

用于长脉冲多束团直线 加速器的 SLED 系统

顾鹏达 裴国玺 王书鸿

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 根据长脉冲多束团直线加速器对输入微波波形的要求,系统研究了带有 SLED 的微波系统,由 SLED 基本理论推导了输出 RAMP 波形和平顶波形脉冲时 SLED 所需的输入波形,给出 SLED 的参数优化方法.用冷测实验对所发展的理论进行了验证,第一次用 SLED 产生了 RAMP 波形和平顶波形的 RF 脉冲.

关键词 SLED 设计 RF 脉冲压缩器 多束团瞬态束流负载 PM-AM 技术

1 引言

多束团运行模式可以大大提高 RF 功率的转化效率,同时也是下一代直线对撞机达到高亮度的主要途径^[1].多束团模式运行时横向尾场将导致束流发射度的增长,纵向尾场将导致束流能散的增大.新的加速结构的设计,如阻尼结构、失谐结构、失谐阻尼结构(DDS)、圆化失谐阻尼结构(RDDS)等,都是围绕抑制横向尾场进行的.纵向尾场引起的多束团束流负载效应导致束团间的能散,为了降低能散,必须对纵向尾场引起的束流负载效应进行补偿.由于基模是用来加速的模式,束流激励起的基模纵向尾场不可能通过加速结构的设计来抑制,所以束流负载的补偿必须依靠对功率源的输出进行控制.主要有 ΔT 方法、 ΔF 方法、精确补偿法^[2] 3 种. ΔT 方法又称早注入法,在结构还未被完全填充时注入束流,束流负载所引起的能量增益下降被新填充部分所抵消,适用于束团长度远小于结构填充时间的情况; ΔF 方法采用专用的补偿加速管,补偿加速管与标准加速管结构相同,其工作频率与加速管的标准工作频率相差 1 或 2MHz,相位与加速相位相差 90° ,束流前面的部分受到减速,后面的部分受到加速,一般要求束团长度 $t_b \leq (1/6\Delta F)$;精确补偿法又称预填充法,可以用于任意长度的束流脉冲.对于长脉冲的情况必须采用精确补偿法.RF 脉冲压缩器是将长而功率低的微波脉冲转换为短但功率大大提高了的微波脉冲,可以得到远高于现有功率源技术水平的高功率微波脉冲.SLED^[3] 是最早应用于加速器的 RF 脉冲压缩器,是 SLAC 能量达到 50GeV 的关键技术之一.高能所原直线加速器

室也研制了 SLED 型的 RF 脉冲压缩器^[4], 成功地应用在北京正负电子对撞机直线加速器上. 现在为适应下一代直线对撞机的要求, 设计了 BPC^[5], SLED-II^[6], DLDS^[7] 等多种 RF 脉冲压缩器^[8]. 本文将讨论强流长脉冲和弱流长脉冲两种情况下, 对于等梯度加速结构, SLED 系统的结构与优化设计. 强流长脉冲时必须考虑束流负载的补偿, 要求 SLED 提供适当的微波波形; 弱流长脉冲时则要求有方波微波脉冲. 冷测实验得到了与理论计算相符合的结果.

2 长脉冲多束团直线加速器所要求的输入微波波形

强流情况下, 精确补偿法要求在 $0 < t < t_f$ 时对加速管中预填充 $G_1(z) = G_0(z) - G_b(z)$ 的场型, t_f 为加速管填充时间, $G_0(z)$ 为方波输入脉冲所产生的加速场型, $G_b(z)$ 为稳态束流负载在加速管中所产生的加速模场型. 在 $t_f < t < (t_b + t_f)$ 时输入微波保持在最大值处. 如果每个束团的电荷分布是一致的, 则每一束团所看到的加速管内的场分布都是稳态束流负载场型, 束流经过加速管后的能量增益是一致的, 不存在任何能散, 这就是束流负载的精确补偿方法. $0 < t < t_f$ 时加速管入口处所需的输入微波如式(1)所示, 这种波形称为 RAMP 波形.

$$\left[\frac{P(t)}{P_0} \right]^{1/2} = 1 - \frac{I_0 s_0 t_f}{2G_0} \left(1 - \frac{t}{t_f} \right), \quad (1)$$

弱流长脉冲时则要求有方波微波脉冲, 脉冲长度为 $t_f + t_b$.

3 产生 RAMP 和平顶微波脉冲时 SLED 所需的输入波形与参数优化方法

SLED 的结构如图 1(a), 其基本工作原理为: 两谐振腔参数完全相同, 速调管的入射波平均地分配到两个谐振腔. 入射波经 3dB 波导定向耦合器的耦合孔到达第二个腔, 和没有经过耦合孔到达第一个腔的波相比, 相位延迟 90° . 当它再次经过耦合孔反射到输入波导中时, 相位与经第一腔的反射波相差 180° , 正好反相, 互相抵消. 所以在输入波导中

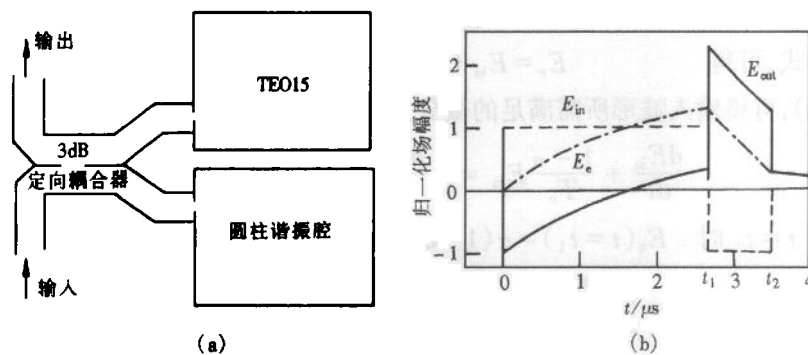


图1 SLED结构及输入、输出波形图

没有反射波. 而在输出波导中两个腔的反射波都被移相 90° , 同相相加, 传向加速管. 在 $0 < t < t_1$ 阶段, 腔内场逐步建立. 腔的反射波, 即 SLED 的输出 E_{out} 可视为两部分的叠加: 腔辐射波 E_c 和入射波在谐振腔入口处的反射波—— E_{in} , 即在每一时刻: $E_{out} = E_c - E_{in}$. 在 t_1 时刻, 输入微波相位反转 180° , 而辐射波的相位不可能发生跃变, 辐射波、入射波同相叠加, 输出波幅度产生跃变, 大大高于入射波的幅度. 可以得到远高于输入脉冲幅度的高功率输出脉冲.

$$\text{SLED 工作的基本方程为} \quad T_c \frac{dE_c}{dt} + E_c = aE_{in}, \quad (2)$$

其中 $T_c = 2Q_1/\omega$, $a = 2\beta(1+\beta)$, $Q_1 = Q_0/(1+\beta)$, β 为谐振腔的耦合系数. 这是 SLED 工作的基本微分方程, 同时也是谐振腔暂态过程的基本方程. 这是一个一阶线性非齐次微分方程, 其典型工作模式的输入、输出波形如图 1(b). 由图 1(b) 可以看出, SLED 的输出呈指数下降形式. 造成 SLED 输出波形呈指数下降的原因为: 在相位反转后, 腔内能量不再增加, 而是一方面向反相位充电, 一方面将能量辐射出去. E_c 随腔内能量实时变化, 而 E_{in} 在输出阶段不变, 输出波的幅度自然随之下降. 为得到长脉冲多束团直线加速器所需的输入波形, SLED 的输入波形必须调制成一定形状. 下面推导 SLED 所需的输入波形.

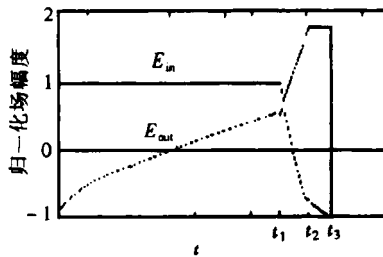


图 2 产生 RAMP 波形的输出脉冲

3.1 强流长脉冲情况

为了补偿束流负载, 功率源的输出峰值场强度应在前一段线性增加, 在后一段则应保持在最大值. 各个场幅度均按输入场幅度进行归一化, 在全文中均如此. SLED 的输入及输出波形如图 2 所示

3.1.1 $t_1 \leq t < t_2$ 期间所需的输入波形

在 $t_1 \leq t < t_2$ 时间内所希望的输出波形为

$$E_{out} = a + b(t - t_1), \quad a = \sqrt{\frac{P(t = t_1)}{P_0}}, \quad b = \frac{(c - a)}{(t_2 - t_1)}$$

初始功率由束流负载的强度决定, c 为最大微波幅度增益. 在任一时刻有

$$E_{out} = E_c - E_{in}.$$

由(3)和(4)式, 可得 $E_c = E_{in} + a + b(t - t_1)$

代入方程(2), 可得输入波形所需满足的微分方程

$$\frac{dE_{in}}{dt} + \frac{1-a}{T_c} E_{in} = -\frac{b(t-t_1)}{T_c} - \frac{a+bT_c}{T_c}$$

初始条件为 $t = t_1$ 时 $E_c(t = t_1) = a(1 - e^{-t_1/T_c})$. 解方程(5), 得到所需的输入波形为

$$E_{in}(t_1 \leq t < t_2) = \left[\frac{bT_c}{(1-a)^2} - \frac{a+bT_c}{1-a} \right] + \frac{b(t-t_1)}{a-1} + e^{(a-1)(t-t_1)/T_c} \left[\frac{a+bT_c}{1-a} - \frac{bT_c}{(1-a)^2} + a(1 - e^{-t_1/T_c}) - a \right] \quad (6)$$

3.1.2 $t_2 \leq t < t_3$ 期间所需的输入波形

在 $t_2 \leq t < t_3$ 期间所期望的输出波形

$$E_{\text{out}} = c, \quad (7)$$

由(7)和(4)可得, $E_c = E_{\text{in}} + c$, 代入方程(2), 得到输入波形的微分方程

$$\frac{dE_{\text{in}}}{dt} + \frac{1-\alpha}{T_c} E_{\text{in}} = -\frac{c}{T_c} \quad (8)$$

初始条件是 E_{in} 在 $t = t_2$ 时刻连续, 其解为

$$E_{\text{in}}(t_2 \leq t < t_3) = \frac{c}{\alpha - 1} + e^{(a-1)(t-t_2)/T_c} \left\{ \left[\frac{bT_c}{(1-\alpha)^2} - \frac{a+bT_c}{1-\alpha} \right] + \frac{b(t_2-t_1)}{\alpha-1} + e^{(a-1)(t_2-t_1)/T_c} \left[\frac{a+bT_c}{1-\alpha} - \frac{bT_c}{(1-\alpha)^2} + \alpha(1-e^{-t_1/T_c}) - a \right] - \frac{c}{\alpha-1} \right\} \quad (9)$$

3.1.3 输出 RAMP 波形时 SLED 参数的优化方法

输出波形在 $t_2 \leq t < t_3$ 期间希望保持在平顶状态, 为抵消腔辐射场幅度的逐渐降低, 输入场的幅度逐渐变大. 当 E_{in} 在 $t = t_3$ 时刻恰好达到 -1 时, 功率增益达到最大. 这时 a 和 c 的关系为 $a = c \times \left[\frac{P(t=0)}{P_0} \right]^{1/2} = c \left(1 - \frac{I_0 s_0 t_f}{2G_0} \right)$. 用公式(9), 取 $E_{\text{in}}(t = t_3) = -1$.

$$c = \frac{f_2}{f_1}. \quad (10)$$

$$= \frac{1 - e^{(a-1)(t_3-t_2)/T_c}}{\alpha - 1} +$$

$$e^{(a-1)(t_3-t_2)/T_c} \left[\frac{1}{\alpha - 1} + \frac{T_c}{(t_2 - t_1)(\alpha - 1)} \left(1 + \frac{1}{\alpha - 1} \right) (1 - e^{(a-1)(t_2-t_1)/T_c}) \right] +$$

$$\left(1 - \frac{I_0 s_0 t_f}{2G_0} \right) e^{(a-1)(t_3-t_2)/T_c} \left\{ e^{(a-1)(t_2-t_1)/T_c} \left[\frac{\alpha}{1-\alpha} + \frac{T_c}{(t_2-t_1)(\alpha-1)} \left(1 + \frac{1}{\alpha-1} \right) \right] - \right.$$

$$\left. \frac{T_c}{(t_2-t_1)(\alpha-1)} \left(1 + \frac{1}{\alpha-1} \right) \right\},$$

$$f_2 = -1 - e^{(a-1)(t_3-t_2)/T_c} e^{(a-1)(t_2-t_1)/T_c} \alpha (1 - e^{-t_1/T_c}).$$

公式(10)就是 SLED 参数优化的基本公式. 用此方程, 可以对给定的 Q_0 和一定输入脉冲长度, 对 β 进行优化. 不同的输入脉冲长度, 有一最大的 c . 反之对于要求的 c 可以得到所需最短的输入脉冲长度.

3.2 弱流长脉冲情况

如图3所示, 输出波形在 $t_1 \leq t < t_2$ 内为

$$E_{\text{out}} = c,$$

其解法如产生 RAMP 波形 $t_2 \leq t < t_3$ 期间所需输入波形的解法, 其微分方程为

$$\frac{dE_{\text{in}}}{dt} + \frac{1-\alpha}{T_c} E_{\text{in}} = -\frac{c}{T_c}.$$

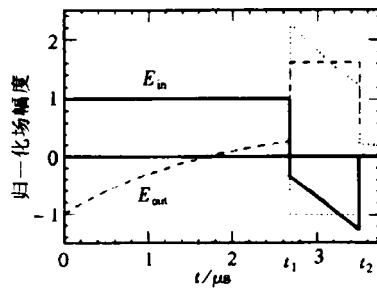


图 3 产生平顶波形输出脉冲

初始条件为在 $t = t_1$ 时刻

$$E_e(t = t_1) = \alpha(1 - e^{-t_1/T_c}),$$

E_e 在 $t = t_1$ 时刻连续. 解方程可得

$$E_{in}(t_1 < t < t_2) = \frac{c}{\alpha - 1} + \left(1 - e^{-t_1/T_c} - \frac{c}{\alpha - 1}\right) \alpha e^{(\alpha-1)(t-t_1)/T_c}. \quad (11)$$

在当 E_{in} 在 $t = t_2$ 时刻恰好达到 -1 时, 功率增益达到最大. 由此可以得出输出平顶波形时, c 值如公

式(12)所示,

$$c = - \frac{[1 + (1 - e^{-t_1/T_c}) \alpha e^{(\alpha-1)(t_2-t_1)/T_c}](\alpha - 1)}{1 - \alpha e^{(\alpha-1)(t_2-t_1)/T_c}}, \quad (12)$$

利用此公式可以对 SLED 的各种相关参数进行优化.

4 冷测实验

由于大功率速调管工作在饱和状态和其非线性, SLED 所需的输入波形不可能由速调管直接产生, 必须对功率源的输出进行合成. 采用 PM-AM^[8,9] 技术对两台功率源的输出进行合成, 可以得到任意波形的微波脉冲, 微波系统如图 4 所示.

冷测实验对 SLED 输入微波按理论计算包络数据进行幅度调制, 以验证论文中发展的用 SLED 产生 RAMP 和平顶微波包络波形理论, 并对实际应用中的调谐等问题进行实验研究. HP8671A 频率综合器与功率放大器组成频率可调的微波连续波信号源, 隔离器吸收掉反射向信号源的反射波, 以免影响信号源稳定性. 首先计算实验所需的微波包络波形, 在微机上用 Easywave 软件编辑, 完成后加载到 LeC-

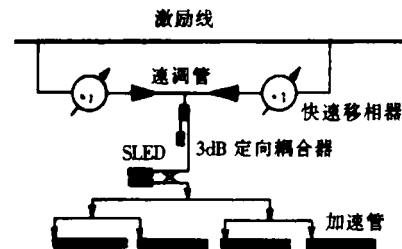


图 4 微波系统结构

roy9100 任意波形发生器的存储器中并执行. 由混频器完成对微波信号的幅度调制. LeCroy9100 任意波形发生器产生双极性信号, 信号极性的变化相当于相位反转了 180° . 用检波器检测 SLED 的输出信号包络, 数字储存示波器观察、测量并记录波形. 由于幅度调制波形不是一个简单的函数, 而是一个很复杂的波形, 产生任意波形的调制信号是实验的关键, LeCroy9100 任意波形发生器是实验的关键设备.

图 5(a) 为由 SLED 产生的平顶波形, 图 5(b) 为由 SLED 产生的 RAMP 波形. 产生峰值功率增益 2.25 的 RAMP 波形所需的最短输入脉冲宽度为 $7.16 \mu\text{s}$, 与理论计算相符合. 输入脉冲宽度小于 $7.16 \mu\text{s}$, 输出脉冲的平顶部分不能保持住; 输入脉冲变长后, 输入脉冲的功率不能得到最好的利用, 应优化输入波形的调形模式, 得到更大的功率增益.

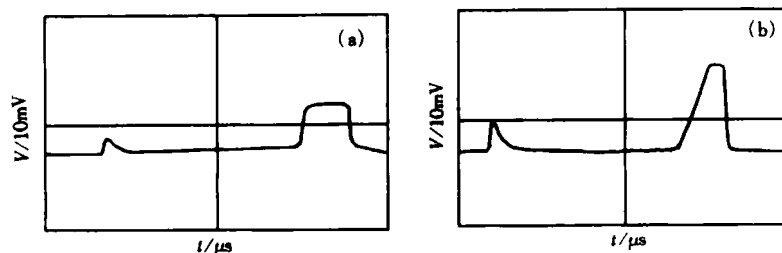


图5 SLED输出波形

(a) SLED输出平顶波形; (b) SLED输出RAMP波形.

5 结论

本文根据长脉冲多束团直线加速器要求,由 SLED 基本理论推导了输出 RAMP 波形和平顶波形脉冲时 SLED 所需的输入波形,给出了 SLED 的参数优化方法. 理论计算和冷测实验结果符合得很好,第一次用 SLED 产生了 RAMP 波形和平顶波形的 RF 脉冲.

参考文献(References)

- 1 Wilson P B. Application of High Power Microwaves. Boston: Artech House, 1994. 287—290
- 2 SLAC Report 474, 1996
- 3 Farkas Z D et al. SLAC-PUB-1453, June 1974
- 4 LI Guang-Lin, REN Wen-Bin, YAN Bin-Shan. High Energy Phys. and Nucl. Phys. , 1984, 8(1):125(in Chinese)
(李广林,任文彬,颜斌山. 高能物理与核物理,1984,8(1):125—128)
- 5 Farkas Z D. IEEE Trans. Microwave Theory Tech. , 1986, 34:1036—1043, SLAC-PUB-3694
- 6 Wilson P B, Farkas Z D, Ruth R D. SLAC-PUB-5330. September 1990
- 7 Mizuno H, Otake Y. Presented at the Linac Conference, Tsukuba, Japan, August 1994; KEK preprint 94—112
- 8 GU Peng-Da. Research on New Type RF Pulse Compressor, IHEP Ph. D Thesis, 1999(in Chinese)
(顾鹏达. 新型 RF 脉冲压缩器研究. 高能物理研究所博士论文,1999)
- 9 Shintake T et al. KEK Preprint, 1997, June, 97—48

SLED System for Long Pulse Multi-bunch Linac

GU Peng-Da PEI Guo-Xi WANG Shu-Hong

(Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract The compensation for transient beam loading effect requires that a modulated RF pulsed is fed to the accelerator. A new SLED system to be able to generate the modulated RF pulse in long pulse multi-bunch linac is studied. The required waveforms of SLED input pulses are computed to generate RAMP and flat-top RF pulses. The optimization method of SLED parameters is formulated. The results of cold test coincide with the theoretical prediction. RAMP and flat-top RF pulses are generated using SLED for the first time.

Key words SLED design, RF pulse compressor, multi-bunch transient beam loading, PM-AM technique

Received 7 April 2000