



·粒子束及加速器技术·

衍射极限储存环束流注入物理方案的设计及模拟

王佩宁, 杨鹏辉, 刘刚文, 白正贺, 李为民

(中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 合肥 230029)

摘要: 衍射极限储存环(DLSR)作为第四代同步辐射光源,正得到世界各国的大力建设和发展。如何在尽量减小对存储束流扰动情况下,高效率地将束流注入到储存环中,是衍射极限储存环设计与运行中的重要课题之一。传统的局部凸轨注入法有着很长的历史,应用广泛且技术成熟,但是传统凸轨注入法会对存储束流造成扰动,且衍射极限储存环的动力学孔径较小,这给传统凸轨注入法的应用带来了困难。为了解决这些问题,改进了一些传统的离轴注入法,提出并发展了一些在轴的注入方法。合肥先进光源(HALF)是规划建设中的衍射极限储存环光源,基于 HALF 储存环的物理设计方案,设计并应用了几种离轴或在轴的注入方案,通过粒子跟踪和模拟的方法验证了它们的可行性并研究了注入效率等物理问题,并对模拟结果进行了讨论和总结。

关键词: 衍射极限储存环; 离轴注入; 在轴注入; 动力学孔径; 合肥先进光源

中图分类号: TL501

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230070

Design and simulation of beam injection scheme for diffraction limited storage ring

Wang Peining, Yang Penghui, Liu Gangwen, Bai Zhenghe, Li Weimin

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

Abstract: As the fourth synchrotron radiation light source, diffraction-limited storage rings (DLSRs) are being vigorously developed and constructed around the world. How to efficiently inject beam into the storage ring while minimizing the disturbance to the stored beam is one of the important issues in the design and operation of DLSRs. The conventional bump injection which has a long history is widely used and has mature technology. However, it disturbs the stored beam and the small dynamic aperture of DLSRs, which makes it difficult to apply the conventional bump injection on DLSRs. To solve these problems, some conventional off-axis injection method have been improved and several on-axis injection methods have been proposed and developed. Hefei Advanced Light Facility (HALF) is a DLSR under planning and construction. Based on the physical design of the HALF storage ring, a couple of off-axis or on-axis injection schemes have been designed and applied. Their feasibility has been verified through particle tracking and simulation, and physical issues such as injection efficiency have been studied. Discussion of results and conclusion are also presented.

Key words: diffraction-limited storage rings, off-axis injection, on-axis injection, dynamic aperture, Hefei Advanced Light Facility

注入系统和技术在电子储存环中有着重要的作用,储存环的运行首先就需要将束流注入,在运行过程中也需要通过注入来维持流强的恒定。一般而言,储存环的束流注入过程可以看做两步:首先,注入束流在注入系统的元件(如局部凸轨、kicker等)作用下进入到储存环的接受度之中;之后,注入束流在同步辐射阻尼的帮助下合并到存储束流之中。由于第二个过程是一个自然的过程,所以在设计束流注入系统和方案时,需要主要考虑如何以高注入效率将注入束流“踢”到储存环的接受度中,并尽量减小对存储束流的扰动。

传统的局部凸轨注入法^[1]使用切割磁铁和一组由冲击磁铁组成的凸轨进行注入。凸轨使得存储束流所在的轨道在局部发生凸起,而注入束流经过切割磁铁的偏转之后平行于凸轨进入接受度之中,并在同步辐射阻尼的作

* 收稿日期:2023-04-01; 修订日期:2023-11-06

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(12005226)

联系方式:王佩宁, wpn13@mail.ustc.edu.cn。

通信作者:刘刚文, hbwxlgw@ustc.edu.cn。

用下最终合并到存储束流之中完成注入。局部凸轨注入法有着很长的发展历史, 能实现 top-up 注入, 应用广泛且技术成熟^[2]。但这种注入方法要求储存环的动力学孔径大于注入束流和存储束流的间距以及切割板的厚度, 这对于孔径较大的第三代光源是可以接受的, 然而衍射极限储存环所使用的高梯度四极铁和强色品校正六极铁使得它的动力学孔径相比于第三代光源显著缩小^[3-5], 因此需要较大动力学孔径的传统局部凸轨注入法难以满足其注入要求。此外, 局部凸轨注入法的凸轨还会对存储束流造成影响。为了解决传统凸轨注入法的问题, 满足衍射极限储存环的注入要求, 改进了一些传统的离轴注入方案, 提出和发展了一些在轴的注入方案。

SLS-II 提出了使用反向切割磁铁的凸轨注入法^[6], 它是传统局部凸轨注入法的改进。通过采用反向切割磁铁, 这种凸轨注入法对动力学孔径的要求相比于传统凸轨注入法有所减小, 可以满足部分衍射极限储存环的注入需求。不过, 凸轨注入法所使用的凸轨会对存储束流造成扰动。而由 KEK-PF^[7-9] 提出并发展的脉冲多极铁注入法使用中心处场强为零的脉冲多极铁代替凸轨来实现注入, 所以对存储束流的影响很小。上述两种注入法都是离轴注入方法, 虽然他们对动力学孔径的要求有所减小, 但是对于部分动力学孔径较低的储存环, 这两种离轴注入方法仍然不能满足它们对注入的需求。因此, 对动力学孔径要求很小的在轴注入法已经在一些衍射极限储存环的设计中被采用, 包括 APS-U^[10]、ALS-U^[11] 和 HEPS^[12] 等。置换注入法会采用逐束团地替换或者逐束团串地替换来实现注入, 逐束团的置换注入方法需要注入器来提供与存储束团能量相同的高电荷量束团用以替换, 并且如何处理被踢出的存储束团也是一个问题。而逐束团串置换注入的方法则需要额外建造一个累积环来提供注入束流和处理被踢出的束流。这些问题给置换注入方法带来了额外的成本, 限制了置换注入的实际应用。另一种能满足小动力学孔径储存环注入需求的在轴注入方法是纵向注入法^[13-14]。在纵向注入法中, 注入束流与存储束流的分离存在于纵向相空间之中, 所以纵向注入法对动力学孔径的要求也比较小。但纵向注入法为了保证对存储束流的透明度, 所使用的短脉冲磁铁的脉冲宽度要短于束团间隔, 这对短脉冲磁铁的技术提出了较高的要求。

HALF 是规划建设中的衍射极限储存环, 本文将结合 HALF 储存环磁聚焦结构 (lattice) 的参数和表现选择合适的方案并在 HALF 上设计并应用这些方案实现注入, 通过模拟结果讨论这些方案的优缺点, 从而给出适合 HALF 的注入方法。所有粒子跟踪和模拟均使用 Accelerator Toolbox^[15] 完成。

1 HALF 储存环简介

HALF 的定位是具有世界先进水平的软 X 射线与 VUV 衍射极限储存环光源。它的物理设计方案基于混合型 MBA lattice 设计理念, 引入反向偏转弯铁和纵向梯度弯铁来降低束流发射度和自然阻尼时间, 是一种改版 H6BA lattice^[16]。HALF 储存环束流能量为 2.2 GeV, 周长约为 480 m, 由 20 个全同的 H6BA 组成, 束流自然发射度约为 86 pm·rad。每个标准单元有 30 块二极铁, 16 块四极铁, 8 块六极铁, 20 个长度为 5.3 m 的长直线节和 20 个 2.2 m 的短直线节, 直线节长度占周长比例大于 30%。储存环详细参数见表 1, 图 1 为储存环一个标准单元及其线性光学参数图。

优化后得到的动力学孔径如图 2 所示, 考虑加入高频腔与误差效应的水平正方向 (束流注入方向) 的动力学孔

表 1 HALF 储存环主要设计参数

Table 1 Main parameters of the HALF storage ring

circumference/ m	beam energy/ GeV	focusing type	natural emittance/ (pm·rad)	transverse tunes (H/V)	natural chromaticities (H/V)	momentum compaction factor	energy loss per turn/keV	harmonic number	RF frequency/ MHz	RF voltage/ kV	damping time (H/V/L)/ms	natural energy spread
479.86	2.2	20×6BA	86.3	48.15/17.15	-77/-57	9.0×10^{-5}	186.7	800	500	1000	27.2/37.7/23.4	0.62×10^{-3}

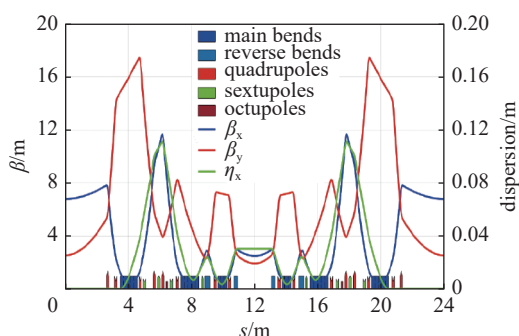


Fig. 1 Magnet layout and linear optical parameters of one period HALF lattice

图 1 HALF 储存环一个周期的 lattice 及线性光学参数

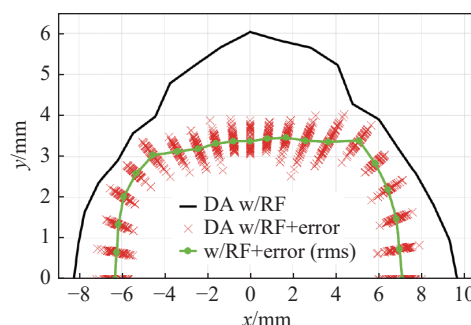


Fig. 2 Dynamic aperture of the HALF storage ring

图 2 HALF 储存环动力学孔径

径约为 7 mm。较大的动力学孔径可以满足使用离轴注入方案进行注入的要求, 所以将会把凸轨注入法和脉冲多极铁注入法应用在 HALF 上。同时, HALF 相对较大的偏能动力学孔径和动量孔径可以满足纵向注入的要求, 不过纵向注入要求短脉冲磁铁的脉冲宽度短于束团间隔, 所以为了降低对短脉冲磁铁的要求, 会先对 HALF 的参数进行一些调整来延长束团间隔。

2 注入方法在 HALF 上的应用

2.1 采用反向切割磁铁的凸轨注入法

在传统的局部凸轨注入法中, 切割磁铁只会影响注入束流, 凸轨则会同时影响注入束流和存储束流。采用反向切割磁铁的凸轨注入法的元件布局如图 3 所示, 对于注入束流来说 K2 产生的磁场被切割磁铁的磁场所抵消, 所以 K2 只对存储束流产生影响但不影响注入束流, 注入束流将沿着之前的角度继续前行并在 K3 处才受到凸轨的影响。因为 K2 只对存储束流有影响, 而切割磁铁只对注入束流有影响, 所以 K2 被命名为“反向切割磁铁”。

应用在 HALF 上的凸轨注入方案布局与参数如图 4 所示, 整套系统由一块切割磁铁和三块冲击磁铁构成, 其中的 K2 为反向切割磁铁。注入束流在切割磁铁出口处的坐标为 (11 mm, -3.2 mrad), 注入束流在注入点处的离轴高度为 3 mm。

为了验证方案的可行性, 对束流注入过程进行了模拟。模拟中注入束流发射度 12 nm·rad, 能散 0.3%, 束流长度 3 mm, 粒子数 10 000。图 5 显示了束流注入过程中注入束流前 6 圈的相空间位置, 黑色竖线为切割板, 虚线椭圆为储存环的注入接受度, 数字分别代表了对应的圈数。可以看到注入束流在经过切割磁铁之后可以很快地进入接受度之中。束流注入物理方案不仅要能够实现束流的注入, 而且要保证具有足够高的束流注入效率。发射度为 12 nm·rad 的注入束流在存在误差的条件下的注入效率如图 6 所示, 可见注入束流在 500 $\mu\text{m}/\mu\text{rad}$ 的误差条件下仍然能达到 70% 左右的注入效率, 说明凸轨注入方案的注入效率很高, 且对误差有着较大的容忍度。

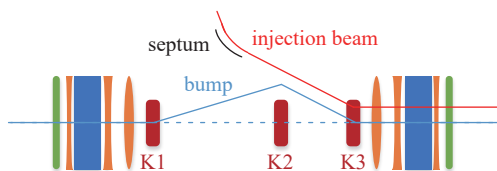


Fig. 3 Schematic layout of injection devices for the bump injection scheme with anti-septum (K2)

图 3 采用反向切割磁铁的凸轨注入法的元件布局示意图

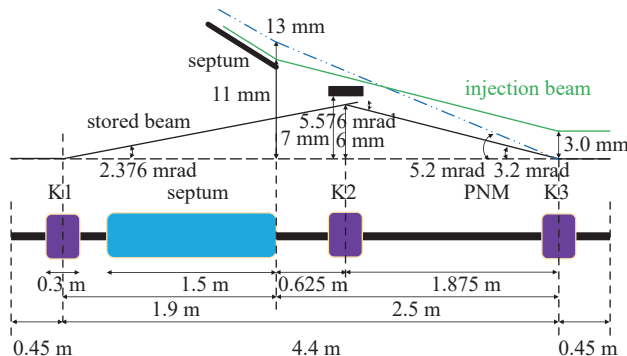


Fig. 4 Element layout of anti-septum injection scheme

图 4 反向切割磁铁注入方案元件布局

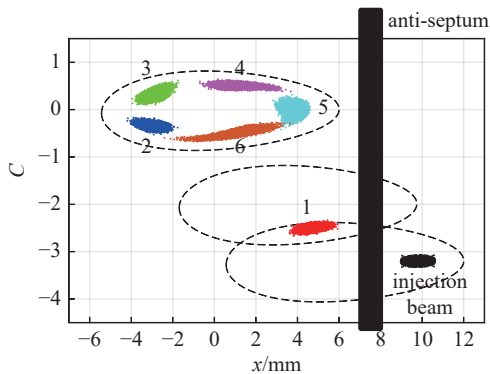


Fig. 5 Position of the first six turns of injection beam

图 5 注入束流前六圈位置

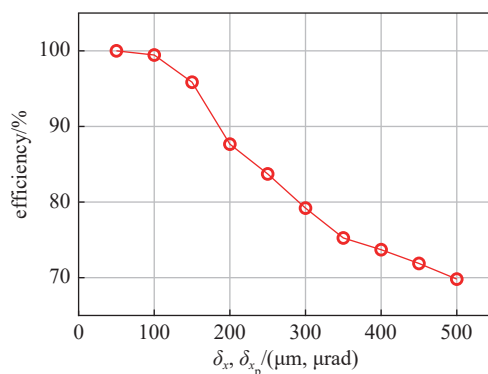


Fig. 6 Injection efficiency of anti-septum injection scheme

图 6 反向切割磁铁方案注入效率

凸轨注入系统中的切割磁铁和冲击磁铁会对注入束流和存储束流造成影响。切割磁铁的脉冲底宽为 60 μs , 对应束流运动 37 圈的时间。前 17 圈切割磁铁漏场只会对存储束流造成影响。第 18 圈时, 冲击磁铁开启准备进行注入。第 19 圈也就是切割磁铁达到顶峰时进行注入。第 20 圈时, 冲击磁铁逐渐关闭。冲击磁铁的脉冲底宽为 3 μs , 所以冲击磁铁对注入束流影响 1 圈, 对存储束流影响 1 到 2 圈。之后的 17 圈切割磁铁漏场继续对注入束流

和存储束流同时造成影响。在整个注入过程中,注入束流受到冲击磁铁影响 1 圈,切割磁铁漏场影响 18 圈。存储束流受到冲击磁铁影响 1 到 2 圈,切割磁铁漏场影响 37 圈。凸轨对存储束流造成影响的模拟结果如图 7 所示,凸轨对于存储束流在 x 方向上的影响不大且会较快地衰减,但会让存储束流的发射度增长到 33 nm·rad,并在 80 ms 之后(约 3 倍阻尼时间)降低到 0.2 nm·rad,约为原水平 2.3 倍。

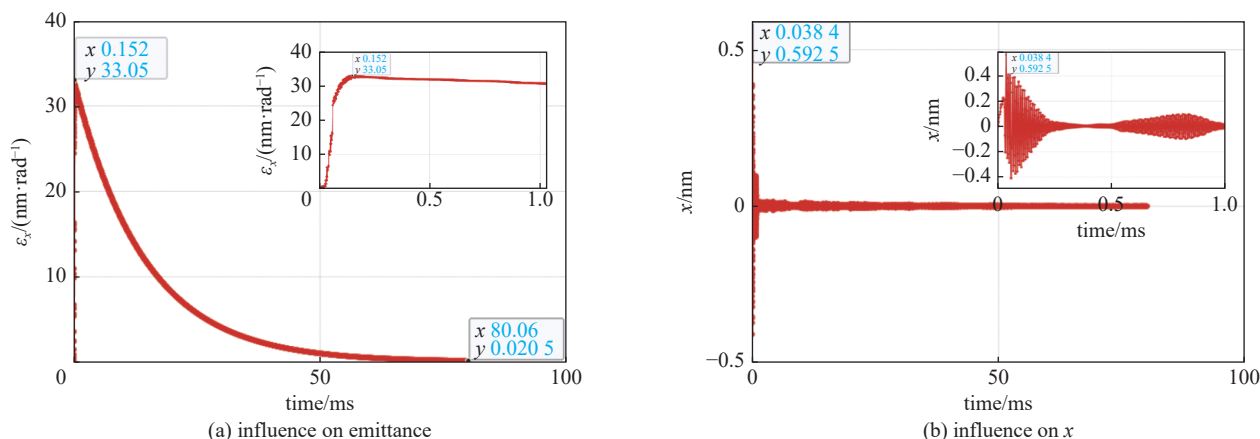


Fig. 7 Influence of anti-septum injection on the stored beam

图 7 反向切割磁铁注入对存储束流造成影响

相比于传统的凸轨注入法,采用反向切割磁铁的凸轨注入法对动力学孔径和对直线节空间的要求均有所降低,同时该方法在较高的误差条件下还有着较高的注入效率。这种方法的缺点是凸轨会对存储束流产生较大扰动。

2.2 脉冲多极铁注入法

脉冲多极铁注入法的元件布局如图 8 所示,这种注入方法将一块脉冲多极铁作为冲击磁铁使用来把注入束流踢进储存环的接受度之中。在脉冲多极铁的帮助下,此注入方法对于动力学孔径的要求相比于传统的局部凸轨注入方法有所减小。同时,由于脉冲多极铁的中心处场强为零,而存储束流的平衡轨道正是从脉冲多极铁的中心处通过,所以脉冲多极铁注入法对存储束流的扰动很小。MAX-IV 是第一个采用脉冲多极铁注入法的 MBA lattice 同步辐射光源^[17-18]。脉冲多极铁注入法的优点和 MAX-IV 的成功案例使得许多光源都对它进行了研究,在此基础上,BESSY-II^[19]提出将脉冲多极铁替换为非线性磁铁。相比于脉冲多极铁,经过设计和优化的非线性磁铁在束流注入处的场强更高,在中心处和束流注入处的梯度更为平缓,所以非线性磁铁对存储束流的透明性更好,并且对误差的容忍度也更高。应用于 HALF 上的脉冲多极铁注入方法也使用非线性磁铁作为冲击磁铁来进行注入,所使用的非线性磁铁结构来自本实验室所设计的新型非线性磁铁^[20],场形则经过调整使其峰值更接近注入处,如图 9 所示。

脉冲多极铁方案的设计主要是安排冲击磁铁的位置和踢力,使得切割磁铁和冲击磁铁可以相互配合把注入束流注入到储存环接受度之中。考虑到 HALF 储存环的动力学孔径在水平正方向上更大,可以为注入束流提供更大的接受度,注入方案选择在环外水平方向进行注入。通过一套基于粒子跟踪的接受度分析方法^[21]获得的一个注入系统布局及注入方案如图 10 所示,注入参数见表 2。

表 2 脉冲多极铁注入方案主要参数

Table 2 Main parameters of pulsed multipole injection scheme

horizontal position of the injection beam at septum/mm	incidence angle of the injection beam at septum/mrad	position of septum	position of nonlinear kicker	length of nonlinear kicker/cm	kick angle of nonlinear kicker/mrad
12	-3.1	midpoint of long straight section	downstream of long straight section	40	3

根据上表的注入参数,对束流注入过程进行了模拟。模拟中使用的注入束流发射度为 1 nm·rad,能散为 0.3%,束团长度为 3 mm,粒子数为 1000。图 11 显示了束流注入过程中注入束流前 5 圈的相空间位置,可以看到注入束

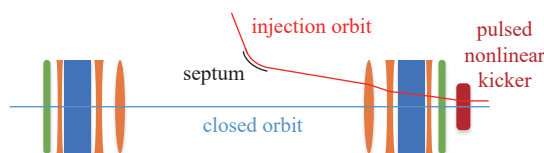


Fig. 8 Schematic layout of injection devices for the multipole kicker injection scheme

图 8 脉冲多极铁注入法的元件布局示意图

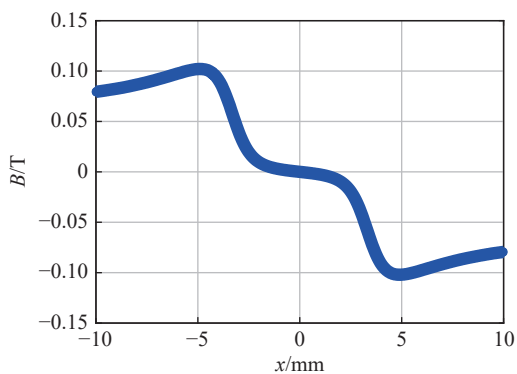


Fig. 9 Field distribution of nonlinear kicker

图9 非线性磁铁场形图

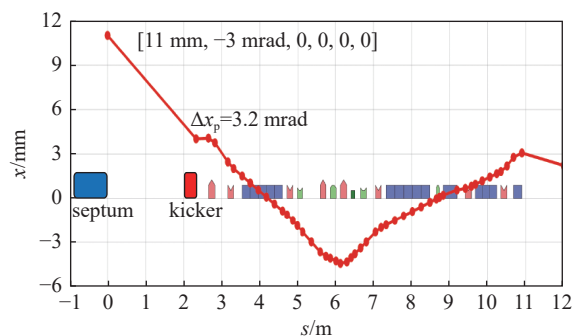


Fig. 10 First turn trajectory of the injection particle and specific parameters of the injection scheme

图10 注入方案及注入束流首圈运动轨迹

流在经过切割磁铁之后可以很快地进入接受度之中。

不同发射度的注入束流在误差存在条件下的注入效率模拟结果如图12所示。发射度为10 nm·rad的注入束流在100 μm/μrad的误差条件下仍有70%以上的注入效率, 不过要略低于凸轨注入法在相同误差条件下的注入效率。

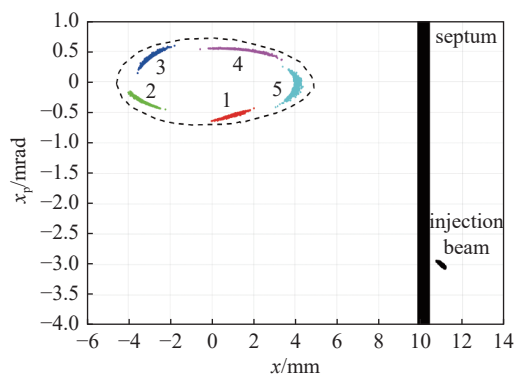


Fig. 11 Accumulation process after pulsed multipole injection

图11 脉冲多极铁注入后束流累积过程

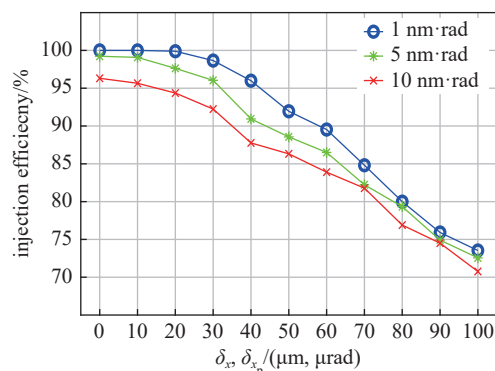


Fig. 12 Injection efficiency of pulsed multipole injection with error

图12 有误差存在下的脉冲多极铁注入效率

最后, 还要对脉冲多极铁注入法对存储束流的影响进行模拟。理论上非线性磁铁在中心处的零场强使得脉冲多极铁注入对存储束流是没有扰动的, 实际上由于误差等因素的存在, 脉冲多极铁注入法还是会对存储束流造成一定的影响。图13分别显示了在受到非线性磁铁影响之后存储束流的发射度和x坐标的变化。可以看到存储束流的x坐标仅增长到0.37 mm且会较快地恢复, 而发射度也仅增长到1.8 nm·rad并在40 ms(约1.5倍阻尼时间)之后降低到了0.13 nm·rad, 约为原水平1.5倍, 说明相比于凸轨注入法, 脉冲多极铁注入法对存储束流的影响较小。

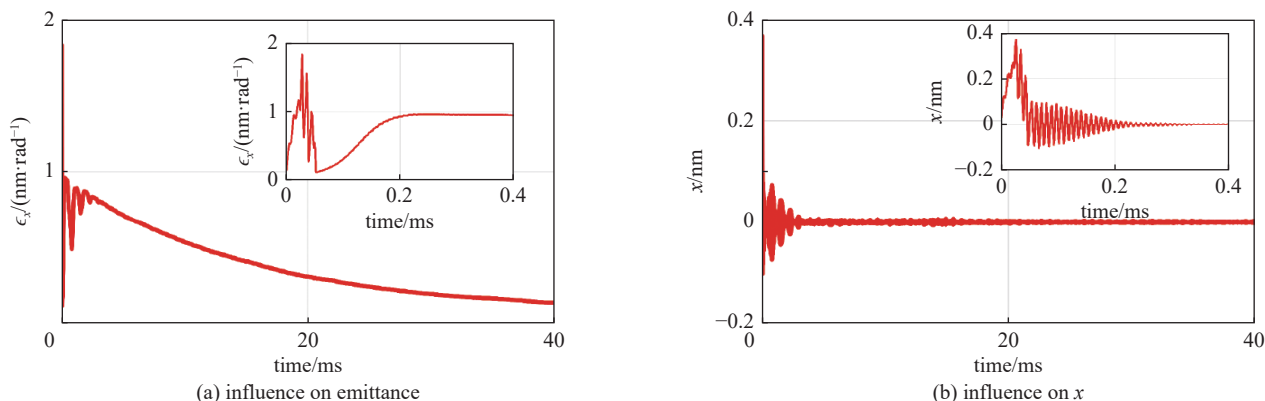


Fig. 13 Influence of pulsed multipole injection on the stored beam

图13 脉冲多极铁注入对存储束流的影响

脉冲多极铁注入法对动力学孔径的要求也有所降低, 且系统结构简单, 对存储束流的影响也较小, 注入效率略低于采用反向切割磁铁的凸轨注入法。该方案的缺点是调节余地较小, 方案一旦确定后难以调整, 不利于进行调试。

2.3 纵向注入法

纵向注入法的元件布局如图 14 所示。在纵向注入法中,注入束流的能量不再与存储束流一致,存在能量偏移的注入束流被短脉冲冲击磁铁置于对应的偏能轨道上。注入束流还会相对于存储束流有一定的时间偏移(通常是高频周期的一半),从而使得注入束流被注入到两个高频 bucket 之间的一条狭窄通道中(存储束流就存在于 bucket 里),这个通道也称为“高尔夫杆”,最终注入束流会被同步辐射阻尼合并到存储束流之中。

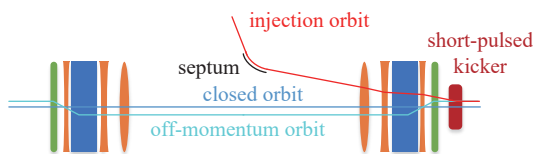


Fig. 14 Schematic layout of injection devices for the longitudinal injection scheme

图 14 纵向注入法的元件布局示意图

在纵向注入之中,为了实现对存储束流的透明,短脉冲冲击磁铁的脉冲长度要短于一个束团间隔。在均匀填充模式下,HALF 的束团间隔为 2 ns,这对短脉冲磁铁的技术提出了很高的要求。目前用于注入的短脉冲磁铁会采用功率场效应晶体管(RF-MOSFET),漂移阶跃恢复二极管(DSRD),快速离子二极管(FID)等装置来提供所需的纳秒级超短脉冲^[12]。RF-MOSFET 受到触发电流、开关回路和触发电路的杂散电感等的限制,最终的脉冲宽度在 6 ns 以上。DSRD 调制器可以做到 5 ns 左右的脉冲宽度,而商用 FID 脉冲器可以达到 4 ns 的脉冲宽度^[22]。但是以目前的技术水平还难以做到在保证足够高的脉冲电压的同时将短脉冲磁铁的脉冲宽度降低到 2 ns。因此,为了使用纵向注入方法在 HALF 上实现束流注入,需要对 HALF 的参数进行调整来延长束团间隔。将高频腔频率由 500 MHz 改为 100 MHz,对应的谐波数为 160,束团间隔 10 ns,这对于使用短脉冲磁铁来说是比较容易达到的,但是高频腔压也需要随之调整来保证纵向接受度能满足纵向注入的需求。

纵向注入对纵向接受度的要求可以通过纵向接受度的上下边界来说明。如图 15 所示,上边界是先经过稳定相位 ϕ_s ,后逼近不稳定点相位 ϕ_u 的稳定轨迹,下边界则是先逼近不稳定点 ϕ_u 的稳定轨迹。实现纵向注入的必要条件是注入相位 ϕ_{inj} 处的下边界能量 δ_0 和稳定相位处的下边界轨迹最大能量 δ_s 要同时小于动量孔径。高频腔由 500 MHz 降低到 100 MHz 后 δ_0 和 δ_s 会发生变化,可能会导致它们无法满足纵向注入的要求。而调整高频腔压可以调节 δ_0 和 δ_s 使它们能够满足需求。

图 16 显示了 δ_0 和 δ_s 随高频腔压的变化,可以看出动量孔径约为 5% 时高频腔压在 266 kV 到 369 kV 之间时 δ_0 和 δ_s 可以满足纵向注入要求,最终选择高频腔压为 350 kV。注入束流的时间偏移为束团间隔的一半即 -5 ns,能量偏移则在注入相位处上边界能量和下边界能量之间取中间值为 4.34%,所有的注入参数见表 3。

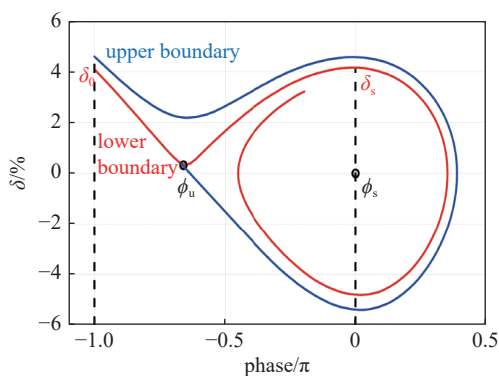


Fig. 15 Upper and lower boundaries of longitudinal phase space in longitudinal injection

图 15 纵向注入中纵向相空间上下边界

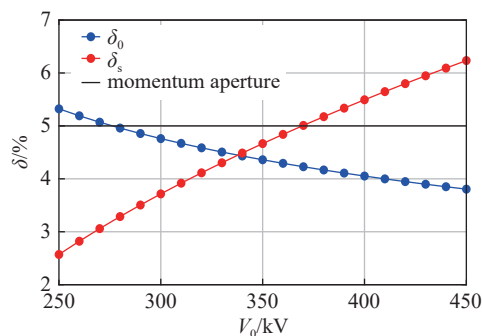


Fig. 16 δ_0 and δ_s change with high frequency cavity voltage

图 16 δ_0 和 δ_s 随高频腔压的变化

表 3 纵向注入方案主要参数

Table 3 Main parameters of longitudinal injection scheme

injection beam time offset/ns	injection beam energy offset/%	RF frequency/MHz	RF voltage/kV	harmonic number	bunch spacing/ns
-5	4.34	100	350	160	10

图 17 是注入束流在纵向接受度中的累积过程。可见纵向注入方法能够成功完成注入,并且注入束流在 40 000 圈后会被阻尼到接近接受度中心处。

纵向注入法对动力学孔径的要求很低,可以满足小孔径储存环的注入需求。但是为了使纵向注入法不影响到

存储束流, 所使用的短脉冲磁铁的脉冲宽度需短于束团间隔。如果通过降低高频腔频率的方法延长束团间隔以降低对短脉冲磁铁技术的要求, 则需要相应地调整高频腔压, 而这又会对高频腔对二极铁和插入件带来的辐射损失的补偿造成影响。

3 总结与展望

在 HALF 储存环的 lattice 上应用了几种适用于衍射极限储存环的注入方案, 通过粒子跟踪和模拟验证了它们的可行性并分析优缺点。纵向注入法作为在轴注入方法, 对动力学孔径的要求很小。但为了保证对存储束流的透明度, 纵向注入方法需要脉冲长度短于束团间隔的短脉冲磁铁, 这对短脉冲磁铁的技术提出了较高的要求。而如果选择使用较低频率的高频腔来延长束团间隔则需要相应地调整高频腔压, 这会影响到高频腔对二极铁和插入件带来的辐射损失的补偿。使用反向切割磁铁的凸轨注入法源于对传统凸轨注入法的改进, 发射度为 $12 \text{ nm}\cdot\text{rad}$ 的注入束流在 $500 \text{ }\mu\text{m}/\mu\text{rad}$ 的误差条件下有 70% 左右的注入效率, 但此方法会让存储束流的发射度增长到 $33 \text{ nm}\cdot\text{rad}$ 。脉冲多极铁注入法结构简单, 仅会让存储束流的发射度增长到 $1.8 \text{ nm}\cdot\text{rad}$, 发射度为 $10 \text{ nm}\cdot\text{rad}$ 的注入束流在 $100 \text{ }\mu\text{m}/\mu\text{rad}$ 的误差条件下有 70% 以上的注入效率, 略低于反向切割磁铁注入法但仍处于较高水平。选择合适的方案需要结合具体 lattice 参数和表现进行分析, 以 HALF 为例, 较大的动力学孔径可以满足离轴注入的要求, 考虑到脉冲多极铁注入法的注入系统结构简单, 对存储束流的影响更小, 注入效率也足够高, 所以脉冲多极铁注入法是比较合适的方法。但这种方法的调节余地较小, 不便于进行调试, 所以在进行调试时可以考虑采用凸轨注入和脉冲多极铁注入相结合的方式, 在束线上同时布置凸轨注入系统和脉冲多极铁注入系统, 两个注入系统可以相互切换而不需要改变整体的布局, 从而可以非常方便地应对调试工作。在前期调试时使用调节余地较大的凸轨注入系统, 在调试后期逐步切换到脉冲多极铁注入系统, 并待调试结束后将凸轨注入系统拆除, 使用脉冲多极铁法进行注入。

参考文献:

- [1] Shang L, Shang F L, Lu Y M, et al. The new injection system of the HLS II[C]//Proceedings of the IPAC 2013. 2013: 687-689.
- [2] Ohkuma H. Top-up operation in light sources[C]//Proceedings of the EPAC08. 2008: 36.
- [3] Bei M, Borland M, Cai Yongda, et al. The potential of an ultimate storage ring for future light sources[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2010, 622(3): 518-535.
- [4] Hettel R. DLSR design and plans: an international overview[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2014, 21(Pt 5): 843-855.
- [5] 焦毅, 白正贺. 第四代同步辐射光源物理设计与优化[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34: 104004. (Jiao Yi, Bai Zhenghe. Physics design and optimization of the fourth-generation synchrotron light sources[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, 34: 104004)
- [6] Gough C, Aiba M. Top-up injection with "anti-septum"[C]//Proceedings of the IPAC2017. 2017: 774-776.
- [7] Harada K, Kobayashi Y, Miyajima T, et al. New injection scheme using a pulsed quadrupole magnet in electron storage rings[J]. Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams, 2007, 10: 123501.
- [8] Takaki H, Nakamura N, Kobayashi Y, et al. Beam injection with a pulsed sextupole magnet in an electron storage ring[J]. Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams, 2010, 13: 020705.
- [9] Takai R, Obina T, Ueda A, et al. Beam profile measurement during top-up injection with a pulsed sextupole magnet[C]//Proceedings of the DIPAC2011. 2011: 305-307.
- [10] Henderson S. Status of the APS upgrade project[C]//Proceedings of the 6th International Particle Accelerator Conference. 2015: 1791-1793.
- [11] Steier C, Anders A, Byrd J, et al. ALS-U: a Soft X-ray diffraction limited light source[C]//Proceedings of the 2nd North American Particle Accelerator Conference. 2016.
- [12] Chen Jinhui, Shi Hengxu, Wang L, 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.
- [13] Aiba M, Böge M, Marcellini F, et al. Longitudinal injection scheme using short pulse kicker for small aperture electron storage rings[J]. Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams, 2015, 18: 020701.
- [14] Hernandez A S, Aiba M. Investigation of the injection scheme for SLS 2.0[C]//Proceedings of the 6th International Particle Accelerator Conference. 2015: 1720-1723.

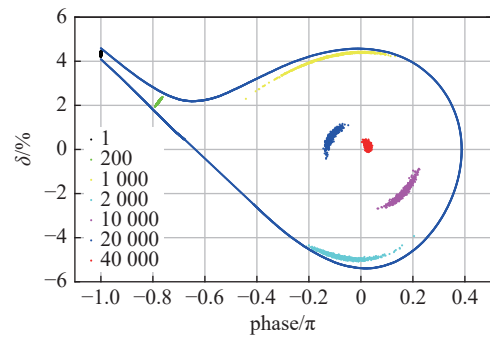


Fig. 17 Accumulation process of injection beam in longitudinal injection

图 17 纵向注入束流累积过程

- [15] Terebilo A. Accelerator toolbox for MATLAB[R]. SLAC-PUB-8732, 2001.
- [16] 白正贺, 刘刚文, 何天龙, 等. 合肥先进光源储存环初步物理设计[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 104003. (Bai Zhenghe, Liu Gangwen, He Tianlong, et al. Preliminary physics design of the Hefei Advanced Light Facility storage ring[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34: 104003)
- [17] MAX IV detailed design report[EB/OL]. <https://www.maxiv.lu.se/accelerators-beamlines/accelerators/accelerator-documentation/max-iv-ddr/>.
- [18] Leemann S C. Pulsed sextupole injection for Sweden's new light source MAX IV[J]. *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, 2012, 15: 050705.
- [19] Atkinson T, Dirsat M, Dressler O, et al. Development of a non-linear kicker system to facilitate a new injection scheme for the BESSY II storage ring[C]//Proceedings of the IPAC2011. 2011: 3394-3396.
- [20] Song Wenbin, Shang Lei, Shang Fenglei, et al. A novel kind of nonlinear kicker for the Hefei Advanced Light Facility[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2021, 990: 164986.
- [21] Wang P N, Liu G, Wang L, et al. Acceptance analysis method for the scheme design of multipole kicker injection[C]//Proceedings of the 12th International Particle Accelerator Conference. 2021: 2900-2902.
- [22] Wang L, Chen J H, Shi H, 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.