

# 北京 $\tau$ -粲工厂储存环磁聚焦结构的设计研究

黄楠 金利慧 刘渭滨 王东 王九庆 于程辉

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

**摘要** 对北京 $\tau$ -粲工厂(BTCF)储存环磁聚焦结构设计中所涉及的一些关键物理问题作了探讨和研究,提出了可行性的方案.该方案的高亮度模式动力学孔径较大;单色模式的托歇克寿命较长、亮度较高;并且能兼容纵向极化束对撞模式.

**关键词** 磁聚焦结构 亮度 动力学孔径 单色模式 极化

## 1 引言

近些年来,筹建 $\tau$ -粲工厂(TCF)成为国际高能物理界在精确研究 $\tau$ 轻子物理和粲物理方面令人瞩目的焦点之一.1995年起,高能物理研究所开展了北京 $\tau$ -粲工厂(BTCF)的可行性研究.由于TCF的亮度要达到 $1 \times 10^{33} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,比目前已有的对撞机的亮度高两个量级,因此它对加速器的设计提出了挑战性的要求.本文介绍了BTCF在磁聚焦结构设计研究方面的进展.研究表明,目前的磁聚焦结构方案是可行的.

## 2 BTCF 储存环的设计目标和特点

经过国际上多次关于TCF的工作会议,TCF储存环的设计目标可以基本确立如下<sup>[1]</sup>:

- 1) 在2.0GeV,实现高亮度模式,峰值亮度达 $L = 1 \times 10^{33} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ .
- 2) 能量可在1.55GeV至2.5GeV之间调节,并保留实现3.0GeV的潜力.
- 3) 合理的对撞区设计,保证谱仪的本底在可接受的水平.
- 4) 磁聚焦结构灵活可调.
- 5) 兼顾实现纵向极化和单色模式.

TCF的物理目标要求加速器首先能保证高亮度,同时兼顾实现纵向极化和单色对撞.

这里依次介绍 TCF 加速器的高亮度模式和纵向极化,以及单色模式的特点.

## 2.1 高亮度模式

当束流流强达到束-束作用限 $\xi_x$ 和 $\xi_y$ 时,亮度公式可以写成:

$$L(\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) = 4.54 \times 10^{40} \frac{(1+r)^2 E^2 (\text{GeV}^2) \varepsilon_x (\text{m} \cdot \text{rad})}{S_b (\text{m}) \beta_y^* (\text{m})} \xi_x \xi_y \quad (1)$$

其中, $r$ 是束团横向尺寸比, $\varepsilon_x$ 是水平发射度, $S_b$ 是束团间距, $\beta_y^*$ 是对撞点处的包络函数, $\xi_x$ 和 $\xi_y$ 取值一般在 $0.04 \pm 0.01$ . 所以,实现高亮度的关键在于减小束团间距,增大发射度,同时保持对撞点处小的包络函数.

根据 1996 年 BTCF 工作会议的结论,采用双束以小角度水平交叉对撞作为高亮度模式的首选方案. 这样,双束的分离将由水平交叉角和垂直静电分离器的共同作用实现. 水平交叉角使双束在第一个寄生对撞点处水平分开,垂直分离器将双束垂直分离进入各自储存环.

根据 CESR 运行的经验,对于水平方向扁平的束流,利用水平交叉角实现双束分离比较容易<sup>1)</sup>. 为避免交叉角可能引起的纵向同步和横向自由振荡的耦合,水平交叉角 $2\phi_c$ 必须满足:

$$2\phi_c \leq 0.16 \frac{\sigma_x^*}{\sigma_l}, \quad (2)$$

这里, $\sigma_x^*$ 是对撞点处的束团水平方向尺寸, $\sigma_l$ 是束长. 在第 $n$ 个寄生对撞点处,交叉角引起的双束分离量为

$$2d_x = 2\phi_c \sqrt{\beta_x^* \beta_{nx}} \cdot \sin\phi_{nx}, \quad (3)$$

$\beta_{nx}$ 是第 $n$ 个寄生对撞点处的包络函数, $\phi_{nx}$ 为该处对应的相位. 根据经验,若 $d_x \geq 5\sigma_{nx}$ ,则认为寄生束-束作用可以忽略. 相应地有 $\beta_x^* \geq \frac{10}{0.16} \frac{\sigma_l}{\sin\phi_x}$ ,因为 $\sigma_l = 0.01\text{m}$ ,所以对撞点处的 $\beta_x^*$ 可设计成 $0.65\text{m}$ .

在 BTCF 的磁聚焦结构设计中,水平交叉角由一对二极铁 BH 产生,水平交叉角取 $2.5\text{--}3.3\text{mrad}$ ,最小束团间距可以减至 $3\text{--}4\text{m}$ . 由(1)式,获得同样亮度所需的发射度将减小,相应地, $\alpha_p$ 也减小, $Q_s$ 可以控制得比较小. 并且,由于束团数的增多,单束团流强也能降低,束团长度拉伸减弱. 所以,采用小角度水平交叉对撞使得τ-粲工厂实现所需的高亮度更为可行. 同时也保留着采用正对碰撞的可能性,这可以通过关掉产生水平小交叉角的二极铁来实现.

1) Tigner M. 私人通信.

## 2.2 纵向极化

如果在 TCF 中实现纵向极化的正负电子束对撞, 则能大大增加它在实验物理上的潜力. 目前, 物理方面主要的兴趣在于  $\tau$  截面的  $CP$  破坏, 束流能量在 1.8—2.0 GeV 之间. BTCF 的可行性研究表明, 在已有的高亮度模式或单色模式的基础上, 只对磁铁布局稍作调整, 加入极化插入节即可实现纵向极化. 而且, 磁聚焦结构参数除了在纵向极化插入节内需要特别地匹配外, 在全环其它地方没有很大的扰动. 纵向极化方案将有专门的论述<sup>[2]</sup>, 本文将集中讨论 BTCF 高亮度和单色模式磁聚焦结构的设计.

## 2.3 单色模式

$$\begin{array}{ccc} E(1+\varepsilon) \longrightarrow & \longleftarrow & E(1-\varepsilon) \\ e^+ E \longrightarrow & \longleftarrow & E e^- \\ E(1-\varepsilon) \longrightarrow & \longleftarrow & E(1+\varepsilon) \end{array}$$

图 1 单色模式对撞示意图

$J/\psi$  的共振峰宽度只有 68 keV. 如果采用单色模式, 就能减小束流对撞时的质心系能散  $\sigma_w$ , 有可能使  $J/\psi$  的事例率提高一个量级. 所谓单色模式, 就是在对撞点引入垂直方向的色散  $D_y^{*\pm}$ , 而且对正负电子, 色散  $D_y^{*+}$  和  $D_y^{*-}$  的大小相等、符号相反. 从而能量偏差为  $+\varepsilon$  的电子  $e^-$  就会与能量偏差为  $-\varepsilon$  的正电子  $e^+$  在同一轨道上对撞, 反之亦然, 如图 1 所示.

单色模式的设计目标就是将  $E_0 = 1.55$  GeV 时的对撞束流的质心系能散降低到 0.15 MeV 以下, 同时保持亮度能达到  $1 \times 10^{32} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ .

由于引入  $D_y^*$ , 质心系能散降低为:

$$\sigma_w = \frac{\sqrt{2} E_0 \sigma_\varepsilon}{\sqrt{1 + (D_y^* \sigma_\varepsilon)^2 / (\varepsilon_y \beta_y^*)}}, \quad (4)$$

这里  $\sigma_\varepsilon$  是自然能散,  $\varepsilon_y$  是垂直发射度. 选择合适的  $D_y^*$ ,  $\varepsilon_y$  和  $\beta_y^*$ , 就能满足单色模式的要求.

单色模式的亮度为:

$$L \approx \frac{k_b f_0 N^+ N^-}{4\pi \sigma_x^* D_y^* \sigma_\varepsilon} = \frac{k_b f_0 N^+ N^-}{4\pi \sqrt{\beta_x^* \varepsilon_x} \cdot D_y^* \sigma_\varepsilon}. \quad (5)$$

这里,  $k_b$  是单束的束团个数,  $f_0$  是回旋频率,  $N^+$ ,  $N^-$  分别表示正、负电子每个束团中的粒子数.

由于  $D_y^{*\pm}$  的引入, 束流将在  $y$  平面内展宽, 即成为  $y$  方向的扁平束. 根据 A. L. Gerasimov 等人的研究<sup>[3]</sup>, 在束流展宽的方向, 束-束作用参数必须小于 0.015, 即

$$\xi_y \approx \frac{N_b \beta_y^* r_e}{2\pi \gamma D_y^{*2} \sigma_\varepsilon^2} \leq 0.015, \quad (6)$$

这就限制了每个束团中的粒子数。

由(5)和(6)式,  $\varepsilon_x$ 和 $\beta_x^*$ 越小,  $D_y^*$ 和 $\sigma_e$ 越大, 能够达到的亮度越高。我们在单色模式的磁聚焦结构中加入扭摆磁铁来减小发射度, 增大能散度。因为设计束长约为 0.01m, 所以由判据 $\sigma_1 \leq \beta_x^*$ , 取 $\beta_x^* = 0.01\text{m}$ 。  $\varepsilon_x$ 不能太小, 否则将使托歇克寿命很短。为了提高托歇克寿命, 可以增大水平发射度的设计值, 使之达到 $\sim 40\text{nm} \cdot \text{rad}$ 。为了保证亮度不因为增大了 $\varepsilon_x$ 而降低, 将 $D_y^*$ 增至 0.45m, 由(6)式, 这可以增加单束团的粒子数。

单色模式还未有实际机器运行的先例, 它将是 $\tau$ -粲工厂的特色之一。

## 2.4 TCF 磁聚焦结构的特点

根据 $\tau$ -粲工厂上述三个模式的要求, 可以归纳出 TCF 磁聚焦结构应具有以下特点:

- 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。

因此, 磁聚焦结构设计的关键是: 具有能兼容各个模式的调节灵活性, 即, 在同一个磁铁布局下, 通过匹配磁铁的强度, 实现不同的模式。

习惯上, 将 $\tau$ -粲工厂的磁聚焦结构分成对撞区、弧区和功用区三个部分, 在对撞区和弧区之间还要加入实现纵向极化的插入节。

显然, 对撞点的包络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。所以 $\tau$ -粲工厂的磁聚焦结构众多设计方案的差别主要体现在对撞区和弧区及极化插入节的设计上。

## 3 磁聚焦结构设计

BTCF 储存环为上下对称的双环结构, 每环长 165m, 宽 53m, 周长 385.4m, 两环垂直间隔 1.67m, 共有一个对撞点。每环可划分为四个主要部分: 对撞区, 两个极化插入节, 两个

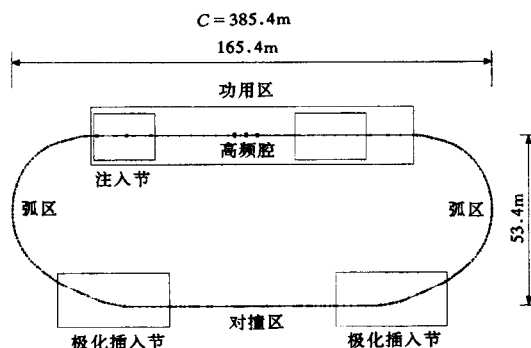


图2 BTCF储存环示意图

弧区和一个包括注入节部分在内的功用区(见图 2)。高亮度模式和单色模式的主要磁聚焦结构设计参数如表 1。高亮度模式的包络函数和色散函数见图 3。

表1 高亮度模式和单色模式的主要磁聚焦结构设计参数

模 式	高亮度模式	单色模式
周长(m)	385.4	385.4
能量(GeV)	2.0	1.55
对撞点处的交叉角(mrad)	$2.6 \times 2$	0.0
弯转半径(m)	8.33	8.33
对撞点处的包络函数 $\beta_x^*/\beta_y^*$ (m)	0.66/0.01	0.01/0.15
对撞点处的色散函数 $D_x/D_y$ (m)	0.0/0.0	0.0/0.45
水平自然发射度(nm·rad)	138	83.36(有wiggler)
垂直发射度(nm·rad)	2.1	5.3
工作点 $\nu_x/\nu_y$	11.75/11.76	12.21/12.23
自然色品 $\xi_x/\xi_y$	-17/-35	-36/-31
动量压缩因子 $\alpha_p$	0.014	0.014
动量散度( $10^{-4}$ )	6	7.8(有wiggler)
阻尼时间 $\tau_x/\tau_y/\tau_z$ (ms)	30/30/15	26/61/90
束团个数	86	29
每团粒子数( $10^{10}$ )	5.4	9.3
束束作用参数 $\xi_x/\xi_y$	0.044/0.04	0.018/0.015
亮度( $10^{33} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	1.0	0.2
质心系能散(MeV)	1.7	0.14

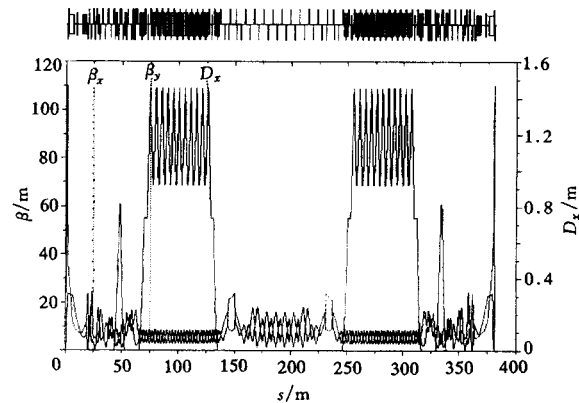


图3 高亮度模式的包络函数和色散函数

### 3.1 对撞区

对撞区包括 micro- $\beta$  插入节和双束的分离区。它的设计既要考虑各个模式的磁聚焦结构参数的匹配,同时还要考虑谱仪探测器和双束分离器件的合理安排。图 4 是对撞区的磁铁分布示意图: Q1 和 Q2 为两块超导四极铁,组成 micro- $\beta$  插入节。ES 为静电分离器。QV1 和 QV2 是两块大孔径的四极铁,可用来进一步增加双束的分离量,使得双束的分开距离增大到能够分别在两环上安装垂直分离切割 B 铁。三块垂直切割铁 BV1、BV2 和 BV3 进一步使双束分离,最后一块垂直弯转铁 BV4 将束流轨道偏回水平平面。

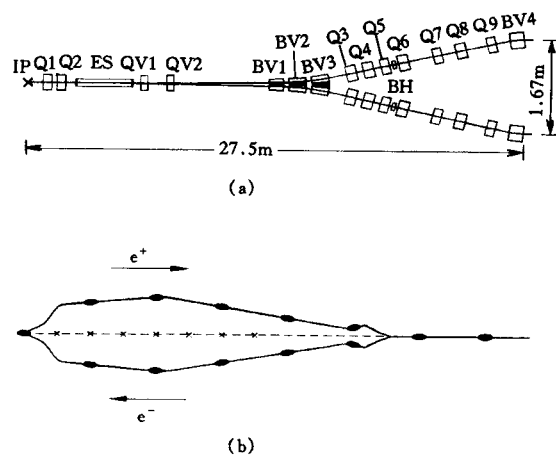


图4 对撞区的磁铁布局图

(a) 侧视图; (b) 俯视图.

● 束团; × 寄生对撞点.

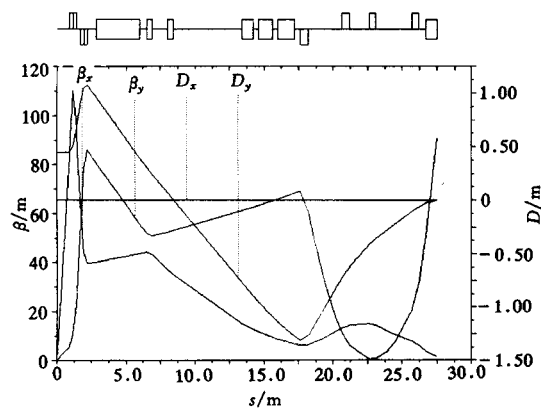


图5 单色模式对撞分离区的包络函数和色散函数

对于高亮度模式,在距离对撞点水平相移为 $\pi$ 的地方对称地放置了一对水平弯转磁铁 BH,两块 BH 之间产生闭轨畸变,使得双束以小角度交叉对撞(在 2.0GeV 时交叉角度为  $\pm 2.6\text{mrad}$ ).

对于单色模式,需要改变 Q1、Q2 和 Q6 的极性,并关掉 Q4、Q8 和 BH. 对撞区的磁聚焦函数见图 5.

这个模式要求正负电子在对撞点的垂直色散函数符号相反,大小相等. 为提高亮度,色散值从以前的 0.35m 提高到了现在的 0.45m.

垂直偏转元件 (ES、BV1、BV2、BV3 和 BV4)使正负电子进入不同的轨道,并产生相反的色散函数. ES 到 BV4 的相移接近 $\pi$ ,目的是消掉垂直色散.

在 BV4 之后是极化插入节,它在极化模式中进行匹配,连接到弧区,它含有包络函数匹配节和自旋转动器.

### 3.2 弧区

弧区的设计既要保证高亮度所需的发射度,还要有利于合理安排色品校正六极子之间的相位关系,使得六极子对线性磁聚焦结构函数的扰动较小.因此改变了最初为增大发射度而采用的不规则 FODO 节调制色散函数的方案.选择自由振荡相移为  $60^\circ$  的标准 FODO 节构建弧区.每个弧区由 14 个 FODO 节组成,包括 10 个相移为  $60^\circ$  的标准节和在弧区两端的消色散节.每个消色散节由两个 FODO 节组成,一个 FODO 节中用直线节取代了弯转铁,用来放置扭摆磁铁以调节发射度.每个靠近弧区的消色散节包含一个由独立电源供电的特殊弯转铁.

对于单色模式,在每环使用了 8 块扭摆磁铁,每个扭摆磁铁(包含四对磁极)的有效长度为 0.84m,弯转半径 14m,聚焦强度  $1.2\text{m}^{-2}$ ,使阻尼分配系数水平方向  $J_x$  从 1 增长到 2.34,纵向  $J_z$  从 2 减小到 0.66.这样在能量为 1.55GeV 时,水平自然发射度变为  $36\text{nm} \cdot \text{rad}$ ,能散从原来的自然能散  $4.6 \times 10^{-4}$  增长到  $8 \times 10^{-4}$  左右.图 6 是单色模式弧区的磁聚

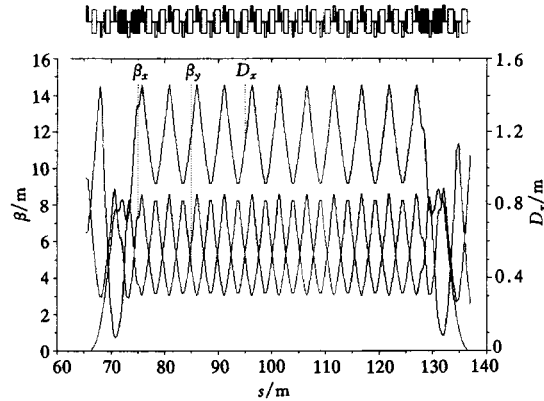


图6 单色模式弧区的包络函数和色散函数

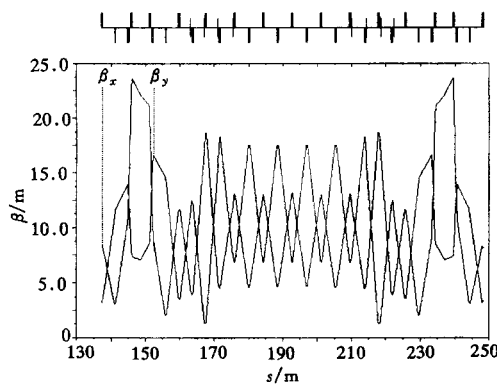


图7 高亮模式(单色模式)功用区的包络函数和色散函数

焦结构及包络函数和色散函数.

### 3.3 功用区

储存环上与对撞点相对的一侧是很长的一个直线段,即功用区.它包括注入节、4 个常规 FODO 节和两个包络函数匹配节,图 7 是此段的包络函数和色散函数,对高亮度模式和单色模式大致相同.冲击磁铁和垂直弯转水平切割磁铁安置在注入节内.设计常规 FODO 节能提供大于 3.2m 长的漂移空间,以安放高频腔.同时由于有 4 个常规 FODO 节,因此可以通过调整 FODO 节的自由振荡相移来灵活地改变全环工作点.

### 3.4 自旋转动器

目前 BTCF 的设计, 在 1.8—2.0GeV 时, 采用对称螺线管自旋转动器的纵向极化方案. 对撞点两侧的转动器, 分别由一对双 B 消色散节 (DBA)、两个超导螺线管 (9.63T) 和多个用于局部耦合补偿及其它匹配四极铁组成. 对于非极化模式超导螺线管将断开电源. 为达到可应用的极化水平, 需要采用自旋匹配以抑制退极化效应. 通过调节 25 个四极子强度来实现自旋匹配, 使退极化时间及平衡态极化水平显著提高 (1.8GeV 时分别为 300min 和 80%; 2.0GeV 时为 230min 和 83%). 图 8 是 1.84GeV 时的平衡态极化水平. 通过改变螺线管场方向可以转换两个对撞束自旋方向的同异. 更细致的研究表明优化极化模式需对磁聚焦结构设计做进一步修改.

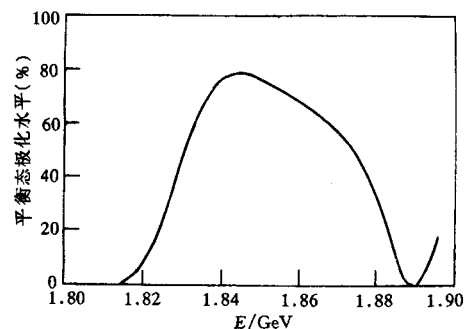


图8 1.84GeV时的平衡态极化水平

## 4 动力学孔径研究

利用 MAD 程序<sup>[4]</sup>作了单粒子六维相空间跟踪模拟. 环中除校色品六极子, 在线性磁

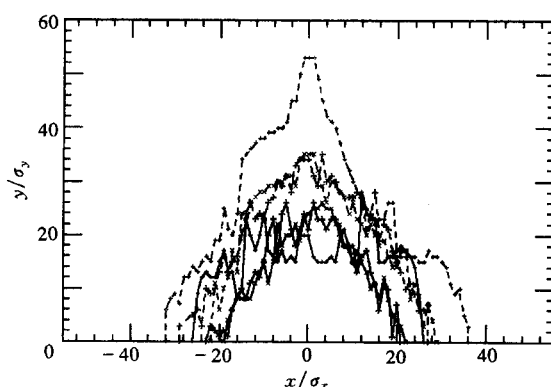


图9 高亮度模式的动力学孔径

✱  $\Delta p/p = +0.006$ ; ✷  $\Delta p/p = 0.000$ ; ✕  $\Delta p/p = -0.006$ .

聚焦结构中无其它校正子, 水平和垂直色品都校到了稍大于零. 为节省计算时间, 对粒子跟踪 2000 圈 (相当于 1/12 阻尼时间). 图 9 是高亮度模式的横向动力学孔径. 图中虚线表示不考虑磁铁公差时的情形, 在相对能散  $\Delta p/p = \pm 0.6\%$ 、全耦合情况下, 获得了  $20\sigma_x \times 15\sigma_y$  的动力学孔径. 图中实线表示带磁铁公差的动力学孔径, 仍大于一般对撞机所要求的  $10\sigma_x \times 10\sigma_y$  的指标. 对自由振荡频率随振幅变化的研究也表明目前的六极子安排引起的非线性较小.



## 5 单色模式的动力学孔径和托歇克寿命

### 5.1 动力学孔径

对单色模式, 初步的六维全耦合跟踪的结果表明动力学孔径在相对能散  $\Delta p/p = \pm 0.008$  时, 为  $17\sigma_x \times 20\sigma_y$ , 如图 10 所示.

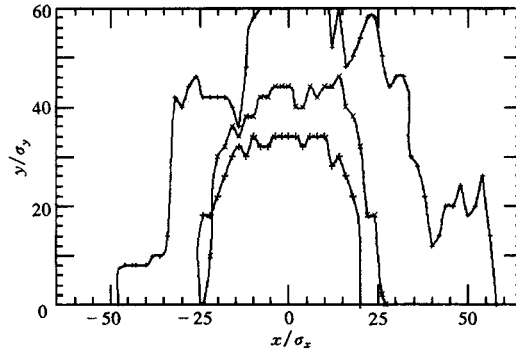


图10 单色模式的动力学孔径

—  $\Delta p/p = +0.008$ ; - -  $\Delta p/p = 0.000$ ; ···  $\Delta p/p = -0.008$ .

### 5.2 托歇克寿命

为了增大托歇克寿命, 需要大的束流尺寸和能量接受度, 因此在弧区采用  $60^\circ$  相移的 FODO 单元以增大动力学孔径、能量接收度和发射度 (有扭摆磁铁时  $\epsilon_x = 35\text{nm} \cdot \text{rad}$ ). 正是足够的动量接受度使得目前方案的托歇克寿命能满足物理实验的要求. 束流的平均托歇克寿命约为 2 小时左右.

利用 ZAP 程序<sup>[5]</sup>估算了单色模式的托歇克寿命, 如表 2.

表2 单色模式的托歇克寿命

能量接受度 ( $10^{-3}$ )	$\epsilon_{x/y} / (\text{nm} \cdot \text{rad})$	托歇克寿命 (h)
8	13/2	0.4
8	35/5.3	1.0
10	35/5.3	1.7
12	35/5.3	2.5
14	35/5.3	3.6

## 6 结论

当前的磁聚焦结构设计对于 BTCF 的要求是可行的, 三个运行模式可兼容于同一个磁聚焦结构. 当然, 在动力学孔径和极化方面仍可以进一步优化.

BTCF 磁聚焦结构设计的研究是 BTCF 可行性研究的一部分, 高能所储存环室物理组

的许多同志都参与了物理参数的选择和方案的讨论,提出了许多很好的建议,在此一并致谢。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences. Feasibility Study Report on Beijing Tau-Charm Factory. IHEP-BTCF, Report-03, Oct. 1996
- [ 2 ] Wang D, Wu Y Z. Longitudinal Polarization Scheme on Beijing Tau-Charm Factory. Proceedings of Frascati'97 Workshop, Oct. 1997
- [ 3 ] Gerasimov A L, Shatilov D N, Zholents A A. Nucl. Instr. and Meth., 1991, A305(1):25—29
- [ 4 ] Grote H, Iselin F C. The MAD Program. CERN / SL / 90-13(AP). 1990
- [ 5 ] Zisman M S et al. ZAP User's Manual. LBL-21270. 1986

## Study of the Lattice Design of BTCF Storage Ring

Huang Nan    Jin Lihui    Liu Weibin    Wang Dong  
Wang Jiuqing    Yu Chenghui

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

**Abstract** The physics issues involved in the lattice design of Beijing Tau-charm Factory (BTCF) storage ring are investigated and studied. A lattice that takes the high luminosity mode as the first priority and is compatible with monochromator mode and polarized beam collision mode is proposed. It's a feasible design with large dynamic aperture for the high luminosity mode and acceptable Touschek lifetime for the monochromator mode.

**Key words** lattice, luminosity, dynamic aperture, monochromator, polarization