

# 随机振动试验中测量不确定度评定

宋小东<sup>1</sup> 袁亦灵<sup>2</sup> 张宏民<sup>1</sup> 肖娅妮<sup>1</sup> 张青青<sup>1</sup>

(1. 成都赛迪育宏检测技术有限公司 四川省成都市 610095)

(2. 中国电子科技集团公司第二十四研究所 重庆市 401332)

**摘要:** 本文结合振动台的随机振动试验工作实际,分析了随机振动试验中的不确定度的来源,用功率谱密度随频率变化曲线作为试验的控制图进行了10次独立试验,采集了功率谱密度和加速度总均方根值试验结果数据,按GB/T 27418-2017《测量不确定度评定与表示》<sup>[1]</sup>的方法对振动台的随机振动试验进行了测量结果的不确定度评定,给出了不确定度的报告与表示。

**关键词:** 测量不确定度; 电动振动试验系统; 随机振动试验; 功率谱密度 PSD; 加速度总均方根值 Grms

一个完整的测量结果,不仅要表示其量值的大小,还需要给出测量的不确定度,以反映被测量真值在一定概率水平下所处的范围。测量不确定度愈小,其测量结果的可疑程度愈小,可信度愈大,测量的质量就愈高,测量数据的使用价值也愈高。

测量不确定度作为测量结果的一部分,合理表征了被测量量值的分散性,对测量结果的可信性、可比性和可接受性都有重要影响,是判据测量活动质量的重要指标<sup>[2]</sup>。

随机振动试验代表了导弹、喷气飞机和火箭发动机等产生的振动环境,是模拟这些环境的更加真实的试验<sup>[3]</sup>。随机振动试验的主要依据GJB150、GJB1032、GJB1407、GJB899、GJB548、GJB360等国家军用标准,被广泛用于电子元器件、组件和整机的检验试验。其试验结果是否准确可靠,直接关系到对被试样品的评价。为了确保振动试验结果的准确可靠,应对其测量结果进行不确定度评定。随机振动试验中的关键参数为功率谱密度 PSD 和加速度总均方根值 Grms,本文对这两个参数的不确定度的来源进行了梳理和分析,并按GB/T 27418-2017《测量不确定度评定与表示》要求对振动台的随机振动试验结果进行了测量不确定度评定。

## 1 不确定度评定

### 1.1 不确定度评定流程

按GB/T 27418-2017《测量不确定度评定与表示》要求,测量不确定度评定的一般流程见图1。

### 1.2 标准不确定度的评定方法

#### 1.2.1 标准不确定度的 A 类评定

对在规定测量条件下测得的量值用统计分析的方法进行的测量不确定度分量的评定。

#### 1.2.2 标准不确定度的 B 类评定

用不同于测量不确定度 A 类评定的方法对测量不确定度分量的评定。如:以前的测量数据、对有关材料和仪器的经验或了解、生产厂提供的技术说明书、校准证书或其他证

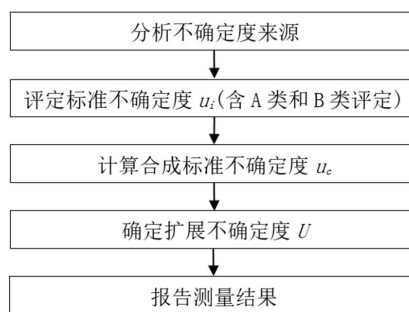


图 1: 评定不确定度的一般流程

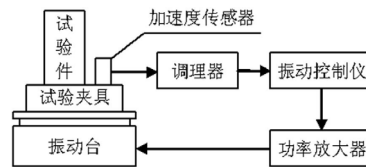


图 2: 振动试验原理框图

书提供的数据、手册给出的参考数据的不确定度等。

### 1.2.3 合成标准不确定度 $u_c$

由在一个测量模型中各输入量的标准测量不确定度获得的输出量的标准测量不确定度。

### 1.2.4 扩展不确定度 U

扩展不确定度指合成标准不确定度 U 与一个大于 1 的数字因子 k 的乘积,即  $U=k \times u_c$ 。数字因子 k 即为包含因子。

在给出扩展不确定度 U 时,一般应注明所取的包含因子 k 值,一般在 2~3 范围内。k 值的值取决于测量模型中输出量的概率分布类型及所选取的包含概率。当输出量和输出量的合成标准不确定度所表征的概率分布近似为正态分布时,若取包含因子等于 2,则扩展不确定度所确定的区间具有的包含概率约为 95%;若取包含因子等于 3,则扩展不确定度所确定的区间具有的包含概率约为 99%。

## 2 随机振动试验原理及不确定度的评定参数

### 2.1 随机振动试验原理

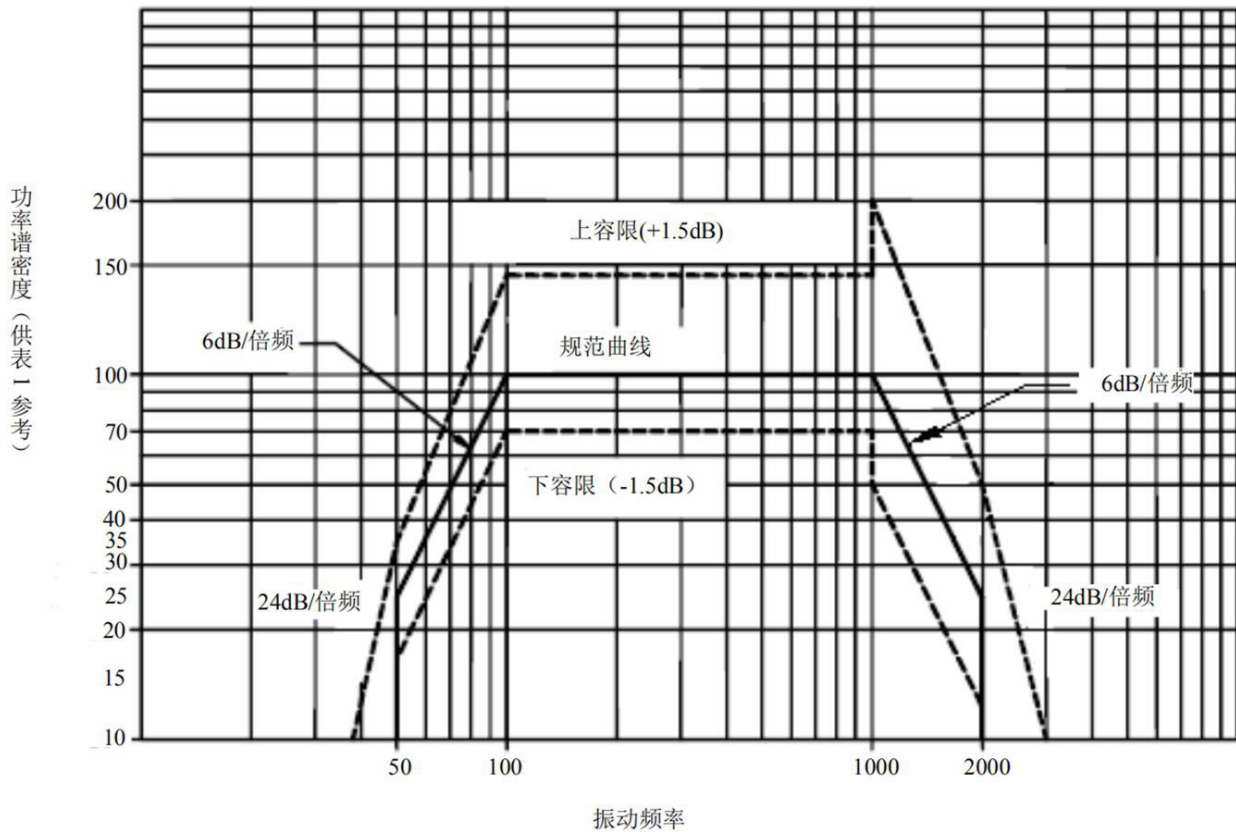


图 3: 功率谱密度 - 振动频率曲线

随机振动在电动振动试验系统上进行。电动振动试验系统由振动台、功率放大器、振动控制仪、振动加速度传感器和风机组成。随机振动试验是由频率范围、功率谱密度、功率谱密度 - 频率曲线图、试验持续时间等参数共同确定。随机振动试验时，在振动控制仪设置试验的谱密度控制谱图，由振动控制仪把驱动信号输出至功率放大器放大后，驱动振动台进行振动。振动台上的加速度传感器将测得的振动信号经过信号调理后反馈到振动控制仪进行闭环控制。在随机振动试验过程中，振动控制仪不断进行均衡，使其振动试验始终保持在所要求的振动条件下进行。振动试验原理框图见图 2。

### 2.2 随机振动试验的不确定度测量参数

随机振动试验的关键参数是功率谱密度 PSD 和加速度总均方根值 Grms。在随机振动试验中，通常给出功率谱密度 PSD 随频率变化曲线作为试验的控制图，随机振动试验结果的准确度就取决于 PSD 的不确定度。加速度总均方根值 Grms 表示试验施加的总量级，即总能量，可以通过总的加速度均方根值大小判断振动级别的高低，振动能量的大小。因此，本次随机振动试验的不确定度测量参数确定为功率谱密度 PSD 和加速度总均方根值 Grms 这两个参数。

## 3 功率谱密度 PSD 不确定度评定

### 3.1 标准不确定度的 A 类评定

按 GJB548B 《微电子器件试验方法和程序》<sup>[4]</sup> 方法 2026 试验条件 2 (C) 对振动台进行 10 次独立试验，试验持续时间 3min。试验的功率谱密度 - 振动频率曲线如图 3 所示，规定的量值如表 1 所示。

表 1: 试验条件 2 的值

试验条件	加速度谱密度 (m/s <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> /Hz	加速度总均方根值 m/s <sup>2</sup>
C	6	107.6

为避免交流电源对测试结果的影响，功率谱密度值的采集特避开 50Hz 及其倍频点。分别采集 117.5Hz、617.5Hz、1220Hz、1820Hz 频率下的功率谱密度值，测试结果如表 2 所示。

由表 1 计算加速度功率谱密度的均值、标准差、A 类不确定度如表 3 所示。

只需以 A 类不确定度的最大值（在频率 617.5Hz 时）0.1000 (m/s<sup>2</sup>)<sup>2</sup>/Hz 进行不确定度评定即可。

表 2 中，ASD 均值：

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

ASD 标准差：

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n-1}}$$

表 2: 功率谱密度测试结果 (单位:  $(\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$ )

频率 (Hz)	117.5	617.5	1220	1820
测试次数				
1	6.0730	5.5817	6.0098	6.3322
2	6.2525	5.5488	5.8265	6.2282
3	5.8352	5.6795	6.0950	6.1944
4	5.6113	6.0315	6.2077	6.1043
5	5.9005	6.1875	6.1297	6.4362
6	6.0473	6.1231	5.9588	6.2215
7	5.9364	6.3694	6.2499	6.4862
8	5.6332	6.3947	5.9862	6.4737
9	5.7745	6.1981	6.0308	6.4852
10	6.3112	6.2185	6.2658	6.4225

表 3: 功率谱密度的均值、标准差、A 类不确定度

振动频率 Hz	均值	标准差 ( $\text{m/s}^2$ ) <sup>2</sup> /Hz	A 类不确定度
117.5	5.9375	0.2373	0.0750
617.5	6.0333	0.3164	0.1000
1220	6.0760	0.1404	0.0444
1820	6.3384	0.1413	0.0447

表 4: 标准不确定度分量汇总表

标准不确定度	不确定度来源	标准不确定度值 ( $(\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$ )
$u_A$	重复性测试	0.100
$u_{B1}$	校准证书	0.142
$u_{B2}$	加速度传感器 灵敏度误差	0.069
$u_{B3}$	调理器非线性影响	0.035
$u_{B4}$	控制仪测量的允许 误差	0.069
$u_{B5}$	振动控制仪测量的 最小分辨力	0.007

表 5: 加速度总均方根值 Grms 测试结果

测试次数 i	测试结果 ( $\text{m/s}^2$ ) $x_i$
1	108.34
2	107.73
3	106.98
4	109.11
5	108.32
6	105.62
7	109.17
8	108.38
9	106.72
10	108.79

ASD 的 A 类标准不确定度:

$$u_A = \frac{s(x)}{\sqrt{n}}$$

### 3.2 标准不确定度的 B 类评定

(1) 查阅该电动振动系统的校准证书, 按照 JJG948-2018《电动振动试验系统》<sup>[5]</sup> 检定合格的一套随机振动试验系统, 其随机振动功率谱密度测量相对扩展不确定度  $U_{rel}=4.7\%(k=2)$ , 即对应的标准不确定度为:

$$u_{B1} = \frac{u_{rel} \times \bar{X}}{k} = 0.142 \quad (\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$$

(2) 查阅该电动振动系统的校准证书, 加速度传感器灵敏度误差不大于 2%。按照一般估计服从矩形 (均匀) 分布的假设, 取包含因子  $k = \sqrt{3}$ , 其标准不确定度:

$$u_{B2} = \frac{2\% \times \bar{X}}{k} = 0.069 \quad (\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$$

(3) 查阅该电动振动系统的校准证书, 调理器非线性影响不大于 1%。按照一般估计服从矩形 (均匀) 分布的假设, 取包含因子  $k = \sqrt{3}$ , 其标准不确定度:

$$u_{B3} = \frac{1\% \times \bar{X}}{k} = 0.035 \quad (\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$$

(4) 查该电动振动试验系统使用手册, 其振动控制仪测量的允许误差为 2%。按照一般估计服从矩形 (均匀) 分布的假设, 取包含因子  $k = \sqrt{3}$ , 其标准不确定度为:

$$u_{B4} = \frac{2\% \times \bar{X}}{k} = 0.069 \quad (\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$$

(5) 查该电动振动试验系统使用手册, 其振动控制仪测量的最小分辨力  $0.000244\text{g}^2/\text{Hz}$ , 则区间半宽度  $0.000122\text{g}^2/\text{Hz}$ 。按照一般估计服从矩形 (均匀) 分布的假设, 取包含因子  $k = \sqrt{3}$ , 其标准不确定度为:

$$u_{B5} = \frac{0.000122\text{g}^2/\text{Hz}}{\sqrt{k}} = 0.007 \quad (\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$$

### 3.3 合成标准不确定度

#### 3.3.1 标准不确定度分量汇总

标准不确定度分量汇总表如表 4。

#### 3.3.2 合成标准不确定度

当上述全部的估计量彼此独立或不相关时, 功率谱密度 PSD 的合成标准不确定度为:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2 + u_{B4}^2 + u_{B5}^2} = 0.202 \quad (\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$$

#### 3.4 扩展不确定度

假设随机振动试验中 ASD 及相对合成标准不确定度  $u_C$  所表征的概率分布近似为正态分布, 取包含因子  $k=2$  (包含概率为 95%), 则 ASD 的相对扩展不确定度为:

$$U = k u_C = 0.404 \quad (\text{m/s}^2)^2/\text{Hz} \quad (k=2)$$

保留两位有效数, 即:

$$U = k u_C = 0.40 \quad (\text{m/s}^2)^2/\text{Hz} \quad (k=2)$$

## 4 加速度总均方根值 Grms 的不确定度评定

### 4.1 标准不确定度的 A 类评定

加速度总均方根值 Grms 的标准不确定度的 A 类评定试验与 3.1 条的试验为同一试验。

加速度总均方根值的测试结果如表 5 所示。

Grms 均值:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 107.92 \text{ m/s}^2$$

Grms 标准差:

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n-1}} = 1.15 \text{ m/s}^2$$

Grms 的 A 类标准不确定度:

$$u_A = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = 0.36 \text{ m/s}^2$$

#### 4.2 标准不确定度的B类评定

查阅设备的校准证书,按照 JJG948-2018《电动振动试验系统》<sup>[5]</sup> 检定合格的一套随机振动试验系统,其加速度示值误差为 1.1%、加速度总均方根值的测量误差 0.5%。

(1) 加速度示值误差加速度传感器灵敏度误差不大于 2%。按照一般估计服从矩形(均匀)分布的假设,取包含因子  $k = \sqrt{3}$ , 其标准不确定度为:

$$u_{Brel1} = \frac{2\% \times \bar{X}}{k} = 0.69 \text{ m/s}^2$$

(2) 加速度总均方根值的测量误差 0.5%。按照一般估计服从矩形(均匀)分布的假设,取包含因子  $k = \sqrt{3}$ , 其标准不确定度为:

$$u_{Brel2} = \frac{1\% \times \bar{X}}{k} = 0.31 \text{ m/s}^2$$

#### 4.3 合成标准不确定度

##### 4.3.1 标准不确定度分量汇总

标准不确定度分量汇总表如表 6。

表 6: 标准不确定度分量汇总表

标准不确定度	不确定度来源	标准不确定度值 (m/s <sup>2</sup> )
$u_A$	重复性测试	0.36
$u_{B1}$	加速度示值误差	0.69
$u_{B2}$	加速度总均方根值的 测量误差	0.31

##### 4.3.2 合成标准不确定度

当上述全部的估计量  $x_i$  彼此独立或不相关时, 加速度总均方根值 Grms 合成标准不确定度为:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2} = 0.84 \text{ m/s}^2$$

#### 4.4 扩展不确定度

假设随机振动试验中加速度总均方根值 Grms 及相对合成标准不确定度  $u_C$  所表征的概率分布近似为正态分布, 取

包含因子  $k=2$  (包含概率为 95%), 则 Grms 的扩展不确定度:

$$U = ku_C = 1.68 \text{ m/s}^2 \text{ (} k=2 \text{)}$$

保留两位有效数, 即:

$$U = ku_C = 1.7 \text{ m/s}^2 \text{ (} k=2 \text{)}$$

#### 5 测量不确定度报告和表示

电动振动试验系统按 GJB548B 方法 2026 试验条件 2 条件 C 进行随机振动试验。

(1) 功率谱密度的测量不确定度报告:

$$ADS = 6.03 \text{ (m/s}^2 \text{)}^2/\text{Hz}$$

在置信度 95% ( $k=2$ ) 的不确定度:

$$U = 0.40 \text{ (m/s}^2 \text{)}^2/\text{Hz}$$

(2) 加速度总均方根值的测量不确定度报告:

$$Grms = 107.9 \text{ m/s}^2$$

在置信度 95% ( $k=2$ ) 的相对不确定度:

$$U = 1.7 \text{ m/s}^2$$

#### 6 结束语

加速度谱密度 ADS 和总均方根加速度 Grms 是随机振动试验的关键参数。本文针对这两个参数进行不确定度来源分析和评定, 重点考虑多次测量下不确定度、检定校准证书给出的测量不确定度, 以及振动控制仪的测量精度等因数。

检测实验室还有数量众多的检测和试验项目, 为保证其结果的有效性, 对这些项目都需要分析主要不确定度来源, 开展不确定度评定。不确定度评定涉及到较多的基本概念和计算方法, 随机振动试验的不确定度评定作为实例仅供参考。

#### 参考文献

- [1] GB/T 27418-2017, 《测量不确定度评定与表示》
- [2] CNAS-CL01-G003, 《测量不确定度的要求》
- [3] GJB 360B-2009, 《电子及电气元器件试验方法》
- [4] GJB 548B-2005, 《微电子器件试验方法和程序》
- [5] JJG 948-2018, 《电动振动试验系统》

#### 作者简介

宋小东 (1994-), 男, 四川省南充市人。2019 年毕业于成都工业学院, 获工学学士学位。主要从事电子产品的机械环境试验。

袁亦灵 (1995-), 女, 重庆市人。2020 年毕业于英国华威大学, 硕士研究生。主要从事电子产品质量管理。

张宏民 (1994-), 男, 四川省德阳市人。2018 年毕业于宜宾学院, 获工学学士学位。现从事电子元器件的测试开发。

肖雅妮 (1997-), 女, 四川省内江市人。2020 年毕业于成都工业学院, 获工学学士学位。主要从事电子产品的机械环境试验。

张青青 (1999-), 女, 四川省绵阳市人。2021 年毕业于洛阳理工学院, 获工学学士学位。毕业后一直主要从事电子元器件的 DPA 试验。