

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 1437—2013

示波器电压探头校准规范

Calibration Specification for Oscilloscope Voltage Probes

2013-11-28 发布

2014-02-28 实施

国家质量监督检验检疫总局 发布

示波器电压探头校准规范

Calibration Specification for

Oscilloscope Voltage Probes

JJF 1437—2013

归口单位：全国无线电计量技术委员会

主要起草单位：广东省计量科学研究院

广东省计量科学研究院东莞分院

参加起草单位：安捷伦科技（中国）有限公司

本规范委托全国无线电计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

张楠 广东省计量科学研究院

常志方 广东省计量科学研究院

叶峻江 广东省计量科学研究院东莞分院

参加起草人：

田志东 安捷伦科技（中国）有限公司



目 录

引言	(II)
1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 术语和定义	(1)
3.1 直流电压衰减比	(1)
3.2 无源探头	(1)
3.3 有源探头	(1)
3.4 差分探头	(1)
4 概述	(1)
5 计量特性	(2)
5.1 直流电压衰减比	(2)
5.2 频率响应	(2)
5.3 上升时间	(2)
5.4 输入电阻	(2)
6 校准条件	(2)
6.1 环境条件	(2)
6.2 校准所用计量标准、仪表设备	(2)
7 校准项目和校准方法	(3)
7.1 外观及工作正常性检查	(3)
7.2 直流电压衰减比	(4)
7.3 频率响应	(5)
7.4 上升时间	(6)
7.5 输入电阻	(6)
8 校准结果表达	(6)
9 复校时间间隔	(7)
附录 A 校准记录格式	(8)
附录 B 校准结果格式	(10)
附录 C 主要项目校准结果不确定度评定实例	(11)
附录 D 使用示波器的 FFT 功能或使用矢量网络分析仪校准探头的频响	(16)
附录 E 差分探头的共模抑制比 (CMRR)	(18)

引 言

本规范依据 JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》编制，其中测量不确定度的评定按照 JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》进行。

本规范中的示波器电压探头是指用于提供示波器和被测试点之间的物理连接和电气连接的电压探头，不包括电流探头和逻辑探头。

本规范为首次制定。



示波器电压探头校准规范

1 范围

本规范规定了示波器电压探头的校准项目、方法及结果处理，适用于各类频率低于6 GHz的示波器电压探头的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1057—1998 数字存储示波器校准规范

JJF 1059.1—2012 测量不确定度评定与表示

JJF 1071—2010 国家计量校准规范编写规则

GB/T 15289—1994 数字存储示波器通用技术条件和测试方法

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

3 术语和定义

3.1 直流电压衰减比 DC attenuation ratio

用来衡量示波器电压探头输入电压和输出电压之间的比率。定义为在示波器电压探头的测量范围内，输入直流电压与输出直流电压之比。

3.2 无源探头 passive probe

不包含有源器件、不需要外部供电就可以正常工作的探头。

3.3 有源探头 active probe

包含有源器件、需要外部供电才能正常工作的探头。一般来讲，输入电容较小，输入电阻也较小，可以减小对被测电路的干扰，达到较宽的测量带宽。非差分有源探头的最大输入电压一般较小，并且需要防护静电放电等因素对有源探头的破坏，而有源差分探头可以用于高电压的差分测量。

3.4 差分探头 differential probe

有一正一负两个输入端和单独地线的有源探头。输出电压与两个输入端之间的电压差成正比。用于观察相互作参考而不是以地电平作参考的信号，以及观察存在大的直流偏置或其他共模成分的信号，如叠加了电源噪声的小信号。

4 概述

示波器电压探头是使用示波器进行测量的重要配套设备，可将不同传输线形式中的电压信号按照一定规律转换为同轴电压信号，提供示波器测量。按照是否包含有源器

件，示波器电压探头可以分为有源探头和无源探头。

5 计量特性

5.1 直流电压衰减比

衰减比：1 : 1 ~ 1 000 : 1。

最大允许误差：±2%。

5.2 频率响应

最大允许误差：±3 dB。

5.3 上升时间

测量范围：≥58 ps。

5.4 输入电阻

输入电阻：50 Ω ~ 100 MΩ。

最大允许误差：±2%。

注：以上技术指标不是用于合格性判别，仅供参考。

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 环境温度：(23 ± 5)℃。

6.1.2 环境湿度：≤80%RH。

6.1.3 电源电压及频率：(220 ± 11) V，(50 ± 1) Hz。

6.1.4 周围无强电磁场干扰及无影响校准系统正常工作的机械振动。

6.2 校准所用计量标准、仪表设备

6.2.1 精密直流电压源

电压范围：(0 ~ 1 000) V；

最大允许误差：±0.1%。

6.2.2 直流高压源

电压范围：(0 ~ 10) kV；

最大允许误差：±1%。

6.2.3 直流电压表

直流电压测量范围：(0 ~ 1 000) V；

直流电压测量最大允许误差：±0.01%。

6.2.4 高频信号发生器

频率范围：50 kHz ~ 6 GHz；

频率准确度：优于 $\pm 1 \times 10^{-6}$ ；

输出功率电平范围：(-50 ~ 20) dBm；

功率电平最大允许误差：±1 dB。

6.2.5 功率计

频率范围：50 kHz ~ 6 GHz；

功率测量范围：(−20~20) dBm；

功率测量最大允许误差：±0.3 dB。

6.2.6 功分器

频率范围：50 kHz~6 GHz；

最大分配功率：0.5 W。

6.2.7 示波器

带宽：大于被校准探头标称带宽的2倍；

电压幅度最大允许误差：±2%；

输入电阻：50 Ω、1 MΩ。

6.2.8 快沿信号发生器

快沿上升时间：小于探头标称上升时间的 $\frac{1}{2}$ ；

频率准确度：优于 $\pm 1 \times 10^{-5}$ ；

快沿幅度（峰峰值）： ≥ 0.1 V。

6.2.9 电阻测试仪

电阻测量范围：10 Ω~300 MΩ；

电阻测量准确度：±0.5%。

6.2.10 正弦波发生器

频率输出范围：1 Hz~50 kHz；

输出峰峰值电压范围：1 mV~10 V；

直流偏置电压范围：(−5~+5) V；

输出电压最大允许误差：±1%。

6.2.11 网络分析仪

频率测量范围：50 kHz~6 GHz。

7 校准项目和校准方法

校准项目见表1。

表1 校准项目表

项目名称	类型	首次校准	使用中校准
外观及工作正常性检查	功能检查	+	+
直流电压衰减比	量值校准	+	+
频率响应	量值校准	+	+
上升时间	量值校准	+	+
输入电阻	量值校准	+	—
注：“+”为必校项目，“—”为选校项目。			

7.1 外观及工作正常性检查

7.1.1 示波器电压探头应有说明书及全部配套附件。

7.1.2 外观结构检查

探头的机械结构应该坚固可靠，探针头部或探针、弹簧挂钩、连接线以及电缆线物理连接完好，无破损；各开关、按键等应安装牢固，调节正常。

7.1.3 有源探头供电检查

通常有源探头是通过与示波器兼容的智能识别和电源供给接口来进行衰减倍率识别和供电的，并能识别所接探头类型，按需要正确设置输入电阻、衰减比、探头电源和偏置范围。对于通过示波器输入接口供电的有源探头，检查时应通过配备有相应系统的示波器来进行。单独外置电源式有源探头要手动检查功能是否正常。

7.1.4 探头补偿检查

使用示波器自带校准信号输出进行探头补偿检查。将探头设置为正常工作状态，探头输出端接入示波器输入端，探头输入端接示波器自带校准信号输出信号端，调整示波器，观察示波器上显示的波形，判断该探头目前的状态是否为欠补偿或过补偿，并给予调整。欠补偿、过补偿以及正常补偿时示波器显示波形如图 1 所示。

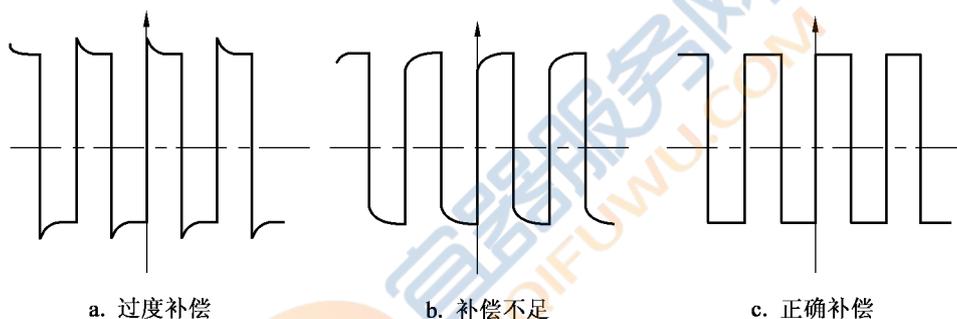


图 1 探头补偿示意图

7.2 直流电压衰减比

7.2.1 仪器连接如图 2 所示。

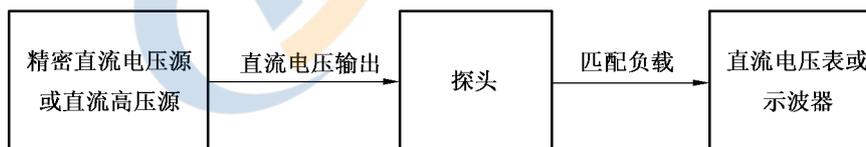


图 2 直流电压衰减比校准

7.2.2 按照图 2 所示，参照附录 A 中表 A.1 中的输入电压设置精密直流电压源或直流高压源输出电压（不同的探头选点不同） U_{IN} ，从直流电压表（适用无源探头）或示波器（适用有源探头）上读出所测量直流电压实际值 U_{OUT} 。并记录于附录 A 表 A.1。考虑到探头的输出电阻与直流电压表输入电阻不一定一致，所以在探头输出端接入直流电压表时，需要确保直流电压表输入电阻与探头输出电阻匹配。当探头输出端接入示波器时，应先用精密直流电压源对示波器的直流电压测量点进行校准，使用示波器对应量程的修正值。探头的直流电压衰减比 a 通过公式 (1) 计算得出：

$$a = \frac{U_{IN}}{U_{OUT}} \quad (1)$$

式中：

a ——探头的直流电压衰减比；

U_{IN} ——探头输入电压，V；

U_{OUT} ——探头输出电压，V。

7.3 频率响应

7.3.1 仪器连接如图 3 所示。

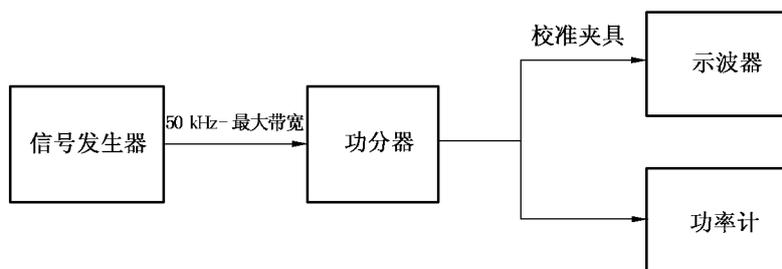


图 3 示波器频率响应校准

信号发生器输出正弦波信号，频率设为 50 kHz，调整输出幅度，使示波器对应量程（连接探头后需使用的量程）显示信号高度为满屏幕的 80%。根据附录 A 表 A.2 中的频率设置，通过功率计监测保持信号发生器输出幅度不变，改变信号发生器输出频率，同时调整示波器的水平扫描系数使波形能够与之相适应，使用示波器的光标功能测量当前频率下示波器显示峰峰值 V_i ，并记录在附录 A 表 A.2 中。

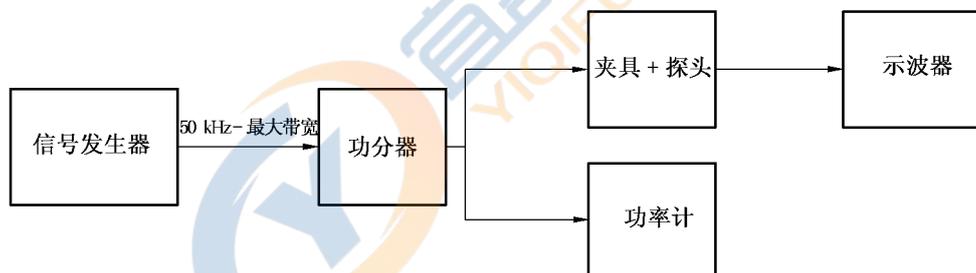


图 4 电压探头频率响应校准

7.3.2 信号发生器输出端与被校准探头的输入端之间需要通过探头校准专用夹具来连接。夹具的终端需要添加 $50\ \Omega$ 终端负载，用以与信号发生器的输出端的匹配。探头与夹具之间的接地应尽量短、尽量直，一般使用探头原厂附带的探针进行连接。

7.3.3 信号发生器输出正弦波信号，频率设为 50 kHz，调整输出幅度，使示波器显示信号高度为满屏幕的 80%。根据附录 A 表 A.2 中的频率设置改变信号发生器输出频率，通过功率计监测保持信号发生器输出幅度不变，同时调整示波器的水平扫描系数使波形能够与之相适应，使用示波器的光标功能测量当前频率下示波器显示峰峰值 V'_i 并记入附录 A 表 A.2 中。探头的频响 b_i 按公式 (2) 计算：

$$b_i = 20 \lg \frac{V_i}{V'_i} \quad (2)$$

式中：

b_i ——探头频响，dB；

V'_i ——未接探头时示波器的修正值；

V'_i ——接入探头后示波器测得的峰峰值。

7.4 上升时间

7.4.1 仪器连接如图 5 所示。

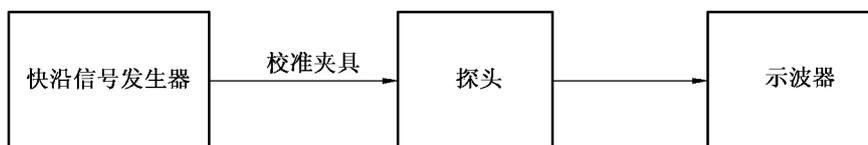


图 5 上升时间校准

7.4.2 设置快沿信号发生器输出电压峰峰值为 1 V 或者最大输出幅度，调整示波器，使显示波形能够满足测量要求，使用示波器的上升时间测量功能测量当前波形的上升时间，并记入附录 A 表 A.3 中。

7.5 输入电阻

7.5.1 仪器连接如图 6 所示。

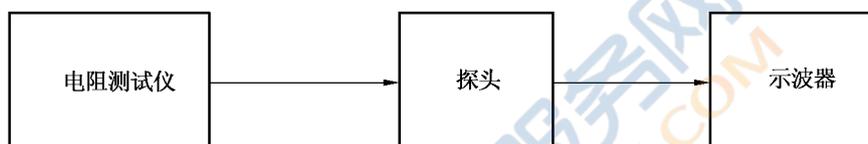


图 6 输入电阻校准

7.5.2 将探头输出端接入到相应匹配阻抗的示波器输入端，然后使用电阻测试仪测量被校准探头的输入电阻，读出测量值，并记入附录 A 表 A.4 中。

8 校准结果表达

校准后，出具校准证书。校准证书由封面和校准数据组成。封面由校准机构确定统一格式，校准数据按附录所列数据表格，并可根据被测示波器电压探头的情况进行填写。证书上的信息应满足以下要求。

- 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，包括名称及代号；
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- k) 校准环境的描述；
- l) 校准结果及其测量不确定度的说明；
- m) 对校准规范的偏离的说明；

- n) 校准证书签发人的签名、职务或等效标识；
- o) 校准结果仅对被校对象有效的说明；
- p) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。

9 复校时间间隔

由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸因素所决定的，因此，送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。推荐复校时间间隔为 1 年。



附录 A

校准记录格式

该记录表格以某给定型号的示波器电压探头要求为参考，给出的频率校准电平校准点以及误差限值，不同型号的示波器电压探头应根据其性能测试手册和技术指标采用相应的值。

表 A.1 直流电压衰减比（以 10 : 1 为例）

直流电压衰减比	输入电压/V	输出电压/V
10 : 1	0.1	
10 : 1	1	
10 : 1	2	
10 : 1	5	
10 : 1	10	
10 : 1	20	
10 : 1	50	
10 : 1	100	
10 : 1	200	

表 A.2 频率响应（以 50 kHz 为参考点，以 10 : 1, 100 MHz 探头为例）

频率	未接探头时示波器的修正值/V	接入探头后示波器测得的峰峰值/V
50 kHz		
500 kHz		
1 MHz		
5 MHz		
10 MHz		
20 MHz		
40 MHz		
60 MHz		
80 MHz		
100 MHz		

表 A.3 上升时间

标称值/ps	实测值/ps

表 A.4 输入电阻

标称值/M Ω	实测值/M Ω



附录 B

校准结果格式

表 B.1 直流电压衰减比 (以 10 : 1 为例)

直流电压衰减比	输入电压/V	输出电压/V	允许范围	结论
10 : 1	0.1			
10 : 1	1			
10 : 1	2			
10 : 1	5			
10 : 1	10			
10 : 1	20			
10 : 1	50			
10 : 1	100			
10 : 1	200			

表 B.2 频率响应 (以 50 kHz 为参考点, 以 10 : 1, 100 MHz 探头为例)

频率	未接探头时示波器的修正值/V	接入探头后示波器测得的峰峰值/V	允许范围	结论
50 kHz				
500 kHz				
1 MHz				
5 MHz				
10 MHz				
20 MHz				
40 MHz				
60 MHz				
80 MHz				
100 MHz				

表 B.3 上升时间

标称值/ps	实测值/ps	允许范围	结论

表 B.4 输入电阻

标称值/M Ω	实测值/M Ω	允许范围	结论

附录 C

主要项目校准结果不确定度评定实例

C.1 直流电压衰减比测量不确定度

C.1.1 不确定度来源

在测量直流电压衰减比时，使用多功能校准仪输出直流电压到被校准探头输入端，然后使用直流电压表测量探头的输出电压，不确定度来源如下：

- a) 测量重复性；
- b) 精密直流电压源输出直流电压最大允许误差；
- c) 直流电压表直流电压测量最大允许误差；
- d) 匹配电阻引入的不确定度。

C.1.2 建立测量模型

被校准电压探头的直流电压衰减比可由公式 (C.1) 获得：

$$a = \frac{U_{\text{IN}}}{U_{\text{OUT}}} = \frac{U_{\text{S}}}{U_{\text{R}} + \delta U + \Delta U} \quad (\text{C.1})$$

式中：

U_{S} ——多功能校准仪输出标准电压；

U_{R} ——直流电压表读数；

δU ——直流电压读数误差；

ΔU ——匹配电阻导致的直流电压表读数变化。

为了方便，按照 U_{IN} 、 U_{OUT} 分别计算不确定度：

$$u(a) = \frac{u(U_{\text{IN}})}{u(U_{\text{OUT}})}$$

两参数明显没有相关性，且有 $10 u(U_{\text{OUT}}) = u(U_{\text{IN}})$ ，分别对各个参数求偏导数可得带灵敏系数公式如下：

$$u(a) = \sqrt{u^2(U_{\text{IN}}) + 100u^2(U_{\text{OUT}})}$$

C.1.3 不确定度评定

以下分别对参数 U_{IN} 、 U_{OUT} 分别进行计算。

- a) 校准过程中的连接及读数重复性 u_1 ，贡献给 $u(U_{\text{OUT}})$ 。

根据实验，标准不确定度分量 u_1 为：

$$u_1 = 96 \mu\text{V}$$

- b) 精密直流电压源输出电压最大允许误差引入的不确定度 u_2 ，贡献给 $u(U_{\text{IN}})$ 。

精密直流电压源的 10 V 最大允许误差为 $\pm 0.000 14 \text{ V}$ ，通过探头的 10 倍衰减，对测量结果的最大影响为 $\pm 0.000 014 \text{ V}$ ，为均匀分布，标准不确定度分量 u_2 为：

$$u_2 = 0.000 014 \text{ V} / \sqrt{3} = 8.1 \mu\text{V}$$

- c) 直流电压表电压测量最大允许误差引入的不确定度 u_3 ，贡献给 $u(U_{\text{OUT}})$ 。

根据直流电压表的指标，其测量 1 V 最大误差为 $\pm 0.000 047 \text{ V}$ ，设测量值落在该

区间内的概率分布为均匀分布标准不确定度分量 u_3 为：

$$u_3 = 0.000\ 047\ \text{V} / \sqrt{3} = 0.000\ 027\ \text{V} = 27\ \mu\text{V}$$

d) 匹配电阻引入的不确定度 u_4 ，贡献给 $u(U_{\text{OUT}})$ 。

匹配电阻的最大允许误差可达到 $\pm 0.05\%$ ，使用直流电压表测量 1 V 时，最大误差为 $\pm 0.000\ 5\ \text{V}$ 。设测量值落在该区间内的概率分布为均匀分布，标准不确定度分量 u_4 为：

$$u_4 = 0.000\ 5\ \text{V} / \sqrt{3} = 0.000\ 29\ \text{V} = 290\ \mu\text{V}$$

C.1.4 不确定度合成

a 不确定度分量综合表

表 C.1 直流电压衰减比测量不确定度分量综合表

i	u_i	不确定度来源	A_i	分布	u_A	u_B
1	u_1	重复性	96 μV	正态	96 μV	—
2	u_2	精密直流电压源	8.1 μV	均匀	—	8.1 μV
3	u_3	直流电压表	27 μV	均匀	—	27 μV
4	u_4	匹配电阻	290 μV	均匀	—	290 μV

b 合成标准不确定度

由上可得，

$$u(U_{\text{OUT}}) = \sqrt{u_1^2 + u_3^2 + u_4^2} = 307\ \mu\text{V}$$

$$u(U_{\text{IN}}) = \sqrt{u_2^2} = 8.1\ \mu\text{V}$$

$$u(a) = \sqrt{u(U_{\text{IN}})^2 + 100u(U_{\text{OUT}})^2} = 0.003\ 1 = 0.3\%$$

c 扩展不确定度

包含因子 $k=2$ ，相对扩展不确定度 U 为：

$$U = ku(a) = 2 \times 0.3\% = 0.6\%$$

C.2 频率响应测量不确定度

C.2.1 测量方法概述

在测量频率响应时，使用信号发生器通过专用夹具输出正弦波信号到被校准探头输入端，然后使用示波器测量探头的输出电压 V_X ，最后将测量结果与未接探头时示波器的修正值 V_0 进行对比，得到探头在当前频率下的频率响应。为计算方便，在测试过程中，将电压单位统一为 dBm。

C.2.2 建立测量模型

被校准电压探头的频率响应可由公式 (C.2) 获得：

$$b = V_X + \Delta P_1 + \Delta V_{S1} + \Delta V_{T1} - (V_0 + \Delta P_0 + \Delta V_{S0} + \Delta V_{T0}) \quad (\text{C.2})$$

式中：

V_X ——接入被校准电压探头测量频响时示波器测得的电压；

V_0 ——未接入被校准电压探头后示波器测得的电压；

ΔP_1 ——测量频响时功率计引入的误差；

ΔP_0 ——测量示波器修正值时功率计引入的误差；

ΔV_{S1} ——测量频响时示波器电压峰峰值测量带来的误差；

ΔV_{S0} ——测量示波器修正值时示波器电压峰峰值测量带来的误差；

ΔV_{T1} ——测量频响时失配引入的误差；

ΔV_{T0} ——测量示波器修正值时失配引入的误差。

C.2.3 不确定度评定

为了方便，按照 V_X 、 V_0 分别计算不确定度。由于 V_X 、 V_0 是通过同样的测量设备和方法测得，具有相关性，通过实验数据由相关性分析得其相关系数 $r=0.992\approx 1$ 。考虑到 $u(V_X)$ 和 $u(V_0)$ 的来源完全一致，应该有 $u(V_X) = u(V_0)$ ，于是由公式 (C.3) 可得：

$$u(b) = \sqrt{u^2(V_X) + u^2(V_0) + 2u(V_X)u(V_0)} = 2u(V_X) \quad (\text{C.3})$$

(1) 功率计最大允许误差

通过校准证书，根据功率计的指标，其最大允许误差为 ± 0.15 dB，为均匀分布，因此：

$$u_1 = 1.7\% / \sqrt{3} = 0.98\%$$

(2) 示波器电压峰峰值测量最大允许误差引入的不确定度 u_2

根据示波器的指标以及校准证书，其测量 0.1 V 峰峰值最大误差为 $\pm 0.5\%$ ，设测量值落在该区间内的概率分布为均匀分布。

标准不确定度分量 u_2 为：

$$u_2 = 0.5\% / \sqrt{3} = 0.46\%$$

(3) 重复性引入的不确定度 u_3

根据实验结果，重复性引入的不确定度 $u_3 = 0.5\%$ 。

(4) 失配引入的不确定度 u_4

失配引入的不确定度 $u_4 = 2\%$ 。

(5) $u(V_X)$ 的合成

$$u(V_X) = \sqrt{\sum_{i=1}^4 u_i^2} = 0.20 \text{ dB}$$

C.2.4 不确定度合成

(1) 不确定度分量综合表

表 C.2 频率响应测量不确定度分量综合表 ($u(V_X)$)

i	u_i	不确定度来源	A_i	分布	u_A	u_B
1	u_1	功率计	2%	均匀	—	2%
2	u_2	示波器	1.2%	均匀	—	1.2%
3	u_3	重复性	1.5%	正态	1.5%	—
4	u_4	失配	3%	反正弦	—	3%

(2) 合成标准不确定度

$$u(b) = \sqrt{u^2(V_X) + u^2(V_0) + 2u(V_X)u(V_0)} = 0.40 \text{ dB}$$

(3) 扩展不确定度

包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度 U 为：

$$U = ku(b) = 2 \times 0.4 \text{ dB} = 0.8 \text{ dB}$$

C.3 上升时间测量不确定度

C.3.1 建立测量模型

在测量上升时间时，使用快沿信号发生器输出快沿信号通过夹具输入到被校准探头输入端，然后使用示波器测量探头的上升时间，被校准电压探头的上升时间可由公式 (C.4) 获得：

$$T = T_X + \Delta T \quad (\text{C.4})$$

式中：

T_X ——示波器的上升时间读数值；

ΔT ——标准器建立时间引入的修正值。

C.3.2 不确定度来源

不确定度来源如下：

- a 测量重复性，贡献给 T_X ；
- b 标准器建立时间引入的不确定度。

C.3.3 不确定度评定

a 校准过程中的连接及读数重复性 u_1

根据实验， $u_1 = 3\%$ 。

b 标准器上升时间引入的不确定度 u_2

带宽为 12 GHz 的示波器上升时间小于 29 ps，快沿信号发生器上升时间也小于 29 ps，用于测量带宽为 1 GHz 的探头上升时间时， $n = \frac{350}{\sqrt{29^2 + 29^2}} = 8.5$ ，测量误差 $\delta =$

$$\sqrt{1 + \frac{1}{n^2}} - 1 = 0.7\%，\text{ 为均匀分布，因此 } u_2 = 0.7\% / \sqrt{3} = 0.4\%。$$

注：如果测量 6 GHz 探头，可以通过消除标准器引入的误差后再计算不确定度。

C.3.4 不确定度合成

a) 不确定度分量综合表

表 C.3 上升时间不确定度分量综合表

i	u_i	不确定度来源	A_i	分布	u_A	u_B
1	u_1	重复性	3%	正态	3%	—
2	u_2	标准器上升时间	0.4%	均匀	—	0.4%

b) 合成标准不确定度

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^2 u_i^2} = 3\%$$

c) 扩展不确定度

包含因子 $k=2$ ，相对扩展不确定度 U 为：

$$U = ku_c = 2 \times 3\% = 6\%$$

C.4 输入电阻测量不确定度

C.4.1 建立测量模型

在测量输入电阻时，将电阻测试仪输入端连接到被校准探头输入端，测量探头的输入电阻，被校准电压探头的输入电阻可由公式 (C.5) 获得：

$$R = R_x + \Delta R + \delta R \quad (\text{C.5})$$

式中：

R_x ——电阻测试仪读数值；

ΔR ——电阻测试仪电阻测量的最大允许误差引入的修正值；

δR ——电阻测试仪分辨力引入的修正值。

C.4.2 不确定度来源

不确定度来源如下：

- a 测量重复性，贡献给 R_x ；
- b 电阻测试仪电阻测量的最大允许误差；
- c 电阻测试仪分辨力引入误差。

C.4.3 不确定度评定

a 校准过程中的连接及读数重复性 u_1

根据实验，标准不确定度 $u_1 = 0.02\%$ 。

b 电阻测试仪电阻测量的最大允许误差引入的不确定度 u_2

电阻测试仪测量 $10 \text{ M}\Omega$ 最大允许误差为 $\pm 0.5\%$ ，为均匀分布，因此：

$$u_2 = 0.5\% / \sqrt{3} \approx 0.28\%$$

c 电阻测试仪分辨力引入误差

一般使用 6 位半数表测量，该项可忽略。

C.4.4 不确定度合成

a 不确定度分量综合表

表 C.4 输入电阻测量不确定度分量综合表

i	u_i	不确定度来源	A_i	分布	u_A	u_B
1	u_1	重复性	0.02%	正态	0.02%	——
2	u_2	电阻测试仪	0.28%	均匀	——	0.28%

b 合成标准不确定度

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^2 u_i^2} = 0.28\%$$

c 扩展不确定度

包含因子 $k=2$ ，输入电阻测量的相对扩展不确定度 U 为：

$$U = ku_c = 2 \times 0.28\% \approx 0.6\%$$

附录 D

使用示波器的 FFT 功能或使用矢量网络分析仪校准探头的频响

D.1 使用示波器的 FFT 功能校准频响

D.1.1 仪器连接如图 D.1 所示



图 D.1 使用 FFT 功能校准频率响应

D.1.2 信号发生器输出端与被校准探头的输入端之间需要通过探头校准专用夹具来连接。注意夹具的终端需要添加 $50\ \Omega$ 终端负载，用以与信号发生器输出端的匹配。探头与夹具之间的接地应尽量短、直，一般使用探头原厂附带的探针进行连接。

D.1.3 信号发生器输出 20 MHz 正弦波，输出幅度为 0 dBm。此时调整示波器的垂直刻度和水平刻度，使波形幅度占据示波器屏幕 80% 以上且不超过满屏幕，水平刻度调整使示波器屏幕显示多于 1 000 个周期以上的波形。此时将示波器的采样率设置为最大值，开启 FFT 功能，同时打开无限余辉显示模式。

D.1.4 设置信号发生器输出扫频信号，扫频频率范围为信号源最低输出频率至待校准探头带宽的 2 倍，输出幅度为 0 dBm，扫频频点为 10 000 个，每个扫频点停留时间为 4 ms。一个扫频周期完成后，此时示波器屏幕上 FFT 的轨迹就是探头的频率响应，使用示波器的“时标”功能，记录探头在各频率点的频率响应。

D.1.5 使用此方法前，需要将信号发生器和示波器本身频响通过校准消除。

D.2 使用矢量网络分析仪校准频响（仅限于输出电阻为 $50\ \Omega$ 的探头）

D.2.1 如图 D.2 所示，通过电缆分别连接测试夹具到网络分析仪的“port1”、“port2”，使用标准校准配件校准所用网络分析仪的两个端口。

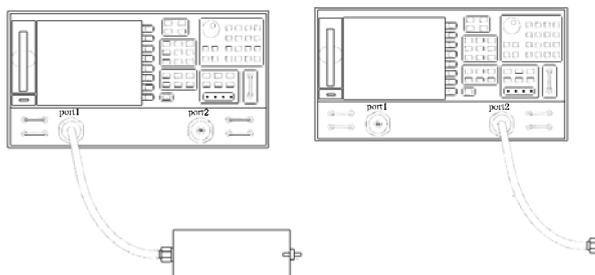


图 D.2 自校准

D.2.2 仪器连接如图 D.3 所示，对矢量网络分析仪所用电缆以及测试夹具进行频率响应归一化校准。

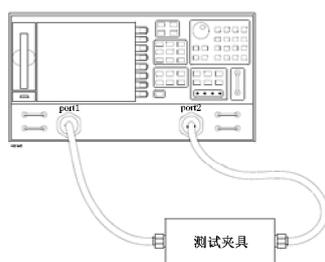


图 D.3 归一化校准

D.2.3 仪器连接如图 D.4 所示，使用矢量网络分析仪 S12 参数对被校准探头进行全频段频响校准。

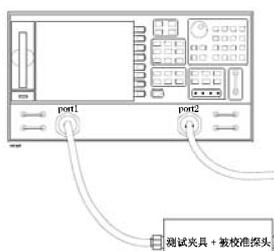


图 D.4 频率响应校准

附录 E

差分探头的共模抑制比 (CMRR)

E.1 共模抑制比简介

理想的差分放大器会对两输入间的差分信号进行放大，同时抑制输入端的共模信号。共模抑制比 (Common Mode Rejection Ratio, 简称 CMRR) 表征了差分放大电路抑制共模信号的能力。一般来说，差分信号是被测的重点关注对象，所以 CMRR 越大，对共模信号的抑制能力越强，对测试的影响就越小。

公式 (E.1) 为共模抑制比的计算公式：

$$\text{CMRR} = \left| 20 \lg \frac{V_d}{V_c} \right| \quad (\text{E.1})$$

式中：

V_d ——差分信号的电压；

V_c ——共模信号的电压。

值得注意的是，差分探头的共模抑制比并非一个固定数值，而是一个随频率改变而变化的变量。一般来说在 DC (直流) 时 CMRR 最大，随着频率的增加，CMRR 会显著减小。图 E.1 为某一型号的差分探头的 CMRR 随频率变化的示意图。

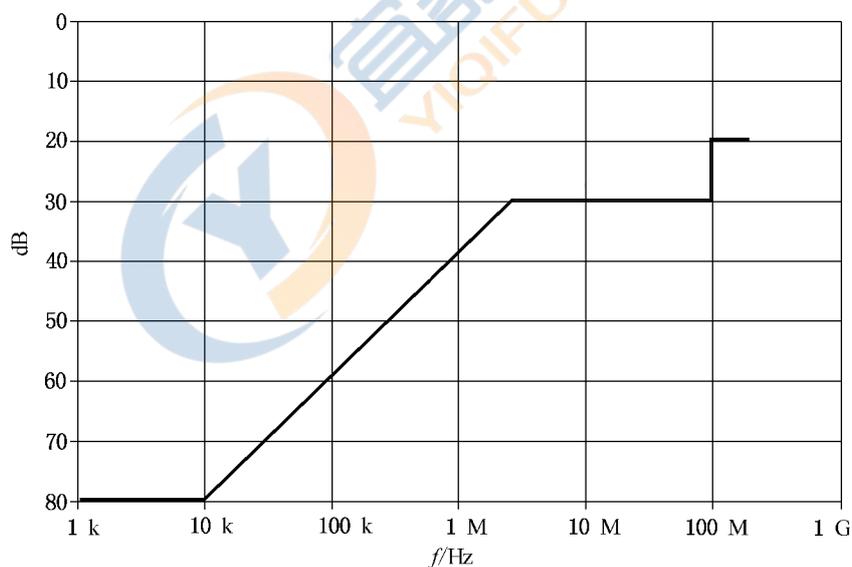


图 E.1 差分探头的 CMRR 随频率变化示意图

E.2 CMRR 的校准

E.2.1 仪器连接如图 E.2 所示。

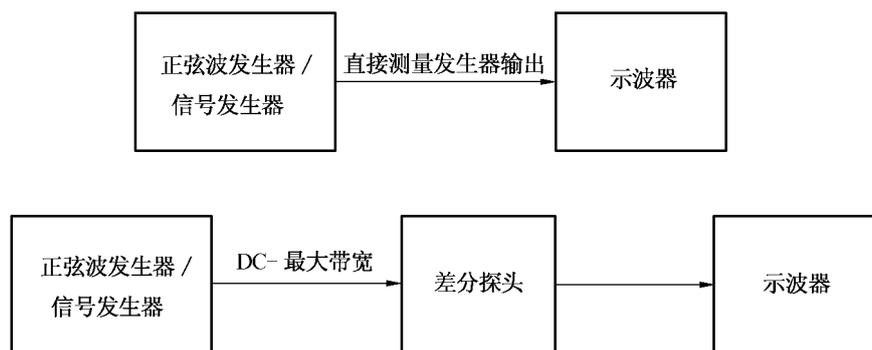


图 E.2 CMRR 的校准

E. 2.2 选用任意波发生器输出 DC~50 kHz 的信号，或者选用信号发生器输出 50 kHz~6 GHz 信号。首先使用示波器直接测量发生器的对地共模信号 V_c ，发生器输出正弦波信号，峰峰值电压为 5 V。然后将差分探头的两个输入端同时连接到发生器的信号输出端，如果有需要，根据被校准差分探头的输入电阻，通过探头校准专用夹具来连接发生器输出端与被校准探头的输入端。校准专用夹具的终端添加 $50\ \Omega$ 终端负载，用以与信号发生器的输出端的匹配。探头与夹具之间的接地应尽量短、尽量直，一般使用探头原厂附带的探针进行连接，将示波器的采样模式选为平均（16 次），使用示波器的峰峰值测量功能读出差分信号 V_d 。

探头在某一频率下的 CMRR 值 C_x 按公式 (E. 2) 计算：

$$C_x = \left| 20 \lg \frac{V_d}{V_c} \right| \quad (\text{E. 2})$$

E. 2.3 如果所选用任意波发生器没有 DC 输出功能，可以用其直流偏置功能代替，用于测量被校准差分探头的直流 CMRR。