

JJF (鄂) XX—XX

# 相控阵超声探伤仪换能器校准规范

Calibration Specification for Ultrasonic Phased Array Flaw

Detector Transducers

(征求意见稿)

20XX - XX - XX 发布

20XX - XX - XX 实施

发 布



# 相控阵超声探伤仪换能器 校准规范

Calibration Specification for Ultrasonic  
Phased Array Flaw Detector Transducers

JJF(鄂)XX—20XX

归口单位：湖北省市场监督管理局

主要起草单位：湖北省计量测试技术研究院

参加起草单位：武汉中科创新科技股份有限公司

本规范委托湖北省计量测试技术研究院负责解释

**本规范主要起草人：**

×××（湖北省计量测试技术研究院）

×××（湖北省计量测试技术研究院）

**参加起草人：**

×××（武汉中科创新科技股份有限公司）

# 目 录

引 言 .....	( II )
1 范围 .....	( 1 )
2 引用文件 .....	( 1 )
3 术语 .....	( 1 )
3.1 换能器 .....	( 1 )
3.2 阵元 .....	( 1 )
3.3 串扰 .....	( 1 )
3.4 相对脉冲回波灵敏度偏差 .....	( 2 )
4 概述 .....	( 2 )
5 计量特性 .....	( 2 )
5.1 中心频率和相对带宽 .....	( 2 )
5.2 脉冲持续时间 .....	( 2 )
5.3 相对脉冲回波灵敏度偏差 .....	( 2 )
5.4 串扰 .....	( 2 )
5.5 不合格阵元数量 .....	( 3 )
6 校准条件 .....	( 3 )
6.1 环境条件 .....	( 3 )
6.2 校准用仪器设备及其它设备 .....	( 3 )
7 校准项目和校准方法 .....	( 3 )
7.1 校准项目 .....	( 4 )
7.2 校准前准备 .....	( 4 )
7.3 校准方法 .....	( 4 )
8 校准结果表达 .....	( 6 )
8.1 校准数据处理 .....	( 6 )
8.2 校准记录 .....	( 6 )
8.3 校准证书 .....	( 7 )
8.4 校准结果的测量不确定度 .....	( 7 )
9 复校时间间隔 .....	( 7 )
附录 A 校准记录参考格式 .....	( 8 )
附录 B 校准证书内页参考格式 .....	( 10 )
附录 C 相控阵超声探伤仪换能器频率测量不确定度评定示例 .....	( 11 )

## 引 言

JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001—2011《通用计量术语及定义》、JJF 1034—2020《声学计量术语及定义》、JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》等共同构成支撑校准规范制定工作的基础性系列规范。

本规范参照了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》中描述的测量方法。

本规范为首次发布。

# 相控阵超声探伤仪换能器校准规范

## 1 范围

本规范规定了相控阵超声探伤仪换能器（以下简称相控阵探头）的计量特性、校准条件和校准方法。

本规范适用于频率范围（0.5~15）MHz 的接触法线性非矩阵及二维矩阵相控阵探头的校准，其他类似的仪器也可参照本规范进行校准。

## 2 引用文件

本规范引用下列文件：

GB/T 12604.1—2020 无损检测 术语 超声检测

GB/T 42399.2—2023 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（ISO 18563-2:2017, Non-destructive testing—Characterization and verification of ultrasonic phased array equipment—Part 2: Probes, IDT）

JB/T 11731—2013 无损检测 超声相控阵探头通用技术条件

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

## 3 术语

### 3.1 换能器 transducer

探头中实现电能转换成超声能并逆向转换功能的元件。

[GB/T 12604.1—2020, 4.1.1]

### 3.2 阵元 element

换能器分割成多个相互独立晶片，由单个或多个晶片所组成的具有独立收发功能的晶元组合称为一个阵元。

[JB/T 11731—2013, 3.3]

### 3.3 串扰 cross talk

相邻的 2 个阵元之间的信号相互耦合，是一个阵元振动引起相邻阵元受迫振动而

产生的耦合信号和电缆信号线之间的互感和互容引起线上的噪声信号的总和。

[JB/T 11731—2013, 3.1]

### 3.4 相对脉冲回波灵敏度偏差 deviation of relative pulse-echo sensitivity

单个阵元的回波灵敏度相对于所有阵元平均灵敏度的偏离程度,即每个阵元发射回波电压幅度与阵元回波电压幅度平均值之间的差值,用式(1)计算。

$$S_{el} = 20 \lg \frac{V_{el}}{\bar{V}} \quad (1)$$

式中:

$S_{el}$ ——相对脉冲回波灵敏度偏差, dB;

$V_{el}$ ——单个阵元反射回波电压幅度, mV;

$\bar{V}$ ——阵元回波电压幅度平均值, mV。

## 4 概述

相控阵探头一般是由若干压电阵元组成的阵列,按阵列类别,相控阵探头可分为线阵探头、环阵探头、部分环扇阵探头、二维矩阵探头;按探头类别,可分为集成楔块接触式探头、非集成楔块接触式探头、液浸式探头。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于航空航天、电力行业、石油化工、压力容器、特种设备行业等各领域。

## 5 计量特性

### 5.1 中心频率和相对带宽

中心频率相对标称值的偏差不超过 $\pm 10\%$ 。

相对带宽相对标称值的偏差不超过 $\pm 15\%$ 。

### 5.2 脉冲持续时间

相对标称值的偏差不超过 $\pm 10\%$ 。

### 5.3 相对脉冲回波灵敏度偏差

不大于 $\pm 4$  dB。

### 5.4 串扰



不小于 25 dB。

## 5.5 不合格阵元数量

线性非矩阵探头：0；

二维矩阵探头：阵元 $\leq 64$ ，0；

阵元 $> 64$ ，不大于 2%。

注：以上指标不用于合格判定，仅供参考。

## 6 校准条件

### 6.1 环境条件

a) 温度：18℃~28℃；

b) 相对湿度：30%~90%。

### 6.2 校准用仪器设备及其它设备

#### 6.2.1 脉冲发射器/接收器

频率范围覆盖（0.1~20）MHz，上升时间不大于 10 ns，负向脉冲不小于 100 V。

#### 6.2.2 信号发生器

频率范围覆盖（0.1~20）MHz，频率 MPE： $\pm 0.1\%$ ，幅值 MPE： $\pm 1.0\%$ 。

#### 6.2.3 数字示波器

至少有两个通道，具备离散傅里叶变换功能，带宽不低于 100 MHz，频率 MPE： $\pm 0.1\%$ ，幅值 MPE： $\pm 3.0\%$ 。

#### 6.2.4 半圆柱形试块

钢材质，试块直径大于相控阵探头长度 20 mm 以上，试块长度大于相控阵探头宽度 20 mm 以上，试块厚度大于或等于其半径。

#### 6.2.5 平面试块

钢材质，试块厚度范围（10~200）mm，试块长度大于相控阵探头长度 20 mm 以上，试块宽度大于相控阵探头宽度 20 mm 以上。

#### 6.2.6 探头转接器

与相控阵探头连接，可将相控阵探头阵元转接成单个独立通道，可与脉冲发生器/接收器、信号发生器、数字示波器相连。

## 7 校准项目和校准方法

## 7.1 校准项目

相控阵探头校准项目见表 1。

表 1 校准项目一览表

序号	项目名称	技术要求条款号	校准方法的条款号
1	中心频率和相对带宽	5.1	7.3.1
2	脉冲持续时间	5.2	7.3.2
3	相对脉冲回波灵敏度偏差	5.3	7.3.3
4	串扰	5.4	7.3.4
5	不合格阵元数量	5.5	7.3.5

## 7.2 校准前准备

a) 外观检查：相控阵探头外侧有无正确标识和装配，有无可能影响其当前和以后可靠性的物理损伤。

b) 脉冲发射器/接收器、信号发生器、数字示波器预热 10 分钟。

c) 连接相控阵探头与探头转接器。

d) 若相控阵探头楔块是非集成楔块，校准前需拆卸楔块；若相控阵探头内集成楔块，校准时需标注楔块角度。

## 7.3 校准方法

### 7.3.1 中心频率和相对带宽

按图 1 所示连接被测相控阵探头与校准用设备，设置脉冲发射器/接收器频率，发射电压，阻抗等参数。将相控阵探头置于试块中心，在接触面涂覆适当耦合剂，施加一定压力确保相控阵探头与试块耦合良好。在数字示波器上找到首次回波，移动探头位置，使回波信号幅度最大，用数字示波器离散傅里叶功能测出首次回波频谱。从频谱幅度最高处下降 6 dB 确定上限频率  $f_u$  和下限频率  $f_l$ ，按式 (2) 计算中心频率，按式 (3) 计算相对带宽。

无楔块相控阵探头校准时，试块选用平面试块，带楔块相控阵探头校准时，试块选用半圆柱试块。

依次测量每个阵元的中心频率和相对带宽。

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

$$\Delta f_{\text{rel}} = \frac{f_u - f_l}{f_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中：

$f_0$ ——中心频率，MHz；

$\Delta f_{\text{rel}}$ ——相对带宽，%；

$f_u$ ——上限频率，MHz；

$f_l$ ——下限频率，MHz。

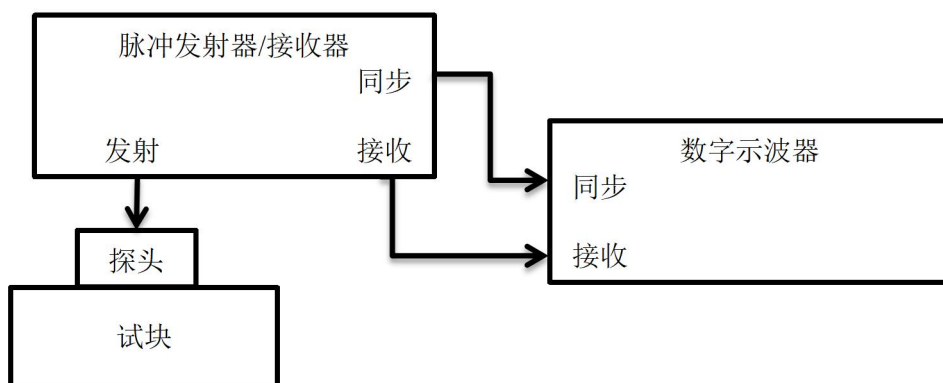


图1 测试设备连接示意图

### 7.3.2 脉冲持续时间

按 7.3.1 中方法测得的首次回波，用数字示波器测量回波幅度下降 20 dB（即峰值 10%）高度位置的时间差即为脉冲持续时间。

依次测量每个阵元的脉冲持续时间。

### 7.3.3 相对脉冲回波灵敏度偏差

按 7.3.1 中方法测得的首次回波，用数字示波器测量峰-峰值，按式（1）计算相对脉冲回波灵敏度偏差。

依次测量每个阵元的相对脉冲回波灵敏度偏差。

### 7.3.4 串扰

按图 2 所示连接被测相控阵探头与校准用设备，信号发生器输出频率设置为相控阵探头中心频率，采用连续正弦波工作模式。信号发生器输出端接相控阵探头某一阵元，示波器测量此阵元带载条件下激励信号电压、以及相邻阵元的串扰电压。测试时，相控阵探头需接触试块。

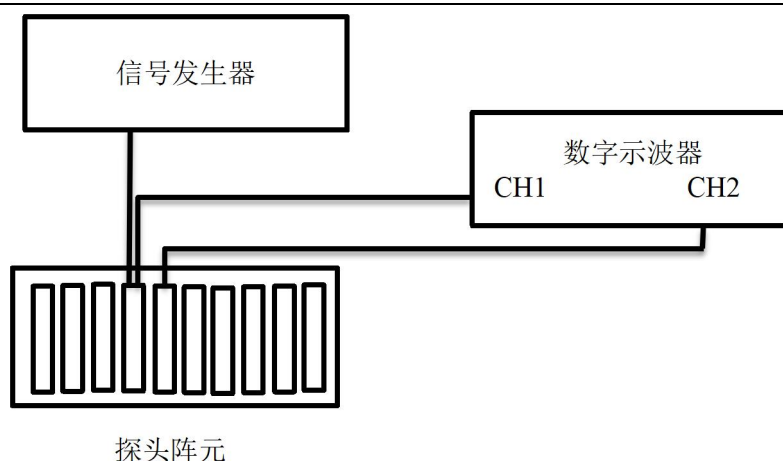


图2 测试设备连接示意图

按式（4）计算相对带宽。

$$C = 20 \lg \frac{V_1}{V_2} \quad (4)$$

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。

取头尾2组阵元，中间均匀取多组阵元，总校准阵元数不低于总阵元数量的25%，最少校准4组阵元。

### 7.3.5 不合格阵元数量

按7.3.3中方法测得的每个阵元反射回波峰-峰值。

以下阵元判定为不合格阵元：

- 1) 未有反射回波；
- 2) 相对脉冲回波灵敏度偏差小于等于-10 dB。

## 8 校准结果表达

### 8.1 校准数据处理

所有的数据应先计算，后修约。频率测量值修约至0.01 MHz，相对带宽修约至0.1%，脉冲持续时间修约至1 ns，相对脉冲回波灵敏度偏差、串扰修约至0.1 dB。

### 8.2 校准记录

校准记录应尽可能详尽记载测量数据和计算结果，推荐的校准记录格式见附录 A。

### 8.3 校准证书

相控阵探头经校准后应出具校准证书。校准证书应至少包括以下信息：

- a) 标题，如“校准证书”；
- b) 校准实验室的名称和地址；
- c) 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
- d) 证书的唯一性标识（如编号）、每页及总页数的标识；
- e) 客户的名称和地址；
- f) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 进行校准的日期；
- h) 如果与校准结果的有效应用有关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；
- i) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- k) 环境条件的描述；
- l) 校准结果及其测量不确定度的说明；
- m) 对校准规范的偏离的说明；
- n) 校准证书或校准报告签发人的签名或等效标识；
- 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，不得部分复制证书的声明。

推荐的校准证书的内页格式参见附录 B。

### 8.4 校准结果的测量不确定度

相控阵探头校准结果的测量不确定度按 JJF 1059.1-2012 的要求评定，不确定度评定示例见附录 C。

## 9 复校时间间隔

相控阵探头的复校时间间隔一般建议为一年。由于复校时间间隔的长短取决于仪器的使用保养情况、使用者、仪器本身质量等诸多因素，因此，送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。

## 附录 A

## 校准记录参考格式

记录编号：\_\_\_\_\_

委 托 方		标 准 器 名 称	
		型 号	
器 具 名 称		编 号	
制 造 厂 商		测 量 范 围	
型 号		不 确 定 度 / 准 确 度 等 级 / 最 大 允 许 误 差	
器 具 编 号		证 书 号	
技 术 依 据		溯 源 机 构	
环 境 条 件	温度： 相对湿度：	°C %	有 效 期
地 点		标 准 器 状 况	

## 1 外观检查：

## 2 中心频率和相对带宽：

阵元						
下限频率 (MHz)						
上限频率 (MHz)						
中心频率 (MHz)						
相对带宽 (%)						
扩展不确定度 ( $k=2$ )						

## 3 脉冲持续时间：

阵元						
脉冲持续时间 (ns)						
扩展不确定度 ( $k=2$ )						

## 4 相对脉冲回波灵敏度偏差:

阵元						
幅度测量值 (mV)						
偏差 (dB)						
扩展不确定度 ( $k=2$ )						

## 5 串扰:

阵元	激励电压(mV)	串扰电压(mV)	串扰 (dB)	扩展不确定度 ( $k=2$ )

## 6 不合格阵元数量:

校准员		核验员		校 准 日 期	年    月    日
-----	--	-----	--	---------	-------------

## 附录 B

## 校准证书内页参考格式

## 校准结果

## 1 中心频率和相对带宽：

阵元						
中心频率 (MHz)						
相对带宽 (%)						
扩展不确定度 ( $k=2$ )						

## 2 脉冲持续时间：

阵元						
脉冲持续时间 (ns)						
扩展不确定度 ( $k=2$ )						

## 3 相对脉冲回波灵敏度偏差：

阵元						
相对脉冲回波灵敏度偏差 (dB)						
扩展不确定度 ( $k=2$ )						

## 4 串扰：

阵元						
串扰 (dB)						
扩展不确定度 ( $k=2$ )						

## 5 不合格阵元数量：

以下空白

共 页 第 页



## 附录 C

## 相控阵超声探伤仪换能器频率测量不确定度评定示例

## C.1 测量原理

C.1.1 测量标准器：脉冲发射器/接收器、数字示波器。

C.1.2 测量对象：相控阵超声探伤仪换能器。

## C.1.3 测量方法

按图 1 所示连接被测相控阵探头与校准用设备，设置脉冲发射器/接收器频率，发射电压，阻抗等参数。将相控阵探头置于试块中心，在接触面涂覆适当耦合剂，施加一定压力确保相控阵探头与试块耦合良好。在数字示波器上找到首次回波，移动探头使回波幅度最大，用数字示波器离散傅里叶功能测出首次回波频谱。从频谱幅度最高处下降 6 dB 确定上限频率  $f_u$  和下限频率  $f_l$ 。

## C.2 测量模型

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

式中：

$f_0$ ——中心频率，MHz；

$f_u$ ——上限频率，MHz；

$f_l$ ——下限频率，MHz。

合成方差和灵敏系数：

$$u^2(f_0) = c_1^2 u^2(f_u) + c_2^2 u^2(f_l) \quad (\text{C.2})$$

$$\text{式中： } c_1 = \frac{\partial f_0}{\partial f_u} = \frac{1}{2}, \quad c_2 = \frac{\partial f_0}{\partial f_l} = \frac{1}{2}。$$

## C.3 输入量标准不确定的评定和不确定度分量

不确定度来源主要有以下几个方面：

- 1) 重复测量引入的标准不确定度  $u_1$ ；
- 2) 脉冲发射器/接收器引入的标准不确定度  $u_2$ ；
- 3) 数字示波器引入的标准不确定度  $u_3$ ；

4) 离散傅里叶变换引入的标准不确定度  $u_4$ 。

### C.3.1 重复测量引入的标准不确定度

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 C.1。

表 C.1 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									

### C.3.2 脉冲发射器/接收器引入的标准不确定度

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：

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

### C.3.3 数字示波器引入的标准不确定度

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

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

### C.3.4 离散傅里叶变换引入的标准不确定度

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：

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

## C.4 不确定分量汇总表

频率测量不确定度分量汇总表见表 C.2。

表 C.2 不确定度分量汇总表

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

## C.5 合成标准不确定度

表 C.2 中各分量独立且相互无关，则：

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

## C.6 扩展不确定度

取包含因子  $k=2$ ，则  $U_{\text{rel}} = 2 \times u(f_0) = 3.0\%$



JJF (鄂) XX—20XX