

变包含角平面光栅单色仪的机械精度分析与测试

刘 楷^{1,2} 薛 松¹ 卢启鹏³ 彭忠琦³ 吴 坤^{1,2} 陈家华¹ 王 勇¹ 巩志华^{1,2}

1 (中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2 (中国科学院研究生院 北京 100049)

3 (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

摘要 在上海同步辐射装置软 X 射线谱学显微光束线站建设中, 为达到变包含角平面光栅单色仪的能量分辨率要求, 平面镜和光栅的转角重复精度必须要求达到 0.43"。为此我们建立了一套由光电自准直仪组成的测试系统, 可以对平面镜和光栅机构进行测试。应用该系统测试了平面镜转角重复精度为 0.166", 光栅转角重复精度为 0.149", 分辨率达到 0.03", 满足了平面镜和光栅的转角重复精度和分辨率要求。此外, 还测量了光栅切换机构的重复精度。

关键词 变包含角平面光栅单色仪, 光电自准直仪, 转角重复精度, 测量

中图分类号 TB922

变包含角平面光栅单色仪^[1-5]具有诸多的优良特性, 如较高的光子输出通量、能量分辨率、光谱纯度和像斑质量, 且能量工作范围宽、光束传输效率高, 因而越来越多地运用于同步辐射光束线中。上海同步辐射装置(SSRF)软 X 射线谱学显微光束线采用一套变包含角平面光栅单色仪系统。该单色仪工作在平行光模式下, 无入射狭缝, 出射狭缝固定, 通过改变包含角来选择波长, 工作范围为 250–2000 eV。单色仪的机械精度直接影响出射光束的能量分辨率和能量位置精度。本文根据光束线中的能量分辨率要求, 对单色仪的转角重复精度和分辨率进行了分析, 并建立了平面镜光栅转角重复精度和光栅切换重复精度的测试系统。

1 能量分辨率对转角重复精度的技术要求

变包含角平面光栅单色仪的原理^[5]如图 1 所示, 在能量扫描过程中, 光栅绕表面中心转动, 平面镜既要转动又要平动, 使平面镜反射的光斑中心不偏离光栅中心。光栅方程为:

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

其中, α 、 β 为光栅入射角和衍射角, m 为衍射级次, λ 为波长, d 为光栅刻线间距, 定义 $C_{ff} = \cos \beta / \cos \alpha$ 为平面光栅光学放大倍数。

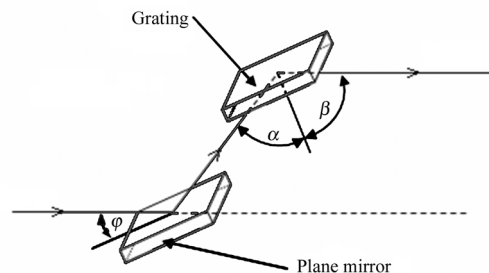


图 1 变包含角平面光栅单色仪原理图
Fig.1 Schematic diagram of the variable-included angle plane-grating monochromator

设平面镜的转角误差为 $\Delta\phi$, 光栅的转角误差为 $\Delta\eta$, 则固定出射方向的衍射光波长变化 $\Delta\lambda$ 满足式(1)与

$$\sin(\alpha + 2\Delta\phi - \Delta\eta) - \sin(\beta + \Delta\eta) = m(\lambda + \Delta\lambda) / d \quad (2)$$

则可得

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{2\cos\alpha \cdot \Delta\phi - (\cos\alpha + \cos\beta) \cdot \Delta\eta}{\sin\alpha - \sin\beta} \quad (3)$$

考虑到 $\Delta\phi$ 和 $\Delta\eta$ 是相互独立的随机量, 它们的贡献之和应取矢量和。所以, 式(3)应为

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\sqrt{(2\cos\alpha \cdot \Delta\phi)^2 + (\cos\alpha + \cos\beta)^2 \cdot \Delta\eta^2}}{\sin\alpha - \sin\beta} \quad (3a)$$

若要求(3)式分子上两项贡献相当, 即

$$\Delta\phi / \Delta\eta = (1 + C_{ff}) / 2 \quad (4)$$

第一作者: 刘 楷, 男, 1981 年出生, 2009 年于中国科学院上海应用物理研究所获博士学位, 核技术及应用专业

收稿日期: 2009-01-09, 修回日期: 2009-05-21

由式(3a)、(4)可得

$$\begin{cases} \Delta\eta = \frac{\sin\alpha - \sin\beta}{\sqrt{2} \cdot (\cos\alpha + \cos\beta)} \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \\ \Delta\varphi = (1 + C_{ff})\Delta\eta / 2 \end{cases} \quad (5)$$

若要满足能量分辨率的设计值 6000@250eV, 则要求平面镜和光栅的转角重复精度为 $\Delta\varphi=0.45''$, $\Delta\beta=0.58''$, 在计算中取 $C_{ff}=1/1.8$, $\alpha=83.86151^\circ$, $\beta=86.59424^\circ$ 。

因此, 将平面镜和光栅的全量程(250–2000 eV)转角重复精度定为 $0.45''$, 分辨率为 $0.05''$ 。由于能量分辨率对平面镜的角度误差更加敏感, 因此机械设计时应优先考虑平面镜的转角重复精度。

对于影响单色仪角度误差的机构因素主要有:

(1) 直线位移扫描机构引起的角度误差 Δ_1

该误差主要取决于直线导轨的制造装配精度, 选用精度为 0.001 mm 的精密导轨, 正弦杆长度按照 600 mm 进行计算, 这样由于直线位移扫描机构带来的角度误差为 $0.34''$;

(2) 平面镜及光栅扫描回转水平轴系引起的角度误差 Δ_2

该误差由轴承径向跳动引起, 在该水平轴系 12° 的转角范围内引起的角度误差为 $0.1''$;

(3) 正弦扫描杆弹性变形引起的角度误差 Δ_3

对于正弦扫描杆不同的截面形状和尺寸, 其弹性变形引起角度误差差距是很大的, 通过选取合适的材料、截面形状和尺寸, 可以将该项误差控制在 $0.1''$ 之内;

(4) 光栅位置切换不重合带来的角度误差 Δ_4

两块光栅的切换过程中, 由于导轨上滑块的跳动使其位置不重合, 从而产生光栅角度误差大约为 $0.21''$ 。据此可以得到单色仪的综合角度误差为 $\Delta=(\Delta_1^2+\Delta_2^2+\Delta_3^2+\Delta_4^2)^{1/2}=0.43''$ 。

2 测试方案

对于平面镜转角重复精度的测量, 根据精密测量原理^[6], 作为精密计量工具, 其综合误差应为被测对象所要求精度值的 1/3, 即测量精度 $\leq 0.14''$, 根据具体情况我们采用光电自准直仪进行测量。

自准直仪型号为 ELCOMAT 3000(德国 Moller-Wedel 公司)^[7], 其测量基本原理见图 2。一个位于准直透镜后部焦平面上照亮的目标被投射到无限远, 并由反射镜所反射。该图像由一个光感接收器接收。自准直仪光轴和反射镜角度之间的微小变化会引起一个偏差, 此偏差能被该仪器精确地测定。该光电自准直仪的测量范围为 $\pm 1050''$, 测量精度为在任意 $20''$ 内为 $\pm 0.10''$, 显示分辨率为 $0.005''$ 。

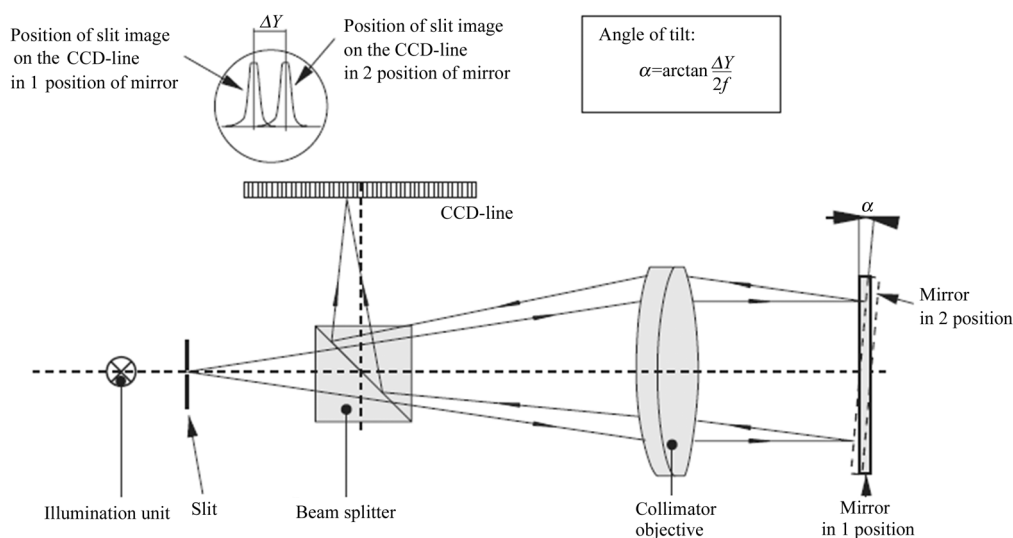


图 2 自准直仪的测量原理图
Fig.2 Schematic diagram of the autocollimator.

平面镜转角重复精度的测量原理见图 3。平面镜的转动过程为: 步进电机通过滚珠丝杠副, 驱动滑台在精密导轨上移动, 推动平面镜正弦杆转动, 从而实现平面镜的转动。其测试方法及步骤如下:

- 1) 在滑台行程范围内某一测量位置处调节光路, 使

- 自准直仪读数为零;
- 2) 转动平面镜到其他位置, 再返回该测量位置(包括正向和反向), 记录此时自准直仪读数;
- 3) 重复测量 10 次, 取 10 次测量值的标准偏差作为该位置的重复精度;
- 4) 测量多个位置, 取所有测量位置的重复精度的最大值作为平面镜的

重复精度。取滑台自下而上走为正向, 反之为反向, 考虑回程误差的影响, 从正反向分别到达待测点的误差不同, 因此需要测量正反方向的误差。对于光栅转角重复精度的测量, 其测试方法与平面镜相同。

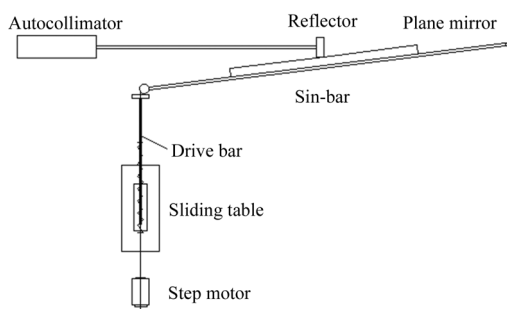


图 3 平面镜转角重复精度的测量原理图

Fig.3 Schematic diagram for measuring angular repeatability of the plane mirror.

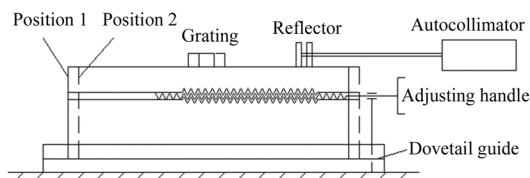


图 4 光栅切换机构重复精度的测量原理图

Fig.4 Schematic diagram for measuring angular repeatability of the grating switch mechanism.

对于光栅切换重复精度的检测, 同样采用光电自准直仪进行测量, 测量原理如图 4 所示, 自准直仪光轴垂直于光束线方向。其测试方法及步骤如下: 1) 光栅切换机构处于位置 1 时, 调节光路, 使自准直仪读数为零; 2) 将单色仪运动到位置 2, 记录自准直仪读数; 3) 再返回位置 1, 记录自准直仪读数; 4) 重复测量 10 次, 取每个位置 10 次测量值的标准

偏差作为该位置的重复精度; 5) 取 2 个位置的重复精度的最大值作为光栅切换机构的重复精度。

3 误差来源及精度可行性分析

该光电自准直仪的测量误差来源主要如下^[8,9]:

1) 光电自准直仪的仪器误差 $\delta_1 = 0.1''$;

2) 反射镜平面度误差带来的误差在实际使用中, 远距离安放仪器不善, 使准直系统轴线与反射镜平面度曲率中心偏离, 引起测量误差。设反射镜工作面平面度为 $1/5$ 光圈(相当于凸形 $h = 6 \times 10^{-5}$ mm), 反射镜直径 $d = 60$ mm, 则其对应的球面半径 $r = d^2 / (8h) = 0.75 \times 10^7$ mm, 球面反射镜焦距 $f' = r/2 = 0.375 \times 10^7$ mm, 则远距离测量, 当上述偏离 $e = 1$ mm 时, $\delta_2 = (e/f')\rho = 0.06''$, 其中 ρ 为将弧度单位换算成六十进制角度单位的换算常数, $\rho = 206265''$;

3) 对准误差 由于采用光电自准直仪配套的激光快速找准器进行找准, 其对准误差 $\delta_3 = 0''$;

4) 外界环境条件引起的误差 外界环境条件的影响包括温度、湿度、气压和振动的影响, 通过建立相对稳定的测试环境, 可使误差降低到 $\delta_4 = 0.01''$ 。

因此, 光电自准直仪在测量中的总误差为 $\delta = (\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2)^{1/2} = 0.12''$, 可满足转角精度的要求。

4 测试结果

4.1 平面镜和光栅转角重复精度的测量结果

在相同条件下, 对 10~90 mm 区间每隔 10 mm 进行 9 组测量, 每组测量 10 次, 取算术平均值, 其标准偏差可作为平面镜和光栅的转角重复精度, 结果如表 1。平面镜和光栅转角的最大误差分别为 $0.166''$ 和 $0.149''$, 小于设计指标要求 $0.43''$ 。

表 1 平面镜和光栅的转角重复精度($''$)
Table 1 Angular repeatability of the plane mirror and the grating

走向 Moving direction	行程 Movement distance /mm	10	20	30	40	50	60	70	80	90	最大误差 Max. error
平面镜 The plane mirror											
正向 Positive		0.013	0.041	0.079	0.100	0.147	0.048	0.166	0.162	0.106	0.166
反向 Reverse		0.031	0.056	0.106	0.077	0.131	0.030	0.119	0.153	0.120	0.153
光栅 The grating											
正向 Positive		0.097	0.056	0.084	0.038	0.068	0.096	0.149	0.086	0.098	0.149
反向 Reverse		0.068	0.081	0.073	0.082	0.069	0.064	0.139	0.063	0.090	0.139

关于分辨率, 当步进电机位移精度在 $0.1 \mu\text{m}$ 时, 光电自准直仪的读数变化 $0.03''$, 能很好满足转角重复精度分辨率 $0.05''$ 的要求。

4.2 光栅切换重复精度的测量结果

相同条件下对两个位置进行 9 组测量, 每组测 10 次, 将算术平均值的标准偏差作为光栅切换机构的重复精度(表 2), 测量结果满足设计指标要求。

表 2 光栅切换机构的重复精度(")
Table 2 The repeatability of the grating switch

运动角 Angular movements	技术要求 Technical requirements	自准直仪光轴垂直于光束线方向 Perpendicular to the beam direction		自准直仪光轴平行于光束线方向 Parallel to the beam direction	
		位置 1 Position 1	位置 2 Position 2	位置 1 Position 1	位置 2 Position 2
滚角 Roll	≤ 10	0.07	0.08	—	—
摆角 Yaw	≤ 10	0.12	0.11	0.07	0.07
投角 Pitch	\leq	—	—	0.05	0.04

5 结论

根据 SSRF 软 X 射线谱学显微光束线站中所使用的变包含角平面光栅单色仪的能量分辨率要求, 对平面镜光栅的转角重复精度和分辨率进行了分析, 利用光电自准直仪建立了一套测试系统。测试结果表明该测试系统满足了平面镜光栅的转角重复精度和分辨率要求。同时, 该测试系统也适用于 SSRF 其它光束线站中的光学元件转角重复精度的测量。此外, 还测量了光栅切换机构的重复精度, 均满足设计指标要求。

参考文献

- Warwick T, Cambie D, Padmore H A, *et al.* Nucl Instr Meth, 2001, **A467/468**: 525–528
- Vasina R, Kolarik V, Dolezel P, *et al.* Nucl Instr Meth, 2001, **A467/468**: 561–564
- Petersen H, Jung C, Hellwig C, *et al.* Rev Sci Instrum, 1995, **66**(1): 1–14
- Technical description of the JUV PGM. Canada: Johnsen Ultravac Inc.
- 徐朝银. 同步辐射光学与工程. (博士论文). 合肥: 中国科学技术大学, 2006: 1–4, 105–111
XU Chaoyin. Synchrotron Radiation Optics and Engineering. Hefei: University of Science and Technology of China, 2006: 1–4, 105–111
- 薛实福, 李庆祥. 精密仪器设计. 北京: 清华大学出版社, 1991
XUE Shifu, LI Qingxiang. Design of Precision Instrument. Beijing: Tsinghua University Press, 1991
- The Instruction Manual of ELCOMAT 3000 Autocollimator. Moeller-Wedel Optical
- 陈家汉. 计量技术, 1996, **6**: 50–53
CHEN jiahan. Meas Tech, 1996, **6**: 50–53
- 欧同庚, 陈志高, 杨博雄, 等. 大地测量与地球动力学, 2007, **27**(6): 98–100
OU Tonggeng, CHEN Zhigao, YANG Boxiong, *et al.* Journal of Geodesy and Geodynamics, 2007, **27**(6): 98–100

Precision of a variable-included angle plane-grating monochromator (PGM) at SSRF

LIU Kai^{1,2} XUE Song¹ LU Qipeng³ PENG Zhongqi³ WU Kun^{1,2} CHEN Jiahua¹ WANG Yong¹
GONG Zhihua^{1,2}

¹(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

²(Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

³(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract In establishing the soft X-ray microscopy beamline at SSRF, angular repeatabilities of the plane mirror and the grating should be better than 0.43" to achieve the PGM's energy resolution. We designed an autocollimator system to measure the plane mirror and the grating. Test results show that angular repeatabilities of the plane mirror and the grating are measured at 0.166" and 0.149", respectively, and the resolution is 0.03", satisfying the technical requirements of the plane mirror and the grating for the angular repeatability and resolution. The angle repeatability of the grating switch is very good, too.

Key words Variable included angle plane-grating monochromator, Photoelectric autocollimator, Angle repeatability, Measurement

CLC TB922