

振动试验及相关参数不确定度评定方法

唐杉林

江苏省电子信息产品质量监督检验研究院 (江苏省信息安全测评中心), 江苏 无锡 214073

[摘要]文中主要讲述了振动试验的基本原理,对电动振动系统进行校准时相关参数的不确定度评定方法,主要针对频率、加速度、随机振动加速度总均方根值、随机振动加速度功率谱密度值、台面加速度幅值均匀度、台面横向振动比。

[关键词]振动试验;频率;加速度;总均方根值;功率谱

DOI: 10.33142/ect.v1i1.8621

中图分类号: TH811

文献标识码: A

Evaluation Method for Uncertainty of Vibration Tests and Related Parameters

TANG Shanlin

Jiangsu Electronic Information Product Quality Supervision & Inspection Research Institute (Jiangsu Information Security Evaluation Center), Wuxi, Jiangsu, 214073, China

Abstract: This paper mainly describes the basic principle of vibration test and the evaluation method of uncertainty of relevant parameters when calibrating the electric vibration system, mainly focusing on frequency, acceleration, total root mean square value of random vibration acceleration, random vibration acceleration power spectral density value, platform acceleration amplitude uniformity, and table transverse vibration ratio.

Keywords: vibration test; frequency; acceleration; total root mean square value; power spectrum

引言

振动试验主要是模拟环境试验,试验参数为振动频率、振动加速度,振动的类型又分为正弦振动、随机振动、正弦加随机振动、随机加随机振动等。由振动频率和加速度衍生出各种相关参数,例如随机加速度总均方根值、随机振动加速度功率谱密度等,振动试验原理示意图如下图1所示。

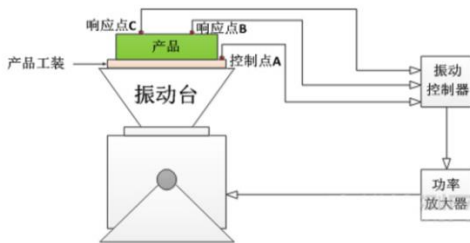


图1 振动试验原理示意图

2 测量过程简述

(1) 测量依据: JJG948-2018《电动振动试验系统检定规程》

(2) 测量环境条件: 温度为(5~35)℃,相对湿度不大于90%。

(3) 测量标准: Vibpilot-8CH型振动测量仪, 352C03/356A33加速度传感器

(4) 被测对象: ES-30-370型电动振动试验台,它由数字式振动控制器、功放、振动台体、加速度传感器等构成。

3 频率示值误差不确定度分析

根据规程中的要求,将振动控制器设置为定频振动,频率设置为1800Hz,加速度设置为3g。将控制仪信号输出端接振动测量仪信号分析部分,振动测量仪的频率分辨率设置成0.1Hz。分别记录振动控制仪的显示值和振动测量仪的频率测量值。

3.1 数学模型

$$a=x-y \quad (1)$$

式中: x——为振动测量仪测得的频率, Hz;

y——为振动控制仪的设定值, Hz;

a——为频率示值误差, Hz。

灵敏度系数: $c_1 = \frac{\partial a}{\partial x} = 1$

3.2 测量不确定度分量来源分析

(1) 测量重复性引入的测量不确定度。

(2) 振动测量仪频率测量误差产生的不确定度。

(3) 振动测量仪频率测量的分辨力引入的测量不确定度。

表1 测量结果

测试编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
频率值 (Hz)	1800.0	1800.2	1800.0	1800.0	1800.2	1800.2	1800.2	1800.0	1800.0	1800.0

3.3 不确定度分量的评定

3.3.1 标准不确定度的 A 类评定

用振动测量仪对频率进行 10 次独立测量。测量结果如下：

根据以下公式

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}{n-1}} \quad (2)$$

计算得单次测量的实验标准差： $s=0.035\text{Hz}$

校准时取单次测量结果，则由测量重复性引入的标准不确定分量 $\mu_1=s=0.035\text{Hz}$ 。

3.3.2 标准不确定度的 B 类评定

(1) 依据厂家提供的资料，可知振动测量仪频率测量允许误差为 $\pm 0.05\%$ 。符合均匀分布，则

$$\mu_{21} = 1800.08 \times \frac{0.05\%}{\sqrt{3}} = 0.52\text{Hz} \quad (3)$$

(2) 振动测量仪的频率分辨力设置成 0.1Hz。读数的分散性符合均匀分布：

$$\mu_{22} = \frac{0.05}{\sqrt{3}} \approx 0.029\text{Hz} \quad (4)$$

3.4 合成标准不确定度的评定

(1) 主要不确定度汇总表如表 1。

表 1 主要不确定度汇总表

不确定度来源	符号	标准不确定度值		
		半区间	分布	μ_i
测量重复性	μ_1			0.035Hz
频率允许误差	μ_{21}	0.90004Hz	均匀	0.52Hz
频率分辨力	μ_{22}	0.1Hz	均匀	0.029Hz

(2) 合成标准不确定度计算

$$\mu_c = \sqrt{c_1^2 \mu_1^2 + c_2^2 \mu_{21}^2 + c_3^2 \mu_{22}^2} = \sqrt{0.035^2 + 0.52^2 + 0.029^2} = 0.52\text{Hz}$$

3.4.3 扩展不确定度的评定

$$U = k \times \mu_c = 2 \times 0.52\text{Hz} = 1.04\text{Hz}$$

式中 k 为包含因子，取 $k=2$ 。

相对扩展不确定度：

$$U_{rel} = \frac{U}{y} \times 100\% = \frac{1.04}{1800} \times 100\% = 0.06\%；k=2 \quad (5)$$

4 加速度不确定度分析

依据 JJG948-2018 的规定，将加速度传感器刚性地连接在振动台面中心，其输出接振动测量仪，在规定的工作频率范围内，对加速度幅值进行测量，以最大的示值误差作为加速度示值的测量结果。

4.1 数学模型

$$\delta = a - A \quad (6)$$

式中： δ ——加速度示值误差；

a ——振动台控制仪的加速度幅值的示值， m/s^2 ；

A ——振动测量仪实测加速度示值， m/s^2 。

$$\text{灵敏度系数：} c_2 = \frac{\partial \delta}{\partial A} = -1$$

4.2 测量不确定度分量来源分析

(1) 测量重复性引入的测量不确定度。

(2) 振动测量仪准确度引入的不确定度。

(3) 振动测量仪横向振动引入的不确定度。

4.3 标准不确定度评定

4.3.1 标准不确定度的 A 类评定

选取电动振动试验系统加速度 40m/s^2 ，通过在重复条件下，连续测量 10 次，得到下列结果如表 2：

表 2 重复测量数据

测试编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
加速度值(m/s^2)	40.5	39.9	40.4	40.2	39.7	39.8	40.3	40.4	39.7	39.9

由公式 (3)、(4)

标准偏差：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\delta_i - \bar{\delta})^2}{n-1}} \quad (3)$$

相对标准不确定度：

$$u_1 = \frac{s}{a} \quad (4)$$

可计算出该点的平均标准偏差 $\sigma = s = 0.39$ 、相对标准不确定度 $u_1 = 0.97\%$

4.3.2 标准不确定度的 B 类评定

根据检定规程的要求，测量电动振动试验系统加速度示值的振动测量分析系统的准确度 $\pm 0.05\%$ ，符合均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，得：

$$u_{21} = \frac{0.05\%}{\sqrt{3}} = 0.029\% \quad (5)$$

电动振动试验系统总是有横向振动的，其影响到振动测量分析系统的准确性。而且电动振动试验系统只有一个方向横向运动最大，所以属于正态分布，根据横向振动计算公式：

横向振动=电动振动试验系统最大允许横向比×标准加速度计误差=50%×2%=1%

$$\mu_{22} = \frac{1\%}{3} = 0.33\% \quad (6)$$

标准器引入的不确定度 u_2 由 u_{21} 、 u_{22} 构成，故：

$$u_2 = \sqrt{c_2^2 u_{21}^2 + c_3^2 u_{22}^2} = 1.74\% \quad (7)$$

4.4 合成标准不确定度

(1) 主要不确定度汇总表如表 3。

表4 测量结果

测试编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
加速度值 (m/s ²)	6.2242	6.1245	6.0859	6.1158	6.4212	6.3218	6.1889	6.0584	6.1459	6.2257
平均值 \bar{y} : 6.1913m/s ²										

表6 测量结果

测试编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
谱密度值 (m ² /s ³)	0.022701	0.021756	0.019875	0.020198	0.022566	0.020722	0.019856	0.019563	0.021355	0.019548
平均值 \bar{y} : 0.020814 m ² /s ³										

表3 主要不确定度汇总表

不确定度来源	符号	标准不确定度值		
		半区间	分布	μ_i
测量重复性	u_1			0.97%
振动测量分析系统准确度	u_{21}	0.05%	均匀	0.029%
电动振动试验系统横向振动	u_{22}	1%	正态	0.33%

(2) 合成标准不确定度计算

以上各项标准不确定度分量是互不相关的,所以相对合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{c_1^2 u_1^2 + c_2^2 u_2^2} = 1.0\% \quad (8)$$

(3) 相对扩展标准不确定度计算

取包含因子 $k=2$, 则: $U_{rel} = k u_c = 2.0\%$

相对扩展不确定度为: $U_{rel} = 2.0\%$; $k=2$

5 随机加速度总均方根值不确定度分析

依据 JJG948-2018 的规定,将加速度传感器刚性地连接在振动台台面中心,其输出接振动测量分析系统,在规定的频率范围内,对随机加速度的总均方根值进行测量,以最大的示值误差作为随机加速度总均方根值的测量结果。

5.1 数学模型

$$y=x \quad (9)$$

式中: y ——随机加速度总均方根值示值, m/s²;

x ——为振动测量仪读取的幅值, m/s²。

灵敏度系数: $c_1 = \frac{\partial y}{\partial x} = 1$

5.2 测量不确定度分量来源分析

(1) 测量重复性引入的测量不确定度。

(2) 振动测量仪误差产生的不确定度。

5.3 不确定度分量的评定

5.3.1 标准不确定度的 A 类评定

对系统的随机加速度总均方根值进行十次独立测量。

测量结果如表 4:

根据以下公式

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}{n-1}} \quad (10)$$

计算得单次测量的实验标准差: $s=0.11m/s^2$

校准时取单次测量结果,则由测量重复性引入的相对不确定分量 $\mu_1 = \frac{u_1}{y} = 1.8\%$ 。

5.3.2 标准不确定度的 B 类评定

由振动测量仪幅值测量误差引入的不确定分量,振动测量仪幅值测量的允许误差 $\pm 0.05\%$,符合均匀分布,所以

$$\mu_{21} = \frac{0.05\%}{\sqrt{3}} = 0.028\%。$$

5.4 合成标准不确定度的评定

(1) 主要不确定度汇总表,如表 5。

表5 主要不确定度汇总表

不确定度来源	符号	相对不确定度值		
		半区间	分布	μ_i
测量重复性	μ_1			1.8%
振动测量仪误差产生的不确定度	μ_{21}	0.05%	均匀	0.029%

(2) 合成相对不确定度计算

$$\mu_c = \sqrt{c_1^2 \mu_1^2 + c_2^2 \mu_2^2} = \sqrt{1.8\%^2 + 0.028\%^2} = 1.8\% \quad (11)$$

相对扩展不确定度 $U_{rel} = 2 \times \mu_c = 3.6\%$; $k=2$

6 随机振动加速度功率谱密度值不确定度分析

依据 JJG948-2018 的规定,将加速度传感器刚性地连接在振动台台面中心,其输出接振动测量分析系统,在规定的频率范围内,对随机振动加速度功率的谱密度值进行测量,以最大的示值误差作为随机加速度功率的谱密度值的测量结果。

6.1 数学模型

$$y=x \quad (12)$$

式中: y ——随机加速度总均方根值示值, m²/s³;

x ——为振动测量仪读取的数值, m²/s³。

灵敏度系数: $c_1 = \frac{\partial y}{\partial x} = 1$

6.2 测量不确定度分量来源分析

(1) 测量重复性引入的测量不确定度。

(2) 振动测量仪误差引入的不确定度。

6.3 不确定度分量的评定

6.3.1 标准不确定度的 A 类评定

对系统的随机加速度功率谱密度值进行十次测量,每

次读 5 个数据，读出其平均数值。测量结果如表 6：

根据以下公式

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}{n-1}} \quad (13)$$

计算得单次测量的实验标准差： $s = 0.11\text{m/s}^2$

校准时取单次测量结果，则由测量重复性引入的标准

不确定分量 $\mu_1 = \frac{s}{\sqrt{5}} = 2.46\%$ 。

6.3.2 标准不确定度的 B 类评定

由振动测量仪测量误差引入的不确定分量，振动测量仪的允许误差为 $\pm 1.0\%$ ，符合均匀分布，所以

$$\mu_2 = \frac{1.0\%}{\sqrt{3}} = 0.29\%$$

6.4 合成标准不确定度的评定

(1) 主要不确定度汇总表如表 7：

表 7 主要不确定度汇总表

不确定度来源	符号	标准不确定度值		
		半区间	分布	μ_i
测量重复性	μ_1			2.46%
振动测量仪产生的不确定度	μ_2	3%	均匀	0.29%

6.4.2 合成标准不确定度计算

$$\mu_c = \sqrt{c_1^2 \mu_1^2 + c_2^2 \mu_2^2} = \sqrt{2.46\%^2 + 0.64\%^2} = 2.8\% \quad (14)$$

扩展不确定度 $U_{rel} = k \mu_c = 2 \times 3.0 = 5.6\%$ ； $k=2$

7 台面加速度幅值均匀度不确定度分析

依据 JJG948-2018 的规定，将不少于 5 只加速度传感器刚性连接在振动台台面中心和不同直径的安装螺栓分布圆周上，其输出接振动测量分析系统，在规定的工作频率范围内，对台面加速度幅值均匀度进行测量，得出振动台台面的加速度幅值均匀度。

7.1 数学模型

$$y = x \quad (15)$$

式中： y ——加速度幅值均匀度，%；

x ——为振动测量仪读取的数值，%。

灵敏度系数： $c_1 = \frac{\partial y}{\partial x} = 1$

7.2 测量不确定度分量来源分析

(1) 测量重复性引入的测量不确定度。

(2) 振动测量仪误差引入的不确定度。

7.3 不确定度分量的评定

7.3.1 标准不确定度的 A 类评定

对台面的加速度幅值均匀度进行十次测量，读出其数值。测量结果如表 8：

根据以下公式：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}{n-1}} \quad (16)$$

计算得单次测量的实验标准差： $s = 0.11\%$

校准时取单次测量结果，则由测量重复性引入的相对不确定分量： $\mu_1 = s \times 100\% = 0.22\%$ 。

7.3.2 标准不确定度的 B 类评定

由振动测量仪测量误差引入的不确定分量，振动测量仪的允许误差为 $\pm 0.5\%$ ，符合均匀分布，所以 $\mu_2 =$

$$\frac{0.5\%}{\sqrt{3}} = 0.29\%$$

7.4 合成标准不确定度的评定

(1) 主要不确定度汇总表，如表 9：

表 9 主要不确定度汇总表

不确定度来源	符号	标准不确定度值		
		半区间	分布	μ_i
测量重复性	μ_1			0.22%
振动测量仪产生的不确定度	μ_2	0.5%	均匀	0.29%

(2) 合成标准不确定度计算

$$\mu_c = \sqrt{c_1^2 \mu_1^2 + c_2^2 \mu_2^2} = \sqrt{0.22\%^2 + 0.29\%^2} = 0.3\% \quad (17)$$

扩展不确定度 $U = k \mu_c = 2 \times 0.3\% = 0.6\%$ ； $k=2$ 。

8 台面横向振动比不确定度分析

依据 JJG948-2018 的规定，将三轴加速度计刚性连接在振动台台面中心，使三轴向加速度计的 X 轴（或 Y 轴）与振动台的耳轴方向重合。加速度计适调放大器连接振动测量仪。在所选频率下以振动台主振方向所允许最大振幅幅值的 50% 进行振动，从振动测量仪上直接读取台面的横向振动比。

8.1 数学模型

$$y = x \quad (18)$$

式中： y ——台面横向振动比，%；

x ——为振动测量仪读取的数值，%。

灵敏度系数： $c_1 = \frac{\partial y}{\partial x} = 1$

表 8 重复测量数据

测试编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
台面加速度均匀度%	2.6	2.5	2.5	2.6	2.6	2.6	2.7	2.8	2.5	2.4
平均值 \bar{y} : 2.6%										

8.2 测量不确定度分量来源分析

- (1) 测量重复性引入的测量不确定度。
- (2) 振动测量仪误差引入的不确定度。

8.3 不确定度分量的评定

8.3.1 标准不确定度的 A 类评定

对台面的横向振动比进行十次测量，读出其数值。测量结果如下：

表 10 重复测量数据

测试编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
横向振动比%	3.3	3.2	3.2	3.4	3.2	3.3	3.3	3.1	3.2	3.4
平均值 \bar{y} : 3.3%										

根据以下公式

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}{n-1}} \quad (19)$$

计算得单次测量的实验标准差： $s=0.097\%$

校准时取单次测量结果，则由测量重复性引入的相对不确定分量： $\mu_1 = s \times 100\% = 0.097\%$ 。

8.3.2 标准不确定度的 B 类评定

由振动测量仪测量误差引入的不确定分量，振动测量仪的允许误差为 $\pm 0.5\%$ ，符合均匀分布，所以

$$\mu_2 = \frac{0.5\%}{\sqrt{3}} = 0.29\%$$

8.4 合成标准不确定度的评定

- (1) 主要不确定度汇总表，如表 11。

表 11 主要不确定度汇总表

不确定度来源	符号	标准不确定度值		
		半区间	分布	μ_i
测量重复性	μ_1			3%
振动测量仪产生的不确定度	μ_2	0.5%	均匀	0.29%

- (2) 合成标准不确定度计算

$$\mu_c = \sqrt{c_1^2 u_1^2 + c_2^2 u_2^2} = \sqrt{0.097\%^2 + 0.29\%^2} = 0.19\% \quad (20)$$

扩展不确定度 $U = k \mu_c = 2 \times 0.19\% = 0.38\%$ ； $k=2$ 。

[参考文献]

- [1] 计恩荣, 陈闯. 振动试验夹具设计要求及验证方法[J]. 混合微电子技术, 2009, 9(11): 43-44.
 - [2] 符瑜慧. 振动试验中主要参数的计算推导及应用[J]. 环境技术, 2010, 28(3): 4-5.
- 作者简介: 唐杉林(1986.5-), 毕业院校: 中国计量大学, 所学专业: 测控技术及仪器, 当前就单位: 江苏省电子信息产品质量监督检验研究院(江苏省信息安全测评中心), 职务: 科员, 职称级别: 工程师。