

# 一种基于散射参数测试的人工电源网络校准方法

李 林 封志明 赵品彰 赵 波

(江苏省计量科学研究院 江苏 南京 210007)

**[摘要]** 由于人工电源网络(LISN)精度直接影响到传导电磁干扰试验结果,通过分析 LISN 电路拓扑结构,建立了高频寄生参数模型及其等效电路,并利用散射参数法分析其校准特性参数,包括分压系数、隔离度、耦合抑制比与受试端阻抗。理论研究与实验结果表明,电路高频寄生参数对 LISN 受试端阻抗影响较大。在电感线圈中施加多个 430  $\Omega$  补偿电阻后可有效提高其特性参数,并为其设计提供理论依据。

**[关键词]** 人工电源网络;寄生参数;S 参数;校准

**[中图分类号]** TM461 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2011)02-0004-05

## A Calibration Method Based on Scattering Parameters of the Artificial Mains Network

Li Lin ,Feng Zhiming ,Zhao Pinzhang ,Zhao Bo

( Jiangsu Institute of Metrology , Nanjing 210007 , China)

**Abstract:** Because the artificial mains network(LISN) has a direct affect on the accuracy of test results on conducted EMI ,this paper established a high-frequency parasitic parameters model and its equivalent circuit by analyzing LISN circuit topology , and analyzed its calibration parameters which include voltage division factor , isolation rejection ratio , coupling rejection ratio and EUT port impedance by using scattering parameter method. Theoretical and experimental results showed that high-frequency parasitic parameters had a great impact on EUT port impedance of LISN. By adding multiple 430  $\Omega$  compensation resistors in the inductance coil ,the parameters were effectively improved and a theoretical basis was provided for its design.

**Key words:** line impedance stabilization network , parasitic parameter , S parameter , calibration

伴随着电子设备的组成和结构日益复杂,电子设备的电磁兼容性逐渐受到用户的重视<sup>[1]</sup>。而电磁兼容性测试则是获取电子产品电子兼容性最为主要也是最为直接的手段。在电磁兼容的传导骚扰中,作为主要辅助测试设备的人工电源网络<sup>[2,3]</sup>发挥着重要的作用。但是人工电源网络的引入也给测试带来了附加误差。为了减小附加误差对测试结果的影响,对人工电源网络的校准显得尤为重要,且其校准精度直接影响着测试的结果<sup>[4]</sup>。频谱仪校准法是人工电源网络目前采用最多的校准算法,然而频谱校准算法只考虑了信号的正向传输,没有考虑信号传输过程中的反射现象,因此将增加测试误差。

为了减少频谱仪忽略信号反射影响造成的误差,本文在分析人工电源网络结构和寄生参数电路模型的基础上,提出了基于矢量网络分析仪校准的 S 参数校准方法,并对其 3 个主要特性参数进行了研究,提出了有效可行的改进方案。

## 1 人工电源网络优化拓扑结构

线阻抗稳定网络 LISN( Line Impedance Stabilization Network) 即 V 型人工电源网络,是目前国际上规定的传导性电磁干扰测量设备,又称人工电源网络或电源阻抗稳定网络,是重要的电磁兼容测试设备<sup>[5]</sup>。其主要作用就是在射频范围内向受试设备端子之间提供一规定阻抗,并能将试验电路与供电电源上的无用

收稿日期: 2011-02-20.

通讯联系人: 李 林,工程师,研究方向:电磁计量、电磁兼容检测. E-mail: 13951644448@139.com

射频信号隔离,进而将骚扰电压耦合到测量接收机上,其过程是噪声分离研究的基础<sup>[6,7]</sup>。

人工电源网络的电路原理图如图1所示,根据GB/T6113.102-2008标准<sup>[5]</sup>,LISN的阻抗规范包括当骚扰输出端接50Ω负载阻抗时在受试设备端(PE除外)测得的相对于参考地阻抗的模和相角两个部分。无源器件电容、电感、电阻在低频状态时呈现本征特性,但是随着频率的增大,由于制作工艺、材料、环境等因素的存在,必然会伴随着微小的寄生参数产生,且频率越高,寄生参数影响越大。通过实验可以测出电感、电容的高频特性,在高频下电感呈容性,电容呈感性;电阻的高频特性暂不能确定,且相对电感、电容影响较小,考虑寄生参数影响时可以忽略电阻的高频寄生参数影响。结合上述考虑可以得出如图2所示的等效电路原理图,其中骚扰输出端口考虑了适配器的高频寄生参数。在寄生参数等效电路的基础上,得出如图3所示考虑各电容、电感的寄生参数时,骚扰输出端接50Ω电阻时L线阻抗的测量原理图。

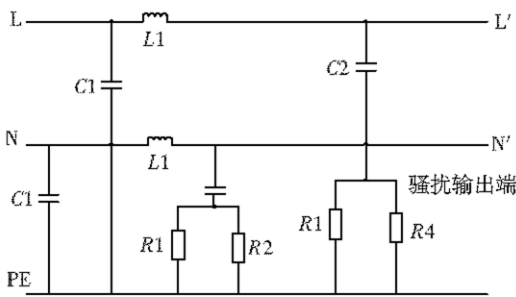


图1 人工电源网络电路原理图

Fig.1 Schematic of artificial mains network

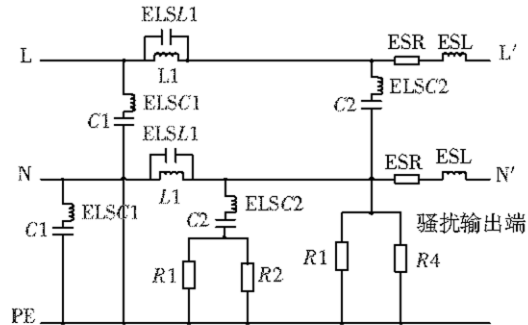


图2 考虑高频寄生参数的等效电路图

Fig.2 Equivalent circuit considering high-frequency parasitic parameters

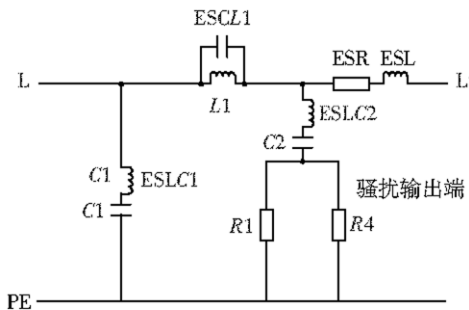


图3 考虑高频寄生参数测量原理图

Fig.3 Measurement schematic considering the high-frequency parasitic

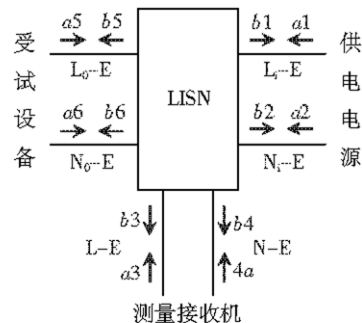


图4 LISN的S参数建模示意图

Fig.4 Schematic model based on scattering parameters of artificial mains network

## 2 基于散射参数测试的 LISN 校准方法

$S$  参数用于表示入射波  $a$  和反射波  $b$  之间的关系,任何网络都可用多个  $S$  参数表征其端口特性。 $n$  端口网络需要  $n^2$  个  $S$  参数,其中,表征某一端口自身入射波和反射波关系的  $S$  参数  $S_{ii}$  称为反射参数,表征不同端口之间的入射波和反射波关系的  $S$  参数  $S_{ij}$  称为传输参数<sup>[8]</sup>。

对 LISN 的测试主要包括隔离度 (IRR)、分压系数 (VDF)、耦合抑制比 (CRR) 和受试端阻抗 4 个方面,而基于矢量网络分析仪 (VNA) 采用散射参数 ( $S$  参数) 方法测量 LISN 的计量特性参数时, LISN 可以看作一个六端口网络,对其进行  $S$  参数建模。如图4所示,其中  $V_{Li-E}$ 、 $V_{Ni-E}$  分别表示供电电源端口火线端子、中线端子非对称参考电压;  $V_{Lo-E}$ 、 $V_{No-E}$  分别表示受试设备端口火线端子、中线端子非对称参考电压;  $V_{L-E}$ 、 $V_{N-E}$  分别表示测量接收机端口火线端子、中线端子非对称参考电压。

通过对散射参数的归一化处理,可以得到端口归一化的电压信号,即  $U_n = \sqrt{Z_0}(a_n + b_n)$ ,其中  $Z_0$  为匹配阻抗,  $a_n$ 、 $b_n$  分别是  $n$  号端口的入射波和反射波。根据散射参数的定义以及归一化处理,可以推导出 LISN 的 4 个基于  $S$  参数的特性参数。在此我们只对分压系数做出详细推导,其他参数推导方法同理可得。

分压系数的推导过程如下:

由散射参数的归一化处理,可以得到:  $V_{L-E} = \sqrt{Z_0}(a_3 + b_3)$ .

$V_{L_0-E} = \sqrt{Z_0}(a_5 + b_5)$   $S_{ij} = b_i/a_j$  将各式代入分压系数的定义式  $VDF_L = 20\log \left| \frac{V_{L-E}}{V_{L_0-E}} \right|$  得:

$$\begin{aligned} VDF_L &= 20\log \left| \frac{\sqrt{Z_0}(a_3 + b_3)}{\sqrt{Z_0}(a_5 + b_5)} \right| = 20\log \left| \frac{a_3 + b_3}{a_5 + b_5} \right| = 20\log \left| \frac{\frac{a_3}{a_5} + \frac{b_3}{a_5}}{1 + \frac{b_5}{a_5}} \right| = \\ &= 20\log \left| \frac{\frac{a_3}{b_5} \times \frac{b_5}{a_5} + \frac{b_3}{a_5}}{1 + \frac{b_5}{a_5}} \right| = 20\log \left| \frac{S_{55} \frac{S_{55}}{S_{53}} + S_{35}}{1 + S_{55}} \right|. \end{aligned} \quad (1)$$

由此推导原理便可以得到人工电源网络基于  $S$  参数的其他特性参数分别如下:

(1) 隔离度:

$$\begin{aligned} IRR_{LL} &= 20\log \left| \frac{V_{L-E}}{V_{L_i-E}} \right| = 20\log \left| \frac{\frac{S_{11}}{S_{13}} + S_{31}}{1 + S_{11}} \right|, \quad IRR_{LN} = 20\log \left| \frac{V_{L-E}}{V_{N_i-E}} \right| = 20\log \left| \frac{\frac{S_{22}}{S_{23}} + S_{32}}{1 + S_{22}} \right|, \\ IRR_{NL} &= 20\log \left| \frac{V_{N-E}}{V_{L_i-E}} \right| = 20\log \left| \frac{\frac{S_{11}}{S_{14}} + S_{41}}{1 + S_{11}} \right|, \quad IRR_{NN} = 20\log \left| \frac{V_{N-E}}{V_{N_i-E}} \right| = 20\log \left| \frac{\frac{S_{22}}{S_{24}} + S_{42}}{1 + S_{22}} \right|. \end{aligned} \quad (2)$$

(2) 分压系数:

$$VDF_L = 20\log \left| \frac{V_{L-E}}{V_{L_0-E}} \right| = 20\log \left| \frac{\frac{S_{55}}{S_{53}} + S_{35}}{1 + S_{55}} \right|, \quad VDF_N = 20\log \left| \frac{V_{N-E}}{V_{N_0-E}} \right| = 20\log \left| \frac{\frac{S_{66}}{S_{64}} + S_{46}}{1 + S_{66}} \right|. \quad (3)$$

(3) 耦合抑制比:

$$CRR_L = 20\log \left| \frac{V_{L-E}}{V_{N_0-E}} \right| = 20\log \left| \frac{\frac{S_{66}}{S_{63}} + S_{36}}{1 + S_{66}} \right|, \quad CRR_N = 20\log \left| \frac{V_{N-E}}{V_{L_0-E}} \right| = 20\log \left| \frac{\frac{S_{55}}{S_{54}} + S_{45}}{1 + S_{55}} \right|. \quad (4)$$

(4) 受试端阻抗:

$$Z = \frac{S_{65}}{S_{55}} - 1. \quad (5)$$

基于  $S$  参数的人工电源网络特性建模方法充分考虑了信号的正向传输参数及反射参数,测量精度比只考虑正向传输参数时大大提高.同时,基于  $S$  参数的人工电源网络特性建模方法能够同时测量人工电源网络的幅频特性和相频特性,以便从幅值和相位两个方面评价噪声分离网络的噪声分离效果.

### 3 实验结果与分析

受试端阻抗是 LISN 特性中较为关键的特性参数,为了利用  $S$  参数测量方法校准该特性参数,我们通过矢网分析仪对 LISN 受试端阻抗进行了校准测量,测量结果如图 5 所示.另外,插入损耗越低越能说明信号得到较为完整的传输,本文在  $S$  参数的基础上也对 LISN 的插入损耗即分压系数进行了校准测量,测量结果如图 6 所示.

测量结果显示:受试端阻抗距离  $50 \Omega$  标准阻抗较大,最大阻抗模值甚至接近  $70 \Omega$ ,而分压系数最大还不足  $-3 \text{ dB}$ ,可见高频寄生参数对受试端阻抗的影响较大,而对分压系数的影响较小,因此最大程度降低高频寄生参数对受试端阻抗的影响是 LISN 校准精度提高的关键.人工电源网络的  $50 \mu\text{H}$  电感的设计是降低高频寄生参数影响的一个主要方法.组成电感的螺线管线圈设计如图 7 所示,其中多个电阻  $R(430 \Omega \pm 10\%)$  分别接于 4 匝与 8 匝处、12 匝与 16 匝处、20 匝与 24 匝处、26 匝与 32 匝处;它是由 35 匝直径为 6 mm 的单层铜线以 8 mm 的间距缠绕在一个绝缘材料的线圈架上构成的,金属壳外的感抗大于  $50 \mu\text{H}$ ,金属壳内的感抗为  $50 \mu\text{H}$ .电感线圈的直径为 130 mm,另外在线圈支架上刻 3 mm 深的螺旋槽,并将金属线

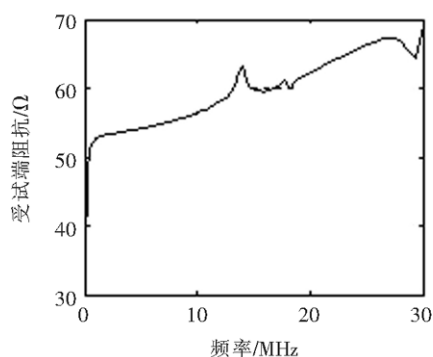


图 5 受试端阻抗的 S 参数测量分析结果

Fig.5 Scattering parameter measurement results of EUT port impedance

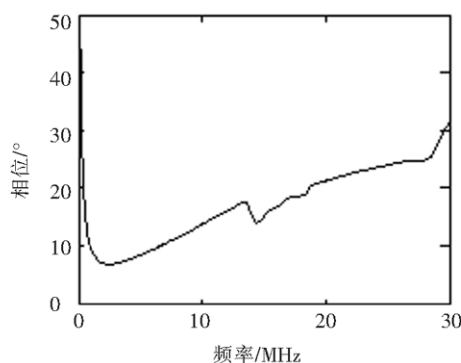


图 6 分压系数的 S 参数测量分析结果

Fig.6 Scattering parameter measurement results of voltage division factor

置于槽中以改善电感线圈缠绕的电气稳定性. 采用线圈分段法缠绕以改善线圈的高频特性, 每段 4 匝, 且每段与  $430\ \Omega$  的电阻并联, 以抑制线圈内部的谐振, 避免谐振在一定的频率范围内导致输入阻抗偏离规定的数值. 通过以上改进, 实验测得 LISN 的受试端阻抗如图 8 所示, 测量结果表明电感的改进方法很好地提高了 LISN 的受试端阻抗特性, 保证了校准的精度.

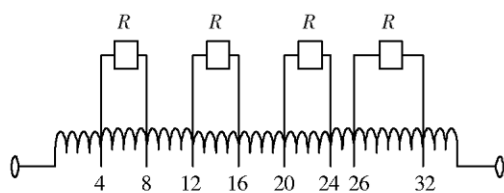


图 7 电感线圈设计

Fig.7 Inductor design

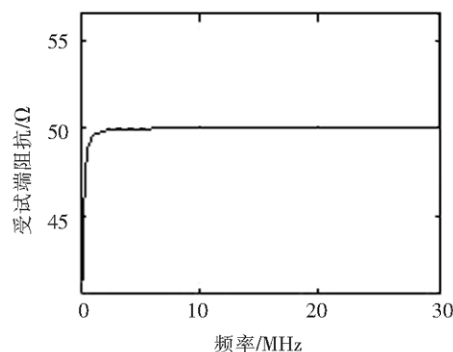


图 8 改进后的阻抗测量结果

Fig.8 Improved results of measurement

## 4 结论

人工电源网络阻抗校准是测量前的一个重要环节, 其校准精度对测量结果起着关键的作用. 本文通过分析人工电源网络的高频寄生参数等效电路模型, 重点研究了基于散射参数的分析方法, 利用散射参数推导了人工电源网络的 4 个主要特性参数, 并通过实验测量了受试端阻抗和分压系数, 验证了散射参数法的可行性与准确性, 并提出了提高校准精度的有效改进措施. 因此, 本文的研究内容对人工电源网络校准具有较高的参考价值.

## [参考文献] (References)

- [1] 高攸纲. 电磁兼容总论 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2001: 5-46.  
Gao Yougang. Pandect of EMC [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2001: 5-46. (in Chinese)
- [2] 岳玲玲, 张晓冬, 唐志君, 等. 多功能测试仪 LISN 的研究与设计 [J]. 机械与电子, 2009(8): 47-49.  
Yue Linlin, Zhang Xiaodong, Tang Zhijun, et al. Research and design of a multifunctional test apparatus LISN [J]. Machinery and Electronics, 2009(8): 47-49. (in Chinese)
- [3] 赵金奎, 王迁. LISN 在电磁兼容性检测中的应用 [J]. 电力电子技术, 2007(12): 39-41.  
Zhao Jinkui, Wang Qian. Applications of LISN in EMC detection [J]. Power Electronics, 2007(12): 39-41. (in Chinese)
- [4] 戎融, 赵阳, 肖家旺, 等. 人工电源网络阻抗高频特性及其校准精度研究 [J]. 电子质量, 2010(11): 75-77.

- Rong Rong ,Zhao Yang ,Xiao Jiawang ,et al. Investigation on high frequency characterization and calibration accuracy for artificial mains network impedance [J]. Electronics Quality ,2010( 11) : 75-77. ( in Chinese)
- [5] 全国无线电干扰标准化技术委员会. GB/T6113. 102 - 2008 无线电骚扰和抗扰度测量设备和测量方法规范 [S]. 北京: 中国标准出版社 2008.
- Committee for Standardization in China. GB/T6113. 102-2008. Radio disturbance and immunity measurement apparatus and methods [S]. Beijing: Standards Press of China ,2008. ( in Chinese)
- [6] See K Y. Network for conducted EMI diagnosis [J]. Electronic Letters ,1999 ,35( 17) : 1 446-1 447.
- [7] Ting Guo ,Chen D Y ,Lee F C. Separation of the common-mode and differential-mode conducted EMI noise [J]. IEEE Trans on Power Electronics ,1996 ,11( 3) : 480-488.
- [8] 赵阳,董颖华,陆婉泉,等. EMI 噪声分离网络在电力线噪声分析中的应用 [J]. 中国电机工程学报 ,2010 ,30( 21) : 114-120.
- Zhao Yang ,Dong Yinghua ,Lu Xiaoquan ,et al. EMI noise discrimination network applied in power line EMI noise analysis [J]. Process of CSEE ,2010 ,30( 21) : 114-120. ( in Chinese)

[责任编辑: 刘 健]

( 上接第 3 页)

#### [参考文献 ](References)

- [1] 樊明龙,倪永宏. 静电及其防护 [J]. 微电子技术 2002 ,30( 6) : 19-21.
- Fan Minglong ,Ni Yonghong. Static electricity and its protect [J]. Microelectronic Technology 2002 ,30( 6) : 19-21. ( in Chinese)
- [2] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 17626. 2 - 2006 ,电磁兼容 试验和测量技术 静电放电抗扰度试验 [S]. 北京: 中国标准出版社 2006.
- Committee for Standardization in China. GB/T 17626. 2 - 2006 ,Electromagnetic compatibility-Testing and measurement techniques-Electrostatic discharge immunity test [S]. Beijing: Standards Press of China 2006. ( in Chinese)
- [3] 王卫民,孙宇华. ESD 破坏的特点及对策 [J]. 电测与仪表 2003 ,5( 6) : 24-26( 38) .
- Wang Weimin ,Sun Yuhua. The character of damage caused by the ESD and the protective project [J] Electrical Measurement and Instrumentation 2003 ,5( 6) : 24-26( 38) . ( in Chinese)
- [4] 孙国至,刘尚合,安霆. 某电子系统的 ESD 抗扰度性能研究 [J]. 中国电子科学研究院学报 2008 ,4( 3) : 351-354.
- Sun Guozhi ,Liu Shanghe ,An Ting. Research on the ESD immunity performance of an electronic system [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology 2008 ,3( 4) : 351-354. ( in Chinese)
- [5] ESD Association Standard STM5. 1 - 1998 ,For electrostatic discharge sensitivity testing - Human Body Model ( HBM) —component level [S]. ESD Association 2001. American national standard 2007

[责任编辑: 刘 健]