

EMC 电磁屏蔽材料设计者指南——连载（一）

1、EMC 设计的紧迫性

本章讲解 EMC 设计的紧迫性，为本书重点介绍实际技术提供背景。首先简单介绍 EMC 符合性测试的要求，然后介绍相关的法规和标准。最后复习一下电磁屏蔽的理论，以为读者提供足够的知识来选择适当的屏蔽技术。

什么是电磁兼容性？

电磁兼容是一台设备在所处的环境中能满意地工作的能力，它既不对其它设备造成干扰，也不受其它干扰源的影响。干扰的定义是能引起误动作或性能下降的电磁能量，今后我们称为 EMI。

任何一个电磁能量会产生扩散的球面波，这种波在所有方向上传播。在任何一点，这种波包含相互垂直的电场分量和磁场分量，这两种分量都垂直于波的传播方向。这种情况如图 1—1 所示。虽然如图 1—2 所示的频谱中的任何频率的都能引起干扰，但主要问题是由 10 KHz~1 GHz 范围内的射频能量引起的。射频干扰（RFI）是电磁干扰的一种特殊形式，光、热和 X 射线是电磁能量的其它特殊形式。

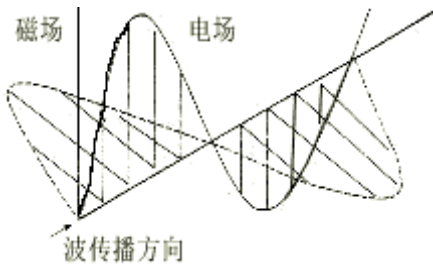


图 1-1 电磁场

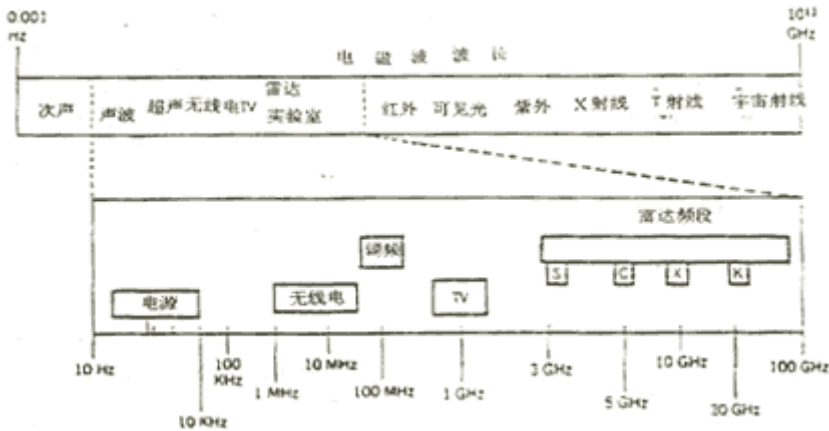


图 1-2 电磁谱

电磁干扰需要两个基本条件：电磁能量源和对这个源产生的特定幅度、频率的能量敏感的器件，称为敏感器。表 1 — 1 给出了一些常见的源和敏感器。另外，在源和敏感器之间还需要传播路径来传输能量。电磁干扰屏蔽通常改变电磁能量传播路径来达到的。

表 1. 1 电磁干扰源和敏感器

电磁干扰源	电磁干扰敏感器
电视和广播	航空导航系统
等幅波发射机	微处理器
电气马达	高保真设备
遥控单元	计算机
电焊装置	等幅波接收机
电气设备	心脏起搏器
发动机点火系统	电子测量设备
雷达发射机	广播和电视接收机
电动工具	电子车库门

电磁干扰分为两类：辐射干扰和传导干扰，这是由传播路径的类型来定的。

当一个器件发射的能量，通常是射频能量，通过空间到达敏感器时，称为辐射干扰。干扰源既可以是受干扰系统中的一部分，也可以是完全电气隔离的单元。传导干扰的产生是因为源与敏感器之间有电磁线或信号电缆连接，干扰沿着电缆从一个单元传到另一个单元。传导干扰经常会影响设备的电源，这可以通过滤波器来控制。辐射干扰能影响设备中的任何信号路径，其屏蔽有较大难度。

辐射电磁能量成为电磁干扰的机理可以由法拉第定律来解释。这个定律表明当一个变化的电场作用于一个导体时，在这个导体上会感应出电流。这个电流与工作电流无关，但是电路会象与工作电流一样来接收这个电流并发生响应。换句话说，随机的射频信号能够向计算机发出指令，使程序发生变化。

技术驱动力

有许多因素使 E M C 成为电子设备设计中重要的内容。

首先，日益增多的电子设备带来了许多电磁干扰源和敏感器，这增加了潜在的干扰。

设备的小型化使源与敏感器靠得很近。这使传播路径缩短，增加了干扰的机会。器件的小型化增加了它们对干扰的敏感度。由于设备越来越小并且便于携带，象汽车电话、膝上计算

机等设备随处可用，而不一定局限于办公室那样的受控环境。这也带来了兼容性问题。例如，许多汽车装有包括防抱死控制系统在内的大量的电子电路，如果汽车电话与这个控制系统不兼容，则会引起误动作。

互联技术的发展降低了电磁干扰的阈值。例如，大规模集成电路芯片较低的供电电压降低了内部噪声门限，而它们精细的几何尺寸的较低的电平下就受到电弧损坏。它们更快的同步操作产生更尖的电流脉冲，这会带来从 I / O 端口产生宽带发射的问题。一般来说，高速数字电路比统的模拟电路产生更多的干扰。

传统上，电子线路装在金属盒内，这种金属盒能够通过切断电磁能量的传播路径来提供屏蔽作用。现在，为了减轻重量、降低成本，越来越多地采用塑料机箱。塑料机箱对与电磁干扰是透明的，因此敏感器件处于无保护的状态。

法律的变化也是驱动力之一。控制电磁发射和敏感度的强制标准的实施，迫使制造商们实施 EMC 计划。产品可靠性的法规将使可靠性成为头等重要的事项，因为一旦设备由于干扰而产生误动作造成伤害，制造商要承担法律责任。这对于医疗设备特别重要。

在竞争日益激烈的工业中，可靠性已经成为电子设备的一个重要市场特征。自动化设备，特别是医疗设备，必须连续工作，这时设备内的 EMI 屏蔽技术提高了设备的可靠性。

对于数据保密的要求是屏蔽市场发展的一个重要动力。已有报道揭露美国驻莫斯科使追究中的信息已被前苏联窃取到，这是通过接收使馆内设备产生的电磁能量来实现的。同样的技术也被用来截获密码，然后攻击银行计算机系统。通过屏蔽，设备的电磁发射能够减小，提高系统的安全性。

现在，人们越来越开始注意各种辐射对健康的影响。过量的 X 射线和紫外线照射的危险已经被充分证明了。现在讨论的焦点是微波和射频显示单元产生的辐射对妇女健康的伤害，因为已经有充分的证据说明在高压线附近生活会患疾病。

法规和标准

对于设备工程师，了解不同市场中对电子设备的 EMC 法规和标准的知识是十分必要的。

现在有许多关于产品辐射和传导发射限制的国家标准和国际标准。有些还规定了对各种干扰的最低敏感度要求。通常，对于不同类型的电子设备有不同的标准。表 1.2 给出了一些电子设备的标准。虽然一个产品要获得市场的成功，满足这些标准是必要的，但符合这些标准是自愿的。

但是，有些国家给出的是规范，而不是标准，因此要在这些国家销售产品，符合标准是强

制性的。有些规范不仅规定了标准，还赋予当局罚没不符合产品的权力。下面几节简单概述一下一些主要的管理机构的电磁兼容标准。

表 1.2 与电磁干扰和兼容相关的标准

标题	国际标准	欧洲标准	英国标准
工业、科学和医疗射频设备射频干扰特性的测量方法和极限值	CISPR11	EN55011	BS4809
汽车、机动船和火花塞点火发动机驱动设备的射频干扰特性测量方法和极限值	CISPR12	EN55012	S833
声音和电视接收机的射频干扰特性的测量方法和极限值	CISPR13	EN55013	BS905 第一部分
家用电器和便携式工具射频干扰特性测量方法和极限值	CISPR14	EN55014	BS800
荧光灯和照明设备的射频干扰性测量方法和极限值	CISPR15	EN55015	BS5394
射频干扰测量装置和测量方法的规范	CISPR16	EN55016	BS727
声音和电视广播接收机敏感度的测量	CISPR20	EN55020	BS905 第二部分
信息技术设备的射频干扰特性测量方法和极限值	CISPR22	EN55022	BS6527
家用电器和类似电气设备引起的电源干扰	IEC555 第 1-3 部分	EN60555	BS5406
工业过程测量恶化控制设备的电磁兼容性	IEC801 第 1-3 部分	HD481	BS6667 第 1-3 部分

国际

C I S P R 是国际电工委员会（I E C）的一个分委会，它成立于 1 9 3 4 年，那时射频干扰问题开始出现。这是编制防止无线电干扰标准的第一个国际化联合组织。C I S P R 没有编制法律或发布法规的机构。它所推荐的标准，只有当个别成员国采取适当的行动时，才

能成为法律。C I S P R 2 2 中推荐的针对信息技术设备的传导和辐射发射要求构成了许多主要国家标准的基础。不幸的是，有些国家在将这些推荐标准作为国家标准时，进行了调整，这造成了不同国家的要求之间的差异。

美国

联邦通信委员会（F C C）是负责频率管理和干扰控制的政府机构。F C C有覆盖多种设备发射限制的规范。F C C纲要第 2 0 7 8 0 号，第 1 5 部分，第 J 分部适用于所有的数字设备。

这些 F C C 规范给出了两个不同的发射极限值。哪一个极限值适用取决于设备在什么环境中使用。A 级设备被设计成在商业或工业环境中使用。更严格一引进的 B 级适用于在家庭或居民工内使用的设备。F C C 没有规定屏蔽效能值，而规定了射频发射值。表 1 . 3 给出了 A 级和 B 级和辐射发射极限值，表 1 . 4 给出了传导发射极限值。

所有在美国国内使用的设备必须满足 F C C 规范。虽然 F C C 的大部分强制性要求在第 1 5 部分，第 1 8 部分也与 E M C 有关。第 1 8 部分也与 E M C 有关，第 1 8 部分中有关于用于工业、科学和医疗目的的射频发生设备的管理条例。它规定了在一些频率点上允许的最大幅射值和 1 0 K H z 至 2 4 5 G H z 频段内这类设备可以使用的频段。

表 1.3 FCC 辐射干扰极限值

频率范围，MHz	场强（μV/m）	
	A 级 30m	B 级 3m
30-88	30	100
88-216	50	150
216-1000	70	200

表 1.4 FCC 传导发射干扰极限值

频率范围，MHz	射频电压（μV）	
	A 级	B 级
0.45-1.6	1000	250
1.6-30	3000	250

德国

德国的关于干扰控制的法规是基于 V D E 制定的标准。相关的标准 V D E 0 8 7 1 覆盖了所的产生或处理射频能量的设备。这些极限值不仅适用于所有种类的计算和数字设备，还适用于工业、科学和医疗设备。唯一的限制是设备产生的基频高于 1 0 K H z。

对于数字设备的要求与 F C C 规定的相似，但是频率范围更宽，低频拓宽到 1 0 K H z。极限值也分为 A 级和 B 级，更严格的 B 级适用于通用的用途。A 级限于需要特殊安装的设备。V D E 关于辐射和传导的极限值在表 1 . 5 和表 1 . 6 中给出。

符合 V D E 0 8 7 1 是强制性的，并由德国邮电部执行。

表 1.5 V D E 辐射干扰极限值

频率范围，MHz	场强（ $\mu\text{V/m}$ ）	
	A 级 100m	B 级 30m
0.01-0.15	34	34
	30 米	10 米
0.15-30	34	34
	30 米	10 米
30-41	54	34
	29.5	34
41-68	54	34
	29.5	34
68-174	54	34
	29.5	34
174-230	54	34
	45	46
230-470	45	46
	59-57	46
470-760	59-57	46
760-1000		

表 1.6 V D E 传导发射干扰极限值

频率范围，MHz	射频电压（ μV ）	
	A 级	B 级
0.01-0.15	91-69.5	79-57.5
	66	54
0.15-0.5	66	54
	60	48
0.5-30	60	48

英国

从表 1.2 中可以看出，英国标准协会发布了好几个关于 E M I 的标准。应用最多的是 B S 6 5 2 7 关于数据处理和电子办公设备产生的乱真信号的极限值和测量方法。这个标准的范围和内容与 C I S P R 2 2 相同，尽管它们的标题不同。覆盖于 0 . 1 5 ~ 3 0 M H z 频率范围的 A 级要求适用于商业和工业场合的应用，更严格的 B 级极限值适用于住宅区中使用的设备。两级都包含准峰值和平均测量的要求。两级的极限值数值是相同的，严格度是通过将测量距离从 3 0 米减小到 1 0 米来实现的。表 1.7 给出了推荐的辐射场强极限值。表 1.8 给出传导发射的电压极限值。

表 1.7 6 2 5 7 辐射干扰极限值

频率范围，MHz	场强（ $\mu\text{V/m}$ ）	
	A 级 30m	B 级 10m
30-230	30	30
	37	37
230-1000	37	37

表 1.8 B S 6 2 5 7 传导发射干扰极限值

频率范围，MHz	射频电压（ μV ）	
	A 级	B 级

	准峰值	平均值	准峰值	平均值
0.15-0.5	79	66	66 减到 56	56 减到 46
0.5-5	73	60	56	46
5-30	73	60	60	50

欧洲经济共同体

为了在欧共体内实现单一的E M C标准，以适应1 9 9 2实行的单一欧洲市场，欧洲委员会推行了欧共指令8 9 / 3 3 6 / E E C，它要求成员对所有的电子装置的电磁兼容性法规化。法规必须包含干扰和敏感度两个方面。这个指令中定义的“装置”包括所有电气、电子应用设备以及配套的电气、电子器件。例外情况是出现在其它包含E M C要求的指令中的装置。目前，这种例外包括机动车点火系统和某些电度表。另外，不是用于商业目的的业余无线电装置也属于例外。这个法规不仅适用于设备的新设计，也适用于指令实施后继续生产的已有设计。

欧洲委员会已经责成C E N E L E C，电工标准化欧洲组织，制定欧洲标准（E N）。成员国必须将这些标准与国家标准等同使用，任何矛盾的标准必须撤除。C E N E L E C E N可以在I E C或C I S P R标准的基础上应用，但不一定要与它们等同。

制造商有两种方法来证明符合这个指令，即“自认证”和使用“技术构造文件”。使用自认证方法时，制造商通过自己测试或按照适当的E N进行测试，来认证产品是否符合。在这种方法中，没有明确要求要使用特许的设施。但是，如果日后发现产品不符合，制造商将承担法律责任。在关于产品符合性的争端中，一个由特许测试部门提供的测试报告是十分有分量的。

如果没有相关的E N，或设备制造商不准备使用它，符合性只有通过编辑技术构造文件来证明。这个文件描述的装置，列出保证设备与指令一致的措施，并包含一个技术报告或权威部门的认证。在英国，一个权威部门是N A M A S（国家测量批准服务）批准的E M C实验室。任何权威部门提供认证在欧共体的所有成员国内都是可行的。

军用设备

为军用设计的电子系统必须满足M I L－S T D－4 6 1 D的要求，这个标准不仅规定了最大辐射发射和传导发射的限制，还规定了系统对辐射和传导干扰的敏感度要求。配套标准M I L－S T D－4 6 2规定了必要的测试装置。商业公司经常将M I L－S T D－4 6 1

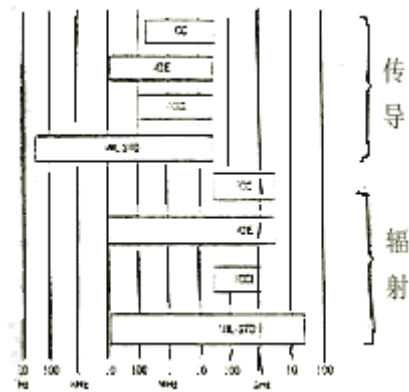
中的某些部分作为产品内部 E M C 规范。

另一个关于 E M I 的军用标准是保密的 T E M P E S T 计划,这是用来保证保密通信系统安全的。现在可以接收并复现出大多数电子设备政党工作时所发射的功率很低的射频信号。象对电子窃听很脆弱的 C R T 终端那样的军用产品就属于 T E M P E S T 的范畴。在实践中, T E M P E S T 控制设备和系统的发射,使无法解译携带信息的信号。

由于关于 E M C 的法规和标准十分复杂,关于信息技术设备的相关标准总结在表 1 . 9 中。一些标准的频率范围在图 1 — 3 中标明。

表 1.9 信息技术设备 (ITE) 的电磁兼容标准

	IEC/CISPR	FCC	CENELECEC	英国标准
传电和辐射发射	CISPR22	15 部分 J 子部分	EN55022	BS6527
关于以下的敏感度				
静电放电	IEC801-2	-	EN55 101-2	BS6667 第二部分
辐射电磁场	IEC801-3	-	EN55 101-3	BS6667 第三部分
电气快速瞬态	IEC801-4	-	-	BS6667 第四部分
电源线良涌	IEC801-5	-	-	BS6667 第五部分
辐射磁场	CISPR	-	未发表的建议稿	-
远程通信线路的传导发射	CISPR	-	-	-



测试

现有的规范和标准对产品辐射的电场强度的极限值是在 3 m、10 m 或 30 m 处规定的。为了测试设备是否满足这些标准，需要一块能提供被测件与天线之间对应距离的足够大的场地。测试场地的背景电磁能量大大低于测试范围。

被测设备所处的状态必须与实际使用状态相同，I / O 接口与适当的外设连接。被测系统要放在转台上，这样可以通过旋转来找到最大辐射信号。转台与天线放在同一个地面上。这样就可以测量系统工作时的辐射了。

这种测试也可以在半无反射室中进行，但一个合适的测试室其尺寸和成本都是可观的。大多数辐射测试是在开阔场中进行，开阔场是精心选择的，其电磁背景很低，周围没有反射物，如建筑物。图 1 — 4 是开阔场的示意图。

为了获得不同材料的屏蔽效能，采用一些其它的测试方法。屏蔽盒是最先开发的方法之一。在密封的屏蔽盒内放置接收天线的装置如图 1 — 5 所示。这个盒子上有一个方形的开口，将它放置在屏蔽室内使外界干扰最小。屏蔽室内有信号发生器和发射天线。被测材料的样品牢固地夹在盒子的开口上，记录下发射天线处的场强和接收天线处的场强。这种材料的屏蔽效能就是两个值的比值。纯铜板可以用来作为参考值。图 1 — 6 所示的四个屏蔽室的装置可以用来提高测量精确度，并且拓宽测量的频率范围。

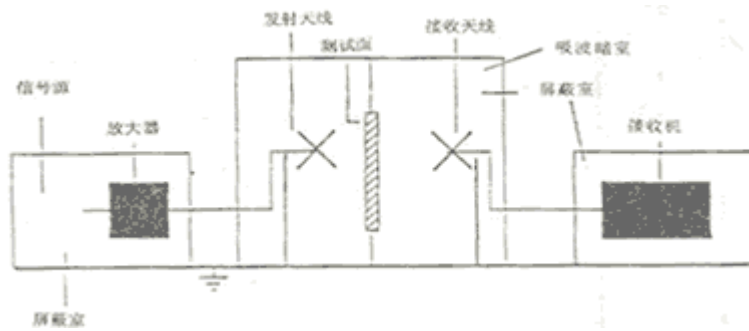


图 1-6 屏蔽室测试

屏蔽的理论方法

电磁波理是经典的理论。麦克斯威尔、法拉第和其它人在电子学之前就建立了描述电场和磁场的基本方程式。然而，对实际中的复杂硬件几乎不能直接应用这些方程式。电场和磁场的衰减用从试验中得到的方程式能够更好的表达，这些方程式在屏蔽的设计中广泛应用。

有许多因素会影响电磁能量源周围的场。源的种类赋予了场一些特征，如辐射幅度。距离源的距离和电磁波传输的媒介的特性都会影响场与屏蔽之间的相互作用。

在电磁屏蔽中，波阻抗 Z_w 是联系这些参数的有用的概念。波阻抗定义为电场 E 与磁场 H 的比值。

源上的驱动电压决定了干扰的特性。例如，环天线中流动的电流与较低的驱动电压对应。结果是在天线附近产生较小的电场和较大的磁场，具有较低的波阻抗。另一方面，四分之一波长的距离上，所有源的波的阻抗趋近于自由空间的特征阻抗，377 欧姆。这时，称为平面波，作为参考，1MHz 的波长是 300m。

按照到源的距离，电磁波可以进一步分为两种，近场和远场。两种场的分界以波长 λ 除以 2π 的距离为分界点。 $\lambda / 2\pi$ 附近的区域称为过渡区。源与过渡区是近场，超过这点为远场。近场波的特性主要由源特性决定，而远场波的特性由传播媒介决定。如果源是大电流、低电压。则在的近场以磁场波为主。高电压、小电流的源产生电场为主的波。

在设计屏蔽控制辐射时，这个概念十分有用。由于这时屏蔽壳与源之间的距离通常在厘米数量级，相对于屏蔽电磁波为近场的情况。在远场，电场和磁场都变为平面波，即，波阻抗等于自由空间的特性阻抗。

知道干扰辐射的近场波阻抗对于设计控制方法是十分有用的。用能将磁通分流的高导磁率铁磁性材料可以屏蔽 200KHz 以下的低阻抗波。反过来，用能将电磁波中电矢量短路的高导电性金属能够屏蔽电场波和平面波。入射波的波阻抗与屏蔽体的表面阻抗相差越大，屏蔽体反射的能量越多。因此，一块高导电率的薄铜片对低阻抗波的作用很小。

对于任何电磁干扰，屏蔽作用由三种机理构成。入射波的一部分在屏蔽体的前表面反射，另一部分被吸收，还有一部分在后表面反射，如图 1-7 所示。

屏蔽效能 SE 等于吸收因子 A 加上反射因子 R，加上多次返射修正因子 B，所有因子都以 dB 表示。

$$SE=A+R+B$$

表 1.10 和表 1.11 给出了不同的屏蔽效能，吸收损耗的计算公式如下：

$$A=1.13t$$

式中； t-屏蔽厚度，cm；

μ_r -屏蔽材料的相对导磁率；

由于吸收主要由屏蔽厚度产生的，吸收因子对所有类型的电磁波都一样，与近场还是远场无关。

以下是计算平面后反射损耗的公式，等于电场波和磁场波有类似的公式。

$$R=168 \lg(\mu_r f / \sigma_r) \text{ dB}$$

表 1.10 信号强度的衰减

dB	衰减的百分比
10	90
20	99
30	99.9

40	99.99
50	99.999
60	99.9999
70	99.99999

表 1.12 给出了一些常用屏蔽材料的相对导电率和导磁率。

如果吸收因子 6dB 以上，多次反射因子 B 可以忽略，仅当屏蔽层很薄或频率低于 20KHz 时，B 才是重要的。

在设计磁屏蔽时，特别是 14KHz 以下时，除了吸收损耗外，其它因素都可以忽略。同样，在设计电场或平面波屏蔽时，只考虑反射因子。

当一束电磁波碰到屏蔽体时，在表面上感应出电流。屏蔽的一个作用是把这些电流在最小扰动的情况下送到大地上，如果在电流的路径上有开口，电流受到扰动要绕过开口。较长的电流路径带来附加阻抗，因此在开口上有电压降。这个电压在开口上感应出电场并产生辐射。当开口的长度达到 $\lambda/4$ 时，就变成效率很高的辐射体，能够将整个屏蔽体接收到的能量通过开口发射出去。为了限制开口效应，一个一般的规则是，如果屏蔽体的屏蔽效能要达到 60dB，开口长度在感兴趣的最高频率处不能超过 0.01λ 。每隔一定间隔接触的复合或用指形簧片连接的缝隙可以作为一系列开口来处理。

值得指出的是，材料本身的屏蔽特性并不是十分重要的，相比之下缝隙开口等屏蔽不连续性是更应该注意的因素。

表 1.12 用于屏蔽的金属特性

金属	相对收导率 σ_r	相对磁导率 μ_r
银	1.05	1
铜	1.00	1
铝	0.61	1
锌	0.29	1
黄铜	0.26	1
镍	0.20	1
铁	0.17	1000

铜	0.10	1000
化学镀镍	0.02	1

总结

所有从事电气或电子设备设计的工程师都应该认识到他们所开发的项目的电磁兼容性要求。为了用较低的成本来解决这些问题，必须在项目的初期就考虑适当的 EMC 措施来满足相关的标准。虽然仔细地进行电路设计能够有效一减小电磁发射和敏感度，但本文后面所详细介绍的有关实际屏蔽技术的资料将使你在每一个特殊项目中采取一种适当的屏蔽。

EMC 电磁屏蔽材料设计者指南——连载（二）

2、导电涂层

有了前一章中关于 RFI/EMI 背景的考虑，现在能研究导电涂层的选择范围。

干扰源

RFI/EMI 源可以划分为两类：

- 天然干扰源—例如雷电放电；
- 人为干扰源—它可以进一步划分为有意和无意干扰源，有意辐射信号来源于电源开关，焊接设备和射频加热器，实际上，所有电子和电气设备都不同程度的产生辐射干扰。

（1）干扰场

干扰能量沿着导线和自由空间传播。因此它成为与线路有关的干扰电压和辐射干扰场强。所传播的各种干扰都存在一定的频率范围。

低于 30MHz 的低频干扰，主要是在导线中传播。这种干扰不能靠简单的屏蔽机壳来防止，而只能用适当的线路滤波器来保护有用信号不受损害。更高频率的干扰（>30MHz）与导线的辐射有关，因为这时导线尺寸可以和波长相比拟。

就电磁波而论，电场强度 E 和磁场强度 H 是由一定的关系或联系在一起的。通常是将电场分量和磁场分量分别屏蔽。在相应的频率范围中符合一定的规则。

在约 1MHz 以下的较低频率范围内，平行于导体壁的电力线是连续的。这里，频率的影响取决于所用屏蔽材料的壁厚和导磁率。

在 1MHz 至 100MHz 的频率范围内，屏蔽柜内受干扰影响的部位包括：前面板的连接面、

门或窗以及引入的主要部件。这时电力线不再保证全部是连续的，从约 100MHz 频率开始，电场屏蔽效能将逐渐减小，而磁场屏蔽效能则不再增加。

对于 100MHz 以上频率范围，所传播的波的电场和磁场分量应当认为是相等的。均匀平面波的屏蔽取决于各自分量在屏蔽材料表面的集肤效应，屏蔽材料的导电率将决定波的反射损耗。

(2) RFI/EMI 传输的含意

RFI/EMI 可以通过传导，耦合或辐射离开干扰源或进入敏感设备，在设备的一部分和另一部分之间，如电源和附近的电路之间，或在两个分开的设备之间，都会产生干扰。

①传导 RFI/EMI 可以通过信号线、天线馈线、电源线、甚至通过 RFI/EMI 敏感设备之间的接地线进行传导。

②耦合 RFI/EMI 可以在具有某些互阻抗的元件、电路或设备之间耦合，通过这种互阻抗，一个电路中的电流或电压能在另一电路中引起电流或电压。互阻抗可以是电导、电容或电感，或者是它们的任意组合。

③辐射 RFI/EMI 可以通过任何一种设备机壳的开口、通风孔、出入口、电缆、测量孔、门框、舱盖、抽屉和面板，以及机壳的非理想连接面等进行辐射。RFI/EMI 也可由进入敏感设备的导线和电缆进行辐射，任何一个良好的电磁能量辐射器也可以作为良好的接收器。

如何进行屏蔽

下面这一节中，将从敏感设备防护外来电磁波的观点来考虑屏蔽。有效的屏蔽对设备自身产生的电磁波也同样有效，它可以防止自身产生的电磁波对其它设备造成危险。对于已有标准来说，屏蔽的后一个目的特别重要。

当电磁波在导电体内引起感应电流时，如果该导体是由良好导体制成，此电流不会穿透该导体。如果敏感设备封闭在一个较大的导电体内，例如在铜制机柜内，就能产生有效的屏蔽。然而，应当明白，电磁波所感应的电流不应传导至屏蔽体的内部，这样的电流才是允许的，否则，该电流就有可能传导至设备或通过电磁波到达设备。在屏蔽体外抑制该电流和电磁波是屏蔽外部干扰的实质。

电磁波感应的电流沿着电阻最小的路径并绕着无缝金属机箱外表面运行，但遇到任何一个连接面时，该电流宁愿绕过一个面进入内部而不越过窄缝隙到达另一个面，如图 2.1 所示。

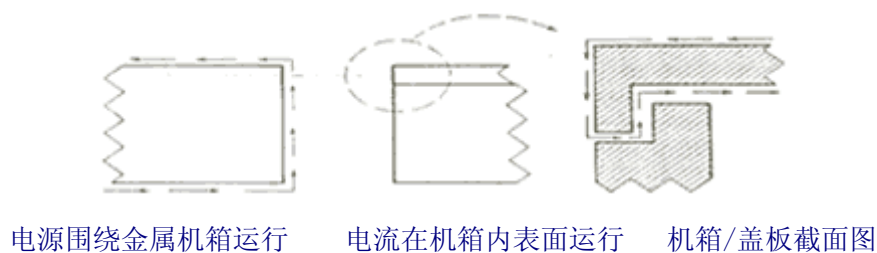


图 2.1 围绕金属机箱的电流路径

因此，用钢制机柜进行屏蔽时，由于能为所有连接面提供一条由一个面至另一个面的高导电路径，所以电流仍保持在机箱外侧。这种导电路径是用特殊的衬垫和在连接表面进行导电涂敷而建立的，导电衬垫将在另外两章中详细讨论。导电路径的任何中断都将使屏蔽效能降低，它取决于缝隙或孔洞尺寸与信号波长之间的关系。对于较低频率或较长波长来说，如果只有一个小孔则不会明显降低屏蔽效能；对于高频或较短波长来说，屏蔽效能的下降将是很剧烈的。

举一个例子，屏蔽体上如果有一个直径为 15mm 的孔洞，对于 10MHz 信号（波长为 30m）来说，将仍然能提供 60dB 屏蔽效能，但对于 1GHz 信号（波长为 30mm）来说，若要保持同样的屏蔽效能，则孔径不能超过 0.15mm。直径为 15mm 的孔对于 1GHz 信号只能提供 20dB 衰减。

如果不止一个孔洞，而且孔距小于信号半波长时，屏蔽效能将进一步降低。如果高频信号波长时，屏蔽效能将进一步降低。如果高频信号要求足够的衰减，则不应采用为了通风目的的孔洞。

图 2.2 表示 RFI/EMI 能量是如何通过吸收、反射和传导而耗散的。屏蔽效能及其产生的衰减与频率、源与屏蔽体的距离、屏蔽体的厚度以及屏蔽材料等有关。由于增加了对 RFI/EMI 能量的反射和吸收的总和，使所传输的电磁能量减小。

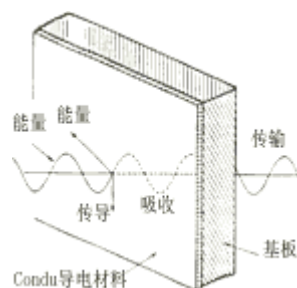


图 2.2 辐射 RFI/EMI 能量的耗散

屏蔽材料

哪些材料能提供最好的屏蔽效能是一个相当复杂的问题。很明显这种材料必须具有良好的导电性，所以未处理过的塑料是无用的，因为电磁波能直接通过它。当然，可以采用金属。然而，应当记住，不能只考虑导电性，其理由就在于，电磁波不但有电场分量，还有磁场分量。要知道高导磁率和高导电率同样重要，高导磁率的意思就是磁力线的高导通性。

钢是一种良导体，而磁导率的量级也会令人满意。它也是相对廉价并能提供很大机械强度的材料，所以有理由利用钢材，廉价的获得满意的屏蔽效能。

应当注意，低频电磁波比高频电磁波有更高的磁场分量。因此，对于非常低的干扰频率，屏蔽材料的导磁率远比高频时更为重要。

用于屏蔽外场直接耦合的机壳或机柜的材料是很重要的。由于是高反射屏蔽，通常采用提供电场屏蔽的薄导电材料。对于 30MHz 以上更高的频率，通常应主要考虑电场分量，在后一种情况下，非铁磁性材料，诸如铝或铜，能提供更好的屏蔽，因为这种材料的表面阻抗很低。

涂层类型

由于发泡塑料易成形，并具有价廉、重量小、便于安装、抗腐蚀、外观好等优点，其应用日益增加。如果能提供有效的 RFI/EMI 屏蔽，则用途将更广泛。通常的方法是，在塑料基底上增加一个导电涂层。就象将塑料机箱放入金属机箱一样。

用于导电涂层的主要材料有银、铜和镍。银是一种高导电性材料，但还应考虑价格是否合适。然而，当用作涂料填充物时，它具有 50 至 80dB 衰减或屏蔽效能，但还取决于频率，见图 2.3。银常用于军用设备，特别是需要防护 EMP（电磁脉冲）的设备。

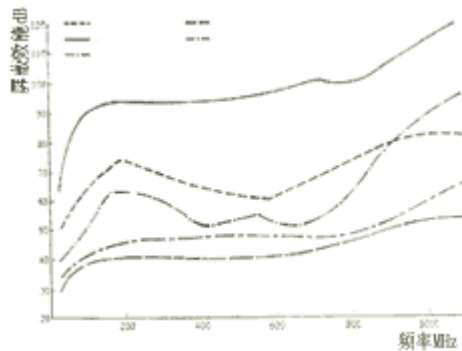


图 2.3 屏蔽效能数据

铜的导电性接近银，但价格低廉。然而，铜易于氧化而使屏蔽效能受到损失，在一般环境条件下，它了不稳定。近来镍已成为主要的研制对象。它不同于铜或银那样的良导体，但由于它存在导磁性，能吸收较多的 EMI。它还具有抗腐蚀的性质，而且成本较低。锌在火焰喷涂中用作主要媒质，具有屏蔽和抗腐蚀性质，但它用作导电涂层并不多见，而且市场进展也较慢。由于石墨仅能提供 20dB 衰减，而且主要用于敏感集成电路的静电防护，所以一般也不同作导电涂层。

(1) 导电漆

迄今为止，成功的导电漆都基于聚丙烯、聚氨脂、乙烯树脂或环氧树脂等衬底。导电漆都有适用期，而更重要的还有贮存期，后者典型的为 6 至 12 个月。所有这些漆都对塑料基底存在腐蚀作用，所以导电漆能穿透塑料并固定在孔缝中。九十

年代的现代导电漆都有不同程度的胶粘性质，而以前由于缺乏胶粘性，经常产生导电漆剥落，甚至将印制板导电路径短路，而不完善的屏蔽所留下的缝隙将起缝隙天线的作用。

所有基底表面应仔细清洁，清除油脂或其它污渍，轻度擦伤也将影响粘附力。

①银漆

银漆能用在陶瓷或更一般的塑料基底上，甚至可用于木质表面上，它有良好的抗磨损特性和可焊接性。银乙炔基是典型的简单组合系统，它在环境温度中约 20min 便可干燥，再过 20 或 30min，便可进行下一次涂敷，直到 20h 以后，化学反应完成之前，尚未达到最大的导电率。银乙炔基的表面电阻率可达到约 $0.01 \Omega/\square$ 而干燥膜厚度为 0.025mm，每升银漆可提供理论覆盖面积为 8.5m²。实际上，由于过喷，约 10%银漆被浪费。

银聚胺脂涂层，通常是两部分组成的系统，其重量的 55%左右为纯金属银薄片或球，对于所有导电漆，通常采用的喷枪的压力为 6~10 和 35~55 磅/平方英寸。压力设备中，空气搅拌器是防止银颗粒沉淀的重要设备。

②镍漆

镍通常与聚丙烯组成镍漆，理想情况下以 ABS、聚苯乙烯、聚碳酸酯为衬底。在喷涂之前，对人造橡胶复盖的表面和玻璃加强的塑料应当轻轻研麻。对于聚丙烯成分，在 20℃ 条件下的干燥时间为 30min，若需第二次喷涂则还需进一步干燥 30min 后进行。经过 120h 后达到完全导电，获得表面电阻率优于 $1.5 \Omega/\square$ 。通常，干燥薄膜厚度规定为 0.050mm，所以喷漆室内应设厚度精确测量设备；如果喷得太厚，则费用太高，喷得太薄，则达不到足够的屏蔽性能。在衬底的转角处喷漆承包商了解有关厚度的规定，以及确定不同厚度的位置都很重要的。

如果衬底用聚丙烯，而且设计成比规定值更薄，可用作更灵敏的热塑性料衬底。聚氨酯适用于复盖热固化和聚合物交联塑料，如复盖人造橡胶海棉，Noryl 和 GRP。聚氨酯漆做衬底再涂敷颜料、固化剂和稀料的混合物，典型的混合比是 6: 1: 1，而且必须达到一定的精确度，如果能产生全部化学反应，则最终的干燥膜就具有应有的全部性质。干燥膜中镍粉的重量至少占 80%，才能得到最佳屏蔽；金属颗粒远多于 84%时，将使胶粘性和衬底的机械性质变差。

当不知道是那一种漆时，可取少量漆涂敷基底的一个小的试验面积，并检验它

在环境应力下的破碎情况。

③铜漆

为开发有效的铜填充导电涂层进行了各种试验，但由于腐蚀而得不到广泛使用。要克服这个问题，只能在铜膜表面加上一层不同导电材料的保护层，但结果在另一种工作条件下将更容易失效。

④底漆

导电漆的性质一般都与基底材料不相容，特别是在胶的物质中更是这样，所以要用专门的底漆。底漆将与塑料基底胶粘在一起，而漆的化学连接本身将转化为层间或与底漆的连接。底漆也用于当所选导电漆与基底化学不相容的情况中。

⑤导电环氧树脂

前面关于导电漆的讨论，主要集中在涂层的塑料基底上，但有时却令人信服的将导电漆用于金属表面。通常，该体系是基于聚丙烯、聚氨酯、乙烯基等，当应用于金属时，它们并不显示出良好的胶粘性。解决的方法是采用粘稠环氧系列材料，它能掺入镍或银。

金属表面进行导电涂敷，可以改进它们的电化学腐蚀性质，特别是相应的导电衬垫与金属接触时。另一方面，金属可以要求装饰性涂敷，但通常的电绝缘涂层应当从衬垫和应屏蔽区域的接触面除掉，更容易的办法是对与同样材料进行整个金属加工后，涂敷导电漆进一步应用时，应当改进带有镍或银薄层的基体金属或合金的屏蔽特性，此填充物通常用于环氧树脂系列。特别是当用于铝部件时，镍显著改进表面电导率，聚乙二烯氟化物和玻璃增强尼龙风扇叶片实际上不能用聚丙烯、聚氨酯或乙烯基油漆系列和导电环氧系列和导电环氧系列涂敷。

镍环氧漆通常由三个系列组成，即衬底、较薄和较硬三类，当全部处理完毕后，能得到 0.025mm 厚干燥膜优于 $5\Omega/\square$ 的表面电阻率和 40 至 50dB 屏蔽效能。这种漆能提供极好的冲击阻尼和良好的胶粘性，特别是与低碳钢、铝、铬酸铝有很好的粘着力。

⑥镍涂层填充物

导电漆如此方便，如果成本能进一步降低，则它将拥有一个很大的市场，镍可用于涂敷各种价廉的颗粒材料，它具有镍的表面性质，而同时具有基底材料的某些性质。镍涂敷的所有材料中，石墨是具有最大潜力的一种。它机械性能好，化

学稳定，而且固有导电性，也较便宜，比重低等优点。其结果是涂敷的颗粒具有比纯镍更低的密度，进一步降低了成本。

实际上，涂敷于石墨上的镍的总量或市场上买得到的涂镍颗粒所具有的镍的重量约占总重量的 25~85%。因为两种材料的密度不同，需要涂敷足够的镍，达到完全复盖石墨。然而，实际上并没有完全复盖，只能有部分颗粒被复盖，例如 25% 镍—石墨颗粒。这种颗粒能用来生产石墨和纯镍之间具有屏蔽性质的涂敷中间体。涂敷颗粒的主要优点是它的总体密度较低，要使填充物较轻，需要提供系统中材料的等效体积。然而，镍涂敷石墨是新开发的产品，尚未完全发挥它的潜力。用镍涂敷的其它导电漆的填料包括铝、玻璃和某些氧化物、碳化物和络钢碳化物。

⑦银涂层填充物

比镍涂敷颗粒更重要的是需要寻找降低纯银导电漆系列成本的途径。

如果射频只在导体的外表面传导，颗粒内部的银是无用的；这种集肤效应约在导体表面 $1\mu\text{in}$ 左右，具有壁厚为 $1\mu\text{in}$ 的空芯银颗粒就可以了。去掉无用的银之后，既显著降低了成本，也大大减轻了重量。

将空芯银颗粒用作涂敷填充物，其颗粒的理想形状应使单位面积包围的体积最大，这样，可用最少的银涂敷任一单位体积，因此，这个理想的形状就是球。球形颗粒还具有另外一些优点：便于喷涂，对射频能量为各向同性。

并提供浓度连续的封装安排，能填充约 70% 的涂层体积。银涂敷在直径约为 $50\mu\text{m}$ 的空芯或实芯陶瓷或玻璃微球上，空芯颗粒用于优先考虑重量的导电漆中。

我们知道，球形体抗均衡压力的能力最旨，而实芯是完全不必要的，因为这将增加不需要的重量和费用。用于涂敷时，重量是很重要的，如果重颗粒在液态导电漆中快速沉淀，形成较硬的沉淀物后就很难扩散或保持分散状态。过重的颗粒还会在管道中沉淀，不仅会引起新的涂层下垂和流动，而且还可能分开，而引起小的未屏蔽的区域。

EMC 电磁屏蔽材料设计者指南——连载（三）

（2）化学镀

化学镀的程序不应与常规的电镀混淆，电镀需要用直流电流使金属镀覆。化学镀或自动催化镀是化学镀覆均匀的固态金属涂层，它将减小零件表面的微电池反应。塑料的化学镀处理是在非导电塑料基材上产生薄金属涂层。通常选用复合镀，即镀铜（高导电性）再镀镍（防锈）。化学镀铜本质上是纯铜镀覆，而化学镀镍可包含 3—10 % 磷。

在塑料镀的基本过程中，模压塑料机壳总是浸泡在一系列化学处理溶液中，由三个主要处理步骤组成，即预处理、催化处理和化学镀处理。化学镀的预处理包括溶解过程的改善——对于所有塑料则不需这一过程——还有酸洗和中和；这些溶液被配成能在塑料表面产生微观孔穴，可为化学镀金属涂覆提供粘附点。催化是由超微金属把颗粒对塑料基板被酸洗后的微孔上的稀释溶液进行吸收而获得的。最后，将酸洗后的塑料部件浸泡在化学镀槽中，把颗粒的吸收作用使从溶液至金属涂覆塑料表面的金属离子减少，从而完成化学镀。典型的处理步骤示于图 2.5。这将产生一个模压式全密封箔壳并相应于双侧塑料镀处理。各种类型和级别的聚合物可以用这种方法进行化学镀，但每种聚合物的估量和模压类型是很重要的，因为同一种聚合物的不同级别的化学反应可以在很大范围内变化。

较差质量的模压制品不适用于双侧处理：因为所有模压制品的高应力部分对化学反应都很敏感，所以较差质量的模压制品在化学腐蚀阶段就要发生破裂。

在塑料表面进行化学镀时，目前采用表面选择法。它应用表面喷涂屏蔽薄膜，即在原始化学镀以后，两次浸泡在化学预处理溶液中实现。这意味着许多不适用于双侧处理的聚合物模压制品，可以在屏蔽壳的内表面进行选择表面镀。

由于采用更厚的金属涂覆，塑料制品双侧和单侧镀处理都能使屏蔽效能增加而提供更大的衰减。

通过自动处理对所有内外表面及凹进部分进行化学镀，以避免人工操作时，视觉上出现的问题。由于化学镀铜是一种纯金属涂层，而没有粘结剂、填充物、氧化物

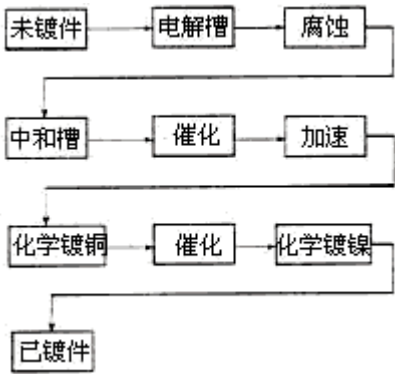


图 2.5 塑料制品化学镀的典型处理过程

和吸附气体等电镀涂层所附有的物质，一个 0.625 微米的极薄的镀覆可以提供约 80 dB 屏蔽效能。铜可以在很宽频率范围内提供 65 至 120 dB 屏蔽效能。而这种处理为保证可重复性和均匀的屏蔽效果提供了可能性，而且，大量生产时重要的是如何合理地降低成本，但这种处理方法的成本是镍导电漆系列用于少量未镀件时所无法比拟的。

表 2—1 给出铜和镍在 30 MHz ~ 1 GHz 频率范围内屏蔽效能的数据。

虽然许多聚合物的类型和等级能用这种方法进行化学镀，但早期估计化学反应是很重要的。在早期，化学镀专家应当和设备设计者以及模压工紧密结合，以便在设计被确定以后，能获得最好的结果。塑料部件的几何形状和模压的质量是化学镀模具设计的重要依据；模压质量是处理时排除空气和化学杂质的保证。

表 2—1 化学镀屏蔽效能测试数据

化学镀层厚度 (μm)	双侧或单侧	屏蔽效能 (dB) ASTM ESU-83 传输线			
		频率 (MHz)			
镍铜		30	100	300	1000
A 0.375 -	2	40	39	39	51
B 0.625 -	2	51	52	56	71
C - 0.375	2	66	70	71	77
D - 0.625	2	71	78	81	>DR
E 0.375 0.625	2	70	76	82	>DR
F 0.750 1.250	1	62	61	58	62
G 0.375 0.625	2	72	80	87	>DR
(56 天湿度)					
H 0.375 0.625	2	71	80	89	88
(56 天干燥)					
动态范围 (DR)		98	95	91	91

这种处理的优点是：

- 对于所选金属给定的重量，实芯全金属箔能提供最佳的导电性 / 屏蔽。铜箔可

在很宽的频率范围内提供屏蔽；

- 所提供的电镀液能自由流动并湿润元件表面，使涂层均匀，可在全部镀层表面得到恒定的屏蔽衰减；
- 它能简单快速的用于复杂的、大型或小型的部件，特别适用于大体积部件；
- 与基体有极好的胶粘性，保证不会破碎或剥落。

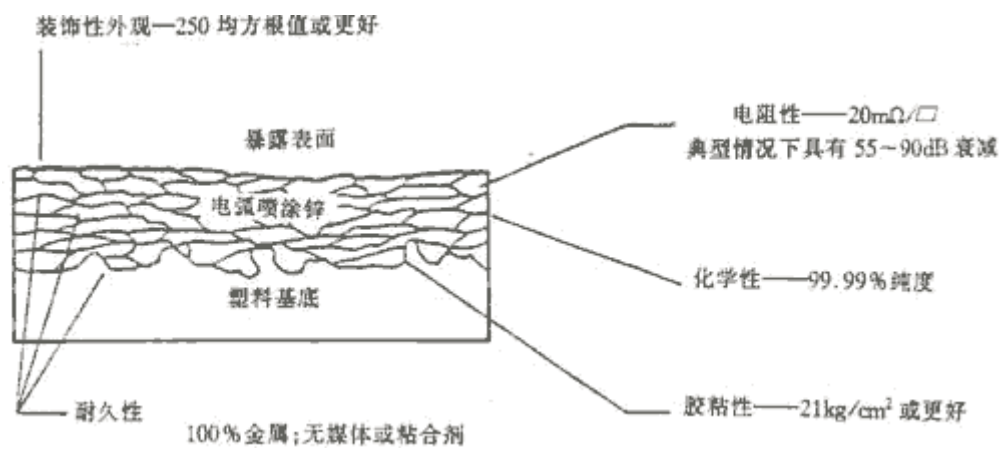
（3）火焰喷涂

金属电弧喷涂，通常用来镀锌，已是很流行的方法，特别是在商用方面。它比导电漆和箔屏蔽更有效。厚度为 $60\text{ }\mu\text{m}$ 时，具有 $55\sim 65\text{ dB}$ 的屏蔽效能，对于更厚的度层将有更大的衰减。然而，它的应用会受到环境的侵蚀，涂层的均匀性不定期取决于操作者的技巧，而且由于涂层相当薄、韧性低，使塑料变得很容易损坏。

此项技术涉及在两条金属导线之间产生电弧，将金属汽化后，利用空气吹在塑料基体上。当熔融金属的粒子撞击塑料表面时，它们展平和冷却后，形成连续的金属薄膜。锌是常用的金属，用于 RFI / EMI 屏蔽目的，由专门的子承包工厂用专用设备进行。

虽然这项技术是最早的屏蔽方法之一，便它的应用受到粘着性和温度这两个内部相关的因素的限制。锌与塑料的连接纯粹是一种由金属粒子撞击所引起的机械连接。如果电弧枪离塑料部件太远，金属粒子就没有足够的能量保证适当的粘着性；然而，枪如果离塑料部件太近，金属冷却时的热耗散，将足以使塑料变形。

在面对枪的一侧，锌涂覆的薄膜相当厚，对于大部分应用都能提供有用的屏蔽效能和低电阻率，见图 2.6。



值得注意的是，如果机壳内侧被设计得更容易进行电弧喷涂，例如没有尖角、在肋之间有适当空间，并消除裂缝深度，将降低成本，并保证使用寿命。75~12

0 R M S 锌镀层能用适当的维护设备始终如一地获得，而且表面呈现银灰色金属镀层，并当破碎时还留下金属光泽。当附加耐磨垫圈时，在磨擦表面得到一个类似的表面。紧配合时，相邻部分装配和拆卸时，互相摩擦的任意区域，每次都产生新的、高导电率的接触。

锌是除银以外，在塑料上获得商用屏蔽涂层，最常用的导体之一。例如，电弧喷锌的电阻率仅为镍的几分之一。在许多情况下，适当的屏蔽能产生 $30 \sim 40$ dB 衰减。如果采用电弧喷锌，这是很容易做到的，它提供的衰减范围可达 $55 \sim 90$ dB，装入喷枪的锌为 99.99% 纯度。而喷涂的结果，金属与任何粘料或其它运载物无关。锌镀层具有韧性和抗腐蚀性质，其表面电阻率的典型为 $0.02 \Omega / \square$ ，衰减可达 90 dB。

（4）真空金属化

真空金属化将提纯的金属沉积在塑料部件上，其主要优点是美观和显著的屏蔽性质。所用的金属为铝（最常用），锌、铜、钢、镍和银。涂层为 $0.05 \sim 10 \mu\text{m}$ 厚，且相当均匀。

尼龙，聚芳基化物，聚酯很适合进行这种处理，而丙烯睛——丁二烯——苯乙烯三元共聚物，聚苯乙烯和聚碳酸酯也能被金属化。然而，粘接性和耐久性却不如其技术。许多材料，特别是聚芳基化物，需要在镀覆之前先做基础涂层。还有许多材料需要一个外部涂层作打底和抗紫外线。真空金属化小室的费用较贵，其尺寸大小将限制需要镀覆的部件的数量。而且保证平滑的金属涂层所用的夹具也将占用小室的空间。

当希望良好的装饰漆能在低频范围同时得到良好的屏蔽性能时，夹具的初始成本将很高，不锈钢的铜夹芯涂层是常用的组合，能给出上至 70 dB 抗扰度，并具有抗腐蚀性。

通常，真空镀覆的涂层是均匀的，不影响塑料的冲击强度，也不影响其内部公差。这种处理能提供涂层的最佳选择，能屏蔽某些产品的重要区域而堵塞穿孔。

这种处理能用于聚光灯反射器，特种封装，底部封装和镜面，与用于 R F I / E M I 屏蔽目的相比，更适宜于用于这个目的。

涂层的代用技术

本节介绍屏蔽塑料基底的另外两种方法，一种是在模压元件系列上附加导电性

质；另一种方法是应用导电金属箔。

（1）导电填充塑料

近几年来，为发展导电填充物作出了许多尝试和努力，这种导电填充物将在不损伤塑料的机械性质的情况下提供屏蔽性能。为了具有竞争力，所使用的材料必须比前述导电涂层技术中所用的材料价格低廉，并能提供 R F I / E M I 防护。

导电聚合物模压元件能提供物理性能坚固的机壳，它能使设备受到冲击时得到防护，而且当受到磨损或物理损伤时，不致象喷涂涂层那样，会使 R F I / E M I 屏蔽受到损害。设备制造者也因导电涂层不必抛光而从降低成本中得到好处。

不同材料被用作塑料中的导电填充物，包括铝粉和纤维、石墨、不锈钢、镍粉和涂银玻璃珠。影响选择填充物材料的三个因素是：

- **成本；**

- 要求导电填充物所占百分数。高面分数填充物不仅增加设备的磨损，还影响模压件的表面光洁度和物理性能；

- 纤维将按照处理时的熔液流动方向排列，而使角形和截面变化区域的屏蔽不均匀性增加，同时不定期引起机械强度的损失。

粉末金属已被证明具有某些优点，它能通过粉末与聚合物树脂的连接，改进模压件的机械性能。铝粉可使树脂基材的热传导增加，可用来改进导热性，而不锈钢纤维只需填充 5 %，就可获得良好的导电性，但铝粉通常则需要填充 3 0 ~ 4 0 %。低填充不锈钢纤维可以将模压件所处理材料的设计改为未加压材料所期望的压缩的设计。

有些应用填充树脂系列模压件的用户，报告说不仅应考虑设备磨损问题——当考虑复杂模压设备结构形式的塑料部件的巨额费用这一主要因素时所需要考虑的问题——之外，还应考虑到在有些模压件中存在导电颗粒的不均匀漂移问题。特别是拐角区域和截面急剧改变的地方，以及几乎找不到任何颗粒的恶劣情况。如果需要采用此项技术，在机壳设计时需要特别仔细，尤其要注意截面的任何一个突变。在设计模具时，如缺乏周密的考虑，就会出现无法使用的模压制品。而在制冷设备中，此类填充物能不太昂贵地提供有用的导热性质，此项技术已成功地应用在与 E M C 目的相反的静电控制中。

（2）胶箔和胶带

有时需要改变形状，则可采用背胶金属箔，它主要用于塑料表面，以提供屏蔽。通常，柔软的箔或带是用铜或铝制成的，可以用于机壳的内表面。然而，此项技术存在两个固有的问题如下：

- 生产是基于手工在基体易损的表面上安放箔片；
- 由基体至基体很少有完全相同的，特别是覆盖复杂的圆角。在一些部件上，需要在箔片之间进行重叠，这就很可能留下缝隙而成为缝隙天线。所采用的背胶常常是非导电的，它将在重叠的胶带或箔片之间形成电阻层。

不用置疑，在 R&D 环境中，对于 R F I / E M I 实验室鉴定，导电箔是一种有用的助手。可用于改进在 E M C 测试中失败的产品，并提高它们的性能。虽然不能被认为是一种理想的生产技术，但 μ 合金和其它软磁合金箔带是很有用的。尽管这些镍铁型合金有加工硬化的性质，如果应用适当，它们在磁场中能提供有用的屏蔽效能，并能很容易地将金属组件、部件附加在塑料模压件上。如果仔细地用在适当设计的部件上，则不需要对镍铁带或箔片重新进行热处理，但如果应用此技术需要箔有一定的形变，则还需进行热处理提高导磁性质。

EMC 电磁屏蔽材料设计者指南——连载（四）

3 编织丝网衬垫

机壳、机柜或机箱材料，无论是塑料喷涂导电漆的，还是用全金属的，在其上都有密封要求。

在接头和缝隙处，导电衬垫是补救屏蔽裙带性（图 3.1）被破坏的方法之一，这是对 R F I / E M I 屏蔽的非永久性的措施，例如门的密封、面板与机壳、机柜工机箱间的密封，以及与其它设备壳体间的密封。还有一种较永久性的密封，这包括：

- 设备上安装蜂窝板和其它屏蔽通风板；
- 设备上安装透明的导电窗；
- 用自攻螺丝、螺栓栓或其它紧固方法，把金属面板固定于金属框架上。

导电衬垫不是屏蔽体，但能保持屏蔽体的连续性。有各种各样已证明是有效的

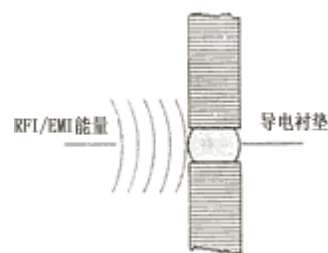


图 3.1 屏蔽体完整性

材料，其选择是根据衰减要求、环境要求、安装方法、防腐蚀、压紧力、接缝的不规则性和价格等因素。

本章详细描述设计编织丝网衬垫的原理。下一章介绍填充导电物的硅树脂衬垫。接地规则都是相同的。编织丝网衬垫已有几十年历史了，有最大的市场，为在接缝处恢复屏蔽体完整性以及其它壳体的连续性，提供了简便的方法。

设计思想

实际上，设计和研究工程师们一定要熟悉编织丝网衬垫，用于屏蔽时才能得到最佳蔽。

低阻接触

如果沿机箱周围的导电路径的连续性遭到破坏，例如加盖板（图 3.2）时，妨碍了电流的流动，因为盖板和机箱仅在几处点接触，而且在这些点处又不可能有低阻接触。细缝隙的作用就象有效的缝隙天线一样，能接收和传输电磁信号，在所有频率（四分之一波长小于缝隙长度）上，有 R F I / E M I 潜在的危险性。如果要保证好的屏蔽，必须在机箱和盖板之间是低阻接触，而且接触处应是连续的。此外，为有效实现屏蔽，在邻近接触点之间的间隔要小。

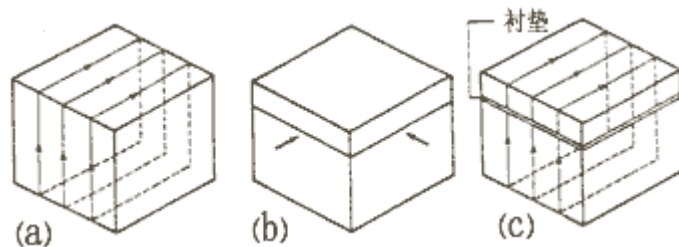


图 3.2 金属机箱/衬垫的电连续性；a) 感应电流的路径；

b) 由于盖板，导电连续性被破坏；c) 由衬垫重新建立导电路径的连续性。

衬垫使用

为了使机箱和盖板之间很好接触，可以使用屏蔽衬垫。在机箱和盖板之间填充衬垫，就可得到低阻接触。衬垫是有弹性的，中以调节尺寸的变化，满足规定的机械允差。

编织丝网衬垫是最普通、最经济的衬垫。它的弹性结构满足长接缝的不均匀性，丝网的微微磨损可以破坏氧化层，使表面间更好接触。机械硬度是重要的因素。丝网衬垫抗金属表面压力，其压力是集中在金属丝网的接触区。当丝网和金属表面的硬度相近，并在氧化膜上有大的压力出现时，氧化膜被破坏，重建了良好的

电接触。

衬垫可以减小接缝（金属机箱两部分之间的接缝）处的泄漏，是由于提供了两部分之间连续的、低阻路径。只要很好装填衬垫，且接触面干净，低阻 是能够实现的。在衬垫和两个导电表面之间，不应有涂漆层、粘合剂、润滑剂或其它绝缘物。常常，为了改善电接触，金属机箱的配合表面可以涂些镍环氧树脂涂料。

衬垫结构

编织丝网衬垫有两种类型：一种是压成矩形截面；一种是和状硅橡胶或其它弹性体加上一层或几层编织丝网。图 3.3 为第一种类型。图 3.3 a 中，在金属片 X X 和 Y Y 之间，衬垫提供低阻路径。导电路径是由丝网提供的，即从 X X 到 Y Y 是丝网的金属丝提供导电路径，也在它们之间起间隔作用，于是最好的安装如图 3.3 b 所示，使衬垫压缩在条，因此 X X 和 Y Y 之间又回到自身的机械接触。按这样的配置，使 X X 和 Y Y 紧靠在一起，缝 隙产生泄漏的可能性很小，衬垫在接缝处保持了良好的电接触。

图 3.3 丝网衬垫的安装

图 3.3 c 表示衬垫是由弹性体上加有管状金属丝网而组成。X X 和 Y Y 之间的接触是靠弹性体芯周围的金属丝网实现的。管状结构压缩后得到低的电阻，但是不会永久性形变，因此，在盖板或门的周围可以使许多缝隙密封。

为了获得最佳的屏蔽效能,屏蔽机箱制造时,使 X X 和 Y Y 之间的缝隙最小,缝隙通过放置在槽中的压缩衬垫来桥接。槽的横截面好坏十分重要:横截面的矩形形状不必太精确,只要避免横截面的变化,但要沿长度方向一致。

衬垫的压缩量

图 3.4 为施加于丝网衬垫的压力与衬垫按与未压缩时的百分比高度之间的关系。上面的曲线表示压力移开以后的永久性形变。低压力下的百分比高度曲线是陡峭的，因为在金属丝网衬垫是松弛的，但是在高压力之下，曲线不太陡峭，因为所有金属丝网都受到压力了。低压力下的永久性形变是无意义的。在使用中，推荐衬垫压缩量不小于 5%，保证产品松弛，防止永久性形变不大于 25%。

• 压缩形变

在衬垫上有过压存在时，将发生永久性形变。设计师把衬垫的使用分成三个主要情况：

- 永久性闭合——压缩形变是不重要的，因为衬垫不要求移去；
 - 有规律的开启与闭合——相同的和重复的开启和闭合，此时压缩形变不十分重要。典型例子是对称的盖板和带合页的门；
 - 可更换的——衬垫放置在不同位置上，每次都得更更换，例如波导中的圆形衬垫。
- 这里，特别要用对称的衬垫，不要重复使用初始的衬垫，而要用新的进行替换。正如已讨论过的那样，压缩形变的高度（衬垫已经压扁）可以比最小压缩高度更低，所以在衬垫和配合表面间将无电接触。

衬垫厚度

图 3.5 表示机箱盖板在 X Z 和 Z 之间接触较差，在 Y 处出现缝隙，下图表示通过缝隙的横截面以及在所标尺寸点处缝隙最大。这最大缝隙是所标尺寸 d。衬垫的压缩量推荐值在 5% 和 25% 之间，在 X 和 Z 处压缩量为 25%，在 Y 处为 5%，显然，尺寸 d 是衬垫 20% 未压缩的厚度，此时要求衬垫的厚度为 5d。在 X 和 Z 处，压缩量为 25%，于是，要使衬垫有缝隙，槽的深度为衬垫未被压缩时的 75%，即 3.75d。

图 3.5 盖板与屏蔽衬垫差的配合

金属和合金

用作编织丝网的材料是蒙乃尔合金、铜、镀锡铜、镀银铜、铝或不锈钢。也可使用镀锡、包铜的钢线（所谓S N－F E－C U），但实际上，任何市售的金属丝网可以用来制作衬垫，其直径为2～3 0 mm等、线径为0.05～0.1 5 2 mm。最常用的直径大约为0.1 1 2 mm，而用铝线来编织时，线径要大些。

某些更不常用的材料是金、钼、铬、镍铁合金、纯铁、铂、镍、银和镍铁高导磁合金。

伽伐尼的效应的考虑

当两个类似金属电极被浸在电触液中时，导体外表与电解液接触，电子就被从一个电极流向另一个电极。电子的流动（即电流）的建立，又支持电流的流动，施主电极就慢慢被腐蚀。不同的金属呈现这个效应有不同的程度，通过比较它们的电位差，就可以分级。

表3.1表示一些较常用的材料，这些材料中任何两个金属之间得出的电压，是表中材料电压之间的电位差。从耐腐蚀的观点看，理想的情况是，衬垫和接触表面都用相同的金属或合金制作，但这是不可能的，特别是那些金属丝硬度比配合面更硬的地方。在理论上，如果在大气中或盐雾条件下，接触的金属电位不大于0.3 V，如果用于室内，则为0.5 V，但要考虑凝露。

表 3.1 相对浸润在海水中氯化亚汞电极的电位			
材料	电位差 V	材料	电位差 V
压铸锌合金	-1.10	铁和钢：耐腐蚀，多量铬%	-0.35
镀锌钢、铬钝化	-1.05	镀锡钢	-0.45
镀镉钢	-0.80	铜和它的合金	-0.25
铝	-0.75	蒙乃尔合金	-0.25
硬铝	-0.60	银	0
铁和钢	-0.70	金	+0.15
铁和钢：耐腐蚀、12%铬	-0.45	铂	+0.15

表 3.2 编织丝网衬垫典型性能数据			
类型	全金属	全金属带液体或空气密封	金属外壳 海棉橡胶芯

闭合力（磅/²）	20-100	30-100	5-50
温度范围（℃）	200	-20～+100	-20～+100
环境密封	无	有	无
屏蔽效能（dB）			
H 场，200KHz	60-80	60-80	60-80
E 场，100MHz	70-80	70-80	80-100

E 场，200MHz	80-100	60-80	60-80
E 场，2GHz	60-80	60-80	60-80
E 场，10GHz	40-60	40-60	40-60

编织衬垫的类型

编织丝网衬垫的基本家族可分为全编织丝网衬垫和橡胶芯编织丝网衬垫，包括需要环境密封的衬垫和带边的衬垫等。

编织衬垫的类型

编织丝网衬垫的基本家族可分为全编织丝网衬垫和橡胶芯编织丝网衬垫，包括需要环境密封的衬垫和带边的衬垫等。

全编织丝网衬垫

全编织丝网衬垫是一种弹性衬垫，它可以理想地用于 R F I / E M I 屏蔽机箱和屏蔽室门；通常其横截面包括矩形、圆形以及带边的圆形（或“P”型）等。带边的衬垫将在另一节中介绍。

表 3. 2 表示全金属或全编织丝网衬垫的典型性能数据。图 3. 7

表示各种衬垫的弹性数据。

图 3. 7 衬垫的弹性

• 橡胶芯编织丝网衬垫

在这种结构中，编织丝网套在一个硅橡胶管上，提供一种高弹性、半全天候的 R F I / E M I 衬垫。橡胶芯编织丝网衬垫将全编织丝网（弹性和导电性）的特性和硅橡胶的特性结合在一起，对于金属机壳和浇铸的或机械的表面都是理想的衬垫材料。硅橡胶管可提供抗灰尘、雨和空气的密封。为了改进 R F I / E M I 屏蔽，可以增加一层编织丝网。这些衬垫能用和全金属衬垫相同的方法固定在给定位置上。

圆形带边的截面是常用的结构。

图 3. 9 为一种能得到适宜的衬垫订货尺寸的标准连接器。用户可按需要的长度切割标准衬垫。为保证 R F I / E M I 屏蔽的连续性，应使丝网延长 4 0 mm 后切断，终端扭绞后插入硅橡胶管，将连接器置于其两端，用适当的胶固定，并将所覆盖的丝网箍紧固定在连接器上，再扭绞后使连接面完全连接。

图 3. 9 橡胶芯衬垫连接系统

橡胶密封丝网衬垫

这类编织丝网衬垫是为环境密封而生产的，它们就象单一部件那样组成一个橡胶密封条，并与 R F I / E M I 屏蔽衬垫搭接。标准橡胶密封材料是氯丁橡胶，但是硅发泡橡胶和其它材料也能应用。这种圆截面编织丝网衬垫有一个橡胶芯，而矩形截面衬垫则应用有弹性的编织丝网。标准截面衬垫可在衬垫的非导体元件上加或不加固定胶后制成。加背胶的衬垫将在下面介绍。

在许多应用场合都要用到带边的衬垫。这种衬垫的结构上有一条编织丝网带，它们可以用铆钉、点焊，或用两块距离可调的板挤压固定。圆柱形截面的衬垫可由编织丝网衬垫构成，或由编织丝网衬垫和硅橡胶芯组成。

带边的衬垫不能塞进缝里，但能与平面接触。通常，由于屏蔽合与盖的接触不良，屏蔽效能不如采用屏蔽衬垫后的值。在许多情况下，带边的衬垫提供的屏蔽效能能满足要求的，而且它们还可以改进已有的结构。

衬垫制造

鉴于编纳网衬垫是连续长度的材料，通常需要成卷供应，但又需要给出适当精确的尺寸，甚至包括安装孔。可以按长度得到材料，并可作小的调节，还有多方面的适应性，可以开发和快速生产样品，如果需要，还可以改进。

背胶衬垫系列

压敏胶薄膜只要撕下背后的纸条就可快速地使用。而且，当与海棉胶密封衬垫结合使用时，还可以得到廉价的固定方式，但重要的是要弄清楚是否需要用胶将衬垫固定在某一位置达几年之久，还是暂时固定在初始位置上，而实际长度的固定是用其它方法得到的。

压敏胶薄膜本质上是非导电的，而且生产人员城要明白，绝缘胶膜不应靠近导电凸缘上。当制造过程中应用液态胶时，实验证明，只要仔细操作，它们可以用在任何地方。当然，更昂贵的导电胶可用来固定编织网衬垫，但需要仔细认真才行。环氧树脂胶并不比氯丁或硅橡胶更有效。如果需要导电连接，银—硅橡胶则是较好的一种。

硅橡胶系列是衬垫与硅橡胶芯连接的理想方法，正如前面所指出的，需要熟练地编织操作。

熔合系列

显然，用编织网衬垫不可能产生一个完整的直角，而应在衬垫制造过程中适当设计其半径，使它最终能满足所需要的斜角。下一章将讨论如何使用硅橡胶衬垫得到所需要的真正直角。

法兰分离式衬垫设计的研究

控制法兰分离的设计是使衬垫不过压的重要保证，如图 3.15 所示。设计依据之一是保证法兰盘足够硬，而不致在法兰固定件之间引起显著的弯曲。相配合的法兰就象螺母和螺钉配合时那样，在必要的公差间隙中会发生 R F I / E M I 泄漏。理想情况下，

配合法兰盘的外部应当是屏蔽室外侧的入口；因此可以用螺钉固定法兰盘，螺钉可穿过屏蔽外侧的法兰盘。由于有紧固件，R F I / E M I 泄漏不再影响屏蔽室总体。

当新的电子设备需要进行屏蔽设计或存在 R F I / E M I 的设备需要加固时，要记住以下事项：

- 最差电连接决定整个屏蔽室的屏蔽效能；
- 检验衬垫是否能提供所要求的 R F I / E M I 屏蔽并满足密封特性；
- 金属至金属接触良好，防止能量泄漏和辐射；
- 用最小厚度与宽度的衬垫处理连接处的不连续面；
- 保证足够的法兰表面，以便安装合适的衬垫；
- 设计屏蔽衬垫，使它经过适当压缩后能提供良好的 R F I / E M I 密封；
- 按不同压力将各类衬垫分级；
- 保证与衬垫接触的金属表面或法兰盘是清洁的，并且完全没有被腐蚀，没有水分、油和其它绝缘层；
- 保证配合表面适当平滑；
- 金属与合金直接接触时，应仔细选择，使电位差最小；
- 查明衬垫对振动和温度的限制。

EMC 电磁屏蔽材料设计者指南——连载（五）

4 硅橡胶衬垫

在上一章中介绍了编织丝网衬垫系统的应用，屏蔽原理同样也用于掺有高导电填充料的硅材料。在硅橡胶中掺入均匀分布的金属颗粒，加工时掺入的，把金属颗粒掺入到粘合体中，形成导电的弹性化合物，既可屏蔽 R F I，又可气密。这是由于材料中金属颗粒和弹性体的联合作用。

硅橡胶衬垫类型

硅橡胶系统通常用于模压成形、薄片冲压成形、印制板屏蔽衬垫和模制零件，硅橡胶衬垫可广泛应用。E M C 设计师可用来阻挡 R F I，方便应用。

金属填充物

硅橡胶中通常掺入银颗粒，但是近来由于成本的原因，由镀银的金属填充物代替。大多数的填充物为在铝、镍和 ballotini 与镀银，后来在玻璃或陶瓷微球状的珠上镀银。除了对重量和节约成本以外，设计时应使 ballotini 方法避开振动条件和 E M P（电磁脉冲）环境。

纯镍粉是用于各种目的好的填充料，碳或石墨也可用，但屏蔽效能较差，属用于静电和放电和地面设备应用，它们的导电性较差。

伽尔伐尼电池效应考虑

在选择适当的硅橡胶系统时，一个重要的问题是电腐蚀，例如上一章编织丝网中考虑的。

挤压成型

大多数制造商至少提供每种截面的十种尺寸硅橡胶衬垫，尽量使设计师得到各种用途的产品，无需冒专门制作的风险。

空心型

空心截面的既有超压缩性，又有同相当的实心横截面相比性，可用在精度稍差些的地方。

特殊剖面

U 型槽和 H 型剖面是用于薄片型的机壳；两种截面沿金属薄壁或条安装。实际用于方舱的门框上。

衬垫装填

挤压成型的衬垫安装常用于槽或沟中。这些衬垫既适用于方舱的压铸件，也适用于

涂导电塑料的铸件。由于材料的塑性形变要保持一定的体积，实心硅橡胶实际上是不可压缩的；因此要给出可压缩性的说明。

在制造沟槽时，总是要比弹性体的截面大些。因为允许弹性体形变，如图 4. 4 槽的截面所示。该图用来说明用圆形衬垫的槽形状，还列出了五种不同尺寸的衬垫。

直径	槽宽	槽高
1.6	2.4	1.2
2.4	3.1	1.7
3.2	3.8	2.4
4.8	6.2	3.8
6.4	8.0	5.1

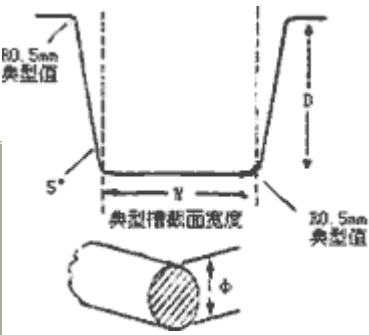


图 4. 4 圆形衬垫的槽截面

决不允许出现图 4. 5a 的情况，图 4. 5 a 安装衬垫槽的截面积是错误的。图 4. 5b 增加槽的宽度，使得衬垫可有适当的压缩。

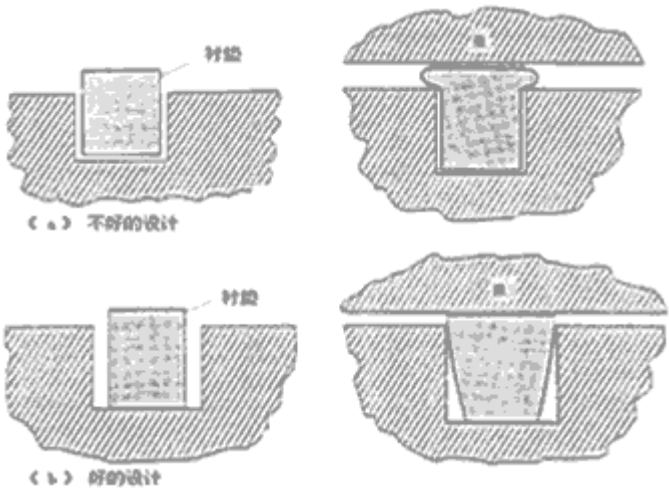


图 4. 5 衬垫形变的考虑 (a) 槽宽不够 (b) 加宽的槽，允许衬垫形变压缩量

通常机壳盖的力设计，是以不产生聚合物衬垫的压缩为准；当然，这是与上一章中编织网进行对比。衬垫受压时若不损坏，可以使用寿命增加。表 4. 1 为物理特性，

表 4.2 为电特性。

表 4.1 桂橡胶的物理特性

特性	试验方法	52-CSS-115	52-CSS-117	52-CSS-118	52-CSS-119	52-CSS-120
弹性体		桂橡胶	桂橡胶	桂橡胶	桂橡胶	桂橡胶
填充物		镍	银-ballotini	镍镀银	铜镀银	铝镀银
颜色		绿	淡黄色	淡黄色	淡黄色	淡黄色
硬度(国际 橡胶硬度 标准±5)	BS903A26	80	75	70	75	70
比重	BS903A1	3.8	1.94	3.7	3.3	2.0
抗拉强度 MPa(min)	BS903A2	2.0	1.5	2.0	2.0	1.5
扯裂强度 N/mm(min)	BS903A3	3.0	7.0	7.0	2.2	5.5
断裂时伸 强度 %(min)	BS903A2	300	120	200	100	200
压缩量 %(max)	BS903A6 22h 125℃	20	25	30	30	30
	BS903a6	20	30	30	30	30
	70h 100℃					
温度范 围,℃		-40～+125	-55～+200	-55～+125	-55～+125	-55～+160

表 4.2 桂橡胶的电特性

特性	试验方法	52-CSS-115	52-CSS-117	52-CSS-118	52-CSS-119	52-CSS-120
屏蔽效能 dB(min) 29MHz～	MIL-STD- 285	100	100	100	100	100

10GHz 电 场						
体积电阻 率 $\Omega\text{-cm}(\text{max})$	MIL-G-83 528	0.20	0.008	0.008	0.008	0.008
寿命试验 后体积电 阻率 $\Omega\text{-cm}(\text{max})$	MIL-G-83 528 48h 155°C	0.40	0.010	0.010	0.010	0.010
振动时电 稳定性 $\Omega\text{-cm}(\text{max})$	MIL-G-83 528	试验中 0.30 试验后 0.20	0.015 0.008	0.010 0.005	0.012 0.008	0.012 0.008
抗拉后是 电稳定性 $\Omega\text{-cm}(\text{max})$	MIL-G-83 528	0.3	0.010	0.010	0.015	0.015
EMP 易损 性 KA/英寸 (min)	MIL-G-83 528	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9

[| 下一页 |](#)

衬垫制作

衬垫截面可以剪裁和切片成型；用此法成型的衬垫成本低。切片成型方法不损球 E M C 或环境密封性能，切片法一般用于磁化物材料，可以加垫加压粘结。片状的强度与衬垫材料一样，且有弹性。

设计槽的截面时，考虑冲压，企口底必须设计一个半径等于或大于密封条宽度的圆弧角。另外，镀银导电硅粘合剂可以在室温下粘结。

O 型圈

O 型和 D 型横截成圈加工成形容易，适合于模具加工。扁平垫圈可以做矩形，加工时可以模压



优越，如图 4.6。实际上，任何截面的形状都可加工成圈，只是复杂截成或有体积要求，才要严格检验。

图 4.6 圈的加工

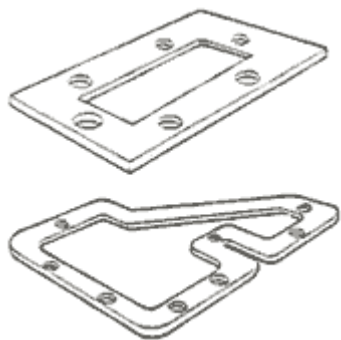


图 4.7 冲切的垫圈

垫圈尺寸精度要求高时，可用冲切的办法加工，但较浪费材料，利用率至多达 80%。冲切的工具不十分贵，适用于波导或法兰安装的衬垫加工。例如，要制作两种垫圈，冲切技术可以很好解决，如图 4.7。不仅可以制作衬垫要求的形状，还可以同时加工安装孔，只是在设计模具时考虑进去就行了。

模制

冲压方法适合于薄片型衬垫，较厚的衬垫或较复杂的形状，可以用模制的方法，模制的方法适合于较厚的导电弹性材料。如果一旦发生设计有变化，就立即停止生产。

印制板用屏蔽衬垫

硅橡胶和聚乙烯可以用作 EMC 衬垫，只方合地用丝漏印技术，此法比上述冲压法要节约得多。也可用于模制导电弹性体。

表 4.3 列出这类衬垫的电和物理特性。

表 4.3 印制电路屏蔽聚合物特性

聚合物类型	填充料	工作温度 ℃(最小/最大)	a) 硬度, A 级 b) 抗拉强度, MPa c) 断裂时拉伸系数, %	物理特性: 热老化后 168h, 70℃ a) 硬度变化, A 级 b) 抗拉变化, %	电特性: 体积电阻率 Ω-cm(最大)	屏蔽效能 ASTM ES 7-83 ASTM ES 7-83 NFC 1000 30MHz~1GHz (dB) (最小 / 最在)	ASTM ES 7-83 FFC 1000 MK-111 30MHz~1GHz (dB) (最小 / 最在)	EMP 易损性 MIL-G-83528	振动 MIL-G-83528 a) 初始体电阻率 b) 试验中体电阻率 c) 试验后体电阻率
-------	-----	------------------	---	---	------------------------	--	--	---------------------	--

				c) 拉伸变化, %					Ω -cm
乙烯基	银	-65~125	a) 75 b) 4.07 c) 50	a)+4 b)-23 c)+20	0.0004	76~106	38~52	通过	a)0.0036 b)0.0036 c)0.0036
硅	银/镍	-65~200	a)81 b)1.45 c)120	a)N/C b)+12 c)+8	0.0059	76~106	38~62	通过	a)0.0057 b)0.0050 c)0.0050
乙烯基	银/镍	-65~125	a)78 b)2.63 c)50	a)-2 b)+21 c)20	0.0014	76~106	41~60	通过	a)0.0052 b)0.0050 c)0.0050

定制产品

丝印工具与模制工具相比成本较低；是可按用户要求制作的经济的衬垫系统。衬垫可以在临时要交付产品上制作，可减少库存量。特殊形状可直接印制在印制电路板、盖板或法兰上。为了减轻重量，规定周边宽度可减至 1 . 5 mm。

氟硅

如果有受液压流体腐蚀的话，如硅脂、双酯基或石油衍生物，硅橡胶可由氟硅系统代替，是极耐腐蚀的。

金属丝硅衬垫

在硅聚合物衬垫中埋入金属丝有两种，即铝丝或蒙乃丝，在化学上他们接合较好，且可卷得最小。有一种是用实心硅化合物，其标准埋线密度为每平方厘米 1 4 5 根金属丝。另一种用法是软体硅海绵体。图 4 . 1 0 表示本研究的屏蔽衰减曲线。

应用

对于军事、工业和商业应用，这两种类型在 R F I / E M I 屏蔽广阔的频段上，有极好的性能。海绵结构实际用于表面不平整度，且只有很低的压力处。实心硅材料推

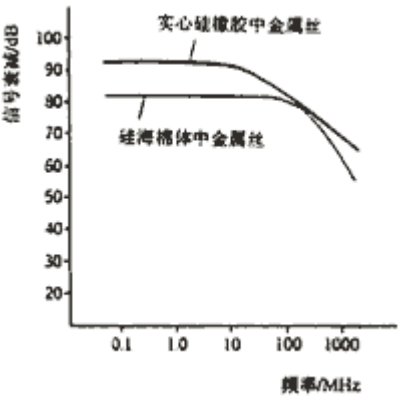


图 4 . 10 硅橡胶中埋入金属丝的典型屏蔽数据

荐压力为 3 4 5 ～ 6 9 0 K P a （ 5 0 ～ 1 0 0 磅 / 平方英寸）和海绵状的结构推荐压力为 1 7 2 ～ 3 4 5 K P a （ 2 5 ～ 5 0 磅 / 平方英寸）。为了防止衬垫由于过压力损坏，设计时应考虑一个压缩量限制的限制器，是十分必要的。

定做产品

衬垫的加工方法可以剪切；也可以冲压。为了得到满足屏蔽要求，配合表面上用条带状裸金属和保护导电镀层。条带可以在一面涂压敏粘结剂。在氟硅系统中可以埋入金属丝。

硅橡胶中的丝网

这种类型的衬垫的制作可以埋入两种不同的丝网。一种是埋铝丝网，可以作为导电衬垫，且在每平方厘米有 9 5 个触点。另一种是在硅橡胶中埋入蒙乃尔丝网，大约每平方厘米有 3 3 个触点。这两种衬垫，在丝网孔中填入了密封的化合物，以提供环境密封，图 4 . 1 1 是屏蔽有效性数据。

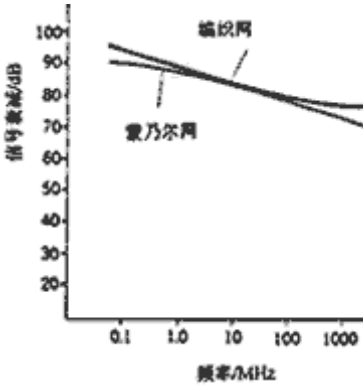


图 4 . 1 1 硅橡胶中埋入丝网的典型屏蔽数据

应用

这两种类型的衬垫推荐用于电子仪器机壳的 R F I / E M C 的屏蔽。编织丝网的设计，可用于军用的、工业的和商业的屏蔽要求，还要有好的环境密封要求，而金属丝网提供耐磨的导电衬垫材料，也是好的电磁密封材料。这两种衬垫推荐的压力为 3 4 5 K P a （ 5 0 磅 / 平方英寸）。

定做产品

衬垫制作是对薄片材料冲切或剪切方法。密封孔或安装孔加工时，在孔和衬垫材料边缘之间至少要留 2. 5 mm。如果不可能实现时，在孔上系用斜坡结构。为了使配合面很好配合，必须清洁裸露的金属——保护导电镀层，然后再使用。背面涂压敏粘合剂，可以方便地固定和组合。如需要，这两种衬垫填料也可以是氟硅系统。

与编织丝网的比较

优点

通常，小截面衬垫用硅橡胶类，放在沟槽内，固定较容易，配合法兰较小。

与大多数编织丝网相比，还可提供环境密封。衬垫的倒角较容易，衬垫加工方便，粘合剂可改变。衬垫在现场更换较容易。对衬垫加的压力小、变型较小，可延长使用寿命。

缺点

硅橡胶埋金属丝网衬垫价格较贵。如果不使用标准产品或截面形状，要花巨大的工具费用，这是与编织丝网衬垫相比。

EMC 电磁屏蔽材料设计者指南——连载（六）

5、填料和粘合剂

很多种类的导电填料和粘合剂，以及在某种程度上说的润滑剂给工程师们提供了增强 EMC 屏蔽完整性的通用方法。他们大多数都采用以前的带金属微粒的树脂胶、镀银的片状结构和球状结构用得最普遍。在最初的设计中使用这种类型的密封剂能对屏蔽进行一点“改进”。

填缝料

不论是单成分还是两种成分的树脂胶，树脂胶内的金属化填料均能在一对配件之间提供很好的电气连接。这一对配件虽然从机械上是固定在一起的，但它们之间还需要半弹性的 EMC 密封。填料要设计成不完全固化的，这样材料就能随着匹配元件移动。这样还有一个特别的好处就是当设备进行维修或移动时，需要把机壳各部分拆卸下来后重新组装时，把旧的填料刮去，重新加入新材料。

应用

在导电填料的众多用途中，其典型的应用如下：屏蔽室或机壳上面板的 RFI / EMI 密封，屏蔽的地下导管系统，防潮接缝，修理损坏的屏蔽密封垫，对螺栓和螺丝孔进行密封，以及许多变型的紧固件系统和设备提供的密封。

这种导电材料不仅能用于两个表面上无氧化层、并经去脂处理、非常干净的金属面之间的密封，还能用于塑料面的表面涂层。

导电填料的使用方法，可以用传统的填隙枪或诸如小的注射器一类的配料设备。也可以用手工方法，如用刮刀或油灰刀。填料没有任何腐蚀性。在室温下使用，

大多数填料不会固化。这种特性可以使填料方便地除去或维修。

如表 5.1 给出了两种填料的典型物理特性，掺硅银导电的填料和掺镍导电的填料。与导电银填料相比，镍的价格较便宜，且具有不同的电特性。

表 5.1 典型填料的物理特性

导电填料	比重	体电阻率 $\Omega\text{—cm}$	固化时间 20℃时 h	屏蔽效能 dB	工作温度范围 ℃	寿命 月
银	4.90	0.001	2	100	55~200	6
镍	2.50	0.05	2	55	55~200	6

导电粘合剂

与填料相比，填料仅需具有合适的弹性，能密封空隙即可，而粘合剂除了导电性以外，还要有足够的机械接合强度，它们用于需连接、密封或焊接两个导电表面：它的成分主要是银系统，溶剂有环氧树脂和硅树脂两种。

应用

粘合剂的典型应用于固定导电衬垫，凹槽可固定导电衬垫处；螺栓和螺钉孔；在电溅射的光导膜片和金属化织物间的连接。在波导工程中，它们方便地用于将搭接部分连接在一起，以及将法兰盘固定在波导上。

环氧树脂

环氧树脂的基本成分有两种。这两种成分尽管在室温下要固化，但还是提供了数小时的适用期，并且固化后的体电阻率大约为 $0.001\ \Omega\text{—cm}$ 。当工作环境温度在 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $+175\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间时，固化材料很坚硬并具有大约 100 kg/cm 的抗剪强度。

环氧树脂最简单的配方是将 A 和 B 两部分按重量或体积等比例混合，这样可以避免混合误差的增大。导电表面必须是十分干净的，没有任何油脂，润滑剂和下模剂及其他一些杂质的痕迹。环氧树脂的使用方法，用刮刀、小刀、滚扎机或其他一些方便的工具。

硅树脂

硅树脂粘合剂似乎初看起来是与用作隔离剂的硅树脂多少有些矛盾。然而，近来提出的配方使硅树脂成为可行的粘合剂，并且有合适的机械性能。它的体电阻率有

可能达到约 $0.05 \Omega \cdot \text{cm}$ 。有时候在未混合的有用材料中放入塑料片将两种成分 A 和 B 分开。一旦取出塑料片，各种成分就能进行有效的混合。

硅树脂的基本用法是对硅树脂采用挤压成型法进行金属加载形成导电硅树脂 O 型环。

其它材料

除了银以外，其他各种各样的填料能提供足够的体电阻率特性，就是不能提供足够的强度；还有的有腐蚀问题，但另有一些如铜，石墨和镍等填料还没有被广泛接受和使用。

导电润滑脂

导电润滑脂的功能之一就是能在涂有润滑的配件之间提供很小的接触电阻，如开关。

通常，以银硅树脂为主的导电润滑剂是一种导电率很高的材料。它不包含碳或石墨填充剂。在很多环境条件下，这种材料都能保持它的电特性和润滑特性。大多数导电润滑剂是粘滞软膏。能在高温或架空的表面上使用而不会滴落或流动。它们还具有防潮性能和防腐蚀性能。

导电润滑脂用在配电站内的开关中或悬挂的绝缘子中心减小 RFI / EMI 噪声。它们也能减小开关滑动金属触片的击穿和避免把接点烧坏。这种导电润滑脂是很有用的，可在滑动的金属触片表面之间保持连续的低阻抗。

由于具有与导电粘合剂一样的体电阻率，所以这样单成分润滑剂的适用期是无限的。在 -50°C 到 $+220^\circ\text{C}$ 的范围内，它是一种有效的导电润滑剂，尤其是在 0°C 以下时，可用在断路器中。

6、机壳上的出入口

使用以前讨论过的技术和材料，不难使一个机壳在从直流直到可见光电磁波频率范围内提供 110 dB 的屏蔽效能。当然，除了低频磁场屏蔽，但在实际中不可能获得理论上的屏蔽效果，因为机壳所必须的出入口和穿透孔破坏了机壳的完整性，使屏蔽效能降低，如图 6.1 所示：

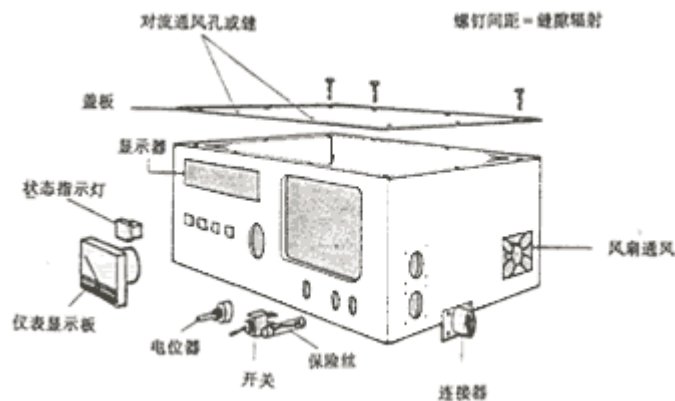


图 6.1 一些破坏机壳完整性的因素

屏蔽的完整性

第 3 章讨论了在屏蔽门上用适当的填料的实践，第 9 章讨论了屏蔽室的门结构。但是，除了门以外，在屏蔽的设计中需要考虑以下的一些或全部因素：

- 盖板；
- 通用孔；
- 测量仪表的指示窗；
- 显示窗；
- 电位器轴；
- 指示灯；
- 保险丝；
- 开关；
- 电源线和信号线连接器。

孔的处理方法

显然，几乎在所有实际应用中都需要对孔、缝隙进行屏蔽。虽然从理论上讲，对六面体金属盒的所有边进行很好的焊接就能提供极好的屏蔽，但这在实际上是不可能的。因此，就有必要考虑采用哪种材料来提高屏蔽的完整性。

盖板

为了仪器的维护，测试或校准，需要一次一次地打开仪器带孔的盖板。对于金属盖板来说，最常采用的方法是第 3 章中讨论的弹性填料。当然，也可以使用第 4 章中所介绍的加载硅树脂填料。

另一方法是指形物支撑，采用铜铍合金指形支撑物应小心使用，那么就不太容易损坏。一般来讲，最好的方法是采用编织导线网或加有金属微粒的硅树脂填料。如果出入口是临时使用，那么可以考虑导电填料。当盖板移去时，需要把已有的导电填料刮除报废。露出配件干净的接触表面。当盖板重新盖上时，再仔细填入新的填料以保证接合的完整性。

通风孔

通风孔基本上分为两类，Rolls Royce 蜂窝状通风孔和较便宜的线网通风孔。通常，对于屏蔽室和屏蔽机壳，既需要对流通风也需要风扇强通风。因为必须要从射频衰减和对空气流的阻力来综合考虑通风口所用电磁屏的屏蔽材料。有两种可能的方法：一种是采用屏蔽盖板；另一种是采用蜂窝状盖板。正如下节所要解释的那样。屏蔽盖板相对较便宜，但它的屏蔽效能有限，并且由于紊流还会影响空气的流动。

蜂窝状通风孔

常常采用蜂窝状材料是因为这种材料既能提供较高的屏蔽效能又能提供线形空气流。在如图 6.2 所示的蜂窝状结构中，每一个六边形单元都是一个截止波导，用于提高屏蔽效能。设计者可用蜂窝状材料来密封可能为 R F 干扰信号通道的散热孔、通风孔和光线孔。这种材料具有重量轻、空气流阻力小、屏蔽效能高和率流小等优点。面板是根据用户的要求做成预先钻孔的或有固定的钩扣的刚性铝结构。

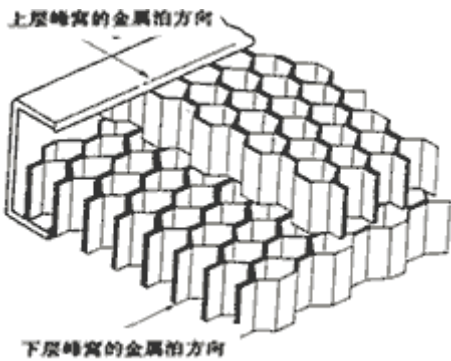
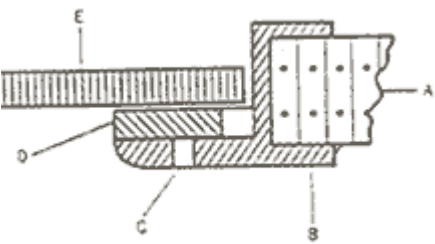


图 6.2 蜂窝结构

在对屏蔽要求很高的设计中，建议采用交叉式蜂窝网状通风结构，也就是在一个框架内由两个 6.35 mm 厚的蜂窝单元制作。这是以稍微增加一点空气的阻力为代价提高了对 R F 干扰信号的衰减。

另外一种可以采用的结构是在交叉式蜂窝状结构中全部采用一种蜂窝单元或者所有的蜂窝单元都进行标准排列，以使单元与滤波器平面的夹角不为 90°（常常为 45°，偶尔也有 30° 或 60°）。采用这种结构有以下几点优点：防水防雨；定向损耗；屏蔽效能增加；小室的长宽比增加。

的蜂窝状铝面板，可以在面板上添加扁平金属或编织。在机壳和通风的铝板之间可以用不同种类的填料来。将编织导线网与海绵状硅树脂结合起来使用十分普 3 所示。一些典型的屏蔽性能数据如表 6.1 所示。



A=铝蜂窝 B=铝型材 C=安装孔 D=网/海绵状衬垫 E=机壳

图 6.3 蜂窝状通风衬垫的典型安装

表 6.1 典型的屏蔽效能

	频率	屏蔽效能
H 场	10KHz	40
	100KHz	54
	1MHz	63
E 和 P 场	1MHz	127
	10MHz	120
	100MHz	113
	1GHz	102
	10GHz	85

对 2 5 0 × 2 5 0 mm 蜂窝通风板的测量

R F I 和尘埃过滤器

蜂窝状通风孔既不能消除灰尘也不能在通风过程中减小一些灰尘，不管用于屏蔽的是编织懈线网也好还是波纹金属网也好。若在这种结构中加入润滑油涂层就可改善它的防尘性能。

电子滤波器和防尘层有三种作用：衰减 R F I ，提代冷空气的通道，滤除空气流中的灰尘，它主要用于低速或中速空气流的工业环境中。滤波器本身由三层波纹铝网构成，以提供最大的去除灰尘的能力和最小的空气流阻力。

安装和密封的方法与蜂窝状通风孔类似。

编织网

要求屏蔽很严时，可以在通风孔处铺设简单的编织导线网带，并采用导电环氧树脂粘合剂，将它固定在应有的位置，以保证金属网与干净的导电机壳壁的电气连接。这种方法的问题是金属网那一层极易损坏或变形。为了避免这种情况的发生，必须要对金属网作额外的机械保护。

观察孔

要求对测量仪、显示器或其它类型的监测设备进行观察与机壳的屏蔽完整性是相矛盾的，通常考虑以下几种方案。

线网窗

用精细的编织线网夹在两层玻璃或聚丙烯板之间。通常，编织网由直径为 0.05 mm 的不锈钢导线做成，每英寸大约有 1000 个孔。导线被涂成黑色以减小光的反射。RFI / EMI 屏蔽滤波器根据不同的应用，通常由玻璃板或聚丙烯制作。玻璃板很结实，有很强的抗腐蚀性和防划痕能力，表面还涂有多层防反射的涂层。相反地，聚丙烯滤波器有很强的抗冲击力，但很容易被划伤，表面软化也非常迅速。对于塑料窗而言是最佳的硬涂层与玻璃的表面硬度不匹配，而又很难在聚丙烯板上形成防反射的透明的导电涂层。

玻璃滤波器中可以是扁平的，也可以根据视频显示器屏蔽的尺寸来确定形状。扁平滤波器的厚度为 1 至 5 mm，弧形 RFI / EMI 滤波器的厚度为 3 到 5 mm。还可以加入偏光镜和光谱响应滤波器、RFI / EMI 滤波器内的导电媒质必须与外壳地端接。

为了提供简单的端接，金属导线网要比绝缘玻璃或塑料层高出一些，以便外框或衬垫能进行电气连接。有时候采用第 5 章中所述的导电粘合剂来提供低阻抗端接。

在图 6.4 中描述三种屏蔽窗金属网的端接方法。在图 6.4 a 中，经过防反射处理的编织导线金属网，放在两层透明的薄板之间，两端用高导电性粘合剂，把金属带做成 U 形实现电气端接。编织导线填料与粘合带表面紧密接触，以保证良好的低阻抗连接。

如图 6.4 b 所示为编织导线衬垫与金属屏蔽网直接电气连接方法。这种方法允许在窗的周围使用玻璃框。如图 6.4c 中，编织金属网先镀上防反射涂层，然后再夹在两块编织金属网，能保证屏蔽的完整性。通过粘合胶带将编织金属网固定在相应的位置上，并使之与外部窗玻璃或塑料相连。

其他金属网窗的端接方法，包括使用镀银汇流条与金属网相连；这些汇流条有时是用导电环氧树脂做成的。

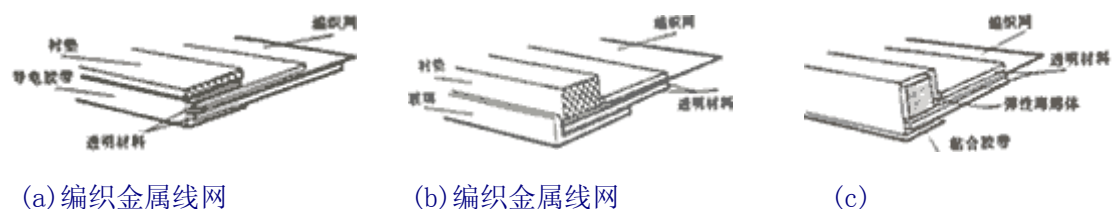


图 6.4 屏蔽金属网的端接

金属织物窗

另一种方法是使用 55 % 或更多的金属化织物作为窗材料。如第 7 章中所描述的那

样。这是一种镀有镍的聚酯纤维。当用于光学方面时，表面涂上黑颜色。

导电光学胶片

另一种完全不同的方法是使用阴极真空镀膜。膜镀在有弹性的聚合胶片的基片上，如聚酯软胶片、聚酰应胺胶片或聚碳酸脂胶片。带电正离子被材料的强大负电压所吸引，打到材料上，从材料表面撞出可移动的原子。这些射出的高能原子被束服在基片表面就形成了镀膜，而且镀膜的性质可控。

这个过程除了可以用来制造导电光学胶片以外，还可以用于制造涂层织物，金属箔、金属网和各种不同的弹性聚合物。经过低温真空处理的涂层费用较低，性能好。任何金属，合金和各种化合物都可以采用真空技术来镀膜、镀膜金属的高能量使其具有极好的对基片的附着力，并且导电胶片的均匀性很好。

胶片可适应各处厚度。较薄的胶片通常必须带有刚性支持物，如玻璃或聚丙烯板，并使用压敏或可溶于水的粘合剂。高导电涂层，如透明导电的金和银镀层用于 R F I / E M I 屏蔽。这些镀层是非常稳定的，可作为耐磨反光胶片上的防反射涂层。与前面所讨论的导电屏蔽网不同，这种涂层在与阴极射线管一起使用时，不会引起扰动图形，

当需要使用大面积的半透明屏蔽时，可以采用多层阴极真空喷镀膜。在很多情况下，这种多层金属镀膜比镀金层经济得多，并且屏蔽效能差不多。这种涂层的典型应用包括人能进得去的法接第笼的屏蔽以及建筑物和其他一些结构的窗的屏蔽。这种涂层在应用中的一个另外的好处是可作为太阳能可控涂层。R F I / E M I 屏蔽减少了建筑向外的 R F I / E M I 辐射，同时也降低了进入建筑物内部的辐射。阴极真空喷镀胶片的 R F I / E M I 屏蔽主要是对波的反射作用而不是吸收。这是因为胶片镀层具有很高的导电性。如图 6.6 和 6.7 所示为可见光的传输特性和胶片材料的屏蔽性能。

这儿所提到的屏蔽效能是在理想的环境条件下所测得的典型数据。胶片的安装方式受一些因素影响，可有所不同，屏蔽效能也有所不同。如果镀层与外壳其余部分电气连接很好。那么这时屏蔽效能最佳。如果电镀胶片与外壳间存在不导电空隙时，这种空隙的作用会就类似于缝隙天线而导致辐射。电镀光学胶片应通过使用导电弹性填料、导电胶带或加载导电金属的粘合剂接地。

当电镀胶片用于建筑物中的 R F I / E M I 屏蔽时，应考虑以下几点，如果建筑物的其他部分在设计和建造时没有考虑 R F I / E M I 屏蔽，那么电镀胶片的屏蔽效能

要严重打折。要避免胶片与窗结构之间的空隙。沿电镀胶片一周应通过框架接地。应对整个建筑物进行测试，以保证获得足够的屏蔽效能。

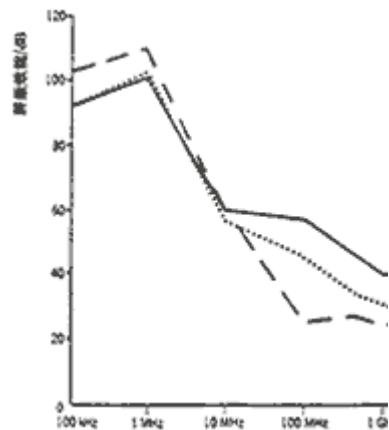
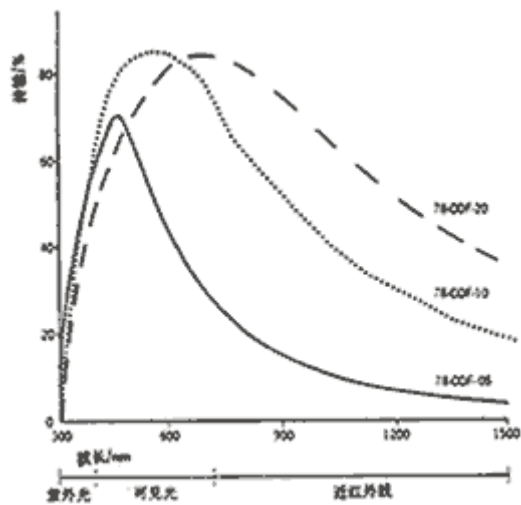
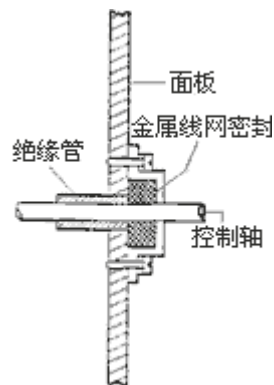


图 6.6 三种表面电阻率的典型胶片材料的谱特性 图 6.7 图 6.6 中间一种胶片的屏蔽效能

78-COF-05 为 $5\ \Omega/\square$ ，78-COF-10 为 $10\ \Omega/\square$ 和 78-COF-20 为 $20\ \Omega/\square$

控制轴

使用金属控制轴的地方，如电位器，控制轴要穿透屏蔽外壳。因此，它们应通过填充导电填料来密封，通常使用编织金属网，控制轴应穿过填充的金属绝缘管。典型的结构如图 6.8 所示，其中绝缘管与机壳面板电气相连。



EMC 电磁屏蔽材料设计者指南——连载（七）

第 7 章 特殊屏蔽材料

在本章节中提到了一些在 EMC 场合中较少用到的材料，其中包括金属化纺织物，导电壁纸， μ 金属，可热成型合金和镀青铜指形簧片等。

金属化纺织物

金属化纺织物是由一些纺织或编制材料作芯材制成的，这些材料包括尼龙、聚脂或纤维编织而成，也可以用玻璃纤维，碳纤维。

通常这些纤维的直径范围是 $10 \sim 250$ 微米, 表面金属涂覆层的厚度为 $0.1 \sim 5$ 微米, 这些材料可通过蒸发或溶解的工艺生产。常用的金属化纺织物由一定范围的镍镀层构成并提供大量的机械特性。金属化纺织物独特的连接方式提供他在 R F I / E M I 屏蔽问题解决方面许多大家感兴趣的特性, 诸如屏蔽效能, 编织的简易性、透气性、透光性和重量轻等特点。金属化的特性不会改变织物的如下特性, 如褶皱、质地、撕扯强度、收缩程度、延伸率等等。

屏蔽效能

由一定标准的镍涂覆的编织物在用同轴方法测量时得到的信噪比为 130 dB 。这样的编织物在置于两片波导法兰之间或配合连接器使用时, 在 $10\text{ MHz} \sim 26\text{ GHz}$ 的远场情况下衰减有 $45 \sim 95\text{ dB}$ 。具体数据取决于特定的编织物与频率。

如此惊人的性能是由这些金属性材料的三个要素提供的。第一个要素是它较低的电气阻抗 (不同编织物每平方阻抗为 $0.1 \sim 3.5\text{ ohms}$) 第二、编织物的表面完全用金属材料涂覆, 在织物纤维交叉的地方提供了较低的接触阻抗。最后一个要素是编织物有限的厚度在高频的时候产生了一定的截止波导的作用。另外的一种方法是纺织之前在塑料线上做导电涂覆, 这样就失去了高导电性编织物在交叉点上有金属涂覆的主要特点。特别是在使用几个月以后, 这种现象更加明显。因为这时线的交叉点部分发生一定的氧化。而这种现象不会发生在表面全涂覆的织物上。见图 7.1



图 7.1 在编织好的织物上进行导电涂覆

基材

构成织物的基材可以是各种可镀或可涂覆的非导电材料, 甚至是导电材料。纺织的方法也有多种形式。

二种主要的纺织方式: 一种是单线纺织, 另一种是多线纺织。用特殊制造的线用于单线纺织, 单线的纺织精度很高, 线间距离是一定的。由于这些特点, 金属化单线织物具有方型网格, 这使它们具有较好的衰减特性。

一些细小的纤维在一起构成了多线。这些线纺织在一起构成的材料上面涂覆连续的金属层 (通常为镍)。不同的纤维以及线之间的交叉点由金属涂覆层连接。这保证了高导电性和较好的屏蔽性能, 多线纺织物中的线和同一个非常紧密的网, 因此不透气。

易纺性

紧密屏蔽的接触点可以通过传统的缝制技术制造，包括三叠缝制。如图 7.2 所示，或使用经过精心设计的导电拉链、镀银的钩子等紧固装置连接。

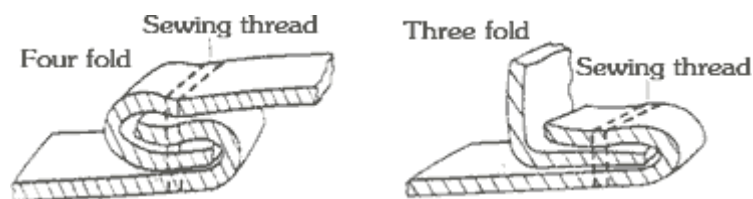


图 7.2 导电织物使用棉线或其它绝缘线缝制

同样也可以用银导电胶来形成低阻抗连接。有些导电编织物可以用低熔点焊锡焊接。其它连接方法包括铆接和用订书钉连接。这些织物也可以很容易用剪刀裁开。在实验室内可以方便地塞进机箱缝隙处用来改善设备的 EMC 性能。

透气性和透光性

有些金属化织物，特别是单线纺织型的，能够提供最大达到 50 % 的开口面积，可以用于屏蔽窗，显示器屏蔽和通风窗等场合。它们的透光性不如我们以前讨论过的导电膜。

重量

金属织物上的金属镀层通常很薄（0.1 ~ 5 微米），材料的基材具有较低的密度，通常为 1 ~ 3。

例如：典型的单线纺织材料比重为 70 ~ 80 g/m²。直流电阻为 60 ~ 70 mΩ / 平方，屏蔽效能在 1 GHz 时超过 70 dB。而多线纺织物的比重为 130 ~ 140 g/m²，直流电阻 85 ~ 105 mΩ / 平方，屏蔽效能在 1 GHz 时超过 62 dB。

应用

对于金属化织物可以在它的一面或三面涂覆绝缘材料，这样就可以将材料的屏蔽效能和防水性能接合起来。这种应用的一个例子是室外广播器材的罩子。

图 7.4 是一种平针织法，这种编织材料非常柔软，可以用于制造屏蔽服和便携式的屏蔽房和帐篷。这些织物也是波导衬垫的理想材料。



图 7.4 单线平针织法导电织物

导电壁纸

导电纤维编织的壁纸，可以提供某种程度的电磁干扰屏蔽，其效果接近昂贵和笨重的金属屏蔽技术。这种复合材料通常是随机交叉在无纺布里的镀镍碳纤维。

屏蔽效能

有文献报道用导电壁纸制造的 Tempest 级屏蔽可以将高达 4 0 G H z 的电磁信号衰减 1 0 0 d B 以上。而通常为了满足 Tempest 要求需要价格昂贵的由铜或铝箔构成的双层笼子。

应用

这种材料可以用标准的非导电壁纸胶粘在墙上，不同于金属箔或金属夹层搭接的地方需要导电性连接。缝隙处的泄露由于无纺布结构中随机排布的镀镍碳纤维的存在而消除。纤维的随机分布构不成明显的截止波导。因此主要在 1 G H z 以内具有较好的屏蔽性能。由于纤维还以随机的方式弯曲，因此这也有助于减小缝隙处的 E M I 泄露。

这种壁纸很容易焊接。因此，既使在接合处也能保证电气完整性，能够与由传统屏蔽材料构成的结构件形成有效的连接，构成法拉第屏蔽罩，见第 9 章。由于重量轻，质地柔软，因此可以做成十分复杂的形状。

通过改变材料纤维的种类、长度、基材结构、密度和重量，材料可以对一定的频率具有屏蔽作用。典型的应用包括屏蔽暗室、民用和军用汽车的 E M C 防护、电子窃听防护和医院内图像扫描仪的机房。也有人用这种材料防止飞机上的电子设备受到 E M I 和雷电的影响。

在建筑上的应用目前正在研究，有些项目在设计全频段屏蔽系统这个系统要在 4 0 G H z 的范围内屏蔽 1 0 0 d B 。这些例子说明了这种材料的潜在广泛用途，在任何需要可靠的电磁干扰保护的场合都能使用这些材料。这些材料能够防止 E M I 的入侵和有效地防止计算机设备的信息被窃取。

磁屏蔽材料

磁屏蔽材料是由铁磁合金制成的。这些材料具有很高的导磁率，这种材料既能防止敏感器件受外界磁场影响，例如有极射线管，也能防止器件产生发射，例如变压器。屏蔽体使用高技术制造的镍基合金，这种材料经过加工以后需要在特定的温度下和氢气中进行热处理。

特性

所有的软磁材料会受到各种拉伸的影响，这是磁化过程特有的性质，与某一种特殊材料没有关系。一个不变的规律是受到拉伸以后导磁率急剧下降，这意味着高导磁率与拉伸是不兼容的。μ 金属是一种商用的导磁率最高的材料，对应力很敏感。这些应力可能是由于跌落、弯曲、钻孔、切割等引起的。常用的三种材料如表 7 . 1 所示，特性见表 7 . 2

表 7 . 1 铁镍合金的基本物理特性

	起时磁导率	最大磁导率	饱和感应强度
--	-------	-------	--------

	在 0.4A/m 时		(特斯拉)
μ 金属	60000	110000	0.77
Radio metal 4550	6000	40000	1.6
Radio metal 36	3000	20000	1.2
	乘磁(特斯拉)	Coercivity A/m (from saturation)	居里温度℃
μ 金属	0.45	1.0	350
Radio metal 4550	1.0	10.0	530
Radio metal 36	0.5	10.0	280

表 7.2 三种常用磁屏蔽合金材料的特性

μ 金属	Radio metal 4550	Radio metal 36
高镍的铁镍合金在很低的场强下具有高磁导率.做为磁屏蔽在较低的干扰场中有很大的衰减,需注意的是防止材料发生饱和。	这种 50%和镍合金比 μ 金属磁导率低，但是具有较高的磁饱和强度。经常与 μ 金属构成双层屏蔽来减小场强防止 μ 金属发生饱和，也常单独使用在对屏蔽要求不是很严格的地方。	这是一种含 36%镍的合金，它是一种最经济的铁镍合金屏蔽材料。它只用于干扰场强很大，频率较高的场合。

应用

屏蔽通常是用金属板构成的，金属板上可以打孔、剪裁，然后用一个胎具来制成屏蔽，形成好的板材缝隙处可以焊接或搭接。对于搭焊建议搭接宽度为 9.5 mm，焊点间距为 13 mm，为了更美观，也可以将整个缝隙焊起来，但要使用 μ 金属或 Radio metal 做辅料，具体取决于母体材料。这种方法不能用于材料厚度小于 0.8 mm 的场合。另一种制造方法是制造深拉伸罐体，这种方法能构成最好的屏蔽体。因为屏蔽体上没有接缝，但是罐体的尺寸会受到限制，因为铁镍合金在接伸过程中很快就变得很难拉伸了。并且由于需要模具这种方法不是很经济。

磁屏蔽胶带

对于小器件或者屏蔽要求不严格的场合可以用薄胶带卷起来达到屏蔽的效果，很难确定需要绕多少圈。因为磁导率的下降与被屏蔽物体的形状有关，通常要绕数圈，这相当于多层屏

蔽。因此最后的方法是边绕边进行实际的测试，这种方法很容易进行修改，但很难获得比较好的屏蔽效果。

EMC 电磁屏蔽材料设计者指南——连载（八）

典型的可热成型合金材料锌的含量有很高的比值，通常为 78 % 的锌和 22 % 的铝。

特性

在室温下，这种合金是非常坚硬的，但当加热 220——270℃时，它变得极易曲折，并且能够拉伸到它原始尺寸的 1500 %，经过加工模制后，它能显现原本的坚硬程度。加热成型后的零件可以加镀层、喷漆、打亮或保持它原有的形式，零件的加工过程是通过迅速焊接完成的。典型的附加拉力大约为 440 MPa。

优点

这种合金材料最适合于做屏蔽壳体和应用用于其它一些 RFI / EMI 屏蔽场合。可以保证较低的工具费用和给工程师提供最大的设计灵活性。图 7.5 为经过热压成型后的屏蔽罩，这种生产方式可以降低工具成本，并可以用低成本压制出数百种不同的形状。这种高成型性合金通常热压成型在铝模上，并且能够提供相对短的生产周期。这种生产过程用塑性注模法完成，并且可以小批量，低成本试制屏蔽物件。

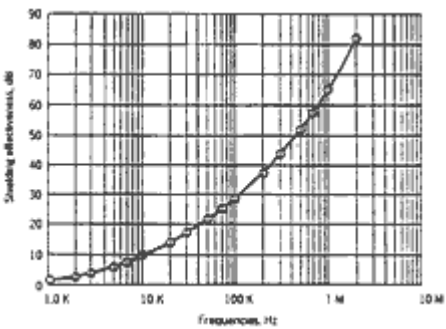


图 7.5 具有 78% 的锌和 22% 的铝的合金材料的屏蔽效果设计思路

这种材料最大的缺点是必须组织成型技术和设备给特定的分销商，而这是一般的电子公司无法轻易满足的。

在真空成型过程中，有许多设计局限需要充分考虑，比如说内径应当与板材厚度一致而最小的外径则应是板材厚度的两倍。而且在设计材料前客户和设计人员的沟通也是非常重要的。

使用弹性的铍青铜材料制成的衬垫，具有广泛应用空间的屏蔽材料。指型簧片可以

弯曲到不同程度来适应两个相对的接触面间极大的不平整性。但如果簧片弯曲过大。超出了它的弹性限度，那么就很难再恢复它的初始形状了。

特性

这种弹性指型簧片采用镀铜合金为原料制造是一个创举，铍铜以屈服点高，拉伸强度大和弹性好而著称，并且还有高导电率，高疲劳强度和良好的抗磨损抗腐蚀性能等优点。铍铜材料没有磁性，并有极佳的温度特性，见表 7. 3。

表 7. 3 一些铍青铜的特性

物理特性	值
比重， g/cm ³	8.4
熔点， °C	900
Coefficient of expansion (20-200°C)	17×10 ⁻⁶
热传导率， cal/cm/se c/°C	0.27
w/cm°C	1.13
vickers hardness Kp/mm ²	350-430
拉伸强度， N/mm ²	1200-1450
Bending resistance at 10 ⁸ cycles,N/mm ²	±250-290
modulus of elasticity,N/mm ²	135000
modulus of torsion,N/mm ²	47000
弹性拉伸极限， N/mm ²	820-930

加工好的铍铜簧片表面可以是明亮的未处理的，也可选择镀锌、镍、银、金等金属或铬酸金属盐。

安装工艺

铍铜指簧片有多种标准安装工艺可供选用如卡装，背胶安装等，部件还可用银焊或软焊技术安装。

卡装式

卡装型垫利用本身优良的弹性卡在需要安装的位置上，通常是法兰或屏蔽壳体的边

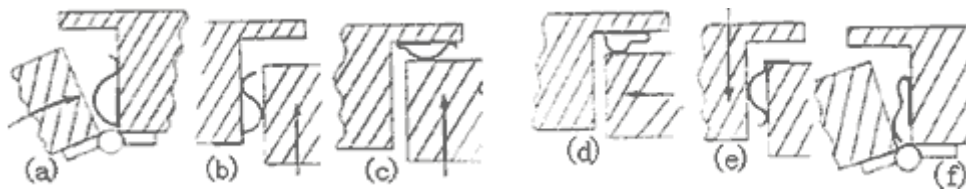
级。卡装半垫也可选择锁定穿孔。

背胶安装

背胶安装系统为金属机箱和屏蔽壳体提供一种方便地、有用地、及时地接触，尤其是在安装空间受限的情况下。背胶在 $-55^{\circ}\text{C}\sim+230^{\circ}\text{C}$ 之间能够提供足够的粘接强度。加上衬垫的几何形状设计，在完全压缩时，粘接强度更高。

安装时需要注意以下事项：

- 将安装表面打磨干净，除去油脂和氧化膜。
- 撕去保护的胶纸。
- 把衬垫放在正确的位置上。如图 7.9 a~e 所示，而图 7.9f 则是一种错误的安装方式。
- 压紧才能够保证机械连接性能。
- 最少保证 24 小时的粘接时间。



铆钉安装

铆钉安装可以提供紧固长久的接触，塑料铆钉或铜铆钉都可以使用。

点焊

安装需要采用基本点焊方式。

焊接

需要标准的低温焊接技术完成，焊接剂通常为洁净的液态非酸性物质。

金属丝网缠带

连载 3 曾经介绍过编织金属丝网衬垫。对于金属网缠带。它是由一根单一的连续金属丝编制而成的。这种形状不会因温度的变化而改变。缠带的末端可以焊接，压接或用环氧导电胶粘接。将丝网缠带以半重叠的方式绕制在电缆上时，它可能为电缆提供一层有效的屏蔽层。金属丝网缠带通常为双层网状，如有特殊需要，也可以生产成四层甚至更多层数。较宽的丝网缠带还可以用于建造法拉第笼使用。

通常此种衬垫是用蒙乃尔合金丝、镀锡铜丝、不锈钢丝、铜丝、镀银铜丝、铝丝或锡铜合金丝编制而成的。

螺旋管衬垫

另外一种在美国较受欢迎的衬垫是使用合金材料，通常是铍青铜或者不锈钢带绕制成具有弹性，导电性和较低成本的螺旋管衬垫。

屏蔽性能

这种衬垫可以提供极佳的屏蔽性能，它具有较低的接触阻抗，它边缘的镀层可以为衬垫提供优良的防腐蚀性能，适量的压缩可以保证设备终生的优良接触。这种衬垫的屏蔽效果一般在 80 dB 以上。

安装

安装这种衬垫通常是如图 7.11 所示的槽安装。铍铜材料通常是镀锡的。一些有环境密封要求的场合，可以使用内芯由硅橡胶灌注的螺旋管。

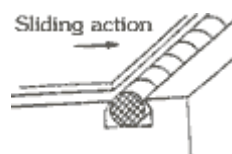


图 7.11 螺旋管衬垫——对于滑动的门或法兰的典型的槽的设计

对于环境密封性要求更高的场合，可以使用由天然硅橡胶条和金属螺旋管衬垫结合在一起的复合型衬垫，如图 7.12 所示。

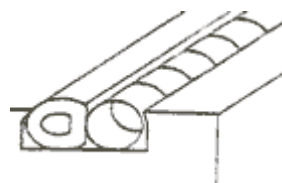


图 7.12 螺旋管衬垫——D 型多重密封衬垫可同时提供 RFI / EMI 防护和环境密封金属化的弹性衬垫

在美国另外一种较受欢迎的衬垫是在有弹性的泡沫芯材上涂覆金属化的物质。它有弹性的外涂覆层可以提供比丝网衬垫多 60%—70%，比指型簧片多 40% 的接触面，以便

保证在两个有细微不规则的金属交配面间提供良好的接触。有效的环境密封性能有时也可以通过特殊泡沫内芯提供。它多维的细胞结构滑入空隙和空格，柔软的泡沫使得机箱的门更加易于开关和锁紧。

屏蔽性能

对于这种材料从 30 MHz 到 1 GHz 可以达到平均 60 dB 的衰减。

安装

衬垫通过自带的压敏胶固定在相应的位置上，也可以选择导电胶安装，胶在 -40℃ 至 +50℃ 之间可以保持良好的粘接。通常情况下的表面电阻为每平方 1 欧姆。

"O" 型密封圈

导电“O”型密封圈对于许多零部件的圆形截面或旋转杆的R F I / E M I防护是非常有必要的。

标准构造

标准的“O”型密封圈是由在连载4中描述的由金属填充的硅橡胶模制而成。但小数量的“O”型密封圈则是由一定长度的圆型导电橡胶条绕制成，用填充有贵重金属的导电胶将两端粘接在一起。

可选构造

谁也不知道为什么“O”型密封不能用金属螺旋管或金属编织网来构成，也许这两种方法都不能提供有效的环境密封吧！

EMC电磁屏蔽材料设计者指南——连载（九）

本章着手讨论一些低阻抗永久性电连接的方法。对待搭接和接地是分开考虑的。

搭接

搭接指的是在多个组件或模块之间，设备或几个系统之间通过低阻抗的导体实现电连接的一种方式。目的是使流动的射频电流生成同种结构，这种电流的潜在的差分可以在金属部件用产生R F I / E M I，以下几点应该引起重视。

- 在高频时搭接导体的阻抗增加。是由于阻抗的感应系统与 $0 / 4$ 相匹配，并且其波动幅度也保持恒定。
- 通常情况下，这个低阻抗搭接与良好的金属间的接触和良好的抗腐蚀、振动能力有关。

电镀腐蚀

电镀腐蚀通常会发生在金属表面，并且致接触阻抗增加，要想完全消除这种影响是非常困难的。

由于编织带具有许多不必要的特性，所以固体条更适合用于搭接。通常氧化物可以单独生成在编织带上，导致编织带的交叉区域改变长度。此变化部分可能会同断裂的带子一起导致产生干扰信号，以致于在电流分配上产生突变和互扰。

通常设备的防振部分为了保证搭接要使用指定的有弹性的搭接带。搭接带通常由铜或铝构成。铜条较好一些。

接地

接地的目的就是在系统中的不同电气元件和地面间提供一个低阻的连接。有一些不同的甚至相互冲突的理由，包括在误动作时保护电路，降低浪涌，连接断路器和保险丝以保证附件、电缆和接口的屏蔽有效性，来实现滤波器和电容抑制部分的性能。并提供一个信号参照条件。由于信号参考平面在绝缘条件下能正常工作。因此不需要接地。

在实践中，通常这种信号参考平面总是接地的。接地的部分必须组合在一起，以便可以控制电流和信号流在最小的相互干扰下工作。从原则上讲，保护性接地部分较次要。低阻抗连接以实现在错误情况下的电流传递，在此时它比主电路更重要。在系统中的电路或是网络对射频部分都有特殊要求，并且要保证导体的长度和频率范围在覆盖区域内。

接地不需要特殊的金属材料。

单点接地

在应用单点接地时，其目的是防止在电路系统中形成低阻抗环路。这种环路会导致大电流，并产生磁场。在低频情况下磁场交互作用是采用 R F I / E M I 的一个最常见原因，而解决电磁兼容问题则通常是困难并且昂贵的。在系统中使用单点接地，如果参考地平面已经提供了的话，就需要考虑以下几个方面。

- 要保证电路和外壳是绝缘的并且是可以拆卸的。
- 要避免接口和控制部分的连接。
- 尽可能多的使用 opto 绝缘来保证电路平衡。
- 确保内部元器件在多路回路中的反馈信号不通过屏蔽。

由于两种不兼容的金属暴露在潮湿的空气中，为了减小腐蚀必须考虑以下几点：

- 用导电漆覆盖任何暴露金属表面或在其上镀锡或铬。
- 避免电流，尤其是直流电流通过搭接部分，因为这种电流会加速腐蚀过程。
- 确保在搭接完成后始终保持紧密和有效的防护镀层与潮湿空气隔绝。
- 设计搭接系统时要想到腐蚀可能发生在其它情况下。

搭接方法

到目前为止最好的搭接方法是由直接的、永久的金属之间的接触来实现的，比如焊接或铜焊。尽管在通常情况下都是适合的。但即使使用最好的焊接剂，接触阻抗仍然

很难达到搭接所需要的效果。半永久性的连接，比如铆接和螺钉安装。能提供有效的搭接，但是任何连接体的相对移动就会影响搭接效果。

搭接硬件

为了减小电感，搭接带应当尽可能的短并且越宽越好。

由金属箔接合在一起的半永久性连接也不能总是保证低阻抗的射频通路，用来连接的螺丝尽管经过处理，但有时仍会有些残留油漆的存在，影响搭接效果。

多点接地

尽管单点接地系统在低频工作良好、多点接地仍然在频率大于 1 MHz 的情况下广泛使用，并且在多点接地下需要克服系统中的不同点的差异。在设计中要考虑以下几点：

- 保证一个低阻抗地平面以使不同点间的差异最小化，并用最短的距离来连接。
- 应当对点的分布和搭接安排做特别注意，以减小信号回路的感应电压。
- 可能需要在地平面上加工几道槽来防止特殊区域的感应电压。
- 在连接点上的平衡信号传送安排是很重要的。
- 信号电缆通常应当放置在临界地平面的集团，以最小化环路可能产生的感应电压。
- 系统的每一个单元都应当安排一个单独的接地连接。

混合接地

通常是两种接地方法，单点接地和多点接地的混合使用。

第 9 章

前面的章节已经介绍了法拉第罩或屏蔽室。有非常多的电子公司都需要安装室内屏蔽区域。本章详细地介绍了屏蔽室的一些具体情况，包括建造一个简单、永久的屏蔽室或一个便携式、可移动的屏蔽室。

在签订购买屏蔽室协议时，有充分的屏蔽经验对于买到合适的屏蔽室是非常重要的。

屏蔽室

屏蔽室在电磁测量领域已经应用了许多年。在这种测量中需要良好的电磁环境。目前，这种屏蔽室已经向非测试的领域运用，比如在雷达站附近保护工作人员的身体健康；再比如保护计算机、医疗设备等敏感仪器。

屏蔽室在 R F I / E M I 测量中的一个主要优势是，它保证了射频与外界进出双向隔离。屏蔽室的应用也使得发射测量得以实现。而屏蔽室内的电磁残余取决于房间的衰减程度，而不是外界的发射程度。当外界环境不是非常恶劣时，一个现代化的屏蔽室可以提供足够的衰减来使外界发射的影响降至最低。

屏蔽室种类

屏蔽室的尺寸没有限制，早期的军用计算机经常在巨大的屏蔽室中进行测试。洲际弹道导弹也要在非常昂贵的屏蔽室内进行测试。有的屏蔽室有几层楼高，还有一些其它的屏蔽室有飞机机库那么大。

相反地，屏蔽室也可以做成便携、可移动式的。比如说建在卡车或拖车上，甚至是一个便携式的金属网笼。两种主要的金属，钢和铜是建造屏蔽室的主要材料。钢通常用于大型屏蔽室，铜则用于其它小型屏蔽室网笼。选择金属通常主要考虑重量、屏蔽效果和成本的限制。钢在 1 5 0 K H z 以上与铜有相同的射频性能，但低于这个频率时，钢的导磁率使得钢有更好的电磁屏蔽效果。

无论是单层或双层结构，接下来都应考虑墙体的结构问题。用板材做成的单层墙不被广泛使用，尽管它比双层结构要便宜的多。在连接处的不同部分都由螺钉和夹子来提供有效连接。当使用螺钉时，双层墙隔离设计能够更有效。

在采用焊接方法连接时，应当考虑采用单层设计。因为如果焊接质量很高的话，电磁泄露实际上就会减小。在减少屏蔽室的空隙时，专业技术，经验是很重要的，因为有一些空隙是看不到的。用单层板材焊在金属框架上的方法，在焊接时，板材对框架有一定的压力，并且框架之间也是焊接在一起的。如果不冒着弄坏它的危险，这种焊接式屏蔽室是不能很快移动的。

双面是金属的三合板通常用于双层屏蔽室。面板不可以拼放在一起，而需要如图 9 . 1 所示那样连接。另一种可供选择的方案是用 0 . 125 英寸厚的金属板做为单层墙

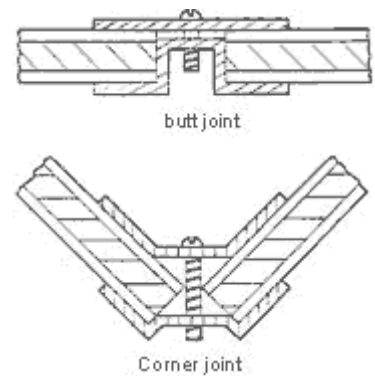


图 9 . 1 典型的夹层式面板连接

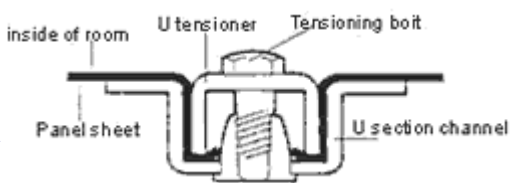


图 9 . 2 单层金属板间的连接

连接方法如图 9.2 所示。

屏蔽室设计方案

穿透屏蔽室的仪器、设备能够危害设计最好的屏蔽室的屏蔽效果。主要的进出孔包括门、电源及相关的换气系统。

通常屏蔽室设计需要提供照明，供热和空调。照明通常采用白炽式的。因为其它方式会产生离子，从而导致射频干扰。

有些屏蔽室采用限制屏蔽窗区域的方法，以外部解决照明问题。屏蔽窗一般没有屏蔽室顶上，照明系统则在屏蔽室外。

当考虑供热和空调需要时，通常不需要提供附加的设施。压缩空气管可以从室外进入屏蔽室来确保合适的通风。排气设备也是必需的，排风窗可以通过蜂窝状的排风口排出废气。蜂窝状的形式不但可以提供良好的屏蔽效果，而且不影响通风质量。