

# 12MeV 直线感应电子加速器

石金水 丁伯南 邓建军 何毅 李劲 戴光森 文龙 曹国高

(中物院西南流体物理研究所, 成都523信箱56分箱, 610003)

**摘要** 12MeV 直线感应电子加速器(LIA)是经10MeV LIA 能量升级和系统改进而来, 该机通过在10MeV LIA 加速末端续接四个加速组元并调整脉冲功率系统, 将输出的电子束的能量升级至12MeV; 同时, 重新设计的输运磁场分布及聚焦系统更趋于合理, 使经10MeV LIA 升级和改进后的12MeV LIA, 打靶电子束能量达到12MeV, 束流约2.6kA, 脉冲半高宽约89ns, 焦斑约4mm。

**关键词** 直线感应电子加速器(LIA) 脉冲功率 束输运和聚焦

直线感应电子加速器是六十年代发展起来的一种新型加速器, 它能产生强流、高亮度、低能散度的高品质电子束, 而部件式结构的特点使它可大量串接获得所需要的能量。由于LIA具备这些优越性能, 因而受到许多国家的重视, 美国、法国、俄罗斯、日本已先后建成多台直线感应加速器<sup>[1-6]</sup>, 并已广泛地应用于闪光X射线照相、辐照效应、自由电子激光、粒子束聚变、高功率微波等研究领域。

本文所介绍的12MeV LIA 是从1994年3月开始, 在10MeV LIA (1994年研制成功)<sup>[7]</sup>基础上进行能量升级和系统改造而来。其具体的设计指标要求为: 加速电压12MV; 打靶束流2kA; 束流脉宽约60ns; 打靶束焦斑直径 6mm。

## 1 加速器系统简介

12MeV LIA 主要由脉冲功率系统、注入器、加速段、束输运和聚焦系统、控制监测系统及真空、油、水、气等辅助系统构成, 主体概貌如图1所示。

脉冲功率系统的功能是将220V、50Hz的市电转变成一组高压脉冲供给加速组元, 可分为脉冲功率调制系统和触发系统。调制系统是 Marx-Blumlein 形成线功率压缩系统(具体参数参见文献[7]), 图2是其功率调制示意图。触发系统将触发指令脉冲放大成符合触发要求的高压脉冲按预定时间分送到 Marx 开关和主开关, 使所有 Marx 发生器和 Blumlein 主开关精确地按照预定时间动作。

注入器采用天鹅绒阴极、带钨网阳极的二极管, 可产生1MeV、10kA、90ns(FWHM)、亮度为 $10^8/(\text{rad}\cdot\text{m})^2$ 的强流脉冲电子束, 该电流被阳极孔准直后, 约2.8kA 进入束传输管道。

加速段包括32个加速组元, 每个加速间隙提供90ns(FWHM)、360kV 的高压脉冲, 图3显示的是加速组元剖面示意图。

束的传输和聚焦采用螺线管线圈, 该系统包括54台恒流励磁电源和54个螺线管线圈。每台电源可提供50~500A(稳定度 3%)连续可调的恒流。螺线管产生的峰值磁场可达0.6T。图4

\* 国防科技基础研究基金资助课题。

1996年11月25日收到原稿, 1997年10月29日收到修改稿。

石金水, 男, 1964年4月出生, 硕士, 副研究员。

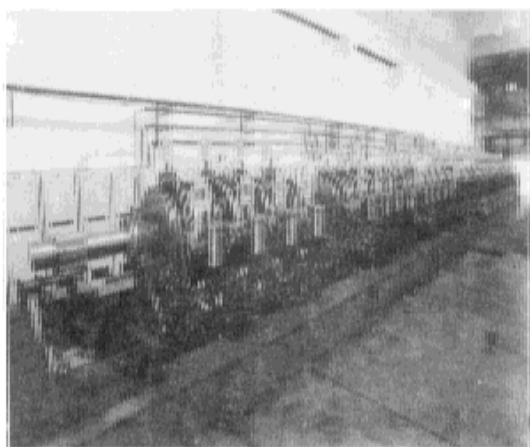


Fig 1 The layout of the 12MeV LIA

图1 12MeV LIA 概貌

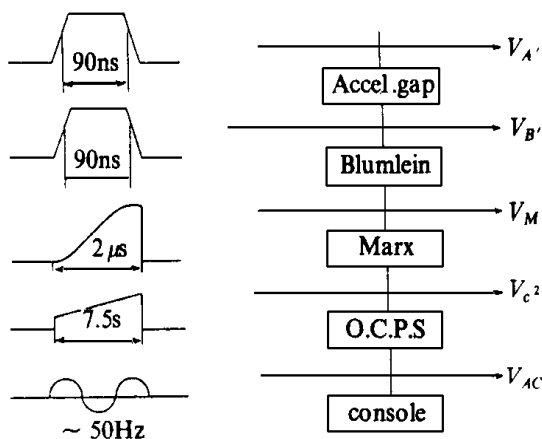


Fig 2 The process of power modulation for the 12MeV LIA

图2 12MeV LIA 功率调制示意图

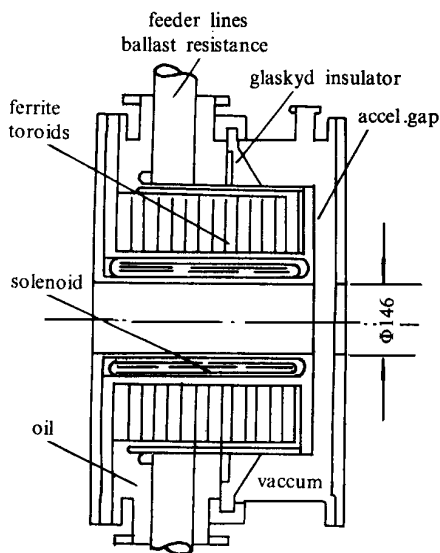


Fig 3 The section of an acceleration-cell

图3 加速单元剖面示意图

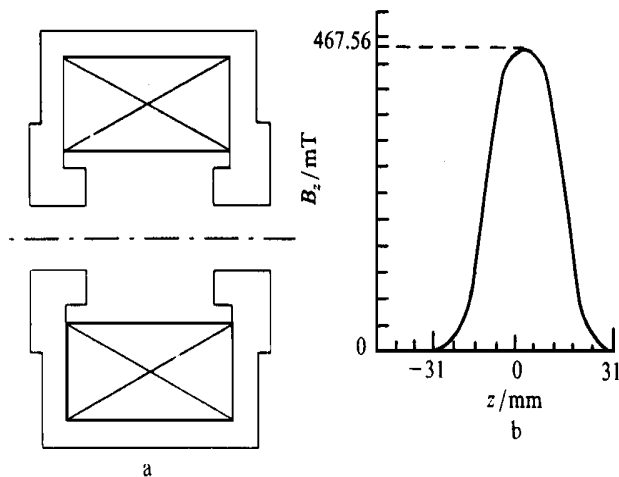


Fig 4 (a) The schematic of a lens

(b) Its axial magnetic field measured on the axis of symmetry z for a coil current of 380A

图4 聚焦螺线管的结构示意图及其轴向磁场分布

是聚焦螺线管的结构示意图及其轴向磁场分布。

## 2 调试及结果

调试主要是优化脉冲功率系统、束运输和聚焦系统的工作状态。

### 2.1 脉冲功率系统的调试

根据10MeV LIA 的运行状况<sup>[7]</sup>, 要满足12MeV LIA 的加速电压设计指标, 仅简单地续接四个加速单元, 加速电压只能达到11.3MV, 若要达到12MV, 则每个加速腔电压至少要增加30kV。这不但增加了加速腔的压力, 而且对Marx 发生器、主开关、触发系统等提出了更高的

要求,考虑不增加M<sub>arx</sub> 发生器, II级发散开关数量<sup>[8]</sup>,必须对脉冲功率系统的布局重新调整。M<sub>arx</sub>1、2、3、4对前28个Blumlein 线供电(负载均分),M<sub>arx</sub>5对后8个Blumlein 线供电,这样使负载分配更合理,有利于系统的调试。

此外,电子束逐个通过32个加速组元获得能量递增,所获能量的峰值大小及散度决定于脉冲功率系统36个主开关与电子束的同步性能。已有的理论计算及实验研究表明(邓建军, 10M eV LIA 调试研究, 内部资料),开关同步性越高,即开关抖动越小,对束的调试越有利。为解决这些问题,在实际调试中,采取了以下措施:(1)研制了一台可靠、稳定的高压同步脉冲触发装置,取代原有的高压脉冲增强器。(2)为保证加速电压与电子束同步,减小能散度,提高束输运效率,重新调整所有触发电缆的电长度及M<sub>arx</sub> 发生器对水介质Blumlein 线的充电电感。(3)兼顾整机运行的稳定性,通过合理调整开关气压等措施,将主开关的抖动限制在5ns 以内。最后稳定运行的典型加速电压显示在图5中。

### 2.2 束输运和聚焦系统调试

2.2.1 束输运系统 12M eV LIA 束输运线长约20m,在束传输过程中,如何有效地避免和解决束的横向运动是调试成败的关键<sup>[9]</sup>。

束包络半径的振荡 在单个螺线管内,  $(\beta\gamma)' \neq 0$ ,束包络方程由下式给出

$$R''(z) + (k_c^2/4 - k_s^2)R(z) - \epsilon_0/(\beta^2\gamma^3R^3) = 0 \tag{1}$$

这里,  $R(z)$  是均方根束半径;  $\gamma$  是相对论因子;  $k_c = eB/\beta\gamma mc$  是电子回旋波数;  $e/m$  是电子荷质比;  $B$  是螺线管产生的轴向磁场;  $c$  是光速;  $k_s^2 = 2I/I_0\beta^3\gamma^3R^2$ ,  $I$  是束流,  $I_0 = mc^3/e$ ;  $\epsilon_0$  是归一化发射度。由于腔电压的提高,电子束在束线上的能量递增与10M eV LIA 有所不同,由(1)式可知,不合适的磁场,将引起发射度的增加及加剧束包络半径的振荡,从而引起束碰壁损失,这样,整个输运磁场布局需重新调试。实验中,利用束线上安装的10组束流及位置监测装置,逐个调节54个螺线管线圈的励磁电流,获得最佳的匹配磁场,直至加速器末端输出束流最大,脉宽最宽,空间散度最小。

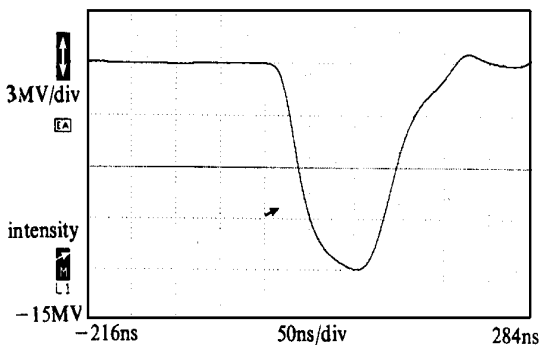


Fig 5 Typical acceleration voltage  
图5 典型的加速电压

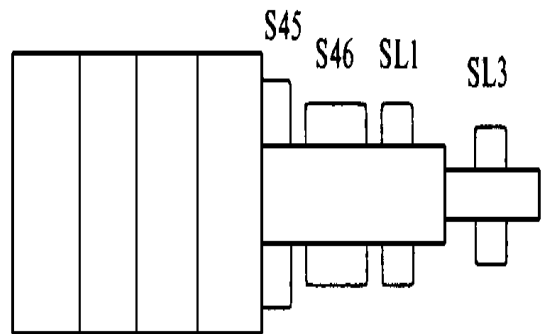


Fig 6 The distribution layout of focusing system  
图6 聚焦系统布局示意图

Corkscrew 运动 当束轴和磁轴不一致时,如果一束电子在  $x-z$  平面内以  $\alpha$  倾角通过磁轴时,则其下游的质心轨道为<sup>[10]</sup>

$$\begin{aligned} x(z, t) &= (\sin\alpha/k_c) \sin[k_c z - k_c z \Delta\gamma(t)/\gamma_0] \\ y(z, t) &= (\sin\alpha/k_c) [1 - \cos(k_c z - k_c z \Delta\gamma(t)/\gamma_0)] \end{aligned} \tag{2}$$

这里,  $\Delta Y(t)/Y_0$  表示电子束的能散度。这种运动称之为质心的螺旋运动(Cork screw), 它会造成束脉冲期间束质心位置的偏移, 当偏心量足够大时, 也会引起束流碰壁损失, 同时它还会造成焦斑的畸变。为尽可能地减少该运动所带来的不利影响, 我们首先采用光学经纬仪对束管道几何轴进行了精确的对中; 调试中, 调整阴阳极面的相对位置, 减小电子束的初始入射角, 即减少Cork screw 运动的幅度; 同时, 脉冲功率系统所采取的有效措施, 尽可能地减小了  $\Delta Y(t)/Y_0$ 。

BBU 与10MeV LIA 一样, 束输运磁场选择合适时, 在12MeV LIA 运行中未观察到明显的BBU 现象。

**2.2.2 聚焦系统** 鉴于原有的布局漂移区间过长及SL<sub>1</sub>与SL<sub>3</sub>间的连贯性较差<sup>[11]</sup>, 对聚焦系统重新进行了设计, 其布局如图6所示。实验结果表明, 该布局更为有效。

### 2.3 打靶束流的典型结果

表1给出的是稳定性考核实验连续十发的实验结果。图7、图8和图9分别是典型的打靶束流及其质心位置、电子束打靶后靶面的破坏情况和采用阴影法所获得焦斑照片黑密度分布曲线。

表1 连续十发实验结果

Table 1 The results of the continuous 10-shots experiments

Shot No.	V/MV	I/kA	pulse width/ns	charge/ $\mu$ C
519	12.00	2.64	89	205
520	12.01	2.55	89	205
521	11.99	2.66	89	217
522	11.99	2.6	89	215
523	12.01	2.4	89	207
524	12.06	2.64	89	214
525	12.02	2.62	89	211
526	12.02	2.67	89	223
527	12.09	2.52	89	197
528	12.01	2.69	89	218

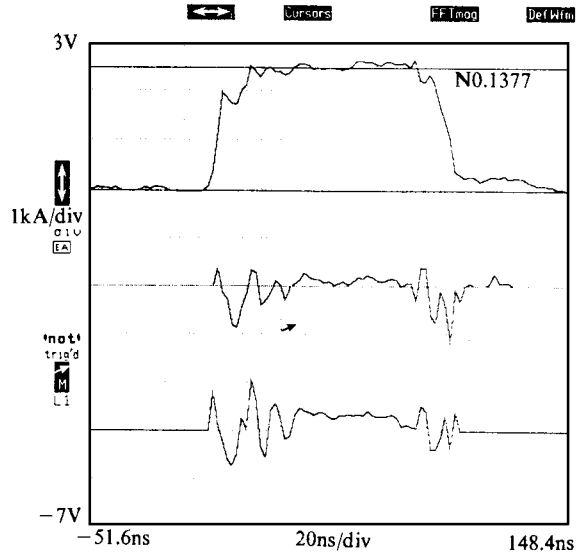


Fig 7 Typical targeting current and its centroid displacement

图7 打靶束流及质心位置

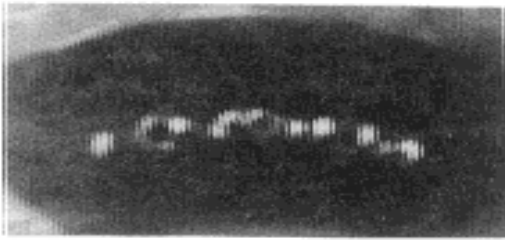


Fig 8 The burn mark of repeated experiments on the target

图8 靶面破坏情况

表2 10MeV LIA 与12MeV LIA 各项性能指标对比  
Table 2 Comparing of performance parameters for the 10MeV LIA and 12MeV LIA

	10MeV LIA	12MeV LIA
energy/MeV	10.3	12.1
beam/kA	2.1	2.6
pulsewidth/ns	70	89
spot size/mm	4~6	~4

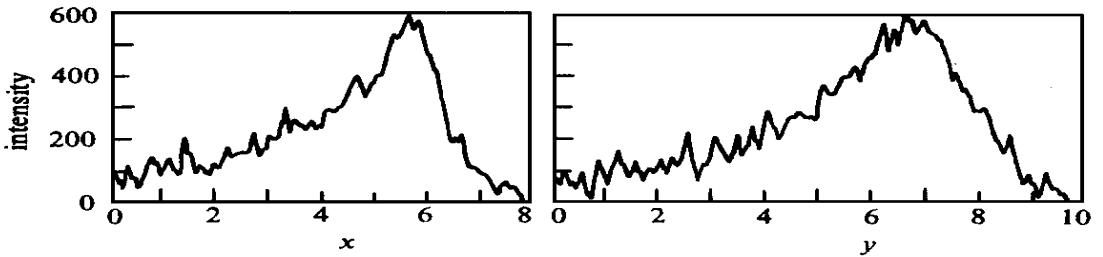


Fig 9 The black intensity curve of the spot size

图9 焦斑黑密度分布曲线

### 3 结论

较之10MeV LIA, 12MeV LIA 整机性能, 无论是稳定性, 还是打靶束的结果, 均有较大提高, 表2列出了10MeV LIA 与12MeV LIA 各项性能指标的对比。

### 参考文献

- 1 Clark C et al UCRL-99202
- 2 No Persond ATA LLL Data (1980)
- 3 Pavlovskii A I Beam s '92, 273
- 4 Kawasaki S Beam s '92, 255
- 5 Kishiro J. IEEE PAC, 1993: 673
- 6 Ph Eyharts IEEE PAC, 1993: 670
- 7 丁伯南 Proc 10MeV LIA, 1994 19
- 8 何毅 Proc 10MeV LIA, 1994 73
- 9 石金水等 强激光与粒子束, 1995, 7(4): 583
- 10 Turner W C. IEEE PAC, 1991: 581
- 11 石金水等 强激光与粒子束, 1996, 8(2): 209

## 12M eV LINEAR INDUCTION ELECTRON ACCELERATOR

Shi Jinshui, Ding Baiman, Deng Jianjun, He Yi,

Li Jin, Dai Guangsen, Wen Long and Cao Guogao

*Southwest Institute of Fluid Physics, P O Box 523-56 Chengdu, 610003*

**ABSTRACT** The 12M eV Linear Induction Accelerator (LIA) comes from promoting beam energy and improving systems of the 10M eV LIA. Promoting beam energy is acquired by the way adding four accelerating cells after the accelerating end of the 10M eV LIA. In improving systems, a renew-designed distribution of transporting magnetic-field and focusing system are more suitable for transporting and focusing electron beams. In this way, and intense electron beam with energy 12M eV, current  $\sim 2.6$  kA, pulse width  $\sim 89$  ns (FWHM) and spot size  $\sim 4$  mm can be obtained at the output end of the 12M eV LIA.

**KEY WORDS** Linear Induction Accelerator (LIA), pulse power, beam transport and focus