

改进后的 BEPC 储存环束流位置测量系统

马力 石平 叶恺容

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 介绍改进后的北京正负电子对撞机束流位置测量系统的软硬件结构和系统的性能。改进后系统的位置测量重复性优于 $10\mu\text{m}$, 测量一次闭轨的时间为 11s , 系统的动态范围大于 81dB , 最小可测束流强度低于 0.5mA 。测量结果的可信度是通过自洽检测来保证的。

关键词 对撞机 束流位置探头 闭轨 位置分辨率 自洽检测

1 引言

闭轨的测量和校正是任何一台加速器的束测和控制系统最基本的功能之一。北京正负电子对撞机 (BEPC) 储存环安装有 32 个束流位置探头 (BPM), 分布在 240.4m 长的束流管道上, 可以用来同时测量正负电子束流的位置。在改进前, BPM 系统的短时间位置测量重复性 (有时称为测量分辨率) 大于 $20\mu\text{m}$ (平均值), 测量一次闭轨的时间为 50s 。近年来, 随着 BEPC 亮度提高改进任务的深入开展和机器研究时间的增加, 加速器物理学家及束流人员对束流位置测量的要求越来越高, 为了提高位置测量的分辨率和减少测量时间, 1996 年初完成了对 BPM 系统的部分软硬件的改造, 并且在 1996—1997 年度的 BEPC 运行中将该系统投入使用。

BEPC 储存环的每个 BPM 都有四个钮扣型电极, 在图 1 中分别用 A、B、C、D 表示, 电极与 BNC 型超高真空穿墙绝缘插座 (feedthrough) 相连, 电极的直径为 20mm 。32 个 BPM 可以分成两种类型, 图 1 (a) 所示的跑道形截面的 BPM 是用在储存环的弧区, 数量为 24 个, 它的电极连同 BNC 插座直接焊在跑道形铝真空盒上。图 1 (b) 所示的圆形截面 BPM 安装在对撞点两侧的长直线节上, 四个电极是通过法兰固定在一节圆形不锈钢束流管道上, 因此, 可以方便地更换电极或是 feedthrough, 这种类型的 BPM 共有 8 个。

每个 BPM 的四个电极信号通过四根电长度相等的 RG223 / U 型同轴电缆传送到束测本地站, 那里安装有 BPM 信号处理电子学。32 个 BPM 共有 128 根传输电缆。每组电缆的长度从 60 到 90m 不等, 取决于 BPM 在储存环中的位置。

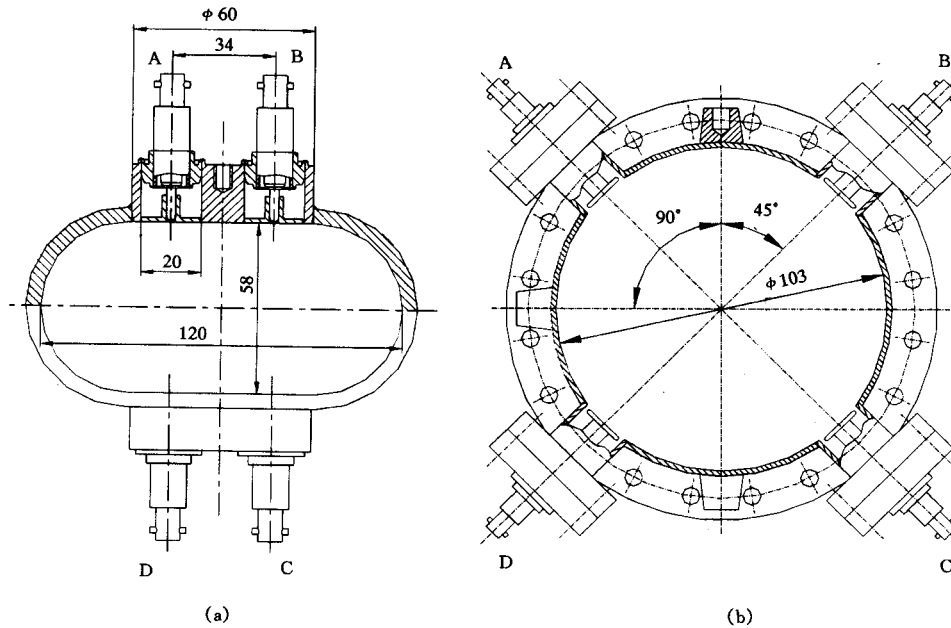


图1 BEPC储存环束流位置探头截面图
(a)弧区BPM; (b)直线节BPM.

2 改进后的 BPM 系统

改进前的系统测量重复性较差的主要原因是由宽带型位置检测器的电子学噪音造成的. 这次改进的主要目的就是为在不增加测量时间的前提下提高测量分辨率, 最简单的方法就是采用高速 ADC 对多次测量值取平均, 以便提高信噪比. 下面就对改进后的系统作一介绍^[1].

2.1 硬件

图 2 是改进后的 BPM 系统硬件框图, 主要在以下几方面进行了改进: 首先, 用两个 12 位 $25\mu\text{s}$ 的 ADC 插件替换了原来的一个 14 位 120ms 的 ADC 插件, 因此, 可以对每个电极信号进行 n 次采样后取平均值 (n 缺省值为 500), 扫描 32 个 BPM 的时间不仅没有增加, 反而从原来的 50s 减少到 11s. 其次, 用本所电子学室研制的 CCU-2-80B 并行机箱控制器替换了原 SLAC 设计的串行机箱控制器 SCC, 与 CCU-2-80B 配套的 I/O 接口板提供了 PC 对两个 CAMAC 机箱中的 21 个 BPM 插件的完整控制, 由此实现了本地测量智能化. 最后, 计算机网络被用来进行 PC 间以及 PC 和 BEPC 储存环在线控制计算机 VAX4500A 间的数据通信.

2.2 软件

保持了原 VAX4090 工作站上的人机交互界面不变, 仅仅将 VAX4500A 上的 BPM 数据采集程序移植到了前端 PC BIPC4 上. PC 上的应用程序是在 Windows 95 环境下

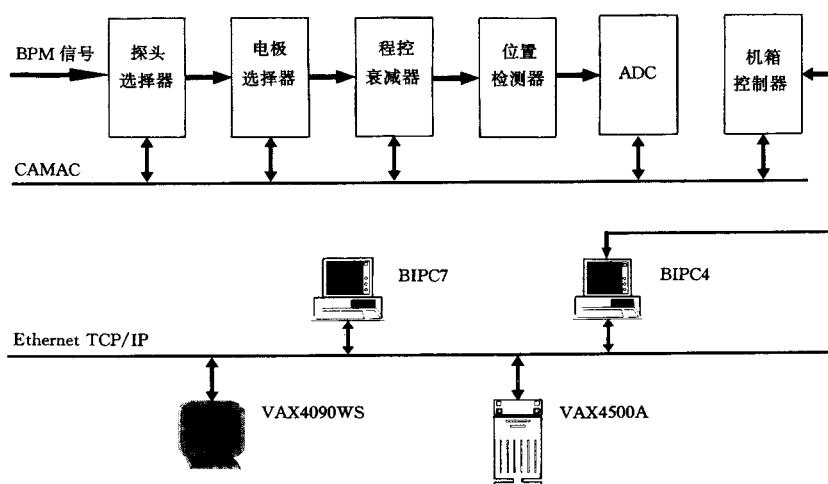


图2 BPM系统硬件框图

利用 Visual C / C++2.0 开发的。测量所需要的一些控制参数,如每个 BPM 电极信号的测量次数 n 等,以及测量到的所有 32 个 BPM 的电极电压值和由此计算出的束流位置值都存储在服务器 BIPC7 的动态数据库中。当启动 BIPC4 上的测量进程后,一个名为 WINBPM 的程序首先初始化 BPM 电子学硬件系统,然后进入一无穷循环过程,每次循环都调用 BPMSCAN 函数,该函数完成以下功能:从 BIPC7 的动态数据库中读取测量控制参数;根据束流强度自动调整程控衰减器的衰减值;通过 ADC 获取每个电极的信号值 n 次,并且对这 n 次测量值求平均;计算每个 BPM 的 x 和 y 方向的束流位置;最后将测量结果存入 BIPC7 的动态数据库。

操作人员可以随时在 VAX4090 控制台上设置新的测量控制参数和显示闭轨测量结果。PC 之间以及 PC 与 VAX4500A 之间的通信采用客户 / 服务器模型和 TCP / IP 协议。

3 系统性能

3.1 闭轨测量

正负电子闭轨的测量可以同时进行。如前所述,尽管扫描所有 32 个 BPM 的时间约为 11s,但从操作人员的角度看,单次测量闭轨的时间远远小于 11s,因为 BIPC7 的动态数据库中总是保留着最近一次的测量结果。准确地讲,动态数据库中测量结果的刷新时间为 11s,而通过网络获取最近一次的测量数据则只需不到 1s 的时间。

图 3 是测量得到的典型的 BEPC 储存环正负电子闭轨畸变(COD)。其中 x 和 y 方向的 COD 均方根值分别为 2.2mm 和 1.5mm。理论上讲,正负电子的 COD 应该是一样的,但实际测量出的正负电子束流位置的最大差别约为 0.5mm,且总是出现在几个固定的 BPM 处,如 BPM1、BPM32,原因目前尚不清楚,正在研究和查找当中。

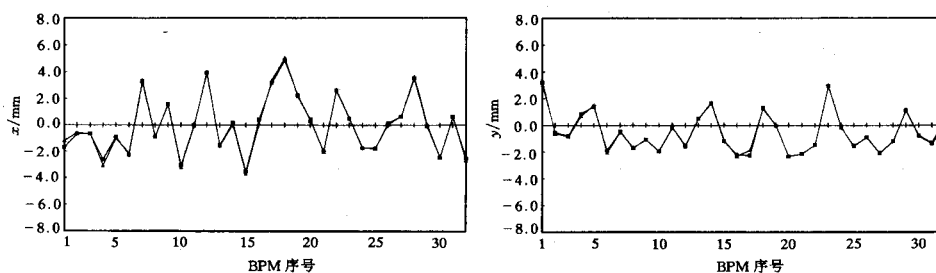


图3 正负电子束流闭轨畸变

▲ 正电子 ■ 电子

3.2 测量重复性

假定在短时间内储存环闭轨不会发生变化,可通过对连续10次闭轨测量结果比较,来检验BPM位置测量的重复性.表1列出了对所有32个BPM的测量均方根误差的统计.改进前, x 和 y 方向的测量均方根误差平均值分别是 $31\mu\text{m}$ 和 $21\mu\text{m}$,改进后分别为 $7\mu\text{m}$ 和 $8\mu\text{m}$.表1中列出的改进后测量误差大于 $10\mu\text{m}$ 的BPM基本属于图1(b)所示的圆形结构,由于这种类型BPM的电极到探头中轴线的距离较远,所以测量灵敏度较低,信噪比也较差.

表1 改进前后BPM测量均方根误差比较

均方根误差/ μm	改进前			改进后		
	≤ 10	≤ 20	> 20	≤ 10	≤ 20	> 20
BPM个数(x 方向)	5	13	14	27	3	2
BPM个数(y 方向)	16	11	5	25	5	2

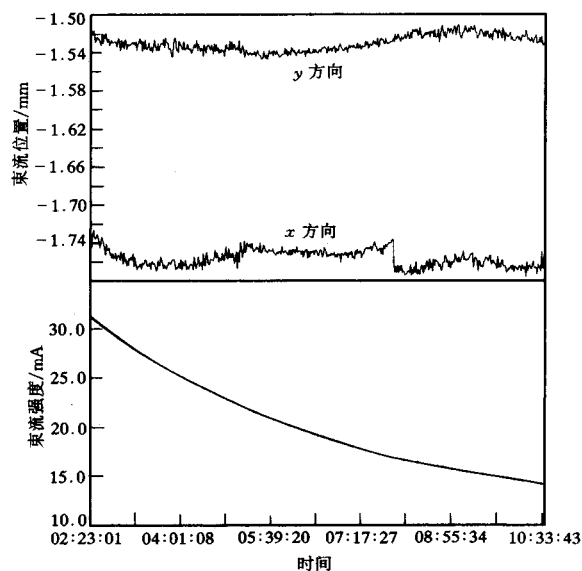


图4 在8小时的存储过程中束流位置的漂移

3.3 动态范围

当束流强度改变时,测量程序会自动调整对信号的衰减量,以保持位置检测器的输出电压在 ADC 的有效输入范围内. 为了防止 BPM 信号处理电子学的意外损坏,程控衰减器的最小值被设置为 5dB,这时可测量的最小束流强度约为 0.5mA. 程控衰减器的调整步长为 1dB,最大衰减值为 81dB,因此,即使不考虑位置检测器本身所具有的 20dB 线性范围,整个系统的动态范围至少为 81dB.

图 4 给出了束流在 8 小时的存储过程中, BPM25 处的束流位置随束流强度的变化. 可以看出,8 小时内 x 和 y 方向的束流位置漂移(峰-峰值)分别小于 $50\mu\text{m}$ 和 $40\mu\text{m}$,其中包括束流位置本身的漂移和 BPM 系统的测量误差.

3.4 自洽检测

4 电极 BPM 处的束流位置除了用全部 4 个电极得到外,还可以用其中任意的 3 个电极得到,因此,可以对 5 个位置计算结果进行比较,如果测量过程中由于噪音干扰或是其它原因,任意两个位置之差的绝对值大于某个小量 δ ,这个位置测量值就是不可信的,这就是所谓的自洽检测. 在进行闭轨测量时,对每个 BPM 都做这样的自洽检测,对不合格的 BPM,将其位置测量值标记上坏读数,操作人员可以不去考虑具有坏读数的 BPM,也可以重新测量一次. 图 5 给出了从 1996 年 11 月至 1997 年 4 月间,在大约 9000 次的测量中,各个 BPM 被标记为坏读数的次数占总测量次数的百分比.

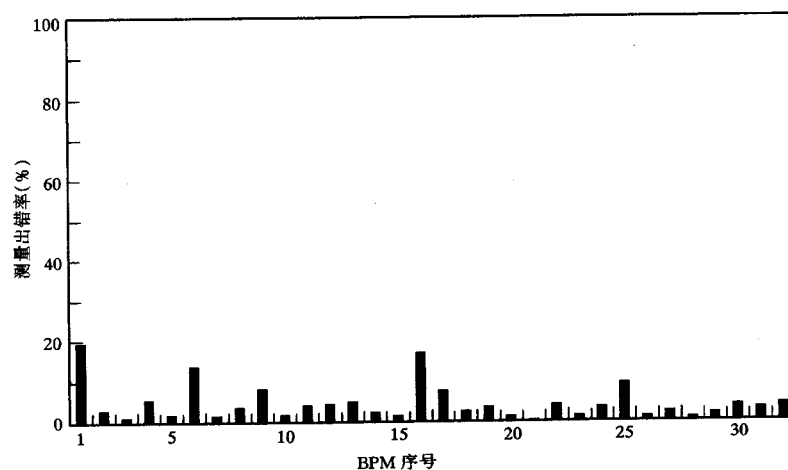


图5 标记为坏读数的次数占总测量次数的百分比

在刚开始用这种方法对 BPM 测量的可信度进行检测时,许多 BPM 坏读数的百分比是很高的,有的甚至达到 90%. 主要原因是由于 4 个电极的信号传输通道的信号衰减量的相对变化造成的,为此又仔细测量了这些参数,并将它们存入计算机中,以便对测出的束流位置进行修正. 现在,对大多数 BPM 来说,用 4 个电极和用任意 3 个电极算出的束流位置的差别一般都小于 0.2mm .

4 结束语

改进后的 BEPC 储存环束流位置测量系统的位置测量重复性从大于 $20\mu\text{m}$ 提高到不到 $10\mu\text{m}$, 测量时间从 50s 减少到 11s (每个电极信号 500 次测量取平均), 系统的动态范围大于 81dB, 最小可测束流强度不到 0.5mA. 测量的可信度通过自治性检测得到保证. 目前该系统较好地满足了加速器物理学家和调束人员的要求.

作者感谢 BEPC 束测组和控制组的许多同事对此项改进工作所做的贡献, 同时也感谢 SLAC 的同行在建立 BPM 信号处理电子学的过程中所给予的帮助和建议. 图 1 是九室机械组杨云绘制的, 在此表示感谢.

参 考 文 献

- [1] Ma L, Shi P, Ye K. et al. Beam Position Monitoring System for the BEPC Storage Ring. Proc. of EPAC'96. Sitges, Spain, June 1996

Upgrade of the BPM System for the BEPC Storage Ring

Ma Li Shi Ping Ye Kairong

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

Abstract The beam position monitoring (BPM) system for the storage ring of the Beijing Electron Positron Collider (BEPC) has been upgraded. The short-term reproducibility of the measurement is better than 10 microns. The measurement time for scanning all BPMs is about 11 seconds. The dynamic rang of the system is over 81 dB and the minimum measurable beam intensity is less than 0.5mA. The reliability of the measurement is assured by the self-consistency check.

Key words Collider, BPM, Closed orbit, Reproducibility, Self-consistency check