

# Evaluation of Measurement Uncertainty in Three Comprehensive Environmental Tests

Li Shen Guangzhi Fan

The 34th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Guilin, Guangxi, 541004, China

## Abstract

The purpose of the three comprehensive environmental tests is to confirm the comprehensive effects of temperature, humidity, and vibration on the functionality and performance of the product during operation. Compared with the effect of a single factor, it can more accurately reflect the adaptability of the product to changes in temperature, humidity, and vibration composite environment during transportation and actual use, and expose product defects. The evaluation of measurement uncertainty in experiments mainly includes three aspects: temperature, humidity, and vibration. It mainly involves the calibration parameters of relevant performance of temperature and humidity test chambers and vibration test benches, measurement repeatability, and correction values of measuring instruments. The measurement uncertainty of the three comprehensive experiments is obtained by combining standard uncertainty components into standard uncertainty. The evaluation of measurement uncertainty is an important means to ensure the effectiveness, accuracy, and authenticity of experiments.

## Keywords

three comprehensive environmental test; mathematical mode; synthesis standard uncertainty; extension uncertainty

## 三综合环境试验测量不确定度的评定

神力 范广智

中国电子科技集团公司第三十四研究所, 中国 · 广西 桂林 541004

## 摘 要

三综合环境试验目的是确认产品在工作期间, 温度、湿度和振动对产品的功能和性能的综合影响。与单一因素作用相比, 更能真实地反映出产品在运输和实际使用过程中、对温湿度及振动复合环境变化的适应性, 暴露产品的缺陷。试验的测量不确定度评定主要包含温度、湿度、振动三个方面, 主要涉及温湿度试验箱、振动试验台的相关性能校准参数、测量的重复性、测量仪器的修正值等, 通过标准不确定度分量合成标准不确定度的方式得到三综合试验的测量不确定度。测量不确定度的评定是确保试验有效性、准确性、真实性的重要手段。

## 关键词

三综合环境试验; 数学模型; 合成标准不确定度; 扩展不确定度

## 1 引言

三综合环境试验是温度、湿度、振动三个试验条件同时开展的综合性环境试验。目前广泛运用于航空、航天、军工、电工、电子等产品整机及零部件上, 是暴露产品的缺陷, 是新产品研制、样机试验、产品合格鉴定试验全过程必不可少的重要试验手段。通过一台由高低温快速温变湿热试验箱和电动振动台组合而成的试验设备实现的试验条件, 与单一应力试验作用相比, 三综合环境试验更能真实地反映电工电子产品在运输和实际使用过程中对温湿度及振动复合环境变化的适应性。在进行温度、湿度、振动三种应力同时施加的综合试验时, 从故障发生的机理来说, 进行温度循环的产

品内部由于材料膨胀系数的差异发生伸缩, 在结合部位发生松动, 这时如果施加湿度, 潮气就会从缝隙间侵入, 使结合部和连接处的摩擦系数降低。再施加振动应力, 相对于特定的频率, 产品的共振现象还会发生。像这样通过运动、吸湿、冻结、共振的反复过程, 使新的失效模式(由大幅度加速的单独因子失效模式和三种因子综合的相叠加效果引起的)的出现成为可能。

## 2 温度与湿度的测量不确定度评定

### 2.1 概述

#### 2.1.1 环境条件及设备

温度 15℃~35℃, 湿度:  $\leq 85\%RH$ ; 高低温快速温变湿热试验箱(温度指示分辨率为 0.1℃, 湿度指示分辨率为 0.1%RH); 数字温湿度计。

【作者简介】神力(1990-), 男, 中国广西桂林人, 本科, 工程师, 从事光通信设备试验与检测技术研究。

### 2.1.2 测量方法

直接测量，将样品放在试验箱中，尽量处于箱体中心位置，将数字温度计的温感探头放置在样品旁，设定试验箱的温度变化速率为 1/min，数字温度计的温度显示作为温度监控<sup>[1]</sup>。开启温箱，将箱内温度升高到温度 40℃、湿度 95%，并保持稳定后，记录数字温度计的显示温度，使试验样品达到温度稳定，并保持 2h 后，记录数字温湿度的显示温度<sup>[2]</sup>。

### 2.1.3 不确定度的来源

测量的重复性、测量仪器修正值、试验箱的偏差、试验箱的校准<sup>[3]</sup>。

## 2.2 数学模型

### 2.2.1 温度数学模型

$$\Delta T = T_1 + T_2 + T_3 \quad (1)$$

其中， $\Delta T$  为温度偏差，℃； $T_1$  为设备显示温度平均值，℃； $T_2$  为中心点 5 次测量的平均值，℃； $T_3$  为测量仪器指示值的修正值，℃。

### 2.2.2 湿度数学模型

$$\Delta H = H_1 + H_2 + H_3 \quad (2)$$

其中， $\Delta H$  为湿度偏差，%RH； $H_1$  为设备显示湿度平均值，℃； $H_2$  为中心点 5 次测量的平均值，%RH； $H_3$  为测量仪器指示值的修正值，%RH。

## 2.3 灵敏度系数

式 (1) 中  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  互相独立，对其分别求导得到灵敏度系数  $C_1=1$ ， $C_2=-1$ ， $C_3=-1$ 。式 (2) 中  $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$  互相独立，对其分别求导得到灵敏度系数  $C_4=1$ ， $C_5=-1$ ， $C_6=-1$ 。

## 2.4 标准不确定度的评定

### 2.4.1 由 $T_1$ 、 $H_1$ 引入的不确定度

以相同的测量程序、相同的测量人员、在相同条件下使用相同的设备、在相同的地点，并且在充分保证其他条件的时间内，重复读取试验箱 5 次的显示数据如表 1 所示。

表 1 重复性读取数据

| 测量次数     | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|----------|------|------|------|------|------|
| 温度 (℃)   | 40.3 | 40.1 | 40.2 | 40.1 | 40.0 |
| 湿度 (%RH) | 95.1 | 95.2 | 95.1 | 95.0 | 95.2 |

根据贝塞尔公式， $T_1$ 、 $H_1$  分量的标准不确定度为：

$$\text{温度: } u_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}{n-1}} = 0.114^\circ\text{C}$$

$$\text{湿度: } u_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2}{n-1}} = 0.084\% \text{RH}$$

### 2.4.2 由 $T_2$ 、 $H_2$ 引入的不确定度

以相同的测量程序、相同的测量人员、在相同条件下使用相同的设备、在相同的地点，并且在充分保证其他条件的

时间内，用数字温湿计重复 5 次测量的显示数据如表 2 所示。

表 2 重复性测量数据

| 测量次数     | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 温度 (℃)   | 40.18 | 40.22 | 40.09 | 40.16 | 40.27 |
| 湿度 (%RH) | 95.08 | 95.21 | 95.25 | 95.16 | 95.10 |

根据贝塞尔公式， $T_2$ 、 $H_2$  分量的标准不确定度为：

$$\text{温度: } u_3 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}{n-1}} = 0.067^\circ\text{C}$$

$$\text{湿度: } u_4 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2}{n-1}} = 0.072\% \text{RH}$$

### 2.4.3 由 $T_3$ 、 $H_3$ 引入的不确定度

由校准证书知，数字温湿计温度修正值  $T_3$  的扩展不确定度  $U=0.06^\circ\text{C}$ ，湿度修正值  $H_3$  的扩展不确定度  $U=0.08\% \text{RH}$ 。以正态分布估计， $k=2.0$ ， $u_5=0.06^\circ\text{C}/2.0=0.030^\circ\text{C}$ ， $u_6=0.08\% \text{RH}/2.0=0.040\% \text{RH}$ 。

### 2.4.4 试验箱的偏差

由校准证书知，试验箱的温度最大偏差为  $0.7^\circ\text{C}$ ，服从均匀分布，则  $u_7=0.7/2 \sqrt{3} = 0.20^\circ\text{C}$ 。试验箱的湿度最大偏差为  $0.9\% \text{RH}$ ，服从均匀分布，则  $u_8=0.9/2 \sqrt{3} = 0.26\% \text{RH}$ 。

### 2.4.5 试验箱的校准

由校准证书知，试验箱校准的温度扩展不确定度为  $0.3^\circ\text{C}$ ， $k=2$ ，则标准不确定度为： $u_9=0.3/2=0.15^\circ\text{C}$ 。试验箱校准的湿度扩展不确定度为  $1.0\% \text{RH}$ ， $k=2$ ，则标准不确定度为： $u_{10}=1.0/2=0.5\% \text{RH}$ 。标准不确定度汇总于表 3，输入量标准不确定度汇总表如表 3 所示。

表 3 标准不确定度汇总表

| 不确定度分量   | 不确定度来源      | $c_i$ | 不确定度  |
|----------|-------------|-------|-------|
| $u_1$    | 试验箱温度读数的重复性 | 1     | 0.114 |
| $u_2$    | 试验箱湿度读数的重复性 | 1     | 0.084 |
| $u_3$    | 试验箱温度测量的重复性 | -1    | 0.067 |
| $u_4$    | 试验箱湿度测量的重复性 | -1    | 0.072 |
| $u_5$    | 数字温湿计温度修正值  | -1    | 0.030 |
| $u_6$    | 数字温湿计湿度修正值  | -1    | 0.040 |
| $u_7$    | 试验箱温度偏差     | 1     | 0.20  |
| $u_8$    | 试验箱湿度偏差     | 1     | 0.26  |
| $u_9$    | 试验箱温度校准     | 1     | 0.15  |
| $u_{10}$ | 试验箱湿度校准     | 1     | 0.5   |

## 2.5 合成标准不确定度

温度合成不确定度：

$$u_{T_c} = \sqrt{\sum_{i=1}^2 U_i^2} = \sqrt{u_1^2 + u_3^2 + u_5^2 + u_7^2 + u_9^2} = 0.29^\circ\text{C}$$

湿度合成不确定度：

$$u_{H_c} = \sqrt{\sum_{i=1}^2 U_i^2} = \sqrt{u_2^2 + u_4^2 + u_6^2 + u_8^2 + u_{10}^2} = 0.58\% \text{RH}$$

## 2.6 扩展不确定度

取 $k=2$ ，温度扩展不确定度的计算公式为： $U=k \times u_{Tc}=2 \times 0.29=0.58^{\circ}\text{C}$ ，湿度扩展不确定度的计算公式为： $U=k \times u_{Hc}=2 \times 0.58=1.16\%\text{RH}$ 。

## 3 振动的测量不确定度评定

### 3.1 概述

#### 3.1.1 环境条件及设备

温度 $15^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$ ，湿度： $\leq 85\%\text{RH}$ ；电动振动试验台。

#### 3.1.2 测量方法

将测振仪的与振动台刚性连接，使其工作轴线与振动台振动方向相一致。开始工作振动台，通过软件采集和分析振动台的相关参数，依据测振仪和振动试验台的控制软件的试验对比结果判断仪器设备是否合格<sup>[4]</sup>。

#### 3.1.3 不确定度的来源

测振仪的加速度示值误差引入的标准不确定度分量，测量的重复性引入的标准不确定度分量。重复性测试记录表如表4所示。

表4 重复性测试记录表

| 次数                     | 1     | 2     | 3     | 4     | 5         | 6     |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-----------|-------|
| 测量值 ( $\text{m/s}^2$ ) | 10.10 | 10.24 | 10.32 | 10.25 | 10.12     | 10.02 |
| 次数                     | 7     | 8     | 9     | 10    | $\bar{X}$ | —     |
| 测量值 ( $\text{m/s}^2$ ) | 10.08 | 10.26 | 10.15 | 10.05 | 10.159    | —     |

### 3.2 数学模型

根据检定规程，用振动分析系统检定振动台的加速度示值误差的数学模型为：

$$\delta_a = a_s - a_o \quad (3)$$

式中： $a_s$ ——振动台控制仪的加速度幅值的示值；

$a_o$ ——测振仪实测加速度幅值。

方差和传播系数：依照公式(1)得 $u^2_c = u^2_{(\delta)} = c^2_{a_s} u^2_{a_s} + c^2_{a_o} u^2_{a_o}$ ，式中 $u_{a_s}$ 、 $u_{a_o}$ 分别为 $a_s$ 、 $a_o$ 的不确定度。

传播系数：

$$c_1 = c_{(a_s)} = \frac{\partial \delta_a}{\partial a_s} = 1, \quad c_2 = c_{(a_o)} = \frac{\partial \delta_a}{\partial a_o} = -1$$

### 3.3 标准不确定度评定

#### 3.3.1 $u(\bar{f})$

以 $160\text{Hz}$ ， $10\text{m/s}^2$ 为例，测振仪的加速度误差引入的相对标准不确定度 $u(\bar{f})$ ，测振仪的误差引入的相对标准不确定度 $u(f_1)$ ，按照测振仪的极限误差指标为 $2\%$ ，设为均匀分布。则 $k=\sqrt{3}$ ， $u(f_1)=2\%/\sqrt{3}=1.15\%$ 。

#### 3.3.2 $u(f_2)$

温度、湿度、磁场、电场、周围低频振动、噪声等环境因素所引入的相对标准不确定度 $u(f_2)$ ，根据有关资料 and 实际经验，这些环境影响的误差极限为 $0.2\%$ 。设为均匀分布， $k=\sqrt{3}$ ，则 $u(f_2)=0.2\%/\sqrt{3}=0.12\%$ 。

由于以上各标准不确定度分量是相互独立的，故合成标准不确定度 $u(\bar{f})$ 为：

$$u(\bar{f}) = \sqrt{u(f_1)^2 + u(f_2)^2} = 1.16\%$$

#### 3.3.3 $u(f)$

重复性引入的相对标准不确定度 $u(f)$ ，A类评定，在 $10\text{m/s}^2$ 这一点，用本检定装置对其进行10次测量，记录其测量值如下：

$$\text{根据公式 } s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \text{ A类标准不确定度 } u=s=$$

$$0.3057\text{m/s}^2=0.306\text{m/s}^2, \text{ 则相对标准不确定度 } u(f) = \frac{0.306}{10} \times 100\% = 3.06\%。$$

#### 3.3.4 标准不确定度

标准不确定度汇总于表5。

表5 输入量标准不确定度汇总表

| 标准不确定度分量     | 不确定度来源 | 评定方法 | 分布 | 分布因子 $ki$  | 相对标准不确定度 |
|--------------|--------|------|----|------------|----------|
| $u(\bar{f})$ | 加速度值   | B    | 均匀 | $\sqrt{3}$ | 1.16%    |
| $u(f)$       | 重复性    | A    | /  | /          | 3.06%    |

#### 3.3.5 合成标准不确定度

$$u_c(F) = \sqrt{u(\bar{f})^2 + u(f)^2} = \sqrt{(0.0116)^2 + (0.0306)^2} = 3.27\%$$

### 3.4 扩展不确定度

取 $k=2$ ，则相对扩展不确定度为：

$$U_{rel} = k \times u_c(F) = 2 \times 3.27\% = 6.54\%$$

## 4 结语

三综合环境试验测量不确定度是一个合理表征环境试验测量结果的分散性的参数，是对环境试验测量结果准确性的定量表征。文中以试验案例的形式对三综合环境试验中温度、湿度、振动三个试验条件分别进行不确定度评定，采用的方式为：①建立相应的数学模型；②根据数学模型评定各分量标准不确定度；③各不确定度分量合成标准不确定度；④计算出扩展不确定度。在受试产品的环境试验规范、试验大纲等文件编制的过程中，合理地考虑相关试验的不确定因素有利于提升试验的准确性、真实性，对于整个试验过程的测量、试验允差的制定、试验结果的准确性判断均有很好的指导作用。

### 参考文献

- [1] JJF 1011—2019 环境试验设备温度、湿度参数[S].
- [2] 赵云鹏,韩崧,谢海滨.温湿度标准箱温度均匀度测量值的不确定度评定[J].计量与测试技术,2017(3).
- [3] 倪育才.实用测量不确定度评定[M].6版.中国质量标准出版传媒有限公司,2020.
- [4] 刘元新,宋晓辉.测量不确定度评定案例[M].北京:中国建材工业出版社,2021.