

上海光源介绍

李浩虎 余笑寒 何建华

2009年4月29日,上海张江高科技园区一个巨大的鸚鵡螺形状的建筑内,上海同步辐射光源正式举办了其竣工典礼。上海光源是目前世界上性能最好的第三代同步辐射光源之一,也是我国迄今为止投资最高、规模最大的大科学装置,其建成标志着我国在建设大科学工程实验装置方面,已具备高水平自主创新和技术集成能力,进入世界先进行列。下文将对上海光源做简单的介绍。

一、同步辐射概述

早在1898年和1900年,法国圣太田矿业学校的李纳(Alfred-Marie Liénard)教授和德国格丁根地球物理实验室的维谢尔(Emil Wiechert)教授就分别独立地根据电磁场理论预言了高速运动的带电粒子在状态发生变化时,会向外发射电磁波,并得出了著名的李纳-维谢尔势公式;1912年,英国阿伯里斯特威斯大学应用数学系主任肖特(G.A. Schott)对这种电磁波的空间角分布、频谱及其极化特性进行了详细地研究。然而直到1947年,人类才首次在美国通用电气公司(the General Electric)的研究所为验证同步加速原理所建造的一台70MeV的电子同步加速器上观测到这种电磁波,并称其为同步辐射,后来又称为同步辐射光,并称产生和利用同步辐射光的科学装置为同步辐射光源或装置。由于同步辐射造成的粒子能量损失限制了加速器所能达到的最高能量,在其发现初期是科学家们努力克服的现象之一。但是人们很快就发现同步辐射所具有的高亮度、高准直性等特点可以用来作为一种新型光源,利用它来探索未知的微观世界。

对于一个光源来说,它所能提供的光子的能量分布和亮度是其最重要的两个参数。在同步辐射光源中,光子是利用高能电子在二极偏转磁铁中运动方向的变化来获得的,因此其光子能量分布也主要由电子的能量和偏转磁铁的磁场强度所决定。根据电动力学和量子力学的相关理论,可以得到电子在受到磁场偏转时的辐射功率 P 如式(1)所示。

$$P = \frac{2}{3} r_0 c E_0 \beta^4 \frac{\gamma^4}{\rho^2}, \quad (1)$$

其中 c 为光速, β 、 γ 为描述电子运动的相对论因子,

$\beta = v/c$, $\gamma = E/E_0$, v 是电子速度, E 为电子的能量, $E_0 = 0.511\text{MeV}$,为电子的静止质量, $r_0 = 2.818 \times 10^{-15}\text{m}$ 为电子的半径, ρ 为电子在磁场中运动时的偏转半径,可以通过洛伦兹力公式 $F = e\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ 求得。由公式(1)可以得到,电子的辐射功率和其能量的4次方成正比,和其通过二极磁场时弯转半径的平方成反比,也就是说在技术条件允许的情况下,在尽可能小的加速器上得到尽可能高的电子能量是提高电子辐射功率的主要手段。

根据理论分析,电子的辐射功率将沿方位角和频谱具有一定的分布,如式(2)所示。

$$\frac{d^2W}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2}{12\pi^3 \epsilon_0 c} \left(\frac{\omega \rho}{c} \right)^2 \frac{(1 + \gamma^2 \theta^2)^2}{\gamma^4} \times \left[K_{2/3}^2(\xi) + \frac{\gamma^2 \theta^2}{1 + \gamma^2 \theta^2} K_{1/3}^2(\xi) \right], \quad (2)$$

其中 $\xi = \omega(1 + \gamma^2 \theta^2)^{3/2} / \omega_c$, $K_{2/3}$, $K_{1/3}$ 为贝塞尔函数, θ 为观察方向与电子运动方向之间的夹角, $\omega_c \approx 3c\gamma^3 / 2\rho$,为一个特征频率参数。由于当 ξ 远大于1时, $K \approx e^{-\xi} / \xi$,也就是说电子所发出的同步辐射功率将集中在沿电子运动方向的一个很小的角度内,并且使用的同步辐射光子频率越高,这个角度越小。

上面讨论的是一个电子同步辐射的情况,实际上同步辐射光源所提供的光子是由很多个电子组成的,通常情况下,一台同步辐射装置能够用于提供光子的电子流强有100mA到1A之间。这些电子通常是以高斯分布的形式被约束在一定的空间范围内,描述其分布状态的参数主要有发射度 ϵ ,水平/垂直束斑尺寸 σ_x / σ_y ,水平/垂直束流张角 σ_x' / σ_y' 等,这些参数将主要影响一台同步辐射光源所提供的光的亮度,即单位时间单位面积内的光子数量。

几十年来,同步辐射光源已经经历了三代的发展,它们的主体都是一台电子储存环。第一代同步辐射光源的电子储存环是为高能物理实验而设计的,只是“寄生”地利用从偏转磁铁引出的同步辐射光,故又称“兼用光源”;第二代同步辐射光源的电子储存环则是专门为使用同步辐射光而设计的,储

存环结构相对简单，电子束的发射度较大，主要从偏转磁铁引出同步辐射光；第三代同步辐射光源的电子储存环对电子束发射度和大量使用插入件进行了优化设计，使电子束发射度比第二代小得多，因此大大提高了同步辐射光的亮度，并可从波荡器等插入件引出高亮度、部分相干的准单色光。第三代同步辐射光源根据其光子能量覆盖区和电子储存环中电子束能量的不同，又可进一步细分为高能光源、中能光源和低能光源。凭借优良的光品质和不可替代的作用，第三代同步辐射光源已成为当今众多学科基础研究和高新技术开发应用研究的最佳光源。

二、上海光源简介

上海同步辐射装置（简称上海光源，Shanghai Synchrotron Radiation Facility，缩写为 SSRF）是一台第三代中能同步辐射装置，也是迄今为止我国最大的大科学装置，总投资达到 14.34 亿，在科学界和工业界有着广泛的应用价值。上海光源可以同时提供从红外光到硬 X 射线的各种同步辐射光，具有波长范围宽、高强度、高亮度、高准直性、优良的脉冲时间结构、高偏振、准相干性、可准确计算、高稳定性等一系列优异特性，可用于从事生命科学、材料科学、环境科学、信息科学、凝聚态物理、原子分子物理、团簇物理、化学、医学、药学、地质学等多学科的前沿基础研究，以及微电子、医药、

石油、化工、生物工程、医疗诊断和微加工等高新技术的开发应用的实验研究。

1993 年，方守贤、丁大钊和洗鼎昌三位院士联合向国家建议在中国大陆建设第三代同步辐射光源。1995 年，上海市政府和中国科学院同意共同向国家建议在上海建设一台第三代同步辐射光源。随后在 1999 年至 2001 年间，开展了 SSRF 的预制研究工作，对第三代同步辐射装置中的重大关键技术和技术难度高的重大关键非标设备进行了攻关。上海光源国家重大科学工程于 2004 年 1 月正式立项，同年 12 月 25 日，工程在浦东张江高科技园区正式破土动工。经过 52 个月的工程建设，上海光源工程于 2009 年 4 月底正式竣工，各项参数均达到或优于设计指标，总体性能达到了同类装置的国际先进水平。

上海光源主要由两大部分组成。一个是加速器部分，主要用来将电子加速至所需要的能量并在储存环中储存足够多的电子，电子的能量决定了同步辐射所产生的光子的能量区间，电子的数量则决定了同步辐射光的亮度；另一个部分是光束线站，电子经过储存环中的二极磁铁时，会沿其运动的切线方向发出具有一定的空间分布和频率分布的同步辐射光，通过光束线上的狭缝、单色器和聚焦镜对这一同步辐射光进行筛选和聚焦后，就可以得到可供

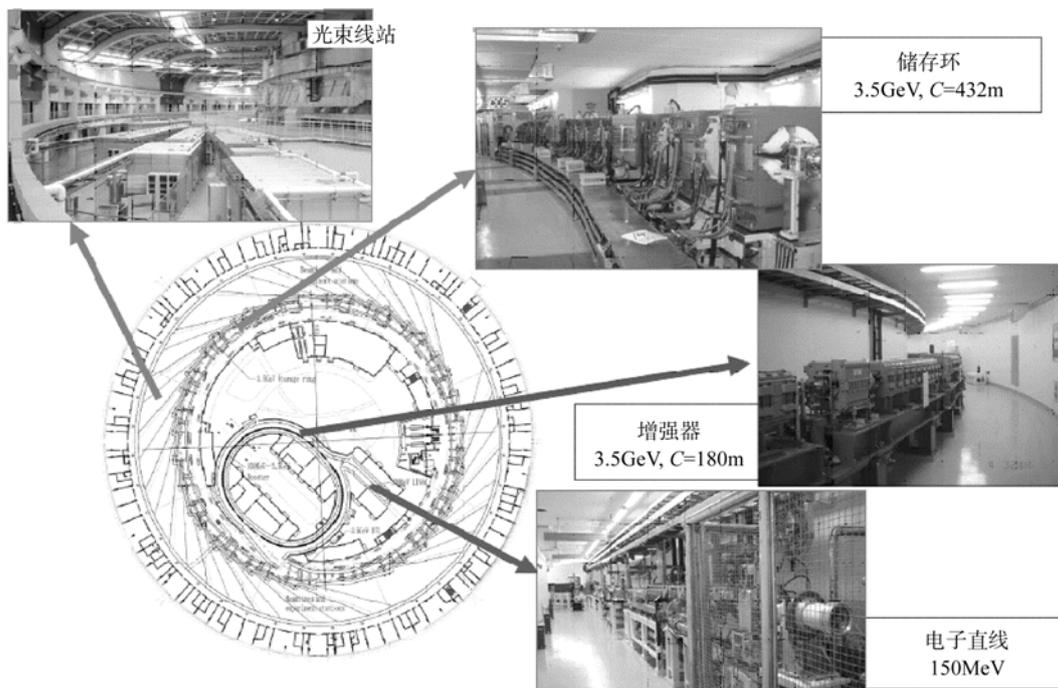


图 1 上海光源加速器和光束线结构简图

用户使用的特定频率的稳定的各种光源，不同的光束线的结构可以得到不同波段不同尺寸的同步辐射光源，如硬 X 射线、软 X 射线等。上海光源通过使用不同种类、不同参数的插入件，能够为用户提供从 0.1~70keV 之间的高性能同步辐射光。图 1 是上海光源加速器和光束线的结构简图。此外由于三代光源对同步辐射光亮度、稳定性等方面的特殊需求，对上海光源的建筑和公用设施方面也提出了很高的要求。



图 2 上海光源直线加速器

三、上海光源加速器部分

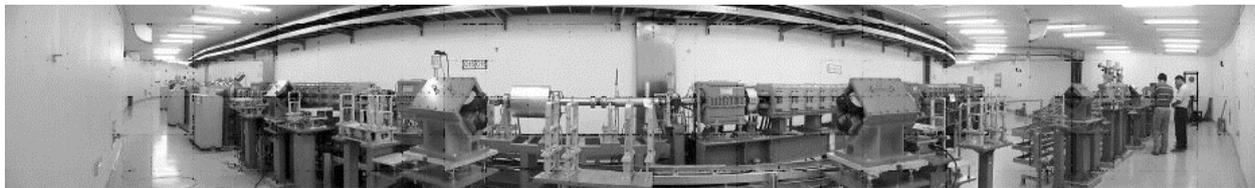
加速器系统是上海光源的重要组成部分，由一台 150MeV 的直线加速器、一台 3.5GeV 的增强器、一台 3.5GeV 的储存环以及连接这三台加速器的束流输运线组成。电子从电子枪中引出后，首先通过直线加速器加速至 150MeV 后，经低能输运线传输至增强器中，进一步将电子束的能量提升至 3.5GeV，最后通过高能输运线将 3.5GeV 的电子传输至储存环中，并进行电子的累积。

1. 加速器系统简介

直线加速器 (LINAC) 直线加速器是将电子枪产生的电子加速到一定的能量，以适应增强器注入的要求，直线引出电子能量太低的话，在注入增强器的时候会有较大的损失，同时也对增强器磁铁、高频等系统的设计加工带来一定的难度。上海光源直线加速器由一台电子枪、两个聚束器、四根微波加速管、一系列聚焦线圈和必要的束流匹配系统组成，可以将电子加速到 150MeV。图 2 为上海光源直线加速器的照片。

增强器 (Booster) 增强器用来将直线引出的 150MeV 的电子加速至上海光源设计能量 3.5GeV，周长 180 米，由 48 块弯转二极磁铁、56 块聚焦四极磁铁、一系列的六极磁铁、校正磁铁、用于加速的高频系统以及注入引出系统组成。电子在增强器里经过大约 250 毫秒、40 多万圈的加速升能后，达到 3.5GeV，然后引出至高能输运线，这一过程每秒钟可以重复 2 次。图 3 为上海光源增强器的照片。

储存环 (Storage Ring) 和所有的第三代同步辐射装置一样，储存环是上海光源的核心系统，它用来完成对增强器引出电子的累积以及高能电子的储存等工作。上海光源的储存环全长 432 米，由 20 个基本单元组成，其中每 5 个基本单元构成一个超周期，一共 4 个超周期，每个基本单元均由 2 块二极磁铁、10 块四极磁铁、7 块六极磁铁和 7 对校正磁铁组成，唯一不同的是四极磁铁和六极磁铁的强度。通过二极磁铁的导向和四极磁铁的聚焦，电子在储存环中将沿一条闭合轨道运动，同时由于高能



增强器的引出区域



增强器标准段区域

图 3 上海光源增强器

电子的同步辐射效应，偏离轨道的电子将在很短的时间里收敛到闭合轨道上来，对于上海光源储存环而言，这个过程大约需要 10 到 20 个毫秒。也正是由于这一收敛特性，储存环才能通过一个经过特殊设计的注入系统实现电子的累积，电子在注入储存环时和闭合轨道保持一定的距离以保证已经储存在环中的电子不会遭到损失，而增强器最快 500 毫秒才能提供一团电子，这时前一次注入的电子早已收敛到闭合轨道上了。

如前文所述，电子在储存环中运动时，受到弯转磁铁的作用发生偏转，同时将沿其运动的切线方向发出具有一定空间和频率分布的同步辐射光。为了提高光的亮度和频率范围，第三代光源中大量采用了一种叫插入件的设备。插入件是由一组极性交替按周期排列的磁铁组成，根据磁场大小和周期长度可分为两类，一类是高场强、长周期的扭摆器 (Wiggler)，通过增加电子轨道的弯转半径和多周期的叠加，可以大幅度地提高同步辐射光的亮度，另一类是低场强、短周期的波荡器 (Undulator)，通过控制磁场的周期性可以实现同步辐射光的相干叠加，从而大幅度地提高某些特定频率的光子的辐射强度。上海光源在不同的单元之间都有一段不含任何元件的直线漂移节，共有 16 段 6.5 米的标准直线节和 4 段 12 米长的长直线节，其中除了两个 12 米长的直线节分别用于放置注入系统和超导高频系统以外，其余 18 个直线节都将用来放置各种类型的插入件。

图 4 为上海光源储存环的一个标准单元的照片。图 5 为储存环上一个真空内插入件的照片，该插入件的最小磁间隙仅 7mm。

2. 上海光源加速器的主要特点

高精度 上海光源加速器系统的总长度超过 700 米，由上千个不同的磁铁、真空、高频等部件



图 4 上海光源储存环 C05 标准单元



图 5 上海光源储存环上安装的真空内插入件

所组成，这些部件的大小从几厘米到几米不等，而电子束团的尺寸最大约几毫米，最小的地方只有几十微米，为了保证电子束能在加速器里顺利地得到加速和储存，所有部件的加工和安装误差都必须控制在理论值的 0.1~0.2 毫米以内，这一数值几乎是世界上机械加工和安装精度的极限。上海光源通过严格的质量管理措施，成功地实现了这一目标，而最终调试的结果也证明了这一结论。如上海光源增强器在不进行任何轨道校正的基础上，就能以接近 100% 的效率成功地将电子从 150MeV 加速至 3.5GeV 的最高能量。

高利用率 上海光源储存环 20 个基本单元中，除了注入系统和高频系统各用去一个 12 米长的直线节以外，其余 18 个直线节都可以用来安装各类插入件，同时每个单元还可以从弯转二极磁铁中引出两条光束线，这样，上海光源总共具有安装 26 条插入件光束线、36 条弯转二极磁铁管束线以及若干条红外光束线等共 60 余条光束线的能力，可以同时为近百个实验站提供同步辐射光。

上海光源每年除了在冬季和夏季各进行一次长时间的停机检修外，其余时间都是处于 24 小时的运行状态，每年的总开机时间超过 7000 小时，其中大部分都用来给用户实验供光，还有一部分时间用来做机器研究和光源的升级改造。

高稳定性 同步辐射光的质量是上海光源能否做出高水平实验结果的关键因素之一，稳定性则是评价同步辐射光质量的重要指标之一。影响同步光稳定性的因素主要包括位置和流强两个条件。

电子束在储存环中由于同步辐射效应的作用，对任意的初始分布状态，在很短的时间里都会变成

高斯分布,此时光源点位置和角度的晃动将会影响最终用户所使用的光的亮度。通常情况下,为了保证同步辐射亮度的稳定性,要求光源点处电子束的晃动小于束斑大小的10%,上海光源的光源点处的电子束最小尺寸仅有不到10微米,这就意味着电子束需要稳定在1微米以内。引起电子轨道变化的原因很多,归纳起来主要有机械振动、电磁场的稳定性和测量系统的准确度三个方面。为了克服这些扰动,上海光源采取了一系列的措施,一方面从加工安装着手,大到光源大厅的建筑,小到磁铁上的一个螺丝、电源里的一个元件,都进行了严格的质量控制,另一方面设计了多种反馈系统,对不同的扰动进行了抑制,最终成功地将轨道稳定性控制在了微米量级。

流强稳定度一方面直接导致了亮度的变化,另一方面由于同步辐射功率的变化,整个装置的温度平衡状态也在改变,这种变化对上面所提到的轨道稳定性有很大的影响。恒流注入是目前三代光源解决这一问题的唯一手段,它通过不断地注入新的电子来保持储存环里电子数的稳定性。上海光源已经成功地对恒流注入的工作模式进行了调试。

四、上海光源光束线部分

1. 概述

同步辐射装置是利用同步辐射光开展多学科前沿研究和高新技术开发应用的综合性先进实验研究平台,科学家们利用同步辐射光开展实验研究的场所被称为实验站,实验站位于电子储存环防护墙外的实验大厅中。储存环中的电子束通过弯转磁铁(bending magnet)、波荡器(undulator)和扭摆器(wiggler)等辐射器件发出的同步辐射光需要被“加工”并传输到实验站中才能使用,连接储存环和实验站的装置被称为光束线,其中位于防护墙内的部分被称为前端区,光束线经常特指防护墙外的部分。

前端区 前端区将同步辐射光从储存环传输到辐射防护墙外,它的功能包括限制下游光束线的光束接受孔径,吸收多余的热负载,保护储存环的超高真空,为下游提供辐射防护,检测光束的位置和方向等。上海光源的前端区需要处理总功率高达几十千瓦,功率密度高达每平方毫米几百瓦的高热负载。

光束线 光束线将前端区输出的光束传输到实验站,并对光束进行“加工”,以满足实验对光束特性的需求。光束线的核心是光学系统,包括选择同步辐射光能量的单色器、对光束进行聚焦、准直

和偏转的反射镜以及限制光束孔径的狭缝等常用的光学元件,光学系统根据实验站对光束特性要求不同采用不同的设计,如硬X射线光束线一般采用晶体单色器获得单色光,软X射线光束线一般采用光栅单色器获得单色光。光束线其他主要系统还包括提供光束传输和光学元件工作所需的高真空环境的真空系统、检测光束线各部位光束位置和强度的光束检测系统、为实验人员提供辐射防护的人身安全及联锁保护系统、为设备提供真空和热保护的设备安全及联锁保护系统以及光束线控制系统。在高热负载条件下,实现光学元件的高精度和高稳定,是对第三代同步辐射装置光束线技术提出的非常苛刻的要求。

实验站 实验站是科学家利用同步辐射光开展实验研究的场所,在这里,同步辐射光照射在样品上,通过研究同步辐射光与样品的相互作用,可以揭示样品的物理、化学和生物特性等,也可以对样品进行加工。在实验站中根据应用领域的要求配备相应的实验方法和设备,同步辐射实验方法可归纳为谱学方法、衍射/散射方法和成像方法等类型,常用的实验设备包括能谱仪(X射线能谱、光电子能谱和红外光谱等)、X射线衍射仪、X射线显微镜、位置灵敏探测器、光强探测器等,此外还包括样品定位、扫描以及提供样品原位环境(如温度、压力、电场、磁场、气体、溶液等)的设备。上述实验设备结合实验站控制系统、实验数据获取系统以及实验数据分析系统实现各种实验功能。

2. 上海光源首批光束线站

上海光源可以容纳几十条光束线和上百个实验站,目前首批建设的7条光束线实验站均已达到设计指标,2009年5月开始对用户开放。下面简要介绍上海光源首批各线站的科学目标:

生物大分子晶体学线站 生物大分子晶体学线站瞄准生命科学前沿若干领域,用于开展生物大分子复合物结构、膜蛋白结构以及面向结构基因组学的大规模、高通量蛋白质结构和功能研究等。在SSRF生物大分子晶体学光束线站上,将可以利用以下多种实验方法开展生物大分子结构研究:多波长反常衍射方法(MAD),单波长反常衍射方法(SAD),同晶置换、分子置换等其他单波长实验方法。

X射线衍射线站 X射线衍射线站的目标是用于材料科学研究,以多晶粉末、薄膜、纳米材料等为主要研究对象,以粉末晶体衍射实验方法为主,兼顾

纳米和表面材料的掠入射(反常)衍射(GIXAD)、反射率、倒易空间 mapping、DAFS 等实验方法。是开展物质结构及动态过程研究的通用衍射实验平台。

XAFS 线站 X 射线吸收精细结构谱(XAFS)能够在固态、液态等多种条件下研究原子(或离子)的近邻结构和电子结构,是研究物质结构非常重要的同步辐射实验方法之一。上海光源 XAFS 线站是一个基于多极 wiggler 光源的通用、高性能 X 射线吸收光谱实验装置,主要用于高能量分辨、高光谱纯度和高信噪比的 X 射线吸收精细结构谱学研究。可以开展低浓度样品(ppm 级)的 XAFS 实验和快时间分辨(秒级)的 XAFS 实验。

硬 X 射线微聚焦及应用线站 硬 X 射线微聚焦及应用线站利用上海光源高亮度的波荡器 X 射线辐射,结合先进的 X 射线光学系统,在实验站得到高通量、能量可调的单色 X 射线微束,结合微束 X 射线荧光分析、微束 X 射线谱学以及微束 X 射线衍射等实验方法,对样品的元素组分和分布、化学特性、物质结构等进行高空间分辨高灵敏的分析。该线站空间分辨达到微米至亚微米量级,元素分析的灵敏度达到亚 ppm 级。

X 射线成像及生物医学应用线站 X 射线成像线站利用上海光源高强度的 X 射线,结合多种先进的成像技术(如利用相衬成像等多种衬度机制成像

技术、显微 CT 技术等),对样品进行无损的高空间分辨、快速的二维、三维成像。该线站既可用于生物软组织及低 Z 材料的低剂量、无损、高分辨、动态的三维成像研究,开展生物医学应用研究,也可用于材料、古生物、考古和地球物理等样品的无损、高分辨、三维成像研究,在相关领域发挥重要作用。

软 X 射线谱学显微线站 软 X 射线谱学显微线站采用椭圆极化波荡器光源,结合扫描透射 X 射线显微术(STXM)的几十个纳米左右的高空间分辨能力和光束线的高能量分辨,通过样品扫描和 NEXAFS 谱技术,对样品进行高空间分辨和高化学态分辨的研究,可以在介观尺度研究固体、液体、软物质(如水凝胶)等多种形态的物质,在生物、材料和环境科学等领域研究中具有重要的应用前景。

X 射线小角散射线站 通过测量 X 射线在样品中散射强度与散射角度的关系曲线,可以分析获得样品中颗粒的尺寸、形状和取向等样品结构的统计信息,X 射线小角散射可以获得样品 1nm~1 μ m 尺度范围的结构信息。上海光源 X 射线小角散射线站以聚合物、纳米材料、生物分子、液晶等为主要研究对象,提供一个以常规小角散射为主、兼顾反常小角散射、掠入射小角散射、小角散射和广角散射同时测量,以及动态过程研究等技术的实验平台。

表 1 上海光源首批线站及其性能指标

光束线实验站名称	光源	主要性能指标
生物大分子晶体学	真空波荡器	光子能量范围: 5~18keV; 聚焦光斑尺寸: 130 \times 40 μ m ² ; 样品处光通量: $\sim 2 \times 10^{12}$ phs/s@12keV; 能量分辨: $< 2 \times 10^{-4}$; 光束发散角: $\sim 0.3 \times 0.1$ mrad ²
X 射线衍射	弯铁	光子能量范围: 4~22keV; 样品处聚焦光斑尺寸: ~ 0.3 mm, 光通量: $> 2 \times 10^{11}$ phs/s@10keV; 能量分辨: $< 2 \times 10^{-4}$; 角度分辨: $\sim 10^{-4}$
XAFS	扭摆器	光子能量范围: 4~50keV; 样品处聚焦光斑尺寸: ~ 0.2 mm, 光通量: $> 2 \times 10^{12}$ phs/s@10keV; 能量分辨: $< 2 \times 10^{-4}$; 高次谐波含量 $< 10^{-4}$
硬 X 射线微聚焦及应用	真空波荡器	光子能量范围: 5~20keV; 样品处最小光斑尺寸: $< 2 \mu$ m, 光通量: $> 10^{11}$ phs/s@10keV; 能量分辨: $< 2 \times 10^{-4}$
X 射线成像及生物医学应用	扭摆器	光子能量范围: 8~72.5keV; 能量分辨: $< 5 \times 10^{-3}$; 最大束斑尺寸: 45mm (H) \times 5mm (V); 光子通量密度: 光子通量密度: $\sim 6 \times 10^{10}$ phs/s/mm ² @20keV; 空间分辨: 1 μ m; 时间分辨: 1ms/帧
软 X 射线谱学显微	椭圆极化波荡器	光子能量范围: 250~2000eV; 能量分辨本领: $> 10000 @ 244$ eV; 空间分辨: ~ 30 nm; 样品处光通量: $> 10^8$ phs/s
X 射线小角散射	弯铁	光子能量范围: 5~20keV; 聚焦光斑尺寸: ~ 0.4 mm, 样品处光通量: $> 2 \times 10^{11}$ phs/s@10keV; 能量分辨: $< 5 \times 10^{-4}$; 最小测量角: ~ 0.4 mrad

五、总结

上海光源的首期建设任务已经顺利完成了,7 条光束线站已经为接近 2000 个用户提供了 3000 多小时的同步辐射光,取得了大量的新实验成果。相

信在不远的未来,随着更多的光束线站的建成,上海光源会成为越来越多的科学家在其科研工作中必不可少的工具之一。

(中国科学院上海应用物理研究所 201204)