

# 天光 II-B 强流脉冲电子加速器的设计

邹 俭, 曾乃工, 王 川, 张天爵, 姜兴东

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

**摘要:** 为了驱动 X 箍缩负载, 在天光 II-A 的 Marx 油箱侧面建立了一条新的实验线路天光 II-B。它在保留装置原有泵浦激光能力的基础上, 还可进行 X-pinch 相关实验研究, 达到了一器两用的目的。天光 II-B 主要由 Marx 发生器、脉冲形成线、主开关、脉冲传输线和负载构成, 形成线工作介质为去离子水, 形成线特征阻抗  $6 \Omega$ , 传输线采用变阻抗线设计, 负载特征阻抗  $1.25 \Omega$ 。本文介绍了天光 II-B 新线的设计、全电路模拟及在电阻负载下的调试结果。模拟和调试结果显示, 天光 II-B 装置在负载电阻为  $1.25 \Omega$  时, 负载上的电流峰值约 269 kA, 脉宽约 50 ns, 电流上升时间小于 30 ns。以上结果证实, 天光 II-B 具有驱动低阻抗 X-pinch 实验线路的能力。

**关键词:** 天光 II-B; 电子加速器; Marx 发生器; 脉冲形成线; 脉冲传输线

中图分类号: TL505

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2013)05-0875-05

doi: 10.7538/yzk.2013.47.05.0875

## Design of Light II-B Pulsed Power Electron Accelerator

ZOU Jian, ZENG Nai-gong, WANG Chuan, ZHANG Tian-jue, JIANG Xing-dong

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract:** The Light II-B was built at the side of the Marx tank of Light II-A for X-pinch test, which kept the original capacity of KrF excimer laser, and can be used for relevant researches of X-pinch. It is composed of a Marx generator, a pulse forming line (PFL), a gas-filled switch, a pulse transmission line (PTL), and a copper-sulphate resistive load. The medium of the forming line is deionized water. The input impedance of the pulse forming line is  $6 \Omega$ , corresponding to an output impedance of  $1.25 \Omega$  for the pulse transfer line. The design of circuit simulation and the debugging results in resistance load were introduced. The results show that the current peak load is about 269 kA, pulse width is about 50 ns, and the current rise time is less than 30 ns when the load is  $1.25 \Omega$ . It indicates that Light II-B has the ability to drive low impedance X-pinch experimental line.

**Key words:** Light II-B; electron accelerator; Marx generator; pulse forming line; pulse transfer line

X-pinch 等离子体是位于主电极间的负载,由两根交叉并接触于一点的金属细丝组成,呈“X”形状,当脉冲功率源输出的大电流流过这两根交叉细丝时,交叉点处的等离子体首先会向外膨胀,然后在磁压力作用下迅速向轴心箍缩,形成 X-pinch 等离子体,并辐射出 X 射线脉冲。X-pinch 等离子体是一种高辐射强度的亚 ns 脉冲 X 射线点源,非常适合作为 X 射线相位差衬托照相的光源<sup>[1-2]</sup>。传统的 X 射线背光照相是基于吸收衬度机制的 X 射线成像,即利用不同物体对 X 射线的吸收程度不同,透过光的强弱辨别物体的内部结构。但这种方法仅对吸收程度相差大的轻元素与重元素的辨别有较好的结果,而对于一些弱吸收样品,如人体内的肿瘤组织结构及软组织结构,成像衬度则很低。相位差衬托照相是利用光穿过样品的不同部分时由于相速差异而发生位相偏移,并通过不同方法记录其相位信息从而得到物体图像的方法,在医学和生物科学上具有重要的应用前景。

国内外公认的衡量用作 X-pinch 负载驱动源的脉冲功率装置规模的主要指标是负载上的快前沿电流值。在 X-pinch 实验中,驱动源具有百 kA 电流的输出及几十 ns 的电流波上升时间即可驱动 X-pinch 实验。中国原子能科学研究院的天光 II-A 装置储能约 5.6 kJ, Marx 发生器输出电压 1.5 MV,具有驱动低阻抗 X-pinch 实验线路的能力。在天光 II-A 装置上建造 X-pinch 光源,并进行 X-pinch 照相实验,可利用现有天光 II-A 的 Marx 发生器,仅需建造新的脉冲形成线(PFL)、主开关、低阻抗传输线以及 X-pinch 负载腔。利用此装置可在建造成本较低的情况下,研究和验证 X-pinch 背光照相与相位差照相技术、验证 X-pinch 光刻技术,为可用于商业运行的紧凑型与桌面型的 X-pinch 光源装置的建造积累设计、运行经验。

本工作拟在天光 II-A 的 Marx 油箱侧面建立一条新的实验线路天光 II-B,设计用于驱动 X-pinch 实验的天光 II-B 的脉冲功率源,进行全电路模拟,并在电阻负载下进行初步调试。

## 1 装置原理

天光 II-B 脉冲功率装置原理示于图 1。其

基本原理为:用 Marx 发生器(0.1  $\mu\text{F}/100\text{ kV}$  的电容器 20 台,单台电容器工作充电电压 75 kV,正负充电)将形成线充电至 1.35 MV 时,主开关击穿,能量由传输线到达负载,测量探头安装在传输线末端。其中脉冲形成线特征阻抗设计为 6  $\Omega$ ,满足与 Marx 发生器阻抗电容匹配,达到较高的能力传输效率,同时增大了主开关的驱动阻抗,延长了输出电流的上升时间。脉冲传输线采用变阻抗线设计,输入端阻抗  $Z_i=6\ \Omega$ ,输出端阻抗  $Z_o=1.25\ \Omega$ ,变阻抗线电压传输系数  $\alpha=\sqrt{Z_o/Z_i}=0.456$ ,电流传输系数  $\beta=\sqrt{Z_i/Z_o}=2.19^{[3-4]}$ 。低的输出阻抗设计是为了在负载上得到较大的电流,满足 X-pinch 实验需求。

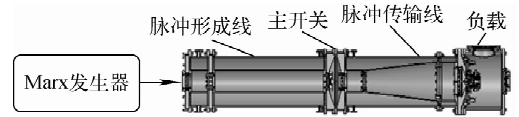


图 1 天光 II-B 脉冲功率装置原理图

Fig. 1 Principle diagram

of Light II-B pulsed power device

## 2 装置设计

### 2.1 Marx 发生器

形成线特征阻抗选择为 6  $\Omega$ 。根据传输线原理,形成线的电容与其脉宽及其阻抗的关系用式(1)表示:

$$C_F = \frac{\tau}{2Z_{\text{PFL}}} \quad (1)$$

Marx 发生器串联后的电容  $C_M$  为 5 nF,与脉冲形成线的电容基本匹配。工作时充电电压为 75 kV,则 Marx 发生器的工作总储能  $W_{\text{Marx}}=5.62\text{ kJ}$ 。

该 Marx 发生器有 10 个场畸变火花开关,开关内充 0.15~0.35 MPa 的合成空气。开关触发电阻  $R_c \approx 1\text{ k}\Omega$ ,充电电阻  $R_c \approx 10\text{ k}\Omega$ ,接地电阻  $R_g \approx 30\text{ k}\Omega$ 。首先通过 140 kV 的脉冲电压对第 1 开关进行触发,余下开关为阻容耦合触发,当电容器充至  $\pm 75\text{ kV}$  时,Marx 发生器标称电压最大,为 1.5 MV。为避免 Marx 电路器件在高压下打火击穿,将 Marx 电路全部浸入绝缘油中。其中,等效串联电阻包括火花电阻、接触电阻和引线电阻,阻值约 6  $\Omega$ ;等效

串联电感约  $3 \mu\text{H}$ ; 等效并联电阻由充电电阻、接地电阻和触发电阻并联构成, 阻值约  $1 \text{ k}\Omega$ 。

为保证 Marx 发生器对形成线的输出能力, 通过模拟软件对其进行电路模拟, 将 Marx 发生器各项参数输入模拟程序中, 模拟结果示于图 2。Marx 发生器对形成线的充电周期约  $600 \text{ ns}$ , 充电效率约  $90\%$ 。实际示波器测量 Marx 发生器对形成线的充电电压波形示于图 3。Marx 发生器标称电压  $1.5 \text{ MV}$ , 脉冲形成线最高峰值电压  $1.28 \text{ MV}$ , 充电效率  $85\%$ , 充电周期  $580 \text{ ns}$ 。

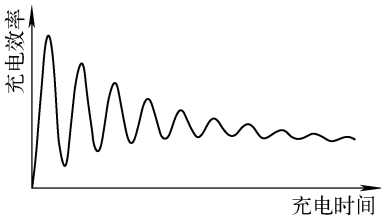


图 2 模拟充电波形

Fig. 2 Charging waveform simulation

对比图 3 与图 2 可看出, 实际测量的 Marx 发生器对形成线的充电电压波形与模拟结果基本一致。以上结果说明, 所设计的 Marx 发生器能满足要求。

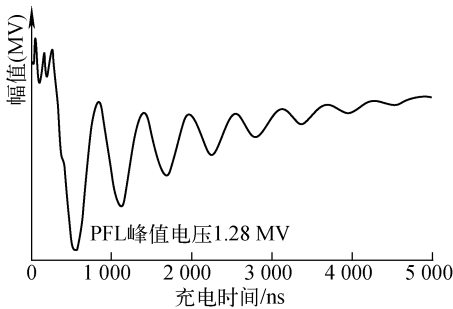


图 3 实测充电波形

Fig. 3 Measured charging waveform

## 2.2 脉冲形成线与传输线

Marx 发生器为  $\mu\text{s}$  级脉冲功率源, 为得到更高的脉冲功率, 满足丝阵负载的需求, 必须通过脉冲形成线(PFL)对 Marx 发生器输出脉冲进行压缩, 使其脉宽为  $50 \text{ ns}$ 。同时, PFL 等效电容与 Marx 发生器串联电容匹配, 才会达到两者间最大的能量传输效率。选定 PFL 的特

征阻抗  $Z=6 \Omega$ , 形成线尺寸既要保证安全不发生击穿, 又不要过于保守, 可通过波阻抗公式确定:

$$Z = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \ln \frac{R_1}{R_2} \quad (2)$$

其中:  $R_1$ 、 $R_2$  分别为外筒、内筒半径;  $\epsilon$  为水介电常数。

水介质传输线的内筒与外筒的安全系数分别为  $K_-$  和  $K_+$ :  $K_- = E_- / F_-$ ;  $K_+ = E_+ / F_+$ 。其中,  $E_-$  和  $E_+$  分别为内筒与外筒的实际工作场强, 可用下式计算:

$$E_+ = \frac{V}{R_1 \ln \frac{R_1}{R_2}} \quad (3)$$

$$E_- = \frac{V}{R_2 \ln \frac{R_1}{R_2}} \quad (4)$$

式中,  $V$  为电压,  $V$ 。

$F_-$  和  $F_+$  分别为内筒与外筒的击穿场强, 可由 J. C. Martin 公式导出:

$$F_+ = \frac{0.23}{A^{0.058} t_{\text{eff}}^{1/3}} \quad (5)$$

$$F_- = \frac{0.56\alpha}{A^{0.069} t_{\text{eff}}^{1/3}} \quad (6)$$

其中: +、- 号表示同轴导体上所加电压的极性;  $\alpha$  为场增强修正因子,  $\alpha = 1 + 0.12((E_{\text{max}} - E_{\text{min}}) / (E_{\text{max}} + E_{\text{min}}))^{1/2}$ ;  $A$  为电极面积,  $\text{cm}^2$ , 对于同轴线的圆筒为其侧面积;  $t_{\text{eff}}$  为有效作用时间,  $\mu\text{s}$ , 指电压超过最大值的  $63\%$  至最大值的时间。

当 Marx 发生器电容充电电压为  $1.5 \text{ MV}$  时, 形成线上的电压峰值  $V_{\text{Fmax}} = 1.35 \text{ MV}$ , 内筒为负高压, 外筒接地。取其外筒内径为  $360 \text{ mm}$ 、内筒外径为  $166 \text{ mm}$ , 则  $E_+ = 0.115 \text{ MV} \cdot \text{cm}^{-1}$ ,  $E_- = 0.249 \text{ MV} \cdot \text{cm}^{-1}$ ; 而  $F_+ = 0.3 \text{ MV} \cdot \text{cm}^{-1}$ ,  $F_- = 0.69 \text{ MV} \cdot \text{cm}^{-1}$ ;  $K_+ = 0.383$ ,  $K_- = 0.361$ , 该安全系数已能满足要求。

传输线采用变阻抗线设计, 变阻抗线输入端阻抗  $6 \Omega$ , 输出端阻抗  $1.25 \Omega$ , 电压传输系数  $\alpha \approx 0.45$ , 电流传输系数  $\beta \approx 2.19$ 。

## 2.3 主开关

在整个脉冲放电装置中, 主开关是一关键性部件<sup>[5-6]</sup>, 其上升时间决定了该脉冲功率发生装置的输出特性, 所以选用充气  $\text{SF}_6$  气体开关

作为主开关,无需外加触发电源,同时具有低抖动和工作范围宽的优点。开关上升时间  $t_s = 2.2\tau_s$ ,其中  $\tau_s$  为开关的时间常数,由电阻项时间常数  $\tau_R$  和电感项时间常数  $\tau_L$  两部分组成:

$$\tau_s = \tau_R + \tau_L。$$

气体开关的电阻项时间常数为:

$$\tau_R = \frac{88(\rho/\rho_0)^{1/2}}{(nZ_s)^{1/3}E^{4/3}} \quad (7)$$

其中: $\rho_0$  为标准状态下空气的密度,1.29 mg/cm<sup>3</sup>;  $\rho$  为充入 SF<sub>6</sub> 气体的密度;  $E$  为开关的击穿场强,10 kV/cm;  $Z_s$  为开关驱动阻抗,由回路电感  $L$  和电容  $C$  决定;  $n$  为火花通道数。

开关的电感项时间常数为:

$$\tau_L = \frac{L_{sp}}{nZ_s} + \frac{L_e}{Z_s} \quad (8)$$

其中: $L_{sp}$  为火花通道电感,nH;  $L_e$  为电极电感,nH。

对于阻抗为 6 Ω 的形成线,开关的驱动阻抗较大,这对要得到小的时间常数非常有利。欲减小开关的时间常数,必须提高它的击穿场强和减小开关电感。为此,本工作选用 SF<sub>6</sub> 气体开关,它有较强的击穿场强;火花通道较短,可减小开关电感。根据以上公式计算可得,开关上升时间小于 30 ns。

## 3 探头选择

### 3.1 电压探头

通常用示波器测量高压脉冲时,需采用分压器将脉冲幅度降低,以满足示波器量程。为了得到真实的波形,分压器的分压比必须准确标定,在高压 ns 技术中,一般采用电容分压器,因其结构简单,频率响应可做到很宽,不直接接触高压电极,可忽略电场扰动影响,所以选用电容分压器作为电压测量探头。

### 3.2 电容分压器设计参数

电容分压器的高压臂电容  $C_{HV}$  为电容分压器内导体杆与传输线内筒之间的电容,由下式<sup>[7-8]</sup>估算:

$$C_{HV} = C_0 \times \frac{\pi r_i^2}{2\pi R_0 d_i} = 1.667 \text{ pF} \quad (9)$$

式中: $r_i = 0.005$  m,为电容分压器内导体杆半径; $d_i = 0.01$  m,为电容分压器内导体杆直径; $R_0 = 0.108$  m,为传输线的外筒内径; $C_0 =$

240 pF,为单位长度(0.01 m)传输线对应的电容。

电容分压器的低压臂电容  $C_{LV}$  为电容分压器内导体杆与电容分压器外筒之间的电容,用下式表示:

$$C_{LV} = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \frac{r_o}{r_i}} = 1106 \text{ pF} \quad (10)$$

式中: $r_o = 0.006$  m,为电容分压器外导体杆的半径; $l = 0.042$  m,为电容分压器导体杆的长度; $\epsilon$  为水的介电常数。

电容分压比  $k_C$  与高压臂电容  $C_{HV}$  及低压臂电容  $C_{LV}$  的关系为: $k_C = \frac{C_{LV} + C_{HV}}{C_{HV}}$ 。由此可估算,本工作所用分压器的电容分压比为 663。

### 3.3 回流器设计参数

负载电流的测量:在传输线末端与负载的绝缘环的外径处,将不锈钢金属膜绕其 1 周构成回路,用于测量电流。由于金属膜电阻难以计算,须进行标定,标定方法参考文献[9-10]。

采用不锈钢薄膜作电阻环,其平均厚度  $\delta = 17 \mu\text{m}$ 、圆周长度  $L = 118$  cm、薄膜宽度  $\Delta w = 2.6$  cm,电阻率  $\rho = 90 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ (环境温度 20 °C)。则金属膜电阻环的阻值  $R_{film}$  由下式估算: $R_{film} = \frac{\rho \Delta w}{L \delta} = 1.16 \text{ m}\Omega$ 。薄膜的趋肤效应深

度可由下式估算: $\delta = \sqrt{2\rho/\omega\mu}$ ,其中磁导率  $\mu = 4\pi \times 10^{-9} \text{ H/cm}$ ,脉冲等效频率  $f = 0.4/t_0$ ,脉冲波形上升时间  $t_0 = 1.8 \times 10^{-8} \text{ s}$ , $\omega = 2\pi f$ 。由此可计算得到  $\delta_0 = 103 \mu\text{m}$ , $\delta_0 \gg \delta$ ,因此趋肤效应可忽略。

## 4 电路模拟

为了完善装置的设计,采用 Ansoft 公司 Simplore6.0 电路模拟软件对全电路进行模拟,模拟输出波形示于图 4。Marx 发生器标称电压 1.5 MV,负载输出电流约 250 kA。

## 5 假负载输出波形

将阻抗约为 1.25 Ω 的 CuSO<sub>4</sub> 水溶液作为负载,其输出波形示于图 5。由图 5 可见,当 Marx 发生器输出电压为 1.4 MV 时,主开关击穿电压 1.177 MV,输出电压 256 kV,输出电流 269 kA,电流波上升时间小于 30 ns、脉宽约 50 ns。由于

$\text{CuSO}_4$  水溶液在配制过程中,很难准确调配到  $1.25 \Omega$ , 实际略小于  $1.25 \Omega$ , 所以在假负载下的输出电流幅值略大于模拟输出的电流值。

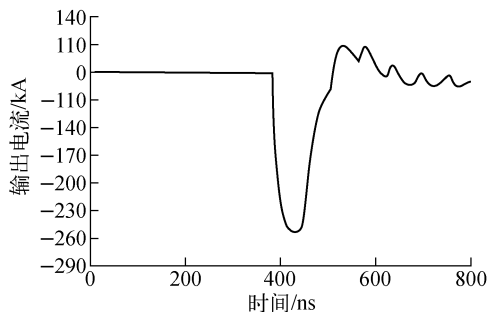


图 4 负载电流模拟波形

Fig. 4 Simulated waveform of load current

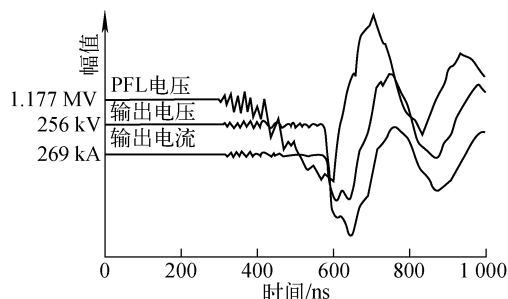


图 5 假负载输出波形

Fig. 5 Output waveform of fake load

## 6 小结

介绍了天光 II-B 新线光源建立的设计方案,经计算和全电路模拟,天光 II-B 装置在负载电阻为  $1.25 \Omega$  时,负载上的电流峰值约  $269 \text{ kA}$ ,脉宽约  $50 \text{ ns}$ ,电流上升时间小于  $30 \text{ ns}$ ,证实天光 II-B 具有驱动低阻抗 X-pinch 实验线路的能力。

## 参考文献:

[1] BOTT S C, PALMER J B A, AMPLEFORD D J, et al. Use of X-pinch to diagnose behavior of low density CH foams on axis of wire array Z-pinch[J]. Rev Sci Instrum, 2004, 75(10): 3 944-3 950.

[2] VOLKOV G S, GRABOVSKII E V, ZURIN M V, et al. An X-ray backlighting technique based on using X-pinch radiation for probing the plasma of multiwire imploding linert the Angara-5-1 facility[J]. Instruments and Experimental Techniques, 2004, 47(3): 376-389.

[3] 杨大为,曾乃工,王晓军,等. 变阻抗线及预脉冲开关的设计与调整[J]. 强激光与粒子束,1991, 3(3):398-404.

YANG Dawei, ZENG Naigong, WANG Xiaojun, et al. Design and adjustment of an impedance tapering line and prepulse switch[J]. High Power Laser and Particle Beams, 1991, 3(3): 398-404(in Chinese).

[4] 杨大为,王乃彦,张奎方,等. 强流脉冲电子加速器充电调整[J]. 原子能科学技术,1988,22(2): 134-147.

YANG Dawei, WANG Naiyan, ZHANG Kuifang, et al. Adjustment for charging process of pulsed intense-electron-beam accelerators[J]. Atomic Energy Science and Technology, 1988, 22(2): 134-147(in Chinese).

[5] 刘锡三. 高功率脉冲功率技术[M]. 北京:国防工业出版社,2005:154-174.

[6] 刘锡三. 强流粒子束及其应用[M]. 北京:国防工业出版社,2007:283-315.

[7] 姜兴东,曾乃工. 高功率脉冲测试探头的标定[C]//第五届高电压新技术交流会论文集. 绵阳:中国工程物理研究院,2000:169-175.

[8] 曾乃工,杨大为,姜兴东,等. 天光 II 号强流脉冲电子加速器[C]//第五届全国高功率会议论文集. 合肥:高电压新技术分委会,1993:207-211.

[9] 邹俭,王川,郑侠,等. 紧凑型 X-pinch 装置探头标定[J]. 强激光与粒子束,2011,23(6):1 687-1 691.

ZOU Jian, WANG Chuan, ZHENG Xia, et al. Measure probes on X-pinch compact pulsed power source[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(6): 1 687-1 691(in Chinese).

[10] FOY R, LABEYRIE A. Feasibility of adaptive telescope with laser probe[J]. Astron Astrophys, 1985, 152(1): 129-130.