



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 17737.1—2000  
idt IEC 61196-1:1995

---

## 射 频 电 缆 第 1 部分：总规范—— 总则、定义、要求和试验方法

Radio-frequency cables  
Part 1: Generic specification—General,  
definitions, requirements and test methods

2000-12-11 发布

2001-06-01 实施

国家质量技术监督局 发布

## 目 次

前言 .....	Ⅱ
IEC 前言 .....	Ⅳ
1 范围 .....	1
2 引用标准 .....	1
3 定义 .....	2
3.1 国际电工词汇(IEV)定义 .....	2
3.2 其他定义 .....	2
4 质量保证 .....	5
5 材料和电缆结构 .....	5
5.1 总则 .....	5
5.2 外观检查 .....	5
5.3 尺寸测量 .....	5
5.4 电缆结构 .....	5
5.5 内导体 .....	5
5.6 介质 .....	6
5.7 外导体或屏蔽层 .....	6
5.8 护套 .....	6
5.9 铠装 .....	7
6 标准额定值和特性 .....	8
7 标识和标志 .....	8
7.1 电缆标识 .....	8
7.2 标签 .....	8
8 试验方法索引 .....	9
9 材料和电缆结构:试验 .....	10
9.1 椭圆度 .....	10
9.2 介质偏心度 .....	11
9.3 镀银层 .....	11
9.4 金属断裂后的抗拉强度和伸长率 .....	11
9.5 金属断裂时的抗拉强度和伸长率 .....	11
9.6 铜包金属的扭转试验 .....	12
10 机械和热特性 .....	12
10.1 介质和护套的附着力 .....	12
10.2 弯曲 .....	14
10.3 低温弯曲性能 .....	14
10.4 抗拉强度(纵向拉伸) .....	15

10.5	抗压性能 .....	15
10.6	介质的耐热流动性 .....	15
10.7	耐热冲击 .....	16
10.8	热性能(仅适用于半硬电缆) .....	16
10.9	尺寸稳定性 .....	16
10.10	耐磨性 .....	17
11	电气特性 .....	18
11.1	导体电阻 .....	18
11.2	绝缘电阻 .....	18
11.3	电容 .....	19
11.4	电容稳定性 .....	20
11.5	介质耐电压 .....	20
11.6	护套耐电压 .....	21
11.7	介质的局部放电 .....	21
11.8	特性阻抗 .....	21
11.9	相对传播速度(速比) .....	23
11.10	电气长度和相位延迟 .....	23
11.11	相位常数稳定性 .....	26
11.12	回波损耗(阻抗均匀性) .....	29
11.13	衰减常数 .....	32
11.14	衰减稳定性 .....	36
11.15	传输畸变 .....	36
11.16	脉冲回波损耗 .....	37
11.17	阶跃函数回波损耗 .....	39
11.18	采用快速傅利叶变换(FFT)频域测量脉冲/阶跃回波损耗 .....	39
11.19	额定功率 .....	39
12	屏蔽效率 .....	48
12.1	表面转移阻抗:线注入法(频域) .....	48
12.2	表面转移阻抗:三同轴法 .....	57
12.3	容性耦合导纳:电容法 .....	59
12.4	屏蔽衰减:吸收钳法 .....	62
12.5	电缆颤噪声电荷电平(机械感应噪声) .....	68
12.6	屏蔽衰减 测量达到和超过 3 GHz 的屏蔽衰减 $\alpha_s$ 的试验方法 .....	71
13	交货和储存 .....	76
14	柔软射频电缆表面转移阻抗和屏蔽衰减极限值指南 .....	76
14.1	总则 .....	76
14.2	电缆类别 .....	77
14.3	最大表面转移阻抗 $Z_T$ 极限值的推导 .....	77
14.4	最小屏蔽衰减极限值的推导 .....	78

## 前 言

本标准等同采用 IEC 61196-1:1995《射频电缆 第 1 部分:总规范——总则、定义、要求和试验方法》及其修定 1(1999-08)。

IEC 61196-1 中公式(25)、(68)等有误,本标准予以修正。

在 GB/T 17737《射频电缆》总标题下,包括若干部分:

GB/T 17737.1《第 1 部分:总规范 总则、定义、要求和试验方法》(idt IEC 61196-1:1995)(即本标准);

GB/T 17737.2《第 2 部分:聚四氟乙烯(PTFE)绝缘半硬射频同轴电缆分规范》(idt IEC 61196-2:1995);

GB/T 17737.3《第 3 部分:局域网用同轴电缆分规范》(idt IEC 61196-3:1998)(正在制定中);

GB/T 17737.4《第 4 部分:辐射电缆规范》(idt IEC 61196-4:1995)(将制定)。

本标准作为《射频电缆》的第 1 部分,是射频电缆的一个通用标准,它规定了射频电缆的总则、定义、要求和试验方法等,包括了 IEC 96-1:1988《射频电缆 第一部分:一般要求和测试方法》和 IEC 61196-1-1:1994《射频电缆 第 1 部分:总规范——第一篇:定义和要求》的所有内容,并在此基础上增加了大量的新试验方法。

我国已参照 IEC 60096-1:1988 或其前版制定了 GB/T 12269—1990《射频电缆总规范》、GB/T 4098.1~4098.10—1983《射频电缆试验方法》、GB/T 12792—1991《射频电缆阻抗均匀性测量方法》和 GB/T 9023—1988《射频同轴电缆屏蔽效率测量方法(转移阻抗法)》。等同 IEC 61196-1-1:1994《射频电缆 第 1 部分:总规范——第一篇:定义和要求》制定了 GB/T 17737.1—1999《射频电缆 第 1 部分:总规范 第一篇:定义和要求》。因此,理论上,本标准制定后,可代替上述所有国家标准。但由于本标准中有许多新方法在我国还有一段消化、吸收的过程,真正执行还需要一段时间,特别是本标准还有一些部分,如质量保证等还有待完善,为此本标准的还不能完全代替 GB/T 12269—1990,需与 GB/T 12269—1990 并行一段时间,待条件成熟后,本标准将自然代替 GB/T 12269—1990。

本标准的制定可代替上述其他国家标准,即:GB/T 4098.1~4098.10—1983、GB/T 12792—1991、GB/T 9023—1988、GB/T 17737.1—1999。

本标准由中华人民共和国信息产业部提出。

本标准由全国电子设备用高频电缆及连接器标准化技术委员会归口。

本标准起草单位:信息产业部电子工业标准化研究所。

本标准主要起草人:吴正平、王锐臻、汪祥兴、高文浩、张国菊。

## IEC 前言

1) IEC(国际电工委员会)是由各国家电工委员会(IEC 国家委员会)组成的世界范围性标准化组织。IEC 的目的是促进在电工电子领域标准化问题的国际合作。为此目的,除其他活动外,IEC 发布了国际标准。国际标准的制定由技术委员会承担,对所涉及内容关切的任何 IEC 国家委员会均可参加国际标准的制定工作。与 IEC 相联系的任何国际、政府和非官方组织也可以参加国际标准的制定。IEC 与国际标准化组织(ISO)根据两组织间协商确定的条件保持密切的合作关系。

2) IEC 在技术问题上的正式决议或协议,是由对这些问题特别关切的国家委员会参加的技术委员会制定的,对所涉及的问题尽可能地代表了国际上的一致意见。

3) 这些决议或协议,以推荐标准的形式供国际上使用,并在此意义上为各国家委员会所认可。

4) 为了促进国际上的统一,IEC 希望各国家委员会在本国条件许可的情况下,采用 IEC 标准文本为其国家标准。IEC 标准与相应国家标准之间的差异,应尽可能在国家标准中指明。

5) IEC 未制定使用认可标志的任何程序,当宣称某一产品符合相应的 IEC 标准时,IEC 概不负责。

国际标准 IEC 61196-1 由 IEC 第 46 技术委员会(通信设备和信号用电缆、电线、波导、连接器和附件)的第 46A 分技术委员会(同轴电缆)制定。

本规范文本以下列文件为依据

国际标准草案	表决报告	对国际标准草案的修改	表决报告
46A(CO)119	46A(CO)132	46A(CO)140	46A(CO)143
46A(CO)139	46A(CO)146		
46A(CO)159	46A(CO)168		

表决批准本规范的详细资料可在上表列出的表决报告中查阅。

# 中华人民共和国国家标准

## 射 频 电 缆

### 第 1 部分:总规范——

### 总则、定义、要求和试验方法

GB/T 17737.1—2000  
idt IEC 61196-1:1995

代替 GB/T 17737.1—1999  
GB/T 4098.1—4098.10—1983  
GB/T 12792—1991  
GB/T 9023—1988

Radio-frequency cables

Part 1: Generic specification—

General, definitions, requirements and test methods

## 1 范围

本规范适用于射频电缆。它规定了射频同轴电缆和屏蔽对称电缆的定义和要求,也规定了射频同轴电缆和对称电缆引用的试验方法。当有争议需指定某一方法作为基准方法时,应在相应电缆规范中指出。

## 2 引用标准

下列标准所包含的条文,通过在本标准中引用而构成本标准的条文。本标准出版时,所示版本均为有效。所有标准都会被修订,使用本标准的各方应探讨使用下列标准最新版本的可能性。

- GB/T 2951.1—1997 电缆绝缘和护套材料通用试验方法 第 1 部分:通用试验方法 第 1 节:厚度和外形尺寸的测量——机械性能试验(idt IEC 60811-1-1:1993)
- GB/T 2951.2—1997 电缆绝缘和护套材料通用试验方法 第 1 部分:通用试验方法 第 2 节:热老化试验方法(idt IEC 60811-1-2:1985)
- GB/T 2951.6—1997 电缆绝缘和护套材料通用试验方法 第 3 部分:聚氯乙烯混合料专用试验方法 第 1 节:高温压力试验——抗开裂试验(idt IEC 60811-3-1:1985)
- GB/T 2951.7—1997 电缆绝缘和护套材料通用试验方法 第 3 部分:聚氯乙烯混合料专用试验方法 第 2 节:失重试验——热稳定性试验(idt IEC 60811-3-2:1985)
- GB/T 2951.8—1997 电缆绝缘和护套材料通用试验方法 第 4 部分:聚乙烯和聚丙烯混合料专用试验方法 第 1 节:耐环境应力开裂试验——空气热老化后的卷绕试验——熔体指数测量方法——聚乙烯中炭黑和/或矿物质填料含量的测量方法(idt IEC 60811-4-1:1985)
- GB/T 17650.1—1998 取自电缆或光缆的材料燃烧时释出气体的试验方法 第 1 部分:卤酸气体总量的测定(idt IEC 60754-1:1994)
- IEC 60028:1925 铜电阻国际标准
- IEC 60050 国际电工词汇(IEV)
- IEC 60068-1:1988 环境试验——第 1 部分:总则和指南
- IEC 60068-2-1:1990 环境试验——第 2 部分:各种试验——试验 A 寒冷
- IEC 60068-2-2:1974 环境试验——第 2 部分:各种试验——试验 B 干热
- IEC 60068-2-14:1984 环境试验——第 2 部分:各种试验——试验 N 温度变化

- IEC 60068-2-20:1979 环境试验——第2部分:各种试验——试验T 锡焊
- IEC 60096-1:1986 射频电缆——第1部分:一般要求和测量方法  
更改单2(1993)
- IEC 60304:1982 低频电缆和电线绝缘的标准颜色
- IEC 60332-1:1993 电缆燃烧试验 第1部分:单根绝缘电线或电缆的垂直燃烧试验
- IEC 60332-2:1989 电缆燃烧试验 第2部分:单根铜芯绝缘细电线或电缆的垂直燃烧试验
- IEC 60332-3:1992 电缆燃烧试验 第3部分:成束电线或电缆的燃烧试验
- IEC 60468:1974 金属材料电阻率测量方法
- IEC 60673:1980 低频小型设备用实芯或绞合导体氟化物绝缘单芯导线
- IEC 60753:1982 聚烯烃绝缘通信电缆用铝导线
- ISO 6892:1984 金属材料——拉力试验
- CISPR 11:1990 工业、科学和医用(ISM)射频设备电磁干扰特性的限制和测量方法
- ITU-T:1984 电缆测量方法纲要

### 3 定义

本规范采用下列定义

#### 3.1 国际电工词汇(IEV)定义

本规范采用 IEC 60050 相应章节的定义术语。

#### 3.2 其他定义

除 IEC 60050 中给出的定义外,下列定义也适用。

##### 3.2.1 空气绝缘电缆 air-spaced cables

除了以规则的间距放置在内导体上的绝缘垫片或螺旋形地固定在内导体上的带和(或)绳外,其他介质全部为空气的电缆。这种绝缘类型的特点是在绝缘垫片之间从内导体到外导体(或屏蔽层)可以不通过固体介质层。

##### 3.2.2 衰减畸变 attenuation distortion

射频电缆的衰减畸变是在给定的频率范围内其衰减频率曲线与一根均匀电缆的均匀响应曲线之间的畸变。

##### 3.2.3 编织公式 braiding formulae

编织公式中所使用的变量如表1所示。

表1 编织公式中的变量

变 量	说 明
$d$	编织线直径或编织带厚度
$D_m$	编织层的平均直径,即介质外径+2.25 $d$
$L$	编织节距
$N$	每锭中导线根数
$W$	对于带子编织, $W$ 为带子宽度 对于圆线编织, $W$ 为 $N \times d$
$n$	锭子总数

##### 3.2.3.1 编织角( $\beta$ ) braid angle ( $\beta$ )

编织角  $\beta$  是指电缆纵轴与编织线所绕的螺旋线切线间的夹角。

$$\beta = \arctan \frac{(\pi D_m)}{L}$$

##### 3.2.3.2 编织系数( $K_L$ ) lay factor ( $K_L$ )

编织系数是指编织线的螺旋长度与编织电缆长度之比。

$$K_L = \sqrt{1 + \pi^2 \cdot \frac{D_m^2}{L^2}} = \frac{1}{\cos \beta}$$

### 3.2.3.3 填充系数( $q$ ) filling factor ( $q$ )

填充系数的定义为:

$$q = \frac{n \cdot W}{2\pi \cdot D_m} \sqrt{1 + \pi^2 \cdot \frac{D_m^2}{L^2}}$$

也可表示为:

$$q = \frac{nW}{2L \sin \beta}$$

### 3.2.3.4 编织密度( $K_c$ ) coverage factor ( $K_c$ )

编织密度与填充系数的关系为:

$$K_c = 2q - q^2$$

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

正在考虑中。

### 3.2.5 偏心率 eccentricity

偏心率是指电缆截面上绝缘厚度的变化量,定义为某一直径上两绝缘厚度的最大差值与该直径的百分比。

### 3.2.6 群延迟畸变 group-delay distortion

群延迟定义为给定频率范围内相位/频率曲线的导数,如果相位特性呈线性,则群延迟为常数。

群延迟畸变定义为群延迟/频率曲线与电气均匀电缆的群延迟(它与频率无关)的畸变。

### 3.2.7 局部不均匀性 local irregularities

局部不均匀性定义为:连接在一起的电缆两端阻抗之差,它们可能会由于接点处的缺陷或者电缆局部损坏点而增大。

### 3.2.8 阻抗均匀性的测量 measurement of the regularity of impedance

阻抗均匀性对用四端法(包括频域法和时域法)直接测量传输特性有影响。

用频域法测量时,传输畸变应按 11.15 的规定进行测量。

用时域法测量时,正向回波(forward echo)可按 ITU-T 电缆测量方法纲要(1984)中所规定的方法进行测量。

阻抗均匀性对用两端法(包括频域法或时域法)间接测量传输特性有影响。

用频域测量时,反射损耗应按 11.12 的规定测量。

用时域测量时,脉冲反射损耗应按 11.16 的规定测量。

### 3.2.9 标称穿透电容 normalized breakthrough capacitance

正在考虑中。

### 3.2.10 椭圆度 ovality

绝缘或电缆横截面的椭圆度定义为两正交直径的最大差值与该两直径平均值的百分比。

### 3.2.11 周期不均匀性 periodic irregularities

周期不均匀性是由制造或电缆结构偏差造成的电缆等距离物理变形所引起的。即使这种不均匀性很小,也会在离散频率点影响传输性能或在数字信号检测中显著地增大输入噪声。

### 3.2.12 相位畸变 phase distortion

相位畸变定义为对于给定的频率范围内相位/频率特性曲线相对于电气均匀一致电缆的相位/频率特性曲线的偏差。

### 3.2.13 额定功率 power rating

电缆的额定功率定义为在任何规定频率和环境温度下能连续工作而既不超过最高允许的工作电压



也不超过内导体的最高允许温度时的输入功率。在这些条件下,电缆应端接与其特性阻抗一致的负载。

### 3.2.14 随机不均匀性 random irregularities

阻抗的随机不均匀性没有再现的特点。在按常规制造的电缆中,这些不均匀性具有明显的统计特点。此不均匀性影响传输的宽频特性。

### 3.2.15 阻抗均匀性 regularity of impedance

局部特性阻抗的不均匀性可能会严重影响传输特性。此不均匀性通常分为三种类型:

- 随机不均匀性
- 周期不均匀性
- 局部不均匀性

### 3.2.16 屏蔽衰减 screening attenuation

正在考虑中。

### 3.2.17 屏蔽效率 screening effectiveness

正在考虑中。

### 3.2.18 半空气绝缘电缆 semi-airspaced cables

一种介质为泡沫聚合物或绝缘管把导体固定在其中心的塑料空气结构的电缆。

此种绝缘类型的特点是从内导体到外导体(或屏蔽层)至少通过一层固体介质。

### 3.2.19 实心绝缘电缆 solid dielectric cables

内导体和外导体(或屏蔽)之间的空间全部由实芯介质填充的电缆。介质可以是均一的,也可以是组合的。后者由两种或两种以上不同性质的材料同心粘合而成。

### 3.2.20 试验程序 testing procedures

#### 3.2.20.1 型式试验 type test

产品的型式试验是在一定数量的代表某类产品的试样上进行的一系列完整试验。其目的是确定制造厂生产的产品是否满足规范要求。

#### 3.2.20.2 型式批准 type approval

型式批准是由合适的受权机构(采购方自己或其委托单位)确定某制造厂生产适当数量的满足规范要求的某类产品的能力。

#### 3.2.20.3 推荐的验收试验 recommended acceptance tests

验收试验是根据采购方与制造厂之间的协议为确定产品能否交货所进行的试验。

推荐的验收试验是:

- a) 样本大小;
- b) 试验的选取;
- c) 试样应满足从规范中所选取试验的要求的程度。

注:有争议时,IEC 标准试验方法应用作验收试验。

#### 3.2.20.4 制造厂试验 factory tests

制造厂试验是制造厂为证明其产品是否符合规范要求所进行的试验。

#### 3.2.20.5 中位值 median value

当得到一些试验结果并已按升序或降序排列,如果获得值的数目为奇数,则中位值是中间的那个值。如果获得的数目为偶数,则中位值是中间两个数值的平均值。

### 3.2.21 转移导纳 transfer admittance

正在考虑中。

### 3.2.22 转移阻抗 transfer impedance

转移阻抗定义为沿电缆屏蔽层测得的电压与电缆内导体通过的电流之比,或反之。

### 3.2.23 传输畸变 transmission distortion

传输畸变是由于随机和周期不均匀性造成射频电缆特性阻抗的不均匀所引起的。主要是由于制造或电缆结构的变化引起电缆等距离的小物理变形因而引起周期不连续性造成的。其结果造成在基频和与周期不连续性的间距相应的谐振点传输信号损失。

传输畸变可用时域法或频域法测量。用时域法测量时,传输畸变通过 ITU-T 电缆测量方法纲要(1984)中所述的回波测量确定的。用频域法测量时,传输畸变是按照衰减畸变、相位畸变及群延迟畸变测量的。

### 3.2.24 速比(相对传播速度) velocity ratio (relative propagation velocity)

速比定义为在规定的试验频率下电缆的传播速度与自由空间中的速度之比。

## 4 质量保证

正在考虑中。

## 5 材料和电缆结构

### 5.1 总则

除非另有规定,所有的物理测量均应在 IEC 60068-1:1988 第 5 章规定的试验的标准大气条件下进行。

### 5.2 外观检查

应进行外观检查以确保在电缆上没有可见的缺陷。进行检查时应用正常视力或校正视力,而不能用放大镜。

### 5.3 尺寸测量

厚度和直径的测量应按照 GB/T 2951.1—2000 第 8 章的规定进行。

### 5.4 电缆结构

电缆结构应符合 5.5~5.9 以及相应电缆规范的规定。

### 5.5 内导体

#### 5.5.1 导体材料

导体应由质量一致的、没有缺陷的软铜线制成。铜的特性应符合 IEC 60028 的规定。

导体也可以是铜包钢线。铜层应连续并应粘附在钢导体上,截面应是圆形的,使得对于 30%和 40%的标称导电率等级的铜包钢线,其最大电阻分别不超过 IEC 60028 规定的铜导体规定值的 3.5 倍和 2.8 倍。当按 9.5 规定的方法试验时,其断裂伸长率应不小于 1%。对于 40%和 30%标称等级的铜包钢线,其最小抗拉强度应分别为 760 N/mm<sup>2</sup>和 880 N/mm<sup>2</sup>。

导体也可以是铜包铝线。铜层应连续并应粘附在铝导体上,其截面应是圆形的,其最大电阻不超过 IEC 60028 规定的铜导体规定值的 1.8 倍。当按 9.4 规定的方法进行拉伸试验时,伸长率应不小于 10%。

导体也可以由符合 IEC 60753 规定的铝线制成。

#### 5.5.2 导体表层

导体表层应符合相应电缆规范的规定。导体可以是裸的、镀锡或有银覆盖层。

##### 5.5.2.1 镀锡层

镀锡层应按 IEC 60673:1980 中 3.1.3 的规定试验。

##### 5.5.2.2 银覆盖层厚度

正在考虑中。

#### 5.5.3 内导体

内导体的结构和材料应在相应电缆规范中规定。

当内导体是单线或管状结构时,在最后拉制后应无接头。

绞合铜线内导体的单线接头应采用冷压焊、非酸性焊剂铜焊或银焊,焊后单线直径应不增大,并无凸起。

每一单线接头与任何其他单线接头之间的距离应不小于 0.3 m。

除了无机绝缘电缆外,从成品电缆上取下的铜单线或铜管样品应无明显的变色,如果导体是镀锡的,其上应无焊剂和清洗物。

#### 5.5.4 可焊性

易焊导体的可焊性应按 IEC 60068-2-20:1979 中 4.6 规定的焊槽法进行检查。应使用非活性助焊剂。

#### 5.6 介质

各电缆要求的介质类型应在相应电缆规范中规定。介质外径、椭圆度和偏心率应在相应规范中给出。

当要求时,介质材料的抗拉强度和断裂伸长率应按 GB/T 2951.1 的规定试验。热老化应按 GB/T 2951.2 的规定进行试验。

#### 5.6.1 偏心率

介质的偏心率应通过测量缆芯的横截面来确定。

测量应按 9.2 规定的试验方法进行。

偏心度的最大值应符合电缆规范的规定。

#### 5.6.2 椭圆度

椭圆度应通过测量缆芯横截面来确定。

应按 9.1 规定的方法确定。

椭圆度应不超过相应电缆规范的规定值。

#### 5.7 外导体或屏蔽层

外导体或屏蔽层的结构和材料应在相应电缆规范中规定。

外导体或屏蔽层可以是下述型式之一或是它们的任意组合。

a) 裸的或镀涂的导线或带子编织层。编织线或编织带的接点应是焊接、拧接或编成的,不允许编织层整体接续。编织层应均匀,编织角及填充系数应在相应电缆规范中规定。

b) 裸的或镀涂的导线或带子在缆芯上绕成一连续而封闭的屏蔽,其上可有、亦可没有金属扎线。

c) 一种适合的导电材料管。

d) 一层纵包金属层或金属化膜,其重叠率约为 20%~25%。

e) 上述各项的组合,外加损耗型传导层或磁性中间层。

f) 两层金属化带或薄膜的组合,其间有一层与金属层相接触的铜线或镀锡铜线。两层金属化带或薄膜纵向或绕包在同轴电缆的介质上。

#### 5.7.1 中间护套/中间层

当在外导体和屏蔽层之间需要有中间层时,中间护套应由塑料制成。

中间护套的结构应在相应电缆规范中规定。

如果采用聚乙烯,它应是低密度或中密度的。适用时,应满足 GB/T 2951.1、GB/T 2951.2 及 GB/T 2951.8 的要求。

如果采用其他材料,其要求应在相应电缆规范中规定。

中间护套应无针眼、裂纹、气泡和其他缺陷,其表面应均匀。

#### 5.7.2 半导体层

正在考虑中。

#### 5.8 护套

除非相应电缆规范另有规定,电缆的外护套应由塑料制成。

当采用聚乙烯或聚丙烯时,应按 GB/T 2951.8 的规定进行试验。除非另有规定,当允许采用着色聚乙烯或聚丙烯作护套材料时,其碳黑含量应为  $2.5\% \pm 0.5\%$ 。

当采用聚氯乙烯时,应按 GB/T 2951.6 和 GB/T 2951.7 的规定进行试验,允许选用一层中间层作为防止增塑剂迁移至介质的阻挡层。当有要求时,着色聚氯乙烯护套应符合 IEC 60304 的规定。

护套材料的抗拉强度和断裂伸长率应按 GB/T 2951.1 的规定试验,热老化应按 GB/T 2951.2 的规定进行。

#### 5.8.1 护套厚度和外径

护套厚度和总外径应按 GB/T 2951.1—1997 第 8 章的规定进行测量。

#### 5.8.2 防潮层

当需要防潮层时,应在护套内加一层金属带或连续的金属阻挡层。

外导体的外面应先纵包或绕包一层由不吸湿带组成的绝缘层,它作为涂有聚合物的铝带纵包层(聚合物涂层在外)的衬垫。对于最大外径等于或小于 12 mm 的电缆,铝带的最小厚度为 0.075 mm;对于最大外径大于 12 mm 的电缆,铝带的标称厚度为 0.15 mm。护套应粘结在铝带外面的聚合物涂覆层上。

#### 5.8.3 椭圆度

椭圆度应通过测量电缆样品的横截面来确定。并按 9.1 规定的测量方法进行确定。

椭圆度应不超过相应电缆规范的规定值。

#### 5.8.4 燃烧性

当相应电缆规范有要求时,电缆成品耐燃烧的能力应按 IEC 60332-1、IEC 60332-2 和 IEC 60332-3 规定的试验方法确定。

#### 5.8.5 燃烧时的腐蚀性产物

当规定时,从电缆成品样品上取出的聚合材料燃烧时所逸出的卤素气体量应按 GB/T 17650.1 的规定确定。

每克被测材料逸出的卤酸量应不超过 5 mg。

#### 5.9 铠装

电缆铠装应在相应电缆规范中规定。

钢线或铝线编织层的编织密度应不小于 80%,钢线的抗拉强度应不小于  $340 \text{ N/mm}^2$ ,铝线的抗拉强度应不小于  $125 \text{ N/mm}^2$ 。

当绕包一层钢带时,垂直于带边测量,绕包间隙不大于 4 mm。当绕包一层以上的钢带时,每层的绕包间隙应不大于带宽的  $1/3 \sim 1/2$ 。较上层钢带应完全覆盖其下层钢带的绕包间隙。

钢带的厚度应近似为 0.1 mm,绕包时,其搭接应不小于 25%。钢线或钢带应镀锌。铝编织层应有防锈保护。

注:铠装层的具体结构和尺寸应根据所能预计的危害对各种不同情况加以规定。表 2 给出了适合于一些设定危害场所的典型结构。

表 2 防危害铠装层

危 害	适用的典型结构示例
磨损、粗糙场合	钢丝或铝合金线编织
拉伸应力	非金属加强件、圆钢丝或扁平钢线绕包
压缩应力	两层钢带绕包
啮齿动物破坏	单层钢带绕包
虫食	单层薄黄铜带绕包

## 6 标准额定值和特性

每种电缆适用的额定值和特性应在相应电缆规范中给出。

## 7 标识和标志

### 7.1 电缆标识

电缆应由护套标志或线标志来识别。

#### 7.1.1 护套标志

要求时,电缆应沿其长度方向永久性地标出制造日期、制造厂或其代号。两相邻标志间的空白间隔应不超过 500 mm。

符合 IEC 标准规定的射频同轴电缆应采用型号表示,表示方法如下:

- a) IEC 标准编号(××);
- b) 字母“IEC”;
- c) 额定特性阻抗值;
- d) 介质外径近似值(mm);
- e) 序号。

例:阻抗为 50 Ω,介质外径为 7.25 mm,且作为具有这些特性的第一种电缆,表示为:

×× IEC 50-7-1

#### 7.1.2 线标志

要求时,应在电缆的外护套内放两根线。一根不溶于丙酮并按国家要求着色的线表示制造厂。一根能溶于丙酮并按表 3 规定着色的线表示制造年份。

表 3 表示制造日期的线标志

制造日期	线状标志颜色
1994	绿/红
1995	黑/白
1996	黑/红
1997	白/红
1998	黄/蓝
1999	黄/绿
2000	黄/黑

### 7.2 标签

在每段电缆成品上系的标签或在线盘侧板的外表面上应标出下列内容:

- a) 电缆的型号;
- b) 制造单位或代号;
- c) 制造日期;
- d) 电缆长度(m)。

## 8 试验方法索引

	特 性	本标准	其他标准	
		分条款	GB 或 IEC 号	条款号
8.1.1	材料和电缆结构			
8.1.1.1	外观检查	5.2	—	—
8.1.1.2	尺寸	5.3	GB/T 2951.1	8
8.1.1.3	椭圆度	9.1	—	—
8.1.1.4	介质偏心度	9.2	—	—
8.1.1.5	镀银层	9.3	IEC 60673	附录 A
8.1.1.6	碳黑含量	—	GB/T 2951.8	11
8.1.1.7	卤酸气体的逸出	—	GB/T 17650.1	—
8.1.1.8	氧指数	—	—	—
8.1.1.9	PVC 的失重	—	GB/T 2951.7	8
8.1.1.10	金属断裂后的抗拉强度和伸长率	9.4	ISO 6892	—
8.1.1.11	金属断裂时的抗拉强度和伸长率	9.5	—	—
8.1.1.12	铜包金属的扭转试验	9.6	—	—
8.1.1.13	塑料的抗拉强度和伸长率	—	GB/T 2951.1	—
8.1.1.14	可焊性	—	IEC 60068-2-20	4.6
8.1.2	机械和热特性			
8.1.2.1	介质附着力	10.1	—	—
8.1.2.2	弯曲	10.2	—	—
8.1.2.3	低温弯曲性能	10.3	—	—
8.1.2.4	电缆的抗拉强度(纵向拉伸)	10.4	—	—
8.1.2.5	抗压性能	10.5	—	—
8.1.2.6	介质的耐热流动性	10.6	—	—
8.1.2.7	耐热冲击	10.7	—	—
8.1.2.8	热性能(仅适用于半硬电缆)	10.8	—	—
8.1.2.9	尺寸稳定性	10.9	—	—
8.1.2.10	耐磨性	10.10	—	—
8.1.3	耐环境影响			
8.1.3.1	耐环境应力开裂	—	GB/T 2951.8	8
8.1.3.2	单根电缆的垂直燃烧	—	IEC 60332-1	—
8.1.3.3	成束电缆的燃烧	—	IEC 60332-3	—
8.2	电气特性			
8.2.1	导体电阻	11.1	IEC 60468	6
8.2.2	绝缘电阻	11.2	—	—
8.2.3	电容	11.3	—	—
8.2.4	电容稳定性	11.4	IEC 60068-2-14	—
8.2.5	介质耐电压	11.5	—	—
8.2.6	护套耐电压	11.6	—	—
8.2.7	介质的局部放电	11.7	—	—

	特 性	本标准	其他标准	
		分条款	GB 或 IEC 号	条款号
8.2.8	平均特性阻抗	11.8	—	—
8.2.9	相对传播速度(速比)	11.9	—	—
8.2.10	电气长度和相位延迟	11.10	—	—
8.2.11	相位常数稳定性	11.11	—	—
8.2.12	回波损耗(阻抗均匀性)	11.12	—	—
8.2.13	衰减常数	11.13	—	—
8.2.14	衰减稳定性	11.14	—	—
8.2.15	传输畸变	11.15	—	—
8.2.16	脉冲回波损耗	11.16	—	—
8.2.17	阶跃函数回波损耗	11.17	—	—
8.2.18	采用快速傅利叶变换(FFT)频域测量脉冲/阶跃函数回波损耗	11.18	—	—
8.2.19	额定功率	11.19	—	—
8.3	屏蔽效率			
8.3.1	表面转移阻抗:线注入法(频域)	12.1	—	—
8.3.2	表面转移阻抗:三同轴法	12.2	—	—
8.3.3	容性耦合导纳:电容法	12.3	—	—
8.3.4	屏蔽衰减:吸收钳法	12.4	—	—
8.3.5	机械感应噪声	12.5	—	—

## 9 材料和电缆结构:试验

### 9.1 椭圆度

#### 9.1.1 原理

电缆的椭圆度是由测量电缆试样横截面上两个正交的直径来确定的。

#### 9.1.2 试验设备

当测量的厚度小于 0.5 mm 时,应使用测量显微镜,其分辨率为 0.01 mm,并可估计到小数点后第三位。

也可用放大倍数为 10 倍以上的投影测量仪来测量。但有争议时,应采用测量显微镜来测量。

#### 9.1.3 试样制备

从电缆成品上至少相隔 100 mm 截取三根试样。每根试样的两端应切平并仔细地清理毛口。

#### 9.1.4 程序

对每一横截面测量两次电缆外径,所测量的直径应相互垂直。

每次测量时,要适当选择位置,使两直径既保持相互垂直,又能给出它们之间的最大差值。

#### 9.1.5 结果表示

椭圆度用下述公式计算:

$$\text{椭圆度} = \frac{2(D_1 - D_2)}{D_1 + D_2} \times 100(\%) \quad \dots\dots\dots(1)$$

式中:  $D_1$ ——较大的直径实测值,mm;

$D_2$ ——较小的直径实测值,mm。

三根试样椭圆度的平均值定义为电缆的椭圆度。

### 9.1.6 要求

椭圆度应符合相应电缆规范的规定。

## 9.2 介质偏心度

### 9.2.1 原理

介质偏心度是由测量电缆试样横截面上的绝缘厚度来确定的。

### 9.2.2 试验设备

当测量的厚度小于 0.5 mm 时,应使用测量显微镜,其分辨率为 0.01 mm,并可估计到小数点后第三位。

也可用放大倍数为 10 倍以上的投影测量仪来测量。但有争议时,应采用测量显微镜来测量。

### 9.2.3 试样制备

从电缆成品上至少相隔 100 mm 截取三根试样,应去除电缆的外围部分直到介质芯子为止,试样两端应切平并仔细地清理毛口。

### 9.2.4 程序

为了确定最小径向厚度的位置,应记下通过导体中心的直径上的两个径向绝缘厚度。应测量绝缘的最大、最小厚度以及该处的绝缘外径。

### 9.2.5 结果表示

试样的偏心度应用下述公式计算:

$$\text{偏心度} = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{D} \times 100(\%) \quad \dots\dots\dots(2)$$

式中:  $T_{\max}$ ——绝缘的最大径向厚度,mm;

$T_{\min}$ ——绝缘的最小径向厚度,mm;

$D$ ——绝缘外径,mm。

介质偏心度定义为三根试样偏心度的平均值。

### 9.2.6 要求

偏心度应符合相应电缆规范的规定。

## 9.3 镀银层

### 9.3.1 原理

本试验通过把镀银导体浸入化学溶液的方法来发现镀银层中的小孔。

### 9.3.2 程序

试验应按 IEC 60673:1980 中的附录 A 的规定进行。

### 9.3.3 要求

如试验结束未发现黑色斑点,就可认为镀银层无小孔洞。离导体端头约 10 mm 以内的黑色斑点不予考虑。

如果一个试样失效,应另取三个试样作试验,并且不允许失效。

## 9.4 金属断裂后的抗拉强度和伸长率

### 9.4.1 原理

本试验确定实心导体的最大负载和塑性伸长。

### 9.4.2 程序

应按 ISO 6892 规定的方法对试样进行试验,夹具的分离速度为 100 mm/min $\pm$ 20 mm/min。

### 9.4.3 要求

断裂后的抗拉强度和伸长率应符合相应电缆规范的规定。

## 9.5 金属断裂时的抗拉强度和伸长率

### 9.5.1 原理



本试验确定低伸长率(约为1%)的实心导体在断裂时的伸长率。

### 9.5.2 试验设备

应使用伸长计或其他适合于测量伸长率的设备,其标具长度应为250 mm。该设备应具有不低于0.25 mm的游标分辨率。

### 9.5.3 程序

试样应固定于试验机的夹具上,加上负载,其值为断裂负载最小规定值的10%。伸长计或其他适当的设备应安装于试样上以测量250 mm范围内的伸长。

在试样上加上拉伸负载时,应观察试样的伸长,并记下断裂发生时的读数,它即为试样的伸长量。

夹具的分离速度应不大于100 mm/min。

### 9.5.4 结果表示

导体断裂伸长率用伸长量与试样原始长度的百分比来表示。

与夹具或伸长计夹头相距25 mm之内发生断裂的试验无效。

### 9.5.5 要求

抗拉强度和伸长率的值应符合5.5的规定。

## 9.6 铜包金属的扭转试验

### 9.6.1 原理

本试验检查导体经扭转至损坏以后的表面状况,以显示出其上是否存在固有缺陷。

### 9.6.2 程序

将一段导线以较小的拉力夹于两个夹具之间,两夹具分离间距等于该试样标称直径的100倍。将一只夹具固定,另一只夹具则以15圈/min的速率进行扭转,所有扭转均应在同一方向上进行。试样应扭转至损坏。

导体的断裂端应用正常视力或不带放大的矫正视力进行检查。

### 9.6.3 要求

导线在断裂前应至少能承受20圈扭转。

导线表面应不显现任何缝隙、相当大的凹痕或开裂,以表明其上不存在固有缺陷。铜层应与母体金属脱离。

## 10 机械和热特性

### 10.1 介质和护套的附着力

#### 10.1.1 原理

本试验使用拉力机来确定绝缘对内、外导体以及护套对外导体的附着力。

#### 10.1.2 试样制备

从电缆成品上截取至少300 mm长的二根试样,除非相应电缆规范另有规定,每根电缆试样应按图1a或1b或1c来制备。

剥头应十分仔细。

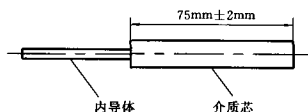


图 1a 柔软电缆剥头

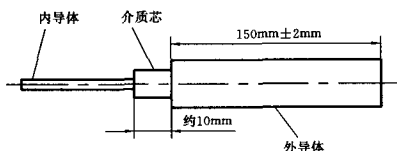


图 1b 半硬电缆剥头

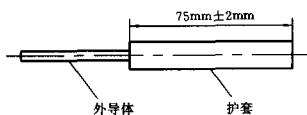


图 1c 护套剥头

### 10.1.3 程序

将试样装入拉力机,试验夹具如图 2a、2b 或 2c 所示。

试验板上小孔的直径应比内导体直径、介质外径、或外导体直径大  $0.10\text{ mm} \pm 0.03\text{ mm}$ 。

将内导体、介质芯子或外导体穿过试验板上的小孔,用稳定增加的力以不大于  $100\text{ mm/min}$  的速度拉拽,应避免突然拉拽和猛拉。

对试样的物理处理应尽可能少,以免损伤试样。

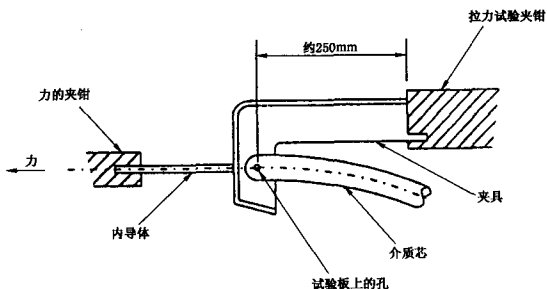


图 2a 柔软电缆用试验夹具

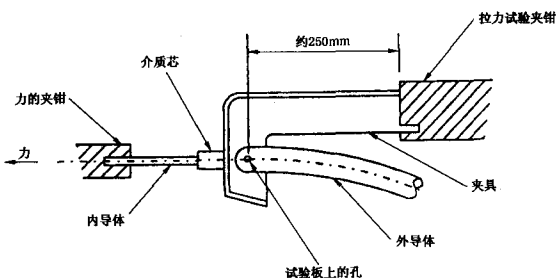


图 2b 半硬电缆用试验夹具

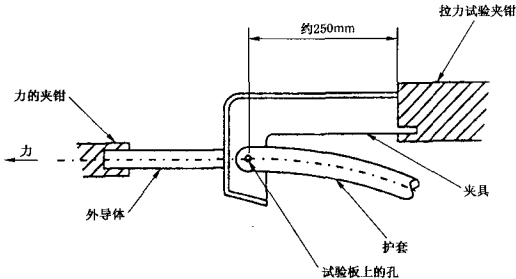


图 2c 外导体和护套用试验夹具

#### 10.1.4 结果表示

绝缘附着力应定义为导体与绝缘之间的粘破坏时的最大拉力读数。

护套附着力应定义为外导体和护套之间的粘破坏时的最大拉力读数。

#### 10.1.5 要求

绝缘和/或护套附着力的值应符合相应电缆规范的规定。

### 10.2 弯曲

#### 10.2.1 原理

本试验通过一段电缆成品经受反复弯曲试验的方法来确定电缆对使用和安装要求的适应性。该电缆段也应该经受在芯轴上的弯曲,以确定其对包装的适应性。

#### 10.2.2 试样制备

从电缆成品的伸出端选出大约 10 m 长的电缆段,但不切断。

#### 10.2.3 程序

电缆应在选定部位围绕一个芯轴作 180°弯曲,芯轴直径在相应电缆规范中规定,接着将电缆拉直,然后再在同一芯轴上以与第一次弯曲相反的方向作 180°弯曲。

重复上述完整的循环弯曲三次,并保证每次弯曲都在电缆的同一部位上进行。

将该电缆的同一端在同一芯轴上绕六圈。卷绕时要保证有足够的拉力,能使电缆的各圈与芯轴保持接触,并保证原先弯曲的部位处于六圈之中。

将经受了两种试验的试样剥开,用正常视力或不带放大的矫正视力进行检查。

#### 10.2.4 要求

电缆的金属构件不应有裂缝或断裂。电缆应满足相应电缆规范规定的电气要求。

### 10.3 低温弯曲性能

#### 10.3.1 原理

本试验确定电缆耐受低温弯曲的能力。

#### 10.3.2 试样制备

试样应从电缆成品上截取。当电缆外径小于 12.5 mm 时,试样长度应不小于电缆外径的 150 倍;当电缆外径等于或大于 12.5 mm 时,试样长度应不小于电缆外径的 120 倍。试样应成圈,成圈直径不小于电缆外径的 30 倍。

#### 10.3.3 程序

试样应按 IEC 60068-2-1 中试验 Aa 的规定进行低温试验,时间不少于 20 h,处理温度按相应电缆规范的规定。

在该周期终了,应将电缆试样在低温箱内连续卷绕在芯轴上,芯轴直径应在相应电缆规范中规定,卷绕速度约为每 4 s 一圈。

对于标称直径小于 12.5 mm 的电缆,应在芯轴上密绕三圈;对于直径等于或大于 12.5 mm 的电缆,应密绕二圈。

剥开电缆试样,用正常视力或不带放大的矫正视力进行检查。

#### 10.3.4 要求

导体、绝缘、护套或中间层(如果有的话)均不应显现损伤的痕迹。

#### 10.4 抗拉强度(纵向拉伸)

正在考虑中。

#### 10.5 抗压性能

##### 10.5.1 原理

本试验确定电缆成品承受压力的能力。

##### 10.5.2 程序

电缆试样应放置在试验装置的基板上,以防止横向移动。用平行于基板的可移动钢板或圆柱形钢轴压住试样。试验装置示于图 3。应逐渐加载,避免任何突然变化。如采用逐级加载法,则其增加率应不超过 1.5:1。

可移动板应在 100 mm 长度的试样上均匀地增加压力。

总负载、加载时间、可移动板边缘倒角半径或芯轴半径 R 应在相应电缆规范中规定。

试验期间和移去负载后,应按本规范 11.16 或 11.17 以及相应电缆规范规定的脉冲法或时域反射计(TDR)法来测量由本试验引起的阻抗不均匀性的尺寸。

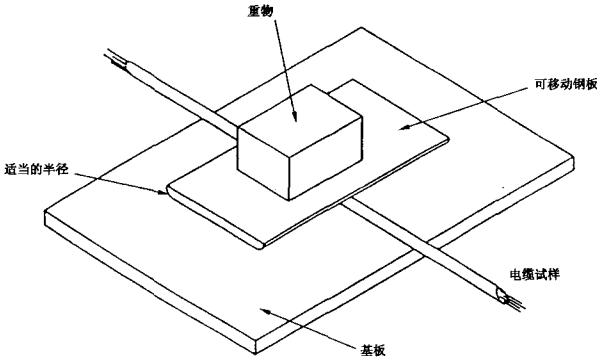


图 3 电缆压力试验装置

##### 10.5.3 要求

试验引起的不均匀性的尺寸应不大于相应电缆规范的规定。

#### 10.6 介质的耐热流动性

##### 10.6.1 原理

本试验确定介质在高温下承受内导体施加的径向压力引起的机械变形的能力。

##### 10.6.2 试样制备

试样应从电缆成品上截取,其长度至少是电缆外径的 30 倍。

将相应电缆规范中规定的重量加在试样两端的内导体上。

##### 10.6.3 程序

试样应在水平芯轴上对称地弯曲,电缆上自由地悬挂重物,芯轴直径约为电缆外径的 10 倍。应按 IEC 60068-2-2 的试验 Ba/Bb 的规定,将试样加热至相应电缆规范所规定的温度,并且至少保持 8 h。

加热时间终了,移去重物,让试样在试验的标准大气条件下,并不受进一步弯曲的情况下冷却1 h。剥开试样,测量内导体与电缆中心的位移。

#### 10.6.4 要求

内导体偏离电缆中心的距离应不大于绝缘标称直径的15%。

### 10.7 耐热冲击

#### 10.7.1 原理

本试验确定绝缘或护套承受高温的能力。

#### 10.7.2 试样制备

试样应从电缆成品上截取,对于外径小于12.5 mm的电缆,试样长度至少应为电缆外径的150倍;对于外径等于或大于12.5 mm的电缆,试样长度至少应为电缆外径的120倍。

试样应成圈,成圈直径不小于电缆标称外径的30倍。

#### 10.7.3 程序

试样应按IEC 60068-2-2中试验Ba的规定,在相应电缆规范规定的温度下加热7 d。

加热时间终了,从试验箱中取出试样,在室温( $20^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ )下冷却1 h。然后将整段试样卷绕在直径为电缆标称外径10倍的芯轴上,接着解绕试样,并在5 min内重复10次。

剥开试样,用正常视力或不带放大的矫正视力进行检查。

#### 10.7.4 要求

绝缘或护套均应无机械损伤的痕迹。

### 10.8 热性能(仅适用于半硬电缆)

#### 10.8.1 原理

本试验确定半硬电缆的电缆结构承受介质高温膨胀的能力。

#### 10.8.2 试样制备

试样长度应为30 mm~350 mm。试样两端应压扁封住,以防绝缘从管状外导体中伸出。

#### 10.8.3 程序

试样应放置于高温箱内,在相应电缆规范规定的温度下放置1 h,然后让试样冷却至室温,用正常视力或不带放大的矫正视力检查。

#### 10.8.4 要求

外导体上应无目力可见的开裂和纵向裂缝;也无介质芯子从试样两端伸出现象。

### 10.9 尺寸稳定性

#### 10.9.1 原理

本试验确定电缆构件相互之间的位移量,以证明该电缆配用连接器的适用性。

#### 10.9.2 试样制备

从电缆成品上截取三段试样,每段长1.5 m。每段试样的两端应切平,使之与纵轴线成直角,并处理干净。

每根试样应卷绕于开口的圆柱形容器的内表面上,该容器的直径约为电缆标称外径的30倍,见图4。试样应卷绕使得不必固定就能保持其位置。卷绕好以后,试样两端的中心导体和绝缘应处于同一平面上。

#### 10.9.3 程序

装有试样的容器应按IEC 60068-2-2中试验Bb的规定加热,加热温度在相应电缆规范中规定,加热时间至少为20 h。

然后,将容器冷却至室温,无需解绕电缆试样,在试样两端测量电缆构件相互之间的位移。

#### 10.9.4 结果表示

六个端面上实测数据的平均值定义为电缆构件的位移。

10.9.5 要求

电缆构件的位移应符合相应电缆规范的规定。

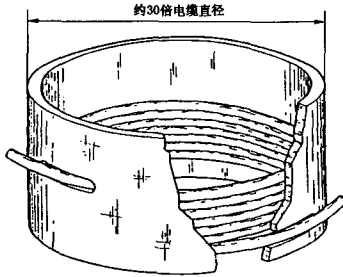


图4 开口的圆柱形容器

10.10 耐磨性

10.10.1 原理

本试验用磨损护套表面的办法来确定电缆护套承受耐磨的能力。

10.10.2 试验设备

刮磨试验装置应符合图5中详述的要求。它应包括一台专门设计用于磨损护套表面的装置。该装置可沿着电缆纵轴的两个方向上移动,移动距离不小于10 mm,循环频率为50~60次/min,一次循环定义为刀片开始移动至回到起始位置。

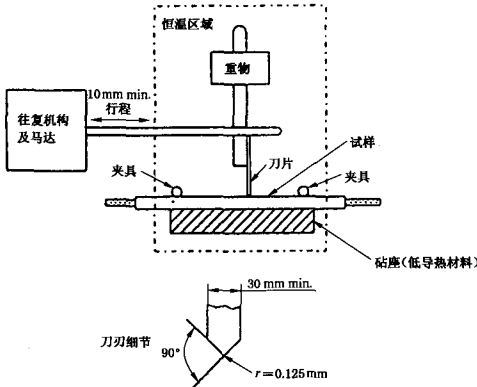


图5 刮磨试验装置

试验装置应配有计数器,以记录直到损坏时的循环次数,并能自动控制,以便当刀片磨损护套而与导体或屏蔽接触时,该装置会停止运转。

刀片应用硬质碳化钨制成,尺寸如图5所示。

施加在刀片上的重量应符合相应电缆规范的规定。

10.10.3 程序

一根长度约750 mm的电缆成品试样应紧固于砧座上,试样和刮磨试验装置一起放入带有适当温控和监视装置的高温箱内,将试样加热至相应电缆规范规定的温度。

每根试样应做4次试验,每做一次试验,试样就朝前移动100 mm,并朝一个方向旋转90°。

## 10.10.4 结果表示

耐磨性定义为刀片磨穿护套,试验装置停止所需的完整循环次数。

## 10.10.5 要求

四次试验的完整循环次数之和应符合相应电缆规范的规定。

## 11 电气特性

## 11.1 导体电阻

## 11.1.1 原理

本试验确定电缆导体的直流电阻。

## 11.1.2 试验设备

试验设备的测量不准确度应在被测值的 0.5% 以内。

使用桥式电路或带有电压表的电流源。依据电阻值的大小,可采用二端法或四端法来测量。

注:更精确的方法(特别是对短段电缆试样),在 IEC 60468 标准中给出。

## 11.1.3 试样制备

剥开试样两端,外导体两端的制备应确保电流在外导体的所有构件中流动。

试样应在 15℃~35℃ 的常温下预置足够长的时间,以使试样温度稳定。

## 11.1.4 程序

当使用带有电压表的电流源时,应测量试样两端的电位差及电流。为了避免试验时产生明显的温升,电流密度应不超过 1 A/mm<sup>2</sup>。测量试样长度,其误差不超过 1%。

## 11.1.5 结果表示

电阻实测值应对长度进行校正,并用 Ω/km 表示。该值应用下式换算成标准温度(20℃)时的值。

$$R = \frac{R_m}{l \cdot [1 + \rho \cdot (t - 20)]} (\Omega/\text{km}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中:  $R_m$ ——电阻实测值,Ω;

$l$ ——试样长度,km;

$\rho$ ——温度系数, K<sup>-1</sup>(对于铜,  $\rho = 3.93 \times 10^{-3}/\text{K}$ );

$t$ ——测量时的温度,℃。

## 11.1.6 要求

导体电阻值应符合有关电缆规范的规定。

## 11.2 绝缘电阻

## 11.2.1 原理

本试验的目的是确定电缆导体之间的直流绝缘电阻。

## 11.2.2 试验设备

直流电源,最大电压 500 V。

兆欧表,量程大于或等于  $2 \times 10^5 \text{ M}\Omega$ 。

## 11.2.3 试样制备

试验应在经过 15℃~35℃ 的温度预置并通过导体连续性检验的电缆成品上进行,试样最短长度以 100 m 为好,导体两端应剥去绝缘。

## 11.2.4 程序

对于同轴电缆,绝缘电阻应在内、外导体之间测量。对于对称电缆,绝缘电阻应在线对的导体之间测量,如有屏蔽,则还应在连接在一起的导体和屏蔽之间测量。

如有关电缆规范未作规定,则试验电压应为 80 V~500 V,最短加压时间为 1 min。

## 11.2.5 结果表示

绝缘电阻应用  $M\Omega \cdot km$  表示。当试验长度不为 1 km 时,实测值应作如下校正:

$$R = R_m \cdot l \quad (M\Omega \cdot km) \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中:  $R_m$ ——绝缘电阻实测值,  $M\Omega$ ;

$l$ ——电缆长度, km。

11.2.6 要求

绝缘电阻的校正应符合有关电缆规范的规定。

11.3 电容

11.3.1 原理

本试验的目的是确定同轴电缆内、外导体之间的电容,或屏蔽对称电缆两内导体之间的电容及其电容不平衡。

11.3.2 试验设备

准确度等于或优于千分之一的电容表或电容电桥,其频率为 800 Hz~1 000 Hz。

11.3.3 试样制备

试样应大于 1.5 m,但小于 2 000 m,试样应预置于 15℃~35℃的常温之中,并通过连续性试验。

注:在大长度或频率较高的情况下,实际电容  $C$  可如下计算:

$$C = \frac{C_m \cdot \beta \cdot l}{\tan(\beta \cdot l)}$$

$$\beta \cdot l = 2\pi \frac{l \cdot f}{3 \times 10^8 \cdot v_r}$$

式中:  $C_m$ ——电容实测值;

$l$ ——物理长度, m;

$f$ ——测量频率, kHz;

$v_r$ ——速比。

11.3.4 程序

11.3.4.1 同轴电缆

电容应在内、外导体之间测量,外导体应接地。为了避免杂散电容对短段电缆的影响,可用同一电缆的两个不同长度试样测量值的差来确定电容。

11.3.4.2 屏蔽对称电缆(两端法)

将屏蔽与电容电桥的接地端相接,则电容应用下式确定:

$$\text{电容} = \frac{C_a + C_b}{2} - \frac{C_c}{4} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中:  $C_a$ ——导体 b 接屏蔽时,导体 a 与导体 b 之间的电容;

$C_b$ ——导体 a 接屏蔽时,导体 b 与导体 a 之间的电容;

$C_c$ ——导体 a 和导体 b 接在一起时,与屏蔽之间的电容。

为避免杂散电容的影响,可采用 11.3.4.1 中给定的方法测量。

11.3.4.3 屏蔽对称电缆(三端法)

电容应用下式确定:

$$\text{电容} = \frac{C_e \times C_f}{C_e + C_f} \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中:  $C_e$ ——导体 b 接电容电桥接地端时导体 a 和屏蔽之间的电容;

$C_f$ ——导体 a 接电容电桥接地端时导体 b 与屏蔽之间的电容。

为避免杂散电容的影响,可采用 11.3.4.1 中给定的方法测量。

11.3.4.4 屏蔽对称电缆的电容不平衡(两端法)

电容不平衡应用下式确定:



$$\text{电容不平衡} = \frac{400(C_a - C_b)}{2(C_a + C_b) - C_c} (\%) \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中:  $C_a$ 、 $C_b$  和  $C_c$  按本规范 11.3.4.2 中的定义。

#### 11.3.4.5 屏蔽对称电缆的电容不平衡(三端法)

电容不平衡应用下式确定:

$$\text{电容不平衡} = \frac{100(C_e - C_f)}{\left[ \frac{C_e \times C_f}{C_e + C_f} \right]} (\%) (\text{校正值}) \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中:  $C_e$  和  $C_f$  按本规范 11.3.4.3 中的定义。

#### 11.3.5 要求

电容和电容不平衡的值应符合有关电缆规范的规定。

### 11.4 电容稳定性

#### 11.4.1 原理

本试验的目的是确定电缆温度变化时的电容稳定性。

本试验检查:

- 介质的塑性流动和外导体的伸长所引起的不可逆变化。
- 热胀冷缩引起的可逆变化以及介质电气特性的可逆变化。

#### 11.4.2 试验设备

准确度等于或优于千分之一的电容表或电容电桥,频率为 800 Hz~1 000 Hz。

#### 11.4.3 试样制备

除非另有规定,本试验应在至少长 15 m 的电缆成品上进行。电缆试样应在 15℃~35℃ 的常温下预处理。

#### 11.4.4 程序

试验应按 IEC 60068-2-14 标准中 Nb 的规定进行。

试验开始时应测量电缆的电容,然后经受下述循环三次,每一循环終了,都应测量电容:

高温	4 h~8 h;
20℃	4 h~24 h;
低温	4 h~8 h;
20℃	4 h~24 h。

高、低温温度应在有关电缆规范中规定。

#### 11.4.5 要求

电容的变化应符合有关电缆规范的规定。

### 11.5 介质耐电压

#### 11.5.1 原理

本试验的目的是确定交流或直流条件下介质的耐电压性能。

#### 11.5.2 试验设备

交流或直流电源。

千伏表(kV)

交流电压的频率应为 40 Hz~60 Hz,其波形应为正弦波。

#### 11.5.3 试样制备

试验应在通过连续性试验的电缆成品上进行。导体应剥出足够长,以防击穿或局部放电。该处绝缘也应作适当的清洁处理。

#### 11.5.4 程序

电缆内、外导体之间或导体之间的绝缘应承受交流或直流电压 1 min。电压值应符合有关电缆规范的规定。试验电压的升压速度应不超过 2 kV/s。

#### 11.5.5 要求

介质不应有击穿。

### 11.6 护套耐电压

#### 11.6.1 原理

本试验通过浸水试验或火花试验来确定护套的耐电压性能。两种方法是等效的,任意一种均可使用。

#### 11.6.2 试验设备

水箱和交流电源。电源频率为 40 Hz~60 Hz,电压为 5 kV(r. m. s.)。

火花试验机,频率为 40 Hz~60 Hz,电压为 8 kV(r. m. s.)。

火花试验机的电极最好由细的串链组成。当一台由火花间隙与电容器串联而成的人工缺陷装置接在电极和大地之间时,火花试验装置的最小灵敏度应足以使检测器启动。电极电压应为 6 kV(r. m. s.)。串联电容器的容量应为 350 pF。火花间隙应由一块平行的金属板在 0.02 s 内通过一个针尖来构成,在这期间,两者的距离为 5 mm。

#### 11.6.3 程序

##### 11.6.3.1 浸水试验

电缆应在温度为 15℃~35℃的水中浸泡 1 h。浸水終了,应在外导体(或屏蔽)与水之间施加下表规定的交流试验电压,试验时间不少于 1 min,但不超过 2 min。

护套标称厚度 mm	试验电压 kV(r. m. s.)
0.5 及以下	不试验
0.5 以上~0.8	2
0.8 以上~1.0	3
1.0 以上	5

##### 11.6.3.2 火花试验

电极应与电缆表面紧密接触。试验电压应加于电极与外导体或屏蔽之间。

电缆通过电极的速度应使电缆每一点与电极接触的时间不少于 0.1 s。

检测器应能使缺陷通过电极后仍然保持其指示。所加的试验电压应如下表所示:

护套标称厚度 mm	试验电压 kV(r. m. s.)
0.5 及以下	不试验
0.5 以上~0.8	3
0.8 以上~1.0	5
1.0 以上	8

#### 11.6.4 要求

护套应无击穿。

### 11.7 介质的局部放电

正在考虑中。

### 11.8 特性阻抗

#### 11.8.1 平均特性阻抗

##### 11.8.1.1 原理

本试验旨在确定射频同轴电缆的平均特性阻抗  $Z_{00}$ 。

11.8.1.2 定义

$Z_{\infty}$ 是平均特性阻抗在高频时的渐近值。它可从测量电气长度和电容来获得。

$$Z_{\infty} = l_{e,\infty} / (c \times C) \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$= 1 / (\Delta f \times C) \quad \dots\dots\dots(10)$$

式中： $l_{e,\infty}$ ——试样在 200 MHz 附近的电气长度；

$c$ ——自由空间的传播速度；

$C$ ——试样的电容；

$\Delta f$ ——大约在 200 MHz 频率下试样相位变化 360°所对应的频率变化。

11.8.1.3 试验设备

电容表或电容电桥,应符合 11.3 的要求。

测量电气长度的试验电路应按 11.10 规定。

11.8.1.4 程序

试样的电容应按 11.3 的规定进行测量。

试样的频率变化  $\Delta f$  应按 11.10 的规定进行测量。

11.8.1.5 结果表示

平均特性阻抗应用下式确定：

$$Z_{\infty} = \frac{1\,000}{\Delta f \times C} (\Omega) \quad \dots\dots\dots(11)$$

式中： $\Delta f$ ——单位为 MHz；

$C$ ——单位为 nF。

11.8.1.6 要求

平均特性阻抗实测值与标称值的偏差应符合有关电缆规范的规定。

11.8.2 时域特性阻抗

11.8.2.1 原理

本试验旨在使用阶跃函数信号来确定射频电缆的时域特性阻抗。

注：阶跃函数反射系数随时间进行显示,以表明试样特性阻抗的局部分布状态。

11.8.2.2 定义

试样的特性阻抗由下式给定：

$$Z = Z_0 \left\{ \frac{\left[ \frac{(1+r)}{(1-r)} \right]}{(1-r^2)} \right\} (\Omega) \quad \dots\dots\dots(12)$$

式中： $Z$ ——试样的特性阻抗；

$Z_0$ ——标准线的特性阻抗；

$r$ ——标准线末端与试样之间台阶的反射系数；

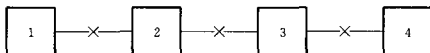
$r_s$ ——试验系统与标准线特性阻抗的差异(如存在的话)产生的反射系数。

对于阶跃函数,上升时间  $t_r$  定义为阶跃幅度的 10% 与 90% 之间的时间差。

11.8.2.3 试验设备

试验设备通常按图 6 配置。

为确定试样两端的特性阻抗,应优选特性阻抗等于试样的标称特性阻抗的标准线。



1—时域反射计(TDR);2—标准线(自选件);3—试样;4—终端负载

图 6 阶跃函数试验设备配置图

## 11.8.2.4 程序

用于测量试样的阶跃函数,应具有符合有关电缆规范规定的上升时间。

测量阶跃反射系数,用式(12)计算特性阻抗。

## 11.8.2.5 要求

时域特性阻抗应符合有关电缆规范的规定。

## 11.9 相对传播速度(速比)

## 11.9.1 原理

本试验确定射频同轴电缆的相对传播速度  $v_{r,\infty}$ (速比)。

## 11.9.2 定义

电缆的相对传播速度(速比)是高频下相对传播速度的逼近值,它定义为:

$$v_{r,\infty} = v_{\infty}/c \quad \dots\dots\dots(13)$$

$$v_{r,\infty} = l/l_{e,\infty} \quad \dots\dots\dots(14)$$

式中:  $v_{\infty}$ ——试样在约 200 MHz 时的传播速度;

$l$ ——试样的物理长度;

$l_{e,\infty}$ ——试样在约 200 MHz 时的电气长度;

$c$ ——自由空间的传播速度。

## 11.9.3 试验设备

测量电气长度的试验电路应符合 11.10 的规定。

确定试样物理长度的测量仪器的误差应不超过 1%。

## 11.9.4 程序

按 11.10 的规定测量试样的电气长度。

测量试样的物理长度。

## 11.9.5 结果表示

相对传播速度(速比)应用下式确定:

$$v_r = 100 \times l/l_{e,\infty}(\%) \quad \dots\dots\dots(15)$$

## 11.9.6 要求

相对传播速度应符合有关电缆规范的规定。

## 11.10 电气长度和相位延迟

## 11.10.1 原理

本方法测量射频同轴电缆的电气长度和相位延迟。电气长度用以确定平均特性阻抗和相对速度。

本方法也可在射频同轴电缆的电气长度或相位延迟有要求的场合使用。

## 11.10.2 定义

射频同轴电缆的电气长度  $l_e$  定义为具有相同相移的真空绝缘电缆的物理长度。

电气长度  $l_{e,\infty}$  是高频时的电气长度  $l_e$  的逼近值,通常在 200 MHz 下测量,此频率已足够高,致使理论近似总能适用。

相位延迟与电气长度的关系如下式:

$$t_{p,\infty} = l_{e,\infty}/c \quad \dots\dots\dots(16)$$

式中:  $c$ ——自由空间的传播速度。

## 11.10.3 试样制备

根据所采用的测量方法,在试样的一端或两端装上连接器。

在只采用一个连接器的情况下,试样另一端应开路。

## 11.10.4 试验设备

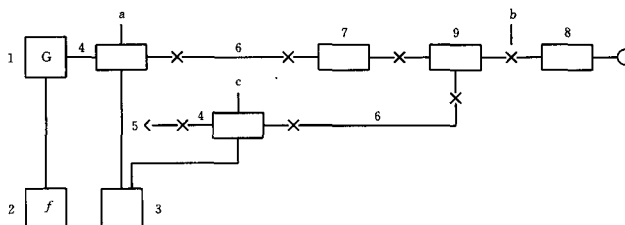
试验设备应能适应相位计法或谐振法的测量要求。如无其他规定,设备的频率覆盖范围应为

30 MHz~300 MHz,本条款给出的设备和试验电路对试验具有代表性,它们能在各种情况下进行试验,可以使用把所示试验电路各部分组合在一起的其他设备,如网络分析仪。

### 11.10.5 相位计法

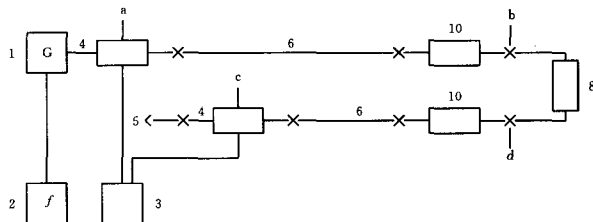
#### 11.10.5.1 配置图

试验设备通常应按图7和图8所示的两种配置图之一来配置。图7电路可用于插入损耗小于和等于10 dB且只使用试样的一端;图8电路可用于较大损耗的试样,电缆的两端都应使用。



1—信号发生器;2—频率计,分辨率 $\leq 1$  kHz;3—相位计,分辨率 $\leq 0.2^\circ$ ;  
4—插入单元;5—终端负载;6—连接电缆;7—衰减器,10 dB;8—试样;  
9—定向耦合器,定向度 $\geq 36$  dB

图7 试样单端连接的相位计法试验配置图



1—信号发生器,30 MHz~300 MHz, $\geq 10$  dBm;2—频率计,分辨率 $\leq 1$  kHz;  
3—相位计,分辨率 $\leq 0.2^\circ$ ;4—插入单元;5—终端负载;6—连接电缆;8—试样;  
10—匹配变压器,试样的标称阻抗

图8 试样两端连接的相位计法试验配置图

#### 11.10.5.2 程序

插入试样,将信号发生器调谐到200 MHz附近的某一频率(频率 $f_1$ ),此时,相位计应正好指示出某一规定值。增加频率,使相位改变 $n \times 360^\circ$ (频率 $f_2$ )。

如果试样的物理长度为 $l$ ,那么推荐选用满足如下方程的 $n$ 值:

$$1 \leq n = \text{INT}\left(\frac{l}{10}\right) \leq 10 \quad \dots\dots\dots (17)$$

式中: $l$ 用“m”作单位。

对于单端连接的试样,频率差 $\Delta f_1$ 从下式获得:

$$\Delta f_1 = \frac{f_2 - f_1}{n} (\text{MHz}) \quad \dots\dots\dots (18)$$

对于两端连接的试样, $\Delta f_1$ 则从下式得到:

$$\Delta f_1 = \frac{(f_2 - f_1)}{\left(\frac{n}{2}\right)} (\text{MHz}) \quad \dots\dots\dots (19)$$

当从试验电路中移出试样后,应在 100 MHz~300 MHz 的频带内选择两个频率,其间隔至少为 50 MHz。记下这些频率  $f_4$  和  $f_5$  时的相位读数  $\phi_4$  及  $\phi_5$ 。

频率差  $\Delta f_2$  从下式得到:

$$\Delta f_2 = (f_5 - f_4) \frac{360}{(\phi_5 - \phi_4)} \text{ (MHz)} \quad \dots\dots\dots (20)$$

11.10.5.3 结果表示

试样的频率差  $\Delta f$  由测量最大点或最小点处的频率来确定。

因为  $\Delta f_1 = (f_2 - f_1)/n$  (见公式(18))

或  $\Delta f_1 = (f_2 - f_1)/(n/2)$  (见公式(19))

及  $\Delta f_2 = 360(f_5 - f_4)/(\phi_4 - \phi_5)$  (见公式(20))

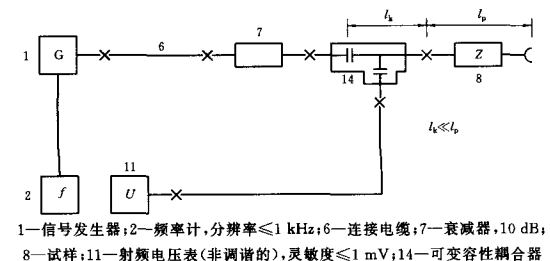
试样的频率  $\Delta f$  可从下式求得:

$$\Delta f = \frac{\Delta f_2 \times \Delta f_1}{(\Delta f_2 - \Delta f_1)} \quad \dots\dots\dots (21)$$

11.10.6 谐振法

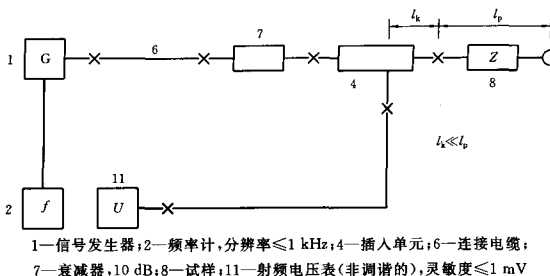
11.10.6.1 配置图

本试验通常应按图 9 或图 10 所示配置图之一来配置。两种方法均能应用于插入损耗不大于 10 dB 的试样,不必使用相位计。此外,图 9 所示配置图可以应用于任意特性阻抗的试样。



1—信号发生器;2—频率计,分辨率≤1 kHz;6—连接电缆;7—衰减器,10 dB;8—试样;11—射频频电压表(非调谐的),灵敏度≤1 mV;14—可变容性耦合器

图 9 松耦合及试样单端连接的谐振法试验配置图



1—信号发生器;2—频率计,分辨率≤1 kHz;4—插入单元;6—连接电缆;7—衰减器,10 dB;8—试样;11—射频频电压表(非调谐的),灵敏度≤1 mV

图 10 紧耦合及试样单端连接的谐振法试验配置图

11.10.6.2 程序

在图 9 试验电路中,应调节可变容性耦合器使电压表处于谐振,即其指示接近最灵敏量程的满刻度。信号发生器应调谐,使在 200 MHz 附近得到两个电压最大值(频率  $f_1, f_2$ ),对于  $n$  值的变化如 11.10.5.2 所述。

在图 10 试验电路中,可采用同样的程序,但信号发生器应调谐到电压最小值。如果由于灵敏度不够

而不能调至最小值,或最小点太宽,那么,应取电压高出最小值 3 dB 时的两个频率的平均值。

### 11.10.6.3 结果表示

试样的频率差  $\Delta f$  由测量最大值或最小值时的频率来确定,试样的  $\Delta f$  可从下式求得:

$$\Delta f = (f_2 - f_1)/n \quad \text{对于单端连接}$$

$$\text{或 } \Delta f = (f_2 - f_1)/(n - 2) \quad \text{对于两端连接}$$

### 11.10.7 电气长度和相位延迟

电气长度定义为:

$$l_{e,\infty} = 300/\Delta f \quad (\text{m}) \quad \dots\dots\dots(22)$$

相位延迟定义为:

$$t_{p,\infty} = 1/\Delta f \quad (\mu\text{s}) \quad \dots\dots\dots(23)$$

式中:  $\Delta f$  单位为 MHz。

当下式成立时,可进行低频测量。

$$\frac{\Delta l_e}{l_e} \approx \frac{4}{D_{3,e} \times \sqrt{f}} \leq 10^{-3} \quad \dots\dots\dots(24)$$

式中:  $\Delta l_e/l_e$ ——低频测量的相对误差;

$D_{3,e}$ ——外导体电气有效直径,mm;

$f$ ——频率,kHz。

### 11.10.8 要求

由于电气长度用以确定其他参数,因此一般不作规定。

### 11.11 相位常数稳定性

#### 11.11.1 原理

本试验确定射频同轴电缆的相位常数在优选频段 30 MHz~1 000 MHz 的温度关系。

#### 11.11.2 定义

相位常数是温度的函数,其变化可以是单向的也可以是多向的,相位常数稳定性用相位常数的总变化来表示,或者在相位-温度关系足够线性的温度范围内,用相位常数的温度系数来表示。

新电缆的相位/温度关系受相位常数的不可逆变化影响,这可用热循环来减小。

除温度外,相位常数还与电缆内部气体的压力和湿度有关,这在气密外导体电缆中尤为重要。

#### 11.11.2.1 相位常数的总相对变化

相位常数的总相对变化定义为:

$$\frac{\delta b_{\text{tot}}}{b} = \frac{l_{e,2} - l_{e,1}}{l} \times v_r \quad \dots\dots\dots(25)^{1)}$$

式中:  $l_{e,1}$ ——试样在  $t_1$  时的电气长度;

$l_{e,2}$ ——试样在  $t_2$  时的电气长度 ( $t_2 > t_1$ );

$l$ ——试样的物理长度;

$v_r$ ——标称速比。

对于单向变化,  $t_1$  和  $t_2$  是给定温度范围的极限温度。

当变化的符号改变时,  $t_1$  和  $t_2$  就成为  $l_e$  出现极值时的温度。

#### 11.11.2.2 相位常数的温度系数

相位常数的温度系数定义为:

采用说明:

1] IEC 61196-1 中公式(25)等号的左边为  $\delta b_{\text{tot}}$ 。

$$t_c = \frac{l_{e,2} - l_{e,1}}{l(t_2 - t_1)} \times v_r \quad (\text{K}^{-1}) \quad \dots\dots\dots (26)$$

式中： $l_{e,1}$ ——试样在  $t_1$  时的电气长度；

$l_{e,2}$ ——试样在  $t_2$  时的电气长度 ( $t_2 > t_1$ )；

$t_1, t_2$ ——相位常数近似为线性的规定温度范围内的任意两个温度；

$l$ ——试样的物理长度；

$v_r$ ——标称速比。

### 11.11.3 试样制备

被测试样的长度仅仅受试验箱容积以及最大允许插入损耗的限制。

试样应在一端或两端装接连接器，这取决于所选定的试验方法。

有关电缆规范应说明密封外导体电缆的两端是否应该密封或开放。

试样应放入能容其自由膨胀的温度箱内。试样的最小弯曲半径推荐为有关电缆规范规定的最小弯曲半径的两倍。

为了消除相位常数的不可逆变化，必需将电缆试样进行若干温度循环的预先处理。在此情况下，循环的高温、低温、循环次数及持续时间应在有关电缆规范中作出规定。

### 11.11.4 试验设备

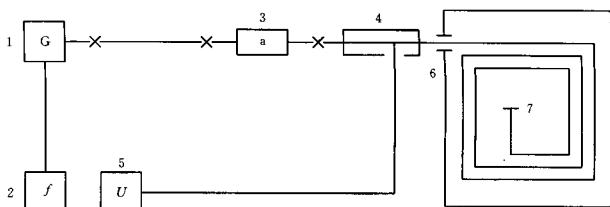
有几种方法可以用来确定相位稳定性，其选择取决于试样的插入损耗。可以采用 11.11.1 所述频带中的任一频率。

只有试样达到其最终温度后才能进行测量。试验设备的选择应使试验结果的误差不超过所规定的最大允许相位变化的 10%。

### 11.11.5 测量线法(插入损耗 < 3 dB)

#### 11.11.5.1 配置图

试验设备通常应按图 11 所示配置图来配置。



1—信号发生器, 30 MHz~1 000 MHz,  $\geq 10$  dB; 2—耦合器, 分辨率  $\leq 10$  kHz; 3—衰减器,

( $Z = \text{试样的 } Z_{\text{nom}}$ )  $\geq 10$  dB; 4—开槽测量线, ( $Z = \text{试样的 } Z_{\text{nom}}$ ) 分辨率  $\leq 0.1$  mm;

5—指示器, 分辨率  $\leq 0.1$  dB; 6—温度箱, 调节度  $\pm 1$  K; 7—试样

图 11 开槽测量线法试验配置图

#### 11.11.5.2 程序

推荐的试验频率应使其波长短于开槽测量线长度的两倍。这将允许在测量线上观察到两个电压最小点。

在较低的频率下, 推荐的所选频率应确保一个电压最小值出现在测量线的中间部位。

当试样达到一个稳定的温度时, 应确定测量线上一个最小值的位置。将测量线的移动架调到此最小值两边电压值比最小值高出 3 dB 的两个位置, 此两个位置的平均值取为最小值的位置。

在规定温度范围内的几个温度下重复上述程序。试验期间, 试验频率应保持恒定(变化小于  $10^{-6}$ )。

#### 11.11.5.3 结果表示



对于相位常数的单向变化,总相对变化的模及温度系数的模用下式确定。

$$\left| \frac{\delta b_{\text{tot}}}{b} \right| = \left| \frac{(l_2 - l_1)}{l} \right| \times v, \quad \dots\dots\dots (27)$$

$$|t_c| = \left| \frac{(l_2 - l_1)}{l(t_2 - t_1)} \right| \times v, \quad \dots\dots\dots (28)$$

式中:  $l_1$ —— $t_1$  时的最小值位置;  
 $l_2$ —— $t_2$  时的最小值位置;  
 $l$ ——试验箱中试样的物理长度;  
 $v$ ——试样标称速比。

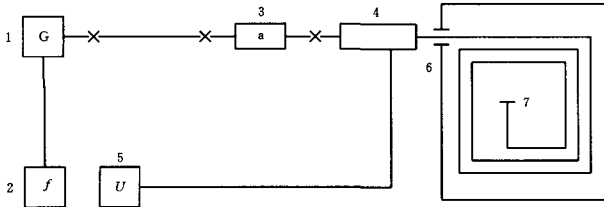
当测量线上的电压最小值随温度上升而移向试样时,  $\delta b_{\text{tot}}/b$  或  $t_c$  的符号为正。

当相位常数多方向变化或非线性变化时,  $t_1$  和  $t_2$  为相位常数出现极限值的两个温度。

11.11.6 变频法(插入损耗 $\leq 3$  dB)

11.11.6.1 配置图

试验设备通常应按图 12 所示配置图配置。



1—信号发生器, 30 MHz~1 000 MHz,  $\geq 10$  dB; 2—频率计, 分辨率 $\leq 10$  kHz;  
 3—衰减器, ( $Z = \text{试样的 } Z_{\text{nom}}$ )  $\geq 10$  dBm; 4—插入单元, ( $Z = \text{试样的 } Z_{\text{nom}}$ );  
 5—指示器, 分辨率 $\leq 0.1$  dB; 6—温度箱, 调节度 $\pm 1$  K; 7—试样

图 12 变频法试验配置图

11.11.6.2 程序

除非有关电缆规范另有规定,一般可在允许的频段内选取任何能给出电压最小值的频率。当试样达到稳定的温度后,应确定出现电压最小值的频率。为此,应在电压最小值频率的上下两边将频率分别调至电压值高出最小值 3 dB 的两个频率,此两频率的平均值即取为最小值频率。

此程序应在规定的温度范围内的几个温度上重复进行。

11.11.6.3 结果的表述

对于相位常数的单向变化,总相对变化和温度系数应为:

$$\delta b_{\text{tot}}/b = \frac{(1/f_2 - 1/f_1)}{1/f_{20}} \times \frac{l_1}{l} \quad \dots\dots\dots (29)$$

和

$$t_c = \frac{(1/f_2 - 1/f_1)}{(1/f_{20})(t_2 - t_1)} \times \frac{l_1}{l} \quad \dots\dots\dots (30)$$

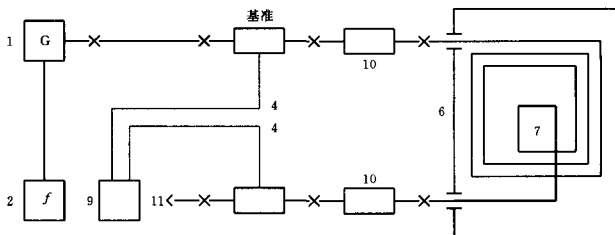
式中:  $f_1$ ——温度为  $t_1$  时最小值的频率;  
 $f_2$ ——温度为  $t_2$  时最小值的频率;  
 $f_{20}$ ——温度为室温时最小值的频率;  
 $l_1$ ——试样的总长度;  
 $l$ ——试样在温度箱中的长度。

当相位常数多方向变化或非线性变化时,  $t_1$  和  $t_2$  为相位常数出现极限值时的两个温度。

11.11.7 相位计法(插入损耗 $\leq 50$  dB)

11.11.7.1 配置图

试验设备通常应按图 13 所示配置图进行配置。



1—信号发生器, 30 MHz~1 000 MHz, ≥10 dBm; 2—频率计, 分辨率≤1 kHz; 4—插入单元(Z=试样的 Z<sub>nom</sub>); 6—温度箱, 调节度±1 K; 7—试样; 9—相位计, 分辨率≤0.1°; 10—匹配变压器(当 Z=Z<sub>插入单元</sub>≠试样的 Z<sub>nom</sub>时使用); 11—负载(Z=Z<sub>插入单元</sub>)

图 13 相位计法的试验配置图

11.11.7.2 程序

除非有关电缆规范另有规定, 一般可在允许的频段内选取任何频率。

相位计应在试验频率下校准。为此, 插入单元的两个端口(如果使用匹配变压器, 则为其端口)应连接在一起, 并将度盘指示调至零。试验过程中, 试验频率应保持稳定(≤10<sup>-6</sup>)。

校准以后, 接入电缆试样, 记下度盘读数。在每一个温度下, 当达到稳定状态条件后, 在记录试样读数前, 都应重复进行校准。

此程序应在有关电缆规范规定的温度范围内的几个温度上重复进行。

11.11.7.3 结果表示

对于相位常数的单向变化, 总相对变化和温度系数应用下式确定。

$$\delta b_{\text{rel}}/b = \frac{0.833(\xi_2 - \xi_1)}{l \times f} \times v_r \quad \dots\dots\dots (31)$$

$$t_c = \frac{0.833(\xi_2 - \xi_1)}{l \times f(t_2 - t_1)} \times v_r \quad \dots\dots\dots (32)$$

式中: ξ<sub>1</sub>——温度为 t<sub>1</sub> 时的相位, (°);

ξ<sub>2</sub>——温度为 t<sub>2</sub> 时的相位, (°);

l——温度箱内试样的物理长度, mm;

v<sub>r</sub>——试样相对传播速度的标称值;

f——试验频率, MHz。

当相位常数多方向变化或非线性变化时, t<sub>1</sub> 和 t<sub>2</sub> 为相位常数出现极限值时的两个温度。

11.11.8 要求

相位常数的最大相对变化和/或温度系数应符合有关电缆规范的规定。

11.12 回波损耗(阻抗均匀性)

11.12.1 原理

本试验旨在确定射频同轴电缆的回波损耗, 可以使用定向耦合器分离入射波与反射波的方法来确定, 也可以通过使用电桥电路测量输入反射系数的方法来确定。

11.12.2 定义

任一频率下的输入阻抗是局部特性阻抗变化的函数, 如变化是周期性的, 则输入阻抗也是变化间隔的函数。在高频时输入阻抗可以与试样的平均特性阻抗有很大的差异, 回波损耗是上述差异在频域内的度量。

回波损耗定义为:

$$a_r = 20 \lg(u_i/u_r) \quad (\text{dB}) \quad \dots\dots\dots (33)$$

式中:  $u_i$ ——对应于阻抗  $Z_n$  的入射波的幅值;

$u_r$ ——试样端接阻抗为  $Z_n$  的负载时反射波的幅值;

$Z_n$ ——有关电缆规范中规定的标称特性阻抗。

回波损耗与反射系数  $r$  的关系为:

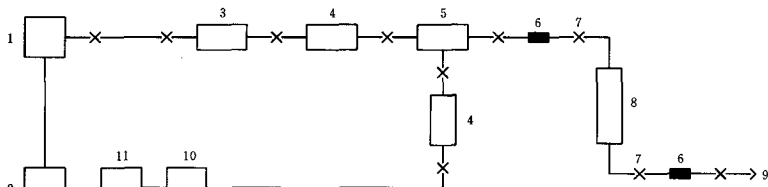
$$\begin{aligned} r &= u_r/u_i \\ &= 10^{-(a_r/20)} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (34)$$

它与驻波比  $s$  有间接关系:

$$s = (1 + r)/(1 - r) \quad \dots\dots\dots (35)$$

### 11.12.3 配置图

试验设备通常按图 14 所示来配置。



- 1—信号发生器,  $\geq 10$  dBm; 2—频率计, 分辨率  $\leq 1$  kHz; 3—可变衰减器 0 dB~50 dB, 1 dB 步进;  
4—衰减器,  $\geq 6$  dB; 5—电桥/反射计, 定向度  $\geq 36$  dB; 6—试验转换器, 固有回波损耗  $\geq 40$  dB;  
7—试验连接器, 固有回波损耗  $\geq 40$  dB; 8—试样; 9—终端负载, 固有回波损耗  $\geq 40$  dB;  
10—信号处理单元; 11—指示器准确度 0.1 dB

注

- 1 为了把误差减至最小, 反射计或电桥的标称特性阻抗应与试样相同, 推荐将具有足够衰减量(如 6 dB)的缓冲衰减器直接接至电桥输入和输出端口, 以使测试端口开路及短路测试引起的扫描图形控制在 1 dB 之内。
- 2 如有关电缆规范未作规定, 则由电桥或反射计的定向度以及其他元件的固有损耗引起的误差应小于相当于最小允许回波损耗的反射的 1/4, 但不小于 0.01。

图 14 回波损耗测量的试验配置图

### 11.12.4 试样制备

除非另有规定, 试样的长度应使最低试验频率时的插入损耗至少为 6 dB。如达不到此要求, 则最小长度应不小于 100 m。

试样两端应安装固有反射较小的连接器, 使试样能直接与电桥或反射计以及终端负载相连接。

### 11.12.5 试验设备的校准

#### 11.12.5.1 用全反射来校准

进行校准时, 应将电桥或反射计的试验端口先开路, 再短路。此时, 反射信号相当于反射系数为 100% 或回波损耗为 0 dB。如果试验端口开路及短路得到的信号电平有差异, 则取两者的平均值作为基准电平。

为了得到与各个小反射系数或大回波损耗相对应的信号电平, 应在规定的频率范围内建立并记录频率校准曲线。可用可变衰减器或带有步进衰减器的信号处理单元来获得不同的信号电平。

#### 11.12.5.2 用标准失配器来校准

本校准可用标准失配器来进行, 失配器的反射系数或回波损耗为已知, 且在规定的频率范围内具有几乎平直的特性。校准时, 为了使电桥或反射计的固有误差的影响减至最小, 标准失配器的反射系

数至少应为此误差的 5 倍。

应按 11.12.5.1 所述作出校准曲线。

11.12.5.3 测量准确度

回波损耗的实测值将具有下述反射系数引起的测量误差：

$$\delta_r = |r_A + r_B e^{-2d}| \dots\dots\dots (36)$$

$$\leq r_m/k \dots\dots\dots (37)$$

式中： $r_A = r_d + r_c + r_s$ ；

$$r_B = r_c + r_s + r_l$$

$r_d$ ——对应于电桥/反射计定向度的反射系数；

$r_c$ ——连接器的反射系数；

$r_s$ ——试验转接器的反射系数；

$r_l$ ——负载的反射系数；

$r_A$ ——电缆输入端的总反射系数；

$r_B$ ——电缆输出端入射波的总反射系数；

$r$ ——试样的传输常数；

$r_m$ ——试样的最大允许反射系数；

$l$ ——试样的物理长度；

$k$ ——除非有关电缆规范另有规定， $k=4$ 。

误差  $\delta r$  只能根据试验来确定。为此，试样用一短段同一类型的电缆来代替，短段电缆的特性阻抗尽可能接近其标称值。电缆的反射系数应在尽可能宽的频带内测量，其物理长度应满足下述条件。

$$l = (2 \text{ 或 } 3) \times 150 \times v_r / (f_2 - f_1) \dots\dots\dots (38)$$

式中： $l$ ——试样的物理长度，m；

$f_1, f_2$ ——频率，MHz。

该电缆首先用匹配负载进行测量，得到如图 15 所示那样的反射系数曲线。然后用失配器来代替匹配负载重复进行测量，得到图 16 所示的结果。失配器的失配量大于  $r_A$  的设定值。

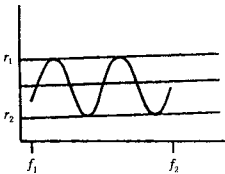


图 15

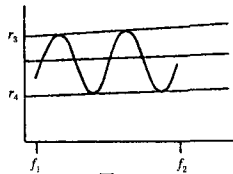


图 16

$r_A$  和  $r_B$  的模如下：

$$|r_A| = (r_3 - r_4) / 2 \dots\dots\dots (39)$$

和

$$|r_B| = (r_1 - r_2) \dots\dots\dots (40)$$

因此，固有误差反射引起的测量误差近似为：

$$\Delta r = \pm (r_A + r_B \times 10^{-a/10}) \dots\dots\dots (41)$$

式中： $a$ ——试样的插入损耗，dB。

11.12.6 程序

在用模拟信号进行处理和记录时，扫频速度应与处理单元显示和记录的瞬态响应相适应。降低扫频速度，直至峰值的大小不再变动为止。

除非使用现代网络分析仪来进行数字信号处理和/或记录,否则,应满足下列条件:

$$n \geq \frac{3(f_2 - f_1)l}{150 \cdot v_r} \quad \dots\dots\dots (42)$$

式中:  $n$ ——在回波损耗曲线频带( $f_2 \sim f_1$ )中的取样点数;

$f_1$ ——频带的最低频率, MHz;

$f_2$ ——频带的最高频率, MHz;

$l$ ——试样的物理长度, m;

$v_r$ ——试样标称速比。

当使用现代网络分析仪时,测量结果与所用的专用设备的型号和调整有很大关系。所以,当使用此类设备时,必须全面规定有关的测量参数,以防对测量结果产生误解和偏差。

### 11.12.7 要求

除非另有规定,所测得的回波损耗最小值应符合有关电缆规范的规定。

为确定试样两端的特性阻抗,应优选与试样的标称特性阻抗相同的标准线。

### 11.13 衰减常数

#### 11.13.1 原理

本试验旨在测定射频同轴电缆在优选频率大于或等于 10 MHz 时的衰减常数。如果试样的复数特性阻抗  $Z^1$  的幅值近似等于其标称值  $Z^2$ , 则也可在较低频率下测定。

#### 11.13.2 定义

衰减常数定义为:

$$a = 10 \lg \left( \frac{P_1}{P_2} \right) \times \left( \frac{100}{l} \right) \quad (\text{dB}/100 \text{ m}) \quad \dots\dots\dots (43)$$

式中:  $P_1$ ——当负载阻抗及信号源的阻抗等于试样的标称特性阻抗时,信号源的输出功率;

$P_2$ ——当试样插入试验系统时测得的输出功率;

$l$ ——试样的物理长度, m。

如果在很低的频率下,  $Z$  和  $Z$  的偏差不能忽略,则试样的长度应如下选取:

$$a \times l/100 >> 8.7 \times r^2 \quad \dots\dots\dots (44)$$

$$r = (|Z| - Z) / (|Z| + Z)^{3/2} \quad \dots\dots\dots (45)$$

式中:  $a$ ——标称衰减常数, dB/100 m;

$l$ ——试样的物理长度, m。

#### 11.13.3 试样制备

试样长度应使测量误差不超过试样衰减的 2%。试样长度的测量误差应不超过 1%。因此,衰减的总误差应不超过 3%。

如果采用如 11.13.7 所述的谐振法,试样的速比为已知,且其误差不超过标称值的 1%,那末,试样长度可由相邻谐振频率之差  $\Delta f$  来确定。

除了谐振法的试验电路 A 之外,试样的每一端都应安装连接器。连接器应与试验设备的端口直接相匹配,否则应采用试验转接器。在很高频率下,应考虑这些转接器的插入损耗。

#### 11.13.4 试验方法

试样既可以在匹配条件下测量,也可以用谐振电路测量,这取决于其衰减值。

采用说明:

1] IEC 61196-1 中为  $Z$ ;

2] IEC 61196-1 没有,为与复数特性阻抗  $Z$  区别开,本标准增加了  $Z$  (表示标称特性阻抗);

3] IEC 61196-1 中为  $r = (|Z| - Z) / (|Z| + Z)$ 。

当在谐振电路法(见 11.13.7)中试样的特性阻抗显得不重要时,如果它与其他程序中试验设备的阻抗不相同,则应采用匹配变压器。谐振法优选适用于具有任何特性阻抗的低损耗短段试样。

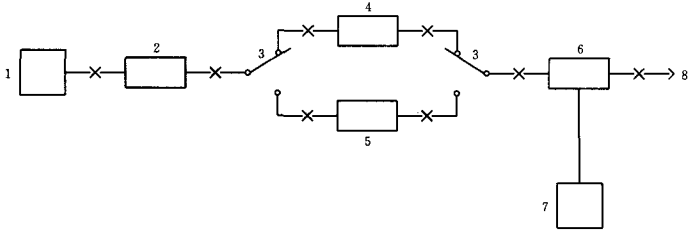
11.13.5 衰减器替代法(插入损耗 $\geq 3$  dB)

试样的衰减用步进衰减器替代,其剩余值指示于测试接收机的度盘上。

11.13.5.1 配置图

试验设备通常按图 17 和图 18 所示两种配置图之一来进行配置。

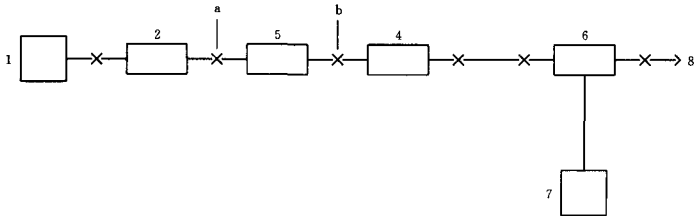
电路 A



1—信号发生器;2—衰减器, $\geq 6$  dB;3—同轴开关,隔离度 $\geq 20$  dB;  
4—衰减装置,0 dB~50 dB,1 dB一档;5—试样;6—插入单元;  
7—指示器,分辨率 $\leq 0.1$  dB;8—终端负载

图 17 替代法试验配置图 A

电路 B



1—信号发生器;2—衰减器, $\geq 6$  dB;4—衰减装置,0 dB~50 dB;  
5—试样;6—插入单元;7—指示器,分辨率 $\leq 0.1$  dB;8—终端负载;  
a,b—试验端口

图 18 替代法试验配置图 B

11.13.5.2 程序

对于试验电路 A,在试验频率下将试样接入试验电路,调整信号发生器电平,使其指示比满刻度偏低 1 dB(读数  $a_1$ ,dB)。然后将衰减装置接入试验电路并进行调整,使偏转读数( $a_2$ ,dB)与原始读数的偏差为最小,此时衰减装置的调定值  $a_s$ 。

对于试验电路 B,试验程序与试验电路 A 时相同,但衰减装置调为零。然后移去试样,将试验端口 a 和 b 连接在一起。再按试验电路 A 那样调整衰减装置。

11.13.5.3 结果表示

衰减常数应按下式确定:

$$a = \frac{a_2 + (a_2 - a_1)}{l(1 + 0.002(t - 20))} \times 100 \quad (\text{dB}/100 \text{ m})(20^\circ\text{C}) \quad \dots\dots\dots (46)$$

式中:  $a_s$ ——衰减器调定值,dB;

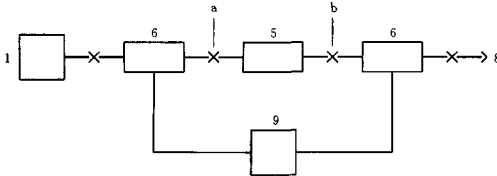
- $a_1$ ——接收机首次读数, dB;
- $a_2$ ——接收机最后读数, dB;
- $l$ ——试样长度, m;
- $t$ ——试样温度, °C。

11.13.6 输入、输出电压(或功率)比较法(插入损耗 $\geq 3$  dB)

衰减常数由输入、输出电压(或功率)之比来确定。两者可用一只测量接收机分别测量,也可用网络分析仪或双通道功率计同时测量。

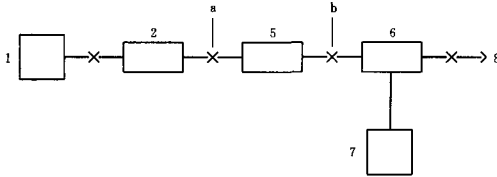
11.13.6.1 配置图

试验设备通常应按图 19 或图 20 所示两个配置图之一来进行配置。



1—信号发生器; 5—试样; 6—插入单元; 8—终端负载;  
9—网络分析仪; a, b—试验端口

图 19 比较法 A 的试验配置图



1—信号发生器; 2—衰减器,  $\geq 6$  dB; 5—试样; 6—插入单元;  
7—测量接收机; 8—终端负载; a, b—试验端口

图 20 比较法 B 的试验配置图

11.13.6.2 程序

对于试验电路 A, 先将试验端口连接在一起, 在试验频率下校准试验电路。然后将试样插入电路, 记下输入与输出电压(或功率)之比值(读数  $a, \text{dB}$ )。

对于试验电路 B, 先将试验端口连接在一起, 在试验频率下校准试验电路(读数  $a_1, \text{dB}$ )。然后插入电缆试样, 进行第二次测量(读数  $a_2, \text{dB}$ )。

11.13.6.3 结果表示

衰减常数由下式确定:

电路 A:

$$a = \frac{a \times 100}{l[1 + 0.002(t - 20)]} \quad (\text{dB}/100 \text{ m})(20^\circ\text{C}) \quad \dots\dots\dots(47)$$

电路 B:

$$a = \frac{(a_1 - a_2) \times 100}{l[1 + 0.002(t - 20)]} \quad (\text{dB}/100 \text{ m})(20^\circ\text{C}) \quad \dots\dots\dots(48)$$

- 式中:  $a$ ——试验电路 A 的读数, dB;  
 $a_1$ ——试验电路 B 不接试样时的读数, dB;  
 $a_2$ ——试验电路 B 接试样时的读数, dB;

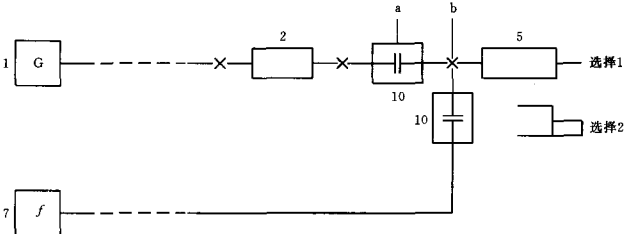
$l$ ——试样长度,m;  
 $t$ ——试样温度,℃。

11.13.7 谐振法(插入损耗 $\leq 3$  dB)

电缆被用作线路谐振器,衰减常数由谐振曲线的带宽来确定。

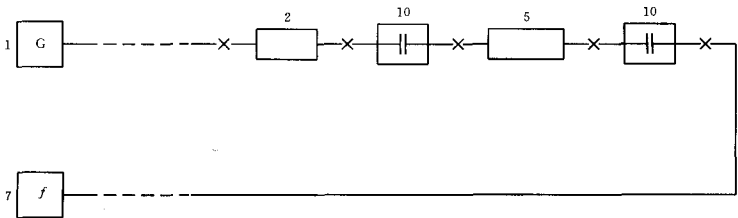
11.13.7.1 配置图

试验设备通常应按图 21 和图 22 所示的两种配置图之一来进行配置。



1—综合信号信号发生器或附带频率计的稳定信号信号发生器,  $\geq 10$  dBm;  
 2—衰减器,  $\geq 10$  dB; 5—试样; 7—测量接收机, 灵敏度 $\leq 10 \mu\text{V}$ ;  
 10—可变容性耦合器(可采用带有分离的可移动内导体的短段同轴线);  
 a, b—试验端口

图 21 谐振法 A 试验配置图



1—综合信号信号发生器或附带频率计的稳定信号信号发生器,  
 10 MHz~1 000 MHz,  $\geq 10$  dBm; 2—衰减器,  $\geq 10$  dB; 5—试样;  
 7—测量接收机, 灵敏度 $\leq 10 \mu\text{V}$ ; 10—可变容性耦合器(可采用  
 带有分离的可移动内导体的短段同轴线)

图 22 谐振法 B 试验配置图

11.13.7.2 程序

在试验电路 A 中:

对试样终端开路, 当

$$f_n = 150 \times v_t \times n / l \quad (\text{MHz}) \quad \dots\dots\dots(49)$$

对试样终端短路, 当

$$f_n = 150 \times v_t \times (n - 0.5) / l \quad (\text{MHz}) \quad \dots\dots\dots(50)$$

时, 试样输入端电压为最大。

式中:  $f_n$ ——试验频率;

$v_t$ ——试样的标称速比;

$l$ ——试样长度,m;

$n$ ——整数。



信号发生器的频率应调谐到谐振频率  $f_n$ 。信号发生器的频率和输出电压应同时调节,以使接收机偏转至满刻度。

为了防止试样的阻尼作用,应调节容性耦合器,使满足下式:

$$U_R < 5 \times 10^{-4} \times U_G \quad \dots\dots\dots (51)$$

(即小于 66 dB)

式中:  $U_R$ ——接收机的满刻度范围;

$U_G$ ——信号发生器输出。

然后,将频率调整至谐振频率两旁最大偏转下降 3 dB 的频率点上,该两频率之差即为带宽  $\delta f$ 。

上述测量应在规定频段的其他谐振频率上重复进行。

试验电路 B 可以防止对接收机的直接耦合。在接近 1 000 MHz 的频率上也应使用此电路,因为在此频率时,难以保持 a—b 的距离(图 21)总比波长短。

### 11.13.7.3 结果表示

衰减常数应由谐振曲线的带宽  $\delta f$  以及相邻谐振频率之差  $\Delta f$  来确定。

$$\Delta f = (f_{n,2} - f_{n,1}) / (n_2 - n_1) \quad \dots\dots\dots (52)$$

式中:  $n_1$ ——谐振频率  $f_{n,1}$  的谐振序数;

$n_2$ ——谐振频率  $f_{n,2}$  的谐振序数。

$$a = \frac{8.686 \cdot \delta f \cdot \pi}{2 \cdot \Delta f \cdot [1 + 0.002 \cdot (t - 20)]} \cdot \frac{100}{l} \quad (\text{dB}/100 \text{ m})(20^\circ\text{C}) \quad \dots\dots\dots (53)$$

式中:  $l$ ——试样长度, m;

$t$ ——试样温度,  $^\circ\text{C}$ 。

当速比为已知时,  $l$  可用下式代替:

$$l = \frac{150 \times v_r}{\Delta f} \quad (\text{m}) \quad \dots\dots\dots (54)$$

式中:  $\Delta f$ ——单位为 MHz。

如果  $b = \pi \times \delta f / 2 \times \Delta f > 0.07$  (电路 A) 或  $b = \pi \times \delta f / 2 \times \Delta f > 0.10$  (电路 B), 则使用上式引入的误差会超过试样总衰减的 0.4%。此时, 应使用更精确的公式。

电路 A

$$a = \frac{434.3}{l \cdot [1 + 0.002(t - 20)]} \times \ln[(1 + \tanh x) / (1 - \tanh x)] \quad (\text{dB}/100 \text{ m})(20^\circ\text{C}) \quad \dots\dots\dots (55)$$

式中:

$$\tanh x = \tanh b / [(0.25 + 2 \tanh^2 b)^{0.5} + 0.5]^{0.5} \quad \dots\dots\dots (56)$$

电路 B

$$a = \frac{868.6}{l \times [1 + 0.002(t - 20)]} \times \ln(\sqrt{1 + \sin^2 b} + \sin^2 b) \quad \dots\dots\dots (57)$$

### 11.13.8 要求

衰减常数应符合有关电缆规范的规定。

#### 11.14 衰减稳定性

正在考虑中。

#### 11.15 传输畸变

##### 11.15.1 原理

本试验确定由于射频同轴电缆局部特性阻抗不均匀性引起的传输畸变。

##### 11.15.2 定义

在频域, 射频电缆的传输畸变用衰减畸变、相位畸变及群延迟畸变来度量。

##### 11.15.2.1 衰减畸变

衰减畸变定义为:对于给定的频段,电缆的衰减/频率曲线与电气上均匀的电缆之平坦响应曲线之间的偏差。

#### 11.15.2.2 相位畸变

相位畸变定义为:对于给定的频段,电缆的相位/频率曲线与电气上均匀的电缆的相位/频率特性之间偏差。

#### 11.15.2.3 群延迟畸变

群延迟定义为:对于给定的频率范围,相位/频率曲线的导数。如果相位特性呈线性,则群延迟为常数。

群延迟畸变定义为:群延迟/频率曲线与电气上均匀的电缆的群延迟之间的偏差。后者与频率无关。

#### 11.15.3 试验设备

对于衰减畸变的测量,至少应使用标量网络分析仪。对于相位畸变和群延迟畸变的测量,推荐使用矢量网络分析仪。

网络分析仪的特性阻抗应与试样的标称特性阻抗相匹配,否则应由软件来消除失配的影响。

#### 11.15.4 试样制备

试样长度应在有关电缆规范中规定。如果设备软件不可能消除连接器的影响,则试样的连接应使其固有反射不对测量结果产生明显的影响。

#### 11.15.5 程序

校准网络分析仪以后,将试样作为四端网络接入,被测参数将显示于仪器的荧光屏上并记录下来。

在模拟信号处理和记录的情况下,扫频速度应与处理单元显示及记录器的瞬态响应相适应。逐渐降低扫频速度,直至峰值的大小都不再变化为止。

当进行数字信号处理和或记录时,应满足下述条件:

$$n \geq \frac{5(f_2 - f_1)}{150 \times v_r} \times l \quad \dots\dots\dots (58)$$

式中:  $n$ ——在形成显示曲线的频率范围  $f_1 \sim f_2$  中的取样点数目;

$f_1$ ——频率范围的最低频率, MHz;

$f_2$ ——频率范围的最高频率, MHz;

$l$ ——试样的物理长度, m;

$v_r$ ——试样的相对传播速度。

#### 11.15.6 结果表示

除非另有规定,指定的试验参数的畸变应该用与电气上均匀电缆的最平滑曲线的最大偏差来确定。

试验参数应如下表达:

——衰减畸变,以 dB 表示;

——相位畸变,以度表示;

——群延迟畸变,以 ns 表示。

#### 11.15.7 要求

衰减畸变、相位畸变或群延迟畸变不应超出有关电缆规范的规定。

#### 11.16 脉冲回波损耗

##### 11.16.1 原理

本试验采用不同类型的脉冲信号来确定射频同轴电缆的时域回波损耗。

注:脉冲回波损耗对时间进行显示,以说明特性阻抗不均匀性的位置分布。试验方法允许确定电缆端部的特性阻抗。试验一般用长段电缆进行,其长度根据脉冲宽度确定。

##### 11.16.2 定义

脉冲回波损耗  $a_P$  定义为:

$$a_p = 20 \lg(u_s/u_{r,x}) \quad (\text{dB}) \quad \dots\dots\dots (59)$$

式中： $u_s$ ——电缆输入端发送脉冲的电压；

$u_{r,x}$ ——电缆输入端测得的由离电缆始端  $x$  处的一个不均匀性引起的反射脉冲的电压。

校正的脉冲回波损耗  $a_{p,c}$  为电缆端部测得的反射损耗减去信号移动  $2x$  的脉冲衰减。它定义为：

$$a_{p,c} = a_p - 2ax/100 \quad (\text{dB}) \quad \dots\dots\dots (60)$$

式中： $a$ ——频率为  $f$  时测得的衰减常数 (dB/100 m)。在  $f_c$  附近，集中了脉冲能量的主要部分；

$x$ ——测得的距离，m。

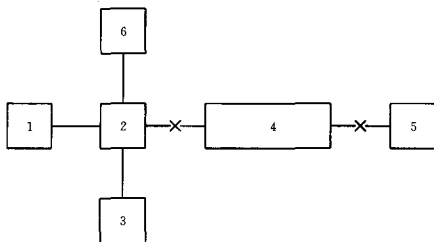
为了灵敏地确定  $a_{p,c}$ ，应注意到由于脉冲畸变脉冲衰减不能线性地随长度变化。

分辨率  $\delta l$  是回波损耗曲线上能区分的两个缺陷之间的最小距离。

脉冲宽度  $t_p$  以脉冲高度的一半处的脉冲宽度值来表示。

### 11.16.3 试验设备

试验设备通常按图 23 配置



1—脉冲信号发生器；2—混合定向耦合器；3—信号处理/显示单元；  
4—试样；5—可调终端负载；6—可调参考标准

图 23 脉冲回波损耗试验设备配置图

### 11.16.4 程序

通常使用两种脉冲。

#### 11.16.4.1 近似正弦平方脉冲

脉冲宽度应在有关电缆规范中规定。

分辨率  $\delta l$  由下式确定：

$$\delta l = 0.15 \times t_p \times v_r \quad (\text{m}) \quad \dots\dots\dots (61)$$

式中： $t_p$ ——脉冲宽度，ns；

$v_r$ ——试样的标称速比。

频率  $f_c$  由下式确定：

$$f_c = 250/t_p \quad (\text{MHz}) \quad \dots\dots\dots (62)$$

图 23 中设备 5 和 6 应调至反射最小。

回波损耗应显示并记录下来。

#### 11.16.4.2 具有正弦平方波形包络的连续波脉冲

载波频率  $f_c$  及脉冲宽度  $t_p$  应在有关电缆规范中规定。分辨率与单脉冲相同，并在 11.16.4.1 中规定。这类脉冲的能量集中于载频周围的一个窄频带内，使其能适用于电视系统所使用电缆的测量。

脉冲频谱宽度  $\delta f$  可由脉冲宽度  $t_p$  用下式确定：

$$\delta f = 1\,000/t_p \quad (\text{MHz}) \quad \dots\dots\dots (63)$$

式中： $t_p$ ——脉冲宽度，ns。

本方法不适用于确定试样两端的特性阻抗。对于制造长度的测量，从电缆响应中把输入连接器对试

样的影响分离出来是可能的,它可通过反射信号的适当选通和取样来实现,从而不受输入端接的影响。

11.16.5 要求

脉冲回波损耗和电缆端部的特性阻抗应满足有关电缆规范的要求。

11.17 阶跃函数回波损耗

11.17.1 原理

本试验利用阶跃函数信号来确定射频电缆时域回波损耗。

注:阶跃函数回波损耗对时间进行显示,以说明电缆始端附近特性阻抗不均匀性的大小和相位的位置分布。对于长段电缆,随长度衰减的反射响应实际上不能校正。

11.17.2 定义

阶跃函数回波损耗定义为:

$$a_{\text{ret}} = 20 \lg(u_{\text{r},x}/u_{\text{t},x}) \quad (\text{dB}) \quad \dots\dots\dots(64)$$

式中:  $u_{\text{r},x}$ ——离电缆始端  $x$  处的不均匀性反射的阶跃电压;

$u_{\text{t}}$ ——施加于试样的阶跃电压。

对于阶跃函数,上升时间  $t_r$  定义为:阶跃幅度的 10% 和 90% 之间的时间差。上升时间影响分辨率。分辨率  $\delta x$  可确定如下:

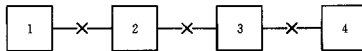
$$\delta x = 15 \times 10^{-5} \times t_r \times v_r \quad (\text{m}) \quad \dots\dots\dots(65)$$

式中:  $t_r$ ——上升时间,ps;

$v_r$ ——试样的速比。

11.17.3 配置图

试验设备通常按图 24 配置。



1—时域反射计(TDR);2—标准线(自选件);3—试样;4—终端负载

图 24 阶跃函数试验设备配置图

为了确定试样两端的特性阻抗,应优选与试样的标称特性阻抗相同的标准线。

11.17.4 程序

对试样进行试验用的阶跃函数的上升时间应符合有关电缆规范的规定。

记下回波损耗的测试曲线。

11.17.5 结果表示

阶跃函数回波损耗用(64)式计算。

11.17.6 要求

回波损耗应符合有关电缆规范的规定。

11.18 采用快速傅利叶变换(FFT)频域测量脉冲/阶跃回波损耗

现代网络分析仪技术提供了利用快速傅利叶变换(FFT)技术进行频域测量来获得特性阻抗位置分布的可能性。

当应用这些方法时,重要的是要注意测量结果与各试验设备的类型和调整有很大关系。因此,应用此方法时,所有有关的测量参数都应全面规定,以免对测量结果产生误解和偏差。

11.19 额定功率

11.19.1 原理

叙述了射频同轴电缆受温度和电压限制的射频额定功率的试验方法。这些试验通常只用于型式试验。因为必须覆盖宽广的电缆尺寸和频率范围,加之特殊场合使用的设备不可能到处具备,因此只给出各种不同原理的试验方法,而不详细讨论试验程序。

## 11.19.2 定义

电缆的额定功率定义为:当电缆端接其特性阻抗时,在任一给定的频率和环境温度下所能连续承受的输入功率。其制约因素是最大允许工作电压或内导体温度。

受电压限制的额定功率  $P_{u,\max}$  可从下式导出:

$$P_{u,\max} = U_0^2 \times Z_r / |Z|^2 \quad \dots\dots\dots (66)$$

$$P_{u,\max} \approx U_0^2 / Z \quad \dots\dots\dots (67)$$

式中:  $U_0$ ——最大允许工作电压, V(r. m. s);

$|Z|$ ——复数特性阻抗  $Z$  的绝对值;

$Z_r$ ——特性阻抗  $Z$  的实部;

$Z$ ——标称特性阻抗。

对于空气绝缘电缆,额定电压取决于工作气压,因而采用内气压为  $10^5$  Pa 及  $20^\circ\text{C}$  时的值。

受温度限制的额定功率  $P_{T,\max}$  定义为内导体达到其最大允许温度  $T_{1,\max}$  时的稳态功率。它采用内部气压为  $10^5$  Pa、环境温度  $40^\circ\text{C}$  时的值。

## 11.19.3 试样制备

试样长度至少应为其外径的 200 倍,但不得短于 1 m。试样应水平放置于静止的空气中,允许自由空气对流,并且应防止受到外部的热辐射。环境温度应为  $40^\circ\text{C}$ , 否则,应按 11.19.5.1 的规定将结果校正至  $40^\circ\text{C}$  时的值。

## 11.19.4 程序

## 11.19.4.1 试验持续时间

对于受电压限制的额定功率,试验持续时间应为 2 min,最大电压增率应为 2 kV/s。

对于受温度限制的额定功率,试验时间应至少持续至内导体达到稳定温度以后 1 h。

## 11.19.4.2 温度测量

取决于电缆尺寸及所用的试验方法,内导体温度可以连续测量,也可以在射频馈电电流短暂中止时测量,在后一种情况,必须在测量时对温度的下降进行校正。

## 11.19.4.3 试验方法

试验方法如下表所示,它们或适用于受电压限制的额定功率试验,或适用于受温度限制的额定功率试验,或两者同时适用。如果具备有足够功率的射频信号发生器,则应优先直接法是优先的方法。

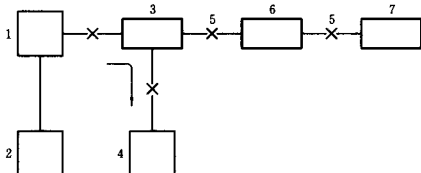
试验方法	$P_{u,\max}$	$P_{T,\max}$
a) 直接法	×	×
b) 环路功率乘法	×	×
c) 串联谐振法(电气长度短的试样)	×	
d) 串联谐振法(电气长度长的试样)	×	
e) 并联谐振法(电气长度短的试样)		×
f) 并联谐振法(0.25 波长试样)	×	×
g) 低频交流或直流法		×

如果试验条件不允许达到环境温度为  $40^\circ\text{C}$  或最大允许内导体温度,则额定功率的实测值可以按 11.19.5.1 的规定校正到标准温度时的值。

如果射频试验频率的适用范围受到限制,则其它频率下受温度限制的额定功率可按 11.19.5.2 的方法来确定。

## a) 直接法

试验配置图如图 25 所示。



1—信号发生器；2—频率计；3—定向耦合器；4—功率计；5—连接器；6—试样；7—终端负载

图 25 确定受温度或受电压限制的额定功率的试验配置图

试样和试验设备之间的失配会引起局部温度变化。这些变化引起的额定功率的最大测量误差定义为：

$$e_{\max} = 100 \cdot \left( \frac{(1+s)^2}{4} - 1 \right) (\%) \quad \dots\dots\dots (68)$$

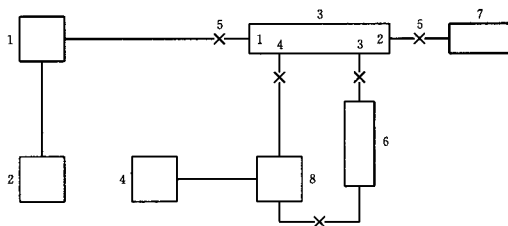
式中：s——试样的驻波比(SWR)；

$e_{\max}$ ——最大误差。

当在电流最小值时测量温度，会出现最大误差。

b) 环路功率乘法法

试验配置图如图 26 所示。



1—信号发生器；2—频率计；3—定向耦合器；4—功率表；5—连接器；

6—试样；7—终端负载；8—耦合装置(插入损耗尽可能小)

图 26 环路功率乘法法的试验配置图

定向耦合器的特性定义如下：

耦合损耗

$$a_K = 10 \lg(P_1/P_3) (\text{dB}) \quad \dots\dots\dots (69)$$

插入损耗

$$a_{1,2} = 10 \lg(P_1/P_2) (\text{dB}) \quad \dots\dots\dots (70)$$

式中： $P_1$ ——端口 1 的输入功率；

$P_2$ ——端口 2 的输出功率；

$P_3$ ——端口 3 的耦合功率。

如果满足下述条件：

——定向耦合器端口 2 低失配

——环路内低失配

——定向耦合器的电气耦合长度为  $\lambda_0/4$ ,  $\lambda_0$  为试验频率的自由空间波长。

——环路的总电气长度为  $N \times \lambda_0$ ,  $N$  为整数。

则环路功率  $P_R$  (在由电缆试样、耦合装置及定向耦合器的 3、4 端口所组成的环路内流通) 将是馈到端口 1 的功率  $P_1$  (信号发生器输出功率) 的倍数:

功率  $P_R$  和输入功率  $P_1$  的比可从下式导出:

$$P_R/P_1 = [K/(1 - A(1 - K^2)^{0.5})]^2 \dots\dots\dots(71)$$

式中:  $A$ —— $10^{-a/20}$ ;

$K$ —— $10^{-a_k/20}$ ;

$a$ ——环路损耗, dB;

$P_R$ ——环路功率;

$P_1$ ——端口 1 的输入功率。

当下式成立时,  $P_R$  为最大值:

$$A^2 + K^2 = 1 \dots\dots\dots(72)$$

在这种最佳耦合损耗的情况, 整个输入功率  $P_1$  全部耦合到环路(即:  $a_{1,2} \rightarrow \infty$ ), 如下图 27 所示。

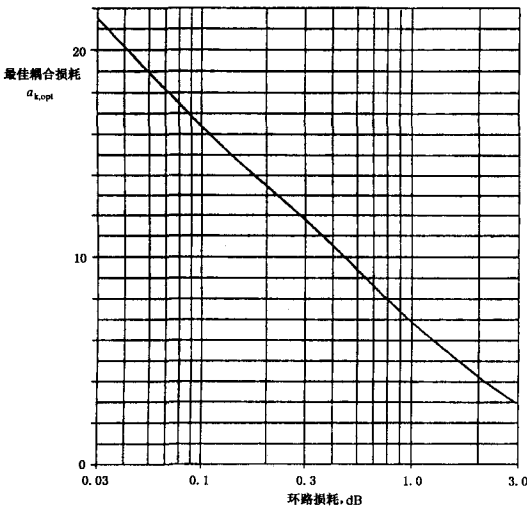


图 27 最佳耦合损耗  $a_{k,opt}$  与环路损耗  $\alpha$  的关系曲线

耦合损耗偏离最佳值的定向耦合器之性能如图 28 所示。

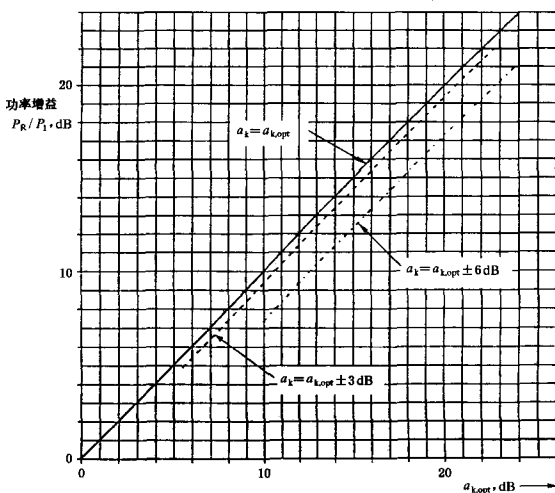
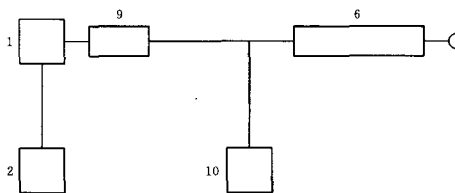


图 28 功率比  $P_R/P_1$  与最佳耦合损耗  $a_{k,opt}$  以及与最佳耦合的偏差的关系曲线  
 c) 用于电气长度短的试样的串联谐振电路  
 试验配置图如图 29 所示。



1—信号发生器;2—频率计;6—试样;9—串联电感;10—含有耦合装置的电压表  
 图 29 用于电气长度短的试样的串联谐振电路的试验配置图

当

$$\omega L = 1/\omega C$$

$$\omega L = \lambda_0 \times Z/2\pi l_e \quad \dots\dots\dots (73)$$

$$= Z/b \quad \dots\dots\dots (74)$$

- 式中:  $\omega$ ——角频率;  
 $\lambda_0$ ——试验频率的自由空间波长;  
 $Z$ ——试样的特性阻抗;  
 $l_e$ ——试样的电气长度;  
 $b$ ——试样的相移,rad;  
 $C$ ——试样的电容;  
 $L$ ——串联电感。



最大试验电压  $U$  由下式计算:

$$U = \frac{U_0 \times Z}{(b \times Z_0) + Z \left( \tan \delta_L + \frac{a}{b} \right)} \quad \dots\dots\dots (75)$$

式中:  $U_0$ ——信号发生器的开路电压;

$Z_0$ ——信号发生器的内阻抗;

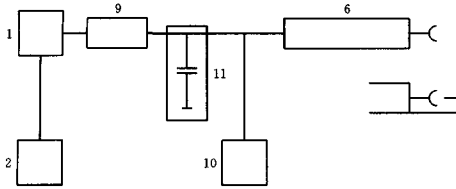
$\delta_L$ ——电感的损耗角;

$a$ ——试样的衰减,  $N_p$ 。

试样应开路,其电气长度应小于或等于  $0.03\lambda$ 。

d) 用于电气长度长的试样的串联谐振电路。

试验配置图如图 30 所示。



1—信号发生器;2—频率计;6—试样;9—串联电感;10—含有耦合装置的电压表;11—并联电容

图 30 用于电气上长试样的采用联谐振电路的试验配置图

当谐振时,  $\omega^2 LC = 1$  ( $\omega$  为角频率), 试验电压  $U$  为:

$$U = \frac{Z \times (L/C)^{0.5}}{Z \times Z_0 + a \times L/C} \times U_0 \quad \dots\dots\dots (76)$$

式中:  $Z$ ——试样的特性阻抗;

$a$ ——试样的衰减,  $N_p$ ;

$L$ ——串联电感;

$C$ ——并联电容;

$Z_0$ ——信号发生器的内阻抗;

$U_0$ ——信号发生器的开路电压。

如果  $Z_0 = Z, L/C = Z^2/a$ , 则可得到试验电压的最大增益:

$$U = U_0 \times (2 \times a^{0.5}) \quad \dots\dots\dots (77)$$

试样终端可以开路或短路,其电气长度  $l_e$  可如下确定:

$$l_e = n \times \lambda_0 / 4 \quad \dots\dots\dots (78)$$

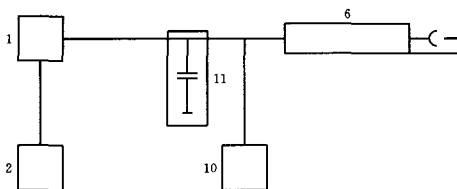
式中:  $\lambda_0$ ——试验频率的自由空间波长;

$n$ ——1, 3, 5……(试样终端短路);

$n$ ——2, 4, 6……(试样终端开路)。

e) 用于电气上短试样的并联谐振电路

试验配置图如图 31 所示。



1—信号发生器;2—频率计;6—试样;10—含有耦合装置的电压表;11—并联电容

图 31 用于电气长度短的试样的并联谐振法的试验配置图

谐振时,

$$1/\omega C = \omega L \quad \dots\dots\dots (79)$$

式中:  $\omega$ ——角频率;

$C$ ——并联电容;

$L$ ——试样的电感。

$$1/\omega C = Z(2\pi l_e/\lambda_0) \quad \dots\dots\dots (80)$$

$$1/\omega C = z \times b \quad \dots\dots\dots (81)$$

则最大试验电流  $I$  定义为:

$$I = \frac{U_0}{(b \times Z) + Z_0 \left( \tan \delta_c + \frac{a}{b} \right)} \quad \dots\dots\dots (82)$$

式中:  $l_e$ ——试样的电气长度;

$\lambda_0$ ——试验频率的自由空间波长;

$U_0$ ——信号发生器的开路电压;

$Z$ ——试样的标称特性阻抗;

$b$ ——试样的相移, rad;

$a$ ——试样的衰减, Np;

$\delta_c$ ——并联电容的损耗角;

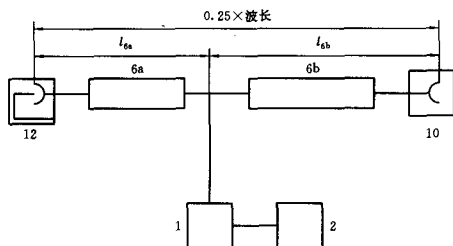
$Z_0$ ——信号发生器的内阻抗。

试样应短路,其电气长度应小于或等于  $0.03\lambda_0$ 。

f) 用于 0.25 波长试样的并联谐振电路

其方法的优点是谐振电路仅由试样形成,从而不需要附加的分立元件。

试验配置图如图 32 所示。



1—信号发生器;2—频率计;6a—短路的试样部分;6b—开路的试样部分;

10—含有耦合装置的电压表;12—含有耦合装置的电流表

图 32 用于 0.25 波长试样的并联谐振电路试验配置图

谐振时最大试验电压  $U_b$  定义为:

$$U_b = U_0/2 \times a^{0.5} \quad \dots\dots\dots (83)$$

式中:  $U_0$ ——信号发生器的开路电压;

$a$ ——试样的衰减,  $N_p$ ;

最大试验电流  $I_s$  为:

$$I_s = U_0/Z \times 2 \times a^{0.5} \quad \dots\dots\dots (84)$$

式中:  $Z$ ——试样的特性阻抗。

当总的电气长度 ( $l_e = l_{e,6a} + l_{e,6b}$ ) 为  $\lambda_0/4$  时, 电路发生谐振:

$$l_{e,6a} = v_r \times \arcsin(a^{0.5})/\beta_0 \quad (m) \quad \dots\dots\dots (85)$$

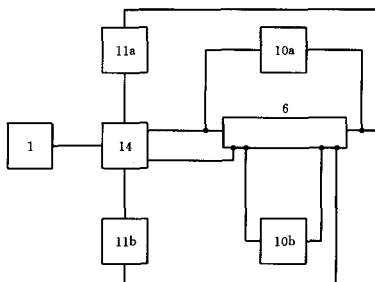
式中:  $a$ ——试样的衰减,  $N_p$ ;

$\beta_0$ ——试样的相位常数,  $rad/m$ ;

$v_r$ ——试样标称速比。

g) 低频或直流法

试验配置图如图 33 所示。



1—交流或直流电源;6—试样;10—电压表;11—电流表;14—可变功率分配器

图 33 低频交流或直流法的试验配置图

本试验采用低频或直流电流加热内外导体的方法来模拟终端接负载的射频同轴电缆内的温度分布。内导体的消耗功率为:

$$P_{d1} = (U_1 \times I_1)/l \quad (W/m) \quad \dots\dots\dots (86)$$

外导体的消耗功率为：

$$P_{d3} = (U_3 \times I_3) / l \quad (\text{W/m}) \quad \dots\dots\dots (87)$$

式中： $U_1$ ——试样内导体上的 IR 降；

$I_1$ ——试样内导体上的电流；

$U_3$ ——试样外导体上的 IR 降；

$I_3$ ——试样外导体中的电流；

$l$ ——试样的长度。

当下式成立时，内导体达到最大允许温度。

$$U_1 / I_1 = R_1 l_1 (1 + \eta_1 (T_{1,\max} - T_s)) \quad \dots\dots\dots (88)$$

式中： $\eta_1$ ——内导体材料的温度系数；

$T_{1,\max}$ ——内导体最大允许温度；

$T_s$ ——试验时的环境温度；

$R_1$ ——环境温度下的内导体电阻；

$l_1$ ——内导体长度。

内导体/外导体的消耗功率之比取决于所模拟的射频频率，它可用功率分配器调整至：

$$\frac{P_{d3}}{P_{d1}} = \frac{a_3(1 + 0.002(T_{1,\max} - T_s)) + 0.5a_2}{a_1(1 + 0.002(T_{1,\max} - T_s)) + 0.5a_2} \quad \dots\dots\dots (89)$$

式中： $a_1$ ——频率为  $f$ 、温度为 20℃ 时的内导体衰减，Np/m；

$a_2$ ——频率为  $f$ 、温度为 20℃ 时的介质衰减，Np/m；

$a_3$ ——频率为  $f$ 、温度为 20℃ 时的外导体衰减，Np/m。

在模拟频率  $f$  和环境温度  $T_s$  下，试样的最大允许额定功率  $P(T_s, f)$  可从下式导出：

$$P(T_s, f) = P_d / 2a_T \quad (\text{W}) \quad \dots\dots\dots (90)$$

$$= (P_{d1} + P_{d3}) / 2a_T \quad (\text{W}) \quad \dots\dots\dots (91)$$

式中： $a_T$ ——工作于最大允许功率的试样之衰减，Np/m。

$a_T$  最好用加热箱进行测量。如果试样太长， $a_T$  可用下式来确定：

$$a_T = a_1 \cdot (1 + 0.002(T_{1,\max} - T_s)) + a_2 + a_3 \cdot (1 + 0.002 \cdot (T_{1,\max} - T_s)) \quad \dots\dots\dots (92)$$

## 11.19.5 结果表示

### 11.19.5.1 额定功率的温度换算公式

内导体温度  $T_1$ ，环境温度为  $T_s$  时测得的受温度限制的允许功率  $P_1$ ，可用下述近似公式换算至内导体最大允许温度  $T_{1,\max}$  及标准环境温度或其他环境温度  $T$  时的值。

$$P = P_1 ((T_{1,\max} - T) / (T_1 - T_s))^{1.14} \quad \dots\dots\dots (93)$$

式中： $P$ ——标准环境温度或其他环境温度下的受温度限制的额定功率；

$P_1$ —— $T_1$  和  $T_s$  下测得的输入功率；

$T$ ——标准环境温度或其他环境温度；

$T_1$ ——内导体温度；

$T_s$ ——试验时的环境温度；

$T_{1,\max}$ ——内导体最大允许温度。

### 11.19.5.2 额定功率的频率换算公式

当射频试验频率适用范围受到限制时，可用下式将频带内的频率  $f_1$  的额定功率外推至频带外的频率  $f_2$ ：

$$P_{(40.f_2)} = P_{(40.f_1)} \times (a_T(f_1)) / (a_T(f_2)) \times X \quad \dots\dots\dots (94)$$

式中：

$$X = P_d(f_2)/P_d(f_1) \quad \dots\dots\dots (95)$$

X 应(从 X=1 开始)反复计算

$$X_{n+1} = (T_{1,\max} - T_4 - (T_4 - T_4) \times X_n^{2.5}) / (Y(T_{1,\max} - T_3) + T_3 - T_4)^{1/3} \quad \dots\dots (96)$$

$n=1, 2, 3, \dots$

$$Y = \frac{a_T(f_1)}{a_T(f_2)} \cdot \frac{a_{1T}(f_2) + 0.5 \times a_2(f_2)}{a_{1T}(f_1) + 0.5 \times a_2(f_1)} \quad \dots\dots\dots (97)$$

式中:  $P(40, f_1)$ ——频率  $f_1$  和环境温度 40℃ 时受温度限制的额定功率;

$P(40, f_2)$ ——频率  $f_2$  和环境温度 40℃ 时受温度限制的额定功率;

$P_d(f_1)$ ——频率  $f_1$  时最大负荷电缆的消耗功率;

$P_d(f_2)$ ——频率  $f_2$  时最大负荷电缆的消耗功率;

$a_T(f_1)$ ——频率  $f_1$  时最大负荷电缆的衰减;

$a_T(f_2)$ ——频率  $f_2$  时最大负荷电缆的衰减;

$a_{1T}(f_1)$ ——频率  $f_1$  时最大负荷电缆的内导体衰减;

$a_{1T}(f_2)$ ——频率  $f_2$  时最大负荷电缆的内导体衰减;

$a_2(f_1)$ ——频率  $f_1$  时介质衰减;

$a_2(f_2)$ ——频率  $f_2$  时介质衰减;

$T_4$ ——标准环境温度(40℃)或其他环境温度;

$T_{1,\max}$ ——内导体最大允许温度;

$T_3$ ——加载电缆的外导体温度;

$T_4$ ——加载电缆的护套温度。

如果  $f_2 < f_1$ , 则必须注意确保  $P(f_2)$  不超过受电压限制的额定功率。

## 12 屏蔽效率

### 12.1 表面转移阻抗: 线注入法(频域)

#### 12.1.1 原理

本试验通过测量表面转移阻抗的方法来确定射频同轴电缆的屏蔽效率。为了测量表面转移阻抗, 对电缆屏蔽施加已知的电流和电压, 并测量内部感应电压。

测量可用普通的高频仪器在几千赫至 3 千兆赫的频段内进行。

#### 12.1.2 定义

##### 12.1.2.1 电气长度短的电 缆

注: 对于电气长度短的电 缆或低频的一个好的判据是  $l < \lambda/10$ , 式中  $l$  为电 缆长度,  $\lambda$  为波长 ( $\lambda = 300/f \sqrt{\epsilon_r}$ ,  $f$  以 MHz 为单 位,  $\lambda$  以 m 为单 位)。

确定射频同轴电 缆屏蔽效率的最重要因素是屏蔽的表面转移阻抗  $Z_T(\Omega/m)$ 。

电 气长度短 的纵向均匀电 缆的表面转移阻抗  $Z_T$  定义为次级电 路(内电 路)上感应的纵向电压与初级电 路(外电 路)中流通的电 流的比。

虽然大多数电 缆的容性耦合可以忽略, 但在单层松编织电 缆的情况, 通过屏蔽小孔的耦合, 用通过电 容  $C_T$  或容性耦合导纳  $Y_C$  来描述。  $Y_C$  定义为次级电 路(内电 路)中的感应电 流与初级电 路(外电 路)上的电压之比。对于电 气长度短 的纵向均匀电 缆:

$$Y_C = j\omega C_T \quad \dots\dots\dots (98)$$

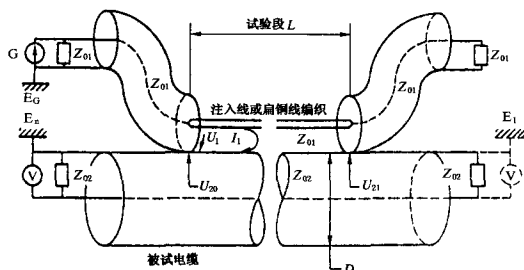
通过电 容  $C_T$  的大小取决于外电 路。

采用说明:

1] IEC 61196-1 中为  $X_{n+1} = (T_{1,\max} - T_4) - (T_4 - T_4) \times X_n^{2.5} / (Y(T_{1,\max} - T_3) + T_4 - T_3)$ 。

## 12.1.2.2 电气长度长的电缆

对于电气长度长的电缆,容性耦合与感性耦合同时作用于电缆,因此,等效转移阻抗  $Z_{TE}$  (它包括两种作用)或屏蔽衰减  $a$ ,是高频时对屏蔽的一种适当量度。



$n$ —近端;  $f$ —远端; 1—初级(注入)电路; 2—次级电路;  $Z_{01}$ —电路 1 的特性阻抗;

$Z_{02}$ —电路 2 的特性阻抗;  $G$ —发生器;  $V$ —接收机;  $E$ —同轴仪器接地

图 34 理论传输型线注入试验配置图

容性耦合阻抗  $Z_F$  定义为:

$$Z_F = j\omega C_T Z_{01} Z_{02} \quad \dots\dots\dots (99)$$

等效转移阻抗  $Z_{TE}$  定义为:

$$Z_{TE} = \max |Z_F - Z_T| \quad \dots\dots\dots (100)$$

根据图 34,相对于馈电方向,耦合转移函数  $T$  是一个不变量。它对于近端及远端耦合的归一化波幅分别为:

$$T_n = \frac{U_{2n} / \sqrt{Z_{02}}}{U_{1n} / \sqrt{Z_{01}}} = \frac{I_{2n} \cdot \sqrt{Z_{02}}}{I_{1n} \cdot \sqrt{Z_{01}}} \quad \dots\dots\dots (101)$$

$$T_f = \frac{U_{2f} / \sqrt{Z_{02}}}{U_{1f} / \sqrt{Z_{01}}} = \frac{I_{2f} \cdot \sqrt{Z_{02}}}{I_{1f} \cdot \sqrt{Z_{01}}} \quad \dots\dots\dots (102)$$

式中:  $U_{1n}$ ——初级电路中近端向远端传输的电压波。对于匹配的电路,并假定可忽略次级电路对初级电路的再耦合波,则在初级电路中不存在向近端传输的波。对于实际射频电缆  $T \ll 1$  的假设是正确的;

$U_{2n}$ ——次级电路中在近端测得的向近端传输的电压波;

$U_{2f}$ ——次级电路中在远端测得的向远端传输的电压波。

## 12.1.3 试验设备

对于高动态范围转移阻抗试验用的测量设备组成如下:

信号发生器

——跟踪发生器或综合信号发生器;

——功率放大器,用于很小的转移阻抗值 ( $< 3 \mu\Omega/m$ , 即  $> 150 \text{ dB}$ );

——校准步进衰减器。

接收机

——低噪声放大器;

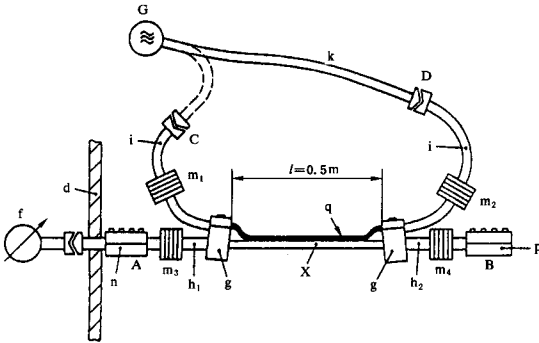
——频谱分析仪。

## 注

- 1 为了取得和显示数据,最好用台式计算机来控制信号发生器和接收机。
- 2 如果注意避免仪器内部的信号泄漏,则利用网络分析仪和宽带低噪声前置放大器就可以测量约 120 dB 的电平差。这些仪器可用于转移函数的相位试验,但在低信号电平时,相位测量的精度要求很严格。
- 3 当测量低的转移阻抗值时,为了防止信号泄漏至接收设备,推荐使用屏蔽室。如果要求的动态范围高达 100 dB 左右,则不必使用屏蔽室。

## 12.1.4 试验装置

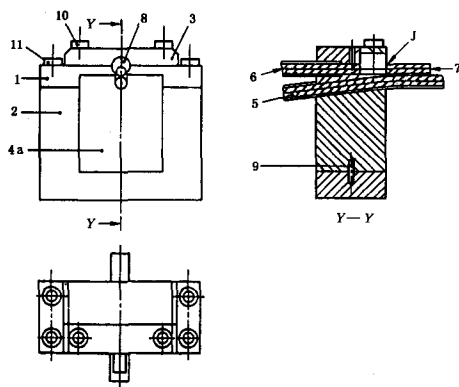
如图 35 所示,初级电路的结构为:由两根或两根以上的平行导线、皱纹铜带或一段平的铜编织和被测电缆外导体所组成的一段传输线作为注入电路。注入电路的两端通过发射器与同轴线相连接。同轴线的导体尺寸与绝缘形式应选择得与初级电路的特性阻抗相匹配。



A, B, C 和 D 在正文中说明。

X—被试电缆(CUT);d—带有屏蔽的同轴馈电孔的屏蔽室墙;G—发生器(综合发生器或跟踪发生器等);f—试验接收机(频谱分析仪、网络分析仪等);g—注入电路发射器; $h_1, h_2$ —黄铜/紫铜管,用作被试电缆的附加屏蔽;i—注入线的馈电电缆(低耗);k—发生器的馈电电缆;m—铁氧体环(长度约 100 mm);n—被试电缆与屏蔽室之间连接部分的附加屏蔽;p—被试电缆终端电阻的附加屏蔽;q—注入线

图 35 实际测量屏蔽效率的完整装置



数量	部 件	部 位	备注,材料
4	公制螺钉 M3×10	11	
2	公制螺钉 M3×6	10	
1	销钉 $\Phi 2 \times 8$	9	
1	泡沫介质	8	$\epsilon$ 接近 1
1	注入线	7	
1	50 $\Omega$ 同轴电缆	6	阻抗按要求
1	被测电缆 (CUT)	5	
1	被测电缆插入衬垫	4a	黄铜
1	阻抗匹配部件	3	黄铜
1	下部件	2	黄铜
1	上部件	1	黄铜
	试验发射器(需 2 只)		

图 36 传输线注入法用发射器装配图——部件表



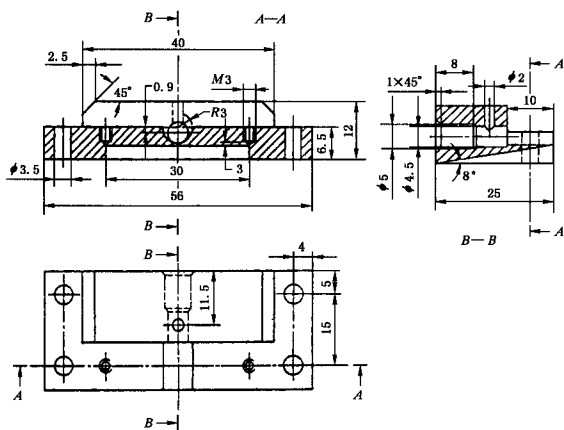


图 37 发射器上部件——部位 1

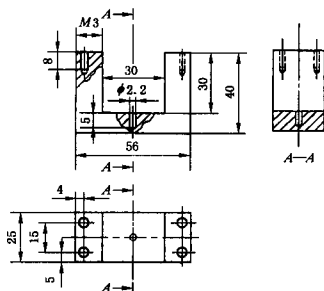


图 38 发射器下部件——部位 2

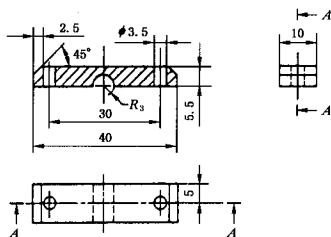


图 39 发射器阻抗匹配部件——部位 3

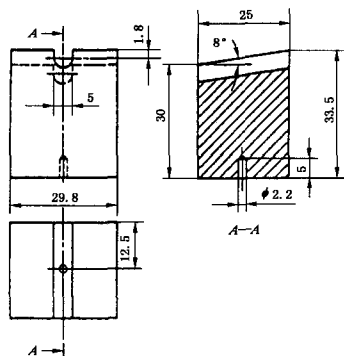


图 40 被试电缆不同尺寸转换衬垫——部位 4

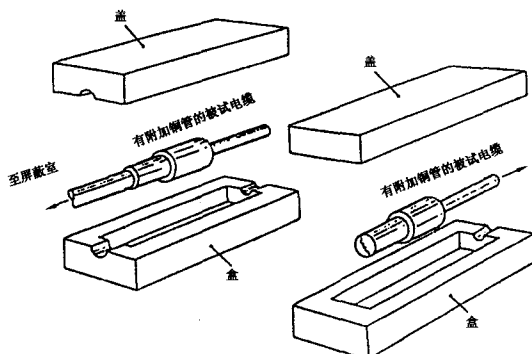


图 41 被试验电缆(CUT)连接器的附加屏蔽

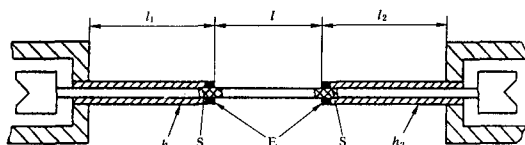


图 42 被试电缆(CUT)制备

发射器结构应调整,使同轴馈电电缆和端接电缆中的对称 TEM 波与沿平行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。适用的一种发射器的细节见图 36~图 40。不连续性的精细调整可用改变泡沫衬垫(图 36 部位 8)的办法来进行。

另外,可用搭于被试电缆上的小型连接器(焊接型)来做发射器,或用更简便的方法即把具有合适特性阻抗的小同轴电缆的外导体捆在被试电缆的裸露护套上。在试验区域,同轴电缆的内导体用两根或四根平行线、皱纹铜带或平铜线编织来延续。发射器不连续性的精细调整可通过把接点和注入线与试验区域的被试电缆护套靠得更紧的办法来实现。

注入线对被试电缆的外屏蔽应有恒定的阻抗,这是很重要的。对于频率范围大于 1 GHz 的测量,馈电电路包括发射器的反射系数应不大于 0.1。可以用时域反射计(TDR)或网络分析仪来检验匹配情况,

网络分析仪应具有使用快速傅利叶变换(FFT)进行频率—时间转换的能力。

图 35 中, A 和 B 是被试电缆和接收机及终端之间连接部分的屏蔽盒。C 和 D 为连接器(SMA, N, TNC 等)。为了防止端子产生激励成为天线, 并增加回路阻抗, 铁氧体环应具有足够的电感(见 12.1.6.1b), 其长度至少应为 100 mm。

#### 12.1.5 试样(被试电缆)制备

当频率在 3 GHz 以下时, 两个发射器之间的试样长度推荐为 0.5 m。对于 12.1.4 所述的发射器, 试验段长度以外的被试电缆应用黄铜或紫铜管加以屏蔽(见图 42 中  $h_1, h_2$ )。屏蔽管应采用焊接或压接的方式在 E 处与电缆屏蔽 S 接触。如果采用焊接方式, 应注意防止电缆绝缘过热。一种好的作法是选择管子直径, 使剥去外护套的被试电缆能插入管内, 并用标准的压接工具固定。这种方法的优点是管子直径的紧密安置, 可防止在被试电缆试验段附近电缆编织 S 发生松散现象。另一种办法是用楔子来接触不可焊接的铝箔/编织电缆。

在被测电缆两端安装适当的连接器(N, SMA)。它们被连接到终端负载和接收机电缆, 并固定于屏蔽盒内。

整个被试电缆应用 TDR 来试验其本身的电气质量。为了防止机械损伤, 在管子和被试电缆的试验部分之间的接点上应避免弯曲力。

为了减小电磁能对自由端产生不希望的耦合,  $l_1$  和  $l_2$  的和应不超过被试电缆试验部分的长度。

#### 12.1.6 测量注意事项

##### 12.1.6.1 减小的初级电流

当用常规的同轴仪器进行远端测量时, 接收机通常在  $E_t$  处接地(见图 34)。在电阻效应可能超过电感效应的低频点, 或由于在高频范围的谐振, 一部分注入电流会从  $E_t$  直接流向  $E_g$  而不沿被试电缆的屏蔽层回流。如果屏蔽层中的电流不直接控制在试验段上, 上述现象将导致灵敏度的降低, 甚至造成测量误差。此问题可作如下解决:

- 避免在较低频率(主要在千赫范围)下进行远端测量;
- 在注入线的同轴馈电器上采用公共模扼流圈(在较高的千赫及更高的频率有效);
- 对发生器或接收机主电源(如果不在同一机架内), 或注入线的同轴馈电器采用隔离变压器。(这些测量从最低频率范围开始有效, 但应注意避免纵向谐振)。

##### 12.1.6.2 非控制电流

需特别注意不通过同轴馈电回路回流的低频地电流。这种电流流经非试验部分的设备, 特别是接收机机架。所以, 当测量很高的屏蔽衰减时, 不能得到所需的灵敏度。最好的方法是采用 12.1.6.1 所述的隔离变压器。

##### 12.1.6.3 电缆屏蔽的圆周方向不均匀性

注入电路所覆盖的圆周角取决于注入电路的特性阻抗与试验电路的阻抗的匹配情况(当使用两根或以上的平行导线时)。

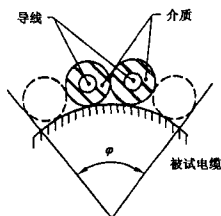


图 43 注入电路的覆盖角

为了充分覆盖圆周,应至少测量4次,每次相隔90°,其覆盖角度为60°~120°。当电缆直径大于10 mm时,必需进行更多的测量。

#### 12.1.6.4 被试电缆初级和次级电路的衰减

电路衰减应足够低,以确保被试电缆所有长度(见图42中*L*)都起作用。

#### 12.1.7 测量程序

按图35配置试验设备。

把发生器输出连接到接收机输入,设定基准电平。

发生器接至C端,接收机与D端相接,测量并贮存注入电路的插入损耗数据。

发生器接至B端,接收机接至被试电缆另一端的A端,测量并贮存被试电缆的插入损耗数据。对于这一校准,为了使接收机达到必需的动态范围,应接入合适的衰减值。

发生器接至C端,用适当的阻抗端接B端和D端,测量近端转移函数。

发生器接至D端,用适当的阻抗端接C端,测量远端的转移函数。

当测量的转移函数值较低时,应在A端和B端加上屏蔽。

测量期间,所有的金属部件离开注入线路的距离都应在0.5 m以上。

相速度*v*的测量可采用时域反射计(TDR)或网络分析仪用常规方法进行,网络分析仪应具有频率—时间转换功能。

适用时,通过电容*C<sub>T</sub>*可用12.3所述程序测量。

#### 12.1.8 结果表示

从上述试验,可计算有效转移阻抗*Z<sub>TE</sub>*和屏蔽衰减*a<sub>s</sub>*,如下:

按照定义:

$$Z_{TEnf} = |Z_F \pm Z_T| \rightarrow Z_{TE} = \max(Z_{TE+}; Z_{TE-})$$

a)

$$Z_{TEnf} \approx \frac{2}{L} \times \sqrt{Z_{01} \times Z_{02}} \times \text{Env}(T_{nf}) \times \left(1 + \frac{\pi \times f \times L}{v_{\pm}}\right) \dots\dots\dots (121)$$

式中: Env(*T<sub>nf</sub>*)——近端/远端耦合函数的包络线;

*L*——被试电缆的长度。

$$T_{nf} = 10^{-A_T/20} \dots\dots\dots (122)$$

$$v_{\pm} = \frac{v_1 \times v_2}{|v_2 \pm v_1|} \dots\dots\dots (123)$$

式中: +表示近端, -表示远端;

*v<sub>1</sub>*表示初级电路的相速;

*v<sub>2</sub>*表示次级电路的相速;

$A_T = A_s - (A_c/2) - (A_l/2)$ (见图58)。

注: 当  $Z_T \gg Z_F$ , 则  $Z_T \approx Z_{TE}$ , 近端( $T_n, v_+$ )或远端( $T_i, v_-$ )数据都可使用。

实际上,对于频率小于30 MHz,优先使用近端测量数据。

如果  $Z_T \gg Z_F$ , 则  $Z_T$  可用图58所示的简单程序和公式(131)进行计算。

b)

$$a_s = -20 \lg(\max[\text{Env}\{T_n\}; \text{Env}\{T_i\}]) \dots\dots\dots (124)$$

在归一化情况  $|\Delta v/v_1| = 10\%$  和  $Z_2 = 150 \Omega$  下,屏蔽衰减 *a<sub>s</sub>* 也可以表示为:

$$a_s(10\%/150 \Omega) \approx -20 \lg \left( \frac{Z_{TE} \times 11 \times v_1}{2\pi f \times \sqrt{Z_{01} \times 150}} \right) \dots\dots\dots (125)$$

只有在频率高于截止频率*f<sub>c</sub>*时屏蔽衰减才是有效的。

$$f_c = \frac{v_1 \times v_2}{|v_2 - v_1| \times \pi \times L} \dots\dots\dots (126)$$

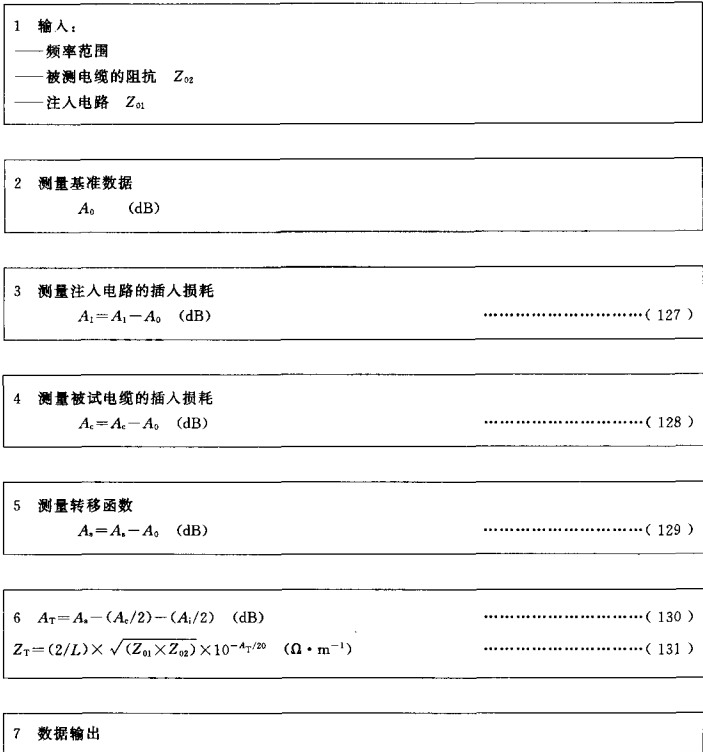


图 58 当  $Z_T \gg Z_F$  时有效的计算机流程图

12.1.9 线注入法的精度和限制

耦合函数的测量精度优于  $\pm 6$  dB。此数据包括评价线路注入试验法时用于比较测量的试验方法的精度。

试验方法的两个限制：

- 上限频率；
- 动态范围。

图 35 所示的普通高频仪器和装置所获实际上限频率约为 3 GHz。然而，如果限制条件是在初级电路或次级电路中出现高次模传输，则本方法可扩展至 10 GHz 或更高的频率。高次模的存在可用扫频传输测量来检验。

动态范围限制仅取决于仪器本身及装置所有部件的仔细屏蔽。

## 12.1.10 要求

在每一试样的周围,应用近端测量或远端测量的方法至少测量四次。转移阻抗的最大实测值应不超过有关电缆规范规定的极限值。

## 12.2 表面转移阻抗;三同轴法

## 12.2.1 原理

本试验用表面转移阻抗来定义射频同轴电缆的屏蔽效率。为了确定表面转移阻抗,将对电缆屏蔽施加已知的电流和电压,并测量内部感应电压。三同轴测量法适用于 100 MHz 以下的频率范围。

## 12.2.2 定义

确定射频电缆屏蔽效率的最重要的因素是电缆屏蔽层的表面转移阻抗  $Z_T(\Omega/m)$ 。

电气长度短的纵向均匀电缆的表面转移阻抗  $Z_T$  定义为:次级电路(内电路)内的纵向感应电压除以初级电路(外电路)中的电流之商。

## 12.2.3 试验设备

试验装置具有“三同轴”结构(见图 44),一短段被研究的圆柱形屏蔽构成馈电同轴系统的内导体,同时又是另一同轴线的导体。内同轴系统中的信号是由屏蔽层的表面转移阻抗引起的。

三同轴装置的内直径和屏蔽之间的比率要足够大,因为在整个测量频段内,外电路的电抗要比其电阻大得多。

被测屏蔽电缆的一端用一电阻端接,电阻的数值等于电缆的特性阻抗。端接电阻用金属套屏蔽,在金属套的开口边缘焊到屏蔽上。端接电阻和电缆同轴地固定于金属管内。在与电阻相反的一边,金属管用短路盘片端接,短路盘片焊到屏蔽上,见图 44。

在金属管中的电缆长度,按所用的测量设备,应不超过  $0.1\lambda \sim 0.35\lambda$ 。金属管外电缆凸出部分的长度没有影响。

## 12.2.4 程序

由被研究的屏蔽和金属管形成的外同轴系统通过内接电阻(方法 1)或直接连接方法(方法 2)从发生器馈电。

不管采用哪一种方法,比值  $U_1/U_2$  都可用校准衰减器直接确定,代替了  $U_1$  和  $U_2$  的分别测量。

注:对两种方法都适合的电缆长度通常为 1 m。

## 12.2.4.1 方法 1:通过电阻馈电

发生器通过一纯电阻( $R$ )馈入外系统,电阻的阻值最好等于外系统特性阻抗的 1.4 倍。电阻的输入电压用适当的电压表测量。电缆本身形成的内系统的输出电压用匹配的电压表测量。

然后,可用下式计算转移阻抗:

$$|Z_T| = \frac{2R}{l} \times \frac{U_2}{U_1} \times F' \quad \dots\dots\dots(103)$$

式中:  $Z_T$ ——转移阻抗,  $\Omega/m$ ;

$R$ ——馈电电阻,  $\Omega$ ;

$l$ ——被试屏蔽的长度, m;

$U_1$ ——电阻  $R$  前测得的外系统输入电压, V;

$U_2$ ——屏蔽终端测得的内系统输出电压, V;

$F'$ ——频率响应的修正系数,见图 45,精确值可由(104)式计算。

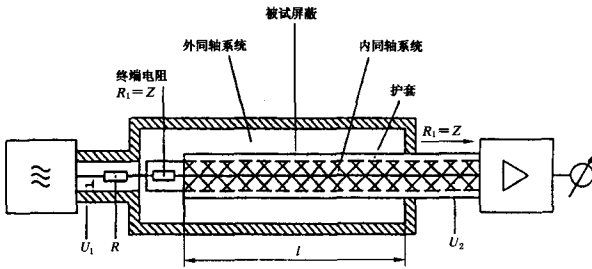


图 44 三同轴试验设备

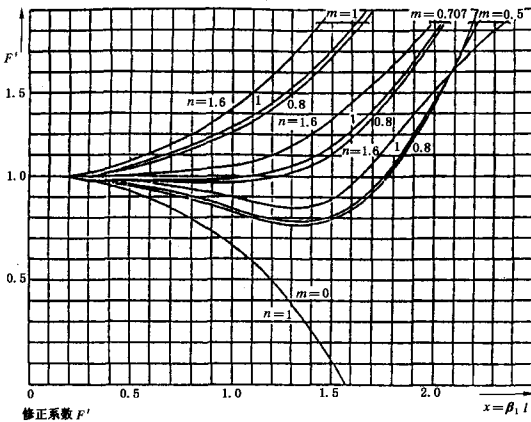


图 45 修正系数  $F'$

系数  $F'$  由下式得到：

$$F' = \frac{|(1-n^2)| \cdot \sqrt{(\cos^2 x + m^2 \cdot \sin^2 x)}}{\sqrt{n^2 \cdot \{\cos x - \cos(nx)\}^2 + \{\sin x - n \cdot \sin(nx)\}^2}} \dots\dots\dots (104)$$

式中： $m=Z_1/R$ ，外系统的特性阻抗除以电阻  $R$  的商；

$Z_1$ ——外系统的特性阻抗， $\Omega$ ；

$n=\lambda_1/\lambda_2$ ；

$\lambda_1$ ——外系统的电气波长；

$\lambda_2$ ——内系统的电气波长；

$x=2\pi l/\lambda$ 。

#### 12.2.4.2 方法 2：直接馈电

发生器直接馈入外系统。此系统的输入电压在屏蔽起始端测量，内系统的输出电压按 12.2.4.1 所

述方法测量。

如果必需在较大的输入电压下测量(例如,屏蔽层的屏蔽效率很高或输出电压表不够灵敏),则本方法优于方法1。本方法可用于比方法1更高的频率。

表面转移阻抗可由下式计算:

$$|Z_T| = 2Z_1 \times \frac{2\pi}{\lambda_1} \times \frac{U_2}{U_1} \times F'' \quad \dots\dots\dots (105)$$

式中:  $F''$ ——频率响应的修正系数,见图46。亦可用(106)式计算:

其他参数与(103)式中含义相同。

修正系数  $F''$ 可由下式计算:

$$F'' = \frac{|(1 - n^2)\sin x|}{\sqrt{n^2\{\cos x - \cos(nx)\}^2 + \{\sin x - n\sin(nx)\}^2}} \quad \dots\dots\dots (106)$$

式中参数的含义与(104)式相同。

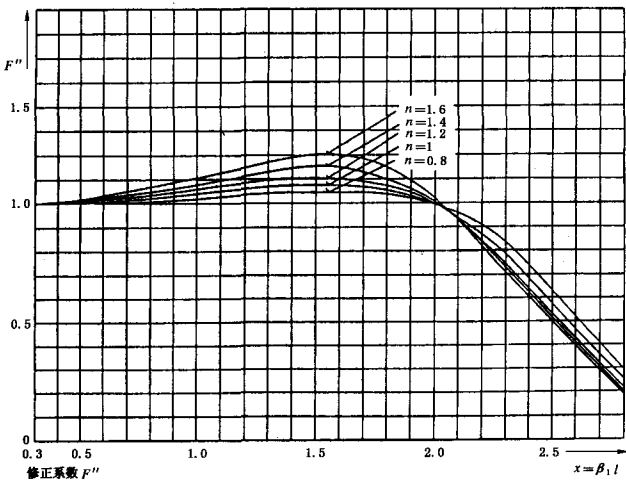


图46 修正系数  $F''$

12.2.5 要求

转移阻抗的最大值应符合有关电缆规范的规定。

12.3 容性耦合导纳:电容法

12.3.1 原理

容性耦合导纳由测量通过电容的方法来确定,通过电容的测量采用电容电桥或脉冲法来进行。

12.3.2 定义

虽然大多数电缆的容性耦合可忽略,但在单层松编织电缆中,通过屏蔽小孔的耦合则用通过电容  $C_T$  或容性耦合导纳  $Y_C$  来描述。

容性耦合导纳  $Y_C$  定义为:次级电路(内电路)中感应电流除以初级电路(外电路)中产生的电压的商。对于电气上短的均匀电缆  $Y_C$  由式(98)给出:

$$Y_C = j\omega C_T$$



电容转移阻抗  $Z_F$  由式(99)定义为:

$$Z_F = jaC_T Z_{01} Z_{02}$$

式中:  $Z_{01}$ ——初级电路(试样的外编织和屏蔽)的特性阻抗;

$Z_{02}$ ——次级电路(试样)的特性阻抗。

### 12.3.3 试验设备

试验装置具有“三同轴”结构。试样内导体的一端用与屏蔽连在一起的金属盘片屏蔽,或用没有电阻的屏蔽终端屏蔽。试样同轴地固定于金属管内,或通过在试样护套上施加一层编织的办法来形成试验装置的外导体。当试样无护套时,则在绝缘管上再施加一层编织。在金属片的相反一边,编织管开路。

#### 12.3.3.1 电容电桥法

将试样的屏蔽接至电容电桥的中间,见图 47。

#### 12.3.3.2 脉冲法

对于  $C_T = 10^{-15} \text{F/m}$  (在导出  $Z_F$  值时,这相当于分辨率为  $1 \text{ m}\Omega/\text{m}$ ),为了在示波器屏幕上得到约  $1 \text{ cm}$  的灵敏度,建议采用下述设备组合。

脉冲发生器		示波器	
输出脉冲	上升时间	灵敏度	带宽
10 V	100 ns	100 $\mu\text{V}/\text{cm}$	1 MHz
100 V	100 ns	1 $\mu\text{V}/\text{cm}$	1 MHz

### 12.3.4 程序

#### 12.3.4.1 电容电桥法

在约  $1000 \text{ Hz}$  的频率下,在试样内导体和金属管或外编织之间测量电容。

#### 12.3.4.2 脉冲法

脉冲发生器信号送入到外同轴系统(激励电路)及示波器的一个通道( $V_1$ )(见图 48)。试样内导体接至示波器的另一通道( $V_2$ )。为了避免连接器失配引起的反射,将脉冲起始后  $(1 \sim 2) \mu\text{s}$  后显示的平均脉冲高度作为  $V_2$  记录下来。

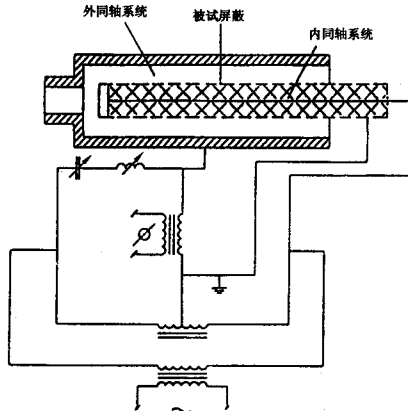


图 47 用电容电桥法测量通过电容的试验配置图

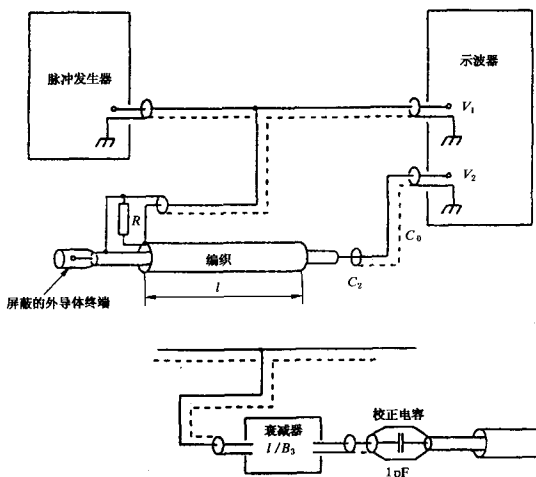


图 48 用脉冲法测量通过电容的试验配置图

### 12.3.5 测量注意事项

#### 12.3.5.1 电容电桥法

为了确保连接电缆电容及测量仪器电容的校正不过份地降低系统的精度,被试屏蔽的长度应在 0.5 m~5 m 之间。

#### 12.3.5.2 脉冲法

测量电路的两端都不用端接其特性阻抗,因此,整个长度应较短,以使谐振在测量前就消失。为了避免来自脉冲发生器输出的干扰,电缆终端应予屏蔽。激励电路被端接,以限制对测量电路的任何谐振。端接电阻置于驱动端,以避免来自表面转移阻抗的可能的误差,在被试屏蔽层中应有足够的电流流动。

为了确定灵敏度和校准试验设备,使用了一只衰减器和一只小的校准电容。为避免产生附加误差,使校准在任意电平上都有效。使用校准电容代替屏蔽开路终端,并通过衰减器将脉冲发生器与其相连接来校准。同此办法,衰减器增益为  $l/B_3$ ,测量电路的总电容不变,校准电平为  $C_3/B_3$ 。如果在校准前脉冲已被正确端接,则  $V_1$  值不会改变,否则,当用衰减器代替负载电阻  $R_1$  时,示波器轨迹所示的  $V_1$  就会稍有变化。

串音灵敏度(它可限制最小可检测信号)通过断开  $P_3$  点并用其他常规调整来观察示波器轨迹  $V_2$  的办法来确定。测量电缆的开路端应仔细屏蔽,连接器壳体应该接在一起以保持连续的屏蔽,仔细调整脉冲发生器和示波器增益使达到所需的最高灵敏度。

#### 12.3.6 结果表示

如果采用电桥法,则  $C_T$  值(pF/m)为电桥读数除以试样长度。

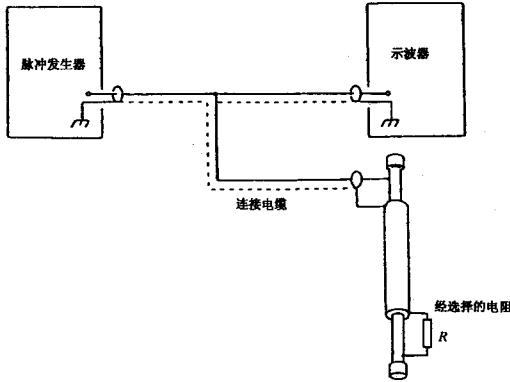


图 49 时域测量的试验配置图

如果采用脉冲法,则通过电容  $C_T$  由下式确定:

$$C_T = (C_2 + C_0/l) \times V_2/V_1 \quad \dots\dots\dots (107)$$

- 式中:  $C_2$ ——试样内介质的电容, pF/m;
- $l$ ——注入编织下的试样长度, m;
- $C_0$ ——杂散电容, pF;
- $V_1$ ——基准脉冲电压;
- $V_2$ ——耦合脉冲电压。

杂散电容由耦合电容、示波器输入电容及试验段之外的试样的附加电容组成。

容性耦合导纳  $Y_C$ (S/m)可如下导出:

$$Y_C = 2\pi f \times C_T \times 10^{-6}/l \quad \dots\dots\dots (108)$$

- 式中:  $C_T$ ——通过电容, pF;
- $l$ ——试样长度, m;
- $f$ ——频率, MHz。

### 12.3.7 电容转移阻抗 $Z_F$ 的确定

如果内、外同轴线的特性阻抗为已知,则从测量编织的通过电容就可容易地推导出电容转移阻抗。只要脉冲发生器上升时间及示波器响应足够快,则采用模拟时域反射计(TDR)那样的组合设备(见图 49)就可得到  $Z_{01}$  和  $Z_{02}$ 。

注:对于一段 1 m 长的试样,其信号延迟(来回)约为 10 ns。一台上升时间为 4 ns 的脉冲发生器及一台带宽为 100 MHz 的示波器的净上升时间为 5.5 ns,它明显短于来自电缆的脉冲的长度。

当端接电阻调到最小反射时,它与被试电路的特性阻抗相等。

电容转移阻抗  $Z_F$  由式(99)导出:

$$Z_F = j\omega C_T \times Z_{01} \times Z_{02}$$

## 12.4 屏蔽衰减:吸收钳法

### 12.4.1 原理

本试验利用吸收钳来确定射频同轴电缆的屏蔽衰减。当吸收钳的孔径大于试样直径时,直接进行测量,当吸收钳孔径较小时,采用延长线进行测量。

依照互易定律并对照 12.1,被试电缆为初级电路,而吸收钳用作接收机。

在 30 MHz~2 500 MHz 的频段,可用普通的高频仪器进行测量。

市售的吸收钳可用于 30~1 000 MHz 和 300 MHz~2 500 MHz。

## 12.4.2 定义

### 12.4.2.1 初级和次级电路

与 12.1 相反,脚标 1 表示试样的内电路,脚标 2 表示电缆的表面(次级电路)。

### 12.4.2.2 吸收钳

电缆(作为初级电路)用功率  $P_1$  馈电。由于电缆和周围环境之间的电磁耦合,激励了表面波,它沿电缆表面向两个方向传播。表面电流用含有一个电流变压器及一个吸收器(通常为铁氧体管)的装置测量,电流变压器用以耦合表面波功率,吸收器形成次级电路的负载。这种组合被称为吸收钳。

### 12.4.2.3 屏蔽衰减

在测得表面电流峰值的基础上,计算由电缆外导体和周围环境组成的次级系统中的最大功率  $P_{2max}$  是可能的。功率  $P_1$  和  $P_{2max}$  之比的对数称为屏蔽衰减。

### 12.4.3 试样制备

试样的有效长度受吸收夹具和铁氧体管限制,如图 51 所示。为了确定次级系统中的最大功率,试样的有效长度应由下式确定:

$$l_{\text{eff}} \geq \frac{150(v_{r,2} \times v_{r,1})}{f_{\text{min}} |v_{r,2} - v_{r,1}|} \quad (\text{当 } v_{r,1} \neq v_{r,2} \text{ 时}) \quad \dots\dots\dots (109)$$

式中:  $l_{\text{eff}}$ ——试样有效长度, m;

$f_{\text{min}}$ ——最低测量频率, MHz;

$v_{r,1}$ ——初级电路的相对传播速度;

$v_{r,2}$ ——次级电路的相对传播速度。

如果不能达到要求的最小有效长度,则允许使用长度为  $l_{\text{actual}}$  的较短电缆,此时,远端串音的实测值应除以以下的值进行修正:

$$\sin^2((\pi/2) \times l_{\text{actual}}/l_{\text{eff}}) \quad \dots\dots\dots (110)$$

## 12.4.4 测量注意事项

射频发生器应仔细地屏蔽,必要时可用屏蔽箱。在使用屏蔽箱的情况下,发生器和匹配网络都应置于屏蔽箱内。至发生器的正前方,应直立一块金属反射板,其高度和宽度至少应为 800 mm。金属板与发生器外壳相连,并有一中心孔可穿过被试电缆。

试样放置于非金属桌子上,在离试样 800 mm 以内的区域内不应有金属物体和人存在(见图 50)。

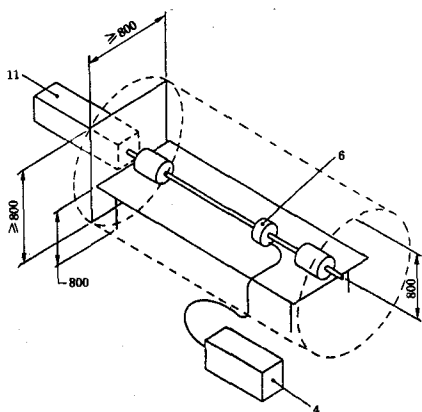
试样应与电流变压器同心地放置。试样的最小有效长度应符合 12.4.3 的规定。

为使射频泄漏最小,所有连接器、连接片和连接电缆都应仔细地安装。在有疑问时,测量装置的屏蔽衰减应通过用带有管状外导体的电缆来替换试样的办法进行试验。此时测得的屏蔽衰减应至少比试样屏蔽衰减高出 10 dB。

如果要求测量灵敏度为 100 dB 或 100 dB 以上,则应采用 CISPR11 修订 1 中图 5 所示的屏蔽预防措施。

注

- 1 如果发生器和接收机部份适当分离,则可使用其他仪器,例如,电平振荡器与测量接收机组合。
- 2 在试样下面铺有约 1 m 宽的金属地板是有益的。



4—测量接收机；6—电流变压器；11—射频发生器的屏蔽

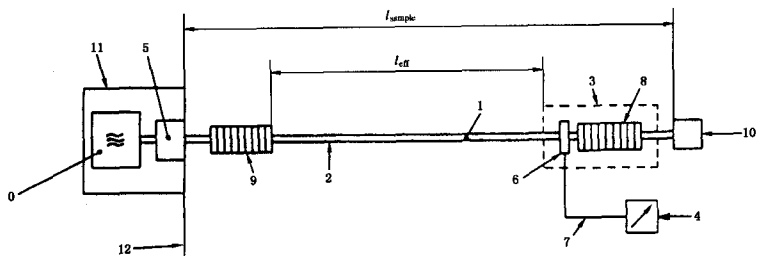
图 50 屏蔽装置

#### 12.4.5 程序

##### 12.4.5.1 方法 1: 直接测量

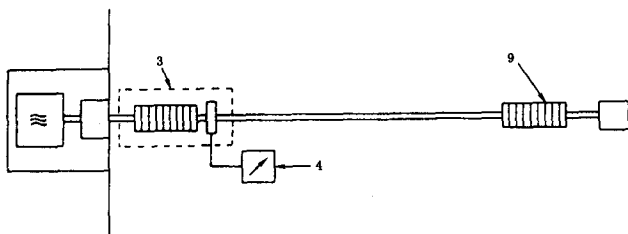
当吸收钳的孔径大于试样直径时,通常按图 51 和图 52 所示配置图来布置试验设备。电流的峰值应用下述方法之一来测量:

- a) 固定频率,移动吸收钳;
- b) 在扫频的基础上固定吸收钳;
- c) 在扫频的基础上移动吸收钳。



0—射频发生器,输出阻抗  $Z_0$ ; 1—试样,特性阻抗  $Z_1$ ; 2—外导体输出电路,特性阻抗  $Z_2$ ;  
 3—吸收钳,阻抗  $Z_3$ ; 4—测量接收机; 5—匹配网络,如  $Z_0 \neq Z_1$  (测量和校准使用同一网络);  
 6—电流变压器; 7—测量接收机连线(测量和校准使用同一网络); 8—钳的吸收器(铁氧体管),衰减  $> 10$  dB; 9—第二吸收器(或第二钳),衰减  $> 10$  dB; 10—试样的终端阻抗  $Z_1$ ;  
 11—射频发生器的屏蔽; 12—反射板;  $l_{\text{sample}}$ —试样的总长度;  $l_{\text{eff}}$ —试样的有效长度

图 51 试样远端表面波的测量



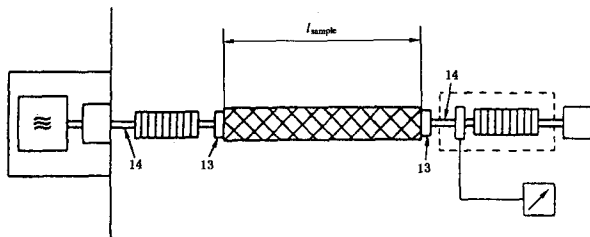
3—吸收钳,阻抗  $Z_3$ ; 4—测量接收机; 9—第二吸收器(或第二钳),衰减  $>10$  dB; 其他均与图 51 相同。

图 52 试样近端表面波的测量

12.4.5.2 方法 2: 用延长线测量

当吸收钳的内径小于试样直径时,则应在试样两端用较细的指示线来延长,延长线的屏蔽衰减应比试样更好。如有可能,应使用具有管状外导体的延长线。试验配置图如图 53 所示。

测量应在试样两端进行。由表面电流随位置和频率而改变,因此,峰值应在扫频的基础上用固定钳测量。



13—无反射电缆转换; 14—延长线

其他均与图 51 相同。

图 53 利用延长线试样的远端表面波测量

12.4.6 测量设备的校准

12.4.6.1 测量设备的插入损耗

在图 54 所示的测量装置中,隔离的试样外导体被接至发生器输出的内导体。

当吸收钳沿着电缆移动至位置  $L_{A1}$  及  $L_{A2}$  时,可以观察到测量接收机(电平表)的最大读数和最小读数。测量装置的插入损耗  $a_M$  用下式确定:

$$a_M = 10 \lg \left( \frac{P_0^2}{P_{4,\max} \times P_{4,\min}} \right)^{1/2} - a_R - a_C \quad (\text{dB}) \quad \dots\dots\dots (111)$$

式中:  $P_0$ ——发生器功率, mW;

$P_{4,\max}$ ——测量接收机(电平表)的最大功率, mW;

$P_{4,\min}$ ——测量接收机(电平表)的最小功率, mW;

$a_R$ ——辐射损耗, dB;

$a_C$ ——由于发生器输出阻抗  $Z_1$  和外导体的外电路阻抗  $Z_2$  之间的失配而引起的校准损耗, dB。

$a_R, a_C$  和  $Z_2$  由下式导出:

$$a_R = 8.71 \lg(22L_A/\lambda) / \lg(0.27L_A\lambda/d^2) \quad \dots\dots\dots (112)$$

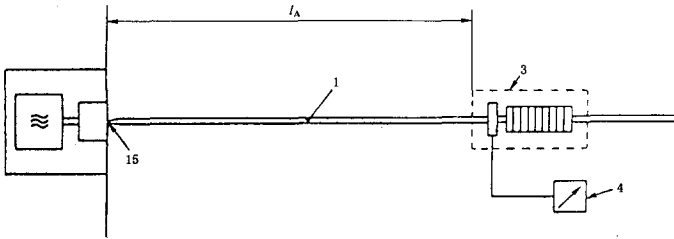
$$a_c = 10 \lg [(Z_1 + Z_2)^2 / 4Z_1 Z_2] \quad \dots\dots\dots (113)$$

$$Z_2 = 60 [\ln(\lambda/\pi d) - 0.6] \quad (\Omega) \quad \dots\dots\dots (114)$$

式中:  $l_A = (l_{A1} + l_{A2}) / 2$ ;

$\lambda$ ——自由空间波长;

$d$ ——试样外导体的外直径。



1—试样; 3—吸收钳, 阻抗  $Z_2$ ; 4—测量接收机; 15—隔离的试样外导体至发生器内导体的连接;  
 $l_A$ —吸收夹具和连接点 15 之间的距离; 若  $f < 500$  MHz, 则  $l_A = 1.0$  m ~  $5.0$  m; 若  $f > 500$  MHz,  
 则  $l_A = 1.0$  m ~  $2.0$  m

图 54 插入损耗测量

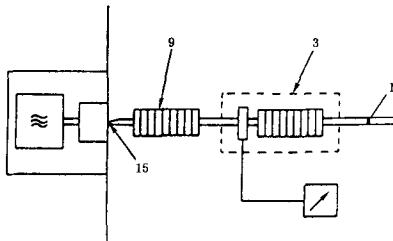
12.4.6.2 吸收器的衰减

吸收器的衰减应能遏止吸收器后的电缆引起的反射波, 其值必需大于 10 dB。

吸收器应用图 55 所示的测量装置来试验。吸收器的位置应尽可能靠近接点 15。其间隙应比次级系统波长的 1/4 小得多。

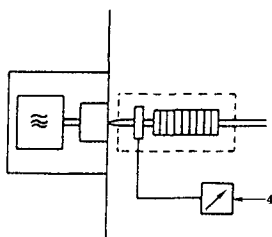
在被试吸收器的正后方(从发生器观察), 试样外导体上的电流用吸收钳测量, 见图 55。

移去吸收器, 将吸收钳移至接点 15, 见图 56。再次测量吸收钳电流, 其电平差即为吸收器衰减。



1—试样; 3—吸收钳, 阻抗  $Z_2$ ; 9—第二吸收器, 衰减 > 10 dB

图 55 电路中吸收器的电平测量



4—测量接收机

图 56 电路中无吸收器的电平测量

12.4.6.3 利用延长线校准

插入损耗及吸收器衰减的测量应在延长线上进行,测量方法与 12.4.6.1 及 12.4.6.2 中在试样上进行测量时的方法相同。

12.4.7 试验结果的表示及要求

12.4.7.1 结果表示

屏蔽衰减  $a_s$  用下式确定

$$a_s = 10 \lg \left( \frac{P_1}{\max(P_{2,n}; P_{2,t})} \right) \dots\dots\dots (115)$$

- 式中:  $P_1$ ——试样内电路的输入功率;  
 $P_{2,n}$ ——匹配外电路近端的最大串音功率;  
 $P_{2,t}$ ——匹配外电路远端的最大串音功率;  
 $\max(P_{2,n}; P_{2,t})$ ——匹配外电路近端或远端的最大功率包络线。

并且:

$$\frac{P_1}{P_{2nf}} = \left( \frac{\omega^2 \times Z_1 \times Z_2 \times (v_1 \pm v_2)^2}{|Z_F \pm Z_T|^2 \times (v_1 \times v_2)^2} \right)$$

- 式中:  $Z_T$ ——表面转移阻抗;  
 $Z_F$ ——容性耦合阻抗;  
 $v_1$ ——内电路的传播速度;  
 $v_2$ ——外电路的传播速度。

事实上,试验结果与内外电路的速度差  $(v_1 - v_2)$  有关,因此,试验结果也可用标准条件  $Z_2 = 150 \Omega$  和速度差为 10% 时值表示。通常,标准条件给出  $a_s$  的一个值即比试验结果差点 10 dB(也见表 5)。

由测量接收机指示的功率实测值分别为  $P_{4n}$  及  $P_{4t}$ , 因此:

$$a_s = 10 \lg \left( \frac{P_0}{\max(P_{4n}; P_{4t})} \right) - a_M \dots\dots\dots (116)$$

- 式中:  $P_0$ ——射频发生器的功率;  
 $a_M$ ——测量装置的插入损耗,依照 12.4.6;  
 $\max(P_{4n}; P_{4t})$ ——测量接收机指示近端或远端的最大功率包络线。

注:  $P_{2max} = P_{2n} + P_{2t}$ 。

12.4.7.2 要求

见表 5,注意,电缆装置的周围条件对吸收钳的测量值  $a_s$  的影响通常达 10 dB,因此应从  $a_s$  去掉。

12.4.8 要求

如果对于运行于功率电平  $P_1$  的电缆系统规定了辐射功率的最大值  $P_{r,max}$ ,则只有屏蔽衰减  $a_s$  符合



下列要求的电缆才适用于该系统:

$$\alpha_s \geq P_1 - P_{R,\max} \quad \dots\dots\dots (117)$$

如果辐射功率电平规定了最大值,则由屏蔽衰减为  $\alpha_s$  的电缆组成的现有系统只能工作于功率电平  $P_1$ ,从而

$$P_1 \leq P_{r,\max} + \alpha_s \quad \dots\dots\dots (118)$$

式中:  $P_1$ ——电缆输入端的功率电平, dB $\mu$ W;

$P_{r,\max}$ ——辐射功率的最大值, dB $\mu$ W。

## 12.5 电缆颤噪声电荷电平(机械感应噪声)

### 12.5.1 总则

同轴电缆承受冲击、拉伸、压力或扭转之类的机械应力时,会在电缆上产生引起干扰电流或干扰电压的电荷。

这种干扰称之为“机械感应噪声”或“电缆颤噪声”,它叠加到电缆传输的信号上,对于低电平信号会有显著影响。

这种机—电变换的频率范围可达到大约 20 kHz。(在出版的文献中,叙述了频率达 1 GHz 的快速脉冲,但这些不包括在本范围内)。

本测试方法的优点是可对被测电缆试样进行精确而受控的激励,且测量结果有重复性。

为了简化对具有不同噪声特性电缆的分类,电缆的颤噪声电荷电平用 dB( $\mu$ C/m)表示 1 个测量单位,其中 0 dB 定为 1  $\mu$ C/m。

特殊设计的电缆具有的颤噪声电荷电平约为 -60 dB( $\mu$ C/m),而标准电缆具有的颤噪声电荷电平约为 0 dB( $\mu$ C/m)。

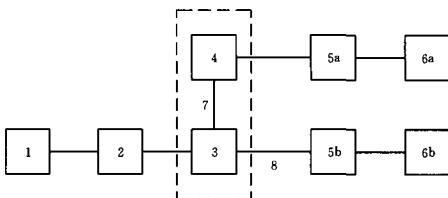
### 12.5.2 原理

本试验的目的是确定电缆承受机械应力时,其内部所产生的电荷。

### 12.5.3 定义

电缆颤噪声电荷电平:对于伸长  $\Delta L$ (m)时测得的电荷与 1  $\mu$ C/m 比值的常用对数值[20log( )]。

### 12.5.4 试验设备



1—信号发生器, 0 kHz~20 kHz; 2—功率放大器; 3—振动器; 4—加速计; 5a—电荷放大器(带附加双积分);  
5b—电荷放大器; 6a—示波器(伸长测量); 6b—示波器(颤噪声电荷测量); 7—试验夹具; 8—被试电缆

图 59 测量配置图

### 12.5.5 试样制备

从 10 m 长的成品电缆上,每隔至少 1 m 取三个试样。每个试样的一端应装上适配的连接器。

每个试样的另一端应制成封闭的屏蔽以隔绝环境的干扰噪声。应剥去大约 25 mm 长的护套,编织层应完好无损。然后,将编织推回去,整齐切去一段绝缘。此编织应返回并焊接,但不得触及内导体。

### 12.5.6 程序

被测电缆一端固定到振动器的振动片,并且用与弹簧卡盘相似的特制夹头,以一固定重量摇曳(见 12.5.7.1)。电缆的另一端连接到电荷放大器。

振动器馈以正弦波信号,使被测电缆上施加的应力沿着其纵轴变化。用这种方法,介质受应力引起的压电效应以及电缆编织和介质相对移动引起的磨擦电效应,两者可只用一种测量方法来模拟和测量。

电缆的伸长通过测量振动器相对于加速计的位移来测量和控制。加速计固定在振动器板上,并连接到其中一个电荷放大器。此放大器的通过对加速计信号的双重积分,提供与被测电缆伸长成正比的输出电压。

被测电缆连接到另一个电荷放大器,其输出电压正比于被测电缆内的电荷,可以连接到示波器或个人电脑。

#### 12.5.7 测量注意事项

##### 12.5.7.1 电缆的固定和机械预加荷载

电缆试样应使用类似于弹簧卡盘的特制夹头来固定,试样固定时应小心防止其受到扭转以及不确定的机械预加荷载。取决于扭转和/或预加荷载,电缆的颤噪声会有不同的结果。试样可能受压缩,从而引起测试结果的误差,因此,为获得重复性好的结果,需要预先施加一定的机械负荷。

利用导轮和重物与夹头相配合,可以得到一定的机械预加荷载。除非有关电缆规范另有规定,外径为5 mm及以下的电缆可使用500 g的重物,外径为10 mm及以下的电缆应使用1 kg的重物。

为了避免电缆试样在具有不确定的机械预加荷载的试验装置内的松弛悬挂,推荐试验装置设计成使电缆试样垂直安装。

##### 12.5.7.2 伸长

为了模仿实际应用,被测电缆的最大相对伸长 $\Delta L/L$ 应在电缆的动态范围内,以免电缆在试验中损坏。在相对伸长 $\Delta L/L$ 的动态范围内(最大约为0.4%),测量值的最大值随着相对伸长 $\Delta L/L$ 的增加而呈现线性的增大。

##### 12.5.7.3 机械谐振

在理想条件下,电缆试样在相对伸长 $\Delta L/L$ 的动态范围内,在大约20 kHz以下测出的电荷与频率有线性关系。

取决于个别的测量装置,在某些频率下会出现机械谐振,它叠加在电缆噪声测量上,会恶化测量结果。

这种机械谐振可从测量结果的频率曲线上的峰值看出,在这些频率下,测量值是不无效的。

为了避免机械谐振,对于振动器的刚性安装以及电缆试样仅用的几个具有短杠杆臂的零件的固定点应加以注意。

推荐采用实心钢的底板安装在结实的地基上。

激励的优选频率范围为50 Hz~200 Hz。

##### 12.5.7.4 重复性

由于电缆的颤噪声沿着长度而变化,所给出的测量方法的重复性约在6 dB之内为2,当要求有更好的重复性时,应增加被测电缆试样数,并且用统计方法处理。

##### 12.5.7.5 接地回路

为了避免不希望的接地回路,电荷放大器可由电池供电。

试验装置的机架应有静电屏蔽作用以免被测电缆接收环境的低频噪声。

#### 12.5.8 测量条件

除非有关电缆规范另有规定,电缆试样的相对伸长 $\Delta L/L$ 应在0.1%~0.5%的范围内。

除非有关电缆规范另有规定,测试应在温度范围18℃~23℃之内进行。

除非有关电缆规范另有规定,激励的频率范围应为50 Hz~200 Hz。

在整个测量频率范围内,机械谐振引起的变化系数应不超过10%。

应在三个不同的电缆试样上各进行三次测量。

#### 12.5.9 结果表示

电缆试样相对伸长  $\Delta L/L$  的距离  $s$  和加速度  $a$  之间的关系式为:

$$s = s_0 \times \sin(\omega t + \theta) \quad \dots\dots\dots (132)$$

$$a = d^2s/dt^2 = -s_0 \times \omega^2 \times \sin(\omega t + \theta) \quad \dots\dots\dots (133)$$

$$a_0 = (2\pi f)^2 \times s_0 \quad \dots\dots\dots (134)$$

电荷系数  $Q_R$  可从下式求出:

$$Q_R = Q_{max}/(L \times \Delta L/L) = Q_{max}/\Delta L \quad \dots\dots\dots (135)$$

式中:  $Q_{max}$ ——测出的电荷,  $\mu C$ ;

$\Delta L$ ——电缆试样的伸长, m;

$L$ ——电缆的激励长度, m;

$\Delta L/L$ ——电缆试样的相对伸长。

电荷系数的平均值  $Q_{Rm}$  应为三个电荷系数测量值  $Q_R$  的平均值。

为了简化低噪声电缆的分类, 将电荷平均系数  $Q_{Rm}$  转换成对数值来定义电缆的颤噪声电荷电平, 0 dB 为  $1 \mu C/m$ 。

$$Q = -20 \lg(Q_{Rm}/1(\mu C/m)) \quad (dB(\mu C/m)) \quad \dots\dots\dots (136)$$

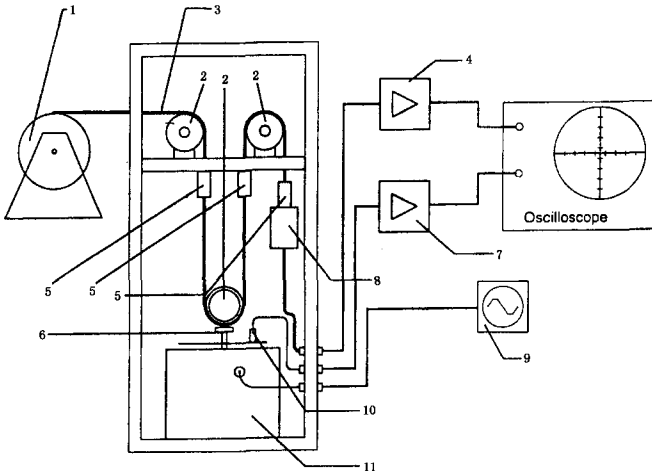
12.5.10 要求

电缆颤噪声电荷电平的测量值应不超过有关电缆规范的规定值。

12.5.11 交货长度上的测量

为了确定电缆交货长度上的颤噪声电荷电平, 可在此交货长度上进行测量。

如果电荷放大器的输入阻抗远小于被测电缆总容性阻抗, 长达 1 000 m 的电缆长度对试验结果的影响仍可忽略不计。被测的电缆段可在总长度的始端、中间或末端。测量交货长度上电缆颤噪声电荷电平的合适试验装置如图 60 所示。



1—电缆盘; 2—导轨; 3—被测电缆; 4—电荷放大器; 5—固定夹头; 6—夹具; 7—带双积分的电荷放大器; 8—预加载重物; 9—信号发生器; 10—加速度计; 11—振荡器

图 60 交货长度上的测量

试验装置同三个引导电缆的导轮(2)组成。其中二个导轮固定在试验装置的机架上,另一个导轮固定在振动器上。然后电缆可在试验装置里前后拉动。

试验时,电缆应使用固定夹头(5)和振动器导轮上的夹具(6)来固定。为了拉直被测电缆段并且施加一定的预加载荷,先将左边的固定夹头(5)固定,然后加上预加载重物并固定第二个固定夹头。

通过将电缆拉直可获得预加载荷,但振动器仍处于自由状态。最后,将振动器导轮上的夹具(6)固定。如果电缆不固定在振动器导轮(6)上,当试验期间振动器工作时被测电缆长度不会受压。

激励的电缆长度  $L$  是两个固定夹头之间的长度。

## 12.6 屏蔽衰减 测量达到和超过 3 GHz 的屏蔽衰减 $a_s$ 的试验方法

### 12.6.1 总则

本三同轴法适用于确定射频同轴电缆屏蔽层的屏蔽衰减  $a_s$  和表面转移阻抗  $Z_T$ 。由于采用外同轴管,本测试不受周围环境以及外界电磁场的影响。

甚至对于超屏蔽电缆,采用常规的仪表也适用于宽广的动态范围和频率范围的测试,可从低频一直到外电路横电磁波极限频率(大约 4 GHz)。

### 12.6.2 测量方法的原理(图 61)

干扰或初级电路是匹配的被测电缆,受干扰或次级电路由被测电缆的外导体(或多层屏蔽电缆的最外层屏蔽)和与被测电缆同轴的实心金属外管所组成。

应测量次级电路远端的电压峰位。次级电路的近端为短路。这种测量不必采用匹配接收机,接收机的输入阻抗只要比次级电路的特性阻抗低,远端测得的电压峰值不受该输入阻抗的影响。但是,低失配是有利的,例如:对于几种尺寸的同轴电缆可通过选择管子的直径范围来实施。

### 12.6.3 定义和理论背景

#### 12.6.3.1 电气符号

$Z_1$	初级电路(被测电缆)的特性阻抗;
$Z_2$	次级电路的特性阻抗;
$Z_N$	被测电缆环境特性阻抗的标准值,(外电路阻抗 $Z_2$ 为 150 $\Omega$ );
$R$	接收机的输入阻抗;
$Z_T$	被测电缆的转移阻抗( $\Omega/m$ );
$Z_F = Z_1 \times Z_2 \times j\omega \times C_T$	被测电缆的容性耦合阻抗( $\Omega/m$ );
$f$	频率(Hz);
$C_T$	外导体单位长度上的通过电容(F/m);
$\epsilon_{r1}$	被测电缆的相对介电常数;
$\epsilon_{r2}$	次级电路的相对介电常数;
$\epsilon_{r2,n}$	电缆环境的相对介电常数的标准值;
$l$	有效耦合长度;
$\lambda_0$	真空中波长;
$c_0$	真空的传输速度;
$a_s$	与吸收钳法结果(见 12.4)可比较的屏蔽衰减;
$a_{sn}$	标准屏蔽衰减( $Z_2 = 150 \Omega$ , $ \Delta v/v  = 10\%$ );
$P_1$	初级回路的馈电功率;
$P_2$	次级回路内接收机输入阻抗 $R$ 上接收的测量功率;
$P_r$	电缆在环境中的辐射功率,它与 12.4 吸收钳法的 $P_{2n} + P_{2t}$ 可以比较;
$P_s$	被测电缆在标准环境中的辐射功率( $Z_2 = 150 \Omega$ , $ \Delta v/v  = 10\%$ )。

$$\varphi_1 = 2\pi \left( \sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}} \right) l / \lambda_0 \quad \dots\dots\dots (137)$$

$$\varphi_2 = 2\pi(\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}})l/\lambda_0 \quad \dots\dots\dots(138)$$

$$\varphi_3 = \varphi_2 - \varphi_1 = 4\pi\sqrt{\epsilon_{r2}}l/\lambda_0 \quad \dots\dots\dots(139)$$

### 12.6.3.2 理论背景

如果忽略次级电路对初级电路的反馈,远端电压  $U_2$  和  $U_1$  之比可精确计算如下:

$$\left| \frac{U_2}{U_1} \right| \approx \frac{Z_T - Z_F}{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}} \times [1 - e^{-j\varphi_1}] + \frac{Z_T + Z_F}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \times [1 - e^{-j\varphi_2}] \times \left| \frac{1}{\omega \times Z_1} \right| \times \left| \frac{c_0}{\alpha + \left( \frac{Z_2}{R} - 1 \right) (1 - e^{-j\varphi_3})} \right| \quad \dots\dots\dots(140)$$

即  $|A+B| \times C \times D$  的形式,式中  $AC$  是远端串音,  $BC$  是反射的近端串音,  $D$  是失配系数。

当  $1 < Z_2/R < 1.25$   $D$  的总振幅小于 2 dB;

当  $Z_2/R = 1.4$   $D$  的总振幅为 3 dB;

当  $Z_2/R > 3$   $D$  的总振幅为 10 dB 及以上。

如果  $\varphi_{1,2} = (2N+1) \times \pi$ ,  $N$  为整数,  $AC$  和  $BC$  有最大值。

### 12.6.3.3 屏蔽衰减

屏蔽衰减  $a_s$  用馈电功率  $P_1$  和外电路电压峰值  $U_2$  产生的辐射功率的周期性最大值  $P_{r,max}$  对数比值来表示:

$$a_s = -10 \lg \left[ \text{Env} \left| \frac{P_{r,max}}{P_1} \right| \right] \quad \dots\dots\dots(141)$$

辐射功率  $P_r$  和输入阻抗  $R$  上测得的接收功率  $P_2$  之间的关系为

$$\frac{P_r}{P_2} = \frac{P_{r,max}}{P_{2,max}} = \frac{R}{2 \times Z_s} \quad \dots\dots\dots(142)$$

由于屏蔽层的电磁耦合以及表面转移阻抗  $Z_T$ , 容性耦合阻抗  $Z_F$  (由近端和远端传输) 和近端反射回来的总反射波的相互迭加, 导致远端电压  $U_2$  变化。

在高频下, 被测电缆在电气上是长的时 (见式 (140))

$$\sqrt{\left| \frac{P_{2,max}}{P_1} \right|} \approx \frac{c_0}{\omega \sqrt{Z_1} \times R} \times \left| \frac{Z_T - Z_F}{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}} + \frac{Z_T + Z_F}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \right| \quad \dots\dots\dots(143)$$

### 12.6.3.4 长度和表面转移阻抗 $Z_T$ 关系

被测电缆的有效耦合长度和电气波长之间的关系对于屏蔽衰减的特性曲线有重要影响。在电气耦合长度短的频率下 (见式 (139)), 测得的衰减随长度增加而减少。因此, 必须要规定相对长度。

当电气长度大时 (见式 (140)), 由耦合电压比的最大包络线得到的屏蔽衰减相对于 6 dB/倍频程增加转移阻抗是常数 (见图 62)。因此, 屏蔽衰减仅在高频下定义。

当

$$\lambda_0/l > 10 \times \sqrt{\epsilon_{r1}} \text{ 或 } f < \frac{c_0}{10 \times l \times \sqrt{\epsilon_{r1}}} \quad \dots\dots\dots(144)$$

则耦合长度是电气短长度。

当

$$\frac{\lambda_0}{l} \leq 2 \times |\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}| \text{ 或 } f > \frac{c_0}{2 \times l \times |\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}|} \quad \dots\dots\dots(145)$$

则耦合长度是电气大长度。

式中:  $l$ ——有效耦合长度, m (图 61 中约为 2 m);

- $\lambda_0$ ——自由空间波长, m;  
 $\epsilon_{r1}$ ——电缆介质的有效相对介电常数;  
 $\epsilon_{r2}$ ——次级电路介质的有效相对介电常数;  
 $f$ ——频率, Hz。

电气短耦合长度下,测得的电压比与转移阻抗  $Z_T$  的关系为:

$$Z_T \times l \approx Z_1 \times \left| \frac{U_2}{U_1} \right| \quad \dots\dots\dots (148)$$

这种情况的更详细说明参见 12.2。

在高频下,如果  $Z_F$  可以忽略,则  $Z_T$  可以按下式计算:

$$Z_T \approx \left| \frac{\omega \times \sqrt{Z_1 R} \times |\epsilon_{r1} - \epsilon_{r2}| \times \sqrt{\left| \frac{P_{2\max}}{P_1} \right|}}{2 \times c_0 \times \sqrt{\epsilon_{r1}}} \right| \quad \dots\dots\dots (149)$$

因此,

$$\sqrt{\left| \frac{P_{2\max}}{P_1} \right|} = \left| \frac{Z_T \times 2 \times c_0 \times \sqrt{\epsilon_{r1}}}{\omega \times \sqrt{Z_1 R} \times |\epsilon_{r1} - \epsilon_{r2}|} \right| \quad \dots\dots\dots (150)$$

## 12.6.4 测试

### 12.6.4.1 设备

测试装置如图 61 所示,其组成如下:

- 三同轴装置,其长度足以产生波在窄频段内的迭加,以获得包络线。
- 通常,耦合长度推荐为 2 m,用在从不到 50 MHz 向上频段来确定屏蔽衰减。圆柱形电缆屏蔽既是馈电同轴系统外导体,又是外系统内导体。外系统外导体是内径的 50 mm 的管子,它在电缆的馈电端与屏蔽层短路。管子内径和屏蔽层外径之比应足够大,以保证其特性阻抗大于接收机的输入阻抗。外电路的相对介电常数应近似等于 1,电缆的护套不计在内。
- 信号发生器,其特性阻抗应与被测电缆相同。如果有需要,对于很高屏蔽衰减的测试,可带功率放大器并且配有阻抗转换器。
- 带有标准衰减器的接收机或网络分析仪。

### 12.6.4.2 被测电缆

电缆试样在远端连接屏蔽良好的阻值等于标称特性阻抗的电阻。端接电阻,屏蔽罩和电缆屏蔽层之间的连接应小心进行,使影响测量结果的接触电阻可以忽略不计。在制备箔屏蔽时应特别小心,以免箔的开裂而引起测试结果的误差。

在馈电端,电缆屏蔽层连接到外管的短路片,必须小心使接触电阻很小而不致影响测试结果。

被测电缆应尽可能与外管保持同心以获得均匀的波传输。

### 12.6.4.3 程序

外电路输出电压和电缆输入电压之比可用网络分析仪直接测量,也可用标准衰减器测量,但接收机输入阻抗和信号发生器输出阻抗相等 ( $R=Z_1$ ),才可将该标准衰减器代替三同轴装置插入系统进行测量。

必须测量电压比最大值的峰值或衰减的最小值,并用作为频率函数记录下来,从而可确定包络线。

如果用转换器代替直接连接,它引起的衰减应在三同轴装置校正时加以考虑。

只要外系统特性阻抗  $Z_2$  大于接收机输入阻抗,测得的电压比与三同轴试验装置的外管直径或外系统特性阻抗  $Z_2$  无关。

### 12.6.4.4 结果表示

可以和吸引钳法的结果相比较(见 12.4)的屏蔽衰减  $a_s$ ,应该用标准值  $Z_s=150 \Omega$  来计算:

$$\begin{aligned}
 a_s &= 10\lg \left| \frac{P_1}{P_{r,\max}} \right| = 10\lg \left| \frac{P_1}{P_{2,\max}} \times \frac{2Z_S}{R} \right| \\
 &= 20\lg \left| \frac{U_1}{U_{2,\max}} \right| + 10\lg \left| \frac{300 \Omega}{Z_1} \right| \\
 &= a_{m,\min} - a_z + 10\lg \left| \frac{300 \Omega}{Z_1} \right| \dots\dots\dots (151)
 \end{aligned}$$

式中:  $a_s$ ——相应于辐射阻抗为  $150 \Omega$  时的屏蔽衰减, dB;

$a_{m,\min}$ ——最小包络曲线测试值的衰减, dB;

$a_z$ ——可能插入的转换器的附加衰减(当校正时, 没有另外消除时), dB;

$U_1$ ——电缆组成的初级电路的输入电压, V;

$U_2$ ——次级电路的输出电压, V;

$Z_1$ ——被测电缆的特性阻抗,  $\Omega$ 。

在频率低于电气上长耦合长度极限值时, 本测试与表面转移阻抗的测试相类似。

### 12.6.5 要求

最小屏蔽衰减测试值应符合有关电缆规范的规定。

如果工作在一定功率电平下的电缆系统的辐射功率极限值有规定, 则功率电平和辐射功率极限值之间的差不得大于该系统所用电缆的屏蔽衰减。

### 12.6.6 标准的屏蔽衰减

屏蔽衰减取决于内外电路之间的速度差。因此试验结果也可用标准条件( $Z_S=150 \Omega$ , 速比差为 10%)来表示。

$$a_{s,n} = a_s + \Delta a \dots\dots\dots (152)$$

式中:  $a_{s,n}$ ——标准屏蔽衰减。

$$a_{s,n} = 20\lg \left| \frac{\omega \times \sqrt{Z_1 \times Z_S} \times \left| \sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2,n}} \right|}{Z_T \times c_0} \right| \dots\dots\dots (153)$$

式中:  $a_s$ ——与式(144)相应的屏蔽衰减;

$Z_1$ ——初级电路的特性阻抗;

$Z_S$ ——被测电缆的环境特性阻抗的标准值,  $Z_S=150 \Omega$ ;

$Z_T$ ——被测电缆的转移阻抗;

$\epsilon_{r1}$ ——被测电缆的相对介电常数;

$\epsilon_{r2,n}$ ——电缆环境相对介电常数的标准值。

根据式(142)、式(143)、式(144)和式(146), 标准屏蔽衰减和实测屏蔽衰减之差可计算如下:

$$\Delta a = 20\lg \left[ \sqrt{2} \times \left| \frac{1 - \sqrt{\frac{\epsilon_{r2,n}}{\epsilon_{r1}}}}{1 - \frac{\epsilon_{r2,n}}{\epsilon_{r1}}} \right| \right] \dots\dots\dots (154)$$

式中:  $\epsilon_{r2,n} \approx 1.1$ , 是测试时外电路(管子)的相对介电常数, 对于速度差  $\Delta v/v_1=10\%$ ,  $\epsilon_{r2,n}$  和  $\epsilon_{r1}$  之间关系为:

$$\sqrt{\frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2,n}}} = 1.1$$

因此, 对于  $\epsilon_{r1} \approx 2.3$  的实心聚乙烯介质电缆和  $\epsilon_{r1} \approx 1.6$  的泡沫聚乙烯介质电缆:  $\Delta a \approx -10$  dB。

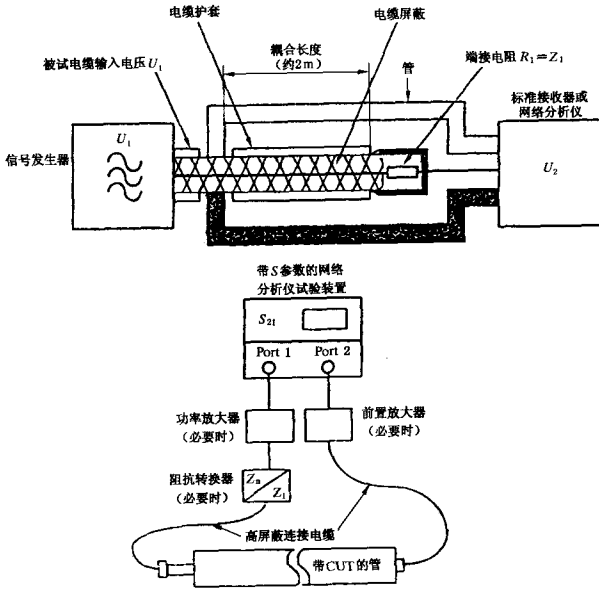


图 61 三同轴测量装置

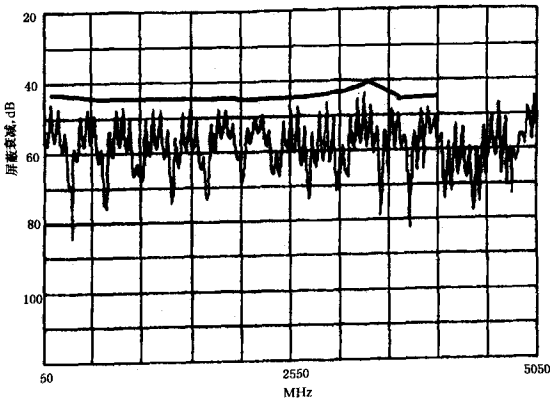
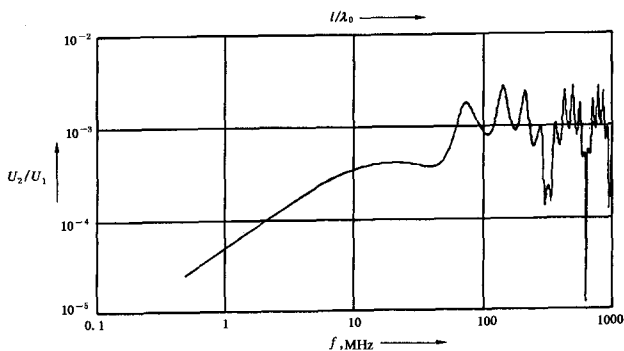
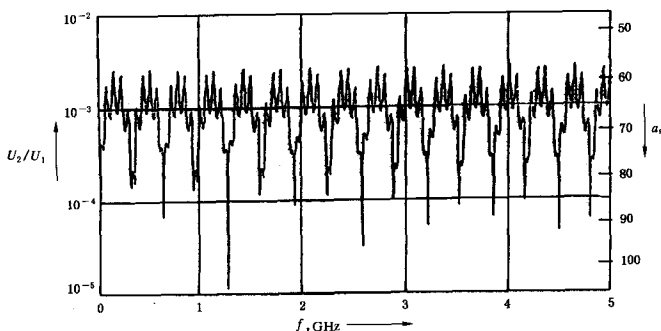


图 62 单层编织电缆测出的耦合电压比  $U_2/U_1$  的最大值包络曲线上求得的实测屏蔽衰减  $\alpha_s$



图 63 单层编织电缆在  $\lg(f)$  坐标上的  $U_2/U_1$  关系图 64 单层编织电缆在线性( $f$ )坐标上的  $U_2/U_1$  和线性( $f$ )坐标上的屏蔽衰减  $a_s$  的关系

### 13 交货和储存

电缆应成盘或成圈交货,并带有适当保护。

电缆成品的两端应当适当密封,以防止潮气侵入。电缆密封应在检验和验收试验后立即进行。

### 14 柔软射频电缆表面转移阻抗和屏蔽衰减极限值指南

#### 14.1 总则

确定射频电缆屏蔽效率一个最重要的参数是其屏蔽层的表面转移阻抗  $Z_T$  ( $\Omega/m$ )。但它不能直接给出电缆内外功率比的信息。而屏蔽衰减  $a_s$  (dB) 则可以给出,并能用开路屏蔽衰减法(吸收钳法)、屏蔽的屏蔽衰减法或混响室法等进行测量。注意: $a_s$  实际上与电缆内外传输速度之差有关。

由于转移阻抗随频率和屏蔽层的结构变化而变化,因而可以把屏蔽层分类,并规定上限频率时的转移阻抗  $Z_T$  的最大值为极限值。这些极限值也可用屏蔽衰减  $a_s$  的最小值表示。为了比较试验结果,应记录两组数据:开路或屏蔽屏蔽衰减的测量结果;归一化到外电路阻抗为  $150 \Omega$  和内外电路传输速度差为  $10\%$  时的结果。通常,归一化结果比吸收钳法测量结果约小  $10 \text{ dB}$ 。

本章规定了具有不同屏蔽结构类型的柔软射频电缆的表面转移阻抗和屏蔽衰减极限值(见 IEC 60096-1:1986 修定单 2 的 A5.5 和 A5.6)。

## 14.2 电缆类别

建议首先规定四种屏蔽结构的类别,如表 4 所示。

表 4 电缆类别

类别	屏蔽概述
1	单层编织电缆
2	双层编织电缆(两层编织相互接触) 类型 1 类型 2
3	箔/编织电缆(绕包箔及一层编织)
4	超屏蔽电缆(双层编织及一层磁性带)

注:将来有可能列入附加的电缆类别。

## 14.3 最大表面转移阻抗 $Z_T$ 极限值的推导

表面转移阻抗  $Z_T$  随频率变化的典型特性在图 57 中简略示出,其中不同屏蔽结构的曲线表示如下:

- 非理想化的单层编织;
- 理想化的单层编织和双层编织;
- 金属箔/编织层;
- 超屏蔽。

曲线一般沿其渐近线出现。低频时的水平渐近线是屏蔽层的单位长度的直流电阻,它与电缆直径和屏蔽材料有关。

在中间频率,某些屏蔽结构可呈现出表面转移阻抗与频率成反比的特性,例如,图 57 中曲线 b) 和 d)。在此区域,选择 5 MHz 确定  $Z_T(5)$  的极限。

但在较高频率段,大多数屏蔽结构表现出与频率成正比的渐近线,在此频率范围内,规定最大表面转移阻抗的最大极限是可能的。选定较低频率点(30 MHz)来确定极限值  $Z_{T1}$ , 选定较高频率(3 GHz)来确定极限值  $Z_{T4}$ 。在 30 MHz 至 3 GHz 之间,在 300 MHz 至 1 GHz 之间的转移阻抗极限值是确定的,不同屏蔽结构的极限值  $Z_{T1}$  至  $Z_{T4}$  如表 5 和图 58 所示。

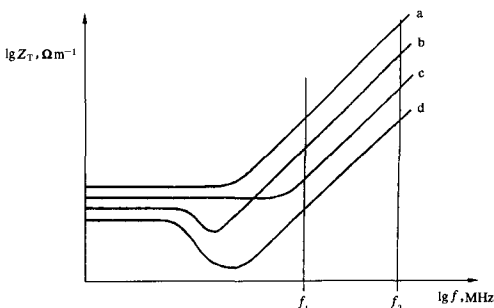


图 57 表面转移阻抗随频率变化示意图

表 5 表面转移阻抗  $Z_T$  和有效表面转移阻抗  $Z_{TE}$  的最大极限  
及屏蔽衰减  $a_s$  的最小极限 ( $DOD \geq 2.95 \text{ mm}$ )<sup>3)</sup>

电 缆		$Z_T(0)^{1)}$	$Z_T(5)^{1)}$	$Z_{T1}$ 和 $Z_{TE1}$	$Z_{T2}$ 和 $Z_{TE2}$	$Z_{T3}$ 和 $Z_{TE3}$	$Z_{T4}$ 和 $Z_{TE4}$	归一化屏蔽 衰减 $a_{sn}$ $Z_s=150 \Omega$ $\Delta v/v_1=10\%$ $v_2=220 \text{ Mm/s}$ $v_1=200 \text{ Mm/s}$	吸收钳测得的 屏蔽衰减 $a_{sc}$ $Z_s=300 \Omega$ $v_2=280 \text{ Mm/s}$ $v_1=200 \text{ Mm/s}$ $\Delta v/v_1=40\%$
类别	结构	直流 mΩ/m	5 MHz mΩ/m	30 MHz mΩ/m	300 MHz mΩ/m	1 GHz mΩ/m	3 GHz mΩ/m	$a_{sn}^{2)}$ dB	$a_{sc}^{2)}$ dB
1	单层编织	(20)	(20)	100	1 000	3 300	10 000	40	50
2	双层编织 类型 1	(9)	(0.6)	3	30	100	300	70	80
	类型 2	(9)	(0.6)	1	10	33	100	80	90
3	箔/编织 (卷状绕包)	(15)	(12)	2	6	20	60	85	95
4	超屏蔽 (两层编织 + 一层带)	(8) (0.1 在 0.1 MHz 时)	(0.02)	0.1	(1) 在考虑中	(3) 在考虑中	(10) 在考虑中	(100)	(110)

1) 要在详细规范中规定;  
2) 用吸收钳测量超过 100 dB 的值较困难。其他值要圆整到最近的 5 dB;  
3) 对于更小电缆,使用两倍  $Z_T$  和低于的屏蔽衰减极限 6 dB 的值。

14.4 最小屏蔽衰减极限值的推导

屏蔽衰减  $a_s$  与表面转移阻抗的关系如下:

$$a_s = 20 \lg \left[ \frac{\sqrt{Z_1 Z_2} \times \omega \times \left| \frac{1}{v_2} - \frac{1}{v_1} \right|}{Z_T} \right] \dots\dots\dots (119)$$

或

$$a_s = 20 \lg \left[ \frac{\sqrt{Z_1 Z_2} \times \omega \times \left| \sqrt{\epsilon_{r2}} - \sqrt{\epsilon_{r1}} \right|}{Z_T \times c_0} \right] \dots\dots\dots (155)$$

式中:  $Z_1$ ——电缆的特性阻抗;

$Z_2$ ——外电路阻抗;

$\epsilon_{r1}$ ——电缆的介电常数;

$\epsilon_{r2}$ ——外电路的介电常数;

$c_0$ ——真空光速;

$v_1$ ——内电路的传输速度;

$v_2$ ——外电路的传输速度;

$Z_F$ ——容性耦合;

$Z_T$ ——表面转移阻抗(当  $Z_F$  很大时,应用有效转移阻抗  $Z_{TE} = \max |Z_F \pm Z_T|$  代替  $Z_T$ )。

为了计算 1 类电缆的最坏情况,例如:

$$Z_1 = 50 \Omega \quad \epsilon_{r1} = 2.25 \quad (v_1 = 200 \text{ Mm/s})$$

$$Z_2 = 150 \Omega \quad \epsilon_{r2} = 1.86 \quad (v_2 = 220 \text{ Mm/s})$$

把这些值代入公式(155),那么,第一类屏蔽结构的屏蔽衰减为

$$a_s = 20 \lg(248 \times f/Z_T) \dots\dots\dots(120)$$

式中:  $f$ ——单位为 MHz;

$Z_T$ ——单位为  $m\Omega/m$ 。

对于电气长度长的电缆,当

$$\frac{\lambda}{l} \leq 2 \times \left| \sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}} \right|$$

并且  $Z_T$  既与频率成正比,又沿电缆长度不变,则  $a_s$  不随频率变化。

注意,具有较高  $a_s$  的较好电缆将具有较低的  $Z_T(m\Omega/m)$ 。

具有不同屏蔽结构的最小屏蔽衰减极限值也在表 5 和图 65 中给出。应选择电缆结构,使得不超过表 5 所示的极限。

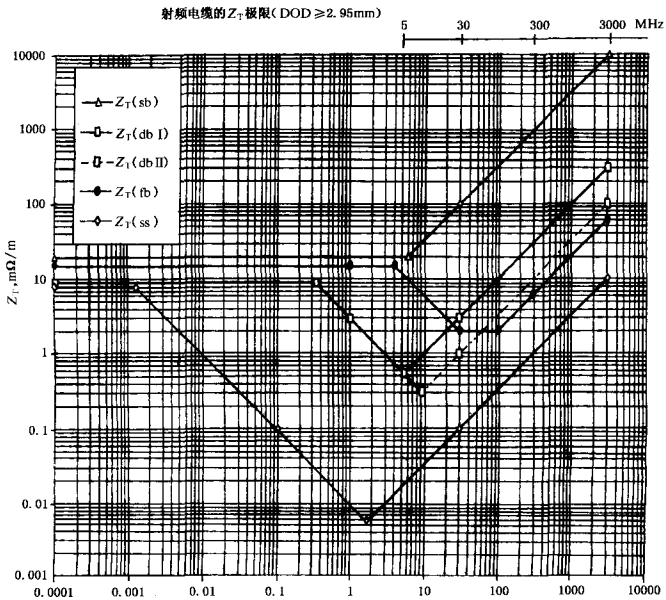


图 65 确定表面转移阻抗对频率  $f$  的极限指南

#### 14.4.1 屏蔽衰减随电缆结构的变化

根据与电缆结构和频率有关的  $\epsilon_{r1}$ 、 $\epsilon_{r2}$ 、 $Z_1$  和  $Z_2$  的变化,可确定修正因子。

最主要的修正因子取决于信号在电缆内外传播的相对速度。