

文章编号: 1002-2082(2009)06-0958-06

# ASAP 模拟变焦系统中鬼像的研究

方 丽, 林 峰, 邱怡申

(福建师范大学 物理与光电信息科技学院, 光子技术福建省重点实验室, 福建 福州 350007)

**摘 要:** 非成像光束在光学系统内表面的多次折射反射容易在像面附近形成光晕或鬼像, 变焦系统由于镜片多, 机构复杂等往往难以进行全面的分析模拟。利用 ASAP 软件模拟每个透射面作为部分透射、部分反射的表面, 对变焦光学系统非轴上光进行分析, 模拟出变焦系统的光学元件表面和光机内壁, 实行实际光线追迹, 然后以像面为研究对象, 进一步实施实际光线追迹, 模拟出全部散射光在像面上的能量分布, 找出鬼像形成的原因, 并在此基础上通过改变二次反射所在面的曲率或改变所在面的折射率两种方法对变焦光学系统进行优化, 减小鬼点数目, 以提高系统的成像质量。

**关键词:** 鬼像; 变焦系统; ASAP; 光线追迹; 模拟

**中图分类号:** O435; TB851

**文献标志码:** A

## Simulation of ghost images in zoom system by ASAP

FANG Li, LIN Feng, QIU Yi-shen

(Fujian Provincial Key Lab of Photonic Technology, School of Physics and Optoelectronics Technology, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

**Abstract:** The stray light which is generated by the residual multi-reflection on the surfaces in optical system easily forms ghost images near the image plane and they influence the acuity and contrast gradient of images, decrease the resolution of lens, and disturb the target discrimination. It is difficult to be simulated and analyzed due to the excessive surfaces, complex structure and locomotory parts in zoom lens. All the transmission planes taken as the partial reflection and partial transmission planes were simulated with ASAP (advanced system analysis program) and the stray rays on “dangerous surfaces” which easily generate the ghost images in zoom lens were analyzed. Based on it, the zoom lens was optimized and the quality of image was improved by changing the curvature and refractive index of the second reflection planes.

**Key words:** ghost image; zoom system; ASAP; ray tracing; simulation

## 引言

杂散光是光学系统中非正常传输光的总称, 主要是由组成系统的光学元件、机械零件的反射和散射而产生。这些杂散光传播回到另一个元件表面, 最后传播到像平面上, 反射的顶点在像平面上时就形成了鬼像, 即鬼像是杂散光的另外一种表现。另外, 红外光学系统还有因系统自身热辐射产生的杂散光<sup>[1]</sup>。

对于成像光学系统, 杂散光会增加像面上的噪声, 降低像面的对比度和调制传递函数, 使整个像面的层次减少, 清晰度变坏, 严重时杂散辐射噪声可能完全淹没目标信号<sup>[2]</sup>。对于变焦成像系统来说, 由于面数较多、结构较为复杂, 更易在像面附近形成光晕或鬼像, 从而影响成像的锐度和对比度, 降低了镜头的分辨率, 干扰目标的识别。另外, 在一些强激光光学系统中, 如果不全面分析系统的杂散

收稿日期: 2009-03-15; 修回日期: 2009-05-07

作者简介: 方丽(1980—), 女, 福建福清人, 硕士研究生, 主要从事光学设计方面的研究。E-mail: lfang0705@126.com

光和鬼像,那么鬼像点带来的强大能量可能会损毁元件,造成损伤<sup>[3-5]</sup>。因此利用计算机来模拟、分析初步设计方案,依据分析结果修改光学元件参数可以大大减少设计时间,降低设计费用,具有实际应用意义。

鬼像仿真的关键问题是模拟出物理属性与现实情况相接近的物体表面状态和光源。目前,很多光学设计软件和分析软件都有鬼像分析功能,常用杂散光分析软件目前国内外广泛使用的有ZEMAX、TracePro、OptiCAD、ASAP等。本文采用的仿真软件是BRO(breault research organization)公司的一个功能强大的光学分析软件ASAPTM(advanced systems analysis program)。由于ASAP是一套综合的光学分析和杂光分析软件包,是利用MonteCarlo法进行光线追迹计算,该软件的杂散光分析计算功能非常强大:可以通过建立三维光机模型,指定散射模型来计算各面的散射光。该软件内置非常全面的BRDF数据库,通过内置的BRDF数据库可以指定各分析面的散射特性,有能力产生反应真实光线在真实世界里的路径的散射模型及接近实际的扩展光源模型<sup>[6]</sup>。故在理论上,采用该软件进行变焦系统的鬼像模拟是可行的。此外,ASAP还可以计算各阶鬼像杂散光、各种衍射杂散光和红外系统的自身热辐射。

## 1 模拟原理

从理论上来说,光线的多次反射和折射在光学系统中的任一表面都会发生,2个面之间每发生1次往返的反射即可形成1次鬼像。通常光学系统由于考虑到价格和技术等问题一般镀单层膜,以可见光为例,镀膜后单面反射率约为0.01,经过2次反射,反射光线的能量约为原能量的1/10 000<sup>[7]</sup>。因此我们在对变焦光学系统进行研究时,一般只考虑2次反射引起的鬼像影响。故对于光学镜头我们仅仅只需模拟每个透射面作为部分透射、部分反射的表面,且透射率为0.99,反射率为0.01。

在ASAP中有大量Isotropic Scatter Models和Anisotropic Scatter Models。其中Polynomial/Trinomial/Binomial散射模型由下列公式定义<sup>[6]</sup>:

Polynomial 模型:

$$\log(bsdf) = \sum_{k=0}^n \left\{ \sum_{i=0}^{m[-k]} \sum_{j=0}^i c_{ijk} (U^i W^j + U^j W^i) + \sum_{i=l'}^l c_{ik} \log(1 + d^i T) \right\} \frac{V^k}{2}$$

Trinomial 模型:

$$\log(bsdf) = \sum_{k=0}^n \left\{ \sum_{i=0}^{m[-k]} \sum_{j=0}^i c_{ijk} (U^i - j V^j + \frac{1}{2} \sum_{i=l'}^l c_{ik} \log(1 + d^i T)) \right\} W^k$$

Binomial 模型:

$$\log(bsdf) = \sum_{k=0}^n \left\{ \sum_{i=0}^{m[-k]} \sum_{j=0}^i c_{ijk} T^{\frac{i}{2}} + \frac{1}{2} \sum_{i=l'}^l c_{ik} \log(1 + d^i T) \right\} V^k$$

式中:  $m, n, l, l'$  是总项数;  $d$  是系数的对数;  $c, c', c'' \dots$  是适合的多项式系数。此模型可以用于模拟类似弥散黑色漆的材料。

下图是Aeroglaze Z306材料的  $\log(bsdf)$  versus  $\log(\beta - \beta_0)$  图。

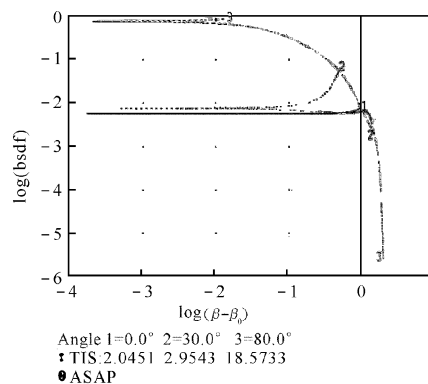


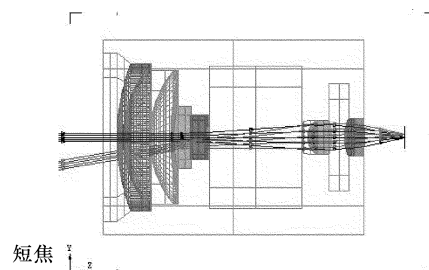
图1 Aeroglaze 漆的多项式模型

Fig. 1 Polynomial model of Aeroglaze paint

对于光机的内壁,由于一般采用发黑铝,具有漫反射的物理属性,与上面材料相似,故我们选用Polynomial/Trinomial/Binomial模型中的Polynomial来模拟发黑铝表面。

## 2 变焦系统实例分析

图2是一个变焦系统,具有10片透镜,其中9片是球面透镜,1片为非球面透镜。以该系统为例,利用ASAP软件对其进行分析。在成像系统中,杂散光的成因有很多,本文主要从2个方面考虑,具体如下。



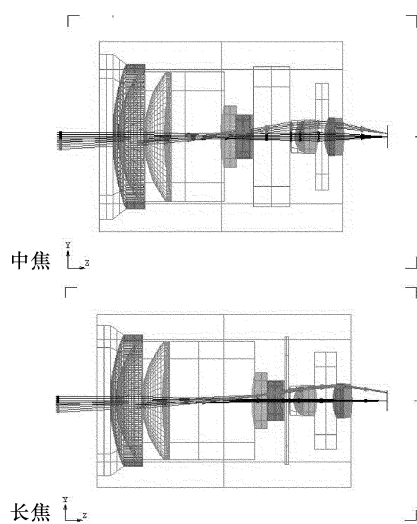


图2 变焦系统

Fig. 2 Zoom system

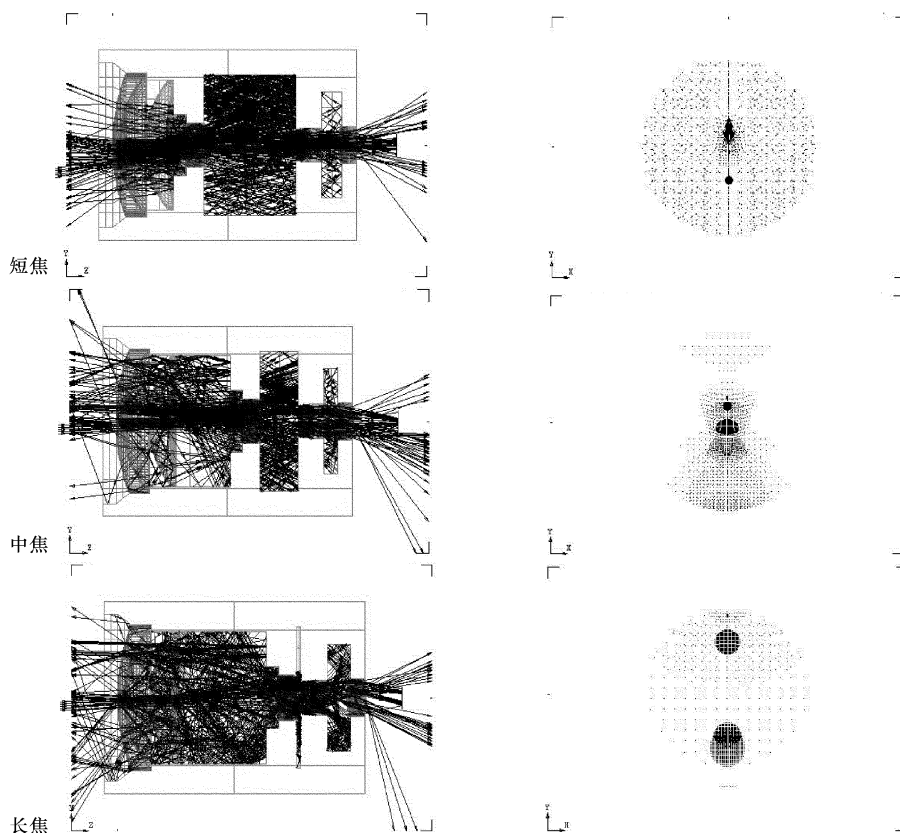


图3 变焦系统的鬼像模拟和点列图

Fig. 3 Simulation of ghost images and spot diagrams of zoom system

在光线历史报表中 Rays 是指路径中的光线数, SumTOTA 是指路径总的光通量, Hits 是指路径中光线与物体的接触次数, Split/Scatter 是指多余反射次数及产生反射的物体数。从结果可以看出路径 1 为正常折射路径, 剩余为各面反射产生的对像面的可疑路径, 对于成像光学系统主要研究像面

## 2.1 视场内散射光

### 2.1.1 建模及光线追迹分析

由于轴上光线产生的杂散光最后在像面上形成光晕, 故我们主要对非轴上光进行研究。如上所述, 模拟出变焦系统的光学元件表面和光机内壁, 进行实际光线追迹, 如图 3 所示。

上图分布为光线追迹图和像面光线的点阵图。ASAP 有能力去完成 1 次高级的光线追迹, 这种光线追迹可以清晰地追踪系统中所有光线的路径, 分析结果如图 4 所示。图 4 中显示了图 3 中变焦系统的光线路径的列表部分数据。光线历史报表是一个对所有光线的完整报告, 记载了有多少光线以这条光路发射, 他们怎样到达最终的实体(在这个事例中是焦平面)以及他们穿过了多少表面(事件计数)。

上的能量分布, 所以我们将像面隔离出来。故以像面为研究对象, 进一步进行实际光线追迹, 模拟出全部散射光在像面上的能量分布图, 如图 5 所示。

从图 5 可以看到变焦系统中出现的几个鬼像及位置能量大小, 而在光线历史报表中可以找出对像面影响最大的路径, 进而找出影响最大的反射

面,如短焦,源于第23个物体(即第15个面)与第16个物体(即第10个面之间)的反射;中焦,源于第6个物体(即第4个面)和第一个物体(即第1个面)之间的反射;长焦,源于第6个物体(即第4个面)和第一个物体(即第1个面)之间的反射。

Path	Ray	Surf	Hit	Cur	Prev	Split/Scatter	...
1	476 6.43E-03	0.27	-22	33	30	0.000	0.000
2	476 1.10E-03	0.17	-22	33	30	18.100	19.100
3	468 1.45E-03	0.24	-22	33	30	19.100	20.100
4	277 2.13E-03	0.13	-22	33	30	2.100	9.100
5	298 5.87E-04	0.00	-28	33	30	18.100	23.100
6	292 5.43E-04	0.00	-28	33	30	18.100	23.100
7	2 1.43E-05	0.00	-28	33	30	2.100	9.100
8	117 5.61E-04	0.00	-26	33	30	4.100	9.100
9	283 1.75E-03	0.26	-26	33	30	1.100	6.100
10	170 8.91E-04	0.13	-22	33	30	16.100	18.100
11	178 8.80E-04	0.12	-24	33	30	16.100	19.100
12	158 1.21E-03	0.00	-28	33	30	19.100	23.100
13	53 1.24E-04	0.02	-24	33	30	1.100	13.100
14	158 1.21E-03	0.00	-28	33	30	19.100	23.100
15	158 2.74E-04	0.04	-26	33	30	18.100	30.100
16	158 1.21E-03	0.02	-24	33	30	19.100	23.100
17	157 2.71E-04	0.04	-28	33	30	21.100	30.100
18	118 4.10E-04	0.06	-28	33	30	19.100	27.100
19	118 3.77E-04	0.06	-32	33	30	18.100	27.100
20	1 6.00E-05	0.00	-21	33	30	7.100	9.100
21	2 8.31E-06	0.00	-22	33	30	9.100	13.100
22	158 9.48E-05	0.01	-18	33	30	1.100	13.100
23	2 1.56E-05	0.00	-24	33	30	1.100	6.100
24	51 2.30E-04	0.00	-26	33	30	22.100	27.100
25	1 1.43E-05	0.00	-26	33	30	7.100	13.100
26	59 1.42E-04	0.02	-28	33	30	23.100	30.100
27	57 2.74E-05	0.01	-34	33	30	13.100	23.100

短焦

中焦

长焦

但我们知道如果对透镜表面镀上多层膜,可以使该面的反射率降为0.002 5。所以我们可以选择对重点面即第4个面和第15个面镀上多层膜,以降低反射率,效果如图6所示。

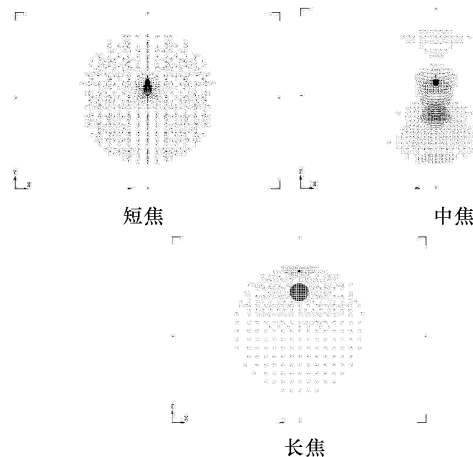


图6 优化后的点列图

Fig. 6 Spot diagrams after optimization

上图可以看出这种方法效果明显简单,但会提高产品的加工成本,这时我们可以通过选择改变2次反射所在面的曲率或改变所在面的折射率进行优化,接下来我们分别采用改变透镜的几何形状和材料折射率,找出哪种方法更易于优化结构。

为了更容易的找出对第4个面和第15个面进行优化的方法,我们再对这3条光线进行具体的实际光线追迹分析,结果如图7所示。

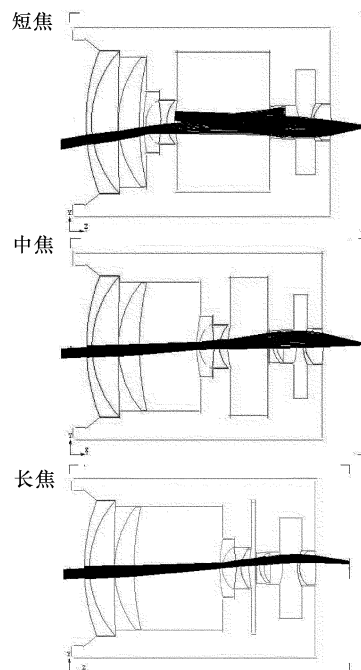


图7 路径的光线追迹

Fig. 7 Ray tracing for path

图4 PATH命令的输出结果

Fig. 4 Output window generated by path command

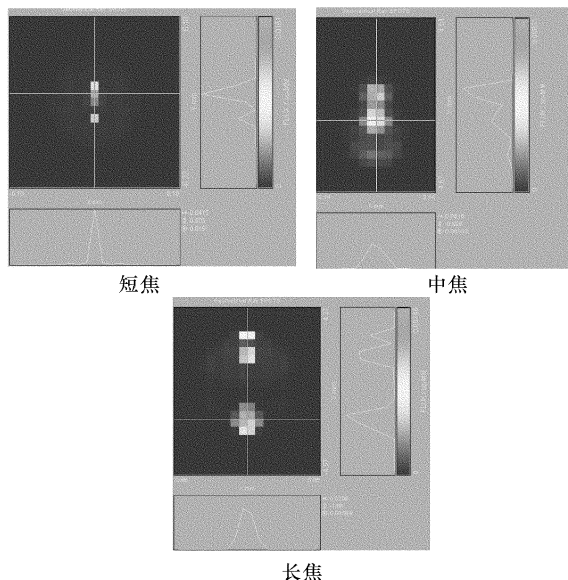


图5 能量分布图

Fig. 5 Energy distribution

### 2.1.2 优化

从上面可以看出第15个面和第4个面对鬼像的贡献最大,故主要通过改变这2个面来减少鬼像的影响。众所周知,减少鬼像对像面的影响可以通过对几个产生鬼像的面进一步降低反射率来实现。现在国内透镜镜面都已镀有减反膜,由于价格和加工技术等原因,大多数透镜表面都只镀单层膜,

由上图我们得到可以通过减小第15个面的曲率和第4个面的曲率或增大它们的折射率,从而尽量保持这些非正常光线的成像走向,再对2种方法像面的能量分布进行分析对比,得到以下结果。

1) 对所在面的镜片做整体弯曲结果,如图8(a)所示。2) 改变所在面的折射率,结果如图8(b)所示。

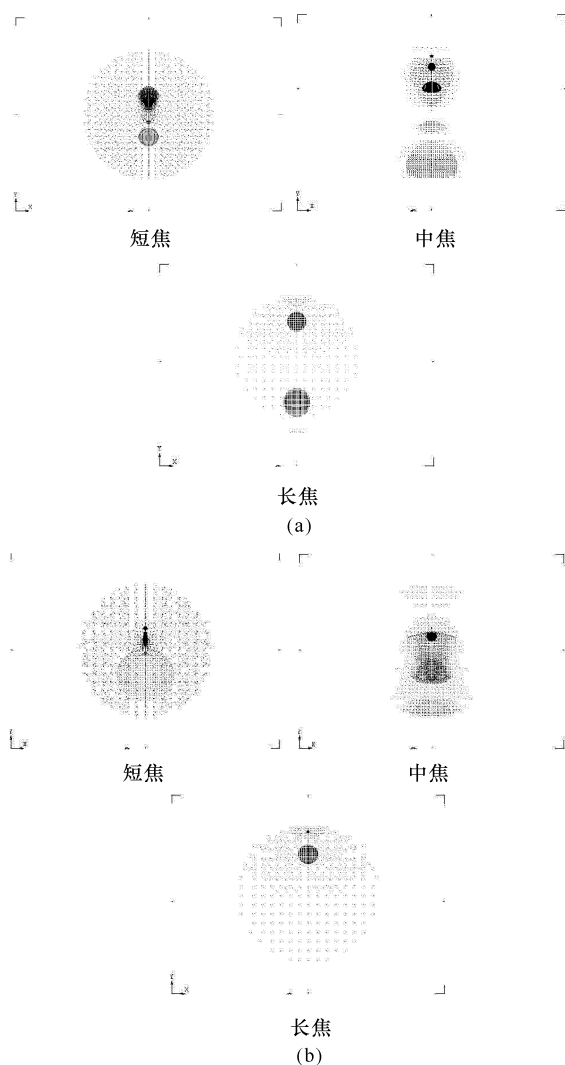


图8 优化后的点列图

Fig. 8 Spot diagrams after optimization

对优化前后的像面点列图相比较;可以看到2种方法都消除了部分鬼像对像面的影响。但同时也可以看出采用不同的方法效果也不同。相对来说改变2次反射所在面的曲率的方法更灵活,效果也更加明显。为了能更清晰的看出通过改变2次反射所在面的曲率的效果,对鬼像的能量分布进行分析,结果如图9所示。

从图9可以看出,效果相当明显,所以最后我们采用对所在面的镜片做整体弯曲处理的方法对

结构进行优化。

State flux	优化前	优化后
短焦	7E-2sq/mm	1.8E-3sq/mm
中焦	1.3E-3sq/mm	7E-4sq/mm
长焦	6.1E-3sq/mm	1.4E-4sq/mm

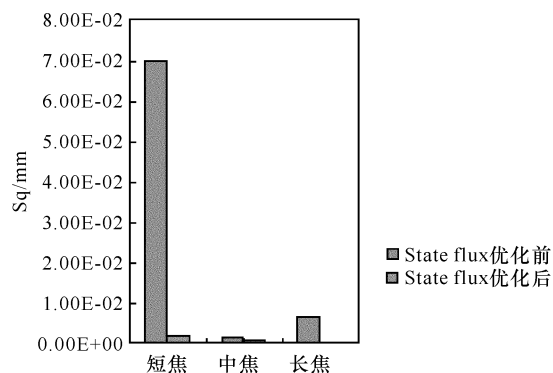


图9 优化前后能量比较

Fig. 9 Comparison of energy before and after optimization

对于系统中产生的其他阶鬼像点,可用同样的方法,找出它们的位置、能量大小及产生的原因,并进行优化。但是也可以看出通过这种方法消除这种鬼像,不可避免地会伴有渐晕现象,会影响最后的成像质量,所以在实际应用中还应当再进行镜头的几何像差的优化,直到最后达到降低鬼像的影响和成像质量之间的平衡。

## 2.2 视场外散射光

当杂散光源,比如太阳在拍摄视场附近时,视场以外的光线能够进入光学系统内部,直接照射到光学系统产生单次散射光。部分散射光线经过光学

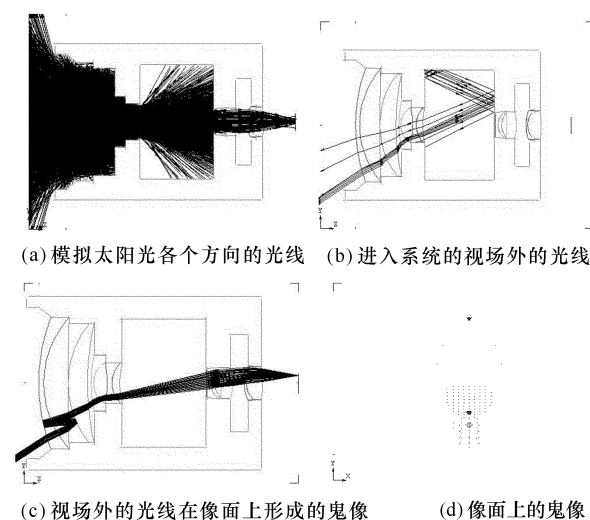


图10 视场外的光线在系统形成的鬼像

Fig. 10 Ray out of FOV can form ghost images in system

系统之后会照射到焦平面形成鬼像。例如,我们模拟太阳光源,看在变焦系统内如何形成鬼像,结果如图 10 所示。

从上面的分析可以看出,视场外的光线也能在该变焦系统内产生鬼像。对于视场外的光线产生的鬼像,我们一般设计相应的遮光罩进行拦光,现在我们可以以上面的结果为依据进行遮光罩的设计,使视场外的光线不能照射到系统上,从而达到消除鬼像的目的。

### 3 结论

变焦镜头作为一种较为复杂的光学系统,由于镜片数量较多,机械结构复杂,并存在运动部件,其杂散光及鬼像分析手段较为匮乏。但通过 ASAP 的光线仿真分析可以为这些部件的结构调整提出详尽的数据和直观的图像参考,这也为通过修改有关透镜的几何参数、材料等对不合理的光路设计进行修正,或为系统引入消杂光结构如遮光罩、表面涂层等手段做出有益的预判。通过 ASAP 的模拟分析比较,我们发现改变 2 次反射所在面的曲率及对关键面加镀宽带多层减反膜等措施是消除或改善变焦镜头鬼像的较为有效的方法。所以用 ASAP 软件进行变焦系统的鬼像模拟分析,对于降低产品成本,达到较高的成像效果有一定的指导意义。

#### 参考文献:

- [1] XI Xiao, LI Xiao-tong, CEN Zhao-feng. Influence of thermal radiations in infrared optical systems [J]. SPIE, 2005, 5638: 362-367.
- [2] 郝云彩, 肖淑琴, 王丽霞. 星载光学传感器消杂光技术

现状与发展[J]. 中国空间科学技术, 1995(3): 40-50.  
HAO Yun-cai, XIAO Shu-qin, WANG Li-xia. Status and development of stray light elimination technology for space-borne optical sensors [J]. Chinese Space Science and Technology, 1995(3): 40-50. (in Chinese with an English abstract)

- [3] HE Zhi-ping, CEN Zhao-feng, LI Xiao-tong, et al. Stray light analysis and calculation modeling of optical system[J]. ISIST, 2002(2): 408-411.
- [4] 庄大奎, 林尊琪, 管小鹏, 等. 神光 II 高功率激光系统中鬼像的计算与分析[J]. 光学学报, 2002, 22(5): 582-585.  
ZHUANG Da-kui, LIN Zhun-qi, GUAN Xiao-peng, et al. Analysis and calculation for the ghost in SHENGUANG II high power laser system[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(5): 582-585. (in Chinese with an English abstract)
- [5] 谭吉春, 景峰, 朱启华, 等. 多通放大器腔内杂散光[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(2): 159-163.  
TAN Ji-chun, JING Feng, ZHU Qi-hua, et al. Stray light inside multi-pass laser cavity of the SG-II prototype module[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2000, 12(2): 159-163. (in Chinese with an English abstract)
- [6] Breault Research Organization, Inc. ASAP Technical Guide, Scattering [R]. Breault Research Organization, Inc, 2004.
- [7] 耿安兵. 光学系统的鬼像分析及快速计算方法[J]. 舰船光学, 2004, 40(4): 34-36.  
GEMG An-bing. Analysis and calculation for the ghost in optical system[J]. Ship Optical, 2004, 40(4): 34-36. (in Chinese with an English abstract)