

单片机的 EMC 测试及 EMC 故障排除

所谓 EMC 就是：设备或系统在其电磁环境中能正常工作，且不对该环境中任何事物构成不能承受的电磁骚扰的能力。EMC 测试包括两大方面内容：对其向外界发送的电磁骚扰强度进行测试，以便确认是否符合有关标准规定的限制值要求；对其在规定电磁骚扰强度的电磁环境条件下进行敏感度测试，以便确认是否符合有关标准规定的抗扰度要求。对于从事单片机应用系统设计的工程技术人员来说，掌握一定的 EMC 测试技术是十分必要的。EMC 是电磁兼容（Electro-Magnetic Compatibility）的缩写，它包括电磁干扰（EMI）和电磁敏感性（EMS）两部分。由于电器产品在使用时对其他电器有电磁干扰，或受到其它电器的电磁干扰，它不仅关系到产品工作的可靠性和安全性，还可能影响其它电器的正常工作，甚至导致安全危险。

1 单片机系统 EMC 测试

（1）测试环境

为了保证测试结果的准确和可靠性，电磁兼容性测量对测试环境有较高的要求，测量场地有室外开阔场地、屏蔽室或电波暗室等。

（2）测试设备

电磁兼容测量设备分为两类：一类是电磁干扰测量设备，设备接上适当的传感器，就可以进行电磁干扰的测量；另一类是在电磁敏感度测量，设备模拟不同干扰源，通过适当的耦合/去耦网络、传感器或天线，施加于各类被测设备，用作敏感度或干扰度测量。

（3）测量方法

电磁兼容性测试依据标准的不同，有许多种测量方法，但归纳起来可分为 4 类：传导发射测试、辐射发射测试、传导敏感度（抗扰度）测试和辐射敏感度（抗扰度）测试。

（4）测试诊断步骤

图 1 给出了一个设备或系统的电磁干扰发射与故障分析步骤。按照这个步骤进行，可以提高测试诊断的效率。

(5) 测试准备

- ①试验场地条件：EMC 测试实验室为电波半暗室和屏蔽室。前者用于辐射发射和辐射敏感测试，后者用于传导发射和传导敏感度测试。
- ②环境电平要求：传导和辐射的电磁环境电平最好远低于标准规定的极限值，一般使环境电平至少低于极限值 6dB。
- ③试验桌。
- ④测量设备和被测设备的隔离。
- ⑤敏感性判别准则：一般由被测方提供，并实时监控和判别，以测量和观察的方式确定性能降低的程度。
- ⑥被测设备的放置：为保证实验的重复性，对被测设备的放置方式通常有具体的规定。

(6) 测试种类

传导发射测试、辐射发送测试、传导抗扰度测试、辐射抗扰度测试。

(7) 常用测量仪

电磁干扰 (EMI) 和电磁敏感度 (EMS) 测试，需要用到许多电子仪器，如频谱分析仪、电磁场干扰测量仪、信号源、功率放大器、示波器等。由于 EMC 测试频率很宽 (20Hz~40GHz)、幅度很大 (μV 级至 kW 级)、模式很多 (FM、AM 等)、姿态很多 (平放、斜放等)，因此正确地使用电子仪器非常重要。测量电磁干扰的合适仪器是频谱分析仪。频谱分析仪是一种将电压幅度随频率变化的规律显示出来的仪器，它显示的波形称为频谱。频谱分析仪克服了示波器在测量电磁干扰中的缺点，能够精确测量各个频率上的干扰强度，用频谱分析仪可以直接显示出信号的各个频谱分量。

在解决电磁干扰问题时，最重要的一个问题是判断干扰的来源。只有准确将干扰源定位后，才能够提出解决干扰的措施。根据信号的频率来确定干扰源泉是最简单的方法，因为在信号的所有特征中，频率特征是最稳定的，并且电路设计人员往往对电路中各个部位的信号频率都十分清楚。因此，只要知道了干扰信号的频率，就能够推测出干扰是哪个部位产生的。对于电磁干扰信号，由于其幅度往往远小于正常工作信号，用频谱分析仪做这种测量是十分简单的。由于频谱分析仪的中频带宽较窄，因此能够将与干扰信号频率不同的信号滤除掉，精确地测量出干扰信号频率，从而判断产生干扰信号的电路。

2 电磁兼容故障排除技术

（1）传导型问题的解决

- ①通过串联一个高阻抗来减少 EMI 电流。
- ②通过并联一个低阻抗将 EMI 电流短路到地或引到其它回路导体。
- ③通过电流隔离装置切断 EMI 电流。
- ④通过其自身作用来抑制 EMI 电流。

（2）电磁兼容的容性解决方案

一种常见的现象是不把滤波电容的一侧看成直接和一个分离的阻抗相连，而看成与传输线相连。典型的情况是，当一条输入输出线的长度达到或超过 $1/4$ 波长时，该传输线变“长”。实际可以用下式近似表示这种变化：

$$l \geq 55/f$$

式中：l 单位为 m，f 单位为 MHz。这个公式考虑了平均传播速度，它是自由空间理论的 0.75 倍。

a. 电介质材料及容差

电磁干扰滤波使用的大部分电容是无极性电容。

b. 差模（线到线）滤波电容性电容。

c. 共模（线到地/机壳）滤波电容

共模（CM）去耦通常使用小电容（10~100nF）。小电容可以将不期望的高频电流在其进入敏感电路之前或在其离噪声电路较远时就将其短路到机壳上去。为了得到良好的高频衰减电路，减小或消除寄生电感是关键之所在。因此有必要使用超短导线，尤其希望使用无引线元器件。

（3）感性、串联损耗电磁兼容解决方案

就电容而言， Z_s 和 Z_l 如果不是纯电阻的话，在计算频率时，要使用它们的实际值。电容器串联在电源或信号电路时，必须满足：

①流过的工作电流不应该引起电感过热或过大的有过之而无不及降；

②流过的电流不能引起电感磁饱和，尤其是对高导磁材料是毫无疑问的。

解决方案有以下几种：

*磁芯材料；

*铁氧体和加载铁氧体的电缆；

*电感、差模和共模；

*接地扼流圈；

*组合式电感电容元件。

（4）辐射型问题的解决

在很多情况下，辐射电磁干扰问题可能在传导阶段产生并被排除，还有些解决方案是可以抑制干扰装置在辐射传输通道上，就像场屏蔽那样工作。根据屏蔽理论，这种屏蔽的效果主要取决于电磁干扰源的频率、与屏蔽装置之间的距离以及电磁干扰场的特性——电场、磁场或者平面波。

①导体带。使用铜或铝带要吧简单快速地建立一种直接的屏蔽和低阻连接或总线。它们对于临时的解决方案和相对永久的解决方案来说是很方便的。厚度在 0.035~0.1mm 之间，并且背面带有导电黏合剂以便安装。如果使用铜导电带，其通过电阻约 20mΩ/cm²。应用场合：电气屏蔽罩；发生故障时泄露点定位；作为一个应急的解决方案，将塑料连接器变成金属的、屏蔽普通的扁平电缆等。

②网状屏蔽带和拉链式外套。涂锡的钢网带：主要用来安装在一个已经装配好的电费护套上作为一种易安装的绷带型的屏蔽罩。为了降低电费的磁场辐射或敏感问题，钢网带是一种有效的解决方案。

拉链式屏蔽外套：当有明显迹象表明电费是主要的引起 EMI 耦合的原因时使用。

③EMI 密封垫。应用场合：当下述条件存在，并且需要真正的 SE 时，EMI 密封垫是最常用的解决辐射问题、敏感问题、ESD、电磁脉冲和 TEMPEST 问题的方法。

*已经把机箱泄漏确认为主要的辐射路径。

*啮合面不够光滑、平整或不够硬、本身无法提供良好的连接接触。

④窗口和通风板的 EMI 屏蔽：适合对孔径的屏蔽。

平面波的大概模型是：

$$SE \approx 104(-20 \lg l) - 20 \lg f$$

式中，SE 单位为 dB；l 为网格或网孔的尺寸，单位为 mm；f 单位为 MHz。当然，随着频率的下降，网孔的屏蔽效率 SE 的上限受限于金属本身。在近区场，对 H 场的屏蔽，其屏蔽功率 SHE 不受频率的影响，可由下式近似得出：

$$SEH \approx 10 \lg(\pi r/l)$$

其中， r 为源到屏蔽罩之间的距离， l 为网孔尺寸，两者单位均为 mm 。

⑤导电涂料：应用于在系统的塑料外壳建立 EMI 屏蔽罩、发送现有普通的或恶化的导电表面的屏蔽效能 SE、防止 ESD 或静电积累现象、增大结合面或密封垫片的接触面积。

⑥导电箔：铝是一种良导体，在 10MHz 以下没有吸收损耗，但它对于电场的任何频率都有较好的反射损耗。应用场合请参阅有关资料。

⑦导电布：可应用于任何 100kHz 到 GHz 级频率范围需要达到 $30 \sim 30\text{dB}$ 衰减的立体屏蔽场合中。

3 电磁兼容性新器件新材料的应用

3.1 电源线滤波器

电源线滤波器安装在电源线与电子设备之间，用于拟制电能传输中寄生的电磁干扰，对提高设备的可靠性有重要作用。滤波器允许一些频率通过，而对其它频率的成份加以拟制。根据干扰源的特性、频率范围、电压和阻抗等参数及负载特性的要求，适当选择滤波器。

3.2 信号阻隔变压器

脉冲型（数字或晶闸管门驱动）或模拟隔离式变压器与交流电源中使用的隔离变压器与交流电源中使用的隔离变压器的原理相同，但传输频带却完全不同，有用信号处理对变压器的一些性能要求（例如失真、 3dB 带宽、损耗、对称性、阻抗、脉冲延时等）非常严格。这种变压器属于宽带设备，最高频率与最低频率的比值 $f_{\text{MAX}}/f_{\text{MIN}}$ 达到数十倍。通过在发送端或接收端切断共模地环路，隔离变压器在不改变差模信号的同时拟制共模噪声。由于共模电压是加在变压器一次侧、二次侧的两边，这种隔离器必须具有较高的击穿电压：典型值为 1.5kV ，某些场合则高达 10kV 。

信号变压器的主要优点是它的简单、耐用、持久和线性，而且价格适中。当频率增加时，其电磁兼容性能下降。

应用场合:

- *当需要环路隔离时，其频率范围从直流到几十 MHz;
- *在低噪声和低失真条件下传输模拟小信号 ($\leq 10\text{mV}$) 时，信号线上可能存在几 V 至几 kV 的共模电压;
- *在晶闸管应用电路中，将触发器驱动电路与共模电压隔离;
- *作为一个现场解决方案，可用来切断一个地环路和搭建一个平衡连接或非平衡连接传输线路。

3.3 电源隔离变压器、电源稳压器和不间断电源

(1) 电源隔离变压器

普通的隔离变压器可以在低频范围切断主电源线的接地环路。当频率升高时，电气隔离由于一次侧间寄生电容 C1-2 的存在而下降。为了减少寄生电容的影响，可以使用落系、螺旋状、分立式的一次和二次绕组，这样可以将寄生电容减小为原为的 $1/3 \sim 1/10$ 。

(2) 法拉第屏蔽变压器

在一次和二次线圈之间包着一层铝箔或铜箔，并使之不与线圈接触以免形成短路。法拉第屏蔽或静电屏蔽层接地。应用范围如下:

- *应用于入室电源或电源分配箱上，作为简单 1: 1 的隔离变压器，隔离 50/60Hz 的地环路;
- *在同一系统中的某一部分重新产生对地保持中性的交流电源，与总电源分配点保持电气隔离;
- *应用于当系统中存在很大的对地漏电电流时，防止过渡频繁触发系统中的接地故障检测器;
- *可以与电源线滤波器结合使用，电源线滤波器的衰减特性仅开始于几十或几百 kHz 以上。

3.4 暂态抑制器

变阻器和固态变阻器（transzorbs）是具有非线性 V-I 特性曲线的元件，可以作为稳压元件。当电压通过该器件后就被箝位在等于或大于击穿电压 VBR 的电压值上。该器件的响应速度快，但在处理的能量值上有一定限制。

3.5 搭接、接地连续性和减少 RF 阻抗器件

①接地编织层或金属带宽而扁的导线比同样横截面积的圆导线具有较小的电感。作为优先的选择参考，可以使用：

*扁平金属带；

*带有扁平接地端子的扁平编织层；

*圆形、多股绞线的跳线。

②印制电路板（PCB）接地垫片。为了建立一个更直接的低阻抗电磁干扰电流接收器，需要使用接地垫片。通常在树脂型垫片中间有一个弹簧夹，用以在一边的 OV 铜板上和加一边 PCB 的安装底盘上提供较强的可靠压力。由于弹簧是铜锡材料制成的，电气接触性能良好，接触电阻为 mΩ 数量级。

③金属电费线槽及其共用的金属编织层。金属电缆托架、公共导线和金属编织层的作用是传输几个相互连接的设备之间的部分接地 EMI 环流。可以把它看作是不同底盘或地线之间的共模短路通道，但实际上除了直流或交流 50/60Hz，这种方法不能应用于较长的距离；可用于计算机室、工厂车间或其它有许多非屏蔽电费的大型场地，不可能或很难将它们换成屏蔽电费或装入管道。

④地阻抗减小，垫高的金属底板接地衬垫。为了减少传导瞬态干扰的输入和周围环境射频场对系统的影响，可以通过设置室内参考接地板或接地网络加以改善。通过这种方法，可以很容易地在高达几百 MHz 的频率上达到 20dB 的改善，也可以减少在同一个房间里的不同设备之间的地电位偏差。

另一种技术：在室内，建议安装抬高的金属底板（RMF），利用地砖的筋条作为接地参考栅格；把塑料减震垫片换成导电减震垫片，就可以建立很好的、持久的电气连接。

②临时接地板。这种后各解决方案最初是 IBM 公司的安装规划工程师们使用的，即安装一块铜板或电镀钢板。对于那些没有“实际地”的场合，由于临时接地板与建筑特结构之间较大的电容（300~1000pF），这给电磁干扰滤波器、瞬态保护器和隔离变压器的法拉第屏蔽层提供了有较的吸收装置。在高频端，这种虚地比长的、绿的或黄绿的接地导线更有效。

结语

在实际 EMC 测试应用中，除了通过标准资格实验室的鉴定测试以外，还有两种可行的方法也是被业界所认可的：TCF（Technical Construction File）和 Self Certification(自检证明)。抗干扰能力测试是十分实用的测试项目。实现电磁兼容的最好办法是，将所有的数字及模拟电路均视为对高频信号响应的电路，用高频设计方法来处理电费屏蔽、PCB 布线和共模滤波。采用整块地平面和电源面也很重要，对模拟电路也该如此，这样做有利于限制高频共模环环。大多数瞬态干扰均属高频，并产生很强的辐射能量。