

掠入射光学系统设计

李 顺^{1, 2} 巩 岩¹

(¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

²中国科学院研究生院, 北京 100039

摘要 介绍了经典 Wolter I 型掠入射成像光学系统的基本结构, 推导了由系统的口径和焦距表示的掠入射系统的参数方程组。通过此方程组可得到掠入射光学系统详细的初始设计参数。此外, 针对掠入射系统不能直接使用常规商业光学设计软件进行优化的问题, 以 Zemax 软件为例, 介绍了怎样利用其宏语言构造优化函数用于掠入射系统的分析和优化。并且进行了一组实例的设计和优化, 优化后系统由经典 Wolter I 型的抛物面-双曲面结构变为具有相同口径和焦距的双曲面-双曲面结构。最后, 对上述两种掠入射系统的成像性能进行了对比分析。分析结果表明, 双曲面-双曲面的结构提高了掠入射系统大视场的分辨率, 能够满足对太阳进行全日面高分辨率观测的要求。

关键词 光学设计; 掠入射望远镜; Zemax; X 射线光学; 空间天气

中图分类号 TH753⁺.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092908.2276

Design of Grazing Incidence Optical System

Li Shun^{1, 2} Gong Yan¹

(¹ State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract The basic structure of classical Wolter type I grazing incidence optical system was presented. And a set of equations, through which the main basic parameters of a grazing incidence optical system were calculated, were calculated from the common equations of those reflecting surfaces. In addition, it was discussed that how to evaluate and optimize the classical Wolter type I grazing incidence optical system using optical design code Zemax's macro language. And specific optimized example was discussed. A hyperboloid-hyperboloid grazing incidence optical system with the same aperture and focal length is achieved from the classical paraboloid-hyperboloid Wolter type I. And the evaluation results of those two grazing incidence optical system show that the optical system's resolution for wide-field has significant improvement and it could meet top-resolution full-disk solar observation requirement.

Key words optical design; grazing incidence telescope; Zemax; X-ray optics; space weather

1 引 言

地球附近的空间环境中, 常常出现给地面和空间高技术设备的可靠运行以及人类的健康带来严重危害的空间环境的变化, 这种空间环境的变化被称为“空间天气”。开展“空间天气”预报, 探测发生在日冕层的太阳耀斑、日冕物资抛射和冕洞等影响日

地空间环境的“策动源”变化, 将为“空间天气”预报提供重要科学依据。观测这些太阳活动情况需要多种科学仪器和设备, 空间太阳软 X 射线成像望远镜是其中关键设备之一^[1, 2]。

由于 X 射线波长极短, 几乎所有介质对其的折射率都接近于 1, 所以 X 射线光学系统多采用掠入

收稿日期: 2008-08-08; 收到修改稿日期: 2008-12-02

基金项目: 国家自然科学基金(40674098)资助课题。

作者简介: 李 顺(1981—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: lishun156@foxmail.com

导师简介: 巩 岩(1968—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光学系统总体设计, 短波段光学技术等方面的研究。

射式。1952 年 H. Wolter 首先提出用一组同轴共焦的二次曲面通过掠入射对 X 射线聚焦成像的思想,并给出了三种 X 射线成像光学系统的基本结构,分别被称为 Wolter I、II 和 III 型。此后,经过多年人们对 Wolter 型 X 射线成像系统结构的研究论证以及实践经验总结,发现由一对连在一起的抛物面和双曲面组成的 Wolter I 型结构,结构简单,便于装调,从而成为 X 射线掠入射天文望远镜的基本结构型式。

为了改进掠入射望远镜的成像质量,国外许多学者对 Wolter 型掠入射光学系统做了大量的分析和改进工作。文献表明:掠入射光学系统在光轴附近极小视场范围内,像差很小几乎达到衍射极限,随着视场的增大,彗差和场曲显著增大,成为系统的主要像差,影响掠入射系统在较大视场时的分辨率^[3~7]。在对掠入射系统进行分析的基础上,部分学者^[8~11]提出了改进 Wolter 型掠入射光学系统成像质量的方法,如匡裕光^[11]曾提出使抛物面和双曲

面的焦点沿光轴方向偏离一定距离,引进一定量的球差,使球差的大小正负可以抵消部分轴外像差的设计结构等。虽然方法各不相同,但是基本思想大都类似,即牺牲部分轴上点像质改善轴外点像质,使系统在整个视场范围内的分辨率达到最优。本文在此思想的基础上讨论怎样进行 Wolter I 型掠入射望远镜的设计和优化工作,并对优化结果进行了对比分析。

2 掠入射光学系统设计

2.1 系统的初始参数计算

Wolter I 型掠入射望远镜由一个抛物面和一个同轴共焦的双曲面组成,整个系统关于光轴是旋转对称的。它利用抛物面和双曲面的内表面作为反射面,其子午截面如图 1 所示。由图可见双曲面的后焦点和抛物面的焦点重合,两面相交所形成圆的半径为 r_0 ,其圆心在 Z_0 处。

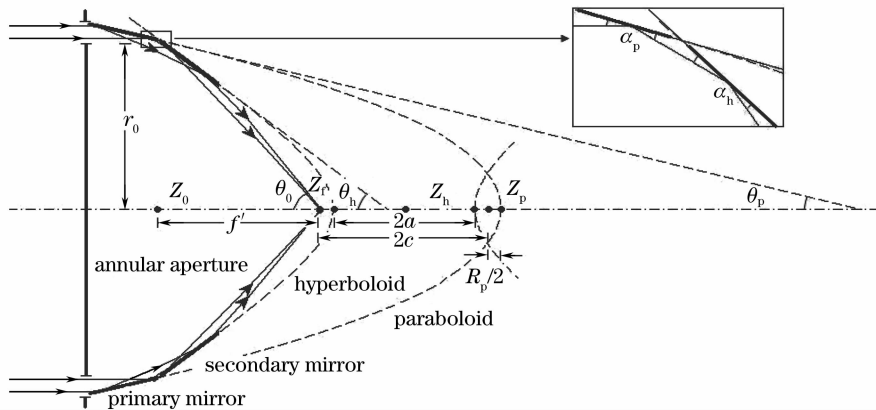


图 1 掠入射望远镜结构示意图

Fig. 1 Configuration of grazing incidence telescope

设抛物面的顶点和双曲面的中心坐标分别为 $(0, 0, Z_p)$, $(0, 0, Z_h)$, 则在柱坐标中抛物面和双曲面方程可分别表示为

抛物面

$$r^2 = 2R_p(z - Z_p), \quad (1)$$

双曲面

$$\frac{(z - Z_h)^2}{a^2} - \frac{r^2}{b^2} = 1, \quad (2)$$

式中 R_p 为抛物面顶点的曲率半径, a 和 b 分别是双曲面的长半轴和短半轴。由双曲面的性质可得:双曲面两顶点间的距离为 $2a$, 两焦点间的距离为 $2c$ (其中 $c^2 = a^2 + b^2$)。通过追迹光线可知平行于光轴的光线通过抛物面和双曲面的反射将在双曲面的前焦点 Z_f 处汇聚, 所以双曲面的前焦点即为光学系

统的焦点, 通过焦点垂直于光轴的平面即为光学系统的焦面, 无限远的物(太阳)通过双曲面和抛物面的反射将在系统焦面处成像。光学系统的有效焦距可表示为 $f_{\text{eff}} \approx f' \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{r_0}{f'} \right)^2 \right]$, 其中 $f' = Z_f - Z_0$ 为 Z_0 与系统焦点之间的距离, 定义为系统的表面焦距, 可见表面焦距的大小直接影响系统的有效焦距^[12]。

由(1)式、(2)式可知, 整个光学系统的结构可以完全由参数 R_p , a 和 b 确定。然而, 作为成像光学系统我们首要关注的是系统焦距和口径的大小, 因为焦距和口径的大小不仅决定了系统的体积, 还直接决定了光学系统分辨率的大小。

设 α_p 和 α_h 分别是平行光入射到两反射面相交

处极小范围内时在镜面的掠入射角, θ_p 和 θ_h 分别为两反射面在其相交处的切面与光轴的夹角, θ_0 为两反射面相交处反射到焦点的光线与光轴的夹角(如图 1 所示), 由几何关系可得

$$\begin{cases} \tan \theta_0 = r_0/f', \\ \theta_0 = 2(\alpha_h + \alpha_p), \\ \theta_p = \alpha_p, \\ \theta_h = 2\alpha_p + \alpha_h, \end{cases} \quad (3)$$

设 $\xi = \alpha_p/\alpha_h$, 可得

$$\begin{cases} \alpha_p = \frac{\xi}{2(1+\xi)}\theta_0, \\ \alpha_h = \frac{\theta_0}{2(1+\xi)}, \\ \theta_p = \frac{\xi}{2(1+\xi)}\theta_0, \\ \theta_h = \frac{1+2\xi}{2(1+\xi)}\theta_0, \end{cases} \quad (4)$$

由 θ_p 和 θ_h 的定义可得

$$\begin{cases} \tan \theta_p = R_p/r_0, \\ \tan \theta_h = \frac{c^2 - a^2}{a^2} \frac{(f' + c)}{r_0}, \end{cases} \quad (5)$$

将 r_0 及 $Z_0 - Z_p = f' + 2c + R_p/2$ 代入抛物面方程可得:

$$c = \frac{r_0^2}{4R_p} - \frac{f'}{2} - \frac{R_p}{4} = \frac{r_0}{4 \tan \theta_p} - \frac{f'}{2} - \frac{r_0 \tan \theta_p}{4}. \quad (6)$$

在掠入射系统设计时, 通常取 $\xi = 1$, 以最优化系统的有效集光面积^[13], 结合(4)式~(6)式可以得到

$$\begin{cases} R_p = r_0 \tan \alpha_0, \\ a^2 = \left(\frac{r_0}{4 \tan \alpha_0} - \frac{f'}{2} - \frac{r_0 \tan \alpha_0}{4} \right)^2 \times \\ \frac{r_0 + 2f' \tan \alpha_0 - r_0 \tan^2 \alpha_0}{r_0 + 2f' \tan \alpha_0 + 4r_0 \tan \alpha_0 \tan 3\alpha_0 - r_0 \tan^2 \alpha_0}, \\ b^2 = \left(\frac{r_0}{4 \tan \alpha_0} - \frac{f'}{2} - \frac{r_0 \tan \alpha_0}{4} \right)^2 \times \\ \frac{4r_0 \tan \alpha_0 \tan 3\alpha_0}{r_0 + 2f' \tan \alpha_0 + 4r_0 \tan \alpha_0 \tan 3\alpha_0 - r_0 \tan^2 \alpha_0}, \end{cases} \quad (7)$$

式中 $\alpha_0 = \theta_0/4 = \frac{1}{4} \arctan\left(\frac{r_0}{f'}\right)$ 。

为了能够使抛物面反射的光线全部入射到双曲面上, 反射镜的轴向长度 L_p 和 L_h 应满足^[13]

$$\frac{L_h}{L_p} \approx \frac{\xi}{1 + (\xi L_p/f')} = \frac{1}{1 + (L_p/f')}, \quad (8)$$

由于 $f' \gg L_p$, 实际使用时可以取 $L_h \approx L_p$ 。利用(7)

式、(8)式就可以由系统的口径(由 r_0 决定)、焦距(由 f' 决定)以及镜面的轴向长度(L_p)确定 Wolter I 型掠入射光学系统的反射面方程以及各种结构参数(顶点曲率半径、二次曲面系数等)。

2.2 用 Zemax 对掠入射系统进行优化

由前面的分析可知, 掠入射系统的有效反射部分为筒状反射镜, 入瞳为大遮拦比的圆环, 与常规的正入射系统有很大不同, 在使用现有商业软件对其进行建模和优化时主要面临以下困难: 1) 默认的光线产生模式不适用于遮拦比如此大的光学系统的设计和优化; 2) 由于大遮拦比, 软件计算的像差系数将不准确; 3) 在优化过程中, 很难保持反射镜的长度及相对位置不变^[14]。为了能够使用现有的商业软件对掠入射系统进行优化, 必须在优化过程中设法保证系统的基本光学结构不变以及足够的待追迹光线, 才可能得到有意义的光学结构。

在 Zemax 中, 可以通过用 ZPL 宏语言构造优化操作数的方法, 来实现在优化过程中保证系统的基本光学参数不变。Zemax 中描述抛物面和双曲面的基本面型方程为^[15]

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}},$$

式中 c 为二次曲面顶点曲率, k 为二次曲面(圆锥)系数, 方程是建立在在以二次曲面的顶点为原点的坐标系下的。

由反射面的面型方程, 可以得到系统口径的表达式

$$r = \sqrt{\frac{2z}{c} - (1+k)z^2}, \quad (9)$$

由(3)式得系统的表面焦距的表达式

$$f' = \frac{r_0}{\tan \theta_0} = \frac{r_0}{\tan 2(\theta_h - \theta_p)}, \quad (10)$$

式中 θ_p 和 θ_h 分别为主镜和次镜在交面处的切面与光轴的夹角(如图 1 所示)。

由(9)式和(10)式, 进而利用 ZPL 宏语言, 就可以编写优化函数对系统的口径和焦距进行限制。同时, 还要限制 $\xi=1$ 使掠入射系统的有效集光面积达到最优^[13]。对掠入射系统进行优化, 仅仅对其基本的光学参数进行限制是远远不够的。由于优化的目的是为了得到更好的系统分辨率, 因此需要在优化函数中使系统像面上的弥散斑半径最小化。可是在掠入射系统中由于系统的遮拦比太大, 系统优化过程中追迹光线太少从而导致系统优化结果不准确, 所以自定义优化函数的下一步就是根据掠入射系统

环形入瞳的遮拦比以及不同的视场来确定优化过程中的待追迹光线。这里既要求有足够的待追迹光线又要求针对优化目标对不同的视场设置不同的权重,是一项比较繁琐的工作。完成自定义优化函数后,就可以使用 Zemax 的优化功能对掠入射系统进行优化了。

下面具体就一种 Wolter I 型掠入射望远镜进行优化,并对优化结果进行分析。望远镜的基本参数如表 1 所示,根据表 1 和上文计算初始结构部分的内容,可以求得此系统的基本结构参数,具体值如表 2 所示。

表 1 掠入射望远镜的基本参数

Table 1 Basic parameters of grazing incidence telescope

Diameter of aperture $2R_0$ /mm	300
Nominal focal length f' /mm	1500
Field of view 2ω /($^\circ$)	0.7
Resolution /(")	5
Length of each mirror L /mm	30
Wavelength range /nm	0.6~6

表 2 Wolter I 结构掠入射望远镜的结构参数

Table 2 Parameters of Wolter type I grazing incidence telescope

Vertex radius of primary mirror /mm	3.738348
Conic constant of primary mirror	-1.000000
Vertex radius of secondary mirror /mm	3.747653
Conic constant of secondary mirror	-1.004984
Separation of joint and primary vertex /mm	3009.350517
Separation of two vertices /mm	1507.479020
Separation of secondary vertex and focus /mm	1.838658
Geometrical collecting area / mm^2	705

利用 Zemax 对表 2 中所示结构进行建模,并将其反射面的顶点曲率半径、二次曲面系数以及各面之间的厚度作为变量,按照前面介绍的方法构造优化函数进行优化。综合考虑掠入射系统的各种光学参量及像面上的分辨率,最终可以得到如图 2、图 3 所示的双曲面-双曲面(H-H)型式的光学系统结构,图中掠入射系统由两个相连的筒状双曲面反射镜组成,其环形入瞳位于镜筒的前端,入射光线通过入瞳并被后面的筒状反射镜反射后聚焦在系统像面上。

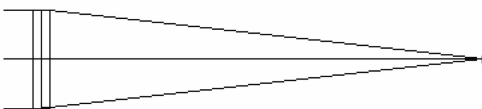


图 2 优化后 H-H 结构掠入射系统的 3 维系统图

Fig. 2 3D layout of optimum H-H grazing incidence optical system

优化后双曲面-双曲面结构掠入射系统的反射面结构参数如表 3 所示。

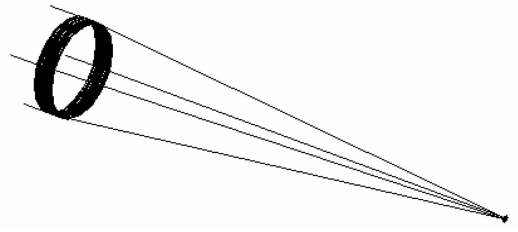


图 3 优化后 H-H 结构掠入射系统的实体模型

Fig. 3 Solid model of optimized H-H grazing incidence optical system

表 3 优化后 H-H 结构掠入射望远镜的结构参数

Table 3 Parameters of grazing incidence telescope after optimization

Vertex radius of primary mirror /mm	3.424507
Conic constant of primary mirror	-1.000120
Vertex radius of secondary mirror /mm	4.014632
Conic constant of secondary mirror	-1.004954
Separation of joint and primary vertex /mm	3115.083597
Separation of two vertices /mm	1645.534358
Separation of secondary vertex and focus /mm	30.085672
Geometrical collecting area / mm^2	717

3 优化结果分析

由于掠入射系统的中心遮拦比高达 99%,而且在建模过程中需要使用另类(Alternate)非球面,所以 Zemax 将不能正确的计算系统的光程差^[15],进而许多像差的计算公式都不再适用。但是其最基本的追迹光线功能在掠入射系统中却仍然有效^[14],因此我们将点列图作为评价掠入射系统几何光学性能的主要指标。由 Zemax 输出的上述 Wolter I 型结构和优化后的双曲面-双曲面结构掠入射系统像面上各个视场的弥散斑如图 4、图 5 所示。

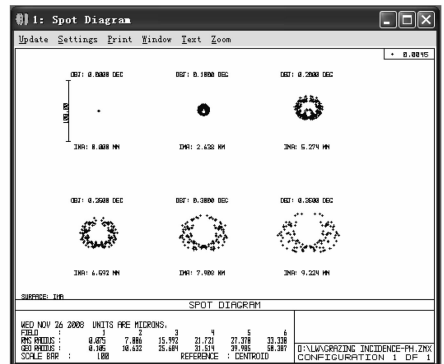


图 4 Wolter I 型掠入射系统像面上的点列图

Fig. 4 Spot diagram of Wolter type I grazing incidence optical system

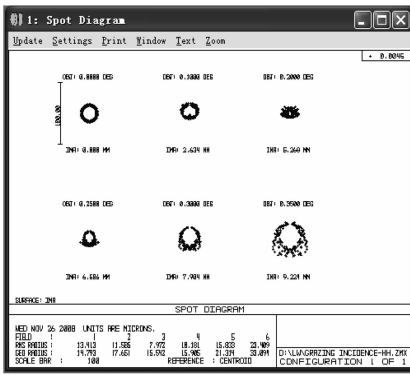


图 5 优化后双曲-双曲结构掠入射系统像面上的点列图
Fig. 5 Spot diagram of optimized H-H grazing incidence optical system

Zemax 可直接计算掠射系统各个视场的弥散斑均方根半径,图 6 是由计算结果所得到的两种掠入射系统像面上的弥散斑均方根半径随视场变化的曲线图。由图可知,在小视场范围内(小于 0.13°) Wolter I 型掠入射系统的分辨率优于双曲面-双曲面结构,随着视场的增大,Wolter I 型结构的分辨率越来越差,而双曲面-双曲面结构的分辨率却变好,在 0.2° 左右达到最优,然后逐渐变差。可以看出优化后的双曲面-双曲面结构掠入射望远镜的大视场分辨率明显提高。

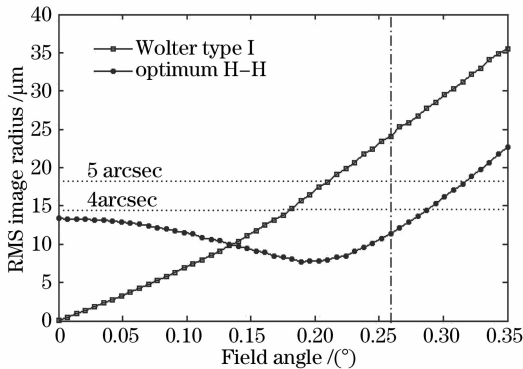


图 6 不同结构掠入射系统像面上弥散斑的均方根半径随视场的变化

Fig. 6 RMS image radius of different glancing incidence optical system structures versus field angle

从地球观测太阳的全视场角约为 $2\omega = 0.53^\circ$, 进行太阳观测时一般要求光学系统的视场要稍大于全太阳视场。对焦距为 1500 mm 的光学系统,角分辨率 $5''$ 对应像面上均方根半径约为 $18.25 \mu\text{m}$ 的弥散斑, $4''$ 对应半径为 $14.60 \mu\text{m}$ 的弥散斑。从图 6 可以看出,Wolter I 型结构望远镜不能以 $5''$ 的角分辨

率覆盖整个太阳视场,而优化后的双曲面-双曲面结构能够以 $4''$ 的角分辨率覆盖整个太阳视场,以 $5''$ 的角分辨率覆盖 1.25 个太阳视场。所以在用于太阳观测时,优化后的双曲面-双曲面结构掠入射系统明显优于经典 Wolter I 型结构。

现在用全视场范围内的平均弥散斑半径来评价掠入射系统的成像质量。平均弥散斑半径的平方与光学系统像面包含的信息量多少成反比,平均弥散斑半径越小像面包含的信息量越多光学系统的成像质量就越高^[16]。平均弥散斑半径 \bar{r} 可表示为

$$\bar{r} = 2\pi \int_0^{\omega} r(\theta) \theta d\theta / \left(2\pi \int_0^{\omega} \theta d\theta \right) = \frac{2}{\omega^2} \int_0^{\omega} r(\theta) \theta d\theta, \quad (11)$$

式中 ω 为光学系统的边缘视场角, $r(\theta)$ 为光学系统像面上弥散斑半径随视场变化的函数。

对本文中的例子利用(11)式通过计算可得到,在全视场范围内,Wolter I 型结构的平均弥散斑半径 $\bar{r} \approx 21.6 \mu\text{m}$,优化后的双曲面-双曲面结构的平均弥散斑半径 $\bar{r} \approx 13.0 \mu\text{m}$ 。经过优化掠入射系统的平均弥散斑半径只相当于优化前的 60%,也就是说优化后掠入射系统所成像包含的信息量是优化前的 2.8 倍,成像质量有很大提高。

为了更加全面的评价掠入射系统的成像质量,分别计算出两种掠入射系统的点扩展函数来表征其成像质量。点扩展函数表示的能量分布越集中,系统的成像质量就越好。由于掠入射系统属于大像差系统,其几何像差引起的像面能量弥散远大于衍射引起的弥散,可以用大量光线追迹而得到的像面光线分布作为几何点扩展函数来近似表示像面上的能量分布^[17]。针对 Zemax 不能直接计算掠入射系统的点扩展函数的问题,这里使用追迹光线得到的几何点扩展函数来近似表示系统像面上的能量分布。具体计算时使用 Zemax 的扩展功能与 Matlab 结合,把入瞳划分成大量面积相等的小块,由物点(无限远处)至每个小块的中心追迹光线。每条光线近似代表相同的能量,从而光线与像面交点的密度即可代表像面上能量的密度^[18]。通过 Matlab 计算出光线与像面交点的密度然后在像面上对其归一化即可得到系统的几何点扩展函数。图 7 为追迹相同数量(约 18000 条)光线的情况下,两种掠入射系统在 $1/2$ 视场的几何点扩展函数。可以看出优化后的双曲面-双曲面结构掠入射系统的点扩展函数的峰值约是 Wolter I 型结构的 3 倍,能量集中度明显提高。

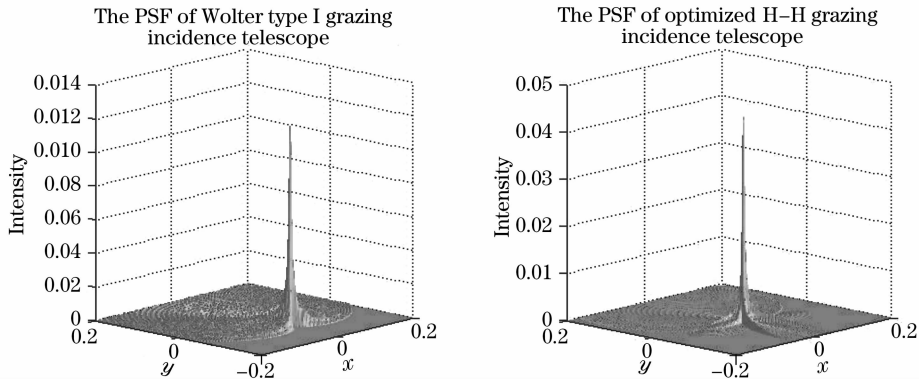


图 7 两种掠入射系统在 $1/2$ 视场下的点扩展函数

Fig. 7 Point spread function of two grazing incidence optical systems at $1/2$ field of view

4 结 论

在对掠入射系统基本结构进行分析的基础上,得到了由系统的口径和焦距表示的掠入射系统的参数方程,进而提出一种利用 Zemax 软件对掠入射望远镜进行优化以得到较好的光学系统结构的方法。最后就一组设计实例对掠入射系统的结构进行了优化和分析。优化后系统由原来的 Wolter I 型变成了双曲面-双曲面的结构型式,从而平衡了轴外点像差,提高了掠入射系统大视场的分辨率。分析结果表明,新的双曲面-双曲面结构的掠入射系统在太阳的全视场范围内,分辨率有明显的提高,能够以 $4''$ 的角分辨率对太阳进行全日面观测。

参 考 文 献

- James R. Lemen, Dexter Duncan, Christopher Edwards *et al.*. The solar X-ray imager for GOES[C]. *SPIE*, 2004, **5171**: 65~76
- Li Baoquan, Zhu Guangwu, Wang Shijin *et al.*. The solar X-EUV imaging telescope [J]. *Chinese J. Geophysics*, 2005, **48**(2): 235~242
李保权, 朱光武, 王世金等. 太阳 X-EUV 成像望远镜[J]. *地球物理学报*, 2005, **48**(2): 235~242
- W. Werner. Imaging properties of Wolter I type X-ray telescopes [J]. *Appl. Opt.*, 1977, **16**(3): 764~773
- Timo T. Saha. Transverse ray aberrations for paraboloid-hyperboloid telescopes[J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(12): 1856~1863
- Timo T. Saha. Aberrations for grazing incidence telescopes[J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(8): 1492~1498
- Kyoji Nariai. Geometric aberration of a generalized Wolter type I telescope[J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(20): 4428~4432
- Kyoji Nariai. Geometric aberration of a generalized Wolter type I telescope. 2: Analytical study[J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(2):

- 345~350
- J. D. Mangus, J. H. Underwood. Optical design of a glancing incidence X-ray telescope[J]. *Appl. Opt.*, 1969, **8**(1): 95~102
- Timo T. Saha, William Zhang. Equal-curvature grazing-incidence X-ray telescopes [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(22): 4599~4605
- Chen Bo, Chen Shuyan, Gong Yan. Design of a complex space soft X-ray and EUV telescope [J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(2): 242~244
陈波, 陈淑妍, 巩岩. 一种复合型空间软 X 射线一极紫外波段望远镜设计[J]. *光学技术*, 2004, **30**(2): 242~244
- Kuang Yuguang. Optical design of X-ray imaging telescope[J]. *Acta Optica Sinica*, 1981, **1**(3): 239~246
匡裕光. X 射线成像望远镜光学设计[J]. *光学学报*, 1981, **1**(3): 239~246
- Patrick L. Thompson, James E. Harvey. Systems engineering analysis of aplanatic Wolter type I X-ray telescopes [J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(6): 1677~1691
- L. P. Van Speybroeck, R. C. Chase. Design parameters of paraboloid-hyperboloid telescopes for X-ray astronomy [J]. *Appl. Opt.*, 1972, **11**(2): 440~445
- James E. Harvey, Andrey Krywonos, Patrick L. Thompson *et al.*. Grazing-incidence hyperboloid-hyperboloid designs for wide-field X-ray imaging applications[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(1): 136~144
- Zemax Optical Design Program User's Guide [Z]. Zemax Development Corporation, February 3, 2005. 270, 228~229
- Patrick L. Thompson, James E. Harvey. Image quality criteria for wide-field X-ray imaging applications[C] *SPIE*, 1999, **3779**: 390~400
- Lü Naiguang. *Fourier Optics* [M]. 2nd ed., Beijing: China Machine Press, 2007. 166~170
吕乃光. *傅里叶光学* [M]. 第二版, 北京: 机械工业出版社, 2007. 166~170
- Wang Zhijiang, Gu Peisen. *Practical Handbook of Optical Technology* [M]. Beijing: China Machine Press, 2007. 242~259
王之江, 顾培森. *实用光学技术手册* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007. 242~259