

第四代同步辐射光源加速器物理与技术*

焦毅^{1,2,†} 白正贺³ 李晓^{1,2,4}

- (1 中国科学院高能物理研究所 北京 100049)
 (2 中国科学院大学核科学与技术学院 北京 100049)
 (3 中国科学技术大学 国家同步辐射实验室 合肥 230029)
 (4 散裂中子源科学中心 东莞 523803)

2023-10-24收到

† email: jiaoyi@ihep.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20240201

Accelerator physics and technology of the fourth-generation synchrotron radiation light source

JIAO Yi^{1,2,†} BAI Zheng-He³ LI Xiao^{1,2,4}

- (1 Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)
 (2 School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)
 (3 National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)
 (4 China Spallation Neutron Source, Dongguan 523803, China)

摘要 同步辐射光源是20世纪应用最广泛的高性能X射线源,已成为物理、化学、能源环境、生物医学、先进材料等领域前沿研究的重要工具。进入21世纪,基于电子储存环的同步辐射光源的发展前沿是第四代同步辐射光源(4GLS)。其采用紧凑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束流发射度,将光源亮度在第三代光源基础上进一步提升2—3个数量级。文章将重点介绍第四代同步辐射光源关键的加速器物理与技术,以及国际范围内第四代同步辐射光源装置的发展情况。

关键词 第四代同步辐射光源, 多弯铁消色散结构, 加速器物理与技术

Abstract Synchrotron radiation light sources based on electron storage rings are the most widely used high-performance X-ray sources in the past 20th century, and have become important tools for frontier research in the fields of physics, chemistry, energy and environment, biomedical science, and advanced materials. In the 21st century, the foremost ring-based light source is the fourth-generation synchrotron radiation light source (4GLS). It generally adopts a compact multi-bend achromat lattice to achieve ultralow electron beam emittance that approaches the diffraction limit of X-rays, thus enabling an increase in the brilliance of the synchrotron radiation by 2—3 orders of magnitude compared to existing third-generation sources. This article will focus on the key accelerator physics and technology issues, as well as the current status, of 4GLSs around the world.

Keywords fourth-generation synchrotron radiation light source, multi-bend achromat lattice, accelerator physics and technology

* 国家自然科学基金(批准号: 12275284; 11922512; 11875259)、国家重点研发计划(批准号: 2022YFA1603402; 2022YFA1603400)资助项目

1 同步辐射光源的原理与发展

人类的生存和发展离不开对光的利用和开发，人类的文明史也是一部利用和开发光资源的历史。光的波长决定了光与物质的相互作用类型，不同波长的光可以像尺子一样，测量不同尺度范围内物质的结构。举例来说，探测宇宙星球，可以选用无线电波；跟踪飞机，可以选用微波(雷达)；而研究比“可见光”波长更短的物体，例如要“看清”病毒、蛋白质分子、金属原子等微观物体，就必须选用与这些微观物体尺度相近或更短波长的光束，即X射线(波长0.01—10 nm)。利用X射线在物质中的衍射、折射、散射等现象，或者利用光束与物体相互作用产生的光激发、光吸收、荧光、光电子发射等特性，可以探测物质的微观结构，以及生成与演化机制。

19世纪末，德国科学家伦琴发现了X射线，使得人类观察世界的视野扩展至肉眼无法看到的物质内部和原子分子尺度的微观世界。此后，X射线被大量应用于医学诊断、工业探伤等多个领域。不过当时X射线的亮度和相干性还非常有限，很大程度上成为限制其在科学研究领域得到更广泛应用的瓶颈。这种情况一直到20世纪中叶“同步辐射”的发现和基于电子储存环的同步辐射光源的出现才发生彻底改变^[1]。同步辐射是速度接近于光速的带电粒子在偏转磁场中运动时，沿着运动曲线的切线方向释放出的电磁辐射。这个现

象就像是在雨中快速转动雨伞，沿伞边缘的切线方向会飞出一簇簇水珠。其最初是在同步加速器上被观察到，所以被称为“同步辐射”^[2]。同步辐射能够提供从红外到硬X射线连续可调的宽波谱，具有高通量、高亮度、窄脉冲、高偏振等优异性能。这里及下文中提到的亮度是指光源在单位时间以某个特定波段辐射的光子的密度，而相干性是指光源产生的同步辐射中相干光子的比例。

同步辐射光源就是产生同步辐射的科学装置。一个典型的同步辐射光源一般包括直线加速器、增强器、储存环、光束线和实验站等，如图1所示。直线加速器和增强器统称为注入器，其中直线加速器产生电子束并进行初级加速，增强器进一步加速电子束至设计能量。另外，也有一些同步辐射光源使用直线加速器直接将电子束加速到设计能量。储存环接收并储存来自注入器的电子束，利用其产生同步辐射，同时为电子束补充同步辐射带来的能量损失，使其能量保持不变。光束线将储存环产生的同步辐射引出，在实验站内运用不同的实验仪器和方法开展科学研究。储存环是同步辐射光源的核心部分，一般由多个重复周期组成，每个周期都可以产生能量、强度、位置非常稳定的同步辐射，同时服务于多个实验站，这也是同步辐射光源的一个巨大优势。经过几十年的发展，同步辐射光源已经成为包括物理、化学、能源环境、生物医学、先进材料等诸多科学领域前沿研究的重要工具。

在20世纪，同步辐射光源经历了三次重要的升级和发展^[1]。第一代同步辐射光源“寄生”在为高能物理实验而设计的对撞机上，作为一种“副产物”其利用二极磁铁偏转电子束从而产生同步辐射，比如美国的CHESS^[3]、我国的北京同步辐射装置BSRF^[4]等光源。之后，由于同步辐射技术的发展以及相关研究需求的增长，专门为同步辐射而设计的第二代同步辐射光源开始出现，不过仍然主要由二极磁铁产生同步辐射，比如美国的NSLS^[5]、巴西的LNLS^[6]、我国的HLS^[7]等光源。第三代同步辐射光源从20世纪90年代开始出现，通过优化储存环设计方案，实现了比第二代小得

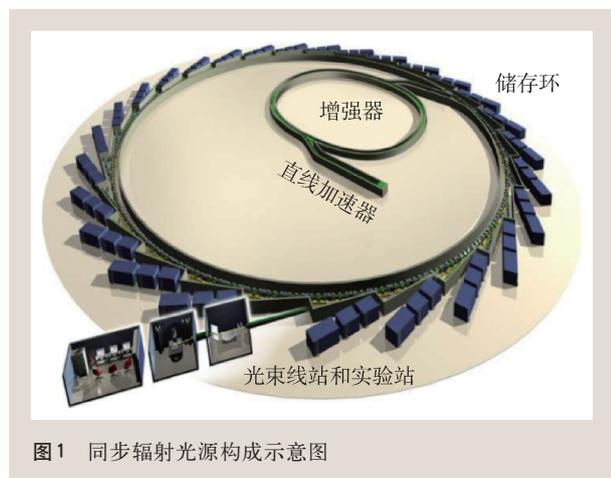


图1 同步辐射光源构成示意图

多的电子束发射度($\text{nm}\cdot\text{rad}$ 量级), 并大量使用插入件, 亮度相比第二代有3—4个量级的提升。由于其优异性能, 世界范围内建有几十台第三代同步辐射光源, 比如美国的ALS^[8]和APS^[9], 意大利的Elettra^[10], 欧洲的ESRF^[11], 日本的SPring-8光源^[12], 德国的BESSY II^[13], 英国的Diamond^[14], 法国的SOLEIL^[15], 我国的上海同步辐射装置SSRF^[16]等。第三代同步辐射光源至今仍是世界范围内开展同步辐射研究的主力装置。

作为第三代同步辐射光源的标志性元件, 插入件由多个方向相反的“磁极对”按照特定的物理设计顺序排列(一般为周期性结构)组合而成, 如图2所示。插入件沿电子运动方向产生周期性变化的磁场; 电子束经过时会被往复、周期性地偏转, 以近似正弦曲线的轨迹“扭摆”前进, 并在扭摆偏转时产生同步辐射。插入件主要分为扭摆器和波荡器两类。扭摆器的磁场强度较大, 周期较长, 周期数较少, 可以提高辐射功率; 而波荡器磁场强度较低, 周期较短, 周期数较多, 不同周期产生的同步辐射光相干地叠加在一起, 可以极大地提高同步辐射光的亮度。

进入21世纪以来, 相干散射与成像、材料表征、原位实验等新技术, 以及生命科学、能源环境等多个研究领域, 均对X射线的通量、亮度、相干性提出更高的要求, 以实现多尺度成像能力和超高空间、时间、能量分辨的观测技术。举例来说, 纳米材料的性能与其尺度密切相关, 往往尺寸上微小的变化会带来性质上的巨大改变。而第三代同步辐射光源的表征手段测得的是很多不同纳米颗粒平均的结果, 无法获得纳米尺度的样品在原位条件下的结构信息, 这就需要更高性能的同步辐射, 以实现纳米级空间分辨率、皮秒级的时间分辨率以及毫电子伏能量分辨率。为了满足日益增长的前沿科学研究和高端产业应用的需求, 具有更高亮度、更高相干性的同步辐射新一代光源应运而生。在新一代光源中, 一种是基于直线加速器的自由电子激光, 具有超高峰值亮度、全相干、超短脉冲等优异性能; 另一种则是基于电子储存环的第四代同步辐射光源。图3从同步辐射亮度角度展示了同步辐射光源的代际演化

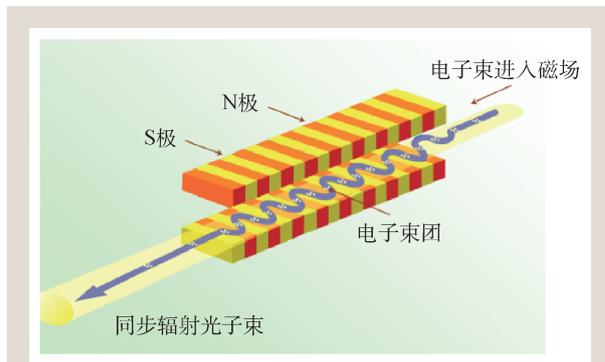


图2 插入件原理示意图

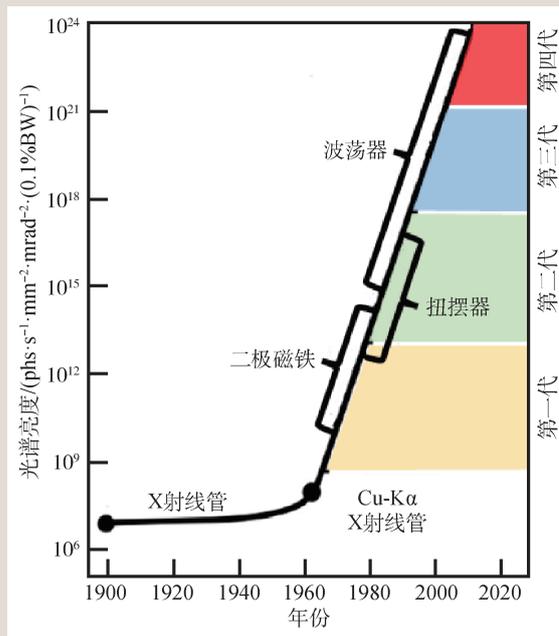


图3 同步辐射光源的代际演化

情况。

与第三代同步辐射光源相比, 第四代同步辐射光源亮度一般提升2—3个量级, 将促进相干X射线成像等新兴实验技术的发展, 对诸多研究领域产生革命性的推动作用^[17]。其电子束发射度降低1—2个量级, 接近甚至达到所辐射的X射线的衍射极限($\lambda/4\pi$), 因此第四代同步辐射光源也被称为衍射极限储存环光源^[18]。举例来说, 波长为0.1 nm的硬X射线, 其衍射极限发射度为8 $\text{pm}\cdot\text{rad}$; 波长为1 nm的软X射线, 其衍射极限发射度为80 $\text{pm}\cdot\text{rad}$ 。要实现如此低的束流发射度, 必须采用紧凑型的多弯铁消色散(multi-bend achromat, MBA)结构^[19], 而小孔径、高梯度磁铁的成功研制^[20]、新型注入方法及技术的提出^[21]、

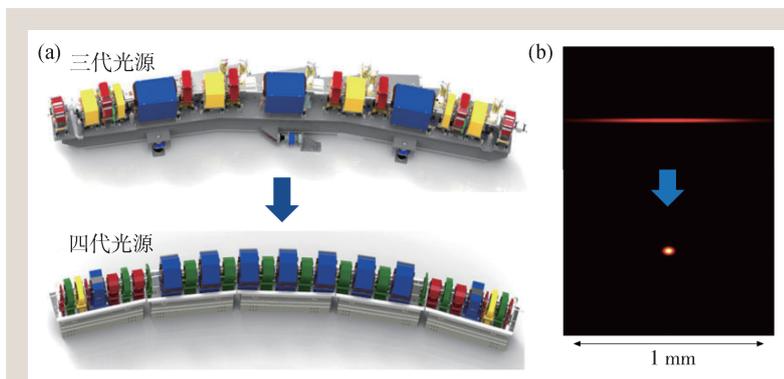


图4 (a) 第三代和第四代同步辐射光源的元件布局对比, 其中第四代同步辐射光源设计主要基于紧凑型的多弯铁消色散结构; (b) 第三代和第四代同步辐射光源的束斑截面, 由扁平分布变为椭圆分布^[29]

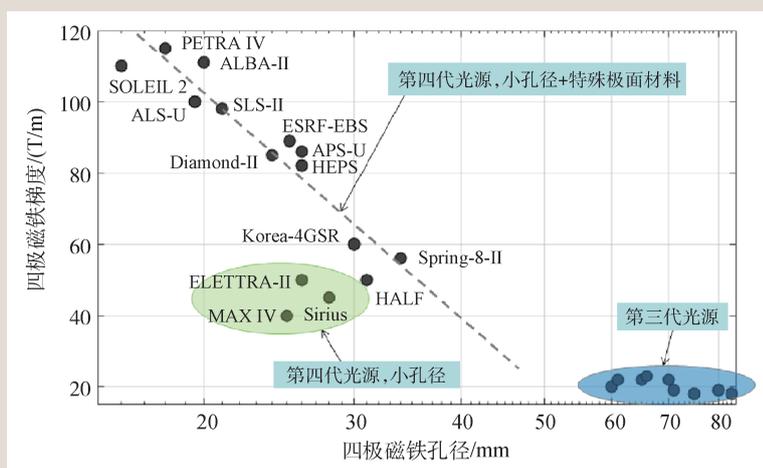


图5 第四代同步辐射光源普遍采用小孔径、高梯度四极磁铁技术

新型真空获得技术^[22]的应用, 使得衍射极限储存环的工程实现成为可能。当前国际上各主要国家纷纷设计建造第四代同步辐射光源, 包括已建成的瑞典的 MAX-IV^[23]、巴西的 Sirius^[24]、欧洲的 ESRF-EBS^[25], 以及建设中的, 如美国的 APS-U^[26]、我国的高能同步辐射光源 HEPS^[27]和合肥先进光源 HALF^[28]等。为了简便起见, 下文中将第四代同步辐射光源简称为第四代光源。

2 第四代同步辐射光源关键的加速器物理与技术

亮度是同步辐射光源最重要的性能指标。亮度与多个参数有关, 如与电子束流强成正比, 与电子束流发射度大致成反比, 与辐射元件参数密切相关。第四代光源与第三代光源均基于电子储

存环, 背后的加速器原理没有本质性的区别。而为了成量级的提升亮度, 第四代光源需要在保持周长基本不变的条件下将电子束流发射度降低1—2个量级, 同时保持与第三代光源相当的流强水平, 并发展更为先进的插入件技术^[18]。

电子束流发射度是光源加速器最重要的指标之一, 描述电子束在四维或六维相空间中所占据的体积。第四代光源设计的关键即是, 通过设计合理的磁聚焦结构, 有效降低电子束流的自然发射度。各光源装置的磁聚焦结构设计各有特点, 不过其共同点在于均采用紧凑型的多弯铁消色散(MBA)结构作为储存环的单元周期。如图4所示, 通过在特定长度的弧区内(通常20—30 m)放置尽可能多的二极磁铁, 将电子束的自然发射度降低1—2个量级, 在两端预留直线节并采用消色散束流光学设计, 用于安装各种类型的插入件^[29]。MBA结构所基于的加速器基本原理是自然发射度与

单块二极磁铁偏转角度的三次方成正比^[30]。而根据加速器物理学家邓昌黎先生在1980年代提出的“理论最小发射度”理论^[31], 要实现超低发射度, 除了增加二极磁铁的数目, 还需要引入足够强的横向聚焦(通过四极磁铁实现)。在此基础上, 加速器物理学家持续探索更为有效的压缩发射度的磁聚焦结构^[32—35]。相关研究显示, 在MBA结构中引入非常规型磁铁, 如带纵向梯度或横向梯度的二极磁铁、带横向梯度的反向偏转二极磁铁等, 可以进一步降低束流发射度。

如图4(a)所示, 第四代光源要在与第三代光源基本相同的弧区长度内, 安装数量更多的二极和四极磁铁。为了实现该目标, 必须发展小孔径、高梯度且高精度的磁铁技术。以四极磁铁为例, 如图5所示, 第四代光源的磁铁孔径通常在25 mm左右, 显著小于第三代光源的磁铁孔径; 另外,

在磁铁极头处采用高磁导率或永磁材料，以提高极面磁场饱和上限和磁场梯度^[36]。为了与小孔径磁铁相匹配，须采用小孔径真空室。在这种情况下，传统真空获得技术的效率大幅降低，需要发展真空盒内壁非蒸散型吸气剂(non-evaporatable getter, NEG)镀膜等新的真空获得技术^[21]。也正是因为这些核心技术的突破和应用，才使得紧凑型的MBA结构设计及第四代光源成为现实。

作为第四代光源的关键技术之一，插入件技术也在不断发展。其发展趋势主要有两个方面^[37]：一是发展短周期、高场强的插入件，使光源向短波长、高亮度发展，如真空内波荡器、低温波荡器、超导波荡器；二是发展特殊磁场结构插入件，以更好地满足用户的特殊需求，如可以有效抑制高次谐波的准周期波荡器，具有低中心轴线热负载且偏振可调的APPLE-Knot波荡器^[38]、X-type波荡器^[39]等。例如，HEPS光源一期采用19台插入件^[40]，包含真空外插入件、真空内波荡器、低温永磁波荡器等多种类型的平面型插入件，以及APPLE-Knot波荡器、芒果扭摆器等两种特殊磁场结构插入件。

如上所述，为了成量级地提升亮度，第四代光源在加速器物理和技术上均引进了新的方法和措施。但采取新的方法或措施，在实现目标之外，往往会带来“副作用”。为了克服这些随之而来的困难及挑战，第四代光源设计建设中主要有两种思路，一是源头控制，这是最优选项，但由于条件所限，往往很难实现；二是进行校正或反馈，当然这会增加设计的复杂度，甚至还可能会引入其他的“副作用”。以下介绍紧凑型的MBA结构设计带来的几项主要挑战及应对措施，包括强非线性效应引起的动力学孔径(储存环中非线性束流动力学所决定的束流稳定区域)显著减小的难题、强聚焦设计自身带来的对误差更为敏感的问题、紧凑型磁铁布局带来的显著的磁场干涉问题，以及更为显著的强流效应对束流流强的限制问题。

在第四代光源中，最主要的非线性来源是色品校正六极磁铁，用于校正四极磁铁带来的与能量相关的束流光学畸变，其强度与发射度大致呈反比关系。随着自然发射度减小，色品校正六极

磁铁的强度随之快速增长，导致极强的非线性效应和动力学孔径显著减小，成为探索极限发射度过程中首先遇到的设计瓶颈。在2000年初，自然发射度在100 pm·rad以下设计方案的动力学孔径普遍在0.1 mm量级，限制了光源的实际可行性。经过20年来的不断探索，目前动力学孔径可以达到mm量级甚至超过10 mm，不过仍明显低于第三代光源的水平(通常在20 mm以上)。第三代光源中普遍采用的成熟的脉冲凸轨注入技术很难适用，所以需要发展适于小动力学孔径的新的注入方法和技术，如在轴注入^[41, 42]，如图6所示。在轴注入可以最大程度地减小注入对动力学孔径的需求。不过需要发展前所未有的纳秒量级的超快脉冲冲击器及其驱动电源技术，还需要相应地革新注入器设计，以同时满足注入器高稳定性设计和新注入方法的相关需求。

由于小孔径、高梯度四极磁铁的大量采用，第四代光源的误差效应更为显著。误差主要分为静态误差、动态误差两类。静态误差包括磁铁安装、准直过程中产生的相对于理想位置的磁铁横向、纵向偏差，以及由于驱动电源的准确性及加工、装配过程偏差带来的相对理论设计值的磁

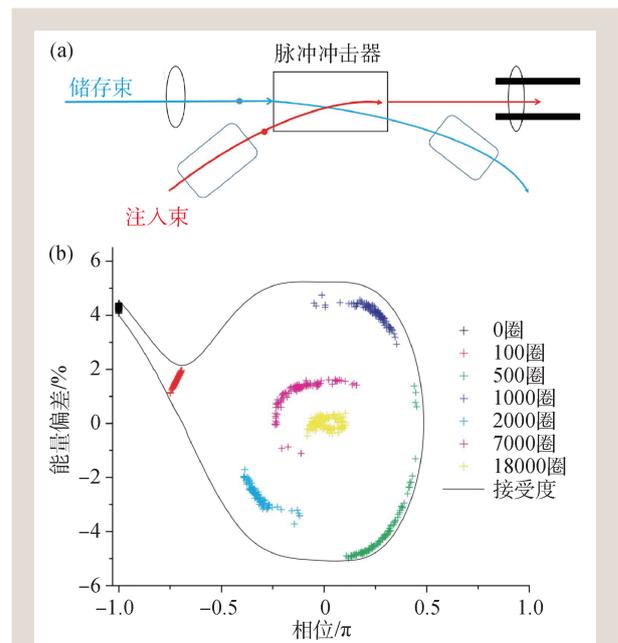


图6 第四代同步辐射光源设计研究中提出的在轴置换注入(a)和在轴纵向注入(b)^[42]示意图

场误差等。动态误差则主要包括地基振动以及电源纹波等带来的磁场波动。源头控制方面的措施包括进一步提高磁铁加工工艺、准直精度、地基处理水平以及电源稳定性和纹波抑制水平等,将相关技术要求推进至当前所能达到的最好水平。更为重要的是发展先进的束流校正及反馈方法和技术。例如,针对第四代光源极具挑战的首圈注入困难的难题,加速器专家基于束流位置逐圈探测技术发展了自动首圈调试方法^[43],并在光源束流调试中成功应用,为快速完成机器调试、达到设计指标提供了极大助力^[44]。此外,光源专家正在开发更高反馈带宽的快轨道反馈系统,以实现亚微米量级的电子束轨道稳定性^[45]。

磁场干涉问题是第四代光源MBA结构设计的固有挑战。MBA结构设计中,磁铁紧密排布,且大部分磁铁为复合型磁铁。例如,HEPS光源相邻磁铁线包间的最短距离小于10 mm,且所有慢校正子功能均由主磁铁上增加绑腿线圈实现。这导致邻近磁铁间显著的磁场干涉效应。磁场干涉效应使得工作点很容易跨越整数、半整数等低阶共振,使得束流光学不稳定而限制束流累积。该效应在第三代光源中可以忽略,而在第四代光源则必须采取应对措施^[46]。这需要对多磁铁联合三维磁场分布进行模拟和测量,基于结果对加速器物理模型(通常是基于各个独立磁铁建模)进行重新建模,对束流光学进行重新设计和匹配。此外,对一些特殊磁铁,还需要预先调节磁场。例如,有些第四代光源采用“绿色”的永磁二极磁铁技术,在实验室对这些磁铁进行独立磁测时,需要将其磁场相对于设计值进行微调,使得束流在实际隧道内感受到的偏转磁场与设计值一致。

第四个挑战是更为显著的强流效应。该效应有两个源头,一方面是发射度成量级下降而流强基本保持不变导致的电子密度显著增加,另一方面是小孔径真空室的采用引起的更强的束流耦合阻抗。这些强流效应既包括单束团效应,也包括多束团效应,将降低束流品质,严重情况下会限制可稳定运行的最高流强。为了有效抑制强流效应,往往多措并举^[47]。在磁聚焦结构设计时即需要考虑相关需求,如尽量提高动量压缩因子、降

低阻尼时间等,以减弱部分强流效应。在源头控制角度,针对关键元件采用低阻抗设计,降低整体阻抗;使用高次谐波腔,纵向拉伸束长,降低电子密度。此外进一步可采用抑制或校正手段,如引入逐束团反馈和足够大的正色品。通过集成上述手段,保证光源在设计流强下保持稳定运行,并具有足够长的束流寿命。

总体而言,先进粒子加速器是基础科学和工程科学的融合,集现代前沿科学技术之大成。有别于基础科学侧重于观察现象和提出解释,同步辐射光源加速器设计建设需要给出切实可行的物理方案并解决具体技术问题,在物理设计和硬件技术水平间反复迭代、优化、平衡,有科学研究和工程技术的双重属性。这种双重属性在第四代光源中显得尤为突出,其对加速器物理设计与多项关键技术均提出极致的指标要求。其设计建设需要在多维变量空间对光源性能进行全局优化,在物理设计与技术路线之间作综合的考量与权衡,最终在光源先进性、可行性、稳定性、经济性等多个目标之间寻得合理的平衡。

3 第四代同步辐射光源的发展情况

目前第四代光源正在世界范围内得到大力发展,除了已建成的瑞典的MAX IV^[48]、巴西的Sirius^[49]和欧洲的ESRF-EBS^[44]外,还有十余台第四代光源正在建设或计划建设,包括我国正在建设的高能同步辐射光源HEPS^[50]和合肥先进光源HALF^[51]。表1列出了目前世界上已建成、正在建设和计划建设的第四代光源的储存环主要参数及目前状态。其中,除HEPS、Korea-4GSR^[52]、MAX IV、Sirius和HALF为新建光源外,其余均是由原有第三代光源升级为第四代光源。

世界上第一台第四代光源是位于瑞典隆德的MAX IV光源^[23]。MAX IV光源是世界首台集成MBA结构设计、小孔径磁铁与真空室技术的同步辐射光源,在528 m的储存环周长上,将束流自然发射度降低至百pm·rad量级水平。MAX IV光源于2015年下半年调试出光,并于2016年建成向用户开放^[48]。它的建成与运行标志着正式进入了

第四代同步辐射光源时代。目前其运行流强为 300 mA，未来计划进一步提高流强。

巴西的 Sirius 光源^[24]是南美洲唯一一台第四代光源。它于 2019 年底调试出光，目前其储存环运行流强为 100 mA，计划于 2024 年将流强提高到 350 mA^[49]。Sirius 光源的束流能量与 MAX IV 光源相同，且储存环周长也接近，但通过在 MBA 结构中采用更强的横向聚焦，实现了更低的束流自然发射度。此外，其插入件直线节的长度更长，插入件直线节和二极磁铁光源点位置处的光学函数包络也更小，这些可进一步提高其同步辐射亮度。

位于法国格勒诺布尔的 ESRF-EBS 光源^[25]是世界上第一台将第三代光源升级为第四代光源的同步辐射光源，也是世界上首台高能区第四代光源。ESRF-EBS 光源在国际上率先提出并采用了混合型 MBA 结构^[53]，这种新结构可以显著降低六极磁铁强度并有效增大动力学孔径，很好地解决了高能区第四代光源设计中遇到的六极磁铁强度过强的问题。此外，为了降低束流发射度，ESRF-EBS 也是第一个采用带纵向梯度的二极磁铁的同步辐射光源。在 6 GeV 的束流能量下，实现了接近 100 pm·rad 的自然发射度。ESRF-EBS 于 2019 年底调试出束，并于 2020 年下半年向用户供光，其运行流强为 200 mA^[44]。

ESRF-EBS 光源提出的混合型 MBA 结构对第四代光源，特别是高能区第四代光源的发展具有重要的推动作用。美国的 APS-U^[26]和 ALS-U^[54]、我国的 HEPS^[27,55]和 HALF^[28]、英国的 Diamond-II^[56]、日本的 SPring-8-II^[57]、德国的 PETRA IV^[58]和韩国的 Korea-4GSR^[59]等光源均借鉴并采用了混合型 MBA 结构。其中，APS-U 光源在混合型 MBA 结构设计中引入了反向偏转二极磁铁，以进一步降低自然发射度。APS-U 还提出了在轴的置换注入^[41]，可实现小动力学孔径情况下的束流注入，并被多个第四代光源所采用。

瑞士的 SLS 2.0 光源提出了集成纵向梯度二极磁铁与反向偏转二极

磁铁的 MBA 结构，可以显著降低束流发射度^[60, 61]。其在储存环束流能量 2.7 GeV 和周长不到 300 m 情况下，将束流自然发射度降低到了 158 pm·rad^[62]。这种 MBA 结构在中低能区第四代光源设计中得到了较为广泛的应用。意大利的 Elettra 2.0^[63]、法国的 SOLEIL II^[64]和加拿大的 CLS2^[65]等光源均采用了类似的 MBA 结构。与混合型 MBA 结构相比，这种结构所使用的磁铁数目相对较多，磁铁布局非常紧凑。为了节省空间，SOLEIL II 在其设计中大量使用了永磁铁。

我国第四代光源的研究基本与世界同步。目前我国正在建设的 HEPS 和 HALF 光源将成为具有世界先进水平的高、低能区的第四代光源。图 7 为 HEPS 的建设进展图和 HALF 的建设效果图。此外，我国也正在设计中能区的第四代光源，例如上海光源升级装置 SSRF-U^[66]和南方先进光源 SAPS^[67]。

作为我国也是亚洲首台第四代光源项目，HEPS^[50]于 2019 年在北京怀柔科学城的北部核心区启动建设，计划于 2025 年底建成并投入使用。HEPS 光源是我国“十三五”期间优先建设的国家重大科技基础设施之一，由中国科学院高能物理研究所承建。历经十余年的设计迭代^[68]，HEPS 目前已完成物理和工程设计^[27, 69, 70]，基本完成土建结构施工，正在并行开展储存环设备安装和注入器束流调试^[71]。HEPS 储存环能量为 6 GeV，束流自然发射度设计值约为 35 pm·rad，高性能光束

表 1 第四代同步辐射光源储存环的主要参数与目前状态

光源	国家或地区	能量/GeV	自然发射度/ pm·rad	周长/m	状态
ESRF-EBS	欧洲	6	133	844	已建成
APS-U	美国	6	42	1103.6	建设中
HEPS	中国	6	35	1360.4	建设中
SPring-8-II	日本	6	50*	1435.43	计划建设
PETRA IV	德国	6	20*	2304	计划建设
Korea-4GSR	韩国	4	62	799.3	建设中
Diamond-II	英国	3.5	161.5	560.56	计划建设
MAX IV	瑞典	3	328	528	已建成
Sirius	巴西	3	250	518.4	已建成
SOLEIL II	法国	2.75	84	353.97	计划建设
SLS 2.0	瑞士	2.7	158	288	建设中
Elettra 2.0	意大利	2.4	212	259.2	建设中
HALF	中国	2.2	86	479.86	建设中
ALS-U	美国	2.0	108	196.51	建设中

注：*表示考虑阻尼扭摆器后的束流自然发射度



图7 我国第四代同步辐射光源项目 HEPS 的建设进展图(左)和 HALF 的建设效果图(右)

线站容量不少于 90 个, 可提供能量高达 300 keV 的 X 射线。HEPS 建成后将成为世界上最亮的第四代光源之一, 并使中国继美、欧、日、德之后跻身为世界五大高能同步辐射光源所在地之一。

HALF^[51]是我国“十四五”期间建设的国家重大科技基础设施, 其定位为具有世界先进水平的软 X 射线与真空紫外波段的第四代光源。中国科学技术大学国家同步辐射实验室早在 2008 年即提出了 HALF 的概念设计^[72, 73], 这也是我国最早的第四代光源概念设计方案。HALF 储存环束流能量为 2.2 GeV, 自然发射度设计值为 86 pm·rad。其 MBA 结构的每个周期中具有长、短两个直线节^[28], 在 480 m 周长内可提供约 35 条的高性能插入件线站。HALF 已于 2023 年开工建设, 计划于 2028 年底之前完成建设。

4 未来展望

在加速器物理与技术的持续革新和系统集成

的背景下, 国际同步辐射光源领域已进入了第四代同步辐射光源时代。世界各主要国家均在积极开展第四代同步辐射光源的物理设计和工程建设。第四代同步辐射光源与第三代同步辐射光源在加速器性能上的显著区别是更低的电子束流发射度。第三代同步辐射光源的电子束自然发射度为 nm·rad 量级。目前世界上已投入运行的三台第四代同步辐射光源, 将自然发射度的指标推进至接近 100 pm·rad。近几年内将会把该指标进一步推进至 10 pm·rad 量级水平。

利用超低发射度的电子束, 第四代同步辐射光源所产生的高亮度和高相干性的同步光将促进相干 X 射线成像等新兴实验技术的发展, 对材料、生命科学、环境、能源等领域研究产生革命性的推动作用。

未来, 可利用快速发展的机器学习方法或结合自由电子激光领域中的新成果, 发展新的、更为先进的提升电子和光束流品质的机制方法, 提升第四代同步辐射光源的整体性能, 例如 pm·rad 量级发射度设计、超短脉宽同步光产生等。此外, 加速器领域的发展趋势是物理与技术越来越密不可分, 发展并验证基于物理原理的新技术或基于新技术的加速器新原理, 为同步辐射光源未来的代际变革提供基础, 也将是一个重要的研究方向。

未来, 可利用快速发展的机器学习方法或结合自由电子激光领域中的新成果, 发展新的、更为先进的提升电子和光束流品质的机制方法, 提升第四代同步辐射光源的整体性能, 例如 pm·rad 量级发射度设计、超短脉宽同步光产生等。此外, 加速器领域的发展趋势是物理与技术越来越密不可分, 发展并验证基于物理原理的新技术或基于新技术的加速器新原理, 为同步辐射光源未来的代际变革提供基础, 也将是一个重要的研究方向。

参考文献

- [1] Zhao Z T. Reviews of Accelerator Science and Technology, 2010, 03: 57
- [2] Elder F R *et al.* Physical Review, 1947, 71(11): 829
- [3] Batterman B W. Nucl. Instr. and Meth. A, 1980, 172: 21
- [4] Tang E, Xian D. Review of Scientific Instruments, 1992, 63: 1575
- [5] Carr G *et al.* Proc. PAC, 2001, 4: 2608
- [6] Craievich A F, Rodrigues A R. Hyperfine Interactions, 1998, 113: 465
- [7] Wang L *et al.* Proc. IPAC, 2010: 2588
- [8] Jackson A. Proc. PAC, 1993: 1432
- [9] Decker G. Proc. PAC, 1996: 698
- [10] Bucchetta C J *et al.* Proc. PAC, 1997: 826
- [11] Zyngier H *et al.* Proc. PAC, 1995, 1: 155
- [12] Date S *et al.* Proc. PAC, 1999: 2039
- [13] Bakker R *et al.* Proc. PAC, 1999: 2382
- [14] Kempson V C. Proc. EPAC, 2008: 2052
- [15] M. Filhol *et al.* Proc. EPAC, 2008: 2022
- [16] Jiang M H *et al.* Chinese Science Bulletin, 2009, 54: 4171
- [17] Eriksson M *et al.* J. Synchrotron Rad., 2014, 21: 837
- [18] Hettel R J. Synchrotron Rad., 2014, 21: 843
- [19] Einfeld D *et al.* Proc. PAC, 1995: 177
- [20] Johansson M *et al.* J. Synchrotron Rad., 2014, 21: 884
- [21] Borland M. Nucl. Instr. and Meth. A, 2006, 557: 230
- [22] Al-Dmour E *et al.* J. Synchrotron Rad., 2014, 21: 878
- [23] Tavares P F *et al.* J. Synchrotron Rad., 2014, 21: 862
- [24] Liu L *et al.* J. Synchrotron Rad., 2014, 21: 904
- [25] Raimondi P *et al.* Commun. Phys., 2023, 6: 82
- [26] Borland M *et al.* Proc. NAPAC, 2016: 877
- [27] Jiao Y *et al.* J. Synchrotron Rad., 2018, 25: 1611
- [28] Bai Z H *et al.* Proc. IPAC, 2021: 407

- [29] <https://als.lbl.gov/als-u/als-u-approach/>
- [30] Sands M. SLAC-PUB-121, 1970
- [31] Teng L C. Fermilab Report TM-1269, 1984
- [32] Nagaoka R *et al.* Nucl. Instr. and Meth. A, 2007, 575:292
- [33] Jiao Y *et al.* Phys. Rev. ST Accel. Beams, 2011, 14:054002
- [34] Farvacque L *et al.* Proc. IPAC, 2013: 79
- [35] Streun A. Nucl. Instr. and Meth. A, 2014, 737: 148
- [36] Chavanne J *et al.* Overview of magnet design issues, presentation at DLSR workshop, 2013
- [37] Hwang C S *et al.* Phys. Rev. ST Accel. Beams, 2011, 14:044801
- [38] Zhang F J *et al.* J. Synchrotron Rad., 2020, 27:1494
- [39] Wallen E. Proc. IPAC, 2022:1624
- [40] Li X Y *et al.* Proc. IPAC, 2021: 339
- [41] Emery L, Borland M. Proc. PAC, 2003:256
- [42] Aiba M *et al.* Phys. Rev. Accel. Beams, 2015, 18:020701
- [43] Sajaev V. Phys. Rev. Accel. Beams, 2019, 22:040102
- [44] Raimondi P *et al.* Phys. Rev. Accel. Beams, 2021, 24:110701
- [45] Lill R *et al.* Proc. IBIC, 2016:55
- [46] Bec G L *et al.* Phys. Rev. Accel. Beams, 2021, 24:072401
- [47] Nagaoka R, Bane K L F. J. Synchrotron Rad., 2014, 21:937
- [48] Tavares P F *et al.* J. Synchrotron Rad., 2018, 25:1291
- [49] Liu L *et al.* Proc. IPAC, 2021: 13
- [50] 焦毅, 潘卫民. 强激光与粒子束, 2022, 34:104002
- [51] Bai Z H *et al.* Proc. IPAC, 2023: 1075
- [52] Kim J. Beam dynamics simulations for Korea-4GSR, presentation at Accelerator Toolbox Workshop, 2023
- [53] Biasci J C *et al.* Synchrotron Radiation News, 2014, 27(6):8
- [54] Tarawneh H *et al.* Proc. PAC, 2013:288
- [55] Xu G *et al.* Chin. Phys. C, 2016, 40:027001
- [56] Alekou A *et al.* Proc. IPAC, 2016:2940
- [57] Tanaka H. Synchrotron Radiation News, 2014, 27(6):23
- [58] Agapov I *et al.* Proc. IPAC, 2022: 1431
- [59] Jang G S *et al.* Nucl. Instr. and Meth. A, 2022, 1034:166779
- [60] Streun A *et al.* Proc. IPAC, 2015:1724
- [61] Riemann B, Streun A. Phys. Rev. Accel. Beams, 2019, 22:021601
- [62] Streun A *et al.* Phys. Rev. Accel. Beams, 2023, 26:091601
- [63] Karantzoulis E *et al.* Proc. IPAC, 2019:1468
- [64] Loulergue A *et al.* Proc. IPAC, 2021:1485
- [65] Dallin L O. Proc. IPAC, 2019:1385
- [66] Tian S Q *et al.* Proc. IPAC, 2015:304
- [67] Zhao Y *et al.* Nucl. Instr. and Meth. A, 2023, 1056:168565
- [68] Jiao Y *et al.* Proc. IPAC, 2018:1363
- [69] Jiao Y *et al.* Proc. IPAC, 2019:1203
- [70] Jiao Y *et al.* Radiat. Detect. Technol. Methods, 2020, 4:415
- [71] 孟才, 曹建社, 何大勇 等. 强激光与粒子束, 2023, 35:054001
- [72] Li W M *et al.* Proc. EPAC, 2008:2136
- [73] Wang L *et al.* Proc. EPAC, 2008:2142



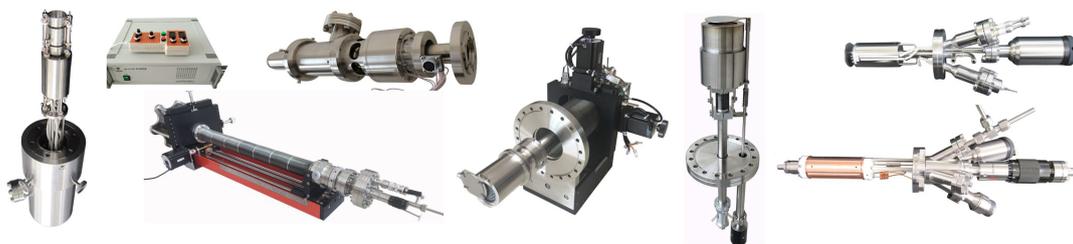
大连齐维科技发展有限公司

地址: 大连高新园区龙头工业园龙天路27号

电话: 0411-8628-6788 传真: 0411-8628-5677

E-mail: info@chi-vac.com HP: <http://www.chi-vac.com>

表面处理和薄膜生长产品: 氩离子枪、RHEED、磁控溅射靶、束源炉、电子轰击蒸发源、样品台。



超高真空腔室和薄膜生长设备: PLD系统、磁控溅射系统、分子束外延系统、热蒸发镀膜装置。

