

文章编号: 1001- 4322(2000)05- 0643- 04

电子储存环中离子俘获不稳定性的强-强模型模拟

李永军, 李国民, 金玉明, 刁操正, 刘功发, 李京韦,
周安奇, 于象坤, 何晓业, 刘祖平

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 合肥市6022信箱, 230029)

摘 要: 在电子储存环中, 由于被束流势阱俘获的离子会引起束流不稳定性, 研究这种不稳定性的产生机制和抑制方法对提高机器的性能有重要理论和现实意义。介绍了用强-强模型对合肥光源电子储存环中离子俘获不稳定性产生机制进行的模拟研究。模拟结果可用于理解在合肥光源电子储存环上观察到的离子俘获现象。

关键词: 电子储存环 离子俘获不稳定性 强-强模型

中图分类号: TL 594 **文献标识码:** A

电子储存环中, 束流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流势阱的作用, 在质量大于临界质量的条件下, 被束流所俘获, 在束流轨道附近作稳定振荡。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的不稳定性。根据离子被俘获的时间不同, 这种束流不稳定性可分为离子俘获不稳定性^[1] (ion-trapping instability) 和快束流离子不稳定性^[2,3] (fast beam-ion instability)。对于类似合肥光源(HLS)的小尺寸储存环, 即使在部分填充模式的情况下, 离子仍不能从束流势阱中逃逸, 因此离子的多圈俘获是引发不稳定性的主要因素。研究这种不稳定性的产生机制和抑制方法对提高机器的性能有重要理论和现实意义。在线性理论处理中, 通常假设环中各处离子云是与通过此处的束团具有相同横向尺寸的刚性束, 且两者之间的相互作用是线性的。由于束团和离子云由大量的粒子所组成, 这些粒子的初始位置各不相同, 因而相互作用也不同, 这使得电子和离子在空间的分布不仅取决于初始分布, 还与两者的相互作用有关。因此, “相同尺寸的刚性束”这种过分简化的束流和离子云模型显然使得线性理论不能自洽。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, Raubenheimer和Zimmernann首先用强-强模型来研究快束流离子不稳定性^[2], 而KEK的Ohmi则用强-弱模型来研究了离子俘获不稳定性^[4]和快束流离子不稳定性^[4]。作者也曾用强-弱模型来研究HLS储存环的离子俘获不稳定性^[5]。本文将介绍用强-强模型来研究HLS储存环离子俘获不稳定性的方法和一些结果。

1 运动方程

首先考虑束流电子和离子的运动方程。相对论性束流电子除了受到外磁场的作用, 还受到经过处的离子的库仑力的作用。一般而言, 束流电子的纵向速度非常接近光速, 离子的纵向速度很小。因此, 束流电子和经过处的离子的库仑作用集中在垂直于束流运动方向的平面上, 同时忽略外磁场对离子的作用。因此, 束流电子和离子的运动方程可以写成

$$\frac{d^2x_e}{ds^2} + K(s)x_e = \frac{2r_e}{\gamma} \sum_{j=1}^{N_i} F_C(x_e - x_{i,j}) \quad (1)$$

$$\frac{d^2x_i}{dt^2} = \frac{2r_p c^2}{A} \sum_{j=1}^{N_e} F_C(x_e - x_{e,j}) \quad (2)$$

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; x_e 和 x_i 分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; $F_c()$ 为两维空间的库仑力, 可表示为

$$F_c(x) = - \frac{x}{|x|^3} \delta(s) \quad (3)$$

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。

离子俘获不稳定性可以通过解方程组(1)和(2)来理解。事实上, 由于束流电子和离子的数目 N_e 和 N_i 都十分巨大, 因此完全解出它们是非常困难的。如果作一些假设, 如连续流、相同尺寸的刚性束、线性的束离作用等, 可以得到有关离子俘获不稳定性的线性理论。显然, 线性理论所用的模型是非常粗糙的, 甚至是不自治的。

2 强-强宏粒子模型

鉴于线性理论中束离模型的不能自治和束-束相互作用的研究方法, Raubenheimer 和 Zimmerman 用强-强模型来研究快束流离子不稳定性, Ohmi 用强-弱模型研究了离子俘获不稳定性 and 快束流离子不稳定性。这里, 我们用强-强模型来研究 HLS 储存环的离子俘获不稳定性。

所谓强-强模型就是: (1) 束流和离子云用一定数目的宏粒子 (macroparticle) 来描述, 束流和离子云的宏观状态由所有的宏粒子集体行为来描述; (2) 束流电子与离子之间的相互作用为两维空间库仑力。

我们用强-强模型对 HLS 储存环的离子俘获不稳定性进行了模拟研究。沿环不同的 β 函数处, 在初始无扰动的束流轨道上设置有 16 个电离点 (ionization point), 即每个周期设置 4 个点, 分别在长直线节中点和其它三个弯铁的中点; 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全同宏粒子, 宏粒子的横向分布的尺寸与此处的束团初始横截面相同; 每个束团由 225 个初始速度为零、初始位置分布为高斯分布的全同宏粒子来表述; 每个宏粒子的状态由两个方向的位置和速度来表述, 此外当宏粒子的横向位置大于一定的值 (真空室半径) 时, 该宏粒子被认为因碰壁而丢失, 用一个变量来标志它; 束团和离子云都采用两维的片状结构; 束团在经过每个电离点时受到该处所有宏粒子冲量的作用, 同时该处的所有的宏粒子在有束团经过时也受到该束团的冲量作用; 束流在两个电离点之间运动由环聚焦结构 (即 lattice) 来描述; 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; 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。

跟踪所有的束团 512 圈以便进行 FFT 分析, 因为考虑离子对束流的作用是长程的, 各个束团的行为应该是相近的, 因此只记录其中一个束团每圈经过固定的一个电离点时的位置和斜率。记录各个电离点处的所有宏粒子在束流经过 512 圈后的位置, 以分析离子在空间的分布。记录每个电离点处的离子云的质心在束流每圈经过时的位置, 对离子运动作 FFT 分析。

3 模拟结果

用上述模拟方法在能量为 80 MeV、45 个束团、流强为 100 mA 的条件下, 对 HLS 储存环在各种不同中性化系数下的离子俘获不稳定性进行了跟踪模拟研究。图 1 为中性化系数为 2% 时, 一个束团在经过一个电离点处的振荡振幅随跟踪圈数的变化。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得多, 所以下文的各种束流参数都是相对竖直方向而言。图 2 为中性化系数分别为 5%, 4%, 3%, 2%, 1% 和 0.5% 时, 一个束团在经过一个电离点处的最大振荡振幅随跟踪圈数的变化。

图 3 为中性化系数为 2% 时, 一个束团横向振荡的 FFT 频谱。由此可见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 (HLS 储存环的设计值为 2.58)。图 4 为一个电离点处离子云质心横向振荡的 FFT 频谱。从中可见, 由于束流和离子的相干运动, 在离子质心运动中包含有束流振荡成份 (在这

里表现为束流振荡的共轭频率)。

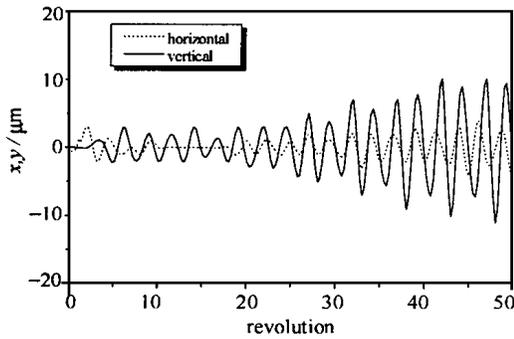


Fig 1 Transverse amplitudes of the bunch coherent motion with neutralization factor is 2%

图1 一个束团在经过一个电离点处的振荡振幅随跟踪圈数的变化(中性化系数为2%)

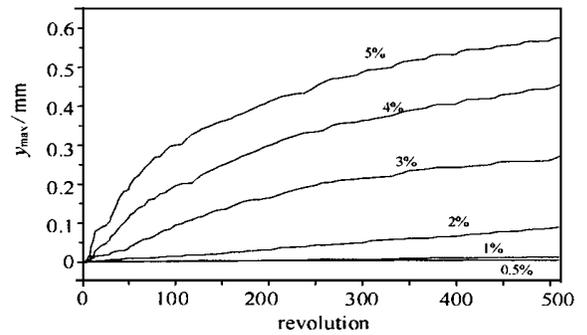


Fig 2 Maximum vertical amplitude of the bunch coherent motion for various neutralization factors

图2 不同中性化系数时,束团振荡的最大振幅随跟踪圈数的变化

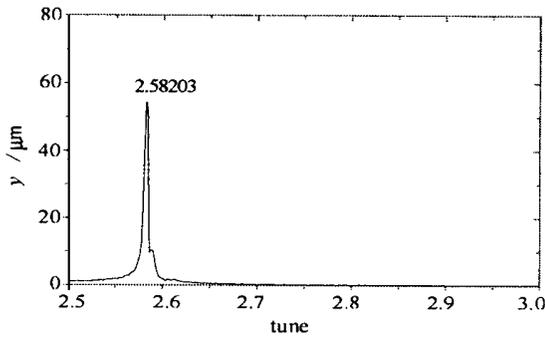


Fig 3 FFT spectrum of bunch coherent motion with neutralization factor is 2%

图3 中性化系数为2%时,一个束团横向振荡的FFT频谱

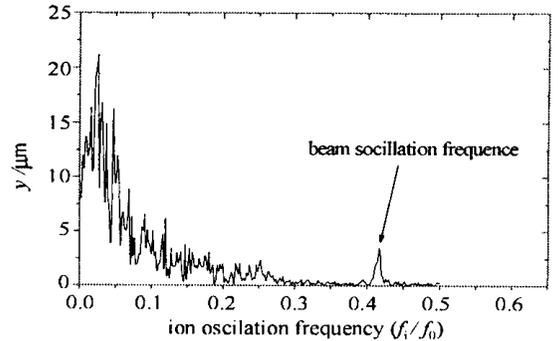


Fig 4 FFT spectrum of the ion-cloud centroid with neutralization factor is 2%

图4 中性化系数为2%时,离子云质心横向振荡的FFT频谱

4 结论

使用强-强模型模拟研究了HLS 储存环离子俘获不稳定性的产生。模拟结果可以用来理解这种不稳定性的产生机制,以及一些重要的参数如中性化系数、不稳定性的增长率数量级的概念有着重要意义。同时为如何抑制这种不稳定性提供理论指导。

将本文结果和强-弱模型模拟的结果^[5]比较可以发现,由于强-强模型的使用,因而考虑了束流电子的振荡频率分散引起的朗道阻尼(L andau damping)对不稳定性的抑制,从而使得不稳定性的增长率为减小。

由于储存环中离子是不断产生的,因此这种静态离子模型是离子数目达到动态平衡时的情况;如果研究离子不断产生过程中的不稳定性,应考虑离子产生率与真空压强的关系。由于在模拟研究中忽略了束流辐射阻尼,会对增长率有过高的估计,由此引入的误差尚须进一步研究。

参考文献:

[1] Baconnier Y. Neutralization of accelerator beams by ionization of residual gas[A]. CAS Proceedings, CERN 8519[C], Geneva: 1985 267.

[2] Raubenheimer T O, Zimmernann F. Fast beam-ion instability. I Linear theory and simulation[J]. *Phys Rev E*, 1995, 52: 5487.

[3] Stupakov G V, Zimmernann F, Raubenheimer T O. Fast beam-ion instability. II Effect of ion decoherence[J]. *Phys Rev E*, 1995, 52: 5499.



- [4] Ohmi K. Numerical study for the two-beam instability due to ions in electron-storage ring[J]. *Phys Rev E*, 1997, **55**: 7750
- [5] 李永军, 金玉明, 李为民, 等. 电子储存环中离子俘获不稳定性和高频清洗的模拟[J]. *高能物理与核物理* 2000, **12**(9).

Simulation of the Ion-trapping Instability Using Strong-strong Model in an Electron Storage Ring

LI Yong-jun, LIW eim in, JIN Yun ing, DIAO Cao-zheng, LIU Gong-fa,

LI Jing-yi, ZHOU An-qi, YU Xiang-kun, HE Xiao-ye, LIU Zu-ping

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China,
P. O. Box 6022, Hefei, 230029, China)

ABSTRACT: The ions trapped by beam potential well can cause beam instability in electron storage rings. It is important to study the mechanism and suppress method of the instability to increase the perform level of machine. In this paper, the simulation methods and results of ion-trapping instability using strong-strong model were introduced for the HLS ring. These results can be used to understand the phenomena observed in the HLS ring.

KEY WORDS: electron storage ring; ion-trapping instability; strong-strong model