



中华人民共和国工业和信息化部 兵工民品计量技术规范

JJF（兵工民品） XXXX—20XX

超声波检测用双晶探头校准规范

Calibration Specification for Dual-element Probe Used in Ultrasonic Testing
(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

超声波检测用双晶探头 校准规范

Calibration Specification for Dual-element
Probe Used in Ultrasonic Testing

JJF（兵工民品） XXXX—20XX

归口单位：中国兵器工业标准化研究所

主要起草单位：晋西工业集团有限责任公司

参加起草单位：国防科技工业 1412 区域计量站

常州春雷电子高新技术有限公司

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：

翟子泰（晋西工业集团有限责任公司）

刘林虎（晋西工业集团有限责任公司）

武鑫财（晋西工业集团有限责任公司）

参加起草人：

刘 震（国防科技工业 1412 区域计量站）

席泽军（国防科技工业 1412 区域计量站）

杨东星（国防科技工业 1412 区域计量站）

李 斌（国防科技工业 1412 区域计量站）

沈 杰（国防科技工业 1412 区域计量站）

武子洁（国防科技工业 1412 区域计量站）

俞兰程（常州春雷电子高新技术有限公司）

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..... (1)

5 计量特性..... (2)

6 校准条件..... (2)

6.1 环境条件..... (2)

6.2 测量标准及其他设备..... (3)

7 校准项目和校准方法..... (3)

7.1 校准项目..... (3)

7.2 校准方法..... (4)

8 校准结果表达..... (9)

9 复校时间间隔..... (10)

附录 A 原始记录格式..... (11)

附录 B 校准证书内页格式..... (13)

附录 C 测量不确定度评定示例..... (14)

引言

本规范依据 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》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。

超声波检测用双晶探头校准规范

1 范围

本校准规范适用于中心频率范围在 0.5MHz~15MHz，双晶片焦距范围在 0mm~100mm 的双晶探头的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

GB/T 12604.1-2020 无损检测 术语 超声检测

GB/T 27664.2-2011 无损检测 超声检测设备的性能与检验 第 2 部分：探头

GB/T 11259-2015 无损检测 超声检测用钢参考试块的制作与控制方法

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

GB/T 12604.1-2020 和 GB/T 27664.2-2011 界定的及下列术语和定义适用于本规范。

3.1

双晶探头 dual-element probe

具有单独的、在电气和声学上互相隔离的发射和接收换能器的探头。

3.2

焦距 focal length

聚焦探头从焦点到声源的距离。

3.3

串扰 cross talk

穿过预制的声隔离层或电隔离层产生的信号干扰。

4 概述

4.1 原理

双晶探头通过两个带有延迟块、相向倾斜互成一定角度的压电晶片分别承担发射、接收信号的任务。两个晶片之间用隔声层隔开，发射晶片发出的声波通过楔形延迟块入射到工件中，形成聚焦声场，缺陷回波通过另一楔形延迟块由接收晶片接收并转化为电信号显示在荧光屏上，从而实现近表面缺陷高灵敏度检测。

4.2 结构

双晶探头为一发一收分离式结构，主要由发射晶片、接收晶片、隔声层和延迟块组成，如图 1 所示。

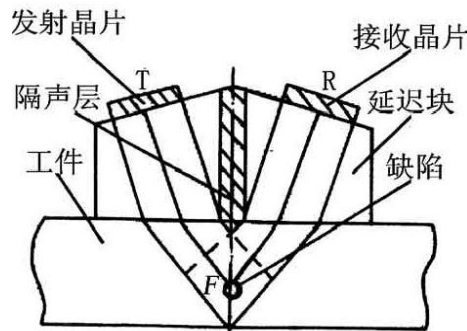


图 1 双晶探头结构图

4.3 用途

双晶探头盲区小、分辨率高，主要用于近表面缺陷、薄壁件及腐蚀壁厚检测，适用于管道、容器、焊缝、高温及曲面工件，可有效检测表面与近表面裂纹、分层、未熔合等缺陷。

5 计量特性

5.1 相对灵敏度

焦距 $\leq 20\text{mm}$ 时，不应低于 45dB；焦距 $> 20\text{mm}$ 时，不应低于 35dB。

5.2 脉冲宽度

最大允许误差不超过标称值的 $\pm 10\%$ 。

5.3 中心频率

最大允许误差不超过标称值的 $\pm 10\%$ 。

5.4 相对带宽

最大允许误差不超过标称值的 $\pm 15\%$ 。

5.5 焦距

最大允许误差不超过标称值的 $\pm 10\%$ 。

5.6 串扰

应大于 30dB。

5.7 斜探头前沿距离

最大允许误差不超过 $\pm 1\text{mm}$ 。

5.8 斜探头折射角

斜探头折射角 $\leq 45^\circ$ 时，最大允许误差不超过 $\pm 1^\circ$ ；斜探头折射角 $> 45^\circ$ 时，最大允许误差不超过 $\pm 1.5^\circ$ 。

注：由于校准无需作出是否合格的判定，因此上述技术指标仅供参考。

6 校准条件

6.1 环境条件

环境条件应满足以下要求：

- a) 温度：（23±5）℃；
- b) 相对湿度：不大于 80%。

6.2 测量标准及其他设备

6.2.1 数字式超声波探伤仪

- 脉冲幅度：（50~600）V；
- 发射脉冲上升时间：小于 10ns；
- 频率范围：（0.5~20）MHz。

6.2.2 数字存储示波器

- 最小带宽：不低于 100MHz；
- 时基测量：最大允许误差±2%；
- 幅值：幅值灵敏度小于每格 5mV，最大允许误差±5%。

6.2.3 标准试块

横波声速为（3255±30）m/s 和纵波声速为（5920±50）m/s 的钢试块，包括半圆柱试块、CSK-1A 试块、DB-H1 试块以及 CSII-1 平底孔试块。

注：建议使用具有不同半径 R 的半圆柱形钢试块，半径范围 12mm~200mm，步进为 R 。钢的质量按 GB/T 11259 规定。每个试块的厚度应大于或等于其半径，最大厚度为 100mm。

6.2.4 游标卡尺

- 测量范围：（0~200）mm；最大允许误差：±0.10mm。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

校准项目见表 1。

表 1 校准项目

序号	校准项目	校准方法条款	备注
1	外观	7.2.1	/
2	相对灵敏度	7.2.2	/
3	脉冲宽度	7.2.3	/
4	中心频率	7.2.4	/
5	相对带宽	7.2.4	/
6	焦距	7.2.5	/

表 1 （续）

序号	校准项目	校准方法条款	备注
7	串扰	7.2.6	/
8	斜探头前沿距离	7.2.7	仅适用于斜探头
9	斜探头折射角	7.2.8	仅适用于斜探头

7.2 校准方法

7.2.1 外观

目视检查探头外形结构是否完好，是否存在能够影响探头性能的物理损伤，标识是否齐全正确（名称、型号规格、制造厂家及出厂编号等）。

7.2.2 相对灵敏度

7.2.2.1 将数字式超声波探伤仪工作模式设置为一发一收，调节增益使数字式超声波探伤仪电噪声电平为满屏的 10%，记录此时增益值 S_0 ，若达不到满屏的 10%，则 S_0 为仪器最大增益值。

7.2.2.2 选用 $\Phi 2\text{mm}$ 平底孔 CSII-1 试块，将数字式超声波探伤仪发射端与探头接收端连接，接收端与探头发射端连接，然后在 CSII-1 试块表面涂覆适量耦合剂，将探头置于试块上，并施加一定压力以保证探头与试块之间耦合良好。移动探头使平底孔波回波幅度最高，调节增益使平底回孔波幅度为垂直刻度的 50%，记录此时数字式超声波探伤仪增益值 S_1 。

7.2.2.3 重复上述操作 6 次，取 6 次结果平均值作为被校探头的相对灵敏度，按公式（1）计算。

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n (S_{0_i} - S_{1_i})}{n} \quad (1)$$

式中：

n ——测量次数， $n = 6$ ；

S ——被校探头的相对灵敏度，dB；

S_{0_i} ——电噪声电平为全屏幅度 10% 时的增益值，dB；

S_{1_i} ——平底孔回波达到全屏幅度 50% 时的增益值，dB。

7.2.3 脉冲宽度

7.2.3.1 将被校探头与测量标准设备按图 2 所示方法连接，参考试块可使用半圆柱试块或 DB-H1 试块，半圆柱试块的半径或 DB-H1 试块的横通孔深度应尽量接近探头的焦距。

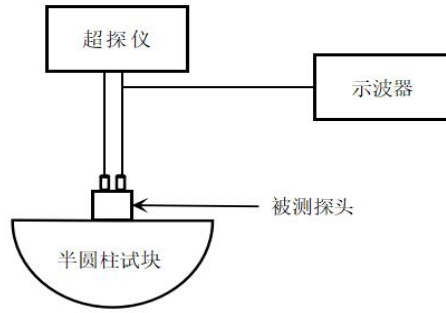


图2 测量标准设备连接示意图

7.2.3.2 对于双晶探头，数字式超声波探伤仪工作方式应设置为一发一收模式。校准时，在双晶探头与半圆柱试块之间涂覆适量耦合剂，并施加一定压力以保证探头与试块之间耦合良好。

7.2.3.3 将被校探头置于半圆柱试块中心，小幅度转动和移动探头使来自试块柱面的多次回波幅度最大，找到第一次回波并放大，得到如图3所示的脉冲波形，在示波器上读出脉冲幅度为最大峰-峰值幅度10%处的脉冲波形宽度即为被校探头的单次脉冲宽度。

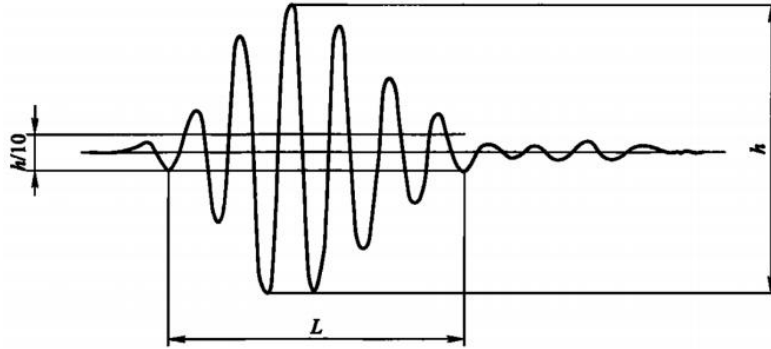


图3 典型的超声脉冲波形图

说明： h —峰-峰值幅度； L —脉冲宽度。

7.2.3.4 重复上述操作6次，取6次结果平均值作为被校探头的脉冲宽度，按公式(2)计算脉冲宽度的相对误差。

$$\Delta L = \frac{L_B - \bar{L}}{\bar{L}} \times 100\% \quad (2)$$

式中：

L_B ——被校探头脉冲宽度的标称值， μs ；

$\bar{L}$ ——被校探头脉冲宽度的平均值， μs ；

ΔL ——被校探头脉冲宽度的相对误差，%。

7.2.4 中心频率和相对带宽

7.2.4.1 被校探头与测量标准设备按图2所示方法连接，将反射体回波放在闸门内，闸

门最小应设置为脉冲宽度的两倍并使脉冲最大值居中,用示波器测出频谱,得到回波频谱下降 6dB 时的高、低截止频率。注意来自探头楔块、探头外壳、阻尼块等的伪回波不应与参考试块回波同时进行分析。

7.2.4.2 重复上述操作 6 次,按公式 (3)、公式 (4) 分别计算出 6 组中心频率和相对带宽,取 6 次结果平均值作为被校探头的中心频率和相对带宽。

7.2.4.3 根据高、低截止频率 f_u 和 f_l ,按公式 (3) 计算中心频率 f_o 。

$$f_o = \frac{f_u + f_l}{2} \quad (3)$$

7.2.4.4 相对带宽 Δf_{rel} 按公式 (4) 计算,以百分数表示。

$$\Delta f_{\text{rel}} = \frac{f_u - f_l}{f_o} \times 100\% \quad (4)$$

式中:

f_o ——中心频率, MHz;

f_u ——回波频谱下降 6dB 时的高截止频率, MHz;

f_l ——回波频谱下降 6dB 时的低截止频率, MHz;

Δf_{rel} ——相对带宽, %。

7.2.4.5 按公式 (5) 计算中心频率的相对误差。

$$\Delta f_o = \frac{f_B - \overline{f_o}}{\overline{f_o}} \times 100\% \quad (5)$$

式中:

f_B ——被校探头中心频率的标称值, MHz;

$\overline{f_o}$ ——被校探头中心频率的平均值, MHz;

Δf_o ——被校探头中心频率的相对误差, %。

7.2.4.6 按公式 (6) 计算相对带宽相对误差。

$$\Delta \Delta f_{\text{rel}} = \frac{\Delta f_{\text{Brel}} - \overline{\Delta f_{\text{rel}}}}{\overline{\Delta f_{\text{rel}}}} \times 100\% \quad (6)$$

式中:

Δf_{Brel} ——被校探头相对带宽的标称值, %;

$\overline{\Delta f_{\text{rel}}}$ ——被校探头相对带宽的平均值, %;

$\Delta \Delta f_{\text{rel}}$ ——被校探头相对带宽的相对误差, %。

7.2.5 焦距

7.2.5.1 使用Φ3mm 横通孔 DB-H1 试块,将数字式超声波探伤仪工作模式设置为一发一收。

7.2.5.2 将数字式超声波探伤仪发射端与探头接收端连接,接收端与探头发射端连接,然后在 DB-H1 试块表面涂覆适量耦合剂,把探头置于试块上并保证隔声层垂直于横通孔,施加一定压力确保探头与试块之间耦合良好。

7.2.5.3 在不同深度的横通孔位置小幅度移动探头使来自横通孔的反射回波幅度最高。以横孔深度为横坐标,回波幅度为纵坐标,制作距离-波幅曲线。距离-波幅曲线至少应有 7 个测量点,所选取的距离应覆盖探头的焦距范围。根据距离-波幅曲线上最大幅度点得出探头焦距。

7.2.5.4 重复上述操作 6 次,取 6 次结果平均值作为被校探头的焦距,按公式 (7) 计算焦距的相对误差。

$$\Delta f_L = \frac{f_{BL} - \overline{f_L}}{\overline{f_L}} \times 100\% \quad (7)$$

式中:

f_{BL} ——被校探头焦距的标称值, mm;

$\overline{f_L}$ ——被校探头焦距的平均值, mm;

Δf_L ——被校探头焦距的相对误差, %。

7.2.6 串扰

7.2.6.1 使用Φ2mm 平底孔 CSII-1 试块,将数字式超声波探伤仪工作模式设置为一发一收。

7.2.6.2 将被校探头连接到数字式超声波探伤仪发射端和接收端的插头上,然后在试块表面涂覆适量耦合剂,将探头置于试块上,并施加一定压力以保证探头与试块之间耦合良好。校准时应确保得到的平底孔回波处于探头聚焦区以内,调整该回波达到数字式超声波探伤仪全屏幅度的 80%并记录增益值 (A_1)。

7.2.6.3 使数字式超声波探伤仪的显示屏上能观察到来自耦合面的回波,调节增益直至其波幅达到全屏幅度的 80%,记录增益值 (A_2)。

7.2.6.4 重复上述操作 6 次,取 6 次结果平均值作为被校探头的串扰,按公式 (8) 计算。

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n (A_{1i} - A_{2i})}{n} \quad (8)$$

式中:

n ——测量次数, $n=6$;

A ——被校探头的串扰, dB;

A_{1_i} ——平底孔回波达到全屏幅度 80%时的增益值, dB;

A_{2_i} ——耦合面回波达到全屏幅度 80%时的增益值, dB。

7.2.7 斜探头前沿距离

7.2.7.1 使用 CSK-1A 试块, 将数字式超声波探伤仪工作模式设置为自发自收。

7.2.7.2 将数字式超声波探伤仪发射端与斜探头接收端连接, 然后在试块表面涂覆适量耦合剂, 将探头置于试块上, 并施加一定压力以保证探头与试块之间耦合良好。

7.2.7.3 移动调整探头, 使来自 CSK-1A 试块 $R100$ 圆弧的反射回波最大, 用游标卡尺量出此时探头前沿至试块前端的长度 L 。对于弧面探头, 应采用带有弧面的试块, 如采用弧面 CSK-1A 试块。

7.2.7.4 重复上述操作 6 次, 按公式 (9) 计算得出探头前沿距离 a 。

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (100 - L_i)}{n} \quad (9)$$

式中:

n ——测量次数, $n=6$;

a ——前沿距离, mm;

L_i ——探头前沿至试块前端的长度, mm。

7.2.7.5 按公式 (10) 计算得出被校探头前沿距离的误差。

$$\Delta a = a_B - a \quad (10)$$

式中:

a_B ——被校探头前沿距离的标称值, mm;

Δa ——被校探头探头前沿距离的误差, mm。

7.2.8 斜探头折射角

7.2.8.1 重复 7.2.7.1、7.2.7.2 步骤, 然后根据不同折射角调整被校探头在试块上的位置。

7.2.8.2 当 $\beta < 60^\circ$ 时, 探头放在图 4(a) 的位置, 观察 $\Phi 50\text{mm}$ 孔的回波; 当 $60^\circ \leq \beta < 70^\circ$ 时, 探头放在图 4(b) 的位置, 观察 $\Phi 50\text{mm}$ 孔的回波; 当 $\beta \geq 70^\circ$ 时, 探头放在图 4(c) 的位置, 观察 $\Phi 1.5\text{mm}$ 横通孔的回波。在探头声束轴线与试块侧面保持平行的情况下前后移动探头, 当观察到的反射回波达到最大时, 用游标卡尺量出此时探头前沿至试块前端的长度 L 。

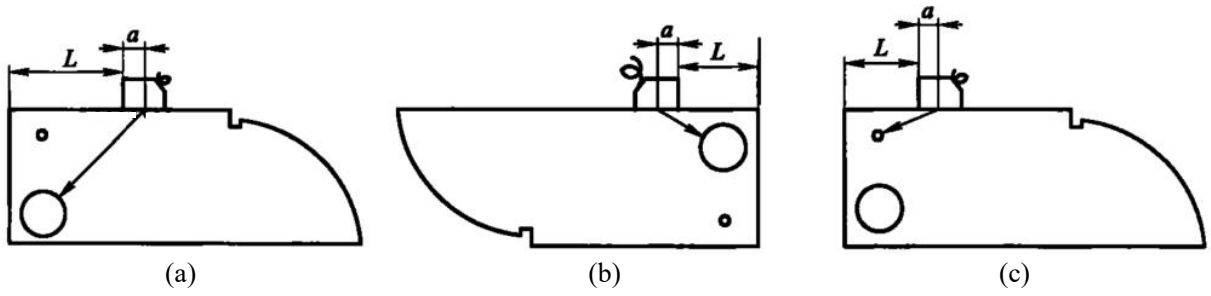


图4 斜探头折射角校准示意图

7.2.8.3 重复上述操作 6 次, 根据折射角的标称值按公式 (11)、公式 (12)、公式 (13) 进行计算, 取 6 次结果平均值作为被校探头的折射角。

$$K = \tan\beta = \frac{\sum_{i=1}^n [(L_i + a - 35)/70]}{n} \quad (\beta < 60^\circ) \quad (11)$$

$$K = \tan\beta = \frac{\sum_{i=1}^n [(L_i + a - 35)/30]}{n} \quad (60^\circ \leq \beta < 70^\circ) \quad (12)$$

$$K = \tan\beta = \frac{\sum_{i=1}^n [(L_i + a - 35)/15]}{n} \quad (\beta \geq 70^\circ) \quad (13)$$

式中:

n ——测量次数, $n = 6$;

a ——前沿距离, mm;

L_i ——探头前沿至试块前端的长度, mm;

K ——斜探头 K 值;

β ——斜探头折射角, $^\circ$ 。

7.2.8.4 按公式 (14) 计算得出被校探头折射角的误差。

$$\Delta\beta = \beta_B - \beta \quad (14)$$

式中:

β_B ——被校探头折射角的标称值, $^\circ$;

$\Delta\beta$ ——被校探头探头折射角的误差, $^\circ$ 。

8 校准结果表达

双晶探头经校准后出具校准证书, 推荐校准证书内页格式见附录 B。校准证书应准确、客观的报告校准结果。校准结果用校准数据的形式给出, 并给出测量不确定度, 不确定度评定示例见附录 C。校准证书至少包含以下信息:

- 标题, 如“校准证书”或“校准报告”;
- 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) 如果与校准结果的有效性和应用有关时，应对抽样程序进行说明；
- i) 对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) 校准证书或校准报告签发人的签名，以及签发日期；
- o) 校准结果仅对被校对象有效的声明；
- p) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书或报告的声明。

9 复校时间间隔

复校时间间隔建议不超过12个月。由于复校时间间隔的长短取决于其使用情况，如使用环境条件、使用频率、本身质量等，因此复校时间间隔由用户根据使用情况自行确定。

附录 A

原始记录格式

原始记录编号：共 页 第 页

委托方名称		委托方地址	
被测设备		制造者	
型号		编号	
环境温度		相对湿度	
校准地点		校准日期	
依据文件（代号、名称）			

计量标准器信息

标准器名称	编号	测量范围	准确度等级/测量不确定度/最大允许误差	溯源机构/证书编号	有效期

1 外观检查：

2 相对灵敏度

测量次数	1	2	3	4	5	6	平均值
电噪声电平为全屏幅度 10%时的增益值/dB							/
平底孔回波达到全屏幅度 50%时的增益值/dB							
相对灵敏度/dB							

3 脉冲宽度

测量次数	1	2	3	4	5	6	平均值	标称值	相对误差
脉冲宽度/ μs									
测量结果不确定度									

原始记录编号：

共 页 第 页

4 中心频率和相对带宽

测量次数	1	2	3	4	5	6	平均值	标称值	相对误差
回波频谱下降 6dB 时的高截止频率/MHz							/	/	/
回波频谱下降 6dB 时的低截止频率/MHz									
中心频率/MHz									
相对带宽									
测量结果不确定度									

5 焦距

测量次数	1	2	3	4	5	6	平均值	标称值	相对误差
焦距/mm									

6 串扰

测量次数	1	2	3	4	5	6	平均值	标称值	相对误差
平底孔回波达到全屏幅度 80%时的增益值/dB							/		
耦合面回波达到全屏幅度的 80%时的增益值/dB									
串扰/dB									

7 斜探头前沿距离

测量次数	1	2	3	4	5	6	平均值	标称值	误差
探头前沿至试块前端的长度/mm									
前沿距离/mm									

8 斜探头折射角

测量次数	1	2	3	4	5	6	平均值	标称值	误差
斜探头 K 值									
斜探头折射角/ $^{\circ}$									

校准人：

核验人：

附录 B

校准证书内页格式

证书编号：共 页 第 页

校准结果			
外观检查：			
序号	校准项目	校准结果	测量结果不确定度
1	相对灵敏度		/
2	脉冲宽度		
3	中心频率		
4	相对带宽		
5	焦距		/
6	串扰		/
7	斜探头前沿距离		/
8	斜探头折射角		/
以下空白			

附录 C

测量不确定度评定示例

C.1 脉冲宽度测量结果不确定度评定

C.1.1 测量模型

$$L = L_m$$

式中:

L ——被校探头脉冲宽度, μs ;

L_m ——示波器读数, μs 。

C.1.2 灵敏系数

$$c = \frac{\partial L}{\partial L_m} = 1$$

C.1.3 测量不确定度的 A 类评定

C.1.3.1 重复测量引起的不确定度分量 $u(L_{m1})$

在正常工作条件下, 等精度重复测量 6 次, 测得脉冲宽度分别为 $1.31 \mu s$, $1.30 \mu s$, $1.29 \mu s$, $1.30 \mu s$, $1.26 \mu s$, $1.31 \mu s$ 。

$$\text{其单次实验标准差为: } s(L_m) = \sqrt{\frac{\sum (L_{mi} - \bar{L}_m)^2}{6-1}} = 0.02 \mu s$$

$$\text{所以, } u(L_{m1}) = \frac{s(L_{m1})}{1.30 \times \sqrt{6}} \times 100\% = 0.63\%$$

C.1.4 测量不确定度的 B 类评定

C.1.4.1 示波器校准引起的不确定度分量 $u(L_{m2})$

由上级证书可知示波器误差为: -0.2% , 按服从均匀分布处理, $k = \sqrt{3}$, 故:

$$u(L_{m2}) = \frac{0.20\%}{\sqrt{3}} = 0.12\%$$

C.1.4.2 示波器分辨力引起的不确定度分量 $u(L_{m3})$

示波器分辨力为: 0.052% , 按服从均匀分布处理, $k = \sqrt{3}$, 故:

$$u(L_{m3}) = \frac{0.052\%}{\sqrt{3}} = 0.030\%$$

由于重复性分量包含分辨力引入的不确定度分量，为避免重复计算，只考虑最大分量，忽略较小分量。

C.1.5 标准不确定度一览表

序号	不确定度来源	标准不确定度分量	灵敏系数	标准不确定度
1	重复测量引起的不确定度分量	$u(L_{m1})$	1	0.63%
2	示波器校准引起的不确定度分量	$u(L_{m2})$	1	0.12%
3	示波器分辨力引起的不确定度分量	$u(L_{m3})$	1	0.030%

C.1.6 脉冲宽度合成标准不确定度

由于上述各分量之间独立不相关，合成标准不确定度可按下式得到：

$$u_c = \sqrt{u^2(L_{m1}) + u^2(L_{m2})} = 0.64\%$$

C.1.7 测量结果的相对扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则 $U_{rel} = ku_c = 2 \times 0.64\% = 1.28\% = 1.3\%$ 。

C.2 中心频率测量结果不确定度评定

C.2.1 测量模型

$$f_o = \frac{f_u + f_l}{2}$$

式中：

f_o ——被校探头中心频率，MHz；

f_u ， f_l ——回波幅度下降 6dB 时的高，低截止频率，MHz。

C.2.2 灵敏系数

$$c_u = \frac{\partial f_o}{\partial f_u}, \quad c_l = \frac{\partial f_o}{\partial f_l}$$

C.2.3 高截止频率标准不确定度评定

C.2.3.1 高截止频率重复测量引起的不确定度分量 $u(f_{u1})$

在正常工作条件下，等精度重复测量 6 次，测得高截止频率分别为 3.07MHz，3.12MHz，3.02MHz，3.04MHz，2.99MHz，3.08MHz。

其单次实验标准差为： $s(f_u) = \sqrt{\frac{\sum (f_{ui} - \bar{f}_u)^2}{6-1}} = 0.05\text{MHz}$

所以， $u(f_{u1}) = \frac{s(f_u)}{3.05 \times \sqrt{6}} \times 100\% = 0.67\%$

C.2.3.2 示波器校准引起的不确定度分量 $u(f_{u2})$

由上级证书可知示波器误差为：-0.2%，按服从均匀分布处理， $k = \sqrt{3}$ ，故：

$$u(f_{u2}) = \frac{0.20\%}{\sqrt{3}} = 0.12\%$$

C.2.3.3 示波器分辨力引起的不确定度分量 $u(f_{u3})$

示波器分辨力为：0.052%，按服从均匀分布处理， $k = \sqrt{3}$ ，故：

$$u(f_{u3}) = \frac{0.052\%}{\sqrt{3}} = 0.030\%$$

由于重复性分量包含分辨力引入的不确定度分量，为避免重复计算，只考虑最大分量，忽略较小分量。

C.2.4 高截止频率标准不确定度一览表

序号	不确定度来源	标准不确定度分量	灵敏系数	标准不确定度
1	高截止频率重复测量引起的不确定度分量	$u(f_{u1})$	1	0.67%
2	示波器校准引起的不确定度分量	$u(f_{u2})$	1	0.12%
3	示波器分辨力引起的不确定度分量	$u(f_{u3})$	1	0.030%

C.2.5 高截止频率合成标准不确定度

由于上述各分量之间独立不相关，合成标准不确定度可按下式得到：

$$u_c(f_u) = \sqrt{c_1 u^2(f_{u1}) + c_2 u^2(f_{u2})} = 0.68\%$$

C.2.6 低截止频率标准不确定度评定

C.2.6.1 低截止频率重复测量引起的不确定度分量 $u(f_{l1})$

在正常工作条件下，等精度重复测量 6 次，测得高截止频率分别为 1.76MHz，1.75MHz，1.78MHz，1.82MHz，1.81MHz，1.78MHz。

其单次实验标准差为： $s(f_l) = \sqrt{\frac{\sum (f_{li} - \bar{f}_l)^2}{6-1}} = 0.03\text{MHz}$

$$\text{所以, } u(f_{11}) = \frac{s(f_1)}{1.78 \times \sqrt{6}} \times 100\% = 0.69\%$$

C.2.6.2 示波器校准引起的不确定度分量 $u(f_{12})$

由上级证书可知示波器误差为：-0.2%，按服从均匀分布处理， $k = \sqrt{3}$ ，故：

$$u(f_{12}) = \frac{0.20\%}{\sqrt{3}} = 0.12\%$$

C.2.6.3 示波器分辨力引起的不确定度分量 $u(f_{13})$

示波器分辨力为：0.052%，按服从均匀分布处理， $k = \sqrt{3}$ ，故：

$$u(f_{13}) = \frac{0.052\%}{\sqrt{3}} = 0.030\%$$

由于重复性分量包含分辨力引入的不确定度分量，为避免重复计算，只考虑最大分量，忽略较小分量。

C.2.7 低截止频率标准不确定度一览表

序号	不确定度来源	标准不确定度分量	灵敏系数	标准不确定度
1	低截止频率重复测量引起的不确定度分量	$u(f_{11})$	1	0.69%
2	示波器校准引起的不确定度分量	$u(f_{12})$	1	0.12%
3	示波器分辨力引起的不确定度分量	$u(f_{13})$	1	0.030%

C.2.8 低截止频率合成标准不确定度

由于上述各分量之间独立不相关，合成标准不确定度可按下式得到：

$$u_c(f_1) = \sqrt{c_1^2 u^2(f_{11}) + c_2^2 u^2(f_{12})} = 0.70\%$$

C.2.9 中心频率相对标准不确定度一览表

序号	不确定度来源	标准不确定度分量	灵敏系数	标准不确定度
1	高截止频率引起的不确定度	$u_c(f_u)$	c_u	0.68%
2	低截止频率引起的不确定度	$u_c(f_1)$	c_1	0.70%

C.2.10 中心频率合成标准不确定度

高截止频率和低截止频率二者完全相关，灵敏系数 $c_u = c_1 = 1/2$ ，则：

$$u_c(f_o) = c_u u_c(f_u) + c_1 u_c(f_1) = 0.69\%$$

C.2.11 测量结果的相对扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则 $U_{\text{rel}} = k u_c(f_o) = 2 \times 0.69\% = 1.38\% = 1.4\%$ 。

C.3 相对带宽测量结果不确定度评定

C.3.1 测量模型

$$\Delta f_{\text{rel}} = \frac{2(f_u - f_l)}{f_u + f_l} \times 100\%$$

式中：

Δf_{rel} -----被校探头相对带宽，%。

C.3.2 灵敏系数

$$c_1 = \frac{\partial \Delta f_{\text{rel}}}{\partial f_u} = \frac{2}{f_u + f_l} - \frac{2(f_u - f_l)}{(f_u + f_l)^2}, \quad c_2 = \left| \frac{\partial \Delta f_{\text{rel}}}{\partial f_l} \right| = \left| -\frac{2}{f_u + f_l} - \frac{2(f_u - f_l)}{(f_u + f_l)^2} \right|$$

C.3.3 高截止频率标准不确定度评定

C.3.3.1 高截止频率重复测量引起的不确定度分量 $u(f_{u1})$

在正常工作条件下，等精度重复测量 6 次，测得高截止频率分别为 3.07MHz，3.12MHz，3.02MHz，3.04MHz，2.99MHz，3.08MHz。

$$\text{其单次实验标准差为：} s(f_u) = \sqrt{\frac{\sum (f_{ui} - \bar{f}_u)^2}{6-1}} = 0.05\text{MHz}$$

$$\text{所以，} u(f_{u1}) = \frac{s(f_u)}{3.05 \times \sqrt{6}} \times 100\% = 0.67\%$$

C.3.3.2 示波器校准引起的不确定度分量 $u(f_{u2})$

由上级证书可知示波器误差为：-0.2%，按服从均匀分布处理， $k = \sqrt{3}$ ，故：

$$u(f_{u2}) = \frac{0.20\%}{\sqrt{3}} = 0.12\%$$

C.3.3.3 示波器分辨力引起的不确定度分量 $u(f_{u3})$

示波器分辨力为：0.052%，按服从均匀分布处理， $k = \sqrt{3}$ ，故：

$$u(f_{u3}) = \frac{0.052\%}{\sqrt{3}} = 0.030\%$$

由于重复性分量包含分辨力引入的不确定度分量，为避免重复计算，只考虑最大分量，忽略较小分量。

C.3.4 高截止频率标准不确定度一览表

序号	不确定度来源	标准不确定度分量	灵敏系数	标准不确定度
1	高截止频率重复测量引起的不确定度分量	$u(f_{u1})$	1	0.67%
2	示波器校准引起的不确定度分量	$u(f_{u2})$	1	0.12%
3	示波器分辨力引起的不确定度分量	$u(f_{u3})$	1	0.030%

C.3.5 高截止频率合成标准不确定度

由于上述各分量之间独立不相关，合成标准不确定度可按下式得到：

$$u_c(f_u) = \sqrt{c_1^2 u^2(f_{u1}) + c_2^2 u^2(f_{u2})} = 0.68\%$$

C.3.6 低截止频率标准不确定度评定

C.3.6.1 低截止频率重复测量引起的不确定度分量 $u(f_{l1})$

在正常工作条件下，等精度重复测量 6 次，测得高截止频率分别为 1.76MHz，1.75MHz，1.78MHz，1.82MHz，1.81MHz，1.78MHz。

$$\text{其单次实验标准差为：} s(f_l) = \sqrt{\frac{\sum (f_{li} - \bar{f}_l)^2}{6-1}} = 0.03\text{MHz}$$

$$\text{所以，} u(f_{l1}) = \frac{s(f_l)}{1.78 \times \sqrt{6}} \times 100\% = 0.69\%$$

C.3.6.2 示波器校准引起的不确定度分量 $u(f_{l2})$

由上级证书可知示波器误差为：-0.2%，按服从均匀分布处理， $k = \sqrt{3}$ ，故：

$$u(f_{l2}) = \frac{0.20\%}{\sqrt{3}} = 0.12\%$$

C.3.6.3 示波器分辨力引起的不确定度分量 $u(f_{l3})$

示波器分辨力为：0.052%，按服从均匀分布处理， $k = \sqrt{3}$ ，故：

$$u(f_{l3}) = \frac{0.052\%}{\sqrt{3}} = 0.030\%$$

由于重复性分量包含分辨力引入的不确定度分量，为避免重复计算，只考虑最大分量，忽略较小分量。

C.3.7 低截止频率标准不确定度一览表

序号	不确定度来源	标准不确定度分量	灵敏系数	标准不确定度
1	低截止频率重复测量引起的不确定度分量	$u(f_{11})$	1	0.69%
2	示波器校准引起的不确定度分量	$u(f_{12})$	1	0.12%
3	示波器分辨力引起的不确定度分量	$u(f_{13})$	1	0.030%

C.3.8 低截止频率合成标准不确定度

由于上述各分量之间独立不相关，合成标准不确定度可按下式得到：

$$u_c(f_1) = \sqrt{c_1^2 u^2(f_{11}) + c_2^2 u^2(f_{12})} = 0.70\%$$

C.3.9 相对带宽标准不确定度一览表

序号	不确定度来源	标准不确定度分量	灵敏系数	标准不确定度
1	高截止频率引起的不确定度	$u_c(f_u)$	c_u	0.68%
2	低截止频率引起的不确定度	$u_c(f_l)$	c_l	0.70%

C.3.10 相对带宽合成标准不确定度

高截止频率和低截止频率二者完全相关，灵敏系数 $c_u=0.31$ ， $c_l=0.52$ ，则：

$$u_c(\Delta f_{\text{rel}}) = c_u u_c(f_u) + c_l u_c(f_l) = 0.57\%$$

C.3.11 测量结果的相对扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则 $U_{\text{rel}} = k u_c(\Delta f_{\text{rel}}) = 2 \times 0.57\% = 1.14\% = 1.2\%$ 。

中华人民共和国工业和信息化部

兵工民品计量技术规范

超声波检测用双晶探头校准规范

JJF(兵工民品) XXXX—20XX

版权所有 不得翻印