

束流逐圈位置测量在BEPC储存环上的初步应用*

焦毅^{1;1)} 张磊¹ 王九庆¹ 岳军会¹ 曹建社¹ 王筠华² 郑凯²

1 (中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2 (中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230029)

摘要 介绍了利用合肥同步辐射光源(HLS)的逐束团位置测量系统在北京正负电子对撞机(BEPC)上进行的逐圈位置测量实验. 在不同条件下对束流进行逐圈位置测量, 得到束流的相运动图像并观测了阻尼效应. 利用基频数值分析(NAFF)方法对逐圈位置数据分析得到高精度的束流频谱, 可以由此研究各种效应引起的工作点漂移. 实验中观测到特定工作点下由色品校正六极子引起的束流共振现象, 并对此作了合理解释.

关键词 逐圈位置测量 基频数值分析 共振

1 引言

逐圈记录的储存环中束流质心位置数据包含了束流的横向阻尼时间、束流运动在相空间的演化、束流的稳定性等诸多重要信息. NAFF(Numerical Analysis of Fundamental Frequency)方法是被广泛应用于天文学、加速器物理等领域的一种精确频谱分析, 能够得到精度很高的束流瞬时工作点信息. 两者结合可以有效地研究储存环中的束流动力学.

利用合肥同步辐射光源(HLS)研制的逐束团(Bunch-by-Bunch)位置测量系统^[1], 在北京正负电子对撞机(BEPC)上对不同条件下的束流进行逐圈位置测量, 得到了束流的相运动图像并观测了阻尼效应. 利用NAFF方法得到高精度的束流频谱, 研究了束流工作点漂移和相关的共振现象等.

2 实验平台介绍

由于BEPC与HLS采用相同的高频频率, 因而较容易将HLS的逐束团位置测量系统移植到BEPC储存环上. 文献[1]中对HLS的逐束团位置测量系统作了详细介绍, 在此不再赘述. 实验利用高频系统的200MHz信号作为ADC的采样时钟, 利用12.5Hz的水平注入冲击磁铁(KICKER)的时钟信号作为ADC的

触发信号, 可实现对BEPC储存环多束团(最多160个束团)长时间(可连续记录 10^5 圈)的逐圈位置测量. 为减小误差, 提高测量精度, 在实验中主要对单束团运行情况进行了观测与分析.

3 NAFF方法

NAFF方法通过计算其自相关函数的模, 取其中最大值对应的频率值, 作为“基频”(fundamental frequency). 只要较少的数据点, 就能得到精度较高的瞬时频率^[2]. 即使对含有随机噪声的周期信号, 也能保持较高的精度^[3].

在BEPC实验中, 为减小束流噪声的影响, 利用KICKER激励束流产生横向较大振幅振荡. 逐圈观测束流质心横向位移, 利用NAFF方法对测量结果进行分析.

图1给出了BEPC同步辐射专用模式(名义工作点为9.38/5.14)下束流水平方向逐圈位置测量及NAFF分析结果. 由图1知, 在50000—70000圈之间, 束流横向运动得到激励, 而这时对应的“基频”即为束流的横向工作点. 用NAFF方法计算得到的工作点保持了很好的稳定性, 其平均值为0.39168, 均方根偏差为0.08%.

2006-01-17 收稿

* 国家自然科学基金(10375076, 10175063)资助

1) E-mail: jiaoyi@ihep.ac.cn

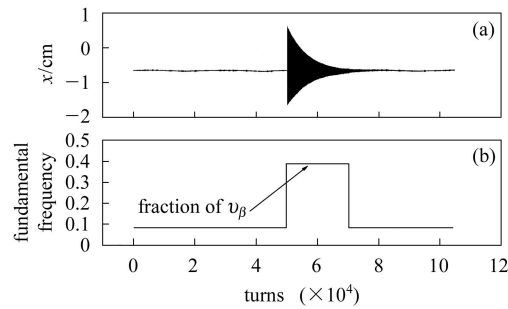


图 1 (a) 为单圈测量结果; (b) 为对每 200 圈数据进行 NAFF 分析得到的“基频”

4 横向阻尼时间与耦合阻抗测量

利用逐束团位置测量系统, 通过拟合图 1(a) 的振幅衰减曲线, 测得 BEPC 储存环 1.3 GeV 束流的横向辐射阻尼时间为 52 ms, 与理论值 85 ms 保持较好的一致^[4].

测量储存环耦合阻抗的方法之一是通过观测束流横向工作点随流强变化关系^[5], 计算得到耦合阻抗. 因为通常工作点随流强变化率仅在 0.0001—0.001/mA^[6, 7], 提高频率测量的精确度则甚为关键. BEPC 上曾采用频谱仪记录束流频谱的峰值 f_{\perp} , 但由于频谱仪测得的峰位容易因干扰而抖动, 精确测量束流横向振荡频率难度较大. 而如第 3 节所述, 利用逐束团位置测量系统及 NAFF 方法, 可获得高精度的束流频率值, 从而提高耦合阻抗测量精度. 在 BEPC 上, 将流强改变 2 mA, 利用 NAFF 得到的垂直方向工作点 ν_y 改变了 2.5×10^{-4} , 且测量重复性很好. 虽然因测量点少且束流流强探测器(DCCT)不够稳定, 尚不足以得到精确的阻抗, 但证实了在未来的 BEPC 重大改造工程(BEPC II) 储存环的耦合阻抗测量中利用此系统进行相关测量的可行性.

5 色品对相运动的影响

在 BEPC 同步辐射专用模式注入能量下, 流强 5 mA, 改变色品 (ξ_x, ξ_y) , 利用 KICKER 激励束流, 逐圈观测束流质心横向位移. 拟合振幅衰减曲线得到不同色品情况下的阻尼率. 阻尼率随色品线性增长, 其阻尼时间为 1.6—6.7 ms (对应圈数为 1900—8300 圈)^[4].

逐圈位置测量得到的是束流每圈的横向位移, 但利用储存环传输矩阵公式, 则可根据相邻两圈的水平位移值得到其中一圈的 (x, x') 信息. 图 2 给出了不同色品条件下的相图. 由于横向阻尼作用, 各相图呈现

速度不同的阻尼收缩过程. 色品为 (5, 5) 时, 阻尼率最大, 相图收缩最快; 色品为 (1, 1) 时, 相图收缩最慢, 反映了头尾阻尼效应对色品的依赖关系^[4].

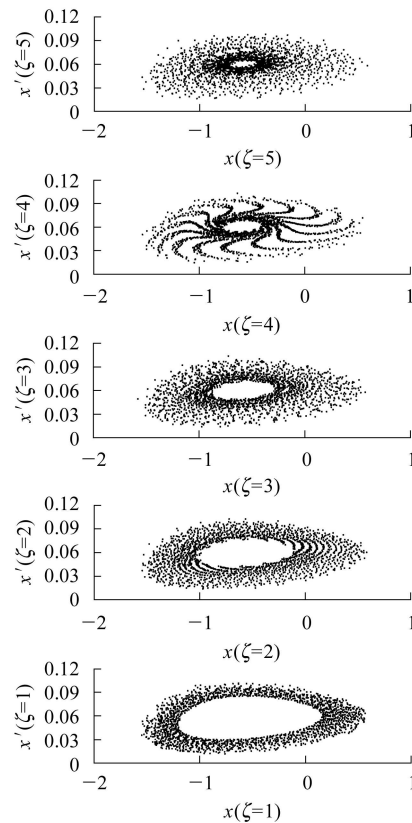


图 2 不同色品条件下相图, 对应自激励起 2000 圈束流横向自由振荡

图 2 中, 色品为 (4, 4) 时的相图与其他显著不同, 呈明显的丝状收缩状, 丝的根数为 14 条, 这与其他非线性实验^[8, 9] 的观测相似. 我们认为这是由束流工作点经历共振引起的¹⁾, 且该共振阶数应与 14 有关. 对逐圈位置测量结果进行 NAFF 分析, 如图 3 所示, 证实了我们的判断. 色品为 (4, 4) 时, 束流横向工作点恰好穿过一条 28 阶共振线 ($28\nu_{x0}=11, \nu_{x0}=0.392857\cdots$); 而其他色品条件下, 束流横向工作点不穿过该共振线. 从时域记录结果来看, 共振对阻尼过程影响很小, 表明该阶共振强度较小.

图 2 中各相图所对应的实验条件的差别, 只是六极子强度的改变. 图 3 中, 束流的横向工作点随色品变化表现为整体移动; 而依赖于振幅的工作点偏移效应较小 (图 3 中工作点随时间变化曲线与图 2 中横向振幅衰减过程相对应). 因此我们推测由于该模式水平工作点离 $28\nu_{x0}=11$ 共振线较近, 而六极子中存在非零闭轨就会引起工作点频移, 因此束流在特定色品时就恰好

1) 李浩虎. 私人通讯.

经历共振. 利用AT程序^[10]将该模式LATTICE工作点拟合在 $\nu_x=9.385$, 然后作单粒子跟踪, 包含辐射阻尼项, 调整六极子强度和粒子初始位置, 观察到了类似的相图.

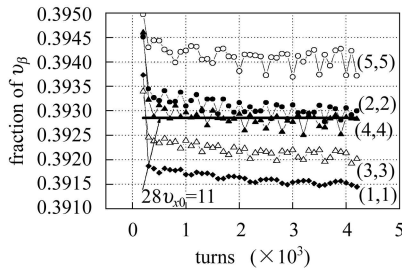


图3 不同色品条件下的NAFF结果

粗直线为共振线 $28\nu_{x0}=11$, \diamond 为色品(1, 1)时NAFF分析结果, \bullet 对应(2, 2), Δ 对应(3, 3), \blacktriangle 对应(4, 4), \circ 对应(5, 5).

为进一步验证推测, 根据实验数据, 利用(1)式对六极子处非零闭轨导致的工作点移动进行了估计, 得到工作点频移与色品的关系如图4.

$$\Delta\nu = \frac{1}{4\pi} \Delta s \sum_n k_2(n) \Delta y(n) \beta(n), \quad (1)$$

$k_2(n)$ 为第 n 块六极子的强度; $\Delta y(n)$ 为第 n 块六极子处的束流闭轨值, 用临近的BPM闭轨值估计; Δs 为各六极子的长度, 取0.2m; $\beta(n)$ 为第 n 块六极子处的包络参数.

考虑到(1)式BPM闭轨、六极铁积分长度和包络参数取值误差等影响, 图4中, 不同色品条件下由于六极子处非零闭轨导致的工作点移动曲线与实验得到的工作点平均值变化曲线, 在量级以及变化趋势上符合得很好. 我们的推测得到了证实. 图4中, 工作点移动幅度达到 $\delta\nu \approx 3.5 \times 10^{-3}$, 影响不可忽略. 在实际储存环运行中, 六极子处总会存在闭轨偏差, 这种由六极子强度改变引起的束流工作点频移无法避免. 因此, 在选择储存环工作点时, 应离各种共振线足够远, 以

保证机器的稳定运行; 而当工作点必须调试到共振线附近时, 如BEPc II为实现较高亮度而将工作点选在0.5附近, 则运行时对闭轨的调整就必须非常小心.

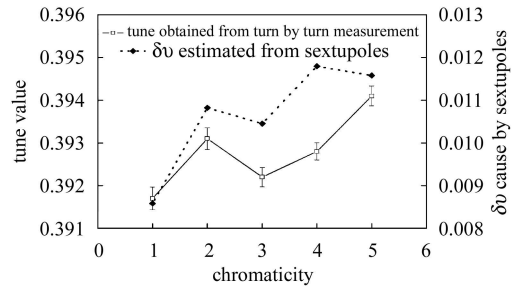


图4 工作点频移随色品变化曲线

实线为六极子处非零闭轨导致的工作点移动估计结果; 虚线为不同色品条件下工作点平均值.

6 结论

利用逐束团位置测量系统以及NAFF分析方法, 可以得到高精度的束流工作点信息, 并可应用于未来BEPc II耦合阻抗测量等研究中. 我们观测到特定色品条件下的共振现象, 并给予合理的解释. 分析发现, 六极子中非零闭轨导致工作点移动, 且幅度不可忽略, 因此在加速器设计及实际运行中, 需使工作点离共振足够远, 或严格控制闭轨, 来保证机器稳定运行. 该实验是逐圈位置测量在BEPc储存环上的初步应用, 为其应用于未来的BEPc II机器调束、运行等做了较好的准备.

作者对BEPc运行组对实验的支持、协作和与物理组同事的有益讨论, 及合肥中国科学技术大学国家同步辐射实验室提供逐束团位置测量设备表示衷心感谢.

参考文献(References)

- LIU J H. Ph. D. Thesis, USTC, 2004, 7 (in Chinese)
(刘建宏. 博士论文, 中国科学技术大学, 2004, 7)
- Laskar J. Physica, 1992, **D56**: 253—269
- Terebilo A et al. IEEE PAC, 1997, 1457
- ZHANG L et al. Measurement of Transverse Damping Time on BEPC. High Power Laser and Particle Beams. 2006, **18**(2): 273—276 (in Chinese)
- (张磊等. BEPC横向阻尼时间的测量. 强激光与粒子束. 2006, **18**(2): 273—276)
- Chao A. Physics of Collective Beam Instabilities in High Energy Accelerators. Wiley, 1993, 2, 185
- GUO Z Y et al. PAC, 1993, 3237—3239
- GUO Z Y et al. EPAC, 2000, 1127—1129
- Lee S Y. Inst. Phys. Conf. Ser., 1992, 131: 249—265
- Miyajima Tsukasa et al. PAC, 2001, 1729—1731
- Terebilo A. SLAC-PUB-8732, 2001

Application of the Turn-by-Turn Beam Position Measurements on BEPC Storage Ring*

JIAO Yi^{1;1)} ZHANG Lei¹ WANG Jiu-Qing¹ YUE Jun-Hui¹ CAO Jian-She¹
WANG Jun-Hua² ZHENG Kai²

1 (Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

2 (National Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

Abstract This paper introduces the turn-by-turn beam position measurements on BEPC storage ring, with the bunch-by-bunch system developed by HLS. The oscillation of the beam transverse position in each turn, the motion in phase space and the transverse damping time can be acquired. With the NAFF method, we could precisely analyze the beam frequency, and furthermore, could research on the beam tune shift. In particular, the resonance phenomenon induced by chromaticity sextupoles, which occurs under special work points, is observed and analyzed.

Key words turn-by-turn position measurement, NAFF method, resonance

Received 17 January 2006

* Supported by National Natural Science Foundation of China (10375076, 10175063)

1) E-mail: jiaoyi@ihep.ac.cn