

长脉冲大功率微波驱动源放电过程研究*

王淦平[†] 向飞 谭杰 曹绍云 罗敏 康强 常安碧

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 绵阳 621900)

(2010年7月19收到; 2010年9月5日收到修改稿)

从理论上分析了充放电时大功率微波(HPM)驱动源——水介质脉冲形成线(PFL)上的波过程,提出了形成线放电过程的等效分析方法,得到了输出脉冲波形平顶畸变与PFL充电电压波形的关系,并使用Pspice软件对等效分析的结果进行了模拟验证.开展了基于水介质脉冲形成线的高功率微波驱动源的实验研究,并依据等效分析法得出的结论,通过控制激光触发开关的导通时间,明显减小了输出脉冲波形平顶的畸变,得到了幅值数百kV、脉宽约150 ns、平顶约60 ns的脉冲电压.

关键词: 脉冲形成线(PFL), 大功率微波, 等效分析, 平顶畸变

PACS: 29.20.df, 29.20.Ej, 91.25.Qi

1. 引言

经微波效应研究发现,脉宽为100 ns左右的长脉冲HPM作用效果最好^[1,2],这就需要相应的脉冲功率装置作为HPM驱动源^[3,4].近年来,中物院应用电子学研究所开展了长脉冲HPM源的研究,实现了脉宽大于100 ns的微波辐射^[5,6];同时,为了实现小型化设计,又开展了长脉冲HPM驱动源的研究^[7].该驱动源命名为直线变压器驱动源(LTD)^[8],它是将初级几个PFL产生的脉冲通过磁芯的感应叠加作用在次级形成高压,为了进一步缩小体积,PFL采用去离子水作为绝缘介质^[9].在对LTD进行调试实验时发现,输出脉冲波形的平顶部分产生了较大的畸变.通过对实验结果的理论分析和进一步的实验研究,发现开关导通时间是影响波形平顶畸变的重要因素.本文正是根据调试实验结果,对充放电时形成线上的波过程进行了分析,提出了PFL放电过程的等效分析方法,并通过实验解决了输出脉冲波形平顶的畸变问题.

2. PFL充放电分析

2.1. PFL充电过程分析

水介质PFL采用双传输线结构,如图1所示.

其中外形成线和内形成线的阻抗均为 Z ,且线长 l 和时延 t_d 相同,负载 $R=2Z$.充电系统主要包括储能电容和脉冲变压器,充电时开关Switch断开,放电时开关闭合.外形成线的左端点S为充电电缆引入点,点Q是内形成线的开路端,点B和点A分别为内外形成线上的任意一点,与内外形成线左端距离分别为 b, a .形成线的充电时间一般为几个 μs ,而电磁波在形成线上的传播时间为几十个ns,所以充电过程中通常把形成线等效成集中参数(电容器)来分析^[10],但为了得到形成线上的波过程,这里采用分布参数电路来分析.

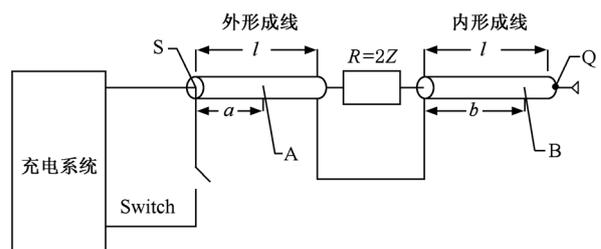


图1 水介质PFL结构示意图

定义图1中从左向右传输的波为前行波 \vec{U} ,从右向左传输的波为反行波 \vec{U} ,图2为充电过程中PFL上的波过程(为了方便描述,此类图中的电压波用方波表示);在 $t=0$ 时刻开始充电,充电系统馈入到形成线点S的电压波为外线上的第一个前行

* 国家高技术研究发展计划项目资助的课题.

[†] E-mail: sanchabao@sohu.com

波,定义为 $U(t)$ ($t < 0$ 时 $U(t) = 0$),当 $t = t_d$ 时电压波波头到达负载并产生反射和透射,反射波将从负载向点 S 运动形成了外线的第一个反行波,透射波从负载向点 Q 运动形成了内线的第一个前行波,根据负载和形成线的阻抗关系可得内线和外线上的波到达负载后的反射和透射系数均为 $1/2$;当 $t = 2t_d$ 时外线的第一个反行波波头到达点 S 产生反射,反射系数设为 $k_1(t)$, (对于非纯阻抗充电系统来说,电磁波在点 S 处的反射系数与频率有关,设 $k_n(t)$ 为外线的第 n 个反行波在点 S 的反射系数),该反射波从点 S 向负载运动形成了外线的第二个前行波,同时,内线的第一个前行波波头到达点 Q 产生反射,开路端反射系数为 1,该反射波从点 Q 向负载运动形成了内线的第一个反行波;当 $t = 3t_d$ 时外线的第二个前行波波头到达负载产生反射和透射,反射和透射系数均为 $1/2$,其中反射波从负载向点 S 运动成为外线的第二个反行波的一部分,透射波从负载向点 Q 运动成为内线的第二个前行波的一部分,同时,内线的第一个反行波波头到达负载产生反射和透射,反射和透射系数均为 $1/2$,其中反射波从负载向点 Q 运动并与此刻外线产生的透射波组成内线的第二个前行波,透射波从负载向点 S 运动并与此刻外线产生的反射波组成外线的第二个反行波;类似的波过程一直进行下去,外线的第 n 个前行波是外线的第 $n-1$ 个反行波经点 S 反射后产生的,外线的第 n 个反行波包含外线的第 n 个前行波经负载后的反射波以及内线的第 $n-1$ 个反行波经负载后的透射波,内线的第 n 个前行波包含外线的第 n 个前行波经负载后的透射波以及内线的第 $n-1$ 个反行波经负载后的反射波,内线的第 n 个反行波是内线的第 n 个前行波经点 Q 反射后产生的. 定义 $\vec{U}_{an}(t)$, $\overleftarrow{U}_{an}(t)$ 分别为经过点 A 的第 n 个前行波和反行波, $\vec{U}_{bn}(t)$, $\overleftarrow{U}_{bn}(t)$ 分别为经过点 B 的第 n 个前行波和反行波,这样就得到线上任意点 A, B 的波过程.

第一个波过程

$$\begin{aligned} \vec{U}_{a1}(t) &= U\left(t - \frac{a}{l}t_d\right), \\ \overleftarrow{U}_{b1}(t) &= \frac{1}{2} \vec{U}_{a1}\left(t - \frac{l-a+b}{l}t_d\right) \\ &= \frac{1}{2} U\left(t - t_d - \frac{b}{l}t_d\right), \end{aligned}$$

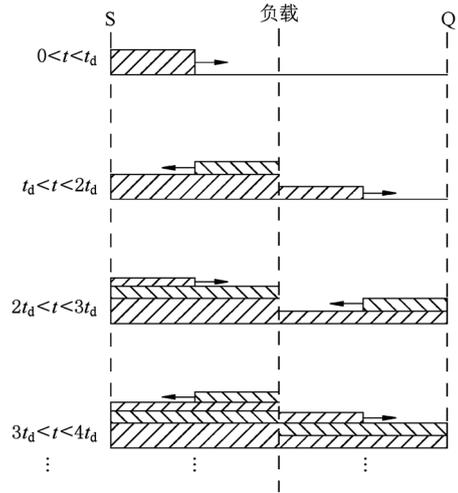


图2 充电时 PFL 上的波过程

$$\begin{aligned} \overleftarrow{U}_{a1}(t) &= \frac{1}{2} \vec{U}_{a1}\left[t - \frac{2(l-a)}{l}t_d\right] \\ &= \frac{1}{2} U\left(t - 2t_d + \frac{a}{l}t_d\right), \\ \overleftarrow{U}_{b1}(t) &= \vec{U}_{b1}\left[t - \frac{2(l-b)}{l}t_d\right] \\ &= \frac{1}{2} U\left(t - 3t_d + \frac{b}{l}t_d\right). \end{aligned}$$

第 n ($n > 1$) 个波过程

$$\begin{aligned} \vec{U}_{an}(t) &= \overleftarrow{U}_{a(n-1)}\left(t - \frac{2a}{l}t_d\right) \\ &\quad \times K_{n-1}\left[t - 2(n-1)t_d - \frac{a}{l}t_d\right] \\ &= \left(\frac{1}{2}\right)^{(n-1)} U\left[t - 2(n-1)t_d - \frac{a}{l}t_d\right] \\ &\quad \times \left\{K_1\left[t - 2(n-1)t_d - \frac{a}{l}t_d\right] + 1\right\} \\ &\quad \times \left\{K_2\left[t - 2(n-1)t_d - \frac{a}{l}t_d\right] + 1\right\} \\ &\quad \dots \left\{K_{n-2}\left[t - 2(n-1)t_d - \frac{a}{l}t_d\right] + 1\right\} \\ &\quad \times K_{n-1}\left[t - 2(n-1)t_d - \frac{a}{l}t_d\right], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \overleftarrow{U}_{bn}(t) &= \frac{1}{2} \vec{U}_{an}\left(t - \frac{l-a+b}{l}t_d\right) \\ &\quad + \frac{1}{2} \overleftarrow{U}_{b(n-1)}\left(t - \frac{2b}{l}t_d\right) \\ &= \left(\frac{1}{2}\right)^n U\left[t - (2n-1)t_d - \frac{b}{l}t_d\right] \\ &\quad \times \left\{K_1\left[t - (2n-1)t_d - \frac{b}{l}t_d\right] + 1\right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \times \left\{ K_2 \left[t - (2n - 1)t_d - \frac{b}{l}t_d \right] + 1 \right\} \\
 & \cdots \left\{ K_{n-1} \left[t - (2n - 1)t_d - \frac{b}{l}t_d \right] + 1 \right\}, \\
 \overleftarrow{U}_{an}(t) &= \frac{1}{2} \overrightarrow{U}_n \left[t - \frac{2(l-a)}{l}t_d \right] \\
 & + \frac{1}{2} \overleftarrow{U}_{b(n-1)} \left(t - \frac{l-a+b}{l}t_d \right) \\
 & = \left(\frac{1}{2} \right)^n U \left(t - 2nt_d + \frac{a}{l}t_d \right) \\
 & \times \left[K_1 \left(t - 2nt_d + \frac{a}{l}t_d \right) + 1 \right] \\
 & \times \left[K_2 \left(t - 2nt_d + \frac{a}{l}t_d \right) + 1 \right] \\
 & \cdots \left[K_{n-1} \left(t - 2nt_d + \frac{a}{l}t_d \right) + 1 \right], \\
 \overleftarrow{U}_{bn}(t) &= \overrightarrow{U}_{bn} \left[t - \frac{2(l-b)}{l}t_d \right] \\
 & = \left(\frac{1}{2} \right)^n U \left[t - (2n+1)t_d + \frac{b}{l}t_d \right] \\
 & \times \left\{ K_1 \left[t - (2n+1)t_d + \frac{b}{l}t_d \right] + 1 \right\} \\
 & \times \left\{ K_2 \left[t - (2n+1)t_d + \frac{b}{l}t_d \right] + 1 \right\} \\
 & \cdots \left\{ K_{n-1} \left[t - (2n+1)t_d + \frac{b}{l}t_d \right] + 1 \right\}.
 \end{aligned}$$

经过形成线上任一点的前行波与反行波之和就是该点的充电电压, 这样就可分别得到负两端的电压值, 两者之差即为充电过程负载上的电压.

2.2. PFL 放电过程分析

开关闭合后 PFL 开始放电, 与充电的过程类似, 区别在于充电系统不再提供外线上的第一个前行波 $U(t)$, 并且点 S 处的反射系数变为 -1 , 同样可以得到放电过程负载电压. 显然按这种方法求解放电时负载电压十分复杂, 通常双传输线结构的 PFL 放电后负载电压波形近似矩形, 幅值等于形成线上的电压值, 脉宽为 $2t_d$ ^[7], 这主要针对直流充电或者是交流的充电周期远远大于形成线放电时间 $2t_d$ 的情况, 也就是在充电过程中形成线上的电压在相差 $2t_d$ 的时间内基本保持不变. 由于去离子水的电阻率 ρ 约 $8 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$, 形成线的自放电速度比较快, 其自放电时间常数为 $\varepsilon\rho$ ^[11], ε 为去离子水的介电常数约 7×10^{-10} , 自放电时间约 $56 \text{ }\mu\text{s}$, 所以对水介质 PFL 要进行快速充电. 实验中采用 $3.5 \text{ }\mu\text{F}$ 的电容器通过 1:5 的脉冲变压器对 PFL 充电, 其内外线

的阻抗均为 $5 \text{ }\Omega$, 时延 t_d 均为 75 ns , 负载阻抗设为 $10 \text{ }\Omega$, 图 3 为充电时形成线点 S 处的电压波形 $U_s(t)$ 与负载上的电压波形 $U_R(t)$, 可以看出充电时负载上的电压远小于形成线上电压, 在 $2t_d$ (150 ns) 的时间内形成线上的电压变化明显, 同样, 放电时负载的电压波形可以通过求解形成线上复杂的波过程得到, 下面将采用等效的分析方法进行分析.

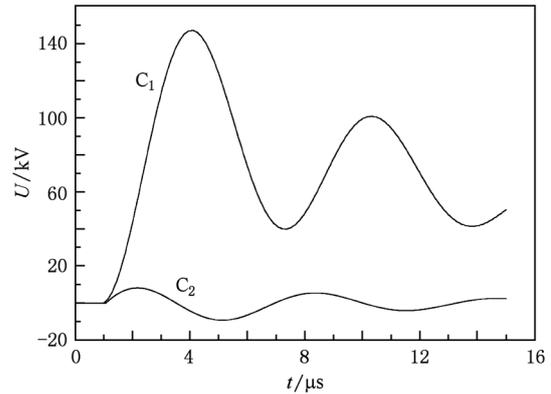


图3 充电电压波形(C_1 :点 S 处电压波形; C_2 :负载电压波形)

3. PFL 放电过程等效分析

在 PFL 充电过程中线上存在前行波和反行波, 假设开关不导通, 充电过程一直进行下去, 定义经过点 S 的前行波之和为 $\overrightarrow{U}_s(t)$, 反行波之和为 $\overleftarrow{U}_s(t)$, 经过点 Q 的前行波和反行波之和分别为 $\overrightarrow{U}_Q(t)$ 和 $\overleftarrow{U}_Q(t)$, $U_s(t) = \overleftarrow{U}_s(t) + \overrightarrow{U}_s(t)$ 就是充电时点 S 处的电压, 其波形如图 3 所示. 在 $t = t_1$ 时刻开关导通, PFL 上的波过程如图 4(a), 此时电源不再对其充电, 点 S 端短路反射系数变为 -1 , 经过点 S 的总前行波由 $\overrightarrow{U}_s(t)$ 跃变为 $-\overleftarrow{U}_s(t)$, 此时点 S 端电压 $E_s(t)$ 为零, $E_s(t)$ 的表达式为

$$\begin{aligned}
 E_s(t) &= 0 \\
 &= -\overleftarrow{U}_s(t) + \overleftarrow{U}_s(t) \\
 &= [\overleftarrow{U}_s(t) + \overrightarrow{U}_s(t)] \\
 &\quad + [-\overleftarrow{U}_s(t) - \overrightarrow{U}_s(t)], \quad (1)
 \end{aligned}$$

式中等号右边第一项就是在开关不导通的情况下经过点 S 的电压, 可以看出由于引入了 $\overrightarrow{U}_s(t)$ 项, 使得 PFL 的放电过程可以等效为两个过程(过程一、过程二)的叠加, 如图 4(b).

3.1. 过程一分析

过程一是 PFL 的充电过程, 即在形成线放电时

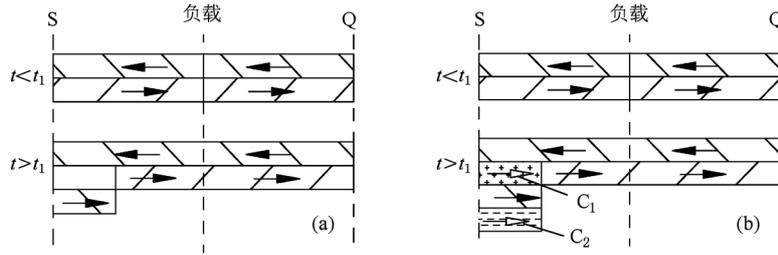


图4 PFL放电时线上的波过程(a)和等效波过程(b)((b) C_1 为引入的电压波, C_2 为引入的大小与 C_1 相等极性相反的电电压波)

刻相当于在点 S 端强行馈入前行脉冲 $\vec{U}_s(t)$, 这个前行脉冲是外加的, 不包含反行波 $\overleftarrow{U}_s(t)$ 在点 S 端的反射部分(该部分算到过程二中), 这样就使得线上的波过程与开关没有导通时一样, 为 PFL 充电过程. 该过程中负载电压即为充电时负载电压 $U_R(t)$, 如图 3 所示.

3.2. 过程二分析

过程二为(1)式中等号右边第二项, 该过程相当于在 PFL 放电时刻, 从点 S 端馈入一个前行脉冲, 该脉冲幅值与过程一中该时刻点 S 的电压值相同, 极性相反. 图 5 为过程二的示意图, 其具体波过程如下.

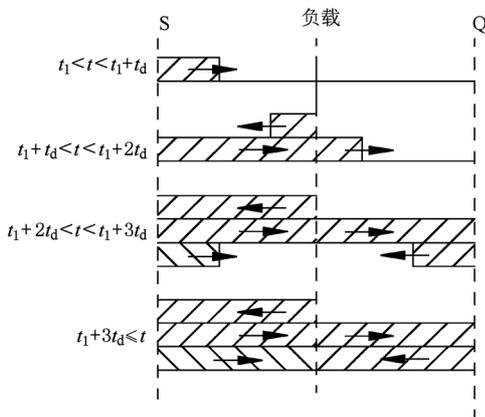


图5 过程二中 PFL 上的波过程

1) 在 $t = t_1$ 时刻开关导通, 从点 S 端馈入外线的第一个前行波 $\vec{E}_{S1}(t)$, 有 $\vec{E}_{S1}(t) = -\vec{U}_s(t) - \overleftarrow{U}_s(t)$, 在 $t = t_1 + t_d$ 时刻该前行波波头到达负载产生反射和透射, 分别形成了外线和内线上的第一个反行波和前行波, 为了使线上的波过程更为清晰, 定义经过负载左端的第 n 个前行波为 $\vec{E}_{L_n}(t)$, 反行波为 $\overleftarrow{E}_{R_n}(t)$, 经过负载右端的第 n 个前行波为

$\vec{E}_{R_n}(t)$, 反行波为 $\overleftarrow{E}_{R_n}(t)$, 有如下关系:

$$\begin{aligned} \vec{E}_{L1}(t) &= \vec{E}_{S1}(t - t_d), \\ \vec{E}_{L2}(t) &= \frac{1}{2} \vec{E}_{L1}(t) = \frac{1}{2} \vec{E}_{S1}(t - t_d), \\ \vec{E}_{R1}(t) &= \frac{1}{2} \vec{E}_{L1}(t) = \frac{1}{2} \vec{E}_{S1}(t - t_d), \end{aligned}$$

此时负载上的电压为

$$\begin{aligned} U_{\text{负载}}(t) &= \vec{E}_{L1}(t) + \overleftarrow{E}_{L1}(t) - \vec{E}_{R1}(t) \\ &= \vec{E}_{S1}(t - t_d) \\ &= -\vec{U}_s(t - t_d) - \overleftarrow{U}_s(t - t_d) \\ &= U_s(t - t_d), \end{aligned} \quad (t_1 + t_d \leq t \leq t_1 + 3t_d). \quad (2)$$

2) 在 $t = t_1 + 2t_d$ 时刻外线第一个反行波波头到达点 S 并产生反射, 由于开关闭合该端点短路, 反射系数为 -1 , 形成了外线上第二个前行波; 同时内线第一个前行波波头到达点 Q, 该点开路反射系数为 1 , 形成了内线上第一个反行波.

3) 在 $t = t_1 + 3t_d$ 时刻外线第二个前行波波头和内线第一个反行波波头同时到达负载, 分别形成了负载左端的第二个前行波 $\vec{E}_{L2}(t)$ 和负载右端的第一个反行波 $\overleftarrow{E}_{R1}(t)$, 有如下关系:

$$\begin{aligned} \vec{E}_{L2}(t) &= -\frac{1}{2} \vec{E}_{S1}(t - 3t_d), \\ \overleftarrow{E}_{R1}(t) &= \frac{1}{2} \vec{E}_{S1}(t - 3t_d). \end{aligned}$$

由于这两个波幅值相同极性相反, 再加上这两个波的在负载端的反射和透射系数均为 $1/2$, 所以外线上的第二个反行波和内线上的第二个前行波为零, 放电过程结束, 此时负载电压为

$$\begin{aligned} U_{\text{负载}}(t) &= \vec{E}_{L1}(t) + \overleftarrow{E}_{L1}(t) + \vec{E}_{L2}(t) \\ &\quad - \overleftarrow{E}_{R1}(t) - \overleftarrow{E}_{R1}(t) \\ &= \vec{E}_{S1}(t - t_d) - \vec{E}_{S1}(t - 3t_d) \\ &= -\vec{U}_s(t - t_d) - \overleftarrow{U}_s(t - t_d) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \overrightarrow{U_s}(t - 3t_d) + \overleftarrow{U_s}(t - 3t_d) \\
 & = -U_s(t - t_d) + U_s(t - 3t_d), \\
 & \quad t_1 + 3t_d < t. \tag{3}
 \end{aligned}$$

充电时点 S 处的电压 $U_s(t)$ 如图 3 所示, 考虑到 $t_d = 75 \text{ ns}$, 与(2)式相比(3)式中负载电压很小, 第二个过程中负载的主波形在 $t_1 + t_d \leq t \leq t_1 + 3t_d$ 时间段内, 负载电压为 $-U_s(t - t_d)$, 该电压波形与充电时点 S 处的电压波形幅值相等, 极性相反.

3.3. 等效分析结论

PFL 放电时负载电压就是上述两个过程中负载电压的叠加, 即

$$\begin{aligned}
 U_{\text{负载}}(t) & = -U_s(t - t_d) + U_R(t) \\
 & \quad (t_1 + t_d \leq t \leq t_1 + 3t_d). \tag{4}
 \end{aligned}$$

如图 3 所示, 与第二个过程相比, 第一个过程中负载电压 $U_R(t)$ 很小(特别是在 LTD 中, 由于充电电流使磁芯饱和, 对 PFL 来说此时负载相当于短路, 其负载电压为零), 并在 $2t_d = 150 \text{ ns}$ 的时间内变化不大, 所以总的负载电压(特别是电压波形的平顶)主要由第二个过程的负载电压决定, 由(2)式可知负载电压波形与充电时点 S 的电压波形一致, 只不过

是极性相反, 也就是说开关在充电电压 $U_s(t)$ 的上升沿时刻导通, 负载电压波形平顶的幅值相应增大, 同样, 开关在 $U_s(t)$ 的下降沿时刻导通, 负载电压波形平顶的幅值相应减小.

3.4. 模拟计算

采用电路仿真软件 Pspice 进行模拟计算, 为了便于定量分析, 在模拟电路中忽略了一些杂散参数的影响, 模拟结果如图 6. 从图中可以看出, 开关在充电电压 $U_s(t)$ 峰值附近导通时负载电压波形的平顶比较平坦, 在其他区域导通时负载波形的平顶与充电电压波形相似, 极性相反. 表 1 为模拟得到的不同开关导通时刻负载及形成线上的电压值, 表中主要列出了开关导通时刻 t_1 以及 $t_2 = t_1 + t_d, t_3 = t_1 + t_{2d}$ 和 $t_4 = t_1 + 3t_d$ 的读数, 可以看出 $-U_s(t_1) + U_R(t_2)$ 与 $U_{\text{负载}}(t_2)$ 以及 $-U_s(t_3) + U_R(t_4)$ 与 $U_{\text{负载}}(t_4)$ 的值分别相等, 并且通过数据比较证明了 $t_1 + t_d \leq t \leq t_1 + 3t_d$ 时间内任一时刻 $-U_s(t - t_d) + U_R(t)$ 与 $U_{\text{负载}}(t)$ 的值相等, 这与理论分析的结果(4)式是一致的. 理论分析与模拟计算均表明, 开关在充电电压达到峰值附近的时刻导通负载可得到

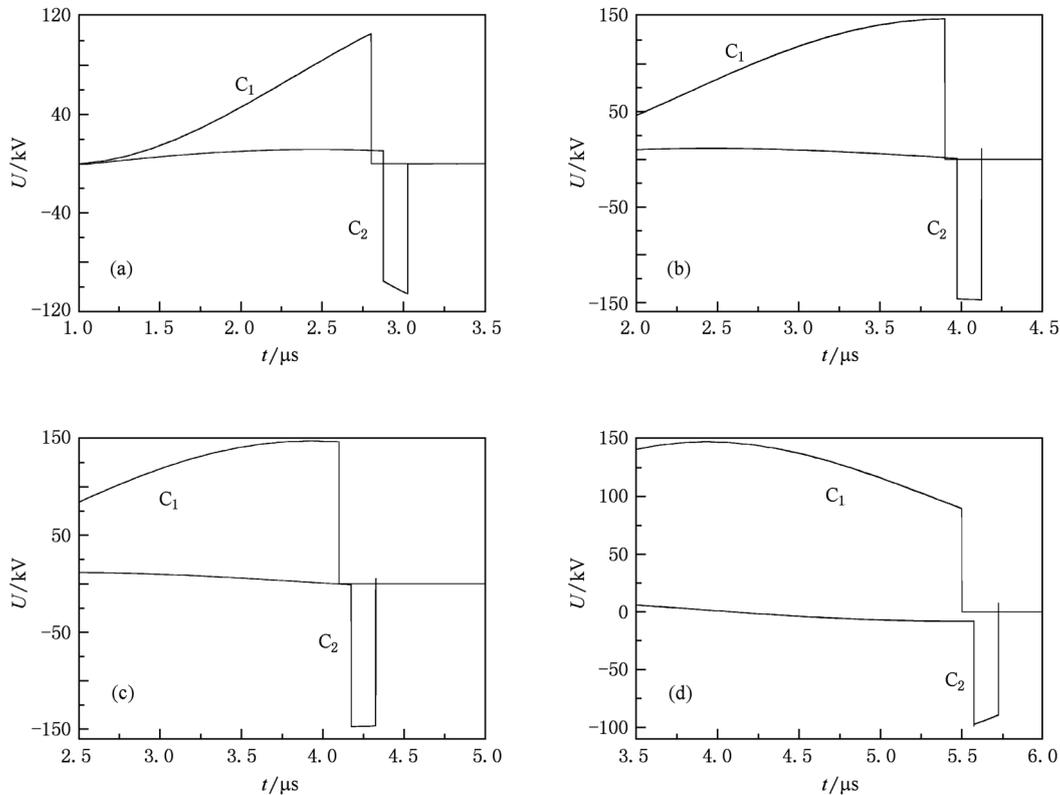


图 6 不同开关导通时刻的电压波形(C_1 : 充电电压波形, C_2 : 负载电压波形) (a) 开关在 $2.8 \mu\text{s}$ 导通; (b) 开关在 $3.9 \mu\text{s}$ 导通; (c) 开关在 $4.1 \mu\text{s}$ 导通; (d) 开关在 $5.5 \mu\text{s}$ 导通

表1 不同开关导通时刻负载及形成线上的电压值

$t_1 / \mu\text{s}$	$U_S(t_1) / \text{kV}$	$U_R(t_2) / \text{kV}$	$-U_S(t_1) + U_R(t_2) / \text{kV}$	$U_{\text{负载}}(t_2) / \text{kV}$	$U_S(t_3) / \text{kV}$	$U_R(t_4) / \text{kV}$	$-U_S(t_3) + U_R(t_4) / \text{kV}$	$U_{\text{负载}}(t_4) / \text{kV}$
2.8	104.79	10.84	-93.95	-93.19	115.33	9.69	-105.64	-105.50
3.9	147.32	1.13	-146.19	-145.92	146.93	-0.40	-147.33	-147.04
4.1	146.49	-0.86	-147.35	-147.04	144.37	-2.27	-146.64	-146.52
5.5	89.81	-8.16	-97.97	-98.72	81.27	-7.87	-89.14	-89.86

平顶较平的电压波形.

4. 实 验

实验中采用四根水介质螺旋 PFL 作为高功率微波驱动源的初级,通过磁芯的感应叠加技术将四根水线产生的高压脉冲在次级上逐级叠加,释放到负载二极管上产生电子束^[12].考虑到水线的自放电影响,在满足电压要求的情况下需要尽可能的缩短充电时间,在实验中通过提高脉冲变压器的初级电压来缩短充电时间,采用激光触发开关来控制导通时间,试验结果如图7.图7中纵坐标刻度为数百 kV/

div,图7(a) C_1, C_2 分别为开关在充电电压的上升沿时刻和峰值时刻导通时二极管的电压波形,由于开关在上升沿时刻导通时形成线充电电压较低,为了方便比较,减小充电电压对开关和二极管工作状态的影响,通过电源控制系统适当的提高充电电压.从实验结果得知,开关在充电电压的上升沿时刻导通,负载电压波形的平顶发生畸变,平顶部分的电压值逐步增大,开关在充电电压的峰值时刻导通时,负载电压波形平顶平坦,这与理论分析和模拟计算是一致的.控制开关在充电电压的峰值时刻附近导通,在负载上可得到幅值数百 kV、脉宽 150 ns 和平顶 60 ns 的电压波形,并在 25 Hz 重频条件下工作稳定.

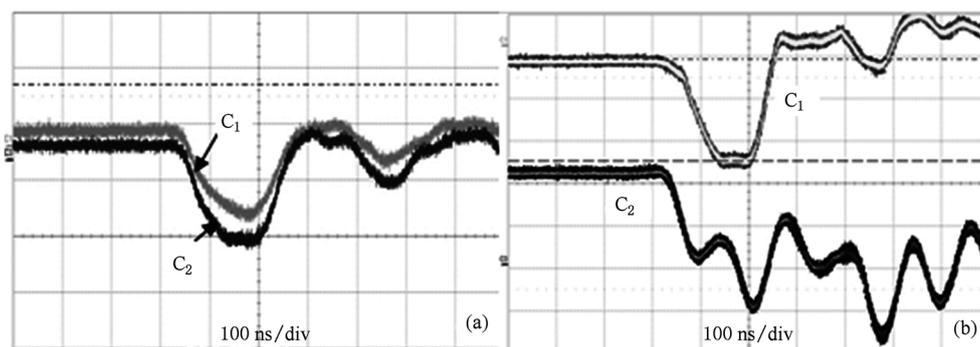


图7 实验波形 ((a) C_1 开关在充电电压上升沿时刻导通二极管电压波形, C_2 开关在充电电压峰值时刻导通二极管电压波形;(b) C_1 :重频 25 Hz 二极管电压重叠波形, C_2 : 重频 25 Hz 充电电压重叠波形

5. 结 论

本文是在 HPM 驱动源的调试实验中,根据输出电压波形平顶产生畸变的问题对 PFL 的充放电过程

进行了分析.通过对形成线上的波过程分析提出了 PFL 放电过程的等效分析法,得到了平顶畸变与 PFL 充电电压波形之间的关系,并通过模拟计算和实验结果进行了验证,解决了快速充电水介质 PFL 输出波形平顶畸变的问题,促进了 HPM 驱动源小型化的发展.

[1] Fang J Y, Liu G Z, Li P, Wang H J, Huang W H 1999 *High Power Laser and Particle Beams* **11** 639 (in Chinese) [方进勇、刘国治、丽萍、王宏军、黄文华 1999 强激光与粒子束 **11** 639]

[2] Liu G Z, Liu J Y, Huang W H, Zhou J S, Song X X, Ning H 2000 *Chin. Phys.* **9** 757

[3] Korovin S D, Gubanov V P, Gunin A V, Pegel I V, Stepchenko A S 2001 *IEEE International Conference on Pulsed Power Plasma*

- Science p1249
- [4] Gubanov V P, Gunin A V, Korovin S D, Stepchenko A S 2001 *IEEE International Conference on Pulsed Power Plasma Science* p336
- [5] Huang H, Fan Z K, Tan J, Ma Q S, Gan Y Q, Chang A B 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1129 (in Chinese) [黄华、范植开、谭杰、马乔生、甘延青、常安碧 2004 物理学报 **53** 1129]
- [6] Huang H, Luo X, Lei L R, Luo G Y, Zhang B Z, Jin X, Tan J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1907 (in Chinese) [黄华、罗雄、雷禄容、罗光耀、张北镇、金晓、谭杰 2010 物理学报 **59** 1907]
- [7] Wang G P, Chang A B, Xiang F, Tan J 2009 *High Power Laser and Particle Beams* **21** 477 (in Chinese) [王淦平、常安碧、向飞、谭杰 2009 强激光与粒子束 **21** 477]
- [8] Kim A A, Kovalchuk B M, Bostrikov A N, Durakov V G 2001 *IEEE International Conference on Pulsed Power Plasma Science* p433
- [9] Yang J H, Zhong H H, Shu T, Zhang J D, Liu J L, Feng J H, Zhou X 2005 *High Power Laser and Particle Beams* **17** 1191 (in Chinese) [杨建华、钟辉煌、舒挺、张建德、刘金亮、冯加怀、周相 2005 强激光与粒子束 **17** 1191]
- [10] Liu X S 2005 *High Pulsed Power Technology* (Beijing: National Defence Industrial Press) p129 (in Chinese) [刘锡三 2005 高功率脉冲技术 (北京:国防工业出版社) 第129页]
- [11] Wang Y 1991 *High Power Pulsed Power Supply* (Beijing: Atomic Energy Press) p52 (in Chinese) [王莹 1991 高功率脉冲电源 (北京:原子能出版社) 第52页]
- [12] Xiang F, Tan J, Zhang Y H, Wang G P, Luo M, Cao S Y, Kang Q, Gong S G, Luo G Y, Li C X, Jin H, Zhang B Z 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4620 (in Chinese) [向飞、谭杰、张永辉、王淦平、罗敏、曹绍云、康强、龚胜刚、罗光耀、李春霞、金晖、张北镇 2010 物理学报 **59** 4620]

Investigation in discharge progress of a long pulse high power microwave-driven source^{*}

Wang Gan-Ping[†] Xiang Fei Tan Jie Cao Shao-Yun Luo Min Kang Qiang Chang An-Bi

(Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China)

(Received 19 July 2010; revised manuscript received 5 September 2010)

Abstract

According to the experiment, we analyze the propagation process of the electromagnetic wave on the pulse forming line with water-dielectric, which is the long pulse high power microwave-driven source. And then an equivalent method of discharge process is put forward to study the cause of the flattop waveform distortion. We find the relationship between the variation trend of the output flattop waveform and the voltage waveform on the pulse forming line, which is validated through the Pspice simulation. By adjusting the breakover time of laser triggered switch, we obtain an output pulse with a flattop of 60 ns, FWHM (full width of half maximum) of 150 ns and voltage amplitude of several hundred kV, showing the distinct improvement on the flattop waveform.

Keywords: pulse forming line (PFL), high power microwave (HPM), equivalent analysis, flattop waveform distortion

PACS: 29.20.df, 29.20.Ej, 91.25.Qi

^{*} Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China.

[†] E-mail: sanchabao@sohu.com