

文章编号 1004-924X(2010)07-1548-06

变包含角平面光栅单色器扫描转角精度的检测

卢启鹏¹, 马磊^{1,2}, 彭忠琦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, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:针对上海光源(SSRF)软 X 射线谱学显微光束线站高分辨变包含角单色器(VAPGM)在超高真空环境下对波长扫描机构转角精度的现场测试,提出了一种实用、有效的检测方法。采用自制的多角棱镜,结合高精度光电自准直仪进行现场测试。首先,介绍了单色器波长扫描原理,给出角度与波长的关系;接着,理论分析了转角精度与系统分辨率之间的关系;最后,介绍了该方法的检测原理、装置及检测步骤。利用该方法完成了 VAPGM 平面镜(PM)和平面光栅(PG)转角精度的检测,结果分别为 0.19", 0.22", 满足单色器技术指标要求。在电离室在线检测了标定后的单色器系统的分辨率,测试结果好于 10 000,进一步验证了该检测方法的有效性。

关键词:同步辐射;变包含角单色器;波长扫描机构;转角精度;多角棱镜

中图分类号:TH744.1; TB92 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101807.1548

Rotation-angle-accuracy measurement of scanning mechanism in variable included angle plane grating monochromater

LU Qi-peng¹, MA Lei^{1,2}, PENG Zhong-qi¹

- (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: A simple, practical, and effective method for measuring the rotation-angle-accuracy of the wavelength scanning mechanism in a Variable Included Angle Plane Grating Monochromator (VAPGM) was proposed in an ultra-high vacuum environment. The method was achieved by using a special angle mirror and a high-precision photoelectric autocollimator. Firstly, the relationship between angle and wavelength was described on the basis of the principle of VAPGM wavelength scanning. Then, the dependence of rotation-angle-accuracy on system resolution was analyzed. Finally, the principle, devices and steps of the method were introduced in detail. By using this method, the rotation-angle-accuracies of the Plane Mirror (PM) and the Plane Grating (PG) were measured, and the results show that they are 0.19" and 0.22", respectively, which fulfills the technical requirements of VAPGM. The resolution power of this monochromator was tested by an ionization chamber after measuring the rotation-angle-accuracy, and the result is superior to 10000. The experimental result

收稿日期:2009-10-15; **修订日期:**2009-11-23.

基金项目:国家重大科学工程上海光源工程项目(No. SS-06, O7093XQ070);应用光学国家重点实验室开放基金资助项目(No. O9Q33FQ091)

further verifies that the method is effective.

Key words: synchrotron radiation; Variable Included Angle Plane Grating Monochromator(VAPGM); wavelength scanning mechanism; rotation-angle-accuracy; angle mirror

1 引言

同步辐射是运动速度接近光速的电子在改变运动方向时,沿其切线发出的电磁辐射^[1],广泛应用于基础科学研究和应用研究领域^[2-3]。为充分利用同步辐射光源的优异特性,获得高通量、高分辨的同步辐射光,满足不同学科研究需要,科学家们已先后研制成功了多种不同种类的单色器^[4-6]。

变包含角平面光栅单色器(Variable included Angle Plane Grating Monochromators, VAPGM)凭借宽光谱、高通量、高分辨、应用灵活等优异性能,在各国同步辐射装置中得到了广泛应用^[7-10]。

上海光源(Shanghai Synchrotron Radiation Facility, SSRF)是我国第三代同步辐射光源^[11], VAPGM是SSRF首批建造的软X射线谱学显微光束线的核心装置,由波长扫描机构、调节机构以及驱动机构等组成^[12]。其中,单色器波长扫描机构的转角精度直接影响波长的准确度和分辨率。根据使用要求,单色器的扫描转角精度在超高真空环境下要优于 $0.43''$ 。但是,由于VAPGM运动结构复杂,且在庞大的同步辐射装置中受棚屋、管线等各种现场状况的限制,要对波长扫描机构进行准确安装、检测并非易事。因此,对单色器波长扫描机构转角精度在线检测方法的研究具有重要意义。

本文在SSRF软X射线谱学显微光束线站VAPGM研制过程中,通过分析单色器工作原理及单色器性能与转角精度的关系,提出了一种简洁、有效的波长扫描机构转角精度的测试方法。利用该方法,完成了其转角精度的检测。结果表明,该方法行之有效,可获得较高的精度,满足单色器系统现场测试要求。

2 VAPGM 波长扫描原理

2.1 波长扫描原理

VAPGM光学系统由前置平面镜(PM)与平面光栅(PG)两块光学元件组成。工作时,PG绕

工作表面中心转动;PM绕镜面外转轴转动,实现转动和平动的复合运动,保证反射光准确入射到PG表面中心。通过两个光学元件转动,改变包含角,进行波长扫描,工作原理如图1所示。

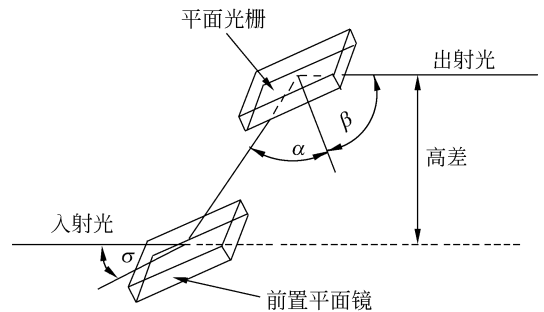


图1 VAPGM 波长扫描原理图

Fig. 1 Schematic diagram of wavelength scanning mechanism for VAPGM

其中 σ 为PM掠入射角, α 为PG入射角, β 为PG衍射角。

平面光栅聚焦方程为:

$$\frac{\cos^2 \alpha}{r} + \frac{\cos^2 \beta}{r'} = 0, \quad (1)$$

式中 r, r' 是PG的入射臂长度和出射臂长度。如果可满足:

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

则可在PG后得到一个固定位置的虚像^[13],即:

$$r' = -r \cdot C_{ff}^2, \quad (3)$$

后经放置在PG后面的聚焦镜,将光束聚焦于单色器的出缝位置。扫描过程中为满足式(2),要求PG的包含角 $(\alpha + \beta)$ 必须是变化的。

由式(2)及光栅衍射方程:

$$d(\sin \alpha - \sin \beta) = m\lambda, \quad (4)$$

可解出波长与角度的关系式为:

$$\lambda = d[\sin \alpha - \sin \{\arccos(C_{ff} \cos \alpha)\}], \quad (5)$$

式中 d 为PG刻线间距, λ 为波长, m 为衍射级次,取 $m=1$ 。

通过获得精确的角度位置,即可实现波长扫描。转角精度则直接影响波长扫描的准确性和分

分辨率。

2.2 转角精度与分辨率的关系

假设 PM 转角误差为 $\Delta\delta$, PG 转角误差为 $\Delta\theta$, 固定出射方向的衍射光波长变化 $\Delta\lambda$, 则满足:

$$\sin(\alpha + 2\Delta\delta - \Delta\theta) - \sin(\beta + \Delta\theta) = \frac{m(\lambda + \Delta\lambda)}{d}, \quad (6)$$

当 $\Delta\delta, \Delta\theta$ 足够小, 由式(4), (6)得:

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

式中 $\Delta\delta$ 和 $\Delta\theta$ 为相互独立的随机量, 二者贡献取矢量和为:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\sqrt{(2\cos\alpha \cdot \Delta\delta)^2 + (\cos\alpha + \cos\beta)^2 \cdot \Delta\theta^2}}{\sin\alpha - \sin\beta}, \quad (8)$$

假定式(7)分子上两项贡献相当, 即:

$$\frac{\Delta\delta}{\Delta\theta} = \frac{(1 + C_{ff})}{2}, \quad (9)$$

则由式(8), (9)可得出转角精度与分辨率的关系式为:

$$\Delta\delta = \frac{(1 + C_{ff}) \cdot (\sin\alpha + \sin\beta)}{2\sqrt{2} \cdot (\cos\alpha + \cos\beta)} \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda}, \quad (10)$$

$$\Delta\theta = \frac{\sin\alpha - \sin\beta}{\sqrt{2} \cdot (\cos\alpha + \cos\beta)} \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda}. \quad (11)$$

根据波长扫描分辨率的设计要求 $5\ 000 @ 250$ eV, 在工作范围内, 转角精度要优于 $0.43''$ 。

3 角度检测方法

由上述理论可知, VAPGM 要求 PM 和 PG 的转角须精确匹配, 才能完成波长扫描。如果二者转角精度达不到设计要求, 转角配合发生偏差, 将直接影响波长扫描精度, 降低单色器性能。因此, 对转角精度的检测是保证单色器实现波长扫描的前提。

但是, VAPGM 自身运动结构的复杂, 以及现工作场状况使转角精度在线检测很有难度。针对上述问题, 本文提出一种简洁、有效的检测方法, 即采用自制多角棱镜并结合自准直法进行转角精度的在线检测。

根据检测要求, 对 PM、PG 转动机构 $2^\circ, 4^\circ$ 和 $6^\circ 3'$ 个点进行测量。检测中使用了自制的多面体角棱镜, 将其中 4 个面作为检测面, 角间隔经严格测试标定, 测试精度 $\leq 0.2''$ 。用标定后的角度值作为角度真值对单色器波长扫描机构进行多角度

的检测。

检测原理如图 2 所示。VAPGM 波长扫描采用正弦机构驱动。将多角棱镜安装在光学转台上, 调节转台, 使自准直仪发出的平行光垂直照射多角棱镜第一个棱镜面。通过直线位移驱动机构, 推动正弦杆转动, 带动多角棱镜旋转。当平行光垂直照射在多角棱镜第二个棱镜面时, 正弦机构转过 α 角, 此时 α 角等于多角棱镜所标定的角度。同样, 当平行光垂直照射第三、第四个棱镜面时, 完成其他角度的测量。因此, 利用该方法可实现转动机构的多角度检测, 完成转角精度的检测。

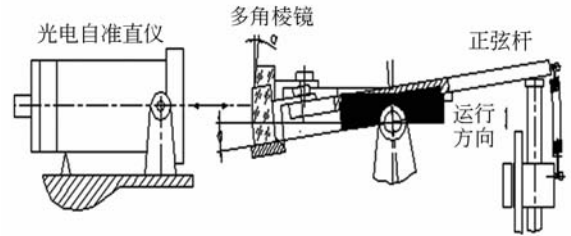


图 2 角度检测原理图

Fig. 2 Principle of angle measurement

为了准确检测转角精度, 需要确定转动角度和直线位移之间的关系。二者关系如图 3 所示, 设 L 为正弦杆杆长, h 为利用线性编码器测量的直线位移, h_0 为初始偏离位移, ϕ 为转动角度, ϕ_0 为初始偏离角度。用方程表示为:

$$\phi = \arcsin\left(\frac{h + h_0}{L}\right) - \phi_0. \quad (12)$$

如果事先对 L, h_0, ϕ_0 数值进行标定, 就能够通过测量直线位移 h 得到转动角度 ϕ 。首先用多角棱镜及光电自准直仪测出光学转台的不同角度值, 同时测出相应的直线位移量, 经数据处理得到 PM、PG 拟合方程, 实现 L 的标定, 得出角度与直

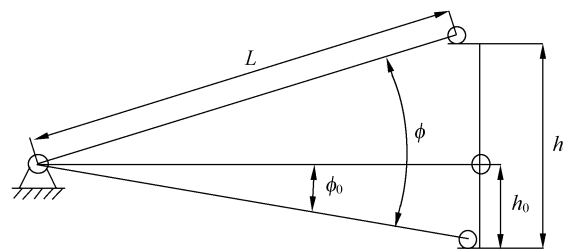


图 3 角度与直线位移的关系

Fig. 3 Relationship between angle and linear displacement

线位移的关系式,进而求得转动角度,实现转角精度的检测。

检测装置中包括自制多角棱镜和高精度光电自准直仪。针对 VAPGM 波长扫描机构 PM,PG 所要检测的角度范围,分别制作两块角间隔为 2°、4°、6°的多角棱镜,如图 4 所示。实际角度值委托中国计量院标定:PM 用多角棱镜为 2.010 222°,4.007 833°,6.002 944°;PG 用多角棱镜为 1.997 805°,3.994 861°,5.999 722°。



图 4 检测用多角棱镜

Fig.4 Angle mirror for measuring

检测中,根据实际要求的检测精度,使用了精度优于 0.1"的光电自准直仪。

4 检测步骤与结果分析

采用上述检测原理及检测装置,分别对 PM 和 PG 转角精度进行检测。具体步骤如下:

(1)在多角棱镜的第一个面处调节光路,使自准直仪读数为零;

(2)转动 PM 和 PG,分别使多角棱镜的第二、三、四个面成为迎光面,记录自准直仪读数及线性编码器测量的直线位移,至此,完成一组单向测量;

(3)重复上述步骤,完成多组测量。

表 1、表 2 即为 PM 和 PG 在转动不同角度时的直线位移测量数据及所得转角精度。

结合(12)式,通过数据处理,拟合出角度和直线位移的对应关系式。其中,PM 拟合结果为:

$$h_M = 693.2191 \sin(\phi_M - 0.2830) + 3.4236, \tag{13}$$

PG 拟合结果为:

$$h_G = 694.9062 \sin(\phi_G - 0.2911) + 3.5312, \tag{14}$$

表 1 PM 转角精度检测结果

Tab.1 Measurement results of rotation-angle-accuracy of PM

检测面	直线位移/(0.1 μm)	角度真值/(°)	转动角度/(°)	二者误差绝对值/(°)	转角精度/(")
面 2	-242 898		-2.007 856	2.3×10^{-5}	
	-242 898		-2.007 856	2.3×10^{-5}	
	-242 898	-2.007 833	-2.007 856	2.3×10^{-5}	0.15
	-242 901		-2.007 881	4.8×10^{-5}	
	-242 897		-2.007 848	1.5×10^{-5}	
面 3	-484 302		-4.005 461	1.7×10^{-5}	
	-484 303		-4.005 469	2.5×10^{-5}	
	-484 301	-4.005 444	-4.005 452	8.0×10^{-6}	0.12
	-484 302		-4.005 461	1.7×10^{-5}	
	-484 300		-4.005 444	0	
面 4	-724 863		-6.000 606	5.0×10^{-5}	
	-724 861		-6.000 590	3.4×10^{-5}	
	-724 859	-6.000 556	-6.000 573	1.7×10^{-5}	0.19
	-724 863		-6.000 606	5.0×10^{-5}	
	-724 862		-6.000 598	4.2×10^{-5}	

表 2 PG 转角精度检测结果

Tab. 2 Measurement results of rotation-angle-accuracy of PG

检测面	直线位移/(0.1 μm)	角度真值/($^\circ$)	转动角度/($^\circ$)	二者误差绝对值/($^\circ$)	转角精度/($''$)
面 2	-241 807		-1.993 968	4.0×10^{-6}	
	-241 811		-1.994 000	2.8×10^{-5}	
	-241 810	-1.993 972	-1.993 993	2.1×10^{-5}	0.13
	-241 810		-1.993 993	2.1×10^{-5}	
	-241 809		-1.993 984	1.2×10^{-5}	
	-483 738		-3.991 032	4.0×10^{-6}	
面 3	-483 738		-3.991 032	4.0×10^{-6}	
	-483 742	-3.991 028	-3.991 065	3.7×10^{-5}	0.13
	-483 739		-3.991 040	1.2×10^{-5}	
	-483 741		-3.991 057	2.9×10^{-5}	
	-726 069		-5.995 930	4.1×10^{-5}	
面 4	-726 068		-5.995 922	3.3×10^{-5}	
	-726 069	-5.995 889	-5.995 930	4.1×10^{-5}	0.22
	-726 073		-5.995 963	7.4×10^{-5}	
	-726 069		-5.995 930	4.1×10^{-5}	

利用式(13)、(14)及直线位移测量数据,求得 PM 和 PG 的转动角度。计算转动角度与角度真值之间的误差绝对值,把所得结果的标准差作为转角精度。如表 1、表 2 所示,PM 和 PG 转角精度最大值分别为 $0.19''$, $0.22''$, 优于单色器技术指标要求的 $0.43''$ 。

光束线安装完成后,采用气体电离室对角度标定后的单色器进行了光谱分辨率测试。当电离室工作气体采用 Ar 气时,测试结果如图 5 所示,单色器分辨率已达 10 000 以上,好于设计指标。

5 结 论

本文针对 SSRF 软 X 射线谱学显微光束线 VAPGM 波长扫描机构转角精度的检测,提出了一种简洁、实用、有效的测试方法。现场测试表明,PM 和 PG 转角精度分别为 $0.19''$, $0.22''$ 。电离室在线检测显示,用该方法测试标定过的单色器系统的分辨率优于 10 000,满足设计指标,进一步证实了该检测方法的有效性。由于该方法具有操作简单、检测精度高、现场操作易于实施等优点,因此对角度的高精度检测具有重要的实际应用价值。

致谢:感谢上海同步辐射实验室邵仁忠研究员、薛松研究员、王勇副研究员等在检测过程中给予的指导与帮助,以及实验室相关工作人员的配合与大力支持。

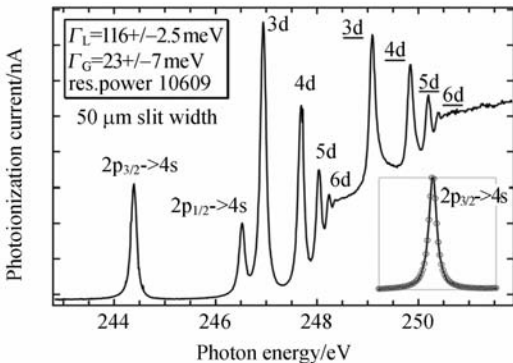


图 5 Ar 的气体吸收谱

Fig. 5 Photoionization spectrum of gas-phase Ar

参考文献:

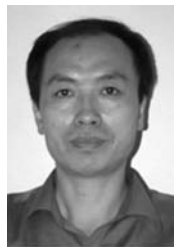
[1] WINICK H, DONIACH S. *Synchrotron Radiation*

Research[M]. New York (USA): Plenum Press, 1980.

[2] 唐福元. 同步辐射的发现、特性及其应用领域的开

- 拓[J]. 物理与工程, 2004,14(3):34-39.
TANG F Y. Synchronized radiation :Its discovery, feature and exploitation [J]. *Physics and Engineering*, 2004,14(3):34-39. (in Chinese)
- [3] ANDREAS K F. Third-generation synchrotron radiation X-ray optics[J]. *Facility. Stru*, 1996, 4(2):121-125.
- [4] 卢启鹏. 同步辐射软 X 射线束线单色器[J]. 光机电信息, 2001(9):35-39.
LU Q P. Synchrotron radiation soft X-ray beam-line monochromator[J]. *OME Information*, 2001(9):35-39. (in Chinese)
- [5] 卢启鹏. 高分辨掠入射软 X 射线 - 真空紫外单色仪[J]. 光学精密工程, 1998,6(5):91-95.
LU Q P. High resolution grazing incidence Soft X-ray and VUV monochromator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1998,6(5):91-95. (in Chinese)
- [6] 汤琦, 马健康, 周泗忠, 等. 弧矢(Sagittal)聚焦双晶单色器设计[J]. 光学精密工程, 2002,10(4):411-415.
TANG Q, MA J K, ZHOU S Z, *et al.*. Design of a sagittally focusing double - crystal monochromator in synchrotron radiation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002,10(4):411-415. (in Chinese)
- [7] 薛松, 邵景鸿, 卢启鹏, 等. NSRL 软 X 射线磁性圆二色光束线[J]. 核技术, 2005,28(10):738-741.
XUE S, SHAO J H, LU Q P, *et al.*. A soft X-ray magnetic circular dichroism beam-line[J]. *Nuclear Techniques*, 2005,28(10):737-741. (in Chinese)
- [8] KAZNACHEYVE K V, BLOMQUIST I, HALLIN E, *et al.*. Hitchcock. Principles of optical design of the SM beamline at the CLS[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2004,705:1303-1307.
- [9] MATSUSHITA T, MAEZAWA H, ISHIKAWA T, *et al.*. New multipole wigglet/undulator beam-line(BL-16)at the Photon Factory[J]. *Sci. Instr.*, 1989,60(7):1874-1876.
- [10] NYHOLM R N, ANDERSEN J, JOHANSSON U. Beamline I311 at MAX-LAB; a VUV/soft X-ray undulator beamline for high resolution electron spectroscopy[J]. *Nucl. Instr. Meth.*, 2001, A467:520-524.
- [11] CHEN S Y, XU H J. Current status of the proposed shanghai synchrotron radiation[C]. *Facility. Proc.* 1998, OfAPAC98 Tsukuba.
- [12] 卢启鹏, 李勇军, 彭忠琦, 等. 六杆并联机构运动学正解研究及在同步辐射光束线中的应用[J]. 光学精密工程, 2008,16(10):1874-1879.
LU Q P, LI Y J, PENG ZH Q, *et al.*. Forward kinematics of six-bar parallel mechanism and its applications in synchrotron radiation beam-line[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(10):1874-1879. (in Chinese)
- [13] PETERSEN H. The plane grating and elliptical mirror: A new optical configuration for monochromators[J]. *Opt. comm*, 1982, 40(6):402-406.

作者简介:



卢启鹏(1964—),男,黑龙江齐齐哈尔人,研究员,博士生导师,1987年于浙江大学获学士学位,1990年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获硕士学位,现从事光谱仪器及同步辐射光束线关键技术的研究。E-mail: luqipeng@126.com



马磊(1982—),男,吉林舒兰人,博士研究生,主要从事单色器关键技术的研究。E-mail: malei215@126.com



彭忠琦(1957—),男,吉林榆树人,1984年于吉林工学院获学士学位,主要从事同步辐射束线单色器的研究。E-mail: pengzhongqi@126.com