

在北京正负电子对撞机上采用小包络函数永久磁铁方案的可行性

李光晓 方守贤

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

1994-06-04 收稿 1995-01-25 收修改稿

摘 要

本文叙述了可供北京正负电子对撞机 (BEPC) 选择的小包络函数 (Mini- β) 永久磁铁方案的设计原则及主要参数。该方案设想 BEPC 储存环南、北对撞区分别设计为 Mini- β 插入节和一般插入节;弧区和注入区保持现结构不动。Mini- β 插入磁铁为一深入谱仪内部的永久磁铁,谱仪大门外侧置一垂直方向聚焦的电磁铁,可有效地补偿增能过程中永久磁铁带来的动力学扰动。主要设计参数为 $\beta_x^* = 1.2\text{m}$, $\beta_y^* = 0.036\text{m}$, 永久磁铁长度和梯度分别是 0.5m 和 8 m/T, 设计亮度与现运行模式相比可望增加到三倍左右。

关键词 Mini- β 插入节,永久磁铁,动力学孔径,亮度。

1 引 言

北京正负电子对撞机 (BEPC) 自 1988 年年底建成后,已运行了五年。其在 2.0GeV 能量下最高亮度达到了 $8.2 \times 10^{30}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$,束流寿命为 6 至 8 小时,已成为该能区中世界上最好的一台对撞机。在这基础上已进行了不少有意义的物理实验,并取得了 τ 轻子质量精确测量的成果。然而, BEPC 的亮度仍远满足不了今后所从事的一些反应截面小的高精度物理实验的需要。因此,不断提高 BEPC 的亮度已成为 BEPC 建成的一个追求目标。

BEPC 目前采用的聚焦结构是低包络函数 (LOW- β) 结构,其对撞点垂直包络函数 β_x^* 为 0.085m。进一步提高 BEPC 亮度的主要手段之一,就是用所谓小包络函数 (Mini- β) 结构,将其 β_x^* 降至 0.03m 左右。Mini- β 的概念,是原西德科学家 K. Steffen 提出的^[1],并在后来的 DORIS II、PEP、PETRA 和 CESR 等对撞机上获得了成功^[2,3]。但这一结构却在 SPEAR 上失败了。事后分析表明^[4],这主要是束团长度不能缩小到足够短而造成的。这为后来采用 Mini- β 提供了一条重要的经验。当前, Mini- β 已被公认为是一个提高亮度的极为有效的措施,因此,研究 BEPC 中采用 Mini- β 的可行性对提高

其亮度具有极其重要的意义。

2 两种不同的 Mini- β 方案比较

探讨 BEPC Mini- β 方案已有较长的历史^[5-10]。BEPC 现有聚焦结构花式 (Lattice) 已在文[9]中有详细描述。其主要特点是具有两个超周期,每一超周期结构为南对撞点插入节-弧区-注入节-弧区-北对撞点插入节。南北两对撞点插入节均为 LOW- β 结构并包括消色散区,因而超周期具有二折对称性。由于 BEPC 只在南对撞点装有谱仪 (BES), 因此,原则上并不要求北对撞点也具有 LOW- β 。所以,在转换成 Mini- β 时就存在两种可能: 即南北对撞点均采用 Mini- β (简称 MM) 或仅在南对撞点采用 Mini- β 而北对撞点仍维持原来的 LOW- β 式某种一般结构(简称 LM)。

对上面两种结构做了详细比较^[10],发现 LM 比 MM 有明显的优点: 1) LM 自然色品较小,动力学孔径也比 MM 大得多。2) LM 可少用两块插入四极磁铁。当然, LM 失去了两折对称性,其在北面消色散区中的四块四极磁铁 Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 的电源就不能再与南面的相应的磁铁的电源串联,要独立调配,这就增加了四台独立电源。但总的来说, LM 占优势,故采用 LM 结构是可取的。在上述比较中,所有弧区和注入区的聚焦结构保持不变,这不但保留了现有结构花式的一些优点,也不给束流的注入及正负电子的分开带来新的不定因素。

3 插入四极铁采用永久磁铁和电磁铁的比较

做为插入磁铁,永磁四极铁主要有两个优点: 1) 永磁四极铁总体积小,便于安装调节。如采用电磁四极铁,则必须使用屏蔽线圈 (back-ing Coil) 等来屏蔽谱仪磁场和电磁四极铁磁场间的相互干扰。由谱仪内部自由空间有限,使得电磁四极铁及屏蔽线圈的制造和安装出现了很困难。相反若采用永磁四极铁,则可省去所有屏蔽元件,从而达到同样梯度时永磁铁的体积比电磁铁小得多,有利于安装和调整。2) 节约用电,便于温控。永磁铁不用耗电,也就不会引起热效应。鉴于谱仪内部探测器对温度特别灵敏,温差必须控制在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 内,所以永磁铁就有很大的优点。当然,采用永磁铁作为插入四极铁也有一些缺点,但均是可以克服的。所以,下面仅介绍永磁四极铁的 LM 方案,简称 PERMC 方案。

4 PERMC 方案概述

4.1 聚焦结构概述

图 1 给出了 PERMC 方案二分之一环的磁聚焦结构。它由 Mini- β 插入节、弧区、注入节、弧区和北区插入节组成。

Mini- β 插入节由一块永久磁铁 Q_p 、四块电磁四极铁 Q_1-Q_4 和五段直线节组成,总长度 13.7m。 Q_p 深入到谱仪内部,从对撞点到 Q_p 入口为 1.33m, Q_p 长度 0.5m, 场

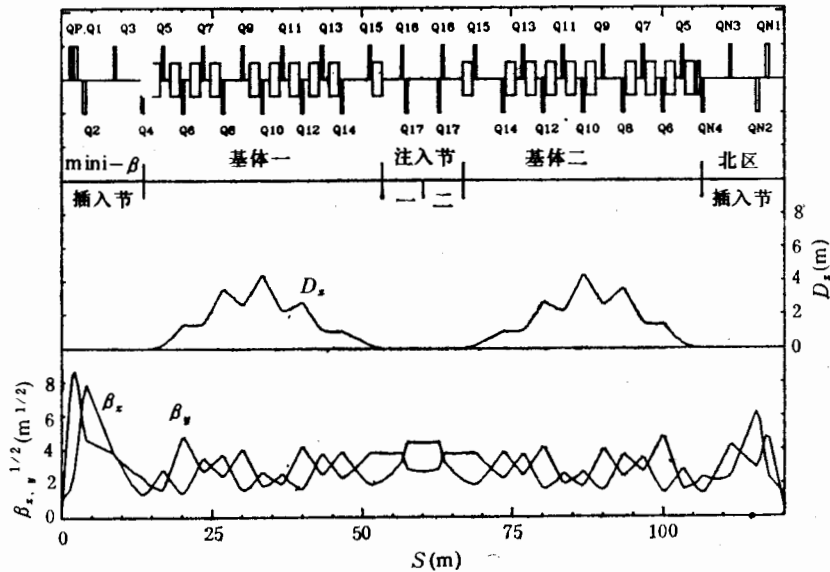


图 1 在 1/2 环上的包络函数 β_x , β_y 和色散函数 D_x
起点为南对撞点.

梯度为 8T/m. 该区内消色散.

弧区和注入节和现结构一样, 注入节内消色散, 以避免节内校耦合用的斜四极磁铁 (RQR3) 带来水平和垂直两方向发射度的耦合.

北区插入节由 QN1—QN4 四块电磁四极铁和四段直线节组成, 长度也是 13.7m. 在此节内置有两个高频腔和一个静电分离器. 节内也消色散, 以避免高频腔电磁场带来粒子运动的横-纵向耦合. 其内四块四极磁铁保持现位置不动以减小工作量, 但必须独立供电, 以确保此插入节为一般插入节, 减小自然色品.

4.2 Mini- β 插入节

Mini- β 插入节参数直接影响对撞亮度. 在不考虑单点对撞的前提下, 当耦合系数 K 满足

$$K = \varepsilon_y / \varepsilon_x = \beta_y^* / \beta_x^* \quad (1)$$

时, 为最佳耦合, 此时水平和垂直两个方向束束频移相等:

$$\Delta Q_x = \Delta Q_y = \Delta Q = \frac{Nr_e}{2\pi K_b \gamma \varepsilon_{x0}}, \quad (2)$$

相应的亮度最高, 为

$$\mathcal{L} = \frac{\pi \gamma^2 K_b f (\Delta Q)^2 \varepsilon_{x0}}{r_e^2 \beta_y^*} \left(1 + \frac{\beta_y^*}{\beta_x^*} \right), \quad (3)$$

式中 ε_{x0} , ε_x 和 ε_y 分别为束团自然发射度、水平方向和垂直方向发射度, ΔQ_x 和 ΔQ_y 为束束频移限, r_e 为经典电子半径, γ 为相对论能量, K_b 和 N 分别为每种束流中束团数和粒子数, f 为粒子回旋频率.

由式(3)可知, 增加发射度 ε_{x0} 和减小对撞点 β^* , 亮度将增加。由于磁铁和真空室孔径的限制, ε_{x0} 在 Mini- β 设计时仍取 LOW- β 设计时的 $0.66\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 左右。根据谱仪区域的边界条件以及 Q_p 处 β_y 的限制, β^* 应不小于 3cm 。BEPC 新增高频腔和采用其它措施后, 期望束长 σ_z 压缩至 3cm , 并根据 $\beta^* \approx 1.2\sigma_z$ 时 BEPC 亮度最高, 信噪比最好的经验, β^* 取为 3.6cm 。

定义束流在水平和垂直方向所需全孔径为

$$\begin{aligned} A_x &= 20\sigma_x + 20\text{mm}; \\ A_y &= 20\sigma_y + 20\text{mm}, \end{aligned} \quad (4)$$

其中, σ_x 和 σ_y 分别为无耦合和指定耦合下束团的均方根半宽度和半高度。在 Mini- β 插入节内, 由于 $D_x = D_y = 0$, σ_x 和 σ_y 分别为

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sqrt{\beta_x \varepsilon_{x0}}; \\ \sigma_y &= \sqrt{\beta_y \varepsilon_y}, \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $\varepsilon_y = \frac{K}{1+K} \varepsilon_{x0}$, K 为耦合系数。

根据[11], BEPC 正常运行 K 值可达 0.01 , 因此, 设计 Mini- β 时 K 取在 0.02 至 0.04 之间, β^* 在 1.6m 至 0.9m 之间。适当调整水平聚焦插入四极磁铁的位置和强度, 可使式(4)定义的束流孔径不超过当地的真空室几何孔径。

Mini- β 设计注入能量为 1.6GeV , 因而从注入到对撞有一个增能过程。为了补偿增能过程中 Q_p 场梯度不变带来的扰动, 谱仪大门口外侧放置了一块垂直方向聚焦的电磁铁。所设计的 Mini- β 插入节磁聚焦结构和真空室尺寸见图 2。在能量从 1.6GeV 增加到 2.0GeV 过程中, 保持工作点不变, Mini- β 插入节内 β 函数变化幅度是 $|\Delta\beta_x| \leq 2.0\text{m}$, $|\Delta\beta_y| \leq 4.5\text{m}$, 环上其余部分 $|\Delta\beta_x| \leq 0.2\text{m}$, $|\Delta\beta_y| \leq 0.2\text{m}$ 。色品变化为 $|\Delta\xi_x| \leq 0.03$, $|\Delta\xi_y| \leq 0.16$ 。永久磁铁能量上升的模拟实验证明, 上述扰动不会导致束流不稳定^[10]。

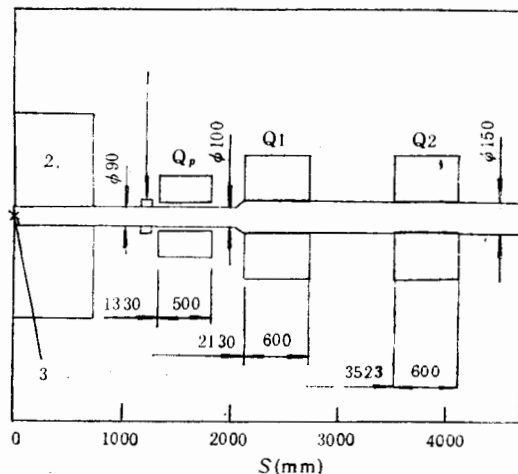


图 2 Mini- β 插入节

1. 亮度监测器; 2. 顶点漂移室; 3. 南对撞点

4.3 北区插入节

北区插入节内有静电分离器和高频腔,使得只有 QN1 和 QN2 有移动位置的可能。研究表明,其位置保持不动,不但可减少工作量,也有利于正负电子束团分开、耦合校正和尽量减弱快头尾效应。因而北区插入节仍保持现结构。

4.4 色品校正和耦合校正

利用环上已有的四套共 36 个六极磁铁进行了色品校正和动力学孔径跟踪。结果表明,PERMC 的束流稳定区为 $25\sigma_x \times 25\sigma_y \times 10\sigma_z$, 比现工作模式的稳定区 ($17\sigma_x \times 17\sigma_y \times 10\sigma_z$) 要大得多。图 3 和图 4 分别给出了初始振荡为 $10\sigma_x$ 和 $10\sigma_y$, (能量振幅为 $10\sigma_e$) 的粒子在水平和垂直方向上用 PARTRICIA 程序跟踪的相图。

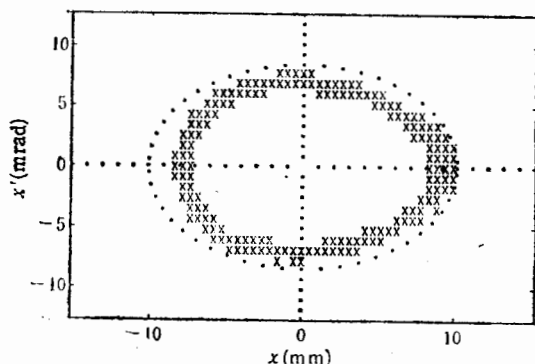


图 3 水平方向单粒子跟踪相图

起始参数: $x = 10\sigma_x$, $y = 10\sigma_y$, $z = 10\sigma_z$;
 $x' = 0$, $y' = 0$, $z' = 0$.

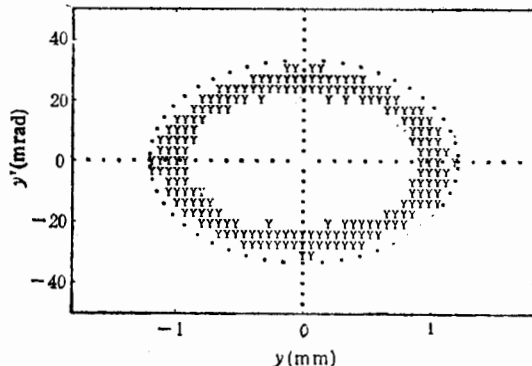


图 4 垂直方向单粒子跟踪相图

起始参数同图 3.

利用现注入区的斜四极磁铁校耦合,理论耦合可校到 0.7%.

4.5 注入

Mini- β 注入模式能量设计为 1.6GeV, 注入区结构和现结构完全一致。若使用现有的 K_1 、 K_2 和 K_3 三块冲击磁铁进行闭轨凸起,则当 $V_{K_1} = 7.61\text{kV}$, $V_{K_2} = 1.70\text{kV}$, $V_{K_3} = 7.77\text{kV}$ 时,闭轨在注入点凸起 26mm。对注入环内的第一束团前 50 圈跟踪计算表明,粒子运动范围处在储存环真空室孔径之内。当第二束团注入时,第一束团的振荡已大为衰减,不会因第二束团注入而损失,因而,能够积累起来。并且,由于注入能量从现在的 1.3 GeV 提升到 1.6 GeV, 横向阻尼大为增强,若仍采用现在的 12.5 Hz 的注入频率,则 Mini- β 模式的注入比现有模式的注入束流会更稳定。

若只使用 K_1 和 K_3 来进行闭轨凸起,由于 K_1 和 K_3 水平相差为 202° ,因而会导致残余闭轨振荡。当 $V_{K_1} = 6.36\text{kV}$, $V_{K_3} = 6.15\text{kV}$ 时,残余闭轨的均方根值最小,为 3.02 mm。此时,残余闭轨的最大值和最小值分别为 9.14mm 和 -6.76mm。此残余闭轨和现运行使用 2-Kicker 注入时的残余闭轨相近,因而 Mini- β 模式也可使用两块冲击磁铁

的注入方案。

4.6 正负电子束团分开

根据束流模拟计算结果^[12]和运行经验,对扁平束流, e^+ 和 e^- 在对撞点垂直轨道分开量应不小于 $3\sigma_x^*$, σ_z^* 为对撞点束团均方根半高度。

BEPC 静电分离器电源设计最高电压可达 60kV, 而在南、北对撞点将 e^+ 和 e^- 分别分开 $3\sigma_{xS}^*$ 和 $3\sigma_{xN}^*$ 时, 所需南、北对撞区静电分离器的电压只分别为 29.97 kV 和 32.00kV。此时残余闭轨的最大值为 5.54mm, 最小值为-4.46mm, 均方根值为 2.73mm。这和现运行束流分开导致的残余闭轨相近。因此, Mini- β 模式束流分开是可行的。

4.7 同步辐射模式

在现 LOW- β 聚焦结构下, 同步辐射专用模式工作点为 $Q_x = 9.38$, $Q_y = 5.14$, 发

表 1 PERMC 与现运行模式主要参数比较

模式	现运行模式	PERMC
能量 $E(\text{GeV})$	2.015	2.0
弯转半径 $\rho(\text{m})$	10.345	10.345
周长 (m)	240.4	240.4
设计亮度 $\mathcal{L}(\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1})$	0.99×10^{31}	2.4×10^{31}
束束频移 ΔQ	0.04	0.04
β_x^*/β_y^* (m/m)	1.3/0.085	1.2/0.036
横向振荡频率 Q_x/Q_y	5.81/6.75	5.785/6.71
自然发射度 $\varepsilon_{x0}(\text{mm} \cdot \text{mrad})$	0.65	0.69
每束环流强度 $I(\text{mA})$	45.6	48.0
自然色品 ξ_x/ξ_y	-12.2/-19.6	-12.3/-16.2
最佳耦合系数 K	0.065	0.03
插入 Q 孔径 $A_x(Q_2)/A_y(Q_1)(\text{mm}/\text{mm})$	134/107	150/72
稳定区	$17\sigma_x \times 17\sigma_y \times 10\sigma_z$	$25\sigma_x \times 25\sigma_y \times 10\sigma_z$

射度为 $0.0757\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 。在 Mini- β 聚焦结构下, 同步辐射专用模式工作点变为 $Q_x = 9.38$, $Q_y = 6.14$, 发射度为 $0.0751\text{mm} \cdot \text{mrad}$, 自然色品为 $\xi_x = -17.3$, $\xi_y = -8.8$, 跟踪动力学孔径为 $15\sigma_x \times 15\sigma_y \times 10\sigma_z$ 。目前在能量为 2.015GeV 的运行模式和所建议的 PERMC 模式的主要性能参数列在表 1 中以进行比较。

5 结 语

BEPC Mini- β 永久磁铁方案, 解决了谱仪内部安装插入 Q 铁的空间紧张等问题, 聚焦结构保持了现有结构参数调节灵活的特点, 在注入、束流分开等方面没有带来新的不稳定因素, 能量上升中永久磁铁带来的扰动不会导致束流损失。由于用南北对撞区插入节

参量相互独立,自然色品有明显下降,粒子稳定区有显著增加。所设计的亮度在 2.0GeV 时,和现运行于 2.0GeV 的模式相比,可望有 3 倍因子的增益。

整个 BEPC 亮度提高方案的研究设计工作延续了较长一段时间。除本文作者外,先后有吴英志、国智元等同志做了不少工作;在永磁方案的设计中,张闯、蒋延龄、黄开席等同志及磁铁组的同志给予了紧密的配合,提供了不少有益的意见,在此对他们表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] K. Steffen, Internal Report DESY M-79123, May 1979.
- [2] H. Nesemann et al., IEEE Trans. on NS NS-30 (1983) 1998.
- [3] K. Wille, DORIS II/III-A 5.8 GeV Storage Ring with High Luminosity, DESY 81-047 Aug. 1981.
- [4] K. Bane et al., Bunch Length and Impedance Measurements in SPEAR, European Particle Acc. Conf., P878, Rome, June 7-11, 1988.
- [5] 吴英志, BEPC 储存环 Mini- β 磁聚焦结构初步设计, BEPC 理论组内部工作报告, 83, 07.
- [6] 洪澎, BEPC Mini- β 方案的设计和初步研究, 硕士学位论文, 高能物理研究所, 1987 年 5 月.
- [7] 国智元等, BEPC 亮度预先研究, 高能所理论组内部报告, BEPC 17H186-6, 1986.
- [8] Wu Yingzhi et al., A proposed Mini- β Scheme for BEPC, Prce. of the Workshop on BEPC Luminosity Upgrades, June 1991.
- [9] 方守贤等, 高能物理与核物理, 10(1986)207.
- [10] 李光晓, BEPC Mini- β Lattice 方案设计及纵向微波不稳定性的初步研究, 博士论文, 高能物理所, 1993 年 7 月.
- [11] 秦庆, BEPC 中束-束相互作用的研究, 硕士论文, 高能物理所, 1991 年.
- [12] S. Myers, Nucl. Instr. Meth., 211 (1983) 263.

Realizability of the Permanent Magnet Mini- β Scheme for the Beijing Electron Positron Collider

Li Guangxiao Fang Shouxian

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

Received 4 June 1994, Revised 25 January 1995

Abstract

The design principle and main parameters of the permanent magnet Mini- β scheme for the Beijing Electron Positron Collider (BEPC) are described. In the design, the BEPC storage ring will have a Mini- β insertion and a conventional insertion in the southern and northern interaction regions respectively. The arc and injection regions are kept unchanged. The Mini- β insertion quadrupoles are designed to be permanent magnets. A vertical focusing electromagnet is positioned near each of the two gates of BES so that the dynamics perturbation due to the constant field strength of the permanent magnet in the energy ramping can be compensated. The designed $\beta_x^* = 1.2\text{m}$, $\beta_y^* = 0.036\text{m}$, and the length and strength of the permanent magnets are 0.5m and 8T/m respectively. Compared with running mode now, the designed luminosity is increased by a factor of about 3.

Key words Mini- β insertion, permanent magnet, dynamic aperture, luminosity.