

怎样做好电磁屏蔽

电磁屏蔽是解决电磁兼容问题的重要手段之一。大部分电磁兼容问题都可以通过电磁屏蔽来解决。用电磁屏蔽的方法来解决电磁干扰问题的最大好处是不会影响电路的正常工作，因此不需要对电路做任何修改。

1 选择屏蔽材料

屏蔽体的有效性用屏蔽效能来度量。屏蔽效能是没有屏蔽时空间某个位置的场强 E_1 与有屏蔽时该位置的场强 E_2 的比值，它表征了屏蔽体对电磁波的衰减程度。用于电磁兼容目的的屏蔽体通常能将电磁波的强度衰减到原来的百分之一至百万分之一，因此通常用分贝来表述屏蔽效能，这时屏蔽效能的定义公式为：

$$SE = 20 \lg (E_1 / E_2) \quad (\text{dB})$$

用这个定义式只能测试屏蔽材料的屏蔽效能，而无法确定应该使用什么材料做屏蔽体。要确定使用什么材料制造屏蔽体，需要知道材料的屏蔽效能与材料的什么特性参数有关。工程中实用的表征材料屏蔽效能的公式为：

$$SE = A + R \quad (\text{dB})$$

式中的 A 称为屏蔽材料的吸收损耗，是电磁波在屏蔽材料中传播时发生的，计算公式为：

$$A = 3.34t (f \mu_r \sigma_r) \quad (\text{dB})$$

t = 材料的厚度， μ_r = 材料的磁导率， σ_r = 材料的电导率，对于特定的材料，这些都是已知的。 f = 被屏蔽电磁波的频率。

式中的 R 称为屏蔽材料的反射损耗，是当电磁波入射到不同媒质的分界面时发生的，计算公式为：

$$R = 20 \lg (Z_w / Z_s) \quad (\text{dB})$$

式中， Z_w = 电磁波的波阻抗， Z_s = 屏蔽材料的特性阻抗。

电磁波的波阻抗定义为电场分量与磁场分量的比值： $Z_w = E / H$ 。在距离辐射源较近 ($< \lambda / 2\pi$ ，称为近场区) 时，波阻抗的值取决于辐射源的性质、观测点到源的距离、介质特性等。若辐射源为大电流、低电压 (辐射源电路的阻抗较低)，则产生的电磁波的波阻抗小于 377，称为低阻抗波，或磁场波。若辐射源为高电压，小电流 (辐射源电路的阻抗较高)，则波阻抗大于 377，称为高阻抗波或电场波。关于近场区内波阻抗的具体计算公式本文不予论述，以免冲淡主题，感兴趣的读者可以参考有关电磁场方面的参考书。当距离辐射源较远 ($> \lambda / 2\pi$ ，称为远场区) 时，波阻抗仅与电场波传播介质有关，其数值等于介质的特性阻抗，空气为 377 Ω 。

屏蔽材料的阻抗计算方法为：

$$|Z_s| = 3.68 \times 10^{-7} (f \mu_r / \sigma_r) (\Omega)$$

f = 入射电磁波的频率 (Hz)， μ_r = 相对磁导率， σ_r = 相对电导率

从上面几个公式，就可以计算出各种屏蔽材料的屏蔽效能了，为了方便设计，下面给出一些定性的结论。

- 在近场区设计屏蔽时，要分别考虑电场波和磁场波的情况；
- 屏蔽电场波时，使用导电性好的材料，屏蔽磁场波时，使用导磁性好的材料；
- 同一种屏蔽材料，对于不同的电磁波，屏蔽效能是不同的，对电场波的屏蔽效能最高，对磁场波的屏蔽效能最低，也就是说，电场波最容易屏蔽，磁场波最难屏蔽；
- 一般情况下，材料的导电性和导磁性越好，屏蔽效能越高；
- 屏蔽电场波时，屏蔽体尽量靠近辐射源，屏蔽磁场源时，屏蔽体尽量远离磁场源；

有一种情况需要特别注意，这就是 1kHz 以下的磁场波。这种磁场波一般由大电流辐射源产生，例如，传输大电流的电力线，大功率的变压器等。对于这种频率很低的磁场，只能采用高导磁率的材料进行屏蔽，常用的材料是含镍 80% 左右的坡莫合金。

2 孔洞和缝隙的电磁泄漏与对策

一般除了低频磁场外，大部分金属材料可以提供 100dB 以上的屏蔽效能。但在实际中，常见的情况是

金属做成的屏蔽体，并没有这么高的屏蔽效能，甚至几乎没有屏蔽效能。这是因为许多设计人员没有了解电磁屏蔽的关键。

首先，需要了解的是电磁屏蔽与屏蔽体接地与否并没有关系。这与静电场的屏蔽不同，在静电中，只要将屏蔽体接地，就能够有效地屏蔽静电场。而电磁屏蔽却与屏蔽体接地与否无关，这是必须明确的。

电磁屏蔽的关键点有两个，一个是保证屏蔽体的导电连续性，即整个屏蔽体必须是一个完整的、连续的导体。另一点是不能有穿过机箱的导体。对于一个实际的机箱，这两点实现起来都非常困难。

首先，一个实用的机箱上会有很多孔洞和孔缝：通风口、显示口、安装各种调节杆的开口、不同部分结合的缝隙等。屏蔽设计的主要内容就是如何妥善处理这些孔缝，同时不会影响机箱的其他性能（美观、可维修性、可靠性）。

其次，机箱上总是会有电缆穿出（入），至少会有一条电源电缆。这些电缆会极大地危害屏蔽体，使屏蔽体的屏蔽效能降低数十分贝。妥善处理这些电缆是屏蔽设计中的重要内容之一（穿过屏蔽体的导体的危害有时比孔缝的危害更大）。

当电磁波入射到一个孔洞时，其作用相当于一个偶极天线（图 1），当孔洞的长度达到 $\lambda/2$ 时，其辐射效率最高（与孔洞的宽度无关），也就是说，它可以将激励孔洞的全部能量辐射出去。

对于一个厚度为 0 材料上的孔洞，在远场区中，最坏情况下（造成最大泄漏的极化方向）的屏蔽效能（实际情况下屏蔽效能可能会更大一些）计算公式为：

$$SE=100 - 20\lg L - 20\lg f + 20\lg [1 + 2.3\lg(L/H)] \quad (\text{dB})$$

$$\text{若 } L \geq \lambda/2, SE = 0 \quad (\text{dB})$$

式中各量： L = 缝隙的长度（mm）， H = 缝隙的宽度（mm）， f = 入射电磁波的频率（MHz）。

在近场区，孔洞的泄漏还与辐射源的特性有关。当辐射源是电场源时，孔洞的泄漏比远场时小（屏蔽效能高），而当辐射源是磁场源时，孔洞的泄漏比远场时要大（屏蔽效能低）。近场区，孔洞的电磁屏蔽计算公式为：

若 $ZC > (7.9/D \cdot f)$ ：

$$SE = 48 + 20\lg ZC - 20\lg L \cdot f + 20\lg [1 + 2.3\lg(L/H)]$$

若 $Zc < (7.9/D \cdot f)$ ：

$$SE = 20\lg [(D/L) + 20\lg (1 + 2.3\lg(L/H))]$$

式中： Zc =辐射源电路的阻抗（ Ω ），

D = 孔洞到辐射源的距离（m），

L 、 H = 孔洞长、宽（mm），

f = 电磁波的频率（MHz）

说明：

- 在第二个公式中，屏蔽效能与电磁波的频率没有关系。
- 大多数情况下，电路满足第一个公式的条件，这时的屏蔽效能大于第二中条件下的屏蔽效能。
- 第二个条件中，假设辐射源是纯磁场源，因此可以认为是一种在最坏条件下，对屏蔽效能的保守计算。
- 对于磁场源，屏蔽效能与孔洞到辐射源的距离有关，距离越近，则泄漏越大。这点在设计时一定要注意，磁场辐射源一定要尽量远离孔洞。

多个孔洞的情况

当 N 个尺寸相同的孔洞排列在一起，并且相距很近（距离小于 $\lambda/2$ ）时，造成的屏蔽效能下降为 $20\lg N^{1/2}$ 。在不同面上的孔洞不会增加泄漏，因为其辐射方向不同，这个特点可以在设计中用来避免某一个面的辐射过强。

除了使孔洞的尺寸远小于电磁波的波长，用辐射源尽量远离孔洞等方法减小孔洞泄漏以外，增加孔洞的深度也可以减小孔洞的泄漏，这就是截止波导的原理。

一般情况下，屏蔽机箱上不同部分的结合处不可能完全接触，只能在某些点接触上，这构成了一个孔

洞阵列。缝隙是造成屏蔽机箱屏蔽效能降级的主要原因之一。减小缝隙泄漏的方法有：

- 增加导电接触点、减小缝隙的宽度，例如使用机械加工的手段（如用铣床加工接触表面）来增加接触面的平整度，增加紧固件（螺钉、铆钉）的密度；
- 加大两块金属板之间的重叠面积；
- 使用电磁密封衬垫，电磁密封衬垫是一种弹性的导电材料。如果在缝隙处安装上连续的电磁密封衬垫，那么，对于电磁波而言，就如同在液体容器的盖子上使用了橡胶密封衬垫后不会发生液体泄漏一样，不会发生电磁波的泄漏。

3 穿过屏蔽体的导体的处理

造成屏蔽体失效的另一个主要原因是穿过屏蔽体的导体。在实际中，很多结构上很严密的屏蔽机箱（机柜）就是由于有导体直接穿过屏蔽箱而导致电磁兼容试验失败，这是缺乏电磁兼容经验的设计师感到困惑的典型问题之一。

判断这种问题的方法是将设备上在试验中没有必要连接的电缆拔下，如果电磁兼容问题消失，说明电缆是导致问题的因素。解决这个问题有两个方法：

- 对于传输频率较低的信号的电缆，在电缆的端口处使用低通滤波器，滤除电缆上不必要的高频频率成分，减小电缆产生的电磁辐射（因为高频电流最容易辐射）。这同样也能防止电缆上感应到的环境噪声传进设备内的电路。

- 对于传输频率较高的信号的电缆，低通滤波器可能会导致信号失真，这时只能采用屏蔽的方法。但要注意屏蔽电缆的屏蔽层要 360° 搭接，这往往是很难的。

在电缆端口安装低通滤波器有两个方法

- 安装在线路板上，这种方法的优点是经济，缺点是高频滤波效果欠佳。显然，这个缺点对于这种用途的滤波器是十分致命的，因为，我们使用滤波器的目的就是滤除容易导致辐射的高频信号，或者空间的高频电磁波在电缆上感应的电流。

- 安装在面板上，这种滤波器直接安装在屏蔽机箱的金属面板上，如馈通滤波器、滤波阵列板、滤波连接器等。由于直接安装在金属面板上，滤波器的输入、输出之间完全隔离，接地良好，导线上的干扰在机箱端口上被滤除，因此滤波效果十分理想。缺点是安装需要一定的结构配合，这必须在设计初期进行考虑。

由于现代电子设备的工作频率越来越高，对付的电磁干扰频率也越来越高，因此在面板上安装干扰滤波器成为一种趋势。一种使用十分方便、性能十分优越的器件就是滤波连接器。滤波连接器的外形与普通连接器的外形完全相同，可以直接替换。它的每根插针或孔上有一个低通滤波器。低通滤波器可以是简单的单电容电路，也可以是较复杂的电路。

解决电缆上干扰的一个十分简单的方法是在电缆上套一个铁氧体磁环，这个方法虽然往往有效，但是有一些条件。许多人对铁氧体寄予了过高期望，只要一遇到电缆辐射的问题，就在电缆上套铁氧体，往往会失望。铁氧体磁环的效果预测公式为：

共模辐射改善 = 20lg（加磁环后的共模环路阻抗/加磁环前的共模环路阻抗）

例如，如果没加铁氧体时的共模环路阻抗为 100 Ω，加了铁氧体以后为 1000 Ω，则共模辐射改善为 20dB。

说明：有时套上铁氧体后，电磁辐射并没有明显的改善，这并不一定是铁氧体没有起作用，而可能是除了这根电缆以外，还有其他辐射源。

在电缆上使用铁氧体磁环时，要注意下列一些问题：

- 磁环的内径尽量小
- 磁环的壁尽量厚
- 磁环尽量长
- 磁环尽量安装在电缆的端头处

射频和天线设计培训课程推荐

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;我们于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

易迪拓培训课程列表: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/129.html>



射频工程师养成培训课程套装

该套装精选了射频专业基础培训课程、射频仿真设计培训课程和射频电路测量培训课程三个类别共 30 门视频培训课程和 3 本图书教材;旨在引领学员全面学习一个射频工程师需要熟悉、理解和掌握的专业知识和研发设计能力。通过套装的学习,能够让学员完全达到和胜任一个合格的射频工程师的要求...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/110.html>

ADS 学习培训课程套装

该套装是迄今国内最全面、最权威的 ADS 培训教程,共包含 10 门 ADS 学习培训课程。课程是由具有多年 ADS 使用经验的微波射频与通信系统设计领域资深专家讲解,并多结合设计实例,由浅入深、详细而又全面地讲解了 ADS 在微波射频电路设计、通信系统设计和电磁仿真设计方面的内容。能让您在最短的时间内学会使用 ADS,迅速提升个人技术能力,把 ADS 真正应用到实际研发工作中去,成为 ADS 设计专家...



课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/ads/13.html>



HFSS 学习培训课程套装

该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程,是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装,可以帮助您从零开始,全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装,更可超值赠送 3 个月免费学习答疑,随时解答您学习过程中遇到的棘手问题,让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>

CST 学习培训课程套装

该培训套装由易迪拓培训联合微波 EDA 网共同推出,是最全面、系统、专业的 CST 微波工作室培训课程套装,所有课程都由经验丰富的专家授课,视频教学,可以帮助您从零开始,全面系统地学习 CST 微波工作的各项功能及其在微波射频、天线设计等领域的设计应用。且购买该套装,还可超值赠送 3 个月免费学习答疑...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/24.html>



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书,课程从基础讲起,内容由浅入深,理论介绍和实际操作讲解相结合,全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程,可以帮助您快速学习掌握如何使用 HFSS 设计天线,让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程,培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合,全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作,同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习,可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年,10 多年丰富的行业经验,
- ※ 一直致力并专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 经验丰富的一线资深工程师讲授,结合实际工程案例,直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>