

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—XXXX

相控阵超声探伤仪校准规范

Calibration Specification for Phased Array Ultrasonic Flaw Detectors
(报批稿)

XXXX-XX-XX发布

XXXX-XX-XX实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

相控阵超声探伤仪校准规范

Calibration Specification for Phased Array

Ultrasonic Flaw Detectors

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

国标（北京）检验认证有限公司

西南铝业（集团）有限责任公司

陕西天成航空材料股份有限公司

西部金属材料股份有限公司

宝钛集团有限公司

西安核设备有限公司

新疆金盛镁业有限公司

湖南湘投金天钛业科技股份有限公司

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

本规范主要起草人：

刘泽晨（西安汉唐分析检测有限公司）
房永强（西安汉唐分析检测有限公司）
王先俊（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）
肖 婷（国标（北京）检验认证有限公司）
李 帅（西安汉唐分析检测有限公司）
张国栋（西南铝业（集团）有限责任公司）
孙宝洋（陕西天成航空材料股份有限公司）
王礼营（西部金属材料股份有限公司）
刘宏伟（宝钛集团有限公司）
王 辉（西安核设备有限公司）
廉学华（新疆金盛镁业有限公司）
刘 飞（湖南湘投金天钛业科技股份有限公司）
杨俊宙（西安建筑科技大学）

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 发射脉冲电压	(1)
4.2 发射脉冲上升时间	(1)
4.3 发射脉冲脉冲宽度	(1)
4.4 频率响应	(2)
4.5 等效输入噪声	(2)
4.6 衰减器误差	(2)
4.7 通道增益误差	(2)
4.8 幅度线性误差	(2)
4.9 水平线性误差	(2)
5 校准条件	(2)
5.1 环境条件	(3)
5.2 测量标准	(3)
6 校准项目和校准方法	(3)
6.1 校准项目	(3)
6.2 校准方法	(4)
7 校准结果表达	(8)
8 复校时间间隔	(9)
附录 A 校准原始记录参考格式	(10)
附录 B 校准证书内页参考格式	(12)
附录 C 相控阵超声探伤仪衰减器误差测量不确定度评定示例	(13)

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 18563-1:2022《无损检测——超声相控阵设备的特性与验证——第 1 部分：仪器》（Non-destructive testing — Characterization and verification of ultrasonic phased array equipment — Part 1: Instruments）的技术内容。

本规范为首次发布。

相控阵超声探伤仪校准规范

1 范围

本规范适用于频率在 (0.5~15) MHz 范围内的多通道相控阵超声探伤仪的校准。

2 引用文件

本规范无引用文件。

3 概述

相控阵超声探伤仪是一种激励相控阵超声换能器产生超声波，并接收在材料中反射的超声信号以评价材料内部缺陷的无损检测仪器，通过软件可以单独控制相控阵探头中每个晶片的激发时间，从而控制产生波束的角度、聚焦位置和焦点尺寸。

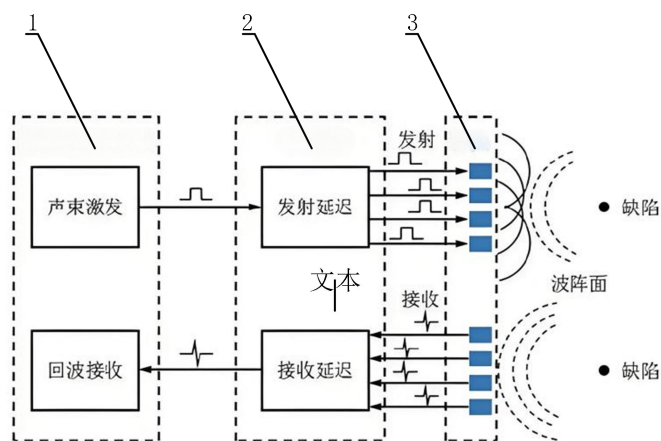


图1 相控阵超声探伤仪工作原理示意图

1—激发与接收模块；2—延时器；3—探头

4 计量特性

4.1 发射脉冲电压

发射脉冲电压与标称发射脉冲电压要求不超过 $\pm 10\%$ 。

4.2 发射脉冲上升时间

发射脉冲上升时间应小于标称发射脉冲上升时间。

4.3 发射脉冲宽度

对于方波脉冲和双极性脉冲波形，每个单独测量通道的脉冲宽度应在标称发射脉冲宽度的 $\pm 10\%$ 范围内。

当使用一个尖峰脉冲波形时，脉冲宽度应小于标称发射脉冲宽度中的最大值，且通道之间的变化应在 $\pm 20\%$ 范围内。

4.4 频率响应

中心频率应在标称中心频率值的 $\pm 10\%$ 范围内。

带宽应在标称带宽的 $\pm 10\%$ 范围内。

4.5 等效输入噪声

等效输入噪声与频带的平方根之比应不大于 $80 \times 10^{-9} \text{ V/Hz}^{1/2}$ 。

4.6 衰减器误差

在整个增益范围内的任何连续1dB区间内，增益误差应不超过 $\pm 0.5 \text{ dB}$ ；在整个增益范围内的任何连续20dB范围内，增益误差应不超过 $\pm 1 \text{ dB}$ ；在整个增益范围内衰减器总误差应不超过 $\pm 2 \text{ dB}$ 。

4.7 通道增益误差

通道增益误差应小于3dB。

4.8 幅度线性误差

幅度线性误差的允许范围见表1，以全屏高度的百分比表示。

表1 幅度线性误差的允许范围

外部标准衰减器设定值/dB	所显示信号幅度的理论值	幅度线性最大允许误差
0	100	$\pm 2\%$
1	90	$\pm 2\%$
2	80	参考线
4	64	$\pm 2\%$
5	50	$\pm 2\%$
8	40	$\pm 2\%$
12	25	$\pm 2\%$
14	20	$\pm 2\%$
20	10	$\pm 2\%$
26	5	$\pm 2\%$

4.9 水平线性误差

参考信号与理想位置的偏差应不超过全屏宽度的 $\pm 1\%$ 。

5 校准条件

5.1 环境条件

室温：（18~28）℃。

5.2 测量标准

测量标准的技术指标见表2。

表2 测量标准的技术指标

序号	测量标准	技术指标	用途
1	信号发生器	频率范围：0.5kHz~35MHz； 频率准确度优于 5×10^{-4} ； 电压幅度误差不超过 $\pm 1\%$ ； 正弦波幅度平坦度优于 $\pm 2\text{dB}$ ； 总谐波失真优于0.3%	用于校准频率响应、等效输入噪声、衰减器误差、通道增益误差、幅度线性误差
2	数字存储示波器	带宽 $\geq 100\text{MHz}$ ； 采样频率：高于200MHz； 至少应有两个通道，具备时间延迟测量（时间分辨率优于 $0.1\mu\text{s}$ ）、幅值测量功能和快速傅里叶变换（FFT）功能	用于校准发射脉冲电压、发射脉冲上升时间、发射脉冲宽度、频率响应、等效输入噪声、衰减器误差、通道增益误差、幅度线性误差
3	无感电阻	阻值为 50Ω ，最大允许误差 $\pm 0.5\Omega$	用于校准发射脉冲电压、发射脉冲上升时间、发射脉冲宽度、频率响应、等效输入噪声、衰减器误差、通道增益误差、幅度线性误差
4	标准衰减器	步进至少包含0.1dB、1dB、10dB； 总衰减量100dB；当信号频率在15MHz以内时，该衰减器任意10dB范围的累积误差应小于0.3dB；最大允许误差： $\pm (1\%A + 0.05)\text{dB}$ ， A 为衰减量	用于校准频率响应、等效输入噪声、衰减器误差、通道增益误差、幅度线性误差和水平线性误差

6 校准项目和校准方法

6.1 校准项目

校准项目包括发射脉冲电压、发射脉冲上升时间、发射脉冲宽度、频率响应、等效输入噪声、衰减器误差、通道增益误差、幅度线性误差和水平线性误差。

6.2 校准方法

6.2.1 发射脉冲电压

6.2.1.1 在进行发射脉冲电压校准时，需要对相控阵超声探伤仪的每一个通道进行校准。设置相控阵超声探伤仪发射为全开状态，通过匹配装置连接相控阵超声探伤仪，将示波器通过无感电阻与匹配装置中对应通道的发射输出插座连接。

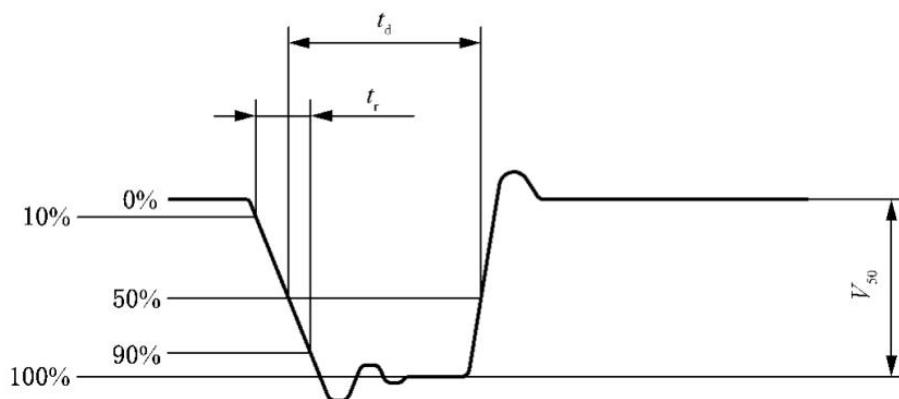
6.2.1.2 通过示波器依次测量并记录所有发射通道的电压。

6.2.2 发射脉冲上升时间

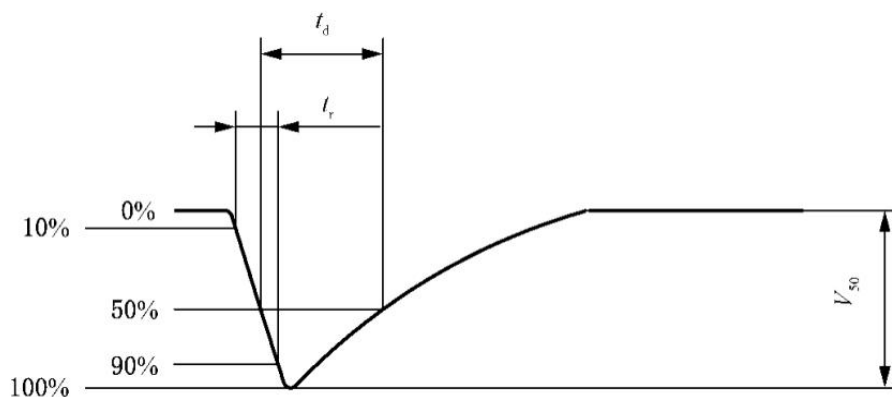
校准方法同 6.2.1.1。通过示波器依次测量并记录所有发射通道电压幅度从 10% 到 90% 的脉冲上升时间，发射脉冲上升时间如图 2 中 t_r 所示。

6.2.3 脉冲宽度

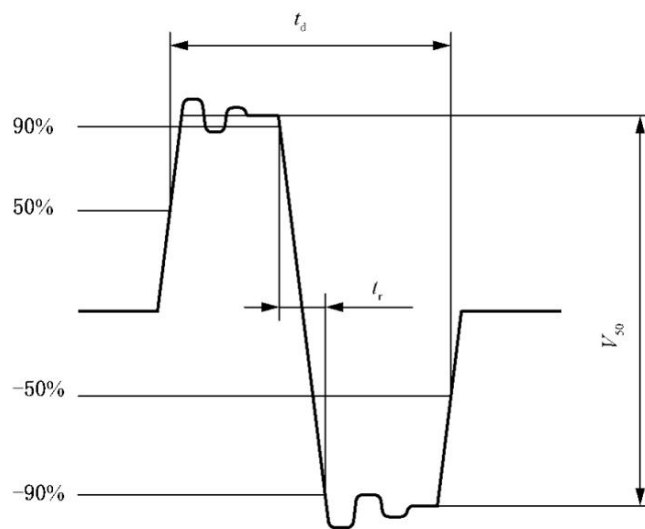
校准方法同 6.2.1.1，通过示波器依次测量并记录所有发射通道的脉冲宽度，脉冲宽度如图 2 中 t_d 所示。



(a) 方波脉冲



(b) 尖峰脉冲



(c)双极性脉冲

图2 三种典型测量发射脉冲

V_{50} —发射脉冲电压； t_r —脉冲上升时间； t_d —脉冲宽度

6.2.4 频率响应

采用图3连接方式。停止相控阵超声探伤仪信号输出。用信号发生器将正弦波信号输入第一个通道。设置相控阵超声探伤仪增益值为满增益中间值，调节相控阵超声探伤仪的正弦信号幅度，使增益中间值设置下产生80%全屏信号高度的信号。推荐选取常用带宽或最大标称带宽进行校准。在相控阵超声探伤仪所设置的频带范围内，改变信号发生器输入正弦波信号的频率，记录每个频带在相控阵超声探伤仪显示最大信号幅度时对应的频率 $f_{\max}$ 以及对应的电平幅度 $A_{\max}$ 。以小于标称频带带宽5%的增量，依次从 $f_{\max}$ 提高和降低频率，并记录相控阵超声探伤仪显示信号幅度低于电平幅度 $A_{\max}$ 3dB时所对应的上限频率 f_u 和下限频率 f_l 。每个频带中心频率 f_0 的计算见公式（1），每个频带的带宽 Δf 的计算见公式（2）。在相控阵超声探伤仪可同时激活的每个通道上重复测量（如：16/64的相控阵超声探伤仪，可同时激活的通道数为16），以得到每个通道的中心频率和带宽。

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

$$\Delta f = f_u - f_l \quad (2)$$

式中：

f_0 ——中心频率，MHz；

f_u ——上限频率，MHz；

f_l ——下限频率，MHz；

Δf ——带宽，MHz。

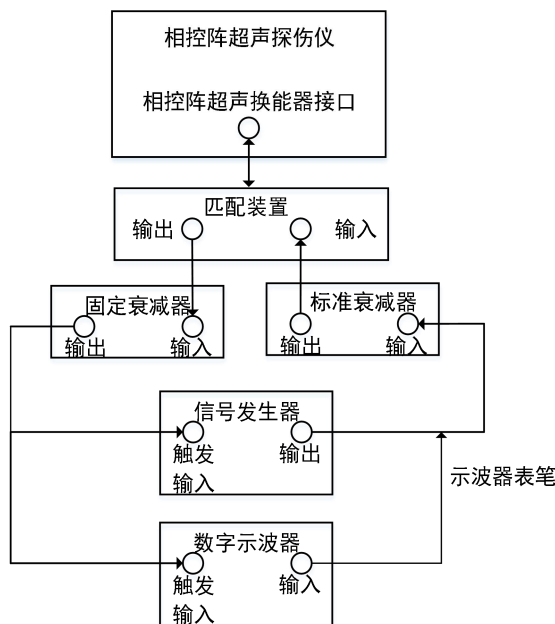


图 3 校准接线图

6.2.5 等效输入噪声

按图 3 方式接线。停止相控阵超声探伤仪信号输出。采用最大带宽中心频率 f_0 的输入信号，测量等效输入噪声。将相控阵超声探伤仪的增益设置到最大值，断开输入信号，记录相控阵超声探伤仪显示屏上的噪声电平，把增益降低至 40dB，重新接通输入信号。调整标准衰减器/或信号发生器使输入信号电平直至射频信号电平与上述噪声电平幅度相同，用示波器测量输入信号的峰-峰值电压 V_{in} ，并记录外部标准衰减器的衰减量 S 。等效输入噪声 V_{ein} 计算见公式（3）。每平方根带宽的噪声计算见公式（4）。在相控阵超声探伤仪可同时激活的每个通道上重复测量，以得到每个通道的等效输入噪声。

$$V_{ein} = \frac{V_{in}}{10^{\frac{S+40}{20}}} \quad (3)$$

式中：

V_{ein} ——等效输入噪声，V；

V_{in} ——峰-峰值电压，V；

S ——外部标准衰减器的衰减量，dB。

$$n_{in} = \frac{V_{ein}}{\sqrt{f_u - f_l}} \quad (4)$$

式中：

n_{in} ——每平方根带宽的噪声, $V/Hz^{1/2}$;

f_u ——上限频率, MHz;

f_l ——下限频率, MHz。

6.2.6 衰减器误差

采用图 3 连接方式。停止相控阵超声探伤仪信号输出。启用通道 1 接收功能并连接信号发生器。使用信号发生器对通道 1 输入频率为最宽频带中心频率 f_0 的正弦波信号, 将相控阵超声探伤仪的增益设置为最小值, 并调整信号发生器产生的参考信号, 使其不饱和显示。在整个增益范围内, 以适当的增量, 增加相控阵超声探伤仪的增益。对于每个增益设定值, 调整外部标准衰减器, 使信号幅度保持恒定高度。对应每个增量, 记录相控阵超声探伤仪的增益值和外部标准衰减器的衰减值。衰减器误差的计算见公式 (5)。在相控阵超声探伤仪可同时激活的每个通道上重复测量, 以得到每个通道的衰减器误差。

$$\Delta S = S_1 - S_2 \quad (5)$$

式中:

ΔS ——衰减器误差, dB;

S_1 ——相控阵超声探伤仪增益值, dB;

S_2 ——外部标准衰减器衰减值, dB。

6.2.7 通道增益误差

采用图 3 连接方式。关闭相控阵超声探伤仪所有通道发射功能。启用通道 1 接收功能并连接信号发生器, 提供一个频率为最宽频带中心频率的正弦信号, 将相控阵超声探伤仪的增益设置为中间值, 调整信号发生器的输出信号, 使通道 1 的信号峰值幅度达到 80% 全屏信号高度。测量 A 扫显示的正弦波的幅度 A_1 (A_1 为通道 1 所测得的信号幅度), 在所有通道上重复进行测量, 取所有测量值中的最大值和最小值。相控阵超声探伤仪通道增益误差计算见公式 (6)。

$$\Delta G = 20 \lg(A_{\max} / A_{\min}) \quad (6)$$

式中:

ΔG ——通道增益误差, dB;

$A_{\max}$ ——所有通道中 A 扫显示的正弦波最大幅度;

$A_{\min}$ ——所有通道中 A 扫显示的正弦波最小幅度。

6.2.8 幅度线性误差

采用图 3 连接方式。停止相控阵超声探伤仪信号输出。启用通道 1 接收功能并通过信号发生器给通道 1 提供一个频率为最宽频带中心频率的正弦信号。将外部标准衰减器设置为 2dB，调节输入信号的幅度和相控阵超声探伤仪的增益，使该信号的幅度为全屏信号高度的 80%；在不改变相控阵超声探伤仪增益的条件下，设置外部标准衰减器到表 1 第 1 列数值，分别测量不同衰减量下相控阵超声探伤仪屏幕上的信号幅度。在相控阵超声探伤仪可同时激活的每个通道上重复测量，以得到每个通道的幅度线性误差。

6.2.9 水平线性误差

采用图 3 连接方式。关闭相控阵超声探伤仪所有通道发射功能，设置为 A 扫显示。调节信号发生器产生具有 11 个规则的彼此分开的正弦波脉冲测试信号（该脉冲信号的频率设置为被校相控阵超声探伤仪最宽频带对应的中心频率）。将相控阵超声探伤仪增益设置为总增益值的 50%，调节标准衰减器和信号发生器输出信号幅度，直到显示在相控阵超声探伤仪上的测试脉冲高度为全屏高度的 80%。调节脉冲的时间关系，使第 3 个脉冲前沿位于水平刻度尺的 20%，同时第 9 个脉冲的前沿位于水平刻度尺的 80%。记录其余 9 个脉冲的前沿超出水平刻度尺理想位置的偏差，取其最大偏差。相控阵超声探伤仪水平线性误差计算见公式（7）。

$$\Delta L = \frac{|a_{\max}|}{B} \times 100\% \quad (7)$$

式中：

ΔL ——时基线性误差；

$|a_{\max}|$ ——其余 9 个脉冲与指定位置的最大偏差；

B ——水平满刻度数。

7 校准结果表达

经校准的相控阵超声探伤仪出具校准证书，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

复校时间间隔的长短取决于其使用情况，使用单位可根据实际使用情况自主决定复校的时间，建议复校时间间隔为1年。

附录 A

校准原始记录参考格式

被校设备信息									
证书编号				委托单位					
校准依据				校准日期					
校准地点				环境条件		℃			
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									
通道_1 校准数据:									
1.发射电压: V, $U_{rel} =$ % ($k=2$)。									
2.上升时间: ns, $U_{rel} =$ % ($k=2$)。									
3.脉冲宽度: ns, $U_{rel} =$ % ($k=2$)。									
4.频率响应									
上限频率: MHz, 下限频率: MHz;									
中心频率: MHz, 带宽: MHz, $U_{rel} =$ % ($k=2$)。									
5.等效输入噪声: $V_{in} =$ V, $S =$ dB, $V_{ein} =$ V, $n_{in} =$ V/Hz ^{1/2} , $U_{rel} =$ % ($k=2$)。									
6.衰减器误差: $S_1 =$ dB, $S_2 =$ dB, $\Delta dB =$ dB, $U_{rel} =$ % ($k=2$)。									
7.通道增益偏差: $A_{max} =$ %, $A_{min} =$ %, $\Delta G =$ %, $U_{rel} =$ % ($k=2$)。									
8.幅度线性误差:									
外部标准衰减器设定值/dB		相控阵超声探伤仪波幅高度 (全屏高度的百分比/%)				允许范围/ (全屏高度的百分比/%)			
0						98~102			
1						88~92			
2						参考线			
4						62~66			
5						48~52			
8						38~42			
12						23~27			
14						18~22			
20						8~12			
26						3~7			
$U_{rel} =$ % ($k=2$)									
9.水平线性误差:									
脉冲 序数	1	2	3	4	5	6	7	8	9

a									
$a_{\max}$	=		, B =		, ΔL =	%	, U_{rel} =	%	($k=2$)
通道_2 校准数据:									
.....									

附录 B

校准证书内页参考格式

通道 1		
校准项目	校准结果	相对扩展不确定度
1.发射电压	V	$U_{\text{rel}} = \text{_____} \% (k=2)$
2.上升时间	ns	$U_{\text{rel}} = \text{_____} \% (k=2)$
3.脉冲宽度	ns	$U_{\text{rel}} = \text{_____} \% (k=2)$
4 中心频率	MHz	$U_{\text{rel}} = \text{_____} \% (k=2)$
5 带宽	MHz	$U_{\text{rel}} = \text{_____} \% (k=2)$
6 等效输入噪声	V	$U_{\text{rel}} = \text{_____} \% (k=2)$
7.衰减器误差	dB	$U_{\text{rel}} = \text{_____} \% (k=2)$
8.通道增益偏差	%	$U_{\text{rel}} = \text{_____} \% (k=2)$
9.幅度线性误差		
外部标准衰减器设定值/dB	相控阵超声探伤仪波幅高度 (全屏高度的百分比/%)	误差/%
0		
1		
2		
4		
5		
8		
12		
14		
20		
26		
$U_{\text{rel}} = \text{_____} \% (k=2)$		
10.水平线性误差	%	$U_{\text{rel}} = \text{_____} \% (k=2)$
通道2		
校准项目	校准结果	相对扩展不确定度
.....		

附录 C

相控阵超声探伤衰减器误差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

测量标准的技术指标见表 C.1。

表C.1 测量标准的技术指标

序号	测量标准	技术指标
1	信号发生器	频率范围：0.5kHz~35MHz； 频率准确度优于 5×10^{-4} ； 电压幅度误差 $\pm 1\%$ ；
2	数字存储示波器	带宽：100MHz； 采样频率：500MHz； 时间分辨率：0.05 μ s
3	无感电阻	50 Ω ，最大允许误差 $\pm 0.5\Omega$
4	标准衰减器	步进为 0.1dB、1dB、10dB；总衰减量 100 dB；最大允许误差： $\pm (1\%A + 0.05)$ dB， A 为衰减量

C.1.3 被校对象

相控阵超声探伤仪。

C.1.4 校准方法

相控阵超声探伤衰减器误差的校准方法见本规范6.2.6，本示例取满屏波高20%为基准波高，对增益/衰减20dB值进行校准，其他增益/衰减值也可参考本示例评定不确定度。

C.2 测量模型

根据相控阵超声探伤仪的特征和验证，其测量模型为：

$$\Delta S = S_1 - S_2 \quad (\text{C.1})$$

式中：

ΔS —衰减器误差，dB；

S_1 ——相控阵超声探伤仪增益值，dB；

S_2 ——标准衰减器衰减值，dB。

C.3 测量结果不确定度主要来源分析

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）被校相控阵超声探伤仪分辨力引入的不确定度 u_2 ；
- （2）标准器最大允许误差引入的不确定度 u_3 。

C.4 测量不确定度的评定

C.4.1 测量重复性引入的不确定度 u_1

调整信号发生器产生的参考信号，使相控阵超声探伤仪波幅高度为 20%全屏高度。对衰减器与相控阵超声探伤仪增益进行对比，以 20dB 值作为调节量，重复调节相控阵超声探伤仪的增益值和外部标准衰减器衰减值 10 次，对比波幅幅度，使得波幅幅度保持一致，用相控阵超声探伤仪设置增益标称值减去外部标准衰减器的衰减值，见表 C.2。

表C.2 衰减器误差重复性测量数据

衰减器误差（dB）					
测量次数	1	2	3	4	5
测量值	0.1	0.1	0	0.1	0.1
测量次数	6	7	8	9	10
测量值	0	0	0.1	0.1	0

根据贝塞尔公式，求得标准偏差：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 0.05\text{dB}$$

因实际测量取单次测量为测量结果，则

$$u_1 = s = 0.05\text{dB}$$

C.4.2 被校相控阵超声探伤仪分辨力引入的不确定度 u_2

标准衰减器衰减值的变化引起被校相控阵超声探伤仪波幅变化，由于标准衰减器最小分度值为 0.1dB，则被校相控阵超声探伤仪分辨力为 0.1dB，得到半宽区间 $a=0.05\text{dB}$ 。假设服从均匀分布，取 $k=\sqrt{3}$ ，则

$$u_2 = \frac{a}{k} = \frac{0.05\text{dB}}{\sqrt{3}} = 0.029\text{dB}$$

C.4.3 衰减器最大允许误差引入的不确定度 u_3

衰减器最大允许误差为 $\pm(1\%A+0.05)\text{dB}$ ，A 为衰减量 20dB，得到衰减器最大允许误

差为 $\pm 0.25\text{dB}$ ，则区间半宽 $a=0.25\text{dB}$ 。假设服从均匀分布，取 $k = \sqrt{3}$ ，则

$$u_3 = \frac{a}{k} = \frac{0.25\text{dB}}{\sqrt{3}} = 0.14\text{dB}$$

C.5 合成标准不确定度

由于各分量彼此独立互不相关，重复性引入的不确定度与分辨力引入的不确定度取较大值，因此合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_3^2} = \sqrt{0.05^2 + 0.14^2} = 0.02\text{dB}$$

C.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则其扩展不确定度为：

$$U = k \cdot u_c = 2 \times 0.02 = 0.04\text{dB}$$
