

飞机机载线槽结构对电磁防护性能的影响研究^{*}庞思宇¹ 钱宇琛¹ 肖海建² 卢翔³ 丁梓航²(1. 中国民航大学航空工程学院 天津 300300; 2. 中国民航大学安全科学与工程学院 天津 300300;
3. 中国民航大学交通科学与工程学院 天津 300300)

摘要: 针对雷击环境下,飞机机载平台内的线束易受到连接设备及外部辐射源的复杂电磁干扰问题,考虑线槽不同结构对线槽防护性能的影响,基于三同轴法,结合 Van Helvoort 形状系数,推导出线槽转移阻抗从低频到高频状态下的理论表达式。进而建立含不同高宽比线槽防护仿真模型,研究不同形状、尺寸的线槽防护性能。最后建立复合材料机身内线槽的雷击电磁防护仿真模型,分析机身不同位置、不同形状线槽的防护作用,进一步验证了不同结构线槽防护性能的差异性。结果表明:高宽比每增加 1/2,线槽屏蔽效能约增加 5 dB,且有效保护区域逐渐扩大;随着与机身蒙皮间距增大,机身内部线缆感应电流线性减小;线槽密封性与防护性能成正比。

关键词: 飞机机载线槽结构;转移阻抗;电磁防护;场线耦合;等效模型

中图分类号: V242 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1010

Research on the influence of aircraft airborne trunking structure on electromagnetic protection performance

Pang Siyu¹ Qian Yuchen¹ Xiao Haijian² Lu Xiang³ Ding Zihang²(1. College of Aerospace Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2. College of Safety Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
3. College of Transportation Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: In response to the complex electromagnetic interference problem of connecting equipment and external radiation sources in the wiring harness of aircraft airborne platforms under lightning strike environment, considering the impact of different structures of the wiring duct on the protective performance of the wiring duct, based on the three axis method and combined with the Van Helvoort shape coefficient, a theoretical expression for the transfer impedance of the wiring duct from low frequency to high frequency state is derived. Furthermore, a simulation model for the protection of wire ducts with different aspect ratios is established to study the protection performance of wire ducts with different shapes and sizes. Finally, a lightning electromagnetic protection simulation model was established for the internal trunking of the composite material fuselage, analyzing the protective effects of different positions and shapes of trunking on the fuselage, and further verifying the differences in the protective performance of different structural trunking. The results show that for every 1/2 increase in aspect ratio, the shielding effectiveness of the trunking increases by about 5 dB, and the effective protection area gradually expands. As the distance between the body and the skin increases, the induced current of the cables inside the body decreases linearly. The sealing performance of the trunking is directly proportional to its protective performance.

Keywords: aircraft airborne trunking structure; impedance transfer; electromagnetic shielding; field line coupling; equivalent mode

0 引言

当复合材料飞机受到雷击后,内部的电子电气线路上

会出现感应电压和磁场变化,对航空线缆产生干扰和破坏^[1]。许多空难事故和飞机故障都直接或间接由电缆系统故障引发,统计表明某型民机非例行排故工作中有 10%与

线缆故障有关,例如该型飞机曾出现由于刹车控制阀线路电磁屏蔽性能不好引发的刹车系统降级事件。

由于飞机自身的结构特点导致其内部大型设备和电气装置布局非常紧密,机舱内的线缆敷设空间和路径严重受到限制,当飞机遭遇雷击时可能产生瞬时高压和大电流影响电气线路的电场和磁场。线槽通常能为线缆提供良好的电磁防护,然而其会因通风、散热和走线需求,开设不同形状、不同尺寸的孔隙,从而为外来电磁辐射直接耦合提供通道,引起线缆的电磁干扰。线槽内部线缆间的耦合干扰,且线槽孔隙也会带来外部电磁干扰,探究机载线槽结构对其内部线缆电磁防护性能对保障民机运营安全具有重要意义。

结合飞机的结构和系统特点,机载线缆的电磁防护措施主要包括线缆金属编织屏蔽层设计和线束敷设设计。国内外学者在金属编织屏蔽层设计方面,多集中于研究屏蔽材料^[2]、编织网结构^[3]、搭接方式^[4-5]对线缆防护性能的影响,现有研究较为成熟。

在线束敷设设计方面,国内外学者多集中于研究线槽材质、结构对线缆防护性能的影响。国际电工委员会和美国电气制造商协会先后发布 IEC 60364-4-44^[6]、NEMA VE 2-2018^[7]等电磁兼容性标准,提供了各种电磁干扰下电气装置的安全防护要求,但是对有关线槽结构屏蔽防护和电缆布局未作具体说明。在材质方面,当前主要研究集中于碳纤维复合材料^[8-9]、金属材料^[10]的防护性能。在结构方面,文献[11]提出了一种基于保角变化的矩量法的转移阻抗精确表达式,并通过对 U 型、I 型以及 L 型等形状的金属线槽进行测量实验,验证了其计算公式的有效性;文献[12]提出了一种基于有限元仿真和偶极矩数值解析的混合方法,用于解决带孔金属外壳内雷电磁脉冲的电磁场分布模拟困难的问题,并通过对比 A320 整机模型在 COMSOL 有限元仿真软件中的计算结果,确定其方法误差低于 10%,计算效率提升了 80%;文献[13]针对介质板拓扑优化中的等效导纳模型的局限性,提出了一种基于双导体传输线方程的屏蔽腔体内置介质板的拓扑模型,用于研究介质板高度、厚度及位置等因素对于腔体屏蔽效能的影响。

综上所述,国内外学者在线缆编织屏蔽层电磁防护技术方面研究较为成熟,但针对不同线槽结构防护效能差异性的研究较少,目前,主要存在以下问题:1)现有的线槽转移阻抗计算方法和公式推导较为复杂,且计算精确度有待提高,应用范围有一定局限性;2)现有文献仅研究了线槽结构高宽比的变化对防护性能的影响,或 U 型、I 型等常见线槽结构防护性能的差异,未结合线槽形状和尺寸方面的防护措施进行综合分析;3)飞机机载线槽内部电磁环境非常复杂,且需要考虑雷击环境对线槽防护性能的影响,现有文献均未涉及。因此有必要深入对不同线槽结构的电磁防护特性进行分析。

本文围绕飞机机载平台内的线槽电磁防护性能进行深

入研究,基于转移阻抗定义表达式,结合线槽形状系数推导线槽转移阻抗在低频和高频状态下的理论表达式;利用 CST 仿真软件,建立含不同高宽比线槽仿真模型,分析物理尺寸、电性能参数以及线缆布局对线槽结构整体屏蔽能力的影响规律;最后通过建立雷击环境下机身内部含不同结构线槽的耦合模型,分析机身不同位置、不同形状线槽的防护作用,进一步验证不同结构线槽防护性能的差异性。

1 线槽转移阻抗的理论分析

在电磁兼容领域,转移阻抗为在屏蔽线缆上注入射频电流时,中心导体上的电压与注入电流的比值^[11]。本文将线槽屏蔽性能用转移阻抗定义,结合 Van Helvoort 形状系数,推导低频和高频条件下的转移阻抗理论表达式。

转移阻抗是屏蔽层内外电磁耦合的度量,其值取决于注入电路和差模电路的三维几何结构。图 1 是共模电流通过线槽耦合到内部区域产生差模电压 v_{dm} ,由式(1)给出:

$$v_{dm} = \frac{\partial \phi}{\partial t} + E_z = \mu_0 \int_S \frac{d\vec{H}}{dt} \cdot d\vec{S} + \int_4^1 \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (1)$$

式中: E_z 是 4-1 间线槽表面电场; $\frac{\partial \phi}{\partial t}$ 是通过回路 1-2-3-4 随时间变化的磁通量; S 是由回路 1-2-3-4 包围的面积; H 是磁场强度; μ_0 是真空的磁导率。

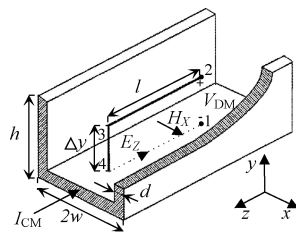


图1 共模电流通过线槽耦合示意图

图1中 d 为结构的厚度, h 为结构的横截面高度, $2w$ 为结构横截面的宽度。由转移阻抗定义可将单位长度 l 的转移阻抗简化为 $V_{DM}(\omega)$ 和 $I_{CM}(\omega)$ 的比值, $V_{DM}(\omega)$ 和 $I_{CM}(\omega)$ 是 v_{dm} 和 i_{cm} 的傅里叶变换,故 Z_t 变为:

$$Z_t = \frac{V_{DM}}{I_{CM}} = \frac{\left[\frac{J_z}{\sigma} + j\omega\mu_0 \int_1^2 H_x dy \right]}{I_{CM}} = \frac{E_z}{I_{CM}} + \frac{j\omega\mu_0 \int_1^2 H_x dy}{I_{CM}} \quad (2)$$

式中: Z_t 是线槽转移阻抗, σ 是接地结构的电导率, J_z 是沿位置 4-1 的接地结构表面的电流密度。上述方程可以改写成阻抗和单位长度互感 M 的和:

$$Z_t = Z_{S,E-field} + j\omega M_{B-field} \quad (3)$$

当低频时(趋肤深度 $\delta = \sqrt{2/\omega\mu_0\sigma} \gg d$), 此时结构中电流密度 J_z 是均匀的, 且 J_z 由通过结构的总电流 I_{CM} 和结构的横截面积决定:

$$J_z(x, y) = \frac{I_{CM}}{2(h+w)d} \quad (4)$$

对于非磁性材料 ($\mu_r = 1$), μ_r 为接地网络结构材料的相对磁导率, 结构内任意点 (x, y) 处的磁场可通过无限多线电流的叠加来确定, 对于一根位于接地结构中心 $(x, y) = (0, 0)$ 上方的单元高度 Δy 处的导线, 可以简化:

$$\int_0^{\Delta y} H_{x,DC}(0, y) dy \approx H_{x,DC}(0, 0) \Delta y \quad (5)$$

$$\Delta y \leq (h + w)/10$$

$$H_{x,DC}(0, 0) = \frac{I_{CM}}{4(h + w)} \left\{ 1 - \frac{1}{\pi} \ln(1 + (h/w)^2) \right\} \quad (6)$$

将式(5)、(6)代入式(3), 低频时转移阻抗变为:

$$Z_i(0, \Delta y) = \frac{1}{2\sigma(h + w)d} + j\omega \frac{\Delta y}{4(h + w)} \left\{ 1 - \frac{1}{\pi} \ln(1 + (h/w)^2) \right\} \quad (7)$$

式(7)右边第 2 项也是导线距结构底部距离 Δy 的函数。对于 $f < f_0$ ($f_0 = 1/\pi\mu_0\sigma d \sqrt{h^2 + w^2}$) 时, 方程式中的第 1 项占主导地位, 第 2 项可忽略不计, 此时传输阻抗等于结构在低频时的直流电阻。随着频率增大, 电流集中在槽结构边缘附近, 在 $f > \mu_r/c(h/w)f_0$ 时中心线上的磁场逐渐减小并趋于稳定。

在高频情况下, 趋肤深度与结构厚度相比较小, 即 $\delta (= \sqrt{2/\omega\mu\sigma}) < d/5$, μ 为导体周围均匀介质的磁导率, 此时频率 $f > 25/\pi\mu_0\mu_r\sigma d^2$ 。电流密度可以用表面电流近似, 位置 (x, y) 的磁场表达式^[14]为:

$$H_x(x, y) = \frac{g(h/w)I_{CM}}{2\pi(h + w)} \cosh\left(\frac{\pi y}{2w}\right) \cos\left(\frac{\pi x}{2w}\right) \quad (8)$$

$$y \leq y_c = h - 0.8w$$

式中: $y=0$ 时位于线槽底部; g 为线槽的形状因子, 由已知线槽中某一点的磁场推导可得, 图 2 为 Van Helvoort 列出的不同高宽比的形状因子 $c(h/w)$ 和 $g(h/w)$ 的值。

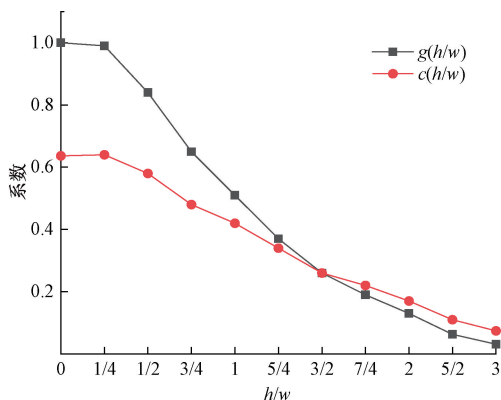


图 2 高宽比与形状系数的关系

将式(8)代入转移阻抗方程, 可得高频状态下转移阻抗近似值:

$$Z_i(x, y) = \frac{g(h/w) \cos\left(\frac{\pi x}{2w}\right) \left\{ j\omega\mu_0 \frac{2w}{\pi} \sinh\left(\frac{\pi y}{2w}\right) \right\}}{2\pi(h + w)} \quad (9)$$

当测量导线放置于结构的正上方时, 转移阻抗简化为:

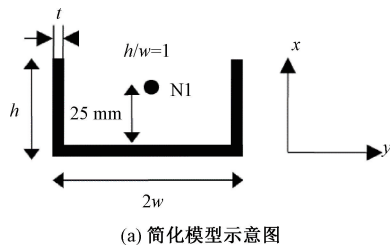
$$Z_i(\Delta y) = j\omega\mu_0 \frac{g(h/w)\Delta y}{2\pi(h + w)} \quad (10)$$

2 线槽不同结构防护性能分析

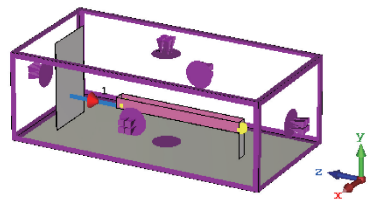
2.1 模型的建立与验证

为了分析物理尺寸、电性能参数以及线缆布局对飞机电气线槽结构整体屏蔽能力的影响, 本节基于三同轴测试方法建立线槽的仿真模型。

在 CST cable studio 工作室中建立横截面总长度 250 mm、长度为 1 m、厚度为 0.56 mm 的 U 型非磁性 ($m=1$) 的简化线槽, 考虑 $h/w=1/2, 1, 3/2, 2$ 这 4 种不同的宽高比, 如图 3(a) 所示。结构材料设置为黄铜, 在结构下方设置 PEC 材料的理想导体平面作为返回路径, 并在底部正上方创建导线以模拟三同轴测试法计算结构转移阻抗, 如图 3(b) 所示。



(a) 简化模型示意图



(b) 实物仿真模型示意图

图 3 线槽仿真模型

为了验证 2.1 节所建线槽转移阻抗计算模型的正确性, 在 MATLAB 中分别建立位于线槽中心上方, 与底板间距 $\Delta y=5, 25, 45$ mm 的线缆, 在 100 Hz 到 300 MHz 频率下对数等分 1 001 个元素的行向量取点, 结合阻抗和导纳矩阵求解得到线槽内线缆的感应电压。同时在 CST 线缆工作室中建立相同的仿真模型, 并计算线缆在 $\Delta y=45$ mm 相同水平的无槽串扰情况, 近端电压结果如图 4 所示。

由图 4 可见, 本文所建立的含线槽的线束串扰预测模型在 3 种 Δy 情况下都与软件仿真结果趋势吻合, 当频率小于 10^7 时, 理论计算值与仿真值误差均低于 5%, 验证了转移阻抗低频表达式(7)和高频表达式(9)的正确性。由于本文提出的转移阻抗计算表达式引入了形状系数, 同时说

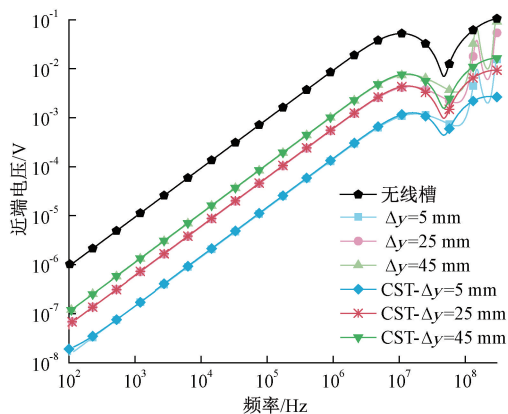
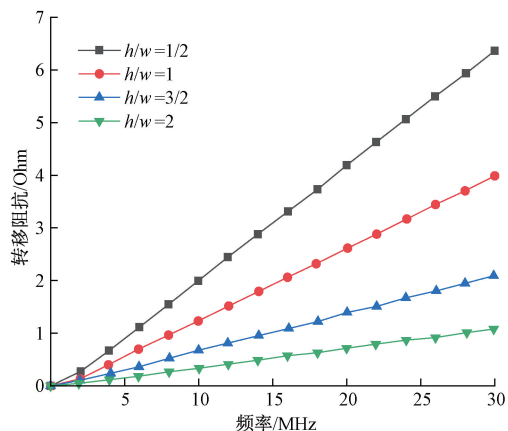


图4 含线槽线缆的近端电压

明了本文计算方法较传统定义计算精度较高。

以图1的U型结构为例,在MATLAB中分别求解0~30 MHz频率下电气结构高宽比 h/w 为1/2、1、3/2、2时的转移阻抗近似值,如图5所示。其中结构电导率为 1.74×10^7 S/m,厚度0.56 mm,周长 $2(h+w)=250$ mm(即结构横截面保持不变),测量导线固定放置于底部上方25 mm处。


 图5 $\Delta y=25$ mm时不同高宽比的结构转移阻抗

由图5可知,当结构周长和频率不变时,高宽比较大的结构其转移阻抗较低,可以推出浅线槽中的线缆更易与共模电流产生磁场耦合,高宽比较大的线槽保护性更好,其内部互感和转移阻抗更小。由转移阻抗表达式推导可知,转移阻抗是结构内部电场和磁场的相关函数, Z_t 取决于注入脉冲电流中的电流分布,而电流分布又由脉冲电流的大小、频率和返回电流的位置决定。在低频时电场占主导作用,转移阻抗约等于低频段结构的直流电阻。高频时磁场是主导因素,转移阻抗与结构形状厚度有关。

将CST仿真计算出的 Z_t 与文献[14]中的近似模型和测试方法得到的数据进行对比,如图6所示。可知,仿真值与实测数据相比误差小于1 dB,故通过仿真的U型结构模型可以准确地计算线槽结构转移阻抗,验证了等效模型的正确性。在300 kHz~30 MHz频率范围内,U型结构的转

移阻抗随着频率增大而增大,随着高宽比的增大而减小,说明在测量导线距U型结构底部距离相同时,深线槽内部对导线的电磁防护性能要比浅线槽的更好。

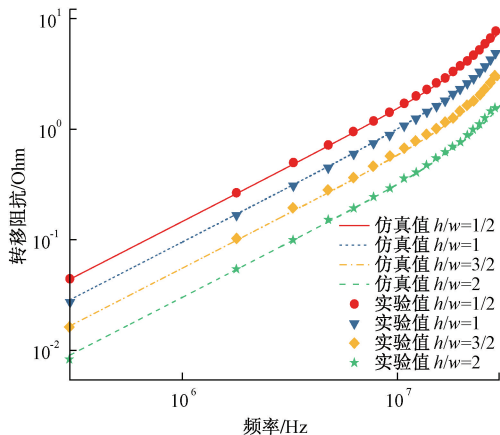


图6 不同高宽比仿真与实验值对比

2.2 线槽形状对转移阻抗的影响

根据FAR25中H分部、航空行业标准HB8465-2014、国际电工标准IEC 60364-4-44等EWIS相关的电磁兼容标准中提出明确建议或规定:EWIS电磁兼容设计和安装所有电气电缆应减小彼此的电磁干扰,若未屏蔽电缆的平行布线长度过长,则需要通过不同电磁兼容性类别规定的不同空间距离间隔或在电缆之间安装金属隔板实现隔离。机体内有大量导电结构如客舱地板座椅轨道、货舱导轨、地板横梁、以及腹板等。通常这些导电结构采用U型、H型、I型、L型等,在环境条件允许的情况下,飞机电气设计师一般可沿着这些构造元素敷设各类互联线束。

由理论分析可知,低频状态(趋肤深度 δ 大于结构厚度 d)下,线槽阻抗主要由结构的直流电阻 R 决定:

$$R = L/\sigma S \quad (11)$$

式中: L 、 S 、 σ 分别为结构长度、横截面积及材料电导率。为分析结构形状参数对转移阻抗的影响,将线槽横截面积简化为厚度 d 与周长 O (忽略 d 的影响)的乘积,故式(11)表示为:

$$R = 2L/\sigma Od \quad (12)$$

以横截面形状分别为平板、U、I、C、L以及封闭U形6种金属铝(电导率为 3.56×10^7 S/m)线槽结构作为分析模型,长1 m,厚度 d 为3 mm,周长 O 为250 mm。

CST的部分RLC求解器可以对全波Maxwell方程进行宽带评估,分别对6种结构进行模型参数电阻、电感、电容提取,设置频率范围0~100 MHz,建立如图7所示模型。

图8为金属结构直流电阻求解结果,在低频情况下,即频率约小于 1.0×10^{-4} MHz时,6种形状结构的电阻都近似为 3.745×10^{-5} Ohm,结果与理论分析一致,当频率 $f < 1/\pi\mu_0\mu_r\sigma d^2$ 时,直流电阻的大小与结构的长度、横截面积和电导率有关,与实际形状尺寸无关。由于趋肤效应,使得频

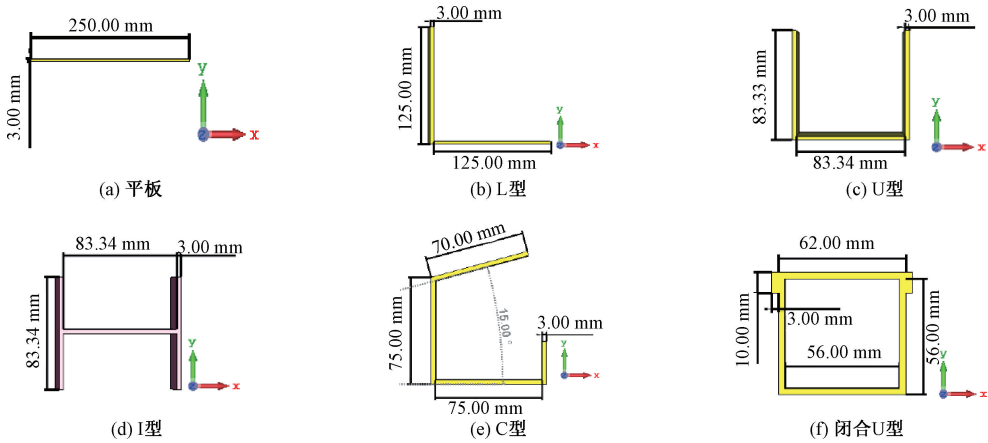


图 7 不同形状金属结构模型建立

率增大时金属结构的有效截面积减小,电阻值随着形状尺寸的不同出现差异,封闭 U 型结构的电阻最大,为 2.5×10^{-4} Ohm 以上。

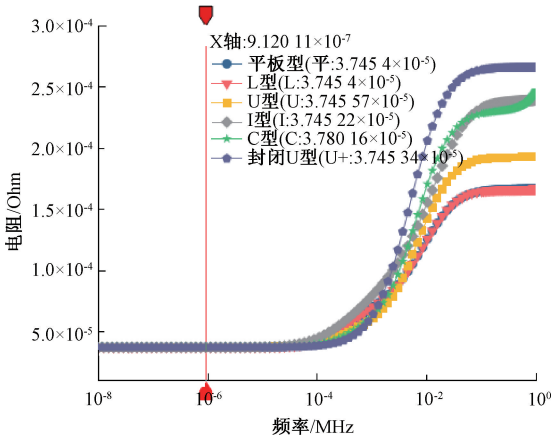


图 8 不同形状金属结构电阻与频率的关系

为进一步探究结构形状及尺寸参数对转移阻抗和内部电磁屏蔽效能的影响,在金属结构横截面且测量导线距底板距离相同的情况下,使用上述建立的三同轴测试结构转移阻抗模型,计算 6 种形状结构的转移阻抗,结果如图 9 所示。

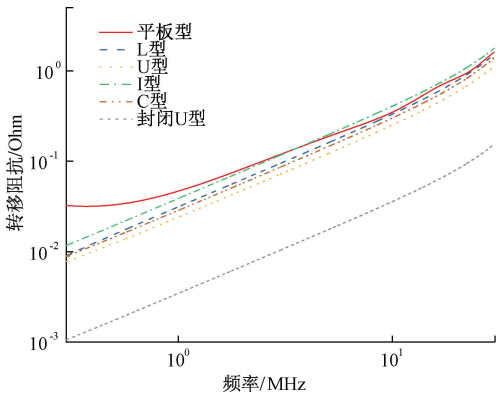


图 9 0~100 MHz 时各种形状结构的转移阻抗

由图 9 可知,平板型转移阻抗在低频时较大,封闭 U 型的转移阻抗远小于其他五种形状结构,说明重叠盖的使用提高了电缆槽的电磁兼容性性能。而对比 L 型、U 型以及 I 型可以发现,I 型结构可以看作背对背的两个 U 型结构,此时高宽比对转移阻抗的影响比重更高,当高宽比较小时,I 型槽的屏蔽性能甚至不如 L 型结构。因此,在环境及重量等条件因素允许下,工程上可多使用 U 型和添加封闭盖的结构,并尽量使用高宽比大于 1 的结构。

2.3 线槽尺寸对屏蔽效能的影响

如果将线槽正下方的场定义为 H_e ,将内部场定义为 H_i ,可以将整个内部区域的场强与线槽正下方的场强进行比较。在线槽外部下方及线槽内部上方区域设置 curve 线段,计算两个区域的近场磁场及其屏蔽效能,如图 10、11 所示。不同宽高比的 x 轴均标准化为 x/w 。由图 10 可知,因离散端口的电压源一致,不同高宽比的线槽外部磁场强度区别不大,而高宽比越大的线槽,其内部磁场强度越小,高宽比 $h/w=1/2$ 与 $h/w=2$ 的内部同位置磁场强度最高相差 15 dB/A 左右。从图 11 可以更清晰地分析不同高宽比线槽的屏蔽效能,线槽所提供的屏蔽效能随着线槽的深度变大而明显增加,线槽高宽比每增加 1/2,其屏蔽效能增加 5 dB 左右,且增加值与深度成正比。

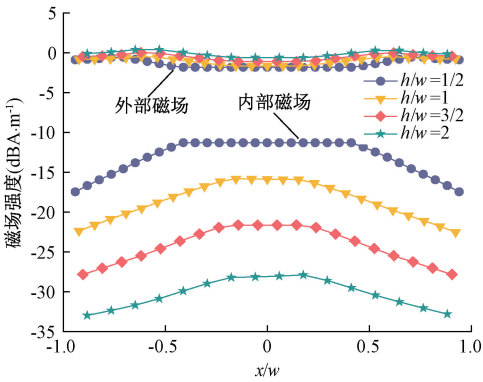


图 10 不同高宽比线槽内外部的磁场强度

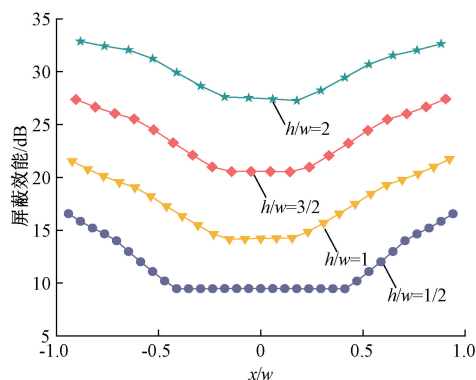


图 11 不同高宽比线槽的屏蔽效能

为了更好地分析高宽比对线槽屏蔽效能的影响,计算 $z=0$ 时线槽内部 x 方向的磁场值 H_x 与线槽正下方 8 mm 处(线槽外)的磁场值,求得得线槽的屏蔽效能,图 12 为线槽 $h/w=1/2, h/w=1, h/w=3/2, h/w=2$ 时 XOY 面的屏蔽效能, x, y 轴已分别归一化为 $x/w, y/h$ 的比值。

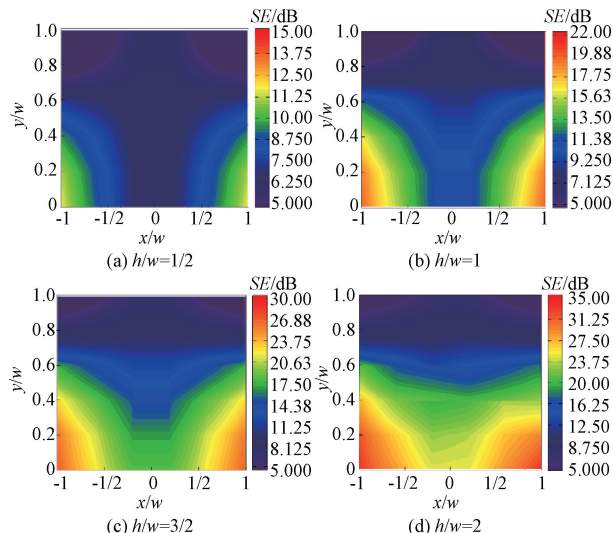


图 12 不同高宽比线槽的屏蔽效能等线剖面图

由图 12 等线剖面图可以得出,随着线槽高宽比的增加,屏蔽效能最大值不断提升,且有效保护区域逐渐扩大, U 型线槽的两个内角比其他区域为电缆提供了良好的保护。显然,在 4 种高宽比结构中, y/h 小于等于 0.6 的区域,线槽侧壁都能减少内部线缆受到的外部电磁干扰,在飞机线缆布线时,可将敏感或干扰电缆沿着构件的内角敷设,且内角的优先级高于构件外部,以降低信号频率内的电磁干扰。线槽的截面深度设计应至少是所考虑放置的最大线缆直径的两倍,且线束高度低于线槽的侧壁,如图 13 所示。

3 复合材料机身内线槽的雷击电磁防护效能分析

本章为了验证第 2 章结论闭合 U 型线槽结构防护性

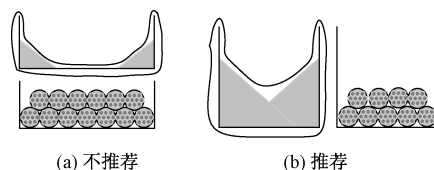


图 13 建议的结构内线束布局方式

能更好在实际工程中的应用,考虑雷电对飞机内部线缆造成电磁干扰^[15-16]影响,建立复合材料机身内线槽的雷击电磁防护仿真模型,分析机身不同位置、不同形状线槽的防护作用。

本章以机身一端蒙皮作为雷击击入点设置离散电流源端口,参考相关雷击测试 SAE-ARP5412^[17-19]等行业标准,将雷电流波形定义为双指数波形,用雷击首次回击电流分量波形 A 模拟雷击电流脉冲注入飞机机身的试验,雷击电流源波形设置如图 14 所示。

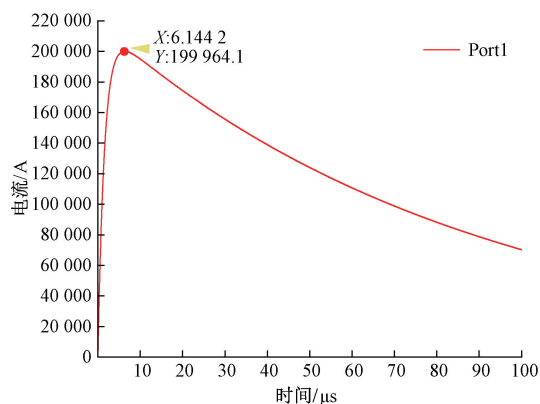


图 14 雷击电流源波形

为探究雷击环境下复合材料飞机机身内线槽的电磁防护效能,在机身内部较为有代表性的位置设置线缆, $S_1 \sim S_8$ 均为半径 0.5 mm 的单线,设立探针监测线路上的雷电瞬态感应电压和电流,图 15 为机身横截面及线缆分布图。在机身模型中分别搭建工型和闭合 U 型客舱座椅轨道,对比分析不同形状线槽的防护性能。

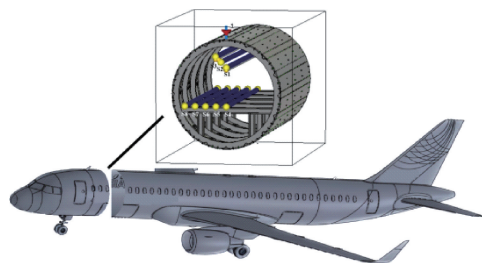


图 15 机身模型与线缆分布简化图

3.1 工形线槽防护性能分析

在机身模型中搭建工型客舱座椅轨道,9 个轨道在地板横梁上并排纵向分布,其简化模型如图 16 所示。

图 17、18 分别为雷击电流 A 下,机身内部 8 根线缆在

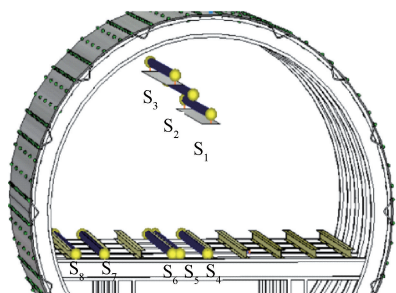


图 16 工型线槽分布图

工字型线槽不同位置感应电流时域波形。对比仿真结果可知,工形轨道内部的 4 根线缆(S_4 、 S_5 、 S_7 、 S_8)感应电流明显小于客舱顶部放置的线缆(S_1 、 S_2 、 S_3),进而验证了线槽对于电磁干扰具有一定的抑制效果,同时说明线束寄身轨道敷设能大大减少闪电瞬态感应电平。线槽内线缆上的耦合电流在 $6.14 \mu\text{s}$ 时达到最大值 $2\,970 \text{ A}$,随后震荡衰减,与所设置的雷击波形分量 A 波形较为相似。对比客舱顶部放置的线缆(S_1 、 S_2 、 S_3)电流参数可知, S_1 线缆的峰值电流为 $2\,584 \text{ A}$, S_3 线缆峰值电流为 $5\,862 \text{ A}$,说明飞机遇到雷击时,其内部不同位置线槽内线缆上的感应电流峰值有明显差异,随着线缆离机身蒙皮越近所受到的电磁场耦合也增大,越靠近机身蒙皮轨道内的线缆感应电流越大。

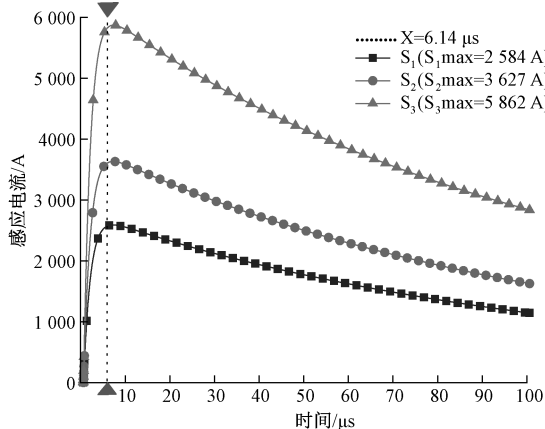


图 17 工形线槽客舱顶部线缆的感应电流

3.2 闭合 U 型线槽防护性能分析

为了对比分析不同形状线槽的电磁防护效果,同时验证含封闭盖线槽防护性能更佳,将工型线槽更改为闭合 U 型线槽,如图 19 所示。

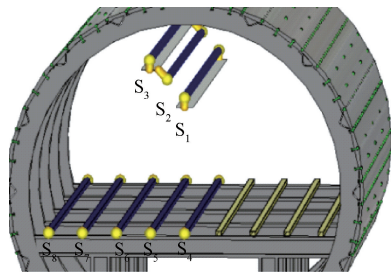


图 19 闭合 U 型线槽分布图

并计算内部线缆的耦合情况,如图 20、21 所示。较工型线槽,相同时间范围内机身内部线缆的耦合电压电流明显减少,其峰值电流为 978 A ,直接减少至工型线槽峰值电流的 $1/3$,客舱顶部放置的线缆感应电压感应电流基本一致。对比工形线槽随着线缆离机身蒙皮越近所受到的电磁场耦合程度越深,线缆上的感应电压电流越大。这说明闭合 U 型线槽在同等条件下电磁防护性能更好,进而验证了第 2 节结论的正确性。因此,线束布局设计时应将敏感设备和线束尽量选择封闭性能更好的线槽,以便提高设备和系统性能,保证飞行安全。

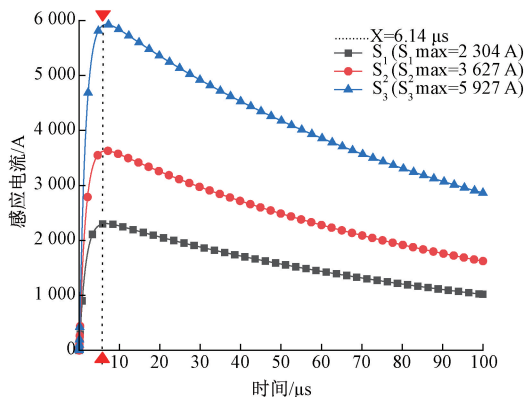


图 20 闭合 U 型线槽客舱顶部线缆的感应电流

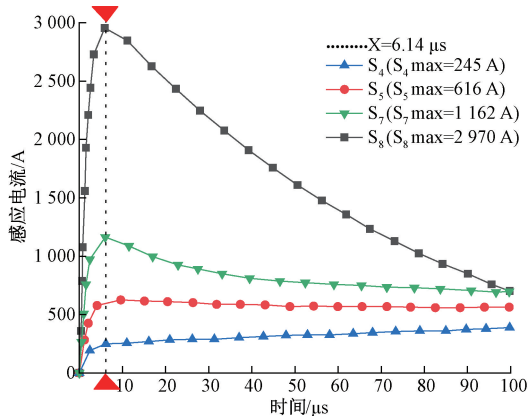


图 18 工型轨道内线缆的感应电流

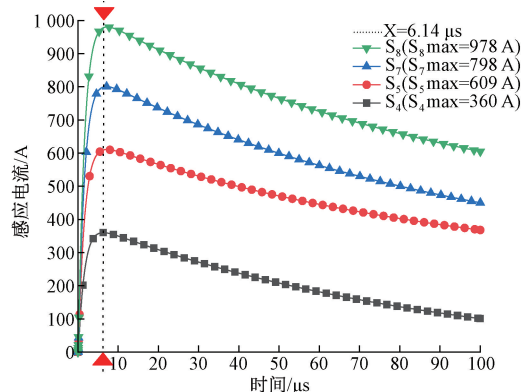


图 21 闭合 U 型线槽内线缆的感应电流

综合飞机雷电间接效应仿真分析结果可知,线槽轨道的形状和位置对线缆的防护性能影响较大,闭合U型线槽具有更优的防护效果。因此,在飞机雷电防护设计时应充分考虑其内部线槽的敷设布局,根据具体情况选择不同的防护线槽。

4 结 论

本文基于CST软件对不同结构线槽以及飞机雷电间接效应进行了有效仿真模拟分析,使用仿真软件有效模拟真实的雷电环境,并通过数值模型准确计算线槽转移阻抗,得出以下结论:

低频时阻抗大小与结构的长度、横截面积和电导率有关,与实际形状尺寸无关。高频时转移阻抗与结构形状厚度有关。当结构周长和频率不变,高宽比较小的结构其转移阻抗较大,结构中的线缆更容易与共模电流产生磁场耦合。

线槽高宽比每增加 $1/2$,其屏蔽效能增加5 dB左右,且增加值与深度成正比。线槽内部区域底部角落位置的电磁防护性能最好,电磁防护的效果由两侧底角位置往线槽中间递减,再由中间位置往上逐渐递减。当使用含封闭盖且高宽比大于1的线槽进行互联线束电磁防护时设计效果更佳。

感应电流的大小随着与机身蒙皮间距离的增大呈线性减小,且线槽密封性与防护性能成正比。闭合U型线槽的防护效果为工型线槽的3倍左右。

参考文献

- [1] 靳嘉嘉,司晓亮,汪友华,等.飞机电缆雷电间接效应的耦合特性仿真研究[J].电工技术,2018(1):20-23.
- [2] MUNALLI D, DIMITRAKIS G, CHRONOPOULOS D, et al. Electromagnetic shielding effectiveness of carbon fibre reinforced composites [J]. Composites Part B: Engineering, 2019,173:106906.
- [3] 胡小龙,李常贤.高速列车屏蔽线转移阻抗与屏蔽效能研究[J].电子测量技术,2022,45(5):80-85.
- [4] CHAKHUNG Y, JIANGUO W, MI Z, et al. Affection of shielding methods on the characteristics for cable coupled to lightning impulse magnetic field[J]. Electric Power Systems Research, 2024,226:109802.
- [5] 蒋晓婷.民用飞机导线和线缆的电磁防护设计[J].科技视界,2018(1):189-190.
- [6] IEC-60364-4-44. Low-voltage electrical installations-Part 4-41: Protection for safety-Protection against electric shock[S]. Spanish Society for Standardization, 2018.
- [7] NEMA VE 2-2018. Cable tray installation guidelines[S]. National Electrical Manufacturers Association Standards, 2018.
- [8] 翁立,闵永刚.石墨烯基吸波复合材料的研究新进展[J].功能材料,2017,48(12):47-55.

- [9] 王丽,王哲,宁国艳.木基导电电磁屏蔽材料的研究进展[J].材料导报,2018,32(13):2320-2328.
- [10] 张晶,康锦萍,李涛永,等.考虑电磁兼容特性下电动汽车直流充电桩测试装置的模块化设计及应用[J].电力自动化设备,2022,42(2):70-76.
- [11] DEURSEN A P J, HORCK F B M, HELVOORT M J A M, et al. Transfer impedance of nonmagnetic conduits of various shapes [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2001,43(1):18-28.
- [12] SKOBLIKOV O, KNIAZIEV V. Penetration of lightning electromagnetic pulses into metallic enclosures with apertures[J]. Electric Power Systems Research, 2014,113:48-63.
- [13] 张岩,田铮,刘尚合,等.内置介质板开孔腔体电磁屏蔽效能拓扑模型[J].微波学报,2023(10):1-10.
- [14] 夏乐祥.设备搭接和线槽电磁防护性能的测试分析[D].南京:东南大学,2018.
- [15] 孙永江,邢云龙,于建成,等.船载雷达设备电磁兼容研究与设计[J].国外电子测量技术,2017,36(3):43-46.
- [16] 钱宇琛,卢翔,周显达.雷击环境下延展金属箔电磁屏蔽特性[J].高电压技术,2022,48(10):4189-4195.
- [17] SAE ARP5412B (R) 2013. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms [S]. American Association of Motor Vehicle Engineers, 2013.
- [18] SAE ARP5416A 2013. Aircraft Lightning Test Methods[S]. American Association of Motor Vehicle Engineers, 2013.
- [19] SAE ARP5414A 2012. Aircraft Lightning Zone [S]. American Association of Motor Vehicle Engineers, 2012.

作者简介

庞思宇,硕士研究生,主要研究方向为航空线缆失效概率计算方法研究。

E-mail:1355899217@qq.com

钱宇琛,硕士研究生,主要研究方向为电磁兼容与防护技术。

E-mail:qzhoubao@gmail.com

肖海建,博士研究生,主要研究方向为航空器结构健康检测、传感器设计研究。

E-mail:2019011039@cauc.edu.cn

卢翔(通信作者),教授,主要研究方向为航空器复合材料结构损伤、防护、修理理论分析和试验研究。

E-mail:xlu@cauc.edu.cn

丁梓航,博士研究生,主要研究方向为航空发动机滑油系统健康监测。

E-mail:15776841636@163.com