雷电流缩比A波发生器电路设计与研究

雷电间接效应是指当雷电放电时伴随产生强大的脉冲电磁场，在电磁耦合效应下，部分雷电能量传导或辐射到机载电气电子设备上，引起过电压或过电流，对飞机电气电子设备造成损坏或干扰。为了探究雷电间接效应及其防护[1]，根据相关波形标准[2]，设计了一种雷电流发生器电路，该电路可以产生用于雷电间接效应研究的缩比A波[3]，使用Matlab仿真软件通过改变*RLC*回路参数来研究影响波形参数的因素，设计出满足要求的波形发生器电路，最后按照仿真电路搭建了一个实际电路，测试结果显示实测波形与仿真波形相吻合，说明该发生器电路达到设计要求。

段泽民[1,2] 孙晓峰[1] 司晓亮[3] 姚志成[3] 许清涛[3]／1.合肥工业大学电气与自动化工程学院 2.安徽省飞机雷电防护省级实验室 3.合肥航太电物理技术有限公司

段泽民／教授

关键词／Keywords

雷电间接效应 · 电流发生器 · 雷电防护 · 电磁耦合 · Matlab仿真 · RLC回路 ·

0 引言

雷电是一种极其壮观的自然现象，地球上平均每天发生约800万次雷电，因此航行中飞机不可避免地会遭遇雷电环境[4]，而要使一架具有现代化大规模集成电路、数字化设备的飞机出现灾难性故障，仅仅需要百万分之一焦耳的能量，因此伴随雷电而产生的巨大能量使飞行事故时有发生。通常雷电对飞机会产生两种损伤效应：直接效应和间接效应。雷电间接效应是指当飞机遭遇雷击时，伴随雷电流的瞬态过程会产生强大的脉冲电磁场[5]，雷电电磁脉冲对飞行器的安全飞行危害[6]极大，通过电磁耦合作用，会在机载电子电气设备连线上感应出电压或电流，并最终出现在设备端口上，造成设备功能受到干扰或损坏。目前，飞机设计中为了减轻飞机重量和提高机动性等目的而普遍采用复合材料[7-8]代替传统的铝合金材料，这就降低了机体对外部电磁环境的屏蔽效能，使得电子电气系统对电磁环境变得更加敏感和脆弱，遭遇雷击时损失更大[9]。基于飞机与机载系统的发展趋势，提高飞机及机载设备的雷电间接效应防护能力的需求日益迫切。根据SAE ARP5412—2013标准，即飞机雷电环境和相关试验波形规定，选取并设计一种用于雷电间接效应试验的雷电流缩比A波电路，该电路可以产生幅值为10 kA、波前时间6.4 μs、半峰值时间64 μs的雷电流波形。

国防基础科研（JCKY2016205B007），工信部民机科研（690638）。

1 雷电流缩比A波波形

冲击电流发生器的工作原理[10-11]：给电容长时间充电，把电能储存在电容器中，待电容器充电到目标电压，电容器在很短时间对负载放电使负载得到很大的瞬时功率。

本文研究的雷电流缩比A波是一种非振荡的双指数波，其工作在过阻尼状态，大量试验以及观测表明，雷电流波形随时间近似以指数规律上升至幅值，然后又近似以指数规律下降。Bruce和Godle 1941年提出了雷电流波形的双指数波形，雷电流缩比A波是一种单极性非周期的脉冲波形，也可近似为双指数波形，其最大峰值为10 kA；峰值时间T_1=6.4 μs；半峰值时间T_2=69 μs，其数学表达式为

$$i(t)=I_m k(e^{-\alpha t}-e^{-\beta t}) \qquad (1)$$

式中，I_m为雷电流幅值；i为雷电流瞬时值；α为波前系数；β为波尾系数；k为波

形校正系数[12]。

通常对于单极性脉冲的雷电流波形，主要用三个参数来表示，即雷电流的幅值I_m、波前时间T_1及半峰值时间T_2。波前时间是指雷电流从零上升到幅值的时间；半峰值时间是指从零上升到幅值，然后下降到幅值1/2的时间。在实际中由于雷电流在起始和峰值处常常叠加有振荡，因此，通常规定在上升沿取$0.1I_m$和$0.9I_m$两点A和B，连接AB两点并向两边延长，交时间轴于M，交过幅值的水平线于C，则该两点水平距离即为波前时间；再由$0.5I_m$的半幅值水平线交波尾于D点，则M、D两点间水平距离即为半峰值时间，雷电流波形图如图1所示。

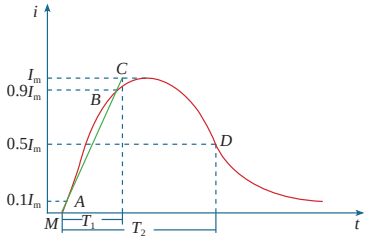

图1　雷电流波形

令

$$I(t)=\frac{i(t)}{I_m}=k(e^{-\alpha t}-e^{-\beta t}) \tag{2}$$

已知雷电流波形的T_1和T_2，根据上式把A、B、C和D四点带入可得以下方程

$$k(e^{-\alpha t_A}-e^{-\beta t_A})=0.1 \tag{3}$$

$$k(e^{-\alpha t_B}-e^{-\beta t_B})=0.9 \tag{4}$$

$$k(e^{-\alpha t_D}-e^{-\beta t_D})=0.5 \tag{5}$$

$$t_A=0.1T_1-t_0 \tag{6}$$

$$t_B=0.9T_1-t_0 \tag{7}$$

$$t_D=T_1-t_0 \tag{8}$$

$$k(e^{-\alpha t_C}-e^{-\beta t_C})=1 \tag{9}$$

式中，t_0为正值，因为峰值最高点C点的斜率为0，可得到方程

$$\alpha e^{-\alpha t_C}-\beta e^{-\beta t_C}=0 \tag{10}$$

联合以上几个方程，可求得不同波形T_1/T_2的α、β和k值如表1所示。

从表1中可以看出，波前系数α远小于波尾系数β，波前时间T_1主要由波尾系数β决定的，而半峰值时间T_2主要由波前系数α决定。由I_m、k、α及β得出缩比A波的数学表达式为

$$i(t)=10\,940.5(e^{-11\,354t}-e^{-647\,265t}) \tag{11}$$

表1　标准波形对应的参数值

T_1/T_2	α	β	k	t_0/μs
6.4/69	11 354	647 265	1.094	0.64
8/20	77 130	248 400	2.32	0.679
10/350	2 125	245 600	1.05	1.943
1.2/50	14 710	2 074 000	1.04	0.241

2　电路参数计算与仿真

2.1　发生器回路参数设计

缩比A波的阻尼系数$\varepsilon=R/2\sqrt{L/C}=3.8$又$I_m^*=I_m/(U_0/\sqrt{L/C})=0.126$，$T_1^*=T_1/\sqrt{LC}=0.55$。

由此可以计算出当电流峰值分别为10 kA、7 kA、5 kA、3 kA和1 kA时回路的R、L和C，如表2所示。

表2　电流发生器回路参数

C/μF	L/μH	R/Ω	U_0/kV
15	9	5.8	61.10
15	9	5.8	42.77
15	9	5.8	30.55
15	9	5.8	18.33
15	9	5.8	6.11

2.2　回路的建模仿真

选取表2中的第一组参数进行仿真[13-14]，其电路原理图如图2所示。

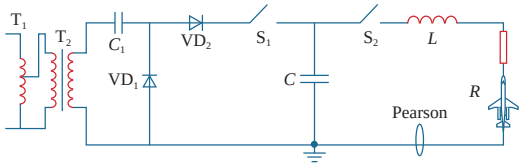

图2　表2第一组参数仿真电路原理图

仿真结果如图3所示。峰值、波前时间及半峰值时间等指标均达到标准要求（误差±10%以内）。

2.3　充电电压对波形的影响

其他参数保持不变，将电容充电电压U_0分别设置为6.11 kV、18.33 kV、30.55 kV、42.77 kV和61.1 kV，其他参数保持不变，仿真结果如图4所示。

仿真结果表明：在其他参数不变时，改变电容充电电压，波形的波前时间和半峰值时间不

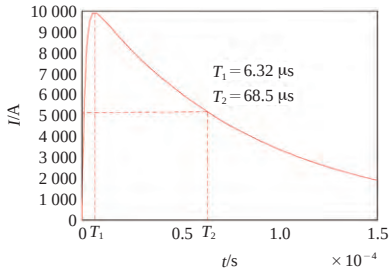

图3 仿真结果图

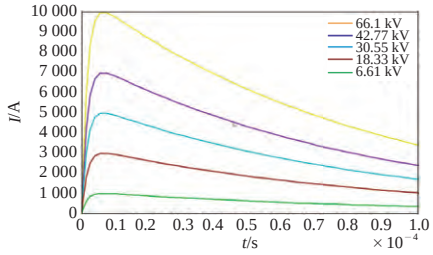

图4 将U_0重置后的仿真结果

变，电流峰值随充电电压的升高线性增加。

2.4 调波电阻对波形的影响

同样保持其他参数不变，将回路电阻R分别设置为5.8 Ω、6.8 Ω、7.8 Ω、8.8 Ω和9.8 Ω，其他参数保持不变，仿真结果如图5所示。

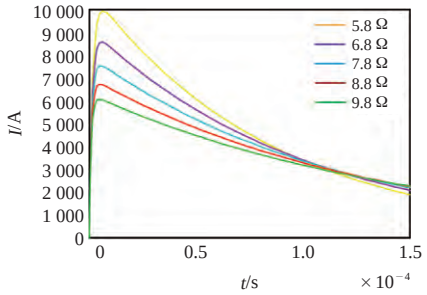

图5 将R重置后的仿真结果

仿真结果表明：在其他参数不变时，电阻主要影响半峰值时间及电流幅值，电阻越大，半峰值时间也越大，电流幅值反而越小，对波前时间几乎无影响。

2.5 调波电感对波形的影响

同样保持其他参数不变，将回路电感L分别设置为9 μH、12 μH、15 μH、18 μH和21 μH，其他参数保持不变，仿真结果如图6所示。

仿真结果表明：在其他参数不变时，电感主要影响波前时间，电感越小波前时间越短，对半峰值时间几乎没有影响。

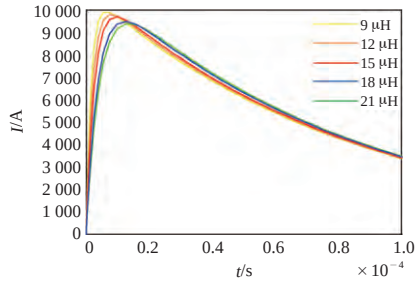

图6 将L重置后的仿真结果

3 发生器充电方式及其控制系统

3.1 充电方式的选择

冲击电流发生器通常采用两种充电方式：恒压充电、恒流充电。恒压充电在充电初始时会产生很大的瞬态电流，需要在回路中加入限流电阻，导致充电速度慢，效率低；与恒压充电相比，恒流充电[15-16]电容器上电压均匀上升，充电较快，此外，由于充电回路没有限流电阻，充电效率大大提高，因此采取恒流充电的方式。恒流充电装置及其控制原理如图7所示。

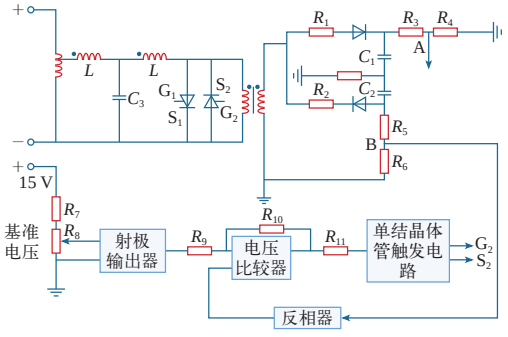

图7 恒流充电装置及其控制

图7为通过晶闸管控制升压变压器一次侧电源的原理接线图。发生器采用两个半波整流方式向主电容C_1和C_2充电。若要使C_1和C_2上的电压达到相等的某个值后停止充电，则可以事先把图7中左下侧所示的低压分压器上的电位调到一个相应的基准电压值。待主电容充电后，由直流分压器的A、B点取得一信号电压，输入该电压到电压比较器，让其与基准电压进行比较。一旦信号电压上升到基准电压值，电压比较器便输出一个电压，该电压可以让单结晶体管的触发电路触发工作，由其发送一触发脉冲去触发晶体管使之导通。图7电路

可使电源在负半波下形成短路。由直流分压器A端输出的信号电压可使另一晶体管导通，此种情况和上述情况基本上相同，只是当基准电压为正时，图中的反相器需改为射极跟随器。

3.2 远程控制系统

发生器控制系统[17-18]采用计算机实现对整个试验装置的自动化控制和操作，主要功能包括：试验波形选择、充电电压及电流数值设定、充放电方式选择、电压和电流数值显示、自动响铃和手动报警以及故障提醒和紧急停止等，整个系统自动化程度高，操作方便，控制系统结构图如图8所示。

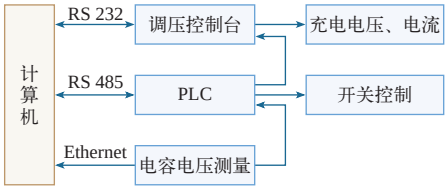

图8 波形发生器控制系统结构图

4 测量系统

由于脉冲电流发生器产生的是高电压、大电流的快脉冲信号，其波形前沿比较陡、上升时间短，要求测量系统具有快速响应的性能，因此对其测量提出了更高的要求。

4.1 电压测量

脉冲电流发生器充电电压幅值高达几十甚至上百千伏，远远大于示波器通道所能承受的电压，因此为了安全，需要用一种分压装置分压后才能进行测量；常用来测量脉冲电压的有电阻分压器、电容分压器及阻容分压器，由于电容式分压器[19]相比于电阻分压器输入阻抗大，对被测电路的影响较小，因此选择电容式分压器测量电容两端电压，其原理图如图9所示，设分压比为k则

$$k=\frac{U_1}{U_S}=\frac{C_1+C_2}{C_1}\approx\frac{C_2}{C_1}(C_2>>C_1) \qquad (12)$$

4.2 脉冲电流测量

由于示波器和探头的耐压有限，在测量大幅值脉冲电流时不能直接使用示波器进行测量，此外，高电压干扰等也会对测量产生一定的误差，

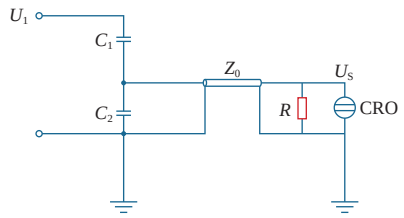

图9 分压器原理图

所以在测量冲击电流时有必要把高压端与示波器隔离起来，把大电流信号转换为小电压信号进行测量。脉冲电流技术中用来测量冲击电流的装置主要有电流互感器、分流器和Rogowski线圈。由于暂态和脉冲大电流的电流变化率极高，用电流互感器[20-21]测量，其磁路容易出现饱和，使得输出不能很好地反映输入信号；电阻式分流器[19]在测量暂态大电流时，在高频下，由于电感分布参数的影响会引起测量波形的畸变，造成测量的准确度不理想，而且还要注意测量回路的接地问题；Rogowski线圈[22-24]是在非铁磁骨架上用铜线绕制而成。同以上两种测量方式相比，采用Rogowski线圈优点：结构简单，测量频带宽，频率范围可以从几千赫兹到几百兆赫兹，幅值测量范围可以从几安培到几百千安培，而且它与被测回路之间没有电的联系以及良好的热稳定性等优点。因此选择Rogowski线圈来测量试验中回路电流，测量系统原理如图10所示。

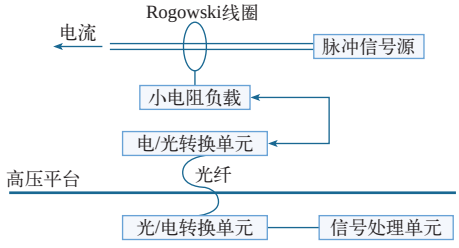

图10 测量系统基本原理

4.3 实测电流波形

经过系统调试和试验测得实测电流波形如图11所示。

5 结束语

雷电流缩比A波发生器主要利用电容器组并联放电产生满足一定幅值、波前和半峰值时间的电

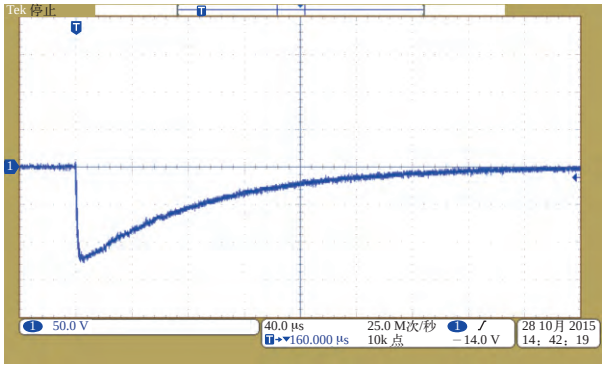

图11 实测波形图

流波形，可用于飞机雷电间接效应试验。本文通过雷电流的双指数模型利用数值方法求取了不同波形T_1/T_2对应的α、β、k和t_0值。采用恒流充电方式对电容进行充电，通过仿真及试验研究了回路各参数对电流波形的影响，试验结果表明，该波形发生器系统工作可靠，各项指标能够达到试验设计要求。

参考文献

[1] 段泽民，司晓亮，孙安宏，等．航空器雷电防护技术 [M]．北京：航空工业出版社，2013．

[2] SAE ARP 5412 REVB—2013 (R) Aircraft lighting environment and related test waveforms [S]．Society of Automotive Engineers，2013．

[3] 段泽民，曹凯峰，等．飞机雷电防护试验与波形 [J]．高电压技术，2000，26 (4)：61-63．

[4] 虞昊，等．现代防雷技术基础 [M]．北京：清华大学出版社，2005．

[5] 田杨萌．雷电电磁脉冲的产生机理 [J]．物理与工程，2006，16 (5)：34-37．

[6] 赵玉龙，刘光斌，余志勇．飞行器LEMP危害及防护研究 [J]．电子设计工程，2012，20 (1)：51，85-87．

[7] 张继奎，张江，等．复合材料层合板雷击损伤数值模拟研究 [J]．高科技纤维与应用，2014，39 (1)：36-39．

[8] 赵金龙，陈晓宁，等．玻璃纤维复合材料雷击破损仿真与试验 [J]．玻璃钢/复合材料，2015 (1)：42-47．

[9] SAE ARP 5416—2013 Aircraft Lighting Test Method [S]．Society of Automotive Engineers，2013．

[10] 韩旻，邹晓兵，张贵新．脉冲功率技术基础 [M]．北京：清华大学出版社，2010．

[11] 陈景亮，姚学龄，孙伟．脉冲电流技术 [M]．西安：西安交通大学出版社，2008．

[12] Gulyas A，Szedenik N．3D simulation of the lighting path using a mixed physical-probabilistic model－the open source lighting model [J]．Journal of Electrostatics，2009，67 (2)：518-523

[13] 陈景亮，姚学玲，袁梅珍．冲击电流发生器回路参数的仿真计算 [J]．电磁避雷器，2003 (4)：40-44．

[14] 田树军，王巨丰，何振东．基于Matlab语言的冲击电流发生器的仿真 [J]．广西电力，2005，28 (2)：56-58．

[15] 尚雷，王相綦，裴元吉，等．新型软开关高压脉冲电容恒流充电方法分析 [J]．强激光与粒子束，2001，13 (2)：241-244．

[16] 刘黎，危立辉．开环PWM控制储能电容恒流充电方法 [J]．现代科学仪器，2010，12 (6)：40-43．

[17] 邵奎．基于RS 485的分布式多总线通信系统设计 [D]．南京：南京理工大学，2013．

[18] 于海生．计算机控制技术 [M]．北京：机械工业出版社，2010：55-56．

[19] 刘金亮，怀武龙，霍哲，等．一种测量脉冲高电压的电容分压器 [J]．强激光与粒子束，2000，12 (1)：122-124．

[20] 邱瑞，周长庚，罗勇，等．高压平台上脉冲电流测量 [J]．现代电子技术，2012，35 (9)：122-124．

[21] 张仁豫，陈昌渔，王昌长．高电压试验技术 [M]．北京：清华大学大学出版社，2009．

[22] 邹积岩，段雄英，张铁．罗柯夫斯基线圈测量电流的仿真与实验研究 [J]．电工技术学报，2001，16 (1)：81-84．

[23] 李红梅，邱景辉，林澍．脉冲电流测量线圈的理论分析与试验研究 [J]．电子测量与仪器学报，2004，18 (增刊2)：703-707．

[24] 李东，董非，赵故，等．基于线圈倾斜方法的永磁同步直线电机推力波动抑制研究 [J]．电气工程学报，2015，10 (8)：45-49．

（收稿日期：2017－01－06）EA