

**CNIC-01610**  
**IAE -0202**

**CIAE 600 kV ns 脉冲中子发生器论文集**  
**SYMPOSIUM ON CIAE 600 kV ns PULSE**  
**NEUTRON GENERATOR**

沈冠仁 等著

**中国核情报中心**  
China Nuclear Information Centre

# 前 言

CIAE 600 kV ns 脉冲中子发生器是中核集团公司批准和组织建造的重要设备，主要用于 14 MeV 中子引起的核反应实验研究工作，特别是次级中子及带电粒子能谱实验测量和评价中子核数据库的宏观检验实验、中子和  $\gamma$  射线计量学等研究工作。它是目前依靠国内技术力量建成的第一台强流 ns 脉冲中子发生器，也是国际上用于 14 MeV 中子引起的核反应实验研究工作的第四台同类设备。

本报告文集包含六篇论文，主要目的是全面介绍 CIAE 600 kV ns 脉冲中子发生器的总体结构及其主要应用，高频离子源、强流 ns 脉冲化装置、初聚系统等几个重要部件的研制工作中解决的主要技术问题，及在发生器调试工作中应注意的问题、经验教训和体会，供以后工作参考。

总结以往的工作，各级领导的支持和帮助，认真分析和坚持正确的研制工作方向，坚持质量第一，根据实际需要不断地探索创新，尽量采用先进技术，多方听取专家意见，博采众长，是克服各种困难并取得成功的基本经验。本文集中有些技术问题在我的同行中持有不同的见解，这是科研工作中的正常现象。欢迎来自各方面的批评指正，以便进一步完善和改进工作。

CIAE 600 kV ns 脉冲中子发生器还有一些工作需进一步改进、完善，愿后任者更好地完成这个工作。

沈冠仁

2001 年 11 月 5 日

# PREFACE

CIAE 600 kV ns Pulse Neutron Generator was built by China National Nuclear Corporation, which is an important facility mainly used for experimental researches of nuclear reactions induced by 14 MeV neutrons, experimental measurements of energy spectra of secondary neutrons and charged particles and macro-checking experiments of evaluated neutron database and dosimetry researches of neutrons and  $\gamma$  rays. It is the first home made one, but the fourth similar facility in the world.

Six articles are included in this symposium. The articles details the general structure, radio frequency ion source, high current beam ns pulsed system, etc. The main technical problems resolved during development are discussed. And attentions and experiences in the generator adjustments are introduced.

Some of my colleagues have held different views on some technical problems in the articles. This is normal in scientific study and technical development. We hope that our readers and colleagues will not spare their comments in order to improve our work.

SHEN Guanren

2001.11.05

# 目 录

<b>CIAE 600 kV ns 脉冲中子发生器介绍</b> .....	(1)
1 CPNG 的总体结构和特点 .....	(1)
1.1 总体结构 .....	(1)
2 CPNG 的特点 .....	(5)
3 脉冲束主要技术性能的测试和结果 .....	(5)
3.1 脉冲束的测试技术 .....	(5)
3.2 脉冲束主要技术性能测试及结果 .....	(6)
4 CPNG 的应用 .....	(7)
4.1 中子物理实验研究工作 .....	(7)
4.2 中子计量学的研究工作 .....	(8)
4.3 作为强中子源应用研究工作 .....	(8)
<b>强流 ns 脉冲化装置的重新研制</b> .....	(9)
1 ns 脉冲束的主要工作原理 .....	(9)
2 ns 脉冲化装置的物理设计 .....	(11)
2.1 脉冲化装置主要设计技术指标 .....	(11)
2 ns 脉冲化装置的物理设计 .....	(11)
2.1 脉冲化装置主要设计技术指标 .....	(11)
2.2 ns 脉冲化装置的技术路线 .....	(11)
2.3 离子束能散的估算 .....	(11)
2.4 影响脉冲化装置技术指标的参量估算 .....	(11)
3 强流 ns 脉冲化装置的研制 .....	(12)
3.1 切割器的研制工作 .....	(12)
3.2 聚束器的研制工作 .....	(14)
3.3 控制器的研制 .....	(16)
3.4 聚束高压功率电源 .....	(16)
4 脉冲束信号拾取系统 .....	(16)
5 CPNG ns 脉冲化装置主要技术指标 .....	(17)
<b>高频离子源的改进和研制</b> .....	(19)
1 高频离子源的主要结构 .....	(19)
2 关于高频离子源的引出束流强度 .....	(21)
3 关于 RFS 离子源的长期工作稳定性 .....	(22)
4 关于离子源的重复性 .....	(23)

5 结果与讨论 .....	(24)
<b>切割器电压扫描仪的研制 .....</b>	<b>(25)</b>
1 设计要求 .....	(25)
1.1 主要技术指标 .....	(25)
1.2 输出显示系统 .....	(26)
2 线路工作原理 .....	(26)
3 整机工作线路 .....	(26)
4 结果与讨论 .....	(26)
<b>ns 脉冲束的调节和工作状态监视 .....</b>	<b>(28)</b>
1 ns 脉冲束调节的指导思想原则 .....	(28)
2 ns 脉冲束工作状态的显示方法 .....	(28)
2.1 电脉冲信号在示波器上显示 .....	(28)
2.2 中子和 $\gamma$ 射线飞行时间谱在微机多道上的显示 .....	(29)
3 ns 脉冲束工作状态的调节 .....	(29)
3.1 ns 脉冲中子发生器建造阶段进行脉冲束调节的目的 .....	(29)
3.2 ns 脉冲束工作状态的调节 .....	(30)
3.3 调节中的注意事项 .....	(30)
4 ns 脉冲束工作状态的监视系统 .....	(30)
<b>超薄高真空阀门与离子束初聚系统 .....</b>	<b>(33)</b>
1 初聚系统重新设计与加工 .....	(33)
2 超薄高真空阀门重新设计与研制加工 .....	(34)
3 结果与讨论 .....	(35)

# CIAE 600 kV ns 脉冲中子发生器介绍

沈冠仁 关遐令 陈洪涛

(中国原子能科学研究院, 北京, 102413)

**摘要:** 介绍了 CIAE 600 kV ns 脉冲中子发生器 (下面简称 CPNG) 总体结构和特点、主要技术性能及其应用。CPNG 由最高输出电压为 600 kV, 电流 15 mA, 高压稳定性和纹波  $\leq 1\%$  六级对称倍加型高压电源, 2214 mm $\times$ 1604 mm $\times$ 1504 mm 不锈钢板高压电极, 及安装在内的高频离子源、预加速间隙透镜、初聚系统、切割器、磁分析器等构成的头部设备, 均匀场加速管、强流 ns 脉冲化装置、在 0° 和 45° 的漂移管道、无油分子泵真空系统组成。CPNG 的特点: (1)强流; (2) ns 脉冲化装置采用的技术路线是低能切割, 高能聚束; (3)结构简单紧凑。

**关键词:** 强流, ns 脉冲, 中子发生器

强流 ns 脉冲中子发生器是进行高水平 14 MeV 中子核数据测量、评价中子核数据库、数据宏观实验检验研究和中子计量学等中子物理实验研究工作必要的基础设备。20 世纪 70 年代美国在劳伦斯·利弗莫尔实验室, 80 年代在日本原子能所和大坂大学建造了三台这样的机器, 进行了大量的次级中子能谱和评价中子核数据库数据的宏观基准实验研究工作, 为美日两国评价中子数据库数据的更新完善起了重要作用。由于建造强流 ns 脉冲化装置技术上存在难度, 目前还没有见到其他国家建成同样的发生器, 用于中子物理实验研究工作。

随着我国核数据和中子计量学研究工作深入发展, 开展高水平次级中子能谱和评价中子核数据库数据的宏观基准实验检验以及中子计量学研究工作的需要, 建造一台强流 ns 脉冲中子发生器是十分必要和具有重要意义的。

中国原子能科学研究院在缺乏经验的情况下, 克服了各种困难和技术难点, 基本采用国内设备, 在 2000 年底建成了 CIAE 600 kV ns 脉冲中子发生器 (以下简称 CPNG)。已达到的主要技术性能如下: 高压范围: 200~600 kV; 束流强度: 直流分析束  $\geq 1$  mA (高频源); 脉冲束平均流强  $\geq 30$   $\mu$ A; 束斑  $\leq \phi(5\sim 8)$  mm; 重复频率: 1.5 MHz;  $\gamma$  峰半宽度  $\leq 1$  ns, 峰高的 1% 处底宽为小于半宽度的 3 倍; 中子峰半宽度约 1.5 ns (中子探测器厚度为 5 cm), 峰高的 1% 处底宽为小于半宽度的 3 倍; 稳定工作时间:  $\geq 100$  h。

## 1 CPNG 的总体结构和特点

### 1.1 总体结构

总体结构的布局见图 1。它由高压电源、高压电极及头部设备、加速管、强流 ns 脉冲化装置、脉冲束管道、直流束管道、真空系统等组成。

### 1.1.1 高压电源

高压电源为 40 kW SCR，2.5 kHz 中频逆变器供电，六级对称型倍加器整流塔安装在  $\phi 800 \text{ mm} \times 1900 \text{ mm}$  玻璃钢绝缘筒，内充变压器油密封，高压从绝缘筒顶部屏蔽罩引出，最高输出电压为 600 kV，直流电流 15 mA。采用双稳压环高压稳定电路，确保高压稳定性和纹波  $\leq 0.1\%$ 。

### 1.1.2 高压电极及头部设备

高压电极  $2214 \text{ mm} \times 1604 \text{ mm} \times 1504 \text{ mm}$ ，用 2.5 mm 厚的不锈钢板制成。曲率半径  $r = 250 \text{ mm}$ ，表面最大电场强度为 23.4 kV/cm。

发生器的头部设备安装在高压电极内，由高频离子源  $\rightarrow$  预加速间隙透镜  $\rightarrow$  初聚系统和超薄高真空阀门  $\rightarrow$  导向器  $\rightarrow$  450 L 分子泵  $\rightarrow$  切割器  $\rightarrow$  可变光栏 (选束孔 1)  $\rightarrow$  磁分析器  $\rightarrow$  测束仪 (选束孔 2) 组成。高频离子源：放电管为  $\phi 23 \text{ mm} \times 170 \text{ mm}$  高纯度石英玻璃管，用热阀自动控制调节供气，高频振荡器用 FU19 做振荡管，吸极引出孔为  $\phi 2 \text{ mm}$ ，束流引出电压 3~5 kV，引出束流 3~5 mA，质子比  $\geq 70\%$ 。

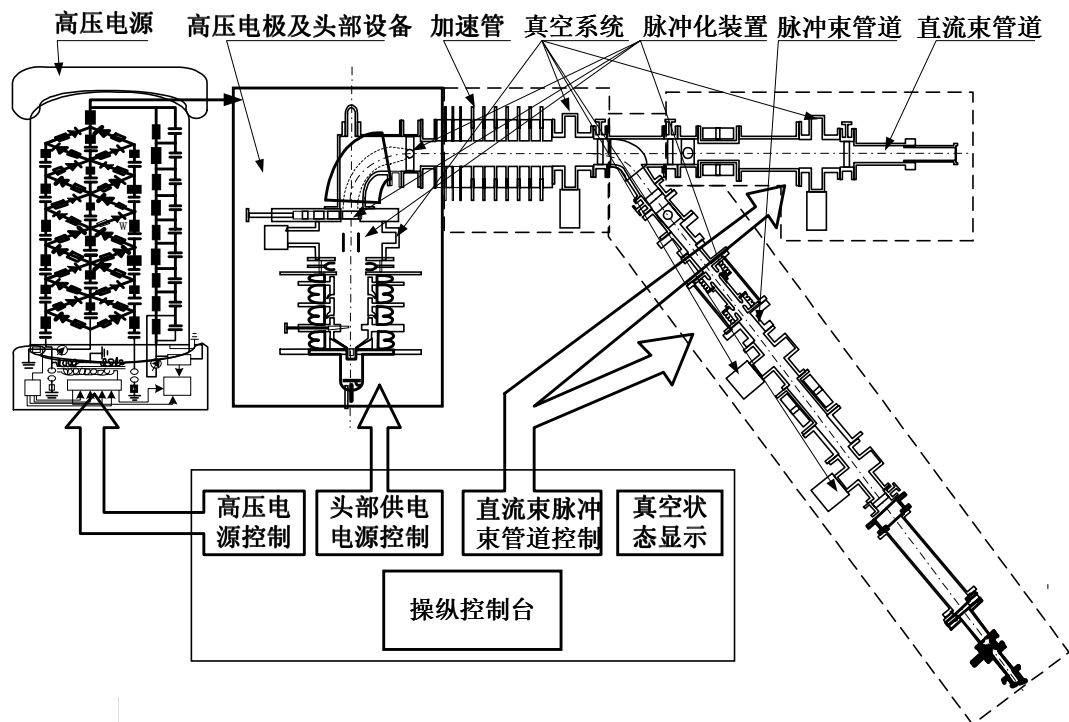


图 1 CIAE 600 kV ns 脉冲中子发生器总体结构示意图

预加速间隙透镜由内径为 $\phi 18\text{ mm}$ 的等径双圆筒透镜，间隙 $3\text{ mm}$ ，焦距为 $85\text{ mm}$ ，用外径 $\phi 180\text{ mm}$ ，内径 $\phi 130\text{ mm}$ ，长 $60\text{ mm}$ 的95陶瓷与初聚系统的第一电极绝缘。其作用是将从离子源引出的离子会聚成束并把离子从引出能量加速到 $30\text{ kV}$ ，满足脉冲化装置切割器的要求。

初聚系统是三圆筒透镜，圆筒内径 $\phi 60\text{ mm}$ ，极间隙 $6\text{ mm}$ 。第一电极与厚 $20\text{ mm}$ 的超薄高真空阀门结合，在更换离子源时阀门关闭，确保加速器的真空度。电极间用外径 $\phi 180\text{ mm}$ ，内径 $\phi 130\text{ mm}$ ，长 $60\text{ mm}$ 的95陶瓷绝缘，并在透镜两端法兰间用拉杆压封。其功能是使离子束聚焦，保证通过透镜的离子束腰位于切割器切割板的中心。

导向器与初聚系统的端法兰和真空泵的三通连接，由上下左右的两组电极组成。其主要功能是确保离子束流从管道的中心漂移通过。

450 L分子泵通过三通管与导向器和光栏连接。切割器切割板安装于三通内靠近导向器的一端。

可变电光栏位于分析磁铁的入口。它的作用是在脉冲束运行时，用 $\phi 15\text{ mm}$ 作选束孔1，确保切割器达到切割要求。在直流束运行时，仅作光栏 $\phi 20\text{ mm}$ 小于分析磁铁入口口径，确保束流打不到分析磁铁上。

磁分析器用对称双聚焦型，入、出倾角 $32.5^\circ$ ，偏转半径 $15\text{ cm}$ ，偏转角度 $90^\circ$ ，磁极间隙 $4\text{ cm}$ ，中心平面最大磁场 $0.2890\text{ T}$ 。供电电源 $20\text{ V}$ ， $20\text{ A}$ ，电流稳定度 $1\times 10^{-4}$ ，磁铁总重 $225\text{ kg}$ 。

测束仪内设置可同轴转动到束流中心线的法拉第筒、选束孔2固定架和空架组成，中心位于磁分析器出口焦点上。用于测量分析束流强度、脉冲束时固定选束孔2和直流束时空架。

头部电源由三台 $10\text{ kV}\cdot\text{A}$ 耐压 $200\text{ kV}$ 隔离变压器串联，一台 $20\text{ kW}$ ， $2.5\text{ kHz}$  SCR中频逆变器供电，封装在 $\phi 465\text{ mm}\times 1250\text{ mm}$ 的玻璃钢圆筒内，充满变压器油进行绝缘和冷却。处于头部高电位的电源用耐压 $35\text{ kV}$ 容量 $4\text{ kVA}$ 的隔离变压器供电，部分设备用变压器油自循环系统冷却，部分用风机冷却。测束仪经过渡漂移管连接到加速管。

### 1.1.3 加速管

外径 $\phi 300\text{ mm}$ ，内径 $\phi 65\text{ mm}$ ，厚 $1\text{ mm}$ 的不锈钢电极，以及外径 $\phi 250\text{ mm}$ ，内径 $\phi 190\text{ mm}$ ，厚 $24\text{ mm}$ 的GG17玻璃管迭加胶接成均匀场型加速管。分两段，每段30节，长 $0.8\text{ m}$ ，耐压 $360\text{ kV}$ 。静态真空度 $5\times 10^{-7}$ 毛（1毛= $133.3224\text{ Pa}$ ），漏气率 $\geq 1\times 10^{-10}\text{ mm Hg}\cdot\text{L/s}$ （ $1\text{ mmHg}=133.3224\text{ Pa}$ ）。均压电阻总值为 $1200\text{ M}\Omega$ ，分压电流 $0.5\text{ mA}$ ，用RJ8-8L高压金属膜电阻，焊接成两端带金属球的连接棒接到加速电极上。为使加速管近似以光滑圆柱对地，加用 $\phi 30\text{ mm}$ 不锈钢管弯成 $\phi 500\text{ mm}$ 圆环作均压环，每6节加一个，均压环的表面径向电场强度为 $E'_m=18.5\text{ kV/cm}$ 。

加速管入口透镜由加速管入口6个电极组成三膜片单透镜。第一和第五电极相连接地，第三电极上加 $20\text{ kV}$ 电位。

### 1.1.4 真空系统

真空系统采取分段抽气法。加速管末端置一台 $1500\text{ L/s}$ 分子泵机组（主泵），主要



维持加速管和束流管道的真空度。分析磁铁前置一台 450 L/s 分子泵保持束流低能漂移段合适的真空度。直流和脉冲束管道在靶前各有一台 450 L/s 分子泵，保持靶室高真空度。脉冲束聚束器傍置一台 450 L/s 分子泵，保持聚束器的高真空度。主泵机组与管道连接处的真空度保持在  $1 \times 10^{-4}$  Pa 左右。

### 1.1.5 束流传输系统

离子束流从离子源引出，到加速管出口后，分两条管道传输：

#### (1) 直流束管道

真空阀→测束仪→四极透镜→450 升分子泵→真空阀→中子靶

#### (2) 脉冲束管道

45° 偏转磁铁→真空阀→测束仪→聚束器→450 L 分子泵→四极透镜→450 L 分子泵→真空阀→拾取信号筒→中子靶室。

四极透镜为二组合四极磁透镜。透镜有效宽度 160 mm，磁场梯度为 0.5 kGs/cm ( $1 \text{ Gs} = 10^{-4} \text{ T}$ )，二透镜间隙 30 mm。

偏转磁铁位于主泵三通后，将束流偏转 45°，传输到脉冲束管道。对称双聚焦型，入、出倾角 14.5°，偏转半径 30 cm，磁极间隙 5 cm，中心平面最大磁场 0.6462 T。供电电源 60 V，25 A，电流稳定度  $1 \times 10^{-4}$ ，磁铁总重 414 kg。

其余部件恕不再详述。

### 1.1.6 强流 ns 脉冲化装置

脉冲化装置主要由切割器和聚束器两部分组成。

#### (1) 切割器

切割器由预加速电源、切割板、选束孔和切割扫描电源组成。切割能量通过预加速电压，使到达切割板的离子束能量为 30 keV。机械设备：离子束，切割板和选束孔，后者的中心必须在同一中心轴线上。切割板长 10 cm，宽 4 cm，相距 2.5 cm，安装在头部真空泵三通内。选束孔 1  $\phi$  15 mm，选束孔 2  $\phi$  4 mm。

扫描电源输出 0.75 MHz 正弦波电压，幅度峰-峰值  $\geq 4000 \text{ V}$ 。

#### (2) 聚束器

聚束器主要由速调管（即聚束腔）、谐振腔（L 线圈和可调节电容）、聚束高压功率源、聚束相位调节和高频高压输入控制器等部件组成。

速调管的功能是对通过速调管离子束的漂移速度进行调整，在离子漂移一定距离后，聚到一起或在很短的时间内到达同一空间位置，如 1 ns 即脉冲束宽。它由中心线与束流线重合的外径  $\phi$  38 mm，内径  $\phi$  32 mm，长 431 mm 的不锈钢管作高压电极；两个外径和内径与高压电极相同长的 18 mm 不锈钢管作地电极，两电极间距 21 mm。用 95 陶瓷架严格固定速调管电极的位置，并密封在  $\phi$  345 mm  $\times$  550 mm 的不锈钢圆筒内。

谐振腔主要由线圈 L、可调节电容和聚束高压输入绝缘柱组成，绝缘柱置于 500 mm  $\times$  550 mm  $\times$  650 mm 不锈钢箱内。线圈 L 用双层紫铜管弯成直径  $\phi$  200 mm，间距 15 mm，共 13 匝。400 mm  $\times$  400 mm  $\times$  2 mm 的置于 L 线圈下部，进行上下调节，改变分布电容，使谐振腔谐振频率达到 6 MHz。

聚束高压输入绝缘柱使聚束高压与地绝缘，并保持聚束腔的高真空度。用外径 $\phi$  78 mm，内径 $\phi$  66 mm，长 107 mm 带裙边的 95 陶瓷绝缘体，满足了使用的需要。

聚束高压用一台 6 kW 的高频机供电，输入聚束高压幅度和聚束相位变化由控制器进行调节。

### 1.1.7 加速器头部供电电源操纵控制系统

操纵控制系统的技术难点是头部供电电源都被安置在高压电极之内，因耐压问题，不能用一般电缆穿过高压电极进行连接，操纵控制。

操纵控制系统用光纤传送信号的研制工作，经历了曲折的过程。主要问题是高频离子源发出的高频信号对光纤输出信号的干扰不能消除，导致用微机控制的失败。采取一定措施调节光纤信号控制，取得了一定的成功，但仍需进一步的改进。

## 2 CPNG 的特点

(1) 强流。

(2) ns 脉冲化装置采用的技术路线是低能切割，高能聚束。

低能切割的优点是粒子束的能量低，要求的切割电源的功率小。但切割的束流强度大，仍需要较高切割扫描电压。

高能聚束降低了对粒子束能散的要求，但离子束能量高，需要很高的高频聚束电压。

(3) 结构简单紧凑。

## 3 脉冲束主要技术性能的测试和结果

### 3.1 脉冲束的测试技术

飞行时间方法是当前普遍使用的 ns 脉冲束测试技术。它不仅用于性能测试，而且还用于脉冲束的调节和运行监视。它的优点是直接显示，易于观察。但在技术上较为复杂，使用人员需经培训。

脉冲信号拾取系统是脉冲化装置的组成部分，提供飞行时间谱仪一路定时信号。它由机械和电子学两部分组成。机械部分也称拾取筒，外圆筒、感应圈及感应电荷引出头，圈的长度由离子束的能量和需要信号上升时间确定。感应圈安装在外圆筒内，并与之绝缘，外圆筒的内径大于感应圈，两端安装限束光栏，确保束流不能直打到感应圈上，并组成电信号回路，输出感应电荷信号。电子学部分应在感应电荷引出头接快前级放大器，通过高频电缆把信号输送到测量室，视信号的大小，决定是否使用主放大器，决定于脉冲束流的强度。把信号送入定时器，作飞行时间方法的一路定时信号。

CPNG 的脉冲信号拾取系统用外径 $\phi$  35 mm，厚 2 mm，长 35 mm 不锈钢管作外圆筒，两端光栏孔为 $\phi$  15，外径 $\phi$  25 mm，厚 0.5 mm，长 8 mm 紫铜环作感应圈并由连连接宁母插头引出。前放用 ORTEC VT120C，输出脉冲拾取信号幅度在 1~1.5 V 之间，不用主放，直接输送到 ORTEC935 定时器得到定时信号。

中子探测器用 GDB49 光电倍增管连接 $\phi$  50 mm $\times$ 50 mm NE312 液体闪烁体组成。用

常规的快中子飞行时间谱仪电子学线路，不再详述。

### 3.2 脉冲束主要技术性能测试及结果

CPNG 脉冲束主要技术性能在 2001 年 1~2 月间，邀请北京大学重离子研究所、北京师范大学和中国原子能科学研究所的专家进行测试，并进行了长时间工作考验，3~5 月间为有关单位提供了几百小时实验工作使用，充分地证明了 CPNG 的工作是稳定可靠的。2001 年 4 月 11 日通过中核集团公司的验收。现把在 2001 年 2 月 22 日由北京大学重离子研究所、北京师范大学的专家测量结果列于表 1。

表 1 CIAE 600 kV ns 脉冲中子发生器主要性能测试结果

测量时间	2001 年 2 月 22 日(1)	2001 年 2 月 22 日(2)
环境条件	温度 15 ℃，湿度 30%	温度 15 ℃，湿度 30%
真空度	$0.8 \times 10^{-4}$ Pa	$0.8 \times 10^{-4}$ Pa
束能量	300 keV	300 keV
直流束	引出 3.0 mA, 分析器出口 1.4 mA	引出 3.0 mA, 分析器出口 1.4 mA
切割扫描电压	3.8 kV	2.9 kV
扫描频率	0.75 MHz	0.75 MHz
选束孔尺寸	第一选束孔: $\phi 15$ mm 第二选束孔: $\phi 3.8$ mm	第一选束孔: $\phi 15$ mm 第二选束孔: $\phi 3.8$ mm
脉冲重复频率	1.5 MHz	1.5 MHz
聚束功率	450 W 左右	440 W 左右
聚束频率	6 MHz	6 MHz
中子源	T(d, n) <sup>4</sup> He 反应 14 MeV 中子	T(d, n) <sup>4</sup> He 反应 14 MeV 中子
测量方法	飞行时间法，探测器 XP2041 光电管加 $\phi 105$ mm $\times$ 50 mm 液体闪烁体	飞行时间法，探测器 XP2041 光电管加 $\phi 105$ mm $\times$ 50 mm 液体闪烁体
平均流强	22 mA	30.3 $\mu$ A
拾取信号 (用 TAK485 示波器测量)	上升时间 1.7 ns 半宽度 1.8 ns 最大幅度 1.1 V 最小幅度 0.6 V	上升时间 1.4 ns 半宽度 1.8 ns 最大幅度 1.2V 最小幅度 0.7V
$\gamma$ 射线峰	半宽度 0.70 ns 1%处底宽 2.2 ns 底宽/半宽=3.2	半宽度 1.0 ns 1%处底宽 2.3 ns 底宽/半宽=2.3
中子峰	半宽度 1.50 ns 1%处底宽 4.1 ns 底宽/半宽=2.7	半宽度 1.1 ns 1%处底宽 2.9 ns 底宽/半宽=2.6
稳定工作时间	$\geq 8$ h	$\geq 8$ h

与国际上同类中子发生器的比较列于表 2。

表 2 国际上同类 ns 脉冲中子发生器主要性能的比较

实验室	能量 keV	离子	脉冲流强/ $\mu\text{A}$	束斑/mm	束宽/ns	重复频率 MHz	中子源强/ $10^{10} \text{ n} \cdot \text{s}^{-1}$
中国 CIAE	600	高频	$\geq 30$	$\phi 5 \sim 10$	1.0	1.5	$1 \times$
美国 LLNL	400	高频		$\phi 6$	1.5	2.5	$5 \times$
日本大坂大学	300	高频	20~40	$\phi 30$	1.5	1~2	0.5 或 $1 \times$
日本原子能所	400	高频	20~40	$\phi 15$	2.0	1~2	0.5 或 $1 \times$

## 4 CPNG 的应用

CPNG 是直流和脉冲束兼用的强流中子发生器。它主要在下列几个方面的应用。

### 4.1 中子物理实验研究工作

#### 4.1.1 中子核数据测量

在 CPNG 上, 可进行由中子引起的各类反应截面的实验测量工作, 其中包括反应全截面  $\sigma_T$ , 弹性和非弹性微分截面  $\sigma_{el}(\theta)$  和  $\sigma_{inel}(\theta)$ , 次级中子双微分截面  $\sigma(E'_n, \theta)$ , 发射的带电粒子双微分截面  $\sigma(E'_x, \theta)$ , 活化截面  $\sigma_{活}$ , n- $\gamma$  俘获截面  $\sigma(n, \gamma)$ , 裂变材料核的裂变截面  $\sigma_f$ , 裂变产额等。

#### 4.1.2 大块物质的宏观检验实验研究工作

##### (1) 评价中子核数据的基准检验实验研究

中子学计算是核装置设计的基础, 评价中子核数据库又是中子学计算中使用的基础数据。因此, 评价中子核数据库数据将直接影响中子学计算结果的可靠性。对于通过评价得到的中子核数据可靠性, 首先进行必要的基准实验检验得到验证。一般用单核素测量大块物质上的泄漏中子谱和在同样实验条件下, 用评价数据进行蒙特卡罗计算谱进行比较分析, 得到有用信息和资料, 检验数据的可靠性。

##### (2) 中子学计算理论的检验

应用简单或复合材料, 进行各反应道的专项积分量测量, 与模型计算结果比较, 可不断地完善计算模型, 减少计算误差。

##### (3) 专项积分量测量

核装置研究中, 对各种材料选择和整体部件的性能, 需要进行专项积分量测量, 对设计部件进行检验和直接使用。

##### (4) 设计思想的检验

根据核装置的概念设计, 建造模拟装置进行积分实验, 来检验设计的总体特性, 指出存在问题和改进方向。其测量的积分量, 可供核装置设计及其他方面应用。

4.1.3 其他方面的中子物理研究工作

4.2 中子计量学的研究工作

4.3 作为强中子源应用研究工作

- (1) 一些重要材料的辐射损伤研究。
- (2) 应用辐照进行材料的改性研究。
- (3) 种子辐照的选优研究工作等。

## **CIAE 600 kV ns Pulse Neutron Generator**

SHEN Guanren GUAN Xialing CHEN Hongtao  
(China Institute of Atomic Energy, Beijing, 102413)

**Abstract:** The overall composition of CIAE 600 kV ns Pulse Neutron Generator (CNPNG) are introduced, and Its characteristic, main technological performance and application were also given. CPNG consists of high voltage power supply with highest output voltage 600 kV, direct current 15 mA, stability and ripple  $\leq 1\%$ , 2214 mm $\times$ 1604 mm $\times$ 1504 mm stainless steel high voltage electrode, built in head equipment uniform field accelerating tube, ns pulsed installation, turbomolecular vacuum pump system and drift pipes at 0° and 45°. It's characteristics are: (1) high current beam; (2) high current beam ns pulsed installation made use of low energy for choper and high energy for buncher; (3) compactly laid out and simple in structure.

**Keywords:** high current beam, ns pulse, Neutron generator, Performances

# 强流 ns 脉冲化装置的重新研制

沈冠仁 关遐令 陈洪涛 刘乃义 高 福  
(中国原子能科学研究院, 北京, 102413)

**摘要:** 介绍了 CIAE600kV ns 脉冲中子发生器使用的强流 ns 脉冲化装置研制工作和达到的技术指标。首先对装置的重要参量进行了理论估算, 初步了解了脉冲化装置工程设计和研制中对重要部件的要求和特别注意的问题, 同时纠正了一些错误物理概念。其次, 重新研制了切割板、选束孔和切割电压扫描仪。着重解决了切割器扫描切割板负载阻抗概念问题, 从使用的  $50 \Omega$  电阻输出阻抗改为容性, 并测量了切割板的动态电容。电压扫描仪的输出从强调功率改为输出电压幅度, 并建立了输出电压幅度显示, 确保最大输出电压(峰-峰值) $\geq 4000$  V。重新设计和加工了速调管和聚束高压输入绝缘柱, 着重解决了聚束高压电极的支撑和聚束高压输入绝缘柱的耐压问题, 对其他部分进行了改进。

**关键词:** 强流, ns 脉冲化装置

强流 ns 脉冲化装置是 CIAE 600 kV ns 脉冲中子发生器 (简称 CPNG) 研制成功与否的关键设备。这个装置的主要特点是低能切割, 切割束流强, 强度变化大, 需要的高频切割电压高。高能聚束, 离子束的能量高, 要求的聚束电压高。由于国内没有研制强流 ns 脉冲化装置的工程设计和实验研制技术资料借鉴, 1997 年以前设计使用的装置, 在工程设计的物理概念上存在问题, 因此, 装置达不到预定的设计要求。1997 年以后我们进行了重新研制, 达到了理论计算预期的主要技术指标, 投入了运行和使用。本文将着重介绍 CPNG 强流 ns 脉冲化装置的主要工作原理、工程设计、研制工作和达到的主要技术指标。

## 1 ns 脉冲束的主要工作原理<sup>[1]</sup>

得到 ns 脉冲束的方法在国际上先后有 (1) 速调管聚束器; (2) 单狭缝谐波聚束器; (3) 双漂移谐波聚束器; (4) Mobleg 磁铁聚束器等。

CPNG 的强流 ns 脉冲化装置使用速调管聚束器<sup>[2~4]</sup>, 其主要工作原理简述如下:

由离子源引出连续离子束流, 用脉冲化装置的切割器切割成具有一定宽度的周期性分布的脉冲束, 输送到速调管聚束, 对脉冲束的离子飞行速度进行调节, 即让飞在前面的变慢, 后面的变快, 脉冲束再往前飞行时, 后面变快的离子追前面变慢的离子, 到达速调管的焦点时, 后面的追上前面的离子, 达到聚束的目的。速调管的焦点设置在中子靶的位置上。

速调管聚束器的优点是结构简单，调节比较方便，可以得到脉冲束宽 $\leq 1\text{ns}$ 的脉冲束。但用正弦波高频谐振聚束电压，线性范围较小，聚束效率较低。

速调管由三个直径相同，金属圆筒电极组成，如图 1 所示，两边的电极接地，中间电极加聚束高频电压，在中间电极的两端间隙形成聚束电场。 $L$  是速调管电极两个间隙中心的距离，由离子的能量和聚束电压频率决定。 $F$  是速调管的焦距，即离子到靶的飞行距离。 $V_m(\text{kV})$ 是聚束电压幅度值。 $Q$  是离子的电荷态。

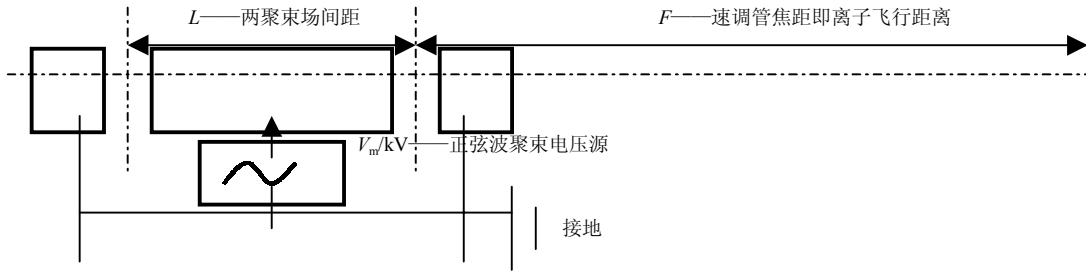


图 1 速调管聚束器示意图

表 1 脉冲束计算结果

初始能量能散 $\Delta E_0/\text{eV}$	聚束电压幅度 $V_m/\text{kV}$	1/10 处脉冲底宽 $T/\text{ns}$	半宽度(FWHM) $\Delta t_0/\text{ns}$
300	17.49	1.20	0.50
400	17.65	1.50	0.70
500	1.94	1.62	0.84
600	18.07	1.74	1.05
700	18.15	1.98	1.20
800	18.29	2.22	1.32

根据参考文献[1]，有：

$$F = \beta \lambda E_0 / \pi E_m \quad (1)$$

其中 $\beta$  为入射粒子的相对速度( $v/c$ )， $\lambda$  是高频聚束电压波长， $E_0$  是入射粒子的初始能量， $E_m$  是聚束器聚束能量幅值。当中子靶位置置于聚束焦点上时，粒子束到达靶上的飞行距离：

$$L_F = F = v E_0 / f \pi E_m \quad (2)$$

其中： $f$ 是聚束高频电压的频率。在非相对论近似下，聚束电压有：

$$V_m=4424.865E_0^{3/2}/fL_rA^{1/2}Q \quad (3)$$

当 $\Delta E_0$ 代表粒子的初始能散时，焦点上获得的最小脉冲宽度：

$$\Delta T_{\min}(\text{ns})= \Delta E_0(\text{eV})/2\pi QV_m(\text{kV})f(\text{MHz}) \quad (4)$$

假设初始能量 300 keV，聚束电压频率 6 MHz，焦距 2.5 m，切割脉冲束宽度 44 ns 的条件下，计算得到的典型结果列于表 1。

## 2 ns 脉冲化装置的物理设计

### 2.1 脉冲化装置主要设计技术指标

根据实验工作的需要，参考国际上先进的强流 ns 脉冲中子发生器主要技术性能，CPNG 要达到的主要技术指标如下：

离子束能量：300 kV。脉冲束平均流强：30~50  $\mu\text{A}$ ，从高频离子源引出的直流分析束 $\geq 3 \text{ mA}$  (按脉冲束的束流效率为 1% 计算)。束斑为 $\phi(5\sim 10) \text{ mm}$ ，重复频率：1.5 MHz。脉冲束的半宽度：1~1.5 ns，峰高的 1% 处底宽 $\leq$ 半宽度的 3 倍。稳定工作时间 $\geq 100 \text{ h}$ 。

### 2.2 ns 脉冲化装置的技术路线

CPNG 脉冲化装置的特点是强流，要求很狭窄的脉冲束半宽度和底宽。根据公式 (4)，脉冲束半宽度正比于离子束的初始能散，反比于聚束电压幅度和频率。按照公式 (3)，聚束电压幅度  $V_m/\text{kV}$  正比于离子束的初始能量，反比于速调管的焦距。经反复的论证计算，为了得到 1~1.5 ns 的脉冲束宽，ns 脉冲化装置采用低能切割，高能聚束的技术路线。低能切割的优点是粒子束的能量低，要求的切割电源的功率小。但切割的束流强度大，仍然要求很高的切割扫描电压。高能聚束降低了对粒子束能散的要求，增加了离子束能量，需要很高的聚束电压。

### 2.3 离子束能散的估算

在采用低能切割，高能聚束技术路线下，离子束的能散主要来源于三个方面：

(1) 离子源引出束的能散。在离子源正常工作的条件下，各种因素综合造成的能散 $\leq 200 \text{ eV}^{[6]}$ 。

(2) 切割器造成的能散。按照理论估算 $\leq 60 \text{ eV}^{[5]}$ 。

(3) 离子加速造成的能散。粒子束经过加速管的加速，达到 300 keV，高压电源稳定性和纹波 $\leq 1\%$ 时，引起能散 $\leq 300 \text{ eV}$ 。

综合三个因素造成的能散 $\leq 400 \text{ eV}$ 。

### 2.4 影响脉冲化装置技术指标的参量估算<sup>[5, 6]</sup>

为了解决 CPNG 脉冲化装置早期研制中达不到原设计指标的问题。对影响脉冲束形状、半宽和底宽，切割器的切割能力的参量进行了估算，主要结果发表在参考文献[7]。它对脉冲化装置的研制和脉冲束的正确调节，取得了非常好的效果。

聚束离子能量 300 keV，聚束电压频率 6 MHz，聚束器焦距 2.5 m，切割能量 30 keV，



切割扫描电压频率 0.75 MHz。在给定的脉冲束主要技术指标条件下，计算的主要结论如下：

(1) 对影响脉冲束形状、半宽度和底宽参量进行的估算。

a. 最佳聚束电压为 19.2 kV。聚束电压在 $\leq$ 或 $\geq$ 超过 100 V 时，脉冲束形状发生变化。 $\leq 100$  V 时，脉冲峰形变宽； $\geq 100$  V 时，出现过聚双峰。两者都造成半宽变宽。这个结果要求，聚束电压的稳定度 $\leq 0.2\%$ 。

b. 切割脉冲有一个最佳宽度，小了将减少流强，大了只增加脉冲束的底宽。CPNG 要求切割脉冲宽度小于 40 ns。

c. 要达到脉宽 $\leq 1.2$  ns，聚束电压相位必须稳定在 $\pm 1^\circ$  以内，能散应 $\leq 590$  eV。

(2) 对影响切割器切割能力参量的计算

a. 切割器切割能力随切割板长度而增大，引起的能散与切割板长度无关。切割电压幅度与切割板长度成反比。计算切割板长 8 m，切割脉冲宽度为 45 ns 时，需达到 2300 V。

b. 切割引起能散与切割孔径有关，孔径越小，能散越小。随切割宽度的增加而减小，其数值一般小于 60 eV。

c. 切割引起能散主要来源于离子源初始发射度，它与离子源发射度几乎成线性变化。离子源初始发射度在 50~170 mm·mrad 范围内时，能散从 25 eV 增加到 100 eV。

(3) 通过理论计算分析，脉冲化装置中聚束电压的相位和幅度稳定装置是必不可少的，特别是相位稳定装置尤其重要。

### 3 强流 ns 脉冲化装置的研制

脉冲化装置的示意图表示见图 2。它由切割器、聚束器和脉冲信号拾取系统组成。

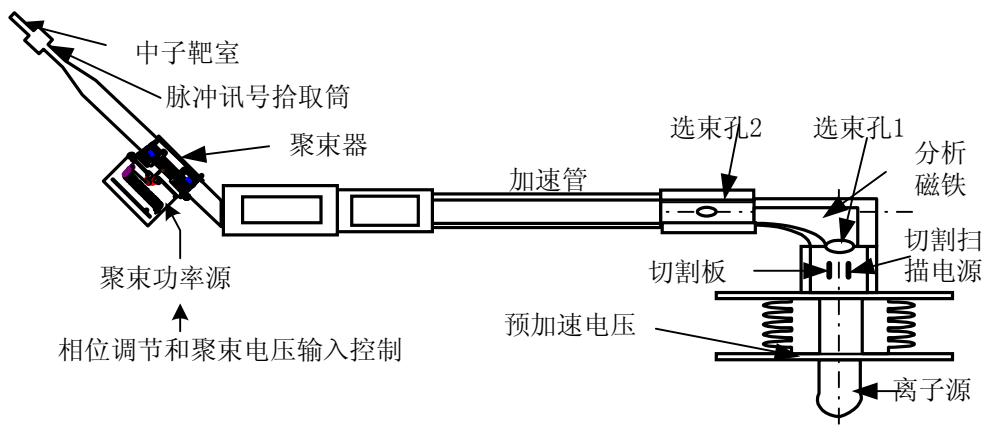


图 2 脉冲化装置示意图

#### 3.1 切割器的研制工作

切割器的结构如图 3 所示。它由预加速间隙透镜及供电电源、切割板、选束孔和切割扫描电源组成。根据上面物理设计，切割离子束能量 30 keV，流强 $\geq 3$  mA，要求切割脉冲的宽度达到 $\leq 40$  ns。

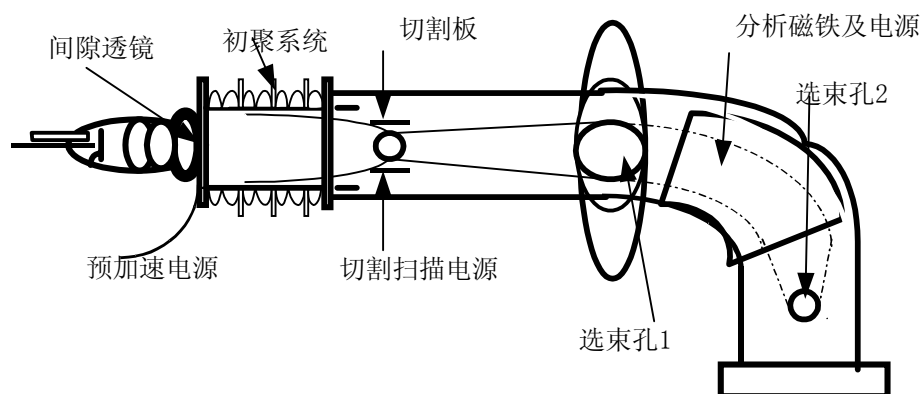


图3 切割器示意图

### 3.1.1 影响切割器能力的主要原因分析

(1) 扫描束流通过分析磁铁，磁铁的聚焦，降低了切割能力。

(2) 扫描电压输送到切割板是容性负载，使用  $50 \Omega$  电阻输出阻抗概念，严重影响谐振回路工作状态，达不到原设计要求输出电压幅度。

(3) 扫描切割要求电压幅度，只强调扫描电源的功率要求，达到了功率，但达不到电压幅度的要求。

(4) 谐振回路制作和扫描电源部分要求高的重要元件和工艺。

### 3.1.2 切割器的研制工作

(1) 机械设备部分

a. 加长切割板从  $4 \text{ cm} \rightarrow 10 \text{ cm}$ 。减少切割板距离从  $3 \text{ cm}$  到  $2.5 \text{ cm}$ 。

b. 缩小原选速孔  $\phi 5 \text{ mm} \rightarrow \phi 4 \text{ mm}$ 。

c. 分析磁铁入口的  $\phi 30 \text{ mm}$  固定光栏改为可变光栏， $\phi 20 \text{ mm}$ ， $\phi 15 \text{ mm}$ ， $\phi 10 \text{ mm}$ ， $\phi 8 \text{ mm}$ ，实行双选束孔，用  $\phi 15 \text{ mm}$ 。

(2) 切割扫描电压电源研制

为了确保新电源设计的研制成功，首先进行下列的准备工作。

a. 与有关部门的同志合作，用上面确定的切割器机械部分的条件，进行理论分析计算达到  $< 40 \text{ ns}$  切割脉冲宽度，要求的切割电压幅度，最大输出电压（峰-峰值） $\geq 4000 \text{ V}$ <sup>[7]</sup>。

b. 测量切割板静态和动态电容值。

了解切割板静态和动态电容值，对于扫描电源的设计特别重要。用扫频并联谐振<sup>[8]</sup>法测量切割板动态电容值，取得较满意的测量结果，所示见图4。三条曲线表示固定吸极电压为  $4.5 \text{ kV}$  和  $4.8 \text{ kV}$  及同时调节吸极和聚焦电压的测量结果，曲线走向一致，在束流强度  $\leq 3 \text{ mA}$  时，动态电容绝对值随束流强度的变化  $\leq 30\%$  以上。

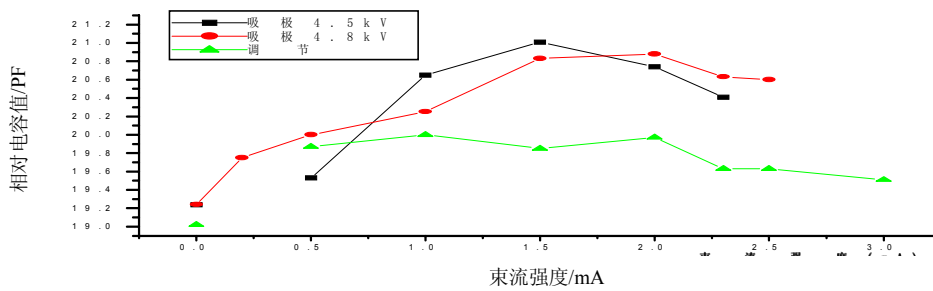


图4 动态电容值测量

c. LC 谐振回路输出电压峰值切割能力实验。分析磁铁入口光栏为  $\phi 20 \text{ mm}$  (第一选束孔), 用功率为  $8 \text{ W}$  的信号发生器产生正弦波输出作扫描电压, 测量切割器的综合切割能力。零-峰值最大为  $2000 \text{ V}$  时, 切割能力为  $16.6\%$ 。图 5 显示切割能力实验结果, 再加上第二选束孔的作用, 完全满足了切割要求。这个实验结果充分表明在设计扫描电源时, 输出电压幅度应是考虑问题的主要方面。

该设备由石家庄有关单位研制, 于 1999 年 8 月建成投入使用, 完全达到了设计目标, 长期工作稳定可靠。其特点之一是在该仪器上用简单的方法即时显示谐振输出电压幅度(峰-峰值), 这是一个创造。

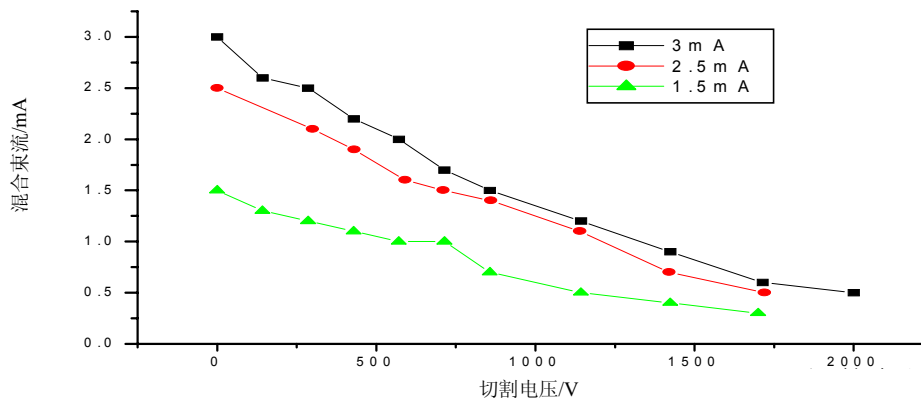


图5 切割能力随扫描电压的变化实验结果

### 3.2 聚束器的研制工作

聚束器的总体结构框架包括速调管、聚束高压 LC 谐振腔 (L 线圈和电容)、聚束高压功率源、聚束相位调节和高频高压输入控制器 (下面简称控制器)。在吸取初期工作的经验教训后, 对聚束器的重要部件进行重新设计, 简述如下。

#### 3.2.1 速调管的研制

##### (1) 速调管几何尺寸的确定

速调管两个聚束间隙的距离  $L$  由公式  $L = \frac{1}{2} \beta CT$  确定。其中  $\beta$  是离子相对速度  $v/c$ ，300 keV 的  $D^+$  束  $\beta = 0.017944$ ， $T$  是聚束电压的周期。当聚束电压的频率为 6 MHz 时， $L = 448$  mm。聚束间隙的距离因由间隙的耐压能力决定。电极头的形状和加工光洁度、聚束电压值直接有关。把电极头加工成圆弧形，高光洁度，去除边尖角处。用外径  $\phi 52$ ，内径  $\phi 32$  制成的圆弧形电极，间隙距离 17 mm，总长 505 mm 的不锈钢管组成的速调管如 6 所示。

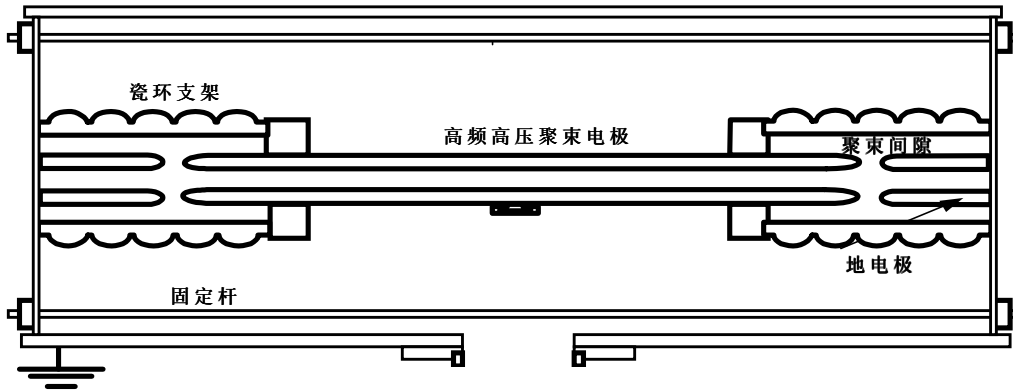


图 6 速调管结构图

## (2) 速调管的几何结构

速调管要求电极间隙距离严格保持不变，中心在同一轴线上也就是要求几何结构稳定，关键是加上聚束电压的中间电极位置的固定。在速调管工作过程中加上很高的聚束电压，发出一定的热量是不可避免的。用耐热可达 1000 °C 以上，热膨胀系数小，结构稳定性好，耐高压的 95 陶瓷加工成  $\phi 160 \times 15$  的圆盘支撑外径  $\phi 150$ ，内径  $\phi 130$  外加裙边长度 80 mm 的圆筒，四根不锈钢杆压紧固定，如图 6 所示，达到了设计和使用要求。

### 3.2.2 聚束高压 LC 谐振腔

聚束高压 LC 谐振腔主要由线圈 L、可调节电容板和聚束高压输入绝缘柱置于 500 mm  $\times$  550 mm  $\times$  650 mm 不锈钢箱内组成，如图 7 所示。

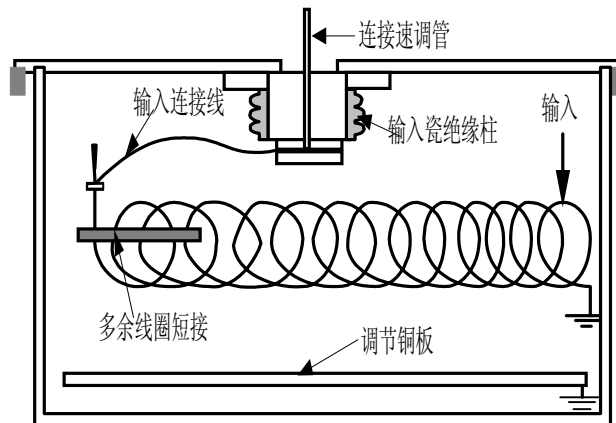


图 7 聚束高压 LC 谐振腔

线圈 L 用外径 $\phi 18$  mm 双层紫铜管弯成直径 $\phi 200$  mm, 间距 15 mm, 共 13 匝构成。内管进水, 外管出水对线圈冷却。要特别注意的是输入连线在聚束高压的最高电压部分, 线圈头部和输入连接线应与速调管外筒保持足够的距离, 防止因耐压不够, 出现电晕或打火。

电容 C 由速调管的极间电容  $C_K$  和谐振腔的分布电容  $C_B$  构成。置于 L 线圈下部  $400\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 2\text{ mm}$  的紫铜板, 上下移动调节, 改变分布电容, 进行微调, 使谐振腔谐振频率到 6 MHz。粗调由打开谐振腔改变线圈的匝数调节。

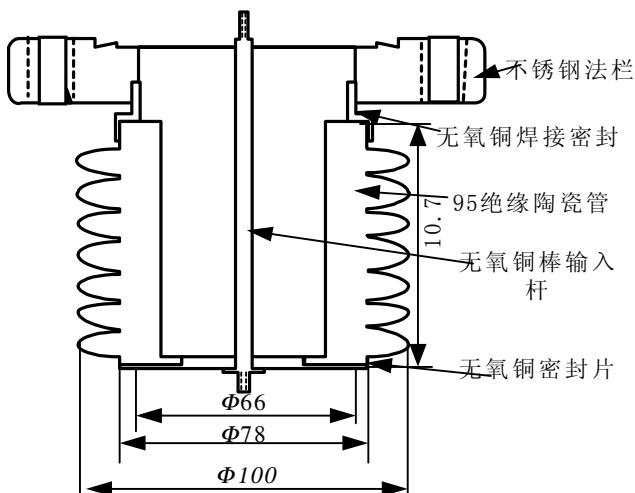


图 8 聚束高压输入绝缘柱

聚束高压输入绝缘柱的功能是使聚束高压与地绝缘, 并保持速调管的高真空密封。它用陶瓷管一端与一个不锈钢法兰焊接, 另一端与聚束电压输入杆焊接密封, 不锈钢法兰与速调管外筒进行密封连接。研制绝缘柱的技术难点是金属与陶瓷焊接问题, 要特别注意焊接质量, 焊接处不能有尖边和毛刺。第二是陶瓷绝缘材料的性能。第三是加工质量。经多次探索和挫折, 最后用外径 $\phi 78$  mm, 内径 $\phi 66$  mm, 长 107 mm 带裙边的 95 陶瓷绝缘体, 如图 8 所示, 满足了设计和使用的需要。

### 3.3 控制器的研制

控制器直接影响加速器脉冲束的工作质量。除技术指标外, 主要要求有三点:

- (1) 显示精确。相位显示应到 $\pm 1^\circ$ , 聚束电压幅度 $\leq 100\text{ V}$ 。
- (2) 相位与高频高压输入分别调节时, 应互不影响。
- (3) 长期稳定工作。要特别注重生产工艺和焊接质量。

### 3.4 聚束高压功率电源

当前使用由北京广播器材厂生产的 6 kW 的高频高压输出功率电源。优点是功率大, 远远超过使用的需要, 使用只需 450 W 左右。工作比较稳定, 经受住了多次严重短路打火。缺点是输出显示太粗。

## 4 脉冲束信号拾取系统

脉冲信号拾取筒如图 9 所示。脉冲信号拾取系统是脉冲化装置的组成部分, 也是飞行时间一路信号。它由机械和电子学两部分组成。机械部分也称拾取筒, 感应圈及感应电荷引出头, 圈的长度  $L$  由离子束的能量和要求信号的上升时间确定。 $L = vt_p$ , 其中  $v$  是离子速度,  $v = (E_D/931)^{1/2} \times c$ ,  $c$  是光速, 对 300 keV 的氘束,  $v = 5.3815 \times 10^8\text{ cm/s}$ 。  $t_p$  是拾

取信号的上升时间。取 1 ns 时,  $L \approx 5.38$  mm。感应圈安装在圆筒内, 并与之绝缘, 圆筒的内径大于感应圈, 两端安装限束光栏, 确保束流不能直打到感应圈上, 并组成电信号回路, 输出感应电荷信号。感应圈长度  $L$ , 直径  $d$  和圆筒的直径  $D$  决定拾取筒的电容  $C_p = 0.2416L / \log(D/d)$  pF。

CPNG 的脉冲信号拾取系统用外径  $\phi 35$  mm, 厚 2 mm, 长 35 mm 不锈钢管作外圆筒, 两端光栏孔为  $\phi 15$ , 外径  $\phi 25$  mm 厚 0.5 mm 长 8 mm 紫铜环作感应圈并由连线接宁母插头引出。

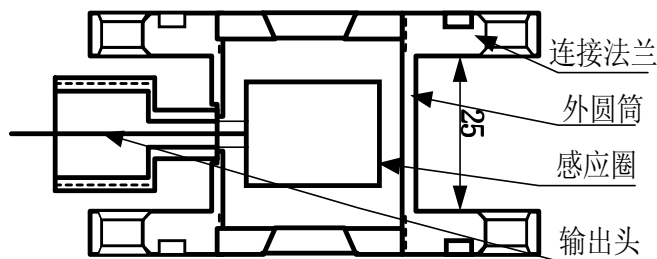


图 9 脉冲信号拾取筒

电子学部分在感应电荷引出头接快前级放大器 ORTEC VT120C, 通过高频电缆把信号输送到测量室, 视信号的大小, 决定是否使用主放大器, 它取决于脉冲束流的强度。输出脉冲拾取信号上升时间为 1.7 ns, 半宽度 1.8 ns, 幅度在 1~1.5 V 之间, 不用主放, 直接输送到 ORTEC935 定时器得到定时信号。

## 5 CPNG ns 脉冲化装置主要技术指标

CPNG 与国际上同类中子发生器的比较列于表 1。

表 1 国际上同类 ns 脉冲中子发生器主要性能的比较

实验室	能量/keV	离子源	脉冲流强/ $\mu$ A	束斑/mm	束宽/ns	重复频率	中子源强/ $10^{10}$ n·s <sup>-1</sup>
中国 CIAE	600	高频	$\geq 30$	$\phi 5 \sim 10$	1.0	1.5	1
美国 LLNL	400	高频		$\phi 6$	1.5	2.5	5
日本大阪大学	300	高频	20~40	$\phi 30$	1.5	1~2	0.5 或 1
日本原子能所	400	高频	20~40	$\phi 15$	2.0	1~2	0.5 或 1

在 CPNG 强流 ns 脉冲化装置研制过程中, 得到了唐洪庆、周祖英、杨丙凡、夏海鸿、曹德彰、李胜利、倪志荣、荀燕红等有关方面的专家和兄弟单位大力支持和帮助, 在此一并表示感谢。

## 参 考 文 献

- 1 关遐令. 600 kV ns 脉冲中子发生器束流光学物理设计(内部资料)
- 2 Anderson J H, Swann D. A Bunching and Chopping System for the Generation of Short Duration Ion Bursts. N. I. M., 1964, 30: 1~22
- 3 陈佳洱. 1979 年全国加速器技术交流会论文集. 75
- 4 Anderson J H, et al. Klystron Bunching of the Ion Beam of A 5.5 MV Van de Graaff. N. I. M., 1966, 40: 30
- 5 张立山. 600 kV 高压倍加器脉冲束的调试参量估算. [硕士论文]. 中国原子能科学研究院
- 6 张立山, 关遐令, 毛孝勇, 沈冠仁. 600 kV ns 脉冲中子发生器的一些相关问题的研究. 原子能科学技术, 1997, 4: 289
- 7 牛铭, 李胜利. ns 脉冲中子发生器切割板电压计算. 原子能科学技术, 2001, 3: 245
- 8 李胜利, 牛铭. ns 脉冲中子发生器切割板电容值测量. 原子能科学技术, 2001, 4: 375

## Development of High Current Beam ns Pulsed System

SHEN Guanren GUAN Xialing CHEN Hongtao LIU Naiyi GAO Fu  
(China Institute of Atomic Energy, Beijing, 102413)

**Abstract:** The development of high current beam ns pulsed system of CPNG and its characteristic, main technological performance and application are introduced. Firstly, important parameters of the system are calculated using theoretical model, the design requirements of some important parts are understood. Some mistakes in physics conception are corrected. Second, the chopper is designed for parallel plate deflector, chopping aperture and sine wave voltage sweeping device. It is emphasized that the conception of parallel plate load impedance is the capacitance load, but not the  $50 \Omega$  load impedance. The dynamic capacitance value has been measured. The output emphasizes the output voltage amplitude, but not the output power for sweeping device. The display system of output sweeping voltage was set up and it is sure that the maximum output voltage( $V-V$ ) is  $\geq 4000$  V. The klystron buncher are re-designed. It is emphasized to overcome difficulty of support high voltage electrode in the klystron and insulator of input sine wave high voltage for the klystron.

**Keywords:** High current beam, ns pulse system

# 高频离子源的改进和研制

沈冠仁 刘乃义 陈红涛 高福  
(中国原子能科学研究院, 北京, 102413)

**摘要:** 主要介绍了“CIAE600 kV ns 脉冲中子产生器”的高频离子源改进研制情况及其结果。RF 离子源为由直径 $\phi 25$  mm, 长 200 mm, 膨胀系数 $\leq 5.1 \times 10^{-7}$  石英放电管, RVC200 自动控制供气阀门, 振荡频率为 108 MHz 高频振荡器, 合金铝加工而成的引出吸极和磁场线圈组成的电容耦合型高频离子源。其特点是体积较小, 引出束流大, 束斑小, 长时间稳定工作, 重复性好。主要技术性能: 引出束流达到 $\geq 3.5$  mA, 靶上束流 $\geq 1.5$  mA, 束斑 $\leq \phi 8$  mm, 稳定工作 100 h。

**关键词:** 强流, 小束斑, 高稳定性, 高频离子源

离子源是加速器的心脏, 发生器的正常工作首先要求离子源工作状态正常。在 CIAE 600 kV ns 脉冲中子发生器(下面简称 CPNG)研制中, 需要一台引出束流强、束斑小、长期稳定工作时间 $\geq 100$  h, 高频用电容耦合和体积较小的高频离子源(下面简称 RFS)。改进和研制工作在一台弱流源的基础上开始, 走过了一段曲折的道路后, 现已建成一台引出束流 3.5 mA 以上, 直流靶上平均束流 1.5 mA 以上, 靶上束斑 $\leq \phi 8$  mm, 稳定工作 100 h 以上的电容耦合型高频离子源, 满足了实际工作的要求。

## 1 高频离子源的主要结构

现已基本定型的强流高频离子源主要结构如图 1 所示。

放电管用  $\text{SiO}_2$  纯度 $\geq 99.95\%$ , 膨胀系数 $\leq 5.1 \times 10^{-7}$  的石英管加工而成, 直径 $\phi 25$  mm, 长 200 mm。 $\phi 2$  mm 的钨棒阳极探针置于石英管的中心, 并对准石英屏蔽罩的中心。

用从瑞士 Balzers 公司引进的 RVC200 自动控制阀门供气, 最小气流量为  $5 \times 10^{-6}$  mbar $\cdot$ L/s (1 bar= $10^5$  Pa), 最大为 1200 mbar $\cdot$ L/s, 漏气率为  $1 \times 10^{-9}$  mbar $\cdot$ L/s。气源由耐高压钢瓶提供, 最高到 10 Torr (1 Torr= $133.322$  Pa)。

高频振荡器由 FU19 及其电子学线路组成。振荡频率约 108 MHz, FU19 板压输入直流电压 600 V, 电流 200 mA 左右。用稳定度在 1%~2% 的直流高压供电。高频输出通过位于靠近吸极的放电管上两个紫铜环与等离子气体耦合。



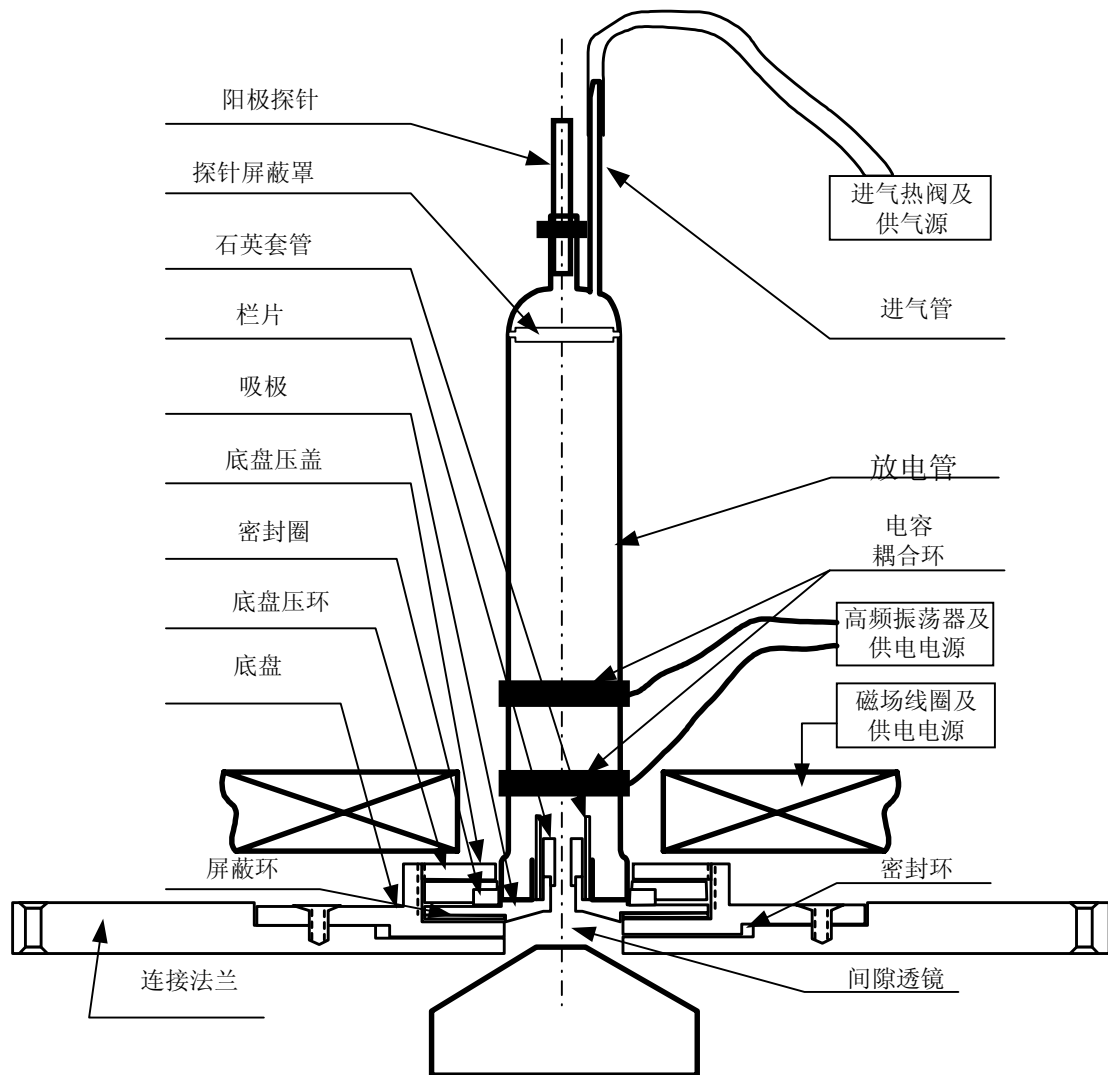


图1 高频离子源结构简图

离子束的引出吸极形状如图2所示。内径 $\phi$  3.75 mm，外径 $\phi$  4.5 mm，长7.3 mm，连接高2 mm，上面 $\phi$  5.6 mm，下面 $\phi$  18 mm的圆锥形引出口，石英套管内径 $D = 4.5+0.25$  mm，长11.5 mm，栏片外径 $\phi$  4.5 mm，内径 $\phi$  2 mm $\times$ 6.5 mm。离子束引出电压3.5~5 kV，用稳定度在0.1%~0.2%的10 kV直流高压供电。

距吸极引出50 mm处，其预加速圆筒直径为18 mm，间隙为2 mm，组成一个焦距为

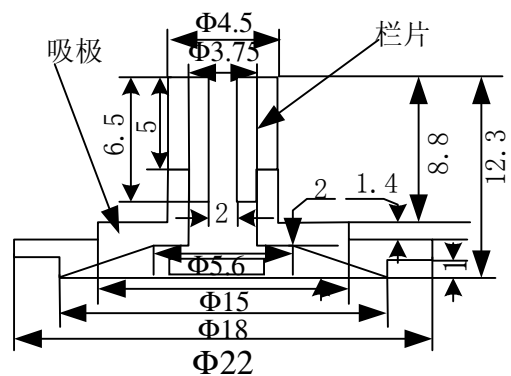


图2 吸极和栏片示意图

69 mm 的间隙透镜，使离子束从引出能量加速到 30 keV。加速电压由一个稳定度在 0.1% 的 35 kV 直流高压电源提供。

磁场线圈为外径  $\phi$  230 mm，内径  $\phi$  50 mm 厚 35 mm。供电电源用 50 V，5 A 直流电源，实用工作电流在 2 A 左右。

对现在基本定型的 CPNG 上使用的 RFS，进行了下列的改进和研制工作。

## 2 关于高频离子源的引出束流强度

高频离子源的引出束流强度由两个因素决定，即放电室的离子浓度和离子引出结构。要得到强引出离子流，首先要提高放电室的离子密度。离子源部件放电管、供气量、振荡器输入功率、耦合环位置、磁场等都是影响放电室离子密度的重要因素。

CPNG 要求强流 RFS，引出离子流强，耗气量较大，放电室有较高的气压，属于第二类气体放电<sup>[1]</sup>，产生电离的电子能量主要从高频电场得到，高频场传递给单位放电体积内电子平均功率  $\bar{P}$  由式(1)表示：

$$\bar{P} = n_e e^2 E_p^2 / 2m\nu [v^2 / (v^2 + \omega^2)] = (n_e e^2 / m\nu) E_{\text{有效}}^2 \quad (1)$$

其中： $E_{\text{有效}}^2 = 1/2(v^2 / v^2 + \omega^2) E_p^2$ ， $n_e$  为电子密度， $\nu$  电子与气体粒子碰撞机率， $\omega$  是高频电场相角的函数， $E_p$  为高频电场强度。

由式 (1) 可以看出，当  $\omega$  一定时， $\bar{P}$  是  $\nu$  的函数， $\nu$  直接与气压相关，所以  $\bar{P}$  也是气压的函数，在  $\nu = \omega$  时， $\bar{P}$  为极大值，放电管内的气压将直接影响电子的平均功率，即影响气体的电离。合适的气压使气体获得最大程度电离度。CPNG 上的 RFS 选用从瑞士进口的智能热阀供气系统，当气体流量或者气压值设定好之后将保持常数不变，确保放电管内的气压恒定，放电室的气压在 30  $\mu\text{mHg}$  (1 mmHg=133.322 Pa) 时达到最佳值。与使用针阀的比较实验结果表示在表 1 中。RFS 高频振荡器的输入功率在 120 W 左右，认真仔细地调节振荡器，使其输出功率与放电室的气压相匹配，被电子共振吸收，增加电子能量和密度为提高离子密度的主要方法。加上纵向磁场，使用高纯石英玻璃作放电管，减少离子的复合机率为辅助手段。同时使用高纯氖气，消除气体中杂质的影响，实现了最佳的离子浓度和质子比目标。

表 1 不同供气阀门实验比较结果

供气阀门	功率管	放电管	吸极	L <sup>1)</sup> 尺寸/mm	引出电压/kV	混合束 <sup>2)</sup> /mA	分析束 <sup>3)</sup> /mA	质子比
针阀	FU19	石英	LY12	2.7	3.6	$\leq 2.5$	$\leq 1.0$	$\leq 70\%$
热阀	FU19	石英	LY12	2.7	3.6	$\geq 3.5$	$\geq 1.4$	$\geq 80\%$

注：1) 石英套管高于栏片顶端距离；

2) 混合束指从离子源引出束流强度，它包括 H<sup>+</sup>, H<sub>2</sub><sup>+</sup>, H<sub>3</sub><sup>+</sup>, e 等；

3) 分析束指离子束经过分析磁铁后得到 H<sup>+</sup> 的束流强度。

其次实现强流的另一重要工作是寻找最佳的离子引出轨道。它由吸极的结构和形状，以及引出孔的大小、引出电压  $V_p$  及离子密度等三个主要因素确定，即取决于放电气体等离子体的发射面的形状。在离子源达到最佳的离子浓度后，吸极的结构和形状和引出孔的大小、引出电压  $V_p$  对离子束的引出起到关键作用。

CPNG 使用的 RFS 吸极结构显示在图 2。根据谢尔比诺夫的实验研究，石英套管内径  $D$ ，吸极引出孔直径  $d$ ，吸极和栏片的长度  $L$ ，石英套管高出栏片顶端的长度  $l$  之间应该满足以下关系：

$$L/d = 4 \sim 6; D/d = 2; l/D = 0.5 \sim 1$$

根据上面的基本关系式，在  $D = 4.5 \text{ mm}$ ， $L = 6.5 \text{ mm}$ ，对  $d$ ， $l$  的尺寸进行实验研究。 $D$  对引出束流强度，吸极特别是对栏片的寿命影响显著，按照 CPNG 的需要，选择  $d = 2 \text{ mm}$  为最佳。在上述条件确定后，对  $l$  的实验结果表示图 3。 $l = 2.7 \pm 0.2 \text{ mm}$  时可以得到十分理想的束流。引出电压  $V_p$  在  $3 \sim 5 \text{ kV}$  之间，引出混合束流强度能稳定在  $3.5 \sim 5 \text{ mA}$ ，分析束可达到  $\geq 1.5 \text{ mA}$ ，束斑在  $5 \text{ mm}$  左右，发射度  $\leq 6\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ，能散度  $\leq 180 \text{ eV}$ ，质子比  $> 70\%$ 。

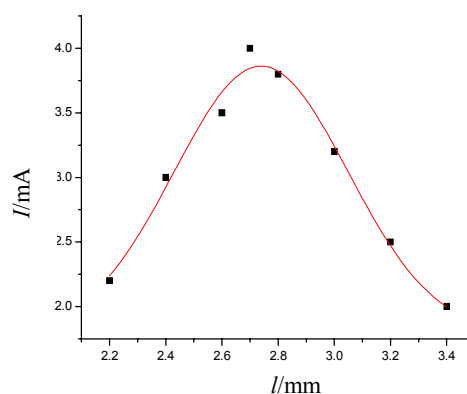


图 3 束流随  $l$  变化实验结果

### 3 关于 RFS 离子源的长期工作稳定性

长期工作稳定性应指两个方面的问题：一是组装好一套离子源，该源最长的工作时间，即源的寿命问题；二是源工作后，连续工作束流强度稳定性的变化。在孙别和等同志的强流高频源研究工作中，对这个问题进行了详细的讨论<sup>[2, 3]</sup>。我们的主要工作介绍如下：

#### (1) 源的寿命问题

源的使用寿命主要取决于吸极和栏片的有效使用时间，而它除了离子束的引出轨道外，与使用的材料直接有关。吸取孙别和等研究工作中的经验，考虑材料的离子复合系数、发热溅射、绝缘等对寿命的影响，采用了复合系数小耐热高的石英做放电管和套管，用耐热好的不锈钢做吸极，溅射相对小的铝合金做栏片，如图 2 所示，取得了很好的效果。栏片直接插到吸极，可以减少吸极的损耗，安装方便。但对栏片的加工，要求精度高。

不同型号的铝的硬度与耐热性能是不一样的，它都会影响栏片的使用寿命。以连续工作  $100 \text{ h}$  以上作为衡量栏片使用寿命合格与否的标准，进行实验发现：当控制离子源束流引出在  $2.5 \text{ mA}$  以下时，栏片可用硬铝 LY-11 型；在  $2.5 \text{ mA}$  至  $3.5 \text{ mA}$  时，需用 LY-12 型；在  $3.5 \text{ mA}$  以上时，如果用一般硬铝，最多只能工作几个小时，要用航空铝合金 LY-16。

在实践中还发现放电管经过反复使用后其复合系数将会逐渐变大，束流的质子比会渐渐降低，引出的束流也随之逐渐减少。这是因为放电管在多次使用和用 5%的氢氟酸浸泡清洗后，放电管内表面杂质增多，石英纯度逐渐降低，最后导致束流的品质下降。

(2) 源工作后，连续工作时段中束流强稳定性的变化。

稳定性可分为两个部分：

a. 瞬间脉动是指连续工作时间内，测量到束流强度的瞬间变化量 $\Delta I_i$ ，它与离子源高频振荡器，供气系统，引出电压及其它们的供电电源的稳定性有关，它可用类似孙别和等给出的计算公式表示：

$$\delta = \left[ \left( \sum_i^m \Delta I_i / I \right) / m \right] \times 100\% \quad (2)$$

在式(2)中， $\delta$ 为在给定的工作时间内测到平均偏差。 $\Delta I_i$ 是第*i*次测量到的偏差值，*m*是测量次数，*I*是要求的束流强度值。

提高束流品质，考虑到其引起瞬间脉动的主要原因，对离子源的部件采取稳定性措施，特别是供电电源的稳定性，如前所述。当前在 $\geq 100$  h的长时间测量中，平均偏差可保持在 2%~3%，最大偏差在 5%~6%。

b. 长时间工作的单向慢漂是指引出束流强度十分缓慢的稳定性漂移。它主要由引出结构，气量供给等变化造成，可以对离子源的参量进行适当的调节来解决问题。

## 4 关于离子源的重复性

由于离子源的部分部件是损耗型的，如吸极、栏片、石英套管、放电管，甚至高频振荡器的振荡管，要进行更换和重新组装。因此，离子源是在不断更新流动中工作，在这几年的工作中，多次遇到离子源更换后，工作状态变坏，甚至不能工作的情况。在这种情况下，我们想到了离子源的重复性问题，即在离子源的损耗部件更新后，保持离子源的工作状态和性能不变。所以重复性应是离子源的一个重要性能指标，是离子源工作者必须考虑的问题。

要解决离子源的重复性问题，简单地说就是要解决损耗部件的重复性问题。但实际工作是很困难的。用同样材料加工好的部件，看上去一样，更换使用后，源的工作状态就不一样。如同一批加工的放电管、吸极和栏片，同一型号的振荡管等。仔细分析研究造成这些“不一样”的原因，是解决重复性问题关键所在。主要措施是：(1) 吸极和栏片是机加工问题，除了提高设计图纸的加工精度外，对加工好的吸极和栏片，进行仔细地检验，保证每个都达到设计要求。(2) 为了寻找放电管之间引起差别的原因，设计了在一些细节上存在不同的管型，进行实验，如阳极探针的长短、位置，对准屏蔽罩的垂直度，屏蔽罩的安装位置和方法等，选择最佳的使用，并说服厂家按照我们的要求制造。(3) 用FU19作高频振荡器的振荡管，它的标准使用输入功率是 90 W，最大板耗功率是 40 W，现在使用的输入功率是 120 W，有时到 140 W。因此如果源的负载匹配不好，功率反馈稍大，就烧振荡管，在某一段时间内，烧了不少管子。用同样线路，更换一个管子就不行，曾经百思不得其解。经反复考证和分析，问题出在管子之间的性能差别上，或者说管子的质量上。在购买时，提出了对每个管子明确的质量要求，特别是放大倍数的性能

指标,基本上解决了问题。(4) 其他问题,如供气量等不再详述。在采取这些措施后,收到了明显的效果,一年多时间内,离子源的重复性很好,为 CPNG 的建成投入运行起了重要作用。

## 5 结果与讨论

一台结构紧凑,体积小,引出束流 3.5 mA 以上,直流靶上平均束流 1.5 mA 以上,脉冲束平均流强  $\geq 30 \mu\text{A}$ ,靶上束斑  $\leq \phi 8 \text{ mm}$ ,稳定工作 100 h 以上的电容耦合型高频离子源已经建成,满足了 CIAE 600 kV ns 脉冲中子发生器的需要。

本文作者对兰州大学孙别和教授和兰州近代物理所肖宗礼研究员对本工作给予的指导和帮助表示深切的感谢。

### 参 考 文 献

- 1 叶铭汉,陈鉴璞.《静电加速器》第五章“高频离子源”
- 2 孙别和,朱学培,陈克凡,柳纪虎.强流高稳定性高频离子源.
- 3 孙别和,朱学培,柳纪虎.高频离子源的束流分析

## Radio Frequency Ion Source

SHEN Guanren LIU Naiyi CHEN Hongtao GAO Fu  
(China Institute of Atomic Energy, Beijing, 102413)

**Abstract:** The study on Radio Frequency Ion Source is mainly introduced, which is used for CIAE600kV ns Pulse Neutron Generator; and obtained result is also presented. The RF ion source consists of a diameter  $\phi 25 \text{ mm}$ , length 200 mm, coefficient of expansion  $\leq 5.1 \times 10^{-7}$  quartz discharge tube, a RVC200 valve of  $\text{D}^+$  gas feed, a 108 MHz/s Rf oscillator, alloy Al canal geometry and an axial magnetic field. It's characteristic are small volume, high extraction beam current, small spot, long timetable work and repeated application. Main technology performance: extraction beam current  $\geq 3.5 \text{ mA}$ , beam current on target  $\geq 1.5 \text{ mA}$ , beam spot  $\leq \phi 8 \text{ mm}$ , stable working time  $\geq 100 \text{ h}$ .

**Keywords:** Big beam, Small spot beam, Stability, Radio frequency ion source

# 切割器电压扫描仪的研制

沈冠仁 李胜利 吴隆成 高福  
(中国原子能科学研究院, 北京, 102413)

王全兴  
(信息产业部电子 54 研究所, 石家庄, 050081)

**摘要:** 介绍了 CIAE600kV ns 脉冲中子发生器切割器切割电压扫描仪的设计要求、工作原理及研制结果。切割器切割电压扫描仪是脉冲化装置的最重要的关键设备之一。它的主要技术指标是: 工作频率:  $750 \text{ kHz} \pm 20 \text{ Hz}$ , 总失真度  $< 5\%$ , 电压增益:  $> 65 \text{ Db}$ ; 输出工作电压  $V-V$  值:  $0 \sim \geq 4000 \text{ V}$  连续可调, 调节精度  $\leq \pm 25 \text{ V}$ ; 输出功率:  $> 7 \text{ W}$ ; 供电要求:  $220 \text{ V AC} \pm 10\%$ ,  $50 \pm 1 \text{ Hz}$ ; 总耗电功率:  $< 100 \text{ W}$ ; 工作环境温度:  $0 \sim 40^\circ$ ; 长期稳定度  $\leq 1\%$ 。

**关键词:** 切割器, 电压扫描仪, CPNG

切割器切割电压扫描仪是脉冲化装置的最重要设备之一。它的技术指标能否达到设计要求, 决定切割器工作的成败。为了吸取初期设计研制不成功的教训, 认真分析研究了不成功的原因, 进行了设计研制方面的准备工作, 提出了详细的设计要求。本设备由信息产业部石家庄电子 54 研究所研制。

## 1 设计要求

经过与有关专家的讨论, 认真分析了原设计切割电压扫描仪的实验测量数据和脉冲化的要求。原设计主要问题是在负载阻抗概念、设计思想重点上<sup>[1]</sup>。为了保证新切割电压扫描仪的研制成功 (下面简称扫描仪), 提出的设计要求如下。

### 1.1 主要技术指标

(1) 扫描仪初级放大器输入阻抗要与输入信号阻抗匹配。

(2) 扫描仪末级功率放大器输出功率转换成电压输入到切割板的 LC 谐振回路, 阻抗应与切割板容抗负载相匹配, 预留谐振回路线圈适应容抗负载变化的抽头, 输出扫描电压频率为  $0.75 \text{ MHz}$  正弦波, 波形失真  $\leq 5\%$ , 频率误差  $\leq 0.01\%$ , 电压幅度 (零-峰最大值)  $\geq 2000 \text{ V}$ 。

(3) 扫描仪用线性直流电源供电, 稳定度  $\leq 0.5\%$ 。线性直流电源二相 AC  $220 \text{ V}$ ,  $50 \text{ Hz}$

交流电源供电。

(4) 长时间稳定工作，连续工作至少大于 8 h。

## 1.2 输出显示系统

成功给出输出电压检测点，并给出检测电压与输出电压比值曲线。设立工作显示灯，输入功率吸收效率显示。

## 2 线路工作原理

线路工作原理如图 1 所示。发生器送出的 0.75 MHz 正弦波控制信号由光纤通过光耦合放大器输入前置放大器，再经推动级到末级功放产生峰-峰值为 250 V 的中压正弦波信号，输入匹配升压 LC 谐振电路，产生最大峰-峰值 $\geq 4000$  V 的正弦波高电压加于切割板负载上，总输出功率 $\geq 7$  W。

线路工作原理的特点是：(1) 线路较简单，末级功放的输出功率小，比原设计的 150 W 小 20 倍。(2) 输出电压高，最大峰-峰值 $\geq 4000$  V。(3) 用线性直流电源给线路供电，保证线路工作的稳定性。

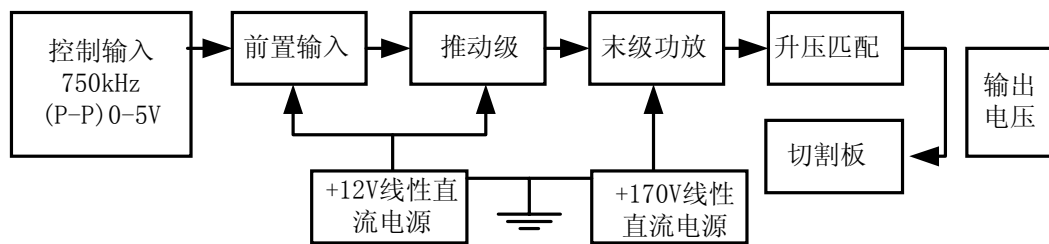


图 1 线路工作原理图

## 3 整机工作线路

整机工作线路由三部分组成：(1) 前置放大和推动级线路；(2) 功率放大，输出升压匹配和输出显示测量线路；(3) 供电电源线路。这个线路的创新是第二部分中由  $R_{13}$ - $R_{17}$ ,  $C_{13}$ - $C_{16}$  和  $D_1$  组成的输出显示测量线路，它把输入到切割板负载的切割电压随机测量并显示在 A 的表头上，给使用扫描仪带来了方便。

## 4 结果与讨论

扫描仪从 1999 年 8 月建成到现在，经过两年的使用，证明了它的稳定和可靠性。它的主要技术指标是：

工作频率：750 kHz $\pm$ 20 Hz。总失真度 $<5\%$ 。电压增益： $>65$  Db。

输出工作电压峰-峰值：0 $\geq 4000$  V 连续可调，调节精度 $\leq \pm 25$  V。

输出功率： $>7$  W。 供电要求：220 V (AC)  $\pm 10\%$ ，50 $\pm 1$  Hz。

总耗电功率：<100 W。工作环境温度：0~40 °C。长期稳定度≤1%。

新研制的扫描仪技术指标全面达到了设计和使用要求，为 CIAE 600 kV ns 脉冲中子发生器的建成起了十分重要的作用。

在扫描仪的研制中，我们首先在物理概念上论证了设计要求，强调容性负载，电压切割的物理设计思想。其次，通过必要的实验研究工作，证实物理思想的正确性，并为工程设计准备了必要的技术数据资料。这是成功的重要经验。

### 参 考 文 献

- 1 沈冠仁, 陈洪涛. 强流 ns 脉冲化装置的研制. CNIC-01610, IAE-0202
- 2 牛铭, 李胜利. ns 脉冲中子发生器切割板电压计算. 原子能科学技术, 2001, 3: 245
- 3 李胜利, 牛铭. ns 脉冲中子发生器切割板电容值测量. 原子能科学技术, 2001, 4: 3755

## Development of A Voltage Scanner of Chopper

SHEN Guanren LI Shengli CHEN Hongtao

WU Longcheng GAO Fu

(China Institute of Atomic Energy, Beijing, 102413)

WANG Quanxin

(54 Institute of Electronic Information Ministry, Shijiazhuang, 050081)

**Abstract:** Development of voltage sweeper of chopper with CPNG are introduced. Voltage sweeper is one of important key parts of chopper. Two years working prove that it is stable and reliable. It's main technology performance save: sine wave frequency:  $750 \text{ kHz} \pm 20 \text{ Hz}$ ; total distortion:  $< 5\%$ ; the voltage gain:  $> 65 \text{ Db}$ ; output voltage ( $V-I$ ):  $0 \sim \geq 4000 \text{ V}$ ; the error  $\leq \pm 25 \text{ V}$ ; output power:  $> 7 \text{ W}$ ; voltage supply:  $220\text{V AC} \pm 10\%$ ,  $50 \pm 1 \text{ Hz}$ ; total power supply:  $< 100\text{W}$ ; Work temperature range:  $0 \sim 40^\circ$ ; Stability in long time  $\leq 1\%$ .

**Keywords:** Chopper, Voltage Scanner, CPNG



# ns 脉冲束的调节和工作状态监视

沈冠仁 陈洪涛

(中国原子能科学研究院, 北京, 102413)

**摘要:** 介绍了 ns 脉冲束正确的调节方法, 简述了 ns 脉冲束工作状态监视系统。用正确思路和方法进行 ns 脉冲束的调节, 对于了解脉冲化装置的工作状态, 分析和解决调节出现的问题, 尽快地使脉冲束达到最佳工作状态, 测量到符合实际的性能指标是十分重要的。

**关键词:** ns 脉冲束, 调节, 监视

用正确思路和方法进行 ns 脉冲束的调节, 对于了解脉冲化装置的工作状态, 分析和解决调节出现的问题, 尽快地使脉冲束达到最佳工作状态, 测量到符合实际的性能指标是十分重要的。在 CIAE 600 kV ns 脉冲中子发生器研制过程中, 对于如何正确地进行 ns 脉冲束的调节、工作状态监视和技术性能测试, 发生过多次的争论。为了总结经验教训, 在本文中进行全面的分析研究, 从而得到正确的调节方法和分析判断和解决出现问题应有的思路和能力。

## 1 ns 脉冲束调节的指导思想原则

脉冲束是对直流束进行切割和聚束的脉冲化基础上建立起来的。因此, 直流束的工作状态将直接影响脉冲束的工作, 换言之如果直流束工作状态不好, 脉冲束将无法工作。进行脉冲束的调节, 首先要求直流束稳定工作。先直流后脉冲指导思想原则也适用于脉冲束的调节工作。

## 2 ns 脉冲束工作状态的显示方法

发生器启动后, 脉冲束的调节, 对脉冲束工作状态进行分析判断是很重要的, 调节是围绕着脉冲束工作状态的分析判断进行。因此, 怎样把脉冲束工作状态明确地显示出来成为首要问题。

### 2.1 电脉冲信号在示波器上显示

用脉冲化装置建立的脉冲束, 打到同轴靶和快速法拉第筒上的束流电荷, 或脉冲束飞过拾取筒产生的感应电荷, 都可以形成具有脉冲束工作状态特性的电脉冲信号。把电脉冲信号在示波器上显示出来, 根据它的上升时间、半宽度、幅度和形状等特性, 分析

判断脉冲束的工作状态。图 1 列出了三种方法输出相似的电脉冲信号。A 代表脉冲束没有达到正常工作状态时输出脉冲形状。B 代表脉冲束调节的中间过程工作状态。C 代表脉冲束达到正常工作状态。输出脉冲信号的上升时间可以相对地反映脉冲束的宽度，但由于电脉冲信号的上升时间还应包括使用的器件、电子学线路和示波器等的贡献，所以不能直接反映脉冲束的宽度。CIAE 600

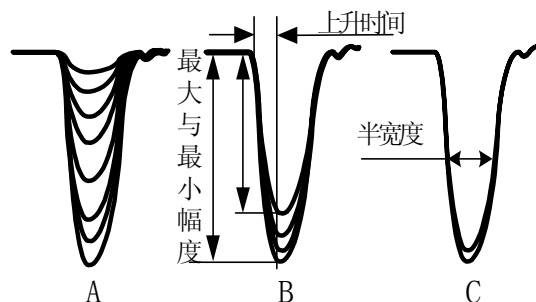


图 1 在示波器上显示的脉冲信号形状

kV ns 脉冲中子发生器从拾取筒得到的脉冲信号正常工作时，有图 1C 的形状，它的上升时间和半宽度都是 1.8 ns，用飞行时间方法测到束宽是 <math><1\text{ ns}</math>。

## 2.2 中子和 $\gamma$ 射线飞行时间谱在微机多道上的显示

因同轴靶和快速法拉第筒安装在脉冲束的焦点上，无法同时安装中子靶，取得脉冲信号时，束流被停止，不能用飞行时间方法进行脉冲束性能的显示。拾取筒安装于中子靶室的前面，束流穿过拾取筒，产生感应电荷，取得电脉冲信号。束流打到中子靶上，因此同时用飞行时间方法进行脉冲束性能测量，飞行时间谱显示脉冲束的性能。图 2 显示飞行时间方法测量束流打到靶上产生的中子和  $\gamma$  射线谱， $\gamma$  射线谱的半宽度和 1% 宽度代表脉冲束宽和底宽。

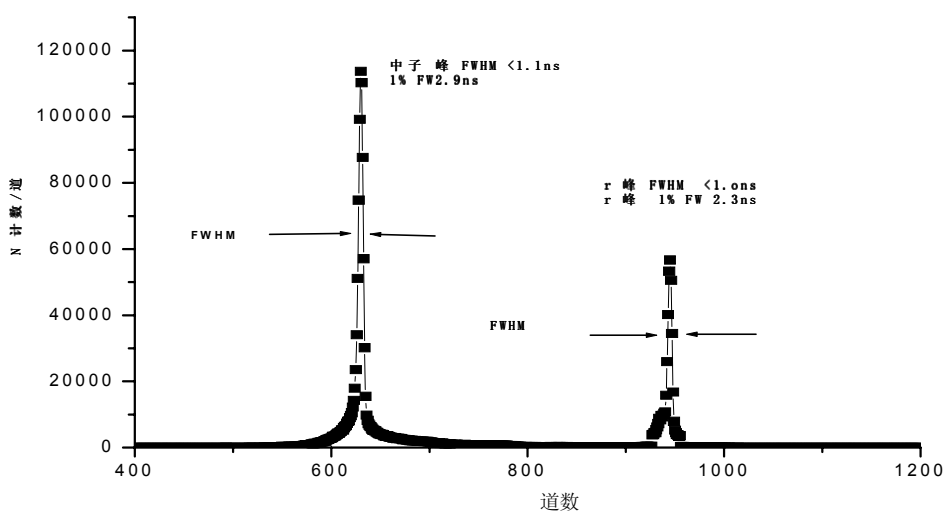


图 2 产生的中子和  $\gamma$  射线谱

## 3 ns 脉冲束工作状态的调节

### 3.1 ns 脉冲中子发生器建造阶段进行脉冲束调节的目的

(1) 把脉冲束的最佳状态调出来，确定它的主要技术性能，并与设计指标进行分析比较，得到发生器特别是脉冲化装置存在问题的信息，指出进一步改进的方向。如 CIAE 600 kV ns 脉冲中子发生器脉冲束的底宽达不到设计指标时，分析测到的飞行时间谱，找到原因是切割脉冲束宽太宽造成，明确了提高切割器切割能力的改进方向等。

(2) 在调节过程中，发现发生器各个部位存在的问题。要调节的各个参量代表发生器的不同部位是清楚的。逐个参量进行反复调节，仔细地观察脉冲束的变化，发现存在问题。由于 CIAE 600 kV ns 脉冲中子发生器工程设计存在很多问题，在调节中都暴露出来，理顺解决存在问题的先后顺序，对尽快地完成发生器的改造有重要作用。先直流后脉冲，先切割后聚束改进工作的指导思想，就是在调节中逐渐形成的，收到了非常好的效果。

### 3.2 ns 脉冲束工作状态的调节

在发生器的启动工作完成后，开始脉冲束的调节，首先对离子源、预加速电压及初聚系统进行联合调节，保证从离子源引出的直流束，能量达到 30 kV，束斑小，束腰位于切割板的中心。然后，启动脉冲化装置，把拾取脉冲信号送到示波器显示，边观察边调节发生器的各个参量，特别是脉冲化装置切割、聚束和相位，使信号达到最佳形状，如图 1C。达不到最佳形状时，应寻找原因，排除故障后，再继续调节，直到达到最佳形状。这里强调指出，要把图 1 中的 A 状态达到 C，只能通过对发生器主要参量进行调节来实现。发生器本身的性能达不到时，要把发生器存在问题解决后，才能调节到 C 状态。要防止一个绝对错误的做法，即调节显示示波器调谐旋钮，把 A 状态的小幅度脉冲切除时，也可以得到类似 C 的单脉冲显示，以此作为脉冲束的工作状态和性能的调试结果。但这是假象，不能代表脉冲束的真实状态。这样做的严重后果是阻止了脉冲束进一步调节，掩盖了发生器存在问题，阻碍了发生器存在问题的发现、改进和提高。

用电脉冲信号的调节，是比较粗的调节，不能直接观察脉冲束精确的工作状态。在把图 1 表示的电脉冲信号调到 C 状态后，再启动飞行时间谱仪系统，得到图 2 所示的飞行时间谱，还是边观察边调节发生器各个部位参量，使中子和  $\gamma$  射线峰形对称，达到最佳半宽和底宽，得到最大的脉冲束平均流强，最小束斑。在发生器的硬件达到设计要求后，调节脉冲束到最佳状态是比较容易实现的。

### 3.3 调节中的注意事项

(1) 脉冲束开始调节前，首先要把直流束调节到稳定工作，从初聚系统引出束的束腰应在切割板的中心位置，束斑要小或者说达到最佳状态，束斑的大小将影响切割板电容值，影响到切割器的切割能力。

(2) 为了保护中子靶不受强直流束的轰击，开始脉冲束调节时，要先打开切割器，加上适当的切割电压，然后再打开聚束器，加聚束电压。

## 4 ns 脉冲束工作状态的监视系统

在脉冲束达到正常工作开始运行后，对其状态进行监视，是保证脉冲束稳定工作的重要措施。主要有下列方法：

### (1) 脉冲束平均流强的监视

用连接到中子靶室的流强表显示在控制室，通过观察强度的稳定性，用于确定发生器离子源的工作状态。

### (2) 拾取信号的工作频率监视

用快定标器记录拾取信号脉冲的工作频率。在正常工作时，拾取信号的工作频率应与切割脉冲的一致，大于或小于切割脉冲频率，都是脉冲束工作状态不正常引起。一般安置于实验测量室，由实验工作人员操作，观察监视。

### (3) 飞行时间谱监视

飞行时间法监视系统，有直观、精确、容易发现脉冲束工作状态变化等优点。在技术上，对于有一定素质的加速器工作人员，经过培训，易于掌握进行监察操作。如图 3 所示，由中子实验大厅拾取筒和中子探测器引出的脉冲信号分别送到两个 ORTEC935 恒比定时，给出定时信号，拾取路经过 ns 延迟送到 ORTEC566 时幅变换器的停止输入，中子探测器路直接送到 ORTEC566 的起始输入，ORTEC566 输出送到微机多道进行分析，获得飞行时间谱。谱仪调试由实验工作人员来做。拾取信号通过 50 Ω 匹配分路器，送到“485”示波器，用观察拾取脉冲信号的工作状态。

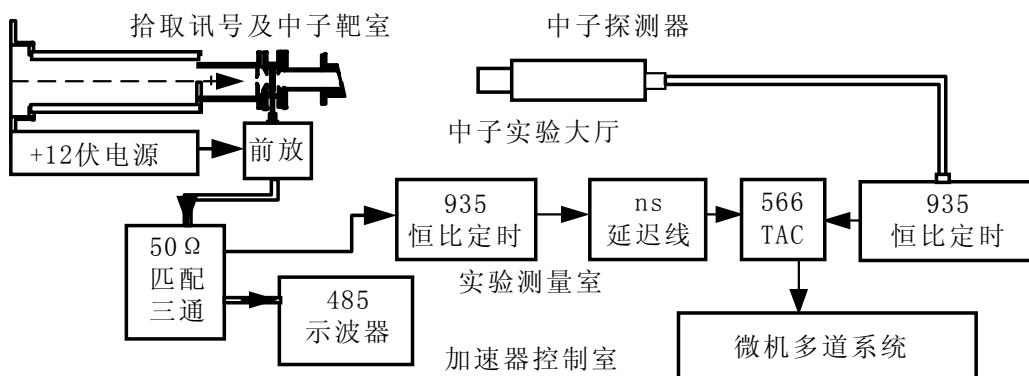


图 3 微机多道监视系统示意图

飞行时间谱出现状态变化的分析判断及应采取的相应的调节措施：

(1) 如果发现谱形不对称，主要是相位发生漂移，应对相位进行适当的调节，使谱形回到对称形状。

(2) 如果谱形出现半宽度变宽时，说明聚束电压发生了漂移，应视峰顶的情况进行分析判断。出现双峰，表明聚束电压往高移动，出现过聚，应降低聚束电压。谱形出现平顶，说明聚束电压向低漂移，出现欠聚，需升高聚束电压。

(3) 如果谱的底部不平或底宽太大，本底增大，说明切割脉冲宽度增大，其原因要认真分析。一般情况下，切割电压向底漂移，需加大，要仔细观察离子源及聚焦电压的工作状态是否变化，它们的变化直接影响切割器的工作。要进行得缓慢、耐心、仔细，而且要注意相互之间的配合调节。

# **Adjustment and Working State Monitor System of ns Pulse Beam**

SHEN Guanren CHEN Hongtao  
(China Institute of Atomic Energy, Beijing, 102413)

**Abstract:** The adjustment of ns pulsed beam of CIAE 600 kV ns Pulse Neutron Generator is introduced; working state monitor system is also presented. It is very important that the ns pulse neutron beam is adjusted by using proper thinking and method for understanding work state of pulse installation, analyzing and solving existing problems of the installation, coming up to quickly optimum work state pulse beam and measuring technology performances.

**Keywords:** ns pulse beam, Adjustment, Monitor system

# 超薄高真空阀门与离子束初聚系统

沈冠仁 秦久昌 苏胜勇 吴隆成 高福  
(中国原子能科学研究院, 北京, 102413)

**摘要:** 介绍了专门为 CIAE 600 kV ns 脉冲中子发生器头部设计和使用的超薄高真空阀门与离子束初聚系统。采取阀门与初聚系统的第一电极合为一体的设计方案。建成并投入使用后, 头部聚焦系统没有电晕、不发热打火。超薄高真空阀门不仅使离子源更换快捷方便, 更重要的是保护整个发生器的真空系统, 特别是保护了加速管的安全使用, 延长了它的使用寿命。

**关键词:** 超薄高真空阀门, 离子束初聚系统, CPNG

在 CIAE 600 kV ns 脉冲中子发生器研制中, 初聚系统耐压不够, 产生电晕和打火。同时在头部没有一个能把离子源与发生器真空系统隔离的高真空阀门, 因此在离子源更换时, 使发生器全部暴露在大气中, 对发生器的真空, 特别是加速管维护产生很坏的影响, 也使发生器的直流束不能正常工作。

经过反复的思考, 采取打破常规办法, 重新设计和建造了初聚系统和超薄高真空阀门, 并使阀门与初聚系统的第一电极合为一体, 解决了上面遇到的难题, 收到事半功倍的效果。

## 1 初聚系统重新设计与加工

初聚系统和超薄高真空阀门的示意结构如图 1 所示。

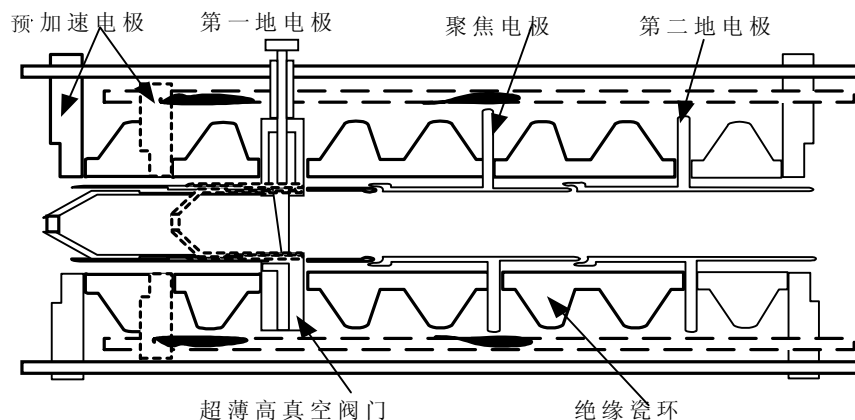


图 1 初聚系统与超薄高真空阀门示意图

图 1 中虚线所示为原设计的初聚系统，由于第一地电极和预加速电极，压紧拉杆和聚焦电极距离太近，耐压不够造成电晕和严重打火，黑斑是打火造成的拉杆缺损处。图 2 所示的曲线 1 和 2 代表原初聚系统的耐压测量结果。重新设计和加工的初聚系统是个三圆筒透镜，圆筒内径 $\phi 60\text{ mm}$ ，极间隙 $6\text{ mm}$ 。第一电极与厚 $20\text{ mm}$ 的超薄高真空阀门结合，在更换离子源时阀门关闭，确保加速器的真空度。电极间用外径 $\phi 180\text{ mm}$ ，内径 $\phi 130\text{ mm}$ ，长 $60\text{ mm}$ 的 $95$ 陶瓷绝缘，并在透镜两端法兰间用拉杆压封。其难点是需聚焦束流强，聚焦电压高。为达到 $30\text{ keV}$ 离子束切割能量的要求，在离子源引出口加预加速电压要高。加长了第一地电极与予加速电极绝缘距离和一个 $3\text{ cm}$ 长带裙边的瓷环（图 1 中用菱形格线显示部分）。同时加大透镜两头的连接法兰直径，由 $\phi 256\text{ mm}$ 增加到 $\phi 300\text{ mm}$ ，扩大了固定拉杆与电极间的距离 $22\text{ mm}$ ，与聚焦电极的距离也增加到 $5\text{ cm}$ 。图 2 中的曲线 3 代表新初聚系统的耐压状况，它完全满足了使用要求。

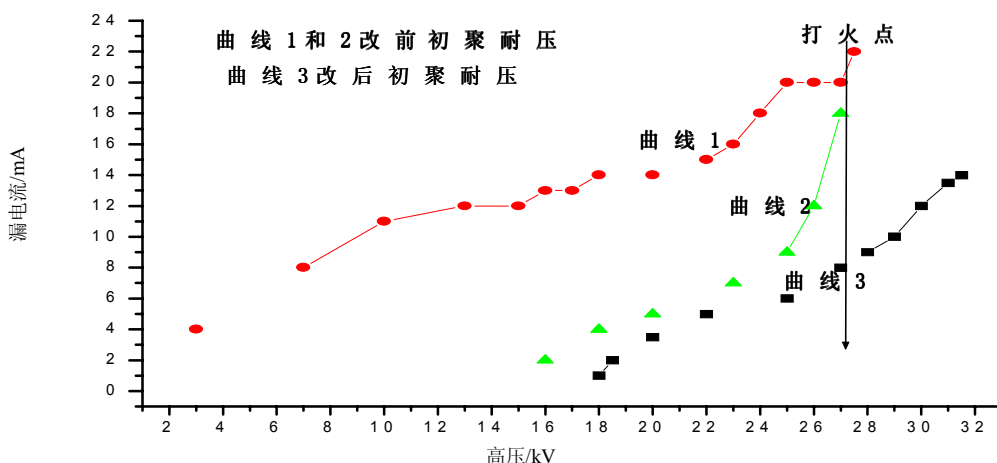


图 2 初聚系统耐压曲线

## 2 超薄高真空阀门重新设计与研制加工

预加速电极连接离子源底盘，原第一地电极没有真空阀门功能，与发生器的加速管和管道直接连通。因此，在更换离子源时，发生器的真空系统全部暴露在大气中。造成这种情况的原因是原来按常规方法为头部设计的阀门装不上，用不了。根据实际需要，决定把阀体作为初聚系统的第一地电极，使阀门和电极二者合一。设计最大困难是空间太小，原有第一地电极只有 $8\text{ mm}$ 厚，按照头部束流光路计算，只能增加到 $20\text{ mm}$ 厚。采取打破常规的设计方案，成为必由之路。一个阀体为直径 $\phi 200\text{ mm}$ ，厚 $20\text{ mm}$ 的高真空阀门的主要结构如图 3 所示。

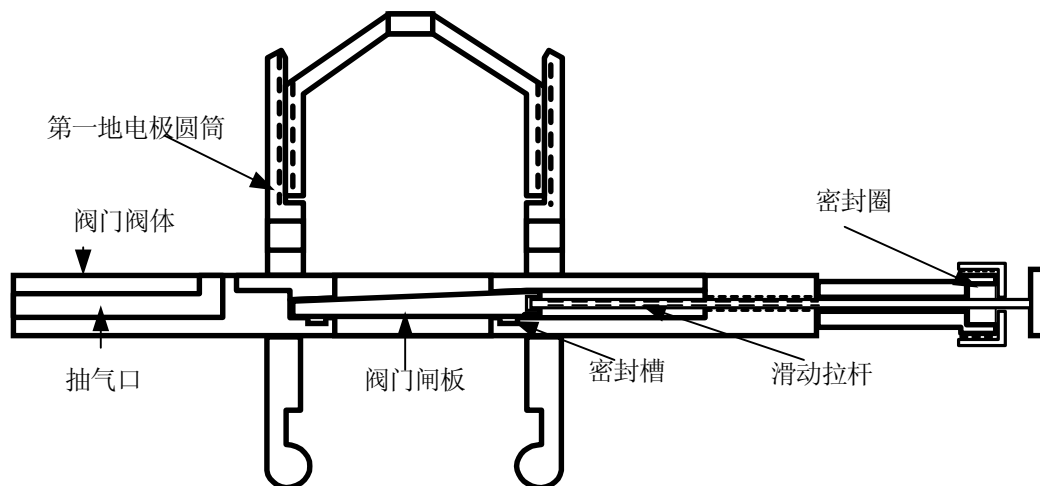


图3 第一地电极和超薄高真空阀门结构图

### 3 结果与讨论

新的初聚系统和超薄高真空阀门建成并投入使用，头部聚焦系统没有电晕、不发热打火。初聚系统正常工作确保离子束斑达到预期的设计指标，在分析磁铁出口为 $\phi 5\text{ mm}$ ，束流运输光路更加合理。

超薄高真空阀门不仅使离子源更换快捷方便，更重要的是保护整个发生器的真空系统，特别是保护了加速管的安全使用，延长了它的使用寿命，为 CIAE 600 keV ns 脉冲中子发生器直流束的正常工作建立了坚实的基础。

## Ultrathin Vacuum Valve and Ion Beam Focusing System

SHEN Guanren QIN Jiuchang SU Shengyong WU Longcheng GAO Fu  
(China Institute of Atomic Energy, Beijing, 102413)

**Abstract:** Design and fabrication of the ultrathin vacuum valve and ion beam focusing system are introduced for application on CIAE 600 kV ns Pulse Neutron Generator. The valve is integrated with first electrode of focusing system. The electric dizzy and striking sparks on focusing system disappeared after using these devices. The ion source can be replaced easily and quickly because the ultrathin vacuum valve was used, and the vacuum system of generator is



protected; specifically, safe action of the accelerating tube is maintained; and using live is extended.

**Keywords:** Ultrathin vacuum valve, Ion beam focusing system, CPNG