

合肥光源

张国斌 胡胜生 封东来

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室 230029)

1984年11月20日,合肥光源奠基典礼隆重举行,标志着我国第一个专用同步辐射光源正式开工建设。合肥光源建设、运行逾三十五年,为我国同步辐射光源技术及其应用的发展做出了重要贡献,同时也从一个侧面反映了世界科技前沿的进展以及我国综合国力的巨大进步。

一、同步辐射

同步辐射(Synchrotron Radiation)是以接近光速运动的电子在磁场中偏转时沿运动轨道切线方向发出的电磁辐射。同步辐射的发现与高能加速器的发展密不可分。20世纪20年代开始,核物理和高能物理的研究需求驱动了粒子加速器技术飞速发展,环形电子同步加速器开始得到广泛研究。科学家们很快就发现,环形电子加速器中电子的能量存在某种损失机制,导致其中电子能量的提高存在瓶颈。20世纪40年代,前苏联和美国科学家以及我国物理学家朱洪元分别独立给出了关于相对论性电子受到加速时发出电磁辐射的较详细的经典理论,指出电子在转弯时将产生电磁辐射从而损失部分能量。1947年在美国通用电气公司的电子能量为70 MeV电子

同步加速器上首次观察到同步加速器中电子产生的光辐射,从此,这类辐射便被称为“同步辐射”。

同步辐射是不受高能物理学家欢迎的,因为它消耗了加速器的能量,阻碍带电粒子能量的提高。但是,科学家们很快便了解到同步辐射具有优异的性能:光谱范围宽广(从远红外到X光波段光谱连续可调,见图1)、光源亮度极高(比常规X光源高出 10^{10} 数量级以上)、高度准直(光源发散角在毫弧度量级)、高度偏振、高重频脉冲光源(光脉冲宽度在皮秒量级),等等。图1示意了同步辐射光谱所覆盖的电磁波谱区间,它覆盖了从远红外、可见光、真空紫外、软X射线、以及硬X射线在内非常宽广的波长范围,与现代科学的主要研究对象如原子、分子、蛋白、细胞等的空间尺度相当。

根据电动力学理论,一个电偶极振子在远处 P 产生的辐射场强度正比于从 P 点处看其电荷运动沿垂直于视线方向的视在加速度。从远处沿环形同步加速器中电子轨道切线方向看其中的运动电子,相当于电偶极振子情形,电子在磁场约束下受向心力作用做回旋运动。当电子相对于观察点 P 作低速运动(运动速度 $v \ll$ 光速 c ,或 $\beta=v/c \ll 1$)时, P 点

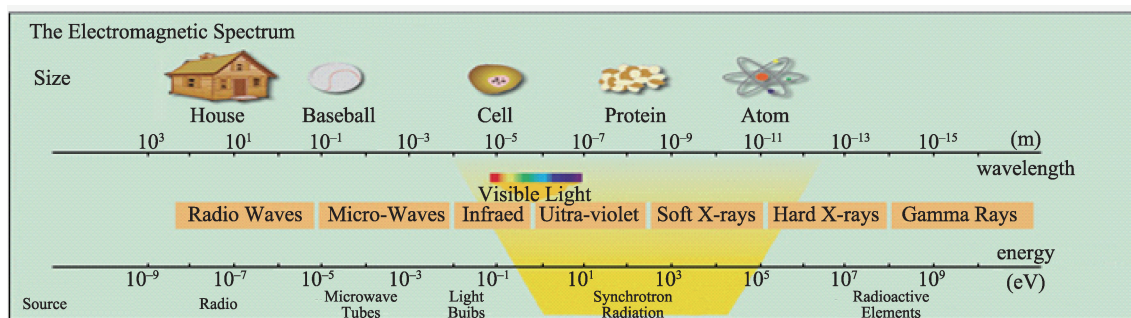


图1 同步辐射的光谱范围

观察到的电偶极辐射场分布为以向心力方向为轴线的纺锤型,辐射频率为电子圆周运动频率。而当电子运动速度接近光速时($\beta \approx 1$), P 点观察到的电偶极辐射场分布将集中在沿其速度方向极小的空间角内(图2),半张角 $\psi \sim 1/\gamma$,其中 $\gamma = E_c/m_0c^2$, E_c 为电子能量, m_0 为电子静质量, $m_0c^2 \approx 0.511$ MeV。

假设同步加速器中电子能量 $E_c \sim 1$ GeV,则 $\gamma \sim 2000$,同步辐射的半张角为毫弧度量级。此时, $\beta = (1 - 1/\gamma^2)^{1/2} \approx 0.999\ 999\ 87$,即电子运动速度非常接近光速,由于相对论时间膨胀效应(时间间隔缩小 $1/\gamma^2$)以及可被观察的辐射张角仅为 $1/\gamma$,观察到的电磁辐射特征频率将是电子圆周运动频率的 γ^3 倍!再假设同步加速器弧区周长为60 m,则其中电子回旋运动频率(光速/周长)约为5 MHz,弯转磁铁产生的同步辐射特征频率在 10^{16} Hz量级,换算成特征波长为纳米量级,属于软X射线波段。提高电子能量,则辐射的特征波长将缩短至0.1 nm,即埃(10^{-10} 米)量级,也就是硬X射线范围。由于同步加速器使用高频腔产生的高频电场加速电子,补偿由于辐射产生的电子能量损失,因此同步加速器中电子以束团形式存在,每个电子束团经过高频腔的时间间隔严格等于高频周期的整数倍,并且由于高频加速的位相要求使得束团长度被压缩到皮秒量级,从而同步辐射呈脉冲状,最大脉冲频率即为高频频率(~ 500 MHz)。由于电子束团的横向尺寸通常小于100微米,配合高度集中的辐

射角分布,使得同步辐射的亮度远远高于常规光源。

同步辐射光源的优异性能使其成为众多前沿科学研究领域不可替代的研究平台,从而奠定了同步辐射技术及应用快速发展的基础。20世纪50年代,前苏联莫斯科列别德夫研究所利用其250 MeV同步加速器开展同步辐射特性研究。紧接着美国国家标准局也开始了相关研究,在Synchrotron Ultraviolet Radiation Facility(SURF)装置上开展同步辐射用于真空紫外波段计量标准及谱学技术应用的可行性研究。SURF的研究工作拉开了同步辐射装置应用的帷幕,随后各国科学家纷纷在已有高能电子加速器上开始了“寄生模式”的同步辐射应用研究,即在高能物理研究的间隙分出少量时间用于同步辐射应用研究。这类光源便是通常所说的第一代同步辐射装置,主要出现于20世纪60年代,如意大利罗马弗拉斯卡蒂实验室的1.15 GeV电子同步加速器、日本东京INS-SOR研究所的750 MeV电子同步加速器、以及德国DESY的6 GeV电子同步加速器,等等。在这一时期,为了提高加速器的束流强度,电子储存环的概念被提出并逐渐成熟。储存环可以获得更稳定的电子轨道、更高的电子束流强度,成为日后同步辐射光源的基础。图3给出了一个储存环结构示意图,其中,对称分布的弯转磁铁使得电子运动方向总体偏转 360° 形成闭合轨道;在偏转磁铁之间的直线节上,按一定规律排布着弯

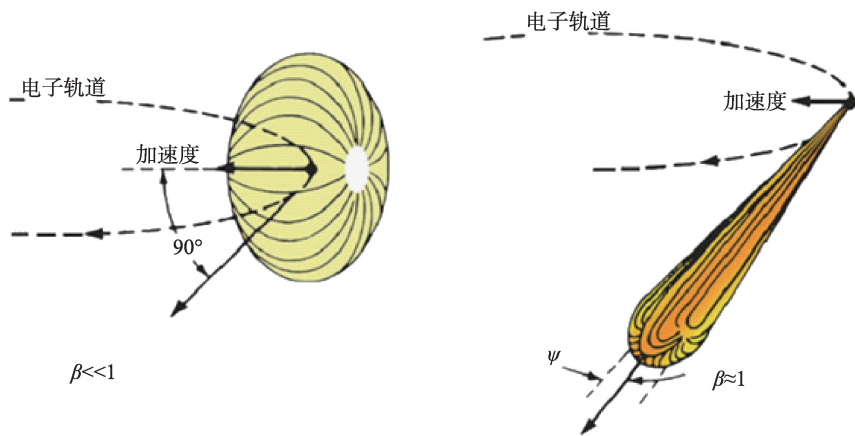


图2 电偶极振子在低速及接近光速运动下的辐射角分布示意图

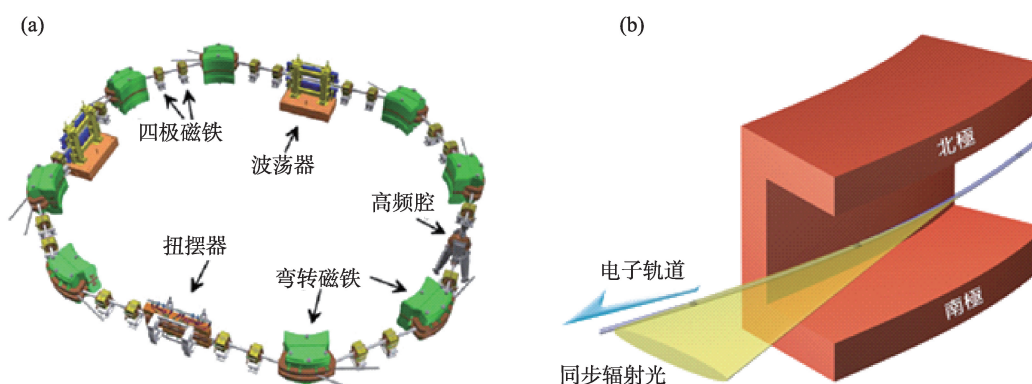


图3 储存环结构部示意图 (a)储存环上主要部件包括高频腔、弯转磁铁、四极磁铁、波荡器、扭摆器等；
(b)弯转磁铁中电子运动轨迹(蓝色弧线)及同步辐射方向(黄色扇形)

转磁铁、高频腔、四极磁铁、插入元件(波荡器和扭摆器)等主要部件。穿过上述部件的几何中心设置了超高真空回路,高能电子(来自直线加速器或电子增能器,此处没有标明)被注入其中做回旋运动,电子经过弯转磁铁时其运动轨迹为圆弧、并沿运动轨迹切线方向发出弯铁辐射光,经过直线节的波荡器或扭摆器时电子沿着直线蛇形前进、并发出亮度更高的辐射光。四极磁铁使得电子保持一定的聚焦状态,从而克服电子之间互相排斥作用。经过高频腔时,电子获得同步加速,补偿其在储存环运动一圈因辐射损失的能量,从而维持稳定运动轨道。

美国威斯康辛大学建成了世界上第一台电子储存环 Tantalus I, 于 1968 年开始尝试同步辐射谱学应用,立刻显示了电子储存环作为同步辐射光源的优越性。20 世纪 70 年代见证了一批储存环光源逐渐对同步辐射应用开放,如法国奥赛的 540 MeV-ACO、美国国家标准局的 250 MeV-SURF II、日本 INS-SOR 的 300 MeV 储存环、美国斯坦福的 2.5 GeV-SPEAR、德国 DESY 的 DORIS 等光源。

“寄生模式”极大地制约着同步辐射应用的发展,无法满足快速增长的同步辐射用户需求。因此,建设专用光源——即通常所说的第二代同步辐射光源,成为必然的选择。第二代同步辐射光源优化了储存环电子聚焦结构,使得储存环发射度(电子束团横向尺寸和发散角的乘积)大幅度减小,从而大大提高了光源亮度,同步辐射实验观测能力也

随之大幅度提升。1981 年,英国达斯伯里 SRS 储存环光源开始用户实验,成为世界首个第二代光源。同年,美国布鲁克海文国家实验室建成 NSLS 光源,包含 0.7 GeV 及 2.5 GeV 两个储存环光源;威斯康辛大学同步辐射中心建成 1 GeV 的 ALADDIN 光源。1982 年,日本筑波 KEK 实验室建成 2.5 GeV 的 PF 光源,德国柏林建成 0.8 GeV 的 BESSY 光源。1984 年法国建成 0.8 GeV 的 SUPER-ACO 光源。同时,部分一代光源通过升级改造成为二代光源,如美国斯坦福同步辐射实验室及德国汉堡的 HASYLAB 光源。二代光源的大量建设及运行开启了同步辐射光源大规模应用时代,合肥光源概念正是在这样的背景下逐步形成的。

二、合肥光源的建设历程及现状

1. 合肥光源建设历程

1978 年党的十一届三中全会召开,昭示着我国



图4 合肥光源奠基(1984.11.20)

科学的春天已来临。中国科学技术大学加速器物理专业的前辈们敏锐地抓住了国际上同步辐射光源的发展机遇,开始了同步辐射光源物理及相关前沿技术的跟踪研究。在顺利完成关键技术预研的基础上,于1981年11月2日以中国科学技术大学(81)第148号文向中国科学院上报了《关于申请批准电子同步辐射实验室计划任务书的请示报告》,吹响了我国专用同步辐射光源建设的号角。1983年4月8日,中华人民共和国国家计划委员会科[1983]470号文件下发了《关于建设国家同步辐射实验室的复函》,正式批准在合肥中国科学技术大学筹建国家同步辐射实验室,建造一台能量为8亿电子伏、平均束流强度为100~300毫安的电子同步辐射加速器及相应的设施,即合肥光源。国家同步辐射实验室也成为我国第一个批准建设的国家实验室。与此同时,北京正负电子对撞机项目也正式立项建设,一机两用,在满足高能物理研究的基础上,提供部分机时给同步辐射应用研究。北京正负电子对撞机属于一代同步辐射光源,合肥光源则是一台专用同步辐射装置,属于二代光源。

历经6年艰苦的建设历程,1989年4月26日合肥光源成功储存束流,强度达4.07 mA,获得第一缕同步辐射光。1990年12月27日,储存流强达到109.4 mA,达到设计指标。又经过了一年左右的试运行,1991年12月23日,合肥光源工程通过技术鉴定,专家们一致认为:由我国自行设计、研制的合肥光源的主要性能已达到国际上同类装置先进水平,



图5 合肥光源一期工程(1989年)

已建成的5条光束线和实验站的主要性能基本达到国际水平。1991年12月26日合肥光源工程顺利通过国家验收、正式对用户开放。合肥光源的建设获得国家科技进步一等奖(1995年)。

回望合肥光源的建设历程,可以深深体会到当年我国大科学工程建设的艰辛。20世纪八十年代,我国科技及工业基础与世界先进水平存在较大差距,同步辐射领域更是差距巨大。同步辐射技术是多学科科研实力的综合体现,它涉及加速器物理、微波技术、超高真空、高精度磁铁及电源、光学精密加工与检测、精密机械、自动控制、先进探测器等等众多领域。同时,它又是一个系统集成的典型,任何一个环节出问题,都关系到工程的成败。在当时的中国建设这样一个大科学工程,是极具挑战的。举几个例子可以说明当时工程建设的艰难。

大型弧状叠片式二极磁铁(弯转磁铁)是储存环上的关键部件之一。因为电子在慢加速过程中需要维持轨道不变,要求二极磁铁满足从3000高斯到12000高斯的大跨度下磁场中心60 mm宽范围内好场区积分场误差小于万分之五,这一要求超过了国际上同类磁铁近一倍,当时国内没有任何建造这类磁铁的经验。在大量调研的基础上,最终选了一家名不见经传的小厂——辽宁精密仪器厂共同研发。他们没有做过磁铁,但有加工精密仪器的技术。合肥光源科技人员常年驻厂,与工厂技术人员一同编制加工工艺,制定加工方案,一道道工序反复摸索,严格把关,硬是自主研发出了具有世界水平的高精度大型二极铁,关键指标均达到或超过了国外同类产品,造价世界最低。

储存环大型超高真空系统的研制也是国内没有先例的。储存环真空室上分布着大量束流检测及控制设备,形成了周长约66米的大型异形真空室,其加工精度及真空度要求都非常高,尤其是静态真空度要达到 10^{-8} 帕,对材料选择和处理、精密加工及超高真空焊接、表面处理等工艺提出了苛刻的要求。光源技术人员充分吸收借鉴国外同类机器真空建造的经验教训,以一丝不苟的科学态度与加

工厂家紧密配合,最终自主研发出合格产品,创造了我国国产大型真空室真空度记录。

插入元件的应用是提高同步辐射光源性能的必由之路。合肥光源在国内率先开展了插入元件应用研究,先后研制出永磁平面波荡器及超导扭摆器,并解决了插入元件对束流物理的影响、成功应用于合肥光源,大大提升了合肥光源性能。

同步辐射光源技术不仅仅涉及到加速器技术,X射线光学技术同样举足轻重。同步辐射X射线光学的核心技术包括X射线波段光学元件的制作、性能检测,以及超高真空兼容的精密机械系统设计和制造。这些技术在合肥光源建设之初国内也是一片空白。譬如,软X射线能区的关键光学元件——光栅和波带片,完全依赖国外进口。为此,合肥光源组建了专门实验室,开展技术攻关,逐渐形成了比肩世界先进水平的衍射光学元件设计及制作能力。同步辐射光学元件尺寸通常达到500 mm以上,光学元件面形精度要求好于0.5微弧度,光学元件的面形检测是关键技术之一。合肥光源研发了国内首个长程面形检测设备(LTP),其检测精度达到0.1微弧度水平,满足了合肥光源光束线建设的需求。合肥光源攻克了平面变线距光栅单色器自主设计及建设技术难关,在国内率先自主建成高性能软X射线平面变线距光栅单色器。

大量的自主研发工作极大地促进了我国同步辐射光源及X射线光学技术的发展,成为我国同步辐射光源事业后续发展的重要基础,同时也促进了相关技术的国产化进程。譬如,合肥光源自主建立的衍射光栅研制能力,在部分满足国内同步辐射装置应用以外,还为我国国防科技提供高质量大口径衍射光栅,打破了国际禁运,极大地支持了我国国防科技建设。

2. 合肥光源现状

合肥光源投入运行后,很快就发现一期工程建设建设的5个光束线及实验站远远不能满足国内用户的需求。1998年合肥光源开始二期建设,主要任务是



图6 合肥光源二期工程(2004年)

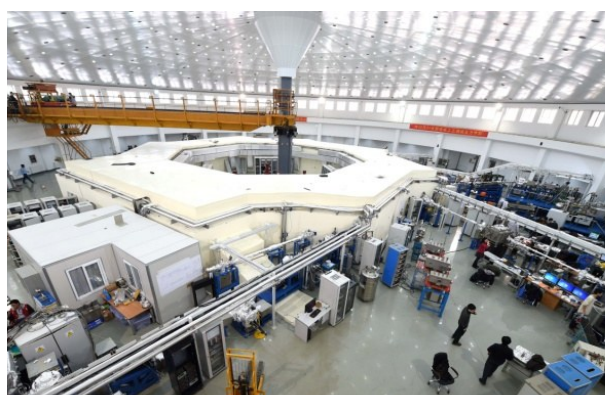


图7 合肥光源升级改造(2014年)

增加若干光束线及实验站。2012年,合肥光源再次执行重大升级改造任务,进一步提升光源亮度、优化光束线及实验站性能。

升级改造后的合肥光源由一台性能良好、稳定运行的800 MeV储存环光源以及十多条各具特色的光束线及实验站组成,重点开展真空紫外-软X射线波段的科学实验,其特色是提供对样品电子结构的精细观测能力,获得样品中能带结构、化学态、成键等等涉及样品物理化学过程的基本信息。主要实验方法包括软X射线能区的吸收谱、园二色谱、光电子能谱、纳米CT,真空紫外能区角分辨光电谱、光电离质谱,以及红外显微光谱等等,研究领域覆盖能源化学、催化、纳米科技、先进材料、环境科学、大气科学、生命科学等。

目前合肥光源年均为用户提供5000小时以上实验机时,产出高水平科研论文达400多篇,媲美国际上高水平三代光源。迄今为止它依然是我国最

表1 合肥光源一期与二期建设和升级改造的主要性能

参量	单位	一期	二期	升级改造
储存环能量	MeV	800	800	800
注入器能量	MeV	200	200	800
电子流强	mA	200	250	360
发射度	nm×rad	160	160	38
运行模式		衰减模式	衰减模式	恒流模式
束流寿命	小时	>8	>8	—
插入元件数目	个	无	2	5
线站数目	个	5	14	10

重要的软X射线光源,是我国相关领域的前沿科学不可或缺的支撑平台型大科学装置。作为一个二代光源,合肥光源的性能在世界同类机器中已非常优秀,但已远远落后于目前主流的三代光源,更无法与正在发展中的第四代同步辐射光源相提并论。

三、未来发展规划

伴随着加速器物理及各种先进技术与装备的发展,同步辐射技术处在持续发展中。从20世纪九十年代开始历经二十年多年,国际上先后建成众多第三代光源。三代光源有两个显著特征:1)光源发射度进一步大幅度降低至10纳米弧度以下(二代光源发射度通常为百纳米弧度);2)不同于二代光源主要使用二极磁铁的辐射,三代光源大量使用安装于储存环直线节的插入元件作为辐射源。插入元件可产生沿直线节以一定周期规则分布的磁场,周期数可达数十至上百,来自不同周期的同步辐射光强度叠加输出。这两个特点,使得三代光源的亮度

较二代光源提高三个数量级左右,显著提升了光源性能。

代表性的高能光源有,德国和法国合作建成于1994年的世界上第一台三代光源——欧洲同步辐射装置 ESRF(6 GeV),建成于1996年美国 APS(7 GeV)以及建成于1997年日本 Spring 8(8 GeV)。代表性的中低能量光源有,建成于1994年美国 ALS(1.9 GeV)、意大利 Elettra(2 GeV)光源,紧随其后的有韩国 PLS(2 GeV)、我国台湾地区的 TLS(1.3 GeV),建成于2001-2010年之间的瑞士德国 BESSY II(1.7 GeV)、SLS(2.4 GeV)、加拿大 CLS(2.9 GeV)、英国 Diamond(3 GeV)、法国 SOLEIL(2.75 GeV)等,以及近年来建成于2012年的韩国 PLS II(3 GeV)和西班牙 ALBA(3 GeV)、2015年的美国 NSLS II(3 GeV)、以及2016年我国台湾地区 TPS(3 GeV)等。我国上海光源 SSRF(3.5 GeV)建成于2009年,是国际先进水平的第三代中能光源,它的建成极大地提升了我国同步辐射光源的技术水平。

进一步降低同步辐射光源发射度、达到辐射光波长的 $1/4\pi$,即所谓的衍射极限,将成为第四代同步辐射光源。此时,光源的亮度已达到极限,即便再降低光源的发射度也不可能再提高光源亮度;同时,也意味着所产生的同步辐射光是横向完全相干的。相干性是第四代光源独特的性能,相比于三代光源,这是性能上的质变。由于四代光源的超高亮度,将使现有三代光源上的谱学探测技术直接升级为纳米空间分辨的谱学探测技术。基于光源的相

表2 升级改造后合肥光源束线的主要性能

束线	辐射元件	能量范围	能量分辨	样品处光斑	光子通量 phs/sec
BL01B	弯铁	20-4000 cm^{-1}	0.25 cm^{-1}	直径约 10 μm	—
BL03U	波荡器	5-21 eV	E/DE~3686	1.6×0.5 mm^2	6×10 ¹²
BL04B	弯铁	5-11.5 eV	E/DE~500	0.6×0.6 mm^2	1×10 ¹²
BL07W	扭摆器	200-867 eV	E/DE~1100	直径 30 nm	1.6×10 ¹¹
BL08B	弯铁	30-400 eV	E/DE~300	2×1 mm^2	1×10 ¹⁰
UL09U	波荡器	8-124 eV	E/DE~3491	0.5×0.8 mm^2	4×10 ¹²
BL10B	弯铁	60-1000 eV	E/DE~1000	2×1 mm^2	1×10 ¹⁰
BL11U	波荡器	20-600 eV	E/DE~14923	0.2×0.1 mm^2	7.7×10 ¹⁰
BL12B	弯铁	100-1000 eV	E/DE~1000	2×1 mm^2	1×10 ⁸
BL13U	波荡器	5-90 eV	E/DE~11000	0.3×0.2 mm^2	2×10 ¹¹

干性,将产生众多超高分辨、超高灵敏探测技术。例如,利用X射线相关光谱技术将可同时实现纳米空间分辨及纳秒时间分辨检测能力,利用X射线干涉仪将可获得超高灵敏检测能力,等等。

由于X射线波长为0.1纳米量级,第四代同步辐射光源的发射度将达到10皮米弧度量级,这给储存环物理设计及工程建设带来了极大的挑战。譬如,第四代光源的真空室直径将小至毫米量级,传统真空获得技术将不再适用;四代光源的电子束团横向尺寸将是10微米量级,其束流轨道稳定性要求将比三代光源提高两个数量级,即在数百米至上千米长的束流轨道上达到微米级精度,从而对电子学控制系统、地基及支撑系统、准直测量技术等提出了及其苛刻的要求。X射线相干性的传输、检测和利用,则对X射线光学系统设计与制造、X射线探测器性能、海量实验数据的存储与处理等提出了前所未有的要求。

第一个尝试利用第四代光源原理与技术的同步辐射光源——瑞典MAXIV光源于2016年建成,在世界上率先使用一个周期包含七块弯转磁铁的聚焦结构、以及与之相匹配的众多先进技术,揭开了衍射极限储存环光源时代的序幕。MAX IV光源的发射度降低到了320皮米弧度,但与实现衍射极限目标仍然有一定距离。目前,国际上正竞相开展第四代光源的技术研发及建设。巴西Sirius光源正在建设中,欧洲ESRF、美国APS和ALS、德国PETRA、日本SPring-8、法国SOLEIL、瑞士SLS、意大利ELETTRA和英国DIAMOND等一批世界主流第三代光源都纷纷提出了雄心勃勃的升级计划并获所在国家支持,在未来5年左右将完成四代光源升级改造。

同步辐射光源中电子能量决定了光源的优势波段。如前所述,同步辐射的特征频率是储存环中电子回旋运动频率的 γ^3 倍。电子能量越高, γ 越大,则其电磁辐射的特征能量就越高。高能光源(电子能量大于5 GeV)辐射的优势在高能硬X射线能区,低能(电子能量2 GeV左右及以下)光源辐射的优势在软X射线能区,中能光源(电子能量3.5 GeV左右)则折中兼顾软、硬X射线能区。不同能区的X射线所观测

的对象各有侧重,硬X射线侧重观测物质的原子结构及其演变,而真空紫外-软X射线更擅长观测与物质功能关联的电子结构。因而,国际上发达国家或地区在建设同步辐射光源时基本都考虑了高中低能区光源合理布局,以充分发挥不同能区光源的优势。

随着我国国民经济及科技竞争力的持续高速增长,我国对先进同步辐射光源的需求日益迫切。借鉴国际同步辐射布局及发展趋势,我国正着力建设和完善国家高性能同步辐射光源体系。在建成中能区先进的第三代中能光源——上海光源SSRF的基础上,我国于十三五期间立项建设高能区先进光源——北京高能光源HEPS。HEPS是我国第一个四代同步辐射光源,计划于2025年建成。它将使我国在高能硬X射线能区的观测能力进入国际先进行列。然而,我国在真空紫外-软X射线能区的观测能力依然远远落后于国际先进水平,低能区现有的合肥光源所能提供的观测技术水平及服务能力已远不能满足我国科研用户不断增长的需求。

为此,合肥光源正在研究我国低能区第四代同步辐射光源建设方案及其可行性,并开展了关键技术预研。规划设计中的我国低能区第四代同步辐射光源的能量将在2.2 GeV左右,发射度将低至85皮米弧度,在软X射线能区的辐射光具有高度相干性(波长大于1 nm时达到衍射极限),有望在十四五期间立项建设,成为世界上综合性能最先进的低能区第四代光源。届时,我国将继美国和欧盟之后实现高中低能区先进光源全覆盖,完善先进光源体系国家战略布局,实现我国同步辐射领域的跨越式发展。



图8 规划中的合肥先进光源(HALF—Hefei Advanced Light Facility)