



·高功率脉冲电源技术及应用·

雷电间接效应多重脉冲组电流产生装置的设计*

刘宏伟, 栾崇彪, 袁建强, 肖金水, 黄宇鹏, 王凌云

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 脉冲功率技术重点实验室, 四川 绵阳 621900)

摘要: 针对雷电间接效应多重脉冲组电流模拟需求, 完成了雷电间接效应多重脉冲组模拟源的设计, 采用20个Crowbar电路支路, 通过分时放电的方式实现1个脉冲串内多脉冲输出需求, 每个支路可以实现最小间隔30 ms的重复频率放电, 从而实现3个脉冲串的输出需求。对放电支路的参数进行了详细设计, 分析了电容、波尾电路电感、波尾电路电阻参数变化对输出特性的影响。分析了采用并联大电容实现放电电容重复频率快速充电的可行性, 完成了装置的初步结构设计并结合装置结构简要分析了电路模拟参数设置的合理性。该装置建成后, 可为电子、电气设备等开展测试提供技术支持。

关键词: 雷电间接效应; 多重脉冲组(H波); 雷电模拟源; 冲击电流发生器

中图分类号: TM833

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230241

Design of multiple pulse group current generation device for indirect lightning effects

Liu Hongwei, Luan Chongbiao, Yuan Jianqiang, Xiao Jinshui, Huang Yupeng, Wang Lingyun

(Key Laboratory of Pulsed Power Technology, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: To meet the requirements of lightning electromagnetic pulse adaptability test of electronic and electrical equipment, it is necessary to develop a simulation device that meets the waveform of multiple pulse groups of lightning indirect effects. Multiple pulse groups with indirect lightning effects require the output of 60 adjustable interval current pulses, with a pulse current greater than 10 kA, a current front (10%–90%) of 100 ns, and a minimum current pulse time interval of only 50 μ s. High requirements have been placed on analog devices. This article focuses on the simulation requirements of multiple pulse group currents for indirect effects of lightning, and has completed the design of a multiple pulse group simulation source for indirect effects of lightning. After the device is built, it can provide technical support for testing electronic and electrical equipment.

Key words: indirect effects of lightning, multiple pulse sets (H-waves), lighting analog source, impulse current generator

雷电是由大气层中不同湿度和温度的气流相对运动而形成的自然现象, 雷电在瞬时释放巨大的能量, 其作用于物体上时会产生巨大破坏影响。雷电对飞行器、水面舰船、地面建筑等都有可能造成危害^[1-3]。雷电的危害主要包括雷电的直接和间接效应危害。雷电直接效应主要是指雷电通道直接附着或雷电流的传导造成的物理效应, 表现为燃烧、爆炸、侵蚀、高压冲击波、结构变形、强电流形成的磁场等。雷电间接效应则来源于雷电产生的电磁场与设备的相互作用。随着各种微电子、电气设备以及大规模集成电路等复杂电子、电气系统在装备上的广泛运用, 各类设备对电磁环境有着更加苛刻的要求, 雷电电磁脉冲对这些电子、电气系统具有现实威胁性。GJB 1389A-2005中明确指出了雷电间接效应的环境参数^[4]。GJB 8848-2016中针对GJB 1389A-2005中的雷电环境要求, 明确了系统的雷电试验方法、试验配置、试验步骤、试验结果评定准则等, 这为开展系统的雷电试验提供了参考和依据^[5]。

* 收稿日期: 2023-07-28; 修订日期: 2023-11-14

基金项目: 国家高技术发展计划项目

联系方式: 刘宏伟, liuhongwei00@tsinghua.org.cn

通信作者: 栾崇彪, luanchongbiao@163.com

雷电电磁脉冲的模拟包括雷电压模拟、雷电流模拟、脉冲电磁场模拟等, GJB 1389A-2005 中给出了直接效应和间接效应雷电流的波形参数和特征, 包括单次放电的电流分量 A、B、C、D、E 以及多重冲击和多重脉冲组波形。国内的研究普遍集中在单脉冲雷电模拟装置研制以及基于单脉冲雷电模拟装置的雷电效应试验、防护技术研究等方面^[6-11], 对多重冲击和多重脉冲组的研究起步较晚, 鲜有相关模拟设备研制的报道。本文对一种雷电间接效应多重脉冲组电流产生装置设计进行详细介绍, 该装置建成后, 可为电子、电气设备等开展测试提供技术支持。

1 多重脉冲组波形参数

GJB 1389A-2005 中给出的雷电间接效应多重脉冲组(H波)的要求如图 1 所示。多重脉冲组 H 波是根据空中飞行所获得的数据推导出来的, 主要包括了云内闪电的高频次特性, 也包含了云地闪初期梯级击穿过程中的放电特性, 这些现象也可能在闪电过程中随机出现。

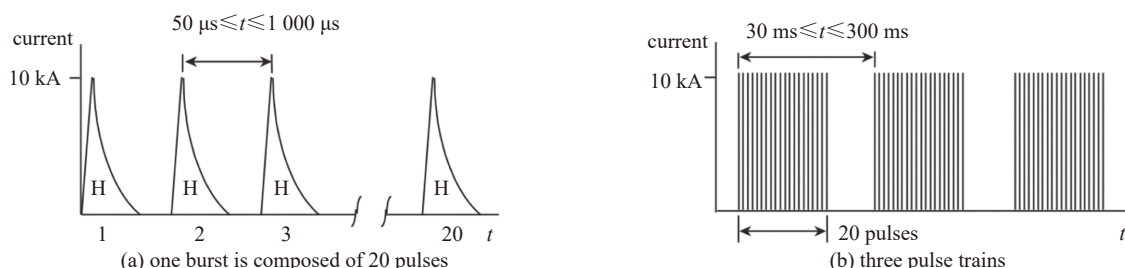


Fig. 1 Multiple pulse group waveforms of lightning indirect effects in the standard

图 1 标准中的雷电间接效应多重脉冲组波形

标准规定的 H 波为双指数波, 即

$$i(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

式中: $i(t)$ 为随时间变化的 H 电流波形, I_0 为 10572 A, α 为 187191 s^{-1} , β 为 19105100 s^{-1} 。式 (1) 的电流脉冲, 其 10%~90% 上升时间约为 100 ns, 0~100% 上升时间约为 240 ns, 峰值约为 10 kA, 半高宽约为 4 μs , 衰减时间常数约为 5.4 μs 。H 波包含 3 个脉冲串, 串之间间隔为 30~300 ms, 每一个脉冲串有 20 个脉冲, 脉冲间隔为 50~1000 μs 。设计中通常要求模拟源峰值、半高宽、上升时间(10%~90% 或者 0~100%) 参数与标准一致, 峰值偏差不超过 $\pm 10\%$, 时间偏差不超过 $\pm 20\%$ 。

2 多重脉冲组试验方法及加载结构电参数分析

GJB 8848-2016 中给出了多重脉冲组试验方法(图 2)。

构建笼形回路导体系统实现测试, 待测试系统(SUT)置于笼形轴心, 雷电流从头部注入, 尾部流出至笼形框架外导体, 形成一个类似同轴传输线的封闭式系统, 以模拟表面均匀的雷电流分布。理论上, 导体系统单位长度电感

$$L_h = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{R}{r} \quad (2)$$

式中: μ 为真空磁导率; R 、 r 分别为外导体半径和 SUT 壳体半径。假设 $R/r=1.5$, 此时由 (1) 式和 (2) 式计算出的单位长度电感为 81 nH/m, 按照 1 m 的总长度设计, 等效电感为 81 nH。

3 放电电路分析

采用撬棒(Crowbar)电路^[12]实现所需的电流波形, 如图 3 所示。其基本原理是: 电容器 C_1 充电到 U_0 , 使开关 U_1 导通, 由 $C_1-U_1-L_1-R_1-R_2-L_2-L_3$ 放电, 形成波头部分; 当放电电流达到峰值时, 此时, 能量转移至电感中, 利用电感中的电流在瞬间不能突变的特点, 此时使撬棒开关 U_2 导通, 由 $U_2-R_2-L_2-L_3$ 放电, 形成波尾部分。

波尾部分的器件仅有电感和电阻, 因此可以很容易计算得到 Crowbar 开关 U_2 闭合后的回路电流。理想情况下, 闭合时回路电流为 I_m , 回路电路方程为

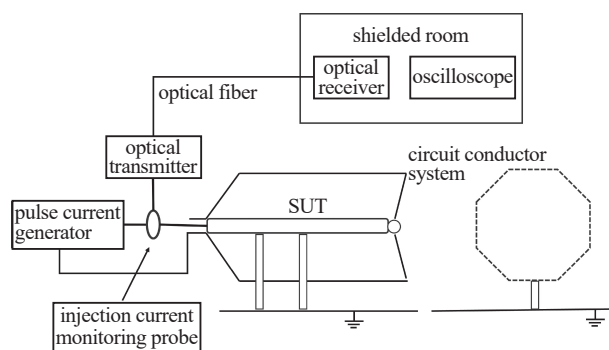


Fig. 2 Method of multi pulse group test

图 2 多重脉冲组试验方法

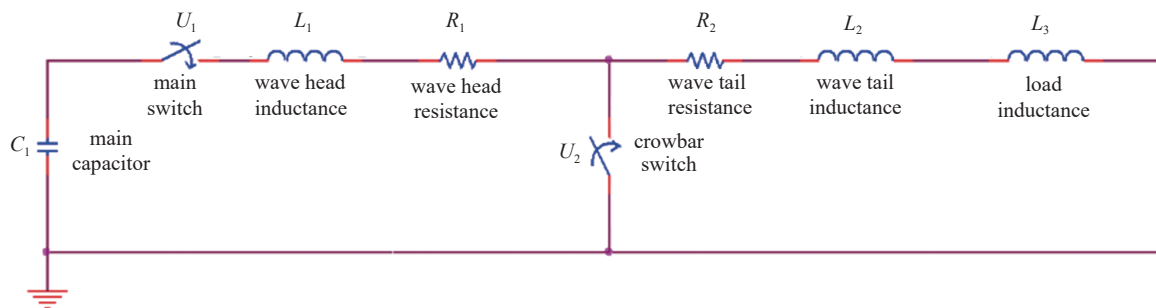


Fig. 3 Schematic diagram of crowbar circuit

图3 撬棒电路示意图

$$R_2 i + (L_2 + L_3) \frac{di}{dt} = 0 \quad (3)$$

$t=0$ 时, $i(0)=I_m$, 求解方程(3), 可以得到

$$i(t) = I_m \exp\left(-\frac{R_2}{L_2 + L_3} t\right) \quad (4)$$

如前文所述, 标准波形波尾部分满足指数衰减规律, 其衰减时间常数为 $5.4 \mu\text{s}$, 式(4)中的电流波形需要满足衰减时间为 $5.4 \mu\text{s}$ 的要求, (4)中指数函数中的系数应为衰减时间的倒数, 因此可以得到

$$\frac{R_2}{L_2 + L_3} \approx \frac{1}{5.4 \mu\text{s}} \approx 1.85 \times 10^5 \text{ s}^{-1} \quad (5)$$

波头部分是典型的 RLC 放电, 显然, 电阻值很小, 因此, 实际上没有办法真正得到与标准完全相同的波头部分。当回路电阻(包括波头电阻和波尾电阻)很小时, 放电产生振荡电流, 假设回路电阻为 0, 可以计算得到其 0~100% 上升时间为

$$T_{0\sim 100\%} \approx 1.57 \sqrt{C_1 (L_1 + L_2 + L_3)} \quad (6)$$

10%~90% 上升时间为

$$T_{10\% \sim 90\%} \approx 1.02 \sqrt{C_1 (L_1 + L_2 + L_3)} \quad (7)$$

峰值电流为

$$I_m = U_0 \sqrt{C_1 / (L_1 + L_2 + L_3)} \quad (8)$$

设计时可以取 Crowbar 电路输出电流 0~100% 上升时间为 240 ns, 也可取输出电流 10%~90% 上升时间为 100 ns, 本文中按后者取值, 此时可以根据(5)、(7)和(8)计算出 Crowbar 电路参数, 并进一步开展电路模拟。

4 多重脉冲组参数设计、模拟及分析

采用 Crowbar 电路实现多重脉冲组电流模拟, 还需要考虑如何实现多脉冲输出。实现多脉冲输出有 3 种方式: 一是采用一个放电电路实现 60 个电流脉冲输出, 这要求放电电路具备时间间隔 $50 \mu\text{s}$ 的重频放电能力; 二是采用 20 个放电单元采用分时放电, 实现 1 个脉冲串放电, 每个放电单元实现 30 ms 时间间隔的重频放电, 实现 3 个脉冲串输出; 三是直接使用 60 个放电单元分时放电。第 1 种方式需要放电使用的高功率开关具备时间间隔 $50 \mu\text{s}$ 的重频放电能力, 可供选择的开关非常有限, 技术难度很大, 第 3 种所需放电单元过多, 不利于实现小型化。因此考虑采用第 2 种方式。

进一步对放电单元参数进行分析。设计输出电流 10%~90% 上升时间为 100 ns, 假设波头电感 L_1 为 $0.15 \mu\text{H}$, 波尾总电感为 $0.35 \mu\text{H}$ (L_2 与 L_3 之和), 通过(5)、(7)和(8)可以计算得到储能电容为 19.2 nF, 工作电压为 51.0 kV, 波尾电阻为 0.065Ω 。计算时忽略了波头电阻, 且未考虑工程实现中通常连接电流源与回路导体系统的高压电缆的参数特性, 为得到更为合理的参数, 需要通过电路模拟对电路参数进行详细设计, 为此, 建立如图 4 所示放电电路进行模拟分析, 通过电路模拟对设计参数进行微调, 形成最终的设计参数, 如表 1 所示(其中: C_0 为单个储能电容; L_5 为短路开关电感; R_s 为短路开关电阻; R_x 为波尾电路杂散电阻; T_D 为传输电缆的传输时间; Z_0 为传输电缆的阻抗; t_0 为短路开关的导通时刻。图 5 给出了模拟结果, 输出电流峰值 10.0 kA, 上升沿(10%~90%)105 ns, 半高宽

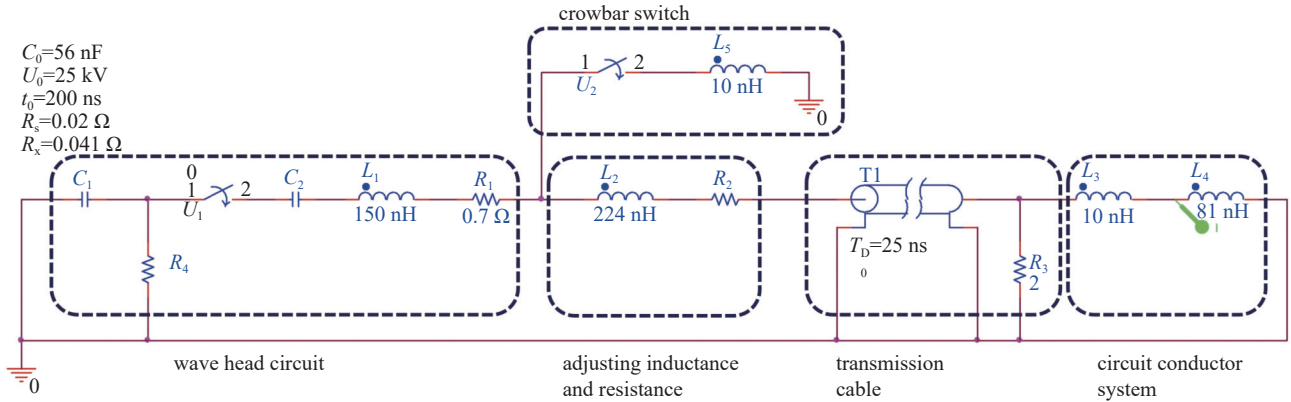


Fig. 4 Single branch analog circuit diagram

图 4 单个支路模拟电路图

表 1 设计参数汇总

Table 1 Summary of design parameters

C_0/nF	U_0/kV	L_1/nH	R_1/Ω	T_D/ns	Z_0/Ω	L_5/nH	L_2/nH	L_3/nH	R_3/Ω	R_x/Ω
56	± 25	150	0.7	25	2	10	224	81	0.02	0.041

3.94 μs , 满足设计要求。

设计参数与实际实现参数可能存在一定偏差, 通过电路模拟分析设计参数偏差的影响。根据第三节对放电电路的分析可知, 波头部分电路是一个欠阻尼 $R-L-C$ 放电电路, 电阻包括波头电阻和波尾电阻, 电感包括波头电感和波尾电感 (包括撬棒开关电感、传输电缆电感、负载电感和其他杂散电感), 电容为储能电容, 波头电路决定了电流上升沿和幅值, 由于电路为欠阻尼电路, 回路电容和电感起决定性作用, 而波尾电感通常大于波头电感, 因此储能电容、波尾电感对波头电路输出参数影响较大。波尾部分电路是一个 LC 衰减电路, 波尾电感和波尾电阻均会对波尾衰减时间产生较大影响, 从而显著影响电流半高宽。综合以上分析, 对储能电容、波尾电感和波尾电阻进行分析, 其中储能电容偏差取 $\pm 5\%$, 波尾电感偏差取 $\pm 10\%$, 波尾电阻偏差取 $\pm 10\%$ 。模拟结果如表 2 所示。从表 2 可以看出, 电容偏差 $\pm 5\%$ 时, 输出峰值偏差约 $\pm 2\%$, 上升沿偏差约 $\pm 2\%$, 半高宽几乎不变, 根据公式 (6) 和 (7), 可以认为输出峰值和上升沿基本上与电容的平方根成正比, 与模拟结果基本一致; 波尾电感偏差 $\pm 10\%$ 时, 输出峰值偏差约 $\pm 3\%$, 上升沿偏差约 $\pm 5\%$, 半高宽偏差约 $\pm 10\%$, 从公式 (4)、(6) 和 (7) 来看, 忽略其他电感, 输出峰值和上升沿与波尾电感的平方根成正比, 半高宽与波尾电感成正比, 模拟结果与理论分析基本一致; 波

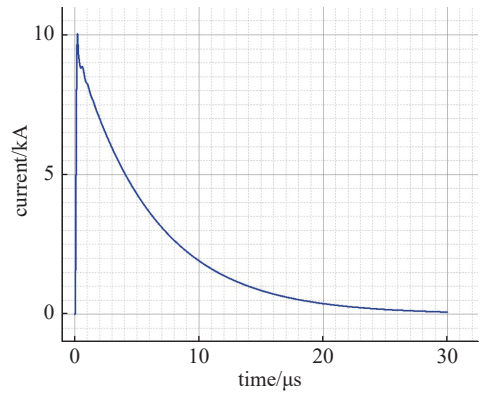


Fig. 5 Single branch analog current

图 5 模拟电流图

表 2 设计参数偏离时的模拟结果对比

Table 2 Comparison of simulation results when design parameters deviate

C_1/nH	inductance of wave tail/nH	$(R_s+R_x)/\text{m}\Omega$	peak current/kA	rising edge (10%~90%)/ns	FWHM/ μs
53.2			9.82	102.5	3.91
56.0			10.02	104.7	3.97
58.8			10.22	106.7	4.01
	337.5		10.34	100.3	3.50
	375.0		10.02	104.7	3.97
	412.5		9.75	108.9	4.43
		0.0549	10.03	104.7	4.40
		0.0610	10.03	104.7	3.97
		0.0671	10.03	104.6	3.62

尾电阻偏差 $\pm 10\%$ 时, 半高宽偏差约 $\pm 10\%$, 从公式(4)来看, 半高宽与波尾电阻成反比, 模拟结果与理论分析基本一致。模拟结果与理论分析结果表现了较好的一致性。

在完成单元分析基础上, 模拟了多个放电单元分时放电的情况, 模拟时放电间隔设置为 $50 \mu\text{s}$, 模拟得到的电流波形如图 6 所示, 20 个脉冲波形一致性较好, 脉冲电流峰值 10.0 kA , 前沿 102.0 ns , 半高宽 $3.9 \mu\text{s}$ 。

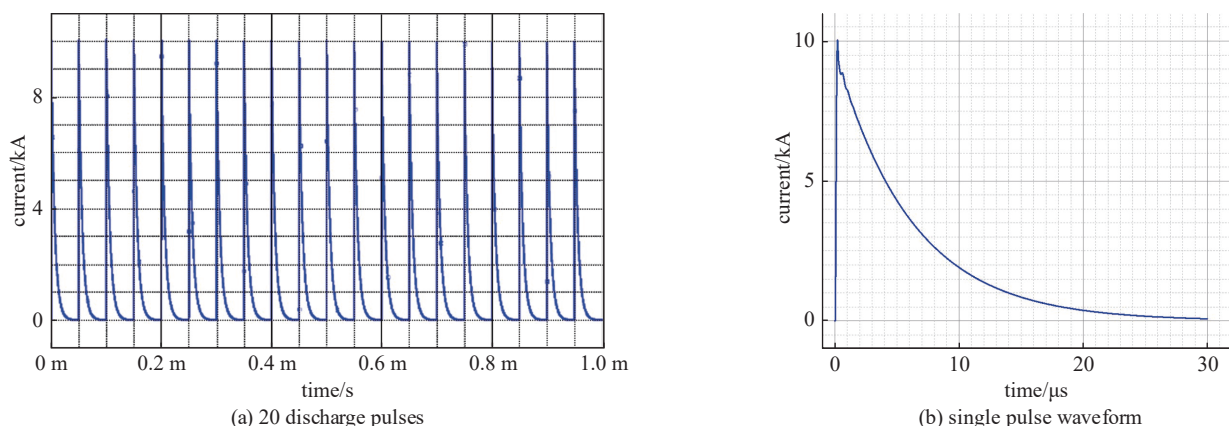


Fig. 6 Simulated waveform of time-sharing discharge output current

图 6 分时放电输出电流模拟波形

5 充电设计

每个放电单元都需要实现 3 脉冲猝发重频工作, 脉冲间充电时间不超过 30 ms , 拟采用与主放电电容并联的储能电容作为中间储能实现多脉冲放电, 储能电容与主放电电容之间采用电阻隔离。再充电过程可以等效为恒压充电过程, 储能电容储能应不低于主放电电容能量的 60 倍(3 脉冲放电总能量与两次再充电过程共消耗 5 倍的能量), 设计电容量为 $3.4 \mu\text{F}$, 额定工作电压 30 kV , 采用金属化膜电容, 预计电容器尺寸(长 \times 宽 \times 高)为 $80 \text{ mm} \times 120 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 。充电电阻的设计考虑再充电时间, 按照不超过 30 ms 的再充电时间, 设计充电时间常数为 7.5 ms , 则可以计算出充电电阻为 $134 \text{ k}\Omega$ 。方案的核心一在于储能电容会带来数百 mA 的电流, 是否会导致气体开关产生续流从而无法关断, 二是再充电过程是否会导致气体开关的再次击穿。为此, 建立了如图 7 所示电路, 分析加入储能电容后的气体开关导通状态和电容再充电时气体开关上的电压波形变化。

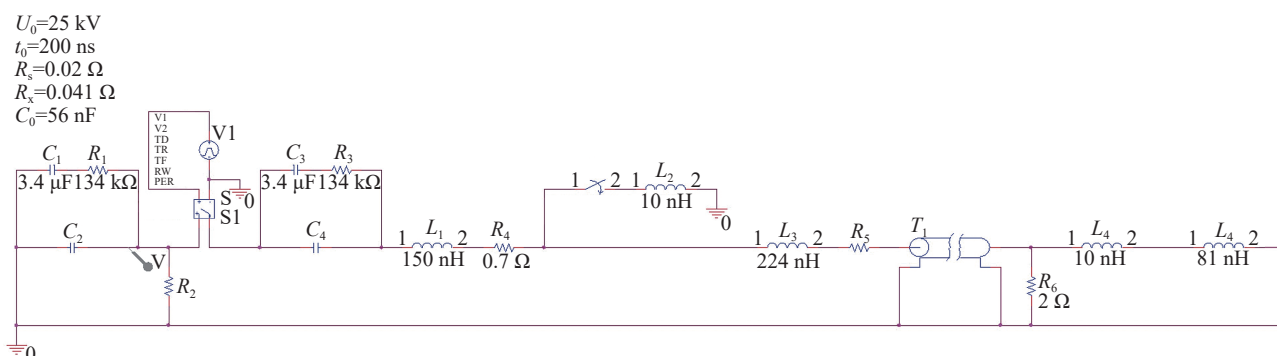


Fig. 7 Recharging process analysis circuit

图 7 再充电过程分析电路图

首先模拟了气体开关不关断时的电流波形, 此处关心的是由于储能电容的加入引起的长时间续流, 理论上峰值续流为充电电压除以充电电阻, 即 0.19 A , 模拟得到的主开关和撬棒开关电流波形如图 8 所示, 主开关和撬棒开关上续流电流分别为 0.186 A 和 0.125 A , 与理论计算吻合。西安交通大学文振明^[13]等研究了续流条件下气体开关的绝缘恢复特性, 研究表明, 电流衰减到某一个值后便会被截断, 对于标准大气压和 0.5 MPa 的干燥空气, 2.5 mm 间隙, 截断时的电流值约为 0.54 A 和 0.22 A 。模拟得到的电流小于 0.22 A , 初步判断主开关可以关断。开关关断后, 进一步分析开关再次加载电压的情况, 假设关断时刻为 0.1 ms , 关断持续时间 0.1 ms , 模拟得到了主开关两端电压波形, 并与文献 [14] 中给出的 0.1 MPa 的 SF_6 气体绝缘恢复曲线对比, 如图 9 所示。充电过程中再充电电压低于绝缘恢复电压, 预计再充电过程不会造成开关再次自击穿。综合以上分析, 该方案具备可行性, 后续将进一步开展

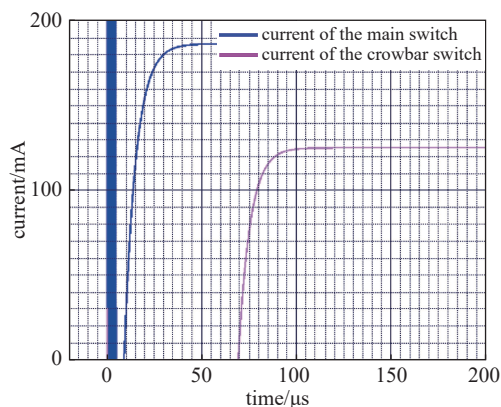


Fig. 8 Switching current waveforms

图8 开关续流电流波形

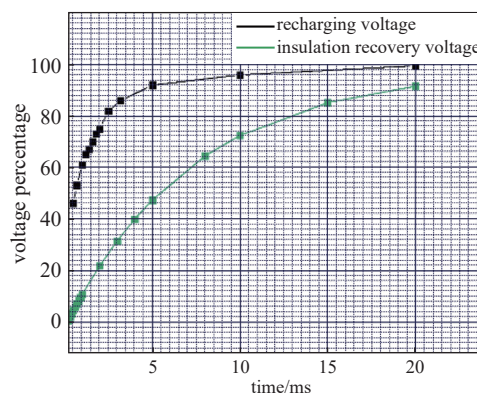


Fig. 9 Recharging voltage and insulation recovery voltage

图9 再充电电压与绝缘恢复电压

实验验证。该方案的优势在于能够大幅简化充电系统,仅使用两台高压电源即可满足重频工作要求。

6 结构设计

装置结构如图10所示,预计单支路尺寸(长×宽×高)约为600 mm×140 mm×350 mm,20个支路并联直径约2 m,高度约600 mm。关键在于如图10所示的结构中结构电感等参数是否超出了电路分析中使用的参数,两个放电电容和开关采用紧凑设计,设计要求电感不超过150 nH,在工程上是可以实现的。波尾电感主要来自于图10中的平板传输部分,电极宽度40 mm,与地电极之间距离10 mm,总长度300 mm,理论计算电感为76 nH,电路模拟中此部分总电感为224 nH,设计裕量充足。

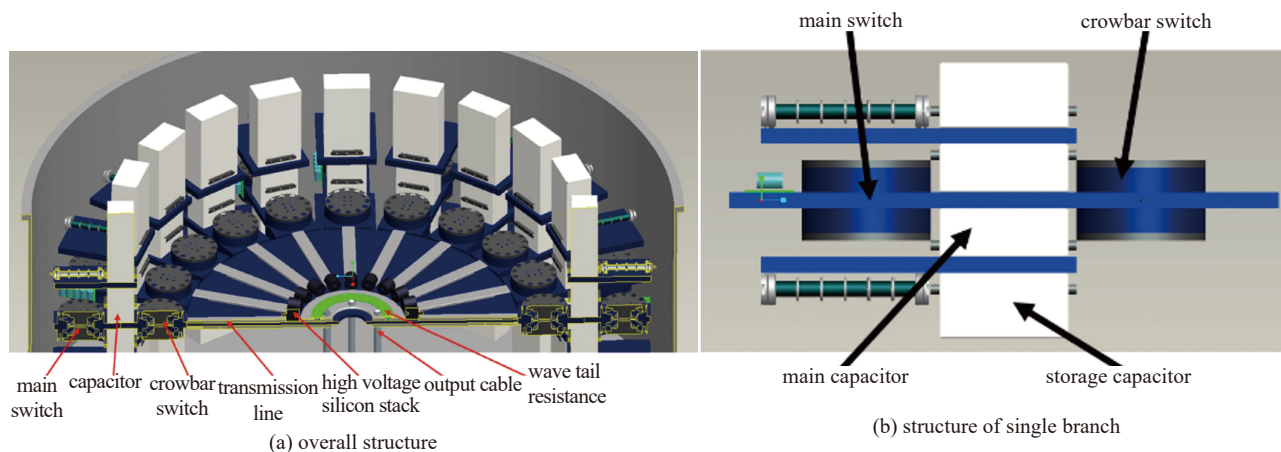


Fig. 10 Schematic diagram of device structure

图10 装置结构示意图

7 结论

本文初步完成了雷电间接效应多重脉冲组模拟源的设计。阐述了Crowbar电路原理,完成了参数的理论计算,进一步通过电路模拟确定了设计参数,在此基础上分析了储能电容、波尾电路电感、波尾电路电阻参数变化对输出特性的影响,储能电容偏差 $\pm 5\%$,波尾电感偏差 $\pm 10\%$,波尾电阻偏差 $\pm 10\%$ 条件下,输出参数均能满足要求。设计了采用并联大电容储能的快速充电方式,理论分析表明该方式可行,采用并联大电容能够大幅简化充电系统,减小系统体积和成本。最后,完成了装置的初步结构设计并简要分析了电路模拟参数设置的合理性。

参考文献:

- [1] 段泽民. 飞机雷电防护概述[J]. 高电压技术, 2017, 43(5): 1393-1399. (Duan Zemin. Review of aircraft lightning protection[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(5): 1393-1399)
- [2] 周萍, 吕英华, 陈志红, 等. 航天系统雷电防护技术发展综述及展望[J]. 宇航学报, 2018, 39(8): 827-837. (Zhou Ping, Lv Yinghua, Chen Zhihong, et al. Review and prospect of lightning protection technology for an astronautic system[J]. Journal of Astronautics, 2018, 39(8): 827-837)
- [3] 郑生全, 王冬冬, 陈亮, 等. 水面舰船雷电电磁脉冲防护设计与试验[C]//第三届全国复杂电磁环境技术及应用学术会议论文集. 2019: CEME-2019-E03.

- (Zheng Shengquan, Wang Dongdong, Chen Liang, et al. Design and test of lightning electromagnetic pulse protection for surface ships[C]//Proceedings of the 3rd National Conference on Complex Electromagnetic Environment Technology and Application. 2019: CEME-2019-E03)
- [4] GJB 1389A-2005, 系统电磁兼容性要求[S]. (GJB 1389A-2005, Electromagnetic compatibility requirements for systems[S])
- [5] GJB 8848-2016, 系统电磁环境效应试验方法[S]. (GJB 8848-2016, Electromagnetic environmental effects test methods for systems[S])
- [6] 黄立洋, 陈晓宁, 郭飞, 等. 直升机雷电间接效应数值仿真[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27: 083205. (Huang Liyang, Chen Xiaoning, Guo Fei, et al. Numerical simulation of lightning indirect effects on helicopter[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 083205)
- [7] 赵京坡, 毛子夏, 董志涛, 等. 航天特种车辆雷电间接效应防护技术研究[J]. *导弹与航天运载技术*, 2019(6): 93-96. (Zhao Jingpo, Mao Zixia, Dong Zhitao, et al. Research on lightning indirect effects protection techniques of aerospace special vehicle[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2019(6): 93-96)
- [8] 张万里, 史云雷, 何勇, 等. 雷电电磁脉冲对典型机载 GPS 模块的损伤效应研究[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 033001. (Zhang Wanli, Shi Yunlei, He Yong, et al. Study on damage effects of lightning electromagnetic pulse on typical airborne GPS module[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 033001)
- [9] 王可, 段艳涛, 石立华, 等. 邻近雷击电场环境模拟装置的设计与实现[J]. *中国舰船研究*, 2019, 14(5): 119-123,158. (Wang Ke, Duan Yantao, Shi Lihua, et al. Design and realization of a nearby lightning-electric field environment simulator[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2019, 14(5): 119-123,158)
- [10] Jiang Anfeng, Fu Zhengcai, Sun Wei, et al. Experimental and analytical investigation of the effects of single and multiple simulated lightning impulse currents on Metal-Oxide arrester blocks[J]. *Electric Power Systems Research*, 2016, 139: 146-152.
- [11] 范丽思, 张希军, 魏光辉. 800kV 雷电电磁脉冲场模拟器的研制[J]. *高电压技术*, 2007, 33(12): 36-38,96. (Fan Lisi, Zhang Xijun, Wei Guanghui. Design of an 800kV LEMP simulator[J]. *High Voltage Engineering*, 2007, 33(12): 36-38,96)
- [12] 姚学玲, 陈景亮, 许雯珺, 等. 用于航空器雷电直接效应测量的 CROWBAR 电路及其波形调整方法: 105119258A[P]. 2015-12-02. (Yao Xueling, Chen Jingliang, Xu Wenjun et al. Cowbar circuit and waveform adjustment method for direct effect measurement of aircraft lightning: 105119258A[P]. 2015-12-02)
- [13] 文振明, 陈立, 任淑一, 等. 基于改进双脉冲法的气体开关间隙绝缘恢复特性[J]. *现代应用物理*, 2022, 13: 030404. (Wen Zhenming, Chen Li, Ren Shuyi, et al. Insulation recovery characteristics of gas switch gap based on improved double-pulse method[J]. *Modern Applied Physics*, 2022, 13: 030404)
- [14] 卢彦雷, 樊亚军, 石磊, 等. 高电压纳秒气体开关绝缘恢复特性的实验研究[J]. *高电压技术*, 2015, 41(6): 1852-1856. (Lu Yanlei, Fan Yajun, Shi Lei, et al. Experiment research of high voltage nanosecond gas switch's insulation recovery[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(6): 1852-1856)