

X 射线成象望远镜光学设计

匡裕光

(中国科学院长春光学精密机械研究所)

提 要

本文提出用同轴不共焦抛物面——双曲面掠射系统,代替现在流行的同轴共焦系统。利用不共焦引入预定量的球差,可以抵消一部分轴外球差。与 Wolter-I 型(象面离焦)相比较,在 $0\sim 15$ 弧分视场内象质有显著改善,在 $15\sim 20$ 弧分视场象质相同。指出用 MTF 评价,可以比用线扩散函数或均方根弥散圆(rms)更准确地评价这类系统的象质。本文还讨论了光阑设置及望远镜口径尺寸公差计算方法。把口径误差表示为焦点与端面的相对位移,可以定量计算口径误差对象质的影响。计算结果与国外已发表的数据基本符合。镜面口径差的公差与圆度公差比口径公差的要求严格一个数量级以上,抛物面比双曲面的口径差的公差严格 $4\sim 5$ 倍。

一、序 言

X 射线成象望远镜所用波段是软 X 射线,波长范围为 $3\sim 60 \text{ \AA}$ 。由于所有介质对软 X 射线的折射率都是接近而略小于 1,故 X 射线光学系统只能是掠射式的,掠射角约为 $1^\circ\sim 3^\circ$ 。在掠射条件下,单个抛物面严重违反阿贝正弦条件,有极大的彗差,不能用做成象系统。1952 年, H. Wolter 首次发表了 X 射线成象光学系统,指出奇数个轴对称掠射面不能消除彗差,不能用做成象系统;为满足阿贝正弦条件,必须用偶数个轴对称掠射面。H. Wolter 还给出了三种 X 射线成象光学系统型式,都是由两个同轴共焦二次曲面组成。其中第一种型式由一对连接在一起的同轴共焦点的抛物面和双曲面组成,基本上满足阿贝正弦条件。由于连接方便,便于装调,成为 X 射线成象望远镜的基本结构形式,叫做 Wolter-I 型^[1][图1(a)]。有许多文章详细讨论过这种望远镜的光学设计问题。

Wolter-I 型不严格满足阿贝正弦条件。H. Wolter^[2], L. P. Van Speybroeck, R. C. Chase^[7]又设计了严格满足阿贝正弦条件的系统。这种系统采用了高次非球面。因为 Wolter-I 型的正弦差很小,这种系统对 Wolter-I 型的改进甚微,实际上没有采用。

由于抛物面和双曲面的近轴曲率半径几乎相等,匹茨瓦和为零。计算表明,各个视场入射到抛物面、双曲面相交圆附近抛物面上窄带的子午和弧矢光束,通过双曲面后都聚焦在同一个象平面上,因此, Wolter-I 型的细光束场曲为

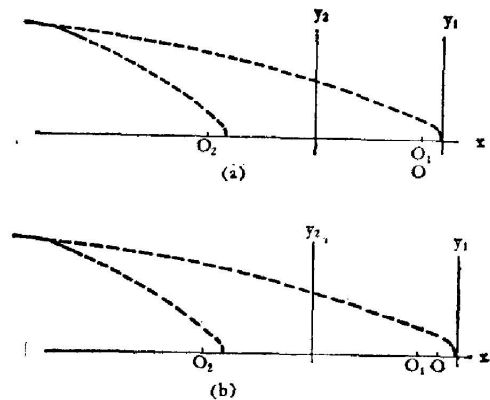


图1 X 射线成象望远镜光学系统示意图
(a) 同轴共焦抛物面双曲面系统(Wolter-I 型)
(b) 同轴不共焦抛物面双曲面系统

零。它的主要象差是较大的轴外球差,与象高的平方成正比,是不能校正的。因此,各个视场的最佳象面位置是一个球面。C. E. Winkler, D. Korsch 认为场曲是 Wolter-I 型的主要象差^[8]。他所说的场曲是表示 0.7 带孔径的轴外球差的宽光束场曲,与上述最佳象面位置决定的球面是一致的。由于还不能把接收器件表面做成球面形状,这项改进也没有被采用。轴外球差是限制 Wolter-I 型可用视场大小的主要因素。

为改进轴外的象质,采用以下两种方法^[3,4]:

1. 限制双曲面的轴向长度,使来自抛物面的轴上光线全部通过,而使轴外光线渐晕,有意拦掉一些不需要的光线。

2. 象面向着物镜方向沿光轴离焦,使轴外光束处于较有利的象面位置。由于通光孔是一个狭窄的圆环,离焦后,轴上点和小视场的点列图也是一个很窄的圆环,圆环中心没有光线,使轴上点和小视场的分辨率下降[图 2(a)]。

改进轴外象质的另一种方法是使二次曲面高次化,有意引进一定量的球差,抵消一部分轴外球差^[9]。

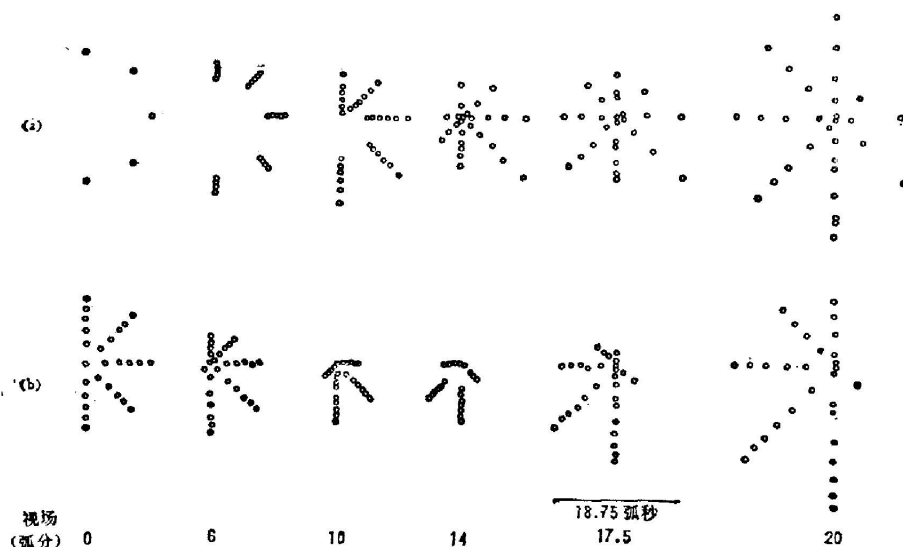


图 2 通过光瞳方位角 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$ 计算的点列图。抛物面长度 5 等分。
(a) Wolter-I 型,象面离焦 $\Delta l = -0.5$ 毫米; (b) 同轴不共焦系统,焦点分开距离 $\Delta d = -23$ 毫米

二、一点新的想法

Wolter-I 型有意利用双曲面一对焦点的共轭关系,使抛物面和双曲面的焦点重合,因此,来自无穷远处的轴上光线在双曲面的另一个焦点处完善成象。

我们反其意而用之,故意使抛物面和双曲面的焦点沿光轴方向偏离一个距离 Δd 。来自无穷远的轴上光线不再在双曲面的焦点处成象,也不是一个完善的象点。不同孔径带的轴上光线与光轴的交点位置不同,引进了一定的球差量。球差量的大小和正负,由同轴抛物面、双曲面焦点沿轴向偏离的大小和方向 Δd 决定[图 1(b)]。该球差量可以抵消一部分轴外球差。

设计步骤: 首先, 利用已知公式求解有预定焦距、视场角、掠射角、集光面积的 Wolter-I 型系统的结构参数^[9], 求得不同视场的象差。第二步, 控制抛物面、双曲面焦点的轴向距离 Δd 的大小和方向, 使引进的球差量与 Wolter-I 型指定视场的轴外球差的一半等值反号, 结果使轴上点和指定视场有等值反号的球差, 在象面上有相同大小的弥散圆; 而 0.7 倍指定视场处几乎完全消除了球差。与 Wolter-I 型(象面离焦)比较, 在指定视场有相同的象质改善时, 同轴不共焦系统的轴上点和小视场的象质有明显改善, 并使 0.7 倍指定视场附近象差极小[图 2(b)]。

三、象质评价方法

1. 线扩散函数

X 射线成像望远镜成像质量的一种流行的评价方法是把线扩散函数的峰值高度的 50% 处的全宽度取作望远镜的分辨率极限^[9]。简称 50% 宽度, 单位弧秒。

图 3 表示有相同性能指标的三种望远镜的 50% 宽度与视场的关系: 1. Wolter-I 型, 不离焦; 2. Wolter-I 型, 象面离焦量 $\Delta l = -0.4$ 毫米; 3. 同轴不共焦系统, 抛物面、双曲面焦点间距离 $\Delta d = -23$ 毫米。 Δl , Δd 的选取是使 20 弧分视场与轴上点有同样大小的弥散圆。

例 1 的 50% 宽度随视场增长很快, 可用视场有限, 视场大于 10 弧分。例 2, 例 3 都比例 1 好。

在 0~10 弧分视场内, 例 3 比例 2 的 50% 宽度显著减小。15~25 弧分视场内, 两者的 50% 宽度相近。

例 3 中, 在 0~20 弧分视场内的 50% 宽度很相近, 约为 4~7 弧秒。子午、弧矢方向的 50% 宽度曲线几乎重合。这些都优于例 2。

此外, 即使两个视场的 50% 宽度相同, 它们

的线扩散函数的峰值高度和能量分布情况也可以大不相同。仅用 50% 宽度一个值不能全面描述图象的质量。有时还要加上峰值高度 30%, 10% 处的全宽度值^[9]。

图 4 是三例的 30% 宽度与视场的关系曲线。例 2, 例 3 的 30% 宽度相近。

2. 程序描述

我们选取几何光学传递函数为象质评价方法。这对于评定光学镜头在由多组元串联组成的光电系统中的作用是特别方便的。由于现有光学工艺水平和接收元件的分辨能力只能达到 5~50 线对/毫米, 远远低于该系统的截止频率, 因此, 可以忽略衍射的影响, 仅对点列图作傅里叶变换, 求得几何光学传递函数。

先求出抛物面和双曲面的交点的 x 坐标。抛物面和双曲面的轴向长度分别由集光面积

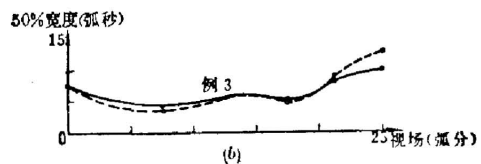
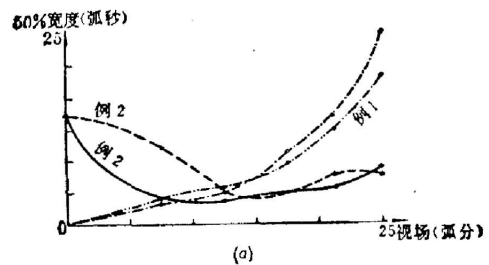


图 3 线扩散函数 50% 宽度——视场曲线

- (a) —····· 例 1. 子午
 —····· 例 1. 弧矢
 ———— 例 2. 子午
 ———— 例 2. 弧矢
 (b) ———— 例 3. 子午
 ———— 例 3. 弧矢

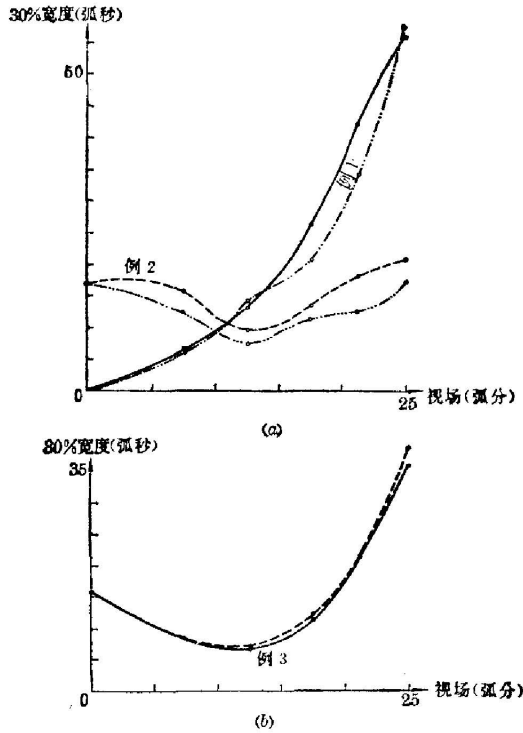


图 4 线扩散函数 30% 宽度——视场曲线

- (a) ————— 例 1. 子午
- - - - - 例 1. 弧矢
- - - - - 例 2. 子午
- - - - - 例 2. 弧矢
- (b) ————— 例 3. 子午
- - - - - 例 3. 弧矢

和轴外渐晕确定。抛物面沿轴向 20 等分, 光瞳方位角 $0^\circ \sim 180^\circ$ 分为 90 等分, 每个视场半个光瞳追迹 1800 条光线。双曲面的轴向长度是限制轴外光线的边界条件, 与双曲面的交点在该边界条件之外的光线均舍去。每个视场实际通过的光线数与光瞳取点数之比为该视场的渐晕系数。

对已计算的点列图沿子午方向和弧矢方向 (以及任何其它方向) 求得线扩散函数。沿 y, z 方向等间隔长条的宽度取为 0.005 毫米。对焦距 1000 毫米, 相当于 1 弧秒。

3. 光学传递函数

表 1 列出例 1 的 MTF。图 5 是例 2, 例 3 的 MTF 曲线。

视场大于 9 弧分, 例 2, 例 3 的 MTF 都优于例 1。

例 2 中, 由于象面离焦后轴上和小视场的点列图是一个很窄的圆环, $0 \sim 7.5$ 弧分视场出现伪分辨现象, 小视场的分辨率很低。

例 3 中, $0 \sim 7.5$ 弧分视场没有伪分辨。 $0 \sim 15$ 弧分视场, 例 3 比例 2 的 MTF 显著提高。 $15 \sim 20$ 弧分视场, 两者的 MTF 相近。 $20 \sim 25$

弧分视场, 例 2 的 MTF 略高于例 3。此外, 例 3 沿子午和弧矢方向的 MTF 曲线比较一致。

表 1 Wolter-I 型(不离焦)MTF

频率(线对/毫米)	视 场 角 (弧分)					
	0	7.5	12.5	17.5	21.25	25
5 M_T^* (周期 37.5 弧秒) M_S^*	1	0.9235	0.598	0.199	0.123	0.0901
		0.9204	0.564	0.158	0.143	0.0988
10 M_T (18.75'') M_S	1	0.726	0.215	0.0737	0.0828	0.0474
		0.716	0.143	0.0985	0.0712	0.0447
20 M_T (9.38'') M_S	1	0.335	0.0728	0.0559	0.0337	0.0270
		0.266	0.0860	0.0477	0.0225	0.0215
30 M_T (6.25'') M_S	1	0.273	0.0796	0.0319	0.0220	0.0174
		0.131	0.0664	0.0232	0.0194	0.0113
40 M_T (4.69'') M_S	1	0.159	0.0408	0.0165	0.0186	0.0225
		0.159	0.0515	0.0258	0.0156	0.0121

* M_T ——子午方向 MTF, M_S ——弧矢方向 MTF。

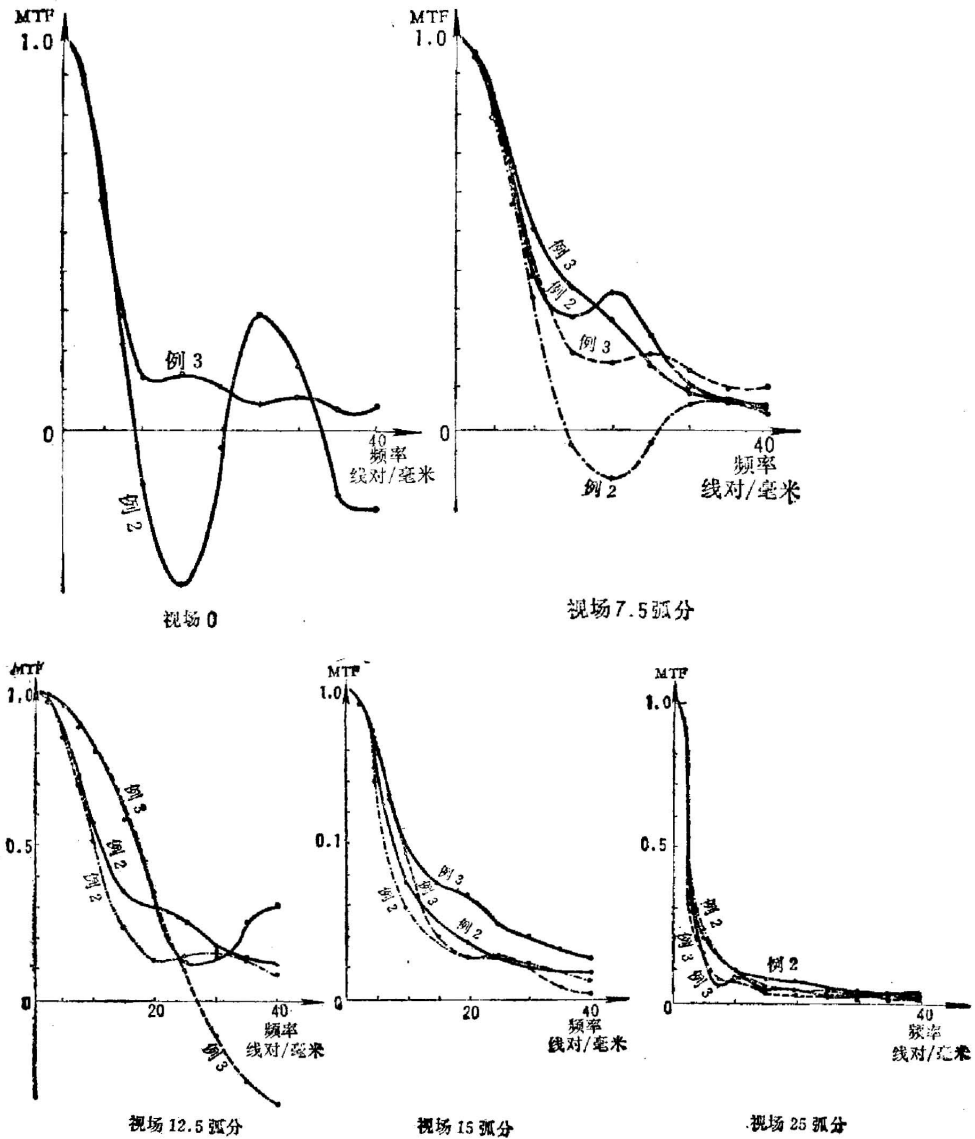


图 5 几个视场的 MTF 曲线

—— 子午 - - - - 例 3. 弧矢 - · - · - 例 2. 弧矢

以上通过点列图、线扩散函数、MTF 三种评价方法, 都说明在 0~15 弧分视场内, 例 3 的象质比例 2 有显著改善。在 15~25 弧分视场内, 两者的象质无显著差别。由于 0~15 弧分视场对用于观测太阳的 X 射线成像望远镜很重要, 以及此项改进是由两个二次曲面实现的, 没有利用高次非球面, 不要任何附加的加工、检测条件, 因此是有意义的。

四、杂光光阑的设置

光阑 1 (图 6) 的口径必须大于双曲面的后口径而略小于抛物面、双曲面相交圆的口径, 以使轴外光束充满抛物面表面。

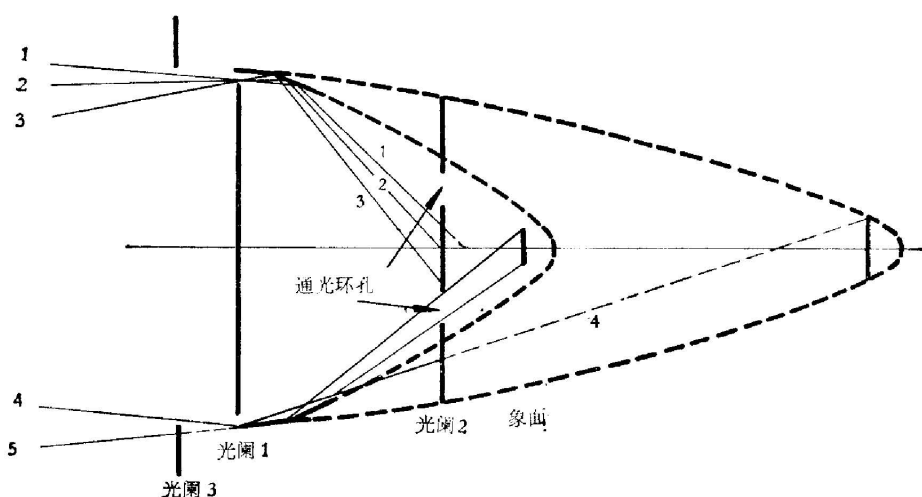


图 6 杂光光阑示意图

圆环形光阑 2 设置在双曲面的后端面和象面之间。圆环的内圆拦去通过双曲面一次反射的光线,外圆拦去通过抛物面一次反射的光线。若光阑 2 设置在双曲面后端面处,则不能拦去从抛物面一次反射的光线。由于一次反射的光线与象面交点的高度远大于有效象高,根本不参与成象,因此,即使不设置光阑 2 也不会出现鬼象。

光阑 3 用于拦去不利于成象的轴外光线。

五、望远镜尺寸公差计算

组成 X 射线望远镜的抛物面、双曲面,在加工过程中按各自的面形检测。加工完成之后,虽然长度、口径、圆度、面形有误差,这些误差只引起非球面参数的微小变化,以及抛物面、双曲面焦点相对于端面的位移,而不是面形偏离了抛物面、双曲面。计算表明,口径误差引起的非球面参数变化是很小的。口径误差主要使端面与焦点的相对位置发生变化,从而使抛物面与双曲面的焦点之间的轴向距离发生变化,这种变化在象面上产生一个球差增量。从指定的口径误差,计算出焦点的位移量,以及球差增量;再从可允许的球差增量反推回去,求得允许的口径误差公差。

对长度的公差要求是不严格的。口径尺寸公差包括端面口径误差,前后端面口径差值的公差,抛物面、双曲面相交圆口径差值的公差,以及端面口径圆度的公差。口径误差引起的焦点位移量可用抛物面、双曲面公式严格计算。为计算圆度公差,把端面对圆的偏离看作椭圆,长短轴方向的口径是不同的,这种差别使沿长短轴方向的光束聚焦位置不同,引起中心象散。圆度公差与前后端面口径差值的公差计算方法相同。因对中心象散的要求比球差的要求严格,因此圆度公差也比口径差值的公差的要求严格。

设前后端面半口径的设计值为 y_1 , y_2 , 实测轴向长度为 l 。加工后对应值加 * 号表示,

$$y_1^* = y_1 + \Delta y_1, \quad y_2^* = y_2 + \Delta y_2。$$

对于抛物面, $y^2 = 2rx$,

$$\Delta x = x^* - x = \frac{y_1^*}{2r^*} - \frac{y_1^2}{2r},$$

$$r^* = (y_2^{*2} - y_1^{*2})/2l_0.$$

对于双曲面,

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{c^2 - a^2} = 1.$$

设在检测时保持 $2c$ 不变(光源与象点距离), 得

$$a^{*6} - \left[\frac{(y_2^{*2} - y_1^{*2})^2}{4l^2} + \frac{1}{2} (y_2^{*2} + y_1^{*2}) + 2c^2 + \frac{1}{4} l^2 \right] a^{*4} \\ + \frac{1}{2} [l^2 + (y_1^{*2} + y_2^{*2}) + 2c^2] c^2 a^{*2} - \frac{1}{4} l^2 c^2 = 0,$$

$$a^* = a \times \sqrt{1 + \frac{y_1^{*2}}{c^2 - a^{*2}}}.$$

已发表的唯一公差数据是 $\Delta y_1 = \Delta y_2 = 0.075$ 毫米, $\Delta(y_1 - y_2) = 0.013$ 毫米, 圆度公差 0.005 毫米^[10]。该文没有说明抛物面与双曲面的公差有无区别。把该望远镜的参数代入本文的公式, 计算结果为:

抛物面:

Δy_1 (毫米)	+0.075	0	+0.013
Δy_2 (毫米)	+0.075	+0.013	0
Δr (毫米)	-0.00031	-0.01237	+0.01392
Δx (毫米)	4.11	-24.02	+28.27

双曲面(令 $\Delta c = 0$)

Δy_1 (毫米)	+0.75	0	+0.2	-0.2
Δy_2 (毫米)	+0.75	-0.2	0	0
Δa (毫米)	+0.001255	-0.07323	-0.07362	+0.07169
Δx (毫米)	13.984	-90.3	-86.7	+94.9

把双曲面的误差值化为与抛物面相同的值, 有:

Δy_1 (毫米)	0.075	0	0.013	-0.013
Δy_2 (毫米)	0.075	-0.013	0	0
Δa (毫米)	0.0001255	-0.00476	-0.00479	+0.00466
Δx (毫米)	1.4	-5.87	-5.64	+6.17

对于上列光学系统、抛物面、双曲面焦点相对位移 $\Delta x = 5$ 毫米, 引起的球差增量不大于 1 弧秒, 对象质无明显影响, 现按这个量考查以上计算结果。

注意到抛物面、双曲面前后端面口径同时增减 Δy 时, 焦点相对于端面的位移是同方向的, 可以互相抵消一部分。当 $\Delta y = 0.075$ 毫米时, $\Delta x_B = 2.7$ 毫米是允许的。必要时还可放宽一倍以内。

双曲面的口径差公差为 0.013 毫米, 圆度公差为 0.005 毫米, 引起的 Δx 不大于 6 毫米, 中心象散的轴向几何量不大于 2 毫米也是合理的。

抛物面口径差公差为 0.013 毫米, 引起焦点位移 $\Delta x = 24 \sim 28$ 毫米是不能允许的。即使把球差增量的允许值放宽到 2 弧秒, 也要求口径差公差为 0.005 毫米, 圆度公差还应更严

格一些。

抛物面、双曲面相交圆的口径误差与口径的误差公差相同, 即 $\Delta y = 0.075$ 毫米。为避免拦光, 双曲面口径应与抛物面口径相等或稍大。

口径差的公差和圆度公差比口径公差的要求严格一个数量级以上, 因为口径差值的误差改变表面斜率, 使焦点位移变大。

抛物面比双曲面的口径差公差的要求严格 4~5 倍, 因为抛物面的斜率通常为双曲面的斜率的 1/3, 因此, 对相同的口径误差量, 抛物面斜率变化引起的焦点位移量比双曲面至少大 3 倍。

由于 X 射线成象望远镜的光学系统结构大致相同, 以上分析也适用于参数不同的别的望远镜。误差允许值应随焦距、掠射角、集光面积作相应的改变。

在总装时, Wolter-I 型和同轴不共焦系统有较大差别。前者总装后, 轴上点应为理想象点, 象质可用刀口法检测。后者总装后, 轴上点有较大的象差, 象质依赖于抛物面和双曲面焦点间的轴向偏离量 Δd , 可以微调抛物面后端面和双曲面前端面之间的间隙, 使 Δd 满足严格的公差要求。最佳象面位置和象质由实拍确定。

作者对王大珩同志、薛鸣球同志的讨论、指导、审阅原稿; 对韩之杰同志编制计算程序表示感谢。

参 考 文 献

- [1] H. Wolter; *Ann. Phys.*, 1952, **10**, 94.
- [2] H. Wolter; *Ann. Phys.*, 1952, **10**, 286.
- [3] J. D. Mangus, J. H. Underwood; *Appl. Opt.*, 1969, **8**, No. 1 (Jan), 95.
- [4] L. P. Van Speybroeck, R. C. Chase; *Appl. Opt.*, 1972, **11**, No. 2 (Feb), 440.
- [5] R. Giacconi, B. Rossi; *Space Sci. Rev.*, 1969, **9**, No. 1 (Feb), 3.
- [6] J. H. Underwood, J. E. Milligan *et al.*; *Appl. Opt.*, 1977, **16**, No. 4, (Apr), 858
- [7] L. P. Van Speybroeck, R. C. Chase; *Appl. Opt.*, 1973, **12**, No. 5 (May), 1042.
- [8] C. E. Winkler, D. Korsch; *Appl. Opt.*, 1977, **16**, No. 9 (Sep), 2464.
- [9] W. Werner; *Appl. Opt.*, 1977, **16**, No. 3 (Mar), 764.
- [10] J. Kevin Silk; *Proc. SPIE*, 1977, **106**, 115.

本文的工作完成于 1979 年 7 月。1980 年 2 月, 蒋筑英同志把本文内容与西德地外所 Heinrich Bräuninger 博士进行过讨论。

Optical design of a grazing incidence X-ray imaging telescope

KUANG YUEGUANG

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 16 May 1980)

Abstract

In this paper, we suggest a grazing incidence mirror system, which consists of a pair of co-axial, non-confocal paraboloid and hyperboloid, instead of the current co-axial, confocal system (i.e. Wolter-I type). By introducing a given amount of spherical aberration into Wolter-I type by means of non-confocal, a part of off-axial spherical aberrations can be compensated. Compared with Wolter-I type, the image quality of this non-confocal system has been improved in the angle field of 0~15 arc min. Results of computation show that MTF is more suitable than line spread function (LSF) or root of mean-square of blur circle (rms) as the criterion for evaluating the image quality of such systems. The set-up of flare stops are considered. Tolerances on the geometrical dimensions of the mirror are analyzed. Heretofore, the error of the size of apertures is represented as a relative shift between the focus and the edge surface of the mirror, and then the image quality is computed accordingly. Substantially, the results are in agreement with the published data. The tolerance of difference of mirror apertures and the tolerance of circularity are more stringent than the tolerance of the size of apertures at least by one order of magnitude. The tolerance of difference of mirror apertures for paraboloid is smaller than that for hyperboloid by a factor of four or five.