

文章编号: 1001-4322(2007)04-0695-05

猝发双脉冲直线感应加速器组元研究*

黄子平, 陈思富, 邓建军, 叶毅

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 在原单脉冲直线感应加速器(LIA)组元的基础上, 利用电缆延时和电缆反射两种方式获得了间隔 500 ~ 1 000 ns 的猝发双脉冲输出。在感应加速腔上进行了双脉冲实验, 获得了幅度大于 200 kV、前沿小于 35 ns、平顶大于 60 ns 的双脉冲加速电压波形。两种方式中第一个脉冲的前沿和幅度都达到了原单脉冲组元的水平, 表明加速腔负载的变化对波形没有明显影响, 但由于电缆对波形的损耗, 第二个脉冲的幅度和前沿比第一个脉冲略差。可以利用水介质传输线来代替长电缆, 减小传输线的长度及其对波形的损耗。两个脉冲间的幅度差异可以通过改变长电缆的阻抗来调节。实验表明, 通过这两种猝发双脉冲的产生方式并结合加速腔磁芯的改进, 可简单高效地完成原单脉冲 LIA 的双脉冲改造。

关键词: 直线感应加速器; 猝发双脉冲; 电缆延时; 电缆反射

中图分类号: TL503.3 文献标识码: A

直线感应加速器(LIA)是产生强流、高能电子束的重要装置之一, 由于其采用了感应加速的原理, 避免了静电加速器的高压击穿问题, 且通过增加加速组元的数量, 理论上可获得无穷高的加速电压。又因为其束流的传输路径为直线, 因此避免了由于束流偏转而产生的不稳定因素, 而且束流在加速间隙获得能量时, 加速电压可维持 $\pm 1\%$ 的平顶, 大大降低了束流能散, 避免了行波或驻波直线加速器的相位问题, 使传输 kA 量级的强束流并实现良好的聚焦成为可能。大型直线感应加速器能量一般在 10 ~ 20 MeV 之间, 流强为几到几十 kA, 脉宽为 20 ~ 100 ns, 最后束流直径可聚焦到 2 mm 左右。

现有的直线感应加速器均以单次方式工作, 加压一次只能加速一个束流脉冲打靶, 而实际应用时常希望其能工作在高重复频率的猝发多脉冲模式下。对原单脉冲 LIA 进行猝发双脉冲改造, 无疑是获得多脉冲 LIA 最经济最简单的方法。

本文在原 LIA 组元基础上, 利用电缆延时和电缆反射两种方式在实验加速腔上获得了满足要求的猝发双脉冲输出(脉冲半高宽 120 ns、幅度 220 kV、间隔 500 ~ 1 000 ns), 并对实验结果进行了分析。

1 组元系统改造

除去油、水、气、真空和控制等辅助系统外, LIA 的加速段是由多个组元串联组成的, 每个组元包括功率系统、复位系统和加速腔三部分。中国工程物理研究院的 LIA 加速组元如图 1 所示。

由 Marx 发生器、Blumlein 脉冲形成线和电缆组成的功率系统本身就具有对加速腔磁芯复位的能力: Marx 发生器对 Blumlein 线充电时, 充电电流通过电缆流经加速腔中环绕磁芯的回路到地, 可在脉冲到达前对磁芯预先复位到反向饱和。

当 Blumlein 线充电到峰值时主开关触发, 脉冲通过 4 条电缆线同时馈入 2 个加速组元, 每个组元由 2 条电

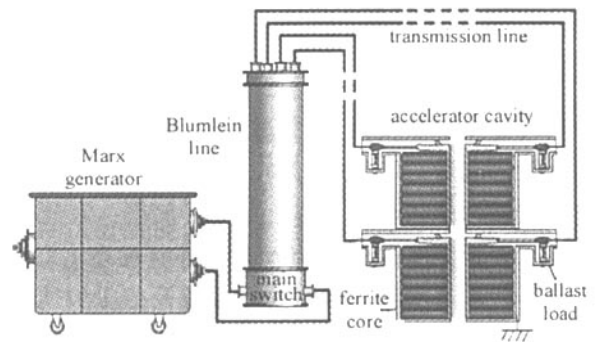


Fig. 1 Sketch map of an LIA cell

图 1 加速组元示意图

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 6Ω , 整条线阻抗为 12Ω , 每条电缆阻抗为 48Ω , 4 条电缆并联总阻抗也为 12Ω , 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)间并联了 2 个镇流电阻。由于在脉冲情况下铁氧体磁芯电感所带来的回路阻抗非常大, 而用于实

* 收稿日期 2006-11-24; 修订日期 2007-03-05
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, 博士生, 从事脉冲功率技术和感应加速器磁芯研究, hzp106@sina.com。

的单组元中没有束流通过,因此,每个镇流电阻阻抗为 48Ω (并联值为 24Ω) 时即满足匹配要求。

1.1 电缆延时方式获得双脉冲

考虑到每个加速腔有 2 根电缆对称馈入,而脉冲在电缆中的传输速度

$$v = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad (1)$$

式中 c 为真空光速, μ_r 和 ϵ_r 分别为同轴电缆内外导体间介质的相对磁导率和相对介电常数。对于实际作为脉冲传输线的 400 kV 高压同轴电缆,脉冲传输 1 m 需要 5 ns。因此,如果将连接加速腔的其中一根传输线延长 100 m,那么由同一根 Blumlein 线产生的脉冲通过 2 根不同长度的传输线将间隔 500 ns 到达加速腔,从而实现猝发双脉冲输出。

然而,延长电缆长度后,必然将改变电缆到加速腔的匹配,如图 2(a) 所示。电缆阻抗为 Z_B ,当电缆等长时可视为并联然后连接到腔,由于加速腔的电感足够大,电容很小,在不考虑束流 I_B 时,只要满足 $R = Z_B/2$,则系统匹配。但当电缆不等长时,脉冲分时到达,则对任一电缆,其负载为 R 与另一根电缆阻抗 Z_B 的并联值,此时要系统实现匹配,则 R 必须足够大。

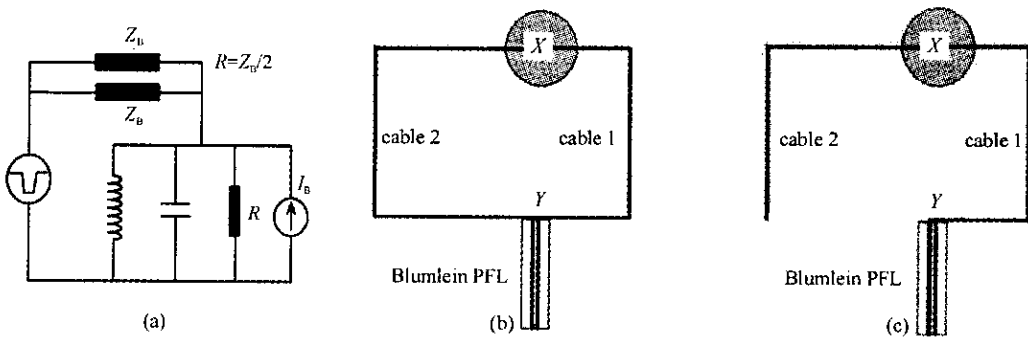


Fig. 2 Sketch map of system load (a), cable delay (b) and cable reflection (c)

图 2 加速腔负载变化(a)、电缆延时(b)和电缆反射(c)示意图

如图 2(b) 所示,当长电缆 2 传输的脉冲到达感应腔 X 后,必然会通过短电缆 1 返回 Blumlein 线出口 Y 。当电缆不等长时,此处的匹配关系将发生变化,电缆 1 在 Y 点的负载变为 Blumlein 线和电缆 2 的并联值,远小于其自身阻抗,会产生严重的短路反射。反射脉冲通过短电缆 1 回到 X 点,则可能与主脉冲波形产生叠加,引起波形畸变。为避免这种情况,电缆 1 的电长度必须大于主脉冲宽度的 50%,对于 120 ns 的主脉冲,电缆 1 不能短于 12 m,因此要产生 500 ns 间隔的猝发双脉冲,电缆 2 的长度应大于 112 m。

1.2 电缆反射方式获得双脉冲

利用脉冲在电缆中的传输速度,还可以采用电缆反射的方法来获得双脉冲,如图 2(c) 所示。Blumlein 线产生的脉冲通过电缆 1 到达感应腔后继续进入电缆 2 传输,电缆 2 的末端浸泡在变压器油中以确保断路,脉冲到达时会发生全反射,反射脉冲会重新通过电缆 2 回到感应腔,从而实现了对加速腔的猝发双脉冲馈入。利用电缆反射的机理,第二个脉冲在长电缆中往返一次,脉冲间隔是电缆 2 电长度的 2 倍,因此可以用同样的电缆获得比电缆延时法长 2 倍以上的脉冲间隔。在感应腔上的匹配情况与采用电缆延时的方法时一样,需要将镇流水阻加大。为了避免 Y 点反射脉冲叠加在主脉冲上,电缆 1 同样有长度要求,但电缆 2 的长度不再与之关联。

通过以上两种方式对功率系统及感应加速腔负载进行改造,原有的单脉冲 LIA 组元就变成了猝发双脉冲 LIA 组元。但是,此时的组元所能感应产生的脉冲数量虽然增加了 1 倍,可脉冲幅度却必然会下降 50%,这仍然不能满足要求。

如果磁芯感应出的电压脉冲的幅度为 V_0 ,脉宽为 t_p ,由法拉第电磁感应定律,有

$$V_0 = - \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{d}{dt} \int B dS \quad (2)$$

磁芯截面积 S 恒定,两边积分(2)式变为

$$V_0 t_p = \Delta B S \quad (3)$$

因此,感应加速腔中磁芯的数量及其磁通密度跳变的范围,决定了加速腔所能感应出电压的幅度和宽度的乘积(伏秒值)。

如果要确保猝发双脉冲的脉宽和幅度都能达到原系统单脉冲的水平,必须将加速腔磁芯的伏秒值增加1倍或在双脉冲间隔内对磁芯进行复位。考虑到脉冲间复位的困难程度及其可能对功率系统带来的巨大影响^[3],选用增加磁芯伏秒值的方式则更为适用。为了继续沿用原来的加速腔,磁芯的总体积应尽量不变,所以须使用磁通密度跳变范围 ΔB 更大的材料作为磁芯。利用非晶材料绕制成同样尺寸的磁环,其 ΔB 比铁氧体磁环可增加1倍左右,成本与相同尺寸的铁氧体环相当,将其作为感应腔磁芯可以解决这个问题。

2 猝发双脉冲实验

采用电缆延时和电缆反射两种方式,在实验加速腔上进行了猝发双脉冲实验。如图3所示,实验加速腔与真实的加速腔结构相似,只是设计时不考虑束流通过,因此束流管道和加速间隙也浸泡在变压器油中,实验时没有真空度的要求。另外实验腔采用分段设计,可容纳更多的磁芯,并在末端装有测量磁芯励磁电流所用的分压电阻环。单脉冲LIA加速腔中的磁芯数量为11块,因此在双脉冲实验中,实验加速腔内放置了23块铁氧体磁芯以确保提供足够大的伏秒值。

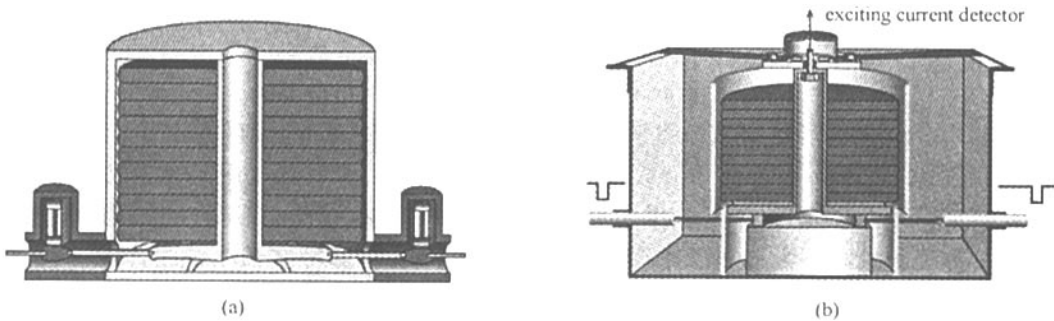


Fig. 3 Sketch map of LIA cavity (a) and experimental inductive cavity (b)

图3 LIA加速腔(a)和实验加速腔示意图(b)

由于加速腔的镇流水阻同时也是测量腔压的高压臂,对组元进行双脉冲改造后,为了满足加速腔与传输线的匹配,镇流水阻越大越好。但为了获得真实的腔压信号,作为高压臂的水阻阻值不能太大,否则其电容性会增加,影响信号的可信度。实验中,将镇流水阻阻值增加到 $620\ \Omega$,其低压臂电阻环阻值为 $11\ \Omega$,以确保腔压信号的真实性和完整性。图4为猝发双脉冲的实验波形。

图4(a)为电缆延时猝发双脉冲波形,脉冲半高宽 $120\ \text{ns}$,间隔 $500\ \text{ns}$ 。脉冲1幅度 $229\ \text{kV}$,前沿 $21\ \text{ns}$,最大励磁电流 $267\ \text{A}$;脉冲2幅度 $223\ \text{kV}$,前沿 $32\ \text{ns}$,最大励磁电流 $491\ \text{A}$,磁芯均未饱和,双脉冲间的电压幅度差异 2.5% 。脉冲2后的反向脉冲是由短电缆在Blumlein线出口口的反射引起的。

图4(b)为电缆反射猝发双脉冲波形,由于采用与电缆延时同一根电缆,因此其脉冲间隔长了1倍,约为 $1\ \mu\text{s}$ 。脉冲1幅度 $196\ \text{kV}$,前沿 $20\ \text{ns}$,最大励磁电流 $240\ \text{A}$;脉冲2幅度 $175\ \text{kV}$,前沿 $36\ \text{ns}$,最大励磁电流 $480\ \text{A}$,磁芯均未饱和,双脉冲间的电压幅度差异 10% 。

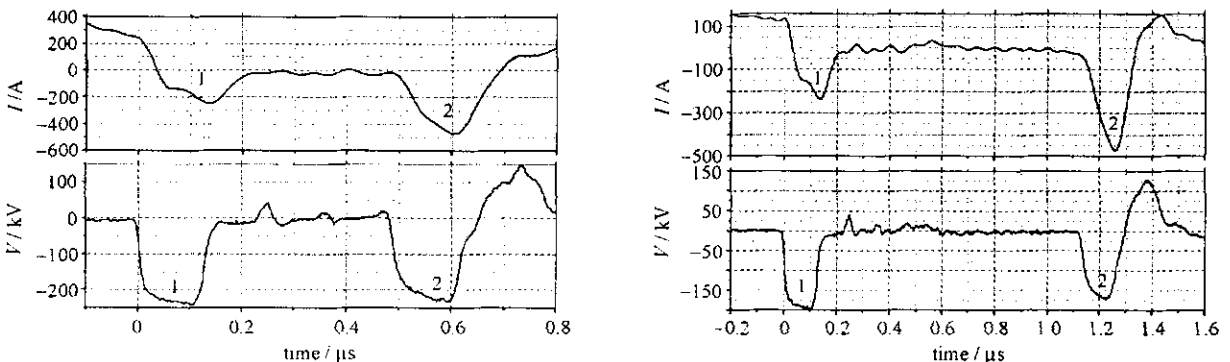


Fig. 4 Double pulse waveform

图4 猝发双脉冲腔压及励磁电流实验波形

3 实验结果分析

实验结果表明,利用电缆延时和电缆反射两种方法,组元改造后都能够产生双脉冲输出,但是第二个脉冲

相对于第一个脉冲, 前沿和幅度都有不同程度的变差, 这在电缆反射方式中尤为明显。为了明确产生差异的原因, 需要测量所使用的长电缆对电脉冲的损耗。将长度差为 100 m 的两根电缆的一端接到 Blumlein 线的输出口, 另一端分别接在两个高压臂为 50Ω 的水电阻分压器上, 测量其波形的差异, 如图 5 所示。

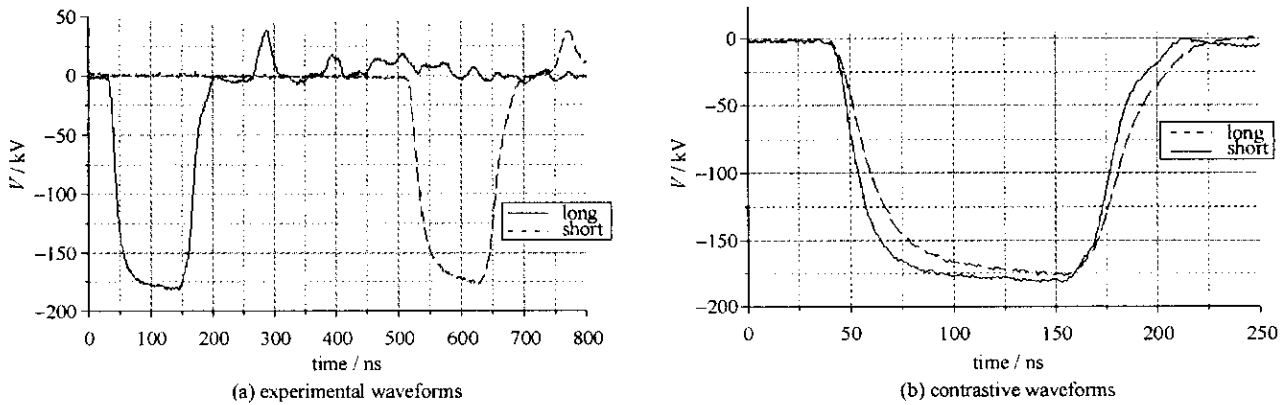


Fig. 5 Transmission waveforms of different cables

图 5 电缆长度对传输波形的影响

结果表明, 电缆 100 m 的长度差对波形有明显影响, 短电缆传输的脉冲, 幅度为 179 kV, 前沿为 24 ns; 长电缆传输的脉冲, 幅度为 171 kV, 前沿为 35 ns。脉冲间幅度差异为 4.5%, 与电缆延时方式在加速腔上获得的腔压幅度差相近, 其前沿差异也接近。可知, 采用电缆延时方法所产生的猝发双脉冲间的差异主要是由于电缆的损耗所引起的, 与加速腔关系不大。对于电缆反射方式, 由于第二个脉冲在长电缆中往返一次, 传输的时间更长, 会对波形有更大的影响, 另外脉冲从短电缆进入长电缆时, 必然在腔上会产生一定损耗, 也会降低第二个脉冲的幅度。

在对 LIA 组元系统进行猝发双脉冲改造的时候, 仍然沿用了用 Marx 对 Blumlein 线的充电电流复位磁芯的方法, 因此, 需要实验确定对这种复位方式能否满足两个脉冲伏秒值的需要, 在两种改造方式下磁芯在复位和励磁下总的磁滞回线如图 6 所示。回线的左边线代表了磁芯的复位情况, 右边线代表了双脉冲对磁芯的励磁情况。在两种改造方式下, 磁芯复位和励磁都未达到饱和, Blumlein 线充电提供的复位脉冲伏秒值能够满足两个 210 kV (对于电缆延时方式) 或两个 190 kV (对于电缆反射方式) 猝发励磁脉冲的需要。如果主脉冲电压继续增高, 则在数次实验后磁芯会出现饱和现象, 导致波形畸变。

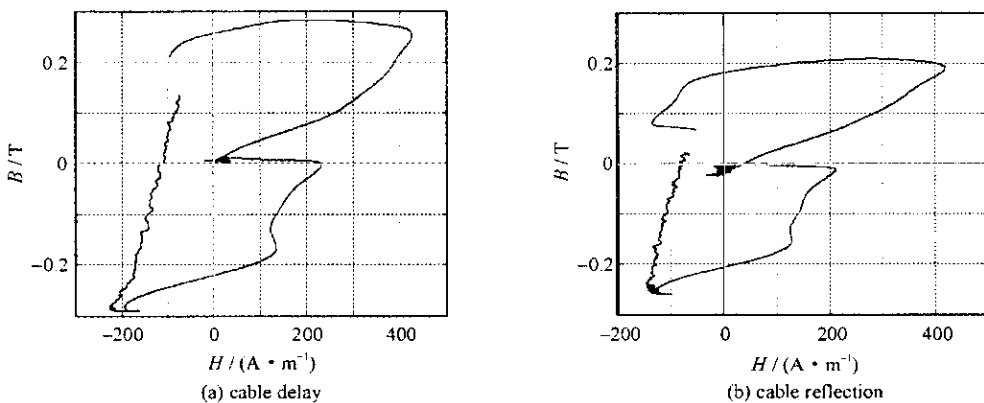


Fig. 6 Cores' magnetization curves of cable delay method (a) and cable reflection method (b)

图 6 电缆延时双脉冲 (a) 和电缆反射双脉冲 (b) 对应的磁芯磁化曲线

4 结 论

通过电缆延时和电缆反射两种方式, 原单脉冲组元系统都较好地实现了猝发双脉冲改造, 在伏秒值足够的情况下, 可获得幅度 200 kV 以上、前沿 30 ns 左右、时间间隔小于 $1 \mu\text{s}$ 的两个加速脉冲输出。两种方式中第一个脉冲的前沿和幅度都达到了原单脉冲组元的水平, 表明加速腔负载的变化对波形没有明显影响, 但由于电缆对波形的损耗, 第二个脉冲的幅度和前沿比第一个脉冲略差。由公式 (1) 可知, 采用相对介电常数大的介质可增加脉冲在传输线中传播的时间, 因此可以考虑利用水介质传输线来代替长电缆, 减小传输线的长度以及对波

形的损耗。另外,两个脉冲间的幅度差异可以通过变化长电缆的阻抗调节,如采用水介质传输线,也会较方便传输线阻抗的调节。

参考文献：

- [1] 黄子平,邓建军,王华岑,等. 直线感应加速器组元的双脉冲改造[J]. 强激光与粒子束,2003,15(10):1029-1032. (Huang Z P, Deng J J, Wang H C, et al. Double-pulse reconstruction of a single-pulse LIA module. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(10):1029-1032)
- [2] 程念安. 单组元试验台研制总结[C]//强流直线感应加速器会议文集. 绵阳:中国工程物理研究院,1994:96-102. (Cheng N A. Design and test of an accelerator module for LIA. Proc of the Conference on 10 MeV LIA. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 1994:96-102)
- [3] 黄子平,李欣,高峰,等. 磁芯材料脉冲间叠加复位研究[J]. 强激光与粒子束,2006,18(7):1173-1177. (Huang Z P, Li X, Gao F, et al. Overlap restoration of LIA's cores between multiple-pulses. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(7):1173-1177)
- [4] 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, et al. Physical design study on linear induction accelerator cell. *High Power Laser and Particle Beams*, 1996, 8(3):313-319)
- [5] Ekdahl C. Modern electron accelerators for radiography[C]//Proc of the 13th International Pulsed Power Conference. Albuquerque, USA, 2001:29-34.

Burst double-pulse cell of LIA

HUANG Zi-ping, CHEN Si-fu, DENG Jian-jun, YE Yi

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

Abstract: A linear induction accelerator(LIA) cell includes the pulse power system, the cavity and the reset system. By methods of cable delay and cable open circuit reflection, a burst double-pulse output can be generated by traditional LIA pulse power system. With the original reset system and the reconstructive power system, the experimental inductive cavity filled with ferrite cores will be worked in burst double-pulse mode. The experimental results prove that by simple reconstruction, an LIA cell can generate double accelerating pulses of interval less than 1 μs with the voltage intensity more than 200 kV, risetime less than 35 ns and flattop more than 60 ns.

Key words: LIA; Burst double-pulse; Cable delay; Cable reflection