

· 特邀综述 ·

上海软 X 射线自由电子激光装置的偏振控制

高张峰^{1,2}, 邓海啸^{1,3*}, 刘波^{1,3}, 王东^{1,3}

¹中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³中国科学院上海高等研究院, 上海 201210

摘要 上海软 X 射线自由电子激光装置(SXFEL)是中国第一台 X 射线相干光源,其辐射波长可覆盖水窗波段。为满足不同的用户需求,装置将加装椭圆极化波荡器,运行模式可在线偏振与圆偏振之间切换。基于 SXFEL 装置对偏振控制方案进行参数设计,评估了电子束抖动的影响,并在理论上分析了该方案的辐射稳定性。此外,还设计了一套圆偏振方向的快速切换结构,它可使 SXFEL 装置以 10 Hz 频率量级在不同的圆偏振方向之间切换。

关键词 激光光学; 自由电子激光; 椭圆极化波荡器; 辐射能量稳定性; 偏振切换

中图分类号 TN248

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0500015

Polarization Control of Shanghai Soft X-Ray Free-Electron Laser Facility

Gao Zhangfeng^{1,2}, Deng Haixiao^{1,3*}, Liu Bo^{1,3}, Wang Dong^{1,3}

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

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

³Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China

Abstract The Shanghai Soft X-ray Free-Electron Laser (SXFEL) Facility is the first coherent X-ray light source in China with a wavelength covering the water window. An elliptically polarized undulator (EPU) will be installed to meet the needs of different users, so that the output laser can be switched between linear polarization and circular polarization. This paper presents the polarization control design for the user facility, the evaluation of bunch energy jitter, and analysis of radiation power stability. Moreover, a switching structure of the circular polarization direction is also designed, so the polarization of the output laser can be switched between opposite directions on the base of permanent magnet oscillator at the rate of tens of Hz.

Key words laser optics; free-electron laser; elliptically polarized undulator; radiation power stability; polarization switch

OCIS codes 140.2600; 140.7240

1 引言

X 射线自由电子激光(FEL)是继同步辐射光源之后的新一代光源,其基本原理是相对论电子束经过波荡器的周期磁场时与电磁场相互作用,受激产生相干辐射,其亮度比同步辐射高 10 个量级。FEL 与第三代光源相比具有超高亮度、超短脉冲以及更优异的相干性等一系列优势^[1-4],是原子物理、飞秒化学等前沿领域的重要工具^[5-6]。近年来,FEL 物

理在超快、双色、大带宽等领域进展神速,具有更广阔的应用前景^[7-10],但它也存在一些问题,如:FEL 光源线站数量较少,对电子束品质要求较高,占地较大,等等。其中的线站数量问题随着高重复频率自由电子激光的问世得到了改善。在硬 X 射线波段,美国加州的直线加速器相干光源(LCLS)是全世界第一台硬 X 射线自由电子激光装置,于 2009 年饱和运行^[11];中国首个硬 X 射线自由电子激光装置(SHINE)于 2018 年 4 月投入建设^[12]。在软 X 射

收稿日期: 2019-09-16; 修回日期: 2019-10-24; 录用日期: 2019-10-30

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFE0103100,2016YFA0401900)、国家自然科学基金(11935020,11775293)

* E-mail: denghaixiao@zjlab.org.cn

线波段,德国的 FLASH 装置^[13]和意大利的 FERMI 装置^[14]均已投入运行;我国的软 X 射线自由电子激光装置则正在建设调试阶段^[15]。

最初 FEL 装置采用的波荡器均为平面波荡器,其优点是结构简单,运行稳定,价格也相对低廉。随着用户对圆偏光的需求日益增长,FEL 装置开始向偏振可控的方向发展。虽然在别的波段有用后续光学元件进行 FEL 偏振控制的研究报道,但软 X 射线在经过光学元件时能量损耗很大,不利于偏振控制,于是交叉平面波荡器(CPU)^[16]和椭圆极化波荡器(EPU)^[17]等方案被陆续提出。交叉平面波荡器方案采用一对相互垂直的平面波荡器产生强度相同、偏振夹角为 90°的两个线偏光脉冲,通过调节两组波荡器之间的移相器使它们的相位差稳定在 90°,从而叠加成圆偏光脉冲。椭圆极化波荡器方案则设计了一种具有特殊磁场分布的波荡器,使电子束在经过波荡器时同时在水平和垂直两个方向上发生振荡,受激辐射出圆偏光。最后,后者得益于更高的圆偏度和稳定性而在 FEL 的实际应用中胜出,其中 APPLE 型波荡器和 DELTA 型波荡器较为常见^[18-19]。

上海软 X 射线自由电子激光装置(SXFEL)是国内首个 X 波段自由电子激光装置,主要包括电子直线加速器、FEL 放大器(波荡器线)、光束线和实验站等部分。SXFEL 分两期建设,分别为试验装置(SXFEL-TF)和用户装置(SXFEL-UF)。本文基于 SXFEL-UF 的设计指标和运行参数,以 SASE 模式对其偏振控制方案进行参数设计。本文第二部分主

要介绍 SXFEL 用户装置;第三部分给出模拟结果,并分析其中电子束能量抖动对辐射脉冲能量的影响以及 reverse taper 对辐射能量抖动的抑制效果;第四部分基于现有的波荡器方案,设计了一套快校正铁结构,以达到输出 X 射线脉冲在相反圆偏振方向之间较快切换的效果。

2 SXFEL-UF 装置简介

SXFEL 装置的建筑总长为 532 m,由直线加速器隧道、束流分配厅、波荡器大厅、光束线和实验大厅组成。SXFEL 采用常温直线加速器产生高能量、低发射度、低能散的电子束团,束团进入下游波荡器段生成 FEL 辐射。运行模式包括自放大自发辐射(SASE)^[20]和外种子模式^[21-23],后者主要包括高增益高次谐波产生(HGHG)^[24]、回声型谐波产生(EEHG)^[25],以及 HGHG 与 EEHG 各种不同的级联组合。目前基于 SXFEL-TF 的束流调试研究已经基本完成,即将启动 SXFEL-UF 的安装工作。

如图 1 所示,SXFEL-UF 是一套基于 1.5 GeV C 波段高梯度电子直线加速器的装置,包括一条辐射波长为 2 nm 的真空波荡器线和一条辐射波长为 3 nm 的常规波荡器线,可以满足不同的用户和实验需求。其中:真空波荡器线由 10 节周期长度为 16 mm、单节长度为 4 m 的真空波荡器组成,负责输出 2 nm 波长的线偏振光;常规波荡器线在平面型主波荡器下游额外加装了 2 节 EPU 波荡器,以 afterburner 的形式提供圆偏振态的 3 nm 辐射光。

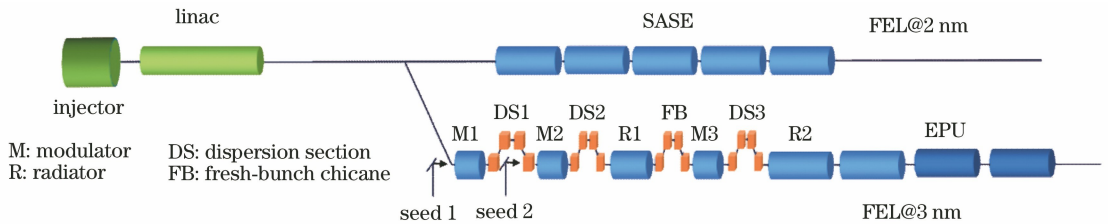


图 1 SXFEL-UF 布局示意图

Fig. 1 Schematic of SXFEL-UF layout

EPU 的制造费用和难度大于平面波荡器,afterburner 的优势在于可以大大缩短所需 EPU 段的长度,降低成本和风险。在常规波荡器线中,加速到 1.5 GeV 的电子束首先在较长的平面波荡器段进行预群聚,达到一定群聚(bunching)的电子束进入下游较短的 EPU 段完成圆偏光辐射。两种波荡器的单节长度均为 3 m,其中的平面波荡器段一共有 10 节,波荡器周期为 23.5 mm;EPU 段一共有 2 节,可以选择运行在相同或相反的偏振方向上,周期为

30.0 mm。波荡器段间长度约为 1 m。通过改变两种波荡器的运行状态,可以得到偏振度极高的圆偏光或线偏光,以及二者的组合。

常规波荡器线的基准工作模式是种子型级联方案,而在 SXFEL-TF 调试过程中,优化后的直线加速器电子束发射度和峰值流强均可优于最初的设计指标。计算结果表明,电子束通过 10 节平面波荡器后在 SASE 模式下亦能达到饱和。EPU 出口得到的是线偏光和圆偏光的叠加,为了获得较

高的圆偏度,需要分离或抑制上游平面波荡器产生的线偏光辐射。前者将 EPU 和平面波荡器的轴线错开一个夹角,通过在中间设置偏转磁铁来改变束流方向;后者针对平面波荡器采用 reverse taper 设计,该设计可随着束流能量的降低提高波荡器的磁场强度,在维持 bunching 的同时抑制线偏光辐射的功率,几乎没有额外增加成本,且对装置的改动很小,泛用性较强^[26]。本文将 SASE 运行模式和 reverse taper 相结合,对软 X 射线自由电子激光装置常规波荡器线的偏振控制效果进行模拟和分析。

3 SXFEL-UF 的偏振控制设计与模拟结果

对于 afterburner 型自由电子激光输出方案,基于 Stokes 参数,圆偏度的计算公式可表示为

$$D_{\text{cir}} = \frac{|S_3|}{S_0} = \frac{|2\langle E_x E_y \sin[\phi_x(t) - \phi_y(t)] \rangle|}{\langle E_x^2 \rangle + \langle E_y^2 \rangle}, \quad (1)$$

式中: $\langle \rangle$ 代表期望值; D_{cir} 为圆偏度; S_0 和 S_3 为 Stokes 参数; E_x 和 E_y 为电场强度在 x 和 y 方向上的幅值; t 为时域变量; $\phi_x(t)$ 和 $\phi_y(t)$ 为两个方向上的电场在时域 t 处的相位。其中, E_y 和 $\phi_y(t)$ 仅由圆偏光辐射的 y 向分量决定,而 E_x 和 $\phi_x(t)$ 由圆偏光辐射的 x 向分量和线偏光辐射共同决定。将二者的参数代入,则 E_x 和 ϕ_x 可表示为

$$\tan \phi_x = \frac{E_{\text{lin}} \sin \phi_{\text{lin}} + E_{\text{cir},x} \sin \phi_{\text{cir},x}}{E_{\text{lin}} \cos \phi_{\text{lin}} + E_{\text{cir},x} \cos \phi_{\text{cir},x}}, \quad (3)$$

式中: E_{lin} 和 $E_{\text{cir},x}$ 分别为线偏光辐射和圆偏光辐射在 x 方向上的电场强度幅值; ϕ_{lin} 和 $\phi_{\text{cir},x}$ 则是二者对应的相位。将(2)、(3)式代入(1)式后,公式较为复杂。在圆偏度较高的情况下,圆偏度的计算公式可近似简化为

$$D_{\text{cir}} \approx 1 - \frac{P_{\text{lin}}}{2P_{\text{cir}}}, \quad (4)$$

式中: P_{lin} 和 P_{cir} 分别为线偏光辐射功率和圆偏光辐射功率。平面波荡器采用 reverse taper 设计^[27],在抑制束团发光的同时可以提高 bunching,从而提高偏振度。设计 reverse taper 时需要确定两个参数:平面波荡器的段数和 reverse taper 强度。由 10 段平面波荡器 SASE 模拟结果的 bunching 变化趋势可知第 6 段波荡器出口的 bunching 强度已经足够大,所以选择第 6 段平面波荡器作为 bunching 段,而在辐射光较强的第 5 段和第 6 段,波荡器采用 reverse taper 设计。通过扫描确定线偏光抑制最佳的工作点,最后选择 taper 强度为 -0.8% 。EPU 则采用 taper 设计,以强化共振效果,提高圆偏光辐射能量。本文采用 3D 模拟软件 GENESIS 1.3 对波荡器的 FEL 辐射进行模拟^[28],模拟得到的辐射功率分布和光谱如图 2 所示:线偏光脉冲能量被控制在 $1.5 \mu\text{J}$,圆偏光脉冲能量为 $186.4 \mu\text{J}$,光谱全宽均约为 2.3 eV ,圆偏度高达 99.6% ,功率达到预期,圆偏性良好。

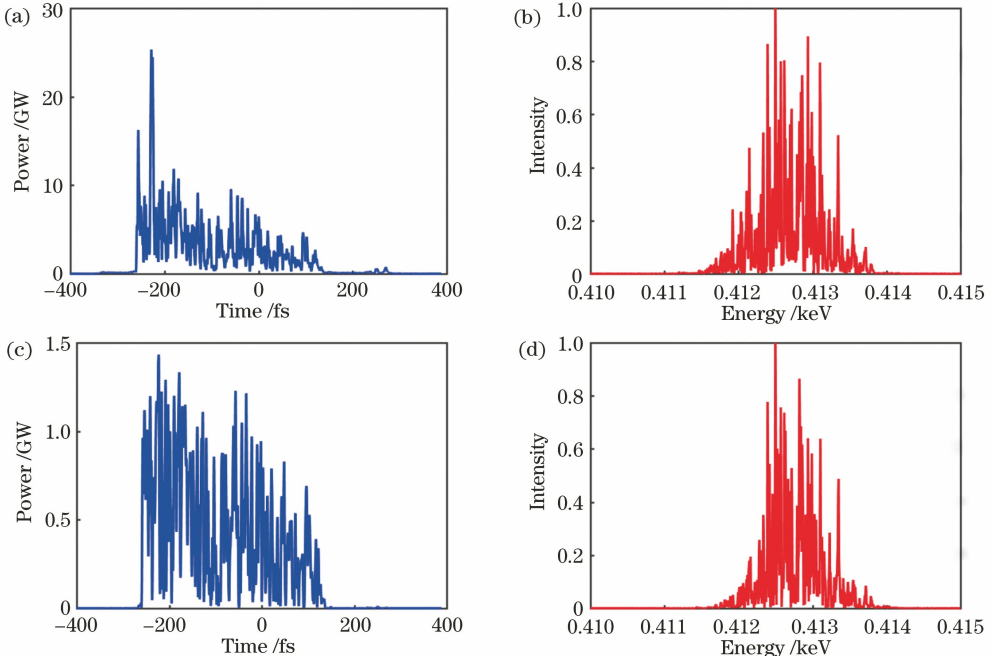


图 2 功率分布和光谱的模拟结果。(a)(b)线偏光;(c)(d)圆偏光

Fig. 2 Simulated power profiles and spectra. (a)(b) Linearly polarized beam; (c)(d) circularly polarized beam

进一步考虑电子束能量差异造成的影响。SXFEL-UF 束流的均方根能量抖动为 0.1%，选取束团能量±0.3%进行扫描，模拟得到线偏光和圆偏光的功率，从而得到圆偏度，结果如图 3 所示。虽然辐射能量的变化比较大，但都达到了设计预期，且偏振度一直稳定在 99.5%以上，说明 SXFEL-UF 束流的能量抖动不会对圆偏光的使用造成影响。束团能量的增减对后续辐射功率的影响是不同的，这是由于一定范围内能量更高的电子束在 reverse taper 后的波荡器中共振发光更强，而能量更低的电子束的辐射则会进一步受到抑制。相对地，后者受到的辐射抑制更强，辐射光的圆偏度更高，但不是很明显。为了提升圆偏度，设计 reverse taper 时要求在正常工作点对辐射的抑制作用最明显；而改变 reverse taper 的强度和束流能量在改变共振关系上是等效的，所以在能量变化零点处的辐射能量存在突变。扫描过程中的辐射能量均在 120 μJ 以上，且实际运行时可以偏离共振点运行，因此该辐射能量突变不会造成影响。

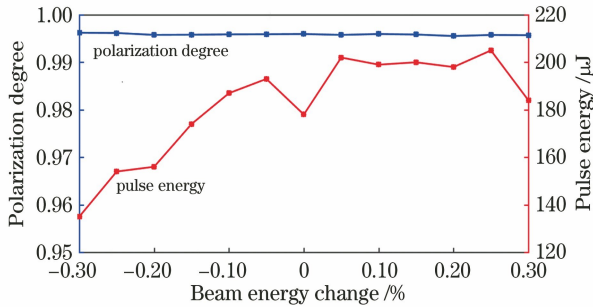


图 3 辐射能量和偏振度随束流能量的变化
Fig. 3 Radiation power and polarization degree varying with beam energy change

最后，由于 SASE 模式的 FEL 辐射是基于噪声的，所以模拟也考虑了不同初始噪声下的 EPU 辐射。选取 30 个不同的噪声模型，并将其与同等辐射水平的平面波荡器进行对比。结果显示：EPU 辐射脉冲能量均值为 186.4 μJ，标准偏差为 8.60 μJ，相对标准偏差为 4.61%；平面波荡器辐射脉冲能量均值为 171.3 μJ，标准偏差为 10.4 μJ，相对标准偏差为 6.08%。EPU 辐射光抖动相比平面波荡器下降了 25%，稳定性明显提升。因为 FEL 辐射功率的高低主要由 bunching 决定，因此对 EPU 设计中进行 reverse taper 处理前后的第 5、第 6 段平面波荡器进行对比，结果发现：处理后，平均群聚因子 (bunching factor) 的相对标准偏差由第 4 段末端的 4.72% 下降至第 6 段末端的 3.87%；而不进行

reverse taper 处理的平面波荡器则从 4.72% 下降至 4.41%。可见，reverse taper 的确增强了束团 bunching 的稳定性，与辐射功率的结果较为吻合。下面基于理论计算进行解释。

SASE 自由电子激光的辐射能量涨落关系可由余理华的涨落强度理论得出^[29]，公式为

$$\sigma_w = \sqrt{\frac{l_c}{l}}, \quad (5)$$

$$l_c = \frac{2\pi N_u \lambda_s L_G}{3L_u}, \quad (6)$$

式中： σ_w 为辐射能量的标准差； l_c 为光脉冲相干长度； l 为光脉冲长度； N_u 为波荡器周期数； λ_s 为共振波长； L_G 为增益长度； L_u 为波荡器长度。由模拟结果可得 reverse taper 处理前波荡器的增益长度约为 1.66 m，reverse taper 处理后波荡器的等效增益长度 (按指数增益计算) 约为 1.23 m，理论计算得辐射能量抖动下降为 24%，与模拟结果十分吻合。由模拟参数理论计算可知同等条件下 EPU 本身的增益长度是 1.48 m，比模拟结果高 20%，可见，reverse taper 处理后结构的增益长度确实进一步缩短了，从而降低了辐射能量抖动。另外，在两节 reverse taper 设计的平面波荡器中，电子束的辐射增长缓慢，而滑移效应依然存在，滑移可使 bunching 有所平滑，因此更为均匀。

4 SXFEL-UF 的偏振快速切换原理、设计与模拟结果

同样，基于 SXFEL-UF 装置，利用多个快速校正磁铁来改变束流的运行轨迹，同时使两个 EPU 段运行在相反的圆偏振模式，就可以达到偏振快速切换的效果，偏振切换原理如图 4 所示。在平面波荡器段和 EPU 段之间加入两个快速校正磁铁，将其频率调整为电子束重复频率的 1/2，以保证有一半的电子束受到二极磁场的偏转；在两个 EPU 段之间加入一个永磁二极磁铁，对所有经过的电子束进行偏转；在 EPU 段末端加入一组快速校正磁铁，施加与第一组二极磁铁相反的磁场，保证所有电子束会且仅会被两组磁铁中的一组偏转；令两段 EPU 运行在相反的偏振模式下。当一个束团从平面波荡器末端出现时，它将受到二极磁场的偏转作用而远离波荡器的轴线，然后以斜入射的方式经过第一段 EPU，其斜向辐射不会被接收；当束团回到轴线时，受到偏转的它将以正入射的方式沿轴线通过第二段 EPU，得到所需的右旋圆偏光，束团最终被束流拉

圾桶回收。与此相反,后一个束团在第一段 EPU 辐射左旋圆偏光,在进入第二段 EPU 前被偏转,滤

去不需要的辐射,出 EPU 后被调整回轴向,并由束流垃圾桶回收。

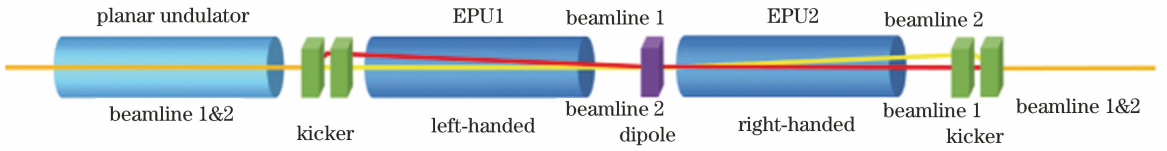


图 4 偏振切换原理示意图

Fig. 4 Schematic of polarization switching

首先需要确定束流斜向通过 EPU 时所需的最小角度,即:既要保证在 EPU 出口成功分离斜向辐射与轴向辐射,又要防止在第一组二极磁铁处产生过大的偏转角而使束团在平面波荡器段产生的 bunching 被破坏。由先前的模拟结果可知 EPU 出口处的辐射光斑半径约为 $50\ \mu\text{m}$,选取光斑间的中心距离为 $120\ \mu\text{m}$,这一距离可以满足分离需求,也是第一组二极磁铁将束团偏离波荡器主轴的距离。由于单节 EPU 和漂移段总长为 $4\ \text{m}$,故估算得到的 EPU 内束团轨迹与波荡器主轴夹角约为 $30\ \mu\text{rad}$ 。在一个波荡器段间设置第一组二极磁铁,计算可得所需快校正磁铁的磁感应强度仅为 $100\ \text{Gs}$ ($10000\ \text{Gs} = 1\ \text{T}$) 左右,而制造磁感应强度为 $100\ \text{Gs}$ 、频率为 $10\ \text{Hz}$ 的快校正铁难度不大。

在此基础上进一步得到第一组二极磁铁的传输矩阵,利用 MATLAB 计算束团相空间变化,再把束

团代入 GENESIS 程序中进行模拟,得到第一段 EPU 末端的束流中心位置,其与 EPU 主轴存在 $10\ \mu\text{m}$ 左右的偏离。这是由 EPU 本身的弱聚焦造成的,继续微调第二块二极磁铁的强度,直到在第一段 EPU 末端,束流中心位置恰好位于轴上。用同样的方法完成第二、第三组二极磁铁的设计。再次模拟,分别得到两个斜向光斑的半径和中心位置,以及两个轴向光斑的半径,它们均满足光斑分离要求。

由于第一段 EPU 对束团 bunching 的破坏不可避免,因此不同偏振方向的圆偏光之间存在强度差异。为了使二者大致接近,与两段 EPU 在相同偏振方向的运行情况不同,偏振切换时第一段 EPU 的参数应略微偏离共振点。模拟所得的功率分布和光谱如图 5 所示。线偏光脉冲能量依旧为 $1.5\ \mu\text{J}$,两段 EPU 的辐射脉冲能量分别为 $39.7\ \mu\text{J}$ 和 $27.6\ \mu\text{J}$,对应的圆偏度分别为 98% 和 97% ,满足设计需求。

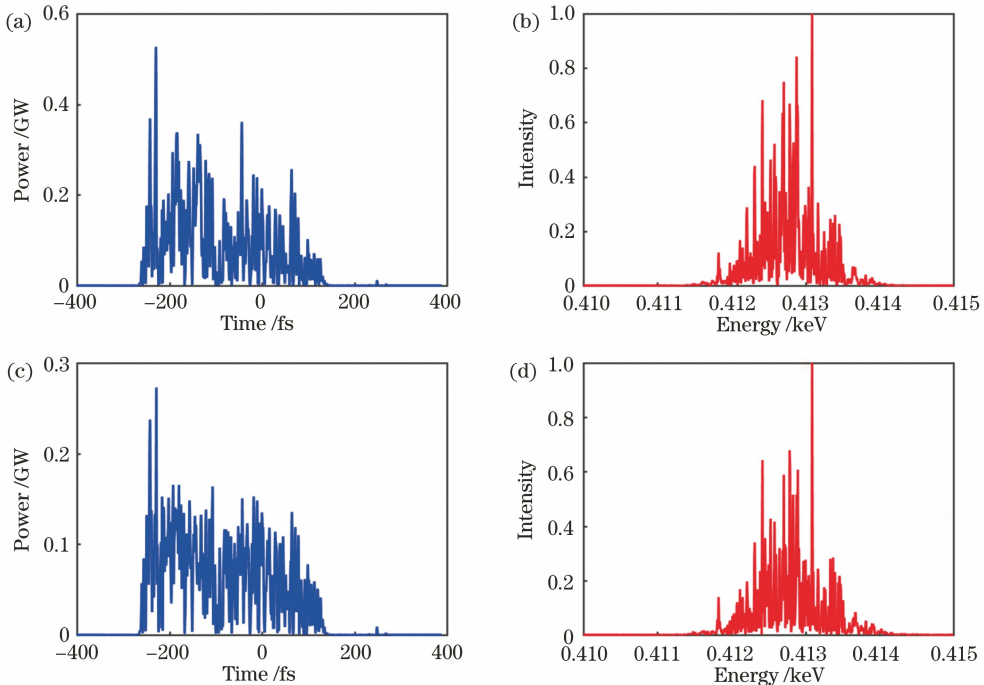


图 5 功率分布和光谱的模拟结果。(a)(b) EPU1;(c)(d) EPU2

Fig. 5 Simulated power profiles and spectra. (a)(b) EPU1; (c)(d) EPU2

同样,考虑电子束能量抖动对偏振切换设计的影响,结果如图 6 所示。与之前类似,电子束能量抖动对圆偏光的偏振度几乎没有影响,偏振度均在 97% 以上。尽管辐射能量产生了较大变化,且在零点处依旧存在能量跳变,但能量依旧保持在可接受的范围内,不同偏振方向的辐射强度也没有过于悬殊。因此,该方案满足束流能量抖动的要求。

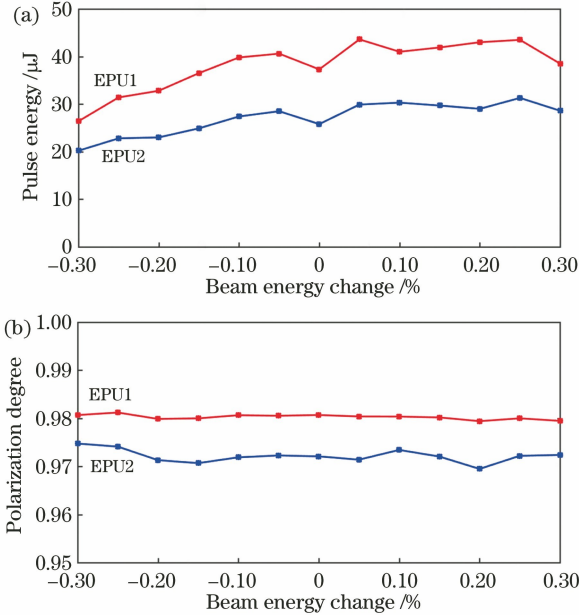


图 6 辐射能量和偏振度随束流能量抖动的变化。

(a) 辐射能量; (b) 偏振度

Fig. 6 Radiation power and polarization degree varying with beam energy. (a) Radiation power; (b) polarization degree

除此之外,由于偏振切换方案中电子束偏离波荡器轴线的距离很短,影响电子束横向位置的因素(如支撑系统的稳定性、装置的定位误差等)虽然对单一偏振方向的圆偏光辐射影响不大,但可能会破坏偏振切换方案中最终辐射的强度、偏振度以及离轴辐射的分离,使其效果降低。装置中束流位置探测器的精度可以小于 $10 \mu\text{m}$,经过模拟可知束流中心轨道偏离波荡器主轴 $10 \mu\text{m}$ 范围内只会略微改变出光的位置,对该方案的稳定性没有影响。当束团偏离中心轨道不足 $20 \mu\text{m}$ 时,造成的光斑强度和位置的变化都较小,对辐射稳定性的影响不大。超过此值后将无法兼顾离轴辐射光的分离和轴向辐射光的收集,当偏离值达到 $60 \mu\text{m}$ 后,几乎难以分离不同方向的辐射光,辐射强度也有一定变化,该方案不再适用。在 SXFEL 装置的直线段出口处,电子束横向位置抖动约为 $20 \mu\text{m}$,波荡器段的位置抖动可以进一步降低,可以满足偏振切换方案的要求。

最后,本文对增加二极磁铁间的漂移段从而降低二极场强度的设想也进行了设计及计算。模拟结果显示这种方案并不会提高后续 EPU 辐射的质量,可能的原因有以下三点:一是强度极小的二极磁铁本身对 bunching 的影响并不大,进一步降低强度收效甚微;二是在第一段 EPU 中束团和主轴的夹角仅由分离光斑的需求决定,束团在斜向的 bunching 恰恰是影响后续主轴发光的关键;三是过长的漂移段需要增加聚焦四极磁铁,但这样会引入斜四极分量使问题复杂化。鉴于当前的设计参数不存在技术难度,更短的布局结构也能预留下更多空间,故维持先前的设计。

5 结 论

上海软 X 射线自由电子激光装置是我国第一台 X 射线相干光源,目前正在建设之中。偏振可控的 X 射线光源在众多领域得到了应用,本文基于 SXFEL 的设计指标和实际运行参数进行了偏振控制设计,在平面波荡器段下游利用两段 EPU 模拟得到了圆偏度在 99.5% 以上、脉冲能量为 $186.4 \mu\text{J}$ 的高质量圆偏振 X 光,并得出装置束流能量抖动对该方案输出性能影响不大的结论。之后进一步比较了不同噪声模型下,EPU 和平面波荡器辐射光能量抖动的差异,在理论上分析了 EPU 结构中的 reverse taper 对辐射能量抖动的抑制效果,分析结果与模拟结果吻合良好。此外,通过将两个 EPU 调节至不同的偏振方向,并于其中加装一套快速校正磁铁结构,额外模拟实现了不同偏振方向圆偏光之间的快速切换(10 Hz 量级),两束圆偏光的脉冲能量和圆偏度均达到设计指标,且满足装置束流能量抖动的要求。该方案所需的快校正磁铁强度相当小,无论是成本还是制造难度都很低。利用快校正磁铁改变电子束在波荡器中轨迹的思路也可用于 FEL 在其他不同运行模式之间的切换(尤其是在低重复频率下极易实现)。

参 考 文 献

- [1] Kim K J. Brightness, coherence and propagation characteristics of synchrotron radiation[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1986, 246(1/2/3): 71-76.
- [2] Bilderback D H, Elleaume P, Weckert E. Review of third and next generation synchrotron light sources [J]. Journal of Physics B: Atomic, Molecular and

- Optical Physics, 2005, 38(9): S773-S797.
- [3] McNeil B W J, Thompson N R. X-ray free-electron lasers[J]. Nature Photonics, 2010, 4(12): 814-821.
- [4] Feng C, Deng H X. Review of fully coherent free-electron lasers[J]. Nuclear Science and Techniques, 2018, 29(11): 160.
- [5] Öström H, Öberg H, Xin H, et al. Probing the transition state region in catalytic CO oxidation on Ru [J]. Science, 2015, 347(6225): 978-982.
- [6] Young L, Kanter E P, Krässig B, et al. Femtosecond electronic response of atoms to ultra-intense X-rays[J]. Nature, 2010, 466(7302): 56-61.
- [7] Qi Z, Feng C, Deng H, et al. Generating attosecond X-ray pulses through an angular dispersion enhanced self-amplified spontaneous emission free electron laser [J]. Physical Review Accelerators and Beams, 2018, 21(12): 120703.
- [8] Feng C, Wang Z, Wang X T, et al. Generation of two-color ultra-short radiation pulses from two electron bunches and a chirped seeded free-electron laser [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2016, 807: 79-85.
- [9] Song M H, Yan J W, Li K, et al. Bandwidth broadening of X-ray free electron laser pulses with the natural gradient of planar undulator [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018, 884: 11-17.
- [10] Yan J W, Deng H X. Generation of large-bandwidth X-ray free electron laser with evolutionary many-objective optimization algorithm[J]. Physical Review Accelerators and Beams, 2019, 22(2): 020703.
- [11] Emma P, Akre R, Arthur J, et al. First lasing and operation of an ångstrom-wavelength free-electron laser[J]. Nature Photonics, 2010, 4(9): 641-647.
- [12] Zhao Z, Wang D, Yin L, et al. SCLF: an 8-GeV CW SCRF linac-based X-ray FEL facility in Shanghai[C] // 38th International Free Electron Laser Conference, FEL2017, August 20-25, 2017, Santa Fe, New Mexico, USA. Geneva: JACoW Publishing, 2017: 182-184.
- [13] Schreiber S, Faatz B, Feldhaus J, et al. FEL user facility FLASH [C] // Proceedings of the 2010 International Particle Accelerator Conference, May 23-28, 2010, Kyoto Japan. [S. l.: s. n.], 2010: 2149-2151.
- [14] Svandrlik M, Bencivenga F, Castronovo D, et al. FERMI status report[C] // 5th International Particle Accelerator Conference (IPAC 2014), June 15-20, 2014, Dresden, Germany. Geneva: JACoW Publishing, 2014: 2885-2887.
- [15] Zhao Z T, Wang D, Yin L X, et al. Shanghai soft X-ray free-electron laser facility[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0100004.
赵振堂, 王东, 殷立新, 等. 上海软 X 射线自由电子激光装置[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0100004.
- [16] Kim K J. Polarization characteristics of synchrotron radiation sources and a new two undulator system [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1984, 222(1/2): 11-13.
- [17] Bahrtdt J, Frentrup W, Gaupp A, et al. Undulators for the Bessy soft-X-ray FEL[C] // 26th International Conference, FEL 2004, and 11th FEL Users Workshop, August 29-September 3, 2004, Trieste, Italy. Geneva: JACoW Publishing, 2004: 610-613.
- [18] Briquez F, Benabherrahmane C, Chubar O, et al. Construction of short period APPLE II type undulators at SOLEIL[C] // Proceedings of FEL08, Gyeongju, Korea. [S. l.: s. n.], 2008: 265.
- [19] Temnykh A B. Delta undulator for Cornell energy recovery linac[J]. Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams, 2008, 11(12): 120702.
- [20] Kondratenko A M, Saldin E L. Generating of coherent radiation by a relativistic electron beam in an undulator[J]. Particle Accelerators, 1980, 10: 207-216.
- [21] Yu L H. Generation of intense UV radiation by subharmonically seeded single-pass free-electron lasers[J]. Physical Review A, 1991, 44(8): 5178-5193.
- [22] Zhao Z T, Wang D, Chen J H, et al. First lasing of an echo-enabled harmonic generation free-electron laser[J]. Nature Photonics, 2012, 6(6): 360-363.
- [23] Liu B, Li W B, Chen J H, et al. Demonstration of a widely-tunable and fully-coherent high-gain harmonic-generation free-electron laser [J]. Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams, 2013, 16(2): 020704.
- [24] Wu J H, Yu L H. Coherent hard X-ray production by cascading stages of high gain harmonic generation [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2001, 475(1/2/3): 104-111.
- [25] Stupakov G. Using the beam-echo effect for generation of short-wavelength radiation[J]. Physical Review Letters, 2009, 102(7): 074801.
- [26] Schneidmiller E A, Yurkov M V. Obtaining high degree of circular polarization at X-ray free electron lasers via a reverse undulator taper [J]. Physical

- Review Special Topics - Accelerators and Beams, 2013, 16(11): 110702.
- [27] Reiche S. GENESIS 1.3: a fully 3D time-dependent FEL simulation code [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1999, 429(1/2/3): 243-248.
- [28] Lutman A A, MacArthur J P, Ilchen M, et al. Polarization control in an X-ray free-electron laser [J]. Nature Photonics, 2016, 10(7): 468-472.
- [29] Li H Y, Krinsky S. Analytical theory of intensity fluctuations in SASE [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1998, 407(1/2/3): 261-266.