

团 体 标 准

T/CSAEXX—2020

电动汽车高压屏蔽线缆 及连接器表面转移阻抗测试方法

Test method for the Shielding High-Voltage Cable and Connector of
Electric Vehicles - Surface transfer Impedance

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的该标准所涉必要专利信息连同支持性文件一并附上。

2020-XX-XX 发布

2020-XX-XX 实施

中国汽车工程学会 发布

目次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 三同轴法	2
4.1 概述	2
4.2 被测样品	3
4.3 测试布置	4
4.4 测试方法 A: 内回路连接匹配电阻, 外回路连接衰减电阻	6
4.5 测试方法 B: 内回路连接负载电阻, 外回路不连接衰减电阻	9
4.6 测试方法 C: 非匹配 (短接—短接)	10
5 管中管法	12
5.1 一般要求	12
5.2 终端电阻	12
5.3 测试布置	12
5.4 测试步骤	13
6 线注入法	14
6.1 一般要求	14
6.2 测试布置	14
6.3 测试装置	16
6.4 测试步骤	17
6.5 测试结果处理	18
附录 A	20
附录 B	22
附录 C	23
附录 D	24
附录 E	26
图 1 表面转移阻抗示意图	2
图 3 被测屏蔽对称多芯高压线缆示意图	4
图 4 被测高压屏蔽连接器示意图	4
图 5 转移阻抗的测试布置—矢量网络分析仪	5
图 6 被测高压屏蔽线缆与测试管的布置示意图	5
图 7 被测高压屏蔽连接器管中管测试法布置示意图	6
图 8 被测高压屏蔽线束测试方法布置示意图	6
图 9 高压屏蔽连接器测试屏蔽盒示意图	6
图 10 测试方法 A: 内回路连接匹配电阻, 外回路连接衰减电阻	8
图 11 测试方法 B 电路连接终端电阻, 外回路不连接衰减电阻布置图	10
图 12 测试方法 C 失配 (短接—短接) 布置图	11
图 13 管中管测试布置图	12

图 14 高压屏蔽线缆表面转移阻抗远端测试布置—线注入法	14
图 15 高压屏蔽线缆表面转移阻抗近端测试布置—线注入法	15
图 16 高压屏蔽线束表面转移阻抗远端测试布置—线注入法	15
图 17 高压屏蔽线束表面转移阻抗近端测试布置—线注入法	16
图 18—注入装置的示意图——列举表	17
图 A—1 阻抗匹配器 — $Z_2 < Z_1$	21
图 A—2 阻抗匹配器 — $Z_1 < Z_2$	21
图 C—1 等效 T—型电路	23
图 D—1 三同轴系统测试示意图	24
图 D—2 三同轴系统测试 3 个回路中的等效电路图	25
图 E.1—被测高压屏蔽线缆的准备	26
图 E.2—被测高压屏蔽线缆连接器的附加屏蔽	27
表 B1 高压屏蔽线缆表面转移阻抗等级(mΩ/m)	22
表 B2 高压屏蔽连接器表面转移阻抗等级(mΩ)	22
表 B3 高压屏蔽线束表面转移阻抗等级(mΩ/m)	22

前 言

本标准按照 GB/T1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写》给出的规则起草。

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。

本标准由中国汽车工程学会电磁兼容分会组织提出。

本标准起草单位：

主要起草人：

电动汽车高压屏蔽线缆及连接器表面转移阻抗测试方法

1 范围

本标准规定了电动汽车高压屏蔽线缆及连接器表面转移阻抗测试方法，适用频率为9kHz~30MHz。

本标准的目的是为高压屏蔽线缆及连接器的屏蔽性能测试建立一套试验方法，包括三同轴法、管中管法和线注入法。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡不是注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适合于文件。

GB T 17737.1-2013 同轴通信电缆 第1部分:总规范 总则、定义和要求(IEC 61196-1: 0:25 IDT)

IEC 62153-4-1:2014 金属通信线缆试验方法 第4-1部分 电磁兼容 屏蔽测量介绍 [Metallic communication cable test methods — Part 4-1: Electromagnetic compatibility (EMC) — Introduction to electromagnetic screening measurements]

IEC 62153-4-3:2013 金属通信线缆试验方法 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 62153-4-4:2015 金属通信线缆试验方法 第4-4部分 电磁兼容 屏蔽衰减 高达3G以上频率的屏蔽衰减测量法[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]

IEC 62153-4-6:2017 金属通信线缆试验方法 第4-6部分 电磁兼容 表面转移阻抗 线注入法 [Metallic cables and other passive components test methods.—Part 4-6: Electromagnetic compatibility (EMC). Surface transfer impedance. Line injection method]

IEC 62153-4-7:2018 金属通信线缆试验方法 第4-7部分 电磁兼容 转移阻抗、屏蔽、耦合衰减 管中管法[Metallic communication cable test methods — part 4-7: Electromagnetic compatibility (EMC) — Test method for measuring of transfer impedance ZT and the screening attenuation as or coupling attenuation ac of connectors and assemblies up to and above 3 GHz— Triaxial tube in tube method]

IEC 62153-4-15:2015 金属通信线缆试验方法 第4-15部分 电磁兼容 转移阻抗、屏蔽、耦合衰减 三同轴室法[Metallic communication cable test methods — Part 4-15: Electromagnetic compatibility (EMC) — Test method for measuring transfer impedance and screening attenuation — or coupling attenuation with triaxial cell]

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件

3.1

内回路 inner circuit

由被测线缆屏蔽层内表面与内导体构成的回路。

3.2

外回路 outer circuit

由被测线缆屏蔽层外表面和测试夹具内表面或注入线构成的回路。

3.3

表面转移阻抗 Transfer impedance

Z_T

回路电流通过内回路的纵向电压 U_2 与馈入外回路电流 I_1 的比值（单位： $m\Omega/m$ ），见图1和式（1）。

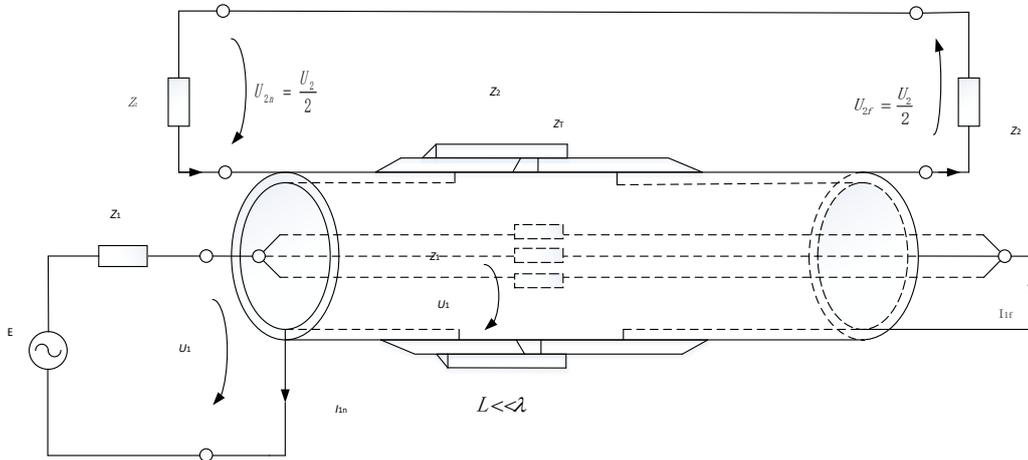


图 1 表面转移阻抗示意图

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

图中：

- Z_1, Z_2 ——内回路和外回路的特性阻抗； λ ——自由空间的波长；
- U_n, U_f ——内回路和外回路的电压（下角标：n:近端，f: 远端）；
- L ——线缆长度，也是屏蔽层长度；
- I_1 ——内回路的电流（下角标：n:近端，f: 远端）。

3.4

截止频率 cut-off frequency

表面转移阻抗测试方法适用的频率上限。

4 三同轴法

4.1 概述

该方法通过向被测屏蔽电缆芯线注入定量的电流，测试屏蔽层与测试夹具间的耦合电压，或者通

通过对被测屏蔽线缆的屏蔽层外表面与测试夹具构成的回路注入定量的电流，测试屏蔽层与电缆芯线之间耦合电压，其耦合电压与注入电流的比值为被测屏蔽线缆的表面转移阻抗。

三同轴法测试表面转移阻抗只适合于电小尺寸的被测屏蔽线缆，通常其电气长度应满足小于被测最高频率波长的六分之一。

4.1.1 一般要求

环境温度（ 23 ± 3 ）℃。

电磁环境不应影响测试结果。

三同轴测试设备应符合IEC 62153-4-3中的要求。

测试方法A、B、C时，应采用不同的负载条件与连接方式。

4.1.2 测试设备

矢量网络分析仪频率范围至少满足9kHz~30MHz，带宽100Hz，其应至少具有两个测试端口及相应的校准器件。

使用测试方法A时，需使用阻抗匹配器，其回波损耗须大于20dB。

4.1.3 校准

测试前必须对测试设备进行校准。

4.2 被测样品

4.2.1 高压屏蔽线缆

被测高压屏蔽线缆的长度不能超过耦合测试长度的50%。

被测高压屏蔽线缆如图2所示，芯线与屏蔽层组成同轴线缆形式。高压屏蔽线缆一端连接终端电阻 R_1 。 R_1 确定方法参考4.4.2， R_1 应在计算值的±10%以内。

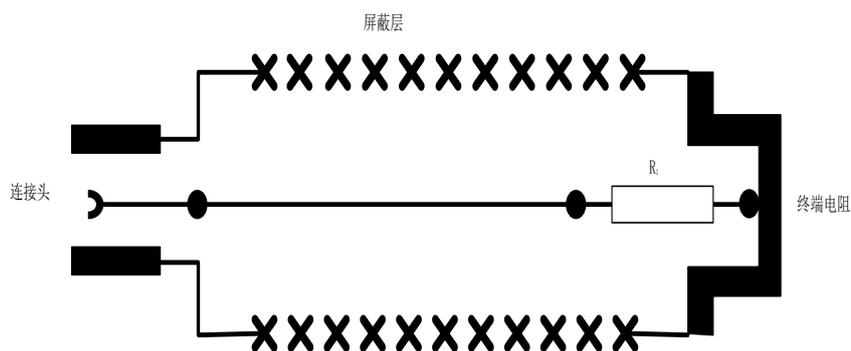


图 2 被测屏蔽高压线缆示意图

另外一端需要专门设计连接器，用于连接被测屏蔽线缆与信号源或阻抗匹配器。所有的连接必须保证接触直流电阻不能影响最终的表面转移阻抗测试结果，接触直流电阻应小于 $2\text{m}\Omega$ 。

多芯屏蔽线缆可以等效为准同轴线缆系统。所有的芯线端焊接在一起，处于短路或端接电阻。其表面转移阻抗测试方法与单芯屏蔽线缆相同。

注：该方法不适用于非对称多芯屏蔽线缆。

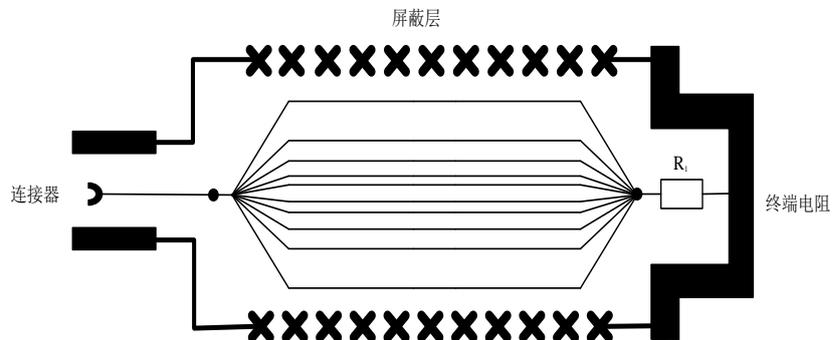


图 3 被测屏蔽对称多芯高压线缆示意图

4.2.2 高压屏蔽连接器

电动汽车高压屏蔽连接器与高压屏蔽线缆一起作为被测件置于测试管中测试。高压屏蔽线缆需穿过高导电率、非磁性材质的延长管（如黄铜，紫铜，铝）。测试外管与屏蔽层连接，另外一端通过专门连接器与测试设备相连。为了不影响最终的表面转移阻抗，接触直流电阻应小于 $2\text{ m}\Omega$ 。

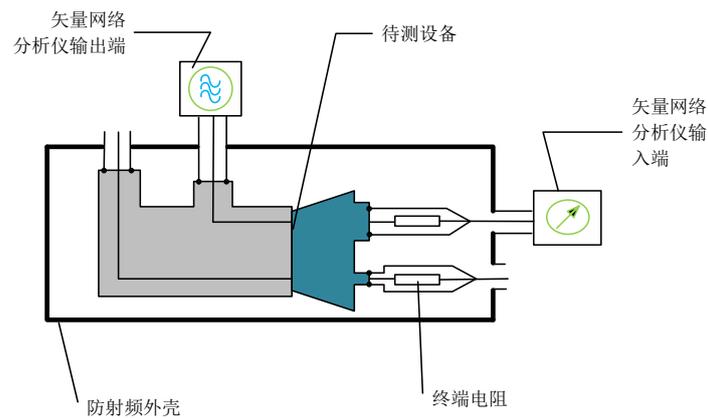
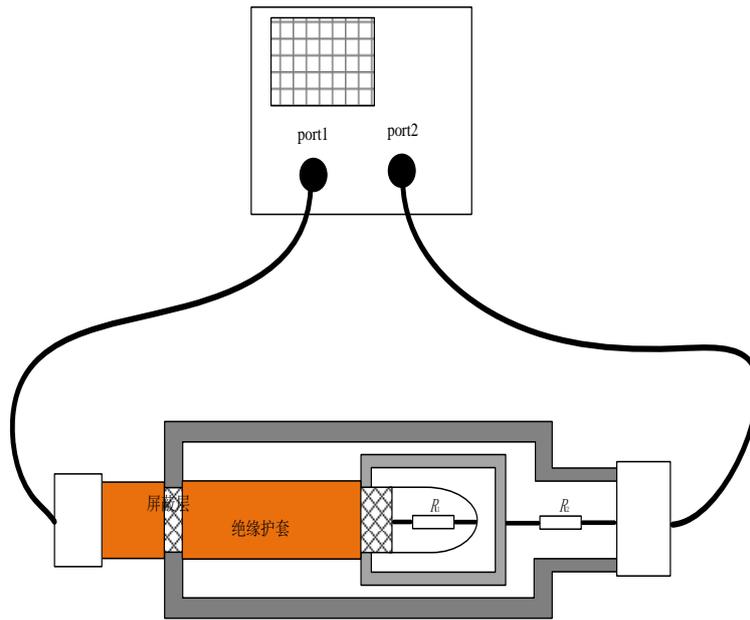


图 4 被测高压屏蔽连接器示意图

4.3 测试布置

4.3.1 高压屏蔽线缆测试布置

常用的测试设备是利用矢量网络分析仪，测试布置如图5所示。



图中：

R_1 ——终端电阻。具体细节见4.4.2；

R_2 ——衰减电阻。其值由不同的测试方法确定，比如短接或是外回路特性阻抗的函数，具体细节见4.4.3。

图5 转移阻抗的测试布置-矢量网络分析仪

图6所示为高压屏蔽线缆的表面转移阻抗的测试设备，该设备与屏蔽线缆组成一种三同轴系统。线缆的屏蔽内层与芯线组成内回路，屏蔽外层与测试设备组成外回路，如图6所示。

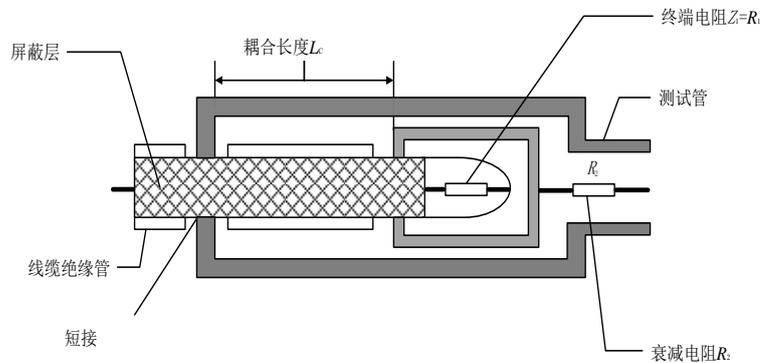


图6 被测高压屏蔽线缆与测试管的布置示意图

4.3.2 高压屏蔽连接器测试布置

典型的高压屏蔽连接器主要包括单芯、两芯或三芯连接器及其它高压屏蔽连接器。通过金属延长管屏蔽其连接导线，测试连接器的转移阻抗，即管中管法（第四章为三同轴法，确认）。其测试布置图如图7所示。

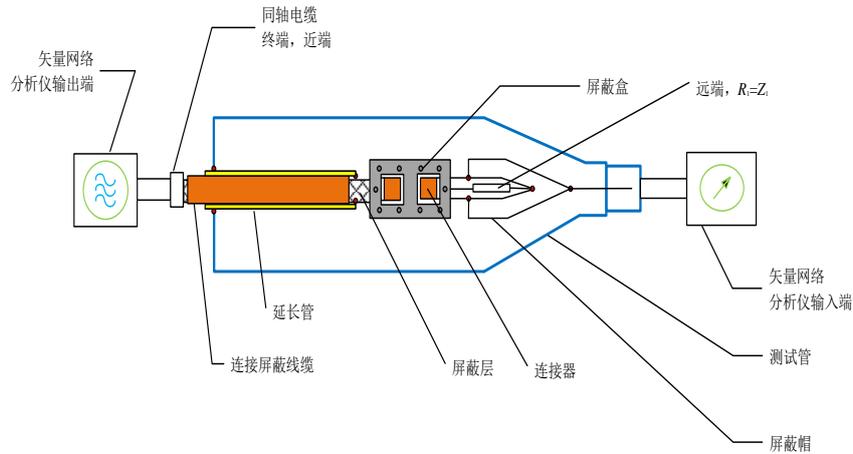


图 7 被测高压屏蔽连接器管中管测试法布置示意图

4.3.3 高压屏蔽线束测试布置

对于高压屏蔽线束的测试方法也是采用三同轴法，其测试布置图如图8所示，高压屏蔽连接器测试屏蔽盒示意图如图9所示。

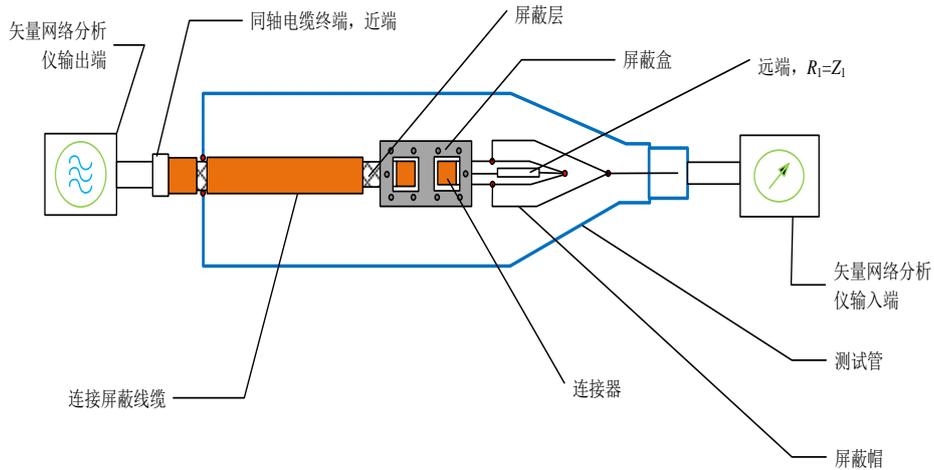


图 8 被测高压屏蔽线束测试方法布置示意图

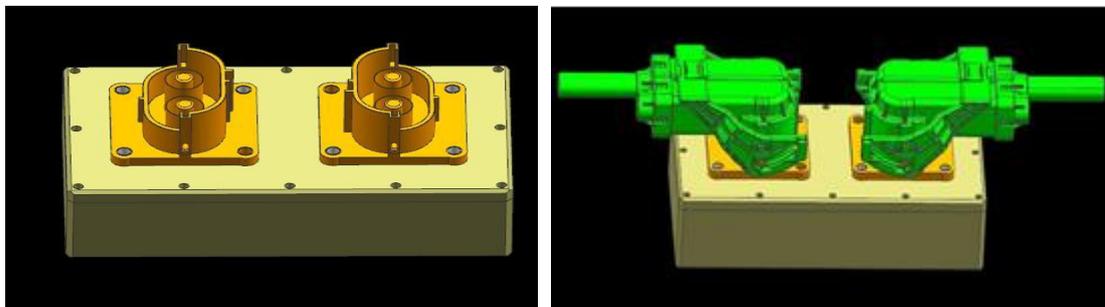


图 9 高压屏蔽连接器测试屏蔽盒示意图

4.4 测试方法 A：内回路连接匹配电阻，外回路连接衰减电阻

4.4.1 一般要求

对样品的要求。

在该方法中，内回路（被测样品）终端电阻等于特性阻抗（ $R_1 = Z_1$ ），并看作是干扰源电路（比如通过矢量网络分析仪输出端馈送）。如果内回路的阻抗未知，则可以按照附录 A 中的描述进行测试。

外回路中，在近端高压屏蔽线缆屏蔽层短接，远端通过衰减电阻 R_2 连接到接收机。

如果内回路的阻抗与信号源阻抗不同，则使用阻抗匹配适配器, 详见附录 A。

测试方法 A 的优点是具有很高的截止频率。然而使用衰减电阻和阻抗匹配适配器会降低测试动态范围。

被测样品最大测试耦合长度 2.67m, 参考 4.4.4。

4.4.2 终端电阻 R_1

本测试方法的高压屏蔽线缆的终端电阻根据以下公式计算：

$$R_1 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{D}{d} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

R_1 —终端电阻；

ϵ_r —测试线缆相对介电常数；

D —屏蔽层内径；

d —内导体外径。

4.4.3 衰减电阻 R_2

为了通过有效地衰减来获得最大平坦的测试带宽，应将电阻 R_2 并入外回路的远端。衰减电阻根据以下公式计算：

$$R_2 = A \times 60 \ln \left(\frac{D}{d} \right) - 50 \dots\dots\dots (3)$$

$$A = \sqrt{2} \text{ 和 } A = \frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

R_2 —衰减电阻

D —测试管的直径；

d —测试电缆屏蔽层外径；

ϵ_{r1} —内电路介电常数；

ϵ_{r2} —外电路介电常数（30MHz 以下可以忽略）。

4.4.4 截止频率 f_{cut}

本测试方法的截止频率与线缆耦合长度根据以下公式计算：

$$f_{cut} \cdot L_C \approx 80 \text{MHz} \cdot \text{m} \dots\dots\dots (5)$$

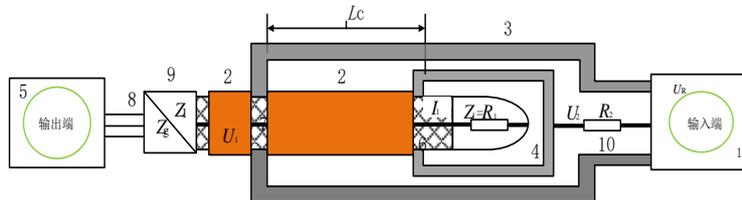
式中：

f_{cut} —截止频率 单位（MHz）；

L_c —线缆耦合长度 单位 (m)。

注：对于一个耦合长度为0.5m的线缆，其表面转移阻抗的最大有效频率为160MHz。

4.4.5 测试布置



说明：

- | | |
|--------------|--------------------|
| 1—矢量网络分析仪输出端 | 10—衰减电阻 R_2 |
| 2—线缆绝缘套管 | L_c —线缆耦合长度 |
| 3—测试套管 | Z_1 —线缆特性阻抗 |
| 4—终端电阻 R_1 | Z_g —系统内部阻抗 |
| 5—矢量网络分析仪输入端 | U_1 —内部电路输入电压 |
| 6—线缆屏蔽层 | U_2 —外电路电压 |
| 7—测试芯线 | U_R —矢量网络分析仪测得电压 |
| 8—连接线 | I_1 —线缆屏蔽层的电流 |
| 9—阻抗匹配适配器 | R_1 —内部电路的终端电阻 |

图 10 测试方法 A：内回路连接匹配电阻，外回路连接衰减电阻

4.4.6 测试步骤

- (1) 线缆一端(内回路)连接到矢量网络分析仪输出端，外回路连接到矢量网络分析仪输入端。
- (2) 衰减因子 (a_{meas}) 应在整个频率范围内以对数频率扫描进行测试，测试频率点应与校准频率点相同：

$$a_{meas} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_2} \right) = 20 \log_{10} (S_{21}) \dots \dots \dots (6)$$

式中：

- a_{meas} —测试过程中的测试衰减因子；
- S_{21} —矢量网络分析仪的 S_{21} 参数
- P_1 —注入内回路的功率；
- P_2 —耦合到外回路功率。

- (3) 由衰减因子可计算得到转移阻抗：

$$Z_T = \frac{R_1(Z_0 + R_2)}{Z_0 L_c} 10^{\left\{ \frac{a_{meas} - a_{cal} - (a_{pad} + 10 \log_{10} (\frac{Z_0}{Z_1}))}{20} \right\}} \dots \dots \dots (7)$$

式中：

- Z_T —表面转移阻抗；
- a_{cal} —通过测试设备的校准程序消除连接电缆的衰减因子；
- a_{meas} —衰减因子；

- Z_1 —内回路的特性阻抗;
- L_c —高压屏蔽线缆耦合长度;
- Z_0 —系统阻抗 (一般大小为 50Ω);
- R_2 —外电路串联电阻 (衰减电阻);
- α_{pad} —阻抗匹配适配器的衰减因子;
- R_1 —内电路终端阻抗。

4.5 测试方法 B: 内回路连接负载电阻, 外回路不连接衰减电阻

4.5.1 一般要求

该方法与测试方法 A 相同, 但不使用阻抗匹配适配器, 也不使用衰减电阻 R_2 。该方法具有更高的动态范围。

被测样品最大测试耦合长度 0.83m , 参考 4.5.2。

4.5.2 截止频率 f_{cut}

本测试方法的截止频率与线缆耦合长度根据以下公式计算:

$$f_{cut} \cdot L_c \approx 25\text{MHz} \cdot \text{m} \dots\dots\dots (8)$$

式中:

- f_{cut} —截止频率;
- L_c —线缆耦合长度。

注: 对于一个耦合长度为 0.5m 的线缆, 其表面转移阻抗的最大有效频率为 50MHz 。

4.5.3 终端电阻 R_1

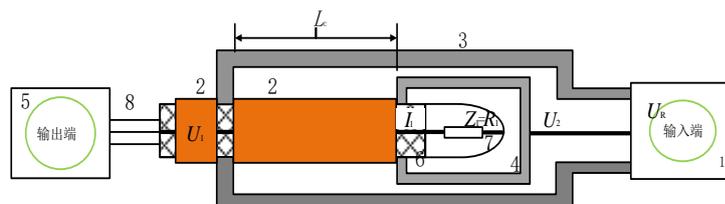
本测试方法的高压屏蔽线缆的终端电阻根据以下公式计算:

$$R_1 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{D}{d} \dots\dots\dots (9)$$

式中:

- R_1 —终端电阻;
- D —屏蔽层内径;
- ϵ_r —测试线相对介电常数;
- d —内导体外径。

4.5.4 测试布置



说明:

- 1—矢量网络分析仪输出端
- 2—线缆绝缘套管
- L_c —线缆耦合长度
- U_1 —内部电路输入电压

- | | |
|--------------|--------------------|
| 3—测试套管 | U_2 —外电路电压 |
| 4—终端电阻 R_1 | U_R —矢量网络分析仪测得电压 |
| 5—矢量网络分析仪输入端 | Z_1 —线缆特性阻抗 |
| 6—线缆屏蔽层 | R_1 —内部电路终端电阻 |
| 7—测试芯线 | I_1 —线缆屏蔽层的电流 |
| 8—连接线 | |

图 11 测试方法 B 电路连接终端电阻，外回路不连接衰减电阻布置图

4.5.5 测试步骤

(1) 线缆一端(内回路)连接到矢量网络分析仪输出端，外回路连接到矢量网络分析仪输入端。

(2) 衰减因子 (a_{meas}) 应在整个频率范围内以对数频率扫描进行测试，测试频率点应与校准频率点相同：

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

式中：

- a_{meas} —测试过程中的测试衰减因子；
- S_{21} —矢量网络分析仪的 S_{21} 参数
- P_1 —注入内回路的功率；
- P_2 —耦合到外回路功率。

(3) 由衰减因子可计算得到表面转移阻抗：

$$Z_T = \frac{Z_0 + R_1}{2L_C} 10^{-\left\{ \frac{a_{meas} - a_{cal}}{20} \right\}} \dots\dots\dots (11)$$

式中：

- Z_0 —系统阻抗（一般大小为 50Ω）；
- a_{meas} —测试过程中的测试衰减因子；
- L_C —高压屏蔽线缆耦合长度；
- R_1 —内电路终端阻抗；
- Z_T —表面转移阻抗；
- a_{cal} —未通过测试设备的校准程序消除连接电缆的衰减。

4.6 测试方法 C：非匹配（短接—短接）

4.6.1 一般要求

在该方法中，内回路和外回路都在一侧短路，即衰减电阻 R_2 和终端电阻 R_1 （见图 10）被短路代替。不使用阻抗匹配适配器。

矢量网络分析仪的输出端连接外回路，内回路（被测屏蔽线缆）在远端连接或矢量网络分析仪的输入端。在此设置中，电容耦合的影响被内/外回路中的短路所抑制。因此测试非常灵敏，因而适合测试非常低的表面转移阻抗值（低于 $1\mu\Omega/m$ 和更低）。

被测样品最大测试耦合长度 1.00m。

4.6.2 截止频率 f_{cut}

本测试方法的截止频率和线缆长度根据以下公式计算：

$$f_{cut} \cdot L_C \approx 30\text{MHz} \cdot \text{m} \dots\dots\dots (12)$$

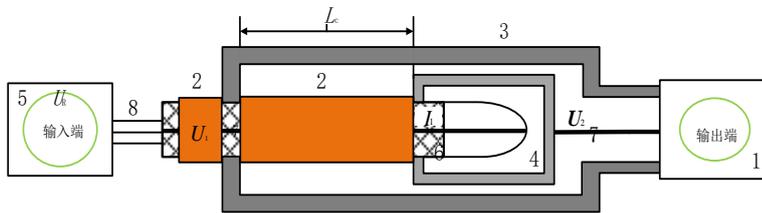
式中：

f_{cut} —截止频率；

L_C —线缆耦合长度 单位 (m)；

注：对于一个耦合长度为0.5m的线缆，其传输阻抗的最大有效频率为60MHz。

4.6.3 测试布置



说明：

- | | |
|--------------|--------------------|
| 1—矢量网络分析仪输出端 | 7—测试芯线 |
| 2—线缆绝缘套管 | 8—连接线 |
| 3—测试套管 | L_C —线缆耦合长度 |
| 4—终端电阻 R_1 | U_1 —内部电路输入电压 |
| 5—矢量网络分析仪输入端 | U_2 —外电路电压 |
| 6—线缆屏蔽层 | U_R —矢量网络分析仪测得电压 |

图 12 测试方法 C 失配（短接—短接）布置图

4.6.4 测试步骤

- (1)外回路连接到矢量网络分析仪输出端，线缆一端(内回路)连接到矢量网络分析仪输入端。
- (2) 衰减因子 (a_{meas}) 应在整个频率范围内以对数频率扫描进行测试，测试频率点应与校准频率点相同：

$$a_{meas} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_2} \right) = 20 \log_{10} (S_{21}) \dots\dots\dots (13)$$

式中：

- a_{meas} —测试过程中的测试衰减因子；
- S_{21} —矢量网络分析仪的 S_{21} 参数；
- P_1 —注入内回路的功率；
- P_2 —耦合到外回路功率。

- (3) 由衰减因子可计算得到表面转移阻抗：

$$Z_T = \frac{Z_0}{2L_C} 10^{\left\{ \frac{a_{meas} - a_{cal}}{20} \right\}} \dots\dots\dots (14)$$

式中：

- Z_0 —系统阻抗（一般大小为 50Ω ）；
- a_{meas} —测试过程中的测试衰减因子；
- L_c —高压屏蔽线缆耦合长度；
- a_{cal} —未通过测试设备的校准程序消除连接电缆的衰减；
- Z_T —表面转移阻抗。

5 管中管法

5.1 一般要求

该测试方法与高压屏蔽线缆的表面转移阻抗测试方法类似。

连接器测试的时候要求测试延长管与高压屏蔽连接器之间的线缆尽可能短，减小线缆对于连接器测试的影响。

5.2 终端电阻

本测试方法高压屏蔽连接器的终端电阻根据高压屏蔽线缆的终端电阻公式计算

$$R_1 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{D}{d} \dots\dots\dots (15)$$

式中：

- R_1 —终端电阻；
- ϵ_r —测试线相对介电常数；
- D —屏蔽层内径；
- d —内导体外径。

5.3 测试布置

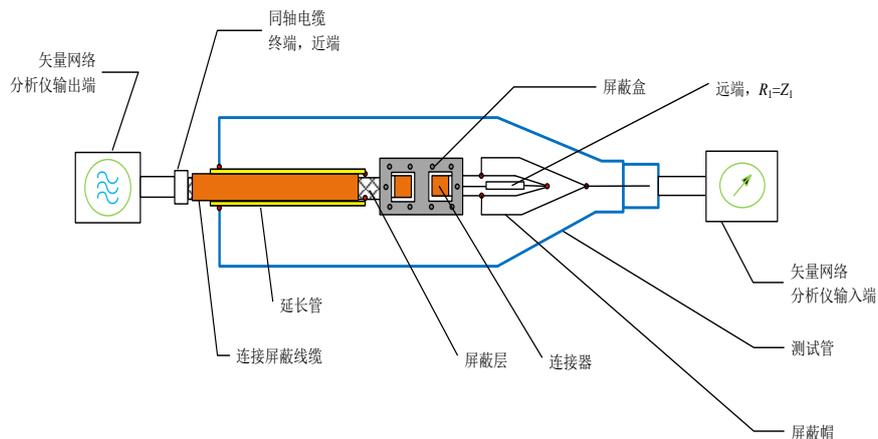


图 13 管中管测试布置图

在整个频率范围内应以对数频率扫描进行测试和记录。

连接延长管的被测高压屏蔽连接器应安装在测试套管内。该延长管应与矢量网络分析仪的输出端近端的测试套管短路相接。连接屏蔽线缆应连接到矢量网络分析仪的 RF 输出端，测试套管的输出连接

到矢量网络分析仪的输入端（见图 13）。

5.4 测试步骤

- (1) 线缆一端(内回路)连接到矢量网络分析仪输出端，外回路连接到矢量网络分析仪输入端。
- (2) 衰减因子 (a_{meas}) 应在整个频率范围内以对数频率扫描进行测试，测试频率点应与校准频率点相同：

$$a_{meas} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_2} \right) = 20 \log_{10}(S_{21}) \dots\dots\dots (16)$$

式中：

- a_{meas} —测试过程中的测试衰减因子；
- S_{21} —矢量网络分析仪的 S_{21} 参数；
- P_1 —注入内回路的功率；
- P_2 —耦合到外回路功率。

- (2) 延长管及被测线缆的剩余转移阻抗表达式：

$$Z_{Tr} = Z_1 \left| \frac{U_2}{U_1} \right| \dots\dots\dots (17)$$

- Z_{Tr} —剩余的转移阻抗；
- Z_1 —内电路终端阻抗；
- U_1 —注入内回路的电压；
- U_2 —耦合到外回路电压。

- (2) 转移阻抗表达式：

$$Z_T = \frac{R_1 + Z_0}{2} \cdot 10^{-\left(\frac{a_{meas} - a_{cal}}{20}\right)} - Z_{con} \text{ 错误!未找到引用源。} \dots\dots\dots (18)$$

或者

$$Z_T = \frac{R_1 + R_0}{2} \cdot 10^{-\left(\frac{a_{meas} - a_{cal}}{20}\right)} - Z_{Tr} \dots\dots\dots (19)$$

式中：

- Z_0 —系统阻抗（一般大小为 50Ω ）；
- a_{meas} —测试过程中的测试衰减因子；
- L_c —高压屏蔽线缆耦合长度；
- a_{cal} —未通过测试设备的校准程序消除连接电缆的衰减；
- Z_T —转移阻抗；
- R_1 —内电路终端阻抗；
- Z_{con} —连接高压屏蔽线缆的转移阻抗；
- Z_{Tr} —剩余的转移阻抗。

6 线注入法

6.1 一般要求

该测试方法通过把规定的电压和电流施加到线缆的屏蔽层并测试感应电压来获得表面转移阻抗的方法，来确定高压屏蔽线缆及高压屏蔽线束的屏蔽效能。

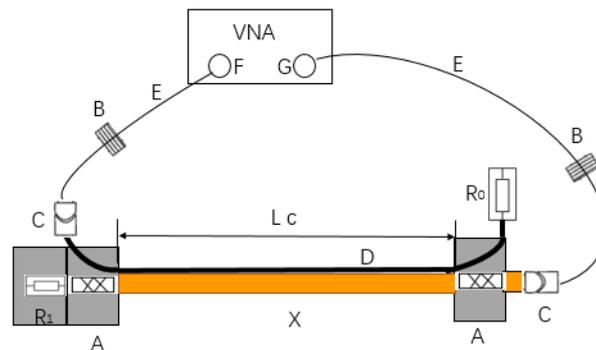
适用于高压屏蔽线缆、高压屏蔽线束、高压屏蔽连接器。

该测试方法应独立布置（无参考地平面）。通过矢量网络分析仪提供参考地，确保测试布置附近无其他金属物体（最小距离：20cm），外部环境不能影响测试结果。

6.2 测试布置

如图 14，注入电路是用多根扁平导线、铜带或铜箔和被测高压屏蔽线缆的外芯线或被测高压屏蔽线束的外芯线所组成的一段传输线。注入电路的两端通过注入装置与同轴线缆相连接。注入线应沿着耦合长度紧贴被测高压屏蔽线缆或被测高压屏蔽线束。注入电路的特性阻抗应接近发生器的输出阻抗和负载电阻 R_0 ，这可以通过选择合适的注入线的芯线宽度。

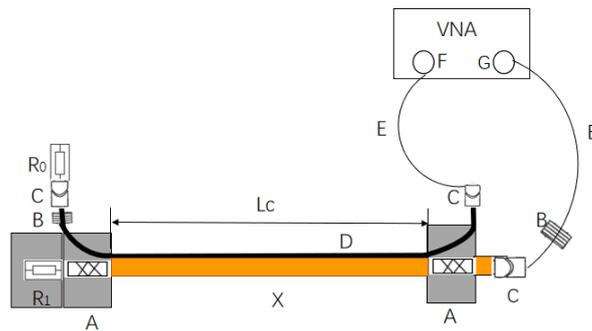
与矢量网络分析仪输出阻抗相比而言，沿耦合线方向的注入装置的反射系数和注入电路的反射系数应小于 0.1，即回波损耗应大于 20dB。



说明：

- | | |
|-----------------|---------------------------|
| A—注入装置 | G—矢量网络分析仪输入端 |
| B—铁氧体 | L_c —耦合长度 |
| C—连接器（SMA, N等） | R_0 —负载电阻（50 Ω ） |
| D—注入线 | R_t —被测高压屏蔽线缆的终端电阻 |
| E—与矢量网络分析仪连接的馈线 | X—被测高压屏蔽线缆 |
| F—矢量网络分析仪输出端 | VNA—矢量网络分析仪 |

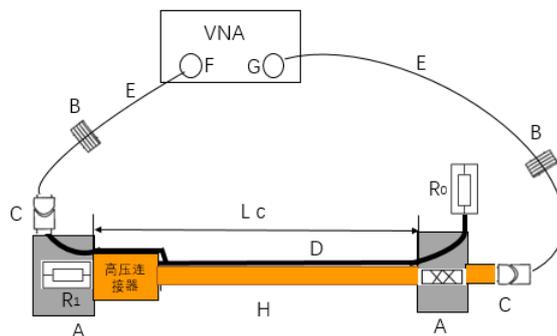
图 14 高压屏蔽线缆表面转移阻抗远端测试布置—线注入法



说明:

- | | |
|-----------------|------------------|
| A—注入装置 | G—矢量网络分析仪输入端 |
| B—铁氧体 | Lc—耦合长度 |
| C—连接器 (SMA, N等) | Ro—负载电阻 (50 Ω) |
| D—注入线 | R1—被测高压屏蔽线缆的终端电阻 |
| E—与矢量网络分析仪连接的馈线 | X—被测高压屏蔽线缆 |
| F—矢量网络分析仪输出端 | VNA—矢量网络分析仪 |

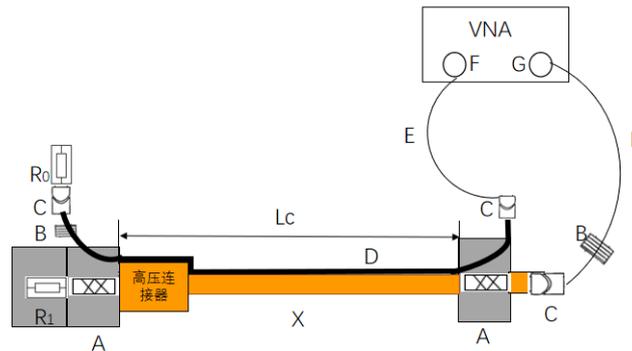
图 15 高压屏蔽线缆表面转移阻抗近端测试布置—线注入法



说明:

- | | |
|-----------------|------------------|
| A—注入装置 | G—矢量网络分析仪输入端 |
| B—铁氧体 | Lc—耦合长度 |
| C—连接器 (SMA, N等) | Ro—负载电阻 (50 Ω) |
| D—注入线 | R1—被测高压屏蔽线缆的终端电阻 |
| E—与接收机、信号器连接的馈线 | H—被测高压屏蔽线束 |
| F—矢量网络分析仪输出端 | VNA—矢量网络分析仪 |

图 16 高压屏蔽线束表面转移阻抗远端测试布置—线注入法



说明：

- | | |
|-----------------|---------------------------|
| A—注入装置 | G—矢量网络分析仪输入端 |
| B—铁氧体 | L_c —耦合长度 |
| C—连接器（SMA, N等） | R_0 —负载电阻（50 Ω ） |
| D—注入线 | R_1 —被测高压屏蔽线缆的终端电阻 |
| E—与接收机、信号器连接的馈线 | H—被测高压屏蔽线束 |
| F—矢量网络分析仪输出端 | VNA—矢量网络分析仪 |

图 17 高压屏蔽线束表面转移阻抗近端测试布置—一线注入法

高压屏蔽线缆的耦合长度取决于测试的最高频率。如果没有明确的规定，其耦合长度应为 500mm，但不小于 300mm。（详见规范性附录 E.2）

6.3 测试装置

6.3.1 测试设备

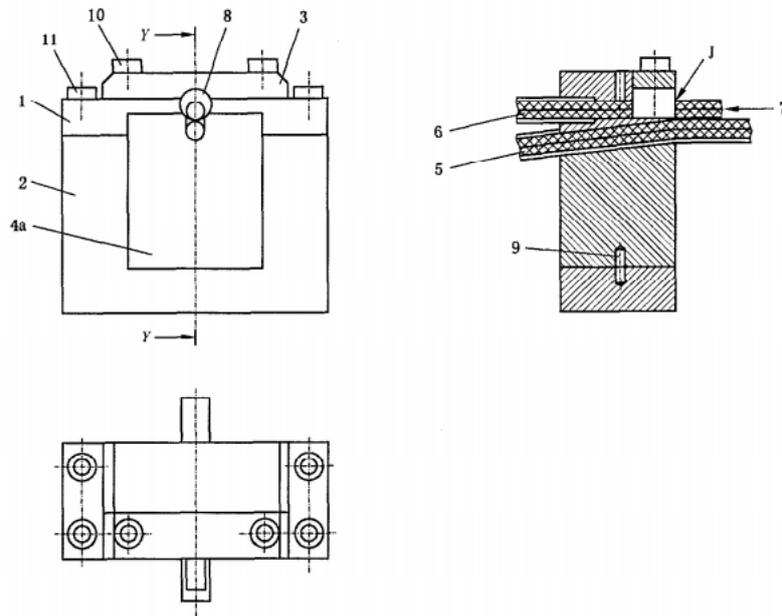
测试设备包括：

- A) 矢量网络分析仪，需要满足测试频率范围；
- B) 时域反射计（TDR）：需要满足上升时间小于 350ps，或者采用具有将回波损耗测试转化为时域状态功能的矢量网络分析仪（至少 3GHz），需要满足测试频率范围。

6.3.2 注入装置

注入装置结构应根据实际高压屏蔽线缆或屏蔽线束进行调整，使同轴线缆和端接线缆中的对称 TEM 波与沿平行线的不对称场得到最佳匹配，并在反复使用时保持良好的机械强度。注入装置推荐使用黄铜，例如图 18—注入装置的示意图。

或者，可用搭于高压屏蔽线缆上的小型连接器（焊接型）来做注入装置，或用更简便的方法即把具有合适特性阻抗的小同轴线缆的外芯线捆在剥掉护套的高压屏蔽线缆上。在试验区域，同轴电缆的内芯线用多根扁平线、皱纹铜带或扁平铜带编织来延续。注入装置不连续性的微调可通过把接点和注入线与试验区的高压屏蔽线缆护靠得更紧的办法来实现。



部位	部件	数量	备注、材料
1	上部件	1	黄铜
2	下部件	1	黄铜
3	阻抗匹配部件	1	黄铜
4a	线缆插入衬垫	1	黄铜
5	被测高压屏蔽线缆	1	/
6	50 Ω 同轴电缆	1	阻抗按要求
7	注入线	1	/
8	泡沫介质	1	er 接近 1
9	销钉 φ 2X8 (mm)	1	/
10	公制螺钉 M3XM6	2	/
11	公制螺钉 M3XM10	4	/

图 18—注入装置的示意图——列举表

6.4 测试步骤

线注入法的测试步骤具体说明如下：

- (1) 高压屏蔽线缆的准备，详见附录 E. 2；
- (2) 注入装置的准备；
- (3) 校准：应使用对数频率扫描法测试连接线和注入电路的回波损耗。应保存校准数据，以便可以对测试结果进行修正。

$$a_{cal} = -20 \cdot \log_{10}(S_{21}) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{U_{gen.cal}}{U_{rec.cal}} \right) \dots \dots \dots (20)$$

式中：

a_{cal} —校准过程中的衰减；

S_{21} —矢量网络分析仪的 S_{21} 参数

$U_{gen, cal}$ —校准时信号源的输出电压；

$U_{rec, ca}$ —校准时接收机的输入电压。

(4) 衰减测试 S_{21} 应在整个频段内优先采用对数频率扫描进行测试，测试频率应与校准频率相同；

(5) 考虑到注入线不能覆盖整个高压屏蔽线缆的四周，测试结果与注入线位置有关。每测试一次，将被测高压屏蔽线缆以芯线为轴旋转 90° ，测试 4 个位置，同时确保源线缆与被测线缆的相对位置固定且阻抗匹配；

(6) 按照测试布置图布置，进行测试

$$a_{meas} = -20 \cdot \log_{10}(S_{21}) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{U_{gen, meas}}{U_{rec, meas}} \right) \dots\dots\dots (21)$$

式中：

a_{meas} —测试过程中的衰减；

S_{21} —矢量网络分析仪的 S_{21} 参数；

$U_{gen, meas}$ —测试时信号源的输出电压；

$U_{rec, meas}$ —测试接收机的输入电压。

6.5 测试结果处理

6.5.1 高压屏蔽线缆的表面转移阻抗 $Z_{T, cable}$

$$Z_{T, cable} = \frac{1}{L_C} \cdot \frac{(R_0 + Z_G) \cdot (R_1 + Z_R)}{2 \cdot \sqrt{Z_G + Z_R}} \cdot 10^{\frac{-A_T}{20}} \dots\dots\dots (22)$$

$$Z_G = Z_R = R_0 = Z_0 \dots\dots\dots (23)$$

$$Z_{T, cable} = \frac{1}{L_C} \cdot (R_1 + R_0) \cdot 10^{\frac{-A_T}{20}} \dots\dots\dots (24)$$

$$A_T = a_{meas} - a_{cal} \dots\dots\dots (25)$$

式中：

Z_G —信号源的阻抗；

Z_R —接收机的阻抗；

Z_0 —具有相同阻抗的系统，与信号源和接收机（矢量网络分析仪）端口的阻抗保持一致；

R_0 —注入回路中的负载电阻 50Ω ；

R_1 —内部回路中的负载电阻（被测高压屏蔽线缆的终端电阻）；

a_{meas} —测试过程中的衰减，单位 dB；

a_{cal} —校准过程中的衰减；

$Z_{T, cable}$ —被测高压屏蔽线缆的表面转移阻抗，单位 $m\Omega / m$ ；

L_c —被测高压屏蔽线缆耦合长度。

在低频时，电容耦合阻抗可忽略不计，有效表面转移阻抗成为表面转移阻抗。

6.5.2 高压屏蔽连接器（包括公端和母端）的表面转移阻抗 $Z_{T, con}$

高压屏蔽连接器的表面转移阻抗是通过高压屏蔽线缆和高压屏蔽线束的表面转移阻抗这两个值之

间的公式换算间接求得的，具体步骤如下：

第一步，根据图 15-高压屏蔽线缆表面转移阻抗测试布置一线注入法，测试计算求得高压屏蔽线缆的表面转移阻抗 $Z_{T,cable}$ 式 (19)，单位 $m\Omega/m$ ；

第二步，根据图 16-高压屏蔽线缆与高压屏蔽线束表面转移阻抗测试布置一线注入法，测试计算求得高压屏蔽线缆与高压屏蔽线束 Z_T 的表面转移阻抗，单位 $m\Omega$ ；

$$Z_T = (R_1 + Z_0) \cdot 10^{\frac{-A_T}{20}} \dots\dots\dots (26)$$

式中：

- R_0 —注入回路中的负载电阻 50Ω ；
- R_1 —内部回路中的负载电阻（被测高压屏蔽线缆的终端电阻）；
- A_T —通过网分测量得到的发射端和测量端电压比值，单位 dB；
- Z_T 被测高压屏蔽线束的表面转移阻抗，单位 $m\Omega$ 。

第三步，高压屏蔽连接器（包括连接器的公端和母端） $Z_{T,con}$ 的表面转移阻抗，单位 $m\Omega$

$$Z_{T,con} = Z_T - (L - L_{CS}) \cdot Z_{T,cable} \dots\dots\dots (27)$$

式中：

- L_{CS} —连接器的长度；
- L —高压屏蔽线束的长度；
- L_c —被测高压屏蔽线缆耦合长度；
- Z_T 被测高压屏蔽线束的表面转移阻抗，单位 $m\Omega$ ；
- $Z_{T,cable}$ 被测高压屏蔽线缆的表面转移阻抗，单位 $m\Omega/m$ 。

附录 A
(资料性附录)

内回路特性阻抗和阻抗匹配器的确定方法

A.1 内回路阻抗

(1) 如果内回路的特性阻抗 Z_1 未知，则可通过矢量网络分析仪与以下方法确定。

被测屏蔽线缆的一端通过合适的连接头（比如 N 接头）连接到矢量网络分析仪，测试频率按线缆长度 $1/8\lambda$ 确定， λ 为测试频率波长：

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

式中：

f_{test} —测试频率；

c —光速 3×10^8 m/s；

ϵ_{r1} —内回路相对介电常数；

ϵ_{r1} —内回路相对介电常数。

(2) 当被测屏蔽线缆远端短接与开路状态下，测试其阻抗 Z_{short} 与 Z_{open} ，基于这两组值，计算得到特性阻抗 Z_1 ：

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

式中：

Z_1 —高压屏蔽线缆特性阻抗；

Z_{short} —高压屏蔽线缆短接阻抗；

Z_{open} —高压屏蔽线缆短接阻抗。

A.2 阻抗匹配器的设计

阻抗匹配器主要针对常见的阻抗系统，如 50Ω 。该测试方法中可能采用阻抗匹配器输出与被测屏蔽线缆特性阻抗相同的阻抗值。阻抗匹配器采用双电阻电路，其中一个串联电阻 R_s 与一个并联电阻 R_p 。

当二次侧阻抗低于一次侧阻抗时，则：

$$R_s = Z_1 \sqrt{1 - \frac{Z_2}{Z_1}} \dots\dots\dots (A.3)$$

$$R_p = \frac{Z_2}{\sqrt{1 - \frac{Z_2}{Z_1}}} \dots\dots\dots (A.4)$$

式中：

R_s —串联电阻；

R_p —并联电阻；

Z_1 —高压屏蔽线缆阻抗;
 Z_2 —系统阻抗。

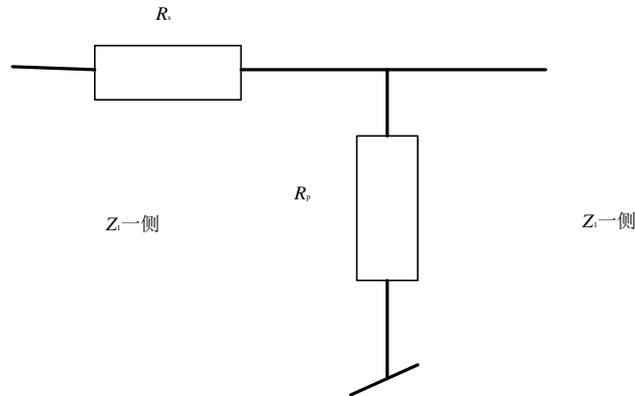


图 A—1 阻抗匹配器 — $Z_2 < Z_1$

当一次侧阻抗低于二次侧阻抗时，则：

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

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

式中：

R_s —串联电阻；

R_p —并联电阻；

Z_1 —高压屏蔽线缆阻抗；

Z_2 —系统阻抗。

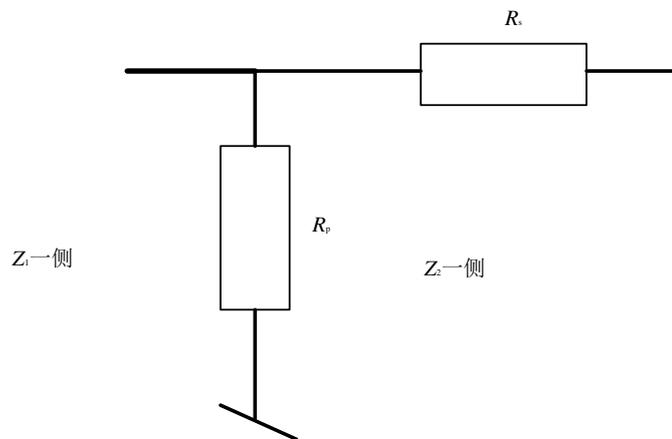


图 A—2 阻抗匹配器 — $Z_1 < Z_2$

附录 B
(资料性附录)
表面转移阻抗限值推荐等级分类

B.1 概述

本附录给出了高压屏蔽线缆及连接器屏蔽效能试验的屏蔽效能推荐等级示例，推荐限值参考奔驰标准。高压屏蔽线缆以及高压屏蔽线束表面转移阻抗的单位 $m\Omega/m$ 。高压屏蔽连接器表面转移阻抗的单位 $m\Omega$ 。最高有效频率由被测高压屏蔽线缆的有效耦合长度有关，对于电动汽车高压屏蔽线缆及高压屏蔽连接器，主要影响整车在低频范围内的电磁辐射水平，因此关注的频率范围 $9kHz\sim 30MHz$ 。

B.2 试验屏蔽效能限值推荐等级分类

本推荐限值给出了高压屏蔽线缆、高压屏蔽连接器、高压屏蔽线束屏蔽效能试验的表面转移阻抗推荐等级示例。

表 B1 高压屏蔽线缆表面转移阻抗等级($m\Omega/m$)

表面转移阻抗等级	9kHz~2MHz	2MHz~30MHz
I	≤ 8	≤ 80
II	≤ 6	≤ 60
III	≤ 4	≤ 40
IV	≤ 2	≤ 20
V	≤ 1	≤ 10

表 B2 高压屏蔽连接器表面转移阻抗等级($m\Omega$)

表面转移阻抗等级	9kHz~2MHz	2MHz~30MHz
I	≤ 40	≤ 180
II	≤ 20	≤ 100
III	≤ 10	≤ 60
IV	≤ 4	≤ 40
V	≤ 2	≤ 20

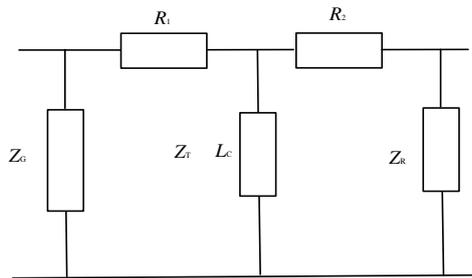
表 B3 高压屏蔽线束表面转移阻抗等级($m\Omega/m$)

表面转移阻抗等级	9kHz~2MHz	2MHz~30MHz
I	≤ 60	≤ 200
II	≤ 40	≤ 180
III	≤ 20	≤ 100
IV	≤ 10	≤ 60
V	≤ 4	≤ 40

附录 C
(资料性附录)
三同轴测试系统的等效 T 型电路

C.1 等效 T—型电路

在三同轴测试方法中，内外电路的终端负载情况直接决定如何转化将S21转换成表面转移阻抗。该测试方法能够近似等效为T—型电路：



- | | |
|-------------------|-----------------|
| R_1 —内回路的终端阻抗 | R_2 —外回路的终端阻抗 |
| Z_T —屏蔽层的表面转移阻抗 | Z_G —信号源的输出阻抗 |
| Z_R —接收机的输入阻抗 | L_C —耦合长度 |

图 C—1 等效 T—型电路

C.2 T—型电路的 S_{21} 参数

基于C-1图T—型等效电路，以及考虑到 $Z_T \ll Z_G(Z_R)$ ，可以得到：

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

式中：

- | | |
|-------------------|--------------------------------|
| R_1 —内回路的终端阻抗 | Z_G —信号源的输出阻抗 |
| Z_T —屏蔽层的表面转移阻抗 | L_C —耦合长度 |
| Z_R —接收机的输入阻抗 | S_{21} —矢量网络分析仪的 S_{21} 参数 |
| R_2 —外回路的终端阻抗 | |

然后接下来，我们可以得到表面转移阻抗的表达式：

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

式中：

- | | |
|-------------------|--------------------------------|
| R_1 —内回路的终端阻抗 | Z_G —信号源的输出阻抗 |
| Z_T —屏蔽层的表面转移阻抗 | L_C —耦合长度 |
| Z_R —接收机的输入阻抗 | S_{21} —矢量网络分析仪的 S_{21} 参数 |
| R_2 —外回路的终端阻抗 | |

附录 D

(资料性附录)

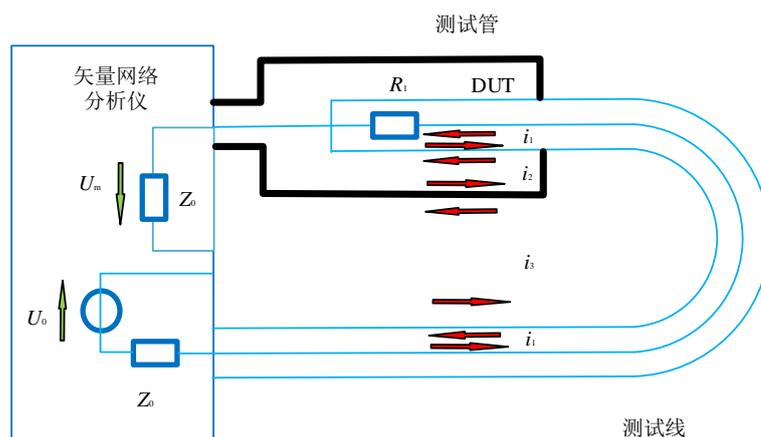
低频地环路对测试结果的影响

D.1 低频地环路

在三同轴测试方法中，由于网络分析仪的输出端和输入端电源系统具有同一参考电位。只要它们接入同一电源系统。这种电源方案导致的地环路在较低频率范围可能影响表面转移阻抗的测试精度。频率范围与系统中的电源线缆、测试线缆相关，通常小于 100kHz。

D.2 干扰原因分析

图 D—1 展示了常见的测试表面转移阻抗的三同轴测试系统。



图中：

U_m —外回路的耦合电压

R_1 —内回路远端终端阻抗

Z_0 —矢量网络分析仪阻抗

U_0 —矢量网络分析仪输出电压

$i_{1,2,3}$ —1,2,3 环路电流

图 D—1 三同轴系统测试示意图

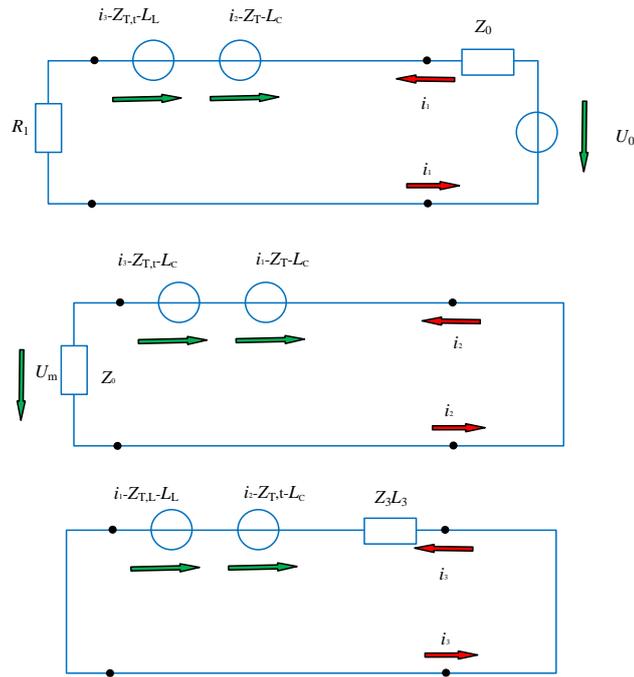
测试布置中包含 3 个耦合回路：

回路 1：被测样品（包含连接同轴线）

回路 2：屏蔽线缆屏蔽层与测试管

回路 3：连接同轴线与测试管

对于三个回路，如果不考虑其衰减因子，其等效电路图如图 D—2 所示：



Z_T —被测样品的表面转移阻抗
 $Z_{T,t}$ —测试管的表面转移阻抗
 L_C —被测样品的长度（耦合长度）
 Z_3 —回路 3 阻抗
 U_m —外回路的耦合电压
 $Z_{T,L}$ —测试连接同轴线表面转移阻抗
 L_L —测试连接同轴线的长度
 Z_0 —矢量网络分析仪阻抗
 L_3 —回路 3 的长度
 U_0 —矢量网络分析仪输出电压

图 D—2 三同轴系统测试 3 个回路中的等效电路图

对于低频范围，波传播效应能够忽略，因此可以得到：

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

式中：

Z_T —被测样品的表面转移阻抗
 $Z_{T,t}$ —测试管的表面转移阻抗
 L_C —被测样品的长度（耦合长度）
 Z_3 —回路 3 阻抗
 U_m —外回路的耦合电压
 $Z_{T,L}$ —测试连接同轴线表面转移阻抗
 L_L —测试连接同轴线的长度
 Z_0 —矢量网络分析仪阻抗
 L_3 —回路 3 的长度
 U_0 —矢量网络分析仪输出电压

从等式右边的表达式可以得出：

1. 采用低表面转移阻抗的测试管与测试同轴线；
2. 测试同轴线的长度尽量短
3. 增加回路 3 的阻抗

回路 3 的阻抗可以通过在测试同轴线上安装合适的铁氧体或隔离信号源与接收系统的电源参考电位。比如电池驱动型电源信号源与接收机，或在它们电源上安装隔离变压器。

附录 E
(规范性附录)
线注入法高压屏蔽线缆的准备

E.1 高压屏蔽线缆的概述

当频率上限达到 1000MHz 时，两个注入装置间推荐的测试长度为 500mm（参见 E.2）。对于注入装置，在测试长度以外的高压屏蔽线缆应用黄铜或铜管进行屏蔽（如图 E.1）。屏蔽管应采用焊接或压接在 E 点处与线缆屏蔽 S 接触。如果使用焊接方式，应注意不要是线缆绝缘过热，一个较好的做法是选择管径，使剥去绝缘外套的线缆能插入管内，并用压接工具固定。该方法的优点是通过对管的紧密固定，可以防止高压屏蔽线缆编织线在测试长度附近松散。另一种可能性是使用楔子来接触不可焊接的铝箔/编织线缆。

高压屏蔽线缆的两端选用合适的射频连接器（如 N，SMA 头），一端连到接收机，一端焊接与其相匹配电阻，其电阻值等于被测线缆的特性阻抗。对于直径大的线缆，建议并联使用多个电阻。

负载电阻和与接收机的线缆的连接安装在屏蔽盒中（图 E.2）。用 TDR 测试被测线缆自身的电气性能。在管子和线缆的测试部分接点上应避免弯曲力，以防止机械损伤。

为减少电磁能对自由端产生的不必要的耦合，L1 和 L2 长度的总和不应超过高压屏蔽线缆测试部分的长度。

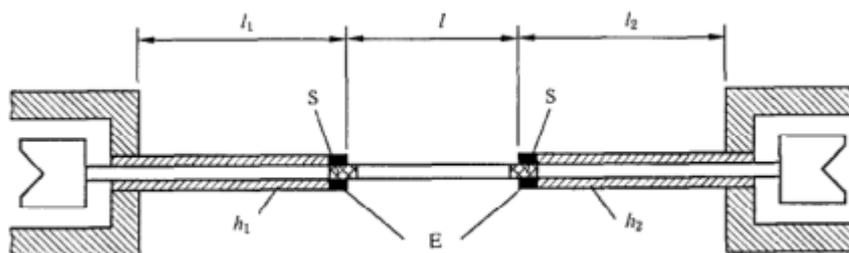


图 E.1—被测高压屏蔽线缆的准备

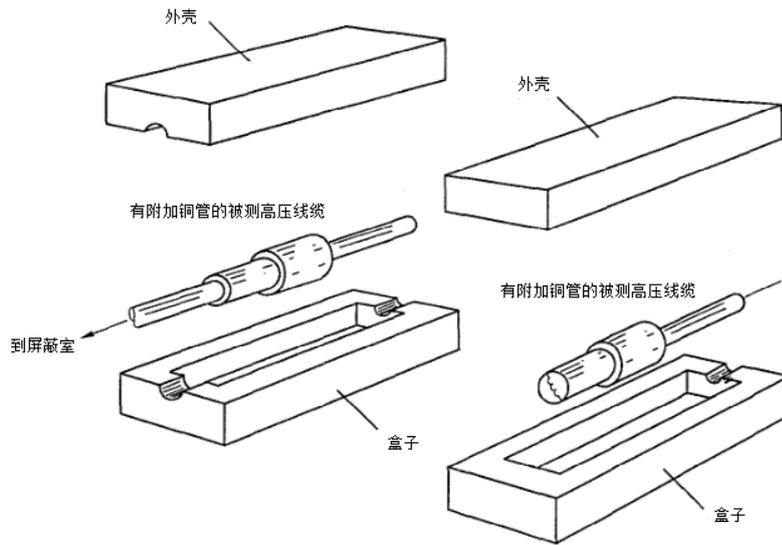


图 E.2—被测高压屏蔽线缆连接器的附加屏蔽

E.2 耦合长度的选择

高压屏蔽线缆的耦合长度取决于测试的最高频率。如果没有明确的规定，其耦合长度应为 500mm，但不小于 300mm。

耦合长度和最高频率之间的关系：

$$L_{c,max} \leq \frac{c}{\pi \cdot f_{max} \cdot \left| \sqrt{\epsilon_{r2}} \pm \sqrt{\epsilon_{r1}} \right|} \dots\dots\dots (E.1)$$

式中：

- ϵ_{r1} 注入电路的相对介电常数；
- ϵ_{r2} 被测高压屏蔽线缆的相对介电常数；
- f_{max} 测试的最高频率，单位 Hz；
- c 光速 3×10^8 m/s；
- π 圆周率；
- $L_{c,max}$ 最大耦合长度。