

# CPNG 脉冲化装置的研制

沈冠仁 关遐令 陈洪涛  
(中国原子能科学研究院 北京 102413)

**摘要** 本文介绍了为 CIAE600kV ns 脉冲中子发生器研制的强流 ns 脉冲化装置和达到的技术指标。其平均流强 $\geq 30\mu\text{A}$ ,束宽为 1.0ns。

**关键词** 强流, ns 脉冲化装置

**中图分类号** TL515

CIAE600kV ns 脉冲中子发生器的强流 ns 脉冲化装置(简称 CPNG)的主要特点是低能切割、高能聚束以及离子束的能量较高。该装置结构简单可靠,切割束流强度大,高频切割和聚束电压高。我们克服了国内没有研制强流 ns 脉冲化装置的工程设计和实验研制技术资料借鉴等困难,研制成了这套装置,达到了预期的主要技术指标,并投入运行和使用。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>[1,2]</sup>

CPNG 的强流 ns 脉冲化装置使用速调管聚束器<sup>[3-5]</sup>,其主要工作原理如下:

由离子源引出连续离子束流,经切割器切割成具有一定宽度的周期性分布的脉冲束,输送加速管,离子束能量提高到 300keV,由 45°偏转磁铁偏转后,送到速调管聚束器,离子束在飞行 2.5m 后,到达速调管的焦点-中子靶上,聚束成 1ns 宽度的脉冲束。

速调管由 3 个直径相同的金属圆筒电极组成(如图 1 所示),由图 1 可见,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。

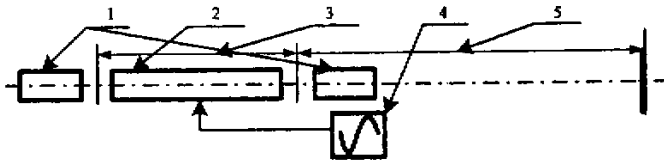


图 1 速调管基本工作原理图

1. 地电极, 2. 聚束高压电极, 3. 聚束场中心间距, 4. 聚束正弦波高压幅度值, 5. 速调管焦距

Fig. 1 Work principle of klystron

1. Polar, 2. Buncher H. V. electrode, 3. Distance of buncher field centre,

4. Buncher sine wave H. V., 5. The focus of klystron

根据参考文献<sup>[1]</sup>,速调管焦距

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

式中,  $\beta$  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为

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

式中,  $f$  是聚束高频电压的频率。在非相对论近似下,聚束电压  $V_m$  为

$$V_m \text{ (kV)} = 4424.865 [E_0 \text{ (MeV)}]^{3/2} / f \text{ (MHz)} L_F \text{ (M)} [A \text{ (Amu)}]^{1/2} Q \tag{3}$$

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为

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

表 1 为在初始能量 300keV、聚束电压频率 6MHz、焦距 2.5m、切割脉冲束宽度 44ns 条件下得到的脉冲束的计算结果。表中  $\Delta E_0$  为初始能散,  $V_m$  为聚束电压,  $T$  为 1/10 处底宽,  $\Delta t_0$  为半宽度。

表 1 脉冲束计算结果  
Table 1 Caculation results of pulse beam

| $\Delta E_0 / \text{eV}$ | $V_m / \text{kV}$ | $T / \text{ns}$ | $\Delta t_0 / \text{ns}$ |
|--------------------------|-------------------|-----------------|--------------------------|
| 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             | 1.9             | 1.20                     |
| 800                      | 18.29             | 2.22            | 1.32                     |

2 CPNG 脉冲化装置的设计

2.1 主要设计技术指标

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

2.2 设计技术路线

按照 CPNG 脉冲化装置要求强流以及 ns 量级脉冲束半宽和底宽的特点。根据式(3)和(4),经反复的论证计算,CPNG 脉冲化装置采用低能切割和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。高能聚束降低了对粒子束能散的要求,增加了离子束能量,提高了聚束电压。

2.3 离子束能散的估算

离子束的能散严重影响脉冲束宽,估算好离子束的能散,对脉冲化装置的设计很重要。能散主要来源于 3 个方面:

- (1)离子源引出束的能散。在正常工作的条件下,各种因素综合造成的能散  $\Delta E_1 \leq 200 \text{eV}$ <sup>[6]</sup>。

(2)切割器造成的能散  $\Delta E_2$ 。按照理论估算  $\Delta E_2 \leq 60 \text{eV}$ <sup>[6]</sup>。

(3)离子加速造成的能散。粒子束经过加速管的加速,其能散达到 300 keV ;高压电源稳定度和纹波 $\leq 1\%$ 时,引起能散  $\Delta E_3 \leq 300 \text{eV}$ 。综合 3 个因素造成的能散  $\Delta E \leq 400 \text{eV}$ 。满足上述设计技术路线的要求。

2.4 影响脉冲化装置技术指标的参量估算<sup>[6,7]</sup>

为了达到主要设计指标,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<sup>[7]</sup>。它对脉冲化装置的研制和脉冲束的正确调节都起到了非常好的效果。

2.4.1 对影响脉冲束形状、半宽和底宽参量的估算 (1)最佳聚束电压为 19.2kV。聚束电压波动在 $\leq$ 或 $\geq 100$ V 时,脉冲束形状发生变化。当聚束电压 $\leq 100$ V 时,脉冲峰形变宽 ;当聚束电压 $\geq 100$ 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 $\leq 0.2\%$ 。(2)切

割脉冲有一个最佳宽度,宽度小了将减少流强,宽度大了只增加脉冲束的底宽。CPNG 要求切割脉冲宽度小于 40ns。(3)要达到脉宽 $\leq 1.2\text{ns}$ ,聚束电压相位必须稳定在 $\pm 1^\circ$ 以内,能散应 $\leq 590\text{eV}$ 。

2.4.2 对影响切割器切割能力参量的计算 (1)切割器切割能力随切割板长度的增加而增大,但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 8cm、切割脉冲宽度为 45ns 时,切割电压达到 2300V。(2)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 60eV。(3)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—170mm·mrad 范围内时,能散从 25eV 增加到 100eV。

2.4.3 理论计算分析的结果表明,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 CPNG 脉冲化装置的研制

脉冲化装置的示意图见图 2。它由切割器、聚束器和脉冲讯号拾取系统组成。

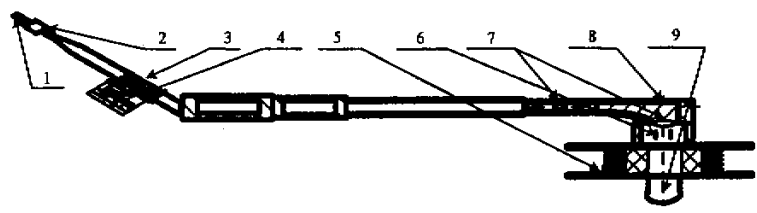


图 2 脉冲化装置示意图

- 1. 中子靶室,2. 讯号拾取筒,3. 聚束器,4. 聚束功率源及输入控制器,5. 预加速电压,
- 6. 切割板及扫描电源,7. 选速孔 1 和 2,8. 分析磁铁,9. 离子源

Fig.2 Pulsed system frame

- 1. Neutron target, 2. Pick up, 3. Buncher, 4. Buncher power and input cotroler, 5. Preaccelerate voltage,
- 6. Choper and choper power, 7. Choper horrow 1 and 2, 8. Analysis magnet, 9. Ion souce

3.1 切割器的研制工作

图 3 为切割器的结构。由图 3 可见,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。根据上面的物理设计,切割离子束能量 30keV,流强 $\geq 3\text{mA}$ ,要求切割脉冲的宽度 $\leq 40\text{ns}$ 。

初期设计的切割器达不到设计要求,其主要原因如下:

- (1)扫描束流通过分析磁铁,因磁铁的聚焦作用,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 50Ω 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。

切割器研制的机械设备部分:(1)加长切割板由 4cm 增长至 10cm 减少切割板距离从 3cm 至 2.5cm;(2)缩小原选速孔由  $\phi 5\text{mm}$  至  $\phi 4\text{mm}$ ;(3)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  $\phi 15\text{mm}$ 。

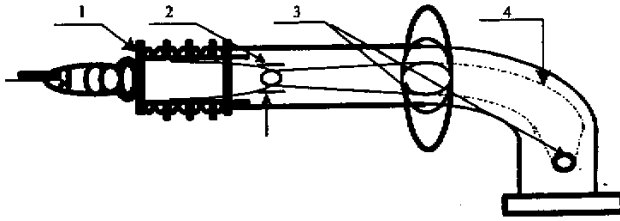


图 3 切割器结构示意图

1. 预加速电源, 2. 切割板及扫描电源, 3. 选速孔 1 和 2, 4. 分析磁铁

Fig.3 Choper frame

1. Preaccelerate power, 2. Choper and choper power, 3. Choper horrow 1 and 2, 4. Analysis magnet

为了确保切割扫描电压电源的研制成功,进行了下列的准备工作。

(1)与石家庄 54 所同志合作,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 ( $P-P$  值)  $\geq 4000\text{V}$ <sup>[8]</sup>。

(2)用扫频并联谐振法<sup>[9]</sup>测量切割板动态电容值,取得了较满意的测量结果(见图 4)。图中 3 条曲线表示固定吸极电压为 4.5kV 和 4.8kV 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。

(3)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 8W 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 2000V 时,切割能力为 16.6%。图 5 为切割能力的实验结果,此结果充分表明,在设计扫描电源时,输出电压幅度是考虑问题的主要方面。该设备由石家庄 54 所卫星通信部于 1999 年 8 月建成并投入使用,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 ( $P-P$  值)。

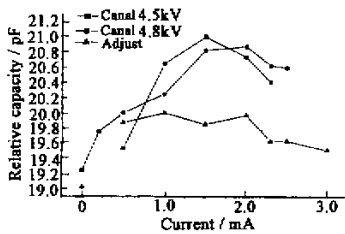
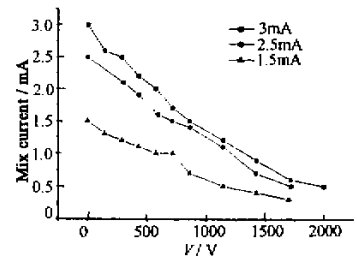


图 4 动态电容值测量

Fig.4 Dinamic capacity measured



5 切割能力随扫描电压的变化  
oper energy are varied with chopped

### 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了重新设计。

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  $L = (1/2)\beta CT$  确定。其中,  $\beta$  是离子速度  $v/C$ , 300keV 的  $D^+$  束  $\beta = 0.017944$ ,  $T$  是聚束电压的周期。当聚束电压的频率为 6MHz 时,  $L = 448\text{mm}$ 。聚束间隙的距离应由间隙的耐压能力决定。把电极头加工成圆弧形,高光洁度,去除边尖角处。用外径  $\phi 52\text{mm}$ 、内径  $\phi 32\text{mm}$  制成的圆弧形电极,间隙距离 17mm,总长 505mm 的不锈钢管组成的速调管如 6 所示。(2)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,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  $1000^{\circ}$  以上,热膨胀系数小,耐高压的 95 陶瓷加工成  $\phi 160\text{mm} \times 15\text{mm}$  的圆盘支撑外径  $\phi 150\text{mm}$ 、内径  $\phi 130\text{mm}$  外加裙边长度 80mm 的圆筒,4 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  $500\text{mm} \times 550\text{mm} \times 650\text{mm}$  不锈钢箱内组成(如图 7 所示)。图中线圈  $L$  用外径  $\phi 18\text{mm}$  双层紫铜管弯成直径  $\phi 200\text{mm}$ ,间距 15mm,共 13 匝构成。内管进水,外管出水对线圈冷却。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,使谐振腔谐振频率至  $6\text{MHz}$ 。粗调由打开谐振腔改变线圈的匝数调节。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首先是金属与陶瓷焊接问题,第二是陶瓷绝缘材料的性能;第三是加工质量。经多次探索,最后用外径  $\phi 78\text{mm}$ 、内径  $\phi 66\text{mm}$ 、长 107mm 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。

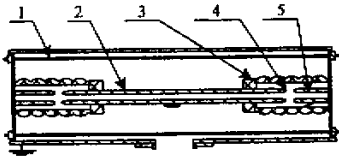


图 6 速调管结构图  
固定杆,2. 高频高压聚束电极,3. 瓷环支架,  
4. 聚束间隙,5. 地电极  
Fig.6 Klystron structure  
ed pole, 2. High frequency high voltage buncher  
, 3. China ring support, 4. Buncher field, 5. Polar

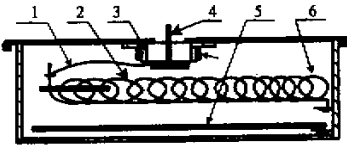


图 7 聚束高压 LC 谐振腔  
1. 输入线,2. 谐振线圈,3. 输入瓷绝缘柱,  
4. 连接速调管,5. 电容调节,6. 输入端  
ig.7 Buncher H. V. LC resonance cavity  
Input line, 2. Resonant corl, 3. Input insulator,  
. To klystron, 5. Capacitance adjust, 6. Input

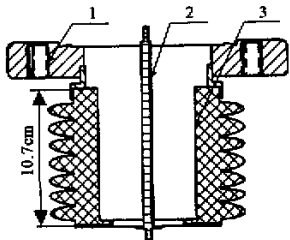


图 8 高频高压输入绝缘柱  
锈钢法兰,2. 输入杆,3. 95 绝缘陶瓷管  
,8. High frequency and high voltage  
input insulator  
ss steel flange, 2. Input pole, 3. 95 china tube

**3.2.3 控制器** 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 3 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。

**3.2.4 聚束高压功率电源** 使用由北京广播器材厂生产的  $6\text{kW}$  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  $450\text{W}$  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。

脉冲束讯号拾取系统

脉冲讯号拾取系统是脉冲化装置的组成部分,它由机械和电子学两部分组成。机械部分也称拾取筒(见图 9),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讯号的上升时间确定。 $L = \nu t_p$ ,其中  $\nu$  是离子速度, $t_p$  是拾取讯号的上升时间。取  $t_p = 1\text{ns}$  时, $L \approx 5.38\text{ mm}$ 。感应圈安装在圆筒内,并与之绝缘,圆筒两端安装限束光栏,确保束流不能直接打到感应圈上,并组成电讯号回路,输出感应电荷讯号。感应圈长度  $L$ 、直径  $d$  和圆筒的直径  $D$  决定拾取筒的电容  $C_p = 0.2416L/\log(D/d) (\text{pF})$ 。

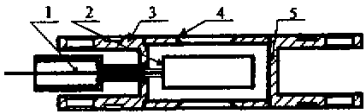


图 9 脉冲讯号拾取筒  
1. 输出, 2. 感应圈, 3. 连接法兰, 4. 限束光栏, 5. 外圆筒  
Fig. 9 Pulse signal pick up  
1. Output, 2. Induction ring, 3. Link flange, 4. Limit beam frame, 5. Circular tube

CPNG 的脉冲讯号拾取系统用外径  $\phi 35\text{mm}$ 、厚  $2\text{mm}$ 、长  $35\text{mm}$  的不锈钢管作外圆筒, 两端光栏孔为  $\phi 15\text{mm}$ 、外径  $\phi 25\text{mm}$ 、厚  $0.5\text{mm}$ 、长  $8\text{mm}$  紫铜环作感应圈并由连线接拧母插头引出。

电子学部分在感应电荷引出头接快前级放大器 ORTEC VT120C, 通过高频电缆把讯号输送到测量室。输出脉冲拾取讯号上升时间为  $1.7\text{ns}$ , 半宽度  $1.8\text{ns}$ , 幅度在  $1\text{--}1.5\text{V}$  之间, 直接输送到 ORTEC935 定时器得到定时讯号。

5 CPNG ns 脉冲化装置主要技术指标

CPNG 的脉冲束主要技术性能达到和部分超过了美国在 LLNL 和日本大坂大学及原子能所建造的强流 ns 脉冲中子发生器, 总体上达到了国际先进水平。与国际上同类发生器的主要性能比较见表 2。

表 2 国际上同类 ns 脉冲中子发生器主要性能的比较

Table 2 The comparison of main technology performance with international similarns pulse neutron generator

| 实验室        | 能量               | 离子源        | 脉冲流强              | 束斑            | 束宽      | 重复频率          | 中子源强                                  |
|------------|------------------|------------|-------------------|---------------|---------|---------------|---------------------------------------|
| Laboratory | $E_n/\text{keV}$ | Ion source | $I_p/\mu\text{A}$ | Spot/mm       | FWHM/ns | Frequency/MHz | Neutron/ $\text{n}\cdot\text{s}^{-1}$ |
| 中国 CIAE    | 600              | 高频 R. F    | $\geq 30$         | $\leq \phi 8$ | 1.0     | 1.5           | $1 \times 10^{10}$                    |
| 美国 LLNL    | 400              | 高频 R. F    |                   | $\phi 6$      | 1.5     | 2.5           | $5 \times 10^{10}$                    |
| OKTAVIAN   | 300              | 高频 R. F    | 20—40             | $\phi 30$     | 1.5     | 1—2           | 0.5 或 $1 \times 10^{10}$              |
| JAERI      | 400              | 高频 R. F    | 20—40             | $\phi 15$     | 2.0     | 1—2           | 0.5 或 $1 \times 10^{10}$              |

致谢 在 CPNG 强流 ns 脉冲化装置研制过程中, 得到了有关方面的专家和兄弟单位大力支持和帮助, 在此表示深切的感谢。

参 考 文 献

1 关遐令. 600kV ns 脉冲中子发生器束流光学物理设计(内部资料), 1990  
GUAN Xialing. Beam optic physics design for 600keV ns pulse neutron generator, 1990

2 北京大学技术物理系. 300kV 中子发生器束流脉冲化系统(内部资料), 1990  
Department of Technology Physics, Beijing University. Beam pulse system of 300kV neutron generator, 1990

3 Anderson J H, Swann D. Nucl Instr Meth, 1963, 30 1—22

4 陈佳洱. 静电加速器的脉冲化装置与有关的束流特性. 1979 年全国加速器技术交流会论文集, 1979. 75  
CHEN Jiaer. Pulse equipment of Van de graaff accelerator and it 'beam performance. Paper collection of China accelerator technology symposium, 1979. 75

5 Anderson J H, Batchelor R, Howe F A, et al. Nucl Instr Meth, 1966, 41 30—41

6 张立山. 600kV 高压倍加器脉冲束的调试参量估算(硕士论文), 1995

ZHANG Lishan. Pulse beam adjust parameter caculations for 600kV cockcroft – walton accelerator, 1995

7 张立山, 关遐令, 毛孝勇, 等. 原子能科学技术, 1997, (4) 289

ZHANG Lishan, GUAN Xialing, MAO Xiaoyong, *et al.* Atom Energy Sci Technol, 1997, (4) 289

8 牛铭, 李胜利. 原子能科学技术, 2001, (3) 245—249

NIU Ming, LI Shengli. Atom Energy Sci Technol, 2001, (3) 245—249

9 李胜利, 牛铭. 原子能科学技术, 2001, (4) 375—378

LI Shengli, NIU Ming. Atom Energy Sci Technol, 2001, 4 375—378

CPNG ns pulsed system for high current beam

SHEN Guanren    GUAN Xialing    CHEN Hongtao  
(China Institute of Atomic Enegy, Beijing102413)

Abstract

A ns pulsed system for high current beam employed in CIAE600kV ns Pulse Neutron Generator was established. Its characteristic, main technological performance and applications were also introduced.

**Key words**    Big beam, ns pulse system

**CLC**    TL515