

**JJF**(有色金属) XXXX─XXXX

××××-××-××发布 ××××-××-××实施

发 布

中华人民共和国工业和信息化部

相控阵超声换能器校准规范

Calibration Specification for Phased Array Probes

（讨论稿）



**JJF（有色金属）XXXX—XXXX**

相控阵超声换能器校准规范

Calibration Specification for Phased Array Probes

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

参加起草单位：

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：**

**参加起草人：**

**目 录**

[1 范围 1](#_Toc196479760)

[2 引用文件 1](#_Toc196479761)

[3 概述 1](#_Toc196479762)

[4计量特性 1](#_Toc196479763)

[4.1相对脉冲回波灵敏度偏差 1](#_Toc196479764)

[4.2频率、相对带宽和脉冲持续时间 1](#_Toc196479765)

[4.3换能器灵敏度 1](#_Toc196479766)

[4.4阵元间串扰 1](#_Toc196479767)

[5 校准条件 1](#_Toc196479768)

[5.1 环境条件 1](#_Toc196479769)

[5.2 测量标准及其他设备 2](#_Toc196479770)

[6 校准项目和校准方法 2](#_Toc196479771)

[6.1 校准项目 2](#_Toc196479772)

[6.2 校准方法 2](#_Toc196479773)

[7 校准结果表达 4](#_Toc196479779)

[8 复校时间间隔 4](#_Toc196479780)

[附录A 5](#_Toc196479781)

[附录B 6](#_Toc196479782)

[附录C 7](#_Toc196479784)

引 言

本规范是以JJF 1071-2010 《国家计量校准规范编写规则》编制。

本规范是以JJF 1059.1-2012 《测量不确定度评定与表示》、ISO 18563-2 《Non-Destructive testing ——Characterization and verification of ultrasonic phased array equipment》、为基础，共同构成支撑对该校准规范的制定工作。

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范围在0.5MHz~15MHz的金属材料无损检测用相控阵换能器校准。

# 2 引用文件

本规范引用了下列文件：

ISO 18563 《Non-destructive testing — Characterization and verification of ultrasonic phased array equipment》

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

# 3 概述

无损检测用相控阵换能器广泛应用于超声无损检测等领域，相控阵换能器由若干压电阵元组成的阵列，通过相控阵超声探伤仪的主机独立控制换能器中的各个阵元，实现换能器声束的相控发射与接收，在介质指定空间区域内实现超声波的偏转和聚焦。常用换能器分为直换能器与斜换能器，此外还有与换能器配套使用的各种楔块等。

# 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与标称值的偏差一般不超过±5dB。

## 4.2频率、相对带宽和脉冲持续时间

中心频率与标称值的偏差一般不超过±10%；

相对带宽与标称值的偏差一般不超过±15%；

脉冲持续时间与标称值的偏差一般不超过±15%。

## 4.3换能器灵敏度

换能器灵敏度与标称值的偏差一般不超过±5dB。

## 4.4阵元间串扰

阵元间串扰应≥25dB。

注：若相控阵换能器出厂时未提供出厂测试报告或上述参数标称值，则将首次校准值作为标称值。

# 5 校准条件

## 5.1 环境条件

室温：（18~28）℃；

水温：（15~33）℃。

## 5.2 测量标准及其他设备

表1测量标准及其他设备

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 序号 | 仪器设备名称 | 技术要求 |
| 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 | 数字示波器 | 工作频率上限不低于100MHz，采样频率应高于200MHz；至少应有两个通道，具备时间延迟测量（时间分辨力优于0.1μs）、幅值测量功能和快速傅里叶变换（FFT）功能。 |
| 3 | 标准试块 | 纵波声速为（5920±50）m/s和横波声速为（3255±30）m/s的钢试块。 |
| 4 | 水听器 | 水听器组带宽应至少覆盖（0.5~15）MHz,水听器有效直径一般应小于介质中工作频率所对应波长的2倍。 |
| 5 | 水槽及多自由度调节机构 | 夹持机构应能够将相控阵换能器固定并调整姿态。 |

# 6 校准项目和校准方法

## 6.1 校准项目

校准项目见表2

表2相控阵换能器超声换能器校准项目一览表

|  |  |
| --- | --- |
| 序号 | 项目名称 |
| 1 | 相对脉冲回波灵敏度偏差 |
| 2 | 频率、相对带宽和脉冲持续时间 |
| 3 | 换能器灵敏度 |
| 4 | 阵元间串扰 |

## 6.2 校准方法

## 6.2.1校准前检查

观察相控阵换能器的外观，应符合以下要求：

1. 待校准相控阵换能器应无明显的损坏，尤其换能器前端的匹配层应完好；
2. 水浸使用的相控阵换能器，水浸部分应密封完好。

## 6.2.2相对脉冲回波灵敏度偏差

在进行相对脉冲回波灵敏度偏差校准时，需要对换能器中的每一个阵元进行校准。

通过分线板卡连接相控阵换能器、脉冲发生/接收仪和数字示波器，设置发射脉冲时间等于1/2标称换能器频率周期的负方波，也可以是负尖脉冲。将相控阵换能器与试块接触并调整至耦合良好。用示波器测出每个阵元反射回波的电压幅值*V*el，并计算和记录每个*V*el的算数平均值*V*av。

每个阵元的相对脉冲回波灵敏度偏差*S*el，可以使用公式（1）进行计算：

$S\_{el}=20lg\frac{V\_{el}}{V\_{av}}$ （1）

## 6.2.3频率、带宽和脉冲持续时间

在进行频率、相对带宽、脉冲持续时间校准时，需要对换能器中的每一个阵元进行校准。接触式相控阵换能器连接方式与仪器设置同7.2.2，水浸式相控阵换能器需要将换能器浸入水中后通过水听器配合水箱及自由调节装置连接，仪器设置同7.2.2。

频率校准时，应从频谱幅度最高出下降6dB时确定频率点，从获得的上限频率*f*u和下限频率*f*l通过公式（2）获得中心频率：

$f\_{0}=\frac{f\_{u}+f\_{l}}{2}$ （2）

相对带宽Δ*f*ref的计算见公式（3）：

$∆f\_{ref}=(\frac{f\_{u}-f\_{l}}{f\_{0}})×1$00% （3）

## 6.2.4换能器灵敏度

在进行换能器灵敏度校准时，连接方式与仪器设置同7.2.2。

任意取相控阵换能器上的一个阵元（一般为第一个阵元或最后一个阵元），使用数字示波器测量其激励信号幅度*V*ref。在相同的激励方式下，依次测量并记录每个阵元的反射回波电压幅值*V*el，计算所有阵元的反射回波电压幅值的算术平均值*V*av。换能器灵敏度*S*pt按公式（4）进行计算：

$S\_{el}=20lg\frac{V\_{av}}{V\_{ref}}$ （4）

## 6.2.5阵元间串扰

阵元数在64个及以内的，需要选择两个位置进行阵元间串扰校准；阵元数超过64个的，需要选择4个位置进行阵元间串扰校准。连接方式同7.2.2，激励信号设置为至少6个周期且频率与换能器标称频率相同的正弦脉冲串。将示波器连接一个相邻阵元进行串扰校准，阵元间串扰CT可以按照公式（5）进行计算：

$CT=20lg\frac{V\_{exc}}{V\_{rec}}$ （5）

式中：

*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

经校准后出具校准证书，校准证书由封面和校准数据内页组成，封面由校准机构确定统一格式，校准数据按照附件B要求，并可根据检漏仪的情况进行填写。校准证书应至少包括以下信息：

a) 标题：校准证书；

b) 实验室名称和地址；

c) 进行校准的地点（如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，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；

h) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；

i) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；

j) 校准环境的描述；

k) 校准结果及测量不确定度的说明；

l) 对校准规范的偏离的说明；

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) 校准结果仅对被校对象有效的声明；

o) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。

# 8 复校时间间隔

建议检漏仪校准时间间隔为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

1. 外观检查：□符合要求 □不符合要求
2. 相对脉冲回波灵敏度偏差/dB，*U*= %（*k*=2）。

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 阵元 | 1 | 2 | 3 | … | n |
| 相对脉冲回波灵敏度偏差 |  |  |  |  |  |

1. 中心频率/MHz，带宽/MHz，脉冲持续时间/μs，*U*= %（*k*=2）。

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 阵元 | 1 | 2 | 3 | … | n |
| 中心频率 |  |  |  |  |  |
| 带宽 |  |  |  |  |  |
| 脉冲持续时间 |  |  |  |  |  |

1. 换能器灵敏度/dB，*U*= %（*k*=2）。

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 阵元 | 1 | 2 | 3 | … | n |
| 换能器灵敏度 |  |  |  |  |  |

1. 阵元间串扰 dB，*U*= %（*k*=2）。

附录B

校准证书内页参考格式

一、外观检查：□符合要求 □不符合要求

二、相对脉冲回波灵敏度偏差/dB，*U*= %（*k*=2）。

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 阵元 | 1 | 2 | 3 | … | n |
| 相对脉冲回波灵敏度偏差 |  |  |  |  |  |

三、中心频率/MHz，带宽/MHz，脉冲持续时间/μs，*U*= %（*k*=2）。

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 阵元 | 1 | 2 | 3 | … | n |
| 中心频率 |  |  |  |  |  |
| 带宽 |  |  |  |  |  |
| 脉冲持续时间 |  |  |  |  |  |

四、换能器灵敏度/dB，*U*= %（*k*=2）。

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 阵元 | 1 | 2 | 3 | … | n |
| 换能器灵敏度 |  |  |  |  |  |

五、阵元间串扰 dB，*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

本附录以中心频率为示例，对其进行测量不确定度评定。其他校准项目可参照本附录作类似评定。

C.1.1测量依据

本规范。

C.1.2测量标准

表C.1 测量标准及技术指标

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 序号 | 测量标准及其他设备 | 技术指标 |
| 1 | 脉冲发生器/接收器 | 超声波接收发射仪应具备频带宽度为0.5MHz~35MHz，激励电压为50V~350V，激励方式为方波、尖波 |
| 2 | 水听器 | 0.5mm≤直径＜2λ，λ为在水介质中声速波长 |
| 3 | 水箱及自由调节装置 | 水箱应满足声场扫描范围的要求，声场长度方向，水箱尺寸应大于被校相控阵换能器的3倍近场区 |

C.1.3被校对象

选用标称中心频率为5MHz的相控阵换能器。

C.1.4校准测量方法

通过扫描机构带动水听器，对相控阵换能器辐射的垂直于声轴方向的电信号进行采集，得到电信号分布数据。通过程序计算找到最大信号幅值点，在最大信号幅值点处采集频率信号，通过程序读得中心频率值。

C.2测量模型

中心频率的测量误差模型见公式C.1：

 *F*=$F\_{1}-F\_{2}$ （C.1）

式中：

$F$1$ $——换能器对应标称值，MHz；

$F$2——标准对应值，MHz 。

C.3 输入量标准不确定度评定

无损检测仪器相控阵换能器中心频率测量结果不确定度的主要来源有：

（1）测量重复性引入的相对不确定度$u\_{1}$；

（2）水听器指向性引入的相对不确定度$u\_{2}$；

（3）拟合算法引入的相对不确定度$u\_{3}$。

C.3.1测量重复性引入的标准不确定度分量$u\_{1}$

对相控阵仪器换能器频率为测量对象，进行10次时域采集，用相控阵换能器频率标称值减去标准值，得到如下数据(MHz)：0.12，0.13，0.10，0.21，0.11，0.22，0.11，0.21，0.12，0.13。

则单次测量引入的标准不确定度为0.047MHz，相对不确定度为 *u*1=0.94%。

C.3.2水听器指向性引入的分量

扫描过程中，被测相控阵换能器和水听器法线并不始终重合，应考虑指向性引入的不确定度分量。由IEC 62127-3 中水听器的指向性图可以得到，即便不做指向性修正，因角度偏转造成的电信号损失不超过10.0%；如果数据处理中考虑指向性修正，则修正后指向性引人的不确定度一般不超过3.0%，则相对标准不确定度：

$u\_{2}$=3.0%/$\sqrt{3}$=1.73%

C.3.3拟合算法引入的分量

实际测量时，因相控阵换能器非理想垂直或水平夹持，以及测量过程中噪声和振动的干扰，频率计算需要利用最小二乘法等算法拟合得到。经实验验证，拟合算法引入的最大相对不确定度一般不超过3.0%，假设满足矩形分布，引入的相对标准不确定度：

$u\_{3}$=3.0%/$\sqrt{3}$=1.73%

C.4合成标准不确定度

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 序号 | 不确定度来源 | 相对标准不确定度/% |
| 1 | 重复性 | 0.94 |
| 2 | 水听器指向性 | 1.73 |
| 3 | 拟合算法 | 1.73 |
| 合成标准不确定度 | 2.63 |

影响频率的各输入量相互独立，不确定度来源及相对合成标准不确定度如表C.1所示。表C.1 测量不确定度汇总表

C.6 扩展不确定度

取包含因子*k*=2，其扩展不确定度为：

$$U\_{rel}=2×2.63\%=5.26\%$$

扩展不确定度取$U\_{rel}=5.3\%$。