



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 31723.405—XXXX/IEC 62153-4-5:2021

代替 GB/T 31723.405—2015

## 金属通信电缆试验方法 第4-5部分： 电磁兼容 耦合或屏蔽衰减 吸收钳法

Metallic communication cable test methods—Part 4-5: Electromagnetic compatibility  
(EMC)—Screening or coupling attenuation—Absorbing clamp method

(IEC 62153-4-5:2021, IDT)

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX—XX—XX 发布

XXXX—XX—XX 实施

国家市场监督管理总局 发布  
国家标准化管理委员会



## 目 次

前言 .....	III
引言 .....	IV
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 试验方法原理 .....	2
5 设备 .....	2
5.1 概述 .....	2
5.2 平衡-不平衡转换器要求 .....	4
5.3 TP 连接单元要求 .....	6
5.4 试验样品 .....	6
6 试验装置 .....	8
6.1 试验装置校准 .....	8
6.2 试验装置的复合损耗 .....	8
6.3 试验装置的衰减 .....	9
6.4 吸收器的插入损耗 .....	10
6.5 试验装置 .....	10
6.6 施加到电缆上的拉力 .....	13
7 测量程序 .....	13
7.1 概述 .....	13
7.2 同轴和准同轴电缆的屏蔽衰减 .....	14
7.3 平衡电缆的耦合衰减 .....	16
8 试验报告 .....	17
9 要求 .....	17
附录 A (规范性) 内部电路阻抗的确定 .....	18
A.1 内部电路阻抗的确定 .....	18
A.2 $Z_L < 50\ \Omega$ 时的阻抗匹配装置 .....	18
A.3 $Z_L > 50\ \Omega$ 时的阻抗匹配装置 .....	19
附录 B (资料性) 自制阻抗匹配适配器示例 .....	20
附录 C (资料性) 平衡电缆耦合衰减试验结果评估 .....	21
C.1 最差值 .....	21
C.2 示例 .....	21
附录 D (资料性) 连接点的反射损耗 .....	24
附录 E (资料性) 混合模式参数 .....	25
E.1 混合模 S 参数的定义 .....	25
E.2 VNA 的参考阻抗 .....	27

参考文献 .....	28
图 1 近端屏蔽衰减测量原理 .....	3
图 2 使用平衡-不平衡转换器的近端耦合衰减测量 .....	4
图 3 无平衡-不平衡转换器时使用多端口 VNA 进行近端耦合衰减测量 .....	4
图 4 屏蔽对称电缆的终端电阻器 .....	7
图 5 试验样品的准备（对绞和多芯电缆） .....	7
图 6 试验装置校准 .....	8
图 7 校准中的端接 .....	9
图 8 吸收器的插入损耗测量 .....	10
图 9 屏蔽双绞电缆测量的屏蔽层连接示例 .....	11
图 10 对称电缆近端测量的试验装置 .....	11
图 11 受试电缆近端表面波的测量原理图 .....	12
图 12 受试电缆远端表面波的测量原理图 .....	12
图 13 远端测量的屏蔽装置 .....	14
图 A.1 $Z < 50 \Omega$ 时的阻抗匹配 .....	18
图 A.2 $Z > 50 \Omega$ 时的阻抗匹配 .....	19
图 B.1 衰减和回波损耗 .....	20
图 B.2 衰减和回波损耗 .....	20
图 C.1 金属箔屏蔽对称电缆的测量示例 .....	21
图 C.2 良好屏蔽的对称电缆的测量示例 .....	22
图 C.3 良好屏蔽的同轴电缆的测量示例 .....	22
图 C.4 对称电缆测量的常见错误（一） .....	23
图 C.5 对称电缆测量的常见错误（二） .....	23
图 D.1 内电阻为 $R_i$ 的源和 $R_L$ .....	24
图 E.1 常规两端口网络 .....	25
图 E.2 常规四端口网络 .....	25
图 E.3 VNA 的物理和逻辑端口 .....	25
图 E.4 混合模式 S 参数的命名法 .....	26
图 E.5 测量配置，单端响应 .....	26
图 E.6 测量配置，差模响应 .....	27
表 1 平衡-不平衡转换器的性能特点（30 MHz~1 GHz） .....	5
表 2 平衡-不平衡转换器的性能特点（30 MHz~2.4 GHz） .....	5
表 3 TP 连接单元的性能特点（30 MHz~2.4 GHz） .....	6

## 前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件是GB/T 31723《金属通信电缆试验方法》的第4-5部分。GB/T 31723已经发布了以下部分：

- 第4-3部分：电磁兼容 表面转移阻抗 三同轴法；
- 第4-4部分：电磁兼容 3GHz及以上频率屏蔽衰减 as 试验方法 三同轴法；
- 第4-5部分：电磁兼容 耦合或屏蔽衰减 吸收钳法；
- 第4-6部分：电磁兼容 表面转移阻抗 线注入法；
- 第4-11部分：电磁兼容 跳线、同轴电缆组件、接连接器电缆的耦合衰减或屏蔽衰减 吸收钳法；
- 第4-12部分：电磁兼容 连接硬件的耦合衰减或屏蔽衰减 吸收钳法；
- 第4-13部分：电磁兼容 链路和信道（实验室条件）的耦合衰减 吸收钳法；
- 第4-14部分：电磁兼容 电缆组件（现场条件）的耦合衰减 吸收钳法。

本文件代替GB/T 31723.405—2015《金属通信电缆试验方法 第4-5部分：电磁兼容 耦合或屏蔽衰减 吸收钳法》，与GB/T 31723.405—2015相比，除结构调整和编辑性改动外，主要技术变化如下：

- 更改了测量频率上限，扩展到2.4GHz（见第1章，2015年版的第1章）；
- 增加了术语“准同轴电缆”（见3.1）；
- 更改了试验方法原理（见第4章，2015版的第4章）；
- 更改了概述（见5.1，2015版的5.1.1）；
- 更改了平衡-不平衡转换器要求（见5.2，2015版的5.1.2）；
- 增加了TP连接单元要求（见5.3）；
- 更改了试验样品（见5.4，2015版的5.2）；
- 更改了试验装置校准（见6.1，2015版的5.3.1.1）；
- 增加了同轴和准同轴电缆的屏蔽衰减和平衡电缆的耦合衰减（见7.2和7.3）；
- 更改了试验报告（见第8章，2015版的6.2）；
- 增加了内部电路阻抗的确定（见附录A）。

本文件等同采用IEC 62153-4-5:2021《金属通信电缆试验方法 第4-5部分：电磁兼容 耦合或屏蔽衰减 吸收钳法》。

本文件做了下列最小限度的编辑性改动：

- 国际文件第4章缺少参数 $P_{\text{diff}}$ 和 $P_{\text{com,max}}$ 的定义，分别补充定义为“匹配差模功率”与“匹配共模功率最大峰值”；
- 国际文件中的式（6） $a_{\text{TP-connectingunit}}$ 缺少定义，补充定义为“所使用的TP连接单元的衰减”；
- 国际文件中的式（7）、式（8）、式（10）和式（11）有误，公式中的分子 $P_2$ 更改为 $P_1$ 。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中华人民共和国工业和信息化部提出。

本文件由全国电子设备用高频电缆及连接器标准化技术委员会（SAC/TC 190）归口。

本文件起草单位：。

本文件主要起草人：。

本文件及其所代替文件的历次版本发布情况为：

- 2015年首次发布为GB/T 31723.405—2015，本次为第一次修订。

## 引 言

为规范金属通信电缆、跳线、同轴电缆组件的电磁兼容测量，以及为金属通信电缆、跳线、同轴电缆组件的制造商和检测机构提供不同的电磁兼容测量方法，GB/T 31723规定了金属通信电缆电磁兼容测量的定义、限值和不同测量方法的试验程序和试验要求，

GB/T 31723拟由以下部分构成。

- 第 4-0 部分：电磁兼容 表面转移阻抗和屏蔽衰减之间的关系 推荐限值；
- 第 4-1 部分：电磁兼容 屏蔽测量的介绍；
- 第 4-2 部分：电磁兼容 屏蔽和耦合衰减 注入钳方法；
- 第 4-3 部分：电磁兼容 表面转移阻抗 三同轴法；
- 第 4-4 部分：电磁兼容 3GHz 及以上频率屏蔽衰减 as 试验方法 三同轴法；
- 第 4-5 部分：电磁兼容 耦合或屏蔽衰减 吸收钳法；
- 第 4-6 部分：电磁兼容 表面转移阻抗 线注入法；
- 第 4-7 部分：电磁兼容 转移阻抗、屏蔽或耦合衰减 管中管法。
- 第 4-8 部分：电磁兼容 容性耦合导纳；
- 第 4-9 部分：电磁兼容 屏蔽平衡电缆的耦合衰减 三同轴法；
- 第 4-10 部分：电磁兼容 馈通和电磁衬垫的转移阻抗和屏蔽衰减 双同轴测试方法；
- 第 4-11 部分：电磁兼容 跳线、同轴电缆组件、接连接器电缆的耦合衰减或屏蔽衰减 吸收钳法；
- 第 4-12 部分：电磁兼容 连接硬件的耦合衰减或屏蔽衰减 吸收钳法；
- 第 4-13 部分：电磁兼容 链路和信道（实验室条件）的耦合衰减 吸收钳法；
- 第 4-14 部分：电磁兼容 电缆组件（现场条件）的耦合衰减 吸收钳法；
- 第 4-15 部分：电磁兼容 使用三轴单元测量转移阻抗和屏蔽衰减或耦合衰减的试验方法；
- 第 4-16 部分：电磁兼容 使用三轴布置将转移阻抗的测量频率范围扩展到更高频率和将屏蔽衰减测量的频率范围扩展到更低频率；
- 第 4-17 部分：电磁兼容 减小因子。

# 金属通信电缆试验方法 第4-5部分： 电磁兼容 耦合或屏蔽衰减 吸收钳法

## 1 范围

本文件描述的吸收钳法适用于在30 MHz~1000 MHz或2400 MHz频率范围内（取决于吸收钳的性能）确定金属通信电缆的耦合或屏蔽衰减的特性。本文件可作为IEC 62153-4-4或IEC 62153-4-9规定的三同轴法的替代方法。由于未规定吸收钳法的外部电路，因此在不同位置 and 不同实验室所得的试验结果可能不同，其变化甚至会超过 $\pm 6$  dB。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

IEC 66050-726 国际电工词汇 第726部分：传输线和波导（International Electrotechnical Vocabulary (IEV)—Part 726: Transmission lines and waveguides）

注：GB/T 14733.2—2008 电信术语 传输线和波导（IEC 60050-726:1982, IDT）

IEC TS 62153-4-1 金属通信电缆试验方法 第4-1部分：电磁兼容 电磁屏蔽测量的介绍 [Metallic communication cable test methods—Part 4-1: Electromagnetic compatibility (EMC)—Introduction to electromagnetic screening measurements]

CISPR 16-1-3:2004 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（Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods—Part 1-3: Radio disturbance and immunity measuring apparatus—Ancillary equipment—Disturbance power）

注：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（CISPR 16-1-3:2016, IDT）

ITU-T G.117:1996 对地不平衡传输（Transmission aspects of unbalance about earth）

ITU-T O.9:1999 评估对地不平衡度的测量配置（Measuring arrangements to assess the degree of unbalance about earth）

## 3 术语和定义

IEC 66050-726和IEC TS 62153-4-1界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

ISO和IEC维护的用于标准化的术语数据库网址如下：

——IEC电工学：<https://www.electropedia.org/>；

——ISO在线浏览平台：<https://www.iso.org/obp>。

### 3.1

**准同轴电缆** quasi-coaxial cable

具有两个或多个内导体，由用作外导体的电缆屏蔽层封闭，在两端连接在一起的电缆结构。

注：屏蔽的对称或多芯电缆通过将内部导电芯线进行短路而成为准同轴系统。

## 4 试验方法原理

电缆（不对称的同轴电缆）或者电缆线对（对称电缆）用功率 $P$ 馈电。由于电缆或电缆线对与周围环境之间的电磁耦合，激励了表面波，其沿着屏蔽层表面（也可以是非屏蔽的电缆表面）向两个方向进行传播。使用一台电流转换器提取表面波功率，同时用一种吸收器（通常为铁氧体管）抑制不想要的共模电流。这种组合体称为吸收钳。

根据测得的表面电流的峰值，可计算出由电缆屏蔽层（或者电缆本身）和周围环境所构成的外部系统功率的最大峰值 $P_{2\max}$ 。

功率 $P_1$ 与 $P_{2\max}$ 之比的对数称为屏蔽或耦合衰减，用dB表示。

对于无平衡-不平衡转换器的测量，功率 $P_{\text{diff}}$ （匹配差模功率）和 $P_{\text{com, max}}$ （匹配共模功率最大峰值）之比的对数称为耦合衰减。

对于不平衡的（同轴）或准同轴电缆，测量结果是屏蔽衰减。对于平衡的（对称）电缆，需要考虑以下两种情况：

- a) 差模馈入的骚扰功率：测量结果为耦合衰减，是不平衡衰减和屏蔽衰减的合成结果；
- b) 共模馈入的骚扰功率：测量结果为屏蔽衰减。

为了测量耦合衰减，需要用平衡信号馈入给受试平衡对线。这可通过以下方式实现：通过使用两端口矢量网络分析仪（VNA）和平衡-不平衡转换器将不平衡（通常为50  $\Omega$ ）的发生器信号转换为平衡电缆的平衡（通常为100  $\Omega$ ）信号。

另一种可选择的是使用4端口VNA或类似试验设备的“无平衡-不平衡转换器”试验方法。首选方法是无平衡-不平衡转换器（虚拟平衡-不平衡转换器）的方法。

表面电流用固定钳以扫频的方式测得。

考虑到在近端或者远端表面波的最大效应，耦合衰减 $a_c$ 或屏蔽衰减 $a_s$ 用公式(1)进行确定：

$$a_c = 10 \lg \left( \frac{P_1}{\max[P_{2n}, P_{2f}]} \right) \dots \dots \dots (1)$$

式中：

$P_1$ ——样品内部电路的输入功率；

$P_{2n}$ ——近端耦合峰值功率的最大值；

$P_{2f}$ ——远端耦合峰值功率的最大值。

IEC TS 62153-4-1详细描述了屏蔽衰减和耦合衰减测量的物理背景信息。

## 5 设备

### 5.1 概述

试验装置的背景噪声应比报告值所需的仪器读数至少低6 dB。这意味着在试验中，考虑到吸收钳以及平衡-不平衡转换器（如果适用）或双绞对线连接系统的最大插入损耗，例如，当测量约90 dB的耦合衰减或屏蔽衰减时，需采用动态测量范围至少有115 dB的设备。设备的精度应优于 $\pm 1$  dB。

当测量较高的屏蔽和耦合衰减值，通常高于80 dB，推荐在屏蔽室（例如电波暗室）中进行测量。

除非在相关电缆规范中另有规定，设备应能在30 MHz~1 GHz和/或500 MHz~2.4 GHz的整个频率范围内测量耦合衰减和屏蔽衰减。对于1 GHz以上的测量，推荐使用无平衡-不平衡转换器的试验程序。

测量装置可采用VNA，也可采用信号发生器和测量接收机。

为了测量耦合衰减以及测量不平衡衰减，需要差分信号。例如，这可通过使用平衡-不平衡转换器产生，该平衡-不平衡转换器将50  $\Omega$  VNA的不平衡信号转换为平衡信号，见图1和图2。

或者,可通过使用两个具有相移为 $180^\circ$  的发生器的VNA来获得平衡信号。另一种选择是使用多端口VNA(虚拟平衡-不平衡转换器)进行测量。平衡线对的特性是根据线对中每个单根导体相对于参考地的测量值以数学方式确定的。用于确定对称对的反射和传输特性的覆盖频率范围不再受平衡-不平衡转换器的限制,而是受VNA和连接技术的限制。

附录E给出了使用虚拟平衡-不平衡转换器测量的混合模式S参数的详细定义。

注:多端口VNA测量中包含的校准和夹具去嵌入功能可取代阻抗匹配适配器(附录B)和考虑的失配损耗(附录D)。

应在发生器正前方放置一块垂直金属反射板,其高度和宽度至少为800 mm。该金属板的中心应有一个用来穿过受试电缆的孔。

在近端(使用分立设备)用于测量最大辐射功率的测量装置如图1~图3所示,包括:

- 吸收钳:频率范围至少为30 MHz~1 GHz,见CISPR 16-1-3:2004。若在该频率范围外进行测量,例如500 MHz~2.4 GHz,则需可替代的吸收钳;
- 铁氧体吸收器:频率范围至少为30 MHz~1 GHz,最小衰减为10 dB;
- 反射板(最小尺寸为800 mm×800 mm);
- 信号发生器或VNA:具有与平衡-不平衡转换器(如果适用)的不平衡端口相同的特性阻抗。必要时通过功率放大器耦合,以满足非常高的动态范围的要求;

或替换为:

- 具有经校准的步进衰减器的接收机或VNA,必要时连接一个低噪声放大器,以满足非常高的动态范围的要求;
- 4端口VNA或类似的试验设备。这种配置可使用共模或差模激励和响应进行试验;
- 用于4端口VNA的电子校准套件;
- 双绞对(TP)连接单元:用于将多端口VNA连接到平衡的受试线缆;
- 打印设备;
- 负载电阻网络:用于端接共模和差模标称阻抗(如果适用);
- 测量良好屏蔽和平衡的电缆时,如果设备没有达到背景噪声电平的要求,可使用一个外部放大器用以提高装置的动态范围。放大器需要良好的屏蔽,其屏蔽外壳应连接至反射板。

应测量放大器的增益用于修正试验结果。测量放大器的增益时,应采取措施,确保放大器不会饱和。在测量期间,为了防止设备过载,需要在接收输入端连接一个衰减器。应测量衰减器的衰减值用于修正试验结果。

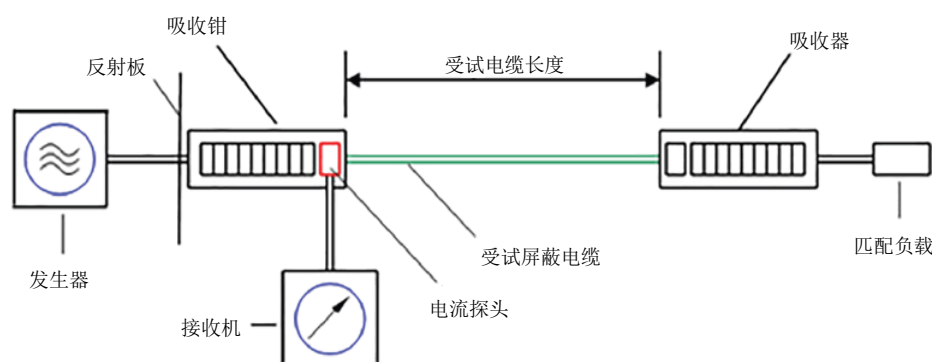


图1 近端屏蔽衰减测量原理

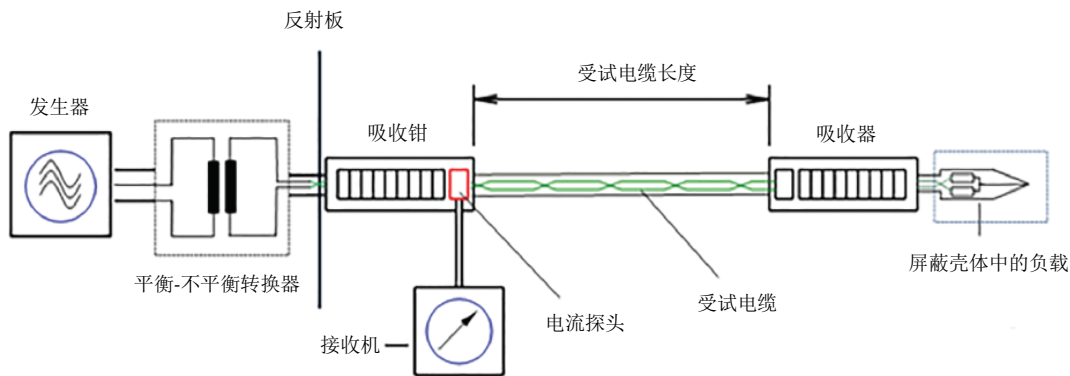


图2 使用平衡-不平衡转换器的近端耦合衰减测量

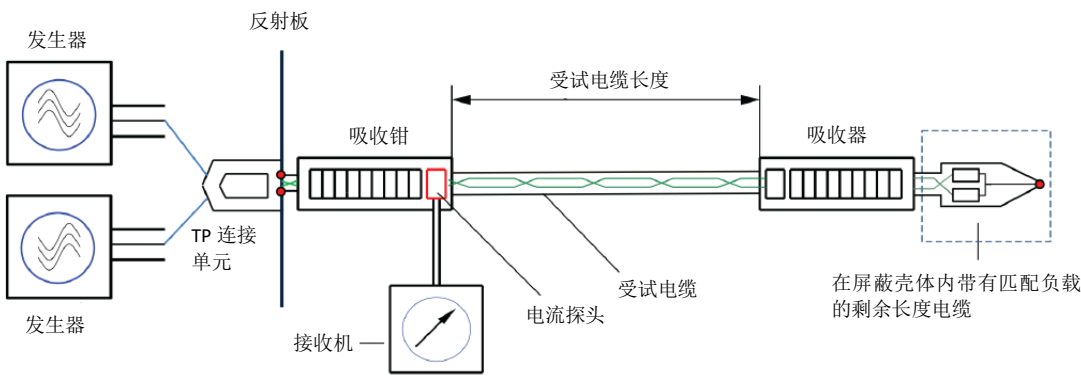


图3 无平衡-不平衡转换器时使用多端口 VNA 进行近端耦合衰减测量

5.2 平衡-不平衡转换器要求

为了测量对称电缆，需采用一个平衡-不平衡转换器，用于将信号发生器不平衡输出的内部阻抗转换为受试平衡电缆对的标称特性阻抗。平衡-不平衡转换器的最低要求见表1（最高频率到1 GHz）和表2（最高频率到2.4 GHz）。为了测量1 GHz以上频率范围，推荐使用无平衡-不平衡转换器的测量程序。平衡-不平衡转换器的衰减应尽量小，因为它会限制耦合衰减测量的动态范围。

表1 平衡-不平衡转换器的性能特点（30 MHz～1 GHz）

参数	数值
阻抗，初级 <sup>a</sup>	50 $\Omega$ （不平衡）
阻抗，次级 <sup>b</sup>	100 $\Omega$ 或 150 $\Omega$ （平衡）
插入损耗 <sup>c</sup> （如果使用，包括匹配衰减器）	$\leq 10$ dB
回波损耗，双向	$\geq 6$ dB
额定功率	可承受的发生器和放大器的功率（如适用）
输出信号平衡 <sup>d</sup>	$\geq 50$ dB, 30 MHz～100 MHz $\geq 30$ dB, 100 MHz～1 GHz
<sup>a</sup> 为适应输出阻抗非 50 $\Omega$ 的 VNA，初级阻抗可能会不同。 <sup>b</sup> 试验平衡-不平衡转换器的平衡输出应与对称电缆对的标称阻抗相匹配。120 $\Omega$ 的电缆终端应采用 100 $\Omega$ 的阻抗。由 100 $\Omega$ 试验系统和 120 $\Omega$ 电缆之间的失配引起的误差可忽略不计。 <sup>c</sup> 平衡-不平衡转换器的工作衰减应通过 3 个背-背连接的平衡-不平衡转换器的 3 次工作衰减测量的算术推导得到。 <sup>d</sup> 测量应按 ITU-T G.117 和 ITU-T 0.9 的规定。	

表2 平衡-不平衡转换器的性能特点（30 MHz～2.4 GHz）

参数	数值
阻抗，初级 <sup>a</sup>	50 $\Omega$ （不平衡）
阻抗，次级 <sup>b</sup>	100 $\Omega$ （平衡）
插入损耗 <sup>c</sup> （如果使用，包括匹配衰减器）	$\leq 2.0$ dB, 30 MHz～2000 MHz $\leq 3.0$ dB, 2000 MHz～2400 MHz
回波损耗，双向	$\geq 20$ dB, 30 MHz～2000 MHz $\geq 15$ dB, 2000 MHz～2400 MHz
共模回波损耗	$\geq 20$ dB, 30 MHz～400 MHz $\geq 15$ dB, 400 MHz～2000 MHz $\geq 12$ dB, 2000 MHz～2400 MHz
最小功率	0.1 W, 30 MHz～2400 MHz
纵向信号平衡	$\geq 60$ dB, 30 MHz～100 MHz $\geq 50$ dB, 100 MHz～2000 MHz $\geq 40$ dB, 2000 MHz～2400 MHz
输出信号平衡 <sup>d</sup>	$\geq 50$ dB, 30 MHz～2000 MHz $\geq 40$ dB, 2000 MHz～2400 MHz
共模抑制	$\geq 50$ dB, 30 MHz～2000 MHz $\geq 40$ dB, 2000 MHz～2400 MHz
<sup>a</sup> 为适应输出阻抗非 50 $\Omega$ 的 VNA，初级阻抗可不同。 <sup>b</sup> 试验平衡-不平衡转换器的平衡输出应与对称电缆对的标称阻抗相匹配。120 $\Omega$ 的电缆终端应采用 100 $\Omega$ 的阻抗。由 100 $\Omega$ 试验系统和 120 $\Omega$ 电缆之间的失配引起的误差可忽略不计。 <sup>c</sup> 平衡-不平衡转换器的工作衰减应通过 3 个背-背连接的平衡-不平衡转换器的 3 次工作衰减测量的算术推导得到。 <sup>d</sup> 测量按 ITU-T G.117 和 ITU-T 0.9 的规定。	

注：对于 1 GHz 以上的测量，首选程序是无平衡-不平衡转换器的试验程序。

5.3 TP 连接单元要求

当分别使用无平衡-不平衡转换器和“虚拟平衡-不平衡转换器”进行测量时,需要一个TP连接单元。见表3。

表3 TP 连接单元的性能特点 (30 MHz~2.4 GHz)

参数	数值
特性阻抗, 初级 (单端) <sup>a</sup>	50 Ω
特性阻抗, 次级 (差分) <sup>a</sup>	1×100 Ω (差分)
回波损耗, 差模 <sup>b</sup>	>20 dB
衰减, 差模 <sup>c</sup>	<0.3 dB
不平衡衰减 (TCTL) <sup>d</sup>	>60 dB-10lg( <i>f</i> ), 最大值为40 dB
<p><sup>a</sup> 两个单端阻抗为 50 Ω 的端口产生 25 Ω 的共模阻抗和 100 Ω 的差模阻抗。</p> <p><sup>b</sup> 进行测量, 例如使用 4 端口混合模式网络分析仪。一个逻辑端口由两个单端端口组合而成。另一个逻辑端口由两个剩下的单端端口组合而成。S 参数 <math>S_{dd11}</math> 的绝对 dB 值表示差模回波损耗。</p> <p><sup>c</sup> 根据上述<sup>b</sup>的试验布置, S 参数 <math>S_{dd21}</math> 的绝对 dB 值表示差模衰减。</p> <p><sup>d</sup> 根据上述<sup>b</sup>的试验布置, S 参数 <math>S_{cd21}</math> 的绝对 dB 值表示 TCTL。</p>	

5.4 试验样品

5.4.1 受试电缆长度

吸收钳和铁氧体管限制试验样品的有效长度, 如图3所示。最小试验长度取决于最低的测量频率。对于30 MHz的最低频率, 最小长度应为600 cm+2×吸收钳的长度±10 cm。

5.4.2 试验样品的制备

5.4.2.1 概述

当吸收钳的孔径小于试验样品的直径时, 应用较细的延长线将受试样品的两端延长。延长线应具有比试验样品更好的屏蔽衰减。如果可能, 宜使用管状外导体的延长线。延长电缆的特性阻抗和传播速度应与受试电缆的相当 (具有相同类型的绝缘层, 例如泡沫的或硬质的)。

5.4.2.2 对称电缆

电缆的总长应至少为100 m。受试电缆长度 (从吸收钳到吸收器) 应符合5.4.1的规定。  
电缆每个线对的近端和远端都要端接差模终端电阻器。见公式 (2)。

$$R_1 = R_{DM} = \frac{Z_{diff}}{2} \dots\dots\dots (2)$$

共模终端应为25 Ω, 即两个 $R_{DM}$ 值的电阻器与到地的中心点串接, 见图4。

注: 现代混合模式的VNA使用25 Ω 的发生器和接收机阻抗作为共模的默认值 (参见E.2)。

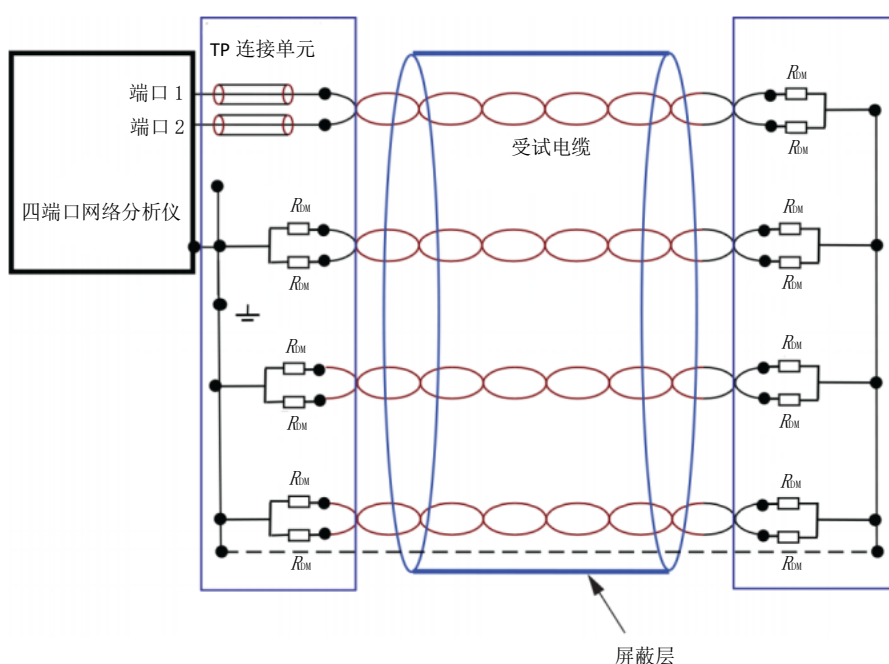


图4 屏蔽对称电缆的终端电阻器

#### 5.4.2.3 同轴或准同轴电缆屏蔽衰减的测量准备

电缆的总长度不需要比受试电缆长度、吸收钳和吸收器的长度之和更长。受试电缆长度（吸收钳到吸收器）应符合5.4.1的规定。

屏蔽对称电缆或屏蔽多芯电缆视为准同轴系统。因此，如果适用，所有绞合线对的导体应在其两端分别连接在一起。所有屏蔽层（包括对绞线或四对绞线的独立屏蔽层）都应在两端连接在一起。屏蔽层应在整个圆周上进行连接（见图5）。

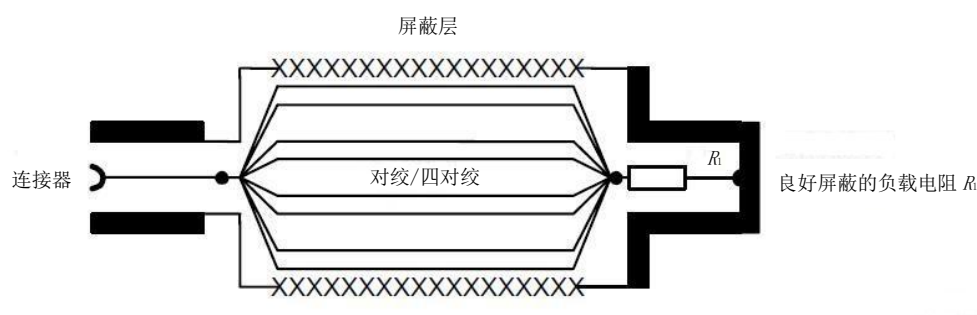


图5 试验样品的准备（对绞和多芯电缆）

准同轴系统应端接标称特性阻抗。应对终端采取良好的屏蔽，以确保试验结果有效。可使用最大上升时间为200 ps的时域反射计（TDR）或者5.4.2.4所描述的方法测量准同轴系统的阻抗。此外，为了匹配发生器的阻抗和准同轴系统的阻抗，需采用阻抗匹配适配器。

#### 5.4.2.4 阻抗匹配

如果同轴或准同轴系统的标称特性阻抗未知，则可通过使用上升时间最大值为200 ps的TDR或使用附录A描述的方法进行测量。当为75 Ω阻抗以外的其他阻抗使用自制适配器时，由于阻抗匹配适配器会

减小试验装置的动态范围，且在100 MHz以下才有足够的匹配（回波损耗），因此不推荐使用匹配发生器的阻抗和同轴或准同轴系统阻抗的阻抗匹配适配器（同时见7.2.2，不匹配条件和附录B）。

5.4.2.5 同轴或准同轴电缆

电缆的总长度不需要比受试电缆长度、吸收钳和吸收器的长度之和更长。受试电缆长度（吸收钳到吸收器）应符合5.4.1的规定。

受试电缆应端接标称特性阻抗。应对终端采取良好的屏蔽，以确保试验结果有效。

6 试验装置

6.1 试验装置校准

首先测量复合损耗，然后对校准装置中的反射损耗进行修正，从而确定试验装置的衰减，见图6。用此方法，可确定吸收钳对入射表面波功率的响应。

在测量中，可不考虑由于表面波阻抗 $Z_s$ 和吸收钳阻抗的不匹配而引起的试验装置的反射损耗。非上述阻抗失配引起的误差可忽略不计。

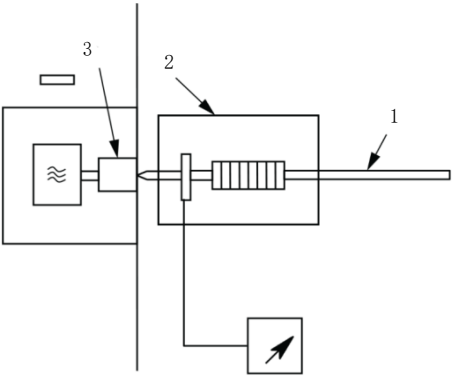
在开始试验装置校准之前，应进行完整的VNA校准。

如果平衡-不平衡转换器的衰减未知，则应进行测量，例如利用两个背对背连接的相同类型的平衡-不平衡转换器进行测量。

6.2 试验装置的复合损耗

6.2.1 概述

为了确定复合损耗 $a_{cal}$ ，发生器的输出功率直接馈入外部电路，外部电路由电缆屏蔽层（屏蔽电缆）或连接在一起的所有导体（非屏蔽平衡电缆）以及周围导体组成。发生器直接端接到受试电缆屏蔽层（屏蔽电缆）或者连接在一起的所有导体（非屏蔽平衡电缆），如图6（采用分立式设备的示例）和图7所示。在关注的整个频率范围内，通过测量吸收钳的输出功率可得到校准装置的复合损耗 $a_{cal}$ 。网络分析仪的校准应包括试验引线的衰减。



- 标引序号说明：
- 1——试验样品的屏蔽层或外导体；
  - 2——吸收钳；
  - 3——安装在反射板上的连接器。

图6 试验装置校准

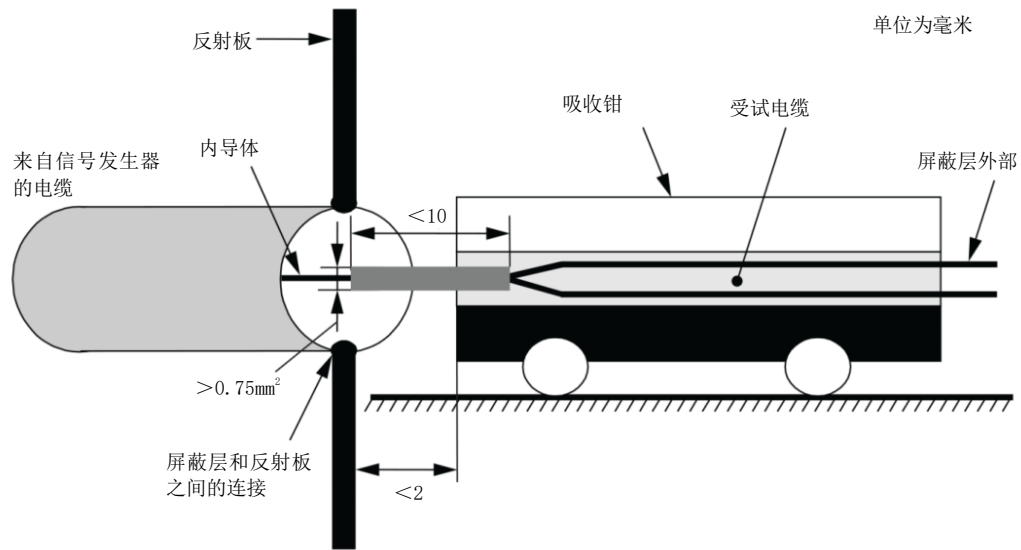


图7 校准中的端接

从发生器输出到电缆屏蔽层或者连接在一起的导体的连接线应为低电阻（最小为 $0.75\text{ mm}^2$ 铜制横截面）且应短（距电缆末端最大为 $10\text{ mm}$ ）。电缆末端应与吸收钳的前端对齐（ $\pm 2\text{ mm}$ ）。

信号发生器输出电缆的屏蔽层应连接到反射板，从而为信号提供返回路径。这也可通过以下方式实现：在反射板上安装连接器（例如同轴连接器），并用一根低损耗电缆（例如同轴电缆）连接信号发生器和连接器。电缆应与该连接器的中心触点相连。

### 6.2.2 试验装置校准中吸收钳的反射损耗

复合损耗测量包括由于试验装置校准中信号发生器与吸收钳中受试电缆之间的阻抗失配引起的反射损耗。

通过测量试验装置校准中吸收钳的复合反射系数可确定反射损耗 $a_{\text{rfl}}$ ，计算见公式（3）：

$$a_{\text{rfl}} = -10 \lg |1 - (S_{11})^2| \dots\dots\dots (3)$$

式中：

$S_{11}$  ——测得的散射参数，当功率直接馈入外部电路，测量反射功率。

测量通常是用VNA测量散射参数 $S_{11}$ 。 $S_{11}$ 等于反射系数。 $S_{11}$ 测量的校准点为受试电缆和信号发生器输出端连接处的界面，例如反射板上连接器的输出端。

### 6.3 试验装置的衰减

吸收钳的衰减 $a_{\text{cl}}$ （包括试验引线的衰减）按公式（4）计算：

$$a_{\text{cl}} = a_{\text{cal}} - a_{\text{rfl}} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

$a_{\text{cal}}$  ——测得的试验布置的复合损耗；

$a_{\text{rfl}}$  ——测得的反射损耗。

$$a_{\text{cal}} = -20 \lg (|S_{21}|) \dots\dots\dots (5)$$

式中：

$S_{21}$  ——测得的散射参数，当功率直接馈入外部电路，测量吸收钳的输出功率。

试验布置的衰减 $a_{\text{m}}$ 计算见公式（6），其应从所有受试电缆的测量中减掉：

$$a_m = a_{cl} + a_{balun}(\text{如适用}) \text{或} a_m = a_{cl} + a_{TP\text{-connecting unit}}(\text{如适用}) \cdots \cdots (6)$$

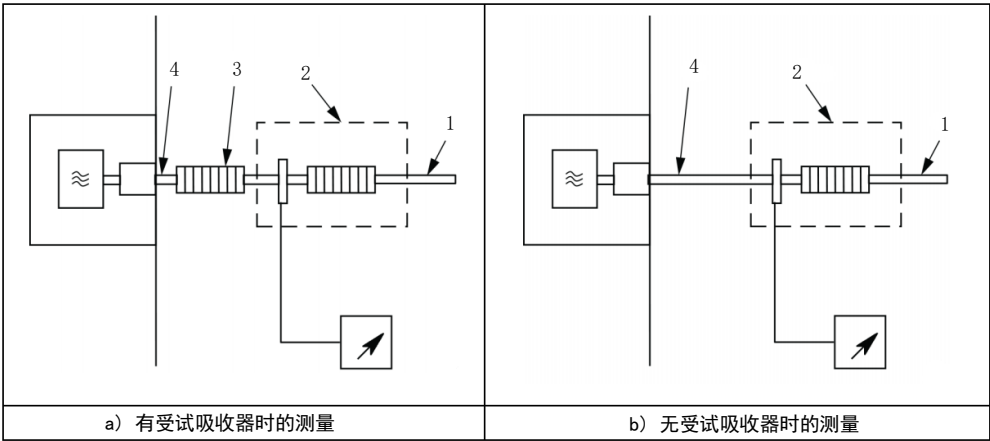
式中：  
 $a_m$ ——试验布置的衰减；  
 $a_{cl}$ ——测得的试验布置的复合损耗；  
 $a_{balun}$ ——所使用的平衡-不平衡转换器的衰减（如果适用）；  
 $a_{TP\text{-connecting unit}}$ ——所使用的TP连接单元的衰减（如果适用）。

6.4 吸收器的插入损耗

吸收器的插入损耗应能确保抑制吸收器后的电缆产生的反射波。其值需大于10 dB。测量装置如图10所示。

受试吸收器尽可能靠近图8中连接点4。其与反射板之间的缝隙应远小于外部系统最高测量频率对应波长的1/4。

直接在受试吸收器的后方（从发生器的方向看过去），使用吸收钳测量电缆外导体（使用同轴电缆）或电缆屏蔽层（使用对称电缆）的电流，如图8a所示。电缆外导体或电缆屏蔽层与发生器的输出端的端接按6.2的规定。然后移去受试吸收器，吸收钳的位置不变，再次用吸收钳测量电流，如图8b所示。两次电平差值为吸收器的插入损耗。



标引序号说明：  
1——电缆试样；  
2——吸收钳；  
3——受试吸收器；  
4——同轴电缆绝缘外导体或平衡电缆的屏蔽层（即电缆试样）与发生器引出端的内导体的连接点。

图8 吸收器的插入损耗测量

如果在较低频段（100 MHz以下）不能满足插入损耗要求，则在这些频段上的测量结果应采用满足要求的较高频段上的结果来替代。应采用一条水平直线进行推算。

注：吸收器的插入损耗测量仅供验证时作为参考，不包括在试验结果的表达式中。

6.5 试验装置

测量近端平衡电缆的耦合衰减或不平衡电缆的屏蔽衰减的试验装置如图1～图3、图10、图11所示。在不平衡（同轴）或准同轴电缆的测量中，不包括平衡-不平衡转换器（或TP连接单元）。

测量远端耦合衰减或屏蔽衰减的试验装置如图12所示，其中吸收钳与铁氧体的位置相互交换。改变吸收钳的方向使电流变换器朝向受试电缆。否则，近端测量与远端测量会相同。

受试电缆连接到信号发生器或平衡-不平衡转换器（对于平衡电缆）或TP连接单元（对于无平衡-不平衡转换器的耦合衰减测量）的输出端。无平衡-不平衡转换器的测量原理如图3所示。

对于平衡电缆，宜注意将退绞限定在必要的范围内。

吸收钳后端的受试电缆应悬挂起来，例如使用线绳支撑，且距离任何金属或者非金属物体最少600 mm。吸收钳放置在非金属桌子上，且传感器侧与桌子边缘的距离最大为50 mm。

应使用具有良好屏蔽的试验引线（即至少是双层屏蔽）连接网络分析仪或信号发生器与平衡-不平衡转换器（如果适用）或受试电缆。

发生器的馈线屏蔽层、平衡-不平衡转换器（如果适用）以及受试电缆的屏蔽层（如果适用）与反射板的连接应保证有较低的阻抗（见图9）。

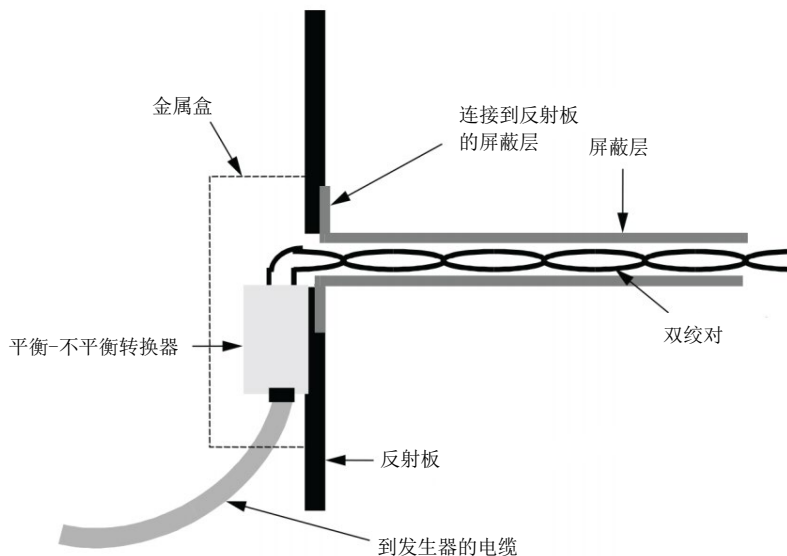


图9 屏蔽双绞电缆测量的屏蔽层连接示例

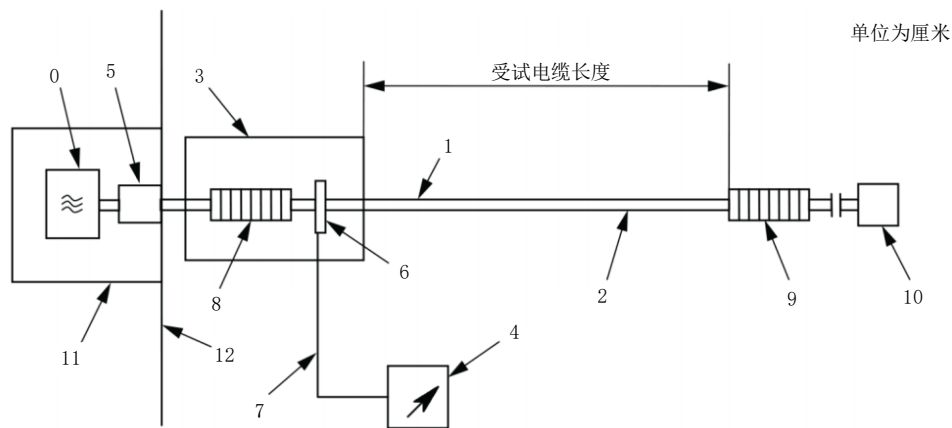
吸收器放置在非金属桌子上，其安装位置距离桌子的边缘最大为50 mm。吸收钳与吸收器的距离应符合5.4.1的规定。桌子的高度至少应为800 mm。

电缆与平衡-不平衡转换器，以及与远端终端的连接应进行良好的屏蔽。在近端，应使用一个固定在接地反射板的金属盒进行屏蔽。

平衡-不平衡转换器和连接电缆应封闭在金属盒内，电缆的屏蔽层在馈入点处与金属盒进行连接。



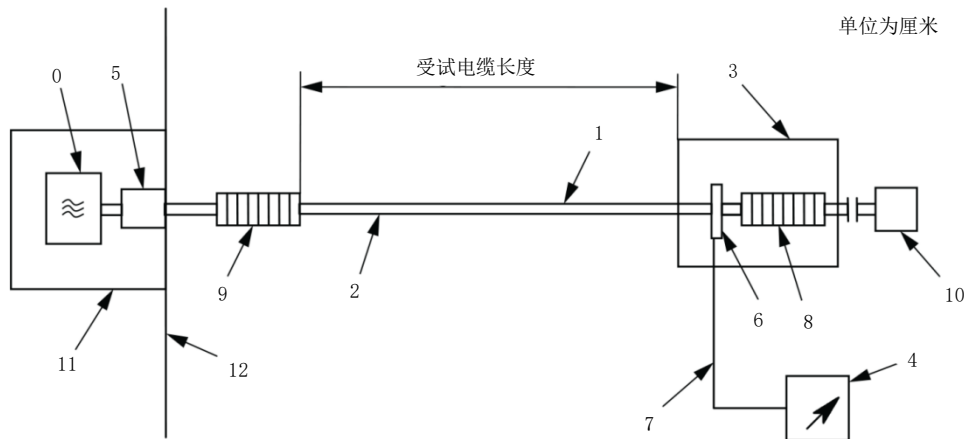
图10 对称电缆近端测量的试验装置



标引序号说明:

- 0 ——信号发生器, 输出阻抗 $Z_0$ ;
- 1 ——受试电缆, 标称特性阻抗 $Z_1$ ;
- 2 ——受试电缆的外部电路, 阻抗 $Z_2$ ;
- 3 ——吸收钳, 阻抗 $Z_3$ ;
- 4 ——测量接收机;
- 5 ——平衡-不平衡转换器 (如果适用);
- 6 ——吸收钳的电流变换器;
- 7 ——测量接收机电缆 (测量和校准使用同一电缆);
- 8 ——钳的吸收器 (铁氧体管);
- 9 ——吸收器 (或第二个吸收钳);
- 10 ——受试电缆的终端;
- 11 ——信号发生器和平衡-不平衡转换器的屏蔽体 (如果需要更高的动态范围);
- 12 ——反射板。

图11 受试电缆近端表面波的测量原理图



注: 图中的标引序号说明见图 11

图12 受试电缆远端表面波的测量原理图

### 6.5.1 试验装置的验证

#### 6.5.1.1 试验装置测量灵敏度的确定

在进行测量之前，应首先确定试验装置的测量灵敏度。

通过测量一根电缆的耦合和屏蔽衰减可确定灵敏度，用于确定测量灵敏度的电缆需要比受试电缆具有更高（尽可能高）的耦合或屏蔽衰减，且应与受试电缆的类型相同（同轴或对称）。

测量布置应与受试电缆的测量布置相同。使用确定测量灵敏度的电缆测得的耦合或屏蔽衰减，能用于确定试验装置可测得的最高耦合或屏蔽衰减。这也可用来表示试验装置背景噪声的水平。

用于确定试验装置背景噪声的可靠方法，例如使用全铜管，其内含带有差模和共模终端的一对或多对双绞对。在整个频带内，这种装置的理论耦合衰减要优于100 dB。所测量的耦合衰减会精确地反映连接工艺的质量以及残留背景噪声的电平。

#### 6.5.1.2 试验装置校准的验证

在可用吸收器不能满足10 dB插入损耗要求的频带内，特别是在100 MHz以下，会产生较高的测量不确定度。

通过将屏蔽层仔细地紧固在反射板上和将不使用的线对端接，可最大限度地降低测量不确定度。

### 6.6 施加到电缆上的拉力

最大拉力应为20 N。

## 7 测量程序

### 7.1 概述

利用扫频的方式用固定钳来测量表面电流。在近端和远端两个位置都进行测量，出现最差测量结果的位置所得到的结果，用作整个测量的结果。

在某些特殊的频点，耦合衰减或屏蔽衰减会有显著的变化，即使同样的电缆，重新摆放后再次测量也是如此。因此，应在某些确定的频率区间内规定耦合衰减或屏蔽衰减的最差值。任意一个频率区间应至少覆盖200 MHz的区间宽度，以消除通常频率变化引起的差别。

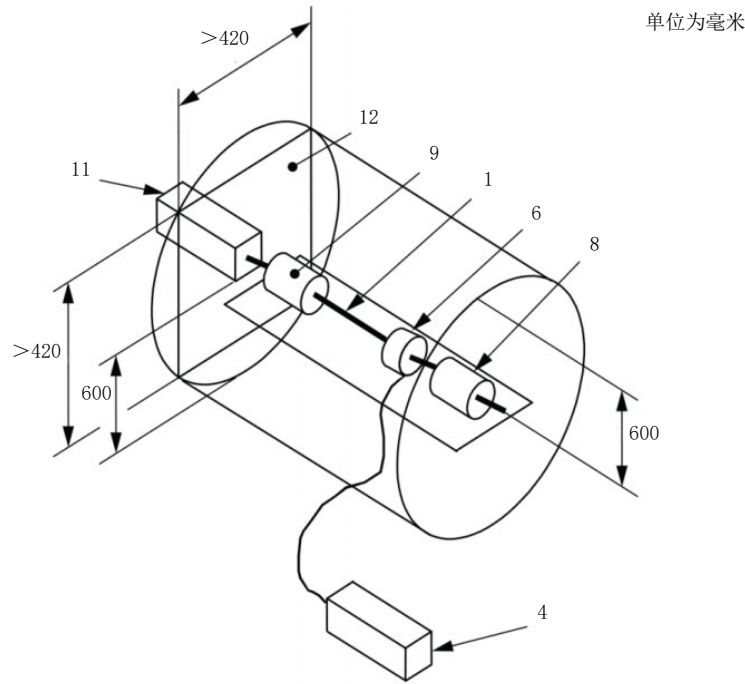
对于对称电缆，所有线对应分别测量。

受试电缆应架空放置。通常在沿电缆轴线的任何方向上，金属物体或人距离受试电缆至少600 mm，见图13。

对于近端测量，吸收钳尽可能靠近反射板。

对于远端测量，吸收钳以及吸收器应互换。在这两种情况中，吸收钳的电流探头（电流变换器）应指向吸收器。

在规定的频率范围内，以及与校准时使用的相同频点上进行线性扫频，可测得吸收钳的输出功率与发生器的输出功率的比值。应使用网络分析仪直接进行测量，或使用分立的信号发生器和测量接收机进行测量。



注：图中的标引序号说明见图 11。

图13 远端测量的屏蔽装置

7.2 同轴和准同轴电缆的屏蔽衰减

7.2.1 匹配条件

7.2.1.1 概述

如果受试电缆的特性阻抗未知，则应根据附录A进行测量。

当发生器阻抗和电缆的标称阻抗相等时，受试同轴或准同轴电缆应直接连接到发生器；否则，应使用阻抗匹配适配器。

受试电缆应在远端端接良好屏蔽的匹配电阻，其阻值等于受试电缆的特性阻抗。

注：阻抗匹配适配器可按照附录A进行制作。

7.2.1.2 试验结果的表示

测得的功率（见图1）分别为 $P_{2n}$ （近端）和 $P_{2f}$ （远端）。若仅考虑测得的功率的最坏情况（ $P_{2n}$ 或 $P_{2f}$ ），则得到公式（7）：

$$\begin{aligned} a_s &= 10 \lg \left( \frac{P_1}{\max[P_{2n}; P_{2f}]} \right) - a_m + 20 \lg(k_m) \\ &= \min \left( 10 \lg \left| \frac{P_1}{P_{2n}} \right|; 10 \lg \left| \frac{P_1}{P_{2f}} \right| \right) - a_m + 20 \lg(k_m) \\ &= \min(-20 \lg|S_{21n}|; -20 \lg|S_{21f}|) - a_m + 20 \lg(k_m) \dots\dots\dots (17) \end{aligned}$$

式中：

$P_1$  ——射频发生器的功率；

$P_{2n,f}$  ——在近端或远端外部中的功率（使用吸收钳测得的）；

$a_m$  ——试验布置的衰减，单位为分贝（dB）；

$k_m$  ——阻抗匹配电路的电压增益（如果未使用阻抗匹配电路，则为1， $k_m$  按照附录A）；

$S_{21n,f}$  ——在近端或远端的正向传输散射参数。

$|S_{21n}|$ ； $|S_{21f}|$  可从网络分析仪上直接读取（即近端与远端测量的最坏情况）。

## 7.2.2 不匹配条件

### 7.2.2.1 概述

受试同轴或准同轴电缆应直接连接到发生器，并在远端应端接良好屏蔽的匹配电阻，其阻抗和标称电缆的阻抗相等。阻抗匹配不是必需的。

应考虑发生器和受试电缆之间失配产生的反射损耗（见附录D）。为此，原则上宜测量受试电缆的（复）散射参数 $S_{11}$ 。然而，已经表明，由于受试电缆的“不良”负载电阻，这种测量容易出错。因此，根据公式（9）计算 $S_{11}$ 。

### 7.2.2.2 试验结果的表示

测得的功率（见图1）分别为 $P_{2n}$ （近端）和 $P_{2f}$ （远端）。若仅考虑测得的功率的最坏情况（ $P_{2n}$ 或 $P_{2f}$ ），则得到公式（8）：

$$\begin{aligned} a_s &= 10 \lg \left( \frac{P_1}{\max[P_{2n}; P_{2f}]} \right) - a_m - \Gamma_s \\ &= \min \left( 10 \lg \left| \frac{P_1}{P_{2n}} \right|; 10 \lg \left| \frac{P_1}{P_{2f}} \right| \right) - a_m - \Gamma_s \\ &= \min(-20 \lg |S_{21n}|; -20 \lg |S_{21f}|) - a_m - \Gamma_s \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

式中：

$P_1$  ——射频发生器的功率；

$P_{2n,f}$  ——在近端或远端外部中的功率（使用吸收钳测得的）；

$a_m$  ——试验布置的衰减，单位为分贝（dB）；

$S_{21n,f}$  ——在近端或远端的正向传输散射参数；

$\Gamma_s$  ——发生器和受试电缆之间失配产生的反射损耗<sup>1</sup>（见附录D），其计算见公式（9）。

$$\Gamma_s = 10 \lg |1 - r^2| = -10 \lg \left| 1 - \left( \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \right)^2 \right| \dots\dots\dots (9)$$

式中：

$r$  ——反射系数；

$Z_0$  ——发生器的特性阻抗；

$Z_1$  ——受试电缆的特性阻抗。

$|S_{21n}|$ ； $|S_{21f}|$  可从网络分析仪上直接读取（即近端与远端测量的最坏情况）。

<sup>1</sup> 反射损耗不应与回波损耗或失配损耗混淆。

### 7.3 平衡电缆的耦合衰减

#### 7.3.1 使用平衡-不平衡转换器的耦合衰减测量

受试平衡（对称）电缆应通过阻抗匹配的平衡-不平衡转换器连接到发生器。平衡-不平衡转换器和连接电缆应屏蔽良好并连接到反射板。

测得的功率（见图3）分别为 $P_{2n}$ （近端）和 $P_{2f}$ （远端）。若仅考虑测得的功率的最坏情况（ $P_{2n}$ 或 $P_{2f}$ ），则得到公式（10）：

$$\begin{aligned} a_c &= 10 \lg \left( \frac{P_1}{\max[P_{2n}; P_{2f}]} \right) - a_m + 20 \lg(k_m) \\ &= \min \left( 10 \lg \left| \frac{P_1}{P_{2n}} \right|; 10 \lg \left| \frac{P_1}{P_{2f}} \right| \right) - a_m + 20 \lg(k_m) \\ &= \min(-20 \lg|S_{21n}|; -20 \lg|S_{21f}|) - a_m + 20 \lg(k_m) \dots \dots \dots (20) \end{aligned}$$

式中：

$P_1$  ——射频发生器的功率；

$P_{2n, f}$  ——在近端或远端外部中的功率（使用吸收钳测得的）；

$a_m$  ——试验布置的衰减，单位为分贝（dB）；

$k_m$  ——阻抗匹配电路的电压增益（如果未使用阻抗匹配电路，则为1， $k_m$ 按照附录A）；

$S_{2n, f}$  ——在近端或远端的正向传输散射参数。

$|S_{21n}|$ ； $|S_{21f}|$ 可从网络分析仪上直接读取（即近端与远端测量的最坏情况）。

耦合衰减由包络线的值 $A$ 表示。值 $A$ 应从以下列值绘出的曲线推导得到。

30 MHz~100 MHz： $A$  dB

100 MHz~1 GHz： $A-20 \lg(f/100)$  dB

其中 $f$ 为频率，单位为兆赫兹（MHz）。

此曲线应上升，直到与第一个峰值相交。在曲线相交处对应的Y轴上，读取 $A$  dB，同时见附录C。

#### 7.3.2 无平衡-不平衡转换器的耦合衰减测量装置

在根据第6章开始装置的校准测量之前，应进行VNA的3端口全校准，或最好是VNA的4端口全校准。

使用多端口VNA进行无平衡-不平衡转换器的耦合衰减测量原理如图3所示。

受试线对应通过TP连接单元连接到VNA的两个端口。

TP连接单元和连接电缆应屏蔽良好并连接到反射板。

#### 7.3.3 试验结果的表示

测得的功率（见图3）分别为 $P_{2n}$ （近端）和 $P_{2f}$ （远端）。若仅考虑测得的功率的最坏情况（ $P_{2n}$ 或 $P_{2f}$ ），则得到公式（11）：

$$\begin{aligned} a_c &= 10 \lg \left( \frac{P_1}{\max[P_{2n}; P_{2f}]} \right) - a_m \\ &= \min \left( 10 \lg \left| \frac{P_1}{P_{2n}} \right|; 10 \lg \left| \frac{P_1}{P_{2f}} \right| \right) - a_m \\ &= \min(-20 \lg|S_{sd21n}|; -20 \lg|S_{sd21f}|) - a_m \dots \dots \dots (31) \end{aligned}$$

式中：

$P_1$  ——在TP连接单元输出端的差模功率；

$P_{2n, f}$  ——在近端或远端外部中的功率（使用吸收钳测得的）；

$a_m$  ——试验布置的衰减，单位为分贝（dB）；

$S_{sd21n, f}$  ——差模（功率注入）和单端模式（使用吸收钳测得的功率）之间的正向传输散射参数。

$|S_{21n}|$ ;  $|S_{21f}|$  可从网络分析仪上直接读取（即近端与远端测量的最坏情况）。

耦合衰减由包络线的值  $A$  表示。值  $A$  应从以下列值绘出的曲线推导得到。

30 MHz~100 MHz:  $A$  dB

100 MHz~1 GHz:  $A-20\lg(f/100)$  dB

其中  $f$  为频率，单位为兆赫兹（MHz）。

此曲线应上升，直到与第一个峰值相交。在曲线相交处对应的Y轴上，读取  $A$  dB，同时见附录C。

## 8 试验报告

受试电缆的耦合或屏蔽衰减应至少比试验装置的测量灵敏度低6 dB。否则，报告中应说明耦合衰减或屏蔽衰减要好于受试电缆的测量值。

同轴电缆的屏蔽衰减通常与频率无关。在整个频带内，最差值对应最大峰值。

对于对称电缆，耦合衰减随频率而增加，约为每十倍频程20 dB。

对于多线对电缆，其在整个长度上被其他线对所围绕的内部线对不宜进行测量。其他线对应进行测量，其最差值应作为电缆的耦合衰减。

如果在相关电缆规范中有要求，则应报告在规定的全频段内扫描频率相对  $a_c$  的记录。

## 9 要求

最小耦合或屏蔽衰减的结果应符合相关电缆规范中的规定。

对于工作在规定功率电平上的电缆系统，如果规定辐射功率的限值，则辐射功率限值与功率电平的差值应不大于系统中电缆的耦合衰减或屏蔽衰减。

## 附录 A (规范性) 内部电路阻抗的确定

### A.1 内部电路阻抗的确定

如果内部电路阻抗 $Z$ 未知,可使用最大上升时间为200 ps的TDR确定或利用VNA使用以下方法确定。

VNA应在连接器端口参考平面进行阻抗测量的校准,将受试样品的一端与VNA进行连接。试验频率应为样品长度为 $\lambda/8$ 对应的近似频率,其中 $\lambda$ 为波长。

$$f_{\text{test}} \approx \frac{c_0}{8 \times L_{\text{sample}} \times \sqrt{\epsilon_{r1}}} \quad (\text{A. 1})$$

式中:

$f_{\text{test}}$  ——试验频率,单位为赫兹(Hz);

$c_0$  ——光速,  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ;

$L_{\text{sample}}$  ——样品长度,单位为米(m);

$\epsilon_{r1}$  ——样品的相对介电常数。

在远端将样品短路。测量短路阻抗 $Z_{\text{short}}$ 。

在与短路处的相同位置将样品开路。测量开路阻抗 $Z_{\text{open}}$ 。

$Z$ 的计算见公式(A.2):

$$Z_1 = \sqrt{Z_{\text{short}} \times Z_{\text{open}}} \quad (\text{A. 2})$$

### A.2 $Z < 50 \Omega$ 时的阻抗匹配装置

如果内部电路阻抗 $Z$ 和负载阻抗 $R_1$ 小于 $50 \Omega$  (发生器阻抗),则使用公式(A.3)和(A.4)计算阻抗匹配装置:

$$R_s = 50 \sqrt{1 - \frac{R_1}{50}} \quad (\text{A. 3})$$

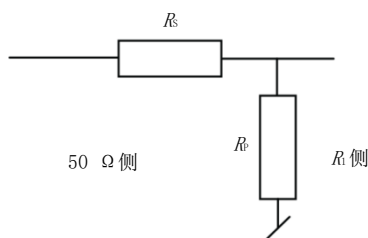
$$R_p = \frac{R_1}{\sqrt{1 - \frac{R_1}{50}}} \quad (\text{A. 4})$$

式中:

$R_s$  ——串联电阻,单位为欧姆( $\Omega$ );

$R_p$  ——并联电阻,单位为欧姆( $\Omega$ )。

配置如图A.1所示。



图A.1  $Z_1 < 50 \Omega$  时的阻抗匹配

电路的电压增益 $k_m$ 的计算见公式(A.5):

$$k_m = \frac{R_1 R_p}{R_1 R_p + R_p R_s + R_1 R_s} \quad (\text{A. 5})$$

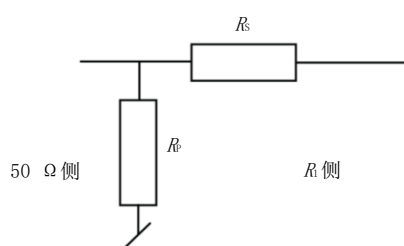
A.3  $Z_1 > 50 \Omega$  时的阻抗匹配装置

如果内部电路阻抗 $Z_1$ 和负载阻抗 $R_L$ 大于 $50 \Omega$ （发生器阻抗），则使用公式（A.6）和（A.7）计算阻抗匹配装置：

$$R_s = R_1 \sqrt{1 - \frac{50}{R_1}} \dots\dots\dots (A.6)$$

$$R_p = \frac{50}{\sqrt{1 - \frac{50}{R_1}}} \dots\dots\dots (A.7)$$

配置如图A.2所示。



图A.2  $Z_1 > 50 \Omega$  时的阻抗匹配

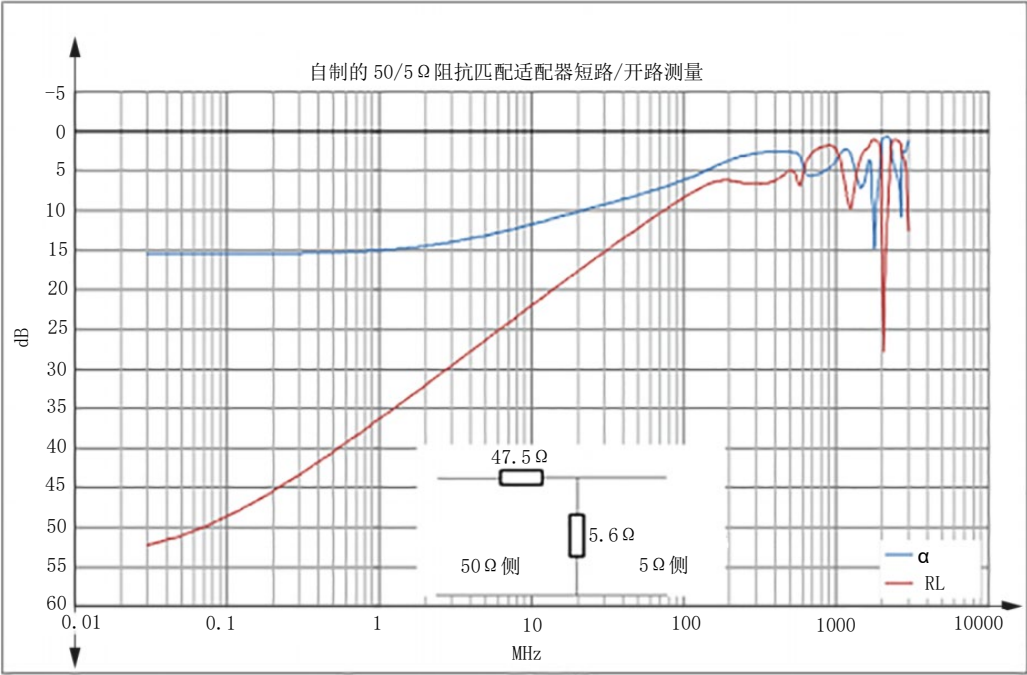
电路的电压增益 $k_m$ 的计算见公式（A.8）：

$$k_m = \frac{R_1}{R_s + R_1} \dots\dots\dots (A.8)$$

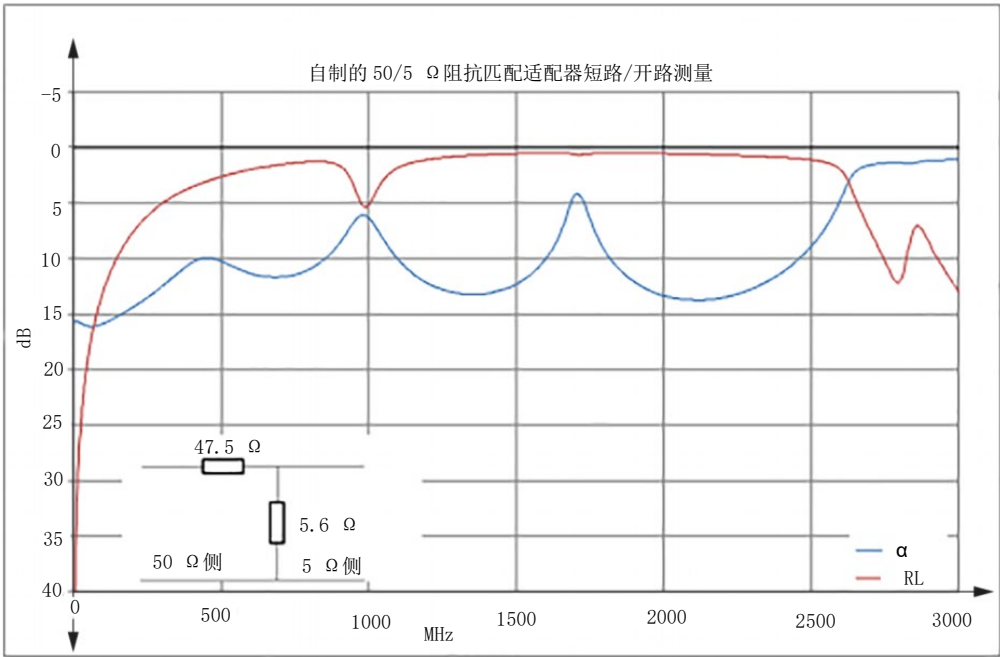
附录 B  
(资料性)

自制阻抗匹配适配器示例

图B.1和图B.2示出了50 Ω到5 Ω的阻抗匹配适配器的衰减( $\alpha$ )和回波损耗(RL)。当测量具有单独屏蔽线对的多芯电缆或测量电动汽车的高压电缆时,受试电缆的典型阻抗为5 Ω。  
衰减和回波损耗通过开路/短路测量得到。能发现匹配适配器只能工作到10 MHz。



图B.1 衰减和回波损耗



图B.2 衰减和回波损耗

附录 C  
(资料性)  
衡电缆耦合衰减试验结果评估

C.1 最差值

最差值 $A(\text{dB})$ 宜从以下列值绘出的曲线中推导得到。

30 MHz~100 MHz:  $A$

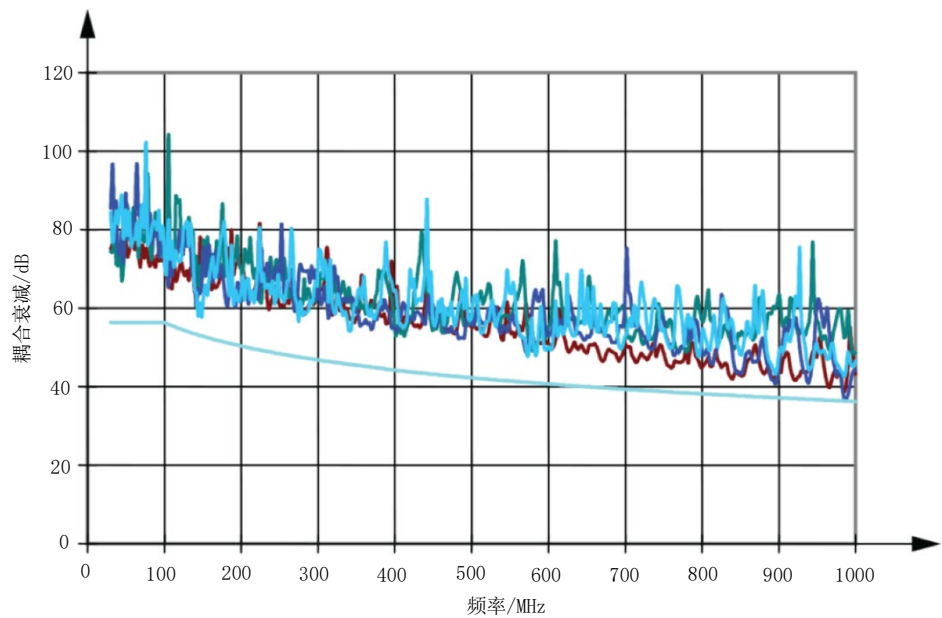
100 MHz~1 GHz:  $A-20\lg(f/100)$

其中 $f$ 为频率,单位为兆赫兹(MHz)。

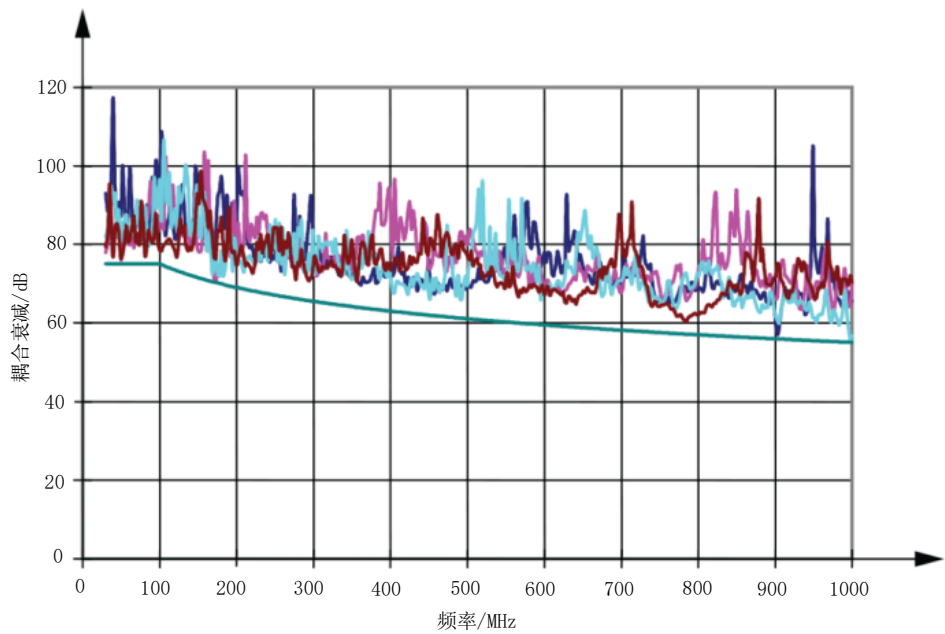
此曲线应上升,直到与第一个峰值相交。见图C.1~图C.5的示例。

在曲线相交处对应的Y轴上,读取 $A(\text{dB})$ 。

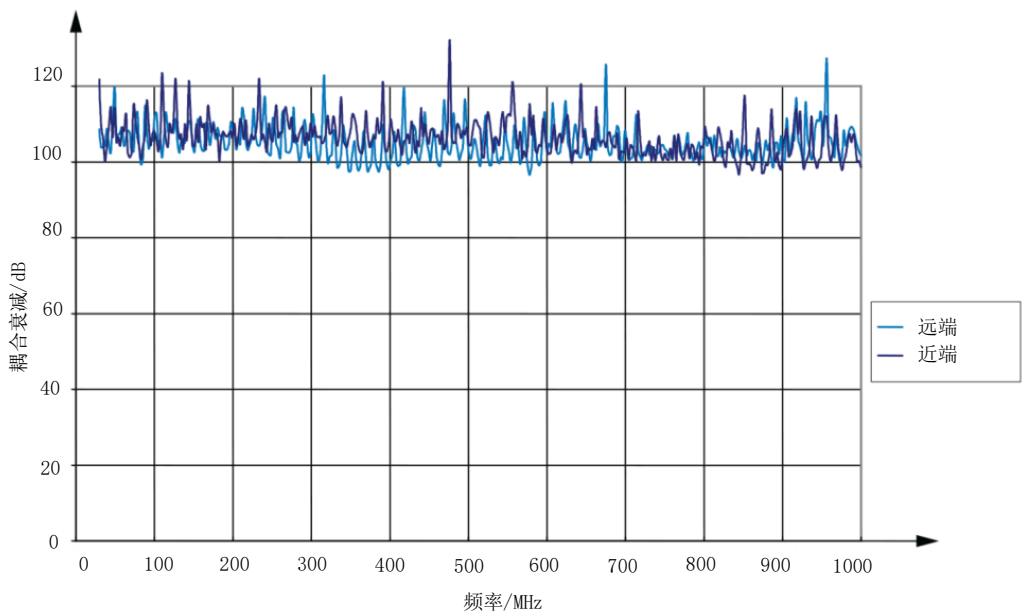
C.2 示例



图C.1 金属箔屏蔽对称电缆的测量示例



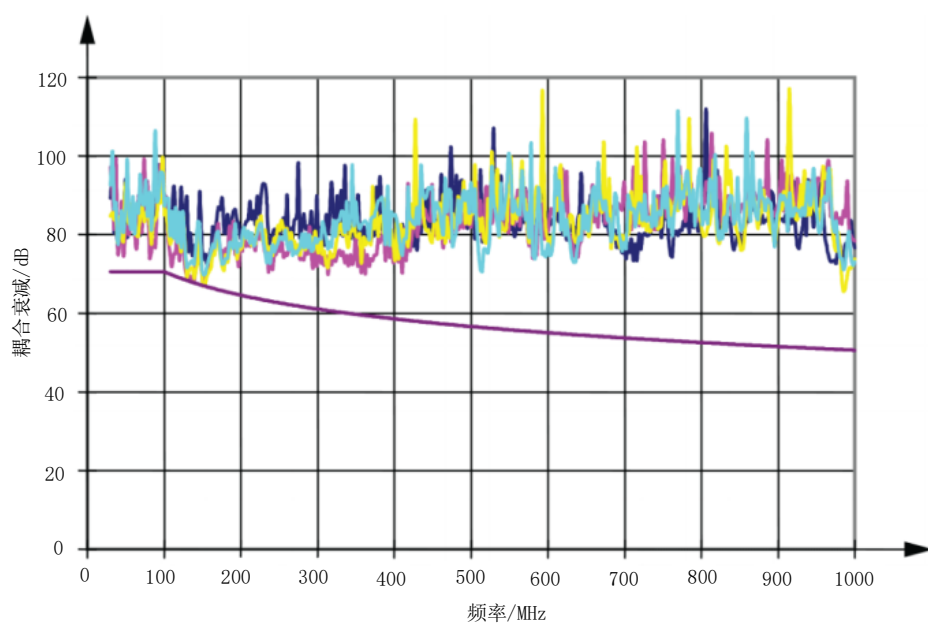
图C.2 良好屏蔽的对称电缆的测量示例



图C.3 良好屏蔽的同轴电缆的测量示例

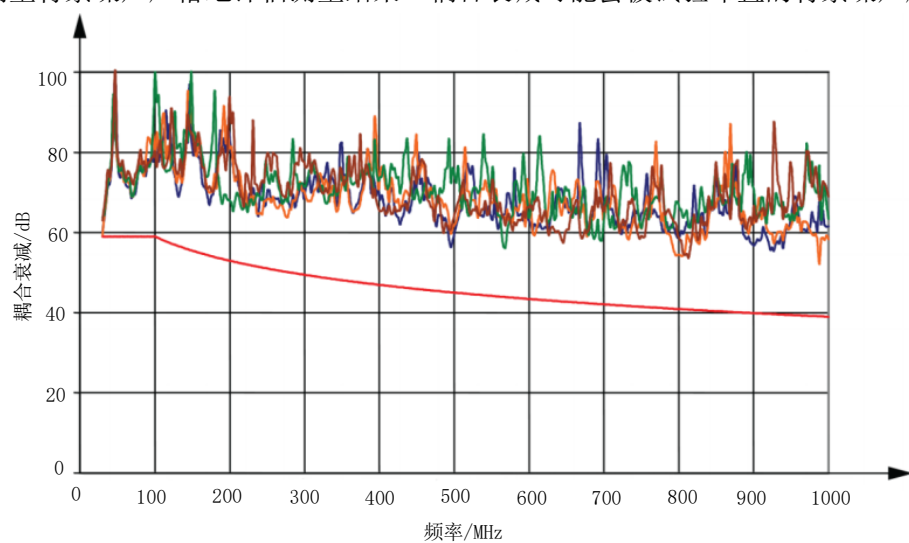
图C.3给出了良好屏蔽的同轴电缆的测量示例。

两种常见的测量错误会使试验结果变得混乱，如低频上非典型的高值以及单一频率上的非典型高值（示例见图C.4和图C.5），宜通过重复试验来避免。



图C.4 对称电缆测量的常见错误（一）

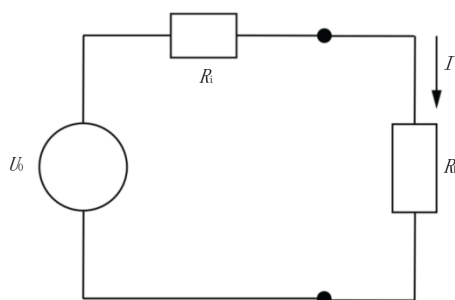
宜通过测量背景噪声严格地评估测量结果。耦合衰减可能会被试验布置的背景噪声所掩盖。



图C.5 对称电缆测量的常见错误（二）

附录 D  
(资料性)  
连接点的反射损耗

如果内阻为  $R_i$  的源输入给具有不同电阻  $R_L$  的负载，则与匹配情况相比，由于失配会造成功率损耗。如果源通过特性阻抗为  $Z_0 = R_i$  的传输线连接到结点，负载通过特性阻抗为  $Z_0 = R_L$  的传输线连接到结点，则等效电路如图D.1所示：



图D.1 内电阻为  $R_i$  的源和  $R_L$

负载电阻  $R_L$  上的功率由公式 (D.1) 得到：

$$P = I^2 R_L = \left( \frac{U_0}{R_i + R_L} \right)^2 R_L = U_0^2 \frac{R_L}{(R_i + R_L)^2} \quad (\text{D. 1})$$

对于阻抗匹配 ( $R_L = R_i$ )，输入的最大功率  $P_0$  见公式 (D.2)：

$$P_0 = U_0^2 \frac{R_i}{4R_i^2} = \frac{1}{4} U_0^2 \frac{1}{R_i} \quad (\text{D. 2})$$

公式 (D.1) 和公式 (D.2) 的比值描述的是损耗，见公式 (D.3)：

$$\frac{P}{P_0} = \frac{U_0^2 R_L}{(R_i + R_L)^2} \frac{4R_i}{U_0^2} = \frac{4R_L R_i}{(R_i + R_L)^2} \quad (\text{D. 3})$$

下面的辅助计算引入反射系数  $r$ ：

$$\begin{aligned} 1 - r^2 &= 1 - \left( \frac{R_L - R_i}{R_L + R_i} \right)^2 = \frac{(R_L + R_i)^2}{(R_L + R_i)^2} - \frac{(R_L - R_i)^2}{(R_L + R_i)^2} \\ &= \frac{R_L^2 + 2R_L R_i + R_i^2 - R_L^2 + 2R_L R_i - R_i^2}{(R_L + R_i)^2} = \frac{4R_L R_i}{(R_L + R_i)^2} \quad (\text{D. 4}) \end{aligned}$$

使用公式 (D.4)，功率比值[公式 (D.3)]变为公式 (D.5)：

$$\frac{P}{P_0} = 1 - r^2 \quad (\text{D. 5})$$

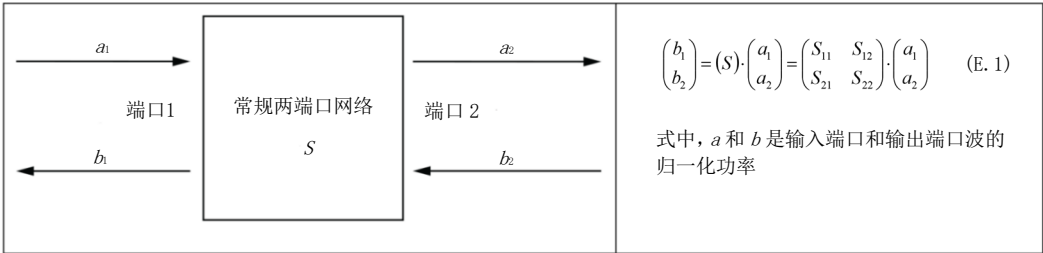
因此， $\Gamma_s$  (dB) 为公式 (D.6) (同时见 IEC TR 62152:2009 的 A.5.3)：

$$\Gamma_s = -10 \lg |1 - r^2| \quad (\text{D. 6})$$

附录 E  
(资料性)  
混合模式参数

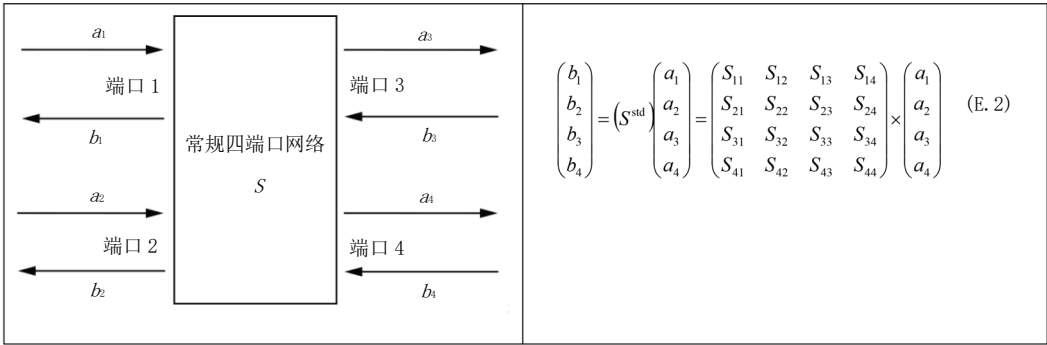
E.1 混合模 S 参数的定义

四极或两端口的传输特性，如同轴电缆，可用散射参数或简称“S参数” 进行描述。在矩阵表示法中，其可书写为如图E.1所示。



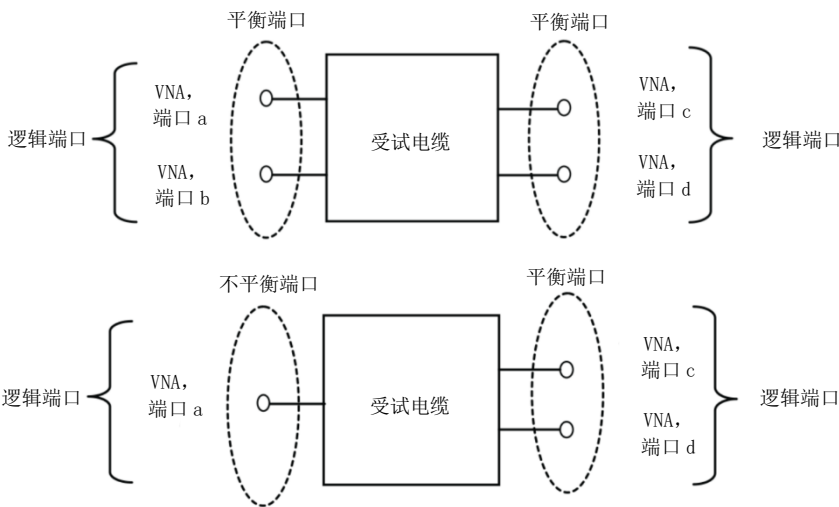
图E.1 常规两端口网络

散射矩阵的定义可以很容易地扩展到任意N个门。对于四端口，得到的网络如图E.2所示。



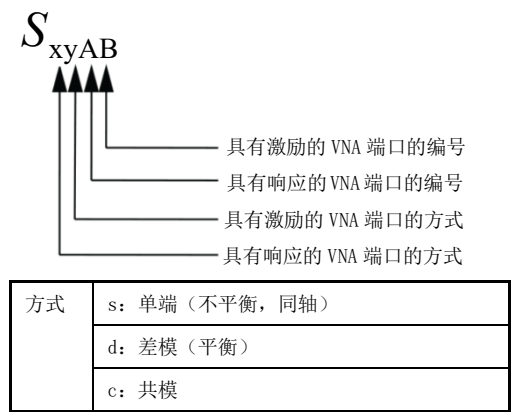
图E.2 常规四端口网络

对于对称的两端口测量，多端口VNA的物理端口可组合成逻辑端口，如图E.3所示。



图E.3 VNA 的物理和逻辑端口

使用图E.4中的命名法。



图E.4 混合模式 S 参数的命名法

因此,  $S$  参数可以理解为功率波的比值, 见公式 (E.5)。

$S_{xyAB} = \frac{\text{方式 } x \text{ 时 VNA 端口 A 的输入信号}}{\text{方式 } y \text{ 时 VNA 端口 B 的输入信号}} \dots\dots\dots (E.3)$

对于对称两端口网络, 不对称四端口散射参数 $S^{\text{std}}$  转换为混合模式散射参数 $S^{\text{mm}}$ 由下式公式(E.4):

$S^{\text{mm}} = M \cdot S^{\text{std}} \cdot M^{-1} \dots\dots\dots (E.4)$

式中:

$M = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (E.5)$

$S^{\text{mm}} = \begin{bmatrix} S_{dd11} & S_{dd12} \\ S_{dd21} & S_{dd22} \\ S_{cd11} & S_{cd12} \\ S_{cd21} & S_{cd22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{dc11} & S_{dc12} \\ S_{dc21} & S_{dc22} \\ S_{cc11} & S_{cc12} \\ S_{cc21} & S_{cc22} \end{bmatrix} \quad (E.6)$

对具有不平衡端口 (单端) 和平衡端口的两端口测量, 会出现以下测量配置:

			d 激励		
			h 单端	i 差模	j 共模
			n 逻辑端口 1	o 逻辑端口 2	p 逻辑端口 2
q	r 单端	s 逻辑端口 1	t $S_{ss11}$	u $S_{sd12}$	v $S_{sc12}$
	w 差模	x 逻辑端口 2	y $S_{ds21}$	z $S_{dd22}$	aa $S_{dc22}$
	bb 共模	cc 逻辑端口 2	dd $S_{cs21}$	ee $S_{cd22}$	ff $S_{cc22}$

图E.5 测量配置, 单端响应

耦合衰减测量对应于差模中的激励和不平衡（同轴）模式（单端）中的响应，即测量 $S$ 参数 $S_{sd12}$ ，见图E.5。屏蔽衰减测量对应于共模中的激励和不平衡（同轴）模式（单端）中的响应，即测量 $S$ 参数 $S_{sc12}$ 。

对于具有两个平衡端口的两端口测量，得到以下试验配置：

			激励			
			差模		共模	
			逻辑端口 1	逻辑端口 2	逻辑端口 1	逻辑端口 3
响 应	差模	逻辑端口 1	$S_{dd11}$	$S_{dd12}$	$S_{dc11}$	$S_{dc12}$
		逻辑端口 2	$S_{dd21}$	$S_{dd22}$	$S_{dc21}$	$S_{dc22}$
	共模	逻辑端口 1	$S_{cd11}$	$S_{cd12}$	$S_{cc11}$	$S_{cc12}$
		逻辑端口 2	$S_{cd21}$	$S_{cd22}$	$S_{cc21}$	$S_{cc22}$

图E.6 测量配置，差模响应

平衡对衰减测量对应于差模中的激励和响应，即测量 $S$ 参数 $S_{dd21}$ ，见图E.6。在差模和共模响应中使用激励的不平衡衰减测量在近端与在远端测量时的 $S$ 参数 $S_{cd11}$ 或 $S_{cd21}$ 相对应。

## E.2 VNA 的参考阻抗

使用混合模式参数的四端口VNA进行测量时，例如使用电子校准装置，宜能实现完整的校准。VNA（ $Z_0=50\ \Omega$ 的物理分析仪端口）设置了默认的参考阻抗值：差模 $Z_{0d}=100\ \Omega$ （ $=2\times Z_0$ ）和共模 $Z_{0c}=25\ \Omega$ （ $=Z_0/2$ ）。

## 参 考 文 献

[1] IEC 62153-4-3 Metallic communication cable test methods—Part 4-3: Electromagnetic compatibility (EMC) —Surface transfer impedance—Triaxial method

[2] IEC 62153-4-4 Metallic communication cable test methods—Part 4-4: Electromagnetic compatibility (EMC)—Test method for measuring of the screening attenuation as up to and above 3 GHz, triaxial method

[3] IEC 62153-4-9 Metallic communication cable test methods—Part 4-9: Electromagnetic compatibility (EMC)—Coupling attenuation of screened balanced cables, triaxial method

[4] IEC TR 62152:2009 Transmission properties of cascaded two-ports or quadripols—Background of terms and definitions

[5] MUND, B & PFEILER, C, Balunless measurement of coupling attenuation of screened balanced cables up to 2 GHz, IWCS, 64rd International Cable Connectivity Symposium, October 05 -10, 2015, Atlanta, GA, USA

[6] HÄHNER, T, MUND, B & SCHMID, T, History and recent trends of triaxial test procedure, Proceedings of the 67nd IWCS Conference, Providence, RI, USA, October 2018