

BEPC 储存环束流振荡频率测量

马力 曹建社 汪林

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 在加速器的运行和机器研究过程中,需要经常对束流振荡频率进行测量. BEPC 储存环束流振荡频率测量系统包括一台频谱仪,两个条形电极装置,两个电压放大器和一个束流振荡检测器. 本文介绍了经过改进的 BEPC 储存环束流振荡频率测量系统.

关键词 储存环 束流 振荡频率 条形电极 频谱

1 引言

束流在储存环中运动时,有时在横向和纵向会沿平衡轨道作相干振荡,束团沿环运动一圈所作振荡的周期数,通常被称为储存环的 tune 值或 Q 值. 束流的横向(水平或垂直)振荡称为自由振荡,纵向振荡则称为同步振荡或是相振荡. Q 值是储存环的重要参数之一,它的选取对束流的性能影响极大,如果 Q 值的选择不合适,就会造成束流寿命的下降甚至束流的丢失. 另外,加速器的其它一些参数,如包络函数、色品,也要借助于 Q 值测量的数据,通过计算求出. 因此,在加速器运行和机器研究过程中, Q 值测量有着十分重要的意义.

由于储存环的 Q 值不是整数,使得束团每圈通过储存环某个固定点的束流探头的位置是不一样的,这种变化的束流位置信号中包含了各种频率的分量,振荡频率分别为 f_x, f_y, f_s , 这些振荡频率与束流回旋频率 f_0 的比值,正好对应于 Q 值的小数部分. 所谓 Q 值测量就是指对小数部分的测量, Q 值的整数部分可以通过分布在环上的束流位置探头的测量结果得到.

因为每当束团经过位置探头时才有信号输出,因此,探头采集到的信号,是包含了各种频率分量的离散采样信号,采样频率即为束流的回旋频率 f_0 . 图 1 是在理想采样条件下,单束团束流位置信号在时域和频域中的波形^[1]. 图 1(a)是束流位置模拟信号 $d_a(t)$ 及其频谱函数 $D_a(f)$. 当采样脉冲很窄时,可以认为它是理想单位冲激函数,如图 1(b)所示. 束流的连续信号 $d_a(t)$ 经采样后,时域上成为离散信号 $d(t)$,频域上成为周期为 f_0 的重复信号 $D(f)$,如图 1(c)所示,在每一周期内,信号频谱相对于 $f_0/2$ 是对称的. 由此可知,

要想测量出束流信号中所有 Q 值对应的频率分量,测量系统的带宽需要且只需要 $f_0/2$. 值得指出的是,由于束流脉冲信号有一定宽度,并非理想采样信号,另外,信号传输电缆也有一定的带宽. 因此,实际测量到的束流信号中的各次谐波分量,并不是在无限宽的频域范围内都是等幅值的.

北京正负电子对撞机(BEPC)储存环可以提供正、负电子对撞束流,用于高能物理实验和兼容模式的同步辐射研究,或者提供电子束流专门用于同步辐射研究. 加速器物理学家经常进行各种机器研究以提高储存环的性能. 表 1 列出了 BEPC 储存环在对撞模式和同步辐射模式下,一些主要的与 Q 值测量相关的储存环参数.

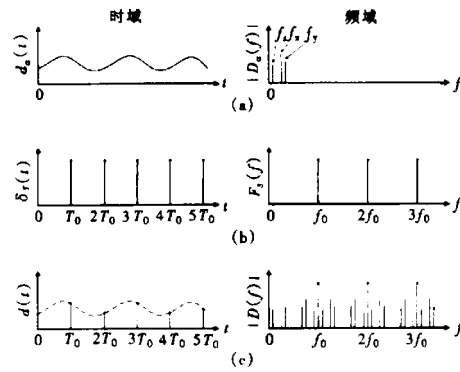


图 1 束流信号在时域和频域中的波形
(a)束流模拟信号;(b)单位冲激信号;
(c)束流离散信号.

表 1 与 Q 值测量相关的 BEPC 储存环参数

参数名称	对撞模式	同步辐射模式
每束束团个数	1	1—100
平均流强(mA)	20—40	40—100
束流能量(GeV)	1.5—2.0	2.2
回旋频率(MHz)	1.247	1.247
高频频率(MHz)	199.526	199.526
理论 tune 频率(kHz)	x	274
	y	212
	s	25
		349
		312
		15

2 系统概述

BEPC 储存环 Q 测量系统的硬件主要包括一台频谱仪、两个条形电极装置(分别用作激励电极和束流信号拾取电极)、两个低频电压放大器和一个束流振荡检测器.

BEPC 储存环自由振荡频率的测量是通过对束流施加一外部激励信号实现的,激励信号被同时送入条形电极装置的一对水平和一对垂直电极,以激发束流的横向相干振荡. 从另一个条形电极装置拾取的束流位置信号,经过振荡检测器处理后送入频谱仪,微机通过 GPIB 接口对测量过程进行控制,并从频谱仪获取测量数据. 图 2 是 BEPC 储存环自由振荡频率测量系统框图. 对于同步振荡频率的测量,唯一的差别是从频谱仪同步跟踪信号源(tracking generator)输出的激励信号,不经放大,直接送入储存环 RF 系统,对 RF 腔压的幅度进行调制,以激发束流的纵向相干振荡.

2.1 频谱仪

频谱仪是 BEPC 储存环 Q 测量系统的核心,型号为 HP3588A. 这是一台频率测量范

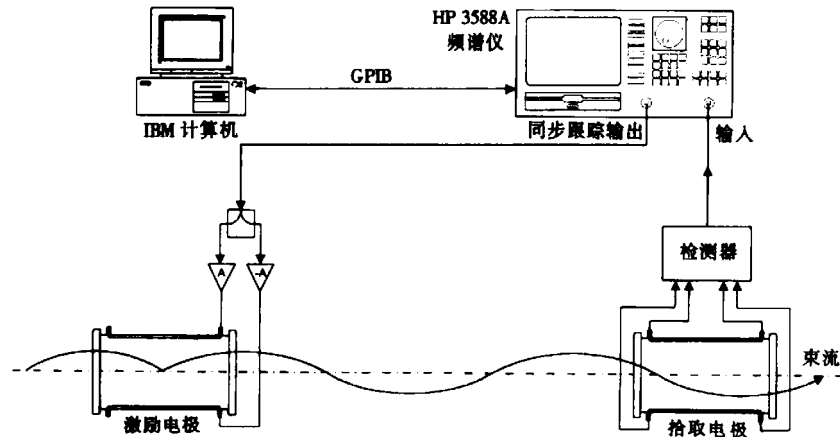


图 2 BEPC 储存环自由振荡频率测量系统框图

围为 10Hz—150MHz 的高性能频谱仪,它提供了两种测量模式,即扫频模式和窄带 zoom 模式.扫频模式采用数字滤波器,同传统的扫频频谱仪相比,在不增加幅度测量误差和降低频率测量分辨率的前提下,提高了测量速度.窄带 zoom 模式则用 FFT,进一步提高了测量速度和信号处理能力.

HP3588A 带有同步跟踪信号输出端口,信号输出幅度从 -60dBm 到 $+10\text{dBm}$ 可调. HP3588A 频谱仪内置一个 3.5 英寸软盘驱动器,仪器面板的设置参数以及测量数据均可存入软盘,也可通过 GPIB 接口与计算机进行数据交换. HP3588A 的可编程特性,使得它能够很容易地被集成到 BEPC 控制系统中去.

2.2 条形电极装置

为了简化设计和降低造价,用于激励和信号拾取的条形电极装置采用了完全相同的机械结构和尺寸.条形电极装置在一节内径为 103mm 的圆形不锈钢真空管道内,安装有 4 个条带形电极,水平和垂直平面上各一对,其机械结构如图 3 所示.电极的长度为 277mm,宽度为 27mm,厚度为 2mm,距真空管道内壁的间距约为 4mm,以形成 50Ω 的传输线.每一电极的两端通过超高真空穿墙绝缘子(feedthrough),与 N 型电缆插座相连.

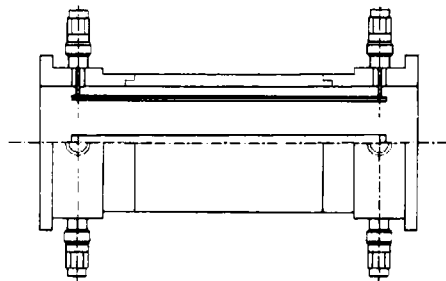


图 3 条形电极结构原理图

外激励信号从激励条形电极的一端输入,另一端处于开路状态,显然这种激励方式为电场激励.束流振荡信号从信号拾取条形电极的两端引出,通过宽带同轴电缆,与位于中央控制室的束流振荡检测器相连,分别用来测量正、负电子的振荡频率.

2.3 电压放大器

电压放大器的作用是对激励信号进行放大,其接线图如图 4 所示.由图可以看到,从频谱仪同步跟踪信号源输出的正弦波扫频信号,经预放大器放大后分为两路,各由两个 Tektronix

公司的 AM501 型放大器做进一步放大. 两个 AM501 的相位相差 180°, 其中每个 AM501 的输出信号再分为两路, 分别用作水平和垂直激励. AM501 的峰值输出电压为 80V, 因此, 施加在一对水平或垂直电极间的最高峰值电压可达 160V. 尽管没有特殊要求, 电压放大器的输出幅频特性曲线, 在 DC—600kHz 的范围内应尽可能平坦.

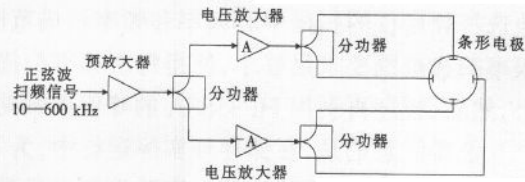


图 4 Q 测量激励驱动电路

2.4 振荡检测器

振荡检测器实际上是一个带通放大器, 对束流位置振荡信号进行放大. 检测器的低端截止频率为 10kHz, 高端截止频率约为束流回旋频率的一半, 即 600kHz, 这一频率范围覆盖了表 1 列出的所有我们感兴趣的束流振荡频率. 检测器通带内的最大增益约为 60dB, 有足够高的信噪比, 因此, 可以很容易用频谱仪从其输出信号中测量到束流的各种振荡频率.

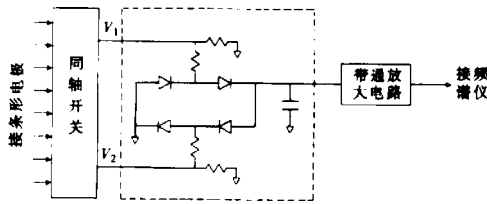


图 5 束流振荡检测器的输入电路

振荡检测器有两个输入端, 具有对两个输入信号求差的功能, 如图 5 虚线框内所示的部分, 因此, 不需要用额外的 RF 器件来获得束流位置的差信号(Δ 信号). 检测器的输入端有一组 RF 同轴继电器, 可对信号拾取条形电极装置的 8 个信号端进行切换, 用以测量不同方向和不同粒子的振荡频率.

3 Q 值测量

Q 值测量可以采用手动方式进行, 将 HP3588A 频谱仪设置为扫频模式, 频率范围通常选择为让所有束流振荡频率可同时显示在荧光屏上, 利用 HP3588A 扩展的光标(marker)功能, 可以很容易地读出各振荡频率的数值. 缩小频率扫描范围可以提高频率测量的分辨率, 但增加了测量时间. 图 6 是 BEPC 储存环运行在同步辐射专用模式时, 频谱仪测量到的束流自由振荡波形, 水平和垂直方向的振荡频率分别为 327kHz 和 290kHz.

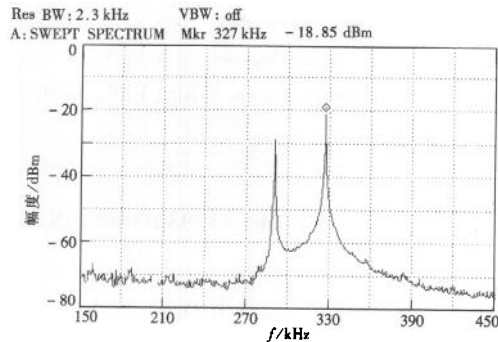


图 6 束流自由振荡频谱

为了实现 Q 值测量的自动化和智能化, 一台带有 HP82341 GPIB 接口卡的 PC 被用来控制频谱仪, 这台 PC 是 BEPC 束流测量系统诸多前端计算机中的一台^[2], 在 Q 值测量系统中起 GPIB 控制器的作用. HP82341 是 HP 公司生产的控制 GPIB 设备的 16 位高速接口卡, 适用于微软公司视窗环境下的各种编程语言.

一个 C 语言程序实现了对自由振荡频率的自动测量, 并将测量结果存入数据库. 测量程序可以交替对水平和垂直振荡频率进行测量, 作为程序的输入参数, 操作员必须正确

地选择频谱仪的扫描中心频率和频率扫描范围,以便让正确的峰值频率显示在荧光屏上. 频率扫描范围要求足够小,使得每次频率扫描后,束流频谱中只有一个谱峰出现在荧光屏上,然后,程序再利用 HP3588A 的峰值搜索功能读出 Q 值频率.

值得注意的是,在储存环实际运行中,为了对 Q 值进行实时监测,激励信号的幅度必须足够小,使物理或同步辐射实验不至于受到扰动.

4 结论

BEPC 储存环 Q 测量系统经过改进后,提高了测量速度和测量分辨率,改进措施包括用新的 HP3588A 频谱仪替换原 TEK7L5 频谱仪,重新加工制造了束流振荡检测器插件,以及实现了用 PC 对 Q 值测量进行控制^[3]. 目前,系统的测量分辨率可达 10^{-4} ,动态范围为 0.4—40mA(单束团流强),测量数据可通过计算机网络存入数据库,以供离线数据分析处理. 一个新的用 Lab View 开发的 Q 值测量程序已经完成,并准备投入实际应用.

作者感谢 BEPC 束流测量组的其他同事对此项工作所做的支持和贡献.

参考文献 (References)

- 1 HE ZhenYa. Theory and Applications of the Digital Signal Processing (in Chinese). Beijing: Post and Telecommunications Press, 1983. 18—25
(何振亚. 数字信号处理的理论与应用. 北京:人民邮电出版社. 1983. 18—25)
- 2 MA Li et al. Using PCs in the BEPC Beam Diagnostic Instrumentation System. In: ZHAO JiJiu, Daneels A ed. Proceedings of the 1997 International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems. Beijing: Science Press, 1997. 180—182
- 3 MA Li et al. The Tune Measurements in the BEPC Storage Ring. In: Chin Y H et al ed. Proceedings of the First Asian Particle Accelerator Conference. Tokyo: KEK, 1998. 522—524

Tune Measurements in the BEPC Storage Ring

MA Li CAO JianShe WANG Lin

(*Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract The betatron and synchrotron tunes are measured frequently during the period of the machine operation and machine studies. The tune measurement system of the BEPC storage ring includes a spectrum analyzer, two sets of the stripline, two voltage amplifiers and a beam oscillation detector. This paper gives the detailed description of the upgraded tune measurement system in the BEPC storage ring.

Key words storage ring, beam, tune, stripline, spectrum

Received 16 June 1999