



中华人民共和国工业和信息化部

电子计量技术规范

JJF(电子)0103—2023

## 相控阵超声点焊分析仪校准规范

Calibration Specification for Phased-array Ultrasonic Spot Welding Analyzers

(报批稿)

2023-××-××发布

2023-××-××实施

中华人民共和国工业和信息化部发布

# 相控阵超声点焊分析仪 校准规范

Calibration Specification for Phased-array

Ultrasonic Spot Welding Analyzers

JJF(电子) 0103—2023

归口单位：中国电子技术标准化研究院

主要起草单位：广电计量检测集团股份有限公司

参加起草单位：广州多浦乐电子科技股份有限公司

本规范技术条文委托起草单位负责解释

**本规范主要起草人：**

赵莹（广电计量检测集团股份有限公司）

乔仁晓（广电计量检测集团股份有限公司）

袁仍（广电计量检测集团股份有限公司）

汤亚泥（广电计量检测集团股份有限公司）

**参加起草人：**

邓晓慧（广电计量检测集团股份有限公司）

伍水生（广电计量检测集团股份有限公司）

李明浩（广电计量检测集团股份有限公司）

邓宇（广州多浦乐电子科技股份有限公司）

目录

引言 ..... II

1 范围 ..... 1

2 引用文件 ..... 1

3 术语和计量单位 ..... 1

4 概述 ..... 2

5 计量特性 ..... 2

5.1 焊核直径 ..... 2

5.2 焊核厚度 ..... 2

5.3 中心频率和相对带宽 ..... 2

5.4 脉冲响应波形和持续时间 ..... 2

5.5 串扰 ..... 2

6 校准条件 ..... 3

6.1 环境条件 ..... 3

6.2 测量标准及其它设备 ..... 3

7 校准项目和校准方法 ..... 4

7.1 外观及工作正常性检查 ..... 4

7.2 焊核直径 ..... 4

7.3 焊核厚度 ..... 5

7.4 中心频率和相对带宽 ..... 6

7.5 脉冲响应波形和持续时间 ..... 7

7.6 串扰 ..... 8

8 校准结果表达 ..... 8

9 复校时间间隔 ..... 9

附录 A 原始记录格式 ..... 9

附录 B 校准证书内页格式 ..... 11

附录 C 测量不确定度评定示例 ..... 13

# 引言

本规范依据 JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》和 JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》编写。

本规范为首次发布。

# 相控阵超声点焊分析仪校准规范

## 1 范围

本规范适用于相控阵超声点焊分析仪的校准。

## 2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1294-2011 超声探伤仪换能器校准规范

GB/T 12604.1-2020 无损检测术语超声检测

JB/T 11731-2013 无损检测超声相控阵探头通用技术条件

ASTM E1065/E1065M-2014 评估超声波探测装置特性的标准指南(Standard Guide for Evaluating Characteristics of Ultrasonic Search Units)

ASTM E2904-2017 相控阵探头的特性及验证(Standard Practice for Characterization and Verification of Phased Array Probes)

注：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 术语和计量单位

### 3.1 相控阵探头 phased array probe

由若干个换能器阵元组成的探头，这些换能器阵元能各自以不同的幅度或相位工作，从而构成不同的声束偏转角与焦距。

[GB/T 12604.1-2020, 6.20]

### 3.2 中心频率 center frequency

幅度比峰值频率的幅度低3dB（穿透检测）或6dB（脉冲回波检测）时所对应的频率的算术平均值。

[GB/T 12604.1-2020, 6.2]

### 3.3 波形持续时间 waveform duration

从规定发射体反射的未经校正的信号或回波中，超过峰值幅度一定水平（如-20dB或-40dB）的信号或回波的持续时间。单位： $\mu\text{s}$ 。

[ASTM E1065/E1065M-2014, 3.2.15]

### 3.4 串扰 cross talk

相邻的两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]

## 4 概述

相控阵超声点焊分析仪（以下简称“点焊分析仪”）一般由主机和相控阵探头两部分组成，工作原理为采用超声相控阵检测技术，使用相控阵探头产生和接收超声波束，通过控制相控阵探头中各阵元发射（或接收）脉冲的不同延迟时间，改变声波到达（或来自）物体内部某点的相位关系，实现焦点和声束方向的变化，从而实现超声波的波束扫描、偏转和聚焦，再采用电子扫描的方法来实现图像成像，从焊点的内部结构及表面获取数据，并实时计算出焊点区域的焊核直径和焊核厚度，从而评估焊点的质量，是一种便携式工业无损检测仪器，广泛应用于汽车制造行业以及电子行业。

## 5 计量特性

### 5.1 焊核直径

测量范围：2.0mm~8.5mm，最大允许误差： $\pm 0.5\text{mm}$ 。

### 5.2 焊核厚度

测量范围：1.0mm~9.0mm，最大允许误差： $\pm 0.1\text{mm}$ 。

### 5.3 中心频率和相对带宽

中心频率：0.5MHz~15MHz，最大允许误差： $\pm 10\%$ ；

相对带宽：10%~150%，最大允许误差： $\pm 15\%$ ，对于宽带窄脉冲探头，相对带宽应 $\geq 60\%$ 。

### 5.4 脉冲响应波形和持续时间

持续时间：0.01 $\mu\text{s}$ ~10 $\mu\text{s}$ ，最大允许误差： $\pm 15\%$ ，对于宽带窄脉冲探头，脉冲持续时间应不超过两个周期。

### 5.5 串扰

测量范围：-120dB~0dB，最大允许值： $\leq -30\text{dB}$ 。

注：以上范围及指标不适用于合格性判定，仅供参考。

## 6 校准条件

### 6.1 环境条件

6.1.1 环境温度：(23±5)℃。

6.1.2 环境相对湿度：≤80%。

6.1.3 其他：周围无影响仪器正常工作的电磁干扰和机械振动。

### 6.2 测量标准及其它设备

#### 6.2.1 脉冲信号发生/接收器

发生器：

脉冲幅值（空载）：≥100V，最大允许误差：±10%；

脉冲上升时间：≤10ns；

脉冲重复频率：100Hz~5kHz，最大允许误差：±10%；

接收器：

接收增益：≥50dB；最大允许误差：(0.5%A±0.02) dB（A为衰减量）；

频率范围：0.1MHz~30MHz。

#### 6.2.2 数字示波器

幅值测量误差：±2%；

频带宽度：≥100MHz；

采样率：≥1GS/s。

#### 6.2.3 示波器探头

直流电压衰减比，100:1，最大允许误差：±2%；

频带宽度：≥100MHz。

#### 6.2.4 函数信号发生器

输出正弦信号幅度：0V<sub>pp</sub>~20V<sub>pp</sub>，最大允许误差：±2.0dB；

输出正弦信号频率：0.1MHz~30MHz，频率偏差：1×10<sup>-5</sup>。

#### 6.2.5 点焊标准试块

点焊标准试块是纵波声速为(5920±50) m/s和横波声速为(3255±30) m/s的钢试块，由不同直径及不同厚度的一系列圆柱凸体组成，试块推荐设凸圆柱体（4~6）个，凸圆柱体直径范围2mm~8.5mm，允许偏差为±0.05mm，凸圆柱体高度范围1mm~9mm，允许偏差为±0.01mm。



6.2.6 回波试块

回波试块采用声速为 $(2330\pm20)$  m/s，声阻抗为 $(2.5\pm0.1)$  Mrayl的聚苯乙烯材料，回波试块的长度应大于探头换能器长度20mm以上，宽度大于探头换能器宽度20mm以上，试块厚度范围5mm~20mm，被测探头标称中心频率为10MHz以下的，建议回波试块的厚度为10mm~20mm，被测探头标称中心频率为15MHz以上的，建议回波试块的厚度为约5mm。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

校准项目见表 1 所示。

表 1 校准项目一览表

序号	校准项目	校准方法条款
1	外观及工作正常性检查	7.2.1
2	焊核直径	7.2.2
3	焊核厚度	7.2.3
4	中心频率和相对带宽*	7.2.4
5	脉冲响应波形和持续时间*	7.2.5
6	串扰*	7.2.6
注：加*号项目为选校项目。		

7.2 校准方法

7.2.1 外观及工作正常性检查

被校相控阵超声点焊分析仪外观应完好，无明显机械损伤和变形；探头与主机连接端口应完好无破损，锁紧装置应能保证连接接口处紧密连接无松动；探头的测量端面应平整。检查结果记录于附录A表A.1中。

7.2.2 焊核直径

焊核直径校准如图 1 所示，将超声耦合剂涂敷于标准试块的校准位置，将相控阵探头置于点焊标准试块的校准位置之上并施加一定的压力，点击“校准”按钮进行自校准；在设置有凸圆柱体的各个测点位置分别测量，读取被校点焊分析仪显示的焊核直径值，各测点位置分别进行 3 次重复测量，每次测量需要重新进行相控阵探头与点焊标准试块的耦合，测得焊核直径的平均值与点焊标准试块凸圆柱体直径的标准值进

行比较, 得到被校点焊分析仪的焊核直径示值误差。

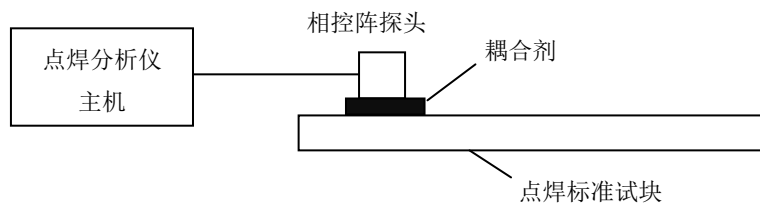


图 1 焊核直径校准示意图

用式 (1) 计算焊核直径的示值误差, 记录于附录 A 表 A.2 中。

$$\delta_D = \bar{d} - d_0 \quad (1)$$

式中:

$\delta_D$ ——焊核直径示值误差, mm;

$\bar{d}$ ——各测点位置 3 次测量的直径的平均值, mm;

$d_0$ ——点焊标准试块凸圆柱体的直径的标准值, mm。

### 7.2.3 焊核厚度

焊核厚度的校准如图 1 所示, 将超声耦合剂涂敷于标准试块的校准位置, 将相控阵探头置于点焊标准试块的校准位置之上并施加一定的压力, 点击“校准”按钮进行自校准; 在设置有凸圆柱体的各个校准位置分别测量, 在被校点焊分析仪 C 扫描显示框图中圆柱体对应的圆形显示区, 任意选中某一阵元, 在被校点焊分析仪 A 扫描显示框图中显示为该阵元的 A 扫描结果, 读取对应的厚度值。各校准位置分别进行 3 次重复测量, 每次测量需要重新进行相控阵探头与点焊标准试块的耦合, 测得焊核厚度的平均值与点焊标准试块凸圆柱体厚度的标准值进行比较得到被校点焊分析仪的焊核厚度示值误差。

用式 (2) 计算焊核厚度的示值误差, 记录于附录 A 表 A.3 中。

$$\delta_T = \bar{t} - t_0 \quad (2)$$

式中:

$\delta_T$ ——焊核厚度示值误差, mm;

$\bar{t}$ ——各测点位置 3 次测量的厚度的平均值, mm;

$t_0$ ——点焊标准试块凸圆柱体的厚度的标准值, mm。

7.2.4 中心频率和相对带宽

相控阵探头中心频率和相对带宽的校准框图如图 2 所示。

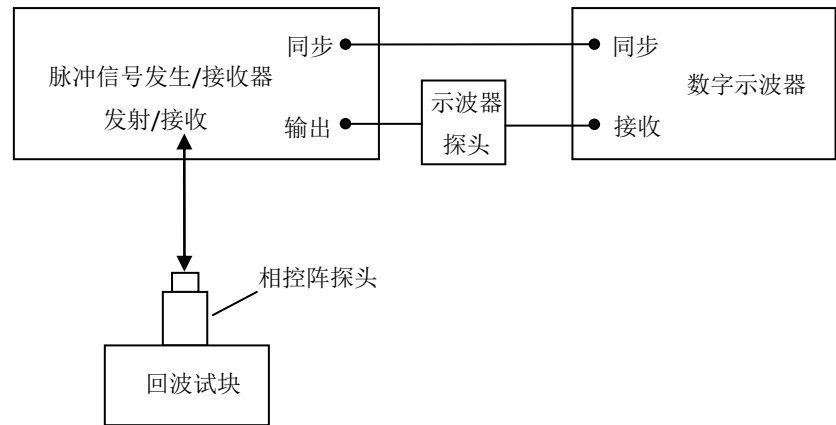
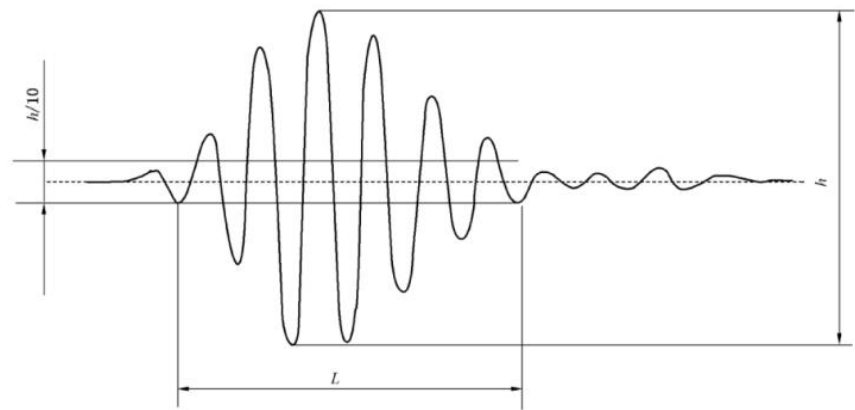


图 2 中心频率和相对带宽校准框图

连接脉冲信号发生/接收器的“发射/接收”端口与相控阵探头的端口，脉冲信号发生/接收器的同步端口与数字示波器的同步端口连接，脉冲信号发生/接收器的输出端口通过示波器探头连接到数字示波器的输入端口，在示波器观察脉冲响应信号，脉冲响应波形如图 3 所示。



图中： $h$ ——峰-峰振幅，V；  
 $L$ ——脉冲持续时间， $\mu\text{s}$ 。

图 3 典型的脉冲响应波形示意图

将反射的最高首次回波放在示波器闸门内，闸门最小应设置为脉冲宽度的两倍，用数字示波器的离散傅里叶变换功能测出脉冲响应的频谱，记录频谱下降 6dB 时的高、低截止频率  $f_h$  和  $f_l$ 。

分别用式（3）和（4）计算中心频率和相对带宽，记录于附录 A 表 A.4.1 和表 A.4.2

中。

$$f_0 = \frac{f_h + f_l}{2} \quad (3)$$

$$r_{BW} = \frac{f_h - f_l}{f_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中:

$f_0$ ——测量得到的探头中心频率值, MHz;

$f_h$ ——频谱下降 6dB 时的高截止频率, MHz;

$f_l$ ——频谱下降 6dB 时的低截止频率, MHz;

$r_{BW}$ ——相对带宽, %。

分别用式 (5) 和 (6) 计算中心频率相对误差和相对带宽误差, 记录于附录 A 表 A.4.1 和表 A.4.2 中。

$$\delta_f = \frac{f_0 - f_s}{f_s} \times 100\% \quad (5)$$

$$\delta_{BW} = r_{BW} - r_{BWS} \quad (6)$$

式中:

$\delta_f$ ——探头中心频率相对误差, %;

$f_s$ ——探头中心频率标称值, MHz;

$\delta_{BW}$ ——相对带宽误差, %;

$r_{BWS}$ ——相对带宽标称值, %。

注: 一般需要对探头中每个阵元进行校准, 也可以根据使用需求进行部分阵元的校准。

### 7.2.5 脉冲响应波形和持续时间

脉冲响应波形和持续时间的校准框图如图 2 所示, 脉冲响应波形示意图如图 3 所示。脉冲响应波形持续时间相对误差按式 (7) 计算, 记录于附表 A.5。

$$\delta_L = \frac{L_0 - L}{L} \times 100\% \quad (7)$$

式中:

$\delta_L$ ——脉冲响应波形持续时间相对误差, %;

$L$ ——脉冲响应波形持续时间测量值,  $\mu\text{s}$ ;

$L_0$ ——脉冲响应波形持续时间标称值,  $\mu\text{s}$ 。

注：一般需要对相控阵探头中每个阵元进行校准，也可以根据使用需求进行部分阵元的校准。

### 7.2.6 串扰

串扰校准如图 4 所示。

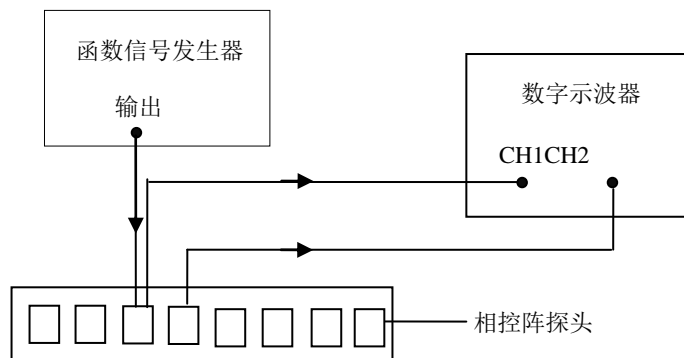


图 4 串扰校准框图

函数信号发生器输出接相控阵探头的被激励阵元，设置函数信号发生器输出为正弦波模式，输出频率为被校相控阵探头的中心频率；用数字示波器通道 1 测量被激励阵元带载荷条件下的激励信号幅度  $A_1$ ，用数字示波器通道 2 测量与被激励阵元相邻阵元接收到的信号幅度  $A_2$ ，串扰值  $\Delta_{ct}$  按式 (8) 计算，记录于附表 A.6。

$$\Delta_{ct} = 20\lg(A_2 / A_1) \quad (8)$$

式中：

$\Delta_{ct}$ ——探头阵元之间的串扰值, dB；

$A_1$ ——探头被激励阵元的响应信号幅度, V；

$A_2$ ——探头被激励阵元的相邻阵元的响应信号幅度, V。

注：一般在相控阵探头阵元阵列中选取头尾和中间约 3~4 对阵元进行串扰的校准，也可以根据使用需求进行其他阵元对的校准。

## 8 校准结果表达

校准后，出具校准证书。校准证书应至少包含以下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；

- d) 证书或报告的唯一性标识 (如编号), 每页及总页数的标识;
- e) 客户的名称和地址;
- f) 被校准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有关时, 应说明被校对象的接收日期;
- h) 如果与校准结果的有效性应用有关时, 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) 校准环境的描述;
- 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) 校准证书签发人的签名、职务或等效标识;
- o) 校准结果仅对被校对象有效的说明;
- p) 未经实验室书面批准, 不得部分复制证书的声明。

## 9 复校时间间隔

建议复校时间间隔不超过 1 年。由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸多因素决定的, 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

## 原始记录格式

## A.1 外观及工作正常性检查

表 A.1 外观及工作正常性检查

项目	检查结果
外观及工作正常性检查	

## A.2 焊核直径

表 A.2 焊核直径

标准值/mm	显示值/mm			平均值/mm	误差/mm	不确定度( $k=2$ )

## A.3 焊核厚度

表 A.3 焊核厚度

标准值/mm	显示值/mm			平均值/mm	误差/mm	不确定度( $k=2$ )

## A.4 中心频率

## A.4.1 中心频率

表 A.4.1 中心频率

标称值/MHz	低截止频率/MHz	高截止频率/MHz	中心频率/MHz	误差/%	不确定度( $k=2$ )

--	--	--	--	--	--

## A.4.2 相对带宽

表 A. 4. 2 相对带宽

标称值/%	低截止频率 /MHz	高截止频率 /MHz	相对带宽/%	误差/%	不确定度( $k=2$ )

## A.5 脉冲波形持续时间

表 A. 5 脉冲波形持续时间

标称值/ $\mu\text{s}$	实测值/ $\mu\text{s}$	误差/%	不确定度( $k=2$ )

## A.6 串扰

表 A. 6 串扰

阵元对	受激励阵元输出 信号幅度/V	相邻阵元输出信号 幅度/V	串扰/dB	不确定度( $k=2$ )



## 附录 B

## 校准证书内页格式

## B.1 外观及工作正常性检查

表 B.1 外观及工作正常性检查

项目	检查结果
外观及工作正常性检查	

## B.2 焊核直径

表 B.2 焊核直径

标准值/mm	显示值/mm	误差/mm	不确定度( $k=2$ )

## B.3 焊核厚度

表 B.3 焊核厚度

标准值/mm	显示值/mm	误差/mm	不确定度( $k=2$ )

## B.4 中心频率和相对带宽

## B.4.1 中心频率

表 B.4.1 中心频率

标称值/MHz	中心频率/MHz	误差/%	不确定度( $k=2$ )

--	--	--	--

## B.4.2 相对带宽

表 B. 4. 2 相对带宽

标称值/%	相对带宽/%	误差/%	不确定度( $k=2$ )

## B.5 脉冲波形持续时间

表 B. 5 脉冲波形持续时间

标称值/ $\mu\text{s}$	实测值/ $\mu\text{s}$	误差/%	不确定度( $k=2$ )

## B.6 串扰

表 B. 6 串扰

阵元对	串扰/dB	不确定度( $k=2$ )

## 附录 C

## 测量不确定度评定实例

## C.1 焊核直径测量结果不确定度评定

## C.1.1 测量模型

焊核直径的测量模型为：

$$D = \bar{d}$$

式中：

$D$ ——校准点的焊核直径，mm；

$d$ ——校准点的焊核直径示值平均值，mm。

## C.1.2 不确定度来源

不确定度来源主要有：被校点焊分析仪示值引入的不确定度分量，包括测量重复性引入的不确定度分量以及分辨力引入的不确定度分量、点焊标准试块引入的不确定度分量等。

## C.1.3 标准不确定度评定

C.1.3.1 被校点焊分析仪示值引入的不确定度分量  $u_1$ 

a) 测量重复性引入的不确定度分量  $u_{11}$

选取点焊分析仪标准块直径 6mm 对点焊分析仪进行重复测量，测量结果如表 C.1 所示。

表 C.1 重复性测量结果（单位：mm）

测量序号	1	2	3	4	5
测量结果	5.8	5.7	5.5	5.8	5.8
测量序号	6	7	8	9	10
测量结果	5.6	5.8	5.7	5.6	5.7
平均值 $\bar{x}_n$	5.70mm		标准差 $s$	0.105mm	

测量结果取 3 次测量平均值，因此，由测量重复性引入的不确定度分量

$$u_{11} = 0.105\text{mm} / \sqrt{3} = 0.061\text{mm}。$$

b) 分辨力引入的不确定度分量  $u_{12}$

点焊分析仪的读数分辨力为 0.1mm，区间半宽度为 0.05mm，按均匀分布，则点焊分析仪分辨力引入的不确定度为： $u_{12}=0.05\text{mm}/\sqrt{3}=0.029\text{mm}$ 。

由于测量重复性包含了人员读数时因分辨率引入的误差，因此由分辨率引入的不确定度分量  $u_{12}$  和测量重复性引入的不确定度分量  $u_{11}$  取大者。

#### C.1.3.2 点焊标准试块引起的不确定度分量 $u_2$

点焊标准试块的校准证书测量结果的扩展不确定度  $U=0.01\text{mm}$ ， $k=2$ ，则  $u_2=0.01\text{mm}/2=0.005\text{mm}$ 。

#### C.1.4 合成标准不确定度

##### C.1.4.1 主要不确定度分量汇总，见表 C.2

表 C.2 主要不确定度分量汇总表

不确定度来源( $u_i$ )	$a_i(\text{mm})$	$k_i$	$u_i(\text{mm})$
被校点焊分析仪示值, $u_1$	0.061	1	0.061
点焊标准试块, $u_2$	0.01	2	0.005

##### C.1.4.2 合成不确定度计算

以上各项不确定度分量相互独立不相关，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 0.061\text{mm}。$$

#### C.1.5 扩展不确定度

取包含因子  $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U = k u_c = 0.13\text{mm}, k=2。$$

### C.2 焊核厚度测量结果不确定度评定

#### C.2.1 测量模型

焊核厚度测量误差模型为：

$$T = \bar{t}$$

式中：

$T$ ——校准点焊核厚度，mm；

$\bar{t}$ ——校准点焊核厚度示值的平均值，mm。

#### C.2.2 不确定度来源

不确定度来源主要有：被校点焊分析仪示值引入的不确定度分量，包括测量重复

性引入的不确定度分量以及分辨力引入的不确定度分量、点焊标准试块引入的不确定度分量以及阵元间存在声程差引入的不确定度分量等。

### C.2.3 标准不确定度评定

#### C.2.3.1 被校点焊分析仪示值引入的不确定度分量 $u_1$

##### a) 测量重复性引入的不确定度分量 $u_{11}$

选取点焊分析仪标准块厚度 1.7mm 对点焊分析仪进行重复测量，测量结果如表 C.3 所示。

表 C.3 重复性测量结果 (单位: mm)

测量序号	1	2	3	4	5
测量结果	1.65	1.68	1.67	1.69	1.67
测量序号	6	7	8	9	10
测量结果	1.68	1.65	1.66	1.66	1.67
平均值 $\bar{x}_n$	1.668mm		标准差 s	0.013mm	

测量结果取 3 次测量平均值，因此，由测量重复性引入的不确定度分量

$$u_{11}=0.013\text{mm}/\sqrt{3}=0.0076\text{mm}。$$

##### b) 分辨力引入的不确定度分量 $u_{12}$

点焊分析仪的读数分辨力为 0.01mm，区间半宽为 0.005mm，按均匀分布，则点焊分析仪分辨力引入的不确定度： $u_{12}=0.005\text{mm}/\sqrt{3}=0.0029\text{mm}。$

由于测量重复性包含了人员读数时因分辨率引入的误差，因此由分辨率引入的不确定度分量  $u_{12}$  和测量重复性引入的不确定度分量  $u_{11}$  取大者。

#### C.2.3.2 点焊标准试块引起的不确定度分量 $u_2$

点焊标准试块的校准证书测量结果的扩展不确定度  $U=0.01\text{mm}$ ， $k=2$ ，则  $u_2=0.01\text{mm}/2=0.005\text{mm}。$

#### C.2.3.3 阵元间声程差引入的不确定度分量 $u_3$

测量试块厚度时为选其中一个阵元的 A 扫波形进行测量，由于相控阵阵列中各阵元由于声束角不一致导致各阵元到达聚焦点声程存在一定的差距，该声程差异一般不超过 0.01mm，服从均匀分布，则由阵元间存在声程差引入的不确定度分量

$$u_3=0.01\text{mm}/\sqrt{3}=0.0058\text{mm}。$$

## C.2.4 合成标准不确定度

C.2.4.1 主要不确定度分量汇总，见表 C.4。

表 C.4 主要不确定度分量汇总表

不确定度来源( $u_i$ )	$a_i(\text{mm})$	$k_i$	$u_i(\text{mm})$
被校点焊分析仪示值, $u_1$	0.0076	1	0.0076
点焊标准试块, $u_2$	0.01	2	0.005
阵元间声程差, $u_3$	0.01	$\sqrt{3}$	0.0058

## C.2.4.2 合成不确定度计算

以上各项不确定度分量相互独立不相关，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 0.011 \text{ mm}。$$

## C.2.5 扩展不确定度

取包含因子  $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U = k u_c = 0.03 \text{ mm}, \quad k=2。$$

## C.3 中心频率测量结果不确定度评定

## C.3.1 测量模型

中心频率的测量模型为：

$$f_0 = \frac{f_h + f_l}{2}$$

式中：

$f_0$ ——测量得到的探头中心频率值，MHz；

$f_h$ ——频谱下降 6dB 时的高截止频率，MHz；

$f_l$ ——频谱下降 6dB 时的低截止频率，MHz。

## C.3.2 不确定度来源

不确定度来源主要有：测量重复性引入的不确定度分量、回波试块引入的频率偏差以及示波器频谱分析频率测量误差引入的不确定度分量。

## C.3.3 标准不确定度评定

C.3.3.1 测量重复性引入的不确定度分量  $u_1$ 

选取 15MHz 的中心频率对点焊分析仪进行重复测量，测量结果如表 C.5 所示。

表 C.5 重复性测量结果（单位：MHz）

测量序号	1	2	3	4	5
测量结果	1.67	2.00	2.27	3.00	1.73
测量序号	6	7	8	9	10
测量结果	2.27	2.40	2.80	2.27	2.47
平均值 $\bar{x}_n$	2.29%		标准差 s	0.42%	

因此，由测量重复性引入的不确定度分量  $u_1=0.42\%$ 。

### C.3.3.2 回波试块的频率偏差引起的不确定度分量 $u_2$

根据测试结果，超声探头与回波试块之间的耦合以及超声波在试块中传播过程形成的频率偏差会引入频率测量的不确定度分量最大为 0.10%，即  $u_2=0.10\%$ 。

### C.3.3.3 数字示波器频谱分析频率测量误差引起的不确定度分量 $u_3$

根据数字示波器的说明书，数字示波器其频率测量最大允许误差为  $\pm ([\text{基准频率误差}] \times [\text{标记频率}] + (\text{频宽}/750 + 2)) \text{ Hz}$ ，基准频率误差为 10ppm，探头最大工作频率范围按 15MHz 计算，频率测量最大相对误差为  $\pm 0.89\%$ ，按均匀分布，则数字示波器频谱分析频率测量误差块引起的不确定度分量  $u_3=0.89\%/\sqrt{3}=0.51\%$ 。由于中心频率为 -6dB 带宽上限频率和下限频率同时测量，其引入的不确定度分量计算如下：

$$c_1 = \frac{\partial f_0}{\partial f_u} = \frac{1}{2} \quad c_2 = \frac{\partial f_0}{\partial f_l} = \frac{1}{2}$$

$$u_3 = \sqrt{c_1^2 u_3^2 + c_2^2 u_3^2} = \sqrt{\frac{1}{4} u_3^2 + \frac{1}{4} u_3^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} u_3 = 0.36\%$$

## C.3.4 合成标准不确定度

### C.3.4.1 主要不确定度分量汇总，见表 C.6

表 C.6 主要不确定度分量汇总表

不确定度来源( $u_i$ )	$a_i$	$k_i$	$u_i$
测量重复性, $u_1$	0.42%	1	0.42%
回波试块引入的频率偏差, $u_2$	0.10%	1	0.10%
示波器频谱分析频率测量误差, $u_3$	0.51%	$\sqrt{2}$	0.36%

### C.3.4.2 合成不确定度计算

以上各项不确定度分量相互独立不相关，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 0.56\%。$$

### C.3.5 扩展不确定度

取包含因子  $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U_{\text{rel}}=k u_{\text{c}}=1.2\%, \quad k=2。$$

---