第40卷第4期 原子能科学技术 Vol. 40, No. 4
2006年7月 Atomic Energy Science and Technology July 2006

合肥光源超导扭摆磁铁模式下线性光学参数补偿

王 琳,徐宏亮,李为民,冯光耀,张善才,张 赫,刘祖平
(中国科学技术大学 国家同步辐射实验室,安徽 合肥 230029)

摘要:合肥光源是1台专用真空紫外光源,为拓展同步辐射用户可用光范围,在储存环上安装了1台6 T的超导扭摆磁铁。超导扭摆磁铁给储存环光学参数带来很大扰动,造成工作点漂移和β函数畸变。最初,在补偿工作点漂移后,成功地存储了束流并产生了硬X射线,但该运行模式下束流寿命短,严重影响其它实验线站的实验工作。在合肥光源二期工程中,重新进行了超导扭摆磁铁补偿计算,在不改变目前储存环磁铁和电源的基础上,同时补偿工作点漂移和β函数畸变,大幅度地改善了束流寿命。

关键词:超导扭摆磁铁;工作点漂移;β函数畸变;束流寿命
中图分类号:TL506 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-6931(2006)04-0503-05

Compensation of Linear Optical Parameters With Superconducting Wiggler Magnet in Hefei Light Source

WANG Lin, XU Hong-liang, LI Wei-min, FENG Guang-yao,
ZHANG Shan-cai, ZHANG He, LIU Zu-ping
(*National Synchrotron Radiation Laboratory,*
University of Science and Technology of China, Hefei 230029, *China*)

Abstract: Hefei light source(HLS) is a dedicated VUV light source. A superconducting (SC) wiggler magnet with peak magnetic field of 6 T was installed in the storage ring in order to extend usable synchrotron radiation spectrum to hard X-ray. The SC wiggler brought a large perturbation to optical parameters of the storage ring, including tune shift and β function distortion. At early days, after tune compensation with SC wiggler, beam was successfully stored with a short beam lifetime. In phase Ⅱ project of HLS, the lattice parameters were adjusted to compensate tune shift and β function distortion, then the beam lifetime was improved significantly.

Key words: superconducting wiggler magnet; tune shift; β function distortion; beam lifetime

收稿日期:2004-10-19;**修回日期**:2005-05-13
基金项目:国家自然科学基金资助项目(10205014);中国科学知识创新工程资助项目(KY4206)
作者简介:王 琳(1972—),男,吉林长春人,副研究员,博士研究生,加速器专业

合肥光源(Hefei light source, HLS)是专用真空紫外光源,可用同步辐射波长处在红外到软 X 射线范围内,其基本参数列于表 1。图 1 是 HLS 通用模式下的 β 函数。为满足国内硬 X 射线同步辐射用户的需求,HLS 于 1998 年增加了 1 台峰值磁场为 6 T 的超导扭摆磁铁(super-conducting wiggler),该装置特征辐射波长为 0.485 nm,有用短波长为 0.097 nm[1]。HLS 束流能量低,超导扭摆磁铁磁场对储存环光学参数影响大,能否合理消除它对聚焦参数的影响,直接影响到 HLS 的束流品质以及同步辐射用户。本工作涉及 HLS 通用运行模式下对超导扭摆磁铁线性效应的补偿计算以及初步实验结果。

表 1 合肥光源基本参数

Table 1 List of main parameters of HLS

参量	参量数值
束流能量(MeV)	800
储存环周长(m)	66.13
设计流强(mA)	300
聚焦结构类型	TBA
弯转磁感应强度(T)	1.2
弯铁辐射的特征波长和可用短波长(nm)	2.4/0.5
超导扭摆磁铁峰值磁感应强度(T)	6.0
超导扭摆磁铁辐射特征波长和可用短波长(nm)	0.485/0.097

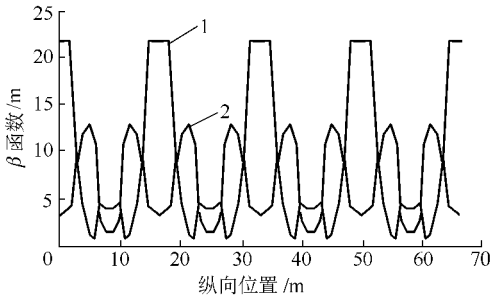

图 1 HLS β 函数(无扭摆磁铁)

Fig. 1 β function of HLS without wiggler magnet

1——水平方向;2——垂直方向

1 超导扭摆磁铁及线性动力学效应

1.1 插入元件简介

超导扭摆磁铁是插入元件的一种。所谓插入元件,是指具有周期性磁场结构的磁装置[2]。当电子束流经过插入元件时,束流轨迹被磁场扭摆,从而改变束流本身特性(如束团长度、束流能散、平衡发射度)及辐射特性。插入元件包括波荡器、扭摆磁铁和波长移动器 3 种,其中,波荡器周期数目多而短,磁场相对较弱;相对于波荡器,扭摆磁铁一般也是多周期的,但磁场较强;波长移动器是单周期的,磁场很强,用于产生短波长同步辐射。作为新型同步辐射光源,插入元件在储存环上得到广泛应用。HLS 超导扭摆磁铁(严格地应称为超导波长移动器)是台 3 磁极单周期的产生硬 X 射线的超导磁装置。

1.2 插入元件对束流动力学的影响

插入元件周期性磁场影响储存环动力学参数。束流经过插入元件产生的同步辐射将影响与辐射相关的参数(动量紧缩因子、阻尼分配数、阻尼时间、能散和发射度等)[3]。插入元件对非线性动力学影响的主要表现是动力学孔径(dynamic aperture,简称 DA)减小。DA 缩小有两种不同机制:1)"天生"类八极磁场作用;2)其线性聚焦作用破坏了 Lattice 对称性,改变了六极磁铁间的相移而激励三阶共振。对强场插入元件,机制 2 的作用一般更明显些,HLS 插入元件的物理设计计算也证实了这一点[1]。

插入元件线性聚焦效应主要表现在工作点(tune)漂移、β 函数畸变、工作点禁带宽度增加、轨道畸变及相关效应[3]。前 3 项效应来自于插入元件的聚焦作用,最后 1 项作用主要来自于插入元件的积分磁场偏差。HLS 用轨道校正系统和超导扭摆磁铁上辅助线圈消除轨道畸变及相关效应。

粒子在扭摆磁场作用下做水平面内的扭摆运动,运动方向与磁场方向有夹角,故粒子受到垂直方向聚焦作用。此聚焦机理类似于矩形铁的边缘聚焦作用,它将改变垂直方向工作点、β 函数、色品及工作点禁带宽度,对水平方向工作点等无影响。另外,插入元件的磁极宽度是有限的,产生磁场强度沿水平变化梯度,故有微弱的水平和垂直聚焦作用。HLS 超导扭摆磁铁水平均匀场区(好于 0.2%)较大(大于 ±20 mm),此聚焦作用可忽略;其对线性光学的影响主要来自于"边缘"聚焦作用。根据扰动理论得到插入元件聚焦作用导致的工作点漂移 $\Delta\nu_{x,y}$ 和最大 β 函数畸变 $\Delta\beta_{x,y}$[3,4],表达式如下:

$$\Delta\nu_y \approx \frac{K\beta_{y,\mathrm{ID}}L_{\mathrm{ID}}}{4\pi}\left(1+\frac{L^2}{12\beta_{y,\mathrm{ID}}^2}\right) \quad \Delta\nu_x \approx 0 \qquad (1)$$

$$\left(\frac{\Delta\beta_y}{\beta_y}\right)_{\max} \approx -\frac{KL_{\mathrm{ID}}\beta_{y,\mathrm{ID}}}{2\sin(2\pi\nu_y)}\left(1-\frac{L_{\mathrm{ID}}^2}{12\beta_y^2}\right)$$

$$\left(\frac{\Delta\beta_x}{\beta_x}\right)_{\max} \approx 0 \qquad (2)$$

式中:ρ 是插入元件峰值磁场 B_0 对应的束流弯转曲率半径;$K=1/(2\rho^2)$ 是插入元件的垂直方向聚焦参数;L_{ID} 是插入元件长度;$\beta_{y,\mathrm{ID}}$ 是插入元件安装位置处的垂直方向 β 函数;ν_x 和 ν_y 是水平和垂直方向工作点;β_x 和 β_y 是水平和垂直方向的 β 函数。

由式(1)和(2)可见,插入元件对水平方向几乎无影响,对垂直方向的影响与插入元件各参数有关。束流能量一定时,插入元件磁场越强,则 ρ 越小,或插入元件磁感应强度一定时,束流能量越低,ρ 越小,这时插入元件影响越大;插入元件位置处 β_y 越大,影响越强。当然,插入元件越长,影响越严重。HLS 束流能量低,同时超导扭摆磁铁磁感应强度高,ρ 很小,约为0.444 4 m,因此,超导扭摆磁铁的影响非常严重。代入 HLS 参数,可得到超导扭摆磁铁导致的垂直方向工作点漂移 $\Delta\nu_y \approx 0.14$,垂直方向 β 函数畸变最大,$(\Delta\beta/\beta)_{y,\max} \approx 140\%$。

扰动非常强时,式(1)、(2)无法准确描述插入元件的影响,甚至会出现线性 Lattice 无稳定解情况。

1.3　扭摆磁铁线性聚焦模型

用 MAD[5] 和 ELEGANT[6] 软件对 HLS 超导插入元件的影响和线性参数的补偿进行了计算。在 MAD 软件中,扭摆磁铁不是标准元件,需构建扭摆磁铁模型来描述其垂直聚焦作用。因扭摆磁铁的垂直聚焦作用类似于矩形铁的边缘聚焦,故采用硬边模型。对 HLS 超导扭摆磁铁,用 3 个不同长度矩形铁模拟 3 个磁极。矩形铁长度及偏转角度满足下面两个条件:硬边模型的偏转角度和每个磁极的偏转角度相同;二者聚焦作用相同。硬边模型可准确描述扭摆磁铁的垂直聚焦效应,但对辐射效应(如发射度的变化)的讨论存在一定偏差。关于硬边模型的描述详见文献[1]和[2]。

ELEGANT 软件用分布的类四极项描述扭摆磁铁的垂直聚焦作用,不同于通常四极矩,它只影响垂直方向聚焦,强度正比于式(1)、(2)中的 K,该软件用正弦变化磁场计算单个磁极的辐射积分,把所有磁极贡献求和得到扭摆磁铁的辐射效应[6]。该软件可准确描述扭摆磁铁的聚焦效应和辐射效应。

分别用 MAD 和 ELEGANT 软件计算了超导扭摆磁铁对 HLS 线性光学参数的影响,两者的计算结果符合很好。计算得到 HLS 超导扭摆磁铁引起的工作点漂移和 β_y 畸变分别为 $\Delta\nu_y \approx 0.14$,$(\Delta\beta/\beta)_{y,\max} \approx 150\%$,与前面根据解析表达式的估计值基本符合。在不同 Lattice 下,计算的工作点漂移与实际测量值符合良好,表明该扭摆磁铁模型基本是准确的。

2　线性光学参数补偿

HLS 在正常运行状态下,超导扭摆磁铁处于关闭状态,如果有硬 X 射线用户需要,就在运行状态下缓慢把扭摆磁铁磁场增加到 6 T,同时,同步地调节储存环聚焦参数,以保证在加磁场过程中束流不会丢失。储存环共计有 8 组(每组 4 块)四极铁,其中,在超导扭摆磁铁两边的 4 块四极铁上并联单独补偿电源,该 4 块磁铁的聚焦强度可以高于同组其它磁铁。

2.1　工作点补偿方案

早期应用的补偿方案主要针对扭摆磁铁带来的工作点漂移,方法如下:降低扭摆磁铁附近 1 组垂直聚焦磁铁的强度来补偿扭摆磁铁产生的垂直工作点漂移;然后微调附近 1 组水平聚焦磁铁补偿垂直聚焦磁铁调整导致的水平工作点微小变化。该方法的优点是容易消除插入元件产生的工作点漂移,当插入元件聚焦作用较弱时,其补偿效果很好。HLS 采用该方案成功地存储了束流。在运行中观察到,束流寿命变短,流强为 300 mA 时,微分寿命从正常状态(关闭超导扭摆磁铁)的 8 h 以上降低到 2~3 h(图 2)。

束流寿命差的可能原因如下:1) 该方案虽补偿了垂直工作点漂移,但进一步增强了 β_y 的畸变(图 3),畸变最大的两位置 β_y 由原来的约 14 m增加到 50 m 以上,这导致了该位置垂直接受度的损失[7](垂直接受度 $A_y=a^2/\beta_y$,a 是该位置垂直半孔径 20 mm),从而影响弹性散射寿命(正比于垂直接受度);2) β_y 畸变破坏了六极磁铁间的 β 相位关系,导致 DA 减小(初步计算数据列于表 2,计算中未考虑磁铁的准直和磁场公差及扭摆磁铁的非线性弱作用),特别

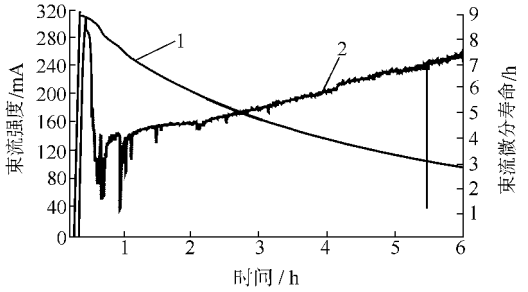

图2 原补偿方案束流寿命曲线

Fig. 2 Lifetime with old compensation scheme

1——束流强度；2——束流微分寿命

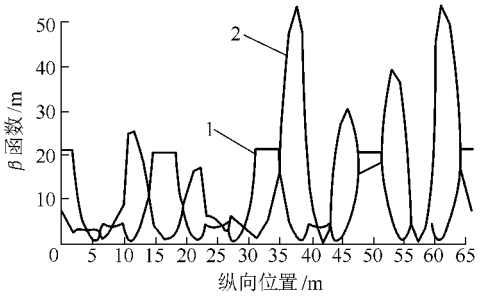

图3 原补偿方案β函数

Fig. 3 β function with old compensation scheme

1——水平方向；2——垂直方向

是具有能量偏差的粒子的DA减小更严重，这将影响到Touschek寿命[8]、非弹性散射寿命和纵向量子寿命等；3）由于扭摆磁铁的辐射阻尼作用，束流发射度降低导致Touschek寿命降低，这会造成一定程度的寿命降低，但这不应是造成HLS束流寿命大幅度降低的主要原因（表2），因素1和2方应是造成寿命降低的主要因素。除寿命降低外，该补偿方案还有其它缺点，如β_y畸变令束流对轨道畸变及真空室变形等容忍度降低，加扭摆磁场前后弯铁辐射光源点的束流尺寸变化剧烈等。

不论因素1和（或）因素2造成束流寿命恶化，都源于该方案没有良好补偿扭摆磁铁造成的β函数畸变。如果恢复HLS储存环β函数的特性，DA和接受度都将大为改善。当然，补偿β函数畸变的同时应保持工作点漂移在允许范围内，避免加扭摆磁场过程中因跨越共振线而导致束流丢失。美国Brookhaven国家实验室的VUV环[9]和Berkeley国家实验室ALS环[10]的线性光学参数校正实验结果也充分表明，恢复β函数的对称性可改善束流寿命。

2.2 工作点和β函数补偿方案

α匹配是常用的一种插入元件补偿方法，它首先调节扭摆磁铁两端4块四极铁来消除β函数畸变，然后调节其它1组或2组四极铁恢复工作点到初始值。按上述方法对HLS进行了超导扭摆磁铁补偿计算。超导扭摆磁铁造成HLS线性光学参数畸变严重，未能按照α匹配思想找到很合理的补偿方案。

改变插入件匹配计算方法，调节环上全部可调参数（对HLS有12个可调变量），同时补偿工作点漂移和全环各点的β函数畸变。匹配计算中，以无扭摆磁铁状态下储存环的工作点

表2 HLS 3种模式下主要束流参数（计算数据）

Table 2 List of main parameters of three lattice configurations in HLS (calculated data)

参量	参量数值		
	正常情况（无扭摆磁场）	早期方案（有扭摆磁场）	新方案（有扭摆磁场）
自然发射度（nm·rad）	174	154	147
水平/垂直方向最大β函数（m）	≈21.9/≈13.7	≈21.2/≈53	≈25/≈15.0
水平/垂直方向平均β函数（m）	≈8.7/≈7.0	≈8.4/≈15.1	≈8.6/≈7.0
校正色品（相同的六极磁铁设置）	≈3.9/≈2.5	≈3.45/≈3.6	≈2.5/≈2.5
自然能散（%）	0.045	0.057	0.057
水平/垂直工作点	3.55/2.60	3.54/2.61	3.535/2.62
无动量偏差时动力学孔径（10 000圈跟踪结果）（起驶位置在12号弯铁前）（mm）	x：>±30 y：>40	x：≈±15 y：≈20	x：≈±30 y：≈25
±1%动量偏差时动力学孔径（计算条件如上同）（mm）	x：>±30 y：>35	x：≈±11 y：<20	x：≈±30 y：≈25

和一些典型位置处 β 函数作为约束条件。经反复迭代计算,得到新的工作点和 β 函数补偿方案,其理论计算的 β 函数示于图 4,其周期性相对于原方案有一定改善,同时工作点漂移不大,这可保证在增加扭摆磁铁磁场过程中束流不会因为碰到强共振线而丢失。表 2 中列出了新补偿方案的一些关键参数。初步的动力学孔径计算表明,新方案的动力学孔径虽未恢复到无扭摆磁铁状态,但比原补偿方案有大幅改善。

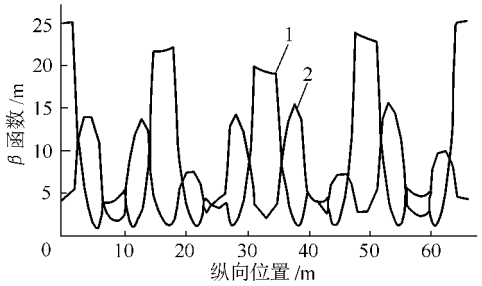

图 4　新补偿方案 β 函数

Fig. 4　β function with new compensation scheme

1——水平方向;2——垂直方向

在实际运行中采用新补偿方案,束流寿命得到大幅度改善。流强为 300 mA 时,微分寿命接近 7 h,束流寿命好于 8 h,达到二期工程设计指标。图 5 所示为采用该补偿方案后的束流寿命图。

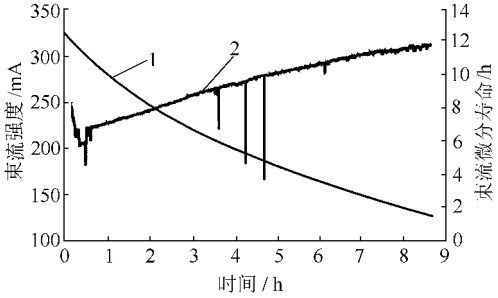

图 5　新补偿方案束流寿命曲线

Fig. 5　Lifetime with new compensation scheme

1——束流强度;2——束流微分寿命

3　结论

超导扭摆磁铁给 HLS 储存环线性光学参数带来很大扰动,这将影响束流寿命。根据对超导扭摆磁铁垂直聚焦作用的线性描述,本文计算了新的 HLS 储存环超导扭摆磁铁补偿方案。新补偿方案基本可消除超导扭摆磁铁带来的扰动。实际运行表明,在补偿超导扭摆磁铁带来的储存环线性参数的扰动后,HLS 束流寿命得到大幅度改善,达到了工程设计指标。

参考文献:

[1]　刘乃泉,张武. 中国科学院"八五"重大科研项目:6 万高斯超导 Wiggler 研制报告:KJ85[R]. 合肥:中国科学技术大学国家同步辐射实验室,1998.

[2]　WIEDEMANN H. Particle accelerator physics Ⅰ and Ⅱ[M]. 2nd ed. New York: Springer, 1998:57-66,326-327.

[3]　WALKER R P. Fifth advanced accelerator physics course:CERN95-06[R]. Switzerland:CERN, 1995.

[4]　ROPERT A. Synchrotron radiation and free electron lasers: CERN98-04[R]. Switzerland: CERN, 1998.

[5]　GROTE H, LSELIN F C. The MAD program user's reference manual: CERN/SL/90-13(AP)[R]. Switzerland:CERN, 1996.

[6]　BORLAND M. Elegant: A flexible SDDS-compliant code for accelerator simulation: advanced photon source LS-287[R]. USA: Arggone National Laboratory, 2000.

[7]　STREUN A. Beam lifetime in the SLS storage ring:SLS-TME-TA-2001-0191[R]. Switzerland: SLS, 2001.

[8]　BENGTSSON J, JOHO W, MARCHAND P, et al. Increasing the energy acceptance of high brightness synchrotron light storage rings[J]. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A, 1998, (404):237-247.

[9]　SAFRANEK J. Experimental determination of storage ring optics using orbit response measurements[J]. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A, 1997, (388):27-36.

[10]　ROBIN D, SAFRANEK J, DECKING W. Realizing the benefits of restored periodicity in the advanced light source[J]. Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams, 1999, 2: 044001-1-044001-12.