

中华人民共和国工业和信息化部

电子计量技术规范

**JJF**(电子)0000─2022

共模吸收装置校准规范

Calibration Specification for Common Mode Absorption Devices

（报批稿）

2022-××-××发布 2022-××-××实施

**中华人民共和国工业和信息化部** 发 布

共模吸收装置校准规范

Calibration Specification for Common Mode Absorption Devices

**JJF(电子)0000**─**2022**

归 口 单 位：中国电子技术标准化研究院

主要起草单位：工业和信息化部电子第五研究所

参加起草单位：广州赛宝计量中心检测服务有限公司

本规范技术条文委托起草单位负责解释

本规范主要起草人：

陈 彦（工业和信息化部电子第五研究所）

张 浩（工业和信息化部电子第五研究所）

詹惠贞（工业和信息化部电子第五研究所）

参加起草人：

付贵瑜（广州赛宝计量中心检测服务有限公司）

强晓霄（广州赛宝计量中心检测服务有限公司）

高翔宇（广州赛宝计量中心检测服务有限公司）

目 录

[引 言 II](#_Toc66434881)

[1 范围 1](#_Toc66434882)

[2 引用文件 1](#_Toc66434883)

[3 术语和计量单位 1](#_Toc66434884)

[3.1 共模吸收装置（CMAD） 1](#_Toc66434885)

[3.2 散射系数（S参数） 1](#_Toc66434886)

[3.3 直通―反射―传输线校准法（TRL校准法） 1](#_Toc66434887)

[4 概述 1](#_Toc66434888)

[5 计量特性 2](#_Toc66434889)

[6 校准条件 3](#_Toc66434891)

[6.1 环境条件 3](#_Toc66434892)

[6.2 测量标准及其它设备 3](#_Toc66434893)

[7 校准项目和校准方法 4](#_Toc66434894)

[7.1 校准项目 4](#_Toc66434895)

[7.2 校准方法 4](#_Toc66434896)

[8 校准结果表达 7](#_Toc66434897)

[9 复校时间间隔 7](#_Toc66434898)

[附录A 原始记录格式 8](#_Toc66434899)

[附录B 校准证书内页格式 10](#_Toc66434900)

[附录C 测量不确定度评定示例 12](#_Toc66434901)

[附录D CMAD校准件 15](#_Toc66434902)

[附录E TRL校准法 17](#_Toc66434903)

# 引 言

本规范依据JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》和JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》编写。

本规范参考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》及CISPR 16-1-4:2019《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。

共模吸收装置校准规范

# 1 范围

本规范适用于30MHz~200MHz频率范围共模吸收装置(CMAD)的校准,其他覆盖此频段的共模吸收装置(CMAD)可参照执行。

# 2 引用文件

本规范引用了下列文件：

GB/T 6113.104/CISPR 16-1-4:2019 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(Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods—Part 1-2: Radio disturbance immunity measuring apparatus—Antennas and test sites for radiated disturbance measurements)。

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

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。

[GB/T 6113.104-2021，3.1.7]。

3.2 散射系数（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。

[GB/T 6113.104-2021，3.1.22]。

3.3 直通―反射―传输线校准法（TRL校准法）through―reflect―line(TRL)calibration

使用三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，需要进行四次参考测量。

[GB/T 6113.104-2021，3.1.28]。

# 4 概述

共模吸收装置（CMAD）采用铁氧体半圆环外套木质绝缘外壳构造而成，铁氧体半圆环分上下两部分镶贴在木质绝缘外壳的内侧，并设置卡扣开关以方便使用。CMAD外观上与骚扰功率测量的功率吸收钳类似，典型长度为0.6m。CMAD通过铁氧体环的吸收作用来抑制共模电流，从而达到抑制线缆向外辐射的共模信号的目的，同时稳定共模阻抗，提高辐射发射测量的准确性。辐射发射测量中， CMAD使用在离开试验空间的连接线缆上，线缆从CMAD的铁氧体环中间穿过。由于不同试验场地上线缆离开试验场地处（例如，转台中心）的共模阻抗和对称性有差异。因此，辐射发射测量中可以通过使用CMAD来提高不同试验场地之间测量结果的复现性。

# 5 计量特性

5.1 校准夹具和共模吸收装置（CMAD）组成的二端口网络的S参数的幅值（30MHz~200MHz），允许范围＜0.25（图1蓝实线）。

* 1. 校准夹具和共模吸收装置（CMAD）组成的二端口网络的S参数的幅值（30MHz~200MHz），允许范围参照5.2.1和5.2.2。
     1. 30MHz和200MHz时指标上限值分别为0.75和0.55（整个频段内随频率的对数线性减小，图1红实线）；
     2. 30MHz和200MHz时指标下限值分别为0.6和0.4（整个频段内随频率的对数线性减小，图1红虚线）。

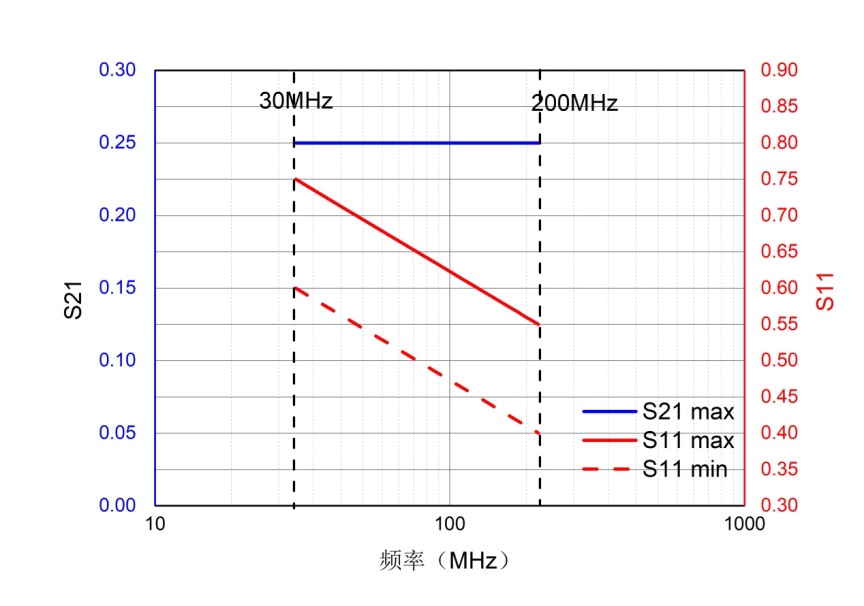


图1 *S*11和*S*21幅值的允许范围

共模吸收装置（CMAD）的计量特性由校准夹具和共模吸收装置（CMAD）组成的二端口网络的散射系数（S参数）来表征。

# 6 校准条件

# 6.1 环境条件

6.1.1 环境温度：(23±5)℃。

6.1.2 环境相对湿度：20%~80%。

6.1.3 供电电源：电压(220±11)V，频率(50±1)Hz。

6.1.4 其他：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 网络分析仪

频率范围：30MHz~200MHz；

输出电平：-20dBm～5dBm；

动态范围：≥80dB；

具备TRL校准法功能选件。

6.2.2 CMAD校准夹具

频率范围30MHz～200MHz，传输线、反射件、直通件均为直径4mm的圆柱金属杆，垂直法兰的两个金属面大小均为100mm×100mm，没有电指标要求，机械尺寸详见附录D。

注:CMAD校准夹具是依据校准模型定义的一套TRL校准件，主要包括参考接地平面上的一根圆柱金属杆（传输线）、两根相同的反射件、一个直通件（或直通连接器）和两个相同的垂直法兰。校准配置图由三个部分组成：一部分为两个垂直参考平面之间（传输线的参考长度）的传输线部分，另外两个部分为垂直参考平面和适配器端口之间的适配器A部分和适配器B部分。

6.2.3 游标卡尺

测量范围：（0～150）mm；

最大允许误差：±0.1 mm。

6.2.4 参考接地平面（RGP）

RGP为金属接地平板，其各边尺寸应至少比CMAD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CMAD校准夹具底面具有良好的电搭接。

# 7 校准项目和校准方法

## 7.1 校准项目

7.1.1校准夹具和共模吸收装置组成的二端口网络的S参数。

7.1.2校准夹具和共模吸收装置组成的二端口网络的S参数。

## 7.2 校准方法

7.2.1外观及工作正常性检查

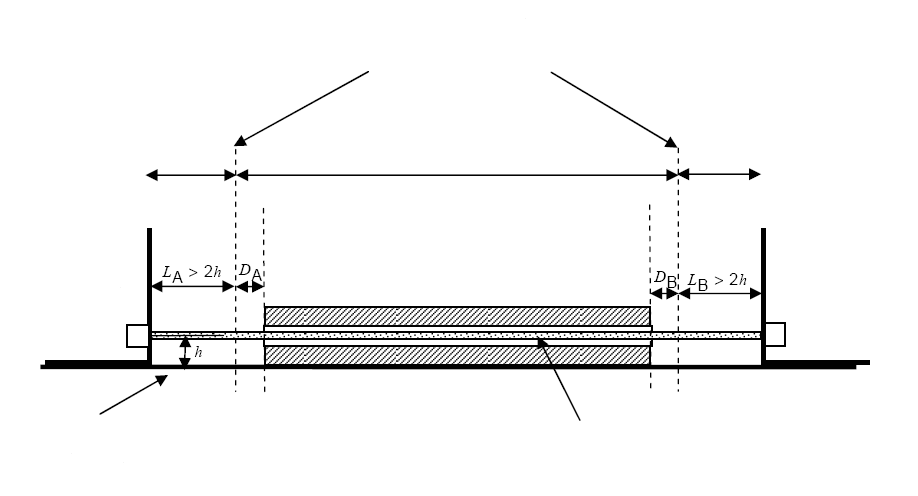
被校准共模吸收装置（CMAD）的外观结构、内部铁氧体环、卡扣开关应完整无损坏,闭合时上下两部分的铁氧体环应对齐无错位、接触面缝隙紧密。检查结果记录于附录A表A.1中。

7.2.2 校准夹具和共模吸收装置（CMAD）组成的二端口网络的S参数

7.2.2.1共模吸收装置（CMAD）的计量特性由校准夹具和CMAD组成的二端口网络的S参数来表征。校准时先使用CMAD校准夹具(TRL校准件)对网络分析仪进行TRL法校准，然后按照规定高度、距离在校准夹具中加入CMAD，测量校准夹具和CMAD组成的二端口网络的S参数。全部校准过程需要在参考接地平面（RGP）上完成，RGP各边尺寸应至少比CMAD和整套校准系统在其平面上的几何投影尺寸大0.2m，且其表面应与CMAD校准件底面具有良好的电搭接。

7.2.2.2 校准配置图及参考平面的定义见图2，配置图由三部分组成：一部分为两个参考平面之间（传输线的参考长度）的传输线部分，另外两个部分为参考平面和适配器端口之间的适配器A部分和适配器B部分。

校准配置规范要求：校准应在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*LA=LB*应大于*2h*（见图2）。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*。放置校准夹具的参考接地平面的长度应大于（*L*jig+4*h*），*L*jig为校准夹具的总长度，宽度应大于4*h*，且其各边尺寸应至少比CMAD和整套校准系统在平面上的几何投影尺寸大0.2m，表面应与垂直法兰底面具有良好的电搭接。



所选择的接近于被校CMAD机械端的参考平面

校准夹具的传输线部分

校准夹具的适配器B部分

校准夹具的适

配器A部分

CMAD

参考接地平面

直径d为4mm的圆柱形金属杆作为传输线

适配器端口B

与网络分析仪的端口B连接

适配器端口A

与网络分析仪的端口A连接

适用于CMAD结构的参考接地平面上的传输线高度h（典型值：30mm，65mm，90mm）

图2 校准配置图和参考平面的定义

7.2.2.3依据校准夹具的功能及尺寸在网络分析仪功能菜单下自定义TRL校准件（具体设置程序可参照网络分析仪的说明书），自定义校准件应包含“反射”、“直通”、“传输线”等三个校准步骤，并与实物TRL校准件相对应。关于TRL校准法的介绍见附录E。

7.2.2.4网络分析仪的频率范围设置为30MHz～200MHz，中频带宽100Hz，选用7.2.2.3中自定义的TRL校准件（菜单中定义的校准步骤）对未加载CMAD的校准夹具(实物TRL校准件)做TRL法校准，分别做“反射”（图3、图4）、“直通”（图5）、“传输线”（图6）三个校准步骤，然后把CMAD 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和模式，分别读出的值，并分别记录在表A.2和表A.3。“反射”、“直通”、“传输线”三个步骤的校准框图如图3至图6所示：



图3 “反射端口A”的校准配置

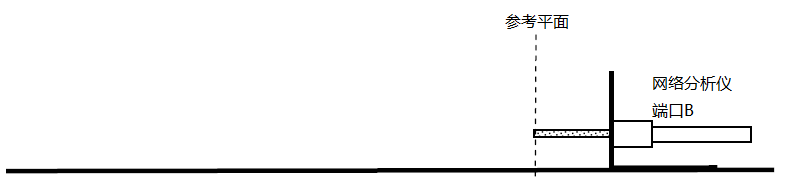


图4 “反射端口B”的校准配置

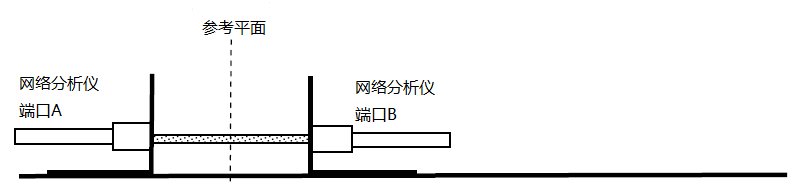


图5 “直通”的校准配置

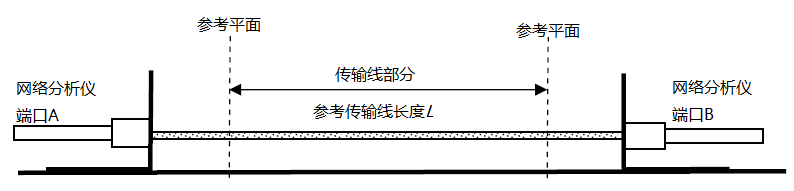


图6 “传输线”的校准配置

# 8 校准结果表达

校准后，出具校准证书。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）证书或报告的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；

e）客户的名称和地址；

f）被校准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

建议复校时间间隔不超过1年。由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、本身质量等诸多因素决定的。因此，申请校准单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。

# 附录A

原始记录格式

A.1 外观及工作正常性检查

表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 校准件和共模吸收装置（CMAD）组成的二端口网络的S参数

表A.2 S参数

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 频率 | 标准值 | 不确定度(*k*=2) |
| MHz | （） | （） |
| 30 |  |  |
| 40 |  |  |
| 50 |  |  |
| 60 |  |  |
| 70 |  |  |
| 80 |  |  |
| 90 |  |  |
| 100 |  |  |
| 120 |  |  |
| 140 |  |  |
| 160 |  |  |
| 180 |  |  |
| 200 |  |  |

A.3 校准件和共模吸收装置（CMAD）组成的二端口网络的S参数

表A.3 S参数

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 频率 | 标准值 | 不确定度(*k*=2) |
| MHz | （） | （） |
| 30 |  |  |
| 40 |  |  |
| 50 |  |  |
| 60 |  |  |
| 70 |  |  |
| 80 |  |  |
| 90 |  |  |
| 100 |  |  |
| 120 |  |  |
| 140 |  |  |
| 160 |  |  |
| 180 |  |  |
| 200 |  |  |

# 附录B

校准证书内页格式

B.1 外观及工作正常性检查

表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 校准件和共模吸收装置（CMAD）组成的二端口网络的S参数

表B.2 S参数

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 频率 | 标准值 | 允许范围 | | | 不确定度(*k*=2) |
| MHz | （） | （） | | | （） |
| 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.3 校准件和共模吸收装置（CMAD）组成的二端口网络的S参数

表B.3 S参数

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 频率 | 标准值 | 允许范围 | | 不确定度(*k*=2) |
| MHz | （） | （） | | （） |
| 30 |  | < | 0.25 |  |
| 40 |  | < | 0.25 |  |
| 50 |  | < | 0.25 |  |
| 60 |  | < | 0.25 |  |
| 70 |  | < | 0.25 |  |
| 80 |  | < | 0.25 |  |
| 90 |  | < | 0.25 |  |
| 100 |  | < | 0.25 |  |
| 120 |  | < | 0.25 |  |
| 140 |  | < | 0.25 |  |
| 160 |  | < | 0.25 |  |
| 180 |  | < | 0.25 |  |
| 200 |  | < | 0.55 |  |

# 附录C

测量不确定度评定示例

C.1 散射参数测量结果不确定度评定

C.1.1 测量模型

散射参数的测量模型为：

*y*=IM （C.1）

式中：

*y*——校准件和共模吸收装置（CMAD）组成的二端口网络的值，无单位；

IM——网络分析仪测量值，无单位。

C.1.2 不确定度来源

不确定度的主要影响量为校准后的系统剩余误差和随机误差，来源有：

1）网络分析仪TRL校准过程不完善引入的标准不确定度分量*u*1；

2）TRL校准件不理想引入的标准不确定度分量*u*2；

3）网络分析仪反射系数测量不准引入的标准不确定度分量*u*3；

4）校准布置不理想引入的相对标准不确定度分量*u*4；

5）线缆弯曲变化引入的标准不确定度分量*u*5；

6）测量重复性引入的标准不确定度分量*u*6。

C.1.3 标准不确定度评定

C.1.3.1网络分析仪TRL校准过程不完善引入的标准不确定度分量*u*1

按B类评定，由实验数据得出网络分析仪TRL校准过程不完善对测量结果的误差影响量最大为0.02，假设为均匀分布，取*k*=，则不确定度分量为

*u*1=0.02/=0.0115

C.1.3.2 TRL校准件不理想引入的标准不确定度分量*u*2

TRL校准件的定义与校准模型（理想值）的不一致造成校准件本身非理想。按B类评定，TRL校准件不理想对测量结果的误差影响量最大为0.02，假设为均匀分布，取*k*=，则不确定度分量为

*u*2=0.02/=0.0115

C.1.3.3 网络分析仪反射系数测量不准引入的标准不确定度分量*u*3

按B类评定,查阅网络分析仪E5071C的技术说明书，校准后的反射系数最大允许误差为0.01。假设为均匀分布，取*k*=，则不确定度分量为

*u*3=0.01/=0.0058

C.1.3.4校准布置不理想引入的相对标准不确定度分量*u*4

按B类评定，实验数据得到校准布置不理想（参考接地平面、传输线在CMAD中的位置、CMAD与参考端面的距离等）对测量结果的误差影响量最大为0.02，假设为均匀分布，取*k*=，则不确定度分量为

*u*4=0.02/=0.0115

C.1.3.5线缆弯曲变化引入的标准不确定度分量*u*5

按B类评定，实验数据得到线缆弯曲变化对测量结果的误差影响量最大为0.01，假设为均匀分布，取*k*=，则不确定度分量为

*u*5=0.01/=0.0058

C.1.3.6测量重复性引入的标准不确定度分量*u*6

利用网络分析仪在重复性条件下对CMAD的反射系数进行十次测量，100MHz频率点反射系数测量结果见表C.1。

表C.1

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 测量序号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 测量结果 | 0.52 | 0.51 | 0.52 | 0.53 | 0.50 |
| 测量序号 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 测量结果 | 0.53 | 0.54 | 0.52 | 0.50 | 0.51 |
| 平均值 | 0.518 | | 标准差*s* | 0.013 | |

测量重复性引入的不确定度分量*u*6=0.013。

C.1.4 合成标准不确定度

C.1.4.1 主要不确定度汇总表，见表C.2。

表C.2

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 不确定度来源(*u*i) | *a*i | *k*i | *u*i |
| 网络分析仪TRL校准过程不完善引入的标准不确定度分量*u*1 | 0.02 |  | 0.0115 |
| TRL校准件不理想引入的标准不确定度分量*u*2 | 0.02 |  | 0.0115 |
| 网络分析仪反射系数测量不准引入的标准不确定度分量*u*3 | 0.01 |  | 0.0058 |
| 校准布置不理想引入的相对标准不确定度分量*u*4 | 0.02 |  | 0.0115 |
| 线缆弯曲变化引入的标准不确定度分量*u*5 | 0.01 |  | 0.0058 |
| 测量重复性引入的标准不确定度分量*u*6 | 0.013 | / | 0.013 |

C.1.4.2 合成不确定度计算

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==0.025

C.1.5 扩展不确定度

取包含因子*k*=2，则扩展不确定度为：

*U*=*k*=0.05，*k*=2。

C.1.6 散射参数校准方法与相同，不确定度可参照以上方法评定。

# 附录D

CMAD校准夹具

CMAD校准夹具是基于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。用户使用网络分析仪测量仪器或元器件时，根据被测对象来设计不同的TRL校准件，这具有一定的难度和挑战性。但事实上，TRL标准件的制作并没有 SOLT标准件要求那么高，尺寸精确度更容易实现。TRL校准的精度只是跟 TRL标准件的质量、重复性部分相关，而不是完全由校准件决定。因此，某种意义上TRL校准件与SOLT校准件相比更容易制作，特性也更容易描述。矢量网络分析仪一般都可以支持TRL校准件的定义、校准及导入功能。

CMAD校准夹具的设计要求：

⑴直通标准

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。

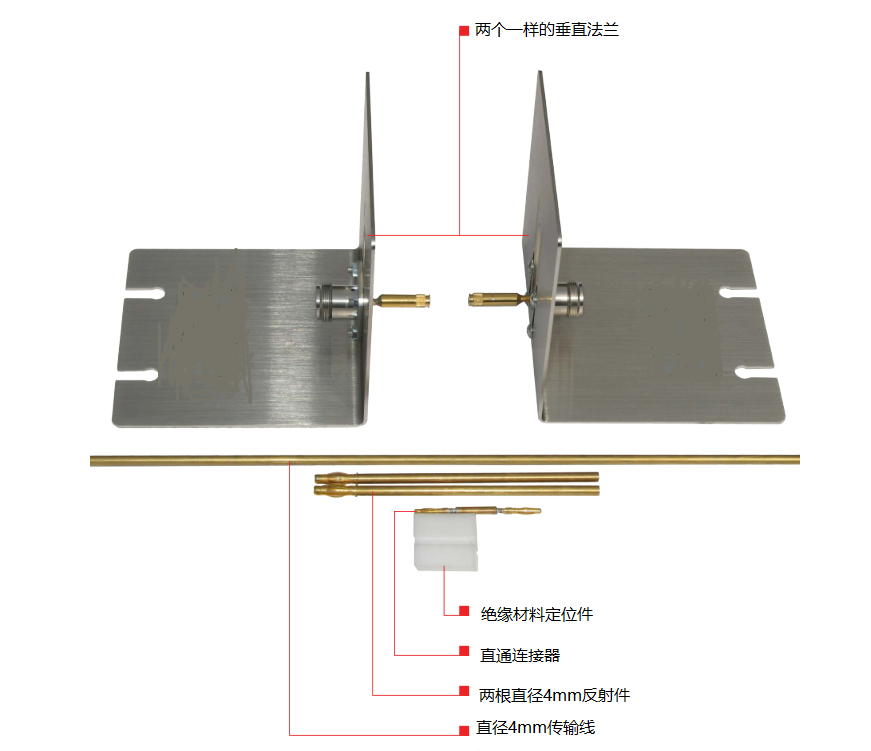
⑵反射标准

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。

⑶传输线标准

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必须在20°~160°之间(或-20°~-160°)。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°。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，必须使用1条以上的传输线以覆盖整个频率范围。

GB/T 6113.104-2021第八章节中定义的典型CMAD校准夹具见图D.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D.1 典型的CMAD校准夹具

# 附录E

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也推荐使用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，就可以把误差盒完整的表征出来。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。

当传输线部分的参考长度为*L*时，则适用的校准频率范围处于以下最低频率*f*L和最高频率*f*H之间：

……………………………………………(E1)

……………………………………………(E2)

式中：*c*为3×108m/s。例如，当传输线部分的参考长度为0.6m时，其适用的频率范围为25MHz~225MHz。