

文章编号: 1672-8785(2024)12-0007-12

红外成像系统异形非球面优化及冷反射分析

卜和阳 田浩南* 虞林瑶 张宇鹏*

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所航空成像与
测量技术研究一部, 吉林 长春 130033)

摘 要: 在设计红外系统的过程中, 通常使用偶次非球面来提高系统性能。通过设计软件的优化功能可以快速找出最佳的非球面, 但是这些非球面很可能会出现震荡面型。为了消除红外成像镜头中的异形非球面和降低系统的冷反射现象, 先从定义角度解析了冷反射现象的评价参数。结合冷反射光迹图, 确定冷反射评价参数依然适用于非球面的冷反射控制。又从矢高角度, 控制从非球面透镜中心至边缘矢高值的单调性以及符号的一致性来消除异形非球面。设计了一款中波红外成像镜头, 其初始设计结构中出现了异形非球面。利用控制矢高值的方法和冷反射抑制方案对异形非球面进行控制。优化后的红外成像系统没有异形非球面, 经透镜各表面反射后返回探测器的冷反射能量覆盖整个探测器像面, 说明此优化方案适用于含有异形非球面的红外系统且更加直观。

关键词: 非球面; 冷反射分析; 异形非球面; 矢高

中图分类号: O432 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2024.12.002

Optimization and Narcissus Analysis of Irregular Aspheric Surfaces in Infrared Imaging Systems

BU He-yang, TIAN Hao-nan*, YU Lin-yao, ZHANG Yu-peng*

(Aeronautical Imaging and Measurement Technology Research Department I, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Even-order aspheric surfaces are usually used to improve system performance when designing infrared systems. The optimization function of the design software can quickly find the best aspheric surfaces, but these aspheric surfaces are likely to have oscillating surface patterns. In order to eliminate the irregular aspheric surfaces in the infrared imaging lens and reduce the narcissus phenomenon of the system, the evaluation parameters of the narcissus phenomenon are first analyzed from the definition perspective. Combined with the narcissus light trace diagram, it is determined that the narcissus evaluation parameters are still suitable for the narcissus control of the aspheric surfaces. From the perspective of the sagittal height, the monotonicity of the sagittal height value from the center to the edge of the aspheric lens and the consistency of the sign are con-

收稿日期: 2024-07-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(62205337)

作者简介: 卜和阳(1984-), 男, 吉林长春人, 硕士, 主要从事光学设计与检测方面的研究。

*通讯作者: E-mail: bhy0125@126.com

trolled to eliminate the irregular aspheric surface. A medium-wave infrared imaging lens is designed, and irregular aspheric surfaces appear in its initial design structure. The irregular aspheric surface is controlled by the method of controlling the sagittal height value and the narcissus suppression scheme. The optimized infrared imaging system has no irregular aspheric surface, and the narcissus energy returned to the detector after reflection from each surface of the lens covers the entire detector image surface, indicating that this optimization scheme is suitable for infrared systems with irregular aspheric surfaces and is more intuitive.

Key words: aspheric surface; narcissus analysis; irregular aspheric surface; sagittal height

0 引言

随着红外光学材料加工工艺的不断提高, 红外镜片的非球面加工得到了长足的进步, 常用高阶非球面的加工结果也更加趋近于理论设计, 为研究人员优化红外镜头提供了更多的自由度。常用的偶次高阶非球面为了降低系统像差, 容易出现异形震荡型曲面。镜片由轴心到边缘的矢高不是单调上升或下降, 而是非单调性浮动。这样的异形非球面对镜片组件的公差要求更严格, 给镜片的加工提出了更高的要求。偶次高阶非球面由于每点的斜率都不同, 所以各点对像面的冷反射效应也不确定。

本文结合 Zemax 设计软件, 从矢高角度对系统中出现的异形非球面进行分析, 先确定了系统中出现难以加工的异形表面时的优化方案, 然后从定义角度解析了传统冷反射评价参数 YNI 和 $I/IBAR$ 的意义; 分析了评价参数不同值的表现形式与高阶非球面冷反射光线足迹的关系, 推出 YNI 和 $I/IBAR$ 的值是否依然可以定性判断偶次高阶非球曲面冷反射的严重程度。结合红外设计实例, 对系统中的异形非球面进行面型轮廓优化, 同时校正系统的冷反射。

1 非球面定义

偶次高阶非球面是一个旋转对称的非球面^[1], 其表达式由标准二次曲面的多项式和附加偶次幂级数多项式组成。已知偶次高阶非球面的表达式为

$$z = \frac{h^2 \rho}{1 + \sqrt{1 - (1 + K)h^2 \rho^2}} + A_{2m} h^{2m} \quad (1)$$

式中, z 为矢高值; ρ 为顶点曲率, $\rho = 1/R$, R

为顶点曲率半径; h 为曲面上任意一点到光轴的垂直距离; K 为二次曲面系数; A_{2m} 为偶次幂级数多项式的非球面系数 ($m = 2, 3, 4, \dots$)。由于偶次高阶非球面的表达式简单, 所以该非球面是应用最广泛的非球面之一。本文基于偶次高阶非球面的面型轮廓和冷反射效应展开分析。

2 冷反射评价参数分析

2.1 参数 YNI 的分析

中红外成像系统中主要定性评价一个面冷反射严重程度的参数为 YNI 和 $I/IBAR$ 的绝对值^[2-3]。YNI 主要反映轴上冷反射的大小, 其定义如下:

$$YNI = yni \quad (2)$$

式中, y 为零视场边缘光线在反射面的入射高度, 如图 1 所示; i 表示边缘光线在某个面的入射角; n 表示该面的折射率。降低冷反射就要提高冷光线在各个折射面上的 YNI 的绝对值, 使得冷反射返回探测器时产生离焦, 被冷光阑和其他孔径遮拦。

如图 1 所示, 设光学系统某个面 S 的球心为 O' , OO' 为 S 面的对称旋转轴, S 面的曲率半径为 R , 入射光线表示来自物面的光线(经 S 面后成像在 F 点), 像高 FW 取为 H 。对零视场边缘光线作逆光线追迹, F 点发出的光线经 S 面反射后, 其反射光线与 FW 有一交点 M , 高度 MF 取为 h 。设零视场光束在 S 面的入射高度为 y , 半孔径角为 θ , i' 为零视场逆光线追迹在 S 面的反射角, i 为入射角。在三角形 NFM 中:

$$\frac{h}{\sin 2i'} = \frac{y/\sin \theta}{\sin[\pi - 2i' - (\pi/2 - \theta)]} = \frac{y/\sin \theta}{\cos(\theta - 2i')} \quad (3)$$

$$h = \frac{y \sin 2i'}{\cos(\theta - 2i') \sin \theta} \approx \frac{2yi'}{\theta} \quad (4)$$

设 H' 是探测器的像面高度, 冷反射能量在探测器像面上的高度为 h' , 零视场边缘光线在焦平面的入射角为 θ' , 由光学不变量 $h'\theta' = hn\theta$, 可以得到:

$$h' = \frac{hn\theta}{\theta'} = \frac{2yni'}{\theta'} \quad (5)$$

$$\theta' = \frac{D/2}{f} = \frac{1}{2f/D} = \frac{1}{2F\#} \quad (6)$$

$$\frac{h}{H} = \frac{h'}{H'} = \frac{2yni'/\theta'}{H'} \approx \frac{4F\#yni'}{H'} \quad (7)$$

$$i = i' \quad (8)$$

$$yni = \frac{hH'}{4HF\#} \quad (9)$$

式中, $F\#$ 为光学系统的 F 数, D 为系统的入瞳直径, f 为系统焦距。通过式(9)可知 YNI 的优化方向, 即可以通过减小系统 $F\#$ (也就是减小系统焦距或者增大系统入瞳口径) 来提高 YNI 的绝对值, 也可以通过减小镜片的曲率半径来降低系统中间像点的尺寸。

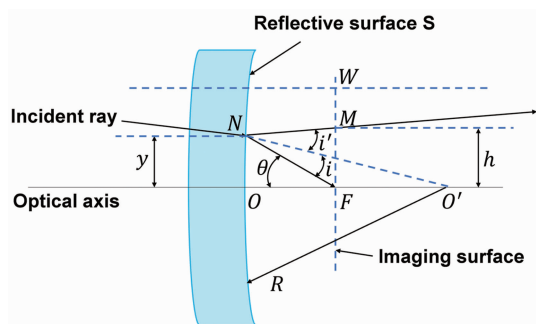


图 1 YNI 定义示意图^[2]

2.2 参数 $I/IBAR$ 的分析

$I/IBAR$ 表示近轴边缘光线的入射角与主光线的入射角的比值, 反映冷反射随视场的变化, 其定义为

$$I/IBAR = \alpha/\alpha_z \quad (10)$$

如图 2 所示, α 表示近轴边缘光线在 S 面的入射角; α_z 是主光线在 S 面的入射角。为了说明边缘光线与主光线的区别, 图 2 中引入了光阑: 边缘光线经过光阑边缘, 主光线经过光阑中心。

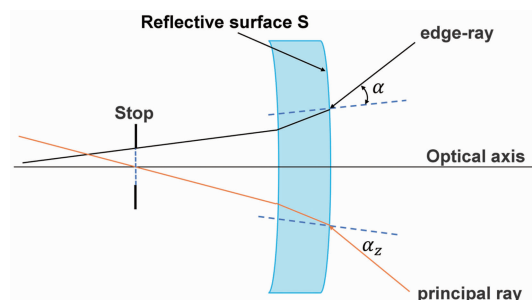


图 2 $I/IBAR$ 定义示意图

当 $I/IBAR$ 的绝对值大于 1 时, 表明该面产生的冷像噪声基本不随视场扫描变化^[4-5]。可认为当 $I/IBAR$ 的绝对值大于 1 时, 该面产生的冷反射能均匀覆盖探测器像面, 且该面对各个视场的冷反射对探测器像面的覆盖尺寸基本一致。

当 $I/IBAR$ 的绝对值小于 1 时, 表明该面产生的冷像噪声随着视场扫描的变化而变化^[6-7]。这意味着该面对各个视场的冷反射在探测器像面的分布位置不同, 覆盖尺寸也有差异。此时只能通过提高 YNI 的绝对值来降低冷反射对成像的影响, 使冷反射随视场变化的缺点表现不出来。 α 和 α_z 都可以通过 Zemax 设计软件中的评价函数得出。利用 DIVI (操作数 1 与操作数 2 的比值) 函数可以直接计算 $I/IBAR$ 的值, 在系统优化过程中控制 $I/IBAR$ 的绝对值大于 1 即可。

3 仿真分析

3.1 光学系统初始设计

本文设计了一款透射式制冷型中波红外镜头。镜头 F 数为 4, 焦距为 80 mm, 工作波段为 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$; 采用像元数为 1280×1024 、像元大小为 $12 \mu\text{m}$ 的制冷型大像面红外探测器。图 3 所示为该透射式制冷型中波红外镜头的光学结构。其中, 前三片透镜将光线汇聚成一次像点, 后三片镜校正像差, 将一次像点再次成像到探测器的像面上。此结构中有非球面 S_2 、 S_3 、 S_6 、 S_7 、 S_9 和 S_{12} , 都是通过 Zemax 设计软件迭代计算选择的最佳偶次非球面^[8]。图 4 所示为该中波红外镜头的传递函数。

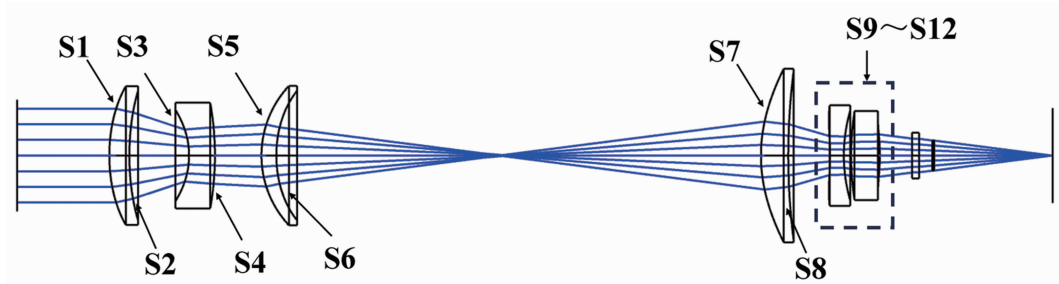


图 3 透射式中波红外成像系统的初始结构图

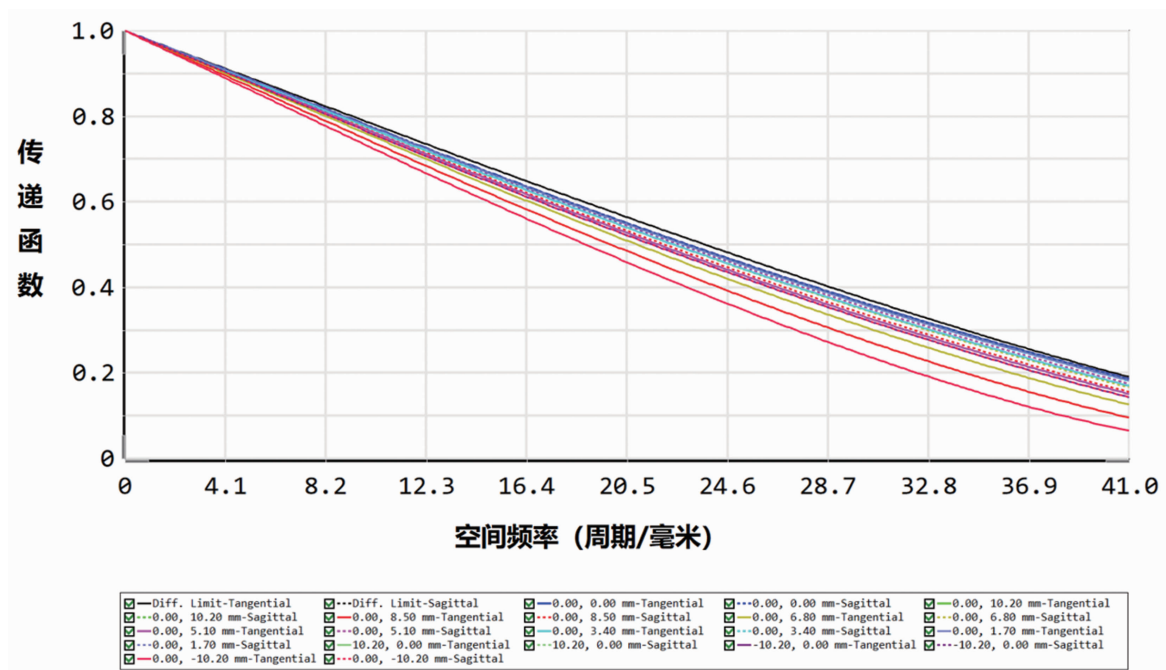


图 4 透射式中波红外成像镜头的初始传递函数

3.2 初始设计中异形非球面的分析

以上镜头的设计已达到衍射极限。将图 3 中的后两片镜放大, 如图 5 所示, S9 和 S12 两个非球面呈现出异形轮廓。通过 Zemax 软件自动迭代优化寻找的最佳偶次高阶非球面, 虽可有效提高系统的传递函数, 但是忽略了光学镜片的加工难度。

在 Zemax 软件中查看 S9 和 S12 异形非球面的矢高值。SSAG 表示定义面中 X 和 Y 定义的坐标点上的矢高。X 和 Y 并非归一化坐标, 而是实际坐标^[9-10], 单位为 mm。由于设计的镜片为偶次非球面, 是轴对称结构, 故只采集 +Y 方向的矢高即可。步进尺寸取 1 mm, 两个面取同等口径值。由表 1 可见, S9 的矢高值从中心向口径边缘移动的过程中不是单调递

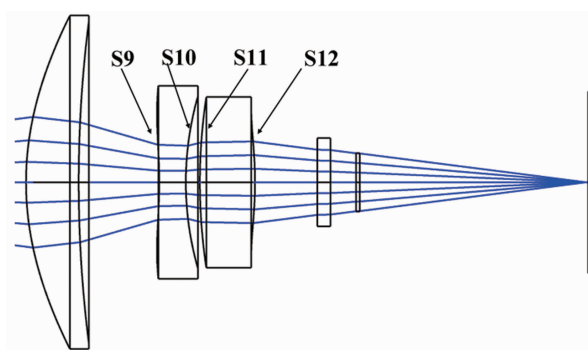


图 5 初始设计中异形非球面的局部放大图

减或单调递增, 而是震荡起伏的; S12 半口径从 0 mm 到 9 mm 增大的过程中矢高值单调递减, 然后半口径从 10 mm 至 11 mm 增大的过程中矢高值递增, 接着到边缘口径的过程中矢高值又再次递减。若减小步进尺寸, 矢高值的

变化可能更加复杂。

非球面及异形非球面上每个点的斜率都不同。表 2 列出了以上 6 个非球面冷反射的 YNI 值和 $I/IBAR$ 值^[11-12]。6 个非球面的冷反射能

量在探测器像面的分布及光迹图如表 3 所示。结合 6 个非球面的 YNI 值和 $I/IBAR$ 值, 分析冷反射评价值的光路表现和实际光线追迹的表现是否一致。

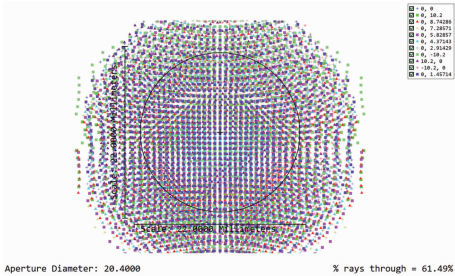
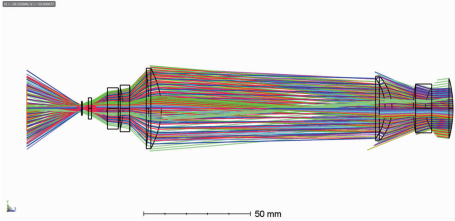
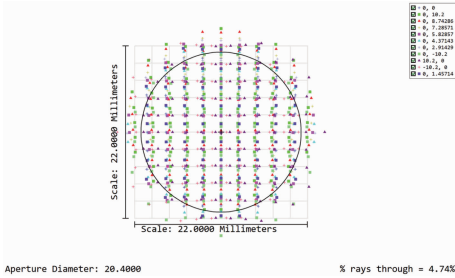
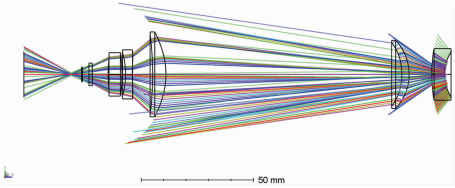
表 1 初始设计中异形非球面的矢高值

序号	评价函数	X/mm	Y/mm	S9	S12
1	SSAG	0	0	0	0
2	SSAG	0	1	−0.0097	−0.012
3	SSAG	0	2	−0.037	−0.047
4	SSAG	0	3	−0.079	−0.101
5	SSAG	0	4	−0.128	−0.171
6	SSAG	0	5	−0.177	−0.250
7	SSAG	0	6	−0.219	−0.326
8	SSAG	0	7	−0.245	−0.389
9	SSAG	0	8	−0.250	−0.424
10	SSAG	0	9	−0.227	−0.422
11	SSAG	0	10	−0.175	−0.330
12	SSAG	0	11	−0.09	−0.345
13	SSAG	0	12	0.022	−0.601
14	SSAG	0	13	0.148	−1.44

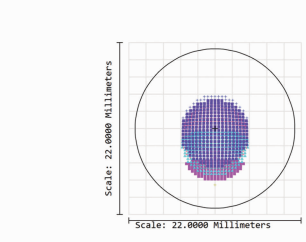
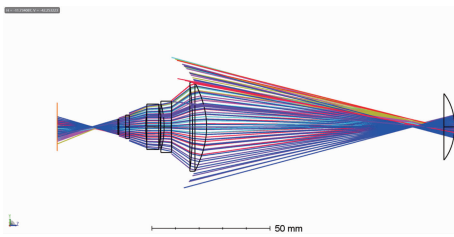
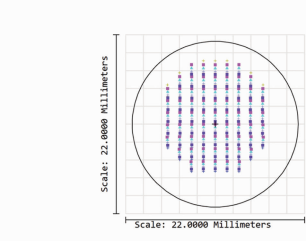
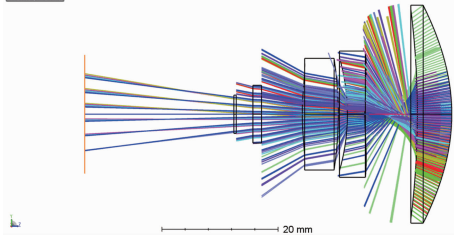
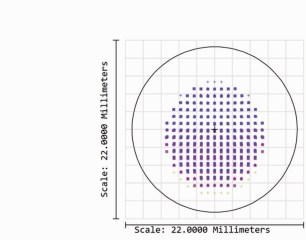
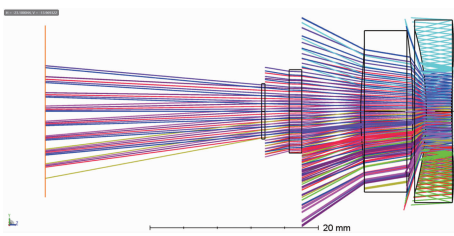
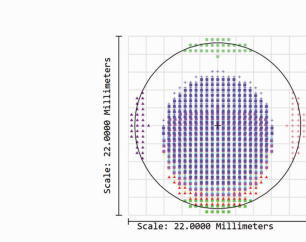
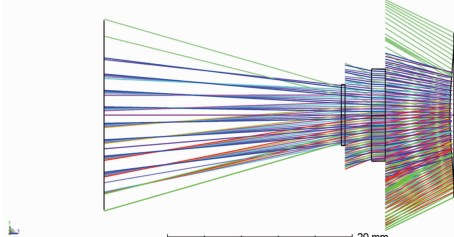
表 2 初始设计中非球面的冷反射评价值

面号	2	3	6	7	9	12
YNI	−1.01	−3.62	0.76	2.25	−1.29	−1.07
$I/IBAR$	1.89	2.3	0.31	0.97	0.55	0.45

表 3 初始设计中非球面的冷反射分布及反射光路径图

面号	冷反射在探测器像面上的分布	冷反射路径
2		
3		

续表 3 初始设计中非球面的冷反射分布及反射光路径图

面号	冷反射在探测器像面上的分布	冷反射路径
6	 Aperture Diameter: 20.4000 % rays through = 6.01%	 50 mm
7	 Aperture Diameter: 20.4000 % rays through = 1.73%	 20 mm
9	 Aperture Diameter: 20.4000 % rays through = 3.67%	 20 mm
12	 Aperture Diameter: 20.4000 % rays through = 9.17%	 20 mm

以上非球面在探测器像面的冷反射分布仿真应用了 11 个视场, X 和 Y 方向都覆盖到 ± 10.2 mm 的像面。由表 2 可知, 面 2 和面 3 的 YNI 和 $I/IBAR$ 绝对值都大于 1。由表 3 可知, 面 2 和面 3 的冷反射返回探测器像面时会产生离焦, 光线发散后覆盖了整个探测器像面, 但大部分为可滤掉的直流噪声信号, 所产生的冷像影响可以通过成像前的非均匀性校正消除。这符合 YNI 和 $I/IBAR$ 的绝对值大于 1 的特征表现。

面 7、面 9 和面 12 的 YNI 绝对值都大于 1, $I/IBAR$ 绝对值小于 1。由表 3 可知, 冷反射返回探测器像面时离焦量更大, 焦点在冷光阑以外, 大部分冷反射被冷光阑和镜片口径光阑遮挡, 少量回到探测器像面, 但无法覆盖整个探测器像面。这表明所产生的冷像噪声随着视场变化而变化, 符合 $I/IBAR$ 的绝对值小于 1 的特征表现。

面 6 的 YNI 和 $I/IBAR$ 绝对值都小于 1, 但面 6 的 YNI 绝对值大于 $I/IBAR$ 绝对值,

所以冷反射返回探测器像面时有一定程度的离焦。由表 3 可知, 虽然冷反射焦点与探测器像面有离焦, 但离焦量较小, 近轴大部分冷反射能量返回到探测器像面, 并集中在小范围内。从面 6 光迹图所显示的视场来看, 边缘视场没有能量回到探测器像面, 所以显示的视场数量变少。面 7 和面 9 的视场数量变少是同样的原因, 这从其单位面积的光线密度也可以看出来。但 $I/IBAR$ 的绝对值小于 1 决定不同视场的冷像噪声差别较大。6 面的冷反射能量分布和光迹图的表现都符合相应 YNI 和 $I/IBAR$ 参数应有的特征。

通过将各个非球面冷反射光线表现出的特性与对应面 YNI 和 $I/IBAR$ 值所定义的特性比对可知, YNI 和 $I/IBAR$ 的绝对值依然用来定性判断非球面甚至异形非球面对探测器像面冷反射的严重程度。

4 中红外光学系统优化

4.1 优化思路

相较于初始光学系统, 我们需要对异形非球面的面型轮廓进行优化, 同时控制整个红外通道的冷反射。要优化异形非球面轮廓, 需满足两个条件: 首先, 矢高符号要一致^[13-14]; 其次, 从镜片中心向边缘移动的过程中, 矢高值需单调递增或者单调递减。优化目标不是让镜片表面无限接近于球面, 而是将非球面平滑化^[15], 没有震荡面型出现。

参看 S9 不同口径下的矢高值, 序号 13 和 14 的矢高值出现了正值, 所以暂时无法确定

S9 的优化方向是凸面还是凹面。可以先将非球面 9 变为标准面, 确定其优化方向, 再定义为偶次非球面, 控制其从镜片中心向边缘移动的过程, 确定坐标矢高差值与 0 的关系。

参看 S12 不同口径下的矢高值, 从曲面中心到边缘口径的过程中, 矢高值虽然没有改变符号, 但一直处于震荡过程中。这样的面型加工后, 检测的 R_t 值也会较大(R_t 代表相对子午线绝对残余偏差的平均值, 单位为 μm), 成品率低。由 S12 中心凸面的特征可知, 优化方向也是凸面, 控制其由中心向边缘移动的过程中矢高值单调递减即可。

以上是控制异形非曲面面型轮廓的具体思路。在控制面型轮廓的同时, 结合 3.2 小节中的结论, 对各个非球面的 YNI 值和 $I/IBAR$ 值进行控制, 从而实现综合优化。

4.2 优化后的光学系统

优化后的透射式制冷型中波红外镜头的结构如图 6 所示, 非球面为 S2、S3、S5、S7、S9 和 S12。对比优化前的结构, S5 变为非球面, S6 恢复为球面。图 7 所示为优化后的红外镜头传递函数。系统后两片镜的放大图如图 8 所示。

对比图 6 与图 3 可知, 图 6 的镜片形状更加合理, 更适合加工, 边缘尺寸留出装调空间, 无明显异形曲面。参看此时 S9 和 S12 的矢高值, 如表 4 所示。S9 的矢高值在由镜片中心向边缘移动的过程中单调递增, S12 的矢高值单调递减, 非球面合理且利于加工。

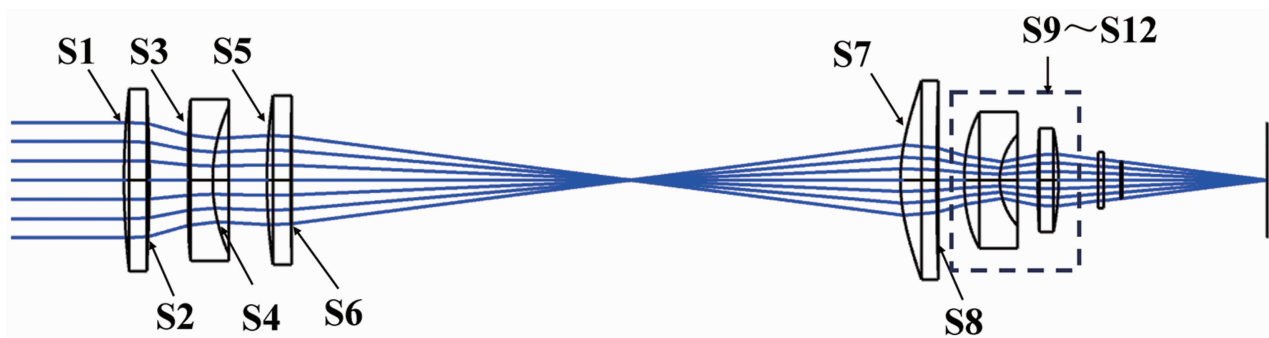


图 6 优化后的透射式中波红外成像系统的结构图

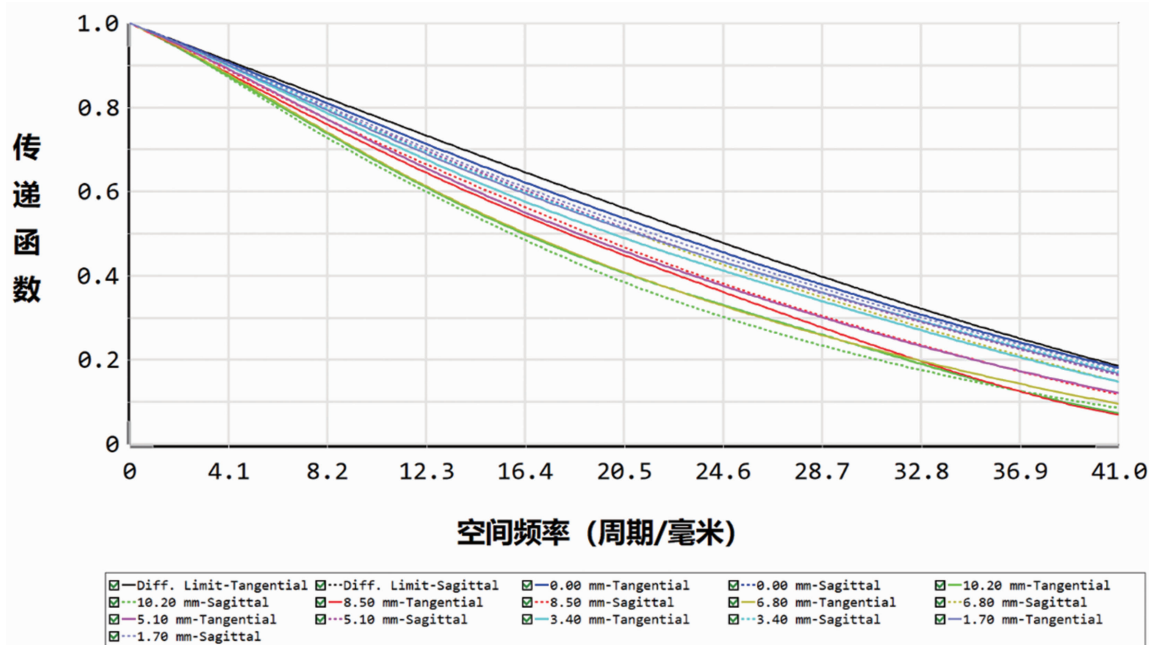


图 7 优化后的透射式中波红外成像镜头的传递函数

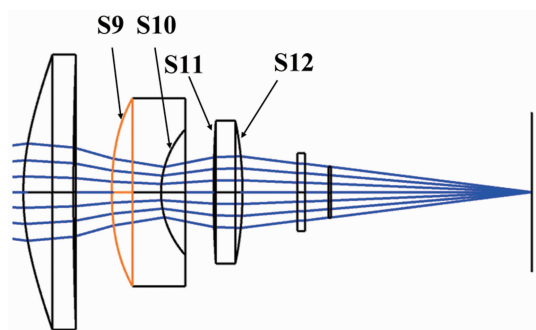


图 8 异形非球面优化后的局部放大图

表 4 异形非球面优化后的矢高值

序号	评价函数	X/mm	Y/mm	S9	S12
1	SSAG	0	0	0	0
2	SSAG	0	1	0.013	-0.011
3	SSAG	0	2	0.051	-0.045
4	SSAG	0	3	0.116	-0.101
5	SSAG	0	4	0.212	-0.178
6	SSAG	0	5	0.343	-0.277
7	SSAG	0	6	0.512	-0.397
8	SSAG	0	7	0.725	-0.539
9	SSAG	0	8	0.987	-0.706
10	SSAG	0	9	1.303	-0.903
11	SSAG	0	10	1.68	-1.139
12	SSAG	0	11	2.122	-1.425
13	SSAG	0	12	2.635	-1.771
14	SSAG	0	13	3.226	-2.181

4.3 优化后的非球面冷反射分析

表 5 列出了优化后的光学系统各个非球面的 YNI 值和 $I/IBAR$ 值。优化后的红外系统中, 6 个非球面的冷反射能量在探测器像面的分布及光迹图如表 6 所示。

表 5 优化设计中的非球面冷反射评价

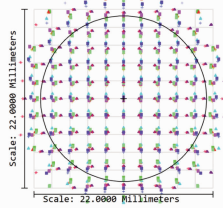
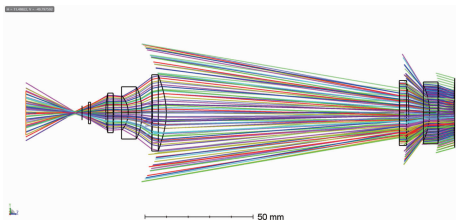
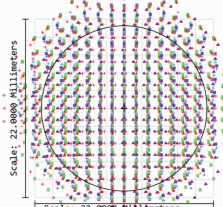
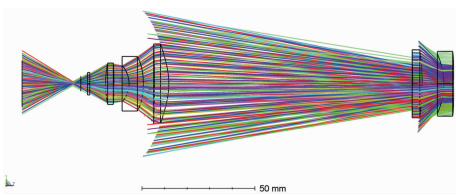
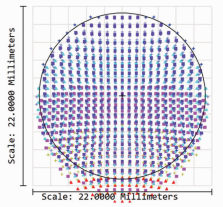
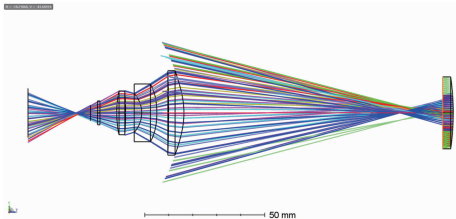
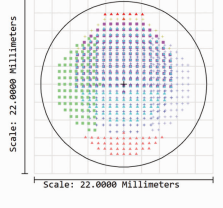
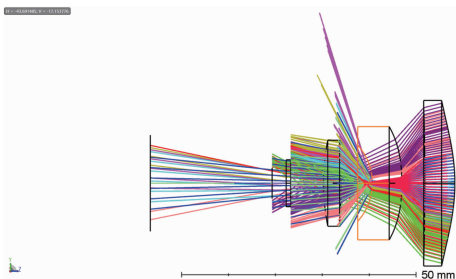
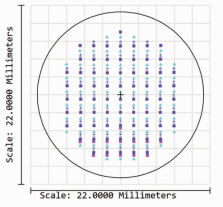
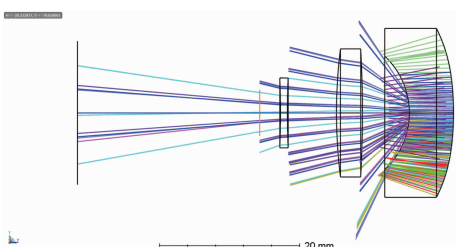
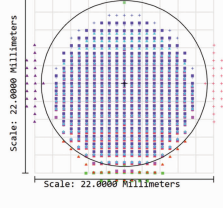
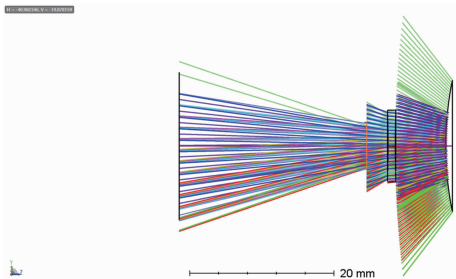
面号	2	3	5	7	9	12
YNI	-5.19	-3.72	1.81	2.35	-0.95	-1.23
$I/IBAR$	3.19	2.56	1.11	0.83	0.89	1.03

通过对初始光学结构的优化, 去掉了所有异形非球面。目前非球面结构合理, YNI 和 $I/IBAR$ 的绝对值都接近 1。也就是说, 优化后非球面的冷反射对探测器像面都属于离焦状态, 冷反射能量中的一部分被冷光阑和镜片口径光阑遮挡, 无法回到探测器内部; 另一部分通过冷光阑的光线均匀分布在整個像面。

4.4 冷反射仿真分析

使用 Tacepro 建模仿真软件对系统结构进行仿真。设置透镜单面反射率为 2%, 将探测器内部光学玻璃定义为完全透射, 并将探测器矩形像面定义为一个高温均匀辐射面, 像面尺寸为 $15.4 \text{ mm} \times 12.4 \text{ mm}$, 辐射光谱范围为 $3.7 \mu\text{m} \sim 4.8 \mu\text{m}$ 。仿真像面辐射出的光线经各

表 6 优化设计中的非球面冷反射分布及光迹图

面号	冷反射在探测器像面上的分布	冷反射路径																				
2	 Scale: 22.0000 Millimeters Scale: 22.0000 Millimeters Aperture Diameter: 20.4000 % rays through = 5.58% <table><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>10.2</td></tr><tr><td>0</td><td>7.24286</td></tr><tr><td>0</td><td>7.28571</td></tr><tr><td>0</td><td>5.82857</td></tr><tr><td>0</td><td>4.37443</td></tr><tr><td>0</td><td>2.95429</td></tr><tr><td>0</td><td>10.2</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1.7</td></tr></table>	0	0	0	10.2	0	7.24286	0	7.28571	0	5.82857	0	4.37443	0	2.95429	0	10.2	0	0	0	1.7	 50 mm
0	0																					
0	10.2																					
0	7.24286																					
0	7.28571																					
0	5.82857																					
0	4.37443																					
0	2.95429																					
0	10.2																					
0	0																					
0	1.7																					
3	 Scale: 22.0000 Millimeters Scale: 22.0000 Millimeters Aperture Diameter: 20.4000 % rays through = 11.63% <table><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>10.2</td></tr><tr><td>0</td><td>7.24286</td></tr><tr><td>0</td><td>7.28571</td></tr><tr><td>0</td><td>5.82857</td></tr><tr><td>0</td><td>4.37443</td></tr><tr><td>0</td><td>2.95429</td></tr><tr><td>0</td><td>10.2</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1.7</td></tr></table>	0	0	0	10.2	0	7.24286	0	7.28571	0	5.82857	0	4.37443	0	2.95429	0	10.2	0	0	0	1.7	 50 mm
0	0																					
0	10.2																					
0	7.24286																					
0	7.28571																					
0	5.82857																					
0	4.37443																					
0	2.95429																					
0	10.2																					
0	0																					
0	1.7																					
5	 Scale: 22.0000 Millimeters Scale: 22.0000 Millimeters Aperture Diameter: 20.4000 % rays through = 9.45% <table><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>10.2</td></tr><tr><td>0</td><td>7.24286</td></tr><tr><td>0</td><td>7.28571</td></tr><tr><td>0</td><td>5.82857</td></tr><tr><td>0</td><td>4.37443</td></tr><tr><td>0</td><td>2.95429</td></tr><tr><td>0</td><td>10.2</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1.7</td></tr></table>	0	0	0	10.2	0	7.24286	0	7.28571	0	5.82857	0	4.37443	0	2.95429	0	10.2	0	0	0	1.7	 50 mm
0	0																					
0	10.2																					
0	7.24286																					
0	7.28571																					
0	5.82857																					
0	4.37443																					
0	2.95429																					
0	10.2																					
0	0																					
0	1.7																					
7	 Scale: 22.0000 Millimeters Scale: 22.0000 Millimeters Aperture Diameter: 20.4000 % rays through = 3.41% <table><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>10.2</td></tr><tr><td>0</td><td>7.24286</td></tr><tr><td>0</td><td>7.28571</td></tr><tr><td>0</td><td>5.82857</td></tr><tr><td>0</td><td>4.37443</td></tr><tr><td>0</td><td>2.95429</td></tr><tr><td>0</td><td>10.2</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1.7</td></tr></table>	0	0	0	10.2	0	7.24286	0	7.28571	0	5.82857	0	4.37443	0	2.95429	0	10.2	0	0	0	1.7	 50 mm
0	0																					
0	10.2																					
0	7.24286																					
0	7.28571																					
0	5.82857																					
0	4.37443																					
0	2.95429																					
0	10.2																					
0	0																					
0	1.7																					
9	 Scale: 22.0000 Millimeters Scale: 22.0000 Millimeters Aperture Diameter: 20.4000 % rays through = 0.54% <table><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>10.2</td></tr><tr><td>0</td><td>7.24286</td></tr><tr><td>0</td><td>7.28571</td></tr><tr><td>0</td><td>5.82857</td></tr><tr><td>0</td><td>4.37443</td></tr><tr><td>0</td><td>2.95429</td></tr><tr><td>0</td><td>10.2</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1.7</td></tr></table>	0	0	0	10.2	0	7.24286	0	7.28571	0	5.82857	0	4.37443	0	2.95429	0	10.2	0	0	0	1.7	 20 mm
0	0																					
0	10.2																					
0	7.24286																					
0	7.28571																					
0	5.82857																					
0	4.37443																					
0	2.95429																					
0	10.2																					
0	0																					
0	1.7																					
12	 Scale: 22.0000 Millimeters Scale: 22.0000 Millimeters Aperture Diameter: 20.4000 % rays through = 7.77% <table><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>10.2</td></tr><tr><td>0</td><td>7.24286</td></tr><tr><td>0</td><td>7.28571</td></tr><tr><td>0</td><td>5.82857</td></tr><tr><td>0</td><td>4.37443</td></tr><tr><td>0</td><td>2.95429</td></tr><tr><td>0</td><td>10.2</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1.7</td></tr></table>	0	0	0	10.2	0	7.24286	0	7.28571	0	5.82857	0	4.37443	0	2.95429	0	10.2	0	0	0	1.7	 20 mm
0	0																					
0	10.2																					
0	7.24286																					
0	7.28571																					
0	5.82857																					
0	4.37443																					
0	2.95429																					
0	10.2																					
0	0																					
0	1.7																					

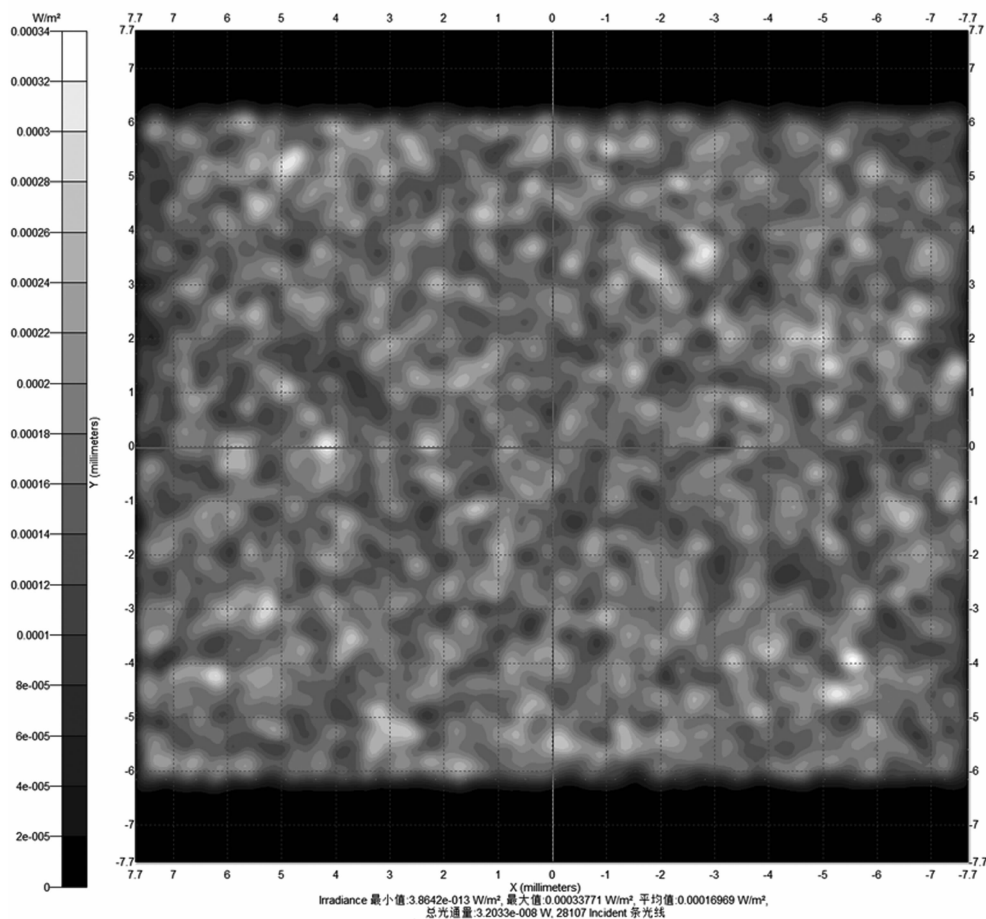


图 9 冷反射在探测器像面上的仿真能量分布图

透镜表面反射回到探测像面后的能量分布如图 9 所示。能量曲线如图 10 所示。图 9 中的横坐标表示探测器像面的长边尺寸，纵坐标表示探测器像面的短边尺寸。图 10 表示经过探测器像面中心且平行于长边的一条线内的能量起伏状态。

通过以上仿真可以看出，从探测器发出的光线经所有透镜表面的反射后再次回到探测器像面，能量分布均匀，没有能量峰值。系统冷反射抑制合理。结合成像前的探测器均匀化校正^[16]，冷反射不会对成像产生影响。

5 结束语

本文先结合公式分析了 YNI 和 $I/IBAR$ 的物理意义，并提出了增大 YNI 绝对值和控制 $I/IBAR$ 绝对值的技术方案。针对一款存在异形偶次非球面的中波红外透射成像镜头，检验了其异形偶次非球面的矢高。将各个偶次非

球面冷反射在探测器像面的分布和光迹图，比对相应 YNI 和 $I/IBAR$ 两个冷反射评价参数值应有的特征表现。结果表明，当前 YNI 和 $I/IBAR$ 两个冷反射评价参数依然适用于判断规则偶次非球面及异形偶次非球面的冷反射严重程度。

利用 Zemax 设计软件对存在异形的非球面的矢高进行优化，使某一面的矢高的符号一致并拥有单调递增或单调递减的曲面轮廓，同时控制系统中非球面的 YNI 和 $I/IBAR$ 两个冷反射评价参数值，探索了在红外光学设计时对异形非球面的优化控制方案。优化后的光学结构中，消除了异形非球面，各非球面的冷反射评价参数的绝对值都趋近于 1。通过 Tracepro 软件仿真各个透镜表面的冷反射对探测器像面的综合影响。结果表明，冷反射能量均匀覆盖探测器像面，无明显峰值，系统冷发射从光学设计角度得到了抑制。基于以上结论，

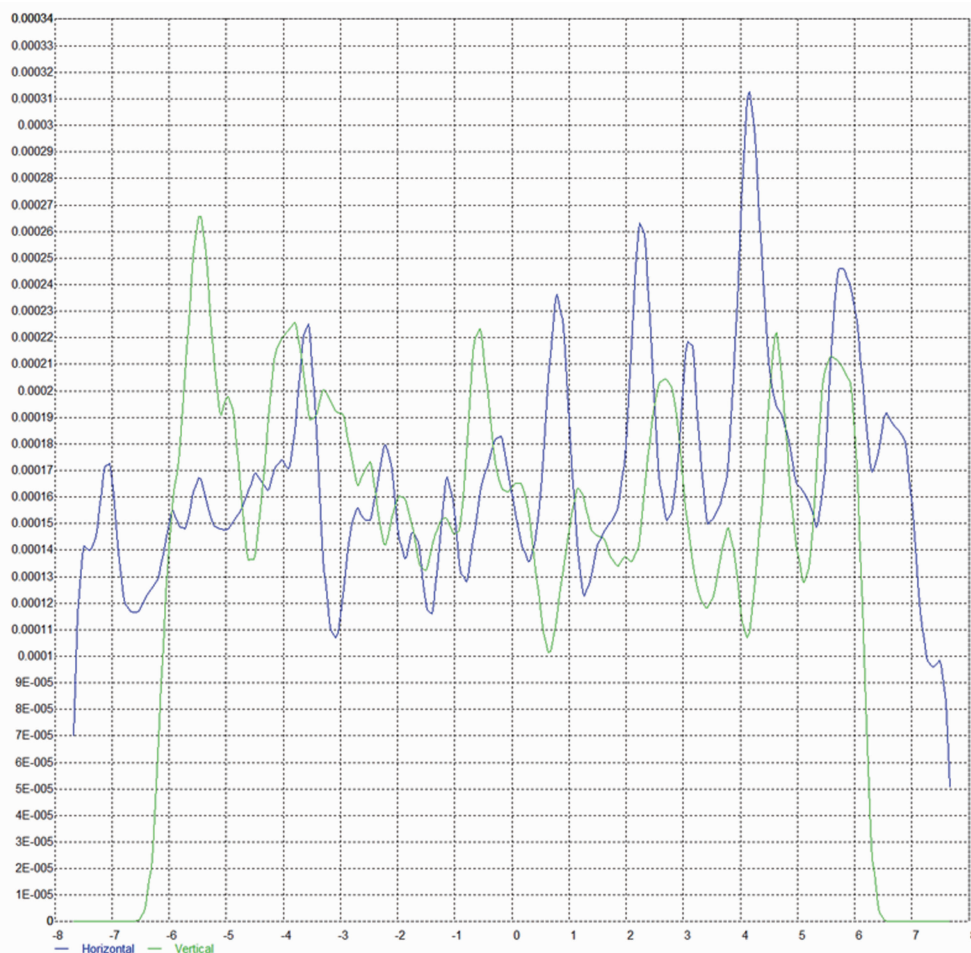


图 10 冷反射在探测器像面的仿真能量曲线图

在连续变焦镜头中异形非球面带来的具体影响是接下来研究的侧重点。

参考文献

- [1] 刘锦琳, 余飞鸿. 旋转对称非球面表述及其特点分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, **58** (9): 0922001.
- [2] 刘洋, 安晓强, 王茜, 等. 基于光学离焦量的致冷型长波变焦红外成像系统冷反射效应的分析与控制 [J]. 光学学报, 2012, **32**(4): 042203.
- [3] 陈锐, 谈新权. 红外图像非均匀性校正方法综述 [J]. 红外技术, 2002, **24**(1): 1-3.
- [4] 代少升, 袁祥辉. 红外图像非均匀性实时校正的新技术 [J]. 光学精密工程, 2004, **12**(2): 201-204.
- [5] 刘欣, 潘枝峰. 红外光学系统冷反射分析和定量计算方法 [J]. 红外与激光工程, 2012, **41** (7): 1684-1688.
- [6] 栾亚东. 红外扫描成像系统中冷反射的光学抑制 [J]. 红外与激光工程, 2006, **35**(S2): 26-30.
- [7] 周凤利, 李辛, 董续勇, 等. 卡塞格林红外光学系统装调技术研究 [J]. 光电工程, 2011, **38** (7): 141-144.
- [8] 沙定国, 全书学, 朱秋东, 等. 光学非球面度的定义及其准确计算 [J]. 光子学报, 1995, **24** (1): 91-95.
- [9] 师途, 杨甬英, 张磊, 等. 非球面光学元件的面形检测技术 [J]. 中国光学, 2014, **7**(1): 26-46.
- [10] 牛金星, 周仁魁, 刘朝晖, 等. 红外探测系统自身热辐射杂散光的分析 [J]. 光学学报, 2010, **30**(8): 2267-2271.
- [11] 姚秀文, 肖静, 曾曙光, 等. 红外光学系统自身杂散辐射分析及抑制 [J]. 激光与光电子学进展, 2009, **59**(12): 91-94.

- [12] 梁子健, 杨甬英, 赵宏洋, 等. 非球面光学元件面型检测技术研究进展与最新应用 [J]. **中国光学**, 2022, **15**(2): 161–185.
- [13] 袁方, 谭庆贵, 王光耀, 等. 基于液晶偏振光栅的快速大角度光束偏转 [J]. **液晶与显示**, 2022, **37**(11): 1411–1419.
- [14] 刘东, 杨甬英, 田超, 等. 用于非球面通用化检测的部分零位透镜 [J]. **红外与激光工程**, 2009, **38**(2): 322–325.
- [15] 于清华, 王敬, 龚学艺, 等. 补偿器设计中鬼像定量仿真分析 [J]. **光电工程**, 2012, **39**(11): 130–133.
- [16] 张葆, 洪永丰, 史光辉. 非均匀性校正红外杂散辐射抑制中的应用 [J]. **光学精密工程**, 2008, **16**(12): 2421–2428.