

BEPC 储存环磁聚焦结构的改进

方守贤 陈利民 陈森玉

陈思育 梁岫如 张 闯

(中国科学院高能物理研究所)

摘 要

本文叙述了 BEPC 储存环磁聚焦结构改进的原则及主要结果。减小 β_x^* 为 0.08m, 设计亮度达到 $2 \times 10^{31} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; 提高 β_x^*/β_y^* 以减小插入节 Q 铁孔径并使储存环水平方向色差效应减小; 采用较多 Q_F 铁强度变量的基体, 得到了较好的消色散和较小的 β 函数调制, 束流稳定区达到 $12\sigma_x \times 12\sigma_y \times 12\sigma_E$; 改善了主冲击磁铁之间的相位, 使之接近 180° , 简化了注入凸轨系统; 在色散较大的位置上提供了四个安放发射度控制扭摆磁铁的长直线节, 在消色散区附近提供了安放同步辐射扭摆磁铁。改进后的方案, 有利于提高低能对撞时的亮度及寄生模式和专用模式下的同步辐射应用, 以满足一机两用的要求。

一、引 言

BEPC 储存环磁聚焦结构的第一版方案^[1](简称 BEPC-V1) 公布以后, 又接着对方案进行了研究, 随着认识的进一步深入和部件研制工作的开展, 提出了改进方案的要求。同时, 同步辐射应用对机器结构提出了新的要求。为此, 我们在基本上不改变由 BEPC-V1 已经确定的硬件指标的条件下(允许储存环周长变化 1%) 寻找新方案。在此过程中, 曾形成了多个方案^[2], 最后确定的方案称作 BEPC-V2。

在 BEPC-V1 中, 对撞点处包络函数 β_x^* 和 β_y^* 值分别选作 0.1m 和 1.3m, 相应的设计亮度为 $1.7 \times 10^{31} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。对撞机理论和运行经验表明, β_x^* 值的减小对提高亮度有利, 也有减少的可能。而提高比值 $R = \beta_x^*/\beta_y^*$, 可减少插入节 Q_1 和 Q_2 的孔径。

BEPC-V1 基体的结构特点是 B 铁的安放位置大致以弧区中点处的 Q 铁为反对称。其缺点是不利于放置色品校正六极子和闭轨校正元件等。注入冲击磁铁系统所占的相移接近 270° , 使注入系统结构较复杂, 而且冲击磁铁强度较高。

在 BEPC-V1 中, 可供安放扭摆磁铁位置上的色散函数 D_x 值较小 ($\sim 1.3\text{m}$), 要求扭摆磁铁强度较高, 不利于发射度控制; 若在该处放置同步辐射扭摆磁铁, 在专用模式下, 将会引起发射度增长。

基于以上分析,我们对磁聚焦结构进行了调整,计算了多种 β_x^* 和 R 值的磁聚焦结构组态^[3],得到了较好的色品校正跟踪结果.表1给出了 BEPC-V1 和 BEPC-V2 的主要参数.

表1 BEPC-V2 和 BEPC-V1 主要参数比较

	BEPC-V1	BEPC-V2	
能量 $E(\text{GeV})$		2.8	
弯转半径 $\rho(\text{m})$		10.345	
周长 (m)	238.4	240.4	
设计亮度 $\mathcal{L}(\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	1.7×10^{31}	2×10^{31}	
$\beta_x^*/\beta_y^* = R$ (m/m)	1.3/0.1=13	1.6/0.08=20	2.0/0.08=25
横向振动频率 Q_x/Q_y	6.28/7.12	6.18/7.12	6.18/7.12
束流自然发射度 $\varepsilon_{x0}(\text{mm} \cdot \text{mrad})$	0.66	0.65	0.66
每束环流强度 $I(\text{mA})$	65	63	64
自然色品 ξ_x/ξ_y	-12.3/-19.2	-10.9/-21.4	-10.9/-21.4
最佳耦合系数 K	0.277	0.224	0.200
插入 Q 孔径需要量 $A_x(Q_x)/A_y(Q_y)$ (mm/mm)	136/108	128/118	120/118
稳定区	$10\sigma_x \times 10\sigma_y \times 6\sigma_E$	$12\sigma_x \times 12\sigma_y \times 12\sigma_E$	$12\sigma_x \times 12\sigma_y \times 12\sigma_E$
主冲击磁铁间的相移 $\Delta\phi_A$	270°	202°	205°
要求静电分离器强度 $\varepsilon \times l_s(\text{kV/m} \times \text{m})$	18.2×2.0	22.6×2.0	25.2×2.0
可供安放 SRW 的直线节可用长度×数目	—	1.8m×2 + 1.4m×2	

二、磁聚焦结构概述

图1给出了 BEPC-V2 四分之一环的磁聚焦结构.它由低 β 插入节、基体和对称节组成.

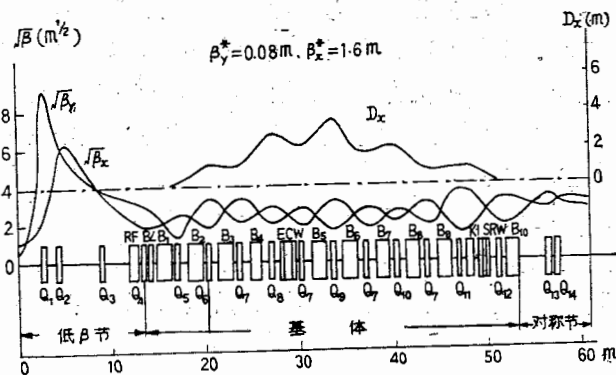


图1 在1/4环上的包络函数 β_x, β_y 和色散函数 D_x

低 β 插入节由四块四极磁铁 (Q_1-Q_4) 和四段直线节组成,总长度为 13.7m. 从对撞点到 Q_1 入口处的 2.5m 长直线节可放置探测器(北京谱仪). [Q_3 和 Q_4 之间的直线节从 5.2m 减小到 4.2m. 该处色散函数为零,用以放置高频腔等设备.

从 B_{10} 出口到对称点的无色散区,是对称节,长 6.75m. 包括两块四极磁铁和两段直线节. 以对称点为中点的直线节长度为 $2 \times 2.55\text{m}$, 用于安放注入铁切割器和一块辅助冲击磁铁. B_{10} 和 Q_{13} 之间的长直线节可放置同步辐射扭摆磁铁或横向反馈系统.

基体的组成是: 十块弯转磁铁, 一块低场弯转磁铁, 十一块四极磁铁及相应的直线节. 其主要单元为分离型 FODO 结构. 在第三单元的前半单元中抽去弯转磁铁,用以安放发射度控制扭摆磁铁 (ECW); 在第六单元的前半单元中抽去弯转磁铁以放置冲击磁铁和同步辐射扭摆磁铁 (SRW).

Q_1 和 Q_2 为插入节四极磁铁, 长 0.6m, Q_3-Q_{14} 为正常四极磁铁, 长 0.4m. B 铁长 1.6m. 储存环总周长为 240.4m.

三、低 β 插入节

低 β 插入节的参数值,直接影响对撞机性能,当发射度比满足

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

时,水平和垂直两个方向的束束频移相等:

$$\Delta Q_x = \Delta Q_y = \Delta Q = \frac{Nr_c}{2\pi K_b \gamma \varepsilon_{x_0}} \quad (2)$$

相应的亮度最高,为

$$\mathcal{L} = \frac{\pi \gamma^2 K_b f (\Delta Q)^2 \varepsilon_{x_0}}{r_e^2 \beta_y^*} \left(1 + \frac{1}{R}\right) \quad (3)$$

式中, ε_{x_0} 、 ε_x 、 ε_y 分别为束团的自然发射度和水平、垂直方向发射度; ΔQ_x 、 ΔQ_y 为束束频移限, r_e 为电子经典半径, 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 (3) 式可见, 增加 ε_{x_0} 和减小 β_y^* , 亮度将增加. 由于磁铁孔径和高频额定功率已经确定, 不允许 ε_{x_0} 有很大变化. 在计算中, 减少 β_y^* , 当 $\beta_y^* = 0.08\text{m}$ 时, $\mathcal{L} = 2 \times 10^{31}\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$, 比 BEPC-V1 提高约 20%. 然而 β_y^* 的进一步减少, 将会增加色品校正的困难.

通常有 $R \gg 1$, 因而 β_y^* 的选取对亮度影响较小, 而对插入节 Q 铁孔径起着决定的作用. 束流在水平和垂直方向所需要的全孔径分别为:

$$A_x = 20\sigma_x + 20\text{mm} \quad (4)$$

$$A_y = 20\sigma_y + 10\text{mm}$$

式中, σ_x 和 σ_y 分别为无耦合和全耦合情况下束团的均方根半宽度和半高度. 在插入节中, $D_x = D_y = 0$, σ_x 和 σ_y 分别为

$$\sigma_x = (\varepsilon_{x_0} \beta_x^*)^{1/2} \quad (5)$$

$$\sigma_y = \left(\frac{1}{2} \varepsilon_{x_0} \beta_y^*\right)^{1/2}$$

在对撞区,距对撞点为 s 处的 β 函数的表达式如下:

$$\beta(s) = \beta^* + s^2/\beta^* \quad (6)$$

β_y 的最大值出现在 Q_1 中, β_x 的最大值在 Q_2 中。显然, β^* 的选择对 β_{\max} 值、机器的色散效应和磁铁孔径有很大影响。 β^* 主要取决于亮度要求和可能。在选取 R 时,有两种考虑: 一是等 β , 即使 $\beta_{y\max}|_{Q_1} \sim \beta_{x\max}|_{Q_2}$, 两个方向的色差效应相当; 二是等孔径, 即 $A_y(Q_1) \sim A_x(Q_2)$ 。在 BEPC-V1 中,参照 SPEAR 的经验,采用了等 β 设计,相应束流在插入 Q 铁中所要求的最大孔径为 $A_x(Q_2) = 136\text{mm}$ 和 $A_y(Q_1) = 108\text{mm}$ 。由于已选定 Q_1 和 Q_2 处的真空盒截面为圆形,插入 Q 铁要按束流在两个方向上所需的最大孔径设计。BEPC-V2 按等孔径考虑,取 $R = 20-25$,在 $\beta_y^* = 0.08\text{m}$ 时, $A_x(Q_2) = 120-128\text{mm}$, $A_y(Q_1) = 118\text{mm}$, 孔径值有所减小。

R 值的增加,必须要相应增加静电分离器的强度,以保证在注入和加速阶段水平方向的束束频移 ΔQ_x 足够小^[5]:

$$\mathcal{E}l_p = c \left(\frac{\beta_x^*}{\beta_y^*} \frac{1}{\beta_{y,p}} \frac{1}{\Delta Q_{x,s}} \right)^{1/2} \quad (7)$$

式中, \mathcal{E} 和 l_p 分别为分离器的场强和长度, $\beta_{y,p}$ 为分离器处的 β_y 值, c 为常数。从 (7) 式看出,分离器的积分强度 $\mathcal{E}l_p$ 正比于 \sqrt{R} , 当 R 从 13 增加到 25 时, $\mathcal{E}l_p$ 约增加 40%。

R 值的增加,还要求有较小的最佳发射度比。磁场误差的模拟研究表明, $R = 20, 25$ 相应的最佳发射度比为 5%, 4%, 是可以获得的。

四、基体和消色散

BEPC 储存环在低 β 插入节和对称节附近的注入点处均要求消色散。如果采用通常大机器那种低 β 插入节(或对称节)—消色散节—正常周期的结构,不仅需要较多的 Q 铁变量,而且工作点和发射度调节不灵活,正常周期也只有 1—2 个。BEPC 采用低 β 插入节—基体—对称节的磁聚焦结构。所谓基体,即是若干准周期单元的总称。它不同于大机器的正常周期,不仅弯转磁铁的排列和直线节的安排在各单元中可能略有不同,而且四极磁铁强度的组数也多于 2, 以满足元件安放,聚焦性能、消色散等方面的要求。BEPC-V1 基体的结构特点是准周期单元以弧区中点附近的 Q 铁为反对称,因而在校正系统中,有两块相邻的六极磁铁和二极磁铁的极性相同。这不利于色品校正和闭轨校正。文献 [6] 提出了一种消色散方法,可以大大缩小计算机的搜索范围,容易找到所需要的解。其基本想法是在 $m\mu = n \cdot 360^\circ$ (m, n 为正整数, μ 为正常周期的相移)的正常周期的端点插入任意个不包含弯转磁铁的匹配区段,则可在该区中获得消色散。

BEPC-V2 需要在高色散处抽去 B 铁供安放 ECW, 并在对称节附近抽去 B 铁和加长直线节以安放冲击磁铁和 SRW。基体中的各个单元不是均匀长度的周期。基体的这种不均匀性将引起包络函数和色散函数的调制。补偿的办法是在适当的 Q 铁中引入强度增量 ΔK , 即增加匹配的变量。这时, $\frac{\Delta\beta}{\beta}$ 和 $\Delta\tilde{D}_x$ 应满足方程^[7]:

式

动
校自
减并
正
放
情

误

和
四
贡
性
就极
5σ
加

$$\frac{d^2}{d\phi^2} \left(\frac{\Delta\beta}{\beta} \right) + 4 \frac{\Delta\beta}{\beta} = -2\Delta K\beta^2 \quad (8)$$

$$\frac{d^2}{d\phi^2} (\Delta\tilde{D}_x) + \Delta\tilde{D}_x = -\Delta K\beta_x^2 \tilde{D}_x$$

式中 $\phi = \int_0^s \frac{ds}{\beta}$ 为相角, $\tilde{D}_x = \frac{D_x}{\sqrt{\beta_x}}$ 为水平方向归一化色散函数。

从(8)式中看出,对于一定的消色散量,在 β_x 较大处所需的 ΔK 较少,对 β 函数的扰动也较小。在 BEPC-V2 基体中,选择五块 Q_F 铁 ($Q_6, Q_8, Q_9, Q_{10}, Q_{11}$) 作变量,获得了较好的聚焦性能。图 1 给出的包络函数 β_x 和色散函数 D_x 的变化曲线表明调制比较小。

五、色品校正

表 1 给出 BEPC-V1 和 BEPC-V2 的参数表明, β_x^* 从 0.1m 减少到 0.08m, 垂直方向自然色品值 ξ , 从 -19.2 增加到 -21.4; R 从 13 增加到 20(25) 时, 水平色品 ξ_x 从 -12.3 减小为 -10.9(-10.2), 总的看来,增加了色品校正的难度。

在 PEP, PETRA 等大型储存环中^[6], 是选择适当的正常周期相移和六极磁铁位置, 并采用多于六组的六极磁铁来满足以上要求。对于 BEPC 这样的小机器, 基体中不包含正常周期, 每一处安放六极磁铁位置上的机器函数及它们之间的相位都在变化, 且可供安放六极磁铁的位置有限, 没有选择的余地。为了减少六极磁铁组数, 需要寻求适合 BEPC 情况的色品校正方式。

在研究储存环的色差效应时, 仍可采用方程式(8)。这时, $\frac{\Delta\beta}{\beta}$ 和 ΔD_x 来源于动量误差 δ , 相应于(8)式右端的 ΔK 分别表示为:

$$\Delta K = -K\delta \quad (\text{对四极磁铁})$$

$$\Delta K_x = \pm K_s \tilde{D}_x \delta \quad (\text{对六极磁铁})$$

$$\text{其中 } K_s = \frac{1}{B\rho} \left. \frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2} \right|_0$$

式(8)是强迫振动方程组, 即在 $\Delta K = 0$ 的区段内, $\frac{\Delta\beta}{\beta}$ 和 $\Delta\tilde{D}_x$ 作圆频率分别为 4π 和 2π 的简谐振动, 在 $\frac{\Delta\beta}{\beta} - \frac{1}{2} \frac{d}{d\phi} \left(\frac{\Delta\beta}{\beta} \right)$ 和 $\Delta\tilde{D}_x - \frac{d}{d\phi} (\Delta\tilde{D}_x)$ 相空间中是一段圆弧; 在四极和六极磁铁中, $\Delta K \approx 0$, 存在扰动; 在插入 Q 铁处, β 和 $\Delta(Kl)$ 均较大, 对于色差的贡献也大, 但该处 $D_x = 0$, 不能采用六极磁铁作局部补偿。如果利用基体单元的不均匀性, 适当改变六极磁铁处的机器函数和六极铁之间以及六极磁铁与插入 Q 铁之间的相移, 就有可能在较少六极磁铁组数的条件下获得较好的色差补偿。

在 BEPC-V1 中, 引入 β 函数的调制, 改变六极磁铁之间的相移, 采用三组共 32 块六极磁铁 (16 块 SF , 8 块 SD 和 8 块 SD_1), 色差补偿效果比较好, 稳定区为 $10\sigma_x \times 10\sigma_y \times 6\sigma_z$ 。在 BEPC-V2 中, β 函数较均匀, 各校正元件的排列因此也比较均匀, 在 Q_7 附近增加了一块 SD_1 ; 调整六极磁铁处 D_x 的值和适当改变 Q_6 和 Q_9 的强度从而调节六极磁铁与

插入 Q 铁之间的水平和垂直方向的相移,使色差补偿和束流稳定区都有明显改善。用PATRICIA程序^[8]跟踪粒子的运动,结果表明,在 β_x^* 减小为0.08m的情况下,仍只需要三组六极磁铁,可达到的束流稳定区为 $12\sigma_x \times 12\sigma_y \times 12\sigma_E$ 。图2和图3分别给出了初始振荡为 $10\sigma_x$ 和 $10\sigma_y$ (能量振荡幅度为 $10\sigma_E$)的粒子在水平和垂直方向上的跟踪结果。

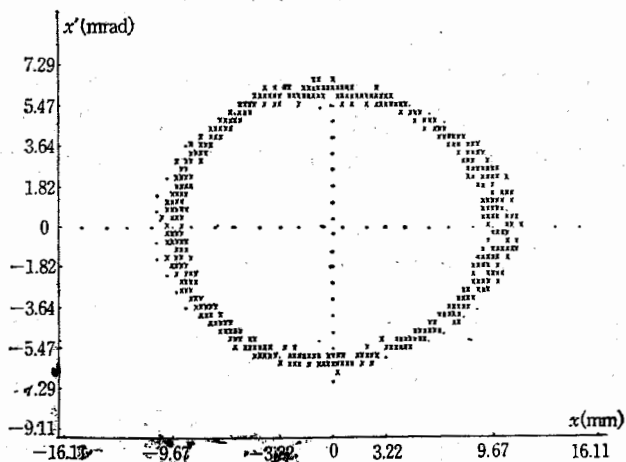


图2 水平方向单粒子跟踪相空间图 $\left(\frac{\Delta p}{p} = 10 \frac{\sigma_E}{E}\right)$

跟踪粒子初始坐标: $x_A = 10.294\text{mm} = 10\sigma_x$, $x'_A = 0.0\text{mrad}$

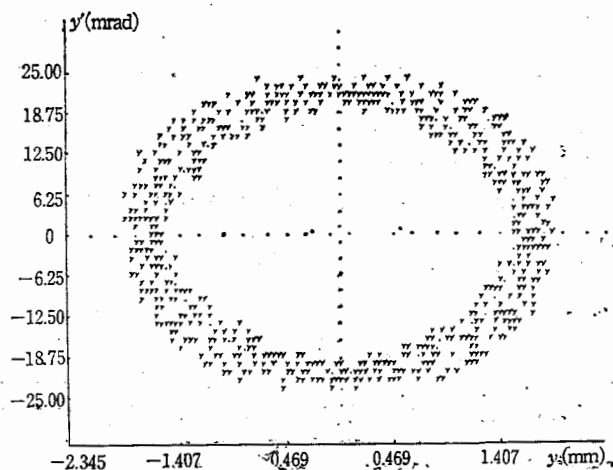


图3 垂直方向单粒子跟踪相空间图 $\left(\frac{\Delta p}{p} = 10 \frac{\sigma_E}{E}\right)$

跟踪粒子初始坐标: $y_A = 1.563\text{m} = 10\sigma_y$, $y'_A = 0.0\text{mrad}$

六、注 入

当两块冲击磁铁之间的相移 $\Delta\phi_K$ 为 180° 的整数倍时,为使注入时的中心轨道凸起,

只需要两块冲击磁铁,而且所需要的冲击磁铁强度最小。在 BEPC-V1 中,由于注入点的位置决定了注入凸轨系统比较复杂,系统所占相移 $\Delta\phi_K$ 约为 270° , 采用了四块冲击磁铁; 在 BEPC-V2 中,改善了注入点的位置和突轨元件布局,系统所占相移 $\Delta\phi_K$ 约为 200° , 仍偏离 180° 。由此而引起残余相干振荡的等效发射度增长可表示为^[9]:

$$\Delta\varepsilon = \beta_K \cdot (\delta\phi_K)^2 \theta_K^2 \quad (9)$$

式中, β_K 和 θ_K 分别为冲击磁铁处的包络函数值及其偏转角, $\delta\phi = \Delta\phi_K - n \cdot 180^\circ$ 。当 $\beta \sim 8\text{m}$, $\theta_K \sim 3\text{mrad}$, $\delta\phi = \pm 20^\circ$ 时, $\Delta\varepsilon \sim 9\text{mm} \cdot \text{mrad}$, 为 e^+ 注入束流发射度的 4.5 倍,这对 β 振荡的扰动不能忽视。因此,需采用三块冲击磁铁,在对称点附近的 K_3 可以补偿注入区以外的扰动。此系统可灵活调节注入束的初始 β 振动幅度。

注入束在 Q_{13} 中通过时,偏离中心轨道约 80mm。该处磁场误差设计值为 $\frac{\Delta B}{B} \sim 1 \times 10^{-3}$ 。研究表明^[10],束流一次通过所引起的发射度增长约为 7%,这是可以允许的。

七、同步辐射

BEPC 储存环除了用于正负电子对撞物理实验外,也用作同步辐射光源。在寄生工作模式下,同步光的强度、亮度和稳定度等都受到束-束相互作用的影响。在专用工作模式下,为单束运行,适当调整磁聚焦参量,可获得更好的同步光性能。当 BEPC 工作在 2.8GeV 时,同步辐射光的临界能量为 4.7keV; 扭摆磁铁场强为 1.8T, 临界能量可提高到 9.4keV, 有利于硬 X 射线应用。

对于 BEPC-V1 的研究表明^[11],在同步辐射专用模式下,束流水平自然发射度 ε_x 可减少到 $0.2\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 。当时,没有提供安放同步辐射扭摆磁铁的位置,若利用发射度控制扭摆磁铁,引出光束的水平张角小(约 9mrad),发射度增长约为 30%。在 BEPC-V2 中,在对称节附近,有四个可供安放同步辐射扭摆磁铁的直线节,可使用长度为 1.8m 和 1.4m 两种。该处 $D_x \sim 0$, β_y 约为 8m, 同步辐射光的引出张角分别为 20, 25mm · mrad。

八、结 语

改进后的 BEPC-V2 提供了良好的聚焦性能和较大的束流稳定区,设计亮度达到 $2 \times 10^{31}\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。磁聚焦结构的安排简化了注入凸轨系统,增加了同步辐射扭摆磁铁。在对 BEPC-V2 的进一步研究中,着重在于研究同步辐射专用模式和注入模式。

参加 BEPC-V1 方案设计的除本文作者以外,还有国智元、吴英志、黄楠、冯宝树等。BEPC 储存环磁聚焦结构的改进工作是在谢家麟教授和徐建铭教授的领导下进行的,多次与国外同行专家进行论论,也得到了国内许多有关同志的帮助,作者谨在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 中国科学院高能物理所: “22/28 亿电子伏北京正负电子对撞机 (BEPC) 初步设计提要” (1982)。
- [2] “BEPC 磁聚焦结构三个方案的比较”高能所粒子动力学组内部报告。(1984.1)。
- [3] 陈利民、陈思育、梁岫如、吕继华、张闯: “BEPC 第二版的磁聚焦组态 1—4”, 高能所粒子动力学组内部报告。

- (1984.3).
- [4] 中国科学院高能物理所: “2.2京电子伏储存环初步设计提要(修订版)”(1984.2).
- [5] B. Richter: “Tune Shift in Storage Ring for Separated Beam Operation”, LEP 176 (1979).
- [6] 方守贤: <原子能科学技术>, V19 (1985), 650.
- [7] E. D. Courant, H. S. Snyder, *Ann. Phys.*, **Vol. 3** (1958), 1-48.
- [8] H. Wiedemann: “Chromaticity Correction in Large Storage Rings”, Report PEP, **220** (1976).
- [9] 张闯: “相位差在 $k\pi$ 附近的两块冲击磁铁对 β 振荡的扰动”, 高能所粒子动力学组内部报告(1983.9).
- [10] 陈思育: “四极磁铁好场区外磁场下降对注入束团一次通过的影响”, 高能所粒子动力学组内部报告(1983.10).
- [11] 陈利民: “BEPC 用作同步辐射光源的初步研究”, <同步辐射应用学术讨论会>资料之八, (1983.4).

IMPROVEMENTS TO THE BEPC STORAGE RING LATTICE

FANG SHOU-XIAN CHEN LI-MIN CHEN SEN-YU CHEN SI-YU

LIANG XIU-RU ZHANG CHUANG

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

The principles and results to improve the BEPC storage ring lattice are described. The minimum β_y^* is chosen to be 0.08 m so that the design luminosity reaches $2 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Increasing the ratio β_x^*/β_y^* , the required aperture of insertion quadrupoles as well as horizontal chromatic aberrations are reduced. A trunk with more variables of Q_x strength is adopted to provide better dispersion suppression and smaller β function, modulation and the dynamical aperture of $12\sigma_x \times 12\sigma_y \times 12\sigma_z$ is attained. The phase advance between two major kickers is changed to be close to 180° in order to simplify the injection system. 4 straight sections where dispersion D_x is large are provided to place emittance control wigglers and other, 4 straight sections near to the zero dispersion regions will be useful for synchrotron radiation applications.