

# 触发时间晃动对束流能谱的影响

任文彬

(中国科学院高能物理研究所, 北京)

本文计算了触发时间晃动对束流能谱的影响, 导出了能量倍增器最佳倒相时间  $t_1$ , 配合束流注入时间, 可使由晃动引起的束流能量分散在相同晃动量  $\Delta t$  下达到最小。

**关键词** 能量倍增器, 能量倍增因子。

## 一、触发时间晃动对束流能谱的影响。

BEPC 贮存环除要求注入的  $e^\pm$  具有一定大小的能量外, 同时还要求它们的能散度  $\frac{\Delta E}{E}$

$\leq \pm 0.6\%$ 。后一要求对电子直线加速器来说是相当严格的, 而影响束流能谱的因素很多, 作者在文献[1]中已有讨论。本文只对 BEPC 等梯度加速管使用了能量倍增器后, 由于触发时间晃动带来的束流能量分散进行讨论。假定速调管输出的脉冲功率波形是理想的方波, 由文献[1]知道, 速调管输出的电场波形和能量倍增器腔释放的电场波形, 以及它们的合成波形如图 1 所示。图 1(d) 中实线表示在不同时间间隔 A, B 和 C 进入等梯度加速管的合成场, 它们分别为:

A 间隔  $0 \leq t \leq t_1$

$$E_L(A) = (\alpha - 1) - \alpha(1 - gz')^\nu \exp(-t/T_c) \quad (1)$$

B 间隔  $t_1 \leq t \leq t_2$

$$E_L(B) = \gamma(1 - gz')^\nu \exp\{-(t - t_1)/T_c\} - (\alpha - 1) \quad (2)$$

C 间隔  $t > t_2$

$$E_L(C) = [\gamma \exp\{-(t_2 - t_1)/T_c\} - \alpha] \exp\{-(t - t_2)T_c\} \cdot (1 - gz')^\nu \quad (3)$$

式中

$$\begin{aligned} \gamma &= \alpha[2 - \exp(-\tau_1)], & \tau_1 &= t_1/T_c; \\ \alpha &= 2\beta/(1 + \beta), & \beta & \text{--- 耦合系数}; \\ T_c &= 2Q_0/\omega(1 + \beta), & \omega &= 2\pi f; \\ z' &= z/L, & \nu &= T_a/[T_c \cdot \ln(1 - g)]. \end{aligned}$$

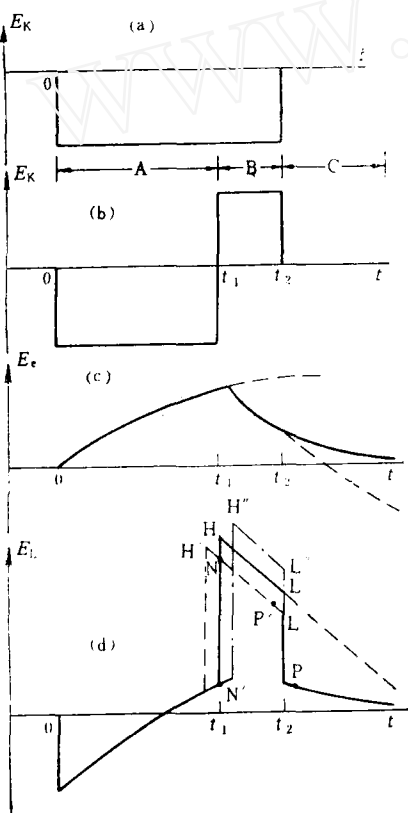


图 1 速调管输出波形

(a) 速调管脉冲功率输出理想波形, (b) 速调管输出波形, (c) 能量倍增器腔释放的电场波形, (d) 能量倍增器和速调管输出合成波形

对于 BEPC 等梯度加速管,  $g = 0.681$ ,  $L = 3.01$  m, 加速管填充时间  $T_a = 0.83 \mu s$ ,  $f =$

2856 MHz, 取  $t_2 = 3 \mu\text{s}$ , 假定能量倍增器腔的  $Q_0 = 1 \times 10^5$ , 那么最佳耦合的  $\beta = 5.2$ 。我们感兴趣的是计算 B 间隔内加速管中建立的加速电压, 下面我们就激励速调管的高频脉冲倒相时间  $t_1$ , 速调管输出高频脉冲的结束时间  $t_2$ , 以及电子注入到加速管的时间  $t_3 = t_2 - \delta t$  等不稳定的情况下, 计算它们对束流能量增益的贡献

1.  $t_1, t_2$  均不晃动(“理想”情况) 这时  $t_2 - t_1 = T_a$ , 由图 1(d) 看到, 当加速管入口为 L 点的合成场时, H 点的合成场刚好传播到加速管的出口。

2.  $t_2$  稳定,  $t_1$  晃动 (1) 先假定  $t_1$  向左边晃动  $\Delta t$ , 即  $t_1$  变为  $t_1 - \Delta t$ , 这时间隔 B 比“理想”情况时增宽了  $\Delta t$ , 即  $t_2 - (t_1 - \Delta t) = T_a + \Delta t > T_a$ , 而这时 B 间隔内的整个脉冲幅度将下降如图 1(d) 中的虚线所示, 在这种情况下计算加速管中的电压可分成两种情况来讨论: ① 若 L' 点合成场出现在加速管入口, 则在加速管出口为 N 点的合成场, 而 H' 点的合成场早已传播出加速管了。② 若要使 H' 点的合成场刚好抵达加速管末端, 则在加速管入口处看到的是 P' 点的合成场。根据上面所述, 这三种不同情况下加速管中建立的电压可表示为:

$$V = \int_0^1 E_L(B) dz' \quad (4)$$

由(4)式可得

$$V = \begin{cases} \gamma_1 \cdot \exp\{-[t_2 - t_1]/T_c\} \cdot [1 - (1-g)^{1+\nu}]/g(1+\nu) - (\alpha-1), & t_2 - t_1 = T_a \\ \gamma_2 \cdot \exp\{-[t_2 - (t_1 - \Delta t)]/T_c\} \cdot [1 - (1-g)^{1+\nu}]/g(1+\nu) - (\alpha-1), & t_2 - (t_1 - \Delta t) > T_a \\ \gamma_2 \cdot \exp\{-[(t_2 - \Delta t) - (t_1 - \Delta t)]/T_c\} \cdot [1 - (1-g)^{1+\nu}]/g(1+\nu) - (\alpha-1), & \end{cases}$$

式中,

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \alpha[2 - \exp(-t_1/T_c)], \\ \gamma_2 &= \alpha[2 - \exp\{- (t_1 - \Delta t)/T_c\}]. \end{aligned}$$

(2) 假定  $t_1$  向右边晃动  $\Delta t$ , 即  $t_1$  变为  $t_1 + \Delta t$ , 这时间隔 B 比“理想”情况窄了  $\Delta t$ , 即  $t_2 - (t_1 + \Delta t) < T_a$ , 根据文献[1], 这时 B 间隔的脉冲幅度将增高, 如图 1(d) 中点划线所示。在这种情况下, 计算加速管中的电压也可以分两种情况讨论: ① 由图 1(d) 看出, 若 H'' 点的合成场抵达加速管的出口, 则 L'' 点的合成场已行进到加速管的  $Z'_{a1}$  处了, 在加速管入口处对应的是贮能腔放电到 P 点的电场。② 若加速管入口处呈现的是 L'' 点的合成场, 则 H'' 点的合成场在加速管中才传播到  $Z'_{a2}$  处, 而在加速管出口处呈现的是 N' 点的合成场。根据以上讨论, 这时加速管中建立的电压分别为:

$$\begin{aligned} V &= \int_0^{z'_{a1}} E_L(C) dz' + \int_{z'_{a1}}^1 E_L(B) dz' \\ &= [\gamma \cdot \exp\{-[t_2 - (t_1 + \Delta t)]/T_c\} - \alpha] \cdot \exp\{-[(t_2 + \Delta t) - t_2]/T_c\} \cdot \\ &\quad \cdot [1 - (1-gz'_{a1})^{1+\nu}]/g(1+\nu) - (\alpha-1)(1-z'_{a1}) + \gamma \cdot \exp\{-[(t_2 + \Delta t) - \\ &\quad - (t_1 + \Delta t)]/T_c\} \cdot [(1-gz'_{a1})^{1+\nu} - (1-g)^{1+\nu}]/g(1+\nu) \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V &= \int_0^{z'_{a2}} E_L(B) dz' + \int_{z'_{a2}}^1 E_L(A) dz' \\ &= \gamma \cdot \exp\{-[t_2 - (t_1 + \Delta t)]/T_c\} \cdot [1 - (1-gz'_{a2})^{1+\nu}]/g(1+\nu) + (\alpha-1)(1-2z'_{a2}) \\ &\quad + \alpha \cdot \exp(-t_2/T_c) \cdot [(1-g)^{1+\nu} - (1-gz'_{a2})^{1+\nu}]/g(1+\nu) \quad (6) \end{aligned}$$

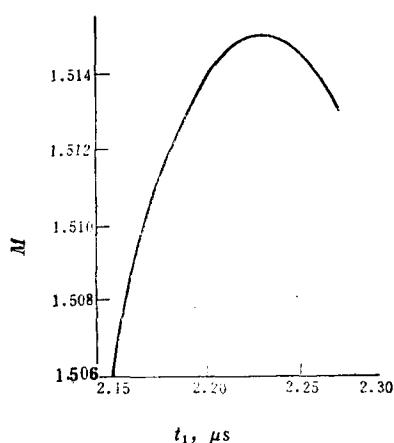


图 2 能量增益因子  $M$  随倒相时间  $t_1$  的变化  
 $T_{rf} = 3 \mu s, T_a = 0.83 \mu s$

上二式中

$$\begin{aligned} \gamma &= \alpha_1 [2 - \exp\{-(t_1 + \Delta t)/T_c\}] \\ z'_{a1} &= \{1 - (1 - g)^{[(t_2 + \Delta t) - t_2]/T_a}\} / g \\ z'_{a2} &= \{1 - (1 - g)^{[t_2 - (t_1 + \Delta t)]/T_a}\} / g \end{aligned}$$

由(4)、(5)、(6)式就可以算出不同倒相时间的  $t_1$  时的能量增益因子  $M$  (见图 2,  $M$  表示应用能量倍增器前后加速管中电子获得的能量<sup>[2]</sup>比值)

3.  $t_1$  稳定 速调管脉冲调制器的高压脉冲宽度有足够的宽, 速调管输出高频脉冲起点晃动, 即  $t_2$  晃动, 但脉冲宽度不变 (速调管输出高频脉冲宽度是由它的前级输出脉冲宽度决定的)。显然它和上面讨论过的晃动结果是一样的, 这里就不再专门加以讨论了。

## 二、最佳倒相时间

在以往的有关文章中<sup>[1-3]</sup>, 都是认为速调管的输出高频脉冲倒相时间应选在  $t_2 - T_a$  时倒相, 但对于等梯度加速管, 若选择倒相时间  $t_1 = t_2 - T_a$ , 则所得能量倍增因子并不是最大, 而是应选在  $t_1$  稍稍延迟  $\Delta t$ , 即  $t_1$  变为  $t_1 + \Delta t$ , 现在若令  $t = t_1 + \Delta t$  作为一个倒相时间变量, 然后由(6)式对  $t$  求导数并使它等于零, 最后我们可得到一个关于  $t$  的超越方程:

$$\begin{aligned} &2\alpha/T_c \cdot \exp\{-(t_2 - t)/T_c\} \cdot [1 - (1 - gz'_{a2})^{1+\nu}] / g(1+\nu) + [\alpha\{2 - \exp(-t/T_c)\} \cdot \\ &\exp\{-(t_2 - t)/T_c\} \cdot (1 - gz'_{a2})^\nu - 2(\alpha - 1) + \alpha \cdot \exp(-t_2/T_c) \cdot (1 - gz'_{a2})^\nu] \cdot \\ &[(1 - g)^{(t_2 - t)/T_a} \cdot \ln(1 - g)] / g \cdot T_a = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

式中

$$z'_{a2} = [1 - (1 - g)^{(t_2 - t)/T_a}] / g, \quad t_1 < t < t_2$$

由(7)式可以求得最佳倒相时间。

图 1(d) 中 B 区合成场脉冲宽度 (由  $t_2$  减去由(7)式确定的最佳倒相时间  $t_2$  得到) 不变且不晃动。我们现在讨论电子枪触发时间来回晃动时所引起的加速束流能量变化, 它可以分两种情况讨论: ① 电子束在 B 区脉冲结束之前  $t_2 - \delta t$  进入加速管, 这时电子在加速管中获得的加速电压为:

$$\begin{aligned} V &= \int_0^{z'_a} E_L(B) dz' + \int_{z'_a}^1 E_L(A) dz' \\ &= \gamma \cdot \exp\{ - [(t_2 - \delta t) - t_1] / T_c \} \cdot [1 - (1 - gz'_{a1})^{1+\nu}] / g(1+\nu) + (\alpha - 1)(1 - 2z'_{a1}) \\ &\quad + \alpha \cdot \exp\{ -(t_2 - \delta t) / T_c \} \cdot [(1 - g)^{1+\nu} - (1 - gz'_{a1})^{1+\nu}] / g(1+\nu) \end{aligned} \quad (8)$$

式中已代入

$$t = t_2 - \delta t,$$

其中,

$$\begin{aligned} \gamma &= \alpha [2 - \exp(-t_1/T_c)], \\ z'_{a1} &= [1 - (1 - g)^{[(t_2 - \delta t) - t_1]/T_a}] / g. \end{aligned}$$

② 电子在 B 区脉冲结束后  $t_2 + \delta t$  进入加速管, 这时电子在加速管中获得的加速电压为:

$$\begin{aligned}
 V &= \int_0^{z'_{d1}} E_L(C) dz' + \int_{z'_{d1}}^{z'_{d2}} E_L(B) dz' + \int_{z'_{d2}}^1 E_L(A) dz' \\
 &= [\gamma \cdot \exp\{-(t_2-t_1)/T_c\} - \alpha] \cdot \exp\{-(t-t_2)/T_c\} \cdot [1 - (1-gz'_{d1})^{1+\nu}] / g(1+\nu) \\
 &\quad + \gamma_1 \exp\{-(t-t_1)/T_c\} \cdot [(1-gz'_{d1})^{1+\nu} - (1-gz'_{d2})^{1+\nu}] / g(1+\nu) \\
 &\quad - (\alpha-1)(z'_{d2}-z'_{d1}) + (\alpha-1)(1-z'_{d2}) \\
 &\quad - \alpha \cdot \exp(-t/T_c) \cdot [(1-gz'_{d2})^{1+\nu} - (1-g)^{1+\nu}] / g(1+\nu) \tag{9}
 \end{aligned}$$

式中

$$\begin{aligned}
 t &= t_2 + \delta t \\
 z'_{d1} &= [1 - (1-g)^{(t-t_2)/T_a}] / g \\
 z'_{d2} &= [1 - (1-g)^{(t-t_1)/T_a}] / g, \quad t-t_1 \leq T_a
 \end{aligned}$$

当  $t-t_1 \geq T_a$  时,  $z'_{d2}$  应等于 1, 由(8)(9)式计算的结果见图 3。

由图 2 可以看出, 在速调管输出高频脉冲宽度不变的情况下, 倒相时间  $t_2$  比所谓的理想倒相时间( $t_1=t_2-T_a$ )要稍微延迟  $\Delta t$ , 这时得到的能量增益最大。由图 3 可以看出, 电子注入到加速管的时间, 一定要选在高频脉冲结束前某一时刻, 即  $t_3=t_2-\delta t$ , 若选取  $\delta t=10$  ns, 并希望由上面谈到的三种时间晃动引起的能散  $\leq \pm 0.1\%$ , 这样我们就可以用(8)式来分别进行计算。图 4 是假定  $t_2$  及电子枪触发时间稳定,  $t_1$  晃动计算的结果, 由图可以看出, 当晃动量  $\Delta t=10$  ns 时, 即  $t_1 \rightarrow t_1+10$  ns,  $\frac{\Delta E}{E} \simeq 2.5 \times 10^{-4}$ , 当  $\Delta t=-10$  ns 时, 即  $t_1 \rightarrow t_1-10$  ns,  $\frac{\Delta E}{E} \simeq -7.9 \times 10^{-5}$ , 我们取  $\frac{\Delta E}{E} = \pm 2.5 \times 10^{-4}$ 。图 5 是假定  $t_1$  及电子枪触发时间稳定,  $t_2$  晃动(即速调管输出高频场脉冲起点晃动)计算的结果, 由图可以看出, 当

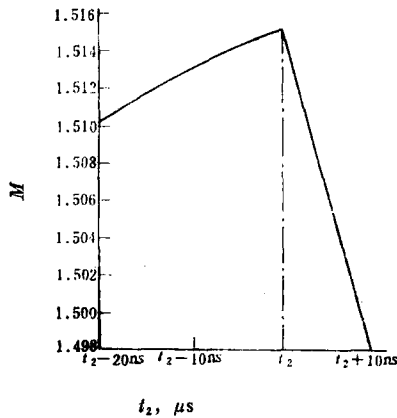


图 3 电子束在 B 区脉冲结束前后注入时获得的能量增益  
 $T_{RF}=3 \mu s, T_a=0.83 \mu s$

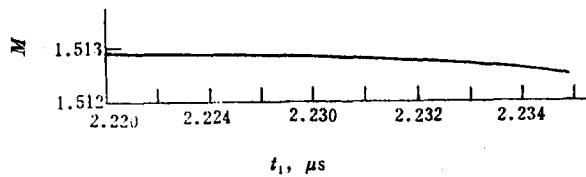


图 4  $t_1$  晃动时的能量增益  
 $T_{RF}=3 \mu s, T_a=0.83 \mu s$

$t_2$  的晃动量为  $\Delta t = \pm 5$  ns 时,  $\frac{\Delta E}{E} \simeq \pm 6.7 \times 10^{-4}$ 。图 6 是假定  $t_1$  和  $t_2$  稳定, 电子枪触发时间晃动计算的结果。由于 BEPC 贮存环要求电子注入时间的晃动量不要超过 1 ns, 因此我们取  $\Delta t = \pm 0.5$  ns, 由图可以看出由此引起的束流能散  $\frac{\Delta E}{E} \simeq \pm 7.9 \times 10^{-5}$ 。由于上述三种时间晃动是随机的, 故由此引起的总能散可表示为:

$$\left(\frac{\Delta E}{E}\right)_{\text{总}} = [(2.5 \times 10^{-4})^2 + (6.7 \times 10^{-4})^2 + (7.9 \times 10^{-5})^2]^{\frac{1}{2}} \approx \pm 7.2 \times 10^{-4}$$

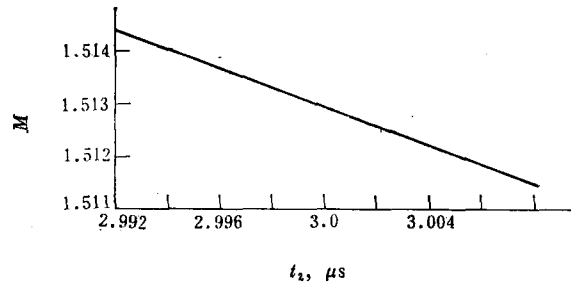


图 5  $t_2$  晃动时的能量增益  
 $T_{RF}=3 \mu s, T_a=0.83 \mu s$

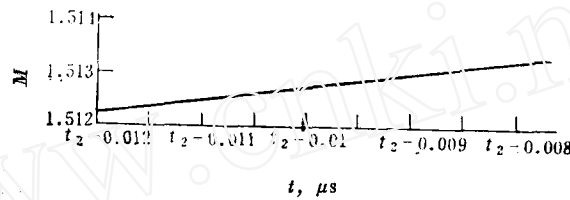


图 6 电子枪触发时间晃动时的能量增益  
 $T_{RF}=3 \mu s, T_a=0.83 \mu s$

### 三、结 论

(1) 对于 BEPC 注入器, 能量倍增器倒相时间应满足  $t_2 - t_1 < T_a$ , 若速调管高频脉冲宽度  $T_{RF}=3 \mu s, T_a=0.83 \mu s$ , 当处于最佳耦合时,  $t_2 - t_1 = 0.769 \mu s$ , 时增益最大。

(2) 电子束应在 B 区脉冲结束之前进入加速管, 切忌在 B 区脉冲结束后进入加速管。

在作这项工作时, 作者得到了朱学泉, 颜斌山, 李广林等同志很有益的讨论, 孙松岚同志全面审阅了本文并在编写计算程序时给作者很多帮助, 作者在此对以上同志表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] 任文彬等, 高能物理与核物理, 9, (3), 313(1985).
- [2] 李广林等, 高能物理与核物理, 8, (1), 125(1984).
- [3] Farkas, Z. D. et al., SLED: "A Method of Doubling SLAC'S Energy", The 9th International Conference on High Energy Accelerator, Stanford Linear Accelerator Centre, Stangord, Ca, May 2-7, 1974.