

电子储存环中离子俘获不稳定性和 高频清洗的模拟*

李永军 金玉明 李为民 孙葆根 殷立新 刘祖平
刁操政 刘功发 周安奇 李京一 于象坤 何晓业

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230029)

摘要 介绍了用强-弱模型对电子储存环中离子俘获不稳定性和高频清洗机制进行模拟研究的结果. 模拟结果可合理地解释在合肥光源(HLS)储存环上观察到的现象.

关键词 离子俘获不稳定性 强-弱模型 高频清洗

1 引言

电子储存环中,束流电子与残余气体相互作用使气体分子电离成正离子和自由电子. 其中带正电的离子,由于受到束团的周期性吸引力,在束流轨道附近作稳定或不稳定的振荡. 当离子在束流轨道附近积累达到一定浓度时,束流和离子的相干振荡会引起束流不稳定性,因此需要用离子清洗手段来抑制这种不稳定性的发生. 在合肥光源(HLS)储存环的机器研究和运行中都观察到由于离子俘获而引起的束流在垂直方向上的不稳定性和工作点的漂移,环中安装的高频和直流两种清洗电极都可以有效地克服离子俘获效应. 文献[1]对直流清洗方法作了较详细的研究. 本文介绍了用强-弱模型对离子俘获不稳定性 and 高频清洗 (beam shaking) 机制进行的模拟研究. 模拟结果可合理地解释在 HLS 储存环上观察到的现象.

考虑束流电子和离子的横向运动. 忽略磁场对离子的作用和离子的纵向运动,参照 K Ohmi 的研究方法^[2],电子和离子的运动方程可以写成

$$\frac{d^2 \mathbf{x}_e}{ds^2} + K(s) \mathbf{x}_e = \frac{2r_e}{\gamma} \sum_{j=1}^{N_i} \mathbf{F}_C(\mathbf{x}_e - \mathbf{x}_{ij}) + f(s) \cos \omega t, \quad (1)$$

$$\frac{d^2 \mathbf{x}_i}{dt^2} = \frac{2r_p c^2}{A} \sum_{j=1}^{N_e} \mathbf{F}_C(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{e,j}), \quad (2)$$

式(1),(2)分别包含 N_e 和 N_i 个方程, N_e 和 N_i 为束流电子和离子的数目, \mathbf{x}_e 和 \mathbf{x}_i 为分

1999-07-06 收稿, 1999-10-15 收修改稿

* 国家九五重大科学工程项目资助

别为它们的横向位置矢量, $K(s)$ 为储存环的聚焦参数, r_e 和 r_p 分别为电子和质子的经典半径, γ 为束流电子的相对能量, A 为离子的质量数, 在 HLS 储存环中我们仅考虑 CO^+ , 即 $A=28$, c 为光速, $f(s)\cos\omega t$ 为作用在束流上的周期性外力, $F_C(\mathbf{x})$ 为两维空间的库仑力

$$F_C(\mathbf{x}) = -\frac{\mathbf{x}}{|\mathbf{x}|^2} \delta(s). \quad (3)$$

通过后面的模拟结果可发现, 储存环中离子的积累仅能达到很低的浓度, 因此在离子运动方程组(2)中, 忽略了离子之间的相互库仑作用.

原则上, 通过解(1)和(2)的运动方程组即可理解离子俘获不稳定性. 但解出这个 $N_e + N_i$ 运动方程是不实际的. 设束流为连续流时, 环中各点的离子云与通过该点时的束团在横向是具有同样尺寸的高斯分布, 且两者之间的相互作用是线性的, 如果仅考虑束流和离子质心运动, 则可以根据线性理论计算这种不稳定性发生的阈值和增长率^[2].

对于 HLS 的聚束束流 (bunched beam), 可根据 Baconnier 使用的线性模型^[3] 和有关环参数计算离子的振荡频率. 有关 HLS 的一些参数和计算结果列在表 1 中.

表 1 HLS 储存环的一些主要参数

周长(m)	66.1308	能量(MeV)	800
回旋频率(MHz)	4.533	谐波数	45
振荡数(ν_y)	2.58	束流发射度(nm. rad)	133
流强(mA)	100	横向耦合系数	0.1
束团尺寸 σ_x/σ_y (mm)	1.0/0.3	离子振荡频率(MHz)	1.16

2 强-弱模型

在线性理论处理过程中, 我们假设环中各处离子云与通过此处的束团具有相同横向尺寸, 且两者之间的相互作用是线性的. 这种过分简化的模型显然是不能自洽的. 同时当组成束团和离子云的大量粒子的振荡频率有展宽时, 就会发生 Landau 阻尼, 从而使不稳定性发生的阈值和增长率发生变化. 因此, SLAC 的 Raubenheimer 和 Zimmermann 首先用强-强模型来研究快束流离子不稳定性 (fast beam-ion instability)^[4,5], 而 KEK 的 Ohmi 则用强-弱模型来研究了离子俘获不稳定性^[2]和快束流离子不稳定性^[2].

所谓强-弱模型作以下假设: 束流是刚性, 它的质心的运动状态受到离子作用而变化, 而束流的高斯分布不受离子的影响; 离子云则用一定数目的宏粒子 (macroparticle) 来描述, 整个离子云的宏观状态由所有的宏粒子集体行为来描述; 束流与离子之间的相互作用为两维空间库仑力. 于是, 运动方程组(1)和(2)可写成

$$\frac{d^2 \bar{\mathbf{x}}_e}{ds^2} + K(s) \bar{\mathbf{x}}_e = \frac{2r_e}{\gamma} \sum_{j=1}^{N_i} F_C(\bar{\mathbf{x}}_e - \mathbf{x}_{ij}) + f(s) \cos \omega t, \quad (4)$$

$$\frac{d^2 \mathbf{x}_i}{dt^2} = \frac{2N_e r_p c^2}{A} F_C(\mathbf{x}_i - \bar{\mathbf{x}}_e), \quad (5)$$

这里的 N_i 和 N_e 分别为环中某处离子数目和一个束团中的电子数目, \bar{x}_e 为束团质心位置矢量, $F_G(\mathbf{x})$ 为处于电荷为高斯分布的电场中带电粒子受到的力^[2]

$$F_{G,x} - iF_{G,y} = -i \left(\frac{\pi}{2(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)} \right)^{1/2} \times \left[w \left(\frac{x + iy}{\sqrt{2(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)}} \right) - \exp \left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2} \right) w \left(\frac{\frac{x\sigma_y}{\sigma_x} + i \frac{y\sigma_x}{\sigma_y}}{\sqrt{2(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)}} \right) \right] \delta(s). \quad (6)$$

3 离子俘获不稳定性的模拟

在 HLS 环中不同的 β 函数处, 沿无扰动的束流轨道上设置有 16 个电离点 (ionization point); 每个点处放置 1000 个初始速度为零、初始位置分布为高斯分布的宏粒子, 该分布的尺寸与此处的束团横截面相同; 束团和离子都采用两维的片状结构模型; 束团在每个电离点处受到该处所有宏粒子冲量作用和, 同时该处的所有的宏粒子在束团经过时也受到束团的冲量作用; 束团在两个电离点之间运动由环聚焦结构 (即 lattice) 来描述. 作模拟跟踪时, 为突出束-离相互作用的非线性现象, 没有考虑环中非线性元件 (如六极铁) 的影响. 所有束团相对于理想轨道的初始偏离为零, 不稳定性由高斯分布的离子云的质心位置的统计涨落引起.

在 HLS 储存环能量为 800MeV、45 个束团、流强为 100mA 的条件下, 对各种不同中性化系数的情况进行了跟踪模拟研究. 由跟踪结果发现, 束流不稳定性在竖直方向比水平方向要严重的多, 所以下文的各种束流参数都是指竖直方向而言. 图 1 为中性化系数分别为 5%, 2%, 1%, 0.5% 和 0.2% 时, 束团最大振荡振幅随跟踪圈数的变化. 由此可见, 在我们设定的情况下, 当环中的中性化系数大于 0.5%, 就会发生离子俘获不稳定性. 因此, HLS 储存环离子俘获不稳定性发生的阈值为中性化系数在 0.005 以下 (如考虑到各种阻尼机制, 这个阈值会有一些的增加).

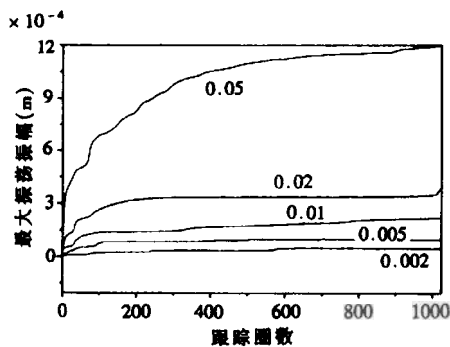


图 1 不同中性化系数时, 束团的最大振荡振幅随跟踪圈数的变化

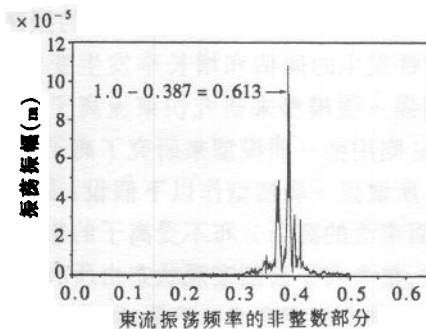


图 2 中性化系数为 1% 时, 束流的 FFT 频谱

图 2 为中性化系数为 1% 时, 束流的 FFT 频谱, 可清楚地看到离子俘获会造成束流电

子横向振荡的频率移动和频率展宽. 图3为一个宏粒子 FFT 频谱中,发现离子振荡的频谱中包含有束流 betatron 振荡的成份,而图2的束流频谱中则不包含有离子振荡的成份. 图4给出了束流的频移(Tune shift)随中性化系数的变化.

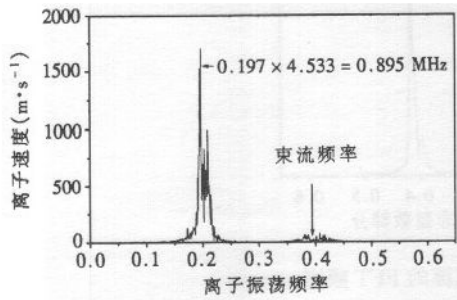


图3 中性化系数为1%时,宏粒子的 FFT 频谱

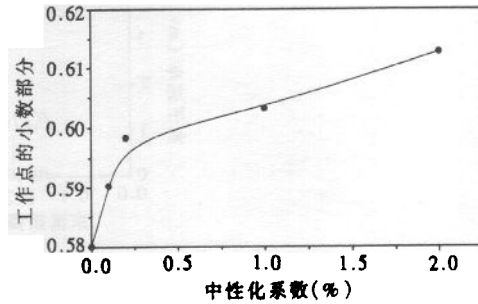


图4 束流的频移随中性化系数的变化

离子云在横向已不再是高斯分布,而与环中各处的 β 函数有关,且和环具有相同的周期结构. 通过跟踪发现,即使在没有任何清洗的情况下,环中的中性化系数不会超过一定的值,否则束流和离子相互作用会使离子的振荡振幅增加而丢失(碰壁).

由于储存环中的离子是不断产生的,离子的产生率与真空压强有关. 在 HLS 环中,当束流能量为 800MeV, CO^+ 的电离截面为 $1.6 \times 10^{-22} \text{m}^2$, 离子的产生率为

$$\lambda(m^{-1}) = 0.0386NP_{\text{CO}}(\text{Pa}), \tag{7}$$

N 为束流电子的总数. 程序采用有束流经过电离点时,每个宏粒子包含的离子数目新增一部分,新增的宏粒子数目由(7)式给出. 图5为不同压强下,束流的最大振荡振幅随跟踪圈数的变化趋势. 由此可见,当真空恶化时,离子俘获不稳定性会变得非常严重. 此时,离子清洗是保证机器正常运行的必要手段,这一点在 HLS 环的运行过程是得到证实的.

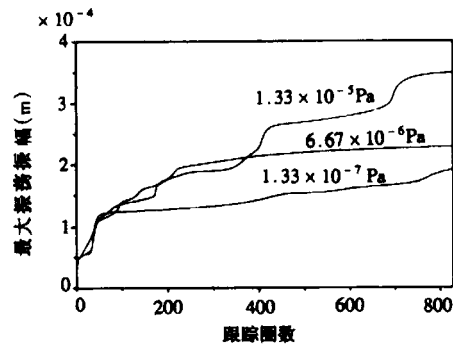


图5 不同压强时束流的最大振荡振幅随跟踪圈数的变化过程

在模拟时,将整个束团看作是刚性的,并认为各个束团中的电子数目是相同的,这样就忽略了束流的朗道阻尼效应;同时,辐射阻尼也被忽略. 因此模拟计算可能会较高地估算了不稳定性的增长率.

4 高频清洗机制的模拟

从束流和离子的相干运动方程组(1)和(2),以及离子振荡频谱中包含有束流 betatron 振荡的成份模拟结果,很自然地想到:如果用一个与离子振荡频率一致的频率去激励束流,激励信号通过束流作用到离子上,使离子发生共振而丢失,从而达到清洗离子的目的.

在模拟跟踪中,当所有束团在通过环中某点时,受到一个频率与环中一些地方离子振

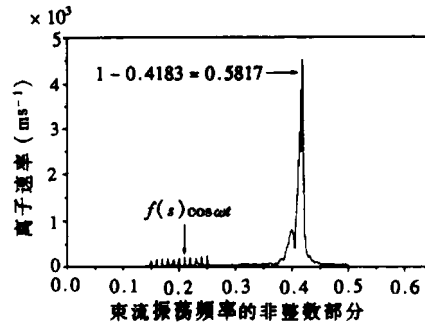


图 6 经高频清洗后束流的 FFT 频谱

荡频率相同的一个高频冲量的作用. 通过跟踪束流和离子的运动,我们发现:

- 1) 通过高频清洗,束流的频谱变得干净,频率漂移和频率展宽都变小;
- 2) 振荡频率与外加信号频率一致的离子被清洗,其它的离子则没有被清洗;
- 3) 由于离子的运动是非线性振荡,离子的振荡频率会随振幅而变化. 因此使用点频信号时,离子清洗效果不明显,使用具有一定频宽清洗信号,清洗效果明显;
- 4) 在环中一处加载的清洗信号通过束流传递到环中各处,使全环各处振荡频率与之一致的离子由于共振而被有效地清洗.

图 6 为经清洗以后束流的 FFT 频谱.

5 结论

使用强-弱模型模拟研究了 HLS 环离子俘获不稳定性和高频清洗机制. 模拟结果与在机器运行和研究中观察到的现象是一致的,这说明了采用的模型是合理的. 同时模拟结果对于理解离子俘获不稳定性产生的过程、一些重要参数的量级概念(如中性化系数)和离子清洗机制,有着重要意义. 同时,为缩短计算时间采用的一些近似模型,如离子产生、忽略束流 Landau 阻尼和辐射阻尼,都会给模拟结果带来的误差尚须进一步研究.

参考文献(References)

- 1 LI Yongjun et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 2000, 24:439
(李永军等. 高能物理与核物理, 2000, 24:439)
- 2 Ohmi K. Phys. Rev., 1997, E55:7750
- 3 Baconnier Y. Neutralization of Accelerator Beams by Ionization of Residual Gas. In: P. Bryant, S. Turner. CERN 85-19, Vol. I. Geneva: 1985. 267
- 4 Raubenheimer T O, Zimmermann F. Phys. Rev., 1995, E52:5487
- 5 Stupakov G V, Zimmermann F, Raubenheimer T O. Phys. Rev., 1995, E52:5499

Simulation of Ion-trapping Instability and Beam Shaking in an Electron Storage Ring

LI YongJun JIN YuMing LI WeiMin SUN BaoGen YIN LiXin LIU ZuPing
DIAO CaoZheng LIU GongFa ZHOU AnQi LI JingYi YU XiangKun HE XiaoYe
(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

Abstract This paper introduces the simulation results of ion-trapping instability and beam shaking mechanism using strong-weak model in an electron storage ring. These results can reasonably explain some phenomena observed in the HLS storage ring.

Key words ion-trapping instability, strong-weak model, beam shaking

Received 6 July 1999, Revised 15 October 1999

* Supported by National 9th Five Important Project on Science