



·粒子束及加速器技术·

# 高能光源增强器束流横向尺寸测量系统设计\*

祝德充<sup>1</sup>, 随艳峰<sup>1,2</sup>, 岳军会<sup>1</sup>, 彭月梅<sup>1</sup>, 刘佳明<sup>1</sup>, 曹建社<sup>1,2</sup>

(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)

**摘 要:** 高能同步辐射光源的增强器将直线加速器注入的束流加速到储存环所需的能量, 为储存环提供高品质的电子束。为了对增强器的束流横向截面尺寸、发射度及能散进行测量, 设计了两条可见光-紫外波段的束测光束线。两条光束线分别选取无色散和色散较大的两处弯铁位置作为光源点, 使用两套同步光成像系统来监测光源点的束流截面尺寸, 并计算束流发射度及能散。介绍了同步光引出真空室及光学成像系统, 对影响成像质量的空间分辨率进行了分析, 并针对升能过程中不同能量下束流光斑变化的测量进行了设计。

**关键词:** 增强器; 束流尺寸测量; 束流诊断; 发射度; 能散; 同步辐射

中图分类号: TL594, TL506

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.200268

## Design of High Energy Photon Source Booster beam size monitor

Zhu Dechong<sup>1</sup>, Sui Yanfeng<sup>1,2</sup>, Yue Junhui<sup>1</sup>, Peng Yuemei<sup>1</sup>, Liu Jiaming<sup>1</sup>, Cao Jianshe<sup>1,2</sup>

(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)

**Abstract:** High Energy Photon Source (HEPS) Booster is designed to ramp up the energy of the beam from linac and inject high quality electron beam to the storage ring. To measure the transverse beam size, emittance and energy spread of HEPS Booster, we designed two beam diagnostic beamlines at visible-UV spectrum region. The source points are at two bending magnets with different chromatic dispersion, one has no dispersion while the other has large dispersion. By measuring the transverse beam sizes with synchrotron imaging system, beam emittance and energy spread can also be calculated. This paper introduces the extraction of visible-UV light, and the optical imaging system, the spatial resolution. It also introduces the design of beam spot changes measurement during beam ramping process.

**Key words:** HEPS Booster; beam size monitor; beam diagnostic; emittance; energy spread; synchrotron radiation

高能同步辐射光源(HEPS)是国家重大科技基础设施建设“十三五”规划确定建设的重大科技基础设施, 是我国第一台基于超低发射度储存环的第四代同步辐射光源<sup>[1-2]</sup>。它的电子能量为 6 GeV, 发射度为 34 pm·rad, 主要由加速器、光束线和实验站组成。HEPS 的加速器由一台 500 MeV 的直线加速器、一条连接直线加速器与增强器的低能输运线、一台能量 500 MeV~6 GeV 的增强器、两条连接增强器与储存环的高能输运线、一台 6 GeV 的超低发射度储存环组成。

增强器(Booster)的功能是把直线加速器注入的束流提升到储存环所需的能量, 为储存环提供高品质的电子束。HEPS 增强器<sup>[3-4]</sup>周长为 454.066 m, 采用 FODO 磁聚焦结构作为 Lattice 基本单元, 在 6 GeV 时的水平发射度为 16.3 nm·rad, 每个单束团电荷量不小于 5 nC, 重复频率为 1 Hz, 周期 1 s。直线加速器的 500 MeV 束流重复频率为 50 Hz, 在 200 ms 内将电子束注入至增强器; 增强器升能过程为 400 ms, 将电子束能量由 500 MeV 提高至 6 GeV; 随后的 200 ms 的能量平顶区进行增强器至储存环的注入或储存环至增强器的引出; 最后的降能过程为 200 ms, 整个循环周期结束。为了对增强器不同模式以及升能过程的束流状态进行观测, 本文介绍了从弯铁引出同步辐射光并

\* 收稿日期: 2020-12-16; 修订日期: 2021-02-28

作者简介: 祝德充(1987—), 男, 博士, 工程师, 从事加速器束流诊断技术研究; zhudc@ihep.ac.cn。

通信作者: 曹建社(1963—), 男, 研究员, 从事加速器束流诊断技术研究; caojs@ihep.ac.cn。

搭建同步光成像系统,对光源点进行成像,获取成像光斑,进而得到束流横向截面尺寸。通过对两处不同色散光源点的横向尺寸进行测量,可进一步计算束流发射度及能散。

## 1 光学系统设计

HEPS 增强器的束流水平尺寸为  $300\sim 500\ \mu\text{m}$ 。当垂直与水平发射度的耦合度为 10% 时,束流垂直尺寸约为  $170\ \mu\text{m}$ ,当耦合度达到 1% 时,束流垂直尺寸约为  $60\ \mu\text{m}$ 。基于同步辐射光的束流尺寸测量方法有很多种,包括同步光成像法<sup>[5-7]</sup>、空间干涉法<sup>[8]</sup>、X 射线小孔成像法<sup>[9]</sup>、KB 镜聚焦成像法<sup>[10]</sup>等。同步光成像法一般是指引出可见光至紫外波段的同步辐射光,搭建望远镜式光学成像系统,将光源点成像至探测器上进行采集;空间干涉法指在成像系统中加入双狭缝或双孔,在探测器上可采集到干涉图样,通过干涉图样的可见度反推光源点尺寸;X 射线小孔成像法与 KB 镜聚焦成像法等,均是在 X 射线波段的测量方法,同步光引出系统及成像元件相对复杂。考虑到对增强器的测量需尽可能简单,且能直接观测到束流光斑,我们计划采用同步光成像法,通过对束流光源点进行成像可直接观测束流状态,再对成像光斑进行高斯拟合可得到束流水平及垂直尺寸。

HEPS 增强器使用传统的 FODO 结构最为基本单元,整体为四重对称结构。两套成像系统分别以第一区的第一块二极磁铁(BS1B01)与第六块二极磁铁(BS1B06)两块弯铁引出的同步光作为光源,光源点中心均位于磁铁中心上游  $457.3\ \text{mm}$  处。由于两处光源点水平方向分别为无色散和色散较大,因此,对无色散点的束流水平尺寸测量,可直接计算束流发射度;对有色散点的水平尺寸测量,再结合无色散点所计算的发射度值,可计算出束流能散。两光源点的垂直方向均无色散,测量束流垂直尺寸后可直接计算发射度,并互相验证。

图 1 为同步光引出及光学成像系统设计图,图中标示了引光真空盒的设计图及同步光引出后的成像光路。在距光源点  $1.41\ \text{m}$  处,使用铜反射镜将同步光中的可见光-紫外波段反射并引出,铜镜水平引光张角为  $4\ \text{mrad}$ ,X 射线会沉积在铜镜内,当增强器流强为  $13\ \text{mA}$  时,铜镜受热功率为  $33.3\ \text{W}$ ,使用水冷带走铜镜热负载。同步光通过蓝宝石窗口后出射至真空外,电子束流不受影响继续向下游传输。

在引光真空盒外安装光学平台,台面尺寸为  $1600\ \text{mm}\times 600\ \text{mm}$ ,光学成像系统安装在光学平台上。成像系统包含透镜、光阑、反射镜、格兰-泰勒偏振棱镜、带通滤光片、中性密度滤光片和 CCD 相机,使用暗室对杂散光进行遮挡。其中,双胶合消像差透镜( $f=950\ \text{mm}$ )用于将光源点成像至 CCD 相机上,透镜距离光源点  $1900\ \text{mm}$ ,距离 CCD 相机  $1710\ \text{mm}$ ,成像系统放大率为 0.9 倍。孔径光阑用于限定入射光张角,提高系统空间分辨率,张角将被限定为水平  $2\ \text{mrad}$ ,垂直  $4\ \text{mrad}$ ;  $350\ \text{nm}$  的紫外带通滤光片,将安装在相机前端 C 接口上,其带宽为  $10\ \text{nm}$ ; 格兰-泰勒偏振棱镜使用高纯度方解石制成,能够提供消光比超过  $100\ 000:1$  的高纯度线偏光,我们使用该棱镜选取水平偏振光( $\sigma$ )用于成像。中性密度滤光片用于调节光强,成像像斑使用 CCD 相机采集。光学系统位于增强器隧道内,透镜与相机均使用电动平移台远程控制进行位置调节,相机为 GigE 千兆网相机,使用网线控制图像采集,并使用外触发模式与增强器注入信号  $1\ \text{Hz}$  同步。

HEPS 增强器弯铁的弯转半径为  $28.52\ \text{m}$ ,束流能量为  $6\ \text{GeV}$ ,流强  $13\ \text{mA}$ ,其垂直方向同步光光通量分布见图 2。该分布为波长  $350\ \text{nm}$  的分布曲线,长虚线为水平偏振  $\sigma$  模分布,短虚线为垂直偏振  $\pi$  模分布,实线为  $\sigma$  模与  $\pi$  模相加后的分布。成像系统将使用格兰-泰勒偏振棱镜消除垂直偏振光,而选取水平偏振光。由该曲线可知,  $350\ \text{nm}$  同步辐射在垂直方向上的有效张角约为  $4\ \text{mrad}$ ,大于  $4\ \text{mrad}$  的光强较弱,难以探测。而  $350\ \text{nm}$  属于紫外波段,需使用紫外波

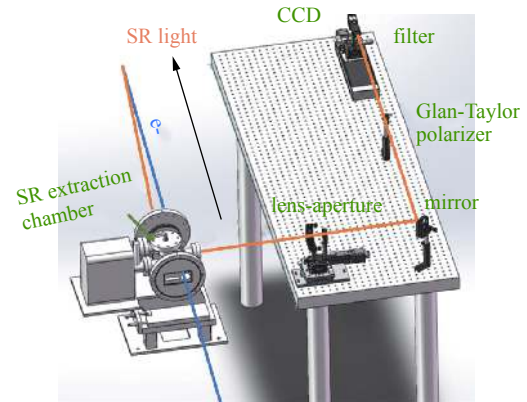


Fig. 1 Beam size monitor based on synchrotron light at HEPS Booster

图 1 增强器同步光束流尺寸测量系统

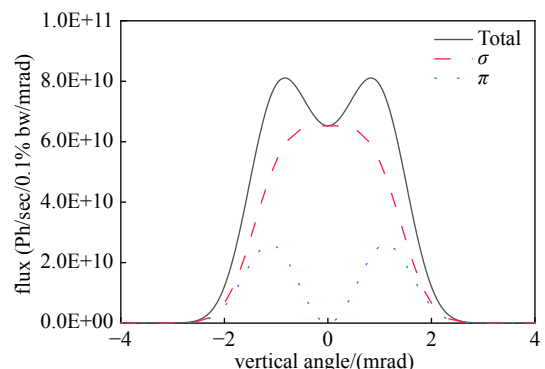


Fig. 2  $350\ \text{nm}$  flux distribution at vertical direction

图 2 垂直方向同步光光通量分布( $350\ \text{nm}$ , 水平偏振  $\sigma$ , 垂直偏振  $\pi$ )

段光学元件, CCD 相机需保证在该波段有足够的灵敏度。

## 2 空间分辨率

基于同步辐射的可见光成像法, 其空间分辨率的影响主要包括景深误差、曲率误差、衍射误差等, 水平方向和垂直方向的误差不同<sup>[7,11]</sup>。

### 2.1 景深误差 $\Delta_{\text{DOF\_rms}}$

由于作为发光点的电子束流有一定的长度, 这将造成景深误差, 存在于水平、垂直两方向。景深误差的最大值用  $\Delta_{\text{DOF\_max}}$  表示, 均方根值用  $\Delta_{\text{DOF\_rms}}$  表示, 可由如下公式计算得到

$$\Delta_{\text{DOF\_max}} \approx \rho \theta_{\text{H}} (\theta_{\text{SR}} + \theta_{\text{H}}) \quad (1)$$

$$\Delta_{\text{DOF\_rms}} = \frac{\Delta_{\text{DOF\_max}}}{2\sqrt{2Ln2}} \quad (2)$$

$$\theta_{\text{SR}} \approx 0.45(\lambda/\rho)^{1/3} \quad (3)$$

其中:  $\rho$  为弯转半径,  $\theta_{\text{H}}$  为成像系统水平方向接收同步光的半张角,  $\lambda$  为波长,  $\theta_{\text{SR}}$  为该波长的同步辐射自然半张角。由公式(1)可知, 水平张角是限制景深误差的主要因素, 张角越大, 景深误差越大。

### 2.2 曲率误差 $\Delta_{\text{Cur\_rms}}$

曲率误差是由电子水平方向的轨迹为一弧线造成的, 因此仅存在于水平方向, 曲率误差大小与水平张角的平方成正比。曲率误差最大值用  $\Delta_{\text{Cur\_max}}$  表示, 均方根值用  $\Delta_{\text{Cur\_rms}}$  表示, 即

$$\Delta_{\text{Cur\_max}} = \frac{\rho}{\cos\theta_{\text{H}}} - \rho \approx \frac{\rho\theta_{\text{H}}^2}{2} \quad (4)$$

$$\Delta_{\text{Cur\_rms}} = \sqrt{\frac{\theta_{\text{H}}}{2} \int_{-\theta_{\text{H}}}^{\theta_{\text{H}}} \left(\frac{\rho x^2}{2}\right)^2 dx} = \frac{\rho\theta_{\text{H}}^2}{2} \frac{1}{\sqrt{5}} = \frac{\Delta_{\text{Cur\_max}}}{\sqrt{5}} \quad (5)$$

### 2.3 衍射误差 $\Delta_{\text{diff}}$

由于光波通过光学系统中限制光束口径的孔径光阑发生衍射, 衍射光斑有一定的大小, 所以把两个衍射像间能分辨的最小间隔称为光学系统的衍射分辨率, 或衍射误差。衍射误差的计算可由瑞利判据得到,  $L$  为物点到入瞳孔径的距离,  $w$  为光学孔径的尺寸,  $\lambda$  为波长。则衍射误差  $\Delta_{\text{diff}}$  可表示为

$$\Delta_{\text{diff}} \approx 1.22 \frac{\lambda L}{w} \quad (6)$$

另外一种计算衍射误差的方法, 是计算光经过孔径后, 在像平面获得光学系统的夫琅禾费衍射图样, 得到光学系统点扩散函数, 然后对其进行高斯拟合, 得到空间分辨率, 矩形孔径与圆形孔径的计算略有不同, 综合考虑不同孔径形状计算结果, 衍射误差公式可表示为

$$\Delta_{\text{diff}} \approx 0.4 \frac{\lambda L}{w} \quad (7)$$

式(6)、式(7)均为常见的表达成像系统衍射误差的方式, 但对点扩散函数进行高斯拟合的方式较瑞利判据小约 1/3。

然而, 以上两种计算衍射误差的方法均考虑的是入射光均匀照射在入瞳孔径上的情况, 但同步辐射光的分布并非均匀分布。A. Hofmann 考虑了同步辐射分布, 并根据夫琅禾费衍射, 给出了同步辐射水平偏振光经过光学系统的衍射分辨率公式<sup>[11]</sup>

$$\Delta_{\text{diff}} \approx 0.21(\lambda^2 \rho)^{1/3} \quad (8)$$

该公式适用于光学系统接收的同步光半张角大于该波长同步辐射自然半张角的情况。HEPS 的增强器在能量 6 GeV 下, 束测线弯铁 350 nm 波长的自然半张角  $\theta_{\text{SR}} \approx 1$  mrad, 当光阑孔径半张角大于该角度时, 即可适用公式(8)。

### 2.4 成像系统空间分辨率

综上, 可得到成像系统的水平与垂直方向的空间分辨率。在水平方向上, 存在景深误差、曲率误差与衍射误

差;在垂直方向上,存在景深误差与衍射误差。计算公式如下

$$\text{水平: } \Delta_H = \sqrt{\Delta_{\text{DOF\_rms}}^2 + \Delta_{\text{Cur\_rms}}^2 + \Delta_{\text{diff}}^2}; \quad (9)$$

$$\text{垂直: } \Delta_V = \sqrt{\Delta_{\text{DOF\_rms}}^2 + \Delta_{\text{diff}}^2}; \quad (10)$$

HEPS的增强器束测线弯铁的曲率半径为28.52 m,能量为6 GeV时,自然半张角 $\theta_{\text{SR}} \approx 1$  mrad。在光阑尺寸选取中,在满足公式(8)的条件下,我们尽可能减小水平张角以降低景深误差与曲率误差。因此,我们选取光阑水平尺寸3.4 mm(2 mrad),垂直尺寸6.8 mm(4 mrad)。经过计算,水平与垂直方向空间分辨率分别为 $\Delta_H \approx 39.7$   $\mu\text{m}$ ,  $\Delta_V \approx 39.2$   $\mu\text{m}$ 。

### 3 升能过程测量

#### 3.1 发射度及能散

束流发射度 $\varepsilon_i$ 与能散 $\sigma_e$ ,将由成像系统测量得到的束流尺寸 $\sigma_i$ ( $i=x, y$ 分别对应束流截面水平、垂直尺寸)及相关的Twiss参数 $\beta_i$ 、色散函数 $\eta_i$ ,由公式(11)计算得到。两测量光源点分别为BS1B01\_SP与BS1B06\_SP, Twiss参数理论值如表1所示。在垂直方向上,由于两光源点均无色散,则有 $\sigma_{y1}^2 = \beta_{y1}\varepsilon_y$ 与 $\sigma_{y2}^2 = \beta_{y2}\varepsilon_y$ ,由两光源点所测得的垂直尺寸均可直接计算垂直发射度 $\varepsilon_y$ ,进行互相验证。在水平方向上,仅BS1B06\_SP有色散,有 $\sigma_{x1}^2 = \beta_{x1}\varepsilon_x$ 与 $\sigma_{x2}^2 = \beta_{x2}\varepsilon_x + (\eta_{x2}\sigma_e)^2$ ,由BS1B01\_SP所测量的 $\sigma_{x1}$ 可计算发射度 $\varepsilon_x$ ,再结合BS1B06\_SP所测量的 $\sigma_{x2}$ 可计算能散 $\sigma_e$ 。即

$$\sigma_i^2 = \beta_i\varepsilon_i + (\eta_i\sigma_e)^2 \quad (11)$$

表 1 BS1B01 与 BS1B06 光源点 Twiss 参数

Table 1 Twiss parameters of BS1B01 and BS1B06 source points

	$\beta_x(\text{m})$	$\beta_y(\text{m})$	$\eta_x(\text{m})$	$\eta_y(\text{m})$
BS1B01_SP	9.9488	5.8821	0.0012	0
BS1B06_SP	5.4159	5.5444	0.1973	0

#### 3.2 升能过程测量

在升能过程中,伴随着束流能量的变化,辐射阻尼效应与量子激发效应会随之变化,束流发射度与能散也会发生改变。在升能过程初期,随着辐射阻尼效应的增强,束流尺寸、发射度与能散等束流参数逐渐减小;当束流能量达到3 GeV时,这些参数达到最小值,此后量子激发效应逐渐变得显著;当达到注入能量6 GeV后,这些参数达到平衡值。

同步光测量系统需要能够监测升能过程中的各束流参数的变化。图3为HEPS增强器升能降能的周期过程及束流尺寸的测量时序。增强器的重复频率为1 Hz,由能量变化曲线可知,直线束流注入至增强器的过程为200 ms;升能过程为400 ms;此后到达能量平顶区,增强器至储存环注入在平顶区完成,此过程为200 ms;降能过程为200 ms。由尺寸变化曲线可知,由于发射度与能散随着能量提高而降低,水平与垂直尺寸也随之降低,能量到达3 GeV时,达到最小值,随后升高达到平衡。为了能够监测升能过程不同能量下的束流状态,CCD相机需使用外触发模式与增强器重复频率1 Hz同步,通过调节Trigger的延迟时间,捕捉不同能量下的束流截面图像。CCD获取的图像为曝光时间内的光斑图像,使用高斯拟合得到的束流尺寸为该段时间内的平均值。因此,若想获得尽可能接近某能量点下的光斑图像,需将曝光时间设置得尽可能短。一般来说,CCD曝光时间在50  $\mu\text{s}$ 至50 ms内可调节,需在保证有效感光的情况下降低曝光时间。

### 4 结 论

本文对HEPS增强器束流横向尺寸测量系统的设计进行了详细介绍。我们设计了两条可见光-紫外波段的束测光束线,均使用直接成像法获取束流光源点像斑,通过高斯拟合得到水平及垂直方向束流尺寸。由于两光源点分别有色散和无色散,这样不仅可计算束流发射度,还可得到能散。本文介绍了同步光引出真空室及光学成像系统,对影响成像质量的空间分辨率进行了计算,并针对升能过程中不同能量下束流光斑变化的测量进行了设计。HEPS作为正在建设的第四代同步辐射光源,其发射度优于34 pm·rad,为了保证储存环较高的注入效率,需要尽可



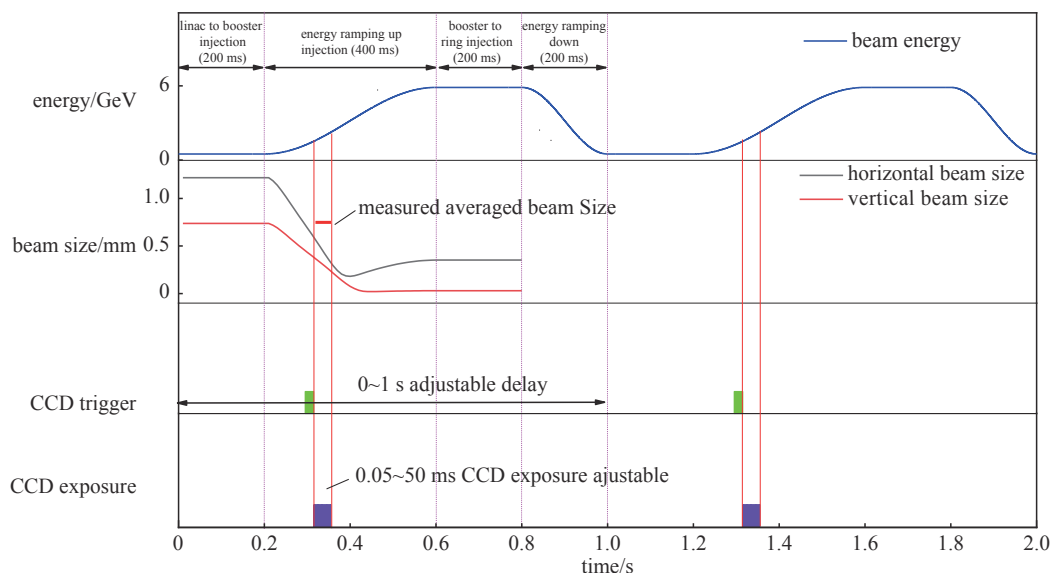


Fig. 3 HEPS Booster energy ramping process and beam size measurement sequence

图 3 HEPS 增强器升能降能周期过程及束流尺寸的测量时序

能减小增强器引出束流时的水平自然发射度。因此,对增强器束流截面的实时成像,对束流尺寸、发射度与能散的测量非常重要。

**致谢** 感谢中国科学院高能物理研究所 HEPS 设计团队及加速器中心束测组同事给予的指导和帮助。

#### 参考文献:

- [1] Jiao Yi, Cui Xiaohao, Duan Zhe, et al. Progress of lattice design and physics studies on the High Energy Photon Source[C]//9th Int Particle Accelerator Conference. 2018: 1510-1513.
- [2] Xu Gang, Jiao Yi, Peng Yuemei. ESRF-type lattice design and optimization for the High Energy Photon Source[J]. *Chinese Physics C*, 2016, 40: 027001.
- [3] Peng Yuemei, Li Jingyi, Meng Cai, et al. Study of the ramping process for HEPS booster[C]//10th Int Particle Accelerator Conference (IPAC'19). 2019: 1521-1523.
- [4] Duan Zhe, Chen Jinhui, Guo Yuanyuan, et al. The swap-out injection scheme for the high energy photon source[C]//9th Int Particle Accelerator Conf. 2018: 4178-4181.
- [5] Changhor Kuo, G H Luo, Jenny Chen, et al. Synchrotron radiation monitor in the booster of NSRRC[C]//Proceedings of APAC. 2004: 380-382.
- [6] Schiffer T, Hänisch P, Hillert W, et al. Set up of a synchrotron light monitor at the 2.5 GeV booster synchrotron at ELSA[C]//5th Int Particle Accelerator Conference. 2014: 3468-3470.
- [7] Cheng Weixing. Synchrotron light monitor system for NSLS-II[C]//Proceedings of BIW10. 2010.
- [8] 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.
- [9] Thomas C, Rehm G, Martin I, et al. X-ray pinhole camera resolution and emittance measurement[J]. *Review of Modern Physics*, 2010, 13: 022805.
- [10] 祝德充, 岳军会, 随艳峰, 等. KB镜束流截面测量系统研制[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 045102. (Zhu Dechong, Yue Junhui, Sui Yanfeng, et al. Development of beam profile monitor using Kirkpatrick Baez mirrors[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 045102)
- [11] Hofmann A H. Diagnostics with synchrotron radiation[R]. CERN CAS 98-04, 1998.