

基于 Code V 和 Tracepro 的成像光学系统一阶鬼像分析方法

梅 超^{1,2} 周泗忠¹ 张恒金¹ 段 晶¹ 姜 凯^{1,2}

(¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 在光学设计时应尽量避免鬼像的产生,所以快速、准确地进行鬼像分析就显得尤为重要。提出利用 Code V 和 Tracepro 软件对光学系统中的鬼像进行仿真分析,用 Code V 确定会产生严重鬼像的光学工作面;将光学系统在 Tracepro 中建模,在物面取不同的位置设为点光源,分别对每个点光源进行分析。分析时可利用表面属性设置限制产生鬼像的工作面,并利用阈值设置限制鬼像的阶数,最终获取一阶鬼像相对位置,以及其和正常像之间的能量大小、分布关系。

关键词 光学设计;鬼像;仿真;成像;能量分布

中图分类号 TN214 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0411003

Method of First-Order Ghost-Image Analysis in Imaging System Based on Code V and Tracepro

Mei Chao^{1,2} Zhou Sizhong¹ Zhang Hengjin¹ Duan Jing¹ Jiang Kai^{1,2}

(¹ Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract During optical designing, ghost images of optical system should be avoided, so fast and precise analysis of ghost images appears to be very important. The way of first-order ghost-image analysis of imaging system based on Code V and Tracepro is proposed. The surfaces which can cause serious ghost image are found out. The optical system model is established in Tracepro. The image is separated into several parts. Different parts are set as different spot sources, then, the spot sources are analyzed one by one. During analysis, the order of the ghost is controlled by threshold and ghost-surface is controlled by the surface property. Through analysis, the position of ghost image, and power distribution of ghost image can be obtained.

Key words optical design; ghost image; simulation; imaging; energy distribution

OCIS codes 290.2745; 220.4830; 110.4280

1 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的。鬼像是杂散光的一种,是由成真实像的光线被光学工作面反射后在像面会聚产生的,所以鬼像按照其与真实像之间的成像关系分为正鬼像

和负鬼像。鬼像都是正常光线在工作表面经过偶数次反射产生的,所以按照光线在光路中反射次数,可以分为一阶鬼像、二阶鬼像和高阶鬼像。

对于成像光学系统,鬼像会增加像面上的噪声,降低像面的对比度和光学系统的光学传递函数,严重时会在像面形成明显的鬼像图案,从而干扰目标

收稿日期: 2012-10-22; **收到修改稿日期**: 2012-12-11

作者简介: 梅 超(1987—),男,博士研究生,主要从事光学系统杂散光分析与抑制等方面的研究。

E-mail: s09026@opt.cn

导师简介: 周泗忠(1953—),男,博士,研究员,主要从事光电跟踪方面的研究。E-mail: szh@opt.ac.cn

识别。另外在一些强激光光学系统中,鬼像点带来的强大能量,可能会损伤光路中的元件。因此,对光学系统进行精确地鬼像分析具有重要的工程应用价值^[3~5]。

通常 Zemax 和 Code V 等光学设计软件自身有鬼像分析功能,但其采用的都是近轴光线分析,分析速度虽快,但采样光线数量少,结果不能直观的显示目标图像和鬼像之间的关系^[6,7]。

Tracepro 和 ASAP 是基于蒙特卡罗 (Monte-Carlo) 光线追迹方法的光学分析软件,可以通过光线追迹获取像面目标(强光源)和鬼像的相对照度以及分布情况。但是通常成像系统具有多个光学表面,对于一阶鬼像进行逐一建模分析会比较繁琐,费时费力^[8~10]。本文利用 Code V 和 Tracepro 数据分析软件的优点,可快速、直观和准确地得到轴上、轴外物点的鬼像结果。

2 分析方法

1) 将设计好的光学系统在 Code V 中进行鬼像分析,找出会造成严重鬼像的光学表面,即 DISC 项较小时对应的光学表面(DISC 项表示鬼像在像面的弥散斑半径)。对于 DISC 较大的面,先不予考虑,因为这些光学表面产生的鬼像在像面的照度相对较低。通过 Code V 的筛选,可以减少 Tracepro 中分析的数据量^[11]。

2) 根据实际设计设置反射面的透射率 T 和反射率 R ,吸收率 A 为设计时的吸收率和散射率之和,其余表面设反射率为 0,透射率为设计时的透射率,吸收率为设计时的吸收率、反射率和散射率之和。这样可消除随机散射和其他表面反射杂散光的影响。

3) 通过阈值设置限定光线折反次数、最低能量、散射次数,从而控制鬼像的阶数。为了消除散射影响,散射次数设为 0。这里主要设置折反次数和最低能量。通常设置的阈值大小为

$$T_h = T \times (T_1 \cdots T_s)^2 \times R_1 \cdots R_n \times \Phi, \quad (1)$$

式中 T 为系统对目标成真实像的透射率, Φ 为单一光线能量,通常设置为 1,所以有

$$T_h = T \times (T_1 \cdots T_s)^2 \times R_1 \cdots R_n, \quad (2)$$

式中 s 为鬼像路径相对于真实像路径所增加的透射面数量, n 产生鬼像的工作面数量,通常为偶数,对于一阶鬼像为 2, $T_1 \cdots T_s$ 为其对应表面的透射率, $R_1 \cdots R_n$ 为其对应表面的反射率。

折反次数 M 为

$$M = N + n + s, \quad (3)$$

式中 N 为正常情况时光线的折反次数。

4) 将强光源或目标作为点光源处理,在物面上选取离散的点设置为光源,通过光源的移动模拟目标运动,然后进行仿真分析获取结果。一般的光学系统,其结构呈轴对称或中心对称,所以只需要在 1/2 或 1/4 像面内,甚至仅径向选点即可进行仿真分析获取结果。对于已经应用的光学系统,当获取如图 2 所示的结果后,仅需要设置太阳光源,该方法仿真获得鬼像图样,通过对比即可找出造成该鬼像的问题所在。

3 举例分析

以某红外光学系统为例,分析其鬼像情况。该光学系统参数为:焦距 $f=200$ mm,入瞳直径 $D=60$ mm,视场 $\theta_{FOV}=1.71^\circ$,主波长 $\lambda=4 \mu\text{m}$,透镜表面透射率为 96%,反射率为 4%,吸收率较小忽略不计。该系统采用 HgCdTe 中波制冷型红外热像仪,靶面大小对角线为 12 mm。其结构如图 1 所示。

利用 Code V 分析其鬼像情况,部分结果如表 1 所示,其中 DBFL 为鬼像系统后焦距,EFL 为鬼像系统有效焦距,DISC 为鬼像弥散斑大小。

由此可知以上几面会造成比较严重的鬼像,需要针对这几个面进行进一步仿真,确定其一阶鬼像对像面的具体影响,作为实例仅分析 10~9 面情况。

将该系统导入 Tracepro 建模,系统第 9 面和第 10 面设置透射率为 96%,反射率为 4%,其余表面设置透射率为 96%,吸收率为 4%。该光学系统中有效工作面为 16 面,所以阈值选取为 $T_h = (96\%)^{16} \times (4\%)^2 \times (96\%)^{2 \times (10-1-9)} = 0.000837$,折

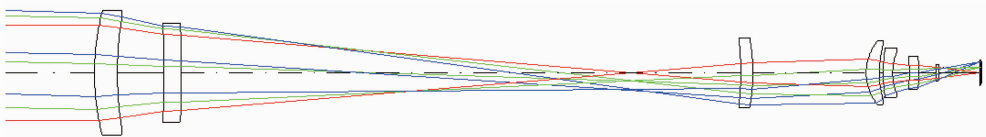


图 1 光学系统结构图

Fig. 1 Optical path of system

表 1 鬼像分布情况表

Table 1 Analysis results of ghost image by Code V

Surface to surface	DBFL	EFL	DISC	Pupil ratio	Magnification
10~9	-57.922895	-259.63642	5.577432	1.483888	1.298153
12~9	4.218221	-23.334313	-4.519433	10.384277	0.116669
15~9	-9.683978	-83.467961	2.900572	1.220918	0.417331
15~4	-22.300527	135.923345	-4.101764	0.187684	-0.679602
12~2	-5.556238	28.788002	-4.825240	4.988009	-0.143937
14~13	-26.942179	-111.91905	6.018362	0.646790	0.559583
16~13	-97.709825	393.894803	-6.201655	1.998227	-1.969430

反次数设置为 18 次。

由于该系统轴对称且中心对称,所以分析时沿径向取点。此处选取 4 个位置的点,如图 2 所示。

图 2 为该光学系统的 10~9 面鬼像在 Tracepro

中的仿真结果,分析了在像面中心[图 2(a)]、1/3 像高[图 2(b)]、2/3 像高[图 2(c)]、像边缘[图 2(d)]有强光源时像面照度情况。

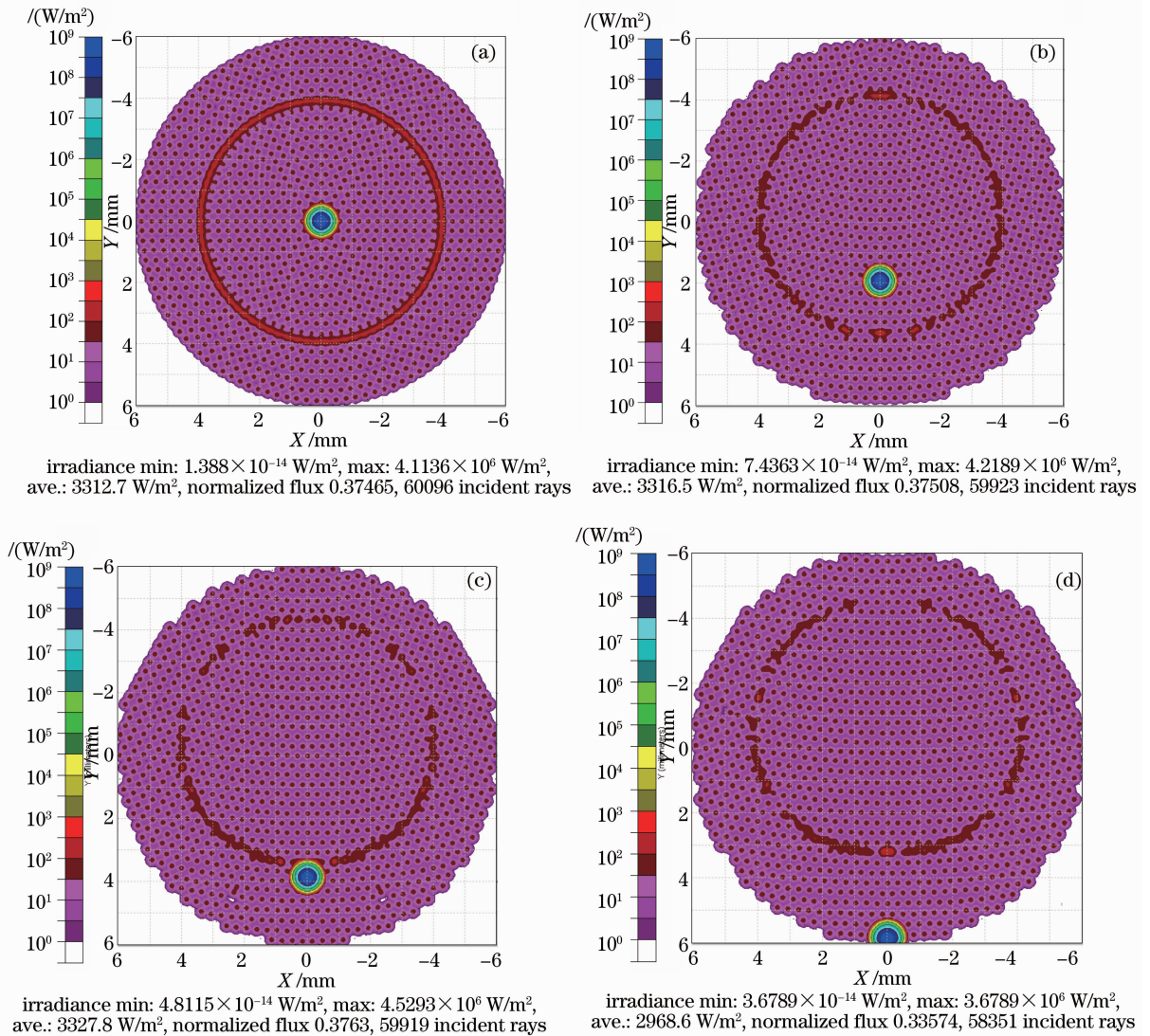


图 2 10~9 面鬼像分布图。(a)像面中心;(b)1/3 像高;(c)2/3 像高;(d)像边缘

Fig. 2 Power distribution of the ghost image caused by the surface 10~9. (a) Image center; (b) 1/3 image height; (c) 2/3 image height; (d) image edge

从图 2 的结果可以看到由 10~9 面引起的鬼像情况

1) 鬼像形状:其能量分布在整个像面上,但主要集中在圆环内,该圆环内径为 3 mm,外径为 5 mm。

2) 鬼像能量:鬼像圆环内能量为目标的 10^{-5} 以下,其余位置鬼像能量为目标的 10^{-6} 以下。该系统使用的制冷型 HgCdTe 探测器像元尺寸 $30\ \mu\text{m}\times 30\ \mu\text{m}$,在 10 kHz 处响应度为 $1\times 10^{10}\ \text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$,信噪比取 4 时,当目标的辐射强度低于 $6\times 10^{-5}\ \text{W}/(\text{cm}^2\cdot\text{sr})$ 时鬼像能量不会被探测响应。

3) 与目标运动关系:该鬼像为负鬼像,当强光源或目标由中心向边缘移动时,其鬼像会反向移动。鬼像圆环能量分布也有所改变,与强光源或目标同一径向上的光斑会在反向移动的同时,靠近其一侧的能量会增强,远离其一侧的会减弱。

4 结 论

以上述光学系统为例,该系统有 16 个光学工作表面,能产生一阶鬼像的组合有 $C_{16}^2=120$ 种,通过 Code V 的筛选可知 7 种组合产生的鬼像相对严重,在 Tracepro 中省略了 113 种情况,减少了大量运算时间。所以在 Code V 和 Zemax 的帮助下,对光学系统一阶鬼像分析的速度显然要比仅使用 Tracepro 分析快。

同样从上述实例可知,利用 Tracepro 可以有效地分析出成像光学系统中各阶鬼像情况,获取全视场鬼像分布的大小、形状和目标的能量比,以及鬼像与目标的运动关系,分析可得的结论要比 Code V 和 Zemax 的结论直观。所以该方法结合了两者的优点,获取的鬼像分析结果对光学系统设计和事后

序列图像分析有一定的指导作用。此外,该方法也可应用于其他各类光学系统的鬼像分析中。

参 考 文 献

- Deng Shitao, Li Xiaotong, Cen Zhaofeng *et al.*. Mitigating damage of the ghost in high power laser facilities by real-ray trace [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5): 585~588
邓诗涛, 李晓彤, 岑兆丰 等. 高功率激光装置中鬼像的模拟应用实际光线追迹法[J]. *光学学报*, 2005, **25**(5): 585~588
- Feng Guoying, Chen Jianguo, Ma Zairu. Locating the near axial ghosts in the high power laser system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 632~635
冯国英, 陈建国, 马再如. 高功率激光系统中近轴鬼像点的寻找[J]. *光学学报*, 2003, **23**(5): 632~635
- Yan Peipei, Fan Xuewu. Optical design and stray light analysis of R-C system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **33**(4): 214~218
闫佩佩, 樊学武. R-C 光学系统设计及杂散光分析[J]. *红外与激光工程*, 2011, **33**(4): 214~218
- Li Ting, Yang Jiangfeng, Ruan Ping *et al.*. Stray light analysis of the lunar-based optical telescope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(S1): 136~141
李 婷, 杨建峰, 阮 萍 等. 月球光学天文望远镜(LOT)的杂散光分析[J]. *光子学报*, 2007, **36**(S1): 136~141
- Stephen M. Pompea, Robert R. Breault. Control of Stray Light [M]. In: Michael Bass. *Handbook of Optics*. Volume 11. New York: McGRAW-HILL, INC, 1995: 7.1~7.32
- Optical Design Program User's Guide [M]. Zemax Development Corporation, 2008. 215~217
- Code V Introductory User's Guide [M]. Optical Research Associates, 2010. 79~80
- Tracepro 学习秘籍[M]. 上海: 讯技光电科技(上海)有限公司出版社, 2006. 143~151
- ASAP Reference Guide [M]. BRO. Inc, 2010. 372~373
- Fang Li, Lin Feng, Qiu Yishen. Simulation of ghost images in zoom system by ASAP [J]. *J. Applied Optics*, 2009, **30**(6): 958~963
方 丽, 林 峰, 邱怡申. ASAP 模拟变焦系统中鬼像的研究[J]. *应用光学*, 2009, **30**(6): 958~963
- Cao Huabao, Lu Xingqiang, Fan Dianyuan. Ghost analysis for complex optical systems based on Zemax [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1236~1239
曹华保, 卢兴强, 范滇元. 用 Zemax 完成复杂光学系统的鬼像分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1236~1239

栏目编辑: 韩 峰