



基于起始触发相位调整的三角波线性度测试方法研究

赵自文¹, 秦源淋¹, 王阳², 葛惠君¹

(1. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471000; 2. 中国合格评定国家认可中心, 北京 100062)

摘要:为解决信号模拟器专用测试设备三角波线性度的测试标定需求, 提出一种基于起始触发相位调整的三角波线性度测试方法。以设备外触发输出作为基准, 通过调整三角波的起始触发相位, 将三角波的上升沿或下降沿进行梯级水平切割, 采用数字示波器和数字电压表组合方式进行监视和测量不同梯级的电压, 利用最小二乘法计算出三角波上升沿或下降沿的线性度, 并对测量结果的不确定度进行分析评定。测量结果比对表明, 设计的三角波线性度测试方法切实可行, 能推广应用到函数发生器三角波线性度的测试, 具有很好的实用性。

关键词: 信号模拟器; 三角波; 起始触发相位; 线性度; 测量不确定度

中图分类号: TP395

文献标志码: A

文章编号: 1674-5124(2019)06-0024-05

Research on triangular wave linearity measurement method based on start trigger phase adjustment

ZHAO Ziwen¹, QIN Yuanlin¹, WANG Yang², GE Huijun¹

(1. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471000, China;

2. China National Accreditation Service for Conformity Assessment, Beijing 100062, China)

Abstract: In order to solve testing and calibration demands of triangular wave's linearity for signal simulator special test equipment, this paper puts forward a kind of method based on start trigger phase adjustment to test triangular wave's linearity. This method takes the equipment's external trigger output as reference, cuts triangular wave's rising edge or falling edge into different levels through adjusting triangular wave's start trigger phase, adopts a combination of digital oscilloscope and digital voltage meter to monitor and measure different voltage levels, calculates the linearity of triangular wave's rising edge or falling edge through the least square method and analyses the measurement result's uncertainty. Comparison of the measurement result shows that this testing method is practicable and can apply widely to test the linearity of function generator's triangular wave.

Keywords: signal simulator; triangular wave; start trigger phase; linearity; measurement uncertainty

收稿日期: 2018-11-15; 收到修改稿日期: 2018-12-20

基金项目: “十三五”国防技术基础研究项目(JSJL2015205B017)

作者简介: 赵自文(1966-), 男, 河南洛阳市人, 研究员, 主要从事信号计量保障技术研究及校准设备研制工作。

0 引言

信号模拟器属于导弹产品的专用测试设备, 用于测试考核产品的静态性能、动态性能^[1], 三角波是该类设备产生的一种特征信号, 该信号技术参数指标除了频率、幅值有要求外, 线性度也有明确指标要求。专用测试设备三角波输出由其内部的信号发生器输出并经二次变换后产生^[2], 三角波会产生一定程度的失真, 因此在产品测试前需对三角波的线性度参数进行测试标定。对于该类设备三角波线性度的测试, 若采用数字示波器测量法, 数字示波器的电压测量分辨率及测量误差不满足测试要求^[3-4]。若按照 JJG 840-2015《函数发生器检定规程》^[5]中规定的三角波线性度测量方法, 使用时存在一定的局限性, 1) 无法同步观察到三角波的失真状态, 不能根据三角波的失真情况及时调整沿上采集点; 2) 采集三角波的上下峰值点电压非常困难^[6]; 3) 对于不同设备不同频率的三角波, 由于输出信号与同步信号间存在不同的延迟^[7], 不易准确设置数字电压表的触发延迟时间; 4) 该方法计算得到的是三角波上升沿/下降沿 10%~90% 之间的线性误差, 而不是包含峰-峰点在内的线性度。上述两种测试方法均无法直接应用, 本文利用设备的触发输出端口而非传统的同步输出端口, 结合起始触发相位调整方式, 对三角波上升沿/下降沿线性度测试方法进行分析研究。

1 测试方法设计

1.1 专用测试设备三角波参数指标要求

频率: 0.1~20 Hz, 误差优于 0.01%; 幅值: 1~10 Vpp, 误差优于 1%; 对称度: 50%; 线性度: 优于 0.5% (峰峰点之间)。

1.2 测试方案

鉴于三角波线性度常规测试方法的局限性, 本文设计数字电压表和数字示波器组合测试方案, 设计以下解决途径: 1) 用数字电压表和数字示波器同时监视测量, 其中数字示波器主要用于观察三角波的失真情况, 便于确定上升/下降沿上的相应测试点位置, 用数字电压表测试三角波沿上不同测试点对应的电压; 2) 舍弃常规的设备同步输出模式, 利用专测设备的触发输出去同步数字示波器和数字电压表, 利用触发输出作基准^[8], 通过调整三角波的起始触发相位, 精确定位三角波上升沿/下降沿上不同测试点的位置; 3) 利用数字电压表的触发延迟功能,

将触发延迟设置在合适的固定时间即可, 对于不同测试点的电压测试, 无需变更触发延迟时间, 简化了操作设置且能保持较高的电压测量准确度; 4) 精细调整三角波的起始触发相位, 采取逐次逼近比较方式获得三角波的峰峰点电压。

三角波线性度组合测试方案组成如图 1 所示, 该设计方案的关键点是对三角波的起始触发相位进行精密连续调整, 等同于对三角波的上升沿/下降沿实施梯级水平切割, 如图 2 和图 3 所示, 最终将三角波沿上位置点 x_{i1} 的电压测量转换成易测量的梯级水平线上位置点 x_{i2} 的电压, 位置点 x_{i2} 对应的水平时间范围非常宽, 便于数字电压表的准确测量。

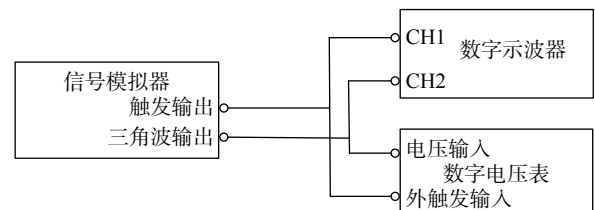


图 1 组合式测试方案连接图

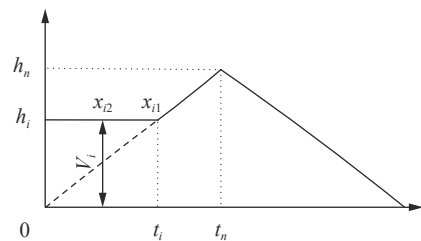


图 2 三角波起始触发相位调整示意图

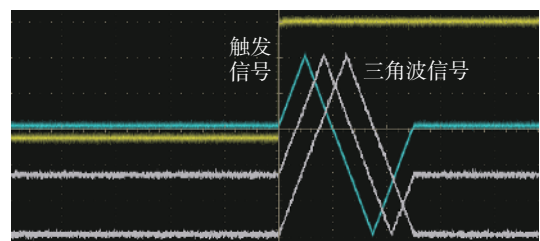


图 3 起始触发相位调整输出的三角波

测试三角波线性度时, 将信号模拟器的触发输出信号连接至数字示波器的 CH1 通道及数字电压表的外触发输入通道, 三角波输出信号连接至数字示波器的 CH2 通道及数字电压表的电压测量输入通道。信号模拟器的三角波参数设置为: 20 Hz, 1 Vpp, 零偏置, 上升沿触发输出, 触发间隔 100 ms; 数字示波器工作在双通道高阻输入模式, 垂直带宽限制在 20 MHz 以下, 触发源选择为 CH1 上升沿, 垂直灵敏度 CH1: 1 V/div、CH2:

0.2 V/div, 时基 5 ms/div; 数字电压表工作在直流电压测量模式, 1 V 量程, 外触发, 触发延迟时间适中。

当示波器观察到稳定的三角波显示时, 基于波形的失真情况确定起始触发相位的步进间隔, 当三角波的上升/下降沿显著失真时需适当减小相位步进间隔, 增加三角波沿上测量点数量, 信号模拟器最小起始触发相位调整间隔为 0.1° 。用初始相位 -90° 作为起始时间 t_1 , 记录峰-峰点内不同起始触发相位点 θ_i (对应不同时间点 t_i) 上数字电压表的电压测量结果 $h_i (i=1, 2, \dots, n)$ 。

1.3 测试设备的选用要求

根据三角波参数指标测试需求, 采用上述测试方案, 选用的数字电压表和数字示波器应满足如下要求:

1) 数字电压表

直流电压测量: 0~10 V, 最高分辨率: 8 位半, 误差优于 0.02%; 具有外触发和触发延迟调整功能。

2) 数字示波器

频带宽度: 0~100 MHz; 最高采样率: 1 GS/s; 垂直灵敏度: 5 mV/div~5 V/div, $\pm 2\%$; 时基: 5 ns/div~5 s/div, $\pm 2 \times 10^{-5}$ 。

1.4 测量结果处理方法

根据三角波上升沿/下降沿不同起始触发相位点 θ_i (对应时间点 t_i) 上的电压测量结果 h_i , 基于最小二乘法计算出最佳拟合直线^[9-11]:

$$h' = a\theta + b \quad (1)$$

其中斜率 $a = \left(\frac{\sum_{i=1}^n h_i \theta_i - \frac{\sum_{i=1}^n h_i \sum_{i=1}^n \theta_i}{n}}{\sum_{i=1}^n \theta_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n \theta_i)^2}{n}} \right)$; 截距

$$b = \left(\frac{\sum_{i=1}^n h_i - a \sum_{i=1}^n \theta_i}{n} \right)$$

利用式(1)计算出相应起始相位点 θ_i 的最佳拟合值 h'_i , 三角波上升沿/下降沿的线性误差为

$$\delta_i = \frac{h_i - h'_i}{A} \times 100\% \quad (2)$$

式中: δ_i ——三角波上升沿/下降沿线性误差;

h_i ——三角波上升沿/下降沿起始触发相位第 i 点的电压测量值, V;

h'_i ——最佳拟合直线上对应第 i 点的计算值, V;

A ——三角波峰峰电压值, V。

三角波上升沿/下降沿的线性度为

$$L = \max |\delta_i| \quad (3)$$

2 测量结果及测量不确定度分析评定

2.1 测量结果

依据上述测试方法对信号模拟器的三角波线性度进行测试, 三角波输出信号: 20 Hz 1 V_{pp} 零偏置。测量用设备: 数字电压表 3 458 A, 数字示波器 MSOX6004A。本文以三角波的上升沿测试为例进行分析, 首先用示波器观察三角波波形, 波形的波峰和波谷处出现明显的弧形失真, 非线性特征明显, 为了能兼顾三角波的波峰和波谷点的电压测量, 取 1.0° 作为起始触发相位的步进间隔, 在三角波上升沿的波谷和波峰之间 $-90.0^\circ \sim 90.0^\circ$ 测量 181 个点, 以初始相位 -90.0° 点的电压测量结果作为起始值 h_1 , 相位 90.0° 点的电压测量结果作为最末值 h_{181} , 表 1 和表 2 分别是起始触发相位 $-90.0^\circ \sim -1.0^\circ$ 和 $0^\circ \sim 90.0^\circ$ 的电压测量结果。

根据表 1 和表 2 的电压测量结果, 应用最小二乘法求得一元线性回归的最佳拟合直线为:

$$h' (V) = 0.005\ 550\ 25 (V/^\circ) \times \theta (^\circ) + 0.000\ 914\ 4 (V)$$

通过计算测量结果与最佳拟合线对应点之间的残差, 判别出 -90.0° 相位点是最大残差点, 其残差为 $e_1 = 0.002\ 208\ V$ 。

利用波峰和波谷点电压计算出三角波的峰峰值为 $A = 0.99464\ V_{pp}$ 。

则三角波上升沿的线性度 $L = 0.22\%$ 。

2.2 测量结果不确定度分析评定

在基于式(2)分析评定三角波线性误差测量不确定度时, 可视作有两个自变量, 其中分子为观测值 h_i 的残差 e_i , 分母为三角波的峰峰值 A , 线性误差可由下式表示:

$$\delta_i = \frac{h_i - (a\theta_i + b)}{A} \times 100\% = \frac{e_i}{A} \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{灵敏系数: } c_{e_i} = \frac{\partial \delta_i}{\partial e_i} = \frac{1}{A}, c_A = \frac{\partial \delta_i}{\partial A} = -\frac{e_i}{A^2}$$

1) 残差 e_i 引入的标准不确定度 $u(e_i)$

最佳拟合直线 $h' = a\theta + b$, 其斜率 a 和截距 b 是通过计算各残差的平方和并使之最小而求得的。

$$E = \sum_{i=1}^n [h_i - (a\theta_i + b)]^2$$

为使 E 最小, 则其对 a 和 b 的一阶偏导 $= 0$, 二阶偏导 > 0 , 即:

$$\frac{\partial E}{\partial a} = 0 \text{ 和 } \frac{\partial E}{\partial b} = 0$$

表 1 三角波上升沿电压测量结果 (起始触发相位: $-90.0^\circ \sim -1.0^\circ$)

i	电压测量值/V	i	电压测量值/V	i	电压测量值/V	i	电压测量值/V	i	电压测量值/V	i	电压测量值/V
1	-0.496 40	16	-0.415 16	31	-0.332 28	46	-0.248 99	61	-0.165 69	76	-0.082 38
2	-0.491 05	17	-0.410 04	32	-0.326 75	47	-0.243 44	62	-0.160 13	77	-0.076 83
3	-0.485 80	18	-0.404 49	33	-0.321 19	48	-0.237 88	63	-0.154 58	78	-0.071 28
4	-0.480 74	19	-0.398 94	34	-0.315 63	49	-0.232 33	64	-0.149 03	79	-0.065 72
5	-0.475 89	20	-0.393 39	35	-0.310 08	50	-0.226 78	65	-0.143 47	80	-0.060 17
6	-0.471 04	21	-0.387 83	36	-0.304 53	51	-0.221 31	66	-0.137 92	81	-0.054 74
7	-0.465 58	22	-0.382 28	37	-0.298 97	52	-0.215 67	67	-0.132 37	82	-0.049 06
8	-0.460 03	23	-0.376 72	38	-0.293 42	53	-0.210 12	68	-0.126 81	83	-0.043 51
9	-0.454 48	24	-0.371 17	39	-0.287 87	54	-0.204 56	69	-0.121 26	84	-0.037 96
10	-0.448 92	25	-0.365 62	40	-0.282 31	55	-0.199 01	70	-0.115 71	85	-0.032 40
11	-0.443 36	26	-0.360 06	41	-0.276 85	56	-0.193 46	71	-0.110 17	86	-0.026 85
12	-0.437 82	27	-0.354 51	42	-0.271 21	57	-0.187 90	72	-0.104 60	87	-0.021 29
13	-0.432 26	28	-0.348 96	43	-0.265 65	58	-0.182 35	73	-0.099 04	88	-0.015 74
14	-0.426 71	29	-0.343 40	44	-0.260 10	59	-0.176 79	74	-0.093 49	89	-0.010 19
15	-0.421 15	30	-0.337 85	45	-0.254 54	60	-0.171 24	75	-0.087 94	90	-0.004 63

表 2 三角波上升沿电压测量结果 (起始触发相位: $0^\circ \sim 90.0^\circ$)

i	电压测量值/V	i	电压测量值/V	i	电压测量值/V	i	电压测量值/V	i	电压测量值/V	i	电压测量值/V
91	0.000 92	107	0.089 78	123	0.178 64	139	0.267 49	155	0.356 35	171	0.445 10
92	0.006 47	108	0.095 33	124	0.184 19	140	0.273 05	156	0.361 90	172	0.450 76
93	0.012 03	109	0.100 88	125	0.189 74	141	0.278 51	157	0.367 46	173	0.456 32
94	0.017 58	110	0.106 44	126	0.195 30	142	0.284 15	158	0.373 01	174	0.461 87
95	0.023 13	111	0.111 97	127	0.200 85	143	0.289 71	159	0.378 56	175	0.467 42
96	0.028 69	112	0.117 55	128	0.206 40	144	0.295 26	160	0.384 12	176	0.472 90
97	0.034 24	113	0.123 10	129	0.211 96	145	0.300 81	161	0.389 50	177	0.477 73
98	0.039 79	114	0.128 65	130	0.217 51	146	0.306 37	162	0.395 23	178	0.482 58
99	0.045 35	115	0.134 21	131	0.222 91	147	0.311 92	163	0.400 78	179	0.487 64
100	0.050 90	116	0.139 76	132	0.228 62	148	0.317 48	164	0.406 33	180	0.492 89
101	0.056 43	117	0.145 31	133	0.234 17	149	0.323 03	165	0.411 89	181	0.498 24
102	0.062 01	118	0.150 88	134	0.239 72	150	0.328 58	166	0.417 44		
103	0.067 56	119	0.156 42	135	0.245 28	151	0.334 10	167	0.422 99		
104	0.073 12	120	0.161 97	136	0.250 83	152	0.339 69	168	0.428 55		
105	0.078 67	121	0.167 37	137	0.256 39	153	0.345 24	169	0.434 10		
106	0.084 22	122	0.173 08	138	0.261 94	154	0.350 80	170	0.439 65		

$$\frac{\partial^2 E}{\partial a^2} > 0 \text{ 和 } \frac{\partial^2 E}{\partial b^2} > 0$$

对以上一阶偏导和二阶偏导求解后, 可推导出拟合直线的斜率 a 和截距 b , 如式(1)所示。

最佳拟合直线的自由度: $\nu = n - 2$ (其中 n 为测量点数, 2 代表上述两个约束条件)^[12], 若以 S_i 表示观测值 h_i 的方差, 则:

$$S_h = \sqrt{\frac{E}{v}} = \sqrt{\frac{\sum e_i^2}{n-2}} = 0.42 \text{ mV}$$

残差 e_i 引入的标准不确定度: $u(e_i) = 0.42 \text{ mV}$

2) 峰峰值 A 引入的标准不确定度 $u(A)$

三角波顶部和底部出现弧形失真, 测量顶部和底部峰值时需要观察波形, 通过精细调整三角波的起始触发相位, 逐次逼近识别出顶部电压最大值和底部电压最小值。峰峰值 A 测量时引入的标准不确定度主要来自两个方面, 1) 三角波的起始触发相位调整分辨率引入的 $u_1(A)$, 2) 数字电压表测量误差引入的 $u_2(A)$, 两者均服从均匀分布^[13]。

三角波起始触发相位分辨力为 0.1° , 最佳拟合直线斜率为 $a=0.005\ 550\ 25 \text{ V}/(^\circ)$, 如图 4 所示, 在三角波的顶部和底部均按此斜率进行估算。

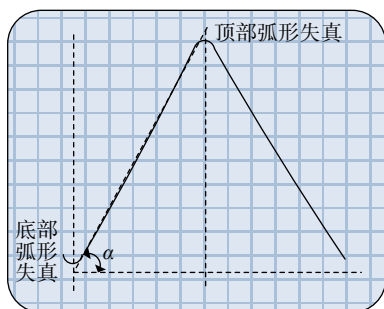


图 4 顶部和底部弧形失真的三角波

$$\text{顶部测量: } u_{11}(A) = \frac{0.005\ 550\ 25 \times 0.1}{2\sqrt{3}} = 0.16 \text{ mV}$$

$$\text{同理底部测量: } u_{12}(A) = 0.16 \text{ mV}$$

数字电压表在直流 1 V 档的测量误差为: $\pm(1.5 \times 10^{-6} \text{ 读数} + 0.3 \times 10^{-6} \text{ 量程})$, 取测量误差的半宽度, 由数字电压表测量误差引入的标准不确定度为:

$$\text{顶部测量: } u_{21}(A) = \frac{1.05 \mu\text{V}}{\sqrt{3}} = 0.61 \mu\text{V}$$

$$\text{同理底部测量: } u_{22}(A) = 0.61 \mu\text{V}$$

$$u(A) = \sqrt{u_{11}^2(A) + u_{12}^2(A) + u_{21}^2(A) + u_{22}^2(A)} = 0.23 \text{ mV}$$

3) 合成不确定度及扩展不确定度

$$u_c = \sqrt{c_{e_i}^2 u^2(e_i) + c_A^2 u^2(A)} = 0.042\%$$

$$U = k u_c = 0.09\% \quad ; k = 2$$

线性度: $L = 0.22\% \pm 0.09\%$

3 测试方法的验证

选用一台 Keysight 33220A 函数/任意波信号发生器, 该台设备由计量机构依据 JJG 840-2015《函数发生器检定规程》出具有检定证书, 三角波上升

沿(10%~90%)最大线性误差为 $0.06\%(1 \text{ kHz}, 1 \text{ Vpp})$ 。

用基于起始触发相位调整的三角波线性度测试方法测试该信号, 为了与检定证书的测试点相对应, 同样测量 10%, 20%, ..., 90% 共计 9 个点, 计算出 9 个点分别对应的起始触发相位, 按照本方法测试要求及数据处理方式计算出三角波上升沿(10%~90%)的最大线性误差为 0.062% , 若测量结果只按一位有效位保留, 那么该测量结果与计量机构证书中所给结果完全相同。

4 结束语

采用本文设计的测试方法已对多台信号模拟器的三角波线性度进行了测试, 应用效果良好, 为型号线提供了一种新的标定测试方法, 保证了产品测量结果的准确性。本测试方法设计合理、实用性强, 不仅能满足信号模拟器等专用测试设备三角波线性度的标定测试需求, 还能推广应用到函数/任意波形发生器三角波线性度的测试。

参考文献

- [1] 赵自文, 徐毓雄, 严宜强. 空空导弹地面检测设备校准方法研究 [J]. 中国测试, 2017, 43(12): 63-68.
- [2] 孙晨朔, 金祖洋, 刘山松. 基于 Howland 电流源产生更优线性度三角波设计 [J]. 电子器件, 2014(3): 561-564.
- [3] 吕云朋, 孙金伟, 张墨. 一种提高示波器线性度的标定方法 [J]. 现代电子技术, 2011(8): 204-206.
- [4] 梁志国, 郭洪侠. 三角波信号沿线性度的统计分析评价方法 [J]. 航空计测技术, 2001(2): 3-5.
- [5] 函数发生器检定规程: JJG840-2015[S]. 北京: 中国质检出版社, 2016.
- [6] 孙艳峰, 黄继国, 李璟. 三角波、锯齿波信号线性度校准技术 [J]. 科技资讯, 2015(23): 14-16.
- [7] 钟长胜, 王轶尊, 高辉. 基于 CPLD 和 DS1020 的多通道延迟脉冲发生器 [J]. 电子技术应用, 2015(1): 57-59.
- [8] 田林青, 李长青. 基于 DDS 信号源外触发功能的多机同步输出解决方案 [J]. 今日电子, 2008(4): 64-65.
- [9] 刘庆, 邵志新. 回归分析的直线拟合不确定度探讨 [J]. 中国测试, 2009(3): 41-44.
- [10] 梁志国, 孙璟宇. 三角波信号波形参数的测量不确定度 [J]. 计测技术, 2005(6): 57-61.
- [11] 米娟层. 一元线性回归中的不确定度分析 [J]. 煤质技术, 2014(1): 21-22.
- [12] 刘渊, 丁建华, 王茂仁. 直线拟合中的不确定度计算 [J]. 物理与工程, 2009(2): 25-27.
- [13] 沈才忠, 刘志敏, 王力敏. 不确定度评定在实验室校准方法制定中的应用 [J]. 中国测试技术, 2008, 34(5): 36-38.

(编辑:刘杨)