

文章编号: 0253-2239(2008)12-2441-05

KBA 型 X 射线显微镜精度控制方法

赵玲玲¹ 胡家升² 孙德林³

(¹ 鲁东大学物理与电子工程学院, 山东 烟台 264025; ² 大连理工大学电子与信息工程学院, 辽宁 大连 116024)
³ 鲁东大学交通学院, 山东 烟台 264025)

摘要 KBA(改进的 KB)型 X 射线显微镜为掠入射非共轴反射成像系统。前一组反射镜和后一组反射镜之间并不是严格垂直的,给像质分析带来相当大的困难。通常的光学 CAD 软件难于适应这种光学系统。把共轴球面折射系统的向量公式调整后设计了掠入射非共轴 KBA 显微镜成像系统程序,并用该程序分析了 KBA 系统的像差及综合误差。分析结果表明,KBA 显微镜系统是大像差系统,当物距公差为 $-0.4 \sim +1$ mm,掠入射公差在 $-8'' \sim 0$,双反射镜夹角公差在 $-20'' \sim 0$,弥散斑的变化在允许的范围内。该程序对于分析和研制 KBA 显微镜系统具有重要意义。

关键词 X 射线光学; X 射线成像; KBA 显微镜; 掠入射反射成像; 消像散系统

中图分类号 O434.19 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082812.2441

Precision Controlling of KBA X-Ray Microscope

Zhao Lingling¹ Hu Jiasheng² Sun Delin³

¹ School of Physics and Electronic Engineering, Ludong University, Yantai, Shandong 264025, China

² School of Electronic and Information Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

³ School of Physics and Electronic Engineering, Ludong University, Yantai, Shandong 264025, China

Abstract KBA X-ray microscope is a grazing non-coaxial incident X-ray microscope. The front pair mirrors are not perpendicular to the back pair strictly, which brings much difficulty to the analysis of image quality. Thus general optical CAD program is not suitable to this kind of optical system. The co-axial spherical refractive vector formulations are adjusted to establish the program for the non-coaxial grazing incident microscope, with which the aberrations and the synthesis errors are analyzed. The analytical results show that KBA microscope is a large aberration system. For an object distance tolerance of $-0.4 \sim 1$ mm, the grazing angle tolerance is $-8'' \sim 0''$, the separation angle tolerance of two mirrors is $-20'' \sim 0''$, and the change of dispersion spot is in an allowed range. This program is meaningful for the analysis and fabrication of KBA microscope.

Key words X-ray optics; X-ray imaging; KBA microscope; grazing reflective imaging; anastigmatic system

1 引 言

介质对 X 射线的折射率小于 1,强烈吸收,给 X 射线成像增加了很多难度。常规的成像方法难以适应 X 射线波段。目前多采用掠入射反射成像和编码孔径成像技术^[1,2]。多层膜技术的发展使得正入射的 X 射线显微镜和望远镜走向实用化,但目前仅限于软 X 射线^[3,4]的长波区域。X 射线的短波波段反射率还没有达到实用水平。

X 射线光刻、空间技术、高能物理^[5,6]以及激光引爆的惯性约束聚变(ICF)的过程诊断等的需

求^[7],使得 X 射线成像技术迅速发展,KB 型显微镜重新引起人们的重视。

KBA 型 X 射线显微镜^[8,9]在子午面和弧矢面均应用两个平行的反射镜。如果两个平行的反射镜之间的夹角为 $\eta(\eta = \theta_1 + \theta_2)$,则入射光线与反射光线的夹角为 2η 。

为中国工程物理研究院的激光等离子体国家重点实验室设计了一套由四个球面反射镜组成的非共轴掠入射 X 射线显微镜,也称为 KBA 型 X 射线显微镜^[8]。在 X 射线显微镜进行像差分析的基础上,

收稿日期: 2007-11-12; 收到修改稿日期: 2008-05-04

作者简介: 赵玲玲(1977-),女,讲师,博士,主要从事图像处理、光学系统设计等方面的研究。E-mail: zll765200@163.com

导师简介: 胡家升(1941-),男,教授,博士生导师,主要从事现代成像技术、图像处理、模式识别、光学系统设计等方面的研究。E-mail: jshu@163.com

研究系统参数的改变对成像质量的影响^[9]。在保证整体质量的前提下,合理的给出各个零部件的加工和装配公差。物距误差为 ± 1 mm,离焦量不超过 ± 100 mm,系统的成像质量变化不大。曲率半径的变化小于100 mm,双反射镜的夹角的改变量控制在 $20''$ 之内。掠入射角的改变对成像质量的影响还是很大的,其误差应该控制在 $10''$ 左右。通过对该显微镜的成像质量分析可以看出,该系统对加工及装配的尺寸精度要求很高。这样的精度要求给测量带来了较大的困难,所以在实际的系统装调过程中需要寻找一种可行而又精度高的测量方法。

2 双反射镜夹角的控制

KBA 双反射镜的夹角是影响 KBA 系统的分辨率的重要因素。由于 KBA 采用的是球面反射镜,反射光会聚焦,使角度测量产生误差,影响测量的精度。在双反射镜中心做两个光阑,由于反射面积很小,这样的反射面可以近似于平面。

装调时双反射镜的夹角由测角仪控制。测角仪发出平行光束(准直光)投射到反射镜上,反射回测角仪。如果反射镜与测角仪的光轴垂直,则光束将反射回其自身,聚焦在焦面中心,这是自准直的基本原理。

四块主镜之间的夹角要求较为严格,为达到要求先将方位维反射镜座侧向固定到精度为 $4.5''$ 的电动转台上,用一台精度为 $4''$ 的测角仪与其中一块已初装上去的反射镜 M_1 自准,然后转动电动转台,使其恰好转 3.2° (图1)。

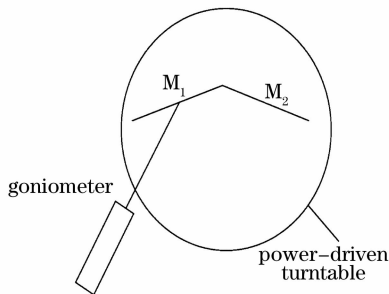


图1 主镜装调示意图

Fig. 1 Schematic of mirror adjustment

如果两块反射镜夹角正确,那么电动转台转 3.2° (转台精度为 $4.5''$)后,第2块反射镜 M_2 也应自准直,聚焦在自准直平行光管的焦面中心。如果不是这样,调整 M_2 反射镜,使其最终达到水平俯仰读数均为相同。调整的最终结果为:水平 $3.2^\circ \sim 7.5''$,俯仰为 $10''$ 。然后用羊干漆封牢。为了防止变形,每过

两天复查一次,测得的变化范围在 $\pm 5''$ 之内。最初主反射镜的镜座采用氧化铝材料,经多日复测发现水平及俯仰两个角度均有较大变化,水平变化小一些但也达到 $1'$,俯仰达 $2' \sim 3'$ 。根据上面的公差计算,水平误差不能大于 $20''$,俯仰变化 $1'$ 也可不影响成像。最后改用 $45^\#$ 钢做反射镜座。调好后复测的结果是,水平俯仰两个角度基本不变,角度精度好于 $4''$,俯仰维及两组间的夹角安装调整方法与此相同。

3 掠入射角的确定

掠入射角是否准确对成像质量影响很大,误差应在 $10''$ 之内^[9]。

由于 KBA X 射线显微镜的主镜系统(包含 $M_1 \sim M_4$ 系统)要安装在激光聚变的靶室内。靶室的空间很小,对掠入射角的要求又很高,显微镜的装调就很困难。调整方法如图2所示。其中 SG_1 是半反半透镜, M_5 是反射镜。在激光腔内经常把一个小的物体放在认为是激光腔中心的位置。激光腔的轴线是通过辅助的 He-Ne 激光控制,为了保证掠入射角的精度,它应该与 M_5 垂直。为了防止杂光, M_5 距离第一块主反射镜24 mm。在中心有一个 $\phi 5$ mm的孔,保证了有效立体角内 X 光能全部通过这个孔径。采用精度为0.5 mm的分划板,该光路保证了掠入射角的精度小于 $10''$ 。进行掠入射角的调整时,He-Ne 激光垂直照射到 M_5 反射镜上,被 M_5 反射返回,经过 SG_1 进入显微镜 MJ。如果聚焦点处在显微镜 MJ 分划板中心,则表明掠入射角是准确的 1.6° 。在装调过程中,为了使 M_5 垂直于激光束,根据聚焦点偏离分划板中心的程度不断地移动主镜系统,直到聚焦点完全处于分划板的中心。

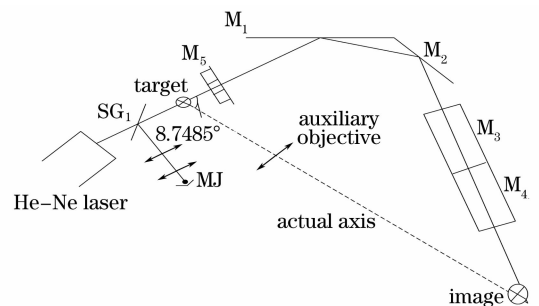


图2 掠入射确定方法

Fig. 2 Method of ensuring grazing incident angle

4 主镜转动角度的确定

为了得到最好的像质,伪轴必须对准目标的中心。图3为 KBA 系统的照明对准光路。KBA X 射

线显微镜与普通光学仪器不同,它的物与像不在同一水平面上,在靶室安装这套仪器就很困难;另外虚光轴与实际光轴夹角达 8.7485° (图 2),对准物镜的光线(沿实轴)与自准光线(沿虚轴)不能同时进入靶室,无法实现目标对准,也无法确定 X 射线主镜的角度。

为了实现方便安装和调整,使实际伪光轴旋转 8.7485° ,两个光轴重合。从卤素灯发出的光和从 He-Ne 激光器发出的光均重合在一起经过反射镜 M_7 ,一部分从反射镜反射后沿原路返回。如果返回的光落到显微镜 MJ 分划板的中心,表明对准准确,掠入射角的精度得到保证。另一部分光(主要是激光)进入主镜系统成像。在图 3 中,反射镜 M_6 是一个半反半透镜。从卤素灯发出的光透过 M_6 直接照射靶球,辅助透镜对靶球成像。如果这个像与前面的 He-Ne 激光通过主镜对靶球所成的像重合,则表明该系统调整好了。

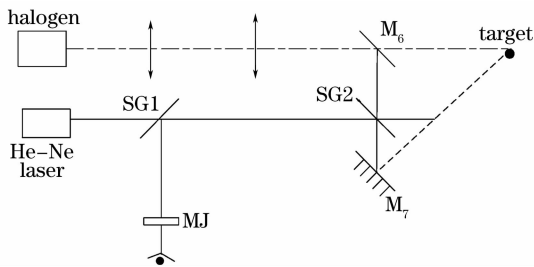


图 3 照明对准光路

Fig. 3 Illuminating and aiming light diagram

主镜的转动由步进电机来控制。步进电机使主镜有三个正交方向的运动:一个纵向的 X ,沿光线传播方向;另外两个运动是横向: Y 是水平, Z 是垂直的。在空气中可以通过调整两个按钮调节它的方向。

以上的主镜转动过程可用几何法和坐标法进行计算,主要用到空间坐标变换和空间运动公式。两种方法都是取第一个反射镜法线上的点,其中 Q_1 点为第一个镜子的中心, K_1 点为法线上离反射镜中心 Q_1 距离为 1 mm 的点计算的。

4.1 空间坐标变换

假设旧坐标系 $Oxyz$ 移到新坐标系 $O'x'y'z'$,它们的基本矢量分别记为 $e_1, e_2, e_3; e'_1, e'_2, e'_3$ 。它们的坐标架公式为^[10]:

$$Oxyz \text{ 系: } [O; e_1; e_2; e_3];$$

$$O'x'y'z' \text{ 系: } [O'; e'_1; e'_2; e'_3];$$

1) 坐标平移

$$\text{设 } \overrightarrow{OO'} = a_1 e_1 + a_2 e_2 + a_3 e_3$$

由新坐标表示旧坐标为

$$\begin{cases} x = x' + a_1 \\ y = y' + a_2 \\ z = z' + a_3 \end{cases}$$

由旧坐标表示新坐标为

$$\begin{cases} x' = x + a_1 \\ y' = y + a_2 \\ z' = z + a_3 \end{cases}$$

2) 坐标旋转

由新坐标表示旧坐标为

$$\begin{cases} x = a_{11}x' + a_{12}y' + a_{13}z' \\ y = a_{21}x' + a_{22}y' + a_{23}z' \\ z = a_{31}x' + a_{32}y' + a_{33}z' \end{cases}$$

由旧坐标表示新坐标为

$$\begin{cases} x' = a_{11}x + a_{21}y + a_{31}z \\ y' = a_{12}x + a_{22}y + a_{32}z \\ z' = a_{13}x + a_{23}y + a_{33}z \end{cases}$$

这里 $a_{11}, a_{21}, a_{31}; a_{12}, a_{22}, a_{32}; a_{13}, a_{23}, a_{33}$ 分别是新基本矢量 e'_1, e'_2, e'_3 的方向余弦。

4.2 空间运动公式

对应空间中任意一点 P ,有唯一一点 P' 与它对应,那么这种对应关系 $\varphi: P \rightarrow P'$ 叫做空间的点变换。点 P 的对应点 P' 叫做变换 φ 下点 P 的像,记为 $\varphi(P)$ 即 $P' = \varphi(P)$,而点 P 叫做点 P' 的原像。

1) 平移变换 $\varphi: P(x, y, z) \rightarrow P'(x', y', z')$

$$\begin{cases} x' = x + x_0 \\ y' = y + y_0 \\ z' = z + z_0 \end{cases}$$

$$\text{设 } \overrightarrow{OO'} = a_1 e_1 + a_2 e_2 + a_3 e_3$$

2) 旋转变换 $\varphi: P(x, y, z) \rightarrow P'(x', y', z')$

$$\begin{cases} x' = a_{11}x + a_{12}y + a_{13}z \\ y' = a_{21}x + a_{22}y + a_{23}z \\ z' = a_{31}x + a_{32}y + a_{33}z \end{cases}$$

图 4(a)和图 4(b)分别是几何法和坐标法计算的主镜转动角度的流程图。两种方法算得的主镜转动角度都是 49.409° 。可以看出,坐标法相对几何法更复杂一些,但坐标法更有利于计算主镜转动对物像关系的影响。

选一个 0.3 mm 的十字丝,并在其上取 36 个点[图 5(a)],通过模拟十字丝上的点成像观察主镜转动对成像的影响。

由图 5(b)可以看出经过四次反射后,物与像成一致的关系。由于各点放大率不同,所成的像不再是标准的十字,而是不规则的十字。主镜的转动使

像的转动不大,因此可以采用这种方法。

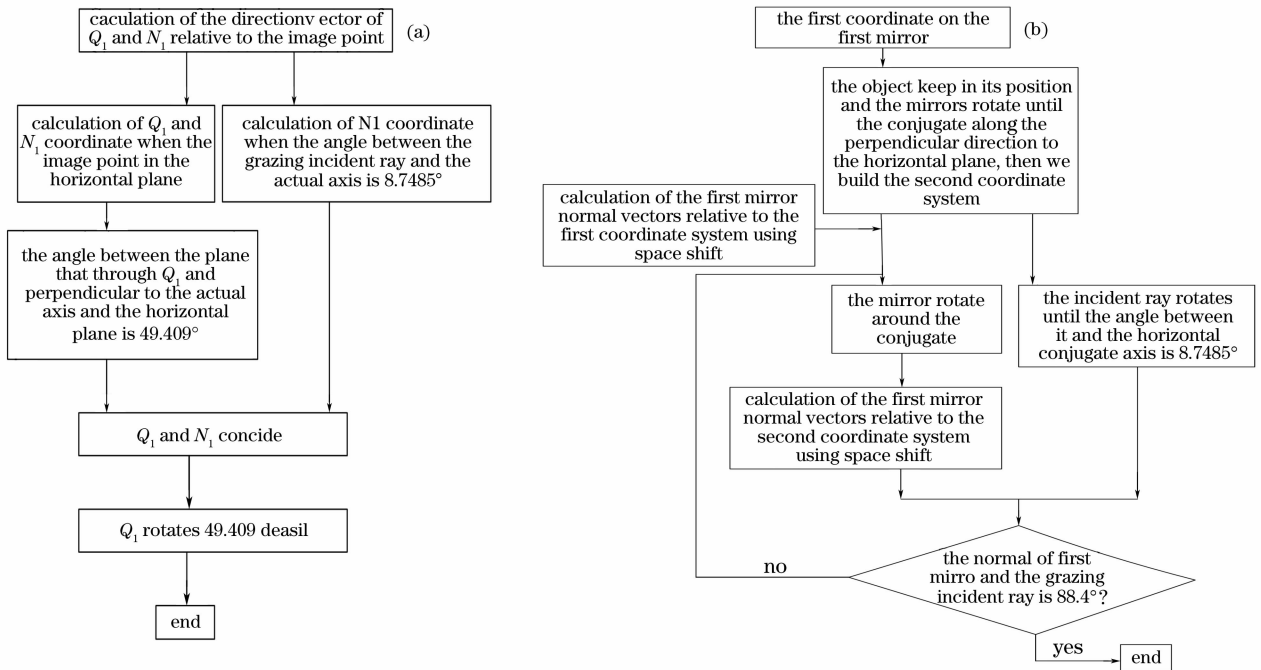


图 4 几何法(a),坐标法(b)计算镜头转动角流程图

Fig. 4 Flow chart of calculating mirror turning angle based on geometry (a), coordinate (b)

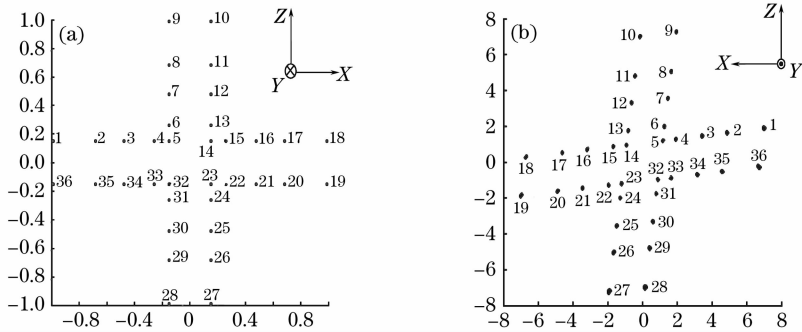


图 5 物方十字丝(a), 十字丝的像(b)

Fig. 5 Crosshair (a) and image (b) in the object space

5 结 论

本文分析了控制掠入射角、双反射镜夹角的方法,为了便于装调,使用主镜转动一定角度的方法,并且分析了镜头转动对成像的影响。分析结果表明,主镜的转动使像的转动不大。通过对掠入射角、双反射镜夹角及主镜转动角度的控制,实现了KBA装调的精度控制,保证了成像质量。

参 考 文 献

1 Hu Jiasheng, Cheng Lihong, Cao Leifeng *et al.*. Image reconstruction with high resolution in X-ray coded aperture imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(12): 1611~1615
 胡家升,程丽红,曹磊峰等. X射线编码孔径成像中的一种高精度图像重构方法[J]. *光学学报*, 2005, **25**(12): 1611~1615

2 Lang Haitao, Liu Liren, Yang Qingguo. A Three-dimensional imaging method based on the principle of coded aperture imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 34~38
 郎海涛,刘立人,阳庆国. 一种基于编码孔径成像原理的三维成像方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1): 34~38
 3 Song Limin, Hu Jiasheng. The designing of grazing angle multi-layer mirrors at 1.03 nm[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2002, **13**(4): 352~355
 宋利民,胡家升. 波长为 1.03 nm 的掠入射多层膜反射镜的设计[J]. *光电子·激光*, 2002, **13**(4): 352~355
 4 Hu Jiasheng, Song Limin. Roughness effects on the reflectance in the design of a soft X-ray multi-layer mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, **12**(4): 380~385
 胡家升,宋利民. 软 X 射线多层膜设计中表面粗糙度对反射率的影响[J]. *光学精密工程*, 2004, **12**(4): 380~385
 5 Yu Yongai, Zhang Lingling, Tang Qianjin. Real-time laser beam quality measurement technique [J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(2): 255~258
 于永爱,张玲玲,唐前进. 激光束质量实时测量技术[J]. *中国激*

- 光, 2007, **34**(2): 255~258
- 6 Gao Yanxia, Zhao Gaiqing. Optical parametric amplification in periodically poled LiNbO₃ for high energy perawatt laser system front end[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(8): 1092~1094
高艳霞, 赵改清. 用于高能拍瓦激光系统前端的周期极化 LiNbO₃ 光参量放大[J]. *中国激光*, 2007, **34**(8): 1092~1094
- 7 Lin Honghuan, Sui Zhan, Wang Jianjun *et al.*. Optical pulse shaping by chirped pulse stacking[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 466~470
林宏奂, 隋展, 王建军等. 啁啾脉冲堆积用于光脉冲整形[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 466~470
- 8 Hu Jiasheng, Zhao Lingling, Li Xiang. Design and analysis of X-ray microscope of four mirrors working at grazing incidence[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2005, **16**(5): 534~537
胡家升, 赵玲玲, 李祥. 非共轴掠入射 X 射线显微镜的设计与分析[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(5): 534~537
- 9 Zhao Lingling, Hu Jiasheng, Li Xiang. Error analysis on the parameters of non-coaxial grazing X-ray microscope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(1): 34~42
赵玲玲, 胡家升, 李祥. 非共轴掠入射 X 射线显微镜参数的误差分析[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(1): 34~42
- 10 Yang Wenmao, Li Quanying. *Space Analytic Geometry* [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 1997. 140~169
杨文茂, 李全英. *空间解析几何*[M]. 武汉: 大学出版社, 1997. 140~169

“光学制造”栏目征稿启事

《激光与光电子学进展》是中国科学院上海光学精密机械研究所主办的激光、光电子领域行业性期刊, 中国科技核心期刊。该刊 1964 年创刊, 至今已出刊 500 余期, 旨在促进国内外学术交流, 沟通科研单位、生产部门与用户的联系, 促进中国光学事业的发展。

中国是世界最大的光学制造产业基地, 全世界 70% 的光器件在中国加工制造。光学制造是光学产业的重要组成部分, 也是光学技术不断发展的重要驱动力。为了深入研讨光学制造技术, 探索光学制造的最新理念、成功案例、市场热点, 《激光与光电子学进展》将从 2008 年 12 月起推出“光学制造”栏目, 现特向国内外广大专家学者征集“光学制造”方面的研究成果、市场分析等方面的论文。

• 征稿内容: 光学元件、光学元器件加工、光学仪器、光学薄膜、光学设计、光学材料、光学检测等光学制造领域;

• 征稿要求: 涉及上述领域的最新研究成果、技术发展动态、热点问题讨论; 产品、技术的开发设计成果和具体应用; 介绍杰出的先进技术或性能/价格比优越的新产品;

• 投稿方式以及格式: 通过网上投稿系统(<http://www.opticsjournal.net/zgjc.htm>)直接上传稿件(主题标明“光学制造”投稿), 也可直接将稿件电子版发至邮箱: lop@siom.ac.cn(主题标明“光学制造”投稿), 详情请参见中国光学期刊网: www.opticsjournal.net。本栏目投稿电子版请使用 MS-word 格式, 如有问题欢迎垂询 021-69918198 与栏目编辑丁洁联系。

• 说明: 此专栏稿件不收审稿费、版面费, 论文一经录用, 稿酬从优。