

文章编号: 1003-501X(2010)10-0064-07

掠入射光学系统成像质量评价

李 顺^{1,2}, 巩 岩¹, 张 巍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, 长春 130033;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 为了能够全面评价掠入射光学系统的成像质量, 基于像差理论和傅里叶光学原理, 使用 Matlab 编程语言编写了针对掠入射系统的像质评价程序, 并利用此程序结合 ZEMAX 软件对用于太阳观测的 Wolter I 型和双曲面-双曲面(H-H)型掠入射系统的成像质量做了详细的分析。结果表明, 该像质评价程序能够计算不同口径和焦距的掠入射系统在不同视场, 不同工作波长时的点扩散函数、能量集中度、线扩散函数和调制传递函数, 对掠入射系统的设计和优化具有指导作用。

关键词: 光学设计; 像质评价; X 射线光学; 掠入射; 太阳观测仪器

中图分类号: TH753 + .1

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2010.10.011

Image Quality Evaluation of Grazing Incidence Optical System

LI Shun^{1,2}, GONG Yan¹, ZHANG Wei¹

(1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

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

Abstract: To completely evaluate the image quality of grazing incidence optical system, based on aberration theory and principle of Fourier optics, an image quality evaluating code for grazing incidence optical system was developed by using Matlab. Then, a detailed image quality analysis of the Wolter type I and hyperboloid-hyperboloid (H-H) grazing incidence optical system for solar observation was presented. The image quality evaluating code could calculate the point spread function, fractional encircled energy, line spread function and modulation transfer function of grazing incidence optical system with different aperture and focal length at different field and wavelength. This code has directive significance to design and optimization of the grazing incidence optical system.

Key words: optical design; image quality evaluation; X-ray optics; grazing incidence; solar observation instrument

0 引 言

太阳掠入射 X 射线成像望远镜是进行太阳活动观测, 预测空间天气变化的重要仪器。其工作在 0.6~6 nm 的软 X 射线波段。由于, 在这个波段范围几乎所有介质的折射率都接近于 1, 所以 X 射线光学系统多采用掠入射式^[1-4]。掠入射望远镜大多采用由一组同轴共焦的二次曲面组成的 Wolter I 型结构或者由 Wolter I 型结构改进的双曲面-双曲面(H-H)结构。这些掠入射系统的反射镜都是大离轴量的筒状二次曲面, 入瞳是遮拦比很高的圆环, 其中 Wolter I 型掠入射望远镜的子午剖面图如图 1 所示^[5-10]。掠入射望远镜的这种特殊结构形式导致在使用商用光学设计软件对掠入射系统的光学结构进行设计、优化和成像质量评价时存在诸多的困难^[8, 11-14]。由于 ZEMAX 不能直接计算掠入射系统的点扩散函数(PSF)、能量集中度(Fractional Encircled

收稿日期: 2010-02-08; 收到修改稿日期: 2010-05-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40674098, 40974110)

作者简介: 李顺(1981-), 男(汉族), 河南淮阳人。博士研究生, 主要从事光学系统设计方面工作。E-mail: lishun156@foxmail.com。

通信作者: 巩岩(1968-), 男(汉族), 吉林梅河口人。博士, 研究员, 主要从事光机系统总体设计等方面工作。E-mail: gongy@sklao.ac.cn。

Energy)、线扩散函数(LSF)和调制传递函数(MTF),致使很难对掠入射系统进行比较全面的像质评价。本文使用 Matlab 编程语言编写了用于掠入射系统的像质评价程序。此程序通过动态数据交换(Dynamic Data Exchange)接口与 ZEMAX 建立链接,综合 ZEMAX 的光线追迹功能和 Matlab 的数学计算能力,用来计算掠入射系统的点扩散函数、线扩散函数、能量集中度和调制传递函数。程序的计算结果可用于对掠入射系统的成像质量进行比较全面的评价,对掠入射系统的设计和 optimization 具有指导作用。

1 DDE 功能简介和像质评价程序设计

动态数据交换(DDE)是为了在程序间共享数据而在 Windows 操作系统内部定义的一个协议。在 Windows 平台上运行的两个应用程序,可以通过建立一个 DDE 链接来交换数据,其中请求建立对话的应用程序称为客户程序(Client),而响应对话请求的应用程序被称为服务器程序(Server)^[15-16]。在我们编写的像质评价程序中,ZEMAX 扮演服务器程序负责追迹光线,并把追迹结果传回 Matlab;而 Matlab 则扮演客户程序,控制整个程序的开始、结束及数据的处理。该像质评价程序的流程图如图 2。

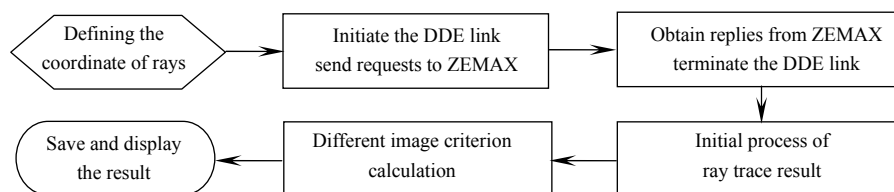


图 2 像质评价程序流程图

Fig.2 Flow chart of image quality evaluated code

1.1 定义待追迹光线阵列

在像质评价程序中,首先需要解决的就是待追迹光线阵列的问题。为此,我们编写了专门用于掠入射系统环形入瞳的光线阵列生成程序,该程序采用圆柱坐标系作为输入坐标系,通过定义相邻光线在光瞳边缘时圆周方向的角度间隔、沿半径方向的距离间隔以及入瞳的遮拦比,把环形入瞳分成大量面积相同的小块,取每个小块的中心作为入射光线的光瞳坐标,从而产生入射光线的光瞳坐标阵列。光线阵列生成程序产生光线光瞳坐标阵列的同时,保证每条光线代表光瞳上相同的面积,进而能够代表相同的光强^[17-18]。图 3 是使用光线阵列生成程序产生的 0.1 弧度间隔(入瞳边缘),0.1 半径(归一化半径)间隔,在遮拦比为 0.5 的环形入瞳上光线的光瞳坐标阵列。可见坐标点在入瞳上均匀分布,每条光线能够代表相同的光强。

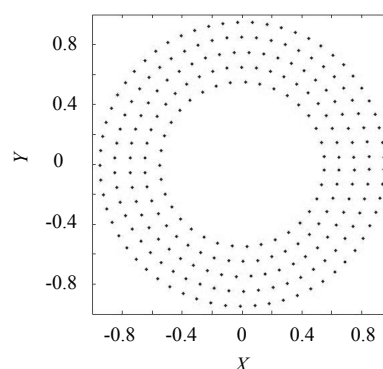


图 3 光线坐标阵列

Fig.3 Coordinate array of rays

得到入射光线的光瞳坐标后,要完全确定入射光线还需要该光线的视场坐标。由于本例评价的掠入射系统是用于观测太阳的望远系统,同一视场的入射光线为平行光,它们的归一化视场坐标和归一化的物方视场相同。最后要按照 ZEMAX 要求的格式,将光线数据存成结构数组的形式,ZEMAX 要求的数组元素的结构如下^[19]:

```
typedef struct
{
```

```
double    x, y, z, l, m, n, opd, intensity;
double    Exr, Exi, Eyr, Eyi, Ezr, Ezi;
int       wave, error, vigcode, want_opd;
}DDERAYDATA;
```

结构体中每个变量所代表的意义根据光线追迹模式的不同会稍有不同,各个变量的具体意义可参考 ZEMAX 操作手册^[19]。根据所产生光线阵列的光瞳坐标和视场坐标,将光线数据存储为以上结构体数组的形式,并根据要求设置 0 元素的数据,等待传送给 ZEMAX。

1.2 建立 DDE 链接追迹光线

一旦所有的光线数据定义成功,就可以与 ZEMAX 建立 DDE 链接。将光线数据数组传递给 ZEMAX “服务器”,由 ZEMAX 进行光线追迹。追迹结果仍然以结构数组的形式传回 Matlab。Matlab 收到结果后,首先确认结果的正确性然后再对结果做进一步的处理。

使用 Matlab 与 ZEMAX 建立链接的基本步骤如下^[20]:

- 1) 打开 ZEMAX 和 Matlab。
- 2) 通过 Matlab 用 ddeinit 函数建立 DDE 链接。
- 3) 用 Matlab 函数发送请求并接收从 ZEMAX 返回的数据。
- 4) 用 dderm 函数结束与 ZEMAX 的链接。

1.3 追迹光线结果的处理

1.3.1 点扩散函数的计算

从 ZEMAX 返回的数据是一系列点的坐标,也就是光线在像面上交点的几何坐标。由这些几何坐标可以得到系统像面上的点列图。由于每个点代表一条光线,根据定义光线阵列时的假设每条光线代表相同的光通量,因此根据点列图可以得到像面上这个点像的亮度分布即几何点扩散函数。掠入射系统为大像差系统,按照像差理论,大像差系统的点扩散函数可以近似由其几何点扩散函数来表示^[17]。由于掠入射系统入瞳的遮拦比很高导致其孔径的衍射作用比普通光学系统要大很多,为了更加精确的描述光学系统的成像特性,在计算其点扩散函数时还要考虑环形入瞳的衍射作用。根据波动光学和傅里叶光学理论可以得到掠入射系统环形孔径衍射作用的数学表达式:

$$I = \frac{I_0}{(1-\varepsilon^2)^2} \left[\frac{2J_1(Z)}{Z} - \varepsilon^2 \frac{2J_1(\varepsilon Z)}{\varepsilon Z} \right]^2$$

其中 $Z = \frac{\pi D r}{f \lambda}$ 。并利用 Matlab 编程语言将此表达式写

成程序的形式作为系统的衍射点扩散函数^[21-23]。然后将几何点扩散函数和衍射点扩散函数进行卷积运算,把卷积运算的结果作为系统最终的点扩散函数^[24-25]。通过以上方法得到双曲面-双曲面型掠入射系统在视场为 10.5' 时的点扩散函数,如图 4。

1.3.2 能量集中度的计算

光学系统的点扩散函数是得到其它各种像质评价标准的基础,但点扩散函数并不是评价光学系统常用的方法。通常设计人员采用能量集中度和调制传递函数来评价掠入射光学系统像质好坏。

能量集中度,即像面上像点光斑的能量随半径的变化。它的横坐标为光斑半径,纵坐标是在所选的半径范围内的光强占光斑总光强的百分比。这种方法能更直观地看出点目标成像的弥散程度。可以采用主光线与像面交点坐标,或者点扩散函数的质心作为光斑中心^[26]。这里采用点扩散函数的质心作为光斑中心,通过计算不同半径范围内点扩散函数的强度占总强度的百分比,即得到掠入射系统的能量集中度。

1.3.3 线扩散函数和调制传递函数的计算

线扩散函数是光学系统对物面上线所成的像,它可以通过点扩散函数的积分求得。通过对点扩散函数

The PSF of grazing incidence optical system

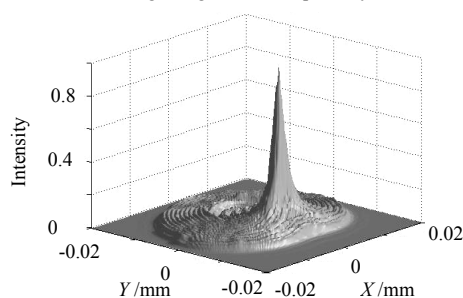


图 4 双曲面-双曲面型掠入射系统的点扩散函数

Fig.4 PSF of H-H grazing incidence optical system

沿子午和弧矢方向积分, 即可以得到光学系统子午和弧矢方向的线扩散函数^[27]。调制传递函数(MTF)是表示光学系统对空间频率响应的函数, 是目前对光学系统进行像质评价时一种常用的方法。调制传递函数是光学传递函数的模, 光学传递函数是光学系统点扩散函数的傅里叶变换^[26-28]。所以只需要把前面求得的点扩散函数或线扩散函数进行傅里叶变换, 然后求模即可得到光学系统的调制传递函数。

2 应用及结果分析

根据以上介绍的方法, 我们使用 Matlab 编程语言编写了针对掠入射系统的像质评价程序。并在普通个人计算机(主频 3.0 GHz、内存 1.5 GB、Windows XP 操作系统)上使用该程序同时追迹约 9 000 条光线(继续增加追迹光线数量, 程序的计算结果并没有显著变化, 说明该光线密度比较合适), 计算了 Wolter I 型和经过优化后的双曲面-双曲面(H-H)型掠入射系统的各种像质评价标准。试验发现, 该像质评价程序同时计算出掠射光学系统的点扩散函数、线扩散函数、能量集中度以及 MTF 四种像质评价指标共耗时 65 s, 说明该像质评价程序能够较快地对掠射系统进行像质评价。文中使用的 Wolter I 型掠入射系统和优化后 H-H 型掠入射系统的光学参数和结构参数见表 1, 由 ZEMAX 得到它们的点列图如图 5^[14]。

表 1 掠入射系统参数

Table 1 Parameters of grazing incidence optical system

Parameters of GI optical system	Wolter I	H-H
Diameter of aperture e/mm	182.47	182.46
Nominal focal length /mm	900	900
Field of view /($^{\circ}$)	0.7	0.7
Wavelength range /nm	0.6~6	0.6~6
Obscuration ratio of aperture	0.986 447	0.986 451
Length of each mirror/mm	50	50
Geometrical collecting area / mm^2	704.039 6	703.779 1
Vertex radius of primary mirror /mm	-2.241 0	-2.144 9
Conic constant of primary mirror	-1.000 000	-1.000 051
Vertex radius of secondary mirror /mm	-2.250 5	-2.276 7
Conic constant of secondary mirror	-1.004 980	-1.004 962
Separation of joint and primary vertex /mm	1 757.206 1	1 797.530 3
Separation of two vertices /mm	-906.079 0	-948.799 8
Separation of secondary vertex and focus /mm	-1.126 8	1.322 2

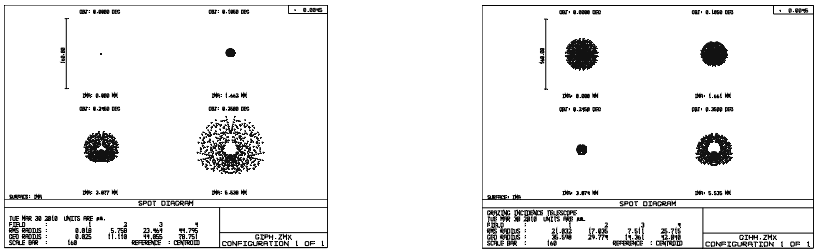


图 5 两种掠入射系统的点列图

Fig.5 Spot diagram of grazing incidence optical system

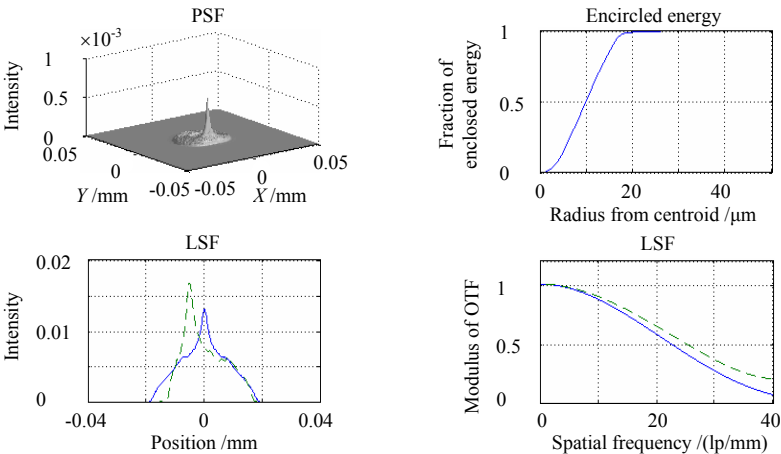


图 6 双曲面-双曲面结构掠入射系统 0.5 视场时各种成像指标

Fig.6 Some image quality criteria of H-H grazing incidence optical system at 0.5 field

我们使用像质评价程序计算了 Wolter I 型和双曲面-双曲面型的掠入射系统在不同视场时的成像质量, 并对计算结果进行对比分析。计算得到双曲面-双曲面掠入射系统结构在 0.5 视场时的点扩散函数、能量集中度、线扩散函数以及调制传递函数 MTF 如图 6 所示。

作为全面评价掠入射系统像质的重要依据, 通过像质评价程序得到 Wolter I 型和双曲面-双曲面型的掠入射系统在中心、0.3、0.7 以及边缘视场时的能量集中度和调制传递函数如图 7 所示。

由图 7 和图 8, 可以得到 Wolter I 型和双曲面-双曲面型的掠入射系统在不同视场时包含 80% 能量时的弥散圆半径, 如表 2。由上图和表 2 可以得到, Wolter I 型结构掠入射系统在中心视场和 0.3 视场的成像质量优于双曲面-双曲面型掠入射系统; 双曲面-双曲面结构的掠入射系统在 0.7 和边缘视场时, 能量集中度和 MTF 都比 Wolter I 型结构有明显的提高, 其中 0.7 视场时包含 80% 能量的弥散斑半径为 $9.5 \mu\text{m}$, MTF 在 40 lp/mm 时大于 0.3。由于 0.7 视场远比中心视场包含的信息量大, 0.7 视场的分辨率较中心视场重要, 可以认为双曲面-双曲面结构的掠入射系统成像质量较 Wolter I 型好。为了验证像质评价程序的正确性, 我们以国外公布的太阳掠射望远镜的结构参数^[8]为例, 采用本文的像质评价程序对其成像质量进行计算, 并将计算结果与其公布的太阳图像数据^[29]进行了对比, 结果显示此像质评价程序的计算结果与所公布图像的分辨率基本相符, 能够有效的反应掠射系统的成像质量。

表 2 包含 80% 能量的弥散圆半径

Table 2 Radius of spot including 80% energy

Normalized field	Wolter I / μm	H-H / μm
0.0	<1.5	28.5
0.3	8.0	23.0
0.7	30.5	9.5
1.0	46.0	33.0

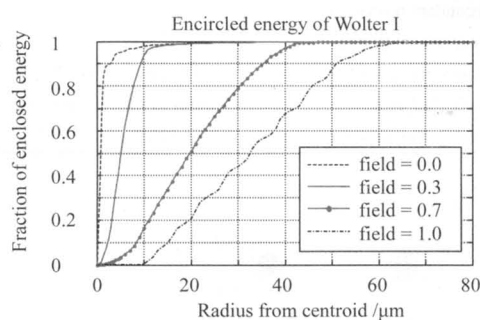


图 7 Wolter I 型掠入射系统不同视场时的能量集中度

Fig.7 FEE of Wolter type I grazing incidence system at different field

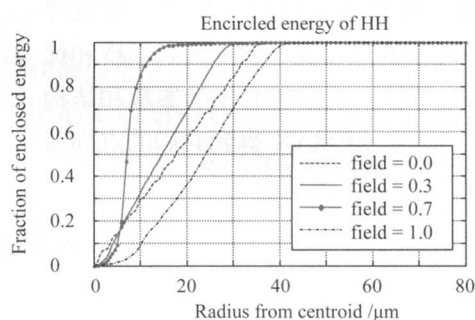


图 8 H-H 型掠入射系统不同视场时的能量集中度

Fig.8 FEE of H-H grazing incidence system at different field

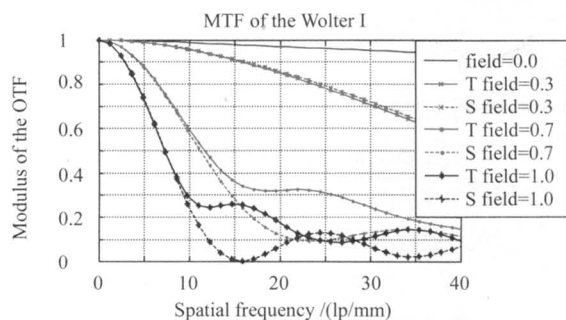


图 9 Wolter I 型掠入射系统在不同视场时的 MTF

Fig.9 MTF of Wolter type I grazing incidence system at different field

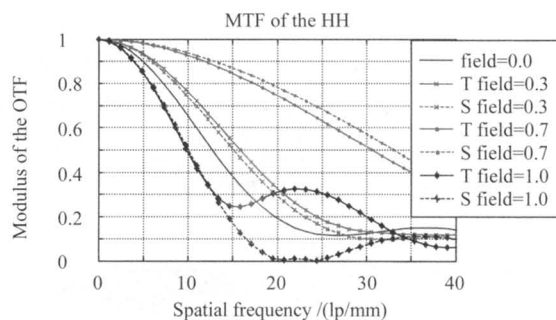


图 10 H-H 型掠入射系统在不同视场时的 MTF

Fig.10 MTF of H-H grazing incidence system at different field

3 结 论

本文针对在使用 ZEMAX 软件对掠入射系统进行优化设计时, 不能直接得到系统的点扩散函数和调制传递函数等像质评价指标的问题, 提出利用 ZEMAX 的扩展功能通过 DDE 接口与 Matlab 建立链接, 进而使用 Matlab 来计算掠入射系统的点扩散函数、能量集中度、线扩散函数和调制传递函数的方法。使用 Matlab

编程语言编写了针对掠入射系统的像质评价程序, 利用该程序分析了 Wolter I 和 H-H 型掠入射望远光学系统在不同视场时, 系统的点扩散函数、能量集中度和调制传递函数等像质评价指标。由此可见, 本文所述方法解决了常规商用软件不能直接用于掠入射光学系统设计优化的缺点, 对掠入射光学系统设计、优化分析具有实际的指导意义。

参考文献:

- [1] Lemen James R, Dexter Duncan, Christopher Edwards, *et al.* The Solar X-ray Imager for GOES [J]. **Proc. of SPIE** (S0277-786X), 2004, **5171**: 65-76.
- [2] 陈波, 尼启良, 曹继红, 等. 空间软 X 射线/极紫外波段正入射望远镜研究[J]. 光学 精密工程, 2003, **11**(4): 315-319.
CHEN Bo, NI Qi-liang, CAO Ji-hong, *et al.* Development of a space soft X-ray and EUV normal incidence telescope [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2003, **11**(4): 315-319.
- [3] 曹志宇, 陆国平, 李保权. 空间太阳 X 射线成像望远镜技术 [J]. 上海航天, 2004(2): 40-44.
CAO Zhi-yu, LU Guo-ping, LI Bao-quan. The Technique of Space Solar X-Ray Telescope [J]. **Aerospace Shanghai**, 2004(2): 40-44.
- [4] 巩岩. 极紫外太阳望远镜成像质量检测系统设计[J]. 光学 精密工程, 2006, **14**(6): 969-973.
GONG Yan. Testing system for performance of EUV solar telescope [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2006, **14**(6): 969-973.
- [5] Mangus J D, Underwood J H. Optical design of a glancing incidence x-ray telescope [J]. **Appl. Opt**(S0003-6935), 1969, **8**(1): 95-102.
- [6] Van Speybroeck L P, Chase R C. Design parameters of paraboloid-hyperboloid telescopes for x-ray astronomy [J]. **Appl. Opt** (S0003-6935), 1972, **11**(2): 440-445.
- [7] 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.
KUANG Yu-guang. Optical design of x-ray imaging telescope [J]. **Acta Optica Sinica**, 1981, **1**(3): 239-246.
- [8] Harvey James E, Krywonos Andrey, Thompson Patrick L, *et al.* Grazing-incidence hyperboloid-hyperboloid designs for wide-field x-ray imaging applications [J]. **Appl. Opt**(S0003-6935), 2001, **40**(1): 136-144.
- [9] Saha Timo T, Zhang William. Equal-curvature grazing-incidence x-ray telescopes [J]. **Appl. Opt**(S0003-6935), 2003, **42**(22): 4599-4605.
- [10] 陈波, 陈淑妍, 巩岩. 一种复合型空间软 X 射线-极紫外波段望远镜设计[J]. 光学技术, 2004, **30**(2): 242-244.
CHEN Bo, CHEN Shu-yan, GONG Yan. Design of a complex space soft X-ray and EUV telescope [J]. **Optical Technique**, 2004, **30**(2): 242-244.
- [11] Werner W. Imaging properties of Wolter I type x-ray telescopes [J]. **Appl. Opt**(S0003-6935), 1977, **16**(3): 764-773.
- [12] Nariai Kyoji. Geometric aberration of a generalized Wolter type I telescope [J]. **Appl. Opt**(S0003-6935), 1987, **26**(20): 4428-4432.
- [13] Saha Timo T. Aberrations for grazing incidence telescopes [J]. **Appl. Opt**(S0003-6935), 1988, **27**(8): 1492-1498.
- [14] 李顺, 巩岩. 掠入射光学系统设计 [J]. 光学学报, 2009, **29**(8): 2276-2281.
LI Shun, GONG Yan. Design of Grazing Incidence Optical System [J]. **Acta Optica Sinica**, 2009, **29**(8): 2276-2281.
- [15] 张文静, 刘文广, 刘泽金. Zemax 与 Matlab 动态数据交换及其应用研究[J]. 应用光学, 2008, **29**(4): 553-556.
ZHANG Wen-jing, LIU Wen-guang, Liu Zhe-jin. Dynamic data exchange between Zemax and Matlab [J]. **Journal of Applied Optics**, 2008, **29**(4): 553-556.
- [16] 刘日昇, 高卫华. Matlab 的动态数据交换及其应用研究[J]. 测控技术, 2001, **20**(6): 39-40.
LIU Ri-sheng, GAO Wei-hua. Matlab's dynamic data exchange and it's application [J]. **Measurement & Control Technology**, 2001, **20**(6): 39-40.
- [17] 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.

- WANG Zhi-jiang, GU Pei-sen. **Practical Handbook of Optical Technology** [M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 242-259.
- [18] Forbes G W. Optical system assessment for design: numerical ray tracing in the Gaussian pupil [J]. **J. Opt. Soc. Am. A** (S1084-7529), 1988, **5**: 1943-1956.
- [19] ZEMAX Optical Design Program User's Guide [K]. ZEMAX Development Corporation, 2005: 270, 228-229.
- [20] Derek Griffith. How to Talk to ZEMAX from MatLab [EB/OL]. 2006 [2009]. <http://www.zemax.com/kb/articles>.
- [21] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999: 247-270.
- YU Dao-yin, TAN Heng-ying. **Engineering Optics** [M]. Beijing: China Machine Press, 1999: 247-270.
- [22] 吕乃光. 傅里叶光学: 第二版[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 31-48.
- LÜ Nai-guang. **Fourier Optics: 2nd ed** [M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 31-48.
- [23] Tschunko Hubert F A. Imaging performance of annular apertures [J]. **Appl. Opt**(S0003-6935), 1974, **13**(8): 1820-1823.
- [24] Thompson Patrick L, Harvey James E. Systems engineering analysis of aplanatic Wolter type I x-ray telescopes [J]. **Opt. Eng** (S0091-3286), 2000, **39**(6): 1677-1691.
- [25] Thompson Patrick L, Harvey James E. Image quality criteria for wide-field x-ray imaging applications [J]. **Proc. of SPIE** (S0277-786X), 1999, **3779**: 390-400.
- [26] 李春芳. Wolter X 射线成像系统设计及成像质量分析 [D]. 大连: 大连理工大学, 2007: 50-55.
- LI Chun-fang. **Design and Imaging Quality Analysis of Wolter X-ray Imaging System** [D]. Dalian: Dalin University of Technology, 2007: 50-55.
- [27] Smith Warren J. **Modern Optical Engineering: 3rd ed** [M]. New York: McGraw-Hill, 2000: 361-362.
- [28] Harvey James E, Krywonas A. A Systems Engineering Analysis of Image Quality [J]. **Proc. of SPIE**(S0277-786X), 2000, **4093**: 379-388.
- [29] Harvey James E, Krywonas A, Atanassova Martina, *et al.* The Solar X-ray Imager on GOES-13: Design, Analysis and On-orbit Performance [J]. **Proc. of SPIE**(S0277-786X), 2007, **6689**: 0I-1-0I-9.



开发的良朋 应用的益友

《电脑开发与应用》月刊

欢迎订阅 诚征广告

本刊集信息、知识、趣味、可读性于一体,以计算机实用技术见长,博采、精选国内外电脑研究、开发与应用的精华。具有军事、兵器控制色彩,军用计算机的开发,将用相当的篇幅刊登企业信息化、信息化建设、信息传输处理与管理方面的信息及文章,关注 IT 产业。尤其是刊登 Internet、Agent、嵌入式系统、片上系统、构件技术、网格技术、软硬件二次开发、中间件技术、电脑测控、CORBA、开放式与微内核技术、柔性敏捷制造等方面的内容,跟踪报道世界最新技术。

本刊为大 16 开 (A4)、80 页、8 元/期、中央级之月刊。每月 5 日出版。

全国各地邮局均可订阅,邮发代号: 22-96 国外代号: M4257

省优部优 华北优秀

联系地址: 太原市 193 信箱 电脑开发与应用编辑部 邮编: 030006

电话: (0351) 8725025 传真: (0351) 8725207 E-mail: DNKF@chinajournal.net.cn