

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 50Ω 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) ≥ 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^[1]

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^[2~4], 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。

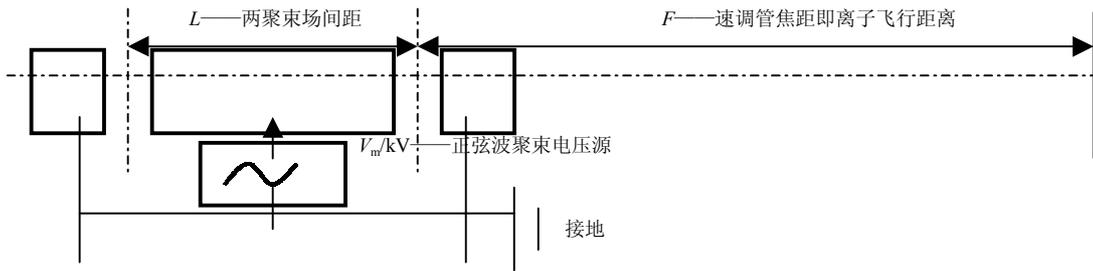


图 1 速调管聚束器示意图

表 1 脉冲束计算结果

初始能量分散 $\Delta E_0/\text{eV}$	聚束电压幅度 V_m/kV	1/10 处脉冲底宽 T/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 β 为入射粒子的相对速度(v/c)， λ 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 ΔE_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 keV。脉冲束平均流强：30~50 μA ，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/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^[5, 6]

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。 ≤ 100 V 时，脉冲峰形变宽； ≥ 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 ≤ 1.2 ns，聚束电压相位必须稳定在 $\pm 1^\circ$ 以内，能散应 ≤ 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。

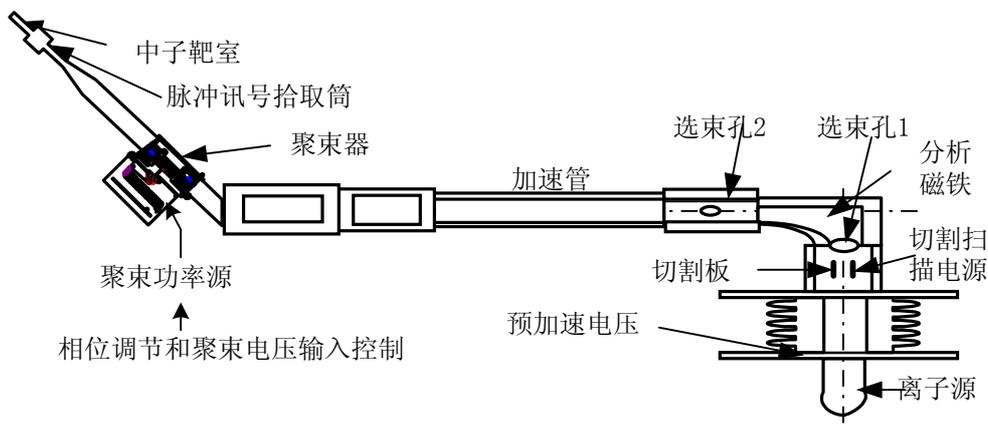


图 2 脉冲化装置示意图

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 ≥ 3 mA，要求切割脉冲的宽度达到 ≤ 40 ns。

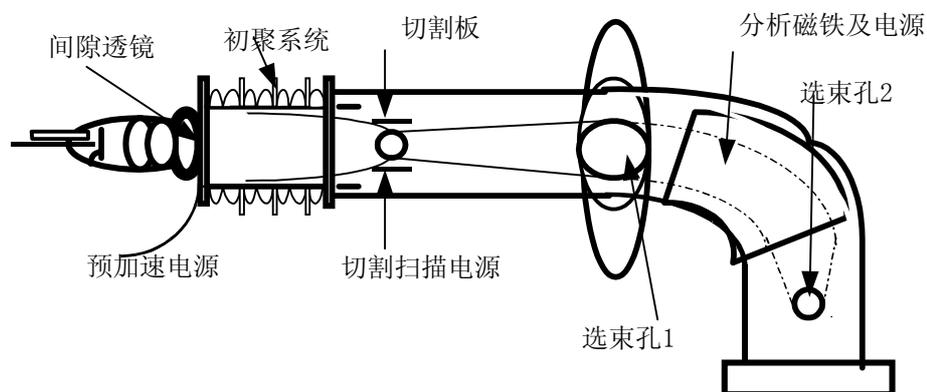


图3 切割器示意图

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） $\geq 4000\ \text{V}$ ^[7]。

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^[8]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。

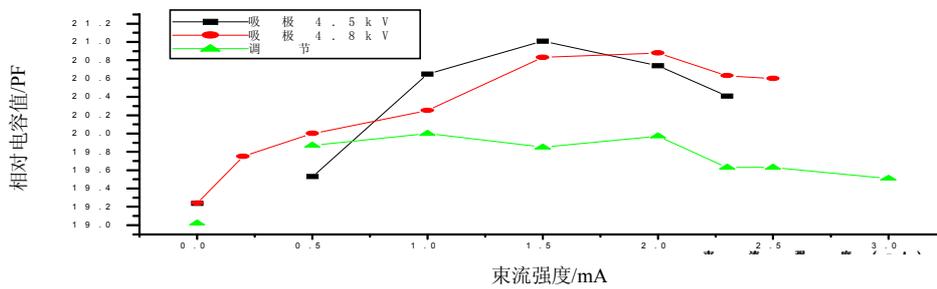


图4 动态电容值测量

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 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 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。

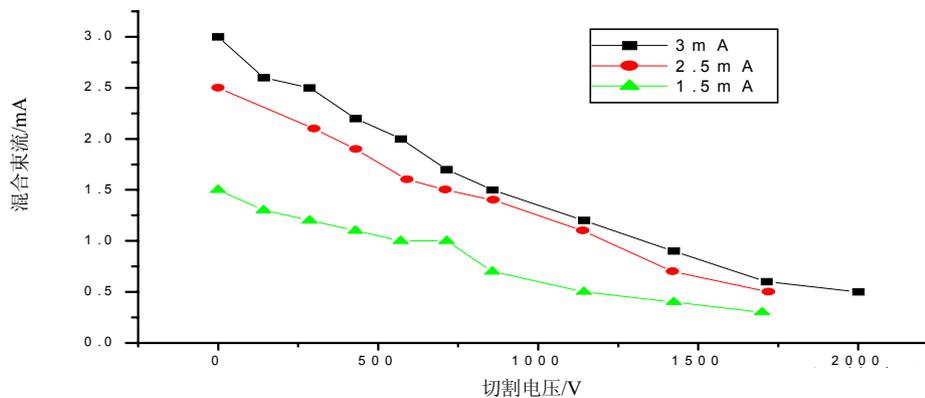


图5 切割能力随扫描电压的变化实验结果

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 β 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。

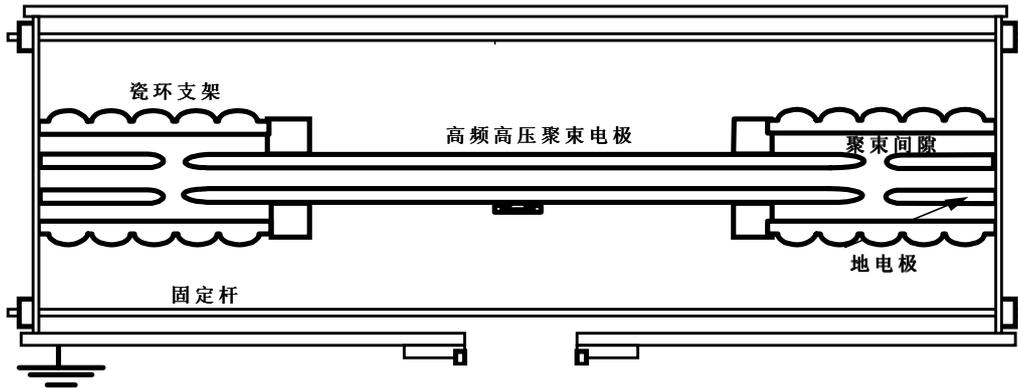


图 6 速调管结构图

(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。

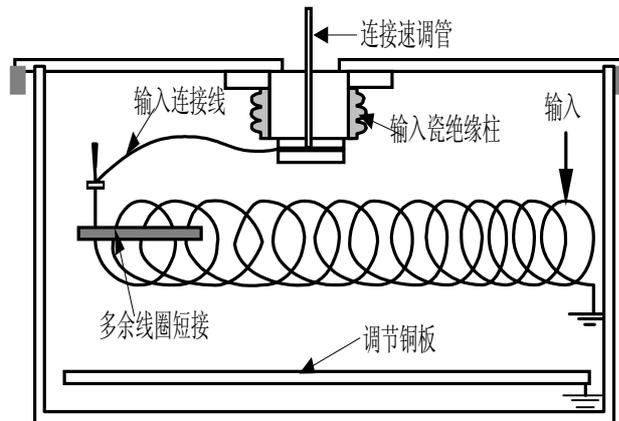


图 7 聚束高压 LC 谐振腔

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。

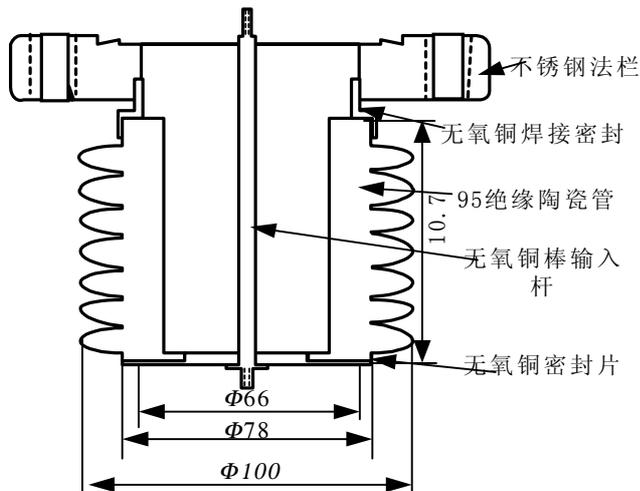


图 8 聚束高压输入绝缘柱

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。

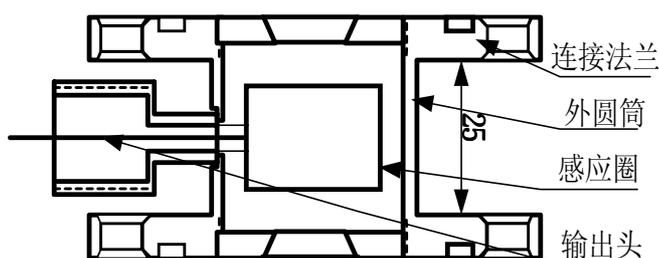


图 9 脉冲信号拾取筒

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/ μ A	束斑/mm	束宽/ns	重复频率	中子源强/ 10^{10} n·s ⁻¹
中国 CIAE	600	高频	≥ 30	$\phi 5 \sim 10$	1.0	1.5	1
美国 LLNL	400	高频		$\phi 6$	1.5	2.5	5
日本大坂大学	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 50Ω 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 ≥ 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