



# 中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 1155—202×

## 30MHz~1GHz吸收钳校准规范

Calibration Specification for Absorbing Clamp

from 30 MHz to 1 GHz

(征求意见稿)

202×-××-××发布

202×-××-××实施

国家市场监督管理总局 发布

# 30MHz~1GHz吸收钳 校准规范

JJF 1155—202×  
代替 JJF 1155-2006

Calibration Specification for Absorbing  
Clamp from 30 MHz to 1 GHz

归口单位：全国无线电计量技术委员会

主要起草单位：中国计量科学研究院

参加起草单位：XXXXXX  
XXXXXX

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：**

XXX（中国计量科学研究院）

XXX（中国计量科学研究院）

XXX（中国计量科学研究院）

**参加起草人：**

XXX（XXXXXX）

XXX（XXXXXX）

# 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 吸收钳因子	(1)
3.2 吸收钳场地衰减	(1)
3.3 吸收钳参考点	(1)
3.4 滑轨参考点	(1)
4 概述	(2)
4.1 吸收钳用途	(2)
4.2 吸收钳装置和结构	(2)
5 计量特性	(2)
5.1 吸收钳因子	(2)
6 校准条件	(2)
6.1 环境条件	(2)
6.2 测量标准及其它设备	(2)
7 校准项目和校准方法	(4)
7.1 校准项目	(4)
7.2 校准方法	(4)
8 校准结果表达	(9)
9 复校时间间隔	(9)
附录 A (规范性)	(11)
附录 B (规范性)	(13)
附录 C (规范性)	(15)
附录 D (资料性)	(27)
附录 E (资料性)	(29)
附录 F (资料性)	(32)
附录 G (资料性)	(36)

# 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》、JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑本校准规范修订工作的基础性系列规范。

本规范参考 GB/T 6113.103-2021《无线电骚扰和抗扰度测量设备和测量方法规范 第 1-3 部分：无线电骚扰和抗扰度测量设备 辅助设备 骚扰功率》、GB/T 6113.202-2018《无线电骚扰和抗扰度测量设备和测量方法规范 第 2-2 部分：无线电骚扰和抗扰度方法 骚扰功率测量》以及 GB/Z 6113.401-2018《无线电骚扰和抗扰度测量设备和测量方法规范 第 4-1 部分：不确定度、统计学和限值建模 标准化 EMC 试验的不确定度》的相关条款和内容编制。

本规范是对 JJF 1155-2006《30 MHz~1.0 GHz 吸收式功率钳校准规范》的修订，主要内容变化如下：

1. 校准规范名称变更为《30 MHz~1 GHz 吸收钳校准规范》；
2. 用吸收钳因子替换第 5 章计量特性中的吸收衰减（插入损耗）；
3. 吸收钳校准方法分为原始校准法和夹具校准法两种，本规范给出的是原始校准法；
4. 新增吸收钳参考场地（ACRS）可接受准则；
5. 新增附录 E（资料性）带有辅助吸收装置的吸收钳的去耦因子 DF 确认方法；
6. 新增附录 F（资料性）吸收钳电流互感器到接收机的去耦因子确认方法；
7. 新增附录 G（资料性）吸收钳校准夹具规范。

本规范历次版本发布情况：

JJF 1155-2006《30 MHz~1.0 GHz 吸收式功率钳校准规范》

# 30 MHz~1 GHz 吸收钳校准规范

## 1 范围

本规范适用于对新制造、购进、使用中和修理调整后的，频率范围在 30 MHz~1 GHz 满足 GB/T 6113.103-2021《无线电骚扰和抗扰度测量设备和测量方法规范 第 1-3 部分：无线电骚扰和抗扰度测量设备 辅助设备 骚扰功率》和 GB/T 6113.202-2018《无线电骚扰和抗扰度测量设备和测量方法规范 第 2-2 部分：无线电骚扰和抗扰度测量方法 骚扰功率测量》标准要求的吸收钳的校准。

## 2 引用文件

本规范引用了下列文件：

GB/T 6113.103《无线电骚扰和抗扰度测量设备和测量方法规范 第 1-3 部分：无线电骚扰和抗扰度测量设备 辅助设备 骚扰功率》

GB/T 6113.202《无线电骚扰和抗扰度测量设备和测量方法规范 第 2-2 部分：无线电骚扰和抗扰度测量方法 骚扰功率测量》

GB/Z 6113.401-2018《无线电骚扰和抗扰度测量设备和测量方法规范 第 4-1 部分：不确定度、统计学和限值建模 标准化 EMC 试验的不确定度》

GB/T 4365《电工术语电磁兼容》

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 吸收钳因子 clamp factor; CF

EUT 的骚扰功率与吸收钳输出端接收电压的比值，用 dB(pW/μV)表示。

注：吸收钳因子是吸收钳的转换系数。

### 3.2 吸收钳场地衰减 clamp site attenuation

EUT 的骚扰功率与测量接收机接收功率之间的理想关系，用 dB 表示。

### 3.3 吸收钳参考点 clamp reference point; CRP

与吸收钳内的电流互感器的前端纵向位置相关的吸收钳外部标记，用于测试过程中标定吸收钳的水平位置。

### 3.4 滑轨参考点 slide reference point; SRP

吸收钳滑轨的一端点，即 EUT 的位置，该端点在测量程序中用于确定 EUT 到吸收钳参考点（CRP）之间的水平距离。

## 4 概述

### 4.1 吸收钳的用途

使用吸收钳进行骚扰功率测量是确定 30MHz 以上频段辐射骚扰的一种方法。该测量方法作为开阔试验场地（OATS）上测量骚扰场强的一种替代方法。

吸收钳适合于某些类型设备的骚扰测量，这取决于受试设备（EUT）的结构和尺寸。应针对每一类别的设备规定严密的测量程序及其适用范围。如果 EUT 自身（不包括连接线缆）的尺寸接近波长的 1/4，则可能产生直接的壳体辐射。仅有电源线作为外部线缆的 EUT，其骚扰能力可以用起辐射天线作用的电源线所提供的功率来衡量。不考虑 EUT 的直接辐射，该功率近似等于用合适的吸收钳环绕电源线并沿其移动测得的最大功率。除了设备的电源线，其外部线缆，不管是屏蔽的还是非屏蔽的，也能以与电源线相同的方式辐射能量。吸收钳也可用于这些线缆的测量。

### 4.2 吸收钳装置及吸收钳的结构

参见本规范附录 D.1 和 D.2。

## 5 计量特性

### 5.1 吸收钳因子

频率范围：30 MHz~1 GHz

吸收钳因子：(-4~5) dB(pW/μV)

注：以上指标仅供参考，不做符合性判定。

## 6 校准条件

### 6.1 环境条件

6.1.1 环境温度：23 °C±5 °C；

6.1.2 相对湿度：≤80 %；

6.1.3 电源要求：220 (1±5 %)V、(50±1) Hz；

6.1.4 周围无影响仪器正常工作的电磁干扰和机械振动。

### 6.2 测量标准及其它设备

#### 6.2.1 吸收钳参考场地（ACRS）

吸收钳参考场地为符合 GB/T 6113.104 归一化场地衰减要求的 10 m 法开阔试验场 (OATS) 或半电波暗室 (SAC), 校准时, 所有设备必须放置在 ACRS 内以避免对周围环境的影响。

在 30 MHz~300 MHz 频率范围内, 满足与在 OATS 上进行参考校准的钳因子偏差  $\leq \pm 0.5$  dB 的其它测试场地也可作为 ACRS, 如果 ACRS 没有金属接地平板, 需要使用一块典型尺寸为 6m×2m 的水平接地平板:

$$\Delta_{ACRS} = |CF_{orig} - CF_{in-situ}| \leq 0.5 \text{ dB}$$

其中:

$\Delta_{ACRS}$  通过将  $CF_{orig}$  与  $CF_{in-situ}$  进行比较得到的差值的绝对值, 单位: dB;

$CF_{orig}$  在辐射发射测量用 10 m 法 OATS 上用原始校准法得到的钳因子, 单位: dB;

$CF_{in-situ}$  在其它现场用原始校准法得到的钳因子, 单位: dB。

若 ACRS 没有水平接地平面, 则地面需铺装一块至少 6 m×2 m 的金属板, 且与垂直参考平面相连后接地。

### 6.2.2 网络分析仪

频率范围: 30 MHz~1 GHz;

动态范围:  $\geq 100$  dB。

### 6.2.3 同轴衰减器

频率范围: 30 MHz~1 GHz;

衰减 (标称值): 10 dB;

电压驻波比:  $\leq 1.2$ ;

连接器类型: N 型 (阳 (输入) -- 阴 (输出))。

### 6.2.4 测试电缆 (同轴衰减器+同轴电缆+直角弯头适配器)

频率范围: 覆盖 30 MHz~1 GHz;

同轴衰减器: 若 6dB 衰减器不是吸收钳组件的一部分, 应将独立的 6dB 衰减器靠近吸收钳的测量连接器端连接。

衰减: 6 dB $\pm$ 0.3 dB;

电压驻波比:  $\leq 1.12$ 。

同轴弯头适配器连接器: N (阳) / N (阴);

RG223 同轴电缆: 长度:  $\geq 5$ m;

连接器类型: N (阳) / N (阳);

### 6.2.5 M 型耦合去耦网络

频率范围：150 kHz~80MHz；

EUT 端口共模阻抗：150Ω±20Ω（0.15 MHz~24 MHz）

150 Ω<sub>-45Ω</sub><sup>+60Ω</sup>（24 MHz~80 MHz）

校准用辅助设备

### 6.2.6 吸收钳滑轨

吸收钳滑轨由大约 6 m 长的不反射和不导电材料构成，其介电常数近似等于空气中的介电常数。吸收钳滑轨的高度应为 0.8m±0.05m。

在滑轨前端有一个对电磁波透明的材料组成的受试线卡钳装置，作为缓冲器以保证吸收钳参考点（CRP）距垂直接地平板的距离不小于 150 mm。另一个相同材料的卡钳装置位于吸收钳滑轨的末端，通过它可将受试线轻微地拉直；

电机驱动的电控滑轨应可设定起始、停止位置、移动速度（需满足 7.2.3 第 2）条的要求）以及开始和停止功能。

6.2.7 一块面积为 2.0m×2.0m 的金属垂直接地平板，在其垂直对称轴上高度为 0.87m 的地方安装一个 N 型馈通连接器。

6.2.8 一根绝缘受试线（LUT），其长度为 7.0m±0.05m，直径为 4mm（绝缘部分除外），基于现实考虑，建议使用一根柔软的校准用绝缘金属导线，通过采用同轴电缆（例如 RG-58）的外屏蔽层，这种方法可以基本满足 4 mm 直径要求。

6.2.9 一个辅助吸收装置（SAD），该辅助装置可以是一个去耦因子  $DF \geq 15$  dB 可随被校钳移动的铁氧体钳。

## 7 校准项目和校准方法

### 7.1 校准项目

#### 7.1.1 吸收钳因子

#### 7.1.2 吸收钳因子带射频吸收体和金属导线的阻抗稳定器的去耦因子 $DF$

要求及检查方法见附录 E。

#### 7.1.3 电流互感器到吸收钳的测量输出端的去耦因子 $DR$

要求及检查方法见附录 F。

### 7.2 校准方法

#### 7.2.1 外观及工作正常性检查

被校准吸收钳的外观应完好无损。

吸收钳输出端应连接大小至少为 6 dB 的 50Ω 射频衰减器和长度大于 5 m 的射频同轴电缆组合（作为待校准吸收钳装置的一部分，通常由客户提供）。

在吸收钳输出端测得的信号电平应比信号发生器关断时在该处测得的环境信号电平高 40 dB。

应根据附录 E 所描述的测量程序验证带射频吸收体和金属导线的阻抗稳定器的去耦因子  $DF$ ，其特性应符合附录 D 的相关要求。

应根据附录 F 所描述的测量程序验证电流互感器到吸收钳的测量输出端的去耦因子  $DR$ 。

### 7.2.2 吸收钳参考场地和校准布置

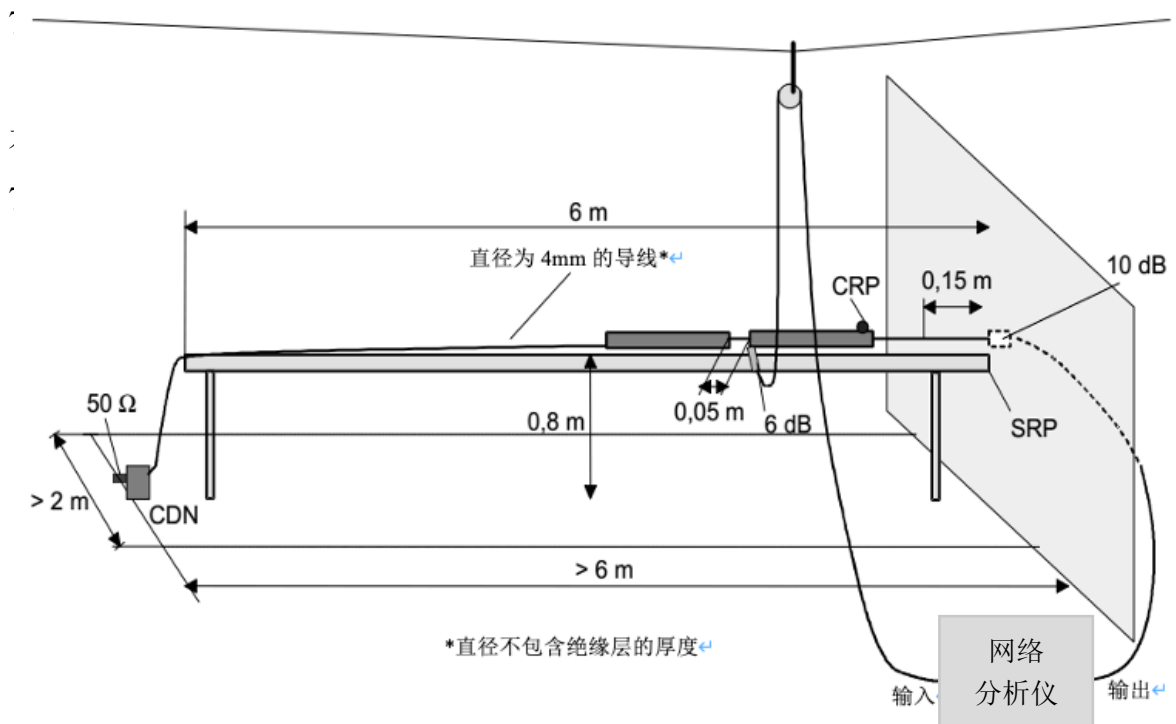


图 1 吸收钳校准场地布置示意图

校准布置由以下几部分组成：

a) 在 ACRS 内安装吸收钳滑轨，确保 LUT 位于距地面  $0.8\text{m} \pm 0.05\text{m}$  的高度上。校准期间，既可以采用定位速度可调的电机驱动的电控滑轨，也可以通过非金属的绳子牵引吸收钳缓慢移动。

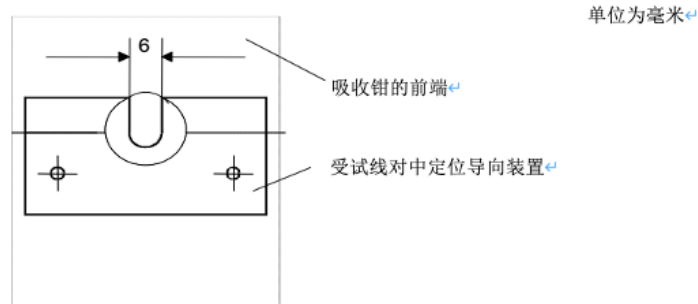
b) 将金属垂直接地平板与金属接地平板相连，该垂直接地平板放置于接近吸收钳滑轨的前面，即被放置在称为滑轨参考点（SRP）的位置上；为便于在 ACRS 内外移动，垂直接地平板需安装在带有锁紧机构滚轮的支架上。

c) 用于校准的绝缘 LUT 的一端被连接（例如焊接）到固定的馈通连接器上，另一端被连接到与金属（水平）接地平板相连的 EMC 传导抗扰度试验用 Mx 型耦合去耦网络（CDN）的共模测试点（通过共模适配器将所有相（L）线和中（N）线短路）上，推荐采用 M1 型 CDN；CDN 的 RF 输入端口端接  $50\Omega$  同轴负载，它为 LUT 的远端提供稳定的不对称阻抗。出于安全原因，CDN 的 AE 端子不能与市电电源相连！

d) 为吸收同轴电缆表面的高频共模电流，抑制电磁干扰对校准结果的影响，建议在测量电缆外部每间隔 30 cm 加装一个铁氧体磁环，其孔径和所穿过的电缆外径适配。测量电缆通过滑轮引导，式测量电缆到吸收钳的角度接近直角且不接触地面。该同轴电缆组件作为待校准吸收钳装置的组成部分通常由客户提供。

e) 如果吸收钳本身不满足去耦因子的要求，则需在位于离被校准吸收钳 50 mm 处的吸收钳滑轨上加装辅助吸收装置（SAD），其作用是在吸收钳提供的去耦衰减基础上提供附加的去耦衰减。

f) 在被校吸收钳的前端安装一个为 LTU 对中定位的非金属导向装置，使 LTU 能从电流互感器的中间通过（图 4），此装置通常属被校吸收钳的一部分。



注：当参考装置使用同轴电缆时，开槽的宽度应修正为同轴电缆的直径。

图 2 校准用绝缘金属导线对中定位导向装置的位置

## 7.2.3 校准程序

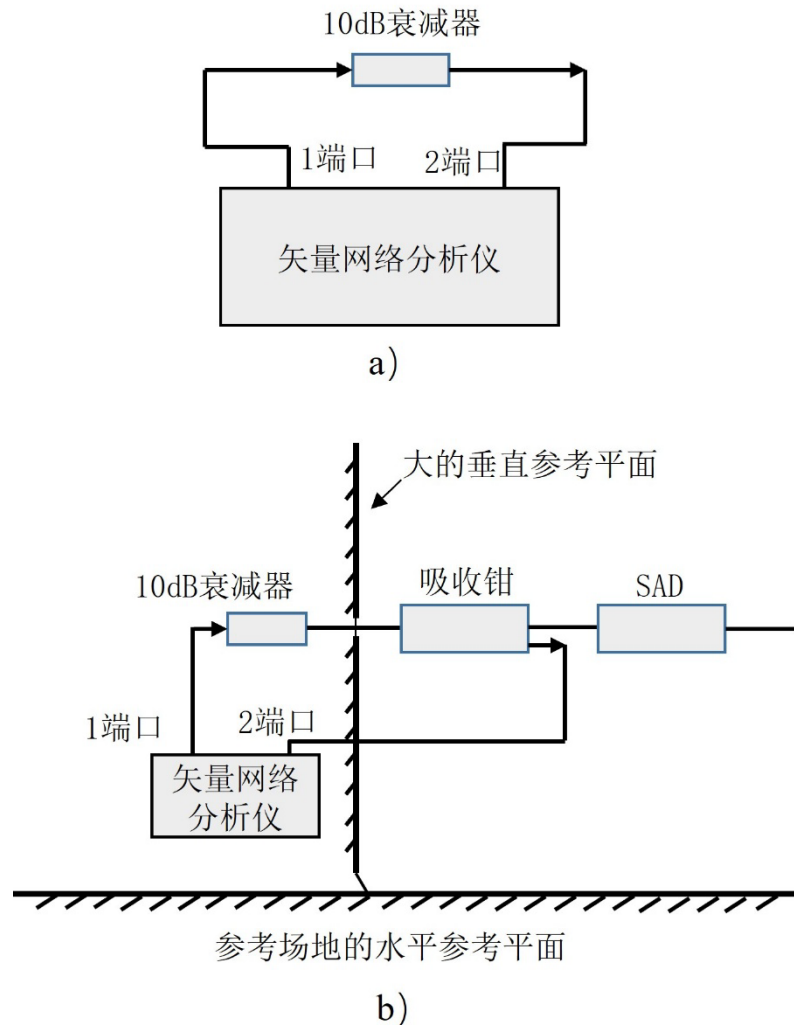


图3 吸收钳校准方法示意图

校准程序确定包括至少 6dB 的衰减器和接收机电缆在内的吸收钳装置的钳因子 (CF)。由于吸收钳的去耦效果并不理想，所以吸收钳和电缆会互相影响。电缆的类型和长度可能会影响总的 uncertainty。因此校准时应将接收机电缆（吸收钳与测量接收机之间的连接电缆）包括在内。

校准程序如下：

1) 参照图 3 a) 进行连接，将网络分析仪 (VNA) 预热 20 分钟，激活最大值保持模式，显示格式为对数，扫频方式为线性连续。频率范围 30 MHz~1000 MHz，扫描频率最大步长设置如下：在 60 MHz 以下的频率范围，步长为 1 MHz；60 MHz~120 MHz 频率范围，步长为 2 MHz；120 MHz~300 MHz 频率范围，步长为 5 MHz；300 MHz 以上，步长为 10 MHz。参照图 3a) 对 VNA 执行传输系数  $S_{21}$  测量的归一化校准。

2) 初始化吸收钳滑轨控制器, 设定起始、停止位置, 及移动速度。吸收钳的移动速度必须保证在小于 10 mm 移动距离内 VNA 可以测量到每个频率的场地衰减。既可以采用电控滑轨, 也可以通过非金属的绳子牵引吸收钳缓慢移动。

3) 如图 3b) 所示, 在垂直参考平面的另一侧将馈通连接器经过一个 10 dB 衰减器和同轴电缆与 VNA 的源端 (端口 1) 相连。

4) 将被校吸收钳和 SAD 一起放置在吸收钳滑轨上, 如图 3b) 所示。被校吸收钳的电流互感器朝向垂直接地平板方向。电流互感器的前边沿是吸收钳参考点 (CRP)。吸收钳应放置在使 CRP 和垂直地平板之间距离为 150 mm 的地方 (通过非金属缓冲器实现)。柔性导线穿过两个钳后, 在吸收钳滑轨的尾部应通过适当的非金属卡线装置被轻微的拉直。柔性导线连接到 CDN 之前不应接触到金属接地平板。

5) 将被校吸收钳的测量输出端口经一个 6 dB 衰减器和足够长的同轴电缆组合与 VNA 的接收机端口 (端口 2) 相连。在整个校准过程中, 应采取措施将测量电缆尽量与被校吸收钳垂直, 并使其悬浮且保持与水平接地平板的间距至少为 200 mm。

6) 测控软件控制吸收钳滑轨从最靠近垂直接地平板的一侧开始, 沿着吸收钳滑轨以合适的速度一起移动被校钳和紧随其后相距 50mm 的 SAD, 直至滑轨控制器设定的停止位置处。读取 VNA 迹线数据上相应频点传输系数的最大值  $S_{21 \max}$ , 传输系数的最大值就是场地衰减的最小值, 用 dB 表示, 也可利用 VNA 的保存功能将整个迹线数据存储至外部闪存, 供后续处理。

7) 从起始频率开始, 根据式 (1) 计算出场地衰减的最小值  $A_{\min}$ , 用分贝 dB 表示。

$$A_{\min} = |S_{21 \max}|$$

通过吸收钳最小场地衰减  $A_{\min}$  计算得到吸收钳装置的钳因子  $CF$ , 用  $\text{dB}(\text{pW}/\mu\text{V})$  表示。

$$CF = A_{\min} - 10\lg(Z_0)$$

式中:

$Z_0$  是网络分析仪接收机端口的阻抗,  $50\Omega$ ;

$$10\lg(Z_0) = 17[\text{dB}(\mu\text{V}/\text{pW})]$$

$$CF[\text{dB}(\text{pW}/\mu\text{V})] = A_{\min}(\text{dB}) - 17[\text{dB}(\mu\text{V}/\text{pW})] \quad (3)$$

将公式（1）代入公式（3）：

$$CF[\text{dB}(\text{pW}/\mu\text{V})] \\ = |S_{21 \max}|(\text{dB}) \\ - 17[\text{dB}(\mu\text{V}/\text{pW})] \quad (4)$$

依次将频率、传输系数 $S_{21 \max}$ 、最小场地衰减 $A_{\min}$ 、吸收钳装置的钳因子 $CF$ 填入附录 A 的表 A-1 原始记录表中，如此循环操作直至停止频率处结束。

根据附录 B 的表 B-1 给出吸收钳装置钳因子 $CF$ 的数值，并绘制 $CF$ 的频响曲线。为方便校准委托方进行结果确认，在符合相关文件规定时，可以将 GB/T 6113.103 标准给定的钳因子限值在表 B-1 和钳因子频响曲线图中一并给出。

## 8 校准结果表达

校准结果应在校准证书上反映。校准证书应至少包含以下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
- d) 证书的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- e) 客户的名称和地址；
- f) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 进行校准的日期，如果与校准结果的有效性和应用有关时，应说明被校对象的接收日期；
- h) 如果与校准结果的有效性应用有关时，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

复校时间间隔由用户根据使用情况自行确定，推荐为 1 年。



## 附录 A（规范性）

## 原始记录格式

表 A-1 实测最小场地衰减和钳因子 $CF$ 计算示例

频率	传输系数 最大值 $S_{21 \max}$	场地衰减 最小值 $A_{\min}$	吸收钳因子 (原始法) $CF$	频率	传输系数 最大值 $S_{21 \max}$	场地衰减 最小值 $A_{\min}$	吸收钳因子 (原始法) $CF$
MHz	dB	dB	dB(pW/ $\mu$ V)	MHz	dB	dB	dB(pW/ $\mu$ V)
30	-20.20	20.20	3.20	300	-16.59	16.59	-0.41
40	-20.12	20.12	3.12	350	-16.84	16.84	-0.16
50	-19.92	19.92	2.92	400	-17.43	17.43	0.43
60	-19.68	19.68	2.68	450	-16.66	16.66	-0.34
70	-18.63	18.63	1.63	500	-16.97	16.97	-0.03
80	-18.56	18.56	1.56	550	-17.19	17.19	0.19
90	-18.84	18.84	1.84	600	-16.64	16.64	-0.36
100	-18.75	18.75	1.75	650	-16.86	16.86	-0.14
110	-17.72	17.72	0.72	700	-16.99	16.99	-0.01
120	-17.67	17.67	0.67	750	-16.92	16.92	-0.08
130	-17.60	17.60	0.60	800	-16.68	16.68	-0.32
140	-17.33	17.33	0.33	850	-17.04	17.04	0.04
150	-17.62	17.62	0.62	900	-16.72	16.72	-0.28
160	-17.11	17.11	0.11	950	-17.27	17.27	0.27
170	-16.69	16.69	-0.31	1000	-17.92	17.92	0.92
180	-16.65	16.65	-0.35				
190	-16.77	16.77	-0.23				
200	-16.74	16.74	-0.26				
210	-16.93	16.93	-0.07				
220	-17.13	17.13	0.13				
230	-17.09	17.09	0.09				
240	-16.95	16.95	-0.05				
250	-16.96	16.96	-0.04				
260	-16.62	16.62	-0.38				
270	-16.52	16.52	-0.48				
280	-16.71	16.71	-0.29				
290	-16.85	16.85	-0.15				
300	-16.59	16.59	-0.41				

吸收钳因子（原始法）的计算公式为：

$$CF[\text{dB}(\text{pW}/\mu\text{V})] = |S_{21 \max}|(\text{dB}) - 17[\text{dB}(\mu\text{V}/\text{pW})] \quad (\text{A-1})$$



## 附录 B（规范性）

## 校准证书内页格式

表 B-1 实测钳因子CF和常规限值举例

频率	吸收钳因子 CF			频率	吸收钳因子 CF		
	下限	实测值	上限		下限	实测值	上限
MHz	dB(pW/μV)			MHz	dB(pW/μV)		
30	-4	3.2	5	300	-4	-0.4	5
40	-4	3.1	5	350	-4	-0.2	5
50	-4	2.9	5	400	-4	0.4	5
60	-4	2.7	5	450	-4	-0.3	5
70	-4	1.6	5	500	-4	-0.0	5
80	-4	1.6	5	550	-4	0.2	5
90	-4	1.8	5	600	-4	-0.4	5
100	-4	1.8	5	650	-4	-0.1	5
110	-4	0.7	5	700	-4	-0.0	5
120	-4	0.7	5	750	-4	-0.1	5
130	-4	0.6	5	800	-4	-0.3	5
140	-4	0.3	5	850	-4	0.0	5
150	-4	0.6	5	900	-4	-0.3	5
160	-4	0.1	5	950	-4	0.3	5
170	-4	-0.3	5	1000	-4	0.9	5
180	-4	-0.4	5				
190	-4	-0.2	5				
200	-4	-0.3	5				
210	-4	-0.1	5				
220	-4	0.1	5				
230	-4	0.1	5				
240	-4	-0.1	5				
250	-4	-0.0	5				
260	-4	-0.4	5				
270	-4	-0.5	5				
280	-4	-0.3	5				
290	-4	-0.2	5				
300	-4	-0.4	5				

测量不确定度： $U = 2.2 \text{ dB} (k = 2)$

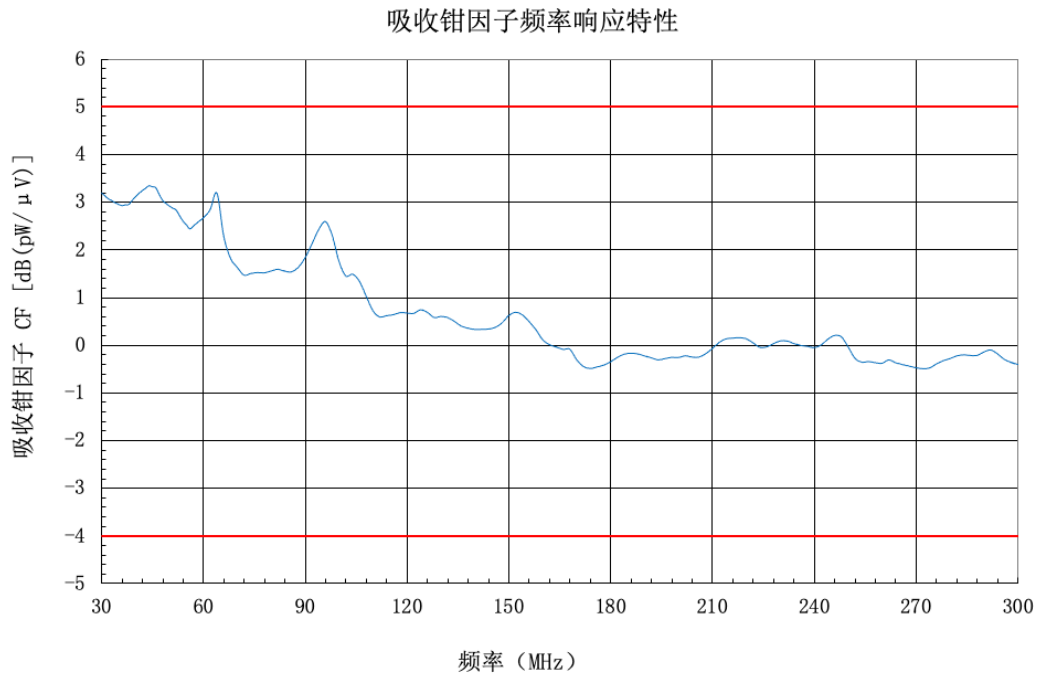


图 B-1 原始校准法吸收钳因子和常规限值频响特性曲线示例

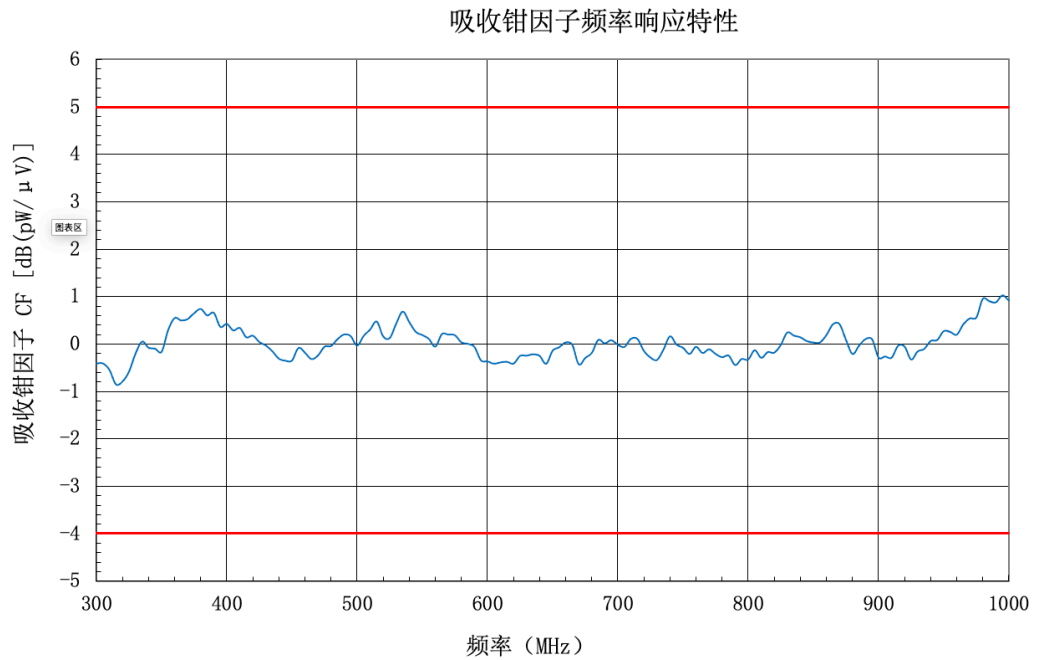


图 B-2 原始校准法吸收钳因子和常规限值频响特性曲线示例

## 附录 C (规范性)

## 吸收钳因子校准的不确定度评定示例

## C.1 建立测量模型

根据本规范 7.2.2 的校准程序,以标准线性形式评估吸收钳因子测量不确定度的测量模型为:

$$CF = \frac{A_{\min}}{Z_0} =$$

$$\frac{|S_{21,\max}|^2}{Z_0}$$

其中

$CF$  – 吸收钳因子,用 S 或  $1/\Omega^{-1}$ 表示;

$A_{\min}$  – 最小场地衰减,无量纲;

$Z_0$  – VNA 端口阻抗,  $50\Omega$ ;

$S_{21,\max}$  – VNA 最大值保持模式测得的电压传输系数,用线性方式表示,无量纲。

利用功率吸收钳测量骚扰功率时,符合性判定的功率限值单位是 dBpW,EMI 测量接收机测得的电压单位是 dB $\mu$ V,吸收钳因子相应也需用分贝表示。公式 (C-1) 用线性表示的吸收钳因子不便使用,为此,需将公式 (C-1) 等号两边取对数,由于吸收钳因子为功率之比,应该取  $10\log_{10}$ :

$$10\lg CF = 10\lg\left(\frac{|S_{21,\max}|^2}{Z_0}\right)$$

$$= 20\lg|S_{21\max}| - 10\lg Z_0$$

(C-2)

其中:

$$10\lg(Z_0) = 10\lg(50\Omega) =$$

17 dB( $\mu$ V/pW)

(C-3)

根据 GB/T 6113.103 公式 (1),吸收钳因子的单位是分贝皮瓦每微伏 dB(pW/ $\mu$ V),代入公式 (C-3) 得:

$$CF[\text{dB}(\text{pW}/\mu\text{V})] = |S_{21\max}| \text{dB} - 17[\text{dB}(\mu\text{V}/\text{pW})] \quad (\text{C-4})$$

式中:

$CF$  – 吸收钳因子, dB(pW/ $\mu$ V);

$S_{21 \max}$  – VNA 最大值保持模式测得的电压传输系数 $S_{21}$ 的最大值 $S_{21 \max}$ （为表述简洁，本附录后续部分用 $S_{21}$ 替代 $S_{21 \max}$ ），dB。

公式（C-4）是仅有一个输入量 $S_{21}$ （用分贝表示）的直接测量，它源自用线性量表示的公式（C-1），可将其视为基本测量模型（又称其为测量函数）。在基本测量模型基础上进行扩展，添加对测量结果不确定度有值得考虑的所有输入量，得到评定不确定度的测量模型（C-5）：

$CF$

$$CF = \frac{|S_{21} \cdot \delta R_{S_{21}} \cdot \delta M \cdot \delta L_{NA} \cdot \delta W_{Far} \cdot \delta D_{Min} \cdot \delta \phi_{LUT} \cdot \delta C_{LUT} \cdot \delta R_{Cal} \cdot \delta S_{Cable} \cdot \delta D_{VCP} \cdot \delta S_{Dev} \cdot \delta C_{gap}|^2}{Z_0} \quad (C-5)$$

式中：

$CF$  – 吸收钳因子，用 S 或 $1/\Omega^{-1}$ 表示；

$S_{21}$  – VNA 最大值保持模式测得的电压传输系数，用线性方式表示,无量纲；

$\delta R_{S_{21}}$  – 电压传输系数 $S_{21}$ 测量重复性误差的修正因子，用线性方式表示,无量纲；

$\delta M$  – VNA 接收机端口与被校吸收钳装置输出端口间阻抗失配误差的修正因子，用线性方式表示,无量纲；

$\delta L_{NA}$  – VNA 测量 $S_{21}$ 时非线性误差的修正因子，用线性方式表示,无量纲；

$\delta W_{Far}$  – 远端 LTU 连接影响的修正因子，用线性方式表示,无量纲；

$\delta D_{Min}$  – 距垂直接地平板最小距离影响的修正因子，用线性方式表示,无量纲；

$\delta \phi_{LUT}$  – LTU 直径影响的修正因子，用线性方式表示,无量纲；

$\delta C_{LUT}$  – LTU 在钳内对中定位影响的修正因子，用线性方式表示,无量纲；

$\delta P_{ACRS}$  – 吸收钳校准方法复现性的修正因子，用线性方式表示,无量纲；

$\delta S_{Cable}$  – 接收机电缆悬挂影响的修正因子，用线性方式表示,无量纲；

$\delta D_{VGP}$  – 垂直接地平板尺寸影响的修正因子，用线性方式表示,无量纲；

$\delta S_{Dev}$  – 吸收钳参考场地偏差的修正因子，用线性方式表示,无量纲；

$\delta C_{gap}$  – 吸收钳中气隙影响的修正因子，用线性方式表示,无量纲。

## C.2 合成标准不确定度的表达式

测量模型公式 (C-5) 中函数  $f$  是输入量  $X_i$  的幂次 (指数为  $p_i$ ) 的乘积, 即  $f(X_1, X_2, \dots, X_N) = c \prod_{i=1}^N X_i^{p_i}$ , 输出量估计值是输入量估计值的相应乘积,  $y = c \prod_{i=1}^N X_i^{p_i}$ 。在这种情况下, 灵敏度系数等于  $p_i y / x_i$ , 如果输出量和输入量均使用相对标准不确定度  $w(y) = u(y) / |y|$  和  $w(x_i) = u(x_i) / |x_i|$ , 在用分贝表示时, 对公式 (C-5) 两边分别取  $10 \log_{10}$ , 则可得出表达式  $w^2(y) = \sum_{i=1}^N p_i^2 w^2(x_i)$ , 此处  $p_i$  为比例系数而非灵敏度系数, 无量纲: 假设  $CF =$

$f(S_{21}, \delta R_{S_{21}}, \delta M, \delta L_{NA}, \delta W_{Far}, \delta D_{Min}, \delta \phi_{LUT}, \delta C_{LUT}, \delta P_{ARCS}, \delta S_{Cable}, \delta D_{VGP}, \delta C_{Dev}, \delta C_{Gap})$  函数中各输入量在显著性程度上互不相关。根据测量模型和不确定度传播定律得到以分贝表示的吸收钳因子的相对合成标准不确定度表达式:

$$\begin{aligned} u_{c,rel}^2(CF) = & 1^2 \cdot u_{rel}^2(S_{21}) + 1^2 \cdot u_{rel}^2(\delta R_{S_{21}}) + 1^2 \cdot u_{rel}^2(\delta M) + 1^2 \\ & \cdot u_{rel}^2(\delta L_{NA}) + 1^2 \cdot u_{rel}^2(\delta W_{Far}) + 1^2 \cdot u_{rel}^2(\delta D_{Min}) + 1^2 \\ & \cdot u_{rel}^2(\delta \phi_{LUT}) + 1^2 \cdot u_{rel}^2(\delta C_{LUT}) + 1^2 \cdot u_{rel}^2(\delta R_{Cal}) + 1^2 \\ & \cdot u_{rel}^2(\delta S_{Cable}) + 1^2 \cdot u_{rel}^2(\delta D_{VGP}) + 1^2 \cdot u_{rel}^2(\delta C_{Dev}) + 1^2 \cdot \\ & u_{rel}^2(\delta C_{gap}) \end{aligned} \quad (C-6)$$

式 (C-6) 中等号右边各输入量的标准不确定度在转换成分贝时, 由于存在平方项, 原本的  $10 \log_{10}$  变为  $20 \log_{10}$ 。钳因子的相对合成标准不确定度和各输入量的相对标准不确定度分别为:

$u_{c,rel}(CF)$  – 吸收钳因子的相对合成标准不确定度, 用分贝 dB 表示;

$u_{rel}(S_{21})$  – VNA 电压传输系数读数误差引入的相对标准不确定度, 用分贝 dB 表示;

$u_{rel}(\delta R_{S_{21}})$  – 测量系统重复性误差修正因子引入的相对标准不确定度, 用分贝 dB 表示;

$u_{rel}(\delta M)$  – 吸收钳装置的输出与 VNA 接收机端口间失配误差修正因子引入的相对标准不确定度, 用分贝 dB 表示;

$u_{rel}(\delta L_{NA})$  – VNA 非线性误差修正因子引入的相对标准不确定度, 用分贝 dB 表示;

$u_{rel}(\delta W_{Far})$  – 远端 LTU 连接影响修正因子引入的相对标准不确定度, 用分贝 dB 表示;

$u_{\text{rel}}(\delta D_{\text{Min}})$  – 距垂直接地平板最小距离影响修正因子引入的相对标准不确定度，用分贝 dB 表示；

$u_{\text{rel}}(\delta \phi_{\text{LUT}})$  – LTU 直径影响修正因子引入的相对标准不确定度，用分贝 dB 表示；

$u_{\text{rel}}(\delta C_{\text{LUT}})$  – LTU 在钳内对中定位影响引入的相对标准不确定度，用分贝 dB 表示；

$u_{\text{rel}}(\delta P_{\text{ACRS}})$  – 吸收钳校准方法复现性修正因子引入的相对标准不确定度，用分贝 dB 表示；

$u_{\text{rel}}(\delta S_{\text{Cable}})$  – 接收机电缆悬挂影响修正因子引入的相对标准不确定度，用分贝 dB 表示；

$u_{\text{rel}}(\delta D_{\text{VGP}})$  – 垂直接地平板尺寸影响修正因子引入的相对标准不确定度，用分贝 dB 表示；

$u_{\text{rel}}(\delta S_{\text{Dev}})$  – 吸收钳参考场地偏差修正因子引入的相对标准不确定度，用分贝 dB 表示；

$u_{\text{rel}}(\delta C_{\text{gap}})$  – 吸收钳中气隙影响修正因子引入的相对标准不确定度，dB。

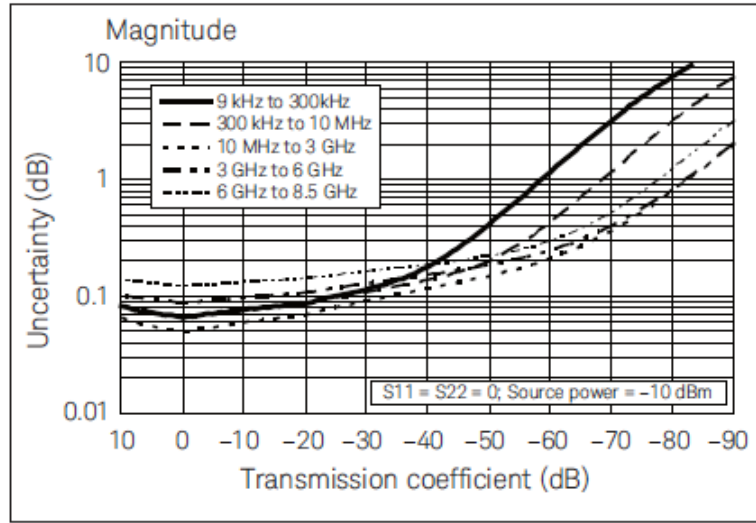
### C.3 标准不确定度分量的评定

#### 1) 网络分析仪测量电压传输系数时引入的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(S_{21,1})$

这项不确定度可从所使用的网络分析仪生产厂家的技术规范中获得。本示例采用 Keysight E5071C 矢量网络分析仪和与其适配的 85032F 校准套件进行仪器校准和传输系数  $S_{21}$  的测量，是德科技（中国）有限公司官网上可免费下载的网络分析仪不确定度计算工具 KeysightUncert.xlsm 是微软公司 Office 中的电子表格文件。打开该文件后，通过查表方式能够获得网络分析仪相应频段内传输系数的测量不确定度，参见图 C.1。该不确定度为扩展不确定度  $U$ ，包含因子  $k = 2$ 。

以频率范围 30 MHz~300 MHz 为例，网络分析仪的显示格式为对数模值 Log Mag，根据 GB/T 6113.103:2021 第 4.3 a)，传输系数  $S_{21}$  的范围是 -13 dB~22 dB，测量不确定度随  $S_{21}$  模值的增加而增加，取  $|S_{21}|_{\text{max}} = 22$  dB 为估计值，再通过查表可知  $S_{21}$  测量的扩展不确定度  $U(S_{21}) = 0.097725$  dB。

Transmission uncertainty (specification)

图 C.1 传输系数  $S_{21}$  模值的扩展不确定度

标准不确定度为:

$$u(S_{21}) = \frac{[U(S_{21})]}{k} = \frac{(10^{0.097725/20} - 1)}{2} = 0.00566$$

相对标准不确定度为:

$$u_{\text{rel}}(S_{21}) = \frac{u(S_{21})}{S_{21 \text{ max}}} = \frac{0.00566}{10^{-22/20}} = \frac{0.00566}{0.07943} = 0.07122$$

式中  $S_{21 \text{ max}}$  是  $S_{21}$  测量范围 -13 dB ~ -22 dB 的最大值。

用分贝表示为:

$$u_{\text{rel}}(S_{21}) = 20 \lg(1 + 0.07122) = 0.597579 \text{ dB}$$

## 2) 测量系统重复性误差引入的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta R_{S_{21}})$

假定非重复性加性修正系数的估计值  $\delta R_{S_{21}} = 0 \text{ dB}$ , 表明此修正项并不用于修正, 仅考虑它的不确定度。可通过测量得到基于  $n = 10$  次重复测量样本  $\delta R_{S_{21} i}$  的单个测量结果的实验标准差  $s(\delta R_{S_{21} i})$ , 即标准不确定度  $u(\delta R_{S_{21}})$ , 服从正态分布。

$$u(\delta R_{S_{21}}) = s(\delta R_{S_{21} i}) = \sqrt{\frac{1}{10 - 1} \sum_{i=1}^{10} (\delta R_{S_{21} i} - \overline{\delta R_{S_{21}}})^2}$$

$$= 0.005$$

标准不确定度用分贝表示为:

$$u(\delta R_{S_{21}}) = 20 \lg(1 + 0.005) = 0.0433 \text{ dB}$$

相对标准不确定度为:

$$u_{\text{rel}}(\delta R_{S_{21}}) = \frac{u(\delta R_{S_{21}})}{\overline{\delta R_{S_{21}}}} = \frac{0.005}{0.07177}$$

$$= 0.06968$$

其中： $\overline{\delta R_{S_{21}}} = 0.07177$ 是 $\delta R_{S_{21}}$ 的平均值。

用分贝表示的相对标准不确定度为：

$$u_{\text{rel}}(\delta R_{S_{21}}) = 20\lg(1 + 0.06968) = 0.58509 \text{ dB}$$

表 C.1 重复性修正项 $\delta R_{S_{21,1}}$ （频率：30MHz~1000 MHz，测量次数：10）

重复性修正 项 $\delta R_{S_{21}}$ 实测值	平均值 $\overline{\delta R_{S_{21}}}$	实验标准差 $s(\delta R_{S_{21} i})$		$u_{\text{rel}}(\delta R_{S_{21}}) = \frac{s(\delta R_{S_{21} i})}{\overline{\delta R_{S_{21}}}}$	
			dB		dB
0.07943	0.07177	0.00500	0.04333	0.06968	0.58509
0.07762					
0.07586					
0.07413					
0.07244					
0.07079					
0.06918					
0.06761					
0.06607					
0.06457					

3) 吸收钳装置的输出与网络分析仪接收机端口之间失配误差引入的相对标准不确定度

$$u_{\text{rel}}(\delta M)$$

已知待校准吸收钳装置内含的 6dB 同轴衰减器和 5m 长电缆组件输出端口的

VSWR 为 $\leq 1.2$ ，反射系数为：

$$\Gamma_{\text{Att}} = \frac{VSWR-1}{VSWR+1} = \frac{1.2-1}{1.2+1} = 0.0909$$

采用校准套件 85032F 修正后的网络分析仪 E5071C 的源匹配 $\geq 41$  dB（频率 $> 10$

MHz~3 GHz），反射系数为：

$$\Gamma_{\text{NA}} = 10^{RL/20} = 10^{(-41 \text{ dB}/20)} = 0.0089$$

当仅知道失配误差的模或失配误差模的极值，不可能计算失配误差 $\delta M$ （尽管阻抗失配引起的是系统误差，通常也难以修正），但失配误差的极值 $\delta M^\pm$ 不大于：

$$\delta M^+ = 20 \cdot \log[1 + (|\Gamma_{Att}| \cdot |\Gamma_{NA}|)] = 20 \log[1 + 0.0909 \times 0.0089] = 0.007035 \text{ dB}$$

$$\delta M^- = 20 \cdot \log[1 - (|\Gamma_{Att}| \cdot |\Gamma_{NA}|)] = 20 \log[1 - 0.333 \times 0.0089] = -0.007040 \text{ dB}$$

假定失配误差加性修正系数的估计值 $\delta M = 0 \text{ dB}$ ，失配误差 $\delta M$ 的概率密度分布近似为反正弦，包含因子 $k = \sqrt{2}$ ，其包含概率的区间宽度不大于 $(\delta M^+ - \delta M^-)$ ，标准偏差（即标准不确定度）不大于其半宽度被 $\sqrt{2}$ 相除所得的商。

标准不确定度：

$$u(\delta M) = \frac{MPEV}{k} = \frac{|\delta M^\pm|_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{10^{0.00704 \text{ dB}/20} - 1}{\sqrt{2}} = \frac{0.00178}{\sqrt{2}} = 0.00126$$

相对标准不确定度：

$$u_{\text{rel}}(\delta M) = \frac{u(\delta M)}{|\delta M|} = \frac{0.00126}{1} = 0.00126$$

用分贝表示：

$$u_{\text{rel}}(\delta M) = 20 \lg(1 + 0.00126) = 0.0109 \text{ dB}$$

#### 4) 网络分析仪非线性误差引入的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta L_{NA})$

GB/T 6113.103:2016 附录 B.2.2.1 要求测量系统的非线性应小于 $\pm 0.1 \text{ dB}$ ， $\delta L_{NA}$ 是对网络分析仪非线性的修正，令加性修正系数的估计值 $\delta L_{NA} = 0 \text{ dB}$ ，假定其服从矩形分布，说明了包含概率区间的半宽度不大于 $\pm 0.1 \text{ dB}$ ，标准不确定度为：

$$u(\delta L_{NA}) = \frac{MPEV}{k} = \frac{|10^{\pm 0.1 \text{ dB}/20} - 1|_{\max}}{\sqrt{3}} = 0.00669$$

相对标准不确定度：

$$u_{\text{rel}}(\delta L_{NA}) = \frac{u(\delta L_{NA})}{\delta L_{NA}} = \frac{0.00669}{1} = 0.00669$$

用分贝表示为：

$$u_{\text{rel}}(\delta L_{NA}) = 20 \lg(1 + 0.00669) = 0.05788 \text{ dB}$$

注：网络分析仪的线性度在反射/传输测量的不确定度评定中，通常不作为独立项显式考虑，而是已隐含在“残余跟踪误差”和“校准后系统不确定度”中——特别是当使用像 Keysight Uncert.xlsm 不确定度计算器时。

#### 5) 远端测试线连接影响引入的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta W_{\text{Far}})$

参考文献[1]中，如果使用辅助吸收装置（SAD），则可以将测试导线远端共模阻抗的影响减小到可忽略的值。远端阻抗的两个极端条件（开路和短路）和有无 SAD 时的

校准结果与按照标准进行的参考测量的结果证实，应用 SAD 可将偏差从 $\pm 1.5$  dB 降至 $\pm 0.2$  dB 以下。由于在接地平面上加装了一个 M 型 CDN，将其 EUT 端口与受试线末端相连，该端口的共模阻抗为 $150\Omega$ ，因此，上述 $\pm 0.2$  dB 的偏差不会被超出。

$\delta W_{\text{Far}}$ 是对远端测试线连接影响的修正，令加性修正系数的估计值 $\delta W_{\text{Far}} = 0$  dB，假定其服从矩形分布，说明了包含概率区间的半宽度不大于 $\pm 0.2$  dB，相对于参考测量钳因子的标准不确定度为：

$$u_{\text{rel}}(\delta W_{\text{Far}}) = \frac{MPEV}{k} = \frac{|10^{\pm 0.2\text{dB}/20} - 1|_{\text{max}}}{\sqrt{3}} = 0.01345$$

用分贝表示为：

$$u_{\text{rel}}(\delta W_{\text{Far}}) = 20\lg(1 + 0.01345) = 0.11603 \text{ dB}$$

#### 6) 距垂直 GP 的最小距离影响引入的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta D_{\text{min}})$

本规范 7.2.1.2 中规定，在垂直接地平板附近有一个对电磁波透明材料组成的缓冲器以保证钳参考点（CRP）和垂直接地平面（滑轨参考点，SRP）之间的最小距离限定为 15 cm。参考文献[1]表明，当没有完全满足该距离时，如果最小距离保持在 $(15 \pm 1)$  cm 以内，则与最小距离 15cm 时的相对偏差小于 $\pm 0.2$  dB。

$\delta D_{\text{min}}$ 是对距垂直 GP 的最小距离影响的修正，令加性修正系数的估计值 $\delta D_{\text{min}} = 0$  dB，假定其服从矩形分布，说明了包含概率区间的半宽度不大于 $\pm 0.2$  dB，相对于参考测量钳因子的标准不确定度为：

$$u_{\text{rel}}(\delta D_{\text{min}}) = \frac{MPEV}{k} = \frac{|10^{\pm 0.2\text{dB}/20} - 1|_{\text{max}}}{\sqrt{3}} = 0.01345$$

用分贝表示为：

$$u_{\text{rel}}(\delta D_{\text{min}}) = 20\lg(1 + 0.01345) = 0.11603 \text{ dB}$$

#### 7) 测试导线直径的影响引入的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta \phi_{\text{Wire}})$

本规范 7.2.1.2 中将测试导线直径规定为 4 mm（横截面积是 $12.6 \text{ mm}^2$ ）。RG58 柔性同轴电缆金属编织层的外表面可用作测试导线，金属编织层的直径为 3.51mm，这种做法可以满足 4mm 直径要求。引用文献[1]给出了直径为 1.6 mm（ $2 \text{ mm}^2$ ）的导线时观察到相对于参考测量钳因子的偏差小于 0.8 dB。实际测试表明，使用直径为 3.51mm（ $9.7 \text{ mm}^2$ ）的同轴电缆时观察到的偏差小于 0.3 dB。

$\delta \phi_{\text{LUT}}$ 是对测试导线直径的影响修正，令加性修正系数的估计值 $\delta \phi_{\text{LUT}} = 0$  dB，假定其服从矩形分布，说明了包含概率区间的半宽度不大于 $\pm 0.3$  dB，相对于参考测量钳因子的标准不确定度为：

$$u_{\text{rel}}(\delta\phi_{\text{LUT}}) = \frac{MPEV}{k} = \frac{|(10^{0.3\text{dB}/20} - 1)|}{\sqrt{3}} = 0.02029$$

用分贝表示为:

$$u_{\text{rel}}(\delta\phi_{\text{LUT}}) = 20\lg(1 + 0.02029) = 0.17447 \text{ dB}$$

#### 8) 测试导线在钳内对中定位影响引入的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta C_{\text{LUT}})$

本规范 7.2.1.2 中规定, 通常情况下, 一个校准用绝缘金属导线对中定位的非金属导向装置安装在被校吸收钳的前端, 使校准用绝缘金属导线能从电流互感器的中间通过。有些类型的吸收钳不具备这样的定位装置(损坏或丢失), 参考文献[1]中给出了拆除定位导向装置后相对于参考测量钳因子的偏差小于-1.2 dB。

$\delta C_{\text{LUT}}$ 是对测试导线在钳内对中定位影响的修正, 令加性修正系数的估计值 $\delta C_{\text{LUT}} = 0 \text{ dB}$ , 假定其服从矩形分布, 说明了包含概率区间的半宽度不大于-0.2 dB, 相对于参考测量钳因子的标准不确定度为:

$$u_{\text{rel}}(\delta C_{\text{LUT}}) = \frac{MPEV}{k} = \frac{|(10^{-1.2\text{dB}/20} - 1)|}{\sqrt{3}} = 0.07450$$

用分贝表示为:

$$u_{\text{rel}}(\delta C_{\text{LUT}}) = 20\lg(1 + 0.07450) = 0.62412 \text{ dB}$$

#### 9) 原始校准方法的复现性引入的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta P_{\text{ACRS}})$

参考文献[1]给出了测试场地内相同位置重复测量的钳因子偏差小于 $\pm 0.1 \text{ dB}$ , 测试暗室内 5 个不同位置的钳因子偏差小于 $\pm 0.4 \text{ dB}$ 。

$\delta P_{\text{ACRS}}$ 是对校准复现性的修正, 令加性修正系数的估计值 $\delta P_{\text{ACRS}} = 0 \text{ dB}$ , 假定其服从矩形分布, 说明了包含概率区间的半宽度不大于 $\pm 0.4 \text{ dB}$ , 相对于参考测量钳因子的标准不确定度为:

$$u_{\text{rel}}(\delta P_{\text{ACRS}}) = \frac{MPEV}{k} = \frac{|10^{\pm 0.4\text{dB}/20} - 1|_{\text{max}}}{\sqrt{3}} = 0.02721$$

用分贝表示为:

$$u_{\text{rel}}(\delta P_{\text{ACRS}}) = 20\lg(1 + 0.02721) = 0.23318 \text{ dB}$$

#### 10) 接收机电缆悬挂影响引入的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta S_{\text{Cable}})$

本规范 7.2.2 校准程序步骤 5) 要求吸收钳的接收机电缆连接到 NA 的输入端。在整个校准过程中, 应将接收机电缆悬浮, 使其总是保持与水平接地平板的间距至少为 200 mm。参考文献[1]给出了在吸收钳装置移动期间, 当电缆接近接地平面 20 cm 至 50 cm 长度时观察到相对于参考测量钳因子的偏差小于 $\pm 0.5 \text{ dB}$ 。

$\delta S_{\text{Cable}}$ 是对接收机电缆悬挂影响的修正,令加性修正系数的估计值 $\delta S_{\text{Cable}} = 0$  dB,假定其服从矩形分布,说明了包含概率区间的半宽度不大于 $\pm 0.1$  dB,相对于参考测量钳因子的标准不确定度为:

$$u_{\text{rel}}(\delta S_{\text{Cable}}) = \frac{MPEV}{k} = \frac{|10^{\pm 0.5\text{dB}/20} - 1|_{\text{max}}}{\sqrt{3}} = 0.03421$$

用分贝表示为:

$$u_{\text{rel}}(\delta S_{\text{Cable}}) = 20\lg(1 + 0.03421) = 0.29218 \text{ dB}$$

11) 垂直接地平面尺寸影响引入的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta D_{\text{VGP}})$

本规范 7.2.1.2 要求垂直接地平面尺寸为  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 。参考文献[1]给出了当垂直接地平面为  $3 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  而不是  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  时相对于参考测量钳因子的偏差小于  $-0.8/+0.3$  dB。

$\delta D_{\text{VGP}}$ 是对垂直接地平面尺寸影响的修正,令加性修正系数的估计值 $\delta D_{\text{VGP}} = 0$  dB,此修正项的钳因子最大相对允许误差根据参考文献[1]的试验结果得到,假定其服从矩形分布,相对于参考测量钳因子的标准不确定度为:

$$u_{\text{rel}}(\delta D_{\text{VGP}}) = \frac{MPEV}{k} = \frac{|(10^{-0.8/20} - 1)|}{\sqrt{3}} = 0.0508$$

用分贝表示为:

$$u_{\text{rel}}(\delta D_{\text{VGP}}) = 20\lg(1 + 0.0508) = 0.4304 \text{ dB}$$

12) 吸收钳参考场地偏差引入的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta S_{\text{Dev}})$

由于 ACRS 的性能已经包含在吸收钳的校准因子中,无法对 ACRS 的性能进行验证,参考文献[2]给出了利用 GB/T 6113.103-2008 第 4.3 c)的参考装置法对半电波暗室内的吸收钳校准场地 ACRS 进行了评估,该方法提出的概念基本上类似于 NSA 对 OATS 的验证。

在没有垂直参考平面的参考场地上,使用一个参考装置和吸收钳一起作为参考校准场地与待验证校准场地之间的传递标准。首先在理想的校准场地(例如满足  $\text{NSA} \leq \pm 4\text{dB}$  要求的开阔试验场)上使用参考装置执行吸收钳因子测量,然后在待验证的吸收钳参考场地上执行相同的测量来验证 ACRS。这两种测量方法之间吸收钳因子的差异是 ACRS 性能的一项指标,该差异应该尽可能小。

验证结果表明,在待验证的吸收钳参考场地上与开阔试验场地上的参考校准的钳因子偏差小于 $\pm 0.5$  dB。

$\delta S_{\text{Dev}}$ 是对吸收钳参考场地偏差的修正，令加性修正系数的估计值 $\delta S_{\text{Dev}} = 0 \text{ dB}$ ，假定其服从三角分布，说明了包含概率区间的半宽度不大于 $\pm 0.5 \text{ dB}$ ，相对于参考测量钳因子的标准不确定度为：

$$u_{\text{rel}}(\delta S_{\text{Dev}}) = \frac{MPEV}{k} = \frac{|(10^{-0.5/20} - 1)|}{\sqrt{6}} = 0.0242$$

用分贝表示为：

$$u_{\text{rel}}(\delta S_{\text{Dev}}) = 20 \lg(1 + 0.0242) = 0.2076 \text{ dB}$$

### 13) 吸收钳中气隙影响引入的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta C_{\text{gap}})$

某些吸收钳有可能使压紧铁氧体铁芯的弹簧松弛。在该“松弛位置”，铁氧体没有完全闭合。参考文献[1]中给出了当错误地使用钳的这种配置进行测量，则相对于参考测量钳因子的偏差将高达 $(-1/+4) \text{ dB}$ 。

当校准出现上述情况时，表明该吸收钳已损坏，继续校准已无意义，需要修理。因此，不确定影响量中不需要考虑这个修正项。

## C.4 不确定度汇总表

表 C.1 吸收钳因子校准不确定度评定汇总表（30 MHz~300 MHz）

符号 $CF_i$	影响量 $CF_i$		不确定度 或误差界 $U_{\text{rel}}(CF_i)$ 或 $u_{\text{rel}}(CF_i)$	包含 因子 $k$ 或 除数	概率密度 分布函数 PDF	相对标准 不确定度 $u_{\text{rel}}(CF_i)$	比例 因子 $p_i$	相对不确定度分量 $p_i u_{\text{rel}}(CF_i)$ 或 $u_{\text{rel}}(CF_i)$
	非线性	线性						
	dB							
$S_{21}$	-22	0.0794	0.01131	2	正态	0.07122	1	0.07122
$\delta R_{21}$	0	1	0.00500	1	正态	0.06968	1	0.06968
$\delta M$	0	1	0.00704	$\sqrt{2}$	U形	0.00126	1	0.00126
$\delta L_{\text{NA}}$	0	1	$\pm 0.10$	$\sqrt{3}$	矩形	0.00669	1	0.00669
$\delta W_{\text{Far}}$	0	1	$\pm 0.20$	$\sqrt{3}$	矩形	0.01345	1	0.01345
$\delta D_{\text{Min}}$	0	1	$\pm 0.20$	$\sqrt{3}$	矩形	0.01345	1	0.01345
$\delta \phi_{\text{LUT}}$	0	1	$\pm 0.30$	$\sqrt{3}$	矩形	0.02029	1	0.02029
$\delta C_{\text{LUT}}$	0	1	$\pm 1.20$	$\sqrt{3}$	矩形	0.07450	1	0.07450
$\delta P_{\text{ARCS}}$	0	1	$\pm 0.40$	$\sqrt{3}$	矩形	0.02721	1	0.02721
$\delta S_{\text{Cable}}$	0	1	$\pm 0.5$	$\sqrt{3}$	矩形	0.03421	1	0.03421
$\delta D_{\text{VGP}}$	0	1	-0.8/+0.3	$\sqrt{3}$	矩形	0.05080	1	0.05080
$\delta S_{\text{Dev}}$	0	1	$\pm 0.5$	$\sqrt{6}$	三角形	0.02419	1	0.02419
$\delta C_{\text{gap}}$	0	1	-1/+4	$\sqrt{3}$	矩形	N/A	1	N/A
相对合成标准不确定度： $u_{\text{c,rel}}(CF) = \sqrt{\sum u_{i,\text{rel}}(CF)^2}$								0.15
相对扩展不确定度 ( $k = 2$ ): $U_{\text{rel}}(CF) = k u_{\text{c,rel}}(CF)$								2.2 dB
								29 %

参考文献

- [1] Heinrich Ryser. Uncertainty Contributions to the Clamp Factor CF of the Absorbing Clamp. EMC Laboratory, Swiss Federal Office of Metrology METAS. Proceedings, 18th Int. Zurich Symposium on EMC, Munich 2007
- [2] Heinrich Ryser. EXPERIENCE WITH NEW CALIBRATION AND TEST SITE VALIDATION METHODS FOR THE ABSORBING CLAMP. Swiss Federal Office of Metrology METAS.

## 附录 D（资料性）

## 吸收钳装置及吸收钳的结构

## D.1 吸收钳装置

吸收钳装置由 5 个组成部分，如图 D.1 所示：

- 宽带射频电流互感器 C；
- 宽带射频功率吸收体和柔性导线的阻抗稳定器 D；
- 铁氧体环的吸收套筒 E 和附件，用于减小电流互感器到测量接收机的同轴电缆表面上的射频电流；
- 吸收钳输出端与连接测量接收机的同轴电缆之间的 6 dB 衰减器；
- 连接测量接收机的同轴电缆。

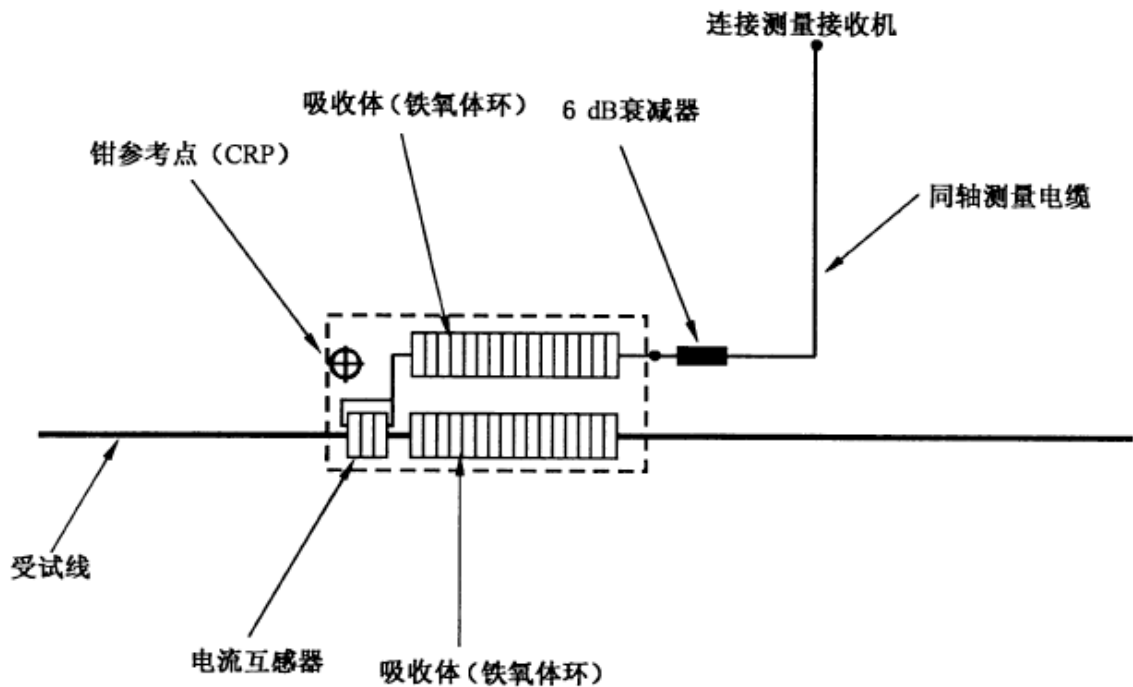


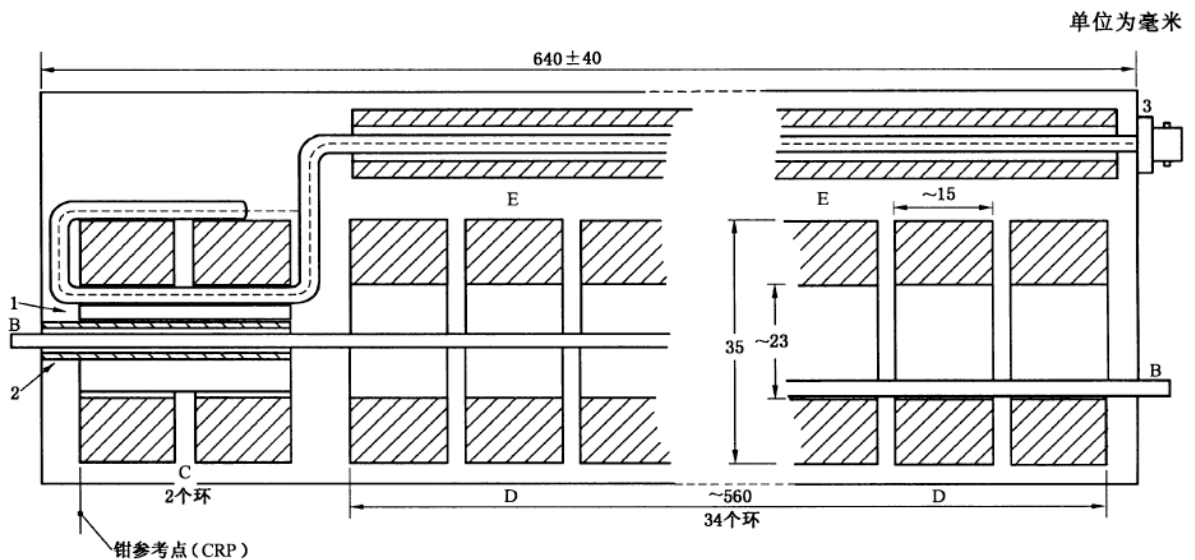
图 D.1 吸收钳装置及其各组成部分

## D.2 吸收钳的结构

吸收钳的结构如图 D.2 所示。吸收钳的参考点 (CRP)，即吸收钳内电流互感器前端的纵向位置。该参考点用于确定程序中吸收钳所在的测量位置。CRP 由吸收钳的制造商在其外壳上标出。

D 由数个铁氧体环组成, E 由铁氧体环或管构成。电流互感器 C 的铁芯为两个或三个 D 中使用的铁氧体环。电流互感器的次级线圈由单匝环绕铁氧体环的小型同轴电缆组成并按图 1 所示连接。电缆通过吸收套筒 E 至吸收钳上的同轴连接器(可经过一个 6 dB 的衰减器)。C 和 D 紧密安装在一起,并沿着同一轴线方向,使其能够沿着受试线 B 移动。吸收套筒 E 通常沿着吸收体 D 一侧安装。D 和 E 都用来衰减流经引线上的不对称电流。

图 D.2 示出了性能经过改进后的吸收钳的某些特征。一对金属半圆筒(1)安装在电流互感器 C 的磁环内侧壁,起电容屏蔽作用,这个圆筒被分成两半。绝缘管(2)把校准用绝缘金属导线架在变换器的中心。这个绝缘管从变换器的输入端一直延伸到吸收体 D 的第一个铁氧体环,它用于吸收钳的校准和测量线径较小的受试线。



标引序号说明:

- B——受试线;
- C——电流互感器;
- D——吸收部分;
- E——来自电流互感器的电缆上的吸收部分;
- 1——一对金属半圆筒;
- 2——受试线 B 的中心定位导管;
- 3——同轴连接器(用于连接 6 dB 衰减器)。

图 D.2 吸收钳的构造示例

## 附录 E（资料性）

带有辅助吸收装置的吸收钳的去耦因子 $DF$ 确认方法E.1 带有辅助吸收装置的吸收钳的去耦因子 $DF$ 

当吸收钳的电流互感器测量骚扰功率时，环绕柔性导线的铁氧体环的去耦衰减就会产生不对称阻抗，并将电流互感器与柔性导线的远端隔离开来，该隔离减小了所连接电源的骚扰影响和远端阻抗的骚扰影响以及对被测电流的影响。这种去耦衰减称为带有辅助吸收装置的吸收钳的去耦因子（ $DF$ ）。

SAD 的去耦因子应按 E.2 描述的测量方法进行确认。SAD 的去耦因子应同吸收钳一起进行测量。

注：新技术的采用使得 SAD 的附加去耦功能集成到吸收钳里成为可能。因此，如果吸收钳本身已满足去耦因子的要求，则不必再用 SAD。

E.2 去耦因子 $DF$ 的确认方法

带射频吸收体和 LUT 阻抗稳定器的去耦因子 $DF$ 的测量方法适用于带有辅助吸收装置的吸收钳，校准实验室可将其作为吸收钳校准前的工作正常性检查的一种方法；吸收钳制造商需将该方法作为质量管理的一种手段。

用吸收钳校准夹具测量去耦因子 $DF$ （见图 E.1、图 G.1 和图 G.2）。对于参考测量和被校吸收钳的测量， $DF$ 的测量均采用  $50\Omega$  的测量系统。由于当钳插入夹具中时，夹具的阻抗会改变，因此空夹具的参考值可能会给出一个实际不存在的测量值。必须要注意：空夹具不是一个  $50\Omega$  的测量系统！

去耦因子 $DF$ 的测量程序：

从图 D.1 可以看出，使用网络分析仪（NA）需分图 D.1.a)和图 D.1.b) 两个测量步骤。首先，进行参考测量，对网络分析仪进行归一化（利用双阴连接器将 NA 的源端和接收机端的电缆短接相连），如图 D.1.a)所示；然后，一个校准用金属杆对中定位的非金属导向装置安装在被校吸收钳的前端，使其能从电流互感器的中间通过（图 4）。将吸收钳放置在夹具中，且 CRP 到垂直法兰的距离为 30 mm，如图 D.1.b)、E.1 和 E.2 所示；同时 SAD 的末端到另一个垂直法兰的距离也为 30 mm。校准用金属杆用香蕉插头连接到垂直法兰的馈通连接器上。夹具的垂直法兰到被校吸收钳的参考点（钳上的 CRP）以及到 SAD 末端的距离应为 30 mm，此时可测得传输系数 $S_{21}$ ，因此 $DF$ 可由式（E.1）确定：

$$= |S_{21}|$$

其中：

$DF$  带有辅助吸收装置的吸收钳的去耦因子，单位：dB；

$S_{21}$  NA测得的传输系数，单位：dB；

带有SAD的吸收钳的去耦因子 $DF$ 既包括吸收钳本身的去耦因子，也包括SAD的去耦因子，它们组合后的去耦因子应符合标准GB/T 6113.103-2021附录B.3.1的相关要求。

注：通常，SAD本身的 $DF$ 约为15 dB。

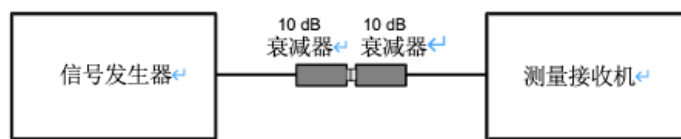


图 D.1a) 参考测量框图

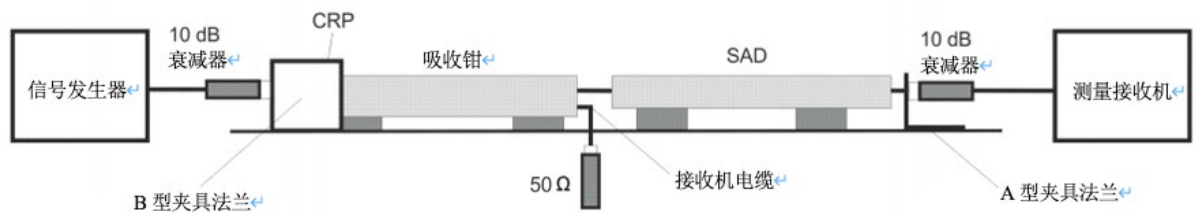


图 E.1b) 吸收钳和 SAD 放置在夹具中的测量

图 E.1 去耦因子 $DF$ 的测量布置图

可用测量接收机和信号发生器的组合实施上述测量，在这种情况下，需在与信号发生器相连和与频谱分析仪相连的电缆末端分别连接一个 10 dB 的 50Ω 同轴衰减器，以改善与校准夹具两端馈通连接器的匹配。

去耦因子 $DF$ 可由下式确定：

$$= P_{\text{ref}}$$

$$- P_{\text{fil}}$$

其中：

$DF$  带有辅助吸收装置的吸收钳的去耦因子，单位：dB；

$P_{\text{ref}}$  参考测量得到的功率，单位：dBm；

$P_{\text{fil}}$  校准夹具内放置带有 SAD 的吸收钳后测得的功率，单位：dB；

功率吸收钳电流互感器到吸收钳测量输出端的去耦因子 $DF$ 仅用于吸收钳校准前的工作正常性检查，判定其是否符合 GB/T 6113.103 所要求的 $DR \geq 30$  dB，因此，确认测试的结果可以特性曲线图的形式给出。当被校吸收钳的委托方需要时，可以给出具体数值。

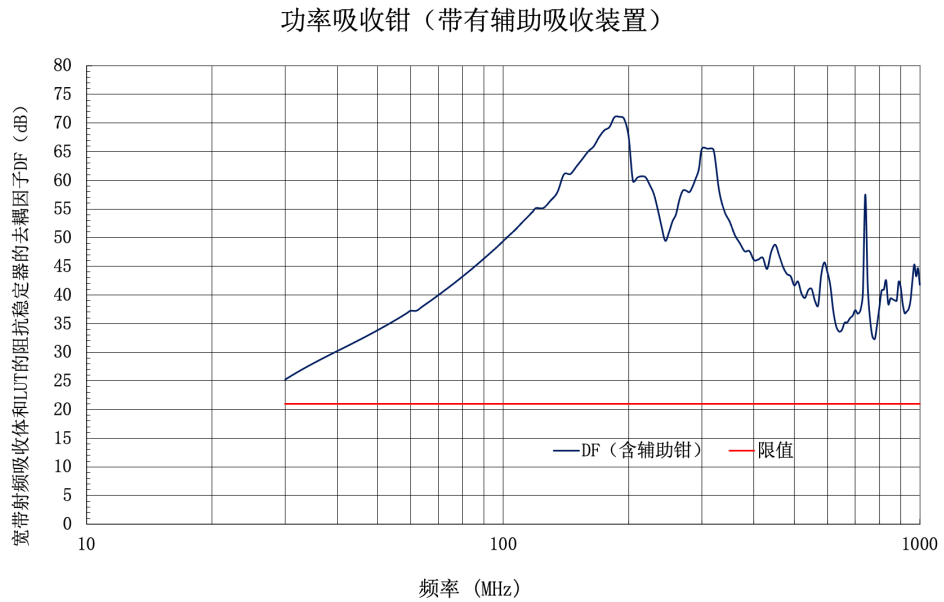


图 E.2 带辅助吸收装置吸收钳的去耦因子 $DF$ 特性曲线图示例

## 附录 F（资料性）

## 吸收钳电流互感器到接收机的去耦因子确认方法

F.1 吸收钳电流互感器到接收机的去耦因子  $DR$ 

吸收钳需要二次去耦，二次去耦是对电流互感器与接收机电缆的不对称（共模）阻抗进行去耦。它是通过在电流互感器到测量接收机之间的电缆上放置铁氧体环来实现。这种去耦衰减称为到测量接收机的去耦因子（ $DR$ ）。

F.2 去耦因子  $DR$  的测量方法

吸收钳电流互感器到接收机的去耦因子  $DR$  的测量方法适用于没有辅助吸收装置的吸收钳，校准实验室可将其作为吸收钳校准前的工作正常性检查的一种方法；吸收钳制造商需将该方法作为质量管理的一种手段。

吸收钳  $DR$  的测量程序如下（见图 F.2a）和图 F.2b）。为了测量穿过电流互感器的同轴电缆上的不对称电压，一个校准用金属杆对中定位的非金属导向装置安装在被校吸收钳的前端，使其能从电流互感器的中间通过（图 F.2）。将不带有 SAD 的吸收钳放置在夹具中，且 CRP 到垂直法兰的距离为 30 mm，如图 F.2b)、G.1 和 G.2 所示；同时被校吸收钳的尾部到另一个垂直法兰的距离也为 30 mm。校准用金属杆用香蕉插头分别连接到 A 型和 B 型垂直法兰的馈通连接器上。

从图 F.1 可以看出，使用网络分析仪（NA）需分为图 F.1a) 和图 F.1b) 两个测量步骤。首先，进行参考测量，对网络分析仪进行归一化（利用双阴连接器将 NA 的源端和接收机端的测量电缆直接相连），如图 F.1a) 所示；

然后，按图 F.1b) 布置吸收钳。通过测量电缆将 NA 的源端口与 B 型夹具法兰（最靠近吸收钳 CRP 的一端）的馈通连接器相连。另外一个 A 型夹具法兰的馈通连接器端接  $50\Omega$ ，端接位置位于吸收钳 CRP 的相反方向。将被校吸收钳输出端用一根短的同轴电缆穿过 A 型夹具法兰下部的圆孔与 A 型 CDN 相连。CDN 放置在金属接地平板上。CDN 的测量输出端与测量接收机相连，CDN 的 AE 侧的 BNC 连接器端接  $50\Omega$ ，此时可由 NA 测得传输系数  $S_{21}$ 。因此可由式（F.1）计算  $DR$ ：

$$DR = |S_{21}|$$

其中：

- $DR$  吸收钳电流互感器到接收机的去耦因子，单位：dB；  
 $S_{21}$  NA 测得的传输系数，单位：dB；

去耦因子 $DR$ 应符合标准GB/T 6113.103-2021附录B.3.2的要求。 $DR$ 既包括吸收钳的衰减也包括A型CDN的衰减。

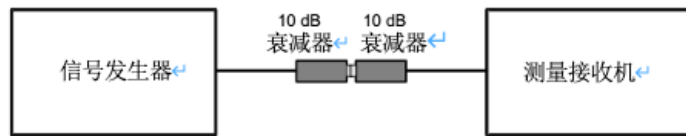


图 F.1a) 参考测量框图

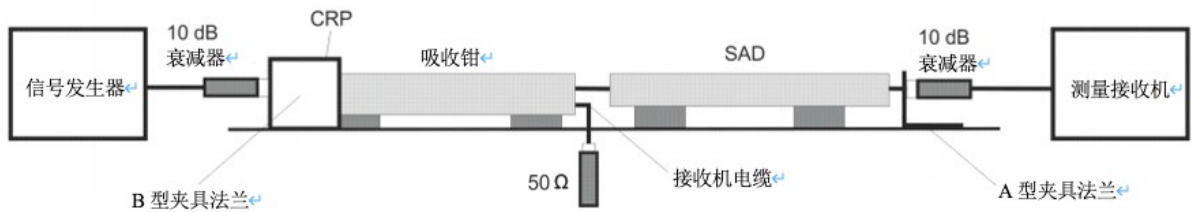


图 F.1b) 吸收钳和 SAD 放置在夹具中的测量

图 F.1 去耦因子 $DF$ 的测量布置图

可用测量接收机和信号发生器的组合实施上述测量，在这种情况下，需在信号发生器输出端和频谱分析仪或测量接收机输入端相连的电缆末端分别接一个 10 dB 衰减器，以改善与校准夹具两端馈通连接器的匹配。

去耦因子 $DF$ 可由下式确定：

$$DF = \frac{P_{\text{ref}}}{P_{\text{fil}}} \quad (\text{F.2})$$

其中：

- $DF$  带有辅助吸收装置的吸收钳的去耦因子，单位：dB；
- $P_{\text{ref}}$  参考测量得到的功率，单位：dBm；
- $P_{\text{fil}}$  校准夹具内放置被校吸收钳后测得的功率，单位：dB；

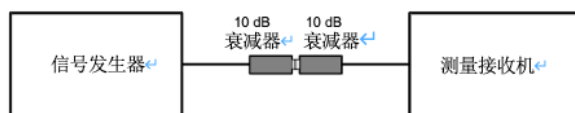
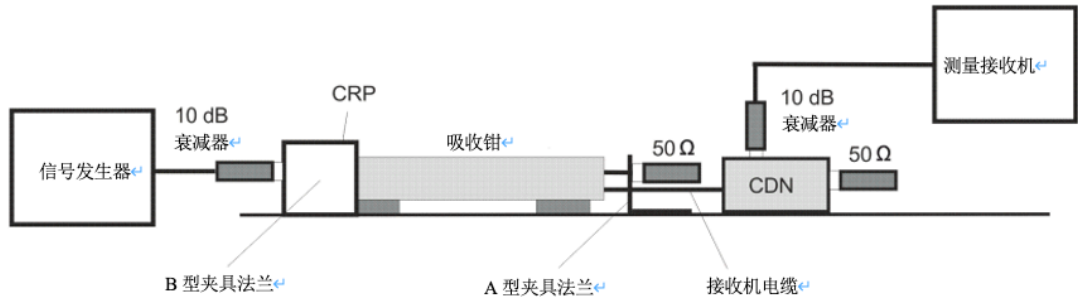
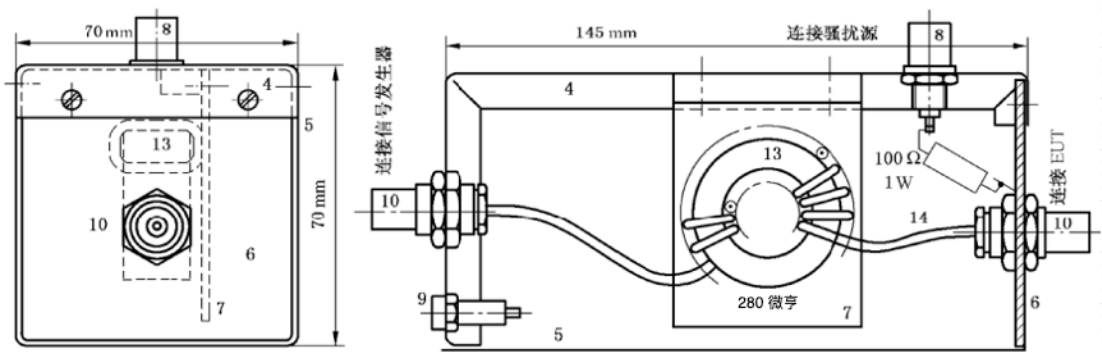


图 F.2a) 参考测量框图

图 F.2b) 去耦因子 $DR$ 的测量布置图图 F.2 去耦因子 $DR$ 的测量布置图

A型耦合单元的电路和结构与 GB/T 6113.102 的图 C.1 相似，只是电感值为  $280\mu\text{H}$ ，电感的结构如图 E.3 所示。



说明：

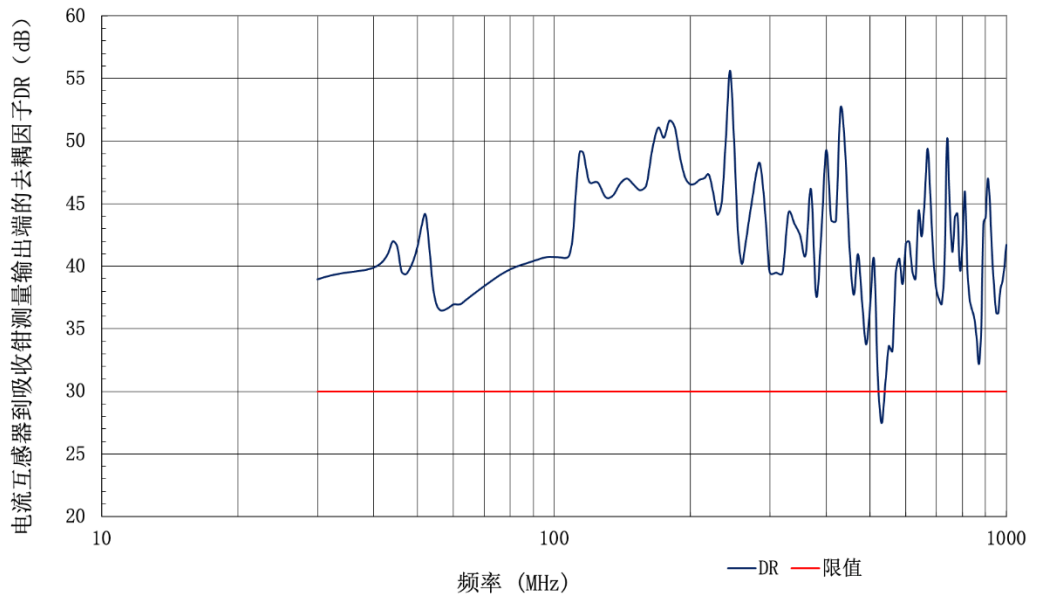
- 4、5 ---- 金属盒（ $145\text{ mm} \times 70\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ ）部件 5 放置在接地平面上；
- 6 ----- 前面板（绝缘材料）；
- 7 ----- 扼流圈的支架板（绝缘材料）；
- 8 ----- BNC 同轴连接器， $50\Omega$ ；
- 9 ----- 接地端子；
- 10 ----- BNC 同轴连接器；
- 13 ----- 磁芯：将材料为 4C6 的（或等效的）2 个铁氧体环叠在一起。其外径为  $36\text{ mm}$ ，内径为  $23\text{ mm}$ ，厚度为  $30\text{ mm}$ 。
- 14 ----- 绕组：用全屏蔽的小型同轴电缆绕 28 匝，例如线径为  $0.9\text{ mm}$  的 UT34，其外部包有未经为  $1.5\text{ mm}$  的绝缘塑料护套。

图 F.3 用于同轴输入的 A 型耦合单元的电路和结构示例

功率吸收钳电流互感器到吸收钳测量输出端的去耦因子 $DR$ 仅用于吸收钳校准前的工作正常性检查，判定其是否符合 GB/T 6113.103 的要求，因此，确认测试的结果可以特性曲线图的形式给出。当被校吸收钳的委托方需要时，可以给出具体数值。

图 F.4 功率吸收钳去耦因子 $DR$ 特性曲线示例

### 功率吸收钳



## 附录 G (资料性)

## 吸收钳校准夹具规范

## G.1 吸收钳校准夹具的用途

吸收钳校准夹具可用于吸收钳去耦因子 $DF$ 和 $DR$ 的性能确认。该夹具用来测量吸收钳和 SAD 在一个  $50\Omega$  测量系统中的插入损耗。应当注意，空夹具的特征阻抗并不是  $50\Omega$ 。夹具校准法的测量使得被测的插入损耗可以独立于环境。

## G.2 吸收钳校准夹具的尺寸和被校吸收钳及辅助吸收钳的布置

吸收钳校准夹具的尺寸和被校吸收钳及辅助吸收钳的布置如图 E.1~图 E.3 所示。

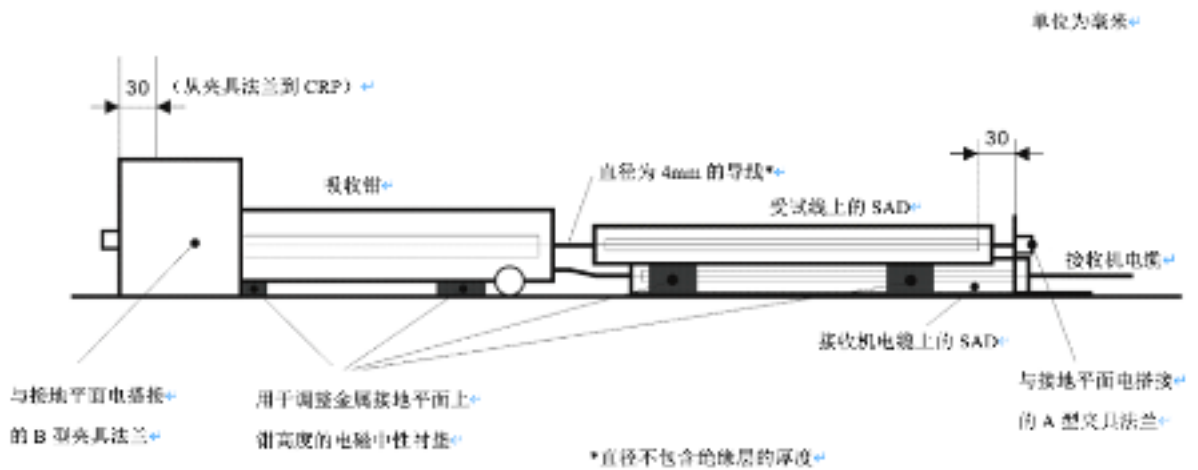


图 G.1 校准夹具的测试图

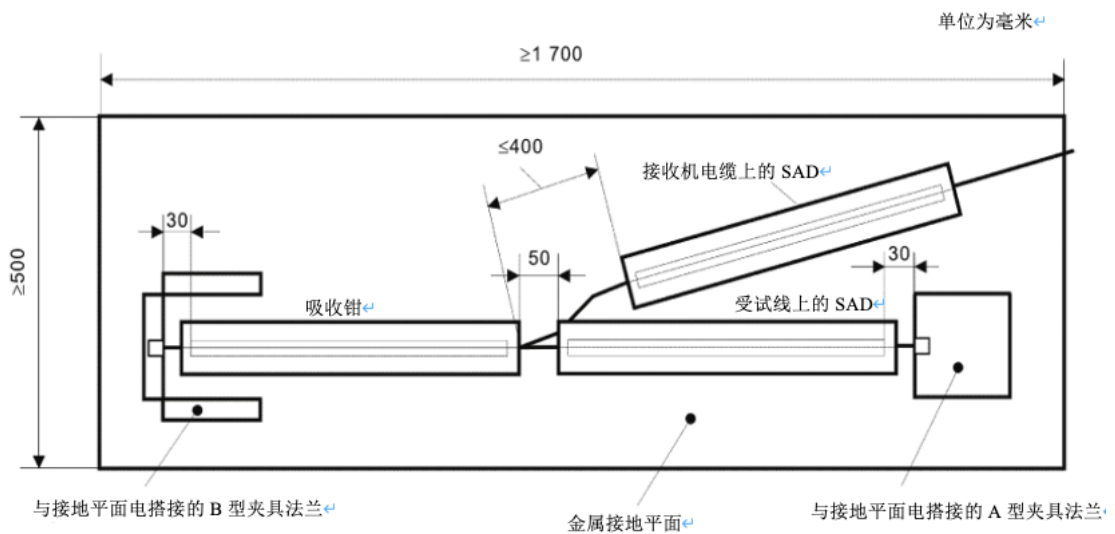
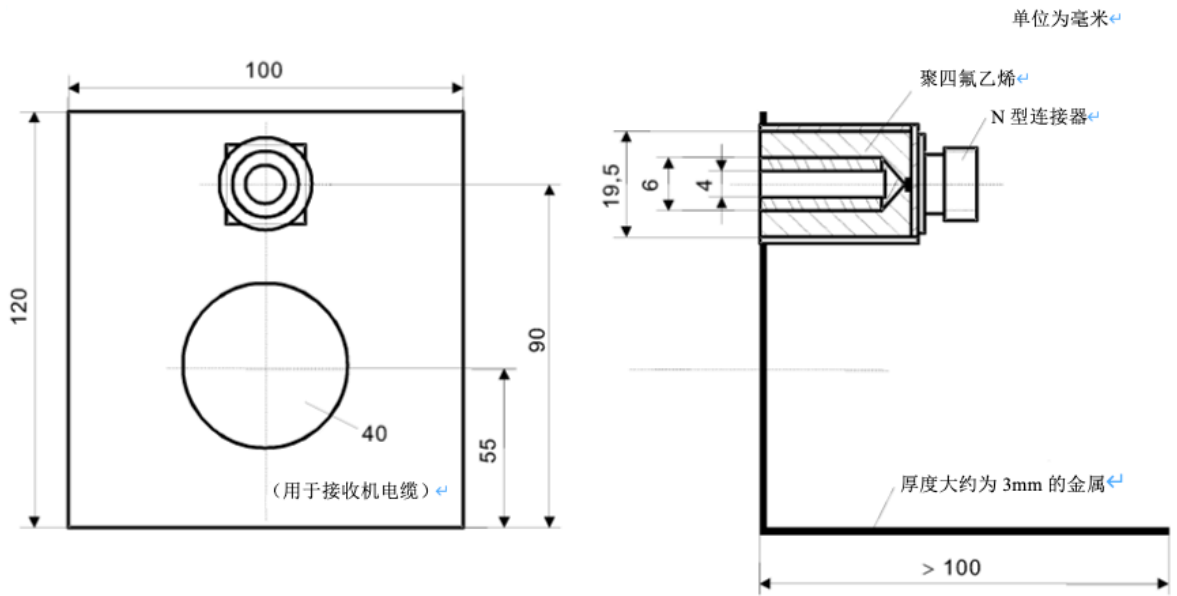
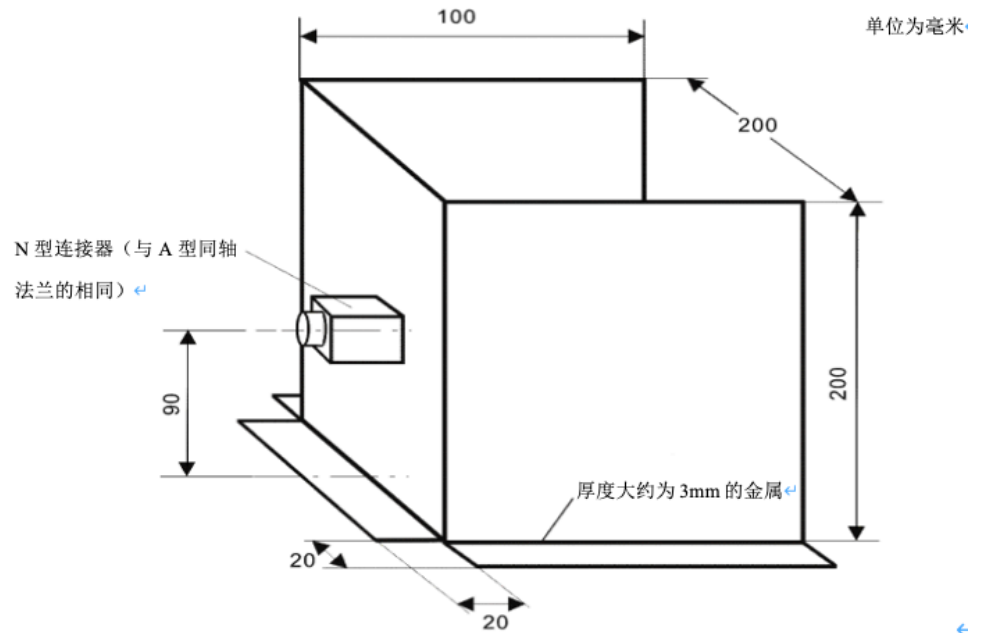


图 G.2 夹具的俯视图



注：底边需要与金属接地板搭接。

图 G.3a) A 型垂直法兰 (SAD 侧)



注：底边需要与金属接地板搭接。

图 G.3b) B 型垂直法兰 (吸收钳 EUT 侧)

图 G.3 夹具垂直法兰的视图

---