

飞机机载线缆的串扰耦合研究

张和茂¹, 王 生¹, 薛 晏¹, 王 旭²

(1. 山西大同大学机电工程学院, 山西 大同 037000; 2. 北京飞机维修工程有限公司, 北京 100621)

摘要: 串扰是典型的传导干扰形式之一, 为保证线缆传输信号的质量, 机载线缆广泛采用不同端接工艺, 保证其传输信号的完整性。依据机载线缆的敷设工艺与电磁抗扰度测试标准实验要求, 构建了含有端接工艺的理论解析模型与三维数值仿真模型。基于仿真模型, 研究不同端接方式以及端接引线长度对串扰等电磁干扰的屏蔽效果。结果表明, 双端接地的屏蔽效果显著, 单端接地有一定的容性耦合抑制能力, 且端接引线越长, 对感性耦合的抑制能力越弱。

关键词: 机载线缆; 屏蔽层; 串扰; CST 仿真

Research on crosstalk coupling of aircraft airborne cables

ZHANG Hemao¹, WANG Sheng¹, XUE Yan¹, WANG Xu²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering Shanxi Datong University, Datong 037000, China;

2. Aircraft Maintenance and Engineering Co., Ltd., Beijing 100621, China)

Abstract: Crosstalk is a common form of conducted interference, and various termination processes are widely employed to ensure the integrity of transmitted signals in order to guarantee their quality. Theoretical analytical models and three-dimensional numerical simulation models incorporating termination processes have been developed based on the laying process of airborne cables and the standard experimental requirements for electromagnetic immunity testing. Based on these simulation models, investigations have been conducted on the shielding effects of different termination modes and terminal lengths on electromagnetic interference such as crosstalk. The results show that the shielding effect of double-terminal grounding is obvious, and the single-terminal grounding has a certain capacitive coupling inhibition ability, and the longer the terminal lead, the weaker the inductive coupling inhibition ability.

Keywords: airborne cable; shielding layer; crosstalk; CST simulation

0 引言

随着航空电子技术与通信技术的迅猛发展, 多电飞机逐步成为现代飞机发展的主流趋势之一。然而机舱内空间有限, 大量电气设备密集分布, 设备间的互联线缆的种类和数量必然大幅增加。以空客的A380为例, 其机内各型线缆长度

超过了500 km。繁冗复杂的线缆成为了机内电磁干扰的主要耦合途径, 不但会像辐射天线一样将电磁波扩散到机内环境, 而且会像接收天线一样接收环境中的高强度电磁场, 并在互联线缆上感应生成瞬态电压及电流, 进而对两端连接的机载航空电子电气设备产生干扰, 导致设备功能的

暂时或永久失效^[1-4]。为了保证机载线缆内传输信号的质量,波音、空客、中国商飞等大型飞机制造商通常在敏感位置敷设屏蔽线缆,通过线缆屏蔽层对机舱内电磁波的屏蔽作用来抑制电磁干扰。大量的数据表明,线缆屏蔽层的接地方式对屏蔽作用有着至关重要的影响。

串扰是传导干扰最重要的耦合形式之一,是机载线缆所受电磁干扰的重要来源^[5-6]。分析串扰的产生机理和影响因素,对于机载线缆的敷设方法以及端接工艺优化具有重要的工程意义。国外学者主要基于传输线理论构建等效分布参数模型,并对串扰进行分析。分布参数模型虽可直观分析串扰线缆的耦合机理,但模型建立的过程中有较多理想约束条件,且对于带有端接工艺的复杂线缆在建模过程中有较多近似约束,难以表征实际敷设线缆时端接方式与线缆空间构型对屏蔽效能以及串扰的影响^[7-8]。国内学者主要在国外学者的基础上进行分析且侧重实验研究,文献[9-10]基于测试线缆s参数评估线缆间的串扰,并依据实验测试结果对串扰的影响因素进行了分析。

然而,机载线缆敷设时往往种类复杂多样,敷设的位置、承载的信号类型和线缆的端接方式都会对其耦合的串扰能量有重要的影响。另外,基于实验的分析方法虽然结果较为准确,但对实验条件提出更高的要求,且增加了研究成本。因此,本文基于数字孪生的理念,借助CST电磁仿真软件对机载线缆的串扰情况进行分析,不仅可以减少研究成本,而且对阐明端接工艺对线缆屏蔽效能的影响机制、揭示线缆实际敷设构型对串扰的影响具有重要意义。

1 端接工艺分类

现行的机载线缆端接工艺复杂多样,按其端接方式分为三类,具体如图1所示。图1中,360°屏蔽是通过线缆压接装置将线缆屏蔽层直接压接到线束连接器的金属外壳上;悬浮屏蔽是线缆两端的屏蔽层不进行接地端接;引线接地是通过端接引线将线缆屏蔽层与飞机结构地连接在

一起,具体又可依据线缆屏蔽层的端部采取一端接地还是两端接地,将其划分为单端接地与双端接地。

实际线缆敷设时,除承载高频通信信号的线缆应用360°屏蔽外,其余大多采用引线接地,且360°屏蔽与悬浮屏蔽都可在接线接地模型上简化构成,因此文中以引线接地为例进行建模研究。

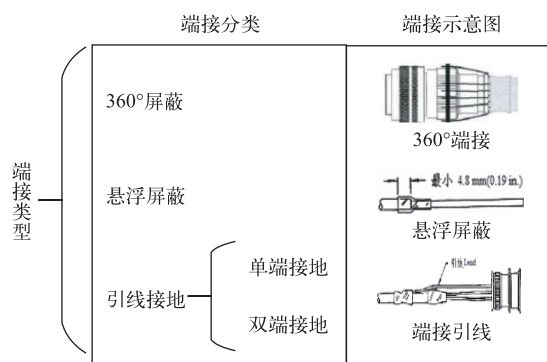


图1 端接方式分类图

Fig. 1 Classification of terminal connection modes

2 解析模型

为便于对采用引线接地工艺的线缆进行分析,建立对应串扰等效模型,示意图如图2所示。

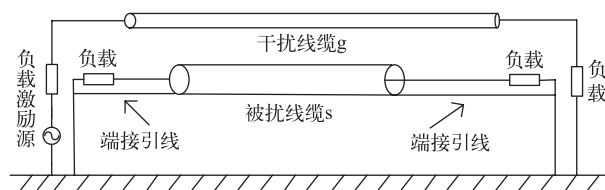


图2 双端引线端接串扰示意图

Fig. 2 Diagram of double-ended lead terminating crosstalk

图2中,线缆g为干扰线缆,线缆s为被扰线缆。依据线缆的接地工艺特征,将其划分为三部分,分别进行建模分析。

考虑到干扰线缆与被扰线缆耦合过程较为复杂,因而需作部分假设:①干扰线缆激发的电磁场与被扰线缆间仅考虑直接的互感、互容耦合关系,忽略经空间环境结构反射导致的多次耦合;②干扰线缆与被扰线缆的线芯间无直接耦合关

系；③被扰线缆屏蔽层内外回路之间的耦合关系可借助转移阻抗和转移导纳予以表征，且线芯的电流由屏蔽层内表面流回，屏蔽层外表面电流由参考地流回，相应参考方向如图3所示。

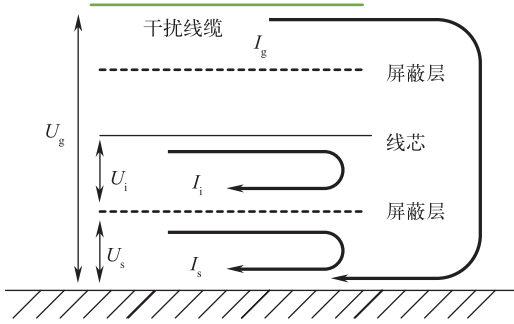


图3 电压与电流参考方向

Fig. 3 Voltage and current reference directions

对于屏蔽层完好的同轴线缆部分，相应形式的传输线方程为

$$\frac{dU_c(x)}{dx} = -Z I_c(x) \quad (1)$$

$$\frac{dI_c(x)}{dx} = -Y U_c(x) \quad (2)$$

$$Z = \begin{pmatrix} j\omega l_g & j\omega l_{gs} & j\omega l_{gs} \\ j\omega l_{gs} & j\omega(l_s + l_i) - 2(Z_t - Z_{sh}) & j\omega l_s - Z_t + Z_{sh} \\ j\omega l_{gs} & j\omega l_s - Z_t + Z_{sh} & j\omega l_s + Z_{sh} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$Y = \begin{pmatrix} j\omega(c_g + c_{gs}) & 0 & -j\omega c_{gs} \\ 0 & j\omega c_i & -j\omega c_i \\ -j\omega c_{gs} & -j\omega c_i & j\omega(c_i + c_s + c_{gs}) \end{pmatrix} \quad (4)$$

相关参数见表1。

表1 线缆参数说明

Tab. 1 Cable parameter description

参数	说明	参数	说明
l_g	干扰线缆自感	c_g	干扰线缆自容
l_s	屏蔽层自感	c_s	屏蔽层自容
l_i	线芯自感	c_i	线芯自容
l_{gs}	屏蔽层干扰线缆互感	c_{gs}	屏蔽层干扰线缆互容
Z_t	屏蔽层转移阻抗	U_c	线束对地电压
Z_s	屏蔽层阻抗	I_c	线束对地电流

为便于式(1)、式(2)求解，可将其转换为等效链路参数方程形式，即

$$\begin{pmatrix} U_c(L) \\ I_c(L) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_c(0) \\ I_c(0) \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中，链路参数方程的传输矩阵为

$$\Phi_c = \begin{cases} \Phi_{11} = Y_c^{-1} \cosh(\sqrt{Y_c Z_c} L) Y_c \\ \Phi_{12} = -Y_c^{-1} \sqrt{Y_c Z_c} \sinh(\sqrt{Y_c Z_c} L) \\ \Phi_{21} = -\sinh(\sqrt{Y_c Z_c} L) (Y_c^{-1} \sqrt{Y_c Z_c})^{-1} \\ \Phi_{22} = \cosh(\sqrt{Y_c Z_c} L) \end{cases} \quad (6)$$

对于带有端接引线部分的线缆，则基于多导体传输线理论进行等效建模

$$\frac{dU_p(x)}{dx} = -Z_p I_p(x) \quad (7)$$

$$\frac{dI_p(x)}{dx} = -Y_p U_p(x) \quad (8)$$

其中

$$Z_p = -j\omega \begin{pmatrix} l_g & l_{gi} & l_{gp} \\ l_{gi} & l_i & l_{ip} \\ l_{gp} & l_{ip} & l_p \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$Y_p = -j\omega \begin{pmatrix} c_g & -c_{gi} & -c_{gp} \\ -c_{gi} & c_i & -c_{ip} \\ -c_{gp} & -c_{ip} & c_p \end{pmatrix} \quad (10)$$

式中， U_p 与 I_p 分别为引线部分内各线芯的对地电压与对地电流； l_{gi} 为干扰线与同轴线缆芯间的互感； l_{gp} 为干扰线与引线间的互感； l_{ip} 为引线同轴线缆芯间的互感； c_{gi} 为干扰线与同轴线缆芯间的互容； c_{gp} 为干扰线与引线间的互容； c_{ip} 为同轴线缆芯与引线间的互容。

为便于求解，同样转换为等效链路参数方程形式，即

$$\begin{pmatrix} U_p(L) \\ I_p(L) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Phi'_{11} & \Phi'_{12} \\ \Phi'_{21} & \Phi'_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_p(0) \\ I_p(0) \end{pmatrix} \quad (11)$$

式中，链路参数方程的传输矩阵为

$$\Phi_p = \begin{cases} \Phi'_{11} = Y_p^{-1} \cosh(\sqrt{Y_p Z_p} L) Y_p \\ \Phi'_{12} = -Y_p^{-1} \sqrt{Y_p Z_p} \sinh(\sqrt{Y_p Z_p} L) \\ \Phi'_{21} = -\sinh(\sqrt{Y_p Z_p} L) (Y_p^{-1} \sqrt{Y_p Z_p})^{-1} \\ \Phi'_{22} = \cosh(\sqrt{Y_p Z_p} L) \end{cases} \quad (12)$$

忽略端接引线两端的差异性，引线部分均可用 F_p 表示，机载线缆的等效链路参数传输矩阵为

$$\Phi_T = \Phi_p \Phi_c \Phi_p \quad (13)$$

机载线缆的链路参数方程可以写为

$$\begin{bmatrix} U(L) \\ I(L) \end{bmatrix} = \Phi_T \begin{bmatrix} U(0) \\ I(0) \end{bmatrix} \quad (14)$$

再联立关于线缆终端负载的关系式, 可实现对线缆终端响应的求解。

$$U(0) = U_s - Z_0 I(0) \quad (15)$$

$$U(L) = Z_L I(L) \quad (16)$$

3 线缆仿真模型

3.1 仿真模型构建

为使构建的仿真模型能准确地模拟机载环境, 需要考虑结构参数与电气特性两个方面。结构参数主要为线缆的长度、相对结构的高度和接地引线的长度等。参考现行的线缆敷设工艺与机载设备抗扰度测试标准DO-160G的要求, 将线缆的对地高度设置为5 cm, 线缆的长度设置为3 m。接地引线与干扰线缆选择AWG22, 屏蔽线缆选择RG316, 相应线缆参数见表2、表3。

表2 RG316 屏蔽线结构参数

Tab. 2 RG316 shielded wire structure parameters

(单位: mm)	
名称	数值
线芯半径	0.24
内绝缘介质半径	0.74
屏蔽层半径	0.99
外绝缘介质半径	1.25

表3 AWG22 结构参数

Tab. 3 AWG22 structural parameters

(单位: mm)	
名称	数值
线芯半径	0.32
绝缘介质半径	0.53

依照上述参数, 建立线缆模型如图4所示。

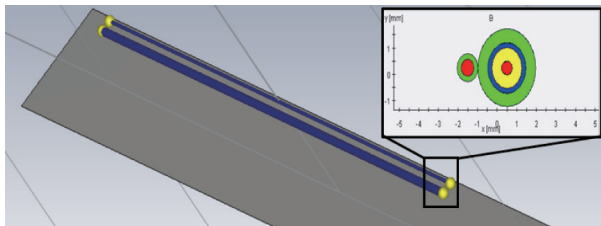


图4 机载线缆仿真模型

Fig. 4 Airborne cable simulation model

电气特性部分对仿真环境赋予相应的边界条件。飞机结构地通常为飞机的金属接地回流网, 为提高仿真效率, 将结构地等效为金属薄板, 材料特性设置为理想导体, 并设置其为电边界, 仿真空间的其余位置为开放边界。

随后, 以端部剥线法的双端接地为例, 建立完整的串扰仿真模型, 取剥线长度为76 mm。仿真电路如图5所示。

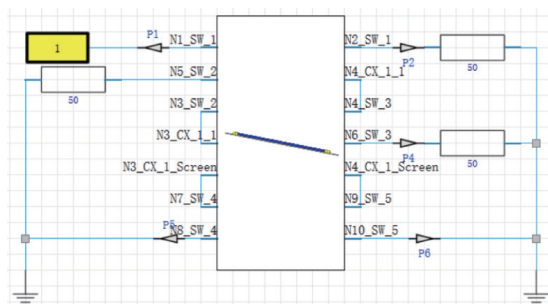


图5 机载线缆等效仿真电路

Fig. 5 Airborne cable equivalent simulation circuit

图5中, port1为信号励磁端口, 为便于归一化, 将其设置为1 V的信号; SW1为干扰线缆; CX为屏蔽线缆; SW2和SW3为屏蔽线剥除屏蔽层的部分, 负载均设置为50 Ω ; CXScreen为屏蔽线的屏蔽层, 通过SW4和SW5接地。

悬浮屏蔽、单端接地建模时的方法与上述基本相同, 单端接地与悬浮接地将无需接地的部分保持屏蔽线缆的状态即可, 因而文中不再赘述。

3.2 仿真模型分析

(1) 接地方式对串扰的影响

为研究不同端接方式下的电磁屏蔽效能, 选择双端接地、单端接地和悬浮接地三种典型工艺为对象, 以同样参数的非屏蔽线缆作为对照组。仿真频率为100 kHz~100 MHz, 结果如图6所示。

仿真结果表明, 30 MHz前双端接地对串扰等电磁干扰的防护能力相比于其他端接方式具有显著的效果; 低频区段内, 单端接地相较于悬浮接地与非屏蔽线缆有一定的屏蔽作用, 而悬浮接地与非屏蔽线缆之间无明显区别。其原因在于当双端接地时, 屏蔽层与端接引线构成完整的屏蔽回路, 对容性耦合、感性耦合均有较好的抑制作

用,因而相对于其他接地方式受到的近端串扰显著减小。当采用单端接地时,虽无法形成完整的屏蔽回路,但电场会经线缆屏蔽层、端接引线终止于结构地,从而提供对容性耦合的抑制作用。当频率增大时,感性耦合逐步占据主导地位,单端接地与另外两种接地方式无明显差异。

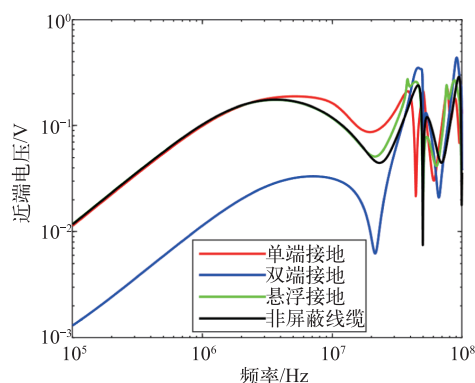


图6 不同端接方式串扰电压对比

Fig. 6 Crosstalk voltage comparison of different termination modes

另外,当线缆的长度达到波长的1/4奇数倍时,会发生谐振。文中线缆的长度为3 m,若频率为25 MHz左右时,其对应的1/4波长为3 m,恰好发生谐振,与仿真结果基本一致。

(2) 端接引线长度或距离对串扰的影响

分析端接工艺间的差异后发现,端接引线对屏蔽作用的影响较为明显。接下来分析采用双端接地时,引线长度对串扰的影响。设置引线长度分别为25 mm、50 mm、75 mm和100 mm,仿真结果如图7所示。

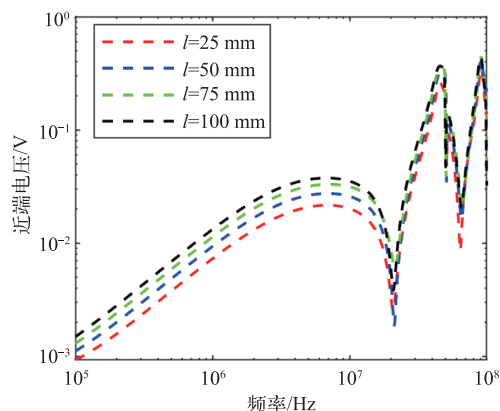


图7 不同端接引线长度串扰电压对比

Fig. 7 Crosstalk voltage comparison for different end lead lengths

仿真结果表明,在达到谐振频率前,引线长度与近端串扰大小呈负相关关系。引线长度的增加,使得端接引线与大地的环路面积增大,即端接引线 with 干扰线缆间的互感增大,导致对感性耦合的抑制作用不足。另外,较长的端接引线也会产生共模辐射,使得近端串扰的电压值进一步增大。

4 结束语

本文基于CST构建了典型端接工艺的电磁仿真模型,该模型参考了现行机载线缆的结构参数与敷设工艺,并结合电磁兼容测试标准的实验要求,在建模过程中对空间构型与接地网络进行了合理简化,具有较好的准确性。针对不同端接方式与端接引线长度进行了研究,研究结果表明,双端接地因具有良好的感性耦合、容性耦合抑制能力,所以屏蔽效果最好;单端接地只有容性耦合作用,因此低频段相较于悬浮接地更好,而高频段与悬浮接地无明显差异。同时,由于感性耦合占据主导地位,端接引线越长,对串扰的抑制能力越弱。

参考文献

- [1] 魏光辉,卢新福,潘晓东.强场电磁辐射效应测试方法研究进展与发展趋势[J].高电压技术,2016,42(5):1347-1355.
- [2] 廖成,张胤,尚玉平,等.传输线电磁脉冲耦合问题研究综述[J].微波学报,2020,36(1):103-110.
- [3] 徐萌,李晓露,张和茂,等.基于有限元的破损屏蔽层转移阻抗仿真分析[J].电测与仪表,2023,60(6):67-73,80.
- [4] 肖春燕,高帅.多电机电气负载引起的电磁干扰[J].北京航空航天大学学报,2015,41(5):793-801.
- [5] 石荣荣,周书,杨成博,等.电磁兼容仿真在EWIS工程实践中的应用[J].飞机设计,2020,40(1):27-31.
- [6] 赵宏旭,董小东,石旭东.屏蔽层端接对机载线

- 缆屏蔽性能影响研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(20): 16-22.
- [7] ROTGERINK JHGJL, SCHIPPERS H. Generic prediction of crosstalk between shielded wires[C]. 2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC 2015. IEEE, 2015: 616-621.
- [8] PAUL C R. Prediction of crosstalk in ribbon cables: comparison of model predictions and experimental results[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2007, 20(3): 394-406.
- [9] 王小宁. 混合模S参数理论及其在信号完整性分析中的应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [10] 陆晓钰, 周香, 王伟科. 机载线缆间的串扰耦合

分析[J]. 安全与电磁兼容, 2023 (2): 34-37.

作者简介

张和茂(1994—), 男, 硕士, 助教, 研究方向为复杂电磁环境效应研究。

王生(1995—), 女, 硕士, 助教, 研究方向为电力系统规划与运行。

薛晏(1996—), 男, 助理实验师, 研究方向为复杂电磁环境实验构建。

王旭(1973—), 男, 高级工程师, 研究方向为发动机维修测试与故障诊断。

(收稿日期: 2024-10-30)