

正负 10~300kV 可调的直升机空中补给静电放电模拟源

孙凤举¹, 曾江涛¹, 邱爱慈¹, 封青梅², 盖同阳¹, 郭建明¹, 黄建军¹, 尹佳辉¹

(1. 西北核技术研究所, 西安 710024; 2. 中国兵器工业第二一三研究所)

Static Discharge Pulsed Simulator with Positive or Negative Voltage from 10 to 300kV

SUN Feng-ju¹, ZENG Jiang-tao¹, QIU Ai-ci¹, FENG Qing-mei², GAI Tong-yang¹, GUO Jian-ming¹

YIN Jia-hui¹, HUANG Jiang-jun¹

(1. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, P.O. Box 69-10;

2. The 23-th Institute of China Weapon Industry)

Abstract: The requirements of the static discharge simulator for the helicopter replenishment in air in the military standard MIL-STD-331 is presented simply. According to the above requirements, the static Electricity Discharge Pulsed Source (SEDPS) with positive or negative polarity and voltage amplitude from 25 to 300kV is developed. The novel property of the SEDPS is that the operation of the high-voltage closing switch of SEDPS of the voltage amplitude from 25 to 300kV is realized by controlling the movement of the electrode of the high voltage switch with PLC elements and solids-state relays control. The configuration, simulating results and typical experimental waveforms on various sorts of loads of inductive, capacitive and 100 ohms cases are presented in the paper.

Key words: electrical explode device (EED); static electricity discharge (SED); pulsed source; military standard; helicopter replenishment

摘 要: 介绍了美军标 MIL-STD-331 对武器装备电爆装置 (EED) 直升机空中补给静电放电试验标准及对静电放电脉冲源的要求, 研制了一台正负 10~300kV 连续可调, 满足标准要求的静电放电 (SED) 脉冲源, 给出了源的结构、工作过程, 模拟计算了静电放电脉冲源连接标准校准电阻、电感性和电容性试品上的电压波形, 模拟与实验结果一致。

关键词: 电爆装置 (EED); 静电放电 (SED); 脉冲源; 试验标准; 空中补给

1 引言

许多现代武器都装有电爆装置 (EED), 它们用来产生各种各样的功能, 如发动机的点火、引信和战斗部的起爆、动力药筒及引信的启动、军需品的抛撒等。不少引信都装有电子元器件, 如晶体管、集成电路, 以及与定时、解除保险或点火功能有关的一些固态装置。在整个后勤期间, 武器要经受各

种操作, 如装箱、卸装、包封在防火塑料中、去掉隔离袋、装配和运输等, 这些过程可能导致人、传输设备、装运容器、弹药或其他任何未接地的物体产生静电。操作人员的着装, 如果是合成纤维制成的则尤为危险。用于空中垂直补给的直升机也能积累足够高的静电, 这些静电可能通过操作人员或相关设备与弹药间的接触, 对装有 EED 的引信放电、或者在电子线路内放电。如果静电足够大, 以致所散射的能量超过 EED 的发火阈值, 就会使 EED 发生意外起爆, 导致严重危害或使武器瞎火。如果由于过电压使电子元器件过载, 就可能造成元器件的参数变化或失效, 这对诸如信号处理、定时、解除保险和发火等功能的完成是极为不利的。因此, 美国在 1992 年颁布的军标 MIL-STD-331 中规定了武器装备抗各种强电磁干扰的要求, 其中规定了静电放电的试验标准^[1]。我国也即将采用该项标准。但是, 目前在我国, 符合上述标准要求, 适用于模拟直升机空中补给的正负 300kV 静电放电脉冲源还是空白, 迫切需要这种静电放电脉冲源, 因此, 我们研制了一台模拟直升机空中补给静电放电的脉冲源, 其设计思想也可用于其它种类静电放电电源的设计, 或用于火箭推进剂、炸药等静电放电效应研究, 以及用于卫星用电子设备和电子器件静电放电效应及加固技术研究等^[2,3,4]。

2 美军标 MIL-STD-331 对静电放电脉冲源的要求

2.1 静电环境

美军标 MIL-STD-331 规定的静电放电试验主要有两种, 人体静电和直升机空中补给静电。影响静电危害的人体生理特性有很宽的范围, 危害还取

决于人的着装和环境空气湿度，在大多数情况下，危害的上限可用一个充电到 25kV 的低损耗低电感 500pF 电容器通过一电阻放电来表示，放电回路总电感不大于 5 μ H；直升机静电带电是由于发动机产生的离子发射和机翼上摩擦电荷的分离引起，其特性范围很宽，但典型的上限值可用充电到 300kV 的 1000pF 的电容器表示。

2.2 对直升机空中补给静电放电脉冲源的要求

美军标推荐的静电放电脉冲源的电路如图 1，要求：1) 在电容器 C 充电期间，试验产品与充电电路隔离；在电容器 C 对试验产品放电期间，充电电源与放电电路隔离；2) 电容器能够充相对于地为正或负电压，幅值 50~300kV 可调；3) 静电放电等效电路参数要求如表 1，工作方式为单次，其中校准电阻为无感电阻，阻值 (100 $\pm$ 5%) Ω ，低电感储能电容器容量为 1000pF $\pm$ 10%；4) 高压引出电极表面光滑、平整，电极形状为平板型或球形，以确保高导电性和放电均匀性，应避免电晕，安装替换方便，电极能经受放电电弧冲击；5) 对电极的控制：使试验电极通过预定固定间隙对试验产品放电，或者能使试验电极以对其标定过的速度移向试验产品。如需对试验产品特定点直接放电，或者在无机机械冲击情况下靠电极来保证与试验产品接触时，可以使用导电突出件与试验产品相接，该突出件和试验产品外壳能够经受住放电电弧的冲击。

表 1 静电放电试验参数要求

Tab.1 The requirements to ESD simulator

充电电压 /kV	电容量 /pF	电阻 R / Ω	放电电感 / μ H	校准负载 / Ω
50 $\pm$ 5%	1000	1*	20 最大	100 $\pm$ 5%
100 $\pm$ 5%	1000	1*	20 最大	100 $\pm$ 5%
150 $\pm$ 5%	1000	1*	20 最大	100 $\pm$ 5%
200 $\pm$ 5%	1000	1*	20 最大	100 $\pm$ 5%
250 $\pm$ 5%	1000	1*	20 最大	100 $\pm$ 5%
300 $\pm$ 5%	1000	1*	20 最大	100 $\pm$ 5%

*放电回路总的布线电阻。要求释放到表 1 校准试验负载上的能量应为电容器储能的 80~100%。

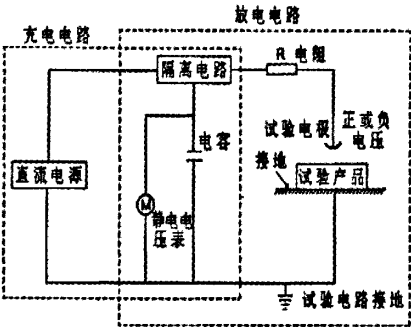


图 1 静电放电脉冲源电路原理图

Fig.1 Schematic circuit of SED simulator

3 直升机空中补给静电放电模拟器

3.1 电路框图和静电放电电源的组成

根据美军标对直升机空中补给静电放电试验要求，采用标准中推荐的电路图 1，具体实现电路示意图如图 2。

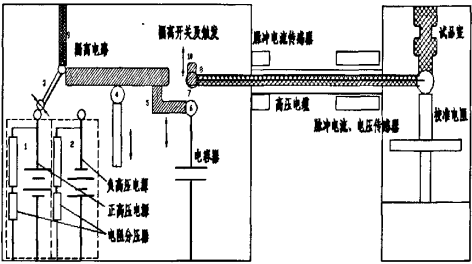


图 2 静电放电脉冲源示意图

Fig.2 Block graph of SED simulator

静电放电测试系统由操作/显示单元、控制/变频电源、 $\pm$ 直流 300kV 高压电源、充电极性转换、隔离电路、储能电容器、300kV 脉冲高压形成单元、高压输出电缆、试品室和脉冲电压/电流测试等部分组成。为了减小 300kV 静电放电脉冲体积和放电时对周围环境的干扰，形成静电放电脉冲的高压部分放置在密封的金属箱内，采用变压器油绝缘，通过一根高压同轴电缆输出到金属试品室，整个系统如图 3。

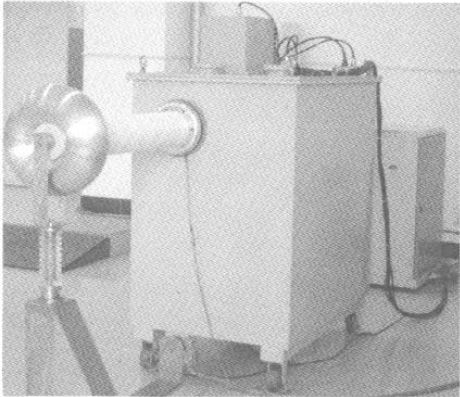


图 3 静电放电模拟器照片

Fig.3 Photo of ESD configuration

3.2 静电放电模拟器放电电路主要参数

3.2.1 储能电容器

按照标准中表 1 要求，研制了 1000pF/300kV 低电感电容器，由于试验时环境温度可能发生变

化，实验研究了其容量随环境温度的变化，实验结果如表 2，当温度在 5~45℃ 范围变化时，电容量有下降趋势，电容量变化小于 1%，满足军标对电容量 1000±10% pF 的要求。

3.2.2 充电电源

可以提供相对于地为正或负、幅值 25—300kV 连续可调的充电电压，电压调节最小步长 5kV，电

源电压不确定度小于 1%，显示表头不确定度小于 1%，电容器上充电电压的不确定度小于 3%。

3.2.3 校准电阻

厂家标称值：100Ω，“无感”电阻，用西北核技术研究所计量站数字多用表，型号 1281，编号 39590，其测量精度小于 1%，测量值为 100.19Ω，满足表 1 要求。

表 2 电容器电容量随环境温度变化

Tab.2 The capacitance of capacitor varies with temperature

温度	5℃	15℃	25℃	35℃	45℃	平均值	标准偏差	相对偏差
编号	电容量 /pF							%
0303624	1030.5	1028.2	1026	1023.2	1020.6	1025.7	3.926	0.38
0303625	1037.2	1035	1033	1030.7	1028.5	1032.9	3.4318	0.33

3.2.4 放电回路参数

放电回路参数一般通过短路放电，由放电电流波形计算放电回路等效电感、电阻等。电容器充电电压为 100kV 时，典型的短路放电波形如图 4，计算得到回路参数为：电感约 2.7μH，回路电阻约 4Ω（包括布线电阻和放电间隙电阻，主要为放电间隙电阻），电流峰值为 1.8kA，周期为 327ns。电容器充电 150kV，试品室连接 100Ω 校准电阻时的典型波形如图 5，电压脉冲前沿小于 50ns，脉宽(FWHM)约 150ns，峰值电压约 119kV，放电回路总电感小于 4μH（包括回路电感、输出高压电极突出件和 100Ω 校准电阻电感），满足标准要求。

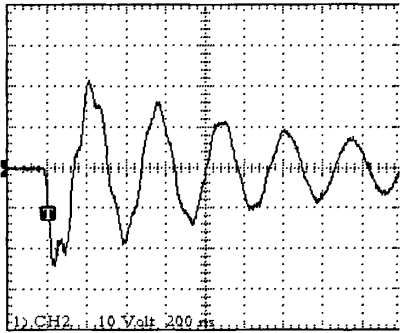


图 4 短路放电电流波形

Fig.4 The waveform of the short circuit discharge

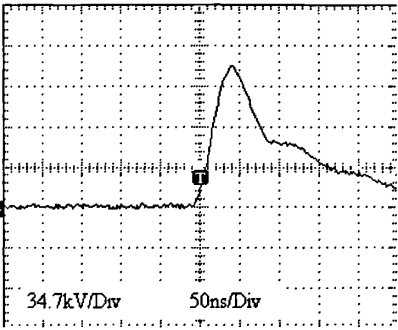


图 5 充电 100kV 连接 100Ω 电压波形

Fig.5 The Voltage waveform of Load at 100kV

4 不同类型负载电路模拟和实验结果

4.1 电路模拟结果

模拟时，电容器容量 1000pF，其它电路参数分别采用试验标准表 1 中的数据和研制系统的等效参数，负载为 100Ω 校准电阻，模拟得到校准电阻上的电压、电流波形如图 6、图 7。

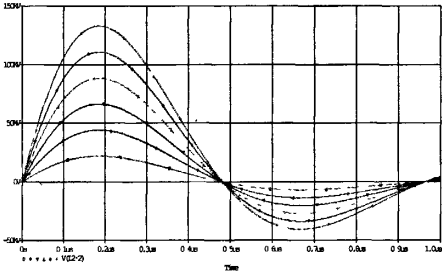


图 6 采用表 1 参数 100Ω 电路模拟结果

Fig.6 Simulating voltage on 100Ω with parameters in Tab.1

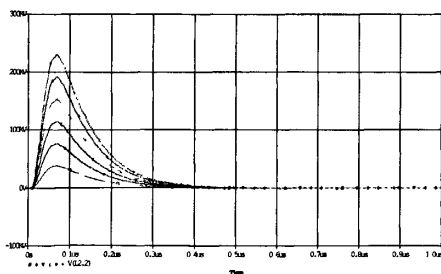


图 7 采用研制系统参数 100Ω 电路模拟结果

Fig.7 Simulating voltage on 100Ω with parameters of developed simulator

采用标准中表 1 电路参数和研制系统的参数 100Ω 校准电阻消耗能量占电容器储能的份额分别为 88.6%、97%。电压波形前沿分别为 180ns、50ns。

4.2 不同负载初步试验结果

负载为容性，充电电压为 50kV（试品为绝缘材料外壳）研制系统放电波形如图 8，电容器充 -300kV 时，负载为 100Ω 校准电阻的波形如图 9，前沿约 50ns，脉宽约 150ns。

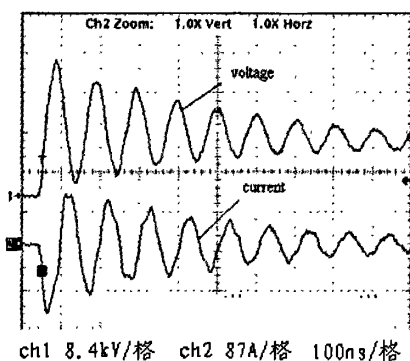


图 8 负载为容性时试验电压波形

Fig.8 Experimental voltage waveform on 100Ω with capacitive load

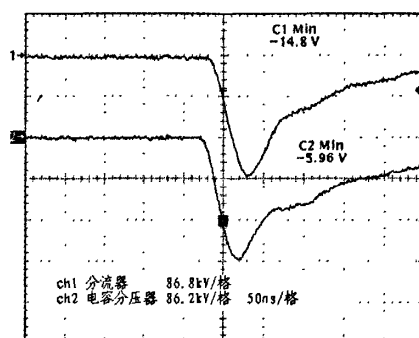


图 9 电容器充电-300kV 连接 100Ω 负载波形

Fig.9 Experimental voltage waveform on 100Ω with negative 300kV charge voltage

结论

根据美军标 MIL-STD-331 对武器装备电爆装置（EED）直升机空中补给静电放电的试验标准要求，研制了一台输出电压幅值 10~300kV 连续可调、极性可正或负直升机空中补给静电放电模拟器，装置功能和主要部件参数完全满足美军标要求。模拟了美军标参数和研制系统参数，输出连接 100Ω 标准校准电阻、电感性 and 电容性试品上的电压波形，模拟结果表明：负载上的电压波形与负载类型密切相关，连接 100Ω 校准电阻，电压波形为阻尼振荡，采用美军标参数和研制系统参数模拟得到的输出波形最大电压幅值分别为 160kV、230kV，前沿分别为 180ns、50ns，脉宽分别约 150ns、350ns，与实验测量结果一致。

参考文献

- [1] P210~218, 美国军标 MIL-STD-331 人体和直升机空中补给静电放电武器装备（EED）试验标准 [S], 1992.
- [2] 李凯, 王立, 秦晓钢. 星用电子设备抗静电放电加固技术研究 [C]. 第七届全国抗辐射电子学与电磁脉冲学术交流会文集, 重庆, 2001, 162~166.
- [3] 蓝增瑞, 金历群. 卫星空间静电效应及其防护 [C]. 第七届全国抗辐射电子学与电磁脉冲学术交流会文集, 重庆, 2001, 149~154.
- [4] 侯民胜, 王书平. 静电放电电磁脉冲模拟装置 [J]. 强激光与粒子束, 2002, 14 (2): 295~298.

正负10~300kV可调的直升机空中补给静电放电模拟源

作者: [孙凤举](#), [曾江涛](#), [邱爱慈](#), [封青梅](#), [盖同阳](#), [郭建明](#), [黄建军](#), [尹佳辉](#)
作者单位: [孙凤举, 曾江涛, 邱爱慈, 盖同阳, 郭建明, 黄建军, 尹佳辉\(西北核技术研究所, 西安, 710024\)](#)
[, 封青梅\(中国兵器工业第二一三研究所\)](#)

本文读者也读过(10条)

1. [薛纯](#), [王耀军](#). [XUE Chun, WANG Yao-jun](#) 静电放电危害及防护技术研究[期刊论文]-[科技信息](#)2010(31)
2. [盛松林](#), [刘尚合](#), [胡小峰](#) 国外ESD相关电磁场实验研究现状及其进展[期刊论文]-[安全与电磁兼容](#)2003(3)
3. [郭鲜艳](#), [孙跃生](#). [GUO Xian-yan, SUN Yue-sheng](#) 电子产品的防静电应用[期刊论文]-[机械管理开发](#)2010, 25(6)
4. [王菊芬](#), [孟浩龙](#). [WANG Ju-fen, MENG Hao-long](#) 绝缘管道内油流带电引起的静电场计算[期刊论文]-[石油工程建设](#)2009, 35(1)
5. [封青梅](#), [何蔚](#), [赵团](#) 电火工系统300kV静电放电测试研究[期刊论文]-[舰船电子工程](#)2004, 24(z1)
6. [来萍](#), [刘发](#) 静电放电(ESD)评价试验的结果及作用分析[会议论文]-1998
7. [李翔](#), [郭惠君](#). [Li Xiang, Guo Hui-jun](#) 电子仪器生产中静电防护的探索与实践[期刊论文]-[兰州石化职业技术学院学报](#)2008, 8(2)
8. [胡宏伟](#) 油品储运过程中产生静电的分析及措施[期刊论文]-[中国新技术新产品](#)2009(1)
9. [余顺秀](#), [刘林](#) 仓储中静电产生, 危害, 防治措施[期刊论文]-[粮食流通技术](#)2004(6)
10. [阮方鸣](#) 静电放电参数与电极运动速度间的关系及其机理研究[学位论文]2008

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Conference_6264318.aspx