

# 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  $\geq 70\%$ 。

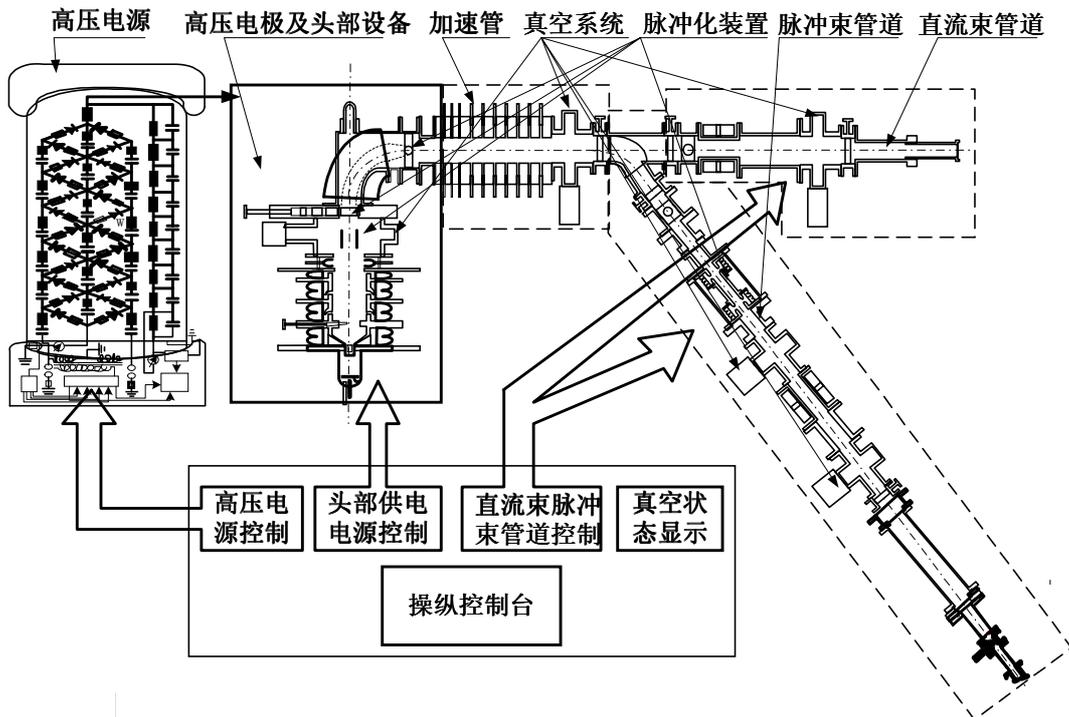


图 1 CIAE 600 kV ns 脉冲中子发生器总体结构示意图

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( $1\text{ 毛}=133.3224\text{ Pa}$ )，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院的专家进行测试，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 °C，湿度 30%	温度 15 °C，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