



中华人民共和国工业和信息化部
有色金属计量技术规范

JJF（有色金属）XXXX—20XX

相控阵超声换能器校准规范

（报批稿）

Calibration Specification for Phased Array Probes

20XX-XX-XX 发布

20XX-XX-XX 实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

相控阵超声换能器校准规范

Calibration Specification for Phased Array

Probes

JJF（有色金属）XXXX—

20XX

归口单位：中国有色金属工业协会

主要起草单位：西安汉唐分析检测有限公司

西部超导材料科技股份有限公司

有色金属技术经济研究院有限责任公司

宝钛集团有限公司

西南铝业（集团）有限责任公司

西安建筑科技大学

本规范主要起草人：

刘泽晨（西安汉唐分析检测有限公司）
余泽利（西安汉唐分析检测有限公司）
刘 柯（西部超导材料科技股份有限公司）
闫雁楠（有色金属技术经济研究院有限责任公司）
王先俊（西安汉唐分析检测有限公司）
魏 康（西安汉唐分析检测有限公司）
刘宏伟（宝钛集团有限公司）
瞿楷东（西南铝业（集团）有限责任公司）
高黎黎（西安建筑科技大学）

本规范委托有色金属行业计量技术委员会负责解释

目录

引言	(II)
1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 概述	(1)
4 计量特性	(1)
4.1 相对脉冲回波灵敏度偏差	(1)
4.2 中心频率和-6dB 相对带宽	(2)
4.3 相控阵超声换能器灵敏度	(2)
4.4 阵元间串扰	(2)
5 校准条件	(2)
5.1 环境条件	(2)
5.2 测量标准	(2)
6 校准项目和校准方法	(3)
6.1 校准项目	(3)
6.2 校准方法	(3)
7 校准结果表达	(5)
8 复校时间间隔	(5)
附录 A 校准原始记录参考格式	(7)
附录 B 校准证书内页参考格式	(9)
附录 C 相控阵超声换能器中心频率的测量不确定度评定示例	(10)

引 言

JJF 1071《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001《通用计量术语及定义》和 JJF 1059.1《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑校准规范制修订工作的基础性系列规范。

本规范参考了 ISO 18563-2 《无损检测-超声相控阵设备特性化与验证-第 2 部分：阵列探头（Non-Destructive testing -Characterization and verification of ultrasonic phased array equipment- Part 2: Array probes）》的技术内容。

本规范为首次发布。

相控阵超声换能器校准规范

1 范围

本规范适用于中心频率在 0.5MHz~15MHz 的金属材料无损检测用线阵列相控阵超声换能器的校准。

2 引用文件

本规范无引用文件。

3 概述

相控阵超声换能器是配套相控阵超声探伤仪/系统使用的装置，由多个独立的阵元（压电晶片）组成。相控阵超声换能器通过电子控制多个阵元的激发时序来实现声束的灵活偏转与聚焦，实现对材料内部缺陷的高精度、多角度成像检测。相控阵超声换能器根据使用类别可分为接触式和水浸式。相控阵超声换能器阵元排列示意图见图1，工作原理示意图见图2。

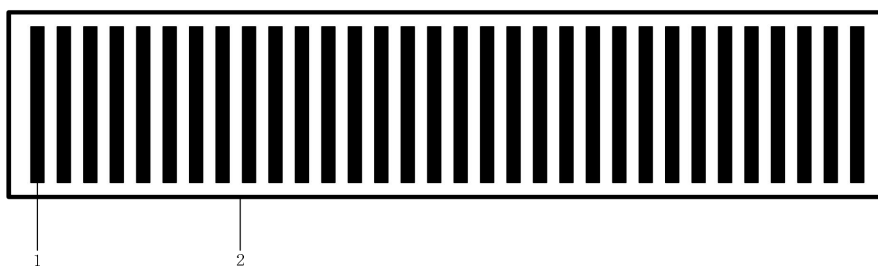


图1 线阵列相控阵超声换能器阵元排列示意图

1—阵元（压电晶片）；2—相控阵超声换能器外壳

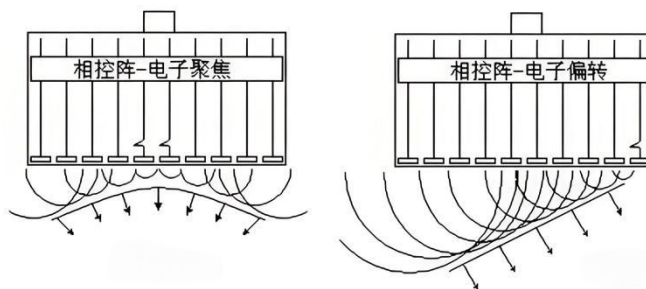


图2 相控阵超声换能器工作原理示意图

4 计量特性

4.1 相对脉冲回波灵敏度偏差

相对脉冲回波灵敏度偏差不超过 $\pm 3\text{dB}$ 。

4.2 中心频率和-6dB 相对带宽

每个阵元的中心频率和-6dB相对带宽应不超过换能器出厂规定值。

4.3 相控阵超声换能器灵敏度

相控阵超声换能器灵敏度与换能器出厂规定值误差不超过 $\pm 3\text{dB}$ 。

4.4 阵元间串扰

阵元间串扰应不小于 25dB 。

5 校准条件

5.1 环境条件

室温：（18~28） $^{\circ}\text{C}$ ；水温：（15~33） $^{\circ}\text{C}$ （如适用）。

5.2 测量标准

测量标准的技术指标见表1。

表 1 测量标准的技术指标

序号	测量标准	技术指标
1	脉冲发生器/接收器	频率范围：0.5kHz~35MHz； 上升时间：不大于10ns； 脉冲幅值（空载）：负向脉冲不小于 100V
2	数字存储示波器	带宽不低于100MHz； 采样频率：大于200MHz； 至少应有两个通道，具备时间延迟测量（时间分辨力优于0.1 μs ）、幅值测量功能和快速傅里叶变换（FFT）功能
3	标准试块	材质不限，声速及声衰减均匀； 试块在换能器每一个阵元的超声传播路径均相同

6 校准项目和校准方法

6.1 校准项目

校准项目包括相对脉冲回波灵敏度偏差、中心频率和-6dB 相对带宽、相控阵超声换能器灵敏度及阵元间串扰。

6.2 校准方法

6.2.1 相对脉冲回波灵敏度偏差

6.2.1.1 在进行相对脉冲回波灵敏度偏差校准时，需要对相控阵超声换能器中的每一个阵元进行校准。

6.2.1.2 通过匹配装置连接相控阵换能器、脉冲发生器/接收器和数字存储示波器，设置脉冲发生器/接收器为发射-接收模式，发射脉冲时间为标称相控阵超声换能器频率周期的负方波或负尖脉冲的一半，发射电压与相控阵超声换能器出厂测试报告保持一致。

6.2.1.3 接触式相控阵超声换能器校准时（若相控阵超声换能器自带楔块，校准时先去掉楔块），将相控阵超声换能器耦合在标准试块上，并调整相控阵超声换能器的相对位置以得到幅度最大且稳定的反射回波；水浸式相控阵超声换能器校准时，选择的标准试块应满足每一个阵元的超声传播路径均相同，在水中调整相控阵超声换能器和标准试块的相对位置以得到幅度最大且稳定的反射回波。

6.2.1.4 将在数字存储示波器上得到的稳定回波放大后进行测量。用示波器测量第 i 个阵元反射回波的电压幅值 V_{eli} ，并计算和记录每个 V_{eli} 的算术平均值 V_{av} 。

每个阵元的相对脉冲回波灵敏度偏差 S_{eli} 计算见公式（1）。

$$S_{eli} = 20 \lg \frac{V_{eli}}{V_{av}} \quad (1)$$

式中：

S_{eli} ——第 i 个阵元的相对脉冲回波灵敏度偏差，dB；

V_{eli} ——第 i 个阵元的反射回波电压幅值，V；

V_{av} ——每个阵元反射回波电压幅值的算术平均值，V。

6.2.2 中心频率和-6dB 相对带宽

需要对相控阵超声换能器中的每一个阵元进行校准。连接方式与仪器设置同 6.2.1.2。中心频率校准时，应从频谱幅度最高处下降 6dB 时确定频率点，从获得的每个阵元上限频率 f_{ui} 和下限频率 f_{li} 通过公式（2）计算中心频率，-6dB 相对带宽 Δf_{refi} 的计算见公式（3）。

$$f_{0i} = \frac{f_{ui} + f_{li}}{2} \quad (2)$$

$$\Delta f_{refi} = \frac{f_{ui} - f_{li}}{f_{0i}} \times 100\% \quad (3)$$

式中:

f_{0i} ——第 i 个阵元的中心频率, MHz;

f_{ui} ——第 i 个阵元的上限频率, MHz;

f_{li} ——第 i 个阵元的下限频率, MHz;

Δf_{refi} ——第 i 个阵元的-6dB 相对带宽。

6.2.3 相控阵超声换能器灵敏度

连接方式与仪器设置同 6.2.1.2。使用数字存储示波器测量脉冲发生器/接收器激励任意阵元时的激励电压 V_{ref} , 将其作为所有阵元的参考信号。在相同的激励条件下, 依次测量并记录每个阵元的反射回波电压幅值 V_{cli} , 计算除选定阵元参考信号外的所有阵元的反射回波电压幅值的算术平均值 V_{av} 。相控阵超声换能器灵敏度 S_{pt} 的计算见公式 (4)。

$$S_{pt} = 20 \lg \frac{V_{av}}{V_{ref}} \quad (4)$$

式中:

S_{pt} ——换能器灵敏度, dB;

V_{av} ——每个阵元反射回波电压幅值的算术平均值, V;

V_{ref} ——数字存储示波器信号幅值, V。

相控阵超声换能器灵敏度与换能器出厂规定值误差 Δ 的计算见公式 (5)。

$$\Delta = S_0 - S_{pt} \quad (5)$$

式中:

Δ ——相控阵超声换能器灵敏度与换能器出厂规定值误差, dB;

S_0 ——换能器出厂规定值, dB;

S_{pt} ——换能器灵敏度, dB;

6.2.4 阵元间串扰

相控阵超声换能器阵元数 n 不大于 64 时, 需要选择 2 个位置进行阵元间串扰校准; 阵元数 n 大于 64 时, 需要选择 4 个位置进行阵元间串扰校准。连接方式同 6.2.1.2, 激励信号设置为至少 6 个周期且频率与相控阵超声换能器标称频率相同的正弦脉冲串。激励任

意一个随机选择的阵元，用示波器测量其相邻阵元接收到的信号电压幅值。阵元间串扰 CT 的计算见公式（6）。

$$CT = 20 \lg \frac{V_{\text{exc}}}{V_{\text{rec}}} \quad (6)$$

式中：

CT ——阵元间串扰，dB；

V_{exc} ——激励电压，mV；

V_{rec} ——相邻阵元收到的信号电压，mV。

7 校准结果表达

校准结果应在校准证书上反映。校准证书至少应包括以下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
 - b) 实验室的名称和地址；
 - c) 实施校准活动的地点，包括客户设施、实验室固定设施以外的地点；
 - d) 证书的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
 - e) 客户的名称和联络信息；
 - f) 被校对象的描述和明确标识；
 - g) 进行校准活动的日期，如果与校准结果的有效性和应用有关时，应说明被校对象的接收日期和证书发布日期；
 - h) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
 - i) 本次校准所用的测量标准和溯源性及有效性说明；
 - j) 校准环境的描述；
 - k) 校准结果及其测量不确定度的说明（给出整个测量范围校准结果测量不确定度的最大值）；
 - l) 对校准规范偏离的说明；
 - m) 校准证书签发人的签名、职务或等效标识，以及签发日期；
 - n) 校准人和核验人签名；
 - o) 校准结果仅对被校对象有效的声明；
 - p) 未经校准实验室书面批准，不得部分复制校准证书的声明。
- 校准原始记录参考格式见附录A，校准证书内页参考格式见附录B。

8 复校时间间隔

建议相控阵超声换能器校准时间间隔为 12 个月；当使用频率较高时，建议用户缩短为 3 个月。

附录 A

校准原始记录参考格式

证书编号： 接收日期： 校准日期： 发布日期：
 委托单位： 校准依据：

被校设备信息										
器具名称					出厂编号					
型号/规格					设备编号					
制造厂					环境条件		°C			
校准地点										
测量标准信息										
名称	编号	设备编号		证书编号		准确度等级/ 最大允许误差/ 测量不确定度		有效日期		
校准结果										
一、相对脉冲回波灵敏度偏差										
阵元序数	1	2	3	4	5	6	7	8	...	n
V_{eli}/V										
V_{av}/V										
S_{cli}/dB										
扩展不确定度 $U=$ _____ ($k=2$)										
二、中心频率和-6dB 相对带宽										
阵元序数	1	2	3	4	5	6	7	8	...	n
f_u/MHz										
f_l/MHz										
f_0/MHz										
Δf_{ref}										
扩展不确定度 $U=$ _____ ($k=2$)										
三、相控阵超声换能器灵敏度/dB										
阵元序数	1	2	3	4	5	6	7	8	...	n
V_{eli}/V										
V_{av}/V										

V_{ref}/V	阵元序数：____， $V_{\text{ref}}=$ _____				
S_{pt}/dB					
S_0/dB					
Δ/dB					
扩展不确定度 $U=$ _____（ $k=2$ ）					
四、阵元间串扰					
阵元数量		激励阵元序数		相邻阵元序数	
V_{exc}		V_{rec}		CT	
扩展不确定度 $U=$ _____（ $k=2$ ）					

附录 B

校准证书内页参考格式

校准结果										
1. 相对脉冲回波灵敏度偏差										
阵元序数	1	2	3	4	5	6	7	8	...	n
S_{el}/dB										
$U=$ _____ ($k=2$)										
2. 中心频率和-6dB 相对带宽/MHz										
阵元序数	1	2	3	4	5	6	7	8	...	n
f_0										
Δf_{ref}										
$U=$ _____ ($k=2$)										
3. 相控阵超声换能器灵敏度										
阵元序数	1	2	3	4	5	6	7	8	...	n
S_{pt}										
$U=$ _____ ($k=2$)										
4. 阵元间串扰										
阵元数量: _____, 激励阵元序数: _____, 相邻阵元序数: _____。										
$CT=$ _____。										
$U=$ _____ ($k=2$)										

附录 C

相控阵超声换能器中心频率测量不确定度评定示例

C.1 概述

C.1.1 校准依据

本规范。

C.1.2 测量标准

脉冲发生器/接收器，频率范围：0.5kHz~35MHz；

数字存储示波器，带宽：200MHz。

C.1.3 被校对象

选用标称中心频率为5MHz的相控阵超声换能器。

C.1.4 校准方法

相控阵超声换能器中心频率的校准方法见本规范6.2.2，本示例取标称频率5MHz的相控阵超声换能器某一阵元为例评定中心频率测量结果不确定度，其他标称频率的相控阵超声换能器也可参考本示例评定不确定度。

C.2 测量模型

中心频率计算公式见公式（C.1）。

$$f_0 = \frac{f_u + f_l}{2} \quad (\text{C.1})$$

式中：

f_0 —中心频率，MHz；

f_u —上限频率，MHz；

f_l —下限频率，MHz。

C.3 测量不确定度的来源分析

相控阵超声换能器中心频率测量结果不确定度的主要来源有：

- 1) 测量重复性引入的不确定度 u_1 ；
- 2) 数字存储示波器准确度引入的不确定度 u_2 ；
- 3) 数字存储示波器分辨力引入的不确定度 u_3 。

C.4 测量不确定度评定

C.4.1 测量重复性引入的不确定度 u_1

用数字存储示波器对相控阵超声换能器的上限频率和下限频率进行测量后得到中心

频率。进行 10 次测量，测量数据表见表 C.1。

表C.1 中心频率重复性测量数据

	测量值/（MHz）				
	第 1 次测量	第 2 次测量	第 3 次测量	第 4 次测量	第 5 次测量
上限频率	7.38	7.41	7.43	7.38	7.36
	第6次测量	第 7 次测量	第 8 次测量	第 9 次测量	第 10 次测量
下限频率	7.41	7.39	7.37	7.41	7.39
	第 1 次测量	第 2 次测量	第 3 次测量	第 4 次测量	第 5 次测量
中心频率	2.46	2.53	2.39	2.46	2.52
	第6次测量	第 7 次测量	第 8 次测量	第 9 次测量	第 10 次测量
平均值 $\bar{x}$ （MHz）	2.37	2.41	2.45	2.45	2.43
	第 1 次测量	第 2 次测量	第 3 次测量	第 4 次测量	第 5 次测量
标准偏差 s (MHz)	4.92	4.97	4.91	4.92	4.94
	第6次测量	第 7 次测量	第 8 次测量	第 9 次测量	第 10 次测量
	4.89	4.90	4.91	4.93	4.91
	4.92				
	0.022				

实际校准取单次测量结果，将标准偏差 s 保留两位小数后取 $s=0.03\text{MHz}$ ，则测量重复性引入的不确定度 u_1 为：

$$u=s=0.03\text{MHz}$$

相对不确定度为：

$$u_1 = \frac{u}{\bar{x}} = \frac{0.03}{4.92} = 0.61\%$$

C.4.2 数字存储示波器准确度引入的不确定度 u_2

由数字存储示波器校准证书可知，示波器频率测量功能最大允许误差为 $\pm 0.50\%$ ，可得区间半宽 $a=0.50\%$ ，假设服从均匀分布，取 $k=\sqrt{3}$ ，则数字存储示波器准确度引入的不确定度 u_2 为：

$$u_2 = \frac{a}{k} = \frac{0.50\%}{\sqrt{3}} = 0.29\%$$

C.4.3 数字存储示波器分辨力引入的不确定度 u_3

由于数字存储示波器的分辨力为 0.01MHz ，则区间半宽 $a=0.005\text{MHz}$ ，假设服从均匀分布，取 $k=\sqrt{3}$ ，则数字存储示波器分辨力引入的不确定度 u_3 ：

$$u_3 = \frac{a}{k} = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.0029\text{MHz}$$

C.5 合成标准不确定度计算

由于各分量彼此独立互不相关，且重复性引入的不确定度 u_1 和分辨力引入的 u_3 取较大者，则 u_3 可忽略不计，当 $f_0=4.92\text{MHz}$ 时，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = \sqrt{0.61\%^2 + 0.29\%^2} = 0.68\%$$

C.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，其扩展不确定度为：

$$U_{rel} = k \cdot u_c = 2 \times 0.68\% = 1.4\%$$
