

# DEPU 对上海光源储存环的影响与补偿\*

张满洲, 王 坤, 张庆磊, 田顺强, 姜伯承

(中国科学院 上海应用物理研究所, 上海 201204)

摘 要: 上海光源储存环安装了一套由两台椭圆极化波荡器组成的插入件(DEPU),该插入件尤其是其中一台椭圆极化波荡器的积分场误差引起了闭轨畸变、工作点漂移、耦合度变化、动力学孔径减小等多种效应,这些效应对上海光源储存环的正常运行造成了极大影响。采用校正线圈前馈将最大闭轨畸变降低到  $10 \mu\text{m}$  的水平,采用四极铁强度前馈将工作点漂移控制在  $0.001$  左右,采用斜四极铁前馈将耦合度很好地控制在  $0.1\%$  左右。通过六极铁在线优化解决了动力学孔径退化的问题,将注入效率保持在  $80\%$  以上。在接近 4 年的运行中,补偿方案工作表现很好,轨道补偿的前馈还在不断地完善中。

关键词: 椭圆极化波荡器; 闭轨畸变; 工作点漂移; 耦合度; 动力学孔径

中图分类号: TL51 文献标志码: A doi:10.11884/HPLPB201729.170014

上海同步辐射光源(SSRF)<sup>[1]</sup>是我国第一台第三代中能同步辐射光源。2010 年开始上海光源设计安装了一台称为超高分辨宽能段光电子实验系统(简称“梦之线”)。通过两台不同能量范围的 APPLE-II 型椭圆极化波荡器提供从  $20 \text{ eV}$  到  $2000 \text{ eV}$  的不同极化状态和能量的光子<sup>[2]</sup>。提供  $20 \sim 200 \text{ eV}$  能量光子的椭圆极化波荡器被称为 EPU58,其周期长度为  $58 \text{ mm}$ ,最小的间隙为  $17 \text{ mm}$ ;提供  $200 \sim 2000 \text{ eV}$  能量光子的椭圆极化波荡器被称为 EPU148,其周期长度为  $148 \text{ mm}$ ,最小间隙为  $22 \text{ mm}$ 。

APPLE-II 型椭圆极化波荡器是一种广泛使用的辐射源,拥有四列可以移动的磁极,这些磁极的间隙(gap)和纵向位置(shift)可调节。间隙变化改变束流感受到的磁场强度,从而改变发射的光子能量。纵向位置变化改变磁场的周期排列,从而改变电子螺旋运动的轨迹,控制发射光子的极化度。复杂的场型和多变量使得 EPU 的积分场误差控制起来较有难度,这些场误差会引入诸如闭轨畸变(COD)、工作点漂移、动力学孔径退化、耦合度变化等多种效应,国际上多家实验室开展了 EPU 的影响和补偿的研究<sup>[3-6]</sup>。在设计和加工阶段,上海光源也对这些误差进行了分析和补偿<sup>[7-8]</sup>。本文将介绍 DEPU 安装在上海光源储存环后,利用束流对 DEPU 的影响和补偿开展的工作。

## 1 闭轨畸变

通常来讲,闭轨畸变来源于一阶积分场的误差引入的踢角

$$\theta = \frac{1}{B\rho} \int_0^L B_y(s) ds \quad (1)$$
$$x(s) = \frac{\sqrt{\beta_s}}{2\sin\pi\nu} \sqrt{\beta_{s0}} \theta \cos(\phi_s - \phi_{s0} + \pi\nu)$$

其中:  $\beta$ ,  $\phi$ ,  $\nu$  是 Twiss 参数;  $B\rho$  是磁刚度,  $B_y$  是沿束流方向的 EPU 磁场。EPU 由周期排列的偏转磁铁构成,理论上正负磁场抵消,实际上由于磁极本身的误差和安装误差,一阶积分场很难完全为零。EPU 的工作特性决定了其产生的积分场误差大小随着间隙和纵向位置而改变。由于两台 EPU 安装在同一个机架上,通过改变机架位置切换束流经过的插入件,在 EPU58 和 EPU148 切换的过程中,即使间隙为最大值,支撑 EPU 的机架带着磁极从束流上方经过直到远离的过程中也会引起积分场的变化,这都会造成闭轨畸变的变化。最小间隙下 EPU58 和 EPU148 的一阶积分场强度都在  $0.02 \text{ T} \cdot \text{cm}$  左右,其引入的闭轨畸变在水平和垂直方向的均方根值(RMS)分别是  $80 \mu\text{m}$  和  $150 \mu\text{m}$ 。如此大的闭轨畸变不仅影响“梦之线”本身的光子位置及其透过率,也会影响其他线站的运行。上海光源的轨道慢反馈系统工作在  $0.1 \text{ Hz}$ ,来不及处理 EPU 状态改变引入的闭轨畸变,而快反馈虽然能够处理接近  $\text{kHz}$  的轨道畸变,但是其校正能力较弱。因此,使用安装在 DEPU 两端

\* 收稿日期:2017-01-13; 修订日期:2017-03-17

基金项目:中国科学院青年创新促进会资助项目(2015210)

作者简介:张满洲(1981—),男,博士,主要从事光源增强器、储存环以及质子治癌加速器的物理工作; zhangmanzhou@sinap.ac.cn.

的水平垂直分别两个校正线圈进行前馈。图 1 给出了随着 U58 的间隙和机架移动过程中,未补偿和动态补偿后的闭轨畸变变化情况。控制系统检测到间隙或机架位置改变时从前馈表中读取相应的校正线圈强度数据,并设置到相应的电源中。未补偿时,闭轨畸变尤其是垂直方向的闭轨畸变随着间隙的变小急剧增大,符合误差与间隙的平方成反比的规律<sup>[5]</sup>。随着机架位置的移动闭轨畸变也在改变,在靠近 EPU148 时达到最大值,水平和垂直分别为 40 和 100  $\mu\text{m}$ 。

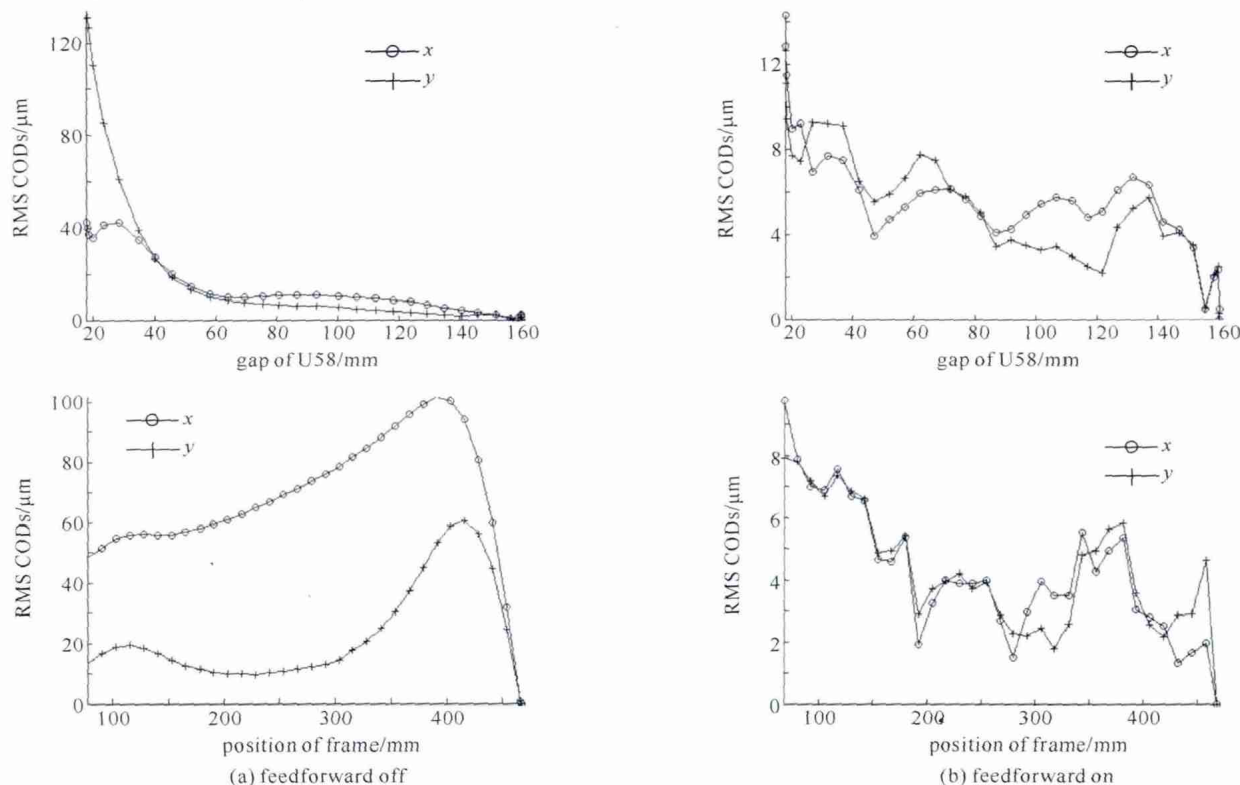


Fig. 1 Closed-orbit distortion(COD) changes with the gap of the undulator EPU58 and frame position

图 1 补偿前后闭轨畸变随 EPU58 间隙和机架位置的变化

在不同间隙下对校正线圈强度和残余闭轨畸变进行二维扫描就可以得到其电源设置,再线性插值得到较细的前馈表。控制器探测到间隙改变时就实时地改变校正线圈的强度。为了加快校正线圈的响应速度,其电源采用模拟电路,但是重复性稍差。在经过校正线圈前馈校正之后的闭轨误差在大间隙下保持得较好,但是小间隙下,增长到 10  $\mu\text{m}$  左右,校正效果不太理想。这是由于插入件很长,不仅一次积分磁场公差效应,其二次积分磁场公差效应也不能忽略。这些效应不仅导致了出射电子束的角度变化,还引起其位置发生变化,很难靠入口和出口两个校正线圈进行校正。前馈表的制作过程中尝试了许多方法来进一步减小残余闭轨畸变,如改变扫描步长和时间,或者改扫描为响应矩阵计算等,但是效果不大。所幸的是,慢反馈和快反馈的能力足以解决前馈之后的残余闭轨畸变量,实际运行时采用前馈和反馈同时运行的方式取得了比较好的结果。

DEPU 不仅需要改变间隙和在两个 EPU 间切换,每个 EPU 在不同间隙下的纵向位置也会改变,这就造成了每个前馈点是间隙和纵向位置二维决定的。而且纵向位置变化引起的闭轨畸变变化是周期性的,而不是如同间隙造成的单调变化的。那么纵向位置的前馈表必须足够细,这极大地增加了前馈表制作的工作量。经过 3 年左右的机器研究时间,才将图 2 中蓝色代表的点扫描完成。但是使用中发现,纵向位置改变时,残余闭轨畸变仍然较大,且中间存在突变,这就是前馈表仍然不够细、跨越了周期变化的峰值的原因。经过分析 EPU 所需要的工作模式,限定了 EPU 在运动过程中只经过如图 2 所示的青

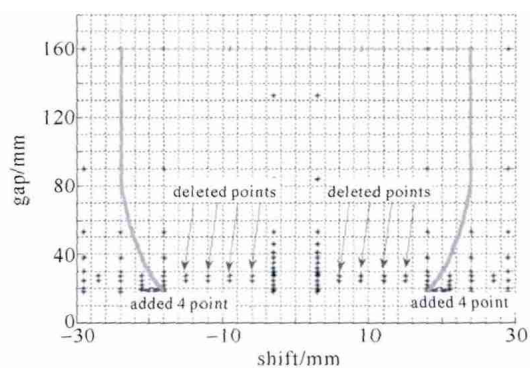


Fig. 2 Movement path of EPU58 and data point  
图 2 EPU58 的运动路径及扫描前馈表数据点

色线条代表的路径,那么前馈点只需要在路径经过的点进行加密,而不经过的点可以删除,这些工作还在进行中。

## 2 工作点漂移

EPU 还会引起全环  $T_{\text{twiss}}$  参数的变化,其直观反映就是工作点的漂移。如图 3 所示,在未校正前,其工作点的移动分别达到了 $-0.006$ 和 $0.012$ 的水平,并且同样与间隙的平方成反比。这将引起光源点束斑尺寸和光通量的变化,严重的还会导致横向反馈因为工作点移动到有效工作区之外而失效,无法抑制束流不稳定性,造成束斑尺寸的增长,甚至刮束。

与闭轨畸变不同,EPU 对  $T_{\text{twiss}}$  参数的影响来源比较复杂,主要是<sup>[1]</sup>:

1) 在插入件内的横向运动引起的聚焦效应。束流在插入件间隙中做类似于正弦运动,如同多个角度相反的弯转磁铁的聚焦作用,这和其他插入件是一样的。

2) 边缘磁场的下降(roll-off)<sup>[2]</sup>。插入件的磁极较小,只能保证中心场强,而无法做到较宽的好场区,边缘磁场就较小。APPLE-II 的 EPU 由于磁结构的原因,尤其是在垂直极化模式下,会产生固有的、较大的横向磁场不均匀性,对束流的非线性动力学造成极大影响,且不同间隙下的影响不同<sup>[6]</sup>。在设计和机械调试过程中,利用 Kick Map<sup>[4]</sup>研究了不同极化模式和间隙下非线性动力学引起的工作点变化,发现 EPU148 对工作点影响较大,并采用 L-shimming 对 EPU148 进行了补偿<sup>[7-8]</sup>。补偿后水平工作点变化从最大 $0.0394$ 下降到最大 $0.0084$ 。而 EPU58 对工作点的影响较小,最大值仅为 $0.003$ ,不需要对其进行垫补。在束流调试过程中,发现补偿后 EPU148 间隙和纵向位置引起的水平和垂直工作点变化都小于 $0.001$ ,显示了 L-shimming 良好的补偿效果。

3) 残余四极分量。在加工时的误差导致残余四极分量的引入。经过测量,EPU58 的残余二阶积分场强为 $0.99\text{ T}$ ,光这一点引入的工作点变化就有 $-0.0087$ 和 $0.015$ ,相比于理论计算由 roll-off 引起的 $0.003$ 而言,残余四极分量的影响几乎占了所有变化的全部。

幸运的是,这些影响因素都不随 EPU 纵向位置的变化而变化,仅需要处理 EPU58 的间隙造成的影响即可。众所周知的是,采用四极铁可以改变工作点和  $T_{\text{twiss}}$  参数。而上海光源储存环中有 200 块四极铁,那么可以选择不同的四极铁组合来同时修复工作点和  $T_{\text{twiss}}$  参数。利用 LOCO<sup>[9]</sup>通过分析某个 EPU58 间隙下的响应矩阵得到它对全环的  $T_{\text{twiss}}$  参数的影响,也可以模拟不同的四极铁组合来代替 EPU58 实现同样的  $T_{\text{twiss}}$  变化,这组四极铁组合值的变化就代表了补偿值的大小。分别测试了采用全环四极铁、EPU 前后各 1 块、2 块、3 块和 5 块四极铁的组合。在对比了不同补偿方法在最小间隙下的闭轨畸变、工作点、 $T_{\text{twiss}}$  参数和注入效率等变化情况后,发现采用全环四极铁的效果最好,前后各 5 块四极铁的效果次之,1 块、2 块和 3 块四极铁的方案只能将工作点较好地恢复,但是 Beta 函数恢复得不理想。由于全环其他 19 个直线节还有插入件需要安装,如果采用全环四极铁补偿的话,势必造成多个补偿互相冲突,控制也很复杂,最终采用了前后各 5 块四极铁补偿的方案。利用前馈表中设置四极铁的变化值和初始值,在间隙改变时,将初始值加上变化值设置到相应的电源中去。图 3 给出了补偿后的工作点变化情况,补偿后基本控制在 $0.001$ 以内。由于不同间隙下采用了两次机器研究时间来补偿,在补偿后的工作点中间有个小的突变,但是这个程度很小,不会对运行造成影响。在近 4 年的运行过程中,该前馈表格工作得很好,每次其他原因导致的模型校正只需要改变前馈表中标记的初始值即可。

## 3 动力学孔径和注入效率

Lattice 对称性的破坏,roll-off 引入的非线性动力学效应,多极场误差,不同入射点造成的聚焦效应的变化等都会引起动力学孔径的减小<sup>[10]</sup>。而动力学孔径的减小最直观反映就是注入效率的减小和束流寿命的降

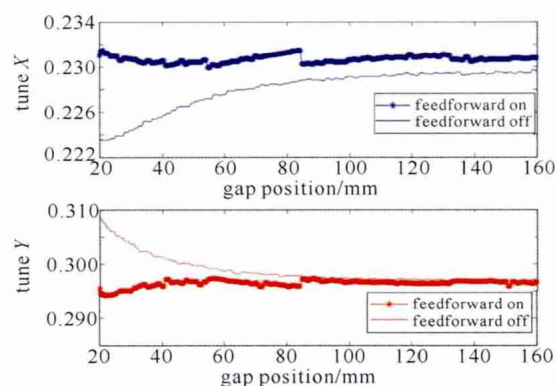


Fig. 3 Tune changes before and after correction

图 3 补偿前后工作点随间隙变化情况

低。从束流调试的结果来看,如图 4 所示,随着 EPU58 的间隙变小,注入效率急剧下降,但是束流寿命的降低并不多。这意味着水平动力学孔径随着 EPU58 的间隙减小很快,而垂直动力学孔径的变化并不大。EPU148 对动力学孔径的影响也较大,但是通过 L-shimming 的补偿后该影响几乎没有了。在运行过程中出现 L-shimming 的垫片脱落和移位时发现 EPU148 的间隙改变时注入效率变化也很大,垫片重新定位后恢复。它们的纵向位置变化对注入效率几乎没有影响。

在 EPU58 的间隙为 22 mm 时,注入效率甚至低于 20%,更小间隙下注入效率更低。在恒流注入的运行模式下,如此低的注入效率势必造成全环和注入区极大的束流损失,引起辐射剂量超标和热量的沉积。Twiss 参数的重建并没有使注入效率恢复多少,需要采用其他方法来进行动力学孔径的优化。

在光源储存环中,谐波六极铁一般用来优化动力学孔径。上海光源储存环中有 6 组谐波六极铁和 2 组色品六极铁。一种在上海光源储存环设计和非线性优化中使用过的多目标遗传算法(MOGA)<sup>[11]</sup>被用来寻找解。实际上,对动力学孔径优化来讲,是单目标的,唯一的目标就是注入效率。经过数代的优化,在 EPU58 间隙为 22 mm 时,注入效率恢复到 80%;而最小间隙 17 mm 下,我们始终无法将注入效率提高到 40% 以上,最终该 EPU 的最小工作间隙被限制到 22 mm。同样设置下,间隙升到 100 mm 以上时注入效率增加到 95% 以上。对六极铁而言,就不需要前馈了。但是六极铁设置仍然与加速器状态相关,在加速器开机或是一些变动时仍然需要对六极铁设置进行优化来同时兼顾 EPU58 小间隙和大间隙。

#### 4 耦合度

随着间隙或者纵向位置的变化,EPU 的斜四极磁场分量强度也会变化,EPU58 引入的最大斜四极场积分强度为 0.45 T。斜四极场强度的变化会导致耦合度的变化,从而引起全环垂直束斑尺寸的变化。耦合度的增加,垂直束斑尺寸的增加会造成光源亮度的下降,增加用户的数据采集时间。图 5 给出了未补偿前,耦合度随着 EPU58 的间隙变化情况。在间隙为 32 mm 左右时,耦合度达到最大值,为最大间隙时的近 6 倍,造成垂直束斑尺寸增加近 150%,亮度下降 60%。间隙再变小时耦合度也会变小。EPU58 的纵向位置变化、EPU148 的间隙和纵向位置变化对耦合度的影响较小,在 5% 量级,在运行中可以忽略。

响应矩阵分析方法仍然可以用于耦合度的测量和校正<sup>[12]</sup>。通过分析响应矩阵的耦合项,可以得到所需的斜四极铁强度校正量。与工作点前馈类似,DEPU 前后各 3 块斜四极铁参与了耦合前馈表的制作。在耦合度变化剧烈的 18~40 mm 阶段,采用了较细的前馈点。经过补偿后,耦合度保持在 0.1% 左右,Xray-pinhole 处的束斑尺寸基本保持不变。在接近 4 年的运行中,该前馈表工作得很好,其中只有因为 60~160 mm 处未进行插值而跳变较大,而后增加了插值点数得以解决。

#### 5 结 论

在束流调试中发现 DEPU,尤其是其中的 EPU58 对上海光源储存环的参数影响较大,包括闭轨畸变、工作点、动力学孔径和耦合度。利用 DEPU 前后校正线圈、四极铁和斜四极铁制作的前馈表对闭轨畸变、工作点和耦合度变化进行了补偿。4 年来这些前馈表工作得很好,校正线圈的前馈表还在不断的增加之中。六极铁优化被用于补偿动力学孔径的变化,需要不断地在机器状态改变时进行更新。这些手段让 DEPU 和全环都处于很好的工作状态。

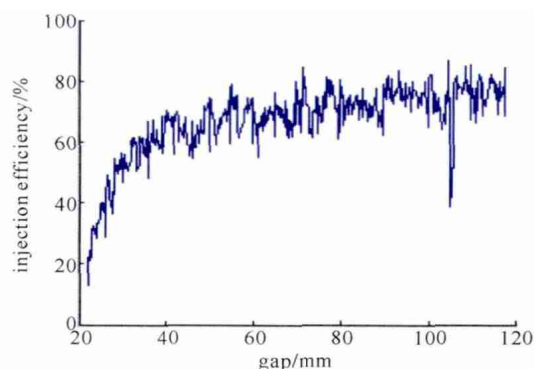


Fig. 4 Injection efficiency varies with gap of EPU58

图 4 注入效率随 EPU58 间隙变化情况

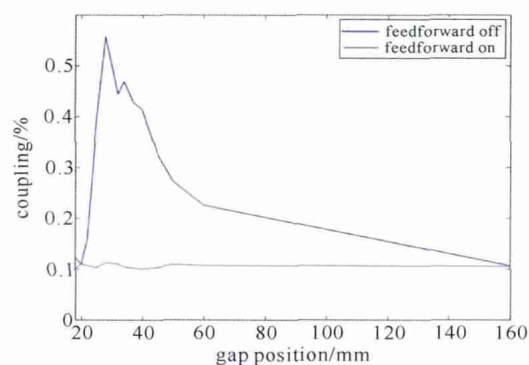


Fig. 5 Coupling varies with gap before and after correction

图 5 校正前后耦合度随 EPU58 间隙的变化

## 参考文献:

- [1] Xu Hongjie, Zhao Zhentang. Current status and progresses of SSRF project[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2008, **19**(1):1-6.
- [2] Zhou Qiaogen, Zhang Wei, Zhang Miao. The design of a pair of elliptically polarized undulators at SSRF[J]. *Transactions on Applied Superconductivity*, 2012, **22**(3): **4904604**.
- [3] Chavanne J, Elleaume P. Latest developments of insertion devices[C]//Proceedings of European Particle Accelerator Conference. 2006:969-973.
- [4] Elleaume P. A new approach to the electron beam dynamics in undulators and wigglers[C]//Proceedings of European Particle Accelerator Conference. 1992:661-663.
- [5] Elleaume P. Introduction to insertion devices[R]. CERN Accelerator School, Darmstadt, 2009.
- [6] Steier C, Marks S, Prestemon S, et al. Studies of the nonlinear dynamics effects of Apple-II type EPU at the ALS[C]//Proceedings of European Particle Accelerator Conference. 2006:2152-2154.
- [7] Zhang Miao, Zhou Qiaogen. Study of nonlinear beam dynamics effects for DEPU at SSRF[C]//Proceedings of International Particle Accelerator Conference. 2012:1347-1349.
- [8] Zhang Miao, Zhou Qiaogen. Study of the beam tune-shift effects for DEPU at SSRF[J]. *Transactions on Applied Superconductivity*, 2012, **22**:**4002203**.
- [9] Safranek J. Matlab-Based LOCO[C]//Proceedings of European Particle Accelerator Conference. 2002:742-745.
- [10] Chavanne J, Van Vaerenbergh P, Elleaume P, et al. Recent achievements and future prospect of ID activities at the ESRF[C]//Proceedings of European Particle Accelerator Conference. 2000: 2346-2348.
- [11] Tian Shunqiang. A design strategy of achievable linear optics for a complex storage ring lattice[J]. *Chinese Physics C*, 2010, **34**(7): 1009-1015.
- [12] Zhang Manzhou, Hou Jie, Li Haohu, et al. Coupling measurement and correction at the SSRF storage ring[J]. *Science China G*, 2011, **54**(s2):201-206.

## Compensations of double elliptical polarization undulator effects on the SSRF storage ring

Zhang Manzhou, Wang Kun, Zhang Qinglei, Tian Shunqiang, Jiang Bocheng

(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China)

**Abstract:** A pair of Apple-II type EPU (double elliptical polarization undulators, DEPU) was installed in the SSRF storage ring. The unwanted integral magnetic field errors induced by the devices lead to closed-orbit distortions (COD), tune shifts, coupling variation, reduction of the dynamic aperture and so on. These effects deteriorate the operation performance of the SSRF. Feedforward tables of corrector coils, quadrupoles and skew quadrupoles are used to correct the COD, tune shifts and coupling, respectively. The max COD keeps smaller than  $10\ \mu\text{m}$ , the tune shifts keep around 0.001 and the coupling keeps 0.1%. Sextupole strengths were optimized to restore the dynamic aperture, the injection efficiency resumes to more than 80%. In the nearly 4 years operation, the compensations have been working well, and there are still more and more supplements and revisions of the feedforward tables in development for the COD corrections.

**Key words:** elliptical polarization undulator; closed-orbit distortion; tune shift; coupling; dynamic aperture

**PACS:** 41.75.Ht; 41.85.Lc