

飞机燃油箱系统雷电点火源仿真研究

杜鸣心, 段雁超, 朱霖

(西安爱邦雷电与电磁环境实验室, 西安 710077)

摘要: 飞机燃油系统雷电防护是飞机设计中需要考虑的一个重要部分。用实验方法研究成本较高, 且周期长, 数值仿真方法具有明显的优势。本文基于 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件, 建立内部带有液压管和燃油管的燃油箱系统模型。通过仿真考察雷电流在燃油箱上的传导路径, 根据电流分布及电场分布给出成为潜在点火源的位置。进而对比研究了两端是否屏蔽对燃油系统上雷电流物理特性的影响。仿真结果表明: 飞机燃油箱系统遭受雷击时, 成为潜在点火源的位置有卡箍边沿、17 号肋与燃油管和液压管连接处、燃油管和液压管以及桁条上距离 16 号肋和 18 号肋上开孔较近的地方, 这些位置需要进行相应的雷电防护设计。在 16 号肋和 18 号肋两端进行屏蔽处理能有效减少燃油箱系统内部潜在点火源。研究结果对飞机燃油箱系统雷电防护设计具有一定借鉴意义。

关键词: 飞机燃油箱系统, 雷击, 电-热耦合, 仿真, 屏蔽, 点火源

雷电是威胁飞机飞行安全的主要电磁环境之一。相关统计显示, 飞机日飞行时间若达到 7 小时, 每 12 个月就可能被雷击中一次; 飞机日飞行时间若达到 10 小时, 每 10 个月则可能被击中一次[1]。飞机遭雷击后, 除了雷电流的冲击效应、热效应、磁力效应等直接效应会对飞机机体造成严重的物理损伤外, 还可以由流入机身的雷电流产生的电磁场和结构电压升高引起电子电气设备产生误操作、损坏, 甚至引起燃油箱的点燃。1959 年一架 L-1649A 型号的飞机在被闪电击中后, 引起了两个油箱发生爆炸, 导致了一场空难。1976 年一架波音 747 在被雷电击中后坠毁。调查报告显示雷电没有直接击中油箱, 而是在燃油箱通气口产生了由雷电诱发的电火花。因此, 飞机燃油箱系统的雷电防护研究对提高飞机飞行安全具有十分重要的意义。

目前国内外对飞机燃油箱系统雷电效应的研究方法主要有试验和仿真两种。采用试验方法研究成本高、难度大、周期长。而仿真方法耗费小、组织方便、建模灵活性和仿真结果可重复性好, 具有明显的优势。

文献[2]研究了飞机的几种不同通气结构孔附近的燃油空气密度。发现要引起点燃, 雷电需要出现在离通气口边缘很近的地方。而且火焰抑制器安装在通气口处, 可以有效的防止点燃的火焰向内蔓延。文献[3]对油料管道雷电效应防护提出了相应的要求。文献[4]研究了燃油箱中紧固件产生火花的概率。文献[5]分析了雷电对数以千计的紧固件的危害, 而且单独分析了闪电对支撑杆、肋等结构的影响。文献[6]介绍了飞机燃油系统雷电着火机理、雷电防护的主要措施和雷电防护试验, 为国内飞机燃油箱雷电防护设计提供指导。文献[7]通过仿真方法研究了飞机遭遇直接雷击时的舱内外电磁环境。通过全波仿真和“场-线-路”两种方法研究了飞行器闪电电磁环境的线缆

耦合问题。研究了雷电通过燃油箱主要外接线缆-油量指示系统(FQIS, Fuel Quantity Indication System)的线缆耦合到油箱内的感应电流大小。

尽管国内外对雷电物理、雷电与飞机之间的相互作用已有大量研究, 但燃油箱系统的雷电直接效应仿真研究却鲜有描述。本文首先基于 COMSOL 有限元仿真软件, 研究了雷电流在燃油箱上的传播特性。进而根据燃油箱上的电流及电场分布, 给出了可能产生火花及热斑点的位置。最后研究了两端屏蔽对燃油系统上雷电流物理特性的影响。

1 仿真设置

SAE ARP 5412A 定义了描述雷电流直接效应的理想化电流波形为 A、B、C、D 四个分量[8], 其中电流 A 分量称为首次回击, 电流峰值可达 200kA, 是影响结构物理损伤的重要分量。电流 A 分量的理论表达式为:

$$I(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$$

其中: $I_0 = 218810 \text{ A}$, $\beta = 11354 \text{ s}^{-1}$, $\alpha = 647265 \text{ s}^{-1}$ 。波形如图 1 所示。

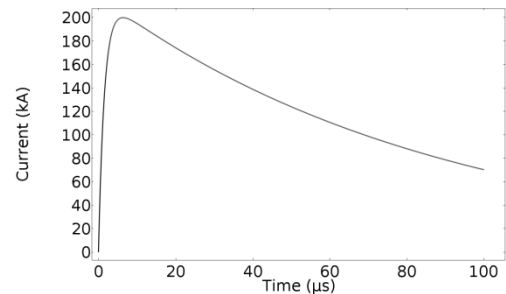


图1 雷电流 A 分量

图 2 给出了燃油箱系统仿真模型。针对该模型, 设计了图 3 所示的两种模型, 其中图 3(a)为 16 号肋和 18 号肋两端屏蔽模型, 图 3(b)为 16 号肋和 18 号肋两端未屏蔽模型。

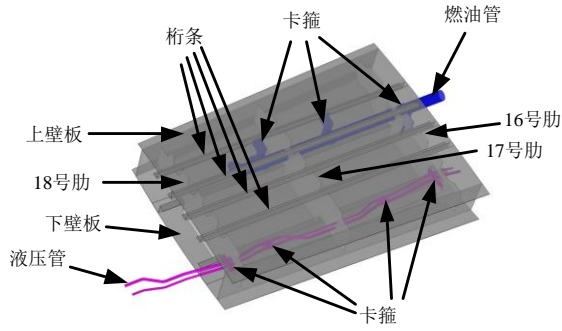


图2 燃油箱系统仿真模型

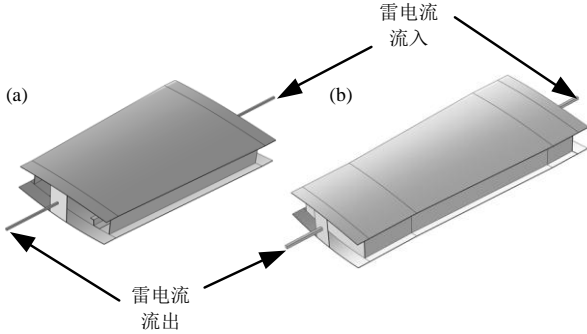


图3 仿真模型设计

(a) 未屏蔽 (b) 屏蔽

本文中雷电仿真方程主要有安培定律和电流守恒定律。

安培定律:

$$\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla(\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \vec{B}) - \sigma \vec{v} \times \vec{B} = \vec{J}_e$$

$$\text{电流守恒定律: } \vec{J} = (\sigma + \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial}{\partial t}) \vec{E} + \vec{J}_e$$

式中, \vec{A} 为磁矢量, \vec{J}_e 为外加电流源, \vec{v} 为导体的速度, 此处为零, 其它为电磁学基本参数。

仿真模型的网格设计使用稳定性较好的自由四面体为基本网格单元。首先对燃油箱内部管路及卡箍等结构进行细致剖分, 刻画出其结构, 进而照一定的增长率向其余结构扩展。网格设计结果如图 4 所示。

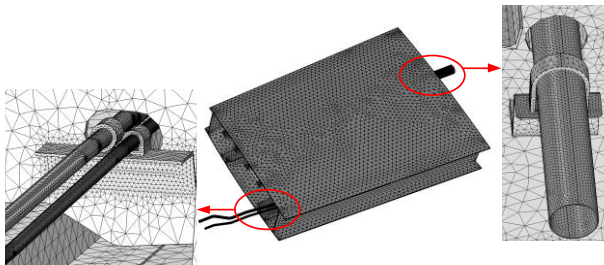


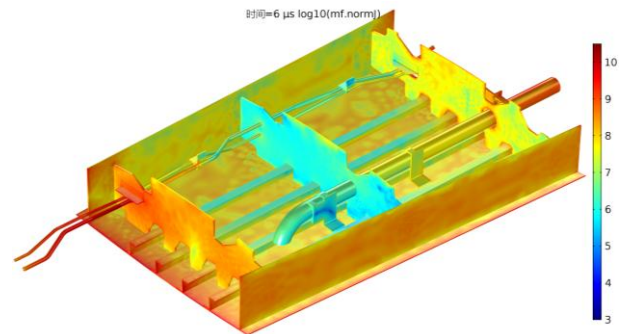
图4 燃油箱系统网格设计结果

2 结果与讨论

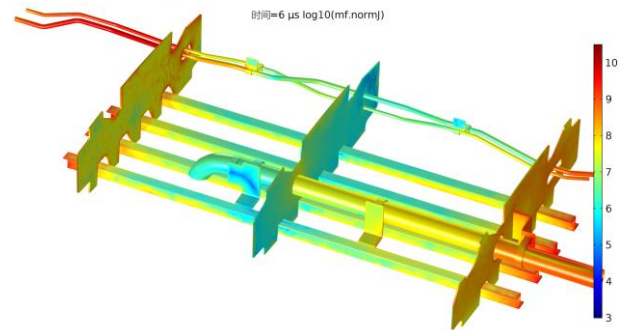
2.1 未屏蔽

图 5 给出了正常模式下油箱系统的电流分布

图, 其中图(a)为燃油箱内部整体电流分布, 图(b)为燃油箱内部管路上电流分布。可以看出电流主要在上下壁板上传播, 且在上下壁板边沿处电流密度较大。整体上电流流入位置附近和流出位置附近电流密度较大。一部分电流从上下壁板传导至 16 号肋, 通过卡箍传导至燃油管和液压管, 同时电流也会通过 17 号肋与上下壁板进行交互。燃油管末端电流密度较小, 这是由于末端并未与油箱其余部分电连接, 电流通过卡箍沿桁条和上下壁板传播。燃油箱内部电流密度最大值量级为 10^8 A/m^2 。油箱内部燃油管和液压管上电流密度较大的地方, 以及卡箍边沿电流密度较大的地方都会成为潜在点火源。



(a) 燃油箱内部整体电流分布



(b) 燃油箱内部管路上电流分布

图5 燃油箱系统电流分布

为了进一步研究油箱内部管路上电流分布规律, 选择图 6 中燃油管和液压管上截面进行积分, 分别绘制出各截面上电流随时间变化曲线, 如图 7 所示。其中图(a)为燃油管上电流曲线, 图(b)为液压管上电流曲线。可以看出无论是燃油管还是液压管, 16 号肋外面的截面上的电流均远大于油箱内部截面上的电流。在燃油管上, 截面 2 上电流大于截面 3 上的电流, 这是由于一部分电流通过卡箍传导至桁条。在液压管上, 截面 5 上的电流大于截面 7 上电流, 且大于截面 6 上的电流, 这是由于一部分电流从 17 号肋传导, 上下壁板上的电流通过卡箍传导至液压管上。

图 8 给出了燃油箱系统的电场分布图。可以看出在电流流入和流出的边沿处电场强度较高,

电场分布受物体结构影响较大，尖角边沿处电场强度较高，最大电场强度处于 $1 \times 10^5 \text{V/m}$ 数量级。油箱 16 号肋、18 号肋上电场强度也较高。油箱的上下壁板、16 号肋及 18 号肋形成了一个金属舱，将油箱内部进行了屏蔽，但是肋上开孔影响了内部电场分布，使得油箱 16 号肋和 18 号肋开孔处电场强度较大，燃油管、液压管及桁条上靠近开孔的地方电场强度也较大。油箱内部燃油管、液压管以及桁条上距离 16 号肋和 18 号肋上开孔较近的地方电场强度较大，卡箍边沿电场强度也较大，这些地方都会成为潜在点火源。

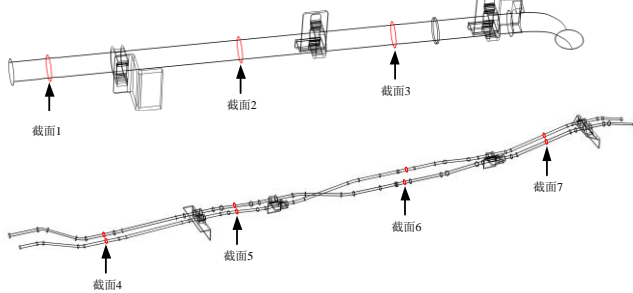
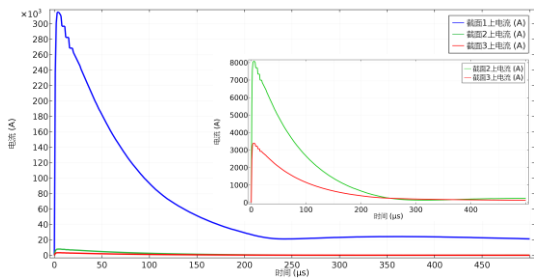
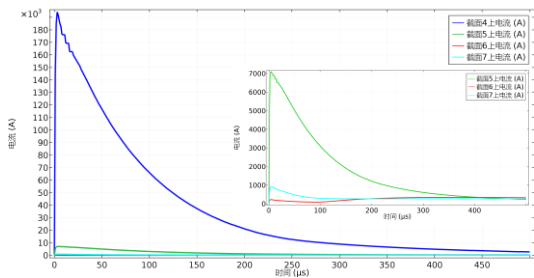


图6 两类管上监测截面位置示意图



(a) 燃油管上电流曲线



(b) 液压管上电流曲线

图7 两类管上不同位置处的电流曲线

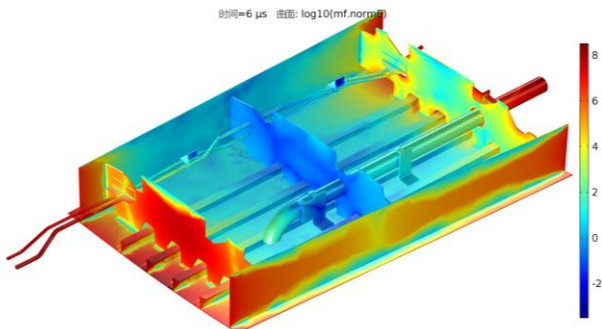


图8 燃油箱系统电场分布

2.2 屏蔽

图 9 给出了燃油箱两端屏蔽时燃油箱系统的电流分布图。可以看出电流主要在上下壁板上传播。燃油箱内部燃油管和液压管上电流密度最大值量级为 10^5A/m^2 ，约为未屏蔽情况下燃油管和液压管上电流密度最大值的千分之一。

图 10 给出了正常模式下燃油箱系统两端屏蔽时的内部电场分布图。可以看出在上下壁板上电场强度较高。油箱上下壁板和四周形成了一个封闭金属舱，将油箱内部进行了屏蔽。液压管尖端感应出 150V/m 的电场强度，液压管和燃油管其余位置处电场强度不大于 10V/m ，远小于未屏蔽状态下的 $1 \times 10^5 \text{V/m}$ 数量级。

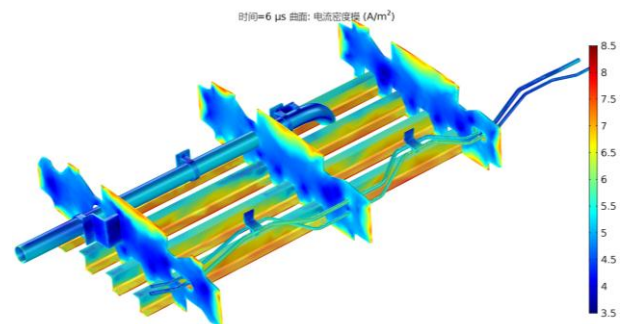


图9 液压管和燃油管上电流分布

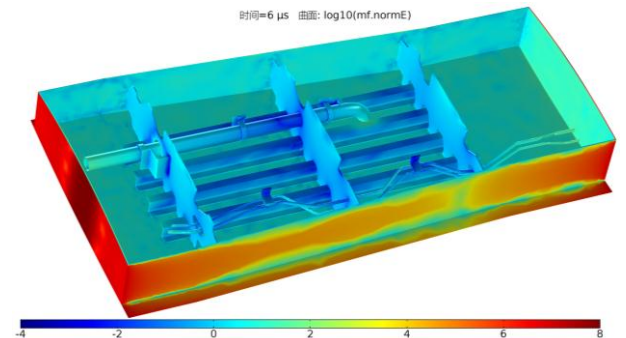


图10 燃油箱内部电场分布

3 结论

本文进行了燃油箱系统未屏蔽状态和屏蔽状态雷击直接效应仿真，得到结论如下：

1) 油箱内部管路中的卡箍会影响电流传播路径，但对电场分布影响不大，16 号肋和 18 号肋上的孔缝对油箱内电场分布影响较大。

2) 雷电流主要沿燃油箱上下壁板传播，燃油箱两端不屏蔽时燃油管和液压管上电流较大；燃油箱两端屏蔽后，非常少量电流传导至肋上，燃油管和液压管上传导电流和感应电流都非常小。

3) 燃油箱两端不屏蔽时，16 号肋和 18 号肋附近开孔处电场强度较大，燃油管、液压管及桁条上靠近开孔的地方电场强度也较大。燃油箱

两端屏蔽后其上下壁板和四周形成了一个封闭金属舱，将内部进行了屏蔽，内部电场较小。

4) 油箱内部燃油管和液压管上电流密度较大的地方，卡箍边沿电流密度较大的地方，以及17号肋与燃油管和液压管连接处电流密度较大的地方，都会成为潜在点火源。油箱内部燃油管、液压管以及桁条上距离16号肋和18号肋上开孔较近的地方电场强度较大，卡箍边沿电场强度也较大，这些地方也会成为潜在点火源。在16号肋和18号肋两端进行屏蔽处理能有效减少燃油箱系统内部潜在点火源。

参考文献：

- [1] Larsson A. The Interaction Between a Lightning Flash and an Aircraft in Flight[J]. Comptes Rendus Physique, 2002, 3: 1423-1344.
- [2] Gerstein M. Investigation of mechanism of potential aircraft fuel tank vent fires and explosions caused by atmospheric electricity[J]. 1964: 231-236.
- [3] Pontecorvo J A. Protection of Airplane Fuel Systems Against fuel Vapor Ignition Due to Lightning [J]. Federal Aviation Administration, Advisory Circular, 1985: 20-53.
- [4] Tristant F, Fustin F, Simonot D, et al. Fuel Tank Safety-Conditioning Aspect for Sparking Phenomenology on Metallic Assemblies[C].International Conference on Lightning. 2015: 1207-1310.
- [5] Tristant F, Fustin F, Terrade F, et al. Fuel Tank Safety-3D Computations for Attachment and Conduction Assessment[C]. International Conference on Lightning. 2015: 1560-1564.
- [6] 许金龙. 飞机燃油系统的雷电防护[J]. 飞机工程, 2001, 1: 32-37.
- [7] 李连桂. 大型飞机燃油箱闪电间接效应仿真研究[D]. 南京航空航天大学, 硕士学位论文, 2017.
- [8] SAE ARP5412A-2005, Aircraft lightning environment and related test waveform[S]. Washington: American Society of Automotive Engineers, 2005.