

# 合肥先进光源储存环磁聚焦结构选择研究

许建豪, 杨鹏辉\*, 任志梁, 王琳, 冯光耀, 白正贺\*

(中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230026)

**摘要:**合肥先进光源(Hefei Advanced Light Facility, HALF)是我国最近立项建设的一台软X射线与真空紫外波段的衍射极限储存环光源,其束流能量为2.2 GeV,发射度目标小于 $100 \text{ pm}\cdot\text{rad}$ 。磁聚焦结构(lattice)设计是储存环物理设计的核心,lattice结构对储存环的性能表现与采用的相关技术至关重要。本文首先设计了一个分布式色品校正的6BA(six-bend achromat)lattice,周长为441.6 m,具有18个周期,实现了 $74 \text{ pm}\cdot\text{rad}$ 的超低自然发射度,水平动力学孔径达6 mm左右;然后简要介绍了为HALF设计的两个混合型MBA lattice(hybrid MBA, HMBA),包括20个周期的H7BA lattice与HALF当前采用的变版H6BA lattice;最后对比研究了HALF采用这3个lattice设计的结果。研究表明,HALF当前采用的变版H6BA lattice的综合性能最好,是相对更好的结构方案。

**关键词:**合肥先进光源;衍射极限储存环;磁聚焦结构;多弯铁消色散

中图分类号:TL54.4

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2022)09-1808-07

doi:10.7538/yzk.2022.youxian.0368

## Study on Selection of Storage Ring Lattice for Hefei Advanced Light Facility

XU Jianhao, YANG Penghui\*, REN Zhiliang, WANG Lin,  
FENG Guangyao, BAI Zhenghe\*

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

**Abstract:** The Hefei Advanced Light Facility (HALF), recently approved by the Chinese government, is a soft X-ray and VUV light source based on diffraction-limited storage ring (DLSR), which has beam energy of 2.2 GeV and emittance goal of less than  $100 \text{ pm}\cdot\text{rad}$ . The lattice design is the core of the storage ring physics design, and the selection of lattice is crucial to the storage ring performance and the related technology that will be used. The emittances of DLSRs are as low as hundreds or even tens of  $\text{pm}\cdot\text{rad}$  and the insertion device radiation brightness is about 1-2 orders of magnitude higher than that of the third-generation light sources. Generally, increasing the number of bends is the most effective method to reduce the emittance and thus multi-bend achromat (MBA) lattices are used for designing DLSRs. In this paper, firstly, a conventional

6BA (six-bend achromat) lattice with distributed chromaticity correction was designed for the HALF storage ring, which has a circumference of 441.6 m with 18 identical cells. In this lattice design, the horizontal and vertical phase advances of each bend unit cell are about  $(0.4, 0.1) \times 2\pi$ , so that main nonlinear effects can be effectively cancelled over five identical unit cells based on higher-order achromat. The lattice has an ultra-low emittance of  $74 \text{ pm} \cdot \text{rad}$  and a horizontal dynamic aperture (DA) of about 6 mm. Then two hybrid MBA lattices (HMBA) designed for HALF with 20 cells were briefly introduced, including an ESRF-EBS type H7BA lattice and a modified H6BA lattice, which have horizontal DAs larger than 10 mm. The latter is the present baseline lattice of HALF, which has a long straight section and a short one in each lattice cell. And the two central bend cells of the baseline lattice use longitudinal gradient bends and reverse bends to reduce the emittance and damping times. The H7BA lattice has a circumference of 441.6 m and a natural emittance of  $84 \text{ pm} \cdot \text{rad}$ , and the circumference and natural emittance of the H6BA lattice are 480 m and  $86 \text{ pm} \cdot \text{rad}$ . Compared to the conventional 6BA lattice designed in this paper, two HMBA lattices have larger DAs which can allow off-axis injection. The conventional 6BA lattice and H6BA lattice have shorter damping times than that of the H7BA lattice, which is beneficial for suppressing emittance increase due to intra-beam scattering. Besides, the H6BA lattice has much more straight sections than the other two lattices. So the present modified H6BA lattice is a better option for the HALF storage ring.

**Key words:** Hefei Advanced Light Facility; diffraction-limited storage ring; lattice; multi-bend achromat

合肥先进光源(Hefei Advanced Light Facility, HALF)是国家同步辐射实验室提出的具有世界先进水平的软 X 射线与真空紫外波段的衍射极限储存环光源<sup>[1-4]</sup>。衍射极限储存环光源是目前世界上正开始大力发展的第 4 代同步辐射光源<sup>[5]</sup>,其电子束发射度低至  $100 \text{ pm} \cdot \text{rad}$ 、甚至  $10 \text{ pm} \cdot \text{rad}$  级水平。目前 HALF 光源项目已得到国家批准,将在“十四五”期间建设。HALF 储存环的主要设计指标:电子束能量为 2.2 GeV,束流自然发射度小于  $100 \text{ pm} \cdot \text{rad}$ ,有较多数目的插入元件直线节以增强支撑更多用户的能力。

磁聚焦结构(lattice)设计是储存环物理设计的核心内容,其决定了储存环光源的主要参数性能、非线性动力学表现以及采用的相关加速器技术。因此,lattice 具体结构对于储存环光源至关重要。为在较合理周长范围内降低电子束流发射度,目前世界上的衍射极限储存环光源都采用多弯铁消色散(multi-bend achromat, MBA)lattice<sup>[6]</sup>。本文将对比研究 HALF

光源储存环采用不同类型 MBA lattice 的设计结果,为其储存环 lattice 的选择以及优化潜力提供参考。

## 1 多弯铁消色散磁聚焦结构(MBA lattice)

提高同步辐射光源亮度和横向相干性的最有效途径是降低电子束发射度。储存环电子束的自然发射度  $\epsilon_{\text{nat}}$  与束流能量  $E$ 、弯铁数目  $N$  以及 lattice 具体结构  $F$  因子相关,可表示为:

$$\epsilon_{\text{nat}} \propto F(\text{lattice})E^2/N^3 \quad (1)$$

由该比例公式可知,对于给定能量的储存环,降低束流发射度的最有效方法是增加弯铁数。因此,与第 3 代光源采用双弯铁消色散(double-bend achromat, DBA)和三弯铁消色散(triple-bend achromat, TBA)lattice 不同,目前的衍射极限储存环光源均采用 MBA lattice。MBA lattice 的紧凑型结构需采用更强聚焦力的四极磁铁,从而需更强的六极磁铁来校正色品,导致更严重的非线性动力学效应。这种非线性效应可严重缩小 MBA lattice 的动力

学孔径和动量孔径,从而限制束流注入方式和注入效率,并降低束流寿命。为尽量减弱这种非线性效应,目前很多 MBA lattice 设计采用了两种基于相移关系的非线性抵消策略: $-I$  传输映射 ( $-I$  transformation) 和高阶消像差 (higher-order achromat, HOA)<sup>[7]</sup>。 $-I$  传输映射抵消方法指引入 1 对积分强度相同的六极铁,使它们之间的线性传输映射为  $-I$  (相移为  $\pi$  的奇数倍),可有效抵消六极铁产生的主要共振驱动项。HOA 指 1 lattice 单元重复多次形成超周期,总相移为  $2\pi$  的整数倍,可使六极铁产生的三阶和四阶共振驱动项基本抵消。

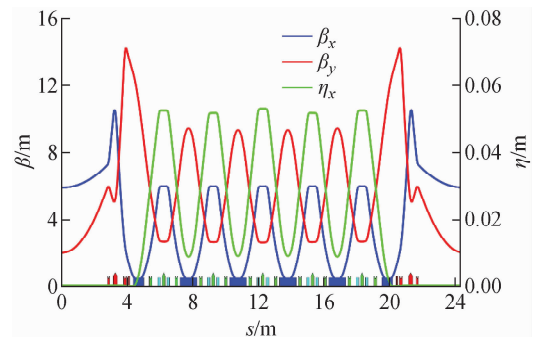
MBA lattice 大致可分为两类:具有分布式色品校正布局的常规型 MBA lattice 和具有集中式色品校正布局的混合型 MBA lattice (hybrid MBA, HMBA)。在常规型 MBA lattice 中,色品由均匀分布在整个 lattice 弧区中的六极铁校正。采用常规型 MBA lattice 的设计包括瑞典 MAX IV 的 7BA lattice<sup>[8]</sup> 和瑞士 SLS-2 的 7BA lattice<sup>[9]</sup> 等,其中 SLS-2 lattice 每个重复弯铁单元的水平与垂直方向的相移为  $(3/7, 1/7) \times 2\pi$ , 在 1 个周期内近似满足 HOA, 可实现三阶和四阶共振驱动项的抵消。在欧洲同步辐射光源升级装置 (ESRF-EBS) 提出的 HMBA lattice<sup>[10]</sup> 中,弧区两端产生 1 对高色散区,使仅位于其中的色品六极铁的强度极大降低,且两个高色散区之间的水平与垂直方向的相移约  $(3\pi, \pi)$ , 近似满足  $-I$ , 可有效抵消六极铁产生的主要非线性效应,从而显著增大动力学孔径。HMBA lattice 已被美国 APS-U<sup>[11]</sup>、中国 HEPS<sup>[12]</sup> 和英国 Diamond-II<sup>[13]</sup> 等第 4 代储存环光源的设计所采用或借鉴。

考虑 HALF 光源束流自然发射度小于  $100 \text{ pm}\cdot\text{rad}$  的设计目标,参考国际上的两个常规型 MBA lattice: SLS-2 的 7BA lattice<sup>[9]</sup> 和 Elettra 2.0 的 6BA lattice<sup>[14]</sup>, 根据式 (1) 的比例关系可知, HALF 储存环采用多于 14 个周期的常规型 7BA lattice 或多于 16 个周期的 6BA lattice 均可实现束流发射度目标。参考 ESRF-EBS 的 H7BA lattice, 根据式 (1) 可知, HALF 储存环采用 20 个周期的 H7BA lattice 也可实现束流发射度目标。因此,可基于这两种 MBA lattice 方案对 HALF 储存环设计进行

研究与比较。

## 2 HALF 的常规型 MBA lattice 研究

对于常规型 MBA lattice, 由于 HALF 光源希望具有较多的直线节数, 因此本文对 18 个周期的常规型 6BA lattice 进行设计研究。考虑选择相对适中的磁铁空间布局与较好的谐波数, 所设计的储存环周长确定为  $441.6 \text{ m}$ , 周期长度为  $24.533 \text{ m}$ , 其中直线节长度为  $5.6 \text{ m}$ , 采用  $500 \text{ MHz}$  高频腔的谐波数为  $648 (= 2^3 \times 3^4)$ 。为增大动力学孔径, 设计的 6BA lattice 采用基于全同弯铁单元的 HOA 抵消, 每个弯铁单元的水平、垂直相移约  $(0.4, 0.1) \times 2\pi$ , 这样可在 5 个弯铁单元间实现有效的非线性抵消<sup>[15-16]</sup>。与 SLS-2 相同, 为降低发射度, 每个弯铁单元均采用反向偏转弯铁<sup>[17]</sup>; 但不同于 SLS-2, 为节省空间, 主弯铁均采用组合型弯铁。此外, 每个 lattice 周期的横向振荡数 (tune) 设置在  $(23/9, 8/9)$  附近, 这样可在 9 个周期内进一步实现非线性抵消。该 6BA lattice 的磁铁布局与线性光学函数如图 1 所示。储存环的主要参数列于表 1, 其中自然发射度为  $74 \text{ pm}\cdot\text{rad}$ 。在 lattice 设计中考虑了采用适中的磁铁强度。对于中间部分的主弯铁单元, 主弯铁的二极和四极磁场强度约为  $0.55 \text{ T}$  和  $7.3 \text{ T/m}$ , 反向偏转组合型弯铁的二极和四极磁场强度约为  $-0.18 \text{ T}$  和  $36.6 \text{ T/m}$ 。直线节两边匹配段中的四极磁铁的最高强度约为  $45 \text{ T/m}$ 。



蓝色方块为主弯铁,青色方块为反向偏转弯铁,红色为四极磁铁,绿色为六极磁铁,棕色为八极磁铁  
图 1 常规型 6BA lattice 的磁铁布局及线性光学函数  
Fig. 1 Magnet layout and linear optical functions of conventional 6BA lattice

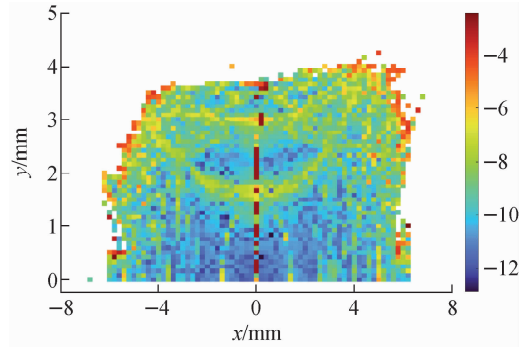
表 1 储存环主要参数

Table 1 Main parameters of storage ring

参数	数值
能量, GeV	2.2
周长, m	441.6
周期数	18
自然发射度, pm·rad	74
工作点 $(x, y)$	46.30, 16.16
自然色品 $(x, y)$	-87, -49
动量紧缩因子	$9.1 \times 10^{-5}$
阻尼分配数 $(x, y, z)$	1.94, 1.00, 1.06
自然阻尼时间 $(x, y, z)$ , ms	19.4, 37.6, 35.5
自然能散	$0.69 \times 10^{-3}$
单圈能损, keV	172.4
总的绝对偏转角度, $(^\circ)$	439
直线节中点处 $(\beta_x, \beta_y)$ , m	5.90, 2.02

在非线性动力学优化中,需减小共振驱动项,并控制随振幅和能量变化的频移。由于 HOA 抵消仅是对主要共振驱动项的抵消,为进一步控制随振幅和能量变化的频移,需对色品六极铁进行分组以增加非线性优化自由度,这就需适当破坏 HOA 抵消的理想条件。优化中将六极铁分为 5 组,并在消色散匹配段加入 1 组八极铁。水平与垂直方向色品校正到(2,2)。图 2 为优化得到的带有频率扩散的动力学孔径,可看到水平动力学孔径约 6 mm。图 3 为横向 tune 随相对能量偏差  $\delta$  的变化,可看到在能量偏差  $\pm 5\%$  以内,横向 tune 未跨域半整数共

振。图 4 为偏能水平动力学孔径及其横向 tune 随振幅的变化,可看到能量偏差  $-5\% \sim 5\%$  的水平动力学孔径均大于 5 mm。优化所使用的六极铁和八极铁的强度分别小于  $3\ 500\ \text{T/m}^2$  和  $55\ 000\ \text{T/m}^3$ ,均在相对适中的范围。



颜色柱代表频率扩散,蓝色表示运动趋于规则,红色表示运动趋于不规则

图 2 带有频率扩散的动力学孔径

Fig. 2 Dynamic aperture with tune diffusion

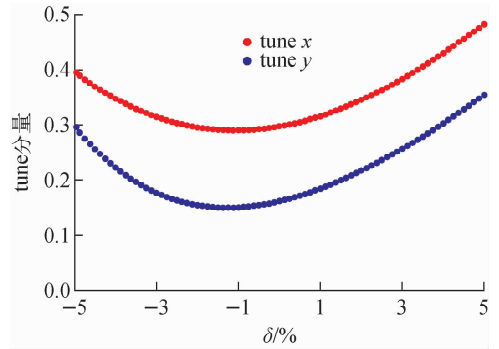
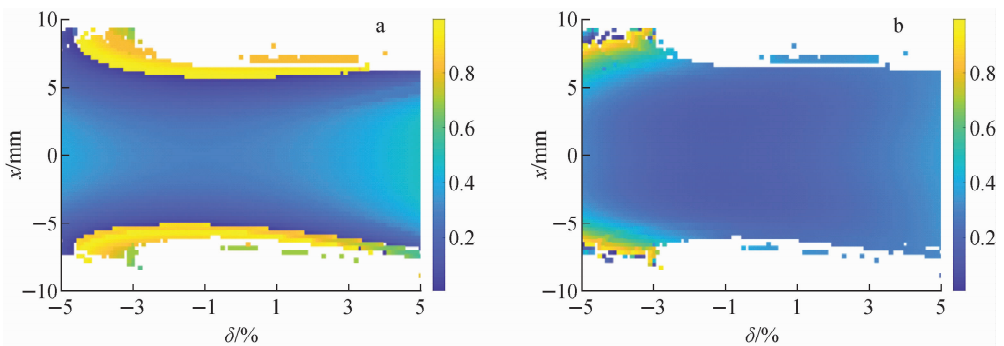


图 3 横向 tune 随相对能量偏差的变化

Fig. 3 Horizontal tune shifts with momentum



颜色柱代表横向 tune 的小数部分,图 a 为水平方向 tune 的变化,图 b 为垂直方向 tune 的变化

图 4 偏能水平动力学孔径及其横向 tune 随振幅的变化

Fig. 4 Off-momentum horizontal dynamic apertures and tune footprints change with amplitude

### 3 HALF 的 HMBA lattice 研究

曾采用 ESRF-EBS 类型的 H7BA lattice 设计了具有 20 个周期的 HALF 储存环<sup>[18]</sup>。这里展示空间布局相对适中的一种设计:储存环周长也为 441.6 m,周期长度为 22.08 m(20 个周期),直线节长度为 5.6 m。该 lattice 的磁铁布局与光学函数如图 5 所示,储存环的自然发射度为 84 pm·rad。采用 H7BA lattice 设计的自然阻尼时间较长(垂直方向超过 50 ms),非常不利于抑制束内散射效应。为进一步降低阻尼时间,提出一种变版 H6BA lattice 结构<sup>[4]</sup>。该结构将 H7BA lattice 中间部分的 3 个组合型弯铁单元改为两个具有纵向梯度弯铁与反向偏转弯铁的单元<sup>[19]</sup>,并在这两个单元之间引入 1 个短的直线节。目前 HALF 光源储存环采用了该变版 H6BA lattice 设计,储存环周长为 480 m,周期长度为 24 m(20 个周期),长、短直线节长度分别为 5.3 和 2.2 m。图 6 为当前该变版 H6BA lattice 的磁铁布局与光学函数。该设计的自然发射度为 86 pm·rad,垂直方向阻尼时间约为 38 ms。这两个 20 个周期的 HMBA lattice 设计(H7BA,变版 H6BA)的水平方向动力学孔径均大于 10 mm。

### 4 两种类型 MBA lattice 的对比

表 2 列出了上述 3 个 MBA lattice 设计的一些参数与性能,这 3 个设计均具有相对适中的磁铁空间布局。常规型 6BA lattice 设计

和 H7BA lattice 设计具有相同的周长,变版 H6BA lattice 设计由于具有中直线节,其周长较前两者长约 40 m。根据式(1)的发射度比例关系可知,常规型 6BA lattice 降低发射度能力最强,即相同周期数下可得到最低的发射度。

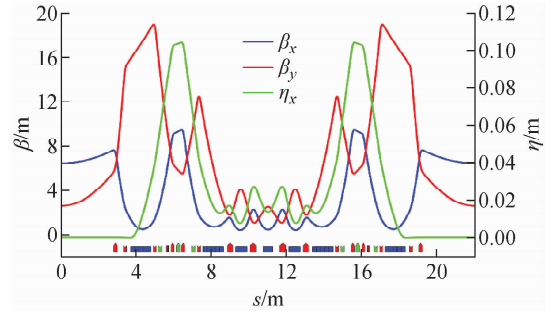


图 5 H7BA lattice 的磁铁布局及线性光学函数  
Fig. 5 Magnet layout and linear optical functions of H7BA lattice

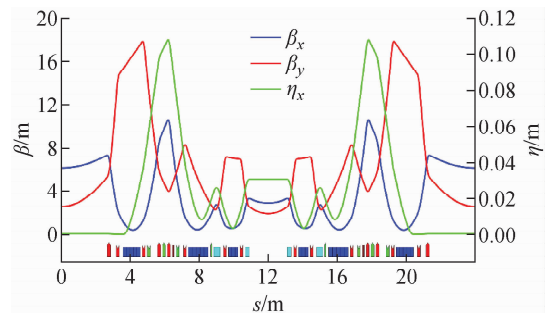


图 6 变版 H6BA lattice 的磁铁布局及线性光学函数  
Fig. 6 Magnet layout and linear optical functions of modified H6BA lattice

表 2 不同类型 MBA lattice 的对比

Table 2 Comparison of different types of MBA lattices

参数	数值		
	6BA	H7BA	变版 H6BA
能量, GeV	2.2	2.2	2.2
周长, m	441.6	441.6	480
周期数	18	20	20
周期长度, m	24.3	22.08	24
自然发射度, pm·rad	74	84	86
自然阻尼时间( $\gamma$ ), ms	38	54	38
动量紧缩因子	$9.1 \times 10^{-5}$	$17.3 \times 10^{-5}$	$9.0 \times 10^{-5}$
直线节数	长 18	长 20	长 20+短 20
直线节空间占比, %	23	25.4	31.3
无误差的水平动力学孔径, mm	~6	>10	>10

但常规型 6BA lattice 的周期长度最长,直线节空间占比最低,且动力学孔径最小,这是因为其分布式色品校正的布局所需的磁铁数目较多,且所使用的六极铁强度较高。考虑误差效应后,常规型 6BA lattice 的动力学孔径将难以满足离轴注入要求。当采用在轴的置换注入时,注入器需提供高电荷量束团;当置换单个束团时,还需采用 ns 级快冲击磁铁。H7BA 和变版 H6BA lattice 由于具有 1 对传输映射为  $-I$  的高色散区,其动力学孔径大于常规型 6BA lattice,可采用离轴注入方式;且它们由于磁铁元件相对较少,周期长度相对较短,直线节空间占比相对较高。

为便于比较自然阻尼时间,表中仅列出了垂直方向的阻尼时间,因为垂直方向的阻尼分配数为 1,其值不随 lattice 变化。可看到,常规型 6BA lattice 和变版 H6BA lattice 两种设计的阻尼时间相同,并且短于 H7BA lattice 的阻尼时间。考虑到阻尼时间正比于储存环周长,且周期数较多时弯铁的二级磁场趋于变弱(不利于缩减阻尼时间),20 个周期的变版 H6BA lattice 的阻尼时间控制的相对较好。对于 H7BA 和变版 H6BA 两个 lattice,尽管变版 H6BA 的弯铁数目较少,但由于中间部分弯铁单元采用了纵向梯度弯铁和反向偏转弯铁,其自然发射度与 H7BA 基本相同;同时由于变版 H6BA 的阻尼时间明显短于 H7BA,考虑束内散射效应后,变版 H6BA 的平衡发射度将会较低。从表中还可看到,常规型 6BA lattice 和变版 H6BA lattice 的动量紧缩因子也基本相同,而 H7BA lattice 的动量紧缩因子明显较大。

通过以上比较,综合考虑束流平衡发射度、动力学孔径、直线节空间占比与直线节数目等因素,HALF 储存环当前采用的 20 个周期的变版 H6BA lattice 设计方案具有相对更好的综合性能。

## 5 结论

HALF 光源为一台 2.2 GeV 的衍射极限储存环光源,其束流自然发射度的设计目标小于  $100 \text{ pm}\cdot\text{rad}$ 。根据束流发射度设计目标,本文对比研究了 HALF 光源储存环采用不同类型 MBA lattice 的设计方案,包括 18 个周期的

常规型 6BA lattice 和 20 个周期的 HMBA lattice。常规型 6BA lattice 降低发射度的能力较强,但动力学孔径较小,难以满足离轴注入,且直线节空间占比也较低。HMBA lattice 动力学孔径较大,可采用离轴注入方式,且直线节空间占比也高。与 H7BA lattice 相比,HALF 光源当前采用的变版 H6BA lattice 不但具有基本相同的发射度,且其自然阻尼时间较短,直线节空间占比较高,直线节数目明显较多。综合来说,当前采用的 20 个周期的变版 H6BA lattice 对于 HALF 光源储存环是个相对更好的设计方案。

## 参考文献:

- [1] LI W, WANG L, FENG G, et al. The concept of Hefei Advanced Light Source (HALS)[C]// Proc of EPAC08. [S. l.]: [s. n.], 2008: 2 136-2 138.
- [2] WANG L, FENG G, ZHANG S, et al. The lattice design of Hefei Advanced Light Source (HALS) storage ring[C]// Proc of EPAC08. [S. l.]: [s. n.], 2008: 2 142-2 144.
- [3] BAI Z, YANG P, LI W, et al. Design study for the first version of the HALS lattice[C]// Proc of IPAC2017. [S. l.]: [s. n.], 2017: 2 713-2 715.
- [4] BAI Z, LIU G, HE T, et al. A modified hybrid 6BA lattice for the HALF storage ring[C]// Proc of IPAC2021. [S. l.]: [s. n.], 2021: 407-409.
- [5] HETTEL R. DLSR design and plans: An international overview[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2014, doi:10.1107/S1600577514011515.
- [6] EINFELD D, PLESKO M, SCHAPER J. First multi-bend achromat lattice consideration[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2014, doi:10.1107/S160057751401193X.
- [7] BENGTTSSON J, STREUN A, SINGH B, et al. Control of the nonlinear dynamics for medium energy synchrotron light sources[C]// Proc of IPAC2018. [S. l.]: [s. n.], 2018: 4 037-4 041.
- [8] LEEMANN S C, ANDERSSON A, ERIKSSON M, et al. Beam dynamics and expected performance of Sweden's new storage-ring light source: MAX IV[J]. Physical Review Special Topics: Accelerators and Beams, 2009, doi: 10.1103/PhysRevSTAB.12.120701.

- [9] STREUN A, GARVEY T, RIVKIN L, et al. SLS-2: The upgrade of the Swiss Light Source [J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2018, doi: 10.1107/S1600577518002722.
- [10] FARVACQUE L, CARMIGNANI N, CHAVANNE J, et al. A low-emittance lattice for the ESRF[C] // *Proc of IPAC2013*. [S. l.]: [s. n.], 2013: 79-81.
- [11] BORLAND M, SUN Y, SAJAEV V, et al. Lower emittance lattice for the Advanced Photon Source upgrade using reverse bending magnets [C] // *Proc of NAPAC2016*. [S. l.]: [s. n.], 2016: 877-880.
- [12] JIAO Y, XU G, CUI X, et al. The HEPS project[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2018, doi: 10.1107/S1600577518012110.
- [13] ALEKOU A, BARTOLINI R, CARMIGNANI N, et al. Study of a double triple bend achromat (DTBA) lattice for a 3 GeV light source[C] // *Proc of IPAC2016*. [S. l.]: [s. n.], 2016: 407-409.
- [14] KARANTZOULIS E, CARNIEL A, CASTRONOVO D, et al. Elettra and Elettra 2.0[C] // *Proc of IPAC2021*. [S. l.]: [s. n.], 2021: 1474-1476.
- [15] BENGTSSON J, STREUN A. Robust design strategy for SLS-2, SLS2-BJ84-001-2[R]. [S. l.]: [s. n.], 2017.
- [16] YANG P, LI W, REN Z, et al. Design of a diffraction-limited storage ring lattice using longitudinal gradient bends and reverse bends[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2021, doi: 10.1016/j.nima.2020.164968.
- [17] STREUN A. The anti-bend cell for ultralow emittance storage ring lattices[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2014, doi: 10.1016/j.nima.2013.11.064.
- [18] XU J, YANG P, LIU G, et al. Constraint handling in constrained optimization of a storage ring multi-bend-achromat lattice[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2021, doi: 10.1016/j.nima.2020.164890.
- [19] RIEMANN B, STREUN A. Low emittance lattice design from first principles: Reverse bending and longitudinal gradient bends[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2019, doi: 10.1103/PhysRevAccelBeams.22.021601.