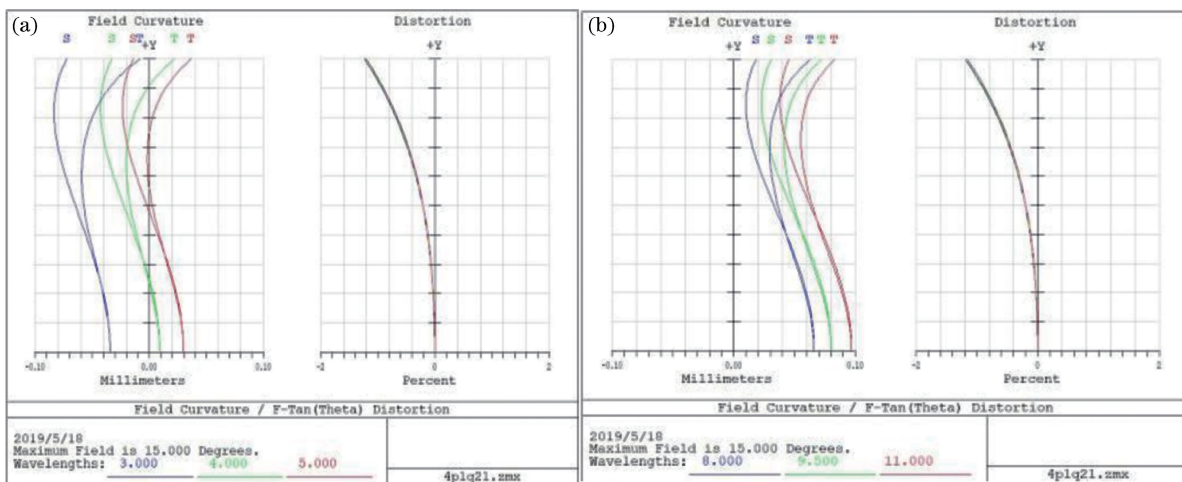


图 3 Q-type 非球面光学系统场曲畸变曲线。(a)中波红外波段;(b)长波红外波段
Fig. 3 Field curvature and distortion curves of optical system with Q-type asphere.

(a) MWIR; (b) LWIR

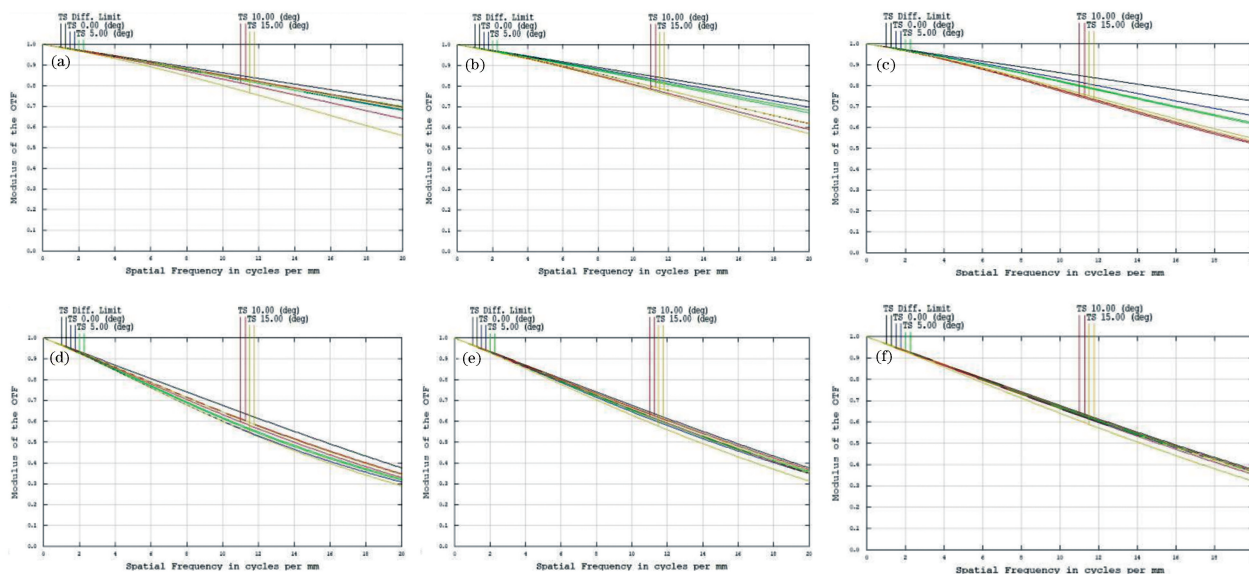


图 4 Q-type 非球面光学系统调制传递函数曲线。(a) -40 °C 中波红外波段;(b) 20 °C 中波红外波段;
(c) 60 °C 中波红外波段;(d) -40 °C 长波红外波段;(e) 20 °C 长波红外波段;(f) 60 °C 长波红外波段

Fig. 4 MTF curves of optical system with Q-type asphere. (a) MWIR at -40 °C; (b) MWIR at 20 °C;
(c) MWIR at 60 °C; (d) LWIR at -40 °C; (e) LWIR at 20 °C; (f) LWIR at 60 °C

4 系统性能对比分析

4.1 基于偶次非球面的双波段红外光学系统设计

为了进一步说明 Q-type 非球面对光学系统成像质量的影响,在设计参数和初始结构相同的情况下,采用偶次非球面设计了一个双波段红外光学系统。两非球面都位于第二透镜的后表面,设计自由度相同,附加多项式均为 6 项,经优化设计后非球面的各项参数如表 4 所示。

与偶次非球面相比,Q-type 非球面的附加项基底正交,各项系数在软件优化过程中彼此独立,不会相互影响。且由表 4 中数据可见,Q-type 非球面的系数都在 10^{-3} 以内,偶次非球面的系数在 10^{-5} 以下,二者相差 2~10 个数量级。所以在 Zemax 软件中,Q-type 非球面的附加项系数能够保留更多的有效数字,有利于提高光学系统的优化效率和光学元件的加工精度。

表 5 为基于偶次非球面光学系统在不同温度环境下的弥散斑均方根半径,中波红外波段的艾里斑

半径为 $12.68 \mu\text{m}$,长波红外波段的艾里斑半径为 $30.12 \mu\text{m}$,与上述 Q-type 非球面光学系统的艾里斑相差无几,但此系统的弥散斑均方根半径相对更大,像散也较大,达到了 0.12 mm 。

表 4 Q-type 非球面和偶次非球面的各项参数
Table 4 Parameters of Q-type asphere and even asphere

Parameter	Q-type asphere	Parameter	Even asphere
ρ_{\max}/mm	8.6222	k/mm	-0.1850
ϵ/mm	0.7303	c/mm	0.0588
c/mm	0.0591	a_4/mm	2.0047×10^{-5}
a_0/mm	-0.1618	a_6/mm	7.5247×10^{-7}
a_1/mm	-0.2998	a_8/mm	-3.5592×10^{-8}
a_2/mm	-0.1856	a_{10}/mm	9.0774×10^{-10}
a_3/mm	-0.0704	a_{12}/mm	4.3803×10^{-12}
a_4/mm	-0.0151	a_{14}/mm	-3.4455×10^{-13}
a_5/mm	-1.1715×10^{-3}		

表 5 偶次非球面光学系统弥散斑均方根半径
Table 5 RMS radius of optical system with even asphere

FOV/(°)	RMS in MWIR			RMS in LWIR		
	-40 °C	20 °C	60 °C	-40 °C	20 °C	60 °C
0	3.934	6.693	10.163	12.291	7.422	2.891
5	4.613	7.856	11.285	11.495	5.912	3.140
10	6.158	10.049	13.437	9.617	4.841	4.010
15	8.222	9.546	11.836	12.725	8.415	7.676

图 5 为基于偶次非球面光学系统在低温、常温、高温下的调制传递函数曲线,图 5(a)、(b)、(c)分别为系统在中波红外波段、不同温度下的调制传递函数曲线,图 5(d)、(e)、(f)分别为系统在长波红外波段、不同温度下的调制传递函数曲线。

可以看到与上述 Q-type 非球面光学系统相比,调制传递函数曲线均有一定程度的下降,成像质量较差。

4.2 与最佳拟合球面的偏离

Q_{con} 型非球面附加项基底的前 6 项可写为

$$\begin{aligned}
 Q_0^{\text{con}}(x) &= 1, \\
 Q_1^{\text{con}}(x) &= -(5 - 6x), \\
 Q_2^{\text{con}}(x) &= 15 - 14x(3 - 2x), \\
 Q_3^{\text{con}}(x) &= -\{35 - 12x[14 - x(21 - 10x)]\}, \\
 Q_4^{\text{con}}(x) &= 70 - 3x\{168 - 5x[84 - 11x(8 - 3x)]\}, \\
 Q_5^{\text{con}}(x) &= -\{126 - x\{1260 - 11x\{420 - x[720 - 13x(45 - 14x)]\}\}\}. \quad (5)
 \end{aligned}$$

通过 MATLAB 软件可计算得出如图 6 所示的 Q-type 非球面的表面面形,其边缘处矢高值最大为

0.186 mm ,最佳拟合球面的曲率半径为 16.873 mm 。图 7(a)、(b)是两个非球面表面与最佳

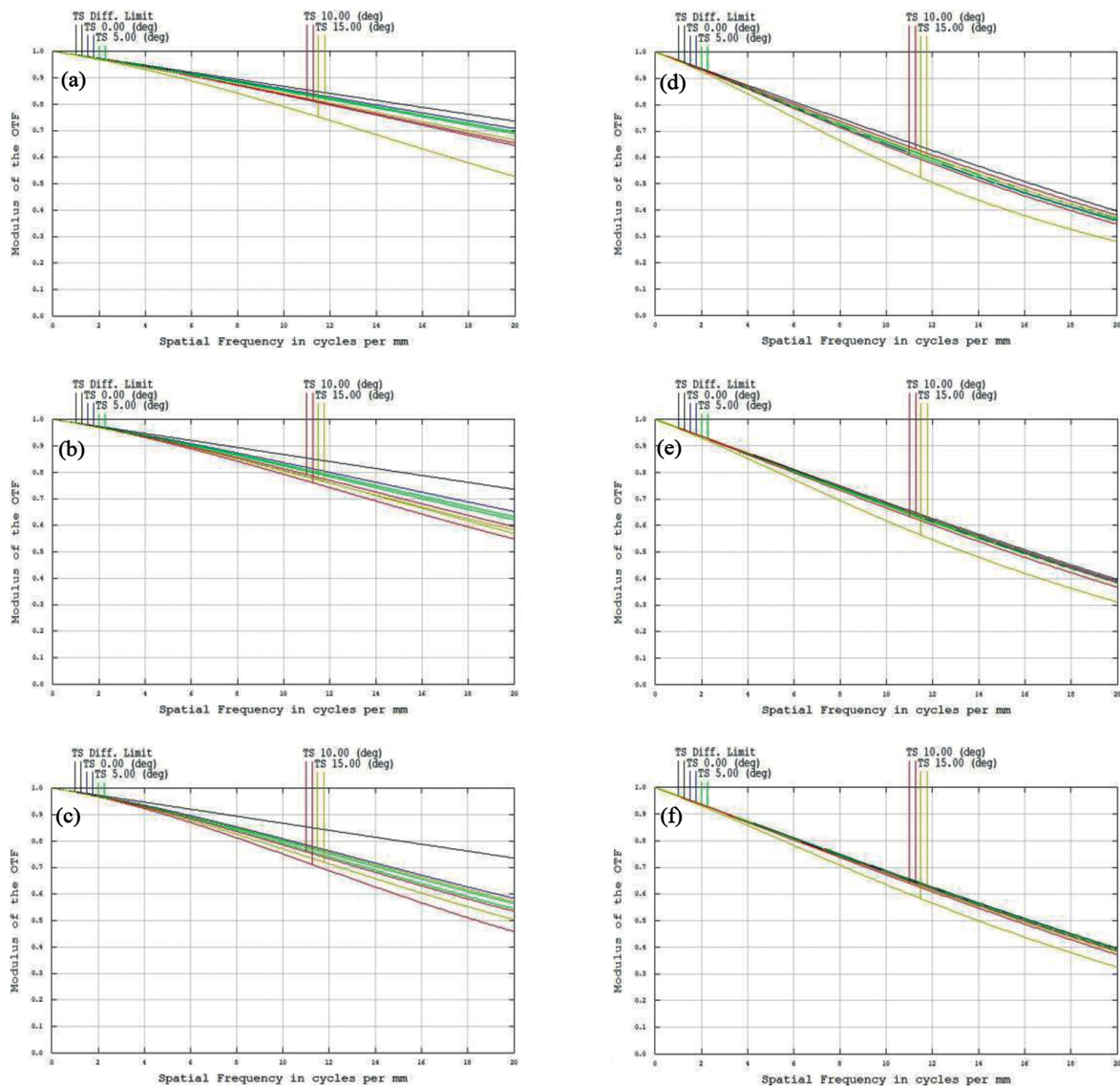


图 5 偶次非球面光学系统调制传递函数曲线。(a) $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 中波红外波段;(b) $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 中波红外波段;
(c) $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 中波红外波段;(d) $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 长波红外波段;(e) $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 长波红外波段;(f) $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 长波红外波段
Fig. 5 MTF curves of optical system with even asphere. (a) MWIR at $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) MWIR at $20\text{ }^{\circ}\text{C}$;
(c) MWIR at $60\text{ }^{\circ}\text{C}$; (d) LWIR at $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$; (e) LWIR at $20\text{ }^{\circ}\text{C}$; (f) LWIR at $60\text{ }^{\circ}\text{C}$

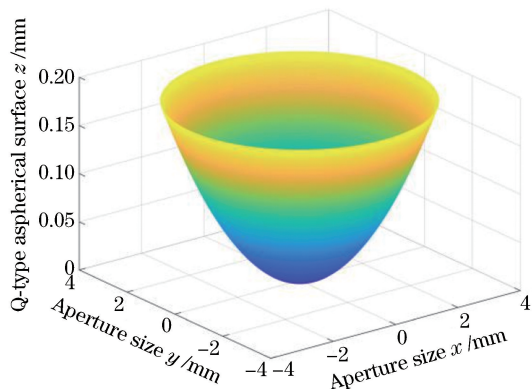


图 6 Q-type 非球面面形
Fig. 6 Q-type aspherical surface

拟合球面间的偏离量曲线,最大值分别为 $0.164\text{ }\mu\text{m}$ 和 $0.609\text{ }\mu\text{m}$,后者约为前者的 3.7 倍。在加工过程中,以超精密车削加工为例,面形偏离量即为精车阶段的切削去除量,因为第二透镜的全口径只有 5 mm ,即使是微米级的偏离也有较大影响,所以 Q-type 非球面的可加工性更强,有利于提高加工精度和效率。

5 结 论

本研究设计了一个非制冷双波段红外光学系统,该系统的设计波段为 $3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 和 $8\sim 11\text{ }\mu\text{m}$,全视场为 30° ,有效焦距为 21 mm , F 数为 2.6 ,总长小

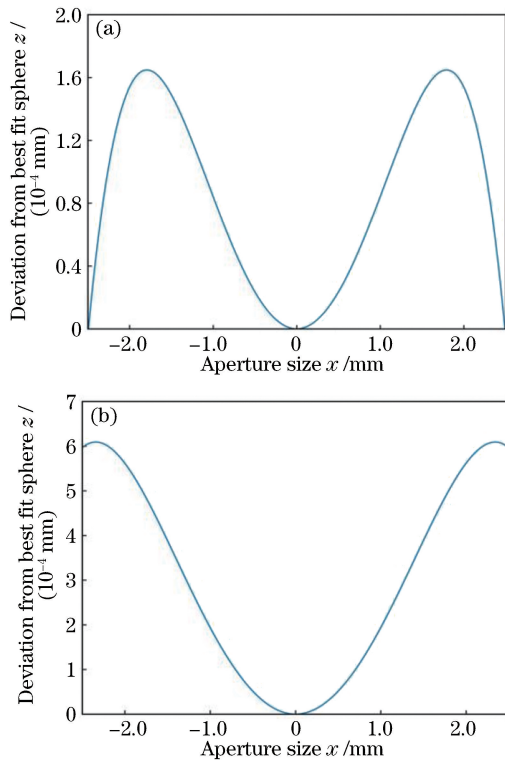


图 7 与最佳拟合球面的偏离量。(a) Q-type 非球面；
(b) 偶次非球面

Fig. 7 Deviation from the best fit sphere.

(a) Q-type asphere; (b) even asphere

于 70 mm。该系统共包含由两种红外材料制备的 4 片透镜,其中第 2 透镜后表面引入了 Q_{con} 型非球面,搭配型号为 FILRTAU2 的红外探测器,在 $-40 \sim 60$ °C 温度范围内能够稳定成像。此外,为了验证 Q-type 非球面在此光学系统设计中的优越性,在相同条件下采用偶次非球面设计了一个双波段红外光学系统,并对两系统的设计结果进行比较分析。结果表明,相比于偶次非球面,Q-type 非球面的附加项系数数量级更合理,有利于提高优化效率和更好地校正像差,并且面形与其最佳拟合球面的偏离量更小,可加工性更强,能够有效降低加工难度,提高加工效率。

参 考 文 献

[1] Zhu J W, Wang Q, Fan J H, *et al.* Design of a miniaturized infrared wide-angle lens [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(7): 070801.
朱佳巍, 王旗, 范俊辉, 等. 一款小型化红外广角镜头的设计 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(7): 070801.

[2] Fan C J, Wang Z Q, Fan X Y. The design of infrared dual-band athermalized optical system with double-layer harmonic diffractive element [J]. *Acta*

Photonica Sinica, 2008, 37(8): 1617-1621.

范长江, 王肇圻, 樊新岩. 含有双层谐衍射元件的红外双波段光学系统消热差设计 [J]. *光子学报*, 2008, 37(8): 1617-1621.

- [3] Jia X R, Li X N, Cao Y H, *et al.* Design of infrared dual-band triple-field optical system [J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(7): 549-555.
贾星蕊, 李训牛, 曹易辉, 等. 红外双色三视场光学系统设计 [J]. *红外技术*, 2014, 36(7): 549-555.
- [4] Forbes G W. Shape specification for axially symmetric optical surfaces [J]. *Optics Express*, 2007, 15(8): 5218-5226.
- [5] Zhou X D, Bai J. Small distortion panoramic annularlens design with Q-type aspheres [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0722003.
周向东, 白剑. Q-type 非球面小畸变全景环带光学系统设计 [J]. *光学学报*, 2015, 35(7): 0722003.
- [6] Ma B, Sharma K, Thompson K P, *et al.* Mobile device camera design with Q-type polynomials to achieve higher production yield [J]. *Optics Express*, 2013, 21(15): 17454-17463.
- [7] Ma B, Li L, Thompson K P, *et al.* Applying slope constrained Q-type aspheres to develop higher performance lenses [J]. *Optics Express*, 2011, 19(22): 21174-21179.
- [8] Li C, Xue C X, Yang H F, *et al.* Optical system design of electronic endoscope objective with Q-type aspheres [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(6): 0622001.
李闯, 薛常喜, 杨红芳, 等. 基于 Q-type 非球面的电子内窥镜物镜光学系统设计 [J]. *光学学报*, 2017, 37(6): 0622001.
- [9] Forbes G W, Brophy C P. Asphere, o asphere, how shall we describe thee? [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7100: 710002.
- [10] Forbes G W. Robust, efficient computational methods for axially symmetric optical aspheres [J]. *Optics Express*, 2010, 18(19): 19700-19712.
- [11] Tamagawa Y, Tajime T. Dual-band optical systems with a projective athermal chart: design [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(1): 297-301.
- [12] Garcia-Nunez D S, Michika D. The design of athermal infrared optical systems [J]. *Proceedings of SPIE*, 1989, 1049: 82-85.
- [13] Liu J, Lu X Q. Design of uncooled infrared dual-band continuous-zoom optical system [J]. *Journal of Xi'an Technological University*, 2016, 36(6): 436-445.
刘钧, 鲁茜倩. 非制冷型红外双波段连续变焦光学系统设计 [J]. *西安工业大学学报*, 2016, 36(6): 436-445.
- [14] Pan Y, Xu X P, Qiao Y. Optical-structural-thermal

- analysis of zoom infrared dual-band projection lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(5): 0522001.
潘越, 徐熙平, 乔杨. 变焦红外双波段投影镜头的光机热分析[J]. *光学学报*, 2018, 38(5): 0522001.
- [15] Fu Q, Zhang X. Materials choose for mid-wave/long-wave dual-waveband infrared optics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0208003.
付强, 张新. 中波/长波双色红外光学系统材料选择 [J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0208003.
- [16] Jiang B, Wu Y H, Dai S X, *et al.* Design of a compact dual-band athermalized infrared system [J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(12): 999-1004.
姜波, 吴越豪, 戴世勋, 等. 紧凑型双波段无热化红外光学系统设计 [J]. *红外技术*, 2015, 37(12): 999-1004.