

纳秒脉冲下几种液态介质绝缘性能的比对

贾 伟¹, 陈志强^{1,2}, 郭 帆^{1,2}, 李尧尧¹, 祁宇航¹, 程永平¹, 杨 天¹

(1. 西北核技术研究院 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 西安 710024;

2. 西安交通大学 电气绝缘与电力设备国家重点实验室, 西安 710049)

摘 要: 利用自行研制的纳秒脉冲实验平台(输出脉冲前沿 30 ns, 半宽百纳秒)和标准介电强度测试仪, 对变压器油、甘油、去离子水、Galden HT200 四种液体绝缘介质在直流与纳秒脉冲下的击穿特性进行了实验研究与结果比对, 结果表明: 在直流与纳秒脉冲下, Galden HT200 均具有最高的击穿场强, 且两种情况下均比变压器油高出 40% 以上; 纳秒脉冲下, Galden HT200 与变压器油的击穿场强均提高 6.5~7 倍, Galden HT200 击穿过程耗时最短(ns 量级), 其次是变压器油(20 ns), 然后依次为甘油(45 ns)和去离子水(70 ns); 多次放电后, 粘度系数最大的甘油更易在电极间隙处聚集碳化放电产物, 粘度系数较小的 Galden HT200 和去离子水则无明显痕迹, 但二者放电过程会产生明显的冲击波, 多次放电后易造成间隙电极松动。

关键词: 纳秒脉冲; 液体介质; 标准油杯; 击穿场强; 绝缘性能

中图分类号: TM 85

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.190338

Comparison of insulation properties of several liquid dielectrics under nanosecond pulses

Jia Wei¹, Chen Zhiqiang^{1,2}, Guo Fan^{1,2}, Li Yaoyao¹, Qi Yuhang¹, Chen Yongping¹, Yang Tian¹

(1. State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;

2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Based on the self-developed nanosecond pulsed test platform with output voltage of 30 ns risetime and 100 ns half width, and the standard dielectric strength DC tester, the breakdown characteristics of four liquid dielectrics (transformer oil, glycerol, deionized water and Galden HT200) under DC and nanosecond pulses were experimentally studied and compared. The following conclusions were obtained: (1) Under both DC and nanosecond pulse, Galden HT200 has the highest breakdown field strength which is more than 40% higher than that of the transformer oil. (2) Under the nanosecond pulse, the breakdown field strength of Galden HT200 and transformer oil both increased by 6.5–7 times than those under DC. And it took the shortest time (nanosecond scale) for Galden HT200 to breakdown, followed by the transformer oil (20 ns), then glycerol (45 ns) and deionized water (70 ns). (3) After multiple breakdowns, a lot of carbonized discharge products were accumulated at the electrode gap in the glycerol which has the largest viscosity coefficient. However, there are no obvious breakdown traces in the Galden HT200 and deionized water, which both have the smaller viscosity coefficient. But obvious shock waves were observed in the Galden HT200 and deionized water, which make the gap electrodes loose.

Key words: nanosecond pulse; liquid dielectric; standard oil-cup; breakdown field strength; insulation characteristics

强电磁脉冲(EMP)具有辐射范围广、频谱宽、强度大等特点,对现代军事行动与日常生活中电子集成度越来越高的信息化装备构成巨大威胁^[1-4]。早期研究证明,脉冲前沿越快,包含的高频成分越多,对装备造成损伤的概率越高^[5-8]。因此,提升环境模拟装置输出脉冲前沿成为加强装备抗 EMP 指标考核的主要技术手段。相同电压等级下,要获得更快的脉冲前沿,就要求模拟器脉冲源具有更紧凑的结构,随之而来的是脉冲源内部结构及其开关部件绝缘性能的大幅提升^[6,9-10]。液体介质因具有较高的击穿场强与良好的绝缘恢复能力,且适用于各种复杂几何结构,而成为紧凑型脉冲源绝缘设计过程中的主选介质之一^[11]。本文选取市场上易于获取且电器绝缘中常用的液体

介质变压器油(25#)、甘油(纯度 $\geq 99.7\%$)、去离子水(电阻率 $1\sim 2(\text{M}\Omega\cdot\text{cm})$)以及一种曾用于 EMP 模拟装置输出开关绝缘介质的液体 Galden HT200(一种防冻液,主要成分全氟聚醚(PEPE))作为研究对象,对其在直流与纳秒脉冲下的击穿特性进行了实验研究与比对。

1 实验装置及方法

1.1 直流实验

四种绝缘介质直流下击穿特性实验采用标准设备 DCJY-80SI 绝缘油介电强度测试仪进行,设备最大直流输出电压 80 kV,测量精度 3%,调压速率 $(2\pm 0.2) \text{ kV/s}$ 。实验电极结构采用 400 mL 标准油杯,电极为黄铜材料,圆形平板结构,直径 25 mm,间距 2.5 mm,电极间电场分布近似为均匀场。

实验方法为:每种绝缘介质按测试仪固定升压速率开展直流耐压实验各 50 次,每次升压间隔时间为 3 min,取 50 次实验结果的平均值求取介质直流击穿强度。

1.2 纳秒脉冲实验

纳秒脉冲下介质击穿特性实验在自研的纳秒脉冲实验平台上开展,布局如图 1 所示,主要由 Marx 触发与控制、紧凑型同轴 Marx 发生器、2 MPa 实验腔体、示波器等组成。实验腔体内包含由回路限流电阻和钳位电阻构成的波形整形电路、测量用电阻分压器(限流电阻前后各一个)、盛有实验样品的标准油杯等,内部充 SF_6 绝缘气体(最大充气压力可达 2 MPa),用于防止内部组件在实验过程中发生沿面闪络。油杯内电极形状、间隙均与直流实验时相同。

实验平台输出电压脉冲前沿约 30 ns,半宽百纳秒,最高幅值可达 473 kV,触发状态下输出脉冲幅值分散性 $\leq 5\%$ 。平台典型输出电压波形及 Marx 发生器开关间隙工作电压 V_o 与自击穿电压 V_b 比值和平台输出电压幅值的关系如图 2 所示。

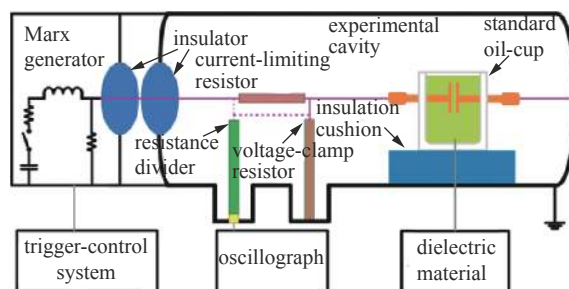
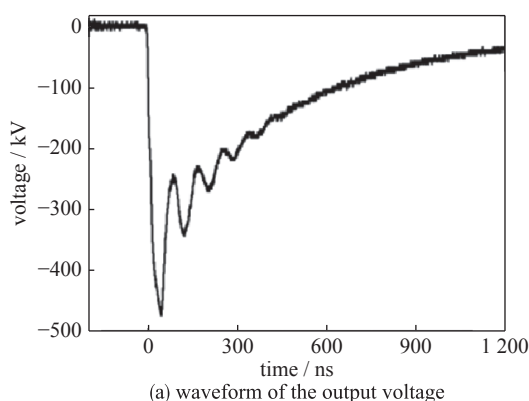
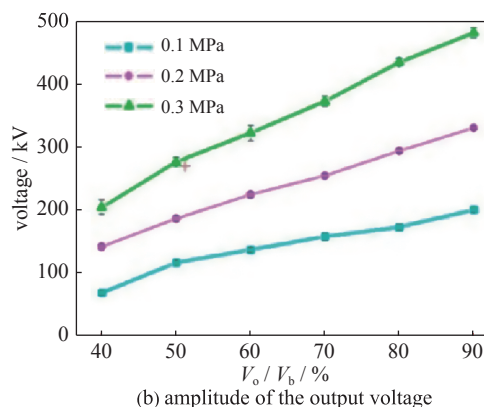


Fig. 1 Composition of the nanosecond-pulse test platform

图 1 纳秒脉冲实验平台系统组成



(a) waveform of the output voltage



(b) amplitude of the output voltage

Fig. 2 Typical waveform and amplitude of the output voltage of the test platform

图 2 平台典型输出电压波形和幅值

实验过程中,首先固定平台输出电压幅值,并保证在该电压幅值下介质样品发生前沿击穿(与 EMP 模拟器脉冲源输出开关的真实工作情况一致),读取发生击穿波形的峰值作为该状态下液体介质的击穿电压。同一状态重复 30 次,每次间隔 5 min,取 30 次实验结果的平均值求取介质击穿强度。

2 实验结果及分析

2.1 直流实验

图 3 和表 1 为四种液体绝缘介质在直流下的击穿实验数据。可见,相同实验条件下 Galden HT200 击穿场强较变压器油高 41.7%。甘油与去离子水为极性介质,直流电压下存在一个持续的泄露电流加热过程^[12-13],因此采用介电强度测试仪测得数据较之变压器油与 Galden HT200 低很多。

2.2 纳秒脉冲实验

图 4 和表 2 为固定实验平台输出脉冲电压幅值 470 kV 情况下,几种液体介质在纳秒脉冲作用下的击穿实验数

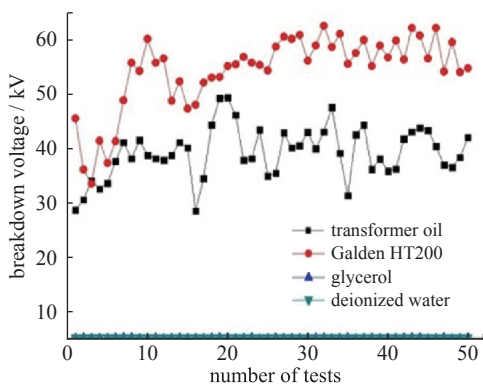


Fig. 3 Breakdown data of four liquid dielectrics under DC

图3 四种液体介质直流击穿数据

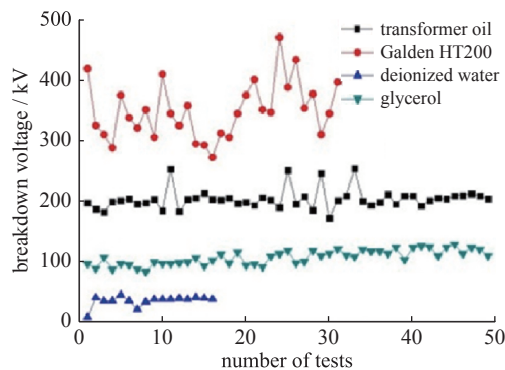


Fig. 4 Breakdown data of four liquid dielectrics under the nanosecond pulse

图4 四种液体介质纳秒脉冲击穿数据

表 1 四种液体介质直流实验击穿数据

Table 1 Breakdown data of four liquid dielectrics under DC

dielectric media	relative permittivity	breakdown vottage/kV	relative deviation/%	breakdown field strength/(kV/mm)
transformer oil	1.87	39.3±4.7	12	15.7
Galden HT200	1.83	55.7±6.8	12.2	22.3
glycerol	31	5.3±0.07	1.3	2.1
deionized water	80	5.2±0.02	0.4	2.08

表 2 四种液体介质纳秒脉冲实验击穿数据

Table 2 Breakdown data of four liquid dielectrics under the nanosecond pulse

dielectric media	breakdown vottage/kV	relative deviation/%	breakdown field strength/(kV/mm)
transformer oil	262.7±13.34	5.07	105.1
Galden HT200	378.8±37.3	9.8	151.2
glycerol	186.3±6.98	3.75	74.5
deionized water	128.1±9.63	7.5	51.2

据。可见，在上升沿 30 ns 左右的脉冲电压作用下，四种液体介质的击穿强度均大幅提高。同时，变压器油与 Galden HT200 击穿分散性有所降低，尤其是变压器油减低明显。变压器油与 Galden HT200 的击穿场强均提高 6.5~7 倍，Galden HT200 的击穿场强仍比变压器油高出 43.8%。甘油与去离子水两种极性介质在纳秒脉冲作用下，也表现出了良好的绝缘耐压性能。其中，去离子水击穿 16 发次以后，Galden HT200 击穿 31 发次之后，击穿电压幅值均发生急剧降低，因此未计入统计。同一液体介质多次实验均出现类似结果，最终查明原因为，该介质放电导致标准油杯电极松动，致使间隙变小，击穿电压随之降低。

2.3 实验结果分析

2.3.1 电压波形分析

图 5 为四种液体介质分别在相同的纳秒脉冲作用下发生击穿时，实验平台内部限流电阻前后两个电阻分压器（如图 1 所示）测得的电压波形。其中，限流电阻前测得电压为 Marx 发生器输出电压，限流电阻后测得电压为加载在标准油杯上的电压。

根据 J. C. Martin 等人关于纳秒脉冲下液体介质击穿过程的描述，可将其等效为如图 6 所示电路形式^[14]。其中， C_g 为装有液体介质的标准油杯中平板电极结构间的等效电容， R_g 为平板电极间液体介质的绝缘等效电阻， R_s 与 L_s 分别为液体介质放电通道等效电阻与电感， R_s 的值随介质击穿过程的发展而不断变化。可见，电极间液体介质的整个击穿过程可等效为一个变阻抗过程。根据这一思路对图 5 进行分析，保证液体介质在 Marx 发生器输出电压作用下均在波形前沿位置发生击穿，则限流电阻前电压波形前沿斜率的突然变化，说明液体介质内部开始发生击穿；限流电阻后电压波形的突然归零，说明液体介质绝缘电阻崩塌，介质完全击穿。

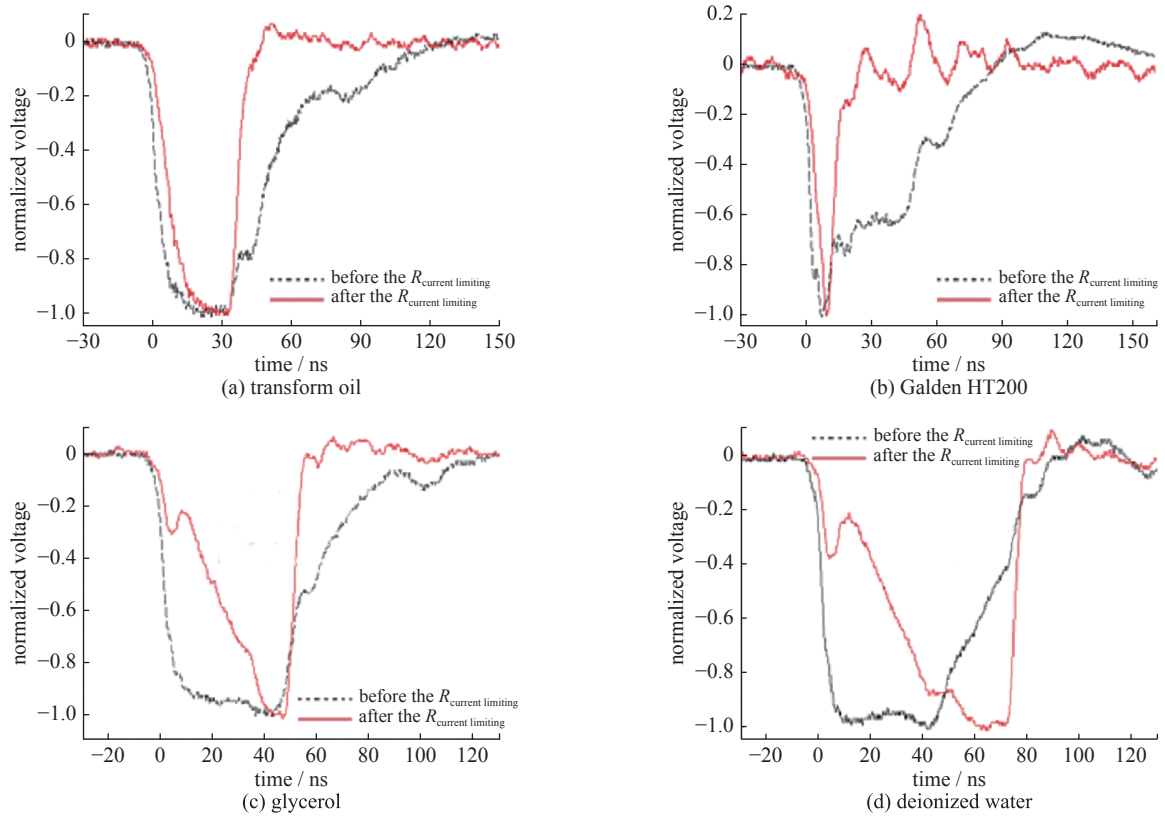


Fig. 5 The breakdown waveforms of four liquid dielectrics under the nanosecond pulse

图 5 四种液体介质的击穿实验波形

分析图 5 波形可知, 纳秒脉冲下作用在 Galden HT200 上的电压波形前沿斜率无明显变化, 在作用 7 ns 后迅速跌落归零, 即, 作用电压达到击穿阈值后, 介质迅速发生击穿。变压器油在脉冲电压作用 10 ns 左右时电压波形前沿斜率开始发生明显变化, 说明介质开始发生击穿; 持续将近 20 ns 后, 作用电压波形迅速归零, 介质完全击穿。甘油与去离子水作用电压波形较为类似, 脉冲电压作用 5 ns 左右时, 介质内部开始发生击穿, 甘油击穿过程持续大约 45 ns, 去离子水击穿过程则持续大约 70 ns。可见, 在相同纳秒脉冲作用下, 去离子水击穿过程耗时最长, Galden HT200 击穿过程耗时最短。

结合液体介质击穿理论分析可知^[11-14], Galden HT200 在纳秒脉冲下的击穿过程更符合“电击穿”理论。极低的介电常数使其所在间隙结构等效电容极小(标准油杯直径 25 mm 的圆形平板电极, 间距 2.5 mm, 采用平板电容容值估算公式计算其结构电容容值约为 3.2 pF), 间隙上电压可快速上升。同时, 富含氟离子的分子结构, 会吸收大量自由电子, 延缓有效电子的出现时刻, 从而利于更高能量电子的产生, 直接轰击介质分子致其电离, 形成类似于气体放电中电子崩的现象, 使液体介质绝缘电阻迅速崩塌, 发生完全击穿。

甘油和去离子水的介电常数分别为 Galden HT200 的 16.9 倍和 43.7 倍, 相同电极结构下具有更大的结构等效电容(53.6 pF 和 138.4 pF), 从而使介质间隙上作用电压的上升变得缓慢。同时, 甘油与去离子水中液体分子的极化特性会抑制自由电子能量的聚集。因此, 二者的击穿过程更符合“气泡击穿”理论。介质击穿存在一个气泡产生、内部气体电离、加热增长、贯穿间隙电极的相对缓慢的发展过程。

变压器油介电常数与 Galden HT200 接近, 但分子结构中不包含可以吸收自由电子的离子, 且呈电中性, 间隙上电压的快速上升产生极强的初始电场, 同时也会产生大量的自由电子, 其击穿更倾向于“电击穿”和“气泡击穿”的混合过程。因此, 相同条件下其击穿电压低于 Galden HT200, 高于去离子水与甘油; 完全击穿所需时间长于 Galden HT200, 但短于去离子水与甘油。

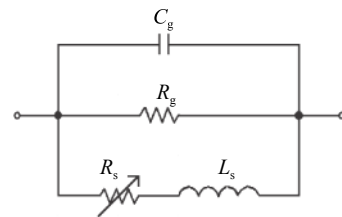


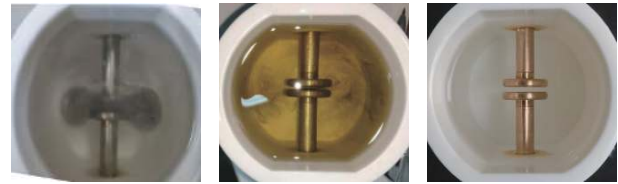
Fig. 6 Equivalent circuit for the liquid dielectric to breakdown

图 6 液体介质击穿过程等效电路

2.3.2 实验现象分析

图 7 为甘油、变压器油和 Galden HT200 分别在相同的纳秒脉冲作用下持续击穿 50 次后的样品形态。甘油样品电极周围形成明显的碳化区域，变压器油样品中出现向四周扩散的碳化痕迹，Galden HT200 样品无明显放电痕迹（去离子水与之相同）。

分析出现上述现象的原因，主要与液体介质自身粘度有关。如表 3 所示，相同温度下，甘油的粘度系数比变压器油大 10^2 个量级，比 Galden HT200 和去离子水大 10^3 个量级。可见，粘度系数越大的液体介质，其放电形成的杂质产物越不易扩散，更易聚集在电极附近，从而对其重复使用次数与绝缘恢复能力产生影响。



(a) glycerol (b) transform oil (c) galden HT200

Fig. 7 Morphology of liquid dielectrics in standard oil cup after 50 times breakdown tests

图 7 50 次持续击穿试验后油杯中绝缘介质的形态

表 3 几种液体介质在 20 °C 时的密度与粘度
Table 3 Density and viscosity of several liquid dielectrics at 20 °C

	density/(g/cm ³)	viscosity/(m ² /s)
deionized water / Galden HT200	1	1.01×10^{-6}
transformer oil	0.895	$(5 \sim 10) \times 10^{-6}$
glycerol	1.25	$(0.458 \sim 1.19) \times 10^{-3}$

同时，实验中还发现随着实验次数的增加，盛有去离子水与 Galden HT200 的标准油杯中均发生了电极松动现象。分析原因，应该是液体放电产生的冲击波对电极反复作用的结果^[5]。可见，相同实验条件下，在粘度系数较小的去离子水和 Galden HT200 中放电产生的冲击力对电极的作用效果更为明显。

3 结 论

本文对变压器油、甘油、Galden HT200 和去离子水四种脉冲功率技术中常用的液体介质在直流与纳秒脉冲作用下的击穿特性进行了实验研究，并对实验中测得的波形与出现的现象进行了比对分析，得到如下一些结论：(1) 在直流与纳秒脉冲（前沿 30 ns，半宽百 ns）下，四种液体介质绝缘性能从高到低的排序均依次是 Galden HT200、变压器油、甘油和去离子水，且两种情况下，Galden HT200 的击穿场强均比变压器油高 40% 以上；(2) 30 ns 脉冲电压作用下，Galden HT200 与变压器油的击穿场强均提高 6.5~7 倍，Galden HT200 击穿耗时最短，其次是变压器油，然后依次是甘油和去离子水；(3) 粘度系数最大的甘油经多次放电后，更容易在电极附近聚集碳化放电产物，而粘度系数最小的去离子水与 Galden HT200 则无明显放电产物；(4) 去离子水与 Galden HT200 中放电产生的冲击力对电极的作用效果更为明显，多次放电后极易造成电极松动。

通过上述实验比对，Galden HT200 绝缘性能极佳，且物理特性与去离子水接近，因此可作为紧凑型脉冲源的首选绝缘介质。但是，在 EMP 模拟装置输出开关绝缘介质的选取上，变压器油因在脉冲下具有更低的击穿分散性，所以更有优势。

参考文献：

- [1] Ba um, C E. Reminiscences of high-power electromagnetic[J]. *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*, 2007, 49(2): 211-218.
- [2] 刘培国, 刘晨曦, 谭剑锋, 等. 强电磁防护技术研究进展[J]. *中国舰船研究*, 2015, 10(2): 2-6. (Liu Peiguo, Liu Chenxi, Tan Jianfeng, et al. Analysis of the research development on HPM/EMP protection[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2015, 10(2): 2-6)
- [3] 邓建球, 郝翠. 强电磁脉冲耦合与电源防护研究[J]. *微波学报*, 2017, 33(6): 85-89. (Deng Jianqiu, Hao Cui. Research on powerful electromagnetic pulse coupling and power source protection[J]. *Journal of Microwaves*, 2017, 33(6): 85-89)
- [4] Shi Lihua. An overview of the HEMP research in China[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2013(3): 422-430.
- [5] Wraight A, Prather W D. Developments in early-time (E1) high-altitude electromagnetic pulse(HEMP) test methods[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2013, 55(3): 492-499.
- [6] Giri D V, Prather W D. High-altitude electromagnetic pulse(HEMP) risetime evolution of technology and standards exclusive for E1 environment[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2013, 55(3): 1-8.
- [7] 谢彦召, 王赞基, 王群书, 等. 基于频域幅度谱数据重建电磁脉冲时域波形[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(3): 320-324. (Xie Yanzhao, Wang Zanji, Wang Qunshu, et al. Reconstruction of electromagnetic pulse wave based on the amplitude spectrum data[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(3): 320-324)

- [8] 朱长青, 刘尚合, 魏明. 强电磁脉冲的有效带宽、测量带宽及来自上升时间的影响[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(1): 99-103. (Zhu Changqing, Liu Shanghe, Wei Ming. High-EMP effective bandwidth, measurement bandwidth and effect from rising time[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(1): 99-103)
- [9] Nyffeler M, Jaquier A, Reusser B, et al. VERIFY, a threat level NEMP simulator with a 1 ns risetime[C]//America Electromagnetic. 2006.
- [10] 张帆, 何鹏军, 孔亮, 等. 宽带强电磁脉冲模拟器发展及设计研究[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30: 013206. (Zhang Fan, He Pengjun, Kong Liang, et al. Survey and design study of mesoband high power electromagnetic pulse radiator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30: 013206)
- [11] 张晋琪, 蒋兴亮, 陈志刚. 液体介质快脉冲电压下击穿特性研究[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(6): 1053-1056. (Zhang Jinqi, Jiang Xingliang, Chen Zhigang. Characteristics study of short-pulsed dielectric breakdown in liquids[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2006, 18(6): 1053-1056)
- [12] 黄思思. 操作冲击电压作用下液体电介质的电场及空间电荷分布特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013. (Huang Sisi. Study on electric field and space charge distribution characteristics in liquid dielectric under switching impulse voltage. Chongqing: Chongqing University, 2013)
- [13] 徐健. 高储能密度液体介质脉冲绝缘特性研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014. (Xu Jian. Study on the pulsed insulating characteristics of high energy storage density liquid dielectrics. Changsha: National University of Defense Technology, 2014)
- [14] Martin T H, Guenther A H. J. C. Martin on pulsed power[M]. New York and London: Plenum Press, 1996.
- [15] 荀涛, 杨汉武, 张建德, 等. 加速器电水锤数值模拟与实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(2): 425-429. (Xun Tao, Yang Hanwu, Zhang Jiande, et al. Numerical and experimental investigation on water shocks due to pulsed discharge in accelerators[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(2): 425-429)