

电磁屏蔽理论与屏蔽设计接地设计

第一部分 电磁骚扰的耦合机理

1、基本概念

电磁骚扰传播或耦合，通常分为两大类：即传导骚扰传播和辐射骚扰传播。通过导体传播的电磁骚扰，叫传导骚扰；通过空间传播的电磁骚扰，叫辐射骚扰。

上图传染病的模型非常近似：

2、电磁骚扰的常用单位

骚扰的单位通用分贝来表示，分贝的原始定义为两个功率的比：

通常用 dBm 表示功率的单位，dBm 即是功率相对于 1mW 的值：

通过以下的推导可知电压由分贝表示为（注意有一个前提条件为 $R_1=R_2$ ）：

通常用 dBuV 表示电压的大小，dBuV 即是电压相对于 1uV 的值。

对于辐射骚扰通常用电磁场的大小来度量，其单位是 V/m。通常用的单位是 dBuV/m。

3、传导干扰

a、共阻抗耦合

由两个回路经公共阻抗耦合而产生，干扰量是电流 i ，或变化的电流 di/dt 。

当两个电路的地电流流过一个公共阻抗时，就发生了公共阻抗耦合。我们在放大器中，级与级之间的一种耦合方式是“阻容”耦合方式，这就是一种利用公共阻抗进行信号耦合的应用。在这里，上一级的输出与下一级的输入共用一个阻抗。

由于地线就是信号的回流线，因此当两个电路共用一段地线时，彼此也会相互影响。一个电路的地电位会受到另一个电路工作状态的影响，即一个电路的地电位受另一个电路的地电流的调制，另一个电路的信号就耦合进了前一个电路。

对于两个共用电源的电路也存在这个问题。解决的办法是对每个电路分别供电，或加解耦电路。

b、容性耦合

在干扰源与干扰对称之间存在着分布电容而产生，干扰量是变化的电场，即变化的电压 du/dt 。

c、感性耦合

在干扰源与干扰对称之间存在着互感而产生，干扰量是变化的磁场，即变化的电流 di/dt 。

当信号沿传输线传播时，信号路径与返回路径之间将产生电场，围绕在信号路径和返回路径周围也有磁场。如图所示，基板材料为FR4的50Ω微带线横截面上的电力线和磁力线，可见，这些场并不仅仅局限于微带线的正下方，而是会延伸到周围的空间。这些延伸出去的场称为边缘场。

边缘场

根据电磁场基本理论，变化的电场产生感应电流，变化的磁场产生感应电压。那么，当一个网络（静态网络）的布线进入另一网络（动态网络）的边缘场时，一旦动态网络上的信号电压和电流发生变化，将会引起边缘场的变化，边缘场的变化又将在静态网络上感应出噪声电压或电流，这就是串扰产生的物理根源。

这种两个网络之间通过场相互作用被称做耦合，耦合又可以分为容性耦合和感性耦合，而把耦合电容和耦合电感分别称做互容和互感。

互容和互感都对串扰有贡献，但要区别对待。当返回路径是很宽的均匀平面时，如PCB上的布线，容性耦合和感性耦合大体相当。因此，要精确预测耦合传输线的串扰，两种因素都必须考虑。如果返回路径不是很宽的均匀平面，比如引线，虽然容性耦合和感性耦合也都存在，但串扰主要来自于互感。这时，如果动态网络上有一个快速变化的电流，如上升、下降沿，将会在静态网络上引起不可忽视的噪声。

d. 共阻抗耦合干扰抑制方法

- 1) 让两个电流回路或系统彼此无关。信号相互独立，避免电路的连接，以避免形成电路性耦合。
- 2) 限制耦合阻抗，使耦合阻抗愈低愈好，当耦合阻抗趋于零时，称为电路去耦。为使耦合阻抗小，必须使导线电阻和导线电感都尽可能小。
- 3) 电路去耦：即各个不同的电流回路之间仅在唯一的一点作电的连接，在这一点就不可能流过电路性干扰电流，于是达到电流回路间电路去耦的目的。
- 4) 隔离：电平相差悬殊的相关系统（比如信号传输设备和大功率电气设备之间），常采用隔离技术。

e. 容性耦合干扰抑制方法

为了抑制电容性干扰可以采取以下措施：

- 1) 干扰源系统的电气参数应使电压变化幅度和变化率尽可能地小；
- 2) 被干扰系统应尽可能设计成低阻；
- 3) 两个系统的耦合部分的布置应使耦合电容尽量小。例如电线、电缆系统，则应使其间距尽量大，导线短，避免平行走线；
- 4) 可对干扰源的干扰对象进行电气屏蔽，屏蔽的目的在于切断干扰源的导体表面和干扰对象的导体表面之间的电力线通路，使耦合电容变得最小；

f. 感性耦合干扰抑制方法

- 1) 干扰源系统的电气参数应使电流变化的幅度和速率尽量小；

被干扰系统应该具有高阻抗；

- 2) 减少两个系统的互感，为此让导线尽量短，间距尽量大，避免平行走线，采用双线结构时应缩小电流回路所围成的面积；
- 3) 对于干扰源或干扰对象设置磁屏蔽，以抑制干扰磁场。
- 4) 采用平衡措施，使干扰磁场以及耦合的干扰信号大部分相互抵消。如使被干扰的导线环在干扰场中的放置方式处于切割磁力线最小（环方向与磁力线平行），则耦合的干扰信号最小；另外如将干扰源导线平衡绞合，可将干扰电流产生的磁场相互抵消。

4. 辐射干扰

a. 近场和远场

干扰通过空间传输实质上是干扰源的电磁能量以场的形式向四周空间传播。场可分为近场和远场。近场又称感应场，远场又称辐射场。判定近场远场的准则是以离场源的距离 r 也定的。

$r > \lambda/2\pi$ 则为远场

$r < \lambda/2\pi$ 则为近场

我们常用波阻抗来描述电场和磁场的关系，波阻抗定义为 $Z_0 = E/H$

在远场区电场和磁场方向垂直并且都和传播方向垂直称为平面波，电场和磁场的比值为固定值，为 $Z_0 = 120\pi = 377$ 欧。下图为波阻抗与距离的关系。

b. 减少辐射干扰的措施

减小辐射干扰的措施主要有：

- 1) 辐射屏蔽：在干扰源和干扰对象之间插入一金属屏蔽物，以阻挡干扰的传播。
- 2) 极化隔离：干扰源与干扰对象在布局上采取极化隔离措施。即一个为垂直极化时，另一个为水平极化，以减小其间的耦合。
- 3) 距离隔离：拉开干扰源与被干扰对象之间的距离，这是由于志在近场区，场量强度与距离平方或立方成比例，当距离增大时，场衰减很快。

4) 吸收涂层法：被干扰对象有时可涂复一层吸收电磁波的材料，以减小干扰。

第二部分 电磁干扰的模式

1 共模干扰与差模干扰

共模干扰 (Common-mode)：两导线上的干扰电流振幅相等，而方向相同者称为共模干扰。

差模干扰 (Differential-mode)：两导线上的干扰电流，振幅相等，方向相反称为差模干扰。

共模(Common mode)是指存在于两根或多根导线中，流经所有导线的电流都是同极性的，差模(Differential mode)是指在导线对上的电流极性是相反的。

共模干扰的干扰电流在电缆中的所有导线上幅度/相位相同，它在电缆与大地之间形成回路流动，见图(a)。差模干扰的干扰电流在信号线与信号地线之间流动，见图(b)。

由于共模干扰与差模干扰的干扰电流在电缆上的流动方式不同，对这两种干扰电流的滤波方法也不相同。因此在进行滤波设计之前必须了解所面对的干扰电流的类型。

2 PCB的辐射与线缆的辐射

1)、PCB辐射

PCB 上有许多信号环路，由中有差模电流环也有共模电流环，计算其辐射强度时，可等效为环天线，辐射强度由下式计算：

2)、线缆的辐射

计算线缆的辐射强度时，将其等效为单极天线，其辐射强度由下式计算：

以上两式可以看出线缆的辐射效率远大于 PCB 的辐射效率。

第三部分 电磁屏蔽理论

1、屏蔽效能的感念

屏蔽是利用屏蔽体来阻挡或减小电磁能传输的一种技术，是抑制电磁干扰的重要手段之一。屏蔽有两个目的，一是限值内部辐射的电磁能量泄漏出该内部区域，二是防止外来的辐射干扰进入某一区域。

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)：

2、屏蔽体上孔缝的影响

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。真正决定实际屏蔽体的屏蔽效能的因素是各种电气不连续缺陷，包括：缝隙、开孔、电缆穿透等。

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。

1、孔缝屏蔽的总体设计思想

根据小孔耦合理论，决定孔缝泄漏量的因素主要有两个：孔缝面积和孔缝最大线度尺寸。两者皆大，则泄漏最为严重；面积小而最大线度尺寸大则电磁泄漏仍然较大。如图所示为一典型机柜示意图，上面的孔缝主要分为四类：

(1) 机箱 (机柜) 接缝

该类缝虽然面积不大，但其最大线度尺寸即缝长却非常大，由于维修、开启等限制，致使该类缝成为电子设备中屏蔽难度最大的一类孔缝，采用导电衬垫等特殊屏蔽材料可以有效地抑制电磁泄漏。该类孔缝屏蔽设计的关键在于：合理地选择导电衬垫材料并进行适当的变形控制。

(2) 通风孔

该类孔面积和最大线度尺寸较大，通风孔设计的关键在于通风部件的选择与装配结构的设计。在满足通风性能的条件下，应尽可能选用屏蔽较高的屏蔽通风部件。

(3) 观察孔与显示孔

该类型孔面积和最大线度尺寸较大，其设计的关键在于屏蔽透光材料的选择与装配结构的设计。

(4) 连接器与机箱接缝

这类缝的面积与最大线度尺寸均不大，但由于在高频时导致连接器与机箱的接触阻抗急剧增大，从而使得屏蔽电缆的共模传导发射变大，往往导致整个设备的辐射发射出现超标，为此应采用导电橡胶等连接器导电衬垫。

由于辐射源分为近区的电场源、磁场源和远区的平面波，因此屏蔽体的屏蔽性能依据辐射源的不同，在材料选择、结构形状和对孔缝泄漏控制等方面都有所不同。在设计中要达到所需的屏蔽性能，则需首先确定辐射源，明确频率范围，再根据各个频段的典型泄漏结构，确定控制要素，进而选择恰当的屏蔽材料，设计屏蔽壳体。

综上所述，孔缝抑制的设计要点归纳为：

- (1) 合理选择屏蔽材料；
- (2) 合理设计安装互连结构。

2、孔洞泄露的评估

机箱上不可避免地会有各种孔洞，这些孔洞最终决定了屏蔽体的屏蔽效能（假设没有电缆穿过机箱）。一般可以认为，屏蔽机箱在低频时的屏蔽效能主要取决于制造屏蔽体的材料，在高频时的屏蔽效能主要取决于机箱上的孔洞和缝隙。当电磁波入射到一个孔洞时，孔洞的作用是相当于一个偶极天线。当缝隙的长度达到 $\lambda/2$ 时，其辐射效率最高（与缝隙的宽度无关）。也就是说，它可以入射到缝隙的全部能量辐射出去，如图所示。

图：孔缝的电磁泄漏

在远场区，如果孔洞的最大尺寸 L 小于 $\lambda/2$ ，一个厚度为0的材料上的缝隙的屏蔽效能为：

如果 L 大于 $\lambda/2$ ，则 $SE=0$ (dB)。

式中 SE —屏蔽效能 (dB)；

L —孔洞的长度 (mm)；

H —孔洞的宽度 (mm)；

f —入射电磁波的频率 (MHz)。

这个公式计算的是最坏情况下（造成最大泄露的极化方向）的屏蔽效能，实际情况下屏蔽效能可能会更高一些。

在近场区，孔洞的泄露还与辐射源是磁场源有关。当辐射源是电场源时，孔洞的泄露比远场小（屏蔽效能高）；而当辐射源是磁场源时，孔洞的泄露比远场大（屏蔽效能低）。对于不同电路阻抗 Z_c 的辐射源，计算公式如下：

若 $Z_c > (7.9/Df)$ ：(电场源)

若 $Z_c < (7.9/Df)$ ：(电场源)

、

式中 SE —屏蔽效能 (dB)；

L —孔洞的长度 (mm)；

H —孔洞的宽度 (mm)；

f —入射电磁波的频率 (MHz)。

这个公式计算的是最坏情况下（造成最大泄露的极化方向）的屏蔽效能，实际情况下屏蔽效能可能会更高一些。

需要注意的问题是，对于磁场辐射源，孔洞在近场区的屏蔽效能与电磁波的频率没有关系，也就是说，很小的孔洞也可能导致较大的泄露。这时影响屏蔽效能的一个更重要参数是孔洞到辐射源的距离。孔洞距离辐射源越近，泄露越大。这个特点往往导

致屏蔽体发生意外的泄漏。因为在屏蔽体上开孔的一个目的是通风散热，这意味着会很自然地将孔洞设计在靠近发热源附近，而发热源往往是大电流的载体，在其周围有较强的磁场。结果，无意识地将孔洞开在强磁场辐射源的附近。因此，在设计中，要注意孔洞和缝隙要远离电流载体，例如线路板、电缆、变压器等。

当N个尺寸相同的孔洞排列在一起，并且相距较近（距离小于 $\lambda/2$ ）时，孔洞阵列的屏蔽效能会下降，下降数值为 $10\lg N$ 。

因为孔洞的辐射有方向性，因此在不同面上的孔洞不会明显增加泄漏，利用这个特点可以在设计时将孔洞放在屏蔽机箱的不同面，避免某一个面的辐射过强。

3 电缆的屏蔽设计

如果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。

电缆穿透的作用是将屏蔽体内外通过导线连通，等效于两个背靠背的天线，对屏蔽体的屏蔽有极大的影响。

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：

- 1) 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。
- 2) 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。
- 3) 采用非屏蔽电缆时，采用滤波连接器转接，保证电缆与屏蔽体之间有足够低的高频阻抗。
- 4) 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。
- 5) 电源线通过电源滤波器出屏蔽体，保证电源线与屏蔽体之间有足够低的高频阻抗。

第四部分 接地设计

接地是抑制电磁干扰、提高电子设备电磁兼容性的重要手段之一。正确的接地既能抑制干扰的影响，又能抑制设备向外辐射干扰；反之错误的接地反而会引入严重的干扰，甚至使电子设备无法正常工作。

1、接地的概念

电子设备中的“地”通常有两种含义：一种是“大地”，另一种是“系统基准地”。接地就是指在系统的某个选定点与某个电位基准间建立低阻的导电通路。“接大地”就是以地球的电位作为基准，并以大地作为零电位，把电子设备的金属外壳、线路选定点等通过接地线、接地极等组成的接地装置与大地相连接。

“系统基准地”是指信号回路的基准导体（电子设备通常以金属底座、机壳、屏蔽罩或粗铜线、铜带作为基准导体），并设该基准导体电位为相对零电位，但不是大地零电位，简称为系统地。

接地的目的有两个：一是为了安全，称为保护接地。电子设备的金属外壳必须接大地，这样可以避免因事故导致金属外壳上出现过高的对地电压而危及操作人员和设备的安全。二是为电流返回其源提供低阻抗通道。

2 接地的种类

实际上，各种地线都存在电气上或是物理上的联系，不一定有明确的划分。在地系统中，有时一个地既承担保护地，又承担防雷地的作用；或既承担工作地，又承担保护地的作用。而不同功能的地连接，针对的电气对象不同，其处理方式的侧重点还会有所差异。

a. 保护接地

保护接地是为了保护设备、装置、电路及人身安全，防止雷击、静电损坏设备，或在设备故障情况下，保护人身安全。因此在设备、装置、电路的底盘及金属机壳一定要采取保护接地。

保护地保护原理是：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，从而达到保护设备和人员安全的作用。

b. 工作接地

工作地是单板、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。

第五部分 滤波设计

1、滤波电路的基本概念

滤波电路是由电感、电容、电阻、铁氧体磁珠和共模线圈构成的频率选择性网络，低通滤波器是电磁兼容抑制技术中普遍应用的滤波器。为了减小电源和信号线缆对外辐射，接口电路和电源电路必须进行滤波设计。

滤波电路的效能取决于滤波电路两边的阻抗特性，在低阻抗电路中，简单的电感滤波电路可以得到 40dB 的衰减，而在高阻抗电路中，几乎没有作用；在高阻抗电路中，简单的电容滤波电路可以得到很好的滤波效果，在低阻抗电路中几乎不起作用。在滤波电路设计中，电容靠近高阻抗电路设计，电感靠近低阻抗电路设计。

电容器的插入损耗随频率的增加而增加，直到频率达到自谐振频率后，由于在导线和电容器电极的电感在电路上与电容串联，于是插入损耗开始下降。

2、电源 EMI 滤波器

电源 EMI 滤波器是一种无源双向网络，它一端接电源，另一端接负载。在所关心的衰减频带的较高频段，可把电源 EMI 滤波器看作是“阻抗失配网络”。

网络分析结果表明，滤波器阻抗两侧端口阻抗失配越大，对电磁干扰能量的衰减就越有效。由于电源线侧的共模阻抗一般比较低，所以滤波器电源侧的阻抗一般比较高。为了得到较好的滤波效果，对低阻抗的电源侧，应配高输入阻抗的滤波器；对高输入阻抗的负载侧，则应配低输出阻抗的滤波器。

普通的电源滤波器对于数十兆以下的干扰信号有较好的滤波作用，在较高频段，由于电容的电感效应，其滤波性能将会下降。对于频率较高的干扰情况，要使用馈通式滤波器。该滤波器由于其结构特点，具有良好的滤波特性，其有效频段可以扩展到 GHz，因此在无线产品中使用较多。

滤波器的使用，最重要的问题是接地问题。只有接地良好的滤波器才能发挥其滤波作用，否则是没有价值的。滤波器使用要注意以下问题：

- 1) 滤波器放置在电源的入口位置；
- 2) 馈通滤波器要放置在机箱（机柜）的金属壁上；
- 3) 滤波器直接与机柜紧密连接，滤波器下面不能涂保护漆；
- 4) 滤波器的输入输出引线不能并行，交叉。

本文转载自：PCB设计专家

免责声明：本文为转载文章，转载此文目的在于传递更多信息，版权归原作者所有。本文所用视频、图片、文字如涉及作品版权问题，请联系小编进行处理。

(mbbeetchina)