

能量倍增器用于行波等阻抗加速管的计算

李广林 任文彬 颜斌山

(高能物理研究所)

摘 要

本文导出了能量倍增器用于行波等阻抗加速管时的能量增益及储能腔的最佳耦合系数。

能量倍增器工作原理在文献中已有介绍,本文只讨论能量倍增器用于等阻抗加速管的能量增益和最佳耦合系数的计算。

(1) 加速管的能量增益

能量倍增器负载中的场可表示为:

$$E_L(A) = (-\alpha e^{-\tau} + \alpha - 1) \cdot E_K, \quad (1)$$

$$E_L(B) = [\gamma e^{-(\tau-\tau_1)} - (\alpha - 1)] \cdot E_K, \quad (2)$$

$$E_L(C) = [\gamma e^{-(\tau_2-\tau_1)}] \cdot e^{-(\tau-\tau_2)} \cdot E_K. \quad (3)$$

式中 $\tau = \alpha(2 - e^{-\tau_1})$,

$$\tau = \frac{t}{T_c}, \quad T_c = \frac{2Q_L}{\omega} = \frac{2Q_0}{\omega(1 + \beta)}$$

β 为储能腔的耦合系数,又 $t_2 = t_1 + T_a$, t_2 为速调管脉冲终止时刻, t_1 为速调管脉冲倒相时刻, T_a 为加速管填充时间。

行波等阻抗加速管内任一点的场可表示为

$$E(z, t) = E[0, t - \Delta t(z)] e^{-ILz'}$$

式中 $\Delta t(z)$ 是波从加速管入口传到该结构 z 点所需的时间, $z' = \frac{z}{L}$, L 为加速管长度, I 为加速管的衰减常数。在等阻抗加速管内,波的群速 $v_g = \text{常数}$,所以

$$\Delta t(z) = \frac{z}{v_g} = T_a z' \quad (4)$$

由于波在加速管中传播,所以(1)~(3)式中的 t 用 $t - \Delta t(z)$ 代替,则加速管中的场为:

$$E(A) = [-\alpha e^{-\tau + \frac{T_a z'}{T_c}} + \alpha - 1] E_K e^{-ILz'} \quad (5)$$

$$E(B) = \left[\gamma e^{-(\tau-\tau_1) + \frac{T_a}{T_c} z'} - (\alpha - 1) \right] E_K e^{-ILz'} \quad (6)$$

$$E(C) = \left[\gamma e^{-(\tau_2-\tau_1)} - \alpha \right] e^{-(\tau-\tau_2) + \frac{T_a}{T_c} z'} \cdot E_K e^{-ILz'} \quad (7)$$

因为输入场在 $z = 0$ 处当 $t_d = 0$, $t_d = t_1$ 和 $t_d = t_2$ 时刻将出现不连续, 从而在加速管对应的 z'_d 处也将出现不连续, 因此我们可使 $\Delta t = t - t_d$, 这样

$$z'_d = \frac{\Delta t(z)}{T_a} = t' - t'_d \quad (8)$$

加速电压是对场从 $z' = 0$ 到 $z' = 1$ 的积分, 而我们感兴趣的是求 $t_1 \leq t \leq t_2$ 内加速管中的电压, 为此有:

$$V = \int_0^{z'_d} E(B) dz' + \int_{z'_d}^1 E(A) dz' \quad (9)$$

式中 z'_d 由(8)式给出. 能量倍增因子定义为(9)式对直波 E_K 在一个填充时间之后建立的电压之比. 考虑到加速管的衰减, 直波 E_K 在加速管中建立的电压为:

$$V_K = \int_0^1 E_K e^{-ILz'} dz' = \frac{1}{IL} (1 - e^{-IL}) \quad (10)$$

式中已定义 $E_K = 1$. 将(5)(6)代入(9), 这时有:

$$\begin{aligned} V = & \frac{\gamma e^{-(\tau-\tau_1)}}{\frac{T_a}{T_c} - IL} \left[e^{\left(\frac{T_a}{T_c} - IL\right) z'_d} - 1 \right] - \frac{(\alpha - 1)}{IL} (1 - e^{-ILz'_d}) \\ & - \frac{\alpha e^{-\tau}}{\frac{T_a}{T_c} - IL} \left[e^{\left(\frac{T_a}{T_c} - IL\right) z'_d} - e^{\left(\frac{T_a}{T_c} - IL\right) z'_d} \right] \\ & - \frac{(\alpha - 1)}{IL} [e^{-IL} - e^{-ILz'_d}] \end{aligned} \quad (11)$$

与加速管中最大加速电压相对应的是 $t = t_1 + T_a$ (或 $t' = t'_1 + 1$) 以及 $z'_d = 1$, 这时(11)式变为:

$$V_{\max} = \frac{\gamma e^{-\frac{T_a}{T_c}}}{\frac{T_a}{T_c} - IL} \left[e^{\left(\frac{T_a}{T_c} - IL\right)} - 1 \right] - \frac{\alpha - 1}{IL} (1 - e^{-IL}) \quad (12)$$

能量倍增因子 $M = \frac{V_{\max}}{V_K}$, 这样

$$\begin{aligned} M = & \left\{ \frac{\gamma e^{-\frac{T_a}{T_c}}}{\frac{T_a}{T_c} - IL} \left[e^{\left(\frac{T_a}{T_c} - IL\right)} - 1 \right] - \frac{\alpha - 1}{IL} (1 - e^{-IL}) \right\} / \\ & \frac{1}{IL} (1 - e^{-IL}) \end{aligned} \quad (13)$$

(2) 最佳耦合系数 β

对每一个具体的加速管结构和不同的速调管脉冲宽度, 要得到最大能量增益, 它一定是与一个具体的耦合系数 β 相联系的, 这个 β 称为最佳耦合系数. 为此对(13)式求

$$\frac{dM}{d\beta} = 0,$$

最后我们得到关于 β 的下述方程:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{(1+\beta)\beta} + \frac{\frac{\omega T_a}{2Q_0} e^{-\frac{\omega T_a(1+\beta)}{2Q_0}}}{2 - e^{-\frac{\omega T_a(1+\beta)}{2Q_0}}} - \frac{\omega T_a}{2Q_0} - \frac{\frac{\omega T_a}{2Q_0}}{\left(\frac{\omega T_a(1+\beta)}{2Q_0} - IL\right)} \\ & + \frac{\omega T_a}{2Q_0} \cdot \frac{e\left[\frac{\omega T_a(1+\beta)}{2Q_0} - IL\right]}{e\left[\frac{\omega T_a(1+\beta)}{2Q_0} - IL\right] - 1} - \frac{(1 - e^{-IL})}{\beta(1+\beta)IL} \\ & \cdot \frac{e^{-\frac{\omega T_a(1+\beta)}{2Q_0}}}{2 - e^{-\frac{\omega T_a(1+\beta)}{2Q_0}}} \cdot \left[\frac{\omega T_a(1+\beta)}{2Q_0} - IL\right] \\ & \cdot \frac{1}{e\left[\frac{\omega T_a(1+\beta)}{2Q_0} - IL\right] - 1} = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

当加速管等参数给定后, 根据(14)式就能算出最佳耦合系数 β_{opt} .

对下述加速管参数; $L = 3.01$ 米, $IL = 0.385$, $T_a = 0.59\mu s$, $f = 2856\text{MHz}$, 以及贮能腔 $Q_0 = 10^5$ 计算出的 M, β 列表如下:

| $T_{RF}(\mu s)$ | β_{opt} | M |
|-----------------|---------------|------|
| 2.5 | 7.7 | 1.71 |
| 2.7 | 7.4 | 1.76 |
| 3 | 7.1 | 1.82 |
| 4 | 6.1 | 1.95 |
| 5 | 5.5 | 2.03 |

T_{RF} 为速调管高频脉冲宽度.

参 考 文 献

- Z. D. Farkas, H. A. Hogg, G. A. Loew and P. B. Wilson, "SLED: A Method of Doubling SLAC's Energy", Proc. 9th Int. Conf. on High Energy Accelerators. SLAC, Stanford, California, 1974, p. 576.

ANALYSIS AND CALCULATION OF THE ENERGY DOUBLER USED FOR TRAVELING WAVE CONSTANT IMPEDANCE ACCELERATING STRUCTURE

LI GUANG-LIN REN WEN-BIN YEN BIN-SHAN

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

The expressions of ED multiplication factor and optimum coupling coefficient of the energy storage cavity are derived for the travelling wave electron linear accelerator of the constant impedance structure.