



中华人民共和国通信行业标准

YD/T 2191.4-2012

电信设备电磁兼容安装及缓和措施 第4部分：高空电磁脉冲(HEMP) 抗扰度——高空电磁脉冲辐射 干扰保护装置技术要求

Electromagnetic compatibility for installation and
mitigation guidelines

Part 4: Immunity to HEMP - Specifications for
protective devices against HEMP radiated disturbance

(IEC/TS 61000-5-4, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 5: Installation and
mitigation guidelines - Section 4: Immunity to HEMP - Specifications for protective
devices against HEMP radiated disturbance. Basic EMC Publication, MOD)

2013-04-25 发布

2013-06-01 实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

目次

前 言.....II

1 范围.....1

2 规范性引用文件.....1

3 术语、定义和缩略语.....1

 3.1 术语和定义.....1

 3.2 缩略语.....3

4 辐射干扰保护装置规范.....3

 4.1 概述.....3

 4.2 屏蔽装置的分类.....3

 4.3 通用要求.....4

 4.4 规格.....4

附录 A（资料性附录） 基本原理.....14

前 言

本部分标准是《电信设备电磁兼容安装及缓和措施》标准的第4部分，该标准包括以下部分：

第1部分：总则

第2部分：接地和线缆

第3部分：高空电磁脉冲保护导则

第4部分：高空电磁脉冲（HEMP）抗扰度——高空电磁脉冲辐射干扰保护装置技术要求

第5部分：高空电磁脉冲（HEMP）抗扰度——高空电磁脉冲射频场感应的传导干扰保护装置技术要求

第6部分：外部电磁干扰的缓和措施

第7部分：电磁干扰保护小室的保护壳体的等级

本部分修改采用了 IEC/TS 61000-5-4《电磁兼容 5-4 部分 安装和解决对策-HEMP 保护装置的技术要求》进行制订。与 IEC/TS 61000-5-4 的差异为

1. 删除了引用文献

2. 部分章节重新进行了排版。

本部分由中国通信标准化协会提出并归口。

本部分起草单位：工业和信息化部电信研究院、华为技术有限公司、中兴通讯股份有限公司、上海贝尔阿尔卡特股份有限公司。

本部分主要起草人：屈鹏飞、张博钧、吴 琼、刘宝殿、周 镒、谢玉明、张兴海、张 科。

电信设备电磁兼容安装及缓和措施

第4部分：高空电磁脉冲(HEMP)抗扰度

——高空电磁脉冲辐射干扰保护装置技术要求

1 范围

本部分规定了为民用设施免受高空核电磁脉冲(HEMP)影响而使用的保护装置的分类、通用要求和规格等。该保护装置的性能要求将在后续标准中给出。

本部分适用于现有的防护 HEMP 辐射电磁场的保护装置。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 4365 电工术语 电磁兼容

3 术语、定义和缩略语

下列术语和定义，以及GB/T 4365中的术语和定义适用于本文件。

3.1 术语和定义

3.1.1

屏障 Barrier

用于将敏感电路与电磁干扰相隔离的设施。屏蔽是屏障的一种方式。

3.1.2

接触电阻 Contact Resistance

两个相互接触的物体之间测得的以欧姆为单位的电阻。

3.1.3

压缩形变 Compression Set

在特定的热、压力和作用时间下由压缩造成的材料高度的永久性缩短的百分比。

3.1.4

耐蚀力 Corrosion Resistance

对金属表面因氧化、电解或者化学污染而造成表面逐渐被破坏的化学过程的耐受性。

3.1.5

截止频率 Cut-Off Frequency

待测特性在此频率的测量值和较低频率的测量值相比降低到了一个指定的比率。

注：对于波导，截止频率是指电磁能量不能在波导内部有效传播的频率。此频率取决于波导的几何截面和尺寸。

3.1.6

伸张度 Elongation

物质在拉力作用下造成长度的增加。

3.1.7

馈入点 Point of Entry

在封闭外壳表面上可注入能量的物理位置。

3.1.8

保护装置 Protective Device

用于防范传导干扰的电子器件如滤波器、气体放电管、金属氧化物电阻等；或者用于防范辐射干扰的电子器件如屏蔽、衬垫、波导等。这样的器件或者几个器件的组合就构成了概念性的系统电磁屏障的一部分。

3.1.9

屏蔽 Shield

将导体材料放置于系统电路、器件或者线缆周围，用于抑制指定区域内部或者外部电磁场的影响。

3.1.10

屏蔽效能 Shielding Effectiveness

某点与源之间放置了屏蔽以后与没有放置屏蔽相比电磁场幅度的降低或者衰减，通常以 dB 为单位。

3.1.11

趋肤深度 Skin Depth

导体内部某点电流密度为导体表面电流密度的 $1/N_p$ ($1/e$ 或 36.8%) 时该点到导体表面的距离。

3.1.12

表面电阻率 Surface Resistivity

物质表面正方形的两对边之间的阻抗，通常以“欧姆每平方单位”来表示。

3.1.13

(同轴线的) 表面转移阻抗 Surface Transfer Impedance (of a Coaxial Line)

同轴线内导体单位长度上的感应电压与同轴线外表面上的电流之比。

3.1.14

抗张强度 Tensile Strength

将样品拉伸至断裂过程中施加的最大拉力。

3.1.15

转移导纳 Transfer Admittance

屏蔽区域受保护一侧上导体感应电流和外壳上不受保护一侧的电压之间的数学关系。是转移阻抗的倒数。

3.1.16

(屏蔽电路的) 转移阻抗 Transfer Impedance (of a Screened Circuit)

屏蔽电路中两规定点之间的电压与屏蔽体指定横断面上的电流的比值。

3.1.17

体积电阻率 Volume Resistivity

物质中大小为 1cm^3 的正方体的两个表面之间的电阻。通常以“ $\Omega\cdot\text{cm}$ ”来表示。

3.1.18

截止波导 Waveguide Below Cut-off

由一定长度波导构成的保护性器件，用于限制低于特定频率的电磁能量的通过。

3.1.19

波导限制器 Waveguide Trap
以截止波导作为屏障的电磁保护装置。

3.2 缩略语

| | | |
|--------------|-------------------------------------|--|
| HEMP/HA-NEMP | High-Altitude Electromagnetic Pulse | 高空核电磁脉冲（这两个缩略语是等 同的，HEMP 比 HA-NEMP 更常用） |
| EMI | Electro Magnetic Interference | 电磁骚扰 |

4 辐射干扰保护装置规范

4.1 概述

屏蔽闭合壳体（法拉第笼、屏蔽箱或者屏蔽建筑）的屏蔽效能会受到侵彻、开孔或者接缝等因素的影响。所有的这些因素都应被处理以使这些因素造成的屏蔽效能降低尽可能减小。此目标可以通过使用各种保护装置实现。

下面将介绍这些保护装置，首先将解释工作原理，然后展示在某些情况下这些设备的不足，最后将列出生产厂应给出的规格。会使用图片来说明工作原理或者以图片为例来说明一些参数是如何与频率相关的。

4.2 屏蔽装置的分类

屏障材料：

- 屏蔽材料；
- 观察窗；
- 通气板；
- 波导陷波器；
- 导电涂料；
- 导电胶和密封剂。

屏蔽线和导管：

- 固体屏蔽；
- 泄漏屏蔽；
- 接头。

衬垫类材料：

- 针织网状衬垫；
- 金属纤维及屏蔽衬垫；
- 导向线衬垫；
- 导电橡胶衬垫。

屏蔽器件：

- 曲肘式套管；
- 轴封；
- 接头衬垫；

- 密封圈;
- 金属胶带;
- 其他器件。

4.3 通用要求

屏蔽材料要达到要求的屏蔽效能则应符合以下电子、机械和环境标准。

电子要求:

对于屏障材料,应提供 E 场、H 场及 10kHz 到 1000MHz 频段内平面波的衰减值。对于衬垫类材料除需要上述同样的信息外,还需要提供直流电阻值。对于屏蔽线缆则需要转移阻抗规格,如果有可能,还需要提供 10kHz 到 100MHz 频段内的转移导纳信息。

机械要求:

所有为正确使用材料而需要掌握的机械特性都应该提供给用户。相关特性见下文。

环境要求:

屏蔽闭合壳体的总体屏蔽效能受不充分电接触造成的缝隙的限制。缝隙屏蔽效能的完整性可以通过改善电接触来优化。使用导电衬垫就可能改善电接触。

然而,使用这样的衬垫并不能长时间地保持屏蔽效能的完整性。环境因素也导致衬垫不能保持屏蔽效能的完整性,应考虑如灰尘、潮湿和水蒸气这些因素的影响。例如,为了通过密封来防止灰尘和潮湿,使用扁的或者条状的 EMI 衬垫粘贴到海绵或者固态弹性体上即可实现。因此关于如何在适宜的环境下使用正确的衬垫材料的信息也应提供。

4.4 规格

4.4.1 概述

保护设施规格的描述应考虑机械设计和电子设置两方面。

规格包括:

- 一般描述(介绍、目的);
- 应用信息(详细的用途);
- 材料描述(材料、构成、颜色、涂层等);
- 性能介绍(E、H 及平面波衰减、直流电阻、温度范围、机械性能、转移阻抗,如有必要也应提供转移导纳);
- 尺寸;
- 使用建议(表面处理、压力、安全及操作警告);
- 制造方法;
- 安装技术(如何安装);
- 存储建议。

4.4.2 屏障材料

4.4.2.1 屏蔽材料

通常有两类可用的材料:

a) 丝网

屏蔽效能取决于被屏蔽物的体积大小、网孔大小及丝网的制作。当减小网孔尺寸或使用共用地线且

彼此绝缘的双层丝网时，屏蔽效能会增加。对于图 1 所示的丝网尺寸，截止频率大约是 80MHz。对于更高的频率会因共振效应而导致振荡。

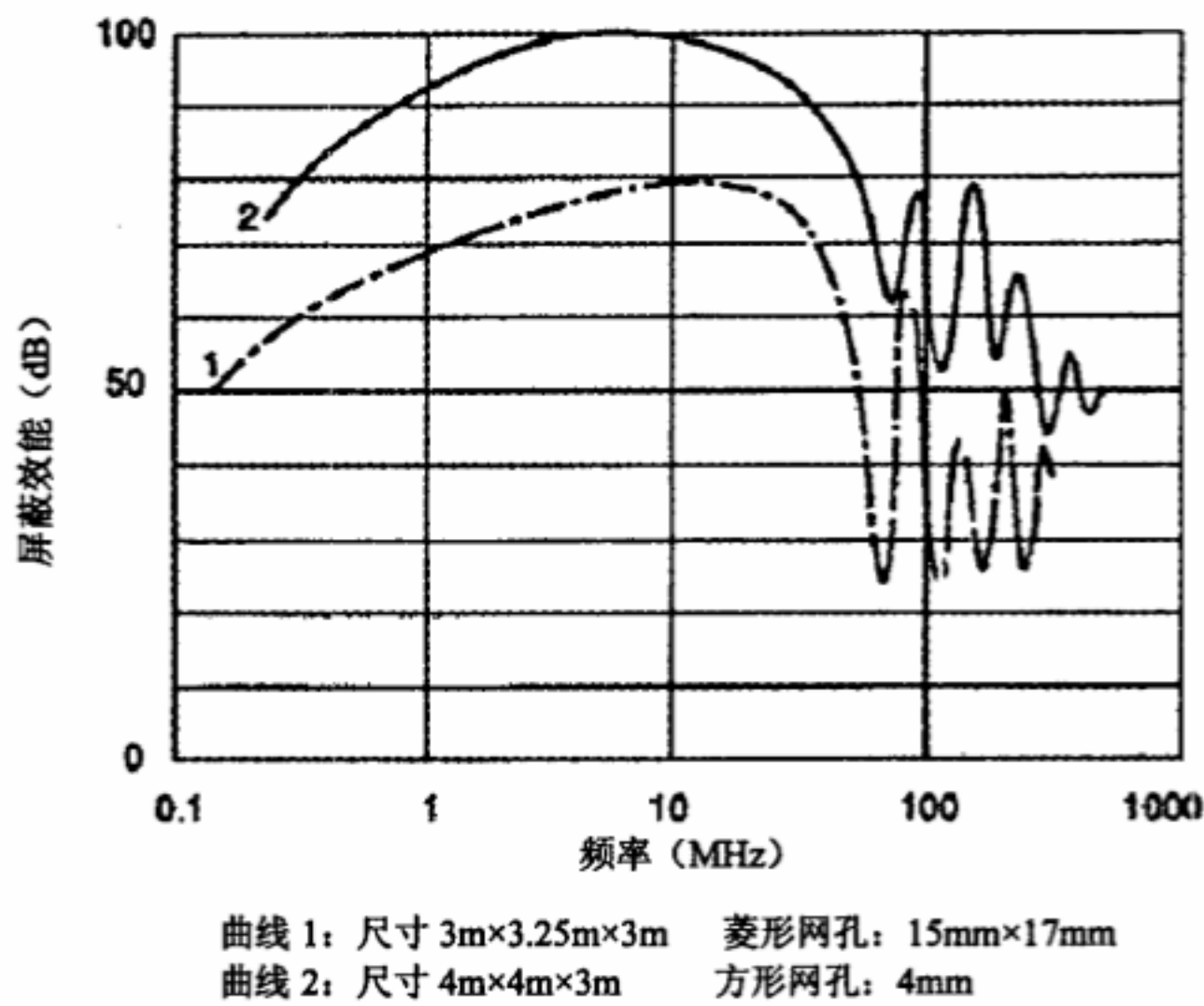


图1 双层丝网对平面波的典型衰减

b) 金属板

如使用均匀的金属板，则屏蔽笼的衰减会更高。由于趋肤深度随频率变化，屏蔽效能会随频率增加而增加，所以即使很薄的金属板在高频也会有足够的屏蔽效能。

对于平面波，当金属板的尺寸与平面波的波长可相比时可使用简单的公式来计算吸收损耗、反射损耗和屏蔽效能。附录 A 将给出计算方法。

图 2 给出了法拉第笼的屏蔽效能的一个例子。

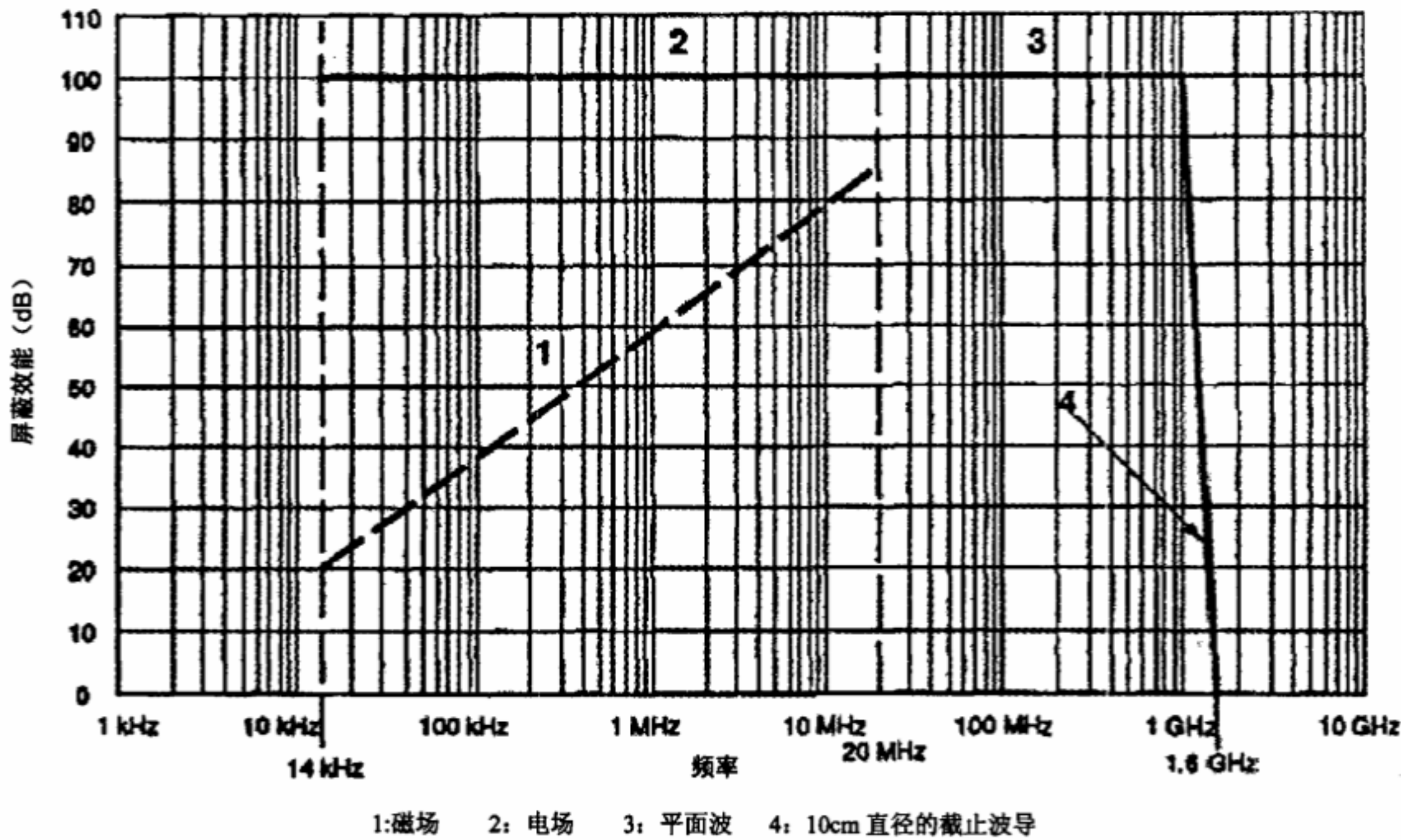


图2 法拉第笼的 HEMP 屏蔽效能范例

需要的规格如下。

屏蔽室：

- 一般描述；
- 各种器件的尺寸；
- 重量；
- 安装方式；
- 点和面的承重；
- 材料的类型；
- 可能的门的类型；
- 不同的进入点及其机械特性；
- 屏蔽效能。

屏蔽柜：

- 一般描述；
- 应用信息；
- 全部尺寸；
- 重量；
- 材料及涂层的类型；
- 屏蔽性能（如图 3 的例子）。

注：在门缝上使用硅基润滑剂是常见的做法。这种做法会使接触电阻增加，因此会导致屏蔽效能下降。

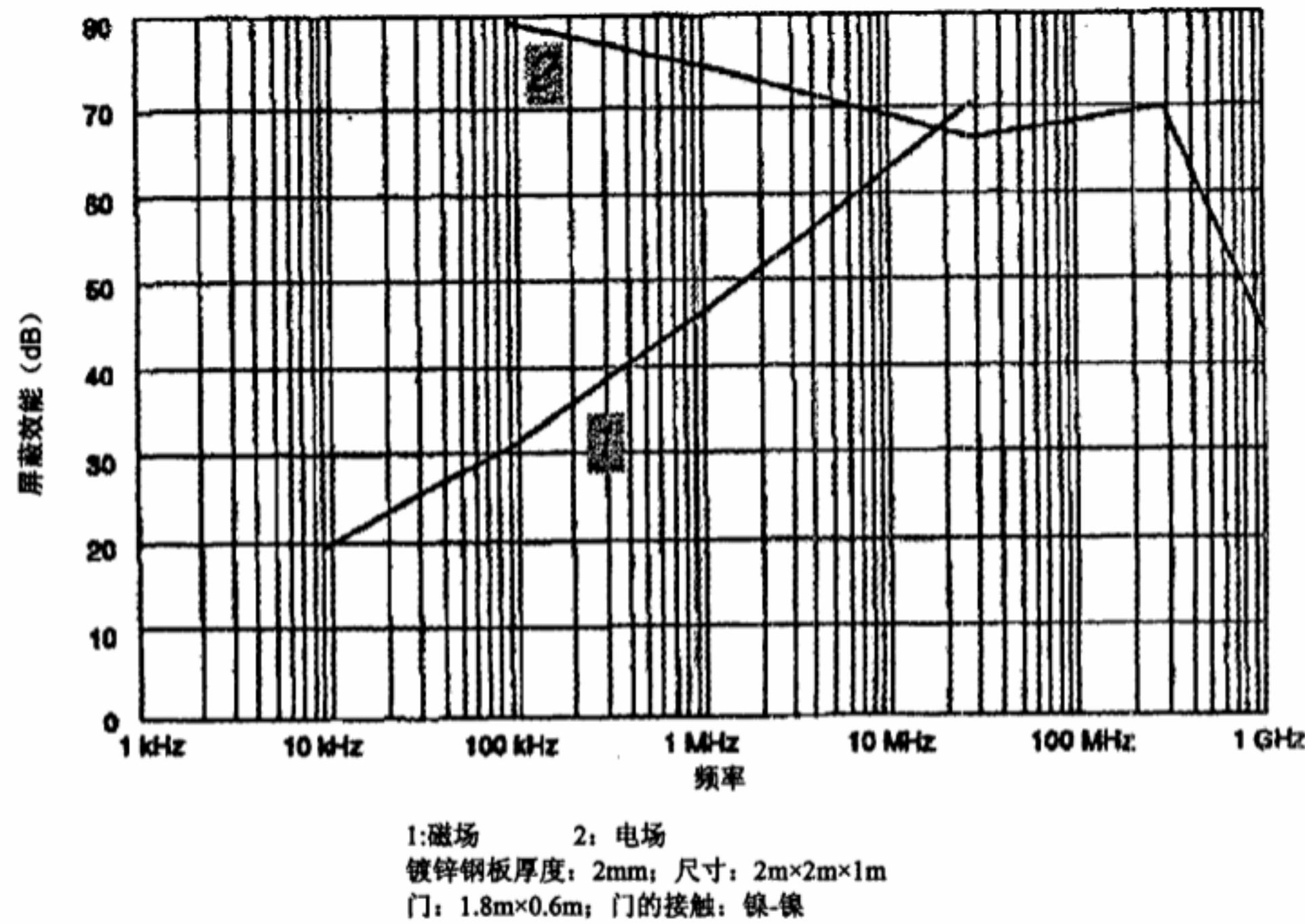


图3 含衬垫的屏蔽箱的衰减

4.4.2.2 观察窗

对于具有显示功能的设备需要使用观察窗时，观察窗也应能起到降低进入到受保护区域内的辐射电磁能量的作用。

观察窗可以使用玻璃、塑料或者二者的结合体制造。EMI 屏蔽可通过将针织或者机织的丝网夹在玻

璃或者塑料层之间的方式实现，也可以通过将观察窗镀上导电外层的方式实现。

屏蔽效能可通过金属丝网孔径的尺寸、交叉线的电接触、材料及线在窗边缘收尾处所使用的技术来确定。

通过假定准静态近似（尺寸 $\ll \lambda$ ），对于具有导电涂层的观察窗，电场只受到反射效应的影响。对于磁场则不同，在同一位置且对同一频率，观察窗后测得的磁场值（ H_2 ）的降低相对于在开孔状态下测得磁场值（ H_1 ）为频率的函数。衰减函数如下

$$\frac{H_2}{H_1} = \frac{1}{1 + j\omega\tau}$$

其中，

$$\tau = 8L / (3\pi(R_s + 2\pi R_c))$$

R_s 是导电膜的表面电阻；

R_c 是导电膜和观察窗边缘之间的接触电阻；

L 是窗的等效电感。

对于观察窗具有丝网的情况，磁场衰减的函数的形式相同。但 R_s 应被 $Z_s = R_s + j\omega L_s$ 代替，其中 R_s 取决于线的线性电阻、网孔尺寸， L_s 取决于窗及网孔的尺寸。

就磁场而言，观察窗的特性类似低通滤波器（如图 4 的例子）。对于具有丝网的观察窗，衰减函数与频率不相关，只取决于窗和孔的特性和尺寸。

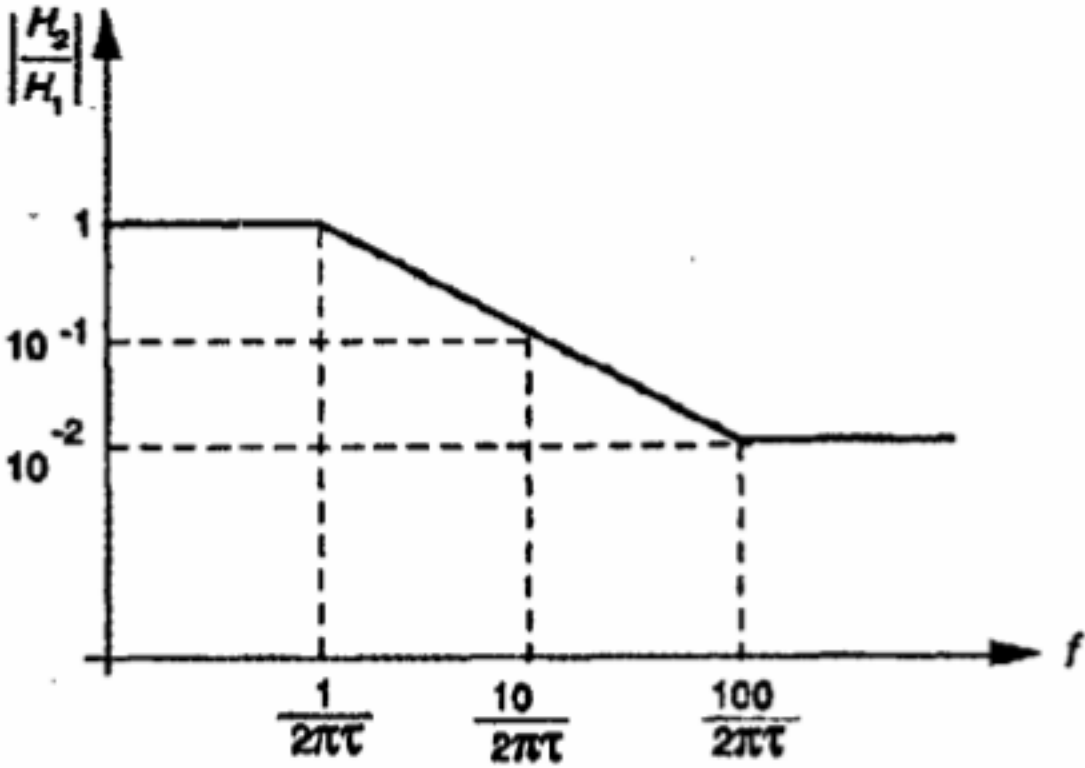


图4 观察窗磁场衰减函数的范例

电场衰减函数在窗口的截止频率以下不依赖于频率。它取决于窗口的尺寸和材料。

需要的规格：

- 一般描述；
- 应用信息；
- 产品描述（光学基片、涂层、安装架、总线终端、端口衬垫和接触面、边缘粘结型叠片、丝网屏蔽窗）；
- 性能介绍（屏蔽效能，温度范围及涂层的表面电阻）；
- 尺寸。

4.4.2.3 通风板

通气板用于需要高等级 EMI 屏蔽性能且需要通风孔、进风口来冷却设备或者排烟的电子产品外壳或者机柜上。

通气板能在高频达到高的屏蔽效能。通气板的制作利用了截止波导的原理，将通气板制成蜂巢状。这样的通气板的从功能上来说说是波导簇。

对于平面波，蜂巢状波导的屏蔽效能为：

$$SE(dB) = 27 \frac{T}{W} - 20 \log N$$

其中：

T 是蜂巢厚度；

W 是每个单元的宽度；

N 是单元的数量；

注意：当频率比波导的截止频率低时公式成立。在那样的情况下， SE 是与频率无关的。另外公式还应满足 $27TW > 20 \log N$ 。

需要的规格：

- 一般描述；
- 应用信息；
- 产品描述（结构、蜂巢中心、接口衬垫、铆钉、涂层）；
- 尺寸；
- 屏蔽效能，温度范围。

4.4.2.4 波导限制器

当不导电的杆需穿过屏蔽时，应使用波导陷波器。对于通风板，应利用截止波导工作原理。

对于给定的截面，波导产生的屏蔽效能可通过如下公式确定

$$SE(dB) = 54.6 \left(\frac{1}{\lambda_c^2} - \frac{1}{\lambda^2} \right)^{1/2} L$$

其中，

λ_c 为截止频率波长，单位为 m；

$\lambda_c = 1.7d$ (d ：圆形波导的直径，单位为 m)；

$= 2a$ (a ，矩形波导的长边，单位为 m)；

λ 为待考察的频率的波长，单位为 m，且有 $\lambda > \lambda_c$ ；

L 为波导的长度，单位为 m。

需要的规格：

- 一般描述；
- 应用信息；
- 产品描述（材料、涂层）；
- 安装技术（螺栓、焊接）；
- 尺寸；
- 截止频率以下的衰减。

4.4.2.5 导电涂层

通过将高度混合了如银、石墨或者镍等导电物质的涂料用于塑料外壳的屏蔽或者接地来改善 EMI 问

题是一种经济有效的方法。

但由于材料的性能会随着时间下降,因此应被谨慎使用。

需要的规格:

- 一般描述;
- 应用信息(应用方法、使用注意事项、表面预处理等);
- 特性(表面电阻、温度范围、存储建议等等)。

4.4.2.6 导电胶和密封剂

导电胶可用于粘结 EMI 窗、通风孔或者丝网来屏蔽永久性的缝隙及填充裂缝或缺口。密封剂可用于搭接处或者对接头,但只能在接头没有破损的情况下使用。

由于导电胶和密封剂的性能会随使用年限下降,因此应谨慎选用。

需要的规格:

- 一般描述;
- 应用信息(应用方法、使用注意事项、表面预处理,等等);
- 特性(体积电阻、温度范围、存储建议等等)。

4.4.3 屏蔽线缆和屏蔽导管

引入到屏蔽线内部的电压和电流取决于屏蔽性能、线缆的长度及其负载阻抗。转移阻抗是一个重要的屏蔽参数,为屏蔽线内导体每米长度上感应的开路电压和屏蔽电流的比值(参见附录 A)。

4.4.3.1 固体屏蔽

由于趋肤效应,只有相对较低的频率能够进入固体屏蔽层内。薄壁圆柱体屏蔽被广泛使用。它由具有均匀大小的截面和管壁厚度的金属管构成。

转移阻抗由 Schelkunoff 公式给出。

对于半径为 a , 厚度为 T ($T \ll a$) 及电导率为 σ 的屏蔽管:

$$Z_T = \frac{1}{2\pi a \sigma T} \frac{(1+j)}{\operatorname{sh} \left[(1+j) \left(\frac{T}{\delta} \right) \right]} \frac{T}{\delta}$$

其中, δ 为趋肤深度。

$$|Z_T| = \frac{R_0 \mu}{(chu - \cos u)^{1/2}}$$

其中,

$\mu = 2T/\delta$, 且有

$R_0 = 1/(2\pi a \sigma T)$ 单位长度屏蔽层的直流电阻。

在 $\delta = a$ 且 $R_0 = 1/(2\pi a \sigma T)$ 的高频,转移阻抗的大小会呈指数曲线减小,对于铜制屏蔽层,这一频率约为 100kHz。

所需规格:

- 100MHz 以内转移阻抗和频率的函数关系;
- 电导率 σ ;
- 机械尺寸。

各类线缆的典型阻抗举例如图 5 所示。

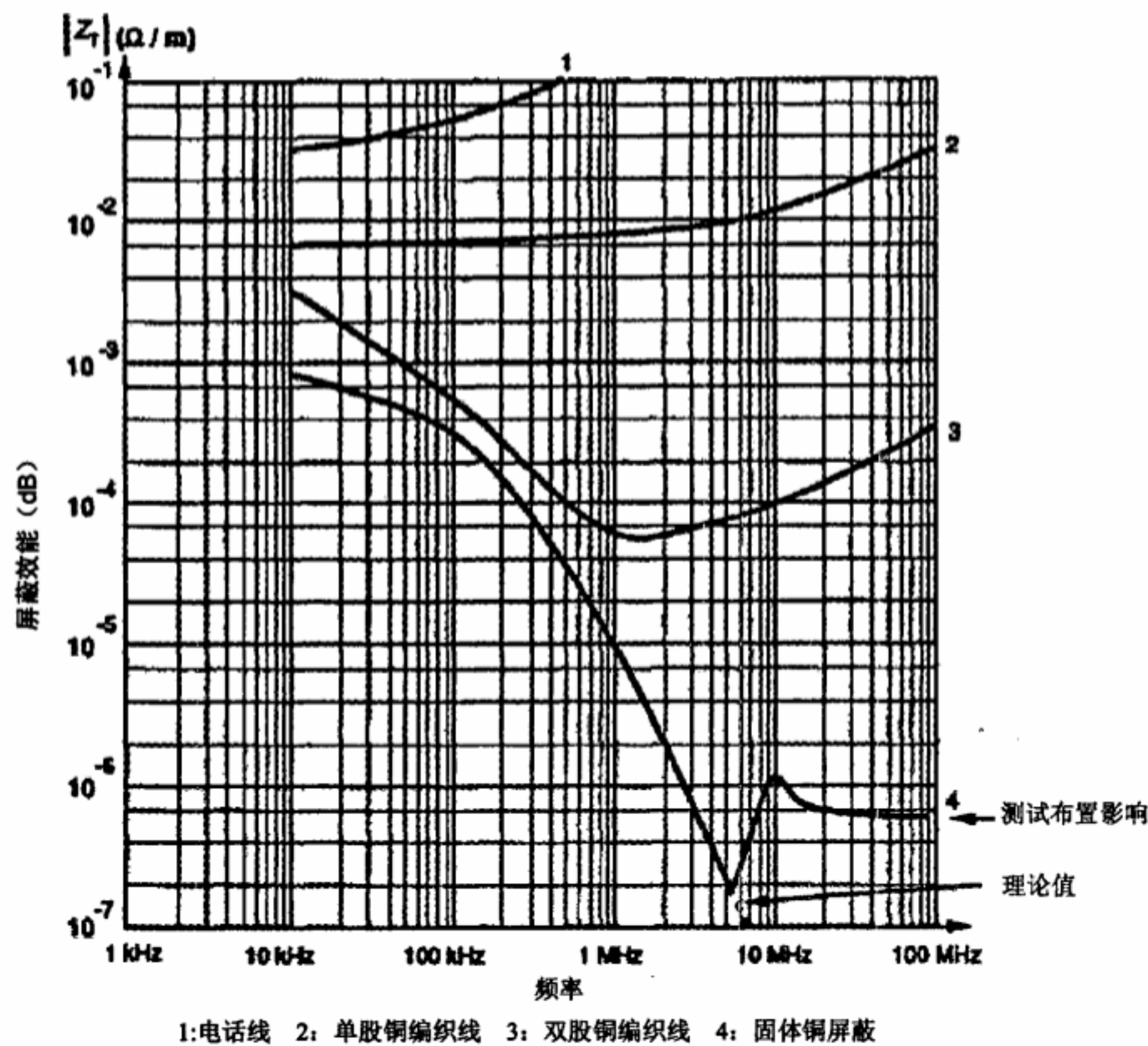


图5 几种线缆的转移阻抗

4.4.3.2 有泄漏的屏蔽

泄漏屏蔽通常是非均匀的，常见于柔性同轴电缆。为强化外部保护区域，应谨慎使用这些屏蔽材料，尤其对于长的线缆。

a) 编织线屏蔽

编织线屏蔽通常用于电子工业。转移阻抗 Z_T 取决于编织特性（参见附录 A）。

在低频，编织线屏蔽的性能类似于均匀固体屏蔽，具有与其相似的单位长度直流电阻。在高频（1MHz 及以上），场的侵彻效应会变得较为突出并会直接耦合到内部导体上。多层编织线屏蔽会减弱这个效应，更适宜用在超过 10m 长的线缆的外部保护区域上。

所需规格：

— 100MHz 以内 Z_T 和频率的函数关系。

转移阻抗和光覆盖因子 K 及载体数目 C 之间的关系如图 6。

b) 带绕屏蔽

带绕屏蔽通常用于需要柔性线缆的场合。

当需要优良的抗干扰或串扰屏蔽时，可将带绕屏蔽与编织线屏蔽协同使用以改善屏蔽性能。

转移阻抗 Z_T 的公式参见附录 A。

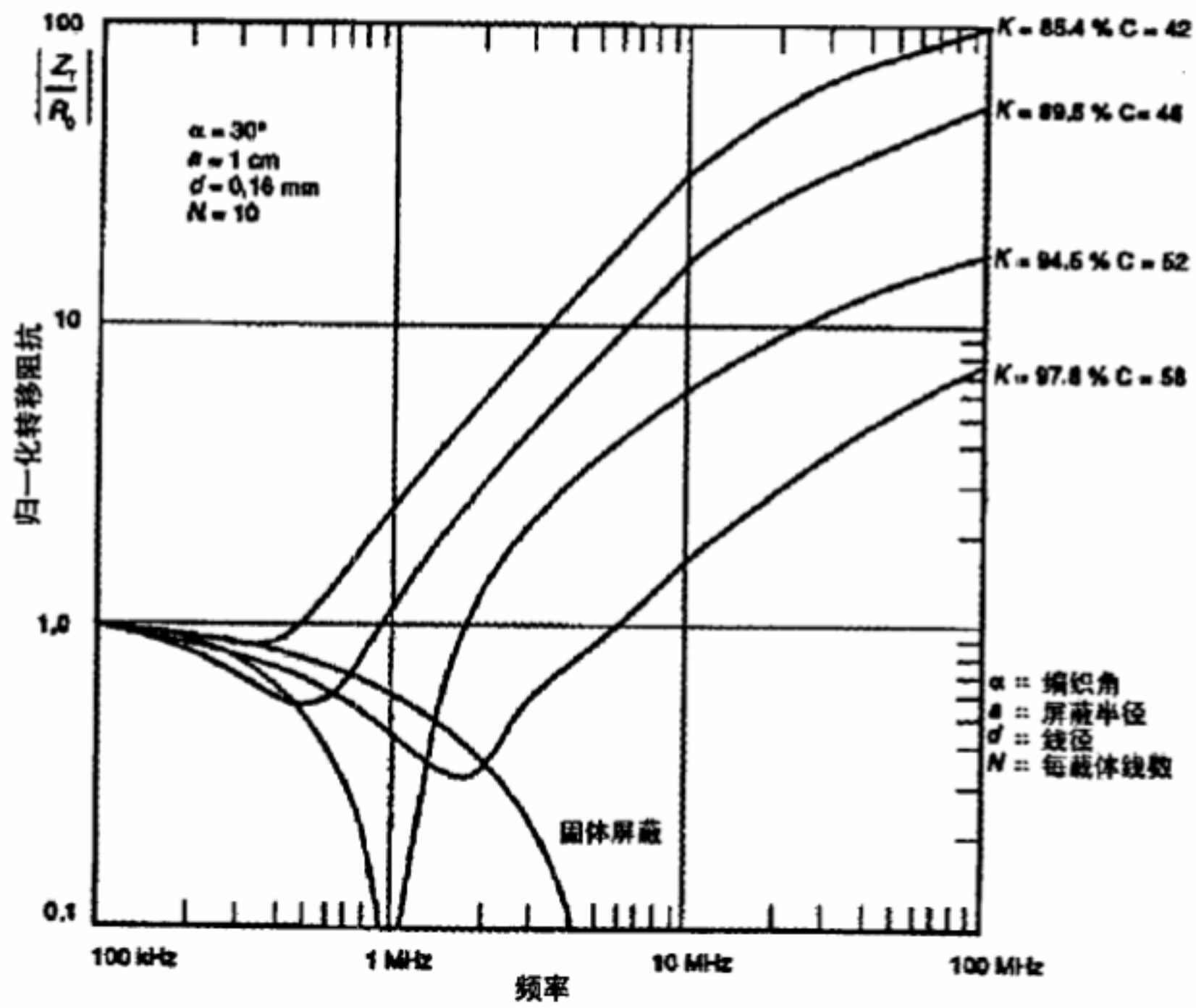


图6 编织线屏蔽和转移阻抗的函数关系范例

所需规格如下。

— 100MHz 以内 Z_T 和频率的函数关系。

带绕屏蔽的转移阻抗和衍射角 α 的函数关系如图 7 中的范例。

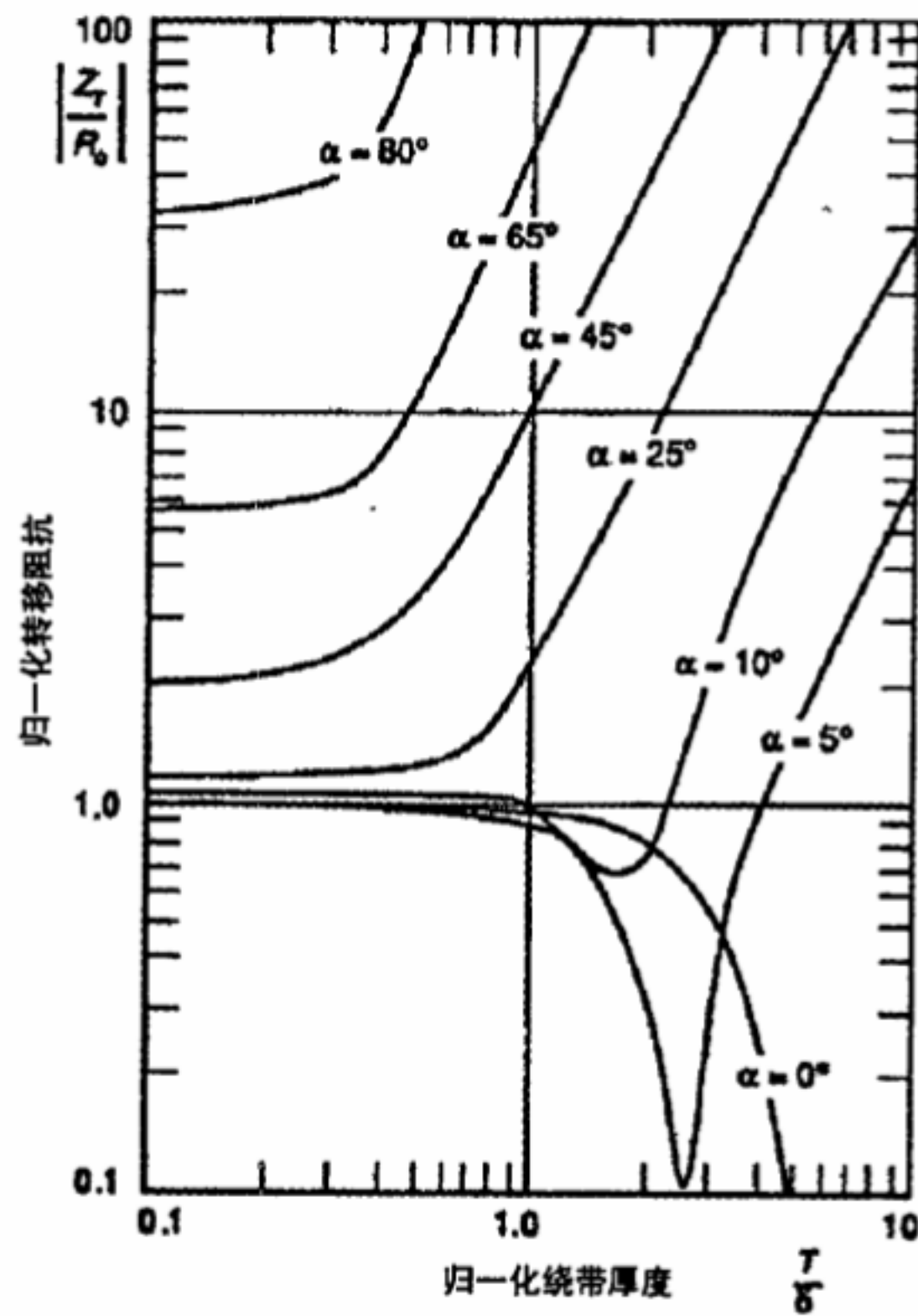


图7 带绕屏蔽转移阻抗的计算

4.4.3.3 接头

接头用作屏蔽闭合壳体和屏蔽线缆之间的接口。通常具有插槽或者缝隙，可使外部电磁场注入到线缆内部。它们通常具有与配合面接触电阻相关的总串连电阻，会产生电压下降并使电场注入到内导体中。

接头的转移阻抗由如下公式给出，单位为 Ω ：

$$Z_T = R_0 + j \omega M$$

其中，

R_0 是在接头两侧测得的电阻；

M 是外部场和线缆内部导体之间的互感。

具有 R_0 小于 $1\text{m}\Omega$ 且 M 约为 10pH 特性的接头是可以获得的。

所需规格：

- 一般描述；
- 转移阻抗；
- 特性（机械、电气、气候和防水）；
- 接触方式（卷曲式、直拉式）；
- 所有必要信息，制图或者布局。

4.4.4 衬垫类材料

4.4.4.1 针织丝网衬垫

通常针织丝网衬垫用于不需要重复打开/关闭或者特别密封环境性能的应用。

所需规格：

- 一般描述；
- 应用信息；
- 材料描述（线网、弹性芯、宽度、厚度、重量）；
- 特性（屏蔽效能、转移阻抗、承载电流能力、温度范围、拉拔强度、延长、颈缩、可焊性、耐腐蚀性）；
- 尺寸；
- 安装技术。

4.4.4.2 金属纤维及金属网

金属纤维和金属网应用于在空间有限且需要最小的衬垫厚度场合时较为理想。

所需规格：

- 一般描述；
- 应用信息；
- 材料描述（金属、密封弹性体、线网、颜色）；
- 特性（屏蔽效能、转移阻抗、承载电流能力、温度范围、建议的关闭力量、泄漏率）；
- 尺寸。

4.4.4.3 导向线衬垫

导向线衬垫由嵌有优质线的刻痕并粘结到弹性物质上形成的复合材料构成。在线散开或者断开不会损害电气和机械构件的场合下，且允许每根线都作为独立的弹簧原件时，建议将导向线衬垫用于 EMI 抑

制、接地、抗静电等应用。

所需规格：

- 一般描述；
- 应用信息；
- 材料描述（线、弹性体、分布、颜色）；
- 特性（屏蔽效能、转移阻抗、承载电流能力、温度范围、建议的关闭力量、可压缩性、压缩形变）；
- 尺寸。

4.4.4.4 导电弹性体

在电气和机械特性都应长时间稳定且需要良好的密封性能和屏蔽效能时可使用导电弹性体。

所需规格：

- 一般描述；
- 应用信息；
- 材料描述（弹性体、填充物、颜色、质地、产品形式）；
- 特性（屏蔽效能、转移阻抗、承载电流能力、温度范围、硬度、体积电阻率、抗拉强度、热导率、断裂伸长率）；
- 尺寸。

4.4.5 屏蔽器件

屏蔽器件可用来屏蔽及密封屏蔽室或屏蔽外壳上常见的钮子开关、接头、波导法兰或者缝隙。

所需规格：

- 一般描述；
- 应用信息；
- 材料描述；
- 特性（屏蔽效能、转移阻抗、承载电流能力、温度范围、允许的驱动次数、硬度、体积电阻率、抗拉强度、断裂伸长率）；
- 尺寸。

附 录 A
(资料性附录)
基本原理

A.1 屏障的屏蔽效能

为屏蔽 HEMP，屏蔽层通常都较厚，屏蔽性能受限于制造过程中的缺陷。对于比较薄的材料，屏蔽效能则受限于外壳、孔、缝隙等的大小和形状。计算无限大平板反射和吸收的一维公式不适用于实际的三维屏蔽壳体。

屏蔽效能的表达式为

$$SE(dB) = A(dB) + R(dB) + B(dB) = \text{吸收} + \text{反射} + \text{内部反射}$$

吸收损耗的计算见下式

$$A(dB) = 0.1315T\sqrt{f\mu_r\sigma_r}$$

其中，

T 为屏障厚度，单位为 mm；

f 为频率，单位为 Hz；

μ_r 为金属对空气的磁导率；

σ_r 为相对于铜的电导率

可用如下公式代替

$$A(dB) = 8.69 \frac{T}{\delta}$$

其中，

δ 为趋肤深度 $= (\pi\mu\sigma f)^{1/2}$ ，单位为 m；

μ ， σ 为磁导率和电导率的绝对值。

厚度每增加 1 个趋肤深度，吸收会增加 9dB。

反射可通过如下公式计算：

对于平面波，

$$R(dB) = 168 + 10 \log \left(\frac{\sigma_r}{\mu_r f} \right)$$

对于电波，

$$R(dB) = 322 + 10 \log \left(\frac{\sigma_r}{\mu_r r^2 f^3} \right)$$

对于磁波，

$$R(dB) = 15 + 10 \log \left(\frac{\sigma_r r^2 f}{\mu_r} \right)$$

其中，

r 是源到屏障之间的距离，单位为 m。

对于无限大的由铜和铁构成的屏障，其反射及反射与吸收的合成分别如图 A.1 和图 A.2 所示。

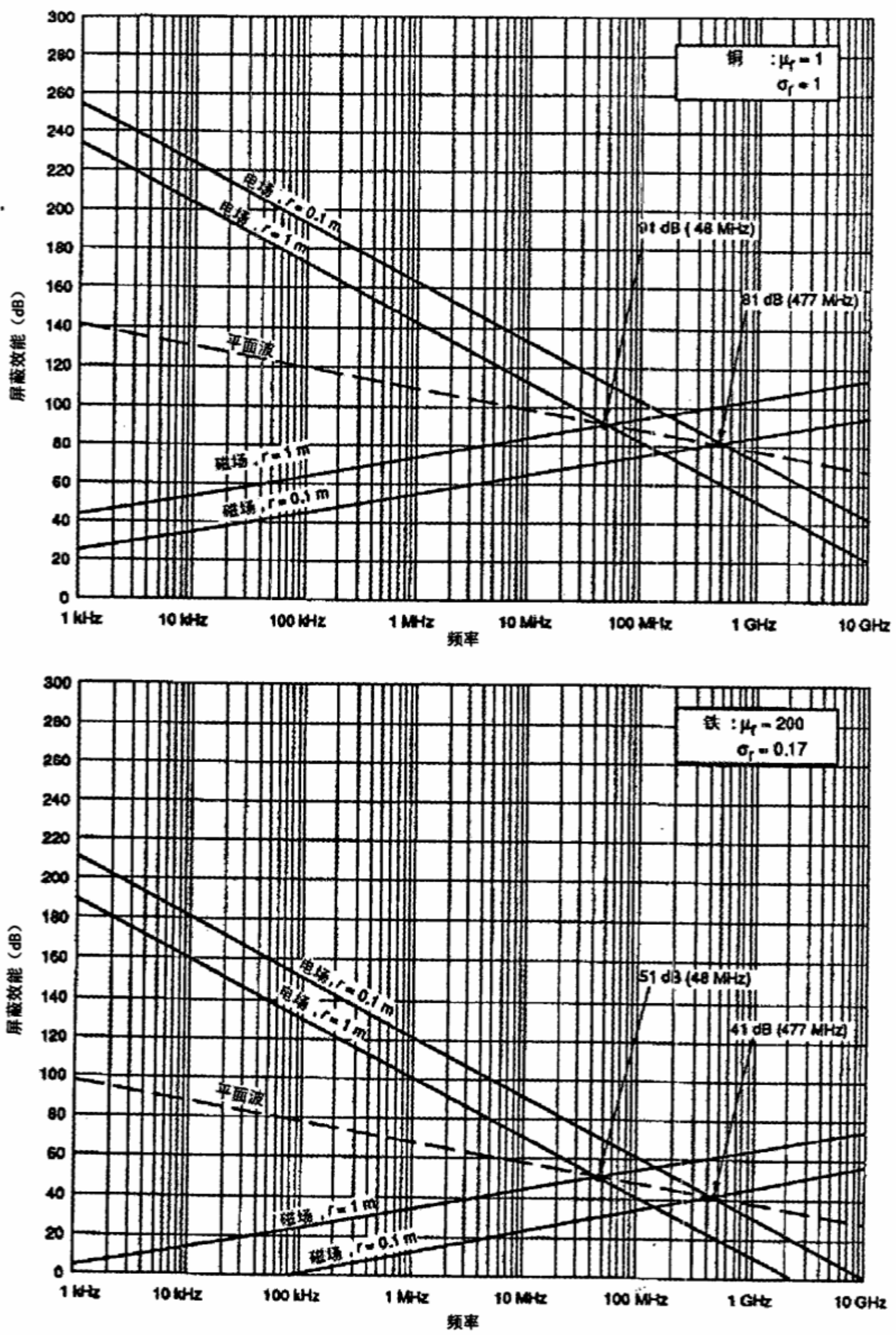


图 A.1 铜和铁的理论反射 (R_{dB})

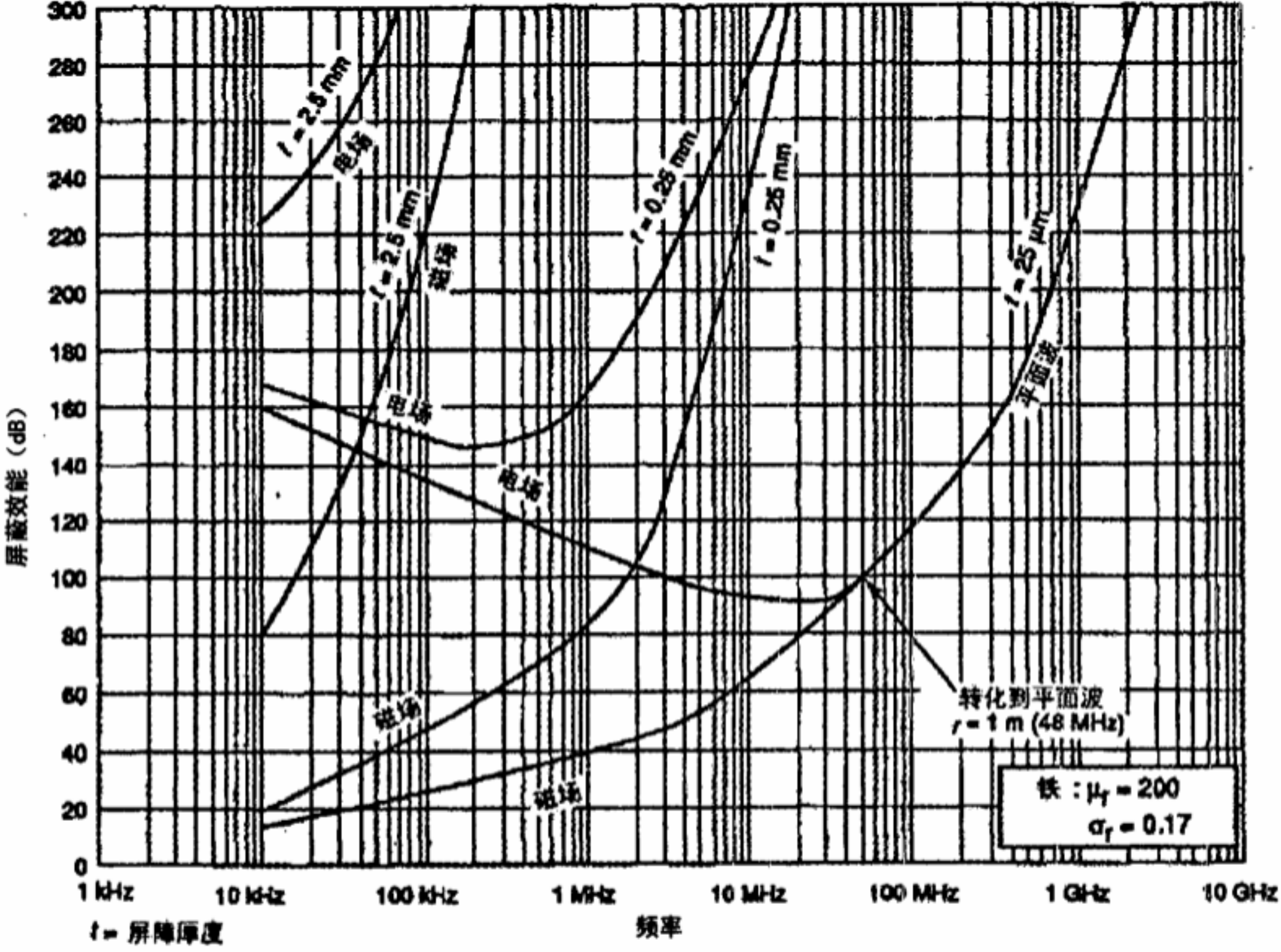
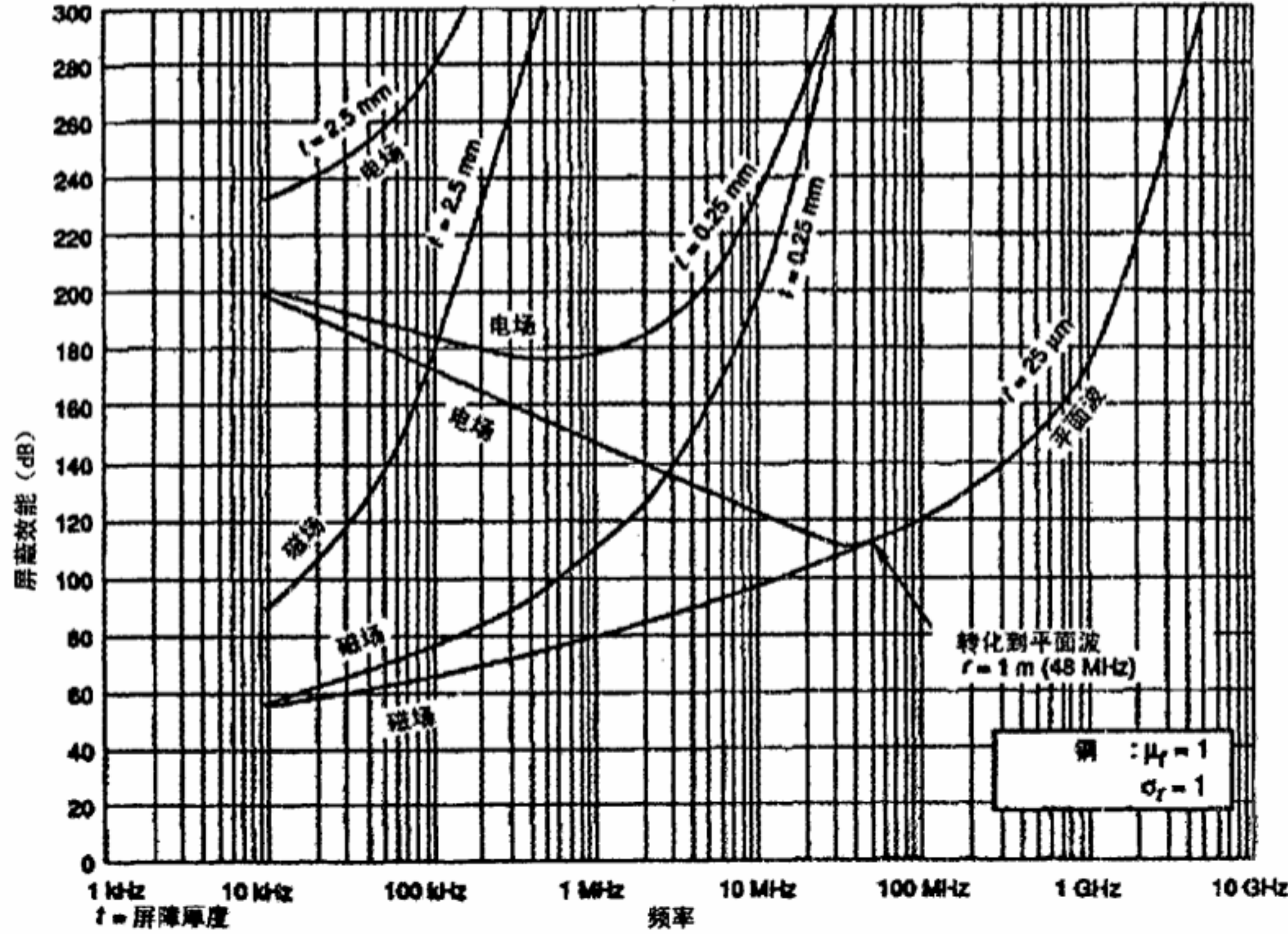


图 A.2 铜和铁反射和吸收合成的理论值 (R_{dB})

内部反射 B 通常可以忽略。如果吸收超过 10dB, B 是非常小的量。

A.2 转移阻抗理论

A.2.1 通过线缆护套的耦合机理

对于屏蔽线缆的电磁场, 电场和磁场分量会通过线缆护套将骚扰电流和电压感应到线缆内部。磁场将在线缆护套上产生感应电流 I 。此外, 对于编织网屏蔽线缆, 电场和磁场会通过护套的孔缝将电压引入到内导体和护套之间。

磁场影响通常更为重要。线缆护套上感应的电流 I_s 可以分为流至内导体的电流 I_i 以及返回到与地相连导体 (如图 A.3) 的电流 I_g 。因此有

$$I_s = I_g + I_i$$

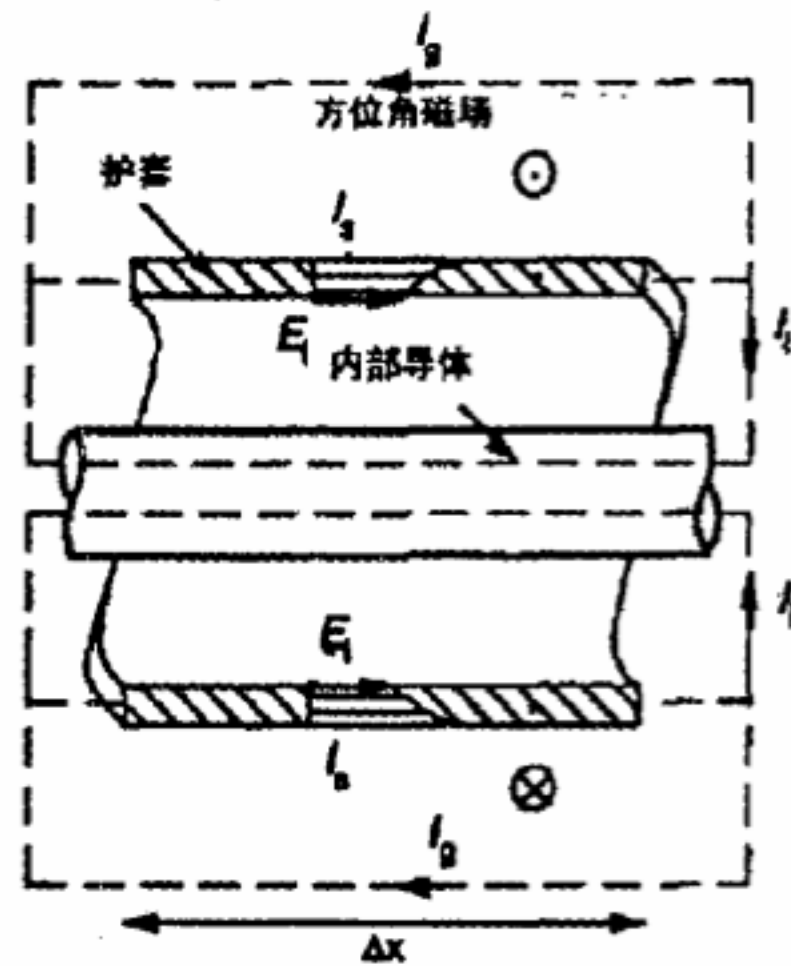


图 A.3 转移阻抗定义

这些电流在线缆护套上的循环会在护套上产生轴向的电场。由于趋肤效应, 在护套截面上电流及电场分布并不均匀。如果 I_g 为流经护套外表面的电流, 则内表面上的电场 E_i 是由很小的电流产生的, 衰减因子可以通过转移阻抗表示。

Schelkunoff 给出了电场 E_i 总的理论表达式, 如下:

$$E_i = Z_{aa}I_i + Z_T I_g$$

其中,

Z_{aa} 为护套的外表面阻抗;

Z_T 被称作线缆转移阻抗。

这个值是按照每单位长度定义的。

在大多数情况下, 线缆的护套是两端接地的, 内导体则端接到高阻上, 即有

$$I_i \ll I_g$$

因此,

$$I_g \approx I_s$$

这意味着转移阻抗可由如下公式给出

$$Z_T(\omega) = \frac{E_i(\omega)}{I_s(\omega)}$$

转移阻抗描述了线缆的屏蔽效果。它在频域内定义, 且有 $\omega=2\pi f$, f 为频率。

转移导纳由通过泄漏屏蔽的容性耦合产生，描述了电场效应。

A.2.2 转移阻抗和转移导纳定义

如前文的定义， I_s 为屏蔽电流， I_i 为内导体上的电流； V_i 为内导体和护套之间的感应电压， V_s 为护套与地之间的电压。转移阻抗和导纳可分别定义如下。

$$Z_T(\omega) = \frac{1}{I_s(\omega)} \frac{dV_i(\omega)}{dx} \quad I_i = 0$$

$$Y_T(\omega) = \frac{1}{V_s(\omega)} \frac{dI_i(\omega)}{dx} \quad V_i = 0$$

上述公式及对应的电路如图 A.4 所示，其中， $dV_i(\omega)$ 和 $dI_i(\omega)$ 为沿屏蔽线分布的电压源和电流源。

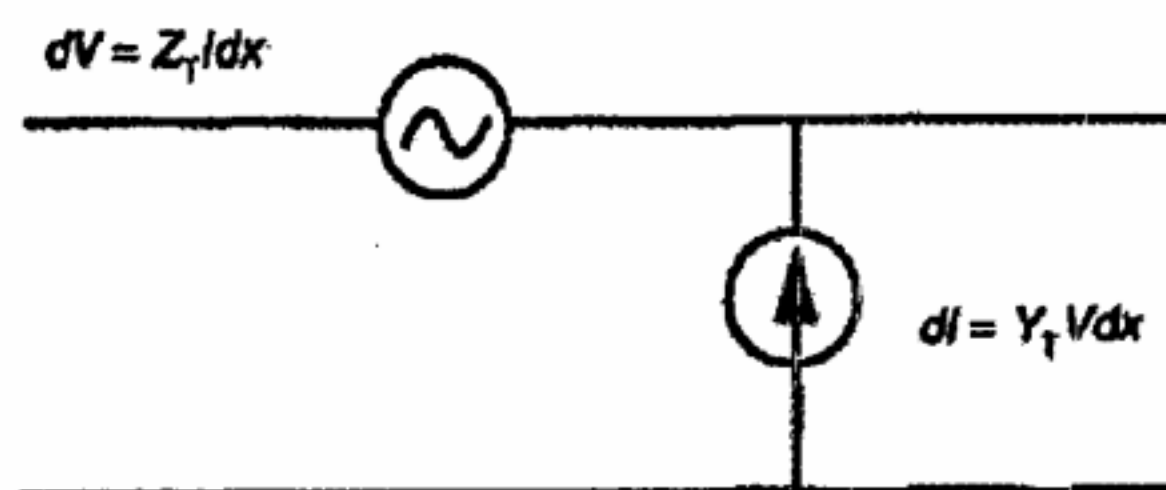


图 A.4 描述转移阻抗和转移导纳效应的等效电路

A.2.3 编织线屏蔽的转移阻抗

编织线屏蔽的转移阻抗由如下近似公式给出。

$$Z_T = Z_d + j\omega L_t$$

其中，

$$Z_d = \frac{4}{\pi d^2 N C \cos \alpha} \frac{(1+j)\frac{d}{\delta}}{\sinh\left[(1+j)\frac{d}{\delta}\right]}$$

$$L_t = \frac{\pi \mu_0}{6C} (1-K)^{3/2} \lambda(\alpha)$$

其中，

Z_d 为扩散项；

d 为线缆直径；

C 为载体数目；

K 为光覆盖因子；

$\Lambda(\alpha)$ 为离心函数（如图 A.5 所示）；

$\delta = 1/(\pi f \mu \sigma)^{1/2}$ 为屏蔽层中的趋肤深度；

L_t 为互感项；

α 为编织角；

N 为每个线束里线的数量。

扩散项 Z_d 的假定条件：屏蔽特性类似于板状屏蔽，且具有与编织线屏蔽相同的单位长度直流电阻，具有与单线径厚度板状屏蔽相同的高频特性。互感项的假定条件：编织线屏蔽的表现与具有椭圆形孔的板状屏蔽相似，且板状屏蔽上的孔的数量、长轴和短轴都与编织线屏蔽的菱形孔相同。

注意- 扩散项 Z_d 实际上只在角度 $\alpha=45^\circ$ 时较为准确, 当 α 不等于 45° 时, 需使用更准确的替代公式。

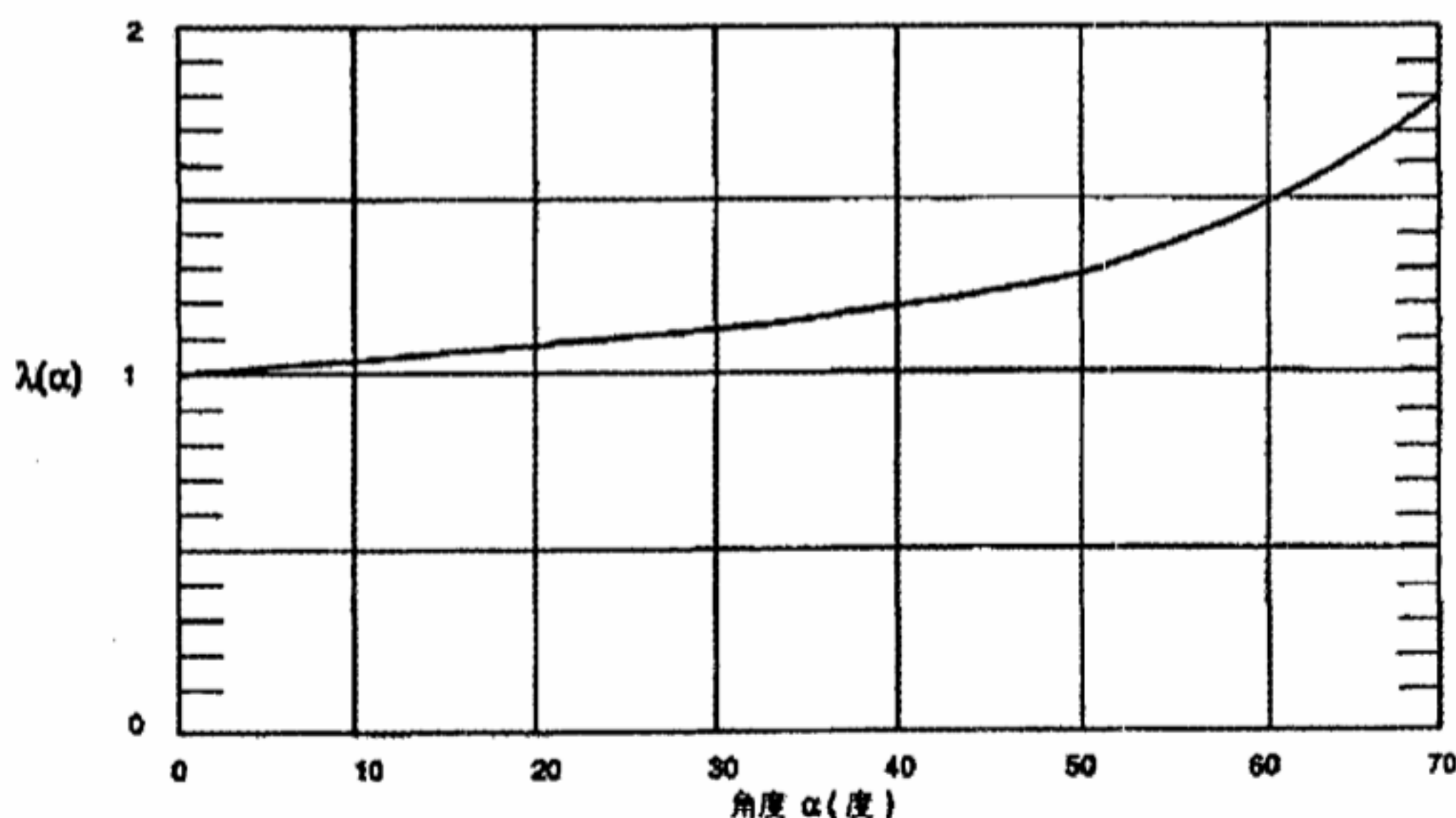


图 A.5 编织屏蔽的离心函数变化

A.2.4 带绕屏蔽线的转移阻抗

带绕屏蔽的转移阻抗可表示为

$$Z_T = R_0 \left[\frac{(1+j)\frac{T}{\delta}}{\sinh\left[(1+j)\frac{T}{\delta}\right]} + \left[\left((1+j)\frac{T}{\delta} \coth\left[\left(1+j\right)\frac{T}{\delta}\right] \right) + j\left(\frac{T}{\delta_0}\right)^2 \frac{a}{T} \right] \tan^2 \alpha \right]$$

其中:

R_0 为单位长度上的直流电阻;

a 为屏蔽层半径;

T 为屏蔽层厚度;

δ 为屏蔽层的趋肤深度;

δ_0 为等效非铁屏蔽体的趋肤深度 (μ_0, σ);

α 为螺旋角 ($\tan\alpha = 2\pi aN = 2\pi asina/W$);

W 为屏蔽带宽度;

N 为每单位长度的绕数。

对于单层缠绕时有部分重叠的屏蔽层获得的转移阻抗应将 W 替换为 $W-W_{ov}$, 其中, W_{ov} 为重叠宽度。在 $T/\delta \ll 1$ 的低频, 重叠类型带绕屏蔽的转移阻抗要比无重叠类型带绕屏蔽的大。但在高频, 绕线之间的电容将使感应效应短路, 导致 Z_T 开始下降。

中华人民共和国
通信行业标准
电信设备电磁兼容安装及缓和措施
第4部分：高空电磁脉冲(HEMP)抗扰度—高空电磁脉冲辐射干扰保护装置技术要求
YD/T 2191.4-2012

*

人民邮电出版社出版发行
北京市崇文区夕照寺街14号A座
邮政编码：100061
宝隆元（北京）印刷技术有限公司印刷
版权所有 不得翻印

*

开本：880×1230 1/16 2013年3月第1版
印张：1.75 2013年3月北京第1次印刷
字数：41千字

15115·14

定价：25元

本书如有印装质量问题，请与本社联系 电话：(010)67114922