

文章编号: 1001-4322(2005)09-1419-04

# 合肥光源储存环上八极磁铁的动力学效应分析\*

王 琳, 李永军, 冯光耀, 张 赫, 徐宏亮, 李为民, 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: 为达到合肥光源二期工程通用模式的设计流强,在储存环上选择垂直方向 函数比较大的位置增加一组八极磁铁。该组八极磁铁对水平方向动力学孔径影响很小,虽然垂直方向动力学孔径明显减小,但仍然大于物理孔径,不会影响束流的注入积累过程。该组八极磁铁产生的垂直方向振荡频率分散可以提供 ms 量级的 Landau 阻尼时间,将明显增强抑制垂直方向束流集体不稳定性的能力。该组八极磁铁投入运行后,合肥光源注入积累过程明显改善,注入流强从无八极磁铁时的约 100 mA 提高到 330 mA 左右。

关键词: 动力学孔径; 八极磁铁; 横向振荡频率分散; Landau 阻尼; 集体不稳定性

中图分类号: TL506 文献标识码: A

合肥光源是一台专用同步辐射光源,其基本参数见表 1。因注入过程中束流能量低,辐射阻尼弱,束流易受到各种不稳定性影响。二期工程后增加了扁平真空室并更换了高频腔。目前储存环上扁平真空室长度所占比例可观,同时新高频腔宽带阻抗和高次模(特别是偶极模式)也强于旧高频腔<sup>[1]</sup>,这很有可能令束流不稳定性情况恶化,特别是在垂直方向。2003 年初调试期间观察到注入过程中束流横向“爆散”现象(blow-up),很难注入积累到 200 mA 以上的流强。因此考虑增强束流

Landau 阻尼以抑制横向不稳定性,有利于提高注入流强。本文介绍了合肥光源八极磁铁系统的物理设计过程,文章第一部分简单介绍 Landau 阻尼和横向振荡频率分散的关系,第二部分计算了八极磁铁对动力学孔径的影响,第三部分给出横向振荡频率与振荡幅度及八极磁铁强度之间的数值关系,最后简单介绍了八极磁铁系统的运行情况。

## 1 Landau 阻尼

Landau 阻尼是储存环中一种非常重要的稳定性机制,相对于非相干的同步辐射阻尼,它是一种相干阻尼。Landau 阻尼的物理过程比较复杂,其产生根源是束流中

存在振荡频率分散,即不同粒子的振荡频率存在微小差别。当束流受到激励时(来自于外部的扰动或者束流与周围环境相互作用产生的尾场力扰动),粒子在外力作用下受迫振荡,其振荡幅度将增长。但由于束流中存在的振荡频率分散及储存环中的非线性效应,束流中粒子将重新分布,于是束流电荷中心的振幅不会持续增长,而是迅速衰减,从而扰动效应被抑制。这就是 Landau 阻尼的基本物理过程<sup>[2-4]</sup>。

储存环中 Landau 阻尼时间与束流振荡频率分散的关系为<sup>[5]</sup>

$$L = \frac{\sqrt{3}}{f_{x,y}} = \frac{\sqrt{3}}{x,y f_0} \quad (1)$$

式中: $f_{x,y}$ 是水平和垂直方向振荡频率; $f_{x,y}$ 是水平和垂直方向振荡频率分散; $f_0$ 是回旋频率; $x,y = f_{x,y}/f_0$ ,是水平和垂直方向工作点(tunes,工作点和振荡频率存在确定对应关系,但该术语更为常用); $x,y$ 是工作点分散(tune spread)。

表 1 合肥光源储存环的基本参数

Table 1 Basic parameters of HLS storage ring

circumference/ m	66.130 8
injection energy/ MeV	200
operation energy/ MeV	800
design beam intensity/ mA	> 300
harmonic number	45
revolution frequency/ MHz	4.533 4
horizontal tunes	3.58
vertical tunes	2.58
transverse radiation damping time	~ 1.4
under injection energy/ s	

\* 收稿日期:2004-10-14; 修订日期:2005-04-27

基金项目:中国科学院知识创新工程资助课题;国家自然科学基金资助课题(10205014);重大科学工程资助课题(P2A02)

作者简介:王 琳(1972—),男,吉林长春人,副研究员,硕士,主要从事加速器物理方面研究;合肥市 6022 信箱;E-mail:wanglin@ustc.edu.cn.

根据(1)式,对合肥光源,回旋频率  $f_0 = 4.533 \text{ MHz}$ ,若横向工作点分散  $\sigma_x = 1.0 \times 10^{-4}$ ,则 Landau 阻尼时间  $\tau_L = 3.82 \text{ ms}$ ,远远小于横向辐射阻尼时间(1.4 s),这对改善束流稳定性是非常有利的。

束流振荡频率分散来自于束流的能量分散和外部约束场的非线性。对于聚束的束流(bunched beam),外部约束力的非线性是振荡频率分散的主要原因<sup>[2]</sup>。在纵向,振荡频率分散来自于 RF 势阱的非线性;在横向,振荡频率分散来自于非线性磁场。一般储存环上的主要非线性元件是用于色品校正的六极磁铁,六极磁铁的主要贡献是产生振荡频率对能量的关联,由于纵向能量振荡周期和不稳定性增长时间相当,而在一个纵向振荡周期内每个粒子的平均能量是相同的,于是六极磁铁产生的横向振荡频率分散在纵向振荡周期内平均后接近于零。低能储存环(如合肥光源)中用于清洗被俘获离子的直流清洗电极也贡献一定的非线性场,但直流清洗电极的电场作用很弱。此二者都很难产生比较强的 Landau 阻尼,储存环中常用于增强 Landau 阻尼的方法是增加八极磁铁。

## 2 动力学孔径研究

正八极磁场表达式可以写为<sup>[6]</sup>

$$B_y = \frac{k_3}{6}(x^3 - 3xy^2), \quad B_x = \frac{k_3}{6}(y^3 - 3yx^2) \quad (2)$$

式中:归一化八极磁铁强度  $k_3 = \frac{1}{B} \frac{\partial^3 B_y}{\partial x^3}$ ,  $B$  是磁刚度,  $R$  是二极磁铁曲率半径。八极磁场将产生非线性共振,导致动力学孔径减小<sup>[7]</sup>。合肥光源在水平方向注入束流,按照目前注入系统设计,注入束流到储存束流轨道距离比较大,因此希望水平方向动力学孔径足够大,以保证注入束流顺利进入储存环,并且保证储存束流不会因为注入系统产生的水平方向扰动而丢失。注入过程中,由于耦合或注入系统在垂直方向的杂散磁场,束流在垂直方向也会受到一定扰动,但是该扰动幅度比较小,因此对垂直方向动力学孔径要求不是非常苛刻。考虑到设计八极磁铁系统的主要目的是抑制垂直方向束流不稳定性,那么八极磁铁的物理位置选择必须保证能有效地产生垂直方向的振荡频率分散,同时对水平方向动力学孔径影响很弱。

合肥光源储存环是分离作用强聚焦 TBA 结构,图 1 表示一个单元的包络函数。根据上述考虑和实际安装空间的限制,确定八极磁铁安装位置在第三块弯转磁铁前,该位置水平方向函数小,垂直方向函数大。全环总共安装了两块八极磁铁。通过动力学孔径跟踪计算讨论了八极磁场对储存环动力学孔径的影响,在校正色品为(3,3)条件下,八极磁铁强度为零时动力学孔径见图 2,八极磁铁积分强度为  $90 \text{ m}^{-3}$  时动力学孔径(计算中未考虑环上其它公差,因此实际动力学孔径应比图 3 更小)如图 3 所示。八极磁铁明显减小了垂直方向动力学孔径,但可以满足注入需要。设计中也考虑了其它一些位置,因水平方向动力学孔径减小太多而未采纳。

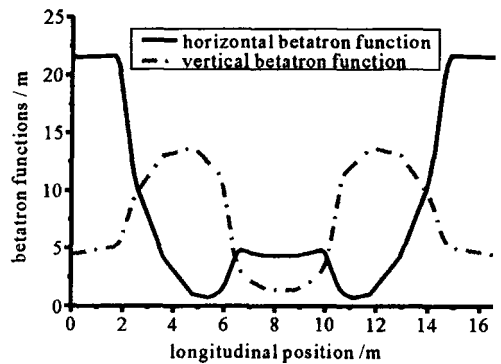


Fig. 1 functions of one cell of HLS storage ring

图 1 合肥光源一个单元 函数图

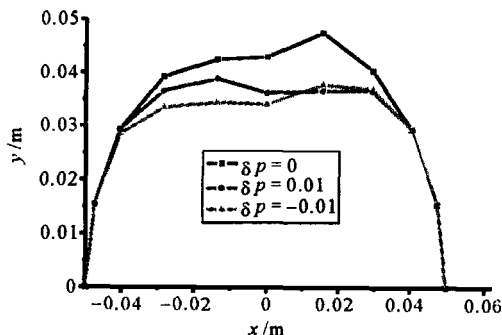


Fig. 2 Dynamic aperture of GPLS without octupoles

图 2 无八极磁铁时 GPLS 模式动力学孔径

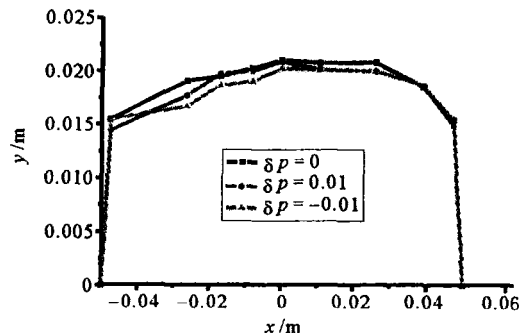


Fig. 3 Dynamic aperture of GPLS when

integrated octupole strength is  $90 \text{ m}^{-3}$

图 3 八极磁铁积分强度为  $90 \text{ m}^{-3}$  时 GPLS 模式动力学孔径

### 3 横向工作点与振幅及八极磁铁强度的关系

束流横向工作点分散与八极磁铁的强度的关系可近似地表达为<sup>[8]</sup>

$$= \frac{3}{8} \frac{2}{\text{oct}} \frac{k_3}{6} \left( \frac{a^2}{0} \right) \quad (3)$$

式中： $\text{oct}$  和  $0$  分别是八极磁铁所在位置和参考位置的函数； $a$  为参考位置的振荡幅度；表示平均值。根据 (3) 式可以估算八极磁铁产生的工作点分散。

为更准确地计算横向工作点与八极磁铁强度及粒子横向振幅的数值关系,设计中采用了数值跟踪粒子轨迹的方法。计算使用 ELEGANT 程序<sup>[9]</sup>,首先把色品校正为 (3,3),然后跟踪不同振幅的粒子 1 024 圈,对粒子轨迹作 NAFF (numerical analysis of fundamental frequency,其精度比普通 FFT 方法更高)<sup>[10]</sup> 分析得到初始振幅不同时粒子的工作点。图 4 表示了初始振幅为 (1.0, 1.0) mm 时粒子的工作点和八极磁铁强度的关系,可以看出随着八极磁铁强度的增加,垂直方向工作点变化要比水平方向工作点变化更明显。图 5 和图 6 表示八极磁铁强度为 0 和 90  $\text{m}^{-3}$  时,粒子工作点和初始振幅的关系,可见八极磁场几乎没有改变水平方向工作点对振幅的依赖关系,但产生了很强的垂直方向工作点对振幅的依赖。

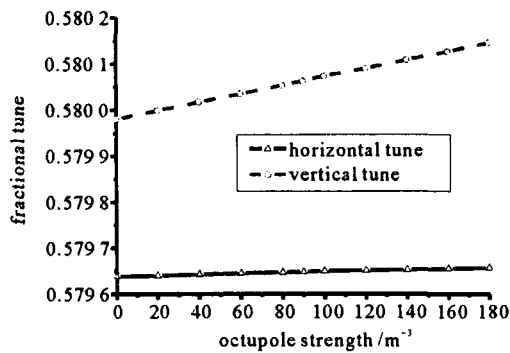


Fig. 4 Tune vs octupole strength at fixed amplitudes

图 4 一定初始振幅的粒子工作点和八极磁铁强度关系

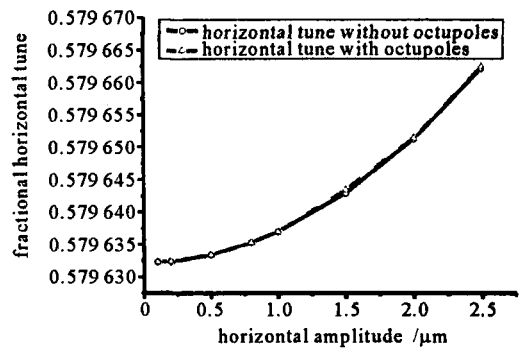


Fig. 5 Horizontal tune vs horizontal amplitudes

图 5 水平工作点和振幅关系

根据动力学孔径和工作点与振幅依赖关系的计算,目前合肥光源八极磁铁设计对粒子动力学的影响主要在垂直方向。注入过程中,垂直方向束流尺寸约为 1 mm (运行中观测数据),当八极磁铁强度为 100  $\text{m}^{-3}$  时,束流垂直方向工作点分散约为 0.000 1,根据 (1) 式估算,对应 Landau 阻尼时间约为 3.8 ms,这远快于同步辐射阻尼时间 1.4 s,有利于垂直方向集体不稳定性的抑制。

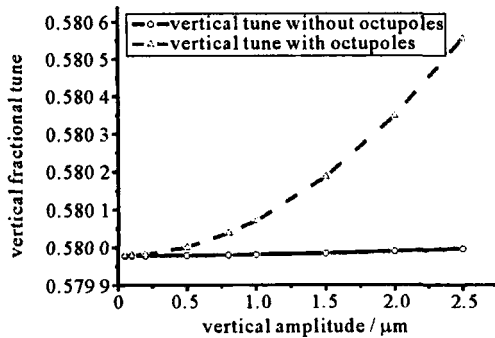


Fig. 6 Vertical tune vs vertical amplitudes

图 6 垂直工作点和粒子振幅关系

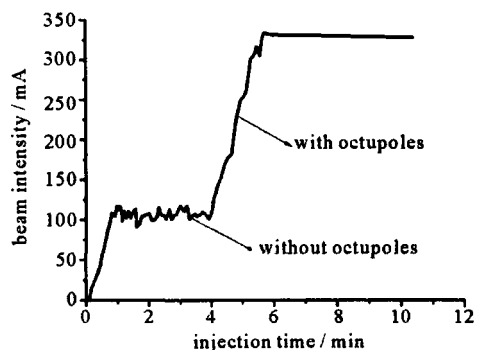


Fig. 7 Injected beam current curve with and without octupoles

图 7 有无八极磁铁情况下的注入束流曲线

### 4 八极磁铁的运行

八极磁铁于 2003 年 10 月完成了机械加工和磁场测量,安装到合肥光源储存环上。首次安装,接错了电流方向,八极磁铁明显不利于束流的注入积累。当改正了八极磁铁的电流方向后,注入积累束流强度明显提高,注入过程更为顺利。图 7 是某次注入过程的束流曲线,为演示八极磁铁的影响,在注入开始阶段,八极磁铁励磁电流设置为零,束流注入积累到 100 mA 左右时,束流发生部分丢束现象,流强很难再提高;这时保持其它注入条件不变,把八极磁铁励磁电流设置为 8 A (对应聚焦强度约为 100  $\text{m}^{-3}$ ),结果注入过程变得顺畅,束流积累

到 330 mA 后停止注入并开始慢加速。限于目前实验手段,尚无法判断合肥光源储存环上八极磁铁抑制了何种横向不稳定性(如单束团不稳定性或耦合束团不稳定)。

## 5 结 论

合肥光源八极磁铁的物理设计是基本合理的,虽然垂直方向动力学孔径有所损失,但是垂直方向阻尼作用大大增强,在注入过程中注入束流强度明显提高(从 100 mA 增加到 330 mA)。在合肥光源储存环上安装八极磁铁是抑制横向束流集体不稳定性的有效手段。如何进一步改善合肥光源注入过程束流稳定性和提高注入束流强度,今后将继续深入研究。

### 参考文献:

- [1] 徐宏亮,王琳,李为民,等. 合肥电子储存环上新旧高频腔的尾场及耦合阻抗的计算[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(2):187—190. (Xu H L, Wang L, Li W M, et al. Calculation of wake field and coupled impedance of upgrade and old RF cavity in Hefei electron storage ring. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(2):187—190)
- [2] Hofmann A. Landau damping[A]. Fifth Advanced Accelerator Physics Course[C]. CERN-95-06, Geneva, Switzerland, 1995. 275.
- [3] Chao A W. Physics of collective beam instabilities in high energy accelerators[M]. New York: John Wiley and Sons Inc, 1993.
- [4] Ng K Y. Physics of collective beam instabilities[R]. FERMLAB-Conf-00/142-T, Fermi National Accelerator Laboratory, USA, Chicago 2000.
- [5] Wilson E. Non-linearity and resonances[A]. Fifth General Accelerator Physics Course[C]. CERN-94-01, Geneva, Switzerland, 1994. 250.
- [6] Wiedemann H. Particle accelerator physics I: basic principles and linear beam dynamics[M]. Berlin: Springer, 1998.
- [7] Gareyte J, Koutchouk J P, Guggiero F. Landau damping, dynamic aperture and octupoles in LHC[R]. Large Hadron Collider Project Report 91, CERN, Geneva, Switzerland, 1997.
- [8] Edwards D A, Syphers M. Tune dependence on momentum and betatron amplitudes[A]. Chao A W, Tigner M. Handbook of Accelerator Physics and Engineering[M]. Singapore: World Scientific, 1999. 71.
- [9] Borland M. Elegant: a flexible SDDS-compliant code for accelerator simulation[R]. Advanced Photon Source LS-287, Argonne National Laboratory, USA, Chicago, 2000.
- [10] Laskar J. Frequency analysis for multi-dimensional systems[J]. *Global Dynamics and Diffusion, Physica D*, 1993, 67:257—281.

## Dynamic effects of octupole-magnets in HLS storage ring

WANG Lin, LI Yong-jun, FENG Guang-yao, ZHANG He, XU Hong-liang, LI Wei-min, LIU Zu-ping  
(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China,  
P. O. Box 6022, Hefei 230029, China)

**Abstract:** In order to attain the design beam intensity of Phase II Project of Hefei Light Source (HLS), one family of octupoles were installed in the place where vertical Batatron function is relatively large in HLS storage ring. After adding octupoles, the horizontal dynamic aperture is little affected but the vertical dynamic aperture decreased drastically. This is not detrimental to beam injection and accumulation, because the vertical dynamic aperture is still larger than physical aperture. The vertical oscillation frequency spread generated by octupoles can provide Landau damping time about several microseconds, which is very helpful to overcome vertical collective instabilities in HLS storage ring, where radiation damping time is 1.4 s. One year's operation has demonstrated the effectiveness of octupoles. The injected beam intensity, which was about 100 mA without octupoles, was improved to more than 330 mA by octupoles.

**Key words:** Dynamic aperture; Octupole magnet; Transverse oscillation frequency spread; Landau damping; Collective instabilities