

## 600 kV 毫微秒脉冲中子发生器研制

中子发生器研制组<sup>1</sup>, 吕建钦<sup>2</sup>, 谢大林<sup>2</sup>, 全盛文<sup>2</sup>, 陈佳洱<sup>2</sup>

(1. 中国原子能科学研究院, 北京 102413;

2. 北京大学 重离子物理研究所, 北京 100871)

**摘要:** 研制了 600 kV ns 脉冲中子发生器 (CPNG6)。CPNG6 由高压电源 (输出电压为 600 kV, 电流为 15 mA, 高压稳定性和纹波均 0.1%)、2 214 mm × 1 604 mm × 1 504 mm 不锈钢高压电极及安装在内的高频离子源、预加速间隙透镜、初聚焦系统、切割器、90° 磁分析器等构成的头部设备, 均匀场加速管, 漂移管, 偏转磁铁, 0° 直流束和 45° 脉冲束流管道, 无油分子泵真空系统等组成。在脉冲束流管道上安装有强流毫微秒脉冲化聚束装置。阐述了该器的方案要点和各部件的主要技术性能及特点。

**关键词:** 中子发生器; 高压电源; 束流; 脉冲调制

**中图分类号:** TL51      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-6931(2003)04-0376-05

## Development of 600 kV ns Pulse Neutron Generator

Development Group of Neutron Generator<sup>1</sup>,

LU Jian-qin<sup>2</sup>, XIE Da-lin<sup>2</sup>, QUAN Sheng-wen<sup>2</sup>, CHEN Jia-er<sup>2</sup>

(1. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413;

2. Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** The 600 kV ns pulse neutron generator (CPNG6) is developed. CPNG6 consists of high voltage power supply with highest output voltage 600 kV, direct current 15 mA, stability and ripple 0.1%, 2 214 mm × 1 604 mm × 1 504 mm stainless steel high voltage electrode, head equipment including RF ion source, clearance lens, elementary focusing system, chopper and magnetic analyzer etc., uniform field accelerating tube, excursion tube, deflect magnet, 0° direct beam current and 45° pulse beam current piping, turbomolecular vacuum pump system. A ns pulse beam device is installed at pulse beam current piping. The project speciality and the performance of CPNG6 are introduced in the paper.

**Key words:** neutron generator; high voltage power supply; beam current; pulse modulation

强流毫微秒脉冲中子发生器是进行 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的主要工具, 同时又是

中子计量学和中子物理实验工作的必需基础设备。随着我国核数据和中子计量学研究工作的深入发展, 建造一台强流毫微秒脉冲中子发生

器是十分必要的。为此,本着立足国内加速器技术基础,尽量采用先进技术的原则,确定在中国原子能科学研究院建造一台 600 kV 毫微秒脉冲中子发生器。该发生器主要技术性能如下:高压范围 200~600 kV;直流分析束流强度 1 mA(高频离子源), 3 mA(双等离子体离子源);脉冲束平均流强 30  $\mu$ A;束斑 8 mm;重复频率 1.5 MHz;峰半高宽 1 ns;中子峰半高宽约为 1.5 ns;峰高的 1%处底宽小于半高宽的 3 倍;稳定工作时间 100 h。

### 1 方案要点

该器将取代原 G600 kV 高压倍加器,放置在中国原子能科学研究院的中子实验厅,布局要兼顾尽可能大的中子飞行距离和中子、场的对称性,重点是保证束流毫微秒脉冲调制性能,并要求结构简单、稳定可靠、操作维护方便等。

根据上述要求,并参考国际上几台性能较好的中子发生器<sup>[1~3]</sup>,确定了该器的总体方案:先分析后加速,即将磁分析器放在高压电极内离子源后,以减小磁分析器体积和造价,减轻加速管负载,有利于获得强直流束;束流脉冲调制采用在加速前的低能漂移段切割和加速后的高能漂移段聚束,在得到窄脉冲的同时,可使加速器技术上实现相对容易、光路布局合理、加速

管内空间电荷发散小、中子飞行距离大于 8 m 等。

### 2 加速器总体结构

加速器平面布置示于图 1。加速器由高压电源、高压电极、头部供电隔离变压器、加速管、三通管及分子泵、偏转磁铁、四极磁透镜、分子泵机组、漂移管、阀门和靶等组成,在脉冲束管道上设置毫微秒聚束装置。加速器主体中心线偏离大厅中轴线以西 0.5 m,呈卧式安装,束中心线距地面 1.9 m,高压电极用 4 只环氧玻璃布圆柱支撑。加速器总长 8.35 m,脉冲管道长约 4 m。

### 3 系统性能特点和主要技术指标

#### 3.1 高压电源

高压电源由 6 级对称 Cockroft-Walton 电路组成,用 1 台 2.5 kHz、25 kW SCR 中频逆变器供电,整流塔放在充油的绝缘筒内,高压由头上屏蔽罩引出,保护电阻 4 M $\Omega$ ,放在高压电极下面的阻容分压器用于测量直流电压,并给出高压稳压负反馈信号电压。图 2 示出该电源的稳压原理示意图,其空载输出电压达到 600 kV。在工作电压 200~550 kV、满载电流达到 15 mA 时,在要求的条件下,电压稳定性和纹波均 0.1%。

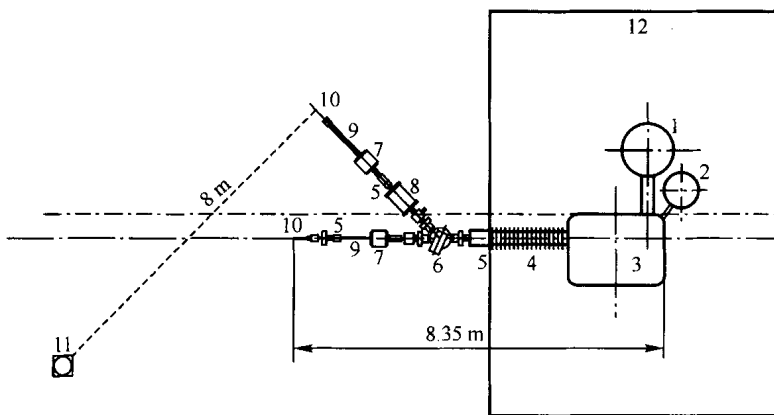


图 1 加速器平面布置图

Fig. 1 Layout of CPNG6

- 1——高压电源;2——隔离变压器;3——高压电极;4——加速管;5——三通接分子泵;
- 6——偏转磁铁;7——四极透镜;8——聚束器;9——漂移管;10——靶;11——探测器;12——屏蔽罩

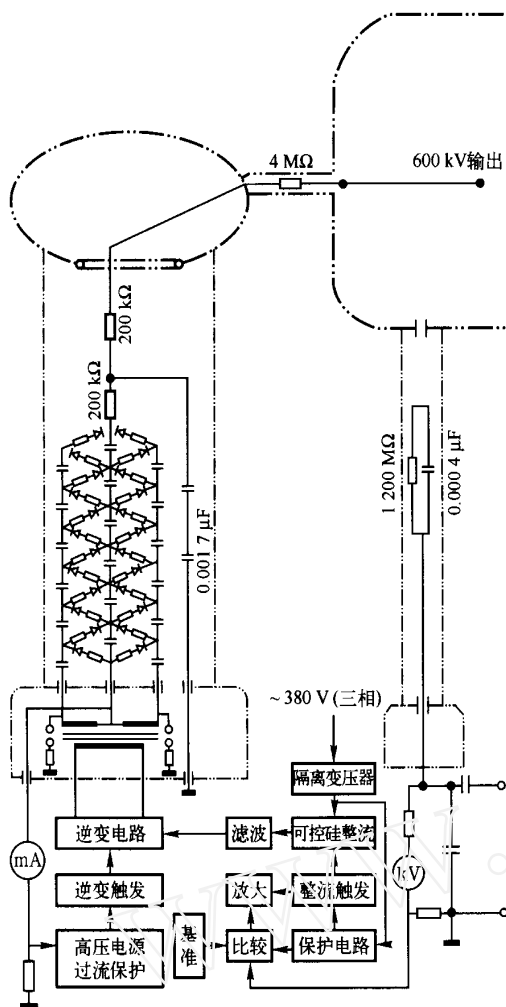


图2 600 kV、15 mA 直流高压电源原理图

Fig. 2 Schematic drawing of 600 kV, 15 mA DC high voltage power supply

### 3.2 高压电极

在 2 214 mm × 1 604 mm × 1 504 mm 不锈钢高压电极内部依次放置离子源、插板阀、单透镜、负压环,内含束流切割器的三通管、可变光阑,现用  $\phi 15$  mm、450 L/s 分子泵机组,90° 双聚集分析磁铁,处于磁后束腰包含选束孔和法拉第筒的测束仪,以及它们的电源。分别由 2 台耐压 600 kV、2.5 kHz、10 kVA 和耐压 600 kV、50 Hz、3 kVA 的隔离变压器供电。为保证束流分析和切割需要的初始能量,离子源及其电源用 1 台耐压 40 kV、4 kVA 的隔离变压器与高压电极隔离。

### 3.3 束流传输

束流传输系统示于图 3。加速器原配备两种类型离子源,其一为改进型 Moak 源,引出离子流 0.5 ~ 3.5 mA,其束流品质,如质子比、能散度、束流发射度和流强均已达到毫微秒脉冲调制要求,靶上束流 1 mA;另一为双等源,引出离子流 10 mA,提供强直流束,直流管道靶上束流虽曾达到 3 mA,但因双等源性能不过关,暂时不予使用。源引出的束流被加速到 25 ~ 30 keV,进入束切割器和分析磁铁,选出原子粒子,然后进入加速管。

加速管为均匀场型,有效长度 1.6 m,由不锈钢电极与 GG-17 硬玻璃环胶接而成,共 64 节,节距 25 mm。加速管内孔  $\phi 65$  mm。为改进加速管径向电场强度,加速管外配加 16 只外径 450 mm、直径 18 mm、截面 254 mm<sup>2</sup> 的均压

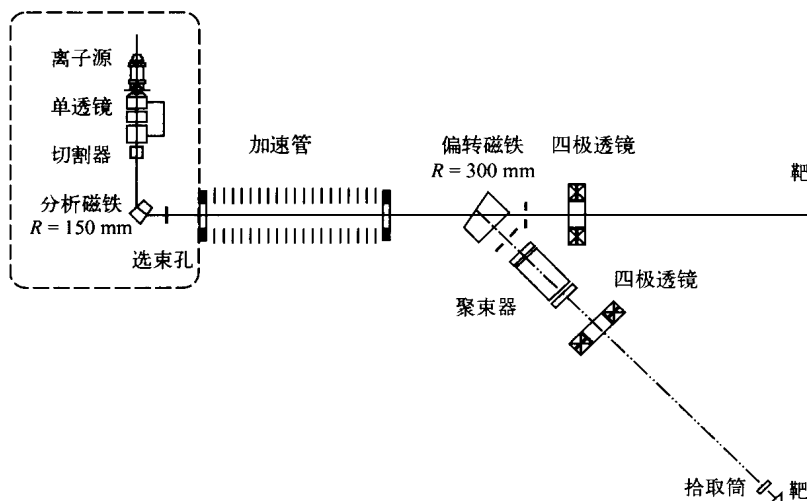


图3 600 kV 毫微秒脉冲中子发生器束流传输和脉冲调制系统

Fig. 3 Beam current transmission and pulse modulation system of 600 kV ns pulse neutron generator

环。为实现不同能量的聚焦匹配,加速管前六电极接成三膜片单透镜,不同能量时,选择不同长度加速管活区,其余部分短接做漂移管用。在加速管后 1 060 mm 处安装 1 台 45°双聚焦偏转磁铁,有两条束流管线引出,0°线为强流束,用于计量标准研究、裂变产额、中子活化截面和激发曲线等实验研究,45°线为脉冲束流线,为微分、双微分和积分实验提供束流。

两条管道靶上束流聚焦由两台二组合四极磁透镜调节,透镜磁场梯度 0.05 T/cm。按实际安装尺寸,离子源发射度为 15 mm·mrad 下计算的束流包络示于图 4。用高频源调试的实

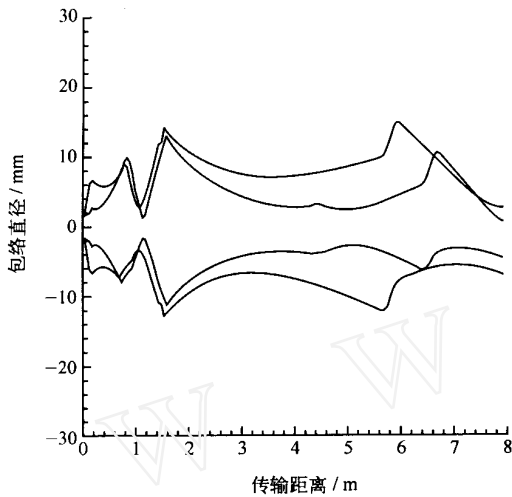


图 4 束流包络

Fig. 4 Beam envelop

内线——300 keV RF 源,脉冲束流线;  
 外线——400 keV 双等源,直流束流线

际结果与计算值基本一致。因双等源发射度较大,调试的实际束包络比计算值大。

### 3.4 束流毫微秒脉冲调制

离子源引出束流被间隙透镜预加速到 25~30 keV,以便进行调制,束流切割器放置在分析磁铁前 330 mm 处,切割板为 50 mm × 100 mm,两板间距 25 mm。为避免 Mobey 效应,切割电场与分析器束流偏转方向垂直。分析磁铁前放置直径可变光阑,以减少双聚焦的 90°分析器在切割电场方向对切割效率的负面影响,使切割后离轴较远的束流不能进入分析器。两板分别由基波 0.75 MHz、峰峰电压  $V_{p-p} = 4$  kV 的正弦波切割电源供电,选束孔为 3.8 mm 圆孔,放在分析磁铁后 200 mm 束腰处。变化切割电压,通过选束孔切出 40~50 ns 脉冲束流段。

脉冲工作的典型能量选为 300 keV,聚束器放在加速偏转后的 45°束流线。聚束器为双间隙单漂移速调管聚束器,聚束筒长 448 mm,直径 30 mm,中心处于偏转磁铁后束腰,聚束间隙 17 mm。聚束功率由 1 台 6 kW 高频机提供,聚束频率为 6 MHz,聚束后经 2.5 m 的漂移,在靶上可获得脉宽小于 1.5 ns 的脉冲束。

脉冲系统结构和馈电控制原理示于图 3 和 5。

用同轴法拉第筒测量脉冲,调试结果为:  $D^+$  能量 300 keV,脉冲半高宽 1.6~1.7 ns,重复频率 1.5 MHz,靶上平均束流大于 30  $\mu$ A。

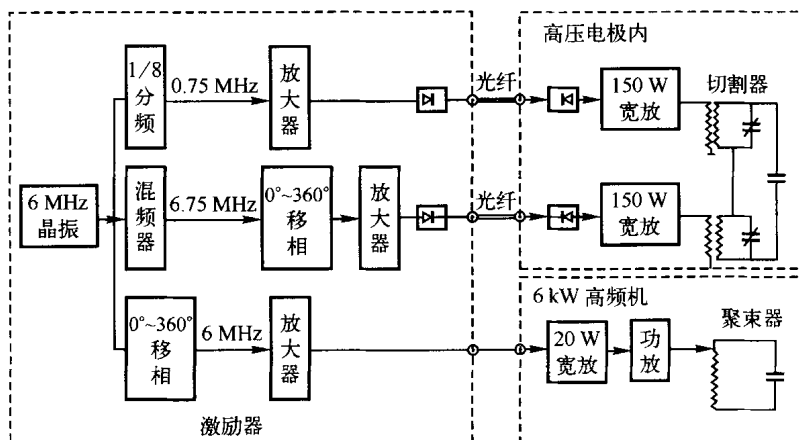


图 5 脉冲调制系统高频馈电及控制原理图

Fig. 5 Scheme of RF feed and control of pulse modulation system

D-T 反应实验测得的中子脉冲谱示于图 6。在切割电压 2.9 kV、聚束腔输入功率 440 W、频率 6 MHz、相位调节到脉冲束最佳工作状态情况下,测得脉冲平均流强为  $30.3 \mu\text{A}$ 。用 TK485 示波器(频宽 350 MHz)测量脉冲拾取信号上升时间为 1.4 ns、半高宽为 1.8 ns、脉冲最大幅度为 1.2 V、最小幅度为 0.7 V 的条件下测量得到 射线峰的半高宽为 1.0 ns,1% 处底宽为 2.3 ns,约为半高宽的 2.3 倍;中子峰半高宽为 1.1 ns,1% 处底宽为 2.9 ns,约为半高宽的 2.6 倍。长时间稳定工作大于 100 h。

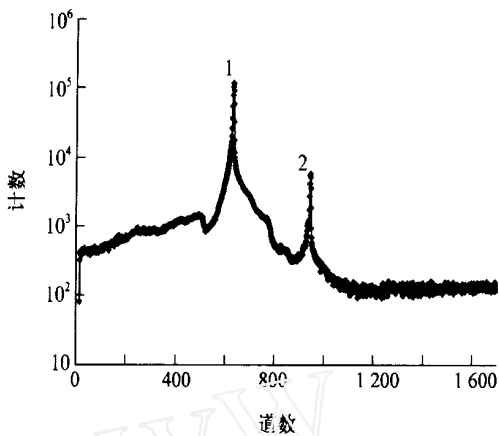


图 6 飞行时间测量谱

Fig. 6 Measured spectrum of time of flight  
1——半高宽 = 1.1 ns, 1/100 底宽 = 2.9 ns,  
底宽/半高宽 = 2.6; 2——半高宽 = 1.0 ns,  
1/100 底宽 = 2.3 ns, 底宽/半高宽 = 2.3  
道宽: 0.246 ns

### 3.5 真空系统

为减小油污染靶,该器采用了 4 台基本上无油的分子泵机组。抽速 1 400 L/s 的主泵放在加速管后的三通管处,3 台抽速 450 L/s 的分子泵,一台放在离子源后,另两台分别放在直流和脉冲靶前。分子泵上和束流通道上设有 8 只气动闸板阀,可提供快速保护。系统静真空达  $(5 \sim 6) \times 10^{-5} \text{ Pa}$ ,工作真空  $10^{-4} \text{ Pa}$ 。

### 3.6 控制系统

加速器地面上各电源控制、测量和保护分

散在各电源机箱面板上,这些电源机箱集中在控制室内的 4 个控制柜上,按系统相对集中排布。高压电极内和离子源各电源采用光-电耦合,利用微电机调节电源输出大小的多圈电位计的正反转,以及通过 V/F、光纤、F/V 变换,将高电位上各电源输出电压信号传到地电位,因光纤隔离高压和传递信号,这样,便可在地电位上实现对 600 kV 高电位上离子源电源的控制和测量。

## 4 结语

600 kV 毫微秒脉冲中子发生器不是一般意义上的常规高压倍加器或中子发生器,而是 1 台技术难度很大的高新技术产品。该器投入运行后,将成为中国原子能科学研究所和国内中子物理研究的主要工具之一和对外交流的窗口,它必将在中子核参数测量和计量标准研究中发挥重要作用。

该器的研制得到中国核工业集团公司科技局、中国原子能科学研究所核技术应用研究所、电物理与激光研究所、核物理研究所等各级领导的关怀和全力支持,在此表示衷心感谢。

## 参考文献:

- [1] Davis JC, Aanderson JD, Booth R, et al. Characteristics of Rotating Target Neutron Source and Its Use in Radiation Effects Studies: UCRL-7685[R]. USA:UCRL, 1975.
- [2] Sumita K, Takahashi A, Lida T, et al. Osaka University 14 MeV Intense Neutron Source and Its Utilizations for Fusion Studies (OKTAVIAN PROGRAM) [A]. Proc 4th Symp Accel Sci Tech [C]. Japan:RIKEN, 1982. 157~164.
- [3] AL-JUWAIR H, Blume G, Janrma RJ, et al. Nuclear Data for Science and Technology (1988MTTO) [J]. Nucl Instrum Methods Phys Res, 1987, B24/25:810~813.

(执笔人:崔山,吴隆成)