

负动量压缩因子磁聚焦结构在 τ -粲工厂 储存环设计中的应用

王九庆 方守贤

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 研究并提出了一个负动量压缩因子($\alpha_p < 0$) τ -粲工厂储存环磁聚焦结构. 对其束团拉伸的计算表明: 在设计流强, 束团长度将比自然束长短, 束团长度不会拉伸.

关键词 磁聚焦结构 动量压缩因子 束团长度拉伸

1 引言

τ -粲工厂是新一代高亮度正负电子对撞机, 束团长度拉伸的问题令人关注. 因此探索设计一个 $\alpha_p < 0$ 的 τ -粲工厂磁聚焦结构, 以利于控制束团长度¹⁾. 本文介绍了 $\alpha_p < 0$ τ -粲工厂高亮度模式的磁聚焦结构和磁聚焦结构参数, 以及动力学孔径的跟踪结果. 说明了磁聚焦结构对单色模式的兼容性及其调节灵活性. 最后, 对 $\alpha_p < 0$ τ -粲工厂储存环中的各种束流不稳定性作了分析和计算, 给出了束团长度随流强的变化曲线. 文章的结论指出设计 $\alpha_p < 0$ 的 τ -粲工厂磁聚焦结构是可行的. 优化设计还有待更深入的研究.

2 τ -粲工厂磁聚焦结构的特点

τ -粲工厂加速器的设计方案尽可能做到利用同一个磁铁布局, 通过对聚焦结构的匹配, 实现不同的模式. 通常将 $E = 2.0\text{GeV}$, 实现峰值亮度 $L = 1 \times 10^{33}\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 称为高亮度模式, 将 J/ψ 共振峰能量 $E = 1.55\text{GeV}$, 实现质心能散小于 0.15MeV , 称为单色模式. 同时, 希望能实现纵向极化. 本文将集中讨论如何实现 $\alpha_p < 0$, 因此暂不考虑纵向极化插入节的设计和磁聚焦结构参数的匹配.

根据高亮度模式(包括正对碰撞的标准模式、小角度交叉对撞模式)和单色模式对磁聚焦结构的参数要求, 可以概括出 τ -粲工厂的磁聚焦结构所具备的特点:

1998-03-06收稿

1) 王九庆, “负动量压缩因子的 τ -粲工厂磁聚焦结构设计及纵向微波不稳定性的初步研究”, 博士论文, 1997

年5月

- (1) 对撞点的包络函数和色散函数可以灵活地调节;
- (2) 发射度可以在很大范围内变动;
- (3) 能散度可调.

习惯上,将 τ -粲工厂的磁聚焦结构分成对撞区、弧区和功用区三个部分,如果考虑纵向极化,则在对撞区和弧区之间还要加入极化插入节.

显然,对撞点的包络函数和色散函数由对撞区的设计决定;发射度和能散度主要由弧区决定. 本文重在讨论如何实现 $\alpha_p < 0$ 的磁聚焦结构. 所以,在设计磁聚焦结构时,弧区采用文献[1]介绍 $\alpha_p < 0$ 的超周期模块结构,对撞区就直接引用了北京 τ -粲工厂(BTCF)可行性研究的设计方案^[2],只是在弧区消色散节与对撞区的连接中进行了适当的匹配.

3 高亮度模式的磁聚焦结构设计

储存环的布局类似 BTCF^[2],采用双环结构. 两环垂直方向分开 1.5m, 共有 1 个对撞点. 每个环分为对撞区、弧区和功用区.

3.1 对撞区

对撞区采用与 BTCF 相同的设计^[2], 双束以小角度交叉对撞(在 2.0GeV 时交叉角度为 $\pm 2.6\text{mrad}$). 在对撞区到弧区之间,安排了 6 块四极铁(Q 铁),组成包络函数匹配节. 这 6 块 Q 铁不仅能完成包络函数匹配,还可以微调对撞点至弧区的自由振荡相位,这在安排六极子校正对撞区插入 Q 铁对色品的贡献时,有利于选择合适的自由振荡相位,以提高动力学孔径. 对撞点的包络函数 $\beta_x^* = 0.65\text{m}$, $\beta_y^* = 0.01\text{m}$, 对撞区最大包络函数水平方向为 38m, 垂直方向为 110m.

3.2 弧区

构建 $\alpha_p < 0$ 的 τ -粲工厂储存环主要体现在弧区设计上,采用文献[1]中介绍的 4B 结构的 $\alpha_p < 0$ 超周期模块. 每段弧区由 6 个模块组成,弧区的两端各有一个消色散节. 每个超周期模块的水平和垂直自由振荡相移都匹配成 300° . 通过改变超周期模块中的色散函数,可以调节全环的发射度. 对应高亮度模式,超周期模块的入口处,色散函数匹配成负的最大值, $D_x \approx -1.55\text{m}$; 在模块的中点,色散函数是正的最大值, $D_x \approx 1.63\text{m}$. 弧区的包络函数和色散函数如图 1 所示.

弧区二极铁(B 铁)的参数如下:长度 1.1m,弯转半径 9.8m,最大场强 1.2T;每段弧区的 B 铁数目为 28. Q 铁的最大磁场梯度小于 15T/m,共有 63 块 Q 铁,比通常 $\alpha_p > 0$ 的磁聚焦结构用的 Q 铁数目多. 这是实现负色散函数的代价.

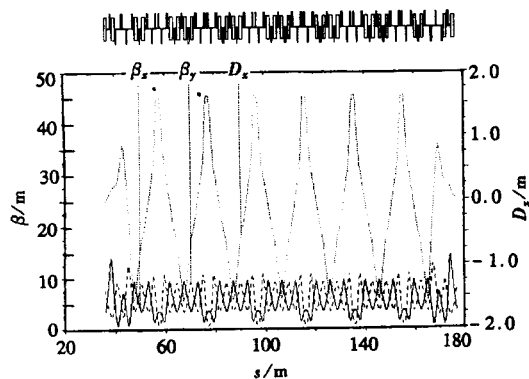


图1 弧区的包络函数和色散函数

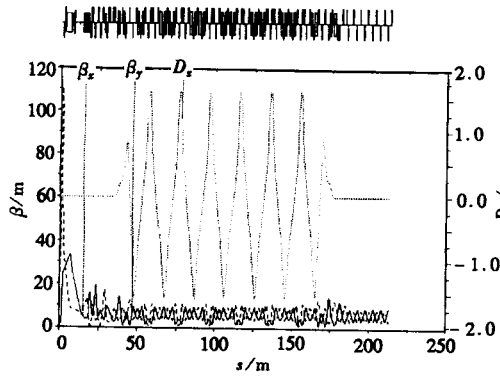


图2 负动量压缩因子的 τ -粲工厂储存环高亮度模式半个环中的包络函数和色散函数

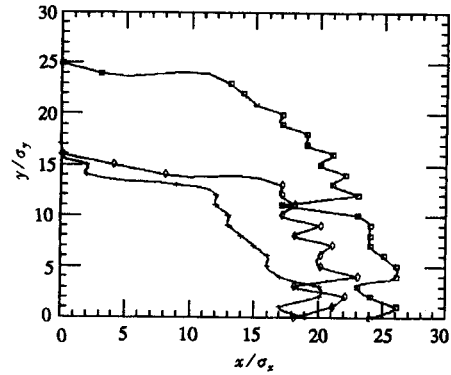


图3 对撞点处, 六维相空间跟踪的横向动力学孔径(不包括磁铁公差的影响)

◇ $\Delta p/p = +0.006$; □ $\Delta p/p = 0.000$;
 □ $\Delta p/p = -0.006$.

表1 $\alpha_p < 0$ 的 τ -粲工厂高亮度模式和单色模式的主要参数

模式	高亮度模式	单色模式
能量 E (GeV)	2.0	1.55
储存环周长 C_0 (m)	425.424	425.424
交叉对撞角度 $2\phi_0$ (mrad)	2×2.6	0.
对撞点的包络函数 β_x^*/β_y^* (m)	0.65/0.01	0.01/0.15
对撞点色散函数 D_x^*/D_y^* (m)	0/0	0/0.35
横向振荡频数 Q_x/Q_y	17.8/17.8	18.2/15.2
动量压缩因子 α_p	-0.0094	-0.0098
每圈同步辐射损失 U_0 (keV)	141	58
水平自然发射度 ϵ_x (nm · rad)	210	56(加Wigglers $J_x=2.3$)
垂直自然发射度 ϵ_y (nm · rad)	3.2	4.0
均方根能散度 σ_ϵ	5.4×10^{-4}	8×10^{-4}
纵向振荡频数 Q_s	0.047	0.054
阻尼时间 $\tau_x/\tau_y/\tau_s$ (ms)	36/38/19	33/75/110(加Wigglers)
自然色品 Q_x'/Q_y'	-26.1/-49.1	-42.0/-39.6
单束总流强 I (A)	0.698	0.2
束团数 k_b	102	35
每个束团中的粒子数 N_b (10^{11})	0.61	0.51
高频频率 f_{RF} (MHz)	507.4	507.4
高频电压 V_{RF} (MV)	4.0	4.0
均方根自然束长 σ_l (cm)	0.74	1.0
束束作用参数 ξ_x/ξ_y	0.033/0.033	0.014/0.011
亮度 L ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	1×10^{33}	1×10^{32}
质心系能散 σ_w (MeV)	1.5	0.12

3.3 功用区

储存环中与对撞区相对的地方有一段长的直线节,它包括一组共 10 个 FODO 周期. 可以通过改变 FODO 周期的自由振荡相移而灵活地调节磁聚焦结构的工作点. 每个 FODO 周期中都有长度在 2m 以上的漂移节,可以安放各种元件. 也可以减少几个 FODO 周期,增长其中的漂移节,便于长元件的安放. 高频腔将安放在功用区. 注入元件如冲击磁铁等也安排在这个区域.

3.4 全环磁聚焦结构参数

将对撞区,弧区和功用区连在一起,就得到了一个完整的储存环的磁聚焦结构. $\alpha_p < 0$ 的 τ -粲工厂高亮度模式的磁聚焦结构的主要参数见表 1. 高亮度模式对撞点起半个环的包络函数和色散函数如图 2.

4 色品校正和动力学孔径

4.1 色品校正六极子的合理布局

安排色品校正六极子时,不仅要使得色品能尽量校至 0,而且要使得包络函数等磁聚焦结构参数受动量的扰动也变小. 由 FODO 周期构成的磁聚焦结构,通常将 FODO 周期的相移匹配成 60° 或 90° ,以利于六极子的合理布局. 在设计 $\alpha_p < 0$ 的磁聚焦结构时采用的是超周期模块,其相移在 210° — 330° 之间. 根据分析¹⁾:对于 270° 相移的超周期模块,相邻两个模块对应的六极子的作用与 90° FODO 周期时对应;对于 300° 相移的超周期模块,相邻模块间对应的六极子的作用与 60° FODO 周期时对应. 因此,考虑将弧区超周期模块的相移匹配成 270° 或 300° . 这里,采用 4B 模块,弧区可以安排 6 个模块,所以,将超周期模块的相移匹配成 300° .

原则上,选择水平与垂直包络函数相差较大,且色散函数绝对值较大的地方安放六极子. 特别地,在 $\alpha_p < 0$ 的超周期模块中,色散函数有正有负,在色散函数为负的地方,六极子必须反号才能获得与色散为正时同样的作用. 弧区共用了 9 组六极子,将水平和垂直方向的色品都校正为 0. 由于选择了色品校正六极子的合理布局,包络函数和自由振荡频数随能量的调制都很小,能满足一般对撞机磁聚焦结构的设计要求.

4.2 动力学孔径的跟踪结果

动力学孔径定义为磁聚焦结构中粒子能够保持运动稳定所对应的相空间最大初始幅度. 一般采用跟踪的方法来研究磁聚焦结构的动力学孔径. 研究表明,为节省计算机时,可以只考察对粒子跟踪 2000 圈的结果. 图 3 表明用 MAD 程序^[3]对单粒子运动六维相空间相图跟踪得到的对撞点处的横向动力学孔径大于 $12\sigma_x \times 12\sigma_y \times 11\sigma_z$,基本能满足对撞机的设计要求.

1) 同第 1 页脚注

目前的跟踪没有引入磁铁的公差引起的非线性扰动. 但是根据文献 [4] 的结论, $\alpha_p < 0$ 的超周期模块对公差并不敏感. 而且, 其相移设计成 300° , 它具有同 60° 相移的 FODO 周期类似的周期单元之间能对公差影响相抵消的优点. 因此, 可以预计磁铁公差不会对动力学孔径有致命的影响.

当然, 六极子的安排还能进一步优化, 甚至能引入谐波六极子抵消色品校正六极子的非线性项影响, 使动力学孔径能进一步提高.

5 单色模式的磁聚焦结构设计

能实现单色对撞是 τ -粲工厂的一个重要特征. 因此, 在磁聚焦结构的设计方案时, 考

虑了保持与高亮度模式相同的储存环磁铁布局不变, 而通过改变对撞区中一些磁铁的极性实现单色对撞; 并在弧区引入罗宾逊扭摆磁铁来改变束流发射度和能散度以满足亮度要求. 单色模式半环的包络函数和色散函数如图 4.

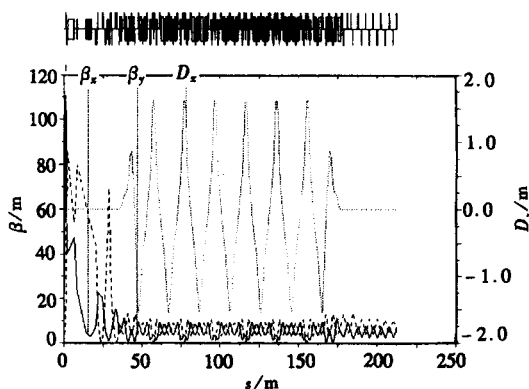


图4 单色模式半环的包络函数和色散函数

$D_{\pm}^* = \pm 0.35\text{m}$, $\beta_x^* = 0.01\text{m}$, $\beta_y^* = 0.15\text{m}$. 对撞区包络函数最大值水平方向 110m, 垂直方向 85m.

5.1 对撞区

磁铁的布局与高亮度模式一致. 单色模式要求对撞点有垂直方向的色散函数, 且对于 e^+ 和 e^- , 色散函数数值相等, 符号相反. 对撞点的色散函数和包络函数为:

5.2 发射度和能散度的控制

为了保证单色模式对撞时亮度能达到 $1 \times 10^{32} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 并且具有足够长的托歇克寿命, 一个可行的办法是将水平发射度控制在 $50 \text{nm} \cdot \text{rad}$ 左右, 同时使能散度增大到 8×10^{-4} . 因此在磁聚焦结构弧区的每个消色散节中都插入了 2 个罗宾逊扭摆磁铁来控制发射度和能散度. 用 MAD 程序计算的结果表明: 加入罗宾逊扭摆磁铁后, 同步辐射阻尼系数 J_x 从 1.0 增加到 2.3, J_e 从 2 减小至 0.7; 水平发射度降为 $56 \text{nm} \cdot \text{rad}$, 能散度由 4.5×10^{-4} 增大到 8.0×10^{-4} ; 满足了单色模式的要求.

5.3 色品校正和动力学孔径

色品校正六极子的布局与高亮度模式时基本一样, 初步的跟踪结果表明在相对能散为 0.8% 时, 不包括高频电压和公差的影响, 横向动力学孔径可达到 $10\sigma_x \times 10\sigma_y$. 如何进一步增大单色模式的动力学孔径还须更深入的研究.

5.4 托歇克寿命

利用 ZAP 程序^[5]估算了单色模式的托歇克寿命. 在目前发射度为 $56\text{nm} \cdot \text{rad}$, 动力学孔径达到 $10\sigma_x \times 10\sigma_y \times 10\sigma_z$, 能量接受度为 0.8% 时, 托歇克寿命约为 1.1 小时, 勉强能满足物理实验的要求. 因此还需进一步优化设计, 以实现更长的托歇克寿命.

6 磁聚焦结构的灵活性

6.1 保持 $\alpha_p < 0$ 调节磁聚焦结构的发射度

通过调整弧区超周期模块中 FODO 周期的相移, 可以改变 $\alpha_p < 0$ τ -粲工厂磁聚焦结构的发射度. 表 2 是对应发射度变化的一些典型参数:

表 2

发射度 (nm · rad)	159	210	256	320
动量压缩因子	-0.0061	-0.0094	-0.013	-0.017
模块中 FODO 周期相移	75°	60°	54°	~35°
超周期模块的相移	300°	300°	300°	300°

特别地, 当发射度调至 $320\text{nm} \cdot \text{rad}$ 时. 具备了实现正对碰撞标准模式的可能性. 此时 $Q_s = 0.06$, 比通常 $\alpha_p > 0$ 的标准模式的值小.

上述对发射度的调节, 均保持超周期模块的相移为 300° 不变. 在不考虑公差时, 用 MAD 作的单粒子跟踪的结果表明动力学孔径均能达到 $10\sigma_x \times 10\sigma_y \times 10\sigma_z$, 所以 $\alpha_p < 0$ 的磁聚焦结构对发射度的调节是比较灵活的.

6.2 兼容实现 $\alpha_p > 0$ 的可能性

作为一个稳妥的方案, 考虑了将磁聚焦结构的动量压缩因子调节为正值的 possibility. 在保持磁铁布局不变的前提下, 对弧区的超周期模块作了重新匹配. 将其水平和垂直方向的相移都匹配至 π 附近, 得到了一个 $\alpha_p > 0$ 的磁聚焦结构方案. 其半环的包络函数和色散函数如图 5. 它的主要参数: $\epsilon_x = 138\text{nm} \cdot \text{rad}$, $\alpha_p = 0.013$, 与 BTCF 的取值相近. 因此也能实现 τ -粲工厂所要求的高亮度. 同样, 也可以在弧区的消色散节内引入罗宾逊扭摆磁铁, 控制发射度和能散度, 以实现单色模式.

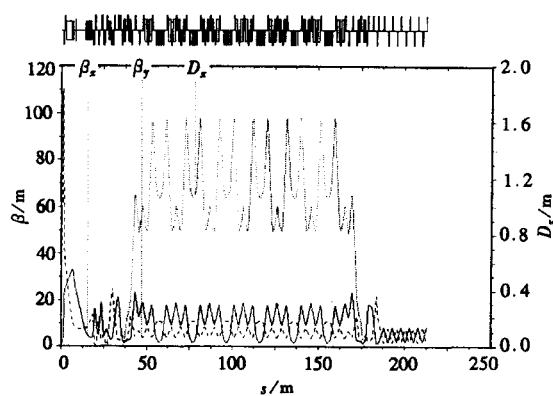


图5 匹配成 $\alpha_p > 0$ 高亮度模式时, 半环的包络函数和色散函数

这样, 我们设计的 τ -粲工厂 $\alpha_p < 0$ 的磁聚焦结构方案能实现将 α_p 调节为正值的可能

性.

7 $\alpha_p < 0$ τ -粲工厂储存环中的束流不稳定性

τ -粲工厂的束团间距相对其它粒子工厂大,束团个数少,但单个束团中的粒子数较多,因此,单束团不稳定性,即束团拉伸问题比较突出,多束团不稳定性相对其它粒子工厂弱^[6].而且,研究单束团不稳定性时,关心的是束团内粒子的分布情况,与 α_p 有关, $\alpha_p < 0$ 与 $\alpha_p > 0$ 时的结果将不同.对于多束团不稳定性,通常将束团当作一个刚性质点来研究,不考虑束团中的粒子分布,因而可以认为 $\alpha_p < 0$ 与 $\alpha_p > 0$ 时的结论相似.因此,着重研究 $\alpha_p < 0$ τ -粲工厂中的单束团不稳定性.对于多束团不稳定性,包括由高频腔高次模引起的多束团不稳定性和横向电阻壁不稳定性,离子效应和光电子效应等,利用 ZAP 等程序作了研究,并参考 BTCF 可行性研究的结论:多束团不稳定性,将不影响 τ -粲工厂的可行性.

7.1 束团拉伸

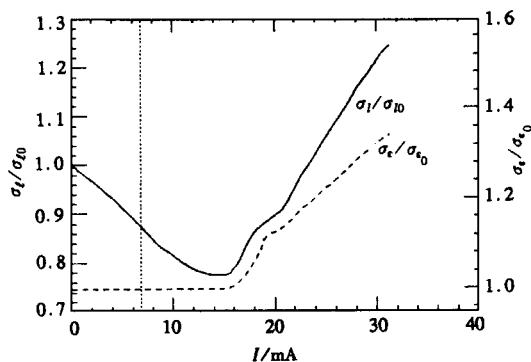


图6 $\alpha_p < 0$ τ -粲工厂的高亮度模式,束团长度和能散度与流强的关系
点线表示设计流强.

按照 Boussard 或 Keil-Schnell 判据计算,设计流强不高于微波不稳定性阈值¹⁾.目前,公认比较可靠的计算束团长度拉伸的方法是利用数值计算或测量得到的全环的纵向尾场函数,计算束团中粒子沿纵向密度分布随流强的变化关系,从而得到束长.这里,借助 K. Oide 和 K. Yokoya 所编写的程序,利用 BTCF 可行性研究所得到的 τ -粲工厂储存环的尾场函数,计算了 $\alpha_p < 0$ 时,束团长度和能散度随流强的变化曲线,如图 6.图中,能散度刚开始增大时所对应的流强为微波不稳定性发生阈值.根据图 6:

1) 设计流强在微波不稳定性发生的阈值以下.阈值流强约为 16mA,比设计流强 6.8mA 高一倍.在设计流强,束团长度将小于均方根自然长度,即,束长拉伸不会发生.

2) τ -粲工厂中,尽管均方根束长已设计得很短: $\sigma_{l0} < 1\text{cm}$,但对于目前的真空盒设计,束流感受的仍然是电感性的阻抗($\alpha_p < 0$ 时,为负电感).这样,在微波不稳定性阈值以下,由于势阱畸变, $\alpha_p > 0$ 时,束团拉伸; $\alpha_p < 0$ 时,束团缩短.这里设计的 $\alpha_p < 0$ 的 τ -粲工厂,周长与 BTCF 不同,真空部件的数量和安排也与 BTCF 有差别,但是,环形真空室对束流表现电感性阻抗的性质不变.所以,束长不会拉伸的结论是合理的.

对于标准模式,由于 $|\alpha_p|$ 增大,微波不稳定性阈值上升到 26mA,因此单束团设计流强尽管增大到 15.4mA,但仍然在微波不稳定性阈值流强以下.对应设计流强,束团长度比

1) 同第1页脚注.

自然束长短。

因此,在设计流强范围内 $\alpha_p < 0$ 的 τ -粲工厂储存环中,束团长度不会拉伸。

8 $\alpha_p < 0$ 的磁聚焦结构方案与 $\alpha_p > 0$ 方案的比较

目前设计的 $\alpha_p < 0$ τ -粲工厂磁聚焦结构方案与 $\alpha_p > 0$ 的方案相比具有以下优缺点:

优点: 1) $\alpha_p < 0$ 的磁聚焦结构方案对发射度和动量压缩因子能灵活调节的范围比较大,同样发射度时,其 $|\alpha_p|$ 比 $\alpha_p > 0$ 的磁聚焦结构的值小。例如,高亮度模式, $\alpha_p < 0$ 时, $|\alpha_p| \approx 0.01$,而 BTCF 方案, $|\alpha_p| = 0.014$ 。 $|\alpha_p|$ 小,有利于控制束长。

2) 对于目前的阻抗预算, $\alpha_p < 0$ 的 τ -粲工厂储存环中没有束团拉伸。

缺点: 1) 周长比 $\alpha_p > 0$ 时长: $\alpha_p < 0$ 的方案周长为 425.4m,而 BTCF 为 385.4m;弧区 Q 铁的数目较多, $\alpha_p < 0$ 时,每段弧区需 63 块 Q 铁,而 BTCF 只需 29 块。

2) 弧区的周期单元比较少,自然色品较大。在高亮度模式, $\alpha_p < 0$ 时, $Q_x'/Q_y' = -26.1 / -49.1$ 。而 BTCF 中, $Q_x'/Q_y' = -20 / -36$ 。因此,校正色品所需的六极子强度比较大,增大了提高动力学孔径的难度。

如果设计能量比 τ -粲工厂高的机器,周长大一些,周期模块的数目能增多,则上述设计 $\alpha_p < 0$ 的磁聚焦结构的缺点可以避免。

9 结论

目前设计的 $\alpha_p < 0$ 的 τ -粲工厂磁聚焦结构方案无论从亮度,磁聚焦结构的灵活性以及动力学孔径上均能初步达到对撞机的设计要求,因而是可行的。 $\alpha_p < 0$ 的对撞机储存环磁聚焦结构的优化设计值得更加深入的探索。

作者感谢黄楠副研究员热心地提供了 τ -粲工厂的对撞区设计方案,以及在磁聚焦结构设计上许多有益的经验。同时也感谢储存环室物理组的全体同仁的关心和支持。

参 考 文 献

- 1 Wang Jiuqing. A Study on Negative- α_p Lattice in Circular Colliders. In: Proc. 6th Accelerator physics Symposium of PASC. Aug. 1997
(王九庆. 负动量压缩因子的环形对撞机磁聚焦结构的研究,见:粒子加速器学会第六届加速器物理讨论会论文集,1997年8月)
- 2 Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences. Feasibility Study Report on Beijing Tau-charm Factory. IHEP-BTCF Report-03, Oct. 1996
- 3 Grote H, Iselin F C. The MAD Program. CERN/SL/90-13(AP), 1990
- 4 Ng K Y et al. Examination of the Stability of the Advanced Imaginary γ_1 Lattice. in Proceedings of the 1991 IEEE Particle Accelerator Conference
- 5 Zisman M S et al. ZAP User's Manual. LBL-21270, 1996
- 6 Chao A W. Proceedings of BTCF Workshop. Beijing 1996

Application of the Negative Momentum Compaction Lattice in a Tau-Charm Factory

Wang Jiuqing Fang Shouxian

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

Abstract A lattice with negative momentum compaction factor ($\alpha_p < 0$) for a taucharm factory is proposed and studied. The bunch length at the designed current by simulation is shorter than the natural rms bunch length, that might be an advantage for adopting the $\alpha_p < 0$ lattice in colliders.

Key words lattice, momentum compaction factor, bunch lengthening