



工业和信息化部电子第五研究所

中国电子产品可靠性与环境试验研究所

中国赛宝实验室

科学 公正 服务 价值  
SCIENCE IMPARTIALITY SERVICE VALUE

## 线缆及连接器组件三同轴法屏蔽效能 测试技术交流

报告人：邵鄂

TEL:15989243213

E-MAIL:shaoe@ceprei.biz



## 报告提纲

01

研究背景及意义

02

屏蔽效能表征及测试标准

03

三同轴法介绍

04

三同轴法屏蔽效能测试案例

05

总结及未来研究方向

## 一. 研究背景及意义

### 汽车内线缆组件架构



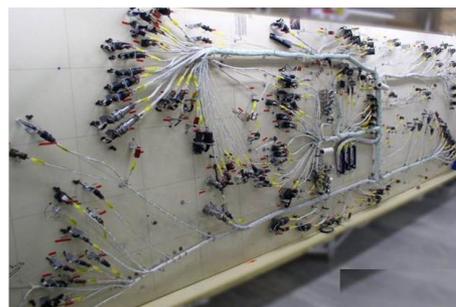
### 飞机内部各种线缆互连组件



电动车内各式高压屏蔽线



各种车载连接器、线缆组件



航空线缆组件



航空电连接器

## 一. 研究背景及意义

### 电气线路互连系统电磁干扰案例

- ❑ 2007年一名飞行员报告称自己驾驶的波音737客机的**导航**设备在起飞后**失灵**。在乘务员要求一名乘客关闭便携式GPS设备后，导航设备随即恢复正常。
- ❑ 某DORNIER 328支线飞机上，曾出现因门位置**信号线电磁屏蔽不好**引起的虚假舱门位置警告信息的多发性故障。

### 电气线路互连系统电磁干扰原因

据统计，在一架大型运输飞机上各种线缆总重达数吨，飞机上发生的各种类型**电磁干扰**中有**60%**是通过**线缆间电磁耦合**产生的。而在实际工业互联系统中(电子设备、电子仪器和控制装置中的互联线缆)，当设备或装置所受干扰严重时，**90%是线缆的原因**。此外，线缆有时还是高效的电磁波辐射天线。

随着飞机、汽车等连续安全运行所必需的操作功能对电气/电子系统的依赖程度增加；**互连线缆、连接器**成为复杂系统中**电磁兼容性**最为薄弱的环节之一，也是一个共性问题。系统互连线设计不合理往往是造成系统电磁兼容性不合格的主要原因。

### 美国联邦航空局：EWIS适航要求

2007年底，美国联邦航空局(FAA)对联邦航空规章(FAR)的25部做出了重大的修正，即在原有的七大分部的基础上新增加了一个分部—第H分部，H分部全称为**Electrical Wiring Interconnection System-电气线路互连系统**，简称为EWIS。

### 中国民用航空局：EWIS适航要求

2016年3月17日，中国民用航空局(CAAC)发布CCAR-25-R4，H分部：电气线路互联系统(EWIS)第25.1707条规定：每个EWIS的设计和安装必须使任何在飞机上可能发生的电气干扰，不会对飞机或其他系统造成危险影响。

## 一. 研究背景及意义

电气线路互连系统: **Electrical Wiring Interconnection System (简称: EWIS)**

各种电线、布线器件、或它们的组合, 用来在两端或多端接点之间传输电能, 包括数据和信号。这些元件包括导线、连接器、接线端子、模块、死接头、密封塞等。

### 电气线路互连系统不合理设计举例



使用较长引线接地

使用屏蔽串联的方式进行屏蔽接地

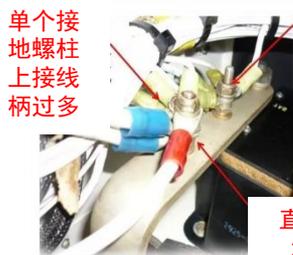


线束外屏蔽层未合理端接



线束外屏蔽层末端接到尾部附件

使用非屏蔽尾部附件



单个接地螺柱上接线柄过多

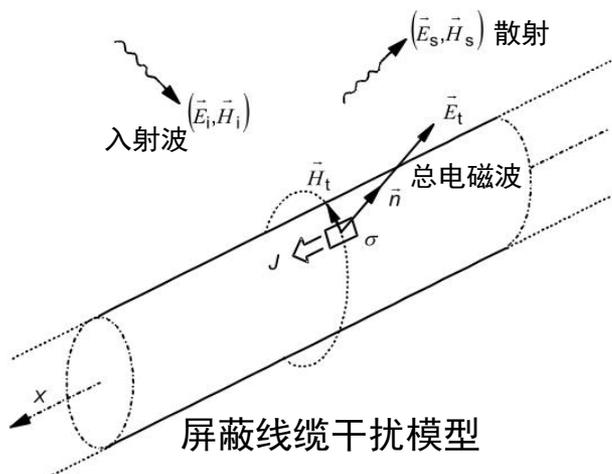
信号地与电源地共用接地螺柱

直流与交流接地点未分离

### 电气线路互连系统重要性

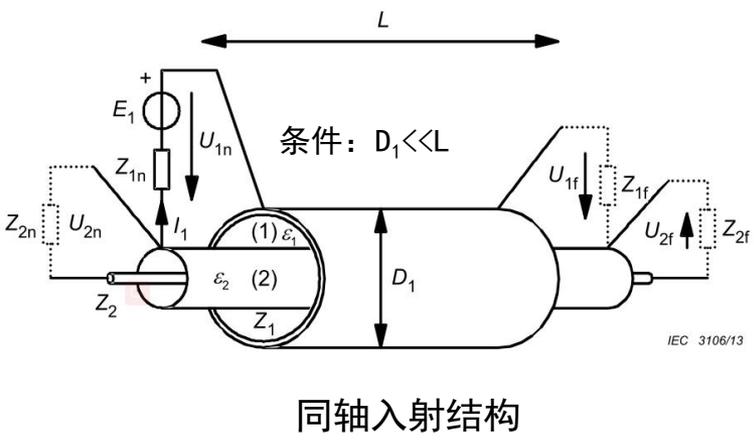
- EMI、EMS、ESD、Lightning、HIRF等电磁效应, 几乎都被认为与EWIS有关
- 多数整机E3问题都与不合理的EWIS设计、EWIS安装、EWIS防护有关
- EWIS隔离设计、综合设计、接地设计都需要考虑电磁兼容相关要求
- EWIS电磁兼容设计的成功, 是产品定型、整机电磁兼容认证符合性的关键
- 绝大多数情况下, EWIS屏蔽效能的优劣决定了设备、系统能否通过电磁兼容测试。一旦测试失败, 往往也多采取加强线缆屏蔽防护来解决问题

## 二. 屏蔽效能表征及测试标准 ——电磁耦合现象



- 线缆的直径  $\ll$  线缆物理长度 / 入射电磁波波长
  - 弱耦合：外部与内部芯线，取决于屏蔽层  $J$  和  $\sigma$
- $$(\vec{E}_t, \vec{H}_t) = (\vec{E}_i, \vec{H}_i) + (\vec{E}_s, \vec{H}_s) \quad J = \vec{n} \cdot \vec{H}_t \quad \sigma = \vec{n} \cdot \vec{E}_t \epsilon_0 \epsilon_r$$
- |     |     |     |      |      |
|-----|-----|-----|------|------|
| 总   | 入射  | 散射  | 表面   | 表面   |
| 电磁场 | 电磁场 | 电磁场 | 电流密度 | 电荷密度 |

- **屏蔽线缆电磁耦合的“源”**：屏蔽层表面电磁场。线缆屏蔽层表面电磁场与表面电流、表面电荷密度直接相关；
- **屏蔽线缆电磁耦合**：由入射波总电磁场或表面电流、电荷密度重新分配，电场通过容性耦合穿透线缆中孔缝；磁场通过感性耦合穿透线缆中孔缝；
- **屏蔽线缆耦合效应模拟**：屏蔽线缆直径通常远小于线缆的长度和入射波的波长，高阶模可以忽略。因此，这种耦合效应可以通过合适的方式，在线缆屏蔽层重构表面电流、表面电荷来模拟。



## 二. 屏蔽效能表征及测试标准 —— 表征参数

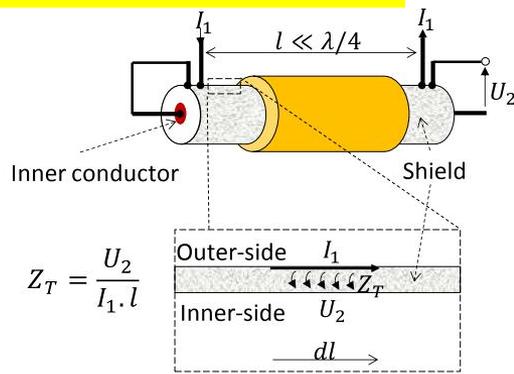
■屏蔽效能：决定了线缆组件在复杂电磁环境中的表现，尤其在航空航天、电动汽车等空间狭小、线缆紧密排布的系统中，线缆组件具有“**低辐射、强抗干扰**”是非常重要的。

波长  
 $\lambda = (c_0 \cdot v_k) / f$

■表征参数：线缆屏蔽效能常用**表面转移阻抗**和**屏蔽衰减**两个参数。

■ 表面转移阻抗 → CUT为“电小”尺寸，波的传播可忽略，短线固有屏蔽参数

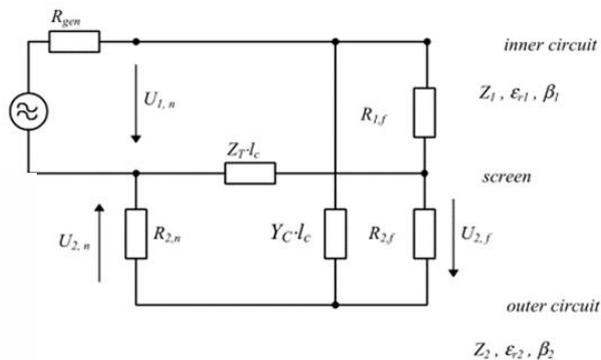
在内电路（线芯与屏蔽层组成的电路）中加载电压，得到电流  $I_1$ ；这个电流辐射到外电路（屏蔽层与测试装置外壳形成的电路）产生的感应电压记为  $U_2$ ，则**转移阻抗**  $Z_T = U_2 / I_1 \cdot L$ 。（相对于单位长度）。



表面转移阻抗定义

■ 屏蔽衰减 → CUT为“电长”尺寸，耦合传输线

线芯馈入功率  $P_{feed}$  和穿透屏蔽层后辐射到空间中的最大功率  $P_{rad,max}$  的比值，能比较直观的表征屏蔽层的衰减能力，则屏蔽衰减定义为：



屏蔽衰减测试等效电路

$$a_s = -10 \lg \left( Env \left| \frac{P_{rad,max}}{P_{feed}} \right| \right)$$

电短：

$$f < \frac{c_0}{10 \cdot l \cdot \sqrt{\epsilon_{r1}}}$$

电长：

$$f > \frac{c_0}{2 \cdot l \cdot \left| \sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}} \right|}$$

## 二、屏蔽效能表征及测试标准

## 线缆屏蔽效能要求

标准号	标准名称	表征参数	试验方法
IEC TS 62153-4-1: 2014 +AMD1:2020 CSV	金属通信电缆试验方法 第4-1部分: 电磁兼容 电磁屏蔽试验介绍	/	/
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	表面转移阻抗	三同轴法
IEC 62153-4-4: 2015	金属通信电缆试验方法 第4-4部分: 电磁兼容 可达3 GHz及以上频率的屏蔽衰减 三同轴法	屏蔽衰减	三同轴法
IEC 62153-4-7: 2021 RLV	金属电缆和其他无源部件试验方法 第4-7部分: 电磁兼容 连接器和组件的表面转移阻抗 $Z_T$ 和屏 蔽衰减 $a_s$ 或耦合衰减 $a_c$ 三同轴管中管法	转移阻抗 屏蔽衰减 耦合衰减	管中管法
IEC 62153-4-9: 2018 +AMD1: 2020 CSV	金属通信电缆试验方法 第4-9部分: 电磁兼容 屏蔽对称电缆的耦合衰减三同轴法	耦合衰减	三同轴法
IEC 62153-4-15: 2021 RLV	金属电缆试验方法 第4-15部分: 电磁兼容 转 移阻抗和屏蔽衰减或耦合衰减 三同轴小室法	转移阻抗和屏 蔽或耦合衰减	三同轴法
ISO 19642- 2:2019	道路车辆-汽车线缆 第2部分 测试方法	表面转移阻抗	三同轴法

## 二、屏蔽效能表征及测试标准

## 连接器屏蔽效能要求

标准代号	被试对象	测试参数	试验方法
SAE/US CAR-17	车载射频连接器	射频泄露	IEC 62153-4-7
SAE/US CAR-49	车载 微同轴连接器	屏蔽衰减 转移阻抗	IEC 62153-4-7 IEC 62153-4-6
IEC 61076-2-101 IEC 60512-26-100 IEC 60512-29-100	圆形连接器	转移阻抗	IEC 62153-4-7
VW 80332 VOLKSWAGEN	高压连接器	转移阻抗	IEC 62153-4-6
MB NLV 215 Mercedes-Benz	高压连接器	转移阻抗	IEC 62153-4-3 IEC 62153-4-6
T/CSAE 189-2021	高压连接器、线缆	转移阻抗	IEC 62153-4-3 IEC 62153-4-6

## 报告提纲

01

研究背景及意义

02

屏蔽效能表征及标准

03

三同轴法介绍

04

三同轴法屏蔽效能测试案例

05

总结及未来研究方向

### 三、三同轴法 ——三同轴法历史

1934 Sergei Alexander Schelkunoff		B. Démoulin	
1976 M. Tyni	Paul Villien	1955 W. Klein	1991 Thomas Kley
1988 Lauri Halme			1988 Bernhard Eicher
1959 Heinrich Kaden		1990 Otto Breitenbach	
	1961 R.F. Muehlberger		1968 Erich Homann
Eric Bech	Jürgen Spatz	1961 John Zorzy	
1956 Heinz Jungfer	1969 Meyer de Stadelhofen		1956 L. Krügel
1974 E.F. Vance	1936 H. Ochem		Eric Guiol
	Patrick Fowler		

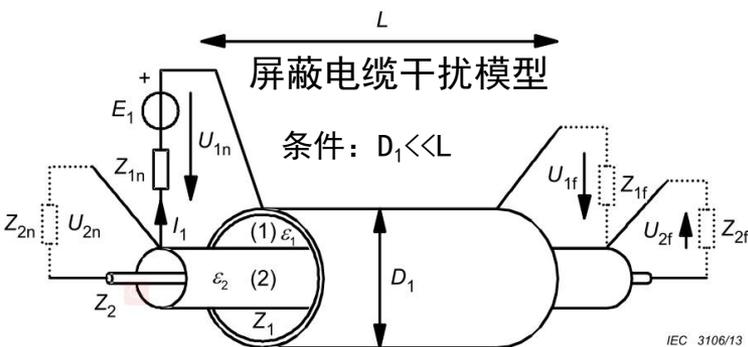
## 三、三同轴法

### ——三同轴装置概念

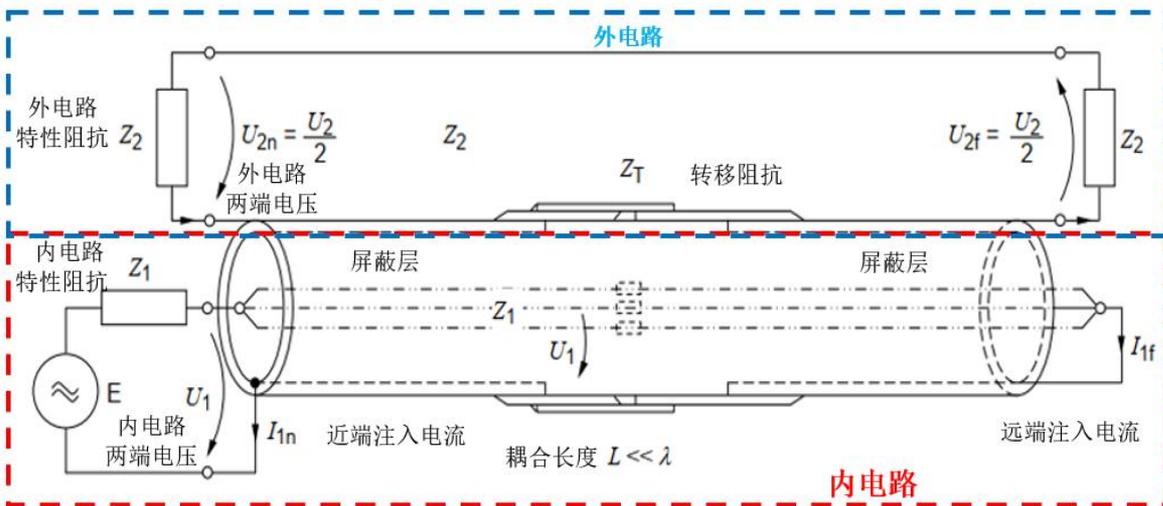
三同轴概念：

“中心导体（芯线）与屏蔽层”、“屏蔽层与试验夹具金属管”、“芯线与金属管”形成三同轴关系

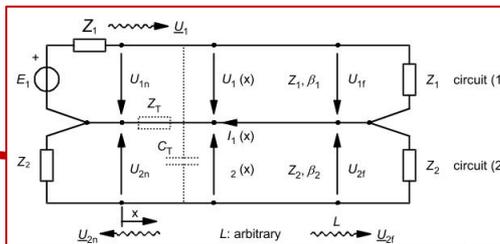
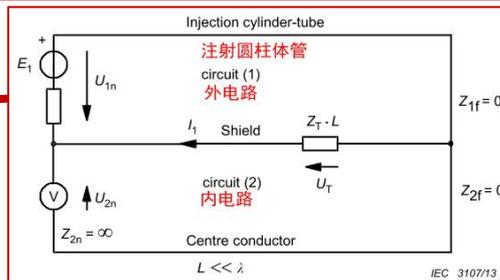
- 外电路：注入圆柱体硬质金属管+屏蔽层
- 内电路：中心导体+屏蔽层



同轴入射结构-三同轴结构



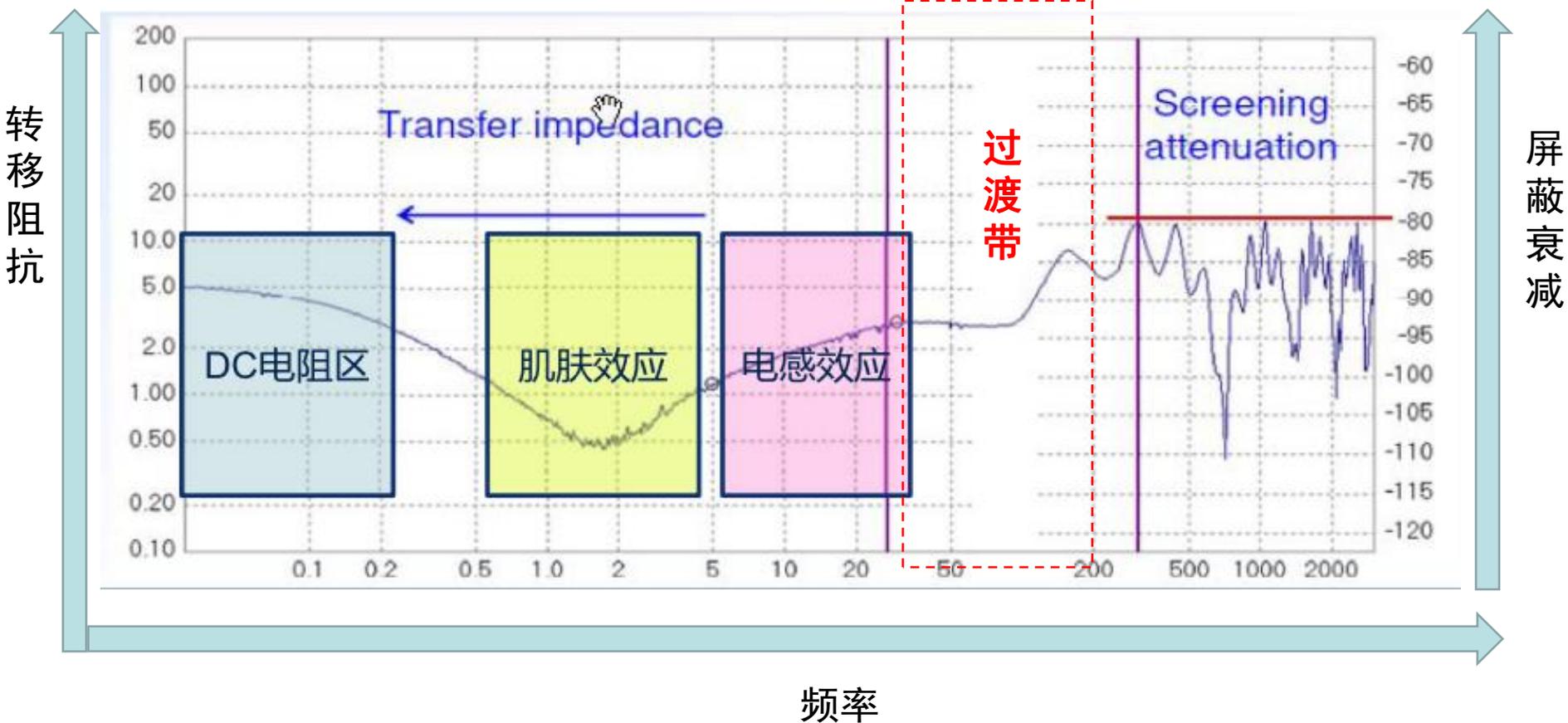
等效电路



两传输线的线间耦合（等效电路）

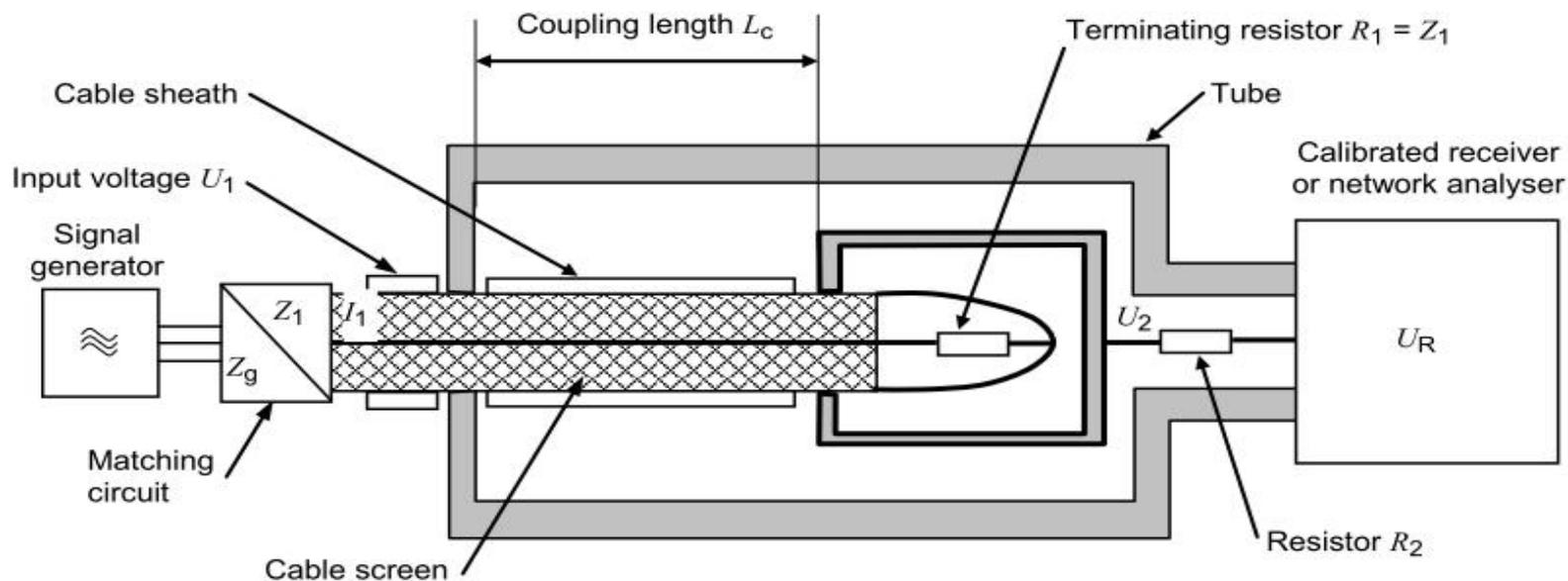
### 三、三同轴法

——屏蔽效能测试结果



### 三、三同轴法

——表面转移阻抗



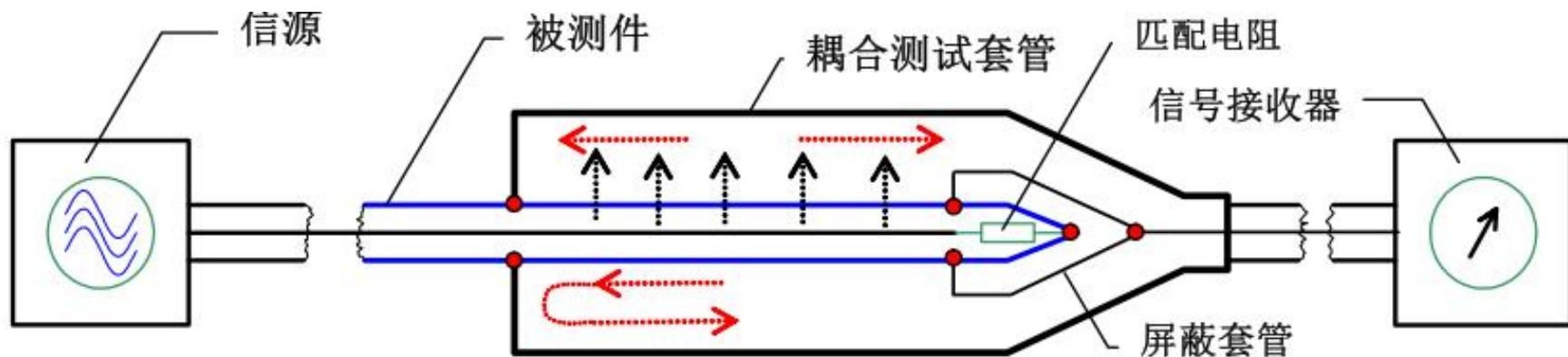
IEC 2707/13

方法A

测试布置复杂，测试结果精确

## 三、三同轴法

### ——表面转移阻抗、屏蔽衰减



信源和接收器包含在VNA中

方法B  
测试相对简单，动态范围大

转移阻抗和屏蔽衰减  
从几 kHz 到（或超过）  
8 GHz只需一次配置

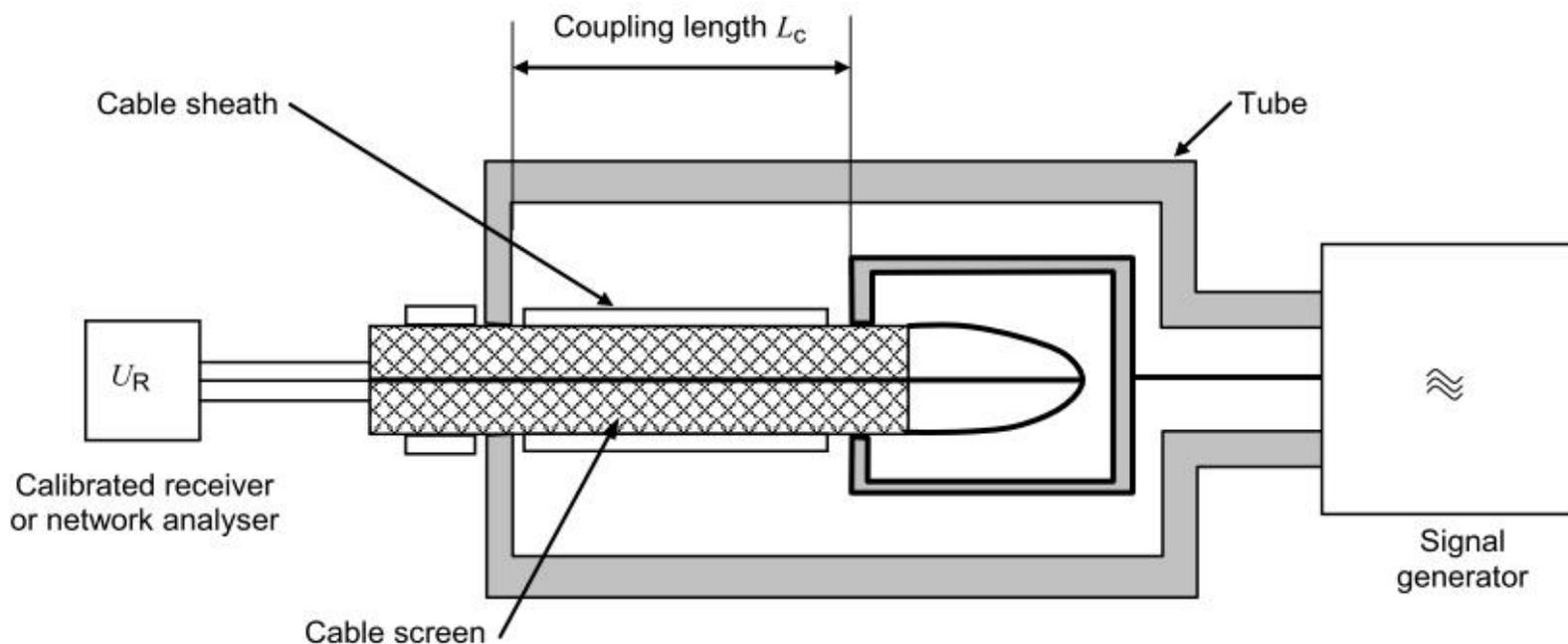
参考标准：

IEC 62153-4-3转移阻抗  
IEC 62153-4-4屏蔽衰减  
EN 50289-1-6通信线缆

- Port1: 线芯导体注入特定频率、一定功率的激励信号；
- Port2: 测量外电路感应电压，再通过一系列的计算得出被测线缆屏蔽层的表面转移阻抗或屏蔽衰减。

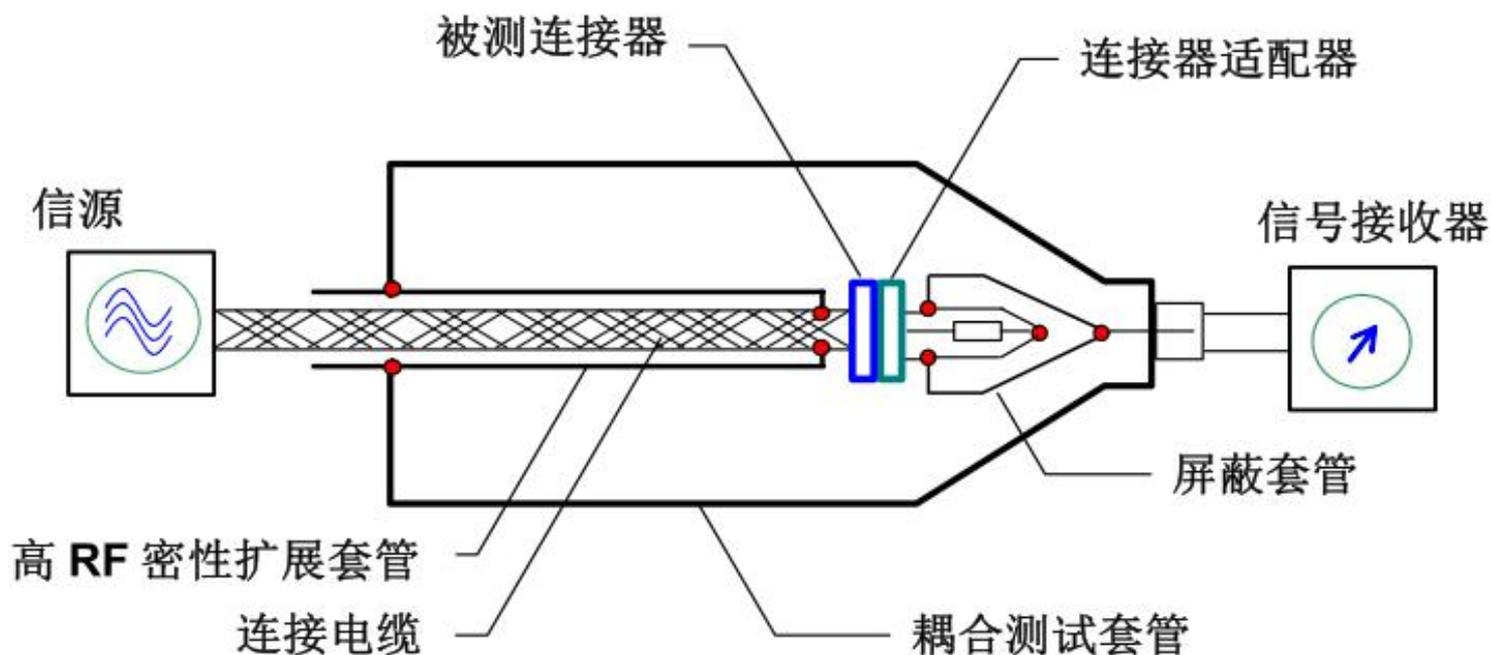


### 三、三同轴法 ——表面转移阻抗



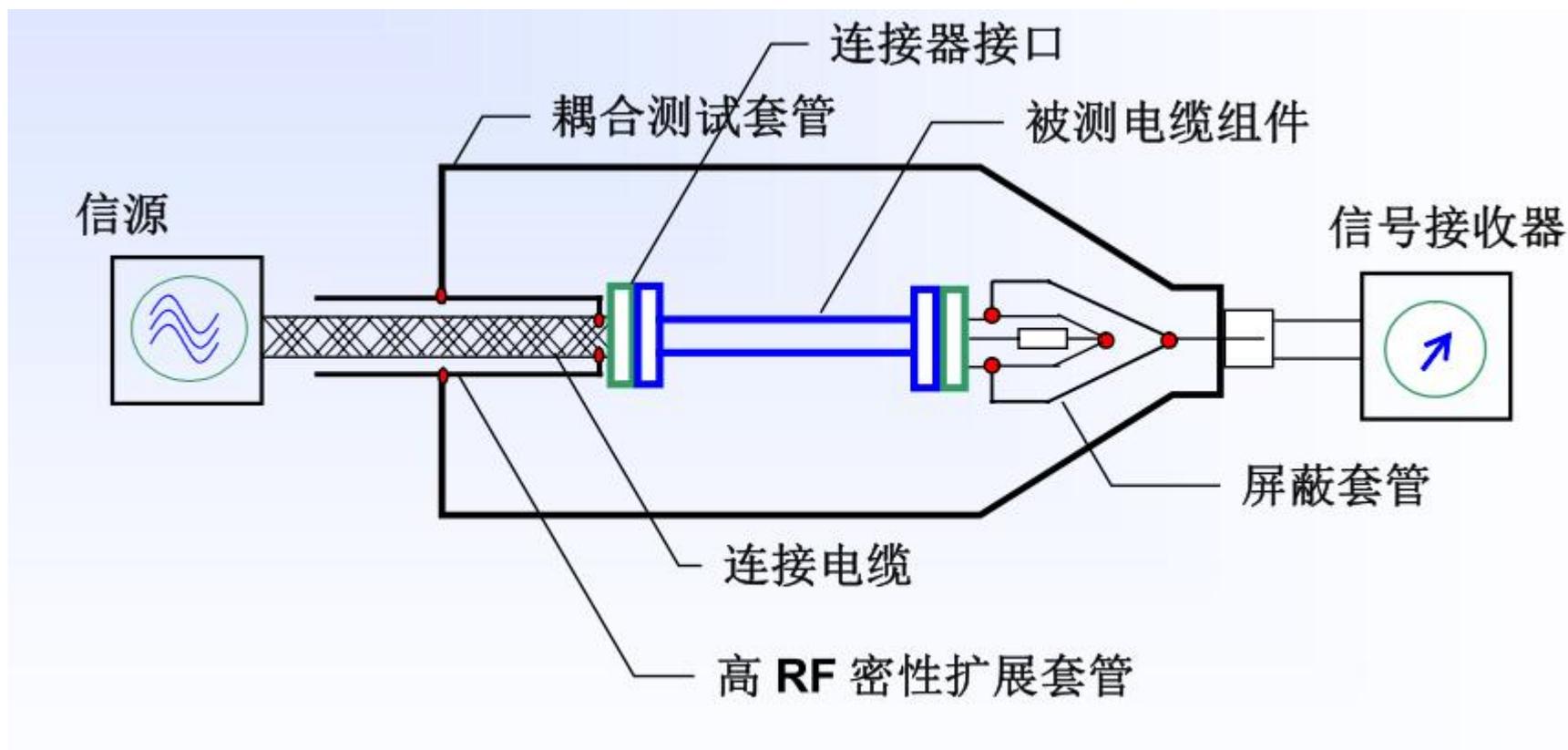
方法C  
测试布置简单，但带宽窄

### 三、三同轴法 —— 连接器管中管法



参考标准：IEC 62153-4-7 管中管法

### 三、三同轴法 —— 电缆组件的测量



## 三、三同轴法

## ——屏蔽效能测试流程

### 一. 试验准备

- ① 样品制备
- ② 辅助件处理

### 二. 测量校准

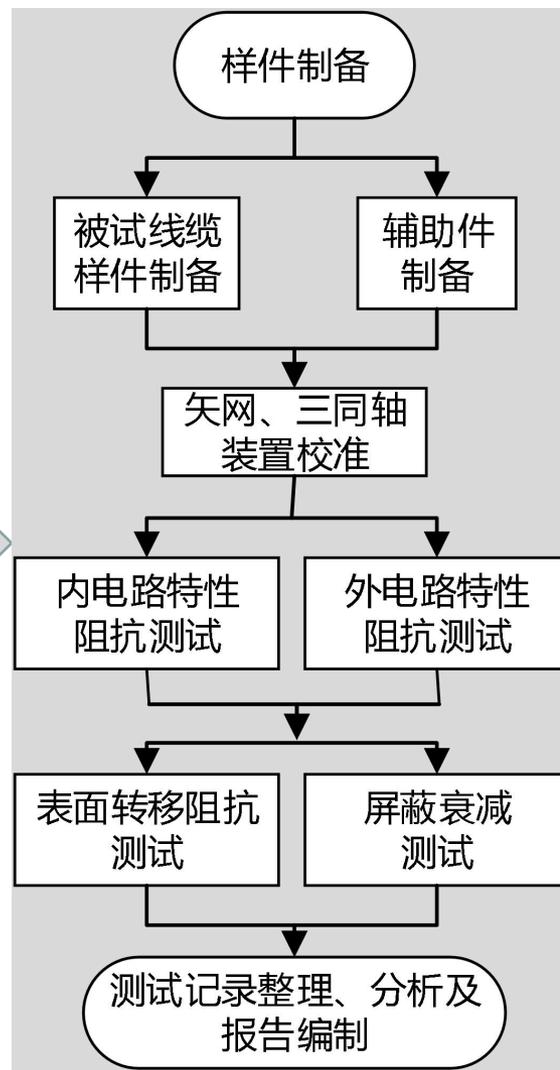
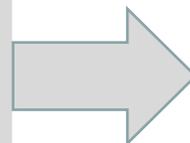
- ① 三同轴装置校准
- ② 矢量网络分析仪校准

### 三. 前置参数测试

- ① 内电路特性阻抗测试
- ② 外电路特性阻抗测试

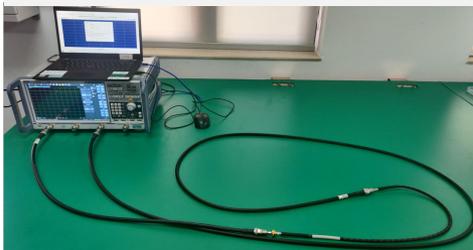
### 四. 正式测试

表面转移阻抗/屏蔽衰减



## 三、三同轴法

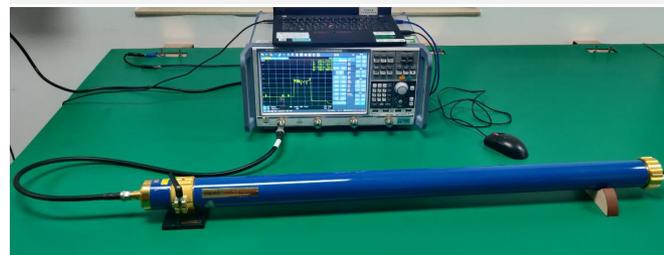
### Z<sub>T</sub>/a<sub>S</sub>测试前校准



### 三同轴内电路特性阻抗测试



### 三同轴外电路特性阻抗测试



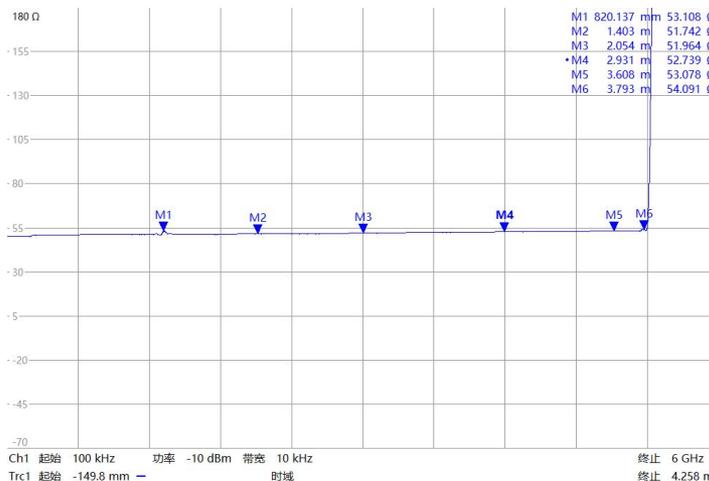
$$a_S = 10 \times \log_{10} \left| \frac{P_1}{P_{1,max}} \right| = 10 \times \log_{10} \left| \frac{P_1}{P_{2,max}} \times \frac{2 \times Z_S}{R} \right|$$

$$= Env \left[ -20 \times \log_{10} |S_{21}| + 10 \times \log_{10} |1 - r^2| + 10 \times \log_{10} \left| \frac{300 \Omega}{Z_1} \right| \right] - a_{att}$$

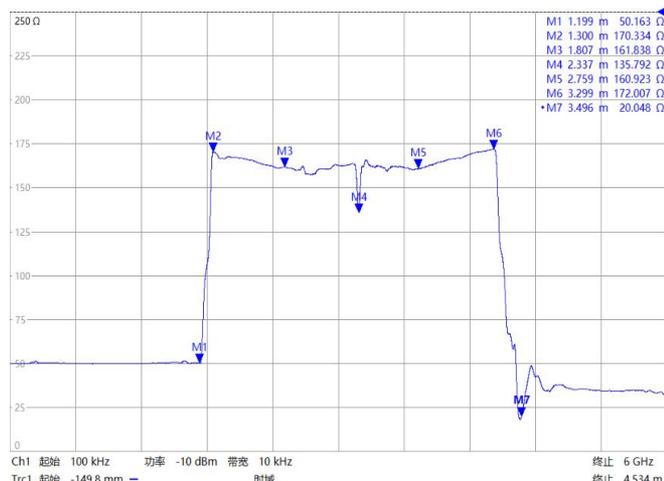
$$r = S_{11} = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0}$$

Z<sub>S</sub>=150 Ω      Z<sub>0</sub>: 网分系统阻抗

Z<sub>1</sub>: CUT的特性阻抗



### 内电路特性阻抗测试结果



### 外电路特性阻抗测试结果

### 正式试验前校准

## 报告提纲

01

研究背景及意义

02

屏蔽效能表征及标准

03

三同轴法介绍

04

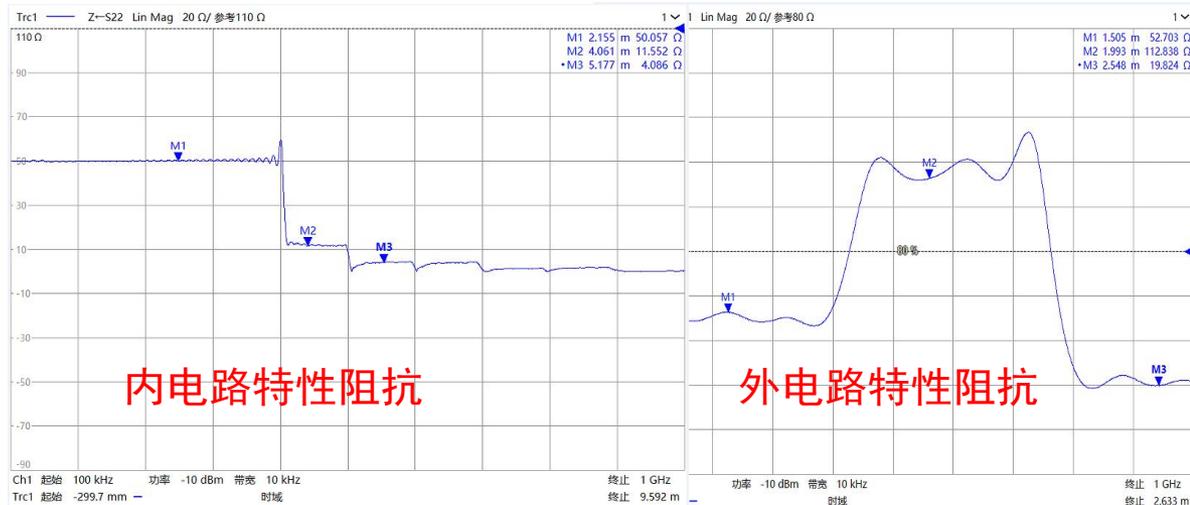
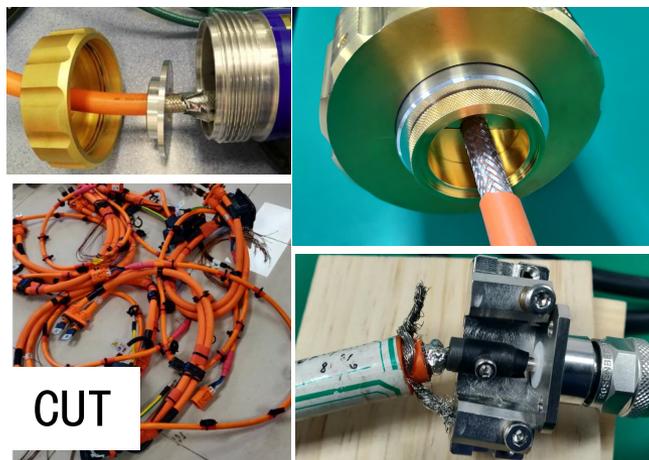
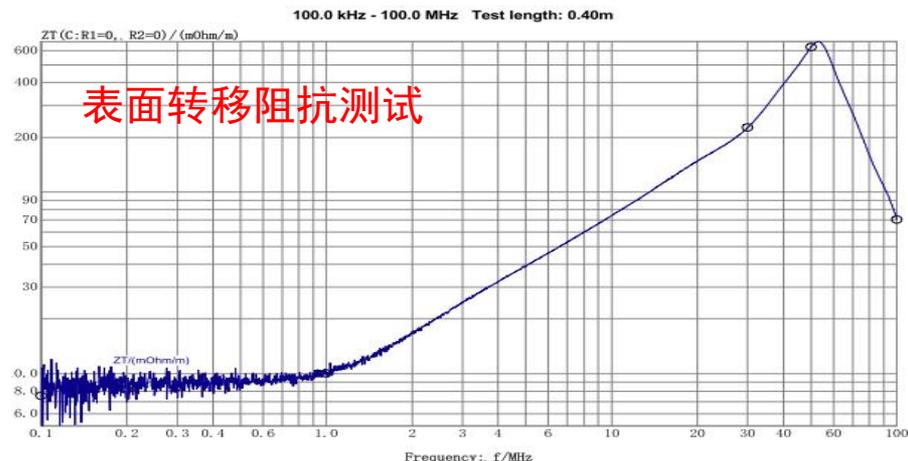
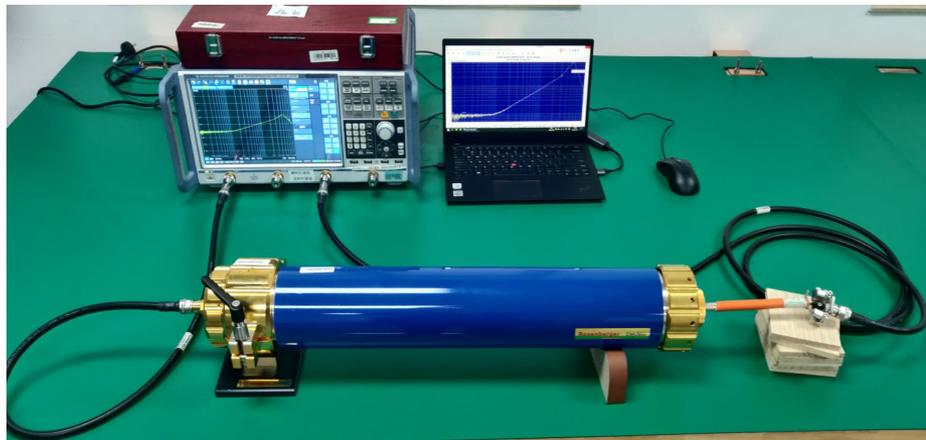
三同轴法屏蔽效能测试案例

05

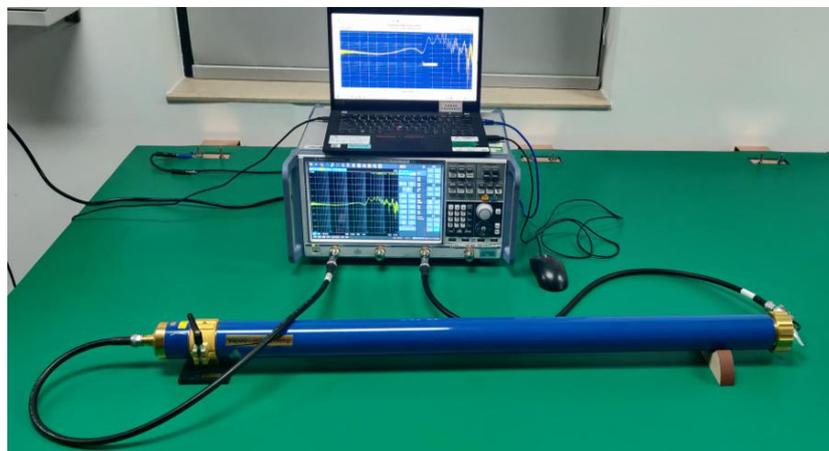
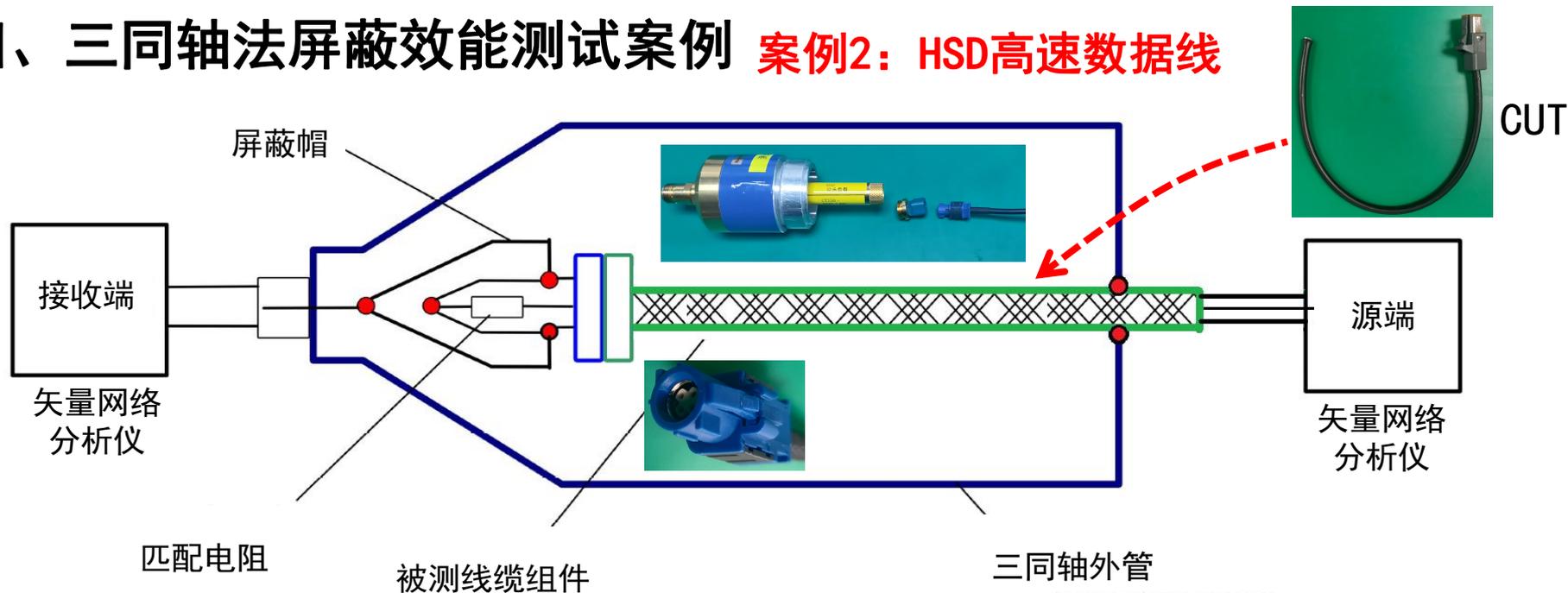
总结及未来研究方向

## 四、三同轴法屏蔽效能测试案例

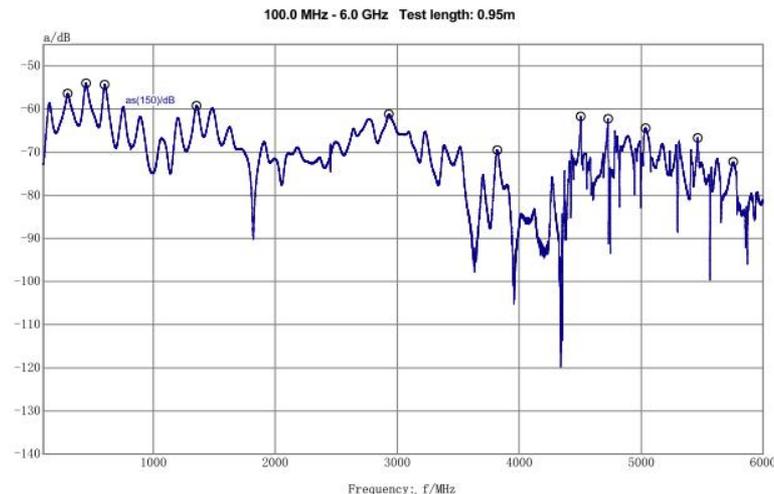
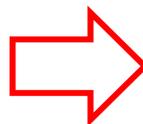
### 案例1：高压动力屏蔽线缆



## 四、三同轴法屏蔽效能测试案例 案例2：HSD高速数据线



屏蔽衰减  
测试结果



# 四、三同轴法屏蔽效能测试案例

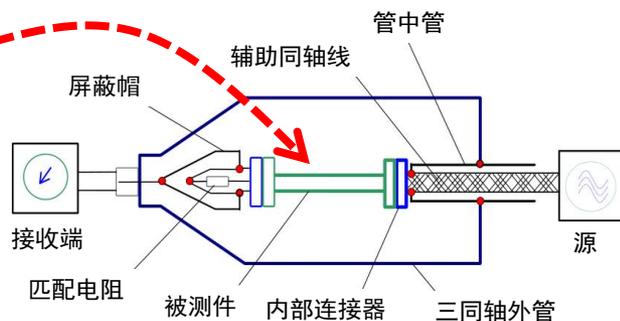
## 案例3: Fakra线缆

CUT

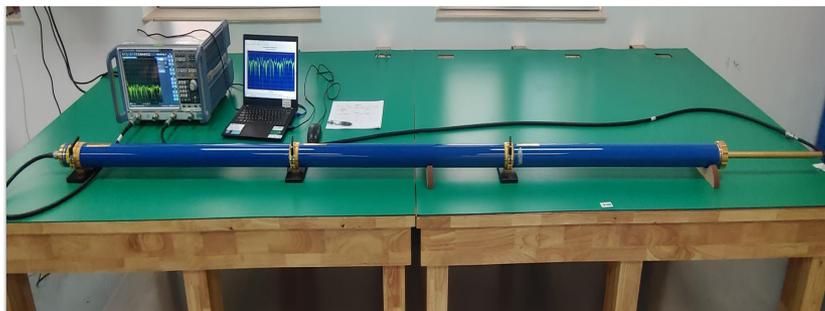


Fakra 屏蔽线

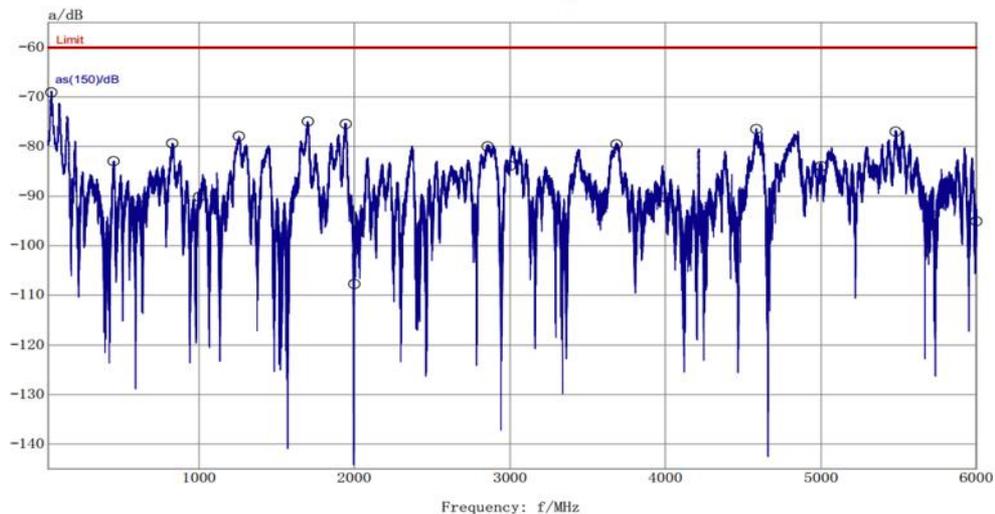
终端



Fakra 连接器

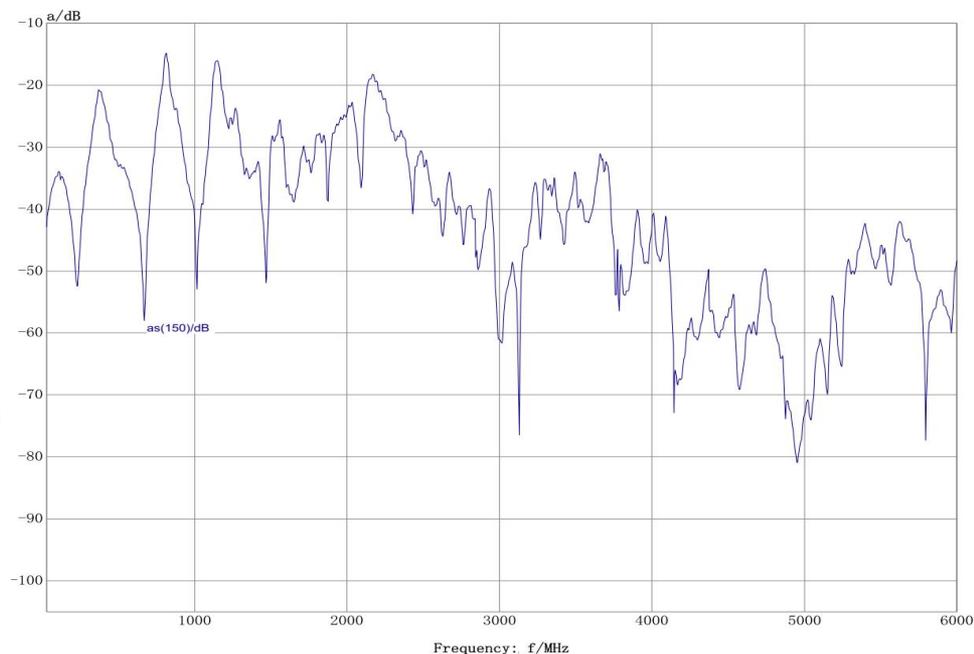
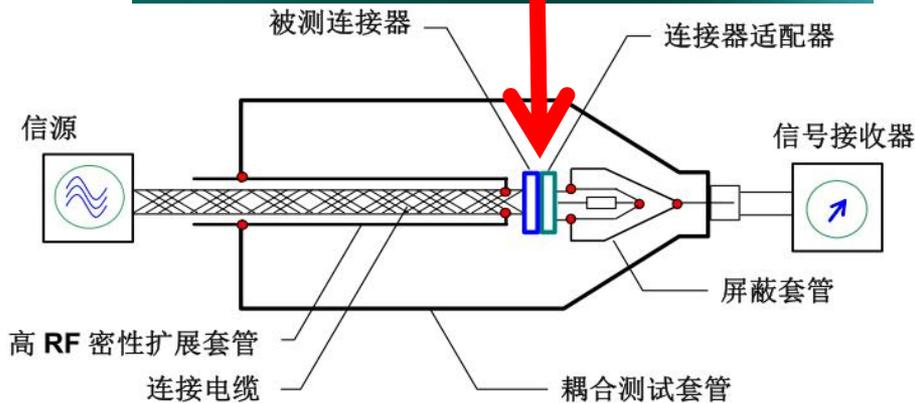
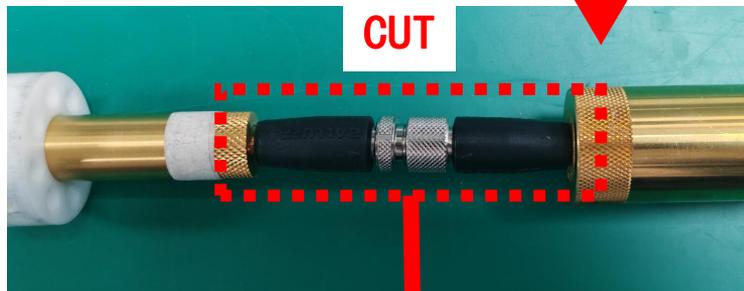
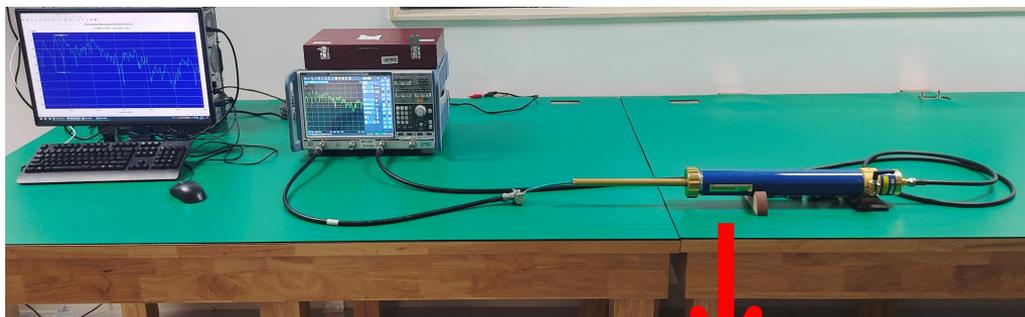


30.0 MHz - 6.0 GHz Test length: 2.76m



## 四、三同轴法屏蔽效能测试案例

### 案例4：以太网连接器



## 报告提纲

01

研究背景及意义

02

屏蔽效能表征及标准

03

三同轴法介绍

04

三同轴法屏蔽效能测试案例

05

总结及未来研究方向

## 五、总结及未来研究方向

### 三同轴法优点

- ❑ 一次布置即可获得 $Z_T$ 和 $a_S$ ;
- ❑ 测试灵敏度高: (125dB);
- ❑ 测试频率范围: 10kHz-8GHz;
- ❑ 测试过程无电磁辐射; 重复性好。

### 三同轴法缺点

- ❑ 试验夹具复杂;
- ❑ 样品制备繁琐;
- ❑ 阻抗不易匹配;
- ❑ 测试长度有限;
- ❑ 存在高阶模;
- ❑ 适用对象有限;
- ❑ 截止频率有限;
- ❑ 测试去嵌复杂。



通信线缆



动力线缆



连接器组件等

### 2. 未来研究方向

- 线缆连接器组件屏蔽效能变化研究, 即不同环境应力条件下对线缆组件屏蔽效能降级的影响, 如霉菌、盐雾、温度、湿热、振动等。
- 不同电搭接工艺线缆连接器组件屏蔽效能测评技术研究, 如分叉线缆等。

# 谢谢



工信部电子五所 邵鄂



15989243213



电磁兼容性设计、验证



shaoe@ceprei.biz



<https://www.ceprei.com/>