

500KV 调制器型加速器的设计与实验*

常安碧 张之福 张德泉 江金生 马乔生
罗敏 郭伟民 谭杰 雒成银 邓仕钰

(中物院应用电子学研究所, 成都市 527 信箱 55 号 610003)

摘要 简要地分析了 500kV 调制器型加速器的工作原理及主要特点, 介绍了各部分电路的设计参数和设计要点以及在不同充电电压、不同阴阳极距离、不同引导磁场等实验条件下, 加速器在单脉冲调试时的初步实验结果。

关键词 调制器型加速器 重复脉冲气体开关 脉冲变压器 引导磁场 长脉冲二极管

ABSTRACT The operating function and the characteristic of 500kV modulation-type accelerator are discussed. The parameters and the keys of each part of circuit design are introduced. On condition that pulse is single and the charging voltage, the distance between cathode and anode, the guide magnetic field are adjustable, the primary result is obtained.

KEY WORDS modulation-type accelerator, repetitive gas spark switch, pulse transformer, guiding magnetic field, long pulse diode

0 引言

重复脉冲电子束源不仅可以用于高功率微波 (HPM)、强激光泵浦、等离子体加热等科学研究领域, 而且在民用工业如脱硫、脱硝、除尘、微波材料处理、微波加热以及医疗等方面也得到了广泛的应用。多年来, 美国、俄罗斯等国家投入大量的人力、物力已研制出不同需求、不同脉宽和不同电压电流等级的重复脉冲加速器, 并已广泛用于科研、环保以及国防等研究领域。我国过去研制的强流脉冲加速器, 大多都在单脉冲下工作, 重复脉冲工作, 特别是脉宽达 $1\mu\text{s}$ 范围重复工作的加速器则研究很少。为了跟踪国外先进技术, 提高我国脉冲功率技术水平, 设计建造了一台调制器型加速器, 其设计指标为: 束能量 500keV; 输出电流 3~5kA; 脉冲宽度约 $1\mu\text{s}$; 重复频率 1~10Hz。

本文分析了调制器型加速器的工作原理, 给出了各部分的设计参数以及单脉冲下的初步调试结果。

1 加速器的组成及工作原理

产生 μs 级或更长脉宽的重复脉冲电子束加速器, 用脉冲形成网络 (PFN) 与脉冲变压器组成调制器型加速器的技术方案更具有优越性, 这种方案具有电路结构简单, 脉宽调节容易实现, 可做到高的重复频率, 所用开关数目少, 控制触发、同步技术要求低等优点, 适合于我国目前的实际技术水平, 调制器型长脉冲加速器的电气原理如图 1 所示。

如图 1 所示, 高压直流电源通过充电电感把 PFN 充电到预定电压后, 外触发使开关 S 导通, PFN 形成的近似方波脉冲通过脉冲变压器升压后, 加到二极管上以产生所需的电子束。可

* 国家 863 激光技术领域资助项目。
1996 年 10 月 23 日收到原稿, 1997 年 5 月 7 日收到修改稿。
常安碧, 男, 1955 年 11 月出生, 副研究员。

以看出, 只有 PFN 输出矩形(或近似矩形)脉冲, 即满足矩形脉冲富氏变换式与 PFN 中各 LC 支路的电流之和相等的条件

$$\frac{E}{Z_{n=1}} b_{2n-1} \sin(2n-1) \frac{\pi}{T} = E \sum_{n=1} \sqrt{\frac{C_{2n-1}}{L_{2n-1}}} \sin(t/\sqrt{L_{2n-1}C_{2n-1}}) \quad (1)$$

或满足

$$\begin{cases} L_{2n-1} = \frac{ZT}{(2n-1)\pi b_{2n-1}} = \frac{ZT}{4} \\ C_{2n-1} = \frac{b_{2n-1}T}{(2n-1)\pi Z} = \frac{4T}{(2n-1)^2\pi^2} \end{cases} \quad (2)$$

的条件, 并且脉冲变压器具有快的响应特性, 才能产生较好的二极管电压波形。

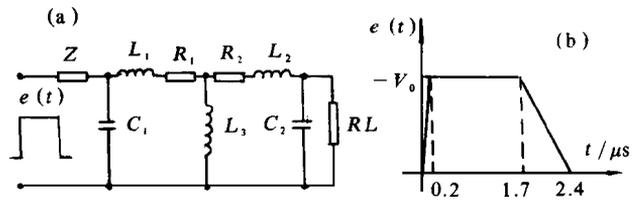
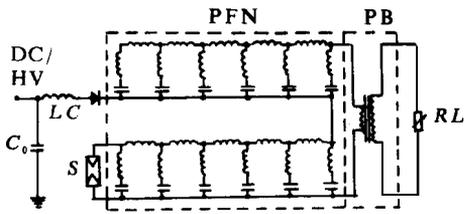


Fig 1 Schematic of modulation-type accelerator

Fig 2 Equivalent circuit of modulation-type accelerator

图 1 调制器型加速器电气原理图

图 2 调制器型加速器简化等效电路

首先采用图 2(a) 所示的简化电路分析调制器型加速器的工作特性, 这时, PFN 的输出用图 2(b) 所示脉冲表示。由图 2(a) 得

$$\begin{cases} Z_1 I_1(s) - \frac{1}{sC_1} I_2(s) = E(s) \\ -\frac{1}{sC_1} I_1(s) + I_2(s) Z_2 - sL_3 I_3(s) = 0 \\ -sL_3 I_2(s) + I_3(s) Z_3 + U(s) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

求解(3)式可求得负载 R 上的电压: $U(s) = \frac{Z_4 C_1 L_3 F(s) s^2}{(Z_3 + Z_4)(Z_1 Z_2 C_1^2 s^2 - 1) - Z_1 C_1^2 L_3 s^4} = E(s) \quad i=1$

$\frac{A_i}{s + a_i}$, 经变换后可得到

$$U(t) = A_1 e^{-\alpha_1 t} + A_2 e^{-\alpha_2 t} + A_3 e^{-\alpha_3 t} + A_4 e^{-\alpha_4 t} + A_5 e^{-\alpha_5 t} \quad (4)$$

式中, $Z_1 = Z + 1/sC_1$, $Z_2 = (L_1 + L_3)s + R_1 + 1/sC_1$, $Z_3 = (L_1 + L_2)s + R_2$, $Z_4 = R/(sRC_2 + 1)$, $\alpha_1 \sim \alpha_5$ 分别为 $U(s)$ 表达式中分母为零的根, $A_1 \sim A_5$ 是待定常数。同时, 我们也采用了 SPICE 软件计算了包括所有寄生参数影响时的输出波形, 结果发现两种方法计算的输出波形基本一致。可见, 采用简化计算方法来进行工程设计, 可完全满足要求。根据计算结果还可看出, 减小加速器回路寄生电感是设计中的关键。

2 主要部分设计参数

2.1 各部分电压及电压传输效率要求

根据图 1, 对从充电电源到电子束输出的各部分电路进行了详细分析计算, 得出了设计加速器电气参数时所需要的各部分电压指标及电压传输效率要求, 如图 3 所示。

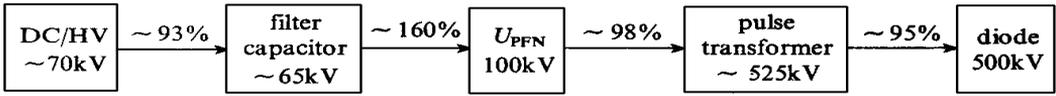


Fig 3 Each section output voltage and voltage transfer efficiency

图 3 各部分输出电压及电压传输效率

2.2 PFN 设计参数

PFN 的主要设计参数如下: 工作电压 $U_{PFN} = 100\text{kV}$; 脉冲宽度 $\tau = 1.8\mu\text{s}$; 特性阻抗为 2.8Ω ; 级数 $n = 6$; 脉冲前沿 $t_r = 0.25\mu\text{s}$; 脉冲后沿 $t_d = 0.35\mu\text{s}$

由于级电感 ($L_i = Z\tau/2n$) 要求很小, 再加上电路分布参数的影响, 高压低阻抗 PFN 的电气参数很难进行精确设计, 本方案采用 Blumlein PFN 的结构, 可把脉冲变压器变比降低一倍, 提高了 PFN 设计阻抗, 降低了设计难度。为了改善输出波形, PFN 采用了非均匀级电容的设计方法, 用计算机优化设计出了各级电容量。在匹配负载下对所设计的 PFN 进行了性能测试, 由表 1 可见设计值与实测值基本一致。

2.3 脉冲变压器的设计参数

为了满足电气参数和绝缘要求, 脉冲变压器结构设计时主要采用了以下几项技术: (1) 采用了不仅适合于高压运行, 而且具有漏感小的锥形绕组结构; (2) 采用 Blumlein PFN, 使脉冲变压器变比降低了 1 倍, 大大降低了漏感对输出特性影响; (3) 采用两端对称引出方式, 使引线长度降到最低。

表 1 Blumlein PFN 设计值与实验值的比较

Table 1 Comparison of theoretical value and experimental value of Blumlein PFN

parameters	Z/Ω	$t_r/\mu\text{s}$	$t_d/\mu\text{s}$	$\tau/\mu\text{s}$
theoretical value	2.8	0.15	0.25	1.8
experimental value	2.6 ~ 3.2	0.2	0.5	1.8

表 2 脉冲变压器设计值与实验值的比较

Table 2 Comparison of theoretical value and experimental value of transformer

parameters	U_{PFN}/kV	V_D/kV	$t_r/\mu\text{s}$	$t_d/\mu\text{s}$	η	$L_p/\mu\text{H}$
theoretical value	95	525	< 0.6	0.7	92%	1.6
experimental value	95	520	0.65	0.8	91%	1.8

脉冲变压器的设计参数为: 变比 $n = 6$, 初级匝数 $n_1 = 5$, 次级匝数 $n_2 = 30$, 铁心面积 $S = 100\text{cm}^2$, 绕组间最大距离 $\delta = 42$, 输出端屏蔽环半径 $R = 16\text{mm}$ 。在 $R = 100\Omega$ 的假负载条件下, 对脉冲变压器主要特性进行了测试, 结果见表 2。

2.4 长脉冲无箔二极管的设计参数

长脉冲运行一般都采用无箔二极管, 因为它具有束质高、有利于产生长脉冲束流, 有利于产生薄空心束和传输更大的束流以及阻抗稳定性高等优点。但无箔二极管电子束的形成与运动规律比有箔二极管的情况复杂得多, 没有成熟的理论和经验来可靠的设计无箔二极管的结构参数。为此, 我们参考了 BANSHEE 加速器二极管模型, 以泊松方程、电子在电磁场中的运动方程、以及满足空间电荷限制条件时二极管应遵循的 Child 发射定律等基本方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} = -\rho/\epsilon_0 \\ \frac{d}{dt}(\gamma m v) = e \left[E + \frac{1}{c} (v \times B) \right] \\ j = \frac{4\epsilon_0}{9} \left(\frac{2|e|}{m_0} \right)^{1/2} \Phi^{3/2} / d^2 \end{cases} \quad (5)$$

为基础,在所要求的 500keV、3~5kA,脉宽 1 μ s 等电子束参数条件下,利用 EDDYC 程序,对无箔二极管结构进行了数值模拟设计,确定了二极管阴阳极结构几何参数:阴极端面外直径 Φ_6 ,内直径 Φ_0 ;阳极结构外直径 Φ_{00} ,过渡区半径 $R = 120$,出口直径 Φ_3 ;阴阳极间距范围 $d = 30 \sim 50$ mm;漂移管 $\Phi_3, L = 200$;引导磁场 $B = 0.5 \sim 1.0$ T。二极管的基本结构如图 4。

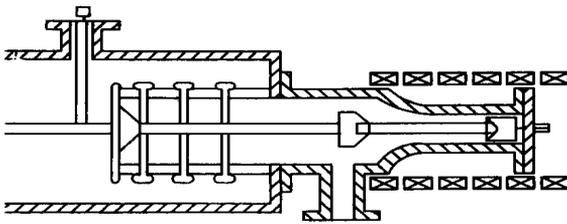


Fig 4 Schematic of long pulse diode

图 4 长脉冲二极管结构示意图

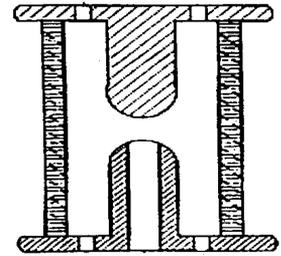


Fig 5 Schematic of gas switch

图 5 气体开关示意图

2.5 气体开关设计参数

重复频率气体火花开关设计必须满足以下几点要求: (1)极间电场尽可能大面积均匀分布; (2)电极间气体流动不存在“死区”; (3)气体流向要有利于带电粒子尽快恢复; (4)选择开关工作稳定、寿命长的电极材料; (5)选择恢复速度快且无污染和危险性的气体介质。设计的开关结构如图 5 所示,设计参数为:工作电压范围 50~100kV;最大脉冲电流 100kA;电荷传递量 0.15~0.3C/pulse;间距 1.2~1.7cm 可调;气压种类及压力 0.25~0.35MPa (表压) 氮气;气体流量 $Q > p v f = 25 \sim 35$ L/s (标准状态);电极尺寸最大直径 $\Phi_0 \sim \Phi_0$,顶部球半径 $SR = 50$,高度 $H = 50$ 。

3 实验安排及初步实验结果

加速器总调试实验初步安排分两个阶段进行,第一阶段在单脉冲下进行实验,第二阶段进行重复脉冲实验。因为长脉冲二极管,有许多复杂的物理问题和技术问题需要解决,特别是实现重复脉冲运行时更是如此,如等离子体、引导磁场、涡流损耗等对二极管束流特性的影响,二极管结构优化、阴极材料选择的实验研究等都是有待进一步开展的研究工作。

在二极管阳极之后接了一段 $\Phi_3 \times 200$ 的漂移管,漂移管后接法拉第筒,阴极发射的电子流在引导磁场作用下通过漂移管运动到其末端由法拉第筒收集。

表 3 列出了不同 PFN 充电电压下法拉第筒上测到的束流波形参数及相应的管电压波形参数。图 6(a)是二极管电压 460kV、束流 3kA 时的电压、电流波形,图 6(b)是 Los Alamos 实验室 BAN SHEE 长脉冲加速器的典型电压电流波形。表 4 列出了 $U_{PFN} = 65$ kV 时,不同引导磁场条件下的束流波形参数及相应的管电压波形参数。图 7 显示了 $U_{PFN} = 65$ kV 时,两种不同引导磁场下的电压电流波形变化情况。

虽然不同条件的实验仍在进行, 所得到的实验数据还很不完善, 但根据目前所得到的实验结果分析, 我们可能初步得到下列几点有意义的结果: (1) 只要保持每次实验时真空度一致, 在相同的 U_{PEN} 、相同的引导磁场和相同的时间间隔条件下, 可得到基本一致的束电压及束流波形; (2) 二极管电压已达到约 500kV, 束流已达 3kA, 脉宽约 1.5 μ s, 基本达到设计指标, 与数值模拟计算结果, 基本一致; (3) 在阴阳极间距 $d = 4.5 \sim 5$ cm 时, 二极管阻抗高于 100 Ω 的设计值, 达到了 150 Ω 左右, 阻抗稳定性较好; (4) 管电压、束流波形形状与模拟计算结果相当, 但由于实际回路电感值比设计值大 30% 左右, 所以电压、电流波形前后沿大于设计值, 而实测脉冲宽度与计算脉冲宽度基本一致; (5) 实验中发现, 不仅引导磁场分布对束流大小影响较大, 而且引导磁场大小对束流、束电压波形和束斑形状的影响也很大, 在相同磁场分布条件下, 似乎存在一最佳引导磁场值, 在此引导磁场下, 可得到最好的束流波形和束斑形状, 表 4 所列出数据在一定程度上也说明这一问题。

表 3 不同充电电压 U_{PEN} 时的电压电流

Table 3 Voltage and current of different charge voltage U_{PEN}

No.	U_{PEN} /kV	Parameters of current			Parameters of voltage		
		t_r/μ s	I_c/kA	τ/μ s	t_r/μ s	V_D/kV	τ/μ s
1	65	0.9	2.85	1.50	1.0	460	1.9
2	65	0.9	2.65	1.50	1.0	420	1.8
3	65	0.8	2.85	1.40	1.0	440	2.0
4	65	1.1	2.95	1.50	1.2	470	2.0
5	65	0.7	2.20	1.70	0.9	435	1.7
6	70	1.1	2.97	1.50	1.1	510	1.5
7	70	1.1	3.05	1.45	1.0	495	1.6
8	70	0.8	3.04	1.40	1.0	505	1.5
9	70	0.8	2.80	1.40	1.0	505	1.5
10	70	1.1	3.04	1.70	1.2	460	1.6

表 4 不同引导磁场下的电压电流

Table 3 Voltage and current of different guiding magnetic field

No.	B /mT	Parameters of current			Parameters of voltage		
		t_r/μ s	I_c/kA	τ/μ s	t_r/μ s	V_D/kV	τ/μ s
1	450	0.8	1.85	1.6	1.0	400	1.9
2	465	0.8	2.34	1.7	1.0	437	2.0
3	480	0.9	2.50	1.7	1.1	439	1.7
4	580	1.1	2.95	1.5	1.2	461	2.0
5	580	1.0	2.90	1.5	1.0	440	2.0
6	637	1.0	2.70	1.5	1.2	480	1.9
7	690	1.0	2.70	1.5	1.2	475	2.0

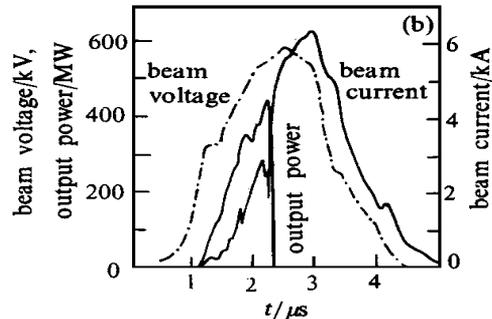
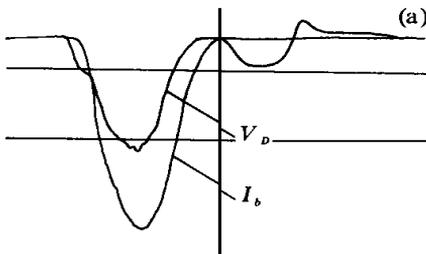


Fig 6 Output voltage and beam current waveform of accelerator

图 6 加速器的输出电压和束流波形

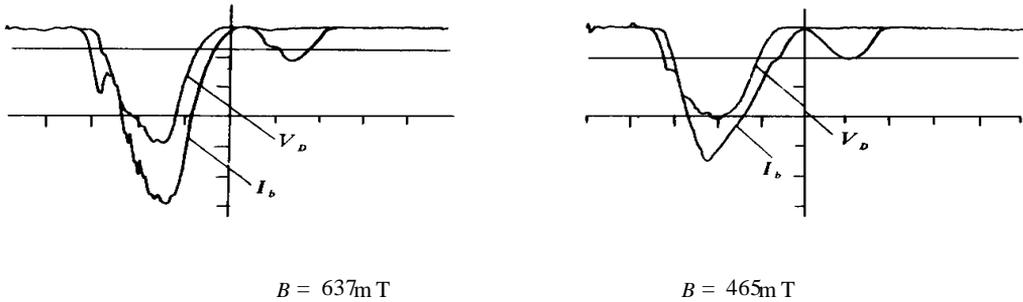


Fig 7 Voltage and current waveform of different guiding magnetic field

图 7 不同引导磁场时的束电压、电流波形

存在的问题主要有以下几点:

(1) 阴极发射稳定性问题: 实验中发现, 除了真空度、引导磁场、充电电压等条件相同之外, 每次实验时间间隔较长时, 阴极发射才比较稳定, 才有可能得到较好的电压、电流波形, 如果时间间隔较短, 则阴极发射不很稳定, 电压、电流波形差别也比较大。找到发射能力强, 且发射比较稳定的阴极材料和阴极处理工艺是提高束流稳定度的关键, 也将是加速器进行重复脉冲出束实验前必须要解决的问题。

(2) 真空度的影响: 每次实验之后, 真空度下降很多, 即使阴极多次发射之后也是这样, 必须从根本上解决这一问题才能进行重复脉冲实验, 解决的办法一是加大泵的抽速, 二是二极管采用低放气率的真空陶瓷绝缘外壳, 三是要采用放气率低的阴极材料, 并在实验前, 对阴极进行预烘烤处理。

(3) 磁场问题: 引导磁场的分布和大小, 不仅影响束流大小, 而且还影响束流质量。阴阳极区磁场分布对不同的阴阳极距离, 不同的阴阳极形状, 甚至对不同的阴极材料, 都对二极管的工作特性和束流特性影响很大, 在不同的充电电压, 不同的阴极形状和阴阳极间距等条件下, 找到最佳的引导磁场分布和引导磁场的大小值, 以便得到最好的束流波形和束斑形状, 是今后实验中应解决的重要问题。

4 结 语

我们完全利用国产元件和材料, 在较短的时间内自行设计, 建造了一台 500kV 长脉冲加速器, 并在各方面条件还很不完备的条件下, 利用现有条件进行了安装、调试, 已在单脉冲下得到了 500keV、3kA、 $1.5\mu\text{s}$ 脉宽的长脉冲束流。通过实验, 积累了一定的经验, 也发现了存在的一些问题, 为今后加速器继续进行出束实验和各部分的改进提供了条件, 也为今后进行重复脉冲实验, 开展加速器单元技术研究奠定了良好的基础。

致谢 加速器的方案制订、设计、加工、安装和实验过程中, 院科技委副主任周传明研究员多次指导工作, 在此表示感谢。

参考文献

- 1 Dwight G Rickel, et al *IEEE Trans* 1992, PS-20(3): 373~ 382
- 2 Stringfield R M, et al Proc 9th Inter. Conf on High Power Particle Beam s, Washington D C, U SA, 1992, 688~ 693
- 3 王莹 高功率脉冲电源, 北京: 原子能出版社, 1991
- 4 东冲 线性调制器理论基础与专用电路, 北京: 国防工业出版社, 1980
- 5 强伯涵 现代雷达发射机的理论和实践, 北京: 国防工业出版社, 1985

DESIGN AND EXPERIMENT OF 500kV MODULATION-TYPE ACCELERATOR

Chang Anbi, Zhang Zhifu, Zhang Dequan, Jiang Jinsheng, Ma Qiaosheng

Luo Min, Guo Weiming, Tan Jie, Luo Chenyin, and Deng Shiyu

Institute of Applied Electronics, CAEP, P. O. Box 527-55, Chengdu, 610003

The technical specification and the electric parameter with consideration of the characteristic of modulation-type long pulse accelerator and its operate mechanism. With dummy load, the electric parameter of PFN and pulse transformer are tested and adjusted. System experiment is operated on condition that pulse is single and the charging source, the distance between cathode and anode, the guide magnetic field are adjustable. The result is obtained: voltage 500kV, current 3kA, pulse duration 1.5 μ s. The wave shapes of voltage and current are fair. Experiment of single pulse agrees with design specification. Changing guide magnetic field, long pulse diode experiment obtained the primary experimental result. It is a good step for operating single pulse experiment, promoting beam stability and bunching repetitive frequency pulse experiment.