

相控阵超声探伤仪换能器校准规范

验证报告

《相控阵超声探伤仪换能器校准规范》编写组

2025 年 8 月

一、验证目的

实验的目的在于验证《相控阵超声探伤仪换能器校准规范（征求意见稿）》（以下简称规范）中提出的校准项目和校准方法的可行性，以及校准阵元数量选择的合理性。

二、校准项目和校准方法选择的依据

1、校准项目的选择

相控阵超声探伤仪及其换能器应用广泛，目前已成为最主流的超声检测方法，相控阵超声探伤仪换能器（以下简称“相控阵探头”）一般是由若干压电阵元组成的阵列。相控阵探头中的各个阵元通过相控阵超声探伤仪主机独立控制，实现探头声束的相控发射与接收，在介质制定空间区域内实现超声波的偏转和聚焦，达到无损检测的目的。相控阵探头广泛应用在航空航天、电力行业、石油化工、压力容器、特种设备行业等各领域。

按照 GB/T 42399.2—2023/ISO 18563—2:2017《无损检测仪器 相控阵阵超声设备的性能与检验 第2部分：探头》，JB/T 11731—2013《无损检测 超声相控阵探头通用技术条件》中相控阵探头性能指标，参照 GB/T 32563—2016《无损检测 超声检测 相控阵超声检测方法》中对相控阵探头的指标要求，同时结合相控阵探头生产厂商和使用方实际需求，确定校准以下校准项目：

- 1) 中心频率和相对带宽；
- 2) 脉冲持续时间；
- 3) 相对脉冲回波灵敏度偏差；
- 4) 串扰；
- 5) 不合格阵元数量。

2、校准方法的确认

对于超声探伤仪换能器，中心频率和相对带宽、脉冲持续时间的校准方法相对比较成熟，主要参照了 GB/T 42399.2—2023 中 8.4 条，JB/T 11731-2013 中 6.5、6.6 中方法。针对不同类型的相控阵探头，选用不同的试块作为反射体。

相控阵探头一般是多阵元探头，该指标可反映阵元间一致性，相比相对脉冲回波灵敏度，相对脉冲回波灵敏度偏差更能反映相控阵探头性能，因此该性能指标校准方法主要参照了 GB/T 42399.2—2023 中 8.3 条方法，而未参照 JB/T 11731—2013 中 6.7 条方法。

串扰主要参照了 GB/T 42399.2—2023 中 8.6 条，JB/T 11731—2013 中 6.4 中方法。

不合格阵元数量参照了 GB/T 32563—2016 附录 A 中坏晶片的判断方法。

三、验证实验设计

本验证试验按校准规范中规定的校准项目和校准方法，在不同条件下对相控阵探头进行校准，验证该校准规范的正确性和可行性。

1、校准项目和校准方法

本规范中确定的校准项目和校准方法如表 1 所示。

表 1 校准项目和校准方法

序号	验证项目	验证方法	技术要求
1	中心频率和相对带宽	按照本规范中 7.3.1 条	中心频率：±10% 相对带宽：±15%
2	脉冲持续时间	按照本规范中 7.3.2 条	±10%
3	相对脉冲回波灵敏度偏差	按照本规范中 7.3.3 条	±4 dB
4	串扰	按照本规范中 7.3.4 条	不小于 25 dB
5	不合格阵元数量	按照本规范中 7.3.5 条	阵元≤64，0 阵元＞64，不大于 2%

2、验证所用标准器具

校准过程中使用的标准器如表 2 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 2 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	频率 MPE：±0.1%
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	/	/

3、被校对象

结合目前相控阵超声探伤仪的使用状况，选取市场上较为常见的两种型号的相控阵探头进行实验，如表 3 所示。

表 3 相控阵探头基本信息

样品	设备名称	型号/编号	制造厂商	技术参数
1	相控阵探头	5L32-0.6×10/ 11636863	武汉中科创新技术股份有限公司	频率：5 MHz 阵元数量：32
2	相控阵探头	1L64-1.0×7/1KL3 335NGA582	广州多浦乐电子科技股份有限公司	频率：1 MHz 阵元数量：64

4、实验条件

实验室条件：温度：（20.5～23.2）℃；相对湿度：（60～75）%。

5、实验分组与设计

本实验报告从被测对象、校准人员两个方面进行实验验证，设计并进行以下 3 次不同条件下的校准实验，如表 4 所示：

1）被测对象验证：对比相同校准人员、使用相同标准器、相同校准方法，对不同被校对象的校准结果，从而对校准规范进行验证。（实验 1、2 对比）。

2）校准人员验证：对比相同被校对象、使用相同标准器、相同校准方法，不同校准人员进行校准的校准结果，从而对校准规范进行验证。（实验 1、3 对比）。

表 4 验证试验分组

实验分组	被校对象	校准单位	校准人员	校准次数
实验 1	样品 1	湖北省计量院	郭海、肖梅	1
实验 2	样品 2	湖北省计量院	郭海、肖梅	1
实验 3	样品 1	湖北省计量院	许昊、李浩琳	1

四、验证结果与分析

1、被测对象验证

对比相同校准人员、使用相同标准器、相同校准方法，对不同被校对象的校准结果，实验 1、实验 2 的校准原始记录见附录 1、2，对其校准结果进行汇总与统计，得到表 5 与表 6 如下所示。

表 5 实验 1 校准结果汇总与统计

校准项目		被校对象 1（实验 1）		
		测量值		扩展不确定度（ $k=2$ ）
中心频率 （MHz）和相对 带宽（%）	1	5.45	53.6	3.0%
	2	5.33	56.3	
	3	5.48	55.3	
	4	5.25	59.0	
	5	5.21	59.0	
	6	5.22	54.7	
	7	5.20	52.7	
	8	5.12	57.0	
	9	5.16	55.7	
	10	5.01	52.9	
	11	5.04	57.0	
	12	5.12	53.2	
	13	5.19	52.9	
	14	4.98	54.5	
	15	4.97	55.4	
	16	5.42	52.4	
	17	5.48	51.8	
	18	5.46	50.4	
	19	5.49	52.1	
	20	5.43	50.3	
	21	5.42	50.1	
	22	5.42	50.7	
	23	5.38	50.4	
	24	5.30	51.7	
	25	5.27	51.3	
	26	5.25	50.8	
	27	5.25	50.8	
	28	5.20	51.1	
	29	5.17	52.0	
	30	5.11	50.1	
	31	5.10	50.0	
	32	4.99	51.1	
脉冲持续时间 （ns）	1	766		3.0%
	2	857		
	3	764		
	4	646		
	5	632		
	6	594		
	7	574		
	8	672		

脉冲持续时间 (ns)	9	604	3.0%
	10	742	
	11	648	
	12	602	
	13	606	
	14	772	
	15	886	
	16	756	
	17	762	
	18	978	
	19	968	
	20	980	
	21	992	
	22	986	
	23	982	
	24	898	
	25	902	
	26	818	
	27	914	
	28	924	
	29	922	
	30	930	
	31	938	
	32	942	
相对脉冲回波灵敏度偏差(dB)	1	0.8	0.5
	2	1.2	
	3	1.7	
	4	1.7	
	5	0.4	
	6	0.0	
	7	0.0	
	8	0.2	
	9	0.3	
	10	-0.2	
	11	-0.1	
	12	-0.6	
	13	-0.4	
	14	0.3	
	15	-0.3	
	16	0.1	

相对脉冲回波灵敏度偏差(dB)	17	0.5	0.5
	18	-0.3	
	19	0.0	
	20	0.4	
	21	-0.1	
	22	0.0	
	23	-1.0	
	24	-0.5	
	25	-0.5	
	26	-0.1	
	27	-1.4	
	28	0.0	
	29	0.0	
	30	-1.8	
	31	0.1	
	32	-1.3	
串扰(dB)	1-2	32.7	1.0
	3-4	30.2	
	5-6	31.5	
	7-8	30.1	
	9-10	33.2	
	11-12	30.2	
	13-14	32.8	
	15-16	30.1	
	17-18	30.9	
	19-20	30.0	
	21-22	32.9	
	23-24	30.5	
	25-26	33.7	
	27-28	30.3	
	29-30	32.7	
	31-32	31.2	
不合格阵元数量		0	/

表 6 实验 2 校准结果汇总与统计

校准项目		被校对象 2（实验 2）	
		测量值	扩展不确定度（ $k=2$ ）
中心频率(MHz) 和相对带宽(%)	1	1.00	72.4
	2	1.06	70.9
	3	1.06	64.5
	4	1.06	69.0
	5	1.06	68.3
	6	1.06	68.5
	7	1.06	68.0
	8	1.04	70.4
	9	1.06	70.5
	10	1.05	70.8
	11	1.07	69.6
	12	1.06	67.0
	13	1.06	67.5
	14	1.06	70.7
	15	1.04	69.5
	16	1.07	67.6
	17	1.05	66.7
	18	1.06	68.1
	19	1.06	68.7
	20	1.05	69.2
	21	1.06	71.2
	22	1.04	67.7
	23	1.07	67.5
	24	1.04	71.4
	25	1.05	69.4
	26	1.05	70.6
	27	1.04	71.5
	28	1.06	69.0
	29	1.04	70.1
	30	1.07	69.2
	31	1.05	70.2
	32	1.06	67.2
	33	1.07	68.5
	34	1.05	70.6
	35	1.06	67.6
	36	1.05	67.4
	37	1.07	66.6
	38	1.05	67.4
	39	1.05	69.6
	40	1.06	68.2

3.0%

中心频率(MHz) 和相对带宽(%)	41	1.04	69.0	3.0%
	42	1.05	69.4	
	43	1.04	68.4	
	44	1.05	70.6	
	45	1.04	71.9	
	46	1.05	68.9	
	47	1.06	68.5	
	48	1.04	68.0	
	49	1.06	67.9	
	50	1.05	67.5	
	51	1.05	69.1	
	52	1.04	69.9	
	53	1.05	68.5	
	54	1.06	68.1	
	55	1.04	67.1	
	56	1.06	69.9	
	57	1.05	65.7	
	58	1.10	57.6	
	59	1.05	68.4	
	60	1.06	59.1	
	61	1.07	67.5	
	62	1.05	64.8	
	63	1.10	55.5	
	64	0.99	71.3	
脉冲持续时间 (ns)	1	3201		3.0%
	2	2650		
	3	3120		
	4	2663		
	5	2846		
	6	2653		
	7	2646		
	8	2834		
	9	2649		
	10	2839		
	11	2644		
	12	2650		
	13	2657		
	14	2646		
	15	2819		
	16	2655		
	17	2845		
	18	2649		

脉冲持续时间 (ns)	19	2664	3.0%
	20	2824	
	21	2658	
	22	3659	
	23	2653	
	24	2832	
	25	2644	
	26	2660	
	27	2665	
	28	2659	
	29	2805	
	30	2655	
	31	2658	
	32	2657	
	33	2652	
	34	2653	
	35	2663	
	36	2795	
	37	2648	
	38	2669	
	39	2659	
	40	2656	
	41	2666	
	42	2670	
	43	3683	
	44	2669	
	45	2650	
	46	3873	
	47	2666	
	48	2853	
	49	2652	
	50	2641	
	51	2650	
	52	2675	
	53	2828	
	54	2642	
	55	3466	
	56	2650	
	57	3708	
	58	3326	
	59	3749	
	60	3466	

脉冲持续时间 (ns)	61	3020	3.0%
	62	2509	
	63	2856	
	64	3534	
相对脉冲回波灵敏度偏差(dB)	1	-1.6	0.5
	2	0.7	
	3	-1.1	
	4	0.8	
	5	-0.4	
	6	-0.1	
	7	0.3	
	8	-1.0	
	9	1.0	
	10	-1.1	
	11	0.9	
	12	-0.2	
	13	-0.2	
	14	0.7	
	15	-1.1	
	16	1.5	
	17	-0.7	
	18	0.6	
	19	-0.1	
	20	-0.5	
	21	0.9	
	22	-1.0	
	23	1.2	
	24	-0.7	
	25	0.4	
	26	0.5	
	27	-0.8	
	28	1.1	
	29	-1.3	
	30	1.0	
	31	-0.8	
	32	-0.2	
	33	0.3	
	34	-1.2	

相对脉冲回波灵敏度偏差(dB)	35	1.0	0.5
	36	-1.1	
	37	1.0	
	38	-0.7	
	39	-0.2	
	40	0.9	
	41	-1.1	
	42	1.4	
	43	-0.9	
	44	0.8	
	45	-0.3	
	46	-0.3	
	47	1.1	
	48	-1.0	
	49	1.2	
	50	-1.1	
	51	0.8	
	52	-0.3	
	53	-0.4	
	54	0.9	
	55	-1.3	
	56	1.2	
	57	-1.1	
	58	0.4	
	59	0.0	
	60	-0.9	
	61	1.0	
	62	-1.3	
	63	0.9	
	64	-1.3	
串扰(dB)	1-2	33.7	1.0
	3-4	33.5	
	5-6	32.7	
	7-8	31.5	
	9-10	32.8	
	11-12	32.3	
	13-14	33.2	
	15-16	31.6	

串扰(dB)	17-18	32.2	1.0
	19-20	32.0	
	21-22	33.1	
	23-24	31.4	
	25-26	31.0	
	27-28	31.8	
	29-30	32.3	
	31-32	32.3	
	33-34	33.2	
	35-36	32.4	
	37-38	31.2	
	39-40	31.6	
	41-42	33.3	
	43-44	33.6	
	45-46	32.5	
	47-48	32.6	
	49-50	30.9	
	51-52	33.3	
	53-54	30.8	
	55-56	32.5	
	57-58	33.1	
	59-60	32.6	
	61-62	33.0	
	63-64	31.7	
不合格阵元数量		0	/

从 1#机、2#机串扰试验数据可以看出，串扰测量值一致性较强，起伏不超过 3.5 dB，且远大于 25 dB，规范中串扰总校准阵元数不低于总阵元数量的 25%，最少校准 4 组阵元，该方法选取校准阵元数量是合理的，能反映出相控阵探头串扰特性，也能提高校准效率。

经验证，以上各校准项目的校准结果均能满足校准规范计量特性要求。

2、校准人员验证

对比相同被校对象、使用相同标准器、相同校准方法，不同校准人员进行校准的校准结果，实验 3 的校准原始记录见附录 3，对其校准结果进行汇总与统计，得到表 7：

表 7 实验 3 校准结果汇总与统计

校准项目		被校对象 1（实验 3）	
		测量值	扩展不确定度（ $k=2$ ）
中心频率(MHz) 和相对带宽(%)	1	5.31	54.8
	2	5.21	57.6
	3	5.39	55.2
	4	5.42	57.8
	5	5.26	56.7
	6	5.27	52.2
	7	5.24	54.6
	8	5.17	54.4
	9	5.18	55.0
	10	5.11	51.9
	11	5.11	57.1
	12	5.20	51.2
	13	5.34	52.2
	14	5.08	55.1
	15	5.03	56.0
	16	5.38	50.0
	17	5.48	50.9
	18	5.44	51.1
	19	5.44	50.7
	20	5.47	50.5
	21	5.39	50.5
	22	5.47	51.0
	23	5.32	50.4
	24	5.25	52.1
	25	5.32	50.8
	26	5.30	50.4
	27	5.35	51.4
	28	5.30	51.9
	29	5.32	53.2
	30	5.17	51.3
	31	5.18	52.0
	32	5.11	53.5
脉冲持续时间 (ns)	1	783	
	2	845	
	3	772	
	4	671	
	5	653	
	6	616	
	7	582	
	8	678	

脉冲持续时间 (ns)	9	613	3.0%
	10	726	
	11	637	
	12	614	
	13	611	
	14	786	
	15	880	
	16	772	
	17	769	
	18	952	
	19	936	
	20	942	
	21	963	
	22	954	
	23	954	
	24	915	
	25	884	
	26	814	
	27	896	
	28	918	
	29	902	
	30	939	
	31	918	
	32	924	
相对脉冲回波灵敏度偏差(dB)	1	1.2	0.5
	2	0.9	
	3	1.5	
	4	1.3	
	5	0.8	
	6	0.4	
	7	-0.3	
	8	0.3	
	9	0.0	
	10	-0.5	
	11	-0.4	
	12	-1.0	
	13	-0.2	
	14	0.0	
	15	-0.6	
	16	-0.4	

相对脉冲回波灵敏度偏差(dB)	17	0.3	0.5
	18	0.2	
	19	0.6	
	20	0.9	
	21	-0.5	
	22	0.2	
	23	-0.8	
	24	-0.3	
	25	-0.1	
	26	0.1	
	27	-1.2	
	28	0.1	
	29	0.1	
	30	-1.5	
	31	-0.1	
	32	-1.6	
串扰(dB)	1-2	33.1	1.0
	3-4	30.1	
	5-6	31.5	
	7-8	30.5	
	9-10	33.0	
	11-12	30.3	
	13-14	32.6	
	15-16	30.3	
	17-18	30.8	
	19-20	30.1	
	21-22	33.2	
	23-24	30.2	
	25-26	33.3	
	27-28	30.7	
	29-30	32.1	
	31-32	31.5	
不合格阵元数量		0	/

对比相同被校对象、使用相同标准器、相同校准方法，不同校准人员在不同时间进行校准的校准结果，实验 1、实验 3 的校准原始记录见附录 1、3，对其校准结果进行汇总与统计，并对 2 次实验结果中校准数据进行验证。因两次试验方法、标准器均相同，测

量不确定相同，因此需验证其是否满足 $|y_1 - y_2| \leq U$ ，两次实验的校准结果汇总与统计如表 8。

表 8 校准结果汇总与统计对比表

校准项目		y ₁ - y ₂		扩展不确定度（k=2）
中心频率 (MHz)和相 对带宽(%)	1	0.14	1.2	3.0%
	2	0.12	1.3	
	3	0.09	0.1	
	4	0.17	1.2	
	5	0.05	2.3	
	6	0.05	2.5	
	7	0.04	1.9	
	8	0.05	2.6	
	9	0.02	0.7	
	10	0.10	1.0	
	11	0.07	0.1	
	12	0.08	2.0	
	13	0.15	0.7	
	14	0.10	0.6	
	15	0.06	0.6	
	16	0.04	2.4	
	17	0.00	0.9	
	18	0.02	0.7	
	19	0.05	1.4	
	20	0.04	0.2	
	21	0.03	0.4	
	22	0.05	0.3	
	23	0.06	0.0	
	24	0.05	0.4	
	25	0.05	0.5	
	26	0.05	0.4	
	27	0.10	0.6	
	28	0.10	0.8	
	29	0.15	1.2	
	30	0.06	1.2	
	31	0.08	2.0	
	32	0.12	2.4	
脉冲持续 时间(ns)	1	17		3.0%
	2	12		
	3	8		
	4	25		
	5	21		

脉冲持续时间(ns)	6	22	3.0%
	7	8	
	8	6	
	9	9	
	10	16	
	11	11	
	12	12	
	13	5	
	14	14	
	15	6	
	16	16	
	17	7	
	18	26	
	19	32	
	20	38	
	21	29	
	22	32	
	23	28	
	24	17	
	25	18	
	26	4	
	27	18	
	28	6	
	29	20	
	30	9	
	31	20	
	32	18	
相对脉冲回波灵敏度偏差(dB)	1	0.4	0.5
	2	0.3	
	3	0.2	
	4	0.4	
	5	0.4	
	6	0.4	
	7	0.3	
	8	0.1	
	9	0.3	
	10	0.3	
	11	0.3	
	12	0.4	
	13	0.2	

相对脉冲 回波灵敏度偏差(dB)	14	0.3	0.5
	15	0.3	
	16	0.5	
	17	0.2	
	18	0.5	
	19	0.3	
	20	0.5	
	21	0.4	
	22	0.2	
	23	0.2	
	24	0.2	
	25	0.4	
	26	0.2	
	27	0.2	
	28	0.1	
	29	0.1	
	30	0.3	
	31	0.2	
	32	0.3	
串扰(dB)	1-2	0.4	1.0
	3-4	0.1	
	5-6	0.0	
	7-8	0.4	
	9-10	0.2	
	11-12	0.1	
	13-14	0.2	
	15-16	0.2	
	17-18	0.1	
	19-20	0.1	
	21-22	0.3	
	23-24	0.3	
	25-26	0.4	
	27-28	0.4	
	29-30	0.6	
	31-32	0.3	
不合格阵元数量		0	/

此项验证需进行以上各主要参数，2 次实验中每项计量特性的校准结果均满足 $|y_1 -$

$y_2| \leq U$ ，数据验证无误。

五、理论验证与实验验证结论

本验证报告说明了规范中校准项目和校准方法的依据与来源，详细解释了参数及串扰测量数量的选择，指出了参照的标准的具体条款。同时按照规范的方法和条款经过不同的分组对比实验，以及后期的实验数据分析，得出规范能较好得指导相控阵超声探伤仪换能器校准工作，能顺利完成相应指标的测量。此次实验表明规范的校准项目及方法合理可行，实用性和可操作性较好，保证相控阵超声探伤仪换能器的计量性能准确可靠。

验证时间：2025 年 8 月

验证人员：郭海 肖梅 许昊 李皓琳

六、附录

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	1.0 dB
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	
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	1.0 dB
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

3、实验 3 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 武汉中科创新科技股份有限公司
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：2025.7.18~2015.7.19；校准温度（21.2~22.6）℃；湿度（63~72）%RH；

校准地点：本院光谷基地 B127 室；校准员 许昊 、 李皓琳

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）	3.86	3.71	3.90	3.85	3.77	3.89	3.81	3.76
上限频率（MHz）	6.76	6.71	6.88	6.99	6.75	6.64	6.67	6.57
中心频率（MHz）	5.31	5.21	5.39	5.42	5.26	5.27	5.24	5.17
相对带宽（%）	54.8	57.6	55.2	57.8	56.7	52.2	54.6	54.4
阵元	9	10	11	12	13	14	15	16
上限频率（MHz）	3.75	3.78	3.65	3.87	3.94	3.68	3.64	4.03
上限频率（MHz）	6.60	6.43	6.57	6.53	6.73	6.48	6.42	6.72
中心频率（MHz）	5.18	5.11	5.11	5.20	5.34	5.08	5.03	5.38
相对带宽（%）	55.0	51.9	57.1	51.2	52.2	55.1	56.0	50.0
阵元	17	18	19	20	21	22	23	24
上限频率（MHz）	4.08	4.05	4.06	4.09	4.03	4.07	3.98	3.96
上限频率（MHz）	6.87	6.83	6.82	6.85	6.75	6.86	6.66	6.74

中心频率 (MHz)	5.48	5.44	5.44	5.47	5.39	5.47	5.32	5.25
相对带宽 (%)	50.9	51.1	50.7	50.5	50.5	51.0	50.4	52.1
阵元	25	26	27	28	29	30	31	32
上限频率 (MHz)	3.97	3.96	3.97	3.92	3.90	3.84	3.83	3.74
上限频率 (MHz)	6.67	6.63	6.72	6.67	6.73	6.50	6.54	6.48
中心频率 (MHz)	5.32	5.30	5.35	5.30	5.32	5.17	5.18	5.11
相对带宽 (%)	50.8	50.4	51.4	51.9	53.2	51.3	52.0	53.5
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)	783	845	772	671	653	616	582	678
阵元	9	10	11	12	13	14	15	16
脉冲持续时间 (ns)	613	726	637	614	611	786	880	772
阵元	17	18	19	20	21	22	23	24
脉冲持续时间 (ns)	769	952	936	942	963	954	954	915
阵元	25	26	27	28	29	30	31	32
脉冲持续时间 (ns)	884	814	896	918	902	939	918	924
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)	10.855	10.458	11.151	10.948	10.325	9.851	9.052	9.694
偏差 (dB)	1.2	0.9	1.5	1.3	0.8	0.4	-0.3	0.3
阵元	9	10	11	12	13	14	15	16
幅度测量值 (mV)	9.375	8.873	8.984	8.362	9.154	9.414	8.742	8.975
偏差 (dB)	0.0	-0.5	-0.4	-1.0	-0.2	0.0	-0.6	-0.4
阵元	17	18	19	20	21	22	23	24
幅度测量值 (mV)	9.730	9.642	9.685	10.431	8.895	9.642	8.548	9.042
偏差 (dB)	0.3	0.2	0.3	0.9	-0.5	0.2	-0.8	-0.3
阵元	25	26	27	28	29	30	31	32
幅度测量值 (mV)	9.320	9.534	8.215	9.546	9.461	7.953	9.253	7.866
偏差 (dB)	-0.1	0.1	-1.2	0.1	0.1	-1.5	-0.1	-1.6
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	2345	51.74	33.1	1.0 dB
3-4	2198	68.50	30.1	
5-6	2037	53.90	31.5	
7-8	2128	63.86	30.5	
9-10	2237	50.19	33.0	
11-12	2127	64.85	30.3	1.0 dB
13-14	2247	52.69	32.6	
15-16	2185	67.10	30.3	
17-18	2283	65.75	30.8	
19-20	2217	69.68	30.1	
21-22	2353	51.22	33.2	
23-24	2186	67.35	30.2	
25-26	2273	49.01	33.3	
27-28	2217	64.81	30.7	
29-30	2298	57.33	32.1	
31-32	2282	60.71	31.5	

6、不合格阵元数量：0

以下空白