

# 《相控阵超声探伤仪换能器校准规范》 试验报告

《相控超声探伤仪换能器校准规范》编写组

2025 年 8 月

# 《相控阵超声探伤仪换能器校准规范》试验报告

## 1. 概述（试验目的）

依据《相控阵超声探伤仪换能器校准规范》（以下简称规范）对样品进行校准，获取实验数据，来验证规范提出的校准方法的可行性和计量特性的合理性。

## 2. 样品选型

1#机：型号：5L32-0.6×10 编号：11636863 生产厂家：武汉中科创新技术股份有限公司

2#机：型号：1L64-1.0×7 编号：1KL3335NGA582 生产厂家：广州多浦乐电子科技有限公司

## 3. 试验条件

### 3.1 环境条件

试验地点：本院光谷基地 B127 室

实验室条件：温度：（20.5～23.2）℃；相对湿度：（60～75）%。

试验日期：2025.07.15～2025.07.23

### 3.2 测量标准

校准过程中使用的标准器如表 1 所示。平面试块主要为探头测试提供反射信号，探头转接器是将相控阵探头阵元转接成一个独立通道，均为辅助设备。

表 1 标准器

标准器名称	规格型号	测量范围	最大允差/准确度等级/不确定度
脉冲发射器/接收器	CTS-8077PR	频率：（0.5～20）MHz 上升时间：8 ns 电压：400 V	
信号发生器	33621A	频率：1Hz~120MHz,电压：1mV~10V（0-p）	频率： $U_{rel}=1.2 \times 10^{-7}(k=2)$ 、电压： $U_{rel}=1.3\%(k=2)$
数字示波器	DSOX2012A	时间：5ns/div~5s/div 幅度：5mV/div~5V/div	时间：MPE：±0.1% 幅度：MPE：±1.5%
平面试块	（100×100×15）mm	（100×100×15）mm	/
探头转接器	128 通道	/	/

## 4. 试验项目和方法

#### 4.1 中心频率和相对带宽

按照规范 7.3.1 条规定的方法测量相控阵超声探伤仪换能器中心频率和相对带宽。  
试验数据如表 2、表 3 所示。

表 2 1#机中心频率和相对带宽

阵元	1	2	3	4	5	6	7	8
中心频率 (MHz)	5.45	5.33	5.48	5.25	5.21	5.22	5.20	5.12
相对带宽 (%)	53.6	56.3	55.3	59.0	59.0	54.7	52.7	57.0
阵元	9	10	11	12	13	14	15	16
中心频率 (MHz)	5.16	5.01	5.04	5.12	5.19	4.98	4.97	5.42
相对带宽 (%)	55.7	52.9	57.0	53.2	52.9	54.5	55.4	52.4
阵元	17	18	19	20	21	22	23	24
中心频率 (MHz)	5.48	5.46	5.49	5.43	5.42	5.42	5.38	5.30
相对带宽 (%)	51.8	50.4	52.1	50.3	50.1	50.7	50.4	51.7
阵元	25	26	27	28	29	30	31	32
中心频率 (MHz)	5.27	5.25	5.25	5.20	5.17	5.11	5.10	4.99
相对带宽 (%)	51.3	50.8	50.8	51.1	52.0	50.1	50.0	51.1

表 3 2#机中心频率和相对带宽

阵元	1	2	3	4	5	6	7	8
中心频率 (MHz)	1.00	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.04
相对带宽 (%)	72.4	70.9	64.5	69.0	68.3	68.5	68.0	70.4
阵元	9	10	11	12	13	14	15	16
中心频率 (MHz)	1.06	1.05	1.07	1.06	1.06	1.06	1.04	1.07
相对带宽 (%)	70.5	70.8	69.6	67.0	67.5	70.7	69.5	67.6
阵元	17	18	19	20	21	22	23	24
中心频率 (MHz)	1.05	1.06	1.06	1.05	1.06	1.04	1.07	1.04
相对带宽 (%)	66.7	68.1	68.7	69.2	71.2	67.7	67.5	71.4
阵元	25	26	27	28	29	30	31	32
中心频率 (MHz)	1.05	1.05	1.04	1.06	1.04	1.07	1.05	1.06
相对带宽 (%)	69.4	70.6	71.5	69.0	70.1	69.2	70.2	67.2
阵元	33	34	35	36	37	38	39	40
中心频率 (MHz)	1.07	1.05	1.06	1.05	1.07	1.05	1.05	1.06

相对带宽 (%)	68.5	70.6	67.6	67.4	66.6	67.4	69.6	68.2
阵元	41	42	43	44	45	46	47	48
中心频率 (MHz)	1.04	1.05	1.04	1.05	1.04	1.05	1.06	1.04
相对带宽 (%)	69.0	69.4	68.4	70.6	71.9	68.9	68.5	68.0
阵元	49	50	51	52	53	54	55	56
中心频率 (MHz)	1.06	1.05	1.05	1.04	1.05	1.06	1.04	1.06
相对带宽 (%)	67.9	67.5	69.1	69.9	68.5	68.1	67.1	69.9
阵元	57	58	59	60	61	62	63	64
中心频率 (MHz)	1.05	1.10	1.05	1.06	1.07	1.05	1.10	0.99
相对带宽 (%)	65.7	57.6	68.4	59.1	67.5	64.8	55.5	71.3

根据以上实验数据，相控阵超声探伤仪换能器中心频率和相对带宽满足 5.1 条的要求。

## 4.2 脉冲持续时间

按照规范 7.3.2 条规定的方法测量相控阵超声探伤仪换能器脉冲持续时间。

试验数据如表 4、表 5 所示。

表 4 1#脉冲持续时间

阵元	1	2	3	4	5	6	7	8
脉冲持续时间 (ns)	766	857	764	646	632	594	574	672
阵元	9	10	11	12	13	14	15	16
脉冲持续时间 (ns)	604	742	648	602	606	772	886	756
阵元	17	18	19	20	21	22	23	24
脉冲持续时间 (ns)	762	978	968	980	992	986	982	898
阵元	25	26	27	28	29	30	31	32
脉冲持续时间 (ns)	902	818	914	924	922	930	938	942

表 5 2#脉冲持续时间

阵元	1	2	3	4	5	6	7	8
脉冲持续时间 (ns)	3201	2650	3120	2663	2846	2653	2646	2834
阵元	9	10	11	12	13	14	15	16
脉冲持续时间 (ns)	2649	2839	2644	2650	2657	2646	2819	2655
阵元	17	18	19	20	21	22	23	24
脉冲持续时间 (ns)	2845	2649	2664	2824	2658	3659	2653	2832
阵元	25	26	27	28	29	30	31	32

脉冲持续时间 (ns)	2644	2660	2665	2659	2805	2655	2658	2657
阵元	33	34	35	36	37	38	39	40
脉冲持续时间 (ns)	2652	2653	2663	2795	2648	2669	2659	2656
阵元	41	42	43	44	45	46	47	48
脉冲持续时间 (ns)	2666	2670	3683	2669	2650	3873	2666	2853
阵元	49	50	51	52	53	54	55	56
脉冲持续时间 (ns)	2652	2641	2650	2675	2828	2642	3466	2650
阵元	57	58	59	60	61	62	63	64
脉冲持续时间 (ns)	3708	3326	3749	3466	3020	2509	2856	3534

根据以上实验数据，相控阵超声探伤仪换能器脉冲持续时间满足 5.2 条的要求。

### 4.3 相对脉冲回波灵敏度偏差

按照规范 7.3.3 条规定的方法测量相控阵超声探伤仪换能器相对脉冲回波灵敏度偏差。

试验数据如表 6、表 7 所示。

表 6 1#机相对脉冲回波灵敏度偏差

阵元	1	2	3	4	5	6	7	8
偏差 (dB)	0.8	1.2	1.7	1.7	0.4	0.0	0.0	0.2
阵元	9	10	11	12	13	14	15	16
偏差 (dB)	0.3	-0.2	-0.1	-0.6	-0.4	0.3	-0.3	0.1
阵元	17	18	19	20	21	22	23	24
偏差 (dB)	0.5	-0.3	0.0	0.4	-0.1	0.0	-1.0	-0.5
阵元	25	26	27	28	29	30	31	32
偏差 (dB)	-0.5	-0.1	-1.4	0.0	0.0	-1.8	0.1	-1.3

表 7 2#机相对脉冲回波灵敏度偏差

阵元	1	2	3	4	5	6	7	8
偏差 (dB)	-1.6	0.7	-1.1	0.8	-0.4	-0.1	0.3	-1.0
阵元	9	10	11	12	13	14	15	16
偏差 (dB)	1.0	-1.1	0.9	-0.2	-0.2	0.7	-1.1	1.5
阵元	17	18	19	20	21	22	23	24
偏差 (dB)	-0.7	0.6	-0.1	-0.5	0.9	-1.0	1.2	-0.7
阵元	25	26	27	28	29	30	31	32
偏差 (dB)	0.4	0.5	-0.8	1.1	-1.3	1.0	-0.8	-0.2

阵元	33	34	35	36	37	38	39	40
偏差 (dB)	0.3	-1.2	1.0	-1.1	1.0	-0.7	-0.2	0.9
阵元	41	42	43	44	45	46	47	48
偏差 (dB)	-1.1	1.4	-0.9	0.8	-0.3	-0.3	1.1	-1.0
阵元	49	50	51	52	53	54	55	56
偏差 (dB)	1.2	-1.1	0.8	-0.3	-0.4	0.9	-1.3	1.2
阵元	57	58	59	60	61	62	63	64
偏差 (dB)	-1.1	0.4	0.0	-0.9	1.0	-1.3	0.9	-1.3

根据以上实验数据，相控阵超声探伤仪换能器相对脉冲回波灵敏度偏差满足 5.3 条的要求。

#### 4.4 串扰

按照规范 7.3.4 条规定的方法测量相控阵超声探伤仪换能器串扰。  
试验数据如表 8、表 9 所示。

表 8 1#机串扰

阵元	1-2	11-12	21-22	31-32
串扰 (dB)	32.7	30.2	32.9	31.2

表 9 2#机串扰

阵元	1-2	9-10	17-18	25-26
串扰 (dB)	33.7	32.8	32.2	31.0
阵元	33-34	41-42	51-52	63-64
串扰 (dB)	33.2	33.3	33.3	31.7

根据以上实验数据，相控阵超声探伤仪换能器串扰满足 5.4 条的要求。

#### 4.5 不合格阵元数量

按照规范 7.3.5 条规定的方法测量相控阵超声探伤仪换能器不合格阵元数量。  
试验数据如表 10 所示。

表 10 不合格阵元数量

不合格阵元数量	1#机	2#机
	0	0

根据以上实验数据，相控阵超声探伤仪换能器不合格阵元数量满足 5.5 条的要求。

#### 5. 试验结果的不确定度

## 5.1 频率测量不确定度

### 5.1.1 数学模型

$$f_0 = \frac{f_u + f_l}{2}$$

$f_0$ ——中心频率，MHz；

$f_u$ ——上限频率，MHz；

$f_l$ ——下限频率，MHz。

### 5.1.2 不确定度传播率

由于  $f_u$  和  $f_l$  互不相关，故其合成方差为

$$u^2(f_0) = c_1^2 u^2(f_u) + c_2^2 u^2(f_l)$$

式中灵敏系数：

$$c_1 = \frac{\partial f_0}{\partial f_u} = \frac{1}{2}$$

$$c_2 = \frac{\partial f_0}{\partial f_l} = \frac{1}{2}$$

### 5.1.3 标准不确定度分量估计

不确定度来源主要有以下几个方面：

- a) 重复测量引入的标准不确定度  $u_1$ ；
- b) 脉冲发射器/接收器引入的标准不确定度  $u_2$ ；
- c) 数字示波器引入的标准不确定度  $u_3$ ；
- d) 离散傅里叶变换引入的标准不确定度  $u_4$ 。

1) 重复测量引入的标准不确定度  $u_1$ ，属 A 类标准不确定度。

重复测量 10 次，由  $s = \sqrt{\frac{\sum (f_{0i} - \bar{f}_0)^2}{n-1}}$  计算实验标准偏差，单次测量  $u_A = s$  可计算 A 类标准

不确定度  $u_1$ 。测量值计算结果见表 11。

表 11 测量值及计算结果

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值 (MHz)	5.28	5.22	5.27	5.33	5.41	5.38	5.44	5.35	5.25	5.36
平均值 (MHz)	5.329									
$u_1 = s$ (%)	1.35									

2) 脉冲发射器/接收器引入的标准不确定度  $u_2$ ，属 B 类标准不确定度。

脉冲发射器/接收器幅值稳定性 MPE:  $\pm 0.1\%$ ，按均匀分布，取  $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_2 = \frac{0.1\%}{\sqrt{3}} = 0.06\%$$

3) 数字示波器引入的标准不确定度  $u_3$ ，属 B 类标准不确定度。

数字示波器 MPE:  $\pm 0.1\%$ ，按均匀分布，取  $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_3 = \frac{0.1\%}{\sqrt{3}} = 0.06\%$$

4) 离散傅里叶变换引入的标准不确定度  $u_4$ ，属 B 类标准不确定度。

离散傅里叶变换引入的误差不超过  $\pm 1.0\%$ ，按均匀分布，取  $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_4 = \frac{1.0\%}{\sqrt{3}} = 0.58\%$$

#### 5.1.4 合成标准不确定度计算

1) 相控阵探头频率测量不确定度的来源及数值汇总表见表 12：

表 12 相控阵探头频率测量不确定度的来源及数值汇总表

标准不确定度分量	符号	分类	标准不确定度/%
重复测量	$u_1$	A	1.35
脉冲发射器/接收器	$u_2$	B	0.06
数字示波器	$u_3$	B	0.06
离散傅里叶变换	$u_4$	B	0.58



2) 合成标准不确定度及扩展不确定度计算

$u_1$ 、 $u_2$ 、 $u_3$ 、 $u_4$  独立且相互无关，则：

$$u(f_0) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = 1.5\%$$

取包含因子  $k = 2$ ，则：

$$U_{\text{rel}} = 2 \times u(f_0) = 3.0\%$$

5.2 脉冲持续时间测量不确定度

5.2.1 数学模型

$$t = t_0$$

式中： $t$ ——时间，ns；

$t_0$ ——测量值，ns。

5.2.2 不确定度传播率

$$u_c^2(t) = c_{(t_0)}^2 u_{(t_0)}^2$$

式中灵敏系数：

$$c_{(t_0)} = \frac{\partial(t)}{\partial(t_0)} = 1$$

5.2.3 标准不确定度分量估计

不确定度来源主要有以下几个方面：

- a) 重复测量引入的标准不确定度  $u_1$ ；
- b) 数字存储示波器引入的标准不确定度  $u_2$ 。

1) 重复测量引入的标准不确定度  $u_1$ ，属 A 类标准不确定度。

由  $s = \sqrt{\frac{\sum (t_i - \bar{t})^2}{n-1}}$  及单次测量  $u_1 = s$  可计算 A 类标准不确定度  $u_1$ ，如表 13 所示。

表 13 A 类标准不确定度  $u_1$

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
时间/ns	604	595	612	595	618	614	605	608	599	593
$u_1/\%$	1.44									

2) 数字存储示波器引入的标准不确定度  $u_2$ ，属 B 类标准不确定度

数字存储示波器时间不确定度为  $U_{\text{rel}}=0.7\%$ ,  $k=2$ , 则:

$$u_2 = \frac{0.7\%}{2} = 0.35\%$$

#### 5.2.4 合成不确定度计量

1) 相控阵超声探伤仪换能器脉冲持续时间测量不确定度的来源及数值汇总表见表 14:

表 14 相控阵探头脉冲持续时间测量不确定度的来源及数值汇总表

标准不确定度分量	不确定度来源	分类	标准不确定度/%
$u_1$	重复测量	A	1.44
$u_2$	数字存储示波器	B	0.35

2) 合成标准不确定度及扩展不确定度计算

$u_1$ 、 $u_2$  独立且相互无关, 则:

$$u_c(t) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 1.5\%$$

取包含因子  $k=2$ , 则:  $U_{\text{rel}} = 2 \times u_c(t) = 3.0\%$

### 5.3 相对脉冲回波灵敏度偏差测量不确定度

#### 5.3.1 数学模型

$$S_{\text{el}} = S_i$$

式中:

$S_{\text{el}}$ ——相对脉冲回波灵敏度偏差, dB;

$S_i$ ——第*i*个阵元相对脉冲回波灵敏度偏差测量值, dB;

#### 5.3.2 不确定度传播率

$$u^2(S_{\text{el}}) = c^2 u^2(S_i)$$

式中灵敏系数:

$$c = \frac{\partial(S_{\text{el}})}{\partial(S_i)} = 1$$

#### 5.3.3 标准不确定度分量估计

不确定度来源主要有以下几个方面:

- 重复测量引入的标准不确定度  $u_1$ ;
- 脉冲发射器/接收器引入的标准不确定度  $u_2$ ;

c) 数字存储示波器引入的标准不确定度  $u_3$ 。

1) 重复测量引入的标准不确定度  $u_1$ ，属 A 类标准不确定度。

由  $s = \sqrt{\frac{\sum (S_{eli} - \bar{S}_{el})^2}{n-1}}$  及单次测量  $u_1 = s$  可计算 A 类标准不确定度  $u_1$ ，如表 15 所示。

表 15 A 类标准不确定度  $u_1$

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
相对脉冲回波灵敏度偏差/dB	0.8	1.4	1.2	1.0	0.9	1.4	1.2	1.5	0.9	1.1
$u_1$ /dB	0.241									

2) 脉冲发射器/接收器引入的标准不确定度  $u_2$ ，属 B 类标准不确定度。

脉冲发射器/接收器幅值稳定性 MPE:  $\pm 0.1\%$  (0.01 dB), 按均匀分布, 取  $k = \sqrt{3}$ , 则:

$$u_2 = \frac{0.1\text{dB}}{\sqrt{3}} = 0.006\text{dB}$$

3) 数字存储示波器引入的标准不确定度  $u_3$ ，属 B 类标准不确定度

数字存储示波器不确定度为  $U_{\text{rel}}=0.9\%$  (0.078 dB),  $k=2$ , 则:

$$u_3 = \frac{0.078\text{dB}}{2} = 0.039\text{dB}$$

#### 5.3.4 合成不确定度计量

1) 相控阵超声探伤仪换能器相对脉冲回波灵敏度偏差测量不确定度的来源及数值汇总表见表 16:

表 16 相控阵探头相对脉冲回波灵敏度偏差测量不确定度的来源及数值汇总表

标准不确定度分量	不确定度来源	分类	标准不确定度/dB
$u_1$	重复测量	A	0.241
$u_2$	脉冲发射器/接收器	B	0.006
$u_3$	数字存储示波器	B	0.039

2) 合成标准不确定度及扩展不确定度计算

$u_1$ 、 $u_2$ 、 $u_3$  独立且相互无关, 则:

$$u_c(S_{el}) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 0.25\text{dB}$$

取包含因子  $k=2$ ，则： $U = 2 \times u_c(S_{cl}) = 0.5\text{dB}$

## 5.4 串扰测量不确定度

### 5.4.1 数学模型

$$C = 20\lg \frac{V_1}{V_2}$$

式中：

$C$ ——串扰，dB；

$V_1$ ——阵元带载条件下激励信号电压，mV；

$V_2$ ——相邻阵元串扰电压，mV。

令  $S_1 = 20\lg V_1$ ， $S_2 = 20\lg V_2$ ，则：

$$C = C_1 - C_2$$

### 5.4.2 不确定度传播率

$$u_c^2(C) = c_1^2 u_c^2(C_1) + c_2^2 u_c^2(C_2)$$

$$\text{式中灵敏系数为： } c_1 = \frac{\partial(C)}{\partial(C_1)} = 1, \quad c_2 = \frac{\partial(C)}{\partial(C_2)} = -1$$

$$\text{即： } u_c^2(C) = u_c^2(C_1) + u_c^2(C_2)$$

### 5.4.3 标准不确定度分量估计

不确定度来源主要有以下几个方面：

- a) 重复测量引入的标准不确定度  $u_1$ ；
- b) 信号发生器引入的标准不确定度  $u_2$ 。
- c) 数字存储示波器引入的标准不确定度  $u_3$ 。

1) 重复测量引入的标准不确定度  $u_1$ ，属 A 类标准不确定度。

由  $s = \sqrt{\frac{\sum (C_i - \bar{C})^2}{n-1}}$  及单次测量  $u_1 = s$  可计算 A 类标准不确定度  $u_1$ ，如表 17 所示。

表 17 A 类标准不确定度  $u_1$

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
阵元间串扰 /dB	32.7	33.5	32.9	33.4	33.6	32.5	32.7	33.6	33.8	33.5
$u_1$ /dB	0.469									

2) 信号发生器引入的标准不确定度  $u_2$ ，属 B 类标准不确定度。

只需考虑信号发生器输出幅值的稳定性，信号发生器一段时间内电压稳定性优于  $\pm 0.1\%$  (0.01 dB)，按均匀分布，则：

$$u_2 = \frac{0.01\text{dB}}{\sqrt{3}} = 0.006\text{dB}$$

3) 数字存储示波器引入的标准不确定度  $u_3$ ，属 B 类标准不确定度

数字存储示波器不确定度为  $U_{\text{rel}}=0.9\%$  (0.078 dB),  $k=2$ ，则：

$$u_3 = \frac{0.078\text{dB}}{2} = 0.039\text{dB}$$

#### 5.4.4 合成不确定度计量

1) 相控阵超声探伤仪换能器串扰测量不确定度的来源及数值汇总表见表 18：

表 18 相控阵超声探头阵元间串扰测量不确定度的来源及数值汇总表

标准不确定度分量	不确定度来源	分类	标准不确定度/dB
$u_1$	重复测量	A	0.469
$u_2$	信号发生器	B	0.006
$u_3$	数字存储示波器	B	0.039

2) 合成标准不确定度及扩展不确定度计算

$u_1$ 、 $u_2$ 、 $u_3$  独立且相互无关，则：

$$u_c(C) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 0.47\text{dB}$$

取包含因子  $k=2$ ，则：  $U = 2 \times u_c(C) = 1.0\text{dB}$

## 6. 试验结果验证

### 6.1 试验结果分析

对两台不同型号的相控阵超声探伤仪换能器进行校准试验，校准结果均能满足规范计量特性要求。

### 6.2 一致性评价

对两台不同型号的相控阵超声探伤仪换能器的校准数据和不确定分析可以看出，该规范针对不同型号仪器的校准结果具有一致性。

### **6.3 试验验证结论**

通过试验，证实规范中所描述的相控阵超声探伤仪换能器计量性能要求、标准器的选择和采用的校准方法是合理可行的。

### **6.4 附录（试验记录）**

1、实验 1 原始记录:

相控阵超声探伤仪换能器试验记录

仪器名称 相控阵探头 制造厂名 武汉中科创新技术股份有限公司

型号规格 5L32-0.6×10 出厂编号 11636863

标准器名称	型号/编号	测量范围	最大允差/准确度等级/不确定度	证书号	有效期
脉冲发射器/接收器	CTS-8077PR	频率：（0.5～20）MHz 上升时间：8 ns 电压：350 V	频率 MPE：±0.1%	LSsx2024-15079	2025.11.05
信号发生器	33621A	频率：1Hz~120MHz, 电压：1mV~10V（0-p）	频率： $U_{rel}=1.2\times 10^{-7}(k=2)$ 、电压： $U_{rel}=1.3\%(k=2)$	2024DW035700928	2025.12.22
数字示波器	DSOX2012A	时间：5ns/div～5s/div 幅度：5mV/div～5V/div	时间 MPE：±0.1% 幅度 MPE：±1.5%	2024DW035700777	2025.10.23

校准依据：JJFxxxx-20xx《相控阵超声探伤仪换能器校准规范》

校准日期：2025.7.15～2015.7.16；校准温度（21.4～22.6）℃；湿度（62～70）%RH；

校准地点：本院光谷基地 B127 室；校准员 郭海 、 肖梅

1、外观检查：符合要求

2、中心频率和相对带宽：

阵元	1	2	3	4	5	6	7	8
上限频率（MHz）	3.99	3.83	3.96	3.70	3.67	3.79	3.83	3.66
上限频率（MHz）	6.91	6.83	6.99	6.80	6.74	6.64	6.57	6.58
中心频率（MHz）	5.45	5.33	5.48	5.25	5.21	5.22	5.20	5.12
相对带宽（%）	53.6	56.3	55.3	59.0	59.0	54.7	52.7	57.0
阵元	9	10	11	12	13	14	15	16
上限频率（MHz）	3.72	3.68	3.60	3.76	3.82	3.62	3.59	4.00
上限频率（MHz）	6.59	6.33	6.47	6.48	6.56	6.33	6.34	6.84
中心频率（MHz）	5.16	5.01	5.04	5.12	5.19	4.98	4.97	5.42
相对带宽（%）	55.7	52.9	57.0	53.2	52.9	54.5	55.4	52.4
阵元	17	18	19	20	21	22	23	24
上限频率（MHz）	4.09	4.08	4.06	4.06	4.06	4.05	4.02	3.93
上限频率（MHz）	6.90	6.83	6.92	6.79	6.78	6.79	6.73	6.67
中心频率（MHz）	5.48	5.46	5.49	5.43	5.42	5.42	5.38	5.30
相对带宽（%）	51.8	50.4	52.1	50.3	50.1	50.7	50.4	51.7

阵元	25	26	27	28	29	30	31	32
上限频率 (MHz)	3.92	3.92	3.92	3.91	3.83	3.83	3.82	3.72
上限频率 (MHz)	6.62	6.58	6.58	6.59	6.51	6.39	6.37	6.29
中心频率 (MHz)	5.27	5.25	5.25	5.20	5.17	5.11	5.10	4.99
相对带宽 (%)	51.3	50.8	50.8	51.1	52.0	50.1	50.0	51.1
扩展不确定度 ( $k=2$ )	3.0%							

### 3、脉冲持续时间:

阵元	1	2	3	4	5	6	7	8
脉冲持续时间 (ns)	766	857	764	646	632	594	574	672
阵元	9	10	11	12	13	14	15	16
脉冲持续时间 (ns)	604	742	648	602	606	772	886	756
阵元	17	18	19	20	21	22	23	24
脉冲持续时间 (ns)	762	978	968	980	992	986	982	898
阵元	25	26	27	28	29	30	31	32
脉冲持续时间 (ns)	902	818	914	924	922	930	938	942
扩展不确定度 ( $k=2$ )	3.0%							

### 4、相对脉冲回波灵敏度偏差:

阵元	1	2	3	4	5	6	7	8
幅度测量值 (V)	10.225	10.775	11.425	11.375	9.800	9.350	9.400	9.575
偏差 (dB)	0.8	1.2	1.7	1.7	0.4	0.0	0.0	0.2
阵元	9	10	11	12	13	14	15	16
幅度测量值 (V)	9.675	9.175	9.250	8.700	8.975	9.700	9.000	9.475
偏差 (dB)	0.3	-0.2	-0.1	-0.6	-0.4	0.3	-0.3	0.1
阵元	17	18	19	20	21	22	23	24
幅度测量值 (V)	9.950	9.075	9.375	9.775	9.275	9.375	8.325	8.875
偏差 (dB)	0.5	-0.3	0.0	0.4	-0.1	0.0	-1.0	-0.5
阵元	25	26	27	28	29	30	31	32
幅度测量值 (V)	8.800	9.250	8.000	9.350	9.325	7.650	9.450	8.100
偏差 (dB)	-0.5	-0.1	-1.4	0.0	0.0	-1.8	0.1	-1.3
扩展不确定度 ( $k=2$ )	0.5 dB							



5、串扰：

阵元	激励电压(mV)	串扰电压(mV)	串扰 (dB)	扩展不确定度 ( $k=2$ )
1-2	2311	53.71	32.7	1.0 dB
3-4	2168	67.2	30.2	
5-6	2065	54.76	31.5	
7-8	2116	66.3	30.1	
9-10	2234	49.11	33.2	
11-12	2123	65.92	30.2	
13-14	2244	51.65	32.8	
15-16	2173	67.8	30.1	
17-18	2279	64.87	30.9	
19-20	2225	70.10	30.0	
21-22	2360	53.17	32.9	
23-24	2173	65.17	30.5	
25-26	2280	46.94	33.7	
27-28	2224	67.69	30.3	
29-30	2293	53.21	32.7	
31-32	2276	62.59	31.2	

6、不合格阵元数量：0

以下空白

2、实验2 原始记录:

相控阵超声探伤仪换能器试验记录

仪器名称 相控阵探头 制造厂名 武汉中科创新技术股份有限公司

型号规格 1L64-1.0×7 出厂编号 1KL3335NGA582

标准器名称	型号/编号	测量范围	最大允差/准确度等级/不确定度	证书号	有效期
脉冲发射器/接收器	CTS-8077PR	频率：（0.5～20）MHz 上升时间：8 ns 电压：350 V	频率 MPE：±0.1%	LSsx2024-15079	2025.11.05
信号发生器	33621A	频率：1Hz~120MHz, 电压：1mV~10V (0-p)	频率： $U_{rel}=1.2 \times 10^{-7}(k=2)$ 、电压： $U_{rel}=1.3\%(k=2)$	2024DW035700928	2025.12.22
数字示波器	DSOX2012A	时间：5ns/div~5s/div 幅度：5mV/div~5V/div	时间 MPE：±0.1% 幅度 MPE：±1.5%	2024DW035700777	2025.10.23

校准依据：JJFxxxx-20xx《相控阵超声探伤仪换能器校准规范》

校准日期：2025.7.21~2015.7.23；校准温度（20.5~23.2）℃；湿度（60~75）%RH；

校准地点：本院光谷基地 B127 室；校准员 郭海 、 肖梅

1、外观检查：符合要求

2、中心频率和相对带宽：

阵元	1	2	3	4	5	6	7	8
下限频率（MHz）	0.64	0.68	0.72	0.69	0.70	0.70	0.70	0.67
上限频率（MHz）	1.36	1.44	1.40	1.43	1.42	1.42	1.42	1.41
中心频率（MHz）	1.00	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.04
相对带宽（%）	72.4	70.9	64.5	69.0	68.3	68.5	68.0	70.4
阵元	9	10	11	12	13	14	15	16
下限频率（MHz）	0.69	0.68	0.70	0.70	0.70	0.69	0.68	0.71
上限频率（MHz）	1.43	1.42	1.44	1.42	1.42	1.43	1.40	1.43
中心频率（MHz）	1.06	1.05	1.07	1.06	1.06	1.06	1.04	1.07
相对带宽（%）	70.5	70.8	69.6	67.0	67.5	70.7	69.5	67.6
阵元	17	18	19	20	21	22	23	24
下限频率（MHz）	0.70	0.70	0.70	0.69	0.68	0.69	0.71	0.67
上限频率（MHz）	1.40	1.42	1.42	1.41	1.44	1.39	1.43	1.41
中心频率（MHz）	1.05	1.06	1.06	1.05	1.06	1.04	1.07	1.04
相对带宽（%）	66.7	68.1	68.7	69.2	71.2	67.7	67.5	71.4

阵元	25	26	27	28	29	30	31	32
下限频率 (MHz)	0.69	0.68	0.67	0.69	0.68	0.70	0.68	0.70
上限频率 (MHz)	1.41	1.42	1.41	1.43	1.40	1.44	1.42	1.42
中心频率 (MHz)	1.05	1.05	1.04	1.06	1.04	1.07	1.05	1.06
相对带宽 (%)	69.4	70.6	71.5	69.0	70.1	69.2	70.2	67.2
阵元	33	34	35	36	37	38	39	40
下限频率 (MHz)	0.70	0.68	0.70	0.70	0.71	0.70	0.68	0.70
上限频率 (MHz)	1.44	1.42	1.42	1.40	1.43	1.40	1.42	1.42
中心频率 (MHz)	1.07	1.05	1.06	1.05	1.07	1.05	1.05	1.06
相对带宽 (%)	68.5	70.6	67.6	67.4	66.6	67.4	69.6	68.2
阵元	41	42	43	44	45	46	47	48
下限频率 (MHz)	0.68	0.69	0.68	0.68	0.67	0.69	0.70	0.69
上限频率 (MHz)	1.40	1.41	1.40	1.42	1.41	1.41	1.42	1.39
中心频率 (MHz)	1.04	1.05	1.04	1.05	1.04	1.05	1.06	1.04
相对带宽 (%)	69.0	69.4	68.4	70.6	71.9	68.9	68.5	68.0
阵元	49	50	51	52	53	54	55	56
下限频率 (MHz)	0.70	0.70	0.69	0.68	0.69	0.70	0.69	0.69
上限频率 (MHz)	1.42	1.40	1.41	1.40	1.41	1.42	1.39	1.43
中心频率 (MHz)	1.06	1.05	1.05	1.04	1.05	1.06	1.04	1.06
相对带宽 (%)	67.9	67.5	69.1	69.9	68.5	68.1	67.1	69.9
阵元	57	58	59	60	61	62	63	64
下限频率 (MHz)	0.71	0.78	0.69	0.75	0.71	0.71	0.79	0.64
上限频率 (MHz)	1.39	1.42	1.41	1.37	1.43	1.39	1.41	1.34
中心频率 (MHz)	1.05	1.10	1.05	1.06	1.07	1.05	1.10	0.99
相对带宽 (%)	65.7	57.6	68.4	59.1	67.5	64.8	55.5	71.3
扩展不确定度 ( $k=2$ )	3.0%							

### 3、脉冲持续时间:

阵元	1	2	3	4	5	6	7	8
脉冲持续时间 (ns)	3201	2650	3120	2663	2846	2653	2646	2834
阵元	9	10	11	12	13	14	15	16
脉冲持续时间 (ns)	2649	2839	2644	2650	2657	2646	2819	2655

阵元	17	18	19	20	21	22	23	24
脉冲持续时间 (ns)	2845	2649	2664	2824	2658	3659	2653	2832
阵元	25	26	27	28	29	30	31	32
脉冲持续时间 (ns)	2644	2660	2665	2659	2805	2655	2658	2657
阵元	33	34	35	36	37	38	39	40
脉冲持续时间 (ns)	2652	2653	2663	2795	2648	2669	2659	2656
阵元	41	42	43	44	45	46	47	48
脉冲持续时间 (ns)	2666	2670	3683	2669	2650	3873	2666	2853
阵元	49	50	51	52	53	54	55	56
脉冲持续时间 (ns)	2652	2641	2650	2675	2828	2642	3466	2650
阵元	57	58	59	60	61	62	63	64
脉冲持续时间 (ns)	3708	3326	3749	3466	3020	2509	2856	3534
扩展不确定度 ( $k=2$ )	3.0%							

#### 4、相对脉冲回波灵敏度偏差：

阵元	1	2	3	4	5	6	7	8
幅度测量值 (mV)	225.7	293.1	237.4	295.1	257.0	267.3	280.2	240.7
偏差 (dB)	-1.6	0.7	-1.1	0.8	-0.4	-0.1	0.3	-1.0
阵元	9	10	11	12	13	14	15	16
幅度测量值 (mV)	301.3	239.1	299.6	263.6	263.3	293.8	239.1	319.9
偏差 (dB)	1.0	-1.1	0.9	-0.2	-0.2	0.7	-1.1	1.5
阵元	17	18	19	20	21	22	23	24
幅度测量值 (mV)	248.9	288.7	266.4	253.8	300.3	241.5	311.2	249.2
偏差 (dB)	-0.7	0.6	-0.1	-0.5	0.9	-1.0	1.2	-0.7
阵元	25	26	27	28	29	30	31	32
幅度测量值 (mV)	282.5	286.7	245.2	308.0	232.0	302.0	245.5	265.2
偏差 (dB)	0.4	0.5	-0.8	1.1	-1.3	1.0	-0.8	-0.2
阵元	33	34	35	36	37	38	39	40
幅度测量值 (mV)	278.0	234.7	302.0	238.0	302.7	249.5	264.9	298.5
偏差 (dB)	0.3	-1.2	1.0	-1.1	1.0	-0.7	-0.2	0.9
阵元	41	42	43	44	45	46	47	48

幅度测量值 (mV)	239.1	318.4	243.8	297.2	262.1	261.2	308.0	241.0
偏差 (dB)	-1.1	1.4	-0.9	0.8	-0.3	-0.3	1.1	-1.0
阵元	49	50	51	52	53	54	55	56
幅度测量值 (mV)	309.0	238.0	295.1	261.5	257.6	300.6	233.6	310.5
偏差 (dB)	1.2	-1.1	0.8	-0.3	-0.4	0.9	-1.3	1.2
阵元	57	58	59	60	61	62	63	64
幅度测量值 (mV)	238.2	281.2	268.8	244.1	301.6	231.5	300.3	231.5
偏差 (dB)	-1.1	0.4	0.0	-0.9	1.0	-1.3	0.9	-1.3
扩展不确定度 ( $k=2$ )	0.5 dB							

#### 5、串扰:

阵元	激励电压 (mV)	串扰电压 (mV)	串扰 (dB)	扩展不确定度 ( $k=2$ )
1-2	2687	55.34	33.7	1.0 dB
3-4	2764	58.56	33.5	
5-6	2597	60.32	32.7	
7-8	2569	68.45	31.5	
9-10	2643	60.34	32.8	
11-12	2713	66.12	32.3	
13-14	2658	58.33	33.2	
15-16	2683	70.54	31.6	
17-18	2586	63.45	32.2	
19-20	2698	67.43	32.0	
21-22	2715	60.23	33.1	
23-24	2578	69.16	31.4	
25-26	2590	73.25	31.0	
27-28	2648	68.24	31.8	
29-30	2741	66.46	32.3	
31-32	2634	63.63	32.3	
33-34	2731	59.46	33.2	
35-36	2647	63.48	32.4	
37-38	2587	71.25	31.2	

39-40	2646	69.44	31.6	1.0 dB
41-42	2731	59.36	33.3	
43-44	2643	55.46	33.6	
45-46	2685	63.45	32.5	
47-48	2713	63.26	32.6	
49-50	2647	75.24	30.9	
51-52	2588	56.23	33.3	
53-54	2569	74.35	30.8	
55-56	2734	64.58	32.5	
57-58	2648	58.35	33.1	
59-60	2694	63.46	32.6	
61-62	2654	59.66	33.0	
63-64	2635	68.46	31.7	

6、不合格阵元数量：0

以下空白