

HIRFL-CSR Tune 值测量系统

赵铁成¹, 毛瑞士^{1,2}, 郑建华¹, 肖国青¹, 夏佳文¹, 原有进¹, 刘勇¹

(1. 中国科学院近代物理研究所, 甘肃兰州 730000; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)工作点(Tune)测量系统已投入调束运行。采用 FFT 测量法,用白噪声信号做激励源,经功率放大并通过同轴开关切换将激励信号加载到垂直或水平的对称极板上,通过位置检测器(BPM)采集束流信号。将 BPM 两极板感应到的束流信号分别经前置放大器放大,再通过相位相差 180°的合路器将差信号送入实时频谱仪进行傅里叶分析,从而计算出 Tune 值。本文主要介绍 HIRFL-CSR 工作点测量原理、系统构成以及测量结果。

关键词:兰州重离子加速器冷却储存环;工作点;白噪声;FFT 法

中图分类号:TL506

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2009)03-0263-03

Tune Measurement System for HIRFL-CSR

ZHAO Tie-cheng¹, MAO Rui-shi^{1,2}, ZHENG Jian-hua¹, XIAO Guo-qing¹,
XIA Jia-wen¹, YUAN You-jin¹, LIU Yong¹

(1. *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The Tune measurement system for HIRFL-CSR has been running in the commissioning of CSRm. The FFT method is used in the system. It is composed of two parts, one is a kicker system that is made up of a noise generator, an excitation kicker, a power amplifier and a switch for the excitation signal, another one is for measurement of the Tune that is made up of a beam position monitor, a 180° hybrid, a switch for the time delay of the synchronization and a real time spectrum analyzer. The principle and the results of the Tune measurement are introduced in the paper.

Key words: HIRFL-CSR; Tune; noise source; FFT method

兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)是一双储存环系统,由主环 CSRm 和实验环 CSRe 构成,测量储存环的工作点并调整到设计值是储存环调束中非常重要的工作。

工作点是储存环的一个非常重要的参数,

其定义为粒子回旋 1 圈的 Betatron 振荡数,通常称为 Tune 值。它由整数部分和分数部分组成。整数部分可通过单个校正铁激励所产生的闭轨失真来测量,分数部分则需采用工作点测量系统来完成。

工作点对束流寿命有很大影响,如果选择不当,会造成束流寿命下降甚至丢失。因此,在储存环调试过程中,测量工作点并将其调整到设计值是一重要步骤。另外,通过测量工作点还可进一步计算包络函数、色品等。

工作点的测量方法有多种,其中,最常用的是扫频激励法,还有快速傅里叶法(FFT)和锁相环法等。在 HIRFL-CSR 主环中,加速粒子的能量最高达 1 000 MeV,对应的回旋频率为 0.228~1.63 MHz。由于 CSRm 的设计工作点为 3.63/2.61,相应的边带频率变化约为 0.8 MHz,因此,本工作选用 FFT 测量法^[1-2]。

1 系统构成

HIRFL-CSR 工作点测量系统主要由激励(Kicker)和测量两部分组成(图 1),激励部分主要包括白噪声信号源(频率 10 MHz)、束流激励电极、功率放大器及激励信号控制系统,测量部分主要由束流位置检测器(BPM)、180°合路器、滤波器及实时频谱分析仪组成。采用白噪声激励,将白噪声信号经功放放大后送到两对对称的平行极板作为激励信号;从 BPM 获取束流信号,然后对信号进行合成,取出两个差信号,送入实时频谱仪进行频谱分析。Tune 值测量包括水平和垂直两个方向,因此,信号在进入频谱仪前需通过控制 1 个 RF Switch 进行信号切换,同样有一套激励信号切换控制系统,对激励信号实现延时控制及信号切换。

2 测量方法

CSRm 工作点的测量是在横向对束流加以

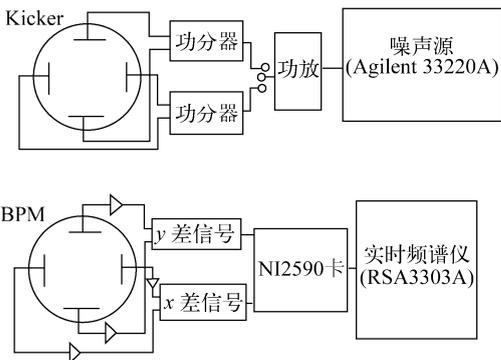


图 1 Tune 值测量系统构成框图

Fig. 1 Block diagram of Tune measurement system

激励,以激发束流的横向相干振荡;选择位置检测器进行测量。

2.1 Kicker 的结构

束流在储存环中稳定运动时,相干振荡振幅很小,测量时需对束流加以激励。选用条形电极作为 Kicker 来激发束团的横向振荡。

将信号源产生的白噪声经功率放大后分为两路,并将其中 1 路反相。将这两个极性相反的电压信号从条形电极的下游加到 1 对极板上,并将上游接 50 Ω 电阻匹配。这样,条带电流激发的磁场和条带电势激发的电场对束流产生纯 Lorentz 偏转力,从而实现束流的激励。若接在电极上游,则电场会与磁场抵消^[3]。

2.2 Pickup 的选择^[4]

选择储存环中 Betatron 振荡相对较大的 BPM 测量 Tune 值,可提高测量分辨率和测量精度。将 1 对垂直或水平 BPM 电极上感应的束流信号分别通过低噪声、宽频带、高增益前置放大器后,送入 1 个反相合路器产生差信号,然后经 RSA3303A 实时频谱仪对差信号进行频谱分析,获取 Tune 值测量所需的各种频率分量信息。

2.3 测量原理

对一完整加速过程的测量,由于频率变化范围较大,而白噪声中包含了各种频率分量,因此,选用白噪声作为激励源。当用白噪声信号对储存环中的束流进行激励时,会产生相干振荡,如果激励频率等于束流的横向 Betatron 振荡频率,则出现共振,通过测量随束流频率变化的共振频率得到工作点的小数部分,从而实现工作点测量。在 BPM 上采集到的束流脉冲信号包含各种频率分量,对获取的信号进行频谱分析,即可得到回旋频率 f_0 的谐波数 n 及相应的边带频率 f_1 ,工作点的小数部分用 q 表示,则 $q = (nf_0 - f_1)/n$ 或 $q = 1 - (nf_0 - f_1)/n$,可通过改变四极铁的电流来观察 f_1 的移动方向,从而判断 q 大于还是小于 0.5。

3 测量过程及结果

CSRm 的加速能量随频率增加而增加(以 C^{6+} 为例),图 2 所示为 7 MeV~1 GeV 的 1 个加速周期。随着加速能量的增加,工作点测量所需的激励功率也会增大,而对于注入束流,激励功率过大则会使束流很快损失,因此,用储存

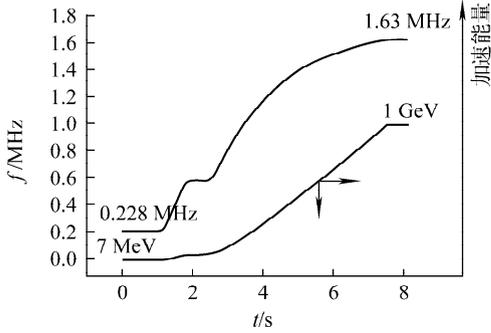


图2 7 MeV~1 GeV 的 1 个加速周期

Fig. 2 A accelerating cycle from 7 MeV to 1 GeV

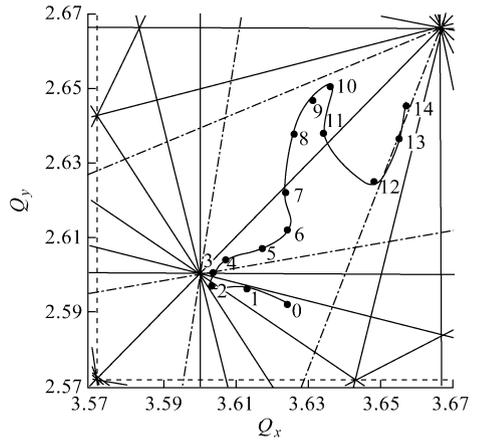


图4 加速过程中工作点的移动

Fig. 4 Tune shifts during ramping

环的同步信号作为触发信号对激励信号源进行延时控制,以确定在不同的能量时给束流 1 个不同功率的激励。

选用 Tektronix 3303A 频谱仪进行测量,因低频时噪声影响很大,为提高信噪比,通常将中心频率设置为回旋频率的 n 次谐波。然后在实时模式下,用单次外触发获取 1 个或 1 段加速过程。图 3 为束流注入时和加速过程中的边带频率与回旋频率 f_0 的 n 次谐波测量结果^[5]。图 3a 从左到右依次为 $(n-q)f_0$ 、 $(n-1+q)f_0$ 、 nf_0 、 $(n+1-q)f_0$ 、 $(n+q)f_0$,图 3b 从左到右依次为 $(n-1+q)f_0$ 、 nf_0 、 $(n+q)f_0$ 、 $(n+1)f_0$ 。图 4 示出加速过程中工作点的变化,根据测量结果对机器的设置进行调整,从而实现理想的加速。

由于对应回旋频率在各方向均有两条边带,且边带之和等于储存环的回旋频率,所以,可根据边带之和来估算系统的测量精度^[1],据此可得 CSRm 系统测量精度为 1×10^{-4} ,基本满足 HIRFL-CSR 的调束要求。利用该系统还测量了 CSRm 的包络函数,与理论值符合很好。

参考文献:

[1] 孙葆根,何多慧,高云峰,等. 合肥光源的工作点测量系统[J]. 核技术,2001, 24(1):47-51.
SUN Baogen, HE Duohui, GAO Yunfeng, et al. Tune measurement system for HLS[J]. Nuclear Techniques, 2001, 24(1): 47-51(in Chinese).

[2] 马力,曹建社,汪林. BEPC 储存环束流振荡频率测量[J]. 高能物理与核物理,2000, 24(8):770-774.
MA Li, CAO Jianshe, WANG Lin. Tune measurement in the BEPC storage ring[J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2000, 24(8): 770-774(in Chinese).

[3] 赵籍九,尹兆升. 粒子加速器技术[M]. 北京:高等教育出版社,2006: 34-37.

[4] MOHOS I, BOJOWALD J, DIETRICH J, et al. New Schottky-Pickup for COSY-J lich[C/OL]. dipac2001, PS07: 117-119. <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/d01/papers/PS07.pdf>.

[5] BASSANESE S, FERIANIS M, IAZZOURENE F. Fast Tune measurement system for the ELETTRA booster[C/OL]. dipac2003, PT25: 231-233. <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/d03/papers/PT25.pdf>.

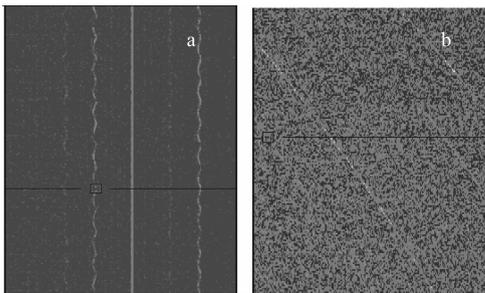


图3 束流注入时(a)和加速过程中(b)的测量结果

Fig. 3 Measurement results

of injecting beam (a) and ramping beam (b)

4 结论

本测量系统是在 HIRFL-CSR 调束过程中逐步改进完善的,目前已实现加速过程中工作点的测量,在 CSRm 调束过程中为储存环束流的存储发挥了重要作用。