



·先进同步辐射物理及技术·

第四代同步辐射光源物理设计与优化*

焦 毅^{1,2}, 白正贺³

(1. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 合肥 230029)

摘 要: 近十年来, 世界上开始大力发展第四代同步辐射光源——衍射极限储存环光源。目前我国正在建设或立项建设两台第四代同步辐射光源: 高能同步辐射光源和合肥先进光源。从储存环磁聚焦结构设计与优化、束流注入与集体效应等方面, 对第四代同步辐射光源的物理设计与优化进行了介绍; 对国际范围内第四代储存环光源装置的研制情况进行了介绍。

关键词: 光源装置; 第四代同步辐射光源; 衍射极限储存环; 物理设计

中图分类号: TL54⁴

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220136

Physics design and optimization of the fourth-generation synchrotron light sources

Jiao Yi^{1,2}, Bai Zhenghe³

(1. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

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

3. National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

Abstract: Over the past decade, the fourth-generation synchrotron light sources based on diffraction-limited storage rings (DLSRs) have been extensively designed and developed around the world. In China, two fourth-generation synchrotron light sources, the High Energy Photon Source and the Hefei Advanced Light Facility, are being or will be constructed. This paper will report the main issues and progresses in physics design and optimization of DLSRs, including lattice design and optimization, beam injection and collective effects, and will also introduce the current design and construction status of DLSR facilities around the world.

Key words: light source facility, fourth-generation synchrotron radiation light source, diffraction-limited storage ring, physics design

同步辐射自 1947 年被发现以来, 因其宽能谱、高亮度、窄脉冲、高偏振等优异性能, 成为探索物质结构的有力工具。迄今, 基于电子储存环的同步辐射光源已经经历了三代的发展^[1]。第一代同步辐射光源的电子储存环是为高能物理实验而设计的, 只是“寄生”地利用从偏转磁铁引出的同步辐射光; 之后, 这些光源被专门为使用同步辐射而设计的第二代同步辐射光源所取代, 不过仍然主要从偏转磁铁引出同步辐射光; 第三代同步辐射光源的电子储存环进行了优化设计, 实现了比第二代小得多的电子束发射度, 同时大量使用插件件, 为物理、化学、环境、材料、生命科学等领域前沿研究提供了重要的研究平台。

21 世纪以来, 世界主要国家纷纷发展性能更高的新一代光源, 有能量回收型直线加速器光源^[2]、自由电子激光^[3]和衍射极限储存环^[4]等不同发展方向。其中, 基于衍射极限储存环的第四代同步辐射光源, 通过将电子束发射度降低 1~2 个量级 (从第三代光源的一般 1~5 nm-rad, 降低至 ~100 pm-rad 甚至以下), 使其接近甚至达到 X 射线的衍射极限发射度 ($\lambda/4\pi$, λ 为波长; 对于波长 λ 为 1 nm 的光子束, 其衍射极限发射度约为 80 pm-rad), 进而实现更高的亮度和横向相干性, 为光子科学相关的多领域前沿研究提供新的机遇。因超高平均亮度、高重复频率、多用户、高稳定性等特点, 衍射极限储存环光源与自由电子激光性能互补, 成为第四代光源的一个重要发展方向。

* 收稿日期: 2022-04-30; 修订日期: 2022-06-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11922512, 11875259)

联系方式: 焦 毅, jiaoyi@ihep.ac.cn。

通信作者: 白正贺, baizhe@ustc.edu.cn。

衍射极限储存环的相关研究可追溯至 20 世纪 90 年代^[5]。不过,直到 2010 年左右,超低发射度储存环一些关键物理与技术的突破才使得衍射极限储存环的实现成为可能。2016 年,瑞典 MAX IV^[6-7] 的成功建成标志着世界光源领域正式进入第四代同步辐射光源的时代。随后,更多国家和地区开始建设第四代同步辐射光源,如巴西的 Sirius^[8]、欧洲的 ESRF-EBS^[9]、美国的 APS-U^[10]、中国的高能同步辐射光源 (High Energy Photon Source, HEPS)^[11] 和合肥先进光源 (Hefei Advanced Light Facility, HALF)^[12] 等。

第四代同步辐射光源物理设计的主要目标就是完成性能先进、技术可行的超低发射度储存环设计方案,容纳尽可能多的插入件光束线,实现尽可能高的同步光亮度与横向相干性;同时,针对超低发射度设计带来的一系列问题及挑战,提出应对方法;此外,对机器进行模拟仿真,明确相关硬件关键参数的技术要求。

本文对包括我国目前正在建设的高能区 HEPS 光源和立项建设的低能区 HALF 光源在内的世界上不同能区的第四代储存环光源装置设计情况进行了介绍。

1 磁聚焦结构设计及优化

为了实现尽可能高的同步辐射亮度,除了需要在储存环内实现尽可能高的电子束流强(百毫安量级),采用先进的插入件技术之外,还需要在插入件处尽可能实现电子与光子束流的相空间匹配,以及最为关键的是,需要尽可能地减小电子束的自然发射度^[13]。后两者是通过储存环的磁聚焦结构 (lattice) 设计来实现的。Lattice 设计是储存环物理设计的基础,决定了储存环的主要性能参数和非线性束流动力学表现。对于超低发射度储存环的 lattice 设计,非线性动力学优化是所面临的主要挑战。最终的非线性动力学性能决定了束流注入方式、注入效率以及束流 Touschek 寿命。

1.1 单元 lattice 与 MBA lattice

储存环中电子束自然发射度是量子激发和同步辐射阻尼的平衡态,只与二极铁内的束流光学参数(特别是色散函数)相关^[14]。对于由许多全同的恒定磁场二极铁组成的电子储存环,理论上存在最小自然发射度,即所谓“理论最小发射度”(theoretical minimum emittance, TME)^[15],即

$$\frac{\varepsilon_{\text{TME}}}{\text{pm}} = 8.24 \times 10^{-3} \gamma^2 \left[\frac{\theta}{\text{rad}} \right]^3 / J_x \quad (1)$$

式中: J_x 为水平阻尼分配数,对采用分离作用二极铁的储存环,其数值 ~ 1 ; $\gamma = E/E_0$, 为洛伦兹因子; θ 为单块二极铁的弯转角度。该式揭示,储存环的自然发射度与单块二极铁的角度(或二极铁的数目)的 3 次方成正比(或反比)。增大储存环内二极铁的数目,是降低自然发射度的最为有效的方式(其他方法可参考文献 [4,13])。

储存环 lattice 的基础单元节包括一块主弯转二极铁以及必要的四极磁铁。严格实现 TME,需要足够的单元节长度以及非常强的横向聚焦(单元节水平相移 $\sim 284^\circ$),使水平色散函数(及束流包络函数)在二极铁中点处局部最小并达到特定的最优值^[16]。不过,在实际 lattice 设计中,往往不采用理想 TME 单元节,而是采用类似结构,在有效控制单元节的长度和聚焦强度的情况下,实现尽可能低的自然发射度。这种单元节可称之为类 TME 单元节。第四代同步辐射光源普遍采用的多弯铁消色散 (multi bend achromat, MBA) 结构,就是希望用足够多的类 TME 单元节,以有效降低束流发射度。MBA 两端与插入件长直线节相连。为了提升光源的同步辐射性能,通常将单元节靠近长直线节一端的色散函数匹配为 0。这种单元节称为匹配单元节。如图 1 所示,一个常规型 MBA 结构包括 2 个匹配单元节和 $(M-2)$ 个类 TME 单元节, M 代表 MBA 中主弯转二极铁的数目。

为了进一步提升 MBA lattice 降低发射度的能力和整体性能,加速器专家针对类 TME 单元节开展了诸多研究。例如,在单元节中采用带横向磁场梯度的组合型二极铁^[16]、纵向磁场梯度二极铁 (longitudinal gradient bend, LGB)^[17] 和反向弯转二极铁 (reverse bend, RB)^[18]。采用组合型二极铁可以通过增加水平阻尼分配数 J_x 来降低发射度,并同时节省空间。LGB 的二极磁场是沿着纵向长度变化的,色散函数越低的地方,二极磁场越强,这样可以减弱同步辐射的量子激发效应,从而降低发射度。采用 RB 可以压低主弯铁内的色散函数,从而抑制量子激发来降低发射度;通过偏心放置四极磁铁以形成 RB,还可以增加 J_x ,进一步降低发射度。另外, LGB 非均匀的二极磁场,以及采用 RB 增加全环总的绝对偏转角度,都可以增加辐射阻尼,也利于降低发射度^[19]。瑞士 SLS-2 的 lattice 设计提出了如图 2 所示采用 LGB/RB 的类 TME 单元节,可以将自然发射度降低到 TME 值以下^[20]。

如图 1(b)所示,除了常规型 MBA lattice,还有一类 MBA lattice,称为混合型 MBA (hybrid MBA, HMBA) lattice。常规型 MBA lattice 也称为分布式色品校正 MBA lattice,其特点是每块主弯铁之间都分布着用于校正色品的六极磁

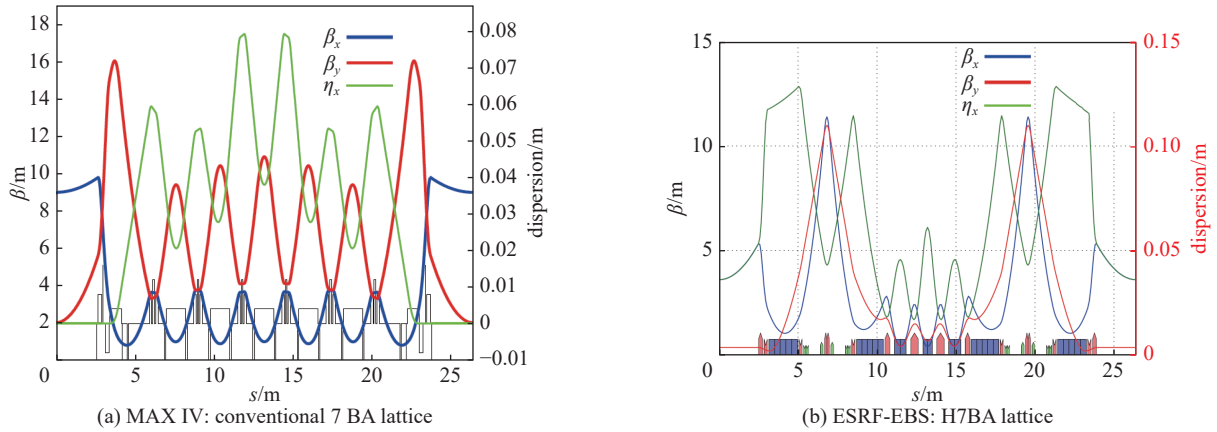


Fig. 1 MAX IV conventional 7BA lattice^[6] and the ESRF-EBS H7BA lattice^[9]
 图 1 MAX IV 的常规型 7BA lattice^[6] 与 ESRF-EBS 的 H7BA lattice^[9]

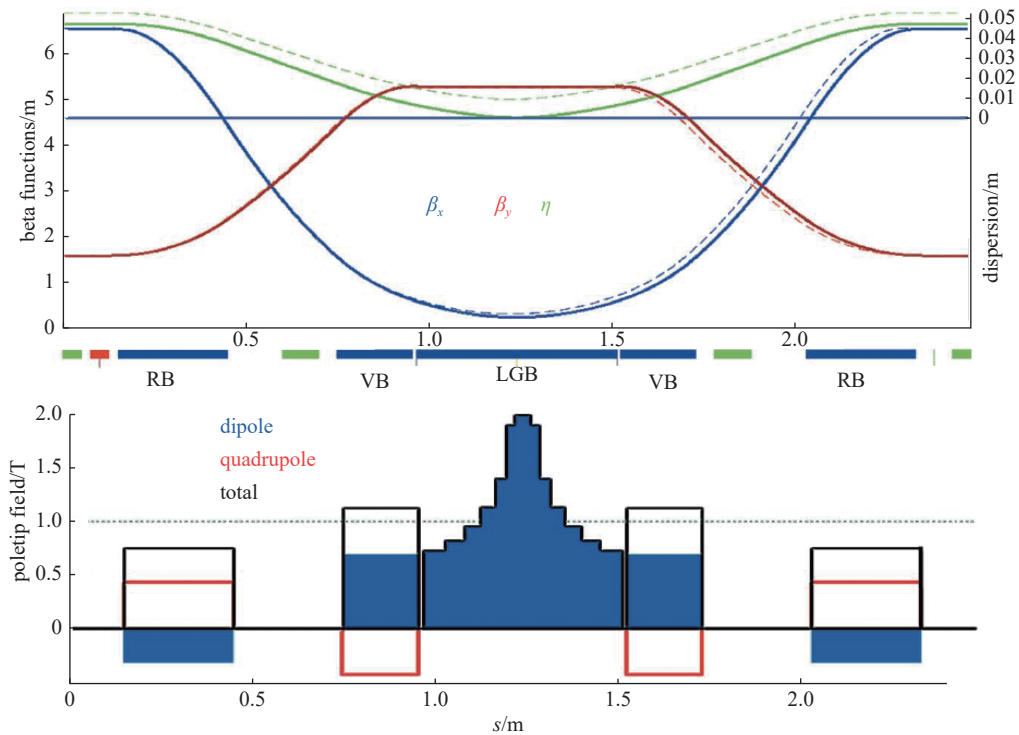


Fig. 2 SLS-2 LGB/RB unit cell lattice^[19]
 图 2 SLS-2 的 LGB/RB 单元 lattice^[19]

铁,例如瑞典 MAX IV 光源的 7BA lattice 和瑞士 SLS-2 的 7BA lattice。在混合型 MBA lattice 中,在两侧的主弯铁之间产生一对高色散区并将六极磁铁集中放置其中。混合型 MBA lattice 由欧洲 ESRF-EBS 提出并已被美国 APS-U、英国 Diamond-II、中国 HEPS 和 HALF 等光源所采用或借鉴。

对于具有相同二极铁数目的常规型 MBA lattice 和混合型 MBA lattice,当常规型 MBA lattice 采用 SLS-2 类型的 LGB/RB 单元节时,其降低发射度能力明显强于混合型 MBA lattice;当常规型 MBA lattice 采用类似 MAX IV 的水平相移较小的类 TME 单元节时,其降低发射度能力弱于混合型 MBA lattice。对于混合型 MBA lattice,由于在两端产生一对高色散区且它们之间的线性传输映射基本满足 -I 传输映射 (-I transformation),不但可以明显降低色品校正所需的六极磁铁强度,而且可以有效地抵消六极磁铁产生的非线性效应,从而显著增大动力学孔径。在高性能第四代光源设计中,如果采用常规型 MBA lattice,其校正色品的六极磁铁强度容易达到磁铁技术决定的上限^[21]。因此,目前的高性能第四代光源设计都采用可明显降低六极磁铁强度的混合型 MBA lattice。而中低能区第四代光源的六极磁铁强度可相对容易控制在较合理的水平,因此其设计可采用常规型 MBA lattice,也可采用混合型 MBA lattice。另外,混合型 MBA lattice 由于中间无六极磁铁分布,其单个周期内的磁铁数量相对较少,周期长度可以相

对较短;而对于常规型 MBA lattice,由于六极磁铁非集中分布,其单个周期内的磁铁数量相对较多。

1.2 非线性动力学优化

第四代光源 MBA lattice 超低的发射度设计,需要采用非常强的六极磁铁补偿自然色品,从而带来极为严重的非线性动力学效应。非线性动力学优化的目标是增大动力学孔径和动量接受度,前者决定了所采用的束流注入方式和注入效率,后者决定了束流的 Touschek 寿命。动力学孔径主要与横向束流动力学相关,而动量接受度则由横向束流动力学及纵向高频参数共同决定^[22]。在第四代光源中,动量接受度主要受到横向束流动力学的限制。为了获得足够好的动力学性能,一般在线性 lattice 设计时就需要考虑如何尽量抵消非线性动力学效应。

共振驱动项方法^[23]和频率映射分析^[24]是两种常用的非线性动力学分析方法。共振驱动项方法将非线性磁铁(六极磁铁和八极磁铁)的哈密顿量表示成一系列非线性量之和,这些非线性量包括依赖于振幅和动量偏差的频移项、各阶共振项及色差项。频率映射分析基于数值跟踪得到的粒子运动轨迹,以很高的精度计算粒子的运动频率及其“扩散率”,从全局角度展现储存环束流动力学的整体性能,并揭示限制动力学孔径的危险共振。在非线性动力学分析优化中,多采用共振驱动项方法控制调节各种非线性量来改善非线性动力学,并通过频率映射分析来洞察非线性动力学相关信息。

Lattice 设计中采用的非线性动力学抵消策略有不同的分类方式。按照实现非线性抵消的相移关系,可以分为: -1 传输映射抵消和高阶消像差 (higher-order achromat, HOA) 抵消^[25]。-1 传输映射抵消要求一对积分强度相同的六极磁铁之间的线性传输映射为 -1,相应的水平相移与垂直相移均为 π 的奇数倍,可以实现三阶共振驱动项抵消。HOA 要求 $N(N \geq 4)$ 个重复单元的水平与垂直方向的总相移为 2π 的整数倍,可以抵消三阶共振驱动项和大部分的四阶共振驱动项。例如, SLS-2 的 7BA lattice 通过将重复的类 TME 单元节的水平与垂直相移设为 $(3/7, 1/7)2\pi$ 以在周期内的 7 个单元间实现近似 HOA 抵消^[26]。按照实现非线性抵消的范围可以分为:单周期内非线性抵消和多周期非线性抵消,也称为局部非线性抵消和全局非线性抵消^[27]。一般来说,六极磁铁之间交错越厉害,非线性抵消的效果越差。相应地,单周期内的抵消比多周期期间的抵消更为有效。为此,越来越多的第四代光源 lattice 设计主要采用单周期内非线性抵消,同时也采用多周期非线性抵消。例如, ESRF-EBS 的 H7BA lattice 除了在单周期内采用 -1 传输映射抵消,还将单周期的水平与垂直相移设在 $(19/8, 7/8)2\pi$ 附近以在 8 个周期间实现基于 HOA 的非线性抵消。需要指出的是,实际 lattice 中使用的都是正六极磁铁,斜六极磁场仅来自于磁铁制造与安装准直误差。仅考虑正六极磁铁情况下满足非线性抵消的相移关系时,对于 -1 传输映射抵消,垂直相移也可以是 π 的偶数倍;对于 HOA 抵消,某个方向的总相移也可以是 2π 的半整数倍。比如,类 TME 单元节的工作点为 $(0.4, 0.1)$ 时,可在 5 个重复单元节间实现 HOA 抵消^[26]。

对于在第四代光源中采用的单周期内非线性抵消,无论是基于 -1 还是 HOA,由于理想抵消情况下的非线性自由度(即六极磁铁组数)非常有限,很难同时控制依赖于振幅和动量偏差的频移项,需要通过对六极磁铁分组来增加优化自由度。例如, APS-U, HEPS 和 SLS-2 lattice 都对其六极磁铁进行了分组优化。HALF 光源曾提出基于 -1 传输映射的局部对称 lattice 和具有交错式高色散区的 MBA lattice^[28],在理想情况下不但可以实现单周期内非线性抵消,还可以具有较多的非线性自由度,允许同时实现较好的标能与偏能非线性动力学表现。另外,除了六极磁铁外,八极磁铁在第四代光源中越来越多地应用于非线性动力学优化,可以更好地控制依赖于振幅和动量偏差的频移项。例如, MAX IV, ESRF-EBS 等光源的 lattice 中都使用了八极磁铁。

借助于计算机技术的飞速发展,加速器领域专家发展了结合数值模拟、并行计算及随机优化算法的数值优化方法^[27]。这种方法可以考虑包括误差、同步辐射效应等在内的复杂模型,并可以对包括动力学孔径、束流寿命等在内的诸多复杂的性能参数进行精确模拟,其结果也更接近机器的实际性能。由于数值优化方法的广泛适用性,目前已成为第四代光源物理设计中基础的必备方法。对于 MBA lattice 设计,其变量可以有几十个,基于遗传算法和粒子群优化算法的多目标随机优化算法已经在 lattice 优化中得到了广泛应用^[29-34]。在 lattice 的多目标优化中,优化变量一般是各种磁铁参数,优化目标可以是储存环性能参数与非线性动力学表现。这使得对 lattice 的线性参数与非线性动力学同时进行优化成为可能。图 3 为 HEPS lattice 数值优化的最终解。其包含多个呈现不同特性的备选解,可以对一个特定 lattice 结构的潜在性能有一个整体又直观的呈现。近年来,机器学习在加速器领域的应用研究开始迅猛发展^[35-36]。机器学习不但可以缩减目标参数的评估时间,提高优化效率;还可以提高优化算法的优化性能。例如,利用监督学习算法,得到动力学孔径与 lattice 参数之间映射的替代模型,大大提升动力学孔径的优化效率^[37];利用聚类、神经网络等机器学习算法,改进种群演化机制,提高遗传算法的收敛速度和优化效果^[38-40]。

2 束流注入与集体效应

尽管很多第四代储存环光源的 lattice 设计采用了非常有效的非线性抵消策略和高效的数值优化方法,但相比第三代光源,其动力学接受度一般还是显著减小。为了在第四代光源中实现高效注入,光源领域不断发展新的束流注入方法及关键技术。由于第四代储存环光源的束流自然发射度比第三代光源降低了 1~2 个数量级,束团内的电子密度大大增加,束内散射效应变得尤为严重。同时,为了实现超低发射度,第四代储存环光源需采用高梯度磁铁,这导致较小的真空室横向尺寸和较大的束流阻抗;上述因素以及储存环中非常小的动量压缩因子,如无特殊措施,会引起束流集体效应所决定的流强阈值的明显下降。

2.1 束流注入

电子储存环束流注入的基本过程一般可以看成由两步组成:1)首先,注入束流在经过注入系统的“踢力”元件(kicker)作用后被储存环的接受度俘获;2)然后,注入束流通过同步辐射阻尼逐渐达到与循环束流一样的平衡状态。由于第 2 个过程是一个自然的过程,在设计束流注入系统时,需主要考虑的是如何在尽量减小对循环束流扰动情况下,高效率地将注入束流“踢”到储存环的接受度中。目前束流注入方式包括脉冲凸轨注入、脉冲多极磁铁(或脉冲非线性磁铁)注入^[41]、置换(swap out)注入^[42]和纵向注入^[43]等。其中,前两种作为离轴注入已应用在目前运行的第三代和第四代储存环光源中,对动力学孔径要求较高,一般要求考虑误差效应之后的动力学孔径在 5 mm 甚至以上;后两种属于在轴注入,对动力学孔径要求较低,特别是对于置换注入,1 mm 左右即可。

对于束流发射度在 100 pm·rad 量级水平的第四代储存环光源,采用有效的非线性动力学抵消策略并适当增大注入直线节的 β 函数,可以使用离轴的脉冲凸轨注入和脉冲多极铁注入。例如 ESRF-EBS 在尽量保持储存环 lattice 的周期性以具有较好的非线性动力学的条件下,设计了专用于束流注入的高 β 注入直线节。脉冲凸轨注入是一种传统的离轴注入方式。为了降低凸轨注入对动力学孔径的要求,SLS-2 提出采用反向切割磁铁(anti-septum),在 5 mm 动力学孔径条件下即可实现凸轨注入^[44]。相对于凸轨注入,因脉冲多极铁的中心磁场为零,脉冲多极铁注入对循环束流扰动很小。图 4 为目前 HALF 光源脉冲非线性磁铁的磁场场形。最近,一种新的离轴注入方式被提出来:孔径分担(aperture sharing)注入^[45],其可以减小所需的动力学孔径大小,但代价是会扰动储存环中的个别循环束团。该注入方式使用快冲击磁铁(fast dipole kicker)将注入束团“踢”到储存环接受度中,但同时这种“踢力”也将作用于个别循环束团上从而产生扰动。在孔径分担注入中,缩短快冲击磁铁的脉冲时间,可以减少所扰动的循环束团个数;采用薄切割板切割磁铁也会减小对循环束团的扰动。

当束流发射度降低至 10 pm·rad 量级水平时,储存环的动力学孔径一般很难做到 5 mm 以上,需要采用在轴注入。在轴注入对动力学孔径的要求较小,利于追求更为极限的低发射度和高亮度设计。在轴置换注入已在一些第四代储存环光源设计中采用,包括美国 APS-U, ALS-U 和我国 HEPS 光源。置换注入要求 ns 级的快冲击磁铁(使其可以只作用于少数束团)^[46],且由于无法实现累积注入,要求注入器提供高电荷量的注入束团,并对替换掉的束团作合理的处理。除了置换注入,近年来国内外同行提出了纵向注入方式,其为一种累积式在轴注入。文献 [43] 中提出,考虑同步辐射阻尼效应,在电子纵向相空间稳定区偏离稳定固定点的相位处有一个狭窄入口,将能量偏高一点的束流注入到该入口就可被储存环的纵向接受度俘获。该注入方式可允许累积注入,不过也需要纳秒级冲击磁铁,此外由于纵向相空间稳定区入口较为狭窄,对注入束的纵向发射度要求较高,并要求足够的偏能动力学接受

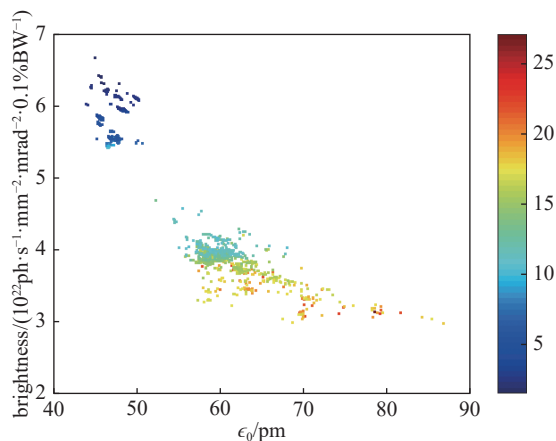


Fig. 3 Final solutions of optimization of the HEPS brightness and dynamic aperture (different colors denote different dynamic aperture areas)

图 3 HEPS 插入件亮度与动力学孔径数值优化的最终解(图中不同颜色表示不同的动力学孔径面积)

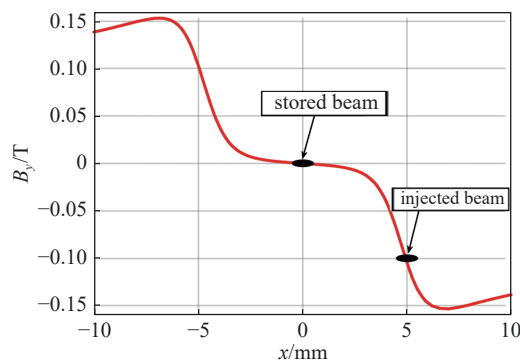


Fig. 4 Field profile of the pulsed nonlinear kicker of HALF

图 4 HALF 光源的脉冲非线性磁铁的磁场场形

度。我国上海光源和北京高能物理研究所提出了基于束团融合的双高频和三高频纵向注入^[47-49], 只需偏相位(而无需偏能)即可实现注入, 某种程度上降低了对注入束纵向发射度的要求。除了使用快冲击磁铁外, 使用偏转腔也可实现纵向注入^[50]。

2.2 集体效应

随着束流发射度降低, 束内散射效应开始变得显著, 特别是在 10 pm-rad 量级发射度的中低能储存环光源设计中尤为如此。在第四代储存环光源设计中, 抑制束内散射效应的主要措施有: 1) 增加辐射能量损失, 缩短阻尼时间, 如采用较多的 LGB 与 RB 弯铁、适当缩短弯铁长度或使用阻尼 wiggler; 2) 降低电子密度, 如使用谐波腔进行束团拉伸或提高束团横向耦合度(包括采用全耦合模式)以增大束团 6D 相空间体积。需要注意的是, 在 lattice 设计中使用较多的 RB 以及缩短弯铁长度时会减小动量压缩因子, 会降低束流不稳定性阈值。在 lattice 设计中需要在阻尼时间和动量压缩因子之间做综合考虑和平衡控制。另外, 适当提高束流能量可以明显缩短阻尼时间(阻尼时间反比于能量的 3 次方), 同时显著降低束内散射效应增长率, 从而更好地抑制束内散射效应^[51]; 选择合适的高频腔频率也会利于抑制束内散射效应。例如, 研究显示, ALS-U 同样流强下, 采用 500 MHz 高频腔比采用 100 MHz 高频腔的束内散射效应要弱一些^[52]。为了尽可能地抑制中低能束流能量下严重的束内散射效应, HALF 光源物理设计中采取了前述多种措施。

第四代储存环光源设计中实现超低的束流发射度需要采用高梯度四极磁铁, 相应地, 色品校正也需要采用高梯度六极磁铁。为了实现高磁场梯度, 相比第三代光源, 第四代光源所采用的磁铁孔径以及真空室尺寸大大减小(一般在 20 mm 左右)。图 5 为第三代和第四代储存环光源的真空室横向尺寸对比图^[45]。这会导致真空元件阻抗的明显增加(横向阻抗反比于真空室尺寸的 3 次方)。另外, 除了超低的束流发射度, 第四代储存环光源的动量压缩因子一般降低到 1×10^{-4} 、甚至 10^{-5} 水平, 阻尼时间一般增加到十至几十 ms, 纵向振荡频率变得较小。这些都更容易导致束流不稳定性的发生。当然, 也存在一些相对有利的因素, 如储存环的平均 β 函数相对较小, 真空室材料更多地采用导电和导热性能更好的材料。不过总体而言, 第四代储存环光源的束流集体效应更加显著。束流不稳定性可以分为单束团不稳定性和多束团不稳定性, 前者主要是由短程尾场或宽带阻抗引起, 后者主要是由长程尾场或窄带阻抗引起。第四代光源储存环中需要关注的单束团不稳定性包括纵向的微波不稳定性、横向模式耦合不稳定性 and 头尾不稳定性等; 多束团不稳定性包括阻抗壁不稳定性、高次模耦合束团不稳定性 and 离子效应等^[53]。

为了提高第四代储存环光源中的束流集体效应所决定的流强阈值, 需要采取抑制束流不稳定性的各种应对措施。首先, 在 lattice 设计时就需要从整体上尽量考虑优化与集体效应相关的参数, 例如, 在空间允许情况下尽量增大真空室横向尺寸, 在对降低发射度影响较小情况下尽量增大动量压缩因子, 在非线形优化时将色品校正到稍大的正值。需要注意的是, 将色品校正到更大的正值时, 一般不利于改善非线性动力学, 不过对于 HMBA lattice, 稍大的正色品或可利于增大动力学孔径和 Touschek 寿命^[54]。其次, 综合运用真空元件阻抗优化、谐波腔拉伸束团、高性能的逐束团反馈系统、束团填充模式优化等多种应对措施。在这些应对措施中, 极为关键的是对储存环各个真空元件的阻抗进行评估和优化, 进而建立全环的阻抗模型并对各种束流不稳定性进行模拟分析。在真空元件阻抗优化时, 既要在全环数目众多的同类元件阻抗进行重点优化, 如巴西 Sirius 光源通过几何形状优化有效降低了其 BPM 阻抗^[55], 也要对个别关键元件阻抗进行重点优化, 如 HEPS 光源通过集成设计明显降低了其注入元件的阻抗^[56]。

3 第四代同步辐射光源装置设计

目前世界上多个国家正大力发展第四代同步辐射光源。瑞典 MAX IV 和欧洲 ESRF-EBS 已建成并投入运行, 巴西 Sirius 光源正在调试中, 同时几台第四代储存环光源正在建设或设计中, 包括我国的 HEPS 和 HALF 光源。根据束流能量的不同, 储存环光源可以分为高能和中低能光源, 而这种能量的不同也会反映在第四代储存环光源装置设计的差异性中。

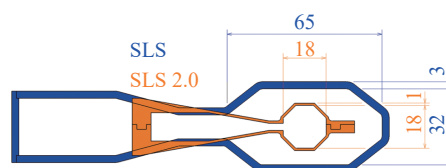


Fig. 5 Comparison of vacuum chambers for SLS, a third-generation synchrotron light source, and for its fourth-generation upgrade SLS-2 (unit: mm)^[45]

图 5 以 SLS 及其升级装置 SLS-2 为例的第三代和第四代储存环光源真空室横向尺寸的比较(单位: mm)^[45]

3.1 高能光源装置设计

高能区的同步辐射光源,可以提供 10 keV 级、甚至 100 keV 以上的高亮度 X 射线脉冲,为高能 X 射线衍射、极端条件实验等用户实验所必需。因其能量高 (≥ 6 GeV)、周长、造价高,通常称为光源中的“旗舰”装置。过去几十年间,世界范围内共建有四台高能区的第三代同步辐射光源装置,分别是美国的 APS^[57]、欧洲的 ESRF^[58]、日本的 SPring-8^[59]、德国的 PETRA-III^[60]。2010 年以来,上述光源纷纷启动了四代光源的升级研究。目前,ESRF 的升级装置 ESRF-EBS 已经完成调试^[61],处于运行阶段;APS 的升级装置 APS-U 正处于建设阶段^[62];另外两台光源的升级装置处于设计阶段,设计方案尚未最终确定^[63-64]。我国在十余年物理设计研究及关键技术研发基础上,完成了国内首台第四代同步辐射光源项目——HEPS^[15, 65-66]的物理设计,并于 2019 年启动工程建设^[67]。表 1 给出了 ESRF-EBS, APS-U, HEPS 等三台高能区四代光源的主要参数。

表 1 目前世界上在建及运行的高能区第四代储存环光源的主要参数

Table 1 Main parameters of high-energy fourth-generation synchrotron light sources being in operation or under construction

light source	energy/GeV	circumference/m	natural emittance/(pm·rad)	momentum compaction/ 10^{-5}	energy loss per turn/MeV	number of straight sections	H/V β @ long straight/m
ESRF-EBS	6.0	844	133	8.7	2.56	32	6.9/2.7
APS-U	6.0	1103.6	41.7	4.0	2.74	40	5.19/2.4
HEPS	6.0	1360.4	34.8	1.8	2.64	48	8.18/5.0(2.56/2.31)

三台高能区的第四代光源的储存环设计,均采用 H7BA lattice。其中 APS-U 和 HEPS 在 lattice 设计中引入了 RB 以进一步降低自然发射度。H7BA 中的二极铁磁场强度普遍较低,无法满足弯铁束线用户对弯铁辐射同步光性能的要求。ESRF-EBS 和 APS-U 在弧区中考虑安装额外的不同类型的弯转磁铁作为弯铁辐射源。不过,这需要复杂的束流光学补偿和校正措施,会对束流光学设计的周期性造成破坏^[68]。而 HEPS 则采用 SLS-2 类型的 LGB/RB 单元节作为每个 7BA 最中间的单元节,并将 LGB 磁铁的中间切片作为弯铁辐射源。这种设计不会破坏 Lattice 周期性,避免了引入专门的弯铁辐射源所导致的一系列物理和技术问题。ESRF-EBS 采用了脉冲凸轨注入。而由于发射度更低、动力学孔径小,APS-U 及 HEPS 均采用了在轴置换注入。这种注入方案要求注入器提供高电荷量的注入束。HEPS 采用了增强器高能累积方案^[69],有效降低了增强器低能阶段单束团电荷量的需求。

3.2 中低能光源装置设计

目前中低能的第四代储存环光源装置设计的束流能量在 2.0~3.5 GeV 之间。表 2 列出了目前世界上主要的中低能第四代储存环光源装置的设计参数,其中 MAX IV 光源已运行, Sirius 光源正在调试^[70],其他光源正在建设或设计中^[12, 45, 71-76]。中低能光源的束流磁刚度比高能光源要小,所使用的四、六极磁铁积分强度一般可以相对较低,因此,如表 2 所示,其采用的 MBA lattice 具有更大的多样性。表 2 中的 Diamond-II, ALS-U 和 HALF 光源的设计借鉴了 HMBA lattice,其他光源则采用了分布式色品校正的常规型 MBA lattice。为增加直线节数,从表 2 中可以看到,部分中低能光源 (Diamond-II, Elettra 2.0 和 HALF) 采用了具有长、中直线节的 lattice 方案,其单个周期内有两个

表 2 目前世界上主要的中低能区第四代储存环光源的设计参数 (Elettra 2.0, Diamond-II 和 HALF 的直线节数目包括长、中直线节)

Table 2 Main parameters of medium- and low-energy fourth-generation synchrotron light source designs (Elettra 2.0, Diamond-II and HALF have long and short straight sections in each lattice period)

light source	energy/GeV	circumference/m	lattice	natural emittance/(pm·rad)	number of straight sections	momentum compaction/ 10^{-5}	natural damping time (H/V/L)/ms
ALS-U	2.0	196.5	9BA	109	12	20	7.7/14.4/12.7
HALF	2.2	479.86	6BA	86	20+20	9	27.2/37.7/23.4
Elettra 2.0	2.4	259.2	6BA	214	12+12	12	5.5/9.1/6.8
SLS-2	2.7	288	7BA	158	12	10.5	4.1/7.5/6.4
SOLEIL-U	2.75	353.74	7BA-4BA	81	20	9.1	7.1/13.2/11.7
MAX IV	3.0	528	7BA	328	20	30.6	15.8/29.4/25.8
Sirius	3.0	518.4	5BA	250	20	16.4	16.9/22.0/12.9
SKIF	3.0	476.14	7BA	72	16	7.6	9.2/17.9/17.0
ILSF	3.0	528	5BA	270	20	18.2	18.9/26.0/16.0
Diamond-II	3.5	560.56	6BA	159	24+24	11	9.5/18.1/16.4

不同长度的直线节。中直线节不仅可以放置短的插入元件,还可以放置主高频腔、谐波腔及其他设备,如 Elettra 2.0 的常温高频腔将放置于中直线节中^[71]。由于中低能光源的周期数相对较少,其非线性动力学效应一般比高能光源要弱一些,相对更容易满足离轴注入要求。表 2 中的 ALS-U 采用在轴置注入,SOLEIL-U 目前同时考虑了离轴和偏能在轴的脉冲非线性磁铁注入^[77],其他光源均采用离轴注入方式。

目前我国立项建设的 HALF 光源将是一台软 X 射线与 VUV 衍射极限储存环光源,储存环能量确定为 2.2 GeV。HALF 光源将 ESRF-EBS 提出的 H7BA lattice 与 SLS-2 提出的 LGB/RB 单元 lattice 结合起来,并进一步借鉴 Diamond-II 的长、中直线节设计,提出并采用了一种新的变版 H6BA lattice^[12]。该 lattice 具有增大动力学孔径、降低束流发射度与阻尼时间、增加直线节空间占比的综合优势。与同样具有长、中直线节的 Diamond-II 的变版 H6BA lattice 相比,在相同能量和周期数情况下,HALF 的变版 H6BA lattice 可以得到更低的束流发射度和更短的阻尼时间。目前所设计的 HALF 储存环的束流自然发射度为 86 pm-rad。在表 2 中,HALF 光源的自然阻尼时间比其他光源要长,这是因为其能量较低且周长较长。HALF 光源将在两个长直线节上安装阻尼扭摆器来进一步降低阻尼时间。由于采用了长、中直线节的设计方案,HALF 储存环的直线节长度占周长比例大于 30%,超过了目前大部分的第四代储存环光源的设计值。考虑加入高频腔及误差效应后的水平正方向(束流注入方向)的动力学孔径约为 7 mm,因此 HALF 储存环将采用离轴的脉冲非线性磁铁注入方式。

4 结 论

目前世界上多个国家正在大力研制和建设第四代储存环光源,我国也正在建设和立项建设两台不同能区的第四代储存环光源——HEPS 和 HALF 光源。第四代储存环光源采用 MBA lattice 以及组合型弯铁、LGB 和 RB 弯铁技术来实现 ~ 100 pm-rad、甚至 ~ 10 pm-rad 量级水平的电子束流发射度。由于极低的束流发射度,储存环中的非线性动力学效应将会非常严重,在 lattice 设计与优化中普遍需要采用非线性抵消策略以及高效的数值优化方法。由于严重的非线性动力学效应导致储存环接受度显著变小,第四代储存环光源开始发展并采用新的对储存环接受度要求较低的束流注入方式和技术。由于极低的束流发射度,第四代储存环光源中束内散射效应变得较为严重;同时极低的束流发射度设计还使真空室横向尺寸明显变小、动量压缩因子也明显变小,给提高束流不稳定性阈值带来很大挑战,需要采取更有效的抑制与应对措施。此外,本文对包括 HEPS 和 HALF 在内的世界上不同能区的第四代储存环光源装置的设计建设情况进行了介绍和分析。

参考文献:

- [1] Zhao Zhentang. Storage ring light sources[J]. *Reviews of Accelerator Science and Technology*, 2010, 3(1): 57-76.
- [2] Pellegrini C, Marinelli A, Reiche S. The physics of X-ray free-electron lasers[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2016, 88: 015006.
- [3] Bilderback D H, Brock J D, Dale D S, et al. Energy recovery linac (ERL) coherent hard X-ray sources[J]. *New Journal of Physics*, 2020, 12: 035011.
- [4] Hettel R. DLSR design and plans: an international overview[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2014, 21(5): 843-855.
- [5] Einfeld D, Schaper J, Plesko M. Design of a diffraction limited light source (DIFL)[C]//*Proceedings Particle Accelerator Conference*. Dallas, USA, 1995: 177-179.
- [6] Tavares P F, Leemann S C, Sjöström M, et al. The MAX IV storage ring project[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2014, 21(Pt 5): 862-877.
- [7] Martensson N, Eriksson M. The saga of MAX IV, the first multi-bend achromat synchrotron light source[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2018, 907: 97-104.
- [8] Liu L, Milas N, Mukai A H C, et al. The Sirius project[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2014, 21(Pt 5): 904-911.
- [9] Farvacque L, Carmignani N, Chavanne J, et al. A low-emittance lattice for the ESRF[C]//*Proceedings of the 4th International Particle Accelerator Conference*. Shanghai, China, 2013: 79-81.
- [10] Borland M, Sun Y, Sajaev V, et al. Lower emittance lattice for the advanced photon source upgrade using reverse bending magnets[C]//*Proceedings of NAPAC2016*. Chicago, USA, 2016: 877-880.
- [11] Jiao Yi, Xu Gang, Cui Xiaohao, et al. The HEPS project[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2018, 25(Pt 6): 1611-1618.
- [12] Bai Zhenghe, Liu Gangwen, He Tianlong, et al. A modified hybrid 6BA lattice for the HALF storage ring[C]//*Proceedings of the 12th International Particle Accelerator Conference*. Campinas, Brazil, 2021: 407-409.
- [13] 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)
- [14] Sands M. Physics of electron storage rings: an introduction[R]. SLAC-121, 1970.
- [15] Teng L C. Minimizing the emittance in designing the lattice of an electron storage ring[R]. Fermilab Report TM-1269, 1984.
- [16] Jiao Yi, Cai Yunhai, Chao A W. Modified theoretical minimum emittance lattice for an electron storage ring with extreme-low emittance[J]. *Physical Review*

- [Accelerators and Beams](#), 2011, 14: 054002.
- [17] Nagaoka R, Wrulich A F. Emittance minimisation with longitudinal dipole field variation[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2007, 575(3): 292-304.
- [18] Streun A. The anti-bend cell for ultralow emittance storage ring lattices[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2014, 737: 148-154.
- [19] Streun A, Garvey T, Rivkin L, et al. SLS-2 – the upgrade of the Swiss light source[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2018, 25(Pt 3): 631-641.
- [20] Riemann B, Streun A. Low emittance lattice design from first principles: reverse bending and longitudinal gradient bends[J]. [Physical Review Accelerators and Beams](#), 2019, 22: 021601.
- [21] Jiao Yi, Xu Gang. PEPX-type lattice design and optimization for the High Energy Photon Source[J]. [Chinese Physics C](#), 2015, 39: 067004.
- [22] Steier C, Robin D, Nadolski L, et al. Measuring and optimizing the momentum aperture in a particle accelerator[J]. [Physical Review E](#), 2002, 65: 056506.
- [23] Bengtsson J. The sextupole scheme for the Swiss light source (SLS): an analytic approach[R]. SLS Note 9/97, 1997.
- [24] Nadolski L, Laskar J. Review of single particle dynamics for third generation light sources through frequency map analysis[J]. [Physical Review Special Topics–Accelerators and Beams](#), 2003, 6: 114801.
- [25] Bengtsson J, Streun A, Singh B, et al. Control of the nonlinear dynamics for medium energy synchrotron light sources[C]//Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference. Vancouver, Canada, 2018: 4037-4041.
- [26] Bengtsson J, Streun A. Robust design strategy for SLS-2[R]. Technical Report SLS2-BJ84-001, 2017.
- [27] Borland M, Decker G, Emery L, et al. Lattice design challenges for fourth-generation storage-ring light sources[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2014, 21(Pt 5): 912-936.
- [28] Bai Zhenghe, Wang Lin. Study of multi-bend achromat lattices for the HALS diffraction-limited storage ring[C]//Proceedings of the 60th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Future Light Sources. Shanghai, China, 2018: 25-27.
- [29] Yang Lingyun, Li Yongjun, Guo Weiming, et al. Multiobjective optimization of dynamic aperture[J]. [Physical Review Special Topics–Accelerators and Beams](#), 2011, 14: 054001.
- [30] Borland M, Emery L, Sajaev V, et al. Multi-objective optimization of a lattice for potential upgrade of the advanced photon source[R]. Technical Report LS-319, 2010.
- [31] Bai Zhenghe, Wang Lin, Li Weimin, et al. Enlarging dynamic and momentum aperture by particle swarm optimization[C]//Proceedings of IPAC2011. San Sebastián, Spain, 2011: 948-950.
- [32] Huang Xiaobiao, Safranek J. Nonlinear dynamics optimization with particle swarm and genetic algorithms for SPEAR3 emittance upgrade[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2014, 757: 48-53.
- [33] Jiao Yi. Improving nonlinear performance of the HEPS baseline design with a genetic algorithm[J]. [Chinese Physics C](#), 2016, 40: 077002.
- [34] Jiao Yi, Xu Gang. Optimizing the lattice design of a diffraction-limited storage ring with a rational combination of particle swarm and genetic algorithms[J]. [Chinese Physics C](#), 2017, 41: 027001.
- [35] 万金字, 孙正, 张相, 等. 机器学习在大型粒子加速器中的应用回顾与展望[J]. [强激光与粒子束](#), 2021, 33: 094001. (Wan Jinyu, Sun Zheng, Zhang Xiang, et al. Machine learning applications in large particle accelerator facilities: review and prospects[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2021, 33: 094001)
- [36] 赵瑀, 李志平, 刘伟航, 等. 衍射极限储存环光源相关物理问题[J]. [科学通报](#), 2020, 65(24): 2587-2600. (Zhao Yu, Li Zhiping, Liu Weihang, et al. Physics issues of the diffraction-limited storage ring light source[J]. [Chinese Science Bulletin](#), 2020, 65(24): 2587-2600)
- [37] Edelen A, Neveu N, Frey M, et al. Machine learning for orders of magnitude speedup in multiobjective optimization of particle accelerator systems[J]. [Physical Review Accelerators and Beams](#), 2020, 23: 044601.
- [38] Li Yongjun, Cheng Weixing, Yu Lihua, et al. Genetic algorithm enhanced by machine learning in dynamic aperture optimization[J]. [Physical Review Accelerators and Beams](#), 2018, 21: 054601.
- [39] Wan Jinyu, Chu P, Jiao Yi, et al. Improvement of machine learning enhanced genetic algorithm for nonlinear beam dynamics optimization[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2019, 946: 162683.
- [40] Wan Jinyu, Chu P, Jiao Yi. Neural network-based multiobjective optimization algorithm for nonlinear beam dynamics[J]. [Physical Review Accelerators and Beams](#), 2020, 23: 081601.
- [41] Takaki H, Nakamura N, Kobayashi Y, et al. Beam injection with a pulsed sextupole magnet in an electron storage ring[J]. [Physical Review Special Topics–Accelerators and Beams](#), 2010, 13: 020705.
- [42] Emery L, Borland M. Possible long-term improvements to the Advanced Photon Source[C]//Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference. Portland, USA, 2003: 256-258.
- [43] Aiba M, Böge M, Marcellini F, et al. Longitudinal injection scheme using short pulse kicker for small aperture electron storage rings[J]. [Physical Review Special Topics–Accelerators and Beams](#), 2015, 18: 020701.
- [44] Gough C, Aiba M. Top-up injection with “anti-septum” [C]//Proceedings of the IPAC2017. Copenhagen, Denmark, 2017: 774-776.
- [45] Braun H, Garvey T, Jorg M, et al. SLS 2.0 storage ring technical design report[R]. PSI Bericht Nr. 21-02, 2021.
- [46] Chen Jinhui, Shi Hua, Wang Lei, et al. Strip-line kicker and fast pulser R&D for the HEPS on-axis injection system[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2019, 920: 1-6.
- [47] Jiang Bocheng, Zhao Zhentang, Tian Shuangqi, et al. Using a double-frequency RF system to facilitate on-axis beam accumulation in a storage ring[J]. *Nuclear*

- Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2016, 814: 1-5.
- [48] Xu Gang, Chen Jinhui, Duan Zhe, et al. On-axis beam accumulation enabled by phase adjustment of a double-frequency RF system for diffraction-limited storage rings[C]//Proceedings of the IPAC2016. Busan, Korea, 2016: 2032-2035.
- [49] Jiang Shichang, Xu Gang. On-axis injection scheme based on a triple-frequency rf system for diffraction-limited storage rings[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2018, 21: 110701.
- [50] Kim J, Jang G, Yoon M, et al. Injection scheme with deflecting cavity for a fourth-generation storage ring[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2019, 22: 011601.
- [51] Yang Penghui, Li Wei, Ren Zhiliang, 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 Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2021, 990: 164968.
- [52] Tarawneh H, Steier C, Falcone R, et al. ALS-II, a potential soft X-ray, diffraction limited upgrade of the advanced light source[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, 493: 012020.
- [53] Nagaoka R, Bane K L F. Collective effects in a diffraction-limited storage ring[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2014, 21(Pt 5): 937-960.
- [54] Carmignani N, Farvacque L, Liuzzo S M, et al. Linear and nonlinear optimizations for the ESRF upgrade lattice[C]//Proceedings of the 6th International Particle Accelerator Conference. Richmond, USA, 2015: 1422-1425.
- [55] Duarte H O C, Sanfelici L, Marques S R, et al. Design and impedance optimization of the Sirius BPM button[C]//Proceedings of the IBIC2013. Oxford, UK, 2013: 365-368.
- [56] Wang Na, Tian Saike, Wang Lei, et al. Impedance optimization and measurements of the injection stripline kicker[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2021, 24: 034401.
- [57] Galayda J N. The advanced photon source[C]//Proceedings of the 1995 Particle Accelerator Conference and International Conference on High Energy Accelerators. Dallas, USA, 1995: 4-8.
- [58] Science and technology programme 2008-2017 (Purple book)[R]. ESRF, 2007.
- [59] Tanaka H, Kumagai N, Masaki M, et al. Top-up operation of SPring-8 storage ring with low-emittance optics[C]//Proceedings of the EPAC2006. Edinburgh, Scotland, 2006: 3359-3361.
- [60] Balewski K, Brefeld W, Decking W, et al. PETRA III: a new high brilliance synchrotron radiation source at DESY[C]//Proceedings of the EPAC 2004. Lucerne, Switzerland, 2004: 2302-2304.
- [61] Raimondi P, Carmignani N, Carver L R, et al. Commissioning of the hybrid multibend achromat lattice at the European Synchrotron Radiation Facility[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2021, 24: 110701.
- [62] Hettel R. Status of the APS-U project[C]//Proceedings of the 12th International Particle Accelerator Conference. Campinas, Brazil, 2021: 7-12.
- [63] Tanaka H, Ishikawa T, Goto S, et al. SPring-8 upgrade project[C]//Proceedings of the IPAC160. Busan, Korea, 2016: 2867-2870.
- [64] Schroer C G, Agapov I, Brefeld W, et al. PETRA IV: the ultralow-emittance source project at DESY[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2018, 25(Pt 5): 1277-1290.
- [65] Jiao Yi. Latest physics design of the HEPS accelerator[J]. *Radiation Detection Technology and Methods*, 2020, 4: 399.
- [66] Jiao Yi, Chen Fusan, He Ping, et al. Modification and optimization of the storage ring lattice of the High Energy Photon Source[J]. *Radiation Detection Technology and Methods*, 2020, 4(4): 415-424.
- [67] Tao Ye. Groundbreaking ceremony at the High Energy Photon Source in Beijing[J]. *Synchrotron Radiation News*, 2019, 32: 40.
- [68] Liuzzo S M, Carmignani N, Chavanne J, et al. Optics adaptations for bending magnet beam lines at ESRF: short bend, 2-pole wiggler, 3-pole wiggler[C]//Proceedings of the IPAC'17. Copenhagen, Denmark, 2017: 666-669.
- [69] Duan Zhe, Chen Jinhui, Guo Yuanyuan, et al. The swap-out injection scheme for the high energy photon source[C]//Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference. Vancouver, Canada, 2018: 4178-4181.
- [70] Liu L, Alves M B, de Sá F H, et al. Sirius commissioning results and operation status[C]//Proceedings of the 12th International Particle Accelerator Conference. Campinas, Brazil, 2021: 13-18.
- [71] Karantzoulis E, Carniel A, Castronovo D, et al. Elettra and Elettra 2.0[C]//Proceedings of the IPAC2021. Campinas, Brazil, 2021: 1474-1476.
- [72] Ghasem H, Martin I P S, Singh B, et al. Progress with the diamond-II storage ring lattice[C]//Proceedings of the 12th International Particle Accelerator Conference. Campinas, Brazil, 2021: 3973-3976.
- [73] Loulergue A, Amornin D, Brunelle P, et al. CDR baseline lattice for the upgrade of SOLEIL[C]//Proceedings of the 12th International Particle Accelerator Conference. Campinas, Brazil, 2021: 1485-1488.
- [74] Steier C, Allézy A, Anders A, et al. Status of the conceptual design of ALS-U[C]//Proceedings of the 8th International Particle Accelerator Conference. Copenhagen, Denmark, 2017: 4134-4137.
- [75] Baranov G, Bogomyagkov A, Morozov I, et al. Lattice optimization of a fourth-generation synchrotron radiation light source in Novosibirsk[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2021, 24: 120704.
- [76] Ahmadi E, Jazayeri S M, Rahighi J. Characterizing and studying the nonlinear beam dynamics performance of Iranian Light Source Facility storage ring[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2019, 927: 140-150.
- [77] Tordeux M A, Alexandre P, Ben El Fekih R, et al. Injection schemes for the SOLEIL upgrade[C]//Proceedings of the 12th International Particle Accelerator Conference. Campinas, Brazil, 2021: 796-798.