

正、负电子贮存环与其入射器 加速频率的关系

严太玄

(中国科学院高能物理研究所)

摘 要

本文分析了 e^-e^+ 电子贮存环与其入射器加速频率是否要成整数倍关系的问题。特别在近年来,次谐波聚束器提出以后,这个问题更为突出。文中对此问题从几方面来进行讨论,最后提出了两个新的建议,使两者频率可以不保持整数倍关系,但又具有频率成整数倍时的优点。

一、引 言

在正、负电子贮存环中,通常采用电子行波直线加速器作为入射器。两者加速频率之间并无一定的制约关系。近年来,为了提高注入效率,在有些设计中,将贮存环的频率选择为入射器频率的次谐波;即 $\frac{f_L}{f_R} = N$; 式中 f_L 为入射器频率, f_R 为贮存环频率, N 为整数。特别在直线加速器中采用次谐波聚束器^[1]以进一步提高注入流强的方法后,频率关系问题就更为重要。本文拟就纵向俘获效率、同步轨道相对中心轨道的偏离等方面对此问题加以探讨,最后提出聚束器直接采用贮存环加速频率来代替次谐波频率及在注入时间的控制上加以改进的两个建议。

二、滑相对俘获效率及平均亮度的影响

当 $\frac{f_L}{f_R} = N$ 时,直线加速器与贮存环高频加速场之间没有滑相而产生相移,注入的束流可调整到贮存环高频俘获区中最佳相区。因此注入效率最高。如 $\frac{f_L}{f_R} \neq N$, 由于两频率不同步而引起滑相,注入束流不能固定在贮存环的最佳相区内,在最坏的情况下,可能使直线加速器输出束流中最边缘的一个束团丢失。设贮存环俘获相区宽度可接纳 N 个直线加速器束团,则最坏情况下俘获粒子的减少的比例为

$$\frac{1}{N} \Delta\eta$$

$\Delta\eta$ 为边缘束团的俘获效率.

由于滑相,入射束团相对于贮存环高频俘获相位是随机的,在重复多次入射后(通常为上万次以上)总的入射俘获效率的降低可认为是最佳相位入射和最差相位入射的平均值,即入射粒子减少的比例为

$$\frac{1}{2N} \Delta\eta$$

如果积累时间为 τ , 贮存环总的工作周期为 T , 则平均亮度 \mathcal{L} 降低的比为

$$\frac{\Delta\mathcal{L}}{\mathcal{L}} \simeq \frac{1}{2} \frac{1}{N} \Delta\eta \frac{\tau}{T}$$

一般情况下 $\frac{\tau}{T}$ 为 $\frac{1}{6} \sim \frac{1}{10}$ 之间, $N \approx 10$, 如 $\Delta\eta = 50\%$. 则 $\frac{\Delta\mathcal{L}}{\mathcal{L}} = 0.5\% - 0.25\%$ 可见对平均亮度影响甚微.

如在入射器中采用了次谐波聚束器,情况就会变得严重,次谐波聚束器将束流在时间上予先进行压缩,因而使直线加速器的束团数 N 减小,如贮存环加速频率不等于次谐波频率,但比较接近,这时两者之间最大相移可达 2π , 因此有使注入束团全部丢失的可能,这样平均束流的损失为 50% , 从而失去了次谐波聚束器的优点,可见在此情况下,两者的频率必须相等.

三、同步轨道相对于中心轨道的偏离

在贮存环中,加速频率决定于束流轨道长度.设计时,同步轨道即为加速器中心轨道.实际上由于安装准直等种种原因,中心轨道与同步轨道可能不重合,此时如能适当微调高频频率,可使两者重合,如贮存环采用直线加速器频率的次谐波,频率不能调整,这就有可能使两轨道不重合而导致真空室有效孔径的减小.

在贮存环中有下列关系:

$$\frac{\Delta f}{f_R} = \frac{\Delta L}{L_0} = \alpha \frac{\Delta p}{p_0}$$

L_0 为中心轨道的周长, p_0 为相应中心轨道的电子动量.

由于两者轨道不重合,产生 Δp , 此时同步轨道相对于中心轨道的偏离为 $x(s)$,

$$x(s) = D(s) \frac{\Delta p}{p_0} = \frac{D(s)}{\alpha} \frac{\Delta L}{L_0}$$

$D(s)$ 为贮存环的偏能系数,最大的偏离产生在 $D(s)$ 最大处,即

$$x_{\max} = \frac{D_{\max}(s)}{\alpha} \frac{\Delta L}{L_0}$$

以 BEPC 为例^[2], $D_{\max}(s) \simeq 3\text{m}$, $\alpha = 0.036$, 如 $\frac{\Delta L}{L_0} \approx 10^{-5}$ 时,也即 $\frac{\Delta f}{f_R} \simeq 10^{-5}$; ΔL 仅为 $2-3\text{mm}$ 时,引起最大的轨道偏差为 1mm 左右,真空室孔径损失约 2mm .

在贮存环的调整中,为了减少一些束流不稳定现象,或为测量某些参数,有时故意将频率作些改变,如果把频率与直线加速器频率关系固定则在贮存环中失去一个可调的

参数.

四、高频系统技术与经济上的影响

贮存环频率的选择必须考虑到高频系统在技术上及经济上的合理性, 特别在贮存环能量增长时, 同步辐射损失急剧增加, 使高频系统的功率增加很快. 为使高频系统成本降低, 必须优先考虑工业上能提供的器件, 在一定条件下, 将贮存环加速频率限制在直线加速器的次谐波频率, 会使选择的自由度减小.

鉴于上述的讨论, 为保留直线加速器采用次谐波聚束器的优点, 同时又不限制贮存环加速频率的选择, 特提出以下两点建议.

1. 聚束器采用贮存环加速频率的建议

将次谐波聚束器采用贮存环加速频率, 此时由于聚束器与贮存环频率是一致的, 因此两者之间不存在滑相引起的种种问题.

可能存在的问题是, 由于聚束器的频率不是直线加速器的次谐波, 是否会引起束流的损失?

设聚束器将电子枪出来的束流聚在 nT_L 的时间宽度, 其中 $T_L = \frac{1}{f_L}$, 由于聚束器频率与直线加速器频率不成整数关系, 因此由于滑相, 束团进入直线加速器后, 相对于直线加速器的高频俘获区的初始相位不是固定的, 但由于直线加速器的高频脉冲宽度总是大于聚束器输出束流的宽度, 在相位合适的条件下, 形成 n 个束团, 在相位不合适时会形成 $(n+1)$ 个束团, 但粒子并没有丢失. 这是因为一部分粒子跑到前一个或后一个高频俘获区, 而使束流宽度变为 $\leq \left(n + \frac{1}{4}\right) T_L$, 如考虑到多次入射的统计效果, 粒子进入前一个或后一个俘获区的几率是相等的, 束宽变为 $\leq \left(n + \frac{1}{2}\right) T_L$, 这些束流进入贮存环的高频俘获区内时, 由于该相区通常有足够大的空间, 因此理应都能得到加速, 如果考虑到边缘束团的俘获效率的降低, 则此降低量也应是较小的.

图 1 表示了三种不同相位的束流俘获情况, 可以看出边缘束团最多占 $\frac{1}{2n}$ 的比例, 同理考虑到多次入射的平均效应, 可能的束流损失为 $\frac{1}{4n} \Delta\eta$, 对平均亮度的影响则为:

$$\frac{\Delta \mathcal{L}}{\mathcal{L}} = \frac{1}{4n} \Delta\eta \frac{\tau}{T}$$

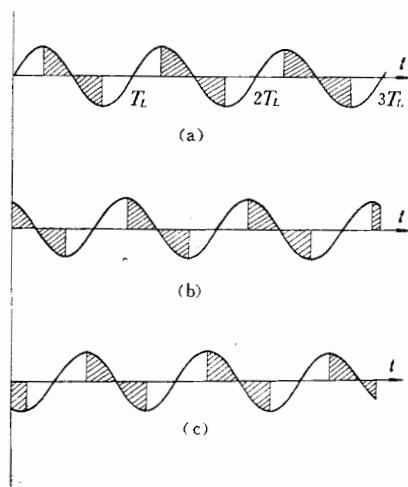


图 1 a 落入正确的相位
b 在后一周期多产生一束团
c 在前一周期多产生一束团

$$\text{设 } n = 3, \Delta\eta = 10\%, \frac{\tau}{T} = \frac{1}{6} - \frac{1}{10},$$

$$\text{则 } \frac{\Delta\mathcal{L}}{\mathcal{L}} = 0.13 - 0.08\%.$$

2. 改进注入时间的建议

如果进一步在入射时间上加以改进,使相邻两次的注入时间间隔满足一定的条件,则可使聚束器输出的束流在每次注入时,皆能满足最佳俘获条件。

设直线加速器频率与聚束器频率(此时聚束器采用贮存环频率)之比为 $N + \xi$, ξ 为小于 1 的尾数,则贮存环频率每经过 F 周期,相移即重复一次,只要 F 满足下列条件

$$F \cdot \xi = \text{最小可能的整数}$$

相邻的注入时间间隔又必须为贮存环中粒子旋转周期 T_0 的整数倍, $T_0 = h(N + \xi) \cdot T_L$, 式中 $h = \frac{f_R}{f_0}$ 为贮存环加速频率与粒子旋转频率之比。如注入时间间隔为 $MT_0 = Mh(N + \xi)T_L$, 只要 Mh/F 为一整数时,即能满足每次入射时,都在最佳相位上。

如 ξ 为三位数字的小数,最坏情况下,此三位数字为一质数,则 $F = 1000$, BEPC 中 $h = 160$, 则 $M = 25$, 也即相邻两次入射时间间隔为 $25 T_0$ 的整数倍即可。通常 T_0 为微秒级,相邻入射的时间间隔约等于横向衰减时间,即几十至几百毫秒,因此要满足上述条件是不成问题的,对积累时间的影响也是微不足道的。对于超过三位数后的尾数,可微调加速频率,使同步轨道略偏中心轨道,由于此时 $\frac{\Delta f}{f_R} < 10^{-6}$ 以下,因此偏离将小于毫米以下。

结 论

(1) 如果直线加速器中不采用聚束器,则贮存环与直线加速器的频率之间不一定非得保持整数关系。

(2) 如果采用聚束器,则聚束器频率必须与贮存环频率相等,但也不一定非得与直线加速器频率保持整数关系。

本工作得到了徐建铭教授的关怀与支持,作者也得到了他具体的帮助与有益的讨论,特在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] G. Mavrogenes et. al.,
Beam Measurement on Argonne Linac for Collider Injector Design. P. 481, 11th Inter. Conf. on High Energy Accelerators.
- [2] 22/28 亿电子伏北京正负电子对撞机初步设计提要,中国科学院高能物理研究所 1982. 12.

DISCUSSION ON THE RELATIONSHIP BETWEEN THE
FREQUENCIES OF INJECTOR LINAC
AND $e^+ e^-$ STORAGE RING

YAN TAI-XUAN

(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

The question of the relationship between the frequencies of injector linac and storage ring is analysed, especially when sub-harmonic buncher is used. In that case, it seems to be necessary to keep the ratio of two frequencies of the linac and storage ring to be an integer. This question is discussed in detail in this paper from several points of view. As a result of the discussion, two suggestions to avoid the restriction on the frequency relationship are presented.