

## 元件缺陷对红外光学系统杂散辐射特性的影响

游兴海, 胡小川, 彭家琪, 张彬

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 针对红外光学系统元件表面缺陷问题, 基于米氏散射理论定量分析了不同疵病等级光学元件表面散射特性, 讨论了光学元件表面双向散射分布函数(BSDF)的变化规律, 进而建立光学元件不同疵病等级的散射模型。在此基础上, 以双子望远镜系统为例, 利用 ASAP 光学分析软件对其主镜在不同疵病等级的情况下, 到达探测器像面上的系统自身热辐射通量及其分布进行了仿真计算, 并根据有效发射率的定义, 对系统杂散辐射性能进行了定量评价。研究分析发现: 光学元件不同疵病等级不仅会造成系统杂散辐射特性及其在探测器像面上的辐射通量分布发生变化, 而且还会导致其有效发射率发生变化。对主镜疵病等级分别为 0、I-10、I-20、I-30、II 和 III 的情况, 计算得到系统有效发射率分别为 2.19%、2.34%、2.46%、2.59%、2.72% 和 3.08%。由此可见, 随着疵病等级的增加, 系统杂散辐射性能逐渐降低。实际工作中, 必须严格控制光学元件表面疵病等级。

**关键词:** 杂散辐射; 光学元件; 缺陷; 有效发射率

**中图分类号:** O434.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0120004

## Effect of defects of component on stray radiation characteristics of infrared optical system

You Xinghai, Hu Xiaochuan, Peng Jiaqi, Zhang Bin

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of the defects on the surface of components in infrared optical systems, the scattering characteristics of optical components surface under different levels of defects were analyzed quantitatively based on Mie scattering theory. The variation of the bidirectional scattering distribution function (BSDF) on the surface of the optical component was discussed, and then a scattering model of optical components under different levels of defects was established. On this basis, a Gemini telescope was taken as an example, and the self-generated thermal radiation flux and its distribution of the system on the image plane was simulated quantitatively by using the ASAP optical analysis software for the case of the primary mirror under different levels of defects. Furthermore, according to the definition of the effective emissivity, the quantitative evaluation of the stray radiation of the system was carried out. The results indicate that the optical component under different levels of defects not only alter the stray radiation flux and its radiation distribution of the system on the image plane, but also change its effective

收稿日期: 2016-05-11; 修订日期: 2016-06-12

基金项目: 科技部创新人才推进计划重点领域创新团队资助(2014RA4051); 四川省教育厅创新团队计划资助项目(13Td0048)

作者简介: 游兴海(1990-), 男, 硕士生, 主要从事红外光学系统设计与优化方面的研究。Email: youxinghai\_scu@163.com

导师简介: 张彬(1969-), 女, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事激光与光通信、光电子技术等方面的研究。Email: zhangbinff@sohu.com

emissivity, the effective emissivity of the system is 2.19%, 2.34%, 2.46%, 2.59%, 2.72% and 3.08% respectively when primary mirror defect levels under six cases such as 0, I-10, I-20, I-30, II and III. Thus, the stray radiation performance of the system decreases with the increasing of the level of the defects. Consequently, the levels of defects on the surface of the optical component should be strictly controlled in the practical applications.

**Key words:** stray radiation; optical components; defects; effective emissivity

## 0 引言

红外光学系统中经过非正常路径到达像面的非成像光线称为杂散辐射<sup>[1]</sup>,而系统自身热辐射是杂散辐射的主要来源之一。光学元件的加工、装配及使用过程中,其表面的各种缺陷,如划痕、麻点、破边及破点等均会导致元件光学特性发生变化,从而改变系统的杂散辐射特性,进而影响像面的杂散辐射通量分布的均匀性。

由于现代加工技术限制,光学元件表面在加工过程中不可避免地会留下各类缺陷,这些缺陷会对入射光造成不同程度的散射,不仅增加了光能量的损耗,而且也会对系统成像质量造成影响,进而影响红外光学系统对目标信号的提取与分析<sup>[2]</sup>,因此,光学元件表面缺陷对系统杂散辐射性能的影响显得格外重要,有必要对其进行研究。

光学元件的表面质量主要采用面形偏差、粗糙度和表面疵病来评价,其散射分为体内散射和表面散射<sup>[3]</sup>。研究发现,在大多数系统中表面散射是最主要的<sup>[4]</sup>。表面散射主要是由表面微观粗糙度、表面缺陷和表面污染引起的,但在 ASAP 仿真分析时,一般假设光学元件为相对理想的情况,即只有表面微观粗糙度引起的散射。由表面微观粗糙度引起的散射通常可以采用经验公式估算出其 TIS 值<sup>[5]</sup>,再利用 ASAP 的 BSDF 拟合工具(BSDF Fit Utility)拟合出其表面的散射特性。

目前,已有文献对微小颗粒的光散射进行了讨论<sup>[6]</sup>,也有学者针对光学元件污染对红外光学系统信噪比的影响进行了研究<sup>[5]</sup>,但光学元件缺陷对红外光学系统杂散辐射特性影响的方面研究较少。针对光学元件污染,学者认为元件表面的散射是由表面粗糙度和污染引起的,并未研究缺陷对元件表面

散射造成的影响。文中考虑光学元件表面散射为由光学元件表面微观粗糙度和表面缺陷引起的散射之和,进而完善了光学元件的散射模型。

基于米氏散射理论定量分析了光学元件表面不同疵病等级的散射特性,进而建立了不同疵病等级光学元件的散射模型。在此基础上,以双子望远镜系统为例,结合 ASAP 光学分析软件,对主镜在不同疵病等级情况下系统的杂散辐射特性进行了仿真分析,并对系统杂散辐射性能进行了定量评价。

## 1 基础理论

### 1.1 米氏散射

早在 1908 年,Gustav Mie 提出了米氏散射理论<sup>[4]</sup>,即任意球形颗粒的散射光强分布与颗粒的粒径及分布存在有密切关系,如图 1 所示。图中光强为  $I_0$  的光沿  $z$  轴正方向传播,散射角  $\theta$  定义为散射光矢量与  $z$  轴正方向的夹角,方位角  $\varphi$  定义为振动面和散射面的夹角, $\lambda$  表示波长。

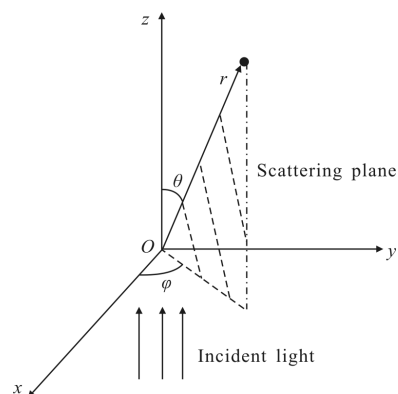


图 1 光散射模型示意图

Fig.1 Sketch of a model for the light scattering

米氏散射理论描述了任意尺寸球形颗粒的散射特性,对于某一颗粒系统有多种粒度分布的颗粒时,

其散射光在光电探测器某一环上散射的光能量为<sup>[6]</sup>:

$$E = \frac{3\lambda^2 I_0}{\pi^2 \rho} \sum_{j=1}^n \frac{W_j}{d_j^3} \int_{\theta_{j,m}}^{\theta_{j,max}} (i_1 + i_2) \sin \theta d\theta \quad (1)$$

式中:  $W_j$  表示直径为  $d_j$  的颗粒的质量;  $\rho$  为其密度;  $I_0$  为初始光强;  $i_1$  和  $i_2$  为散射强度函数, 可分别表示为:

$$i_1(\alpha, m, \theta) = |S_1|^2 = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \pi_n + b_n \tau_n) \right|^2 \quad (2)$$

$$i_2(\alpha, m, \theta) = |S_2|^2 = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \pi_n + b_n \tau_n) \right|^2 \quad (3)$$

式中: 振幅函数  $S_1$  和  $S_2$  为表征粒径大小的无因次参量  $\alpha = (\pi d / \lambda)$ ;  $m$  为颗粒相对周围介质的折射率;  $n$  的取值参照 Wiscombe 给出的检验公式来确定<sup>[6]</sup>; 米氏系数  $a_n$  和  $b_n$  为:

$$a_n = \frac{\varphi_n(\alpha) \varphi_n'(m\alpha) - m \varphi_n'(\alpha) \varphi_n(m\alpha)}{\xi_n(\alpha) \varphi_n'(m\alpha) - m \xi_n'(\alpha) \varphi_n(m\alpha)} \quad (4)$$

$$b_n = \frac{m \varphi_n(\alpha) \varphi_n'(m\alpha) - \varphi_n'(\alpha) \varphi_n(m\alpha)}{m \xi_n(\alpha) \varphi_n'(m\alpha) - \xi_n'(\alpha) \varphi_n(m\alpha)} \quad (5)$$

式中:  $\varphi_n(z)$ 、 $\xi_n(z)$  及其导数满足:

$$\varphi_n(z) = \frac{2n-1}{z} \varphi_{n-1}(z) - \varphi_{n-2}(z) \quad (6)$$

$$\varphi_n'(z) = -\frac{n}{z} \varphi_n(z) + \varphi_{n-1}(z) \quad (7)$$

$$\xi_n(z) = \frac{2n-1}{z} \xi_{n-1}(z) - \xi_{n-2}(z) \quad (8)$$

$$\xi_n'(z) = -\frac{n}{z} \xi_n(z) + \xi_{n-1}(z) \quad (9)$$

式中:  $z$  可以是  $\alpha$  或  $m\alpha$ , 并由初始条件、米氏散射系数  $a_n$  和  $b_n$  得以求解。

散射角函数  $\pi_n$  和  $\tau_n$  满足递推公式:

$$\pi_n = \frac{2n-1}{n-1} \cos \theta \pi_{n-1} - \frac{n}{n-1} \pi_{n-2} \quad (10)$$

$$\tau_n = n \cos \theta \pi_n - (n+1) \pi_{n-1} \quad (11)$$

因此, 当颗粒的无因次粒径参数  $\alpha$ 、复折射率  $m$  以及  $\lambda$  确定时, 利用公式(1)~(11)可以计算 Mie 散射系数  $a_n$  和  $b_n$ 、角系数  $\pi_n$  和  $\tau_n$  以及散射光强函数  $i_1$  和  $i_2$ , 从而求得球形颗粒散射光能量  $E$ 。

### 1.2 光学元件表面不同疵病等级的散射特性

根据国标(GB1185-79)中光学元件表面缺陷的检测标准<sup>[6]</sup>, 元件疵病等级由低到高可以划分为 0、I-10、I-20、I-30、II 和 III 等 10 个等级, 疵病等级越高, 表明元件加工质量越差。其中, 0 级表示元件表面没有任何疵病。在此基础上, 根据光学元件缺陷分

布的幂分布模型<sup>[7]</sup>, 可近似模拟出元件不同疵病等级的 BSDF 曲线。表 1 列出了有效孔径为 1 m 的元件在不同疵病等级情况下的 TIS, 图 2 进一步给出了元件表面不同疵病等级 BSDF 随散射角的归一化分布。计算时假定元件材料为硅, 其折射率为  $3.44 - 2.4 \times 10^{-8}i$ , 计算波长  $4 \mu\text{m}$ 。

表 1 不同疵病等级 TIS

Tab.1 Different defect levels TIS

| Defect levels | I-10                  | I-20                  | I-30                  | II                    | III                   |
|---------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| TIS           | $3.22 \times 10^{-4}$ | $7.35 \times 10^{-4}$ | $1.02 \times 10^{-3}$ | $2.95 \times 10^{-3}$ | $3.56 \times 10^{-3}$ |

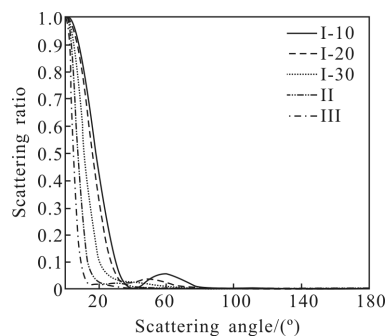


图 2 光学元件不同疵病等级 BSDF 随散射角的归一化分布  
Fig.2 Different defect levels of optical component BSDF along with the normalized distribution of the scattering angle

由表 1 可以看出, 随着元件疵病等级的增加, 其散射量逐渐增大。进一步分析图 3 可知, 不同疵病等级元件的表面散射能量主要集中在  $0^\circ \sim 90^\circ$  范围内, 且在一定范围内, 随着散射角度的增加, 散射比减小。由此可见, 元件疵病等级越高, 其散射能量越集中。

## 2 红外光学系统杂散辐射的仿真分析

### 2.1 光机仿真模型的建立

为研究元件缺陷对系统杂散辐射特性的影响, 再加之元件缺陷对光学系统反射元件的影响更明显<sup>[6]</sup>, 故以双反射式双子望远镜系统为例, 使用 ASAP 光学分析软件建立如图 3 所示的三维光机仿真模型。系统入瞳直径为 8 000 mm,  $F$  数为 16, 工作波段  $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ , 系统温度为 293 K。系统设有冷阑, 以抑制非视场光线到达探测器。

文中在对元件表面粗糙度进行散射建模的同时, 进一步考虑了元件表面缺陷引起的散射, 从而完

善了光学元件的散射模型。

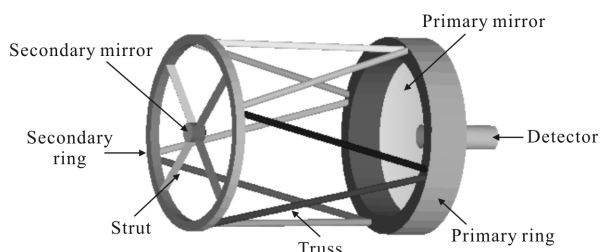


图 3 双子望远镜系统三维仿真模型

Fig.3 Three-dimensional simulation model of Gemini telescope system

### 2.2 杂散辐射特性分析

以图 3 所示的双子望远镜为例，表 2 给出了主镜不同疵病等级时探测器像面接收到的系统杂散辐射

射通量。

由表 2 可以看出，系统各光学件和机械件自身辐射通量之和随主镜疵病等级的增加而增大，主要原因是光学件的杂散辐射较之机械件的杂散辐射大得多，而主镜表面疵病致使其发射率增大，进而引起到达像面上的杂散辐射通量明显增大。由于次镜正对探测器，受主镜疵病的影响较小，因而其杂散辐射通量基本没有变化。此外，主镜表面疵病对各机械件均有不同程度的影响。具体来说，主镜表面疵病对诸如主镜、次镜、次镜支撑筋等视场内元件影响较小，而对诸如桁架、主镜环、次镜环等视场外元件影响较大，且对于能够被探测器直接“看到”的元件影响较为严重。

表 2 主镜不同疵病等级时系统元件到达探测器的杂散辐射通量(单位:W)

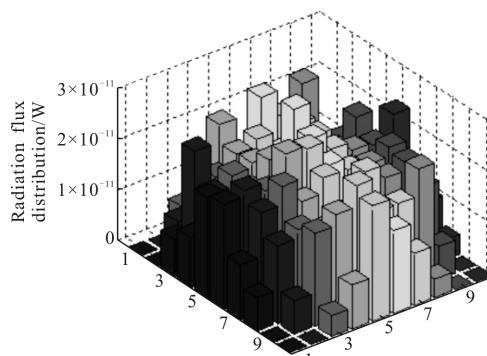
Tab.2 Focal plane stray radiation flux from different defect levels of primary mirror (Unit:W)

|                         | Defect level 0         | Defect level I-10     | Defect level I-20     | Defect level I-30     | Defect level II       | Defect level III      |
|-------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Primary mirror          | $9.18 \times 10^{-6}$  | $5.21 \times 10^{-5}$ | $5.42 \times 10^{-5}$ | $5.54 \times 10^{-5}$ | $6.17 \times 10^{-5}$ | $6.93 \times 10^{-5}$ |
| Secondary mirror        | $5.16 \times 10^{-5}$  | $5.16 \times 10^{-5}$ | $5.16 \times 10^{-5}$ | $5.16 \times 10^{-5}$ | $5.18 \times 10^{-5}$ | $5.18 \times 10^{-5}$ |
| Front of primary ring   | $1.93 \times 10^{-10}$ | $1.01 \times 10^{-9}$ | $1.58 \times 10^{-9}$ | $2.56 \times 10^{-9}$ | $3.99 \times 10^{-9}$ | $5.70 \times 10^{-9}$ |
| Side of primary ring    | $5.69 \times 10^{-11}$ | $1.49 \times 10^{-7}$ | $1.82 \times 10^{-7}$ | $2.16 \times 10^{-7}$ | $3.43 \times 10^{-7}$ | $5.62 \times 10^{-7}$ |
| Front of secondary ring | $6.16 \times 10^{-7}$  | $6.97 \times 10^{-7}$ | $7.68 \times 10^{-7}$ | $8.26 \times 10^{-7}$ | $9.87 \times 10^{-7}$ | $1.32 \times 10^{-6}$ |
| Side of secondary ring  | $5.69 \times 10^{-7}$  | $5.70 \times 10^{-7}$ | $5.70 \times 10^{-7}$ | $5.71 \times 10^{-7}$ | $5.71 \times 10^{-7}$ | $5.73 \times 10^{-7}$ |
| Strut                   | $2.53 \times 10^{-8}$  | $8.61 \times 10^{-8}$ | $8.62 \times 10^{-8}$ | $8.62 \times 10^{-8}$ | $8.67 \times 10^{-8}$ | $8.71 \times 10^{-8}$ |
| Truss                   | $8.33 \times 10^{-10}$ | $1.55 \times 10^{-9}$ | $4.88 \times 10^{-9}$ | $7.57 \times 10^{-9}$ | $2.53 \times 10^{-8}$ | $3.52 \times 10^{-8}$ |
| Total                   | $6.45 \times 10^{-5}$  | $1.14 \times 10^{-4}$ | $1.16 \times 10^{-4}$ | $1.17 \times 10^{-4}$ | $1.24 \times 10^{-4}$ | $1.32 \times 10^{-4}$ |

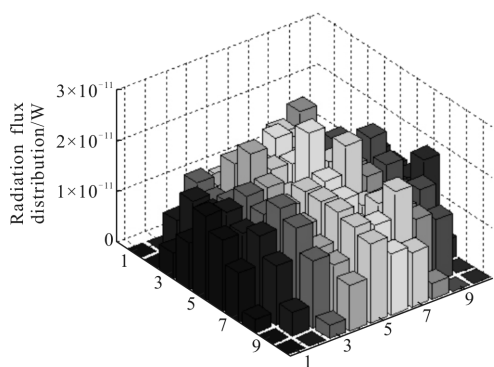
随着主镜疵病等级的变化，通过主镜疵病到达探测器的杂散辐射传输路径也会发生改变，从而影响像面上杂散辐射通量分布。以主镜环正面为例，将探测器像面划分为  $10 \times 10$  的矩阵探测单元，图 4 给出了主镜在不同疵病等级条件下主镜环正面到达探测器面上的杂散辐射通量分布。

从图 4 可以看出，随着主镜疵病等级的增加，探测器像面上的杂散辐射通量分布各不相同，其均方根值分别为：0.53、0.48、0.48、0.46、0.43 和 0.40，表明光学元件的加工质量对望远镜系统中的杂散辐射通量分布有明显影响。受表面疵病影响，主镜环正面在探测器像面上杂散辐射通量分布的均匀性有所变化，且主镜存在疵病时杂散辐射分布均匀性较之主

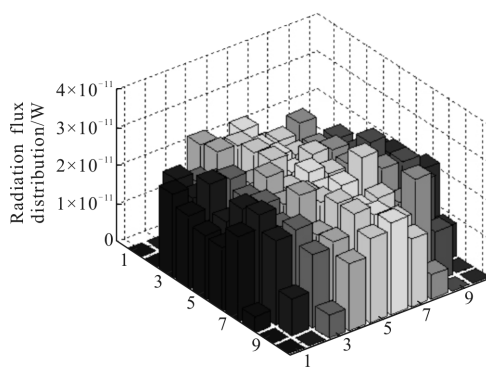
镜无疵病时要好些<sup>[8-9]</sup>，但同时也会使到达探测器像面的杂散辐射通量明显增大。



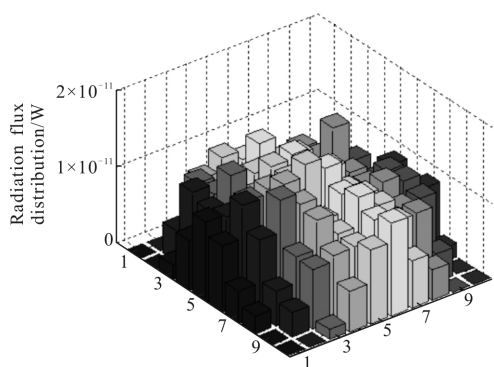
(a) Clean



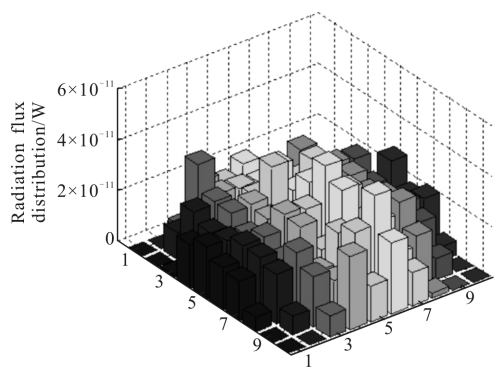
(b) Defect level I-10



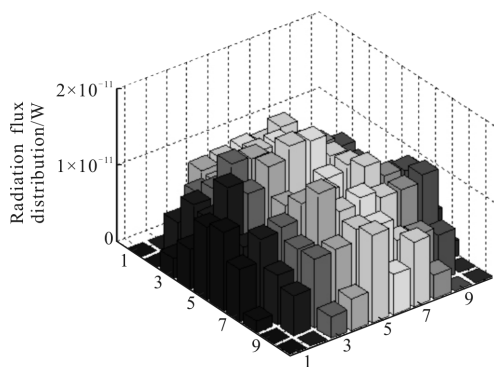
(f) Defect level III



(c) Defect level I-20



(d) Defect level I-30



(e) Defect level II

图 4 主镜无疵病及不同疵病等级时主镜环正面杂散辐射通量分布

Fig.4 Stray radiation flux distribution of the front of the primary mirror ring from the primary mirror without defects and different defect levels

### 2.3 红外光学系统杂散辐射性能评价

为了对红外光学系统自身热辐射性能进行评价,引入有效发射率的概念<sup>[5]</sup>。红外光学系统的有效发射率定义为探测器像面接收到的系统各元件总的杂散辐射通量除以将红外望远镜系统的最后一个光学元件作为黑体辐射源时,探测器像面接收到的辐射通量,即:

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{P_{\text{sum}}}{P_r} \quad (13)$$

式中: $P_{\text{sum}}$ 为探测器像面接收的各元件自身杂散辐射的总辐射量; $P_r$ 为探测器像面接收的由参考黑体辐射源的热辐射所产生的辐射通量。

根据上述系统有效发射率的定义,将最后一个光学元件(即次镜)作为黑体辐射源,计算得到探测器像面接收到的辐射通量,并结合表 2 给出的探测器像面接收的各元件自身杂散辐射的总辐射量,由公式(13)计算得到系统有效发射率。表 3 列出了主镜在不同疵病等级情况下系统的有效发射率。

表 3 红外光学系统有效发射率

Tab.3 Effective emissivity of the infrared optical system

| Defect levels of primary mirror | Clean | I-10  | I-20  | I-30  | II    | III   |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Effective emissivity            | 2.19% | 2.34% | 2.46% | 2.59% | 2.72% | 3.08% |

由表 3 可以看出,随着主镜疵病等级的增加,红外光学系统的有效发射率逐渐增大,系统杂散辐射性能逐渐降低。

### 3 结 论

基于Mie 散射理论建立了光学元件表面不同疵病等级的散射模型。以双子望远镜系统为例,分析了主镜在不同疵病等级情况下系统的杂散辐射特性,并对系统杂散辐射性能进行了定量评价。

仿真结果表明:元件疵病等级越高,其表面散射量越大。受主镜表面疵病影响,其自身杂散辐射通量随着疵病等级增加而增大,并对系统其它元件的杂散辐射通量产生影响,进而导致系统总杂散辐射通量随之增大。其次,随着主镜疵病等级的变化,系统其它元件的杂散辐射在像面处的分布也会发生变化。最后,在主镜疵病等级分别为 0、I-10、I-20、I-30、II 和 III 六种情况下,计算得到系统有效发射率分别为 2.19%、2.34%、2.46%、2.59%、2.72%、3.08%,由此可见,随着疵病等级的增加,系统的杂散辐射性能逐渐降低。因此,必须严格控制元件表面疵病等级,以保证红外光学系统性能满足实际应用需求。

### 参考文献:

- [1] Xuan Ming, Wang Jiaqi. Current status of space remote sensing equipments research base in CIOMP [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(1): 1-16. (in Chinese)  
宣明,王家骥. 长春光机所航天光学遥感器研制基地建设进展[J]. 中国光学, 2015, 8(1): 1-16.
- [2] Jiang Lun, Hu Yuan, Dong Keyan, et al. Passive athermal design of dual-band infrared optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3353-3357. (in Chinese)  
江伦,胡源,董科研,等. 红外双波段光学系统被动式消色差设计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(11): 3353-3357.
- [3] Shi Tu, Yang Yongying, Zhang Lei, et al. Surface testing methods of aspheric optical elements [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(1): 26-46. (in Chinese)  
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.
- [4] Wang Xueyan. Research on particle size test algorithm based on Mie theory [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2011. (in Chinese)  
王雪艳. 基于米氏散射理论的粒度测试算法研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2011.
- [5] Xiao Jing, Zhang Bin. Influence of the optical components contamination on the signal to noise ratio in infrared optical systems [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 1010-1016. (in Chinese)  
肖静,张彬. 光学元件污染对红外光学系统信噪比的影响分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 1010-1016.
- [6] Han Chen. Theoretical and experimental study of the light scattering properties of micro particles[D]. Wuhan: Huangzhong University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)  
韩晨. 微小颗粒光散射特性的理论与实验研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [7] Xu Deyan, Wang Qing, Gao Zhishan, et al. Current Optical Components Detection and International Standards [M]. Beijing: Science Press, 2009: 264-267. (in Chinese)  
徐德衍,王青,高志山,等. 现行光学元件检测与国际标准 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 264-267.
- [8] Zhou Lidan. Research on the "defect" distribution of the optical elements in high power laser device and the statistical law of the beam near field quality [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2009. (in Chinese)  
周丽丹. 高功率激光装置光学元件“缺陷”分布与光束近场质量统计规律研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2009.
- [9] Yang Zhihui, Guo Juguang, Tong Huiyuan, et al. Analysis of impact on infrared radiation calibration caused by stray radiation of collimator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3199-3204. (in Chinese)  
杨智慧,郭聚光,佟惠原,等. 平行光管杂散辐射对红外辐射定标影响的分析 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(10): 3199-3204.
- [10] Wang Fuguo, An Qichang. Evaluation of mirror surface figures for TMT based on SlopeRms [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(5): 1171-1175. (in Chinese)  
王富国,安其昌. 30 m 望远镜三镜镜面面形误差的斜率均方根评价[J]. 光学精密工程, 2014, 22(5): 1171-1175.