

CNIC-01899

CAEP-0195

小型移动式 neutron 发生器

周长庚 李彦 胡永宏 姜本超 伍春雷

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳, 621900)

摘 要

把从国外引进的高压终端与自行研制的脉冲系统等结合在一起, 建成了一台小型移动式 neutron 发生器。该 neutron 发生器的长度是 2 500 mm, 重量小于 1 t, 可以方便地移动到所需要的实验场合。它主要由高频离子源、加速管、高压发生器、聚焦装置、供气系统、微秒脉冲系统、控制系统、真空系统和实验靶室组成。它能产生 150 μA 的直流氘离子束和宽度为 10~100 μs , 频率分别为 10 Hz, 1 000 Hz, 10 000 Hz 的脉冲氘离子束。D-T 中子产额可达 $1.5 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$ 。文章主要介绍了小型移动式 neutron 发生器主要部件的工作原理和结构。

关键词: neutron 发生器 小型 移动 直流 脉冲

A Compact Mobile Neutron Generator

(*In Chinese*)

ZHOU Changgeng LI Yan HU Yonghong LOU Benchao WU Chunlei
(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, Mianyang, 621900)

ABSTRACT

Through fitting the high voltage terminal from introducing overseas and pulse system et al. from oneself developing together, a compact mobile neutron generator is established. The length and weight of this neutron generator are 2 500 mm and less than 1 t, respectively. It can be expediently moved to the location which is required by experimental people. It is consisted of RF ion source, acceleration tube, high voltage generator, focus device, microsecond pulse system, gas leak system, control system, vacuum system and experimental target. It can produce 150 μA continuous deuterium ion beam current, also can produce the pulse deuterium ion beam current. The pulse widths are 10~100 μs and frequencies 10 Hz, 1 000 Hz, 10 000 Hz. The D-T neutron yields of the neutron generator may arrive $1.5 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$. The working principle and the structure of the main parts of this neutron generator are described.

Key words: Neutron generator, Compact, Mobile, Continuous beam current, The pulse beam current

引言

小型移动式 neutron 发生器,也称小型移动式加速器中子源。它是中子物理实验研究的重要平台之一。我们把从国外引进的高压终端与自行研制的脉冲系统、控制系统、绝缘气体净化存储装置、冷却系统、束流测量装置结合在一起,建成了脉冲直流两用的小型移动式中子发生器。该中子发生器体积小($2\,500\text{ mm}\times 600\text{ mm}\times 1\,400\text{ mm}$),重量轻(小于 1 t)。可以放到特殊场合进行特殊材料的 D-T 聚变中子物理实验,也可以用作移动中子成像的中子源。由于它能够产生微秒脉冲束,所以,将在与时间相关联的中子物理实验中发挥重要作用。

美国的 INEL 和 LANL 两个实验室在 20 世纪 90 年代初建立了小型移动式中子发生器^[1],并用它进行了脉冲球测量实验。这种小型移动式中子发生器被安装在一个带轮子的金属平台上,高压电源是 150 kV ,采用潘宁离子源,无磁分析器,中子产额约 10^8 n/s 。

俄罗斯 TRINITY 研究所研制了产额达到 10^9 n/s 的小型中子发生器^[2],并用它进行了一些中子测量设备的精确标定。

对于中子管^[3](亦有文章称其为小型中子发生器),东北师范大学等单位都有较强的研制能力,中子管与本文所述的小型中子发生器在技术指标和功能上有较大的不同,在国内,还未见到直流脉冲两用的小型中子发生器的公开报道。

1 总体布局

根据中子物理实验要求,确定了小型移动式中子发生器及配套测试系统的总体布局 and 结构,图 1 是小型移动式中子发生器的总体结构图。

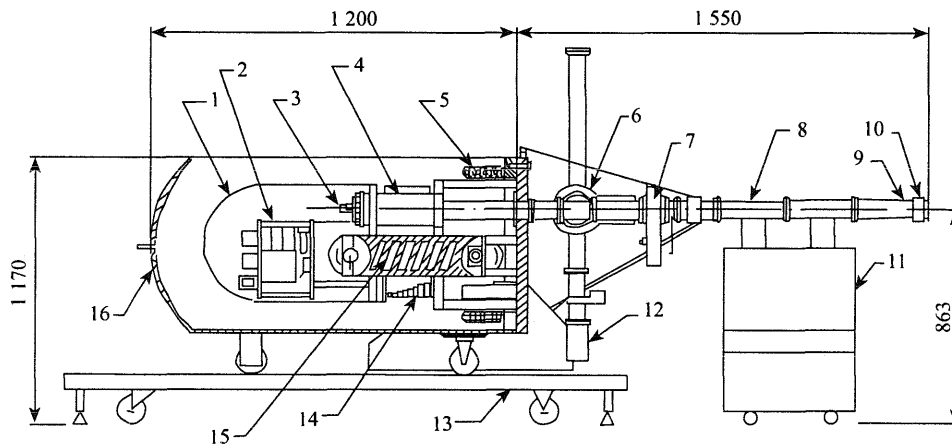


图 1 小型移动式中子发生器结构示意图

- 1—高压终端外壳;2—离子源电源和脉冲产生器;3—高频离子源;4—加速管;5—水冷线圈;
6—真空主阀门;7—辅助阀门;8—聚束管;9—漂移管;10—实验靶室;
11—水冷装置;12—油扩散泵;13—平板车;14—充电带;15—均压电阻;16—钢桶

小型移动式中子发生器主要由高频离子源、加速管、聚焦装置、供气系统、微秒脉冲系

统、高压发生器(静电起电机)、控制系统、实验靶室等组成。其外形为卧式,移动平台可再往钢筒扩展。引进的高压终端(the high voltage terminal)内含高频离子源、加速管、静电起电机。高压终端密封在一个长1 200 mm,直径为600 mm的钢筒里,钢筒内充 $67 \times 10^5 \sim 7 \times 10^5$ Pa 的绝缘气体,其中, N_2 为 40%, CO_2 为 55%, SF_6 为 5%。绝缘气体通过一个(除湿、过滤)气体处理装置注入钢桶内。钢桶底部有两个轮子,轮子通过滑槽固定在一个平板车上。检修时可以将钢桶顺滑槽移离高压终端。

平板车可以自由移动。当中子发生器运行时,由平板车下面的支脚固定中子发生器。钢桶外是真空系统。真空系统由油扩散泵、真空室和真空阀门构成。

用 LEADS 程序^[4]对小型移动式中子发生器进行了模拟计算,结果表明,束流输运过程、最大束流(150 μA)到达靶上的束斑直径等技术指标均满足总体设计要求。图 2 为小型移动式中子发生器的束流包络图, X, Y 表示任意轨迹相对参考轨迹在 X 方向和 Y 方向的投影, Z 表示轴向投影。

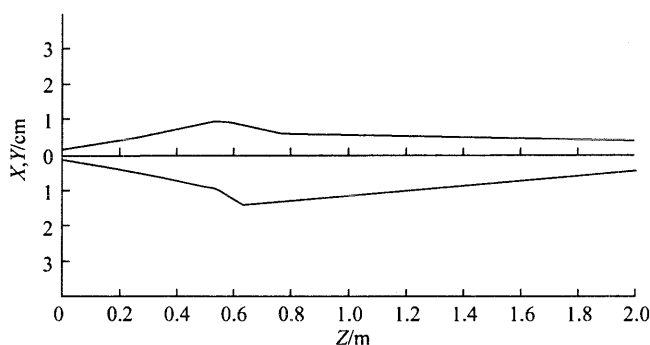


图 2 束流包络图

2 各部分的原理结构

2.1 高频离子源

高频离子源是高压终端的最重要部件之一,它的优点是结构简单,体积小,工作稳定,束流品质好。高频离子源的基本工作过程是:高频振荡器通过电容耦合,纵向磁场输送高频功率到放电管,高频离子源引出离子电流 1 mA(最大 2 mA)。进入放电管的氘气用钨管来开关与调节。正常运行时,在电极和钨罐的外壳之间加 1 V 左右的交流电压(电流约 20 A),使钨管导通,氘气进入离子源的放电管。可通过调节交流电流的大小来控制工作气压的大小(根据经验,一般控制在 0.2 Pa 左右)。

2.2 加速管

采用等梯度加速管把引出的氘离子束加速到 200 keV(可达到 300 keV)。等梯度加速管的优点是电压分布均匀,不易击穿。在相同的加速电压下,等梯度加速管长度较短。加速管的长度约为 212 mm,内径为 70 mm,加速管主要由不锈钢电极和绝缘陶瓷构成,采用耐热真空胶把加速管和离子源紧凑地连接在一起。

2.3 真空系统

如图 3 所示,真空系统主要由一台直连泵、一台油扩散泵、冷阱、真空电源和真空计等组成。

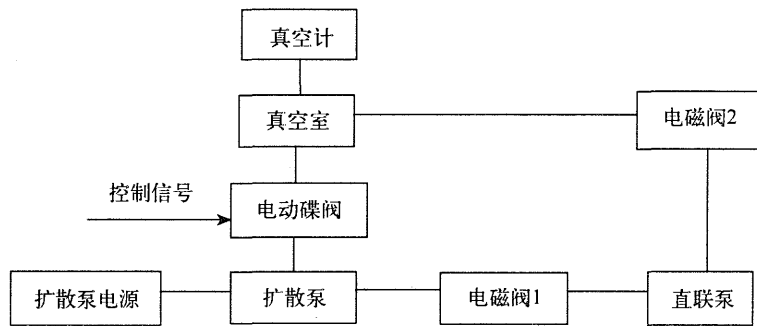


图 3 真空系统示意图

系统的真空度可达到 1×10^{-4} Pa。运行前,直连泵启动,开始抽低真空,电磁阀 1、电磁阀 2 开,电动蝶阀关,出气口直接通到实验大厅的排气管口,然后由 60 m 高烟囱把气体排出。

当低真空度达到 10^{-1} Pa 以下时,电磁阀 2 关,冷阱加液氮,油扩散泵开,开始抽高真空。在真空室装有电离规管和热偶规管各一只,通过导线连到复合真空计,可在面板上实时检测系统的真空度,一旦发现真空度下降,自动控制系统会发出报警,必要时自动关闭电动蝶阀或切断系统电源。

2.4 静电起电机

静电起电机为中子发生器提供 300 kV 的高压。采用带动式输电系统,其初步工作原理如图 4 所示。带动式输电系统由输电带、上下转轮、喷电与刮电针排、喷电电源等组成。输电电流为,

$$I = \sigma bv \quad (1)$$

式中: σ ——输电带表面平均电流密度, $A \cdot cm^{-2}$;

b ——输电带宽度, cm;

v ——输电带的线速度, $cm \cdot s^{-1}$ 。

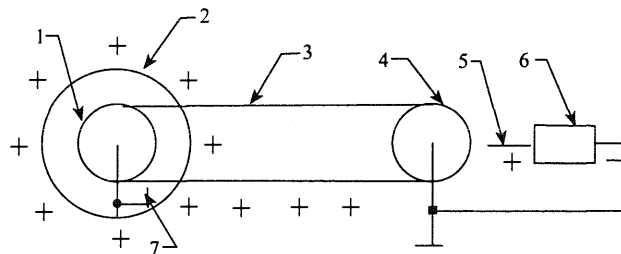


图 4 静电起电机

1—上转轮;2—高压电极;3—输电带;4—下转轮;5—喷电针排;6—喷电电源;7—刮电针排

下转轮相对的喷电针排是一排金属针，针尖面对输电带。针排加上高压后，在针尖附近形成强电场，使周围的气体放电，即电晕放电。电荷在电场的作用下飞到输电带上，使其带电。刮电的原理与此相同，只是电场方向相反。

2.5 微秒脉冲系统

微秒脉冲系统原理如图 5 所示。通过触发电路启动多谐振荡器产生微秒脉冲波形，再经过功率放大后，控制开关电路对地连接与断开。使 +2 kV 高压交替加到放电管的阳极与控制极之间，从而产生微秒脉冲氦离子束。脉冲宽度和频率由控制电路设定。

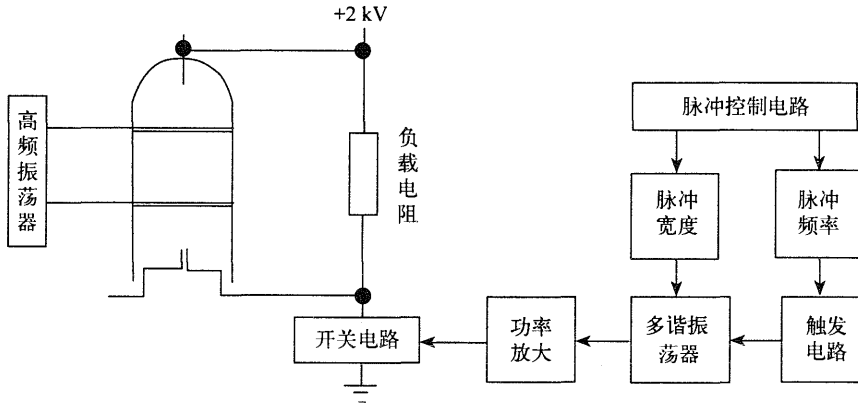


图 5 微秒脉冲系统原理示意图

2.6 束流测量装置

图 6 是束流测量装置结构图，该装置可以测量直流束和微秒脉冲束。测量装置中包含一个靶片，靶片外由流经冷却室的水冷却。测量装置内设置一个负压环（抑制板），加上 200 V 左右的负电压。从靶片表面发射的二次电子，受到负压环和靶片之间的电场作用，返回到靶片上，不会对测量精度产生影响。可用微安表直接测量离子束流强度。微秒脉冲束

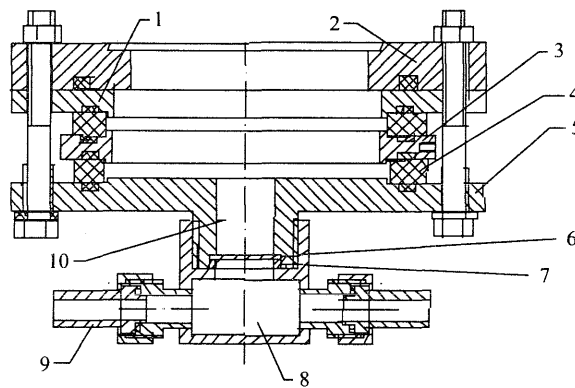


图 6 束流测量装置结构示意图

1—上法兰；2—连接法兰；3—负压环；4—绝缘垫；5—下法兰；6—靶片；
7—靶片垫；8—冷却室；9—冷却水入口；10—靶室

则需用示波器测量。

2.7 冷却系统

在某些特殊工作环境实验时,没有供水设备,小型移动式中子发生器的冷却水采用自循环方式。即备一可出入实验场所的水箱,水箱含有热交换装置(如图7所示)。小型移动式中子发生器冷却过程为:通过水泵向小型中子发生器的冷却系统(钢筒、扩散泵、靶室等)供水,出水把热量带出并回输到水箱。一旦发生故障,水流继电器立即给出信号到控制系统,自动切断系统高压,以保护设备。

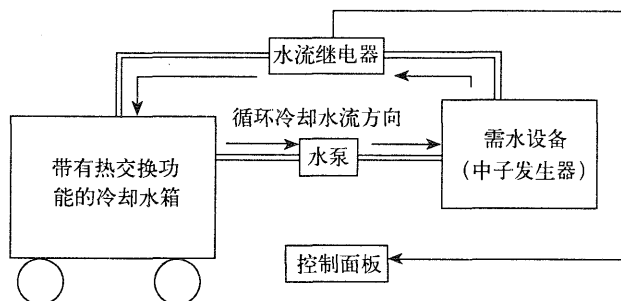


图7 冷却系统原理结构图

2.8 控制系统

小型中子发生器控制系统的工作原理如图8所示。自动控制系统主要由便携计算机、通讯模块、中心控制器、通讯总线、现场控制器组成。现场控制器设置在小型移动中子发生器的运行现场,完成对参数的测量和控制。它通过通讯总线把测量信号送到便携计算机,同时也接受便携计算机发出的命令,实现对小型移动中子发生器的控制。例如,在便携计算机中,我们选择“调节离子源束流”菜单,屏幕弹出一个“离子源束流”数码显示条,下方置两个按键,左键为“减1”操作,右键为“加1”操作。当按键时,计算机把“减1”或“加1”的命令串口发到中心控制器,中心控制器把相应的计数脉冲通过RS485总线送到现场控制器,现场

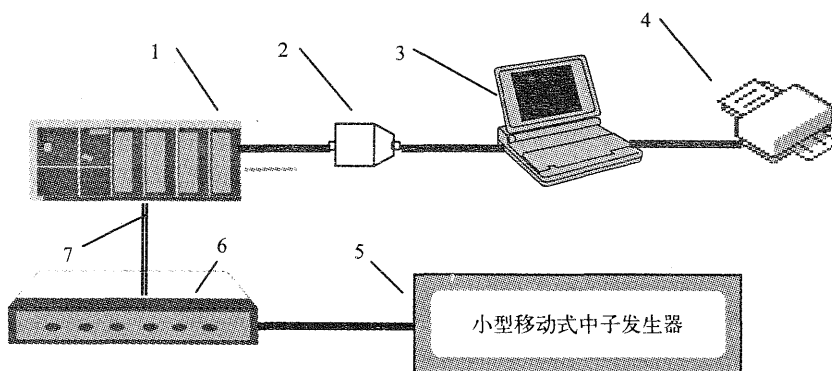


图8 控制系统设计原理图

1—中心控制器;2—通讯模块;3—便携计算机;4—打印机;
5—小型移动式中子发生器;6—现场控制器;7—通讯总线

控制器将脉冲整形后直接输出到步进电机,步进电机带动连杆调节离子源引出电流的大小。靶上束流输出与离子源引出电流的大小密切相关,通过现场控制器中的 A/D(模数)转换电路把靶上束流变成数字代码,再经过 RS485 总线传送到中心控制器,中心控制器对数据进行初步处理后送到便携计算机进行处理、显示、存储。现场控制器主要由 PLC 和输出输入模块组成。中心控制器主要由单片机和 RS485 通讯模块组成。

3 测量结果

用束流测量装置测得氘离子束流为 $150 \mu\text{A}$,束斑直径为 10 mm 。用数字示波器测得氘离子脉冲束幅度为 $140 \mu\text{A}$,脉冲宽度为 $16 \mu\text{s}$ 。

用伴随 α 粒子法测得 D-T 中子产额为 $1.5 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$ 。小型移动式中子发生器主要技术性能指标如表 1 所列。

表 1 小型移动式中子发生器主要技术性能指标

名称	技术指标
外形	卧式
工作方式	直流脉冲两用
直流方式,靶上束径	$10 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$
直流方式离子束流	$150 \mu\text{A}$
直流束不稳定性	5%
微秒脉冲束半宽度	$10 \sim 100 \mu\text{s}$ 可调
微秒脉冲重复频率	1 Hz, 10 Hz, 100 Hz, 1 000 Hz
D-T 直流中子产额	$1.5 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$

4 结 语

小型移动式中子发生器脉冲、直流两用,直流束稳定,微秒脉冲束可调。其体积较小,可以很方便地移动,在中子物理实验和中子无损检测技术领域具有较好的发展前景。

参 考 文 献

- 1 Smith J R, et al. Multiplication of 14-MeV neutrons in bulk beryllium. *Fusion Technology*, 1993, 23:53~54
- 2 Kaschuck Y A, et al. Compact neutron generator for diagnostic applications. *Review of scientific instruments*, 1999, 70:1104~1105
- 3 魏宝杰,岳成波,李文生. 自成靶陶瓷中子管及其应用. *核技术*, 1993, 16(12):726~729
- 4 Lu Jianqin. LEADS: A graphical display computer program for linear and electrostatic accelerator beam dynamic simulation. *Nucl. Instr. Meth.*, 1995, A(355):253~256