

HIRFL-CSR 频谱现象：中心频率突变分析研究

李 朋^{1,2} 原有进¹ 冒立军¹ 夏佳文¹ 殷达钰^{1,2}

1 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2 (中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 HIRFL-CSR 调试过程中, 利用频谱分析仪实时监测束流, 根据其上测的数据进行相关参数调整, 改善束流的品质。本文对分析仪上观测到的现象—束流的中心频率发生突变进行了研究, 主要就电子束的高压不稳定性 and 中性化因子的突变做了理论分析, 并进行了相关的模拟计算, 根据模拟结果初步断定该现象的出现由电子束的中性化因子导致。

关键词 频谱分析仪, 电子冷却, 动量分散, 中性化因子

中图分类号 O572.21*1

利用频谱仪分析肖特基噪声信号观测束流的纵向和横向的运动, 横向的信号分析可测量束流的工作点、色品和横向的发射度; 纵向的信号分析可测量束流的动量分散, 得到实际的中心频率, 进而算得束流的能量^[1]。HIRFL-CSR(Heavy Ion Research Facility in Lanzhou, Cooler Storage Ring)调试过程中, 在频谱分析仪上观测到了图 1 所示的现象: 束流的中心频率发生了突变, 需分析其发生原理, 以改善束流的累积效果, 表 1 为调试时的基本参数。

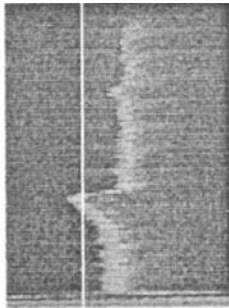


图 1 反常的频谱现象

Fig.1 The unusual spectral phenomenon.

表 1 束流参数

Table 1 Parameters of beam

参数 Parameters	数值 Values
离子 Ions	Ar
质量数和电荷数 Mass and charge	36 and 18
束流能量 Energy /MeV	21.7
中心频率 Center frequency /MHz	0.395121
电子束流强 Electron current /A	0.196

1 肖特基信号理论及探测设备

1.1 肖特基信号理论

在储存环中, 一个带有电荷 Ze 的粒子在环中以频率 $f_k=1/T$ 在理想的平衡轨道上运动, 它在环上某个固定位置的束流探头上产生的信号是一个冲击函数。设 t_k 为粒子通过探针的初始时刻, 则该粒子在探针上所产生信号的傅立叶变换的表达式为:

$$I(f) = Ze f_0 \delta(0) + 2Ze f_0 \sum_{k=1}^{\infty} \delta(f - k f_0) \quad (1)$$

由式(1), 单粒子的频谱为离散的周期性线谱, 谱线间距等于回旋频率 f_0 。 $n=0$ 的谱线是信号的直流分量, 其他谱线对应于信号的各次谐波。设束流有 N 个粒子组成, 最初的相位为 φ_k , 中心频率为 f_k , 频率分散为 $f_0 \pm \Delta f/2$, 则整体束流在探针上所产生的电流是 $i_k(t)$ 的均值, 为 $I_0 = N(Ze f_0) = N i_0$, 故式(1)只剩下直流分量, 其他项因为束流方位角相位的随机分布而抵消, 但其均方根为:

$$\begin{aligned} \langle I_n^2 \rangle &= (2i_0)^2 \left(\frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \cos^2 n\varphi_k + \sin^2 n\varphi_k \right) \\ &= 2(Ze)^2 f_0^2 N \end{aligned} \quad (2)$$

由式(2), 其流强与束流的中心频率成正比, 与能量相关, 这为下文的分析提供了依据^[2]。

国家自然科学基金委员会重点项目(10635090)资助

第一作者: 李朋, 男, 1984 年出生, 2006 年毕业于贵州大学, 现为硕博连读研究生, 主要研究方向为加速器物理与技术, 控制技术

收稿日期: 2008-10-13, 修回日期: 2008-12-19

1.2 Schottky 探针

用于测量束流回旋频率的探针为 BPM(束流位置探测器),在 HIRFL-CSR 上采用容式三角型 BPM,其探测到的信号经前置放大器放大后输出,用 Tektronix 公司的 RSA3303A 实时频谱分析仪观测。前置放大器采用 P/N AM-4A-000110-11030N 型宽带放大器,带宽为 DC-1 GHz,噪声系数 1.7 μV,放大增益 52 dB;频谱仪 RSA3303A 最高测量频率为 3 GHz。

2 频谱现象—中心频率突变原因分析

2.1 电子束的高压电源不稳定

电子冷却要求电子束的平均速度与离子束的平均速度相等,以获得强的冷却率,若电子束的能量发生突变,离子束的能量——即中心频率——就会发生变化。

电子束的能量主要取决于电子冷却装置的阴极电位,阴极高压电源的调制会引起电子束的纵向不稳定。设电子电流为 I_e ,电子枪阳极对阴极的电位为 U_{ac} ,电源的不稳定会引起电子电流的相对变化,即: $\delta I_e/I_e = 3\delta U_{ac}/(2U_{ac})$ 。则由电源不稳定所引起的电子能量的变化为:

$$\delta E = \frac{eI_e}{2\pi\epsilon_0 c\beta} \frac{3}{2} \frac{\delta U_{ac}}{U_{ac}} \left[\frac{1}{2} + \ln\left(\frac{r_d}{r_b}\right) \right]$$

其中, r_d 和 r_b 分别为冷却段漂移管的半径和电子束的半径^[3]。

根据上述分析,测量了电子冷却装置的阴极电压。图 2 是 2007 年 5 月 1 日 7 点 40 分采集的数据,1 s 采一次: Max: -11.8629; Min: -11.8662; (Max-Min)/Ave=2.7×10⁻⁴。图 3 为次年 6 月 5 日采集的数据,0.1 s 采一次: Max: -3.959; Min: -3.9595; (Max-Min)/Ave=1.2×10⁻⁴。

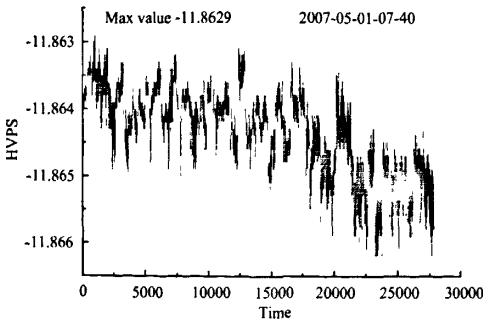


图 2 高压数据(2007-05-01)
Fig.2 HVPS data on May 1, 2007.

由图(2)、(3),电源虽有一定波动,但 (Max-Min)/Ave 都在允许的范围之内,不会造成中心频率的突变。倘若再次出现图 1 的现象,我们将对电子束的高压电源数据多次采集,判断其稳定性。

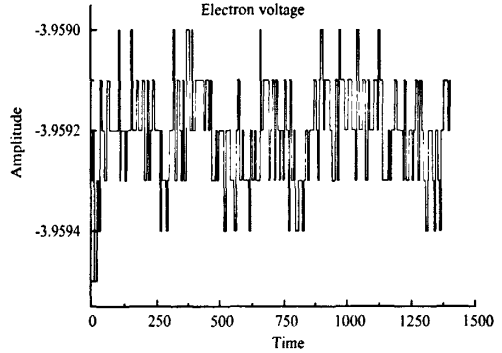


图 3 高压数据(2008-06-05)
Fig.3 HVPS data on June 5, 2008.

2.2 电子束的中性化因子的影响

首先介绍中性化因子,电子束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俘获,在束流轨道附近作稳定振荡,平均的中性化因子定义为 $\eta = Zn/n_e$, n_e 为电子束密度, n_i 为俘获离子密度^[4]。

电子冷却过程中,增大电子束流强可减少冷却时间,提高冷却效率,但当其流强达到一定程度后,空间电荷效应就会非常明显,反而影响冷却率,空间电荷效应的电荷势为式(3):

$$U_{sp}(r) = -\frac{I_e}{4\pi\epsilon_0 c\beta} \left[1 + 2\ln\left(\frac{b}{a}\right) - \left(\frac{r}{a}\right)^2 \right] (1 - \eta) \quad (3)$$

由式(3),空间电荷效应随着电子束流强增大,进而引起更大的动量分散,但由于中性化因子的存在,能降低空间电荷效应的影响。

就处于中心的粒子模型推导中心频率随流强的变化。电子束的能量为:

$$E_c = (\gamma - 1)m_e c^2 = e(U_c + U_{sp}) = \frac{1}{2} m_e v_e^2 \quad (4)$$

其中, U_c 为电子枪的阴极电压, U_{sp} 为空间电荷效应产生的电势^[5]。

电子和离子的速度匹配达到平衡的频率公式为:

$$f_0 = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{2}{m_e} e(U_c + U_{\text{sp}}(r=0))} \quad (5)$$

$$= \frac{1}{L} \sqrt{\frac{2}{m_e} e(U_c - \frac{I_c}{4\pi\epsilon_0 c \beta} [1 + 2\ln(\frac{b}{a})](1-\eta))}$$

可见中心频率随流强的增大而减小,但是不同的中性化因子引起的改变不同^[6]。图4显示了中心频率随流强的变化情况(圆点线 $\eta=0.96$, 方点线 $\eta=0.4$)。

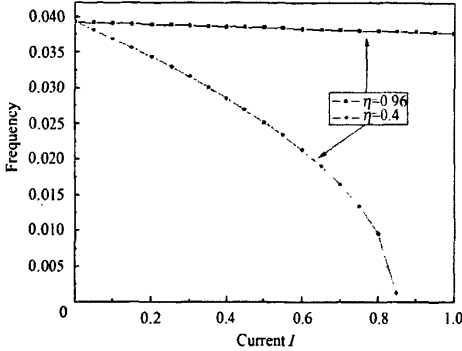


图4 中心频率随不同的中性化因子变化

Fig.4 Frequency change with different neutralization factor.

因此,冷却过程中,如中性化因子突然变化,电子束能量就可能发生突变,导致束流的回旋频率发生变化,出现频谱分析仪上如图1现象。

3 模拟计算

根据上述理论分析,对中性化因子的突变过程进行了模拟。采用单粒子模型,只模拟其冷却段后动量分散的变化,将环中的其他部分视为直线段。在冷却过程中,突然改变中性化因子,观察动量分散的变化。设定环和电子束的参数,设最初的动量分散为 $\Delta P/P_0$, 计算下式

$$\left(\frac{\Delta P}{P}\right)_t = \left(\frac{\Delta P}{P}\right)_0 - \frac{d}{ds} \left(\frac{\Delta P}{P}\right) + \left(\frac{\Delta P}{P}\right)_n$$

其中, $\frac{d}{ds} \left(\frac{\Delta P}{P}\right) = \frac{F_n}{AM_e c^2 \beta^2 \gamma}$ 为电子冷却力作用分

量, $\left(\frac{\Delta P}{P}\right)_n = \frac{I_c e(1-\eta)}{4\pi\epsilon_0 \beta^3 c^3 m_e \gamma} \frac{r^2}{r_0^2}$ 为空间电荷场势^[3]。

在程序中设定离子束和电子束的初始参数,进行常规计算和突变计算,两者区别在于冷却过程中中性化因子是否发生变化。

常规计算,也即中性化因子未发生变化时的动量分散的变化,结果如图5,动量分散随冷却时间的增加而减小。

进行突变计算时,让中性化因子从0.96变到0.4,模拟动量分散的变化趋势。结果见图6。在中性化因子的突变过程中,动量分散也跟随发生了突变,因此初步可断定图1的现象由电子束的中性化因子所导致。

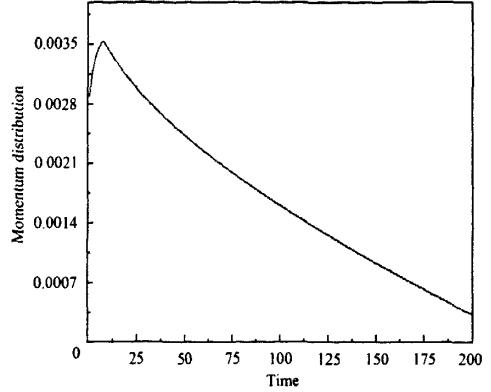


图5 中性化因子不变

Fig.5 Stable neutralization factor.

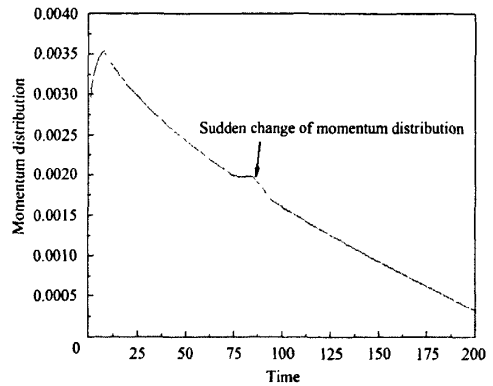


图6 中性化因子突变

Fig.6 Abrupt change of the neutralization factor.

4 总结

就频谱仪上观察到的中心频率发生了突变现象进行了理论推导和模拟计算。模拟结果表明:电子束的中性化因子的突变会导致束流的中心频率发生变化,影响束流的累积效果。在模拟计算过程中,只考虑了电子冷却过程的影响,没有加入环的其他部分的作用,这将是下一步的模拟工作计划。同时将分析导致中性化因子不稳定的原因,例如双流不稳定性等。

参考文献

- 1 Peter Forck Schottky noise analysis GSI REPORT
- 2 Tan J. Beam diagnostics with schottky noise in LEIR.

- EPAC 2006
- 3 饶仪农. HIRFL-CSR 电子冷却. 博士论文, 1997
RAO Yinong. HIRFL-CSR electron cooling. 1997
- 4 Baconnier Y. Neutralization of accelerator beams by ionization of the residual gas. CERN accelerator school
- 5 Bosser J. The experimental study of neutralized electron beams for electron cooling
- 6 Bosser J. Neutralization of the LEAR electron cooling beam: experimental results PAC95, Dallas, 2943

Spectrum phenomenon of HIRFL-CSR: sudden change of central frequency

LI Peng^{1,2} YUAN Youjin¹ MAO Lijun¹ XIA Jiawen¹ YIN Dayu^{1,2}

1(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

2(Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In commissioning the HIRFL-CSR (Cooler Storage Ring of Heavy Ion Research Facility in Lanzhou), with the spectrum analyzer monitoring the beams on-line, we measured many parameters of the beam status for improving quality of the heavy ion beams. In this paper, the sudden change of the beam center frequency is analyzed. A theoretical analysis is done mainly on instabilities of the electron voltage and the neutralization factor. Simulations were made for the problem. According to the simulation result, we can conclude that it is the instability of neutralization factor that caused the problem.

Key words Spectrum analyzer, Electron cooling, Momentum distribution, Neutralization factor

CLC O572.21*1