衍射极限储存环光源相关物理问题

赵瑀^{1,2,3}, 李志平^{1,2,3}, 刘伟航^{1,2,3}, 万金宇^{1,2}, 焦毅^{1,2*}

1. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049;
2. 中国科学院大学物理科学学院, 北京 100049;
3. 散裂中子源科学中心, 东莞 523803

* 联系人, E-mail: jiaoyi@ihep.ac.cn

2020-02-24 收稿, 2020-05-08 修回, 2020-05-08 接受, 2020-05-09 网络版发表

国家自然科学基金(11922512)和中国科学院青年创新促进会(Y201904)资助

摘要 基于电子储存环的同步辐射光源是20世纪基础科学研究领域应用最为广泛的高性能X射线源, 已经历了三代发展. 第四代同步辐射光源一个重要的发展方向是衍射极限储存环光源. 衍射极限储存环基于紧致型的多弯铁消色散结构, 可以实现接近甚至达到X射线衍射极限的超低发射度, 具有超高亮度、强相干性等优点. 不过, 超低发射度设计带来一系列的挑战, 需要在诸多性能参数之间寻求合理的平衡点. 本文将主要介绍衍射极限储存环的磁聚焦结构设计及注入方法的发展演化、面临的挑战以及解决措施. 此外, 还将介绍机器学习在衍射极限储存环物理研究中的应用, 以及结合自由电子激光原理提升同步辐射性能等课题.

关键词 同步辐射光源, 衍射极限储存环, 多弯铁消色散结构, 机器学习, 自由电子激光

基于电子储存环的同步辐射光源已经历了三代发展^[1]. 随着插入件技术的成熟发展以及亮度的逐步提升, 第三代同步辐射光源成为国际上同步辐射光源的主流. 然而, 近20年来, 科学界认为第三代同步辐射光源的潜力已发挥到极限, 需要发展更高性能的光源. 另外, 相干散射与成像技术、材料表征、原位实验新技术、纳米谱学技术等多个研究领域, 均提出需要更高亮度、更高相干性的X射线, 以实现多尺度成像能力和超高空间、时间、能量分辨的革命性观测技术^[2,3]. 亮度和相干性公式^[4]表明, 发射度越低, 亮度越高, 相干性越好, 因此更低发射度、更高亮度的第四代同步辐射光源应运而生. 新一代同步辐射光源有能量回收型直线加速器光源^[5]、自由电子激光(free electron laser, FEL)^[6,7]和衍射极限储存环^[8]等不同发展方向. 其中, 衍射极限储存环因超高平均亮度、高重复频率、多用户、高稳定性等特点, 与自由电子激光互补, 成为第四

代同步辐射光源一个重要的发展方向. 衍射极限储存环中的束流发射度接近甚至达到X射线的衍射极限($\lambda/4\pi$, λ 为X射线波长). 例如, 波长为0.1 nm的硬X射线, 其衍射极限发射度为8 pm rad; 波长为1 nm的软X射线, 其衍射极限发射度为80 pm rad. 相比第三代同步辐射光源(发射度为1000~5000 pm rad), 衍射极限储存环通过采用紧致型的多弯铁消色散(multi-bend achromat, MBA)结构, 增加储存环内二极铁的数目, 将发射度降低1~2个量级. 事实上, 早在20世纪90年代, Einfeld等人^[9]已经提出基于MBA结构的超低发射度储存环的物理设计方案. 然而, 受限于当时磁铁、真空、注入等技术难题, 这种类型的储存环很难具体实现. 直到近年来, 小孔径高梯度磁铁的成功研制、新型注入技术的提出、非蒸散型吸气剂材料(non-evaporable getter, NEG)涂层在真空实现中的应用等, 使衍射极限储存环的实现成为可能. 目前, 很多国家和地区已经建成或正在建

引用格式: 赵瑀, 李志平, 刘伟航, 等. 衍射极限储存环光源相关物理问题. 科学通报, 2020, 65: 2587–2600

Zhao Y, Li Z P, Liu W H, et al. Physics issues of the diffraction-limited storage ring light source (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 2587–2600, doi: 10.1360/TB-2020-0165

设衍射极限储存环光源,如瑞典MAX-IV^[10]、巴西Sirius^[11]、欧洲同步辐射光源升级装置(European Synchrotron Radiation Facility-Extremely Brilliant Source, ESRF-EBS)^[12]、美国先进光子源升级装置(Advanced Photon Source-Upgrade, APS-U)^[13]、中国高能同步辐射光源(High Energy Photon Source, HEPS)^[14]等。

然而,极小的束流发射度也会给加速器物理和技术带来一系列的挑战,如六极铁强度过高引起的非线性效应增强、动力学接受度减小引起的注入困难、小孔径真空管道引起的阻抗增大等。本文将主要介绍衍射极限储存环物理设计部分课题的发展成果、遇到的挑战以及解决措施,简要介绍了未来光源发展的两个可能的研究课题,包括机器学习在衍射极限储存环中的应用,以及将衍射极限储存环与自由电子激光原理相结合提升光源辐射性能的研究。

1 衍射极限储存环光源物理

在衍射极限储存环设计中,为了实现超低发射度,除了增加二极铁数目,还必须采用很强的横向聚焦和六极磁铁,这将引起极强的非线性效应,导致束流动力学优化困难、动力学接受度变小、动力学孔径减小,进一步给注入带来了困难;动量接受度减小,束流寿命降低。另一方面,超低发射度下,束长较短,真空盒和孔径减小,使得束流集体效应增强,孔径误差容忍度降低。相比第三代光源,衍射极限储存环稳定的参数空间更为狭窄,需要在加速器物理和技术之间,在先进性、稳定性、经济性等不同方面作更为细致综合的权衡。而这些考量均需要在光源的物理设计,特别是磁聚焦结构(lattice)设计中得到体现。以下将重点介绍国际加速器领域在超低发射度储存环的磁聚焦结构设计、束流动力学优化及注入方法等方面的研究进展。

1.1 磁聚焦结构设计

磁聚焦结构设计是指通过不断调整磁铁的位置以

及强度达到预想性能的过程^[15]。这个性能包含束流发射度、长直线节长度、满足注入的束流寿命和动力学孔径等。衍射极限储存环磁聚焦结构设计面临的首要挑战就是在周长、磁铁参数合理,长直线节数目较多的前提下,降低发射度至接近甚至达到衍射极限。

众所周知,电子储存环中,考虑恒定弯转磁场二极铁情况,由于量子激发和辐射阻尼的相互作用,束流达到一个平衡态发射度^[16]:

$$\varepsilon_{x0} = C_q \gamma^2 \frac{\langle H \rangle_{\text{dipole}}}{J_x \rho}, \quad (1)$$

其中, $C_q = 3.8319 \times 10^{-13} \text{ m}$; γ 为相对论因子;

$J_x = 1 - \oint \left(\frac{1}{\rho} + 2\rho k \right) ds$ 为水平阻尼分配系数,对于恒定弯转磁场的二极铁, $J_x \approx 1$; ρ 为二极铁弯转半径; k 是二极铁中的四极磁场强度; $\langle H \rangle_{\text{dipole}}$ 是对二极铁内的 H 函数取平均值,该函数只与色散函数和包络函数相关。

$$H = \gamma_x^2 D_x^2 + 2\alpha_x D_x D'_x + \beta_x D_x'^2, \quad (2)$$

其中, γ_x 、 α_x 、 β_x 为Courant-Snyder参数; D_x 为水平色散函数; $D'_x = dD_x/ds$, s 为电子沿束流轨道的纵向位置。

研究表明,当二极铁中的色散函数和包络函数满足图1所示条件时,平衡发射度达到理论最小值(theoretical minimum emittance, TME)^[17]。严格满足TME条件的单元节,由于其水平相移达到 284° ,需要非常强的横向聚焦,这会引入很大的自然色品,要求很强的色品校正六极铁,引入极强的非线性效应。为此,发展了更利于实际光源设计的改进型TME单元节^[18],使其水平相移小于 180° ,同时还可缩小单元节的长度。

在光源磁聚焦结构设计中,通常将水平发射度公式改写成

$$\varepsilon_0 = C_q \gamma^2 \frac{F(\text{lattice})}{J_x} \frac{1}{N_d^3}, \quad (3)$$

其中, N_d 为储存环内二极铁数目; $F(\text{lattice})$ 是与磁聚焦结构相关的参数,存在理论最小值,如对于双弯铁消色

图1 (网络版彩色)TME条件(a)及TME单元节结构(b)^[17]

Figure 1 (Color online) Condition of TME (a) and structure of TME unit cell (b)^[17]

散(double bend achromat, DBA)结构, $F_{\text{DBA}} = 1 / (4\sqrt{15})$, 对于TME结构, $F_{\text{TME}} = 1 / (12\sqrt{15})$. 由公式(3)可知, 增加储存环中二极铁数目是降低发射度的最有效方法. 此外, 降低束流发射度的方法还有减小束流能量、增大 J_x 、增大辐射阻尼效应等, 不过效果有限. 束流能量的选择取决于感兴趣的同步辐射光的波段, 一般不能随意改动; 在二极铁中增加横向梯度, J_x 可以由1增大到2左右; 可以采用专用的阻尼扭摆器增大辐射阻尼效应, 不过会减少波荡器磁铁的加载空间.

如上所述, 衍射极限储存环基于MBA结构设计(单个MBA结构内的二极铁数目>3). 标准MBA结构见图2, 中间采用多个改进型TME单元节, 两侧采用匹配单元节将外侧长直线节处的色散函数匹配为0. 第一次将这种标准MBA结构设计变成现实的装置是瑞典的MAX-IV光源^[10], 已于2016年建成. 随后, 巴西的Sirius光源^[11]也采用了MBA结构设计. 这些光源采用了新的磁铁和真空技术以实现紧致型的MBA结构, 如采用小孔径(直径达25 mm)、高梯度(达50 T/m)四极磁铁; 采用非蒸散型吸气剂材料涂层分布式抽真空方案, 取代第三代光源常见的集中式吸气泵.

然而, 标准MBA结构存在一定的局限性, 特别是对于高能区衍射极限储存环. 研究表明, 当进一步降低发射度到100 pm rad以下时, 将需要非常强的色散校正六极铁^[19]. 这时, 即使采用小孔径磁铁技术, 仍然会要求六极铁长度很长. 这使得设计紧致型的MBA结构变得非常困难, 限制了进一步压低发射度的可能性.

为了解决上述困难, 国际上提出了混合MBA(hybrid-MBA)结构. 如图2所示, 混合MBA结构由中间多个改进型TME单元节和两侧各一个类-DBA组成. 一方面, 通过在两侧类-DBA结构中采用两块纵向梯度二极铁, 形成两个大的色散局部凸轨, 并将所有色散校正六极铁集中放置在色散凸轨中, 大大降低六极铁强度.

另一方面, 在中间的改进型TME单元节中采用超高梯度(80~100 T/m)四极铁, 以实现更紧凑的磁铁布局. 通过将色品校正、发射度压缩功能分离, 混合MBA结构很好地解决了发射度降低与六极铁强度增加之间的矛盾. 另外, 通过调整六极铁间相移, 使其等于或接近 $(2n+1)\pi$, 从而在单个MBA内抵消大部分六极铁的非线性效应, 实现较大的动力学接受度. 该结构由加速器物理专家Raimondi提出, 并首先应用于ESRF-EBS光源^[12]的物理设计中. 由于混合MBA结构的优异性能, APS-U^[13]、先进光源升级装置(Advanced Light Source-II, ALS-II)^[20]、HEPS^[14]、合肥先进光源(Hefei Advanced Light Source, HALS)^[21]等多个光源均基于该结构设计.

为了更进一步降低发射度, 在改进型TME单元节之外, 瑞士同步辐射光源升级装置(Swiss Light Source-II, SLS-II)的专家提出了新的超低发射度单元节结构^[22]. 这种新型的单元节, 一方面采用纵向梯度二极铁^[23-27], 使其弯转半径与 H 函数的变化趋势相趋近; 另一方面采用反向弯转二极铁^[28,29], 将色散函数与束流包络函数进行相对独立的调节, 可以更有效地降低束流发射度. 研究显示, 利用这种新型单元节^[29]可以实现比TME更小的发射度. 将上述新手段与已有混合MBA结构相结合, 可以进一步降低储存环的发射度. 例如, APS-U将混合结构与反向弯转二极铁结合^[13], HEPS将混合结构与这种新的单元节相结合^[14], 均实现了更低的束流发射度.

此外, 美国国家同步辐射光源升级装置(National Synchrotron Light Source-II, NSLS-II)的专家提出复杂二极铁方案^[30-32], 即在增加全环二极铁数目 N_d 的同时, 将每块二极铁再划分成 N_p 块更小的二极铁组合, 进一步降低发射度:

$$\varepsilon_x = F(\text{lattice}) \frac{E^2}{J_x N_d^3} \Rightarrow F(\text{lattice}) \frac{E^2}{J_x |N_d N_p|^3}. \quad (4)$$

图2 (网络版彩色)混合MBA lattice结构

Figure 2 (Color online) Structure of hybrid-MBA lattice

图3 (网络版彩色) I型和II型复杂二极铁磁铁布局^[31,32]. (a) I型复杂二极铁束流参数; (b) I型复杂二极铁磁铁布局; (c) II型复杂二极铁磁铁布局

Figure 3 (Color online) The magnet layout of complex bend I and II^[31,32]. (a) Optics parameters of complex bend I; (b) the magnet layout of complex bend I; (c) the magnet layout of complex bend II

如图3所示, I型复杂二极铁^[31,32]是二极、四极磁铁交错排布的组合磁铁,其布局类似于FODO结构.这种设计要求四极铁梯度极高(~ 200 T/m),需要采用超导磁铁和永磁磁铁技术,整块磁铁的长度较长.为了进一步减小磁铁长度,研究者提出了新的只包含四极磁极的II型复杂二极铁方案^[29].不过,这种方案要求磁场梯度更高(>250 T/m),对磁铁设计和建造带来了新的更大的挑战.

综上,衍射极限储存环磁聚焦结构设计,一方面,通过采用MBA结构、复杂二极铁等方法增加二极铁的数目,压缩二极铁内的色散函数和水平 β 函数,调整二极铁磁场分布减小 H 函数,以及通过在二极铁中增加横向梯度以增加 J_x 等方法实现超低发射度.另一方面,设计建造小孔径、高强度的复合磁铁,在强聚焦前提下,控制单元节的相移小于 π ,或采用特殊设计(如产生色散凸轨),降低六极铁强度,控制储存环中的非线性效应.反向二极铁、纵向梯度铁、复杂二极铁等复合磁铁的提出,为未来更进一步降低发射度提供了一条可行路径,即发展新的复合磁铁.

1.2 束流动力学及亮度优化

衍射极限储存环的束流动力学优化,需要考虑在众多的性能参数之间找到合理的平衡点.这些性能参数包括主要与线性束流动力学相关的发射度、亮度,以及与非线性束流动力学密切相关的动力学孔径(dynamic aperture, DA)、局部动量接受度(local momentum acceptance, LMA)、束流寿命等.其中,非线性束流动力学优化是极具挑战性的研究课题.

非线性优化往往是通过调整六极铁的位置、强度,增加八极铁等手段,调整工作点小数部分以及六极铁

处的lattice参数,以达到最小化共振驱动项和幅度或动量依赖的工作点漂移.

非线性束流动力学优化主要有解析优化和数值优化两类方法^[4,33].解析优化包括Lie代数方法、优化高阶驱动项、全局或局部的抵消技术等方法^[12,33,34].其中,全局抵消技术是通过调整工作点,使其接近四阶几何消色差条件来减小非线性效应;局部优化通过将每组六极铁之间的相移控制在 π 的奇数倍,使其满足 $-I$ 传输条件,抵消六极铁所引起的大部分非线性效应.值得指出的是,这些解析方法基于微扰理论,在稳定区边界(如动力学孔径边界)附近预测的偏差很大.而衍射极限储存环的非线性束流动力学性能与线性束流光学参数、六极铁强度、六极铁间相移等多个参数相关,且没有简单的依赖关系,按照解析方法计算优化并不总能得到很好的非线性束流动力学性能.

为此,在实际设计优化中,通常利用这些解析方法得到初始解.在此基础上,基于数值模拟跟踪直接计算非线性束流动力学性能参数,利用各种优化算法作进一步的优化.常用的优化算法包括多目标遗传算法(multi-objective genetic algorithm, MOGA)^[35-39]、多目标粒子群算法(multi-objective particle swarm algorithm, MOPSO)^[40-42]、模拟退火算法、蚁群算法等. MOPSO能够在解空间中产生更多的多样性,全局搜索能力强,但收敛速度较慢;而MOGA拥有更快的收敛速度,却容易在解多样性不足时陷入局部收敛^[43].模拟退火算法局部搜索能力强,但很容易陷入局部收敛.

目前,将多种已有的优化算法相结合,如将MOPSO和MOGA交替使用是一种提高优化效率的可行方法^[43].在算法的演化过程中, MOPSO能在当前解集中不断馈入更多的多样性,而当多样性足够好时, MOGA又能表

现出更快的收敛速度. 研究表明, 将两种优化方法交替使用, 其效果优于单独使用其中任何一种方法^[43].

另外, 数值模拟优化通常需要耗费大量计算资源和时间, 并且即使利用这些强大的优化算法, 也不能保证一定能找到优化问题的全局最优解. 因此, 发展更高效的优化算法非常重要.

亮度是衍射极限储存环光源的一个关键参数. 当磁聚焦结构及发射度确定后, 可以通过采用真空内插入件和特殊类型插入件、匹配束流包络函数以实现电子束与同步光匹配等方法提升同步辐射亮度.

1.3 注入方法

在三代光源中, 常用的注入方式是局部凸轨注入^[44]. 在此基础上, 针对较小DA的磁聚焦结构设计, 可以采用减小注入束与循环束之间的距离, 或增加注入点处的 β_x 实现注入^[45]. 针对较小MA的磁聚焦结构设计, 可以采用恒流(top-up)注入. 然而, 即使采用上述措施, 凸轨注入仍然需要较大的动力学孔径(>10 mm). 在衍射极限储存环中, 因为存在极强的非线性作用, 其动力学接受度普遍较小. 此外, 如果追求更低的束流发射度和亮度, 需要在动力学接受度上作进一步牺牲. 因此, 有必要发展适用于较小DA情况的注入方法.

2007年, 日本加速器专家提出了多极铁脉冲离轴注入方法^[46]. 该方法利用多极铁中心磁场为0, 可以使循环束通过磁铁中心而不受影响, 偏心注入的电子束受到多极铁提供的横向偏转力被环接受度俘获, 从而完成注入. 为了使循环束在脉冲多极铁中心受到的磁场最小化, 需要将中心轨道附近的脉冲磁场设计得尽可能小. 根据图4(c), 脉冲六极铁或者脉冲八极铁均比

脉冲四极铁合适. 2009年, 日本PF光源实现了脉冲六极铁恒流注入^[47], 且证明脉冲多极铁注入对循环束流的扰动更小. 相比局部凸轨注入方法, 该方法中注入束与循环束距离减小, 要求动力学孔径大于5 mm. 脉冲多极铁注入方式被MAX-IV和Sirius等光源采用.

与离轴注入相比, 在轴注入对动力学孔径要求较小, 是衍射极限储存环主要采用的注入方法. 在轴注入主要分为在轴横向注入和在轴纵向注入两种方式.

在轴横向注入是利用快速冲击器将一个或者多个新鲜注入的束团踢至储存环的中心轨道并将相应的束团替换掉, 因此也被称为置换注入^[48], 见图5(a). 由于注入束团直接注入至中心轨道, 要求动力学孔径在1 mm量级. 不过, 这种注入方式不能累积束流, 因此需要注入器提供全电荷束团. 此外, 还需发展10 ns左右脉宽的快速冲击器技术. APS-U, ALS-U, HEPS光源均采用置换注入方法.

在轴纵向注入是将电子束偏能注入, 利用储存环的纵向束流动力学过程实现注入和累积. 单高频频率的在轴纵向注入(图5(c))^[49], 是通过快速冲击磁铁, 将能量稍高、与同步相移有偏差的新鲜束团注入到两个纵向相稳定区之间, 同时保证其在纵向接受度内, 并因同步辐射阻尼效应被其中一个相稳定区俘获, 从而完成束流积累. 为保证注入效率, 要求动力学孔径在1 mm量级. 此外, 要求动量接受度足够大, 并严格控制相位和能量抖动, 同时要求几纳秒脉宽的快速冲击器技术. 为了降低对快速冲击器脉宽的要求, 需要不断发展新的注入方式. 在此基础上, 加速器专家提出了基于纵向相空间调控的双高频频率的纵向注入方法^[50,51], 以及三高频频率的纵向注入方法^[52]. 其中, 三高频频率

图4 (网络版彩色) 脉冲凸轨注入示意图(a)、脉冲六极铁注入示意图(b)及多极磁场曲线图(c)^[47]

Figure 4 (Color online) Schematic views of pulsed bump injection (a) and pulsed sextupole magnet injection (b), and the field curve of multipoles (c)^[47]

图5 (网络版彩色)在轴注入方法布局图,及单高频和三高频纵向注入过程。(a)在轴置换注入布局图;(b)在轴纵向注入布局图^[49];(c)单高频纵向注入过程^[49];(d)三高频纵向注入过程^[52]

Figure 5 (Color online) Schematic views of on axis injection and process of single- and triple-frequency longitudinal injection. (a) Schematic view of on-axis swap-out injection; (b) schematic view of on-axis longitudinal injection^[49]; (c) process of single-frequency longitudinal injection^[49]; (d) process of triple-frequency longitudinal injection^[52]

纵向注入(图5(d))^[52],将基频腔与二次谐波腔、三次谐波腔组合起来,形成一个更大的相稳定区,可以有效降低对快速冲击器脉宽的要求。

1.4 束流集体效应

束流集体效应是指粒子与粒子之间的相互作用(如散射、空间电荷效应)或粒子与真空管道之间的电磁相互作用(如阻抗)对束流的影响。束流集体效应会引起束流发射度增大、寿命变差、能散增加等问题。为了实现衍射极限储存环光源的设计性能,需要对束流集体效应进行有效抑制。

相比第三代光源,衍射极限储存环发射度降低,动量接受度减小,使束内散射效应^[53]和托歇克效应^[54]变得非常显著。束内散射效应是束团内部多次小角度库仑散射,会引起发射度增长;托歇克效应则是束团内部大角度库仑散射,会导致散射的粒子从束流相稳定区“逃逸”,引起粒子丢失和寿命变差。束内散射效应与束团粒子数目、粒子能量、束团发射度、能散以及束团长度有关。利用谐波腔拉伸束长、选择合适能量、采用低电荷束流、增加阻尼扭摆磁铁、实现“圆”束流等方法^[55,56]可以缓解束内散射效应。另外,托歇克寿命高度依赖于储存环的动量接受度^[57]。一般而言,优化束流动力学,得到大于3%的动量接受度,可实现合理的托歇克寿命。

高流强的束流在不连续的尺寸有限的真空盒中运动,会产生尾场,尾场反作用于束流,会破坏束流稳定性。束流与尾场的相互作用强度可用阻抗表征。一般而言,阻抗随着真空盒孔径减小而增大,纵向阻抗和横向阻抗与真空盒半径 b 的关系分别为 b^{-1} 和 b^{-3} 。相比第三代光源,衍射极限储存环的真空盒尺寸大大减小,采用了NEG镀膜^[58],这引起更大的束流阻抗,会导致局部功率沉积、发射度增长、能散增加、存在束流阈值等诸多问题。因此,需要对真空元件阻抗进行数值计算,对元件结构作相应优化;利用谐波腔拉伸束长,降低束流密度;还可以采用高导电性材料(如铝或铜),以及平滑真空盒表面等措施来减小阻抗。另外,采用正色品和反馈系统也可以有效地抑制束流集体效应。

2 衍射极限储存环光源性能提升可能的研究课题

2.1 机器学习

机器学习^[59]是人工智能的一个重要分支,是将无序数据转化为有用信息的方法。机器学习的主要目标是识别数据中的模式,来解决那些传统方法本来难以解决甚至不可解决的问题。随着计算机性能的进步,机器学习技术有了惊人的发展和应用,在包括计算机视觉、自然语言识别、人脸识别、医学诊断、智能推送

等众多领域取得了巨大成功. 近年来, 加速器专家们愈发地重视机器学习在加速器中的应用, 在许多国际加速器会议中, 如IPAC(<https://ipac2019.vrws.de>)、PCaPAC(<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/pca-pac2018>)、ICALEPCS(<http://icalepcs2019.vrwd.de>)等, 专门设置了机器学习相关分会场.

目前, 机器学习在加速器物理研究、智能控制、设备故障预诊断等多个方面已经取得了一些研究成果. 不过, 机器学习在衍射极限储存环上的应用研究仍处于初级阶段. 近年来, 机器学习领域发展的一些先进算法和技术, 如基于深度神经网络的强化学习算法、先进的大数据储存管理技术等尚未在衍射极限储存环光源中得到应用. 作为典型的学科交叉领域, 机器学习在衍射极限储存环上的应用发展潜力十分巨大.

在衍射极限储存环的物理设计中, 非线性优化是非常复杂的课题. 将机器学习与优化算法相结合, 是提高衍射极限储存环非线性性能参数的一个行之有效的方法. 在优化过程中会产生大量的数值模拟数据, 这些数据正好可以用于机器学习. 例如, 美国布鲁克海文国家实验室(Brookhaven National Laboratory, BNL)以及我国的中国科学院高能物理研究所(Institute of High Energy Physics, IHEP)的专家^[60,61]提出, 将加速器磁聚焦结构优化过程中产生的数据进行聚类, 根据各个类的平均适应度对其进行评价, 挑选出最优类. 然后, 从最优类的变量范围中寻找潜在优质解, 并用潜在优质解替代原本的非优质解, 可以大幅提高MOGA的优化速度. 这种方法已成功应用于NSLS-II和HEPS光源的非线性动力学优化中.

另一方面, 衍射极限储存环的调束运行需要对数以千计的设备元件同时进行精确控制. 由于衍射极限储存环尚在建设当中, 机器学习与调束运行结合的案例较少. 不过, 机器学习已经在多个加速器装置中成功应用. 作者预期, 机器学习可以在调束运行、束流实验、数据分析等多个领域得到广泛应用, 并发挥良好的促进作用. 下面列举几个机器学习在加速器装置中实际应用的成功案例.

2018年, 美国SLAC国家加速器实验室(SLAC National Accelerator Laboratory, SLAC)的专家^[62]针对直线加速器相干光源(Linac Coherent Light Source, LCLS)和加速器科学与实验测试装置(Facilities for Accelerator Science and Experimental Test, FACET-II), 利用模拟数据进行训练, 构建了以束流位置、发射度、束长等

可测量参数作为输入, 束流纵向相位分布作为输出的机器学习模型. 通过基于该模型的反馈控制, 实现了对LCLS电子束纵向相位的精确控制. 2019年, 美国劳伦斯伯克利国家实验室(Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL)的专家^[63]提出了一种类似的机器学习反馈调节方法用于控制光源的束流稳定性. 他们训练了一个神经网络模型, 该模型以插入件参数和色散函数为输入变量, 束团尺寸为输出结果, 并根据该模型进行反馈控制, 可以大幅提高ALS的束流稳定性(图6). 这种方法能将束团尺寸的波动降低至噪声量级, 比传统的控制方法更为有效.

除了束流控制以外, 机器学习还被用于解决某些复杂的设备控制问题. 2015年, 美国Fermi实验室的专家^[64]利用机器学习方法对电子枪的谐振频率进行控制. 电子枪谐振频率会随温度产生明显的偏移, 可以通过精确控制冷却水温度控制电子枪谐振频率. 然而, 传统的控制方法很难对特定位置的水温进行精确控制. 为此, 他们训练了一个能根据当前冷却水阀门开启值来快速预测几个特定位置处冷却水温度的机器学习模型. 基于训练好的机器学习模型, 利用一个预测型的控制算法就可以方便地控制多个位置的冷却水的温度, 从而实现对电子枪的谐振频率的控制. 这些成功应用都展现了机器学习用于储存环加速器智能控制方面的巨大潜力.

在加速器运行时, 各个系统的设备故障往往会严重影响其运行效率, 大幅拖延科研进度. 加速器故障的发生往往突然且迅速, 难以依靠传统手段进行有效预防, 事后排查也十分困难. 利用机器学习对设备故障进行预诊断, 则可能是一种有效的故障预防方法. 2017年, 欧洲核子中心(European Organization for Nuclear Research, CERN)的Wielgosz等人^[65]成功使用长短神经网络模型对大型强子对撞机(Large Hadron Collider, LHC)的超导磁铁状态进行了监测. 这种方法可以有效预测超导磁铁的打火失超故障, 为设备的稳定运行带来保障.

2.2 更优异的同步辐射性能

衍射极限储存环的辐射性能与三代光源相比已有大幅提升, 而作为用户装置, 性能需匹配用户需求. 随着用户需求的不断提高, 相应的辐射性能也要进一步改善和升级. 下面就缩短辐射脉冲长度和提高辐射相干性两方面来讨论获得更优异同步辐射性能的可能

图6 (网络版彩色)神经网络模型和线性回归模型预测得到的垂直方向束团尺寸与ALS真实测得的束团尺寸的比较^[63]

Figure 6 (Color online) Comparison of the measured vertical beam size of the ALS and the vertical beam size predicted by a neural network and linear regression^[63]

路径。

储存环中的束流长度在皮秒量级,其产生的同步辐射脉冲长度也在同一量级。若能将辐射脉冲长度缩短至飞秒量级,将会使在衍射极限储存环光源上开展物质的超快过程研究成为可能。

实际上,国际加速器领域在第三代光源时代就已经对如何在储存环光源中产生飞秒脉冲开展了许多研究。1996年,美国阿贡国家实验室(Argonne National Laboratory, ANL)的专家提出一种利用高功率飞秒激光调制产生束流飞秒切片(femtosing)的方法^[66]。如图7所示,电子束在调制器中进行能量调制后,在下游二极铁的作用下,不同能量的电子横向位置发生偏移,进而产生切片束流。切片束流通过波荡器辐射出短脉冲,并通过光圈孔径将短脉冲与背景辐射分离。

飞秒切片方法获得的短脉冲源自切片束流的自发辐射,光子通量相比于未切片束流显著降低。在衍射极限储存环中应用此方案,相比第三代光源切片效率更高,相干性更好,不过光子通量依然损失较大^[67]。其主要

图7 (网络版彩色)飞秒切片方法示意图

Figure 7 (Color online) Schematic view of the femtoslicing method

要原因是自发辐射的光子数正比于电子数,切片后的电子数目降低导致光子通量降低。如果能在储存环中实现相干辐射,其辐射光子数正比于电子数平方,则光子通量将会大幅提升。

在储存环光源中,可借鉴自由电子激光(free electron laser, FEL)原理实现相干辐射。FEL按初始信号起源可分成两类。第一类的初始信号起源于束流的自发辐射,此类FEL单次增益有低增益和高增益两种模式;

第二类的初始信号来源于预群聚束流的相干辐射, 此类FEL单次增益为高增益. 利用外置激光对束流进行密度调制可实现预群聚. 群聚后的束流通过下游波荡器可获得波长为外置激光高次谐波的相干辐射光. 将外置激光调制束流的预聚束方案应用于储存环可实现飞秒相干辐射, 大幅提高光子通量. 相关的预聚束方案有谐波产生方案(coherent harmonic generation, CHG)^[68,69]、回声型谐波产生方案(echo-enable harmonic generation, EEHG)^[70~74]、相位汇聚谐波产生方案(phase-merging enhanced harmonic generation, PEHG)^[75~77], 以及与PEHG相似的基于横向-纵向耦合的方案^[78,79]. 由于谐波转换次数和高功率激光技术限制, 利用这些方案可在储存环中获得极紫外辐射.

为获得更短辐射波长, 结合第一类初始信号为自

发辐射的FEL将是一种可能方向. 此类FEL在低增益模式下为获得高功率输出, 往往采用多次增益方式. 具体而言, 束流多次在光学共振腔内与光场作用, 多次放大光场, 最后饱和输出. 这种结构也被称为FEL振荡器^[80]. 储存环的多束团模式非常适合为FEL振荡器提供束流. 事实上, 储存环和FEL振荡器的结合也已实现^[81]. 不过, 受反射镜技术的限制, 其辐射波长在百纳米以上, 很难达到X射线波段, 这种类型的储存环FEL逐渐退出研究前沿. 近年来, 晶体反射材料的发展使FEL振荡器实现X射线输出成为可能^[82], 基于FEL振荡器的储存环FEL研究又再次开展^[83]. 在FEL理论发展初期, 高增益模式被认为是获得X射线FEL的有效路径^[84]. 不过, 高增益X射线FEL对束流品质的要求非常苛刻. 20世纪80年代中期, 对放置于储存环bypass直线节的高增益FEL的分

图 8 (网络版彩色)Bypass光源布局以及双环光源示意图、FEL功率增益模拟曲线. (a) Bypass光源布局; (b) 双环光源示意图; (c) 双环光源FEL功率增益模拟曲线; (d) 双环光源FEL横向模式图

Figure 8 (Color online) Schematic view of the bypass light source and the double ring light source, simulated FEL power gain curve. (a) Layout of the bypass light source; (b) layout of the double ring light source; (c) simulated FEL power gain curve in double ring light source; (d) transverse mode pattern for the double ring light source FEL

析^[85,86]表明, 受限于储存环的能散($\sim 0.1\%$)、峰值流强(~ 100 A)和归一化发射度($\sim 10^{-6}$ m), 最短辐射波长在50 nm左右. 此后, 高亮度光阴极电子枪技术的发展使得FEL研究转向基于直线加速器的高增益FEL. 时至今日, 基于直线加速器的FEL已获得显著成功. 另一方面, 随着储存环理论和加速器技术的发展, 特别是衍射极限储存环的提出、束流能散补偿技术的出现和束流压缩技术的成熟, 国内外又重新开展储存环高增益X射线FEL的研究.

为克服衍射极限储存环的峰值电流、能散和空间限制, 实现高增益辐射, 国际加速器专家提出结合bypass和横向梯度扭摆器(transverse gradient undulator, TGU)^[87](图8(a))在储存环中实现高增益自由电子激光的方案^[88,89]. 模拟结果表明, 通过压缩束流长度获得大于百安培峰值流强后, 利用横向梯度扭摆器可获得百兆瓦软X射线(~ 1 nm)辐射.

Bypass结构只能产生一条FEL束线. 为提高束流利用率, 我们提出了双环光源方案. 如图8(b)所示, 双环光源分为两个环, 内环为衍射极限储存环, 外环有多个长直线节(>10 m)用于自由电子激光. 其工作模式为: 将内环束流引出至外环, 经束流压缩后在外环的多个横向梯度波荡器中产生自由电子激光, 之后将束流解压缩

恢复至原束长, 并回注至内环, 利用辐射阻尼机制, 恢复到平衡态后再次引出. 其重复频率可达千赫兹量级. 模拟分析(图8(c))显示, 这种方案也可得到百兆瓦软X射线(~ 3 nm)辐射.

在储存环中压缩束团后, 如何维持短束长并有效抑制相干辐射效应引起的相空间畸变和发射度增长是其中一个关键问题. 国内外已针对该效应开展了深入研究^[90-100], 其中将低动量压缩因子的磁聚焦结构设计和消除相干辐射效应导致的横向发射度增长的点力模型^[100]相结合是目前较有前景的方案之一.

3 总结与展望

基于电子储存环的同步辐射光源是20世纪基础科学研究领域应用最为广泛的X射线源. 目前, 同步辐射光源已发展到第四代, 而基于紧致型多弯铁磁聚焦结构的衍射极限储存环光源, 作为其中的一个重要发展方向, 将相关的加速器技术和物理都推进到了“极限”. 在其物理设计优化中, 调节变量数目繁多, 参数要求趋近极限, 需要多方面综合考量, 全局优化. 另外, 衍射极限储存环要求发展新的磁铁、真空、注入等技术. 未来, 可通过机器学习和储存环FEL等方法, 进一步提升光源整体性能.

参考文献

- 1 Zhao Z T. Storage ring light sources. *Rev Accel Sci Tech*, 2010, 3: 57–76
- 2 Huang X B. Potential performance limit of storage ring. In: Proceedings of 8th International Particle Accelerator Conference, Copenhagen, Denmark, 2017, WEPAB14. 2836–2839
- 3 Eriksson M, van der Veen J F, Quitmann C. Diffraction-limited storage rings—A window to the science of tomorrow. *J Synchrotron Rad*, 2014, 21: 837–842
- 4 Jiao Y, Xu G, Chen S Y, et al. Advances in physical design of DLSR (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2015, 27: 045108 [焦毅, 徐刚, 陈森玉, 等. 衍射极限储存环物理设计研究进展. *强激光与粒子束*, 2015, 27: 045108]
- 5 Bilderback D H, Brock J D, Dale D S, et al. Energy recovery linac (ERL) coherent hard X-ray sources. *New J Phys*, 2010, 12: 035011
- 6 Pellegrini C, Marinelli A, Reiche S. The physics of X-ray free-electron lasers. *Rev Mod Phys*, 2016, 88: 015006
- 7 Feng C, Deng H X. Review of fully coherent free-electron lasers. *Nucl Sci Tech*, 2018, 29: 160
- 8 Hettel R. DLSR design and plans: An international overview. *J Synchrotron Rad*, 2014, 21: 843–855
- 9 Einfeld D, Schaper J, Plesko M. Design of a diffraction limited light source (DIFL). In: Proceedings of Particle Accelerator Conference, Dalls, USA, 1995, TPG08. 177–179
- 10 Tavares P F, Leemann S C, Sjöström M, et al. The MAX IV storage ring project. *J Synchrotron Radiat*, 2014, 21: 862–877
- 11 Liu L, Milas N, Mukai A H C, et al. The Sirius project. *J Synchrotron Radiat*, 2014, 21: 904–911
- 12 Farvacque L, Carmignani N, Chavanne J, et al. A low-emittance lattice for the ESRF. In: Proceedings of 4th International Particle Accelerator Conference, Shanghai, China, 2013, MOPEA008. 79–81
- 13 Borland M, Berenc T, Sajaev V, et al. Lower emittance lattice for the Advance Photon Source Upgrade using reverse bending magnets. In: Proceedings of North American Particle Accelerator Conference, Chicago, USA, 2016, WEPOB01. 877–880
- 14 Jiao Y, Xu G, Cui X H, et al. The HEPS project. *J Synchrotron Radiat*, 2018, 25: 1611–1618
- 15 Borland M, Decker G, Emery L, et al. Lattice design challenges for fourth-generation storage-ring light sources. *J Synchrotron Radiat*, 2014, 21:

912–936

- 16 Sands M. The physics of electron storage rings: An introduction. In: Conference Proceedings of 1970, 6906161, SLAC-PUB-121. 257–411
- 17 Teng C L. Minimizing the Emittance in Designing the Lattice of an Electron Storage Ring. Fermilab Report, Fermi National Accelerator Lab, Batavia, IL, USA, 1984, TM-1269
- 18 Jiao Y, Cai Y, Chao A W. Modified theoretical minimum emittance lattice for an electron storage ring with extreme-low emittance. *Phys Rev Spec Top-Accel Beams*, 2011, 14: 054002
- 19 Jiao Y, Xu G. PEPX-type lattice design and optimization for the High Energy Photon Source. *Chin Phys C*, 2015, 39: 067004
- 20 Sun C, Nishimura H, Robin D, et al. Design of the ALS-U storage ring Lattice. In: Proceedings of 8th International Particle Accelerator Conference, Copenhagen, Denmark, 2017, WEPAB105. 2827–2829
- 21 Bai Z H, Li W, Luo Q, et al. Initial lattice design for Heifei Advanced Light Source: A VUV and soft X-ray diffraction-limited storage ring. In: Proceedings of 7th International Particle Accelerator Conference, Busan, Korea, 2016, WEPOW027. 2889–2891
- 22 Streun A, Aiba M, Ehrlichman M, et al. Design studies for an upgrade of the SLS storage ring. In: Proceedings of 6th International Particle Accelerator Conference, Richmond, USA, 2015, TUPJE047. 1724–1727
- 23 Nagaoka R, Wrulich A F. Emittance minimisation with longitudinal dipole field variation. *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, 2017, 575: 292–304
- 24 Guo J, Raubenheimer T. Low emittance E^+/E^- storage ring design using bending magnet with longitudinal gradient. In: Proceedings of 8th European Particle Accelerator Conference, Paris, France, 2002. 1136–1138
- 25 Papaphilippou Y, Elleaume P. Analytical considerations for reducing the effective emittance with variable dipole field strengths. In: Proceedings of Particle Accelerator Conference, Knoxville, TN, USA, 2015. 2086–2088
- 26 Wang C X. Minimum emittance in storage rings with uniform or nonuniform dipoles. *Phys Rev Spec Top-Accel Beams*, 2009, 12: 061001
- 27 Streun A, Wrulich A. Compact low emittance light sources based on longitudinal gradient bending magnets. *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, 2015, 770: 98–112
- 28 Streun A. The anti-bend cell for ultralow emittance storage ring lattices. *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, 2014, 737: 148–154
- 29 Riemann B, Streun A. Low emittance lattice design from first principles: Reverse bending and longitudinal gradient bends. *Phys Rev Accel Beams*, 2019, 22: 021601
- 30 Shaftan T, Smaluk V, Wang G. The concept of complex bend. Report, BNL-211211-2019-TECH, 2019
- 31 Wang G, Shaftan T, Smaluk V, et al. Complex bend: Strong-focusing magnet for low-emittance synchrotrons. *Phys Rev Accel Beams*, 2018, 21: 100703
- 32 Wang G, Shaftan T, Smaluk V, et al. Complex bend. II. A new optics solution. *Phys Rev Accel Beams*, 2019, 22: 110703
- 33 Chao A W. Lecture notes on special topics in accelerator physics. SLAC, SLAC-PUB-9574, 2012
- 34 Cai Y, Bane K, Hettel R, et al. Ultimate storage ring based on fourth-order geometric achromats. *Phys Rev Spec Top-Accel Beams*, 2012, 15: 054002
- 35 Bazarov I V, Sinclair C K. Multivariate optimization of a high brightness dc gun photoinjector. *Phys Rev Spec Top-Accel Beams*, 2015, 8: 034202
- 36 Yang L, Robin D, Sannibale F, et al. Global optimization of an accelerator lattice using multiobjective genetic algorithms. *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, 2009, 609: 50–57
- 37 Borland M, Sajaev V, Xiao A, et al. Direct methods of optimization of storage ring dynamic and momentum aperture. In: Proceedings of Particle Accelerator Conference, Vancouver, Canada, 2009, TH6PFP062. 3850–3852
- 38 Yang L, Li Y, Guo W, et al. Multiobjective optimization of dynamic aperture. *Phys Rev Spec Top-Accel Beams*, 2011, 14: 054001
- 39 Gao W, Wang L, Li W. Simultaneous optimization of beam emittance and dynamic aperture for electron storage ring using genetic algorithm. *Phys Rev Spec Top-Accel Beams*, 2011, 14: 094001
- 40 Bai Z, Li W, Wang L. Emittance optimization using particle swarm algorithm. In: Proceedings of 2nd International Particle Accelerator Conference, San Sebastián, Spain, 2011, WEPC109. 2271–2273
- 41 Pang X, Rybarczyk L J. Multi-objective particle swarm and genetic algorithm for the optimization of the LANSCE linac operation. *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, 2014, 741: 124–129
- 42 Huang X, Safranek J. Nonlinear dynamics optimization with particle swarm and genetic algorithms for SPEAR3 emittance upgrade. *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, 2014, 757: 48–53
- 43 Jiao Y, Xu G. Optimizing the lattice design of a diffraction-limited storage ring with a rational combination of particle swarm and genetic algorithms. *Chin Phys C*, 2017, 41: 027001
- 44 Seeman J T. Injection issues of electron-positron storage rings. In: Conference-9204126-9, Stanford Linear Accelerator Center, Menlo Park, CA (United States), 1992, SLAC-PUB-5933
- 45 Bei M, Borland M, Cai Y, et al. The potential of an ultimate storage ring for future light sources. *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, 2010, 622:

518–535

- 46 Harada K, Kobayashi Y, Miyajima T, et al. New injection scheme using a pulsed quadrupole magnet in electron storage rings. *Phys Rev Spec Top-Accel Beams*, 2007, 10: 123501
- 47 Takaki H, Nakamura N, Kobayashi Y, et al. Beam injection with a pulsed sextupole magnet in an electron storage ring. *Phys Rev Spec Top-Accel Beams*, 2010, 13: 020705
- 48 Borland M. A super-bright storage ring alternative to an energy recovery linac. *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, 2006, 557: 230–235
- 49 Aiba M, Böge M, Marcellini F, et al. Longitudinal injection scheme using short pulse kicker for small aperture electron storage rings. *Phys Rev Spec Top-Accel Beams*, 2015, 18: 020701
- 50 Jiang B C, Zhao Z T, Tian S Q, et al. Using a double-frequency RF system to facilitate on-axis beam accumulation in a storage ring. *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, 2016, 814: 1–5
- 51 Xu G, Chen J H, Duan Z, et al. On-axis beam accumulation enabled by phase adjustment of a double-frequency RF system for diffraction-limited storage rings. In: Proceedings of 7th International Particle Accelerator Conference, Busan, Korea, 2016. 2032–2035
- 52 Jiang S, Xu G. On-axis injection scheme based on a triple-frequency rf system for diffraction-limited storage rings. *Phys Rev Accel Beams*, 2018, 21: 110701
- 53 Piwinski A. Intra-beam scattering. In: Month M, Turner S, eds. *Frontiers of Particle Beams*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1988
- 54 Piwinski A. The Touschek effect in strong focusing storage rings. 1999, arxiv: preprint physics/9903034
- 55 Li W, Bai Z H, Zhang T, et al. Study of the intra-beam scattering effects in the HALS Storage Ring. In: Proceedings of 10th International Particle Accelerator Conference, Melbourne, Australia, 2019, TUPGW042. 1501–1503
- 56 Vivoli A, Bence A, Brunelle P, et al. Intra-beam scattering effect in the SOLEIL storage ring upgrade. In: Proceedings of 10th International Particle Accelerator Conference, Melbourne, Australia, 2019, WEPTS011. 3106–3108
- 57 Carnignani N. Touschek lifetime studies and optimization of the ESRF: Present and upgraded lattice. Doctor Dissertation. Pisa: University of Pisa, 2015
- 58 Nagaoka R, Bane K L F. Collective effects in a diffraction-limited storage ring. *J Synchrotron Radiat*, 2014, 21: 937–960
- 59 Carleo G, Cirac I, Cranmer K, et al. Machine learning and the physical sciences. *Rev Mod Phys*, 2019, 91: 045002
- 60 Li Y, Cheng W, Yu L H, et al. Genetic algorithm enhanced by machine learning in dynamic aperture optimization. *Phys Rev Accel Beams*, 2018, 21: 054601
- 61 Wan J, Chu P, Jiao Y, et al. Improvement of machine learning enhanced genetic algorithm for nonlinear beam dynamics optimization. *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, 2019, 946: 162683
- 62 Scheinker A, Edelen A, Bohler D, et al. Demonstration of model-independent control of the longitudinal phase space of electron beams in the Linac-coherent light source with femtosecond resolution. *Phys Rev Lett*, 2018, 121: 044801
- 63 Leemann S C, Liu S, Hexemer A, et al. Demonstration of machine learning-based model-independent stabilization of source properties in synchrotron light sources. *Phys Rev Lett*, 2019, 123: 194801
- 64 Edelen A L, Biedron S G, Milton S V, et al. Initial experimental results of a machine learning-based temperature control system for an RF gun. In: Proceedings of 6th International Particle Accelerator Conference, Richmond, VA, 2015, MOPWI028. 1217–1219
- 65 Wielgosz M, Skoczeń A, Mertik M. Using LSTM recurrent neural networks for monitoring the LHC superconducting magnets. *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, 2017, 867: 40–50
- 66 Zholents A A, Zolotarev M S. Femtosecond X-ray pulses of synchrotron radiation. *Phys Rev Lett*, 1996, 76: 912–915
- 67 Di Mitri S, Barletta W, Bianco A, et al. Laser-slicing at a low-emittance storage ring. *J Synchrotron Radiat*, 2019, 26: 1523–1538
- 68 Girard B, Lapiere Y, Elleaume P, et al. Optical frequency multiplication by an optical klystron. *Phys Rev Lett*, 1984, 53: 2405–2408
- 69 Yu L H. Generation of intense UV radiation by subharmonically seeded single-pass free-electron lasers. *Phys Rev A*, 1991, 44: 5178–5193
- 70 Stupakov G. Using the beam-echo effect for generation of short-wavelength radiation. *Phys Rev Lett*, 2009, 102: 074801
- 71 Xiang D, Stupakov G. Echo-enabled harmonic generation free electron laser. *Phys Rev Spec Top-Accel Beams*, 2009, 12: 030702
- 72 Evain C, Loulergue A, Nadjai A, et al. Soft X-ray femtosecond coherent undulator radiation in a storage ring. *New J Phys*, 2012, 14: 023003
- 73 Gao W W, Li H T, Wang L. Preliminary study of EEHG-based superradiant undulator radiation at the HLS-II storage ring. *Chin Phys C*, 2017, 41: 078101
- 74 Liu W H, Zhou G Q, Jiao Y. Generating femtosecond coherent X-ray pulses in a diffraction-limited storage ring with the echo-enabled harmonic generation scheme. *Nucl Sci Tech*, 2018, 29: 143
- 75 Deng H, Feng C. Using off-resonance laser modulation for beam-energy-spread cooling in generation of short-wavelength radiation. *Phys Rev Lett*, 2013, 111: 084801
- 76 Feng C, Deng H, Wang D, et al. Phase-merging enhanced harmonic generation free-electron laser. *New J Phys*, 2014, 16: 043021
- 77 Liu W H, Jiao Y. Generating ultrashort X-ray pulse in a diffraction-limited storage ring by phase-merging enhanced harmonic generation with

- normal modulator. In: Proceedings of 9th International Particle Accelerator Conference, Vancouver, Canada, 2018, TUPMF051. 1371–1374
- 78 Feng C, Zhao Z. A storage ring based free-electron laser for generating ultrashort coherent EUV and X-ray radiation. *Sci Rep*, 2017, 7: 4724
- 79 Wang X, Feng C, Liu T, et al. Angular dispersion enhanced prebunch for seeding ultrashort and coherent EUV and soft X-ray free-electron laser in storage rings. *J Synchrotron Radiat*, 2019, 26: 677–684
- 80 Deacon D A G, Elias L R, Madey J M J, et al. First operation of a free-electron laser. *Phys Rev Lett*, 1977, 38: 892–894
- 81 Billardon M, Ortega J M, Elleaume P, et al. First operation of a storage-ring free-electron laser. *Phys Rev Lett*, 1983, 51: 1652–1655
- 82 Kim K J, Shvyd'ko Y, Reiche S. A proposal for an X-ray free-electron laser oscillator with an energy-recovery linac. *Phys Rev Lett*, 2008, 100: 244802
- 83 Kim K J, Kearney S P, Kolodziej T, et al. High-flux, fully coherent X-ray FEL oscillator. In: proceedings of 38th International Free-Electron Laser Conference, Santa Fe, New Mexico, 2017, TUC03
- 84 Pellegrini C. The history of X-ray free-electron lasers. *Eur Phys J H*, 2012, 37: 659–708
- 85 Murphy J B, Pellegrini C. Generation of high-intensity coherent radiation in the soft-X-ray and vacuum-ultraviolet region. *J Opt Soc Am B*, 1985, 2: 259–264
- 86 Kim K J, Bisognano J J, Garren A A, et al. Issues in storage-ring design for operation of high-gain FEL. *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, 1985, 239: 54–61
- 87 Huang Z, Ding Y, Schroeder C B. Compact X-ray free-electron laser from a laser-plasma accelerator using a transverse-gradient undulator. *Phys Rev Lett*, 2012, 109: 204801
- 88 Cai Y, Ding Y, Hettel R, et al. An X-ray free electron laser driven by an ultimate storage ring. *Synchrotron Radiat News*, 2013, 26: 39–41
- 89 Di Mitri S, Cornacchia M. Operating synchrotron light sources with a high gain free electron laser. *New J Phys*, 2015, 17: 113006
- 90 Nakazato T, Oyama M, Niimura N, et al. Observation of coherent synchrotron radiation. *Phys Rev Lett*, 1989, 63: 2433
- 91 Saldin E L, Schneidmiller E A, Yurkov M V. On the coherent radiation of an electron bunch moving in an arc of a circle. *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, 1997, 398: 373–394
- 92 Dohlus M, Limberg T. Emittance growth due to wake fields on curved bunch trajectories. *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, 1997, 393: 494–499
- 93 Braun H, Chautard F, Corsini R, et al. Emittance growth during bunch compression in the CTF-II. *Phys Rev Lett*, 2000, 84: 658–661
- 94 Heifets S, Stupakov G, Krinsky S. Coherent synchrotron radiation instability in a bunch compressor. *Phys Rev Spec Top-Accel Beams*, 2002, 5: 064401
- 95 Hajima R. Emittance compensation in a return arc of an energy-recovery linac. *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, 2004, 528: 335–339
- 96 Bassi G, Agoh T, Dohlus M, et al. Overview of CSR codes. *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, 2006, 557: 189–204
- 97 Sagan D, Hoffstaetter G, Mayes C, et al. Extended one-dimensional method for coherent synchrotron radiation including shielding. *Phys Rev Spec Top-Accel Beams*, 2009, 12: 040703
- 98 Yakimenko V, Fedurin M, Litvinenko V, et al. Experimental observation of suppression of coherent-synchrotron-radiation-induced beam-energy spread with shielding plates. *Phys Rev Lett*, 2012, 109: 164802
- 99 Di Mitri S, Cornacchia M, Spampinati S. Cancellation of coherent synchrotron radiation kicks with optics balance. *Phys Rev Lett*, 2013, 110: 014801
- 100 Jiao Y, Cui X, Huang X, et al. Generic conditions for suppressing the coherent synchrotron radiation induced emittance growth in a two-dipole achromat. *Phys Rev Spec Top-Accel Beams*, 2014, 17: 060701

Summary for “衍射极限储存环光源相关物理问题”

Physics issues of the diffraction-limited storage ring light source

Yu Zhao^{1,2,3}, Zhiping Li^{1,2,3}, Weihang Liu^{1,2,3}, Jinyu Wan^{1,2} & Yi Jiao^{1,2*}¹ Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;² School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;³ Spallation Neutron Source Science Center, Dongguan 523803, China* Corresponding author, E-mail: jiaoyi@ihep.ac.cn

The synchrotron radiation light source based on electron storage ring is the most widely used high-performance X-ray source in the field of basic scientific research in the 20th century, and has undergone three generations of development. One important direction of the new generation light source, i.e., the fourth generation light source, is the so-called diffraction-limited storage ring (DLSR) light source. DLSR, with ultra-high average brightness, high repetition frequency, multi-user, high stability, complementary to the free electron laser (FEL), has a great development in recent decades. By adopting lattice design based on compact multi-bend achromats (MBAs), DLSR allows to achieve one or two orders of magnitude lower emittance approaching the diffraction limit of X-rays, and much higher brightness and coherence than available in the third generation light source, while inheriting the high brightness, multi-user and high stability advantages of existing ring light sources. In this paper, the progress made in the last few decades in physics design and optimization of the DLSR, especially on the ultralow-emittance lattice and injection schemes, will be overviewed. To achieve an ultralow emittance, lattice structures of standard MBA and hybrid MBA, and novel magnets of high-gradient quadrupole, antibend, longitudinal gradient dipole and complex bend, have been proposed. To obtain optimized beam dynamics in a DLSR, theoretical and numerical methods have been developed to date. Due to the fact that the nonlinearities are extremely high in a DLSR and the nonlinear dynamics is greatly coupled with the linear optics, the most effective and most commonly used way is global and stochastic optimization of the ring performance evaluated by numerical tracking. To deal with the challenges of injecting to a DLSR with small dynamic acceptance, different injection schemes, such as, pulsed multipole injection, on-axis swap-out injection and on-axis longitudinal injection, have been proposed. Collective effects, especially the intra beam scattering and the Touschek effects, become significant as emittance decreases, requiring methods of bunch lengthening and transverse feedback to ensure the stability of the particle motion at a high beam current. Besides, a few developing topics in DLSR physics will be discussed. Machine learning, the method of transferring disorder data into useful information, is an important branch of artificial intelligence, and has been used in accelerator control system and beam commissioning. This method would be very useful and helpful in the design and optimization, initial commissioning and daily operation of a DLSR. A rational combination of machine learning and multi-objective optimization algorithm, like multi-objective genetic algorithm and multi-objective particle swarm algorithm, can effectively improve the optimization performance, and has been successfully applied in nonlinear optimization of light sources. In addition, improving the performance of synchrotron radiation by combining the beam physics of DLSR and the principle of FEL is one developing research topic which might be able to provide base for further development of the DLSR. Combined with bypass and transverse gradient undulator, high gain FEL could be achieved in the storage ring. Besides, double ring light source, divided into two loops, the inner ring is DLSR, and the other is FEL with more long straight sections, was proposed to improve the utilization rate of the beams.

synchrotron radiation light source, diffraction-limited storage ring, multi-bend achromat, machine learning, free electron laser

doi: [10.1360/TB-2020-0165](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0165)