



中华人民共和国工业和信息化部 机械计量技术规范

JJFZ (机械) xxxx-xxxx

中低频功率放大器校准规范

(报批稿)

Calibration Specification for Medium and Low
Frequency Power Amplifiers

2026—XX—XX 发布

2026—XX—XX 实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

中低频功率放大器校准规范

Calibration Specification for Medium and Low

Frequency Power Amplifiers

JJFZ (机械) XXXX
-202x

归口单位：中国机械工业联合会

主要起草单位：西安高压电器研究院股份有限公司

参加起草单位：西安安泰电子科技有限公司

本规范委托全国机械汽车专业计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

- 常 旂（西安高压电器研究院股份有限公司）
- 钟 磊（西安高压电器研究院股份有限公司）
- 张 鹤（西安高压电器研究院股份有限公司）

参加起草人：

- 李炳宏（西安高压电器研究院股份有限公司）
- 魏 坤（西安安泰电子科技有限公司）
- 李 阳（西安安泰电子科技有限公司）
- 王 锐（西安安泰电子科技有限公司）

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..... (1)

6 校准条件..... (2)

7 校准项目和校准方法..... (3)

8 校准结果表达..... (10)

9 复校时间间隔..... (10)

附录 A 原始记录内页格式..... (11)

附录 B 校准证书内页格式..... (12)

附录 C 测量不确定度评定示例..... (13)

附录 D DC 下电压增益及其频率响应校准方法.....(25)

引 言

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》共同构成支撑本规范制定工作的基础性系列规范。

本规范为首次发布。

中低频功率放大器校准规范

1 范围

本规范适用于频率在 30MHz 以下，电压输出在 60kV（峰-峰值）内，输出功率在 20kW(峰值)内的中低频功率放大器的校准。

2 引用文件

JJF 1200—2008 《声频功率放大器校准规范》

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 增益的频率响应 gain frequency response

电压增益在频率范围内相对于参考频率下电压增益的变化量，单位 dB。

3.2 信噪比 signal-to-noise ratio

最大输出电压与无信号输入时的输出噪声电压之比，单位 dB。

3.3 输出电压零点漂移 output voltage offset drift

无信号输入时，输出端出现的直流电压，单位 V。

4 概述

中低频功率放大器是将输入电平信号放大到一定功率水平，以驱动负载工作的一种电子设备，通常由激励输入电路、低通滤波电路、初级增益调节、末级功率放大、闭环增益控制、输出保护电路等单元组成，其原理框图如图 1 所示。

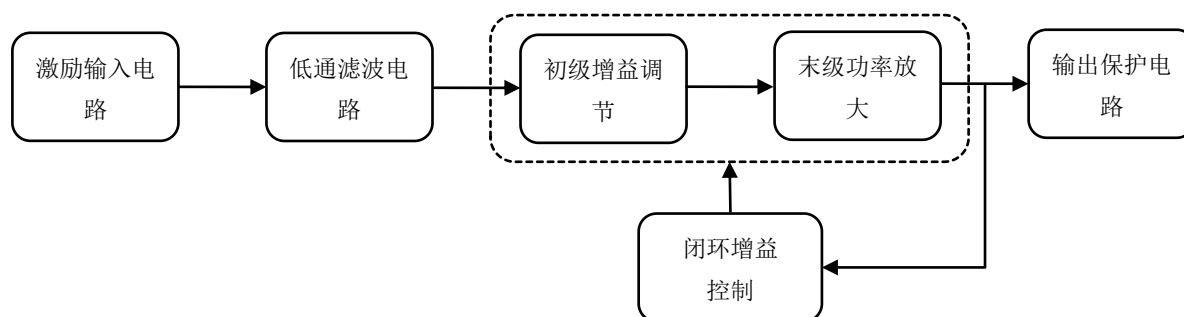


图 1 中低频功率放大器原理框图

5 计量特性

5.1 电压增益

增益范围：1~10000（倍数表示法）；

最大允许误差： $\pm(0.1\%\sim 20\%)$ 。

增益范围：0dB~80dB（分贝表示法）；

最大允许误差： $\pm(0.01\text{dB}\sim 2\text{dB})$ 。

5.2. 增益的频率响应

频率响应范围：在工作频率范围其频率响应一般应优于 $\pm 3\text{dB}$ 。

5.3 输出电压示值

电压范围：10mV~60kV（峰峰值）；

最大允许误差： $\pm(0.1\%\sim 20\%)$ 。

5.4 最大输出功率

功率范围：1W~20kW（峰值）

5.5 失真度

失真度范围：0.01%~3%

5.6 信噪比

信噪比范围： $\geq 60\text{dB}$ 。

5.7 输出电压零点漂移

零点漂移范围：10mV~3V。

注：以上技术指标仅供参考，不作为符合性判定依据。

6 校准条件

6.1 环境条件

环境温度： $23^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ ；

相对湿度： $\leq 80\%$ ；

电源：交流供电电压： $(220\pm 11)\text{V}$ ，交流供电频率： $(50\pm 1)\text{Hz}$ 。

其他：周围无影响仪器正常工作的机械振动和电磁干扰。

6.2 测量标准及其他设备

a) 交流数字电压表（2 台）

频率范围：10Hz~1MHz；

电压范围：10mV~1kV；

电压最大允许误差： $\pm(0.01\%\sim 5\%)$ 。

b) 正弦波信号发生器

频率范围：10Hz~30MHz；

频率最大允许误差： $\pm (1 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-3})$ ；

电压范围：10mV~10V；

电压最大允许误差： $\pm (0.5\% \sim 5\%)$ 。

c) 数字示波器

带宽：大于被校中低频功率放大器标称带宽的 2 倍；

电压最大允许误差： $\pm (1\% \sim 3\%)$ 。

d) 电压探头

带宽：大于被校中低频功率放大器标称带宽的 2 倍；

衰减比：1:1~5000:1；

最大允许误差： $\pm (0.5 \sim 3\%)$ 。

e) 电流探头

带宽：大于被校中低频功率放大器标称带宽的 2 倍；

输出电压比：1V/A~1mV/A；

最大允许误差： $\pm (1\% \sim 5\%)$ 。

f) 失真度测量仪

失真度：0.01%~30%；

最大允许误差： $\pm (5\% \sim 40\%)$ （相对误差）。

g) 负载电阻

阻值范围：0.1 Ω ~10M Ω ；

最大允许误差： $\pm 5\%$ 。

h) 直流数字电压表

电压：10mV~100V；

最大允许误差： $\pm (0.01\% \sim 0.5\%)$ 。

注：除上述设备外，也可使用其他符合要求的计量器具。

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 校准项目表

序号	项目名称
1	电压增益
2	增益的频率响应
3	输出电压示值
4	最大输出功率
5	失真度
6	信噪比
7	输出电压零点漂移

7.2 校准方法

7.2.1 外观及工作正常性检查

被校中低频功率放大器的外观应完好，无影响正常工作的机械损伤，其开关、按键、旋钮应牢固且调节正常。

通电后开关、按键、显示屏和各种状态指示灯应工作正常。

校准前，被校中低频功率放大器以及所用标准器应按各自说明书的要求预热。

7.2.2 电压增益

7.2.2.1 校准点选取

a) 定值增益的中低频功率放大器,选择 1kHz 作为典型频率点，在输出电压范围内选取 3-5 个电压值，包括最大输出电压和 10%最大输出电压。

b) 增益连续可调的中低频功率放大器,在增益范围内选取 3-5 个增益点,选择 1kHz 作为典型频率点，在输出电压范围内选取 3-5 个电压值，包括最大输出电压和 10%最大输出电压。

注：可根据送校单位的实际需求选取校准点。

7.2.2.2 校准方法

a) 仪器连接如图 2 所示。

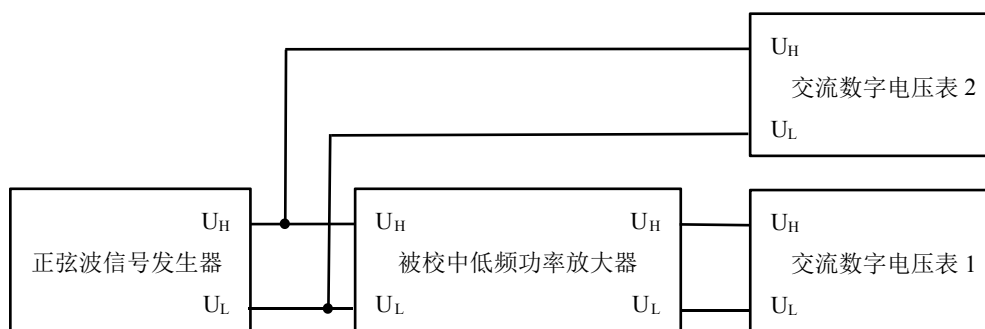


图 2 电压增益校准接线示意图(交流数字电压表)

- b) 根据校准点设置被校中低频功率放大器的增益并调节正弦波信号发生器的输出；
 c) 待输出稳定后，同时读取并记录交流数字电压表 2 的测量结果 U_i 和交流数字电压表 1 的测量结果 U_o ；

- d) 电压增益用倍数表示时，电压增益标准值 A_r 按公式 (1) 计算：

$$A_r = \frac{U_o}{U_i} \quad (1)$$

式中：

A_r —被校中低频功率放大器的电压增益标准值；

U_o —被校中低频功率放大器的输出电压标准值，V；

U_i —被校中低频功率放大器的输入电压标准值，V。

按公式 (2) 或公式 (3) 计算电压增益误差：

$$\Delta A = A_t - A_r \quad (2)$$

式中：

ΔA —被校中低频功率放大器的电压增益绝对误差；

A_t —被校中低频功率放大器的电压增益示值或标称值。

$$\gamma = \frac{A_t - A_r}{A_r} \times 100\% \quad (3)$$

式中：

γ —被校中低频功率放大器的电压增益相对误差，%；

- e) 电压增益用分贝表示时，标准值 G_r 按公式 (4) 计算：

$$G_r = 20 \times \lg \frac{U_o}{U_i} \quad (4)$$

式中：

G_r —被校中低频功率放大器的电压增益标准值，单位 dB；

按公式 (5) 计算电压增益误差:

$$\Delta G = G_t - G_r \quad (5)$$

式中:

ΔG —被校中低频功率放大器的电压增益误差, 单位 dB;

G_t —被校中低频功率放大器的电压增益示值或标称值, 单位 dB。

f) 也可按图 3 所示接线, 校准方法同上, 读取并记录正弦波信号发生器显示的电压峰峰值 U_i 和示波器测得的电压峰峰值 U_o , 进行计算。

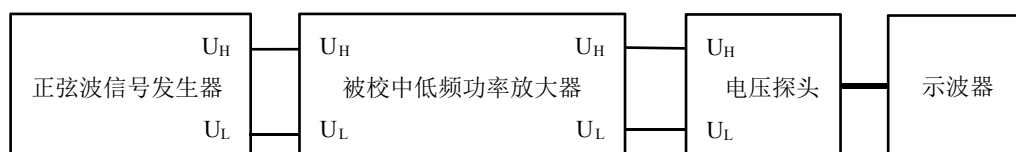


图 3 电压增益校准接线示意图(示波器)

7.2.3 增益的频率响应

7.2.3.1 校准点选取

- 电压增益点的选取参照 7.2.2.1
- 在频率范围内选取 5~15 个频率点 (包含参考频率 1kHz 及上、下限频率点);
- 选取最大输出电压点。

7.2.3.2 校准方法

- 仪器连接如图 4 所示。

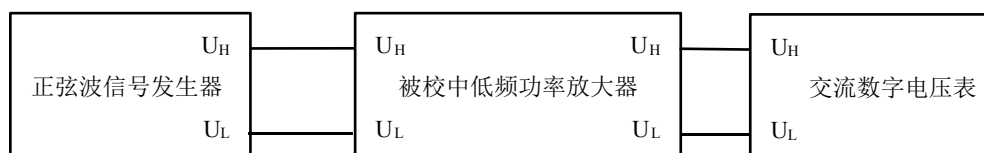


图 4 增益的频率响应校准接线示意图(交流数字电压表)

b) 设置正弦波信号发生器的输出频率为 1kHz, 根据校准点, 设置被校中低频功率放大器的增益并调节正弦波信号发生器的输出电压。待输出稳定后, 读取并记录交流数字电压表的测量结果 U_{ref} 。

c) 正弦波信号发生器的输出电压保持不变, 根据校准点调节输出频率, 待输出稳定后, 读取并记录不同频率下交流数字电压表的测量结果 U_f ;

- 按公式 (6) 计算增益的频率响应:

$$Resp_i = 20 \times \lg \frac{U_f}{U_{ref}} \quad (6)$$

式中:

$Resp_i$ —被校中低频功率放大器的增益的频率响应, 单位 dB

U_f —被校中低频功率放大器的不同频率的输出电压值, 单位: V;

U_{ref} —被校中低频功率放大器的参考频率的输出电压值, 单位: V。

f) 也可按图 3 所示接线, 校准方法同上, 读取并记录示波器测得的电压峰峰值, 进行计算。

7.2.4 输出电压示值

7.2.4.1 校准点选取

- 电压增益的选取参照 7.2.2.1;
- 在频率范围内选取 3~5 个频率点 (包含 1kHz);
- 在输出电压范围内选取 3~5 个电压值 (包含最大输出电压和 10%最大输出电压)。

7.2.4.2 校准方法

- 仪器连接如图 4 所示;
- 根据校准点设置被校中低频功率放大器的增益并调节正弦波信号发生器的输出;
- 待输出稳定后, 读取并记录交流数字电压表的测量结果 U_s 和被校中低频功率放大器的电压示值 U_i ;
- 若 U_i 为峰峰值, 按公式 (7) 计算输出电压示值的相对误差。

$$\gamma = \frac{U_{tp-p} - U_s \times 2\sqrt{2}}{U_s \times 2\sqrt{2}} \times 100\% \quad (7)$$

式中:

γ —被校中低频功率放大器输出电压示值的相对误差, %;

U_{tp-p} —被校中低频功率放大器输出电压示值 (峰峰值), V;

U_s —被校中低频功率放大器输出电压标准值 (有效值), V。

- 若 U_i 为峰值, 按公式 (8) 计算输出电压示值的相对误差。

$$\gamma = \frac{U_{tp} - U_s \times \sqrt{2}}{U_s \times \sqrt{2}} \times 100\% \quad (8)$$

式中:

U_{tp} —被校中低频功率放大器输出电压示值 (峰值), V;

- 也可采用图 3 所示接线。若被校中低频功率放大器的输出电压示值为峰峰值,

选择示波器的电压峰峰值测量功能；若为峰值，选择示波器的电压峰值测量功能。读取并记录输出电压示值 U_t 和示波器的测量值 U_s ，按公式（9）计算输出电压示值的相对误差。

$$\gamma = \frac{U_t - U_s}{U_s} \times 100\% \quad (9)$$

式中：

U_t —被校中低频功率放大器输出电压示值，V；

U_s —被校中低频功率放大器输出电压标准值，V。

7.2.5 最大输出功率

7.2.5.1 校准点选取

- 电压增益的选取参照 7.2.2.1
- 在频率范围内选取 3~5 个频率点（包含 1kHz）；
- 选取最大输出电压。

7.2.5.2 校准方法

- 仪器连接如图 5 所示， R_L 为被校中低频功率放大器说明书允许接入输出端的最小负载电阻。

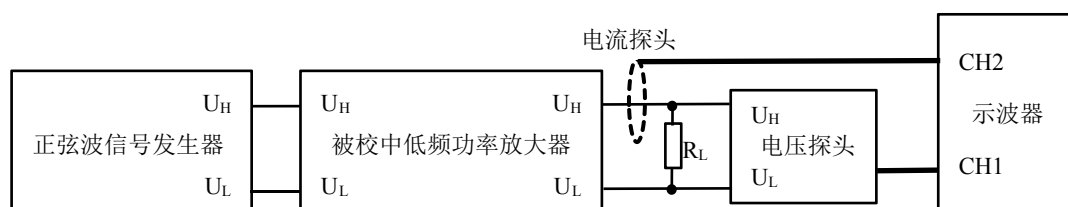


图 5 最大输出功率的校准接线示意图

- 根据校准点，设置被校中低频功率放大器的增益并调节正弦波信号发生器的输出。
- 待输出稳定后，读取并记录示波器测得的峰值电压 U_p 和峰值电流 I_p ，按公式（10）计算被校中低频功率放大器最大输出功率：

$$P_p = U_p \times I_p \quad (10)$$

式中：

P_p —被校中低频功率放大器最大输出功率值（峰值），单位：W；

U_p —被校中低频功率放大器输出电压值（峰值），单位：V；

I_p —被校中低频功率放大器输出电流值（峰值），单位：A。

7.2.6 失真度

7.2.6.1 校准点选取

- a) 电压增益的选取参照 7.2.2.1;
- b) 频率点为 1kHz（或按说明书里给出的频率值）。
- c) 在输出电压范围内选取 3~5 个电压值。

7.2.6.2 校准方法

- a) 仪器连接如图 6 所示。

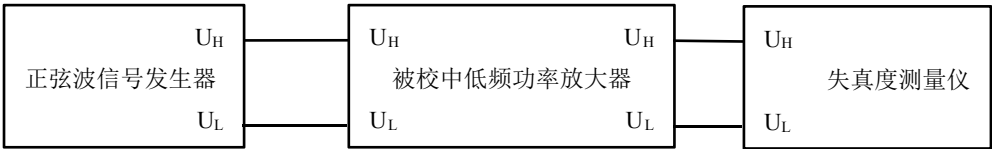


图 6 失真度校准接线示意图

- b) 根据校准点，设置被校中低频功率放大器的增益并调节正弦波信号发生器的输出。
- c) 待输出稳定后，读取并记录失真度测量仪的显示值。

7.2.7 信噪比

7.2.7.1 校准点选取

电压增益的选取参照 7.2.2.1

7.2.7.2 校准方法

- a) 仪器连接如图 7 所示，短接被校中低频功率放大器输入端，示波器选择交流耦合模式和电压有效值测量。

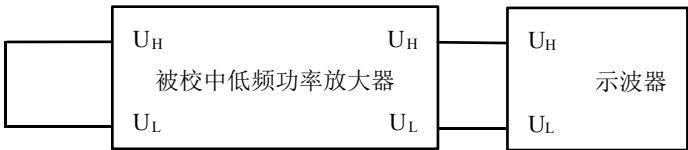


图 7 信噪比校准接线示意图

- b) 根据校准点，设置被校中低频功率放大器的增益，读取并记录示波器的测得值 U_N ，按公式（11）计算信噪比。

$$SNR=20\times\lg \frac{U_A}{U_N} \tag{11}$$

式中：

SNR —被校中低频功率放大器信噪比，单位 dB

U_A —被校中低频功率放大器标称的最大输出电压（有效值），单位：V；

U_N —被校中低频功率放大器噪声电压，单位：V；

7.2.8 输出电压零点漂移

7.2.8.1 校准点选取

电压增益的选取参照 7.2.2.1

7.2.8.2 校准方法

a) 仪器连接如图 8 所示，短接被校中低频功率放大器输入端。

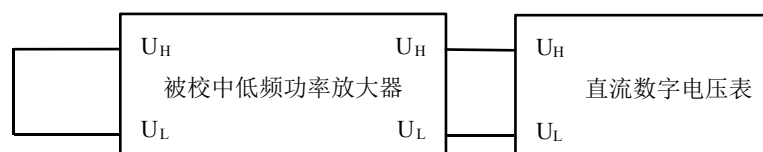


图 8 输出电压零点漂移校准接线示意图

b) 根据校准点，设置被校中低频功率放大器的增益，读取并记录直流数字电压表的测量结果 U_D ，即为输出电压零点漂移。

8 校准结果表达

校准结果应在校准证书上反映。校准证书应至少包括以下信息：

- 标题，“校准证书”；
- 实验室名称和地址；
- 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
- 证书的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- 客户的名称和地址；
- 被校对象的描述和明确标识；
- 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；
- 如果与校准结果的有效性或应用性有关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；
- 对校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- 校准环境的描述；
- 校准结果及其测量不确定度的说明；
- 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声明；
- p) 未经实验室书面批准，不得部分复印证书或报告的声明。

9 复校时间间隔

复校时间间隔由用户根据使用情况自行决定，推荐为 1 年。

附录 A

原始记录内页格式

A.1 外观及工作正常性检查:

A.2 电压增益:

频率	电压增益设 定值	输入电压标 准值	输出电压标 准值	电压增益标 准值	增益误差	$U_{\text{rel}} (k=2)$

A.3 增益的频率响应:

频率	电压增益	输出电压	频率响应	$U (k=2)$

A.4 输出电压:

频率	电压增益	输出电压示值	输出电压标准值	示值误差	$U_{\text{rel}} (k=2)$

A.5 最大输出功率:

频率	电压增益	输出电压	输出电流	最大输出功率	$U_{\text{rel}} (k=2)$

A.6 失真度:

频率	电压增益	输出电压	失真度	$U_{\text{rel}} (k=2)$

A.7 信噪比:

电压增益	标称输出电压	噪声电压	信噪比	$U (k=2)$

A.8 输出电压零点漂移:

电压增益	输出电压零点漂移	$U_{\text{rel}} (k=2)$

附录 B

校准证书内页格式

B.1 外观及工作正常性检查:

B.2 电压增益:

频率	电压增益设 定值	输入电压标 准值	输出电压标 准值	电压增益标 准值	增益误差	$U_{\text{rel}} (k=2)$

B.3 增益的频率响应:

频率	电压增益	输出电压	频率响应	$U (k=2)$

B.4 输出电压:

频率	电压增益	输出电压示值	输出电压标准值	示值误差	$U_{\text{rel}} (k=2)$

B.5 最大输出功率:

频率	电压增益	最大输出功率	$U_{\text{rel}} (k=2)$

B.6 失真度:

频率	电压增益	输出电压	失真度	$U_{\text{rel}} (k=2)$

B.7 信噪比:

电压增益	信噪比	$U (k=2)$

B.8 输出电压零点漂移:

电压增益	输出电压零点漂移	$U_{\text{rel}} (k=2)$

附录 C

测量不确定度评定示例

C.1 电压增益测量不确定度评定

C.1.1 测量方法:

按本规范 7.2.2.2 中校准方法进行校准, 测量标准为 2 台交流数字电压表。

以被校中低频功率放大器电压增益设定为 10, 输入电压 1V (1kHz), 输出电压 10V (1kHz) 为例进行电压增益的不确定度评定。

按公式 (C.1) 计算被校中低频功率放大器的电压增益:

$$A_r = \frac{V_o}{V_i} \quad (\text{C.1})$$

式中:

A_r —被校中低频功率放大器的电压增益标准值;

V_o —被校中低频功率放大器的输出电压标准值, V;

V_i —被校中低频功率放大器的输入电压标准值, V。

根据不确定度传播公式, 因为 V_o 和 V_i 的测量相互独立, 按公式 (C.2) 计算电压增益的相对标准不确定度:

$$u_{\text{rel}}(A_r) = \sqrt{u_{\text{rel}}^2(V_o) + u_{\text{rel}}^2(V_i)} \quad (\text{C.2})$$

式中:

$u_{\text{rel}}(A_r)$ —电压增益的相对合成标准不确定度;

$u_{\text{rel}}(V_o)$ —输出电压引入的相对标准不确定度;

$u_{\text{rel}}(V_i)$ —输入电压引入的相对标准不确定度。

C.1.2 不确定度来源

C.1.2.1 输出电压的不确定度来源如下:

- 交流数字电压表 1 测量不准确引入的不确定度分量 u_1 ;
- 输出电压测量重复性引入的不确定度分量 u_2 。

C.1.2.2 输入电压的不确定度来源如下:

- 交流数字电压表 2 测量不准确引入的不确定度分量 u_3 ;
- 输入电压测量重复性引入的不确定度分量 u_4 。

C.1.3 标准不确定度评定

C.1.3.1 输出电压引入的标准不确定度

a) 交流数字电压表 1 测量不准确引入的不确定度 $u_{1\text{rel}}$

使用的交流数字电压表, 在 10V (1kHz) 时最大允许误差为 $\pm 0.01\%$, 按均匀分布, 则包含因子 $k=\sqrt{3}$ 。计算可得引入的相对标准不确定度 $u_{2\text{rel}}=5.8\times 10^{-5}$ 。

b) 输出电压测量重复性引入的不确定度 $u_{2\text{rel}}$

重复性引入的不确定度采用 A 类评定, 10 次重复测量结果见表 C.1。

表 C.1 输出电压测量结果

第 i 次测量	1	2	3	4	5
测量值(V)	9.99959	9.99950	9.99947	9.99942	9.99945
第 i 次测量	6	7	8	9	10
测量值(V)	9.99954	9.99965	9.99971	9.99973	9.99966

测量结果平均值 $\bar{V}_0=9.99958\text{V}$, 用贝塞尔公式计算实验标准差 $s=1.1\times 10^{-4}\text{V}$, 则标准不确定度 $u_3=s=1.1\times 10^{-4}\text{V}$, 经计算重复性引入的相对标准不确定度 $u_{3\text{rel}}=\frac{u_3}{\bar{V}_0}=1.1\times 10^{-5}$ 。

C.1.3.2 输入电压引入的标准不确定度

a) 交流数字电压表 2 测量不准确引入的不确定度 $u_{3\text{rel}}$

使用的交流数字电压表, 在 1V (1kHz) 时最大允许误差为 $\pm 0.01\%$, 按均匀分布, 则包含因子 $k=\sqrt{3}$ 。计算可得引入的相对标准不确定度 $u_{3\text{rel}}=5.8\times 10^{-5}$ 。

b) 输入电压测量重复性引入的不确定度 $u_{4\text{rel}}$

重复性引入的不确定度采用 A 类评定, 10 次重复测量结果见表 C.2。

表 C.2 输入电压测量结果

第 i 次测量	1	2	3	4	5
测量值(V)	1.000002	1.000005	1.000008	1.000001	1.000003
第 i 次测量	6	7	8	9	10
测量值(V)	1.000003	1.000004	1.000001	1.000006	1.000004

测量结果平均值 $\bar{V}_1=1.000004\text{V}$, 用贝塞尔公式计算实验标准差 $s=2.2\times 10^{-6}\text{V}$, 则标准不确定度 $u_4=s=2.2\times 10^{-6}\text{V}$, 经计算重复性引入的相对标准不确定度 $u_{4\text{rel}}=\frac{u_4}{\bar{V}_1}=2.2\times 10^{-6}$ 。

C.1.4 合成标准不确定度

标准不确定度分量汇总见表 C.3。

表 C.3 标准不确定度一览表

分量	不确定度来源	相对标准不确定度值
u_{1rel}	交流数字电压表 1 测量不准确	5.8×10^{-5}
u_{2rel}	输出电压测量重复性	1.1×10^{-5}
u_{3rel}	交流数字电压表 2 测量不准确	5.8×10^{-5}
u_{4rel}	输入电压测量重复性	2.2×10^{-6}

以上不确定度分量彼此不相关，则相对合成标准不确定度：

$$u_{rel}(A_r) = \sqrt{u_{rel}^2(V_o) + u_{rel}^2(V_i)} = \sqrt{u_{1rel}^2 + u_{2rel}^2 + u_{3rel}^2 + u_{4rel}^2} = 8.3 \times 10^{-5}$$

C.1.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则相对扩展不确定度为：

$$U_{rel} = k u_{crel} = 1.7 \times 10^{-4}$$

C.2 增益频率响应测量不确定度评定

C.2.1 测量方法：

按本规范 7.2.3.2 中的校准方法进行校准，测量标准为交流数字电压表。

以参考频率为 1kHz，响应频率点为 200kHz，被校中低频功率放大器电压增益为 17，正弦波信号发生器设置输出电压峰峰值 10V，输出电压峰峰值 170V 为例，进行不确定度评定。

按公式 (C.3) 和 (C.4) 计算被校中低频功率放大器的电压增益：

$$A = \frac{V_f}{V_{ref}} \quad (C.3)$$

$$Resp_i = 20 \times \lg A \quad (C.4)$$

式中：

A —不同频率的输出电压值相对于参考频率输出电压值的线性比例

$Resp_i$ —被校中低频功率放大器增益频率响应，单位 dB

V_f —被校低频功率放大器在不同频率的输出电压值，单位：V；

V_{ref} —被校低频功率放大器在参考频率的输出电压值，单位：V。

C.2.2 不确定度来源

不确定度来源有以下 4 项。

a) 交流数字电压表 1kHz 下测量不准确引入的不确定度分量 u_1 ；

b) 1kHz 下测量重复性引入的不确定度分量 u_2

c) 交流数字电压表 200kHz 下测量不准确引入的不确定度分量 u_3 ;

d) 200kHz 下测量重复性引入的不确定度分量 u_4 ;

C.2.3 标准不确定度评定

C.2.3.1 交流数字电压表 1kHz 下测量不准确引入的标准不确定度 u_{1rel}

使用的交流数字电压表, 在 60V (1kHz) 时最大允许误差为 $\pm 0.01\%$, 按均匀分布, 则包含因子 $k=\sqrt{3}$ 。计算可得引入的相对标准不确定度 $u_{1rel}=5.8\times 10^{-5}$ 。

C.2.3.2 1kHz 下测量重复性引入的标准不确定度 u_{2rel}

重复性引入的不确定度采用 A 类评定, 10 次重复测量结果见表 C.4。

表 C.4 1kHz 下电压测量结果

第 i 次测量	1	2	3	4	5
测量值 (V)	60.018	60.023	60.016	60.017	60.014
第 i 次测量	6	7	8	9	10
测量值 (V)	60.015	60.021	60.017	60.019	60.012

测量结果平均值 $\overline{V_{ref}}=60.017V$, 用贝塞尔公式计算实验标准差 $s=3.26\times 10^{-3}V$, 则标准不确定度 $u_2=s=3.3\times 10^{-6}V$, 经计算重复性引入的相对标准不确定度 $u_{2rel}=\frac{u_2}{V_{ref}}=5.4\times 10^{-5}$ 。

C.2.3.3 交流数字电压表 200kHz 下测量不准确引入的标准不确定度 u_{3rel}

使用的交流数字电压表, 在 60V (200kHz) 时最大允许误差为 $\pm 0.3\%$, 按均匀分布, 则包含因子 $k=\sqrt{3}$ 。计算可得引入的相对标准不确定度 $u_{3rel}=1.7\times 10^{-3}$ 。

C.2.3.4 200kHz 下测量重复性引入的标准不确定度 u_{4rel}

重复性引入的不确定度采用 A 类评定, 10 次重复测量结果见表 C.5。

表 C.5 200kHz 下电压增益测量结果

第 i 次测量	1	2	3	4	5
测量值 (V)	59.823	59.828	59.824	59.829	59.823
第 i 次测量	6	7	8	9	10
测量值 (V)	59.827	59.832	59.821	59.826	59.824

测量结果平均值 $\overline{V_f}=59.826V$, 用贝塞尔公式计算实验标准差 $s=3.3\times 10^{-3}V$, 则标准不确定度 $u_4=s=3.3\times 10^{-3}V$, 经计算重复性引入的相对标准不确定度 $u_{4rel}=\frac{u_4}{\overline{V_f}}=5.6\times 10^{-5}$ 。

C.2.4 合成标准不确定度

标准不确定度分量汇总见表 C.6。

表 C.6 标准不确定度一览表

分量	不确定度来源	相对标准不确定度值
u_{1rel}	交流数字电压表 1kHz 下测量不准确	5.8×10^{-5}
u_{2rel}	1kHz 下测量重复性	5.4×10^{-5}
u_{3rel}	交流数字电压表 200kHz 下测量不准确	1.7×10^{-3}
u_{4rel}	200kHz 测量重复性	5.6×10^{-5}

以上不确定度分量彼此不相关，则线性比例 A 的相对合成标准不确定度 $u_{rel}(A)$ ：

$$u_{rel}(A) = u_{crel} = \sqrt{u_{1rel}^2 + u_{2rel}^2 + u_{3rel}^2 + u_{4rel}^2} = 1.7 \times 10^{-3}$$

增益频率响应 $Resp_i$ 与线性比例 A 的关系为： $Resp_i = 20 \times \lg A$ ，单位 db。根据不确定度传播公式：

$$u(Resp_i) = \left| \frac{d(Resp_i)}{d(A)} \right| \times u(A) = \frac{20 \times u(A)}{\ln(10) \times A} = \frac{20}{\ln(10)} \times u_{rel}(A) \approx 0.015 \text{ dB}$$

C.2.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则绝对扩展不确定度为：

$$U = k u(Resp_i) = 0.030 \text{ dB}$$

C.3 输出电压测量不确定度评定

C.3.1 测量方法：

按本规范 7.2.4.2 中的校准方法进行校准，测量标准为示波器、电压探头。

以被校中低频功率放大器电压增益为 17，正弦波信号发生器设置输出电压峰峰值 10V（1MHz），输出电压峰峰值 170V（1MHz）为例进行不确定度评定。

C.3.2 不确定度来源

不确定度来源有以下 4 项。

- 示波器测量不准确引入的不确定度分量 u_1 ；
- 电压探头测量不准确引入的不确定度分量 u_2 ；
- 测量重复性引入的不确定度分量 u_3 ；
- 被测仪器分辨力引入的不确定度分量 u_4 。

C.3.3 标准不确定度评定

C.3.3.1 示波器测量不准确引入的标准不确定度 u_{1rel}

使用的示波器，最大允许误差为 $\pm 1.5\%$ ，按均匀分布，则包含因子 $k=\sqrt{3}$ 。计算可得引入的相对标准不确定度 $u_{1\text{rel}}=8.7\times 10^{-3}$ 。

C.3.3.2 电压探头测量不准确引入的标准不确定度 $u_{2\text{rel}}$

使用的电压探头，最大允许误差为 $\pm 1.5\%$ ，按均匀分布，则包含因子 $k=\sqrt{3}$ 。计算可得引入的相对标准不确定度 $u_{2\text{rel}}=8.7\times 10^{-3}$ 。

C.3.3.3 测量重复性引入的标准不确定度 $u_{3\text{rel}}$

重复性引入的不确定度采用 A 类评定，10 次重复测量结果见表 C.7。

表 C.7 输出电压测量结果

第 i 次测量	1	2	3	4	5
测量值 (V)	155.2	155.2	155.2	155.3	155.2
第 i 次测量	6	7	8	9	10
测量值 (V)	155.2	155.2	155.3	155.2	155.3

测量结果平均值 $\bar{V}_s=155.2\text{V}$ ，用贝塞尔公式计算实验标准差 $s=4.83\times 10^{-2}\text{V}$ ，则标准不确定度 $u_3=s=4.8\times 10^{-3}\text{V}$ ，经计算重复性引入的相对标准不确定度 $u_{3\text{rel}}=\frac{u_3}{\bar{V}_s}=3.1\times 10^{-4}$ 。

3.3.4 被测仪器分辨力引入的标准不确定度 $u_{4\text{rel}}$

分辨力为 0.1V ，分辨力引入的相对不确定度为 $u_{4\text{rel}}=2.9\times 10^{-4}$ ，小于重复性引入的不确定度，舍去分辨力引入的不确定度。

3.4 合成标准不确定度

标准不确定度分量汇总见表 C.8。

表 C.8 标准不确定度一览表

分量	不确定度来源	相对标准不确定度值
$u_{1\text{rel}}$	示波器测量不准确	8.7×10^{-3}
$u_{2\text{rel}}$	电压探头测量不准确	8.7×10^{-3}
$u_{3\text{rel}}$	测量重复性	3.1×10^{-4}

以上不确定度分量彼此不相关，则相对合成标准不确定度

$$u_{\text{crel}}=\sqrt{u_{1\text{rel}}^2+u_{2\text{rel}}^2+u_{3\text{rel}}^2}=1.2\times 10^{-2}$$

3.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则相对扩展不确定度为：

$$U_{\text{rel}} = k u_{\text{crel}} = 2.4 \times 10^{-2}$$

C.4 最大输出功率测量不确定度评定

C.4.1 测量方法:

按本规范 7.2.5.2 中的校准方法进行校准, 测量标准为示波器、电压探头、电流探头。

以被校中低频功率放大器电压增益为 17, 正弦波信号发生器设置输出电压峰值 5V (10Hz), 输出电压峰值 85V (10Hz), 功率达到最大输出功率峰值 42.5W 为例进行不确定度评定。

C.4.2 不确定度来源

不确定度来源有以下 6 项。

- a) 示波器通道 1 测量不准确引入的不确定度分量 u_1 ;
- b) 电压探头测量不准确引入的不确定度分量 u_2
- c) 电压测量重复性引入的不确定度分量 u_3 ;
- d) 示波器通道 2 测量不准确引入的不确定度分量 u_4 ;
- e) 电流探头测量不准确引入的不确定度 u_5
- f) 电流测量重复性引入的不确定度分量 u_6 ;

C.4.3 标准不确定度评定

C.4.3.1 示波器通道 1 测量不准确引入的标准不确定度 $u_{1\text{rel}}$

使用的示波器, 最大允许误差为 $\pm 1.5\%$, 按均匀分布, 则包含因子 $k = \sqrt{3}$ 。计算可得引入的相对标准不确定度 $u_{1\text{rel}} = 8.7 \times 10^{-3}$ 。

C.4.3.2 电压探头测量不准确引入的标准不确定度 $u_{2\text{rel}}$

使用的电压探头, 最大允许误差为 $\pm 1.5\%$, 按均匀分布, 则包含因子 $k = \sqrt{3}$ 。计算可得引入的相对标准不确定度 $u_{2\text{rel}} = 8.7 \times 10^{-3}$ 。

C.4.3.3 电压测量重复性引入的标准不确定度 $u_{3\text{rel}}$

重复性引入的不确定度采用 A 类评定, 10 次重复测量结果见表 C.9。

表 C.9 输出电压测量结果

第 i 次测量	1	2	3	4	5
测量值 (V)	85.1	85.1	85.3	85.2	85.1
第 i 次测量	6	7	8	9	10
测量值 (V)	85.3	85.2	85.1	85.1	85.1

测量结果平均值 $\bar{V}_p = 85.16\text{V}$ ，用贝塞尔公式计算实验标准差 $s = 0.084\text{V}$ ，则标准不确定度 $u_3 = s = 0.084\text{V}$ ，经计算重复性引入的相对标准不确定度 $u_{3\text{rel}} = \frac{u_3}{\bar{V}_p} = 9.9 \times 10^{-4}$ 。

C.4.3.3 示波器通道 2 测量不准确引入的标准不确定度 $u_{4\text{rel}}$

使用的示波器，最大允许误差为 $\pm 1.5\%$ ，按均匀分布，则包含因子 $k = \sqrt{3}$ 。计算可得引入的相对标准不确定度 $u_{4\text{rel}} = 8.7 \times 10^{-3}$ 。

C.4.3.4 电流探头测量不准确引入的标准不确定度 $u_{5\text{rel}}$

使用的电压探头，最大允许误差为 $\pm 1\%$ ，按均匀分布，则包含因子 $k = \sqrt{3}$ 。计算可得引入的相对标准不确定度 $u_{5\text{rel}} = 5.8 \times 10^{-3}$ 。

C.4.3.6 电流测量重复性引入的标准不确定度 $u_{6\text{rel}}$

重复性引入的不确定度采用 A 类评定，10 次重复测量结果见表 C.10。

表 C.10 输出电流测量结果

第 i 次测量	1	2	3	4	5
测量值 (A)	0.499	0.499	0.499	0.499	0.499
第 i 次测量	6	7	8	9	10
测量值 (A)	0.499	0.499	0.498	0.499	0.499

测量结果平均值 $\bar{I}_p = 0.499\text{A}$ ，用贝塞尔公式计算实验标准差 $s = 3.2 \times 10^{-4}\text{A}$ ，则标准不确定度 $u_6 = s = 3.2 \times 10^{-4}\text{A}$ ，经计算重复性引入的相对标准不确定度 $u_{6\text{rel}} = \frac{u_6}{\bar{I}_p} = 6.3 \times 10^{-4}$ 。

C.4.4 合成标准不确定度

标准不确定度分量汇总见表 C.11。

表 C.11 标准不确定度一览表

分量	不确定度来源	相对标准不确定度值
$u_{1\text{rel}}$	示波器通道 1 测量不准确	8.7×10^{-3}
$u_{2\text{rel}}$	电压探头测量不准确	8.7×10^{-3}
$u_{3\text{rel}}$	电压测量重复性	9.9×10^{-4}
$u_{4\text{rel}}$	示波器通道 2 测量不准确	8.7×10^{-3}
$u_{5\text{rel}}$	电流探头测量不准确	5.8×10^{-3}
$u_{6\text{rel}}$	电流测量重复性	6.3×10^{-4}

以上不确定度分量彼此不相关，则相对合成标准不确定度

$$u_{\text{crel}} = \sqrt{u_{1\text{rel}}^2 + u_{2\text{rel}}^2 + u_{3\text{rel}}^2 + u_{4\text{rel}}^2 + u_{5\text{rel}}^2 + u_{6\text{rel}}^2} = 1.4 \times 10^{-2}$$

C.4.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则相对扩展不确定度为：

$$U_{\text{rel}} = k u_{\text{crel}} = 2.8 \times 10^{-2}$$

C.5 失真度测量不确定度评定

C.5.1 测量方法：

按本规范 7.2.6.2 中的校准方法进行校准。

以被校中低频功率放大器电压增益设定为 10，输入电压 1V（1kHz），测量出输出电压失真度为 0.3% 为例进行不确定度评定。

C.5.2 不确定度来源

不确定度来源有以下 2 项。

- a) 失真度测量仪引入的不确定度分量 u_1 ；
- b) 测量重复性引入的不确定度分量 u_2 ；

C.5.3 标准不确定度评定

C.5.3.1 失真度测量仪测量不准确引入的标准不确定度 $u_{1\text{rel}}$

使用的失真度测量仪的最大允许误差为 $\pm 5\%$ ，按均匀分布，则包含因子 $k=\sqrt{3}$ 。计算可得引入的相对标准不确定度 $u_{1\text{rel}} = 2.9 \times 10^{-2}$ 。

C.5.3.2 失真度测量重复性引入的标准不确定度 $u_{2\text{rel}}$

重复性引入的不确定度采用 A 类评定，10 次重复测量结果见表 C.12。

表 C.12 失真度测量结果

第 i 次测量	1	2	3	4	5
测量值 (%)	0.296	0.296	0.297	0.296	0.296
第 i 次测量	6	7	8	9	10
测量值 (%)	0.296	0.296	0.296	0.297	0.296

测量结果平均值 $\bar{X} = 0.296\%$ ，用贝塞尔公式计算实验标准差 $s = 0.00042\%$ ，则标准不确定度 $u_6 = s = 0.00042\%$ ，经计算重复性引入的相对标准不确定度 $u_{2\text{rel}} = \frac{u_2}{\bar{X}} = 1.4 \times 10^{-3}$ 。

C.5.4 合成标准不确定度

标准不确定度分量汇总见表 C.13。

表 C.13 标准不确定度一览表

分量	不确定度来源	相对标准不确定度值
$u_{1\text{rel}}$	失真度测量仪测量不准确	5.8×10^{-5}
$u_{2\text{rel}}$	失真度测量重复性	1.1×10^{-5}

以上不确定度分量彼此不相关，则相对合成标准不确定度

$$u_{\text{crel}} = \sqrt{u_{1\text{rel}}^2 + u_{2\text{rel}}^2} = 2.9 \times 10^{-2}$$

C.5.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则相对扩展不确定度为：

$$U_{\text{rel}} = k u_{\text{crel}} = 5.8 \times 10^{-2}$$

C.6 信噪比测量不确定度评定

C.6.1 测量方法：

按本规范 7.2.7.2 中的校准方法进行校准，测量标准为示波器。

以噪声电压 10.22mV，标称最大输出电压 60.104V 为例，进行不确定度评定。

按公式 (C.5) 计算信噪比：

$$SNR = 20 \times \lg \frac{V_A}{V_N} \quad (\text{C.5})$$

式中：

SNR —被校中低频功率放大器信噪比，单位 dB

V_A —被校中低频功率放大器标称的最大输出电压（有效值），单位：V；

V_N —被校中低频功率放大器噪声电压，单位：V；

C.6.2 不确定度来源

不确定度来源有以下 2 项。

a) 示波器测量不准确时引入的不确定度分量 u_1 ；

b) 噪声电压测量重复性引入的不确定度分量 u_2 ；

C.6.3 标准不确定度评定

C.6.3.1 示波器测量不准确引入的标准不确定度 $u_{1\text{rel}}$

使用的示波器的最大允许误差为 $\pm 1.5\%$ ，按均匀分布，则包含因子 $k=\sqrt{3}$ 。计算可得引入的相对标准不确定度 $u_{1\text{rel}}=8.7 \times 10^{-3}$ 。

C.6.3.2 噪声电压测量重复性引入的标准不确定度 $u_{2\text{rel}}$

重复性引入的不确定度采用 A 类评定，10 次重复测量结果见表 C.14。

表 C.14 噪声电压测量结果

第 i 次测量	1	2	3	4	5
测量值 (mV)	10.22	10.23	10.22	10.22	10.23
第 i 次测量	6	7	8	9	10
测量值 (mV)	10.21	10.22	10.23	10.21	10.22

测量结果平均值 $\bar{V}_N = 10.22\text{mV}$ ，用贝塞尔公式计算实验标准差 $s = 7.4 \times 10^{-3}\text{mV}$ ，则标准不确定度 $u_2 = s = 7.4 \times 10^{-3}\text{mV}$ ，经计算重复性引入的相对标准不确定度 $u_{2\text{rel}} = \frac{u_2}{\bar{V}_N} = 7.2 \times 10^{-4}$ 。

C.6.4 合成标准不确定度

标准不确定度分量汇总见表 C.15。

表 C.15 标准不确定度一览表

分量	不确定度来源	相对标准不确定度值
$u_{1\text{rel}}$	示波器测量不准确	8.7×10^{-3}
$u_{2\text{rel}}$	噪声电压测量重复性	7.2×10^{-4}

以上不确定度分量彼此不相关，则噪声电压的相对合成标准不确定度 $u_{\text{rel}}(V_N)$

$$u_{\text{rel}}(V_N) = u_{\text{crel}} = \sqrt{u_{1\text{rel}}^2 + u_{2\text{rel}}^2} = 8.7 \times 10^{-3}$$

$SNR = 20 \times \lg \left(\frac{V_N}{V_N} \right) = 20 [\lg(60.104) - \lg(V_N)]$ ，根据不确定度传播公式，则：

$$u(SNR) = \left| \frac{d(SNR)}{d(V_N)} \right| \times u(V_N) = \frac{20 \times u(V_N)}{\ln(10) \times V_N} = \frac{20}{\ln(10)} \times u_{\text{rel}}(V_N) \approx 0.076 \text{ dB}。$$

C.6.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U = k u(SNR) = 0.16 \text{ dB}$$

C.7 输出电压零点漂移不确定度评定

C.7.1 测量方法：

按本规范 7.2.8.2 中的校准方法进行校准，测量标准为直流数字电压表。

电压增益为 17 时，输出电压零点漂移 0.1082V 为例进行不确定度评定。

C.7.2 不确定度来源

不确定度来源有以下 2 项。

- a) 直流数字电压表测量不准确引入的不确定度分量 u_1
- b) 测量重复性引入的不确定度分量 u_2 ;

C.7.3 标准不确定度评定

C.7.3.1 直流数字电压表测量不准确引入的标准不确定度 u_{1rel}

使用的直流数字电压表的最大允许误差为 $\pm 0.01\%$ ，按均匀分布，则包含因子 $k=\sqrt{3}$ 。
计算可得引入的相对标准不确定度 $u_{1rel}=5.8\times 10^{-5}$ 。

C.7.3.2 测量重复性引入的标准不确定度 u_{2rel}

重复性引入的不确定度采用 A 类评定，10 次重复测量结果见表 C.16。

表 C.16 输出电压零点漂移测量结果

第 i 次测量	1	2	3	4	5
测量值（mV）	19.24	19.22	19.25	19.27	19.25
第 i 次测量	6	7	8	9	10
测量值（mV）	19.28	19.26	19.24	19.25	19.23

测量结果平均值 $\overline{V_D}=19.25\text{mV}$ ，用贝塞尔公式计算实验标准差 $s=0.018\text{mV}$ ，则标准不确定度 $u_2=s=0.018\text{mV}$ ，经计算重复性引入的相对标准不确定度 $u_{2rel}=\frac{u_2}{\overline{V_D}}=9.3\times 10^{-4}$ 。

C.7.4 合成标准不确定度

标准不确定度分量汇总见表 C.17。

表 C.17 标准不确定度一览表

分量	不确定度来源	相对标准不确定度值
u_{1rel}	直流数字电压表测量不准确	8.7×10^{-3}
u_{2rel}	输出电压零点漂移测量重复性	7.2×10^{-4}

以上不确定度分量彼此不相关，则相对合成标准不确定度

$$u_{crel}=\sqrt{u_{1rel}^2+u_{2rel}^2}=9.3\times 10^{-4}$$

C.7.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则相对扩展不确定度为：

$$U_{rel}=k u_{crel}=2\times 10^{-3}$$

附录 D

DC 下电压增益及其增益频率响应的校准方法

D.1 适用范围

本方法适用于工作频率下限为 DC 的功率放大器的电压增益及其增益频率响应的校准操作。

D.2 测量标准及其配套设备

a) 直流标准电压源:

范围: 10mV~10V;

最大允许误差: $\pm (0.01\% \sim 0.5\%)$

b) 直流数字电压表:

范围: 10mV~1000V;

最大允许误差: $\pm (0.01\% \sim 0.5\%)$

c) 直流高电压测量装置:

范围: 1kV~60kV;

最大允许误差: $\pm (0.01\% \sim 0.5\%)$ 。

D.3 校准方法

a) 仪器连接如图 D.1 所示, 被校中低频功率放大器的输出电压大于 1000V 时, 用直流高电压测量装置代替直流数字电压表。

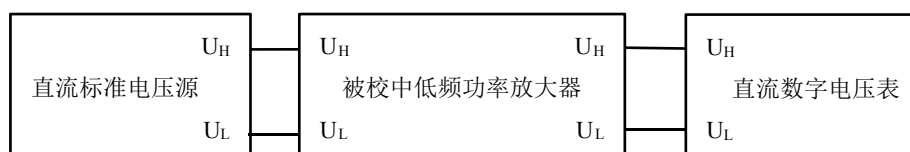


图 D.1 接线示意图

b) 电压增益点的选取参照 7.2.2.1。设置被校中低频功率放大器的增益, 调节正弦波信号发生器的输出使得中低频功率放大器达到最大输出电压, 读取并记录直流数字电压表的测量结果 U_i 和直流标准电压源的显示值 U_o ;

c) 若 1kHz 下电压增益用线性表示为 A_{ref} , 按 7.2.2.2 中公式 (1) 计算得到 DC 下增益 A_{DC} , 则增益频率响应公式 D.1 计算。

$$\text{Resp}_{\text{DC}} = 20 \times \lg \frac{A_{\text{DC}}}{A_{\text{ref}}} \quad (\text{D.1})$$

式中:

$Resp_{DC}$ —DC 下增益的频率响应, 单位 dB;

A_{DC} —DC 下电压增益

A_{ref} —1kHz 下电压

d) 若 1kHz 下测得的增益用分贝表示为 G_{ref} , 按 7.2.2.2 中公式 (4) 计算得到 DC 下增益 G_{DC} , 则增益频率响应公式 D.2 计算。

$$Resp_{DC}=G_{DC}-G_{ref} \quad (D.2)$$
