

软 X 射线谱学显微光束线单色器结构设计及精度测试

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 针对上海光源谱学显微光束线站的性能要求,对其核心部件单色器进行结构设计。阐述了单色器的扫描运动原理,论述了波长扫描机构的设计方案,具体分析平面镜和光栅的转角重复精度影响因素;描述光栅切换机构,着重分析其水平偏差、垂直偏差、滚角、摆角和投角的精度问题;采用六杆并联机构的方案完成镜箱调节机构的设计,分析其支杆的调节范围和分辨力情况。给出了单色器的结构,并且对其精度进行了测试。测试结果表明,平面镜和光栅的转角重复精度分别为 $0.166''$ 和 $0.149''$;光栅切换机构的滚角、摆角和投角的重复精度分别为 $0.08''$ 、 $0.12''$ 和 $0.05''$ 。这说明了单色器的结构设计方案和机械精度满足技术要求。

关键词 光学器件;同步辐射;谱学显微;单色器;机械结构;重复精度

中图分类号 TH744.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0234001

Structure Design and Accuracy Testing of Monochromator in a Soft X-Ray Spectromicroscopic Beamline

Gong Xuepeng Lu Qipeng Peng Zhongqi

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

Abstract In order to satisfy the technical requirement of soft X-ray microscopy beamline in Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF), whose key assembly monochromator is designed. Wavelength scanning movement principle of monochromator is described. Design scheme of wavelength scanning mechanism is discussed, and factors affecting the angular repeatability of plane mirror and plane grating are analyzed in detail; switching mechanism of plane grating is described, and horizontal deviation, vertical deviation, roll angle precision, yaw angle precision and pitch angle precision are analyzed in detail; six-bar parallel mechanism is used for adjusting the UHV-chamber, and adjusting range and resolution of the bar are analyzed. The entire structure of monochromator is presented, and its precision testing is performed. Results show that the angular repeatability of plane mirror and plane grating are $0.166''$ and $0.149''$, and roll, yaw and pitch angular repeatability of plane grating switching mechanism are $0.08''$, $0.12''$ and $0.05''$, indicating that structure design and precision of monochromator satisfy the technical demand.

Key words optical devices; synchrotron radiation; spectromicroscopy; monochromator; mechanical structure; repeatability

OCIS codes 350.4600; 120.4640; 130.4815

1 引言

随着科学技术的发展,越来越多的研究领域要求在亚微米甚至纳米空间尺度内开展样品的光谱成像研究。上海光源(SSRF)软 X 射线谱学显微光束

线站瞄准世界科技前沿,主要用于材料、环境、生物、有机地球化学和陨星等众多学科领域的研究^[1]。光源采用椭圆偏振波荡器(EPU)插件,置于低 β 值的标准直线节内,能够提供多种极化状态的软 X 射

收稿日期: 2012-06-24; 收到修改稿日期: 2012-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(11079035)和国家重大科学工程项目上海光源工程(SS-06)资助课题。

作者简介: 龚学鹏(1982—),男,博士,助理研究员,主要从事精密机械方面的研究。

E-mail: gongxuepeng120@yahoo.com.cn

* 通信联系人。E-mail: luqipeng@126.com

线。软 X 波段光子能量范围较大,因此需要性能良好的单色器作为其分光设备。

对于谱学显微光束线站而言,单色器是其核心部件,单色器性能的优劣直接影响到光束线的整体性能。对于硬 X 射线波段,一般采用晶体单色器;而对于软 X 射线波段,则采用光栅单色器。上海光源属于第三代光源,这种高亮度的光源为光子通量、光谱分辨和空间分辨上一个台阶提供了基础,而要实现高亮度光源带来的优势,对单色器的性能提出了更高的要求。

针对谱学显微光束线站的性能要求,采用变包含角平面光栅单色器^[2~5]。该单色器距离光源 32 m,在平行光模式下工作,无入射狭缝,出射狭缝位置固定,光学放大倍数可在 1.8~2.5 范围内调节,通过改变包含角来选择波长,能量扫描范围为 250~2000 eV。该单色器机械结构的关键技术指标为:平面镜和光栅的转角重复精度为 0.43";光栅切换重复精度分别为滚角精度 10",摆角精度 10",投角精度 0.4"。要达到上述指标,单色器就要具备合理的机械结构。

本文针对单色器的精度要求,完成了单色器的整体结构设计,着重阐述了单色器的关键结构,并采用自准直法对单色器的机械精度进行了测试。测试结果表明,单色器的技术指标满足设计要求,为实现光束线的整体性能指标打下了基础。

2 单色器扫描运动原理

变包含角平面光栅单色器(VAPGM)的主要光学元件是前置平面镜和平面光栅,通过平面镜和光栅的运动来实现波长扫描。在波长扫描过程中,光栅要绕其表面中心转动,平面镜既要转动,又要平动,从而使其反射的光斑中心始终位于光栅中心。根据光栅衍射方程[(1)式]和光学放大倍数[(2)式]可以得出波长和角度的关系[(3)式]^[6]:

$$\sin \alpha - \sin \beta = m\lambda/d, \quad (1)$$

$$C_{ff} = \cos \beta / \cos \alpha, \quad (2)$$

$$\lambda = d\{\sin \alpha - \sin[\arccos(C_{ff} \cos \alpha)]\}, \quad (3)$$

式中 α 为光栅的入射角, β 为光栅的衍射角, d 为光栅的刻线间距, λ 为波长, m 为衍射级次,取 $m = 1$ 。波长扫描原理如图 1 所示。

要实现准确的波长扫描,关键是实现平面镜转动和平动的复合运动。这种复合运动采用离轴转动原理来实现,即在整个波长扫描范围内,选用三个角度的光线打在光栅中心,而其他角度偏离光栅中心的程度非常小,依据此原则,得出平面镜的转轴位置

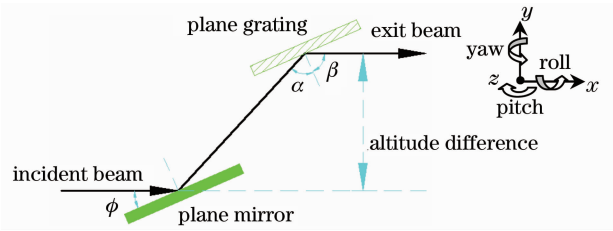


图 1 变包含角平面光栅单色器波长扫描原理

Fig. 1 Principle of wavelength scanning for VAPGM 以及转动半径。图 2 为平面镜离轴转动原理图。 $M(X_M, Y_M)$ 为平面镜转轴坐标, R_M 为平面镜转动半径, X_I 为平面镜入射光斑的横坐标, ϕ 为平面镜掠入射角,为光栅入射角, β 为光栅衍射角。 Y_H 为入射光线的纵坐标值。根据几何关系,可以得出^[3,7]

$$(X_M - X_I) \tan \phi + R_M / \cos \phi = Y_M - Y_H, \quad (4)$$

$$\overline{OG} = -Y_H / \cos \alpha - X_M \sin 2\phi / \cos \alpha -$$

$$2R_M \cos \phi / \cos \alpha + 2Y_M \cos^2 \phi / \cos \alpha. \quad (5)$$

在 Y_H 已知的条件下,要想使光栅的入射光线始终落在 O 点,需要使(5)式等于零。将三个能量点的 ϕ 和 α 值代入(5)式,就可以解出 X_M, Y_M 和 R_M 的值。在本设计中, $Y_H = (30 \pm 0.01)$ mm,选择的三个能量点分别为:250 eV($\alpha = 83.86151^\circ, \phi = 4.77212^\circ$), 800 eV($\alpha = 87.66664^\circ, \phi = 3.26801^\circ$)及 2000 eV($\alpha = 88.52372^\circ, \phi = 2.06712^\circ$),经过计算,可以得出: $X_M = -0.005872$ mm, $Y_M = 15.160254$ mm, $R_M = 30.160367$ mm。将这三个值作为单色器结构设计的重要依据。

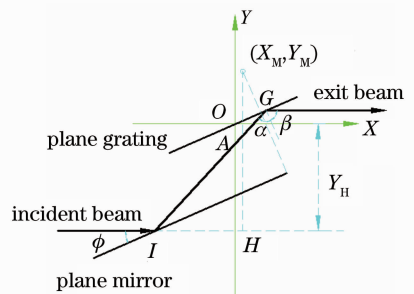


图 2 变包含角平面光栅单色器平面镜离轴转动原理

Fig. 2 Principle of plane mirror's off-axis rotation for VAPGM

3 单色器结构设计

变包含角平面光栅单色器是一种极为复杂和精密的装置,涉及到精密机械、光学、真空和冷却等多方面的技术^[8~12]。为了满足谱学显微光束线站的总体指标,根据前述的波长扫描原理和平面镜离轴转动原理来完成变包含角平面光栅单色器的整体结

构设计。高性能的光谱输出决定了单色器在设计过程中存在较多的技术难点,主要包括高精度波长扫描机构的设计、高精度光栅切换机构的设计、结构紧凑的姿态调节机构设计以及各个机构的高精度装校等。

3.1 波长扫描机构

波长扫描机构是单色器的核心,其作用是使平面镜和平面光栅绕各自的转轴进行转动,从而实现能量在 250~2000 eV 之间进行选择。要实现能量的精确选择,就要满足在 250 eV 时,光束能量分辨率为 6000 的设计值。直接影响能量分辨率的是平面镜和平面光栅的转角精度,设平面镜的转角误差为 $\Delta\varphi$,平面光栅的转角误差为 $\Delta\eta$,固定出射方向衍射光的波长变化为 $\Delta\lambda$,则满足^[4]

$$\Delta\varphi = \frac{(1 + C_{ff})(\sin \alpha + \sin \beta)}{2\sqrt{2}(\cos \alpha + \cos \beta)} \frac{\Delta\lambda}{\lambda}, \quad (6)$$

$$\Delta\eta = \frac{\sin \alpha - \sin \beta}{\sqrt{2}(\cos \alpha + \cos \beta)} \frac{\Delta\lambda}{\lambda}, \quad (7)$$

(6)、(7)式表示出平面镜和光栅的转角误差与分辨率的关系,根据光束线的分辨率设计要求,平面镜和光栅的转角误差应小于 0.43"。据此设计波长扫描机构。

波长扫描机构包括三方面:1)实现平面镜运动的正弦机构,其主要由正弦杆机构和直线位移机构组成;2)实现光栅运动的正弦机构,也是由正弦杆机构和直线位移机构组成;3)平面镜和光栅的轴系结构。

对于平面镜和光栅的正弦机构而言,影响转角精度的主要是直线位移机构的精度和正弦杆的刚度。直线位移机构精度取决于精密导轨的重复精度和光栅尺的测量精度。选用精度为 1 μm 的精密导轨,正弦杆的设计长度为 690 mm,由此可以得出转角误差为 0.3"。如果要进一步减小转角误差,采用 0.5 μm 精度的光栅尺作为闭环检测元件,这样所对应的转角误差为 0.15"。

正弦杆在波长扫描过程中运动速度很低,可以近似认为其始终处于平衡状态,因此其只受到重力的作用。对于光栅正弦杆,其结构相对简单,采用 4Cr13 矩形截面的正弦杆。此正弦杆挠度变化为 0.075 μm ,有效杆距变化 0.01 μm ,由此引起的转角误差小于 0.054"。平面镜的正弦杆结构相对复杂,主要由安装镜子的镜框和连接杆组成,这就使得平面镜的正弦杆结构的刚度既要受到镜子自身重力的影响,又要受到镜架和连接杆装配关系的影响。采用 4Cr13,镜框截

面内腔形状为矩形,其尺寸为 82 mm×64 mm,外部通过肋板加强,这样可以将其转角误差控制在 0.15"之内。

平面镜要离轴转动,光栅要绕其表面中心轴线转动,这就使得两者不共轴。如果分别为两者设计轴系,就会使得单色器整体结构过于复杂,而且不利于保证两者的空间位置精度,从而引起较大的转角误差。为了能够获得较小转角误差并使单色器结构更为紧凑,设计了一种偏心轴系结构。这种结构使支撑体的两个轴孔可以同时加工,从而保证两者的同轴度。偏心轴系要应用在超高真空环境中,所以采用滚动轴承作为偏心轴的支撑,支点距离为 150 mm,正弦杆长度为 690 mm,这样可以计算出偏心轴系由于轴承径向跳动引起的误差,在 9°的转角范围内转角误差为 0.2"。

除以上机构引起的转角误差外,还有光栅切换位置不重合引起的误差(约为 0.19")和温度变化引起的误差(约为 0.1")。这样,转角的综合误差约为

$$\delta = \sqrt{0.15^2 + 0.15^2 + 0.2^2 + 0.19^2 + 0.1^2} = 0.36", \quad (8)$$

综合转角误差满足小于 0.43"的设计要求。根据上述的分析和基本原理,设计出波长扫描机构,如图 3 所示。通过电机驱动直线位移机构上的推杆推动正弦杆机构绕偏心轴系的转轴进行转动,进而实现波长扫描。

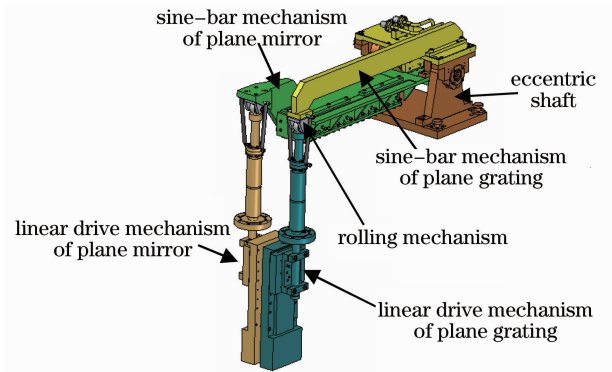


图 3 波长扫描机构

Fig. 3 Structure of wavelength scanning mechanism

3.2 光栅切换机构

根据单色器的性能和精度要求,采用两块光栅分别应用于低能段(250~750 eV)和高能段(275~2000 eV)。这两块光栅在同一基底上,即同一基底上有两个光栅工作区域。对于光栅工作区域的切换,可以有两种方案:1)在镜箱内部调节,2)随镜箱一起移动进行调节。第一种方案需要通过线性驱动

装置将直线运动传递到镜箱内部,进而实现光栅工作区域的切换,这样就会对前面所叙述的偏心轴系和光栅正弦杆机构提出更高的要求,使其机械结构更加复杂,不利于控制光栅的运动精度,而且会影响波长扫描机构的精度。第二种方案在镜箱底部安装导轨,通过镜箱的横向直线运动来实现光栅工作区域的切换,这种方案避免了偏心轴系和光栅正弦杆机构复杂化的要求,有利于控制光栅的运动精度以及波长扫描机构的精度。

实验中采用第二种方案来设计光栅切换机构。镜箱的平移距离为 15 mm。要保证单色器的工作性能,需要对光栅切换机构中直线导轨的精度提出确切的要求。

首先,要保证直线导轨与光栅转轴的平行度要求,包括直线导轨与光栅转轴的水平偏差和垂直偏差。水平偏差是由于直线导轨与光栅转轴在水平方向上的平行度引起的[图 4(a)],会导致单色器的镜箱在光束线中的位置发生改变。此精度要求不高,

根据光束线的实际情况,取 0.1 mm。因此,水平偏差可以表示为

$$\delta_{\parallel} \leq \arctan\left(\frac{0.1}{15}\right) = 0.3^{\circ}. \quad (9)$$

垂直偏差是由于直线导轨与光栅转轴在垂直方向的平行度引起的[图 4(b)],会导致光栅的出射光线产生垂直方向的平移,从而影响光斑的质量和能量分辨率。由于出射光线还要经过超环面镜聚焦,会降低对光斑和能量分辨率的影响。所以,根据实际的加工和装配水平,允许在切换过程中光栅的出射光束具有 10 μm 的平移量。因此,垂直偏差可以表示为

$$\delta_{\perp} \leq \arctan\left(\frac{0.01}{15}\right) = 0.03^{\circ}. \quad (10)$$

在 15 mm 的切换距离内,要保证直线导轨和光栅轴线的平行度以及水平偏差和垂直偏差满足上述的要求,通过选择精密直线导轨以及给出相关零件的合理形位公差就可以实现。

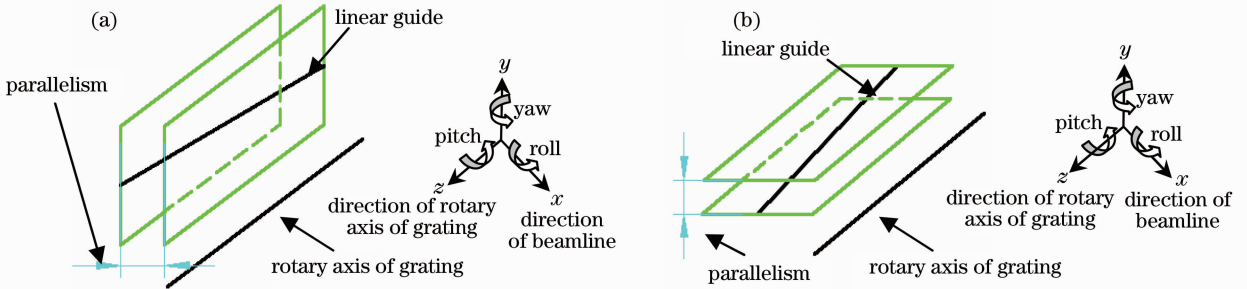


图 4 直线导轨与光栅转轴的平行度要求示意图。(a) 水平方向; (b) 垂直方向

Fig. 4 Schematic diagram of parallelism between linear guiding rail and grating's rotation axis. (a) Horizontal direction; (b) vertical direction

其次,要保证在光栅工作区域切换过程中由于直线导轨不平行所引起的镜箱转角精度要求,主要涉及到单色器镜箱的滚角(Roll)、摆角(Yaw)和投角(Pitch)误差。滚角误差会导致光斑产生漂移,根据光束线和单色器的技术指标要求,滚角误差应小于 10",经计算其导致的光斑漂移为 0.7 μm,不随能量的扫描而变化。摆角误差也会导致光斑产生漂移,对于不同的能量,其光斑漂移会产生变化,这就需要在全谱扫描过程中的光斑漂移进行计算,摆角误差所引起的光斑漂移可以表示为^[6]

$$\Delta = \frac{r_1 r_3}{r_1 + r_2} \sin \delta \frac{2 \sin^2 \varphi - 2 \cos \beta \cos \alpha}{-\cos 2\varphi + 2 \cos \alpha \cos \beta} \quad (11)$$

在此系统中, $r_1 = 32$ m 为光源到单色器的距离; $r_2 = 2$ m 为单色器到超环面镜的距离; $r_3 = 8$ m 为超环面镜到出射狭缝的距离; δ 为摆角角度误差;

α 为光栅入射角; β 为光栅衍射角; φ 为前置平面镜掠入射角。根据光斑漂移重复精度的要求,对影响单色器摆角误差的因素进行误差分配,可取光栅切换机构摆角误差为 $\delta = 10''$,所以,当能量 $E = 275$ eV, $C_{if} = 1.8$ 时,光斑的漂移最大为 0.57 μm,在允许范围内。投角误差会引起能量的漂移,根据单色器性能要求,取投角误差为 0.4"。

通过以上叙述可知,要达到单色器的精度要求,光栅切换机构的直线导轨不平行所引起的转角误差应满足: $\delta_{\text{Roll}} < 10''$, $\delta_{\text{Yaw}} < 10''$, $\delta_{\text{Pitch}} < 0.4''$ 。

要保证滚角、摆角和投角误差的要求,主要取决于直线导轨和滑块自身的精度、滑块的高度成组相互差以及滑块与轨道间宽度成组相互差。选择精密级的直线导轨,其滑块精度小于 6 μm,其所引起的角度重复精度可以达到 4" (小于 10")。光栅工作区

域的转换只需要保证两个切换点的位置重复,这样使用精度优于 $0.5 \mu\text{m}$ 的滑块,可以使角度重复精度达到 $0.34''$ (小于 $0.4''$)。

根据以上的分析,完成光栅工作区域切换机构的设计,其具体结构如图 5 所示。滑轨固定在大理石台上,滑块通过连接板与镜箱底板相连,驱动机构由手轮、精密丝杆和螺母等组成;驱动机构带动镜箱底板沿滑轨进行直线运动,从而使镜箱及镜箱内的所有部件一起平移,进而实现光栅工作区域的切换。

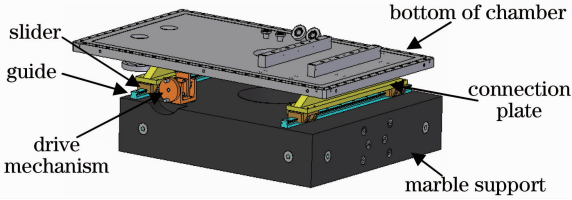


图 5 光栅工作区域切换机构

Fig. 5 Plane grating switching mechanism

3.3 镜箱姿态调节机构

对单色器的设计,除了光栅和平面镜的运动机构以及真空镜箱外,还需要支撑镜箱的精密调节平台。采用六杆并联机构来完成精密调节平台的设计。单色器箱体姿态调节的调整范围和分辨率要求为:位移调节范围 $\pm 5 \text{ mm}$,位移分辨率 0.01 mm ;角度调节范围 $\pm 1.5''$,角度分辨率 $5''$ 。

该并联机构的六个支杆有三个竖直杆和三个水平杆,各个支杆的中位长度为 211 mm 。要使支杆的调整量要达到 $\pm 5 \text{ mm}$,需采用差动螺旋方式,一端螺纹的螺距 $P_1 = 2 \text{ mm}$,另一端螺纹的螺距 $P_2 = 1.25 \text{ mm}$,差动量 $P_D = 0.75 \text{ mm}$ 。 $P_1 = 2 \text{ mm}$ 的螺杆长度为 $L_1 = 28 \text{ mm}$, $P_2 = 1.25 \text{ mm}$ 的螺杆的长度为 $L_2 = 17.5 \text{ mm}$ 。要保证角度调节范围为 $\pm 1.5''$,则支杆的间距最大值为 $L_{\text{max}} = 380 \text{ mm}$ 。

在保证调节范围的前提下,还要满足分辨率要求。假定在调节过程中所使用的扳手长 $l_w = 300 \text{ mm}$,具有 $l'_w = 5 \text{ mm}$ 的线性灵敏度,则支杆的位移分辨率 l'_s 为

$$l'_s = P_D \frac{l'_w}{2\pi l_w} = 0.75 \times \frac{5}{2 \times 3.14 \times 300} = 0.002 \text{ mm}, \quad (12)$$

这满足 0.01 mm 的分辨率要求。角度分辨率为

$$\alpha' = \arctan\left(\frac{l'_s}{L_{\text{max}}}\right) = \arctan\left(\frac{0.002}{380}\right) = 1'', \quad (13)$$

这满足 $5''$ 的分辨率要求。六杆并联机构的整体结构如图 6 所示。

3.4 整体结构

除上述的主要机构外,单色器还包括超高真空

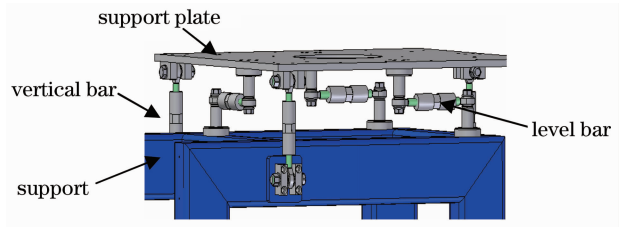


图 6 六杆并联机构结构图

度的镜箱、光栅和平面镜的冷却装置、大理石平台以及控制系统。单色器整体结构如图 7 所示。

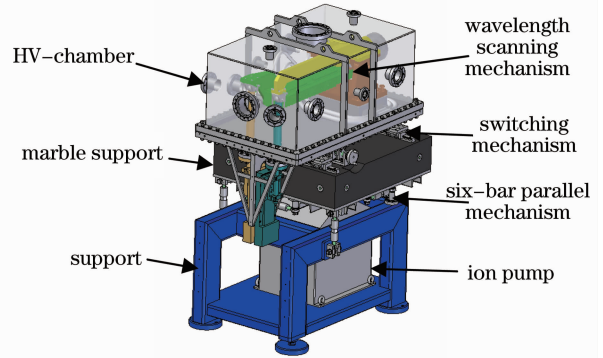


图 7 单色器整体结构

Fig. 7 Structure of monochromator

4 单色器机械精度测试

单色器设计完成并加工装配后,需要对其机械精度进行测试,以检验是否达到所需要的精度要求。采用精度优于 $0.1''$ 的 ELCOMAT3000 型光电自准直仪对光栅和平面镜的转角重复精度以及光栅切换重复精度进行检测,检测结果如表 1^[13,14] 和 2 所示。

表 1 平面镜和光栅转角重复精度

Table 1 Angular repeatability of plane mirror and plane grating

Travel / mm	Plane mirror / (")		Plane grating / (")	
	Positive direction	Reverse direction	Positive direction	Reverse direction
10	0.013	0.031	0.097	0.068
20	0.041	0.056	0.056	0.081
30	0.079	0.106	0.084	0.073
40	0.100	0.077	0.038	0.082
50	0.147	0.131	0.068	0.069
60	0.048	0.030	0.096	0.064
70	0.166	0.119	0.149	0.139
80	0.162	0.153	0.086	0.063
90	0.106	0.120	0.098	0.090
Max error	0.166	0.153	0.149	0.139

表 2 切换机构重复精度
Table 2 Repeatability of switching machine

Movement angle		Roll / (")	Yaw / (")	Pitch / (")
Technical requirements		≤10	≤10	≤0.4
Optical axis parallel to beam direction	Position1	0.07	0.12	
	Position2	0.08	0.11	
Optical axis vertical to beam direction	Position1		0.07	0.05
	Position2		0.07	0.04

从表 1 中可以看出,平面镜和平面光栅的转角重复精度分别为 $0.166''$ 和 $0.149''$,都优于光束线所要求的技术指标 $0.43''$ 。从表 2 中也可以看出,切换机构的滚角、摆角和投角的重复精度分别为 $0.08''$ 、 $0.12''$ 和 $0.05''$,这满足技术指标的要求。

5 结 论

针对上海光源谱学显微光束线站的技术要求,对平面光栅单色器进行结构设计。论述了波长扫描机构、光栅切换机构和镜箱姿态调节机构的设计方案。分析了波长扫描机构中平面镜和光栅的转角重复精度问题。为保证转角重复精度,设计了偏心轴系结构。分析了光栅切换机构中直线导轨的精度,指出要满足单色器的性能要求,需要严格控制直线导轨不平行所引起的滚角、摆角和投角精度。采用六杆并联机构实现镜箱的姿态调整功能,其调节范围和分辨力满足设计要求。测试了单色器的机械精度,平面镜和光栅的转角重复精度分别为 $0.166''$ 和 $0.149''$,小于 $0.43''$,切换机构的滚角、摆角和投角的重复精度分别为 $0.08''$ 、 $0.12''$ 和 $0.05''$,这满足技术指标要求。

参 考 文 献

- Ma Lidun. Shanghai Synchrotron Radiation Facility and its application[J]. *Physical Testing and Chemical Analysis Part A (Physical Testing)*, 2009, **45**(11): 717~723
马礼敦. 同步辐射装置-上海光源及其应用[J]. 理化检验(物理分册), 2009, **45**(11): 717~723
- A. V. Pimpale, S. K. Deshpande, V. G. Bhide. Design considerations for the rotation of a plane premirror of a monochromator for reflecting synchrotron radiation onto the same spot of the dispersing grating of the XUV beamline [J]. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(13): 1591~1594
- F. Riemer, R. Torge. Bessy SX-700 U HV monochromator: design features and kinematic concept [J]. *Nucl. Instrum. Methods*, 1983, **208**(1-3): 313~314
- Lu Qipeng, Ma Lei, Peng Zhongqi. Rotation-angle-accuracy measurement of scanning mechanism in variable included angle plane grating monochromator [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2010, **18**(7): 1548~1553
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
- Wu Kun, Xue Song, Lu Qipeng *et al.*. Simulation analysis and measurement of rotation angle repeatability for grating sine mechanism of SX-700 monochromator [J]. *Optics & Precision*

Engineering, 2010, **18**(1): 45~51

- 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 Kun, Xue Song, Lu Qipeng *et al.*. Analysis of light spot transversal transfer for the variable included angle plane grating monochromator at SSRF [J]. *Nuclear Techniques*, 2010, **33**(5): 321~325
吴坤, 薛松, 卢启鹏等. 变包含角平面光栅单色器光斑横移分析[J]. 核技术, 2010, **33**(5): 321~325
- Tai Renzhong. Primary Design of Soft X-Ray Microscopy Beamline [M]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2006. 15~16
邵仁忠. 软 X 射线谱学显微光束线站初步设计报告 [M]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2006. 15~16
- Li Yongjun, Lu Qipeng, Peng Zhongqi *et al.*. Exact solution and applications of the inverse kinematics of six-bar parallel mechanism in synchrotron radiation beamline [J]. *Nuclear Techniques*, 2008, **31**(7): 485~488
李勇军, 卢启鹏, 彭忠琦等. 同步辐射光束线六杆并联机构的逆运动学精确求解及应用[J]. 核技术, 2008, **31**(7): 485~488
- Lu Qipeng, Li Yongjun, Peng Zhongqi *et al.*. Forward kinematics of six-bar parallel mechanism and its applications in synchrotron radiation beamline [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2008, **16**(10): 1874~1879
卢启鹏, 李勇军, 彭忠琦等. 六杆并联机构运动学正解研究及其在同步辐射光束线中的应用[J]. 光学精密工程, 2008, **16**(10): 1874~1879
- Kong Peng, Bayanheshig, Li Wenhao *et al.*. Optimization of double-grating flat-field holographic concave grating spectrograph [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0205001
孔鹏, 巴音贺希格, 李文昊等. 双光栅平场全息凹面光栅光谱仪的优化设计[J]. 光学学报, 2011, **31**(2): 0205001
- Xue Qingsheng, Huang Yu, Lin Guanyu. Optical system design of wide-angle and high-resolution spaceborne imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0822001
薛庆生, 黄煜, 林冠宇. 大视场高分辨率星载成像光谱仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2011, **31**(8): 0822001
- Yu Lei, Wang Shurong, Qu Yi *et al.*. Single-grating optical system of imaging spectrometer with high resolution for ionosphere detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0712005
于磊, 王淑荣, 曲艺等. 用于电离层探测的单光栅高分辨率成像光谱仪光学系统研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(7): 0712005
- Liu Kai, Xue Song, Lu Qipeng *et al.*. Precision of a variable-included angle plane-grating monochromator (PGM) at SSRF [J]. *Nuclear Techniques*, 2009, **32**(12): 881~884
刘楷, 薛松, 卢启鹏等. 变包含角平面光栅单色仪的机械精度分析与测试[J]. 核技术, 2009, **32**(12): 881~884
- Chen Jiahua, Xue Song, Lu Qipeng *et al.*. The variable included angle plane grating monochromator and the key technology [J]. *Scientia Sinica Physica; Mechanica & Astronomica*, 2011, **41**(1): 6~11
陈家华, 薛松, 卢启鹏等. 变包含角平面光栅单色器及其关键技术[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2011, **41**(1): 6~11

栏目编辑: 何卓铭