

KB 镜束流截面测量系统研制*

祝德充^{1,2}, 岳军会¹, 随艳峰¹, 季大恒¹, 曹建社¹,
叶恺容³, 陈杰³, 田顺强³, 冷用斌³

(1. 中国科学院高能物理研究所, 粒子加速物理与技术重点实验室, 北京 100049; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800)

摘要: 为了对衍射极限储存环的束流横向截面尺寸及发射度进行测量, 设计了一套 Kirkpatrick-Baez (KB) 反射镜聚焦成像系统, 并在上海光源 (SSRF) 储存环进行预制研究。该系统主体由两面垂直放置的 KB 反射镜组成, 分别在水平及垂直方向对弯转磁铁光源点进行成像, 系统工作在硬 X 射线波段, 聚焦光斑被闪烁体 X 射线相机采集。对影响系统成像质量的像差和点扩散函数进行了计算。目前, 实现了对束流的实时成像, 可精确测量束流横向截面尺寸为 $75.9 \mu\text{m}$ (水平方向) 和 $20.2 \mu\text{m}$ (垂直方向), 系统稳定性 (RMS) 小于 $0.1 \mu\text{m}$ 。

关键词: KB 镜; 束流尺寸测量; 束流诊断; 发射度; 同步辐射

中图分类号: TL594; TL506 **文献标志码:** A **doi:** 10.11884/HPLPB201830.170415

对于第三代同步辐射光源电子储存环来说, 对获取高亮度 X 射线同步辐射光的迫切需求促使设计者尽可能地降低发射度。最近, 世界多个国家和地区的加速器领域专家开始讨论并设计具有极低束流发射度、更高亮度和更高横向相干性的储存环。由于其束流水平自然发射度接近 X 射线的衍射极限, 因此被称为衍射极限储存环 (DLSR)。国内, 中国科学院高能物理研究所正在进行超低发射度的衍射极限环, 即高能光源 (HEPS) 的预研工作。

束流发射度是判断储存环性能的重要参数之一, 可通过测量光源点束流横向截面尺寸后结合该点 Twiss 参数计算得到。DLSR 的束流发射度在 $0.01 \sim 0.3 \text{ nm} \cdot \text{rad}$ 范围内, 束流尺寸在 μm 量级。运用传统的方法对如此小的束流尺寸进行测量极具挑战性。可见光成像法^[1]受到可见光波段 (约 400 nm) 衍射的限制, 空间分辨率极限为数十 μm ; 可见光双缝干涉法^[2]具有更高的分辨率, 可通过增大狭缝间距的方法提高分辨率, 但受到同步光垂直自然张角的限制; X 射线波段的小孔成像法^[3]由于结构简单、实用性高的特点被广泛应用, 其最佳分辨率的计算需对衍射极限 (孔过小) 及几何弥散 (孔过大) 进行平衡, 适合测量大于 $10 \mu\text{m}$ 的光斑; X 射线菲涅尔波带片成像法^[4]及复合折射透镜法^[5]的分辨率可达 μm 量级, 但需要使用单色器消除色差, 光通量较低, 很难实现实时测量; 而基于 Kirkpatrick-Baez (KB) 镜的成像方法, 由于采用掠反射聚焦方式而不存在色差, 无需单色器, 因此光通量高, 信噪比高, 同时具备分辨率高的特点, 成为我们在 DLSR 束流截面成像的研究方向。

上海光源 (SSRF) 是我国第一台三代同步辐射光源, 其水平束流发射度设计值为 $3.9 \text{ nm} \cdot \text{rad}$, 是目前国内发射度最低的光源。在光源建设初期, 已经搭建有 X 射线小孔成像系统 (X-pinhole)^[6] 及可见光空间干涉系统^[7] 来测量束流横向截面尺寸。为了开展衍射极限储存环束流截面尺寸测量的预研工作, 我们在 SSRF 原 X-pinhole 系统基础上设计并搭建了 KB 镜成像系统, 借助 SSRF 条件开展研究, 实现了与 X-pinhole 系统可切换并用。本文详细介绍了 KB 镜系统的设计、像差与点扩散函数计算及在线调试结果等。

1 系统设计

上海光源以第一单元第二块弯铁的 0.8° 线作为引出光源点, 建立了专用的 X 射线电子束流诊断线站^[8], 该光源点的束流尺寸 σ 值约为 $78 \mu\text{m}$ (水平) 与 $20 \mu\text{m}$ (垂直)。引出前端区使用厚度 1 mm 、直径 2 mm 的铝作为引出窗隔离真空, 使用前端开孔的锥型吸收块, 吸收 0.8° 线外的 X 射线。铝窗口距离弯铁光源点为 5.69 m , 引出同步辐射光的张角为 0.35 mrad 。原 X-pinhole 系统的针孔放置在距铝窗口 0.5 m 处, KB 镜真空室放置在 X-pinhole 系统的针孔后。

* 收稿日期: 2017-10-29; 修订日期: 2017-12-10
基金项目: 国家自然科学基金项目 (11605213)
作者简介: 祝德充 (1987—), 男, 博士研究生, 主要从事加速器束流诊断技术研究; zhude@ihep.ac.cn。

1.1 Kirkpatrick-Baez 镜系统

1948 年, Kirkpatrick 与 Baez 二人首次提出 KB 聚焦反射镜^[9], 它由两面相互垂直放置的球面镜分别对水平和垂直方向的 X 射线进行聚焦。KB 镜系统典型的优势是没有色差, 无需单色器, 相互垂直放置也起到消除像散的作用。由于两面镜子相互独立, 非耦合式, 且具有相同的聚焦模式, 所以两成像关系相互影响很小。KB 镜子午方向的聚焦方程为

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} = \frac{2}{R\sin\theta} \tag{1}$$

式中: p 与 q 分别是物距和像距; f 为焦距; R 为镜面曲率半径; θ 为掠入射角度。

如果 KB 聚焦镜的两块镜子都是柱面, 弧矢方向没有聚焦能力, 两镜子各自独立在入射平面内对光束聚焦; 如果两块镜子中有一块是球面镜或两块都是球面镜, 需考虑弧矢方向的聚焦对第二块镜子子午聚焦的影响。

1.2 上海光源 KB 镜系统设计

上海光源 KB 镜束测成像系统的设计简图如图 1 所示。两面 KB 镜垂直放置, 均为内凹的圆柱面型, 分别聚焦水平及垂直方向的 X 射线, 详细参数见表 1。镜体被姿态调节机构固定, 均放置在独立的超高真空室内, 以防止镜面在 X 射线照射下被氧化。为了隔离低频震动, KB 镜经由超高真空调节机构固定在一块 518 mm×712 mm×857 mm 的大理石基座上。两面 KB 镜均可远控调节姿态, 包括切入、切出光路, 倾斜角度 (pitch) 调整等。垂直聚焦镜 (VFM) 距离光源点 7.36 m, 距离像点 8.08 m, 放大率为 1.1 倍; 水平聚焦镜 (HFM) 距离光源点 7.72 m, 距离像点 7.72 m, 放大率为 1 倍。在 KB 镜真空室前, 放置有水平及垂直两个入射狭缝, 分别确定入射至系统内 X 射线的水平及垂直角度为 $122 \mu\text{rad} \times 117 \mu\text{rad}$ 。狭缝前的 Cu 衰减片用于衰减入射光子通量, 同时保护镜面免受长时间、高热负载运行。

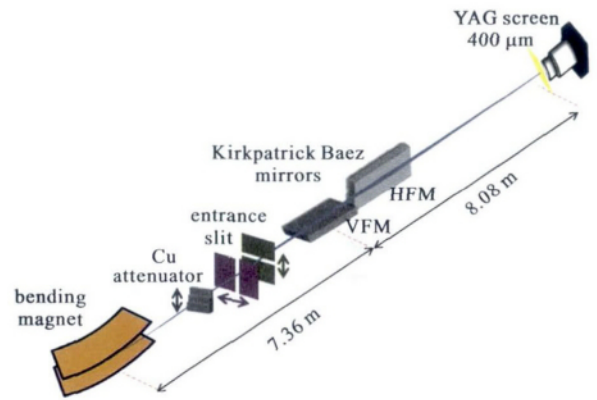


Fig. 1 Schematic diagram of Kirkpatrick Baez (KB) mirror system
图 1 KB 镜成像系统设计简图

表 1 KB 镜参数

Table 1 Design parameters of KB mirrors

mirror	VFM	HFM
shape	cylindrical	cylindrical
radius of curvature/km	2.57	2.57
grazing angle/mrad	3	3
substrate	silicon	silicon
coating	Rh	Rh
acceptance angle/ μrad	122	117
size $L \times W \times H$	320 mm×40 mm×40 mm	320 mm×40 mm×40 mm
clear aperture $L \times W$	300 mm×10 mm	300 mm×10 mm
roughness RMS/nm	<0.2	<0.2
slope error RMS/ μrad	<0.3	<0.3
distance to source/m	7.36	7.72
distance to image/m	8.08	7.72
magnification	1.1	1
heat load	hitting 1.083 W@absorbed 0.832 W	hitting 0.251 W@absorbed 0.058 W

两面 KB 镜均为 Thales SESO 加工, 基底材料为 Si, 表面镀铑厚度 50 nm, 曲率半径为 2.57 km。两镜的子午方向面型误差要求优于 $0.3 \mu\text{rad}$, 弧矢方向面型误差优于 $5 \mu\text{rad}$ 。两镜的掠入射角度均为 3 mrad, 因此高能硬 X 射线会被第一面反射镜所吸收。考虑到铝窗口及入射狭缝对 X 射线的吸收, 在 300 mA 束流流强下, 计算得到入射至第一面镜的热负载为 1.083 W。其中 0.832 W 会被吸收需要水冷带走, 0.251 W 被反射

至第二面反射镜。图 2 为经过系统的同步辐射光谱,包括被铝窗口及狭缝衰减后的光谱,范围为 12~60 keV,峰值处的光子能量约为 26 keV;经过 VFM 镜及 HFM 镜后,峰值处光子能量约为 20.5 keV。

1.3 图像采集系统

KB 镜系统的像斑被 X 射线相机采集,该相机距弯铁光源点 15.44 m,由 YAG:Ce(400 μm)闪烁体、微距镜头(Componon 2.8/50, Schneider-Kreuznach)及 CCD 相机(AVT Guppy F-080B,像素单元尺寸 4.65 μm)组成。闪烁体将 X 射线转换为峰值波长为 530 nm 的可见光,闪烁体上的光斑被微距镜头成像至 IEEE 1394 接口的 CCD 相机上。镜头的放大率为 2 倍,因此 X 射线相机的有效像素为 4.65 μm/2=2.325 μm。系统的数据采集处理软件在 Windows 平台上采用 LabVIEW 图形化编程语言进行开发,通过 Shared Memory IOC core 技术来实现 EPICS 的数据接口,完成 LabVIEW 应用程序和控制系统之间的数据交换。

2 像差及点扩散函数

2.1 像差

由于反射式聚焦结构的设计,使得 KB 镜系统无色差。根据 Jean Susini 的分析^[10],引起 KB 镜成像像斑尺寸变大的主要像差为三阶球差、一阶慧差及三阶慧差。仅从几何学上来考虑,像斑尺寸可以表示为

$$F = \frac{3}{16}L^2 \frac{\theta}{p} \frac{1-M^2}{M} + SM + S(M+1) \frac{L}{4p} \quad (2)$$

式中: F 为像斑尺寸(FWHM); L 为光线照射在镜面上的长度; $M=q/p$ 为放大率; S 为光源点尺寸。公式右侧第一项为三阶球差;第二项为光源点尺寸经过放大后的像斑尺寸;第三项中包含一阶慧差及三阶慧差项。

当 $M \approx 1$,即物距与像距相等时,物点与像点处于罗兰圆上,第一项球差为零,成像系统无球差,此时慧差成为导致像斑展宽的主要像差。经过计算,慧差所引起的像斑展宽小于光源点尺寸(FWHM)的 2%,可以忽略。因此,下节中在计算系统点扩散函数所引起的像斑展宽时未将像差因素包含进去。

2.2 点扩散函数(PSF)

KB 镜成像质量的优劣主要取决于系统的点扩散函数(PSF)。X 射线相机所采集的图像为光源点横向截面与整个系统 PSF 的卷积,包括如下几项:KB 镜衍射的 PSF,X 射线相机的 PSF,KB 镜面型精度所引起的像展宽。我们无法直接测量系统的点扩散函数,因此我们假设光源及各项 PSF 均为高斯分布,通过计算各项的 RMS 值来评估系统的 PSF。CCD 采集到的像斑 RMS 值 Σ 可表示为

$$\Sigma^2 = (\sigma M)^2 + S_{\text{diff}}^2 + S_{\text{slope}}^2 + S_{\text{camera}}^2 = (\sigma M)^2 + S_{\text{sys}}^2 \quad (3)$$

式中: σ 是弯转磁铁光源点束流尺寸的 RMS 值; M 是 KB 镜的放大倍率; S_{diff} 是 KB 镜孔径引起的衍射; S_{slope} 是 KB 镜面型精度引起像展宽的 RMS 值; S_{camera} 是 X 射线相机 RMS 空间分辨率; S_{sys} 是整个系统的有效 RMS 点扩散函数。

由于 HFM 镜和 VFM 镜在放大倍率和入射孔径上有较小差别,在此我们仅讨论 VFM 镜,其目标测量尺寸 $S \approx 20 \mu\text{m}$,放大率 $M=1.1$ 。

衍射极限 S_{diff} 以 FWHM 表示的公式为

$$S_{\text{diff}}^{\text{FWHM}} = \frac{0.88\lambda}{2NA} \quad (4)$$

$$NA = \frac{OA}{2q} \quad (5)$$

$$OA = p\theta_{\perp} \quad (6)$$

$$\theta_{\perp} = \frac{E_0}{E} \left(\frac{\lambda}{3\lambda_c} \right)^{1/2} \quad (7)$$

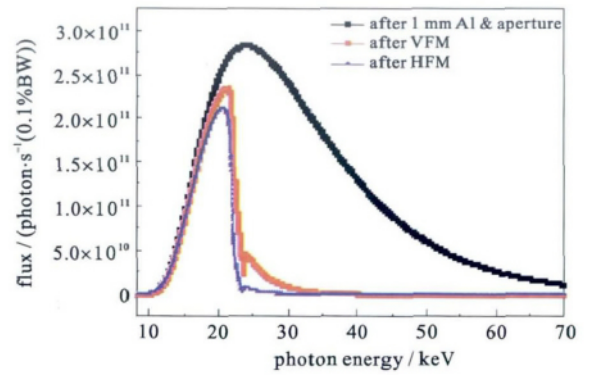


Fig. 2 Spectrum of the synchrotron radiation filtered by Al window, entrance slits, vertical focusing mirror (VFM) and horizontal focusing mirror (HFM)

图 2 经过 Al 窗口与入射狭缝、VFM 镜、HFM 镜后的同步辐射光谱

式中: NA 为数值孔径,表示成像系统收集光的能力; λ 为 X 射线的波长,取光谱峰值 20.5 keV,即 0.06 nm; $p = 7.36$ m,为物距; $q = 8.08$ m 为像距; OA 为 X 射线投射至 VFM 镜的光学孔径,由于我们的 VFM 镜尺寸足够大,20.5 keV 能量的 X 射线完全投射至 VFM 镜内,因此计算 OA 时可采用 X 射线的垂直张角 θ_{\perp} 乘以物距 p ; $E_0 = 0.51$ MeV,为电子的静止能量; $E = 3.5$ GeV,为 SSRF 储存环电子能量; $\lambda_c = 0.326$ nm,为 SSRF 弯铁光源的特征波长。计算得到以 FWHM 表示的衍射极限 $S_{diff}^{FWHM} = 1.6 \mu\text{m}$,以 RMS 表示的衍射极限为 $S_{diff}^{RMS} = S_{diff}^{FWHM}/2.35 = 0.68 \mu\text{m}$ 。

当 X 射线被 KB 镜表面反射至像面时,KB 镜的面型影响将被放大。我们用公式 $S_{slope} = 2\sigma_{slope}q$ 来计算 KB 镜面型误差引起像面展宽的 RMS 值,其中 $\sigma_{slope} = 0.3 \mu\text{rad}$, $q = 8.08$ m,可得 $S_{slope} = 4.8 \mu\text{m}$ 。

目前,KB 镜系统与 X-pinhole 系统共用一台 X 射线相机,根据之前的测量结果,其空间分辨率 $S_{camera} = 10 \mu\text{m}$ 。因此,计算得到系统的 RMS 点扩散函数 $S_{sys} = 11.1 \mu\text{m}$ 。当图像采集端获取到像斑截面时,经过高斯拟合,可得到 RMS 值 Σ ,再根据式(3)进行反卷积计算,可进一步将测量精度提高以逼近真实值 S 。可以看出,X 射线相机的空间分辨率在系统的 PSF 中占主导因素,我们下一步将对其进行升级更新,采用 20 倍的高倍物镜及像素单元尺寸更小的 CCD 相机,来获得空间分辨率约 $1.5 \mu\text{m}$ 的 X 射线相机。

3 实验结果

上海光源对用户供光时运行在恒流注入(Top-up)模式下,流强稳定在 260 mA。在恒流注入模式下,经过对 KB 镜姿态的反复调节优化,在 X 射线相机上采集到了成像光斑,如图 3 所示。经过高斯拟合,采集到的光斑水平及垂直尺寸(RMS)分别为 $76.7 \mu\text{m}$ 和 $24.8 \mu\text{m}$ 。图 4 为 KB 镜系统在线运行 1 h 的历史数据,水平尺寸及垂直尺寸的标准差分别为 $0.083 \mu\text{m}$ 和 $0.1 \mu\text{m}$,小于束流尺寸的 0.4%,可以看出工作在硬 X 射线波段的 KB 镜成像系统非常稳定。由式(3)计算真实尺寸为 $75.9 \mu\text{m}$ 和 $20.2 \mu\text{m}$ 。KB 镜光源点的 Twiss 参数理论值如表 2 所示。束流发射度 ϵ_i 将由计算得到的束流尺寸 σ_i ($i = x, y$ 分别对应束流截面水平、垂直尺寸)及相关的 Twiss 参数 β_i 、色散函数 η_i 、能散 σ_e 由以下公式获得

$$\sigma_i^2 = \beta_i \epsilon_i + (\eta_i \sigma_e)^2 \tag{8}$$

得到当前状态下束流的水平发射度为 $4.36 \text{ nm} \cdot \text{rad}$,垂直发射度为 $32.3 \text{ pm} \cdot \text{rad}$ 。

表 2 光源点理论参数

Table 2 Theoretical electron parameters of source point

β_x / m	β_y / m	η_x / m	η_y / m	σ_e
0.794 0	12.65	0.048 7	0	$0.985 3 \times 10^{-3}$

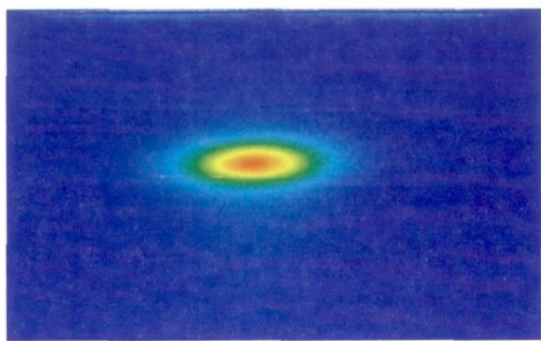


Fig. 3 Transverse beam profile captured by KB mirror system
图 3 KB 镜系统获取的储存环束流截面图像

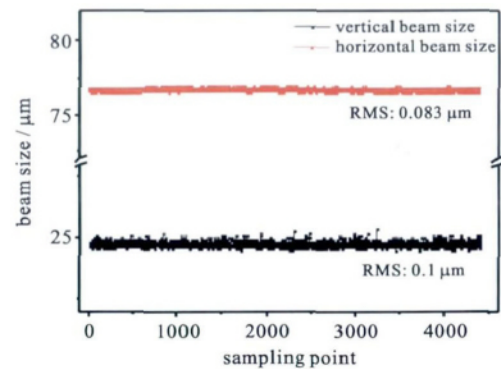


Fig. 4 1 h history data of horizontal and vertical beam size
图 4 束流水平及垂直尺寸的 1 h 历史数据

4 结 论

本文对上海光源 KB 镜束流截面成像系统的系统设计、像差及点扩散函数计算、在线调试结果等进行了详细介绍。目前,系统已经完成了调试,可以对束流截面进行实时成像,精确测量水平及垂直方向束斑尺寸,监测两个方向束斑尺寸的动态变化。在恒流注入模式下,得到水平及垂直尺寸分别为 $75.9 \mu\text{m}$ 和 $20.2 \mu\text{m}$,系统测量标准差小于束流尺寸的 0.4%。原 X 射线相机的分辨率较低,是当前影响系统空间分辨率的主导因素,更换高分辨率相机是系统进一步优化的方向。

致谢 感谢中国科学院上海应用物理研究所束测组、物理组、机械组、真空组、运行组的帮助。

参考文献:

- [1] Scheidt K. UV and visible light diagnostics for the ESRF storage ring[C]//Proc of European Particle Accelerator Conference. 1996;1621-1623.
- [2] Mitsuhashi T. Spatial coherency of the synchrotron radiation at the visible light region and its application for the electron beam profile measurement[C]//Proceedings of Particle Accelerator Conference. 1997;766-768.
- [3] Thomas C, Rehm G, Martin I, et al. X-ray pinhole camera resolution and emittance measurement[J]. Review of Modern Physics, 2010, 13:022805.
- [4] Sakai H, Fujisawa M, Iida K, et al. Improvement of Fresnel zone plate beam-profile monitor and application to ultralow emittance beam profile measurements[J]. Physical Review Special Topics—Accelerators and Beams, 2007, 10:042801.
- [5] Kube G, Gonschior J, Hahn U, et al. PETRA III diagnostics beamline for emittance measurements[C]//Proc of IPAC. 2010.
- [6] Huang Guoqing, Chen Jie, Chen Zhichu, et al. X-ray pinhole camera system design for SSRF storage ring[J]. Nuclear Techniques, 2010, 33(11):806-809.
- [7] 陈杰,叶恺容,冷用斌. 上海光源同步辐射空间干涉仪研制[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(1):179-184. (Chen Jie, Ye Kairong, Leng Yongbin. Development of Shanghai synchrotron radiation facility synchrotron radiation interferometer. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(1):179-184)
- [8] Leng Yongbin, Ye Kairong, Zhou Weimin, et al. SSRF beam diagnostics system commissioning[C]//Proc of Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerator Conference. 2009;24-26.
- [9] Kirkpatrick P, Baez A V. Formation of optical images by X-rays[J]. Journal of the Optical Society of America, 1948, 38(9):766.
- [10] Susini J. Design parameters for hard X-ray mirrors: the European Synchrotron Radiation Facility case[J]. Optical Engineering, 1995, 34(2):361-376.

Development of beam profile monitor using Kirkpatrick Baez mirrors

Zhu Dechong^{1,2}, Yue Junhui¹, Sui Yanfeng¹, Ji Daheng¹, Cao Jianshe¹,
Ye Kairong³, Chen Jie³, Tian Shunqiang³, Leng Yongbin³

(1. Key Laboratory of Particle Acceleration Physics and Technology, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: A Kirkpatrick Baez mirror imaging system has been designed and installed to measure the beam transverse profile and emittance of SSRF storage ring. The new system could be interchangeable with the original X-pinhole system. Two orthogonal cylindrical mirrors are used to image the dipole source point in the horizontal and vertical directions. Hard X-ray with peak energy of 20.5 keV will be focused at the X-ray scintillator camera. Aberration and point spread function which would cause image blur are evaluated. The system commissioning and optimization have been done. The electron transverse beam size has been measured precisely with horizontal 75.9 μm and vertical 20.2 μm . The system stability is less than 0.1 μm .

Key words: KB mirror; beam size measurement; beam diagnostic; emittance; synchrotron radiation

PACS: 29.20.db; 29.27.Fh