

# 上海光源增强器动态升能过程分析\*

李浩虎<sup>1)</sup> 刘桂民

(上海应用物理研究所 上海 201800)

**摘要** 上海光源增强器采用FODO型磁聚焦结构,由28个FODO单元组成,周长180m,可将直线加速器引出的100MeV的电子束加速至3.5GeV,用于储存环的注入,重复频率为2Hz.增强器的动态升能过程将直接影响到储存环的注入效率.报告上海光源增强器动态升能过程中磁铁磁场、高频电压的上升过程、涡流效应及影响以及束流参数的变化等.

**关键词** 上海光源 增强器 升能过程

## 1 引言

上海光源是国家“十五”期间重大科学工程之一<sup>[1]</sup>,目的是建成1台性能指标居国际前列的第3代中能同步辐射光源,提供从X射线到远红外波段的高亮度光.其加速器系统由1台100MeV的直线加速器、1台全能量增强器、1台3.5GeV的储存环以及连接它们的高低能输运线组成.

增强器的动态升能过程是影响储存环注入效率、束流参数及其时间结构的重要因素之一<sup>[2]</sup>.增强器采用FODO结构,共28个基本单元,周长180m,重复频率2Hz.其二极铁曲率半径为14.515m,有效地降低了动态升能过程中的涡流效应.

## 2 涡流效应

SSRF增强器的注入能量为100MeV,对应二极铁强度为 $B_{\min} = 0.023\text{T}$ ,引出能量为3.5GeV,对应的 $B_{\max} = 0.804\text{T}$ .升能过程中,由于涡流效应的存在,二极铁磁场的变化将在真空盒内产生1个附加六极子场,其强度与真空盒的形状、材料、束流能量以及二极铁磁场的变化速度有关.为了最大限度地减小涡流场的强度,选择二极铁磁场的上升曲线为

$$B(t) = B_0(a_1 - \cos(\omega_r t)), \quad (1)$$

其中 $a_1 = (B_{\max} + B_{\min}) / (B_{\max} - B_{\min})$ ,  $\omega_r = 2\pi f_r$ 为重复频率,  $B_0 = (B_{\max} - B_{\min}) / 2$ 对应附加六极子强度为<sup>[3]</sup>

$$k_2 = 2F\mu_0\sigma \frac{h\omega_r}{g\rho} \frac{\sin(\omega_r t)}{a_1 - \cos(\omega_r t)}, \quad (2)$$

其中 $\mu_0$ 为真空中的磁导率,  $\sigma$ 为真空室材料的导电率,  $h$ 为真空室的壁厚,  $g$ 为真空盒的高度,  $\rho$ 为二极铁曲率半径,  $F$ 为1个真空室形状因子,对于SSRF增强器,  $F = 1.4944$ .图1为能量及 $k_2$ 随时间的变化曲线,由图中可以看出,能量约200MeV时,涡流效应最强,对应的 $k_2 = 0.29\text{m}^{-3}$ .

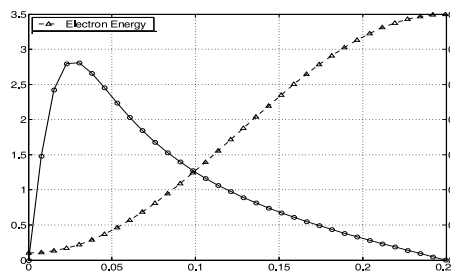


图1 能量及 $k_2$ 随时间的变化曲线

涡流产生的附加六极场将改变增强器的色品,导致其能量接受度的减小.计算表明,水平及垂直色品的变化和附加六极场强度 $k_2$ 之间的关系分别为 $\Delta\xi_x = 35.97k_2$ ,  $\Delta\xi_y = -47.17k_2$ .增强器的工作点为(8.18, 5.23),涡流效应最大时,  $k_2 = 0.29\text{m}^{-3}$ ,可以得到当 $\Delta P/P = 1.68\%$ 时,将穿越 $\nu_y = 5$ 的共振线.

\* 国家大科学工程“上海同步辐射装置”项目资助

1) E-mail: lihaohu@sinap.ac.cn

### 3 高频电压上升过程

简单起见, 选择增强器高频电压的上升曲线和二极铁磁场的上升曲线具有相同的形式. 其引出时的高频腔压由高频腔的最高电压所决定, 为1.8MV. 注入时的高频腔压大小决定了增强器在注入时的能量接受度, 应当能够覆盖直线加速器引出束流的能量区间, 同时注入时由于电子能量很低, 高频腔压也不应过大, 否则将引起较强的纵向相振荡. 图2为不同的初始腔压和对应的注入最大能散接受度之间的关系, 由于直线加速器的引出束流能散为0.5%, 中心能量晃动约为0.5%, 因此初始腔压应为200kV左右.

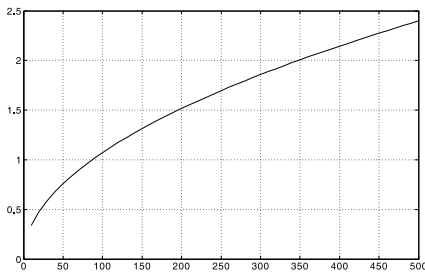


图2 注入时最大能量接受度和高频电压之间的关系

设置了高频上升曲线后, 就可以求得不同时间、不同能量下的同步相位 $\phi_s$ 、最大能量接受度 $(\Delta E/E_s)_{\max}$ 以及最大相宽接受度 $\Delta\phi_{\max}$ <sup>[4]</sup>. 图3为能量接受度和相位接受度随能量的变化曲线, 注入引出时高频腔压分别为200kV和1.8MV.

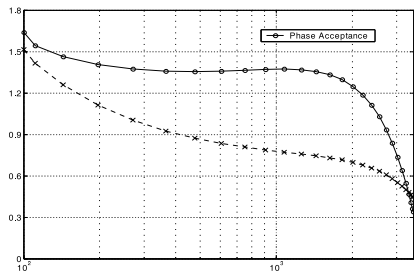


图3 能量接受度和相位接受度随束流能量的变化

### 4 束流发射度的变化

增强器中, 束流能散、束长以及横向发射度随能量的变化可以由下式求出<sup>[5, 6]</sup>:

$$\frac{dA_i}{dt} = -A_i \left( \frac{\dot{E}}{E} + J_i \frac{P_\gamma}{E} \right) + C_q \frac{P_\gamma \gamma^2}{E} G_i, \quad (3)$$

其中下标 $i = 1, 2, 3$ 时,  $A_i$ 分别代表能散 $(\sigma_E/E)^2$ 、束长 $\sigma_\tau^2$ 以及水平发射度 $\epsilon_x$ . 式中右边第1项为能量

变化的影响, 第2项为同步辐射的影响, 最后一项为量子激发的影响.  $J_i$ 分别为 $J_\epsilon$ ,  $J_\epsilon$ 及 $J_x$ , 为辐射阻尼时间.  $P_\gamma$ 为同步辐射功率.  $C_q = 55h/32\sqrt{3}mc$ 为一常数.  $G_i$ 分别为 $G_1 = I_3/I_2$ ,  $G_2 = \alpha T_0 E G_1 / e\dot{V}_0$ ,  $G_3 = I_5/I_2$ , 其中 $\alpha$ 为动量压缩因子,  $T_0$ 为回旋周期,  $e\dot{V}_0 = (q^2 - 1)^{1/2} U_0 \omega_{RF}$ ,  $q$ 为过压因子,  $U_0$ 为单圈同步辐射能量损失,  $I_2, I_3, I_4, I_5$ 为同步辐射积分. 图4为能散、束长及水平发射度随能量的变化曲线.

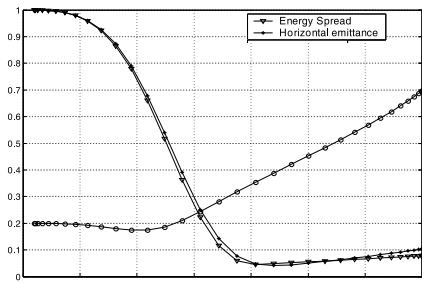


图4 电子束能散、束长及水平发射度随能量的变化

### 5 误差影响

升能过程中, 对束流影响较大的误差主要来自二极铁磁场上升速度的变化以及四极铁与二极铁上升曲线之间的同步性等. 前者将造成涡流效应的增大, 根据第2节的分析可得, 会导致增强器能量接受度的减小, 严重时可通过调节六极铁的上升曲线来加以补偿. 后者则引起工作点的晃动, 上海光源增强器在升能过程中要求四极铁与二极铁之间的同步性要好于0.1%, 模拟结果表明, 工作点的晃动 $\sqrt{\Delta\nu_x^2 + \Delta\nu_y^2} < 0.02$ , 不会通过有危害的共振线.

### 6 结论

通过上面的分析计算可以得出:

1) 增强器引出束流水平发射度约0.1mm·mrad, 能散小于0.1%, 束团长度约21mm, 可以满足储存环注入的需要.

2) 注入时高频电压200kV, 对应能量接受度为1.5%, 通过合适的twiss参数匹配, 可以得到较高的注入效率.

3) 升能过程中, 四极铁和二极铁强度同步性好于0.1%, 造成工作点的漂移很小, 不影响束流整体的稳定性.

4) 重复频率为2, 最大附加六极场强度小于 $0.3\text{m}^{-3}$ , 对应的能量接受度大于1.5%.

**参考文献(References)**

- 1 ZHAO Zhen-Tang, XU Hong-Jie. SSRF: A 3.5 GeV Synchrotron Light Source For China. In: Leonid Rivkin ed. Proceeding of EPAC 2004. Lucerne: EPS-AG, 2004. 2365—2367
- 2 Carlo J. Bocchetta. A Full Energy Injector For ELETTRA. In: M. Regler ed. Proceeding of EPAC 2000. Vienna: EPS-AG, 2000. 607—609
- 3 Edwards D A, Syphers M J. An Introduction to the Physics of High Energy Accelerators. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1993. 110—115
- 4 Le Duff J. Longitudinal Beam Dynamics In Circular Accelerators. In: S. Turner. CAS, Fifth General Accelerator Physics Course, I. Geneva: CERN. 1994. 289—311
- 5 Walker R P. Radiation Damping. In: S. Turner. CAS, Fifth General Accelerator Physics Course, I. Geneva: CERN. 1994. 461—480
- 6 Walker R P. Quantum Excitation and Equilibrium Beam Properties. In: S. Turner. CAS, Fifth General Accelerator Physics Course, I. Geneva: CERN. 1994. 481—498

## Analysis of the Ramping Process of the SSRF Booster<sup>\*</sup>

LI Hao-Hu<sup>1)</sup> LIU Gui-Min

(Shanghai Institute of Applied Physics, CAS, Shanghai 201800, China)

**Abstract** The booster of the Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF) is designed to accelerate the electron beam from 100MeV to 3.5GeV in 250ms, with a repetition frequency of 2Hz. Its circumference is 180m with a periodicity of 28 FODO cell. Energy ramping in the booster synchrotron is the one of the important processes that will affect the beam parameters, the time structure and the injection efficiency of the storage ring. In this paper, the ramping process of the SSRF booster is described in detail, such as ramping curves of magnets and RF voltage, eddy current effect and chromaticity correction, phase space evolution during acceleration, etc.

**Key words** SSRF, booster, ramping process

---

<sup>\*</sup>Supported by National Key Scientific Project “Shanghai Synchrotron Radiation Facility”

1) E-mail: lihaohu@sinap.ac.cn