

文章编号: 2095-4980(2016)02-0224-05

一种紧凑型宽带高功率微波驱动源

王俞卫, 陈冬群, 张建德, 吴川, 李达, 宋恒, 刘车波

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 为实现对传输线开关振荡器或振荡天线进行快速充电, 以提高其耐压能力和产生高频振荡信号的能量效率, 本文研制了一种基于 Tesla 变压器的电容储能型脉冲驱动源。本文首先介绍该驱动源的工作原理和运行过程, 接着利用等效电路方法分析了关键电路参数对负载充电过程的影响, 然后介绍该驱动源的具体工程设计, 最后介绍该驱动源初步测试结果以及将其应用于变压器油在 10 ns 量级脉冲下击穿特性研究的实验情况。实验表明, 输出火花开关在中储电容器充电电压为 -191 kV 导通时, 通过电感对等效电容为 15 pF 的传输线充电电压峰值为 -224 kV, 电压上升时间约 10 ns。研究结果表明本文研究的驱动源能够满足对传输线开关振荡器等电容负载进行快速充电至数百 kV 高压的应用需求。

关键词: 宽带高功率微波; 传输线开关振荡器; 振荡天线; Tesla 变压器

中图分类号: TN015; TM83

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201602.0224

A compact pulsed power driving source for wideband high power microwave radiation

WANG Yuwei, CHEN Dongqun, ZHANG Jiande, WU Chuan, LI Da, SONG Heng, LIU Chebo

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

Abstract: A compact pulsed power driving source based on a Tesla transformer utilizing capacitive energy storage method is introduced. This pulsed power driving source has been designed for fast charging of transmission line switched oscillators or resonant antennas in order to improve their voltage capability and energy efficiency of generating high frequency oscillations. Firstly, the schematic and operation processes of the driving source are described. Then the influences of the key circuit parameters to the charging process of the load are analyzed by utilizing equivalent circuit method. And the engineering design of driving source has also been introduced. At last, the preliminary test results of the driving source and the experiment using this driving source to investigate the transformer oil breakdown characteristics under 10 ns pulse are introduced. It is shown that transmission line with an equivalent capacitance of about 15 pF is charged to a peak voltage of -224 kV within about 10 ns through a connecting inductor under the condition that the output spark gap switch closed when the intermediate capacitor is charged to -191 kV. It can be concluded that this pulsed power driving source satisfies the requirements for fast charging of capacitive loads such as transmission line switched oscillators to hundreds of kilo volts.

Key words: wideband high power microwave; transmission line switched oscillator; resonant antenna; Tesla transformer

宽带高功率微波具有一定的谱宽但能谱又相对集中, 对目标不需要先验性认识, 目标防护难, 并且能够在一定程度进行定向辐射。与窄带和超宽带高功率微波相比, 宽带高功率微波峰值功率或辐射因子相对较低。但是, 宽带高功率微波辐射系统具有体积小、重量轻和成本低等优点, 具有良好的应用前景, 是高功率微波的一个重要研究方向^[1]。

收稿日期: 2014-11-24; 修回日期: 2015-01-31

基金项目: 国家高技术项目基金资助项目(2014AA8033031)

近年来,国内外公开文献报道了多种宽带高功率微波产生方式,其中最主要的有 2 种:一是向宽带天线馈入阻尼正弦脉冲来产生;二是激励振荡天线产生^[2-5]。采用这 2 种产生方式的典型装置分别是基于 Buam 提出的传输线开关振荡器(Switched Oscillator)的 MATRIX 和德国 DIEHL Munitionssysteme 公司研制的基于振荡天线的 DS 系列宽带源^[2-3]。

对于传输线开关振荡器和振荡天线,它们都是在传输线的一端连接短路开关,利用传输线阻抗变换原理产生振荡信号。研究表明,传输线开关振荡器和振荡天线的电长度决定所产生振荡信号的频率,而开关的击穿电压和导通速度分别是决定其耐压能力和产生高频振荡能量效率的关键因素^[6-7]。根据火花隙开关所采用的气体或液体绝缘介质的击穿特性,为了实现较高的耐压能力和较快的导通速度,缩短传输线开关振荡器或振荡天线的充电时间是一种有效的方法^[8]。于是,基于传输线开关振荡器和振荡天线的宽带高功率微波系统大多采用 Marx 发生器作为驱动源^[1-5]。然而,Marx 发生器的建立需要多级电容器和开关串联,由于电容器、开关和连接结构带来的固有电感(即 Marx 发生器内电感)限制,一般的高电压、大储能 Marx 发生器要做到百 ns 量级时间内释能是很困难的^[9]。V G Baryshevsky 等人研制了一种 Marx 发生器对振荡天线充电,该 Marx 发生器输出电压上升时间能够达到 50 ns^[4],属于公开文献报道中应用于驱动宽带发生器的一种快 Marx 发生器。

为了实现传输线开关振荡器进行快速充电,本文研究了一种具有较小内电感的基于 Tesla 变压器的电容储能型脉冲驱动源。

1 工作原理

在火花隙开关导通之前,传输线开关振荡器或振荡天线都可以等效为电容器。理论上,以储能电容器对电容器充电可以达到较快的充电速度,其充电速度主要受回路电感限制。因此,本文研制的脉冲驱动源也采用电容储能,其等效电路如图 1 所示。图中 C_0 表示初级电容器, L_p 、 L_s

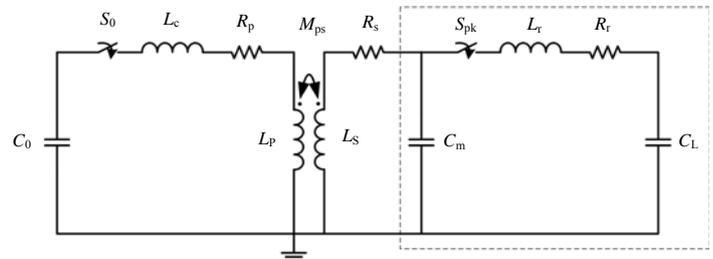


Fig.1 Equivalent circuit of the pulsed driver

图 1 脉冲驱动源等效电路图

和 M_{ps} 分别表示 Tesla 变压器原边、副边电感以及它们之间的互感, C_m 表示中储电容器, C_L 表示传输线开关振荡器或振荡天线等电容负载, S_0 表示初级电容器放电开关, S_{pk} 表示输出火花隙开关, L_c 表示初级电容器内感及其与变压器原边之间的连线电感, R_p 表示初级电容器内阻、连线电阻以及变压器原边绕组电阻, R_s 表示变压器副边绕组电阻, L_r 和 R_r 分别表示中储电容器与负载之间的连线电感和电阻。

该驱动源的工作过程分 3 个阶段:第 1 阶段充电电源对初级电容器 C_0 充电至一定高压 U_0 ;第 2 阶段初级电容器 C_0 通过火花隙开关 S_0 对 Tesla 变压器原边放电,利用 Tesla 变压器对中储电容器 C_m 充电至数百 kV 高压;第 3 阶段中储电容器 C_m 通过火花隙开关 S_{pk} 对电容负载进行快速充电。

2 电路模拟

从以上叙述可以看出,中间储能电容器 C_m 是驱动源的核心部件, C_m 参数的选择是系统设计的关键。因此,本文以在 10 ns 内对等效电容 C_L 为 66 pF 的传输线开关振荡器充电至数百 kV 高压为例,利用等效电路方法考察了中储电容器对负载充电回路中主要电路参数对充电效能的影响。

由于中储电容器 C_m 对负载 C_L 充电的充电时间为 10 ns 量级,在此时间对应的频率下,Tesla 变压器副边呈高阻抗,可以将其近似为开路。因此,仅对图 1 中虚框内部分进行模拟分析。设置参数 $C_L=66$ pF, $L_r=100$ nH, $R_r=20$ m Ω ,中间储能电容器 C_m 的初始电压 $U_m=-200$ kV。

当 C_m 在 $C_L \sim 9C_L$ 范围以 $2C_L$ 为间隔进行参数扫描,得到 C_m 和 C_L 上电压,分别如图 2 和图 3 所示。从图中可以看出,当从 C_L 增加到 $9C_L$ 时, C_L 充电电压峰值从 -200 kV 增大到 -366 kV,而 C_m 的剩余电压也从 0 增大到 -168 kV。这说明增大中储电容器 C_m 的电容量有利于提高电容负载 C_L 充电电压峰值,但是 C_L 充电电压峰值的提高幅度随 C_m 的增大逐渐降低,同时 C_L 充电电压上升到峰值的时间也会略有增加,而 C_m 的能量利用效率则随 C_m 的增大显著降低。因此,中储电容器 C_m 的电容量需根据负载和系统能量效率等指标综合考虑确定。本文将 C_m 的电容量取值范围确定为 $5C_L \sim 9C_L$ 。

保持其他参数不变,取 $C_m=7C_L$,当 L_r 在 50 nH~250 nH 范围以 50 nH 为间隔进行参数扫描,得到 C_m 和 C_L 上电压分别如图 4 和图 5 所示,可以看出,负载电容 C_L 充电电压上升到峰值的时间随着 L_r 的增大而增加,而

C_L 充电电压峰值及 C_m 的剩余电压保持不变。因此，在系统设计中可以一定程度地减小中储电容器 C_m 与负载电容 C_L 的内感以及它们之间的连线电感，以缩短对负载电容 C_L 的充电时间。

当 $C_L=66$ pF, $C_m=7C_L$, $R_f=20$ m Ω , $L_r=200$ nH 时，负载 C_L 充电电压上升时间约为 11.4 ns，满足对电容负载进行快速充电的需求。此时，中储电容器 C_m 对负载 C_L 充电的能量效率约 43.6%，但是负载 C_L 的充电电压峰值是中储电容器 C_m 充电电压的 1.75 倍，这有利于降低对 Tesla 变压器以及中储电容器绝缘能力的要求。

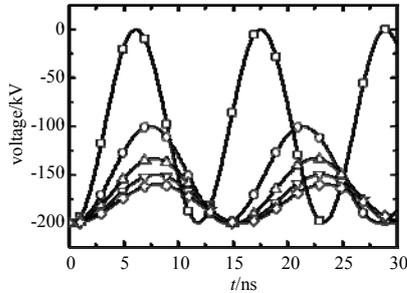


Fig.2 Variation of the discharging voltage waveforms on intermediate capacitor with capacitance C_m
图 2 C_m 对中储电容器放电电压波形的影响

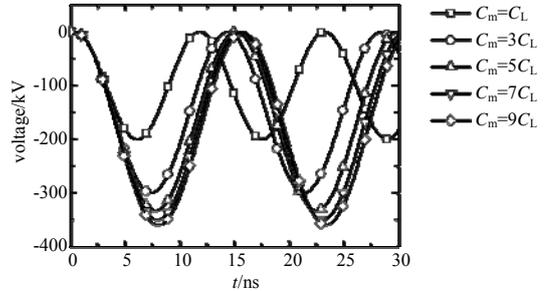


Fig.3 Variation of the charging voltage waveform on load capacitor C_L with capacitance C_m
图 3 C_m 对负载电容 C_L 充电电压波形的影响

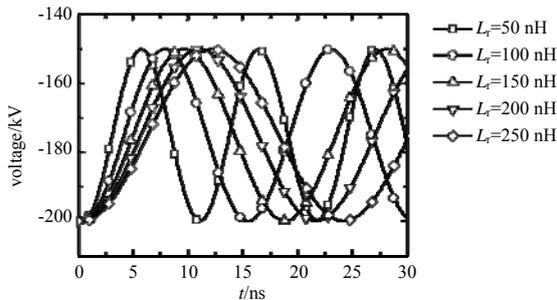


Fig.4 Variation of the discharging voltage waveform on intermediate capacitor with inductance L_r
图 4 L_r 对中储电容器放电电压波形的影响

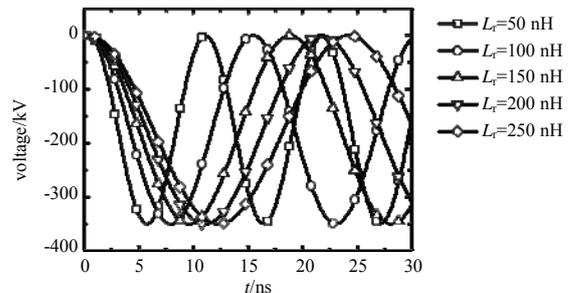


Fig.5 Variation of the charging voltage waveform on load capacitor C_L with inductance L_r
图 5 L_r 对负载电容 C_L 充电电压波形的影响

3 工程设计

根据图 1 所示的电路原理图设计的驱动源结构示意图如图 6 所示。为减小内电感，脉冲驱动源采用同轴结构，最大直径约 175 mm，轴向长度约 470 mm。

Tesla 变压器采用空心结构，原边为紧贴尼龙外筒内壁的圆柱形单匝铜带，副边为绕制在圆锥形高分子量聚乙烯骨架上的铜导线绕组。原边单匝铜带两端分别与初级电容器 C_0 的接地端 GND 和高压端 HV 连接。副边绕组直径较大端为接地端，直径较小端为高压端。10 kHz 下，测得变压器原边电感约为 110 nH，副边电感约为 74.5 μ H，根据测量结果计算得到耦合系数约为 0.51。

中间储能电容器采用 4 个额定电压为 50 kV 的低内电感陶瓷电容器串联构成，其中 3 个陶瓷电容的额定电容为 2 nF，另 1 个为 1 nF，4 个电容器串联的等效电容约为 0.4 nF。为减小体积，电容器组置于变压器副边绕组内部，两端分别与变压器副边的高压和接地端连接。变压器副边和中储电容器高压端通过同轴过渡段内导体与输出火花隙开关高压电极连接，而变压器绕组和中储电容器接地端通过变压器外部均匀分布的铜带与同轴过渡段外导体(装置外壳)连接。为实验方便，输出火花隙开关的间隙设计为在线可调，以保证其在中储电容器充电电压接近或达到第一负峰值时稳定导通。

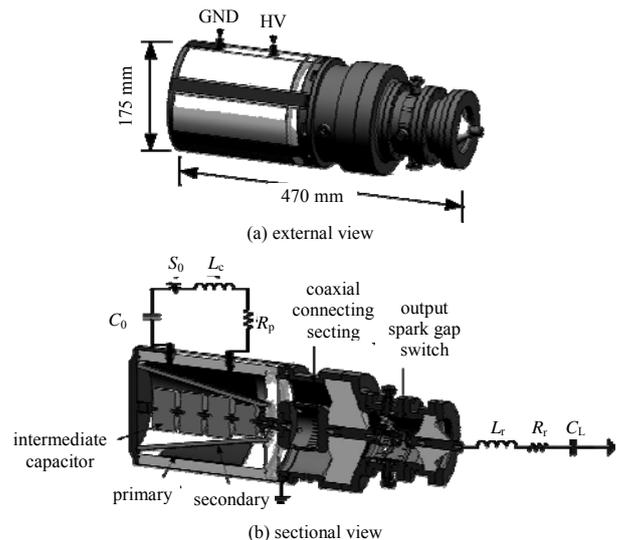


Fig.6 Structural diagram of the pulsed driver
图 6 脉冲驱动源结构示意图

采用同轴传输线电感计算公式，计算得到图 6 所示脉冲驱动源回路电感小于 200 nH，其中不包括开关火花间隙电感。

中储电容器电压通过同轴过渡连接段内的自积分电容分压器测量，其结构示意图及等效电路如图 7 所示，图中 HV 表示高压脉冲， C_1 和 C_2 分别表示高压臂和低压臂等效电容， R_m 表示匹配/补偿电阻， T 表示同轴传输线缆， R_0 表示示波器输入阻抗。分压器主要由铜箔和同轴过渡段内、外导体构成。铜箔与外导体之间为绝缘介质薄膜，相邻两者之间紧密贴合，构成低压臂电容 C_1 。铜箔与内导体之间为变压器油，构成高压臂电容 C_2 。铜箔和外导体分别与同轴输出端口的内、外导体连接。匹配/

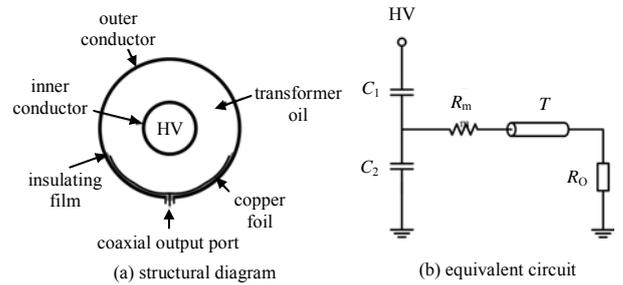


Fig.7 Capacitive voltage divider
图 7 电容分压器

补偿电阻 $R_m=100\ \Omega$ ，示波器输入阻抗 $R_0=50\ \Omega$ ，铜箔面积足够大，以使 $(R_m+R_0)C_2$ 满足自积分条件。采用在线标定方法，标定分压器以及匹配/补偿电阻、同轴传输线和示波器构成的测量通道的灵敏度为 2.878 kV/V。

4 实验结果及分析

初步实验中，以等效电容约 160 nF、额定电压为 100 kV 的电容器组作为初级能源 C_0 对上述驱动源进行了测试，初级电容器组通过火花隙开关对 Tesla 变压器原边放电。为减小初级电容器与 Tesla 变压器原边之间的连线电感，初级电容器和火花隙开关尽量靠近变压器输入端。实验装置照片如图 8 所示。

初级电容器 C_0 充电电压为 22 kV，且输出火花开关保持断开时，测得中储电容器充电电压波形如图 9 所示。可以看出，中储电容器第一个负电压峰值约 -216 kV，从初级电容器放电开关导通到中储电容器充电电压达到第一负峰的时间约 900 ns。

本文设计的脉冲驱动源，已应用于变压器油等绝缘介质在 10 ns 量级脉冲下击穿特性的实验研究^[10]。实验中，放电开关 S_{pk} 在中储电容器充电电压接近第一负峰导通时，测得中储电容器通过电感对等效电容为 15 pF 传输线充电电压波形分别如图 10 所示。开关 S_{pk} 导通时，中储电容器充电电压约 -191 kV。可看出，传输线充电电压峰值约 -224 kV，电压上升时间约 10 ns。

以上实验结果中，传输线充电电压峰值与输出火花隙开关导通时中储电容充电电压的升压系数较仿真结果小，这主要是因为是在上升时间为 10 ns 量级脉冲下，回路中电感和传输线都不能简单地等效为图 1 所示的单个集中电感和电容构成的单级网络，而是具有传输特性的多级网络。此外，Tesla 脉冲变压器原边电感较小，初级电容器内感和内阻，以及它与变压器原边之间的连线电感 L_c 偏大，影响了初级能源的利用效率。

根据图 1 所示电路模型估算， $C_L=15\ \text{pF}$ ， $L_t=700\ \text{nH}$ ， $R_t=20\ \text{m}\Omega$ 时，图 6 所示脉冲驱动源对 C_L 的充电电压上升时间约为 10.2 ns。而根据前面的估算，脉冲驱动源的内感小于 200 nH，这说明中储电容器和等效电容为 15 pF 的传输线之间的连线电感和传输线自身的杂散电感之和约为 500 nH。以该脉冲驱动源对等效电容为 66 pF 的传输线开关振荡器充电时，如果脉冲驱动源与传输线开关振荡器的连线电感以及传输线开关振荡器自身杂散电感之和也达到 500 nH，根据图 1 所示等效电路估算，脉冲驱动源对传输线开关振荡器的充电电压上升时间将达到 21 ns。因此，为了缩短对传输线开关振荡器的充电时间，减小脉冲驱动源和传输线开关振荡器之间的连线电感也很关键。

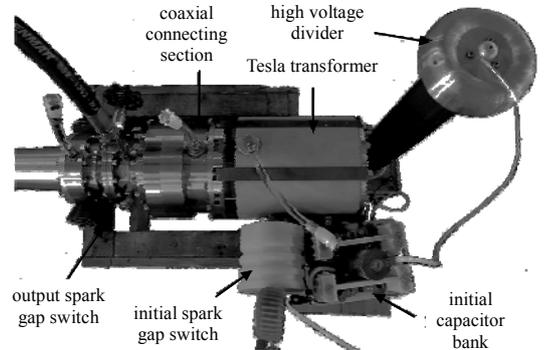


Fig.8 Photograph of the experimental device
图 8 实验装置照片

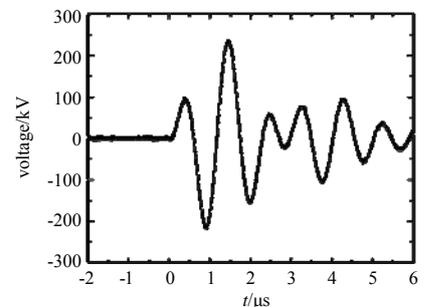


Fig.9 Voltage waveform on the intermediate capacitor when S_{pk} keeps open
图 9 开关 S_{pk} 保持断开时中储电容器电压波形

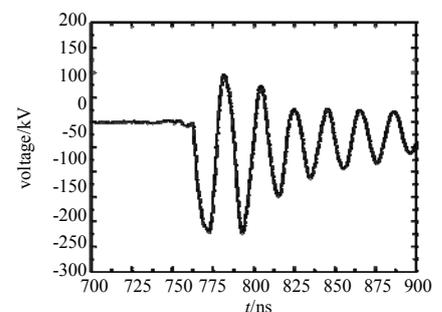


Fig.10 Charging voltage waveform of the transmission line with an equivalent capacitance of 15 pF
图 10 等效电容 15 pF 传输线充电电压波形

如上叙述, 本文研制的脉冲驱动源内电感小于 200 nH, 利用该脉冲驱动源对等效电容为 15 pF 的传输线充电初步证明了能够实现对电容负载进行快速充电。与文献[4]中的 Marx 发生器相比较, 由于本文研制的脉冲驱动源内电感较小, 输出电压上升时间明显提高, 且本文研制的脉冲驱动源结构简单、紧凑, 工程实现难度小。

5 结论

本文首先简要分析了传输线开关振荡器等电容负载对快速充电的需求及方法, 然后介绍了一种基于 Tesla 变压器的电容储能型脉冲驱动源的设计和初步实验结果。初步实验中, 以充电电压为 22 kV 的 160 nF 电容器组作为初级能源, 通过 Tesla 变压器对中储电容器充电的第一负峰值电压为-216 kV。将该脉冲驱动源应用于变压器油在 10 ns 量级脉冲下的击穿特性研究中, 当输出火花隙开关在中储电容器充电电压为-191 kV 导通时, 通过连线电感对等效电容为 15 pF 的传输线充电电压峰值为-224 kV, 电压上升时间约 10 ns。实验初步证明本文研制的脉冲驱动源能够满足对传输线开关振荡器等电容负载快速充电至数百 kV 高压的应用需求。

参考文献:

- [1] JAMES B,JOHN S,EDL S. 高功率微波[M]. 2 版. 江伟华,张驰 译. 北京:国防工业出版社, 2008. (JAMES B,JOHN S,EDL S. High Power Microwaves[M]. 2nd ed. Translated by JIANG Weihua,ZHANG Chi. Beijing:National Defense Industry Press, 2008.)
- [2] WILLIAM D Prather,CARL E Baum,ROBERT J Torres,et al. Survey of worldwide high-power wideband capabilities[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2004,46(3):335-344.
- [3] 孟凡宝. 高功率超宽带电磁脉冲技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2011:14-17. (MENG Fanbao. High Power Ultrawide Band Electromagnetic Pulse Technology[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2011:14-17.)
- [4] BARYSHEVSKY V G,BORISEVICH A E,GURINOVICH A A,et al. A compact high power microwave (HPM) source[C]// 2009 IET European Pulsed Power Conference. Geneva:IET, 2009:1-4.
- [5] LEE J M,KWON H O,HWANG S M,et al. Design of a damped sinusoidal oscillator system[C]// 2011 IEEE Pulsed Power Conference (PPC). Chicago, IL:IEEE, 2011:414-419.
- [6] WANG Yuwei,CHEN Dongqun,ZHANG Jiande,et al. Investigation of a high power electromagnetic pulse source[J]. Review of Scientific Instruments, 2012,83(9):094702-094702-7.
- [7] WANG Yuwei,CHEN Dongqun,ZHANG Jiande,et al. Investigation of a compact coaxially fed switched oscillator[J]. Review of Scientific Instruments, 2013,84(9):094705.
- [8] MARTIN T H. An empirical formula for gas switch breakdown delay[C]// Proceedings of the 7th IEEE Pulsed Power Conference. Monterey,CA:IEEE, 1989:73-79.
- [9] 刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2005:29-95. (LIU Xisan. High Pulsed Power Technology[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2005:29-95.)
- [10] 吴川,陈冬群,王俞卫,等. 纳秒脉冲下变压器油击穿特性实验研究[C]// 第五届全国超宽谱/带与短脉冲电磁学会议. 2014. (WU Chuan,CHEN Dongqun,WANG Yuwei,et al. Experimental investigation on nanosecond breakdown characteristics of transformer oil[C]// 5th National Conference on Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics, 2014.)

作者简介:



王俞卫(1983-), 男, 四川省营山县人, 博士, 讲师, 主要研究方向为脉冲功率技术和宽带高功率微波技术.email:ywei_wang@163.com.

宋 恒(1990-), 男, 四川省眉山市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为宽带高功率微波技术。

刘车波(1964-), 男, 湖南省益阳市人, 学士, 高级实验师, 主要研究方向为脉冲功率技术。

陈冬群(1970-), 男, 湖南省祁东县人, 博士, 研究员, 主要研究方向为脉冲功率技术。

张建德(1964-), 男, 湖南省醴陵市人, 博士, 教授, 主要研究方向为高功率微波技术。

吴 川(1990-), 男, 浙江省台州市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为脉冲功率技术。

李 达(1983-), 男, 长沙市人, 技术员, 主要研究方向为脉冲功率技术。