

某航空电子系统电源滤波电路性能仿真分析与测试

潘加明¹, 胡超¹, 朱赛赛¹, 肖扬², 景莘慧², 周忠元²

(1. 中国航空无线电电子研究所, 上海 200241; 2. 东南大学电磁兼容研究室, 南京 211189)

[摘要] 飞机航空电子系统设备级滤波电路对系统的正常工作有重要作用, 从中选取 28V 直流电源滤波电路作为典型电路, 结合印制线路板 (PCB: Printed circuit boards) 图, 基于计算机仿真技术 (CST) 对其进行场路协同仿真; 最后通过矢量网络分析仪对实际滤波电路进行了共模和差模插入损耗测试, 验证了场路协同仿真的正确性, 并通过实验和仿真得出每种类型的电气元器件对共模和差模插入损耗的贡献。

[关键词] 电源滤波电路; 仿真; 插入损耗; 共模; 差模

[中图分类号] V243.1; V351.36 **[文献标识码]** A **[DOI 编码]** 10.12175/j.issn.1006-141X.2020.01.12

[文章编号] 1006-141X(2020)01-0068-05

Simulation Analysis and Test of Power Filter Circuit of a Certain Aircraft Avionics System

PAN Jia-ming¹, HU Chao¹, ZHU Sai-sai¹, XIAO Yang², JING Shen-hui², ZHOU Zhong-yuan²

(1.China National Aeronautical Radio Electronics Research Institute, Shanghai 200241,China;

2.Southeast University, College of Mechanical Engineering, Institute of EMC ,NanJing 211189,China)

Abstract: Equipment level filter circuit of a certain aircraft avionics system plays an important role in the normal operation of the system. 28VDC power supply filter circuit is selected as a typical circuit, which is combined with PCB printed circuit board diagram to conduct field and road co-simulation based on CST. Finally, the common mode insertion loss and differential mode insertion loss of the filter circuit are tested by the vector network analyzer to verify the correctness of the field-circuit co-simulation and the actual test, and the influence of each type of electrical components on common mode insertion loss and differential mode insertion loss is obtained through experiment and simulation.

Key words: power filter circuit, simulation, insertion loss, common mode, differential mode

0 引言

综合显示处理系统是某型飞机的航空电子系统的核心分系统, 是飞机最主要的人机接口系统和信息处理系统, 该系统的综合显示单元 (IDU: Integrated Display Unit) 工作正常与否对航空电子

系统综合化处理功能的实现有重要作用。IDU 中的电源滤波板集合了 28 V 直流、ARINC 429^[1-2]、ARINC 664^[3-4]、RS 422 等滤波电路, 电源、通信等信号进入 IDU 后都必须先经过该板进行滤波处理, 使电源、通信电路变得“干净”。

本文首先选取某航空电子系统综合显示单元

28 V 直流滤波电路为研究对象, 对其进行电路参数设计和实物制作, 并基于计算机仿真技术 (CST: Computer Simulation Technology) 软件对实际电路板进行了场路协同仿真分析^[5]; 其次利用矢量网络分析仪对插入损耗进行了测试, 验证了场路协同仿真设计方法的正确性。最后, 通过依次保留单个共模电感、保留共模电感和共模电容、保留共模电感和差模电容等对滤波板进行仿真和测试, 从中总结出每种类型的电气元器件对共模插入损耗和差模插入损耗的贡献和影响。

1 1 28V 直流接口滤波电路设计

1.1 28V 直流电源滤波电路原理设计

按传播途径, 电磁干扰分为传导干扰和辐射干扰, 导干扰可分共模和差模两种模式, 抑制传导干扰的主要措施是加装滤波器^[6]。

如图 1 所示, 以某航空电子系统综合显示单元为例, 电源依次通过插头、插座、电源板 (滤波电路), 经过滤波后的“干净”电源到达内部电路。电源滤波的作用是使有用信号如工频或直流 (本项目指的是 28 V 直流) 信号通过, 使无用的干扰频率信号衰减^[7]。电路由 L_1 、 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 组成^[8]; L_1 为共模电感, C_3 、 C_4 为共模滤波电容; C_1 、 C_2 为差模电容。

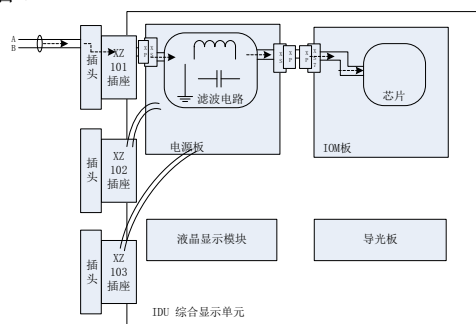


图1 综合显示单元的电源传递路径图

1.2 滤波参数确定

28 V 直流滤波电路的应用范围是电子控制装置的供电。电路中所有的电容要符合电路耐压的要求, 差模电容额定电压满足降额 50% 要求 (通常额定电压要求 100 V 以上), 共模电容额定电压需要满足接口耐压的要求 (通常额定电压要求 500 V 以

上)。

综合考虑相关要求并结合设计经验, 图 2 滤波电路元器件的初始选值如下:

(1) 电路中 L_1 共模电感取值范围为 100 μH ~30 mH, 典型值选取 2.8 mH;

(2) C_1 建议取值范围为 0.1 μF ~10 μF , 典型值选取 1 μF ;

(3) C_2 电容选取范围为 0.1 μF ~10 μF , 典型值选取 1 μF ;

(4) C_3 ~ C_4 电容取值范围为 100 pF~100 nF, 典型值选取 100 nF。

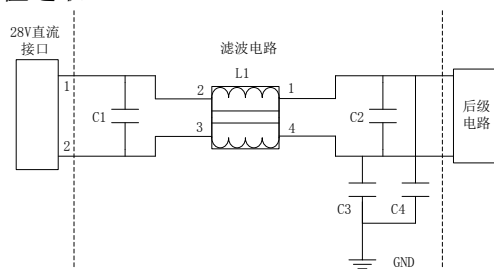


图2 28 V 直流电源接口原理图设计

2 基于 CST 的滤波电路仿真

由于电子元件在高频时分布参数的影响不可忽略, 为全面反映共模电感元件的高频特性, 使用矢量网络分析仪测量实际电感元件的 S 参数, 得到“.s4p”文件^[9], 并将此参数用于此后的仿真分析中。差模电容和共模电容的寄生参数则由厂家提供。

仿真的具体步骤如下:

(1) 将印制电路板 (PCB: Printed Circuit Board) 文件 (.brd 文件) 导入到 CST 微波工作室中, 如图 3 所示;

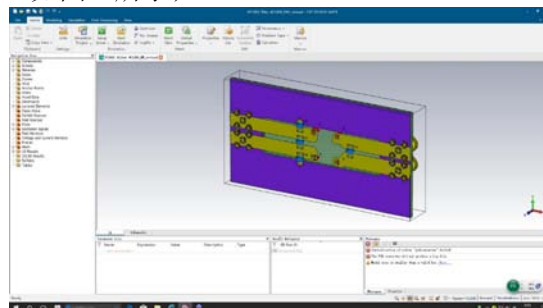


图3 PCB 文件导入 CST 微波工作室

(2) 根据滤波电路设计原理图, 在 CST 中的“schematic”中建立原理图如图 4 所示。其中, 对于

共模电感的 S 参数加载, 使用此前测量得到的共模电感“.s4p”文件;

(3) 将共模电容和差模电容的寄生参数(包括寄生电感等)在 CST 仿真中进行设置;

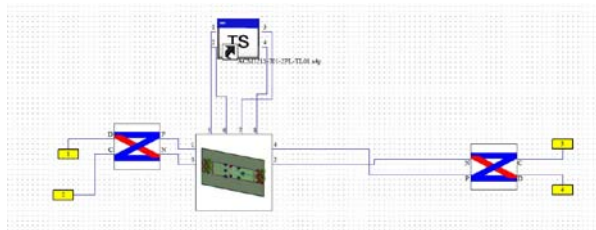


图4 CST 原理图界面设计滤波仿真电路

(4) 设置求解器, 将仿真频率设置为 300 kHz~100 MHz;

(5) 利用 CST 对 28 V 直流电源滤波电路进行场路仿真, 得到关于该滤波板的差模插入损耗和共模插入损耗的仿真结果。

3 28 V 直流电源滤波板测试

为了验证 28 V 直流滤波电路的设计及场路协同仿真的正确性, 使用矢量网络分析仪(型号: Keysight E5071C)^[10]对电源滤波板实物进行共模和差模插入损耗测试, 如图 5 所示, 测试连接图如图 6 所示。

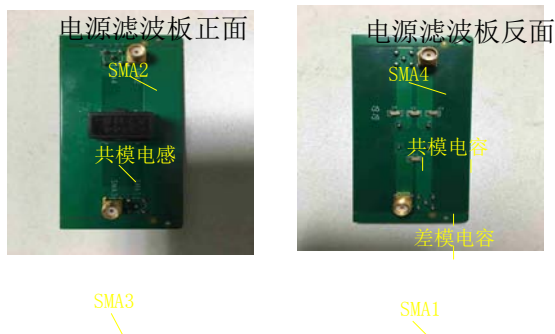
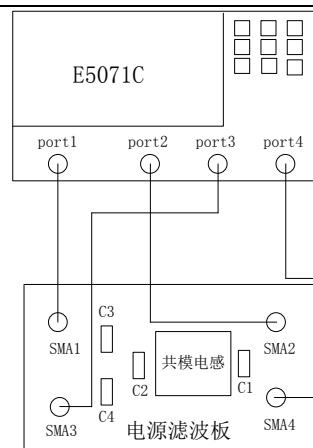


图5 28 V 直流电源滤波板



图注: 小型射频接口 (SMA: Sub-Miniature-A)

图6 插入损耗测试连接示意图

上述仿真和实验结果对比见图 7 和图 8。分析可知, 仿真和实测的共模和差模插入损耗相关曲线, 整体趋势大致相同, 吻合度较好, 验证了使用 CST 场路协同仿真的可行性和准确性。

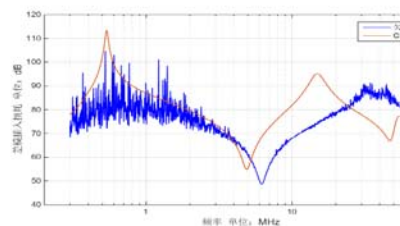


图7 CST 仿真和实测差模插入损耗对比图

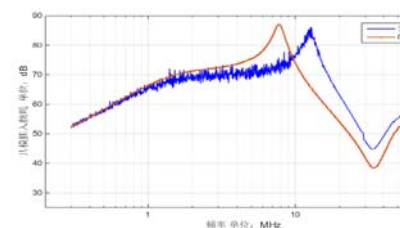


图8 CST 仿真和实测共模插入损耗对比图

4 仿真测试结果分析

为了详细了解共模电感、共模电容和差模电容分别对共模、差模插入损耗的影响, 我们依次进行以下仿真和实验测试:

4.1 单共模电感下的仿真与测试

(1) 在矢网测试中, 滤波板上只保留共模电

感并进行测试, 测试结果如图 9 所示。

(2) 在 CST 仿真中, 滤波板 PCB 模型上只保留共模电感, 仿真结果如图 9 所示。

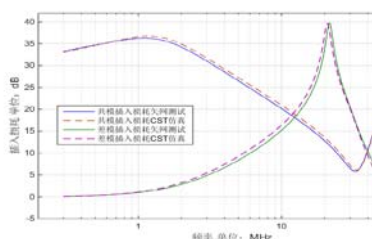


图9 仅保留共模电感时的测试和仿真插入损耗

(3) 分析上述结果可知：

①在仿真和测试中, 仅保留共模电感的滤波板在低频段（小于 3 MHz ）时对该频段干扰信号的差模插入损耗较小, 而随着频率的不断增大, 共模电感的分布参数作用显现出来, 在频率为 20 MHz 左右时, 共模电感发生谐振, 此时则对差模插入损耗有较大影响；

②在仿真和测试中, 仅保留共模电感的滤波板在低频段（小于 4 MHz ）时对该频段干扰信号的共模插入损耗较大, 而随着频率的不断增大, 共模电感的分布参数作用显现出来, 在频率为 30 MHz 左右时, 对共模插入损耗无太大影响。

4.2 共模电感和共模电容下的仿真与测试

(1) 在矢网测试中, 滤波板上保留共模电感、共模电容, 测试结果如图 10 所示。

(2) 在 CST 模型中, 滤波板 PCB 模型上保留共模电感、共模电容, 仿真结果如图 10 所示。

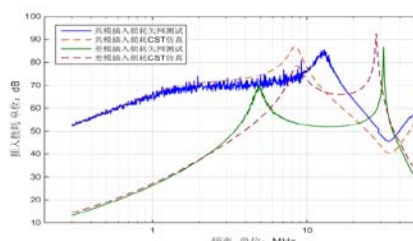


图10 保留共模电感和共模电容时的测试和仿真插入损耗

(3) 分析上述结果可知：

①在仿真和测试中, 保留共模电感和共模电容的滤波板在低频段（小于 1 MHz ）时对该频段干扰信号的差模插入损耗较小, 而随着频率的不断增大, 共模电感、共模电容的分布参数作用显现出来, 在频率分别为 7 MHz 或者 22 MHz 左右时, 滤波板对差模插入损耗有较大影响；

②在仿真和测试中, 保留共模电感和共模电容的滤波板在低频段（小于 14 MHz ）时对该频段干扰信号的共模插入损耗非常大, 而随着频率的不断增大, 共模电感的分布参数作用显现出来, 对共模插入损耗影响有所减小, 但是在测试频段内仍然满足大于 30 dB 的要求。由此可见, 共模电容的加入对高频段共模干扰的抑制有着重要的影响。

4.3 共模电感和差模电容下的仿真与测试

(1) 在矢网测试实验中, 滤波板上保留共模电感、差模电容进行测试, 测试结果如图 11 所示。

(3) 在 CST 模型中, 滤波板 PCB 模型上保留共模电感、共模电容。仿真结果如图 11 所示。

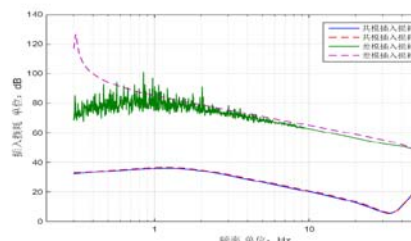


图11 保留共模电感和差模电容时的测试和仿真插入损耗

(4) 分析上述结果可知：

①在仿真和测试中, 保留共模电感和差模电容的滤波板在低频段（小于 10 MHz ）时对该频段干扰信号的差模插入损耗较大, 而随着频率的不断增大, 差模电容的分布参数作用显现出来, 滤波板对差模插入损耗的影响逐渐减小, 但在测试频段内, 差模的插入损耗大于 30 dB , 满足相关设计要求；

②在仿真和测试中, 保留共模电感和差模电容的滤波板在低频段（小于 3 MHz ）时对该频段干扰信号的共模插入损耗非常大, 而随着频率的不断增大, 共模电感的分布参数作用显现出来, 对共模插入损耗影响有所减小, 甚至低于 30 dB 。由此可见：

缺少共模电容，单独靠共模电感抑制频率超过 3 MHz 共模干扰的抑制影响有限。

4.4 仿真测试结果对比结论

通过以上三组的仿真、测试的结果对比，我们可以得到如下结论，如表 1 所示。

表1滤波电路元器件对插入损耗的影响

	差模插入损耗	共模插入损耗
共模电感	小于 20 MHz 时，共模电感对差模插入损耗无衰减；大于 20 MHz 时，共模电感的寄生参数对差模插入损耗有影响。	小于 3 MHz 时，共模电感对共模插入损耗有较大衰减；大于 3 MHz 时，共模电感对共模插入损耗无衰减。
共模电容	小于 3 MHz 时，共模电容对差模插入损耗无衰减；大于 3 MHz 时，共模电容对差模插入损耗有影响。	共模电容着重提高高频时，对共模插入损耗的影响；在测试频段内，共模插入损耗均大于 30 dB。
差模电容	小于 3 MHz 时，差模电容对差模插入损耗影响大；但随频率升高，差模损耗略减，但仍在达标范围内。	低频无影响。

通过上述对比分析，可得如下结论：

- (1) 共模电感对滤波电路低频时的共模干扰抑制有较大影响；
- (2) 共模电容对滤波电路高频时的共模干扰

- 抑制有较大影响；
- (3)差模电容对全频段的差模干扰抑制有较大影响。

5 结束语

本文针对航空电子系统某设备中的 28 V 直流电源滤波电路，采用基于 CST 的仿真软件进行场路协同仿真，并使用矢量网络分析仪对实物进行了共模和差模插入损耗的测试，对比 CST 场路协同仿真结果和实测曲线可知：（1）基于 CST 的场路协同仿真由于考虑了元器件的高频分布参数，准确反映了插入损耗频率特性；（2）通过依次采取对保留单个共模电感、保留共模电感和共模电容、保留共模电感和差模电容的滤波板进行仿真和测试，总结出每种类型的电气元器件对共模插入损耗和差模插入损耗的贡献和影响。

本文提出的仿真分析和测试方法对 28 V 直流电源滤波电路的设计、仿真和测试有重要参考作用，也对 ARINC 429、ARINC 664 等通信滤波电路的设计和仿真具有一定的应用价值。

参 考 文 献

[1] 李声飞. 一种基于 FPGA 的多功能 ARINC 429 总线接口[J]. 信息技术与信息化, 2016, (12): 48-51.

[2] 张桢, 孙沛. 基于 FPGA 的 ARINC 429 总线通讯板设计[J]. 航空计算技术, 2010, (4): 112-115.

[3] 任仁良, 赵尊全, 冯建朝. 总线在现代飞机配电系统中的应用[J]. 测控技术, 2013, (12): 114-117.

[4] 熊华钢, 李峭, 黄永葵. 航空电子全双工交换式以太网标准研究[J]. 航空标准化与质量, 2008, (1): 25-28.

[5] CST 工作室套装丛书[M]. 北京:电子科技大学出版社, 2015-05.

[6] PAUL C R. Introduction to electromagnetic compatibility[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007.

[7] 周立夫, 林明耀. EMI 电源滤波器的设计和仿真分析[J]. 低压电器, 2004(4): 7-9.

[8] 刘婷婷, 邓豹, 贺莹. 电源无源滤波器设计[J]. 信息通信, 2019, (4): 84-86.

[9] PENG H, ZHONGYUAN Z, MINGJIE S, YA L, XIANG Z, PENG L, QI Z. A simple measurement method for frequency-dependent impedance and parasitic parameters of common-mode chokes[C]. 2019 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal &Power Integrity (EMC+SIPI), 22-26 July 2019, New Orleans, LA, USA, 2019: 266-271.

[10] Keysight. E5071C 网络分析仪的使用说明[EB/OL]. [2019-10-16]. <https://max.book118.com/html/2018/0312/157026001.shtm>.

[收稿日期] 2020-01-02