

基于束流的准直的初步实验研究

马力 曹建社 汪林 赵政 王书梅

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 束流位置探头电中心相对于邻近四极磁铁磁中心的位置偏移,可以通过基于束流的准直技术加以确定,其准直精度可以比用传统的准直方法提高一个数量级.介绍了基于束流的准直的基本原理和在 BEPC 储存环上的初步实验结果,以及对今后进一步开展该项实验研究的设想.

关键词 储存环 束流 准直 BPM

1 引言

正负电子储存环的性能主要取决于四极磁铁(Q铁),当束流闭轨调整到Q铁磁中心时,往往能获得较高的对撞亮度和较好的束流状态.由于Q铁的准直公差要求是最高的,因此,Q铁的磁中心可以作为闭轨测量和校正的绝对参考点.一个好的束流位置探头(BPM)必须与其临近的Q铁有紧固的机械定位,以便它能精确地测量出束流相对于Q铁磁中心的位移.尽管BPM及其信号处理电子学在安装前后都经过仔细地标定和准直,但由于各种原因,BPM的电中心与Q铁的磁中心仍然存在着不确定关系,使得BPM的位置测量读数同实际束流位置有一定的误差.在北京正负电子对撞机(BEPC)储存环中,这种测量误差的量级达到几百微米,在个别位置上,甚至达到几个毫米,如果用这样的测量结果进行闭轨校正,则很难达到预期目的.基于束流的准直(BBA)技术则可以对BPM的测量结果进行标定,使得束流位置的测量精度提高一个数量级.

如图1所示,当位于 s_0 处长度为 l 的Q铁的强度 k 有一增量 Δk 时,束流将会受到一个角度的偏转 $\Delta y'(s_0)$,而 $\Delta y'(s_0)$ 的大小正比于 Δk 和束流相对于这块Q铁磁中心的距离 $y(s_0)$,

$$\Delta y'(s_0) = \Delta k \cdot l \cdot y(s_0), \quad (1)$$

$\Delta y'(s_0)$ 将使任意 s 处的束流闭轨产生一增量 $\Delta y(s)$,

$$\Delta y(s) = \frac{\Delta y'(s_0) \sqrt{\beta(s_0)\beta(s)}}{2\sin\pi\nu} \cos(|\mu(s) - \mu(s_0)| - \pi\nu), \quad (2)$$

式中 β, μ 和 ν 分别是储存环的包络函数,相移和自由振荡频率。 $\Delta y(s)$ 可以通过辅助

BPM 进行测量,显然,当调节 $y(s_0)$ 使得束流通过 Q 铁的磁中心时,由 Δk 造成的任意 s 处的 $\Delta y(s)$ 应该为零,这时,如果被测 BPM 的读数不为零,它反映的是被测 BPM 的电中心相对于此 Q 铁的磁中心的位置偏移(offset),这种用束流来确定 BPM offset 的方法,就是所谓的基于束流的准直.

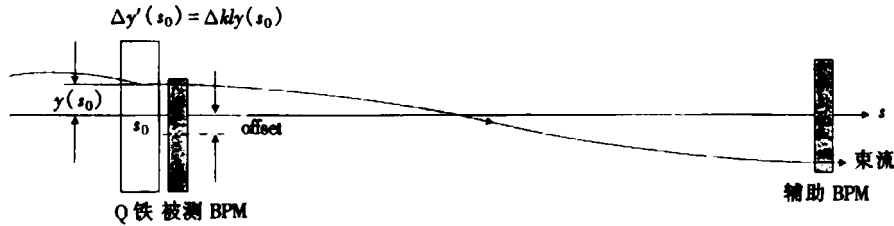


图 1 基于束流的准直原理

由于 $\Delta y'(s_0)$ 改变的是整个储存环束流的闭轨,因此,实验中只需选择任意一个相位满足(2)式中余弦函数项不为零的辅助 BPM,便可测量出闭轨的变化. 但为了能方便地对所有 BPM 的 offset 均可以进行测量,往往同时选择两个辅助 BPM 来测量闭轨变化,这两个 BPM 之间的相位差应尽量接近 $(2n+1)\pi/2$, 以确保闭轨的变化至少能被其中的一个 BPM 测出.

世界上许多加速器都已经采用 BBA 技术^[1-7]. 对于第三代同步辐射光源和未来直线对撞机,其性能指标的实现越来越取决于准直的精度,仅仅用传统的机械准直技术已不能满足要求,必须用束流自身对机器进行更精确的准直. 正是基于这一点,我们在 BEPC 上开展了 BBA 的实验研究,以便掌握这一技术. 有理由相信,通过 BBA 方法提高了闭轨的绝对测量精度后,对进一步解决北京谱仪的噪声问题和提高对撞亮度一定会有积极的推动作用.

2 BEPC 上的 BBA 初步实验

如前所述,BBA 实验至少应该具备两个条件. 首先,每台 Q 铁的强度必须能够单独调节,其次,束流位置检测系统的测量灵敏度和测量精度必须足够高.

早在 1991 年我们就试图用 BBA 方法对 BPM 的 offset 进行测量,由于当时 BEPC 储存环束流位置测量系统的测量分辨率不能满足要求,因此,实验结果不能令人满意. 1996 年,经过改进后的束流位置测量系统,32 个 BPM 的平均位置测量分辨率达到 $10\mu\text{m rms}$ ^[8],满足了重新进行该项实验的条件.

目前,BEPC 储存环 Q 铁的供电方式是,一台电源至少为两台 Q 铁的主绕组供电,因此,只能通过辅助绕组或是分流电阻来调节单台 Q 铁的强度. BEPC 储存环分为 4 个象限 R1—R4,与环中所有 32 个 BPM 相邻的 Q 铁中,只有靠近对撞点 IP 的 4 块 Q1 铁具有辅助绕组 QT1 及其配套的电源,它们在环中的位置如图 2 所示. 在储存环注入模式下,这 4 块 Q1 铁系水平散焦的 D 铁,垂直方向包络函数较大,因此,我们决定首先对这 4 块 Q1 铁附近的 BPM 垂直方向 offset 进行测量.

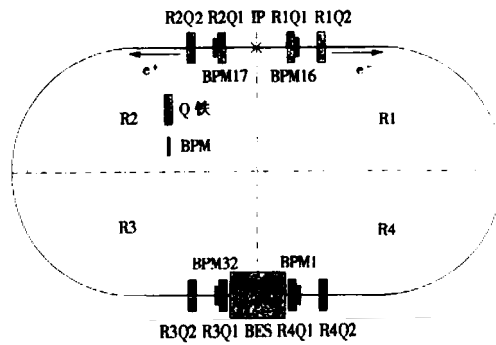


图 2 实验用 Q 铁和 BPM 在储存环中的位置

从(2)式可以看出,为了提高测量灵敏度,测量闭轨变化用的辅助 BPM 应该尽量选择在束流包络函数大的地方.另外,被测 BPM 和辅助 BPM 之间的相位差应使(2)式中余弦函数项尽量接近 ± 1 .我们发现, BPM16 和 BPM32, BPM1 和 BPM17 之间正好满足上述条件,因此,选择这两对 BPM 互为被测 BPM 和辅助 BPM.

整个实验步骤是,通过局部凸轨不断改变束流在某块 Q1 铁,即与其相邻的被测 BPM 处的垂直位置,在每个束流位置点(由被测 BPM 读出),均测量出 QT1 电源在两种电流值(这里我们取 0A 和 2A)时辅助 BPM 的垂直束流位置,并求出两者的位置差.由于闭轨扰动是在 Q1 铁强度的两个稳定状态下测量的,因此这种方法也被叫做直流法或静态法.

3 实验结果

图 3 分别给出了 BEPC 储存环注入模式下,对 BPM16, BPM17, BPM32, BPM1 垂直方向 offset 的测量结果.图中水平坐标轴为改变相应 Q1 铁的强度后,束流位置在辅助 BPM 处的变化量,垂直坐标轴为不同闭轨条件下被测 BPM 的读数.显然,如果束流通过 Q1 铁的磁中心,改变 Q1 铁强度对闭轨的扰动幅度为最小,此时被测 BPM 读数应该为零,如果不为零则应该进行修正.反之,如果束流没有通过 Q1 铁的磁中心,改变 Q1 铁强度后,闭轨的增量与束流距 Q1 铁磁中心的距离成线性关系.

图 3 同时给出了拟合公式,公式中的常数项为改变 Q1 铁强度后,辅助 BPM 位置变化量为零时,被测 BPM 的读数,即是所要确定的被测 BPM 的 offset,它们分别是 BPM16 为 0.27mm, BPM17 为 -3.36mm, BPM32 为 1.08mm, BPM1 为 3.12mm,测量的均方根误差分别为 $\pm 0.24\text{mm}$, $\pm 0.10\text{mm}$, $\pm 0.22\text{mm}$, $\pm 0.09\text{mm}$.公式中的一次项系数为拟合直线的斜率,反映了当束流没有通过 Q1 铁的磁中心时,改变 Q1 铁强度对闭轨产生扰动的灵敏程度.

测量误差主要是由 BPM 系统的噪音引起的.值得指出的是,由于实验中被选用的 4 个 BPM 有较大的真空管道半径,它们是全部 32 个 BPM 中位置测量分辨率最低的,即便如此,offset 的测量精度也从毫米量级提高到数百微米量级.如果希望减小测量误差,则需进一步提高 BPM 系统的信噪比和位置测量分辨率.根据参考文献报道,国外加速器实

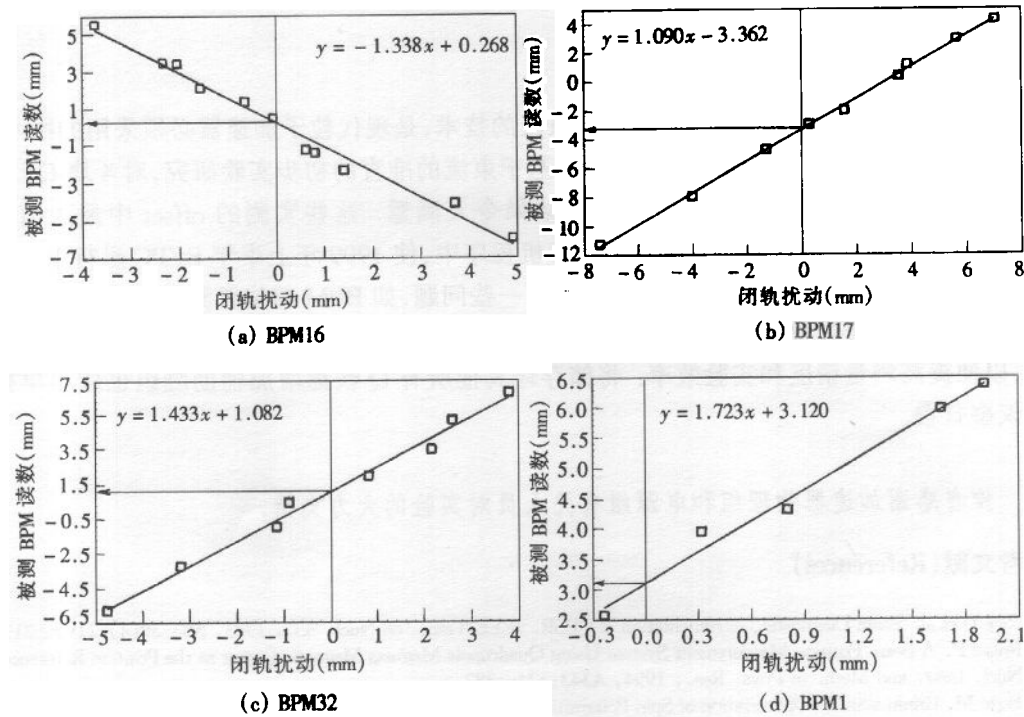


图 3 基于束流的准直实验结果

□ 实测数据, — 测量数据的线性拟

验室同类实验的测量精度已经做到优于 $50\mu\text{m}$ ^[5]

4 实验的完善

为了实现对储存环所有 BPM 的 offset 进行测量和提高测量效率,需要完成以下工作. 首先,将 BEPC 储存环所有 Q 铁加上辅助绕组,使储存环中各个 Q 铁的强度可以独立微调,这不仅是 BBA 实验研究的需要,也是进行其它一些机器研究,如测量包络函数的需要.

其次,BBA 实验可以采用所谓的 k 调制方法,即用一个具有固定角频率 ω 的低频正弦信号 $\Delta k = \Delta k_0 \sin \omega t$ 对 Q 铁的强度 k 进行调制, ω 的选取应远小于束流的同步振荡和自由振荡频率,用频谱仪测量因 $\Delta y'(s_0)$ 造成的闭轨信号中的调制频率分量. 由于这种 k 调制方法采用交变信号改变 Q 铁强度,因此,有时也叫做交流法或动态法. 同直流法相比,这种方法有许多优点,比如,当 $\Delta k_0/k$ 足够小时,可以通过束流闭轨的自然变化,实时监测束流相对于 Q 铁磁中心的相对位移,而无须人为地去改变束流闭轨. 另外,此方法可以同时以不同的频率对多台 Q 铁的 k 值进行调制,从而同时对多个 BPM 的 offset 进行测量,提高了实验效率. 在 LEP 上进行的 BBA 实验研究,就是采用的这种 k 调制的方法^[7].

5 结束语

基于束流的准直连同其他各种基于束流的技术,是现代粒子加速器必须采用的技术. 1998 年底,我们在 BEPC 储存环上进行了基于束流的准直的初步实验研究,对 4 块 Q1 铁附近的 BPM 垂直方向 offset 做了标定,结果令人满意. 这些实测的 offset 中最大值达 -3.36mm ,它们被输入到闭轨测量的计算机程序中,使 1999 年上半年 BEPC 运行中的闭轨测量结果得到修正. 实验中同时也暴露出一些问题,如 BPM 的位置测量分辨率和灵敏度仍不够高,测量过程和数据处理未实现完整的计算机控制,这些都需要做进一步的改进,以便提高测量精度和实验效率. 将储存环其他所有 Q 铁都增加辅助绕组也应尽早提到议事日程.

作者感谢加速器物理组和电源组有关人员对本实验的大力支持.

参考文献 (References)

- 1 Rice D et al. Beam Diagnostic Instrumentation at CESR. *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, 1983, NS-30(4):2190—2193
- 2 Røjsel P. A Beam Position Measurement System Using Quadrupole Magnets Magnetic Center as the Position Reference. *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.*, 1994, A343:374—382
- 3 Böge M, Brinkmann R. Optimization of Spin Polarization in the RERA Electron Ring Using Beam Based Alignment Procedures. In: Heller K J and Smith S L ed. *AIP Conference Proceedings 1995*, 343:287—293
- 4 Tenenbaum P et al. Beam-Based Magnetic Alignment of the Final Focus Test Beam. In: *Proc. of the 1995 Particle Accelerator Conference*. New York: IEEE, Inc., 1995, 2096—2098
- 5 Portmann G et al. Automated Beam Based Alignment of the ALS Quadrupoles. In: *Proc. of the 1995 Particle Accelerator Conference*. New York: IEEE, Inc., 1995, 2693—2695
- 6 Endo K et al. Preliminary Orbit Measurement for Beam-Based Alignment. In: Myers S et al. ed. *Proc. of the 5th European Particle Accelerator Conference*. London: IOP Publishing Ltd., 1996, 1657—1659
- 7 Schmidt R. Misalignments from k-Modulation. In: Poole J ed. *Proc. of the 3rd Workshop on LEP Performance*, Geneva: CERN, 1993, 139—142
- 8 MA Li, SHI Ping, YE KaiRong. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.* (in Chinese), 1998, 22(5):475—480 (马力,石平,叶恺容. *高能物理与核物理*, 1998, 22(5):475—480)

Preliminary Experiment on Beam-Based Alignment

MA Li CAO JianShe WANG Lin ZHAO Zheng WANG ShuMei
(*Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China*)

Abstract The offset of the beam position monitor (BPM) with respect to the magnetic center of the quadrupole can be determined by the method of the beam-based alignment. The BPM alignment accuracy can be improved by one order of magnitude compared with conventional surveying techniques. This paper gives a brief introduction to the principle of the beam-based alignment and the description of the preliminary experiment performed on the BEPC storage ring. The considerations of the further experiments are also given.

Key words storage ring, beam, alignment, BPM

Received 12 October 1999, Revised 1 December 1999