



江苏省地方计量技术规范

JJF（苏）282—2024

电磁注入钳校准规范

Calibration Specification for Electromagnetic Injection Clamps

2024-09-26 发布

2024-12-01 实施

江苏省市场监督管理局发布

电磁注入钳校准规范

Calibration Specification for Electromagnetic
Injection Clamps

JJF(苏)282 — 2024

本规范经江苏省市场监督管理局于 2024 年 09 月 26 日批准，并自 2024 年 12 月 01 日起施行。

归口单位：江苏省通讯计量专业技术委员会

主要起草单位：江苏省计量科学研究院

参加起草单位：苏州泰思特电子科技有限公司

常州检验检测标准认证研究院

国家能源集团科学技术研究院有限公司

本规范委托江苏省通讯计量专业技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

高 佳（江苏省计量科学研究院）

冯铁英（江苏省计量科学研究院）

安靖婕（江苏省计量科学研究院）

本规范参加起草人：

刘顺坤（苏州泰思特电子科技有限公司）

唐 翼（常州检验检测标准认证研究院）

范 臻（国家能源集团科学技术研究院有限公司）

刘 皓（江苏省计量科学研究院）

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 电磁注入钳	1
3.2 电磁去耦钳	1
3.3 耦合系数	1
3.4 阻抗	1
3.5 去耦系数	1
3.6 共模吸收装置	2
3.7 散射参数 (S 参数)	2
3.8 直通-反射-传输线校准法 (TRL 校准法)	2
3.9 直通-开路-短路-匹配校准法 (TOSM 校准法)	2
4 概述	2
5 计量特性	2
5.1 电磁注入钳	2
5.2 电磁去耦钳	3
5.3 共模吸收装置	3
6 校准条件	3
6.1 环境条件	3
6.2 测量标准及其他设备	3
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
7.2.1 外观及工作正常性检查	4
7.2.2 电磁注入钳的校准	5
7.2.3 电磁去耦钳的校准	8
7.2.4 共模吸收装置的校准	8
8 校准结果表达	9
9 复校时间间隔	10
附录 A 校准原始记录格式	11
附录 B 校准证书内页格式	13
附录 C 测量不确定度评定示例	15
附录 D 电磁注入钳、去耦钳校准夹具	17
附录 E CMAD 校准夹具	18
附录 F 150 Ω / 50 Ω 适配器的机械结构	19
附录 G TRL 校准法	21

引 言

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》共同构成支撑本规范制定工作的基础性系列规范。

本规范参考 GB/T 17626.6《电磁兼容 试验和测量技术 射频场感应的传导骚扰抗扰度》及 GB/T 6113.104《无线电骚扰和抗扰度测量设备和测量方法规范第 1-4 部分：无线电骚扰和抗扰度测量设备辐射骚扰测量用天线和试验场地》中相关条款进行编写。

本规范为首次发布。

电磁注入钳校准规范

1 范围

本规范适用于 150kHz~80MHz 频率范围射频场感应的传导骚扰抗扰度用的电磁注入钳、电磁去耦钳的校准，亦适用于 30MHz~200MHz 频率范围辐射骚扰测量用共模吸收装置的校准，其他频段的电磁注入钳、电磁去耦钳、共模吸收装置可参照执行。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

GB/T 17626.6 电磁兼容试验和测量技术射频场感应的传导骚扰抗扰度

GB/T 6113.104 无线电骚扰和抗扰度测量设备和测量方法规范第 1-4 部分：无线电骚扰和抗扰度测量设备辐射骚扰测量用天线和试验场地

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 电磁注入钳 electromagnetic injection clamp

容性和感性耦合相结合的注入装置，也叫电磁钳（EM 钳）、电磁耦合钳。

3.2 电磁去耦钳 electromagnetic decoupling clamp

用于辅助设备与 EUT 之间起到有效隔离的铁氧体装置。

3.3 耦合系数 coupling factor

在耦合装置的被测设备端口（EUT）所获得的开路电压（电动势）与信号注入端（RF IN）的开路电压的比值，单位是 dB。

3.4 阻抗 input impedance

当电磁注入钳或去耦钳和规定的试验夹具整体被视为一个二端口装置时，阻抗特性可以通过使用网络分析仪在 50Ω 系统中测量其 S 参数来表示，单位是 Ω。

3.5 去耦系数 decoupling factor

在耦合装置的被测设备端口（EUT）所获得的开路电压（电动势）与辅助设备端（AE）的开路电压的比值，单位是 dB。

3.6 共模吸收装置 common mode absorption device (CMAD)

辐射发射测量中,施加在离开试验空间后的电缆上以减小标准符合性不确定度的装置。

3.7 散射参数 (S 参数) scattering parameters (S-parameters)

用于描述插入到传输线的两端口网络性能的四个参数的集合。

3.8 直通-反射-传输线校准法 (TRL 校准法) through-reflect-line calibration

使用 3 个已知阻抗的校准件 (直通、反射和传输线) 对矢量网络分析仪进行内部校准或者外部校准的校准方法, 需要进行 4 次参考测量。

3.9 直通-开路-短路-匹配校准法 (TOSM 校准法) through-open-short-match calibration

使用 3 个已知阻抗的标准套件 (短路、开路和匹配/负载) 和一个传输标准套件 (直通) 对矢量网络分析仪进行校准的校准方法, 需要进行 7 次参考测量, 亦称 SOLT 法 (short-open-load-through calibration)。

4 概述

电磁注入钳是一种高效宽带式钳注入装置, 可以起到对线缆、电源供电线等进行注入信号并抑制干扰信号对其设备造成影响的作用, 主要用于射频场感应的传导骚扰抗扰度的测量。电磁去耦钳、共模吸收装置通过去耦性能抑制对其他设备造成影响, 此外共模吸收装置可有效地抑制共模电流, 从而达到抑制线缆向外辐射共模信号的目的, 同时稳定共模阻抗, 提高辐射发射测量的准确性, 广泛用于辐射骚扰测量。

5 计量特性

5.1 电磁注入钳

5.1.1 阻抗

频率范围: (0.15~80) MHz;

阻抗范围: (50~320) Ω 。

5.1.2 去耦系数

频率范围: (0.15~80) MHz;

标称值范围: (-10~0) dB。

5.1.3 耦合系数

频率范围：（0.15~80）MHz；

标称值：0dB；

最大允许误差：±6dB。

5.2 电磁去耦钳

5.2.1 阻抗

频率范围：（0.15~80）MHz；

阻抗范围：（200~800）Ω。

5.2.2 去耦系数

频率范围：（0.15~80）MHz；

标称值范围：（-15~0）dB。

5.3 共模吸收装置

5.3.1 S_{21} 幅值

频率范围：30MHz~200MHz；

幅值范围：小于 0.25。

5.3.2 S_{11} 幅值

频率范围：30MHz~200MHz；

幅值范围：（0.6~0.75）（30MHz），（0.4~0.55）（200MHz），随频率的对数线性递减。

注：上述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

环境温度：（23±5）℃；

相对湿度：≤80%；

电源电压及频率：（220±22）V，（50±1）Hz；

其他：周围无影响校准工作正常进行的电磁干扰及机械振动。

6.2 测量标准及其他设备

6.2.1 网络分析仪（具有 TRL、TOSM（SOLT）校准法选件）

频率范围：150kHz~200MHz；

动态范围：不小于 80dB；

传输系数幅值测量最大允许误差： $\pm(0.01\sim0.1)$ dB。

6.2.2 50 Ω 终端负载

频率范围：150kHz \sim 80MHz；

电压驻波比：不大于 1.2。

6.2.3 10dB 衰减器

频率范围：150kHz \sim 80MHz；

标称值：10dB \pm 0.3dB；

电压驻波比：不大于1.2。

6.2.4 150 Ω /50 Ω 适配器对

插入损耗标称值：9.5dB（150kHz \sim 80MHz）；

最大允许误差： \pm 0.5dB。

6.2.5 参考接地平面

其各边尺寸应至少比校准夹具和整套校准系统在平面上的几何投影尺寸大0.2m，且其表面应与校准夹具底面具有良好的电搭接的金属接地平板。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

如表 1 所示。

表 1 校准项目表

序号	校准项目	
1	外观及工作正常性检查	
2	电磁注入钳	阻抗
		去耦系数
		耦合系数
3	电磁去耦钳	阻抗
		去耦系数
4	共模吸收装置	S_{21} 幅值
		S_{11} 幅值

7.2 校准方法

7.2.1 外观及工作正常性检查

被校准的电磁注入钳、电磁去耦钳、共模吸收装置带有必要的附件、说明书，各部分应完整，无影响正常工作的机械损坏，开关旋钮、铁氧体环、半圆形铜箔片安装牢固

无脱落松动或开裂，记录在附录 A.1。

7.2.2 电磁注入钳的校准

7.2.2.1 阻抗

1) 将电磁注入钳校准夹具（详见附录 D）置于参考接地平面上，周围无明显反射物，圆柱形金属杆的高度应处于钳开口的中心位置。设置网络分析仪的扫描频率范围为 150kHz~80MHz，中频带宽 1kHz，选择 TOSM 校准法，分别在校准夹具的两端口进行开路-短路-匹配及直通操作对网络分析仪进行自校准，使用网络分析仪的端口补偿功能（或其它方法）抑制电缆末端（连接校准夹具的端）与钳参考点之间长度引入的影响量。

2) 按照图 1 进行设备连接。其中电磁注入钳的信号注入端（RF IN）接 50Ω 终端负载，保持间距 $L_A = L_B = 30\text{mm} \pm 5\text{mm}$ ，高度 $h = (50 \sim 70)\text{mm}$ ，打开网络分析仪的 S 参数功能，分别测量 4 个 S 参数 S_{11} 、 S_{12} 、 S_{21} 、 S_{22} 的复数形式，记录在附录 A.2。

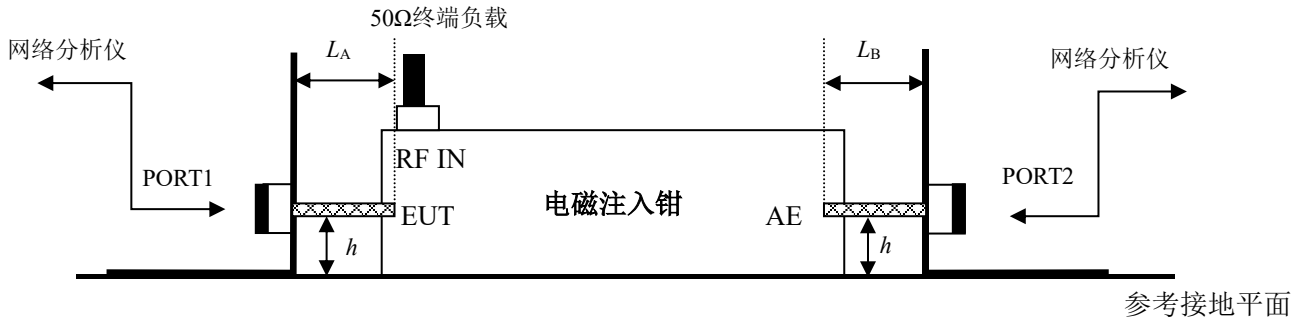


图 1 电磁注入钳阻抗校准示意图

3) S 参数是网络分析仪在 $Z_{\text{ref}}=50\Omega$ 系统中测量得到的，由于校准夹具的阻抗 Z'_{ref} 通常不是 50Ω，为获得电磁注入钳 EUT 端的阻抗，需使用 A、B、C、D 参数进行数据转换，得到一组独立于 Z_{ref} 的转换参数见式（1）～（12）：

注：所有计算 S 参数均为复数形式

$$Z_{\text{ref}}=50\Omega \quad (1)$$

$$A=\frac{(1+S_{11})(1-S_{22})+S_{12}S_{21}}{2S_{21}} \quad (2)$$

$$B=\frac{(1+S_{11})(1+S_{22})-S_{12}S_{21}}{2S_{21}}*Z_{\text{ref}} \quad (3)$$

$$C=\frac{(1-S_{11})(1-S_{22})-S_{12}S_{21}}{2S_{21}}/Z_{\text{ref}} \quad (4)$$

$$D=\frac{(1-S_{11})(1+S_{22})+S_{12}S_{21}}{2S_{21}} \quad (5)$$

以 A、B、C、D 参数为依据，可以计算出一组基于校准夹具特性阻抗 Z'_{ref} 的 S 参数。

$$Z'_{\text{ref}} = 60\Omega \cosh^{-1}\left(\frac{2h}{d}\right) \quad (6)$$

式中： d 为夹具的导体直径（定义为 4mm）；

h 为夹具的导体中心在接地平面上方的高度。

$$B' = B/Z'_{\text{ref}} \quad (7)$$

$$C' = C * Z'_{\text{ref}} \quad (8)$$

$$S'_{11} = \frac{A+B'-C'-D}{A+B'+C'+D} \quad (9)$$

$$S'_{12} = \frac{2(AD-BC)}{A+B'+C'+D} \quad (10)$$

$$S'_{21} = \frac{2}{A+B'+C'+D} \quad (11)$$

$$S'_{22} = \frac{-A+B'-C'+D}{A+B'+C'+D} \quad (12)$$

阻抗 Z_{in} 由式 (13) 给出：

$$Z_{\text{in}} = Z'_{\text{ref}} \frac{1+S'_{11}}{1-S'_{11}} \quad (13)$$

7.2.2.2 去耦系数

- 1) 按照图 1 进行设备连接。
- 2) 电磁注入钳的去耦系数 F_D 由式 (14) 得到，记录在附录 A.3。

$$F_D = 20\lg(|S'_{21}|) \quad (14)$$

7.2.2.3 耦合系数

1) 按照图 2 进行设备连接。将 150Ω/50Ω 适配器（详见附录 E）用金属杆连成对，两端各接入一个 10dB 衰减器并通过电缆连接至网络分析的端口，设置网络分析仪的频率扫频范围与被校电磁注入钳的工作频段相一致，源功率为 0dBm，中频带宽不大于 1kHz，测量模式设置为 S_{21} ，显示格式设置为对数幅度，读取被校 150Ω/50Ω 适配器在不同频率下的插入损耗值 A_1 ，记录在附录 A.4。

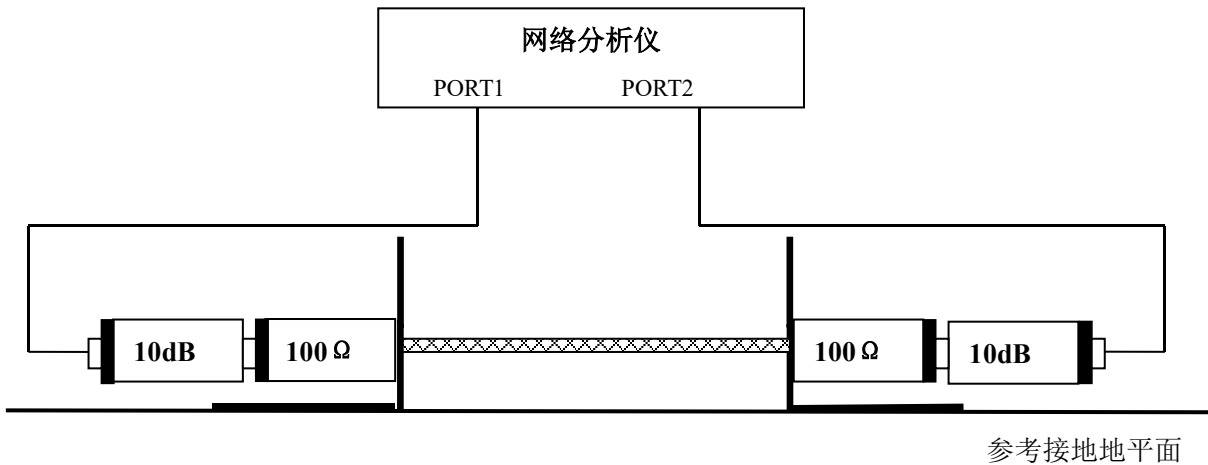


图2 150Ω/50Ω适配器对的归一化校准示意图

2)按照图3所示设备连接。在150Ω/50Ω适配器对中加入电磁注入钳，保持间距 $L_A = L_B = 30\text{mm} \pm 5\text{mm}$ ，高度 $h = (50 \sim 70)\text{mm}$ ，网络分析仪PORT1的电缆连接到电磁注入钳的RF IN端，PORT2的电缆连接至电磁注入钳的EUT端，电磁注入钳的AE端接50Ω终端负载。使用网络分析仪的Mark功能，记录相应频率点下的 S_{21} 测量结果 A_2 在附录A.4。

3)由式(15)计算耦合系数 C ，并将计算结果记录在附录A.4。

$$C = A_2 - A_1 \quad (15)$$

式中：

C —电磁注入钳的耦合系数，单位dB；

A_1 —150Ω/50Ω适配器对的插入损耗，单位dB；

A_2 —电磁注入钳EUT端至RF IN端的插入损耗，单位dB。

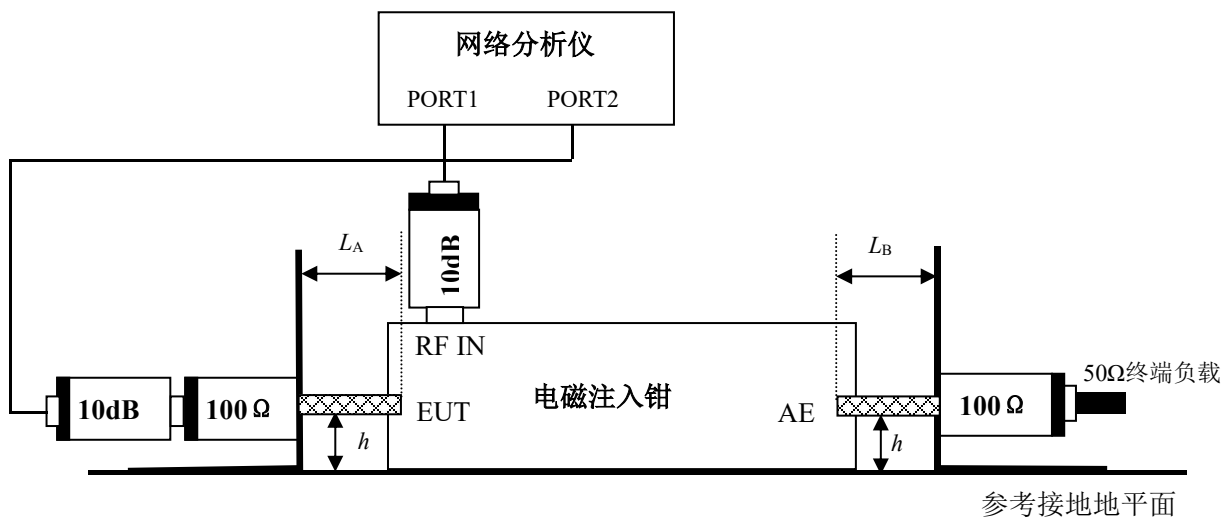
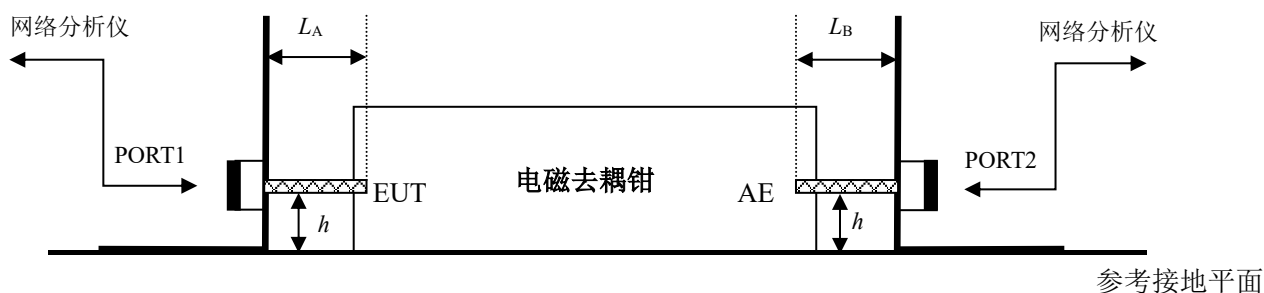


图3 电磁注入钳耦合系数校准示意图

7.2.3 电磁去耦钳的校准

7.2.3.1 阻抗

- 1) 按照图 4 进行设备连接。
- 2) 参考 7.2.2.1 中的步骤 1)~3)，测量电磁去耦钳 EUT 端的阻抗，记录在附录 A.5。



7.2.3.2 去耦系数

- 1) 按照图 4 进行设备连接。
- 2) 参考 7.2.2.2 中的步骤 2)，测量电磁去耦钳的去耦系数，记录在附录 A.6。

7.2.4 共模吸收装置的校准

7.2.4.1 S_{11} 幅值和 S_{21} 幅值

1) 网络分析仪的频率范围设置为 30MHz~200MHz，中频带宽 100Hz，选用自定义的 TRL 校准件对未加载 CMAD 的校准夹具（实物 TRL 校准件，详见附录 F）做 TRL 法校准，即分别做“反射”、“直通”、若干“传输线”的校准步骤（详见附录 G）。

2) 按照图 5 进行设备连接。校准时应在待测 CMAD 结构所确定的高度上进行，传输线（圆柱形金属杆，长度近似等于两个参考平面之间长度和 A、B 部分长度的总和）距离参考接地平面的高度 h 等于 CMAD 铁氧体环中心距离参考接地平面的高度，典型值为 30mm、65mm 和 90mm。参考平面和校准夹具的垂直法兰之间（适配器）的距离 $L_A=L_B$ 应大于 $2h$ 。参考平面和 CMAD 末端之间的距离 D_A 和 D_B 应尽可能的短，不大于 h 。

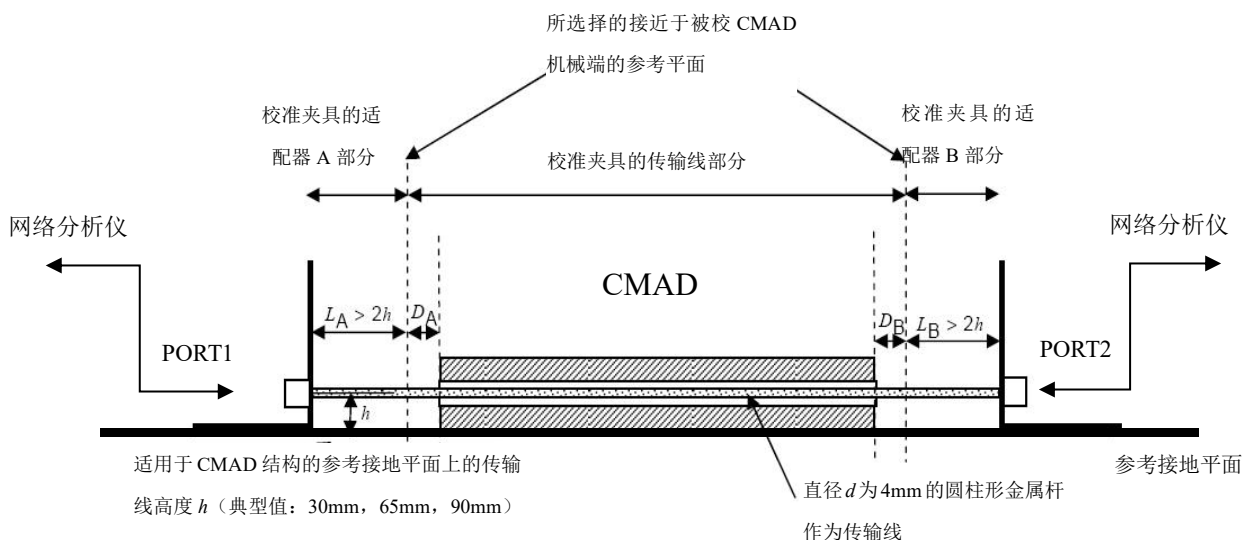


图 5 CMAD 校准示意图

3) 将 CMAD 按照规定距离、高度等要求加载到校准夹具的传输线中测量 S 参数，网络分析仪选择线性幅度模式，通过切换测量菜单下的 S_{11} 和 S_{21} 模式，分别读出 S_{11} 和 S_{21} 的幅值，并分别记录在附录 A.7 和 A.8。

8 校准结果表达

校准结果应在校准证书上反应，校准证书应至少包括以下信息：

- 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

复校时间间隔是由仪器的使用情况、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。

建议复校时间间隔为 1 年。

附录 A

校准原始记录格式

A.1 外观及工作正常性检查

项目	检查结果
外观检查	
工作正常性检查	

A.2 电磁注入钳-阻抗

频率/MHz	S_{11}	S_{12}	S_{21}	S_{22}	标称值/ Ω	实测值/ Ω	不确定度($k=2$)
0.15							
...							
80							

A.3 电磁注入钳-去耦系数

频率/MHz	S_{11}	S_{12}	S_{21}	S_{22}	标称值/dB	实测值/dB	不确定度($k=2$)
0.15							
...							
80							

A.4 电磁注入钳-耦合系数

频率/MHz	A1/dB	A2/dB	标称值/dB	实测值/dB	不确定度($k=2$)
0.15					
...					
80					

A.5 电磁去耦钳-阻抗

频率/MHz	S_{11}	S_{12}	S_{21}	S_{22}	标称值/ Ω	实测值/ Ω	不确定度($k=2$)
0.15							
...							
80							

A.6 电磁去耦钳-去耦系数

频率/MHz	S_{11}	S_{12}	S_{21}	S_{22}	标称值/dB	实测值/dB	不确定度($k=2$)
0.15							
...							
80							

A.7 共模吸收装置 S_{11} 幅值

频率/MHz	标称值	实测值	不确定度($k=2$)
30			
...			
200			

A.8 共模吸收装置 S_{21} 幅值

频率/MHz	标称值	实测值	不确定度($k=2$)
30			
...			
200			

附录 B

校准证书内页格式

B.1 外观及工作正常性检查

项目	检查结果
外观检查	
工作正常性检查	

B.2 电磁注入钳阻抗

频率/MHz	标称值/ Ω	实测值/ Ω	不确定度($k=2$)
0.15			
...			
80			

B.3 电磁注入钳去耦系数

频率/MHz	标称值/dB	实测值/dB	不确定度($k=2$)
0.15			
...			
80			

B.4 电磁注入钳耦合系数

频率/MHz	标称值/dB	实测值/dB	不确定度($k=2$)
0.15			
...			
80			

B.5 电磁去耦钳阻抗

频率/MHz	标称值/ Ω	实测值/ Ω	不确定度($k=2$)
0.15			
...			
80			

B.6 电磁去耦钳去耦系数

频率/MHz	标称值/dB	实测值/dB	不确定度($k=2$)
0.15			
...			
80			

B.7 共模吸收装置 S_{11} 幅值

频率/MHz	下限	实测值	上限	不确定度($k=2$)
30	0.60		0.75	
40	0.57		0.72	
50	0.55		0.70	
60	0.53		0.68	
70	0.51		0.66	
80	0.50		0.65	
90	0.48		0.63	
100	0.47		0.62	
120	0.45		0.60	
140	0.44		0.59	
160	0.42		0.57	
180	0.41		0.56	
200	0.40		0.55	

B.8 共模吸收装置 S_{21} 幅值

频率/MHz	实测值	上限	不确定度($k=2$)
30		0.25	
...		0.25	
200		0.25	

注：校准证书也可附加校准结果曲线图。

附录 C

测量不确定度评定示例

C.1 电磁注入钳耦合系数的测量不确定度评定

C.1.1 测量模型

$$C=A_2-A_1 \quad (\text{C.1})$$

式中:

C —电磁注入钳的耦合系数, dB;

A_1 —150Ω/50Ω适配器对的插入损耗, dB;

A_2 —电磁注入钳 EUT-AE 端的插入损耗, dB。

C.1.2 不确定度来源

不确定度来源如下:

- 1) 网络分析仪传输测量系数幅值测量最大允许误差引入的标准不确定度 u_1 ;
- 2) 150Ω/50Ω适配器对的插入损耗误差引入的标准不确定度 u_2 ;
- 3) 衰减器与电磁注入钳 RF IN 的失配误差引入的标准不确定度 u_3 ;
- 4) 衰减器与 150Ω/50Ω适配器的失配误差引入的标准不确定度 u_4 ;
- 5) 校准布置不理想引入的标准不确定度 u_5 ;
- 6) 测量重复性引入的标准不确定度 u_6 。

C.1.3 标准不确定度分量的评定

- 1) 网络分析仪传输系数幅值测量最大允许误差引入的标准不确定度 u_1

根据网络分析仪的技术说明书, 在 0.15MHz~80MHz 频段, 网络分析仪传输测量最大允许误差为±0.10dB, 假设为均匀分布, $k=\sqrt{3}$, 则 $u_1=0.1\text{dB}/\sqrt{3}=0.057\text{dB}$ 。

- 2) 150Ω/50Ω适配器插入损耗误差引入的标准不确定度 u_2

150Ω/50Ω适配器插入损耗误差与标称值 9.5dB 存在一定程度的偏差, 最大偏差为±0.5dB, 假设为均匀分布, $k=\sqrt{3}$, 则 $u_2=0.5\text{dB}/\sqrt{3}=0.289\text{dB}$ 。

- 3) 衰减器与电磁注入钳 RF IN 端的失配误差引入的标准不确定度 u_3

衰减器与电磁注入钳 RF IN 端的失配误差最大按 0.10dB 计算, 按反正弦分布, 包含因子 $k=\sqrt{2}$, 则 $u_3=0.10\text{dB}/\sqrt{2}=0.071\text{dB}$ 。

- 4) 衰减器与 150Ω/50Ω适配器的失配误差引入的标准不确定度 u_4

衰减器与 150Ω/50Ω适配器的失配误差最大按 0.10dB 计算, 按反正弦分布, 包含因

子 $k=\sqrt{2}$ ，则 $u_4=0.10\text{dB}/\sqrt{2}=0.071\text{dB}$ 。

5) 校准布置不理想引入的标准不确定度分量 u_5

校准布置不理想（参考接地平面、校准夹具传输线在钳开口中心、校准夹具垂直板与钳参考点的距离等）对测量结果的误差影响量最大为 0.05dB ，假设为均匀分布，取 $k=\sqrt{3}$ ，则 $u_5=0.05/\sqrt{3}=0.029\text{dB}$

6) 测量重复性引入的标准不确定度 u_6

对电磁注入钳在 80MHz 频点处的耦合系数，重复测量 10 次，测量重复性引入的标准不确定度分量 $u_5=0.07\text{dB}$ 。

C.1.4 合成标准不确定度

耦合系数测量不确定度主要分量见表 C.1

表C.1耦合系数测量不确定度分量汇总表

不确定度来源	类型	分布	包含因子	灵敏系数 $ c_i $	标准不确定度 $ c_i u_i$
网络分析仪传输系数幅值 测量最大允许误差	B	均匀分布	$\sqrt{3}$	1	0.057
150Ω/50Ω适配器插入损耗误 差	B	均匀分布	$\sqrt{3}$	1	0.289
衰减器与电磁注入钳 RF IN 的失配误差	B	反正弦分布	$\sqrt{2}$	1	0.071
衰减器与 150Ω/50Ω适配器 的失配误差	B	反正弦分布	$\sqrt{2}$	1	0.071
校准布置不理想	B	均匀分布	$\sqrt{3}$	1	0.029
测量重复性	A	/	/	/	0.12

以上各项不确定度分量相互独立不相关，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{c_1^2 u_1^2 + c_2^2 u_2^2 + c_3^2 u_3^2 + c_4^2 u_4^2 + c_5^2 u_5^2 + c_6^2 u_6^2} = 0.34\text{dB}$$

C.1.5 扩展不确定度

包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度：

$$U=k \times u_c=2 \times 0.34=0.68\text{dB}$$

附录 D

电磁注入钳、去耦钳校准夹具

如图 D.1~图 D.3 所示, 用于测量电磁注入钳 (或去耦钳) S 参数的校准夹具在参考接地平面上方具有一根圆柱形金属杆, 圆柱形金属杆的长度 ($L_A + L_B + L_{\text{参考}}$) 的尺寸见图 D.2。电磁注入钳 (或去耦钳) 参考点 (第一个磁芯) 与夹具垂直金属板边缘之间的距离 L_A 和 L_B 应满足 $30 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$, $L_{\text{参考}}$ 与电磁注入钳 (或去耦钳) 的长度一致。圆柱形金属杆的直径 d 为 4 mm , 高度 h 与电磁注入钳开口的中心位置保持一致, 典型值为 $50 \text{ mm} \sim 70 \text{ mm}$ 。

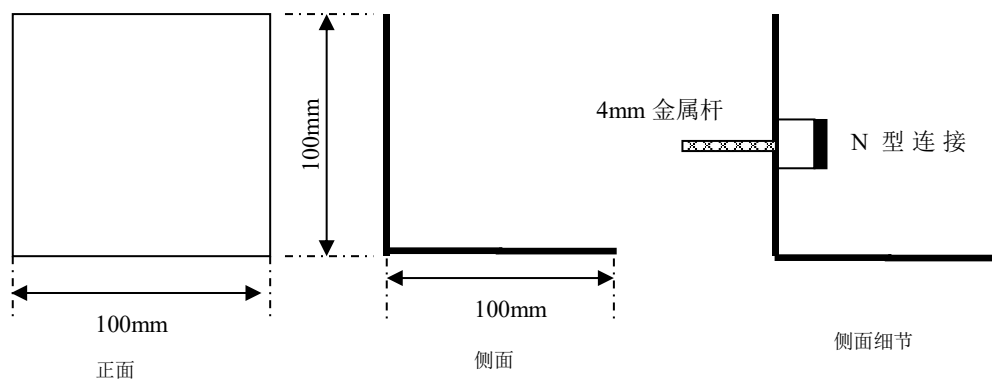


图 D.1 参考平面尺寸

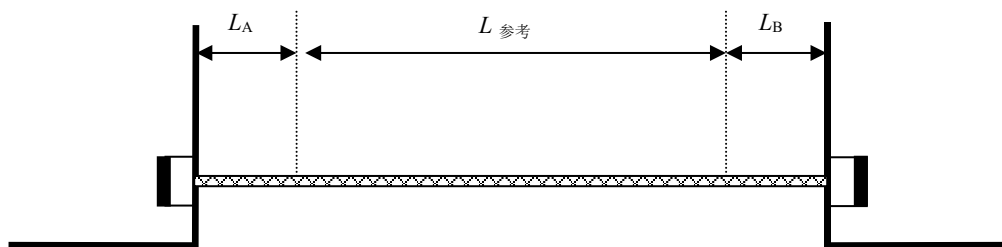


图 D.2 校准夹具

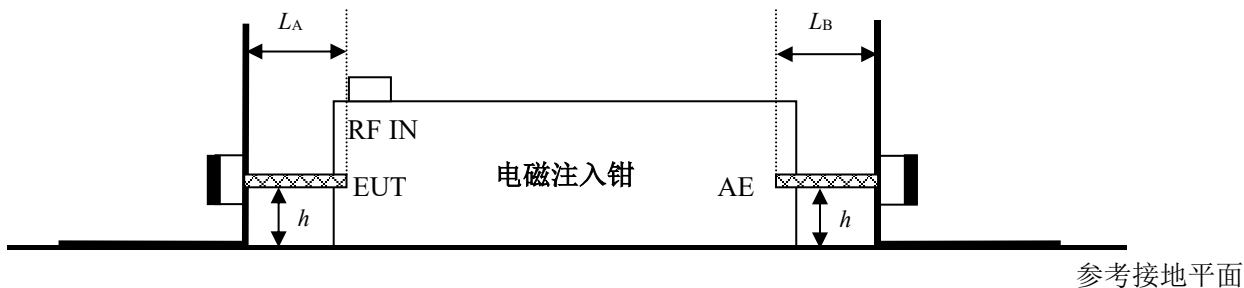
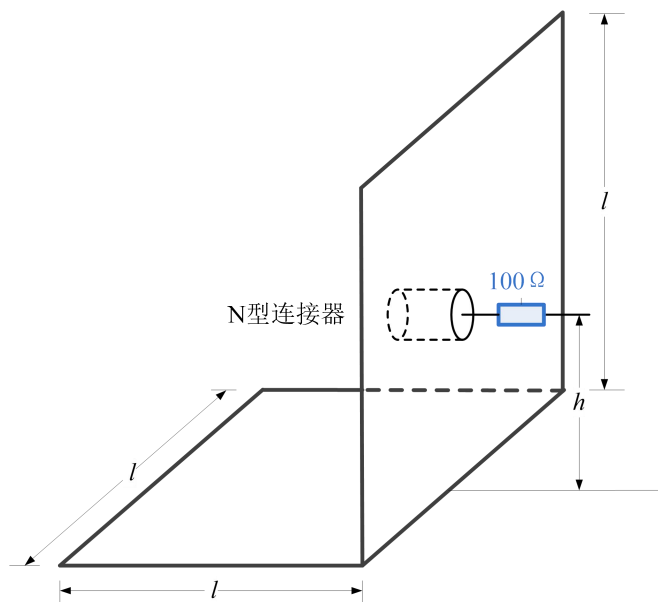
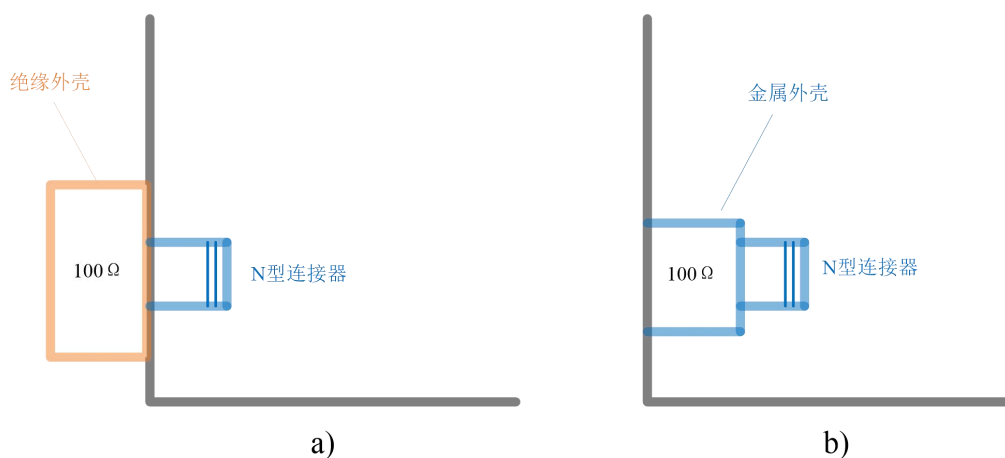


图 D.3 加入被测电磁注入钳后的校准夹具

附录 E

150 Ω /50 Ω 适配器的机械结构

150 Ω /50 Ω 适配器的形状呈现立体的“L”型，由两个边长为 l 的正方形的金属平面垂直拼接而成，机械结构如图E.1所示，材质一般为铜或铝。同轴连接器（推荐N型连接器）直接或间接固定在垂直平面上，其内导体连接100 Ω 无感电阻后，再连接4mm插头/插座，外导体则与金属平面相连，4mm插头的中心与水平面的距离为 h 。如图E.2所示，N型连接器与无感电阻可以在垂直面的异侧，也可以在同侧，两者在电阻的封装形式上有所区别。金属平面的尺寸由被校耦合去耦网络共模点与参考接地平面的距离 h 决定。当 $h=30\text{mm}$ 时， l 为100mm，当 h 大于30mm且不大于100mm时， l 为150mm。

图 E.1 150 Ω /50 Ω 适配器立体示意图图 E.2 150 Ω /50 Ω 适配器侧视图

附录 F

CMAD 校准夹具

CMAD 校准夹具（实物 TRL 校准件）是基于 TRL 校准法和被测对象定义的一套直通、反射、传输线标准，即 TRL 校准件。由于 TRL 校准件的定义基于被测对象（严格说是被测对象的校准夹具），现实中很少有通用的 TRL 校准件，一般要求用户根据所用校准夹具的材料、机械结构、物理尺寸及工作频率来设计制造出相应的 TRL 校准件。

1) 直通标准件

电气长度为0时，无损耗，无反射，传输系数为1；电气长度不为0时，直通标准件的特性阻抗必须和传输线标准件相同，无需知道损耗。如果用作设为参考测量面，需知道电气长度具体值，且群时延设定为0的话，参考测量面位于直通标准件的中间。

2) 反射标准件

反射标准为高反射器件（开路），反射系数的相位必须在正负90°以内且近似为1，两端口的反射标准必须具备好的一致性，不需知道具体的幅度特性，相位特性必须在1/4波长内。

3) 传输线标准件

传输线的特性阻抗作为测量时的参考阻抗，校准系统阻抗的定义和传输线特性阻抗一致。传输线和直通之间的插入相位差值建议在20°~160°之间(或-160°~-20°)。如果相位差值接近0°或者180°时，由于正切函数的特性，容易造成相位模糊，最优的相位差值一般取1/4波长或90°。标准件传输线Line和直通件Through的长度差不能等于中心频率半波长的整数倍，以避免奇异点的出现，即： $\Delta\varphi \neq n \times \frac{\lambda}{2}$ 。因此适用频率范围会受到限制，

即：终止频率 f_{STOP} 和起始频率 f_{START} 的最大比值为8:1。其中： $f_{START} = \frac{1}{360^\circ} \times$

$\frac{c(\text{光速})}{l_{line}}(20^\circ + n * 180^\circ)$ ， $f_{STOP} = \frac{1}{360^\circ} \times \frac{c(\text{光速})}{l_{line}}(160^\circ + n * 180^\circ)$ 。当工作频率范围大于8:1时，即频率跨度与起始频率比值大于8时，可通过增加校准标准件来扩展校准频率范围，如传输线Line2的长度较传输线Line1短，可以设置 $Line2 = 2 \times Line1 / 3$ ，从而实现频率扩展至高频。对于扫描频率低于较长的传输线Line所对应的20°限制值，可以采用匹配件Match进行TRM校准，实现低频扩展。

典型CMAD校准夹具见图F.1，包含两个4mm转N型连接器的垂直法兰、绝缘材料定位件（用于固定传输线使其尽可能位于CMAD两个铁氧体半圆环的中间）、直通件或直

通连接器（用于连接两根反射标准形成直通标准）、两根反射件（直径4mm的圆柱形金属杆）、传输线（直径4mm的圆柱形金属杆，可以有多根不同长度以覆盖更宽的频率范围）。

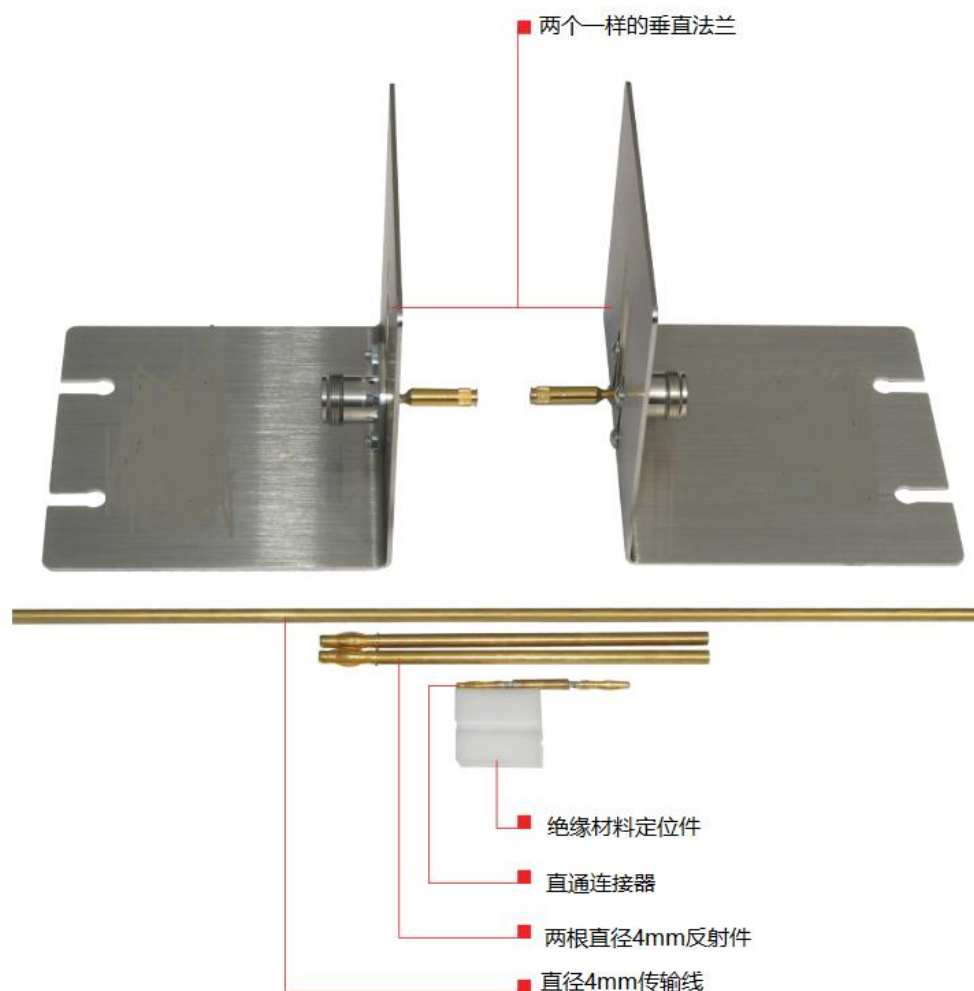


图 F.1 典型 CMAD 校准夹具实物图

附录 G

TRL 校准法

TRL 校准法是网络分析仪常见的一种校准方法,理论上相对于 SOLT 校准法(短路—开路—负载—直通)具有更高的精度,尤其适合非同轴环境的夹具测量,在精度要求高且校准件与被测对象连接类型不同时推荐使用 TRL 校准法。传统 SOLT 校准,通过测量 1 个传输标准件和 3 个反射标准件来决定 12 项误差模型;而 TRL 校准是通过测量 2 个传输标准件和 1 个反射标准件来决定 10 项误差模型或者 8 项误差模型,取决于所用网络分析仪的接收机结构。TRL 校准件不需要像 SOLT 校准件进行完整或精确的定义,只需建立模型进行三种简单的连接校准,就可以把误差源完整的表征出来。对于 TRL 校准,不需要已知校准平面外部的适配器部分和适配器端口的性能,更确切地说,在校准程序中已包含这些性能测量,并通过 TRL 校准进行适当的补偿。

使用 TRL 校准法测量 CMAD 的 S 参数时,传输线部分的特征阻抗和参考长度应准确地获知,网络分析仪的固件或外部修正计算所使用的校准数据将会用到该数据。传输线部分的参考长度确定了 TRL 校准的频率范围。这种频率限制源于 TRL 校准法中使用的数学程序。在此程序中,某些频率点会出现除数为零(或者非常小的值)的情形,应避免这种情况。

1) “反射”(端口 A): 测量适配器部分 S_{11} 的复数值,端口 A 的适配器没有任何其他连接(模拟开路),如图 G.1 所示。

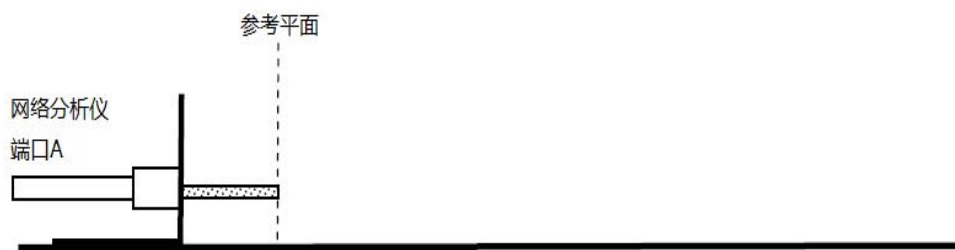


图 G.1 “反射端口 A” 的校准配置

2) “反射”(端口 B): 测量适配器部分 S_{22} 的复数值,端口 B 的适配器没有任何其他连接(模拟开路),如图 G.2 所示。



图 G.2 “反射端口 B” 的校准配置

3) “直通”测量两个适配器直接连接在一起(中间没有传输线部分)时的 S_{11} 、 S_{12} 、 S_{21} 和 S_{22} 的复数值, 如图 G.3 所示。

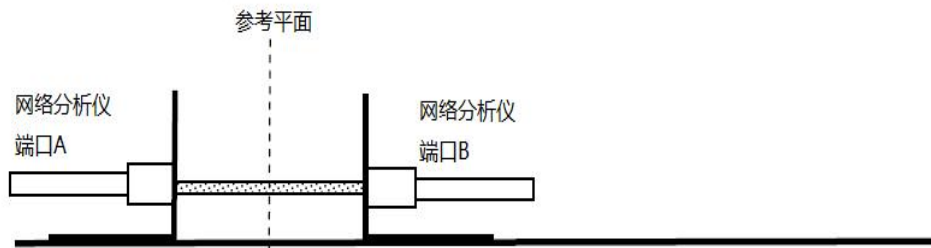


图 G.3 “直通”的校准配置

4) “传输线”：测量引入传输线部分后 S_{11} 、 S_{12} 、 S_{21} 和 S_{22} 的复数值, 如图 G.4 所示。



图 G.4 “传输线”的校准配置

江苏省地方计量技术规范
电磁注入钳校准规范
JJF(苏)282—2024
江苏省市场监督管理局发布

*

江苏省计量协会印刷
版权所有不得翻印

*

开本 880 mm×1230 mm 16 开本
2024 年 12 月 印刷