

星载设备电源线传导发射的测量不确定度评定方法<sup>\*</sup>

宁飞 贺庚贤 葛欣宏

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

**摘要:**星载设备电源线传导发射的测量不确定度评定较为复杂,本文在对10 kHz~10 MHz电源线传导发射测量(CE102)的不确定度来源进行分析的基础上,以某星载设备作为受试设备,研究了10 kHz~10 MHz电源线传导发射的测量不确定度评定方法。首先,阐述了10 kHz~10 MHz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、仪器的计量性能及阻抗不匹配等引入的不确定度分量等。其次,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。最终,采用GUM法对10 kHz~10 MHz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,某星载设备CE102测量结果的扩展不确定度为2.7 dB。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,对其他军用平台电子设备的CE102测量不确定度评定具有重要的参考价值。

**关键词:**电磁兼容;CE102;测量不确定度;GUM法

**中图分类号:** TB97   **文献标识码:** A   **国家标准学科分类代码:** 510.1099

## Measurement uncertainty assessment method of spaceborne equipment's power line conducted emission

Ning Fei He Gengxian Ge Xinhong

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

**Abstract:** Measurement uncertainty assessment of spaceborne equipment's power line conducted emission is very complex. Based on analysis uncertainty sources of the power line conducted emission measurements from 10 kHz to 10 MHz(CE102), taking a spaceborne equipment as test equipment, measurement uncertainty methods of CE102 is studied. Firstly, the measurement principle of CE102 is introduced. On the basis of analyzed the measurement principle, the main uncertainty source including the measurement repeatability, instrument's measurement performance and impedance mismatch, et al, is determined. Secondly, mathematical model of measurement uncertainty is established, and standard measurement uncertainty of each component is assessed. Finally, the expanded uncertainty of CE102's measurement results is calculated by GUM method. The results show that the expanded uncertainty of a spaceborne equipment's CE102 measurement results is 2.7 dB. The results give a positive effect for the EMC measurement systems development in laboratory building, improve the laboratory measurement capability and protect the quality of the measurement results, and it has important reference value for the CE102's measurement uncertainty assessment of electronic equipment on other military platform.

**Keywords:** electromagnetic compatibility; CE102; measurement uncertainty; GUM method

### 1 引言

GJB 151A—1997规定,星载设备的电磁兼容标准实验中,10 kHz~10 MHz电源线传导发射(CE102)是必须达标的一项,CE102的测量结果能够验证星载设备的所有电源

导线及返回线是否满足GJB 151A—1997的传导发射限值要求,对CE102的测量结果进行不确定度评定具有重要意义。测量不确定度在JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》中定义为: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<sup>[1-2]</sup>。对CE102进行测量不确定

度评定,一方面,能够衡量 25 Hz~10 kHz 电源线传导发射的测量结果的质量;另一方面,在实验室认可工作中,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 10 kHz~10 MHz 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已有了一定的研究基础,文献[3-6]针对传导发射进行了测量不确定度评定,文献[3]提出了研究测量不确定度的研究思路,但未进行详尽的不确定度评定研究,文献[4-6]直接给出了不确定度评定的结果,对各不确定度分量的评定较为简略,文献[7]评定了民用标准中的电源线传导发射,本文在上述工作的基础上,以某星载设备为被测对象,进一步研究了 CE102 的测量不确定度评定方法,提出了 CE102 测量不确定度评定的完整的数学模型,着重对阻抗失配修正因子及 LISN 的阻抗不稳定带来的不确定度进行了分析。

## 2 测量原理

10 kHz~10 MHz 电源线传导发射测量中,LISN 作为主要的测量设备,采样电源线中的传导发射信号,EMI 测量接收机通过同轴电缆及衰减器与 LISN 的信号输出端连接,衰减器能够在信号输出电平过大的情况下,对测量接收机的射频输入端口加以保护。测量接收机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,其次,选择一条电源线或回线,采用《GJB 152A-1997 军用设备和分系统电磁发射和敏感度测量》中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,最后,对星载设备中其它的电源线都进行重复测试。

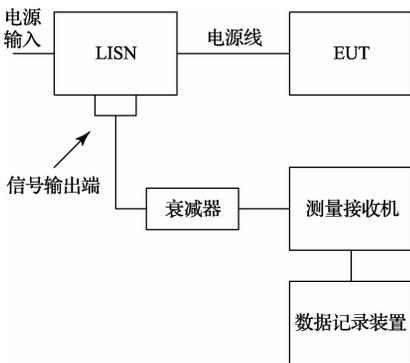


图 1 CE102 测量系统布置图

## 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<sup>[8-9]</sup>,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。据此分析,在 CE102 测量环节中,LISN、EMI 测量接收机及衰减器的计量性能、阻抗失配、测量的重复性均引入了测量不确定度分量。

据此,建立传导电压  $U_{CE}$  的测量模型为:

$$U_{CE} = V_r + L_c + L_{LISN} + U_r + \delta M + \delta Z$$

式中:

$V_r$ :接收机电压读数,  $\text{dB}\mu\text{V}$ ;

$L_c$ :接收机、人工电源网络和衰减器路径的衰减量,  $\text{dB}$ ;

$L_{LISN}$ :人工电源网络的电压分压系数,  $\text{dB}$ ;

$U_r$ :测量接收机自身引入的不确定度,  $\text{dB}$ ,由对接收机正弦波电压不准确的修正值  $\delta V_{sc}$ ,对接收机脉冲幅度响应不理想的修正值  $\delta V_{ps}$ ,对接收机脉冲重复频率响应不理想的修正值  $\delta V_{pr}$ ,对接收机本底噪声影响的修正值  $\delta V_{nf}$  等不确定度分量构成;

$\delta M$ :测量接收机、电缆、LISN 不完全匹配导致的失配修正因子,  $\text{dB}$ ;

$\delta Z$ :LISN 的阻抗不稳定带来的不确定度,  $\text{dB}$ 。

## 4 测量不确定度评定方法

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 类不确定度的评定

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。

以某星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 1 MHz 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,具体数据见表 1。

首先,计算被测量的最佳估计值  $\bar{V}$ ,有  $\bar{V} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n V_i =$

59.059  $\text{dB}\mu\text{V}$ ;

其次,计算实验标准偏差  $s(V_k)$ ,有:

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

经计算,  $s(V_k) = \sqrt{\frac{2.4185}{9}} = 0.5184 \text{ dB}\mu\text{V}$

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

$$u(V_r) = s(\bar{V}) = s(V_k) / \sqrt{10} = 0.1639 \text{ dB}\mu\text{V}$$

表 1 测量接收机读数的 A 类评定计算

测量列 $i$	测量值 $R(\text{dB}\mu\text{V})$	$(R - \bar{R})^2$
1	58.77	0.0835
2	58.64	0.1756
3	59.80	0.5491
4	58.62	0.1927
5	59.05	0.0001
6	59.85	0.6257
7	59.58	0.2714
8	59.17	0.0123
9	58.56	0.2490
10	58.55	0.2591
Sum	590.59	2.4185
$\bar{R}$	59.059	—

## 4.2 B 类测量不确定分量评定

### 4.2.1 接收机、人工电源网络和衰减器路径的衰减量 $L_c$

在测量中  $L_c$  被加入到接收机的读数中,对结果进行修正。由于  $L_c$  本身的精度有限,它会带来不确定度的贡献量,  $L_c$  所带来的不确定度的贡献量由三部分组成,即接收机与衰减器间的电缆损耗  $L_{c1}$ 、衰减器与 LISN 间的电缆损耗  $L_{c2}$  及衰减器的衰减量  $L_a$  所贡献的不确定度。采用矢量网络分析仪 R&S ZVB20 单独测量电缆损耗  $L_{c1}$ 、 $L_{c2}$ ,由矢量网络分析仪的精度限制,电缆损耗的测量结果精确到 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 dB/2=0.005 dB,服从均匀分布,包含因子为  $\sqrt{3}$ ,则电缆损耗  $L_{c1}$  的标准不确定度为  $u(L_{c1}) = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.003$  dB,电缆损耗  $L_{c2}$  的标准不确定度为  $u(L_{c2}) = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.003$  dB。

$u(L_a)$  的评定主要取决于衰减器的衰减量所带来的测量不确定度,仪器的校准报告中  $L_a$  的扩展不确定度为 0.1~0.3 dB( $k=2$ ),取最大值计算标准不确定度  $u(L_a)$ ,有  $u(L_a) = 0.3/2 = 0.15$  dB。

综上,  $L_c$  的标准不确定度为:

$$u(L_c) = \sqrt{u^2(L_{c1}) + u^2(L_{c2}) + u^2(L_a)} = 0.15 \text{ dB}$$

### 4.2.2 LISN 的插入损耗, $L_{\text{LISN}}$

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。

仪器的校准报告中, LISN 插入损耗的扩展不确定度为:  $U = 0.3$  dB( $k=2$ ),则  $L_{\text{LISN}}$  的标准测量不确定度为  $u(L_{\text{LISN}}) = 0.3/2 = 0.15$  dB。

### 4.2.3 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:

$\delta V_{\text{SW}}$ : 对接收机正弦波电压不准确的修正值, dB;

$\delta V_{\text{PA}}$ : 对接收机脉冲幅度响应不理想的修正值, dB;

$\delta V_{\text{PR}}$ : 对接收机脉冲重复频率响应不理想的修正值, dB;

$\delta V_{\text{NF}}$ : 对接收机本底噪声影响的修正值, dB。

仪器的校准报告中,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  $u(\delta V_{\text{SW}}) = 0.3/2 = 0.15$  dB

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

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

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

则  $u_r$  的标准测量不确定度为:

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

### 4.2.4 阻抗失配修正因子 $\delta M$

由于测量接收机-电缆-衰减器-电缆-LISN 路径阻抗不完全匹配,需要对结果修正,其修正的最佳值为 0 dB。

电缆-衰减器-电缆的串联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,二端口网络<sup>[10]</sup>的另一端连接到测量接收机,则阻抗失配修正因子为:

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

式中:  $\Gamma_e$  为接被测设备的人工电源网络端口的反射系数,  $\Gamma_r$  为测量接收机的反射系数,查阅 NNBL 8226-2 型线性阻抗稳定网络 LISN 反射系数随频率的变化曲线,得知,在 150 kHz~30 MHz 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 ( $S_{11} \leq 1, S_{22} \leq 1$ ),其衰减可忽略 ( $S_{21} \approx 1$ ),且接收机射频衰减为 10dB 或更大,这时电压驻波比为  $\text{VSWR} \leq 1.2:1$ ,相当于  $\Gamma_r \leq 0.09$ 。

据此,可以计算  $\delta M$  的极限值,有:

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

$\delta M$  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  $\delta M$  的标准测量不确定度为  $u(\delta M) = 0.58$  dB。

### 4.2.5 LISN 的阻抗不稳定带来的不确定度 $\delta Z$

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  $\Omega$ ,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  $\Omega$  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 频点时阻抗的偏差与 50  $\Omega$  的标准值最大,此时阻抗为 37  $\Omega$ (模)。与标准值相比, $\delta Z$  的区间半宽为:

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

表 2 B 类标准不确定度分量评定结果表

输入量	标准不确定度/dB	概率分布	灵敏系数
接收机、人工电源网络和衰减器路径的衰减量 $L_c$	0.15	正态分布	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 $\delta M$	0.58 dB	U 型分布	1
LISN 的阻抗不稳定带来的不确定度 $\delta Z$	1.067 dB	三角分布	1

合成标准不确定度为:

$$u_c = \left[ u^2(V_r) + u^2(L_c) + u^2(L_{lisn}) + u^2(U_r) + u^2(\delta M) + u^2(\delta Z) \right]^{0.5} =$$

1.335 dB

#### 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:

$U=K \times u_c=2 \times 1.335 \text{ dB}=2.67 \text{ dB}$ ,取两位有效数字  $U=2.7 \text{ dB}$ 。

## 5 结 论

本文系统地研究了星载设备电源线传导发射的测量不确定度评定方法,以某星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 CE102 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、失配修正因子及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]. 1999.
- [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] 孙玮. 电磁兼容发射测量中的不确定度[J]. 环境技术,2013(10):36-39.

由 LISN 的基本功能可知上述情况出现的概率很小,按照 CISPR 16-4 标准,取三角分布,包含因子为  $\sqrt{6}$ ,故  $u(\delta Z)=2.615/\sqrt{6}=1.067 \text{ dB}$ 。

#### 4.3 测量结果的合成标准不确定度

- [4] 杨旭富,刘宝华. 电磁骚扰测量不确定度的评定[J]. 通信技术,2011,44(9):126-128.
- [5] 余洪文,方强,熊洋洋. 电源端子传导骚扰试验测量不确定度的评定[J]. 日用电器,2012(4):36-38.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [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

宁飞,工学学士,副研究员,主要研究方向为航天器有效载荷电测技术,电磁兼容。

贺庚贤,工学学士,研究员,硕士生导师,主要研究方向为航天器有效载荷电测技术。

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,航天器有效载荷电测技术。  
E-mail:gexin820209@126.com