

同步加速器中束流能量的修正

张 闯

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 叙述了同步加速器中束流能量测量和修正的原理,推导出关于闭合轨道畸变和校正二极子强度的束流能量的修正公式,介绍了这些公式在北京正负电子对撞机(BEPC)上的应用,并对其结果进行了讨论.

关键词 同步加速器 束流 能量修正 闭合轨道 色散函数

1 引言

束流能量是粒子加速器的主要参量之一,其精确测定无论对于物理实验还是对于加速器本身都有重要意义.例如,在北京正负电子对撞机上测定的 τ 轻子质量,是根据 τ 轻子对在其产生阈处正负电子的能量而得到的,束流能量的准确性,直接影响测出的 τ 轻子质量值.

最常采用的测量能量的方法是分析磁铁法.让束流通过一块磁场均匀的偏转磁铁,测量束流在靶上的位移,即可得到能量及其分布. BEPC注入器中的束流能量就是这样测定的.通常磁铁测量精度可达 1×10^{-4} ,相应能量精度也是 10^{-4} 量级.这种方法简单易行,但需要将束流从加速器引出.

利用加速器中一些与束流能量有严格关系的现象,可精确确定束流能量.例如,利用极化束流能量与粒子自旋频率 f 的线性关系,通过去极化共振确定 f ,从而得到束流能量,精度达到 2×10^{-5} ^[1,2].测量极化度需要复杂的设备,而 BEPC在低能段自然极化时间常数偏长(在 τ 能量下为6.2小时),给这种方法的实施带来困难.

在同步加速器中,束流在偏转磁铁的作用下沿闭合轨道运动,中心粒子与加速场同步,容易计算在理想轨道上运动粒子的能量 E :

$$(E^2 - E_0^2)^{1/2}(\text{GeV}) = 0.0477135 \oint B ds (\text{T} \cdot \text{m}), \quad (1)$$

式中, E_0 为粒子静止能量.只要准确测量磁铁积分场强($\Delta B / B \approx 10^{-4}$),就能由(1)式计算理想粒子的能量.

由于存在实际轨道与设计轨道的长度偏差和磁场误差,束流会偏离理想轨道,因此必

须考虑这些误差效应对束流能量进行修正.

2 束流能量的闭轨修正

在同步加速器中,理想粒子的能量与偏转磁场同步,而纵向运动的自动稳相则要束团沿长度为高频波长整数倍的轨道运动.用束流位置探头(BPM)能够测量束流的横向(水平和垂直方向)位置,而根据 BPM 的读数 x_{BPM} 也可以求得相应的能量修正量. x_{BPM} 由两部分组成:

$$x_{\text{BPM}} = x_E + x_b. \quad (2)$$

式中 x_E 为能量偏差的贡献:

$$x_E = D \cdot \delta, \quad (3)$$

这里, D 为色散函数, $\delta = \Delta E/E$, 而 x_b 源于磁场误差,是围绕理想轨道的波动项.将(2)式改写为左端为 x_b 的式子,两边取平方,并对所有的 BPM 求和:

$$\sum_i x_{b,i}^2 = \sum_i (x_{\text{BPM},i} - D_i \cdot \delta)^2. \quad (4)$$

由于 x_b 与能量误差 δ 无关,故有

$$\frac{\partial}{\partial \delta} \left(\sum_i x_{b,i}^2 \right) = 0, \quad (5)$$

从而得到

$$\delta = \frac{\sum_i D_i x_{\text{BPM},i}}{\sum_i D_i^2}. \quad (6)$$

从式(6)可见,由 x_{BPM} 的值计算 δ 时要对 D_i 加权,其物理原因是能量误差引起的轨道偏离与色散函数值 D_i 成正比,见式(3).

图 1 给出了不同色品值 ($\xi_x = 3, 6, 9$) 下水平振荡频数 ν_x 随高频频率 f_{rf} 的变化曲线,其交点相应于与理想轨道同步的 f_{rf} 值.这个测量值与由(6)式计算的结果很好地相符.

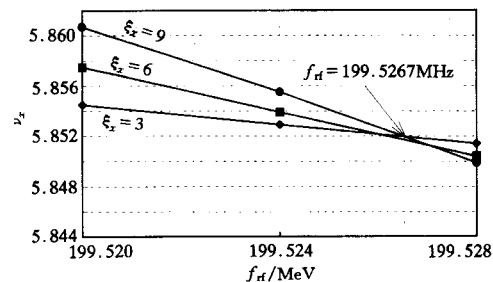


图1 不同色品值时 ν_x 随 f_{rf} 的变化

3 束流能量的二极场修正

同步加速器中的二极场包括偏转磁场误差,四极磁铁横向安装位置误差和校正二极子场强等.设在位置 s_2 处有一个二极场扰动 $\Delta B(s_2)$, 则在整个环上引起闭轨畸变 $x(s_1)$, 从而使轨道长度趋于改变,但同步加速(自动稳相)原理又要求轨道长度不变,因而必存在动量误差来补偿闭轨引起的改变:

$$\Delta L = \int_s^{s+L} x(s_1) \cdot h(s_1) ds_1 + \delta \cdot \alpha_p L = 0. \quad (7)$$

式中 L 为轨道长度, $h = 1/\rho$ 为轨道曲率, α_p 为动量压缩因子. 磁场误差 $\Delta B(s_2)$ 引起的闭轨畸变为

$$x(s_1) = -\frac{1}{2\sin\pi\nu} \int_{s_1}^{s_1+L} \sqrt{\beta(s_1)\beta(s_2)} \frac{\Delta B(s_2)}{B\rho} \cos[\pi\nu + \mu(s_1) - \mu(s_2)] ds_2, \quad (8)$$

其中, β 为包络函数, μ 为 β 振荡相角, $B\rho$ 为磁刚度, 而负号是由于假定与主磁场方向相同的场为正, 此时 $dx/ds < 0$.

将(8)式代入(7)式, 利用色散函数的计算公式

$$D(s_1) = \frac{1}{2\sin\pi\nu} \int_{s_1}^{s_1+L} \sqrt{\beta(s_1)\beta(s_2)} \cdot h \cdot \cos[\pi\nu + \mu(s_1) - \mu(s_2)] ds_2, \quad (9)$$

得到:

$$\delta = \frac{\sum_i \theta_i D_i}{\alpha_p L}. \quad (10)$$

式中, $\theta_i = \Delta B \cdot l/B\rho$ 为磁场误差 ΔB 产生的偏转角. 与(6)式相类似, (10)式中色散函数对于能量修正也以权重因子出现. 如果每一块偏转磁铁都改变相同的磁场 ΔB , 即

$$\theta = \frac{\Delta B}{B} \varphi_B, \quad (11)$$

这里, φ_B 为偏转磁铁的偏转角, 则由(10)式得:

$$\delta = \frac{\sum_i \theta_i D_i}{\alpha_p L} = \frac{\Delta B}{B} \frac{\sum_i \varphi_B D_i}{\alpha_p L} = \frac{\Delta B}{B}. \quad (12)$$

(12)式中的最后一步利用了能量压缩因子的公式

$$\alpha_p = \frac{1}{L} \oint h \cdot D ds. \quad (13)$$

(12)式作为能量修正公式(10)的特例, 体现在升磁场加速(“ramp”)过程中.

4 能量修正公式在 BEPC 中的应用

能量修正公式(6)和(10)已编入 BEPC 闭轨校正程序 ORBIT 中. 程序在将 BPM 的数据读入的同时即进行能量修正计算, 其结果送到数据库的相应单元. 偏转磁铁的场强由两个方法得到, 一是测量励磁电流, 再由在实验室精确测定的励磁曲线计算; 另一是直接测量与各偏转磁铁串联的一块参考磁铁, 再由已知的相互关系计算^[3]. 通常 BEPC 只使用 1—2 块校正二极铁, 二极场相应的能量修正量较小. 修正后的束流能量在线进程 CURMON 中得到, 在监视器上显示, 每隔 5 分钟更新一次提供实验物理取用的数据库单元, 进而与其他加速器参量一起计入实验数据带. 图 2 是从 τ 轻子质量测定实验数据带中

读出的能量随时间的变化曲线.

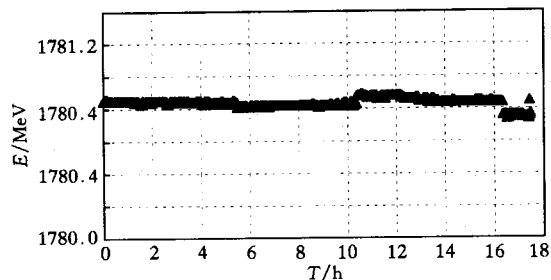


图2 一次典型的物理实验过程中束流能量随时间的变化

此外,程序中还考虑了地磁修正.尽管如此,仍然有些未知的误差没有计入,如偏转磁铁场的离散和聚焦磁铁的安装误差等.以上修正的正确性仍需实验的检验.表1给出了 BEPC 修正后的能量(在当时高频频率与校正元件设置下,束流能量的修正量为 0.5—0.6MeV)与用更精确的去极化共振方法测定的 J/ψ 和 ψ' 共振峰国际公认的能量比较^[4].

表1 BEPC测定的 J/ψ 和 ψ' 能量与国际公认值的比较

共振峰	BEPC测定能量 $E_{\text{BEPC}}/\text{MeV}$	国际公认能量 $E_{\text{PDG}}/\text{MeV}$	$(E_{\text{BEPC}} - E_{\text{PDG}})/\text{MeV}$
J/ψ	3097.20	3096.93 ± 0.1	0.27
ψ'	3686.88	3686.00 ± 0.1	0.88

从表1中可以看出, BEPC 修正后的能量与 10^{-5} 量级精度的国际公认值在 $(1-2) \times 10^{-4}$ 的范围内相符合.

作者衷心感谢 BEPC 运行组和 BES τ 质量测定课题组同事的圆满合作以及储存环室物理组同事的有益讨论.

参 考 文 献

- 1 Johnson J R et al. Beam Polarization Measurements at the SPEAR Storage Ring, SLAC-PUB-2903, April 1983
- 2 Koutchouk J-P. Energy Calibration with a Polarized Beam at LEP. In: Proc. 15-th ICHEA, July 1992
- 3 Du W F et al. Field Measurement of the Reference Magnet for BEPC. In: Proc. 15th ICHEA, July 1992
- 4 Bai J Z et al (BES Collaboration). Phys. Rev., 1996, **D53**:20

Beam Energy Correction in Synchrotrons

Zhang Chuang

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

Abstract The principle of beam energy measurement and its correction in synchrotrons are described. The formulas of beam energy correction for closed orbit distortion and dipole correctors are derived. The application of these formulas in the Beijing Electron-Positron Collider (BEPC) is introduced and the results are discussed.

Key words synchrotron, beam, energy correction, closed orbit distortion, dispersion