

BEPC 基于束流准直的 BPM OFFSET 测量系统*

胡春良¹⁾

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 束流轨道对加速器的运行很重要,为了能准确的测量束流的位置,有必要对束流位置监视器(BPM)本身进行快速,准确的准直.介绍在 BEPC 上用束流作为基准来测量 BPM 的零点偏差(OFFSET).这套测量系统用辅助绕组来改变四极磁铁的强度,已经应用到 BEPC 上,并且取得一定效果.

关键词 束流位置监视器 零点偏差 北京正负电子对撞机 束流准直 辅助绕组

1 引言

粒子加速器技术在近数十年间得到了极大地发展,粒子能量和流强都有了很大的提高,对束流轨道测量的要求十分高.

对束流轨道的监测是通过束流位置监视器(BPM)来完成的.一般来说,BPM 总是放置在四极磁铁旁边,固定在束流真空管道上.在加速器检修期间,虽然会对 BPM 的位置进行准直,但是由于 BPM 是固定在真空管道上,易受热胀冷缩,震动等因素的影响,同时 BPM 的位置中心与它的电中心也有一定差距,相对而言,四极磁铁是固定在大的支架上,稳定性较高,对四极磁铁的准直要求也比较高,四极磁铁的位置能被比较精确的定位,因而以四极磁铁为基准,快速准确测量 BPM 的电中心与四极磁铁的磁中心之间的偏差(OFFSET)是完全可行的.

在国外的新一代加速器上都设计了基于束流准直的测量系统,在老的加速器中大部分也添加了同类装置^[1,2].在国内的各个加速器中还没有类似的系统,为了提高 BEPC 的运行效率和为 BEPC II 进行技术储备,我们在 BEPC 中安装了这个系统,进行研究和应用.

2 测量的方法

2.1 基本理论

当束流没有经过四级磁铁中心,四极磁铁强度有一个微小改变时,束流会受到一个二级场的作用,引起角度的偏转^[3,4]:

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

$y(s_0)$ 是 s_0 处的闭轨, Δk 是四极磁铁梯度变化量.

当四极磁铁磁场变化较小,对全环轨道参数影响很小,在任意 s 处的束流闭轨产生的变化为

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

$\mu(s)$, $\mu(s_0)$ 为相位, ν 是工作点.

调节 s_0 处的闭轨 $y(s_0)$,使束流通过四极磁铁中心,即 $y(s_0) = 0$,那么 s_0 处四极磁铁强度的较小改变将不引起其他 s 处闭轨的改变,这时该四极磁铁处的 BPM 的读数应为 0,如不为 0,读数就是这个 BPM 的 offset,即零点误差.

2.2 直线拟合

当束流轨道不经过四极磁铁中心时,四极磁铁

2003-04-18 收稿,2003-07-14 收修改稿

* BEPC 改进项目基金资助

1) E-mail: hucl123@sina.com

强度的微小变化所引起的闭轨扰动是全环的,可以选择在环中的一个适当的点 $s = s_0$ 处来观测闭轨的变化.

选择一块校正子,调节校正子的强度 θ ,如 $\theta = \theta_1$,使 $s = 0$ 处的束流闭轨 x_{s_0} 发生改变,

$$\Delta x_{s_0}(\theta_1) = \frac{\theta_1 \sqrt{\beta(s_0)}}{2\sin\pi\nu} \sqrt{\beta(s_0)} \cdot \cos(\varphi(s_0) - \varphi(s_0) - \pi\nu), \quad (3)$$

$s = 0$ 处的闭轨变为 $x_{s_0} + \Delta x_{s_0}(\theta_1)$,改变 $s = 0$ 处四极磁铁的强度,使它提高 Δk ,此时四极磁铁的强度为 $k + \Delta k$,观测点 $s = s_0$ 处的闭轨为 $x_s(+\Delta k)$,再使四极磁铁的强度减少 Δk ,四极磁铁的强度为 $k - \Delta k$,观测点的闭轨为 $x_s(-\Delta k)$,这样就得到在四极磁铁强度微小变化时观测点的闭轨变化,

$$\Delta x_s(\theta_1) = x_s(+\Delta k) - x_s(-\Delta k), \quad (4)$$

对于不同的校正子值 ($\theta = \theta_i, i = 1, 2, \dots$), $s = 0$ 处的闭轨处于不同的位置,有

$$\Delta x_s \propto x_{s_0} + \Delta x_{s_0}(\theta), \quad (5)$$

因而

$$\Delta x_s \propto \theta, \quad (6)$$

得到一组相对应的 $(\Delta x_{s_i}, \theta_i, i = 1, 2, \dots)$,对观测点的闭轨变化和校正子强度进行线形拟合,得到 $\Delta x_s = f(\theta)$.

当 $\Delta x_s = 0$ 时,它表示四极磁铁的扰动不影响观测点处的闭轨,此时束流经过四极磁铁的中心,得到对应的校正子的强度 θ ,代入(3)式可以得到此时的待测 OFFSET 的 BPM 的值,或者也可以由直线拟合得出 $x_{s_0} = g(\theta)$,代入所求 θ 值,得到所要的 BPM 的值,这个所得到的值就是测量的 OFFSET.

2.3 二次曲线拟合

在直线拟合的状况下,不是观测环中某一处的闭轨变化,而是计算全环的闭轨 ($x_{ij}(-\Delta k), j = 1, 2, \dots, 32$),得到

$$\Delta x(\theta_i) = \frac{1}{32} \sum_{j=1}^{32} (x_{ij}(+\Delta k) - x_{ij}(-\Delta k))^2, \quad (7)$$

$$\Delta x(\theta_i) \propto \theta_i^2, \quad (8)$$

$\Delta x(\theta)$ 与 θ 是二次型关系,用最小二乘法拟合出它们的关系,得到 $\Delta x = f(\theta)$,是抛物线,如图 1 所示. 当 $\Delta x = 0$ 或最小时,四极磁铁的扰动不影响全环的闭轨或影响最小,表明此时束流经过四极磁铁的中心,得到对应的校正子的强度 θ ,代入式(3)可

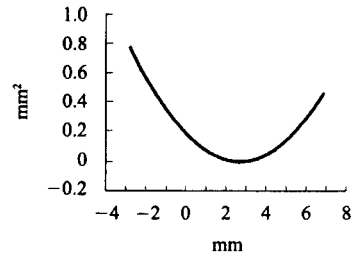


图 1 二次拟合

以得到此时的待测 OFFSET 的 BPM 的值,或者也可以由直线拟合得出 $x_{s_0} = g(\theta)$,代入所求 θ 值,得到所要的 BPM 的值,这个所得到的值就是测量的 OFFSET.

3 系统硬件

为了能够测量 BPM 的 OFFSET,要求各个 BPM 在很临近的地方有四极磁铁,并且这些四极磁铁的强度能够在小范围内独立可调. BEPC 的 lattice 是四折对称结构,分为 4 个区,各区对称的四极磁铁共用一个电源,在同一区有些四极磁铁在结构上也是对称的,有的是 8 块或 16 块共用一个电源, BPM 是紧邻着水平聚焦四极磁铁安装的,因此,为了能达到测量要求,必须添加辅助系统. 常用的方法一般有两种:给四极磁铁加分流电阻或加辅助绕组,考虑到 BEPC 四极磁铁供电电源具有低电压大流强的特点,选择了给四极磁铁添加辅助绕组的方案.

3.1 对辅助绕组的要求

能尽量大地调节 110Q 铁主磁场,调节强度不小于 3%;辅助线圈的绕制需在储存环现场完成,且不能打开磁铁,一般也不能移动周围其他设备;导线的绝缘层要有足够的耐辐射性能;线圈没有水冷;价格适当.

110Q 磁铁辅助线圈要求具有调节最大主磁场 3% 的能力. 110Q 的最高中心磁场梯度为 1118 Gs/cm,励磁的安培因子为 1.03,最大励磁安匝数为 13867A·W. 因此辅助线圈的最大安匝数为 416A·W.

实验表明采用有效截面为 10mm²84 芯多股铜绞线,每极绕 15 匝的辅助线圈可以满足调节 110Q 磁铁磁场 3% 的要求,并且辅助线圈通电时对主线圈的高阶场相对偏差没有新的贡献. 辅助线圈直流电阻约 0.18Ω,直流电感约 0.012H.

3.2 绕组安装

全环共有 36 块 BPM,4 个区每区 9 个,其中在南

北对撞点附近的 4 个 RSQ1 四极磁铁已装了辅助绕组,因而共需要安装其 32 组四极磁铁的辅助线圈. 一个四极磁铁有四个磁极,每个磁极上都安装绕组,合称一组绕组. 安装好的绕组如图 2 所示. 每个磁极最里面的是四极磁铁的磁极,边缘的绕线就是绕组,绕组用铁片固定形状,用塑料胶布来加固定位. 每极的辅助绕组有 15 匝,8 下 7 上分两层绕在磁极上.

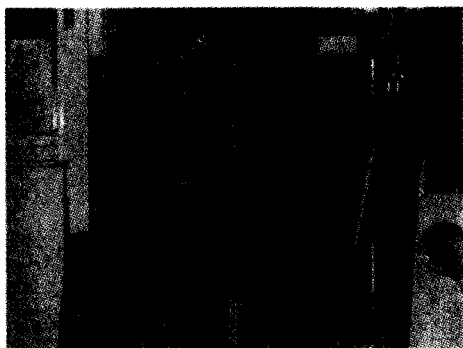


图 2 隧道中的四极磁铁辅助绕组

3.3 绕组电源

根据辅助绕组实验得出的结果,绕组线圈的最大电流需要 37A,绕组数目为 32,因而对电源设计的要求为:能够在切换方式下给 32 台磁铁辅助绕组线圈独立供电,电源个数一台. 电源的具体参数:(1)输出电流变化范围: -40—40A;(2)电流稳定度: 0.1%;(3)外接负载直流电阻 0.18Ω,电感 0.012H;(4)从一个电流为 40A 的线圈切换使另一个线圈电流到达 40A,其间切换时间不大于 2 分钟.

3.4 其他设备

电缆连接辅助绕组和电源,每组辅助线圈需要两根电缆,32 组共 64 根,越 6km,在夏季停机其间由运行部门给予铺设完毕

控制系统是连接 BEPC 中央控制室控制台与在电源厅的电源之间的控制电缆,以及电缆接口. 由于有一条现成空余的控制电缆,因而系统就直接利用了这条电缆.

3.5 软件系统

由于测量过程复杂烦琐,因此我们编写了与硬件系统配套的软件,进行自动测量和数据处理.

4 试验测量

测量前,首先要选择合适的校正子,用来调整束

流经过待测量的 BPM 处的位置. 由于 BEPC 束流运行的实际模式和理论模式有一定差距,所以测量前先测量各个校正子对各处 BPM 的响应,选择对待测量的 BPM 影响比较合适的校正子. 合适的标准是当校正子强度改变时对测量处的 BPM 的闭轨改变最大或比较大,这样在待测量处得到足够的闭轨变化时,而其他地方的闭轨变化比较小,不会因为改变过大而造成束流寿命不好或者丢束.

BEPC 有很多运行模式,实际测量时,只选择一个常用的模式进行测量,这样只要测量过一次校正子与各个 BPM 的相应关系,以后测量一般就不用再测量了.

测量过程比较简单,首先在输入文件中确定好要测量的 BPM,以及相应的辅助绕组和校正子,把辅助绕组电源电流置零,校正子给定一个值,测量这时的测量点的闭轨,然后分别给辅助绕组加上一个正的电流和一个负的电流,测量全环的闭轨,比较这两次闭轨,就得到闭轨的差,这就得到了束流通过 BPM 的一个位置,其最临近的四极磁铁强度发生微小变化时,对闭轨的扰动. 改变校正子的电流强度,调节束流通过 BPM 的位置,重复以上步骤. 测量中,一般改变 7 次校正子的强度,得到 7 组扰动,分析数据,得到 BPM 的 OFFSET. 对于测量一个 BPM 的 OFFSET 时,每次给辅助绕组加的电流大小都是一样的.

BEPC 的 BPM 的单个测量误差比较大,为了提高测量精度,测量闭轨时,测量 10 次来取平均,以降低 BPM 的读数误差,10 次闭轨测量的方差约为 0.1—0.2mm.

根据 BPM 的读数误差,在测量中就需要注意,用校正子调节束流经过待测量的 BPM 的位置时,各次的位置之间间隔至少要在 1mm 以上,以减小 BPM 读数的相对误差.

5 与机械准直结果的比较

2002 年 BEPC 夏季检修期间对 BPM 进行了机械准直,在给出的结果中发现有一些数据表明 BPM 在垂直方向上偏离磁铁中心过大,最大已超过 10mm,实际运行时也说明校正好的闭轨有很大问题,所以准直数据让人难以相信. 由于从机械准直记录上查不出问题,因此决定用本套测量系统来测量一下 BPM 的 OFFSET,与机械准直结果进行对比. 由于时间紧迫,挑选了一个 BPM 来测量,为 BPM18,

测量时数据库中已经置入新的机械准直结果, BPM18 的机械准直结果是 -8.93mm . BPM18 是紧邻二区的四级磁铁 R2Q4 安装的, 就用这块四级磁铁上的辅助绕组来测量 BPM18 的垂直方向的 OFFSET. BPM18 的垂直方向 OFFSET 的测量结果如图 3 和图 4 所示.

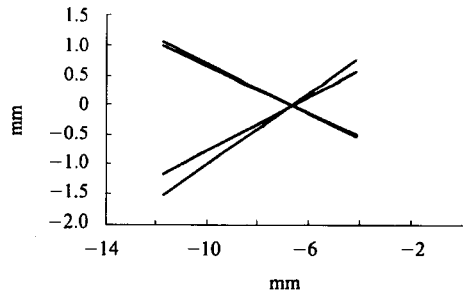


图3 直线拟合结果

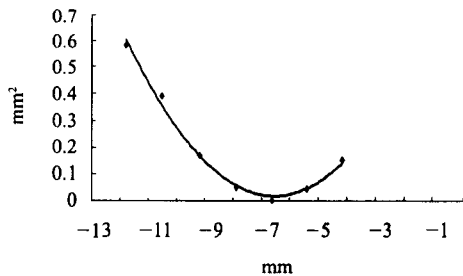


图4 二次拟合结果

图 3 中横坐标是指束流经过 BPM18 的位置, 纵坐标是观测点在辅助绕组电流分别取不同值时闭轨的差, 选择全环 32 个 BPM 中闭轨变化最大的 4 个, 以该处的闭轨变化作为参考, 直线拟合的 OFFSET 结果是 -6.58mm . 图 4 是以全环的闭轨的变化来测量 BPM 的 OFFSET, 横坐标是指束流经过 BPM18 的位置, 纵坐标是所有 BPM 处闭轨变化的平方的平均值, 二次拟合得到一条抛物线, 当抛物线取最小值时, 横坐标是 -6.53mm , 既为二次拟合得到的 BPM18 垂直方向的 OFFSET.

因为二次拟合测量精度比较高, 所以取二次拟合的结果作为 BPM18 垂直方向的 OFFSET, 为

-6.53mm . 这个结果的物理含义是指当 BPM18 读数为 -6.53mm 时束流经过四极磁铁的中心, 说明现在的 BPM18 的垂直测量基准中心比四极磁铁中心的高 6.53mm . 现在的 BPM 的基准中心是依据机械准直结果对 BPM 的基准中心进行校正后得到的, 机械准直对于 BPM18 垂直方向的位置偏差为 -8.93mm , 那么 BPM18 垂直方向的基准被校上了 8.93mm , 而实际只应该往上校正 $8.93 - 6.53 = 2.40\text{mm}$, 也就是正确的机械准直的数据应为 -2.40mm .

经过再次核查机械准直数据记录, 发现准直 BPM18 的基准如果变成测量 BPM1 的基准时, 就能得到与 -2.40 相近的结果. 依此, 准直人员证实, 这次机械准直中, 所有的 BPM 用的都是一个高度测量基准, 因此错误根源是在计算准直数据时有写 BPM 用错了准直基准. 测量 BPM18 的高度基准与测量 BPM1 的高度基准相差 6.5mm , 校正后得到的 BPM18 垂直方向的机械准直结果为 -2.43mm , 与本测量系统估计的结果相符合.

所有的机械准直数据重新校正后, 没有了偏差很大的数值, 随后的期间用本系统对全环的 BPM 测量了一次, 与机械准直校正后的结果相比, 两者基本符合. 两种测量结果的比较, 说明基于束流的准直测量系统的结果更加准确和可靠.

6 改进和结束语

测量的 OFFSET 值的精度主要取决于 BPM 的读数精度, 多次测量以及增加拟合时数据点的数目可以提高测量结果精度, 这都使测量时间变长. 当 BPM 的读数精度提高后, 可以节省测量时间和提高测量的结果的精度.

感谢加速器中心的磁铁组, 电源组同仁的大力配合, 理论组同事的协助, 本工作是在吴英志研究员的指导下完成的.

参考文献 (References)

- 1 Rojsel P. Nucl. Instr and Meth. in Phys. Res., 1994, A(343):374—382
- 2 Corbett W J, Hettel R O, Nuhn H -D. Quadrupole Shunt Experiments at Spear, SLAC-PUB-7162, May 1, 1996
- 3 Rice D et al. IEEE Transactions on Nuclear Science 1983, NS30(4):2190
- 4 Schmidt R. Misalignments from K-modulation, Proceedings of the Third Workshop on LEP performance, CERN SL/93 - 19(DI), 1993, 139

Beam-Based Calibration System of BPM Offset on BEPC*HU Chun-Liang¹⁾

(the Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

Abstract The ever-increasing demand for better performance from circular accelerators requires improved methods to calibrate beam position monitors (BPM). A beam based calibration system has been established to locate the centers of the BPM with respect to the magnetic center of quadrupole magnets.

Additional windings are applied to the quadrupole magnets to make the quadrupole magnetic strength individually adjustable and the number of the power supply of all 32 additional windings is only one. Software system has been finished to automatically measure the offsets of BPMs.

The effect of the beam-based calibration system shows that the calibration of BPM has been more quickly and accurately.

Key words BPM, offset, BEPC, beam-based, additional winding