

小型低能加速器的开发应用

崔山 张兴治 周文振
(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 本文简介了中国原子能科学研究院研制开发的几台小型低能加速器的性能、结构特点、主要应用和研制进展。
关键词 脉冲中子发生器, 回旋加速器, 高频单腔电子辐照加速器, 驻波电子直线加速器, 离子源, 电子枪.

1 引言

继 HI-13 串列静电加速器投入运行后, 面临向国民经济主战场转移的要求, 中国原子能科学研究院的加速器科研, 向两个方向发展. 其一是开展自由电子激光和准分子激光研究. 其二是为适应科研和国民经济应用要求, 开发小型低能加速器. 为此研制开发了 600kV ns 脉冲中子发生器、Cyclone-30 型回旋加速器、RSA-1 型高频单腔电子辐照加速器和 Raphytron 电子直线探伤加速器. 本文将简要介绍这些加速器的性能、结构特点和应用前景.

2 600kV ns 脉冲中子发生器

为适应核工程和核能研究对高精度 14MeV 中子核参数测量和中子、 γ 计量标准研究的需要, 研制了一台 600kV 毫微秒脉冲中子发生器.

加速器平面布置示于图 1. 高压电源由一台 6 级对称 Cockcroft-Walton 线路组成, 用 40kW 和 2.5kHz 中频逆变器供电, 整体放在充油的绝缘筒内, 空载最大电压 600kV, 工作电压 200~550kV, 满载电流 15mA, 电压稳定性和纹波好于 0.1%.

加速器主体卧式安装, 高压电极内放置离子源、单透镜、90°分析磁铁、脉冲切割器、450 l/s 分子泵机组及它们的电源. 由一台 10kVA 的中频隔离变压器供电.

加速器配备两种离子源, 其一为改进性型 Moak 源, 引出束流 3mA, 提供脉冲束. 另一种为双等源, 引出 10mA, 提供直流束. 源引出束流被间隙透镜加速到 30keV, 经 90°双聚焦分析磁铁

选出原子粒子, 送入加速管. 脉冲工作时, 由单透镜出来的 30keV 束流, 被 $40 \times 40\text{mm}^2$ 和间隙 30mm 的双谐波切割器切成脉宽 40~50ns 的脉冲束, 选束孔放在分析磁铁后束腰, 孔径 6mm.

加速管为均匀场型, 有效长度 1.6m, 内孔径 65mm. 为实现不同能量聚焦匹配, 加速管入口前六节接成三膜片单透镜.

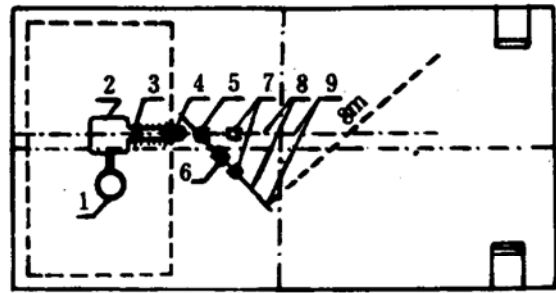


图 1 600kV ns 脉冲中子发生器平面布置图. 1. 高压发生器 2. 高压电极 3. 加速管 4. 三通和真空系统 5. 偏转磁铁 6. 聚束器 7. 四极磁透镜 8. 漂移管 9. 靶

加速管后 1.06m 处安装一台 45°双聚焦偏转磁铁, 有两条束流管线引出. 直流线流强 3~5mA 提供计量标准研究、中子活化截面与激发曲线测量及质子与中子辐照实验. 45°管线为脉冲束流线, 在磁铁后束腰设置双间隙单漂移速调管聚束器, 聚束筒直径 30mm, 聚束间隙 6mm, 聚束功率由一台 6kW、6MHz 的高频机提供. 聚束后, 经 2.5m 漂移空间, 在靶上获得脉宽小于 1.5ns, 重复频率 1.5MHz, 平均流强 30~50 μA 的脉冲束. 脉冲工作典型能量选 300keV, 提供中子飞行谱仪测量微分、双微分和积分截面等实验.

该器采用微机控制,并保留手控. 预计 1994 年完成该项目.

3 Cyclone-30 型回旋加速器

Cyclone-30 型回旋加速器是由原子能院与比利时 IBA 公司合作建造的生产放射性同位素的专用加速器. 这是一台固定磁场, 固定频率的机器, 可把 H^- 离子加速到 30MeV, 通过改变剥离箔的径向位置, 引出能量可以在 15~30MeV 调节. 可同时引出不同能量的两束束流, 流强达到 $350\mu A$. 图 2 为 Cyclone-30 型回旋加速器结构图.

主磁铁由扇角 $54^\circ\sim 58^\circ$ 的四个扇形磁极构

成, 设计结合了紧凑型和分离扇形回旋加速器两者的优点, 具有峰间隙小、垂直聚焦强、D 盒电容小、磁极完全对称、真空室简单、中心区磁场均匀、允许较低注入能量和不需校准线圈等特点, 等时场靠采用适当磁极形状和调整扇形磁极侧边镶条来建立. 峰场 1.7T, 谷场 0.12T, 磁铁总重 45t. 磁铁供电功率只有 7kW. 磁场测量结果表明: 等时场相对高频相移小于 $\pm 10^\circ$, 一次谐波小于 5×10^{-4} .

高频加速电极(D)型盒是由上下垂直插入谷区的 $1/4$ 共振线构成, D 电极角度 30° , 工作在粒子回旋频率的 4 次谐波上, 工作频率 65.5 MHz, 两 D 盒在中心面下面的中心点相接. D 盒

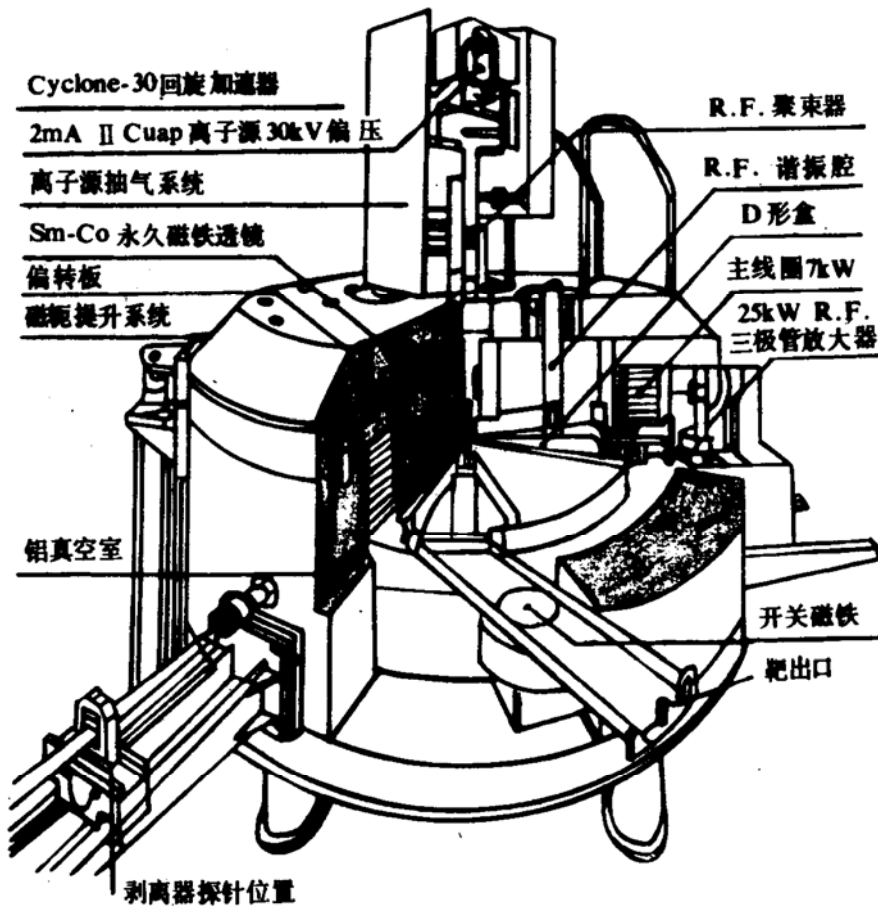


图 2 Cyclone-30 回旋加速器总体结构图

加上 50kV 加速电压,每个腔体 RF 功率 5.5kW, 20kW 功率用于束流加速,末级高频功率放大器是零偏压栅极接地电路,放在磁铁附近,通过电容与腔体耦合,具有良好的稳定性.

放在磁铁上面的离子源采用“Multicusp”弧放电负氢离子源,引出束流 3~4mA,加速到 30kV,通过包括 Einzell 透镜,高频聚焦束和在机器内的“Glass”透镜组成的轴向注入系统引入机器,通过中心区准柱形偏转板将束流送入加速器中心平面.负氢离子源在加速器外部有独立的抽气系统.

加速到要求能量的 H⁻ 离子通过相对中心对称放置的碳箔剥离掉电子,变成正离子(质子)经边缘磁场引出,剥离箔的更换是完全自动化的.生产同位素的靶是完整的自动化生产系统,靶的装卸、更换和转运全部自动化进行.

该器采用西门子公司“SIMATIC”工业程序控制机实现全自动化控制.在无人操作情况下可连续生产同位素.

这台器放在该院国家同位素工程技术中心,用于生产核医学应用的短寿命同位素,如 ¹¹C、¹³N、¹⁵O、¹⁸F、⁶⁷Ga、¹¹¹In、¹²³I、²⁰¹Tl 和工业同位素 ⁵⁷Co. 该中心还将配备 PET 正电子发射断层扫描照像机,建成我国第一个 PET 中心.

该器主机和有关辅助设备由该院再设计、加工安装调试,部分设备从国外进口,目前加速器已安装完,预计 1994 年中投入使用.

4 RSA-1 型高频单腔电子辐照加速器

RSA-1 型高频单腔电子辐照加速器,是基于高频谐振腔加速原理,设计用于电子束辐射加工生产线.该器设计电子束能量 1.0~2.0 MeV,在整个能区内,电子束平均功率不小于 20kW.具有能量和束功率适中,体积小结构紧凑,操作维护方便,没有高压型加速器高气压绝缘和易产生高压击穿放电,损坏绝缘柱和加速管等薄弱环节,可配备线性、双面、三向或四向束流扫描器,尽可能高效适应各种产品辐射加工要求等特点. RSA-1 结构原理示于图 3.

由无氧铜做的准环型谐振腔由相互对插的两个同轴半腔组成,安装在直径 1.2m,高 1.2m 的不锈钢真空室内.谐振腔两个圆柱形电极构成加速间隙.电子枪安装在上电极内,栅极与上电极同电位且接地,阴极与栅极通过绝缘子隔离.谐振腔的下电极即是电子枪阳极,这样就构成三极管加速系统,加速电子流强可通过改变相对于栅极的阴极正偏压来调节.下半腔靠三个绝缘子支撑且与地隔离.为防止放电和消除加速间隙中的离子,在下半腔上加上 6~9kV 直流负偏压.上下两半腔对插部分外筒边缘形成的电容将高频电流短路.在下半腔圆柱电极内装有聚焦磁透镜,它将加速的电子束会聚成束,通过加速器孔道,送入束流扫描器.

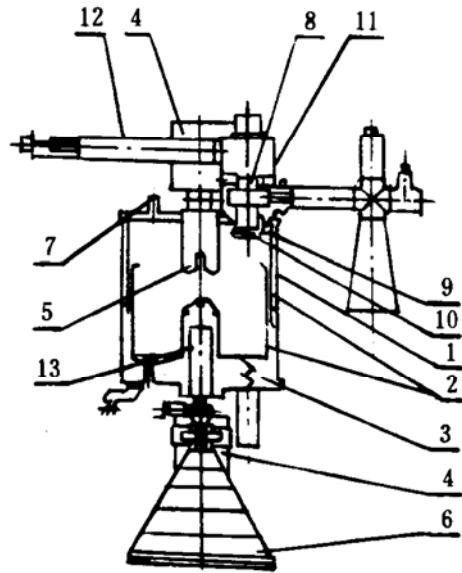


图 3 RSA-1 加速器结构原理图. 1. 真空室 2. 谐振腔 3. 电感 4. 钛泵 5. 电子枪 6. 扫描盒 7. 探针 8. 振荡管 9. 耦合电感 10. 隔直电容 11. 反馈电容 12. 阴极回路

高频发生器装在真空室上法兰.与加速谐振腔通过耦合电感相连接.高频发生器是由 GI-50A 型振荡三极管构成的栅极接地式自激振荡器.工作频率为 116.8MHz.振荡器的反馈与调谐,通过改变振荡管阳极与阴极间电容和阴极谐振回路短路环来实现.发生器阳极电路由加

速谐振腔和耦合电路构成。

振荡管阳极电压由高压脉冲调制器供给。调制器由储能电感、可控硅触发器、脉冲成形线、饱和电感和脉冲变压器构成。可产生脉宽 0.4~0.7ms、重复频率 2~50Hz、电流 100~150A 和电压 30kV 高压脉冲。

加速器真空室高真空由 3 台 250 l/s 冷阴极溅射离子泵维持,工作时另起动一台 450 l/s 分子泵机组。静真空 5×10^{-6} Pa,工作真空好于 1×10^{-4} Pa。

加速器引出束流经场强为 0.035~0.04T 交变磁场扫成宽 980mm 的长条形束,通过 50 μ m 钛箔引到大气中辐照样品。

加速器各部分控制、测量及连锁保护都集中在控制台,通过遥控实施整机控制。第一台 RSA-1 加速器已售出,正在用户现场调试。

5 驻波型电子直线加速器探伤机

用射线照像的办法对大、厚金属或非金属材料中缺陷的无损检测技术,是重型机械、冶金工业、化工压力容器、巨型锅炉及国防军工系统

中不可缺少的检测手段。加速器产生的 X 射线能量高、穿透力强、输出剂量大、焦点小和相对灵敏度高,比其它探伤手段有明显的优势。在加速器探伤机中尤以驻波型电子直线加速器更占统治地位。图 4 为该院开发的驻波型电子直线探伤机结构方块图,简称 Raphytron。该装置具有下列特点:

1)磁控管为加速器的微波功率源,输出 2MW 脉冲功率,微波功率经传输系统进入加速管,在加速管内建立微波电磁场。

2)来自电子枪的电子束经加速管中的微波电磁场获得能量,束团完成聚束加速后轰击靶子,在钨靶上产生高能 X 射线,X 射线经准直锥后穿透被测件再打在 X 胶片上,由 X 胶片测知被检测件有无损伤。

3)为保证加速器的正常稳定运行,除对加速器采取恒温外,钨靶、负载和磁控管采用水冷措施,用自动频率控制系统调节因周围环境温度变化及功率源波动等因素造成的频率变化。

4)用三相交流电整流,由充电电感对脉冲形成线谐振充电,用闸流管控制放电,形成矩形

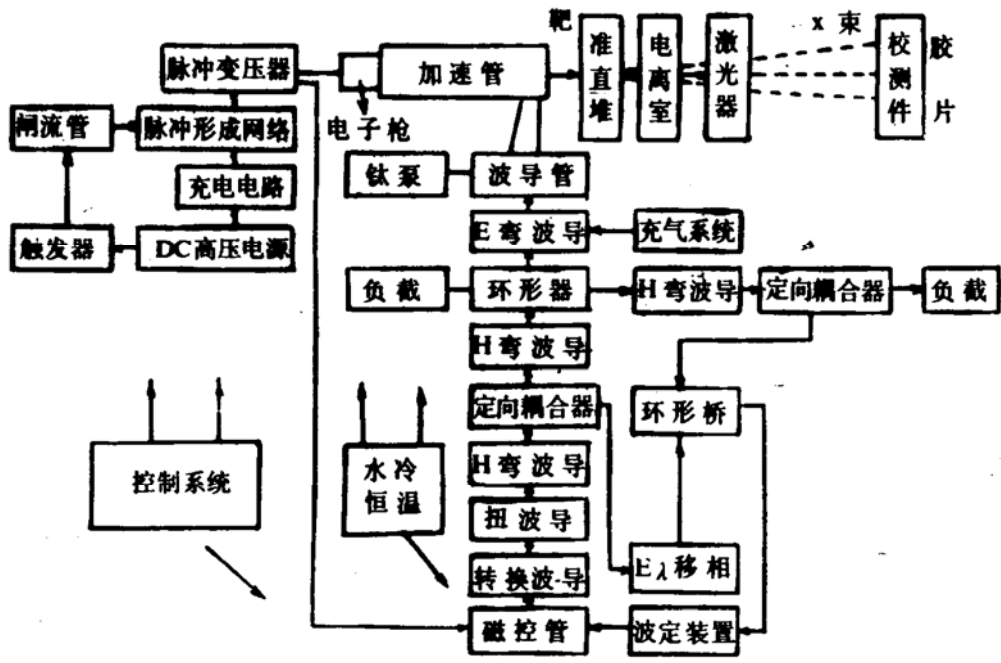


图 4 Raphytron 电子直线探伤加速器结构方块图

脉冲,经脉冲变压器升压后,分两路供给电子枪和磁控管.

5)为保证人身安全和设备安全运行,主控制器采用电子学线路与继电器的逻辑控制线路.主控采用分级管理.控制器面板设置“待机”、“启动”、“出束”、“中断”和“急停”纽,累计剂量与剂量率用双重剂量仪指示以保证可靠工作,同时系统有连锁、保护装置.

该院于 1987 年开始研制 4MeV 驻波电子直线加速器探伤机,在清华大学、机电部 12 所和自动化所协助下,于 1989 年 3 月研制成功.通过鉴定并获中核总科技进步二等奖.已先后为兰州石化机械厂和武汉锅炉厂研制出 3MeV 和 4MeV 探伤机,整机性能达到美国 Varian 公司同类产品水平.其性能及与国外同类机比较列于表 1.

表 1 4MeV 探伤加速器性能比较

	Varian(美瓦里昂)	原子能研究院	Mitsubishi(日三菱)
型 号	Linatron 400	Raphytron 4	ML-5R II
能 量	4MeV	4MeV	4MeV
剂 量 率	400R/min-m	350R/min-m	240R/min-m
束斑大小	2mm	2mm	1mm
准直锥角	22.5°	22.5°	17°
钢半值层	25mm	25.3mm	/
不对称性	±5%(±7.5°处)	±5%(±7.5°处)	/
均 匀 度	>70%(±7.5°处)	>71%(±7.5°处)	/
漏 剂 量	0.1%	0.1%	>0.3%
探伤灵敏度	1%	1%	(1~2)%
加速结构	驻波(自聚焦)	驻波(自聚焦)	行波(外聚焦)
磁 控 管	2MW/2kW	2MW/2kW	2MW/2kW

Developments of Small Types of Low Energy Accelerators and Their Applications

Cui shan Zhang Xingzhi Zhou Wenzhen

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

Abstract The brief description of some small types of low energy accelerators developed in China Institute of Atomic Energy are given, with the emphasis on their specifications, distinguishing features of construction and applications. Developing aspects are also presented.

Key Words puls neutron generator, cyclotron, R. F. single cavity electron radiation accelerator, standing wave linac, ion source, electron gun.