

光学学报

上海硬 X 射线自由电子激光装置光源性能参数与稳定性研究

齐争¹, 黄楠顺^{2,3}, 邓海啸^{1*}, 刘波¹, 王东¹

¹中国科学院上海高等研究院上海光源科学中心, 上海 201200;

²中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 研究了上海硬 X 射线自由电子激光装置 (SHINE) 第三条波荡器线 FEL-III 的光源性能参数及其稳定性。FEL-III 波荡器线可覆盖 10~25 keV 的光子能量, 是 SHINE 目前三条波荡器线中光子能量最高的。在光源性能参数与稳定性的研究中, 考虑了束流散粒噪声、束流初始横向位置和入射角抖动, 以及四极铁的横向位置误差等因素, 给出了比较清晰和明确的光源参数和稳定性的表现, 这可为束线站和实验站的设计提供参考, 也可为潜在的用户实验提供参考。

关键词 X 射线光学; 自由电子激光; 上海硬 X 射线自由电子激光; 性能参数; 稳定性

中图分类号 TN248.6

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1134016

Performance Parameters and Stability Studies on FEL-III Beamline of Shanghai High Repetition Rate XFEL and Extreme Light Facility

Qi Zheng¹, Huang Nanshun^{2,3}, Deng Haixiao^{1*}, Liu Bo¹, Wang Dong¹

¹Shanghai Synchrotron Radiation Facility, Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201200, China;

²Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In this paper, we demonstrate the performance parameters and stability of the FEL-III beamline of Shanghai high repetition rate X-ray free electron laser and extreme light facility (SHINE). FEL-III beamline covers the photon energy of 10–25 keV, which is the FEL beamline with the highest energy among the initial three beamlines in SHINE. In the studies and analysis of performance parameters and stability of sources, the electron beam shot noise, the transverse position and incident angle jitter of the electron beam launch condition, and the horizontal position misplacement of the quadrupoles are taken into account. The results provide a solid and clear illustration for the possible performance and stability of the light source. It will also serve as a reference for the design of the optical beamlines and the experimental endstations, and it will provide reference for potential user experiments.

Key words X-ray optics; free-electron laser; Shanghai high repetition rate X-ray free electron laser and extreme light facility; performance parameters; stability

收稿日期: 2022-02-09; 修回日期: 2022-02-25; 录用日期: 2022-04-18

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFE0103100)、国家自然科学基金委(12125508, 11935020)、上海市优秀学术/技术带头人(21XD1404100)、上海市“基础研究特区计划”(JCYJ-SHFY-2021-010)

通信作者: *denghaixiao@zjlab.org.cn

1 引言

X 射线自由电子激光(XFEL)在过去的十几年里取得了巨大的进展^[1-3], XFEL 装置也已经成为了众多前沿科学研究领域强有力的工具^[4-5], 并且, 先进的 XFEL 光源的实现也在持续激发新的创意和想法, 启发新的方法和技术, 使更多的科学研究和探索成为可能。我国的 XFEL 装置的研究和发展迄今为止已经经历一段漫长和艰苦的旅程, 并且也取得了丰硕的成果^[6-11]。经过巨大的努力, 上海软 X 射线自由电子激光试验装置(SXFEL-TF)已经成功运行, 可以产生波长为 8.8 nm 的软 X 射线自由电子激光脉冲^[7-8], 而作为 SXFEL-TF 的升级, 上海软 X 射线自由电子激光用户装置(SXFEL-UF)也正在紧张的调试之中^[9-11], SXFEL-UF 有两条波荡器线, 一条可以产生 3~10 nm 的外种子自由电子激光脉冲, 另一条可以提供 2~7 nm 的自放大自发辐射(SASE)自由电子激光脉冲。

上海硬 X 射线自由电子激光装置(SHINE)将是我国第一台硬 X 射线自由电子激光装置^[12]。SHINE 基于一台连续波超导射频直线加速器, 其最高束流能量为 8 GeV, 最大重复频率可以达到 1 MHz, 它将通过束流分配系统分别驱动三条波荡器线, 即 FEL-I、FEL-II 和 FEL-III, 并最终产生 0.2~25 keV 光子能量的辐射脉冲, 在这三条波荡器线之中, FEL-III 是光子能量最高的, 可以覆盖 10~25 keV 范围的光子能量, 因而其发光条件也是最苛刻的, 其对各种误差会更敏感, 要求也会更严格。随着设计和建造的逐渐深入, 人们越来越关心 SHINE 光源的参数及其稳定性, 这对光学传输线以及终端实验站的设计和建设都至关重要, 也会直接影响将来的用户实验。

对于一个大型的科学实验与用户装置来讲, 影响其稳定性的因素可能有很多, 包括各种有源设备的输出参数抖动以及某些关键器件的位置误差等, 相应地, 这也会成为某些设备或系统的关键技术指标^[13]。另外, 对于 SASE 本身, 其输出脉冲本质上起源于束流的散粒噪声, 这也会影响其最终输出的稳定性。从国内外已经实现的或投入运行的自由电子激光装置的表现来看, FEL 最终输出参数的抖动大概是其输出参数的 10% [均方根(RMS)], 这是对 FEL 出光结果的一般统计与大概评估, 对此研究人员并没有进行系统的理论或实验研究。因此, 本文将基于 FEL-III 波荡器线, 考虑束流散粒噪声、束流

初始横向位置、入射角抖动, 以及四极铁的横向位置误差等, 对 SHINE 光源的参数和稳定性进行理论分析与研究。

2 性能与稳定性研究

FEL-III 波荡器线所用到的基本束流和波荡器参数如表 1 所示, 表 2 给出了 FEL-III 辐射光子能量为 10 keV 和 15 keV 时的光源参数, 表 2 中 FWHM 为半峰全宽。

表 1 SHINE FEL-III 波荡器线参数

Table 1 SHINE FEL-III beamline parameters

Parameter	Value
Beam energy /GeV	8
Slice energy spread /%	0.01
Normalized emittance /($\mu\text{m}\cdot\text{rad}$)	0.5
Charge /pC	100
Peak current /A	1500
Undulator period length /mm	16
Undulator segment length /m	4
Undulator segment number	40
Photon energy /keV	10-25

表 2 SHINE FEL-III 光源参数

Table 2 SHINE FEL-III photon beam parameters

Parameter	Value 1	Value 2
Photon energy /keV	10	15
Pulse energy / μJ	278	143
Bandwidth /%	0.066	0.051
Pulse length (FWHM) / μm	12	10
Spot size (FWHM) / μm	130	85
Divergence (FWHM) / μrad	1.90	1.58

首先研究了束流的散粒噪声对 15 keV FEL 辐射的影响, 在基本相同的束流参数和波荡器参数的条件下, 改变束流的初始随机噪声, 给出不同的 FEL 辐射模拟结果。为了进行对比, 并同时体现出理想的束流纵向分布与实际的束流纵向分布对辐射结果的影响, 使用一个理想的高斯分布束流和一个通过比较实际的从头至尾模拟得到的头尾有双峰分布的束流分别进行模拟, 模拟结果如图 1 所示, 这里主要考虑了光斑尺寸、光束散角与峰值功率。

从头至尾模拟得到的束流的归一化发射度只有 0.2 $\mu\text{m}\cdot\text{rad}$, 比常规的理想束流的 0.5 $\mu\text{m}\cdot\text{rad}$ 的

发射度要好得多,因此利用从头至尾模拟得到的束流的 FEL 辐射会更早达到饱和,最终出口处的峰值功率要更高,图 1(f)中峰值功率会到百 GW 量级,而图 1(c)的常规理想束流功率约为十 GW 量级,同时由于光束有散角,饱和之后其光斑尺寸会继续变大,最终的光斑尺寸也会变大,图 1(d)中最终的光斑尺寸约为 $154.5 \mu\text{m}$,比图 1(a)中最终的光斑尺寸($104.7 \mu\text{m}$)要更大。对于常规的理想分布的束

流和从头至尾模拟得到的较为实际的双峰分布的束流而言,不同的束流参数会对最终 FEL 输出的结果有影响,但同时更重要的是, FEL 输出的光斑尺寸和光束散角的稳定性都是很好且一致的,即束流的散粒噪声导致的 FEL 输出性能的抖动峰峰值都可以保持在 1% 以下,因此在接下来的参数和稳定性的研究中,以常规的高斯分布的束流为基础来进行模拟。

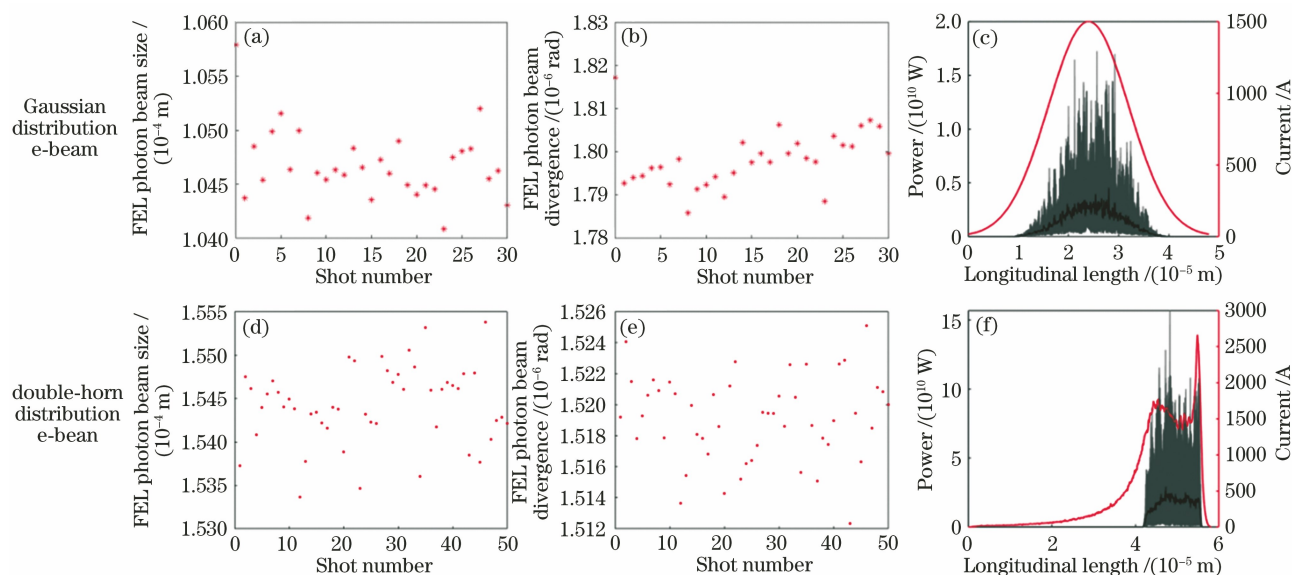


图 1 考虑束流的散粒噪声,在理想的高斯分布束流和实际的从头至尾模拟得到的头尾双峰分布束流的条件下, FEL 辐射在 15 keV 时的光斑尺寸、光束散角、流强分布与 FEL 辐射脉冲分布的性能参数与稳定性结果。(a)(d)光斑尺寸; (b)(e)光束散角; (c)(f)流强分布与 FEL 辐射脉冲分布

Fig. 1 Performance parameters and stability of 15 keV photon beam size, divergence, current profile, and FEL radiation pulses considering shot noise using a normal ideal Gaussian distribution electron beam and a start-to-end double-peak distribution electron beam. (a)(d) Photon beam size; (b)(e) divergence; (c)(f) current profile and FEL radiation pulses

FEL 辐射光束的散角是衡量光束半径相对于传播距离的增长率的角度量,小的光束散角对 X 射线光束线站的设计有重要意义。光束散角可以从辐射场的角频谱表示法中获得,而为了获得辐射场的角频谱,可以对复数形式的电磁场进行横向二维傅里叶变换,辐射场的横向二维傅里叶变换可以写为

$$F(k_x, k_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp[-i2\pi(k_x x + k_y y)] dx dy, \quad (1)$$

式中: $f(x, y)$ 是复数形式的辐射场; $F(k_x, k_y)$ 是相应的角频谱; x 和 y 代表横、纵向坐标; k_x 和 k_y 代表 x 和 y 方向的空间频率。实际上,这个表示法意味着把光束看成是许多不同传播方向的平面波的叠加,并通过横向傅里叶变换给出所有平面波的幅度和相位,因此,这个横向傅里叶变换结果的平均值可

以表明光束整体的传播方向,而它的均方根大小则可以代表光束的散角。由于 FEL 的三维模拟软件 Genesis^[14] 可以直接给出三维的辐射场分布,因此可以直接在数值模拟中得到辐射场的角频谱,从而可以给出 FEL 辐射光束的散角。

束流初始横向位置和入射角的抖动也会对 FEL 出光的结果有很大影响,因为电子束流是 FEL 出光放大的媒介,束流的不稳定会很直接地传递给 FEL 的不稳定,初始束流指在波荡器段入口处的束流。对于一般的横向高斯分布束流而言,束流尺寸约为 $20 \mu\text{m}$,束流散角约为 $2 \mu\text{rad}$,在研究中,假设束流初始的抖动是初始参数的 10% (RMS),在不同的抖动参数的条件下,给出了 100 组 FEL 输出的结果,对于 10 keV 的辐射光子能量,其输出的光源参数的稳定性结果如图 2 中所示,除了光斑尺寸与光束散角,这里也给出了 FEL 辐射光束的光斑位置及

光束指向角度的结果。

从图 2(a) 中可以看到, 平均光斑尺寸约为 $155 \mu\text{m}$ (FWHM), 并且比较稳定。图 2(b) 中的平均光束散角约为 $2.2 \mu\text{rad}$ (FWHM), 在图 2(c) 中可以看到 x/y 方向的光斑位置抖动分别是 $2.0 \mu\text{m}/$

$4.4 \mu\text{m}$ (RMS), 这是图 2(a) 中平均光斑尺寸的 $3.1\%/6.7\%$, 图 2(d) 给出了光源的指向稳定性结果, x/y 两个方向的光束指向角度只有 $14.7 \text{ nrad}/13.4 \text{ nrad}$, 是图 2(b) 中光束本身散角的 $1.6\%/1.4\%$, 在这个条件下的模拟结果中光源的指向是非常稳定的。

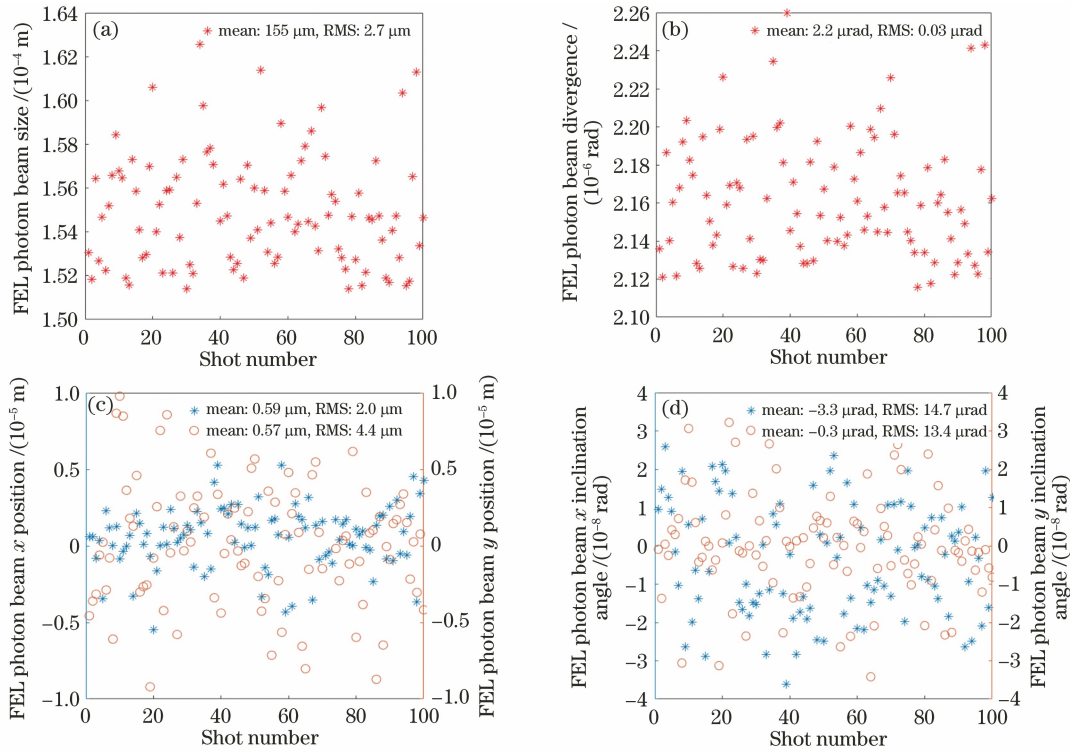


图 2 束流初始 10%(RMS)的横向位置和入射角抖动下的 10 keV 辐射光子能量时光斑尺寸、光束散角、 x/y 方向的光斑位置、 x/y 方向的光束指向角度的输出参数及稳定性。(a)光斑尺寸;(b)光束散角;(c) x/y 方向的光斑位置;(d) x/y 方向的光束指向角度

Fig. 2 Output parameters and stability of photon beam size, divergence, position in x/y dimension, and pointing angle in x/y dimension for lateral position and incident angle jitter of 10% (RMS) of initial beam when irradiance energy is 10 keV. (a) Photon beam size; (b) divergence; (c) position in x/y dimension; (d) pointing angle in x/y dimension

另外一个对光源稳定性有重要影响的因素是波荡器段四极铁的位置误差。一般来讲, 设备安装准直的精度约为百微米量级, 而 FEL 辐射要求的轨道平直度则要到微米量级, 四极铁的位置误差对束流轨道的影响较大, 进而会影响 FEL 辐射。在研究中, 首先通过稳态模拟给出不同的四极铁位置误差对辐射功率的影响, 从而得到一个比较合适的误差值以进行后续的稳定性与模拟。图 3 中分别给出了 x/y 方向不同的四极铁位置误差对应的 FEL 输出功率的箱线图, 其中短横线为每一个位置误差对应的输出功率的平均值, 可以作为参考。可以看出, 随着位置误差的增大, 峰值功率整体呈下降趋势, 而且图 3(b) 中 y 方向峰值功率的下降要比图 3(a) 中 x 方向下降得多, 这是因为 x 方向波荡器好场区更大, 对轨道误差的容忍度较 y 方向要好一

点。为了简单起见, 将 $x、y$ 方向的位置误差限定在相同的值, 并且保证峰值功率下降不超过 5%, 最终选择了一个比较严格的限制, x/y 方向的四极铁位置误差均为 $0.5 \mu\text{m}$ (RMS)。

在两个方向的四极铁误差都是 $0.5 \mu\text{m}$ (RMS) 的条件下, 给出了 50 组 10 keV 光子能量辐射的结果, 如图 4 所示。从图 4(a) 中可以看出, 光斑大小约为 $153 \mu\text{m}$ (FWHM), 图 4(b) 中显示光束散角约为 $2.2 \mu\text{rad}$ (FWHM), 图 4(c) 表明 x/y 方向的光斑位置是 $2.0 \mu\text{m}/1.6 \mu\text{m}$, 是光斑尺寸的 $3.0\%/2.5\%$, 图 4(d) 中 x/y 方向的光束指向角度是 $13.7 \text{ nrad}/12.3 \text{ nrad}$, 大概是图 4(b) 中光束散角的 $1.5\%/1.3\%$ 。可以看出, 由于选择的是比较严格的四极铁位置误差参数, 相应的 FEL 输出结果也比较稳定。

从以上的结果可以看出,束流的散粒噪声、束流初始 10%(RMS)的横向位置和入射角抖动、 x/y 方向的 $0.5 \mu\text{m}/0.5 \mu\text{m}$ 的四极铁位置误差单独作用时,对 FEL 输出的性能参数和稳定性影响均比较小,接下来需要把它们放在一起,综合考虑 FEL 输出的性能参数和稳定性。60 组 FEL 输出的结果如图 5 中所示。平均光斑尺寸约为 $156 \mu\text{m}$ (FWHM),

平均光束散角约为 $2.2 \mu\text{rad}$ (FWHM),光斑尺寸和光束散角都比较稳定。光斑 x/y 方向的位置抖动为 $3.6 \mu\text{m}/5.1 \mu\text{m}$,约为光斑平均尺寸的 $5.4\%/7.6\%$, x/y 方向的光束指向角度是 $11.7 \text{ nrad}/17.7 \text{ nrad}$,约是光束散角的 $1.2\%/1.9\%$ 。可以看到,综合考虑这几类误差源,辐射光斑的横向位置抖动确实变大了,但仍没有超过 10% ,而光束指向角度

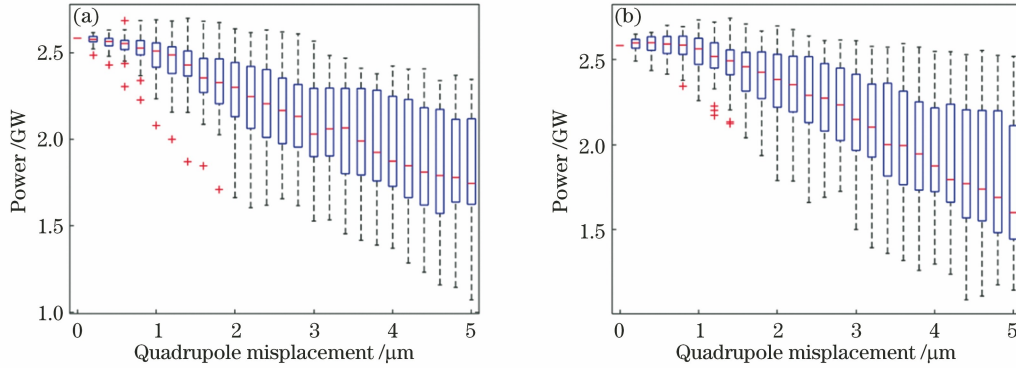


图 3 x, y 方向不同的四极铁位置误差对 FEL 稳态输出功率的影响。(a) x 方向;(b) y 方向

Fig. 3 FEL stable peak power varying with quadrupole misplacement in x and y directions. (a) x direction; (b) y direction

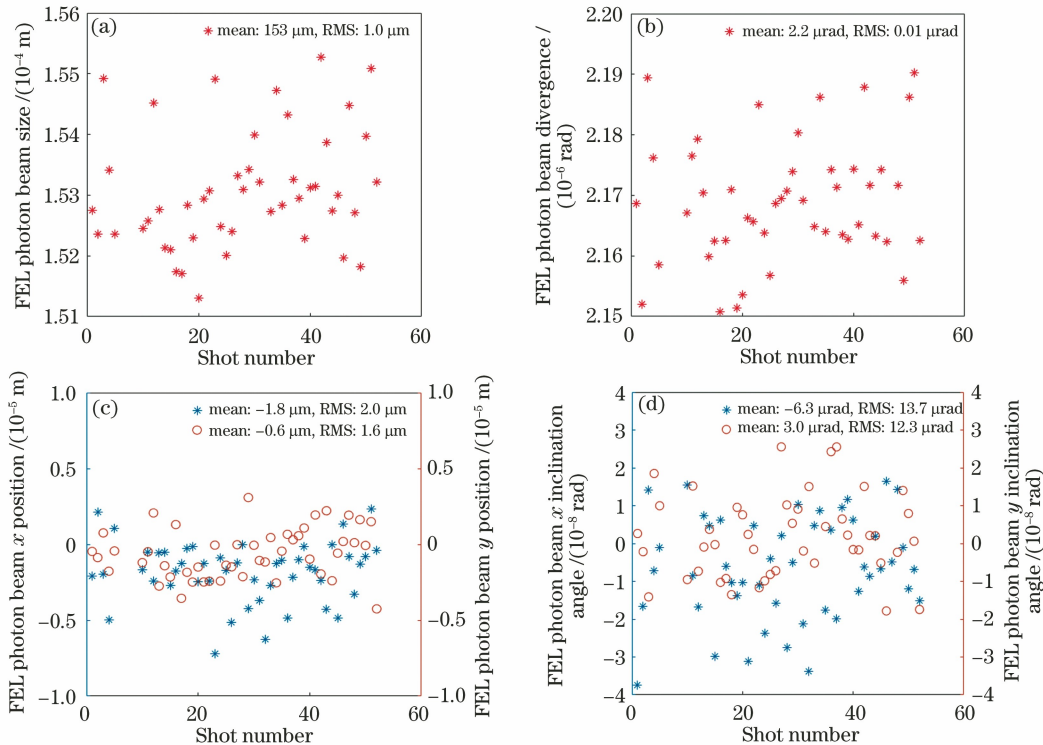


图 4 四极铁位置误差在 x/y 方向为 $0.5 \mu\text{m}/0.5 \mu\text{m}$ 时,10 keV FEL 辐射光斑尺寸、光束散角、 x/y 方向的光斑位置、 x/y 方向的光束指向角度的输出参数及稳定性。(a)10 keV FEL 辐射光斑尺寸;(b)光束散角;(c) x/y 方向的光斑位置;(d) x/y 方向的光束指向角度

Fig. 4 Output parameters and stability of photon beam size, divergence, position in x/y dimension, and pointing angle in x/y dimension considering a $0.5 \mu\text{m}/0.5 \mu\text{m}$ quadrupole misplacement in x/y dimension when FEL irradiance energy is 10 keV. (a) Photon beam size; (b) divergence; (c) position in x/y dimension; (d) pointing angle in x/y dimension

的稳定性基本没变。

为了进一步研究这些误差因素的影响,将束流的初始横向位置和入射角度抖动增大到了 20% (RMS),四极铁 x/y 方向的位置误差增大到了 $1.0 \mu\text{m}/1.0 \mu\text{m}$,计算了 100 组 FEL 辐射,结果如图 6 所示。可以看到,增大误差之后,光斑大小和光束散角都变大了,分别从约 $156 \mu\text{m}$ 和 $2.2 \mu\text{rad}$ 变为了 $171 \mu\text{m}$ 和 $2.4 \mu\text{rad}$;同时,光斑尺寸和光束散

角本身的抖动明显变大,分别为 $12.6 \mu\text{m}$ 和 $0.16 \mu\text{rad}$,分别为平均光斑尺寸的 17% 和平均光束散角的 16%。另外,光斑位置和光束指向角度的抖动也增加了, x/y 方向的光斑位置抖动为 $14.7 \mu\text{m}/9.4 \mu\text{m}$,是光斑大小的 20%/13%,已经超过了一般所认为的 10% 的抖动性。 x/y 方向的光束指向角度抖动变为了 $34.4 \text{ nrad}/31.0 \text{ nrad}$,分别是光束散角的 3.4%/3.0%。

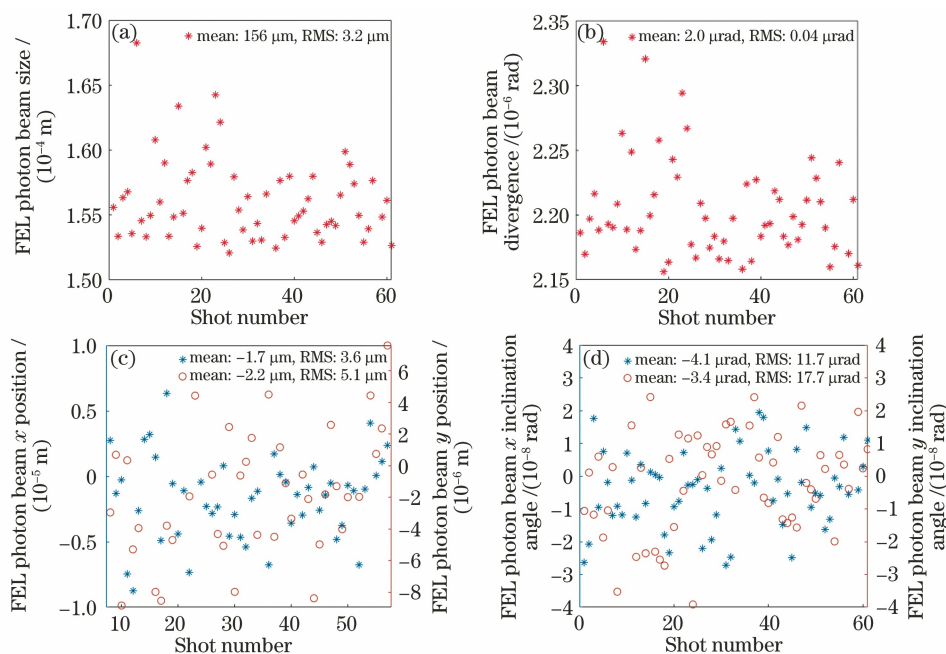


图 5 综合考虑束流的散粒噪声、束流初始 10% (RMS) 的横向位置和入射角抖动、 x/y 方向的 $0.5 \mu\text{m}/0.5 \mu\text{m}$ 的四极铁位置误差,给出 10 keV FEL 辐射的光斑尺寸、光束散角、 x/y 方向的光斑位置、 x/y 方向的光束指向角度的输出参数及稳定性。(a) 光斑尺寸;(b) 光束散角;(c) x/y 方向的光斑位置;(d) x/y 方向的光束指向角度

Fig. 5 Output parameters and stability of photon beam size, divergence, position in x/y dimension, and pointing angle in x/y dimension considering comprehensive effect from shot noise, transverse jitter of 10% (RMS) of initial beam size and beam divergence, and $0.5 \mu\text{m}/0.5 \mu\text{m}$ quadrupole misplacement in x/y dimension when FEL irradiance energy is 10 keV. (a) Photon beam size; (b) divergence; (c) position in x/y dimension; (d) pointing angle in x/y dimension

总之,不同的误差条件下 10 keV FEL-III 辐射的性能参数稳定性结果如表 3 中所示。可以看到 x, y 方向均为 $0.5 \mu\text{m}$ 的四极铁位置误差对 FEL

的稳定性没有太大影响,而随着四极铁位置误差增加到 $1.0 \mu\text{m}$,束流初始横向抖动增加到 20%,FEL 辐射的抖动会明显变大。

表 3 FEL-III 光源性能参数与稳定性

Table 3 FEL-III photon beam performance parameters and stability

%

Considering factor	Beam size	Divergence	Position in x/y	Pointing angle in x/y
Transverse jitter	4.0	3.6	3.1/6.7	1.6/1.4
Quadrupole misplacement	1.5	1.2	3.0/ 2.5	1.5/1.3
Transverse jitter & quadrupole misplacement	4.8	4.1	5.4/7.6	1.2/1.9
Double transverse jitter & quadrupole misplacement	17.0	16.0	20.0/13.0	3.4/3.0

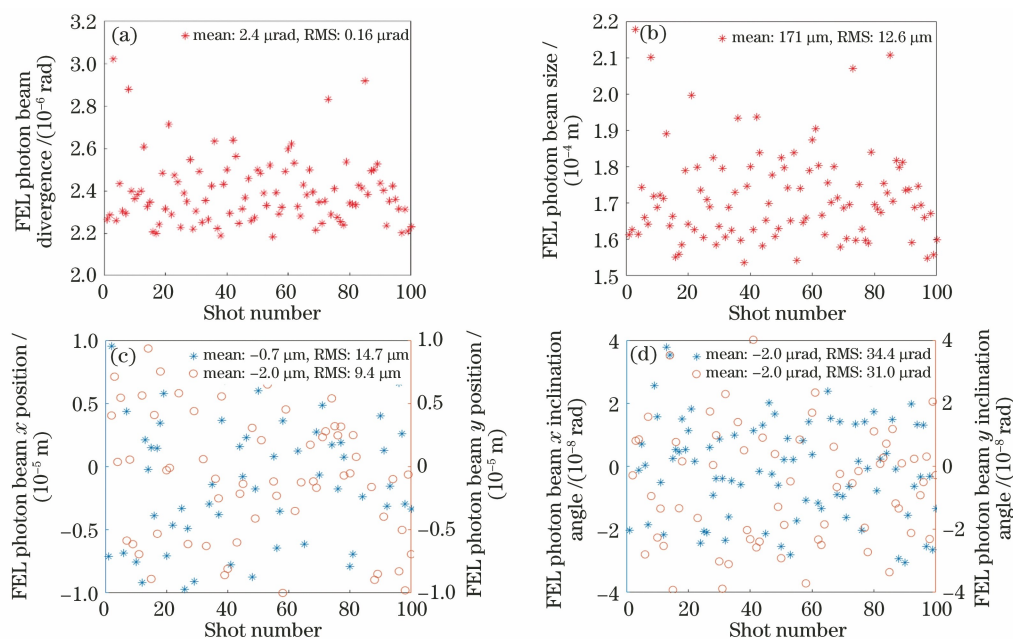


图 6 增大误差为束流初始 20% (RMS) 的横向位置和入射角抖动、 x/y 方向的四极铁位置误差为 $1.0 \mu\text{m}/1.0 \mu\text{m}$ 时, 10 keV FEL 辐射的光斑尺寸、光束散角、 x/y 方向的光斑位置、 x/y 方向的光束指向角度的输出参数及稳定性。

(a) 光斑尺寸; (b) 光束散角; (c) x/y 方向的光斑位置; (d) x/y 方向的光束指向角度

Fig. 6 Output parameters and stability of photon beam size, divergence, position in x/y dimension, and pointing angle in x/y dimension considering comprehensive effect from increased error sources of transverse jitter of 20% (RMS) of initial beam size and beam divergence and $1.0 \mu\text{m}/1.0 \mu\text{m}$ quadrupole misplacement in x/y dimension when FEL irradiance energy is 10 keV. (a) Photon beam size; (b) divergence; (c) position in x/y dimension; (d) pointing angle in x/y dimension

3 结 论

研究了束流散粒噪声、束流横向抖动和四极铁位置误差对光源参数的影响, 结果表明, 如果束流横向位置和入射角抖动在 10% (RMS) 的束流本身参数范围内, 并且四极铁位置误差不超过 $0.5 \mu\text{m}$, 则光源参数的总体抖动不会超过输出参数的 10%, 这个关于光源稳定性的理论研究结果与已有的自由电子激光装置的实际出光结果是一致的^[15]。需要说明的是, 实际装置中存在更多的误差源, 而不仅仅局限于本文所研究到的, 其中最重要的一点是, 束流本身的参数是不理想和不完美的。一般来讲, 电子束流的中心能量相对抖动约为 1.0×10^{-4} , 能量抖动在波荡器线中的残余色散的影响下会增加束流的横向抖动^[16], 因此波荡器中的残余色散需要减小到毫米量级。

参 考 文 献

[1] Emma P, Akre R, Arthur J, et al. First lasing and operation of an ångström-wavelength free-electron laser[J]. Nature Photonics, 2010, 4(9): 641-647.

[2] Allaria E, Appio R, Badano L, et al. Highly coherent and stable pulses from the FERMI seeded free-electron laser in the extreme ultraviolet [J]. Nature Photonics, 2012, 6(10): 699-704.

[3] Huang N S, Deng H X, Liu B, et al. Features and futures of X-ray free-electron lasers [J]. The Innovation, 2021, 2(2): 100097.

[4] Chapman H N. X-ray free-electron lasers for the structure and dynamics of macromolecules [J]. Annual Review of Biochemistry, 2019, 88: 35-58.

[5] Bostedt C, Boutet S, Fritz D M, et al. Linac coherent light source: the first five years [J]. Reviews of Modern Physics, 2016, 88(1): 015007.

[6] Feng C, Deng H X. Review of fully coherent free-electron lasers [J]. Nuclear Science and Techniques, 2018, 29(11): 1-15.

[7] Zhao Z T, Wang D, Gu Q, et al. SXFEL: a soft X-ray free electron laser in China [J]. Synchrotron Radiation News, 2017, 30(6): 29-33.

[8] 赵振堂, 王东, 殷立新, 等. X 射线自由电子激光试验装置 [J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0114006.

Zhao Z T, Wang D, Yin L X, et al. Shanghai soft X-ray free-electron laser test facility [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0114006.

- [9] 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.
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.
- [10] Liu B, Feng C, Gu D, et al. The SXFEL upgrade: from test facility to user facility [J]. Applied Sciences, 2021, 12(1): 176.
- [11] 高张峰, 邓海啸, 刘波, 等. 上海软 X 射线自由电子激光装置的偏振控制[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500015.
Gao Z F, Deng H X, Liu B, et al. Polarization control of Shanghai soft X-ray free-electron laser facility[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500015.
- [12] Zhu Z Y, Zhao Z T, Wang D, et al. Sclf: an 8-GeV CW SCRF linac-based X-ray FEL facility in Shanghai [C]//38th International Free Electron Laser Conference, August 20–25, 2017, Santa Fe, NM, USA. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 2018: MOP055.
- [13] Abela R, Aghababayan A, Altarelli M, et al. XFEL: the European X-ray free-electron laser technical design report: Preprint DESY 2006-097[R]. Berlin: Helmholtz Association, 2006.
- [14] 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.
- [15] Lee H S, Yang H R, Min C K, et al. XFEL performance achieved at PAL-XFEL [EB/OL]. [2020-02-09]. [https://accelconf. web. cern. ch/ ipac2019/papers/tuyplm1. pdf](https://accelconf.web.cern.ch/ipac2019/papers/tuyplm1.pdf).
- [16] Prat E, Decking W, Limberg T. Dispersion effects on performance of the free-electron laser FLASH[J]. Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams, 2010, 13(4): 040701.