

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802074

基于自适应蒙特卡洛法的磁场辐射发射 测量不确定度评定

何纯全 赵炳秋 万海军

(海军研究院 北京 100161)

摘要: 针对测量不确定度评定中测量不确定度表示指南法(GUM)不适用于输入输出变量关系非线性或输出变量非正态分布的情况,提出采用自适应蒙特卡洛法(AMCM)评定 25 Hz~100 kHz 磁场辐射发射(RE101)测试的测量不确定度。首先阐述蒙特卡洛法(MCM)和 AMCM 评定测量不确定度的计算步骤,其次分别用 AMCM 和 GUM 法评定 RE101 测量不确定度,在相同的包含概率下比较两种方法的覆盖区间差值与数值允差,表明 AMCM 的评定结果可靠性更高,适用于 RE101 测量不确定度评定。AMCM 可以推广到其他电磁兼容测试项目的不确定度评定中,将有效提高不确定度评定的可靠性。

关键词: 电磁兼容;RE101;测量不确定度;自适应蒙特卡洛法

中图分类号: TM937.1;TB972 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1099

Magnetic field radiated emissions measurement uncertainty evaluation using adaptive Monte Carlo method

He Chunquan Zhao Bingqiu Wan Haijun

(Naval Research Institute, Beijing 100161, China)

Abstract: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM) is not suitable for uncertainty evaluation when the input and output variants are nonlinearly correlated or the output variant is not normally distributed. Aiming to this problem, adaptive Monte Carlo method (AMCM) is adapted for uncertainty evaluation of magnetic field radiated emissions measurement from 25 Hz to 100 kHz (RE101). At first, calculation steps for measurement uncertainty evaluation using Monte Carlo method (MCM) and AMCM are promoted. Then RE101 measurement uncertainty is evaluated by AMCM and GUM method respectively. By comparing the difference of coverage interval values of the two methods and the numerical tolerance, it is shown that the evaluation result of AMCM is more reliable, thus suitable for RE101 measurement uncertainty evaluation. The AMCM can be popularized to other electromagnetic compatibility (EMC) test items for measurement uncertainty evaluation, which improving measurement uncertainty evaluation reliability effectively.

Keywords: electromagnetic compatibility; RE101; measurement uncertainty; adaptive Monte Carlo method

0 引言

测量结果的准确程度一般用测量值与真值的偏差——测量误差^[1]来衡量。然而测量过程受测试设备、测试方法和测试环境等多种因素影响,同时被测变量通常不稳定,导致无法获取真值^[2]而只能得到估计值。因此需要引入测量不确定度^[3],通过描述测量值的分散程度来衡量估计值的准确程度。

当前测量不确定度评定广泛采用文献[4]的方法。文献[4]为测量不确定度表示指南法(guide to the expression

of uncertainty in measurement, GUM),适用于输入变量与输出变量为线性关系且输出变量为正态分布的模型,不满足该条件的模型则需要通过蒙特卡洛法(monte carlo method, MCM)评定测量不确定度^[5-7]。文献[6]采用 GUM 法和 MCM 两种方法分别评定测量不确定度,结果表明两种方法都是可靠的,但 MCM 准确度更高。文献[7]将神经网络、支持向量机和 MCM 结合,取得了汽车事故中乘员颈部损伤仿真的不确定度评定的准确结果,而 GUM 法则不适合此类输入输出变量高度非线性的仿真模型。自

适应蒙特卡洛法 (adaptive Monte Carlo method, AMCM) 对 MCM 进行改进, 通过判断输入数据是否统计稳定决定仿真次数, 可以在指定计算精度下减少计算量^[5-8]。文献[8]采用 GUM 法和 AMCM 分别评定传输线阻抗测量的不确定度。在两种方法的测量不确定度评定中, 采用多次测量数据计算输入变量的参数和概率密度函数 (probability density function, PDF), 因此输入变量的参数和 PDF 准确度较高。对比发现, GUM 法的评定结果过估计, AMCM 的评定结果更为合理且计算精度更高。由文献[5-8]可知, MCM 可以验证 GUM 法的准确性, 且 MCM 的评定结果可靠性更高。

电磁兼容性测试中通常用 GUM 法评定不确定度^[9-10], 而文献[11]利用 MCM 评定 10 kHz~10 MHz 电源线传导发射 (CE102) 的测量不确定度, 并针对两个输入变量的情况对比了 GUM 和 MCM, 指出 MCM 的仿真结果与 GUM 法的理论计算有差异。磁场辐射发射 (GJB 151B-2013, RE101)^[12]测试项目的测量不确定度评定中, 由于输入变量的 PDF 不全是正态分布, 为了保证评定结果的可靠性, 且在指定计算精度下尽量减少仿真时间, 考虑采用 AMCM 评定测量不确定度。本文余下部分介绍 MCM 和 AMCM 的实现步骤, 采用 Python 程序仿真基于 AMCM 的 RE101 测量不确定度评定, 将仿真结果与基于 GUM 法的计算结果进行对比, 证明基于 AMCM 的评定结果可靠性更高, 适用于 RE101 的测量不确定度评定。

1 自适应蒙特卡洛法

1.1 MCM 的计算步骤

基于 MCM 的不确定度评定的计算步骤为:

1) 建模: 确定输入变量 $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_N)$, 输出变量 \mathbf{Y} , 以及输入与输出的关系 $\mathbf{Y} = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$ 。

2) 取值: 确定输入变量 X_n 的 PDF, 根据 PDF 生成输入的随机数 $(x_{1,i}, x_{2,i}, \dots, x_{N,i}), i = 1, 2, \dots, M$ 。 $x_{n,i}$ 为随机变量 X_n 的第 i 次取值。 M 可以取 10^6 。

3) 计算: 根据建模结果, 计算输出随机变量的取值 $y_i = f(x_{1,i}, x_{2,i}, \dots, x_{N,i})$ 。

根据 y_i 计算 \mathbf{Y} 的平均值 \bar{y} 、标准差 $u(y)$ 、给定包含概率 p 的覆盖区间 $(y_{p,low}, y_{p,high})$, 其中 \bar{y} 为随机变量 \mathbf{Y} 的估计值。

1.2 AMCM 的计算步骤

测量值的标准差用科学计数法写成 10 进制数:

$$u(y) = c \times 10^l \quad (1)$$

令 c 的整数位个数为 n_{dig} , 则数值允差为:

$$\delta = 0.5 \times 10^l \quad (2)$$

采用数值允差 δ 作为判断仿真数据是否统计稳定的依据, 结合 1.1 节 MCM 计算步骤, AMCM 的计算步骤为:

1) 确定输入变量 $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_N)$, 输入变量 X_n 的 PDF, 输出变量 \mathbf{Y} , 以及输入与输出的关系 $\mathbf{Y} = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$ 。确定包含概率 p 、整数 $M = \max(100/(1-p),$

$10^4)$ 、 n_{dig} (较小的正整数)。循环次数初始值为 $h=0$ 。

2) 循环次数 h 增加 1, 根据 PDF 生成输入的 M 组随机数 $(x_{1,i}^{(h)}, x_{2,i}^{(h)}, \dots, x_{N,i}^{(h)}), i = 1, 2, \dots, M$ 。计算输出 $y_i^{(h)} = f(x_{1,i}^{(h)}, x_{2,i}^{(h)}, \dots, x_{N,i}^{(h)})$ 及其估计值 $\bar{y}^{(h)}$ 、标准差 $u(y^{(h)})$ 、包含概率 p 的覆盖区间 $(y_{p,low}^{(h)}, y_{p,high}^{(h)})$ 。

3) 根据 $y_i (i = 1, 2, \dots, hM)$ 计算 \mathbf{Y} 的标准差 $u(y)$, 根据 n_{dig} 计算 $u(y)$ 的数值允差 δ 。

4) 计算:

$$s_y^{(h)} = \sqrt{\frac{1}{h(h-1)} \sum_{i=1}^h (y^{(i)} - \bar{y})^2}$$

$$\bar{y} = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^h \bar{y}^{(i)} \quad (3)$$

$$s_{u(y)}^{(h)} = \sqrt{\frac{1}{h(h-1)} \sum_{i=1}^h (u(y^{(i)}) - u(y))^2}$$

$$u(y) = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^h u(y^{(i)}) \quad (4)$$

$$s_{y_{p,low}}^{(h)} = \sqrt{\frac{1}{h(h-1)} \sum_{i=1}^h (y_{p,low}^{(i)} - \bar{y}_{p,low})^2}$$

$$\bar{y}_{p,low} = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^h y_{p,low}^{(i)} \quad (5)$$

$$s_{y_{p,high}}^{(h)} = \sqrt{\frac{1}{h(h-1)} \sum_{i=1}^h (y_{p,high}^{(i)} - \bar{y}_{p,high})^2}$$

$$\bar{y}_{p,high} = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^h y_{p,high}^{(i)} \quad (6)$$

5) 若 $2s_y^{(h)}$ 或 $2s_{u(y)}^{(h)}$ 或 $2s_{y_{p,low}}^{(h)}$ 或 $2s_{y_{p,high}}^{(h)} > \delta$ 则返回步骤 2); 若 $2s_y^{(h)}, 2s_{u(y)}^{(h)}, 2s_{y_{p,low}}^{(h)}, 2s_{y_{p,high}}^{(h)} \leq \delta$, 则认为数据已统计稳定, 根据 $y_i (i = 1, 2, \dots, hM)$ 计算给定概率 p 的覆盖区间 $(y_{p,low}, y_{p,high})$, y 由式 (3) 计算, $u(y)$ 在步骤 3) 中计算。根据计算步骤, 归纳的 AMCM 计算流程如图 1 所示。

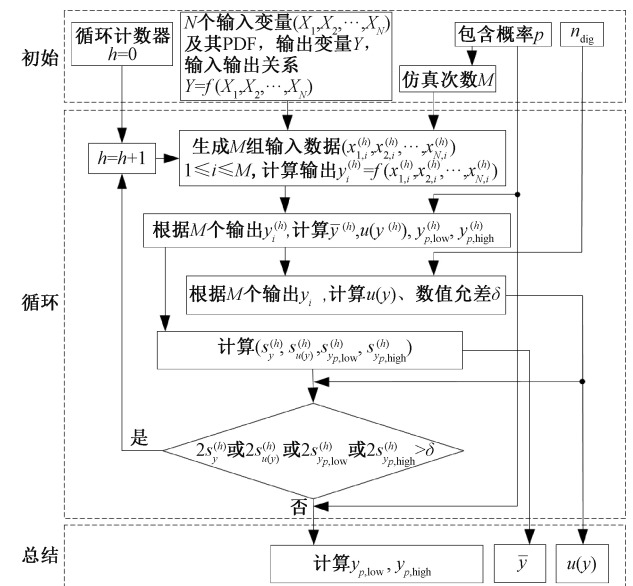


图 1 自适应蒙特卡洛法计算步骤

2 RE101 测量不确定度评定

RE101 的测试配置如图 2 所示。EMC 测试中不确定性主要来源于 EUT 自身、测试仪器设备、EUT 的布置、测试程序 and 环境影响^[13]。测试仪器为 Agilent N9038A 测量接收机, Solar 7334-1 环天线。EUT 为水泵, 经初步测试发现磁场辐射最强位置为水泵电源线接线盒附近, 因此测试位置为接线盒正前方 7 cm 处。

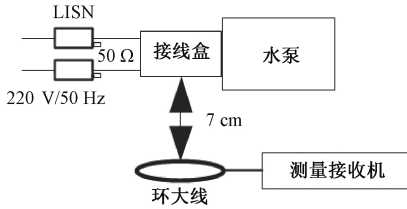


图 2 RE101 测试配置

2.1 AMCM 评定测量不确定度

考虑测试仪器引入的不确定性, 根据文献[13]及仪器设备校准证书, RE101 项目测试数据的不确定性来源如表 1 所示。

表 1 RE101 测试的不确定性来源

| 输入变量 | 标准不确定度 (dB, 50 Hz 处) | 概率密度函数/ 取值范围 | 数据 来源 |
|---------------------------------|-------------------------|----------------------|----------|
| 接收机读数 V_r | 0.30 | 正态分布 | 校准证书 |
| 天线与接收机之间的 线路衰减 A_c | 0.05 | 正态分布 | 校准证书 |
| 天线系数 F_a | 0.50 | 正态分布 | 校准证书 |
| 接收机正弦波电压 δV_{sw} | 0.50 | 正态分布 | 文献[13] |
| 接收机脉冲幅度 响应 δV_{pa} | 0.87 | 矩形分布 (-1.5, 1.5) | 文献[13] |
| 接收机脉冲重复 频率响应 δV_{pr} | 0.40 | 正态分布 | 校准证书 |
| 天线接收机之间 阻抗不匹配 δM | 0.67 | U 型分布 (-1.0, 0.9) | 文献[13] |
| 天线系数现场测 量的差异 δA_N | 1.63 | 三角形分布 (-4.0, 4.0) | 文献[13] |
| 天线与 EUT 距 离 δd | 0.17 | 矩形分布 (-0.1, 0.1) | 文献[13] |

设 V_{EUT} 为 EUT 在环天线位置处的磁场强度, 不考虑 V_{EUT} 的不确定性, 令 $V_{EUT} = 150$ dBpT。结合表 1, 输出磁场强度为:

$$y = V_{EUT} + V_r + A_c + F_a + \delta V_{sw} + \delta V_{pa} + \delta V_{pr} + \delta M + \delta A_N + \delta d \quad (7)$$

式(7)中模型将各个输入变量的影响都转换成了对测

试结果的增益影响。由于已知的各个输入变量的增益值在测量结果中都将在最终结果中消除, 因此本文在后续仿真中都将各个输入变量的增益估计值设为 0。确定包含概率 $p = 95\%$, $M = 10^4$ 。根据表 1 中各个输入变量的 PDF 生成随机数, 其中 U 型分布也称为反正弦分布^[14]。

本文利用 Python3 的 math、numpy、matplotlib 库进行仿真计算和作图。根据 1.2 节的 AMCM 计算步骤, 当 $n_{dig} = 2, h = 2$ 时数据统计稳定, 标准不确定度 $u(y) = 2.2$ dB, 数值允差 $\delta = 5 \times 10^{-2}$, 估计值 $y = 150.0$ dBpT, 95% 覆盖区间根据仿真结果为 $(y_{p,low}, y_{p,high}) = (145.7, 154.3)$; 当 $n_{dig} = 3, h = 502$ 时数据统计稳定, 标准不确定度 $u(y) = 2.23$ dB, 数值允差 $\delta = 5 \times 10^{-3}$, 估计值 $y = 149.95$ dBpT, 95% 覆盖区间根据仿真结果为 $(145.63, 154.27)$ 。输出磁场强度 Y 的概率分布如图 3 所示, 图中虚线为正态分布 $N(y, u(y))$ 。 $n_{dig} = 2, 3$ 的仿真结果中, 在远离估计值的位置, 输出磁场强度 Y 的概率分布与正态分布的重合度较高; 在靠近估计值的位置, 输出磁场强度 Y 的概率一般小于正态分布理论值。

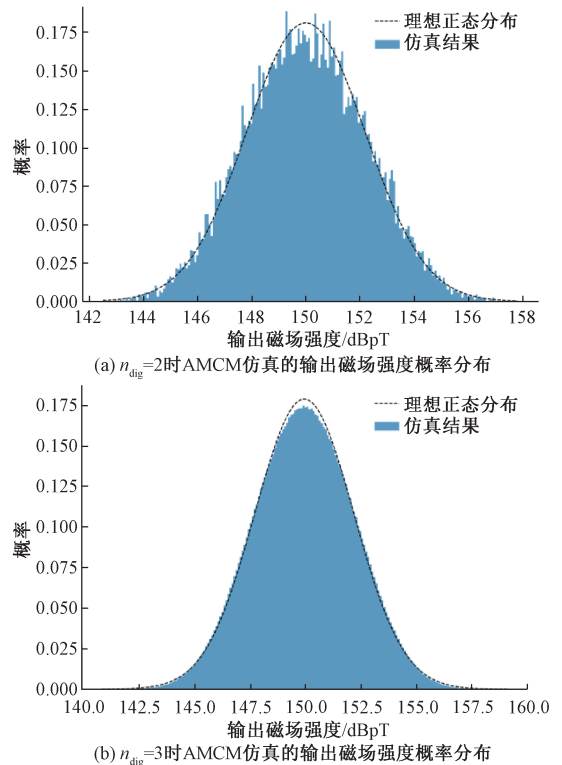


图 3 AMCM 的输出磁场强度概率分布

2.2 GUM 法评定测量不确定度

输入变量仍然如表 1 所示, 根据 GUM^[14] 法的 B 类评定方法, 输出磁场强度的标准不确定度为:

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^9 c_i^2 u(V_i)^2 + 2 \sum_{i=1, i \neq j}^9 \sum_{j=1}^9 c_i c_j u(V_i) u(V_j) r(V_i, V_j)} \quad (8)$$

假设表 1 中各输入变量对不确定度的影响程度一致,且相互独立,则 $c_i = 1, r(V_i, V_j) = 0, (i, j = 1, 2, \dots, 9)$, GUM 法认为输出服从正态分布,当包含区间 $p = 95\%$ 时 $k = 2$, 覆盖区间为 $(V_{EUT} - ku(y), V_{EUT} + ku(y))$ 。 $n_{dig} = 2$ 时, $u(y) = 2.2$, 覆盖区间为 $(145.6, 154.4)$; $n_{dig} = 3$ 时, $u(y) = 2.16$, 覆盖区间为 $(145.68, 154.32)$ 。

2.3 比较分析

相同包含概率下, GUM 法覆盖区间记为 $(y_{p,low}^{GUM}, y_{p,high}^{GUM})$, 类似地 AMCM 覆盖区间记为 $(y_{p,low}^{AMCM}, y_{p,high}^{AMCM})$, 计算:

$$\begin{aligned} d_{low} &= |y_{p,low}^{GUM} - y_{p,low}^{AMCM}| \\ d_{high} &= |y_{p,high}^{GUM} - y_{p,high}^{AMCM}| \end{aligned} \quad (9)$$

判断:

$$d_{low} \text{ 或 } d_{high} > \delta \quad (10)$$

若式(10)成立,则 GUM 法不确定度评定结果不可靠,而 AMCM 更可靠^[15]。

结合 2.1、2.2 小节的计算结果,当 $n_{dig} = 2$ 时, $\delta = 5 \times 10^{-2}$, $d_{low} = |145.6 - 145.7| = 0.1$, $d_{high} = |154.4 - 154.3| = 0.1$ 。

当 $n_{dig} = 3$ 时, $\delta = 5 \times 10^{-3}$, $d_{low} = |145.68 - 145.63| = 0.05$, $d_{high} = |154.32 - 154.27| = 0.05$ 。

$n_{dig} = 2, 3$ 时, $d_{low} > \delta, d_{high} > \delta$, 因此 RE101 不确定度评定中采用 AMCM 比 GUM 法更可靠。

3 结 论

本文采用 AMCM 和 GUM 法分别进行 RE101 测量不确定度评定,通过比较相同包含概率下的覆盖区间端点差值与数值允差,表明 AMCM 的评定结果可靠性更高,适用于 RE101 测量不确定度评定。AMCM 可以推广到其他电磁兼容测试项目中,有效提高测量不确定度的可靠性。

本文在不确定度评定中只考虑了测量仪器自身及测量仪器布置的影响,而实际测量中 EUT 自身、EUT 的布置、测试程序等也是不可忽略的因素,因此测量结果的标准不确定度真实值应大于理论计算值。

参考文献

- [1] LOKEN E, GELMAN A. Measurement error and the replication crisis [J]. Science, 2017, 355 (6325): 584-585.
- [2] RAGHU N K. Measurement uncertainty and its connection with true value in the GUM versus JCGM documents[J]. Measurement, 2018, 127:525-532.
- [3] COURTENAY N D, GREGIS F. The evaluation of measurement uncertainties and its epistemological ramifications[J]. Studies in History and Philosophy of Science, 2017, 65: 21-32.
- [4] JCGM 100:2008; Evaluation of measurement data-guide to the expression of uncertainty in measurement [S]. Joint Committee for Guides in Metrology, 2008.

- [5] JCGM 101: 2008; Evaluation of measurement data-supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement"-Propagation of distributions using a Monte Carlo method [S]. Joint Committee for Guides in Metrology, 2008.
- [6] SONG J, NIU B, WANG D, et al. Comparison of the Monte Carlo and guide to uncertainty in measurement methods in estimating measurement uncertainty: Indirect measurement of the CaMV35S promoter in mixed samples of genetically modified soybean [J]. Food Control, 2018, 90: 131-139.
- [7] WANG S L, DING X H, ZHU D Y, et al. Measurement uncertainty evaluation in whiplash test model via neural network and support vector machine-based Monte Carlo method [J]. Measurement, 2018, 119: 229-245.
- [8] TOLIC I, MILICEVIC K, TOKIC A. Measurement uncertainty of transmission line resistance calculation using 'Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement' and adaptive Monte-Carlo method [J]. IET Science, Measurement & Technology, 2017, 11(3): 339-345.
- [9] 曹晟,葛欣宏.军用设备地线传导敏感度的测量不确定度评定研究 [J]. 长春理工大学学报, 2017, 40(6): 69-72.
- [10] 宁飞,贺庚庆,葛欣宏.星载设备电源线传导发射的测量不确定度评定方法 [J]. 电子测量技术, 2016, 39(1): 80-83.
- [11] ALEKSANDAR M K, DEJAN D D, ZORAN A R, et al. Uncertainty evaluation of the conducted emission measurements [J]. Nuclear Technology&Radiation Protection, 2013, 28(2): 182-190.
- [12] GJB 151B-2013 军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量[S]. 总装备部军标出版发行部, 2013.
- [13] Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods-Part 4-2: Uncertainties statistics and limit modeling-Measurement instrumentation uncertainty CISPR 16-4-2[S]. International Electrotechnical Commission, 2011.
- [14] 刘存成,胡畅.基于 MATLAB 用蒙特卡洛法评定测量不确定度[M].北京:中国质检出版社, 2014: 109-110.
- [15] 全如松.基于蒙特卡洛法计量校准不确定度评定方法的研究[D].保定:河北大学, 2013: 46-47.

作者简介

何纯全,1985 年出生,博士、工程师,主要研究方向为电磁兼容论证评估、试验、数字信号处理。

E-mail: hcq908@163.com

赵炳秋,1985 年出生,工程师,主要研究方向为电磁兼容论证与评估、电磁兼容测试与防护。

万海军,1977 年出生,高级工程师,主要研究方向为电磁兼容论证与评估、电磁兼容测试与防护。