



·脉冲功率技术·

一种改进型螺旋发生器研究*

孙晶晶¹, 杨 双¹, 孙艺杰¹, 张瀚文¹, 于瑞鑫¹, 高景明^{1,2}, 杨汉武^{1,2}

(1. 国防科技大学 前沿交叉学科学院, 长沙 410073; 2. 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 长沙 410073)

摘 要: 研究了一种改进型螺旋发生器, 以解决传统结构螺旋发生器在匝数较多时输出电压波形第二峰值大于第一峰值和输入开关的峰值电流及其电流上升率较大的问题, 并进行了数值仿真和实验验证, 仿真结果与实验结果基本吻合。通过电磁场分析波传输过程发现: 改进型结构增加的一圈会造成额外的反射, 使各层间电压同向叠加的时刻发生改变, 从而降低了后续更高峰值的振荡。最终研制了一台改进型螺旋发生器, 在 15 pF 的高压电容负载上可产生第一峰值 51 kV、前沿 50 ns 的输出电压波形, 整个发生器体积小于 0.5 L。之后该改进型螺旋发生器将结合半导体开关实现高压纳秒脉冲触发器的全固态设计。

关键词: 螺旋发生器; 不同结构; 电磁场模拟; 波传输过程; 电压叠加

中图分类号: TM832

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230088

Research on an improved spiral generator

Sun Jingjing¹, Yang Shuang¹, Sun Yijie¹, Zhang Hanwen¹, Yu Ruixin¹, Gao Jingming^{1,2}, Yang Hanwu^{1,2}

(1. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: An improved spiral generator is studied to solve the problem that the second peak value of output voltage waveform is larger than the first peak value and the peak current of input switch and its current rise rate are larger when the number of turns of the traditional spiral generator is large. Numerical simulation and experimental verification are carried out, and the simulation results are basically consistent with the experimental results. Through electromagnetic field analysis of the wave transmission process, it is shown that the additional winding of the improved structure will cause extra reflection, which changes the time when the voltage between the layers is superimposed in the same direction, thus reducing the subsequent oscillations of higher peaks. Finally, an improved spiral generator is tested and it can generate a high voltage pulse with the first peak voltage of 51 kV and the leading edge of 50 ns on a high voltage capacitor load of 15 pF. The volume of the whole generator is less than 0.5 L. The improved spiral generator will then be combined with the semiconductor switch to achieve an all-solid-state design of a high-voltage nanosecond pulse trigger generator in the future.

Key words: spiral generator, different structure, electromagnetic field simulation, wave transmission process, voltage superposition

螺旋发生器是将带状导体与绝缘介质按照一定的顺序铺设并卷绕成阿基米德螺旋形状, 用于产生高压纳秒脉冲的器件。1964 年 Fitch 和 Howell 首次提出螺旋发生器模型, 认为螺旋发生器可以被看作是一个电矢量被瞬态重新排列再串联相加的装置, 其升压原理为矢量反转^[1]。相较于 Marx 发生器和脉冲变压器等升压器件^[2-5], 螺旋发生器具有单开关操作、储能升压为一体、结构紧凑等优点, 在脉冲功率领域得到了广泛研究和应用, 如用于制作开关触发器、便携式 X 射线设备、RF 振荡器、爆炸发生器等^[6-10]。工程应用中传统结构的螺旋发生器还存在一些问题, 一是为了得到更高的升压比, 往往需要增加螺旋发生器的匝数, 但这会导致输出电压波形第二峰值大于第一峰值^[11]; 二是在数千伏的充电电压下, 螺旋发生器输入开关的峰值电流及其电流上升率较大, 且螺旋发生器输入开关的电

* 收稿日期: 2023-04-16; 修订日期: 2023-07-03

基金项目: 国家重点实验室主任基金项目 (SKL 2022 ZR06)

联系方式: 孙晶晶, 906520302@qq.com。

通信作者: 杨汉武, yanghw@nudt.edu.cn;

高景明, jingming@nudt.edu.cn。

感和通态阻抗也会极大影响螺旋发生器的升压效率^[12-13],因此同时满足传统结构螺旋发生器输入开关要求的半导体开关较难获得。在传统结构^[12]和 Pal'chikov 提出的螺旋发生器结构^[14]的基础上进行了研究,通过数值仿真和实验发现了一种改进型结构,它能降低第二峰值及后续振荡,同时还能降低输入开关的峰值电流及其电流上升率。通过分析改进型结构和传统结构螺旋发生器的波传输过程,探究了改进型结构相较于传统结构能降低第二峰值及后续振荡的原因,并按照这两种结构分别研制了螺旋发生器,开展了实验验证。

1 改进型螺旋发生器的设计与仿真

1.1 改进原理

传统结构的螺旋发生器示意图及电场矢量分布如图 1 所示,可以看出螺旋发生器由两层金属带和两层绝缘围着一个支撑内筒卷绕而成,金属带本文采用的是铜带。铜带 M 和铜带 N 之间为绝缘层,绝缘层分为主动层(active layer)和被动层(passive layer)。主动层的一端连接输入开关 S_1 、一端开路,被动层的两端均开路。先通过直流电源对螺旋发生器进行充电至电压 U_c ,然后闭合开关 S_1 ,该时刻记为 $t=0$ 。图 1(a)、(b)分别为 $t=0$ 、 $t=t_r=2l/v$ 时螺旋发生器横截面的电场矢量分布图, t_r 为输出电压波形的上升时间, l 为主动层的总长度, v 为主动层中电压波的传播速度。由图 1(a)可以看出当 $t=0$ 时主动层和被动层的电场方向相反(箭头表示电场方向),经过矢量叠加后输出电压 U_0 为 0, U_0 为输出端同一方向上每层绝缘两端铜带之间的电压叠加之和。由图 1(b)可以看出当 $t=t_r$ 时,所有主动层的电场方向反向(箭头表示电场方向),主动层和被动层的电场方向相同,此时螺旋发生器的输出电压 U_0 达到最大值。理想情况下螺旋发生器在负载 Z 上能得到输出电压峰值为 $2nU_c$ 的三角波, n 为铜带 M 的绕制匝数,也即主动层和被动层的层数。但实际上螺旋发生器的升压比 α 达不到 $2n$, α 为实际输出电压 U_0 除以充电电压 U_c 的比值。随着匝数增加,传统结构的螺旋发生器主动层和被动层中电压波的延时差异会逐渐增加,从而使所有主动层和被动层两端铜带之间的电压在第二峰值时刻发生了程度较高的同向叠加,故匝数较大时传统结构输出电压波形第二峰值会大于第一峰值。

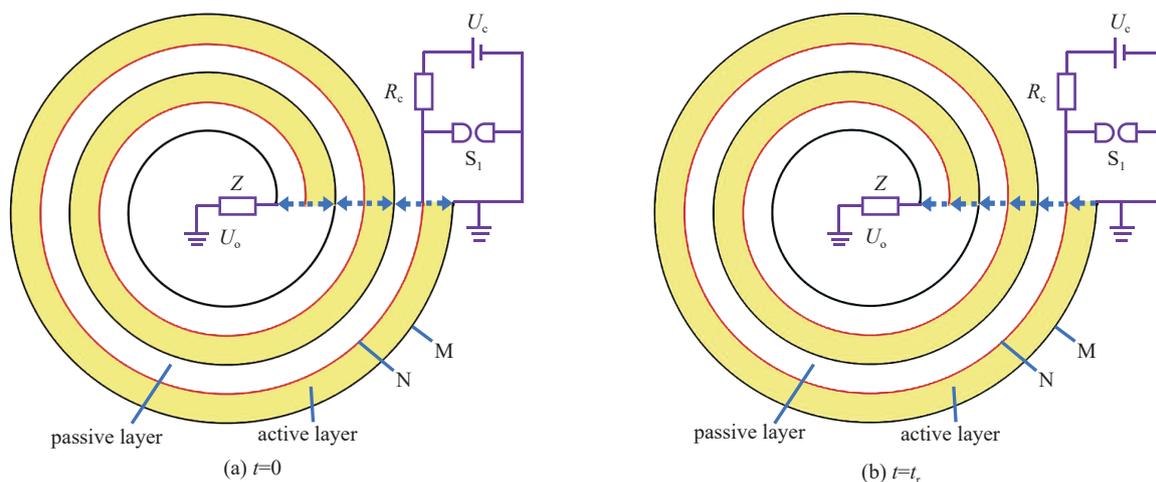


Fig. 1 Schematic diagram and electric field vector distribution of spiral generator

图 1 螺旋发生器结构示意图及电场矢量分布

为了使螺旋发生器在第二峰值时刻不发生程度较高的同向叠加,我们提出了一种改进型结构。螺旋发生器传统结构与改进型结构的示意图如图 2 所示,在传统结构的基础上,改进型结构被动层和铜带 M 再往外多绕制了一圈。我们的思路是,增加的一圈会造成额外的反射,从而使各层间电压波同向叠加的时刻发生改变。在 CST 中根据传统结构和改进型结构构建了两个螺旋发生器模型,分别为模型 1、模型 2,其中主动层都取 7 圈。分别对这两个模型按图 2 所示电路进行场路协同仿真并监测电场分布随时间的变化,充电电压 U_c 设置为 10 V,负载 Z 为 10 pF 电容。两种结构输入端都接在最外层的铜带 M 和 N 之间,输出端都接在铜带 M 最里层末端与地电位之间。

为了分析波传输过程,在模型 1、模型 2 横截面每层绝缘两端的铜带之间都加上离散端口,并分别观察了模型 1 和模型 2 横截面每一层绝缘两端铜带之间电压随时间的变化图像。

图 3 为模型 1 各离散端口的位置分布及各端口监测的电压随时间的变化图像,各端口的位置分布如图 3(a) 所示,各端口监测的电压随时间的变化如图 3(b)、(c) 所示。端口 2 监测的是输出电压 U_2 随时间的变化,如图 3(b) 所示,模型 1 在 $t=610.6$ ns 时达到第一峰值, $t=623$ ns 时达到第二峰值,输出电压波形第二峰值远大于第一峰值。端

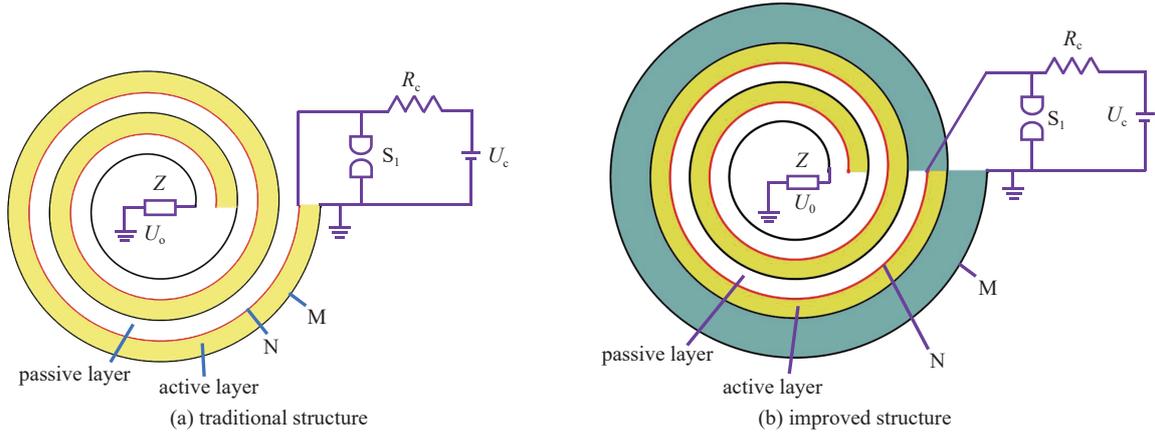


Fig. 2 Schematic diagram of two different structures of spiral generator

图2 螺旋发生器两种不同结构示意图

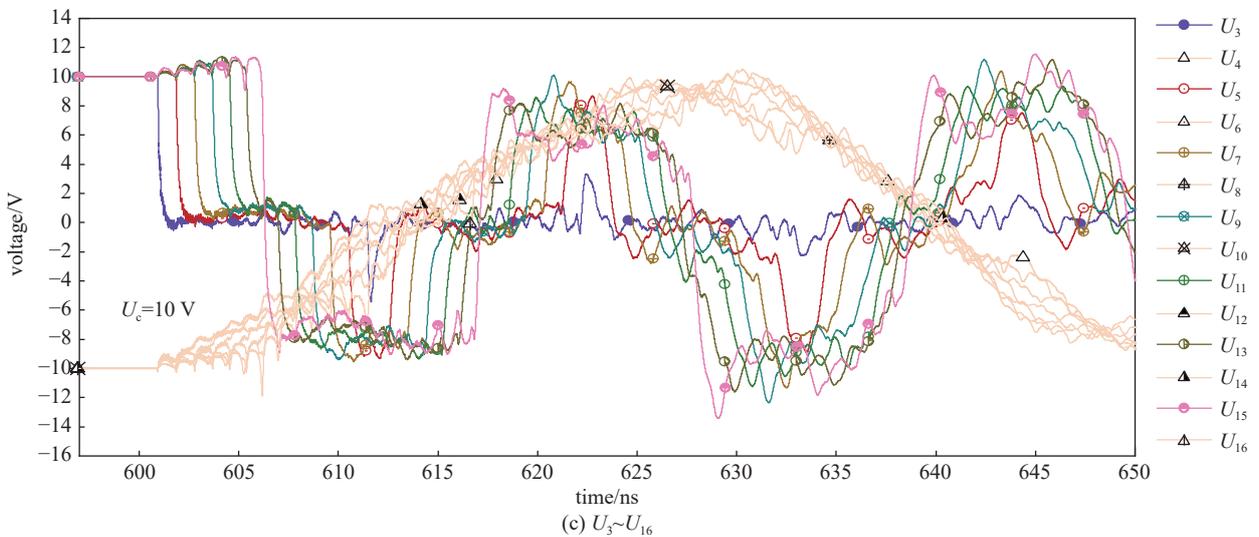
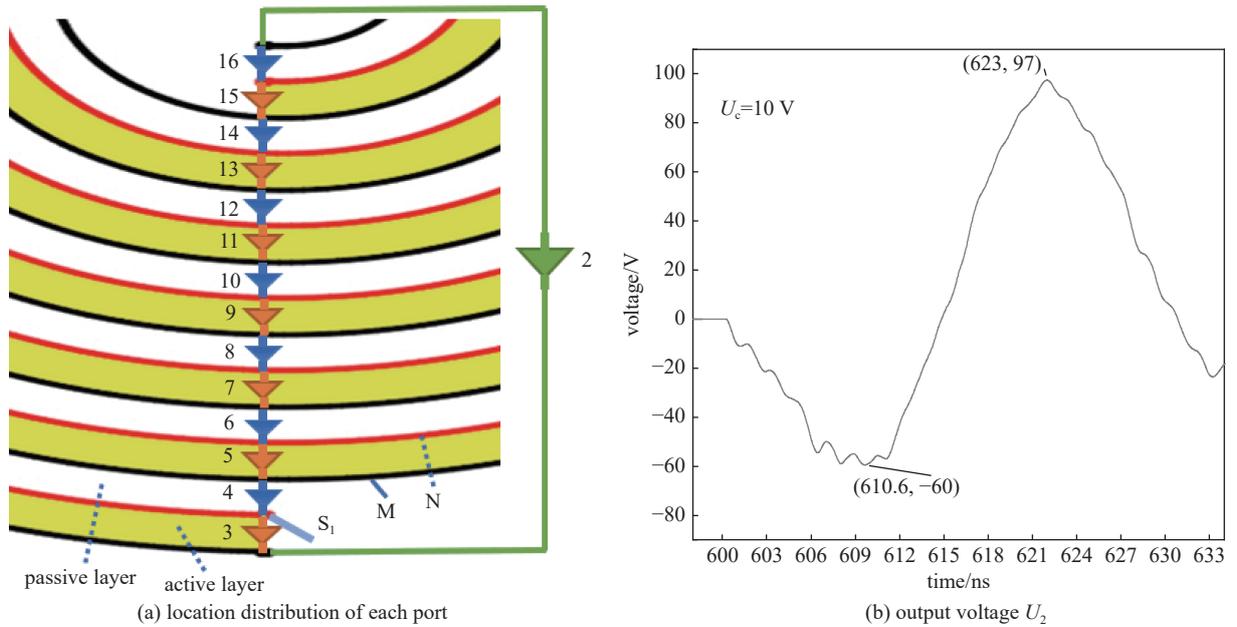


Fig. 3 Location distribution of each port and voltage monitored by each port over time of the traditional structure

图3 传统结构各端口的位置分布及各端口监测的电压随时间的变化图像

口3~16分别监测的是模型1横截面每一层绝缘两端铜带之间电压随时间的变化如图3(c)所示, 端口3位于主动层靠近输入开关 S_1 处, 端口15位于主动层靠近输出端处。其中奇数端口3~15依次监测的是主动层两端铜带之

间的电压 $U_3 \sim U_{15}$ (奇数); 偶数端口 4~16 依次监测的是被动层两端铜带之间的电压 $U_4 \sim U_{16}$ (偶数)。由图 3(c) 可以看出, 在输入开关闭合前, 各主动层两端铜带之间的电压 $U_3 \sim U_{15}$ (奇数) 一直为 10 V。在 $t=601$ ns 输入开关闭合后, 电压反射系数为 -1, 靠近开关处的主动层两端铜带之间电压从 10 V 突变为 0, 然后这个电压波开始由开关处沿着主动层向螺旋内侧传输。这个为 0 的电压波依次到达端口 3~端口 15 (奇数) 所在的主动层, 故 $U_3 \sim U_{15}$ (奇数) 依次降为 0。当 $t=601$ ns + $l/v=606.2$ ns 时, l 为主动层的总长度, v 为电压波的传播速度, 该电压波到达主动层最内侧端点遇到开路边界反射回去, 因开路的反射系数为 1, 主动层靠近输出端两端铜带之间的电压 U_{15} 又从 0 增大, 但方向与之前相反。之后该电压波依次反射回端口 13~端口 3 (奇数) 所在的主动层, 故 $U_{13} \sim U_3$ (奇数) 也依次由 0 增大。直至该反射波回到输入开关 S_1 处, 并重复上述过程, 这就是传统结构螺旋发生器的波传输过程。由图 3(c) 可以看出, 在 $t=610.6$ ns 第一峰值时刻所有主动层两端铜带之间的电压发生反向, 所有被动层两端铜带之间电压方向没有发生变化, 但此时由于耦合作用被动层中的电压振荡得较快, 幅值几乎衰减到 0, 故传统结构第一峰值时刻升压比往往不够高; 在 $t=623$ ns 第二峰值时刻, 所有主动层的电压方向与开关闭合前方向相同, 所有被动层的电压由于耦合作用反向, 方向与主动层方向相同, 且幅值较高, 故传统结构在第二峰值时刻的升压比会比在第一峰值时刻的升压比大。由于波的传输和反射有能量损耗, 之后的输出电压波峰值基本不会大于第二峰值, 故在匝数较大时传统结构的第二峰值一般为其输出电压波形的最大波峰值。

图 4 为模型 2 各离散端口的位置分布及各端口监测的电压随时间的变化图像, 各端口位置分布如图 4(a) 所

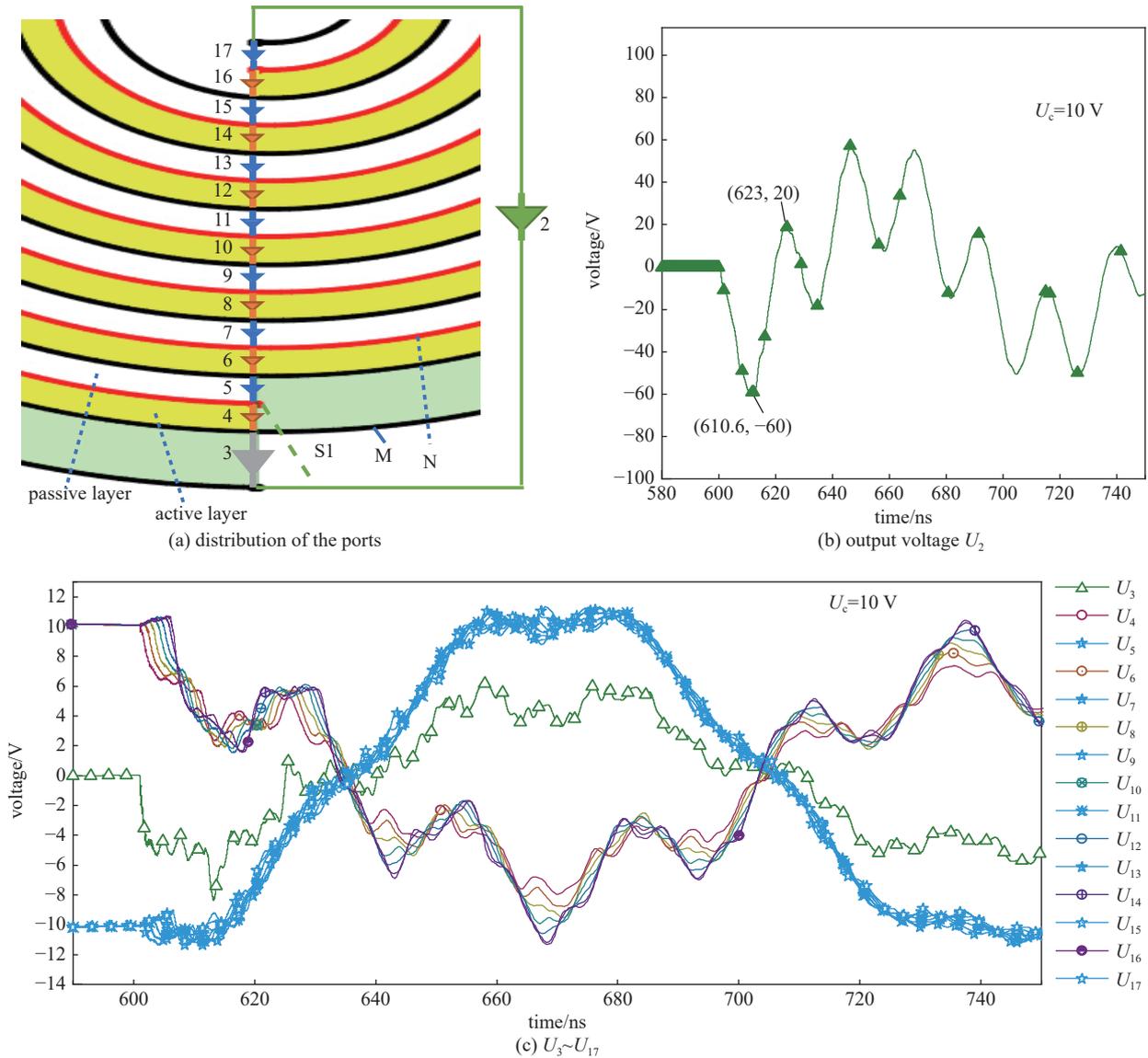


Fig. 4 Distribution of the ports and voltage monitored by each port over time of the improved structure

图 4 改进型结构各端口的位置分布及各端口监测的电压随时间的变化图像

示,各端口监测的电压随时间的变化如图4(b)、(c)所示。图4(b)为端口2监测的输出电压 U_2 随时间的变化,由图4(b)可知,模型2在 $t=610.6$ ns时达到第一峰值, $t=623$ ns时达到第二峰值,第一峰值大于第二峰值。端口3~17分别监测的是模型2横截面每一层绝缘两端铜带之间电压 $U_3\sim U_{17}$ 随时间的变化,如图4(c)所示:端口3监测的是铜带M往外多绕制的一圈与其相邻一圈铜带之间的电压 U_3 ;偶数端口4~16依次监测的是主动层两端铜带之间的电压 $U_4\sim U_{16}$ (偶数);奇数端口5~17依次监测的是被动层两端铜带之间的电压 $U_5\sim U_{17}$ (奇数)。由图4(c)可以看出在 $t=610.6$ ns第一峰值时刻,被动层两端铜带之间的电压 $U_5\sim U_{17}$ (奇数)基本不变,为 -10 V左右;主动层两端铜带之间的电压 $U_4\sim U_{16}$ (偶数)由于振荡衰减为 2 V左右;铜带M往外多绕制的一圈与其相邻一圈铜带之间的电压 U_3 也因振荡衰减 -4 V左右,故经过叠加后输出电压为 -60 V,与模型1输出电压第一峰值基本一致。由于结构发生改变,增加的一圈造成了额外的反射,使改进型结构所有主动层和所有被动层的振荡频率几乎一致,故主动层和被动层在一段时间内不会发生程度较高的同向叠加,从而降低了输出电压波形第二及后续峰值,减少了螺旋发生器的过零振荡幅度。

1.2 仿真结果对比

以传统结构卷绕的模型1和以改进型结构卷绕的模型2场路协同仿真输出波形如图5所示,其中输出电压波形如图5(a)所示,模型1输出电压波形中第二峰值为最大电压输出,且还有其他波峰值也大于第一波峰值。模型2输出电压波形第二峰值显著降低,实现了我们所设想。

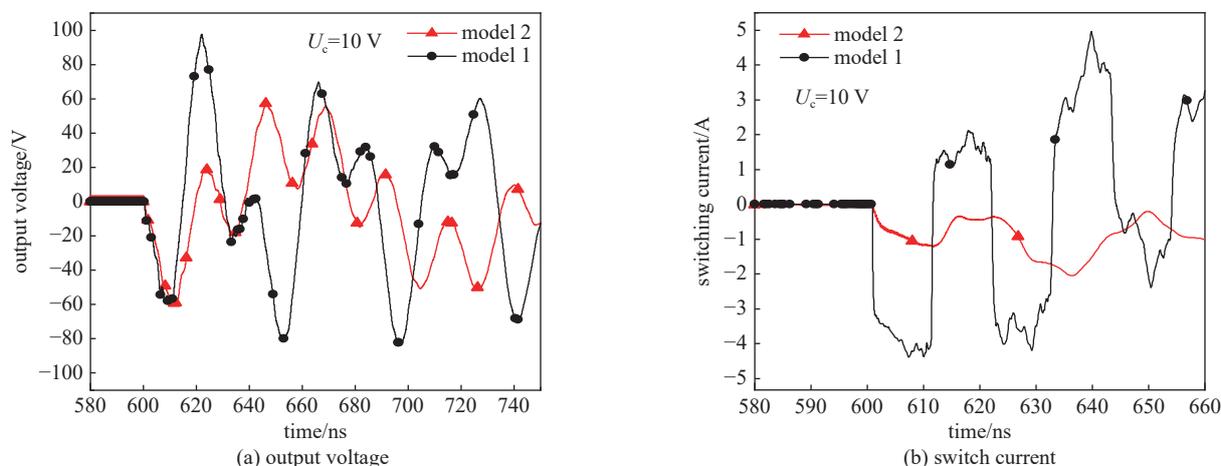


Fig. 5 Simulation waveforms of output voltage and switching current of two spiral generator models

图5 两种结构螺旋发生器模型的输出电压和开关电流仿真波形

模型1和模型2输入开关的电流波形如图5(b)所示,从图5(b)中可以看出模型2输入开关的峰值电流及电流上升率小于模型1的峰值电流及电流上升率。该结果表明采用改进型结构还可以降低输入开关的峰值电流及其电流上升率,这有利于提高开关的恢复速度、重复频率和寿命。并且这还将减小螺旋发生器对半导体开关在峰值电流和电流上升率上的要求,从而使螺旋发生器输入开关的设计更容易实现,为半导体开关替代气体开关作为螺旋发生器的输入开关提供了可能性。

在CST输出的三维仿真结果中分别观察了模型1和模型2在输出电压波形第二峰值时刻输出电极附近的电场强度分布。模型1在第二峰值时刻输出电极附近的电场强度分布如图6(a)所示,其输出电极附近的电场强度为 20 V/mm左右;模型2在第二峰值时刻输出电极附近的电场强度分布如图6(b)所示,其输出电极附近的电场强度为 5 V/mm左右。故在输出电压波形第二峰值时刻,与模型1对比,模型2输出电极附近的电场强度大幅减少。在实际工程应用中,螺旋发生器用作开关触发器充电电压为 5 kV左右,那么模型2在第二峰值时刻输出电极附近的电场强度为 25 kV/cm左右,而模型1在第二峰值时刻输出电极附近的电场强度为 100 kV/cm左右。因此在其他条件相同时,采用改进型结构可以减少输出电极附近的电场强度,从而减少器件发生沿面闪络或击穿的概率。

2 实验

根据改进型结构和传统结构分别制作了螺旋发生器,主动层的圈数均为16。选用厚度为 0.1 mm、宽度为 2 cm的薄铜带作为导体;采用聚酰亚胺薄膜(Kapton膜)作为绝缘介质,每一绝缘层由4层 0.05 mm厚、 4.8 cm宽的Kapton膜组成,Kapton膜的相对介电常数 ϵ_r 约为 4.2 ;内筒直径为 8 cm。

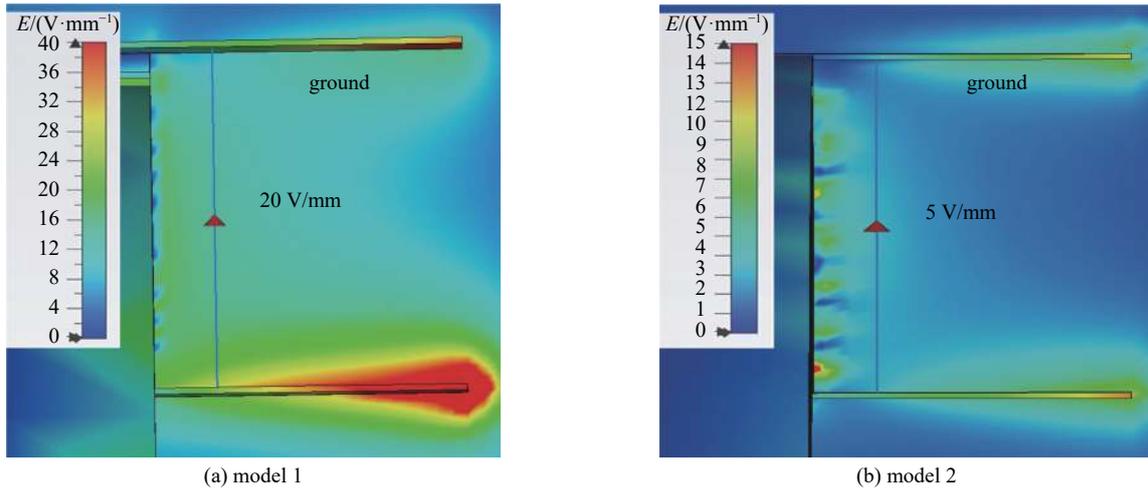


Fig. 6 Electric field distribution near the output electrode of model 1 and model 2 at the second peak time

图 6 模型 1 和模型 2 在第二峰值时刻输出电极附近的电场分布

卷绕后两种结构的螺旋发生器实物图如图 7 所示, 图 7(a)为改进型结构, 其尺寸为 $\phi 108 \text{ mm} \times 48 \text{ mm}$; 图 7(b)为传统结构, 其尺寸为 $\phi 107 \text{ mm} \times 48 \text{ mm}$ 。可以看到, 两种结构的螺旋发生器都非常紧凑, 符合脉冲功率系统核心器件小型化、紧凑化的发展方向。



Fig. 7 Actual diagram of improved structure and conventional structure spiral generator

图 7 改进型结构和传统结构螺旋发生器实物图

按图 2(a)、(b)所示电路搭建实验平台, 将制作的螺旋发生器浸没在变压器油中进行实验, 输入开关为火花间隙开关, 输出端负载为 15 pF 高压电容, 充电电压为 100 V 。两种结构的输出电压波形如图 8(a)所示, 可以看出, 传统结构第二峰值为其输出电压波形的最大电压输出, 且还有其它波峰值也大于第一波峰值; 而改进型结构第二峰值显著降低, 且第一波峰为最大电压输出。两种结构输入开关的电流波形如图 8(b)所示, 可以看出, 采用改进型

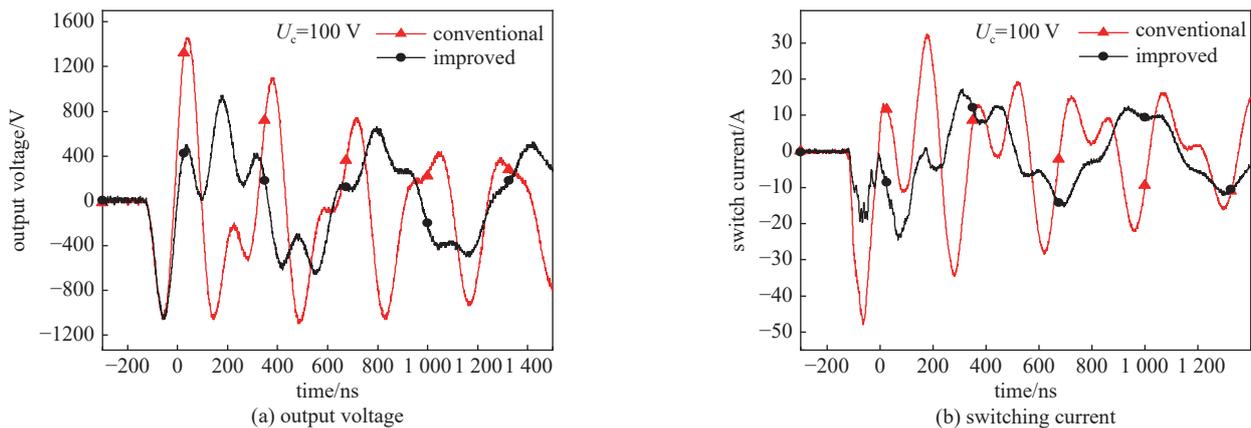


Fig. 8 Comparison of experimental waveforms of improved structure and conventional structure at the output voltage and input switching current

图 8 改进型结构和传统结构的输出电压和输入开关电流的实验波形对比图

结构还可以降低输入开关的峰值电流和电流上升率。

当充电电压为 4.7 kV、负载为 15 pF 的高压电容时, 以改进型结构卷绕的螺旋发生器可产生升压比为 11、第一峰值为 51 kV、前沿为 50 ns 的输出电压波形, 整个发生器的体积小于 0.5 L, 输出电压波形如图 9 所示, 之后该改进型结构的螺旋发生器将结合快速半导体开关实现高压脉冲触发器的全固态设计。

3 结 论

螺旋发生器具有结构紧凑、储能升压为一体等优点, 在脉冲功率领域有着很大的研究价值和应用前景。相较于传统结构, 改进型结构降低了输出电压波形第二峰值及后续振荡, 还降低了输入开关的峰值电流及电流上升率。本文还通过电磁场模拟分析了螺旋发生器改进型结构和传统结构的波传输过程, 研究发现改进型结构增加的一圈会造成额外的反射, 使螺旋发生器在第二峰值时刻不发生程度较高的同向叠加, 从而降低了输出电压波形第二峰值。

以改进型结构卷绕的螺旋发生器在负载为 15 pF 的高压电容上可产生升压比为 11、第一峰值为 51 kV、前沿为 50 ns 的输出电压波形, 整个发生器的体积小于 0.5 L, 之后该改进型结构的螺旋发生器将结合快速半导体开关实现高压脉冲触发器的全固态设计。

参考文献:

- [1] Fitch R A, Howell V T S. Novel principle of transient high-voltage generation[J]. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1964, 111(4): 849-855.
- [2] 王莹, 孙元章, 阮江军, 等. 脉冲功率科学与技术[M]. 汕头: 汕头大学出版社, 2010. (Wang Ying, Sun Yuanzhang, Ruan Jiangjun, et al. Science and technology on pulsed power[M]. Shantou: Shantou University Press, 2010)
- [3] 李飞, 宋法伦, 甘延青, 等. 低抖动Marx型触发源系统设计与实验[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017, 15(2): 323-327. (Li Fei, Song Falun, Gan Yanqing, et al. Design and test of Marx trigger source with low output jitter[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2017, 15(2): 323-327)
- [4] 张瑜. 基于闭合磁环脉冲变压器的紧凑型高压纳秒脉冲发生器[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009: 1-8. (Zhang Yu. A compact high-voltage nanosecond pulse generator based on pulse transformer with closed magnetic core[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009: 1-8)
- [5] 陈绒. 模块化, 轻量化, 长脉冲高功率调制器及其同步合成相关技术的研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2021: 1-10. (Chen Rong. Study on the modularized, light-weight, long-pulse, and high-power modulators and their synchronous synthesis-related technologies[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2021: 1-10)
- [6] Shkuratov S I, Baird J, Talantsev E F, et al. Completely explosive ultracompact high-voltage pulse generating system[C]//2005 IEEE Pulsed Power Conference. 2005: 445-448.
- [7] Roberts Z, Shotts Z, Miller R, et al. Design and testing of a vector inversion generator operating as a RF oscillator[C]//2007 IEEE 34th International Conference on Plasma Science. 2007: 424.
- [8] Pal'chikov E I, Dolgikh A V, Klypin V V, et al. Pulse X-ray device based on a combined spiral generator[J]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2019, 60(3): 586-591.
- [9] Pouraimis P G, Platis A P, Koutsoubis J M, et al. A compact high-voltage, nanosecond pulse generator for triggering applications[C]//2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application. 2018: 1-4.
- [10] Yan Jiaqi, Parker S, Gheorghiu T, et al. Miniature solid-state switched spiral generator for the cost effective, programmable triggering of large scale pulsed power accelerators[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2021, 24: 030401.
- [11] Yan Jiaqi, Parker S, Bland S. An investigation into high-voltage spiral generators utilizing thyristor input switches[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(9): 10005-10019.
- [12] Rühl F, Herziger G. Analysis of the spiral generator[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1980, 51(11): 1541-1547.
- [13] 杨凌云, 王毓华, 张奇. 产生毫微秒脉冲高压的螺旋形带状线发生器的研究[J]. 电子科学学刊, 1984, 6(4): 317-325. (Yang Lingyun, Wang Yuhua, Zhang Qi. Research on spiral strip line generator for obtaining millimicrosecond pulsed high voltage[J]. *Journal of Electronics*, 1984, 6(4): 317-325)
- [14] Pal'chikov E I, Ryabchun A M, Krasnikov I Y. Modified spiral high-voltage generator for feeding a pulsed X-ray apparatus[J]. *Technical Physics*, 2012, 57(2): 292-301.

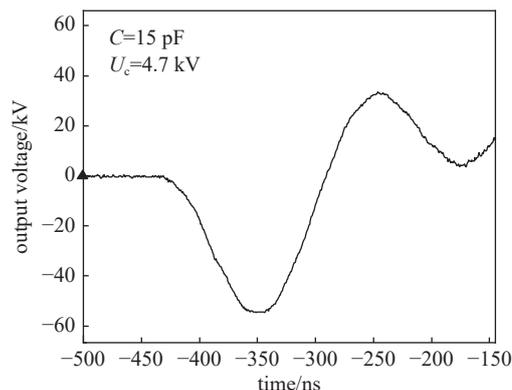


Fig. 9 Output voltage waveform of improved structure

图 9 改进型结构输出电压波形