

25 Hz~10 kHz 电源线传导发射的测量不确定度 评定方法研究*

葛欣宏 刘 逦 蔚素升 张 宇

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

摘 要: 传导发射的测量环节较多,导致传导发射测量不确定度的评定较为复杂,在对 25 Hz~10 kHz 电源线传导发射测量(CE101)的不确定度来源进行分析的基础上,以某机载电子设备作为受试设备,研究了 25 Hz~10 kHz 电源线传导发射的测量不确定度评定方法。1)阐述了 25 Hz~10 kHz 电源线传导发射测量的测量原理,在分析测量原理的基础上,确定了测量活动中的不确定度来源主要为测量的重复性、仪器的计量性能、阻抗不匹配及测量系统搭建中引入的不确定度分量等。2)建立了测量不确定度评定的数学模型,并对各测量不确定度分量进行了标准测量不确定度评定。3)采用 GUM 法对 25 Hz~10 kHz 电源线传导发射的测量结果进行了扩展不确定度计算。结果表明,某机载电子设备传导电流的扩展测量不确定度为 2.7 dB μ A。研究结果对电磁兼容实验室建设中的测量系统开发、实验室测量能力的提升以及测量结果质量的保障具有积极的作用。

关键词: 电磁兼容;CE101;测量不确定度;GUM 法

中图分类号: TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.3599

Measurement uncertainty assessment method's research of power line conducted emission from 25 Hz~10 kHz

Ge Xinhong Liu Luo Wei Susheng Zhang Yu

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China)

Abstract: Conducted emission measurements has more links, leads to measurement uncertainty assessment of conducted emission is more complex. In this paper, on the basis of analyzed power line conducted emission measurements from 25 Hz to 10 kHz (CE101) of uncertainty sources, taking airborne electronic equipment as test equipment, studied uncertainty methods of CE101. Firstly, introduced the measurement principle of CE101, on the basis of analyzed the measurement principle, determine the measurement activities as the main uncertainty source is measurement repeatability, instrument's measurement performance, impedance mismatch and measurement system's structures, etc. Secondly, establish the mathematical model of measurement uncertainty, and accessed standard measurement uncertainty of each component. Finally, we calculated the expanded uncertainty of CE101 by GUM method. The results showed that, expanded measurement uncertainty of airborne electronic equipment's conduction current is 2.7 dB. The results have a positive effect for development measuring system in construction of EMC laboratory, enhance the laboratory measurement capability and protect the quality of the measurement results.

Keywords: electromagnetic compatibility; CE101; measurement uncertainty; GUM method

1 引 言

测量不确定度表征合理地赋予被测量值的分散性,是与测量结果相联系的参数^[1-2]。在军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求中,水面舰船、潜艇、陆军飞机(含航线保障设

备)必须在电磁兼容实验室进行 25 Hz~10 kHz 电源线传导发射(CE101)测量,以验证水面舰船、潜艇、陆军飞机(含航线保障设备)的电源线(包括返回线)是否满足标准要求;一方面,为衡量 25 Hz~10 kHz 电源线传导发射的测量结果的质量,需要对测量结果进行不确定度评定;另一方面,在实验室

收稿日期:2015-03

* 基金项目:吉林省科技发展计划(20120331)项目

认可工作中,需要在两个或多个实验室进行能力比对,判定各实验室得到的测量结果是否处于合理范围内,测量不确定度评定是能力比对的重要环节,它使各电磁兼容实验室的 25 Hz~10 kHz电源线传导发射的测量结果可以方便地进行互相比较,提高了测量结果的一致性。目前,电源线传导发射的测量不确定度评定方面的研究,以 CE102 或民用标准中的相关项居多^[3-6],国内对 25 Hz~10 kHz 电源线传导发射(CE101)测量不确定度评定方法的相关研究较少,仅文献[7]中对 CE101 的测量不确定度评定方法进行了较系统的研究,但选取的样本量较少,且评定过程中未考虑电流探头至 LISN 距离的误差引入的不确定度分量 δ_d ,导致其不确定度评定具有一定的局限性,本文依据 GJB-152A-97《军用设备和分系统电磁发射和敏感度测量》及电磁兼容实验室的测量配置现状,参考国家标准 GB/T 6113.402-2006,对 25 Hz~10 kHz 电源线传导发射的测量不确定度评定方法进行了研究。

2 测量原理

25 Hz~10 kHz 电源线传导发射测量中,电流探头作为主要的测量设备,依据电磁耦合原理,将电源线中的传导发射转换为传导发射电流,EMI 测量接收机通过同轴电缆与电流探头连接,以频域的形式测量传导发射电平,并通过数据记录仪(PC)记录数据。测量配置中,电源线需要经过 LISN(人工电源网络)为 EUT(被测设备)供电,LISN 一方面可以为 EUT 提供规定的电源阻抗;另一方面用于阻挡 EUT 本身的电磁干扰返回至电源及耦合电路,以提供干净的电源品质。

测量中,首先依据图 1 连接测试系统,EUT 通电预热,使其达到稳定工作状态,选择一条电源线将电流探头钳在上面,采用 GJB 152A-97 的通用要求中规定的带宽和最小测量时间,使测量接收机在适用的频率范围内扫描,获取传导发射的最终测量结果,测量结束后,选择另一条电源线或回线进行测量,直至将所有电源线及回线的传导发射都测量完毕。

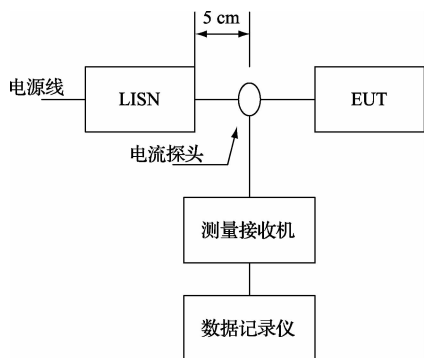


图 1 CE101 测量系统布置

3 测量不确定度的来源分析及数学模型的建立

测量不确定度的来源很多,通常是由测量设备、测量

人员、测量方法和被测对象的不完善引起,包括测量过程中人为造成的测量偏差、测量仪器计量性能的局限性及在相同条件下被测量在重复观测中的变化等^[8-9]。据此分析,在 CE101 测量环节中,LISN、EMI 测量接收机及电流探头的计量性能、测量系统布置中电流探头与 LISN 的距离、测量的重复性等均对测量活动的不确定度分量,此外,由于测量过程中需要考虑阻抗失配问题,阻抗失配也是主要的测量不确定度分量之一。

据此,建立传导电流 I 的数学模型为:

$$I = V_r + S_T + L_c + L_{lissn} + U_r + \delta M + \delta Z + \delta d \quad (1)$$

式中: V_r 为接收机电压读数, dB μ V; S_T 为电流探头的转移导纳, dB; L_c 为接收机与人工电源网络的连接电缆的衰减量, dB; L_{lissn} 为 LISN 的插入损耗, dB; U_r 为测量接收机自身引入的不确定度, dB,由对接收机正弦波电压不准确的修正值 δV_{sc} ,对接收机脉冲幅度响应不理想的修正值 δV_{pr} ,对接收机脉冲重复频率响应不理想的修正值 δV_{pf} ,对接收机本底噪声影响的修正值 δV_{nf} 等不确定度分量构成; δM 为阻抗不匹配引入的不确定度, dB; δZ 为 LISN 的阻抗不稳定带来的不确定度, dB; δd 为电流探头至 LISN 距离的误差引入的不确定度, dB。

4 测量结果的测量不确定度评定

测量不确定度评定主要包括 A 类评定和 B 类评定两个部分:A 类评定为在规定测量条件下能够将测得的量值用统计分析的方法进行评定的测量不确定度分量;B 类评定用不同于 A 类评定的方法对测量不确定分量进行评定。

4.1 A 类测量不确定分量评定

依据国家标准 GB/T 6113.402-2006,测量接收机电压读数 V_r 需要采用 A 类测量不确定分量评定方法进行评定,接收机测量读数的变化是由测量系统不稳定及人员操作的重复性等因素引起的。选择某陆军机载设备作为受试设备,依据试验的标准测量配置进行 10 次测量,由于 200 kHz 处的测量值接近于限值,在该频点处取 10 次测量结果用于评定,具体数据如表 1 所示。

表 1 测量接收机读数的 A 类评定计算

测量列 i	测量值 $R/\text{dB}\mu\text{V}$	$\nu=(R-\bar{R})^2$
1	95.71	0.105 6
2	96.02	0.403 2
3	94.06	1.755 6
4	94.95	0.189 2
5	95.93	0.297 0
6	95.15	0.055 2
7	95.99	0.366 0
8	94.76	0.390 6
9	95.82	0.189 2
10	95.46	0.005 6
Sum	953.85	3.757 4
\bar{R}	95.385	

1) 计算被测量的最佳估计值 \bar{V} , 有:

$$\bar{V} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n V_i = 98.385 \text{ dB}\mu\text{V};$$

2) 计算实验标准偏差 $s(V_k)$, 有:

$$s(V_k) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2}, n=10$$

$$\text{经计算, } s(V_k) = \sqrt{\frac{3.7574}{9}} = 0.646 \text{ dB}\mu\text{V}$$

3) 计算被测量估计值 \bar{V} 的 A 类标准不确定度 $u(V_r)$, 有:

$$u(V_r) = s(\bar{V}) = s(V_k) / \sqrt{10} = 0.204 \text{ dB}\mu\text{V}$$

4.2 B 类测量不确定分量评定

4.2.1 电流探头的转移导纳, S_T

在实际测试中, 电流钳存在转移导纳, 会引入不确定度。

信息产业部军工电子 602 计量测试站的校准报告中, 电流探头转移导纳的扩展不确定度为: $U=0.3 \text{ dB}$ ($k=2$), 则 S_T 的标准测量不确定度为 $u(S_T)=0.15 \text{ dB}$ 。

4.2.2 电缆衰减, L_c

L_c 是电流探头与接收机间的电缆及其转接头的衰减损耗, 单位为 dB。在测量中 L_c 被加入到接收机的读数中, 对结果进行修正。然而, L_c 本身的精度是有限的, 因此它会带来不确定度的贡献量。

电流探头与接收机间的电缆及其转接头的衰减损耗采用矢量网络分析仪 R&S ZVB20 进行单独测定, 受检测仪器精度限制, 衰减量的测量结果精确到 0.01 dB, 测量系统的稳定性较好, 经多次测量的数值均一致。因此 L_c 的区间半宽为 $0.01 \text{ dB}/2=0.005 \text{ dB}$, 服从均匀分布, 包含因子为 $\sqrt{3}$ 。

则 L_c 的标准测量不确定度为 $u(L_c) = 0.005/1.732 \text{ dB}=0.003 \text{ dB}$ 。

4.2.3 LISN 的插入损耗, L_{lissn}

由于 LISN 插入在 EUT 和接收机之间, 具有一定的插入损耗, 该插入损耗应该加入到最后的测量结果中。因此, 插入损耗的不确定度会给最终测试结果带来一定的不确定度贡献量。

信息产业部军工电子 602 计量测试站的校准报告中, LISN 插入损耗的扩展不确定度为: $U=0.3 \text{ dB}$ ($k=2$), 则 L_{lissn} 的标准测量不确定度为 $u(L_{lissn}) = 0.3/2 = 0.15 \text{ dB}$ 。

4.2.4 接收机自身引入的不确定度修正因子, U_r

对于从 INPUT 端口输入的骚扰, 测量接收机在处理数据过程中会引入一定的不确定度。

影响接收机测量结果的因素比较多, 其中最主要的影响因素包括:

δV_{SW} : 对接收机正弦波电压不准确的修正值, dB;

δV_{PA} : 对接收机脉冲幅度响应不理想的修正

值, dB;

δV_{PR} : 对接收机脉冲重复频率响应不理想的修正值, dB;

δV_{NF} : 对接收机本底噪声影响的修正值, dB。

信息产业部军工电子 602 计量测试站的校准报告中, 正弦波电压的扩展测量不确定度为 0.3 dB; 接收机脉冲幅度响应的扩展测量不确定度为 0.6 dB; 接收机脉冲重复频率响应的扩展测量不确定度为 0.6 dB; 显示平均噪声电平的扩展测量不确定度为 0.3 dB;

则:

$$u(\delta V_{SW}) = 0.3/2 = 0.15 \text{ dB}$$

$$u(\delta V_{PA}) = 0.6/2 = 0.3 \text{ dB}$$

$$u(\delta V_{PR}) = 0.6/2 = 0.3 \text{ dB}$$

$$u(\delta V_{NF}) = 0.3/2 = 0.15 \text{ dB}$$

则 u_r 的标准测量不确定度为:

$$u(u_r) = \sqrt{0.15^2 + 0.3^2 + 0.3^2 + 0.15^2} = 0.47 \text{ dB}$$

4.2.5 阻抗不匹配引入的不确定度, δM

由于接收机与 LISN 的阻抗不完全匹配, 需要对结果修正, 其修正的最佳值为 0 dB。

接收机与 LISN 间组成了一个二端口网络, 人工电源网络的信号采样端口连接到二端口网络的一端上^[10], 二端口网络的另一端连接到测量接收机, 则阻抗失配修正因子为:

$$\delta M = 20 \lg[(1 - \Gamma_c S_{11})(1 - \Gamma_r S_{22}) - S_{21}^2 \Gamma_r \Gamma_c]$$

式中: Γ_c 为接被测设备的人工电源网络端口的反射系数, Γ_r 为测量接收机的反射系数, 查询 NNBL 8226-2 型 LISN 反射系数曲线, 可知, 在 25 Hz~10 kHz 的频段内, 电压反射系数最大值为 0.4 dB, 即 1.047。假设接到接收机上的是一根良好匹配的电缆 ($S_{11} \ll 1$, $S_{22} \ll 1$), 其衰减可忽略 ($S_{21} \approx 1$), 且接收机射频衰减为 10 dB 或更大, 这时电压驻波比为 $VSWR \leq 1.2:1$, 相当于 $\Gamma_r \leq 0.09$ 。

据此, 可以计算 δM 的极限值, 有:

$$\delta M^{\pm} = 20 \lg[1 \pm (|\Gamma_c| |S_{11}| + |\Gamma_r| |S_{22}| + |\Gamma_c| |\Gamma_r| |S_{11}| |S_{22}| + |\Gamma_c| |\Gamma_r| |S_{21}|^2)] \approx 20 \lg[1 \pm (|\Gamma_c| |\Gamma_r|)] = [-0.86, 0.78] \text{ dB}$$

δM 的半宽度值为 0.82 dB, 服从 U 型分布, 包含因子为 $\sqrt{2}$, 则阻抗失配修正因子 δM 的标准测量不确定度为 $u(\delta M) = 0.58 \text{ dB}$ 。

4.2.6 LISN 的阻抗不稳定引入的不确定度, δZ

由于 LISN 的阻抗随频率会发生一定的变化, 低频率端阻抗小于 50 Ω , 这样会使测量结果发生波动, 带来不确定的贡献量。

通过分析电路发现, LISN 之所以不稳定, 主要因为 50 Ω 的电路支路上还有一部分并联电路, 并联电路中的电容, 尤其是电感在不同频率下阻抗特性会发生变化。查阅阻抗特性曲线, 在 150 kHz 频点时阻抗为 37 Ω 。与标准

值相比, δZ 的区间半宽为:

$$|20\lg(37/50)| = 2.615 \text{ dB}$$

由 LISN 的基本功能可知上述情况出现的概率很小, 按照 GB/T 6113.402-2006 标准, 取三角分布, 包含因子为 $\sqrt{6}$ 。

$$u(\delta Z) = 2.615/\sqrt{6} = 1.067 \text{ dB}$$

4.2.7 电流探头至 LISN 距离的误差带来的不确定度, δd

GJB 152A-97 标准中规定, 电流探头至 LISN 距离为 5 cm, 但实际操作中, 被测线缆的平直度、直尺的精度会导致电流探头至 LISN 的实际距离存在误差。因此, 电流探头至 LISN 距离的误差会给最终测试结果带来一定的不确定度贡献量。

采用测量方法确定该不确定度分量, 为避免相关性计算, 依据图 1 布置测量系统, 但采用不同型号的测量接收机。电流探头至 LISN 距离的上限 d^+ 设为 5.5 cm, 下限 d^- 设为 4.5 cm, 这是按标准布置测量系统后, 依据工程经验可能带来的最坏结果。在上下限处分别测量传导发射, 有 $\delta d^+ - \delta d^- \approx 0.5 \text{ dB}$, 区间半宽为 0.25 dB, 由于通常情况下上下限出现的概率很小, 因此认为 δd 服从三角分布, 包含因子为 $\sqrt{6}$ 。

综合计算, L_{lisn} 的标准不确定度 $u(L_{lisn}) = 0.102 \text{ dB}$ 。

4.3 测量结果的合成标准不确定度

如表 2 所示 B 类标准不确定度分量的评定结果表, 据此, 可以计算合成标准不确定度。

表 2 B 类标准不确定度分量评定结果

输入量	标准不确定度	概率分布	灵敏系数
电流探头 传输导纳, S_T	0.15 dB	正态分布	1
电缆衰减, L_c	0.003 dB	均匀分布	1
LISN 插入损耗 L_{lisn}	0.15 dB	正态分布	1
接收机自身引入的 不确定度修正因子, U_r	0.47 dB	正态分布	1
失配修正因子, δM	0.58 dB	U 型分布	1
LISN 的阻抗不稳定 带来的不确定度 δZ	1.067 dB	三角分布	1
电流探头至 LISN 距离的误差, δd	0.102 dB	三角分布	1

合成标准不确定度为:

$$u_c = [u^2(V_r) + u^2(S_T) + u^2(L_c) + u^2(L_{lisn}) + u^2(U_r) + u^2(\delta M) + u^2(\delta Z) + u^2(\delta d)]^{0.5} = 1.34 \text{ dB}\mu\text{A}$$

4.4 测量结果的扩展不确定度

取 $k = 2$ (对应 95% 的置信水平), 扩展不确定度为: $U = k \times u_c = 2 \times 1.34 \text{ dB} = 2.68 \text{ dB}\mu\text{A}$, 取两位有效数字 $U = 2.7 \text{ dB}\mu\text{A}$ 。

5 结论

系统的研究了 CE101 25 Hz~10 kHz 电源线传导发射的测量不确定度评定方法, 以某陆军机载受试设备为测量对象, 进行了测量不确定度评定, 由评定结果可知, 影响 CE101 测量不确定度的各种分量中影响程度由大到小依次是 LISN 的阻抗不稳定带来的不确定度、失配修正因子、接收机自身引入的不确定度分量等。研究结果对电磁兼容实验室建设中的测量系统开发、实验室测量能力的提升以及测量结果质量的保障具有积极的作用。

参考文献

- [1] JJF 1059.1-2012. 测量不确定度评定与表示[S].
- [2] 宋明顺, 方兴华, 黄佳, 等. 校准和检测中微小样本测量不确定度评定方法研究[J], 仪器仪表学报, 2014, 35(2): 419-426.
- [3] 王化吉. EMC 传导发射测试测量不确定度评定[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(3): 42-44.
- [4] 张萌. EMC 电源线传导发射测量不确定度评定[J]. 国外电子测量技术, 2007, 26(10): 24-25, 42.
- [5] 杨志豪, 黄昊培, 李蕴, 等. 电源端口骚扰电压测量中的不确定度分析[J]. 现代电子技术, 2013, 36(22): 105-107.
- [6] 冯英强, 周振平. 传导发射测量不确定度评定的验证[J]. 宇航计测技术, 2008, 28(5): 53-56.
- [7] 李申颖. 电磁兼容实验室不确定度评定分析研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [8] GB/T 6113.402-2006. 无线电骚扰和抗扰度测量设备和测量方法规范第 4-2 部分: 不确定度、统计学和限值建模测量设备和设施的不确定度[S].
- [9] 徐波. TD-LTE 测试系统载波泄漏测量不确定度评定[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(5): 49-51.
- [10] 唐正明, 章三妹, 朱峰. 动车组数字设备的弓网电弧电磁干扰分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(9): 980-985.

作者简介

葛欣宏, 1982 年出生, 工学博士, 副研究员, 主要研究方向为电磁兼容、计算电磁学、光电系统检测等。
E-mail: gexin820209@126.com