

总线连接器转移阻抗快速测试研究^{*}

徐金华¹, 刘光斌¹, 王 凯²

(1 第二炮兵工程学院, 西安 710025;

2 第二炮兵驻孝感地区军事代表室, 湖北孝感 432100)

摘要: 1553B 总线系统已广泛应用于飞行器中, 为确保大系统的电磁兼容性, 有必要开展总线连接器的屏蔽效能测试研究。针对当前总线连接器转移阻抗测试方法的局限, 提出了一种新的搭接简单、测试方便的快速测试方法。通过大量的测试试验, 获取了该型总线连接器的转移阻抗特性; 并通过比照分析测试数据与经验公式, 验证了所提出的测试方法的有效性。

关键词: 总线连接器; 转移阻抗; 屏蔽效能; 快速测试

中图分类号: TP336 **文献标志码:** A

A Rapid Method for Measuring Transfer Impedance of Bus Connectors

XU Jinhua¹, LIU Guangbin¹, WANG Kai²

(1 The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China;

2 Military Representative Office of the Second Artillery in Xiaogan Area, Hubei Xiaogan 432100, China)

Abstract: The 1553B bus system has been widely used in aircraft, so it is necessary to analyze shielding effectiveness of the bus connectors to ensure electromagnetic compatibility of the whole system. Transfer impedance is an effective attribute of shielding efficiency of connectors. Based on the analysis of limit of current test methods, a simple and convenient workbench setup has been developed to test the transfer impedance of bus connectors. Through a lot of experiments, the transfer impedance characteristics have been acquired, meanwhile, the simulation results of shielded bus connectors based on the measuring data have been proven to be consistent with the experience formula analysis, which proves validity of the proposed method.

Keywords: bus connectors; transfer impedance; shielding effectiveness; rapid measurement

0 引言

为保证飞行器大系统级的电磁兼容性(EMC), 必须要开展部件级的总线互联结构连接器的屏蔽性能研究。总线连接器屏蔽性能的优劣通常采用转移阻抗值的大小来表征, 当前众多飞行器上采用了 1553B 总线互联结构连接器, 在进行转移阻抗分析时均可采用“同轴近似”, 其测试方法可以采用通用的匹配三同轴法(matched-triaxial method)和线注入法(line-injection method)^[1-6]。但 1992 年 Halme 结合 IEC-96.1 标准对几种典型的测试方法进行了分析比较, 指出这些方法由于试验搭接很费时并

不能适用快速发展的小型高频连接器的测试分析^[1]。因而, 在侧重于分析系统电磁兼容性且不苛求测试数据严格精确的条件下, 设计一种结构简单、搭接方便、连接器转移阻抗测试方法是很有意义的, 且可以为总线系统的 EMC 设计提供技术支撑。

1 连接器转移阻抗分析

通常在使用总线连接器时, 需要综合考虑连接器的价格、功能和便捷性, 对于某些重要系统来说(如, 机载武器系统等), 最值得关注的是连接器的屏蔽性能。连接器的屏蔽效能取决于多方面的因素, 如外壳的材料、连接器的尺寸等。

^{*} 收稿日期: 2008-11-01

作者简介: 徐金华(1982-), 男, 江苏泰兴人, 博士研究生, 研究方向: 系统可靠性与电磁环境控制。

但显然,这些物理量难以有效地表征连接器的屏蔽效能。

理论上,通过求解复杂的 Maxwell 方程可以获得连接器的屏蔽效能,但工程实际中,在分析外界干扰对总线互联结构连接器的耦合效应时,连接器的屏蔽效能应通过连接器的转移阻抗测试来进行分析(1992 年, Szentikuti 在连接器屏蔽效能分析中引入了转移阻抗方法^[7])。

对于电路级分析,连接器的尺寸一般都是“电小”的,因而可以作为集总电路元素。通常,具有近 100% 屏蔽材料覆盖的连接器因电场导致的泄露是很小的,因而在分析总线连接器屏蔽效能时,仅仅考虑磁场耦合。

当连接器外层屏蔽体上的电压在线缆与机壳之间激励“天线”效应时,会发生辐射,但由于连接器内部信号线上的差模信号产生的电压与连接器的主轴是正交的,因而其作用是有限的;而当外部屏蔽体上有共模电流激励时,即会在连接器内部信号线上产生径向电压,该电压无疑会对信号的传输产生影响。因而,在分析连接器的转移阻抗时,将仅考虑共模电流诱发的差模耦合电压。此耦合电压与共模电流的比值即可衡量连接器的屏蔽效能。

连接器的转移阻抗 Z_t 定义为连接器内导体芯线上的耦合电压 V_{DM} 与连接器外表面上的电流 I_{CM} 的比值,如式(1)所示:

$$Z_t = \frac{V_{DM}}{I_{CM}} \tag{1}$$

工程实践中,连接器转移阻抗的计算式通常采用下式进行估计^[8]:

$$Z_t = R_{DC} \frac{kt}{\sinh kt} \tag{2}$$

式中: $R_{DC} = l_t/2\pi\sigma r_t$ 为直流电阻, $k = (1 + j)/\delta$, $\delta = \sqrt{2/\omega\sigma\mu_0}$ 为趋肤深度, r_t 为连接器的内径。显然,连接器转移阻抗测试时,各种因素(包括,屏蔽层的结构、衬垫等)很容易干扰测试结果。

2 连接器转移阻抗快速测试方法

总线连接器转移阻抗测试的常用方法是匹配三同轴法和线注入法,这两种方法的优点是测试数据精度高,缺点是对实验条件的要求较为苛刻,且试验搭接费时、结构繁杂,难以有效地适应

小型高频总线连接器的转移阻抗测试。

针对通用测试方法的局限,文中提出了一种结构简单、搭接方便的总线连接器转移阻抗测试方法。即在较为纯净的背景环境中,直接使用信号发生器通过电流钳(current clamp)在连接器屏蔽体上注入电流,同时,使用频谱仪或网络分析仪来测试连接器内部线缆导体上的耦合电压。该方法,在不苛求测试数据严格精确的条件下,降低了试验条件的限制。具体的测试原理图如图 1 所示。

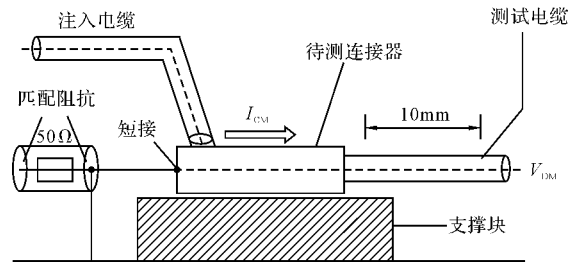


图 1 连接器转移阻抗快速测试原理图

图 1 中,共模电流从左边注入到待测连接器的屏蔽层上,连接器内部的导体与屏蔽层在左端短接^[8];差模耦合电压可在右端的短电缆上采用频谱仪测量。

测试时,差模电压和共模电流通过测量直接获取,待测连接器可以很方便地替换,并且该测试可在背景较为纯净的普通实验室内进行,从而有效地克服了通用方法的不足。

根据图 1 所示的测试原理,搭建了 1553B 总线屏蔽连接器的转移阻抗测试装置,如图 2 所示。

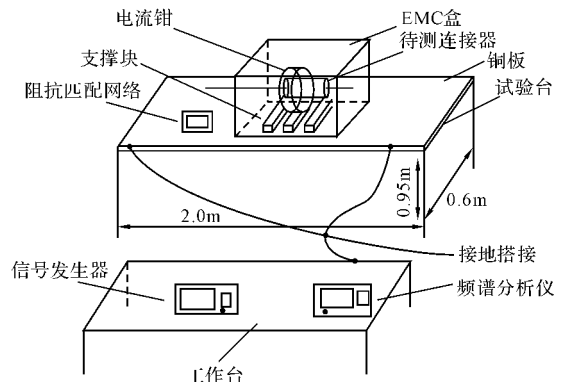


图 2 快速测试时试验搭接简图

测试开始时,应先进行开环测试(即未将连接器接入测试回路)。共模电流将直接注入至电缆上,以确保差模耦合电压的测试值仅反映频谱仪输入模块的转移阻抗。通常情况下,该测试获

得的转移阻抗是感性的,其值相当于 0.4nH 或 2.5mΩ。

为降低转移阻抗 Z_t 测试门限,一般将待测连接器放置在铜制或铁制的 EMC 盒子中。此外,为减小差模耦合电压测试电缆上的共模电流值,应将测试装置的套管与 EMC 盒子全方位连接,极力避免“pigtail”式搭接,以降低频谱分析仪的耦合噪声幅值。实际测试时,允许存在 6dB 的误差。

3 快速测试试验与结果分析

测试用频谱仪为 R&S/FSP30(频率范围 9kHz~30GHz),试验前应对其进行校准,可以采用频谱仪等设备面板上的按钮进行设置,也可以采用相应工作频率范围(如,300kHz~1.82GHz)的 S 参数仪进行校正^[4];测试用信号发生器为 R&S/SMR20(频率范围 10MHz~20GHz),按照扫频发射和点频发射两种方式对连接器终端匹配阻抗与未匹配阻抗两种情况进行测试并记录;测试用电流钳为 R&S/EZ-17,选取测试频段为 1M~200MHz,该频段内电流钳的耦合校正因子约为 $k = -17\text{dB}$,其值较为稳定;测试用连接器为 1553B 总线通用连接器。

3.1 扫频方式激励时测试结果

图 3~图 5 为信号发生器扫频方式激励时,频谱仪在连接器内部导体上测得差模耦合电压波形。

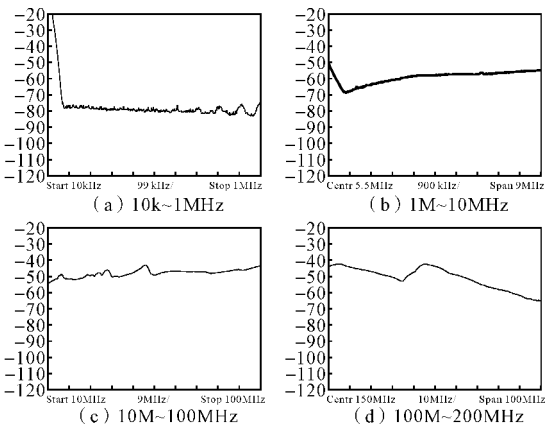


图 3 施加共模电流时屏蔽连接器

电磁耦合频谱(连接器末端接匹配阻抗)

分析图 3~图 4 的相应频段可以看出,连接器匹配阻抗时和未匹配阻抗时,连接器内部电缆的耦合频谱有明显差别。后者在全频段内改善

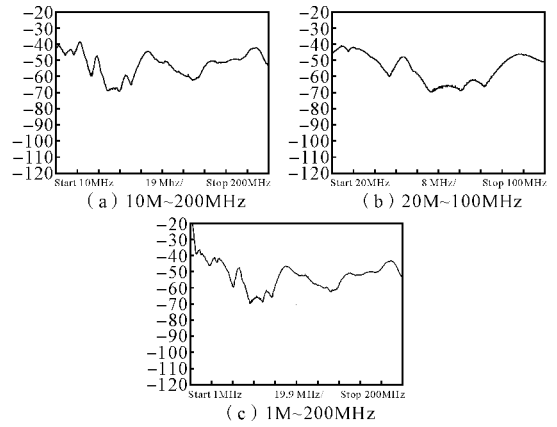


图 4 施加共模电流时屏蔽

连接器电磁耦合频谱(连接器端接匹配阻抗)

了连接器的抗干扰性,在某些频点处的耦合频谱甚至降低了 30dB(如约 60MHz 处)。

3.2 点频方式激励时测试结果

在 1M~200MHz 频段内分 10 个频点发射,测试连接器接匹配阻抗与未接匹配阻抗两种情况下内部电缆上的耦合频谱,同时,结合信号发生器、频谱仪和电流钳的相关参数分析,可得结果如表 1~表 3 所示。

根据测试时不同参数和单位间的对应关系,可得待测参数之间存在如下关系式:

$$\begin{aligned}
 I_{CM} &= 10^{(P_1+k-60)/20} \\
 U_{DM1} &= 10^{(P_2-P_3-13)/20} \\
 U_{DM2} &= 10^{(P_4-P_3-13)/20}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

式中: I_{CM} 为换算后的连接器上的共模电流; U_{DM1} 为未匹配电阻时连接器上的差模耦合电压; U_{DM2} 为匹配电阻时连接器上的差模耦合电压; P_1 为信号发生器的发射功率; P_2 为未匹配阻抗时频谱仪在连接器屏蔽层与内部导体间测得的接收功率; P_3 为信号线上的损耗功率; P_4 为匹配阻抗时频谱仪在连接器屏蔽层与内部导体间测得的接收功率。

分析表 2 和表 3 中各参数相应的测试数据,应用仿真软件 Matlab,可仿真得到如图 5 所示的总线屏蔽连接器转移阻抗随频率变化特性。

比较表 2 和表 3 可以看出,相应频段处匹配阻抗后连接器内部电缆与屏蔽层间的差模耦合电压明显下降;分析表 1 转移阻抗测试数据和仿真图 5,显然随着频率的上升,连接器转移阻抗基本上呈下降趋势,这与大多文献的分析是一致的,从而也进一步验证了经验公式(2)的正确性。

结果分
析:随着频率的上升,连接器屏蔽材料的趋肤效应愈加明显,因而一定程度上提高了连接器的屏蔽效能。

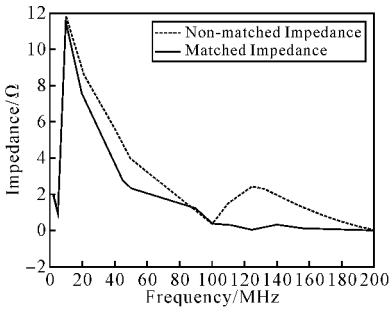


图 5 连接器转移阻抗随频率变化特性

表 1 不同频率处试验测试参数

测试频率 f /MHz	校正因子 k /dBm	发射功率 P_1 /dBm	接收功率 P_2 /dBm	信号线损 P_3 /dBm	接收功率 P_4 /dBm
1	-8.7	-20			
2	-13.3	-20	-59.16	-25.54	
5	-16.5	-20	-50.52	-25.68	
10	-17.1	-20	-49.93	-25.72	-50.15
20	-17.0	-20	-52.57	-25.66	-53.76
50	-16.3	-20	-55.44	-29.06	-59.82
100	-15.1	-20	-56.20	-45.85	-51.42
125	-14.2	-20	-66.45	-47.05	-64.78
150	-12.7	-20	-46.42	-38.84	-51.57
175	-9.2	-20	-46.32	-39.27	-53.91
200	-7.9	-20	-47.12	-38.26	-60.00

表 2 未匹配阻抗时试验测试参数

测试项	频点 /MHz									
	2	5	10	20	50	100	125	150	175	200
差模电压 / μ V	13.49	34.67	36.94	27.45	13.34	17.7	0.47	12.22	11.76	12.05
共模电流 /mA	4.80	0.33	0.31	0.32	0.34	0.39	0.44	0.52	0.78	90.16
转移阻抗 /m Ω	2.01	1.04	11.8	8.7	3.90	0.40	2.41	1.5	0.61	0.001

表 3 匹配阻抗时试验测试参数

测试项	频点 /MHz									
	2	5	10	20	50	100	125	150	175	200
差模电压 / μ V	9.59	31.62	36.02	23.93	8.05	3.07	0.057	6.75	4.91	2.74
共模电流 /mA	4.80	0.33	0.31	0.32	0.34	0.39	0.44	0.52	0.78	90.16
转移阻抗 /m Ω	1.87	0.94	11.5	7.6	2.30	0.08	0.01	0.13	0.06	0.001

4 结束语

随着飞行器系统电磁环境日趋复杂化,确保总线系统电磁兼容性变得愈加重要。由于屏蔽连接器通用测试方法耗时、测试条件严格,文中提出了一种搭接简单、测试方便的快速测试方法,通过实际测试验证了本方法测试结果与经验公式分析相一致,并获得了总线屏蔽连接器转移阻抗特性的一些重要结论。

参考文献:

- [1] L Halme. Development of IEC cable shielding effectiveness standards[C]// Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Anaheim, Canada, 1992: 321—328.
- [2] 齐磊, 崔翔, 谷雪松. 屏蔽电缆转移阻抗和转移导纳的宽频测量[J]. 电波科学学报, 2007, 22(4): 697—698.
- [3] L Jung, J Luiken. Evaluation of measured complex transfer impedances and transfer admittances for the characterization of shield inhomogeneities of multiconductors cables[J]. IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, 1999, 41(4): 460—468.
- [4] P D Langhe, L Martens, D D Zutter. Transfer impedance measurements on the shielding of a multi-pins board-to-board connectors[C]// Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Chicago, IL, 1994: 453—455.
- [5] M Bluhm, E Peroglio, G Pierucci, et al. Measurements of transfer impedance with the line injection method on cables and connectors[C]// Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Washington, DC, 2000, 2: 599—560.
- [6] 孙蓓云, 郑振兴, 周辉, 等. 屏蔽电缆转移阻抗的测量[J]. 核电子学与探测技术, 2002, 22(2): 179—181.
- [7] B T Szenkuti. Shielding quality of cables and connectors: some basics for better understanding of test methods[C]// Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Anaheim, Canada, 1992: 294—301.
- [8] F B M van Horck, A P J van Deursen, P C T van der Laan, et al. A rapid method for measuring the transfer impedance of connectors[J]. IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, 1998, 40(3): 193—194.