

多模块快直线变压器高功率脉冲源的研究

向飞[†] 谭杰 罗敏 王淦平 康强

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 绵阳 621900)

(2010年7月18日收到; 2010年8月28日收到修改稿)

阐述了利用快脉冲直线型变压器驱动源(FLTD)技术实现紧凑型高功率脉冲源的思想, 分析了FLTD模块数量与系统输出品质之间的关系, 通过改进馈电方式降低了对初级整形回路电感的要求, 利用回程线圈削弱了波形畸变, 通过工程实验, 取得了重复频率25 Hz、平顶约80 ns、电子能量近0.8 MeV的束流输出, 为重复频率、紧凑型、模块化高功率脉冲源的研制提供了新思路.

关键词: 紧凑, 快直线变压器, 模块化, 高功率脉冲源

PACS: 41.20.-q, 41.20.Gz, 41.75.Lx

1. 引言

近年来随着材料技术的发展, 俄国科学家提出了一种命名为快脉冲直线型变压器驱动源(FLTD)的组件结构^[1,2]. 其实质就是一个1:1的直线脉冲变压器驱动源, 在模块内实现电流汇集, 多模块逐级感应实现电压叠加后直接驱动负载, 技术上不存在诸如耐压结构等瓶颈限制, 结构紧凑, 实现了模块化设计.

该技术初衷是用于快Z箍缩等核爆领域研究, 但由于技术优势明显, 在其他脉冲功率领域也有用武之地. 目前研究比较多的是结合半导体开关(MOS-FET)进行高重复频率大功率源研究, 其重复频率有望达到兆赫兹^[3]水平, 但功率水平不高; 另一研究领域是高功率微波应用, 采取FLTD技术路线利用初级整形手段^[4], 可以研制成紧凑型、模块化高功率脉冲源, 其中FLTD研究是关键所系.

2. FLTD 模块与系统

电磁感应电压叠加器模块级数受系统输出品质要求限制. 脉冲直线型变压器驱动源本质上是RLC放电回路, 考察特征函数 $f(t) = A \times [1 - \exp(-t/\tau)]$, 其中 t 为波形上某点所处的时刻, τ 为特征时间, A 为波幅. 不计开关抖动, 假设开关同

步触发, 延迟为 t_0 , 则第 n 个模块输出为 $F_n(t) = A - A \exp\{-[t + (n-1)(t_0 + \tau')]/\tau\}$, 其中第一个模块波幅起点为时刻原点, τ' 为下一个开关触发前波传输时间. 最终输出为

$$F(t) = nA - A \sum_0^{n-1} \exp\{-[t + n(t_0 + \tau')]/\tau\}. \quad (1)$$

(1)式能够反映前沿情况, 如果考虑全波过程, 用分段函数容易表示. 所以模块级数的基本关系为

$$n < \frac{T'}{|t_0 + \tau'|}, \quad (2)$$

其中, T' 为初次级脉冲顶宽差. 如果开关触发采用补偿式触发, 控制触发时间等于 $-t_0$, 负号表示提前触发, 则模块数目可以无限多. 现实中, 使用激光触发开关容易实现系统开关抖动小的要求^[5], 但受机械结构限制, 光路上不容易实现等功率等光程触发, 希望从触发顺序上能够得到光程补偿.

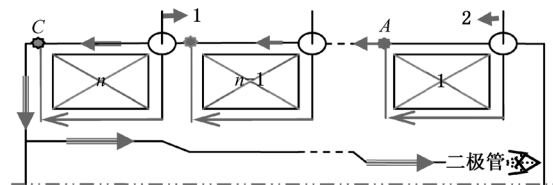


图1 FLTD 波传输原理

FLTD 波传输过程如图1所示, 当初级电流波穿过磁芯, 在感应定律作用下, 次级电压波就会分别从A—C处向二极管传输. 所以靠近二极管的模块

[†] E-mail: yaneryan_2002@163.com

为首个应该触发的模块,即开关触发光路应从 2 到 1 传输,这时开关延迟是有利的.其实用电路模型根据输出波形的需要可以确定级数的多寡.系统电路如图 2 所示,其中 R_d 为等效负载, R_s 为开关电阻, R_0 为初级源内阻, L_s 为开关及引线电感, L_u 为磁化电感^[2], Δ 为开关延时,假设馈电前后沿为 70 ns,顶

部为 100 ns,电压幅度随模块数目变化,负载总是与模块内阻与级数 n 的积匹配,对 10 级系统($R_d = 100 \Omega$),其负载功率水平总是相同,模块长度约 50 cm.则 $L_u = 25 \mu\text{H}$, $L_s = 100 \text{ nH}$ 时,可以得到图 3 所示结果.

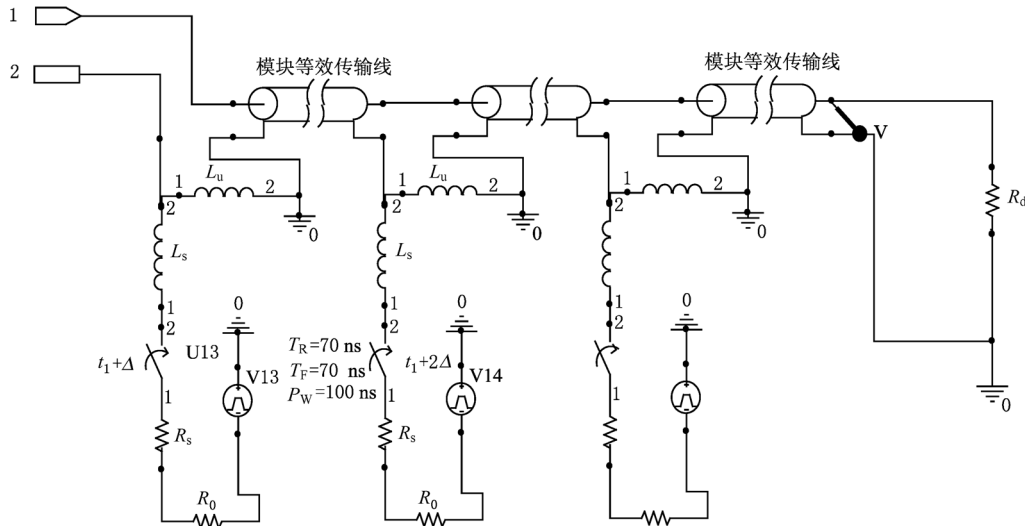


图 2 多级 FLTD 系统电路

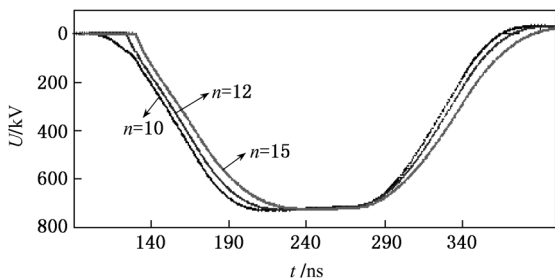


图 3 电路模拟结果

模拟结果表明:级数越多,次级输出顶宽越窄;如果初级馈电顶宽不大于 100 ns,在负载端顶宽大于 80 ns 的要求下,级数不能大于 10,如果初级脉冲顶宽低于预期,则模块数应减少;同时开关具有一定抖动性,级数限制更加苛刻,否则开关触发光路必须不惜代价采取补偿措施.

3. FLTD 馈电方式

我们曾使用水介质螺旋式 Blumlein 线作为初级整形手段^[6],该方法优势是可以获得较快的脉冲前沿,不利之处是不够紧凑,要实现双侧对称馈电则必须两个开关,而触发用高能单激光束不易在多

轴多向上实现等光强分光,使用一个开关是最佳选择.近年来,电感与内阻都很小的特种陶瓷电容器技术发展迅速,其储能密度相当高,高达约 1 J/cm^3 ,采用串并联方式,可以利用人工网络原理实现多口馈电的紧凑型初级脉冲成形构想^[7].人工网络(PFN)是非常成熟的技术,关键构件是低电感电容,两个人工网络可以构成一个 Blumlein 型线,多个 Blumlein 型线可以通过一个开关向同一负载并联放电.

重点考虑单侧与双侧对称两种馈电方式,如图 4 所示.磁通量的变化归根结底是初级线电流在路径与磁面上的积分,线电流路径长度不一样,其衰减程度不同,激起感应电压的分布也不均匀.

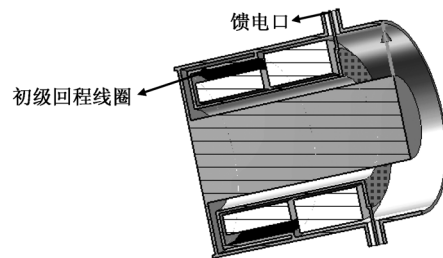


图 4 模块结构

其实初级电流可以看成表面波电流,即导电媒

质中、皱肤深度内的平面波. 其单位长度内功率损耗因子为 $1 - e^{-2\alpha}$, α 与管壁表面阻抗相关, 表面阻抗 Z_s 为

$$Z_s = (1 + j) \sqrt{\frac{\pi f \mu}{\sigma}}$$

$$= (1 + j) R_s,$$

其中, f 为波频率, μ 为波导壁磁介常数, σ 为电导率. 对同轴线 TEM 波, 波导壁损耗因子

$$\alpha \approx \frac{R_s}{2} \frac{1/a + 1/b}{\sqrt{1/\epsilon} \ln(b/a)},$$

其中, a, b 分别为次级同轴线内外半径, ϵ 为同轴线介质介电常数, α 为极小量. 假设初级轴向长度为 l , 内径为 r_1 , 则最长路径与最短路径传输系数之比 k 为

$$k \approx 1 - 2\alpha(\sqrt{2r_1^2 + l^2} - l).$$

$k < 1$, 相同参数下双馈结构比单馈结构波形要好, 用数值模拟方法可以证实. 假设系统为图 5 所示四模块系统, 两侧馈电口均内置电阻、电感元件. 单侧馈电时仅在某一侧馈电口施加激励源, 另一侧馈电口以内置电阻为 $10 \text{ M}\Omega$ 表示断路, 激励源一侧馈电口内置电阻为 $10 \text{ }\Omega$, 电感为 DL ; 双馈时两侧馈电口同时施加激励源, 内置电阻均为 $20 \text{ }\Omega$, 电感同为 $2DL$; 两种馈电方式下均外接 $40 \text{ }\Omega$ 负载匹配输出, 所得模拟结果如图 6 所示. 其中幅度较低的两波形是馈电口电压; 激励源同时施加各馈电口, 设定下降与上升沿为 70 ns , 顶部宽度为 100 ns , 电压幅度为 140 kV ; 较高幅值的为输出口负载电压, 为了便于比较假定两者方向一致(如图 5 中箭头 9 方向).

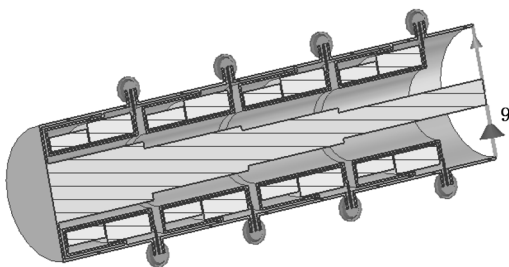


图 5 四模块 LTD 模型

可见, 负载电压前沿出现突变; 如果初级回路参数相同, 则双馈比单馈波形平顶度要好, 且前沿突变现象明显好转, 顶部更宽, 前沿更陡; 如果初级电感很小, 即使是单侧馈电也能获得相当好的波形.

造成前沿突变的原因主要是回路电感或系统开关抖动. 开关同步性测量特征波形如图 6 所示,

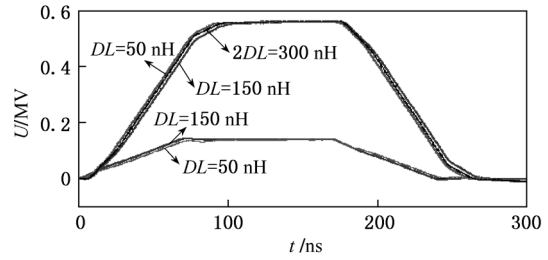


图 6 四模块系统模拟结果

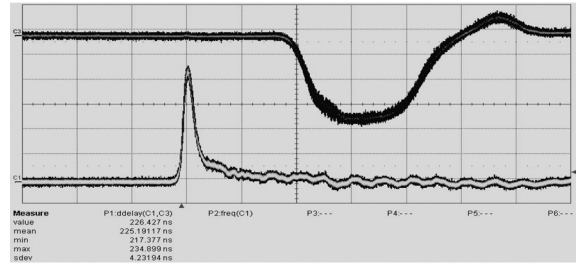


图 7 开关同步性测量

$C2$ 为二极管电压, $C1$ 为开关触发信号, 两者时间差的统计代表开关抖动, 图示数据为平面二极管负载下重复频率 25 Hz 发射 20 次时两信号序列的处理结果. 可见: 电压前沿确实有明显畸变, 而开关同步不一致性未超过 5 ns , 不至于造成叠加波形前沿明显畸变, 则电感是决定因素, 即采用双侧馈电方式可以降低系统对初级回路电感的要求.

4. FLTD 初级回程线圈

其实场不均匀性是始终存在的, 增加初级线圈的长度即增加一段初级回程线圈可以抵消部分影响. 而漏磁通定义成初、次级电流线圈产生的未被铰链的磁通, 采用回程线圈又意味着漏感增大, 需要权衡考虑. 通过模拟计算可以优化到合适长度, 假设模型结构参数与图 5 一样, 双侧同时馈电, 内置电阻为 $20 \text{ }\Omega$, 电感为 200 nH , 回程线圈长度为变量.

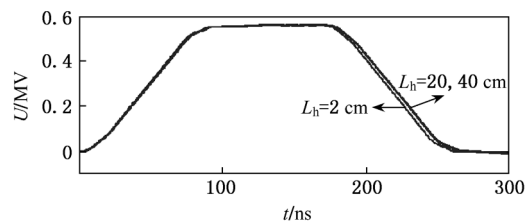


图 8 初级回程线圈的影响

如图 8 所示模拟结果表明: 回程线圈可以改良

场不均匀性,使脉冲宽度略有增加;只要回程线圈贴着外筒内壁延伸,所增加漏感的幅度很小,不会引起前沿畸变;回程线圈达到一定长度后,再增加毫无意义.

5. 实验研究

选取某种牌号的非晶合金为磁芯材料,其叠片

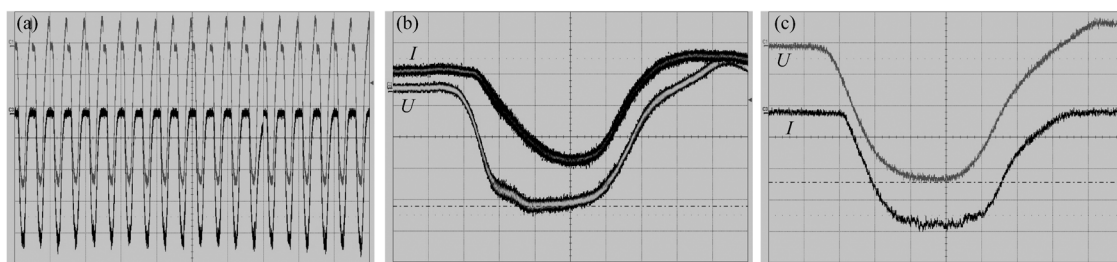


图9 实验结果

系统调试结果如图9所示,其中(a)为平面二极管重复频率25Hz发射20个波形序列;(b)为(a)序列的展开叠放图,(c)为无箔二极管单次特征波形;电压记作 U ,电流记作 I ,时间尺度均为每格50 ns,电压幅值尺度约每格200 kV,电流幅值尺度超过每格1 kA.结果表明:整个系统能量效率接近70%,工作稳定,抖动范围小;在百多 Ω 时二极管电子能量接近0.8 MeV,顶宽约80 ns;电流波形品质与阴极爆炸发射特性(即二极管性质)有关;重复频率可以达到25 Hz,由开关同步触发性能决定;不足的是波形前沿较缓,其主要原因可能是陶瓷电容器虽然电感与内阻不大,但多个电容器串并联使用时,累加效应比预期大得多.

厚度为25 μm ,饱和磁感应强度约1.5 T,整个功率源由4个LTD模块组成.系统工作过程:先用充电电容经升压变压器充电后形成能库,控制闸流管为双Blumlein型PFN充电;几微秒后精确控制高能激光信号,使场畸变火花开关同步导通;初级脉冲从双侧馈电口同时引入到直线变压器,次级脉冲直接作用于二极管;以电容分压器监测二极管电压,以洛科夫斯基线圈监测二极管束流^[8].

6. 结 论

阐述了紧凑型模块化高功率脉冲源的实现思想,分析了FLTD模块级数与系统输出品质之间的关系,通过馈电方式设计降低了FLTD初级整形回路电感要求,引入初级回程线圈削弱了波形畸变,成功研制了具有较好束流品质的四模块FLTD高功率脉冲发生器.100 Ω 多时功率源输出电子能量接近0.8 MeV,顶宽约80 ns,重复频率可以达到25 Hz.所以利用FLTD技术路线可以研制成高效率、紧凑型、模块化高功率脉冲源,从而推动相应高功率微波器件技术向前发展^[9].

- [1] Weinbrecht E A, McDaniel D H, Bloomquist D D 2003 14th IEEE Intern Pulsed Power Conference Albuquerque, USA 15—18 June 2003 p157
- [2] Toury M, Vermar C, Ethechosahar B, Veron L, Mouiuet M 2007 the 16th IEEE International Pulsed Power Conference and the 34th IEEE International Conference on Plasma Science Albuquerque, USA 17—22 June 2007 p135
- [3] Smith I D 2004 Phys. Rev. Spec. Top. Accel. Beams 7 64
- [4] Bushnell A H, Song B M, Ennis J, Miller R, Johnson D, Maenchen J 2004 IEEE International Power Modulator Conference San Francisc USA 2004 p348
- [5] Jia W L, Shi W, Ji W L, Ma D M 2007 Acta Phys. Sin. 56

- 3845 (in Chinese) [贾婉丽、施卫、纪卫丽、马德明 2007 物理学报 56 3845]
- [6] Xiang F, Tang J, Zhang Y H, Wang G P, Luo M, Cao S Y, Kang Q, Gong S G, Luo G Y, Li C X, Jing H, Zhang B Z 2010 Acta Phys. Sin. 59 4621 (in Chinese) [向飞、谭杰、张永辉、王淦平、罗敏、曹绍云、康强、龚盛刚、罗光耀、李春霞、金晖、张北镇 2010 物理学报 59 4621]
- [7] Luis S, Caballero B, Smith P W 2007 the 16th IEEE International Pulsed Power Conference and the 34th IEEE International Conference on Plasma Science Albuquerque, USA 17—22 June 2007 p546
- [8] Zhang Y H, Ma Q S, Xiang F, Gan Y Q, Chang A B, Liu Z,

Zhou C M 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3111 (in Chinese) [张永辉、马乔生、向飞、甘延青、常安碧、刘忠、周传明 2005 物理学报 **54** 3111]

[9] 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]

Fast linear transformer high power pulse generator

Xiang Fei[†] Tan Jie Luo Min Wang Gan-Ping Kang Qiang

(*Institute of Applied Electronics, China Academy Engineering of Physics, Mianyang 621900, China*)

(Received 18 July 2010; revised manuscript received 28 August 2010)

Abstract

The realization technique of fast linear transformer driver on the compact modularized high power pulse generator was expounded. The influence on Modular amount and the output quality of fast linear transformer driver (FLTD) was analyzed. The limitation on FLTD primary inductance was reduced by optioned feeding structure. The waveform distortion was weakened by designed back swing coil. Through engineering experiments, electron beam closed 0.8MeV with repetition frequency of 25 Hz and top time of ~ 80 ns were obtained. So this paper gave a new idea for research on the modularization compact high power pulse generator with higher repetition rate.

Keywords: compact, fast pulse linear transformer driver, modularization, high power pulse generator

PACS: 41. 20. – q, 41. 20. Gz, 41. 75. Lx

[†] E-mail: yaneryan_2002@163.com