



·脉冲功率技术·

紧凑型高功率亚纳秒脉冲压缩装置的设计研制*

王翔宇, 卢彦雷, 朱郁丰, 方旭, 乔汉青, 张兴家

(西北核技术研究所 先进高功率微波技术重点实验室, 西安 710024)

摘要: 分析了三传输线型脉冲压缩装置的原理, 从提高功率增益和小型化角度, 在脉冲压缩装置中设计了一种 3 起端并联绕线的内置型高阻螺旋线结构。建立电路仿真模型和三维结构电磁场仿真模型, 分析了高阻螺旋线特征参数对功率增益的影响。根据优化后的结果研制出紧凑型高功率亚纳秒脉冲压缩装置, 经测试, 前级输入脉冲宽度 8 ns, 功率 1 GW 时, 输出脉冲宽度 1.5 ns, 功率 3.7 GW, 功率增益 3.7。经过 30 万次运行考核, 装置内部无滑闪和击穿现象, 验证了设计可靠性。

关键词: 亚纳秒脉冲; 脉冲压缩; 螺旋线; 功率增益

中图分类号: TN782

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220254

Design and development of compact high power subnanosecond pulse compression device

Wang Xiangyu, Lu Yanlei, Zhu Yufeng, Fang Xu, Qiao Hanqing, Zhang Xingjia

(Key Laboratory of Advanced Science and Technology on High Power Microwave, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: The principle of triple transmission line type pulse compression device is analyzed, and a built-in high resistance spiral with three parallel winding wires is designed to improve power gain and minimize the device. The circuit simulation model and three-dimensional structure electromagnetic field simulation model are established, and the influence of high resistance spiral characteristic parameters on power gain is analyzed. Based on the optimized results, a compact high power subnanosecond pulse compression device is developed. The results show that when the input pulse width is 8 ns and the power is 1 GW, the output pulse is 1.5 ns and the power is 3.7 GW. The power gain is 3.7. After 300 000 times of operation evaluation, there is no flashover and breakdown inside the device, which verifies the reliability of the design.

Key words: subnanosecond pulse, pulse compression, spiral, power gain

高功率亚纳秒脉冲在脉冲驱动源主开关的低抖动触发^[1-3]和超宽谱高功率微波^[4-7]等领域具有重要应用。一种产生高功率亚纳秒脉冲的方法是为脉冲驱动源输出脉冲增加陡化和截断开关^[8-9], 使脉冲的前后沿时间达到亚纳秒级。但脉冲驱动源受限于升压所需电学参数和高压结构尺寸, 输出脉冲通常在 5 ns 以上, 只利用脉冲前后沿的方式能量输出效率低, 不利于高功率系统长期运行的可靠性。脉冲压缩技术^[10]可以将脉冲驱动源产生的 ns 级脉冲进一步压缩转换为亚纳秒脉冲, 同时提高输出脉冲的功率和系统整体的能量效率, 成为产生亚纳秒脉冲的主要方法。文献 [11] 在脉冲驱动源主开关输出侧直连 6.5 Ω 低阻抗亚纳秒脉冲形成线, 输出 3.9 倍功率增益的亚纳秒脉冲, 但功率增益显著低于理论值, 且亚纳秒脉冲形成线阻抗过低, 不利于绝缘和后级开关快速导通。文献 [12] 基于三传输线脉冲压缩原理, 在 50 Ω 形成线上输出 1.8 倍功率增益的亚纳秒脉冲, 但功率增益偏低且装置整体尺寸较长。

为了使高功率亚纳秒脉冲压缩装置结构更加紧凑, 推进系统小型化并提高长期运行的可靠性, 本文基于三传输线型亚纳秒脉冲压缩装置原理, 开展了装置结构和高阻螺旋线的优化设计。提出一种 3 起端并联绕线的内置型高阻螺旋线结构, 在 CST 中建立三维仿真模型, 分析了结构参数对脉冲压缩装置功率增益和内部场强的影响。根

* 收稿日期: 2022-08-19; 修订日期: 2022-11-29

基金项目: 国防科技创新特区项目

联系方式: 王翔宇, wangxiangyu@nint.ac.cn。

据优化后的参数研制出一套 GW 级亚纳秒脉冲压缩装置, 建立实验平台开展测试, 完成了参数的实验验证。

1 脉冲压缩装置设计

1.1 亚纳秒脉冲压缩原理

亚纳秒脉冲压缩装置的电路原理如图 1 所示^[13]。其中 TL₁ 为脉冲驱动源的形成线 (电长度为 τ₁, 阻抗 Z₁), TL₂ 为高阻传输线 (电长度 τ₂, 阻抗 Z₂), TL₃ 段为亚纳秒脉冲形成线 (电长度 τ₃, 阻抗 Z₃), TL₄ 为匹配传输线 (阻抗 Z₄=Z₃), S₁ 为脉冲驱动源主开关, S₂ 为亚纳秒开关, R 为吸收负载。TL₂, TL₃ 和 S₂ 为亚纳秒脉冲压缩装置组成部分。

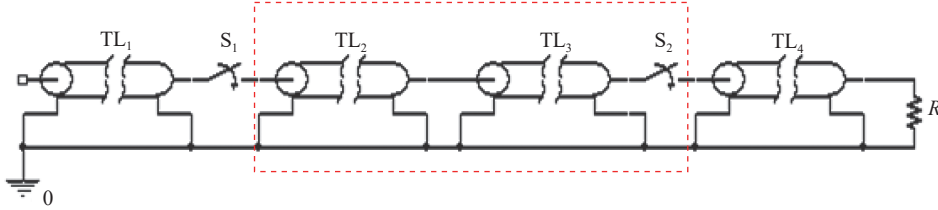


Fig. 1 Circuit schematic of the pulse-compression device

图 1 脉冲压缩装置电路原理图

初始时刻 TL₁ 充电电压为 2U₀, 主开关 S₁ 导通后可形成峰值电压为 U₀, 脉冲宽度 T₀=2τ₁ 的脉冲, 经高阻传输线 TL₂ 对形成线 TL₃ 进行充电, 此脉冲会在 TL₃ 与 TL₂ 上反复叠加, 在 T₀ 时间之后电压达到最大值。令 α₁₂ 为 TL₁ 对 TL₂ 的入射系数, α₂₃ 为 TL₂ 对 TL₃ 的入射系数, α₃₂ 为 TL₃ 对 TL₂ 的入射系数, β₁₂ 为 TL₂ 对 TL₁ 的反射系数, β₃₂ 为 TL₂ 对 TL₃ 的反射系数, β₂₃ 为 TL₃ 对 TL₂ 的反射系数。令 N₁=τ₁/τ₃, N₂=τ₂/τ₃, 在理想条件下 (脉冲前沿 t_r 远小于脉冲宽度 T₀), 对此电路进行波过程分析得到 TL₃ 的最大充电电压为^[13]

$$U_{TL_{3max}} \approx 2U_0 \alpha_{12} \alpha_{23} \sum_{n=1}^{N_1} \beta_{23}^{n-1} + 2U_0 \alpha_{12} \alpha_{23} \beta_{12} \beta_{32} \sum_{j=1}^{N_1-N_2} \beta_{23}^{j-1} + 2U_0 \alpha_{12} \alpha_{23}^2 \alpha_{32} \beta_{12} \sum_{l=1}^{N_1-N_2-1} \beta_{23}^{l-1} \quad (1)$$

开关 S₂ (假设为理想开关) 导通后, 在匹配负载 TL₄ 上会得到的脉冲电压为 U_{TL_{3max}}/2, 脉冲宽度为 2τ₃ 的亚纳秒脉冲。则从 TL₁ 到 TL₃ 的功率增益 G 为}

$$G = \frac{U_{TL_{3max}}^2 / 4Z_3}{U_0^2 / Z_1} \quad (2)$$

1.2 脉冲压缩装置参数设计

在脉冲压缩装置的参数设计中, 脉冲驱动源、负载和输出脉宽的参数已经确定: 脉冲驱动源阻抗 Z₁=40 Ω, 输出脉冲宽度 T₀=8 ns; 负载传输线阻抗 Z₄=12.5 Ω, 与后级功分器输入阻抗匹配; 输出脉冲宽度 1 ns, 对应 τ₃=0.5 ns。基于上述参数对脉冲压缩装置的亚纳秒脉冲形成线阻抗 Z₃、高阻传输线阻抗 Z₂、电长度 τ₂ 进行设计。

为实现最大能量传输效率, Z₃=Z₄=12.5 Ω。根据式 (1), 不能得到 Z₂ 和 τ₂ 的解析解, 可以通过 PSPICE 参数扫描仿真得到功率增益 G 最大时的最优解, 仿真结果如图 2 所示。G 随 Z₂ 的增大逐渐增大并趋向稳定, G 随 τ₂ 先增大后减小。高阻线 Z₂ 的作用类似于 CLC 谐振电路中的电感, 在两侧低阻抗线阻抗和电长度失配的情况下, 提供更高的能量传输效率, 从而提高了功率增益。

为了实现脉冲压缩装置的紧凑化设计, 采用螺旋线作为高阻传输线, 可有效缩短高阻传输线的长度。同时, 亚纳秒脉冲形成线通常采用尼龙作为形成线介质, 其低阻抗的特征对应较大的内筒半径, 将螺旋线内置于亚纳秒形成线内筒中, 如图 3 所示, 可进一步缩短脉冲压缩装置整体长度, 实现小型化。

螺旋线阻抗 Z_s 和电长度 τ_s 满足^[14]

$$\begin{cases} Z_s = k_s Z_{coax} \\ k_s = \sqrt{1 + \frac{2\pi^2}{S^2} \frac{1}{\ln(r_2/r_1)} \frac{r_1^2 (r_2^2 - r_1^2)}{r_2^2}} \\ Z_{coax} = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln(r_2/r_1) \\ \tau_s = k_s \tau_{coax} \end{cases} \quad (3)$$

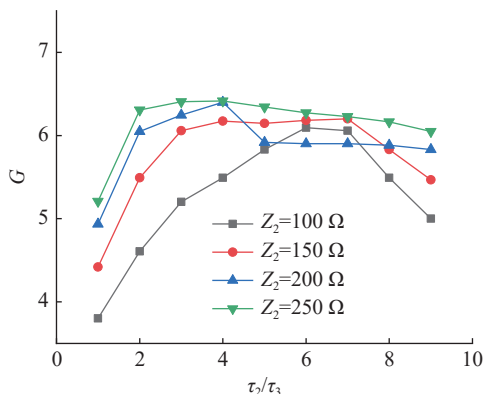


Fig. 2 Power gain vs Z_2 and τ_2

图2 功率增益 G 随 Z_2 和 τ_2 的变化曲线

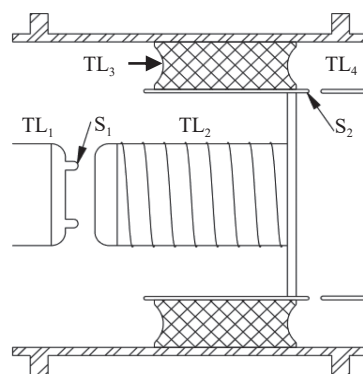


Fig. 3 Structure schematic of the pulse-compression device

图3 脉冲压缩装置结构示意图

式中： Z_{coax} 为半径 r_1 的螺旋内筒视为直导体筒时其与半径 r_2 的外筒构成的同轴线阻抗； k_s 为螺旋线慢波系数； S 为螺距； τ_{coax} 为看作同轴线时的电长度。

根据上述分析，结合功率容量需求，设计脉冲压缩装置外筒内半径 90 mm，亚纳秒脉冲形成线 TL₃ 内筒外半径为 62 mm，TL₃ 长度 84 mm。取 $r_2=60$ mm， $r_1=35$ mm，螺旋线匝数为 4，螺距 $S=20$ mm，由式 (4) 计算得到 $Z_s \approx 280 \Omega$ ， $\tau_s \approx 2.3$ ns，在图 2 的高功率增益区间。

1.3 脉冲压缩装置数值仿真

螺旋线和亚纳秒脉冲形成线在实际结构中呈现为非理想传输线，对脉冲压缩装置结构进行三维电磁仿真，可以得到更准确的功率增益和内部场强仿真结果。根据 1.2 中的脉冲压缩装置结构设计参数，在 CST 软件中建立图 4 所示的仿真模型。在该模型中，螺旋线分别采用 3 起端并联绕线和单起端绕线方式，相比单起端绕线，3 起端并联绕线方式线匝总数更多，减小了线匝间距，匝间电场更为均匀，可以使螺旋线更趋向于均匀传输线特征，更接近设计的阻抗和电长度参数。螺旋线起始端与亚纳秒脉冲形成线内筒保持足够的绝缘距离，螺旋线内置深度 60 mm。从模型左侧端口馈入脉宽 8 ns，1 W 的脉冲，监测亚纳秒脉冲形成线的充电电压，得到功率增益。

图 5 分别给出了螺旋线 3 起端并联绕线和单起端绕线的亚纳秒脉冲形成线充电电压仿真结果。根据式 (1) 和 (2) 计算得到，3 起端并联绕线功率增益 $G \approx 3.95$ ，单起端绕线功率增益 $G \approx 3.45$ 。两种结构的螺旋线电场场强最大值均位于线圈表面，场强大小接近，换算馈入 1 GW 时，场强约为 310 kV/cm。使用 3 起端并联绕线的螺旋线内置结构，可以获得较高的功率增益，不会增加内部场强，而且有利于螺旋线结构支撑的稳定性。

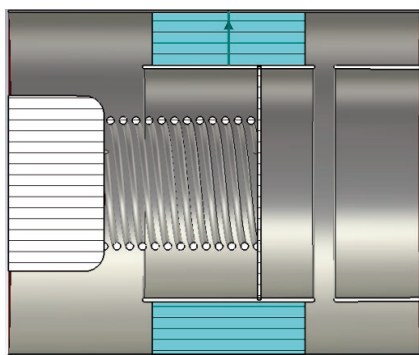


Fig. 4 Simulation model of the pulse-compression device in CST MWS

图4 CST 中的脉冲压缩装置仿真模型

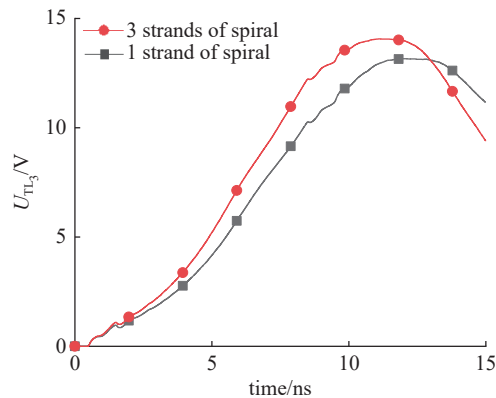


Fig. 5 Simulation of the charging voltage in TL₃

图5 TL₃ 的充电电压仿真波形

2 实验研究

根据参数设计和仿真结果，完成了紧凑型高功率脉冲压缩装置的结构设计和加工装配。亚纳秒开关 S_2 采用环形电极开关，环形电极直径与形成线内筒直径相同，电极头曲率半径设计为 1.5 mm，增大电极头部电场增强系数，提高击穿电压稳定性。 S_2 间隙为 4 mm，采用高压氮气作为开关气体介质和装置内部绝缘气体。装置设计承

压 6 MPa, 总长 190 mm, 外筒内直径 180 mm。

接入脉冲驱动源 TL_1 和负载 R , 开展测试。使用微分型探头测量 TL_3 的充电电压波形。负载 R 为输入阻抗 12.5Ω 的一分四功分器, 在功分器分路后的传输线上使用积分型电容分压器^[15] 测量亚纳秒脉冲输出波形。图 6 为脉冲驱动源 TL_1 的输出脉冲电压波形, 功率 1 GW, 脉宽 8 ns。图 7 为微分型探头测量的波形和积分处理后的实际充电电压波形, 当装置充入 4.5 MPa 氮气时, TL_3 充电时间约 8 ns, 在充电上升沿接近峰值处击穿, 有利于获得高功率增益。

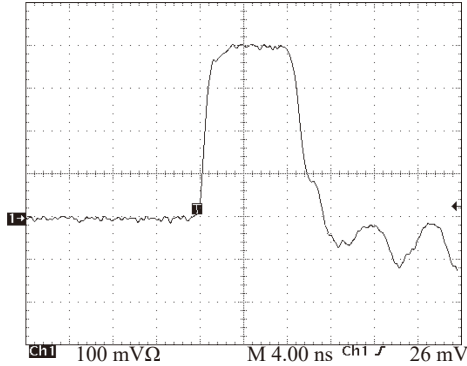


Fig. 6 Output voltage waveform of TL_1

图 6 TL_1 的输出脉冲电压波形

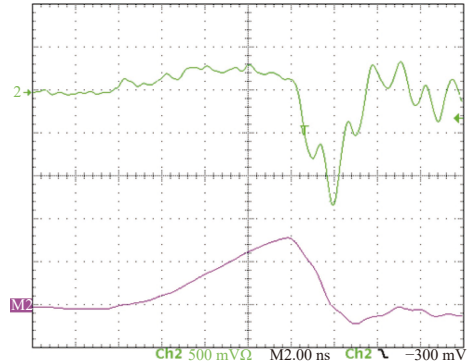


Fig. 7 Charging voltage waveform of TL_3

图 7 TL_3 的充电电压波形

图 8 为分压器测量的脉冲压缩装置输出的亚纳秒脉冲波形, 4 个分压器位于一分四功分器分路后的传输线上, 接 23 m 测量线缆+40 dB 衰减器标定的分压比为 180 000。输出脉宽约 1.5 ns, 计算脉冲峰值约 216 kV, 传输线阻抗 50Ω , 4 路脉冲总功率约 3.7 GW, 忽略功分器传输损耗, 脉冲压缩装置功率增益 $G=3.7$, 略低于 1.3 节中 $G \approx 3.95$ 的仿真结果。原因是实际中不能保证开关 S_2 在充电最大值处击穿, 且气体开关存在导通损耗。

图 9 为输出 30 万个脉冲后脉冲压缩装置的内部照片, 主开关 S_1 有均匀的放电通道痕迹, 高阻螺旋线无放电痕迹, 验证了内置型高阻螺旋线设计的可靠性。

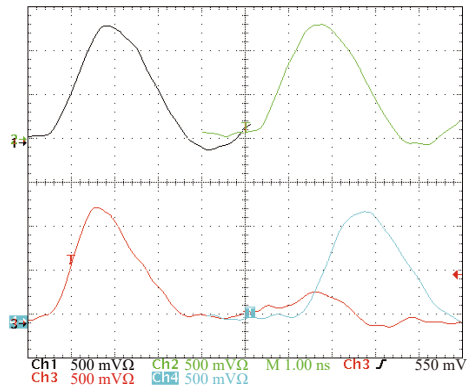


Fig. 8 Output voltage waveform of the power divider after the pulse-compression device

图 8 脉冲压缩装置后级功分器测量的四路输出脉冲电压波形



Fig. 9 Internal photo of the pulse compression device after outputting 300 000 pulses

图 9 输出 30 万个脉冲后脉冲压缩装置的内部照片

3 结 论

本文基于三传输线亚纳秒脉冲压缩原理, 设计了一种将高阻螺旋线内置的紧凑型亚纳秒脉冲压缩装置, 介绍了参数设计、电路和三维结构电磁仿真方法。研制的脉冲压缩装置总长 190 mm, 外筒内直径 180 mm。实验结果表明: 输入脉冲脉宽 8 ns、峰值功率 1 GW 时, 可产生峰值功率 3.7 GW、半高宽约 1.5 ns 的脉冲, 实现了 3.7 倍的功率增益。通过仿真分析和实验验证, 高阻螺旋线采用三起端并联绕线, 在保持匝间绝缘距离的条件下更趋向于均匀传输线特征, 内置于亚纳秒脉冲形成线内筒, 可在减小装置尺寸的同时保持较高的功率增益和可靠性。

参考文献:

- [1] Shpak V G, Shunailov S A, Yalandin M I. Investigations of compact high-current accelerators RADAN-303 synchronization with nanosecond

- accuracy[C]//Proceedings of the 10th IEEE International Pulsed Power Conference on Digest of Technical Papers. 1995: 544-548.
- [2] 王俊杰, 樊亚军, 石磊, 等. 纳秒级Trigatron开关触发特性[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(3): 569-573. (Wang Junjie, Fan Yajun, Shi Lei, et al. Triggering characteristics of nanosecond Trigatron switch[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(3): 569-573)
- [3] Ding Weidong, Wang Yanan, Fan Chuan, et al. A subnanosecond jitter trigger generator utilizing Trigatron switch and avalanche transistor circuit[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2015, 43(4): 1054-1062.
- [4] 樊亚军. 高功率亚纳秒电磁脉冲产生[D]. 西安: 西安交通大学, 2002. (Fan Yajun. Generation of high power subnanosecond electromagnetic pulses[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2002)
- [5] 黄裕年, 任国光. 高功率超宽带电磁脉冲技术[J]. *微波学报*, 2002, 18(4): 90-94. (Huang Yunian, Ren Guoguang. High power ultra-wideband electromagnetic pulse technology[J]. *Journal of Microwaves*, 2002, 18(4): 90-94)
- [6] Efremov A M, Koshelev V I, Plisko V V, et al. A high-power synthesized ultrawideband radiation source[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2017, 88: 094705.
- [7] Balzovsky E, Buyanov Y, Koshelev V, et al. Compact combined antenna for high-power ultrawideband radiation sources with subnanosecond pulse duration[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2021, 63(11): 2866-2869.
- [8] 李登云, 邱爱慈, 孙凤举, 等. 100 kV触发器输出脉冲的陡化[J]. *高电压技术*, 2008, 34(6): 1255-1260. (Li Dengyun, Qiu Aici, Sun Fengju, et al. Peaking risetime of the output pulse for 100kV triggering generator[J]. *High Voltage Engineering*, 2008, 34(6): 1255-1260)
- [9] 丁恩燕, 张现福, 陆巍, 等. 短路-锐化开关组合形成超宽带双极脉冲实验分析[J]. *高电压技术*, 2010, 36(10): 2555-2559. (Ding Enyan, Zhang Xianfu, Lu Wei, et al. Experimental analysis of UWB bipolar pulse with chopping-peaking switch[J]. *High Voltage Engineering*, 2010, 36(10): 2555-2559)
- [10] O'Loughlin J P, Copeland R P. Subnanosecond power conditioning technique using transmission line to transmission line charging[C]//Twentieth Conference Record on Power Modulator Symposium. 1992.
- [11] 石磊, 朱郁丰, 卢彦雷, 等. 基于脉冲形成线充电的脉冲压缩技术[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27: 065003. (Shi Lei, Zhu Yufeng, Lu Yanlei, et al. Pulse compression based on pulse forming line charging technology[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 065003)
- [12] 张兴家, 卢彦雷, 樊亚军, 等. 一种三传输线型亚纳秒脉冲压缩装置[J]. *强激光与粒子束*, 2017, 29: 115002. (Zhang Xingjia, Lu Yanlei, Fan Yajun, et al. Triple transmission line type subnanosecond pulse-compression device[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2017, 29: 115002)
- [13] Shpak V G, Oulmascoulov K, Shunailov S A, et al. Amplitude compression of high-voltage pulses in subnanosecond formers on gas spark gaps[C]//12th IEEE International Pulsed Power Conference on Digest of Technical Papers. 1999.
- [14] 勒威斯 I A D, 威尔斯 F H. 毫微秒脉冲技术[M]. 席德明, 译. 北京: 科学出版社, 1965: 42-47. (Lewis I A D, Wells F H. Millimicrosecond pulse techniques[M]. Xi Deming, trans. Beijing: Science Press, 1965: 42-47)
- [15] 卫兵, 傅贞, 王玉娟, 等. 脉冲功率装置中电容分压器的设计 and 应用[J]. *高电压技术*, 2007, 33(12): 39-43. (Wei Bing, Fu Zhen, Wang Yujuan, et al. Design and performance of capacitive divider for high-voltage pulse measurement[J]. *High Voltage Engineering*, 2007, 33(12): 39-43)