

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 2079—2023

射频传导抗扰度耦合/去耦网络 校准规范

Calibration Specification for Coupling/Decoupling Networks of
Conducted Disturbances Induced by Radio-Frequency Fields Testing

2023-10-12 发布

2024-04-12 实施

国家市场监督管理总局 发布

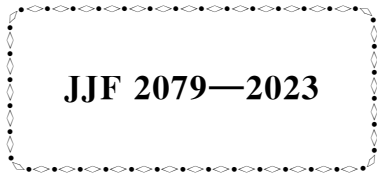
射频传导抗扰度耦合/去耦网络

校准规范

Calibration Specification for Coupling/Decoupling

Networks of Conducted Disturbances

Induced by Radio-Frequency Fields Testing



JJF 2079—2023

归口单位：全国无线电计量技术委员会

主要起草单位：上海市计量测试技术研究院

江苏省计量科学研究院

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

本规范主要起草人：

詹志强（上海市计量测试技术研究院）

赵品彰（江苏省计量科学研究院）

李 渤（中国计量科学研究院）

参加起草人：

滕玉龙（上海市计量测试技术研究院）

李 林（江苏省计量科学研究院）

林浩宇（中国计量科学研究院）

周 雷（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)
4 概述	(1)
5 计量特性	(2)
5.1 受试设备 (EUT) 端共模阻抗模值	(2)
5.2 150 Ω /50 Ω 适配器对插入损耗	(2)
5.3 耦合系数	(2)
5.4 去耦衰减	(2)
6 校准条件	(3)
6.1 环境条件	(3)
6.2 校准用设备	(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)
8 校准结果表达	(8)
9 复校时间间隔	(9)
附录 A 原始记录内页格式	(10)
附录 B 校准证书内页格式	(14)
附录 C 主要项目校准不确定度评定示例	(16)
附录 D 150 Ω /50 Ω 适配器、共模转换适配器、同轴-共模适配器结构示意图	(21)
附录 E 受试设备 (EUT) 端共模阻抗模值校准方法 2	(23)

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编制工作的基础性系列规范。

本规范的制定参考了 GB/T 17626.6—2017《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 17626.6—2017 等同采用 IEC 61000-4-6：2013。

本规范为首次发布。

射频传导抗扰度耦合/去耦网络 校准规范

1 范围

本规范适用于电磁兼容领域射频场感应的传导骚扰抗扰度试验中所用耦合/去耦网络（0.15 MHz~230 MHz）的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

GB/T 17626.6—2017 电磁兼容 试验和测量技术 射频场感应的传导骚扰抗扰度

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 耦合系数 coupling coefficient

在耦合/去耦网络的受试设备（EUT）端口所获得的开路电压与施加到射频输入（RF IN）端上的开路电压的比值。

3.2 去耦衰减 decoupling attenuation

在耦合/去耦网络的辅助设备（AE）端口所获得的开路电压与施加到射频输入（RF IN）端上的开路电压的比值。

4 概述

射频传导抗扰度耦合/去耦网络（以下简称耦合/去耦网络）的作用是将射频骚扰信号耦合到受试设备所连接的各种电缆上，并防止骚扰信号影响非受试装置、设备和系统。它具有3个端口：射频输入（RF IN）端、受试设备（EUT）端和辅助设备（AE）端。通常由金属外壳、绝缘部件、电子元器件（电源或信号端子、射频连接器、电阻、电感、电容）等部分构成，其结构如图1所示。

类型主要包括：用于屏蔽电缆的CDN-S型耦合/去耦网络、用于非屏蔽电缆的CDN-M型耦合/去耦网络、用于非屏蔽平衡线的CDN-T型耦合/去耦网络等。

图2给出了CDN-M3型耦合/去耦网络的简化电路图。

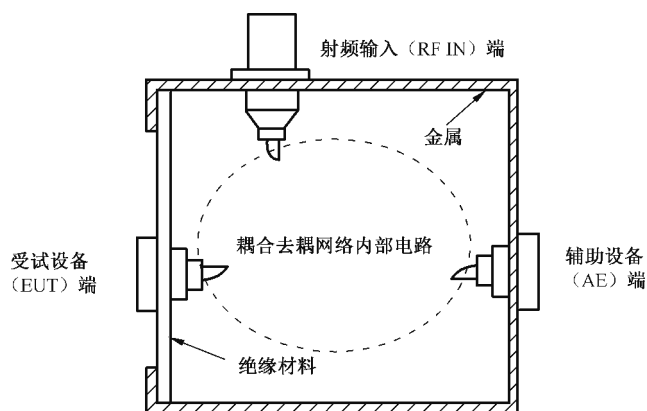


图 1 耦合/去耦网络结构示意图

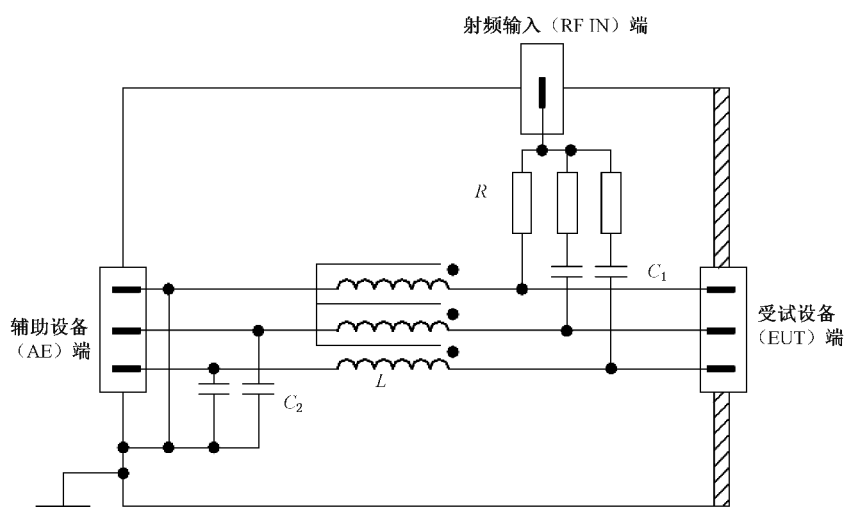


图 2 CDN-M3 型耦合/去耦网络的简化电路图

5 计量特性

5.1 受试设备 (EUT) 端共模阻抗模值

阻抗模值参考值: 150Ω 。

允许误差范围: $(-20 \sim 20) \Omega$, $(0.15 \text{ MHz} \leq f \leq 24 \text{ MHz})$;

$(-45 \sim 60) \Omega$, $(24 \text{ MHz} < f \leq 80 \text{ MHz})$;

$(-60 \sim 60) \Omega$, $(80 \text{ MHz} < f \leq 230 \text{ MHz})$ 。

5.2 $150 \Omega/50 \Omega$ 适配器对插入损耗

标称值: 9.5 dB ;

最大允许误差: $\pm 0.5 \text{ dB}$ 。

5.3 耦合系数

$(0 \pm 1.5) \text{ dB}$ 。

5.4 去耦衰减

$\geq 20 \text{ dB}$ 。

注: 以上技术指标不作合格性判别, 仅提供参考。

6 校准条件

6.1 环境条件

环境温度： $(23\pm 5)^{\circ}\text{C}$ ；

相对湿度： $\leq 80\%$ ；

电源电压及频率： $(220\pm 11)\text{ V}$ ， $(50\pm 1)\text{ Hz}$ ；

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 校准用设备

6.2.1 网络分析仪

频率范围： $0.15\text{ MHz}\sim 230\text{ MHz}$ ；

阻抗测量最大允许误差： $\pm 5\%$ ；

传输系数幅值测量最大允许误差： $\pm(0.01\sim 0.4)\text{ dB}$ 。

6.2.2 同轴精密负载

频率范围： $0.15\text{ MHz}\sim 230\text{ MHz}$ ；

特征阻抗： $50\ \Omega$ ；

电压驻波比： ≤ 1.1 。

6.2.3 标准 $150\ \Omega/50\ \Omega$ 适配器对

频率范围： $0.15\text{ MHz}\sim 230\text{ MHz}$ ；

标称插入损耗： 9.5 dB ；

最大允许误差： $\pm 0.20\text{ dB}$ ；

单只 $150\ \Omega/50\ \Omega$ 适配器一端通常为 4 mm 接头，另一端为同轴接头，示意图见附录 D。

6.2.4 共模转换适配器

数量：两只；

用于确定耦合/去耦网络的共模点，一端为 4 mm 接头，另外一端与耦合/去耦网络的 EUT 端匹配，示意图见附录 D。

6.2.5 同轴-共模适配器

数量：两只；

用于确定阻抗参考面，一侧为连接共模点的 4 mm 接头，另一侧为同轴接头，具体结构描述见附录 D。

6.2.6 同轴固定衰减器

数量：两只；

频率范围： $0.15\text{ MHz}\sim 230\text{ MHz}$ ；

衰减： 10 dB ；

电压驻波比： ≤ 1.1 ；

最大允许输入功率： 0 dBm 。

6.2.7 游标卡尺

测量范围： $(0\sim 200)\text{ mm}$ ；

最大允许误差： $\pm 0.1 \text{ mm}$ 。

6.2.8 参考接地平面

为平整的金属平板，材质为铜、黄铜或者铝；参考接地平面的尺寸应超过置于平面上器件所有边的几何投影尺寸至少 0.2 m 。

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	受试设备 (EUT) 端共模阻抗模值
2	$150 \Omega/50 \Omega$ 适配器对插入损耗
3	耦合系数
4	去耦衰减

7.2 校准方法

7.2.1 外观及工作正常性检查

被校耦合/去耦网络不应有影响正常工作的机械损伤，各按键开关、连接器应安装牢固、通断分明、转换清晰、定位准确，底部的金属面应足够干净和平整、无氧化物。检查完成后将结果记录于表 A.1 中。

校准时注意事项：

(1) 各部件的导电部分应充分接触，必要时可以使用螺栓或者导电胶带固定于参考接地平面上；

(2) 参考接地平面应符合 6.2.8 的要求。

7.2.2 受试设备 (EUT) 端共模阻抗模值

7.2.2.1 仪器连接如图 3 所示，将一对同轴-共模适配器对称地放置于参考接地平面上，并用硬质的校准专用线连接，射频电缆连至左侧的同轴-共模适配器。硬质金属连接线与参考接地平面之间的距离 h 由被校耦合/去耦网络 EUT 端口的高度决定， h 的取值范围为 $30 \text{ mm} \sim 100 \text{ mm}$ 。

7.2.2.2 使用游标卡尺测量右侧的同轴-共模适配器端面与左侧同轴-共模适配器之间的距离，记录为 d 。右侧的同轴-共模适配器端面定义为阻抗参考面，右侧端口的同轴连接器内导体端面定义为自校准端面，使用游标卡尺测量此两端面间距离，记录为 l ，并将 l 记录于表 A.2 对应的表格中。

7.2.2.3 设置网络分析仪源功率为 0 dBm ，中频带宽不大于 1 kHz ，频率范围与被校耦合/去耦网络的工作频段相一致。

7.2.2.4 使用开路器 (OPEN)、短路器 (SHORT)、匹配负载 (MATCH) 对右侧端口进行单端口自校准。

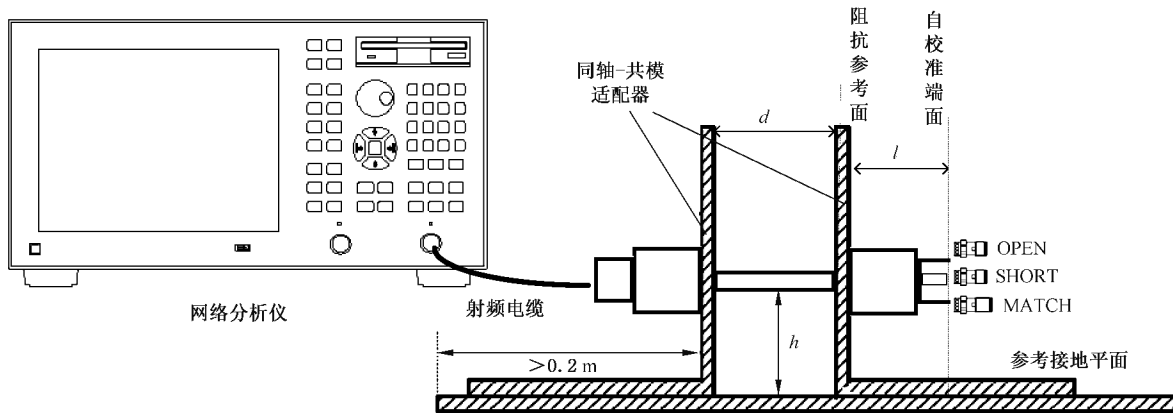


图3 网络分析仪自校准连接布置示意图

7.2.2.5 仪器的连接布置如图4所示，移走右侧的同轴-共模适配器，其他部件的位置保持不变。左侧的同轴-共模适配器连接共模转换适配器后与被校耦合/去耦网络的EUT端相连。保持左侧同轴-共模适配器与CDN端面之间的距离为7.2.2.2中的 d 值（偏差 $\leq \pm 1$ mm内）。耦合/去耦网络的射频输入端连接同轴精密负载。

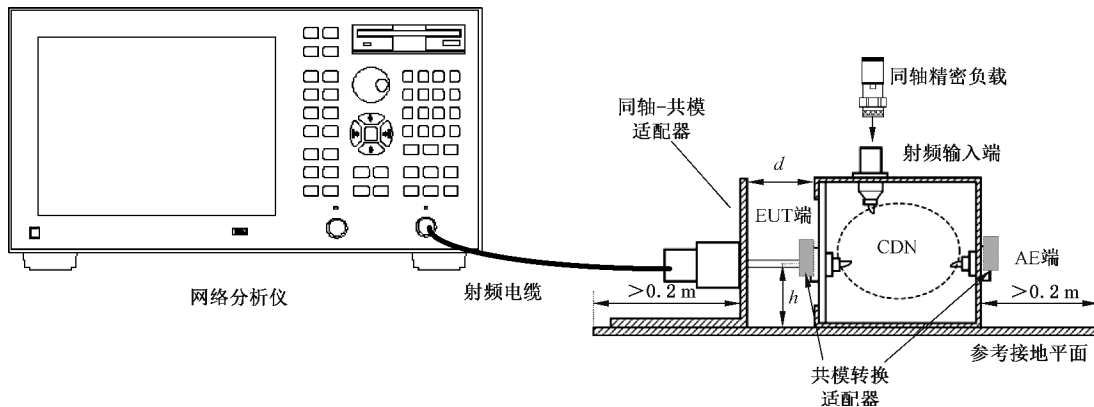


图4 受试设备（EUT）端共模阻抗模值的校准连接布置示意图

7.2.2.6 如果网络分析仪具备电长度补偿技术功能，则将7.2.2.2中的测得的 l 值和导线的介电常数输入至网络分析仪。网络分析仪的阻抗测量结果显示类型设为“ $|Z| - \theta$ ”或“ $R + jX$ ”格式，设定网络分析仪的标记（marker）频率，分别在耦合/去耦网络的AE端相对参考接地平面开路 and 短路两种情况下，在网络分析仪上读出阻抗模值 $|Z_{ce}|$ ，如果显示结果是 $R + jX$ 格式，则需通过公式（1）来计算共模阻抗模值 $|Z_{ce}|$ 。

$$|Z_{ce}| = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (1)$$

式中：

$|Z_{ce}|$ ——共模阻抗模值， Ω ；

R ——网络分析仪显示阻抗实部， Ω ；

X ——网络分析仪显示阻抗虚部， Ω 。

将 $|Z_{ce}|$ 值或 $R + jX$ 值记录于A.2对应的表格中，此时的 $|Z_{ce}|$ 值就是受试设备（EUT）端共模阻抗模值。

7.2.2.7 如果网络分析仪不具备电长度补偿功能，则将网络分析仪的阻抗测量结果显

示类型设为“ $R+jX$ ”格式，设定网络分析仪的标记（marker）频率，分别在耦合/去耦网络的 AE 端相对参考接地平面开路 and 短路两种情况下，在网络分析仪上读出 $R+jX$ ，记为 Z_i ，使用公式（2）计算耦合/去耦网络受试设备（EUT）端共模阻抗模值 $|Z_{ce}|$ 。

$$|Z_{ce}| = \left| Z_0 \frac{Z_i - jZ_0 \tan(\beta l)}{Z_0 - jZ_i \tan(\beta l)} \right| \quad (2)$$

式中：

Z_{ce} ——耦合/去耦网络受试设备（EUT）端共模阻抗值， Ω ；

Z_0 ——长度为 l 的线缆标称阻抗值， 50Ω ；

Z_i ——网络分析仪测量得到的共模阻抗值， Ω ；

l ——线缆长度，m；

β ——相位常数， $1/m$ 。

此处：

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3)$$

式中：

λ ——信号在线缆中的波长，m。

此处：

$$\lambda = \frac{v_p}{f} \quad (4)$$

式中：

f ——信号频率，Hz；

v_p ——电磁波在长度为 l 的线缆中的相速度，m/s。

此处：

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (5)$$

式中：

c ——电磁波在自由空间的传播速度，m/s；

ϵ_r ——长度为 l 的线缆中介质的介电常数，通常为 2。

将公式（5）代入到公式（4）、将公式（4）代入到公式（3）、将公式（3）代入到公式（2）得到公式（6）：

$$|Z_{ce}| = \left| Z_0 \frac{Z_i - jZ_0 \tan\left(2\pi \frac{f}{c} \sqrt{\epsilon_r} l\right)}{Z_0 - jZ_i \tan\left(2\pi \frac{f}{c} \sqrt{\epsilon_r} l\right)} \right| \quad (6)$$

按照公式（6）计算共模阻抗值 $|Z_{ce}|$ ，并将计算结果记录于 A.2 对应的表格中。

7.2.2.8 分别在 AE 端开路 and 短路的情况下，测量共模阻抗值。如果耦合/去耦网络具有线路切换测量功能，则将其切换至其他功能状态，重复步骤 7.2.2.6 或 7.2.2.7，直至完成所有功能状态下的 EUT 端共模阻抗值的校准。

$$C = A_2 - A_1 \quad (7)$$

式中：

C ——耦合/去耦网络的耦合系数，dB；

A_1 ——标准 $150 \Omega/50 \Omega$ 适配器对的插入损耗，dB；

A_2 ——网络分析仪读数值，dB。

将计算结果记录于 A.4 中。

7.2.4.3 如果耦合/去耦网络具有线路切换测量功能，则将其切换至其他功能状态，重复步骤 7.2.4.2，直至完成所有功能状态下的耦合系数校准。

7.2.5 去耦衰减

7.2.5.1 仪器的连接布置如图 7 所示，网络分析仪的源端与耦合/去耦网络的射频输入端相连。

7.2.5.2 设定测试频率，分别在耦合/去耦网络的 EUT 端相对参考接地平面开路 and 短路两种情况下，读出网络分析仪在不同频率下的传输测量结果，记为 A_3 (dB)，利用下列公式计算得到耦合/去耦网络的去耦衰减 D 。

$$D = A_3 - A_1 \quad (8)$$

式中：

D ——耦合/去耦网络的去耦衰减，dB；

A_1 ——标准 $150 \Omega/50 \Omega$ 适配器对的插入损耗，dB；

A_3 ——网络分析仪读数值，dB。

将计算结果记录于 A.5 中。

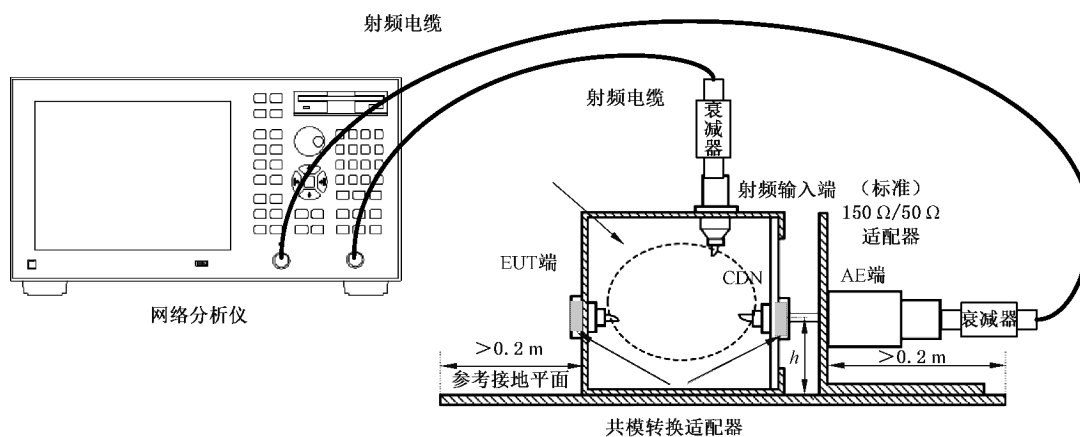


图 7 去耦衰减校准连接布置示意图

7.2.5.3 如果耦合/去耦网络具有线路切换测量功能，则将其切换至其他功能状态，重复步骤 7.2.5.2，直至完成所有功能状态下的去耦衰减校准。

8 校准结果表达

射频传导抗扰度耦合/去耦网络校准后，出具校准证书。校准证书至少应包含以下信息：

- 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或应用有关时，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

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

原始记录内页格式

A.1 外观及工作正常性检查

项目	检查结果

A.2 受试设备（EUT）端共模阻抗模值

A.2.1 网络分析仪具有电长度补偿功能

A.2.1.1 与参考面间距离 l

参数类型	实测值 mm	不确定度 $U(k=2)$
端面间距离		

A.2.1.2 受试设备（EUT）端共模阻抗（AE 端开路时）

功能状态	频率 MHz	$R+jX$	$ Z_{ce} $	不确定度 $U(k=2)$

A.2.1.3 受试设备（EUT）端共模阻抗（AE 端短路时）

功能状态	频率 MHz	$R+jX$	$ Z_{ce} $	不确定度 $U(k=2)$

A. 2.2 网络分析仪不具有电长度补偿功能

A. 2.2.1 与参考面间距离 l

参数类型	实测值 mm	不确定度 $U (k=2)$
距离 l		

A. 2.2.2 受试设备 (EUT) 端共模阻抗 (AE 端开路时)

功能状态	频率 MHz	$Z_i = R + jX$	$ Z_{ce} = \left Z_0 \frac{Z_i - jZ_0 \tan\left(2\pi \frac{f}{c} \sqrt{\epsilon_r} l\right)}{Z_0 - jZ_i \tan\left(2\pi \frac{f}{c} \sqrt{\epsilon_r} l\right)} \right $	不确定度 $U (k=2)$

A. 2.2.3 受试设备 (EUT) 端共模阻抗 (AE 端短路时)

功能状态	频率 MHz	$Z_i = R + jX$	$ Z_{ce} = \left Z_0 \frac{Z_i - jZ_0 \tan\left(2\pi \frac{f}{c} \sqrt{\epsilon_r} l\right)}{Z_0 - jZ_i \tan\left(2\pi \frac{f}{c} \sqrt{\epsilon_r} l\right)} \right $	不确定度 $U (k=2)$

A. 3 150 Ω /50 Ω 适配器对插入损耗

频率 MHz	实测值 dB	不确定度 $U (k=2)$

A.4 耦合系数

A.4.1 AE 端开路时

功能状态	频率 MHz	A_1 dB	A_2 dB	插入损耗 dB ($C=A_2-A_1$)	不确定度 $U(k=2)$

A.4.2 AE 端短路时

功能状态	频率 MHz	A_1 dB	A_2 dB	插入损耗 dB ($C=A_2-A_1$)	不确定度 $U(k=2)$

A.5 去耦衰减

A.5.1 EUT 端开路时

功能状态	频率 MHz	A_1 dB	A_3 dB	去耦衰减 dB ($D=A_3-A_1$)	不确定度 $U(k=2)$

A.5.2 EUT 端短路时

功能状态	频率 MHz	A_1 dB	A_3 dB	去耦衰减 dB ($D=A_3-A_1$)	不确定度 U ($k=2$)

附录 B

校准证书内页格式

B.1 受试设备 (EUT) 端共模阻抗

B.1.1 受试设备 (EUT) 端共模阻抗 (AE 端开路时)

功能状态	频率 MHz	实测值 Ω	不确定度 $U (k=2)$

B.1.2 受试设备 (EUT) 端共模阻抗 (AE 端短路时)

功能状态	频率 MHz	实测值 Ω	不确定度 $U (k=2)$

B.2 150 Ω /50 Ω 适配器对插入损耗

频率 MHz	实测值 dB	不确定度 $U (k=2)$

B.3 耦合系数

B.3.1 AE 端开路时

功能状态	频率 MHz	实测值 dB	不确定度 $U(k=2)$

B.3.2 AE 端短路时

功能状态	频率 MHz	实测值 dB	不确定度 $U(k=2)$

B.4 去耦衰减

B.4.1 EUT 端开路时

功能状态	频率 MHz	实测值 dB	不确定度 $U(k=2)$

B.4.2 EUT 端短路时

功能状态	频率 MHz	实测值 dB	不确定度 $U(k=2)$

附录 C

主要项目校准不确定度评定示例

C.1 受试设备 (EUT) 端共模阻抗模值的校准不确定度评定

C.1.1 测量模型

$$Z_{ce} = Z_0 \frac{Z_i - jZ_0 \tan\left(2\pi \frac{f}{c} \sqrt{\epsilon_r} l\right)}{Z_0 - jZ_i \tan\left(2\pi \frac{f}{c} \sqrt{\epsilon_r} l\right)} \quad (\text{C.1})$$

式中:

Z_{ce} ——共模阻抗值, Ω ;

Z_0 ——长度为 l 的线缆标称阻抗值, 此处为 50Ω ;

Z_i ——网络分析仪测量得到的共模阻抗值, Ω ;

l ——线缆长度, m;

f ——信号频率, Hz;

c ——电磁波在自由空间的传播速度, 3×10^8 m/s;

ϵ_r ——长度为 l 的线缆中介质的介电常数, 通常为 2。

对公式 (C.1) 求偏导, 令

$$A = j \tan\left(2\pi \frac{f}{c} \sqrt{\epsilon_r} l\right) \quad (\text{C.2})$$

公式 (C.1) 对 Z_i 求偏导, 得到

$$c_1 = \frac{\partial Z_{ce}}{\partial Z_i} = \frac{Z_0^2(1-A^2)}{(Z_0 - AZ_i)^2} \quad (\text{C.3})$$

公式 (C.1) 对 Z_0 求偏导, 得到

$$c_2 = \frac{\partial Z_{ce}}{\partial Z_0} = A \frac{(-Z_0^2 - Z_i^2 + 2AZ_i Z_0)}{(Z_0 - AZ_i)^2} \quad (\text{C.4})$$

式 (C.1) 对 ϵ_r 求偏导, 得到

$$c_3 = \frac{\partial Z_{ce}}{\partial \epsilon_r} = j \frac{(Z_0 Z_i^2 - Z_0^3)}{(Z_0 - AZ_i)^2} \times \frac{\pi f l}{\cos^2\left(\frac{2\pi f}{c} \sqrt{\epsilon_r} l\right) \times c \sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{C.5})$$

公式 (C.1) 对 l 求偏导数, 得到

$$c_4 = \frac{\partial Z_{ce}}{\partial l} = j \frac{(Z_0 Z_i^2 - Z_0^3)}{(Z_0 - AZ_i)^2} \times \frac{2\pi f \sqrt{\epsilon_r}}{\cos^2\left(\frac{2\pi f}{c} \sqrt{\epsilon_r} l\right) \times c} \quad (\text{C.6})$$

以 230 MHz 频率为例, 即 $f = 2.3 \times 10^8$ Hz, $c = 3 \times 10^8$ m/s。

$Z_i = 119 \Omega - j15 \Omega$, 最大允许误差为 $\pm 5\%$ 。

Z_0 取值为 50Ω , 电缆的驻波系数通常为 1.1, 换算成阻抗的最大允许误差为 $\pm 10\%$ 。

ϵ_r 通常取值为 2，最大允许误差为读数的 $\pm 5\%$ ，即最大允许误差为 ± 0.10 。

l 长度为 $-46.4 \text{ mm} = -0.0464 \text{ m}$ ，考虑长度测量时卡尺测量的角度以及测量位置的影响，取测量结果的最大允许误差为 $\pm 1 \text{ mm}$ 。

由于需要计算的结果为 $|Z_{ce}|$ ，因此，得到 $|c_1|$ 、 $|c_2|$ 、 $|c_3|$ 、 $|c_4|$ 的计算结果为

$$|c_1| = 0.611;$$

$$|c_2| = 1.225;$$

$$|c_3| = 11.57 \Omega;$$

$$|c_4| = 997.3 \Omega/\text{m}。$$

C.1.2 不确定度来源

根据前面分析，不确定度来源如下：

- 1) 网络分析仪阻抗测量最大允许误差引入的标准不确定度 u_1 ；
- 2) 长度为 l 的线缆标称阻抗 Z_0 最大允许误差引入的标准不确定度 u_2 ；
- 3) 长度为 l 的线缆中介质的介电常数最大允许误差引入的标准不确定度 u_3 ；
- 4) 长度 l 值测量误差所引入的标准不确定度 u_4 ；
- 5) 同轴负载阻抗变化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 标准不确定度评定

- 1) 网络分析仪阻抗测量最大允许误差引入的标准不确定度 u_1

在 230 MHz 频率时，阻抗测试量测量共模阻抗值 $Z_i = 119 \Omega - j15 \Omega$ ，得到 $|Z_i|$ 为 119.9Ω ，阻抗测量最大允许误差为 $\pm 5\%$ ，得到 $\Delta |Z_{i1}| = \pm 6.00 \Omega$ ，为均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_1 = 6.00 \Omega / \sqrt{3} \approx 3.46 \Omega$$

- 2) 长度为 l 的线缆标称阻抗 Z_0 最大允许误差引入的标准不确定度 u_2

Z_0 取值为 50Ω ，假设其线缆的驻波系数为 1.1，得到其阻抗范围为 $(45.0 \sim 55.0) \Omega$ ，得到 $\Delta |Z_0| = \pm 5.0 \Omega$ ，为均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_2 = 5.0 \Omega / \sqrt{3} \approx 2.886 \Omega$$

- 3) 长度为 l 的线缆中介质的介电常数最大允许误差引入的标准不确定度 u_3

ϵ_r 通常取值为 2，最大允许误差为读数的 $\pm 5\%$ ，得到 $\Delta \epsilon_r = \pm 0.10$ ，为均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_3 = 0.10 / \sqrt{3} \approx 0.0577$$

- 4) 长度 l 值测量误差所引入的标准不确定度 u_4

考虑长度测量时卡尺测量的角度以及测量位置的影响，取测量结果的最大允许误差为 $\pm 1 \text{ mm}$ ，即 $\Delta l = \pm 1.0 \text{ mm}$ ，为均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_4 = 1.0 \text{ mm} / \sqrt{3} \approx 0.577 \text{ mm} = 5.77 \times 10^{-4} \text{ m}$$

- 5) 同轴负载阻抗变化引入的标准不确定度 u_5

在对耦合/去耦网络的阻抗进行校准时，需要在射频输入端接 50Ω 同轴负载，由于

该负载的阻值无法为理想的 50Ω ，会使阻抗校准结果产生偏差。在 VSWR 小于 1.1 时，在其他条件均不变的情况下采用不同的负载进行试验，得到 $\Delta |Z_{12}| = \pm 0.70 \Omega$ ，为均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，得到：

$$u_5 = 0.70 \Omega / \sqrt{3} \approx 0.404 \Omega$$

6) 测量重复性引入的标准不确定度 u_6

使用网络分析仪测量射频传导抗扰度耦合/去耦网络在频率为 230 MHz 时阻抗共模阻抗模值，重复测量 10 次，经补偿计算后，用贝塞尔公式计算得到单次测量值的实验标准偏差： $s(y) = 0.29 \Omega$ ，即

$$u_6 = 0.29 \Omega$$

C.1.4 合成标准不确定度

1) 标准不确定度分量表

受试设备 (EUT) 端共模阻抗测试标准不确定度分量见表 C.1。

表 C.1 受试设备 (EUT) 端共模阻抗测量标准不确定度分量汇总表

序号	不确定度来源	标准不确定度	分布	灵敏系数 $ c_i $
1	网络分析仪最大允许误差	3.46Ω	均匀分布	0.61
2	长度为 l 的线缆标称阻抗 Z_0 最大允许误差	2.886Ω	均匀分布	1.22
3	长度为 l 的线缆中介质的介电常数最大允许误差	0.057 7	均匀分布	11.57Ω
4	长度 l 值测量误差	$5.77 \times 10^{-4} \text{ m}$	均匀分布	$997.3 \Omega/\text{m}$
5	同轴负载阻抗变化	0.404Ω	均匀分布	1
6	测量重复性	0.29Ω	——	1

2) 合成标准不确定度

以上不确定度分量彼此不相关，则

$$u_c = \sqrt{|c_1|^2 u_1^2 + |c_2|^2 u_2^2 + |c_3|^2 u_3^2 + |c_4|^2 u_4^2 + |c_5|^2 u_5^2 + |c_6|^2 u_6^2} = 4.24 \Omega$$

C.1.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，得到

$$U = 2 u_c \approx 8.5 \Omega$$

C.2 耦合系数的校准不确定度评定

C.2.1 测量模型

$$C = A_2 - A_1 \quad (\text{C.7})$$

式中：

C ——耦合/去耦网络耦合系数，dB；

A_1 ——标准 $150 \Omega/50 \Omega$ 适配器对的插入损耗，dB；

A_2 ——网络分析仪插入损耗测试值，dB。

对 (C.7) 求偏导数：对 A_2 求偏导数，得到 $c_1=1$ ；对 A_1 求偏导数，得到 $c_2=-1$ 。

C.2.2 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最大允许误差引入的标准不确定度 u_1 ；
- 2) 标准 $150\ \Omega/50\ \Omega$ 适配器对插入损耗误差引入的标准不确定度 u_2 ；
- 3) 衰减器与耦合/去耦网络的射频输入端的失配引入的标准不确定度 u_3 ；
- 4) 衰减器与 $150\ \Omega/50\ \Omega$ 转换器的 $50\ \Omega$ 端的失配引入的标准不确定度 u_4 ；
- 5) 测量重复性引入的标准不确定度 u_5 。

C.2.3 标准不确定度的评定

- 1) 网络分析仪传输幅度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 $0.15\ \text{MHz}\sim 300\ \text{MHz}$ 频段，在测量 $10\ \text{dB}$ 插入损耗时，网络分析仪传输幅度测量的最大允许误差为 $\pm 0.10\ \text{dB}$ ，为均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_1 = 0.10\ \text{dB}/\sqrt{3} \approx 0.0577\ \text{dB}$$

- 2) 标准 $150\ \Omega/50\ \Omega$ 适配器对插入损耗误差引入的标准不确定度 u_2

标准 $150\ \Omega/50\ \Omega$ 适配器对插入损耗误差与标称的 $9.5\ \text{dB}$ 存在一定程度的偏差，经实测最大偏差为 $\pm 0.20\ \text{dB}$ ，为均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则

$$u_2 = 0.20\ \text{dB}/\sqrt{3} \approx 0.115\ \text{dB}$$

- 3) 衰减器与耦合/去耦网络的射频输入端的失配引入的标准不确定度 u_3

衰减器输出端的电压驻波比 ≤ 1.1 ，则其反射系数的模值 $|\Gamma_1|$ 为

$$|\Gamma_1| = 0.048$$

耦合/去耦网络的射频输入端的电压驻波比小于 1.3 ；则其反射系数的模值 $|\Gamma_{\text{RF}}|$ 为

$$|\Gamma_{\text{RF}}| = 0.130$$

失配误差极限值用下式估计：

$$\Delta_1 = \pm 8.68 |\Gamma_1| |\Gamma_{\text{RF}}| \quad (\text{C.8})$$

式中：

Δ_1 ——失配误差极限值，dB；

$|\Gamma_1|$ ——衰减器输出端反射系数；

$|\Gamma_{\text{RF}}|$ ——耦合/去耦网络的射频输入端反射系数。

得到

$$\Delta_1 = \pm 0.054\ \text{dB}$$

即 $a_3 = \pm 0.054\ \text{dB}$ ，在该区间内的概率分布为反正弦分布，包含因子 $k = \sqrt{2}$ ，标准不确定度分量

$$u_3 = 0.054\ \text{dB}/\sqrt{2} \approx 0.038\ \text{dB}$$

- 4) 衰减器与 $150\ \Omega/50\ \Omega$ 转换器的 $50\ \Omega$ 端的失配引入的标准不确定度 u_4

衰减器输出端的电压驻波比 ≤ 1.1 ，得到其反射系数的模值

$$|\Gamma_2| = 0.048$$

150 Ω /50 Ω 转换器的 50 Ω 端的电压驻波比小于 1.2；得到其反射系数的模值

$$|\Gamma_m| = 0.091$$

失配误差极限值用下式估计：

$$\Delta_2 = \pm 8.68 |\Gamma_2| |\Gamma_m| \quad (\text{C.9})$$

式中：

Δ_2 ——失配误差极限值，dB；

$|\Gamma_2|$ ——衰减器输出端反射系数；

$|\Gamma_m|$ ——耦合/去耦网络的射频输入端反射系数。

得到

$$\Delta_2 = \pm 0.038 \text{ dB}$$

即 $a_4 = \pm 0.038 \text{ dB}$ ，在该区间内的概率分布为正弦分布，包含因子 $k = \sqrt{2}$ ，标准不确定度分量

$$u_4 = 0.038 \text{ dB} / \sqrt{2} \approx 0.027 \text{ dB}$$

5) 测量重复性引入的标准不确定度 u_5

按照规范 7.2.3 中的方法测量耦合/去耦网络在 230 MHz 频点处的插入损耗值，重复测量 10 次，用贝塞尔公式计算得到单次测量值的实验标准偏差 $s(y)$ 为 0.05 dB，即

$$u_5 = 0.05 \text{ dB}$$

C.2.4 合成标准不确定度

1) 标准不确定度分量表

插入损耗测量标准不确定度分量见表 C.2。

表 C.2 插入损耗测量标准不确定度分量汇总表

不确定度	来源	分布	包含因子	标准不确定度/dB
u_1	网络分析仪传输幅度测量最大允许误差	均匀分布	$\sqrt{3}$	0.057 7
u_2	150 Ω /50 Ω 适配器对插入损耗误差	均匀分布	$\sqrt{3}$	0.115
u_3	衰减器与耦合/去耦网络的射频输入端的失配	反正弦分布	$\sqrt{2}$	0.038
u_4	衰减器与 150 Ω /50 Ω 转换器的 50 Ω 端的失配	反正弦分布	$\sqrt{2}$	0.027
u_5	测量重复性	——	——	0.05

2) 合成标准不确定度

以上不确定度分量彼此不相关，则

$$u_c = \sqrt{c_1^2 u_1^2 + c_2^2 u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2} = 0.15 \text{ dB}$$

C.2.5 扩展不确定度

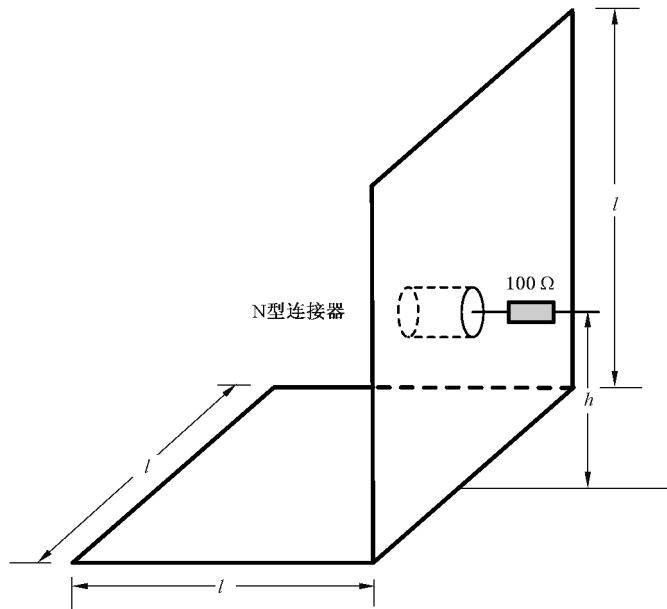
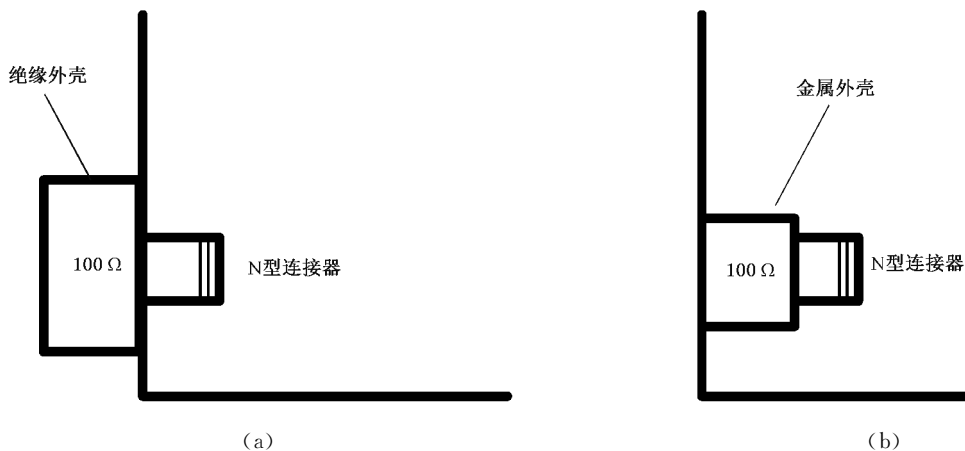
包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度：

$$U = k \times u_c = 2 \times 0.15 \text{ dB} = 0.30 \text{ dB}$$

附录 D

150 Ω /50 Ω 适配器、共模转换适配器、同轴-共模适配器结构示意图D.1 150 Ω /50 Ω 适配器的机械结构图

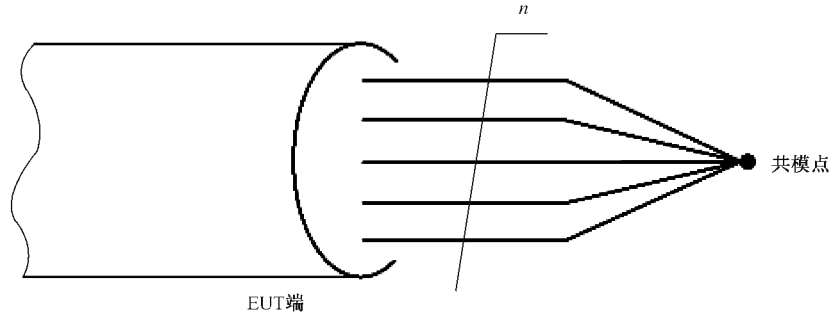
150 Ω /50 Ω 适配器的形状呈现立体的“L”型，由两个边长为 l 的正方形的金属平面垂直拼接而成，机械结构如图 D.1 所示，材质一般为铜或铝。同轴连接器（推荐 N 型连接器）直接或间接固定在垂直平面上，其内导体连接 100 Ω 无感电阻后，再连接 4 mm 插头/插座，外导体则与金属平面相连，4 mm 插头的中心与水平面的距离为 h 。如图 D.2 所示，N 型连接器与无感电阻可以在垂直面的异侧，也可以在同侧，两者在电阻的封装形式上有所区别。金属平面的尺寸由被校耦合/去耦网络共模点与参考接地平面的距离 h 决定。当 $h = 30$ mm 时， l 为 100 mm；当 h 大于 30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

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

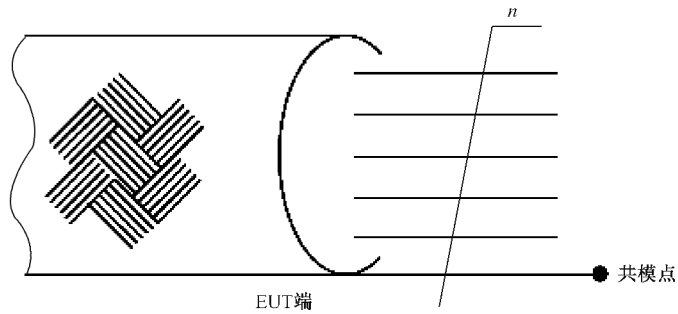
D.2 共模转换适配器

用于确定耦合/去耦网络的共模点，一端为 4 mm 接头，另外一端与耦合/去耦网络的 EUT 端匹配。

当 EUT 端连接非屏蔽电缆时，共模点由多条线路短接得到 [如图 D.3 (a)] 所示；当 EUT 端连接屏蔽电缆时，共模点与屏蔽层等电位 [如图 D.3 (b)] 所示。



(a) 非屏蔽电缆



(b) 屏蔽电缆

图 D.3 共模点的定义

D.3 同轴-共模适配器

用于确定阻抗参考面，一侧为连接共模点的 4 mm 接头，另一侧为同轴接头，机械结构与 150 Ω /50 Ω 适配器相似，只是水平面的尺寸没有要求。

附录 E

受试设备 (EUT) 端共模阻抗模值校准方法 2

E.1 使用背景

规范正文 7.2.2 中受试设备 (EUT) 端共模阻抗模值的校准连接如图 E.1 和图 E.2 所示。

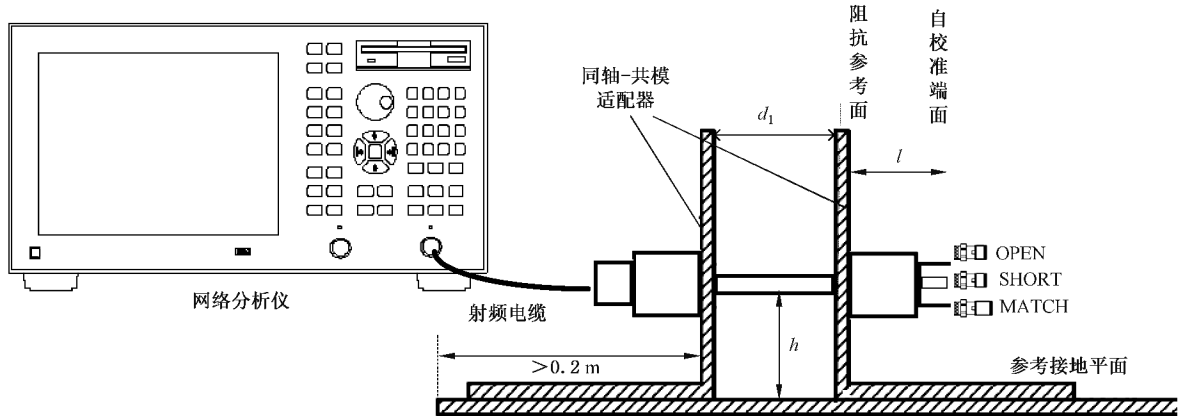


图 E.1 网络分析仪自校准时的连接布置示意图

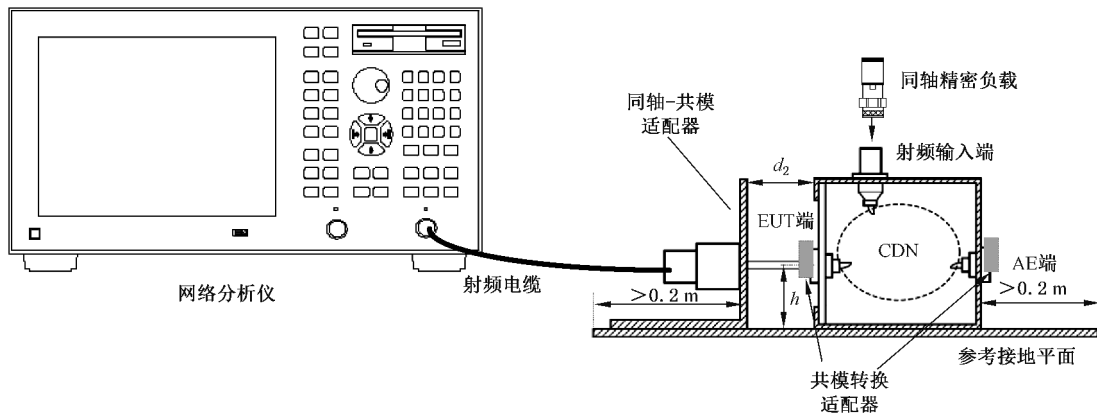


图 E.2 受试设备 (EUT) 端共模阻抗模值校准连接布置示意图

在正文 7.2.2 中, 需要满足条件 $d_1 = d_2$ (d_1 与 d_2 的偏差 $\leq \pm 1$ mm); 当该条件无法满足或不易实现时, 可使用附录 E 中的方法完成受试设备 (EUT) 端共模阻抗模值校准。

E.2 受试设备 (EUT) 端共模阻抗模值校准方法及步骤

E.2.1 网络分析仪单端口自校准

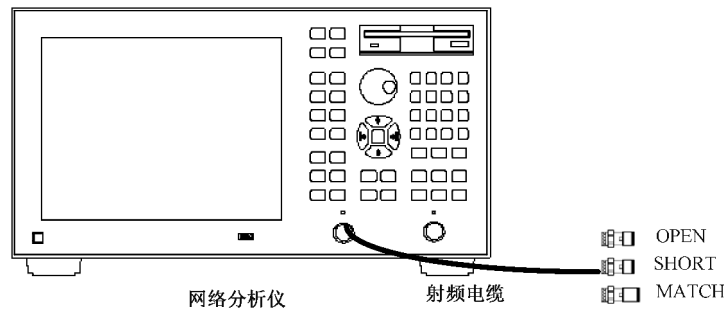


图 E.3 网络分析仪自校准时的连接布置示意图

E. 2. 1. 1 仪器连接如图 E. 3 所示。设置网络分析仪源功率为 0 dBm，中频带宽不大于 1 kHz，频率扫频范围与被校耦合/去耦网络的工作频段相一致。

E. 2. 1. 2 使用开路器（OPEN）、短路器（SHORT）、匹配负载（MATCH）在线缆的同轴端口进行单端口自校准。

E. 2. 2 受试设备（EUT）端共模阻抗模值的校准

E. 2. 2. 1 仪器如图 E. 4 连接；使用游标卡尺测量图中的 d_2 、 d_3 值，并使用公式（E. 1）计算得到 l 值。

$$l = d_2 + d_3 \quad (\text{E. 1})$$

并将计算结果记录于 A. 2 中。

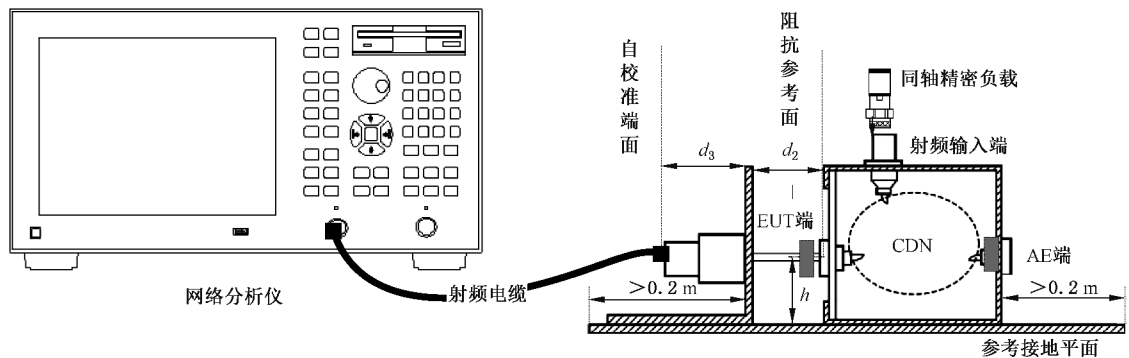


图 E.4 受试设备（EUT）端共模阻抗模值校准连接布置示意图

E. 2. 2. 2 如果网络分析仪具备电长度补偿技术功能，则将 E. 2. 2. 1 中的 l 值输入至网络分析仪。分别在耦合/去耦网络的 AE 端相对参考接地平面开路 and 短路两种情况下，在网络分析仪上读受试设备（EUT）端共模阻抗模值 $|Z_{ce}|$ 。

E. 2. 2. 3 如果网络分析仪不具备电长度补偿功能，则可以按照公式（E. 2）进行计算。

$$|Z_{ce}| = \left| Z_0 \frac{Z_i - jZ_0 \tan(\beta l)}{Z_0 - jZ_i \tan(\beta l)} \right| \quad (\text{E. 2})$$

式中：

Z_{ce} ——受试设备（EUT）端共模阻抗模值， Ω ；

Z_0 ——长度为 l 的线缆标称阻抗值，此处为 50 Ω ；

Z_i ——网络分析仪测量得到的共模阻抗值， Ω ；

l ——线缆长度，此处 $l = d_2 + d_3$ ，为正值，m；

β ——相位常数，1/m。

E.2.2.4 详细步骤可参见 7.2.2，直至完成所有 $|Z_{ce}|$ 的校准。
