



湖北省地方计量技术规范

JJF (鄂) xxxx—202x

声学 and 振动数据转换器 校准规范

Calibration Specification for Acoustic and Vibration Data Converters

(送审稿)

20**-**-**发布

20**-**-**实施

湖北省市场监督管理局 发布

声学 and 振动数据转换器 校准规范

Calibration Specification for

JJF XXXX—202X

Acoustic and Vibration Data Converters

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：武汉普创数据科技有限公司

岩联（武汉）科技有限公司

湖北省计量测试技术研究院荆州分院

湖北省计量测试技术研究院荆门分院

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：

姚秋平（湖北省计量测试技术研究院）

王 飞（湖北省计量测试技术研究院）

汤 雄（湖北省计量测试技术研究院）

参加起草人：

许 昊（湖北省计量测试技术研究院）

焦富清（武汉普创数据科技有限公司）

王承成（岩联（武汉）科技有限公司）

严建福（湖北省计量测试技术研究院荆州分院）

陈谊丽（湖北省计量测试技术研究院荆门分院）

目 录

引 言	II
1 范围	1
2 引用文件	1
3 术语和计量单位	1
3.1 计量单位	1
3.2 术语及定义	1
4 概述	2
5 计量特性	2
5.1 数模转换器总谐波失真	2
5.2 数模转换器取样频率误差	2
5.3 模数转换器抗混叠带外衰减	2
5.4 模数转换器动态有效位数	3
5.5 模数转换器增益	3
5.6 模数转换器采样频率误差	3
5.7 模数转换器无杂散动态范围	3
5.8 模数转换器总谐波失真	3
5.9 模数转换器信噪比	3
5.10 模数转换器动态显示延迟	3
6 校准条件	3
6.1 环境条件:	3
6.2 测量标准及其他设备	3
7 校准项目和校准方法	4
7.1 校准项目	4
7.2 校准方法	4
7.2.1 数模转换器总谐波失真	4
7.2.2 数模转换器取样频率误差	6
7.2.3 模数转换器抗混叠带外衰减	6
7.2.4 模数转换器动态有效位数	7
7.2.5 模数转换器采样频率误差	8
7.2.6 模数转换器增益	8
7.2.7 模数转换器无杂散动态范围	8
7.2.8 模数转换器总谐波失真	9
7.2.9 模数转换器信噪比	9
7.2.10 模数转换器动态显示延迟	10
8 校准结果的处理	10
8.1 校准数据处理	10
8.2 校准证书	10
8.3 校准结果的测量不确定度	10
9 复校时间间隔	11
附录 A 校准证书的内容和记录格式	12
附录 B 测量不确定度评定示例	15

引 言

JJF 1001—2011《通用计量术语及定义》、JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1059.1—2012《测量不确定度的评定与表示》共同构成制定本校准规范的基础性系列规范。

规范部分主要计量特性参照《IEEE Std 1241TM-2010 IEEE Standard for Terminology and Test Methods for Analog-to-Digital Converters》中声学和频谱分析应用场景的关键参数。

本规范为首次发布。

声学 and 振动数据转换器校准规范

1 范围

本规范适用于 0.01 Hz~200 kHz 声学 and 振动数据转换器的校准。

2 引用文件

本规范引用下列文件：

JJG 188—2017 声级计

JJF 1001—2011 通用计量术语及定义

JJF 1034—2020 声学计量名词术语及定义

GB/T 3102.7-1993 声学的量和单位

GB/T 3947-1996 声学名词术语

IEEE Std 1057™-2007 数字化波形记录仪 (IEEE Standard for Digitizing Waveform Recorders)

IEEE Std 1241™-2010 模数转换器术语和试验方法 (IEEE Standard for Terminology and Test Methods for Analog-to-Digital Converters)

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 计量单位

本规范采用 GB/T 3102.7 规定的量和单位。

3.2 术语及定义

JJF 1001—2011、JJF 1034—2020、JJG 188—2017 和 GB/T 3947—1996 界定的及以下术语和定义适用于本规范。

3.2.1 总谐波失真 total harmonic distortion(THD)

对于具有既定频率和幅度的正弦波输入信号，总谐波失真是指在输出频谱上所有谐波失真成分有效值的和与输出频谱上基波有效值之比。

3.2.2 噪声 noise

噪声是输出信号(转换为输入单元)与输入信号之间的任何偏差，但线性时不变系统响应(增益和相移)、直流电平移位或总谐波失真引起的偏差除外。

3.2.3 信噪比 signal-to-noise ratio (SNR)

信噪比是指定频率和幅度的正弦波输入信号的有效值与噪声的有效值比值。

3.2.4 信号与噪声和失真比 signal-to-noise-and-distortion ratio (SINAD)

信号的均方根值与噪声和失真均方根的比值。

注：除非另有规定，SINAD 测量使用正弦波输入信号。SINAD 取决于所施加正弦波的振幅和频率。应规定进行测量时的振幅和频率。

3.2.5 有效位数 effective number of bits (ENOB)

以模数转换方式进行波形测量时，对波形测量结果带来的附加信噪失真比所对应的理想模数转换位数。

3.2.6 混叠 aliasing

模数转换系统用比输入信号的最高频率分量低得多的速率对连续的随时间变化的输入信号取样，在输出信号中引入虚假频率分量的现象。

3.2.7 无杂散动态范围 spurious-free dynamic range(SFDR)

对于指定幅度和频率的纯正弦波输入，模数转换器的输出最大谐波或杂散频谱分量与纯正弦波信号电平分贝差。

4 概述

声学 and 振动数据转换器由模拟电信号转数字信号和数字信号转模拟信号的硬件与控制软件组成，是实现声学 and 振动数字测量的核心设备。数据转换特性是声学振动测试中关键的基础指标。声学 and 振动数据转换器主要具有两个核心功能：数模转换功能——实现信号发生器、音频播放器等设备的模拟信号输出，涉及相关功能描述时简称为数模转换器。模数转换功能——实现对信号的检测、测试和分析等功能，涉及相关功能描述时简称为模数转换器。

5 计量特性

5.1 数模转换器总谐波失真

不低于制造标准的要求。

5.2 数模转换器取样频率误差

不低于制造标准的要求。

5.3 模数转换器抗混叠带外衰减

不低于制造标准的要求。

5.4 模数转换器动态有效位数

不低于制造标准的要求。

5.5 模数转换器增益

不低于制造标准的要求。

5.6 模数转换器采样频率误差

不低于制造标准的要求。

5.7 模数转换器无杂散动态范围

不低于制造标准的要求。

5.8 模数转换器总谐波失真

不低于制造标准的要求。

5.9 模数转换器信噪比

不低于制造标准的要求。

5.10 模数转换器动态显示延迟

不低于制造标准的要求。

6 校准条件

6.1 环境条件：

——温度：(18~28) °C；

——相对湿度：(30~90) %；

——静压：(80~103) kPa。

6.2 测量标准及其他设备

a) 数字正弦信号发生器：频率范围为 0.01 Hz~200 kHz，输出信号的总失真应不大于 0.01%，频率年稳定性应不大于 $\pm 1\text{ppm}$ ，频率误差应不大于 5×10^{-6} （加频率标准器时： 1×10^{-7} ）。

b) 频率计：测量准确度应不大于 1×10^{-8} 。

c) 数字电压表：交流电压测量准确度应不大于 0.1%。

d) 白噪声信号发生器：正态幅值分布，上限频率不低于被检转换器的最高分析频率。

e) 频谱分析仪：频率范围应不低于 2 MHz，动态范围应大于 110dB 或比被检数模转换器最大动态范围大至少 6dB。

f) 频率标准器：应优于 1×10^{-7} 。

g) 数据采集仪：带 FFT 分析功能，频率范围应不低于 2 MHz。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

声学 and 振动数据转换器的校准项目见表 3。

表 3 校准项目一览表

序号	项目名称	技术要求的条款号	校准方法的条款号
1	数模转换器总谐波失真	5.1	7.2.1
2	数模转换器取样频率误差	5.2	7.2.2
3	模数转换器抗混叠带外衰减	5.3	7.2.3
4	模数转换器动态有效位数	5.4	7.2.4
5	模数转换器采样频率误差	5.5	7.2.5
6	模数转换器增益	5.6	7.2.6
7	模数转换器无杂散动态范围	5.7	7.2.7
8	模数转换器总谐波失真	5.8	7.2.8
9	模数转换器信噪比	5.9	7.2.9
10	模数转换器动态显示延迟	5.10	7.2.10

7.2 校准方法

7.2.1 数模转换器总谐波失真

数模转换器总谐波失真可采用 7.2.1.1 所述频谱分析仪法进行校准，校准时使用频谱分析仪作为测量标准。也可选用 7.2.1.2 所述数据采集仪法进行校准，校准时使用数据采集仪作为测量标准。

7.2.1.1 频谱分析仪法

校准示意图参见图 1。在数模转换器的工作频率范围内，在高、低两个频段中各选一个频率点，幅值设置为数模转换器满幅值 90%。

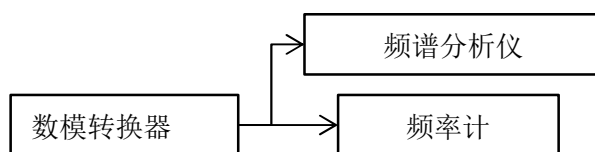


图 1 数模转换器总谐波失真频谱分析仪法

被校准数模转换器完成上述设置并输出信号，用频谱分析仪直接分析包括基波在内

的十次谐波分量。按照公式(1), 2 至 10 谐波分量均方根求和与基波分量进行比值运算, 得到数模转换器总谐波失真。

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{10} U_i^2}}{U_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

THD ——被校数模转换器总谐波失真, %;

U_i ——第 i 次谐波分量的电压有效值, mV;

U_1 ——基波分量的电压有效值, mV。

注: 本方法虽然规定 $k=10$, 在实际测量时可以根据实际谐波分量而定, 由于是累加的, 多数情况 7 次谐波以后分量可以忽略不计, 可根据测量不确定度灵活处理。

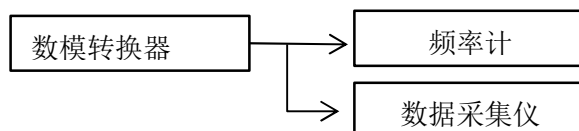


图 2 数模转换器总谐波失真数据采集仪分析法

7.2.1.2 数据采集仪分析法

校准示意图参见图 2。同 7.2.1.1 选择幅值; 在高、低两个频段中各选一个频率测试点, 具体频率按照相干采样原则设置, 采样点数选为 2 的 n 次幂的倍数, 以方便计算机进行处理, 比如使用较多的 512、1024、2048、4096 等。正弦波个数 M 、采样点数 N 、采样频率 f_{sampls} 、及信号频率 f_{signal} , 必须满足以下关系:

$$\frac{M}{f_{\text{signal}}} = \frac{N}{f_{\text{sampls}}} \quad (2)$$

式中:

M ——正弦波个数, 个;

N ——采样点数, 个;

f_{sampls} ——被校数模转换器的采样频率, Hz;

f_{signal} ——信号频率, Hz;

用数据采集仪采集数模转换器输出信号, 并进行 FFT 频谱分析; 用公式 (1) 计算总谐波失真 THD 。

7.2.2 数模转换器取样频率误差

校准示意图参见图 1。在数模转换器的工作频率范围内，选取高、低二个频段，在每个频段内选取两个频率。数模转换器输出幅值设置为便于频率计读数的合适幅值。用数字方波完成上述设置，并输入至被校准数模转换器，用频率计按 5s（或厂家规定的短时间）间隔读取 5 次输出信号频率值，根据平均后平均值 f 与数模转换器标称频率 f_t 按公式（3）计算数模转换器取样频率误差 ε_f 。

$$\varepsilon_f = \frac{f - f_t}{f_t} \times 100\% \quad (3)$$

式中：

ε_f ——数模转换器取样频率误差，%；

f_t ——信号频率，Hz；

f ——输出信号的平均频率，Hz。

7.2.3 模数转换器抗混叠带外衰减

校准示意图参见图 3，用于对称双极性输入电路结构的模数转换器，加载信号直流偏置为 0；对不能直接接入正弦交流信号的单极性输入电路结构的模数转换器，加载信号直流偏置为量程的 1/2；正弦信号幅值 V_i 为所选量程最大值 90%。

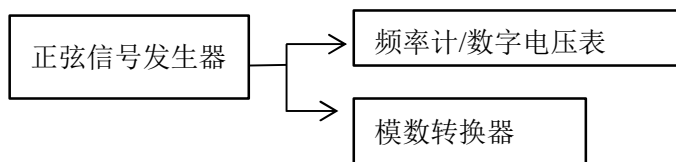


图 3 模数转换器抗混叠带外衰减测量框图

在高于模数转换器的上限采样频率频率范围中，选择并设置信号发生器频率为一个合适的带外频率 f_i ，按式（4）计算混叠频率分量带外衰减 A （dB/oct）。

$$A = \frac{20 * \lg \left(\frac{V_0}{V_i} \right)}{\log_2 \left(\frac{f_i}{f_u} \right)} \quad (4)$$

式中

V_i ——声学 and 振动数据转换器测量的混叠频率分量的幅值，V；

V_0 ——带外信号幅值，V；

f_i ——带外信号的频率，Hz；

f_u ——声学 and 振动数据转换器的上限频率，Hz。

7.2.4 模数转换器动态有效位数

7.2.4.1 校准示意图参见图 3，信号加载如同 7.2.3 描述。在模数转换器的工作频率范围内，选取合适的量程档。设置信号发生器低失真正弦信号的频率为 f_t ， f_t 按式 (4) 选择，这里 J 与 M 互质。调节信号发生器输出电压幅值 E_p ，采集仪记录的正弦波幅值为所选量程不过载的最大值。

$$f_t = \left(\frac{J}{M}\right) f_s \quad (5)$$

式中：

f_t ——信号频率，Hz；

J —— M 个数据中所含信号整周期个数，个；

f_s ——采样频率，Hz；

M ——采集数据个数，个。

7.2.4.2 采集记录数据 x_i (10 个以上信号周期)，按照最小二乘法找出最佳拟合正弦信号：

$$a(t) = E \sin(2\pi f t + \theta) + d \quad (6)$$

式中：

t ——拟合信号的时间，s；

$a(t)$ ——拟合信号的瞬态值，mV；

E ——拟合信号的幅度，mV；

f ——拟合信号的频率值，Hz； θ ——拟合信号的初相位，rad；

d ——拟合信号的直流分量，mV。

7.2.4.3 按式 (7) 计算实际有效值误差 ρ ：

$$\rho = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - E \sin(2\pi f t_i + \theta) - d)^2} \quad (7)$$

式中：

ρ ——实际幅度有效值误差，mV；

n ——数据采样点数，个；

t_i ——第 i 个测量点的时刻，s；

x_i —— t_i 时刻输入端的采集数据，mV；

7.2.4.4 模数转换器的动态有效位数 EB 按公式 (8) 计算:

$$EB = \log_2 \left(\frac{E_r}{2\rho\sqrt{3}} \right) \quad (8)$$

式中:

EB ——动态有效位数, bit;

E_r ——模数转换器量程, mV。

7.2.5 模数转换器采样频率误差

校准示意图参见图 3, 信号频率和数据采集方式同 7.2.4.1。采用正弦拟合法, 对采集数据进行同 7.2.4.2 相同的正弦拟合得到正弦频率为 f 。模数转换器采样频率误差 ε_f 按公式(9)计算:

$$\varepsilon_f = \frac{f - f_t}{f_t} \quad (9)$$

式中:

ε_f ——模数转换器采样频率误差, %;

f_t ——信号频率, Hz;

f ——拟合信号的频率, Hz。

7.2.6 模数转换器增益

校准示意图参见图 3, 信号频率和数据采集方式同 7.2.4.1。对采集数据进行同 7.2.4 相同的正弦拟合得到正弦波峰值 E_p 的最小二乘估计值 E , 被校通道的交流增益 G 按公式(10)计算:

$$G = \frac{E}{E_p} \quad (10)$$

式中:

G ——被校模数转换器增益;

E ——拟合的信号峰值电压, mV;

E_p ——正弦信号的峰值电压, mV。

7.2.7 模数转换器无杂散动态范围

校准示意图参见图 4, 采用纯电阻作为负载, 阻值由制造商确定。

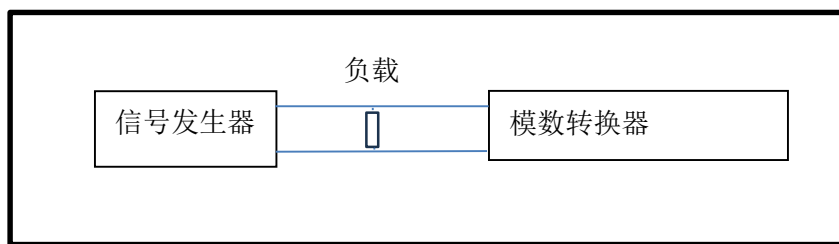


图 4 模数转换器无杂散动态范围校准

在模数转换器的工作频率范围内，在应用频段的中间或是使用时常用的参考频率点，正弦信号发生器选取一个频率点，具体频率按照相干采样原则设置，采样点数选为 2 的 n 次幂的倍数；幅值设置为模数转换器满幅值 90%。数据转换器采集正弦信号发生器输出信号，分析数据转换器数据并进行 FFT 频谱分析，正弦峰值幅度和工作带宽范围内全部杂散信号的峰值幅度，模数转换带内无杂散动态范围用式 (11) 计算，为两者之差（用 dB 表示）。

$$SFDR = 20 \lg(A_{rms}) - 20 \lg\{\max(X_{avg}[n_{nf}])\} \quad (11)$$

式中：

$SFDR$ ——被校模数转换器的无杂散动态范围，dB；

A_{rms} ——是输入信号基波的均方根电平，mV；

X_{avg} ——在输入信号频率处杂散谐波功率谱平均幅值，mV；

n_{nf} ——功率谱频宽，通常为频谱分析的频率分辨率，Hz。

7.2.8 模数转换器总谐波失真

校准示意图参见图 4，采用纯电阻作为负载，阻值由生产厂商确定。在声学 and 振动数据转换器应用频段的常用的参考频率点（声学数据转换器为 1kHz，振动数据转换器为 160 Hz），正弦信号发生器选取频率点时频率按相干采样原则设置，采样点数选为 2 的 n 次幂的倍数；信号频率用公式 (2) 计算，频率值在小数点后最少保留 5 位有效数字。幅值设置为 100 mV。

模数转换器档位按照制造商的规定设置。模数转换器采集正弦信号发生器输出信号，分析数据转换器数据并进行 FFT 频谱分析。按照公式 (1) 计算模数转换器总谐波失真。

7.2.9 模数转换器信噪比

校准示意图参见图 4，采用纯电阻作为负载，阻值由制造商确定。在模数转换器的

工作频率范围内, 正弦信号发生器选取一个在应用频段的中间或是使用时常用的参考频率点, 具体频率按照相干采样原则设置, 采样点数选为 2 的 n 次幂的倍数; 幅值设置为模数转换器满幅值 (注意微调, 不得使其过载)。模数转换器采集正弦信号发生器输出信号, 并进行 FFT 频谱分析。而后关闭信号发生器输出, 同样采集数据并进行 FFT 频谱分析。模数转换器信噪比按公式 (12) 计算。

$$SNR = 20 \lg(A_{rms}) - 20 \lg\{\max(X_{avg}[n_{nf}])\} \quad (12)$$

式中:

SNR ——被校模数转换器的信噪比, dB;

A_{rms} ——输入信号基波的均方根电平, mV;

X_{avg} ——无输入信号时噪声谐波功率谱平均幅值, mV;

n_{nf} ——功率谱频宽, 通常是频谱分析分辨率, Hz;

注: 模数转换器应关闭自动量程 (如有此功能), 多量程模数转换器每个量程应分别测量。

7.2.10 模数转换器动态显示延迟

声学 and 振动数据转换器按制造商说明书设置动态显示模式, 校准示意图参见图 3。正弦信号发生器输出频率幅值按照 7.2.7 设置。启动正弦信号发生器输出同时启动秒表计时, 观察数据转换器动态显示达到稳定的幅值后停止秒表计时。秒表时间即为模数转换器动态显示延迟时间, 单位为秒(s)。延迟时间应不大于制造商声明时间。

8 校准结果的处理

8.1 校准数据处理

所有数据应先计算, 后修约, 出具校准数据按如下方法修约:

a) 数模转换器总谐波失真、数模转换器取样频率误差、模数转换器采样频率误差应修约至 0.001%;

b) 模数转换器抗混叠带外衰减、模数转换器动态有效位数、模数转换器无杂散动态范围应修约至小数点后 1 位;

c) 模数转换器增益应修约至小数点后 2 位。

8.2 校准证书

声学 and 振动数据转换器经校准出具校准证书。校准证书应包括的信息及推荐的校准证书内页格式见附录 A。

8.3 校准结果的测量不确定度

声学 and 振动数据转换器校准结果的测量不确定度按 JJF 1059.1 的要求评定，不确定度评定的示例见附录 B。

9 复校时间间隔

声学 and 振动数据转换器的复校时间间隔建议为一年。复校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，送校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 校准证书的内容和记录格式

A.1 声学 and 振动数据转换器的校准证书至少应包括以下信息：

- 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，如果与校准结果的有效性和应用有关时，应说明被校准对象的接收日期；
- 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，包括名称及代码；
- j) 本次校准所用测量标准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、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，不得部分复制证书的声明。

A.2 推荐声学 and 振动数据转换器的校准记录内页格式见图 A.1。

A.3 推荐声学 and 振动数据转换器的校准证书内页格式见图 A.2。

一 外观检查:

二 数模转换总谐波失真

频率__ Hz THD = __%

测量不确定度:

三 数模转换器取样频率误差误差:

表 1 取样频率误差

频率示值 Hz						
误差%						

测量不确定度:

四 模数转换器抗混叠带外衰减:

表 2 模数转换器抗混叠带外衰减

上限频率 /Hz	带外信号频 率/Hz	带外信号幅 值/V	混叠信号幅 值/V	带外衰减 /dB/oct

测量不确定度:

五 模数转换器动态有效位数: __ Bit (频率__ Hz)

测量不确定度:

六 模数转换器采样频率误差: __%(采样率__ Sa/s, 信号频率__ Hz, 拟合频率__ Hz)

测量不确定度:

七 模数转换器增益

表 3 模数转换器增益

信号峰值/V						
拟合信号峰值/V						
增益						

测量不确定度:

八 模数转换器无杂散动态范围

频率 __ Hz SFDR __ dB 测量不确定度:

九 模数转换器总谐波失真:

频率__ Hz THD = __% 测量不确定度:

十 模数转换器信噪比: 频率 __ Hz SNR __ dB 测量不确定度:

十一 模数转换器动态显示延迟: __ s

其它:

—————以下空白—————

图 A.1 校准记录内页的格式

校准结果 共 页 第 页

一 外观检查:

二 数模转换总谐波失真

频率__ Hz THD = __%

测量不确定度:

三 数模转换器取样频率误差误差:

表 1 取样频率误差

频率示值 Hz						
误差%						

测量不确定度:

四 模数转换器抗混叠带外衰减:

表 2 模数转换器抗混叠带外衰减

上限频率 /Hz	带外信号频 率/Hz	带外信号幅 值/V	混叠信号幅 值/V	带外衰减 /dB/oct

测量不确定度:

五 模数转换器动态有效位数: __ Bit (频率__ Hz)

测量不确定度:

六 模数转换器采样频率误差: __% (采样率__ Sa/s, 信号频率__ Hz, 拟合频率__ Hz)

测量不确定度:

七 模数转换器增益

表 3 模数转换器增益

信号峰值/V						
拟合信号峰值/V						
增益						

测量不确定度:

八 模数转换器无杂散动态范围

频率 __ Hz SFDR __ dB 测量不确定度:

九 模数转换器总谐波失真:

频率__ Hz THD = __% 测量不确定度:

十 模数转换器信噪比: 频率 __ Hz SNR __ dB 测量不确定度:

十一 模数转换器动态显示延迟: __ s

—————以下空白—————

图 A.2 校准证书内页的格式

附录 B 测量不确定度评定示例

本附录以数模转换器总谐波失真、模数转换器无杂散动态范围为例，说明声学 and 振动数据转换器数模转换和模数转换特性校准项目的不确定度评定过程。

B1.1 数模转换器总谐波失真的不确定度分析示例

B1.1.1 测量原理

声学 and 振动数据转换器的数模转换器总谐波失真测量原理是测量被校仪器输出的模拟信号包括基波在内的十次谐波分量的电压有效值，然后计算 2 至 10 次谐波分量电压有效值的平方和开方根与基波分量的电压有效值之比得到总谐波失真。如果采用频谱分析法，各个分量的电压有效值由频谱分析仪直接测量得到；如果采用数据采集仪分析法，各个分量的电压有效值是通过数据采集仪采集后进行 FFT 频谱分析得到。本示例以数模转换器总谐波失真为 0.0030% 时的测量数据进行不确定度评定。

B1.1.2 测量模型

数模转换器的总谐波失真的测量模型为：

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{10} U_i^2}}{U_1} \times 100\% \quad (B.1)$$

式中：

THD ——被校数模转换器总谐波失真，%；

U_i ——第 i 次谐波分量的电压有效值，mV；

U_1 ——基波分量的电压有效值，mV。

其不确定度传递公式为：

$$u^2(THD) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial THD}{\partial U_i} \right)^2 u^2(U_i) \quad (B.2)$$

上式传递系数估计为 1。

B1.1.3 输入量标准不确定度的评定和不确定度分量

引入测量不确定度的来源包括：各个谐波处噪声引入的电压误差、高次谐波截断引入的失真误差、测量重复性。

(1) 各个谐波处噪声引入的电压误差

数据采集仪法中每个谐波分量的电压有效值由数据采集仪的 FFT 频谱分析功能

模块输出。噪声引入的电压误差是数据采集仪在每个谐波频率点的噪声水平，由数据采集仪的测量不确定度计算得到。每个谐波处噪声引入的电压误差互不相关，各个谐波处噪声引入的电压误差： $u_1 = 0.000018\%$ 。

(2) 测量重复性

总谐波失真的测量重复性引入的标准不确定度，由多次测量结果的标准偏差给出。某型号样机实验中，测量不确定度由电压 5 次测量的标准偏差给出 $u_3 = 0.00015\%$ 。总谐波失真测量结果见表 B1.1.1。

表 B1.1.1 总谐波失真的测量结果 (1000 Hz)

测量次数	1	2	3	4	5	平均值	谐波附近 本底噪声
基波有效 值 (mV)	6.9637	6.9981	6.9940	6.9973	6.9982	6.9902	
二次谐波 (mV)	1.91E-04	1.91E-04	1.95E-04	2.19E-04	1.93E-04	1.98E-04	7.00E-07
三次谐波 (mV)	5.72E-05	5.76E-05	5.50E-05	5.07E-05	5.25E-05	5.46E-05	5.56E-07
四次谐波 (mV)	3.44E-05	3.39E-05	3.31E-05	3.02E-05	3.24E-05	3.28E-05	4.96E-07
五次谐波 (mV)	5.20E-06	5.19E-06	5.89E-06	5.07E-06	5.01E-06	5.27E-06	3.94E-07
六次谐波 (mV)	9.80E-06	9.89E-06	9.89E-06	9.66E-06	8.91E-06	9.63E-06	3.94E-07
七次谐波 (mV)	8.60E-06	8.61E-06	8.81E-06	8.13E-06	8.71E-06	8.57E-06	3.94E-07
八次谐波 (mV)	3.80E-06	3.80E-06	3.94E-06	3.89E-06	3.85E-06	3.86E-06	3.94E-07
九次谐波 (mV)	5.30E-06	5.31E-06	5.37E-06	5.37E-06	5.50E-06	5.37E-06	3.94E-07
十次谐波 (mV)	2.60E-06	2.60E-06	2.63E-06	2.69E-06	2.66E-06	2.64E-06	3.94E-07
谐波失真 (%)	0.00291	0.00289	0.00294	0.00324	0.00290	—	—

B1.1.4 不确定度分量汇总表

表 B.1.1.2 总谐波失真的测量不确定度来源及数值 (1000 Hz)

序号	来源	符号	数值/%
1	各个谐波处噪声引入的电压误差	u_1	0.000018
2	重复性	u_2	0.00015
合成标准不确定度 (%)		u_c	0.00015
扩展不确定度 ($k=2$) / (%)		U	0.00030

B1.1.5 合成标准不确定度

各个谐波处噪声引入的电压误差、测量重复性引入的标准不确定度分量互不相关，合成标准不确定度 u_c 如下式计算：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 0.00015\%$$

B1.1.6 扩展不确定度

取包含因子 $k = 2$ ，扩展不确定度 $U=0.00030\%$ 。

B1.1.7 测量不确定度报告

数模转换器总谐波失真为 0.0030%时，测量的扩展不确定度为 $U=0.00030\%$ ， $k=2$ 。

B1.2 模数转换器无杂散动态范围的不确定度分析示例

B1.2.1 测量原理

声学 and 振动数据转换器的模数转换器无杂散动态范围的测量原理是利用信号发生器产生满足以下两个条件的模拟信号：一、信号频率与模数转换器的采样频率满足相干采样原则；二、信号幅度超过模数转换器量程的 90%，经过模数转换器采集分析后得到输入信号基波的均方根电平和工作频带内杂散信号的峰值幅度，计算两者之差，用 dB 表示得到无杂散动态范围。本示例以数模转换器模数转换器无杂散动态范围为 82.1 dB 时的测量数据进行不确定度评定。

B1.2.2 测量模型

模数转换器的无杂散动态范围测量模型为：

$$SFDR = 20 \lg(A_{rms}) - 20 \lg\{\max(X_{avg}[n_{nf}])\} \quad (B.3)$$

式中：

$SFDR$ ——被校模数转换器的无杂散动态范围，dB；

A_{rms} ——输入信号基波的均方根电平，mV；

X_{avg} ——无输入信号时噪声谐波功率谱平均幅值，mV；

n_{nf} ——功率谱频宽，通常是频谱分析分辨率，Hz。

由上式可得无杂散动态范围各分量的灵敏系数为：

$$c(A_{rms}) = \frac{20}{A_{rms}} \lg e$$

$$c(X_{avg}) = -\frac{20}{X_{avg}} \lg e$$

B1.2.3 输入量标准不确定度的评定和不确定度分量

引入测量不确定度的来源包括：正弦信号发生器幅值稳定性、频谱分析算法、背景噪声引入的电压误差、测量重复性。

(1) 正弦信号发生器幅值稳定性引入的测量不确定度 u_1

样机试验中正弦信号发生器幅值稳定性估计为 0.5%，取包含因子为 $\sqrt{3}$ ， $u_1 = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.29\%$ 。该百分误差换算成分贝差为 0.025 dB。

(2) 频谱分析算法引入的测量不确定度 u_2

采用 FFT，点数为 8192，不加窗函数，考虑截断和栅栏效应，FFT 算法引入的最大相对误差为 0.36。按反正弦分布，取包含因子为 $\sqrt{2}$ ，测量不确定度为 $u_2 = \frac{0.36}{2\sqrt{2}} = 0.127$ 。该百分误差换算成分贝差为 1.18 dB。

(3) 测量重复性引入的标准不确定度 u_3 ，由多次测量结果的标准偏差给出。

在相同条件下对无杂散动态范围重复测量 10 次，样机的无杂散动态范围测量结果见表 B 1.2.1。

表 B 1.2.1 模数转换器无杂散动态范围重复性测量结果

测量序号	无杂散动态范围/dB
1	82.1
2	82.1
3	82.2
4	82.1
5	82.1
6	82.1
7	82.2
8	82.1
9	82.1
10	82.1
标准差	0.042

B1.2.4 不确定度分量汇总表

表 B 1.2.2 无杂散动态范围的测量不确定度来源及数值

序号	来源	符号	数值 /dB
1	正弦信号发生器幅值稳定性	u_1	0.025
2	频谱分析算法	u_2	1.18
3	测量重复性	u_3	0.042
合成标准不确定度 (dB)		u_c	1.2
扩展不确定度 ($k=2$) / (dB)		U	2.4

B1.2.5 合成标准不确定度

正弦信号发生器幅值稳定性、频谱分析算法、测量重复性引入的标准不确定度分量互不相关，合成标准不确定度 u_c 如下式计算：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 1.2 \text{ dB}$$

B1.2.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则模数转换器无杂散动态范围的扩展不确定度 $U = 2.4 \text{ dB}$ 。

B1.2.7 测量不确定度报告

模数转换器无杂散动态范围为 82.1 dB 时，测量的扩展不确定度为 $U=2.4 \text{ dB}$, $k=2$ 。