



中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 1437—XXXX

示波器电压探头校准规范

Calibration Specification of Oscilloscope Voltage Probes

(征求意见稿)

××××-××-××发布

××××-××-××实施

国家市场监督管理总局发布

示波器电压探头校准规范

Calibration Specification of
Oscilloscope Voltage Probes

JJF 1437—XXXX
代替 JJF 1437—2013

归口单位：全国无线电计量技术委员会

起草单位：中国航天科工集团二院二〇三所
广东省计量科学研究院
广东省计量科学研究院东莞计量院
中国计量科学研究院

本规范委托全国无线电计量技术委员会负责解释

本规范起草人：

XXX

XXX

XXX

XXX

XXX

XXX

XXX

目 录

引 言.....	II
1、范围.....	1
2、引用文件.....	1
3、术语和定义.....	1
下列术语适用于本规范。.....	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 直流电压偏置范围.....	2
5.3 频带宽度.....	2
5.4 上升时间.....	2
5.5 输入电阻.....	2
5.6 输出电阻.....	2
6、校准条件.....	2
6.1 环境条件.....	2
6.2 校准用设备.....	2
7、校准项目和校准方法.....	3
7.1 校准项目.....	4
7.2 校准方法.....	4
8、校准结果表达.....	11
9、复校时间间隔.....	12
附录 A 校准记录格式.....	13
附录 B 校准证书内页格式.....	15
附录 C 主要项目校准结果不确定度评定示例.....	17
附录 D 差分探头的共模抑制比.....	28
附录 E 校准夹具.....	30

引 言

本规范是对 JJF 1437-2013《示波器电压探头校准规范》的修订。规范依据 JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》和 JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》编写。

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。

与 JJF 1437-2013 相比，主要变化的内容包括：

- 增加了“直流偏置”、“输出电阻”校准项目；
- 修改了“频带宽度”、“上升时间”的校准方法，“频率响应”更改为“频带宽度”；
- 频带宽度校准范围由 6GHz 变更为 16GHz；
- 上升时间测量范围由 $\geq 58\text{ps}$ 变更为 $\geq 28\text{ps}$ ；
- 直流电压衰减比范围由 1:1 ~ 1000:1 变更为 1:1 ~ 500:1，增加了直流电压测量范围；
- 增加了校准用设备中数字多用表、校准夹具、探头定位器；
- 删除了校准用设备中直流高压源、直流电压表和电阻测试仪。

示波器电压探头校准规范

1、范围

本规范适用于输入接口形式为探针、SMA、BNC 等类型，工作带宽不高于 16GHz，直流电压测量范围不大于 1kV 的各类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：

IEEE Std 1696TM-2013 电路测试探头术语与测试方法标准（Standard for Terminology and Test Methods for Circuit Probes）

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

下列术语适用于本规范。

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比较小，并且需要防护静电放电等因素对有缘探头的破坏，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成正比。用于观察互相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测量传输线电压信号的重要配套设备，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

该部分规定被校计量器具的计量特性

5.1 直流电压衰减比

范围：1:1 ~ 500:1;

直流电压电压测量范围：0~1kV;

最大允许误差：±2%。

5.2 直流电压偏置范围

范围：-16V~+16V;

最大允许误差：±2%。

5.3 频带宽度

范围：50kHz ~ 16GHz;

最大允许误差：±3dB。

5.4 上升时间

范围：≥28ps。

5.5 输入电阻

范围：50Ω ~ 100MΩ;

最大允许误差：±2%。

5.6 输出电阻

范围：50Ω、1MΩ;

最大允许误差：±2%。

注：以上技术指标不适用于合格性判别，仅供参考。

6、校准条件

6.1 环境条件

a) 环境温度：(23±5)℃;

b) 相对湿度：≤80%RH;

c) 供电电源：(220±11)V, (50±1)Hz;

d) 其它：周围无影响校准系统正常工作的电磁场干扰及机械振动。

6.2 校准用设备

6.2.1 直流电压源

电压范围：(0~1000)V;

最大允许误差：±(0.1%设置值+1mV)

6.2.2 数字多用表

直流电压测量范围：(0~1000)V;

直流电压最大允许误差：±(0.01%测量值+0.1mV);

电阻测量范围：10 Ω ~300M Ω ；

电阻最大允许误差： $\pm 0.5\%$

6.2.3 信号发生器

频率范围：50kHz~16GHz；

输出功率电平范围：-50 dBm~20dBm；

功率电平最大允许误差： ± 1 dB。

6.2.4 低频信号发生器

频率范围：1Hz~50kHz；

输出峰峰值电压范围：1mV~10V；

直流偏置电压范围： ± 5 V；

输出电压最大允许误差： $\pm 1\%$ 。

6.2.5 功率计

频率范围：50kHz~16GHz；

功率测量范围：-20dBm~20dBm；

功率测量最大允许误差： ± 0.3 dB。

6.2.6 功分器

频率范围：50kHz~16GHz；

最大输入功率：0.5W。

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： $\pm 2\%$ ；

输入电阻：50 Ω 、1M Ω 。

6.2.8 快沿信号产生器

上升时间：小于被校准示波器电压探头标称上升时间的 1/2；

快沿幅度（峰峰值）： ≥ 100 mV；

6.2.9 网络分析仪

频率测量范围：50kHz~16GHz；

传输幅度测量范围：0dB~60dB；

传输幅度测量最大允许误差： ± 0.25 dB。

6.2.10 校准夹具

带宽： ≥ 16 GHz；

端口驻波比： < 1.6 。

6.2.11 探头定位器

具有探头夹持功能和 X 轴、Y 轴、Z 轴三轴调节转向功能。

7、校准项目和校准方法

7.1 校准项目

校准项目见表 1 所示。

表 1 校准项目表

序号	项目名称	类型
1	外观及工作正常性检查	功能检查
2	直流电压衰减比	量值校准
3	直流电压偏置范围	量值校准
4	频率响应	量值校准
5	上升时间	量值校准
6	输入电阻	量值校准
7	输出电阻	量值校准

7.2 校准方法

7.2.1 外观及工作正常性检查

7.2.1.1 外观结构检查

探头的机械结构应该坚固可靠，标志清晰明确，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。被校示波器电压探头应有说明书及配套附件。

7.2.1.2 工作正常性检查

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。

7.2.1.3 探头补偿检查

具有补偿功能的探头需要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，探头输入端与示波器校准信号输出端连接。调整示波器，观察示波器上显示波形，判断该探头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。

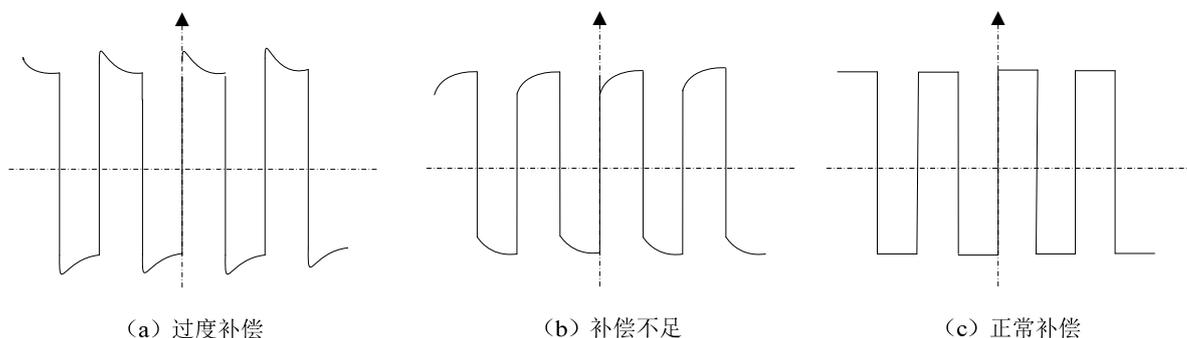


图 1 探头补偿示意图

7.2.2 直流电压衰减比

a) 按图 2 连接仪器；

b) 直流电压源输出接口通过连接器与校准夹具同轴端口 A 连接，其同轴端口 B 不

连接其他器件；特别的，当被校探头输入接口形式为 SMA、BNC 等类型时，直流电压源输出接口不与校准夹具连接，通过连接器直接与被校探头输入接口连接；

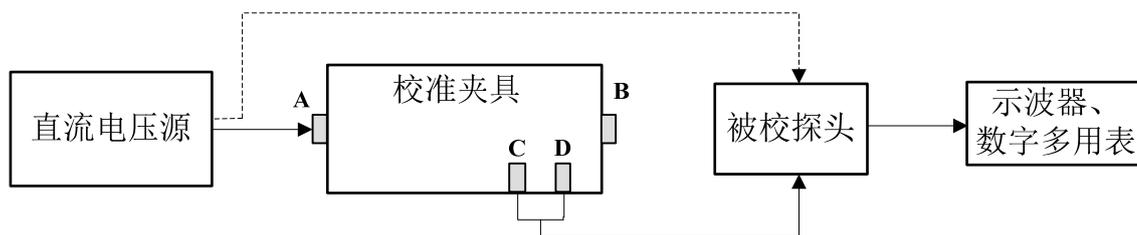


图 2 直流电压衰减比测量连接示意图

c) 利用探头定位器将被校探头输入接口的探针压接到校准夹具信号平面 C、接地平面 D，使其稳定连接，将输出接口与示波器或数字多用表输入接口连接；

d) 设置直流电压源输出电压为 V_{in} 直流电压信号，调整示波器或数字电压表设置，读取示波器或数字多用表上显示的电压测量值 V_{out} ，用公式 (1) 计算探头的直流电压衰减 a 并记入附录 A 表 A.1 中。

e) 改变直流电压源输出的直流电压值，重复步骤 d)，完成测试。

$$a = \frac{V_{in}}{V_{out}} \quad (1)$$

式中：

a ——被校准示波器电压探头的直流电压衰减，V；

V_{in} ——被校准示波器电压探头的输入直流电压，V；

V_{out} ——被校准示波器电压探头的输出直流电压，V。

f) 对于电压衰减比可设置的探头，设置不同的衰减比重复上述步骤，完成测试。

7.2.3 直流电压偏置范围

a) 按图 3 连接仪器；

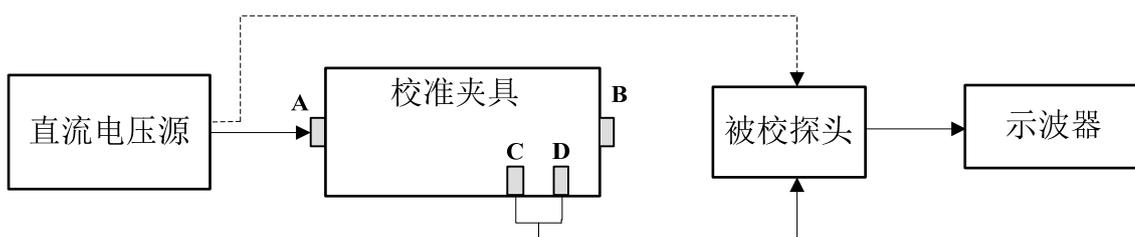


图 3 直流电压偏置范围测量连接示意图

b) 直流电压源输出接口通过连接器与校准夹具同轴端口 A 连接，其同轴端口 B 不连接其他器件；特别的，当被校探头输入接口形式为 SMA、BNC 等类型时，直流电压源输出接口不与校准夹具连接，通过连接器直接与被校探头输入接口连接；

c) 利用探头定位器将被校探头输入接口的探针压接到校准夹具信号平面 C、接地平面 D，使其稳定连接，将输出接口与示波器输入接口连接；

d) 按照被校探头直流电压偏置范围标称上限指标设置示波器电压探头偏置，调整直流电压源输出，设置示波器垂直档位为最小档位，同时观察示波器上波形位置，当波形正好位于屏幕中心位置时停止调整，记录当前直流电压源输出电压值并记入附录 A 表 A.2 中；

e) 改变步骤 d) 中设置电压的极性，调整直流电压源输出，设置示波器垂直档位为最小档位，同时观察示波器上波形位置，当测得波形正好位于屏幕中心位置时停止调整，记录当前直流电压源输出电压值并记入附录 A 表 A.2 中。

f) 选取被校探头直流电压偏置范围不同电压值设置示波器电压探头偏置，重复步骤 d)、e) 完成测试。

7.2.4 频带宽度

7.2.4.1 信号发生器扫频测量法

a) 按图 4 连接仪器；

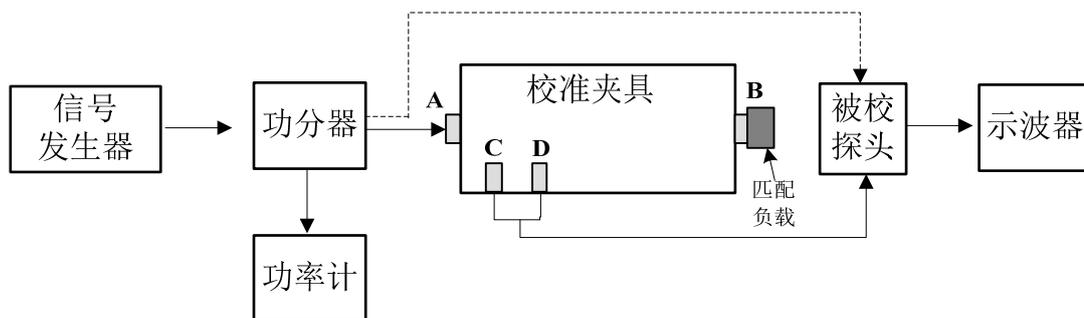


图 4 频带宽度校准连接示意图

b) 信号发生器输出接口与功分器输入接口连接，功分器的两个输出接口通过等长同轴线缆分别与功率计的输入接口和校准夹具的 A 端口连接；特别的，当被校探头输入接口形式为 SMA、BNC 等类型时，功分器输出接口不与校准夹具连接，通过等长同轴线直接与被校探头输入接口连接；

c) 利用探头定位器将被校探头输入接口的探针压接到校准夹具信号平面 C、接地平面 D（特别注意，此时探针与信号平面 C、接地平面 D 的压接点应紧靠校准夹具的 A 端

口), 使其稳定连接, 将输出接口与示波器输入接口连接, 校准夹具 B 端口与匹配负载相连;

d) 设置信号发生器输出正弦波信号, 起始频率设置为 50kHz 或者被校探头带宽上限频率的 1/20, 调整信号发生器输出功率, 使示波器测得信号显示高度为对应量程 (连接探头后需使用的量程) 满屏幕的 80%;

e) 调整示波器水平档位, 使其完整显示多个波形, 利用示波器的自动测量功能测量当前频率测得的电压幅度值 V_{li} , 作为示波器测得被校探头的输出电压, 设置功率计显示为电压值, 读取当前频率下测得电压幅度值 V_{0i} , 作为被校探头的输入电压, 将上述测量值记录到表 A.3 中。

f) 按公式 (2) 计算该频率点被探头的相对于参考点的频率响应 A_i , 记录到表 A.3 中。

$$A_i = 20 \lg \frac{V_{li}}{V_{0i}} - A_{0i} \quad (2)$$

A_i ——频率为 i 时被校探头的频率响应, dB;

A_{0i} ——频率为 i 时被示波器的频率响应, dB, 示波器的频率响应来源于上级单位的校准值;

V_{li} ——频率为 i 时示波器测得被校探头的输出电压, V;

V_{0i} ——频率为 i 时被校探头的输入电压, V;

g) 改变信号发生器输出频率, 重复步 e) ~f), 直至完成被校探头标称频带宽度对应的最大频率的测量;

h) 对步骤 g) 得到的 A_i 求绝对值, 得到 $|A_i|$, $|A_i|_{MAX} \leq 3\text{dB}$, 则被校探头频带宽度为标称频带宽度。

7.2.4.2 网络分析仪测量法

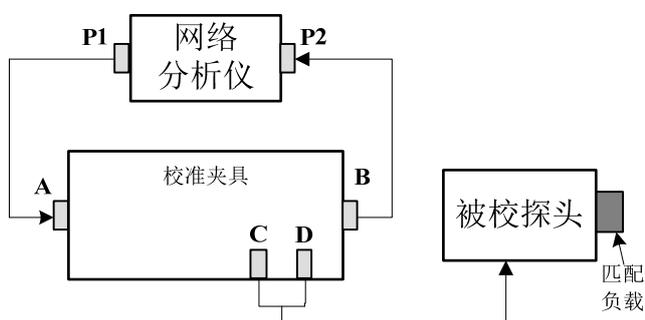
本方法仅适用于输出端为 BNC、SMA 等标准接口, 且输出电阻为 50Ω 的无源示波器电压探头。

a) 按图 5 (a) 将校准夹具的端口 A、B 端分别利用等长同轴电缆与网络分析仪的 P1 与 P2 接口相连接,

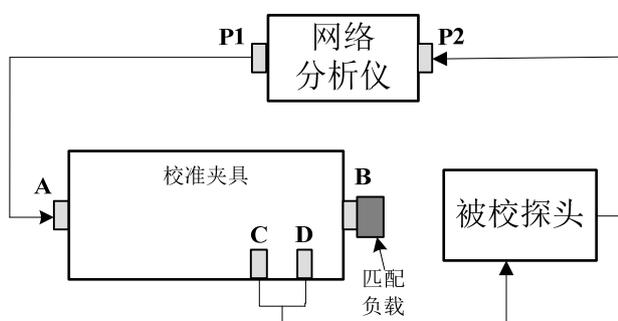
b) 利用探头定位器将被校探头输入接口的探针压接到校准夹具信号平面 C、接地平

面 D（特别注意，此时探针与信号平面 C、接地平面 D 的压接点应紧靠校准夹具的 B 端口），使其稳定连接，将输出接口与匹配负载相连；特别的，当被校探头输入接口形式为 SMA、BNC 等类型时，网络分析仪 P1 和 P2 通过等长同轴线缆直接连接，如图 5(c) 所示；

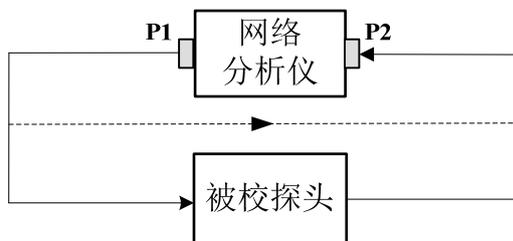
c) 设置网络分析仪扫频范围，频率起始可以设置为 50kHz 或者被测示波器电压探头带宽上限频率的 1/20，频率终止设置为示波器电压探头的标称带宽对应频率，网络分析仪测量参数设置为 S_{21} ，对网络分析仪的 P1 端口与 P2 端口进行直通 S_{21} 校准，显示格式设置为 dB，测得被校示波器电压探头校准夹具的 $S_{21}(f_i)$ ；



(a)



(b)



(c)

图 5 频率响应校准连接示意图

d) 按照图 5 (b) 所示保持校准夹具 A 端口与网络分析仪 P1 端口连接，将校准夹具

B 端口与匹配负载连接，

e) 利用探头定位器将被校探头输入接口的探针压接到校准夹具信号平面 C、接地平面 D（特别注意，此时探针与信号平面 C、接地平面 D 的压接点应紧靠校准夹具的 B 端口），使其稳定连接，将被校示波器电压探头输出端与网络分析仪 port2 端口连接，测得被校示波器电压探头的 $S'_{21}(f_i)$ ；特别的，当被校探头输入接口形式为 SMA、BNC 等类型时，网络分析仪 P1 和 P2 通过等长同轴线缆分别与网络分析仪的 P1、P2 端口连接，进行测量；

f) 按公式（3）计算示波器电压探头在各频点的幅度变化量 A_i 。

$$A_i = S_{21}(f_i) - S'_{21}(f_i) \quad (4)$$

式中：

A_i —— f_i 频率下的衰减量，dB；

$S_{21}(f_i)$ ——未接入被校探头测得的传输系数，dB；

$S'_{21}(f_i)$ ——接入被校探头测得的传输系数，dB。

g) 利用光标搜索功能查找被校探头标称带宽内不同频率对应的频响，利用公式（3）计算得出校探头在标称带宽内功率衰减量 A ，将结果记录到表 A.4 中。

7.2.5 上升时间

a) 按图 6 连接仪器；

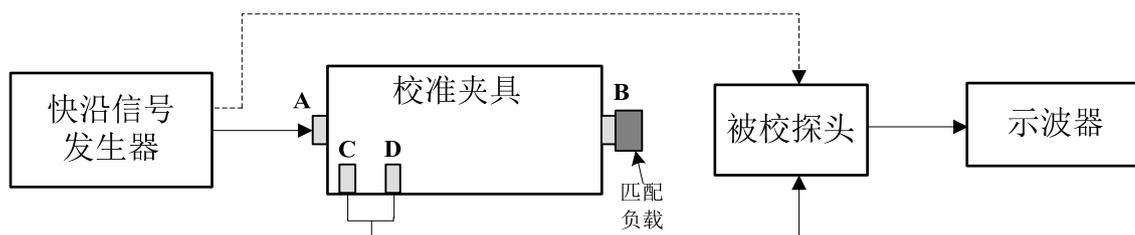


图 6 上升时间校准连接示意图

b) 将快沿信号发生器输出接口与校准夹具同轴端口 A 直接连接，其同轴端口 B 不连接其他器件；特别的，当被校探头输入接口形式为 SMA、BNC 等类型时，快沿信号发生器输出接口不与校准夹具连接，直接与被校探头输入接口连接；

c) 利用探头定位器将被校探头输入接口的探针压接到校准夹具信号平面 C、接地平

面 D（特别注意，此时探针与信号平面 C、接地平面 D 的压接点应紧靠校准夹具的 A 端口），使其稳定连接，将输出接口与示波器输入接口连接；

d) 设置快沿信号发生器输出电压峰峰值为 1V 或者最大输出幅度的快沿信号，调整示波器垂直和水平档位，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，并记录到表 A.5 中；

e) 利用公式（5），计算得出被校探头上升时间，并记录到表 A.5 中。

$$t_{\text{probe}} = \sqrt{t_{\text{measured}}^2 - t_{\text{standard}}^2 - t_{\text{oscilloscope}}^2} \quad (5)$$

式中：

t_{probe} ——被校准示波器电压探头上升时间，ps；

t_{measured} ——示波器测量得到的上升时间测量值，ps；

t_{standard} ——快沿产生器输出信号上升时间，ps；

$t_{\text{oscilloscope}}$ ——示波器自身的上升时间，ps。

7.2.6 输入电阻

a) 按图 7 连接仪器；

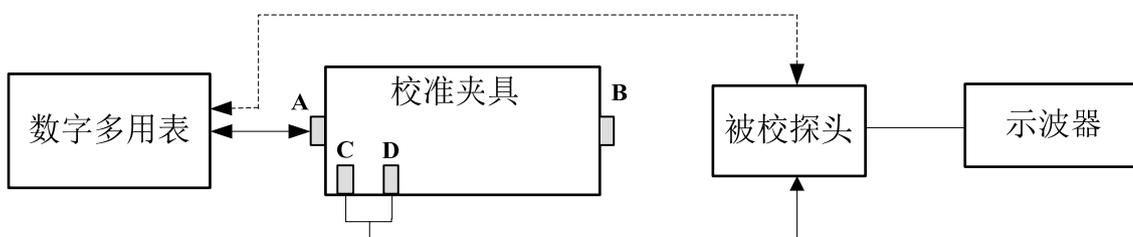


图 7 输入电阻校准连接示意图

b) 将数字多用表的输入端口通过连接器与校准夹具同轴端口 A 直接连接，其同轴端口 B 不连接其他器件；特别的，当被校探头输入接口形式为 SMA、BNC 等类型时，数字多用表输入接口不与校准夹具连接，直接与被校探头输入接口连接；

c) 利用探头定位器将被校探头输入接口的探针压接到校准夹具信号平面 C、接地平面 D（特别注意，此时探针与信号平面 C、接地平面 D 的压接点应紧靠校准夹具的 A 端口），使其稳定连接，将输出接口与相应匹配阻抗的示波器输入接口连接，以保证输出端的阻抗匹配；

d) 调用数字多用表电阻测量功能，读取当前的测量值作为被校准探头的输入电阻，记入附录 A 表 A.6 中。

7.2.7 输出电阻

本方法仅适用于输出端为 BNC、SMA 等标准接口的示波器电压探头。

a) 按图 8 连接仪器；

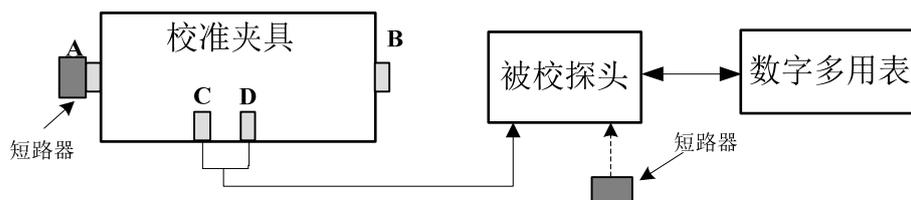


图 8 输出电阻校准连接示意图

b) 将校准夹具的同轴端口 A 与短路器连接，特别的，当被校探头输入接口形式为 SMA、BNC 等类型时，则不使用校准夹具，直接将探头输入接口与短路器连接；

c) 利用探头定位器将被校探头输入接口的探针压接到校准夹具信号平面 C、接地平面 D，使其稳定连接；

d) 将被校探头输出接口与通过连接器与数字多用表输入接口连接，调用数字多用表电阻测量功能，读取当前的测量值作为被校准示波器电压探头输出电阻，记入附录 A 表 A.7 中。

8、校准结果表达

示波器电压探头校准后，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格式，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。

9、复校时间间隔

推荐复校时间间隔为 1 年。

由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸多因素所决定，因此，送交单位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，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。

一、外观及工作正常性检查

- 1、外观：
- 2、工作正常性：
- 3、探头补偿功能：

二、技术指标测试

表 A.1 直流电压衰减比

直流电压衰减比	输入电压/V	输出电压/V	直流电压衰减比 测得值	$U(k=2)$
1: 1				
1: 1				
10: 1				
10: 1				
100: 1				
100: 1				
500: 1				
500: 1				

表 A.2 直流电压偏置范围

标称值/V	输入电压	测得值/V	$U(k=2)$
0.01			
-0.01			
0.1			
-0.1			
1			
-1			
...			
-...			
标称上限指标			
标称下限指标			

表 A.3 频带宽度测量（信号发生器扫频测量法）

频率 (GHz)	被校探头输入电压/V	示波器测得被校探头的输出电压/V	示波器的频响/dB	被校探头的频响/dB	允许范围 (dB)	$U(k=2)$
					±3	
					±3	
					±3	

表 A.4 频带宽度测量（网络分析仪测量法）

频率 (GHz)	未接入被校探头测得的传输系数/dB	接入被校探头测得的传输系数/dB	被校探头的频响/dB	允许范围 (dB)	$U(k=2)$
				±3	
				±3	
				±3	

表 A.5 上升时间

标称值 /ps	示波器测得 值/ps	快沿信号的上升 时间/ps	示波器自身的上升 时间/ps	计算值 /ps	$U(k=2)$

表 A.6 输入电阻

标称值 (M Ω)	测得值 (M Ω)	$U(k=2)$

表 A.7 输出电阻

标称值 (Ω)	测得值 (Ω)	$U(k=2)$

附录 B 校准证书内页格式

一、外观及工作正常性检查

- 1、外观：
- 2、工作正常性：
- 3、探头补偿功能：

二、技术指标测试

表 B.1 直流电压衰减比

标称值	测得值	$U(k=2)$
1: 1		
1: 1		
10: 1		
10: 1		
100: 1		
100: 1		
500: 1		
500: 1		

表 B.2 直流电压偏置范围

标称值/V	测得值/V	$U(k=2)$
(上限)		
(下限)		

表 B.3 频率响应

频率 (GHz)	频率响应测得值 (dB)	允许范围 (dB)	$U(k=2)$
		± 3	
		± 3	
		± 3	

表 B.4 上升时间

标称值 (ps)	测得值 (ps)	$U(k=2)$

表 B.5 输入电阻

标称值 (M Ω)	测得值 (M Ω)	$U(k=2)$

表 AB.6 输出电阻

标称值 (Ω)	测得值 (Ω)	$U(k=2)$

附录 C 主要项目校准结果不确定度评定示例

C.1 直流电压衰减比测量不确定度评定

C.1.1 测量模型

$$a = \frac{V_{\text{in}}}{V_{\text{out}}}$$

式中：

a ——被校准示波器电压探头直流电压衰减；

V_{in} ——被校准示波器电压探头输入电压，V；

V_{out} ——被校准示波器电压探头输出电压，V。

C.1.2 不确定度来源

在测量直流电压衰减比时，将直流电压源输出的直流电压通过校准夹具连接到到被校探头的输入端，然后使用数字多用表测量探头的输出电压，不确定度来源如下：

- 1) 数字多用表测量电压不准引入的不确定度 u_1 ；
- 2) 直流电压源输出电压不准引入的不确定度 u_2 ；
- 3) 校准夹具不准引入的不确定度 u_3 ；
- 4) 测量重复性引入的不确定度 u_4 。

C.1.3 标准不确定度分量评定

- 1) 数字多用表测量电压不准引入的不确定度 u_1

采用 B 类方法评定，数字多用表测量 250mV 直流电压最大允许误差为 $\pm 1.58\text{mV}$ ，取 $k = \sqrt{3}$ （均匀分布），则：

$$u_1 = 1.58 / \sqrt{3} \approx 0.91\text{mV}$$

- 2) 直流电压源输出电压不准引入的不确定度 u_2

采用 B 类方法评定，直流电压源输出电压 2.5V 直流电压最大允许误差为 $\pm 0.65\text{mV}$ ，取 $k = \sqrt{3}$ （均匀分布），则：

$$u_2 = 0.65 / \sqrt{3} \approx 0.36 \text{ mV}$$

3) 校准夹具不准引入的不确定度 u_3

在直流相关特性参数的校准中,通过校准夹具进入被校准宽带示波器探头的标准信号都是直流电压信号,校准夹具引入的不确定度就是由校准夹具自身存在的传输电阻所造成的分压引起的。经过测量得到校准夹具传输电阻大小约为 0.3Ω ,而被校准的宽带示波器探头输入电阻为 $100\text{k}\Omega$,传输电阻所造成的分压比约为 3×10^{-6} ,相对于其他分量来说几乎可以忽略不计,因此在评定直流相关参数的不确定度时不用考虑校准夹具所引入的分量大小。

4) 数字多用表测量重复性引入的不确定度 u_4

采用 A 类方法评定,示波器测量被校示波器电压探头输出电压,重复测量 n ($n=10$) 次,算术平均值为 247.31mV ,实验标准偏差为 1.61mV ,故由测量重复性引入的不确定度为 $u_4=1.6\text{mV}$ 。

C.1.4 合成标准不确定度

表 C.1 不确定度分量汇总表

不确定度分量	不确定度来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度
u_1	数字多用表测量电压	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.91mV
u_2	直流电压源输出电压不准	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.36mV
u_3	校准夹具	B	-	-	忽略不计
u_4	重复性	A	-	-	1.61mV

上述不确定度分量中 u_1 与 u_4 贡献给 $u(V_{\text{out}})$, u_2 贡献给 $u(V_{\text{in}})$, 各个不确定分量之间独立不相关,可以得到:

$$u(V_{\text{in}}) = \sqrt{u_2^2} = u_2 = 0.36\text{mV}$$

$$u(V_{\text{out}}) = \sqrt{u_1^2 + u_4^2} = 1.85\text{mV}$$

合成不确定度:

$$u_c = \sqrt{\frac{u^2(V_{\text{in}})}{V_{\text{out}}^2} + \frac{V_{\text{in}}^2 u^2(V_{\text{out}})}{V_{\text{out}}^4}} = 0.00144 \approx 0.14\%$$

C.1.5 扩展不确定度

取 $k=2$ 扩展不确定度:

$$U = ku_c = 0.00288 \approx 0.29\%$$

C.2 直流电压偏置范围测量不确定度评定

C.2.1 测量模型

$$B = M$$

式中:

B ——被校准示波器电压探头偏置电压, V;

M ——直流电压源输出电压, V。

C.2.2 不确定度来源

不确定度来源如下:

- 1) 示波器测量电压不准引入的不确定度 u_1 ;
- 2) 直流电压源输出电压不准引入的不确定度 u_2 ;
- 3) 直流电压源分辨率引入的不确定度 u_3 ;
- 4) 测量重复性引入的不确定度 u_4 。

C.2.3 标准不确定度分量评定

- 1) 示波器测量电压不准引入的不确定度 u_1

采用 B 类方法评定, 根据上级量传证书示波器测量 0V 直流电压最大允许误差为 $\pm 9\text{mV}$, 取 $k=2$ (均匀分布), 则:

$$u_1 = 9\text{mV} / 2 \approx 4.5\text{mV}$$

- 2) 直流电压源输出电压不准引入的不确定度 u_2

采用 B 类方法评定, 根据仪器说明书直流电压源输出电压 2.5V 直流电压最大允许误差为 $\pm 0.65\text{mV}$, 取 $k = \sqrt{3}$ (均匀分布), 则:

$$u_2 = 2.5 / \sqrt{3} \approx 0.36\text{mV}$$

- 3) 直流电压源分辨率引入的不确定度 u_3

直流电压源分辨率引入的不确定度可以忽略不计。

4) 测量重复性引入的不确定度 u_4

采用 A 类方法评定，直流电压源及示波器测量被校示波器电压探头偏置范围，重复测量 n ($n=10$) 次，算术平均值为 2.5098V，实验标准偏差为 0.0028V，故由测量重复性引入的不确定度为 $u_4 = 0.0029V$ 。

C.2.4 合成标准不确定度

表 C.2 不确定度分量汇总表

不确定度分量	不确定度来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度
u_1	示波器测量电压不准	B	均匀	2	4.5mV
u_2	直流电压源输出电压不准	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.36mV
u_3	直流电压源分辨率引入	B	-	-	忽略不计
u_4	重复性	A	-	-	2.8mV

各分量独立不相关，合成不确定度：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_4^2} = 5.4\text{mV}$$

C.2.5 扩展不确定度

取 $k=2$ 扩展不确定度：

$$U = ku_c \approx 11.8\text{mV}$$

C.3 频率响应测量不确定度评定（信号源扫频测量法）

C.3.1 测量模型

$$A_i = 20\lg \frac{V_{li}}{V_{0i}} - A_{0i}$$

式中：

A_i ——频率为 i 时被校探头的频率响应，dB；

A_{0i} ——频率为 i 时被示波器的频率响应，dB，示波器的频率响应来源于上级单位的校准值；

V_{li} ——频率为 i 时示波器测得被校探头的输出电压，V；

V_{0i} ——频率为 i 时被校探头的输入电压，V。

C.3.2 不确定度来源

不确定度来源如下：

- 1) 功率计测量不准引入的不确定度 u_1 ；
- 2) 示波器测量电压幅度不准引入的不确定度 u_2 ；
- 3) 示波器频响引入的不确定度 u_3 ；
- 4) 校准夹具引入的不确定度 u_4 ；
- 5) 测量重复性引入的不确定度 u_5 。

C.3.3 标准不确定度分量评定

- 1) 功率计测量不准引入的不确定度 u_1

采用 B 类方法评定，由上级校准证书可知功率计扩展不确定度 0.07dB， $k=2$ （正态分布），则：

$$u_1 = 0.07\text{dB} / 2 \approx 0.035\text{dB}$$

- 2) 示波器测量电压幅度不准引入的不确定度 u_2

采用 B 类方法评定，根据上级量传证书示波器测量 1V 正弦信号幅度最大允许误差为 $\pm 22\text{mV}$ ，取 $k = \sqrt{3}$ （均匀分布），则：

$$u_2 = 22\text{mV} / \sqrt{3} \approx 12.7\text{mV}$$

- 3) 示波器频响引入的不确定度 u_3

采用 B 类方法评定，根据溯源证书示波器在 16G 带宽时的频响引入的不确定度为 0.5dB，取 $k=2$ （均匀分布），则：

$$u_3 = 0.5\text{dB} / 2 = 0.25\text{dB}$$

- 4) 校准夹具引入的不确定度 u_4

采用 B 类方法评定，校准夹具引入的不确定度 0.2dB，取 $k = \sqrt{3}$ （均匀分布），则：

$$u_4 = 0.2\text{dB} / \sqrt{3} \approx 0.12\text{dB}$$

- 5) 测量重复性引入的不确定度 u_5

采用 A 类方法评定，信号发生器及功率计测量被校示波器电压探头 16GHz 频率响应，重复测量 n ($n=10$) 次，算术平均值为 -1.28dB，实验标准偏差为 0.16dB，故由测量重复性引入的不确定度为 $u_5 = 0.16\text{dB}$ 。

C.3.4 合成标准不确定度

表 C.3 不确定度分量汇总表

不确定度分量	不确定度来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度
u_1	功率计测量不准	B	正态	2	0.035dB
u_2	示波器测量电压幅度不准	B	均匀	$\sqrt{3}$	12.7mV
u_3	示波器频响引入的不确定度	B	正态	2	0.25dB
u_4	校准夹具引入的不确定度	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.12dB
u_5	测量重复性引入的不确定度	A	-	-	0.16dB

各分量之间除 u_2 与 u_3 强相关外，其他分量之间独立不相关，合成不确定度：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + \left(\frac{\partial A_1}{\partial V_1}\right)^2 u_2^2 + \left(\frac{\partial A_1}{\partial V_0}\right)^2 u_3^2 + 2 \frac{\partial A_1}{\partial V_1} \frac{\partial A_1}{\partial V_0} u_2 u_3 + u_4^2 + u_5^2} = 0.34\text{dB}$$

C.3.5 扩展不确定度

取 $k=2$ 扩展不确定度：

$$U = ku_c \approx 0.68\text{dB}$$

C.4 频率响应测量不确定度评定（网络分析仪测量法）

C.4.1 不确定度来源

不确定度来源如下：

- 1) 网络分析仪传输幅度测量不准引入的不确定度 u_1 ；
- 2) 校准夹具去嵌入不准引入的不确定度 u_2 ；
- 3) 测量重复性引入的不确定度 u_3 。

C.4.2 标准不确定度分量评定

- 1) 网络分析仪传输幅度测量不准引入的不确定度 u_1

根据上级量传证书网络分析仪传输幅度测量扩展不确定度为 0.15dB，按照 B 类不

确定度评定，取 $k=2$ （正态分布），则有：

$$u_1 = 0.15\text{dB} / 2 \approx 0.08\text{dB}$$

2) 校准夹具去嵌入不准引入的不确定度 u_2

根据上级量传证书校准夹具去嵌入不准引入的不不确定度为 0.12dB，按照 B 类不确定度评定，取 $k=2$ （正态分布），则有：

$$u_2 = 0.12\text{dB} / 2 \approx 0.06\text{dB}$$

3) 测量重复性引入的不确定度 u_3

根据重复性实验，按照 A 类不确定度评定，重复性引入的不确定度为 $u_3 = 0.05\text{dB}$ 。

C.4.3 合成标准不确定度

表 C.3 不确定度分量汇总表

不确定度分量	不确定度来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度
u_1	网络分析仪传输幅度测量不准	B	正态	2	0.08dB
u_2	校准夹具去嵌入不准	B	正态	2	0.06dB
u_3	重复性	A	-	-	0.05dB

u_1 、 u_2 与 u_3 独立不相关，则合成不确定度为

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 0.12\text{dB}$$

C.4.4 扩展不确定度

取 $k=2$ 扩展不确定度：

$$U = ku_c \approx 0.24\text{dB}$$

C.5 上升时间测量不确定度评定

C.5.1 测量模型

$$t_{\text{probe}} = \sqrt{t_{\text{measured}}^2 - t_{\text{standard}}^2 - t_{\text{oscilloscope}}^2}$$

式中：

t_{probe} ——被校准示波器电压探头上升时间，ps；

t_{measured} ——示波器测量得到的上升时间测量值，ps；

t_{standard} ——快沿产生器输出信号上升时间，ps；

$t_{\text{oscilloscope}}$ ——示波器自身的上升时间，ps。

C.5.2 不确定度来源

不确定度来源如下：

- 1) 示波器上升时间测量不准引入的不确定度 u_1 ；
- 2) 标准快沿信号引入的不确定度 u_2 ；
- 3) 校准夹具引入的不确定度 u_3 ；
- 4) 测量重复性的不确定度 u_4 。

C.5.3 标准不确定度分量评定

- 1) 示波器上升时间测量不准引入的不确定度 u_1

采用 B 类方法评定，由上级校准证书可知示波器上升时间测量的扩展不确定度 1.5ps， $k=2$ （正态分布），则：

$$u_1 = 3.0\text{ps} / 2 \approx 1.5\text{ps}$$

- 2) 标准快沿信号引入的不确定度 u_2

采用 B 类方法评定，7ps 快沿信号扩展不确定度 1.2ps， $k=2$ （正态分布），则：

$$u_2 = 1.5\text{ps} / 2 \approx 0.75\text{ps}$$

- 3) 校准夹具引入的不确定度 u_3

采用 B 类方法评定，校准夹具引入的不确定度 1.8ps，取 $k=\sqrt{3}$ （均匀分布），则：

$$u_3 = 1.8\text{ps} / \sqrt{3} \approx 1.03\text{ps}$$

- 4) 测量重复性引入的不确定度 u_4

采用 A 类方法评定，快沿产生器测量被校示波器电压探头上升时间，重复测量 n （ $n=10$ ）次，算术平均值为 28.7ps，实验标准偏差为 0.32ps，故由测量重复性引入的不确定度为 $u_4 = 0.32\text{ps}$ 。

C.4.4 合成标准不确定度

表 C.4 不确定度分量汇总表

不确定度分量	不确定度来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度
u_1	示波器快沿信号测量不准引入的不确定度	B	正态	2	1.5ps
u_2	标准快沿信号引入的不确定度	B	正态	2	0.75ps
u_3	校准夹具引入的不确定度	B	均匀	$\sqrt{3}$	1.03ps
u_4	测量重复性引入的不确定度	A	-	-	0.32ps

各分量之间独立不相关，合成不确定度：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = 1.7\text{ps}$$

C.5.5 扩展不确定度

取 $k=2$ 扩展不确定度：

$$U = ku_c \approx 3.4\text{ps}$$

C.6 输入电阻测量不确定度评定

C.6.1 测量模型

$$R_{\text{in}} = M$$

式中：

R_{in} ——被校准示波器电压探头输入电阻， Ω ；

M ——数字多用表测量结果， Ω 。

C.6.2 不确定度来源

不确定度来源如下：

- 1) 数字多用表测量电阻不准引入的不确定度 u_1 ；
- 2) 数字多用表分辨力引入的不确定度 u_2 ；
- 3) 测量重复性引入的不确定度 u_3 。

C.6.3 标准不确定度分量评定

- 1) 数字多用表测量电阻不准引入的不确定度 u_1

采用 B 类方法评定，数字多用表测量 $100\text{ k}\Omega$ 最大允许误差为 $\pm 1.1\text{ }\Omega$ ，取 $k = \sqrt{3}$ （均匀分布），则：

$$u_1 = 1.1/\sqrt{3} \approx 0.012\% = 0.64\Omega$$

2) 数字多用表分辨力引入的不确定度 u_2

采用八位半数字表，该项不确定度分量可以忽略不计。

3) 测量重复性引入的不确定度 u_3

采用 A 类方法评定，使用数字多用表测量宽带示波器电压探头输入电阻 ($100\text{ k}\Omega$)，重复测量 n ($n=10$) 次，算术平均值为 $100.00671\text{ k}\Omega$ ，实验标准偏差为 1.71Ω ，故由测量重复性引入的不确定度为 $u_3 = 1.71\Omega$

C.6.4 合成标准不确定度

表 C.5 不确定度分量汇总表

不确定度分量	不确定度来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度
u_1	数字多用表测量电阻不准	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.64Ω
u_3	重复性	A	-	-	1.71Ω

各分量独立不相关，合成不确定度：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_3^2} = 1.83\Omega$$

C.6.5 扩展不确定度

取 $k=2$ 扩展不确定度：

$$U = ku_c \approx 3.7\Omega$$

C.7 输出电阻测量不确定度评定

C.7.1 测量模型

$$R_{\text{out}} = M$$

式中：

R_{out} ——被校准示波器电压探头输入电阻， Ω ；

M ——数字多用表电阻测量结果， Ω 。

C.7.2 不确定度来源

不确定度来源如下：

1) 数字多用表测量电阻不准引入的不确定度 u_1 ；

2) 数字多用表分辨力引入的不确定度 u_2 ;

3) 测量重复性引入的不确定度 u_3 。

C.7.3 标准不确定度分量评定

1) 数字多用表测量电阻不准引入的不确定度 u_1

采用 B 类方法评定, 数字多用表测量 $50\ \Omega$ 最大允许误差为 $\pm 0.0017\ \Omega$, 取 $k = \sqrt{3}$ (均匀分布), 则:

$$u_1 = 0.0017 / \sqrt{3} \approx 0.00098\ \Omega$$

2) 数字多用表分辨力引入的不确定度 u_2

采用八位半数字表, 该项不确定度分量可以忽略不计。

3) 测量重复性引入的不确定度 u_3

采用 B 类方法评定, 使用数字多用表测量宽带示波器电压探头输入电阻, 重复测量 n ($n = 10$) 次, 算术平均值为 $50.8841\ \Omega$, 实验标准偏差为 $0.00942\ \Omega$, 故由测量重复性引入的不确定度为 $u_3 = 0.00942\ \Omega$

C.7.4 合成标准不确定度

表 C.6 不确定度分量汇总表

不确定度分量	不确定度来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度
u_1	数字多用表测量电阻不准	B	均匀	$\sqrt{3}$	$0.00098\ \Omega$
u_3	重复性	A	正态	2	$0.00942\ \Omega$

各分量独立不相关, 合成不确定度:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_3^2} = 0.00947\ \Omega$$

C.7.5 扩展不确定度

取 $k = 2$ 扩展不确定度:

$$U = ku_c \approx 0.019\ \Omega$$

附录 D 差分探头的共模抑制比 (CMRR)

D.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(D.1)为共模抑制比的计算公式:

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

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，但随着频率的增加，CMRR 会显著减小。图 D.1 为某一型号的差分探头的 CMRR 随频率变化的示意图。

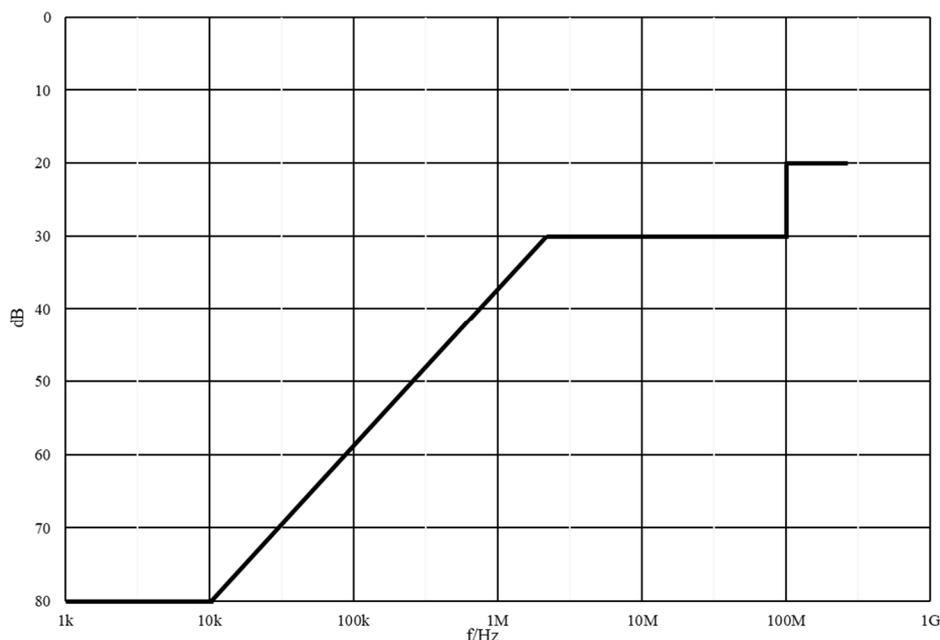


图 D.1 差分探头的 CMRR 随频率变化示意图

D.2 CMRR 的校准

D.2.1 仪器连接如图 D.2 所示，

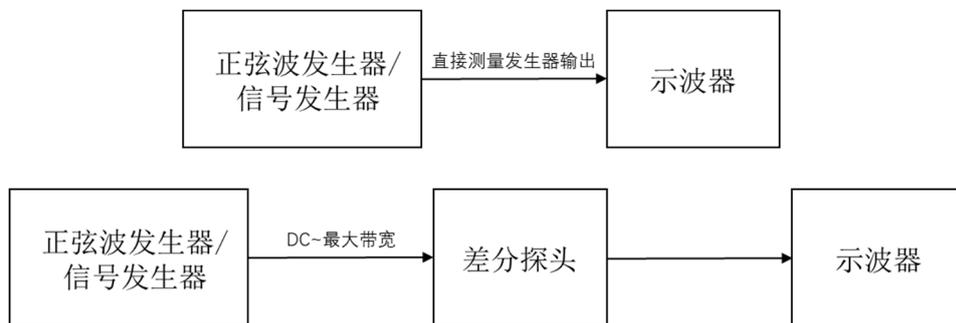


图 D.2 CMRR 的校准

D.2.2 选用任意波发生器输出 DC~50kHz 的信号，或者选用信号发生器输出 50kHz~6GHz 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 5V，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 50Ω 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成尽量短、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(D.2)计算：

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

D.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。

附录 E 校准夹具

E. 1 概述

校准夹具由两个同轴端口及平面传输线结构组成，其中同轴端口用于连接其他校准用设备，平面传输线结构用于连接输入端前端接口为探针形式的被校示波器电压探头。

E. 2 结构

校准夹具的结构如附图 E.1 所示。A、B 端为同轴接口，C 平面为信号电极，D 平面为接地电极。

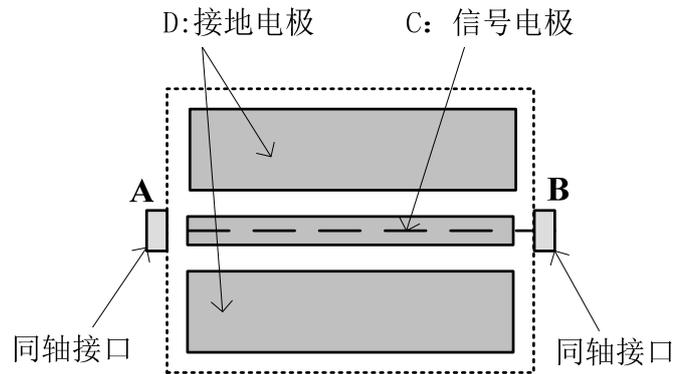


图 E.1 校准夹具结构图