

# 高能同步辐射光源

焦 毅

(中国科学院高能物理研究所 100049)

作为中国第一台第四代同步辐射光源,高能同步辐射光源(High Energy Photon Source, HEPS)于2019年在北京怀柔科学城的北部核心区启动建设,并计划于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,为国家重大战略需求和前沿基础科学研究提供技术支撑平台的国家重大科技基础设施之一。图1展示了HEPS光源建设情况和效果示意图。光源整体建筑外形酷似一个放大镜,又似一枚开启未知世界的钥匙。HEPS光源建成后,将成为世界上最亮的第四代同步辐射光源之一,进而发展成为世界上最先进的X射线光子科学研究平台之一。这将填补我国高能区同步辐射装置的空白,同时使中国继美、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,为科学家探索微观物质世界,向更深更广的未知领域探索增添又一利器。

自1947年在粒子加速器中发现同步辐射以来,世界各国不断设计建造产生高性能同步辐射的加速器装置,同步辐射光源。在光子科学前沿研究的持续推动下,同步辐射光源已经历了几代的发展。其中,第三代同步辐射光源是20世纪基础科学研究

领域应用最为广泛、性能优异的X射线源。其利用加速器中产生的高性能电子束(发射度在 $1000\sim 5000\text{ pm}\cdot\text{rad}$ ),通过弯转磁铁或特殊设计的波荡器等插入件,产生具有宽波段、高准直、高偏振、高亮度、高稳定性等优异性能的X射线,为物理、化学、环境、材料、生命科学等领域的前沿研究提供了良好的研究平台。目前,全世界有超过50台光源在同时运行。

进入21世纪以来,世界各国纷纷提出未来光源的发展规划。几乎所有的规划报告都对性能更为先进的光源提出了需求。发展第四代光源,对服务国家经济社会发展,满足前沿基础科学研究需求,提升国家整体竞争力,均有非常重要的意义。第四代光源主要有基于电子直线加速器的自由电子激光和基于电子储存环的第四代同步辐射光源等两个主要发展方向。以下将介绍第四代同步辐射光源的基本概念、设计挑战和HEPS的设计方案与关键技术。

## 1. 第四代同步辐射光源的概念

同步辐射光源的一个最重要的设计目标是实现尽可能高的同步光亮度。这要求除了在储存环



图1 HEPS光源建设情况(a)及效果示意图(b)。该光源于2019年6月启动开工建设

内实现尽可能高的电子束流强(百毫安量级),并采用各种先进插入件之外,最为关键的是,尽可能地减小电子束在水平、垂直方向的发射度。作为同步辐射光源的主要部分,电子储存环,通常建在一个水平面上。储存环中的电子束沿着束流轨道循环运动,在二极铁磁场作用下改变运动方向,同时发出同步辐射光。在同步辐射阻尼和量子激发的共同作用下,电子束的分布会达到一个平衡态。在零误差和零流强近似下,电子束的垂直发射度接近于零,而水平发射度则会稳定在一个特定值,称之为水平自然发射度。可以通过耦合调整的手段改变水平和垂直发射度的具体数值,不过二者之和始终等于水平自然发射度。因此,第四代同步辐射光源的设计目标在储存环设计中即主要体现为追求尽可能低的水平自然发射度。

根据加速器物理理论,水平自然发射度只与储存环中二极铁内的束流光学参数,特别是色散函数相关。在20世纪80年代初,著名华裔加速器物理学家邓昌黎先生证明,储存环设计存在“理论最小发射度”(Theoretical Minimum Emittance, TME)。根据TME原理,最有效的压缩发射度的途径为减小单块二极铁的弯转角度(采用更多的二极铁<sup>①</sup>);同时,相应地增加横向聚焦(采用强四极磁铁)。与之相对应的磁聚焦结构,称为多弯铁消色散结构(multi-bend achromat, MBA)。MBA结构中间包含多个基于TME原理设计的单元节,两侧为消色散

长直线节,用于安装各种插入件。此外,光源设计还需要考虑合理的储存环周长及工程预算,以及尽可能地增加消色散长直线节的数量<sup>②</sup>。综合以上考虑,第四代同步辐射光源普遍采用紧致型MBA结构,这也是其与第三代光源最本质的区别所在。通过采用紧致型MBA结构,增加储存环中二极铁的数目,并采用强横向聚焦,将水平自然发射度降低1到2个量级,使其接近甚至达到X射线的衍射极限( $\lambda/4\pi$ ,  $\lambda$ 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 $8 \text{ pm}\cdot\text{rad}$ ;波长为1 nm的软X射线,其衍射极限发射度为 $80 \text{ pm}\cdot\text{rad}$ 。因此,第四代储存环光源有时也被称为衍射极限储存环光源。

以美国ALS光源为例(图2),在同样的储存环隧道内,通过将原来的三弯铁消色散结构升级为九弯铁消色散结构,成功地将水平自然发射度由 $2000 \text{ pm}\cdot\text{rad}$ 降至 $\sim 100 \text{ pm}\cdot\text{rad}$ 。电子束及同步光的束斑,在第三代光源中是一个扁平分布;而在第四代光源中则变成一个很小的椭圆斑点,从而带来亮度和横向相干性的极大提升。

## 2. 第四代同步辐射光源的挑战

第四代同步辐射光源所采用的超低发射度的紧致型MBA结构设计,给加速器物理与技术带来了一系列挑战,如图3所示。

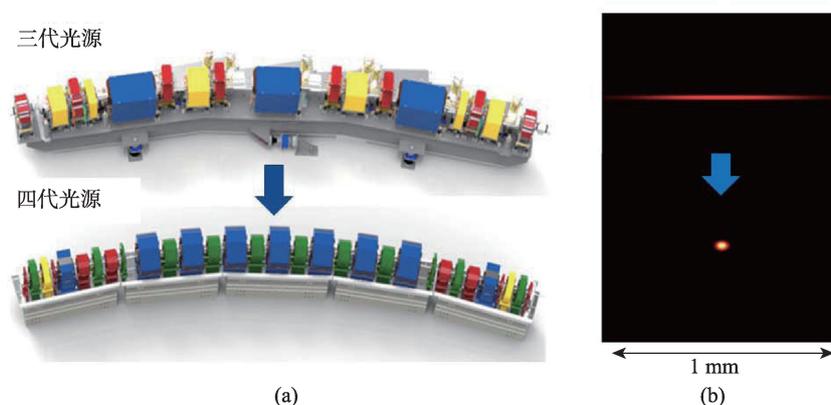


图2 (a)第三代和第四代同步辐射光源的元件布局对比。其中,第四代同步辐射光源设计主要基于紧致型多弯铁消色散结构;  
(b)第三代和第四代光源的束斑截面对比(<https://als.lbl.gov/als-u/als-u-approach/>)

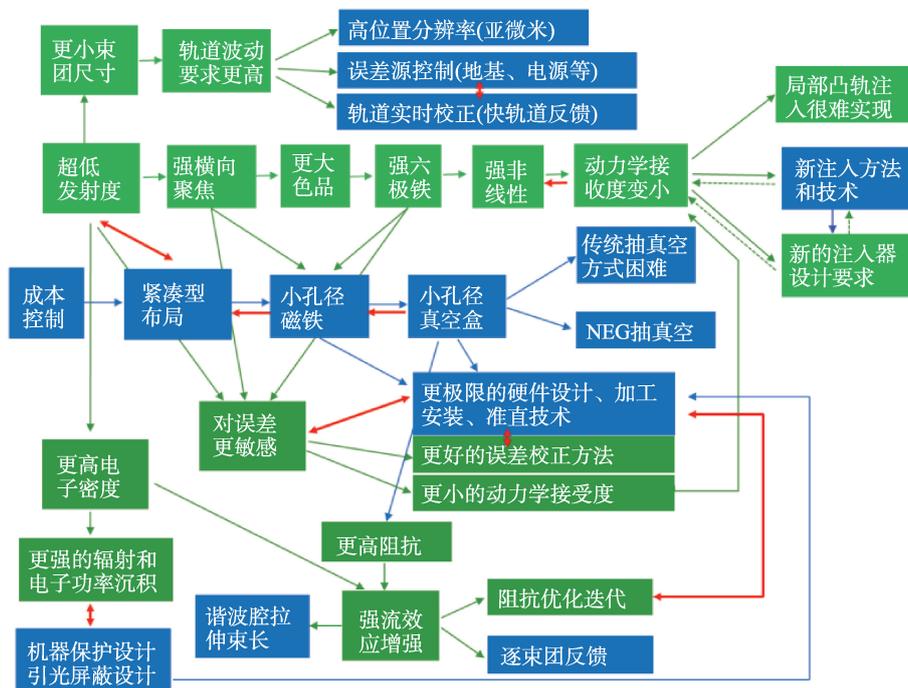


图3 第四代同步辐射光源设计中面临的系列加速器物理(绿色方框)及技术(蓝色方框)挑战。其中,绿色、蓝色箭头表示正向影响的关系链条,红色箭头表示反向或相互影响的关系链条

第四代光源的主要挑战之一是强非线性元件引起的动力学孔径显著减小的问题。衍射极限储存环中的强横向聚焦会导致很大的负自然色品。如果不对其加以校正,将会引起共振穿越或强流不稳定性等,限制储存环的最高流强,影响光源的整体性能。因此,在衍射极限储存环的设计中必须引入非常强的六极铁将色品校正为正值。而六极铁与二极、四极铁的不同之处在于,它是非线性元件,是电子储存环中非线性效应的最主要来源。因此,在利用六极铁进行色品补偿的同时,给储存环中引入了极强的非线性效应。其结果是,相比第三代光源,第四代光源的动力学孔径大幅减小。第三代光源的动力学孔径在 10 ~ 30 mm 之间。而对于第四代光源,即使利用各种先进的理论与数值方法优化,其可实现的动力学孔径通常限制在 1mm 量级。动力学孔径的显著减小有两个直接的影响。其一,第三代光源普遍采用的成熟的脉冲凸轨注入技术不再适用,需要发展适于小动力学孔径的新的注入方法和技术;其二,要求相应地革新注入器设计,以

在实现高度稳定性的同时,满足新注入方法的相关需求。

第四代光源中两项至关重要的技术是小孔径磁铁与真空技术。在紧致型 MBA 结构中引入强横向聚焦,需要尽可能地增加四极铁的梯度,缩短四极铁的长度。这要求发展小孔径、高梯度且高精度的四极铁技术。为了与小孔径磁铁相匹配,须采用小孔径真空盒。而当真空盒孔径大幅减小后,传统的真空获得技术变得非常低效。这需要发展新的真空获得技术,例如,国际上新发展的真空盒内壁非蒸散型吸气剂(NEG)镀膜技术。

此外,由于强横向聚焦和小孔径磁铁的采用,第四代光源的束流动力学对误差极为敏感,因而对误差控制、束流轨道稳定性和束流集体不稳定性控制等提出了更为严格的要求。这除了要求发展更好的误差效应校正方法,还需要严格控制磁铁及真空元件的加工和准直精度,将其推进至当前最好的技术水平。光源用户实验所用的同步光性能与电子束流的轨道稳定性紧密相关。国际上,光源领域

通常要求将电子束的轨道稳定性控制在束团尺寸的10%以内。在第四代光源中,电子束的水平和垂直方向尺寸均在微米量级,相应地,需要将轨道稳定性控制在亚微米量级。这就需要发展当前国际上指标最先进的束流监测技术、误差源控制技术以及轨道实时反馈控制技术。此外,为了追求高亮度,第四代光源的电子束流强与第三代光源保持在同一量级,而水平自然发射度则下降1到2个量级,这意味着电子密度大大增加;同时由于大量采用小孔径真空盒,束流阻抗显著增强(横向阻抗近似与真空盒孔径的立方成反比),其引起的束流集体效应在严重情况下将限制可稳定运行的最高流强。相应地,需要结合各种可能的抑制方法和手段,如逐元件分析优化阻抗、利用谐波腔拉伸束长、控制腔型结构的高次模、研发阻尼更快的逐束团反馈系统等,以有效控制各种束流集体不稳定性,确保光源在高流强下稳定运行。

值得指出的是,以上提到的仅是第四代光源设计中部分代表性的物理及技术挑战。此外,图3中各个影响链条并非简单的单向传递,有时候也会反向或相互影响。例如,在关键加速器技术无法取得有效突破的情况下,其技术瓶颈会反过来影响光源的物理设计及参数选择。总体而言,第四代光源对加速器物理和技术均提出了非常“极限”的要求,其稳定的参数空间非常狭窄,加速器物理与技术之间的耦合非常显著。第四代光源设计需要在多维变量空间对光源性能进行全局扫描和优化,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、稳定性、经济性等不同目标之间寻得合理的平衡。

### 3. 高能同步辐射光源的设计方案与关键技术

在广泛借鉴国际光源领域的最新研究成果的基础上,我们经过十余年的深入探索和迭代优化,充分结合国内加速器物理与技术的实际发展情况,

完成了性能先进、切实可行的HEPS光源设计方案。

光源的整体设计方案如图4所示。HEPS加速器由一台直线加速器、一台增强器、一台超低发射度储存环以及连接各部分的三条输运线组成。电子束自产生后,在直线加速器被加速至5亿电子伏特(500 MeV);之后,经低能输运线注入至增强器,在增强器中被进一步加速至60亿电子伏特(6 GeV),并最终注入至储存环。HEPS储存环由48个改进型混合7BA单元组成,束流能量为6 GeV,最高流强200 mA,自然发射度约 $35 \text{ pm} \cdot \text{rad}$ ;提供48个6米长的消色散直线节,用于安装波荡器等插入件设备;可在0.1纳米硬X射线波段提供亮度超过 $1 \times 10^{22} \text{ phs/s/mm}^2/\text{mrad}^2/0.1\% \text{ BW}$ 的高性能同步光。

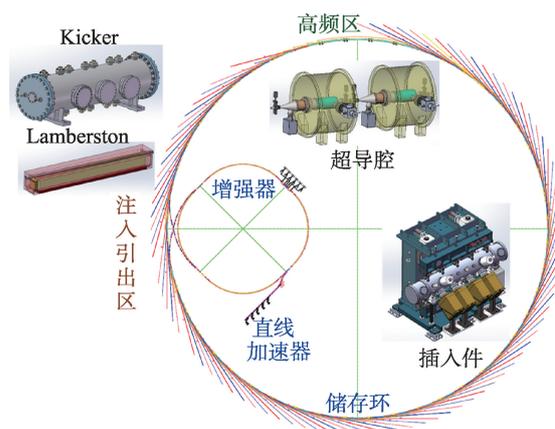


图4 HEPS光源整体设计布局示意图。图中给出了注入引出元件、超导高频腔、插入件以及用户束线(放射状线条)的示意图

在HEPS储存环设计中,我们基于改进的优化算法,提出了性能更优的改进型混合MBA结构设计方案。在第四代光源储存环的磁聚焦结构设计中,加速器专家普遍利用随机优化算法在多维变量空间进行全局优化,以尽可能地挖掘衍光源的极限性能。其中,一个具有代表性的随机优化算法是遗传算法。其模拟自然界中的进化过程,从一个随机生成的种子群开始,不断通过交叉、变异产生子群,并不断演化,直至趋于优化。不过经验显示,在将遗传算法应用于超低发射度储存环设计这一复杂的优化问题时,其容易收敛至局部最优解。为此,我们在HEPS储存环设计优化中引入了粒子群优化

算法<sup>③</sup>,通过结合遗传算法快速收敛和粒子群算法不断馈入多样性的优点,从而更有效地搜索全局最优解。此外,我们还利用机器学习对种群演化过程中积累的大量数据进行训练,先后发展了基于聚类算法和神经网络的性能更优异的优化算法。这些算法,为我们开展系统性的方案比较以及探索新型的磁聚焦结构提供了强大助力。世界各高能区光源的储存环磁聚焦结构设计通常采用混合MBA结构。借助于上述优化算法,我们提出了性能更优的改进型混合MBA结构。其采用包含反向弯转二极铁与纵向梯度二极铁的新型单元节以及高-低束流包络函数直线节设计。利用这种新型的MBA结构,可以进一步减小HEPS的发射度,将光源亮度提升30%以上。

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。该方案元件布局简单,仅需要一块切割磁铁和脉冲冲击器(kicker)。注入束经过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。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,它要求纳秒量级的超快kicker以及高电荷量(大于15 nC)的注入束。为了应对这些挑战,在注入技术方面,我们发展了带状线冲击器及其驱动快脉冲电源技术,可将冲击脉冲宽度控制在10 ns以内。在物理设计方面,我们提出了增

强器高能累积方案,充分利用置换注入中被替换的电子束。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~7 nC,显著降低了注入器的设计难度及运行风险。

在高梯度磁铁和小孔径真空技术实现方案上,我们在HEPS光源的预制研究阶段,攻克了相关的技术难题,在国内首次成功研发了80 T/m的超高梯度四极铁和NEG镀膜真空技术(图5)。此外,在磁铁加工、装配、准直等环节中,采用严格的精度控制(如,四极磁铁极面加工误差小于20微米,准直精度小于30微米),以实现万分之一量级的磁场质量,减小对束流动力学的扰动。除了采用先进的NEG镀膜技术,在真空设计中,我们还采用无氧铜作为真空盒主要材料,并对真空盒、光子吸收器、波纹管等进行了优化设计,以同时满足真空获得、辐射能量吸收、阻抗优化等多方面要求。

在束流集体不稳定性抑制方面,为了实现200 mA的设计流强,我们对储存环阻抗和束流集体不稳定性进行了系统评估。通过对主要阻抗元件逐一建模,发现潜在的元件结构设计问题并予以改进。基于全环阻抗模型,我们开展了束流集体不稳定性的数值模拟研究,进而提出了相应的抑制措施,包括在储存环中引入足够大的正色品(+5)、采用阻尼时间0.1 ms的逐束团反馈系统、使用三次谐波腔(499.8 MHz)配合基频腔(166.6 MHz,见图5)实现

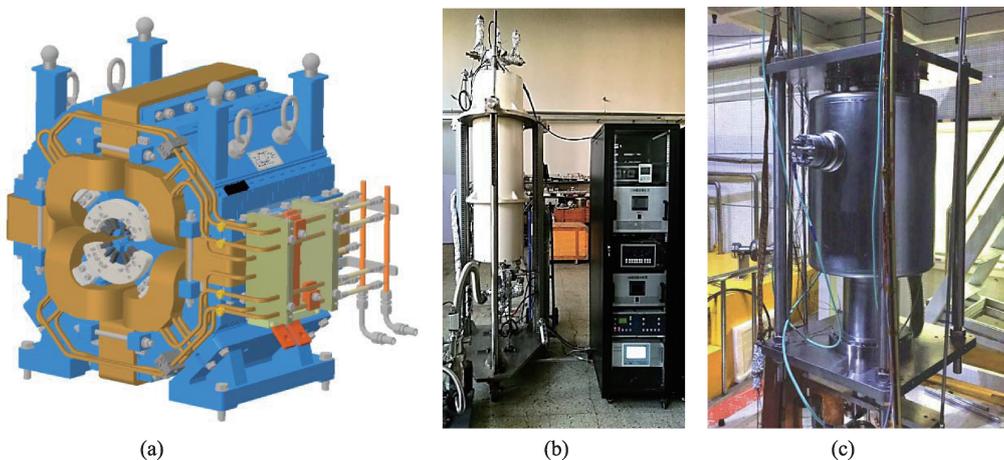


图5 HEPS光源研制的80 T/m的超高梯度四极铁(a)、真空盒内壁吸气剂镀膜系统(b)以及166.6 MHz超导高频原型腔(c)

束长拉伸等,以保证光源在高流强情况下稳定运行。

在束流轨道稳定性控制方面,为了将插入件处的束流轨道稳定性控制在束团尺寸的10%以内,我们在误差源控制、束流轨道精确测量、快轨道反馈系统设计等方面开展了大量的研究工作。影响电子束流轨道稳定性的两个重要误差源是地基振动及磁铁电源纹波。为了有效控制误差,我们在HEPS地基施工环节,对储存环隧道和实验大厅进行了防微振基础换填处理,将振动频率在1到100赫兹的地面振动在1秒内的均方根位移积分控制在25纳米以内。在电源设计中,我们利用开关电源技术,并结合磁铁自身的电感特性,将主磁铁电源的电流纹波控制在10 ppm以下。对束流轨道实现高精度控制和反馈的前提是对束流轨道的精确测量。对于HEPS,其束流位置测量系统要求在22 kHz快轨道测量模式下实现优于0.3微米的测量精度。为此,我们在束流位置测量系统的电子学硬件设计、固件开发及算法研究等方面开展了大量的研究工作,以在实现高测量精度的同时,保证测量系统的长期稳定性。与此同时,我们还开展了快轨道反馈系统的设计研制,目标是实现500 Hz以上(目标1000 Hz)的有效反馈带宽。

此外,在HEPS设计中,我们采取了严格的辐射防护及机器保护设计。作为一台高能区的第四代光源,HEPS储存环中的电子束及同步光具有非常高的功率密度。必须采取严格的机器保护措施。一旦机器出现非正常运行的情况,这些措施将避免束流或同步光沉积导致的元件损伤和机器故障。为此,我们设计了基于束流轨道的机器保护系统。当电子束的轨道漂移超过特定阈值时,将立即启动打束,在1 ms以内将束流流强快速降为零,以保护真空设备免受同步光损伤。另外,我们在HEPS储存环中安装了束流准直器,将损失的电子集中收集,并对准直器作专门的辐射屏蔽设计,以保障工作环境的辐射剂量始终处于安全范围内。

## 4. 总结

按照规划,HEPS将于2025年建成运行。届时,它将与世界上正在运行的美国的APS、欧洲的ESRF、日本的SPring-8、德国的Petra-III(及其升级工程)一起,构成世界五大高能同步辐射光源。HEPS将为材料科学、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,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。

### 注释:

- ① 考虑一个简单情况,全环采用相同的二极铁。二极铁的数目与单块二极铁的弯转角度的乘积恒定,为360度。
- ② 长直线节的数量很大程度上决定了光源光束线及实验站的数量。
- ③ 粒子群优化算法模拟自然界中的雁群飞行过程,每个种子通过判断自己与处于领先位置的种子的距离,来确定下一步前进的方向和速度,通过多次迭代,使所有种子向最优方向发展。

