JJF

**中华人民共和国国家计量技术规范**

**JJF XXXX—202X**

空气超声成像仪校准规范

**Calibration Specification for Air Ultrasound Imagers**

**（**征求意见稿）

202X-XX-XX发布 202X-XX-XX实施

**国家市场监督管理总局**发布

|  |
| --- |
|  |
| 空气超声成像仪校准规范**Calibration Specification for Air Ultrasound Imagers** | **JJF XXXX—202X** |

归口单位： 全国声学计量技术委员会

起 草 单 位： 深圳市计量质量检测研究院

 中国计量科学研究院

 浙江省计量科学研究院

 杭州兆华电子股份有限公司

 南京信息工程大学

 上海其高电子科技有限公司

本规范委托全国声学计量技术委员会负责解释

本规范起草人：

 张瑞纹 (深圳市计量质量检测研究院)

 牛 锋 (中国计量科学研究院)

 何龙标 (中国计量科学研究院)

 高申平 (浙江省计量科学研究院)

 庞晓峰 (深圳市计量质量检测研究院)

 曹祖杨 (杭州兆华电子股份有限公司)

 吴礼福 (南京信息工程大学)

张南雄 (上海其高电子科技有限公司)

目 录

[1 范围 1](#_Toc139045042)

[2 引用文件 1](#_Toc139045043)

[3 术语和计量单位 1](#_Toc139045044)

[3.1 超声 ultrasound ,ultrasonic sound 1](#_Toc139045045)

[3.2 声成像 acoustic image 1](#_Toc139045046)

[3.3 横向空间分辨力 transverse spatial resolution 2](#_Toc139045047)

[3.4 阵列动态范围dynamic range of the array 2](#_Toc139045048)

[4 概述 2](#_Toc139045049)

[5 计量特性 2](#_Toc139045050)

[5.1 横向定位偏移距离 2](#_Toc139045051)

[5.2 纵向定位偏移距离 2](#_Toc139045052)

[5.3 最小成像声压级 2](#_Toc139045053)

[5.4 级线性 2](#_Toc139045054)

[5.5 横向空间分辨力 2](#_Toc139045055)

[5.6 阵列动态范围 2](#_Toc139045056)

[6 校准条件 3](#_Toc139045057)

[6.1 消声室环境条件 3](#_Toc139045058)

[6.2 测量标准及其它设备 3](#_Toc139045059)

[7 校准项目和校准方法 3](#_Toc139045060)

[7.1 校准项目 3](#_Toc139045061)

[7.2 校准方法 4](#_Toc139045062)

[8 校准结果表达 7](#_Toc139045063)

[8.1 校准结果 7](#_Toc139045064)

[8.2 数值修约 8](#_Toc139045065)

[8.3 校准证书 8](#_Toc139045066)

[8.4 校准结果的测量不确定度 8](#_Toc139045067)

[9 复校时间间隔 9](#_Toc139045068)

[附录A 10](#_Toc139045069)

[附录B 13](#_Toc139045070)

引 言

本规范依据JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》的要求和格式编写。

本规范参考了JJF 1504—2015《空气超声测量仪校准规范》对测试频率点的规定，对最小成像声压级和级线性提了计量性能要求，参考了JJF 1496—2014《声源识别定位系统(波束形成法)校准规范》，在计量性能中纳入了定位偏移距离和横向空间分辨力。

本规范依据JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》给出了横向定位偏移距离、最小成像声压级、横向空间分辨力、传声器阵列动态范围的测量不确定度的评定实例。

本规范为首次发布。

空气超声成像仪校准规范

# 范围

本规范适用于空气超声成像仪、工业声学空气超声成像仪、声波空气超声成像仪、超声相机20 kHz以上频段的校准，20 kHz以下频段可参照采用。

# 引用文件

本规范引用下列文件：

JJF 1001 通用计量术语及定义

JJF 1034—2020 声学计量名词术语及定义

JJF 1059.1—2012 测量不确定度评定与表示

JJF 1496—2014 声源识别定位系统（波束形成法）校准规范

JJF 1504—2015 空气超声测量仪校准规范

GB/T 3102.7 声学的量和单位

GB/T 3947—1996 声学名词术语

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。

# 术语和计量单位

本规范采用GB/T 3102.7中规定的量和单位。

JJF 1001、JJF 1034和GB/T 3947中界定的及以下术语和定义适用于本规范。

## 3.1 超声 ultrasound ,ultrasonic sound

频率高于可听声频率上限的声。

注：超声频率低限大致为20 kHz。

[来源：GB/T 3947—1996，2.9]

## 3.2 声成像 acoustic image

基于[传声器](https://baike.baidu.com/item/%E4%BC%A0%E5%A3%B0%E5%99%A8/2398527?fromModule=lemma_inlink" \t "_blank)阵列测量技术，通过测量一定空间内的声波到达各传声器的信号相位差异，依据[相控阵](https://baike.baidu.com/item/%E7%9B%B8%E6%8E%A7%E9%98%B5/12729994?fromModule=lemma_inlink" \t "_blank)原理确定声源的位置，测量声源的幅值，并以图像的方式显示声源在空间的分布，即取得空间声场分布云图－声像图，其中以图像的颜色和亮度代表强弱。

## 3.3 横向空间分辨力 transverse spatial resolution

在与传声器阵列轴向垂直方向上能分辨的两个声源的声中心之间的最小距离。

[来源：JJF 1034—2020，4.144]

## 3.4 阵列动态范围dynamic range of the array

传声器阵列能够同时准确定位的两个声源的最大声压级差。

# 概述

空气超声成像仪是定位空气中超声信号源的仪器，可用于气体泄露、真空泄露、放电故障点检测，也可用于车厢、船舶气密性检测及机械振动异响定位。空气超声成像仪一般由传声器阵列、摄像头、阵列信号采集分析单元以及阵列信号分析软件等组成。空气超声成像仪多采用传声器阵列波束形成技术获取指定频段的声源位置，并配合摄像头实时采集视频画面，将声成像动态地呈现在显示器上。

# 计量特性

## 横向定位偏移距离

横向定位偏移距离的技术要求一般由制造厂给出；若无相应规定，距离声源3 m处，声波入射角为0°时，横向定位偏移距离一般不大于0.01 m。

## 纵向定位偏移距离

纵向定位偏移距离的技术要求一般由制造厂给出；若无相应规定，声波入射角为0°时，纵向定位偏移距离一般不超过±10%。

## 最小成像声压级

最小成像声压级的技术要求一般由制造厂给出。

## 级线性

空气超声成像仪级线性误差一般不超过±2 dB。

## 横向空间分辨力

空气超声成像仪在距离声源3 m处，40 kHz频率下，横向空间分辨力一般不大于0.05 m。

## 阵列动态范围

在工作频率范围内，空气超声成像仪的阵列动态范围一般不小于厂家给出的技术指标。

注：以上技术要求不是用于合格性判定，仅供参考使用。

# 校准条件

## 消声室环境条件

——温度：（15～35）℃；

——相对湿度：(30～70）%；

——静压：（86～108）kPa。

## 计量标准器及主要配套设备

在使用的工作频率范围内，计量标准器及主要配套设备的性能要求如下：

* + 1. 声频信号发生器：频率误差不超过±0.25%，输出信号总失真不大于0.1%，稳定性优于±0.1 dB。
		2. 声频功率放大器：测量频率范围内，频率响应不应超过±0.2 dB。
		3. 声源：测量频率范围内，所需声压级（40 dB以上）总失真不大于3.0%。
		4. 消声室：室内本底噪声在被测频点的窄带声压级应低于测试声信号。
		5. 声分析仪：

——测量频率范围内，频率响应优于±0.2 dB；
——具有FFT分析功能，且在测量频段范围内的频率分辨率不大于20 Hz。

* + 1. 测量传声器单元：100 Hz~100 kHz 范围满足 JJG 175 规定的性能要求。
		2. 卷尺：分辨力至少1 mm，最大允许误差不应超过0.1%。
		3. 气压计：校准环境条件内，静压测量的最大允许误差不超过士0.2 kPa。
		4. 温湿度表：校准环境条件内，温度测量的最大允许误差不超过士0.5 ℃，相对湿度测量的最大允许误差不超过士10%。

# 校准项目和校准方法

##  校准项目

空气超声成像仪的校准项目见表1。

表1 空气超声成像仪校准项目一览表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 项目名称 | 技术要求的条号 | 校准方法的条号 |
| 1 | 外观检查 | —— | 7.2.1 |
| 2 | 横向定位偏移距离 | 5.1 | 7.2.2 |
| 3 | 纵向定位偏移距离 | 5.2 | 7.2.3 |
| 3 | 最小成像声压级 | 5.3 | 7.2.4 |
| 4 | 级线性 | 5.4 | 7.2.5 |
| 5 | 横向空间分辨力 | 5.5 | 7.2.6 |
| 6 | 阵列动态范围 | 5.6 | 7.2.7 |

##  校准方法

* + 1. 外观及功能性检查

空气超声成像仪应有完整的产品标识或铭牌，应完整、清晰标识产品名称、型号、出厂编号、制造厂名称、产品依据的标准（若有）等信息。

* + 1. 橫向定位偏移距离
1. 横向定位偏移距离的测量如图1所示，用支架固定一个半径可读的圆环组，将声源固定在其圆心，发出40 kHz声信号，空气超声成像仪位于声源正前方，垂直于圆环平面的中轴线，距离声源3 m处。



图1 空气超声成像仪定位偏移距离校准装置

1. 声源在空气超声成像仪中心点声压级至少60 dB，使空气超声成像仪稳定成像，对于频率范围可调的空气超声成像仪，调节检测信号频段为最小，且校准频点落于空气超声成像仪频带内，空气超声成像仪声成像显示的声源中心与实际声源中心之间的距离为该频点下的横向定位偏移距离。
2. 调节声源信号频率，在20 kHz、25 kHz、31.5 kHz频点重复上述b)步骤，横向定位偏移距离应满足5.1要求。
	* 1. 纵向定位偏移距离
3. 纵向定位偏移距离的测量如图1所示，声源产生40 kHz声信号，空气超声成像仪位于声源正前方，垂直于圆环平面的中轴线，距离声源1.5 m处。
4. 声源在空气超声成像仪中心点声压级至少60 dB，使空气超声成像仪稳定成像，该频点下的纵向定位偏移距离*S*可通过公式（1）计算得到。

S= *S*1-*S*2 （1）

式中：

*S*1——空气超声成像仪上读到的空气超声成像仪到声源的距离。

*S*2——空气超声成像仪传声器阵列平面中心到声源中心的距离。

1. 调节声源信号频率，在20 kHz、25 kHz、31.5 kHz频点重复上述b)步骤。
2. 调整空气超声成像仪与声源的距离至3 m，重复上述b)-c)步骤，纵向定位偏移距离应满足5.2要求。
	* 1. 最小成像声压级
3. 如图2所示，将声源和空气超声成像仪安装在自由场装置适当位置上，空气超声成像仪传声器阵列与声源中心同轴且距离为3.0 m。
4. 声源发出40 kHz稳定声信号，使得空气超声成像仪检测到稳定的声信号。
5. 对于频率范围可调的空气超声成像仪，调节检测信号频段为最小，且校准频点落于空气超声成像仪频带内。
6. 调节空气超声成像仪测量声压范围最小，逐渐减小信号幅值，直到空气超声成像仪刚好可以稳定成像，所得声成像为单一成像，不发生漂移、闪灭且满足5.1定位偏移距离的要求。
7. 保持信号发生器的设置和输出信号幅值不变，如图3所示，采用测量传声器替代空气超声成像仪，传声器正对声源中心且距离0.5 m，设置声分析仪频率分辨率不大于20 Hz，声分析仪显示声压级即为空气超声成像仪的最小成像声压级。



图2 空气超声成像仪最小成像声压级校准装置（替代前）



图3 空气超声成像仪最小成像声压级校准装置（替代后）

1. 在标称频率范围内，选择1/3倍频程中心频率点、被校空气超声成像仪频率上限及频率下限作为测量频率点，重复上述b)至c)步骤。
	* 1. 级线性
2. 校准装置示意图如图2，声源信号频率为40 kHz，空气超声成像仪位于声源正前方1m处，调节声源在空气超声成像仪中心点的幅值为90 dB。
3. 声源声信号幅值以10 dB步进衰减，记录每一次信号变化时，空气超声成像仪的示值变化量，直至40 dB，应满足5.3要求。
	* 1. 横向空间分辨力
4. 如图4所示，声频信号发生器的两通道分别经声频功率放大器接声源1与声源2，两个声源中心之间的距离为50 cm，空气超声成像仪放置于距2个声源连线中心点正前方3 m处。



图4 横向空间分辨力测量示意图

1. 信号发生器输出分别设置为40 kHz和39 kHz，两个声源在空气超声成像仪处产生的声压级均应大于60 dB，且在空气超声成像仪上显示的声压级一致，在空气超声成像仪中分辨出两个声源。
2. 逐渐减小两个声源的距离，直到空气超声成像仪中两个声源定位刚好同时稳定显示，不发生漂移、闪灭且不能满足5.1中定位偏移距离的要求，此时两个声源的距离即空气超声成像仪在该频点下的横向空间分辨力。

注：如有需要，其他频点的横向空间分辨力参照校准。

* + 1. 传声器阵列动态范围
1. 校准装置示意图如图4，声源1和声源2的距离为50 cm，空气超声成像仪放置于距2个声源连线中心点正前方3 m的位置处。
2. 两个声源分别发出40 kHz稳态正弦电信号，声源在空气超声成像仪处产生的声压级大于60 dB，在空气超声成像仪中可以清晰的看到两个声成像，且定位偏移距离满足5. 1的要求。
3. 逐步调节声源1的声压级，直到空气超声成像仪可以同时显示两个满足5.1要求的声源定位结果的极限，且显示界面中不出现其他声成像，记录声源1在空气超声成像仪显示的声压级*L*1和声源2在空气超声成像仪显示的声压级*L*2。
4. 将声源1的声压级调回到b)步骤中的状态，使得在空气超声成像仪中可以同时看到两个声成像，逐步调节声源2的声压级，直到空气超声成像仪可以同时显示两个满足5.1要求的声源定位结果的极限，记录声源1在空气超声成像仪显示的声压级差$L\_{1}^{'}$和声源2在空气超声成像仪显示的声压级差$L\_{2}^{'}$。
5. 由公式(2）得到该频点下的传声器阵列动态范围*D*。

$D=\frac{\left|L\_{1}−L\_{2}\right|+\left|L\_{1}^{'}−L\_{2}^{'}\right|}{2}$ （2）

注：如有需要，其他频点的阵列动态范围参照校准。

# 校准结果表达

## 8.1 校准结果

校准证书应至少包括以下信息：

a）标题，如“校准证书” ；

b）实验室的名称和地址；

c）进行校准的地点（如果与实验室地址不同）；

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受日期；

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）对校准规范的偏离说明；

n）校准证书或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声明；

p）未经实验室书面批准，不得部分复制校准证书的声明。

## 8.2 数值修约

所有的数据应先计算，后修约，出具校准数据的有效位数按如下方法修约：

——横向定位偏移距离、横向空间分辨力修约至0.1 cm；

——纵向定位偏移距离空气超声成像仪距离分辨力一致；

——最小成像声压级修约至0.1 dB；

——级线性修约至与空气超声成像仪声压级分辨力一致；

——传声器阵列动态范围与空气超声成像仪声压级分辨力一致。

## 8.3 校准证书

经校准的空气超声成像仪应出具校准证书。校准证书应包括的信息见8.1条，推荐的校准证书的内页格式见附录A。

## 8.4 校准结果的测量不确定度

空气超声成像仪校准结果的不确定度按JJF 1059.1—2012 的要求评定，测量不确定度的评定示例见附录B。

# 复校时间间隔

空气超声成像仪的复校时间间隔建议为一年。由于时间间隔的长短取决于其使用情况，如环境条件、使用频率及测量对象等，因此，使用单位可根据实际使用情况自主决定复校的时间间隔。

# 附录A

**校准证书的内页格式**

推荐的校准用空气超声成像仪校准证书的内页格式见表A.1

表A.1 校准证书的内页格式

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **校 准 结 果** 共 页 第 页1 横向定位偏移距离

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 声源频率kHz | 声源声压级dB | 声源失真% | 定位偏移距离dB |
| 20 |  |  |  |
| 25 |  |  |  |
| 31.5 |  |  |  |
| 40 |  |  |  |

2 纵向定位偏移距离

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 距离 | 声源频率kHz | 声源声压级dB | 声源失真% | 定位偏移距离dB |
| 1.5 m | 20 |  |  |  |
| 25 |  |  |  |
| 31.5 |  |  |  |
| 40 |  |  |  |
| 3.0 m | 20 |  |  |  |
| 25 |  |  |  |
| 31.5 |  |  |  |
| 40 |  |  |  |

**校 准 结 果** 共 页 第 页3 最小成像声压级

|  |  |
| --- | --- |
| 频率kHz | 最小成像声压级dB |
| 2 |  |
| 3.15 |  |
| 4 |  |
| 6.3 |  |
| 8 |  |
| 10 |  |
| 12.5 |  |
| 16 |  |
| 20 |  |
| 25 |  |
| 31.5 |  |
| 40 |  |

 4 级线性

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 频率kHz | 声源幅值dB | 声源失真% | 空气超声成像仪声压级dB |
| 40 |  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |

**校 准 结 果** 共 页 第 页5 横向空间分辨力：40 kHz频率下横向空间分辨力 6 阵列动态范围：40 kHz频率下阵列动态范围： 校准结果测量不确定度的描述：校准技术依据：校准的环境条件： 空气温度： ℃； 相对湿度： ％； 静压： kPa |

#

# 附录B

**测量不确定度的评定示例**

分别对最小成像声压级、横向定位偏移距离、级线性、横向空间分辨力、阵列动态范围进行不确定度评定。

B.1 最小成像声压级的测量不确定度评定

测量过程中从信号发生器发出的电信号经功率放大器到声源，系统性的误差在两次测量的差值运算时被消除，包括环境条件等系统误差均可不考虑。而所有与声压级测量值相关的随机因素都得考虑，此例的不确定度评定中，主要考虑重复性测量引起的不确定度$u\_{1}$和测点位置引起的不确定度，包括横向位置引入的不确定度$u\_{2}$及纵向距离引入的不确定度$u\_{3}$；主要考虑声压级测量系统引起的不确定度$u\_{4}$，包括声分析仪数据采集与分析部分、测量传声器部分、前置放大器部分引入的不确定度。

B.1.1 A类不确定度的评定

分别在不同的频点对最小成像声压级重复10次测量，以其标准偏差作为测量重复性引入的测量不确定度分量。测试结果见表B.1：

表B.1 最小成像声压级重复性测试

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 频率kHz | 声压级/dB | 平均值/dB | 标准偏差/dB |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 3.15 | 19.4 | 19.2 | 19.0 | 25.1 | 25.0 | 22.7 | 22.2 | 22.3 | 21.9 | 22.0 | 21.9 | 2.2 |
| 4 | 19.9 | 24.5 | 19.4 | 24.0 | 23.8 | 23.4 | 23.9 | 23.5 | 23.1 | 23.6 | 22.9 | 1.8 |
| 6.3 | 25.6 | 25.5 | 25.5 | 25.5 | 25.5 | 26.6 | 25.6 | 26.4 | 26.4 | 26.6 | 25.9 | 0.5 |
| 8 | 17.4 | 17.5 | 17.3 | 16.9 | 17.0 | 16.5 | 16.2 | 15.8 | 16.2 | 16.1 | 16.7 | 0.6 |
| 10 | 26.4 | 26.5 | 25.5 | 25.3 | 25.1 | 23.6 | 23.4 | 23.8 | 23.9 | 23.4 | 24.7 | 1.2 |
| 12.5 | 18.7 | 19.6 | 19.5 | 19.4 | 19.2 | 19.3 | 19.3 | 19.6 | 19.2 | 20.1 | 19.4 | 0.4 |
| 16 | 22.9 | 24.2 | 24.7 | 25.0 | 25.1 | 24.6 | 23.0 | 24.2 | 24.3 | 23.7 | 24.2 | 0.8 |
| 20 | 19.6 | 17.4 | 18.5 | 18.7 | 20.3 | 20.9 | 20.4 | 20.4 | 20.3 | 19.8 | 19.6 | 1.1 |
| 25 | 6.4 | 6.2 | 6.0 | 6.0 | 5.2 | 5.4 | 5.6 | 5.6 | 5.8 | 5.9 | 5.8 | 0.4 |
| 31.5 | 12.0 | 11.6 | 11.5 | 11.7 | 11.6 | 11.5 | 11.4 | 11.5 | 11.5 | 11.4 | 11.6 | 0.2 |
| 40 | 14.0 | 14.1 | 14.7 | 14.8 | 15.5 | 15.4 | 13.4 | 13.8 | 13.4 | 13.4 | 14.3 | 0.8 |

B.1.2 B类不确定度的评定

B.1.2.1 纵向测量距离

通过距离因子20logS评估自由场中，距离3m测试条件下，增或减5 mm和10 mm时测试结果:

表B.2 纵向距离变化对测试结果的影响

|  |  |
| --- | --- |
| 频率/kHz | 声压级变化量/dB |
| -10 mm | -5 mm | 0 mm | +5 mm | +10 mm |
| 3.15～40 | -0.09 | -0.04 | 0.00 | 0.04 | 0.09 |

3m自由场测试过程中一般可将纵向距离误差控制在大概在±10 mm范围，考虑均匀分布，由此估算纵向距离偏差引起的不确定度：

$u\_{2}=0.09/\sqrt{3}$*=*0.052 dB （B.1）

B.1.2.2 横向测量距离

通过实验来评估水平距离对声压级测量结果的影响，改变测试距离，在规定的距离增或减2 mm 、4 mm及6 mm，结果见表B.3:

表B.3 横向距离变化对测试结果的影响

|  |  |
| --- | --- |
| 频率/kHz | 声压级/dB |
| -6 mm | -4 mm | -2 mm | 0 mm | +2 mm | +4 mm | +6 mm |
| 3.15 | 60.1  | 60.0  | 60.8  | 60.8  | 60.7  | 60.7  | 60.6 |
| 4 | 60.3  | 59.5  | 60.4  | 59.5  | 60.3  | 59.8  | 60.3 |
| 6.3 | 58.5  | 59.4  | 59.4  | 59.5  | 59.5  | 59.5  | 59.5 |
| 8 | 58.7  | 59.6  | 59.7  | 59.8  | 59.9  | 59.9  | 59.9 |
| 10 | 63.3  | 64.1  | 64.1  | 63.7  | 63.6  | 63.8  | 63.6 |
| 12.5 | 57.8  | 58.8  | 58.8  | 58.8  | 58.7  | 57.9  | 58.6 |
| 16 | 59.7  | 60.6  | 60.7  | 60.5  | 60.0  | 59.9  | 59.7 |
| 20 | 63.0  | 63.0  | 63.0  | 62.8  | 63.0  | 62.8  | 61.9 |
| 25 | 61.8  | 61.7  | 61.7  | 61.3  | 61.1  | 60.2  | 60.3 |
| 31.5 | 61.8  | 59.7  | 60.0  | 60.5  | 59.2  | 59.7  | 60.9  |
| 40 | 59.6  | 59.4  | 59.4  | 59.1  | 58.4  | 58.4  | 58.1 |

3m自由场测试过程中一般可将横向距离误差控制在大概在±6 mm范围，考虑均匀分布由此估算横向距离偏差引起的不确定度：

表B.4 横向距离变化引入的不确定度分量

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 频率/kHz | 误差/dB | *u*3/dB |
| 3.15 | 0.81  | 0.47  |
| 4 | 0.89  | 0.51  |
| 6.3 | 1.04  | 0.60  |
| 8 | 1.20  | 0.69  |
| 10 | 0.86  | 0.50  |
| 12.5 | 1.02  | 0.59  |
| 16 | 1.04  | 0.60  |
| 20 | 1.12  | 0.65  |
| 25 | 1.60  | 0.92  |
| 31.5 | 2.10  | 1.20  |
| 40 | 1.55  | 0.89  |

B.1.2.3 声压级测量系统

表B.5 声压级测量系统引入的不确定度

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 测试仪器名称 | 最大允许误差 | 标准不确定度（*k*=2） |
| Pulse信号分析仪 | ±0.05 dB | 0.03 dB |
| 测量传声器 | ±0.5 dB | 0.29 dB |
| 前置放大器 | ±0.3 dB | 0.17 dB |

B.1.2.4 标准不确定度各分量一览表，见表B.6

表B.6 标准不确定度各分量一览表

|  |  |
| --- | --- |
| 标准不确定度各分量*u*i | 不确定度来源 |
| *u*1 | 重复性测量引起的不确定度 |
| *u*2 | 纵向测试距离引起的不确定度 |
| *u*3 | 横向测试距离引起的不确定度 |
| *u*4 | 声压级测量系统引入的不确定度 |

B.1.3 合成标准不确定度

表B. 6所列各标准不确定度分量互不相关，合成标准不确定度见表B.7：

表B.7 合成标准不确定度：

|  |  |
| --- | --- |
| 频率/kHz | 合成标准不确定度/dB |
| 3.15 | 2.28 |
| 4 | 1.90 |
| 6.3 | 0.85 |
| 8 | 0.98 |
| 10 | 1.34 |
| 12.5 | 0.79 |
| 16 | 1.06 |
| 20 | 1.41 |
| 25 | 1.06 |
| 31.5 | 1.26 |
| 40 | 1.24 |

取不确定度较大点作为校准不确定度，*u*c=2.28 dB

B.1.4 扩展不确定度

合成后的标准不确定度，按近似正态分布考虑，当取包含因子*k* = 2时，其扩展不确定度

=2 ×2.28 dB≈ 4.6 dB （B.2）

则空气超声成像仪最小成像声压级误差的测量扩展不确定度*U* = 4.6 dB， *k* = 2。

B.2 横向定位偏移距离的测量不确定度评定

B.2.1 A类不确定度的评定

分别在不同的频点对横向定位偏移距离重复10次测量，以其标准偏差作为测量重复性引入的测量不确定度分量。测试结果见表B.8：

表B.8 横向定位偏移距离的重复性测量结果

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 频率kHz | 横向定位偏移距离/cm | 平均值/cm | 标准偏差/cm |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 20 | 7.2 | 5.8 | 6.5 | 6.6 | 5.8 | 6.0 | 5.7 | 5.7 | 7.0 | 6.5 | 6.3 | 0.6 |
| 25 | 3.5 | 5.2 | 4.5 | 4.0 | 4.3 | 5.5 | 6.0 | 5.0 | 7.0 | 6.3 | 5.1 | 1.1 |
| 31.5 | 3.0 | 4.0 | 3.2 | 3.5 | 3.8 | 4.8 | 4.5 | 4.3 | 4.3 | 4.8 | 4.0 | 0.6 |
| 40 | 7.0 | 4.5 | 5.4 | 4.3 | 4.6 | 5.3 | 4.5 | 4.5 | 5.7 | 4.8 | 5.1 | 0.8 |

B.2.2 B类不确定度的评定

B.2.2.1 纵向测量距离引入的不确定度

距离3m测试条件下，增或减5 mm和10 mm时测试结果:

表B.9 纵向距离变化对测试结果的影响

|  |  |
| --- | --- |
| 频率/kHz | 横向定位偏移距离变化量/cm |
| -10 mm | -5 mm | 0 mm | +5 mm | +10 mm |
| 20 | -0.1 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.2 |
| 25 | -0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.2 |
| 31.5 | 0.2 | 0.1 | 0.0 | -0.1 | 0.1 |
| 40 | -0.2 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.1 |

3m自由场测试过程中一般可将纵向距离误差控制在大概在±10 mm范围，考虑均匀分布，由此估算纵向距离偏差引起的不确定度：

$u\_{2}=0.2/\sqrt{3}$=0.12 cm （B.3）

B.2.2.2 横向测量距离引入的不确定度

通过实验来评估水平距离对横向定位偏移距离测量结果的影响，改变测试距离，在规定的距离增或减2 mm 、4 mm及6 mm，结果见表B.10:

表B.10 横向距离变化对测试结果的影响

|  |  |
| --- | --- |
| 频率/kHz | 横向定位偏移距离/cm |
| -6 mm | -4 mm | -2 mm | 0 mm | +2 mm | +4 mm | +6 mm |
| 20 | 5.6 | 5.7 | 5.8 | 6.0 | 5.9 | 5.8 | 5.8 |
| 25 | 5.5 | 5.1 | 5.3 | 5.5 | 5.4 | 5.0 | 5.1 |
| 31.5 | 4.8 | 4.7 | 4.5 | 4.8 | 4.3 | 4.3 | 4.8 |
| 40 | 5.6 | 5.4 | 5.2 | 5.3 | 5.2 | 5.1 | 5.2 |

3m自由场测试过程中一般可将横向距离误差控制在大概在±6 mm范围，考虑均匀分布由此估算横向距离偏差引起的不确定度：

表B.11 横向距离变化引入的不确定度分量

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 频率/kHz | 误差/cm | *u*3/cm |
| 20 | 0.4  | 0.23 |
| 25 | 0.5  | 0.29 |
| 31.5 | 0.5  | 0.29  |
| 40 | 0.3 | 0.18 |

B.2.2.3 尺子测量引入的不确定度分量

查检定证书可知：

$u\_{4}=2.5×10^{−5}cm$ （B.4）

B.2.2.4 数据修约引入的不确定度分量

数据修约间隔为0.1 cm，考虑均匀分布，由此引入的标准不确定度为:

$u\_{5}=\frac{0.05}{\sqrt{3}}≈0.03 cm$ （B.5）

B.2.2.5 标准不确定度各分量一览表，见表B.12

表B.12 标准不确定度各分量一览表

|  |  |
| --- | --- |
| 标准不确定度各分量*ui* | 不确定度来源 |
| *u*1 | 重复性测量引起的不确定度 |
| *u*2 | 纵向测试距离引起的不确定度 |
| *u*3 | 横向测试距离引起的不确定度 |
| *u*4 | 尺子测量引入的不确定度 |
| *u*5 | 数据修约引入的不确定度 |

B.2.3 合成标准不确定度

表B.12所列各标准不确定度分量互不相关，合成标准不确定度见表B.13：

表B.13 合成标准不确定度：

|  |  |
| --- | --- |
| 频率/kHz | 合成标准不确定度/cm |
| 20 | 0.66 |
| 25 | 1.15 |
| 31.5 | 0.68 |
| 40 | 0.83 |

取不确定度较大点作为校准不确定度，*u*c=1.15 cm

B.2.4 扩展不确定度

合成后的标准不确定度，按近似正态分布考虑，当取包含因子*k* = 2时，其扩展不确定度

=2 ×1.15 cm= 2.3 cm （B.6）

则空气超声成像仪横向定位偏移距离的测量扩展不确定度*U* = 2.3 cm， *k* = 2。

B.3 级线性测量的测量不确定度评定

B.3.1 A类不确定度的评定

对级线性重复10次测量，以其标准偏差作为测量重复性引入的测量不确定度分量。测试结果见表B.14：表B.14 40 kHz的级线性重复性测量结果

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 声源供电电压/mV | 声源幅值/dB | 空气超声成像仪声压级/dB |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 536 | 90 | 96.5 | 97.1 | 97.1 | 97.3 | 97.1 | 96.7 | 96.4 | 96.5 | 96.6 | 96.6 |
| 168 | 80 | 87.3 | 88.3 | 88.4 | 88.4 | 88.3 | 87.5 | 87.6 | 87.7 | 87.8 | 87.8 |

表B.15 级线性测量标准偏差

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 标准衰减/dB | 空气超声成像仪声压级衰减/dB | 标准偏差/dB |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 10 | 9.2 | 8.8 | 8.7 | 8.9 | 8.8 | 9.2 | 8.8 | 8.8 | 8.8 | 8.8 | 0.18 |

B.3.2 B类不确定度的评定

B.3.2.1 声压级测量系统

表B.16 声压级测量系统引入的不确定度

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 测试仪器名称 | 最大允许误差 | 标准不确定度（*k*=2） |
| Pulse信号分析仪 | ±0.05 dB | 0.03 dB |
| 测量传声器 | ±0.5 dB | 0.29 dB |
| 前置放大器 | ±0.3 dB | 0.17 dB |

B.3.2.2 数据修约引入的不确定度分量

数据修约间隔为0.1 dB，考虑均匀分布，由此引入的标准不确定度为:

$u\_{2}=0.05/\sqrt{3}$≈0.03 dB （B.7）

B.3.2.3 标准不确定度各分量一览表，见表B.17

表 B.17 标准不确定度各分量一览表

|  |  |
| --- | --- |
| 标准不确定度各分量*ui* | 不确定度来源 |
| *u*1 | 重复性测量引起的不确定度 |
| *u*2 | 声压级测量系统引入的不确定度 |
| *u*3 | 数据修约引入的不确定度 |

B.3.3 合成标准不确定度

表 B.17所列各标准不确定度分量互不相关，合成标准不确定度：

*u*c≈0.384 dB （B.8）

B.3.4 扩展不确定度

合成后的标准不确定度，按近似正态分布考虑，当取包含因子*k* = 2时，其扩展不确定度

=2 ×0.384 dB≈ 0.8 dB （B.1）

则空气超声成像仪级线性误差的测量扩展不确定度*U* = 0.8 dB， *k* = 2。

B.4 横向空间分辨力测量的测量不确定度评定

B.4.1 A类不确定度的评定

在40 kHz频点对横向空间分辨力进行重复10次测量，以其标准偏差作为测量重复性引入的测量不确定度分量。测试结果见表B.18：

表B.18 40 kHz的横向空间分辨力重复性测量结果

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 频率kHz | 横向空间分辨力/cm | 平均值/cm | 标准偏差/cm |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 40 | 26.5 | 25.0 | 25.0 | 24.8 | 24.5 | 24.8 | 24.8 | 24.6 | 24.8 | 24.6 | 24.9 | 0.6 |

B.4.2 B类不确定度的评定

B.4.2.1 纵向测量距离引入的不确定度

距离3m测试条件下，增或减5 mm和10 mm时测试结果:

表B.19 纵向距离变化对横向定位偏移结果的影响

|  |  |
| --- | --- |
| 频率/kHz | 横向空间分辨力变化量/cm |
| -10 mm | -5 mm | 0 mm | +5 mm | +10 mm |
| 40 | -0.2 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.0 |

3m自由场测试过程中一般可将纵向距离误差控制在大概在±10 mm范围，考虑均匀分布，由此估算纵向距离偏差引起的不确定度：

$u\_{2}=0.2/\sqrt{3}$=0.12 cm （B.9）

B.4.2.2 横向测量距离引入的不确定度

通过实验来评估水平距离对横向定位偏移距离测量结果的影响，改变测试距离，在规定的距离增或减2 mm 、4 mm及6 mm，结果见表B.20:

表B.20 横向距离变化对横向定位偏移结果的影响

|  |  |
| --- | --- |
| 频率/kHz | 横向空间分辨力/cm |
| -6 mm | -4 mm | -2 mm | 0 mm | +2 mm | +4 mm | +6 mm |
| 40 | 25.2 | 24.8 | 24.8 | 24.9 | 24.8 | 25.0 | 25.1 |

3m自由场测试过程中一般可将横向距离误差控制在大概在±6 mm范围，考虑均匀分布由此估算横向距离偏差引起的不确定度：

$u\_{3}=0.3/\sqrt{3}$=0.18 cm （B.10）

B.4.2.3 尺子测量引入的不确定度分量

查检定证书可知：

$u\_{4}=2.5×10^{−5}cm$ （B.11）

B.4.2.4 数据修约引入的不确定度分量

数据修约间隔为0.10 cm，考虑均匀分布，由此引入的标准不确定度为:

$u\_{5}=0.05/\sqrt{3}≈0.03cm$ （B.12）

B.4.2.5 标准不确定度各分量一览表，见表B.21

表 B.21 标准不确定度各分量一览表

|  |  |
| --- | --- |
| 标准不确定度各分量*ui* | 不确定度来源 |
| *u*1 | 重复性测量引起的不确定度 |
| *u*2 | 纵向测试距离引起的不确定度 |
| *u*3 | 横向测试距离引起的不确定度 |
| *u*4 | 尺子测量测量引入的不确定度 |
| *u*5 | 数据修约引入的不确定度 |

B.4.3 合成标准不确定度

表 B.21所列各标准不确定度分量互不相关，合成标准不确定度：

*u*c≈0.64 cm （B.13）

B.4.4 扩展不确定度

合成后的标准不确定度，按近似正态分布考虑，当取包含因子*k* = 2时，其扩展不确定度

=2 ×0.64= 1.28 cm （B.14）

则空气超声成像仪横向空间分辨力的测量扩展不确定度*U* = 1.28 cm， *k* = 2。

B.5 阵列动态范围测量的测量不确定度评定

B.5.1 A类不确定度的评定

在40 kHz频点对阵列动态范围进行重复10次测量，以其标准偏差作为测量重复性引入的测量不确定度分量。测试结果见表B.22：

表B.22 40 kHz的阵列动态范围重复性测量结果

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 频率kHz | 传声器阵列动态范围/dB | 平均值/dB | 标准偏差/dB |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 40 | 11.9 | 11.9 | 12.0 | 12.0 | 11.9 | 11.7 | 12.0 | 11.9 | 11.9 | 11.7 | 11.9 | 0.09 |

B.5.2 B类不确定度的评定

B.5.2.1 纵向测量距离

通过距离因子20logS评估自由场中，距离3m测试条件下，增或减5 mm和10 mm时测试结果:

表B.23 纵向距离变化对测试结果的影响

|  |  |
| --- | --- |
| 频率/kHz | 声压级变化量/dB |
| -10 mm | -5 mm | 0 mm | +5 mm | +10 mm |
| 40 | -0.09 | -0.04 | 0.00 | 0.04 | 0.09 |

3m自由场测试过程中一般可将纵向距离误差控制在大概在±10 mm范围，考虑均匀分布，由此估算纵向距离偏差引起的不确定度：

$u\_{2}=0.09/\sqrt{3}$=0.052 dB （B.15）

B.5.2.2 横向测量距离

通过实验来评估水平距离对声压级测量结果的影响，改变测试距离，在规定的距离增或减2 mm 、4 mm及6 mm，结果见表B.24:

表B.24 横向距离变化对测试结果的影响

|  |  |
| --- | --- |
| 频率/kHz | 声压级/dB |
| -6 mm | -4 mm | -2 mm | 0 mm | +2 mm | +4 mm | +6 mm |
| 40 | 59.6  | 59.4  | 59.4  | 59.1  | 58.4  | 58.4  | 58.1 |

3m自由场测试过程中一般可将横向距离误差控制在大概在±6 mm范围，考虑均匀分布由此估算横向距离偏差引起的不确定度：

$u\_{3}=1.5/\sqrt{3}$=0.87 dB （B.16）

B.5.2.3 数据修约引入的不确定度分量

数据修约间隔为0.1 dB，考虑均匀分布，由此引入的标准不确定度为:

$u\_{4}=\frac{0.05}{\sqrt{3}}≈0.03 dB$ （B.17）

B.5.2.4 声音发生系统引入的不确定度分量

表B.25 声压级测量系统引入的不确定度

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 测试仪器名称 | 最大允许误差 | 标准不确定度（*k*=2） |
| 声频信号发生器 | ±0.1 dB（稳定性） | 0.06 dB |
| 声频功率放大器 |  ±1 dB（通道增益差） |  0.58 dB |

B.5.2.5 标准不确定度各分量一览表，见表B.26

表 B.26 标准不确定度各分量一览表

|  |  |
| --- | --- |
| 标准不确定度各分量*ui* | 不确定度来源 |
| *u*1 | 重复性测量引起的不确定度 |
| *u*2 | 纵向测试距离引起的不确定度 |
| *u*3 | 横向测试距离引起的不确定度 |
| *u*4 | 数据修约引入的不确定度 |
| *u*5 | 声音发生系统引入的不确定度 |

B.5.3 合成标准不确定度

表B. 25所列各标准不确定度分量互不相关，合成标准不确定度：

*u*c≈1.06 dB （B.18）

B.5.4 扩展不确定度

合成后的标准不确定度，按近似正态分布考虑，当取包含因子*k* = 2时，其扩展不确定度

=2×1.06≈ 2.2 dB （B.19）

则空气超声成像仪横向空间分辨力的测量扩展不确定度*U* = 2.2 dB， *k* = 2。