



中华人民共和国国家计量技术规范

JJF XXXX—XXXX

不对称人工网络校准规范

Calibration Specification for Asymmetric Artificial Networks

(征求意见稿)

××××-××-××发布

××××-××-××实施

国家市场监督管理总局 发布

不对称人工网络校准规范
Calibration Specification for
Asymmetric Artificial Networks

JJF XXXX—XXXX

归口单位：全国无线电计量技术委员会

主要起草单位：XXXXXX

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 (XXXXXX)

XXX (XXXXXX)

参加起草人：

XXX (XXXXXX)

XXX (XXXXXX)

目 录

引言.....	II
1 范围.....	1
2 引用文献.....	1
3 术语和计量单位.....	1
4 概述.....	1
5 计量特性.....	2
6 校准条件.....	4
7 校准项目和校准方法.....	6
8 校准结果表达.....	12
9 复校时间间隔.....	13
附录 A 原始记录内页格式.....	14
附录 B 校准证书内页格式.....	17
附录 C 主要项目校准不确定度评定示例.....	20
附录 D 阻抗测量适配器、共模转换适配器.....	29
附录 E 纵向转换损耗探头.....	31

引 言

JJF 1001《通用计量术语及定义》、JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》和 JJF1059.1-2012《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。

本规范参考了下列文件：

GB/T 6113.102—2025 《无线电骚扰和抗扰度测量设备和测量方法规范 第 1-2 部分：无线电骚扰和抗扰度测量设备 传导骚扰测量的耦合装置》。

本规范为首次发布。

不对称人工网络校准规范

1 范围

本规范适用于电磁兼容领域传导骚扰测量试验中所用不对称人工网络的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

GB/T 6113.102—2025 无线电骚扰和抗扰度测量设备和测量方法规范 第 1-2 部分：
无线电骚扰和抗扰度测量设备 传导骚扰测量的耦合装置

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

3 术语和定义

3.1 纵向转换损耗（longitudinal conversion loss; LCL）

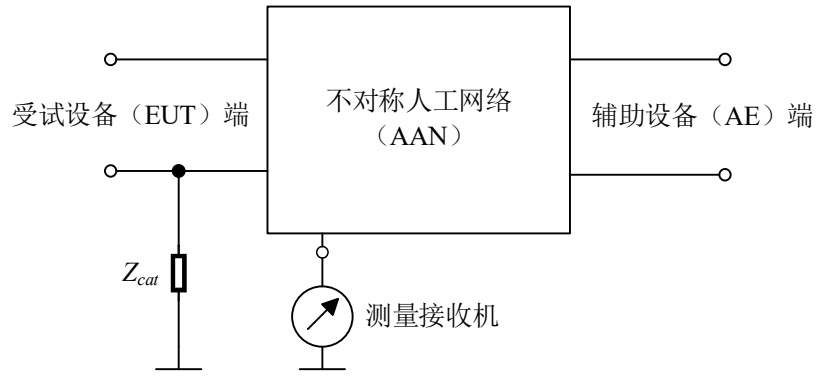
在一个单端口或双端口网络中，由互连线上的纵向（不对称模式）信号在网络的端子上产生无用横向（对称模式）信号程度的量度。LCL 为比值，用 dB 表示。

[GB/T 6113.102, 3.1.13]

4 概述

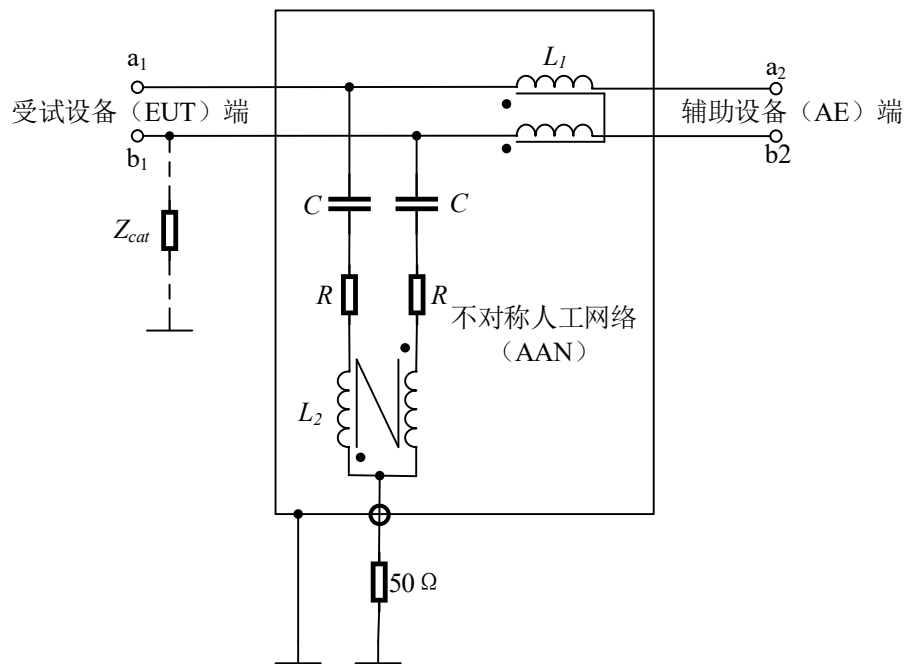
不对称人工网络（英文简写：AAN）的作用是将受试设备信号线上的骚扰分量从有用信号中分离出来进行测量，是通过其内部的耦合电路和滤波器实现对高频信号的耦合和隔离。不对称人工网络主要用于测量非屏蔽对称信号（例如电信）线上的共模电压（或将共模电压注入到非屏蔽信号线上）同时具有抑制差模信号功能的网络。它具有 3 个端口：射频输出（RF OUT）端（连接测量接收机）、受试设备（EUT）端和辅助设备（AE）端。原理框图如图 1 所示。

不对称人工网络通常由金属壳体、电子元器件等部分构成，图 2 给出了用于单一对线测量的 T 型网络的简化电路图。



Z_{cat} 代表非平衡网络，用于调节 ANN 的 LCL（纵向转换损耗）以满足要求

图 1 不对称人工网络及其端口的原理框图



$$C=4.7 \mu\text{F}$$

$$R=200 \Omega$$

$$L_1=2 \times 38 \text{ mH}$$

$$L_2=2 \times 38 \text{ mH}$$

Z_{cat} 代表非平衡网络，用于调节 ANN 的 LCL（纵向转换损耗）以满足要求

图 2 用于单一对线测量的 T 型网络的简化电路图

5 计量特性

5.1 共模阻抗

频率范围：0.15 MHz~30 MHz；

模值标称值：150 Ω ；

最大允许误差：± 20 Ω；

相位标称值：0°；

最大允许误差：±20°。

5.2 电压分压系数

标称值：9.5 dB；

最大允许误差：±1 dB。

5.3 去耦衰减

优于 35 dB~55 dB（0.15 MHz~1.5 MHz，随频率的对数呈线性增加）；

优于 55 dB（1.5 MHz~30 MHz）。

5.4 纵向转换损耗（LCL）

5.4.1 对六类（或更好）非屏蔽平衡对线电缆所连接端口进行测量时所用的 AAN：

纵向转换损耗（即 α_{LCL} ）随频率 f （MHz）按下式变化：

$$\alpha_{LCL} = 75 - 10 \lg \left[1 + \left(\frac{f}{5} \right)^2 \right] \quad (1)$$

最大允许误差：±3 dB（0.15 MHz ≤ f < 2 MHz）；

-3 dB ~ +6 dB（2 MHz ≤ f ≤ 30 MHz）；

5.4.2 对五类（或更好）非屏蔽平衡对线电缆所连接端口进行测量时所用的 AAN：

纵向转换损耗（即 α_{LCL} ）随频率 f （MHz）按下式变化：

$$\alpha_{LCL} = 65 - 10 \lg \left[1 + \left(\frac{f}{5} \right)^2 \right] \quad (2)$$

最大允许误差：±3 dB（0.15 MHz ≤ f < 2 MHz）；

-3 dB ~ +4.5 dB（2 MHz ≤ f ≤ 30 MHz）；

5.4.3 对三类（或更好）非屏蔽平衡对线电缆所连接端口进行测量时所用的 AAN：

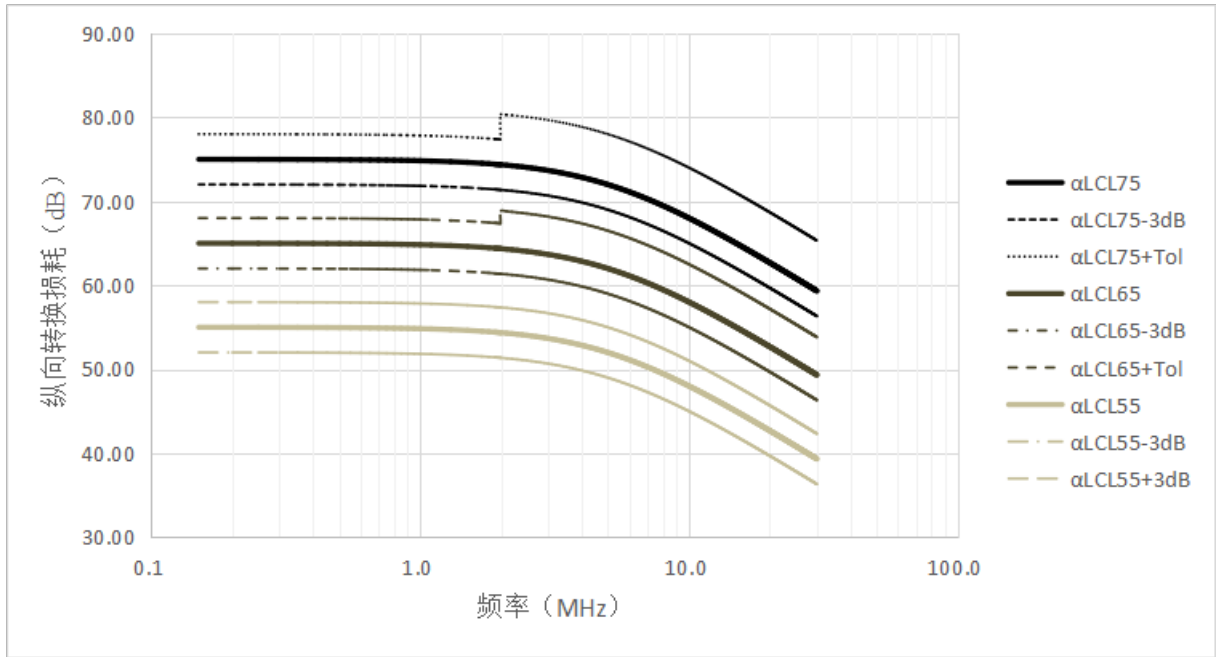
纵向转换损耗（即 α_{LCL} ）随频率 f （MHz）按下式变化：

$$\alpha_{LCL} = 55 - 10 \lg \left[1 + \left(\frac{f}{5} \right)^2 \right] \quad (3)$$

最大允许误差：±3 dB。

5.5 对称电路的插入损耗

（0~3）dB。



注：图中曲线根据 5.4 的公式 (1)、公式 (2) 和公式 (3) 给出的计算公式得到。55 dB、65 dB 和 75 dB 的理想值在图中用粗线表示，其允差用虚线表示。Tol 为 5.4.1、5.4.2 和 5.4.3 中规定的最大允许误差。

图 3 纵向转换损耗要求

注：以上技术指标仅供参考，不做符合性判别。

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 环境温度： $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$ ；

6.1.2 相对湿度： $\leq 80\%$ ；

6.1.3 供电电源： $(220 \pm 11) \text{V}$ ， $(50 \pm 1) \text{Hz}$ ；

6.1.4 其它：无影响仪器正常工作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： $0.15 \text{MHz} \sim 30 \text{MHz}$ ；

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： $\pm (0.01 \sim 0.3) \text{dB}$ 。

6.2.2 同轴精密负载

频率范围： $0.15 \text{MHz} \sim 30 \text{MHz}$ ；

特征阻抗： 50Ω ；

电压驻波比： ≤ 1.1 。

6.2.3 标准 150 Ω /50 Ω 适配器

频率范围：0.15 MHz ~ 30 MHz；

标称插入损耗：9.5 dB；

最大允许误差： ± 0.20 dB；

150 Ω /50 Ω 适配器一端通常为 4 mm 接头（或与不对称人工网络的 EUT 端匹配接头），另一端为同轴接头。

6.2.4 10 dB 同轴固定衰减器

频率范围：0.15 MHz ~ 30 MHz；

电压驻波比： ≤ 1.1 。

6.2.5 其他辅助设备

a. 共模转换适配器

用于确定不对称人工网络的共模点，一端为 4 mm 接头，另外一端与不对称人工网络的 EUT 端匹配，具体结构描述见附录 D。

b. 阻抗测量适配器

用于确定阻抗参考面，一端为连接共模点的 4 mm 接头（或与不对称人工网络的 EUT 端匹配接头），另外一端为同轴接头，具体结构描述见附录 D。

c. LCL 探头

频率范围：0.15 MHz ~ 30 MHz；

固有平衡应比被校不对称人工网络要求的纵向转换损耗至少高 10 dB。

d. LCL 转换适配器

用于确定测量线路，一端与 LCL 探头的测量端匹配，另外一端与不对称人工网络的 EUT 端匹配。

e. 无感电阻

直流阻值：150 Ω ，100 Ω

f. 平衡/不平衡转换器（2 个）

频率范围：0.15 MHz ~ 30 MHz；

特性阻抗：初级为非平衡 50 Ω ，次级为平衡 100 Ω 。

g. 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 所示。

表 1 校准项目表

序号	校准项目	条款
1	共模阻抗	7.2.2
2	电压分压系数	7.2.3
3	去耦衰减	7.2.4
4	纵向转换损耗 (LCL)	7.2.5
5	对称电路的插入损耗	7.2.6

7.2 校准方法

7.2.1 外观及工作正常性检查

被校不对称人工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。

校准时应注意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。

7.2.2 共模阻抗

7.2.2.1 设置网络分析仪的频率范围与被校不对称人工网络的工作频段相一致，源功率为 0 dBm，中频带宽不大于 100 Hz，阻抗测量结果显示类型设为“ $R + jX$ ”格式。网络分析仪连接测量电缆后，在电缆末端对网络分析仪进行“开路-短路-匹配”单端口校准。

7.2.2.2 将阻抗测量适配器放置于参考接地平面上，“开路-短路-匹配”单端口校准后的电缆末端连至阻抗测量适配器，使用网络分析仪的端口延伸功能，对阻抗测量适配器的电气长度进行修正。

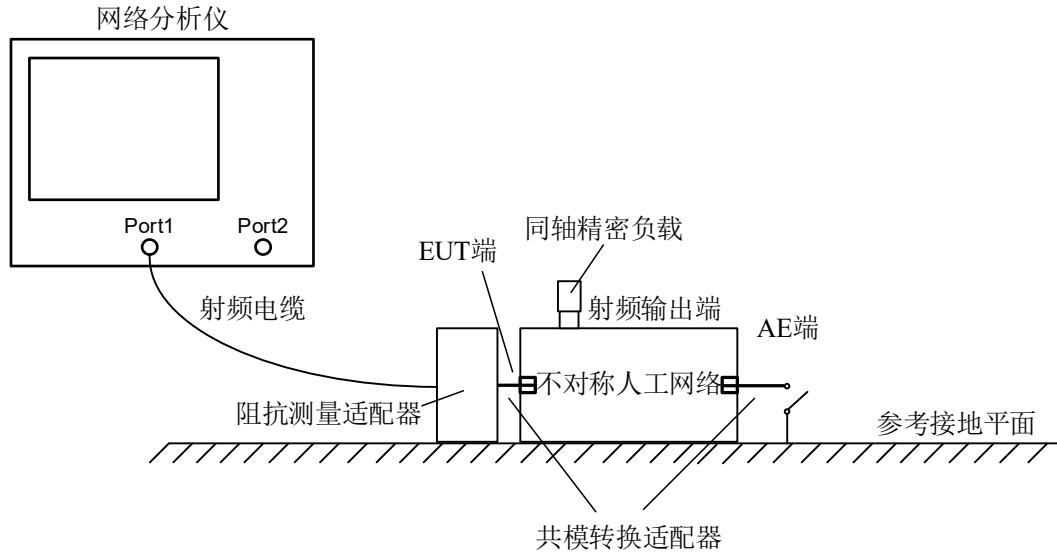


图 3 共模阻抗的校准连接布置示意图

7.2.2.3 仪器的连接布置图如图 3 所示，被校不对称人工网络的射频输出端接同轴精密负载，阻抗测量适配器通过共模转换适配器连接到被校不对称人工网络的 EUT 端口。设定网络分析仪的频率，分别在不对称人工网络的 AE 端相对参考接地平面开路 and 短路（通过共模转换适配器短路）两种情况下，在网络分析仪上读出阻抗实部 R 和虚部 X ，通过公式（4）来计算共模阻抗模值 $|Z_{cc}|$ ，通过公式（5）来计算共模阻抗的相位 θ_{cc} 。将 $R + jX$ 值记录于 A.2 对应的表格中。

$$|Z_{cc}| = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (4)$$

式中：

$|Z_{cc}|$ ——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 。

$$\theta_{cc} = \arctg\left(\frac{X}{R}\right) \quad (5)$$

式中：

θ_{cc} ——共模阻抗相位， $^\circ$ ；

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 。

7.2.3 电压分压系数

7.2.3.1 网络分析仪的两个射频电缆端均连接同轴固定衰减器。设置网络分析仪的频率

范围与被校不对称人工网络的工作频段相一致，源功率为 0 dBm，中频带宽不大于 100 Hz，测量模式设置为传输测量，测量显示格式设置为对数幅度。仪器的连接布置图如图 4 所示，对网络分析仪（包含射频电缆和衰减器）进行直通校准。

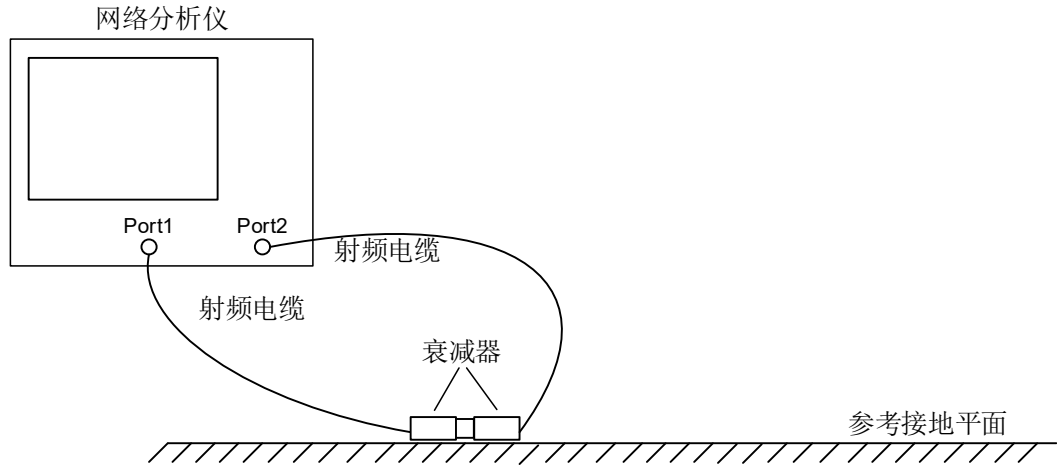


图 4 直通校准连接布置图

7.2.3.2 按照图 5 连接仪器，网络分析仪的源端与被校不对称人工网络的 EUT 端相连，网络分析仪的测量端与被校不对称人工网络的射频输出端相连，被校不对称人工网络的 AE 端通过共模转换适配器相对参考接地平面接 150 Ω 无感电阻。

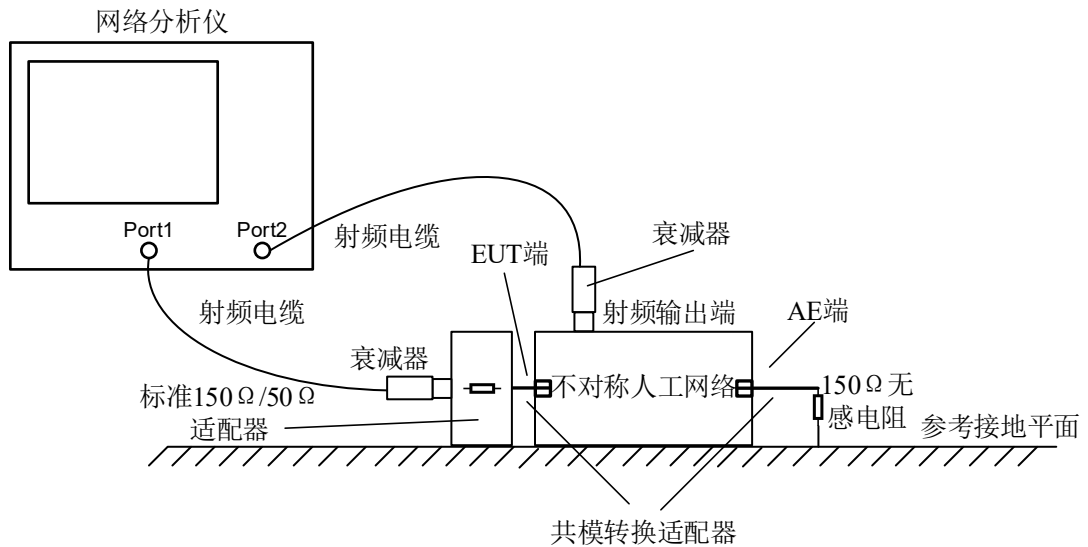


图 5 电压分压系数的校准连接布置示意图

7.2.3.3 设定网络分析仪的标记频率，读出网络分析仪在不同频率下的插入损耗值，即为被校不对称人工网络的电压分压系数 F_{AAN} ，记录于 A.3 对应的表格中。

7.2.4 去耦衰减

7.2.4.1 设置网络分析仪的频率范围与被校不对称人工网络的工作频段相一致，源功率

为 0 dBm，中频带宽不大于 100 Hz，测量模式设置为传输测量，测量显示格式设置为对数幅度，对网络分析仪进行直通校准。

7.2.4.2 按照图 6 连接仪器，网络分析仪的源端与被校不对称人工网络的 AE 端相连，网络分析仪的测量端与被校不对称人工网络的射频输出端相连。

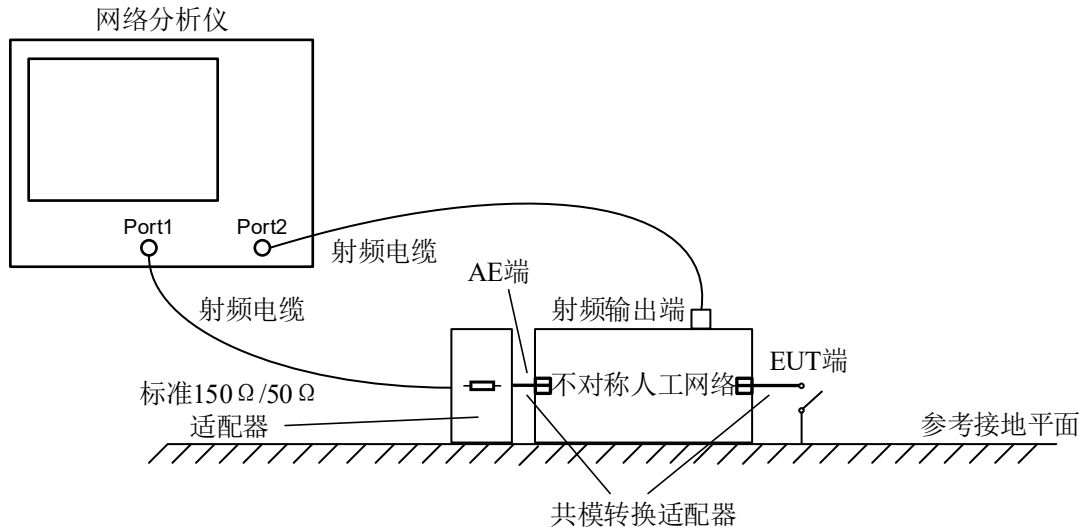


图 6 去耦衰减的校准连接布置示意图

7.2.4.3 设定测量频率，分别在被校不对称人工网络的 EUT 端相对参考接地平面开路 and 短路（通过共模转换适配器短路）两种情况下，读出网络分析仪在不同频率下的插入损耗值，记为 a_{IL} ，利用公式（6）计算得到被校不对称人工网络的去耦衰减 a_{decoup} ，记录于 A.4 对应的表格中。

$$a_{decoup} = a_{IL1} - F_{AAN} \quad (6)$$

式中：

a_{decoup} —— 不对称人工网络的去耦衰减，dB；

a_{IL1} —— 网络分析仪测量的插入损耗值，dB；

F_{AAN} —— 不对称人工网络的电压分压系数，dB。

7.2.5 纵向转换损耗

7.2.5.1 设置网络分析仪的频率范围与被校不对称人工网络的工作频段相一致，源功率为 0 dBm，中频带宽不大于 100 Hz，测量模式设置为传输测量，测量显示格式设置为对数幅度。网络分析仪的双端口连接射频电缆后，在射频电缆末端对网络分析仪进行全双

端口校准。

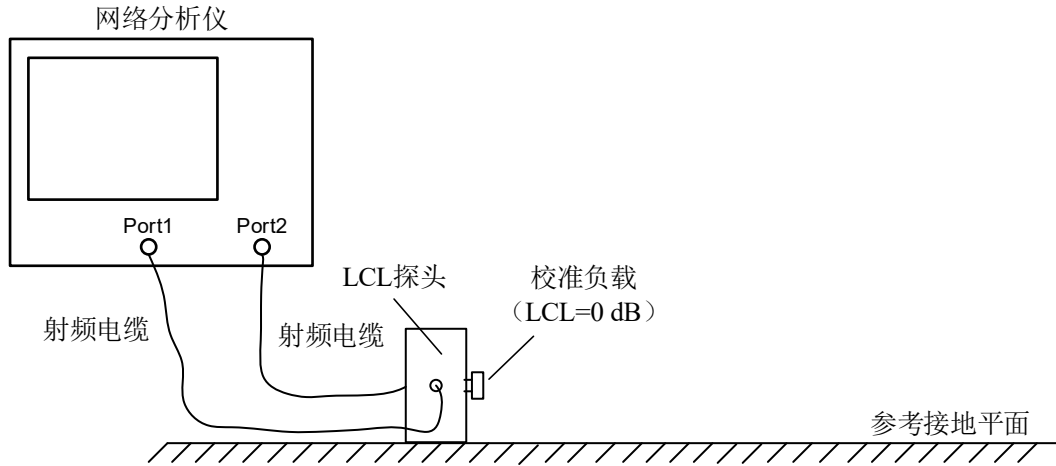


图 7 LCL 探头的直通校准连接布置示意图

7.2.5.2 仪器的连接布置图如图 7 所示，将 LCL 探头放置于参考接地平面上，其测量端与校准负载（LCL=0 dB）相连，网络分析仪的输出端与 LCL 探头的输入端相连，设定网络分析仪的标记频率，读出网络分析仪在不同频率下的插入损耗读数 a_{IL2} ，记录于 A.5 对应的表格中。

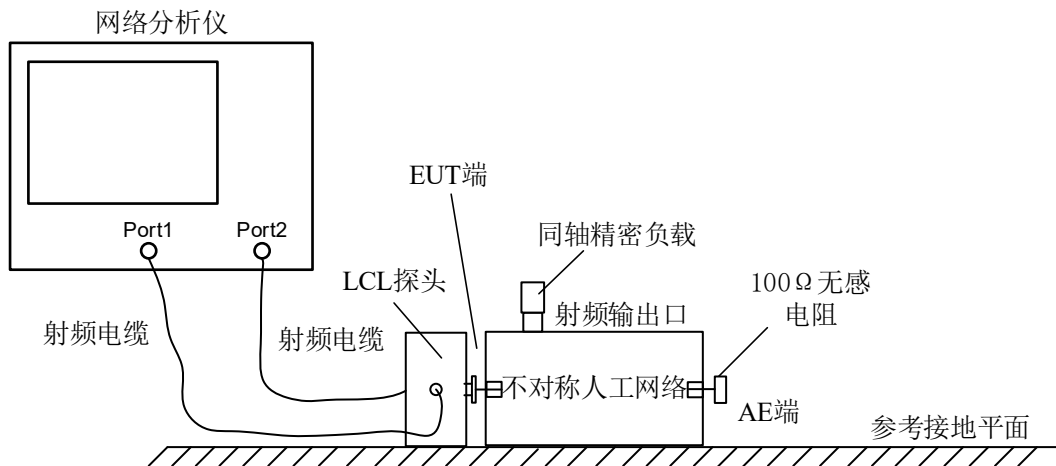


图 8 纵向转换损耗校准连接布置示意图

7.2.5.3 按照图 8 连接仪器，选择与不对称人工网络待测对线相一致的 LCL 转换适配器，将 LCL 探头的测量端与被校不对称人工网络的 EUT 端相连，被校不对称人工网络的射频输出端接同轴精密负载，被校不对称人工网络的 AE 端每对线的线-线间接 100Ω 无感电阻，设定网络分析仪的标记频率，读出网络分析仪在不同频率下的插入损耗读数 a_{IL3} ，

记录于 A.5 对应的表格中。

7.2.5.4 利用公式 (7) 计算得到被校不对称人工网络的纵向转换损耗, 记录于 A.5 对应的表格中。

$$a_{\text{LCL}} = a_{\text{IL3}} - a_{\text{IL2}} \quad (7)$$

式中:

a_{LCL} —— 不对称人工网络的纵向转换损耗, dB;

a_{IL2} —— LCL 探头测量端与校准负载 (LCL=0 dB) 相连时的插入损耗值, dB;

a_{IL3} —— LCL 探头测量端与被校不对称人工网络的 EUT 端相连时的插入损耗值, dB。

7.2.5.5 对于有多组对线的被校不对称人工网络, 更换与不对称人工网络其他待测对线相一致的 LCL 探头适配器, 更换对线进行 7.2.5.3~7.2.5.4 的测量, 将结果记录于 A.5 对应的表格中。

7.2.6 对称电路的插入损耗

7.2.6.1 网络分析仪的两个射频电缆端均连接同轴固定衰减器。

7.2.6.2 设置网络分析仪的频率范围与被校不对称人工网络的工作频段相一致, 源功率为 0 dBm, 中频带宽不大于 100 Hz, 测量模式设置为传输测量, 测量显示格式设置为对数幅度。

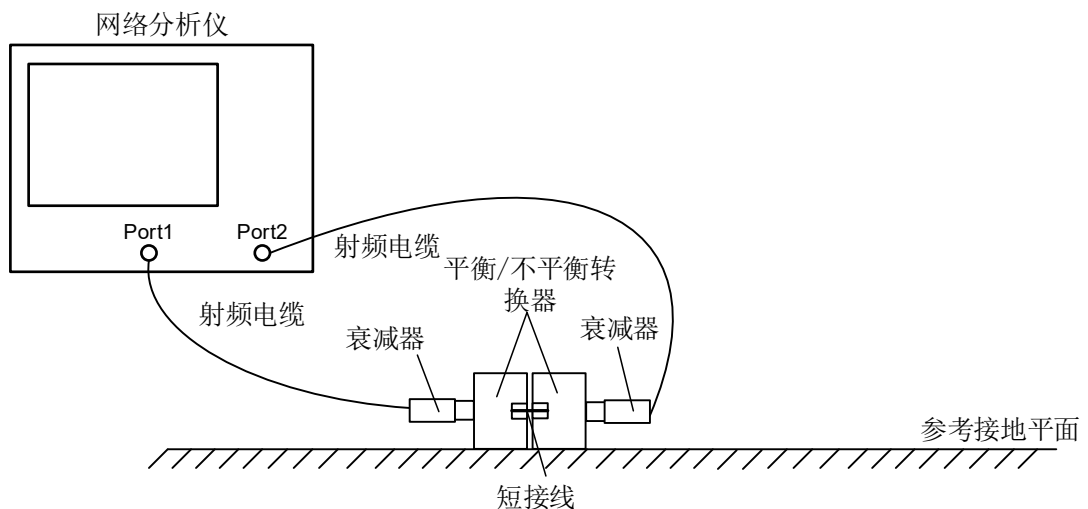


图 9 平衡/不平衡转换器直通校准连接布置示意图

7.2.6.3 仪器的连接布置图如图 9 所示, 将两个平衡/不平衡转换器放置于参考接地平面

上，网络分析仪经衰减器与平衡/不平衡转换器的同轴端相连，该同轴端与不对称人工网络待测对线相一致，对网络分析仪进行直通校准。

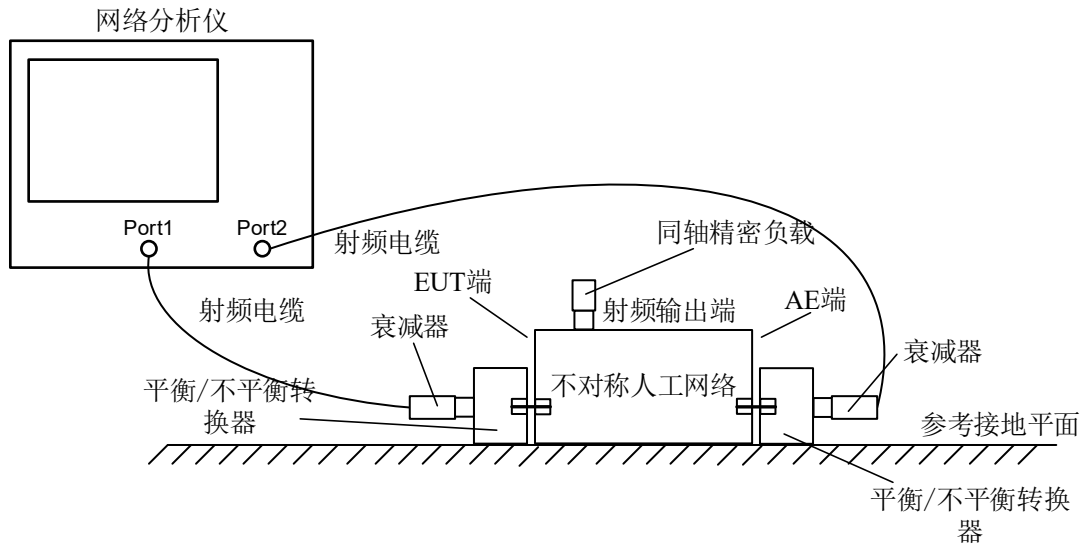


图 10 对称电路的插入损耗校准连接布置示意图

7.2.6.4 按照图 10 连接仪器，被校不对称人工网络的射频输出端接同轴精密负载，网络分析仪的输出端经衰减器和平衡/不平衡转换器与不对称人工网络的 EUT 端相连；网络分析仪的输入端经衰减器和平衡/不平衡转换器与不对称人工网络的 AE 端相连。

7.2.6.5 设定网络分析仪的标记频率，读出网络分析仪在不同频率下的对称电路插入损耗值，记录于 A.6 对应的表格中。

7.2.6.6 对于有多组对线的被校不对称人工网络，更换对线进行 7.2.6.3~7.2.6.5 的测量，将结果记录于 A.6 对应的表格中。

8、校准结果表达

不对称人工网络校准后，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
外观	
工作正常性	

A.2 共模阻抗

A.2.1 共模阻抗模值（AE 端开路 and 短路）

频率/MHz	阻抗 $R+jX$	模值 $ Z_{cc} /\Omega$		不确定度 $U(k=2)$
		AE 端开路	AE 端短路	

A.2.2 共模阻抗相位（AE 端开路 and 短路）

频率/MHz	阻抗 $R+jX$	相位 $\theta_{cc}/^\circ$		不确定度 $U(k=2)$
		AE 端开路	AE 端短路	

A.3 电压分压系数

频率/MHz	电压分压系数 F_{AAN}/dB	不确定度 $U(k=2)$

A.4 去耦衰减（EUT 端开路 and 短路）

频率/MHz	EUT 端开路		EUT 端短路		不确定度 $U(k=2)$
	插入损耗 a_{IL1}/dB	去耦衰减 $a_{\text{decoup}}/\text{dB}$	插入损耗 a_{IL1}/dB	去耦衰减 $a_{\text{decoup}}/\text{dB}$	

A.5 纵向转换损耗（LCL）

对线	频率/MHz	插入损耗/dB		纵向转换损耗 a_{LCL}/dB	不确定度 $U(k=2)$
		a_{IL2}	a_{IL3}		

A.6 对称电路的插入损耗

对线	频率/MHz	插入损耗/dB	不确定度 $U(k=2)$

附录 B

校准证书内页格式

B.1 共模阻抗

B.1.1 共模阻抗模值 (AE 端开路 and 短路)

频率/MHz	实测值/ Ω		不确定度 $U(k=2)$
	AE 端开路	AE 端短路	

B.1.2 共模阻抗相位 (AE 端开路 and 短路)

频率/MHz	实测值/ $^{\circ}$		不确定度 $U(k=2)$
	AE 端开路	AE 端短路	

B.2 电压分压系数

频率/MHz	实测值/dB	不确定度 $U(k=2)$

B.3 去耦衰减（EUT 端开路 and 短路）

频率/MHz	实测值/dB		不确定度 $U(k=2)$
	EUT 端开路	EUT 端短路	

B.4 纵向转换损耗（LCL）

对线	频率/MHz	实测值/dB	不确定度 $U(k=2)$

B.5 对称电路的插入损耗

对线	频率/MHz	实测值/dB	不确定度 $U(k=2)$

附录 C

不确定度评定示例

C.1 共模阻抗模值的校准不确定度评定

C.1.1 不确定度来源

使用网络分析仪直接测量被校不对称人工网络的共模阻抗模值，引入的不确定度分量来源包括：

- 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) 共模转换适配器残余影响引入的标准不确定度 u_2 ；
- 3) RF 端口远端 $50\ \Omega$ 负载引入的标准不确定度 u_3 ；
- 4) 测量重复性引入的标准不确定度 u_4 。

C.1.2 标准不确定度的评定

下面以使用网络分析仪，在 $30\ \text{MHz}$ 频率时，校准不对称人工网络共模阻抗模值为例计算。

C.1.2.1 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 $30\ \text{MHz}$ 频率时，阻抗测试量测量共模阻抗值 $Z_{\text{ce}} = 142.4\ \Omega - j48.3\ \Omega$ ，得到 $|Z_{\text{ce}}|$ 为 $150.4\ \Omega$ ，阻抗测量最大允许误差为 $\pm 5\%$ ，得到 $\Delta|Z_{\text{ce}}| = \pm 7.52\ \Omega$ ，为均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_1 = 7.52 / \sqrt{3} \approx 4.34\ \Omega$$

C.1.2.2 共模转换适配器残余影响引入的标准不确定度

实际测量一对共模转换适配器偏离 $150\ \Omega$ 负载的阻抗值，得到偏差为 $1.66\ \Omega$ ，假设阻抗是累加的，那么由共模转换适配器带来的阻抗模值的误差为 $0.83\ \Omega$ ，为均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_2 = 0.83 / \sqrt{3} \approx 0.48\ \Omega$$

C.1.2.3 RF 端口远端 $50\ \Omega$ 负载引入的标准不确定度 u_3

测量共模阻抗时，不对称人工网络的 RF 端口接 $50\ \Omega$ 负载，由于该负载的阻值无法为理想的 $50\ \Omega$ ，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，得到共模阻抗模值的测量结果最大偏差为 $\pm 0.7\ \Omega$ ，为均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_3 = 0.7 / \sqrt{3} \approx 0.404\ \Omega$$

C.1.2.4 测量重复性引入的标准不确定度 u_4

按 A 类方法评定测量重复性引入的不确定度。使用网络分析仪测量不对称人工网络在频率为 $30\ \text{MHz}$ 时共模阻抗模值，重复测量 10 次，测量结果如表 C.1 所示。用贝塞尔公式计算得到单次测量值的实验标准偏差： $s(y) = 0.11\ \Omega$ ，则：

$$u_4 = 0.11 \Omega$$

表 C.1 不对称人工网络共模阻抗模值测量数据

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值/ Ω	157.4	157.3	157.4	157.5	157.4	157.5	157.4	157.7	157.4	157.4

C.1.3 合成标准不确定度

共模阻抗测试标准不确定度分量汇总如表 C.2 所示

表 C.2 共模阻抗测试标准不确定度分量汇总表

序号	不确定度来源	分布	包含因子	标准不确定度
1	网络分析仪最大允许误差	均匀分布	$\sqrt{3}$	4.34 Ω
2	共模转换适配器残余影响	均匀分布	$\sqrt{3}$	0.48 Ω
3	RF 端口远端 50 Ω 负载	均匀分布	$\sqrt{3}$	0.404 Ω
4	测量重复性	—	—	0.11 Ω

以上不确定度分量彼此不相关，则

$$u_c = \sqrt{c_1^2 u_1^2 + c_2^2 u_2^2 + c_3^2 u_3^2 + c_4^2 u_4^2} \approx 4.39 \Omega$$

C.1.4 扩展不确定度

取包含因子 $k = 2$ ，得到

$$U = 2u_c = 8.8 \Omega$$

C.2 共模阻抗相位的校准不确定度评定

C.2.1 不确定度来源

使用网络分析仪直接测量被校不对称人工网络的共模阻抗相位，引入的不确定度分量来源包括：

- 1) 网络分析仪相位测量最大允许误差引入的标准不确定度 u_1 ；
- 2) 共模转换适配器残余影响引入的标准不确定度 u_2 ；
- 3) RF 端口远端 50 Ω 负载引入的标准不确定度 u_3 ；
- 4) 测量重复性引入的标准不确定度 u_4 。

C.2.2 标准不确定度的评定

下面以使用网络分析仪，在 30 MHz 频率时，校准不对称人工网络共模阻抗相位为例计算。

C.2.2.1 网络分析仪相位测量最大允许误差引入的标准不确定度 u_1

在 30 MHz 频率时, 阻抗测试量测量共模阻抗值 $Z_{ce} = 142.4\Omega - j48.3\Omega$, 得到为 150.4Ω , 阻抗测量最大允许误差为 $\pm 5\%$, 得到 $\Delta|Z_{ce}| = \pm 7.52\Omega$, 相位测量最大允许误差为 $\pm \sin^{-1}(\Delta|Z_{ce}|/100) \approx \pm 4.31^\circ$, 为均匀分布, $k = \sqrt{3}$, 则:

$$u_1 = 4.31 / \sqrt{3} \approx 2.49^\circ$$

C.2.2.2 共模转换适配器残余影响引入的标准不确定度 u_2

实际测量一对共模转换适配器偏离 150Ω 负载的相位值, 得到偏差为 0.18° , 假设相位是累加的, 那么由共模转换适配器带来的阻抗相位的误差为 0.09° , 为均匀分布, $k = \sqrt{3}$, 则:

$$u_2 = 0.09 / \sqrt{3} \approx 0.052^\circ$$

C.2.2.3 RF 端口远端 50Ω 负载引入的标准不确定度 u_3

测量共模阻抗时, 不对称人工网络的 RF 端口接 50Ω 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, 得到共模阻抗相位的测量结果最大偏差为 $\pm 0.3^\circ$, 为均匀分布, $k = \sqrt{3}$, 则:

$$u_3 = 0.3 / \sqrt{3} \approx 0.17^\circ$$

C.2.2.4 测量重复性引入的标准不确定度 u_4

使用网络分析仪测量不对称人工网络在频率为 30MHz 时共模阻抗相位, 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: $s(y) = 0.05^\circ$, 则:

$$u_4 = 0.05^\circ$$

表 C.3 不对称人工网络共模阻抗相位测量数据

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值 / ($^\circ$)	-18.7	-18.6	-18.6	-18.6	-18.6	-18.6	-18.6	-18.7	-18.7	-18.8

C.2.3 合成标准不确定度

共模阻抗相位测试标准不确定度分量汇总如表 C.4 所示

表 C.4 共模阻抗相位测试标准不确定度分量汇总表

序号	不确定度来源	分布	包含因子	标准不确定度
1	网络分析仪最大允许误差	均匀分布	$\sqrt{3}$	2.49°
2	共模转换适配器残余影响	均匀分布	$\sqrt{3}$	0.052°
3	RF 端口远端 50Ω 负载	均匀分布	$\sqrt{3}$	0.17°
4	测量重复性	——	——	0.05°

以上不确定度分量彼此不相关, 则

$$u_c = \sqrt{c_1^2 u_1^2 + c_2^2 u_2^2 + c_3^2 u_3^2 + c_4^2 u_4^2} \approx 2.50^\circ$$

C.2.4 扩展不确定度

取包含因子 $k = 2$ ，得到

$$U = 2u_c = 5.0^\circ$$

C.3 电压分压系数的校准不确定度评定

C.3.1 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 $150\ \Omega/50\ \Omega$ 适配器插入损耗误差引入的标准不确定度 u_2 ；
- 3) 衰减器与不对称人工网络的射频输出端的失配引入的标准不确定度 u_3 ；
- 4) AE 端接 $150\ \Omega$ 无感电阻误差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.3.2 标准不确定度的评定

下面以使用网络分析仪，在 $30\ \text{MHz}$ 频率时，校准不对称人工网络电压分压系数为例计算。

C.3.2.1 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，频率 $30\ \text{MHz}$ ，在测量 $9.5\ \text{dB}$ 插入损耗时，网络分析仪传输幅度测量的最大允许误差为 $\pm 0.13\ \text{dB}$ ，为均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_1 = 0.13/\sqrt{3} \approx 0.0751\ \text{dB}$$

C.3.2.2 标准 $150\ \Omega/50\ \Omega$ 适配器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，最大允许误差为 $\pm 0.20\ \text{dB}$ ，为均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则

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

C.3.2.3 衰减器与不对称人工网络的射频输出端的失配引入的标准不确定度 u_3

衰减器端口的电压驻波比 ≤ 1.1 ，则其反射系数的模值 $|\Gamma_{A1}|$ 为

$$|\Gamma_{A1}| = 0.048$$

不对称人工网络的射频输出端的实测电压驻波比为 3.8 ，则其反射系数的模值 $|\Gamma_{RF}|$ 为

$$|\Gamma_{RF}| = 0.583$$

失配误差极限值用下式估计：

$$\Delta_1 = \pm 8.68 |\Gamma_{A1}| |\Gamma_{RF}|$$

式中：

Δ_1 ——失配误差极限值，dB；

$|\Gamma_{AI}|$ ——衰减器端口反射系数；

$|\Gamma_{RF}|$ ——不对称人工网络的射频输出端反射系数。

得到

$$\Delta_1 = \pm 0.243 \text{ dB}$$

即 $a_1 = \pm 0.243 \text{ dB}$ ，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

$$u_3 = 0.243/\sqrt{2} \approx 0.172 \text{ dB}$$

C.3.2.4 AE 端接 150Ω 无感电阻误差引入的标准不确定度 u_4 ；

150Ω 无感电阻误差会对测量结果造成一定程度的误差，在阻值最大误差小于 $\pm 1.5 \Omega$ 时，在其他条件均不变的情况下采用不同的负载进行试验，得到电压分压系数的测量结果最大偏差为 $\pm 0.20 \text{ dB}$ ，为均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则

$$u_4 = 0.20/\sqrt{3} \approx 0.12$$

C.3.2.5 测量重复性引入的标准不确定度 u_5

使用网络分析仪测量不对称人工网络在频率为 30 MHz 时电压分压系数，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： $s(y) = 0.01 \text{ dB}$ ，则：

$$u_4 = 0.01 \text{ dB}$$

表 C.5 不对称人工网络电压分压系数测量数据

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值/(dB)	10.14	10.13	10.15	10.15	10.15	10.15	10.16	10.15	10.17	10.16

C.3.3 合成标准不确定度

电压分压系数测试标准不确定度分量汇总如表 C.6 所示

表 C.6 电压分压系数测试标准不确定度分量汇总表

序号	不确定度来源	分布	包含因子	标准不确定度/dB
1	网络分析仪传输幅度测量最大允许误差	均匀分布	$\sqrt{3}$	0.0751
2	$150 \Omega/50 \Omega$ 适配器插入损耗误差	均匀分布	$\sqrt{3}$	0.115
3	衰减器与不对称人工网络的射频输出端的失配	反正弦分布	$\sqrt{2}$	0.172
4	AE 端接 150Ω 无感电阻误差	均匀分布	$\sqrt{3}$	0.12
5	测量重复性	——	——	0.01

以上不确定度分量彼此不相关，则

$$u_c = \sqrt{c_1^2 u_1^2 + c_2^2 u_2^2 + c_3^2 u_3^2 + c_4^2 u_4^2 + c_5^2 u_5^2} \approx 0.25 \text{ dB}$$

C.3.4 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，得到

$$U = 2u_c = 0.50 \text{ dB}$$

C.4 去耦衰减的校准不确定度评定

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 $150 \Omega/50 \Omega$ 适配器插入损耗误差引入的标准不确定度 u_2 ；
- 3) 衰减器与不对称人工网络的射频输出端的失配引入的标准不确定度 u_3 ；
- 4) 电压分压系数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.4.2 标准不确定度的评定

下面以使用网络分析仪，在 30 MHz 频率时，校准不对称人工网络电压分压系数为例计算。

C.4.2.1 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，频率 30 MHz ，在测量 75 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 $\pm 1.58 \text{ dB}$ ，为均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_1 = 1.58/\sqrt{3} \approx 0.912 \text{ dB}$$

C.4.2.2 标准 $150 \Omega/50 \Omega$ 适配器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 dB 存在一定程度的偏差，最大允许误差为 $\pm 0.20 \text{ dB}$ ，为均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则

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

C.4.2.3 衰减器与不对称人工网络的射频输出端的失配引入的标准不确定度 u_3

衰减器端口的电压驻波比 ≤ 1.1 ，则其反射系数的模值 $|\Gamma_{A1}|$ 为

$$|\Gamma_{A1}| = 0.048$$

不对称人工网络的射频输出端的实测电压驻波比为 3.8 ，则其反射系数的模值 $|\Gamma_{RF}|$ 为

$$|\Gamma_{RF}| = 0.583$$

失配误差极限值用下式估计：

$$\Delta_1 = \pm 8.68 |\Gamma_{A1}| |\Gamma_{RF}|$$

式中：

Δ_1 ——失配误差极限值，dB；

$|\Gamma_{A1}|$ ——衰减器端口反射系数；

$|\Gamma_{RF}|$ ——不对称人工网络的射频输出端反射系数。

得到

$$\Delta_1 = \pm 0.243 \text{ dB}$$

即 $a_1 = \pm 0.243 \text{ dB}$ ，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

$$u_3 = 0.243/\sqrt{2} \approx 0.172 \text{ dB}$$

C.4.2.4 电压分压系数引入的标准不确定度 u_4 ；

电压分压系数的扩展不确定度为 0.50 dB， $k = 2$ ，则

$$u_4 = 0.50/2 = 0.25$$

C.4.2.5 测量重复性引入的标准不确定度 u_5

使用网络分析仪测量不对称人工网络在频率为 30 MHz 时电压分压系数，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： $s(y) = 0.98 \text{ dB}$ ，则：

$$u_4 = 0.98 \text{ dB}$$

表 C.7 不对称人工网络去耦衰减测量数据

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值/(dB)	74.48	75.36	75.33	76.90	76.93	77.07	76.95	76.95	77.07	77.16

C.4.3 合成标准不确定度

电压分压系数测试标准不确定度分量汇总如表 C.8 所示

表 C.8 去耦衰减测试标准不确定度分量汇总表

序号	不确定度来源	分布	包含因子	标准不确定度/dB
1	网络分析仪传输幅度测量最大允许误差	均匀分布	$\sqrt{3}$	0.912
2	150 Ω /50 Ω 适配器插入损耗误差	均匀分布	$\sqrt{3}$	0.115
3	衰减器与不对称人工网络的射频输出端的失配	反正弦分布	$\sqrt{2}$	0.172
4	电压分压系数	正态分布	2	0.25
5	测量重复性	——	——	0.98

以上不确定度分量彼此不相关，则

$$u_c = \sqrt{c_1^2 u_1^2 + c_2^2 u_2^2 + c_3^2 u_3^2 + c_4^2 u_4^2 + c_5^2 u_5^2} \approx 1.38 \text{ dB}$$

C.4.4 扩展不确定度

取包含因子 $k = 2$ ，得到

$$U = 2u_c = 2.76 \text{ dB}$$

C.5 纵向转换损耗（LCL）的校准不确定度评定

C.5.1 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最大允许误差引入的标准不确定度 u_1 ；
- 2) LCL 探头不理想引入的标准不确定度 u_2 ；
- 3) 射频输出口接 50Ω 负载误差引入的标准不确定度 u_3 ；
- 4) AE 端接 100Ω 无感电阻误差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.5.2 标准不确定度的评定

下面以使用网络分析仪，在 30 MHz 频率时，校准不对称人工网络纵向转换损耗为例计算。

C.5.2.1 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，频率 30 MHz ，在测量 60 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 $\pm 0.377 \text{ dB}$ ，为均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_1 = 0.377 / \sqrt{3} \approx 0.218 \text{ dB}$$

C.5.2.2 LCL 探头不理想引入的标准不确定度 u_2

LCL 探头不理想会对测量结果造成一定程度的误差，经实测最大误差为 $\pm 0.13 \text{ dB}$ ，为均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则

$$u_2 = 0.13 / \sqrt{3} \approx 0.08 \text{ dB}$$

C.5.2.3 射频输出口接 50Ω 负载误差引入的标准不确定度 u_3

测量 LCL 时，不对称人工网络的 RF 端口接 50Ω 负载。由于该负载的阻值无法为理想的 50Ω ，会使 LCL 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 LCL 的测量结果最大偏差为 $\pm 0.24 \text{ dB}$ ，为均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_3 = 0.24 / \sqrt{3} \approx 0.14 \text{ dB}$$

C.5.2.4 AE 端接 100Ω 无感电阻误差引入的标准不确定度 u_4

100Ω 无感电阻误差会对测量结果造成一定程度的误差，在阻值最大误差小于 $\pm 1 \Omega$ 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 LCL 的测量结果最大偏差为 $\pm 0.34 \text{ dB}$ ，为均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则

$$u_4 = 0.34/\sqrt{3} \approx 0.20 \text{ dB}$$

C.5.2.5 测量重复性引入的标准不确定度 u_5

使用网络分析仪测量不对称人工网络在频率为 30MHz 时纵向转换损耗，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： $s(y)=0.056\text{dB}$ ，则：

$$u_5 = 0.056 \text{ dB}$$

表 C.9 不对称人工网络纵向转换损耗测量数据

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值/(dB)	51.30	51.40	51.30	51.36	51.40	51.47	51.41	51.40	51.45	51.43

C.5.3 合成标准不确定度

纵向转换损耗测试标准不确定度分量汇总如表 C.10 所示

表 C.10 纵向转换损耗测试标准不确定度分量汇总表

序号	不确定度来源	分布	包含因子	标准不确定度/dB
1	网络分析仪传输幅度测量最大允许误差	均匀分布	$\sqrt{3}$	0.218
2	LCL 探头不理想	均匀分布	$\sqrt{3}$	0.08
3	射频输出口接 50Ω 负载误差	均匀分布	$\sqrt{3}$	0.14
4	AE 端接 100Ω 无感电阻误差	均匀分布	$\sqrt{3}$	0.20
5	测量重复性	——	——	0.056

以上不确定度分量彼此不相关，则

$$u_c = \sqrt{c_1^2 u_1^2 + c_2^2 u_2^2 + c_3^2 u_3^2 + c_4^2 u_4^2 + c_5^2 u_5^2} \approx 0.35 \text{ dB}$$

C.5.4 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，得到

$$U = 2u_c = 0.70 \text{ dB}$$

附录 D

阻抗测量适配器、共模转换适配器

D.1 阻抗测量适配器的机械结构图

阻抗测量适配器用于确定阻抗参考面,可将参考面从同轴端面移至 4 mm 插座端面,其形状主要有两种呈现形式:“L”型和立方体型。“L”型由两个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。同轴连接器直接固定在垂直平面上,其内导体连接 4 mm 插座,外导体则与金属平面相连;4 mm 插座的中心与水平面的距离为 h (一般为 30 mm),其外导体直接固定在垂直平面上,外导体内径 D 与内导体外径 d 关系为公式 (D.1):

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(\frac{D}{d}\right) \quad (\text{D.1})$$

式中:

Z_0 ——特征阻抗, 50 Ω ;

ϵ_r ——介质的介电常数,空气通常为 1;

D ——外导体内径;

d ——内导体外径。

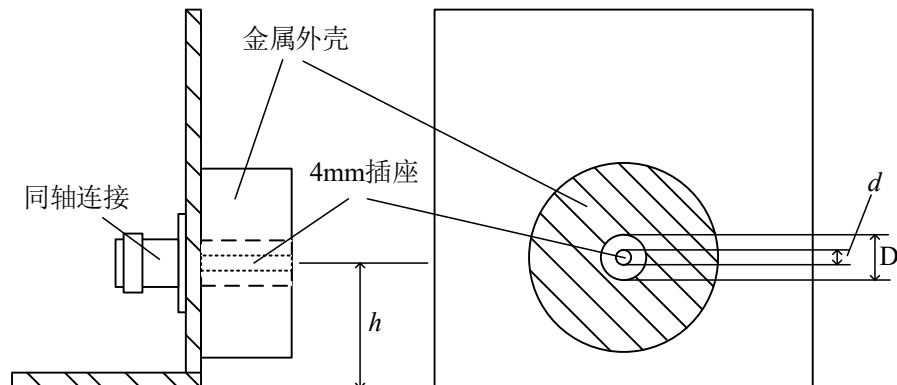


图 D.1 “L”型阻抗测量适配器侧视图和正视图

立方体型由一块金属块构成,机械结构如图 D.2 所示,材质一般为铜或铝。同轴连接器直接固定在金属块上,其内导体连接 4 mm 插座,外导体则与金属块的侧面相连;4 mm 插座的中心与水平面的距离为 h (一般为 30 mm),整个金属块作为其外导体,外

导体内径 D 与内导体外径 d 关系为公式 (D.1)

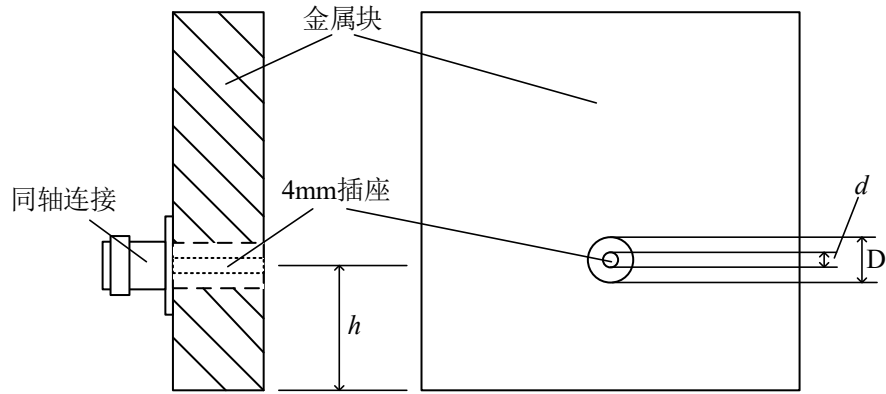


图 D.2 立方体型阻抗测量适配器侧视图和正视图

D.2 共模转换适配器

用于确定不对称人工网络的共模点，一端为 4 mm 接头，另外一端与不对称人工网络的 EUT 端匹配（EUT 端接口类型包括：RJ45，RJ11，D-Sub 25 等，其内部为所有物理线对连接在一起并与 4mm 接头直接相连，如图 D.3 所示。

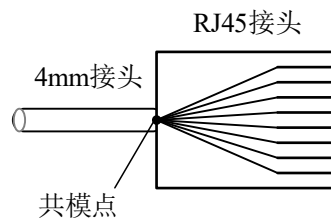


图 D.3 不对称人工网络 EUT 端为 RJ45 所使用的共模转换适配器

附录 E

纵向转换损耗探头

E.1 纵向转换损耗（LCL）的定义

根据 ITU-T 建议书 G.117，纵向转换损耗（LCL）的测量应按照图 E.1 所示的电路图进行。

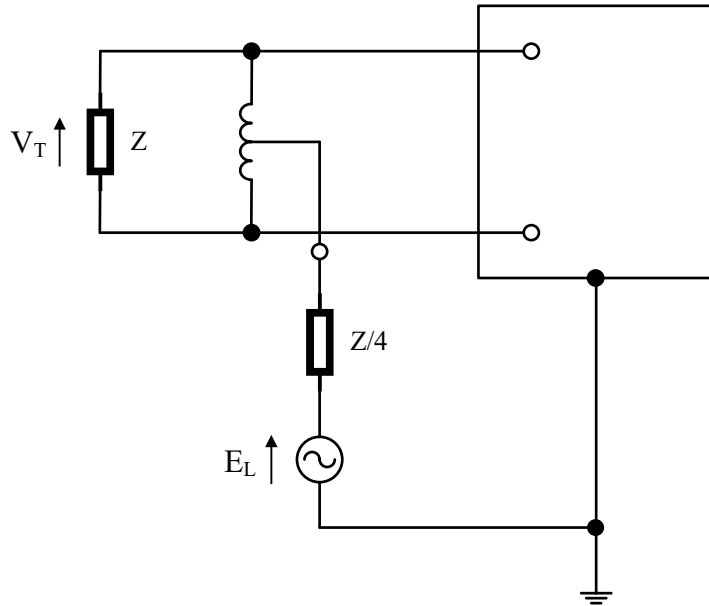


图 E.1 ITU-T 定义 LCL 测量方法的电路图

参见图 E.1，ITU-T 将纵向转换比 c 定义为

$$c = \frac{V_T}{E_L}$$

以及纵向转换损耗（LCL）为

$$\text{LCL} = 20 \lg \left| \frac{1}{c} \right| = 20 \lg \left| \frac{E_L}{V_T} \right| \text{ dB} \quad (\text{E.1})$$

从式（E.1）和图 E.1 可以看出，纵向转换损耗（LCL）是由于被测二端口设备的电气不平衡，将施加的共模电压转换成差模电压的量度。

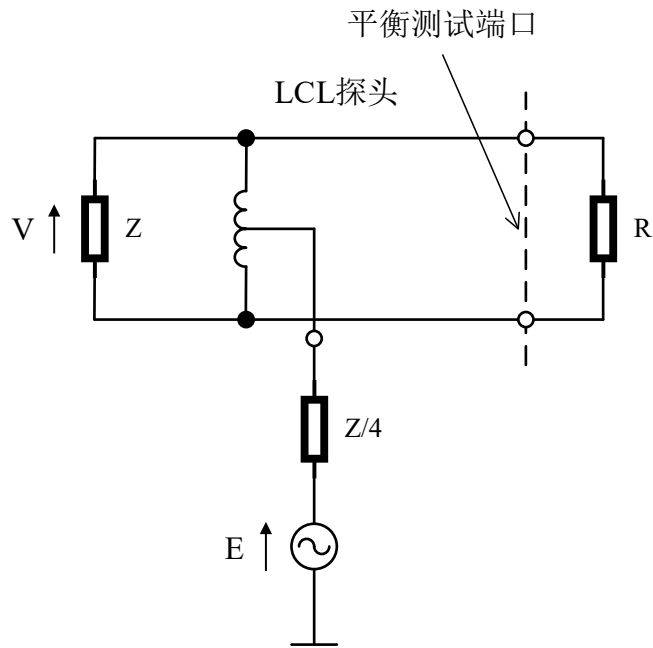
E.2 纵向转换损耗探头的校验

E.2.1 设置网络分析仪的频率范围与被校验 LCL 探头的工作频段相一致，源功率为 0 dBm，中频带宽不大于 100 Hz，测量模式设置为传输测量，测量显示格式设置为对数幅度。网络分析仪的双端口连接射频电缆后，在射频电缆末端对网络分析仪进行全双端口

校准。

E.2.2 仪器的连接布置图如图 7 所示，将 LCL 探头放置于参考接地平面上，其测量端与校准负载（LCL=0 dB）相连，网络分析仪的输出端和输入端与 LCL 探头的输入端和输出端相连，对网络分析仪执行归一化操作。

E.2.3 仪器的连接布置图如图 E.2 所示，LCL 探头的平衡测试端口接 $100\ \Omega$ 无感电阻，网络分析仪测量得到该探头的残留纵向转换损耗，该测量值应比被校不对称人工网络要求的纵向转换损耗至少高 10 dB。



注 1: $R=100\ \Omega$ 。

图 E.2 LCL 探头残留 LCL 校验布置

E.2.4 仪器的连接布置图如图 E.3 所示，LCL 探头的平衡测试端口接 π 型电路，网络分析仪测量得到 π 型电路的 LCL 测量值。使用数字多用表测量 R_1 、 R_2 和 R_3 三个电阻值并用式 (E.2) 进行计算得到 π 型电路的 LCL 计算值，将 LCL 计算值和测量值进行比较，要求其偏差 $\leq \pm 1\text{dB}$ 。

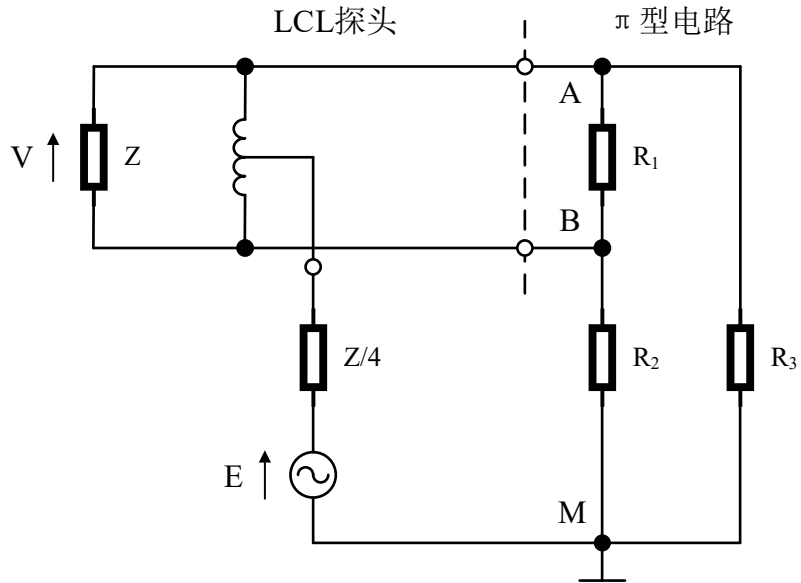


图 E.3 LCL 示值误差校验布置

$$LCL = 20 \times \lg \left(2 \times \frac{(Z_{AM} + Z_{BM})}{(Z_{AM} - Z_{BM})} \right) \quad (\text{E.2})$$

注： $Z_{AM} = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{(R_1 + R_2) \times R_3}$, $Z_{BM} = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{(R_1 + R_3) \times R_2}$