

DKBA

华为技术有限公司企业技术规范

DKBA0.400.0022 REV. 2.0

电磁兼容性结构设计规范

华为技术有限公司 发布

前 言

本规范根据国家标准GJB 1046、GJB 12190、MIL- HDBK-419、IEC TS 61587-3、IEEE299-1997以及ARP1705 等系列标准编制而成。

本规范起草单位：华为技术有限公司结构造型设计部

本规范授予解释单位： 华为技术有限公司结构造型设计部

本规范起草人：

本规范审核人：

标准化审核人：

本规范批准人：

本规范在编制和审核过程中，得到了EMC特别工作组各位同仁的协助，在此表示衷心的感谢！

目 录

| | |
|--------------------|----|
| 1 范围 | 8 |
| 2 引用标准 | 8 |
| 3 术语 | 9 |
| 4 电磁场的基本概念 | 10 |
| 4.1 基本概念 | 10 |
| 4.1.1 电场 | 10 |
| 4.1.2 磁场 | 10 |
| 4.1.3 电磁感应定律 | 11 |
| 4.2 电磁场方程组 | 11 |
| 4.3 电磁波的传播特性 | 12 |
| 5 电磁兼容的基本概念 | 14 |
| 5.1 电磁兼容的定义 | 14 |
| 5.2 电磁兼容的三要素 | 14 |
| 5.3 如何实现电磁兼容 | 14 |
| 5.4 产品电磁兼容性能具体要求 | 15 |
| 5.5 解决电磁兼容问题的手段 | 16 |
| 6 电磁屏蔽的基本理论 | 17 |
| 6.1 电磁屏蔽的概念 | 17 |
| 6.2 连续屏蔽体的屏蔽 | 18 |
| 6.2.1 连续屏蔽体屏蔽模型 | 18 |
| 6.2.2 吸收损耗 | 19 |
| 6.2.3 反射损耗 | 19 |
| 6.2.4 多次反射修正因子 | 20 |
| 6.2.5 薄膜连续屏蔽体的屏蔽 | 20 |
| 6.2.6 双层屏蔽 | 21 |

| | |
|-------------------------|----|
| 6.3 不连续屏蔽体的屏蔽 | 21 |
| 6.3.1 缝隙屏蔽 | 22 |
| 6.3.2 开孔屏蔽 | 23 |
| 6.3.3 电缆穿透 | 26 |
| 6.3.4 屏蔽体的综合屏蔽效能 | 28 |
| 7 屏蔽设计 | 29 |
| 7.1 选择屏蔽效能指标 | 29 |
| 7.1.1 结构件屏蔽效能等级 | 30 |
| 7.1.2 公司现有产品的RE测试结果概况 | 30 |
| 7.1.3 公司现有结构件屏蔽效能测试结果概况 | 32 |
| 7.1.4 如何选择结构件屏蔽效能指标 | 34 |
| 7.1.5 屏蔽效能指标的默认含义 | 35 |
| 7.1.6 关于低频磁场屏蔽 | 35 |
| 7.1.7 关于1GHz以上的屏蔽 | 36 |
| 7.2 选择屏蔽体方案 | 36 |
| 7.3 屏蔽设计成本分析 | 38 |
| 7.4 缝隙的屏蔽设计 | 39 |
| 7.4.1 紧固点直接连接的屏蔽 | 39 |
| 7.4.1.1 减小缝隙的最大尺寸 | 39 |
| 7.4.1.2 增加缝隙深度 | 40 |
| 7.4.1.3 紧固点间距的选择 | 42 |
| 7.4.1.4 凸包的屏蔽 | 44 |
| 7.4.2 安装屏蔽材料 | 44 |
| 7.4.2.1 安装屏蔽材料的应用场合 | 44 |
| 7.4.2.2 缝隙中安装屏蔽材料后的屏蔽分析 | 45 |

| | |
|-----------------------|----|
| 7.4.2.3 缝隙的结构形式 | 45 |
| 7.4.2.4 屏蔽材料与零件之间的相容性 | 47 |
| 7.4.3 屏蔽材料的选用 | 47 |
| 7.4.3.1 公司允许使用的屏蔽材料 | 47 |
| 7.4.3.2 各种材料的应用场合 | 51 |
| 7.4.3.3 屏蔽材料的压缩方向 | 51 |
| 7.4.3.4 各种材料的压缩量范围 | 52 |
| 7.4.3.5 屏蔽材料的安装形式 | 53 |
| 7.4.3.6 各种材料的屏蔽性能 | 55 |
| 7.4.3.7 新材料和新技术的应用 | 56 |
| 7.5 通风孔的屏蔽设计 | 56 |
| 7.5.1 选择通风孔的屏蔽方案 | 56 |
| 7.5.2 穿孔金属板 | 57 |
| 7.5.3 截至波导通风板 | 59 |
| 7.6 局部开孔的屏蔽 | 60 |
| 7.7 塑胶件的屏蔽设计 | 60 |
| 7.8 单板局部屏蔽 | 62 |
| 7.8.1 盒体式结构 | 62 |
| 7.8.2 围框式结构 | 63 |
| 7.9 电缆对屏蔽的影响 | 64 |
| 7.9.1 光纤出线 | 65 |
| 7.9.2 屏蔽电缆夹线 | 65 |
| 7.9.3 屏蔽连接器转接 | 70 |
| 7.9.4 滤波连接器转接 | 72 |
| 7.9.5 电缆直接出屏蔽体 | 72 |
| 7.9.6 电源滤波器转接 | 73 |

| | |
|-------------------|-----------|
| 7.10 内部隔离设计 | 73 |
| 7.11 屏蔽效能裕量设计 | 74 |
| 8 接地的基本理论 | 76 |
| 8.1 接地的概念 | 76 |
| 8.2 接地的作用 | 76 |
| 8.3 搭接的概念 | 78 |
| 8.4 搭接的目的 | 78 |
| 9 搭接接地设计 | 79 |
| 9.1 搭接设计基本原则 | 79 |
| 9.2 搭接设计要求 | 79 |
| 9.2.1 搭接设计基本要求 | 79 |
| 9.2.2 结构件之间的电连接 | 81 |
| 9.3 搭接电阻 | 81 |
| 9.3.1 搭接电阻的应用 | 81 |
| 9.3.2 搭接电阻值的规定 | 82 |
| 9.4 搭接与屏蔽 | 83 |
| 9.5 搭接设计的具体实施方案 | 83 |
| 9.5.1 机柜的搭接设计 | 84 |
| 9.5.2 插箱、模块的搭接 | 85 |
| 9.5.3 并柜时机柜的搭接 | 85 |
| 9.5.4 外部接地线与机柜的搭接 | 85 |
| 9.5.5 滤波器的接地设计 | 86 |
| 9.5.6 接地线 | 87 |
| 9.6 典型错误搭接方法 | 88 |
| 10 屏蔽性能测试 | 89 |
| 10.1 机柜/子架的屏蔽效能测试 | 89 |
| 10.1.1 测试原理 | 89 |

| | | |
|----------|------------------|-----|
| 10.1.2 | 测试布局 | 89 |
| 10.1.3 | 被试件条件 | 90 |
| 10.1.4 | 测试报告 | 90 |
| 10.1.5 | 排除谐振点 | 91 |
| 10.1.6 | 测试结论 | 91 |
| 10.2 | 开孔和缝隙的屏蔽效能测试 | 92 |
| 10.2.1 | MIL-G-83528的测试方法 | 92 |
| 10.2.1.1 | 测试原理 | 92 |
| 10.2.1.2 | 测试布局 | 93 |
| 10.2.1.3 | 测试频段 | 94 |
| 10.2.1.4 | 天线的位置 | 94 |
| 10.2.2 | 华为公司测试方法 | 94 |
| 10.2.2.1 | 测试原理 | 94 |
| 10.2.2.2 | 测试布局 | 96 |
| 10.2.2.3 | 测试频段 | 97 |
| 10.2.2.4 | 测试过程 | 97 |
| 10.3 | 屏蔽材料的屏蔽性能测试 | 97 |
| 10.3.1 | 屏蔽材料的导电性能测试 | 97 |
| 10.3.2 | 屏蔽材料的转移阻抗测试 | 97 |
| 10.3.2.1 | 测试原理 | 97 |
| 10.3.2.2 | 屏蔽质量的概念 | 99 |
| 10.3.2.3 | 测试布局 | 99 |
| 10.3.2.4 | 关于测试压力 | 100 |
| 10.3.2.5 | 测试频段 | 100 |
| 10.3.2.6 | 测试步骤 | 100 |
| 10.3.2.7 | 测试结果 | 101 |
| 10.3.3 | 屏蔽材料的屏蔽效能测试 | 101 |

| | |
|---------------------|------------|
| 10.3.4 各种测试方法的比较和应用 | 101 |
| 11 屏蔽效能预测与仿真 | 103 |
| 11.1 经验数据库的积累 | 103 |
| 11.2 局部细节的屏蔽效能分析 | 104 |
| 11.3 电磁场模拟仿真 | 104 |

华为技术有限公司企业技术规范

DKBA0.400.0022 REV. 2.0

电磁兼容性结构设计规范

1 范围

本规范规定了电磁兼容性结构设计（屏蔽和搭接等）的主要原理、设计原则和详细设计方法。

本规范适应于确定产品结构方案和进行详细结构设计，是确定产品电磁兼容方案中结构屏蔽方案的依据。华为公司所有需要屏蔽的产品结构方案必须符合本规范的相关规定。

2 引用标准

下列标准包含的条文，通过在本规范中引用而构成本规范的条文。在标准出版时，所示版本均为有效。所有标准都会被修订，使用本规范时应探讨、使用下列标准最新版本的可能性。

| | |
|----------------|--|
| GJB 1046 | 舰船搭接、接地、屏蔽、滤波及电缆的电磁兼容性要求和方法 |
| GJB 12190 | 接地、搭接和屏蔽设计的实施 |
| MIL-HDBK-419 | 电子设备和设施的接地搭接和屏蔽 |
| IEC TS 61587-3 | Electromagnetic Shielding Performance Tests for Cabinets, Racks and Subrack of IEC 60917 and IEC 60297 |
| IEEE299-1997 | IEEE Standard Method of Measuring Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures |
| ARP1705 | Coaxial Test Procedure to Measure the RF Shielding Characteristics of EMI Gasket |

| | |
|--------------------|------------------|
| | Materials |
| DKBA0.400.0038V2.0 | 屏蔽材料的代码规范 |
| DKBA0.460.0030V1.0 | 屏蔽材料导电性能测试规范 |
| DKBA0.460.0031V1.0 | 屏蔽材料屏蔽性能测试规范 |



I. 术语

本规范中的术语符合IEC50-161《电磁兼容性术语》的规定。



II. 电磁场的基本概念

如果要深入理解电磁兼容的理论，找到解决实际问题的方法，需要了解一点电磁场的基本概念。这样才能对许多产品设计中的现象进行合理的解释，并运用电磁场的理论解决问题，总结经验，来指导产品设计。

A. 基本概念

1. 电场

根据库仑定律，空间中两个点电荷之间存在着相互作用力，该作用力大小如下式所示，方向满足同性相斥，异性相吸的原则。

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

式中： F 电荷之间的作用力

q_1, q_2 两个电荷的电量

r 电荷之间的距离

ϵ 媒质的介电常数

根据库仑定律总结出来，如果空间中存在一个电荷 q_1 ，则空间中的另一个电荷 q_2 将受到电荷 q_1 的作用力，因此电荷 q_1 引入空间以后，就在空间中产生了一种特殊的物质——电场。电荷 q_2 在电场中产生的作用力表征了电场的存在。

为了消除电荷 q_2 对电场作用力的影响，定义电场强度 E 的概念：



$$E = \lim_{q \rightarrow 0} \frac{F}{q}$$

式中： F 为电荷 q 在电场中产生的作用力

我们可以发现电场强度表征了电场的特性，与引进的实验电荷无关。电场强度是表述电场的重要概念，其单位为 V/m ，工程实际中用的更多的是 N/C 。

除了电荷能够产生电场之外，根据电磁感应定律，交变磁场也能够产生电场，具体分析见4.1.3节。

1. 磁场

运动的电荷形成电流，电流的周围存在另外一种特殊的场，这种场对静止电荷并没有作用力，而是对运动的电荷有作用力，这个作用力称为洛伦兹力，而这种场称之为磁场。与电场强度相对应，磁场用磁感应强度 B 来表征。

根据毕奥—沙伐尔定律，磁感应强度为：

$$B = \frac{1}{4\pi} \mu_0 \int \frac{Idl}{r^2}$$

式中： μ_0 表示媒质的磁导率，

Idl 电流元

r 离电流元的距离

根据毕奥—沙伐尔定律，再运用叠加定理就可以求得闭合载流回路中电流 I 在空间产生的磁感应强度。

磁场对处于场中的移动电荷有力的作用，这个作用力叫做洛伦兹力。同样，除了空间运动电荷，交变的电场也能产生磁场。



1. 电磁感应定律

在磁场中，当一个闭合的导电回路界定的曲面中磁通量发生变化时，回路中将产生感应电动势：

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$$

感生电动势的方向由楞次定律确定。导电回路中出现感应电动势意味着在导体中存在电场，导体中自由电子受此电场的作用而作定向运动形成电流，这个电场称为感应电场。

电磁感应定律得出磁场和电场是可以转换的。

B. 电磁场方程组

根据上述电磁场的基本概念和定律，总结和推广出来麦克斯韦方程组，分别为：

麦克斯韦第一方程，即全电流定律。该方程揭示不仅电流可以产生磁场，交变电场也能够产生磁场。

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \oint_S (\mathbf{J}_c + \mathbf{J}_v + \frac{1}{\mu_0} \frac{d\mathbf{D}}{dt}) \cdot d\mathbf{s}$$

麦克斯韦第二方程，即电磁感应定律的推广。该方程揭示了交变电场将在周围空间产生磁场。

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\oint_S \frac{1}{\epsilon_0} \frac{d\mathbf{B}}{dt} \cdot d\mathbf{s}$$

麦克斯韦第三方程，即库仑定律的推广。该定律揭示了电场与电荷源之间的关系。

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = \oint_V \rho \, dV$$

麦克斯韦第四方程，即高斯定律的推广，揭示了磁通连续性原理。

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0$$

麦克斯韦电磁场方程组以数学形式概括了宏观电磁场的基本性质，是

电磁场的基本方程。如果再加上媒质的状态方程将构成完整的电磁场方程。

麦克斯韦方程揭示了时变的电场要在周围空间产生磁场，时变的磁场也要在空间产生电场。电场和磁场构成统一的电磁现象不可分的两个方面，它们互相依存、相互制约，又相互转换，形成统一的一种物质形式就是时变电磁场。这种时变电磁场用麦克斯韦方程组可以完整地描述出来。

C. 电磁波的传播特性

根据麦克斯韦方程组可以看出，时变电磁场以电磁波的形式在空间传播，从麦克斯韦方程组中导出电场和磁场的齐次（非齐次）波动方程，并在一定的边界条件和初始条件下有解。由此表示电磁场在所给条件下的空间分布和随时间的变化规律，表征了电磁波的存在。

分析电磁波在空间传输时，有一个十分重要的概念就是波阻抗 Z 。波阻抗是电磁波中电场分量与磁场分量的比，即：

$$Z = \frac{E}{H}$$

波阻抗是表征电磁波传输特性的主要参数。波阻抗随电磁波的传输特性而变化。

在分析波阻抗时，一般定义离源的距离 $r < \frac{k}{20}$ 的区域为近场区，而 $r > \frac{k}{20}$ 的区域为远场区。在近场区，波阻抗与源的特性有关，如果源的特性为电场分量为主，则波阻抗 Z 值十分大，称之为高阻抗场；如果源的特性为磁场分量为主，则波阻抗 Z 值十分小，称之为低阻抗场。在远场区，电场分量和磁场分量相当，而且方向垂直，波阻抗 $Z = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi \approx 377(\Omega)$ 。也就是说在远场波阻抗恒定，可以认为是均匀的平面波，如图4-1所示。

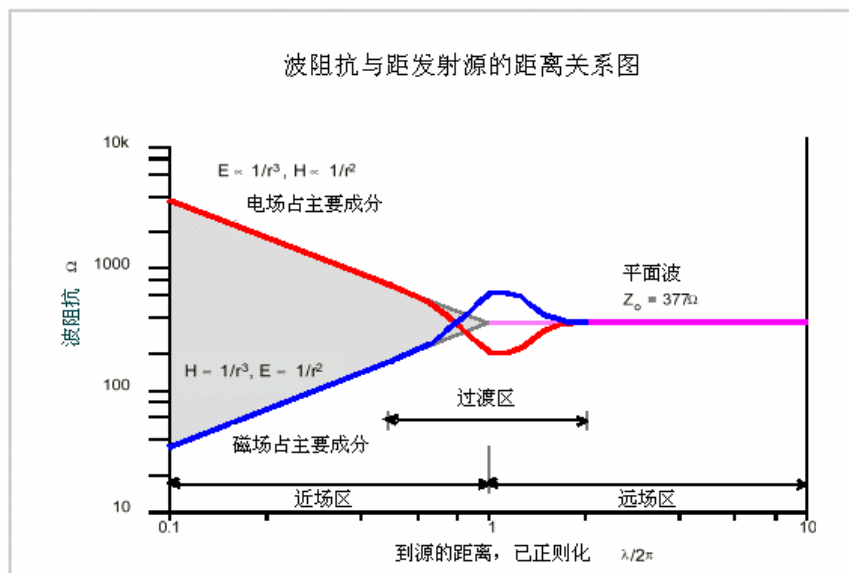


图 4-1 波阻抗与距发射源距离的关系

一般认为交变电压源近场为高阻抗场，主要分量为电场；而交变电流源近场为低阻抗场，主要分量为磁场。分析电磁场近场特性对屏蔽设计十分重要，对于高阻抗场，由于波阻抗大，主要是依靠反射损耗增加屏蔽效能；而对于低阻抗场，由于波阻抗十分小，反射损耗已经可以忽略，主要是依靠吸收损耗增加屏蔽效能。具体的屏蔽机理见6.2节分析。

II. 电磁兼容的基本概念

A. 电磁兼容的定义

电磁兼容（Electromagnetic Compatibility）指设备或分系统在其电磁环境中能正常工作且不对该环境中的其他设备或分系统构成不能承受的电磁骚扰的能力，简称EMC。

电磁兼容是一个系统级的概念，其含义在于兼容的性能，包含不能过分干扰其他设备 ze 常 ze 作的能力，和具有一定的抗干扰能力两方面的含义。

站在不同角度，电磁兼容可以指产品之间的兼容性，也可以是产品内部的兼容。一般我们更多关注的是产品之间的兼容性，包括产品的干扰和抗干扰等级。几乎所有关于产品的电磁兼容标准均是指这方面的要求，例如：GB9254-88《信息技术设备的无线电干扰极限值和测量方法》就是规定了信息设备对外的干扰极限值。但是，产品内部的兼容性也是不能忽视的，我司不少产品出现过某一块单板工作，就干扰其余单板导致无法正常开工的案例。

B. 电磁兼容的三要素

电磁兼容的三要素为：干扰源、耦合通道、敏感源。研究电磁兼容问题必须从这三要素着手，缺一不可。当我们在研究交换机的干扰问题时，交换机是干扰源，耦合通道为空气以及各种电缆，与交换机在同一个环境中的其他电子设备就是敏感源。反过来当我们研究交换机的敏感度（即抗干扰能力）时，交换机变成了敏感源，与交换机在同一个环境的其他电子设备变成了潜在的干扰源，同时还可能存在各类自然干扰源，例如雷电等。

可以看出，理解电磁兼容的含义必须站在系统的角度，全面地看待问

题，而不能孤立地看待某一个方面。例如，结构件本身并不存在电磁兼容的问题，但是结构件的屏蔽功能是抑制电磁波在空间传输的主要途径，从而有助于提高产品的电磁兼容性能；反过来看，未良好接地的结构件又可能成为有效的天线，从而降低产品的电磁兼容性能。

C. 如何实现电磁兼容

电磁兼容包括了对外干扰和抗干扰能力两方面的含义。为了保证产品的电磁兼容性能，一般规定了干扰极限值和抗干扰能力的限制值，从而保证各种产品在一起能够实现兼容。如图5-1所示，如果产品的干扰值低于干扰限制值，抗干扰能力高于抗干扰限制值，则可以认为这个产品符合电磁兼容性要求。如果所有产品均满足电磁兼容性要求，则在同一个环境中一般能够实现兼容。

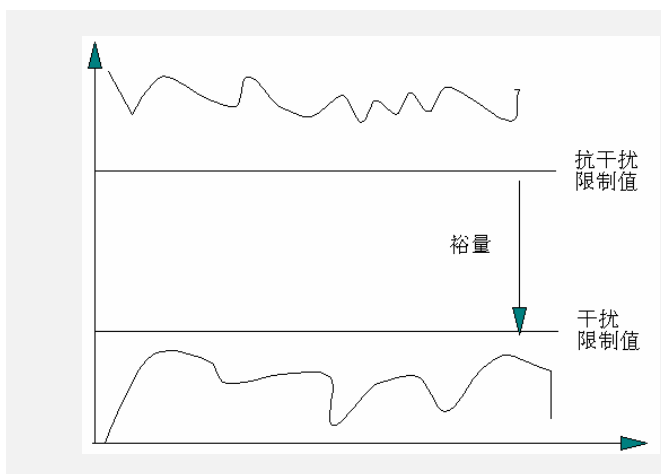


图5-1： 产品的电磁兼容性要求

D. 产品电磁兼容性能具体要求

一般产品的电磁兼容性能包括两部分：电磁发射（EMI）和电磁敏感度（EMS）。电磁发射包括辐射发射（RE）和传导发射（CE），电磁敏感



度(EMS)主要包括辐射敏感度(RS)、传导敏感度(CS)、静电放电(ESD)、快速瞬态脉冲串(EFT)、浪涌(SURGE)、电压跌落与中断(DIPS)、工频磁场敏感度(MS)。一般产品对电磁兼容性要求主要是以上9项,少数特殊的产品可能还会有其他的要求,例如无线基站可能还会有天线端口杂散发射的要求。

辐射发射(RE)是考察产品通过壳体端口辐射出去的干扰信号。

传导发射(CE)是考察产品通过线缆端口传导出去的干扰信号。

辐射敏感度(RS)是考察产品对通过壳体端口耦合的外部干扰的承受能力。

传导敏感度(CS)是考察产品对通过线缆端口耦合的外部干扰的承受能力。

静电放电(ESD)是考察设备对静电干扰的承受能力,有接触放电和空气放电两种情况。

快速瞬态脉冲串(EFT)考察感性负载切换产生的高频小能量脉冲对设备干扰的影响。

浪涌(SURGE)是考察容性负载切换、雷电等产生的大能量瞬态脉冲对设备干扰的影响。

电压跌落与中断(DIPS)是考察电网故障、短路等造成电压瞬时跌落和中断对设备干扰的影响。

工频磁场敏感度(MS)是考察产品抗工频磁场干扰的能力。

E. 解决电磁兼容问题的手段

为了保证产品实现电磁兼容,主要采取的方法有:控制干扰源的发射、抑制干扰信号的传播以及增强产品的抗干扰能力。具体在产品设计中体现为:

Y 完善硬件电路设计和PCB布局设计

硬件电路是电磁干扰的源头，也是电磁兼容设计最关键的环节。一般在产品设计中应该充分考虑到电磁兼容的需求，在电路设计和PCB设计中采取有效措施，抑制干扰源的发射水平。

Y 屏蔽

将产品或者其局部用金属体包起来，可以抑制电磁波从空间辐射出去或者辐射进来，起到了降低产品对外辐射，提高产品抗外部辐射干扰的能力。屏蔽是产品实现电磁兼容的有效手段之一。

Y 滤波

滤波可以把有用信号频谱以外的干扰信号能量加以抑制，它既可以抑制对外的干扰，也能够抑制外部干扰信号对产品的影响。滤波是电路设计中实现电磁兼容的主要手段。

Y 接地

接地主要的目的是在产品内部形成一个低阻抗回路以及等电位的连接。良好的接地可以有效的抑制噪声和防止干扰，从而提高产品的电磁兼容性。

为了保证产品的电磁兼容性，具体采取的措施有许多。在实际产品设计中应该采取哪些手段需要考虑这些手段对信号质量、散热、工艺、成本等其他方面的影响，综合各方面的利弊，按照系统设计的思想确定最终的方案。电磁兼容是一门实践性十分强的科学，除了理论分析指导，还应该更加关注实际运用中的效果，在实践中不断总结，积累设计经验。

III. 电磁屏蔽的基本理论

A. 电磁屏蔽的概念

电磁场通过金属材料隔离时，电磁场的强度将明显降低，这种现象就是金属材料的屏蔽作用。我们可以用同一位置无屏蔽体时电磁场的强度与加屏蔽体之后电磁场的强度之比来表征金属材料的屏蔽作用，定义屏蔽效能（Shielding Effectiveness，简称SE）：

$$SE = 20 \lg\left(\frac{E_1}{E_2}\right), \text{ 电场的屏蔽效能}$$

$$SE = 20 \lg\left(\frac{H_1}{H_2}\right), \text{ 磁场的屏蔽效能}$$

式中： E_1, H_1 分别为无屏蔽体时的电场强度和磁场强度，

E_2, H_2 分别为有屏蔽体时的电场强度和磁场强度。

电磁屏蔽的机理分析目前有三种方法：

一是借助电路理论中的电磁感应原理。交变电磁场通过金属材料表面时，金属材料会由于感应电动势而形成涡流。这个涡流所产生的磁场，正好与原来的磁场方向相反，从而抵消了部分原来的磁场，起到屏蔽作用。另外，由于金属材料具有一定的电阻，涡流在金属材料内部产生热消耗了部分入射电磁波的能力，同样也起到了屏蔽的作用。用电路理论分析电磁屏蔽的机理比较简单形象，但是它没有反映出来电磁场本身的特性对屏蔽的影响，而实际上这一点十分重要。一般我们主要用电路理论来分析和解释结构设计中屏蔽要求的原理，不用于精确计算屏蔽效能。

二是根据电磁场理论。电磁波在不同传播媒质的界面，由于波阻抗的突变，电磁波会发生反射。另外，在传输媒质中，例如金属材料内部，电

磁波会发生衰减。这种反射和衰减作用正好就说明金属材料的屏蔽机理。

三是根据传输线理论，电磁波在有损耗的非均匀传输线中，由于传输线的阻抗与电磁波的阻抗不匹配，电磁波会发生反射现象，加上传输线是有损耗的，电磁波在传输过程中会发生衰减。这与电磁波理论分析中的反射和衰减十分类似，但是这种方法会比电磁波的分析方法更加简便得多，也是目前电磁屏蔽分析中应用最多的方法。

B. 连续屏蔽体的屏蔽

分析金属材料的屏蔽性能，一般先从连续屏蔽体着手，再考虑屏蔽体上面的缝隙、孔洞等电气不连续情况。连续屏蔽体指结构上是完整封闭的，电气上是连续的均匀金属板构成的理想封闭屏蔽体。

1. 连续屏蔽体屏蔽模型

假设一块连续金属板，厚度为 t ，金属两侧的传输媒质为空气。入射波 P_{i1} 在金属板的第一个分界面 a 上面，由于空气和金属板的波阻抗突变，电磁波的一部分能量 P_{r1} 被反射，剩余部分 P_{t1} 穿过界面进入金属板内部。电磁波在金属板内部传输时，金属板会损耗电磁波的能量使其衰减至 P_{t2} 。透射波 P_{t2} 到达第二个界面 b 又发生反射 P_{r2} ，最后只剩下一小部分能量 P_{out} 进入屏蔽体内部空间。具体如图6-1所示：

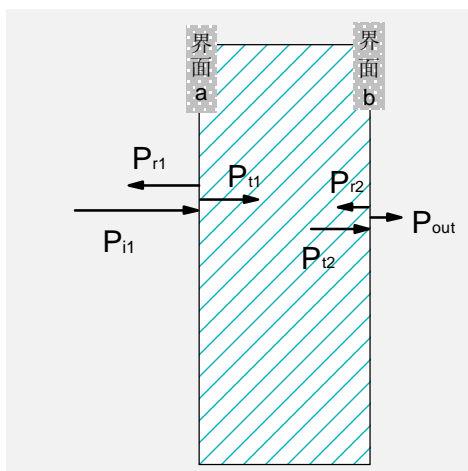


图6-1：金属材料屏蔽模型

在上述屏蔽模型中，电磁波入射到金属板上时发生反射，从屏蔽的角度看称之为反射损耗。透射波在金属板内部传输时衰减的被损耗的那部分称之为吸收损耗。第二个界面上被反射的电磁波在第一个界面又发生反射和透射，反复下去直到全部消耗完。这种多次反射现象称之为多次反射修正因子。总之，金属板的屏蔽作用为：

$$SE = A + R + B$$

式中： A 吸收损耗

R 反射损耗

B 多次反射修正因子

2. 吸收损耗

根据传输线计算理论，可以得到吸收损耗的计算公式为：

$$A = 0.131 t \sqrt{f} \mathbf{I}_r \mathbf{r}_r$$

式中： A 吸收损耗，单位dB

t 金属板厚度，单位mm

f 电磁波的频率，单位Hz

\mathbf{l}_r 金属板的相对磁导率

\mathbf{r}_r 金属板的相对电导率

由此可知，金属板的吸收损耗正比于板厚，并随着入射波的频率、磁导率和电导率增高而增加。

举例：0.5mm厚的铝板，计算得到30MHz时吸收损耗为280dB。由此可见，连续屏蔽体的吸收损耗是十分高的，已经远远超过了工程实际的需要，一般工程设计中板厚已经足够满足要求，专门为屏蔽考虑加厚材料并没有太大意义。

3. 反射损耗

由于一般空气的波阻抗远大于金属板的波阻抗，金属板的反射损耗可简化为：

$$R = \frac{Z_w}{4Z_s}$$

式中： R 反射损耗，单位dB

Z_w 空气的波阻抗，单位 Ω

Z_s 金属板的波阻抗，单位 Ω

金属的波阻抗为：

$$Z_s = 3.68\% 10^{-7} \sqrt{f\% \mathbf{l}_r / \mathbf{r}_r}$$

空气的波阻抗 Z_w 表征了电磁波的传播特性，与源的特性，离源的距离等因素有关，具体分析见4.3节介绍。根据不同场合下空气波阻抗的不同，

可以得到：

i. 位于远场区时：

$$R = 168 - 10 \lg\left(\frac{A_r}{r_r}\right)$$

可见随着频率的增高，反射损耗降低，金属板的导电率越低，反射损耗越大，而导磁率越低，反射损耗反而变小。

ii. 近场主要为电场时：

$$R = 322 - 10 \lg\left(\frac{f^3 r^2 A_r}{r_r}\right)$$

式中： r 金属板到源的距离，单位m。

可见近场为电场时，反射损耗除了与频率、导电率、导磁率相关之外，还与金属板到源的距离有关，而且离源越近，反射损耗越大。这就是屏蔽电场时屏蔽体离源越近越好的原因。

iii. 近场主要为磁场时：

$$R = 14.6 + 10 \lg\left(\frac{f^2 r A_r}{r_r}\right)$$

可见近场为磁场时，反射损耗随着频率、导磁率的增加而增加，随着导电率的增加反而减小。同时请注意反射损耗随着距离的增加而增加，这就是屏蔽磁场时屏蔽体离源越远越好的原因。

4. 多次反射修正因子

多次反射修正因子的计算方法十分复杂，不但与波阻抗的幅值有关，还与电磁波的相位有关。如果吸收损耗 $A \geq 10\text{dB}$ ，就可以忽略多次反射因子的影响。由于我司结构件考虑强度的需求，板厚一般均已经足够保证吸收损耗 $A \geq 10\text{dB}$ ，除薄膜屏蔽之外，一般均可以忽略多次反射因子的影响。所以本文不再详细分析多次反射修正因子的计算，详细内容可以查阅相关



资料。

5. 薄膜连续屏蔽体的屏蔽

薄膜屏蔽的屏蔽体的厚度 t 足够小，满足：

$$t < \frac{\lambda}{4}$$

式中： λ 电磁波在薄膜中传播的波长。

$$\lambda = \frac{4\pi}{\sqrt{\mu\sigma}}$$

式中： μ ， σ 薄膜的磁导率和电导率。

薄膜屏蔽主要体现为在塑胶件上面喷导电漆，玻璃上面镀膜实现屏蔽。由于导电薄膜十分薄，吸收损耗基本可以忽略，其屏蔽效能主要取决于反射损耗和多次反射修正因子。且多次反射修正因子是一个较大负值，起到了减小屏蔽效能的作用。

理论上，如果薄膜厚度满足 $t < \frac{\lambda}{4}$ ，薄膜厚度增加并不能增加其屏蔽效能。但是实际上，由于薄膜并不是理论导体，薄膜厚度越厚，其导电性能将会明显的提高，从而提高了其屏蔽性能。所以增加薄膜的厚度对于提高屏蔽性能还是有明显意义的。

6. 双层屏蔽

有时候为了增加屏蔽效果，可以采用双层屏蔽的方案。双层屏蔽的屏蔽效能为：

$$SE_S = SE_1 + SE_2 + C$$

式中： SE_1 ， SE_2 两层屏蔽体的屏蔽效能

C 两层屏蔽体之间多次反射修正因子。

修正因子 C 是负值，这主要是反映了电磁波在两层屏蔽体之间的空间内多次反射后有相当一部分穿透第二层屏蔽体进入了内部空间，导致屏蔽效能的降低。另外，两层屏蔽体之间的空间还可能造成谐振，对双层屏蔽造成负面影响。

修正因子 C 的影响因素十分多，分析十分复杂，本文不详细介绍。总之，双层屏蔽的屏蔽效能并不是两层屏蔽体的屏蔽效能简单相加，实际屏蔽效能肯定会小于两层屏蔽体屏蔽效能之和。

另外，还需要注意的是两层屏蔽体之间应该隔离开，以免外层屏蔽体上面的地电流影响到内层屏蔽体，减小双层屏蔽的屏蔽效能。

C. 不连续屏蔽体的屏蔽

在上节分析中，将屏蔽体简化成电气连续、封闭的理想屏蔽体。实际上，屏蔽体上面不可避免地存在各种缝隙、开孔以及进出电缆等各种缺陷，这些缺陷将对屏蔽体的屏蔽效能有急剧的劣化作用。

上节中分析的理想屏蔽体在30MHz以上的屏蔽效能已经足够高，远远超过工程实际的需要。实际屏蔽体的屏蔽效能主要取决于屏蔽体上面各种电气不连续的缺陷的屏蔽效能。上节中的分析对于认识屏蔽的理论，选择屏蔽方式和屏蔽材料具有重要的指导意义。真正决定实际屏蔽体的屏蔽效能的因素是本节要分析的各种电气不连续缺陷，包括：缝隙、开孔、电缆穿透等。

1. 缝隙屏蔽

屏蔽体上面的缝隙十分常见，特别是目前机柜、插箱均是采用拼装方式，其缝隙十分多，如果处理不妥，缝隙将急剧劣化屏蔽体的屏蔽效能。

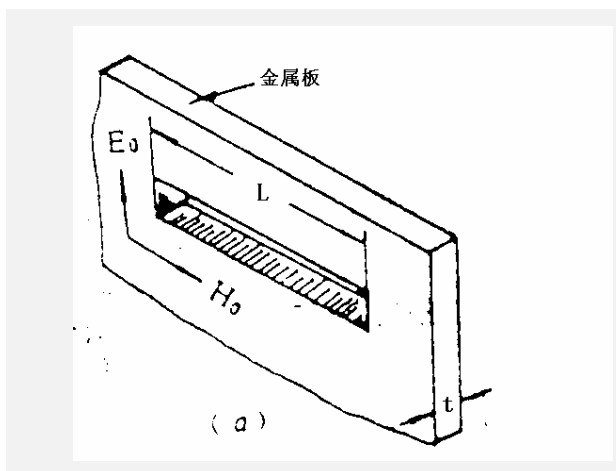


图6-2：缝隙的原型

为分析缝隙的屏蔽效能，以金属板上开了一个狭长的缝隙为例说明。如图6-2所示，假设缝隙长度为 l ，该缝隙的屏蔽作用由两部分组成：一是缝隙开口处的阻抗与空间阻抗不匹配，引起电磁波反射损耗；二是电磁波透入缝隙后，在内部传输时将产生传输损耗。总之，缝隙的屏蔽效能为：

$$SE = R_a + A_a$$

式中： R_a 反射损耗，单位dB。

A_a 传输损耗，单位dB。

根据传输线理论，缝隙的反射损耗为：

$$R_a = 20 \lg \frac{x(1+N)^2}{4N}$$

式中： N 缝隙波阻抗与空气波阻抗之比

$$N = \frac{l}{\sigma r} \quad \text{近场主要为磁场}$$

$$N = j6.69 \times 10^{-5} f l \quad \text{平面波}$$

r 屏蔽体离场源的距离，单位cm。

l 缝隙的长度，单位cm。

f 频率，单位MHz。

缝隙的传输损耗为：

$$A_a = 27.3 \frac{l}{t}$$

式中： t 缝隙的深度，单位cm。

从上面的分析可以看出，缝隙的屏蔽效能除了与电磁波特性和有关之外，主要与缝隙的深度 t 和缝隙的长度 l 有关。增大缝隙的深度，减小缝隙的长度将增大缝隙的屏蔽效能。请注意缝隙的屏蔽效能与缝隙的宽度没有关系，因此缝隙的屏蔽效能取决于缝隙的最大尺寸，而不是其面积。

缝隙的深度可以是板厚，或者缝隙的搭接深度。而缝隙的长度十分复杂，它并不直接就是缝隙中紧固点的间距。从两个紧固点之间缝隙的微观结构可以看出，材料直接还是会存在电接触的可能，缝隙的长度为缝隙中接触点之间的距离，具体如图6-3所示。缝隙的长度与基材的表面状态，基材的刚性，紧固点的间距有关。基材的表面越平整光滑、刚性越好，紧固点间距越小，缝隙的长度将越小，从而屏蔽效能越高。这就是为什么型材之间连接的螺钉间距允许比两个平板直接连接的螺钉间距要大得多得原因。

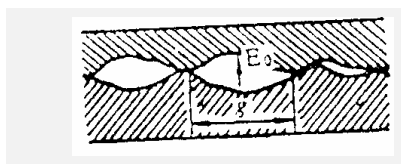


图6-3：缝隙的微观结构

一般应根据产品功能需求，尽可能选择合理的缝隙结构方案，再根据屏蔽效能要求选择合适的紧固点间距。另外，结构方案可能的情况下，尽可能增加缝隙的搭接深度，可以有效地提高屏蔽效能。

仅仅依靠增加紧固点数量来提高屏蔽效能是不可取的，当紧固点数量增加有困难时，可以在缝隙中加屏蔽材料，用屏蔽材料的变形来弥补缝隙



中的各种缺陷。屏蔽材料的屏蔽机理与连续屏蔽体的屏蔽理论相同。

2. 开孔屏蔽

由于通风散热的需求，必然在屏蔽体上开通风孔。通风孔上面的电磁泄漏，可能导致屏蔽体整体屏蔽效能的降低。通风孔的屏蔽效能与场源的特性、离源的距离、频率、开孔的最大尺寸以及开孔的面积等诸多因素相关。

常用的通风孔为金属丝网和穿孔金属板，他们的屏蔽效能可以用下面的经验公式来分析：

$$SE_{dB} = A + R + B + K_1 + K_2 + K_3$$

式中： A 孔眼中的传输衰减，单位dB

R 孔眼的单次反射损耗，单位dB

B 多次反射修正项，单位dB

K_1 与孔数有关的修正值，单位dB

K_2 由于集肤深度不同而引入的低频修正项，单位dB

K_3 由于相邻孔间的相互耦合引入的修正项，单位dB。

传输损耗，当入射波频率低于孔的截至频率 f_c 时：

$$A = 27.3 \frac{t}{w} \quad (\text{dB}) \text{ 矩形孔}$$

$$A = 32 \frac{t}{D} \quad (\text{dB}) \text{ 圆形孔}$$

式中： t 孔深 (cm)

w 与电场垂直的矩形孔宽边长度 (cm)

D 圆形孔的直径 (cm)



单次反射损耗:

$$R = 20 \lg \frac{(1+N)^2}{4N} \quad (\text{dB})$$

式中: N 孔眼特性阻抗与入射波阻抗之比

$$N = \frac{w}{a^2} \quad \text{适用于低阻抗场的矩形孔}$$

$$N = \frac{D}{3.682a} \quad \text{适用于低阻抗场的园形孔}$$

$$N = j6.69\% 10^{-5}fw \quad \text{适用于平面波场的矩形孔}$$

$$N = j5.79\% 10^{-5}fD \quad \text{适用于平面波场的园形孔}$$

$$r \quad \text{干扰源到屏蔽体的距离 (cm)}$$

$$f \quad \text{频率 (MHz)}$$

多次反射修正项, 当 $A > 10\text{dB}$ 时, 多次反射修正项可以忽略, 否则:

$$B + 20 \lg \left[1 - \frac{(xNx-1)^2}{(xNx+1)^2} \% 10^{-A/10} \right] \quad (\text{dB})$$

K1项, 如果干扰源非常靠近屏蔽体, 则K1值可以忽略。当干扰源到屏蔽体的距离比孔眼间距大得多时, 孔数修正项可表示为

$$K_1 = -10 \lg an \quad (\text{dB})$$

式中: an 空隙率。

K2项:

$$K_2 = 20 \lg(1 + 35p^{-2.3}) \quad (\text{dB})$$

式中: p 孔间导体深度 集肤深度

K3项, 当穿孔金属板上孔间距小, 并且孔深比孔径小得多时, 相邻孔之间有耦合作用, 耦合修正项表示为:

$$K_3 = 20 \lg[\coth(\frac{A}{8.686})] \quad (\text{dB})$$

举例：1mm厚电解板，开孔F4mm，孔间距6mm，孔数量为50确50，则50MHz时计算出屏蔽效能为60dB。这个数据与实际测试基本相符。

通过上面的分析公式可以看出，穿孔金属板开孔的最大尺寸对屏蔽效能影响最大，其次是孔深，影响最小的是孔间距。因此在可能的情况下尽可能开很密的通风孔，有利于散热。

当穿孔金属板的空隙率不够高或者屏蔽效能不够高时，可以使用截止波导通风板。

截止波导通风板的结构形式如图6-4所示。它是用许多截止波导组成的，截止波导的深度大大增加了电磁波的衰减。

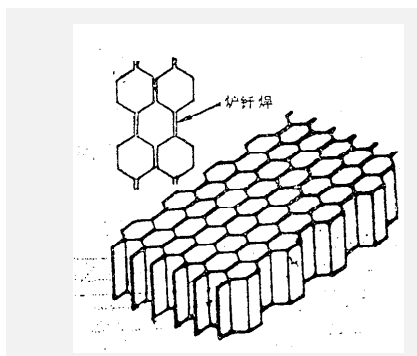


图6-4：截止波导通风板的结构形式

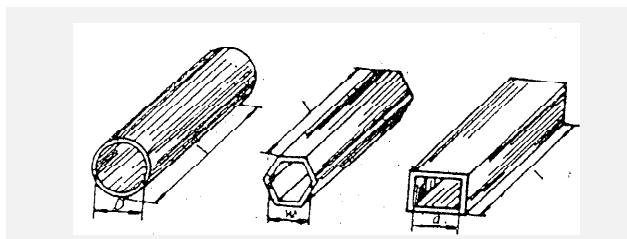


图6-5：截止波导的结构形式

截止波导的截面形式主要有三种：圆形、矩形、六角形，如图6-5所示。

这三种波导管的截至频率 f_c 分别为：

$$f_c = \frac{15}{a} \% 10^9 \quad (\text{Hz})$$



$$f_c = \frac{17.6}{D} \% 10^9 \quad (\text{Hz})$$

$$f_c = \frac{15}{w} \% 10^9 \quad (\text{Hz})$$

式中： a 矩形波导管最大边尺寸 (cm)

D 圆形波导管的内直径 (cm)

w 六角形波导管内壁的外接圆直径 (cm)

当电磁波的频率远低于波导管的截至频率时，单个截止波导的屏蔽效能：

$$SE = 1.823 \% f_c \% l \% 10^{-9} \sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \quad (\text{dB})$$

式中： SE 屏蔽效能 (dB)

f 电磁波的频率 (Hz)

l 截至波导的长度 (cm)

设计截至波导管时，应根据欲屏蔽的电磁波的最高频率 f 来确认截至频率 f_c ，为使波导管有足够的屏蔽效能，应满足 $f_c \gg f$ ，一般取 $f_c = 5 \sim 10 \% f$ ，由 f_c 的计算公式得到截面尺寸，并综合考虑安装、加工、造型方面的要求，最后按所需要的屏蔽效能计算截至波导管的长度，一般要求 $l > 3a$ ， $l > 3D$ ， $l > 3w$ 。

3. 电缆穿透

上面所有的分析中均仅仅是分析了屏蔽体本身的屏蔽效能，如果有一个导体从屏蔽体中穿出去，将对屏蔽体的屏蔽效能产生显著的劣化作用。这种穿透比较典型的是电缆从屏蔽体中穿出。

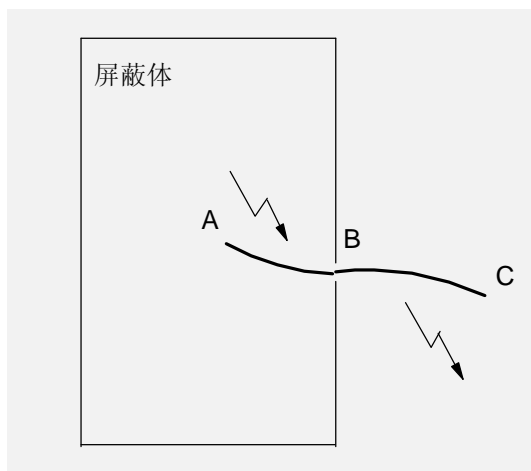


图6-6: 电缆穿透原理图

电缆穿透的数学模型十分复杂，为了直观地分析这种穿透对屏蔽的破坏作用，我们可以简单地将电缆简化成一个导体，忽略电缆芯线的影响，如图6-6所示。电缆在屏蔽体内部为AB段，在屏蔽体外部为BC段。屏蔽体内部的干扰耦合到电缆AB段上面，产生干扰电流 I_s 。干扰电流流过B点时，由于B点与屏蔽体之间未连接， Z_B 足够大，因此干扰电流直接穿透屏蔽体到BC段。在BC段干扰电流通过空间向外辐射。等效电路图如图6-7所示。

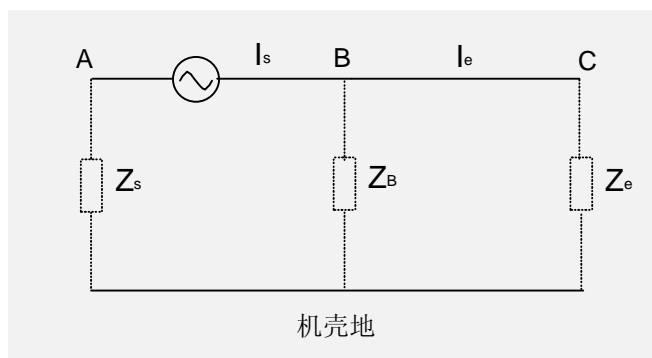


图6-7: 电缆穿透等效电路图

如果在B点保证与屏蔽体之间的可靠接触，可以认为 $Z_B \rightarrow 0$ ，因此 $I_e \rightarrow 0$ ，电磁波在屏蔽体外部基本无辐射。等效电路图如图6-8所示：

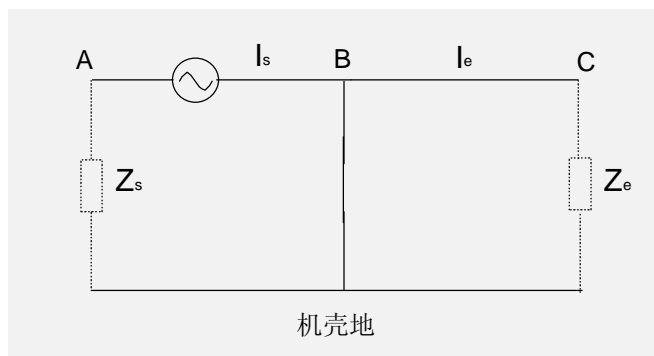


图6-8：电缆接地时等效电路图

如果B点与屏蔽体之间接触不可靠，将增大 Z_B 值，结果导致 I_e 增加，对外辐射上升。这就是要求屏蔽电缆出屏蔽体时必须接地，而且接地十分良好的原因。当然，如果在出线位置加穿心电容之类的滤波器，同样也是降低了 Z_B ，达到减小对外辐射的目的。

上面将电缆简化成一个导体，忽略了芯线的影响，从而清楚地阐述了屏蔽电缆需要可靠接地的原理。实际上，由于芯线的存在，芯线的干扰电流将更加直接，而且芯线可能与屏蔽层之间直接形成干扰电流的回路，因此对屏蔽性能的破坏实际上还要大得多。

4. 屏蔽体的综合屏蔽效能

上面讨论了各种缺陷的屏蔽效能，往往实际屏蔽体中包括各种缺陷，实际屏蔽体的屏蔽效能是综合反映各种缺陷以及屏蔽体本身性能的结果。按照传输线的理论，如果近似认为各种缺陷电磁波传输的相位相同，则综合屏蔽效能 SE_s 为：

$$SE_s = -20 \lg \left(\sum_{i=1}^n 10^{-SE_i/20} \right)$$

式中： SE_i 各种缺陷的屏蔽效能。

上述分析方法是按照最不利的情况得出的结论，实验数据表明，实际



结果会有2dB以内的误差，对于屏蔽分析而言，这种误差是可以忽略的。

按照上面的分析方法，我们可以根据屏蔽体上面各种缺陷的屏蔽效能综合成实际屏蔽体的屏蔽效能。实际屏蔽效能一般取决于屏蔽体中屏蔽效能最差的哪一个缺陷。因此屏蔽设计中需要注意考虑屏蔽体的完整性，不能有比较明显的缺陷，将局部缺陷设计比其他的好很多也没有意义。

IV. 屏蔽设计

A. 选择屏蔽效能指标

结构件的屏蔽效能指标与产品EMC息息相关，具体与RE、RS、ESD关系最密切。根据公司产品的实际情况，结构件的屏蔽效能指标对RE影响最大，其余的影响比较小，因此我们可以先忽略其他指标的影响。理论上讲，在整个测试频段将RE测试值减去限制线规定值，再加上安全裕量就是结构件所需的屏蔽效能。如图7-1所示，产品的RE测试结果超过了限制线CLASS B规定值15dB左右，因此我们可以初步估计机柜的屏蔽效能要求为30-1000 MHz为20dB，其中5dB为裕量。

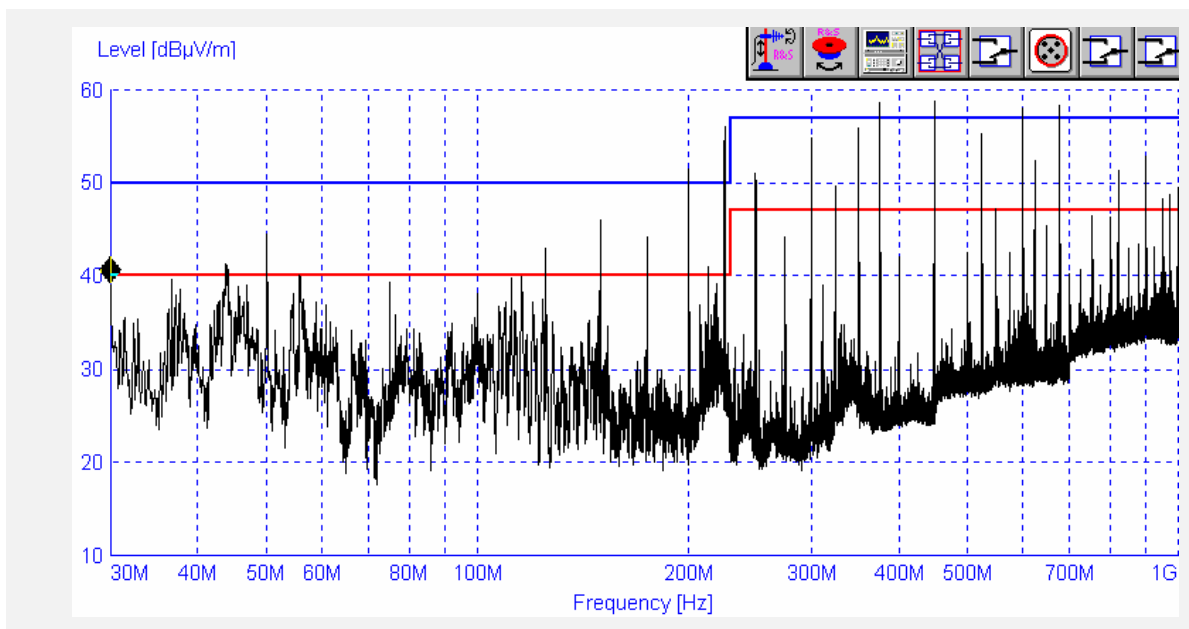


图7-1：某产品RE测试结果（未屏蔽）

但是这种估算方法是不严谨的。RE测试值与许多因素有关，特别系统是带电缆测试时，线缆辐射很可能是引起RE超标的主要原因，仅仅改善结



构件并没有太大的作用。再者，结构件屏蔽效能的测试方法和最终产品的RE测试之间还是有一定差异的，上面的这种之间估算方法有很大的误差。更重要的是，在新产品开发时，我们无法知道产品RE的测试结果。

因此，确定结构件的屏蔽效能主要是根据经验确定，综合考虑系统EMC性能的需求，再考虑成本、工艺性等其他方面的要求。

1. 结构件屏蔽效能等级

根据IEC61587-3标准的推荐，将结构件屏蔽效能等级分为三级，具体的屏蔽效能指标如表7-1所示：

表7-1：IEC61587-3推荐的屏蔽效能等级

| 级别 | 30-230MHz屏蔽效能 | 230-1000MHz屏蔽效能 |
|----|---------------|-----------------|
| 1 | 20 | 10 |
| 2 | 40 | 30 |
| 3 | 60 | 50 |

上表中规定的屏蔽效能等级是十分粗的。已有经验表明，通信产品的结构件屏蔽效能要达到第二级已经有一定的难度，对于机柜/插箱类产品要求达到第三级要求实现起来十分困难。615机柜高等级屏蔽方案是以牺牲了工艺性、成本作为代价，经过反复改进才能够达到第三级要求。这种方案显然是不适合于批量生产的，不是真正意义的产品。

根据公司产品的实际经验，结构件屏蔽效能超过30dB/1GHz是没有太大的必要的。因此我们可以按照公司的需求，将结构件屏蔽效能大致分为三级，具体屏蔽效能指标如表7-2所示：

表7-2：华为公司结构件的屏蔽效能等级

| 级别 | 30-230MHz屏蔽效能 | 230-1000MHz屏蔽效能 |
|----|---------------|-----------------|
| 1 | 20 | 10 |
| 2 | 30 | 20 |



| | | |
|---|----|----|
| 3 | 40 | 30 |
|---|----|----|

实际上，表7-2将结构件屏蔽效能分级主要是用于区别不同的实现方案。在产品总体方案中结构件的屏蔽效能指标并不需要按照级别来描述，可以直接规定各频率段的屏蔽效能指标，或者只规定某一个频率的屏蔽效能指标即可。一般来讲，低频段的屏蔽效能比高频段高10-15dB，因此也可以只规定从低频到高频整个频段内的屏蔽效能。

举例：规定某机柜的屏蔽效能指标为30-230MHz: 30dB；230-1000MHz: 15dB。也可以简单地描述为15dB/1GHz。或者30MHz-1GHz: 15dB。

1. 公司现有产品的 RE 测试结果概况

在确定产品的屏蔽效能指标之前，需要先对同类产品或相关者产品的RE测试结果有一定的了解，因此有必要先介绍公司现有产品的大致测试结果。

对于公司大多数低端产品，由于工作频率比较低的产品，其RE测试结果显示在230MHz以上基本上不会超标，在30-230MHz虽然会有一定的超标，但主要的原因也是电源和线缆辐射。图7-2为典型的测试结果。可以看出，其屏蔽效能要求是十分低的。其屏蔽效能指标可以选择10dB/1GHz，甚至更低。

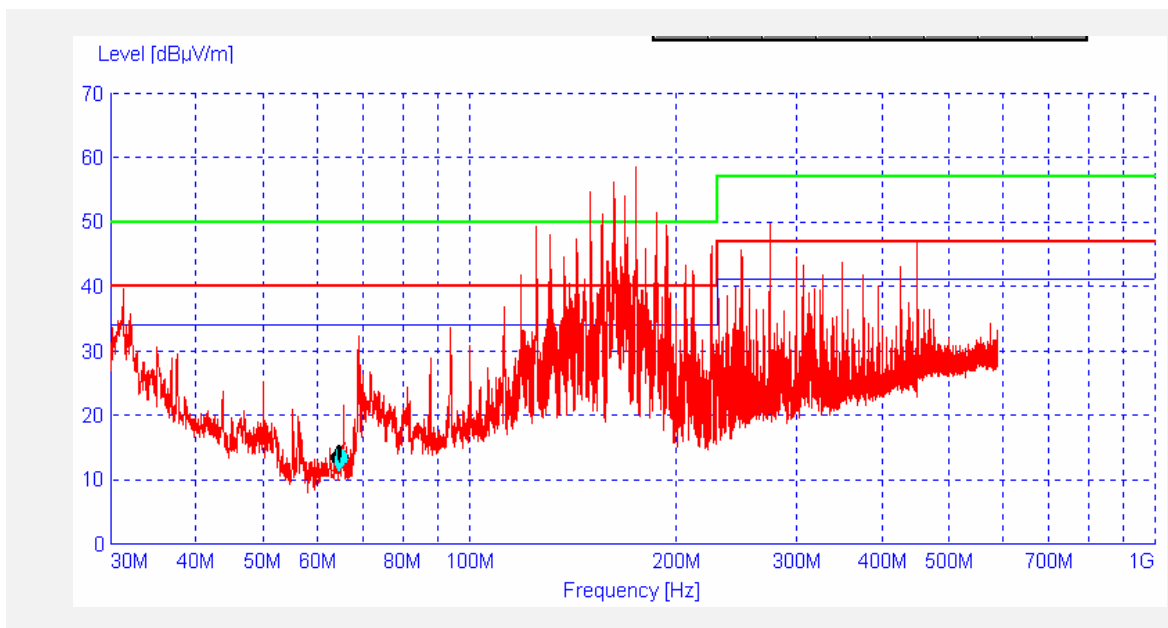


图7-2：某交换机RE测试结果

对于工作频率比较高的产品，典型的是数通、传输产品。其RE测试结果在230MHz以上可能存在一定的辐射超标，但是一般也不会超出10dB以上。图7-1就是某数通产品的RE测试结果。可以看出，对于工作频率比较高的产品，其屏蔽效能要求一般可以选择20dB/1GHz左右。

其实结构件的屏蔽效能指标与公司单板和PCB的EMC设计水准有密切的关系。单板是RE的源头，如果单板和PCB设计得好，结构件的屏蔽效能指标就可以放宽。反之，如果单板设计的不合理，结构件屏蔽的压力就十分大，甚至可能根本无法实现。比较典型的例子是某产品在改板之前，其RE测试结果再整个频段超出限制线25以上dB。这个产品是一个2U的小盒子，结构太紧凑，要实现30dB/1GHz的屏蔽效能几乎不可能。导致该产品的EMC攻关陷于停顿。后来，随着公司单板和PCB的EMC设计水平逐渐提高。该产品经过改板之后，单板辐射显著降低，结构件只需要屏蔽10dB/1GHz就解决了RE问题。

2. 公司现有结构件屏蔽效能测试结果概况

确定结构件的屏蔽效能指标还与公司现有设计水准有关，以免提出过高的要求而没有能力实现。因此有必要介绍公司现有产品中结构件屏蔽效能测试结果。

图7-3为交换机拼装机柜的测试结果，其屏蔽效能为30-230MHz：20dB；230-1000MHz：10dB。

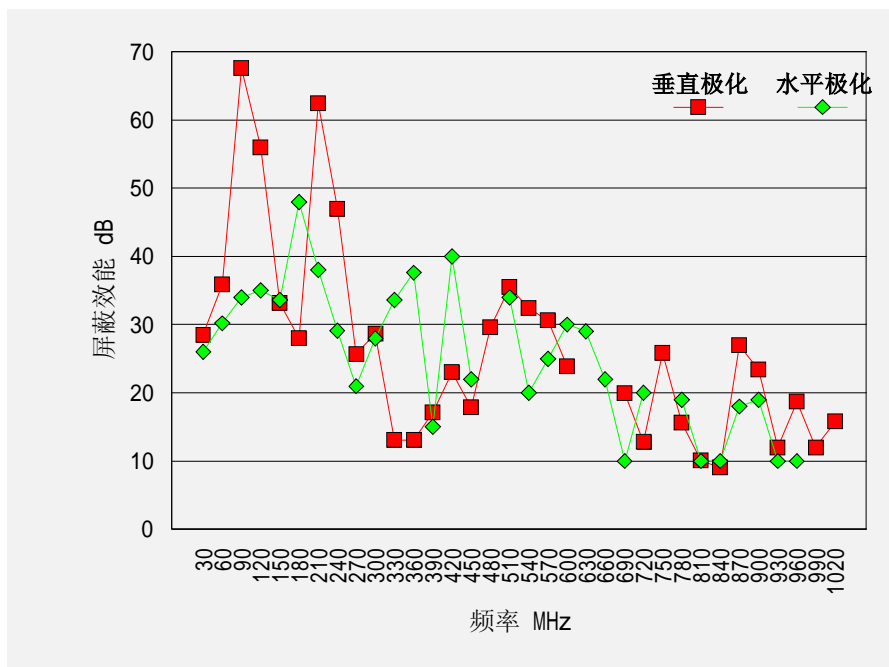


图7-3：交换拼装机柜屏蔽效能测试

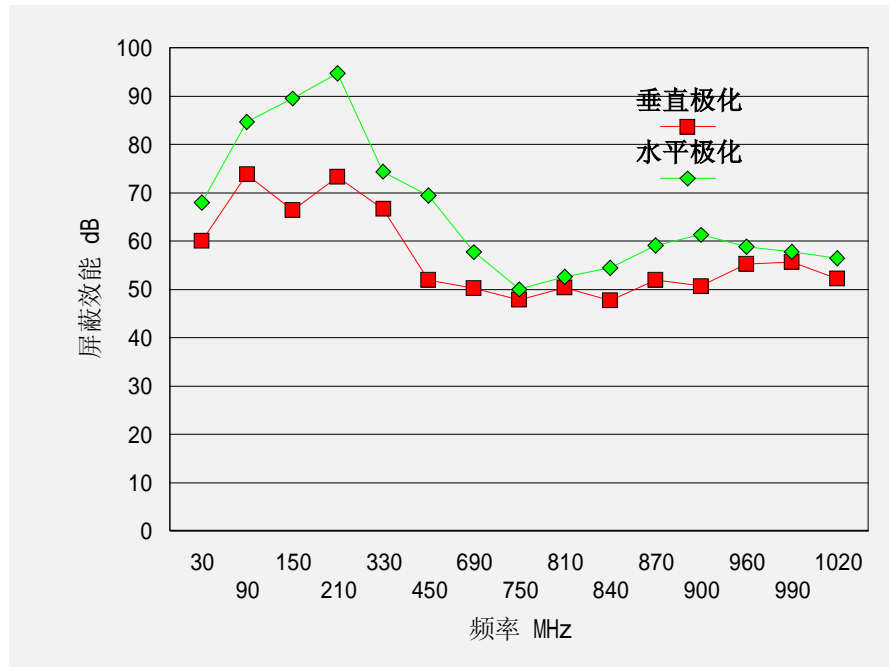


图7-4: 615高等级屏蔽机柜屏蔽效能

图7-4为615高等级屏蔽机柜的测试结果，其屏蔽效能为30-230MHz: 60dB; 230-1000MHz: 50dB。

图7-5为2000插箱的屏蔽效能测试结果，其屏蔽效能为30-230MHz: 30dB; 230-1000MHz: 20dB。

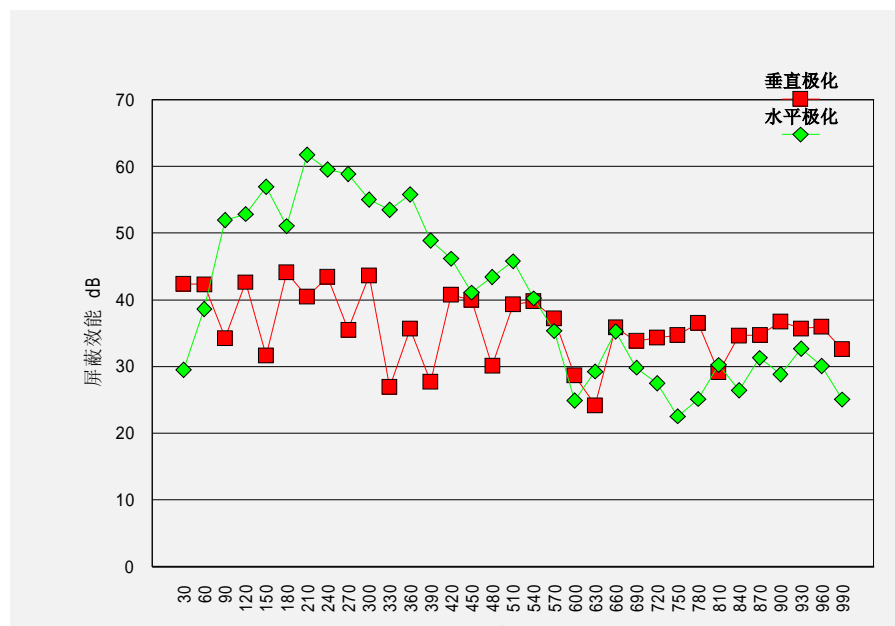


图7-5：2000插箱屏蔽效能

图7-6为2000机柜的屏蔽效能测试结果，其屏蔽效能为30-230MHz：
30dB；230-1000MHz：15dB。

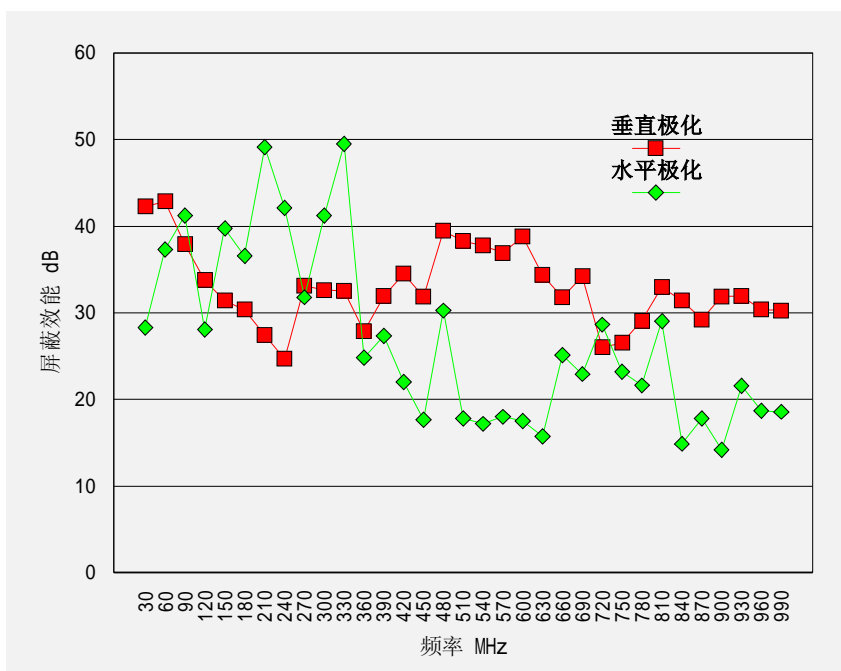


图7-6：2000机柜屏蔽效能

图7-7为2500+子架的屏蔽效能测试结果，其屏蔽效能为30-230MHz：
30dB；230-1000MHz：15dB。

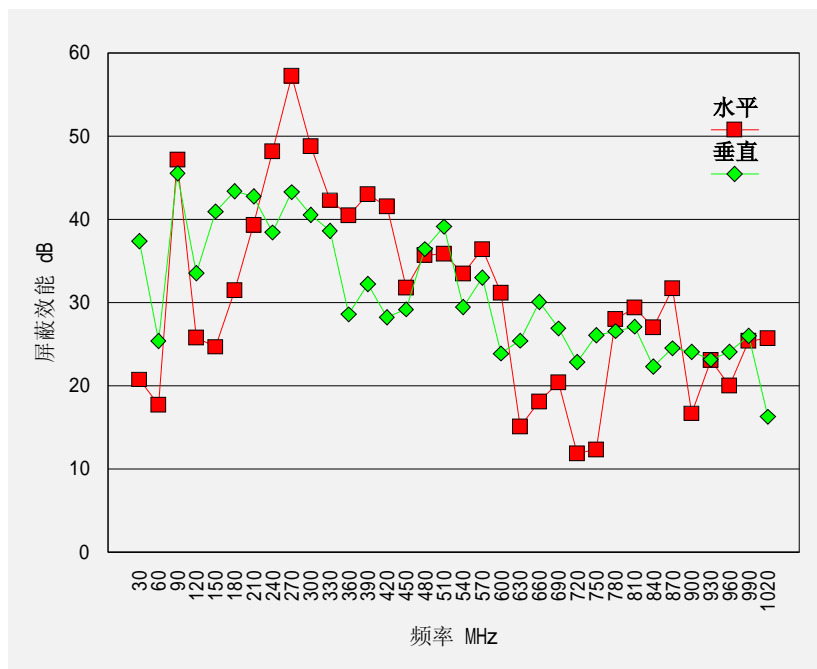


图7-7: 2500+子架屏蔽效能

从上面的典型结果看，除615高等级机柜是以不惜代价的方式实现屏蔽效能十分高之外，绝大多数机柜/插箱的屏蔽效能均在10dB/1GHz至20dB/1GHz之间，其中有的产品还是经过改进之后才能达到上述指标。虽然公司最高的设计水平可以达到50dB/1GHz，但是作为产品而言，公司目前结构件屏蔽效能设计水平就是在20dB/1GHz左右。

3. 如何选择结构件屏蔽效能指标

前面已经阐述，选择结构件的屏蔽效能指标主要是综合考虑系统的EMC性能，加上成本、工艺性方面的限制，根据经验最终确定。

从已有产品的屏蔽效能来看，结构件屏蔽效能指标不要超过30dB/1GHz这个要求，否则实现起来有比较大的困难，导致牺牲产品的其他性能。

按照公司单板EMC的规划，单板级EMC设计的目标是不屏蔽时产品的RE最高不超过CLASS A + 10dB。这对应的结构件屏蔽效能为20dB/1GHz。

随着单板EMC设计水平的提高，将逐步降低结构件屏蔽效能指标的要求。

总之，根据产品的不同需求，推荐结构件的屏蔽效能选择10dB/1GHz和20dB/1GHz两个等级，或者更低。设计人员选择30dB/1GHz的屏蔽效能时应该十分慎重。除非有特殊的理由，一般禁止选择更高的屏蔽效能等级。

如果产品确实需要达到30dB/1GHz或者更高的屏蔽效能，可以将屏蔽方案作成多级屏蔽组合的形式，例如模块插箱级屏蔽加上机柜级屏蔽，从而降低每一级屏蔽体的屏蔽效能指标要求。

实际上，设计人员不要过分强调屏蔽效能指标的重要性。严格来说，屏蔽效能指标主要的目的在于牵引设计人员做出更好的屏蔽方案，他只是衡量设计方案的依据之一，并不能全面地说明结构件的EMC方案。有关结构件本身的电连续性，线缆、连接器等接地措施有时候会更加重要。设计人员应该更加注重结构件总体EMC方案的合理性和全面性。

4. 屏蔽效能指标的默认含义

统一规定：结构件屏蔽效能的指标默认测试标准为IEC 61587-3，默认的测试频段为30-1000MHz。结构件的屏蔽效能指标可以用30-230MHz和230MHz-1000 MHz两个频段的指标要求来表达，也可以仅用1GHz的屏蔽效能指标来表达，两者是等效的。

举例：屏蔽效能指标20dB/1GHz与30-230MHz: 30dB；230-1000MHz: 20dB的要求是等效的。一般低频段的屏蔽效能指标高于高频段10-15dB。

如果结构件有磁场屏蔽指标或者1GHz以上的屏蔽效能指标，则必须清楚地表达清楚采用哪种测试方法，在什么频段下的屏蔽效能指标为多少，不能采用上述默认的简化描述方式。

5. 关于低频磁场屏蔽

本规范中关于屏蔽设计主要是指电场或者电磁场的屏蔽，并没有详细讨论低频磁场的需求。通信产品对屏蔽的需求主要为30MHz以上，这时的干扰主要是电磁场的形式，没有磁场屏蔽方面的需求。另外，我司绝大多数产品中并不存在不能忍受的磁场干扰，产品测试中几乎没有出现过这方面的问题。因此总体上看，目前产品中并没有低频磁场屏蔽方面的迫切需求。

在个别产品中可能存在大量线圈、变压器，可能会导致局部有比较强的干扰。如果同时在该产品中存在磁场敏感设备，例如CRT等，这时应该采取特殊措施。

磁场屏蔽主要是依靠高导磁材料来实现屏蔽，因此一般不能使用铝合金。另外，低频磁场主要是依靠吸收损耗，基本上没有反射损耗，因此需要屏蔽体有足够的厚度。而屏蔽体上面的缺陷，例如开孔、缝隙等影响并不明显。还需要注意的是，由于磁场强度是以距离的三次方衰减的，因此需要注意考虑系统的合理布局，干扰源和敏感设备之间尽可能远，减小相互之间的干扰。就是屏蔽体也应该尽可能离干扰源远，有助于提高屏蔽效能。

另外，随着产品逐渐考虑符合NEBS标准需求，该标准对产品的磁场发射强度是强制检测的，因此以后产品发展可能需要考虑磁场屏蔽的需求。

磁场屏蔽的需求和更详细的实现方法需要根据公司的发展作进一步的研究。

6. 关于 1GHz 以上的屏蔽

上面讨论的屏蔽效能指标，频率均只是到1GHz为止，这主要是因为目前绝大多数产品的RE测试只是测试到1GHz。随着无线产品标准的发展，特别是3G产品的需求，结构件将有可能需要考虑1GHz以上的屏蔽效能需求，



例如1 - 4GHz或者1 - 12.75GHz频段。在这些频段的屏蔽，将对结构件的缝隙、开孔等缺陷要求十分苛刻。随着公司产品往拼装化方向发展，这方面的矛盾将十分突出。

举例：如果为实现20dB/1GHz的屏蔽，开孔不能超过15mm的话，则实现20dB/10GHz的屏蔽的话，开孔不能超过1.5mm。目前的结构形式几乎不可能实现。

1GHz以上的屏蔽要求已经不是常规方法可以实现的，需要采取特殊的理论和特殊方法。例如可以采用吸波材料来控制缝隙泄漏而不是普通的屏蔽材料。1GHz以上屏蔽的具体实施方案将需要根据公司产品的发展作进一步的研究。

B. 选择屏蔽体方案

一般产品的屏蔽方案按照级别从高至低可以分为机柜屏蔽、模块屏蔽、单板屏蔽以及单板局部屏蔽。

采用机柜屏蔽时，对机柜内部所有模块均有屏蔽作用，比较适合于内部模块均有一定的屏蔽需求的情况，但是不能消除系统内部的相互干扰。机柜屏蔽时由于屏蔽体中需要处理的缝隙、开孔等缺陷比较多，成本会比较高。而且由于缺陷较多，容易出现問題，屏蔽效能一般不能做得太高。更重要的时，由于电缆从机柜中出线时处理措施十分困难，一般有大量电缆出现时不适合采用机柜屏蔽的方案。在出电缆比较少或者出大量光纤的产品中比较适合机柜屏蔽的方案。

举例：交换机机柜需要出大量的用户线，用机柜屏蔽的方案不好。当然由于其他原因，公司的交换机机柜最终采用了屏蔽的拼装机柜，同时也带来了出线的困难。

模块屏蔽是指子架、插箱以及小模块的屏蔽，包括某些终端产品只有一个小模块的屏蔽。模块屏蔽方案由于可以采用连接器直接出线，非常适合于大量出线的产品。模块屏蔽还可以避免模块之间的相互干扰。



举例：数通产品大量使用插箱级屏蔽，电缆出线均采用拉手条上面直接出线，通过连接器保证屏蔽电缆的接地。各模块独立满足EMC要求，对于产品的灵活组合十分有利。

举例：无线产品中某TRX模块，由于存在十分强的高频干扰，且内部模拟电路对外界干扰十分敏感。将该模块作成一个独立的屏蔽盒，有效地抑制了该模块的对外干扰，同时又提高了该模块的抗干扰能力。

单板屏蔽可以将个单板之间相互隔离，同时也保证了对外干扰的屏蔽。单板屏蔽最大的优势是可以消除板间干扰。这种方案比较简单，但是需要注意可能会导致结构方案的复杂化，相应的成本会比较高。同时需要注意这种方案可能对散热带来潜在的困难。

举例：C公司高端数通产品中一般采用了单板屏蔽方案，所有单板均安装在屏蔽板上。

单板局部屏蔽主要用于抑制单板上局部器件或者局部电路的干扰，或者保护局部敏感电路。单板局部屏蔽在无线产品中应用十分常见，主要是通过安装屏蔽盒来实现，实现起来十分容易。

通过上面我们可以发现，选择屏蔽体方案的级别越低，实现起来越容易，能够达到的屏蔽效能越高。至于成本则需要根据实际情况分析，一般而言，单板局部屏蔽是最便宜的，机柜、模块级屏蔽成本比较高，单板局部屏蔽成本需要根据实际情况判断。

在实际选择屏蔽方案时，应该根据产品的实际需要，综合考虑选用最优的方案组合。在大的方面无非是机柜屏蔽和模块屏蔽两种方案选一种，再加上细节方面的考虑。例如，8011是模块屏蔽加上单板屏蔽。BTS3.0基站是机柜屏蔽加上模块屏蔽。

总而言之，选择屏蔽体方案时应遵守以下原则：

综合考虑，根据实际需要选用最优的组合方案；在电缆比较多的产品中尽可能选用模



块屏蔽方案。

C. 屏蔽设计成本分析

由于屏蔽需求，必然导致结构件成本增加。成本增加主要是表现在：

- Y 由于屏蔽的需要，需要安装一定数量屏蔽材料。这是成本增加最主要的因素。
- Y 由于屏蔽需要，需要改进结构件的方案，增加结构件的复杂程度，例如增加螺钉，增加结构件强度等。
- Y 由于屏蔽需要，需要采用特殊的工艺措施，例如导电性要求，喷涂保护等。

根据统计，公司目前产品中，如果屏蔽效能要求不超过20dB/1GHz，由于屏蔽需求导致结构件成本增加一般在10-30%之间，具体还与屏蔽方案和使用的屏蔽材料有关。

一般屏蔽效能要求越高，成本增加越多。对于屏蔽效能要求达到30dB/1GHz的结构方案，其成本将增加30-40%以上。这就是建议绝大多数产品屏蔽效能指标不要超过20dB/1GHz的根本原因。反过来我们可以发现，拼装机柜由于屏蔽要求低，其成本增加就比较少。

举例：2500+ 子架屏效20dB/1GHz，屏蔽材料占子架总成本30%；拼装机柜屏效10dB/1GHz，屏蔽材料占机柜成本10%。

屏蔽成本增加最主要的因素是屏蔽材料的价格。我们可以看出，屏蔽成本占结构件的比例是比较大的。为降低成本，引进和开发新型的低成本屏蔽材料是必须的。近年来国际上有采用不锈钢簧片替代目前昂贵的铍铜簧片的趋势。由于不锈钢簧片价格便宜，已经足够满足通信产品的需要，公司将逐步开发不锈钢簧片，有计划地替代现有铍铜簧片甚至导电布材料。

总之，为了尽可能降低结构件成本，首先必须考虑尽可能选用比较低的屏蔽效能指标，从而从源头上解决成本增加的问题。另外，由于屏蔽成

本增加绝大多数是因为屏蔽材料的价格太高，因此在屏蔽体方案中尽可能减少屏蔽材料的数量，或者使用比较廉价的屏蔽材料。

D. 缝隙的屏蔽设计

屏蔽体由于结构功能的需要，存在大量的缝隙。这些缝隙的屏蔽设计是屏蔽体屏蔽设计中最复杂，最关键的一部分。缝隙的屏蔽设计是体现设计人员水平的最关键的技术。

缝隙的屏蔽可以大致分为两种：紧固点（包括螺钉、铆钉、点焊、锁扣等）直接连接；在缝隙中安装屏蔽材料实现电连接。

紧固点直接连接的方案工艺简单，成本低廉，一般是首选的方法。这种连接方式主要应用在屏蔽效能不高于20dB/1GHz的屏蔽体中。

对于结构上不能采取紧固点连接（例如活动缝隙）或者结构方案中不允许采取太多紧固点的屏蔽体，可以采取在缝隙中安装屏蔽材料的方式。设计合理的缝隙，安装屏蔽材料后屏蔽效能比较容易达到20dB/1GHz以上的屏蔽效能要求。

1. 紧固点直接连接的屏蔽

根据6.3.1节的分析，缝隙的屏蔽效能与电磁波的特性、材料的导磁率、导电率、缝隙的最大尺寸，缝隙的深度等因素有关。其中结构方案中最关注的就是缝隙的最大尺寸和缝隙的深度，这两点是决定缝隙屏蔽效能的主要因素。根据分析得结论，减小缝隙的最大尺寸，增加缝隙的深度有利于提高缝隙的屏蔽效能。另外，保证零件连接面良好的导电性是屏蔽的基本要求，尤其需要注意喷漆零件必须在连接面保证可靠的喷漆保护，哪怕是一点油漆也将急剧破坏缝隙的屏蔽效能。

a) 减小缝隙的最大尺寸

为了减小缝隙的最大尺寸，最直接的方法就是减小紧固点的间距。在实际产品应用中这是非常常用的措施，往往许多产品由于考虑到屏蔽的需求增加了许多螺钉，这些很正常的现象。

需要注意的是，缝隙的最大尺寸并不等于紧固点的间距。实际上，在紧固点之间材料还是存在很大的可能性会接触在一起的，这在6.3.1节中已经分析得很清楚。因此缝隙的最大尺寸除了与紧固点间距有密切的关系之外，还与缝隙具体的连接结构形式有关，提高缝隙零件表面精度和零件的刚性将有助于减小缝隙的最大尺寸。为了提高屏蔽性能，仅仅靠减小紧固点的间距是不可取的，应该综合考虑采取更加合理的结构形式来减小缝隙的最大尺寸。

例如，某缝隙中本来采取两块钢板直接连接的屏蔽方式，如图7-8所示，如果将结构方案改成图7-9那样将其中一块板折弯90°。由于提高了零件的刚性，同样紧固点间距的状态下，图7-9中最大缝隙将比图7-8的要小。如果进一步将其换成型材，如图7-10所示。其刚性和表面质量均有一定的提高，屏蔽效能将进一步提高。

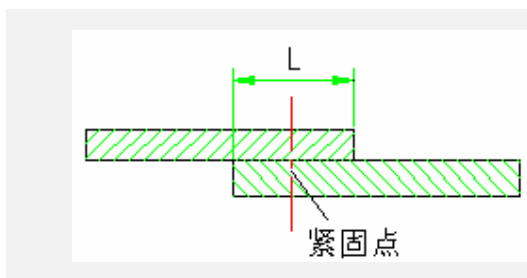


图7-8：钢板直接连接的缝隙屏蔽方案

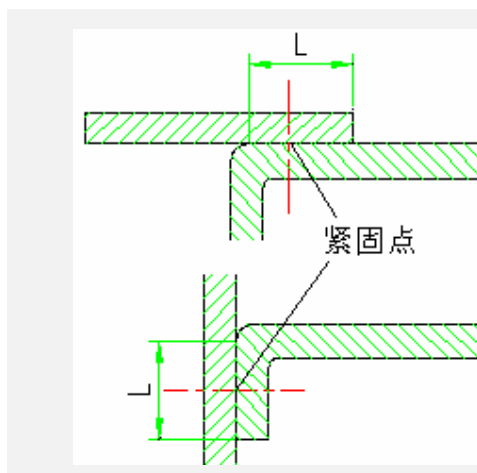


图7-9：钢板折弯90°之后连接的缝隙屏蔽方案

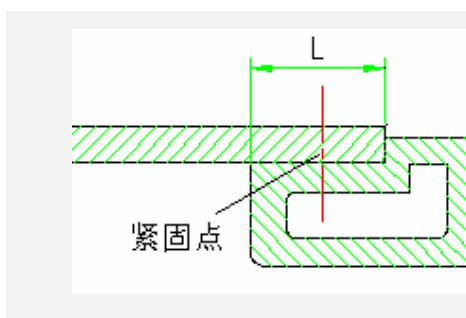


图7-10：钢板与型材连接的缝隙屏蔽方案

b) 增加缝隙深度

缝隙的深度指电磁波衰减方向的尺寸，一般指两个零件直接搭接的厚度。如果是一个零件上的缝隙，则缝隙深度指零件材料的厚度。

在做结构方案时有意识增加缝隙的深度，将显著提高缝隙的屏蔽效能。如图7-8至图7-10中，增加尺寸 L 将增加缝隙的屏蔽效能。经验表明，由于零件的刚性和紧固点的面积有限，单排紧固时缝隙深度超过30mm就没有什么意义了。比较理想的值是15-25mm，至少应大于10mm，应根据结构方案的可实现性尽可能选择大值。如果希望能够进一步增加缝隙的深度，可以采取比较特殊的结构方案，变相增加缝隙的深度。如图7-11所示的结构方

案由于将缝隙分成了两条，实际上将缝隙的深度比图7-10所示方案增加了一倍。

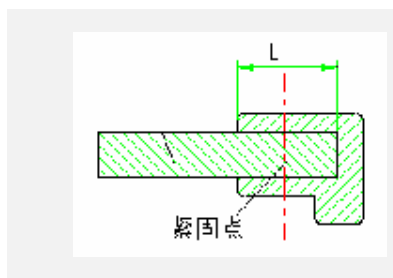


图7-11：增加缝隙深度的方法

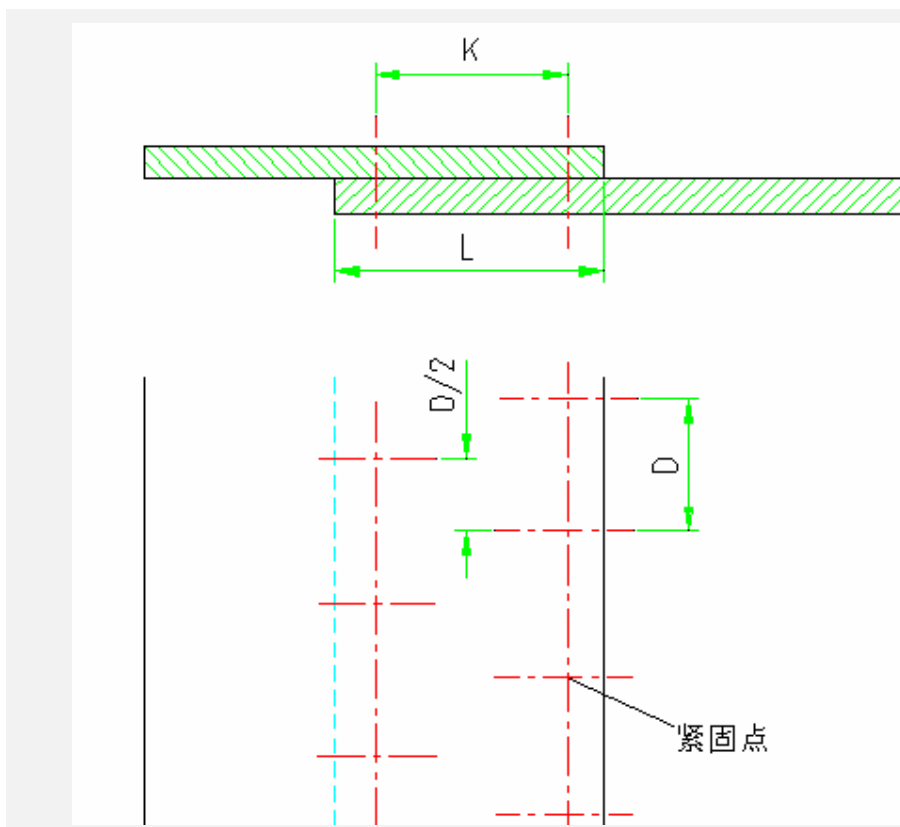


图7-12：双排紧固结构方案

对于屏蔽效能要求比较高的场合，可以考虑采取双层紧固的方式，如图7-12所示，这种双层屏蔽的结构也可以变化成两个零件折弯之后在另一个平面上面再紧固一次。双层紧固不但可以提高缝隙的深度，同时由于双



层紧固增加的零件之间接触的可能性，也大大降低了缝隙的最大尺寸，因此双层屏蔽将大大提高缝隙的屏蔽效能。双层屏蔽时需要注意两层紧固点的位置应该错开。

c) 紧固点间距的选择

紧固点的间距将直接影响到缝隙的屏蔽效能，也是结构设计中最关心的数据。通过上面的分析，得出紧固点的间距与缝隙的屏蔽效能要求，缝隙的深度以及缝隙的具体结构连接形式等因素有关。表7-3为按照华为公司屏蔽效能测试方法得出的单排紧固点间距推荐值。

表7-3格中的数据是按照板厚为1.5mm，缝隙长度为600 确 600mm的方孔而得到的测试数据，并已经考虑的一定安全裕量。实际设计时应该参照该表的推荐数据，并根据实际结构形式进行一定的调整。一般根据实际结构形式中安装状况、缝隙的深度选择一个最接近的数据，并根据实际情况增大或者减小5-10mm。

举例：某机柜顶盖板采用螺钉间距方式与围框（压铸件）连接，缝隙深度15 mm，要求屏效为20dB/1GHz，则按照表中推荐选择板与压铸件形式，缝隙深度为15-20mm那一栏，得到螺钉间距推荐值为90mm。由于该缝隙的总长度为400 确 350mm，与实际测试偏小，螺钉间距可以取大值，但是缝隙的深度为15mm，是推荐值中的偏小值。综合考虑选择螺钉间距为90-95mm左右，具体应该根据方便设计来圆整数据。

举例：两块1.5mm钢板直接铆接连接，缝隙深度为12mm，要求屏效为20dB/1GHz，则按照表中推荐值选择缝隙深度为10和15-20这两栏数据之间，即螺钉间距推荐为60-70mm。然后再根据缝隙的长度来确定最终的铆钉间距。

对于表7-3中没有描述到的，或者对推荐值有怀疑时，可以按照10.2节的方法，模拟实际工作状态进行实际测试。测试原理和测试方法见10.2节的分析。需要注意测试出来的结果至少应该留10-15dB的安全裕量。

对于图7-15所示的双排紧固形式，紧固点间距K与缝隙深度L有关，一



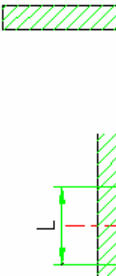
般至少应大于30mm，推荐选择缝隙深度为50mm以上，相应紧固点间距推荐为：

$$K = L - 10 \text{ i } 15\text{mm}$$

一般不主张过分增加K和L值，以免造成结构形式变得复杂。D值的选取按照表7-4推荐值。

表7-3：单排紧固时紧固点距离的推荐值

单位： mm

| 安装状况 | 缝隙深度 L | 10dB/1GHz | 20dB/1GHz | 30dB/1GHz |
|--|--------|-----------|-----------|-----------|
| 板与板直接连接 | < 10 | 110 | 60 | 30 |
| | 15-20 | 130 | 70 | 40 |
| | > 25 | 140 | 80 | 45 |
| 板与板折弯90°后连接  | < 10 | 120 | 70 | 40 |
| | 15-20 | 140 | 80 | 50 |
| | > 25 | 150 | 90 | 55 |
| 板与型材或者压铸 | < 10 | 130 | 80 | 50 |


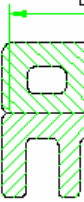

| | | | | |
|--|-------|-----|-----|----|
| 件连接  紧固点 | | | | |
| | 15-20 | 150 | 90 | 60 |
| | > 25 | 160 | 100 | 65 |
| 型材或压铸件之间连接  | < 10 | 140 | 90 | 60 |
| | 15-20 | 160 | 100 | 70 |
| | > 25 | 170 | 110 | 75 |
| 板与型材连接特例  板厚2.5至 紧 | 15-20 | 180 | 110 | 80 |
| | > 25 | 200 | 120 | 90 |

表7-4：双排紧固时紧固点间距D的推荐值



单位： mm

| 缝隙深度L | 屏蔽效能20dB/1GHz | 屏蔽效能30dB/1GHz |
|-------|---------------|---------------|
| 30 | 120 | 80 |
| 50 | 150 | 100 |
| 70 | 180 | 120 |

a) 凸包的屏蔽

有一种比较特殊的缝隙屏蔽方案就是利用凸包的形式保证缝隙的两个零件直接可靠接触。凸包的结构形式中采用了最简洁的方案保证缝隙两个零件之间的接触，但是这种接触同时也破坏其他可能存在的接触，使缝隙的最大尺寸实际上就是凸包之间的距离。另外，凸包也使缝隙的深度取决于凸包接触点的直径，一般为1-2mm甚至更小。按照6.3.1缝隙屏蔽的分析，由于缝隙深度很小，缝隙最大尺寸较大（一般40-50mm），缝隙的传输损耗可以忽略。缝隙的屏蔽效能主要取决于缝隙的反射损耗。根据实际测试数据，凸包间距40-50mm，屏蔽效能不超过10dB/1GHz。减小凸包的间距有利于提高缝隙的屏蔽效能，一般每减小一倍，屏蔽效能增加6dB，即如果凸包间距减小到20-25mm，缝隙屏蔽效能约为15dB/1GHz。凸包的间距再减小就没有什么意义了，反而会使这种简洁的结构形式变得复杂。

总之凸包的屏蔽形式是一种简洁、经济的方案，在屏蔽效能要求不高于15dB/1GHz推荐考虑使用，这时凸包间距为20-25mm。凸包屏蔽形式一般更多的用于屏蔽效能低于10dB/1GHz的场合，凸包间距为40-50mm。

2. 安装屏蔽材料

a) 安装屏蔽材料的应用场合

当缝隙的结构形式是活动缝隙或者不能使用太多的紧固点时，可以在缝隙中安装屏蔽材料。主要用于门缝隙的屏蔽、拉手条屏蔽以及螺钉紧固

时螺钉太多，工艺性不好等场合。

举例：机柜门的缝隙为活动缝隙，不能采用紧固方式来屏蔽，这时必须采用屏蔽材料，利用屏蔽材料的弹性来保证电连续性。

举例：某机柜柜顶的盖板与围框之间采用螺钉连接，由于屏蔽效能要求高，共需要紧固螺钉44个，工艺性不好。改进后缝隙中安装导电布材料，螺钉数量减少到16个。

b) 缝隙中安装屏蔽材料后的屏蔽分析

缝隙中安装屏蔽材料后，缝隙的屏蔽机理可以按照连续屏蔽体的理论进行分析，影响缝隙的屏蔽效能的因素有：电磁波的特性、缝隙两个零件之间的接触阻抗。显然，接触阻抗越小，屏蔽体越完整，缝隙的屏蔽效能越高。

两个零件之间的接触阻抗取决于零件与屏蔽材料之间的接触阻抗以及屏蔽材料本身的导电率和导磁率。零件与屏蔽材料之间的接触阻抗与屏蔽材料本身的阻抗以及缝隙中屏蔽材料的安装形式有关。

其实零件与屏蔽材料之间的接触阻抗与零件本身的特性也有关系，但是前面连续屏蔽体的屏蔽分析中可以看出，金属材料本身的屏蔽性能已经远远超过工程实际需要，因此我们可以忽略零件本身的特性对缝隙屏蔽效能的影响。

总之，缝隙中安装屏蔽材料后，其屏蔽效能主要由屏蔽材料本身的屏蔽特性、屏蔽材料与零件之间的接触阻抗。缝隙屏蔽设计时应选用屏蔽性能良好的屏蔽材料，并采用合适的安装形式，保证足够的压缩量，以减小屏蔽材料与零件之间的接触阻抗。

对于屏蔽效能要求不高于15dB/1GHz的场合，屏蔽材料可以分段安装。这时缝隙的屏蔽机理与上一节通过紧固点紧固的原理相同，可以认为各段屏蔽材料就是紧固点，屏蔽材料之间的间距就是缝隙的最大尺寸，屏蔽材料压缩后接触宽度就是缝隙的深度，然后参照上一节中相关设计数据确定

屏蔽材料之间的间距。分段安装的方式有一个很大的优点就是减小了屏蔽材料的压缩力，材料的变形要小得多，主要适合于屏蔽效能要求不高，且零件对弹性力十分敏感的场所。

c) 缝隙的结构形式

选择合适的结构形式，保证屏蔽材料可靠的压缩是屏蔽设计的重点。合理的结构形式有利于提高缝隙的屏蔽效能，如图7-13所示，方式二和三的结构形式两个零件之间的接触能够提供额外的屏蔽效果，另外，由于有安装槽，能够保证屏蔽材料可靠的压缩。因此方式二和方式三的屏蔽效果比方式一好，其中方式三比方式二又稍微好一些。

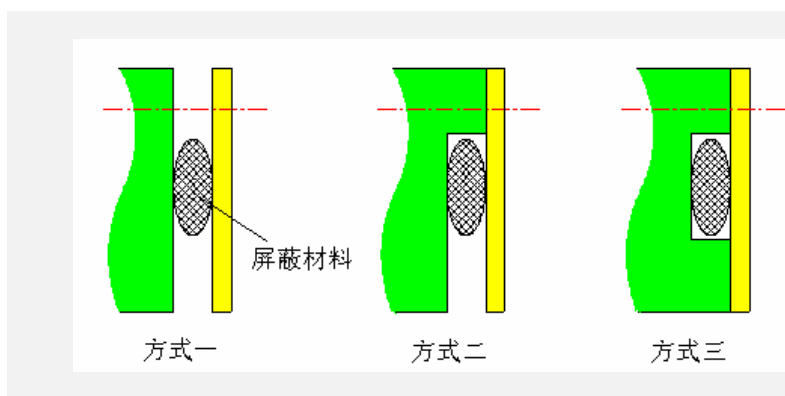


图7-13：缝隙的不同结构形式

屏蔽材料在缝隙中具体安装形式主要有：卡装、PSA胶粘接、直接紧固（点焊、螺钉等）连接等形式。一般推荐使用卡装或者直接紧固的方式。采用PSA胶粘接时需要注意绝大多数材料的背胶都是不导电的。另外，有部分屏蔽材料要求必须采用安装槽的形式。

保证屏蔽材料可靠的压缩对于缝隙屏蔽设计至关重要，必须保证屏蔽材料的压缩量在许可范围之内，保证屏蔽材料与零件之间可靠接触，同时也注意不能过度压缩。在确定缝隙的屏蔽设计方案时，并不能简单地将设计的缝隙认为就是屏蔽材料的压缩量。由于屏蔽材料本身的弹性，决定了零件上面有较大的弹性力。如果零件的刚性不好，零件会产生比较大的弹

性变形。所以，屏蔽材料压缩后的高度应该是缝隙的设计缝隙加上零件的弹性变形量。确定缝隙的结构形式时应预先根据屏蔽材料的弹性系数估计零件的变形量，合理选择缝隙的缝隙，保证屏蔽材料的压缩量在规定的范围之内。零件的弹性变形可以用Pro/E工具进行分析，如果零件的弹性变形超过了规定的范围，应该采取措施增加零件的刚性或者增加紧固点的数量。

举例：某屏蔽机柜的门变形范围超过了屏蔽材料许可范围，将门锁由两点紧固改成三点紧固后减小了变形范围，符合设计要求。

举例：某插箱盖板与横梁直接用导电布连接，由于盖板变形范围太大，不能保证导电布可靠的压紧，实际安装中发现中间局部位置导电布根本没有压上，导致屏蔽效能十分低。改进后在盖板上面加加强筋，提高盖板的刚性。并在中间加一个螺钉紧固，从而保证了盖板的变形范围符合设计要求。

这里主要考虑零件之间的缝隙符合压缩量范围，保证屏蔽材料的压缩量在许可范围之内。关于安装屏蔽材料之后缝隙的紧固方式以及紧固点距离选取，已经是超出了本规范的范畴，本规范中不详细介绍。

关于各种屏蔽材料的压缩量-压缩力关系图请查阅各类屏蔽材料的外购件技术规范。各种屏蔽材料的压缩量范围见7.4.3.2节的详细规定。

举例：导电布EMIS-D01的压缩力可以查阅DKBA0.480.0019《屏蔽材料——导电布技术规范》。

d) 屏蔽材料与零件之间的相容性

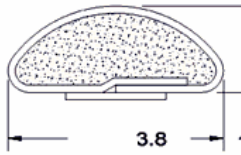
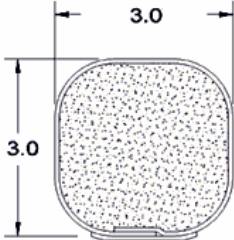
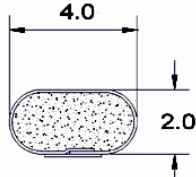
选用屏蔽材料时，需要注意屏蔽材料与零件之间的相容性，避免产生电化学腐蚀。部门优选的屏蔽材料均已经有这方面的测试报告，设计时不必太多考虑这方面的问题。需要注意的时，屏蔽材料一般主要的成分为Ag或者Cu等，与钢板和铝板之间还是存在比较大的电化学腐蚀的可能性，因此一般不允许直接应用于户外产品中。如果必须使用，也应该先设计防水结构，屏蔽设计应该在防水结构的内部。

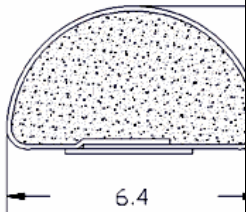
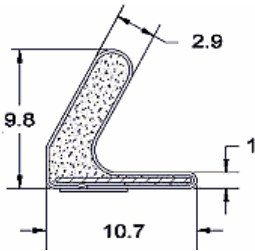
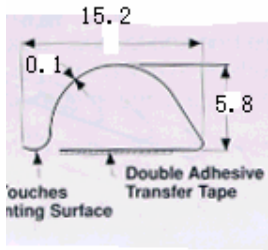
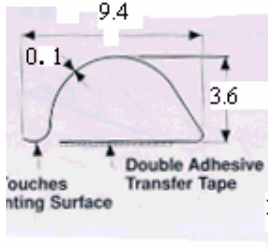
3. 屏蔽材料的选用

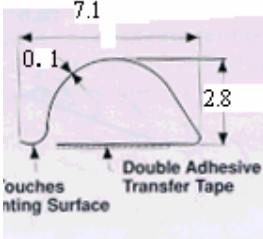
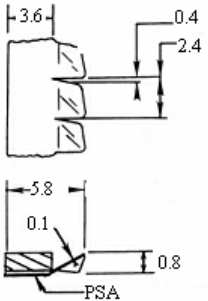
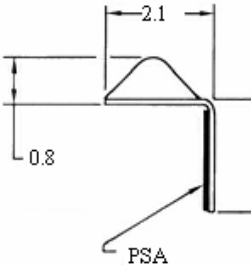
a) 公司允许使用的屏蔽材料

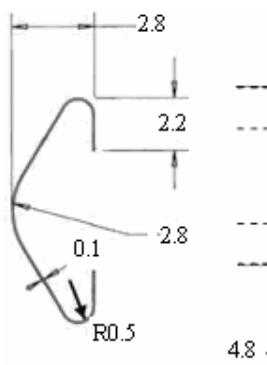
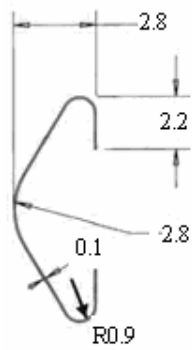
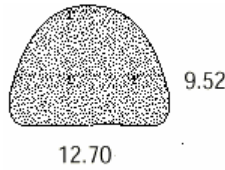
公司目前允许选用的屏蔽材料有：导电布、簧片、金属丝网、螺旋管、导电橡胶、FIP点胶。除FIP点胶技术外，公司对每类材料中允许使用的各种屏蔽材料进行了编码。目前公司许可使用的屏蔽材料如表7-5所示。缝隙屏蔽设计时必须使用这些优选的屏蔽材料，并且屏蔽材料的绘图和标注、安装要求必须符合DKBA0.400.0038《屏蔽材料的代码规范》的规定。

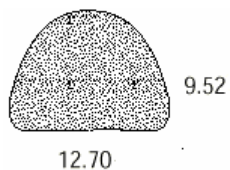
表7-5：允许使用的屏蔽材料代码

| 类别 | 华为代码 | 形状尺寸 | 技术规范 |
|-----|----------|---|----------------|
| 导电布 | EMIS-D01 | 半椭圆形，宽度3.8，高度1.5  | DKBA0.048.0019 |
| | EMIS-D02 | 方形，宽度3，高度3  | |
| | EMIS-D03 | 长腰形，宽度4，高度2  | |
| | EMIS-D04 | 半椭圆形，宽度6.4，高 | |

| | | | |
|----|----------|---|----------------|
| | | 度 3.6  | |
| | EMIS-D05 | C形，宽度10.7，高度9.8  | |
| 簧片 | EMIS-H01 | 指形，宽度15.2，高度5.8  | DKBA0.048.0020 |
| | EMIS-H02 | 指形，宽度9.4，高度3.6  | |
| | EMIS-H03 | 指形，宽度7.1，高度2.8 | |

| | | | |
|--|----------|---|--|
| | |  | |
| | EMIS-H04 | <p>锯齿形，宽度5.8，高度0.8。</p>  | |
| | EMIS-H05 | <p>90度锯齿形，宽度4.1，高度2.1。</p>  | |
| | EMIS-H06 | <p>卡式C形，宽度8.1，高度2.8，用于1.0mm、1.2mm板。</p> | |

| | | | |
|----------|----------|---|----------------|
| | |  | |
| | EMIS-H07 | <p>卡式C形，宽度8.1，高度2.8，用于1.5mm、2mm板。</p>  | |
| | EMIS-H08 | <p>拉手条专用 宽度5.6，高度2.8</p> | DKBA0.048.0158 |
| 螺旋管 | EMIS-L01 | <p>圆形，直径2.62，有内芯。</p> | DKBA0.048.0021 |
| | EMIS-L02 | <p>圆形，直径6.35mm</p> | |
| 金属 丝网 | EMIS-S01 | <p>半椭圆形，宽度12.7，高度9.52，无背胶</p>  | DKBA0.048.0022 |
| | EMIS-S02 | <p>半椭圆形，宽度12.7，高度9.52，有背胶</p> | |

| | | | |
|------|----------|--|----------------|
| | |  | |
| 导电橡胶 | EMIS-X01 | 圆形，横截面直径1.02mm | DKBA0.048.0023 |
| | EMIS-X02 | 半腰形，宽度3.1，高度3.43 | |
| | EMIS-X03 | 横截面直径1.25mm，周长185mm-190mm | DKBA0.048.0108 |
| | EMIS-X04 | 横截面直径1.25mm，周长135mm-140mm | DKBA0.048.0109 |

a) 各种材料的应用场合

屏蔽材料的选用可以总结为：尽可能选用导电布和簧片这两类屏蔽材料，金属丝网主要用于电缆出线接地，FIP技术仅用于压铸件的缝隙屏蔽。部门将逐步取消螺旋管和导电橡胶的应用，目前表7-5中的相应编码仅限于老产品中使用。

FIP技术是在基材上面现场将导电胶点在规定位置上，固化后胶与基材为一体。这种技术主要用于结构紧凑的压铸件，中间隔离的筋宽度十分小（2-3mm），一般的屏蔽材料难以满足要求。如果压铸件中隔离筋的屏蔽可以用螺钉紧固的方式屏蔽，或者宽度能够使用一般屏蔽材料满足要求，应该优选选用螺钉紧固或者一般屏蔽材料屏蔽。

导电布材料是目前通信产品中普遍应用的一种材料。这种材料压缩力小，不易损坏，价格比较便宜。但是这种材料屏蔽性能一般，应用在产品中工业感没有簧片那么好，一般不主张用在影响外观的位置。另外除EMIS-D05之外，一般不能承受侧压力，EMIS-D01和EMIS-D04有保留地允许用于侧压，请注意避免材料在应用过程中翻起来。

簧片材料屏蔽性能比导电布要好得多，应用在产品中工业感好，产品显得有档次，大多数簧片均适合于侧压的场合。簧片容易损坏，在非正常



应用状态下容易掉齿。另外，簧片价格比较昂贵，一般是导电布2-3倍。不过随着不锈钢簧片的应用，价格将不是主要的问题。不锈钢簧片的价格与导电布价格基本持平，甚至还要低一些。

如果结构尺寸允许，尽量选用高度尺寸比较大的屏蔽材料。高度比较大的尺寸压缩量也大，允许压缩的范围也大一些，相应降低了零件的刚性和精度要求。

b) 屏蔽材料的压缩方向

根据压缩方向的不同，屏蔽材料可以分为正压和侧压两种应用场合。正压时压缩力方向与屏蔽材料的安装面垂直，表7-5中所有材料均可以应用在正压的场合。侧压时压缩力方向与屏蔽材料安装面平行，因此压缩力可能会将屏蔽材料掀起来，只有少数特殊设计的材料才能承受侧压力。屏蔽材料正压和侧压的应用场合如表7-6所示。

表7-6：各种屏蔽材料正压和侧压的应用场合

| 代码 | 是否可以正压 | 是否可以侧压 |
|----------|--------|-----------------------|
| EMIS-D01 | 既 | 避免使用，少数拔插次数不多的场合可以使用。 |
| EMIS-D02 | 既 | |
| EMIS-D03 | 既 | |
| EMIS-D04 | 既 | 避免使用，少数拔插次数不多的场合可以使用。 |
| EMIS-D05 | 既 | 既（只能单方向侧压） |
| EMIS-H01 | 既 | 既（只能单方向侧压） |
| EMIS-H02 | 既 | 既（只能单方向侧压） |
| EMIS-H03 | 既 | 既（只能单方向侧压） |
| EMIS-H04 | 既 | |
| EMIS-H05 | 既 | |
| EMIS-H06 | 既 | 既 |

| | | |
|----------|---|------------|
| EMIS-H07 | 既 | 既 |
| EMIS-H08 | 既 | 既（只能单方向侧压） |
| EMIS-L01 | 既 | 既 |
| EMIS-L02 | 既 | 既 |
| EMIS-S01 | 既 | |
| EMIS-S02 | 既 | |
| EMIS-X01 | 既 | |
| EMIS-X02 | 既 | |
| EMIS-X03 | 既 | |
| EMIS-X04 | 既 | |

举例：*EMIS-D05*可以正压，也可以侧压，侧压时只能承受图7-14所示的侧压力。

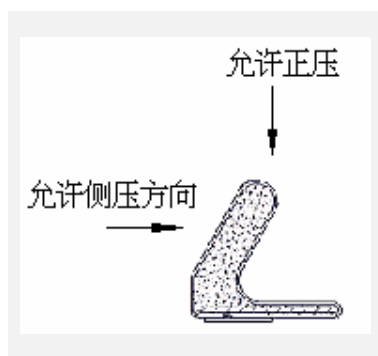


图7-14：EMIS-D05的压缩力方向

a) 各种材料的压缩量范围

屏蔽材料的压缩量对屏蔽材料的屏蔽性能有至关重要的影响。一般导电布的允许压缩量为其高度的30-70%，推荐为40-60%；簧片的允许压缩量为其高度的20-80%，推荐为30-60%；螺旋管和导电橡胶的标称压缩量为其高度的25%，允许范围为10-40%；金属丝网的压缩量为其高度的20-80%，推荐30-60%；FIP点胶标称压缩量为高度的25%，允许范围为10-40%。各种屏蔽材料推荐的压缩量和压缩范围如表7-7所示，表中缝隙宽度（台阶高度）



指安装屏蔽材料的缝隙深度的设计值或者台阶的高度设计值，压缩后高度指屏蔽材料在压缩状态的高度尺寸，将屏蔽材料原高度减去压缩后高度就是屏蔽材料的压缩量。

表7-7：各种屏蔽材料压缩范围

| 代码 | 屏蔽材料高度 | 设计间隙推荐值 | 压缩后高度范围 |
|----------|--------|------------|----------|
| EMIS-D01 | 1.5 | 0.8 | 0.6-1.0 |
| EMIS-D02 | 3 | 1.6 | 1.2-2.1 |
| EMIS-D03 | 2 | 1.2 | 0.8-1.4 |
| EMIS-D04 | 3.6 | 2 | 1.2-2.5 |
| EMIS-D05 | 9.8 | 4.5 | 3.5-7 |
| EMIS-H01 | 5.8 | 3 | 1.5-4.5 |
| EMIS-H02 | 3.6 | 2.4 | 1.8-3.0 |
| EMIS-H03 | 2.8 | 1.9 | 1.6-2.2 |
| EMIS-H04 | 0.8 | 0.3 | 0.1-0.6 |
| EMIS-H05 | 0.8 | 0.3 | 0.1-0.6 |
| EMIS-H06 | 2.8 | 卡式安装，见技术资料 | |
| EMIS-H07 | 2.8 | | |
| EMIS-H08 | 2.5 | 0.5 | 0.3-0.8 |
| EMIS-L01 | 2.62 | 1.9 | 1.6-2.1 |
| EMIS-L02 | 6.35 | 4.8 | 4.4-5.1 |
| EMIS-S01 | 9.52 | 6.5 | 4.8-8.7 |
| EMIS-S02 | 9.52 | 6.5 | 4.8-8.7 |
| EMIS-X01 | 1.02 | 0.7 | 0.6-0.85 |
| EMIS-X02 | 3.41 | 2.6 | 2.3-2.9 |
| EMIS-X03 | 1.15 | 0.8 | 0.6-1.0 |
| EMIS-X04 | 1.15 | 0.8 | 0.6-1.0 |

a) 屏蔽材料的安装形式

屏蔽材料的安装形式有：卡式、PSA粘接、槽式安装。每种材料允许的安装形式见表7-8所示。一般优先考虑卡式安装形式，部分型号的产品只能使用槽式安装形式。



表7-8：各种屏蔽材料的安装形式

| 代码 | 卡式安装 | PSA粘接 | 槽式安装 |
|----------|------|-------|--------------|
| EMIS-D01 | | 既 | 既 |
| EMIS-D02 | | 既 | 既 |
| EMIS-D03 | | 既 | 既 |
| EMIS-D04 | | 既 | 既 |
| EMIS-D05 | | 既 | 既 |
| EMIS-H01 | | 既 | 既（注意足够的滑动空间） |
| EMIS-H02 | | 既 | 既（注意足够的滑动空间） |
| EMIS-H03 | | 既 | 既（注意足够的滑动空间） |
| EMIS-H04 | | 既 | 既 |
| EMIS-H05 | | 既 | 既 |
| EMIS-H06 | 既 | | |
| EMIS-H07 | 既 | | |
| EMIS-H08 | 既 | | |
| EMIS-L01 | | | 既 |
| EMIS-L02 | | | 既 |
| EMIS-S01 | | 既 | 既 |
| EMIS-S02 | | 既 | 既 |
| EMIS-X01 | | | 既 |
| EMIS-X02 | | | 既 |
| EMIS-X03 | | | 既 |
| EMIS-X04 | | | 既 |

簧片EMIS-H01、EMIS-H02、EMIS-H03需要注意安装面足够的宽度，因为簧片的齿在压缩后需要一定的滑动范围，具体的宽度需要见表7-9所示。另外需要注意安装面足够的光滑，一般不允许拉丝、喷砂等处理方式，以免表面摩擦系数太大，导致簧片的齿不能正常滑动而断裂。

表7-9：部分簧片的最小安装宽度

| 代码 | EMIS-H01 | EMIS-H02 | EMIS-H03 |
|--------|----------|----------|----------|
| 安装面最小宽 | 22 | 15 | 12 |



a) 各种材料的屏蔽性能

在保证屏蔽材料压缩量的前提下，各种屏蔽材料能够达到的屏蔽效能可以参考表7-10的数据。需要注意的是，表7-10中的数据是在应用条件比较理想的屏蔽效能，是一般缝隙屏蔽的最高设计值，表中的数据主要用于选择屏蔽材料。实际应用中由于屏蔽材料的安装方式、紧固点的间距以及紧固方式等将会大大影响缝隙的屏蔽效能，实际屏蔽效能可能会更低一些。特别是应用再活动缝隙中，由于不可控因素太多，实际产品中难以保证屏蔽材料的可靠压缩，最高屏蔽效能至少应降低10dB。

举例：EMIS-D05应用在机柜的门缝隙时，由于紧固点少，门的缝隙尺寸难以控制，屏蔽效能往往很难高于20dB/1GHz。

表7-10：各种屏蔽材料的屏蔽效能

| 代码 | 推荐的最高屏蔽效能 |
|----------|-----------|
| EMIS-D01 | 30dB/1GHZ |
| EMIS-D02 | 40dB/1GHz |
| EMIS-D03 | 40dB/1GHz |
| EMIS-D04 | 30dB/1GHZ |
| EMIS-D05 | 30dB/1GHZ |
| EMIS-H01 | 50dB/1GHz |
| EMIS-H02 | 50dB/1GHz |
| EMIS-H03 | 50dB/1GHz |
| EMIS-H04 | 40dB/1GHz |
| EMIS-H05 | 40dB/1GHz |
| EMIS-H06 | 40dB/1GHz |
| EMIS-H07 | 40dB/1GHz |
| EMIS-H08 | 25dB/1GHz |
| EMIS-L01 | 30dB/1GHz |
| EMIS-L02 | 30dB/1GHz |
| EMIS-S01 | 25dB/1GHz |
| EMIS-S02 | 25dB/1GHz |
| EMIS-X01 | 20dB/1GHz |



| | |
|----------|-----------|
| EMIS-X02 | 20dB/1GHz |
| EMIS-X03 | 20dB/1GHz |
| EMIS-X04 | 20dB/1GHz |

屏蔽体的屏蔽效能要求高于表7-10中的推荐数据时，建议采用其他材料。如果实际应用中必须采用这种材料，可以采取其他的补救措施提高屏蔽效能，例如继续减小紧固点间距，采用双层屏蔽等。

实际屏蔽体中缝隙的屏蔽效能可以按照10.2节的方法进行测试，测试得到的结果一般应该留一个安全裕量10-15dB。测试方法见10.2节的详细描述。

a) 新材料和新技术的应用

屏蔽技术也是在不断的发展，目前不断涌现出来许多新技术和新材料。比较典型的有FIP点胶技术、屏蔽玻璃、不锈钢簧片等。

FIP点胶技术和屏蔽玻璃目前公司刚刚起步使用，其详细技术有待进一步的研究。

不锈钢簧片是相对铍铜簧片而提出的。由于铍铜簧片的价格昂贵，加上铍铜簧片需要进口，采购周期太长。另外，铍铜材料是不可回收的，不符合环保要求，而ISO14000环保认证已经逐步成为国际大公司的趋势。总之，针对通信产品中屏蔽要求不高的特点，目前通信行业已经有用不锈钢簧片替代铍铜的簧片的趋势。

不锈钢簧片一般采用高弹性不锈钢箔片（厚度在0.1mm以下），使用连续模具成型。一般可以由企业自己定制，具有价格便宜、制造周期短的优点，而其屏蔽性能和弹性也已经满足通信产品的需求。

公司将逐步开发不锈钢簧片取代现有铍铜簧片的应用，甚至取代部分导电布的应用。不锈钢簧片将成为公司用量最大的主要屏蔽材料。请设计人员关注最新的应用。



B. 通风孔的屏蔽设计

1. 选择通风孔的屏蔽方案

通风孔的屏蔽设计主要需要处理屏蔽和散热之间的矛盾，常用的屏蔽方式有：金属丝网、穿孔金属板、截止波导通风板。

金属丝网孔隙率大，十分适合于散热要求高的场合。由于金属丝网的感性特性，其屏蔽效能难以做得很高，一般不高于20dB/1GHz，与穿孔金属板的屏效相当。不过，金属丝网需要专门的安装框，并需要采取必要的措施保证安装缝隙的屏蔽。因此金属丝网反而会导致结构更加复杂。综合考虑起来，一般尽可能推荐使用穿孔金属板，不主张使用金属丝网。

穿孔金属板是最常用的解决方案。直接在结构件上面开孔，结构形式十分简单，而且成本十分低。穿孔金属板的孔隙率在30-60%之间，一般能够满足绝大多数产品散热的需要。穿孔金属板的屏蔽效能在10-30 dB/1GHz之间，也已经可以满足绝大多数通信产品的需求。绝大多数产品中应考虑采用穿孔金属板。

截止波导通风板的孔隙率十分高，可以达到95%以上。由于截止波导的原理决定其屏蔽效能十分高，可以达到50-80dB/1GHz。但是截止波导通风板的成本十分高，一般铝制波导的价格为1000元/m²以上。另外，波导通风板有一定的厚度（包括安装框一般为16mm），需要注意结构上面留足够的空间。波导通风板由于价格昂贵，而且一般通信产品没有应用的需求，应用十分少。只有在屏蔽效能要求特别高，或者散热有特别要求，用穿孔金属板已经无法实现的情况下，才考虑采用波导通风板。

2. 穿孔金属板

穿孔金属板就是直接在结构件的金属板上面开阵列的通风孔。这种通



风孔一般是用模具直接成型的，加工成本十分低。

通过6.3.2节的分析可以看出，穿孔金属板开孔的最大尺寸对屏蔽效能影响最大，其次是孔深，影响最小的是孔间距。开孔的最大尺寸越小，孔深越大，孔间距越大，金属板的屏蔽效能越高。

由于穿孔金属板的屏蔽效能与开孔的最大尺寸有关，而不是孔的面积。因此在保证足够的通风面积的前提下，推荐开孔为圆孔和六角形孔，其次是方孔。一般不要开腰形孔甚至细长孔。孔的最大尺寸推荐为4 - 8mm，具体与屏蔽效能指标有关，详细的尺寸请参照表7-11中规定的的数据。

由于穿孔金属板的屏蔽效能与孔的最大尺寸、孔深的关系最大，因此一般尽可能开小孔，开十分密，保证足够的屏蔽效能的同时，也保证有足够的孔隙率。

由于板厚的增加有利于提高屏蔽效能，一般建议尽可能选取厚一点的通风板。

举例：通用的通风板厚度为1.0 - 2.0mm。如果结构尺寸允许，尽可能选择1.5甚至2.0mm的板，有利于提高通风孔的屏蔽效能。

表7-11为开孔数量为50 50，按照华为公司的屏蔽效能测试方法进行测试得到的结论，详细的测试方法请见10.2节。已经由于测试不可避免存在误差，表中的数据已经留10-15dB的安全裕量。

表7-11：典型通风孔的屏蔽效能

单位：dB

| 板厚 (mm) | 孔尺寸 (mm) | 孔间距 (mm) | 30-230MHz 屏蔽效能 | 230-1000MHz 屏蔽效能 | 孔隙率 |
|------------|------------------|----------|-------------------|---------------------|------|
| 2.0 | 圆孔Φ4或外 接圆Φ4的六 | 6 | 55 | 40 | 0.35 |
| | 圆孔Φ5或外 接圆Φ5的六 | 7 | 50 | 35 | 0.4 |
| | 圆孔Φ6或外 接圆Φ6的六 | 8 | 45 | 30 | 0.44 |
| | 圆孔Φ8或外 接圆Φ8的六 | 10 | 35 | 20 | 0.5 |
| | 方孔4 X 4 | 6 | 50 | 35 | 0.44 |



| | | | | | |
|-----|--------------|----|----|-----|------|
| | 方孔5 X 5 | 7 | 45 | 30 | 0.51 |
| | 方孔6 X 6 | 8 | 40 | 25 | 0.56 |
| | 方孔8 X 8 | 10 | 30 | 15 | 0.64 |
| | 方孔10 X 10 | 12 | 25 | 10 | 0.69 |
| 1.5 | 圆孔Φ4或外接圆Φ4的六 | 6 | 50 | 135 | 0.35 |
| | 圆孔Φ5或外接圆Φ5的六 | 7 | 45 | 30 | 0.4 |
| | 圆孔Φ6或外接圆Φ6的六 | 8 | 40 | 25 | 0.44 |
| | 圆孔Φ8或外接圆Φ8的六 | 10 | 30 | 15 | 0.5 |
| | 方孔4 X 4 | 6 | 45 | 30 | 0.44 |
| | 方孔5 X 5 | 7 | 40 | 25 | 0.51 |
| | 方孔6 X 6 | 8 | 35 | 20 | 0.56 |
| | 方孔8 X 8 | 10 | 25 | 10 | 0.64 |
| | 方孔10 X 10 | 12 | 20 | 5 | 0.69 |
| 1.0 | 圆孔Φ4或外接圆Φ4的六 | 6 | 45 | 130 | 0.35 |
| | 圆孔Φ5或外接圆Φ5的六 | 7 | 40 | 25 | 0.4 |
| | 圆孔Φ6或外接圆Φ6的六 | 8 | 35 | 20 | 0.44 |
| | 圆孔Φ8或外接圆Φ8的六 | 10 | 25 | 10 | 0.5 |
| | 方孔4 X 4 | 6 | 40 | 25 | 0.44 |
| | 方孔5 X 5 | 7 | 35 | 20 | 0.51 |
| | 方孔6 X 6 | 8 | 30 | 15 | 0.56 |
| | 方孔8 X 8 | 10 | 20 | 5 | 0.64 |

通过测试对比，已经证明通风板为钢板或者铝板，屏蔽效能基本相同。

当辐射源与通风板之间距离与测试条件不符时，在30-230MHz频段屏蔽效能可能会由于近场效应有变化，但是230-1000MHz频段一般已经是远场，没有什么影响，因此辐射源位置的变化对通风孔的设计影响不大，一般可以忽略。

孔的数量与表中的测试条件不符时，只要孔的数量在一个数量级时，

屏蔽效能基本相同，但是如果孔的数量十分少或者十分多时，必须考虑孔的数量的影响。当孔的数量十分多时，可以将孔当成几个50X50的部分，按照6.3.4节屏蔽体的综合屏蔽效能进行分析；当孔的数量十分少时，也可以按照同样理论反推。

举例：孔数为30X30或者70X70时，屏蔽效能与表中的数量50X50基本相同，设计时可以忽略这个因素的影响。

1. 截至波导通风板

截止波导通风板是利用截止波导的原理制作成的通风板，有的资料也称为蜂窝通风板。选用截止波导通风板时需要确定截止波导板的开孔直径、厚度以及材料。

截止波导通风板的直径决定了截止频率，一般要求截止频率是最高工作频率的5-10倍。截止频率的具体分析见6.3.2节分析。一般的通信产品均选择外径为3.18mm的六边形截止波导。

截止波导的厚度决定了截止波导通风板的屏蔽效能，厚度越大，屏蔽效能越高。但是厚度太大，占结构空间越大。一般推荐选择厚度为12.7mm的截止波导，加上外框厚度为16mm。

波导通风板的材料有铝合金和钢两种。铝制波导通风板是粘接制成的，必须经过导电处理（导电氧化、镀锡、镀镍等）后才能使用。钢制波导通风板是采用钎焊方式制成的，使用时只要做防腐处理即可。钢制波导通风板的价格十分昂贵，一般通信产品难以接受，不推荐使用。铝制波导通风板的价格也比较昂贵，一般为1000元/m²，使用时需要慎重考虑。铝制波导通风板容易损坏，不能承重。

波导通风板一般是和安装框一起构成一个组件，安装框上面一般带屏蔽材料，保证安装缝隙有足够的屏蔽效能。这种组件可以根据安装接口尺寸直接向供应商定制。

B. 局部开孔的屏蔽

局部开孔指在屏蔽体上面开少数的几个孔，例如20个。这时用通风孔的屏蔽机理来分析误差已经十分大。局部开孔的屏蔽机理可以按照缝隙的屏蔽原理来分析，将开孔当成缝隙的缺陷来处理。

局部开孔主要的应用实例有拉手条上面扳手的缝隙、光纤出线孔、指示灯、拨码开关的开孔等。局部开孔的屏蔽效能可以根据经验来判断，当开孔的最大尺寸小于电磁波波长的 $1/20$ 时，屏蔽效能为20dB。因此对于屏蔽效能为20dB/1GHz 时，局部开孔的最大尺寸应小于15mm（1GHz时波长为300mm）。实际上，当孔的间距远远大于孔的最大尺寸时，孔的数量已经可以忽略，这时可以适当放宽孔的最大尺寸的要求。

局部开孔的应用情况十分复杂，应该根据具体应用状态灵活分析，详细的机理分析和实际应用有待进一步的研究。

C. 塑胶件的屏蔽设计

塑胶件的屏蔽设计主要是在塑胶件的内侧或者外壁上覆盖一种或多种具有导电导磁的屏蔽膜，达到屏蔽的目的。主要的手段有：涂覆导电磁涂料、喷涂导电漆、真空镀铝、电镀或化学镀、粘贴金属箔（或复合箔），甚至采用导电塑料。相对而言，喷涂导电漆目前已经比较成熟，也是通信产品常用的解决方案。

塑胶件的屏蔽推荐采用喷涂导电漆。根据薄膜屏蔽理论，导电漆的屏蔽效能主要取决于反射损耗，起决定因素的是电磁波的空气波阻抗与导电漆的波阻抗之比。由于电磁波的空气波阻抗是已经确定的，降低导电漆的波阻抗将有利于提高其屏蔽效能。因此，选用导电性能好的导电漆，增加喷涂厚度，有利于提高导电漆的屏蔽效能。

导电漆的喷涂工艺比较简便，但是需要注意导电漆的喷涂与普通漆的

喷涂有所不同。由于导电漆中含有金属颗粒，喷涂应采用高容量低压（HVLP）喷涂系统，喷涂时喷枪压力应合适，尽量避免金属颗粒撞到喷涂面上反弹回落喷涂面造成粗糙现象。

推荐选用含Ni/Cu颗粒类的导电漆，这种类别的导电漆性价比比较合适。

评价导电漆的性能指标为固化后的导电性能，一般要求导电漆固化后至少应满足表面电阻小于 0.2ohm/inch^2 。对于具体产品，可以将指标换算成最大对角线电阻要求。

由于导电漆的技术仍然在发展，公司目前的应用也十分少，导电漆的类别和导电性能的检验有待进一步的研究。

塑胶件产品一般至少由两个以上零件组成，因此零件之间的缝隙成为了塑胶件屏蔽的主要难题。虽然塑胶件喷导电漆之后其屏蔽效能一般能够满足要求，但是两个零件之间的接缝往往成为了泄漏的主要原因。

接缝的处理方式一般有三种，如图7-15所示。分别适合于不同的应用场合。方式一是通过两个零件的接缝处相互咬合，利用塑胶件的弹性保证缝隙的接触。这种屏蔽的方式比较简单，两个零件通过少数的几个螺钉连接即可。但是这种缝隙的结合方式很难保证缝隙的可靠接触，屏蔽效能不超过 $10\text{dB}/1\text{GHz}$ ，更重要的是这种方式缝隙的接触有很大的随机性，很难保证产品的一致性，因此只有在屏蔽效能要求十分低，甚至只有接地的要求时采用这种形式。

方式二是在接缝处采用FIP点胶技术，点 $0.8\text{--}0.9\text{mm}$ 高的导电胶，两个零件压紧之后保证缝隙的屏蔽效果。这种屏蔽方式理论上是可行的，而且已经是手机中的成熟技术。但是点胶技术的加工效率并不高，目前公司正在引进阶段，成本还比较高，有待进一步的研究。

方式三是在一个零件的内侧固定不锈钢片，利用不锈钢片保证屏蔽效能，不锈钢片与另一个零件（已经喷导电漆）的内侧接触。从而回避了缝隙的屏蔽问题。这种是一种比较理想的解决方案，整体屏蔽效能可以达到 $20\text{dB}/1\text{GHz}$ 。但是不锈钢片需要开模具。

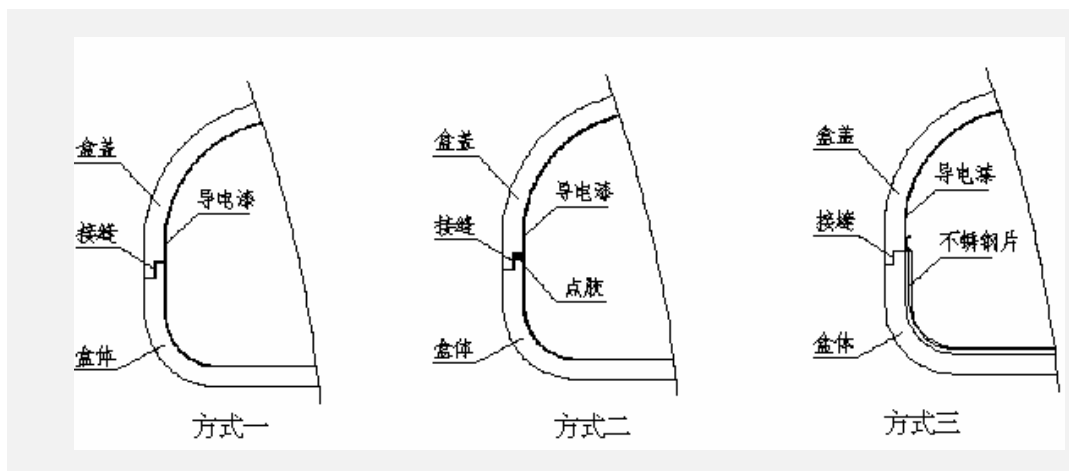


图7-15：塑胶件缝隙常用屏蔽形式

由于存在通风孔、接缝等各种不可避免的缺陷，塑胶件喷导电漆处理屏蔽效能一般为10dB/1GHz，最高能够做到20dB/1GHz。超过这个指标后应该考虑其他屏蔽方案。

塑胶件屏蔽还有一种特殊的处理方式，就是将塑胶件内侧粘接一层薄板，利用金属薄板来屏蔽。这种屏蔽方式实际上与常用的屏蔽方法相同。

D. 单板局部屏蔽

当单板上局部有强干扰源或者敏感电路时，需要在单板的局部考虑屏蔽措施。单板的局部屏蔽通常的做法就是安装屏蔽盒。屏蔽盒有盒体式结构和围框式结构两种形式。

1. 盒体式结构

盒体式结构采用冷轧薄钢板或者镀锡钢板冲压、折弯而成，通过盒体管脚与PCB板经过波峰焊固定，具体如图7-16所示。这种屏蔽方式的屏蔽效能一般可达20dB/1GHz，这种屏蔽方式是最常用的，推荐在产品中优先考

虑。盒体的引脚间距应小于12mm，引脚自身宽度一般为0.8mm~0.9mm，引脚长度不大于3mm。盒体对角有一对预紧引脚，安装屏蔽盒时，先将屏蔽盒扣上PCB板，拧转预紧引脚，将屏蔽盒固定在PCB板上，再进行波峰焊。

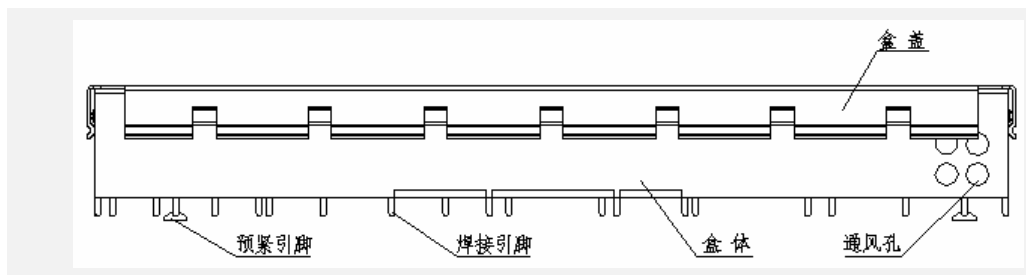


图7-16：屏蔽盒的结构形式

如果屏蔽盒需要更高的屏蔽效能，通过引脚焊接的方式屏蔽性能可能不满足要求，可以采用回流焊，使屏蔽盒与PCB板连接为一个整体。盒体上面有定位引脚限位，定位引脚一般取2~3个。安装时只需将屏蔽盒扣在PCB板上，再进行回流焊接。

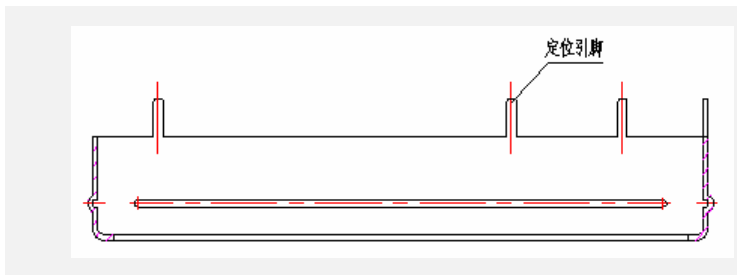


图7-17：回流焊时屏蔽盒结构形式

一般屏蔽盒内部的元器件可能需要调试，因此屏蔽盒一般设计成图7-16所示的盒体与盒盖组合的形式。如果不需要调节，则最好作成一体的，以简化结构形式。

屏蔽盒常用材料有冷轧薄钢板、镀锡青铜、不锈钢、镀锡钢、铍铜、锌铝合金。其中在我司产品中应用最为广泛的是冷轧薄钢板、镀锡钢板（马口铁）、锌铝合金。

冷轧薄钢板成本低，来料广泛，在加工后需镀锡处理，增加表面的耐腐蚀性、可焊性，我司无线产品中应用较多。需要注意控制镀锡质量，以免在恶劣环境下箱体生锈。

镀锡钢板是有预镀工艺的钢板，加工后不需表面处理工艺，可焊性好，工艺简单。但是这种材料加工断口的防锈需要引起足够重视。冷轧薄钢板和镀锡钢板的厚度一般为0.3mm~0.5mm。

2. 围框式结构

围框式结构的屏蔽盒主要用于单板工作频率十分高，有特殊屏蔽要求的场合。在射频模块中应用比较常见。围框与PCB之间的连接可以是回流焊或者螺钉连接。

围框式结构一般采用锌铝合金压铸或者型材拉制而成，加工后进行导电氧化或者化学氧化处理。一般结构形式如图7-18所示。

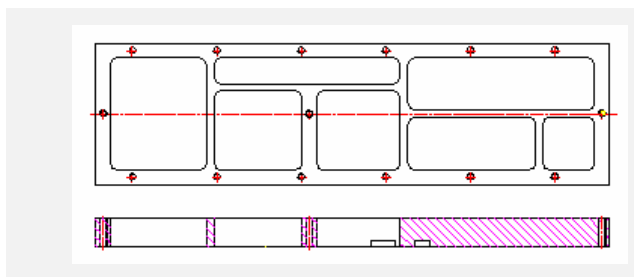


图7-18：围框式屏蔽盒盒体结构

采用螺钉连接时，盒体的中间隔筋一般取3~4mm，如果需要安装螺钉，则在相应位置。周围隔筋由于要安装螺钉，厚度一般取5~6mm。围框式结构盒体与盒盖之间用螺钉连接，螺钉间距30~40mm。如果屏蔽效能要求很高，可以在盒体与盒盖之间加装屏蔽材料，这时要求隔筋宽度相应增加，导致结构十分笨重。这时可以采取FIP点胶技术，一般点胶的宽度为1.2mm，高度为0.9-1.0mm。因此隔筋最小宽度可以做到2mm。采用点胶时也应该有



一定的紧固螺钉，一般螺钉间距为100-150mm，保证胶的可靠压缩。一般胶的压缩量为25%，即0.9-1.0mm高的胶压缩到0.6-0.7mm。为避免过度压缩，应该在安装螺钉位置有限位装置，例如凸台。

围框式屏蔽有一种特殊形式就是整个PCB全部包在屏蔽盒内，这时实际上已经是一个屏蔽的模块。

E. 电缆对屏蔽的影响

根据6.3.3节电缆穿透的分析可以看出，电缆进出屏蔽体时的接地对屏蔽体的屏蔽性能有至关重要的影响。

为了避免电缆穿透对屏蔽体的影响，可以从几个方面采取措施：

Y 采用光纤出线。由于光纤本身没有金属体，也就不存在电缆穿透的问题。

Y 采用屏蔽电缆时，屏蔽电缆在出屏蔽体时，采用夹线结构，保证电缆屏蔽层与屏蔽体之间可靠接地，提供足够低的接触阻抗。

Y 采用屏蔽电缆时，用屏蔽连接器转接将信号接出屏蔽体，通过连接器保证电缆屏蔽层的可靠接地。

Y 采用非屏蔽电缆时，采用滤波连接器转接，由于滤波器通高频的特性，保证电缆与屏蔽体之间有足够低的高频阻抗。

Y 采用非屏蔽电缆时，电缆在屏蔽体的内侧（或者外侧）要足够短，使干扰信号不能有效地耦合出去，从而减小了电缆穿透的影响。

Y 电源线通过电源滤波器出屏蔽体，由于滤波器通高频的特性，保证电源线与屏蔽体之间有足够低的高频阻抗。

1. 光纤出线

光纤由于不存在干扰信号的耦合，可以自由进出屏蔽体。光纤的出线只需要光纤的进出口开孔对屏蔽体的影响。根据光纤口的数量，参照通风

孔的屏蔽设计或者局部开孔的屏蔽设计方法。

2. 屏蔽电缆夹线

屏蔽电缆出屏蔽体时，可以采用专门的夹线结构形式，保证电缆的屏蔽层与屏蔽体之间可靠接触，保证屏蔽电缆可靠接地。原则上要求电缆的屏蔽层与屏蔽体360°接触，并有足够的压紧力。实际上很难做到360°的接触，一般能够做到180-270°的接触就已经能够满足要求。但是严禁采用屏蔽电缆抽头的形式与屏蔽体之间实现点连接。由于夹线装置不可能提供十分良好的接地，夹线方式主要用于屏蔽效能要求不超过20dB/1GHz的屏蔽体中。

夹线装置的设计十分关键。除了要保证电缆的屏蔽层可靠接地之外，还需要考虑实际操作的方便性。一般夹线方式主要用于模块、子架或者机柜顶部，尽量避免用于机柜底部，以免造成操作困难。

图7-19至7-20为L公司传输产品子架的出线方式。出线在子架的顶部，金属丝网将电缆夹紧后直接卡在钣金件的槽中。屏蔽电缆在夹线的位置剥开保护层，屏蔽层通过金属丝网与屏蔽体可靠接触。由于金属丝网的弹性，保证金属丝网与电缆的屏蔽层大面积接触。金属丝网有一定的预压缩量，保证不出线时也有足够的屏蔽性能。

金属丝网依靠结构件的槽固定，一个槽中用一根金属丝网对折后卡进去。安装时先将金属网卡进去槽中，但不要全部卡入，然后将屏蔽电缆的局部剥开，卡到金属丝网之间。装配完之后再将金属丝网全部卡进槽中，这样避免了卡线时电缆破坏金属丝网的端面的金属丝。

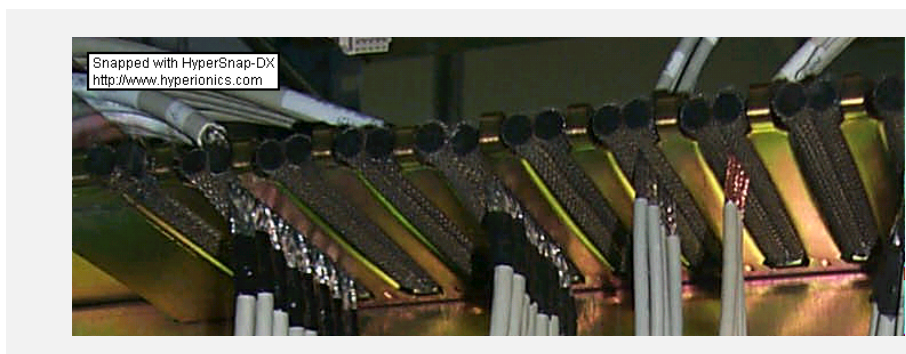


图7-19: L公司传输子架的夹线方式

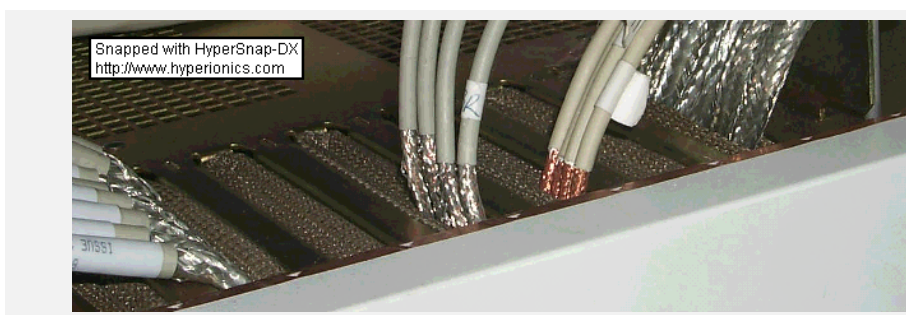


图7-20: L公司传输子架的夹线方式

图7-21为R公司的夹线簧片。这种簧片夹线的方式是每根电缆单独出线，通过簧片保证电缆屏蔽层与屏蔽体之间的可靠接触，适合于电缆数量较少，种类较多的应用场合。



图7-21：R公司的夹线簧片

将屏蔽电缆剥开一部分以后，用簧片缠绕在屏蔽电缆的屏蔽层上面，成360°接触，并用扎线带将簧片固定。电缆与簧片一起从屏蔽体上面的开孔上面伸出，簧片与屏蔽体上面的开孔360°接触，保证电缆的屏蔽层可靠的接地，并提供足够的屏蔽效能。簧片外边的发泡海绵有两作用：提供必要的弹性以及防尘。

这种夹线方式操作维护十分方便，由于簧片具有一定的弹性，屏蔽体上开孔大小可以作为一个系列化的尺寸。另外，这种簧片可以设计成长条状的，实际装配过程中根据线缆的直径大小裁剪成相应长度即可。

采用这种方案时电缆必须采用其他方法可靠的固定，保证电缆是垂直卡入安装孔中，以免由于电缆的移动导致簧片不能正确卡在安装孔上，导致这种处理措施失效，甚至会损坏簧片。另外需要注意连接器的最大尺寸，保证能够从安装孔中穿出。

图7-22，7-23是S公司交换机的的夹线方式，屏蔽电缆夹在安装槽中，通过夹紧机构保证电缆的屏蔽层与屏蔽体的可靠接触。这种方式比较适合于电缆种类十分少，但是同一种电缆数量十分多的应用场。一般这时屏蔽

体的屏蔽效能不高于10dB/ 1GHz。

安装槽与屏蔽电缆的屏蔽层直接接触保证可靠接地。考虑到安装的方便性，一般两排电缆安装在一个槽中。安装槽的宽度、深度以及卡紧机构对于电缆的可靠接地十分重要。卡紧机构是一个专用的弹片，这种结构十分简单、巧妙。



图7-22: S公司交换机出线方式

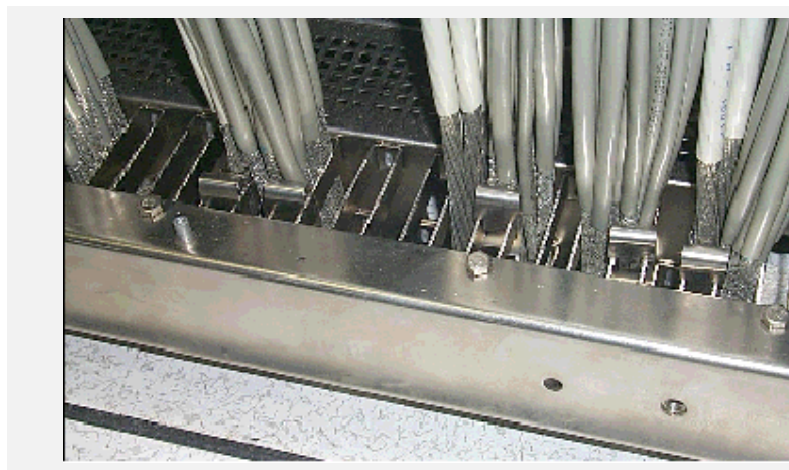


图7-23: S公司交换机出线方式

根据图7-20所示原理，公司已经开发了一种金属丝网夹线装置。采用如图7-24所示的型材，图号Q/DKBA0.021.0245。金属丝网EMIS-S01安装在型材的两侧槽中。型材直接铆接在屏蔽体上面。具体安装示意图如图7-25所

示。

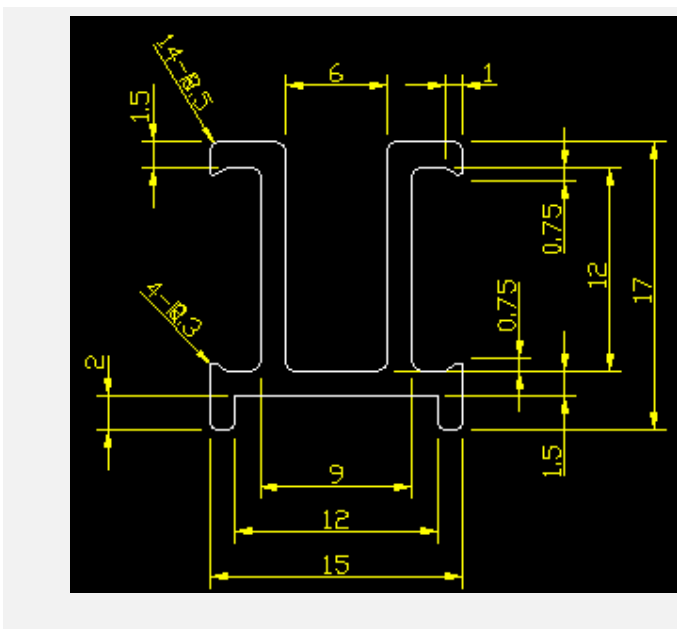


图7-24: 夹线型材图

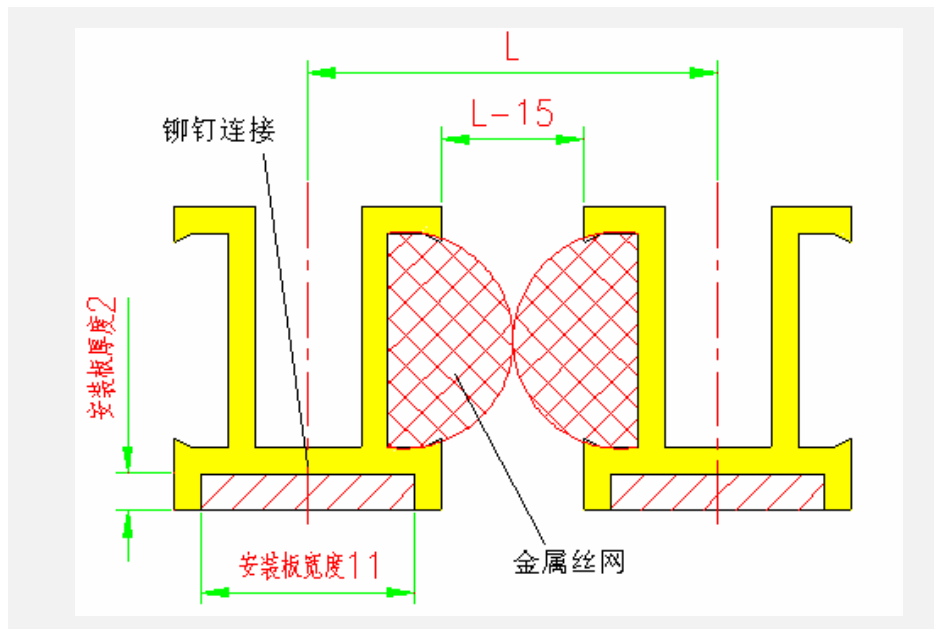


图7-25: 夹线示意图

采用EMIS-S01时，图中尺寸 $L = 23mm$ 。因此电缆剥开保护层后直径不

大于8mm，这已经能够满足绝大多数应用。如果有少数直径特别粗的电缆，可以增加L尺寸，但是需要注意缝隙的屏蔽问题。

上述的夹线方式适合在子架、插箱出线，电缆夹好后在型材的端头安装一固定条固定。但是这种夹线方式存在装线时操作性不好的缺陷，尤其是机柜下出线，使用上述方案要将手伸到机柜下去拉扯电缆，操作困难。并且当电缆带有连接器头时还需要在一头开孔，保证连接器头可以穿过夹线装置，开孔要用一活动盖板屏蔽。在这种情况下，可以选用下面的夹线方案。

这种夹线装置由一根根夹线安装条组成，安装条与安装板之间一端用十字槽固定，一端用螺钉固定。安装条两侧有带背胶的金属丝网EMIS-S02，屏蔽电缆从两安装条的金属丝网之间穿过，金属丝网有一定的预压缩量，没有电缆穿过时也有足够的屏蔽效能，同样的屏蔽电缆的屏蔽层直径不应大于8mm。安装板的尺寸与安装形式如图7-26所示。

安装条型材图号是DKBA 0.021.0371。安装条尺寸如图7-27所示。安装条上卡槽的宽度视安装板的厚度而定，一把比安装板厚大0.3mm。同时安装条安装金属丝网部分要比安装板开口宽度小2~3mm，保证安装时不会产生干涉。安装条的长度和安装板开口的宽度视允许的情况而定，但不要超过150mm，以保证良好的刚性和屏蔽性能。

这种夹线方式适用于机柜的出线，可以实现单面操作、维护。

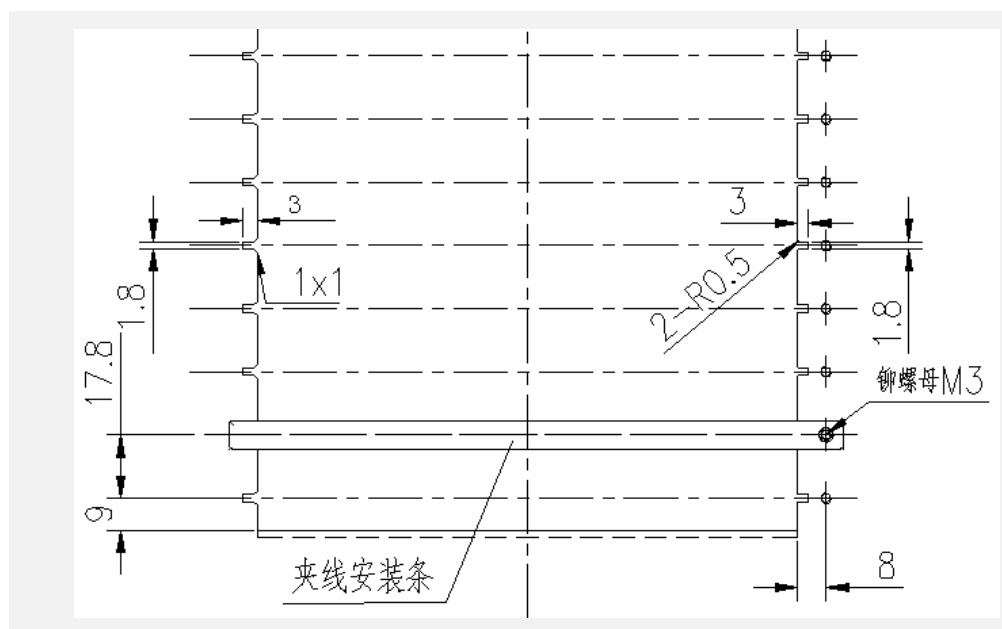


图 7-26 安装板尺寸与安装示意图

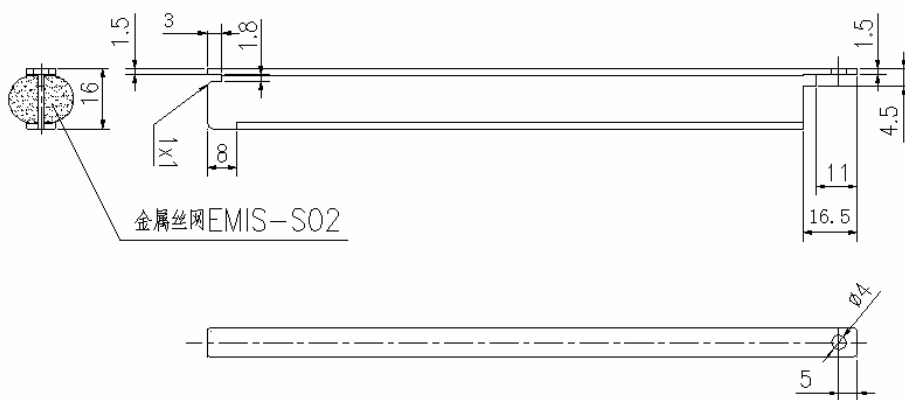


图7-27 安装条尺寸图

3. 屏蔽连接器转接

通过屏蔽连接器转接是一种十分理想的出线方式，其原理如图7-28所

示。

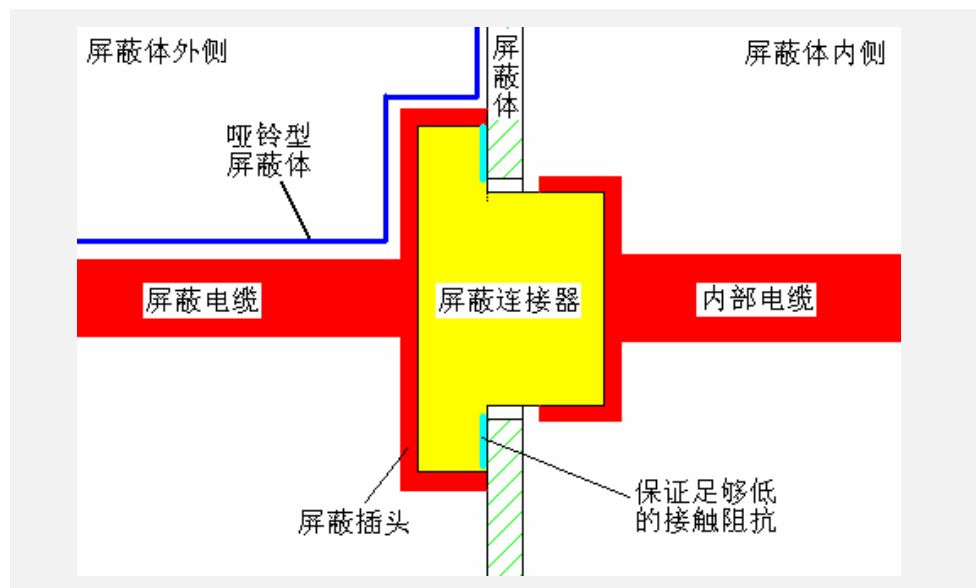


图7-28：屏蔽连接器转接原理

屏蔽连接器安装在屏蔽体上面，在屏蔽体外侧，屏蔽电缆通过屏蔽插头连接在屏蔽连接器上面。屏蔽电缆、屏蔽插头、屏蔽体连接器以及结构件本身的屏蔽体构成了典型的哑铃型屏蔽体（图中蓝线所示），有效地保证了屏蔽体的完整性。内部电缆一般是非屏蔽的，如果是屏蔽电缆，一般也要求与屏蔽连接器之间可靠接地。

采用这种方式时需要注意屏蔽连接器与屏蔽体之间缝隙的屏蔽（图中绿色部分）。如果屏蔽连接器直接安装（例如通过螺钉）在屏蔽体上面，一般能够保证提供足够低的搭接阻抗，主要用于屏蔽效能不高于20dB/1GHz的情况。当屏蔽连接器与屏蔽体之间无法直接固定，或者直接固定无法保证足够的屏蔽效能时，可以在屏蔽连接器与屏蔽体之间的缝隙中装屏蔽材料（导电布或者不锈钢簧片），保证缝隙的屏蔽效能。这种屏蔽材料需要按照屏蔽连接器的形状定制加工，一般推荐导电布材料。

屏蔽连接器的具体安装形式见产品样本，只要能够满足上述低阻抗接触即可，并不一定要按照上图的形式。

屏蔽连接器典型的应用是拉手条出线。屏蔽连接器与拉手条之间可靠接地，屏蔽电缆通过屏蔽插头连接在连接器上面。这时屏蔽连接器在屏蔽体内侧直接安装在PCB上面（不是通过电缆连接）。这种应用场合尤其需要注意屏蔽连接器与屏蔽体之间的低阻抗搭接，条件许可时考虑屏蔽连接器与屏蔽体之间安装屏蔽材料。

屏蔽连接器转接的方式结构简单，操作性十分好。推荐设计人员优先考虑采取这种方式。典型的应用是插箱级屏蔽，加上拉手条出线。

4. 滤波连接器转接

这种方式主要适合于非屏蔽信号电缆。滤波连接器安装在屏蔽体上，信号线上的干扰通过滤波器之后已经基本上没有穿透屏蔽体，从而保证屏蔽体的完整性。滤波连接器典型的应用是在出线时加一个穿心电容，这种阵列穿心电容已经有商品化的产品。

选用滤波连接器是需要注意滤波器的插损曲线，避免影响有用信号的信号质量。滤波连接器转接的方式成本十分昂贵，而且操作性不好。在军品中应用较多，不推荐在通信产品中应用。

5. 电缆直接出屏蔽体

电缆直接出屏蔽体，必须保证电缆在屏蔽体的一侧足够短，避免干扰信号的耦合和发射。一般要求电缆在屏蔽体一侧的长度小于80mm，注意这个长度要求包括了PCB上面的走线，直到滤波电路或者接地为止。如图7-29所示。

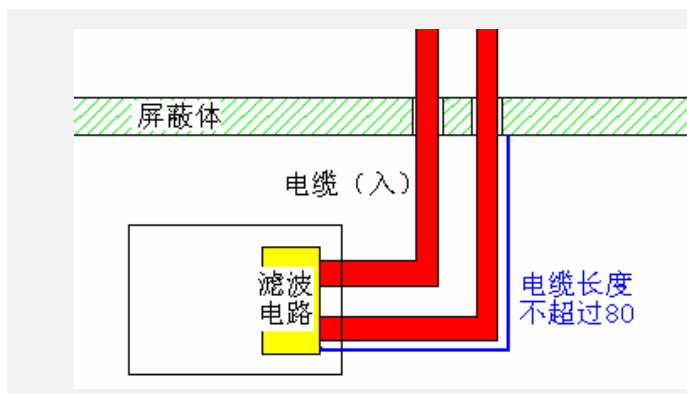


图7-29：电缆直接出屏蔽体

由于电缆直接出屏蔽体不可避免还是会存在干扰信号的穿透，一般不推荐使用。特殊情况下必须使用也只用于屏蔽效能不高于10dB/1GHz的场合，并且需要注意线缆辐射对产品EMC性能的潜在影响。

需要说明的是接地线穿过屏蔽体时不仅要保证在屏蔽体内长度不超过80mm，并且不要破坏接地电缆的保护外皮，因为这种保护外皮是有防火要求的。

6. 电源滤波器转接

电源线进出屏蔽体一般均是通过EMI滤波器转接。通过滤波器转接需要注意必须保证滤波器壳体与屏蔽体（PGND）之间足够低的接触阻抗。原则上要求滤波器的进出线隔离在屏蔽体的两侧，如图7-28所示。滤波器的输入输出线分别位于屏蔽体的两侧，从而保证了输入输出线的隔离，推荐在产品中尽可能使用这种方式。

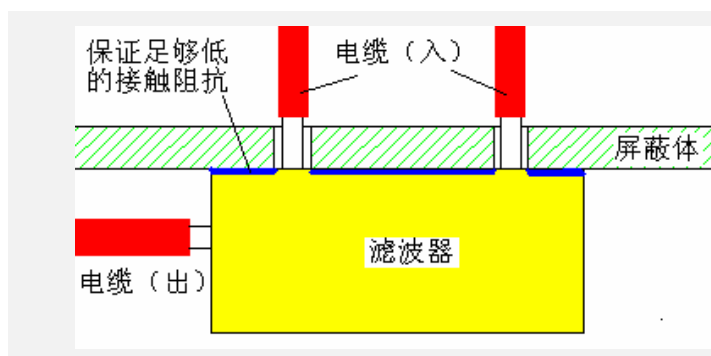


图7-30：滤波器的安装图

如果图7-30所示的方案实现起来有困难，可以采取图7-31所示的方法。注意输入线应该尽可能的短，以免破坏屏蔽体的完整性。另外应该保证滤波器的进出线有足够的隔离（禁止并行走线，禁止捆扎在一起）。

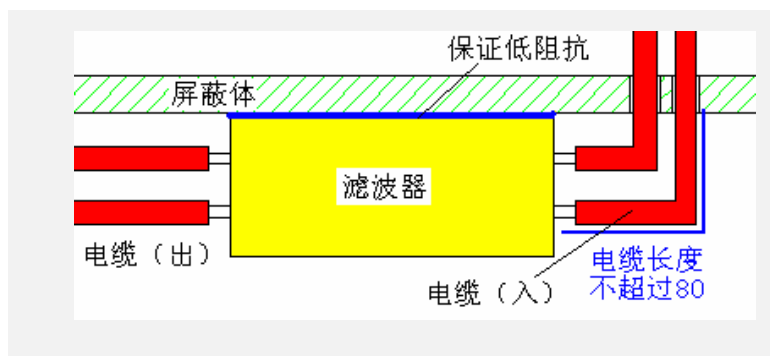


图7-31：滤波器的安装图

电源线不能EMI滤波器转接时，可以考虑直接进出屏蔽体，这时按照直接出屏蔽体的电缆处理，见7.9.5节介绍。如果可以使用屏蔽电源线，采用夹线或者屏蔽连接器的方式，请参见7.9.2和7.9.3节介绍。

F. 内部隔离设计

为了提高系统内部的兼容性，降低系统内部单板之间的干扰，需要考虑单板之间的隔离设计。单板之间的隔离并不是严格的屏蔽，不能按照一



般的屏蔽设计方法来进行设计。屏蔽设计更加注重屏蔽体的完整性，要求构成一个封闭的屏蔽体，屏蔽体是否接地与屏蔽效能并没有直接的关系。而隔离设计是利用金属导体隔离干扰源和敏感电路，增长电磁波的传输途径，由于电磁波是随着传输距离衰减，从而达到减小干扰的目的。隔离设计时隔离的金属导体必须接地。

典型的应用是8011产品中，由于单板之间潜在的干扰十分严重，因此将单板安装在金属板上面，插入插箱中，单板之间通过金属板实现了隔离的目的。金属板通过滑道、拉手条接地。

产品内部是否需要隔离设计，需要根据产品的需求来确定。公司大多数产品干扰并不严重，而且抗干扰能力很强，目前还没有隔离设计的需求。只有少数速率特别高的单板可能会有这方面的需求。随着通信产品集成度越来越高，工作速率越来越快，单板之间的隔离设计需求会日益显著。

G. 屏蔽效能裕量设计

上面分析了屏蔽体上面各种缺陷的屏蔽效能，包括各种缝隙、开孔、电缆穿透等。实际屏蔽体的屏蔽效能应该是这些缺陷对屏蔽效能影响的综合表现。根据6.3.4节的分析，屏蔽体的实际屏蔽效能一般取决于屏蔽体中屏蔽效能最差的哪一个缺陷。这就是屏蔽设计中需要保证每个缺陷均有足够的屏蔽效能的原因。

根据6.3.4节的分析，屏蔽体的综合屏蔽效能实际上比每个缺陷的屏蔽效能还要低，具体低多少分析起来十分复杂，工程实际中也没有必要知道准确的数据，可以用裕量设计的方法来保证屏蔽体最终有足够的屏蔽效能。

在选择屏蔽体的屏蔽效能指标时，屏蔽效能指标的默认含义是按照IEC61587-3的标准进行测试得到的屏蔽效能，而实际产品中辐射源的位置是不定的，往往干扰源离缝隙、开孔等各种缺陷十分近，已经是典型的近场屏蔽，其屏蔽效果与干扰源放置在机柜中间是有差异的。这种干扰源位置变化导致的屏蔽效能的变化规律有待进一步的研究，但是目前我们可以



用安全裕量的设计思想来避免，这就是7.1节中屏蔽效能指标需要留一定的安全裕量的根本原因。

另外，实际工程应用中，屏蔽设计实现起来总是与设计值之间存在一定的差异，最明显的就是批量生产时难以保证结构件的一致性，总是可能存在少数不可控因素导致屏蔽设计达不到预期的要求。特别是门缝隙这样的活动缝隙，实际安装中由于误差的原因，难以达到设计图纸规定的范围，从而实际屏蔽效能会有一定的降低。因此在选择屏蔽方案时，需要留一定的安全裕量来保证最终产品符合屏蔽性能要求。

综合考虑以上因素，结构件屏蔽设计时每个缺陷的屏蔽效能应该留5-10dB的安全裕量。对于活动的缝隙，应该选择裕量大一点，对于通风孔这样的固定缺陷，裕量可以选择小一点。

需要注意的是，本章7.4-7.9节中推荐的屏蔽设计具体数据已经考虑到了本节所述的设计裕量，实际设计中可以直接应用，或者根据产品的不可控因素再增加设计裕量。

I. 接地的基本理论

A. 接地的概念

接地，比较直观的就是接大地。实际上，接地是一个系统级的概念，接大地已经不能清晰地描述系统接地的概念了。为了清楚表达接地的概念，可以引用亨利·奥特的定义：“接地是为电流返回其源提供的低阻抗通道”。

对于不同的应用，有不同的理解，对于线路工程师来说，接地的含义通常是线路电压的参考点；对于系统设计师来说，它常常是机柜或机架；而对电气工程师来说，它却是绿色安全地线或接到大地的意思。

B. 接地的作用

设计中接地往往基于各种理由，例如电力配电、安全、信号综合、防雷、EMI 和静电放电等等。接地设计时，电流幅度和频率是两项关键因素，他们决定着接地应采用何种方式以及系统对接地质量要求的高低。根据接地需求的不同，接地的主要作用有：

Y 防雷接地

把可能受到雷击的物体和大地相接，以提供泄放大电流的通路称之为防雷地。这种接地的目的很明确，就是防止人及物体遭到雷击，这些物体可以是天线、大楼、电子或电气设备等。

由于雷电放电电流一般是脉冲性的大电流（可高达上百千安），其上升沿可达到微秒量级（1-10微秒，持续时间100微秒以下），因此要求防雷接地的接地阻抗要小。为了避免雷击电流引发机房设备之间的高电位差，要求设备之间特别是有电气联系或距离较近的设备进行低电感和电阻搭接。

Y 保护接地

保护接地就是为了保护设备、装置、电路及人身的安全。因此，在设备、装置、电路的底盘及机壳端一定要采取保护接地。因保护接地和人身安全相关，保护接地的方式在配电的标准规范中以及安全规范都有严格规定。

保护地主要用以保护工频故障电压对人身造成的危害，其保护原理是：通过把带故障电压的设备外壳短路到大地或地线端，保护过程中产生的短路电流使熔丝或空气开关断开。保护地的工频电阻要求较小，同时要求保护地的可靠性很高。从电源频率的角度来看，如仅对人身安全的保护接地而言，可以不对保护地提出低电感的要求。

Y 工作接地

工作地线是单板、母板或系统之间信号的等电位参考点或参考平面，它给信号回流提供了低的阻抗通道。信号质量很大程度上依赖于工作接地质量的好坏。由于受接地材料特性和其他技术因素的影响，接地导体的连接或搭接无论做的如何好，总有一定的阻抗，信号的回流会在工作地线上产生电压降，形成地纹波，对信号质量产生影响；信号越弱，信号频率越高，这种影响就越严重。尽管如此，在设计和施工中最大限度地降低工作接地导体的阻抗仍然是非常重要的。

Y 屏蔽接地

屏蔽接地是和结构息息相关的措施。电磁屏蔽时并不要求与大地连接，屏蔽结构接到大地上更多的是安全等方面的需要。

为了防止电磁辐射和干扰，系统设计中常采用结构屏蔽的方法。为了使结构有较好的屏蔽效能，要求对结构箱体的开孔尺寸有一定限制，特别是通风孔。但是电缆出线往往会破坏了这种屏蔽效能，因此要求电缆在出屏蔽体时与机柜连接。

Y 防静电接地

静电的危害是众所周知的，当人手触摸电子装备时，由人体附带的数



以千伏的静电电压，会对设备中的电子器件发生放电，虽然静电的能量不高，但产生的瞬时电流足够大，有可能造成电子器件的损坏。

人体产生的高电压静电通过没有接好大地的单板上安装的金属拉手条，会产生放电现象，如果单板上的电子器件绝缘处理的不好，瞬态“大电流”足以破坏绝缘造成单板上器件的永久性损坏。如果在机箱上装了防静电手腕，在人体触摸设备之前，通过防静电手腕把静电泄放到大地，以使人体和设备之间的电位相等从而达到保护的目的。

由于防静电接地大多针对人和设备，因此在人体和设备之间增加保护电阻（如防静电手腕中的电阻）防止机柜带电对人身造成的可能伤害，当然也可限制人体对地产生的静电泄放电流，从而起到保护设备的作用。

C. 搭接的概念

搭接指在两个金属物体之间建立一条低阻抗连接通路的工艺措施。由于通信产品十分复杂，接地的回路不可避免需要许多零件组成，这样各零件之间的搭接性能显得十分重要。搭接的重点是低阻抗的回路，低阻抗并不仅仅是直流电阻足够低，而是整个频段的阻抗均足够低，往往更重要的是高频段的低阻抗要求。

结构件往往是各种干扰电流、故障电流的回流通路，因此要求结构件是一个低阻抗通路，各有关零件之间应该搭接良好。典型的例子是机柜的门由于防静电和安全的原因，需要提供一个低阻抗回路，保证静电干扰和故障电流的回路，因此机柜的门与机架之间要有接地线。

D. 搭接的目的

搭接是给系统提供一个低阻抗通路，保证系统的性能不会受搭接点的影响。搭接性能的要求取决于实际需求中搭接的目的。综合起来，搭接的目的主要有：

- Y 基于防护的考虑，保护设备和人身安全，防止雷电放电的危害；
- Y 基于安全的考虑，建立故障电流的回路通路，防止产生危险电压；
- Y 基于信号质量的考虑，建立信号电流的均匀、稳定的通路；
- Y 基于电磁兼容的考虑，防止机箱、机柜壳体上的射频电位；
- Y 基于防静电的考虑，防止静电电荷的积累而产生危险电压。

这些目的的根本都是减小连接点之间的电位差。但是为了实现不同目的，搭接的性能要求是有差别的。例如为了防静电，允许有 $50\text{k}\Omega$ 的搭接阻抗；而为了安全和防护的要求，搭接阻抗必须小于 0.1Ω 。实际设计中应该根据不同的需求确定搭接的性能要求，再根据搭接性能要求确定搭接的实现方案。

为了保证搭接性能，除了有低阻抗的要求之外，还必须注意搭接部位有足够的连接强度，搭接部位不会产生不能接受的电化学腐蚀。还有就是搭接可靠，没有产生松动的潜在危险。这些均是搭接的具体实现中应该注意的细节，其性能的优劣与具体设计方案有关。



II. 搭接接地设计

A. 搭接设计基本原则

搭接设计的基本原则是保证结构件自身以及结构与地系统之间良好的电连续性，并提供足够低的阻抗（从直流电阻到高频阻抗），实现结构件的等电位连接。结构件的这种等电位连接对系统的安全性和电磁兼容性，甚至产品的正常工作均有十分重要的影响。在产品的设计初期，结构设计人员就应该重视搭接设计，保证各零件之间的等电位连接。

B. 搭接设计要求

1. 搭接设计基本要求

要 保证搭接面具有良好的导电性

一般要求结构件连接表面和电缆连接端子应该是导电的或者经过导电处理的。目前常用的不锈钢材料，铜合金，钢板镀锌钝化、镀镍处理，铝板导电氧化处理，接线端子表面镀锡处理等均符合要求。如果结构件表面由于到其他方面的需求而必须进行喷漆处理（或者其他绝缘处理），这时尤其要注意保证搭接面的导电性能，例如喷漆保护。

由于工艺条件的限制，在产品设计中，搭接面的表面处理措施往往已经根据其他方面的需求确定下来了，因此一般不单独对搭接面的导电性能提出具体的指标要求。引进新的表面处理工艺时，必须保证新的处理工艺在导电性能方面不比现在的成熟工艺差。

要 保证搭接面的清洁干净

为了保证搭接面的导电性能，搭接面必须清洗干净，保证无灰尘、油

膜、油漆、氧化层、阳极氧化膜，以及其他非导电材料。当结构件采取喷漆处理时，尤其需要注意可靠的喷漆保护，搭接面不能有任何油漆，因为那怕是一点点油漆也将导致搭接性能的急剧劣化。

要 保证搭接面可靠接触

一般只允许采用面接触的形式实现搭接，原则上禁止通过螺纹、铆钉等方式实现搭接。尤其是螺纹喷漆后，螺钉的电连接性是依靠意外来实现的，十分不可靠。新的连接方式，例如破漆垫片等，需要经过实验验证才能使用。

要保证搭接面是接触在一起，尤其是铆接时需要注意这一点，因为铆接往往很难保证接触面的可靠接触。有相对运动的零部件不得依靠导轨、销轴等活动连接方式进行搭接，必要时可以通过接地电缆实现搭接。

要 保证搭接面有足够的紧固力

对于单点搭接，可以采用螺钉、焊接等紧固方式，原则上限制采用铆接的形式。采用螺钉连接时，必须采用M5或者更大的螺钉连接，螺钉的紧固力应符合现有工艺文件规定的扭矩要求。另外，螺钉应有防松装置，保证不会脱落。

对于多点搭接，一般的结构方案均能够满足要求，对连接形式不再做具体要求。

要 有足够的接触面积

对于单点搭接，要求搭接面直径大于 $\Phi 15\text{mm}$ 。

对于多点搭接，一般的结构方案均能够满足要求，对连接形式不再做具体要求。

要 防止搭接点产生电化学腐蚀

搭接面采用不同材料配对时，将可能会产生电化学腐蚀，这种电化学腐蚀显然将对搭接性能有巨大的影响。由于这种影响是产品检验中难以发现的，存在一定的隐蔽性，所以设计方案中需要注重材料配对的选择，在



方案阶段就保证不会发生电化学腐蚀。

目前常用的材料配对中，钢板镀彩锌以及电解板与接线端子镀锡、铜排镀镍、铝合金导电氧化等材料之间的接触是符合要求，不会发生电化学腐蚀。但是铝合金导电氧化与接线端子镀锡、铜排镀镍之间在较恶劣环境下将有可能产生轻微的电化学腐蚀，考虑到目前的实际应用需求，允许继续使用，但是需要保证其应用的工艺，并尽可能避免使用这些配对形式。

其他类别的材料配对是否能够使用请参考相关的工艺文件，确认不会产生电化学腐蚀。

其他特殊要求

原则上搭接点的紧固不得使用自攻螺丝。特殊场合下必须使用自攻螺钉时，要保证维护时不需要拆卸该螺钉。

2. 结构件之间的电连接

对于机柜类产品，一般以机架（围框、立柱等组成）作为搭接的参考地平面，而其他产品一般以金属外壳作为搭接的参考地平面。除参考地平面之外的其他的金属结构件一般均应该与参考地平面搭接，实现等电位连接，例如门、侧门、内部插箱、电源盒、走线槽等。

机架内部的结构件是否需要搭接在一起的原则为：所有可能引起危险电压金属零部件必须与参考地平面搭接，除非本文另有规定。

理论上，如果结构件与参考地平面之间有足够的绝缘强度在某些应用场合下面也是符合要求的。为避免引起混乱，简化设计原则，建议一般的结构件均应与参考地平面之间可靠搭接。

对于快卸锁、门锁（不包括锁杆，锁杆应该保证可靠搭接）、外部装饰条等小零部件，一般可以不接地。除非有证据表明对系统有明显影响。

走线槽如果是金属件，由于可能会对线缆中的信号产生影响，必须与



机架可靠连接。

C. 搭接电阻

1. 搭接电阻的应用

在产品设计中需要注意搭接电阻（即直流搭接电阻）的正确应用。搭接性能是由搭接点的直流电阻至高频阻抗的综合性能决定。由于高频阻抗在测试上面存在特殊性，不适合用于常规测试。一般产品检验中只能提出直流搭接电阻的要求。

对于同样的搭接形式，其直流电阻与其高频阻抗有一定的对应关系，因此通过比较直流电阻基本上能够反映搭接的性能。规定直流搭接电阻也有利于促使设计人员中提高工艺措施，保证工艺规范的实施，从而提高搭接的可靠性。

总之搭接的性能主要由搭接的具体形式来保证，需要设计人员根据本规范中的具体要求，在产品方案中体现搭接设计的需求。而规定搭接电阻对保证搭接的可靠性，比较同一种搭接形式实施以后性能的优劣具有重要的意义。

2. 搭接电阻值的规定

搭接电阻值的大小关系到系统各方面的性能，规定搭接电阻值关系到许多方面的需求，下面从不同角度分析搭接电阻的取值，从而得出一个综合的结论。

首先，从防静电的角度看，搭接电阻小于 $50\text{k}\Omega$ 就已经足够。这个电阻值显然是太大了，因此我们可以暂不考虑防静电方面的需求。

其次，从防护的角度看，当然是越小越好。根据GJB1210的规定，信号地线的搭接电阻必须小于 $0.1\text{m}\Omega$ ，这个值是考虑到恶劣环境中防护方面的



需求而确定的。但是，实际上在《舰艇电子装配抗恶劣环境设计要求实施指南》中，这个电阻值已经放宽到 $2\text{m}\Omega$ 。放宽的根本原因是要实现 $0.1\text{m}\Omega$ ，费用将急剧上升。显然，通信产品中不能按照军标的要求进行设计，因此 $2\text{m}\Omega$ 的电阻还可以继续放宽。

还有，根据安全方面的考虑，IEC60950中规定小于 $100\text{m}\Omega$ （额定电流小于 16A 的设备）。

另外，根据GJB/Z25-91《电子设备和设施的接地、搭接和屏蔽设计指南》中规定，为了降低结构件上面的电流噪声，要求屏蔽体提供小于 $50\text{m}\Omega$ 的通路电阻。

最后，从可靠性角度看，提出较低的搭接阻抗，就必须保证清洁表面、保证足够的搭接面积和接触力，从而将腐蚀等其他因素导致搭接阻抗降低的程度减至最低，从而提高搭接设计的可靠性。因此在经济性条件下应提出尽可能低的搭接阻抗。

从应用角度看，在实际产品应用中，按照4.2.1节要求，一般结构件通过M5螺纹连接，保证直径大于 15mm 的搭接面积，比较容易实现小于 $10\text{m}\Omega$ 的搭接电阻。

而且，实际上不能仅仅用搭接阻抗来衡量系统接地的性能，因为在实际的地系统中地线的感抗在高频电路中诱发的干扰将远远大于搭接电阻造成的危害，没有必要让搭接阻抗比连接体本身的固有阻抗还小得多。

总之，根据上面的分析，综合考虑公司现有生产能力以及经济性要求，可以得出搭接电阻的指标要求为：

任意两个有搭接要求的零部件之间搭接电阻不大于 $50\text{m}\Omega$ 。

该连接电阻包括：一个机柜（或子架、机箱等）内部任意两个结构件之间的电阻、结构件与电缆屏蔽层之间的电阻、连接器与结构件之间的电阻、滤波器外壳与结构件之间的电阻等等。

考虑到时效性的影响，对于装配完3-6个月的产品，上述指标应再放宽



30%，即不大于 $65\text{m}\Omega$ ；对于装配完6个月以上的产品，上述指标应放宽60%，即不大于 $80\text{m}\Omega$ 。

对于结构件自身电连续性，只要符合上面的规定即可，即任意两个有搭接要求的零部件之间电阻小于 $50\text{m}\Omega$ ，不对每一个搭接部位的电阻值进行规定。一般检验时应选择最不利的情况进行检测，并充分注意检测仪器电极本身电阻值的影响。另外，测试点不应该是没有搭接要求的零部件，也包括屏蔽材料。关于屏蔽材料的搭接性能见下节分析。

D. 搭接与屏蔽

结构件的屏蔽性能与搭接之间有十分密切的关系，结构件良好的电连续性是实现屏蔽的基础。搭接设计中除考虑屏蔽的要求之外，同时也考虑了安全、防护等方面的需求，搭接性能要求往往要比屏蔽性能的要求更加严格。因此，屏蔽材料的搭接阻抗并不一定能够满足搭接性能的指标要求，其中导电布、导电橡胶、金属丝网等类屏蔽材料的搭接电阻肯定会超过9.3.2节中规定的数值，但是屏蔽材料本身并不会对系统产生劣化作用，可以认为还是合格的。这也是规定测试结构件整体连续性时测试点不应该包括屏蔽材料的原因。

结构件之间不能仅仅依靠导电布、导电橡胶、金属丝网等类别屏蔽材料实现搭接，应采用其他辅助措施，如螺钉连接、接地线等。但是如果用簧片、螺旋管等纯金属类材料，则仅用这种材料实现搭接是允许的，而且一般均能够满足要求。例如机柜的侧门与机架之间如果是用导电布材料屏蔽，并无其他可靠的电连接，则应该考虑采用接地线实现搭接；如果使用簧片材料屏蔽，而且正常状态下侧门是不打开的，则不需要再用接地线，因为通过簧片搭接比接地线要好得多。

另外，接地线以及其他类别的搭接条不能直接穿过屏蔽体，以免由于线缆辐射而破坏屏蔽的完整性。如果一定要穿过屏蔽体，则在进出屏蔽体时应与屏蔽体可靠搭接（面接触或者多点连接）。

E. 搭接设计的具体实施方案

本节以机柜为例，说明结构件中搭接设计的实施方案。一体化机箱，盒式结构的搭接设计相对比较简单，可以参照机柜的搭接形式，保证结构件的电连续性。

1. 机柜的搭接设计

机架作为搭接的参考地平面

良好搭接的机架是一个理想的参考地平面。机架一般由围框、立柱等部分组成。

围框和立柱通过螺钉连接（或者焊接），注意围框与立柱的接触面必须是导电处理的（铝合金导电氧化处理等）。

盖板与围框之间采用螺钉多点连接，并保证盖板与围框之间接触面是导电处理。因为盖板上面往往会安装滤波器、出线装置、接地铜条等，一般建议盖板采用钢板镀彩锌处理，不要喷漆。

方孔条最好直接与立柱连接，或者通过支撑条与立柱连接。机柜内部插箱、模块一般均通过方孔条与机架这个地平面连接，因此方孔条的搭接需要足够重视。要求方孔条与立柱之间采用多点连接，每个搭接面保证是导电的。一般建议方孔条直接采用钢板镀彩锌或者铝合金导电氧化处理，不要再喷漆。

通过上述方式，能够保证机架本身是一个良好的等势体，作为搭接的参考地平面。

柜门和侧门的搭接

门、侧门与机架之间可以通过接地线搭接。一般建议在门、侧门上面焊接接地螺柱，围框上对应位置开螺孔，通过接地线连接。并且接地线采

用螺钉固定时一定要加弹垫和平垫，保证良好的、可靠的电气连接。

对于屏蔽机柜，门和侧门之间是否需要接地线按照以下原则处理：

如果在正常工作情况下，门和侧门是可以打开的，则必须加接地线，以保证可靠的连接。

如果门和侧门与机架之间的屏蔽材料是采用导电布、金属丝网等电阻比较大的材料，无论门、侧门是否会打开，均需要接地线，因为通过这些屏蔽材料的搭接是不够的。

如果在正常工作情况下，门、侧门是不打开的（典型的有机柜侧门、基站的后门），而且与机架之间的屏蔽材料是采用簧片、螺旋管等纯金属材料，则没有必要再加接地线。

2. 插箱、模块的搭接

机柜内部的插箱、模块本身必须保证良好的电连续性。模块、插箱一般通过挂耳与方孔条连接，从而与机架之间实现良好的搭接。注意挂耳与方孔条之间必须是面接触，在采用浮动螺母时，挂耳或者方孔条上面应该有合适的开槽，防止挂耳与浮动螺母只是线接触而并没有与方孔条之间可靠搭接。

插箱、模块内部PCB上面的PGND应该通过安装螺钉与拉手条连接，拉手条再通过螺钉、铆钉等可靠的搭接方式与横梁、侧板、挂耳连接。背板上面的PGND应该通过安装螺钉与横梁连接，并通过螺钉、铆钉等可靠的搭接方式与侧板、挂耳连接。背板上PGND至电源盒或者机柜顶部的PGND电缆仍然可以保留。

拉手条与横梁之间不能依靠扳手实现搭接，必须采用螺钉连接。

3. 并柜时机柜的搭接

并柜时机柜之间可以通过机柜顶部的并柜连接板实现搭接，并不再需要机柜之间PGND连接电缆。并柜连接板与围框之间的接触面必须是导电处理，并柜连接板与围框之间通过螺钉可靠接触。在工程安装说明书中应注明并柜连接板的搭接作用，必须安装。

如果机柜并柜时采用导线将两个机柜汇流条的PGND、或者机架连接起来，实现两个机柜的等电位，就没有必要采用并柜连接板来实现两个机柜的搭接。

4. 外部接地线与机柜的搭接

一般在机柜的盖板上面安装一个铜条接外部接地线。铜条直接与盖板螺钉连接，连接螺钉不少于3个。铜条折弯部分伸入机柜内部，与配电盒的PGND端子相连。机柜结构件通过本身的搭接与铜条相连，同时机柜内部可安装一个铜条作为PGND的参考地，并与机柜顶部的铜条相连。

5. 滤波器的接地设计

根据应用场合不同，滤波器可以分为电源滤波器和信号滤波器。

根据滤波器的频率特性，滤波器又可以分为低通、高通、带通、带阻等种类。不同种类的滤波器用于滤除不同的干扰。

当干扰频率较高时，使用低通滤波器，当干扰频率较低时，使用高通滤波器，当信号频率的带宽较窄，而干扰的带宽较宽时，使用带通滤波器，当干扰信号的带宽较窄时，使用带阻滤波器。

电源滤波器属于低通滤波器，在电磁兼容领域，低通滤波器是使用最普遍的，因为大部分电磁干扰的频率都较高。特别是在数字电路中，减小

干扰的一个主要方法是减少脉冲信号的高次谐波。这是靠低通滤波器来实现的。

电缆直接穿透屏蔽体会降低屏蔽性能，是因为屏蔽机箱内的干扰通过空间感应到电缆上，在电缆上产生了电流，这个电流流到机箱外部，并产生二次辐射，导致设备产生超标辐射发射。同样，机箱外部的电磁波干扰感应到电缆上，在电缆上产生的电流流进机箱，产生二次辐射，对机箱内的电路造成干扰，如图9-1所示。也就是说电缆成了一根高效的电磁波接收和发射天线。解决这个问题的最有效方法是在电缆的端口上安装滤波器。

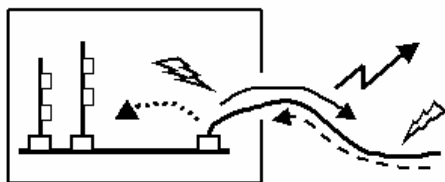


图9-1 无滤波器的情况

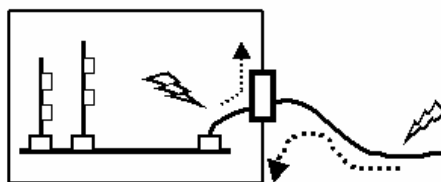


图9-2 安

装滤波器的情况

图 9-2表明了安装滤波器后的情况，这时屏蔽体内感应的噪音电流可以通过屏蔽体的内壁回流，屏蔽体外感应的噪音电流通过屏蔽体的外壁、接地线回流。这样滤波器就起到了内外电磁环境隔离的效果，也是为什么要求滤波器一定要与箱体良好搭接的原因。

必须保证滤波器与屏蔽插箱壳体之间有良好的导电连接，如果滤波器与箱体之间搭接阻抗很大，噪音电流就不能通过通过箱体回流，而是流向外部电缆，造成对外的辐射干扰。根据9.3.2节的规定，滤波器与箱体之间的搭接电阻不应大于50mΩ。

普通电源滤波器通过2~4个螺钉与箱体连接，馈通滤波器则通过本身自带螺母与箱体连接，这些连接方式只要保证足够的压紧力、良好的导电接触面积，搭接阻抗都能满足要求。

对于信号滤波连接器，一般通过其两端的螺钉将连接器压紧在插箱箱体上。如果产品测试表明信号连接器的搭接阻抗不满足要求，可以在连

接器与箱体之间加导电衬垫，导电衬垫可以根据连接器的形状定制。对于一些常用DB头连接器的导电衬垫，可以直接采购。

对于交流供电设备中的交流滤波器，或者交流插座，要求滤波器和插座的PGND线与箱体就近搭接，搭接阻抗要满足9.3.2节中规定的要求。图 9-3是一个交流滤波器插座。

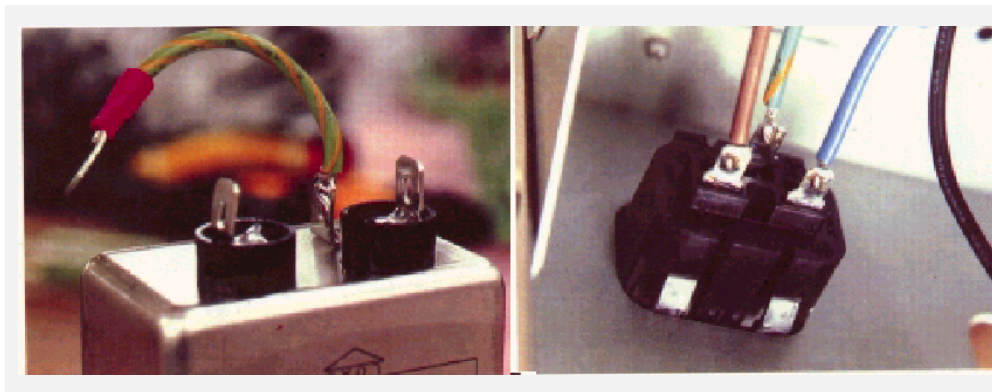


图 9-3 交流滤波插座

9.5.6 接地线

机柜与机房地之间的接地线应该使用足够粗的电缆（具体要求见本规范其他部分的规定），电缆颜色推荐为黄绿线。该接地线与机柜之间通过M8或者更大的螺钉连接。建议在机柜顶部安装铜条，接地线连接到铜条上面。

结构件内部为实现搭接，活动连接时允许使用接地线连接，例如门与机架之间的搭接。该接地线应该使用大于 4mm^2 的电缆。该接地线的连接螺钉建议使用M6，并使用公司统一的组合螺钉和接地螺柱（带台阶）。当有其他条件限制，必须使用更小的螺纹时，螺纹大小应该符合下表规定：

| 设备额定电流（A） | 最小螺纹直径（mm） |
|-----------|------------|
|-----------|------------|



| | |
|----------|---|
| 16 | 4 |
| >16 ~ 40 | 5 |
| > 40 | 6 |

9.6 典型错误搭接方法

Y 插箱与机架之间通过滑道搭接

某产品中插箱与机架之间通过安装滑道实现搭接。由于这种搭接并不能保证可靠的接触，特别是安装面由于磨损十分容易生锈导致搭接失效。正确的做法应该是通过方孔条搭接。

熨喷漆保护不良

某产品拉手条全部喷漆，与插箱之间的接触面根本不能电连接，只能通过松不脱螺钉实现搭接。正确的做法是接触面应该保护，不能喷漆，而且不能在保护面内由于存在开孔导致保护不彻底，存在油漆痕迹。

熨铝合金阳极氧化处理后搭接

某产品中，拉手条是阳极氧化处理的，与子架之间不能根本没有电连接，只是通过松不脱螺钉实现搭接。正确的做法应该是采用导电氧化处理。

熨门与机架之间依靠门轴搭接

某机柜中门与机架之间仅仅通过门轴实现电连接，设计人员还振振有辞地说用万用表量了之后是通的。实际上这种搭接是不可靠的，正确的做法应该是用接地线连起来。

熨传输子架与机柜之间用M3螺钉接电缆

传输某个产品中子架与机柜之间用电缆连接，实现搭接，连接时用的螺钉为M3。首先子架与机柜之间用电缆搭接是不可取的，因为通过结构件实现搭接比电缆要可靠得多。另外，用电缆连接时螺钉也太小，必须用M5



以上得螺钉。

某标准机柜后方孔条用于扎线，没有接地

某标准机柜后方孔条没有接地，而该方孔条又用于扎线，存在潜在的
安全隐患。正确的做法应该是后方孔条与机架之间多点接地。

I. 屏蔽性能测试

A. 机柜/子架的屏蔽效能测试

1. 测试原理

机柜/子架的屏蔽效能测试按照标准IEC61587-3规定的方法进行。测试环境、测试条件、测试设备的设置以及测试程序除本规范另行规定之外，均直接遵守IEC61587-3的规定。IEC61587-3 标准原文请查询文档室资料。

IEC61587-3 标准中规定了测试的频段为30-1000MHz。考虑到通信产品的实际需求，在实验室条件许可的情况下，允许将测试频段扩展到4GHz。需要注意在1 - 4GHz范围内球形偶极子天线应有足够的发射功率，接收天线符合IEC相关标准规定。

2. 测试布局

测试布局如图10-1至10-2所示。参考测试时，球形偶极子天线放置在测试台上面，接收天线测试偶极子天线发射出来的信号强度。最终测试时，球形偶极子天线放置的机柜/子架内，接收天线测试测试经过偶极子天线经过机柜子架屏蔽后的信号强度。将前后测试信号相减就得到了屏蔽效能。

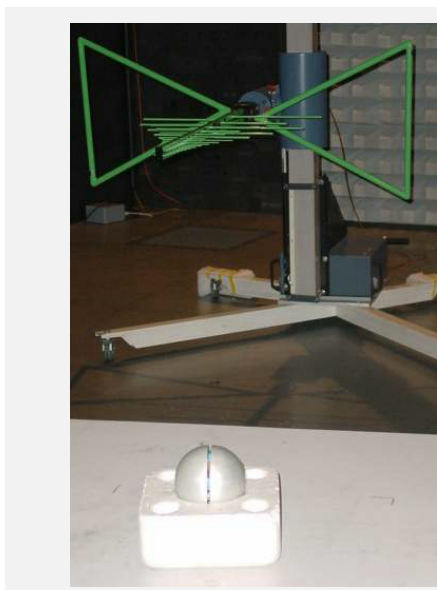


图10-1：参考测试布局图

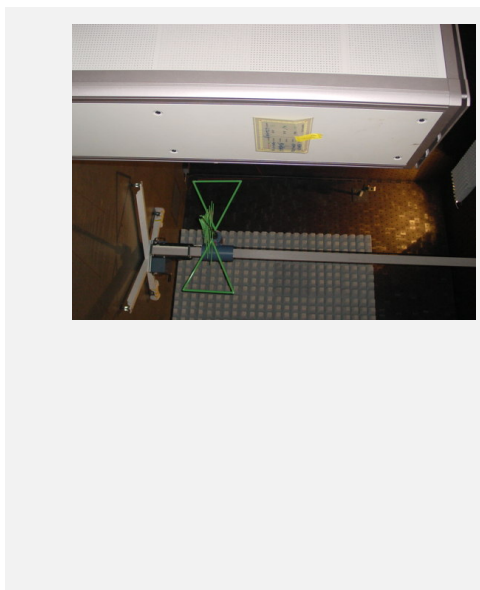


图10-2：最终测试布局图

3. 被试件条件

被试结构件应该安装齐套，带全部的屏蔽材料和正常使用状态下所有的结构件，并保证与最终使用状态尽可能一致。一般内部不安装单板，可以用等效的假拉手条和假面板保证屏蔽体的完整性。

测试天线放置在机柜/子架内部时，必须保证天线周边100mm的净空间，特殊情况下至少要保证无导电物体，以免由于近场效应影响天线的正常性能。因此，被试件内部至少应该有300mm净空间，小于这个要求的结构件不能进行测试。举例：测试插箱时必须是6U以上的插箱，对于2U这样的小盒子无法按照这个标准进行测试。

测试机柜时原则上应将机柜内部的子架、模块拆除，但是不能破坏机柜的屏蔽完整性。特殊情况下允许保留内部模块，但是必须保证上面规定了100mm净空间的要求，以免干扰天线的正常性能。

4. 测试报告

测试报告中至少应包括被试件的描述和一个表格，表格中有参考测试、最终测试以及屏蔽效能的数据，水平极化和垂直极化的数据均需要列出。测试报告中还应包括屏蔽效能的曲线，测试结论。测试报告应采用统一的模板。模板形式另行规定。

5. 排除谐振点

根据IEC61587-3的规定，屏蔽效能测试结论中，如果有证据表明该频点是谐振点，则可以排除这一频点的数据。由于在实际产品中，机柜/子架内部是安装了单板、电缆以及内部结构件，电磁波是无法象空机柜/子架那样发生谐振的，这就是标准中规定排除谐振点的原因。

谐振点可以通过计算公式来确定，具体计算方法如下：

$$f = 150 \% \sqrt{\left(\frac{m}{A}\right)^2 + \left(\frac{n}{B}\right)^2 + \left(\frac{l}{C}\right)^2}$$

f ：谐振频率，单位MHz

$m, n, l = 1, 2, \dots$ ，注意最多只能有一个为0

A, B, C ：机柜/子架内部净空间的长、宽、高，单位m。

这样 m, n, l 分别取不同的值，就可以得到一系列的谐振频点。

计算出来的谐振点往往不是十分准确，特别是到高频段，谐振点越来越密，根本无法判断是否是由于谐振影响了最终测试结果。在实际测试中可以用吸波材料的方法来验证谐振点。具体操作方法为：

- i. 谐振点会导致屏蔽效能急剧降低，找出这样的点，并对比计算的谐振点是否比较接近，初步判断是否可能是谐振点。
- ii. 在机柜/子架内上面或者下面加一块大的吸波材料，将这个面盖起来，从而破坏机柜内部的谐振状态，重新测试怀疑频点的屏蔽效能。
- iii. 对比加吸波材料前后的屏蔽效能，如果屏蔽效能提高10dB以上，则可以认定这一点是谐振点。

由于加吸波材料后对结构件屏蔽效能并不会有明显的改善，一般允许使用加吸波材料后的数据作为这一点的屏蔽效能，但是应该在测试报告中注明。

6. 测试结论

将测试的屏蔽效能数据与设计指标相比较，就可以得出机柜/子架是否满足设计要求，并在测试报告中说明。

由于屏蔽效能测试存在太多的不确定因素，屏蔽效能测试误差较大。国外研究文献表明，即使严格按照IEC61587-3标准规定进行，测试误差最

大可能达到6dB。因此规定，如果所有测试频点中90%以上的频点均超过设计指标要求，而且最低点不小于设计指标6dB，则可以认定机柜/子架达到设计指标要求。

B. 开孔和缝隙的屏蔽效能测试

根据上节阐述的机柜/子架屏蔽效能测试方法，我们可以得到结构件作为一个整体的屏蔽效能。这个屏蔽效能是结构件上面各种缺陷（例如开孔、缝隙等）的综合体现，一般取决于屏蔽效能最差的那个缺陷。机柜/子架测试完以后，可以采用近场探头对策的方法定位出来最差的缺陷。但是，机柜/子架的屏蔽效能并不能反应其他缺陷的屏蔽性能。另外，在产品的设计初期，对于结构件屏蔽体上面各种缺陷的屏蔽性能需要有一个评估，保证其屏蔽性能满足设计要求。但是也不能设计过头，屏蔽性能太好了，导致影响其他方面的性能。

为了单独评估各种缺陷的屏蔽效能，依据MIL-G-83528、IEEE299-1997、GB12190标准规定的方法，对各种开孔和缝隙等局部缺陷进行屏蔽效能测试。

1. MIL-G-83528 的测试方法

a) 测试原理

根据标准MIL-G-83528的规定，在屏蔽室上面开610mm的方孔（标准原文为24英寸24英寸）。在方孔上面安装一个盖板，模拟实际情况中开孔、缝隙的工作状态。首先在开阔场中标定发射天线和接收天线，在保持同样工作状态的条件下测试加上盖板后接收天线的信号，与标定值相比较可以得到盖板上开孔和或者缝隙的屏蔽效能。具体原理见图10-3所示。

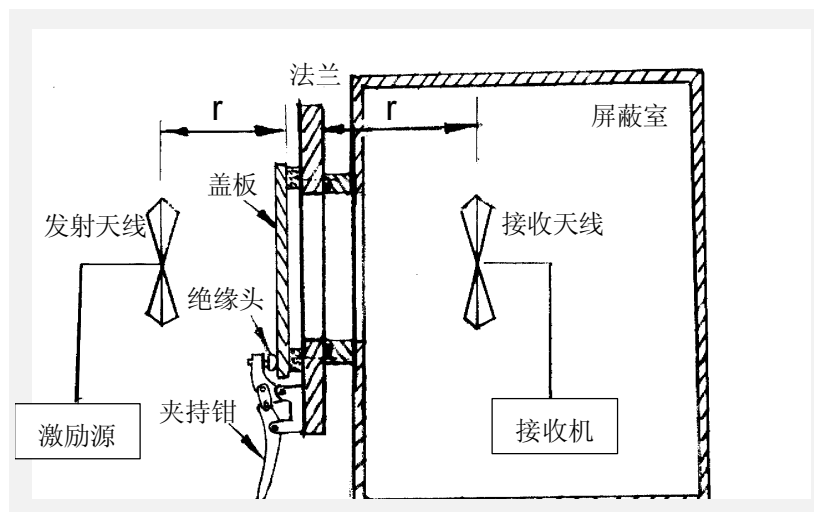


图10-3: MIL-G-83528测试原理

关于MIL-G-83528的详细测试方法请查阅文档室资料中的标准原文。

b) 测试布局

实际应用中参考测试如图10-4所示，接收天线和接收机放置在屏蔽室内，信号源、放大器、发射天线位于屏蔽室外部。调整信号源的功率，保证接收机上面接收到的信号有足够的动态范围。这种参考测试的布局与标准规定的开阔场标定方式有一定差别，但是由于测试频段高，有数据已经表明这种影响并不明显。

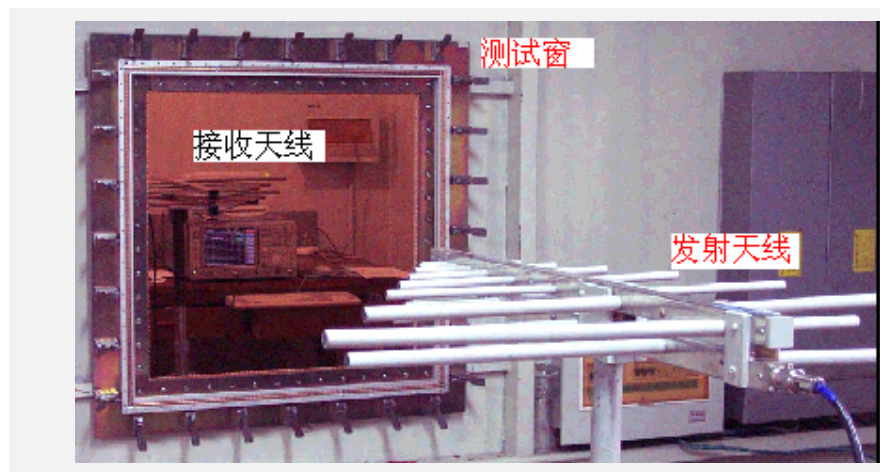


图10-4: 测试总体布局

参考测试完之后，保持接收天线、发射天线不变，将试件安装在测试窗上面，进行最终测试，具体如图10-5至图10-6所示。再读接收机上面的数据，为最终测试数据。将前后两个数据相减，就可以得到屏蔽效能。



图10-5：发射部分布局



图10-6：接收部分布局

实际测试中最好能够直接用接收机的信号源驱动发射天线，用跟踪信号源的方式扫频测试，这样效率十分高。但是需要注意将接收机的信号从屏蔽室中引出来时应该有足够的屏蔽效果，以免影响测试结论。

c) 测试频段

测试频率包括磁场和电场，可以测试9KHz - 30MHz的磁场和30MHz -



18GHz的电场。需要注意的是保证测试频段范围内屏蔽室、法兰、盖板等其他缝隙的屏蔽效能足够，不影响测试的结果。

按照结构件屏蔽效能测试要求，我们一般只测试30 - 1000MHz或者30 - 4000MHz这个频段，具体取决于测试条件。

d) 天线的位置

标准推荐按照1米法的测试方法进行，发射天线和接收天线与被试件之间的距离为1米，即上原理图中 $r = 1$ 米。

发射天线正对盖板的中心。接收天线应该测试三个位置，分别为正对盖板中心、左右旋转45°，并保持接收天线与盖板的距离为1米。记录三个位置的最大值。

2. 华为公司测试方法

a) 测试原理

MIL-G-83528标准规定的测试方法需要有专门的屏蔽室，且在屏蔽室上面开孔，公司并不具备这样的条件。根据标准GB12190推荐的方法，参照标准IEC 61587-3测试机柜/子架的屏蔽效能测试方法，用一个小屏蔽测试箱代替屏蔽室。

屏蔽测试箱如图10-7所示：

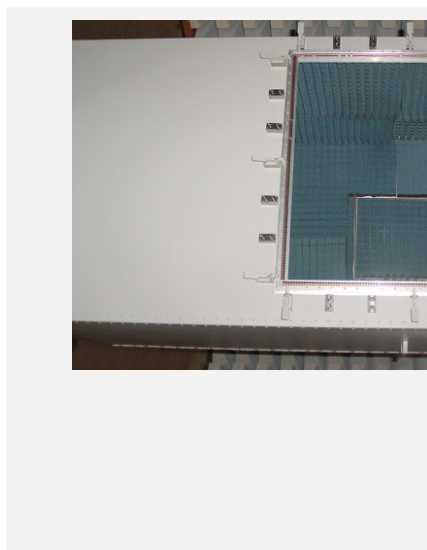


图10-7：屏蔽测试箱外观

屏蔽测试箱正面开610mm的标准方孔，为安装盖板，孔上面安装了一个法兰，并在法兰外部安装了一定数量的夹持钳，用于压紧盖板。测试时完全按IEC61587-3规定的方法测试盖板上开孔或者缝隙的屏蔽效能。发射天线为球形偶极子天线，放置在屏蔽测试箱内部。接收天线和接收机使用产品EMI/EMS测试时用的天线和设备，测试环境为半电波暗室。测试原理图如图10-8所示：

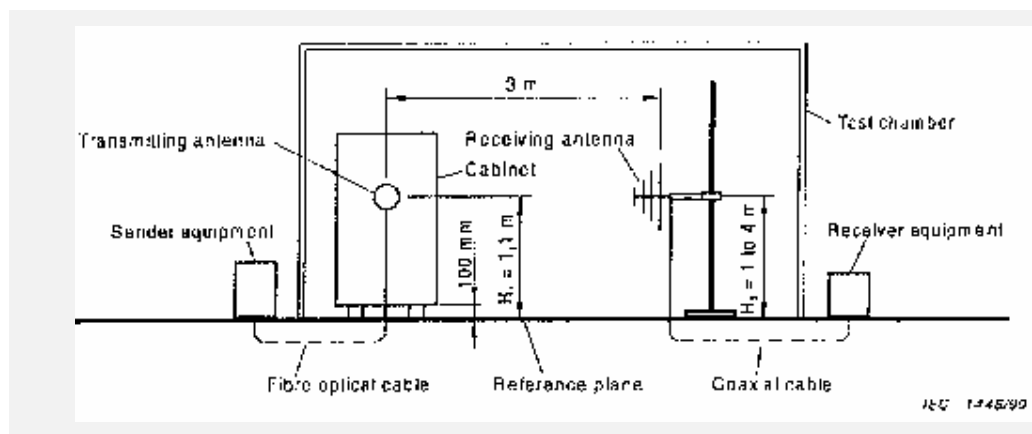


图10-8：测试原理图

屏蔽测试箱本身的屏蔽效能，以及测试箱上面安装法兰以及与盖板之间的缝隙应该有足够的屏蔽效能，以免影响测试结果。要求屏蔽测试箱以

及与安装法兰的屏蔽效能在整个测试频段的屏蔽效能高于被试件屏蔽效能20dB。

通过比较上节内容和本节介绍的两种方法可以发现，采用公司的测试方法——屏蔽测试箱的测试方法与MIL-G-83528规定的测试方法有一些区别。采用屏蔽测试箱的方法更加接近产品的实际应用情况，而且已经有测试数据（请查阅与东南大学合作项目的结果分析报告）表明两种测试方法之间测试结果的差别在误差范围之内，是可以接受的。因此公司采用屏蔽测试箱的方法替代MIL-G-83528的测试方法。

b) 测试布局

测试布局如图10-9至10-10所示。参考测试时，球形偶极子天线放置在测试台上面，接收天线测试偶极子天线发射出来的信号强度。最终测试时，球形偶极子天线放置测试箱内，接收天线测试测试经过偶极子天线经过开孔或者缝隙屏蔽后的信号强度。

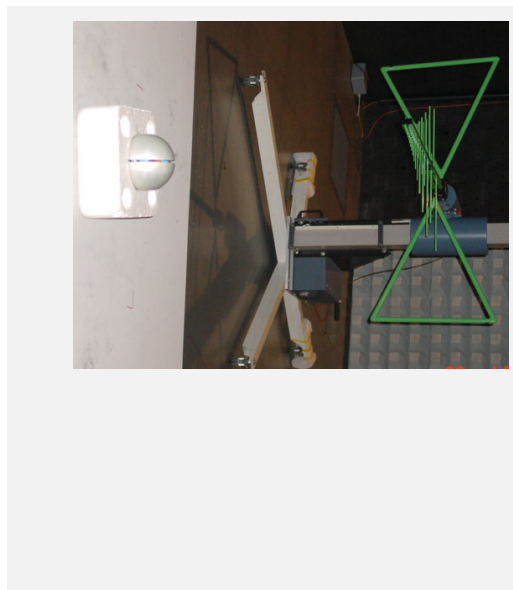


图10-9：参考测试布局图

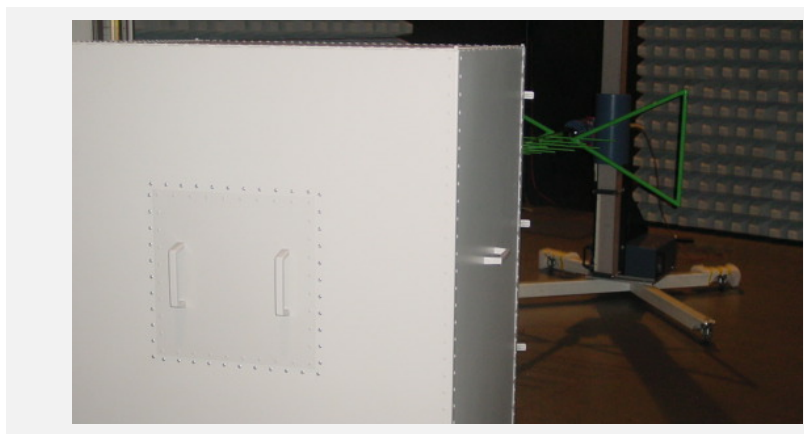


图10-10：最终测试布局图

c) 测试频段

由于采用球形偶极子天线，测试频段为30MHz - 1000MHz。如果测试系统条件许可的话，允许扩展到4GHz。

d) 测试过程

测试中测试仪器、天线、测试布局以及测试步骤、测试结果均按照机柜/子架屏蔽效能测试方法（即IEC61587-3标准方法）进行，详细见10.1节规定。

C. 屏蔽材料的屏蔽性能测试

1. 屏蔽材料的导电性能测试

屏蔽材料的导电性能一般用材料的直流电阻来衡量。关于屏蔽材料电阻的测试方法请直接查阅DKBA0.460.0030《屏蔽材料导电性能测试规范》。

2. 屏蔽材料的转移阻抗测试

a) 测试原理

屏蔽材料的转移阻抗是根据标准ARP1705规定的测试方法,是以电路的概念来衡量屏蔽材料的电场屏蔽性能好坏。它指在信号源激励下,屏蔽材料的夹持面板间感应的电压与流经材料的单位电流之比。标准ARP1705原文请查阅文档室资料。

根据ARP1705的原理,转移阻抗的测试装置基本结构形式如下图所示:

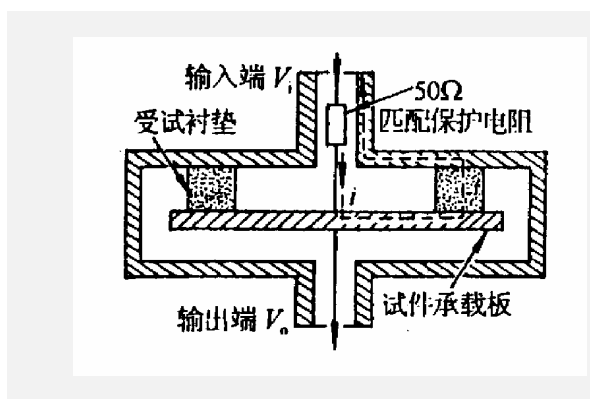
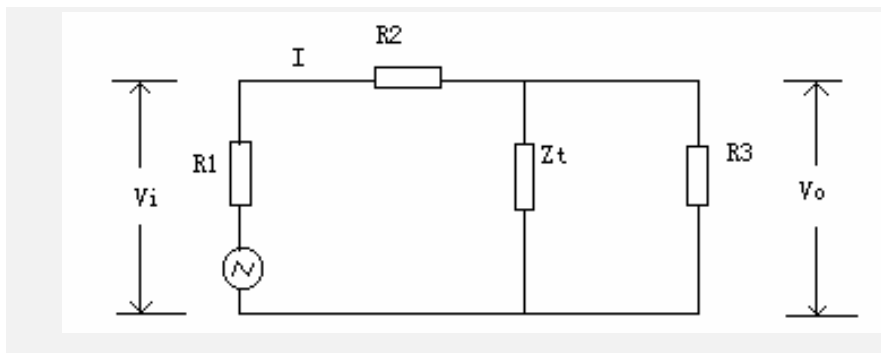


图10-11：转移阻抗测试装置结构形式

测试过程中需要测试试样处于一定的压缩状态下,实际测试装置中还需要压紧机构,并需要检测材料上面的压紧力以及材料的变形量(即承载盘的位移)。该测试装置在美国Spira公司有商品出售,国内东南大学电磁兼容研究室也研制了同样的装置。

从测试装置的结构示意图可以看出,激励信号在输入端通过一个 50Ω 的匹配保护电阻输入到试件承载盘,然后到输出端。在承载盘上面屏蔽材料也构成了一个电流通路,通过测试屏蔽材料上面的电压以及电流就可以得出材料的转移阻抗。该装置的具体原理见等效电路图:



图中：

R1: 信号源内阻, 50Ω

R2: 匹配保护负载, 50Ω

R3: 接收机输入负载, 50Ω

Zt: 屏蔽材料的转移阻抗, 单位 Ω

根据等效电路图分析如下：

$$\because Z_t \wedge 50\Omega \quad \therefore I = \frac{V_i}{50}$$

$$\therefore V_o = I \cdot Z_t \quad Z_t = \frac{V_o}{I}$$

$$Z_t = 50 \cdot \frac{V_o}{V_i}$$

将Zt用dB的形式表达可以得到：

$$Z_{dBW} = 34dBW + V_{odBW} - V_{idBW}$$

为了使不同材料的测试结果具有可比性，可以把实验测得的转移阻抗转化为单位长度上的转移阻抗，这个过程称为归一化。定义：

Zo: 归一化转移阻抗, 单位dBΩ-m

L: 材料长度, 单位 m

则：

$$Z_o = \frac{V_o}{I \cdot L}$$

$$Z_{odBW-m} = Z_{dBW} + L_{dBm}$$

一般产品测试的结论中转移阻抗均是指归一化转移阻抗 Z_{odBW-m} 。

b) 屏蔽质量的概念

在军标中一般用屏蔽质量来表征屏蔽材料的屏蔽性能。定义屏蔽质量
为入射波空气波阻抗与屏蔽材料的转移阻抗之比。

$$SQ = Z_w - Z_o$$

式中：

SQ ：屏蔽质量，单位dB

Z_w ：入射波空气波阻抗，单位dBΩ

Z_o ：归一化转移阻抗，单位： dBΩ-m

需要注意的是屏蔽质量与屏蔽效能之间的概念差别。

需要特别说明的是屏蔽材料的屏蔽质量与屏蔽材料的屏蔽效能是有概念性的区别的。屏蔽效能的概念见6.1节的详细阐述。目前大多数供应商提供的屏蔽材料样本中关于材料的性能往往直接按照平面波的波阻抗计算出来材料的屏蔽质量。这也就是屏蔽材料供应商提供样本中的屏蔽效能曲线十分高的原因所在。

c) 测试布局

测试时布局如图10-12所示。频谱分析仪输出的信号经过放大器放大后输入到测试装置的输入端，测试装置的输出信号在频谱分析仪上面显示出来。由于采用跟踪源的扫频方式，测试效率十分高。

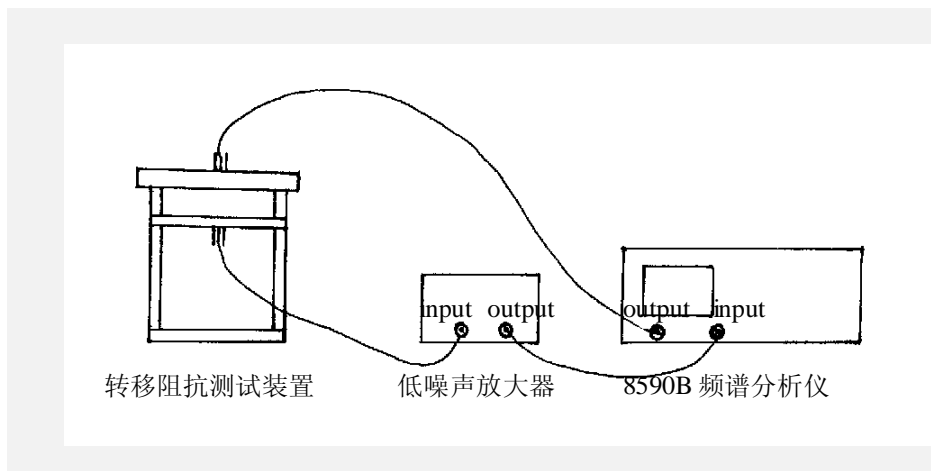


图10-12：测试

布局图

d) 关于测试压力

根据ARP1705标准的建议，测试应在三种压力3.6、5.4、17.9Kg/cm下面进行。根据华为公司产品的实际需要，屏蔽材料的压缩力最大不允许超过2.5Kg/cm。因此不能完全按照ARP1705标准规定的压力进行测试。

实际上，我们更加关心的是在某一个压缩量下面屏蔽材料的转移阻抗，屏蔽材料上面的压力应该作为测试的输出。因此规定屏蔽材料在推荐压缩状态下进行测试，并记录屏蔽材料上面的压缩力大小。

e) 测试频段

根据ARP1705的建议，测试装置允许的测试频率范围为直流到700MHz。700MHz以上由于测试装置的谐振以及装置内部的接触阻抗会影响测试结果的可信度，导致测试的重复性不好，一般不推荐测试。

根据华为公司的实际应用，规定只需要测试30-700MHz范围内的转移阻抗。



f) 测试步骤

- A. 调试测试环境，保证仪器设备工作正常，连接正确。
- B. 记录频谱分析仪的噪声水平。调整信号源功率，保证足够大的动态范围。
- C. 将频谱分析仪的输出接到输入端，测试信号源的电压值 V_i (dBmV)。
- D. 测试装置中不放置屏蔽材料，记录各频率点的电压值 VO_1 (dBmV)，包括曲线和数据。
- E. 在测试装置中放置屏蔽材料，调整压紧力，保证屏蔽材料的压缩量达到规定值。记录各频率点的电压值 VO_2 (dBmV)，记录压紧力数值。
- F. 重复步骤5的测试，调整压紧力，使屏蔽材料的压缩量达到另一个规定值，记录相应数据。
- G. 测试完一种材料后，更换屏蔽材料，重复步骤5，6，测试另一种材料，直到所有测试测试完毕。
- H. 测试仪器重新启动后，需要按照上面的步骤重新调整。
- I. 一般测试完一种材料后重复进行一下步骤4，以检验测试的可重复性。

g) 测试结果

每种试样的测试报告应包括测试试样的基本描述，并给出不同压缩量下各频率对应的归一化转移阻抗、屏蔽质量的测试数据，用表格和曲线的形式表达。

3. 屏蔽材料的屏蔽效能测试

10.2.2节中规定的开孔和缝隙的屏蔽效能测试方法也可以用于测试屏蔽材料在实际应用状态下的屏蔽效能。具体做法是将屏蔽材料按照实际应用状态安装在盖板上面，按照10.2.2节中规定的方法测试其屏蔽效能。



关于屏蔽材料屏蔽效能的详细测试方法和要求请直接查阅 DKBA0.460.0031《屏蔽材料屏蔽性能测试规范》。

4. 各种测试方法的比较和应用

本规范中介绍了三种屏蔽材料屏蔽性能方面的测试方法，即：电阻的测试、转移阻抗的测试、屏蔽效能的测试。屏蔽效能最能够反应实际应用状态，其测试结果可以直接应用在产品设计中（注意需要留一定的裕量），也能够用于比较不同材料，不同供应商的材料之间的屏蔽性能。

转移阻抗能够直接反映屏蔽材料性能的优劣，但是由于测试原理本身就存在许多不确定性，其测试过程中影响因素太多，一般其测试结果主要用于对比不同类别的材料、不同供应商的材料之间的性能优劣，而不必关心其绝对值的大小。

屏蔽材料的电阻仅仅只能反映材料对直流电流的通流能力，严格来说并不能直接反映材料的导电性能。但是由于屏蔽效能和转移阻抗需要专门的测试装置和测试仪器，制作专门的测试试件，并不适合与工业应用中大批量的检验。一般屏蔽材料的检验仅仅是检测屏蔽材料的电阻是否符合要求。

总而言之，屏蔽材料的屏蔽效能最能够反映屏蔽材料的屏蔽性能；屏蔽材料的屏蔽效能和转移阻抗主要用于实验室研究，比较和筛选屏蔽材料的性能；屏蔽材料的电阻测试主要用于质量检验。

I. 屏蔽效能预测与仿真

目前大多数产品的屏蔽设计基本上是事后测试发现问题再采取改进措施。这种方式容易导致结构件的反复更改，增加设计的成本，延长了产品的开发周期。如果能够在产品设计初期就预测出来结构件的屏蔽效能，判断其屏蔽体的屏蔽效能是否符合要求，将可以起到事半功倍的效果，效益也十分明显。不过，电磁兼容还是一门实践性十分强的研究课题，目前还有许多问题没有足够的理论来支持好解释。这也就决定了结构件屏蔽效能的预测十分复杂，目前还很不成熟，它还是一个正在发展的前沿课题。

根据预测的方法以及预测的依据不同，结构件屏蔽效能的预测主要有三条途径：一、通过测试积累的数据，根据经验来建立经验数据库并共享，依靠专家的分析来预测屏蔽体的屏蔽效能；二、通过理论计算的方法，预测屏蔽体中各种缺陷的屏蔽效能，从而判断整个屏蔽体的屏蔽效能；三、用电磁场分析的方法，通过模拟各种实际状态确定边界条件，进行计算机仿真分析，得到屏蔽体的屏蔽效能。这三种方法各有所长，应该根据实际情况来选择运用。不过，如前面所述，屏蔽效能的预测分析还是一门前沿课题，其详细的发展方向有待公司进一步的研究。

A. 经验数据库的积累

经验数据库的方法是依靠大量的测试和积累，并对测试结果进行必要的归纳总结，得出一些判断的经验法则和经验数据。在判断产品方案时，参照最接近的经验数据，根据专家的经验来判断产品的屏蔽效能。

本文第10节中讲述了许多屏蔽效能的测试方法，包括依照IEC61587-3进行的机柜插箱屏蔽效能测试方法（见10.1节）、依照MIL-G83528进行的开孔和缝隙屏蔽效能测试方法（见10.2.1节）、华为公司自己的开孔和缝隙



的屏蔽效能测试方法（见10.2.2节）以及依照ARP1705进行的屏蔽材料屏蔽性能测试方法（见10.3.2节）。按照这些测试方法可以进行大量的基础研究，掌握基本的测试数据。

本文中有大量的表格中均给出了各种应用状态下结构要素的确定，包括螺钉间距的选择，各种开孔的屏蔽效能。这些数据均是按照上述测试方法得出的结论。将这些表格中的数据继续细化，丰富出来更多的应用状态，就可以得到一个完善的经验数据库，用来指导设计人员进行设计。

目前国内已经有人正在开发屏蔽材料的应用数据库，这种数据库正是按照经验数据库的思路建立起来的。

B. 局部细节的屏蔽效能分析

屏蔽体上的各种缺陷，包括缝隙、开孔、电缆穿透等，均可以建立起来完善的数学模型，并计算公式得到屏蔽效能。本文第6章中简单介绍了连续屏蔽体以及不连续屏蔽体的各种缺陷的分析方法和计算公式。不过这种理论分析与实际测试数据之间的误差需要足够的重视。

开孔的屏蔽效能已经有十分成熟的计算方法，而且这种方法已经得到了实际测试的验证。本文中6.3.2节介绍的计算公式可以直接用于产品方案阶段预测通风孔的屏蔽效能。

缝隙的屏蔽效能计算存在一定的难度，主要是缝隙的最大尺寸取决于具体安装状态，而且存在很大的不确定性。目前尚没有一套比较完整的经验公式来进行缝隙的屏蔽效能预测。

电缆穿透对屏蔽效能的影响由于因素太多，计算起来十分复杂，即使计算出来的结果误差也十分大，没有什么应用价值。一般不主张利用理论分析的方法来确定电缆与屏蔽体之间的接触阻抗要求。

总之，由于理论分析的不完善，目前理论计算预测屏蔽效能的方法还十分的不成熟。除了通风孔可以进行理论计算外，其他的缺陷很难用计算



的方法来预测。

C. 电磁场模拟仿真

一个完整的插箱或者机柜存在各种屏蔽的缺陷，包括缝隙、通风孔、一些操作开关的局部开孔、以及进出的电缆。要将这些缺陷都用量化的数学模型表示几乎不可能。例如缝隙的屏蔽效能与紧固点的距离、缝隙的深度、基体的表面质量等因素有关，并且如果安装屏蔽材料的还要考虑屏蔽材料的压缩量、基体材料在屏蔽材料压缩力的作用下的变形，这样多因素是不可能用一个完整的数学模型来表示的。

因此在应用数值方法对电磁场的模拟中简化处理或者忽略缝隙、电缆的影响，只考虑通风孔、局部开孔、以及发射源在有孔插箱不同位置这些因素。这样的模拟结果同样对结构设计有很好的指导意义，尤其是发射源对插箱上开孔的距离不同对屏蔽效能的影响，对通风散热和避免过设计都有很好的作用。考虑发射源的位置得到的结构件的屏蔽效能更接近在实际产品中应用的情况，因为在实际产品中每一块单板、每一条电缆都是发射源，其位置是分布在插箱内所有地方，与屏蔽效能测试中插箱中央只有一个点源的情况相比，更靠近开孔和缝隙。因此在实际产品中结构件提供的屏蔽效能要低于屏蔽效能测试中得到的数据。应用数值方法对屏蔽效能进行预测仿真有待进一步的研究。

模拟电磁场的数值计算方法通常有矩量法和时域有限差分法（FDTD），其中时域有限差分法应用更为广泛。

FDTD（Finite-Difference Time-Domain）时域有限差分法是求解电磁问题的一种优良数值方法。它采用中心有限差分式代替麦克斯韦时域场旋度方程中的微分式，得到关于场分量的有限差分式，用具有相同电参量的空间网格去模拟被研究体，设定合适的边界条件，求出麦克斯韦方程解，从而得出网格空间内的电场、磁场分布。

对于源安放在屏蔽机箱内部的情况，采用FDTD法的优越性在于：不



必另外专门去考虑机箱内壁的复杂反射，因为FDTD法完全是基于麦克斯韦方程组导出的，而麦克斯韦方程组本身就已经涵盖了有关电磁波反射的边界条件。在不同的介质分界面，FDTD算法只需要改变相应的介电系数和导磁系数等电参数即可。

目前能够对电磁场进行模拟仿真的商业软件有Asoft公司HFSS，Zeland公司的IE3D和Fidelity，Remcom公司的XFDTD，EMS-PLUS公司的EZ-FDTD等。