

直线感应加速器

程念安

(流体物理研究所 成都 610003)

摘要 本文描述了直线感应加速器(LIA)的原理,组成和特点;综述了国内外的研究动态;概略介绍了CAEP流体物理研究所(IFP)研制的10MeV LIA. LIA的技术特点和主要参数:可产生强脉冲X射线;打靶束流2.1kA,焦斑约4.5mm、距靶1m处射线照射量约为 $2.3 \times 10^{-2} \text{c/kg}$;该机前段(3.3MeV)可与整机脱开、平移后与摇摆器(wiggler)对接,用于自由电子激光研究.对10MeV LIA的关键技术研究和新的研究计划也作了描述.

关键词 直线感应加速器, 注入器, 束亮度.

1 前言

直线感应加速器(Linear Induction Accelerator)产生于60年代初,它是利用电磁感应原理、在加速腔的间隙中产生一个加速电压,采用积木式单元结构、把相同的 N 个加速腔直线排列,当电子通过时被逐级加速,轨迹为一直线.可加速电子、也可加速离子,束流从kA到几十kA,能量可从几百keV到上百MeV.与高电压脉冲型二极管加速器相比,它具有较好的束品质、而不需苛刻的高电压绝缘要求,而且容易实现高重复频率工作,具有高脉冲功率和高平均功率的特点.近十年来,直线感应加速器得到了较快的发展.70年代美国研制了ETA、ATA^[1],着重用于电子束大气传输研究,后又用于LIA-FEL研究;劳伦斯利佛莫尔实验室为了核武器研制的需要,80年代初研制成一台20MeV的LIA(FXR)^[2],用来产生强脉冲X射线进行外轰X光照相;近来洛斯阿拉莫斯实验室又化巨资研制2台20MeV的LIA(DARHT)^[3],希望赶在核禁试前能投入运行,用于外轰X光照相实验,起到“替代”核试验的作用.国际物理公司为了高功率微波研究的需要,研制了一台紧凑的能高重复率工作的直线感应加速器(CLIA)^[4],它与微波器件配合、就成了可运载的高功率微波武器. LIA在自由电子激光和轻离子聚变等领域也有重要应用.在民用开发中, LIA早已引起了

有关方面的关注.使各国科学家对LIA研制有浓厚兴趣.

根据高技术中自由电子激光(FEL)研究和内外动力学研究中闪光X射线照相的需要,CAEP-IFP于1991年建成了我国第一台LIA(3.3MeV),用于曙光-1自由电子激光(SG-FEL)研究,进行了自发辐射放大试验,此后又进行了FEL常参数和变参数放大器实验,均达到亚洲领先水平.在3.3MeV的基础上,1992年又建成10MeV LIA,用作产生强脉冲X射线源,可对内外动力学等快速过程做脉冲X光摄影,在流体动力学研究中发挥了很大的作用.这项工作得到由全国十三位同行专家组成的鉴定委员会的充分肯定.鉴定认为:“10MeV LIA系统复杂,技术难度大,在美俄等国资料和技术保密条件下,发扬自力更生、艰苦奋斗精神,采用国产材料和器材高质量地设计和研制成功10MeV LIA,成为我国第一台强流电子直线感加速器,也是亚洲最大一台,标志着我国在这领域的重进展.”当前,流体物理所的科技人员制订了新的研究计划,向着更高更新的目标努力.

2 LIA的工作原理

LIA的工作原理如图1所示,调制器实际上是整套脉冲功率系统,能在负载上产生数百kV的脉冲电压,引起磁蕊中磁通量变化,导致次级线圈间隙中产生一个感应脉冲电压 u .由图可见,一个加速腔就是一个1:1

的脉冲变压器. 当电子通过间隙时被加速获得能量 $\Delta E = eu$, 如果把 N 个腔直线排列, 电子逐级通过后获得能量 $E = Neu$. 电子除在间隙中加速外, 从一个间隙到下一间隙是在真空管道中匀速前进的, 通常称为漂移, 真空管道叫漂移管. 由于空间电荷作用、束位置偏离及尾场效应等影响, 电子束在加速、漂移过程中要向外不对称扩散、最后碰壁导致束崩溃(BBU). 为使电子束在加速器中从头至尾不碰壁, 尽量减少损失, 必须用轴向磁场来约束, 在漂移管外面都装有螺旋管线圈. 为及时检查和调整电子束心的位置, 在相应位置还设置了束心位置监测器和位置调整线圈.

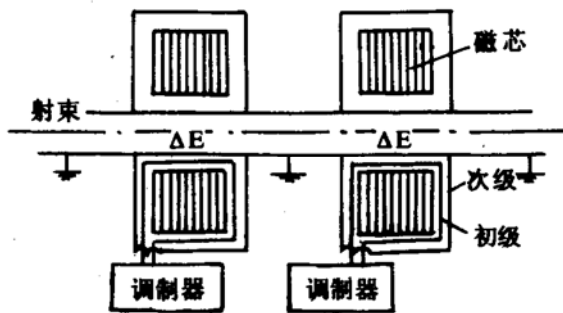


图 1 磁芯型直线感应加速器的调制器激励的示意图

由上可见, 一台 LIA 主要有电子束源(注入器)、加速腔、调制器(脉冲功率系统)和束运输系统组成. 由于 LIA 的束流通常都在 kA 以上, 空间电荷效应很严重, 在研制过程中, 高亮度强流束的产生、脉冲功率系统的同步、强流束的运输和聚焦等就更显得困难和复杂, 虽然至今在理论上技术上都有很大的进展, 仍有很多课题有待探索.

3 10MeV LIA 概况

(CAEP-IFP)研制的 10MeV LIA 由注入器、加速段、脉冲功率系统、束运输和聚焦系统、控制和监测系统组成, 还配备有真空、绝缘油、去离子水和绝缘气等辅助系统.

加速器的前四个组元和二极管组成 1MeV 注入器, 可提供 3kA 电子束进入加速

段. 加速段分 7 组, 每组有 4 个组元, 组与组间跨接桥接线圈, 以保证轴向输运磁场连续性. 另外, 还装有束心位置监测和束流测试装置、束位置调整线圈等. 束输运管道全长约 20m, 共配置 45 个螺旋管线圈, 确保能使 90% 的束流输运到末端. 从加速器出口到靶室约有 4m, 布有 5 个螺旋管线圈和二一个带铁壳的聚焦磁透镜, 使束聚焦到 0.03cm 厚的钽靶上, 产生韧致辐射.

该加速器采用 BITBUS 总线, 四台微机联网的控制监测系统, 取得了满意的结果.

包括注放器在内的前 12 个组元(组成 3.3MeV LIA), 装在可平移的机架上, 便于平移后与 Wiggler 对接组成曙光 1 号自由电子激光装置, 用于 LIA-FEL 实验研究. 平时与后 20 个组元串接成 10MeV 机, 用于外轰 X 光照像实验. 运行二年来, 该机稳定可靠, 时间控制精度在 0.1 μ s 以内. 已在流体力学实验研究中发挥了重要作用.

4 10MeV LIA 的关键技术研究

4.1 研制铁氧体大环

磁芯是 LIA 的关键元件, 大都采用铁氧体, 对它的技术要求是: 磁密振幅 ΔB 要大, 以获得高的伏-秒值; 增量导磁率 μ_{Δ} 要大, 以得到高的能量传输效率; 矫顽力 H_c 要小, 便于复位; 电阻率 ρ 大, 绝缘强度高. 当时国内没有这种元件, 国外又不准向我们出口, 只能自行研制, 与兄弟单位协作, 从配方、工艺等各方面进行了探讨, 建立了全 R 寸样品的脉冲 ΔB - ΔH 特性测试装置, 确立了评估指标和方法. 经反复研究试制, 实现了批量生产, 性能指标达到:

外径 $\varphi_o = 508\text{mm}$ 饱和磁密 $B_s \geq 0.4\text{T}$

内径 $\varphi_i = 254\text{mm}$ ($H = 800\text{A/m}$ 时)

厚 $\delta = 25\text{mm}$ 剩余磁密 $B_r \approx 0.3\text{T}$

电阻率 $\rho = 3 \times 10^6 \Omega\text{-cm}$ 增量导磁率 $\mu_{\Delta} \geq 400$

这些指标与日本 TDK-PE11 铁氧体大环相比毫不逊色.

4.2 研制加速组元

加速组元是 LIA 的基本单元,其结构与组成如图 2 所示. 每个组元的加速腔中有 14 块铁氧体, 在加速间隙上的加速电压为

$$U_a = \frac{\Delta B \cdot S}{t} \times 10^{-4} \quad (1)$$

式中, $\Delta B(\tau)$ 是铁氧体中磁密变化, $S(\text{cm}^2)$ 是铁氧体的截面积, $t(\text{s})$ 是脉冲宽度. 在参量合适情况下, 铁氧体大环中的磁密变化 ΔB 是:

$$2B_s \geq \Delta B \geq B_r + B_s \quad (2)$$

为确保加速腔在 400kV 高压脉冲下各部位不产生放电或击穿, 对腔体各部位电场分布做了数值模拟计算, 并用均压环、大圆弧连接等措施把最大电场降到 120kV/cm 以下.

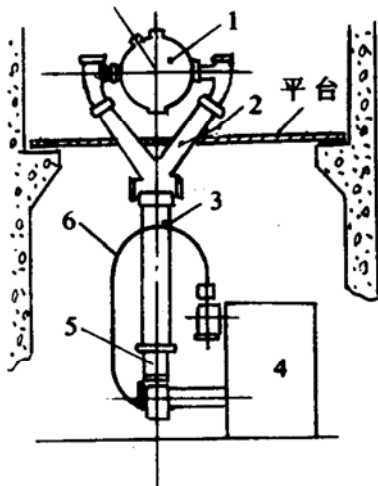


图 2a 加速组元示意图

- 1 加速腔 2 馈线 3 blumlein 线
- 4 Marx 发生器 5 开关 6 触发电缆

在设计束半径 R_b 和管半径 R_p 时, 为了避免形成虚阴极, 当 $R_b \leq \frac{1}{2} R_p$ 时束流 I_b 必须小于空间电荷限制电流 $I_L(\text{kA})$, 即

$$I_b < I_L = \frac{17(\gamma^{2/3} - 1)^{1/2}}{1 + 2 \ln \frac{R_p}{R_b}} \quad (3)$$

利用旁轴近似和线性空间电荷力假设, 轴向磁场 B_z 与束半径 R_b 应满足

$$10B_z R_b \approx (1.36I_b/\gamma)^{1/2} \quad (4)$$

为了克服加速间隙引起的像移不稳定性, 磁

场还须满足

$$10B_z R_b \geq (1.36I_b \gamma \omega / L)^{1/2} \quad (5)$$

式中, γ 为相对论因子, $\omega(\text{cm})$ 为加速间隙宽, $L(\text{cm})$ 为两加速间隙间距.

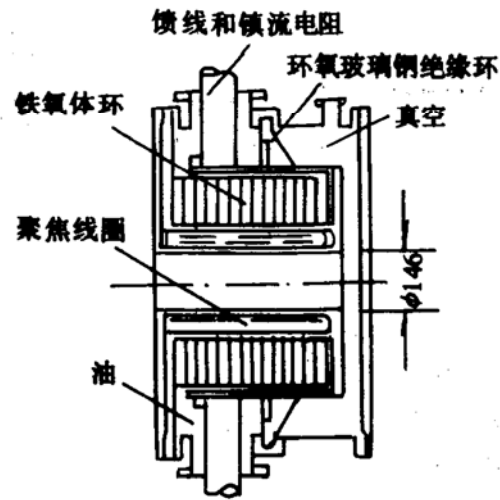


图 2b 加速腔剖面图

实验证实加速腔体在 350kV 和脉宽 100ns 时没有击穿等异常情况; 当高于 350kV 时, 脉宽变窄, 说明铁氧体已饱和, 和计算预估符合得很好.

4.3 注入器研制

注入器(又叫电子枪)是加速器的电子源, 10MeV LIA 要求注入器电压 1MV、束流 3kA, 半径 2cm. 它的组成如图 3 所示, 四个加速腔被一根阴极杆贯穿, 每个腔提供 250kV 脉冲电压, 在二极管的阴-阳极间隙上有 1MV 电压, 导致冷场场致等离子体发射. 数值模拟和实验证实, 采用二极管结构较为理想, 阴极发射体用 $\Phi 60$ 天鹅绒, 阳极接地, 阳极孔 $\Phi 40$, 用 0.03mm 厚的钨网复盖, 钨网透光率为 90%, 钨网后是孔径 $\Phi 40$ 的铝准直器, 经 3cm 后逐步过渡到 $\Phi 146$ 束管道. 束穿过钨网在长约 70cm 的漂移管中受到磁场调制后进入加速段. 线圈 S_1 用来产生反向磁场, 确保阴极发射面处的磁场为零, 满足布里渊条件. 这种二极管体积小、结构简单便于更换, 与国外资料报道的都不一样, 与 EXR 的相比 R 寸小三分之一, 重量只有 1/4~1/3,

但束亮度比它好. 采用真实电压波形对二极管进行模拟计算, 考虑了阴极材料和阴极等

离子体运动的影响等, 计算与实验结果符合得相当好.

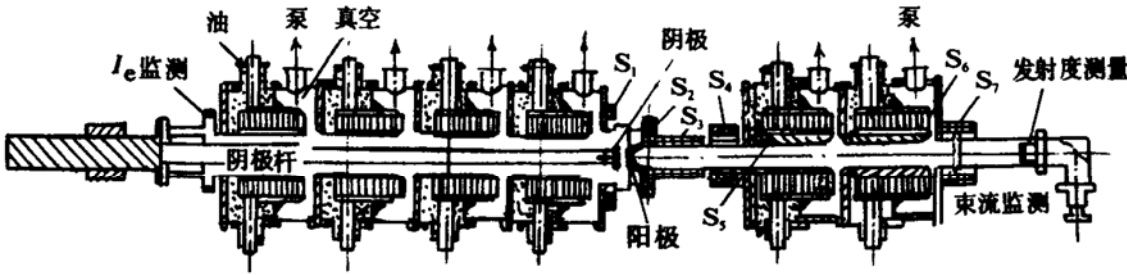


图 3 注入器主体示意图

采用“胡椒筒”法和磁准直器对束亮度测量, 这种注入器的束亮度达 $2.4 \times 10^4 \text{ A}/(\text{cm} \cdot \text{rad})^2$, 比理论计算值低, 这是由于测试方法中因时间积分和能量积分的影响. 当采用准直孔对束准直后, 可除去大部分低能束, 使束脉冲变窄、束流减小但束亮度却提高了, 这是降低时间和能量积分影响后, 使束亮度趋于“真值”的结果. 当准直孔径为 2cm 时, 获得束流 1kA, 束亮度达 $10^5 \text{ A}/(\text{cm} \cdot \text{rad})^2$.

4.4 脉冲功率系统研究

脉冲功率系统是 LIA 的能源. 10MeV LIA 共用了五台 Marx 发生器, 每台分别为 6~7 根 Blumlein 线充电, 每根“B”线为每一个加速组元提供脉冲高压. 为了实现加速腔上的电压脉冲与电子束达到该腔的时间同步, 模拟计算认为每根“B”线主开关动作时间的抖动必须在 3ns 以内, 为克服这一难题, 选择了场畸变开关为主攻方向, 通过数值计算和实验研究, 获得了一整套运行可靠的数据资料; 对开关触发信号采用了三级放大辐射式线路, 即一路触发信号使第一级开关动作, 带动五路输出去触发五个第二级开关, 每个二级开关又输出 6~7 信号分别去触发每根“B”线的主开关. 通过不同长度电缆的配置和调节各开关绝缘气体 ($\text{N}_2 - 80\%$, $\text{SF}_6 - 20\%$) 压力, 确保开关同步. 大量实验表明, 时间抖动能控制在 2ns 以内.

4.5 束输运和聚焦研究

因空间电荷、TM 模存在、磁场波动及束

心与磁轴及几何轴失配等原因, 总有束心横向运动和螺旋运动, 导致束流损失和束品质下降, 严重的会造成束崩溃 (BBU). 束输运系统功能就是避免和克服各种效应的影响, 使束流和束亮度损失尽可能小. 10MeV LIA 的束输运系统已如前述; 它是大量模拟计算和分析研究的结果, 其中包括如下主要结果:

1) 初始大半径束在比初始 Betatron 波长短的距离内迅速减小, 而束的发射度增长很小.

2) 利用平衡束包络方程可决定不同能量时束半径与轴向磁场大小的关系, 即束半径 R_b 应满足方程

$$K_B R_b - K_s / R_b - \epsilon / R_b^3 = 0 \quad (6)$$

ϵ 为均方根发射度, $K_B = (eB_z / 2\beta\gamma mc^2)^2$, $K_s = 2I_b / \beta^2 \gamma^3 I_0$. B_z 为轴向磁场; γ 为相对论因子; I_0 为阿尔芬电流. 对 10MeV LIA 来说 $R_b \approx 1$ 时最大 $B_z \approx 0.14(\text{T})$, 设计时, 螺旋管最大磁场可达 0.2(T).

3) 对加速间隙处磁场波动分析认为: 波动要引起发射度增加, 在低能区尤为明显.

4) 在调试中注意了线圈引线走向; 使磁轴与地磁轴一致, 尽量减小横磁场; 做好磁轴与几何轴对中准直; 研制了 500A 高稳定度低波纹的线圈直流电源等. 另外, 还配置了 10 组束流位置监测器和束心位置调整用的余弦线圈, 这些措施保证了束的输运.

5) 束输运调试中, 束心螺旋模运动是调

试的主要困难,特别是对聚焦来说.在大量理论计算和实验探索后,已初步掌握了控制束心螺旋模运动的规律.这样束在20m的漂移加速过程中,束流损失在10%以内,与国外水平不相上下.

分析了空间电荷、束发射度、束能散度和透镜的像差等对束聚焦的影响,并作了理论估算,结果显示:10MeV LIA的发射度和能散度是限制聚焦的主要因素,估算焦斑约在4~5mm,从X光针孔照相和打靶烧蚀孔的痕迹分析,焦斑大小与理论分析基本一致.

5 新的研究计划

LIA有着广泛的应用前景,它正朝着高亮度、高重复率和轻小型方向发展.流体物理所已制订了新的研究计划.近期内在10MeV LIA研制基础上,把束亮度提高1个量级;研制出能散度小于1%的LIA;改进束运输系统,努力避免和减小高频TM模对束的影响;不久将研制一台全新的LIA,主要指标是18

~20MeV,3kA束流,焦斑~2mm.

在研制10MeV LIA同时,一台小能量3kHz脉冲功率源已交付使用,现已进入高重复率LIA的研制阶段,一台紧凑的小型多用途CLIA也正与有关单位协作共同研制.

借此机会向全国的兄弟单位、专家致谢!感谢他们在10MeV LIA研制期间给予的帮助和支持.

参 考 文 献

- 1 Hester R E, et al. The Experiment Test Accelerator (ETA). Proceeding of Particle Accelerator Conference. San Francisco. March 12~14 1979
- 2 High-Explosive Flash Radiography Facility (FXR) Project No. 78~16C MISC-2806. May, 1979
- 3 Burns M, et al. Technology Demonstration for the DARHT Linear Induction Accelerator, 9th International Conference on High power particle Beams Washington. DC. May 25~29. 1992, P. 283.
- 4 Ashby S R, et al. CLIA-A Compact Linear Induction Accelerator System. 同[3], P. 1855.

Linear Induction Accelerator

Cheng Nianan

(Institute of Fluid Physics, Chengdu 610003)

Abstract The basic principle, construction and characteristics of the LIA, together with a summary of the recent developments and achievements in the scientific field both at home and abroad are presented in this paper. A 10MeV LIA has been developed at IFP, CAEP for flash X-ray radiography application. A 2.4kA, 70ns electron beam can be transported through the accelerator, while 2.1kA is focused onto the target (Ta) With about 4mm spot to produce intensive pulsed X-ray. The dosage is 3×10^{-2} C/kg at 1 meter from target. The front section (3.3MeV) of the machine was specially designed so that it may be separated from the mainbody and translated to be aligned and jointed with a wiggler for FEL experiments. The key technical developments of the 10MeV LIA and new research programs at CAEP are briefly introduced.

Key Words Linear Induction Accelerator (LIA), injector, beam brightness.