



·先进同步辐射物理及技术·

高能同步辐射光源*

焦 毅^{1,2}, 潘卫民^{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, 北京 100049)

摘 要: 基于多弯铁消色散结构的超低发射度储存环光源是新一代同步辐射光源发展的一个重要方向。作为国内第一台第四代同步辐射光源, 高能同步辐射光源已经完成物理及工程设计, 并于 2019 年启动建设。高能同步辐射光源电子能量 6 GeV, 流强 200 mA, 水平自然发射度低于 60 pm-rad, 可提供能量达 300 keV 的 X 射线, 在典型硬 X 射线波段的同步辐射亮度达 1×10^{22} phs \cdot s $^{-1}$ \cdot mm $^{-2}$ \cdot mrad $^{-2}$ \cdot (0.1%bw) $^{-1}$, 可为材料科学、化学工程、能源环境、生物医学、航空航天、能源环境等众多基础和工程科学研究领域提供先进的实验平台。本文将介绍高能同步辐射光源项目的整体方案及物理设计。

关键词: 多弯铁消色散结构; 第四代同步辐射光源; 高能同步辐射光源

中图分类号: TL54 4

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220080

High Energy Photon Source

Jiao Yi^{1,2}, Pan Weimin^{1,2}

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

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

Abstract: The ultralow emittance storage ring light source based on multi-bend achromats is an important development direction of the new generation of synchrotron radiation light source. As the first fourth generation synchrotron radiation light source in China, High Energy Photon Source (HEPS) is under construction. The physics and engineering design has been finished for HEPS. The beam energy is 6 GeV, the beam current is 200 mA, and the horizontal natural emittance is less than 60 pm-rad, promising radiation brightness of up to 1×10^{22} phs \cdot s $^{-1}$ \cdot mm $^{-2}$ \cdot mrad $^{-2}$ \cdot (0.1%bw) $^{-1}$ at typical hard X-ray regime. HEPS will be an important platform to support original and innovative research in the fields of basic science and engineering science. This paper will introduce the overall and physics design of the HEPS project.

Key words: multi-bend achromats, fourth generation synchrotron radiation light source, High Energy Photon Source

自 X 射线被发现以来, 其对人类的生活和科学技术发展带来了重大的影响。特别是在科学研究领域, X 射线使人类突破了一般光学技术方法的限制, 可以深入物质内部, 观测物质内部的微观原子、分子结构, 成为人类在原子、分子层次上探索微观世界的最有效方法和手段。例如, 作为材料物质最基本的原子、分子结构, 其最可靠的数据几乎都是基于 X 射线衍射的实验方法得到的。

X 射线作为探测物质结构的探针, 其光源亮度是最为关键的指标。更高的亮度意味着可以在空间、能量、时间等维度上获得更好的分辨能力和更高的实验效率。因此, 获得更高亮度的 X 射线源一直是科学技术人员孜孜不倦追求的目标。由伦琴发现 X 射线所使用的装置发展起来的固定靶、转靶 X 光机, 为 X 射线的应用发挥了重要作用, 如今仍在实验室中使用。20 世纪中叶, 基于高能粒子加速器的 X 射线产生技术, 诞生了同步辐射光源, 其性能远比常规 X 射线源先进。在半个多世纪的发展历程中, 同步辐射光源经历了三代的演化: 与高能物理研究兼用的第一代, 专用于同步辐射实验的第二代和基于低发射度储存环并以波荡器插入件为主要辐射源的第三代同步辐

* 收稿日期: 2022-03-21; 修订日期: 2022-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11922512)

联系方式: 焦 毅, jiaoyi@ihep.ac.cn。

通信作者: 潘卫民, panwm@ihep.ac.cn。

射光源。自 20 世纪 70 年代以来,同步辐射光源已经成为支撑多学科前沿研究及众多国家需求、工业应用研究至关重要的重大科技基础设施。直接基于同步辐射光源的研究工作已经获得了 5 次诺贝尔奖,一系列创新的工业、医药等产品也在同步辐射光源的支持下得到研发。同时,科学研究前沿、国家需求的发展也不断地促进着同步辐射光源性能的提升,国际上大约每隔十年左右就会出现一批新的性能更好的同步辐射光源。目前,全世界正在运行的同步辐射光源有 50 多台,是数量最多、支撑学科范围最广的大科学实验设施。

21 世纪以来,国际上又出现了基于直线加速器和长尺度波荡器的 X 射线自由电子激光^[1-2]等相干光源和极低发射度储存环光源(也称为衍射极限储存环光源^[3-4])。能量回收直线加速器光源也属于此类极低发射度的光源^[5]。随着瑞典的 MAX IV^[6]等低发射度储存环光源的成功建造,极低发射度储存环光源逐渐被公认为环形同步辐射光源的主要发展方向。这种光源在加速器上采用多弯铁消色散的新型磁聚焦结构,可将储存环的束流发射度降低到 0.1 nm·rad 以下,获得高出目前第三代光源 1~2 个数量级的亮度。新光源将促进相干 X 射线成像、X 射线光子相干谱学等新兴的实验技术的发展,并与 X 射线自由电子激光一起,对材料、生命科学、环境、能源等领域的研究产生革命性的推动作用。

建设高性能的第四代同步辐射光源,将使我国基础科学相关领域的研究在国际竞争中处于有利的位置,极大地推动我国基础科学、应用科学的研究及相关技术发展。2009 年,我国在上海建成了大陆地区唯一的一台中能区第三代同步辐射光源——上海光源^[7]。在此之后,经过十余年物理设计研究及关键技术研发,我国在“十三五”期间启动了国内第一台第四代同步辐射光源项目——高能同步辐射光源(High Energy Photon Source, HEPS),以期为基础科学、工业应用、重大战略需求等多个方面的前沿研究提供全方位的支持(与此同时或随后,国内多家研究机构也启动了第四代同步辐射光源或类似的环形光源的设计研制)。以下,将对 HEPS 项目及其物理设计方案进行介绍。

1 HEPS 项目

HEPS 项目由中国科学院高能物理研究所承建,建设周期为 6.5 年。该项目于 2019 年启动建设^[8],预期 2025 年建成。HEPS 主要由加速器、光束线和实验站及相关配套设施组成,示意图见图 1。加速器主要包括电子能量为 6 GeV 的储存环,以及为储存环提供束流的直线加速器、输运线和增强器等。光束线站首批建设包括硬 X 射线纳米探针线站、工程材料线站、硬 X 射线相干散射线站等在内的 14 条公共光束线站,以及 1 条光学测试束线。

HEPS 工程目标为:(1)建设国际领先的高能同步辐射光源,储存环能量达 6 GeV,亮度达 $1 \times 10^{22} \text{ phs} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{mrad}^{-2} \cdot (0.1\% \text{bw})^{-1}$,发射度小于 60 pm·rad,高性能光束线站容量不少于 90 个,可提供能量达 300 keV 的 X 射线。(2)设施

空间分辨能力达到 10 nm 量级,具备单个纳米颗粒探测能力;能量分辨能力达到 1 meV 量级;时间分辨达到 ps 量级,具备高重复频率的动态探测能力。

HEPS 对前沿科学研究的支撑能力主要体现在以下方面:(1)提供能量上限可达 300 keV 的高性能同步辐射 X 射线,探测真实材料在真实工作状态下的实时变化;(2)为衍射实验提供 μm 量级的聚焦光斑,获得重要但结晶困难的蛋白质晶体结构,解决生命科学研究的瓶颈问题;(3)为谱学和成像研究提供 nm 量级的聚焦光斑,直接观察 nm 尺度上的变化过程;(4)达到 ps 量级的时间分辨能力,研究物质(生命物质和非生命物质)结构变化的动力学过程,为实现物质调控奠定基础;(5)超高能量分辨(1 meV)的谱学方法为精细结构研究提供条件;(6)原位研究和极端条件下的研究。

HEPS 建成后,可以与上海光源等在地理位置上形成互补,与北京怀柔科学城其他大科学装置一起形成综合性的大装置集群,还能使我国在加速器技术、高能 X 射线应用等领域达到国际先进水平,大幅提升同步辐射装置对我国科学研究的整体支撑能力。HEPS 光源的设计亮度高于目前世界上现有和同步建设的光源,并且还有进一步的提升空间。作为第四代同步辐射光源,HEPS 可以为我国战略性领域和方向的突破性科技创新提供强有力的支撑,同时为在众多基础科学的前沿开展更灵敏、更精细、更快、更复杂和更接近实际工作环境的科学研究提供适应调控时代要求的前所未有的实验平台,支撑科学研究更精细地以空间、时间、能量 3 个维度,从分子、

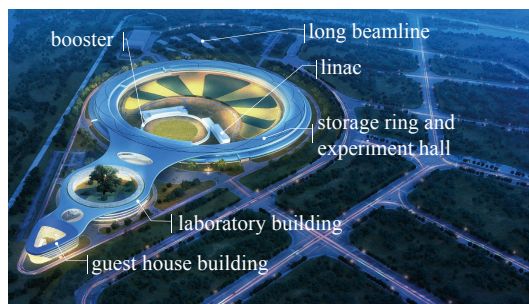


Fig. 1 Schematic view of the HEPS project

图 1 HEPS 光源各部分组成示意图

原子、电子、自旋的水平认识物质(包括生命物质和非生命物质),进而实现多层次、多尺度的物质调控,对环境科学、纳米科技、催化和能源、生命科学和生物医学、先进材料和制造等多个领域的前沿研究和发展起到重要的推动作用。

2 HEPS 物理设计

HEPS 的一个最主要的设计目标是实现低于 60 pm-rad 的电子束团水平自然发射度,从而提供超高亮度和高横向相干度的高性能 X 射线。早在 2008 年,高能物理研究所即启动了光源的概念设计。经过十余年的优化迭代^[9],储存环设计从最初的能量 5 GeV、水平自然发射度 1 nm-rad 的 DBA 方案^[10]演化为能量 6 GeV、水平自然发射度 34.2 pm-rad 的 7BA 方案^[11]。基于该 7BA 方案,2018 年,我们完成了 HEPS 初步设计方案^[12]。不过,在后续的硬件和工程设计中,不断涌现出新的问题和挑战。为此,我们在初步设计方案基础上作了重要调整^[13]。在储存环每个 7BA 单元(28.4 m)中进一步挤出了约 1.1 m 的纵向空间,以满足束测、真空等元件的安装需求;通过多维变量空间的多目标优化,将自然发射度和亮度设计指标仍然维持在初步设计的水平,同时实现了足够大的动力学接受度以及比初步设计方案更高的束流寿命。此外,对相关的物理问题及设计研究进行了更新和完善。以下,将从储存环磁聚焦结构、插入件、束流注入、束流集体效应、轨道稳定性、机器保护等方面进行简要介绍。

HEPS 储存环由 48 个混合 7BA 组成,分为 24 个周期^[14]。一个周期的元件布局及束流光学参数分布如图 2 所示。储存环主要束流参数见表 1。

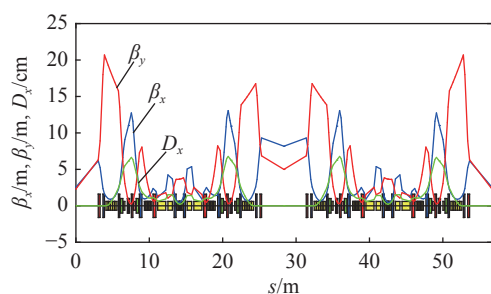


Fig. 2 Optical functions of one super period of the HEPS storage ring

图 2 HEPS 储存环单个周期的线性束流光学参数

表 1 HEPS 储存环主要参数
Table 1 Main parameters of the HEPS Storage Ring

parameter	value
beam energy/GeV	6
beam current/mA	200
circumference/m	1360.4
natural emittance/(pm-rad)	34.8
tune (H, V)	115.15, 104.29
natural chromaticity (H, V)	-209, -233
momentum compaction factor	1.83×10^{-5}
energy loss per turn W/O ID/MeV	2.64

混合 7BA 结构首先由 ESRF 光源提出^[15]。一个混合 7BA 由 2 个类 DBA(双弯铁消色散结构)单元节与 3 个类 TME(理论最小发射度)单元节^[16]组成。在类 DBA 单元节中,采用纵向梯度二极磁铁产生大的色散凸轨,并将六极铁集中放置其中,以有效控制色品校正六极铁的强度。在类 TME 单元节中,采用带水平散焦的组合型二极磁铁以及超高梯度(≥ 80 T/m)的四极磁铁,以同时实现紧凑型元件布局和超低发射度。

在 HEPS 储存环磁聚焦结构(lattice)设计中,我们在混合 7BA 基础上,主要作了以下三点改进。

(1) 更低发射度设计。根据对不同超低发射度单元节的对比结果^[17],将每个标准的混合 7BA 中间的类 TME 单元节,替换为包含反向弯转二极铁及纵向梯度二极铁的新型单元节^[18];此外,将类 DBA 单元节中的一组四极磁铁替换为反向弯转二极铁,从而进一步降低了水平自然发射度。

(2) 高-低 β 直线节设计。实际设计经验显示,如果将所有长直线节的水平、垂直 β 函数均压缩至接近最优值以实现尽可能高的亮度^[19],将很难实现足够大的动力学接受度。另外注意到,只有一部分用户实验追求极高的同步辐射亮度。为此,我们将 48 个 7BA 分为 24 个周期,通过束流光学参数匹配,实现交替分布的高-低 β 直线节,降低了动力学优化的难度,同时为不同光束线设计及不同类型元件安装,多提供了一种选择。

(3) 弯铁辐射源设计。在混合 7BA 设计中,二极铁弯转磁场普遍较低,不足以满足弯铁束线用户对弯铁辐射同步光性能的要求。ESRF-EBS 在弧区中安装了额外的不同类型的弯转磁铁作为弯铁辐射源。不过,这会破坏 lattice 的周期性,需要复杂的束流光学补偿和校正措施^[20]。在 HEPS 设计中,我们将 7BA 最中间磁铁的中心切片作为弯铁辐射源^[21]。其磁场可以在较大范围内改变,以产生不同临界光子能量的同步光,满足不同用户需求;且不会破坏 lattice 周期性和束流动力学性能,很好地避免了引入专门的弯铁辐射源而导致的一系列物理与技术问题。

HEPS 一期共建设 14 条插入件光束线。每条插入件光束线分别在储存环上占用一个直线节,并在其中安放

1至3台不等的插入件。针对不同用户对同步辐射性能的不同要求,对插入件参数进行了多轮迭代优化。目前所有插入件的类型、参数已全部确定^[22]。插入件数量总计19台,包括17台平面型插入件和2台非平面型插入件。平面型插入件均采用高性能磁极材料,以实现高峰值场强。两台非平面型插入件为APPLE-Knot波荡器及芒果扭摆器。其中,APPLE-Knot波荡器^[23-24]工作在100 eV~2 keV软X射线能量段,偏振度可在水平线偏振、垂直线偏振与圆偏振三个模式间自由切换。芒果扭摆器可以为用户在水平、垂直两个方向上均提供较大的光斑尺寸。如图3所示,HEPS一期插入件产生的同步辐射,在10 keV能量附近,亮度超过 1×10^{22} phs·s⁻¹·mm⁻²·mrad⁻²·(0.1%bw)⁻¹,光子能量最高可至~300 keV。

在此基础上,我们对插入件对束流动力学的影响进行了分析和优化。模拟结果显示,APPLE-Knot波荡器对束流动力学的影响最为显著。通过调整APPLE-Knot波荡器的位置(由预先的高 β 直线节改至低 β 直线节),显著改善了其对动力学孔径及束流寿命的影响^[25]。

在HEPS储存环注入设计中,我们采用了国际上先进的在轴置换注入方案^[26]。如图4所示,该方案在注入区(和引出区)需要一块切割磁铁和相应的快脉冲冲击器(kicker)。注入束经过注入kicker偏转后,直接进入储存环的闭合轨道上,取代电荷量已衰减的循环束(循环束则被引出)。这种注入方案对动力学孔径要求较低,有利于追求极致的低发射度和高亮度。不过,它要求ns量级的超快kicker。通过技术研发,我们发展了带状线冲击器及其驱动高压快脉冲电源技术^[27-28],可将冲击脉冲宽度控制在10 ns以内。受限于6 m的直线节长度和带状线冲击器强度,我们设计了局部真空方案的Lambertson型切割磁铁,可实现1.6 T·m的积分场强和2 mm的切割板等效厚度。

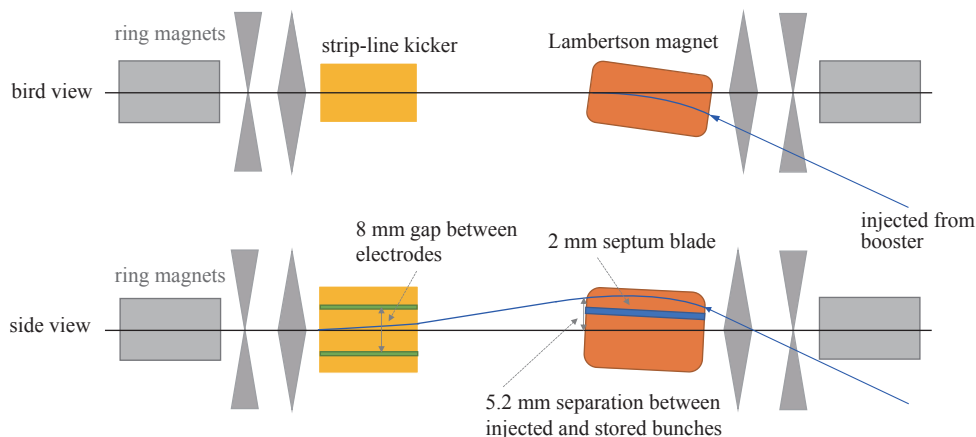


Fig. 4 Schematic view of the on-axis swap-out injection into storage ring

图4 储存环在轴置换注入示意图

此外,这种注入方案要求注入器提供高电荷量(最高约15 nC)的注入束。为了应对上述挑战,我们采用了增强器高能累积方案^[29]。该方案将储存环中被替换的束团回注至增强器,同较小电荷量束团融合以恢复高电荷量,之后重新注入至储存环。通过采用这种方案,将增强器低能阶段单束团电荷量的需求降低至约7 nC。充分考虑注入需求以及强流效应影响^[30],经过多轮设计迭代,我们完成了直线加速器^[31]、增强器^[32]及输运线设计^[33]。直线加速器设计能量500 MeV,脉冲重复频率50 Hz,脉冲电荷量最高7 nC。增强器lattice设计基于FODO结构,周长约454 m,6 GeV能量下水平自然发射度约16 nm·rad。

第四代光源储存环中的误差(如,磁铁场误差、准直误差)效应非常显著。我们针对储存环首圈轨迹校正^[34-35]进行了模拟,便于在储存环调束初期快速实现束流存储。此外,对各种类别的误差进行了建模,并基于LOCO等校正方法对轨道及束流光学参数校正进行了细致的数值模拟^[36]。在此基础上,确定了束测及校正元件的布局。注意到六极铁中非零闭轨可对束流动力学产生明显的影响,我们安装了六极铁在线活动支架^[37],以控制该效应。此外,

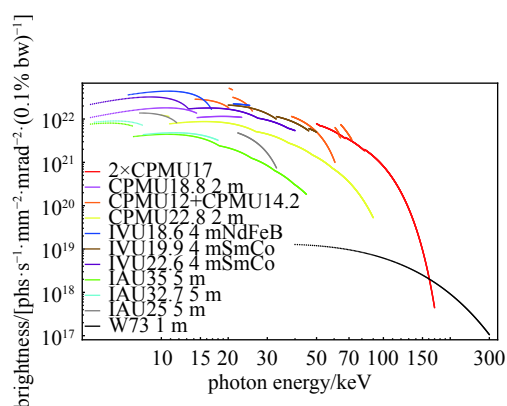


Fig. 3 Brightness of all IDs for 13 beam lines at 200 mA

图3 流强为200 mA时13条插入件束线的同步光亮度

在与硬件系统多次迭代的基础上,明确了机械、磁铁、电源、束测等硬件参数的误差要求。模拟结果显示(见图5),误差校正后的动力学孔径满足注入要求^[38]。

此外,为了将光源点处的束流轨道稳定性控制在束团尺寸的10%以内,我们开展了动态误差相关的研究。我们对HEPS项目的地基整体振动进行了多次实地测量,结合模拟分析,要求1~100 Hz范围内地面振动的均方根位移积分小于25 nm^[39]。此外,我们对包括磁铁电源纹波、地面振动等在内的动态误差对轨道波动的影响进行了模拟分析^[40],并确定了采用快、慢结合的轨道反馈方案。模拟结果显示(见图6),为实现500 Hz以上的有效反馈带宽,需严格控制快轨道反馈系统的总体延时^[41]。

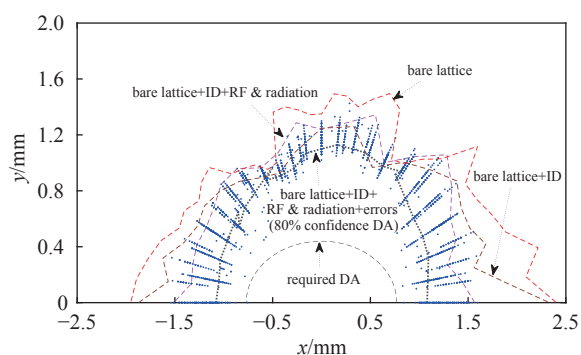


Fig. 5 Dynamic aperture of the storage ring with different conditions

图5 不同条件下的储存环动力学孔径

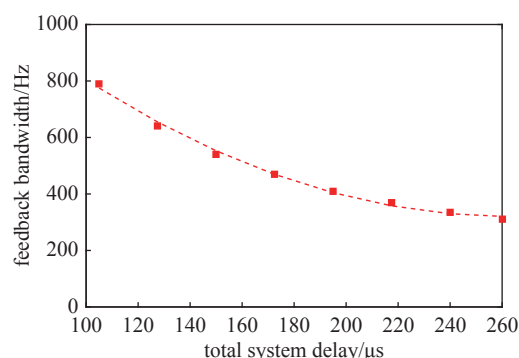


Fig. 6 Effective bandwidth of the fast orbit feedback versus total system delay

图6 快轨道反馈系统的有效带宽随系统延时的变化关系

HEPS 储存环设计大量采用了小孔径真空盒(内径 22 mm)和小间隙插入件(最小间隙约 5 mm),这使得 HEPS 储存环的阻抗相比第三代光源显著增大。此外,超低的横向发射度导致电子密度更大,束流集体效应可能成为限制第四代光源束流强度及机器性能的重要因素。

为此,我们对储存环耦合阻抗进行了逐元件建模,并针对关键部件进行了阻抗测量及优化^[42-44];基于全环阻抗模型,对储存环中可能发生的单束团、多束团不稳定性进行了数值模拟;进而相应地提出抑制束流不稳定性的措施,包括在储存环中引入逐束团反馈和足够大的正色品、使用三次谐波腔(499.8 MHz^[45])配合基频腔(166.6 MHz^[46])实现束长拉伸等,以保证光源在 200 mA 设计流强下稳定运行^[47-49]。此外,我们对储存环中的离子效应、束内散射效应、托歇克效应进行了深入的模拟分析^[50-51]。结果显示,考虑物理孔径、实际误差、插入件等因素情况下,200 mA 设计流强下束流寿命超过 5 h(680 束团填充)。

高能量、高密度的电子束或其产生的同步光,在一些特殊情况下(如高频腔保护或轨道畸变很大等),可能会轰击或照射在插入件、BPM、波纹管等元件上,导致元件性能下降、不可逆损伤乃至机器故障。针对该问题,我们开展了深入的设计研究。在储存环正常运行时,托歇克散射会使得电子损失在全环随机发生。我们设计了准直器,以集中收集损失的电子,减小插入件等元件处的束损,同时便于进行局部辐射屏蔽设计。在储存环非正常运行突然丢束时,准直器还将作为束流垃圾桶,防止电子束在极短的时间全部丢失在某些敏感元件上,造成元件不可逆损伤^[52]。经过深入的模拟分析,我们确定了准直器数量、孔径等参数^[53]。另一方面,为了避免因同步光照射在敏感元件上产生过高热负载甚至不可逆的元件损伤,我们基于光路追踪模拟,确定了基于插入件两侧 BPM 读数的快机器保护系统阈值^[54],以及储存环中同步光挡块的数量、位置、孔径等参数^[55-56]。

3 总结

作为国内第一台第四代同步辐射光源,HEPS 项目已经于 2019 年启动建设。目前,HEPS 项目已基本完成土建结构施工,正在进行设备安装及调束准备(包括自主编写基于 python 的调束软件^[57])。HEPS 光源设计,通过采用多弯铁消色散结构,在 6 GeV 电子能量下可实现 60 pm.rad 以下的超低束流发射度,产生亮度达 1×10^{22} phs·s⁻¹·mm⁻²·mrad⁻²·(0.1%bw)⁻¹ 的高性能 X 射线。建成后,HEPS 将填补我国高能区同步辐射装置的空白,成为世界上最亮的第四代同步辐射光源之一,为材料科学、化学工程、生物医学、航空航天、能源环境等众多基础和工程科学研究领域提供先进的实验平台,为我国在与经济社会发展及工业核心需求相关的战略性研究领域取得突破性创新,提供强有力的支撑。

参考文献:

- [1] Huang Nanshun, Deng Haixiao, Liu Bo, et al. Features and futures of X-ray free-electron lasers[J]. *The Innovation*, 2021, 2: 100097.
- [2] Pellegrini C, Marinelli A, Reiche S. The physics of X-ray free-electron lasers[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2016, 88: 015006.
- [3] Hettel R. DLSR design and plans: an international overview[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2014, 21(5): 843-855.
- [4] 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)
- [5] 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*, 2010, 12: 035011.
- [6] 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.
- [7] Yin Lixin, Tai Renzhong, Wang Dong, et al. Progress and future of Shanghai Synchrotron Radiation Facility[J]. *Journal of the Vacuum Society of Japan*, 2016, 59(8): 198-204.
- [8] Tao Ye. Groundbreaking ceremony at the high energy photon source in Beijing[J]. *Synchrotron Radiation News*, 2019, 32: 40.
- [9] Jiao Yi, Xu Gang, Peng Yuemei, et al. Evolution of the lattice design for the High Energy Photon Source[C]//Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference. Vancouver, Canada, 2018.
- [10] Project proposal of the BAPS[R]. 2012.
- [11] Jiao Yi, Xu Gang, Cui Xiaohao, et al. The HEPS project[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2018, 25(6): 1611-1618.
- [12] Institute of High Energy Physics, HEPS preliminary design report[R]. 2018.
- [13] Jiao Yi. Latest physics design of the HEPS accelerator[J]. *Radiation Detection Technology and Methods*, 2020, 4: 399.
- [14] 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.
- [15] Farvacque L, Carmignani N, Chavanne J, et al. A low-emittance lattice for the E. S. R. F. [C]//Proceedings of the 4th International Particle Accelerator Conference. Shanghai, 2013: 79-81.
- [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] Jiao Yi, Li Xiaoyu, Xu Gang. Performance comparison of different ultralow emittance unit cells[C]//Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference. Vancouver, Canada, 2018.
- [18] 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.
- [19] Jiao Yi, Li Ming, Li Xiaoyu. Brightness dependence investigation and optimization for the HEPS[C]//Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference. Vancouver, Canada, 2018.
- [20] 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 8th International Particle Accelerator Conference. Copenhagen, Denmark, 2017.
- [21] Jiao Yi, Cui Xiaohao, Duan Zhe, et al. Beam dynamics study in the HEPS storage ring[C]//Proceedings of the 10th International Particle Accelerator Conference. Melbourne, Australia, 2019.
- [22] Li Xiaoyu, Jiao Yi, Lu Huihua, et al. Status of HEPS insertion devices design[C]//Proceedings of the 12th International Particle Accelerator Conference. Campinas, Brazil, 2021.
- [23] Ji Fuhao, Chang Rui, Zhou Qiaogen, et al. Design and performance of the APPLE-Knot undulator[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2015, 22(4): 901-907.
- [24] Yang Yanwei, Li Xiaoyu, Lu Huihua. A practical design and field errors analysis of a merged APPLE-Knot undulator for High Energy Photon Source[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2021, 1011: 165579.
- [25] 李啸宇, 田赛克. 新版ID模型对储存环V3设计方案的托歇克寿命影响分析[R]. HEPS-AC-AP-TN-2020-033-V0, 2020. (Li Xiaoyu, Tian Saik. Analysis of the influence of new ID model on Touschek life of storage ring V3 design[R]. HEPS-AC-AP-TN-2020-033-V0, 2020)
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] Wang Lei, Chen Jinhui, Shi Hua, et al. A novel 5-cell strip-line kicker prototype for the HEPS on-axis injection system[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2021, 992: 165040.
- [29] 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.
- [30] Xu Haisheng, Peng Yuemei, Wang Na. Studies of transverse single-bunch instabilities in booster synchrotrons[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2019, 940: 313-319.
- [31] Meng Cai, He Xiang, Jiao Yi, et al. Physics design of the HEPS LINAC[J]. *Radiation Detection Technology and Methods*, 2020, 4(4): 497-506.
- [32] Peng Yuemei, Duan Zhe, Guo Yuanyuan, et al. Design of the HEPS booster lattice[J]. *Radiation Detection Technology and Methods*, 2020, 4(4): 425-432.
- [33] Guo Yuanyuan, Wei Yuanyuan, Peng Yuemei, et al. The transfer line design for the HEPS project[J]. *Radiation Detection Technology and Methods*, 2020,

- 4(4): 440-447.
- [34] Zhao Yaliang, Duan Zhe, Ji Daheng, et al. First turn around strategy for HEPS[C]//Proceedings of the 8th International Particle Accelerator Conference. Copenhagen, Denmark, 2017.
- [35] Wang Bin, Duan Zhe, Ji Daheng, et al. Progress of the first-turn commissioning simulations for HEPS[C]//Proceedings of the 12th International Particle Accelerator Conference. Campinas, Brazil, 2021.
- [36] Ji Daheng, Cui Xiaohao, Duan Zhe, et al. Beam performance simulation with error effects and correction on HEPS design[C]//Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference. Vancouver, Canada, 2018.
- [37] Wu Lei, Zhou Ningchuan, Li Chunhua, et al. Design and test of the beam-based alignment sextupole experimental mover prototype for HEPS[J]. *Radiation Detection Technology and Methods*, 2021, 5(4): 570-575.
- [38] 季大恒, 焦毅, 段哲. HEPS包含ID的误差校正结果[R]. HEPS-AC-AP-TN-2021-003-V0, 2021. (Ji Daheng, Jiao Yi, Duan Zhe. Error correction result with insertion device for the HEPS[R]. HEPS-AC-AP-TN-2021-003-V0, 2021)
- [39] Yan Fang, Xu Gang, Lin Guoping, et al. The design and prototype test for the tunnel foundation of high energy photon source[C]//Proceedings of the 11th Mechanical Engineering Design of Synchrotron Radiation Equipment and Instrumentation. Chicago, IL, USA, 2021.
- [40] Huang Xiyang, Jiao Yi, Wei Yuanyuan. Preliminary investigation of the noises and updates on physics studies of FOFB in HEPS[C]//Proceedings of the 12th International Particle Accelerator Conference. Campinas, Brazil, 2021.
- [41] 黄玺洋, 魏源源. FOFB-only模拟总结[R]. HEPS-AC-AP-TN-2022-009-V0, 2022. (Huang Xiyang, Wei Yuanyuan. Summary of the FOFB-only simulations[R]. HEPS-AC-AP-TN-2022-009-V0, 2022)
- [42] Wang Na, Tian Saiké, Li Xiaoyu, et al. Development of the impedance model in HEPS[C]//Proceedings of the 8th International Particle Accelerator Conference. Copenhagen, Denmark, 2017.
- [43] Wang Na, Tian Saiké, Wang Jiuqing. Impedance evaluation of masks in the HEPS storage ring[C]//Proceedings of the 12th International Particle Accelerator Conference. Campinas, Brazil, 2021.
- [44] Wang Na, Tian Saiké, Wang Lei, et al. Impedance optimization and measurements of the injection stripline kicker[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2021, 24: 034401.
- [45] Zheng Hongjuan, Zhang Pei, Li Zhongquan, et al. Design optimization of a mechanically improved 499.8-MHz single-cell superconducting cavity for HEPS[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2021, 31: 3500109.
- [46] Zhang Pei, Zhang Xinying, Li Zhongquan, et al. Development and vertical tests of a 166.6 MHz proof-of-principle superconducting quarter-wave beta=1 cavity[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2019, 90: 084705.
- [47] 王娜, 许海生, 田赛克, 等. 高能同步辐射光源中的耦合阻抗及束流集体效应研究[J]. *原子能科学技术*, 2019, 53(9): 1601-1606. (Wang Na, Xu Haisheng, Tian Saiké, et al. Study of beam coupling impedance and beam collective effect in High Energy Photon Source[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2019, 53(9): 1601-1606)
- [48] 许海生, 王娜, 田赛克. HEPS储存环V3.1 lattice中阻抗引起的束流集体不稳定性[R]. HEPS-AC-AP-TN-2021-042-V0, 2021. (Xu Haisheng, Wang Na, Tian Saiké. Collective beam instability caused by impedance in HEPS storage ring v3.1 lattice[R]. HEPS-AC-AP-TN-2021-042-V0, 2021)
- [49] Xu Haisheng, Xu Jingye, Wang Na. Influences of harmonic cavities on single-bunch instabilities in electron storage rings[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2021, 32: 89.
- [50] Tian Saiké, Wang Jiuqing, Xu Gang, et al. Intra-beam scattering studies for low emittance at BAPS[J]. *Chinese Physics C*, 2015, 39(6): 067001.
- [51] 许海生, 王娜, 田赛克, 等. HEPS储存环lattice全流强参数[R]. HEPS-AC-AP-TN-2020-027-V1, 2021. (Xu Haisheng, Wang Na, Tian Saiké, et al. Full charge beam parameters of the HEPS storage ring[R]. HEPS-AC-AP-TN-2020-027-V1, 2021)
- [52] Cui Xiaohao, Jiao Yi, Zhao Yaliang. Beam loss simulations during beam dumping in HEPS[C]//Proceedings of the 12th International Particle Accelerator Conference. Campinas, Brazil, 2021.
- [53] Li Nan, Zhao Yaliang, Jiao Yi. Comparison simulation results of the collimator aperture in HEPS storage ring[C]//Proceedings of the 12th International Particle Accelerator Conference. Campinas, Brazil, 2021.
- [54] 赵亚亮, 焦毅, 李春华. MPS 阈值和同步光引出张角总结[R]. HEPS-AC-AP-TN-2020-026-V0, 2020. (Zhao Yaliang, Jiao Yi, Li Chunhua. Summary of MPS threshold and synchronous light extraction angle[R]. HEPS-AC-AP-TN-2020-026-V0, 2020)
- [55] 李超, 李春华. HEPS中同步光挡块的设计考虑[R]. HEPS-AC-AP-TN-2019-019-V0, 2019. (Li Chao, Li Chunhua. Design consideration of synchronous radiation masks in HEPS[R]. HEPS-AC-AP-TN-2019-019-V0, 2019)
- [56] 纪红飞, 李春华, 季大恒, 等. HEPS储存环中同步光挡块挡光效果的核算[R]. HEPS-AC-AP-TN-2021-019-V0, 2021. (Ji Hongfei, Li Chunhua, Ji Daheng, et al. Calculation of the effect of synchronous radiation masks in HEPS storage ring[R]. HEPS-AC-AP-TN-2021-019-V0, 2021)
- [57] Lu Xiaohan, Ye Qiang, Ji Hongfei, et al. Status of high level application development for HEPS[C]//Proceedings of the 18th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems. Shanghai, China, 2021.