



·先进同步辐射物理及技术·

束内散射效应下 HALF 储存环物理参数的优化设计

罗楚文, 刘刚文, 李伟伟, 胡楠, 李为民, 白正贺, 王琳

(中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 合肥 260029)

摘要: 合肥先进光源 (HALF) 是我国规划建设的软 X 射线与 VUV 衍射极限储存环光源 (DLSR)。如何有效地实现衍射极限束流发射度, 是 DLSR 物理设计中的核心问题之一。基于束流发射度演化方程, 针对 HALF 项目的储存环物理设计方案, 计算了束内散射 (IBS) 效应带来的发射度增长, 研究了 DLSR 中关键参数选择对 IBS 造成的发射度增长的影响。研究表明, 在中低能 DLSR 物理设计中需要综合考虑储存环的周长、同步辐射阻尼时间等关键参数, 以更好地抑制束流发射度的增长。在此研究基础上, 通过综合考虑用户需求与储存环物理要求, 提出了 HALF 当前工程项目的储存环物理设计方案。进一步综合应用束团拉伸、全耦合等措施后, 更高效地抑制了 HALF 储存环内 IBS 造成的束流发射度增长。

关键词: 衍射极限储存环; 合肥先进光源; 亮度; 束内散射; 发射度增长

中图分类号: TL503

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220140

Parameters optimization considering intra-beam scattering in HALF lattice design

Luo Chuwen, Liu Gangwen, Li Weiwei, Hu Nan, Li Weimin, Bai Zhenghe, Wang Lin

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Hefei Advanced Light Facility (HALF) is aimed to be a world-class diffraction limited storage ring (DLSR) in the soft X-ray & VUV regime. The characteristics and law of beam emittance evolution due to intra-beam scattering (IBS) in HALF storage ring was studied based on equations of equilibrium emittance. The results show that, it is necessary to comprehensively optimize the key parameters to obtain excellent beam performance in physical design of middle to low-energy DLSR. Applying the key parameters optimization strategy and taking methods to release the emittance growth due to IBS into consideration, the new version of HALF lattice can meet the needs of soft X-ray diffraction limit.

Key words: diffraction-limited storage ring, Hefei Advanced Light Facility, brilliance, intra-beam scattering, emittance growth

电子束流发射度是同步辐射光源最核心的技术指标, 提高亮度和增强空间相干性最直接有效的方法是降低束流发射度^[1]。先进同步辐射光源中以应用高性能插入元件辐射为主, 当光源电子束流发射度达到或接近光束的衍射极限 ($\lambda/4\pi$), 插入元件辐射具有高度的空间相干性及超高的亮度^[2]。除此之外, 优异的稳定性与可靠性、出色的多用户支撑能力, 使得衍射极限储存环光源成为与自由电子激光装置性能互补的第四代光源的主要方案^[3]。目前各国都逐步开始了第四代同步辐射光源的发展^[4-5], 如 ESRF^[6], APS^[7] 等光源的升级, 及 Sirius^[8], HEPS^[9] 等新光源项目的建设。中国科学技术大学提出合肥先进光源 (Hefei Advanced Light Facility, HALF) 的建设方案, 目标是建设国际先进水平的软 X 射线与 VUV 衍射极限储存环光源^[10]。

通常光源为了追求更高的平均亮度和光子通量, 还需要较高的工作流强。强流下电子束流发射度不仅取决于储存环束流自然发射度, 各种强流效应^[11-12] 同时也会导致发射度增长。随着束流发射度降低至衍射极限, 强流下

* 收稿日期: 2022-05-05; 修订日期: 2022-06-19

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016Y-FA0402000); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (12005226); 国家自然科学基金面上项目 (11475167)

联系方式: 罗楚文, lcw038@mail.ustc.edu.cn。

通信作者: 王琳, wanglin@ustc.edu.cn。

束内散射 (Intra-Beam Scattering, IBS) 效应成为导致发射度增长的主要因素。特别是中低能储存环, IBS 效应造成的束流发射度增长尤其严重, 导致光源辐射亮度和空间相干性能的下降, 例如 SOLEIL 升级项目中, 单束团流强 20 mA 下发射度由 76.3 pm-rad 增长到 307 pm-rad^[13]。因此, 在 HALF 这种能量较低的衍射极限储存环物理设计中, 超低发射度下 IBS 效应的影响成为光源物理设计中的重要研究课题之一。

本文将基于发射度演化方程和束内散射效应的 B-M 模型, 对 HALF 内束内散射效应进行数值计算研究, 探索束内散射效应与储存环的基本物理设计参数间的关系, 进一步作为储存环物理设计参数优化的参考。

1 发射度演化方程和束内散射效应

储存环束流自然发射度取决于同步辐射阻尼与量子激发效应的平衡。强流下, 储存环中电子束流发射度还取决于各种发射度增长效应, 其变化规律可由发射度演化方程给出^[14]。

$$\frac{d\varepsilon_x}{dt} \equiv -\frac{2}{\tau_x}(\varepsilon_x - \varepsilon_{x0}) + \frac{2\varepsilon_x}{T_x} \quad (1)$$

$$\frac{d\varepsilon_y}{dt} \equiv -\frac{2}{\tau_y}(\varepsilon_y - \varepsilon_{y0}) + \frac{2\varepsilon_y}{T_y} \quad (2)$$

$$\frac{d\sigma_p^2}{dt} \equiv -\frac{2}{\tau_p}(\sigma_p^2 - \sigma_{p0}^2) + \frac{2\sigma_p^2}{T_p} \quad (3)$$

式中: $\varepsilon_{x0,y0}$ 是束流水平和垂直方向自然发射度; σ_{p0} 是束流自然能散; $\varepsilon_{x,y}$ 是束流水平和垂直方向发射度; σ_p 是束流能散; $\tau_{x,y,p}$ 是水平、垂直和纵向同步辐射阻尼时间; $T_{x,y,p}$ 是水平、垂直和纵向发射度增长率。

储存环中垂直方向束流发射度取决横向耦合和垂直方向发射度增长机制^[15]。横向发射度耦合系数为 κ , 应用 Betatron 耦合理论, 水平与垂直方向发射度关系满足^[16]

$$\varepsilon_y = \kappa\varepsilon_x \quad (4)$$

$$j_x\varepsilon_x + j_y\varepsilon_y = j_x\varepsilon \quad (5)$$

式中: ε 是束流总发射度; $j_{x,y}$ 为阻尼分配数。对电子储存环, 满足 $j_y = 1$, 则有

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{j_x}{j_x + \kappa} \varepsilon \\ \varepsilon_y = \frac{\kappa j_x}{j_x + \kappa} \varepsilon \end{cases} \quad (6)$$

在零流强下 (即无 IBS), $\varepsilon_{x0} = j_x\varepsilon_0/(j_x + \kappa)$, $\varepsilon_{y0} = \kappa j_x\varepsilon_0/(j_x + \kappa)$, ε_0 是自然发射度。

只考虑横向耦合条件下, 束流垂直方向的发射度不是独立变量, 它取决于横向耦合度及水平方向的发射度。假设 Betatron 耦合对横向运动本征函数影响较小, 横向发射度演化方程式 (1) 和式 (2) 可简化^[15] 为

$$\frac{d\varepsilon_x}{dt} = -\frac{2}{\tau_x}(\varepsilon_x - \varepsilon_{x0}) - \frac{2}{\tau_y}(\varepsilon_y - \varepsilon_{y0}) + \frac{2}{T_x}\varepsilon_x \quad (7)$$

从式 (3) 和式 (7) 求解可以得到 Betatron 耦合条件下储存环平衡发射度及能散, 即

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{\varepsilon_0}{1 - \frac{\tau_x}{\left(1 + \frac{\kappa\tau_x}{\tau_y}\right)T_x}} \\ \sigma_p^2 = \frac{\sigma_{p0}^2}{1 - \tau_p/T_p} \end{cases} \quad (8)$$

求解平衡发射度方程, 可以得到考虑发射度增长效应后的储存环平衡束流发射度^[15]。

电子束团内, 电子相互作用发生库伦散射时, 当散射角比较小, 小角度散射的随机叠加会带来束团内粒子动量重新分布, 使得束流六维相空间扩张, 束流发射度变大, 这一类的小角度库伦散射被称为束内散射^[17]。本文中 IBS 效应的发射度增长率计算采用的 Bjorken-Mtingwa (B-M) 模型^[18], 并引入 K. Bane 高相对论下的近似^[19]

$$\frac{1}{T_p} \approx \frac{r_0 c N (\log)}{16\gamma^3 \varepsilon_x^{3/4} \varepsilon_y^{3/4} \sigma_s \sigma_p^3} \left\langle \sigma_{HG} \left(\frac{a}{b} \right) (\beta_x \beta_y)^{-1/4} \right\rangle \quad (9)$$

$$\frac{1}{T_{x,y}} \approx \frac{\sigma_p^2 \langle \mathcal{H}_{x,y} \rangle}{\varepsilon_{x,y} T_p} \quad (10)$$

式中： r_0 是电子经典半径； c 是光速； N 是束团中粒子数目； γ 是相对论性能量因子； σ_s 是束团长度； $\beta_{x,y}$ 是水平和垂直方向 Beta 函数； $\langle \dots \rangle$ 表示对关心区域求平均； $(\log) \approx \ln \left(\frac{\sqrt{\beta_y} \varepsilon_y \gamma^2 \varepsilon_x}{r_0 \beta_x} \right)$ 是库伦因子； $\mathcal{H}_{x,y} = \frac{\left[\eta_{x,y}^2 + \left(\beta_x \eta'_{x,y} - \frac{1}{2} \beta'_{x,y} \eta_{x,y} \right)^2 \right]}{\beta_{x,y}}$ 是色散不变量； $(\eta_{x,y}, \eta'_{x,y}, \beta'_{x,y})$ 分别是储存环水平和垂直方向色散函数及其微分、Beta 函数微分； σ_H 满足 $\frac{1}{\sigma_H^2} = \frac{1}{\sigma_p^2} + \frac{\mathcal{H}_x}{\varepsilon_x} + \frac{\mathcal{H}_y}{\varepsilon_y}$ ； $a = \frac{\sigma_H}{\gamma} \sqrt{\frac{\beta_x}{\varepsilon_x}}$ ； $b = \frac{\sigma_H}{\gamma} \sqrt{\frac{\beta_y}{\varepsilon_y}}$ ； $g(x) \approx x^{(0.021-0.044 \ln x)}$ ($0.01 < x < 1$)。

当发射度增长率为常数时，平衡发射度可以解析求解。但是对于 IBS 效应，其增长率是束流发射度、能散、束团长度的函数，因此发射度平衡方程无法获得解析解，为此我们采用数值方法计算束流发射度演化过程，得到束流平衡发射度。

对平面型储存环而言，垂直方向因安装准直公差产生垂直偏转磁场导致色散不变量不等于零，会产生一个垂直方向的束流发射度。在设计阶段，我们无法准确预知储存环垂直方向色散偏差的贡献，且储存环运行中经过调试和误差校正后，基本可以控制储存环残余垂直色散的影响，因此垂直方向只考虑横向耦合作用带来的发射度。根据横向耦合条件下的发射度演化方程(3)，(7)及束内散射效应增长率公式(9)，(10)，我们编写了计算程序，研究随 lattice 参数及束流参数变化，IBS 效应影响下的平衡发射度。

2 HALF 预研项目设计方案中 IBS 效应计算与储存环关键参数的影响

在中国科学院与安徽省政府支持下，2017 年启动了合肥先进光源 (HALF) 预研项目。项目中对 HALF 物理设计进行了细致的研究和优化，基于项目组提出的 IDB-MBA lattice (MBA with interleaved dispersion bumps, 具有交错式高色散区的 MBA 单元) 设计理念，完成了 HALF 储存环物理设计方案^[20]。HALF 储存环束流能量为 2.4 GeV，周长为 672 m，由 30 个全同的 IDB-7BA 组成，束流自然发射度为 24.7 pm·rad，为缓解 IBS 效应，储存环可以调整到差共振工作模式下，获得 100% 横向耦合。储存环详细参数见表 1，图 1 为储存环标准单元的 twiss 参数图。该 lattice 具有较好的标能 (on-momentum) 与偏能 (off-momentum) 非线性动力学表现。

为了追求高辐射光子通量，储存环通常工作在高流强下 (300~500 mA)，此时 IBS 效应的影响必须评估。350 mA 工作流强，束团 bucket 80% 均匀填充，束团自然长度 3.6mm，计算 10% 耦合与 100% 耦合两种情况下，平衡发射度和相对发射度增长如表 2 所示。结果表明，HALF 中存在严重的束内散射效应发射度增长。10% 耦合下，相对发射度增长率为 299%；即使 100% 耦合下，相对发射度增长率也达到了 215%。这意味着，虽然在储存环 lattice 设计中我们做出了巨大的努力获得了超低发射度，但是强流效应使得降低发射度的努力

表 1 7BA 储存环主要设计参数

Table 1 Main parameters of the 7BA storage ring

parameter	value
beam energy	2.4 GeV
circumference	672 m
natural emittance	24.7 pm·rad
tune (H, V)	71.30, 23.30
natural chromaticity (H, V)	-97, -110
momentum compaction factor	5×10^{-5}
natural energy spread	7.97×10^{-4}
natural damping time (H, V, L)	(37.7, 58.8, 40.8) ms
energy loss per turn	182.9 keV
RF frequency	500 MHz

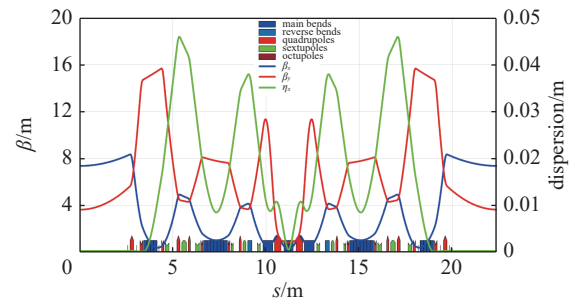


Fig. 1 Magnet layout and linear optical functions of one period 7BA lattice

图 1 7BA 储存环一个周期的磁聚焦结构及线性光学参数

表 2 HALF 储存环 IBS 效应影响下平衡发射度

Table 2 Equilibrium emittance of the storage ring under IBS effects

$\kappa/\%$	$\varepsilon_0/(\text{pm}\cdot\text{rad})$	$\varepsilon/(\text{pm}\cdot\text{rad})$	$\sigma_{p0}/10^{-4}$	$\sigma_p/10^{-4}$	$\varepsilon_{x0}/(\text{pm}\cdot\text{rad})$	$\varepsilon_x/(\text{pm}\cdot\text{rad})$	$(\varepsilon_x - \varepsilon_{x0})/\varepsilon_{x0}$
10	24.7	98.4	7.97	11.5	23.2	92.5	2.99
100	24.7	77.7	7.97	10.5	15.0	47.3	2.15

成果大打了折扣。

虽然采取了各种措施, HALF 中 IBS 发射度增长依旧很强烈。回顾发射度平衡方程(8)发现, 自然发射度、储存环阻尼时间和 IBS 增长率对最终平衡发射度的获得有决定性的影响。研究中首先采用单变量方法分析各个参数的影响, 即只改变发射度增长方程中某个参数, 计算平衡束流发射度的变化。以下计算发射度随自然发射度、阻尼时间、周长的变化, 取 350 mA 工作流强, 束团 bucket 80% 均匀填充, 束团自然长度 3.6 mm, 耦合系数 10%。

发射度及发射度增长率随自然发射度的变化如图 2 所示, 可以看出: (1) 随着自然发射度降低, 发射度增长率急剧增加, 例如, 自然发射度为 20 pm·rad 时的发射度增长率为 2673 s⁻¹, 是 80 pm·rad 时发射度增长率 149.5 s⁻¹ 的约 18 倍; (2) 与之相应, 自然发射度越小, 相对的发射度增长量越大, 例如 PEP-X^[15]。随着自然发射度增大, 平衡发射度与自然发射度越来越接近, 即束内散射效应的影响越来越轻。由此可知, 虽然降低储存环自然发射度是有利于降低平衡发射度的, 但是其收益并非线性关系, 这主要是由于超低自然发射度下更强烈的束内散射效应。考虑到降低自然发射度, 储存环周长需要更长以布置更多的弯转磁铁, 需要更强的横向聚焦, 这会导致光源建设成本的急剧增高以及储存环非线性表现优化的困难, 因此根据光源总体目标合理地确定自然发射度设计指标, 才是优化的选择。

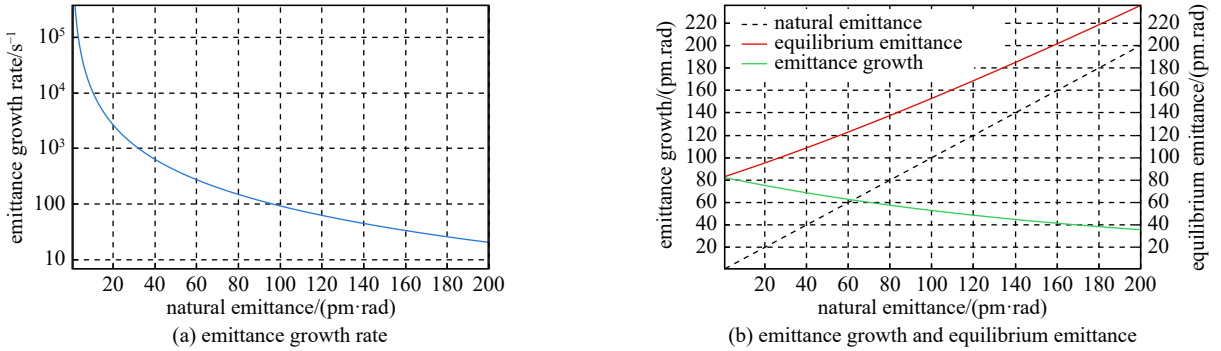


Fig. 2 Change of emittance and emittance growth rate with natural emittance

图 2 发射度及发射度增长率随自然发射度的变化

平衡方程中另外一个重要参数是辐射阻尼时间, 束流平衡发射度随同步辐射阻尼时间的变化计算结果如图 3 所示。虽然阻尼时间不影响 IBS 效应的瞬态增长率, 但是最终的束流平衡发射度变化范围很大, 比如阻尼时间由 60 ms 减小到 20 ms 时, 平衡发射度由 99 pm·rad 变到 69 pm·rad, 可见, 缩短辐射阻尼时间对于减轻 IBS 效应的影响是非常关键的。

但是在真实储存环物理设计中, 初始自然发射度与辐射阻尼时间不是彼此孤立的。在电子储存环中, 束流自然发射度和辐射阻尼时间分别为^[16]

$$\begin{cases} \varepsilon_{x0} = \mathcal{F}_{\text{lattice}} C_q \gamma^2 \theta^3 \\ \tau_i = \frac{2T_0}{C_r E^3 I_2} \frac{1}{j_i} \quad (i = x, y, s) \end{cases} \quad (11)$$

式中: C_q 是量子常数; γ 是洛伦兹因子; θ 是单个弯转磁铁弯转角; $\mathcal{F}_{\text{lattice}}$ 取决于 lattice 设计; $C_r = 8.85 \times 10^{-5} \text{ m}/(\text{GeV})^3$; j_i 为阻尼分配数; I_2 是同步辐射积分; T_0, E 分别是储存环回旋周期和运行能量。储存环自然发射度与周长三次方有反比关系, 辐射阻尼时间与周长则是正比关系, 因而, 周长越大, 越有利于降低束流自然发射度, 但是辐射阻尼时间也越长, 这些都会导致相对更严重的 IBS 发射度增长。

根据束流自然发射度和辐射阻尼时间与周长的相对关系, 应用发射度平衡方程, 在不同周长下束流的 IBS 发射度增长效应影响的计算结果见图 4。由图可见, 当周长很短时, 虽然 IBS 效应的影响较弱, 但是由于储存环自然发射度比较大, 强流下平衡发射度较大, 很难实现衍射极限发射度; 当周长很长时, 虽然自然发射度迅速降低, 但是 IBS 效应的影响更强烈, 平衡发射度的减小量也低于预期。当周长在 450~1500 m 区间时, 考虑 IBS 效应后束流平衡发射度的大小相当, 增加储存环长度对于改善光源的性能表现贡献不大。因此储存环物理设计中应当根据规模、需求等限制条件合理选择储存环周长规模。值得指出的是, 此数值计算中基于合肥先进光源预研工程版本 lattice 设计参数, 对于不同的电子束能量, lattice 设计选择、周长的优化区间会有所差异。

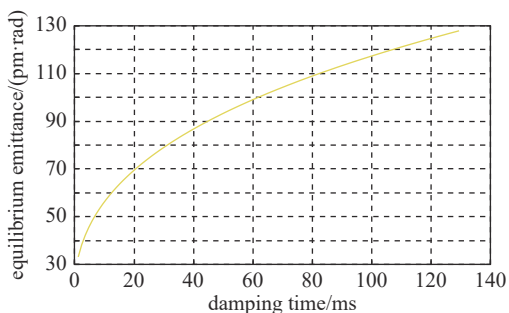


Fig. 3 Equilibrium emittance vs SR damping time
图 3 平衡发射度随同步辐射阻尼时间的变化

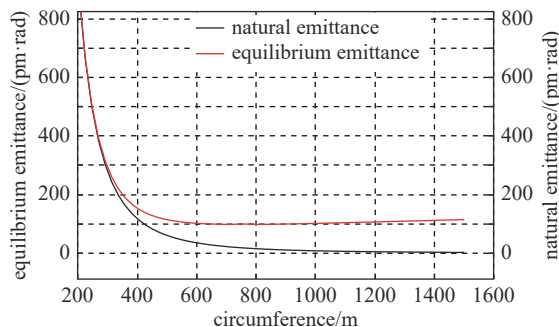


Fig. 4 Parameter optimization of storage ring circumference
图 4 储存环周长参数的优化

通过 HALF 预研项目设计方案中 IBS 的研究, HALF 后续版本 lattice 的设计可以适度增大自然发射度以缓解 IBS 的影响, 选择储存环周长小的设计获得更小阻尼时间以加大对 IBS 的抑制作用, 从而得到符合需求的平衡发射度。

3 HALF 工程项目设计方案的 IBS 发射度增长计算及抑制措施

在上面研究基础上, 通过综合考虑用户需求与储存环物理要求, 我们重新设计了 HALF 储存环 lattice 结构^[21]。新设计方案采用带纵向梯度弯转磁铁和反向偏转磁铁的改进型混合 6BA, 其标准单元的 twiss 参数如图 5 所示。新设计方案中, 缩短了储存环周长, 更好地控制光源的规模; 通过增加 6BA 单元的中直线节, 令全环的直线节数目增加到了 40 个, 提高了光源的性价比; 同时优化二极磁场的分布和四极磁铁横向聚焦参数, 降低束流自然发射度和进一步增强同步辐射阻尼。储存环的主要参数见表 3。

由于周长缩短, 以及采用 6BA 聚焦结构后弯铁数目减少, 储存环的自然发射度增加到 85 pm·rad。同样储存环设计有全耦合的差共振工作模式, 可以缓解 IBS 效应。350 mA 工作流强, 束团 bucket 80% 均匀填充, 束团自然长度 2 mm, 计算 10% 耦合与 100% 耦合两种情况下, 平衡发射度和相对发射度增长见表 4。从表 4 可见, 束内散射效应影响下, 相对发射度增长率, 10% 耦合为 117.8%, 100% 耦合为 80.3%。对比表 2, 可以看出通过自然发射度和辐射阻尼时间的优化, HALF 束内散射效应相对发射度增长率显著下降, 发射度增长明显缓和。从用户角度, HALF 目标是软 X 射线和 VUV 衍射极限光源, 发射度 100 pm·rad 以下就能满足要求, 表 4 中 100% 耦合下平衡发射度符合用户要求。

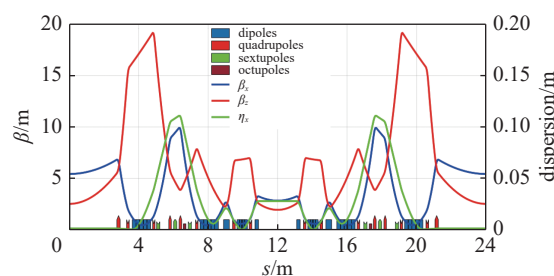


Fig. 5 Magnet layout and linear optical functions of one period 6BA lattice

图 5 6BA 储存环一个周期的磁聚焦结构及线性光学参数

表 3 6BA 储存环主要设计参数

Table 3 Main parameters of the 6BA storage ring

parameter	value
beam energy	2.2 GeV
circumference	480 m
natural emittance	85.1 pm·rad
tune (H, V)	48.175, 17.175
natural chromaticity (H, V)	-75, -59
momentum compaction factor	6.3×10^{-5}
natural energy spread	6.6×10^{-4}
damping time (H, V, L)	(22, 32.4, 21.2) ms
energy loss per turn	217.5 keV
RF frequency	500 MHz

表 4 HALF 储存环在 IBS 效应影响下平衡发射度

Table 4 Equilibrium emittance of the HALF storage ring under IBS effects

$\kappa/\%$	$\epsilon_0/(\text{pm}\cdot\text{rad})$	$\epsilon/(\text{pm}\cdot\text{rad})$	$\sigma_{p0}/10^{-4}$	$\sigma_p/10^{-4}$	$\epsilon_{x0}/(\text{pm}\cdot\text{rad})$	$\epsilon_x/(\text{pm}\cdot\text{rad})$	$(\epsilon_x - \epsilon_{x0})/\epsilon_{x0}$
10	85.1	185.4	6.6	9.19	79.6	173.4	1.178
100	85.1	153.4	6.6	8.35	50.2	90.5	0.803

虽然优化了储存环的 lattice 参数, 但是 IBS 效应的影响依旧是不可忽略的, 这是中低能衍射极限储存环的主要特点。为此, 储存环物理设计中必须要考虑相应的抑制措施进一步减弱其影响。由发射度演化方程(3), (7)及束内散射效应增长率公式(9), (10)可知, 在固定束流能量和初始发射度的条件下, 可以通过如下措施减小 IBS 增长率: (1)降低单束团电荷量, 当储存环总运行流强固定时, 希望储存环填充尽量多的束团; (2)增大横向耦合, 前面

计算结果也表明 100% 耦合时 IBS 导致的平衡发射度增长为 80.3%，显著小于 10% 耦合时的平衡发射度增长 117.8%。；(3) 拉伸束团长度，通过谐波腔^[5]等拉伸束团长度，可以大幅度减小 IBS 增长率；(4) 通过其它措施缩短辐射阻尼时间，例如在直线节上应用阻尼扭摆磁铁 (damping wiggler)。

综合考虑上述方法，合肥先进光源采取了如下措施缓解 IBS 效应：

(1) 储存环高频系统频率选择为 500 MHz，降低单束团内电子数目。如果应用瑞典 MAX IV 光源的 100 MHz 高频系统，虽然束团长度有所增加，利于减轻 IBS 效应，但是在同样总运行流强下的单束团电荷量会增加 5 倍。10% 横向耦合的 IBS 发射度增长，采用 500 MHz 高频系统下增长率为 117.8%，100 MHz 高频系统下增长率为 166%；

(2) 储存环多工作模式，在扁平束 (flat beam) 模式下，横向耦合度为 10%，IBS 增长率为 117.8%；当工作点调整到差共振模式下 (表 4)，横向耦合度为 100%，这有利于减小 IBS 增长率，降低束流平衡发射度，从而提高在软 X 射线波段的插入元件辐射的亮度和空间相干性；

(3) 应用三次谐波腔拉伸束团长度^[22]，其优点是在不改变束流能散的条件下，能够有效拉伸束团长度。物理设计中谐波腔腔压为 0.9 MeV，工作在过拉伸模式，预期把束团长度拉伸 5 倍以上；

(4) 应用阻尼扭摆磁铁^[14-15, 23]，一方面可以缩短辐射阻尼时间，另一方面阻尼扭摆磁铁还可以降低储存环自然发射度。优化选择扭摆磁铁长度 4m，周期长度 0.1m，峰值场磁场强度 1.8T，束流自然发射度降低到 84.2 pm·rad，辐射阻尼时间缩短到 (21.8, 29.8, 18.2) ms。

在 500 MHz 高频下，假定均匀填充 80% 束团 (为了克服离子俘获效应)，设定横向耦合度为 10% 和 100%，束团长度为自然长度的 5 倍，自然发射度为 84.2 pm·rad，辐射阻尼时间为 (21.8, 29.8, 18.2) ms，计算得到 350 mA 流强下束流水平方向平衡发射度见表 5。100% 耦合下，束流发射度、能散与束流流强的关系见图 6。可以看出，束流水平方向发射度：350 mA 工作流强时，为 63.8 pm·rad；100 mA 验收流强时，为 54.3 pm·rad；500 mA 最大工作流强时，为 68.1 pm·rad。采取进一步抑制束内散射效应的措施后，HALF 束流发射度能降低到 68 pm·rad 以下。

表 5 HALF 储存环在 IBS 效应影响下平衡发射度
Table 5 Equilibrium emittance of the HALF storage ring under IBS effects

$\kappa/\%$	$\varepsilon_0/(\text{pm}\cdot\text{rad})$	$\varepsilon/(\text{pm}\cdot\text{rad})$	$\sigma_{p0}/10^{-4}$	$\sigma_p/10^{-4}$	$\varepsilon_{x0}/(\text{pm}\cdot\text{rad})$	$\varepsilon_x/(\text{pm}\cdot\text{rad})$	$(\varepsilon_x - \varepsilon_{x0})/\varepsilon_{x0}$
10	84.2	129	6.94	7.98	78.5	120.3	0.53
100	84.2	110.5	6.94	7.56	48.6	63.8	0.31

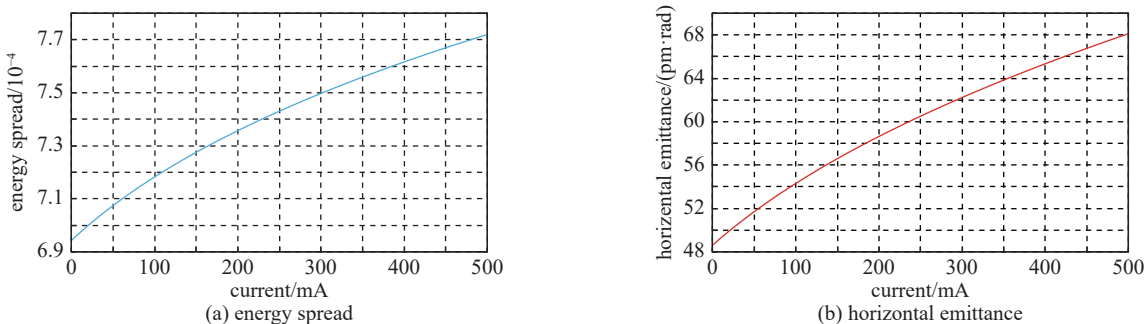


Fig. 6 Change of energy spread and horizontal emittance with beam current

图 6 能散及水平方向平衡发射度随束流流强的变化

4 结 论

本文通过简化的横向耦合度主导的发射度演化方程，通过数值计算研究分析了合肥先进光源储存环中束内散射效应，表明在中低能衍射极限储存环中 IBS 效应表现非常严重，会导致束流品质的恶化，影响光源的性能表现。

IBS 效应的影响与储存环初始自然发射度、储存环周长，密切相关。减小储存环周长、适当放宽初始发射度的设计目标，有效地减轻了 IBS 效应的影响。比较合肥先进光源两版储存环物理设计方案中 IBS 效应影响，现版设计方案中 IBS 效应造成的发射度增长显著减轻，综合采用增加横向耦合度、拉伸束团长度和增强阻尼扭摆磁铁等措施后，可以实现软 X 射线衍射极限的设计目标。同时新方案也更利于控制光源的规模和投资，提高光源的性价比。

参考文献：

- [1] Wang Dong. Overview of light source developments in Asia/Oceania[C]//Proceedings of IPAC 2019. Melbourne, 2019.
- [2] Einfeld D. World-wide upgrades overview new DLSR projects[C]//Proceedings of Workshop on Coherence Light Source. Hefei, 2019.
- [3] Bei M, Borland M, Cai Y, et al. The potential of an ultimate storage ring for future light sources[J]. *NuclInstrum Methods Phys Res A*, 2010, 622(3): 518-535.
- [4] Hettel R. DLSR design and plans: an international overview[J]. *J Synchrotron Radiat*, 2014, 21(5): 843-855.
- [5] Wang Lin. Diffraction limited storage ring: technical challenges and opportunities[R]. Sanpu, Beijing, 2019.
- [6] Dimper R, Reichert H, Raimondi P, et al. ESRF upgrade programme phase II (2015 - 2022) technical design study[R]. France: ESRF, 2014.
- [7] FomekT E. Advanced photon source upgrade project final design report[R]. Washington: USDOE Office of Science, 2019.
- [8] Liu Lin, Milas N, Mukai A H C, et al. The Sirius project[J]. *JSynchrotron Radiat*, 2014, 21(5): 904-911.
- [9] Jiao Yi, Xu Gang, Cui Xiaohao, et al. The HEPS project[J]. *JSynchrotron Radiat*, 2018, 25(6): 1611-1618.
- [10] Wang Lin, Bai Zhenghe, Nan Hu, et al. Hefei Advanced Light Source: a future soft X-ray diffraction-limited storage ring at NSRL[C]//Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference. Vancouver: IPAC, 2018.
- [11] Borland M, Decker G, Emery L, et al. Lattice design challenges for fourth-generation storage-ring light sources[J]. *J Synchrotron Radiat*, 2014, 21(5): 912-936.
- [12] 焦毅, 徐刚, 陈森玉, 等. 衍射极限储存环物理设计研究进展[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27: 045108. (Jiao Yi, Xu Gang, Chen Senyu, et al. Advances in physical design of diffraction-limited storage ring[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 045108)
- [13] Vivoli A, Bence A, Brunelle P, et al. Intra-beam scattering effect in the SOLEIL storage ring upgrade[C]//Proceedings of the 10th International Particle Accelerator Conference. Melbourne: IPAC, 2019.
- [14] Fan Wei, Wang Lin, et al. Emittance growth estimation due to intrabeam scattering in Hefei Advanced Light Source (HALS) Storage Ring[C]//Proceedings of IPAC10. 2010.
- [15] Cai Yunhai, Bane K, Hettel R, et al. Ultimate storage ring based on fourth-order geometric achromats[J]. *Phys Rev ST Accel Beams*, 2012, 15: 054002.
- [16] 刘祖平. 同步辐射光源物理引论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009: 7. (Liu Zuping. Introduction of synchrotron radiation light source physics[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009: 7)
- [17] Piwinski A. Intra-beam-scattering[C]//Proceedings of the 9th International Conference on High Energy Accelerators. Stanford: SLAC, 1974: 405-409.
- [18] Bjorken J D, Mtingwa S K. Intrabeam scattering[J]. *Part Accel*, 1983, 13: 115-143.
- [19] Bane K L F. A simplified model of intrabeam scattering[C]//Proceedings of EPAC 2002. Paris: EPAC, 2002: 1443-1445.
- [20] Bai Zhenghe, Li Wei, Liu Gangwen, et al. Study of seven-bend achromat lattices with interleaved dispersion bumps for HALS[C]//Proceedings of the 10th International Particle Accelerator Conference. Melbourne: IPAC, 2019.
- [21] 合肥先进光源项目建议书[R]. 合肥: 中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 2020. (Hefei Advanced Light Source project proposal[R]. Hefei: University of Science and Technology of China, National Synchrotron Radiation Laboratory, 2020)
- [22] Bassi G, Tagger J. Longitudinal beam dynamics with a higher-harmonic cavity for bunch lengthening[J]. *Int J Mod Phys A*, 2019, 34: 1942040.
- [23] Murphy J. Synchrotron light source data book: version 1.0[R]. Upton: Brookhaven National Laboratory, 1989: 28-37.