

基于飞机油箱口结构的射频放电等效电路仿真模型

符新凯¹, 戴飞^{1*}, 胡瑞韬¹

¹电子信息工程学院, 北京航空航天大学, 北京

摘要

在电磁兼容领域中,除了电磁干扰还会存在毁灭性的电磁辐射危害。其中电磁辐射对燃油危害的研究关键在于掌握射频放电的击穿特性,为研究不同频率的击穿特性,本文基于电磁场和电路理论,以飞机油箱口结构为例构建了氩气射频放电前后的等效电路模型,并简要分析了射频放电规律。根据电磁场和电路理论,飞机油箱口放电结构等效为圆柱型交流电容,等效电路的并联电阻阻值随气体的导电性能变化而变化,能有效表征气体击穿电离程度的高低。仿真研究表明,相同激励电压条件下,频率越高,气体越容易击穿,等效并联电阻阻值越低。气体击穿电离程度随频率升高存在不连续放电、连续稳定放电、积累效应和雪崩效应四种不同的放电规律。

引言

- 失去控制和防范的过度电磁能量,不仅会导致电磁干扰,更会对一些特定目标产生毁灭性影响,一般称之为电磁辐射危害。美军标MIL-STD-464C[1]中已经明确提出电磁辐射危害的三种电磁辐射危害,电磁辐射对人体危害(Hazards of electromagnetic radiation to personnel, HERP)、电磁辐射对燃油危害(Hazards of electromagnetic radiation to fuel, HERF)、电磁辐射对军械危害(Hazards of electromagnetic radiation to ordnance, HERO)。但相对其他两种电磁辐射危害,人们尚未能深入把握电磁辐射对燃油危害的作用机理。美国研究团队于上个世纪60年代给出了一些实验性的结论,但其关键作用机理和参数尚未公开。
- 与业内已经研究较为成熟的静电放电的电荷累积效应相比,射频放电的诱因主要是特定频率在电不连续结构处耦合的电场对气体中带电粒子的作用,其中电场为电磁场领域问题。因此可以采用电磁场理论研究电不连续处电磁耦合规律,通过建立射频放电的等效电路模型研究其放电特性。
- 而根据北京航空航天大学的研究[2],不同频率下的射频放电具有不同的放电周期,电子的运动随放电周期中电场的变化而不同,从而不同频率下放电机理具有完全不同的物理特性。为深入研究射频放电的特征,本文针对中国海军标准的飞机油箱和加油枪结构建立多物理场的射频放电模型,提取模型结构参数和电参数建立未击穿时的等效交流电容模型,提取放电前后的集总电路性能参数验证等效交流电容并建立击穿放电的等效电路模型。

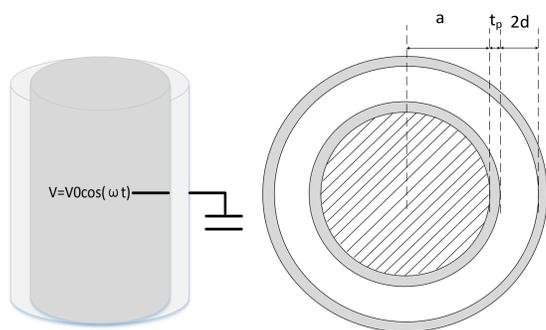


图1 圆柱电极的横截面结构示意图

仿真电磁场理论

- 本文将两块同心的圆柱体介质作为放电两极,圆柱电极长度为150mm,内部电极半径为a,两个电极间距为2mm,内部电极接正弦电压激励,外部电极接地,中间充满氩气。圆柱体横截面结构示意图如图所示。在计算过程中,在圆柱体侧壁的中心馈电,由于圆柱体长度远大于电极距离,所以可以忽略边缘效应,将三维模型简化为一维轴对称模型,大大减小计算量。
- 在圆柱体侧壁中点Z=0处馈电,则由边界条件:
1 Z=0, $\psi = V_0 \cos \omega t$ ($\psi = -\int E_z(z,0) dz$)
2 在 $r=a+tp$, $z=0$, $D_z = \epsilon_0 \epsilon_r E_z = \epsilon_0 \epsilon_r E_z = D_z$
- 求解得到缝隙处的电磁场分布为:
$$E_r = i_z \begin{cases} \frac{A_1}{r} & r \in (a, a+tp) \cup (a+tp+2d, a+2tp+2d) \\ \frac{A_2}{r} & r \in (a+tp, a+tp+2d) \end{cases}$$

其中 $A_1 = \frac{V_0}{\ln \frac{(a+tp)(a+2tp+2d)}{a(a+tp+2d)} + \frac{\epsilon_r}{\epsilon_0} \ln \frac{a+tp+2d}{a+tp}}$
 $A_2 = \frac{\epsilon_r}{\epsilon_0} A_1$
$$H_\theta = i_z \begin{cases} \frac{A_1}{r} & r \in (a, a+tp) \cup (a+tp+2d, a+2tp+2d) \\ \frac{A_2}{r} & r \in (a+tp, a+tp+2d) \end{cases}$$
- 由电场和磁场积分得到终端电压和电流为:
$$v = \left[A_1 \ln \frac{(a+tp)(a+2tp+2d)}{a(a+tp+2d)} \cos(\beta \frac{l}{2}) + A_2 \ln \frac{a+tp+2d}{a+tp} \cos(\beta \frac{l}{2}) \right] \cos \omega t$$

$$i = -\frac{4\pi\epsilon_0}{\eta} \sin(\beta \frac{l}{2}) \sin \omega t$$
- 根据交流电容理论,随着电长度的增加,介质板上会出现引线电感等分布效应。上式中三角函数泰勒展开的不同近似条件可得到不同阶数的等效电路模型,例如一阶近似为电容模型,二阶为电容串联电感模型。
- 本文以一阶近似举例说明。当 $f < 60\text{MHz}$ 时,一阶近似电压电流计算得到电容。

comsol仿真软件的使用

- 本文采用comsol软件的等离子体:直流放电模块进行仿真研究,仿真模型的结构为一维轴对称模型,具体参数参考前文圆柱电容器结构。激励信号为 $V = -600[V] \sin(\omega t)$, 气体间隙为氩气,初始压强为一个大气压,初始温度为400K。

实验结果

- 根据仿真结果,等效电路模型中的电导与激励频率成正比,意味着气体击穿电离度也与激励频率成正比。在相同电压幅值、不同激励频率的大量仿真下,从低频到高频存在5种不同击穿特性。

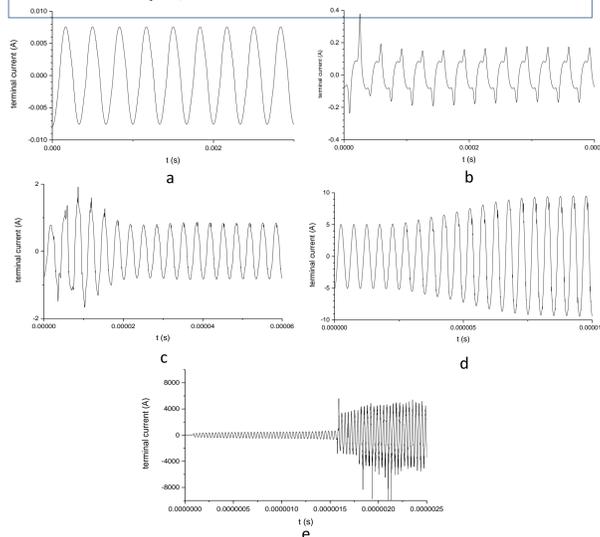


图2 终端电流3kHz(a)、30kHz(b)、300kHz(c)、2MHz(d)、30MHz(e)

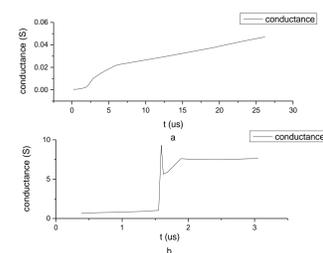


图3 3MHz(a)电子累积效应的电导曲线和30MHz(b)电子雪崩效应的电导曲线

- 1) 1Hz~10 kHz: 仿真的终端电流与前文交流电容的解析值完全一致,即等效电路的电导分量无穷小,气体介质未被击穿。
- 2) 10 kHz~100 kHz: 从每半个周期突变的终端电流曲线可知,此频段的击穿属于周期性离散击穿。从等效电路的电导在每半个周期击穿状态的转变来看,击穿时是一个较小值,未击穿时是无穷小值。
- 3) 100 kHz~1MHz: 在这个频段,碰撞电离产生的等离子体在600V的激励下足够维持连续的击穿状态,此时等效电导逐渐趋于稳定,不再随时间而变化。
- 4) 1MHz~10 MHz: 连续碰撞电离产生的自由电子会在交变电场作用下电离出更多自由电子,形成电子累积效应击穿。从图中的终端电流曲线可以看出,最开始时气体并没有发生击穿,而是随着时间逐渐增加。如图所示的等效电导会随时间逐渐增加。
- 5) 10MHz~60MHz: 由于电子累积效应电子增加到一定程度后量变引起质变,电离出的自由电子会突然大幅增长,导致类似PN结的电子雪崩效应击穿。从等效电导来看,电子雪崩效应击穿时等效电导突增近10倍。

参考文献

- MIL-STD-464C, Electromagnetic environmental effects requirements for systems [S], December 1, 2010, pp.11-17
- Feng Xiaoyao, Dai Fei, Fu Xinkai. A Study on the Mechanism of Hazards of High Intensity Radiated Field to Fuel Based on Multi-Physics Field [A]. 2017 Progress In Electromagnetic Research Symposium in Singapore[C]
- Chen Qiong, Electromagnetic Compatibility Engineering Handbook [M], Beijing, National Defense Industrial Press, 1993.pp.196-200, pp.1255-1256
- HB5942-86, Size Standard for Aircraft Pressure Refueling Joints [S]. Beijing: Ministry of Aerospace Industry, People's Republic of China, 1986
- HB6130-87, Aircraft Pressure Refueling Dimensions Standard [S]. Beijing: Ministry of Civil Aviation of the People's Republic of China, 1987
- Doling Su, Aixin Chen, Electromagnetic fields and waves [M]. Higher Education Press, 2009.pp326-334
- Cn.comsol.com. [Online]. Available: <http://cn.comsol.com/model/dielectric-barrier-discharge-8637>. [Accessed: 20- Jan- 2017].

联系方式

符新凯
电子信息工程学院
北京航空航天大学
地址:北京市海淀区学院路37号E-mail: xinkaifu@foxmail.com
网址: www.buaa.edu.cn
电话: +86-188-1140-9533

致谢

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 61571027, 61427803)。