

电子直线加速器的能量倍增器

李广林 颜斌山 李有猛 邓燕平 王 劲 刘晋通

(中国科学院高能物理研究所, 北京)

研制了用于电子直线加速器的能量倍增器。试验结果表明, 装置可靠地工作于输入功率电平 14.5 MW(脉冲宽度 3 μ s), 输出峰值功率增益达 7dB, 用于 BEI-1 电子直线加速器, 加速能量得到 >1.45 的增益。

关键词 能量倍增器, 填充时间, 功率增益。

一、前 言

七十年代, 美国 SLAC 在其两哩长的电子直线加速器上应用 SLED(SLAC 能量倍增器) 技术, 使加速器能量提高了 1.4 倍。近年来西欧的 CERN 和西德的 DESY 也在研制此项装置。在北京正负电子对撞机(BEPC) 工程中, 做为注入器的电子直线加速器的能量要求为 1.1/1.4 GeV。按最初的设计考虑, 需要至少 28 个输出功率为 16 MW 的大功率速调管做为功率源。在采用能量倍增器后, 所需速调管数目可减少至 16 个, 其中 13 个速调管后加用能量倍增器。这样, 在加速器输出能量不变的情况下, 节省了 12 个速调管及其高压调制器、聚焦线圈和电源、控制线路等设备。由于每台能量倍增器的造价仅及一套速调管及其有关设备的七分之一左右, 并且具有体积小、操作简单、不再需能源供应等优点, 故大大节约了投资、建筑面积、能源消耗等, 而且提高了整个加速器的可靠性。为实现此方案, 我们参考 SLED 设计, 研制了为 BEPC 工程使用的能量倍增器, 并成功地在 BEI-1 加速器(BEPC 注入器的预制模型) 上得到了应用。

二、工 作 原 理^[1]

能量倍增器的工作原理示于图 1。

能量倍增器由两个与波导过耦合的高 Q 值腔体及波导微波网路组成, 放置在速调管输出至加速器的波导传输系统中。此外, 在速调管的激励端串接一个 180° 倒相器。速调管输出的脉冲功率经波导送至两个能量倍增器的储能腔。在腔内逐步建立起电场的同时, 部分能量释放出来。两腔释放的辐射波经微波网路后在速调管一端互相抵消而在加速器一端相加。当速调管工作脉冲剩下一个填充时间(加速结构的) 时, 使 180° 倒相器动作, 则腔释放出的波将与由速调管来的而经腔与波导界面反射的波在加速器端正好叠加, 从而得到功率的倍增。这时的输出波脉冲宽度变窄而功率增加。其工作过程可参见图 2。

设速调管输出波脉冲为 E_k , E_r 为腔的辐射波, E_L 为能量倍增器输出的合成波。根据功率平衡, 可列出方程:

$$P_K = P_R + P_C + \frac{dW_c}{dt}$$

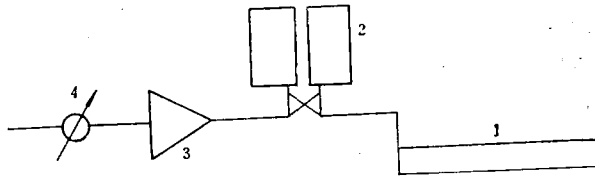


图 1 能量倍增器工作原理图
1—加速器；2—能量倍增器；3—速调管；4—180°移相器。

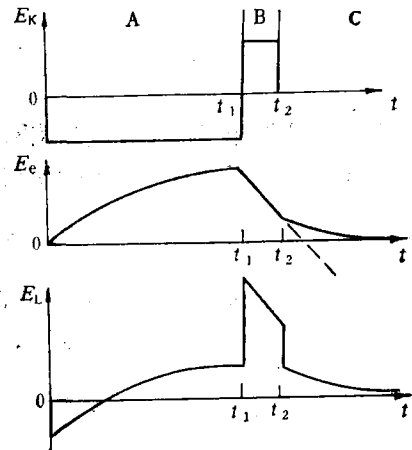


图 2 能量倍增器工作过程

其中 P_R 为腔反射功率，

P_e 为腔耗，

$\frac{dW_c}{dt}$ 为腔内功率增长。

经过变换，可得到相应的微分方程

$$-\alpha E_K = E_e + T_c \frac{dE_e}{dt}$$

其中 $\alpha = \frac{2\beta}{1+\beta}$

β 为腔的耦合系数，

$T_c = \frac{2Q_0}{\omega(1+\beta)}$ 为腔的填充时间，

Q_0 为腔的无载品质因数。

取 t_1 为倒相开始时间， t_2 为速调管脉冲终止时间。将时间分为 A(0- t_1)，B(t_1 - t_2)，C(> t_2) 三段。解此方程，并设 $E_K = -1$ (t 由 0 至 t_1)，则可得负载的波 E_L

$$E_L(A) = -ae^{-\tau} + (\alpha - 1)$$

$$E_L(B) = \gamma e^{-(\tau - \tau_1)} - (\alpha - 1)$$

$$E_L(C) = [\gamma e^{-(\tau_2 - \tau_1)} - \alpha] e^{-(\tau - \tau_2)}$$

其中

$$\gamma = \alpha(2 - e^{-\tau_1})$$

$$\tau = \frac{t}{T_c}$$

我们感兴趣的是 B 段。在极端情况下，即当 $\beta \gg 1$ ， T_c 很大且 $t_1 \gg T_c$ 时， $E_L(B) \rightarrow 3$ ，也即可得到约 9 倍的峰值功率输出。实际上，由于 Q_0 ， β 及 t_1 的有限值，可能得到的峰值功率增益在 6—8dB 间。

三、用于电子直线加速器时的能量增益

能量倍增器用于电子直线加速器时, 所能得到的最大能量增益可用能量倍增因子 M 表示, M 即是以无能量倍增器时的加速能量归一化后束流的能量增益。

1. 等梯度加速结构情况^[1]

加速管内的场作为沿轴距离 Z 和时间 t 的函数可表示为

$$E(Z, t) = E[0, t - \Delta t(Z)]$$

其中

$$\Delta t(Z) = \int_0^Z \frac{dZ}{v_g(Z)} = \int_0^Z \frac{dZ}{v_{g0}(1-gZ/L)}$$

L 为加速管长度,

v_g 为群速,

g 为群速变化常数。

将能量倍增器输出场代入, 对有用的 A 及 B 段场积分并考虑其中的不连续性, 最后可得出能量倍增因子为

$$M = \gamma e^{-T_a/T_e} [1 - (1-g)^{1+\nu}] [g(1+\nu)]^{-1} - (\alpha - 1)$$

其中 T_a 为加速管填充时间,

$$\nu = \frac{T_a}{T_e} [\ln(1-g)]^{-1}.$$

2. 等阻抗加速结构情况^[2]

加速管内的场可表示为

$$E(Z, t) = E[0, t - \Delta t(Z)] \cdot e^{-Iz}$$

其中 $\Delta t(Z) = Z/v_g$

I 为加速结构衰减常数

令 $u = \frac{T_a}{T_e}$, 可得出能量倍增因子

$$M = \frac{IL}{1-e^{-IL}} \left[\frac{\gamma e^{-u}}{u-IL} (e^{u-IL} - 1) + \frac{\alpha-1}{IL} (e^{-IL} - 1) \right]$$

还可根据 M 与 β 的关系, 得出最佳耦合系数。

在 BEPC 注入器(即 1.1/1.4 GeV 电子直线加速器) 中采用等梯度加速结构。其工作参数为 $f = 2856$ MHz, $L = 3.01$ m(有效长度), $g = 0.681$, $T_a = 0.83 \mu s$ 。若速调管输出功率脉宽为 $3 \mu s$, 能量倍增器腔体 $Q_0 = 10^5$, $\beta \sim 5.2$, 则能量倍增因子(即最大能量增益) ~ 1.5 。实际上, 由于不尽完善的加工及小的失调等, 可达到的值要稍低些。

四、能量倍增器的部件

能量倍增器由储能腔、微波网路及倒相等组成。其结构示于图 3。

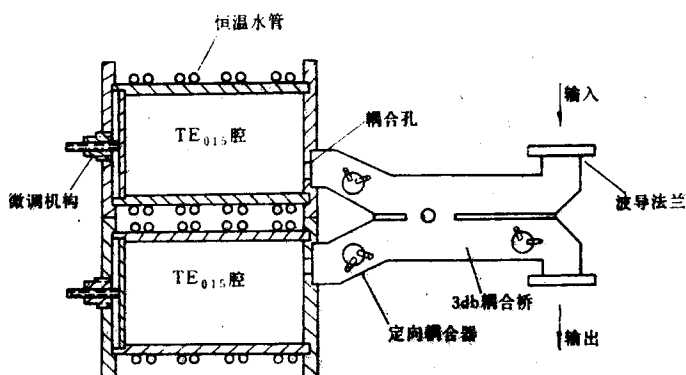


图 3 能量倍增器结构示意图

1. **储能腔** 要求有高的无载品质因数，工作于过耦合情况。采用工作于 TE_{015} 模的圆柱形高导无氧铜腔，其 Q_0 值可达 10^5 ，且较易加工制造，干扰模式少（简并模 TM_{115} 可在端板处开环形槽使其降低 20 MHz 以上）。利用一个端板的强迫变形，还可对腔做 $\sim \pm 1$ MHz 的频率微调。腔与波导通过端板上的圆孔耦合。在腔的圆柱壁上开有小孔，使一个以钨制成的解谐探针可探进腔内，从而使腔解谐十余兆赫。探针拉出后能量倍增器恢复正常工作。利用解谐装置可使加速器工作于有能量倍增器和无能量倍增器两种状态，并有利于测量和调试。解谐装置可在控制台上加以控制。在腔的外壁围有水管，利用恒温水使腔工作于 $45^\circ\text{C} \pm 0.2^\circ\text{C}$ 。腔体加工工艺要求较高，内表面光洁度要求 ∇_{10} ，除最后一道焊接工序为氩弧焊外，其余都在氢炉中进行。

2. **微波网路** 为波导窄壁耦合桥路，耦合度为 3 dB。对其要求是能承受高功率和良好的对称性。实际做到的不平衡 < 0.2 dB。为了测量和监视的方便，在连接腔体的两个波导臂及输出波导上装置了波导-同轴式定向耦合器。

3. **倒相器** 为由 PIN 管构成的电控 180° 移相器，其开关速度 $< 50\text{ns}$ 。倒相器放置于微波激励系统中的低电平段，倒相触发脉冲为 TTL 电平，可变延时且宽度可调。

五、测试与试验结果

试制了能量倍增器 1# 及 2# 样机。其中 1# 样机无解谐装置，为分离部件式。2# 样机带有解谐装置并焊接成一整体。

图 4 及图 5 给出 1# 及 2# 样机的实物照片。

在低功率下对样机进行了参数测试。其主要参数为：

	无载品质因数, Q_0	耦合系数, β
1# 样机	95000	5.4
2# 样机	98000	4.9

随后进行了高功率试验并用于 BEI-1 电子直线加速器。在下列情况下进行了实验：

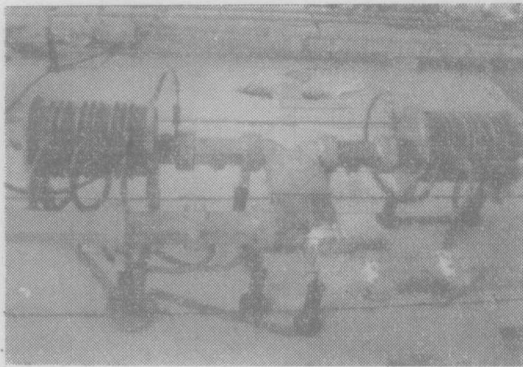


图 4 1#样机在 BEI-1 加速器上

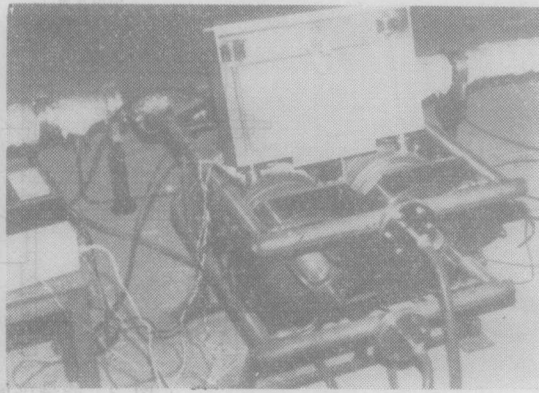


图 5 2#样机在高功率测试中

频率	2856.2MHz
速调管输出脉冲功率	14.5MW
速调管输出脉冲宽度	3 μ s
倒相起始时间	2.2 μ s
系统工作真空度	1×10^{-7} Torr
加速束流脉冲宽度	20 ns

图 6 给出能量倍增器输出功率包络波形。测得的峰值功率增益 ~ 7 dB, 能量倍增因子 > 1.45 。

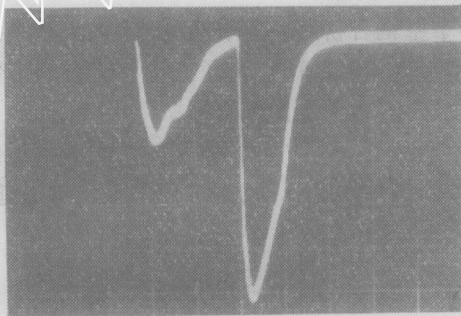


图 6 能量倍增器输出波形

在加功率过程中曾发现有轻微的打火及放气, 但经数小时老练后即趋于正常, 稳定地工作于输入功率 14.5 MW, 此时输出峰值功率达 70MW。

高能所实验工厂承制了装置的主体, 其中黄富河、杨贯玉、季熙等同志解决了不少工艺问题; 在高功率试验中得到了全室同志的大力支持; 任文彬、陈鹤芳、周锦宝、何凡、陆慧宏等同志对工作提供了意见或具体帮助, 在此一併表示感谢。

参 考 文 献

[1] Farkas, Z. D. et al., proceedings IX_{th} International Conference on High Energy Accelerator, SLAC Stanford, California, P, 576, 1974.

[2] 李广林、任文彬和颜斌山, 高能物理与核物理 8(1), 1(1984)。