

# 信号发生器输出幅度平坦度测量中的非线性与相关性研究

商佳尚

(北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

**摘要:** 针对评价信号发生器输出特性的一项重要指标——信号发生器输出幅度平坦度, 介绍了输出幅度平坦度的测量方法, 并且针对其不同的计算公式建立了测量的数学模型; 由于该数学模型是非线性模型, 并且由于输入量之间可能存在相关性, 所以在进行测量不确定度分析的过程中必须考虑在合成标准不确定度时是否需要加入数学模型按泰勒级数展开后所得方差的高阶项以及表征相关性的协方差项; 根据高阶项对合成标准不确定度整体的贡献大小判断是否可以忽略; 同时比较了通过实验方法得到相关系数与相关系数直接取 0 或取 1 时对应扩展不确定度的大小; 最后针对幅度平坦度的测量提出有效避免处理相关问题的方法, 并对环境温度、供电电源以及阻抗匹配等影响信号发生器幅度平坦度测量不确定度的实际操作问题给出具有实用价值的参考意见。

**关键词:** 信号发生器; 输出幅度平坦度; 非线性模型; 相关性

## Research on the Nonlinearity and Interdependency in the Measurement of the Output Amplitude Flatness of Signal Generators

Shang Jiashang

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

**Abstract:** The output amplitude flatness of signal generators is an important technical index to evaluate the output property of a signal generator. In this paper, the measurement method of output amplitude flatness is introduced, and measurement mathematical models are proposed according to different formulas. Because of the nonlinearity of the mathematical models and the possible interdependency between different input variables, it must be considered whether the higher-order items and the covariance items in the Taylor series expansion should be taken into account in the combined standard uncertainty in the process of the measurement uncertainty analysis. It is analyzed whether the higher-order items could be ignored according to their contributions to the combined standard uncertainty. And the expanded uncertainties are compared when the correlation coefficient is evaluated at different values—‘0’, ‘1’ and the experimentally decided value, respectively. In the end, a valid method is proposed to avoid working on the covariance items in the measurement of the output amplitude flatness, and some practical suggestions are offered on how to deal with the problems that are the influences of environment temperature and power supply and impedance matching on the measurement uncertainty of the output amplitude flatness of signal generator.

**Keywords:** signal generators; output amplitude flatness; nonlinear models; interdependency

## 0 引言

信号发生器在生产实践和科研领域中有着广泛的应用, 它是一种能够产生不同频率、波形和幅度的输出设备, 可以为被测电路提供所需特定参数的电测试信号。信号发生器输出幅度的平坦度是评价信号发生器输出特性的一项重要指标。信号发生器输出幅度在其工作频率范围内应保持恒定, 由于各种原因使得不同频率时输出幅度产生差异。信号输出的不稳定, 会直接造成各项测量结果的不确定性。而影响幅度平坦度的因素很多, 如环境、电源、负载等变化都会造成输出幅度的变动。当信号发生器由一个频率点换到另一个频率点时, 希望信号的输出幅度保持不变, 但早期的信号发生器很难做到这一点, 每次切换频率都需要先调节振荡器的输出耦合或电平调节衰减器, 把输出电平调到参考值, 这样就大大增加了操作的复杂性。目前新型的信号发生器都带有内部的自动稳幅装置, 亦称为自动

电平控制 (ALC), 它可以很好地提高宽带幅度的一致性<sup>[1]</sup>。

## 1 输出幅度平坦度的测量

输出幅度平坦度是测试信号发生器输出特性的一项重要参数。输出幅度平坦度是指信号发生器在规定的输出幅度时, 其频率范围内某频率点的输出幅度与参考频率点输出幅度的比值或分贝数差值。通常低频信号发生器的输出幅度可以用数字多用表、高频电压表作为测量设备, 高频和微波信号发生器的输出幅度一般用功率计或测量接收机作为测量设备<sup>[2]</sup>。图 1 为某型号信号发生器在不同频率下输出幅度平坦度的测量值 (以 0.1 MHz 作为参考频率点)。

用数字多用表测量信号发生器输出幅度平坦度的方法如下: 将被检信号发生器设置为参考频率点, 用数字多用表测量其输出幅度的电压值为  $V_0$ , 在被检信号发生器工作频率范围内, 连续改变其输出频率, 用数字多用表分别测量其它各频率点输出幅度的电压值为  $V_i$ , 则被检信号发生器的输出信号幅度平坦度按式 (1) 或式 (2) 计算:

$$\delta = \frac{V_i - V_0}{V_0} \times 100\% \quad (1)$$

收稿日期:2016-04-28; 修回日期:2016-05-03。

作者简介:商佳尚(1981-), 女, 北京人, 硕士, 工程师, 主要从事电磁、无线电及时间频率的计量测试工作。

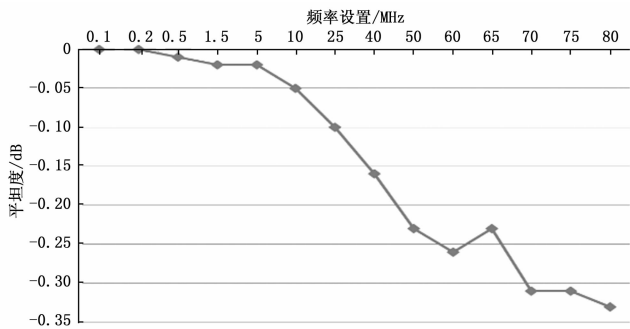


图 1 某型号信号发生器在不同频率下输出幅度平坦度的测量值

式中,  $\delta$  为输出幅度平坦度;  $V_i$  为各频率点输出电压值 (V);  $V_0$  为参考频率点输出电压值 (V)。

$$\Delta = 20 \lg \frac{V_i}{V_0} \quad (2)$$

式中,  $\Delta$  为输出幅度平坦度 (dB);  $V_i$  为各频率点输出电压值 (V);  $V_0$  为参考频率点输出电压值 (V)。

## 2 输出幅度平坦度的测量不确定度分析

### 2.1 测量问题概述

以用数字多用表测量被检信号发生器的输出幅度为例, 输出幅度平坦度的计算公式可以根据上述 (1) 式计算, 由此建立测量的数学模型为:

$$y = \frac{V_i - V_0}{V_0} \quad (3)$$

### 2.2 整理测量数据

设被检信号发生器为 GW 公司生产的 GFG-8050, 输出幅度设置为 1 V (有效值), 参考频率点为 1 kHz, 用 Agilent 公司生产的数字多用表 3458A 作为电压标准测量该输出幅度的电压值为  $V_0$ , 调节信号发生器 GFG-8050 的输出频率为 20 kHz, 用数字多用表 3458A 测量该频率点输出幅度的电压值为  $V_i$ 。

测量数据及经计算得到的算数平均值和平均值的实验标准偏差见表 1 所示。

表 1 数字多用表测量信号发生器输出幅度的数据

测量次数 $k$	输出幅度为 1 V (1kHz)的测量值 $V_{k0}$	输出幅度为 1 V (20kHz)的测量值 $V_{ki}$
1	1.001 630 V	1.000 777 V
2	1.001 635 V	1.000 788 V
3	1.001 641 V	1.000 783 V
4	1.001 630 V	1.000 785 V
5	1.001 647 V	1.000 777 V
6	1.001 632 V	1.000 791 V
7	1.001 630 V	1.000 788 V
8	1.001 638 V	1.000 785 V
9	1.001 627 V	1.000 780 V
10	1.001 632 V	1.000 788 V
平均值 $\bar{V}$	1.001 63 V	1.000 78 V
平均值的实验标准偏差 $s(\bar{V})$	0.000 001 95	0.000 001 55

### 2.3 测量不确定度的主要来源

根据对实际测量情况的分析可知, 测量不确定度的主要来

源包括: 数字多用表测量信号发生器输出电压的测量准确度, 数字多用表的读数分辨力以及数字多用表测量的分散性, 假设供电电源和实验室环境条件等产生的影响可忽略不计。

2.3.1 数字多用表的测量准确度引入的不确定度  $u_1(V_0)$ 、 $u_1(V_i)$

根据数字多用表 3458A 的说明书可知测量幅度为 1 V (1 kHz) 的准确度为  $\pm 0.000\ 09$  V, 测量幅度为 1 V (20 kHz) 的准确度为  $\pm 0.000\ 16$  V, 按均匀分布考虑, 取包含因子  $k = \sqrt{3}$ , 则:

$$u_1(V_0) = \frac{0.000\ 09}{\sqrt{3}} = 0.000\ 052\ V$$

$$u_1(V_i) = \frac{0.000\ 16}{\sqrt{3}} = 0.000\ 092\ V$$

2.3.2 数字多用表的读数分辨力引入的不确定度  $u_2(V_0)$ 、 $u_2(V_i)$

数字多用表 1 V 量程的分辨力为 0.000 000 1 V, 按均匀分布考虑, 取包含因子  $k = \sqrt{3}$ , 则:

$$u_2(V_0) = u_2(V_i) = \frac{0.000\ 000\ 1}{2\sqrt{3}} = 0.000\ 000\ 029\ V$$

2.3.3 数字多用表测量分散性引入的不确定度  $u_A(V_0)$ 、 $u_A(V_i)$

对信号发生器输出幅度 1 V (1 kHz)、1 V (20 kHz) 分别进行多次重复测量 (测量次数  $n=10$ ), 按贝塞尔公式计算, 则 10 次测量算数平均值的实验标准偏差为:

$$u_A(V_0) = \frac{s}{\sqrt{n}} = 0.000\ 001\ 95\ V$$

$$u_A(V_i) = \frac{s}{\sqrt{n}} = 0.000\ 001\ 55\ V$$

2.3.4 计算标准不确定度  $u(V_0)$ 、 $u(V_i)$

以上对测量不确定度的贡献可归结为数字多用表测量输出幅度 1 V (1 kHz) 的标准不确定度  $u(V_0)$  和数字多用表测量输出幅度 1 V (20 kHz) 的标准不确定度  $u(V_i)$ , 即:

$$u(V_0) = \sqrt{u_1^2(V_0) + u_2^2(V_0) + u_A^2(V_0)} = 0.000\ 052\ V$$

$$u(V_i) = \sqrt{u_1^2(V_i) + u_2^2(V_i) + u_A^2(V_i)} = 0.000\ 093\ V$$

### 2.4 合成标准不确定度

合成标准不确定度是由各测量不确定度分量合成得到的, 同时还必须考虑其数学模型是否为非线性模型, 以及各分量之间是否存在相关性。如果数学模型为非线性模型, 那么在合成标准不确定度时应考虑是否需要加入数学模型按泰勒级数展开后的高阶项; 如果各分量之间存在相关性, 那么在合成标准不确定度时应考虑是否需要加入协方差项。

由上述式 (3) 可知, 该数学模型为非线性模型, 所以在合成标准不确定度时应考虑加入高阶项, 且由于输入量  $V_0$ 、 $V_i$  是由同一数字多用表测量得到的, 它们之间可能存在相关性, 因此在合成标准不确定度时应考虑加入协方差项。

对非线性数学模型按泰勒级数展开, 当每个输入量都对其平均值对称分布并考虑下一个高阶项时, 不确定度的传播定律<sup>[3]</sup>为:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \right)^2 + \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial^3 f}{\partial x_i \partial x_j^2} \right] u^2(x_i) u^2(x_j) \quad (4)$$

在式 (4) 的基础上加入表示相关性的相关系数可得不确定度的传播定律为:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \right)^2 + \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial^3 f}{\partial x_i \partial x_j^2} \right] u^2(x_i) u^2(x_j) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial f}{\partial x_j} \cdot u(x_i) \cdot u(x_j) \cdot r(x_i, x_j) \quad (5)$$

式中,  $r(x_i, x_j)$  为输入量  $x_i$  和  $x_j$  的相关系数。

相关系数不仅可以从理论上进行分析和评估, 还可以通过实验测量得到。

当输入量分别为  $V_0$  和  $V_i$  时, 其测量结果的平均值  $\bar{V}_0$  和  $\bar{V}_i$  之间的相关系数<sup>[4]</sup>为:

$$r(\bar{V}_0, \bar{V}_i) = \frac{s(\bar{V}_0, \bar{V}_i)}{s(\bar{V}_0)s(\bar{V}_i)} \quad (6)$$

$$\text{式中, } s(\bar{V}_0, \bar{V}_i) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (V_0 - \bar{V}_0)(V_i - \bar{V}_i)$$

因此, 根据式 (5) 和式 (6) 计算数学模型式 (3) 中被测量的合成标准不确定度表示式为:

$$u_c^2(y) = \bar{V}_0^{-4} \bar{V}_i^2 u^2(V_0) + \bar{V}_0^{-2} u^2(V_i) + 3 \bar{V}_0^{-4} u^2(V_0) u^2(V_i) + 8 \bar{V}_0^{-6} \bar{V}_i^2 u^4(V_0) - 2 \bar{V}_0^{-3} \bar{V}_i^2 u(V_0) u(V_i) \frac{s(\bar{V}_0, \bar{V}_i)}{s(\bar{V}_0)s(\bar{V}_i)} \quad (7)$$

根据上述数据计算得到:

$$\begin{aligned} \bar{V}_0 &= 1.001\ 63 \\ \bar{V}_i &= 1.000\ 78 \\ u(V_0) &= 0.000\ 052 \\ u(V_i) &= 0.000\ 093 \\ r(\bar{V}_0, \bar{V}_i) &= \frac{s(\bar{V}_0, \bar{V}_i)}{s(\bar{V}_0)s(\bar{V}_i)} = -0.283\ 7 \end{aligned}$$

将以上计算结果代入式 (7) 得:

$$u_c(y) = 0.000\ 12$$

2.5 扩展不确定度

取包含因子  $k=2$ , 计算扩展不确定度为:

$$U = k u_c(y) = 2 \times 0.000\ 12 = 0.000\ 24$$

2.6 幅度平坦度的测量结果

将幅度平坦度按百分比表示, 则:

$$\delta = \frac{V_i - V_0}{V_0} \times 100\% = -0.085\%$$

扩展不确定度同样按百分比表示, 则:

$$U = 0.024\% (k=2)$$

3 幅度平坦度的对数计算公式的测量不确定度分析

3.1 建立测量的数学模型

当计算公式采用上述 (2) 式时, 建立测量的数学模型为:

$$y = 20 \lg \frac{V_i}{V_0} \quad (8)$$

3.2 计算标准不确定度  $u(V_0)$ 、 $u(V_i)$

同上所述:

$$\begin{aligned} u(V_0) &= \sqrt{u_1^2(V_0) + u_2^2(V_0) + u_A^2(V_0)} = 0.000\ 052\ \text{V} \\ u(V_i) &= \sqrt{u_1^2(V_i) + u_2^2(V_i) + u_A^2(V_i)} = 0.000\ 093\ \text{V} \end{aligned}$$

3.3 合成标准不确定度

根据式 (5) 和式 (6) 计算数学模型式 (8) 中被测量的

合成标准不确定度表示式为:

$$\begin{aligned} u_c^2(y) &= 400 \bar{V}_0^{-2} (\ln 10)^{-2} u^2(V_0) + 400 \bar{V}_i^{-2} (\ln 10)^{-2} u^2(V_i) + \\ &\quad 1\ 000 \bar{V}_0^{-4} (\ln 10)^{-2} u^4(V_0) - 800 \bar{V}_0^{-1} \bar{V}_i^{-1} (\ln 10)^{-2} \\ &\quad u(V_0) u(V_i) \frac{s(\bar{V}_0, \bar{V}_i)}{s(\bar{V}_0)s(\bar{V}_i)} \end{aligned} \quad (9)$$

根据上述计算结果代入式 (9) 得:

$$u_c(y) = 0.001\ 03\ \text{dB}$$

3.4 扩展不确定度

取包含因子  $k=2$ , 计算扩展不确定度为:

$$U = k u_c(y) = 2 \times 0.001\ 03\ \text{dB} = 0.002\ 1\ \text{dB}$$

3.5 幅度平坦度的测量结果

$$\Delta = 20 \lg \frac{V_i}{V_0} = -0.007\ 4\ \text{dB}, U = 0.002\ 1\ \text{dB} (k=2)$$

4 测量分析

1) 对于非线性数学模型, 高阶项的处理相对比较复杂, 应尽可能地避免处理高阶项。关键是要考虑不确定度传播率中高阶项相对于合成标准不确定度整体的贡献大小, 从而判断是否可以忽略。当非线性表现不是很明显时, 高阶项的量值很可能比一阶项小很多, 这时就可以忽略高阶项, 按线性模型处理不确定度传播率。

2) 从上述合成标准不确定度表示式 (7) 的情况可以看出, 输入量  $V_0$  和  $V_i$  的数学期望值均远大于其标准不确定度  $u(V_0)$  和  $u(V_i)$ , 因此式 (7) 中等式右边的第三项和第四项远小于第一项和第二项, 所以式 (7) 中的高阶项可以忽略。从上述合成标准不确定度表示式 (9) 的情况可以看出, 输入量  $V_0$  和  $V_i$  的数学期望值均远大于其标准不确定度  $u(V_0)$  和  $u(V_i)$ , 因此式 (9) 中等式右边的第三项远小于第一项和第二项, 所以式 (9) 中的高阶项可以忽略。

3) 当输入量之间存在相关性时, 通常必须确定各输入量之间的相关系数后才能计算合成标准不确定度。各输入量之间的相关性可以分为 4 种情况: ①完全不相关  $r=0$ ; ②完全正相关  $r=1$ ; ③完全负相关  $r=-1$ ; ④输入量之间部分相关。在实际应用中, 由于某些输入量之间的相关系数比较难确定, 为了简化处理问题, 将相关系数近似为  $r=0$  或  $r=1$  的情况, 这样做虽然规避了实验与计算的复杂性, 但同时也给测量不确定度的评估带来了风险。下面就针对输出幅度平坦度测量的输入量之间的相关性, 取相关系数  $r=0$  和取相关系数  $r=1$  的情况, 分别计算得到测量结果的扩展不确定度, 与通过实验测量获取相关系数计算的扩展不确定度进行比较, 具体数据见表 2。

表 2 相关系数  $r$  经实验得到后的计算结果与  $r=0$  和  $r=1$  时的计算结果比较

幅度平坦度计算公式: $\delta = \frac{V_i - V_0}{V_0} \times 100\%$			
幅度平坦度 计算值	$r$ 经实验获得, 计算 $U(k=2)$	$r=0$ 时, 计算 $U(k=2)$	$r=1$ 时, 计算 $U(k=2)$
-0.085%	0.024%	0.021%	0.008%

幅度平坦度计算公式: $\Delta = 20 \lg \frac{V_i}{V_0}$			
幅度平坦度 计算值	$r$ 经实验获得, 计算 $U(k=2)$	$r=0$ 时, 计算 $U(k=2)$	$r=1$ 时, 计算 $U(k=2)$
-0.007 4 dB	0.002 1 dB	0.001 9 dB	0.000 7 dB

(1) 从表 2 数据可以看出, 当假定相关系数为  $r=1$  时得到的测量不确定度并不一定会大于  $r=0$  时的测量不确定度, 因为在合成标准不确定度时还应考虑灵敏系数和相关系数的正负问题。

(2) 由于相关系数的实验测量和计算相对繁琐, 应尽可能地采取合理的测量方法来避免输入量之间的相关性。本例中采用同一台数字多用表测量不同频率下电压值的方法, 使测量数据之间引入更多的相关性。如果在有条件的情况下, 可以采用两台数字多用表分别测量不同频率下的电压值, 这样就可以有效地避免处理相关性的问题。

4) 影响信号发生器输出幅度平坦度的测量不确定度来源除上述分析外, 还包括环境、电源、负载等条件变化因素。

(1) 信号发生器及其测量设备的技术指标一般都与环境温度的影响有直接关系, 温度系数带来的测量误差可以在误差公式计算中进行修正。如果仪器产品说明书中未给出温度系数指标, 可通过进行环境温度试验测试仪器设备实际温度系数的大小。

(2) 供电电源电压及频率的变化也会对测量准确度造成影响。有时供电电网由于其它设备使用而产生的脉冲会通过电源电路叠加到仪器设备的内部电路, 从而导致信号发生器输出幅度的变化以及计量标准的测量误差。可通过使用净化稳压电源有效隔离电网对仪器设备的干扰。

(3) 在进行高频或高功率测量时, 阻抗匹配问题变得不可忽略。在实际测量时, 应尽可能地减小因失配误差带来的影

响。由于仪器设备在不同频率范围的电压驻波比有所变化, 可以根据其产品说明书给出的技术参数估计由于失配带来的不确定度大小。

## 5 结束语

通过对信号发生器幅度平坦度的测量试验, 获得某型号信号发生器幅度平坦度的实际测量数据, 并给其与频率相对应的关系曲线, 说明幅度平坦度对于信号发生器性能评价的重要性。另外, 通过对幅度平坦度测量不确定度的非线性数学模型分析, 总结出其中高阶项可以根据其量值的大小进行忽略处理的经验; 同时针对非线性数学模型中的相关项, 提出建立独立测量系统避免引入相关项的处理方法, 可以避免或降低相关性引入的不确定度。最后, 对环境温度、供电电源以及阻抗匹配等影响信号发生器幅度平坦度测量不确定度的实际操作问题给出具有实用价值的参考意见或有针对性的解决方案。

### 参考文献:

- [1] 汤世贤. 微波测量 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1981.
- [2] 国防科工委科技与质量司. 无线电电子学计量 (下册) [M]. 北京: 原子能出版社, 2002.
- [3] 倪育才. 实用测量不确定度评定 [M]. 北京: 中国计量出版社, 2008.
- [4] 中国计量测试学会, 一级注册计量师基础知识及专业实务 (下册) [M]. 北京: 中国计量出版社.
- [5] Pliska T F, Angus J, Jew F L. ADA081128: BIT/external test figures of merit and demonstration techniques [R]. Rome Air Development Center Griffiss AFB NY, 1979.
- [6] 国防科学技术工业委员会. GJB2072-94 维修性试验与评定 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
- [7] 徐忠伟, 周玉芬, 高锡俊. 测试性验证中抽样方案的精确算法 [J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2000, 11 (1): 76-78.
- [8] 田 仲. 测试性验证方法研究 [J]. 航空学报, 1995, 16: 65-70.
- [9] 石君友, 康 锐. 基于通用充分性准则的测试性试验方案研究 [J]. 航空学报, 2005, 26 (6): 691-695.
- [10] 石君友, 田 仲. 机内测试定量要求的现场试验验证方法研究 [J]. 航空学报, 2006, 27 (5): 883-887.
- [11] 田艳梅, 张志华, 郭尚峰. 二项分布下的一种贝叶斯可靠性验收试验方案 [J]. 运筹与管理, 2004, 13 (4): 65-68.
- [12] 张志华, 姜礼平. 成敗型产品的 Bayes 鉴定试验方案研究 [J]. 海军工程大学学报, 2004, 16 (1): 9-13.
- [13] 李 进, 赵 宇, 黄 敏. 基于决策级数据融合的可靠性综合验证方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36 (5): 576-579.
- [14] 李天梅, 丘 静, 刘冠军. 利用研制阶段试验数据制定测试性验证试验方案新方法 [J]. 机械工程学报, 2009, 45 (8): 52-58.
- [15] 李天梅, 丘 静, 刘冠军. 基于 Bayes 变动统计理论的测试性外场统计验证方案 [J]. 航空学报, 2010, 31 (2): 335-341.
- [16] 常春贺, 杨江平, 曹鹏举. 基于研制信息的测试性验证试验方案研究 [J]. 航空学报, 2012, 33 (11): 2057-2064.
- [17] Hamada M S, Wilson A G, Reese C S, et al. Bayesian reliability [M]. New York: Springer, 2008.

(上接第 288 页)

15.69%; 对于 LRU2, 使用方承担的风险为 31.04%; 对于 LRU2, 使用方承担的风险为 20.66%。使用方承担的风险远高于合同要求。

## 5 结论

针对产品在研制阶段存在大量的试验数据的情况, 提出了一种基于验前试验信息熵的测试性验证试验方案。该方案能有效降低测试性验证试验样本量, 或在验证试验故障样本量保持不变的情况下降低风险。于技术复杂、造价高昂、风险要求低的武器装备利用本文方法能有效减少试验样本量大, 缩短试验周期长, 降低试验费用高。

### 参考文献:

- [1] 田 仲. 系统测试性设计分析与验证 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
- [2] 韩庆田, 卢洪义, 杨兴根. 军用装备测试性技术发展趋势分析 [J]. 仪器仪表学报, 2006, 27 (s6): 352-354.
- [3] Laurent O. Using formal methods and testability concepts in the avionics systems validation and verification (V&V) process [A]. Proc. of 2010 Third International Conference on Software Testing, Verification and Validation [C]. 2010: 1-10.
- [4] 石君友, 纪 超, 李海伟. 测试性验证技术与应用技术现状分析 [J]. 测控技术, 2012, 31 (5): 29-32.
- [5] Department of Defense. MIL-STD-471A Maintainability verification/demonstration/evaluation [S]. U. S. Government Printing Office, 1973.