

## 紧凑 Tesla 变压器型纳秒脉冲源<sup>\*</sup>

石 磊, 朱郁丰, 卢彦雷, 乔汉青, 夏文锋, 樊亚军

(西北核技术研究所, 高功率微波技术重点实验室, 西安 710024)

**摘 要:** 采用带有开路磁芯的 Tesla 变压器与单筒脉冲形成线一体化结构, 研制了一台基于 Tesla 变压器的紧凑 GW 级纳秒脉冲源, 该源包括一个 40  $\Omega$  脉冲形成线、内置 Tesla 变压器、初级电路及高压吹气主开关等, 具有变比高、结构紧凑、能量传输效率高、便于重复频率运行等特点。给出了脉冲形成线、Tesla 变压器和主开关等的工作原理、设计方法和模拟计算。实验结果表明, 该脉冲源输出电压大于 200 kV, 脉冲宽度约 8 ns, 可以在重复频率 100 Hz、平均输出功率 1 GW 情况下稳定运行, 实验结果与理论设计相符。

**关键词:** ns 脉冲源; Tesla 变压器; 脉冲形成线; 主开关; 开路磁芯

**中图分类号:** TM836

**文献标志码:** A

**doi:**10.11884/HPLPB201426.125001

与传统的高压脉冲功率装置, 如 Marx 发生器等相比, Tesla 变压器型脉冲源具有能量传输效率高、结构紧凑等特点, 可以做到变比高、体积小、重量轻, 而且所需开关少, 触发容易, 便于重复频率运行, 因而在重复频率型脉冲功率源方面得到了越来越多的应用。Tesla 变压器是一种双谐振脉冲变压器, 它的原型结构是由美国著名发明家 Nikola Tesla 于 1891 年在他的一项发明专利中首次提出的<sup>[1]</sup>。把 Tesla 变压器与脉冲形成线结合起来的想法是由俄罗斯科学院 G. A. Mesyats 院士和他的同事们提出来的<sup>[2]</sup>。托木斯克大电流所 S. D. Korovin 等人把 Tesla 变压器与单筒形成线相结合研制出了“SINUS”系列脉冲源<sup>[3]</sup>, 叶卡捷琳堡电物理所 V. G. Shpak 等人把 Tesla 变压器与 Blumlein 相结合研制出了“RADAN-303”系列小型脉冲功率源<sup>[4-5]</sup>, 为我们提供了小型化紧凑型高功率脉冲源设计的范例, 在国内多家单位也开展了 Tesla 型脉冲源研究并取得了很大成绩<sup>[6-8]</sup>。根据实验需求, 本文采用带有开路磁芯的 Tesla 变压器与单筒脉冲形成线一体化结构, 研制了一台紧凑型 GW 级纳秒脉冲源, 该源主要包括单筒脉冲形成线、内置 Tesla 变压器、初级电路和高压吹气气体主开关等几部分, 其主要技术指标为: 脉冲形成线特性阻抗 40  $\Omega$ , 输出电压 200 kV, 输出功率 1 GW, 脉冲宽度 8 ns, 重复频率 100 Hz。

### 1 脉冲形成线

单筒形成线的结构参数主要有外筒半径  $r_1$ 、内筒半径  $r_2$  和长度  $l$ , 这些参数由绝缘和脉冲宽度决定。根据脉冲功率源功率 1 GW 设计指标, 当形成线特性阻抗  $Z = 40 \Omega$  时, 形成线输出电压约为 200 kV, 考虑到主开关导通时损耗, 单筒脉冲形成线的充电电压  $V_s$  应达到 500 kV, 脉冲形成线的绝缘应具有耐受 500 kV 的能力。主开关在脉冲形成线末端。单筒形成线脉冲源的原理结构见图 1。

选择脉冲形成线充变压器油作绝缘介质, 变压器的相对介电常数为  $\epsilon_r = 2.25$ 。综合考虑, 选择脉冲形成线阻抗  $Z = 40 \Omega$ 。外筒内半径  $r_1 = 108 \text{ mm}$ , 内筒外半径  $r_2 = 40.0 \text{ mm}$ , 内外筒间隙  $\Delta_2 = 63.2 \text{ mm}$ , 总长度  $l = 76 \text{ cm}$ 。可以计算出脉冲形成线电容为  $C_s = 2\pi\epsilon_0\epsilon_r l / \ln(r_1/r_2) = 94 \text{ pF}$ 。

形成线内筒外表面电场可以表达为

$$E_2 = \frac{V_s}{r_2 \ln(r_1/r_2)} \quad (1)$$

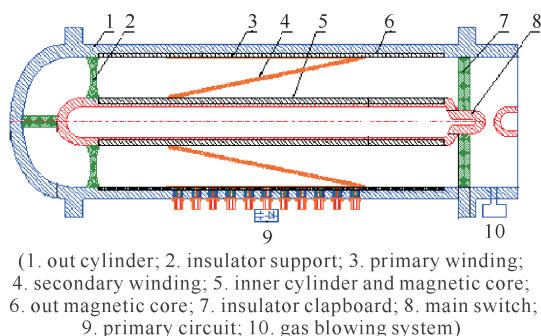


Fig. 1 Schematic of pulse generator structure

图 1 脉冲源原理结构图

形成线内筒外表面电场可以表达为

\* 收稿日期: 2014-04-17; 修订日期: 2014-06-19

基金项目: 国家高技术发展计划项目

作者简介: 石 磊 (1966—), 男, 博士, 研究员, 主要从事超宽谱高功率微波技术和脉冲功率技术研究; shilei@nint.ac.cn。

当形成线内外筒之间的电压  $V_s = 500$  kV 时,内筒表面电场为 126 kV/cm,在变压器油作绝缘介质、 $\mu\text{s}$  量级充电情况下,这个场强是安全的。

对于理想主开关,脉冲源输出电压波形是一理想方波,而对于实际的主开关具有一定的导通时间,则脉冲源电路模拟输出电压波形如图 2 所示,输出功率大于 1 GW、脉冲宽度约 8 ns。

## 2 Tesla 变压器

空心变压器的耦合系数通常较小。理论分析表明,耦合系数越小,变压器输出电压最大峰值出现的时间越晚,用此脉冲对负载充电,系统将承受更长时间的高电压振荡冲击,这必然加大装置绝缘负担,不利于装置的小型化设计。另一方面,在实际变压器中,电阻功耗的存在会造成电压振幅的逐渐衰减,小耦合系数时,电压最大峰值出现时间后移,其幅值会相应降低,这将不利于对负载的充电。因此我们采用带有开路磁芯的 Tesla 变压器设计方案。

### 2.1 Tesla 变压器初次级线圈参数

Tesla 变压器线圈结构见图 1。初级绕组为一匝 ( $N_1 = 1$ ) 金属薄带线圈,次级绕组为单层锥形多匝 ( $N_2$ ) 线圈。形成线中筒和外筒半径确定后,初次级线圈大小半径也随之确定。设薄壁初级线圈选用厚度为 0.3 mm 的紫铜板,半径为 108 mm,长度为  $l_k$ ;锥形次级线圈参数为:大半径为 108 mm,小半径为 40 mm,长度为  $l_k$ 。

对于特性阻抗为  $40 \Omega$  的 1 GW 单筒脉冲驱动源,Tesla 变压器次级电压(也就是形成线内外筒之间的电压)  $V_s = 500$  kV,加入不闭合磁芯后,耦合系数增大,考虑理想情况,所有磁通均通过磁芯,无漏磁。Tesla 变压器初级回路电容初始电压  $V_0 = 800$  V,驱动源稳定运行在 500 kV,单次运行电压应该更高,Tesla 变压器应该具有输出更高电压的能力,再考虑到多种损耗选  $N_2 = 800$  匝。次级线圈漆包线直径(含绝缘层)选为 0.35 mm,初次级线圈长度均为 280 mm。

在线圈尺寸确定的情况下,磁芯长度越长,则漏磁越少,但实际上磁芯尺寸不可能太长。根据 Tesla 变压器设计经验,当磁芯长度  $l_T$  大于初次级线圈长度  $l_k$  的 2 倍时,初次级线圈耦合效果较好,并且磁芯长度越长则初次级线圈耦合效率越高<sup>[2]</sup>。根据形成线结构尺寸,选择磁芯长度  $l_T = 560$  mm。考虑到漏磁,并根据文献[9]估算出初级线圈电感  $L_p \approx 0.45 \mu\text{H}$ ,次级线圈电感  $L_s \approx 320$  mH。

### 2.2 Tesla 变压器电路模拟

次级回路电容(也就是脉冲形成线电容)  $C_s = 94$  pF。当初次级回路振荡频率相等时,次级电压具有极大值,实际设计时取初级回路电容  $C_p = 70 \mu\text{F}$ 。以上参数是在理想情况下得到的,与实际情况有一定差别。具体设计时,要做反复验算和调整。

对于带有开路磁芯的 Tesla 变压器,设  $\beta = r_1/r_2$ ,Tesla 变压器的耦合系数可以表示为<sup>[10]</sup>

$$k = \sqrt{1 - \frac{2r_1^2(\beta-1)(2\beta+1)\ln\beta}{3\beta^2 l_k(l_T - l_k)}} \quad (2)$$

经计算,该纳秒脉冲源 Tesla 变压器的耦合系数为 0.9。

Tesla 变压器等效电路如图 3 所示,其中  $L_{p1}$ ,  $L_{s1}$  分别为初级、次级回路的杂散电感,  $R_p$ ,  $R_s$  分别为初级、次级回路的电阻。根据 Tesla 变压器回路各参数估算,用 Pspice 电路模拟软件计算出次级线圈电压波形如图 4 所示,次级线圈电压最大值约 510 kV,对应最大值的充电时间为  $5.1 \mu\text{s}$ 。初级电路峰值电流为 11.3 kA,次级电路电流峰值电流 10.6 A。

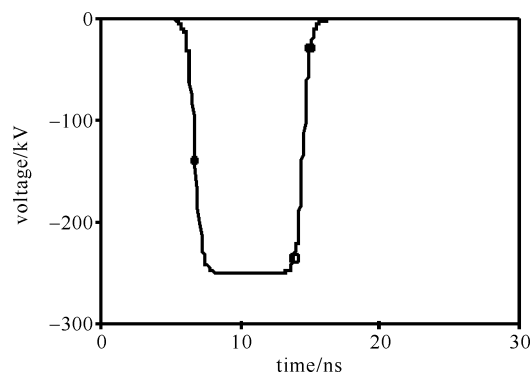


Fig. 2 Simulated output voltage of pulse generator

图 2 脉冲源输出电压模拟波形

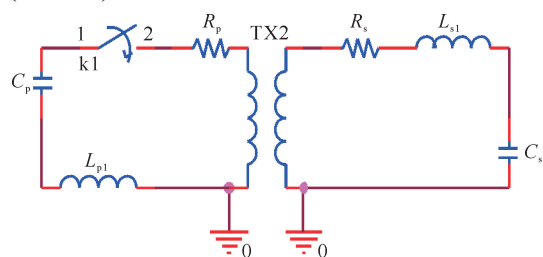


Fig. 3 Equivalent circuit diagram of Tesla transformer

图 3 Tesla 变压器等效电路图

## 2.3 Tesla 变压器磁芯截面选取

根据现有磁性材料特性, Tesla 变压器磁芯选择厚度为 0.08 mm DG6 硅钢片。磁芯有效截面积是 Tesla 变压器的重要参数之一, 根据电磁感应定律有<sup>[11]</sup>

$$\int_0^{\Delta t} V_s dt = N_2 \Delta B_{\max} S \quad (3)$$

对于所选磁芯材料, 取磁感应强度线性较好处, 选择最大磁感应强度变化量  $\Delta B_{\max}$  为 1.0 T。根据式(3)对次级线圈电压(如图 4 所示)积分(时间从 0 到电压最大值的时间)得: 磁芯截面面积  $S = 20 \text{ cm}^2$ 。

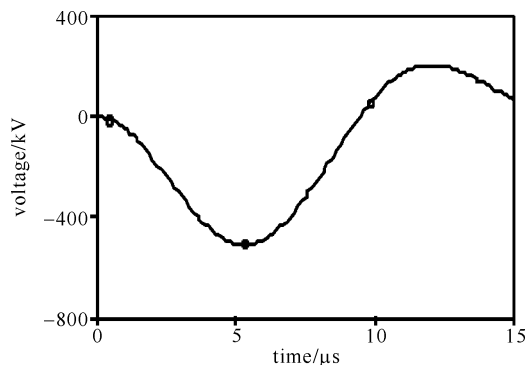


Fig. 4 Simulated voltage of secondary winding

图 4 次级线圈电压模拟波形

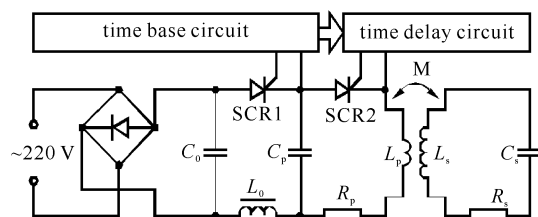


Fig. 5 Primary circuit diagram of Tesla transformer

图 5 Tesla 变压器初级电路原理图

## 3 初级电路

Tesla 变压器初级电路采用谐振充电电路, 它是能量由市电网向 Tesla 变压器传递的通路, 其原理图如图 5 所示。采用交流市电整流滤波后经一级谐振充电电路对初级电容  $C_p$  充电, 经适当延时后初级开关 SCR2 导通, 对 Tesla 变压器放电。设计时尽量减小回路失谐和杂散电感、分布电阻等参数, 以得到较高能量传输效率。满足此条件时, 初级回路具有较高的电流峰值和最大电流上升率, 即要求充电开关具有较大的峰值电流承受能力和电流上升率耐量, 选定具有较强通流能力和较高  $di/dt$  耐量的快速三端可控硅作为初级回路开关。

## 4 主开关

当 Tesla 变压器对脉冲形成线充电接近最大值时, 主开关快速导通, 将脉冲形成线的能量传输给负载。根据脉冲源输出功率和设计耐压指标, 主开关的最高工作电压为 500 kV、工作电流约为 12 kA。从纳秒脉冲产生需要考虑, 主开关导通速度越快越好, 对于如此高的功率容量和导通速度, 目前只有高压气体火花隙开关可以满足要求, 因此, 主开关设计为高压气体多通道火花隙开关。但是高压气体开关重频特性受限于气体的绝缘恢复时间, 为加快开关绝缘恢复, 采取对开关电极间隙吹气的方法, 提高开关在 100 Hz 重频运行时的电压击穿稳定性。

主开关位于形成线的输出端, 见图 1。由气体击穿理论可知, 开关间隙越小, 导通速度越快。但减小开关间隙必然会降低开关击穿电压, 为了提高小间隙开关耐受高电压的能力, 通常的方法是提高开关中绝缘气体的压力。主开关承受压力达到几 MPa, 在这样的压力下, 用于油气隔离和开关电极支撑的绝缘隔板会产生变形, 这种变形往往是不规则的, 这将造成开关电极同心度和平行度的降低。为此, 经过力学和电场计算, 选择了合适的绝缘支撑材料和结构, 并且设计了开关电极自适应安装结构, 有效地保证了主开关电极头的同心度和平行度, 为开关多通道导通创造了条件<sup>[12]</sup>。

## 5 实验结果

Tesla 变压器型 GW 级纳秒脉冲源及其测量探头位置如图 6 所示, 其中电容分压器 D1 用于测量脉冲形成线充电电压(即 Tesla 变压器输出电压), 经标定其测量系统分压比为  $9.68 \times 10^3$ ; 电容分压器 D2 用于测量脉冲源产生的纳秒电压脉冲, 经标定其测量系统分

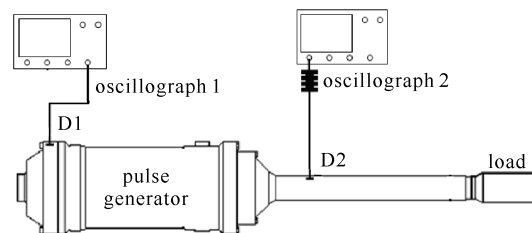


Fig. 6 Diagram of voltage probe positions of pulse generator

图 6 脉冲源测量探头位置示意图

压比为  $41.6 \times 10^3$ 。

当 GW 级纳秒脉冲源主开关断路未击穿时,可以得到脉冲形成线充电电压完整波形,典型波形如图 7 所示,其电压峰值充电时间为  $5 \mu\text{s}$ 。脉冲源工作时,主开关采用自击穿高压气体开关,其自击穿有一定的分散性,为了保证每次实验主开关在充电电压最大值之前导通,并获得尽可能高的输出功率,通常调节主开关间隙使其在最大充电电压约 90% 处(充电时间约  $4.0 \mu\text{s}$ )击穿。主开关击穿时,典型的脉冲形成线充电电压波形如图 8 所示,主开关在充电时间  $4.2 \mu\text{s}$  处击穿,形成线充电电压为 435 kV,对应的输出纳秒电压脉冲如图 9 所示,电压峰值为 208 kV(对应功率 1.1 GW),脉宽约 8 ns,与理论设计符合较好。形成线最大充电电压 500 kV,最大输出脉冲功率 1.36 GW。

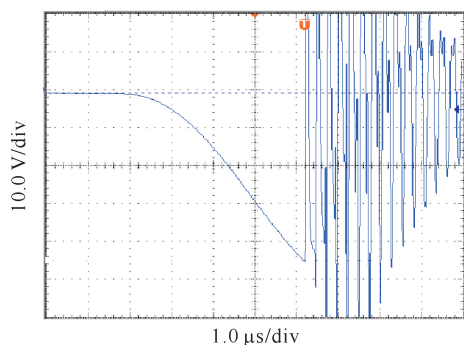


Fig. 8 Charging voltage of pulse forming line

图 8 脉冲形成线充电电压波形

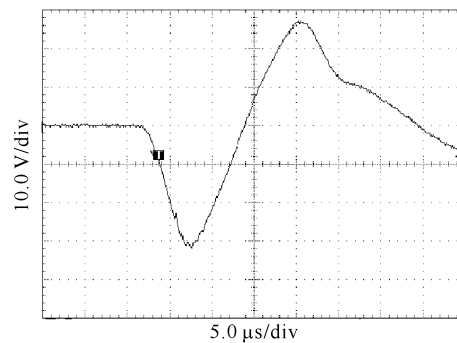


Fig. 7 Whole charging voltage of pulse forming line

图 7 脉冲形成线充电电压完整波形

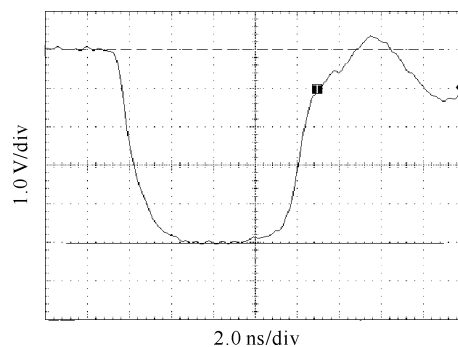


Fig. 9 Output voltage of pulse generator

图 9 脉冲源输出电压波形

在脉冲源单次运行的基础上,开展了重频实验调试,在平均输出功率 1 GW 情况下,重复频率达 100 Hz。

## 6 结 论

研制了一台 Tesla 变压器型 GW 脉冲源,形成线最大充电电压 500 kV,输出脉冲最大功率 1.36 GW,脉冲宽度约 8 ns。可以在重复频率 100 Hz、平均输出功率 1 GW 情况下稳定运行,脉冲源的实验运行技术指标均达到并超过了设计要求。该脉冲源主要用于高压气体开关、产生超宽谱窄脉冲和束流二极管等研究。

## 参考文献:

- [1] Tesla N. System of electric lighting: USA, 454622[P]. 1891-06-23.
- [2] El'chaninov A S, Korovin S D, Mesyats G A, et al. Generation and amplification of microwave radiation with the use of high-current small-sized accelerators[C]//Proc of 6th International Conference on High-Power Particle Beams. 1986.
- [3] Gubanov V P, Korovin S D, Pegel I V, et al. Compact 1000 pps high-voltage nanosecond pulse generator[J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 1997, **25**(2):258-265.
- [4] Shpak V G, Yalandin M I, Oulmascoulov M R, et al. 1000 pps subnanosecond high-voltage generator[C]//Proc 11th IEEE International Pulsed Power Conference. 1997:1576-1580.
- [5] Mesyats G A, Shpak V G, Yalandin M I, et al. Compact high-current accelerator based on the RADAN SEF-303 pulsed power source[C]//Proc 9th IEEE International Pulsed Power Conference. 1993:835-838.
- [6] 康强,常安碧,李名加,等.带脉冲形成线的 1.0 MV 100 Hz 紧凑型 Tesla 变压器的研制[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(3):451-454. (Kang Qiang, Chang Anbi, Li Mingjia, et al. Development of a 1.0 MV 100 Hz compact Tesla transformer with PFL. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(3):451-454)
- [7] 刘金亮,钟辉煌,谭启美,等. Tesla 变压器型电子束加速器初步实验[J]. *强激光与粒子束*, 2002, **4**(6):938-940. (Liu Jinliang, Zhong Huihuang, Tan Qimei, et al. Tesla-transformer-type electron beam accelerator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **4**(6):938-940).
- [8] 王俊杰,朱四桃,周金山,等.百 kV 级纳秒脉冲源的设计与实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2012, **24**(3):711-714. (Wang Junjie, Zhu Sitao, Zhou Jinshan, et al. Design and experimental research of 100 kV nanosecond pulse generator. *High Power Laser and Particle Beams*,

2012, **24**(3):711-714)

- [9] 石磊,樊亚军,朱郁丰. 具有不闭合磁芯的 Tesla 变压器初次级线圈电感估算[J]. 强激光与粒子束, 2013, **25**(10):2763-2766. ( Shi Lei, Fan Yajun, Zhu Yufeng. Estimation of the primary and secondary coil inductances of Tesla transformer with open circuit magnetic core. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, **25**(10):2763-2766)
- [10] Peng Jianchang, Liu Guozhi, Su Jiancang, et al. Designing and testing of high-coupling Tesla transformer[C]//Proc of the 17th International Conference on High-Power Particle Beams. 2008:294-297.
- [11] 石磊,樊亚军,周金山,等. 双路输出超宽谱高功率微波驱动源 Tesla 变压器[J]. 强激光与粒子束, 2013, **25**(7):1751-1754. (Shi Lei, Fan Yajun, Zhou Jinshan, et al. Tesla transformer of dual output ultra-wide spectrum HPM pulse generator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, **25**(7):1751-1754)
- [12] 樊亚军. 高功率亚纳秒电磁脉冲产生[D]. 西安:西安交通大学, 2004. (Fan Yajun. Generation of high power sub-nanosecond electromagnetic pulses. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2004)

## Compact GW nanosecond pulse generator based on Tesla transformer

Shi Lei, Zhu Yufeng, Lu Yanlei, Qiao Hanqing, Xia Wenfeng, Fan Yajun

(*Science and Technology on High Power Microwave Laboratory,*

*Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69-13, Xi'an 710024, China*)

**Abstract:** A compact high-power(GW level) nanosecond pulse generator is developed. The pulse generator includes a  $40\Omega$  coaxial pulse forming line charged by a built-in Tesla transformer with open circuit magnetic core, primary circuit and high-voltage gas switch with gas circulating between the electrodes. The generator has characteristics of high transformer ratio, compact structure, high energy transfer efficiency, and convenient for high repetition rate operation. The operation principles, design methods and simulated calculations of pulse forming line, Tesla transformer and main switch are described. The experimental results show that the output voltage of the pulse generator is more than 200 kV with a width of about 8 ns, and it can operate steadily under the condition of repetition rate of 100 Hz and average output power of 1 GW, the experimental results are in good agreement with that from theoretical design.

**Key words:** ns pulse generator; Tesla transformer; pulse forming line; main switch; open circuit magnetic core

**PACS:** 84.30.Jc; 84.70.+p