



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 31723.403—XXXX/IEC 62153-4-3:2013

---

## 金属通信电缆试验方法 第4-3部分：电 磁兼容 表面转移阻抗 三同轴法

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

(IEC 62153-4-3:2013, 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 .....	IV
引言 .....	V
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 原理 .....	3
5 试验方法 .....	4
5.1 通则 .....	4
5.2 试验设备 .....	4
5.3 校准程序 .....	4
5.4 试样制备 .....	5
5.5 试验装置 .....	5
5.6 试验配置 .....	6
5.7 试验结果的表示 .....	8
6 试验方法 A: 内回路和外回路中的阻尼电阻匹配 .....	8
6.1 通则 .....	8
6.2 阻尼电阻 $R_2$ .....	8
6.3 截止频率 .....	8
6.4 装置框图 .....	8
6.5 测量程序 .....	9
6.6 试验结果评估 .....	9
7 试验方法 B: 带负载电阻的内回路和不带阻尼电阻的外回路 .....	10
7.1 通则 .....	10
7.2 截止频率 .....	10
7.3 装置框图 .....	10
7.4 测量程序 .....	10
7.5 试验结果评估 .....	11
8 试验方法 C: (不匹配)–短路–短路无阻尼电阻 .....	11
8.1 通则 .....	11
8.2 截止频率 .....	11
8.3 装置框图 .....	11
8.4 测量程序 .....	12
8.5 试验结果评估 .....	12
附录 A (规范性) 内回路阻抗的测量 .....	14
A.1 内回路阻抗 .....	14

附录 B (规范性) 阻抗匹配适配器 .....	15
B.1 阻抗匹配电路的设计 .....	15
B.2 阻抗匹配电路的频率响应 .....	16
附录 C (规范性) 编织层“套取”法的样品制备 .....	18
C.1 通则 .....	18
C.2 同轴电缆 .....	18
C.3 对称及多芯电缆 .....	21
C.4 用 TDR 验证试样的制备 .....	23
附录 D (资料性) 将三轴试验装置转化为 T 型电路 .....	25
D.1 通则 .....	25
D.2 T 型电路的散射参数 $S_{21}$ .....	25
附录 E (资料性) 用于测量转移阻抗的三轴试验装置的截止频率 .....	26
E.1 等效电路 .....	26
E.2 耦合方程 .....	26
E.3 截止频率 .....	27
E.4 介电常数和阻抗的测定 .....	28
附录 F (资料性) 接地回路对低频测量的影响 .....	30
F.1 通则 .....	30
F.2 试验装置分析 .....	30
参考文献 .....	33
图 1 $Z_T$ 的定义 .....	2
图 2 $Z_F$ 的定义 .....	2
图 3 同轴电缆试样的准备 .....	5
图 B.1 $Z_2 < Z_1$ 时的阻抗匹配 .....	15
图 B.2 $Z_2 > Z_1$ 时的阻抗匹配 .....	16
图 B.3 同轴阻抗匹配适配器 (50 $\Omega$ 至 75 $\Omega$ ) .....	17
图 B.4 50 $\Omega$ 到 75 $\Omega$ 阻抗匹配适配器的衰减 .....	17
图 C.1 同轴电缆: 电缆“A”端的制备 .....	19
图 C.2 同轴电缆: 电缆“B”端的制备 .....	21
图 C.3 对称电缆: 电缆“A”端的制备 .....	21
图 C.4 对称电缆: 电缆“B”端的制备 .....	23
图 C.5 A 端的典型谐振 .....	24
图 C.6 B 端的典型谐振 .....	24
图 D.1 将三轴试验装置转化为 T 型电路 .....	25
图 E.1 三轴试验装置的等效电路 .....	26
图 E.2 不同负载条件下三轴试验装置的频率响应曲线 .....	28

图 E.3 长度为 50 cm 的外回路（测量管）测量出的 $S_{11}$ .....	29
图 F.1 三轴试验装置.....	30
图 F.2 三轴试验装置的等效电路.....	31
图 F.3 测量误差影响的示例.....	32

## 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4-3部分。GB/T 31723已经发布了以下部分：

- 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、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。

本文件等同采用IEC 62153-4-3:2013《金属通信电缆试验方法 第4-3部分：电磁兼容(EMC)表面转移阻抗 三同轴法》。

文本件做了下列编辑性改动：

- 公式重新编号。

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这些专利的责任。

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/TC190）归口。

本文件起草单位：中国电子技术标准化研究院、上海电缆研究所有限公司。

本标准主要起草人：XXX。

## 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，拟由18个部分构成：

- 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。目的在于规定金属通信电缆表面转移阻抗和屏蔽衰减之间的关系和推荐限值；
- 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 链路和信道的耦合衰减（实验室条件）吸收钳法；
- 第4-14部分：电磁兼容 电缆组件的耦合衰减（场条件）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4-3部分：电磁兼容 表面转移阻抗 三同轴法

## 1 范围

本文件通过把规定的电压和电流施加到电缆屏蔽层并测量感应电压从而获得表面转移阻抗的方法。本试验仅测量转移阻抗的磁分量。

注：测量静电分量（电容耦合阻抗），宜采用IEC 62153-4-8中所描述的方法。

本文件规定的三同轴法通常适用于频率范围达30 MHz的1 m试样和频率范围达100 MHz的0.3 m试样，这表示在试样中电长度小于1/6波长。

## 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 60050（所有部分） 国际电工词汇（IEV）[International Electrotechnical Vocabulary（IEV）]

IEC/TR 62153-4-1:2010 金属通信电缆试验方法 第4-1部分：电磁兼容性（EMC）电磁屏蔽（EMC）测量简介 [Metallic communication cable test methods — Part 4-1: Electromagnetic compatibility (EMC) —Introduction to electromagnetic (EMC) screening measurements]

## 3 术语和定义

IEC 60050界定的术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**内回路 inner circuit**

由试样屏蔽层和导体构成的回路。

注：与内回路有关的参数用下标“1”表示。见图1和图2。

### 3.2

**外回路 outer circuit**

由屏蔽层表面和周围试验装置内表面构成的回路。

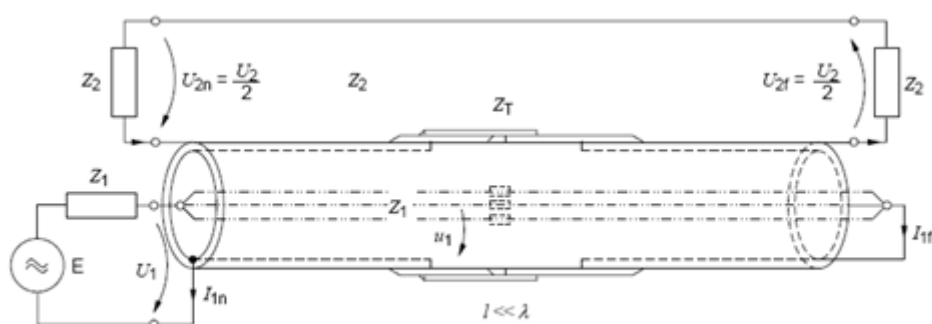
注：与外回路有关的参数用下标“2”表示。见图1和图2。

### 3.3

**转移阻抗 transfer impedance**

$Z_T$

被试屏蔽层和测试装置造成的在匹配的外回路内产生的纵向电压与馈入到内回路的电流的比值，反之亦然（见图1）。

图1  $Z_T$  的定义

$$Z_T = \frac{U_2}{I_1} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

$Z_1, Z_2$ ——内回路和外回路的特性阻抗;

$U_1, U_2$ ——内回路和外回路电压( $n$ : 近端,  $f$ : 远端);

$I_1$  ——内回路电流( $n$ : 近端,  $f$ : 远端);

$l$  ——与被试屏蔽层长度相对应的电缆的长度;

$\lambda$  ——自由空间中的波长。

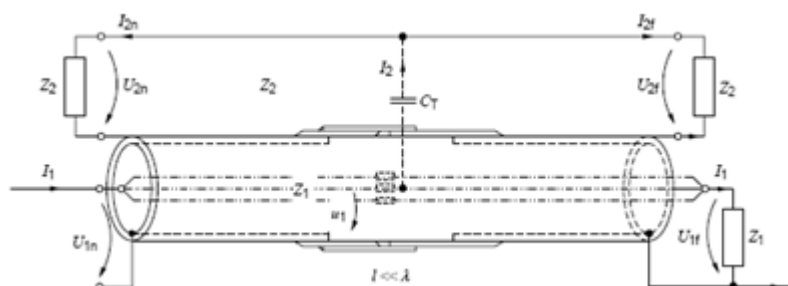
注: 转移阻抗以  $\text{m}\Omega/\text{m}$  来表示。

### 3.4

#### 容性耦合阻抗 capacitive coupling impedance

$Z_F$

感应到匹配的外系统终端阻抗  $Z_2$  的2倍电压与馈入（不在屏蔽层上徘徊）到内回路的电流  $I_1$  之比，反之亦然（见图2）。

图2  $Z_F$  的定义

$$I_{2n} = I_{2f} \dots\dots\dots (2)$$

$$U_{1n} = U_{1f} \dots\dots\dots (3)$$

$$I_{2n} = I_{2f} = (1/2) \times I_2 = I_2/2 \dots\dots\dots (4)$$

$$I_2 = I_{2n} + I_{2f} \dots\dots\dots (5)$$

$$Z_F = \frac{U_{2n} + U_{2f}}{I_1} = \frac{2U_{2f}}{I_1} = Z_1 Z_2 \times j\omega C_T \dots\dots\dots (6)$$

式中:

$Z_1, Z_2$ ——内回路和外回路的特性阻抗;  
 $U_1, U_2$ ——内回路和外回路电压( $n$ : 近端,  $f$ : 远端);  
 $I_1$ ——内回路电流( $n$ : 近端,  $f$ : 远端);  
 $I_2$ ——外回路电流( $n$ : 近端,  $f$ : 远端);  
 $C_T$ ——耦合电容;  
 $l$ ——与被试屏蔽层长度相对应的电缆的长度;  
 $\lambda$ ——自由空间中的波长。

注: 容性耦合阻抗用 $m\Omega/m$ 来表示。

### 3.5

**有效转移阻抗** effective transfer impedance

$Z_{TE}$

#### 3.5.1

**有效转移阻抗** effective transfer impedance

$Z_{TE}$

每个频率的  $Z_F$  和  $Z_T$  之和或二者之差的最大绝对值。

$$Z_{TE} = \max|Z_F \pm Z_T| \dots\dots\dots (7)$$

注: 有效转移阻抗用 $\Omega$ 来表示。

#### 3.5.2

**参考阻抗为 1  $\Omega$  的有效转移阻抗**

$Z_{TE}$

每个频率的  $Z_F$  和  $Z_T$  之和或二者之差的最大绝对值用 $dB(\Omega)$ 来表示。

$$Z_{TE}[dB(\Omega)] = +20 \log_{10} \left( \frac{|Z_{TE}|}{Z_{T,ref}} \right) \dots\dots\dots (8)$$

式中:

$Z_{T,ref}$  —— 数值为 $1 \Omega$ 的参考转移阻抗。

注: 有效转移阻抗用 $dB(\Omega)$ 来表示。

### 3.6

**耦合长度** coupling length

$L_c$

电缆在试验装置内的长度, 即被试屏蔽层的长度。

注: 耦合长度和测试方法会影响可测量转移阻抗的最高频率。详细说明参见IEC/TR 62153-4-1:2010的第8章。

### 3.7

**截止频率** cut-off frequency

能够测量转移阻抗的最高频率。

注: 截止频率随耦合长度和所使用的测试方法而变化。详细说明参见IEC/TR 62153-4-1:2010的第8章。截止频率的计算方法见附录E。

## 4 原理

本试验通过把规定的电压和电流施加到电缆屏蔽层并测量感应电压从而获得表面转移阻抗的方法, 从而确定屏蔽电缆的屏蔽效率。本试验仅测量转移阻抗的磁分量。测量静电分量(电容耦合阻抗), 宜采用IEC 62153-4-8中所描述的方法。

三同轴法通常适用于频率范围达30 MHz的1 m试样和频率范围达100 MHz的0.3 m试样，这表示在试样中电长度小于1/6波长。详细说明参见IEC/TR 62153-4-1:2010。

## 5 试验方法

### 5.1 通则

本试验应在 $(23 \pm 3)^\circ\text{C}$ 温度下进行测量。

本试验方法是通过在三同轴试验装置中测量电缆，来确定电缆的转移阻抗。三同轴试验装置可通过刚性管来实现。下面介绍了使用不同负载条件的不同试验方法。所有不同的试验方法在达到其相应截止频率之前测试结果相同。

### 5.2 试验设备

测量可以采用网络分析仪（VNA），或代之以一个离散信号发生器和一个选择性测量接收器。

测量设备组成如下：

- a) 网络分析仪（配备S参数测试仪）或其他设备
- 信号发生器特性阻抗与被试同轴电缆相同或配一个阻抗适配器，如果需要极高的屏蔽衰减则配置一个功率放大器；
  - 配备低噪声放大器的接收器可实现极高的屏蔽衰减；
  - 发生器和接收器应具有相同的系统阻抗：

$$Z_g = Z_R = Z_0 \dots\dots\dots (9)$$

- b) 阻抗匹配回路（如需要）
- 一次回路侧：发生器标称阻抗；
  - 二次回路侧：内回路标称阻抗；
  - 回波损耗： $>10\text{ dB}$ 。

可选设备：

- a) 上升时间短于200 ps的时域反射计（TDR），或者最高频率达5GHz且具有时域能力的网络分析仪；
- b) 绘图仪。

### 5.3 校准程序

应在测量转移阻抗的相同频率点上校准，即在转移阻抗确定的整个频率范围内，以对数扫频的方式进行测量。

当使用带有S参数测试仪的矢量网络分析仪时，应进行双端口校准，包括连接试验装置和试验设备的连接电缆。校准的基准面是连接电缆的连接器界面。

当使用矢量网络分析仪（无S参数测试仪）时，即使用功率分配器，应对包括连接试验装置和试验设备的连接电缆进行THRU校准。

当使用离散信号发生器和接收器时，应测量连接电缆的综合损耗并保存校准数据，以便于校正结果。

$$a_{cal} = 10\log_{10}\left(\frac{P_1}{P_2}\right) = -20\log_{10}(s_{21}) \dots\dots\dots (10)$$

式中：

- $P_1$  —— 校准过程中的功率馈入；
- $P_2$  —— 校准过程中的接收功率。

如果使用放大器，应测量上述频率范围内的增益，并保存数据。

如果使用阻抗适配器，应测量上述频率范围内的损耗，并保存数据（见附录B）。

#### 5.4 试样制备

试样的长度应不超过耦合长度的50%。

同轴电缆按图3所示进行制备。



图3 同轴电缆试样的准备

同轴电缆的一端与完好屏蔽的电阻器 $R_1$ 相匹配。 $R_1$ 的值取决于所使用的试验方法（如下所述），即短路、等于内回路的特性阻抗 $Z_1$ 或等于发生器阻抗。由于 $R_1$ 阻值与 $Z_1$ 接近（在10%以内），因此将 $R_1$ 作为标准值电阻。

另一端配一个连接器来连接发生器或阻抗适配器（取决于使用的试验方法）。所有连接均应使射频接触电阻相对于测量结果可忽略不计。

屏蔽的对称电缆视为准同轴系统。所以，所有绞线对/四线组中的导体，其末端应连接在一起（其它连接方式正在研究中）。所有的屏蔽层，包括单独屏蔽的绞线对/四线组的屏蔽层，其两端均应连接在一起。这些屏蔽层连接起来时，应覆盖整个圆周。如图4所示。

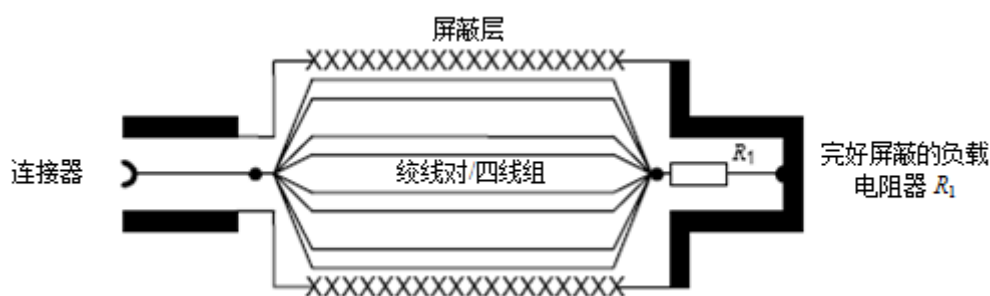


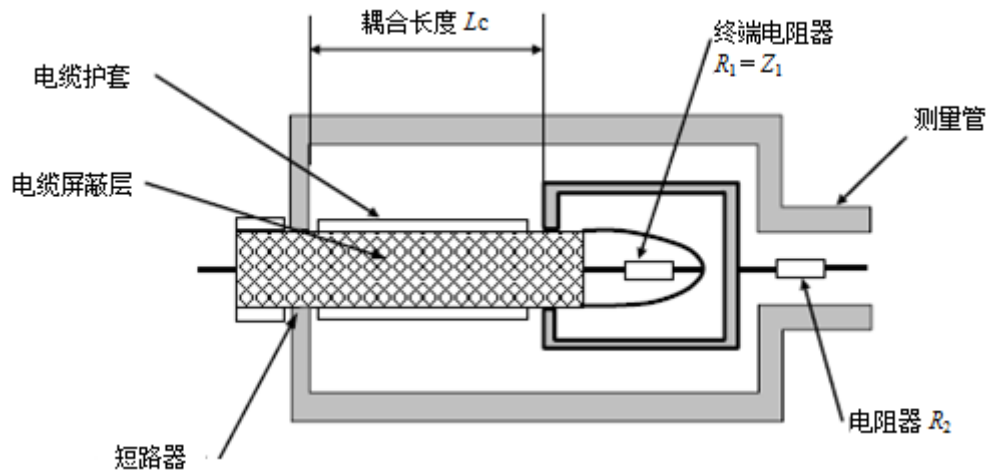
图4 同轴电缆试样的准备

#### 5.5 试验装置

试样应安装到试验装置。试验装置是一种三同轴形式的装置。电缆屏蔽层构成内系统的外导体和外系统的内导体。

在刚性装置中，外回路的外导体是一种非铁磁性金属（如黄铜或铜）制成的传导性优良的测量管，其与电缆馈电侧的屏蔽层短路（见图5）。

在柔性装置中，应拉伸覆盖率 $>70\%$ 编织角 $<30^\circ$ 的外回路外导体镀锡铜丝编织层，使其覆盖被测电缆的整个长度（见附录C）。



$R_1$ ——终端电阻。 $R_1$ 的值取决于所用的试验方法，即短路、等于内部电路的特性阻抗 $Z_0$ 或等于发生器阻抗，详见相应测试方法。

$R_2$ ——终端电阻。 $R_2$ 的值取决于所用的试验方法，即短路或外回路阻抗的函数，详见相应测试方法。

图5 与测量管的连接

5.6 试验配置

5.6.1 通则

根据试验装置的不同，使用不同的试验配置，这些均取决于试验方法。不同的试验配置可能对测量值转换为转移阻抗的过程产生影响（见附录D）。

5.6.2 带 S 参数测试仪的网络分析仪

常见的试验装置是带 S 参数测试仪的网络分析仪（见图6）。

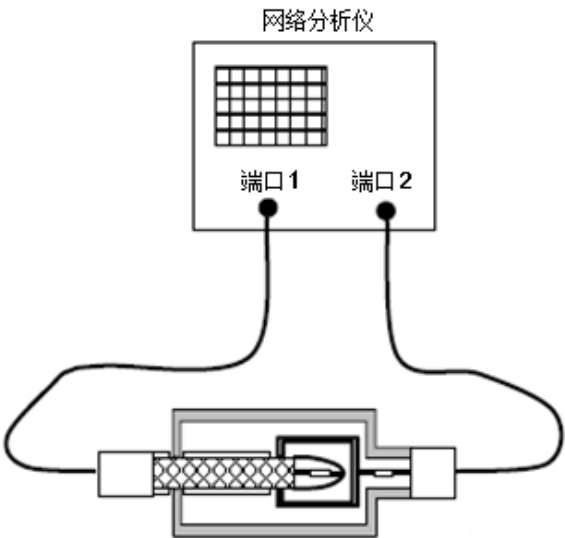


图6 采用网络分析仪（带 S 参数测试仪）的试验装置

5.6.3 带功率分配器的（矢量）网络分析仪

如果没有S参数测试仪，则可以使用功率分配器（见图8）。功率分配器可以是2电阻或3电阻类型（见图7）。当使用馈入短路的测试方法时（见第8章），从测量的散射参数 $S_{21}$ 到转移阻抗的转换将取决于所使用的功率分配器类型。

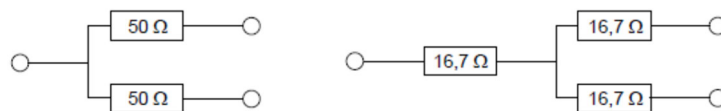


图7 2电阻和3电阻类型的50 Ω功率分配器

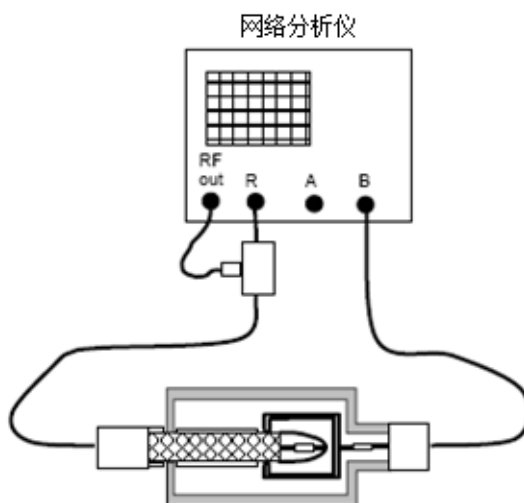


图8 采用网络分析仪和功率分配器的试验装置

#### 5.6.4 单独的信号发生器和接收器

当测量具有很低转移阻抗的极好屏蔽层时，由于接地回路的缘故，试验结果可能会在低频下存在误差。为避免接地回路，使用单独的发电机和接收器，它们由电池驱动或通过断路器连接到电源（参见图9）。

当将电源接入短路时（见第8章），可以通过电阻（其值等于发生器阻抗）馈电以避免损坏发生器（图10）。

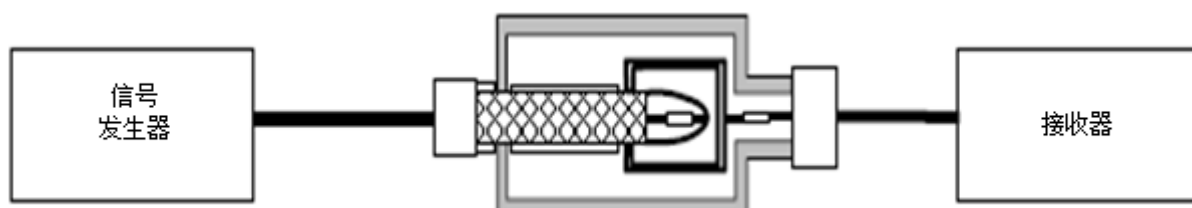


图9 采用一个信号发生器和一个接收器的试验装置



图10 采用一个信号发生器和一个接收器并带有馈电电阻的试验装置

## 5.7 试验结果的表示

### 5.7.1 表示

转移阻抗值表达为相关电缆规范规定的要求频率下的mΩ/m。

### 5.7.2 试验报告

试验报告应记录试验结果，并应就是否满足相关电缆规范的要求给出结论。

## 6 试验方法 A：内回路与外回路中的阻尼电阻匹配

### 6.1 通则

在这种方法中，内回路（电缆）端接匹配的终端（ $R_1=Z_1$ ），并被视为干扰电路（由发生器供电）。如果内回路的阻抗未知，应按照附录A的要求进行测量。

外回路在电缆屏蔽层的近端短路，并通过阻尼电阻 $R_2$ 连接到远端的接收器。

如果内回路的阻抗与发生器阻抗不匹配，应使用阻抗匹配适配器（见附录B）。

注：此方法通常适用于刚性设备。

### 6.2 阻尼电阻 $R_2$

为利用临界阻尼获得装置最大平衡带宽，电阻器 $R_2$ 宜安装在外回路的远端。 $R_2$ 的阻值为：

$$R_2 = A \times 60 \ln \left( \frac{D}{d} \right) - 50 \dots\dots\dots (11)$$

$$A = \sqrt{2} \text{ 或 } A = \sqrt{\frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}}} \dots\dots\dots (12)$$

式中：

$D$  —— 测量管内径；

$d$  —— 电缆屏蔽层的外径；

$\epsilon_{r1}$  —— 内回路介电常数；

$\epsilon_{r2}$  —— 外回路介电常数。

### 6.3 截止频率

该试验方法的截止频率-长度乘积为（详见IEC/TR 62153-4-1:2010的第8章）：

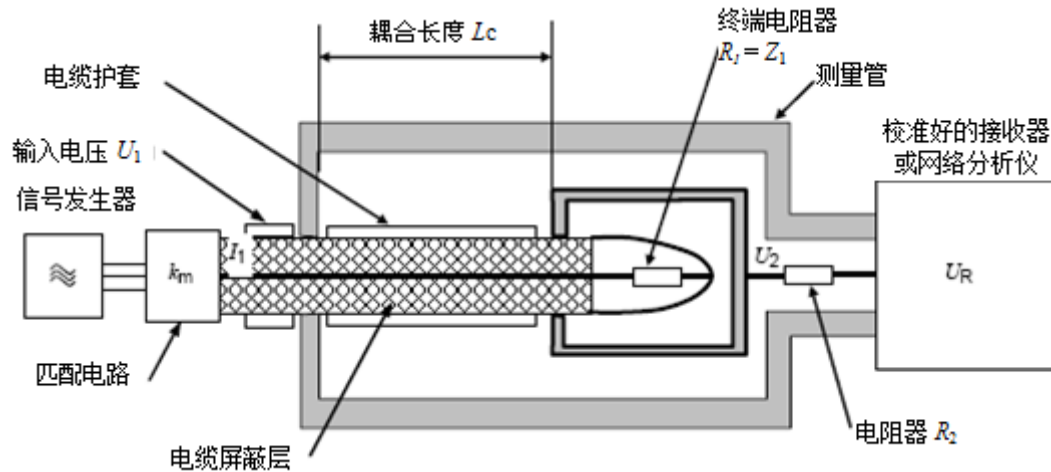
$$f_{\text{cut}} \times L \approx 80 \text{ MHz} \times \text{m} \dots\dots\dots (13)$$

示例：对于 0.5 m 的耦合长度，可测量转移阻抗的最大频率为 160 MHz。

### 6.4 装置框图

试验装置的框图如图11所示。





说明：

- $Z_g$ ——发生器阻抗；
- $Z_1$ ——被测电缆阻抗；
- $U_1$ ——内回路输入电压；
- $U_2$ ——外回路电压；
- $U_R$ ——接收器测得的电压；
- $L_c$ ——耦合长度；
- $R_1$ ——内回路终端电阻；
- $R_2$ ——阻尼电阻；
- $I_1$ ——电缆屏蔽层电流。

图11 试验装置（原理）

## 6.5 测量程序

将试样接到发生器，外回路（测量管）应接到接收器。

应在转移阻抗确定的整个频率范围内，并在与校准程序相同的频率点，最好以对数扫频的方式，优先测量衰减  $a_{meas}$ 。

$$a_{meas} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_1}{P_2} \right) = -20 \log_{10} (S_{21}) \quad (14)$$

式中：

- $P_1$ ——内回路馈入功率；
- $P_2$ ——外回路功率。

## 6.6 试验结果评估

下式给出了测得的衰减到与转移阻抗的转换关系。

$$Z_T = \frac{R_1 (Z_0 + R_2)}{Z_0 L_c} 10^{-\left\{ \frac{a_{meas} - a_{cal} - (a_{pad} + 10 \log_{10} (\frac{Z_0}{Z_1}))}{20} \right\}} \quad (15)$$

式中：

- $Z_0$ ——系统阻抗（一般为  $50 \Omega$ ）；
- $Z_1$ ——内回路特征阻抗；
- $Z_T$ ——转移阻抗；

- $a_{\text{meas}}$  —— 测量程序测得的衰减；  
 $a_{\text{cal}}$  —— 没有通过试验设备校准程序消除的连接电缆衰减；  
 $L_c$  —— 耦合长度；  
 $R_1$  —— 内回路终端电阻；  
 $R_2$  —— 外回路串联电阻；

## 7 试验方法 B：带负载电阻的内回路和不带阻尼电阻的外回路

### 7.1 通则

此试验方法与第6章相同，但是不使用阻抗匹配适配器和阻尼电阻 $R_2$ ，且具有较高的动态范围。

负载电阻等于内回路和发生器的阻抗。当使用带功率分配器的网络分析仪而不是带S参数测试仪的网络分析仪时，后一种情况很有用。

### 7.2 截止频率

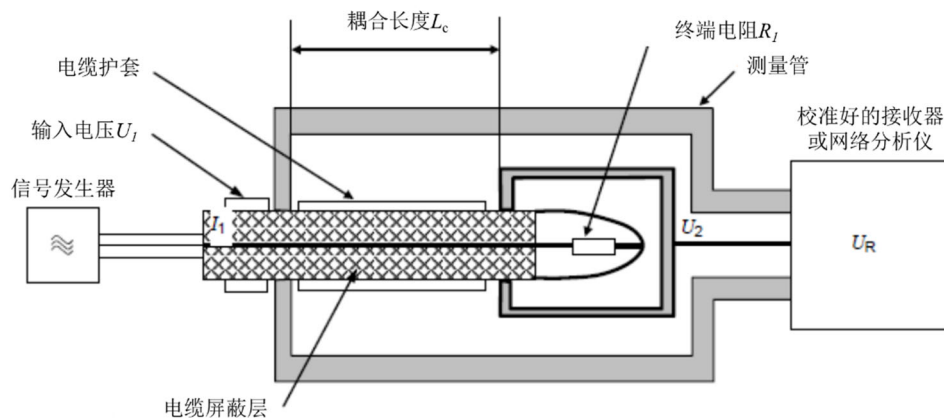
该试验方法的截止频率-长度乘积为：

$$f_{\text{cut}} \times L \approx 25 \text{ MHz} \times \text{m} \dots\dots\dots (16)$$

示例：对于 0.5 m 的耦合长度，可测量转移阻抗的最大频率为 50 MHz。

### 7.3 装置框图

试验装置的框图如图12所示。



说明：

- $U_1$  —— 内回路输入电压；  
 $U_2$  —— 外回路电压；  
 $U_R$  —— 接收器测得的电压；  
 $L_c$  —— 耦合长度；  
 $R_1$  —— 内回路终端电阻；  
 $I_1$  —— 电缆屏蔽层电流。

图12 试验装置（原理）

### 7.4 测量程序

将试样接到发生器，外回路（测量管）应接到接收器。

应在转移阻抗确定的整个频率范围内，并在与校准程序相同的频率点，最好以对数扫频的方式，优先测量衰减 $a_{meas}$ 。

$$a_{meas} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_1}{P_2} \right) = -20 \log_{10} (S_{21}) \dots\dots\dots (17)$$

式中：

$P_1$  —— 内回路馈入功率；

$P_2$  —— 外回路功率。

## 7.5 试验结果评估

下式给出了测得的衰减到与转移阻抗的转换关系。

$$Z_T = \frac{R_1 + Z_0}{2L_c} 10^{-\left\{ \frac{a_{meas} - a_{cal}}{20} \right\}} \dots\dots\dots (18)$$

式中：

$Z_T$  —— 转移阻抗；

$Z_0$  —— 系统阻抗（一般为 $50 \Omega$ ）；

$a_{meas}$  —— 测量程序测得的衰减；

$a_{cal}$  —— 没有通过试验设备校准程序消除的连接电缆衰减；

$L_c$  —— 耦合长度；

$R_1$  —— 内回路终端电阻（等于内回路和发生器阻抗）；

## 8 试验方法 C：（不匹配）-短路-短路无阻尼电阻

### 8.1 通则

该方法内回路和外回路在一侧短路，即阻尼电阻 $R_2$ 和终端电阻 $R_1$ （见图5）被短路。试验装置不使用阻抗匹配适配器。

发生器在近端为外回路馈电，内电路（被试电缆）在远端连接接收器。在此试验装置中，容性耦合的影响为一次和二次系统中的短路器所抑制。此外，这种方法还极为敏感，因此适于测量极低的转移阻抗值（低至 $1 \mu\Omega/m$ 及其以下）。使用下述编织层套取法可在机械试验之前、之时和之后测量被试电缆的转移阻抗。

注：该方法可采用刚性或柔性（编织层套取法）试验装置。

### 8.2 截止频率

对于刚性试验装置，该试验方法的截止频率-长度乘积为：

$$f_{cut} \times L \approx 30 \text{ MHz} \times m \dots\dots\dots (19)$$

示例：对于 0.5 m 的耦合长度，可测量转移阻抗的最大频率为 60 MHz。

对于柔性试验装置（编织层套取法），该试验方法的截止频率-长度乘积为：

$$f_{cut} \times L \approx 20 \text{ MHz} \times m \dots\dots\dots (20)$$

示例：对于 0.5 m 的耦合长度，可测量转移阻抗的最大频率为 40 MHz。

### 8.3 装置框图

试验装置的框图如图13所示。

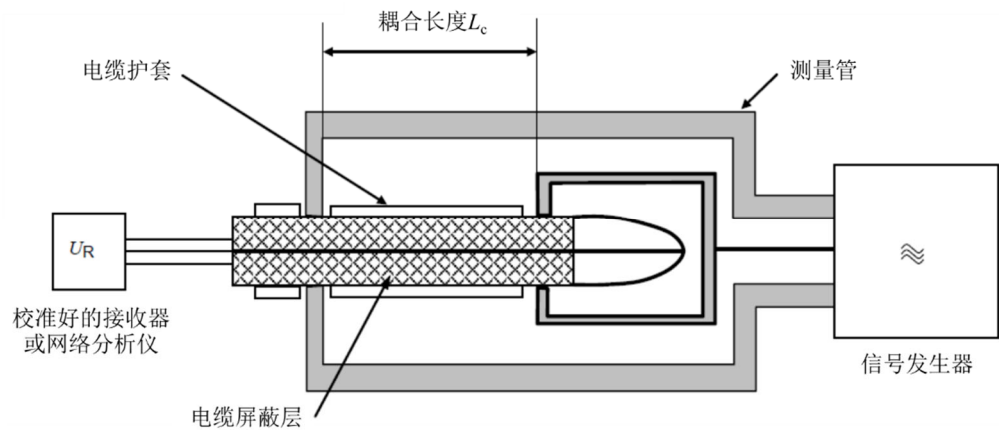


图13 试验装置（原理）

8.4 测量程序

将外回路（测量管）接到发生器，内回路（电缆）接到接收器。在柔性试验装置（编织层套取法）中，外回路对应“A”端，内回路对应“B”端（见附录C）。

应在转移阻抗确定的整个频率范围内，并在与校准程序相同的频率点，最好以对数扫频的方式，优先测量衰减 \$a\_{meas}\$。

$$a_{meas} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_1}{P_2} \right) = -20 \log_{10} (S_{21}) \dots\dots\dots (21)$$

式中：

- \$P\_1\$ —— 内回路馈入功率；
- \$P\_2\$ —— 外回路功率。

8.5 试验结果评估

下式给出了测得的衰减到与转移阻抗的转换关系：

$$Z_T = \frac{Z_0}{2L_c} 10^{-\left\{ \frac{a_{meas} - a_{cal}}{20} \right\}} \dots\dots\dots (22)$$

当（矢量）网络分析仪发生器端带有双电阻功率分配器时：

$$Z_T = \frac{Z_0}{2L_c} 10^{-\left\{ \frac{a_{meas} - a_{cal}}{20} \right\}} \dots\dots\dots (23)$$

当（矢量）网络分析仪发生器端带有3电阻功率分配器时：

$$Z_T = \frac{Z_0}{4L_c} 10^{-\left\{ \frac{a_{meas} - a_{cal}}{20} \right\}} \dots\dots\dots (24)$$

单独的信号发生器和接收器、带有S参数测试仪的矢量网络分析仪或功率分配器，通过馈电电阻（阻值等于发生器的阻抗）馈送功率：

$$Z_T = \frac{Z_0}{L_c} 10^{-\left\{ \frac{a_{meas} - a_{cal}}{20} \right\}} \dots\dots\dots (25)$$

式中：

- \$Z\_T\$ —— 转移阻抗；
- \$Z\_0\$ —— 系统阻抗（一般为50 \$\Omega\$）；
- \$a\_{meas}\$ —— 测量程序测得的衰减；

$a_{\text{cal}}$  —— 没有通过试验设备校准程序消除的连接电缆衰减；  
 $L_{\text{c}}$  —— 耦合长度。

附 录 A  
(规范性)  
内回路阻抗的测量

A.1 内回路阻抗

若内系统阻抗 $Z_1$ 未知，则可采用TDR或通过（矢量）网络分析仪（VNA）采用如下方法来测定。

先在连接器界面的基准面将网络分析仪进行阻抗测量校准，然后将制备好的试样的一端接到校准好的网络分析仪。试验频率应为试样长度为 $1/8\lambda$ （ $\lambda$ 为波长）时的近似频率。

$$f_{test} = \frac{c}{8 \times L_{sample} \times \sqrt{\epsilon_{r1}}} \dots\dots\dots (A.1)$$

式中：

$f_{test}$  —— 试验频率；

$c$  —— 光速， $3 \times 10^8$  m/s；

$\epsilon_{r1}$  —— 内回路介电常数；

$L_{sample}$  —— 试样长度。

将试样在远端短路。测量阻抗  $Z_{短路}$ 。

将试样在短路的同一点断路。测量阻抗  $Z_{断路}$ 。

$Z_1$  按如下公式计算：

$$Z_1 = \sqrt{Z_{短路} \times Z_{断路}} \dots\dots\dots (A.2)$$

## 附录 B (规范性) 阻抗匹配适配器

### B.1 阻抗匹配电路的设计

#### B.1.1 通则

阻抗匹配电路应以双电阻器电路来实现：一个串联电阻器 $R_S$ ，和一个并联电阻器 $R_P$ (对于某些阻抗组合，如 $50\ \Omega/75\ \Omega$ ，可用工业适配器)。

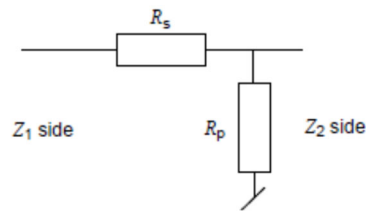
#### B.1.2 次级阻抗 $Z_2$ 小于初级阻抗 $Z_1$

若次级阻抗 $Z_2$ 小于初级阻抗 $Z_1$ ，则采用以下公式：

$$R_S = Z_1 \sqrt{1 - \frac{Z_2}{Z_1}} \dots\dots\dots (B.1)$$

$$R_P = \frac{Z_2}{\sqrt{1 - \frac{Z_2}{Z_1}}} \dots\dots\dots (B.2)$$

这种配置，见图B.1所示。



图B.1  $Z_2 < Z_1$  时的阻抗匹配

该电路的电压增益 $k_m$ 为：

$$k_m = \frac{Z_2 R_P}{Z_2 R_P + R_P R_S + Z_2 R_S} \dots\dots\dots (B.3)$$

该电路的散射参数 $S_{21}$ 为：

$$S_{21} = \frac{2R_P \sqrt{Z_1 Z_2}}{(R_S + R_P + Z_1)(R_P + Z_2) - R_P^2} \dots\dots\dots (B.4)$$

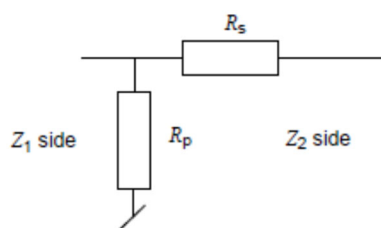
#### B.1.3 次级阻抗 $Z_2$ 大于初级阻抗 $Z_1$

若次级阻抗 $Z_2$ 大于初级阻抗 $Z_1$ ，则采用以下公式：

$$R_S = Z_2 \sqrt{1 - \frac{Z_1}{Z_2}} \dots\dots\dots (B.5)$$

$$R_P = \frac{Z_1}{\sqrt{1 - \frac{Z_1}{Z_2}}} \dots\dots\dots (B.6)$$

这种配置，示意于图B.2。

图B.2  $Z_2 > Z_1$  时的阻抗匹配

该电路的电压增益 $k_m$ 为:

$$k_m = \frac{Z_2}{R_s + Z_2} \dots\dots\dots (B.7)$$

该电路的散射参数 $S_{21}$ 为:

$$S_{21} = \frac{2R_p\sqrt{Z_1Z_2}}{(R_s + R_p + Z_2)(R_p + Z_1) - R_p^2} \dots\dots\dots (B.8)$$

## B.2 阻抗匹配电路的频率响应

### B.2.1 通则

公式B.3、公式B.4、公式B.7、公式B.8给出了在低频下计算电压增益和散射参数的计算公式。但是，在较高的频率下，必须考虑杂散电感和电容的影响。因此，阻抗匹配适配器的参数不仅仅通过计算获得，而且需要在一定的频率范围内进行测量。

### B.2.2 使用两个相同的阻抗匹配适配器测量

如果使用两个相同的阻抗匹配适配器（例如当使用工业级50  $\Omega$ 至75  $\Omega$ 同轴阻抗匹配适配器时），通过测量两个配接适配器的散射参数 $S_{21}$ ，可以获得单个适配器的衰减。那么，单个适配器的衰减是测得 $S_{21}$ 的一半。

### B.2.3 使用断路/短路法测量

通常情况下，尤其使用自制阻抗匹配适配器时，很难（不可能）找到两个完全相同的适配器。在这种情况下，适配器的衰减可以通过断路/短路法来测量，通过a)在次级侧断路b)在次级侧短路来测量适配器在初级侧的输入阻抗。衰减可以从以下公式获得：

$$\gamma = \alpha + j\beta = \operatorname{artanh} \sqrt{\frac{Z_s}{Z_0}} \dots\dots\dots (B.9)$$

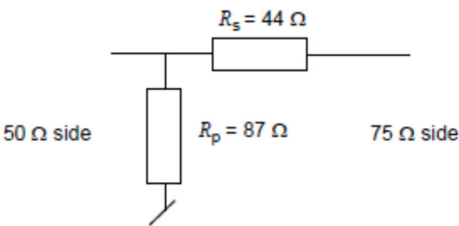
式中:

- $\gamma$  —— 阻抗匹配适配器的传播常数;
- $\alpha$  —— 阻抗匹配适配器的衰减常数, N;
- $\beta$  —— 阻抗匹配适配器的相位常数, rad;
- $Z_0$  —— 当次级侧断路时, 适配器初级侧的输入阻抗;
- $Z_s$  —— 当次级侧短路时, 适配器初级侧的输入阻抗。

### B.2.4 50 $\Omega$ 至75 $\Omega$ 同轴阻抗匹配适配器的示例

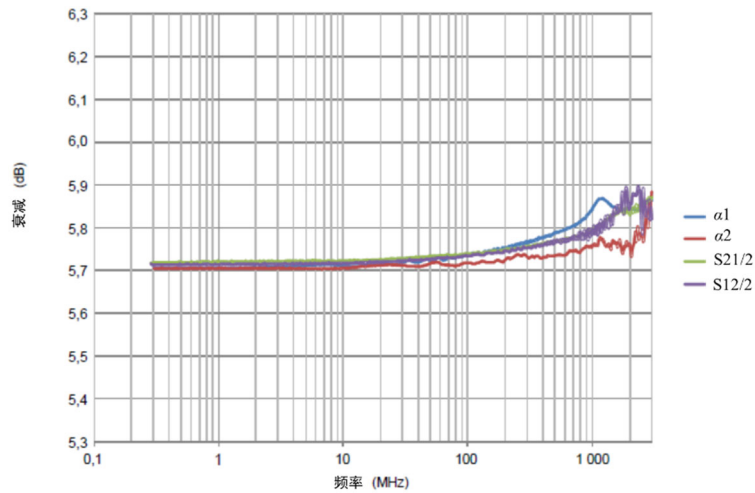
工业级50  $\Omega$ 至75  $\Omega$ 的同轴阻抗匹配适配器，其衰减为5.75 dB。使用87  $\Omega$ 的电阻 $R_p$ 和44  $\Omega$ 的电阻 $R_s$ 配置阻抗匹配电路，如图B.3所示：





图B.3 同轴阻抗匹配适配器（50 Ω 至 75 Ω）

按照B.1.3的公式计算散射参数 $S_{21}$ 为：  
 $S_{21}=0.516\text{ dB}$ 或 $S_{21}=-5.75\text{ dB}$ 。  
使用断路/短路方法计算衰减为：  
 $Z_0=87\text{ }\Omega$ ， $Z_s=29.22\text{ }\Omega$ ， $\alpha=0.662$ ， $N_p=5.75\text{ dB}$ 。  
按照B.2.2和B.2.3中描述的方法对衰减的测量结果如图B.4所示。



图B.4 50 Ω 到 75 Ω 阻抗匹配适配器的衰减

图中：

- $\alpha_1$  —— 通过断路/短路法测量第一阻抗匹配适配器的衰减常数；
- $\alpha_2$  —— 通过断路/短路法测量第二阻抗匹配适配器的衰减常数；
- $S_{21}/2$ —— 当两个适配器配接时，测得 $S_{21}$ 的一半乘以-1；
- $S_{12}/2$ —— 当两个适配器配接时，测得 $S_{12}$ 的一半乘以-1。

由于两个被试阻抗匹配适配器几乎一致，两种方法的测试结果基本一致。

可以发现，衰减测试值（低频下）与计算值略有不同，测试值为5.72 dB，计算值为5.75 dB。在较高频率下，衰减测试值略有升高，从5.7 dB增加到5.9 dB。

## 附录 C

### (规范性)

#### 编织层“套取”法的样品制备

##### C.1 通则

在采用“套取”编织层的试样装置中，“套取”的编织层成为外同轴系统的外导体。

如果接触电阻已经最大限度减小，则让待测屏蔽层与电缆的内导体短路。对于箔编织屏蔽层，应特别注意箔与内导体应连接良好。

屏蔽层应完全将绝缘的导体封闭，应围绕导体360°焊接，并且屏蔽层所有被骚扰部分应焊接完好。导体不应伸出焊缝，并且应修整。应采用一段热缩管或其它适宜材料包覆焊缝，将其绝缘。

为将干扰电流传输到被试屏蔽层，应围绕短路器放置一个由适宜厚度铜箔制成的屏蔽壳体（应避免使用自粘铜带），并且该屏蔽壳体应焊接到被试屏蔽层上，使内导体与屏蔽层之间的短路器在内部。另一侧的屏蔽壳体，应围绕一段导体来形成，以便将屏蔽壳体连接到适用连接器（如N型）的中心插针。

此端称之为“A”端。

应拉伸编织密度 $>70\%$ 且编织角 $<30^\circ$ 的锡包铜编织层，覆盖整段电缆和整个连接器。外编织层应牢固连接到连接器，确保形成360°接触(例如采用软管夹)。应采用热缩管或其它适用材料包覆整段外编织层，确保外编织层牢固而稳定地压到电缆护套上。

在距屏蔽壳与被试屏蔽层之间的焊接位置1m(或0.3m)处，被试电缆的外编织层和屏蔽层应环绕360°焊接在一起。应去除外编织层任何多余部分。外编织层与屏蔽层之间的焊缝应用热缩管或适用材料绝缘。屏蔽壳与屏蔽层之间的焊缝，和外编织层与电缆屏蔽层之间的焊缝，二者之间的长度为耦合长度 $L_c$ 。

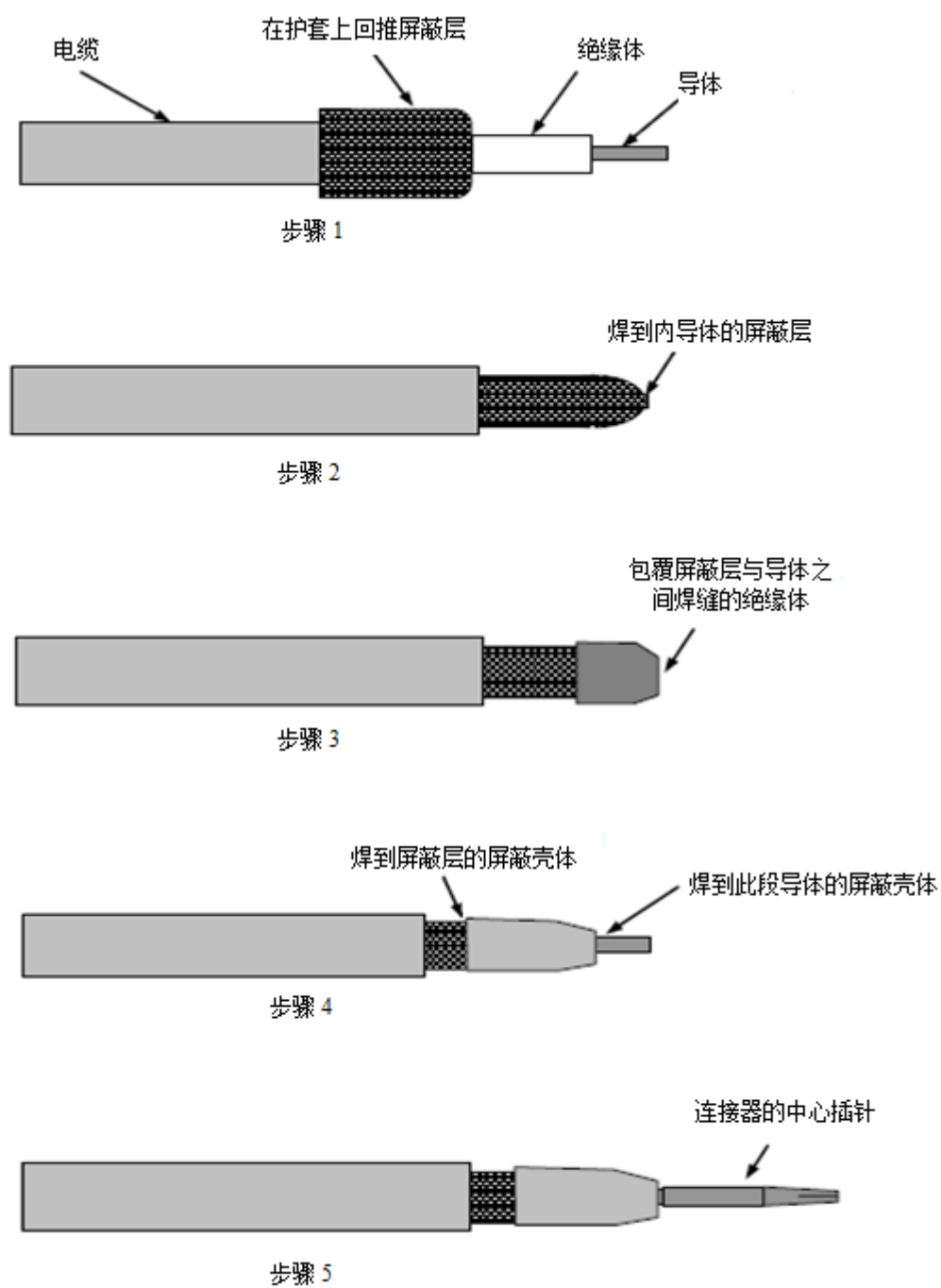
伸出的电缆应配接适用的连接器（例如N型连接器）。伸出部分的长度应尽可能短。

这一端称之为“B”端。

可以用TDR(或代之以具有时域能力的网络分析仪)检查连接器本身是否不小心短路(详见附录C.4)

##### C.2 同轴电缆

同轴电缆试样制备的各个步骤见图C.1和图C.2。



图C.1 同轴电缆：电缆“A”端的制备

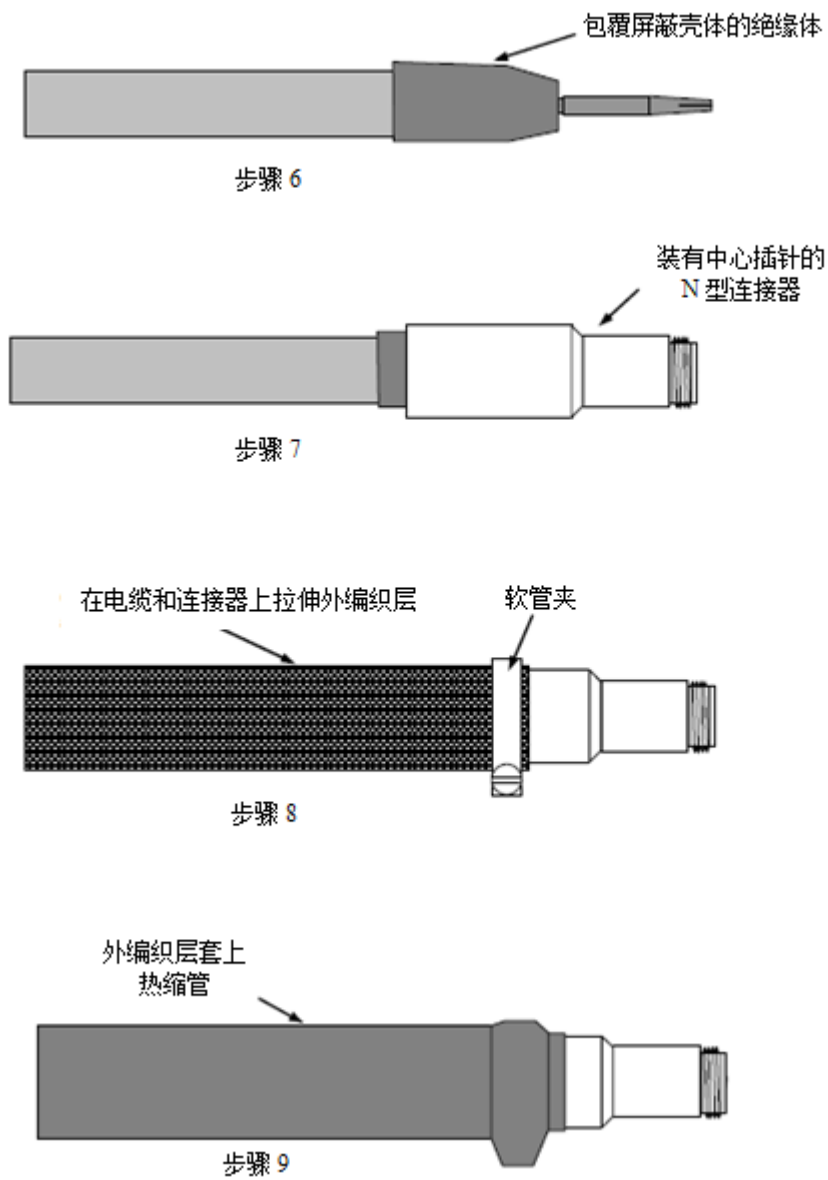
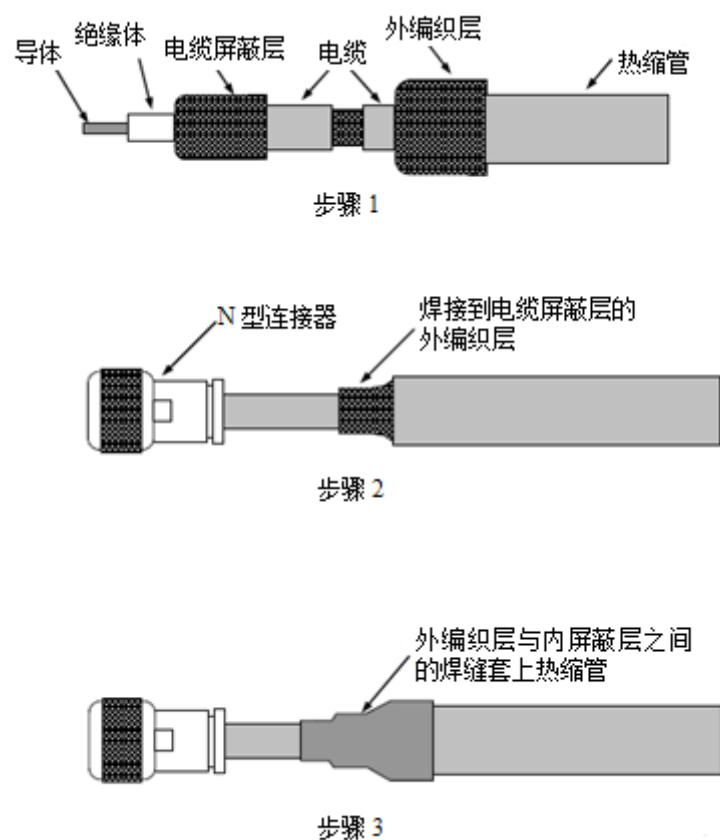


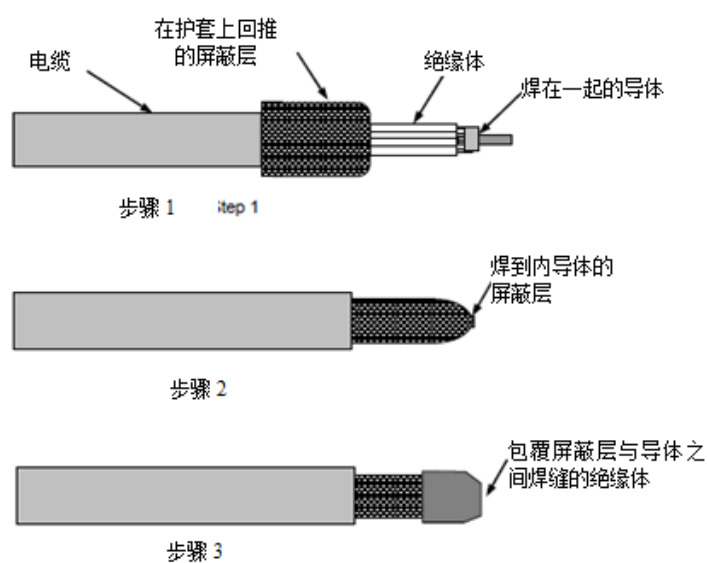
图 C.1 （续）



图C.2 同轴电缆：电缆“B”端的制备

### C.3 对称及多芯电缆

对称或多芯电缆试样制备的各个步骤在图C.3和图C.4中给出。



图C.3 对称电缆：电缆“A”端的制备

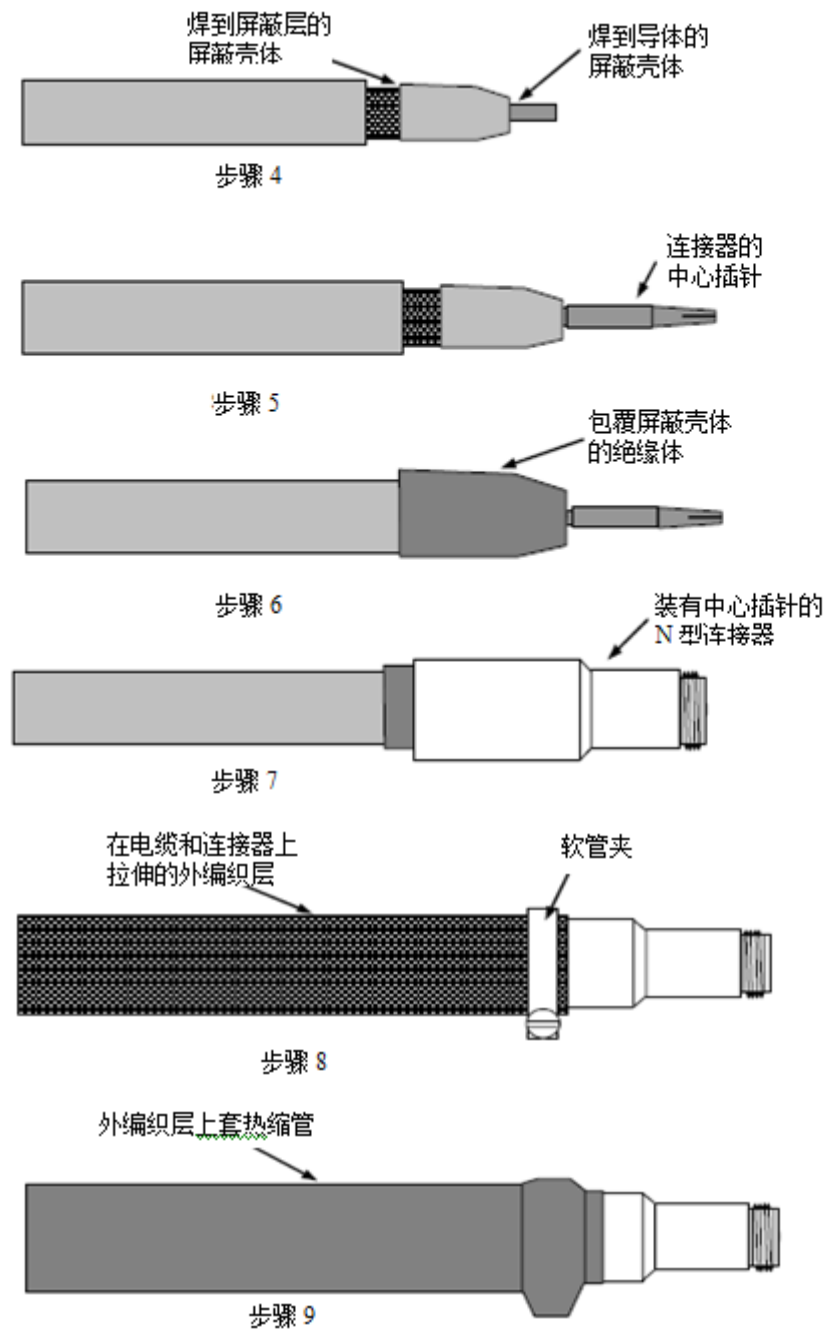
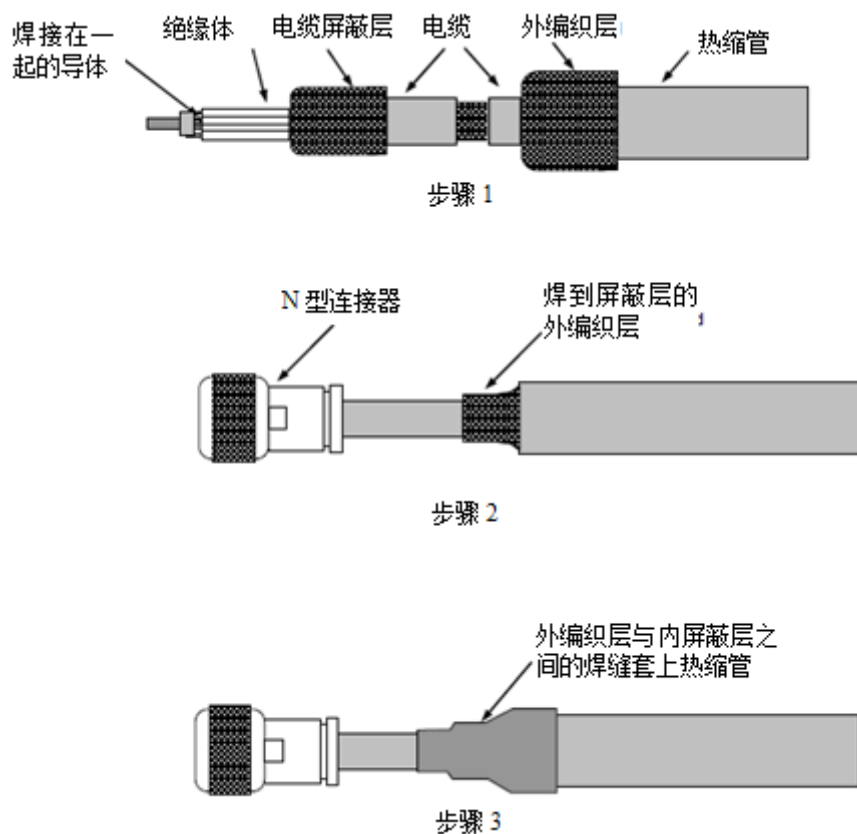


图 C.3 (续)



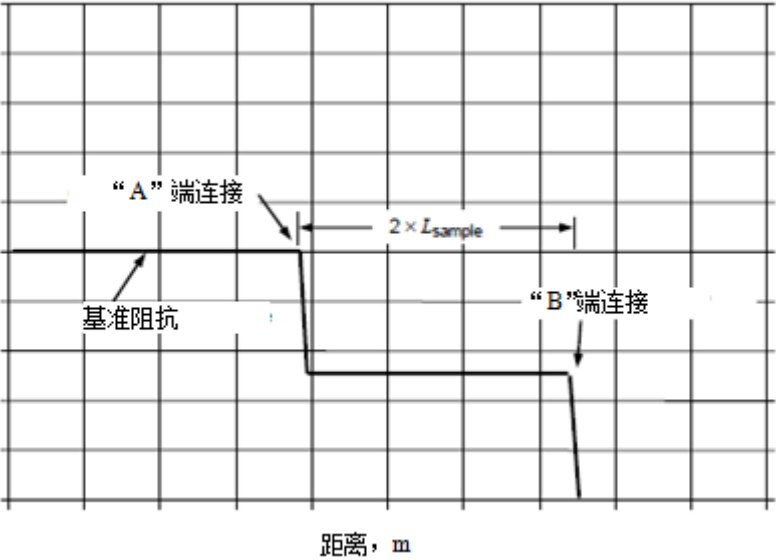
图C.4 对称电缆：电缆“B”端的制备

#### C.4 用 TDR 验证试样的制备

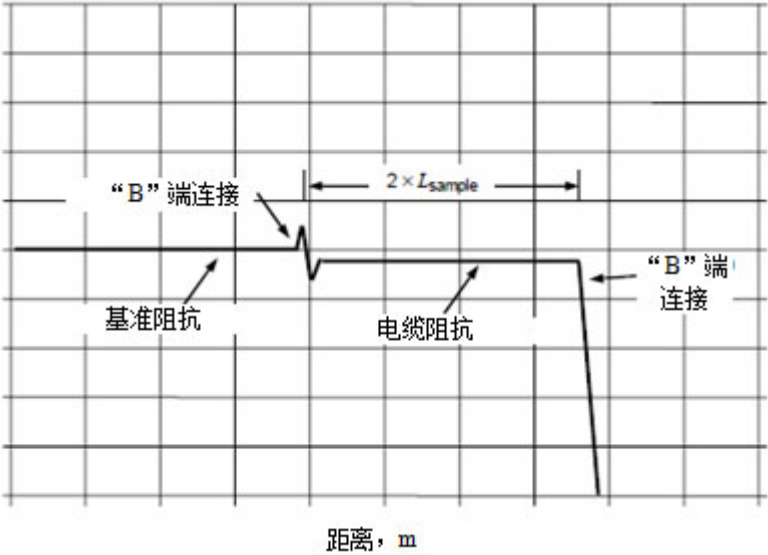
可用TDR或具有时域能力的网络分析仪查验方法B中试样的制备：

“A”端接到TDR时的典型响应曲线，如图C.5所示。试样的始端和终端可以很容易确定。也可以查验连接器在“A”端是否不小心短路。

“B”端接到TDR时的典型响应曲线，如图C.6所示。试样的始端和终端很容易确定。



图C.5 A端的典型谐振



图C.6 B端的典型谐振



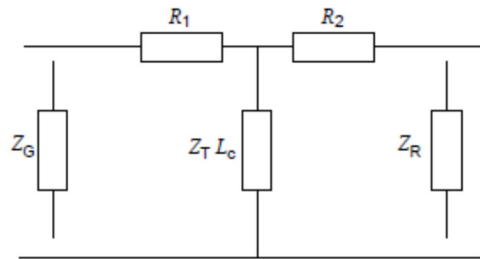
## 附录 D

(资料性)

## 将三轴试验装置转化为 T 型电路

## D.1 通则

内回路和外回路的负载条件影响散射参数测量值 $S_{21}$ 向转移阻抗的转换。这可以利用如图D.1所示的T型电路近似试验装置来进行解释。



说明：

$R_1$ ——内回路终端阻值

$R_2$ ——外回路终端阻值

$Z_T$ ——电缆屏蔽层的转移阻抗

$Z_G$ ——发生器阻抗

$Z_R$ ——接收器阻抗

$L_c$ ——耦合长度

图D.1 将三轴试验装置转化为 T 型电路

D.2 T 型电路的散射参数  $S_{21}$ 

T型电路散射参数的计算公式来自相关文献中（Vierpoltheorie, Wilhelm Klein[2]）。考虑到 $Z_T \ll Z_G$ 和 $Z_R$ ，我们得到：

$$S_{21} = Z_T L_c \frac{2\sqrt{Z_R Z_G}}{(R_1 + Z_G)(R_2 + Z_R)} \dots\dots\dots (D.1)$$

由此，我们得到了转移阻抗：

$$Z_T = \frac{(R_1 + Z_G)(R_2 + Z_R)}{2\sqrt{Z_R Z_G}} \frac{S_{21}}{L_c} \dots\dots\dots (D.2)$$

该公式是适用于所有三轴试验方法的通用公式，用于将测得的 $S_{21}$ 转换为转移阻抗。

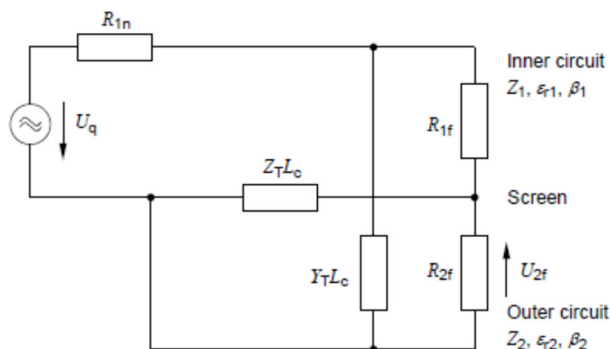
## 附录 E

(资料性)

## 用于测量转移阻抗的三轴试验装置的截止频率

## E.1 等效电路

三轴试验装置的等效电路如图E.1所示。



说明:

$Z_{1,2}$  ——内回路（电缆）或外回路（测量管）的特性阻抗

$\epsilon_{1,2}$  ——内回路（电缆）或外回路（测量管）的介电常数

$\beta_{1,2}$  ——内回路（电缆）或外回路（测量管）的相位常数

$L_c$  ——耦合长度

$Z_T$  ——转移阻抗

$Y_T$  ——电容耦合导纳

$R_{1n}$  ——内回路（电缆）近端的负载电阻。其阻值等于发生器的输出阻抗，等于带馈电电阻接收器的输入阻抗

$R_{1f}$  ——内回路（电缆）远端的负载电阻。根据试验方法不同，阻值等于电缆或短路的特性阻抗

$R_{2f}$  ——外回路（测量管）远端的负载电阻

$U_q$  ——发生器的电动势

$U_{2f}$  ——外回路远端的电压

图E.1 三轴试验装置的等效电路

## E.2 耦合方程

考虑到外回路近端（电缆屏蔽层和测量管之间）的短路，忽略了干扰衰减和干扰线路的衰减，忽略了电容耦合导纳（可能由于电缆屏蔽层和测量管之间的短路引发），假设使用非铁磁性材料并引入了更多变量，则可以得到以下方程式，该方程式描述了一次回路和二次回路之间的耦合[3]（参见IEC/TR 62153-4-1）：

$$\frac{U_{2f}}{U_q} = \frac{Z_T L_c}{R_{1f} + R_{1n}} g \quad (\text{E. 1})$$

$$g = -\frac{1}{N} \frac{j\beta_1}{(\beta_1^2 + \beta_2^2)L_c} \left\{ \frac{R_{1f}}{Z_1} [\cos(\beta_1 L_c) - \cos(\beta_2 L_c)] - j \frac{\beta_2}{\beta_1} \sin(\beta_2 L_c) + j \sin(\beta_1 L_c) \right\} \quad (\text{E. 2})$$

$$N = \{ \cos(\beta_1 L_c) + j \frac{\sin(\beta_1 L_c)}{R_{1f} + R_{1n}} [Z_1 + \frac{R_{1f} R_{1n}}{Z_1}] \} \{ \cos(\beta_2 L_c) + j \frac{Z_2}{R_{2f}} \sin(\beta_2 L_c) \} \quad (\text{E. 3})$$

$$\beta_{1,2}L_C = 2\pi \frac{L_C}{\lambda_{1,2}} \frac{2\pi \cdot f \cdot L_C \sqrt{\epsilon_{r1,2}}}{c} \dots\dots\dots (E.4)$$

式中:

$Z_{1,2}$  —— 内回路（电缆）或外回路（测量管）的特性阻抗;

$\epsilon_{r1,2}$  —— 内回路（电缆）或外回路（测量管）的介电常数;

$\theta_{r1,2}$  —— 内回路（电缆）或外回路（测量管）的相位常数;

$\lambda_{1,2}$  —— 内回路（电缆）或外回路（测量管）的波长;

$L_C$  —— 耦合长度;

$Z_T$  —— 转移阻抗;

$R_{1n}$  —— 内回路（电缆）近端的负载电阻。其阻值等于发生器的输出阻抗，等于带馈电电阻接收器的输入阻抗;

$R_{1f}$  —— 内回路（电缆）远端的负载电阻。根据试验方法不同，阻值等于电缆或短路的特性阻抗;

$R_{2f}$  —— 外回路（测量管）远端的负载电阻。其阻值等于发生器的输出阻抗，等于带馈电电阻接收器的输入阻抗;

$U_q$  —— 发生器的电动势;

$U_{2f}$  —— 外回路远端的电压;

$c$  —— 光速;

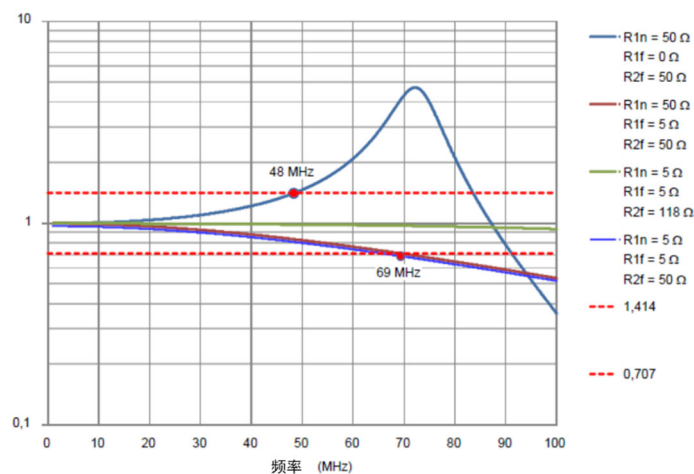
$g$  —— 三轴测试装置频率响应系数;

$f$  —— 频率。

### E.3 截止频率

系数 $g$ 描述了测试装置的频率响应性。在低频下，当 $\lambda \gg L$ 时，系数 $g$ 等于1。随着频率升高， $g$ 开始振荡，因此测量结果也开始振荡。截止频率是指在没有由测试装置引起振荡的情况下，可以测量转移阻抗的最大频率。截止频率被定义为与测量结果的线性插值的3 dB偏差，也就是说，系数 $g$ 为 $>\sqrt{2}$ 或 $<1/\sqrt{2}$ 。

图E.2为三轴装置在不同负载条件下的频率响应图。截止频率由频率响应曲线与 $\sqrt{2}$ 和 $1/\sqrt{2}$ （即 $\pm 3$  dB）两条水平线的交点获得。



三轴装置的频率响应曲线要求如下:

- 耦合长度为39 cm;
- 内回路（被测电缆）的阻抗为5 Ω;
- 外回路（测量管）的阻抗为71 Ω;

- d) 内回路（被测电缆）的介电常数为7；  
e) 外回路（测量管）的介电常数为1.46。

说明：

$$R_{in}=50\ \Omega$$

$R_{tr}=0\ \Omega$  —— 根据第8章（测试方法C：（不匹配）-短路-短路不带阻尼电阻）测试条件的计算结果

$$R_{tr}=50\ \Omega$$

$$R_{in}=50\ \Omega$$

$R_{tr}=5\ \Omega$  —— 根据第7章（测试方法B：带负载的内回路与不带阻尼电阻的外回路）测试条件的计算结果

$$R_{tr}=50\ \Omega$$

$$R_{in}=5\ \Omega$$

$R_{tr}=5\ \Omega$  —— 根据第6章（测试方法A：内回路与外回路中的阻尼电阻匹配）测试条件的计算结果

$$R_{tr}=118\ \Omega$$

$$R_{in}=5\ \Omega$$

$R_{tr}=5\ \Omega$  —— 根据第6章（测试方法A：内回路与外回路中的阻尼电阻匹配）不带阻尼电阻测试条件的计算结果

$$R_{tr}=50\ \Omega$$

图E.2 不同负载条件下三轴试验装置的频率响应曲线

#### E.4 介电常数和阻抗的测定

为了计算截止频率，需要获得内回路、外回路的介电常数和阻抗。内回路（DUT）的介电常数和阻抗通常是已知的，或者可以通过断路/短路测量获得（参见B.2.3）。

为了确定外回路（测量管）的阻抗和介电常数，可以利用电路变换理论。电路的输入阻抗可以用式表示（忽略衰减）：

$$Z_{in} = Z_c \frac{\frac{Z_{load}}{Z_c} + j \tan(\beta L)}{1 + \frac{Z_{load}}{Z_c} j \tan(\beta L)} \quad \text{..... (E. 5)}$$

式中：

$Z_{in}$  —— 传输电缆的输入阻抗；

$Z_{load}$  —— 传输电缆的负载阻值；

$Z_c$  —— 传输电缆的特性阻抗；

$\beta$  —— 传输电缆的相位常数；

$L$  —— 传输电缆的长度；

$j$  —— 虚数单位 $\sqrt{-1}$ 。

输入阻抗随着 $\beta L$ 周期性变化。引入波长后，理解更为清晰。

$$\tan(\beta L) = \tan(2\pi \frac{L}{\lambda}) \quad \text{..... (E. 6)}$$

式中：

$\lambda$  —— 传输电缆的波长。

当长度为半波长（ $\lambda/2$ ）的偶数倍时， $\tan\beta L=0$ ；当长度为四分之一波长（ $\lambda/4$ ）的奇数倍时， $\tan\beta L=\infty$ 。这样就得到了电缆的输入阻抗：

$$Z_{in} = Z_2 \quad (\text{当 } L=n\lambda/2)$$

$$\text{或 } Z_{in} = \frac{Z_c^2}{Z_2} \quad (\text{当 } L=(2n+1)\lambda/4)$$

当长度为半波长 ( $\lambda/2$ ) 的偶数倍时, 输入阻抗等于负载电阻; 当长度为四分之一波长 ( $\lambda/4$ ) 的奇数倍时, 传输电缆充当双变压器。

当三轴装置的外回路发生短路时:

$$Z_{in} = 0 \text{ 或 } S_{11} = -1 \quad (\text{当 } L = n\lambda/2)$$

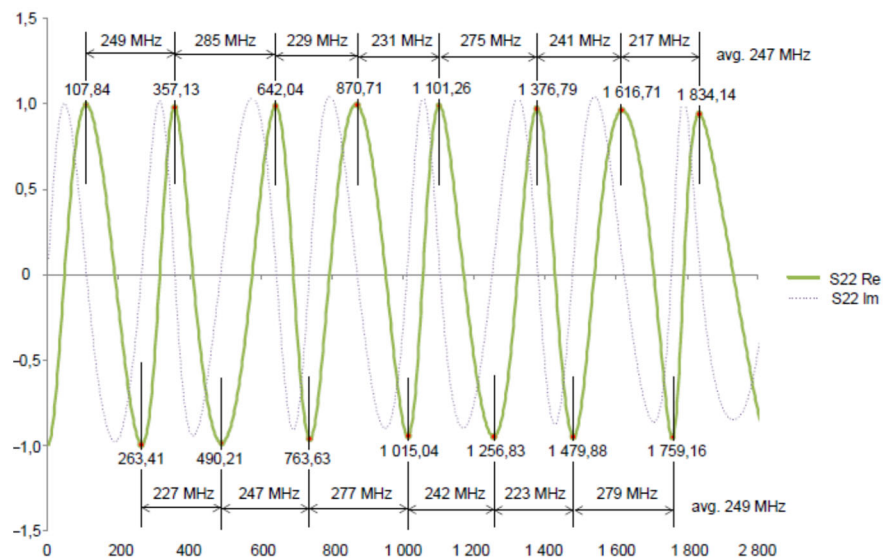
$$Z_{in} = \infty \text{ 或 } S_{11} = +1 \quad (\text{当 } L = (2n+1)\lambda/4)$$

当测量出散射参数  $S_{11}$  并观察到两个连续共振时, 即实部  $R_e(S_{11}) = -1$  ( $I_m(S_{11}) = 0$ ) 或实部  $R_e(S_{11}) = +1$  ( $I_m(S_{11}) = 0$ ), 可以求出介电常数。

当  $R_e(S_{11}) = -1$  或  $R_e(S_{11}) = +1$  时:

$$\varepsilon_r = \left[ \frac{c}{2 \cdot L \cdot \Delta f} \right]^2 \dots\dots\dots (E. 7)$$

应采用至少5个连续谐振的平均频率间隔, 如图E. 3所示。



图E. 3 长度为 50 cm 的外回路 (测量管) 测量出的  $S_{11}$

如图E. 3所示, 两个连续谐振的平均频率间隔为248 MHz, 因此外回路的介电常数为  $\varepsilon_{r2} = 1.46$ 。

已知电缆和测量管的尺寸, 并确定了外回路的介电常数后, 可以计算外回路的阻抗:

$$Z_2 = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_{r2}}} \ln \left( \frac{D}{d} \right) \dots\dots\dots (E. 8)$$

式中:

$Z_2$  —— 外回路的特性阻抗,  $\Omega$ ;

$\varepsilon_{r2}$  —— 外回路的介电常数;

$D$  —— 测量管的内直径, mm;

$d$  —— 电缆屏蔽层的外直径, mm。

附录 F  
(资料性)

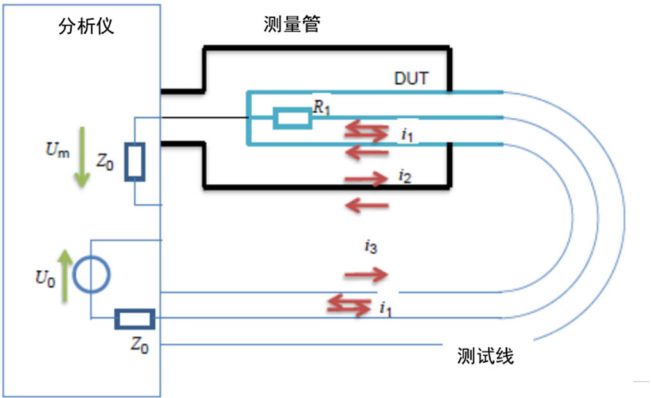
接地回路对低频测量的影响

F.1 通则

在常见的试验装置中，发生器和接收器具有相同的接地电位。这不仅对网络分析仪，而且对单独的发生器和接收器也同样适用，只要它们都直接连接到电源（由于接地导体）即可。该接地回路会导致测量误差，尤其是在较低频率下。

F.2 试验装置分析

图F.1展示了用于测量传输阻抗的常用三轴试验装置。



说明：

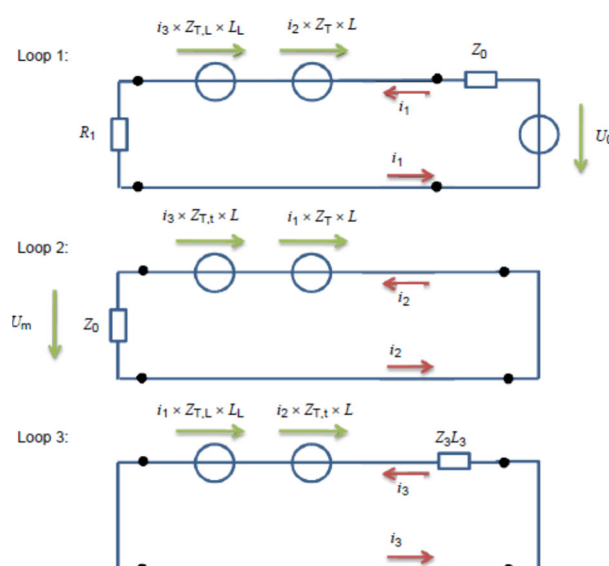
- $U_m$  —— 外回路的测试电压；
- $U_0$  —— 发生器的电压；
- $R_1$  —— 内回路（DUT）远端的负载阻抗；
- $i_{1,2,3}$  —— 回路1，2，3中的电流；
- $Z_0$  —— 系统阻抗（发生器和接收器）。

图F.1 三轴试验装置

该试验装置包含三个耦合回路：

- 回路1：带有测试线的被测设备（DUT）；
- 回路2：电缆屏蔽层和测量管之间；
- 回路3：测量管和测试线之间。

在DUT和三轴试验装置的外回路无损耗的情况下，在理想测试线下3个回路的等效电路如图F.2所示：



说明：

- $Z_T$  —— DUT的转移阻抗；
- $Z_{T,L}$  —— 测试线的转移阻抗；
- $Z_{T,t}$  —— 测量管的转移阻抗；
- $L_L$  —— 测量管的长度；
- $L$  —— DUT的长度（耦合长度）；
- $Z_0$  —— 系统阻抗（发生器和接收器）；
- $Z_3$  —— 回路3的纵向阻抗；
- $L_3$  —— 回路3的长度。

图F.2 三轴试验装置的等效电路

在低频下可以忽略波传播效应，我们可以得到：

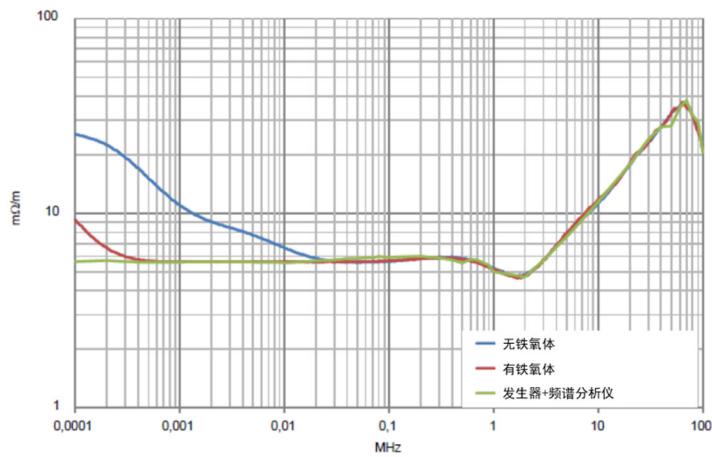
$$\frac{U_m}{U_0} \frac{R_1 + Z_0}{L} \approx Z_T + \frac{Z_{T,t} \times Z_{T,L} \times L_L}{Z_3 \times L_3} \dots\dots\dots (F.1)$$

第二项显示测量误差。可以通过以下方式减少测量误差：

- 使用低转移阻抗的测量管和测试线；
- 使用短测试线；
- 增加回路3的纵向阻抗。

可以通过使用铁氧体测试线或使用不在同一接地电位上的发生器和接收器来增加回路3的阻抗，即使用电池驱动或通过单独变压器连接到电源的单独发生器和接收器。

测量误差的影响如图F.3所示。



汽车高压电缆转移阻抗测试结果为：

- a) 根据第8章的测试方法C；
- b) 耦合长度39 mm；
- c) 内回路（被测电缆）的阻抗为50 Ω。

说明：

- |           |   |
|-----------|---|
| 无铁氧体      | —— 使用矢量网络分析仪进行测量，测试线未使用铁氧体；               |
| 有铁氧体      | —— 使用矢量网络分析仪进行测量，测试线使用铁氧体；                |
| 发生器+频率分析仪 | —— 使用离散发生器和频谱分析仪进行测量，其中频谱分析仪通过离散变压器连接到电源。 |

图F.3 测量误差影响的示例



参 考 文 献

- [1] IEC 62153-4-8, Metallic communication cable test methods — Part 4-8: Electromagnetic compatibility (EMC)—Capacitive coupling admittance
- [2] KLEIN Wilhelm, Vierpoltheorie, Wissenschaftsverlag—Bibliographisches Institut, 1972
- [3] KLEY Thomas, “Optimierte Kabelschirme Theorie und Messung”, Diss. ETH Nr. 9354, 1991.
-