

文章编号: 1001-4322(2003) 10-1029-04

# 直线感应加速器组元的双脉冲改造\*

黄子平, 邓建军, 王华岑, 李欣

(中国工程物理研究院 流体物理研究所,四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 对用于单脉冲直线感应加速器的加速组元进行了双脉冲改造的初步尝试:利用传输线延时获得了双脉冲馈入;用铁氧体作为磁芯材料,在感应腔上得到了双脉冲腔压波形。结果表明,现有组元功率系统经过简单的改造,可以获得两个甚至多个脉冲输出;在伏秒值允许的范围内,铁氧体磁芯的感应腔可以感应出双脉冲波形。为以后多脉冲直线感应加速器的改造和设计提供了一个方向,也提出了一些有待解决的问题。

**关键词:** 直线感应加速器(LIA); 双脉冲; 铁氧体

**中图分类号:** TL503.3 **文献标识码:** A

大型的直线感应加速器(LIA)在对爆轰产物流体力学性质的研究中有着非常重要的作用。如果把一台只能产生单个脉冲的LIA组元进行改造,使之能在 $\mu\text{s}$ 级的时间内感应出多个电压脉冲,加速多个束流脉冲打靶,在一次爆轰实验中拍摄到连续的照片,则不仅能节省大量的实验经费,更是技术上的提高与创新。

本文利用单次LIA原有的脉冲功率源(Marx发生器、Blumlein线)和组元加速腔,以铁氧体大环作为感应磁芯,将Blumlein线脉冲输出中的一路馈入100m长电缆进行延时,靠Blumlein线的充电电流复位磁芯,成功地获得了两个间隔500ns的感应电压脉冲。并通过截断延时电缆长度获得了不同时间间隔的双脉冲波形。为多脉冲LIA加速腔的设计积累了经验,并对铁氧体在多脉冲情况下的性能研究提供了实验数据。

## 1 实验设备

中国工程物理研究院的LIA加速组元1B2C脉冲功率系统的示意图如图1所示。

Marx对Blumlein线充电到峰值时主开关触发,脉冲通过4条电缆线馈入两个加速组元,每个组元由2条电缆对称馈入。Blumlein线内筒和中筒间及中筒和外筒间的特性阻抗都是6、整条线阻抗为12,每条电缆阻抗为48,4条电缆并联总阻抗也为12,与Blumlein线匹配。为了匹配电缆的脉冲输出,在馈入口和加速腔外壳(接地)间加了一个镇流电阻,理论上两个镇流电阻的并联阻抗、铁氧体磁芯电感等效阻抗和束流通过间隙时的等效阻抗并联后,阻抗应为24才能与两根并联的电缆匹配。而实际在脉冲情况下,铁氧体磁芯电感所带来的回路阻抗是非常大的,而用于实验的单组元中也没有束流通过,因此,每个镇流电阻阻抗为48(并联值为24)时即满足匹配要求。加速组元的具体结构如图2所示。

电流脉冲通过脉冲馈入口4进入组元,一部分通过镇流电阻2损失掉,一部分通过5馈入加速腔,成为铁氧体环6的初级功率源,感生出的电压加在间隙8(次级)上,加速通过间隙的电子束。绝缘环9的作用是将腔中心需要抽真空的部分和外围需要注油绝缘的部分分开,同时也降低了抽真空的难度。组元上有两路信号输出,一路从镇流电阻的分压环(RVP)1上分压得到,另一路从电容探头(CVP)10上得到,都反映的是加速间隙8处的电压波形。

加速组元感应磁芯的复位是依靠Marx给Blumlein线充电时流入组元的充电电流,其极性与高压脉冲相

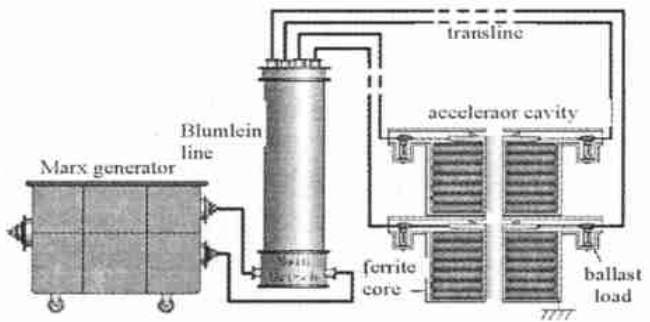


Fig. 1 Schematic of pulsed power system for the LIA cell

图1 加速组元脉冲功率系统示意图

\* 收稿日期:2003-03-06; 修订日期:2003-06-26

基金项目:国防科技基础研究基金资助课题

作者简介:黄子平(1977-),男,硕士,从事高功率脉冲方面的研究.四川绵阳919-106信箱;E-mail:hzp0816@yeah.net

反,幅值较小但已足够将铁芯复位至  $-B_r$  处。原系统中的两根馈入电缆均为 20m 长,为产生双脉冲,将其中一根替换为 120m 长电缆,两根电缆中的充电电流到达组元的时间不同,因此两个脉冲之间仍存在反向的充电电流给铁氧体复位,但是复位时间较短。当两根电缆等长时,脉冲同时进入组元,所以从每条电缆向组元看出去,看到的电阻都是 48 ,因此是匹配的。而将一根电缆延时后,馈入的两个脉冲先后到达,这时从任意电缆向组元看出去时,电阻是镇流电阻和另一条电缆阻抗的并联值。因为两条电缆的阻抗是相同的(48 ),所以并联值必定小于 48 。为了达到匹配,同时又要能测到馈入电压脉冲波形,决定将镇流电阻阻抗升高到 2.5k (两个 5k 并联),远远大于电缆阻抗 48 ,使并联阻抗与电缆基本匹配。

## 2 实验结果

感应腔的单脉冲典型波形如图 3 所示,脉冲半高宽为 120ns,幅值 280kV。图 4 为在馈入电压幅值 120kV 情况下不同脉冲间隔时感应腔的双脉冲感应波形。当两根电缆传输线分别为 20m 和 120m 时,由于波在传输线中的速度为 0.2m/ns,因此在感应腔上便得到了间隔 500ns 的双脉冲馈入;截短电缆的长度,分别得到了间隔 400ns 和 270ns 的双脉冲馈入。图中  $V_r$  为电阻分压器测得的波形, $V_c$  为电容分压器测得的波形。可以看出,在此电压幅度下,加速间隙上的双脉冲波形受脉冲间隔时间影响不大。

实验中脉冲的半高宽约为 120ns,由 Blumlein 脉冲形成线的几何尺寸决定。在单脉冲情况下,感应腔的 11 块铁氧体磁芯饱和和前所能达到的最大伏秒值约为  $300\text{kV} \times 120\text{ns}$ ,即电压幅度超过 300kV,磁芯将出现明显饱和。为了观测在双脉冲情况下利用 Blumlein 线充电电流复位的方式,磁芯所能正常工作的最大电压,在脉冲间隔 500ns 的情况下采集了不同馈入脉冲幅度时加速间隙的波形,如图 5 所示。

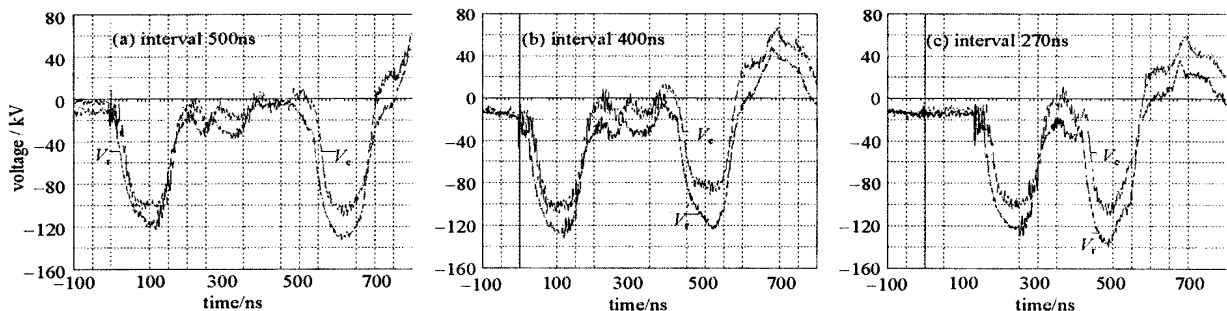


Fig. 4 Double-pulse voltage waveform on accelerating gap with different pulse interval

图 4 不同脉冲间隔时加速间隙上的双脉冲波形

## 3 结果分析

实验结果表明,利用电缆延时的方法,组元功率系统改造后能够产生双脉冲输出,含铁氧体磁芯的感应腔在伏秒值允许的范围内,可以在加速间隙上感应出较好的双脉冲波形。但随着馈入电压幅度的增加,磁芯在第二个脉冲到达时会逐渐达到饱和。

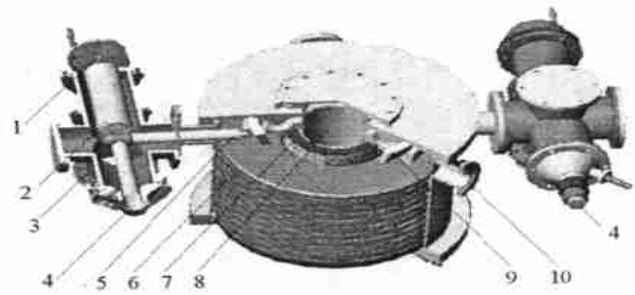


Fig. 2 Cutaway view of a LIA cell

1. resistor divider; 2. ballast load; 3. connecting cavity;
4. feed lines (from cable); 5. feed lines (to accelerator cavity);
6. ferrite core; 7. solenoid; 8. accelerator gap; 9. insulator ring;
10. portal of the capacitive probe (to measure voltage between the gap)

图 2 LIA 加速组元剖面图

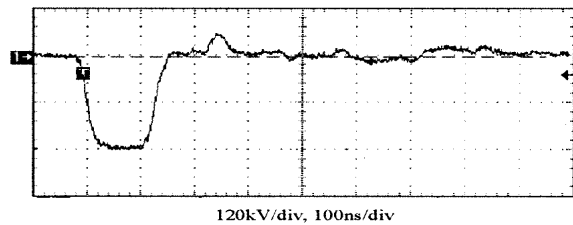


Fig. 3 Representative waveform of single pulse

图 3 单脉冲的典型波形

图 4 中,  $V_r$  和  $V_c$  的幅值有一些差别, 这主要是因为两种测量方法的原理有所不同, 电容分压器 (CVP) 一经标定, 分压比将固定不变, 而电阻分压器 (RVP) 由于水电阻阻值随温度变化, 所以分压比会有一个波动范围。在图 5 中, 则只采用了 CVP 的测量数据。图 4 中两脉冲间电压的波动较大, 后发现是由于 Blumlein 线另外两路输出的负载失配引起的, 调整后, 在图 5 中波形有了明显改善。

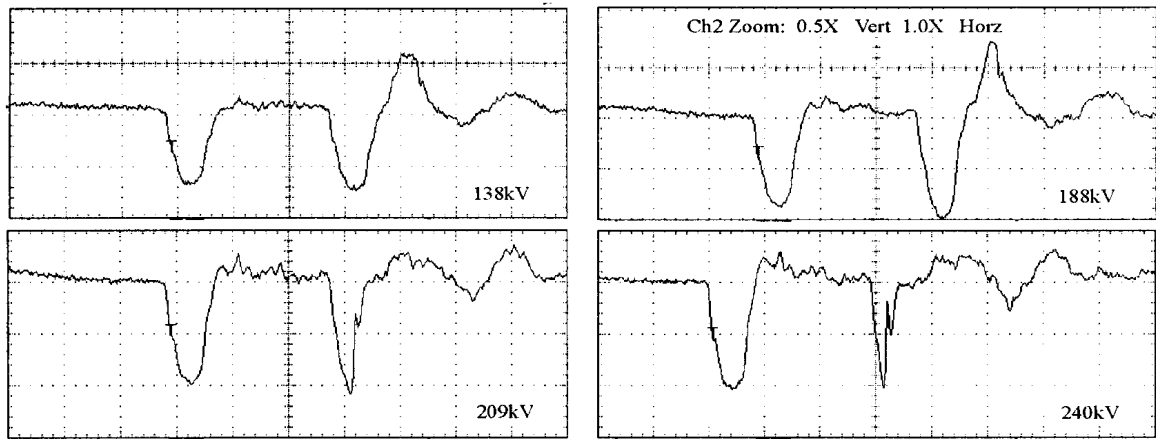


Fig. 5 Double-pulse voltage waveform on accelerating gap with different input voltage

图 5 不同馈入电压幅值时加速间隙上的双脉冲波形

第二个脉冲后面有一个较大的反射脉冲, 下面对它的形成进行分析: 如图 1, 假定传输线 1 的电长度为  $T_1$ , 传输线 2 为  $T_2$ , Blumlein 线输出脉冲幅度为  $V$ , 磁芯回路呈现高阻状态。则在 Blumlein 线触发后  $T_1 + T_2$  时, 幅度为  $V$  的脉冲会通过传输线 1, 2 同时回到 Blumlein 线的输出端, 此时负载为 Blumlein 线及另外两根传输线, 阻值为传输线 1, 2 并联值的  $1/3$ , 系统失配, 会反射一个  $-V/2$  的脉冲回到传输线 1, 2 中, 在  $2T_1 + T_2$  和  $T_1 + 2T_2$  时到达感应腔, 其幅值为励磁脉冲的一半。对比实验波形, 其位置和幅度都与实验符合。当磁芯呈现饱和时, 其回路逐渐变为低阻状态, 能量大部分由磁芯回路泄漏, 在  $T_1 + T_2$  时刻回到 Blumlein 线输出端的脉冲幅值会降低, 反射的脉冲幅值也同样降低, 因此在磁芯饱和后第二个脉冲后的反射脉冲会减弱以致消失, 如图 5 的下面两个波形所示。在铁氧体磁芯饱和前, 也可以通过硅堆隔离的方法来有效地去除主脉冲以后的反射波形。

利用 Blumlein 线的充电电流来复位磁芯, 在单脉冲情况下有很好的效果 (幅值达到 280kV 仍未出现饱和现象), 但在双脉冲时对第二个脉冲则基本不起作用 (幅度达到 188kV 时就已经出现饱和趋势), 可见单脉冲和多脉冲间的复位要求是不同的。定性地说, 磁芯回路中的复位电流强度达到  $I$  时就认为磁芯复位到理想值, 由于回路本身有很大的电感, 其中的电流强度必然有一个渐变的过程, 对于约 10kV 的复位电压, 这一过程约需要  $2\mu\text{s}$ 。对于单脉冲, 主脉冲到达前有近  $3\mu\text{s}$  的复位时间, 因此有很好的复位效果; 而对于第二个脉冲, 则只有 500ns 的复位时间, 所以效果不明显。要实现脉冲间复位, 必须提高复位电压, 以缩短磁芯回路中复位电流建立的时间。

## 4 结 论

通过传输线延时, 单组元功率系统较好地实现了双脉冲输出; 在增加镇流电阻阻值以实现匹配后, 在馈入脉冲电压较低的情况下, 感应腔得到了较好的双脉冲腔压波形, 说明在伏秒值允许的范围内铁氧体磁芯是可以正常工作在双脉冲情况下的。当电压幅度增加时, 感应腔较早出现饱和现象, 说明脉冲间复位较单脉冲复位有较大的特殊性, 需要进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 程念安. 单组元试验台研制总结 [A]. 强流直线感应加速器会议文集 [C]. 绵阳: 中国工程物理研究院流体物理所, 1994. 96—102. (Cheng N A. Design and test of an accelerator module for LIA. Proceedings of the conference on 10MeV LIA. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 1994, 96—102)
- [2] 戴光森. 多块铁氧体组合的脉冲性能研究 - 单组元模拟实验 [A]. 强流直线感应加速器会议文集 [C]. 绵阳: 中国工程物理研究院流体物理所, 1994. 86—91. (Dai G S. The performance of ferrite cores combination in pulse. Proceeding of the conference on 10MeV LIA. Mianyang: China

- Academy of Engineering Physics, 1994. 86—91)
- [3] 王华岑, 文龙, 章文卫, 等. 直线感应加速器加速腔物理设计与研究[J]. 强激光与粒子束, 1996, 8(3): 313—319. (Wang H C, Wen L, Zhang W W. Physical design study on linear induction accelerator cell. *High Power Laser and Particle Beams*, 1996, 8(3): 313—319)
- [4] Ekdahl C. Modern electron accelerators for radiography[A]. Proc of the 13th International Pulsed Power Conference[C]. Albuquerque, USA, 2001. 29—34.
- [5] 邓建军. “神龙一号”直线感应加速器物理设计[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(5): 502—504. (Deng J J. Physical design of the Dragon linear induction accelerator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(5): 502—504)

## Double-pulse reconstruction of a single-pulse LIA module

HUANG Zi-ping, DENG Jian-jun, WANG Hua-cen, LI Xin

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, P. O. Box 919-106, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** A double-pulse line induced accelerator (LIA) module is reconstructed based on a usual single-pulse LIA module. By changing the length of one of the cables between the inductive cell and the Blumlein pulse forming line, two induction pulses are generated by the ferrite cores inductive cell. The interval time of the pulses is adjustable by changing the lengths of the cable, also the input voltage is changed in different experiments. The results show that it is possible for the existing LIA power system to generate multi-pulses; the ferrite cores of LIA can induct multi-pulses when their voltage-second range is enough; and the resetting effect of the cores is tied up with the resetting time and resetting voltage.

**Keywords:** Line induced accelerator (LIA); Double-pulse; Ferrite