

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 1653—2017

电容式工程测量传声器校准规范

Calibration Specification for Condenser Project Measurement Microphones

2017-11-20 发布

2018-02-20 实施

国家质量监督检验检疫总局 发布

电容式工程测量
传声器校准规范

Calibration Specification for Condenser
Project Measurement Microphones

JJF 1653—2017

归口单位：全国声学计量技术委员会

起草单位：衡阳衡仪电气有限公司

中国计量科学研究院

国营四三八〇厂嘉兴分厂

深圳市计量质量检测研究院

广州动态集成检测认证有限公司

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：

刘湘衡（衡阳衡仪电气有限公司）

牛 锋（中国计量科学研究院）

舒国华（国营四三八〇厂嘉兴分厂）

张国庆（深圳市计量质量检测研究院）

吕林华（广州动态集成检测认证有限公司）

何龙标（中国计量科学研究院）

谭校明（衡阳衡仪电气有限公司）



仪器服务网
YIQIFUWU.COM

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 术语和定义	(1)
3.2 量和单位	(3)
4 概述	(3)
5 计量特性	(3)
5.1 灵敏度级	(3)
5.2 频率响应	(4)
5.3 动态范围上限	(5)
5.4 下限频率	(5)
6 校准条件	(6)
6.1 环境条件	(6)
6.2 测量标准及其他设备	(6)
7 校准项目和校准方法	(7)
7.1 校准项目	(7)
7.2 校准前检查	(7)
7.3 灵敏度级的校准方法	(8)
7.4 频率响应的校准方法	(11)
7.5 动态范围上限的校准方法	(14)
7.6 下限频率的校准方法	(14)
8 校准结果表达	(15)
8.1 校准记录	(15)
8.2 校准数据处理	(15)
8.3 校准证书	(15)
8.4 校准结果的测量不确定度	(15)
9 复校时间间隔	(15)
附录 A 校准记录的内容和格式	(16)
附录 B 校准证书的内容和格式	(19)
附录 C 测量不确定度评定示例	(22)

引 言

本规范依据 JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》所给出的规则和格式编制，测量不确定度按照 JJF 1059.1—2012《测量不确定度的评定与表示》的要求评定和表示。

本规范参考了国家电子行业标准 SJ/T 10724—2013《电声学 测量电容传声器通用规范》和 SJ/T 10725—2013《电声学 测量电容传声器电声性能的测量方法》。

本规范为首次发布。



电容式工程测量传声器校准规范

1 范围

本规范适用于电容式工程测量传声器的校准。

2 引用文件

本规范引用下列文件：

JJF 1001—2011 通用计量术语及定义

JJF 1019—2007 工作标准传声器（耦合腔比较法）

JJF 1034—2005 声学计量名词术语及定义

JJF 1137—2005 传声器前置放大器校准规范

GB/T 2900.86—2009 电工术语 声学 and 电声学

GB/T 3240 声学测量中的常用频率

GB/T 3785.1—2010 电声学 声级计 第1部分：规范

GB/T 3947—1996 声学名词术语

GB/T 15173 电声学 声校准器

GB/T 20441.1—2010 电声学 测量传声器 第1部分：实验室标准传声器规范

GB/T 20441.4—2006 测量传声器 第4部分：工作标准传声器规范

SJ/T 10724—2013 电声学 测量电容传声器通用规范

SJ/T 10725—2013 电声学 测量电容传声器电声性能的测量方法

IEC 61094-6: 2004 测量传声器 第6部分：用于测定频率响应的静电激励器
(Measurement microphones—Part 6: Electrostatic actuators for determination of frequency response)

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 术语和定义

JJF 1001—2011、JJF 1034—2005 和 JJF 1059.1—2012 界定的及以下术语和定义适用于本规范。

3.1.1 电容传声器 condenser microphone

利用电容的变化工作的传声器。

[GB/T 2900.86—2009，定义 801-26-13]

3.1.2 工程测量传声器 project measurement microphone

满足声级计及声压测试系统对电声性能和机械尺寸要求的传声器。它的灵敏度可用以下方法之一校准：

- a) 与已校准的标准传声器作比较；
- b) 使用 GB/T 15173 规定的声校准器校准。

[SJ/T 10724—2013, 定义 3.1]

3.1.3 开路电压 open-circuit voltage

传声器除了连接它的接地屏蔽结构外, 没有其他电负载时, 用插入电压技术测得的传声器电输出端的交流电压。

[GB/T 20441.1—2010, 定义 3.3]

3.1.4 参考点 reference point

为描述传声器的位置而规定在传声器上的或传声器附近的一个点。

[GB/T 3785.1—2010, 定义 3.12]

注: 参考点可以是传声器膜片的中心。

3.1.5 主轴 principal axis

通过传声器的参考点并与膜片垂直的直线。

[GB/T 20441.4—2006, 定义 3.2]

3.1.6 参考平面 reference plane

垂直于传声器主轴并紧靠传声器保护栅的平面。

[GB/T 20441.4—2006, 定义 3.3]

3.1.7 声压灵敏度 pressure sensitivity

对给定频率和给定环境条件的正弦声波, 传声器开路电压与均匀作用于传声器膜片上(即传声器的声学端)声压的比值。

[GB/T 20441.1—2010, 定义 3.4]

3.1.8 自由场灵敏度 free-field sensitivity

对给定频率和给定环境条件的指定入射方向的正弦平面行波, 传声器开路电压与在声场中引入传声器前存在于传声器声中心位置处的自由场声压的比值。

[GB/T 20441.1—2010, 定义 3.6]

注: 当频率足够低以至于声场受传声器的干扰可忽略时, 自由场灵敏度接近于声压灵敏度。

3.1.9 扩散场灵敏度 diffuse-field sensitivity

在扩散场中, 对给定频率和给定环境条件下的正弦声波, 传声器开路电压与在声场中引入传声器前存在于传声器声中心位置处声压的比值。

[GB/T 20441.1—2010, 定义 3.8]

注: 当频率足够低以至于声场受传声器的干扰可忽略时, 扩散场灵敏度接近于声压灵敏度。

3.1.10 灵敏度级 sensitivity level

传声器灵敏度与参考灵敏度之比的以 10 为底的对数乘以 20。

注:

1. 灵敏度级分为声压灵敏度级、自由场灵敏度级和扩散场灵敏度级。
2. 参考灵敏度为 1 V/Pa。

3.1.11 [灵敏度级的] 频率响应 [sensitivity level] frequency response

在给定条件下, 传声器在不同频率时的灵敏度级与在参考频率时的灵敏度级的差值。

注: 频率响应分为声压频率响应、自由场频率响应和扩散场频率响应。

3.1.12 静电激励器响应 electrostatic actuator response

用特别设计的、由幅值对频率均匀的电压驱动的静电激励器测得的作为频率函数的传声器相对于规定频率的输出。

[SJ/T 10725—2013, 定义 3.9]

3.1.13 动态范围上限 upper limit of the dynamic range

引起传声器输出电压总失真为 3% 时所对应的声压级。

3.1.14 下限频率 lower limiting frequency

灵敏度级比参考频率时的声压灵敏度级低 3 dB 时所对应的频率。

3.2 量和单位

工程测量传声器主要计量特性的单位名称和符号如下:

- 灵敏度级的单位为分贝 (dB), 参考值为 1 V/Pa;
- 灵敏度的单位为伏每帕 (V/Pa);
- 频率响应的单位为分贝 (dB);
- 动态范围上限的单位为分贝 (dB), 基准值为 20 μ Pa;
- 下限频率的单位为赫兹 (Hz)。

4 概述

电容式工程测量传声器 (以下简称为工程测量传声器) 是通过电容的变化而将声压信号转换为电信号的测量传声器。它分为 1 级和 2 级两种性能等级, 分别适用于 GB/T 3785.1—2010 规定的 1 级和 2 级声级计及其他声压测试系统。对工程测量传声器的频率响应和稳定性等主要计量性能的要求低于实验室标准传声器和工作标准传声器。

按电声特性, 工程测量传声器可分为声压型、自由场型和扩散场型, 它们的声压灵敏度、自由场灵敏度或扩散场灵敏度在尽可能宽的频率范围内近似地与频率无关。

工程测量传声器的标称直径主要有 23.77 mm、12.7 mm 和 6.35 mm 三种。尺寸较小的传声器通常具有更宽的频率范围。

工程测量传声器的类型标识由字母 PM、一位表示机械结构的阿拉伯数字和一位表示电声特性的拉丁字母构成。数字 1、2 或 3 分别表示标称直径为 23.77 mm、12.7 mm 或 6.35 mm 的工程测量传声器; 而字母 P、F 或 D 分别表示声压型、自由场型或扩散场型工程测量传声器。例如, PM2F 表示标称直径为 12.7 mm、自由场型的工程测量传声器。

5 计量特性

5.1 灵敏度级

5.1.1 在 200 Hz~1 000 Hz 范围内的参考频率处, 工程测量传声器灵敏度级 (和对应

的灵敏度)的优选标称值为:

- -26 dB (50 mV/Pa);
- -32 dB (25 mV/Pa);
- -38 dB (12.5 mV/Pa);
- -44 dB (6.3 mV/Pa);
- -50 dB (3 mV/Pa);
- -60 dB (1 mV/Pa)。

参考频率通常为 250 Hz 或 1 000 Hz。

5.1.2 1 级工程测量传声器灵敏度级与标称值的偏差一般不超过 ± 2.0 dB, 2 级一般不超过 ± 3.0 dB。

5.2 频率响应

工程测量传声器灵敏度级的频率响应一般不超过表 1 给出的极限值。

表 1 频率响应的极限值

频率 Hz	频率响应的极限值/dB					
	PM1		PM2		PM3	
	1 级	2 级	1 级	2 级	1 级	2 级
10	+2.0, -∞	+3.3, -∞	+2.0, -∞	+3.3, -∞	+2.0, -∞	+3.3, -∞
12.5	+1.7, -∞	+3.3, -∞	+1.7, -∞	+3.3, -∞	+1.7, -∞	+3.3, -∞
16	+1.3, -2.7	+3.3, -∞	+1.3, -2.7	+3.3, -∞	+1.3, -2.7	+3.3, -∞
20	±1.3	±2.0	±1.3	±2.0	±1.3	±2.0
25	+1.3, -1.0	±2.0	+1.3, -1.0	±2.0	+1.3, -1.0	±2.0
31.5	±1.0	±2.0	±1.0	±2.0	±1.0	±2.0
40	±0.7	±1.3	±0.7	±1.3	±0.7	±1.3
50	±0.7	±1.3	±0.7	±1.3	±0.7	±1.3
63	±0.7	±1.3	±0.7	±1.3	±0.7	±1.3
80	±0.7	±1.3	±0.7	±1.3	±0.7	±1.3
100	±0.7	±1.0	±0.7	±1.0	±0.7	±1.0
125	±0.7	±1.0	±0.7	±1.0	±0.7	±1.0
160	±0.7	±1.0	±0.7	±1.0	±0.7	±1.0
200	±0.7	±1.0	±0.7	±1.0	±0.7	±1.0
250	±0.7	±1.0	±0.7	±1.0	±0.7	±1.0
315	±0.7	±1.0	±0.7	±1.0	±0.7	±1.0
400	±0.7	±1.0	±0.7	±1.0	±0.7	±1.0
500	±0.7	±1.0	±0.7	±1.0	±0.7	±1.0

表 1 (续)

频率 Hz	频率响应的极限值/dB					
	PM1		PM2		PM3	
	1 级	2 级	1 级	2 级	1 级	2 级
630	±0.7	±1.0	±0.7	±1.0	±0.7	±1.0
800	±0.7	±1.0	±0.7	±1.0	±0.7	±1.0
1 000	±0.5	±0.7	±0.5	±0.7	±0.5	±0.7
1 250	±0.7	±1.0	±0.7	±1.0	±0.7	±1.0
1 600	±0.7	±1.3	±0.7	±1.0	±0.7	±1.0
2 000	±0.7	±1.3	±0.7	±1.0	±0.7	±1.0
2 500	±0.7	±1.7	±0.7	±1.3	±0.7	±1.0
3 150	±0.7	±1.7	±0.7	±1.3	±0.7	±1.0
4 000	±0.7	±2.0	±0.7	±1.7	±0.7	±1.3
5 000	±1.0	±2.3	±0.7	±1.7	±0.7	±1.3
6 300	+1.0, -1.3	±3.0	±0.7	±2.0	±0.7	±1.7
8 000	+1.0, -1.7	±3.3	±1.0	±2.3	±0.7	±1.7
10 000	+1.3, -2.0	+3.3, -∞	+1.0, -1.3	±3.0	±0.7	±2.0
12 500	+1.7, -3.3	+3.6, -∞	+1.0, -1.7	±3.3	±1.0	±2.3
16 000	+2.0, -10.7	—	+1.3, -2.0	+3.3, -∞	+1.0, -1.3	±3.0
20 000	+2.4, -∞	—	+1.7, -3.3	+3.6, -∞	+1.0, -1.7	±3.3
25 000	—	—	+2.0, -10.7	—	+1.3, -2.0	+3.3, -∞
31 500	—	—	+2.4, -∞	—	+1.7, -3.3	+3.6, -∞
40 000	—	—	—	—	+2.0, -10.7	—
50 000	—	—	—	—	+2.4, -∞	—

5.3 动态范围上限

对于 PM1 型工程测量传声器，动态范围上限一般不低于 135 dB，PM2 型一般不低于 140 dB，PM3 型一般不低于 150 dB。

5.4 下限频率

当工程测量传声器的压力均衡孔完整地暴露于声场中时，其下限频率一般在 3 Hz~10 Hz 之间。

注：由于校准无需作出合格与否的判定，因此第 5 章中给出的指标仅供参考。

6 校准条件

6.1 环境条件

工程测量传声器应在以下环境条件下进行校准：

- 空气温度：18 ℃～28 ℃；
- 相对湿度：30%～90%；
- 静压：86 kPa～106 kPa；
- Z 计权环境噪声级应比试验信号级至少低 20 dB。

6.2 测量标准及其他设备

a) 声校准器

1 级或 LS 级声校准器，标称频率应包括 1 000 Hz 或 250 Hz。

b) 参考传声器

灵敏度和频率响应已校准的工作标准传声器（WS），其声压和自由场响应修正值为已知，其性能应符合 GB/T 20441.4—2006 的要求。

c) 测量放大器

测量放大器的频率响应，在 10 Hz～50 kHz 频率范围内不超过±0.1 dB，在 3 Hz～10 Hz 频率范围内不超过±0.2 dB，总失真不大于 0.1%，40 dB 范围内的级线性误差不超过±0.15 dB。

d) 数字电压表

数字电压表测量交流电压的最大允许误差，在 10 Hz～50 kHz 的频率范围内不应超过±0.2%，在 3 Hz～10 Hz 的频率范围内不超过±1%。

e) 数字频率计

在 3 Hz～50 kHz 的频率范围内，数字频率计测量频率或周期的最大允许误差不超过±0.5%。

f) 声频信号发生器

声频信号发生器的频率范围不小于 3 Hz～50 kHz。以 1 kHz 为参考，10 Hz～50 kHz 范围内的幅频特性优于±0.1 dB，3 Hz～10 Hz 范围内优于±0.2 dB。总失真不大于 0.1%，输出信号电压不低于 30 V。

注：如果输出电压不能达到 30 V，可通过放大来实现。

g) 前置放大器

前置放大器的频率响应，在 10 Hz～50 kHz 频率范围内不超过±0.1 dB，在 3 Hz～10 Hz 频率范围内不超过±0.2 dB。

h) 消声室和声源

在测试频率范围内，消声室有效工作空间范围中的声压级与平方反比定律理论值的偏差不超过±1.0 dB。声源能在传声器位置产生所要求的声压级的正弦信号声压，总失真不超过 3%。

i) 直流电压源

输出电压一般为 800 V，测量期间的幅值漂移不大于 0.1%。

j) 静电激励器

静电激励器应具有 IEC 61094-6: 2004 附录 A 所示的结构和设计, 在参考频率处, 其响应重复性的实验标准偏差不大于 0.04 dB。

k) 有源耦合腔

耦合腔的最大尺寸应小于空气中声波波长的 1/20, 腔内与腔外应有压力均衡装置, 在与传声器耦合时不应漏气。

l) 声频功率放大器

在 10 Hz~50 kHz 的频率范围内, 声频功率放大器频率响应不超过 ± 0.2 dB, 总失真不大于 0.5%。

m) 高声压传声器校准器

校准仪腔内的声压连续可调, 最高声压级不小于 154 dB, 总失真不大于 0.6%。

n) 失真测量仪

失真测量仪的最大允许误差不超过量程的 $\pm 10\%$ 。

o) 监测传声器

声压型高声压测量传声器, 动态范围上限不低于 160 dB。

p) 低频耦合腔

低频耦合腔的频率范围至少为 3 Hz~300 Hz。

q) 气压表

气压表的最大允许误差不超过 ± 0.2 kPa。

注: 测量放大器、数字电压表、数字频率计等分离设备可由带有相应功能的声分析仪替代。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

工程测量传声器的校准项目见表 2。实验室宜根据工程测量传声器的型号及预期用途, 选择适用的校准项目。

表 2 校准项目一览表

序号	项目名称	计量特性的条号	校准方法的条号
1	灵敏度级	5.1	7.3
2	频率响应	5.2	7.4
3	动态范围上限	5.3	7.5
4	下限频率	5.4	7.6

7.2 校准前检查

目视检查工程测量传声器:

- a) 应无机械性损伤或变形;
- b) 膜片应清洁, 无污染、锈蚀现象。

工程测量传声器如不符合上述要求，则不应进行校准。

7.3 灵敏度级的校准方法

7.3.1 概述

对大多数的工程测量传声器，当参考频率为 250 Hz 时的自由场灵敏度级、扩散场灵敏度级和声压灵敏度级三者基本上是相等的。当参考频率为 1 kHz 时，三者之间可能有较大的差异，特别是对 PM1 型工程测量传声器。

传声器制造商通常会提供自由场和扩散场修正值，以便由声压灵敏度级得到相应的自由场灵敏度级和扩散场灵敏度级。因此，通常只需测定工程测量传声器的声压灵敏度级即可。

7.3.2 声压灵敏度级

7.3.2.1 工程测量传声器的声压灵敏度级采用声校准器法直接测量，测量装置如图 1 所示。

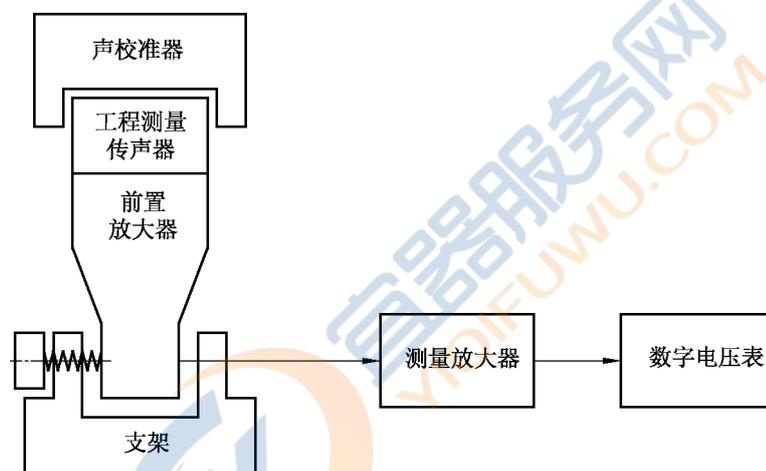


图 1 声压灵敏度级测量装置示意图

7.3.2.2 声压灵敏度级的测量步骤如下。

a) 测量放大器置于线性频率响应、S（慢）时间计权以及与被校工程测量传声器相应的极化电压挡。接入测量放大器内部的 50 mV 参考电压，调节测量放大器的“前置放大器输入”灵敏度，使数字电压表的示值为 50.0 mV。

b) 使工程测量传声器与声校准器紧密耦合，并使工程测量传声器的主轴垂直于水平面。

c) 接通声校准器的电源，在制造商规定的稳定时间之后，读取并记录数字电压表的交流电压示值 U_x ，按公式 (1) 计算工程测量传声器的输出电压级 L_U 。

$$L_U = 20 \lg \frac{U_x}{U_0} \quad (1)$$

式中：

L_U ——工程测量传声器的输出电压级，dB；

U_x ——数字电压表的交流电压示值，V；

U_0 ——参考电压， $U_0 = 1 \mu\text{V}$ 。

d) 按公式 (2) 计算工程测量传声器的声压灵敏度级:

$$L_{M_p} = -26 - (L_{p_0} + \Delta p - L_U) + A \quad (2)$$

式中:

L_{M_p} ——声压灵敏度级, dB;

L_{p_0} ——声校准器声压级的校准值, dB;

Δp ——声校准器的静压修正值, dB;

L_U ——工程测量传声器输出电压级, dB;

A ——前置放大器的传输损失, dB。

声校准器的静压修正值或修正方法可由声校准器的使用说明书中获得。前置放大器的传输损失可从其使用说明书中获得或按 JJF 1137—2005 的 7.2.3 测得。

7.3.2.3 工程测量传声器的声压灵敏度按公式 (3) 计算。

$$M_p = 10^{0.05L_{M_p}} M_r \quad (3)$$

式中:

M_p ——声压灵敏度, V/Pa;

L_{M_p} ——声压灵敏度级, dB;

M_r ——参考灵敏度, $M_r = 1$ V/Pa。

7.3.3 自由场灵敏度级

7.3.3.1 如传声器制造商提供了工程测量传声器的自由场修正值, 则可用于将 7.3.2 测得的声压灵敏度级换算为自由场灵敏度级。

7.3.3.2 工程测量传声器的自由场灵敏度级也可采用自由场替代法测量, 测量装置如图 2 所示。其中的传声器为替换使用的工程测量传声器和参考传声器。参考传声器应为已知自由场灵敏度级的工作标准传声器。

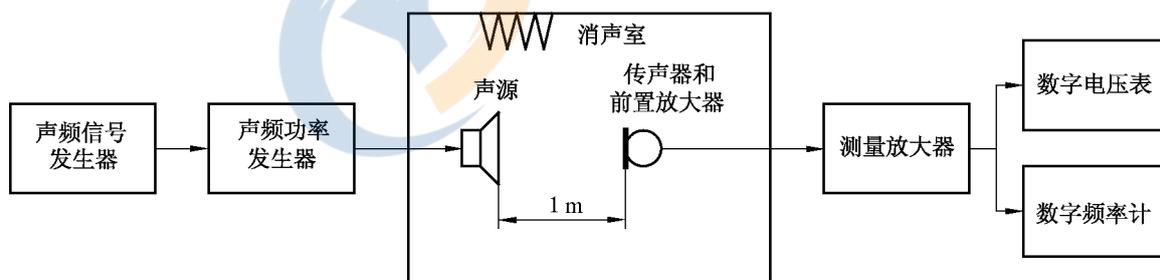


图 2 自由场灵敏度级测量装置示意图

7.3.3.3 自由场灵敏度级的测量步骤如下。

a) 测量放大器置于线性频率响应、S (慢) 时间计权以及与被校工程测量传声器相应的极化电压挡。

b) 按图 2 布置声源和参考传声器, 使传声器主轴与声源的主轴重合, 二者声中心的距离为 $1\ 000\ \text{mm} \pm 5\ \text{mm}$, 调节音频信号发生器输出信号的频率为参考频率 (通常为 $1\ \text{kHz}$), 调节输出信号电压使测量放大器指示为参考声压级, 记录数字电压表的示值 U_r 。

c) 保持音频信号发生器的输出恒定, 用工程测量传声器取代参考传声器, 记录数

字电压表的示值 U_x 。

d) 按公式 (4) 计算工程测量传声器的自由场灵敏度级。

$$L_{Mf} = L_{Mf0} + 20 \lg \frac{U_x}{U_r} \quad (4)$$

式中:

L_{Mf} ——工程测量传声器的自由场灵敏度级, dB;

L_{Mf0} ——参考传声器的自由场灵敏度级的校准值, dB;

U_r ——使用参考传声器时数字电压表的示值, V;

U_x ——使用工程测量传声器时数字电压表的示值, V。

7.3.3.4 工程测量传声器的自由场灵敏度可按公式 (5) 计算。

$$M_f = 10^{0.05L_{Mf}} M_r \quad (5)$$

式中:

M_f ——自由场灵敏度, V/Pa;

L_{Mf} ——自由场灵敏度级, dB;

M_r ——参考灵敏度, $M_r = 1$ V/Pa。

7.3.4 扩散场灵敏度级

7.3.4.1 如传声器制造商提供了工程测量传声器的扩散场修正值, 则可用于将 7.3.2 测得的声压灵敏度级换算为扩散场灵敏度级。

7.3.4.2 如参考传声器在不同声入射角时的自由场灵敏度级为已知, 则也可采用自由场替代法测量工程测量传声器的扩散场灵敏度级。

在 7.3.3.3 的测量中, 以 30° 的步值改变工程测量传声器的方位, 测得不同声入射角时工程测量传声器的自由场灵敏度级, 按公式 (5) 计算出相应的自由场灵敏度, 再按公式 (6) 计算工程测量传声器的扩散场灵敏度。

$$M_d = \sqrt{K_1 M_{f0}^2 + K_2 M_{f30}^2 + K_3 M_{f60}^2 + K_4 M_{f90}^2 + K_5 M_{f120}^2 + K_6 M_{f150}^2 + K_7 M_{f180}^2} \quad (6)$$

式中:

M_d ——扩散场灵敏度, V/Pa;

M_{f0} 、 M_{f30} 、 M_{f60} 、 M_{f90} 、 M_{f120} 、 M_{f150} 、 M_{f180} ——入射角分别为 0° 、 30° 、 60° 、 90° 、 120° 、 150° 和 180° 时的自由场灵敏度, V/Pa;

$$K_1 = K_7 = 0.018;$$

$$K_2 = K_6 = 0.129;$$

$$K_3 = K_5 = 0.224;$$

$$K_4 = 0.258。$$

然后, 按公式 (7) 计算工程测量传声器的扩散场灵敏度级。

$$L_{Md} = 20 \lg \frac{M_d}{M_r} \quad (7)$$

式中:

L_{Md} ——扩散场灵敏度级, dB;

M_d ——扩散场灵敏度，V/Pa；

M_r ——参考灵敏度， $M_r=1$ V/Pa。

7.4 频率响应的校准方法

7.4.1 概述

7.4.1.1 宜优选静电激励器法。由于电容传声器的静电激励器响应接近于声压频率响应，只是在高频段有细微的差异，根据制造商提供的修正值，即可由静电激励器响应得到传声器的自由场频率响应和扩散场频率响应。

在低频段，传声器的自由场频率响应接近于声压频率响应，所以，低频段的自由场灵敏度级也可采用耦合腔替代法或耦合腔比较法获得。

在 7.3.4 的每一测试频率（包括参考频率），测出不同声入射角时的自由场灵敏度级，再按公式（7）计算各频率时的扩散场灵敏度级，也可确定工程测量传声器的扩散场频率响应。

7.4.1.2 对 1 级工程测量传声器，测量频率宜按 GB/T 3240 取 1/3 oct 常用频率的标称值；对 2 级工程测量传声器，测量频率宜按 GB/T 3240 取 1/1 oct 常用频率的标称值以及传声器频率范围的上、下限值。测量频率范围宜按使用说明书或用户要求，当使用说明书和用户无要求时，可参照表 1。

7.4.2 静电激励器法

7.4.2.1 采用静电激励器法测量工程测量传声器频率响应的装置如图 3 所示，图 3 中的 R 为 10 M Ω 的电阻器，C 为 5 nF 的电容器。

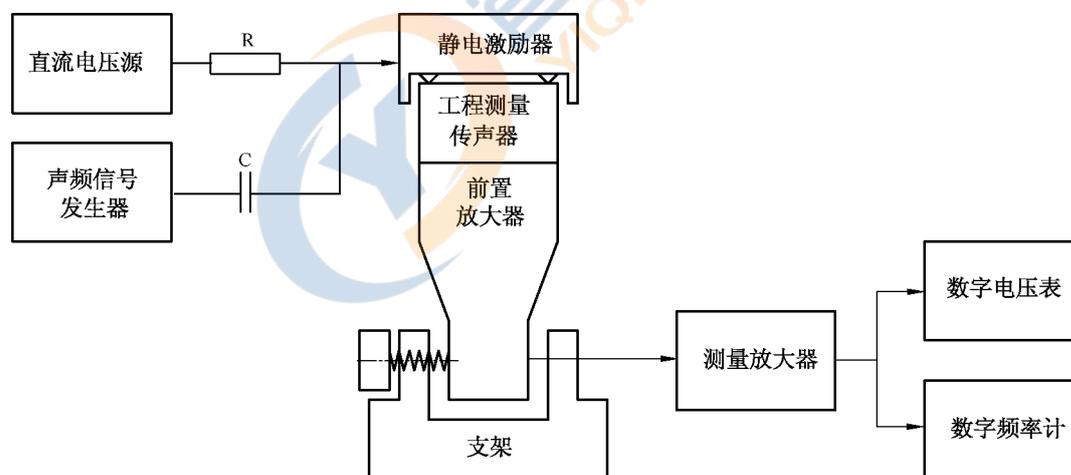


图 3 静电激励器法测量装置示意图

7.4.2.2 静电激励器法测定工程测量传声器频率响应的步骤如下。

a) 测量放大器置于线性频率响应、S（慢）时间计权和与被校工程测量传声器相应的极化电压挡。用内部参考源校准好测量放大器。

b) 取下工程测量传声器的保护栅，将静电激励器置于传声器膜片上方。

c) 接通直流电压源，所施加的直流电压宜至少比音频信号的交流电压大 10 倍。音频信号发生器的输出信号频率置于参考频率（通常为 1 kHz），调节其信号幅值，确保在测试频率范围内，静电激励器能产生高于环境噪声至少 20 dB 的响应级，记录数字电

压表的交流电压示值 U_r 。

d) 保持声频信号发生器的输出电压不变,按 7.4.1.2 的规定改变信号频率 f_i ,在每一测试频率,记录数字电压表的交流电压示值 U_i 。

e) 按公式 (8) 计算工程测量传声器的静电激励器频率响应。

$$\delta_{ai} = 20 \lg \frac{U_i}{U_r} \quad (8)$$

式中:

δ_{ai} ——工程测量传声器的静电激励器频率响应, dB;

U_r ——测试频率为参考频率时数字电压表的交流电压示值, V;

U_i ——测试频率为 f_i 时数字电压表的交流电压示值, V。

f) 在步骤 e) 得到的静电激励器频率响应上迭加制造商提供的声压响应修正值即可得到工程测量传声器的声压频率响应。

注:前置放大器和测量放大器的频率特性会影响测量结果,必要时需加以修正。

7.4.2.3 如制造商提供了传声器的自由场修正值和扩散场修正值,便可在声压频率响应的基础上获得工程测量传声器的自由场频率响应和扩散场频率响应。

7.4.3 耦合腔替代法

7.4.3.1 采用耦合腔替代法测量工程测量传声器声压灵敏度级频率响应的装置如图 4 所示。图中的传声器为交替使用的参考传声器和工程测量传声器。参考传声器宜与被校的工程测量传声器具有相同的标称直径。

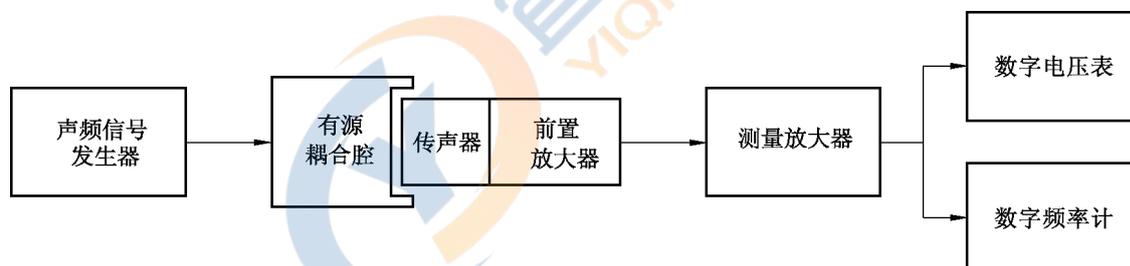


图 4 耦合腔替代法测量装置示意图

7.4.3.2 耦合腔替代法测定工程测量传声器声压频率响应的步骤如下。

a) 测量放大器置于线性频率响应、S(慢)时间计权和与被校工程测量传声器相应的极化电压挡。用内部参考源校准好测量放大器。

b) 将参考传声器与有源耦合腔紧密耦合。声频信号发生器的信号频率置于参考频率,调节输出信号电压使测量放大器指示为参考声压级,记录数字电压表的示值 U_{0r} 。

c) 保持声频信号发生器的输出恒定,用工程测量传声器取代参考传声器后,记录数字电压表的示值 U_{ri} 。

d) 按 7.4.1.2 的规定改变信号频率 f_i 。在每一测试频率,使用参考传声器时,调节信号电压使数字电压表的示值与步骤 b) 时相同;然后用工程测量传声器取代参考传声器,保持信号电压不变,记录数字电压表的示值 U_{xi} 。

e) 按公式 (9) 计算工程测量传声器的声压频率响应。

$$\delta_{pr,i} = 20 \lg \frac{U_{xi}}{U_{xr}} + \delta_{pr,i} \quad (9)$$

式中：

$\delta_{pr,i}$ ——工程测量传声器的声压频率响应，dB；

U_{xr} ——使用工程测量传声器在参考频率时数字电压表的示值，V；

U_{xi} ——使用工程测量传声器在测试频率 f_i 时数字电压表的示值，V；

$\delta_{pr,i}$ ——参考传声器的声压频率响应，dB。

注：前置放大器和测量放大器的频率特性会影响测量结果，必要时需加以修正。

7.4.3.3 如制造商提供了传声器的自由场修正值和扩散场修正值，便可在声压频率响应的基础上获得工程测量传声器的自由场频率响应和扩散场频率响应。

7.4.4 耦合腔比较法

由于耦合腔替代法在高频段的不确定度较大，所以，有条件时也可采用耦合腔比较法测定工程测量传声器的声压频率响应。

耦合腔比较法测定工程测量传声器声压频率响应的测量装置如 JJG 1019—2007 的图 1 所示，测量方法见 JJG 1019—2007 的 7.3.1.3。

7.4.5 自由场替代法

7.4.5.1 自由场替代法用于测定工程测量传声器中频段和频段的高频段的自由场频率响应，测量装置如图 2 所示。

7.4.5.2 自由场替代法测定工程测量传声器自由场频率响应的步骤如下。

a) 测量放大器置于线性频率响应、S（慢）时间计权和与被校工程测量传声器相应的极化电压挡。用内部参考源校准好测量放大器。

b) 按图 2 布置声源和参考传声器，使传声器主轴与声源的主轴重合，二者声中心的距离为 $1\,000\text{ mm} \pm 5\text{ mm}$ ，调节声频信号发生器输出信号的频率为参考频率，调节输出信号电压使测量放大器指示为参考声压级，记录数字电压表的示值 U_{or} 。

c) 保持声频信号发生器的输出恒定，用工程测量传声器取代参考传声器，记录数字电压表的示值 U_{xr} 。

d) 按 7.4.1.2 的规定改变信号频率 f_i 。在每一测试频率，使用参考传声器时，调节信号电压使数字电压表的示值与步骤 b) 时相同；然后用工程测量传声器取代参考传声器，保持信号电压不变，记录数字电压表的示值 U_{xi} 。

e) 按公式 (10) 计算工程测量传声器的自由场频率响应。

$$\delta_{fr,i} = 20 \lg \frac{U_{xi}}{U_{xr}} + \delta_{fr,i} \quad (10)$$

式中：

$\delta_{fr,i}$ ——工程测量传声器的自由场频率响应，dB；

U_{xr} ——使用工程测量传声器在参考频率时数字电压表的示值，V；

U_{xi} ——使用工程测量传声器在测试频率 f_i 时数字电压表的示值，V；

$\delta_{fr,i}$ ——参考传声器的自由场频率响应，dB。

注：前置放大器和测量放大器的频率特性会影响测量结果，必要时需加以修正。

7.4.5.3 在某些测试频率，自由场装置中的声压级可能达不到参考声压级，此时可选择其他适当的声压级，必要时也可改变 7.4.5.2b) 中的距离，但在计算频率响应时需作相应的调整。

7.5 动态范围上限的校准方法

7.5.1 工程测量传声器动态范围上限的测量装置如图 5 所示。

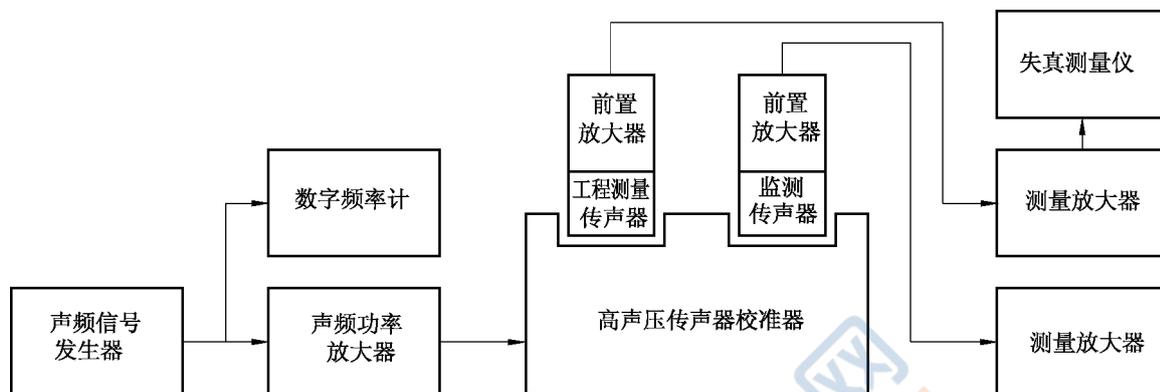


图 5 动态范围上限测量装置示意图

7.5.2 动态范围上限的试验步骤如下。

a) 将工程测量传声器和监测传声器同时耦合在高声压传声器校准器的耦合腔中。

b) 将两个回路中的测量放大器都置于线性频率响应、S（慢）时间计权以及与所用传声器相应的极化电压挡。用内部参考源校准好测量放大器。

c) 音频信号发生器置于制造商规定的频率，如无特别要求，则置于 95 Hz。从制造商规定的传声器动态范围上限以下 5 dB 起，缓慢地加大音频信号发生器的输出电压，由监测传声器回路中的测量放大器监视耦合腔内的声压级，同时观察失真测量仪的示值，当总失真达到 3.0% 时，记录监测传声器回路中测量放大器的示值。该示值对应的声压级即为工程测量传声器动态范围上限 L_{pU} 。

7.6 下限频率的校准方法

7.6.1 工程测量传声器的下限频率采用低频耦合腔法测量，测量装置如图 6 所示。需特别注意的是，工程测量传声器的压力均衡孔应暴露于声场中。

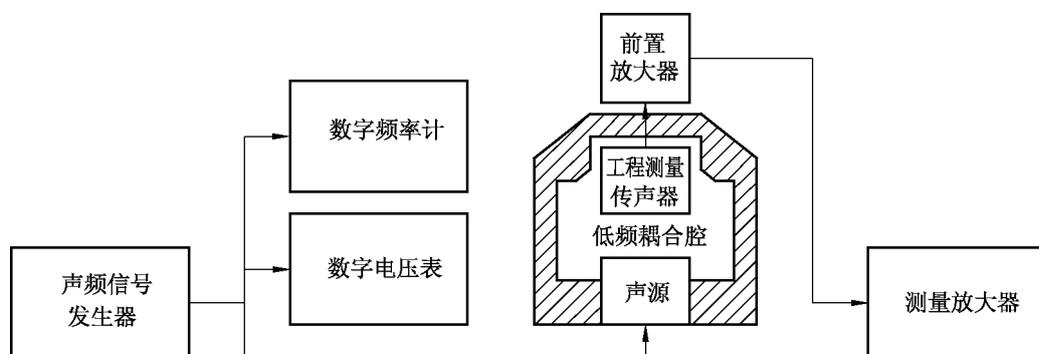


图 6 下限频率测量装置示意图

7.6.2 工程测量传声器下限频率的测量步骤如下。

a) 将工程测量传声器置于低频耦合腔内，确保工程测量传声器的压力均衡孔完整地暴露于声场中。

b) 测量放大器置于线性频率响应、S（慢）时间计权和与被校工程测量传声器相应的极化电压挡。用内部参考源校准好测量放大器。

c) 将声频信号发生器频率置为 250 Hz 或 95 Hz，记录测量放大器的示值。

d) 保持声频信号发生器的输出电压不变，逐渐降低信号频率，当测量放大器的示值比步骤 c) 记录的示值低 3.0 dB 时，记录数字频率表的示值，该频率即为工程测量传声器的下限频率 f_L 。

如有必要，应对声源的频率响应进行修正。

如需要，计算传声器下限频率的倒数即可得到传声器的均压时间常数。

8 校准结果表达

8.1 校准记录

校准记录应尽可能详尽地记载测量数据和计算结果。

推荐的校准记录的格式见附录 A。

8.2 校准数据处理

所有的数值应先计算，后修约。出具的校准数据按如下方法修约：

a) 灵敏度级及其频率响应的修约间隔为 0.1 dB；

b) 灵敏度保留 3 位有效数字；

c) 动态范围上限的修约间隔为 1 dB；

d) 下限频率的修约间隔为 0.1 Hz。

8.3 校准证书

应为校准的工程测量传声器出具校准证书。校准证书应包括的信息及推荐的校准证书的内页格式见附录 B。

8.4 校准结果的测量不确定度

工程测量传声器校准的测量不确定度应按 JJF 1059.1—2012 的要求评定，不确定度评定的示例见附录 C。

8 复校时间间隔

建议工程测量传声器复校时间间隔为 1 年。然而，复校时间间隔的长短取决于仪器的使用情况（使用部位的重要性、环境条件、使用频率）、使用者、仪器本身质量等诸多因素，因此，客户可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。

附录 A

校准记录的内容和格式

工程测量传声器校准记录的内容及推荐的格式见图 A.1。

电容式工程测量传声器校准记录			共 页 第 页		
委托方: _____		校准日期: _____ 年 ____ 月 ____ 日			
制造商: _____		产品型号: _____		出厂编号: _____	
性能等级: _____		类型标识: _____		极化电压: _____ V	
1 校准前检查					
2 灵敏度级					
2.1 声压灵敏度级					
极化电压: _____ V; 参考频率 f_0 : _____ Hz					
声校准器声压级的校准值 L_{p0} : _____ dB, 基准值为 20 μ Pa					
声校准器的静压修正值 Δp : _____ dB					
前置放大器的传输损失 A : _____ dB					
数字电压表交流电压示值 U_x : _____ mV, 传声器输出电压级 L_U : _____ dB					
声压灵敏度级 L_{Mp} : _____ dB, 扩展不确定度: _____ dB ($k=2$)					
声压灵敏度 M_p : _____ mV/Pa					
2.2 自由场灵敏度级					
极化电压: _____ V; 参考频率 f_0 : _____ Hz					
参考传声器自由场灵敏度级的校准值 L_{Mf0} : _____ dB, 参考值为 1 V/Pa					
参考传声器的输出电压 U_r : _____ mV, 工程测量传声器的输出电压 U_x : _____ mV					
自由场灵敏度级 L_{Mf} : _____ dB, 扩展不确定度: _____ dB ($k=2$)					
自由场灵敏度 M_f : _____ mV/Pa					
2.3 扩散场灵敏度级					
极化电压: _____ V; 参考频率 f_0 : _____ Hz					
声入射角	参考传声器的 输出电压 U_r V	工程测量传声 器的输出电压 U_x V	参考传声器自由场灵 敏度的校准值 L_{Mf0} dB	自由场灵 敏度级 L_{Mf} dB	自由场 灵敏度 M_f mV/Pa
0°					
30°					
60°					
90°					
120°					
150°					
180°					
扩散场灵敏度 M_d : _____ mV/Pa;					
扩散场灵敏度级 L_{Md} : _____ dB, 参考值为 1 V/Pa; 扩展不确定度: _____ dB ($k=2$)					

图 A.1 校准记录的格式

电容式工程测量传声器校准记录

共 页 第 页

3 灵敏度级的频率响应

3.1 静电激励器法

参考频率 f_0 : _____ Hz参考频率时数字电压表的示值 U_r : _____ V

测试频率 f_i Hz	数字电压表的示值 U_i V	激励器响应级 δ_{ai} dB	修正值 dB	频率响应 dB	扩展不确定度 dB ($k=2$)

3.2 耦合腔替代法

参考频率 f_0 : _____ Hz使用参考传声器时的示值 U_{0r} : _____ dB使用工程测量传声器时的示值 U_{xr} : _____ dB

测试频率 f_i Hz	数字电压表的示值 U_{xi} V	声压频率响应 dB	修正值 dB	频率响应 dB	扩展不确定度 dB ($k=2$)

3.3 自由场替代法

参考频率 f_0 : _____ Hz使用参考传声器时的示值 L_{0r} : _____ dB使用工程测量传声器时的示值 L_{xr} : _____ dB

测试频率 f_i Hz	数字电压表的示值 U_{xi} V	自由场频率响应 dB	修正值 dB	频率响应 dB	扩展不确定度 dB ($k=2$)

图 A.1 (续)

4 动态范围上限测试频率 f_i : _____ Hz总失真 D_t : _____ %动态范围上限 L_{pU} : _____ dB, 扩展不确定度: _____ dB ($k=2$)**5 下限频率**参考频率 f_0 : _____ Hz参考频率时的声压级 L_{p0} : _____ dB下限频率时的声压级 L_{pL} : _____ dB下限频率 f_L : _____ Hz, 扩展不确定度: _____ Hz ($k=2$)

校准的技术依据: JJF 1653—2017 电容式工程测量传声器校准规范

校准所使用的标准装置的名称、溯源性及有效性的说明:

校准条件:

空气温度: _____ °C

相对湿度: _____ %

静 压: _____ kPa

环境噪声: _____ dB

校准员:

核验员:

图 A.1 (续)

附录 B

校准证书的内容和格式

- B.1 工程测量传声器的校准证书至少应包括以下信息：
- a) 标题，如“校准证书”；
 - b) 校准实验室的名称和地址；
 - c) 进行校准的地点（如果与校准实验室的地址不同）；
 - d) 证书的唯一性标识（如编号），页码及总页数的标识；
 - e) 客户的名称和地址；
 - f) 被校对象的描述和明确标识（如型号、性能等级、类型标识及出厂编号等）；
 - g) 进行校准的日期；
 - h) 本技术规范的标识，包括名称及编号；
 - i) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性的说明；
 - j) 校准环境的描述；
 - k) 校准结果及其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；
 - 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。
- B.2 推荐的工程测量传声器校准证书的内页格式见图 B.1。

证书编号××××××—××××

校准机构授权说明					
校准的技术依据 JJF 1653—2017 电容式工程测量传声器校准规范					
校准环境条件及地点					
空气温度	℃	相对湿度	%	静压	kPa
地 点					
校准使用的计量（基）标准装置					
名 称	测量范围	不确定度 /准确度等级 /最大允许误差	计量（基）标准 证书编号	有效期至	
校准使用的标准器					
名 称	测量范围	不确定度 /准确度等级 /最大允许误差	检定/校准 证书编号	有效期至	

第×页 共×页

图 B.1 校准证书内页的格式

附录 C

测量不确定度评定示例

C.1 引言

由于声压灵敏度级及其频率响应是工程测量传声器最主要的计量特性，所以本附录选用声压灵敏度级和声压灵敏度级的频率响应作为测量不确定度评定的示例。

本附录还给出了动态范围上限和下限频率的测量不确定度的评定示例。

C.2 声压灵敏度级

C.2.1 测量模型

按 7.3.2 给出的方法测定工程测量传声器的声压灵敏度级，计算声压灵敏度级的公式 (2) 亦是该计量特性的测量模型，稍加整理后变为公式 (C.1)。

$$L_{M_p} = L_U - L_{p_0} - \Delta p + A - 26 \quad (\text{C.1})$$

式中：

L_{M_p} ——声压灵敏度级，dB；

L_U ——工程测量传声器输出电压级，dB；

L_{p_0} ——声校准器声压级的校准值，dB；

Δp ——声校准器的静压修正值，dB；

A ——前置放大器的传输损失，dB。

C.2.2 合成标准不确定度的计算公式

由于公式 (C.1) 中 L_U 、 L_{p_0} 、 Δp 和 A 的不确定度互不相关，故声压灵敏度级的合成标准不确定度 u_c 可用公式 (C.2) 表示：

$$u_c(L_{M_p}) = \sqrt{c^2(L_U)u^2(L_U) + c^2(L_{p_0})u^2(L_{p_0}) + c^2(\Delta p)u^2(\Delta p) + c^2(A)u^2(A)} \quad (\text{C.2})$$

公式 (C.2) 中灵敏系数分别为：

$$c(L_U) = \frac{\partial L_{M_p}}{\partial L_U} = 1$$

$$c(L_{p_0}) = \frac{\partial L_{M_p}}{\partial L_{p_0}} = -1$$

$$c(\Delta p) = \frac{\partial L_{M_p}}{\partial \Delta p} = -1$$

$$c(A) = \frac{\partial L_{M_p}}{\partial A} = 1$$

将各灵敏系数代入公式 (C.2) 后，即可得到计算声压灵敏度级的合成标准不确定度 u_c 的公式 (C.3)：

$$u_c(L_{M_p}) = \sqrt{u^2(L_U) + u^2(L_{p_0}) + u^2(\Delta p) + u^2(A)} \quad (\text{C.3})$$

C.2.3 测量不确定度评定

C.2.3.1 鉴于工程测量传声器声压灵敏度级存在重复性测量不一致的可能，故此在重

复性测量条件下对某工程测量传声器的输出电压级重复测量 6 次，并得到其 6 次的测量值分别为 61.73 dB、61.66 dB、61.66 dB、61.73 dB、61.66 dB 和 61.66 dB。

依照标准不确定度 A 类评定方法，计算得到上述 6 次工程测量传声器输出电压级测得值的算术平均值 $L_{U_{av}}=61.68$ dB，并按公式 (C.4) 计算工程测量传声器输出电压级 6 次测得值的实验标准偏差 $s(L_U)$ ：

$$s(L_U) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_{U_i} - L_{U_{av}})^2}{n-1}} \quad (\text{C.4})$$

式中：

$s(L_U)$ —— 重复测量的实验标准偏差，dB；

L_{U_i} —— 第 i 次测得的工程测量传声器输出电压级，dB；

$L_{U_{av}}$ —— 工程测量传声器输出电压级 n 次测得值的算术平均值，dB；

n —— 重复测量的次数。

由此即可获得测量重复性误差引入的标准不确定度：

$$u_1(L_U) = s(L_U) = 0.036 \text{ dB}$$

C.2.3.2 测量放大器的级线性（包括指示器的级线性）误差不超过 ± 0.15 dB，其引入的不确定度按均匀分布估计考虑，取包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，故测量放大器的级线性误差引入的标准不确定度 $u_2(L_U) \approx 0.089$ dB。

C.2.3.3 当声校准器的信号频率与测量放大器的校准信号频率不同时，测量放大器的频率响应会引入不确定度。在适用频率范围内测量放大器的频率响应估计为 ± 0.1 dB，其引入的不确定度按均匀分布估计考虑，取包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，故测量放大器频率响应引入的标准不确定度 $u_3(L_U) \approx 0.058$ dB。

C.2.3.4 测量放大器为工程测量传声器所提供的极化电压的误差不超过 $\pm 0.1\%$ ，约合 0.009 dB，其引入的标准不确定度按均匀分布估计考虑，取包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，故测量放大器的极化电压误差引入的标准不确定度 $u_4(L_U) \approx 0.005$ dB。

C.2.3.5 数字电压表的交流电压测量误差不超过 $\pm 0.2\%$ ，约合 0.017 dB，其引入的不确定度按均匀分布估计考虑，取包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，故交流电压测量误差引入的标准不确定度 $u_5(L_U) \approx 0.01$ dB。

C.2.3.6 工程测量传声器前腔体积（包括等效体积）会影响耦合后声校准器在其耦合腔中所产生的声压级，其引入的标准不确定度估计为 $u_6(L_U) = 0.02$ dB。

C.2.3.7 声校准器产生的校准声压级与其校准证书给出的校准值的误差引入的标准不确定度估计为 $u_7(L_{p0}) = 0.03$ dB。

C.2.3.8 在试验环境条件下，空气温度变化对 1 级声校准器产生的声压级的改变量不超过 ± 0.033 dB，其引入的不确定度按均匀分布估计考虑，取包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，故温度变化引入的标准不确定度分量 $u_8(L_{p0}) \approx 0.019$ dB。

C.2.3.9 需就静压对声校准器产生的声压级进行修正，由于静压修正值的误差和静压修正方法不完善所引入的标准不确定度估计为 $u_9(\Delta p) = 0.015$ dB。

C. 2. 3. 10 需对前置放大器传输损失进行修正，由于前置放大器传输损失修正值的误差和其修正方法不完善所引入的标准不确定度估计为 $u_{10}(A)=0.005$ dB。

C. 2. 3. 11 由于要求报告的声压灵敏度级的修约间隔为 0.1 dB，矩形分布的半区间宽为 0.05 dB，其引入的不确定度按均匀分布估计考虑，取包含因子 $k=\sqrt{3}$ ，故数值修约引入的标准不确定度 $u_{11}(\nu)\approx 0.029$ dB。

C. 2. 4 合成标准不确定度

通过 C. 2. 3 评定的声压灵敏度级的标准不确定度及其输出量的标准不确定度分量汇总如表 C. 1 所示。

表 C. 1 声压灵敏度级的标准不确定度一览表

不确定度来源	标准不确定度		灵敏系数	输出量标准不确定度分量 /dB
	符号	数值 /dB		
测量重复性误差	$u_1(L_U)$	0.036	1	0.036
测量放大器的级线性误差	$u_2(L_U)$	0.089	1	0.089
测量放大器的频率响应	$u_3(L_U)$	0.058	1	0.058
极化电压的误差	$u_4(L_U)$	0.005	1	0.005
交流电压测量误差	$u_5(L_U)$	0.01	1	0.01
前腔体积误差	$u_6(L_U)$	0.02	1	0.02
声校准器声压级误差	$u_7(L_{p0})$	0.03	-1	0.03
空气温度变化的影响	$u_8(L_{p0})$	0.019	-1	0.019
静压修正误差	$u_9(\Delta p)$	0.015	-1	0.015
传输损失修正误差	$u_{10}(A)$	0.005	1	0.005
数值修约	$u_{11}(\nu)$	0.029	1	0.029

因上述标准不确定度分量各自独立、互不相干，按公式 (C. 3) 计算并考虑数值修约引入的不确定度，便可得出工程测量传声器声压灵敏度级的合成标准不确定度 u_c ：

$$u_c = \sqrt{0.036^2 + 0.089^2 + 0.058^2 + 0.005^2 + 0.01^2 + 0.02^2 + 0.03^2 + 0.019^2 + 0.015^2 + 0.005^2 + 0.029^2} \\ \approx 0.124 \text{ (dB)}$$

C. 2. 5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则工程测量传声器声压灵敏度级的扩展不确定度 U 为：

$$U = k \times u_c = 2 \times 0.124 = 0.248 \text{ (dB)}$$

因为要求修约间隔为 0.1 dB，所以，工程测量传声器声压灵敏度级的报告扩展不确定度为：

$$U = 0.3 \text{ dB}, k = 2$$

C. 3 声压灵敏度级的频率响应

C. 3. 1 测量模型

本规范 7. 4. 2 规定了采用静电激励器法测定传声器的声压灵敏度级的频率响应，即

先测定传声器的静电激励器响应，再施加制造者提供的声压场修正值，从而获得传声器灵敏度级的声压频率响应。

静电激励器法测定声压灵敏度级频率响应的测量模型见公式 (C.5)。

$$\delta_p = \delta_a + C_p \quad (\text{C.5})$$

式中：

δ_p ——声压灵敏度级频率响应，dB；

δ_a ——静电激励器频率响应，dB；

C_p ——声压场修正值，dB。

C.3.2 合成标准不确定度的计算公式

由于公式 (C.5) 中 δ_a 和 C_p 的不确定度互不相关，故声压灵敏度级频率响应的合成标准不确定度 u_c 可用公式 (C.6) 表示：

$$u_c(\delta_p) = \sqrt{c^2(\delta_a)u^2(\delta_a) + c^2(C_p)u^2(C_p)} \quad (\text{C.6})$$

公式 (C.6) 中灵敏系数分别为：

$$c(\delta_a) = \frac{\partial \delta_p}{\partial \delta_a} = 1$$

$$c(C_p) = \frac{\partial \delta_p}{\partial C_p} = 1$$

将各灵敏系数代入公式 (C.6) 后，即可得到计算声压灵敏度级频率响应的合成标准不确定度的公式 (C.7)：

$$u_c(\delta) = \sqrt{u^2(\delta_a) + u^2(C_p)} \quad (\text{C.7})$$

C.3.3 测量不确定度的评定

C.3.3.1 在重复性测量条件下，测试频率分别为工作范围的最低频率 (10 Hz) 和最高频率 (31 500 Hz) 时，对某工程测量传声器的交流输出电压级重复测量 6 次，并按公式 (8) 计算传声器的静电激励器频率响应，测量数据及计算结果见表 C.2。

表 C.2 静电激励器频率响应的测量重复性

测量顺序	交流电压示值 U_i / mV		静电激励器频率响应 δ_{ai} / dB	
	测试频率		测试频率	
	10 Hz	31 500 Hz	10 Hz	31 500 Hz
1	0.515	0.099	-0.28	-14.61
2	0.512	0.101	-0.33	-14.43
3	0.510	0.102	-0.37	-14.35
4	0.509	0.101	-0.38	-14.43
5	0.509	0.098	-0.38	-14.69
6	0.512	0.099	-0.33	-14.61
算术平均值 $\delta_{a,av}$	—	—	-0.345	-14.52
实验标准偏差 $s(\delta_a)$	—	—	0.039	0.134

按公式 (C.4) 计算静电激励器频率响应的实验标准偏差, 其值见表 C.2。

由此即可得到测量重复性误差在低频段和高频段引入的标准不确定度分别为:

$$u_{1L}(\delta_a) = s_L(\delta_a) = 0.039 \text{ dB}$$

$$u_{1H}(\delta_a) = s_H(\delta_a) = 0.134 \text{ dB}$$

C.3.3.2 声频信号发生器的幅频特性优于 $\pm 0.1 \text{ dB}$, 其引入的不确定度按均匀分布估计考虑, 取包含因子 $k = \sqrt{3}$, 故声频信号发生器的幅频特性所引入的标准不确定度 $u_2(\delta_a) \approx 0.058 \text{ dB}$ 。

C.3.3.3 静电激励器的激励电压-等效声压转换过程中的误差所引入的标准不确定度, 在低频段和高频段分别估计为 $u_{3L}(\delta_a) = 0.01 \text{ dB}$ 和 $u_{3H}(\delta_a) = 0.07 \text{ dB}$ 。

C.3.3.4 前置放大器的频率响应优于 $\pm 0.1 \text{ dB}$, 其引入的不确定度按均匀分布估计考虑, 取包含因子 $k = \sqrt{3}$, 故前置放大器频率响应引入的标准不确定度为 $u_4(\delta_a) \approx 0.058 \text{ dB}$ 。

C.3.3.5 测量放大器的频率响应优于 $\pm 0.1 \text{ dB}$, 其引入的不确定度按均匀分布估计考虑, 取包含因子 $k = \sqrt{3}$, 故测量放大器频率响应引入的标准不确定度为 $u_5(\delta_a) \approx 0.058 \text{ dB}$ 。

C.3.3.6 测量放大器在 20 dB 内的级线性优于 $\pm 0.1 \text{ dB}$, 其引入的不确定度按均匀分布估计考虑, 取包含因子 $k = \sqrt{3}$, 故测量放大器级线性误差所引入的标准不确定度 $u_6(\delta_a) \approx 0.058 \text{ dB}$ 。

C.3.3.7 数字电压表的交流电压测量误差不超过 $\pm 0.2\%$, 约合 $\pm 0.017 \text{ dB}$, 由于在计算频率响应时取两电压值之比, 因此可取为 $\pm 0.009 \text{ dB}$, 其引入的不确定度按均匀分布估计考虑, 取包含因子 $k = \sqrt{3}$, 故数字电压表交流电压测量误差引入的标准不确定度 $u_7(\delta_a) \approx 0.005 \text{ dB}$ 。

C.3.3.8 在测量过程中, 包括直流电压源、声频信号发生器和测量放大器在内的信号和测量系统的非稳定性引入的标准不确定度估计为 $u_8(\delta_a) = 0.058 \text{ dB}$ 。

C.3.3.9 由于传声器的静电激励器响应与声压频率响应在高频段会有些差异, 因而需作声场修正, 由于修正值的误差或者修正不完善而引入的标准不确定度估计为 $u_9(C_p) = 0.25 \text{ dB}$ 。

C.3.3.10 要求报告的声压灵敏度级频率响应的修约间隔为 0.1 dB , 矩形分布的半区间宽为 0.05 dB , 其引入的不确定度按均匀分布估计考虑, 取包含因子 $k = \sqrt{3}$, 故数值修约引入的标准不确定度 $u_{10}(v) \approx 0.029 \text{ dB}$ 。

C.3.3.11 数字频率计频率示值误差也会引入不确定度, 但是, 由于传声器频率响应曲线相对平直, 其所引入的不确定度可忽略不计。同时, 由于是电压比值的测量, 实验环境等其他因素所引入的测量不确定度也可忽略不计。

C.3.4 合成标准不确定度

通过 C.3.3 评定的声压灵敏度级频率响应的标准不确定度及其输出量的标准不确定度分量汇总如表 C.3 所示。

表 C.3 声压灵敏度级频率响应的标准不确定度一览表

不确定度来源	标准不确定度				灵敏系数	输出量标准不确定度分量 /dB	
	符号		数值/dB			低频	高频
	低频	高频	低频	高频			
测量重复性误差	$u_{1L}(\delta_a)$	$u_{1H}(\delta_a)$	0.039	0.134	1	0.039	0.134
声频信号发生器的幅频特性	$u_2(\delta_a)$		0.058		1	0.058	
静电激励器电声转换误差	$u_{3L}(\delta_a)$	$u_{3H}(\delta_a)$	0.01	0.07	1	0.01	0.07
前置放大器频率响应	$u_4(\delta_a)$		0.058		1	0.058	
测量放大器频率响应	$u_5(\delta_a)$		0.058		1	0.058	
测量放大器级线性误差	$u_6(\delta_a)$		0.058		1	0.058	
交流电压测量误差	$u_7(\delta_a)$		0.005		1	0.005	
系统不稳定	$U_8(\delta_a)$		0.058		1	0.058	
声场修正值误差	$U_9(C_p)$		—	0.25	1	—	0.25
数值修约	$U_{10}(\nu)$		0.029		1	0.029	

因上述标准不确定度分量各自独立、互不相干，按公式 (C.7) 计算并考虑数值修约引入的不确定度，可得到工程测量传声器在工作频率范围低频段和高频段的声压灵敏度级频率响应的合成标准不确定度 u_{cL} 和 u_{cH} 分别为：

$$u_{cL} = \sqrt{0.039^2 + 0.058^2 + 0.01^2 + 0.058^2 + 0.058^2 + 0.058^2 + 0.005^2 + 0.058^2 + 0.029^2} \\ \approx 0.139 \text{ (dB)}$$

$$u_{cH} = \sqrt{0.134^2 + 0.058^2 + 0.07^2 + 0.058^2 + 0.058^2 + 0.058^2 + 0.005^2 + 0.058^2 + 0.025^2 + 0.029^2} \\ \approx 0.321 \text{ (dB)}$$

C.3.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则工程测量传声器声压灵敏度级频率响应在低频段和高频段的扩展不确定度 U_L 和 U_H 分别为：

$$U_L = k \times u_{cL} = 2 \times 0.139 = 0.278 \text{ (dB)}$$

$$U_H = k \times u_{cH} = 2 \times 0.321 = 0.642 \text{ (dB)}$$

因为要求修约间隔为 0.1 dB，所以，工程测量传声器声压灵敏度级频率响应的报告扩展不确定为：

$$U = 0.3 \text{ dB}, k = 2 \text{ (适用于低频段)}$$

$$U = 0.7 \text{ dB}, k = 2 \text{ (适用于高频段)}$$

C.4 动态范围上限

C.4.1 测量模型

本规范设计的工程测量传声器动态范围上限的测量方法，是在被试传声器输出信号的总失真达到规定的限值 (3%) 时，测量被试传声器的输入声压级。这样，动态范围上限的测量不确定度主要来自于两个方面：

- a) 声压级的测量不确定度；
b) 失真测量误差引入的声压级测量不确定度。

动态范围上限的测量模型见公式 (C.8)。

$$\Delta L_{\rho U} = L_{\rho Ux} - L_{\rho U0} \quad (\text{C.8})$$

式中：

$\Delta L_{\rho U}$ ——动态范围上限的测量误差，dB；

$L_{\rho Ux}$ ——动态范围上限的测得值，dB；

$L_{\rho U0}$ ——动态范围上限的参考量值，dB。

C.4.2 合成标准不确定度的计算公式

由于公式 (C.8) 中 $L_{\rho Ux}$ 和 $L_{\rho U0}$ 的不确定度互不相关，故动态范围上限的合成标准不确定度 u_c 可用公式 (C.9) 表示：

$$u_c(L_{\rho U}) = \sqrt{c^2(L_{\rho Ux})u^2(L_{\rho Ux}) + c^2(L_{\rho U0})u^2(L_{\rho U0})} \quad (\text{C.9})$$

公式 (C.9) 中灵敏系数分别为：

$$c(L_{\rho Ux}) = \frac{\partial \Delta L_{\rho U}}{\partial L_{\rho Ux}} = 1$$

$$c(L_{\rho U0}) = \frac{\partial \Delta L_{\rho U}}{\partial L_{\rho U0}} = -1$$

将各灵敏系数代入公式 (C.8) 后，即可得到计算动态范围上限的合成标准不确定度的公式 (C.10)：

$$u_c(L_{\rho U}) = \sqrt{u^2(L_{\rho Ux}) + u^2(L_{\rho U0})} \quad (\text{C.10})$$

C.4.3 测量不确定度的评定

C.4.3.1 鉴于动态范围上限存在重复性测量不一致的可能，故此在重复性测量条件下对某工程测量传声器的动态范围上限重复测量 6 次，其测得值分别为 153.5 dB、153.4 dB、153.5 dB、153.6 dB、153.4 dB 和 153.4 dB。

计算得到上述 6 个动态范围上限测得值的算术平均值 $L_{\rho Uav} = 153.47$ dB，并按公式 (C.4) 计算工程测量传声器动态范围上限 6 次测得值的实验标准偏差 $s(L_{\rho U}) = 0.082$ dB。可将其作为测量重复性误差引入的标准不确定度为：

$$u_1(L_{\rho Ux}) = s(L_{\rho U}) = 0.082 \text{ dB}$$

C.4.3.2 前置放大器的频率响应优于 ± 0.1 dB，其引入的不确定度按均匀分布估计考虑，取包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，故前置放大器频率响应引入的标准不确定度 $u_2(L_{\rho Ux}) \approx 0.058$ dB。

C.4.3.3 测量放大器的频率响应优于 ± 0.1 dB，其引入的不确定度按均匀分布估计考虑，取包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，故测量放大器频率响应引入的标准不确定度 $u_3(L_{\rho Ux}) \approx 0.058$ dB。

C.4.3.4 测量放大器的级线性优于 ± 0.15 dB，其引入的不确定度按均匀分布估计考虑，取包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，故测量放大器级线性误差引入的标准不确定度 $u_4(L_{\rho Ux}) \approx 0.087$ dB。

C. 4. 3. 5 包括监测传声器在内的声压级测量系统校准的不确定度约为 ± 0.3 dB, 其引入的不确定度按均匀分布估计考虑, 取包含因子 $k=\sqrt{3}$, 故测量放大器级线性误差引入的标准不确定度 $u_5(L_{pUx})\approx 0.173$ dB。

C. 4. 3. 6 在测定动态范围上限时, 需测量输出信号的总失真, 总失真的测量误差会导致动态范围上限参考量值的不准确。总失真测量不确定度的来源主要包括信号源(声频信号发生器和功率放大器)、高声压传声器校准仪及测量回路(前置放大器和测量放大器)的总失真和失真测量仪的测量误差。总失真的测量不确定度估计为 0.3% 。总失真的测量不确定度导致动态范围上限参考量值的标准不确定度估计为 $u_6(L_{pU0})=0.3$ dB。

C. 4. 3. 7 要求报告的动态范围上限的修约间隔为 1 dB, 矩形分布的半区间宽为 0.5 dB, 其引入的标准不确定度按均匀分布估计考虑, 取包含因子 $k=\sqrt{3}$, 故数值修约引入的标准不确定度 $u_7(v)\approx 0.29$ dB。

C. 4. 4 合成标准不确定度

通过 C. 4. 3 评定的动态范围上限的标准不确定度及其输出量的标准不确定度分量汇总如表 C. 4 所示。

表 C. 4 动态范围上限的标准不确定度一览表

不确定度来源	标准不确定度		灵敏系数	输出量标准不确定度分量/dB
	符号	数值/dB		
测量重复性误差	$u_1(L_{pUx})$	0.082	1	0.082
前置放大器的频率响应	$u_2(L_{pUx})$	0.058	1	0.058
测量放大器的频率响应	$u_3(L_{pUx})$	0.058	1	0.058
测量放大器的级线性误差	$u_4(L_{pUx})$	0.087	1	0.087
测量系统校准不准确	$u_5(L_{pUx})$	0.173	1	0.173
总失真的测量误差	$u_6(L_{pU0})$	0.3	-1	0.3
数值修约	$u_7(v)$	0.29	1	0.29

因上述标准不确定度分量各自独立、互不相干, 按公式 (C. 10) 计算并考虑数值修约引入的不确定度, 可得到工程测量传声器动态范围上限的合成标准不确定度 u_c 为:

$$u_c = \sqrt{0.082^2 + 0.058^2 + 0.058^2 + 0.087^2 + 0.173^2 + 0.3^2 + 0.29^2} \approx 0.47 \text{ (dB)}$$

C. 4. 5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$, 则工程测量传声器动态范围上限的扩展不确定度 U 为:

$$U = k \times u_c = 2 \times 0.47 = 0.94 \text{ (dB)}$$

因为要求修约间隔为 1 dB, 所以, 工程测量传声器动态范围上限的报告扩展不确定度为:

$$U = 1 \text{ dB}, k = 2$$

C. 5 下限频率

C. 5. 1 测量模型

本规范设计的工程测量传声器下限频率的测量方法, 是在被试传声器的输出信号级

比参考频率时输出信号级降低 3 dB 时, 测量信号频率。所以, 下限频率的测量不确定度主要来自于两个方面:

- a) 频率测量误差;
- b) 传声器输出信号级测量误差引入的频率测量不确定度。

下限频率的测量模型见公式 (C. 11)。

$$\Delta f_L = f_{Lx} - f_{L0} \quad (\text{C. 11})$$

式中:

Δf_L ——下限的测量误差, Hz;

f_{Lx} ——下限的测得值, Hz;

f_{L0} ——下限的参考量值, Hz。

C. 5.2 合成标准不确定度的计算公式

由于公式 (C. 11) 中 f_{Lx} 和 f_{L0} 的不确定度互不相关, 故下限频率的合成标准不确定度可用公式 (C. 12) 表示:

$$u_c(f_L) = \sqrt{c^2(f_{Lx})u^2(f_{Lx}) + c^2(f_{L0})u^2(f_{L0})} \quad (\text{C. 12})$$

公式 (C. 12) 中灵敏系数分别为:

$$c(f_{Lx}) = \frac{\partial \Delta f_L}{\partial f_{Lx}} = 1$$

$$c(f_{L0}) = \frac{\partial \Delta f_L}{\partial f_{L0}} = -1$$

将各灵敏系数代入公式 (C. 12) 后, 即可得到计算动态范围上限的合成标准不确定度的公式 (C. 13):

$$u_c(f_L) = \sqrt{u^2(f_{Lx}) + u^2(f_{L0})} \quad (\text{C. 13})$$

C. 5.3 测量不确定度的评定

C. 5.3.1 鉴于下限频率存在重复性测量不一致的可能, 故此在重复性测量条件下对某工程测量传声器的下限频率重复测量 6 次, 其测得值分别为 2.5 Hz、2.7 Hz、2.7 Hz、2.8 Hz、2.8 Hz 和 2.7 Hz。

计算得到上述 6 个下限频率测得值的算术平均值 $f_{Lav} = 2.7$ Hz, 并按公式 (C. 4) 计算工程测量传声器下限频率 6 个测得值的实验标准偏差 $s(f_L) = 0.11$ Hz。可将其作为测量重复性误差引入的标准不确定度为:

$$u_1(f_{Lx}) = s(f_L) = 0.11 \text{ Hz}$$

C. 5.3.2 数字频率计的频率示值误差不超过 $\pm 0.5\%$, 其引入的不确定度按均匀分布估计考虑, 取包含因子 $k = \sqrt{3}$, 故数字频率计频率示值误差引入的标准不确定度约为 0.029% , 当下限频率为 10 Hz 左右时, $u_2(f_{Lx}) \approx 0.0029$ Hz。

C. 5.3.3 由于在确定下限频率时需要测量工程测量传声器的输出信号级, 所以该输出信号级的测量误差会导致下限频率参考量值的不准确。输出信号级测量不确定度的主要来源包括信号源和测量回路的频率响应、测量仪器的测量误差以及系统的非稳定, 输出信号级的测量不确定度估计为 0.17 dB。在传声器下限频率处, 输出信号级的频率响应曲线斜率一般为 -20 dB/dec 左右, 所以 0.17 dB 的声压级的不确定度将导致约 1.94%

的频率测量不确定度，当下限频率为 10 Hz 时，由于输出信号级测量误差引入的频率测量不确定度 $u_3(f_{L0})=0.194$ Hz。

C.5.3.4 要求报告的下限频率的修约间隔为 0.1 Hz，矩形分布的半区间宽为 0.05 Hz，其引入的不确定度按均匀分布估计考虑，取包含因子 $k=\sqrt{3}$ ，故数值修约引入的标准不确定度 $u_4(\nu)\approx 0.029$ Hz。

C.5.4 合成标准不确定度

通过 C.5.3 评定的动态范围上限的标准不确定度及其输出量的标准不确定度分量汇总如表 C.5 所示。

表 C.5 下限频率的标准不确定度一览表

不确定度来源	标准不确定度		灵敏系数	输出量标准不确定度分量/dB
	符号	数值/Hz		
测量重复性误差	$u_1(f_L)$	0.11	1	0.11
数字频率计频率示值误差	$u_2(f_{Lx})$	0.002 9	1	0.002 9
输出信号级测量误差	$u_3(f_{L0})$	0.194	-1	0.194
数值修约	$u_4(\nu)$	0.029	1	0.029

因上述标准不确定度分量各自独立、互不相干，按公式 (C.13) 计算并考虑数值修约引入的不确定度，可得到工程测量传声器动态范围上限的合成标准不确定度 u_c 为：

$$u_c = \sqrt{0.11^2 + 0.002\ 9^2 + 0.194^2 + 0.029^2} \approx 0.23(\text{Hz})$$

C.5.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则工程测量传声器下限频率的扩展不确定度 U 为：

$$U = k \times u_c = 2 \times 0.23 = 0.46(\text{Hz})$$

因为要求修约间隔为 0.1 Hz，所以，工程测量传声器下限频率的报告扩展不确定度为：

$$U = 0.5 \text{ Hz}, \quad k = 2$$