

文章编号 1004-924X(2014)08-2142-09

X射线干涉光刻光束线偏转镜系统的设计与测试

龚学鹏, 卢启鹏*, 彭忠琦

(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)

摘要:介绍了上海光源 X 射线干涉光刻(XIL)光束线的基本情况。为实现光束线的光束偏转和光路切换,完成了其偏转镜系统的研制。分析了偏转镜系统的功能,设计了偏转镜的调节机构、切换机构和冷却结构。论述了调节机构的关键运动,即镜箱外直线运动转化为超高真空内旋转运动的实现过程;讨论了切换机构重复精度与承载能力之间的关系,并完成了精密丝杆的校核。采用镜子支撑方式和冷却方式集成的方案设计了冷却结构,并通过数值模拟分析了冷却结构和冷却效果。模拟结果表明镜子子午面形误差和弧矢面形误差分别约为 6.5 rad 和 7 rad。应用激光干涉仪和光电自准直仪对调节机构和切换机构进行了测试,结果表明:调节机构的线性分辨率可达 0.2 μm ,切换机构的重复精度满足设计要求。

关键词:上海同步辐射光源;X射线干涉光刻;偏转镜;结构设计;精度测试

中图分类号:TH744.1;TN305.7 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142208.2142

Design and testing of deflecting mirror system of X-ray interference lithography beamline

GONG Xue-peng, LU Qi-peng*, PENG Zhong-qi

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

* Corresponding author, E-mail: luqp@ciomp.ac.cn

Abstract: The X-ray interference lithography (XIL) beamline at Shanghai Synchrotron Radiation Facility was introduced. To achieve the beam deflection and optical pathway switch of the beamline, a deflecting mirror system of XIL beamline was designed. The function of the deflecting mirror system was analyzed and its adjusting mechanism, switching mechanism and cooling structure were designed respectively. The key movement of adjusting mechanism was discussed, which is the translating process of a linear motion outside the mirror chamber into a rotary motion in ultra high vacuum. Then, the relationship between repeatability and carrying capacity of the switching mechanism was analyzed, and the strength of precision screw was checked. A cooling structure was designed by integrating a mirror support mode and a cooling mode, and the cooling effect was analyzed by numerical simulation method. The simulated results show that the meridian direction slope error and the sagittal direction slope error of the deflection mirror are about 6.5 rad and 7 rad respectively. The precisions of adjust-

收稿日期:2013-11-12;修订日期:2014-01-07.

基金项目:国家重大科学工程资助项目;上海光源工程资助项目(No. SS-06);国家自然科学基金资助项目(No. 11079035)

ting mechanism and switching mechanism were tested by a laser interferometer and a photoelectric autocollimator, and testing results show that linear resolution capability of adjusting mechanism is up to $0.2 \mu\text{m}$, and the repeatability of switching mechanism satisfies the technical demands.

Key words: Shanghai Synchrotron Radiation Facility; X-ray interference lithography; deflecting mirror; structure design; precision testing

1 引言

当今世界,纳米科技飞速发展,纳米结构的复杂程度、尺寸和性能都在不断提高。获得更小特征尺寸的纳米结构以及其组装结构是越来越多科研人员的目标。为了获得更小特征尺寸的纳米结构,科研人员开发了多种微纳加工技术,如电子束直写光刻、聚焦离子束刻蚀、激光干涉光刻和纳米印章刻蚀等^[1-4]。这些技术虽然可以获得纳米尺寸的结构,但是还远不能满足更高精度纳米结构和纳米器件的制备以及微纳加工方面的特殊要求。

X射线干涉光刻(X-ray Interference Lithography, XIL)是利用 2 束或多束相干 X 光束的干涉条纹对光刻胶进行曝光的新型先进微纳加工技术,可以开展几十甚至十几纳米周期的纳米结构加工,相比上述加工方法具有很多优点。国际开展 XIL 科学、技术和应用研究的光束线有 2 条——瑞士光源(SLS)的 XIL 线站和 Wisconsin 大学同步辐射中心(SRC)的 EUV-IL 线站。利用 XIL 技术已经获得了纳米线、纳米点、纳米环等不同形状、不同周期的(最小可达 12.5 nm)光刻图形。H. H. Solak 等人结合衍射型 XIL 技术和电沉积方法在 SiO_2 基底上制作了周期为 71 nm 的 Ni 点阵^[5],以及其它一系列成果^[6-7]。这些研究都是 XIL 技术在先进器件研究中的应用,除此之外,研究人员还将 XIL 技术应用到了生物研究和工业应用中^[8-9]。

鉴于 XIL 技术的先进性和优越性,我国也加强了在 XIL 技术方面的投入,并以上海光源为依托,建设 X 射线干涉光刻光束线站。为了使我国的 X 射线干涉光刻光束线的性能达到国际先进水平,需要一系列的精密机械装置来实现 X 射线的整形和加工,偏转镜系统就是这些重要装置之一。国内外研究机构对与偏转镜系统相类似的精密装置已进行了相关研究,其基本方案是通过机械传动的方式实现镜子的偏转、切换以及真空腔体的调

整。对于上海光源 XIL 光束线偏转镜系统而言,由于其机械精度和镜子表面热变形要求非常高,所以需要更合理的设计方案来实现其高性能的要求。

本文介绍了 X 射线干涉光刻光束线的基本情况,研究了 XIL 光束线关键的精密机械装置——偏转镜系统,并完成了其结构设计和精度测试工作,为 XIL 光束线的建设提供性能优良的关键设备。

2 X 射线干涉光刻光束线

上海光源 X 射线干涉光刻光束线是利用上海光源现有的高亮度相干 X 射线,从软 X 射线谱学显微光束线(STXM)波荡器中引出一条分支光束线,建设 X 射线干涉光刻分支线站。XIL 分支线站主要进行先进器件、生物应用和工业应用等研究。光束线光学原理如图 1 所示,其主体包括偏转镜、聚焦镜和出射狭缝。XIL 和 STXM 光束线共用一个 EPU 光源。当需要进行 STXM 研究时,要将光束线引入 STXM 实验站中;当需要进行 XIL 研究时,光束线要切换至 XIL 实验站中。为了解决这一关键问题,在原 STXM 光束线上增加了 2 个光学元件,即图 1 中所示的偏转镜和聚

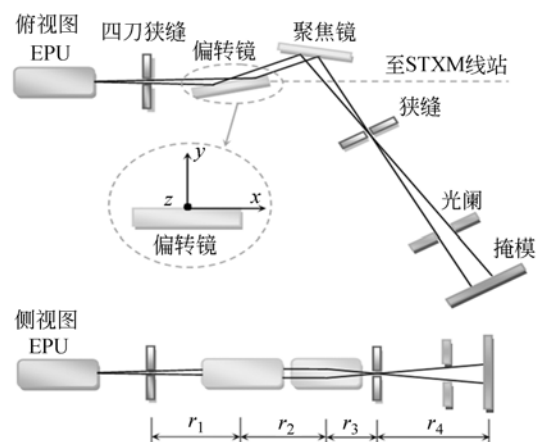


图 1 XIL 光束线光学原理

Fig. 1 Optical principle of XIL beamline

透镜,其中偏转镜除使原光束线偏转外,还要具备切换光路的作用。

3 偏转镜系统设计

3.1 功能解析与技术要求

偏转镜的主要作用是偏转光束和切换光路,为了实现这两个主要功能,需要偏转镜调节机构和切换机构。偏转镜位于光束线的上游,吸收光束的大部分能量,这些能量将引起偏转镜的热变形,所以,还需要冷却结构来平衡偏转镜吸收的热量。为使入射光束水平偏转 1.5° ,并通过调整掠入射角来修正像距误差,对偏转镜调节范围和分辨率提出了较高要求。为保证 STXM 光束线和 XIL 光束线的稳定运行,偏转镜位置应有较高的重复精度。为了获得高质量光斑,对镜子的热变形也有较高要求。具体技术要求如表 1 所示。 x 、 y 、 z 方向如图 1 所示。

表 1 偏转镜机械精度及面形误差要求

Tab. 1 Requirement of mechanical precision and shape error of deflecting mirror

	调整范围	分辨率	重复精度	面形误差
镜子调节机构	$\pm 1^\circ$	$0.5''$	N/A	N/A
x	N/A	N/A	$10 \mu\text{m}$	N/A
y	10 mm	N/A	$5 \mu\text{m}$	N/A
镜子切换机构	z	N/A	$10 \mu\text{m}$	N/A
$r-x$	N/A	N/A	$2''$	N/A
$r-y$	N/A	N/A	$5''$	N/A
$r-z$	N/A	N/A	$4''$	N/A
镜子热变形面形误差	N/A	N/A	N/A	$15 \mu\text{rad}$

3.2 偏转镜调节机构设计

偏转镜调节机构的作用是使镜子偏转一定的角度,并且可以在一定角度范围内任意调节。镜子的面形制造误差所引起的像距误差需要调节微调偏转镜和聚焦镜的角度才能修正,因此,偏转镜调节机构的关键作用是在超高真空环境中获得足够高的分辨率。基本方案是将直线运动转化为镜子的旋转运动,如图 2 所示。设直线驱动机构的移动距离为 h ,所对应的偏转镜转动角度为 θ ;直线驱动机构的线性分辨力为 h' ,所对应的偏转镜角度分辨力为 θ' ;转动机构的臂长为 l ,则:

$$\theta = \arctan \left[\frac{h}{l} \right], \quad (1)$$

$$\theta' = \arctan \left[\frac{h'}{l} \right]. \quad (2)$$

根据偏转镜的尺寸和光学设计的要求,将转动机构的臂长设计为 110 mm 。要使镜子的调整达到 $\pm 1^\circ$,分辨力达到 $0.5''$,依据式(1)和(2),直线驱动机构的调整范围需大于 3.8 mm ,线性分辨力需达到 0.26 mm 。对于直线驱动机构,采用 PK596H-B 型 5 相步进电机,步距角为 1.8° ,细分数为 40;精密丝杆直径为 10 mm ,导程为 0.64 mm ;则直线驱动机构的线性分辨力为:

$$l' = \frac{d}{\frac{360}{\alpha} \times n}, \quad (3)$$

其中: d 为丝杆的导程, α 为电机步距角, n 为细分数。根据式(3)可以得出直线驱动机构的线性分辨力为 $0.08 \mu\text{m} (< 0.26 \mu\text{m})$,满足设计要求。

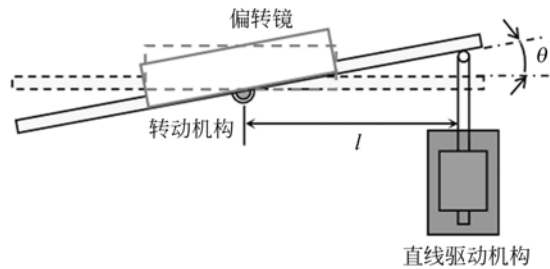


图 2 偏转镜调节机构方案

Fig. 2 Scheme of adjusting mechanism of deflecting mirror

偏转镜调节机构的具体设计方案如图 3 所示,其包括直线驱动机构、直线馈入机构、旋转机构和镜架结构等。调节机构将真空镜箱外的直线运动转化为真空镜箱内的旋转运动,涉及到在不破坏真空环境前提下机械运动的传递问题。本方案中,采用波纹管隔离真空腔内外环境的直线馈入机构来解决。偏转镜调节机构的具体工作过程为:步进电机带动丝杆转动,从而使直线馈入机构在波纹管的限制下将直线运动传递到镜架结构上,镜架结构在旋转机构的限制下产生偏转,进而实现镜子的偏转和微调,从而达到光学设计的要求。由于偏转镜在实际工作中的偏转量较小,以及在微调过程中角度分辨力较高,因此需要严格控制关键零件的形位公差、表面粗糙度以及配合精度。为了达到光学设计要求,采用高精度 THK 导轨 SSR15XV2SSC1+160LYP-II 型号直

线驱动机构和旋转机构的关键配合使精度达到 1~3 μm。

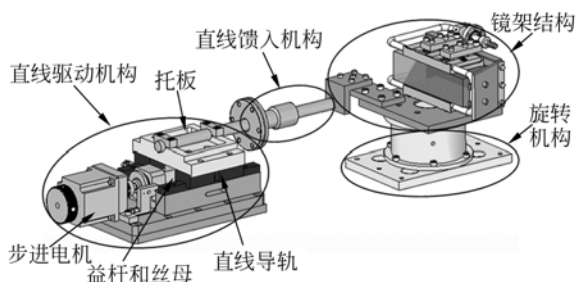


图 3 偏转镜调节机构

Fig. 3 Adjusting mechanism of deflecting mirror

3.3 偏转镜切换机构设计

采用真空镜箱、镜架、镜子和镜子调节机构共同运动的方式来实现偏转镜的切换。偏转镜切换机构如图 4 所示。由于真空镜箱、镜架、镜子、镜子调节机构和支撑板的重力都作用在直线导轨和螺旋传动机构上,所以传动螺杆将承受一定的轴向载荷和径向载荷。对于切换机构,最重要的是获得足够的重复精度,以实现镜子位置的精确定位,要获得较高的重复精度,就需要采用导程较小的螺杆,导程较小的螺杆又意味着承载能力的下降,因此,需要对螺旋传动进行详细的设计。根据偏转镜系统的整体结构以及切换机构的空间位置,采用 THK SR30TB2SSC1+760P-II 型号导轨作为导向装置,采用 M20×0.75mm 的细牙螺杆和螺母作为螺旋传动的关键零件。通过上述设计,再采用东方步进电机 PK543BW1-H100,来实现 0.2 μm 的分辨力,电机具备 0.1~0.3 μm 的精度,因此,理论上可以满足切换机构的技术要

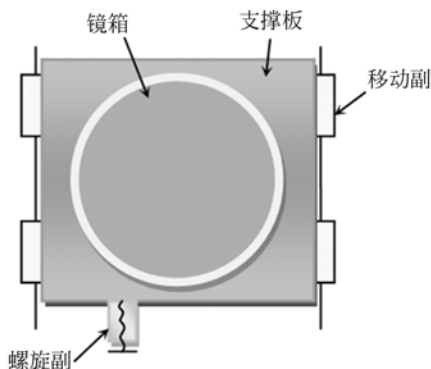


图 4 偏转镜切换机构方案

Fig. 4 Scheme of switching mechanism of deflecting mirror

求。为了进一步提高重复精度,还需要克服螺杆的回程差,文中采用了消间隙螺母、配备高精度光栅尺进行闭环控制以及采用单向切换等方法。螺旋传动机构可以满足精度要求,但其承载能力需要从耐磨性、螺杆强度、螺杆稳定性以及螺纹牙强度等 4 个重要方面进行校核。

在镜子的切换过程中,螺杆主要承受轴向载荷和扭矩的作用。由于在切换过程中,支撑板沿直线导轨运动的非常缓慢,可以认为螺杆的受力处于平衡状态。螺杆的轴向载荷主要是由直线导轨的摩擦力引起的,扭矩主要由螺纹力矩引起。镜箱、镜架组件、调节机构和镜箱支撑板的总重量 $G=2\ 570\text{ N}$,直线导轨摩擦系数 $f=0.003$,螺杆中径 $d_2=19.51\text{ mm}$,小径 $d_1=19.2\text{ mm}$,螺旋升角 $\varphi=0.7^\circ$,当量摩擦角 $\rho'=6.59^\circ$ 。对于螺杆的耐磨性,通常采用螺纹接触处的压强 p 来表示:

$$p = F_a / \pi d_2 h z, \quad (4)$$

其中: F_a 为轴向载荷, $F_a = G \times f = 2\ 570 \times 0.003 = 7.7\text{ N}$; z 为接触的螺纹圈数, $z = 53$; d_2 为螺纹中径, $d_2 = 19.51\text{ mm}$; h 为螺纹工作高度, $h = 0.75\text{ P} = 0.75 \times 0.75 = 0.56\text{ mm}$ 。所以,螺纹接触处的压强 $p = 0.004\text{ MPa}$,其小于螺旋副的许用压强。

由于螺杆受到轴向载荷和扭矩的作用,所以,对于螺杆强度而言,需采用第四强度理论来计算当量应力 σ_e :

$$\sigma_e = \sqrt{\left(\frac{4F_a}{\pi d_1^2}\right)^2 + 3\left(\frac{T}{\pi d_1^3/16}\right)^2}, \quad (5)$$

其中: T 为螺纹力矩:

$$T = \frac{1}{2} d_2 F_a \tan(\varphi + \rho') = 9.6\text{ N} \cdot \text{mm}. \quad (6)$$

则当量应力 $\sigma_e = 0.03\text{ MPa}$,其值也小于螺杆的许用应力。螺杆的稳定性与螺杆的材料和柔度有关,经过计算,该螺杆的柔度 $\lambda = 21.45$,满足要求。为了获得较高的精度,该螺杆采用细牙螺纹,其强度的校核公式为:

$$\tau = \frac{F_a}{\pi d_1 b z}, \quad (7)$$

其中: b 为螺纹牙根部的宽度, $b = 0.74\text{ P} = 0.74 \times 0.75 = 0.56\text{ mm}$;则 $\tau = 0.004\text{ MPa}$,其小于许用应力。

通过以上叙述,可知切换机构的关键部件—精密螺旋传动部件的机械强度和精度满足设计要求,切换机构的具体结构如图 5 所示。

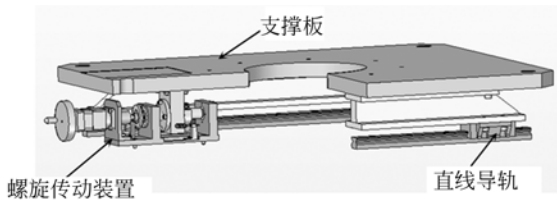


图 5 偏转镜切换机构

Fig. 5 Switching mechanism of deflecting mirror

3.4 偏转镜冷却结构设计

由于偏转镜位于 XIL 光束线的上游,故会吸收大量的辐射,从而导致偏转镜产生热变形。为了保证偏转镜的面形精度,需要为其设计冷却结构。偏转镜本身需要支撑结构(镜架)来支撑,所以,将镜架和冷却结构集成在一起,形成一种集成设计方案。采用冷却水循环冷却,冷却水通过无氧铜压板与镜子产生热交换,从而达到冷却的目的。偏转镜冷却结构如图 6 所示。

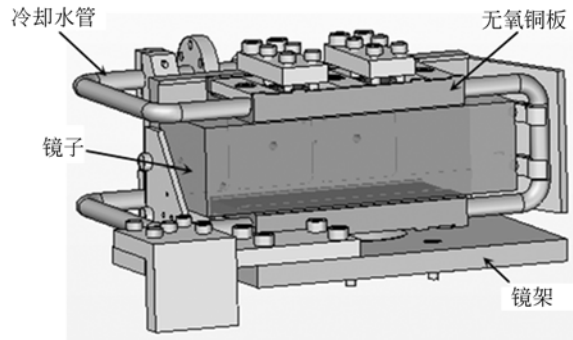


图 6 偏转镜冷却结构图

Fig. 6 Cooling structure of deflecting mirror

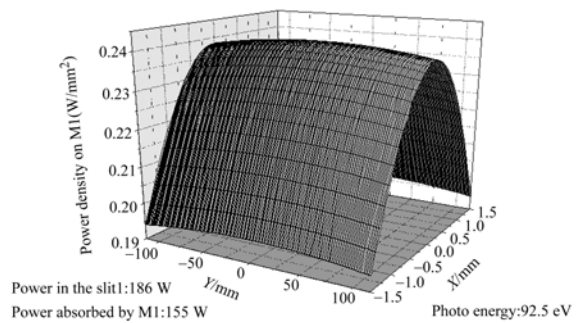


图 7 偏转镜的功率密度分布

Fig. 7 Power density of deflecting mirror

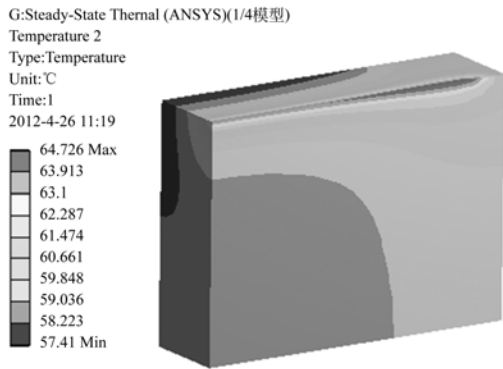
表 2 材料参数

Tab. 2 Material parameters

	Density /($\text{kg} \cdot \text{mm}^{-3}$)	Poisson's ratio	Young's modulus /MPa	Thermal expansion /($1/^\circ\text{C}$)	Specific heat/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	Thermal conductivity/ ($\text{W} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)
Si	2.33×10^{-1}	0.28	110,000.0	2.2×10^{-6}	702.0	0.15
Cu	8.9×10^{-6}	0.33	130,000.0	1.66×10^{-5}	385	0.37

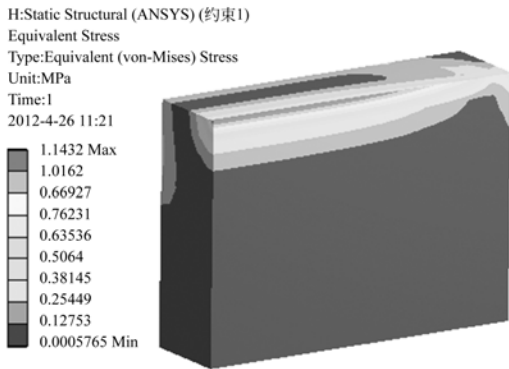
通过 SPECTRA8.1 计算得出,当入射光能量为 92.5 eV 时,被偏转镜吸收的功率为 155 W,最大吸收功率密度为 $0.241 \text{ W}/\text{mm}^2$,如图 7 所示。硅和铜的材料参数如表 2 所示。冷却水的对流系数为 $1.0 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{mm}^2 \cdot ^\circ\text{C})$,参考温度为 30°C 。通过 ANSYS 热力耦合分析^[10-12]对偏转镜的冷却结构进行模拟,1/4 模型的模拟结果如图 8 所示。图 8(a)为偏转镜的温度场分布,最小值为 57.41°C ,出现在与无氧铜板接触的一面,最大值为 64.726°C ,出现在同步辐射光照射区域,从模拟结果可以看出,采用冷却水获得了较好的冷却效果,温度梯度最大相差了 7.3°C ,这说明镜

子所吸收的热量已与冷却水之间产生了热交换。图 8(b)为偏转镜的等效力分布,最大值为 1.1432 MPa ,出现在同步辐射光照射区域。在同步光的照射下,镜子热变形是不可避免的,只能通过冷却方法的改进和结构的优化来抑制。对于镜子而言,保证其精度的关键是保证其子午方向面形误差和弧矢方向面形误差足够小,偏转镜子午和弧矢面形误差结果如图 9 所示。在图 9(a)中,空心点曲线表示镜子表面子午方向节点的变形趋势,实心点曲线表示镜子表面子午方向节点的面形误差。子午方向节点最大变形约为 $4.53 \mu\text{m}$,出现在距镜子中心 55 mm 处,最小变形约为 4.



(a) 温度场分布

(a) Temperature field distribution



(b) 等效应力分布

(b) Equivalent stress distribution

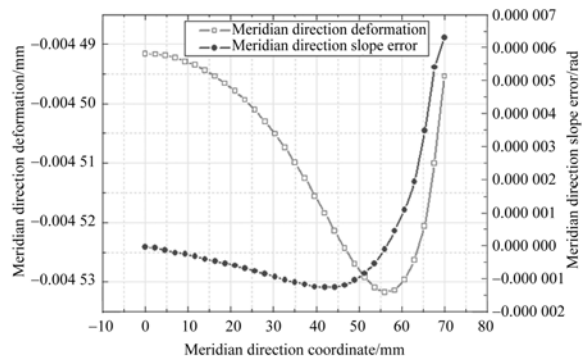
图 8 偏转镜热力耦合分析结果

Fig. 8 Thermal-structure analysis results of deflecting mirror

49 μm ,出现在镜子中心,这是由于沿子午方向镜子中心区域与冷却水的热交换程度比较高,而镜子的边缘区域与冷却水的热交换程度比较低。镜子子午方向的最大面形误差约为 $6.5 \mu\text{rad}$,出现在距离镜子中心 70 mm 处,而镜子中心区域的面形误差在 $1 \mu\text{rad}$ 左右,这说明通过循环水冷却获得了比较好的效果。同步辐射光主要集中于镜子表面的狭长形中心区域,所以,镜子边缘较大的面形误差对同步辐射光传输影响很小。在图 9(b)中,空心点曲线表示镜子表面弧矢方向节点的变形趋势,实心点曲线表示镜子表面弧矢方向节点的面形误差。弧矢方向节点最大变形约为 $4.49 \mu\text{m}$,出现在镜子中心,最小变形约为 $4.35 \mu\text{m}$,出现在距离镜子中心 20 mm 处,这是由于沿弧矢方向镜子的边缘与冷却水的热交换程度比较高,而镜子中心区域与冷却水的热交换程度比较低。镜

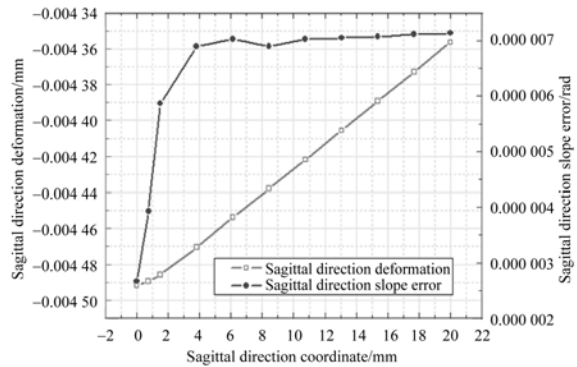
子弧矢方向的最大面形误差约为 $7 \mu\text{rad}$,出现在距离镜子中心 20 mm 处,而镜子中心区域的面形误差在 $2.6 \mu\text{rad}$ 左右。

通过上述的分析可知,偏转镜表面子午面形误差最大值约为 $6.5 \mu\text{rad}$,弧矢面形误差最大值约为 $7 \mu\text{rad}$,都小于 $15 \mu\text{rad}$,满足偏转镜面形误差的技术要求,因此,偏转镜冷却结构的设计方案可行。



(a) 子午方向

(a) Meridian direction



(b) 弧矢方向

(b) Sagittal direction

图 9 偏转镜面形误差分析结果

Fig. 9 Analysis results of slope error of deflecting mirror

3.5 偏转镜系统整体结构

以上论述了偏转镜系统关键部件的设计方案,包括调节机构、切换机构和冷却结构。除了这些关键部件外,偏转镜系统还包括镜箱、镜箱支撑结构、离子泵、冷却水进出结构和支架等部件。偏转镜系统是一台精密的光学设备,各个部件的相互协调运作才能有效完成偏转镜系统的功能。偏转镜系统整体结构如图 10 所示。

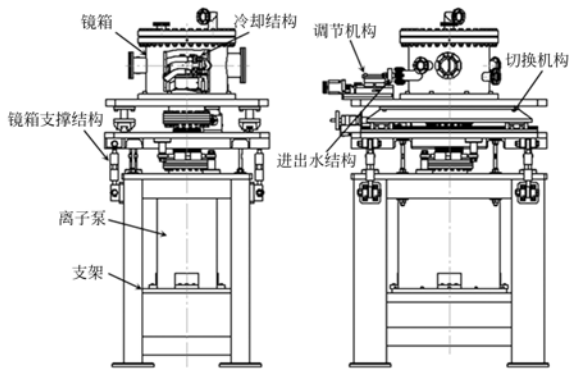


图 10 偏转镜系统整体结构

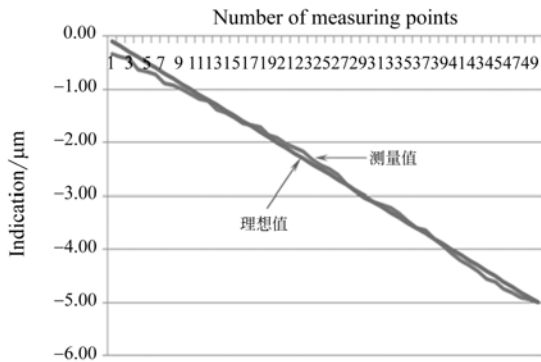
Fig. 10 Entire structure of deflecting mirror system

4 偏转镜系统测试

4.1 调节机构精度测试

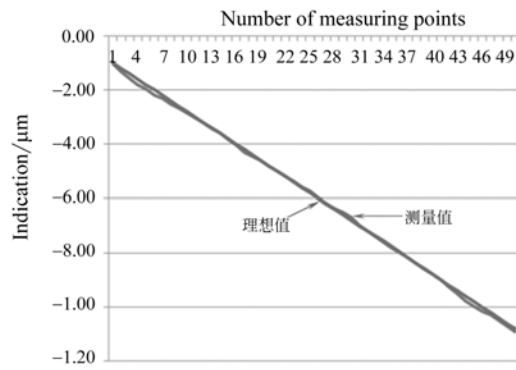
采用 Agilent5529A 型号激光干涉仪对调节机构线性分辨力进行测试。控制调节机构的步长分别为 0.1 和 0.2 μm , 分别测试距离正限位 2、3、4、5、6、7、8、9、10、11 和 12 mm 等位置的运动情况, 每个位置的测量点个数为 50 个。图 11 为距离正限位 2 和 4 mm 位置的测试结果。

在图 11 中, 调节机构在测量位置所产生的位移理想值以及激光干涉仪在测量位置所产生的测量值已标识出来。从图 11 中可以看出, 无论是距离正限位 2 mm 的位置还是距离正限位 4 mm 的位置, 当步长为 0.1 μm 时, 理想值和测量值的偏差是比较大的; 当步长为 0.2 μm 时, 理想值和测量值的偏差较小; 通过计算得知, 当步长为 0.1 μm 时, 理想值和测量值之间误差的标准差为



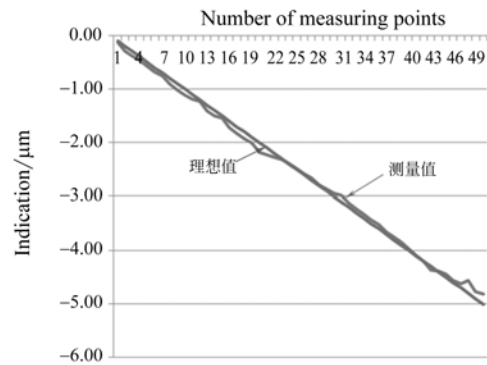
(a) 距离正限位 2 mm, 步长为 0.1 μm

(a) With distance from position limit of 2 mm and step length of 0.1 μm



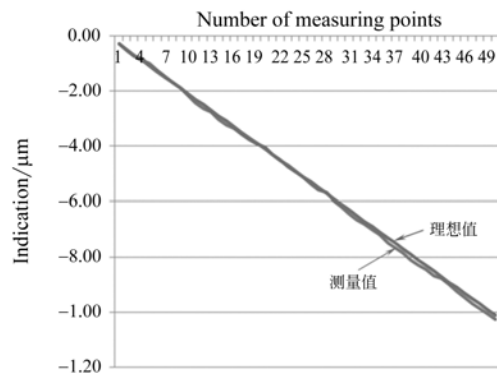
(b) 距离正限位 2 mm, 步长 0.2 μm

(b) With distance from position limit of 2 mm and step length of 0.2 μm



(c) 距离正限位 4 mm, 步长 0.1 μm

(c) With distance from position limit of 4 mm and step length of 0.1 μm



(d) 距离正限位 4 mm, 步长 0.2 μm

(d) With distance from position limit of 4 mm and step length of 0.2 μm

图 11 调节机构的分辨力测试结果

Fig. 11 Testing results of resolution capability of adjusting mechanism

0.09 μm ; 当步长为 0.2 μm 时, 理想值和测量值

之间误差的标准差为 $0.08 \mu\text{m}$ 。因此,当步长为 $0.1 \mu\text{m}$ 时,可以认为激光干涉仪的读数随调节机构步进的变化是均匀的;当步长为 $0.2 \mu\text{m}$ 时,激光干涉仪的读数与理想值更为接近。除距离正限位 2 和 4 mm 的位置外,其他位置的测试结果与其非常类似。实际上,调节机构所需要的角度分辨力为 $0.5''$,换算成线性分辨力为 $0.26 \mu\text{m}$,因此,认为调节机构的分辨能力满足设计要求。

4.2 切换机构精度测试

采用 ELCOMAT 3000 型号的自准直仪对切换机构进行重复精度测试。首先,在某一位置调节自准直仪的读数为零;其次,移动切换机构到另一位置记录自准直仪的读数;最后,返回前一位置记录自准直仪读数。每个位置重复测量 10 次,算出其标准差,将两个位置的最大标准差作为切换

表 3 切换机构重复精度测试结果

Tab.3 Testing results of switching mechanism repeatability

项目	精度要求	测试结果
x	$10 \mu\text{m}$	$0.7 \mu\text{m}$
y	$5 \mu\text{m}$	$0.4 \mu\text{m}$
z	$10 \mu\text{m}$	$3.4 \mu\text{m}$
$r-x$	$2''$	$0.44''$
$r-y$	$5''$	$1.923''$
$r-z$	$4''$	$1.749''$

参考文献:

- [1] SCHATTENBURG M L, AUCCOIN R J, FLEMING R C, *et al.*. Fabrication of high-energy X-ray transmission gratings for the Advanced X-ray Astrophysics Facility (AXAF)[J]. *SPIE*, 1994, 2280: 181-190.
- [2] GEORGE R B. *Electron-Beam Technology in Microelectronics Fabrication*[M]. New York: Academic Press, 1980: 11-16.
- [3] HIRSCHER S, KÜMMEL M, KIRCH O, *et al.*. Ion projection lithography below 70 nm ; tool performance and resist process [J]. *Microelectronic Engineering*. 2002, 61-62: 301-307.
- [4] RESNICK D J, DAUKSHER W J. Imprint lithography: lab curiosity or the real NGL[J]. *SPIE Microlithography Conference*, 2003, 12-23.
- [5] HEYDERMAN L J, SOLAK H H, DAVID C, *et al.*. Arrays of nanoscale magnetic dots; Fabrication

机构的重复精度^[13-15]。表 3 为切换机构重复精度的测量结果。从表 3 可以看出, x 、 y 、 z 、 $r-x$ 、 $r-y$ 和 $r-z$ 方向的重复精度分别为 $0.7 \mu\text{m}$ 、 $0.4 \mu\text{m}$ 、 $3.4 \mu\text{m}$ 、 $0.44''$ 、 $1.923''$ 和 $1.749''$, 满足设计要求。

5 结 论

本文介绍了上海光源 X 射线干涉光刻光束线的基本情况,给出了偏转镜系统的主要功能与设计的要求。设计了偏转镜调节机构;分析了其关键运动情况,即将镜箱外的直线运动转化为真空镜箱内的旋转运动。完成了偏转镜切换机构的设计,并分析了其重复精度与承载能力之间的关系;校核了精密丝杆的承载能力,满足设计要求。采用镜子支撑方式和冷却方式集成的方案完成了偏转镜冷却结构的设计,并对冷却效果进行数值分析。结果表明,偏转镜表面子午面形误差最大值约为 $6.5 \mu\text{rad}$,弧矢面形误差最大值约为 $7 \mu\text{rad}$,满足偏转镜面形误差的技术要求。实验对调节机构的分辨力和切换机构的重复精度进行了测试,结果表明,调节机构的分辨力可达 $0.2 \mu\text{m}$,切换机构 x 、 y 、 z 、 $r-x$ 、 $r-y$ 和 $r-z$ 方向的重复精度分别为 $0.7 \mu\text{m}$ 、 $0.4 \mu\text{m}$ 、 $3.4 \mu\text{m}$ 、 $0.44''$ 、 $1.923''$ 和 $1.749''$,满足设计要求。

- by x-ray interference lithography and characterization [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 85: 4989-4991.
- [6] YASIN E, HARUN H S, CHRISTIAN D, *et al.*. Bilayer Al wire-grids as broadband and high performance polarizers[J]. *Optics Express*, 2006, 14 (6): 2323-2334.
- [7] SOLAK H, DAVID C, GOBRECHT J, *et al.*. Fabrication of high-resolution zone plates with wideband extreme-ultraviolet holography [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 85(14): 2700-2702.
- [8] HARUN H S, YASIN E, PHILIPP K. Photon-beam lithography reaches 12.5 nm half-pitch resolution [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*. 2007, 25: 91-95.
- [9] TEIXEIRA A I, ABRAMS G A, MURPHY C J, *et al.*. Cell behavior on lithographically defined nanostructured substrates[J]. *J. Vac. Sci. Tech. B*, 2003, 21(2): 683-68.
- [10] 高飒飒,卢启鹏,彭忠琦,等. 超高真空精密四刀狭

- 缝的结构原理及有限元分析[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(7): 1741-1747.
- GAO S S, LV Q P, PENG ZH Q, *et al.*. Principle and finite element analysis on UHV four-knife precision slits [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(7): 1741-1747. (in Chinese)
- [11] 赵磊, 巩岩, 赵阳. 光刻投影物镜中的透镜柔性微动调整机构[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(6): 1425-1433.
- ZHAO L, GONG Y, ZHAO Y. Flexure-based X-Y micro-motion mechanism used in lithography lens [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6): 1425-1433. (in Chinese)
- [12] 刘书田, 胡瑞, 周平, 等. 基于筋板式基结构的大口径空间反射镜构型设计的拓扑优化方法[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(7): 1803-1810.
- LIU SH T, HU R, ZHOU P, *et al.*. Topologic optimization for configuration design of web-skin-type ground structure based large-aperture space mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(7): 1803-1810. (in Chinese)
- [13] 龚学鹏, 卢启鹏, 彭忠琦. 软 X 射线谱学显微光束线单色器结构设计及精度测试[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0234001.
- GONG X P, LU Q P, PENG Z Q. Structure design and accuracy testing of monochromator in a soft X-ray spectromicroscopic beamline [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0234001. (in Chinese)
- [14] 吴坤, 薛松, 卢启鹏, 等. SX-700 单色器光栅正弦机构转角重复精度的模拟分析与测量[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(1): 45-51.
- WU K, XUE S, LU Q P, *et al.*. Simulation analysis and measurement of rotation angle repeatability for grating sine mechanism of SX-700 monochromator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 45-51. (in Chinese)
- [15] 卢启鹏, 马磊, 彭忠琦. 变包含角平面光栅单色器扫描转角精度的检测[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(7): 1548-1553.
- LU Q P, MA L, PENG ZH Q. Rotation-angle-accuracy measurement of scanning mechanism in variable included angle plane grating monochromator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7): 1548-1553. (in Chinese)

作者简介:



龚学鹏(1982—),男,内蒙古赤峰人,博士,副研究员,2010年于吉林大学获得博士学位,研究方向为精密机械设计与工程 CAE 分析。E-mail: gongxuepeng120@foxmail.com



卢启鹏(1964—),男,黑龙江人,研究员,博士生导师,1990年于中国科学院长春光机所获得硕士学位,主要从事同步辐射光束线关键技术的研究。E-mail: luqp@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)