



·粒子束及加速器技术·

基于单个四条带 BPM 的非拦截式能散度测量方法

钟黎明, 涂修德, 陈曲珊, 付强, 胡言琦, 熊永前

(华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 能散度是反映束流品质的重要参数, 采用传统测量方法测量时打到靶上的束流不能得到利用, 测得的数据也是多个宏脉冲的平均值, 利用该方法的测量结果进行束流调节时, 要等待荧光靶从束流轨道中反复插入和提出, 调节时间很长。基于单个四条带束流位置检测器, 结合发射度测量的方法, 实现了非拦截式能散度测量方法。该方法能在不加入额外设备的情况下对每个束流宏脉冲的能散度进行测量, 测量结果与传统的拦截式测量方法结果相吻合。进行了误差分析, 指出为了减小测量系统误差, 需要尽可能使束流通过束流位置检测器中心。

关键词: 束流测量; 束流位置检测器; 四极分量; 能散度测量; 误差分析

中图分类号: TL53

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210537

Non-interceptive beam energy spread measurement with a 4-stripline BPM

Zhong Liming, Tu Xiude, Chen Qushan, Fu Qiang, Hu Yanqi, Xiong Yongqian

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In linear accelerator free-electron laser facilities, energy spread is an important parameter reflecting the quality of the beam. The traditional measurement method, which uses a bending magnet, fluorescent screens and cameras, is an interceptive measurement method. The beam hitting the screen cannot be utilized during the measurement, and the measured data is the average of multiple macro pulses. Moreover, when using the measurement results of this method for beam tuning, the commissioning may take a long time since the fluorescent screens need to be repeatedly inserted and raised from the beam trajectory, thus new non-interceptive measurement methods need to be developed. This paper implements such a method using a single 4-stripline beam position monitor in conjunction with the emittance measurement method. This method is able to measure the energy spread of each macro beam pulse without inserting extra equipment. The measurement results are in agreement with those of the conventional interceptive measurement method. It is indicated by the error analysis that in order to reduce the measurement systematic error, it is necessary to make the beam pass through the center of the beam position monitor.

Key words: beam measurement, beam position monitor, quadrupole component, energy spread measurement, error analysis

束流位置检测器(BPM)是一种在加速器装置中广泛应用的设备, 常用于测量束流位置, 从结构上可分为钮扣电极型、条带电极型和腔型。华中科技大学自由电子激光装置(HUSTFEL)中使用的是四电极条带型, 其位置测量的基本原理是: 束流通过 BPM 时在条带电极上感应出正比于束流流强的信号, 外部电路对此信号处理后得到束流的位置信息。

位置信息是束流横向分布的一阶矩, 束流尺寸和发射度则对应于其横向分布的二阶矩。Miller 等^[1]假定束流在横向上服从高斯分布, 并推导了从 BPM 信号中计算二阶矩的方法, Russell 和 Carlsten^[2]进一步指出高斯分布的假定不是必要的, 即任意横向分布的束流均能得到计算其二阶矩。起初, Miller 的方法被用于在直线段上测量束流发射度^[1-2]以及束流尺寸^[3], 而当束流经过二极铁时, 算式中引入了额外的色散和能散度的乘积项, 因此发射度和色散函数已知时可以用来测量束流能散度^[4]。

* 收稿日期: 2021-12-01; 修订日期: 2022-02-20
基金项目: 国家自然科学基金项目 (NSFC12175077)
联系方式: 钟黎明, zlim@hust.edu.cn。
通信作者: 熊永前, yqxiong@hust.edu.cn;
陈曲珊, chenqushan@hust.edu.cn。

BPM 对束流进行测量时不会阻挡束流, 是一种非拦截式测量设备, 因此在测量能散度的基础上, 又可进一步将测量结果作为反馈信息, 实现闭环能量反馈^[5-7], 使束流能散的稳定程度大大提高。荆晓兵等^[6]使用两个 BPM, 在弯转段上实现了束流能量和能散测量, 测量不确定度好于 0.39%。本文只使用一个 BPM, 进行能散度的测量方法研究, 并对测量误差进行了分析, 说明了四极分量测量误差对能散测量准确性的影响。由于这一方法能够对每个宏脉冲测量, 可以将测量结果用作反馈信息进行在线束流品质的优化。

1 BPM 能散度测量原理

本文设计的 BPM 能散度测量方案分为两个部分, 一是从 BPM 电极信号中提取出四极分量, 二是测量输运线入口处的束流横向相空间参数。

1.1 四极分量的提取

四极分量的提取起始于对电极感应信号的分析, 如图 1 所示, R 为 BPM 腔室半径, ϕ 为电极张角, $I(r, \theta)$ 为 (r, θ) 处的电流密度。假设束流流强为 I_b , 则 $\iint I(r, \theta) r dr d\theta = I_b$ 。线电流 $I(r, \theta)$ 在腔壁 (R, α) 处的感应线电流密度为^[1]

$$j(R, \alpha, r, \theta) = \frac{I(r, \theta)}{2\pi R} \frac{R^2 - r^2}{R^2 + r^2 - 2Rr \cos(\alpha - \theta)}$$

$$= \frac{I(r, \theta)}{2\pi R} \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{R} \right)^n \cos[n(\alpha - \theta)] \right\} \quad (1)$$

式(1)对 (r, θ) 在整个腔室内求积分, 便可求得整个束流在腔壁 (R, α) 处的感应电流

$$j(R, \alpha) = \frac{I_b}{2\pi R} \left[1 + 2 \left(\frac{\langle x \rangle}{R} \cos \alpha + \frac{\langle y \rangle}{R} \sin \alpha \right) + 2 \left(\frac{\langle x^2 \rangle - \langle y^2 \rangle}{R^2} \cos 2\alpha + 2 \frac{\langle xy \rangle}{R^2} \sin 2\alpha + \dots \right) \right] \quad (2)$$

式中: $\langle x \rangle$, $\langle y \rangle$ 是束流质心的位置; $\langle x^2 \rangle$, $\langle y^2 \rangle$ 是束流横向分布的二阶矩; $\langle xy \rangle$ 表示束流 x, y 方向参数的耦合度。第二项对应 $n=1$ 为束流横向分布的一阶矩, 第三项对应 $n=2$ 为二阶矩, 分别是电极信号的二极分量和四极分量, 且它们依次与 R^n 成反比, 因此 $n \geq 3$ 的项可予以忽略。由于电极对称性, 每个电极信号强度的各分量与 $\alpha_0 = 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$ 处的电流成正比, 将(2)式对 α 在区间 $\left[\alpha_0 - \frac{\phi}{2}, \alpha_0 + \frac{\phi}{2} \right]$ 内进行积分, 得到四个电极的信号强度如下

$$U_A = \frac{I_b \phi}{2\pi R} \left(1 + K_D \frac{\langle x \rangle}{R} + K_Q \frac{\langle x^2 \rangle - \langle y^2 \rangle}{R^2} + \dots \right)$$

$$U_B = \frac{I_b \phi}{2\pi R} \left(1 + K_D \frac{\langle y \rangle}{R} - K_Q \frac{\langle x^2 \rangle - \langle y^2 \rangle}{R^2} + \dots \right)$$

$$U_C = \frac{I_b \phi}{2\pi R} \left(1 - K_D \frac{\langle x \rangle}{R} + K_Q \frac{\langle x^2 \rangle - \langle y^2 \rangle}{R^2} + \dots \right)$$

$$U_D = \frac{I_b \phi}{2\pi R} \left(1 - K_D \frac{\langle y \rangle}{R} - K_Q \frac{\langle x^2 \rangle - \langle y^2 \rangle}{R^2} + \dots \right) \quad (3)$$

式中: K_D, K_Q 为常数, 与电极张角有关, $K_D = 2 \frac{\sin(\phi/2)}{\phi/2}$, $K_Q = 2 \frac{\sin \phi}{\phi}$ 。将电极信号分解为各分量后, 通常可使用差和比法计算出束流位置和四极分量。差和比法为大多数实验室所采用, 李鹏等提出另一种灵敏度和线性度更好的对数比法^[8], 其思想是利用函数 $\ln(1+x)$ 的泰勒级数展开并忽略高次项。将式(3)中各电极信号取对数, 级数展开并忽略 3 次及以上的项后可解出

$$\begin{cases} \langle x \rangle = \frac{R}{2K_D} \ln \frac{U_A}{U_B} \\ \langle y \rangle = \frac{R}{2K_D} \ln \frac{U_C}{U_D} \\ \langle x^2 \rangle - \langle y^2 \rangle = \frac{R^2}{4K_Q} \left\{ \frac{1}{4} \left[\left(\ln \frac{U_A}{U_C} \right)^2 - \left(\ln \frac{U_B}{U_D} \right)^2 \right] + \ln \frac{U_A U_C}{U_B U_D} \right\} \end{cases} \quad (4)$$

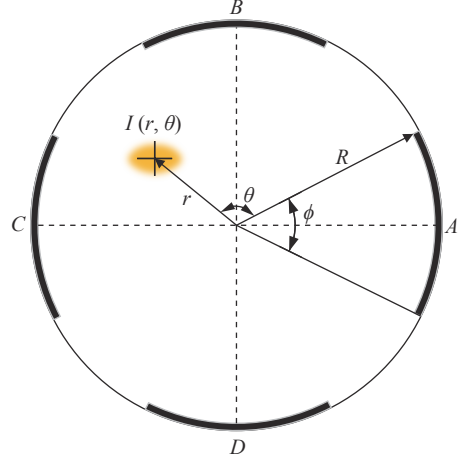


Fig. 1 Schematic of 4-stripline BPM

图 1 四电极条带 BPM 原理示意图

需注意的是式(3)得到的信号强度需要假设每个电极对束流的响应一致,实际上由于加工误差、信号传输通道不一致等因素,这一假设不能成立,需在采集到的信号前乘以一个系数,即电极增益系数,四个电极的增益系数不相等,则需要对增益系数进行标定^[9-10]。从式(4)可以看出,当电极增益系数不同时,取对数后相当于增加了一个偏移量。

1.2 测量系统的实现方法

HUSTFEL 中进行能散度测量的输运线如图 2 所示, B1 和 B2 是二极铁, Q1-Q3 是四极铁, Q2 在 y 方向聚焦, Q1, Q3 在 x 方向聚焦, F1-F3 是荧光靶。F3 用于发射度测量, F1、F2 和二极铁 B2 共同构成拦截式能散度测量系统。由束流线性传输理论

$$\sigma_x^2 - \sigma_y^2 = \beta_x \epsilon_x - \beta_y \epsilon_y + R_{16}^2 \delta^2 \quad (5)$$

式中: R_{16} 是传输矩阵元, 与色散有关, δ 是要求算的能散度。

等式的左边通过 BPM 用上一节所述的对数比法求得, 等式右边 ϵ_x , ϵ_y 和 β 函数均可通过发射度测量模块事先计算得到, 于是可以求得式中唯一的未知量 δ , 由此得到单个 BPM 的能散度计算公式为

$$\delta = \frac{\sqrt{Q_\sigma - Q_r}}{R_{16}} \quad (6)$$

其中

$$Q_\sigma = \sigma_x^2 - \sigma_y^2 = \langle x^2 \rangle - \langle y^2 \rangle - (\langle x \rangle^2 - \langle y \rangle^2) \quad (7)$$

由(7)式计算得到为 x, y 方向束流尺寸的平方之差, 其中被减去的一阶矩平方称为寄生位置信号^[11]。而 $Q_r = \beta_x \epsilon_x - \beta_y \epsilon_y$ 是(5)式右边不含能散的项, 由发射度测量得到。

2 能散度测量结果

从上面的分析可以确定实验步骤, 调节束流稳定后测量能量, 再分别使用 F1 和 F2 测量能量分析系统上游和下游的束斑尺寸, 并使用下式计算能散

$$\delta = \frac{\sqrt{\sigma_{\text{out}}^2 - R_{11}^2 \sigma_{\text{in}}^2}}{R_{16}} \quad (8)$$

其中: R_{11} 和 R_{16} 是 F1 经过 B2 到 F2 的传输矩阵元; σ_{in} 是束流进入能量分析铁 B2 之前, 在 F1 上的束斑半径, 而 σ_{out} 是在 F2 上的束斑半径, 均使用 RMS 统计方式, 并将连续 10 次尺寸测量的平均值作为一个有效数据代入式中计算。实验中交替测量 σ_{in} 和 σ_{out} 进行多次计算, 以此作为多次拦截式测量的结果。

然后要进行发射度测量, 分别使用 Q2 和 Q3 测量 y 方向和 x 方向的横向参数, 并计算式(6)中的 Q_r 。每次改变上游的移相器、衰减器和加速管聚焦线圈的设定后, 束流横向和纵向参数发生改变, 因此需重新测量。求出 Q_r 后当作常数送入计算程序, 将束流轨道调到 BPM 处便能够实时计算每个宏脉冲的能散度。

发射度测量使用四极铁扫描法, 并对四极铁扫描法的数据进行二次曲线拟合。分别在不同束流能量下进行实验, 对第一次实验数据, 其拟合结果如图 3 所示, 第二次实验的数据与之类似。两次测量结果见表 1。

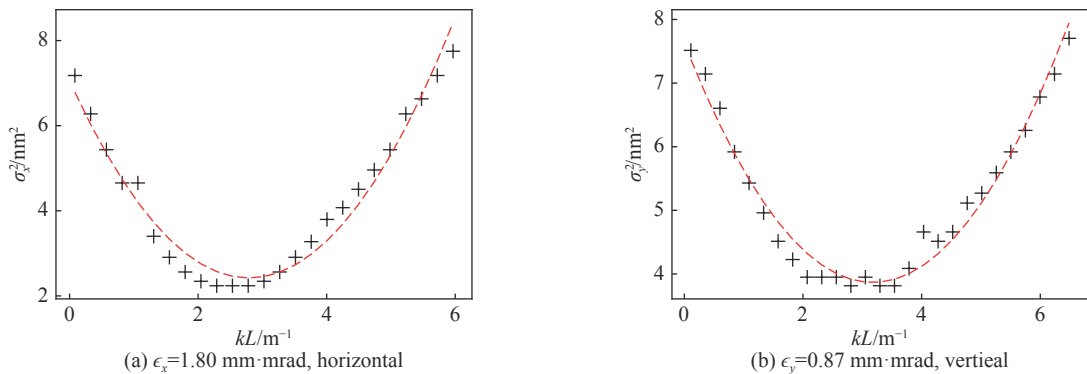


Fig. 3 Emittance measurement with quadrupole variation in horizontal and vertical direction

图 3 x 方向(左)和 y 方向(右)使用四极铁扫描法发射度测量的结果

表 1 不同束流参数的发射度测量结果
Table 1 Results of emittance measurements

No.	beam energy/MeV	$\beta_x/(mm \cdot mrad^{-1})$	$\beta_y/(mm \cdot mrad^{-1})$	$\epsilon_x/(mm \cdot mrad)$	$\epsilon_y/(mm \cdot mrad)$
1	9.9	2.95	0.05	1.80	0.87
2	10.1	2.50	0.04	1.67	1.10

图 4 为分别在不同束流参数下使用 BPM 连续测量的结果, 图中 μ, σ 分别是连续测量的均值和标准差。图 4(a) 为束流动能 $E_k=9.9$ MeV, 连续测量 10 min 的能散度变化曲线和直方图, 拦截式测量所得能散度为 0.49%。从图中可以观察到周期大约 200 s 的能散度剧烈变化, 这与实验时观察到的束流不稳定一致, 对此现象暂未有较好的归因。

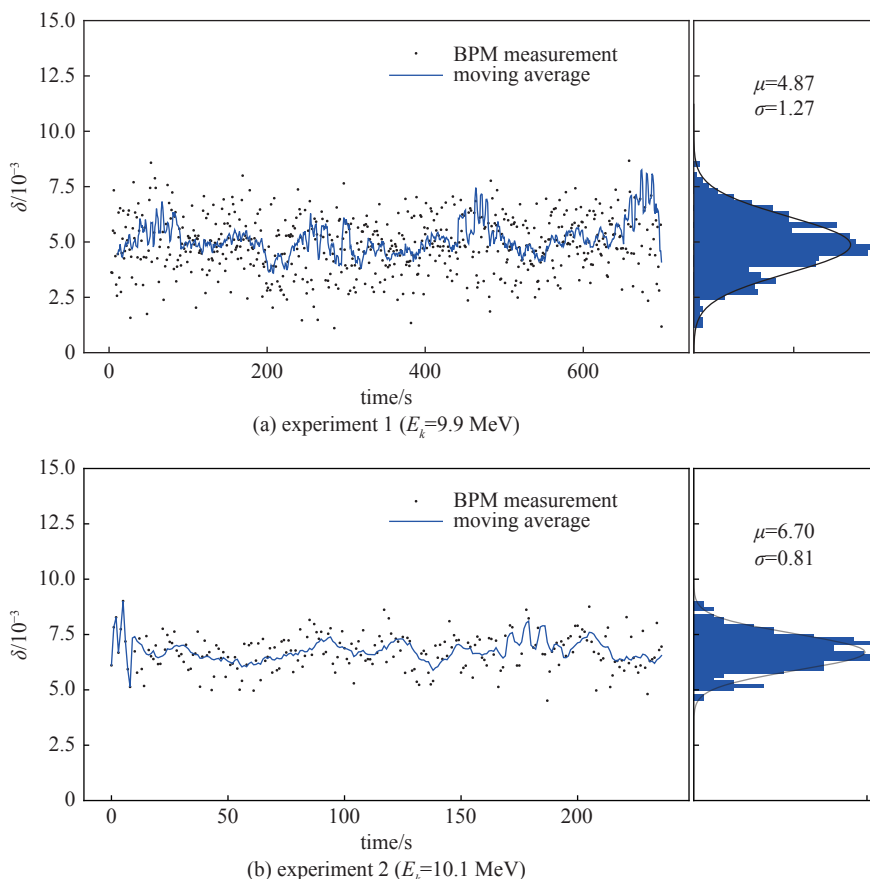


Fig. 4 Continuous energy spread measurement with BPM

图 4 BPM 连续能散度测量

图 4(b) 为束流动能 $E_k=10.1$ MeV, 连续 4 min 的能散度测量结果, 曲线是取 10 次滑动平均后的值, 去除 3 倍标准差之外的异常数据后的测量结果为 0.67%, 此次实验使用拦截式测量的结果为 0.66%。BPM 测量均值与拦截式测量均值相对差距小于 2%, 可认为两种测量方法测得的均值结果一致。两次能散测量的结果汇总如表 2 所示。

表 2 不同束流参数下的能散测量结果

Table 2 Results of energy spread measurements with different beam parameters

No.	beam energy/MeV	Q_r/mm^2	interceptive measurement $\delta/10^{-3}$	BPM measurement $\delta/10^{-3}$
1	9.9	5.27	4.85 ± 0.20	4.87 ± 1.27
2	10.1	4.09	6.61 ± 0.25	6.70 ± 0.81

3 测量误差分析

由于非拦截式测量的目的之一是要将测量结果用于在线束流优化, 对 BPM 非拦截式测量方法的单次测量误差进行评估也是重要的。测量误差来源于两部分: 一是束流宏脉冲之间的参数分散性, 二是测量系统的误差。前

者需要从微波功率系统角度进行分析,这里分析后者。

对式(6)应用误差传播公式,可得

$$\Delta f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2} \quad (9)$$

并进行适当代换后可以得到能散测量的相对误差

$$\frac{\Delta \delta}{\delta} = \frac{\Delta Q_\sigma}{2R_{16}^2 \delta^2} \quad (10)$$

从式(10)可以知道当能散越小时,单次测量的相对误差越大,这一点从第一次实验的 BPM 测量的能散更小而标准差更大也可以得到验证。将 $R_{16}=294.5 \text{ mm}$ 代入式(10)中,可以求出不同能散、不同 ΔQ_σ 情况下的测量相对误差,如图 5(a)所示,在能散越小时,满足同样的相对测量误差所要求的四极分量测量误差 ΔQ_σ 就越小。

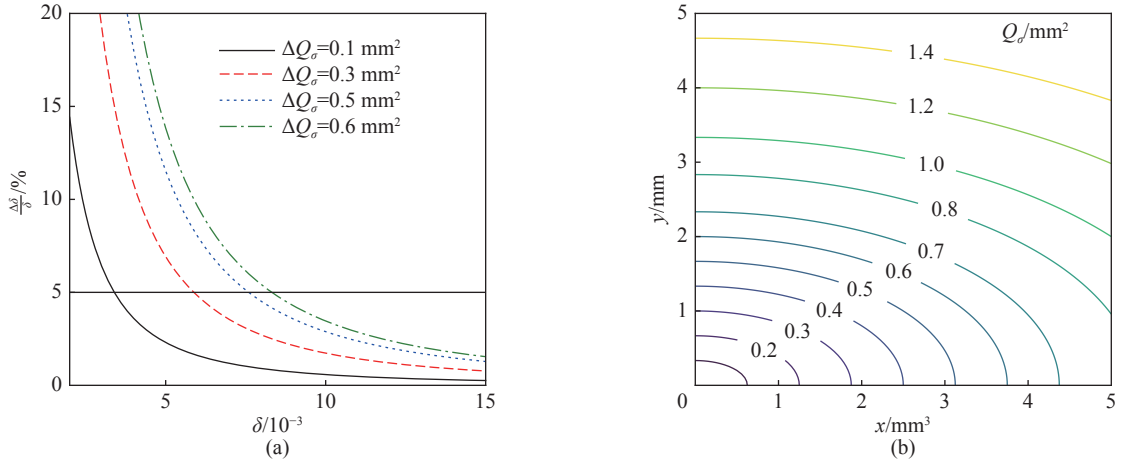


Fig. 5 Error analysis of energy spread measurement with BPM

图 5 BPM 能散测量的误差分析

Q_σ 的测量误差与 x 和 y 方向的测量误差有关,同样应用式(9)分析 x 和 y 方向位置测量误差对四极分量测量误差的影响,有

$$\Delta Q_\sigma^2 = (2x\Delta x)^2 + (2y\Delta y)^2 \quad (11)$$

从式(11)可以看到其等误差线是一系列椭圆,且与束流横向位置有关,横向偏离中心越大,误差也越大。离线标定的最坏结果为 $\Delta x=0.08 \text{ mm}$, $\Delta y=0.15 \text{ mm}$ ^[12],代入式中可作等误差线如图 5(b)所示。对于上述两次实验测量的情况,取连续测量的均值 $\langle x \rangle = -0.95 \text{ mm}$, $\langle y \rangle = 0.58 \text{ mm}$ 和 $\langle x \rangle = -0.77 \text{ mm}$, $\langle y \rangle = 1.84 \text{ mm}$ 代入,那么两次实验的相对测量误差 $\Delta \delta / \delta$ 分别为 5.6% 和 7.3%,相应的 $\Delta \delta$ 分别是 0.27×10^{-3} 和 0.49×10^{-3} ,结合实验数据的能散标准差,可反推束流本身的不稳定导致的标准差为 1.24×10^{-3} 和 0.64×10^{-3} ,可见测量误差的主要来源是束流宏脉冲与宏脉冲之间的参数分散性。

4 结 论

本文从 BPM 电极信号分析出发,结合束流发射度测量方法,使用单个四条带 BPM,实现了非拦截式能散度测量。实验结果表明,非拦截式能散度测量结果与传统拦截式测量结果吻合,两种方法测量的均值相对差距小于 2%。实验中的测量系统误差与束流中心位置偏移有关, x 方向 -0.77 mm 与 y 方向 1.84 mm 的位置偏移会导致 7.3% 的相对误差,为了尽可能减小系统误差,应使束流通过 BPM 中心。除了系统误差外,束流宏脉冲之间的参数分散性也会对测量误差有影响,因此需要提高微波系统的稳定性。这一非拦截式测量方法能够进一步用于在线束流品质优化,将 BPM 的测量数据实时送入控制系统束流优化模块,结合优化算法,调节移相器、衰减器等可调参数,使束流更加稳定。

参考文献:

- [1] Miller R H, Clendenin J E, James M B, et al. Nonintercepting emittance monitor[C]//Contributed to the 12th International Conference on High-Energy Accelerators. 1983.

- [2] Russell S J, Carlsten B E. Measuring emittance using beam position monitors[C]//Proceedings of International Conference on Particle Accelerators. 1993: 2537-2539.
- [3] Suwada T S T. Multipole analysis of electromagnetic field generated by single-bunch electron beams[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2001, 40(2R): 890-897.
- [4] Suwada T, Satoh M, Furukawa K. Nondestructive beam energy-spread monitor using multi-strip-line electrodes[J]. *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams*, 2003, 6: 032801.
- [5] Suwada T, Satoh M, Furukawa K. New energy-spread-feedback control system using nondestructive energy-spread monitors[J]. *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams*, 2005, 8: 112802.
- [6] 荆晓兵, 高峰, 戴曼, 等. 一种在线式电子束能量测量方法[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 055104. (Jing Xiaobing, Gao Feng, Dai Man, et al. An on-line electron beam energy measurement technique[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 055104)
- [7] 张俊强, 汪宝亮, 袁任贤, 等. 上海光源直线加速器的能量反馈控制[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 125105. (Zhang Junqiang, Wang Baoliang, Yuan Renxian, et al. Energy feedback control for linac of SSRF[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 125105)
- [8] Li P, Sun B G, Luo Q, et al. New methods of measuring emittance using beam position monitors[C]//Proceedings of 2007 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. 2007: 1675-1678.
- [9] 马天骥. HLS II 储存环束流位置测量系统的研制及相关研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013: 107-112. (Ma Tianji. Development and studies of storage ring beam position monitor system at HLS II[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013: 107-112)
- [10] 邹俊颖. HLS II 注入器束流位置测量系统的研制及应用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014: 21-27. (Zou Junying. Development and application of injector beam position monitor system at HLS II[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014: 21-27)
- [11] Sounas A, Gąsior M, Lefevre T, et al. Beam size measurements based on movable quadrupolar pick-ups[C]//Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference. Geneva, Switzerland: JACoW Publishing, 2018: 2028-2031.
- [12] 徐君. 紧凑型THz-FEL源直线加速器束流位置测量系统的研制[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015: 52-53. (Xu Jun. Development of beam position measure system for compacting THz-FEL source linear accelerator[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015: 52-53)