

本次交流的内容

1. 电磁兼容整改及对策概述
2. 电磁兼容故障诊断方法
3. 连续传导发射超标问题及对策
4. 断续传导发射超标问题及对策
5. 辐射骚扰超标问题及对策
6. 骚扰功率干扰的产生和对策
7. 谐波电流测试问题对策
8. 静电放电抗扰度问题对策及整改措施
9. 电快速脉冲群抗扰度问题对策及整改措施
10. 浪涌冲击抗扰度问题对策及整改措施
11. 辐射抗扰度测试问题对策及整改措施
12. 传导抗扰度测试问题对策及整改措施

21:01

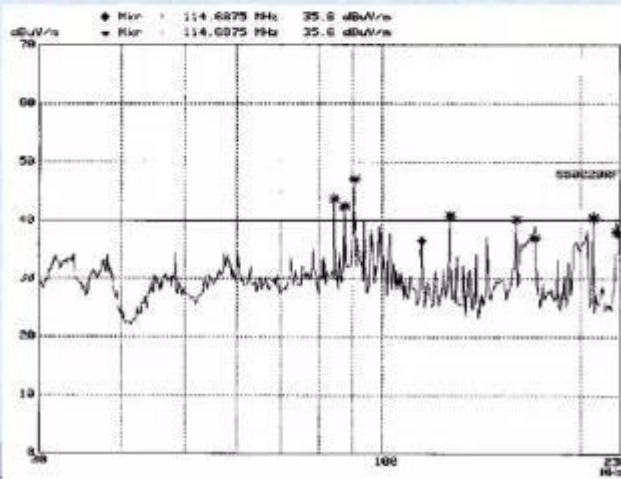
电磁兼容整改及对策

2/161

1. 电磁兼容整改概述

1.1 什么时候需要电磁兼容整改

- 对电子、电气产品，**设计阶段**就应考虑电磁兼容性，将产品在生产阶段出现电磁兼容问题的可能性减少到一个较低的程度。
- 但是否满足要求，要通过**电磁兼容测试**检验其标准的符合性。
- 由于电磁兼容的**复杂性**，即使对一个电磁兼容设计问题考虑得比较周全得产品，在设计制造过程中，难免出现一些电磁干扰的因素，造成最终电磁兼容测试**不合格**。
- 在电磁兼容测试中，这种情况还是**比较常见**的。



- 对产品**定型前**的电磁兼容测试不合格的问题，我们完全可以遵循正常的电磁兼容设计思路，按照电磁兼容设计规范法和系统法，针对产品存在的电磁兼容问题**重新进行设计**。
- 从**源头**上解决存在的电磁兼容隐患。属电磁兼容设计范畴。

目前国内电子、电气产品比较普遍存在的情况是：

- 产品在进行电磁兼容型式试验时，产品设计已经定型，产品外壳已经开模，PCB板已经设计生产，部件板卡已经加工，甚至产品已经生产出来等着出货放行。
- 对此类产品存在的电磁兼容问题，只能采取“**出现什么问题，解决什么问题**”的**问题解决法**，以对产品的**最小改动**使其达到电磁兼容要求。
- 这就属于电磁兼容**整改对策**的范畴，这是我们**这次课程**需要探讨的问题。

1.2 常见的电磁兼容整改措施

对常见电磁兼容不合格，综合采用以下整改措施，一般可解决大部分问题：

■ 屏蔽问题：

- 加强屏蔽、减少缝隙：可以在屏蔽体的装配面处涂导电胶，或者在装配面处加导电衬垫，甚至采用导电金属胶带进行补救。
- 导电衬垫可以是编织的金属丝线、硬度较低易于塑型的软金属(铜、铅等)、包装金属层的橡胶、导电橡胶或者是梳状簧片接触指状物等。

■ 布局布线问题：

- 在不影响性能的前提下，适当调整设备内部各部件之间的布局，电缆走向和排列，以减小不同类型的部件、电缆相互影响。



■ 接地问题：

- 加强接地的性能，降低接地电阻；
- 对于设备整体要有单独的低阻抗接地。

■ 接口问题：

- 加强接口的滤波和金属机箱与屏蔽层的连接；
- 在设备电源、信号的输入、输出线上改进或加装滤波器。

■ 电缆问题：

- 正确选择传输电缆；电缆的屏蔽层正确接地；
- 改变普通的小信号或高频信号电缆为带屏蔽的电缆；改变普通的低频、大电流信号或数据传输信号电缆为对称绞线电缆。

■ 关键部位的处理：

- 对重要部件、板卡、器件进行屏蔽、隔离处理，如加装接地良好的金属隔离仓或小的屏蔽罩等。

■ 电路和电源问题：

- 改进或增加电源、电路的滤波，以旁路去其高频干扰。

21:01

电磁兼容整改及对策

6/161

此次根据各电磁兼容项目的特点，将其分为以下类别进行讨论：



21:01

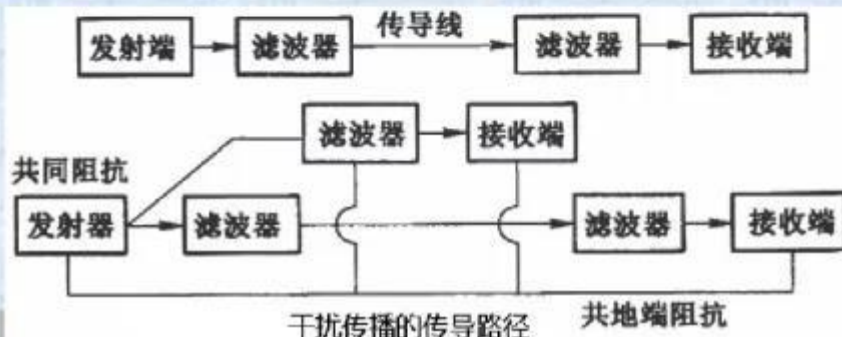
7/161



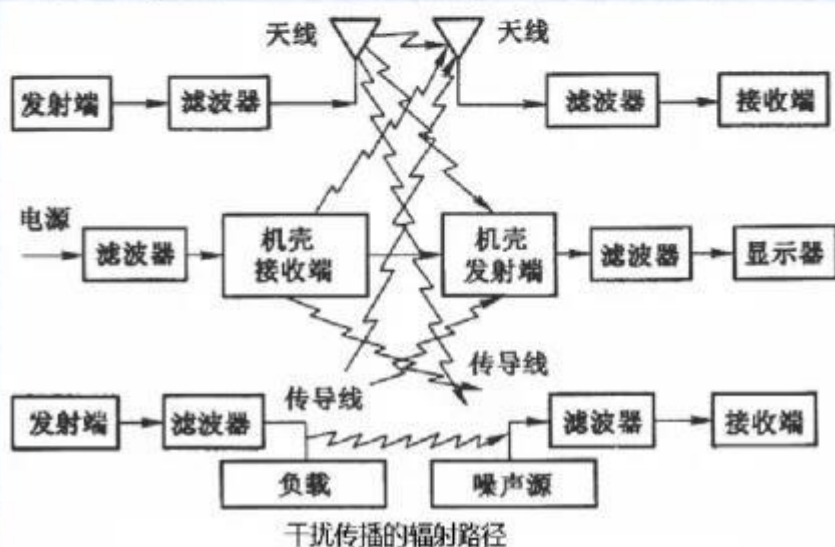
2. 电磁骚扰故障诊断

2.1 电子、电气产品内的主要电磁骚扰源

- 开关电源的开关回路：主频几十kHz到百余kHz，高次谐波可延伸到数十MHz。
- 设备直流电源的整流回路：工频线性电源工频整流噪声频率上限可延伸到数百kHz；开关电源高频整流噪声频率上限可延伸到数十MHz。
- 电动设备直流电机的电刷噪声：噪声频率上限可延伸到数百MHz。
- 电动设备交流电机的运行噪声：高次谐波可延伸到数十MHz。
- 变频调速电路的骚扰发射：开关调速回路骚扰源频率从几十kHz到几十MHz。
- 设备运行状态切换的开关噪声：由机械或电子开关动作产生的噪声频率上限可延伸到数百MHz。
- 智能控制设备的晶振及数字电路电磁骚扰：骚扰源主频几十kHz到几十MHz，高次谐波可延伸到数百MHz。



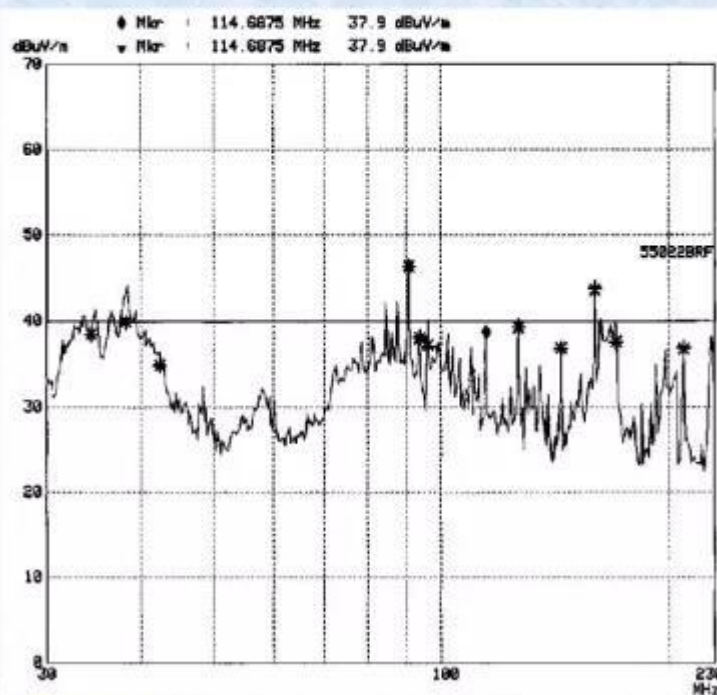
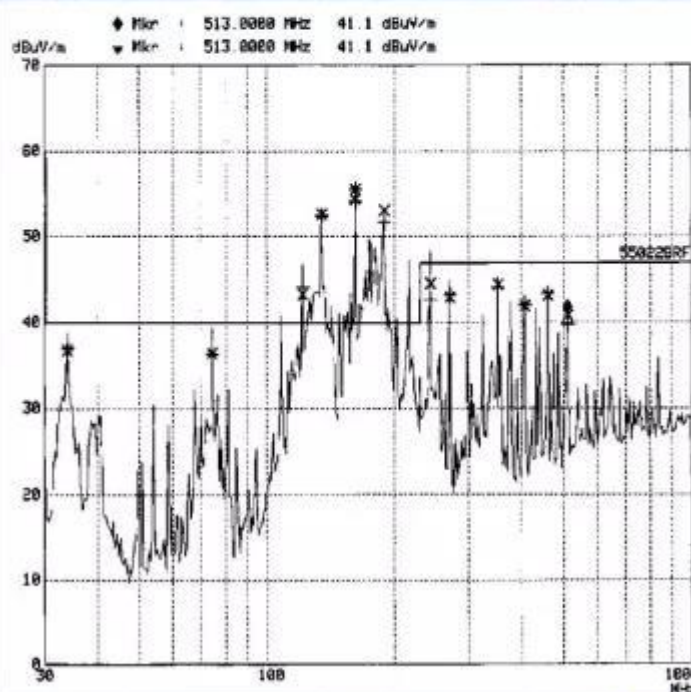
- 微波设备的微波泄漏：骚扰源主频数GHz。
- 电磁感应加热设备的电磁骚扰发射：骚扰源主频几十kHz，高次谐波可延伸到数十MHz。
- 电视电声接收设备的高频调谐回路的本振及其谐波：骚扰源主频数十MHz到数百MHz，高次谐波可延伸到数GHz。
- 信息技术设备及各类自动控制设备的数字处理电路：骚扰源主频数十MHz到数百MHz（经内部倍频主频可达数GHz），高次谐波可延伸到十几GHz。



2.2 骚扰源定位

2.2.1 根据测量曲线定位:

■ 依据：超标骚扰频率范围、超标骚扰频域分布、窄带还是宽带骚扰等来判断



21:01

电磁兼容整改及对策

10/161

2.2.2 根据被测设备工作方式和内部结构定位:



21:01

电磁兼容整改及对策

11/161

2.2.3 根据被测设备组成和功能定位:

根据被测设备组成和功能定位



21:01

电磁兼容整改及对策

12/161

2.2.4 根据功能模块工作进行故障定位:

- 若设备的各个模块可以**暂停和恢复**工作，可以通过逐个暂停这些模块的工作来判断骚扰来源。
- 若模块不可以独立暂停和恢复工作，可以通过与该设备其它功能模块一起**组合**进行暂停和恢复工作，从而判断骚扰的大概来源。
- 若模块不可以独立暂停和恢复工作，也可以通过用待判断模块与其它合格设备的相关功能模块组合并测量的方式，从而判断骚扰的大概来源。
- 对怀疑骚扰超标的模块，可以用与合格模块**置换**的方式进行骚扰判定。



21:01

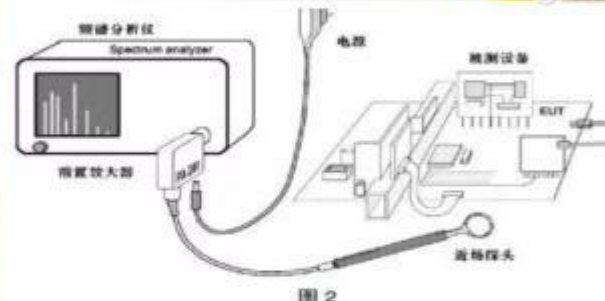
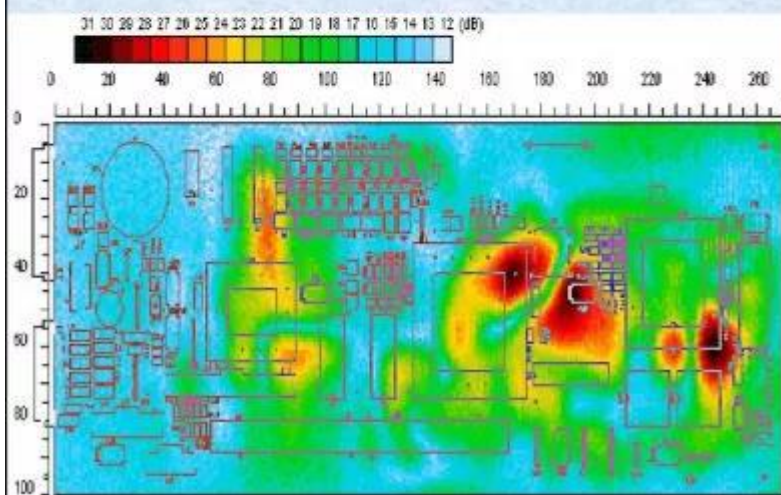
电磁兼容整改及对策

13/161



2.2.5 使用分析工具或近场探头进行故障定位

- 对于设备内部或PCB组件的故障可使用专用的扫描分析工具进行进一步的故障定位，可将骚扰发射较大的区域确定在很小的局部范围。
- 也可以使用近场探头+频谱分析仪/示波器将骚扰发射较大的地方定位在某一PCB走线，或内部互连线上。



2.2.6 磁场电场近场探头及其内部结构

Figure 1 Three constructions for magnetic field probes

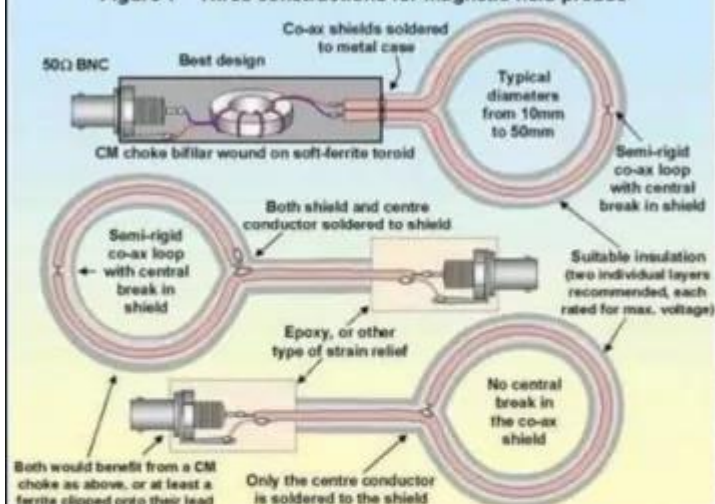
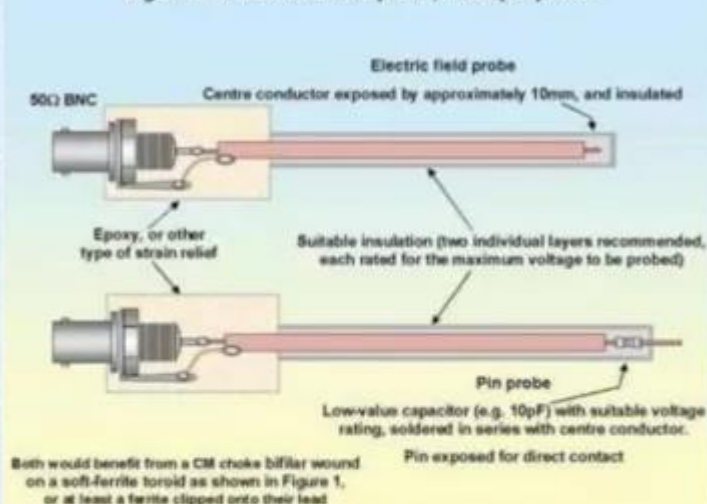
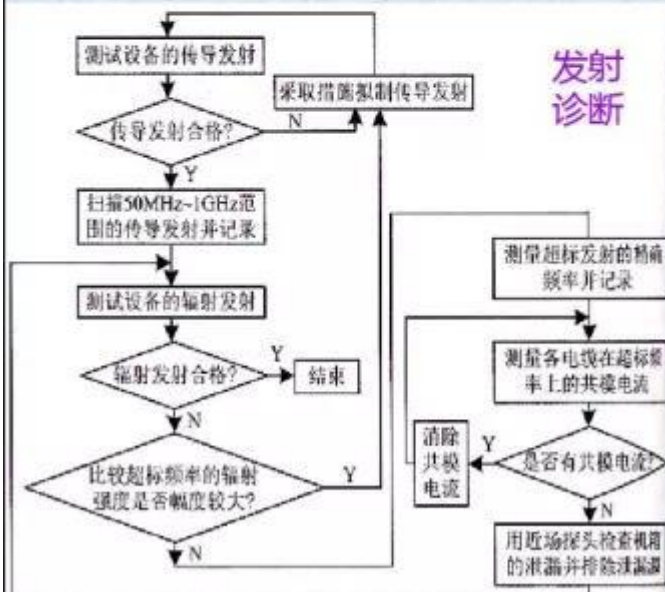
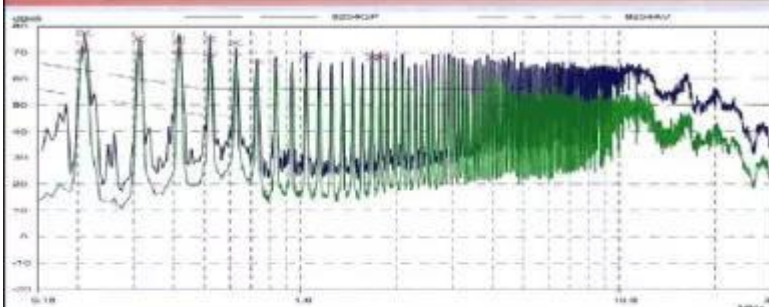


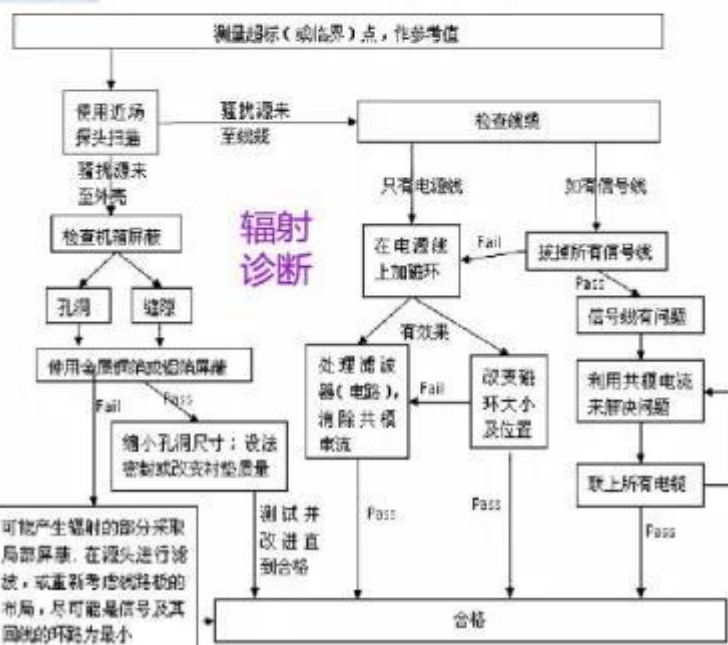
Figure 2 An electric field probe, and a pin probe



2.3 EMI问题诊断流程



发射
诊断



拔掉电源线附近的其它电缆

差共模判断

传导
诊断

差模

共模

滤波器安装问题

滤波器问题

<1MHz

>1MHz

>10MHz

截止频率过高

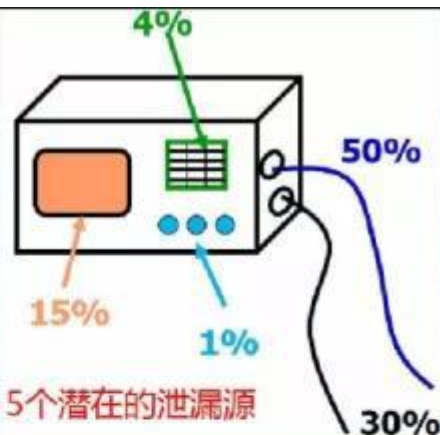
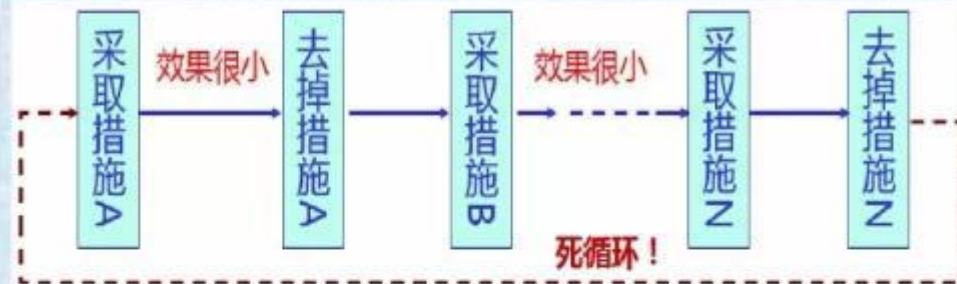
过渡带不陡

高频滤波不良

21:01

图1 电磁兼容测试诊断步骤

2.4 常见错误及其原因分析



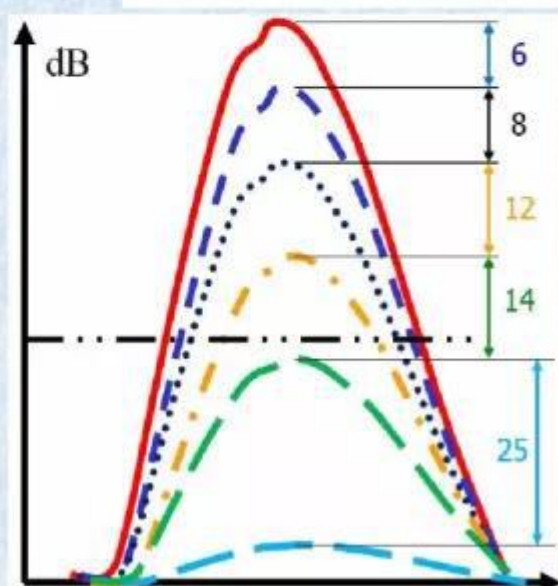
解决最大的泄漏源: 改善量 = $20\lg \frac{1}{0.5} = 6 \text{ dB}$

解决第二大的泄漏源: 改善量 = $20\lg \frac{0.5}{0.2} = 8 \text{ dB}$

解决第三大的泄漏源: 改善量 = $20\lg \frac{0.2}{0.05} = 12 \text{ dB}$

解决第四大的泄漏源: 改善量 = $20\lg \frac{0.05}{0.01} = 14 \text{ dB}$

解决最后的泄漏源: 改善量 = $20\lg \frac{0.01}{0.0006} = 25 \text{ dB}$



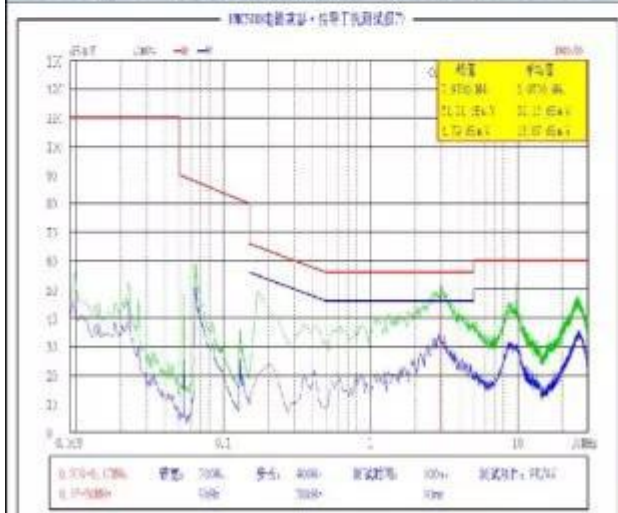
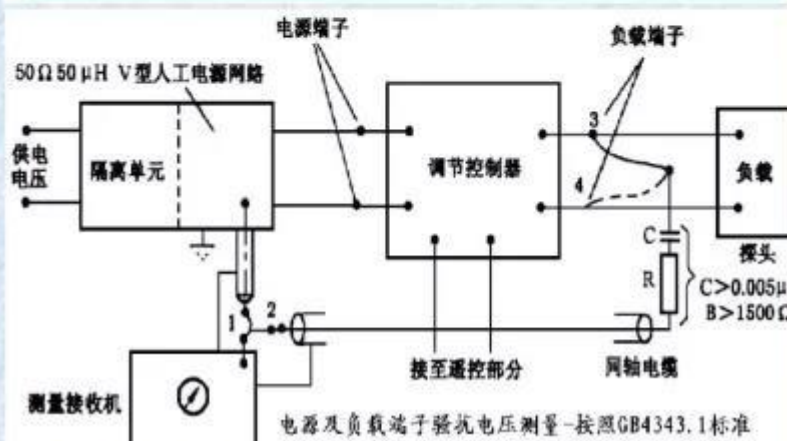
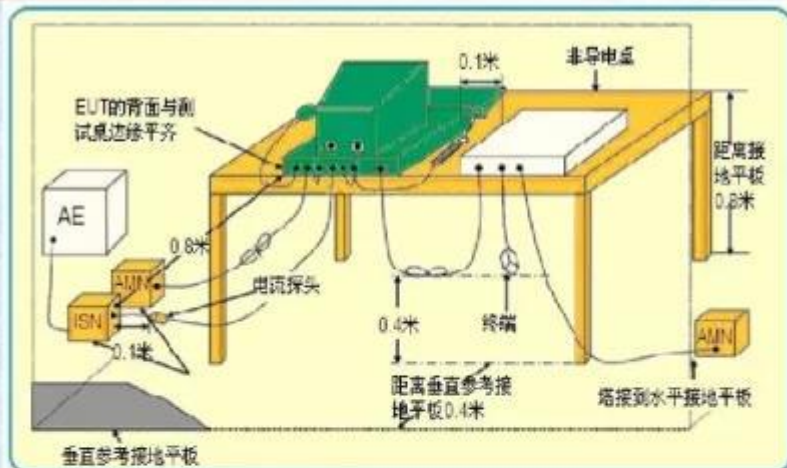
21:01

3. 电子、电气产品连续传导发射超标问题及对策

■ 电子、电气产品电源或通信端连续传导骚扰

- 一般测量频率范围为150kHz-30MHz或9kHz-30MHz（灯具）
- 电视机的天线端骚扰电压测量频率范围则为30-2150MHz

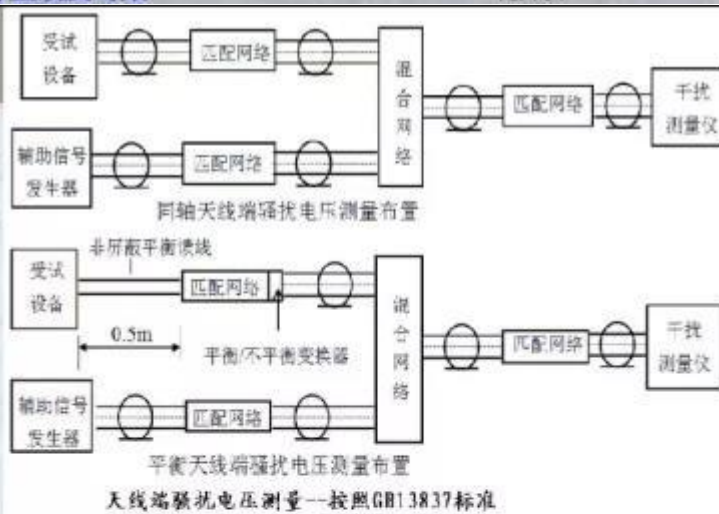
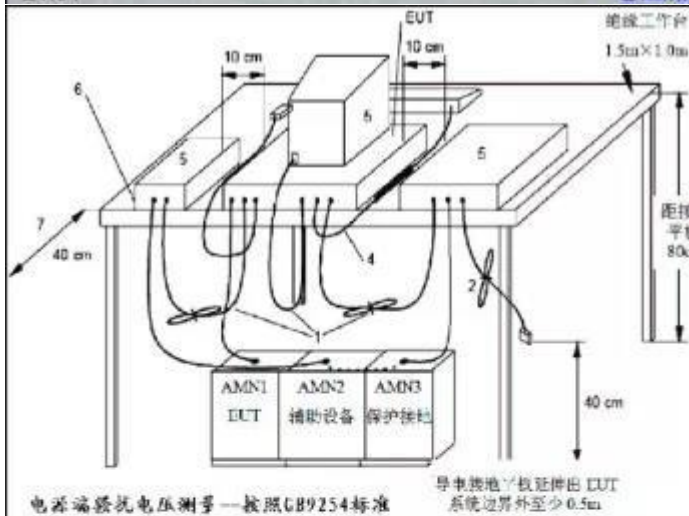
■ 测量分别在电源端子及负载端子和附加端子上进行。



21:01

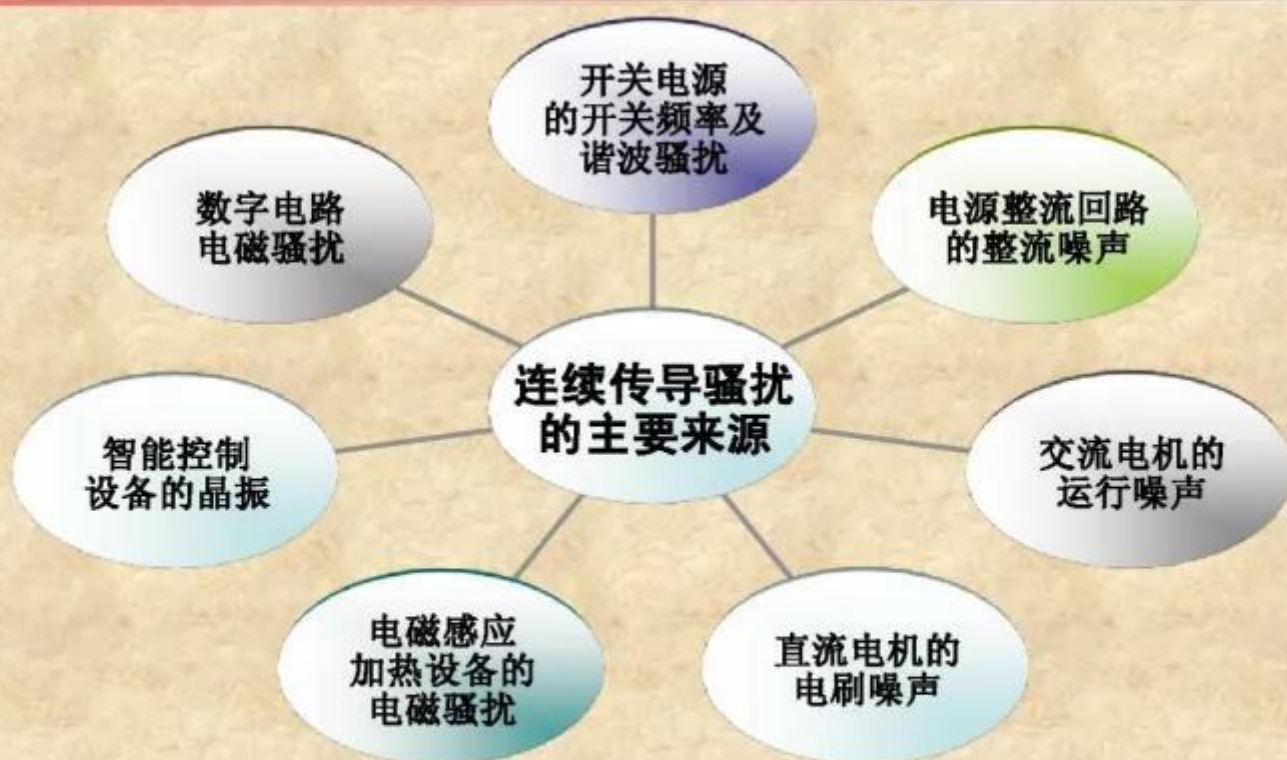
电磁兼容整改及对策

18/161



传导骚扰测试

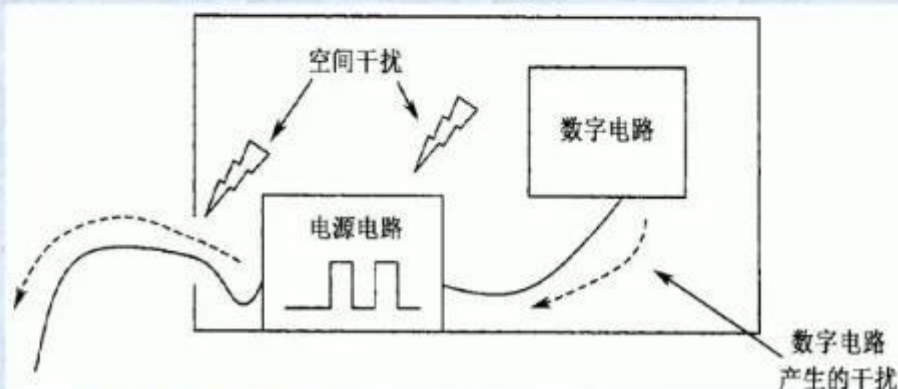




- 当我们通过骚扰定位方式找到超标点的骚扰来源后，
- 即可采用相对应的骚扰抑制措施。

3.1 射频传导发射试验失败的原因

- 导致射频传导发射超标的原因如图所示。
 - (1) 开关电源或DC/DC变换器工作在脉冲状态，它们本身会产生很强的干扰，这种干扰既有共模分量，也有差模分量。对于一般开关电源和变换器，在1MHz以下以差模干扰为主，在1MHz以上以共模干扰为主。
 - (2) 数字电路的工作电流是瞬变的，虽然在每个电路芯片的旁边和线路板上都安装了解耦电容，但还是会有一部分瞬变电流反映在电源中，沿着电源线传导发射。
 - (3) 机箱内的线路板、电缆都是辐射源，这些辐射能量会感应进电源线和电源电路本身，形成传导发射。
- 需要注意的是，当机箱内各种频率的信号耦合进电源电路时，由于电源内二极管、三极管电路，会使这些不同频率的信号相互发生混频、调制，甚至对干扰进行放大，从而导致严重干扰。



3.2 通过射频传导发射试验的措施

- 电源入口处安装电源滤波器是保证通过电源传导骚扰唯一方法。
- 如果仅做150kHz~30MHz传导发射试验，一般电源线滤波器就可满足要求，大部分电源线滤波器在100kHz以上都已有较大插入损耗。
- 由于30MHz以上高频性能不良会导致辐射发射问题，所以应注意。
- 如果需要做30~300MHz的骚扰功率或30MHz以上辐射骚扰场强测试，选择滤波器时必须注意滤波器的高频特性。

抑制30MHz以下的共模与差模传导骚扰

抑制30MHz以上通过电源线发射的辐射骚扰（骚扰场强、骚扰功率）

电源
滤波器
功能

21:01

电磁兼容整改及对策

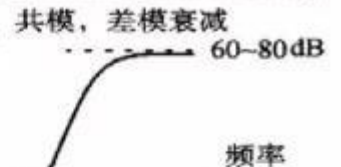
22/161

3.2.1 对电源线的处理

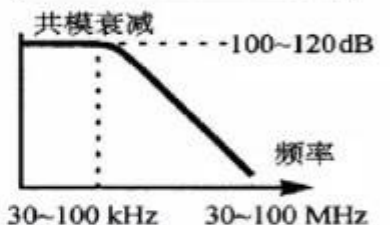
- (1) 加装电源线滤波器（如果已经有滤波器。则换用高性能的滤波器），要特别注意安装位置（尽可能放在机箱中电源线入口端）和安装情况，要保证滤波器外壳与机箱搭接良好、接地良好。
- (2) 检查电源线附近有无信号电缆存在，有无可能是因为信号电缆与电源线之间的耦合使电源线的传导骚扰发射超标（这种情况多见于超标频率的频段较高的情况下）。如有，或拉大两者间的距离，或采取屏蔽措施。
- (3) 虽经采取措施，设备传导骚扰发射仍未达标。此时可考虑在设备内部线路连接接地端子的地方串入一个电感。由于这部分连接属单点接地，平时无电流流过，因此这个电感可以做得较大。

通过主电源线耦合

电源线滤波器

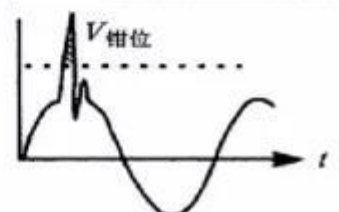


屏蔽隔离变压器



电源稳压器和不间断电源

瞬态抑制器



电源线抑制器件特性

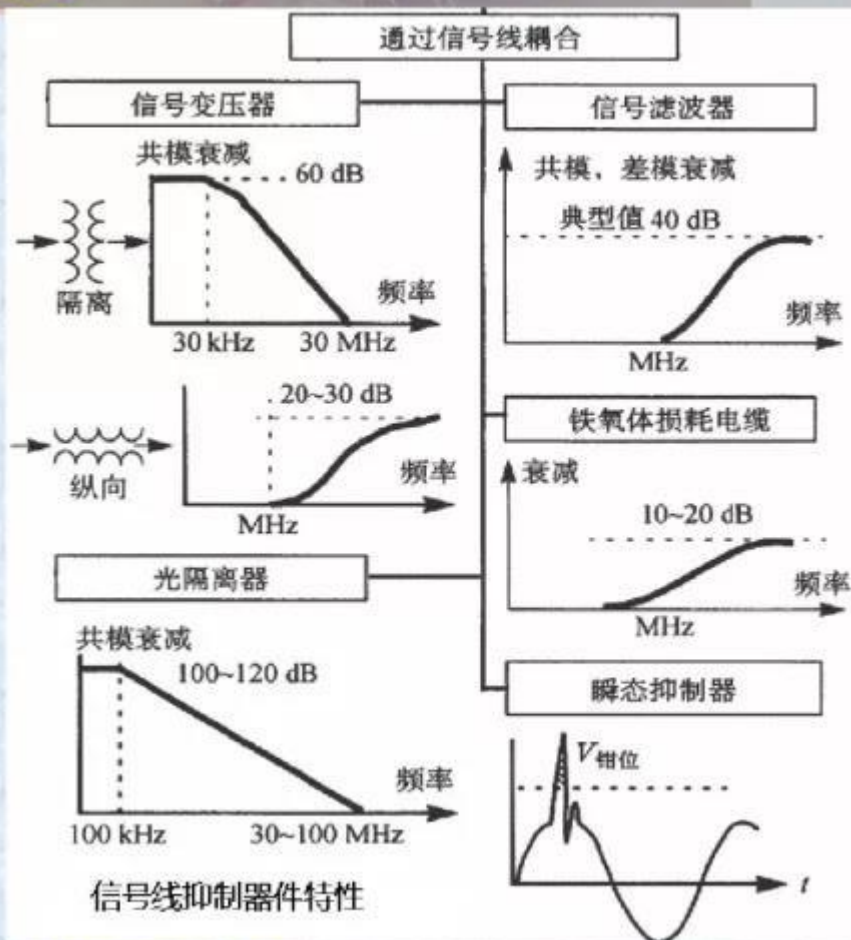
21:01

电磁兼容整改及对策

23/161

3.2.2 对信号线的处理

- (1) 对信号线进行共模滤波，必要时采用滤波连接器（或滤波阵列板）。注意滤波器的参数，传导骚扰发射超标的频率比辐射骚扰发射超标的频率应低些，因此取用的元件参数应当偏大一些。
- (2) 在信号线上套铁氧体磁环（或铁氧体磁夹）。
- (3) 注意信号线周围有无其他辐射能量（附近的布线及印刷板的布局）被引到信号线上。如有，或拉大两者的距离，或采取屏蔽措施，或考虑改变设备内部布局 and 印刷板的布局。



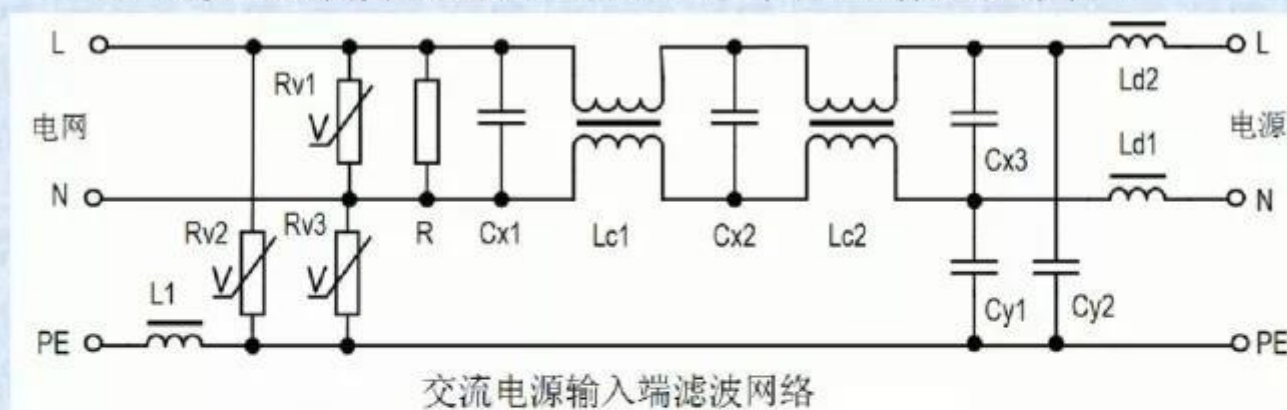
21:01

电磁兼容整改及对策

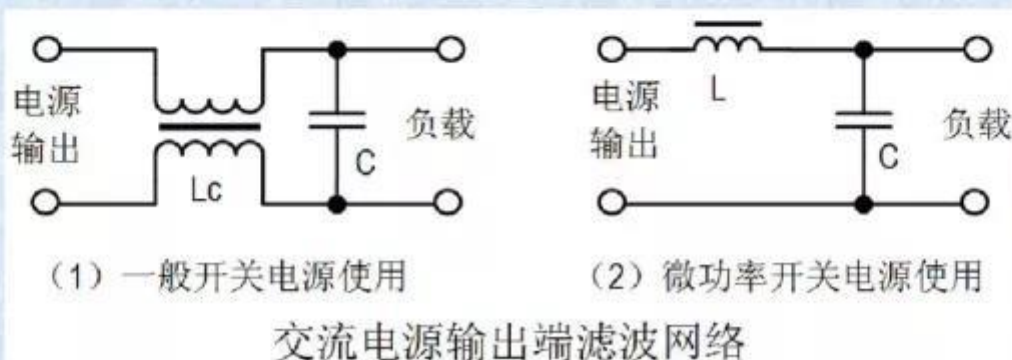
24/161

3.3 典型实例

对电源端连续传导骚扰可以通过以下的电路加以抑制：



对于负载端子和附加端子的传导骚扰可以通过以下的电路加以抑制：

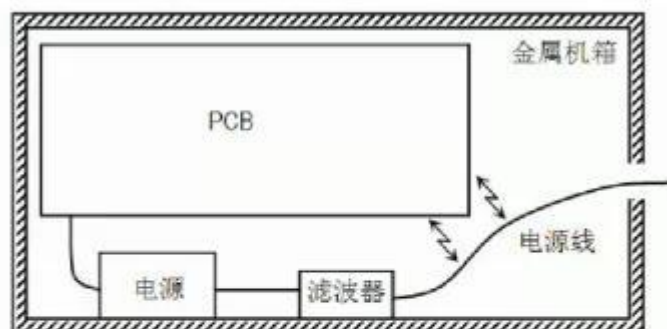


21:01

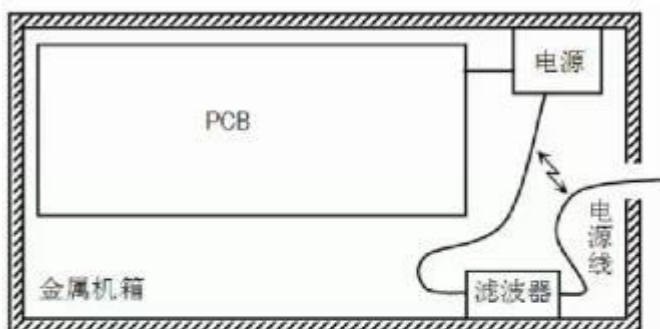
电磁兼容整改及对策

25/161

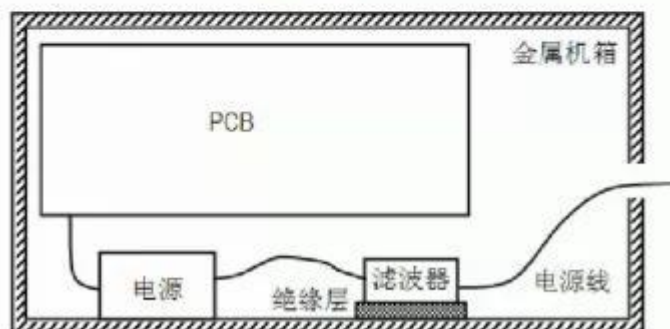
- 无论是对电源端子、负载端子和附加端子采取抑制措施，若使用独立的滤波器时，需注意其安装方式。



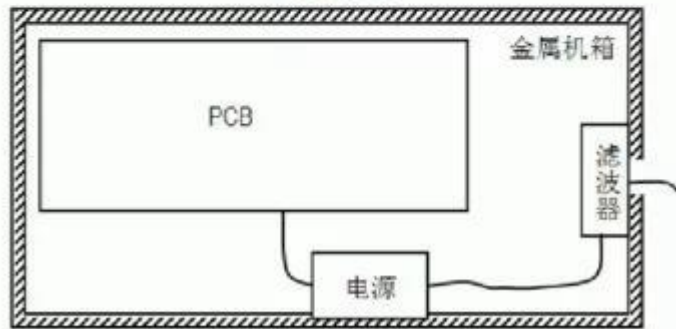
a 错误安装



b 错误安装



c 错误安装

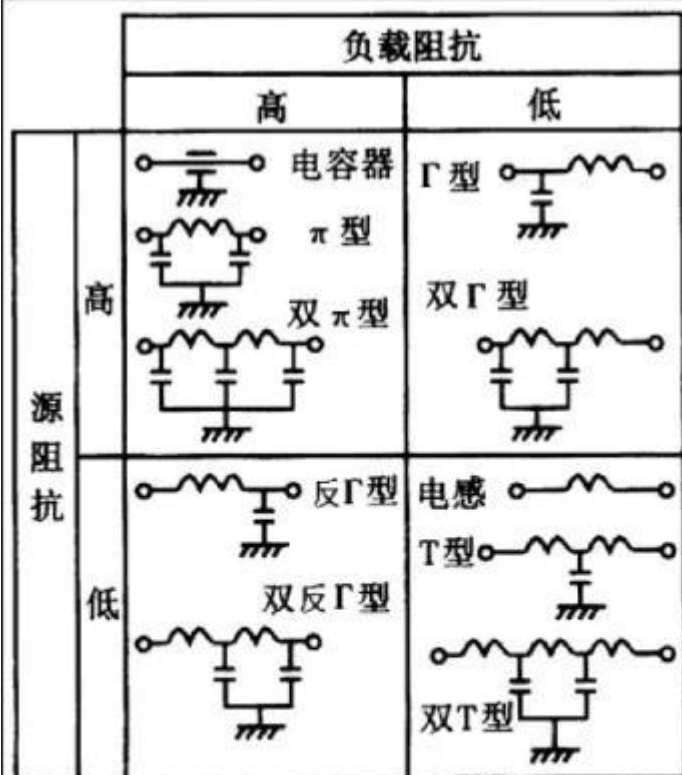


d 正确安装

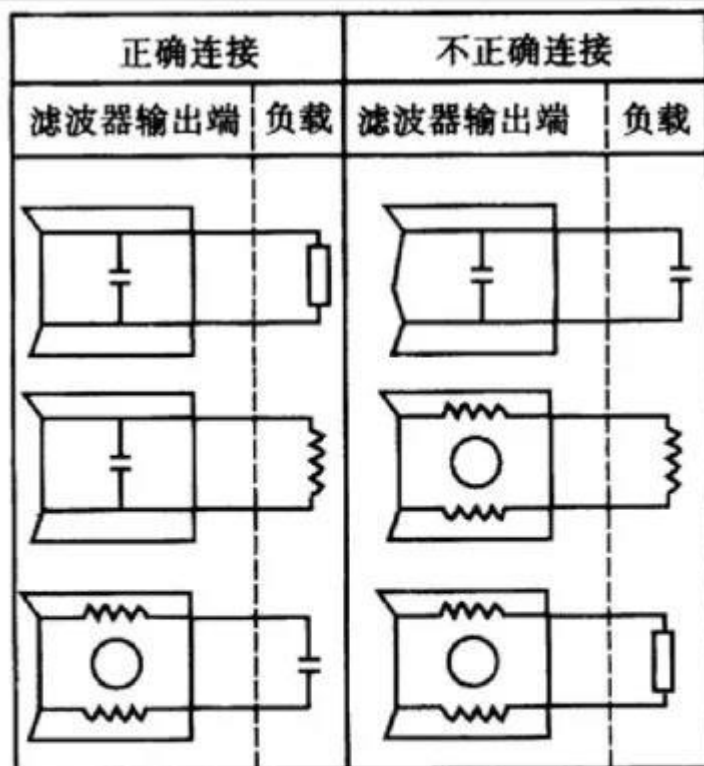
21:01

电磁兼容整改及对策

26/161



(a) 源、负载和 EMI 滤波器网络结构的选取



(b) 负载搭配的正与误

21:01

电磁兼容整改及对策

27/161

4. 电子、电气产品断续传导发射超标问题及对策

- 例如：家电类产品断续传导骚扰标称测量频率范围148.5kHz-30MHz（实际为150kHz-30MHz）。
- 测量在电源端子上进行，喀呖声测量的频率点为：150kHz、500kHz、1.4MHz、30MHz
- 断续传导骚扰的主要来源：
 - 恒温控制器具，程序自动的机器和其他电气控制或操作的器具的开关操作会产生断续骚扰。
 - 此类操作一般通过继电器和程控电子/机械开关等实现。
 - 此类骚扰一般由继电器、开关的触点抖动及非纯阻负载通断所产生的电涌冲击形成。



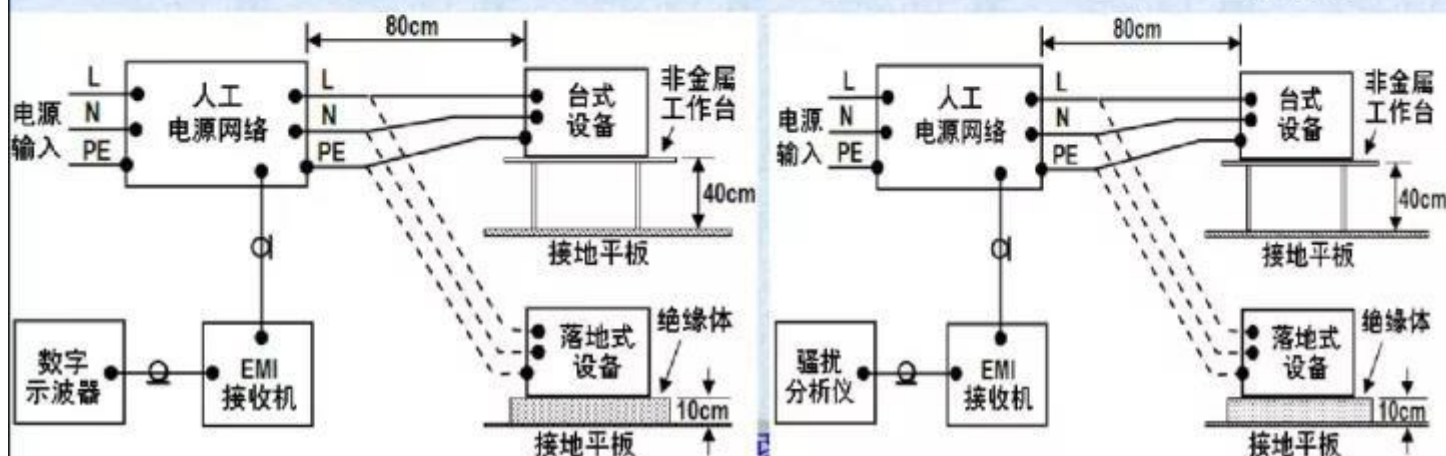
21:01

电磁兼容整改及对策

28/161

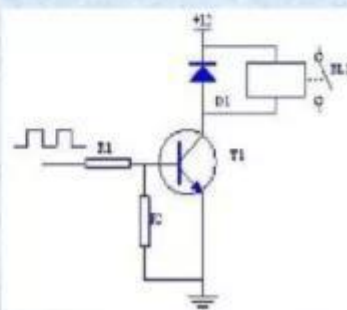
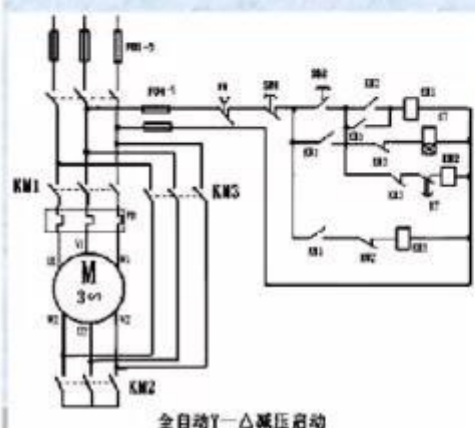
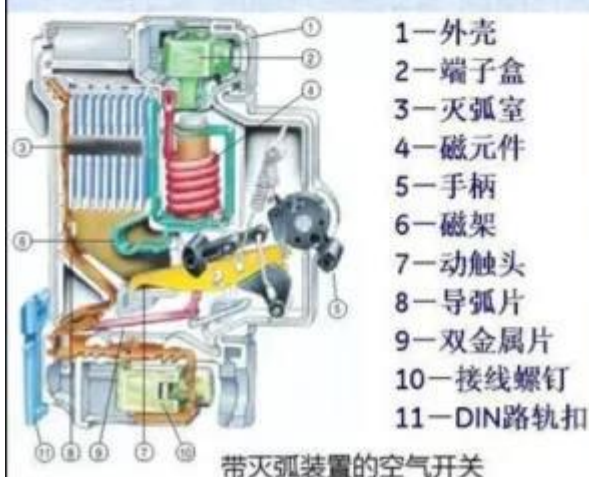
4.1 断续传导骚扰测试存在问题的相应对策

- 从以上分析，我们知道若设备存在断续骚扰测试不合格，一般是由设备的程控开关操作产生的。
- 我们可以从以下方面来考虑处理对策：
 - ◆ 一是从内部电路和结构上考虑，减少其断续骚扰，使其满足测量要求。
 - ◆ 二是从电源电路和电源结构入手，在电源中采取适当的措施，对内部电路产生的断续骚扰加以抑制，使其满足测量标准的要求。



4.2 对内部电路的断续骚扰抑制措施:

- a) 在开关触点或开关模块两端并联高频电容或RC、DRC吸波网络，吸收开关抖动脉冲及非阻性负载的浪涌脉冲。
- b) 对被供电设备内通过程控开关控制的非阻性部件的供电回路上增加限流电路或软启动装置，抑制其启动浪涌冲击。
- c) 对被供电设备内通过开关量控制的感性部件应增加反向浪涌吸收元件，以吸收部件断电时产生的反向感应高压浪涌冲击。
- d) 在被供电设备的电源输入端增加高频吸收回路，抑制其高频骚扰向电源反向注入。



4.3 电源本身的断续骚扰抑制措施:

- 针对电源连续骚扰电压抑制措施若实施得当，能在电源的输入和输出端形成很好的隔离，能解决断续骚扰问题。
- 若实测量断续骚扰依然超标，可能对策有：
 - a) 被供电设备的断续骚扰巨大，电源滤波网络无法将其完全抑制，此时应根据超标的频率范围加强相应频段滤波网络的滤波能力；
 - b) 电源的输入端和输出端靠得太近，形成空间耦合，此时应通过改变布局 and 布线结构加大两者之间距离，以减轻这种耦合。
 - c) 若EUT有保护地，可能因为接地位置不当，断续骚扰经不当接地耦合到电源输入端，此时应调整 and 改变接地方式来减少这种骚扰。
 - d) 若确定断续骚扰超标是通过接地线引起的，可在电源地与负载地之间连接处增加高频扼流圈。
 - e) 若确定断续骚扰是地线引起，在不影响EUT正常工作时，也可将电源地与负载地分开，让负载浮地。

5. 电子、电气产品辐射骚扰超标问题及对策

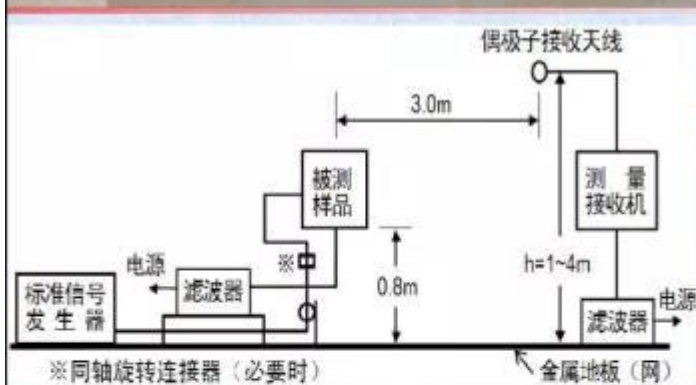
- 电子、电气产品辐射骚扰场强测量频率范围30MHz-6GHz。
- 30MHz-1GHz测量一般在开阔场或半电波暗室中进行。
- 1GHz-6GHz测量一般在全电波暗室进行。



21:01

电磁兼容整改及对策

32/161



21:01

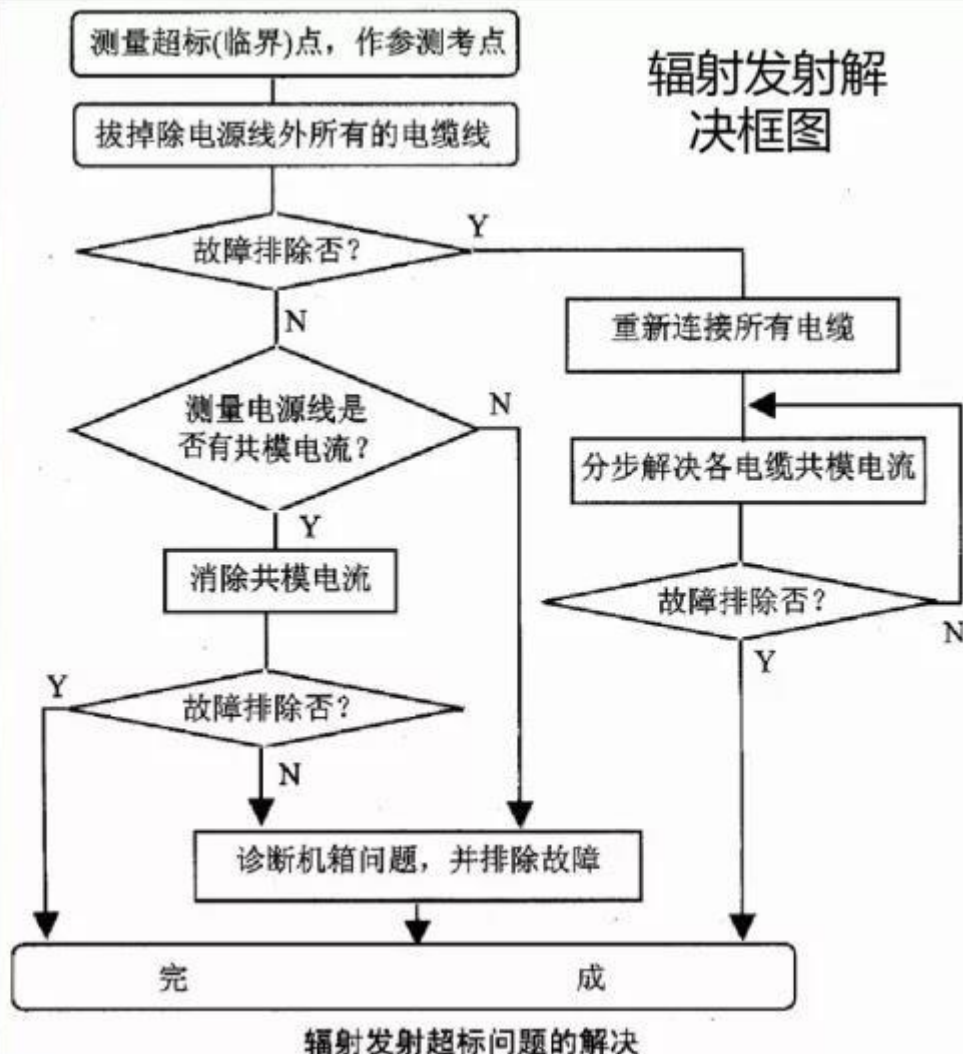
电磁兼容整改及对策

33/161

- 当我们通过骚扰定位方式找到辐射骚扰超标点的骚扰源后，即可采用相对应的骚扰源抑制措施。

一般来说：

- 首先抑制骚扰源，这可以通过优化电路设计、电路结构和排版，加强滤波和正确的接地来达到。
- 其次是要切断耦合途径，这可以通过正确的机壳屏蔽和传输线滤波达到。



21:01

5.1 导致辐射发射试验失败的原因

设备的辐射骚扰发射超标有两种可能：

- 一种是设备外壳的屏蔽性能不完善；
- 另一种是射频骚扰经由电源线和其他线缆的逸出。
- 判断方法是，拔掉不必要的电线和电源插头，继续做试验，如果没有任何改善迹象，则应当怀疑是设备外壳屏蔽性能不完善；
- 如果有所改善，则有可能是被拔线缆的问题。
- 如果针对以上两种可能，采取了必要措施，仍然没有任何改进，则有可能是设备上余下线缆的问题。
- 工作时产生脉冲电压或电流的设备在进行辐射发射试验时容易失败。

21:01

设备产生辐射发射的原因按照影响大小排序如下：

(1) 设备外拖的、没有经过滤波的非屏蔽电缆。

- 设备外拖的任何电缆都是高效的辐射天线，无论这根电缆上是否传输高频信号，它都是最主要的辐射源。
- 一个错误的概念是：只有传输高频信号或数字信号的电缆才会产生辐射。
- 电缆产生的辐射以共模辐射为主，对于传输高频信号或数字脉冲信号的电缆，所传输的信号本身就是辐射源。
- 对于传输低频或直流信号的电缆，共模电压主要由机箱内的电磁波感应上电缆，或者由线路板的地线和电源线噪声引起。



(2) 高频滤波不良的电源电缆。

- 另一个重要的辐射源就是滤波不良的电源线电缆，这是一个极容易被忽视的问题。
- 在电源线上安装滤波器已经成为一个规范性的设计。
- 但是许多人仅认识到电源线滤波器对传导发射的作用，而没有认识到它对辐射发射的影响。
- 实际上很多辐射发射超标都是电源线滤波不良引起的。

(3) 非屏蔽机箱（机箱内的线路板和电缆）。

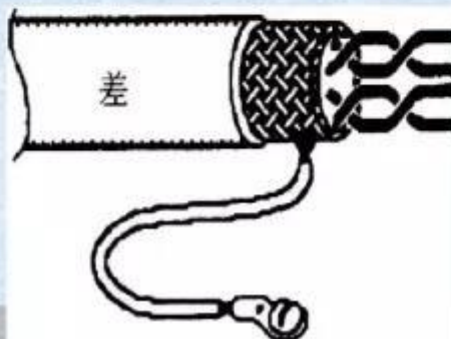
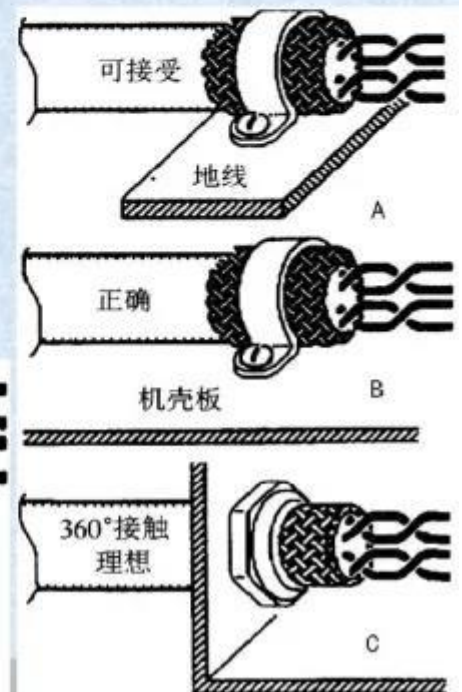
- 许多商业设备采用了没有经过导电涂覆处理的塑料机箱，这类机箱对电磁波没有屏蔽作用，因此线路板及内部互连电缆产生的辐射都是不容忽视的。
- 一般含有微处理器电路的设备使用非屏蔽机箱很难满足商业电磁兼容标准中对辐射发射限制的要求。

(4) 屏蔽层端接不良的屏蔽电缆。

- 有些设备虽然采用屏蔽电缆作为互连电缆，但是电缆屏蔽层并没有接到正确的位置，或者没有按照360°端接的原则端接，从而产生辐射。

(5) 屏蔽机箱上的缝隙和孔洞

- 屏蔽机箱的泄漏主要来自机箱上的孔洞和缝隙。
- 特别是当孔洞和缝隙附近有电缆、线路板等辐射源时，孔洞和缝隙 的泄漏十分明显。



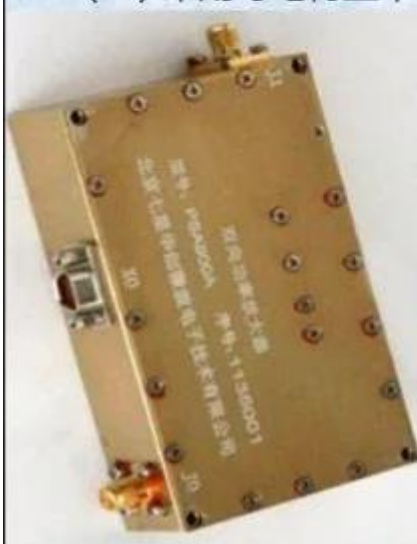
5.2 通过辐射发射试验的措施

5.2.1 机箱问题

5.2.1.1 金属机箱屏蔽性能不完善

- 对金属机箱屏蔽不完善引起辐射骚扰发射超标，应采取以下措施：

- 1) 机箱缝隙过大，或机箱配合上存在问题
 - (1) 清除结合面上的油漆、氧化层及表面玷污；
 - (2) 增加结合面紧固件数目及接触表面的平整度；
 - (3) 采取永久性的接缝（要连续焊接）；
 - (4) 采用导电衬垫来改善接触表面的接触性能。



2) 其他功能性开孔过大

■ 处理意见：

- (1) 通风口采用防尘板，必要时采用波导通风板，但后者成本昂贵；
- (2) 显示窗口采用带有屏蔽作用的透明材料；或采用隔舱，并对信号线采取滤波措施；
- (3) 对键盘等采用隔舱，并对信号线采取滤波措施。

3) 机箱内部布线不当，电磁骚扰透过缝隙逸出

■ 处理意见：

- 将印刷板及设备内部布线等可能产生辐射骚扰的布局，远离缝隙或功能性开孔的部位，
- 或采取增加屏蔽的补救措施或重新布局。

5.2.1.2 非金属机箱

非金属机箱辐射骚扰发射超标时，应采取以下措施：

- (1) 对机箱进行导电性喷涂，特别要注意在结合部分的缝隙也要进行喷涂，保证机箱有导电性的连接；
- (2) 对产生辐射骚扰和可能产生辐射骚扰的部分采取局部屏蔽，并将所有进入或离开屏蔽体的导线需进行滤波或套上吸收磁环；
- (3) 对内部布线和印刷线路板的布局重新考虑，尽可能使信号及其回线的环路为最小。



5.2.2 线缆问题

由线缆问题引起辐射骚扰发射超标时，应采取以下措施：

1) 对电源线的处理

- (1) 加装电源线滤波器（如果已经有滤波器，则换用高性能的滤波器），要特别注意安装位置（尽可能放在机箱中电源线入口端）和安装情况，要保证滤波器外壳与机箱搭接良好、接地良好；
- (2) 如果不合格的频率比较高，可考虑在电源线入口的部分套装铁氧体磁环。

2) 对信号线的处理

- (1) 在信号线上套铁氧体磁环（或铁氧体磁夹）；
- (2) 对信号线滤波（共模滤波），必要时将连接器改用滤波阵列板或滤波连接器；
- (3) 换用屏蔽电缆，屏蔽电缆的屏蔽层与机箱尽量采用360°搭接方式，必要时在屏蔽线上再套铁氧体磁环。

21:01

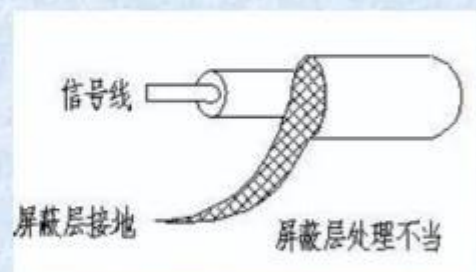
电磁兼容整改及对策

42/161

5.2.3 其他处理方法

■ 如果机箱是金属机箱（包括做过导电涂覆处理的塑料机箱），可采取以下设计：

- (1) 所有外拖电缆采用屏蔽电缆，屏蔽层与金属机箱360°端接；
- (2) 传输直流或低频模拟信号的电缆在端口采取良好的共模滤波措施；
- (3) 电源线上安装高频性能良好的滤波器，并且将滤波器安装在金属机箱的电源插座面板上；
- (4) 按照电磁屏蔽的原理设计机箱。



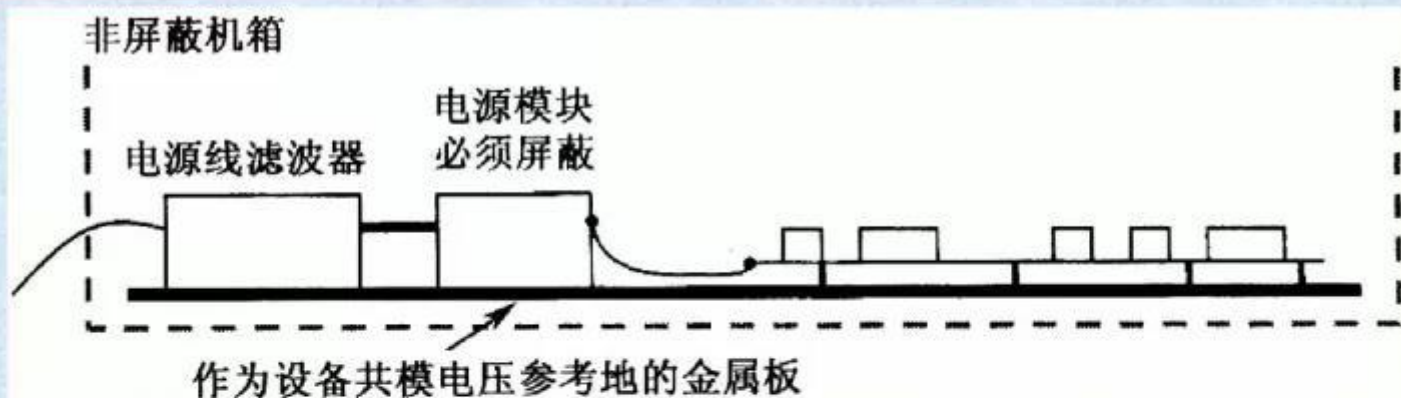
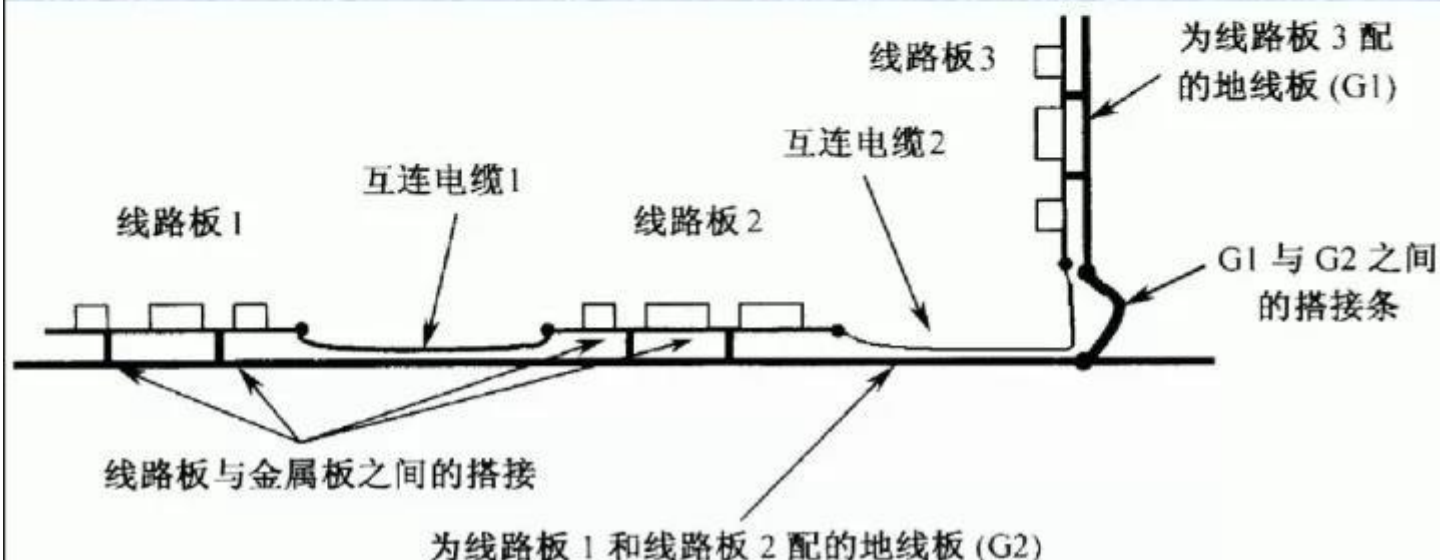
21:01

电磁兼容整改及对策

43/161

如果机箱是非屏蔽机箱，可采取以下技术措施：

- (1) 精心设计线路板，减小线路板的差模辐射和I/O端口的共模电压，最好采用多层线路板；
- (2) 精心设计内部电缆，减小内部电缆的差模辐射和共模辐射；
- (3) 在线路板下放置一块金属板，金属板与线路板之间的距离尽量小。如果线路板是双层板，甚至是单层板，需将金属板与线路板的信号地多点连接起来，以改善信号地的质量。如果线路板是四层以上的线路板，由于本身的信号地已经很好，仅需要将金属板与线路板的地线在I/O接口处相连。

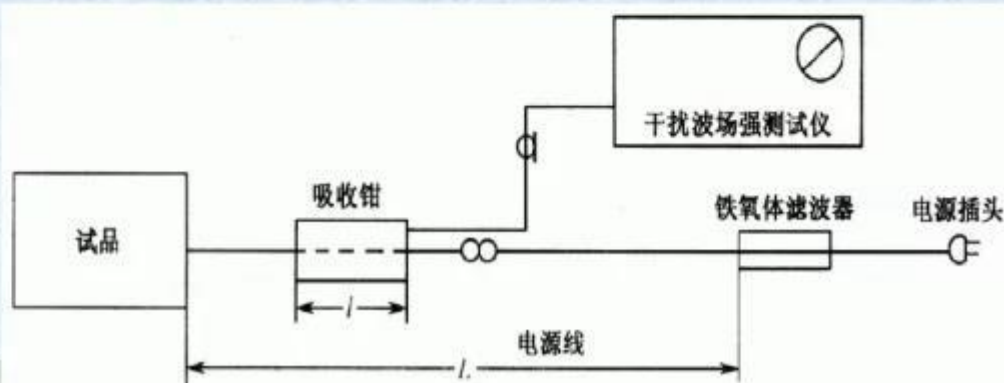


- (4) 内部互连电缆避免从线路板上跨过，尽量靠近线路板下方的金属板，必要时采用屏蔽电缆，屏蔽层与金属板以低阻抗搭接起来，如图所示。
- (5) 外拖电缆使用屏蔽电缆，屏蔽电缆的屏蔽层与线路板下方的金属板以最低的阻抗搭接起来；
- (6) 在线路板的I/O电缆接口处安装滤波器，滤波器的地与线路板下方的金属板以最低的阻抗连接；
- (7) 采用高频性能良好的电源线滤波器，滤波器的外壳直接安装在金属板上。如果设备使用了开关电源，开关电源必须屏蔽起来。并且将电源线滤波器的外壳与开关电源的金属外壳以最低的阻抗搭接起来（通过线路板下方的金属板连接），如上图所示。

6. 骚扰功率干扰的产生和对策

6.1 骚扰功率(30MHz~300MHz)的测量

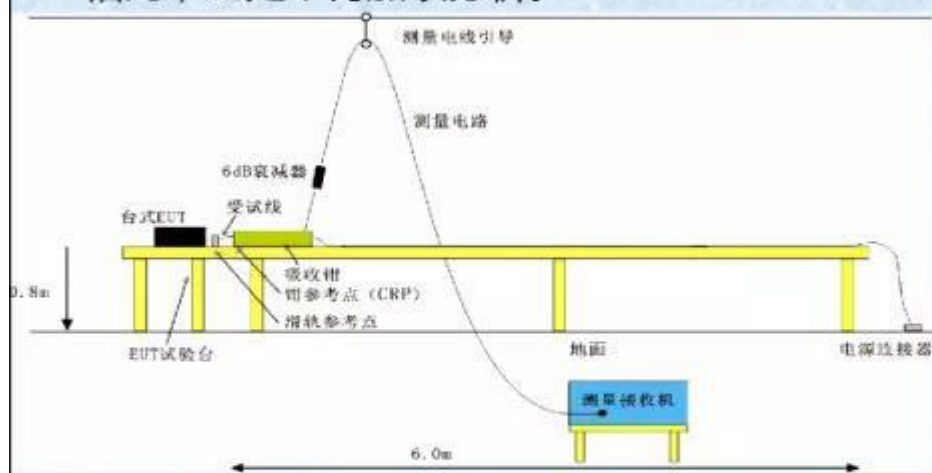
- 一般认为，声频功率放大器、音/视盘机、录音机等设备，它们30MHz以上的辐射发射主要是通过与其相连的电源线和其他连接线向外辐射的。
- 因此可以用电源线和和其他连线上的骚扰功率来定义其辐射骚扰性能。
- 考虑到连线的天线辐射一般在半波长处最大，30MHz对应半波长5m，所以测试前要将被测设备电源线及长度可选其他连线用同质线缆延长至5m以上，再考虑到功率吸收钳（及起滤波作用的辅助钳）长度约1m，则线缆总长度延长至大约为6m。
- 测试时，被测设备置于0.8m高非金属台面，被测线缆在台上平直展开，功率吸收钳测量端（即电流互感器一端）对着被测设备，沿着远离它的方向移动，最多移动至5m处。
- 记录测量频率点处的最大干扰值。
- 对每个感兴趣频率，反复移动吸收钳，以获得最大骚扰。



21:01

6.2 骚扰功率泄漏的骚扰源分析

- 骚扰功率泄漏的骚扰源与辐射发射骚扰源基本相同，此处不再加以分析。



6.3 导致功率发射试验失败的原因

- 由于功率发射试验的频率较高（30 ~ 300MHz），因此导致这项试验失败的主要原因是电源线滤波装置的高频插入损耗不足。
- 对可能存在的问题总结如下：
 - （1）滤波器电路没有屏蔽，这种情况经常发生在将滤波电路安装在线路板上的场合，高频干扰直接耦合进滤波电路，造成滤波器失效；
 - （2）滤波器本身高频性能不良，在100MHz以上插入损耗很小；
 - （3）使用非屏蔽机箱，导致滤波器的金属外壳无处端接；
 - （4）使用非屏蔽机箱，干扰直接耦合到电源线和信号线上，滤波器实际上没有起作用；
 - （5）在屏蔽机箱中，滤波器离电源进口过远、造成干扰直接耦合到电源线和信号线上；
 - （6）在屏蔽机箱中，滤波器外壳与金属机箱之间连接阻抗过大（没有直接搭接，而是通过长导线连接）；
 - （7）滤波器的输入线与输出线靠得很近，发生耦合，导致滤波器的高频插入损耗不足。

21:01

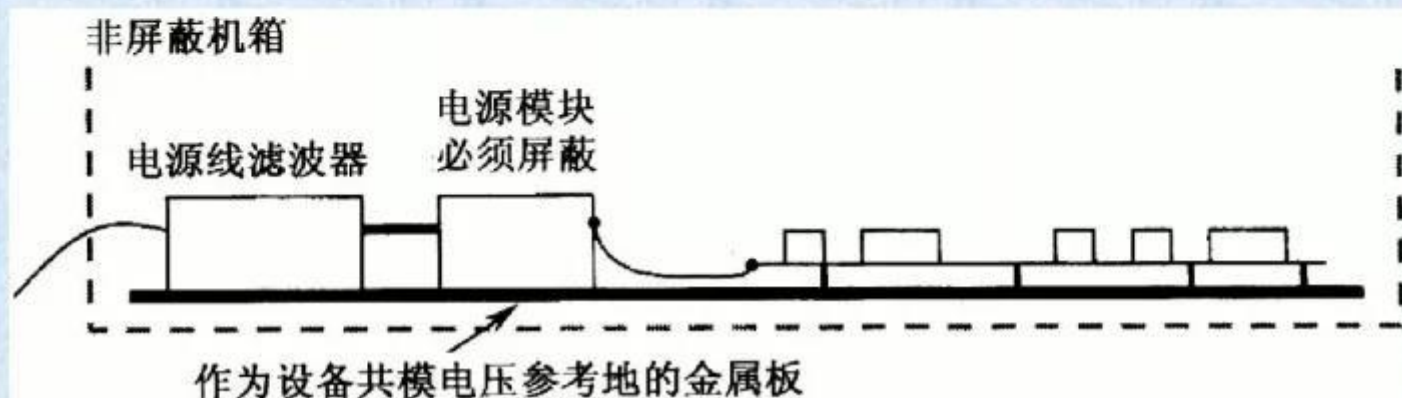
电磁兼容整改及对策

48/161

6.4 通过骚扰功率发射试验应采取的措施

针对以上可能发生的问题，在设计时要特别注意被测电源线和信号线的高频滤波，主要措施如下：

- （1）选用高频性能良好（在100kHz~300MHz的频率范围内具有40dB以上的插入损耗）的电源线和信号线滤波器；
- （2）如果是屏蔽机箱，将滤波器安装在金属机箱面板上；
- （3）如果是非金属机箱，在机箱底部设置一块大金属板，将开关电源和滤波器安装在这块金属板上（如下图）。



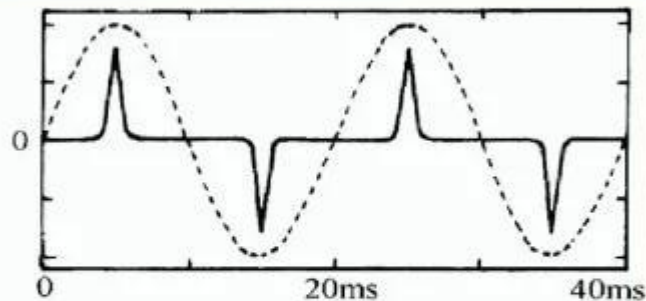
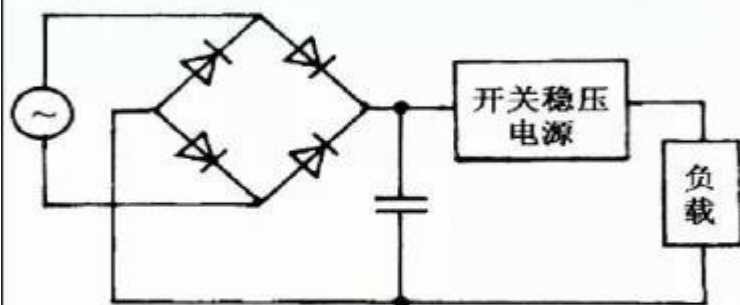
21:01

电磁兼容整改及对策

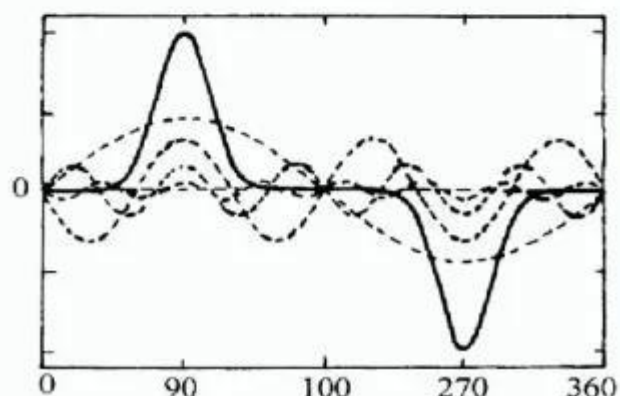
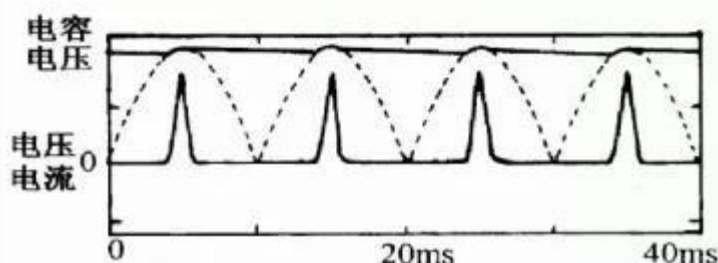
49/161

7. 谐波电流测试常见问题对策及整改措施

- 对由交流市网供电的产品，谐波电流是一个很重要的电磁兼容测量项目。
- 在低压市网使用的设备，其供电电压是正弦波，但其电流波形未必是正弦波，可能有或多或少的畸变。
- 大量的此类设备应用，会造成电网电压波形畸变，使电网电能质量下降。



高压整流电路及对应的畸变电流波形



7.1 测量标准介绍

- 下面以GB17625.1标准为例，对谐波电流的测量作一个简要介绍。
- 标准名称：GB17625.1-2012 idt IEC61000-3-2:2009 + Cor.1 《电磁兼容限值 谐波电流发射限值（设备每相输入电流 $\leq 16A$ ）》
- GB17625.1-2012是众多电子电器产品认证检验的一个重要依据标准。该标准测量和限制的就是由低压市电供电的电子、电气产品（设备每相输入电流 $\leq 16A$ ）在使用时其供电电流波形畸变的程度。
- GB17625.1-2012标准是通过限制设备电流的高次谐波分量的大小来限制设备电流波形的畸变的。GB17625.1考虑到第40次谐波电流含量。

7.1.1 标准的适用范围

- 该标准只对：
 - 接入频率为50Hz/60Hz、相电压为220V/230V/240V的低压供电系统
 - 且每相输入电流不大于16A提出谐波电流限值要求。
- 该标准是一个通用电磁兼容标准。
- 适合于本标准的产品类别较多，如：
 - 家用电器、电动工具、电气照明设备、信息技术设备、影音设备等等。

7.1.2 谐波电流限值

- 下列类型设备的限值在该标准中未作规定：
 - 额定功率75W及以下的设备，照明设备除外（将来该值可能从75W减小到50W）；
 - 总额定功率大于1kW的专用设备；
 - 额定功率不大于200W的对称控制加热元件；
 - 额定功率不大于1kW的白炽灯独立调光器。
- （通常有生产厂家利用此条的限制项来达到免于进行谐波电流限制的目的）

21:01

电磁兼容整改及对策

52/161

7.2 谐波电流发射的基本对策

- 解决谐波发射超标问题的基本办法：
 - 在原来的电源电路中增加功率因数校正（PFC）电路。
 - 或改变已有的PFC电路，使其满足测试标准要求。
- 功率因数校正一般分为两种类型：
 - 即主动式和被动式。
- 当然对于中小功率的电子、电器设备：
 - 尽可能将其消耗的有功功率降低到75W以下，也不失为一种有效的方法。因为标准没有对75W及以下的设备给出限值（照明设备除外）。
- 对于一些专用的或特殊用途的设备：
 - 使其满足标准限值中免于限制条款，也是可行的。
- 由于半波整流方式和利用相位截波方式调节（如可控硅非过零控制）对电源进行对称和非对称控制都很容易产生非常大的谐波电流。
- 谐波电流标准一般不允许采用半波整流方式和对电源进行对称/非对称控制。
- 若测试时谐波电流超标，建议将电源半波整流方式 and 对称/非对称控制方式改为其他的控制方式：
 - 将半波整流改为全波整流或桥式整流方式。
 - 将用相位截波方式调节的对称/非对称控制方式改成对称过零触发控制方式。

21:01

电磁兼容整改及对策

53/161

7.2.1 被动式功率因数校正

- 目前消费类电子、电气产品所采用开关电源电路多是开关频率比较低、电路结构简单、成本较低的形式，其谐波电流发射超过限值的问题也较普遍。
- 在这种情况下，成本控制可能是主要的考虑。
- 采用低频滤波电路可以降低谐波成份到限值以下，该措施属于被动式功率因数校正。
- 这种方案适合于中小功率设备。
- 因为需要滤除工频谐波，对大功率设备，滤波器重量和成本可能会较高，此为其不足。

7.2.2 主动式功率因数校正

- 主动式功率因数校正电路可以最大限度的提高功率因数，使其接近于1，这是目前较为理想的谐波电流解决方案。
- 这样的开关电源电路必须使用二级开关电路控制：
 - 其中一级开关电路用来控制电流谐波；另外一级开关电路用作电压调整。
- **该方案特点**：电路比较复杂；对电路元件要求高；增加的改进成本较高；而且对原来电源电路设计概念必须作彻底更新。
- 使用中还应该注意到：设备注入电源的射频传导骚扰可能因此而增加，这时必须再根据需要增加抑制电源传导骚扰的元件。
- 显然，因为技术的原因，该方案一般不能应用在采用线性电源变压器供电设备上。
- 由于该方案对电路改动太大，一般少在谐波电流测试不通过时作为整改对策使用。

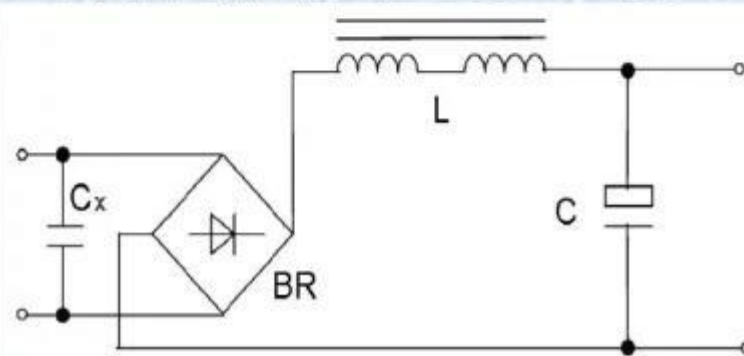
21:01

电磁兼容整改及对策

54/161

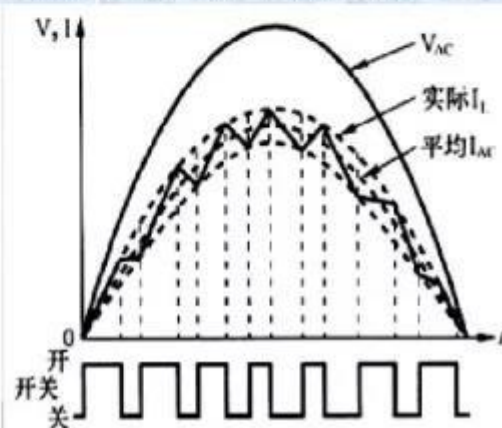
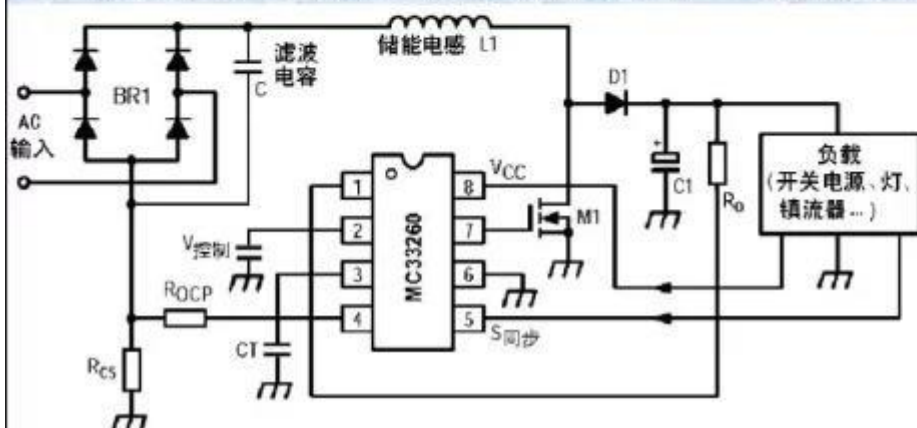
7.3 被动式解决方案（无源PFC电路）

- 如图所示：方案适用于直接利用高压整流方式来供电的产品。
- 仅仅由一个低频扼流圈组成，插入整流桥和滤波电容之间。
- 其工作原理非常简单：低频扼流圈的电感 L 和整流电容 C 以及低频扼流圈的分布电容共同组成一个低频谐波电流滤波器。
- 电路参数设计成对50Hz基波成份衰减很小，对三次以上谐波成份衰减很大，尤其是三次谐波（150Hz）的衰减最大。
- 低频谐波电流抑制滤波器在电源整流之后或者之前某些点插入电流回路，就可以起到抑制谐波电流的目的。
- 可以解决300W以下产品的谐波电流问题，并且不需要电路其它参数作任何改变，也不会降低原电源电路的其它性能。
- 其缺点是体积较大，重量约100-200克。



7.4 主动PFC解决方案

- 该方案是在主电源上串联另一个电源变换电路，强迫电源紧密跟随正弦型线电压获取电流。如图所示。该电路能将电源功率因素从0.35提高到0.9~0.99。
- 该方案适用于直接利用高压整流方式来供电的产品。
- 工频交流经过整流器整流后变成波动的直流，该波动直流提供给PFC转换电路进行转换。
- 对一般普通的开关电源来说，由于PFC控制电路相当于在原开关电源的整流和滤波回路之间增加了一级开关回路。
- 一方面增加了电路的复杂程度，可能需要对原系统的电源部分重新设计和排版；
- 另一方面，由于相当于增加了一级开关转换电路，电源产生的射频骚扰必然有所增加甚至超标，这时可能需要采取一些措施使其重新符合相关标准的要求。



7.5 谐波问题的其它对策

- 以上谐波电流问题解决方案主要适用于直接利用高压整流方式来供电的产品。
- 此类产品谐波电流非常大，若不采取相应对策，则难以满足谐波标准要求。
- 对通过工频变压器供电的产品和直接使用交流电源而不通过电源变换电路二次供电的家电产品，一般情况下谐波电流不大，且其谐波电流限值比较宽松，即使不采取谐波电流抑制措施，其谐波电流测试合格率还是非常高的。
- 但我们依然需要注意以下几个方面的内容：
 - 对那些非高压整流方式来供电的家电产品，低次谐波电流限值比较宽松，合格是比较容易的，此时，应注意的是20次以上的高次谐波电流容易出现問題。
 - 对此类的高次谐波超标问题，一般在电源回路中增加适当的高次谐波滤波电感（高频扼流圈）即可解决问题。

8 静电放电抗扰度测试常见问题对策及整改措施

- 静电是两种介电系数不同的物质磨擦时，正负极性的电荷分别积累在两个物体上而形成。
- 就人体而言，衣服与皮肤之间的磨擦发生的静电是人体带电的主要原因之一。
- 静电源跟其它物体接触时，存在着电荷流动以抵消电压，这个高速电量的传送，将产生潜在的破坏电压、电流以及电磁场，这就是静电放电。
- 在电子产品的生产和使用过程中，操作者是最活跃的静电源，可能积累一定数量的电荷，当人体接触与地相连的元件、装置的时候就会产生静电放电。静电放电一般用ESD表示。



- ESD会导致电子设备严重地损坏或操作失常。
- 大多数半导体器件都很容易受静电放电而损坏，特别是大规模集成电路器件更为脆弱。
- 静电对器件造成的损坏有显性的和隐性的两种。
- 隐性损坏在当时看不出来，但器件变得更脆弱，在过压、高温等条件下极易损坏。
- ESD两种主要的破坏机制是：由于ESD电流产生热量导致设备的热失效；由于ESD感应出高的电压导致绝缘击穿。
- 除容易造成电路损害外，ESD也会对电子电路造成干扰。
- 一般来说，造成损坏，ESD电火花必须直接接触电路线，而辐射耦合通常只导致失常。
- 在ESD作用下，电路中的器件在通电条件下比不通电条件下更易损坏。

- ESD电路的干扰有二种方式。
- 一种是传导方式，若电路的某部分构成了放电路径，即ESD接侵入设备内的电路，ESD电流流过IC的输入端，造成干扰。
- ESD干扰的另一种方式是辐射干扰。即静电放电时产生了尖峰电流，这种电流中包含有丰富的高频成分。从而产生辐射磁场和电场。当距离较近时，无论是电场还是磁场都是很强的。ESD发生时，在附近位置的电路一般会受到影响。
- ESD在近场，辐射耦合的基本方式可以是电容或电感方式，取决于ESD源和接受器的阻抗。在远场，则存在电磁场耦合。
- 与ESD相关的电磁干扰（EMI）能量上限频率可以超过1GHz。在这个频率上，典型的设备电缆甚至印制板上的走线会变成非常有效的接收天线。因而，对于典型的模拟或数字电子设备，ESD会感应出高电平的噪声。

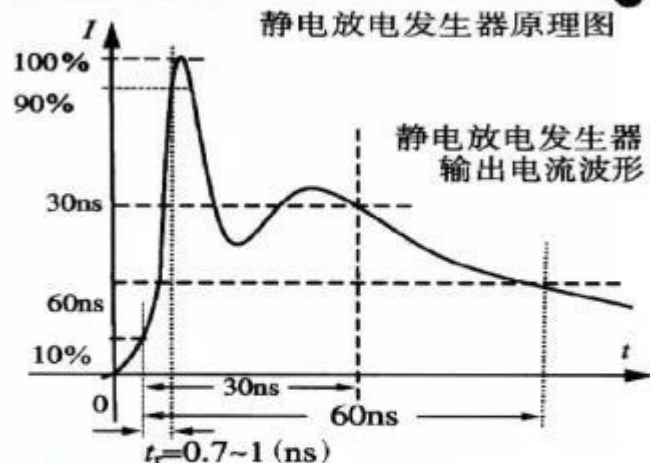
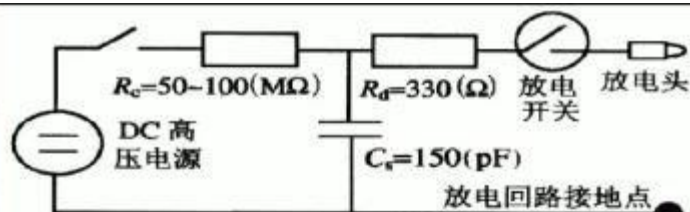
8.1 电子产品的静电放电测试及相关要求

- 对不同使用环境、不同用途、不同ESD敏感度的电子产品标准对静电放电抗扰度试验的要求是不同的
- 但这些标准关于ESD抗扰度试验大多都直接或间接引用GB/T17626.2（idt IEC 61000-4-2）：《电磁兼容 试验和测量技术 静电放电抗扰度试验》这一国家电磁兼容基础标准，并按其中的试验方法进行试验。
- 下面就简要介绍一下该标准的内容、试验方法及相关要求。



8.1.1 ESD的模拟:

- 放电线路中的储能电容CS代表人体电容，现公认150pF比较合适。
- 放电电阻Rd为330Ω，代表手握钥匙或其他金属工具的人体电阻。
- 现已证明，用这种放电状态来体现人体放电的模型是足够严酷的。



8.1.2 试验方法

- 该标准规定的试验方法有两种：**接触放电法和空气放电法**。
 - 接触放电法：试验发生器的电极保持与受试设备的接触并由发生器内的放电开关激励放电的一种试验方法。
 - 空气放电法：将试验发生器的充电电极靠近受试设备并由火花对受试设备激励放电的一种试验方法。
- 接触放电是优先选择的试验方法；
- 空气放电则用在不能使用接触放电的场合中。
- 测试除了对被测样品直接放电外，还需对水平和垂直耦合板间接放电。



8.1.3 试验环境

■ 对空气放电该标准规定了环境条件：

■ 环境温度：15℃~35℃、相对湿度：30%~60%RH、大气压力：86kPa~106kPa

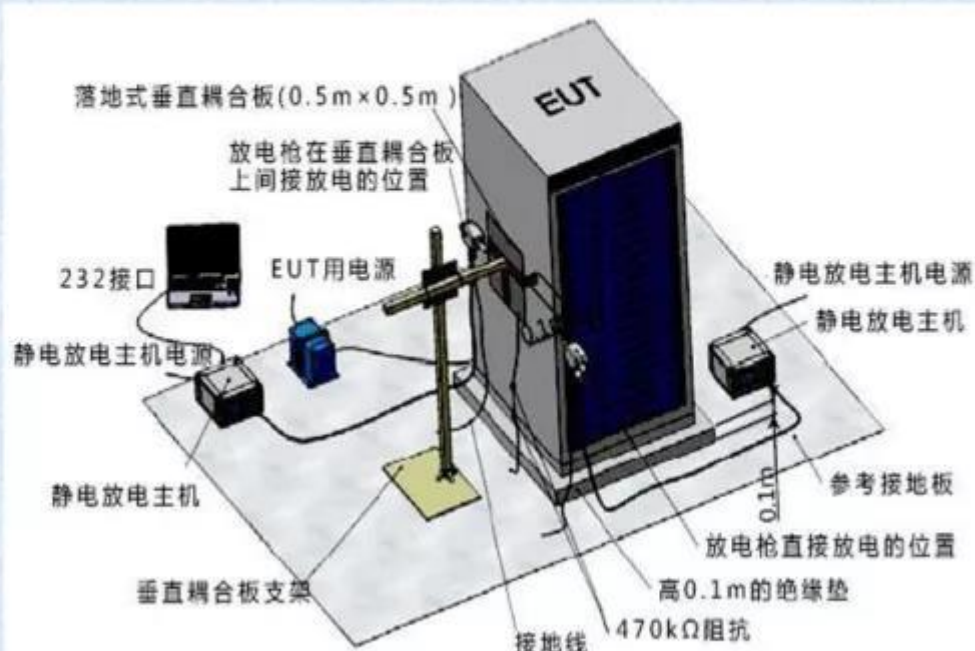
■ 对接触放电该标准未规定特定的环境条件。

8.1.4 试验布置

■ 标准对试验布置做出了详细规定。

■ 台式和落地式设备试验布置示意图见下页。

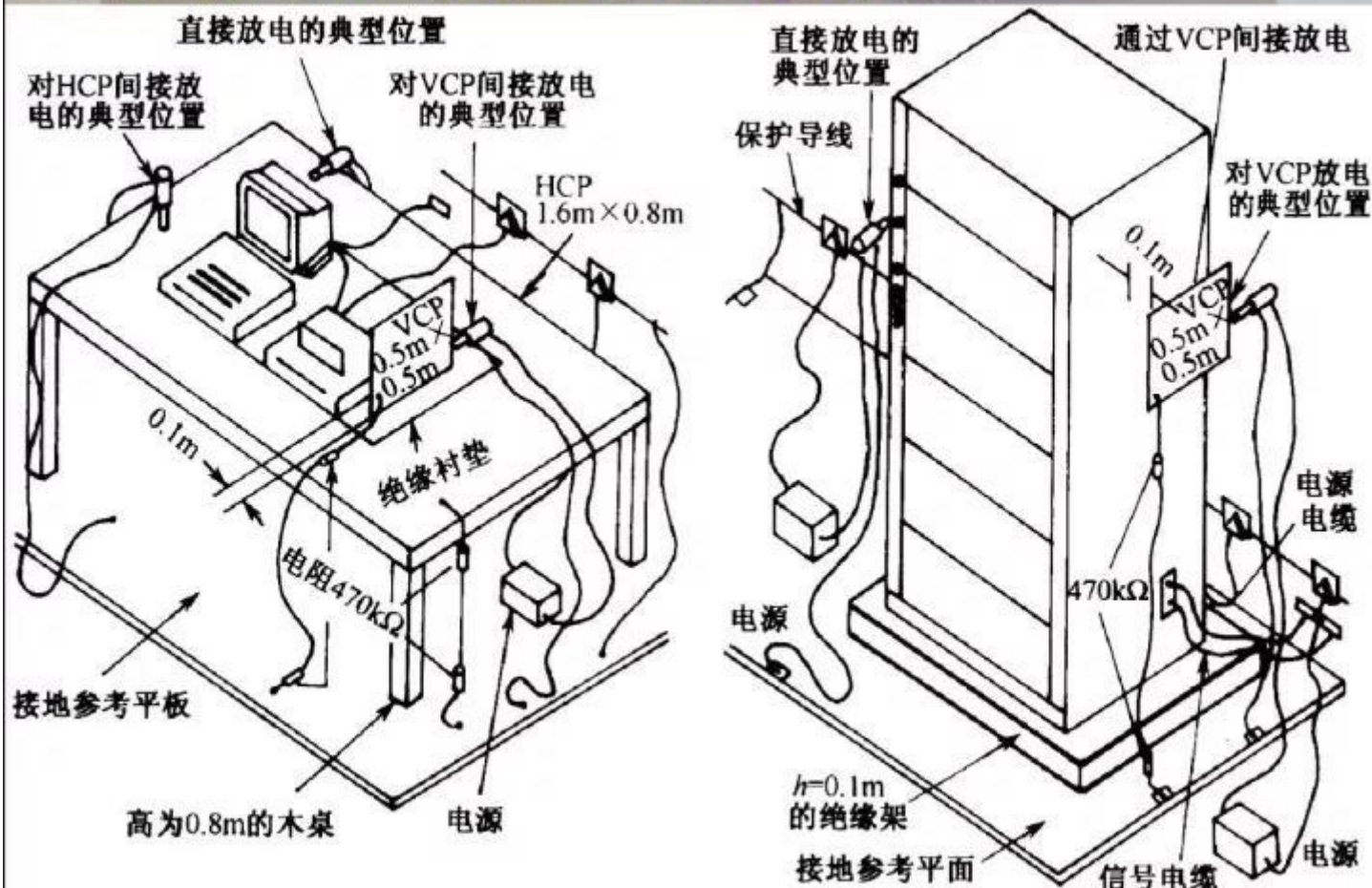
■ 对落地式设备，进行垂直耦合板测试时，应使用专用的测试架，通过移动和升降测试架，使得测试覆盖EUT四个侧面的所有部分。



落地式设备静电试验示意图

21:02

台式和落地式设备的试验布置图



21:02

8.1.5 试验实施

■ 实施部位：

- **直接放电**施加于操作人员正常使用受试设备时可能接触到的点或面上；
- **间接放电**施加于水平耦合板和垂直耦合板。
- 直接放电模拟了操作人员对受试设备直接接触时发生的静电放电情况。
- 间接放电则是对水平耦合板和垂直耦合板进行放电，模拟了操作人员对放置于或安装在受试设备附近的物体放电时的情况。
- **直接放电时，接触放电为首选形式；**
- 只有在**不能用接触放电的地方**（如表面涂有绝缘层，计算机键盘缝隙等情况）才改用**气隙（空气）放电**。
- **间接放电：选用接触放电方式。**
- **试验电压要由低到高逐渐增加到规定值。**
- 不同的产品或产品族标准对试验的实施可能根据产品的特点有特定的规定。

21:02

电磁兼容整改及对策

66/161

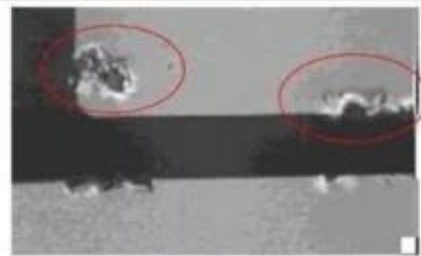
8.1.6 试验结果

■ 若静电放电测试通不过，可能产生如下后果：

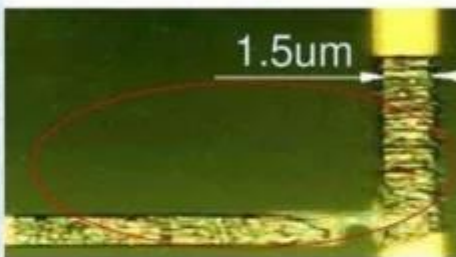
- （1）直接通过能量交换引起半导体器件的损坏。
- （2）放电所引起的电场与磁场变化，造成设备的误动作。



IC烧穿



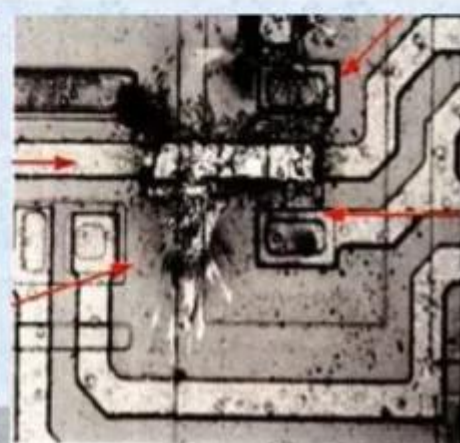
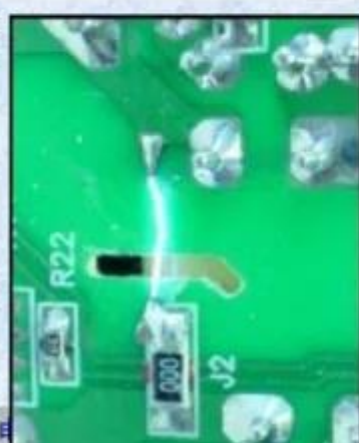
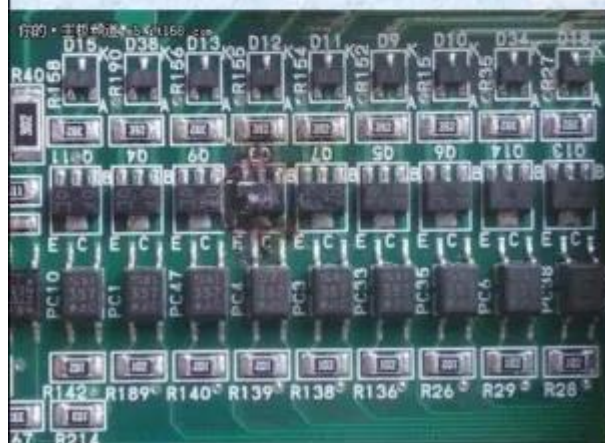
IC集成电路热熔



IC内走线烧毁



液晶板烧穿



8.2 电子产品的静电放电对策及改进要点

- ESD通常发生在产品自身暴露在外的导电物体，或者发生在邻近的导电物体上。
- 对设备而言，容易产生静电放电的部位是：
 - 电缆、键盘及暴露在外的金属框架以及设备外壳上的孔、洞、缝隙等。
- 常用的改进方法是在产品ESD发生或侵入危险点，例如输入点和地之间设置瞬态保护电路，这些电路仅仅在ESD感应电压超过极限时发挥作用。
- 保护电路可以包括多个电流分流单元。
- 减小ESD产生的电磁干扰（EMI）影响电子产品或设备的方法：
 - 完全阻止ESD产生；
 - 阻止因ESD产生的EMI耦合到电路或设备
 - 以及通过设计工艺增加设备固有的ESD抗扰性。

21:02

电磁兼容整改及对策

68/161

- 有很多种电路可以达到ESD保护的目，但选用时必须考虑以下原则，并在性能和成本之间加以权衡：
 - 速度要快，这是ESD干扰的特点决定的；
 - 能应付大的电流通过；
 - 考虑瞬态电压会在正、负极性两个方向发生；
 - 对信号增加的电容效应和电阻效应控制在允许范围内；
 - 考虑体积因素；
 - 考虑产品成本因素。

我们可以从以下几种抑制ESD干扰的方法中选择适用的对策：

21:02

电磁兼容整改及对策

69/161

8.2.1 外壳设计：

- 外壳在人手和内部电路间建立隔离层，阻止ESD的发生。
- 金属外壳同时也是阻止ESD间接放电形成的辐射及传导耦合的关键。
- 一个完整的封闭金属壳能在辐射噪声中屏蔽电路。
- 但由于从电路到屏蔽壳体的ESD副级电弧可能产生传导耦合，因而一些外壳设计使用绝缘体，在绝缘壳中，再放置一个金属的屏蔽体。
- 这种设计的好处是既可以防止因操作者对金属外壳的直接接触放电造成干扰，又可以防止操作者对周围物体放电时形成的EMI耦合到内部形成干扰。同时在操作者对外壳的孔、洞、缝隙放电时给放电电流一个泄放通道，防止对内部电路直接放电。
- 这种做法的简化是在设备金属外壳上涂绝缘漆或贴一层绝缘物质，使绝缘能力大于20kV。

21:02

电磁兼容整改及对策

70/161

- 因为静电会穿过孔洞、缝隙放电，
- 所以绝缘外壳的孔洞、缝隙与内部电路间应留有足够的空间。
- 2cm左右的空气隙可以阻止静电放电的发生。
- 对外壳上的孔、洞、排气口等，用几个小孔代替一个大孔，从EMI抑制的角度来说更好。
- 为减小EMI噪声，缝隙边沿每隔一定距离处使用电连接。
- 对金属外壳而言，外壳各部分之间的搭接非常重要：
- 若机箱两部分之间的搭接阻抗较高，当静电放电电流流过搭接点时，会产生电压降，这可能会影响电路的正常工作。

21:02

电磁兼容整改及对策

71/161

■ 解决这个问题的方法有两个：

- 1) 尽量使外壳保持导电连续，减少搭接阻抗。
- 2) 在电路与机箱之间增加一层屏蔽，减小电路与机箱之间的电容耦合。内层屏蔽要与外壳连接起来。

■ 如果是塑料外壳，则要求对电路的接地进行仔细布置，以防止放电电流感应到电路上去。

■ 塑料外壳的优点是不会产生直接放电现象。

■ 如果塑料外壳上没有大的开孔，则塑料外壳能对电路起到保护作用。

■ 但塑料外壳对防止操作者对周围物体放电时耦合到内部形成干扰无抑制能力。

8.2.2 接地设计：

- 一旦发生了静电放电，应该让其尽快旁路入地，不要直接侵入内部电路。
- 例如内部电路如用金属机箱屏蔽，则机箱应良好接地，接地电阻要尽量小。
- 这样放电电流可以由机箱外层流入大地；
- 同时也可以将对周围物体放电时形成的骚扰导入大地，不会影响内部电路。
- 对塑料机箱，则不存在机箱接地的问題。

- 对金属机箱，通常箱内的电路会通过I/O电缆、电源线等接地。
- 若机箱接地不良或不接地，当机箱上发生静电放电时，机箱的电位上升，而内部电路由于接地，电位保持在地电位附近。
- 这时，机箱与电路之间存在着很大的电位差。
- 这会在机箱与电路之间引起二次电弧，使电路造成损坏。
 - 通过增加电路与外壳之间的距离可以避免二次电弧的发生。
 - 当电路与外壳之间的距离不能增加时，可以在外壳与电路之间加一层接地的金属挡板，挡住电弧。
 - 如果电路与机箱连在一起，则只应通过一点连接。防止电流流过电路。也可以很好地防止二次电弧的发生。
- 线路板与机箱连接的点应在电缆入口处。

8.2.3 电缆设计：

- 一个正确设计的电缆保护系统可能是提高系统ESD非易感性的关键。
- 作为大多数系统中的最大的“天线” — I/O电缆特别易于被ESD干扰感应出大的电压或电流。
- 从另一方面，如果电缆屏蔽同机壳地连接的话，电缆也对ESD干扰提供低阻抗通道。
- 通过该通道ESD干扰能量可从系统接地回路中释放，因而可间接地避免传导耦合。
- 为减少ESD干扰辐射耦合到电缆：
 - 线长和回路面积要减小；
 - 应抑制共模耦合并且使用金属屏蔽。

- 对于输入/输出电缆可采用使用屏蔽电缆、共模扼流圈、过压箝位电路及电容旁路滤波器措施。
- 在电缆的两端，电缆屏蔽必须与壳体屏蔽连接。
- 在互联电缆上安装一个共模扼流圈可以使静电放电造成的共模电压降在扼流圈上，而不是另一端的电路上。
- 两个机箱之间用屏蔽电缆连接时，通过电缆的屏蔽层将两个机箱连接在一起。这样可以使两个机箱之间的电位差尽量小。
- 这里，机箱与电缆屏蔽层之间的搭接方式很重要。
- 强烈建议在电缆两端机箱与电缆屏蔽层之间360°搭接。

8.2.4 键盘和面板：

- 键盘和控制面板的设计必须保证放电电流能够直接流到地，而不会经过敏感电路。
- 对于绝缘键盘，在键与电路之间要安装一个放电防护器（如金属支架），为放电电流提供一条放电路径。
- 放电防护器要直接连到机箱或机架上，而不能连到电路地上。
- 当然，用较大的旋钮（增加操作者到内部线路的距离）能够直接防止静电放电。
- 键盘和控制面板设计应使放电电流不过敏感电路而直接到地。
- 采用绝缘轴和大旋钮可以防止向控制键或电位器放电。
- 现在，较多的电子产品面板采用薄膜按键和薄膜显示窗，由于该另外，现在大多数键盘的按键内部均有由耐高压的绝缘薄膜构成的衬垫，可有效防止ESD的干扰。

21:02

电磁兼容整改及对策

77/161

- 对于输入/输出电缆可采用使用屏蔽电缆、共模扼流圈、过压箝位电路及电缆旁路滤波器措施。
- 在电缆的两端，电缆屏蔽必须与壳体屏蔽连接。
- 在互联电缆上安装一个共模扼流圈可以使静电放电造成的共模电压降在扼流圈上，而不是另一端的电路上。
- 两个机箱之间用屏蔽电缆连接时，通过电缆的屏蔽层将两个机箱连接在一起，这样可以使两个机箱之间的电位差尽量小。
- 这里，机箱与电缆屏蔽层之间的搭接方式很重要。
- 强烈建议在电缆两端机箱与电缆屏蔽层之间360°搭接。

21:02

电磁兼容整改及对策

76/161

8.2.5 电路设计：

- 设备中不用的输入端不允许处于不连接或悬浮状态，而应当直接或通过适当电阻与地线或电源端相连通。
- 一般来说，与外部设备连接的接口电路都需要加保护电路：
- 其中也包括电源线，这一点往往被硬件设计所忽视。
- 以微机为例来讲，应该考虑安排保护电路的环节有：串行通信接口、并行通信接口、键盘接口、显示接口等。
- 滤波器必须用在电路中以阻止ESD形成的EMI耦合到设备。
 - 如果输入为高阻抗，一个分流电容滤波器最有效，因为它的低阻抗将有效地旁路高输入阻抗，分流电容越接近输入端越好。
 - 如果输入阻抗低，使用一系列铁氧体可以提供最好的滤波器，这些铁氧体也应尽可能接近输入端。

在内部电路上加强防护措施：

- 对于可能遭受直接传导的静电放电干扰的端口，可以在I/O接口处串接电阻或并联二极管至正负电源端。
- MOS管的输入端串接100k Ω 电阻，输出端串接1k Ω 电阻，以限制放电电流。
- TTL管输入端串接22 ~ 100 Ω 电阻，输出端串接22 ~ 47 Ω 电阻。
- 模拟管输入端串接100 Ω ~ 100k Ω ，并且加并联二极管，分流放电电流至电源正或负极，模拟管输出端串接100 Ω 的电阻。
- 在I/O信号线上安装一个对地的电容能够将接口电缆上感应的静电放电电流分流到机箱，避免流到电路上。
- 但这个电容也会将机壳上的电流分流到信号线上。为了避免这种情况的发生，可以在旁路电容与线路板之间安装一只铁氧体磁珠，增加流向线路板的路径的阻抗。
- 需要注意的是，电容的耐压一定要满足要求。静电放电的电压可以高达数千伏。

- 一个瞬态防护二极管也能够对静电放电起到有效的保护。
 - 但需要注意：用二极管虽然将瞬态干扰的电压限制住了，但高频干扰成分并没有减少；
 - 该电路中一般应有与瞬态防护二极管并联的高频旁路电容抑制高频干扰。
- 在电路设计及电路板布线方面：
 - 应采用门电路和选通脉冲。
 - 这种输入方式只有在静电放电和选通同时发生时才能造成损坏。
 - 而脉冲边沿触发输入方式对静电放电引起的瞬变很敏感，不宜采用。

8.2.6 PCB设计：

- 良好的PCB设计可以有效地减少ESD干扰对产品造成的影响。
- 这也是电磁兼容设计中ESD设计部分的一个重要的内容。
- 大家可以从那部分课程中得到详细的指引。
- 对一个成品进行电磁兼容对策时，很难再对PCB进行重新设计（改进成本太高），此处不再加以介绍。

8.2.7 软件:

- 除了硬件措施外，软件抑制方案也是减少系统锁定等严重失常的有力方法。
- 软件ESD抑制措施分为两种常用的类别：
 - 刷新、检查并且恢复。
- 刷新：涉及到周期性地复位到休止状态的系统，定期刷新显示器和指示器状态。
 - 只需进行反复刷新然后假设状态是正确的，其它的事就不用做了。
- 检查/恢复：过程用于决定程序是否正确执行。
 - 它们在一定间隔时间被激活，以确认程序是否在完成某个功能。
 - 如果这些功能没有实现，一个恢复程序被激活并执行。

21:02

电磁兼容整改及对策

82/161

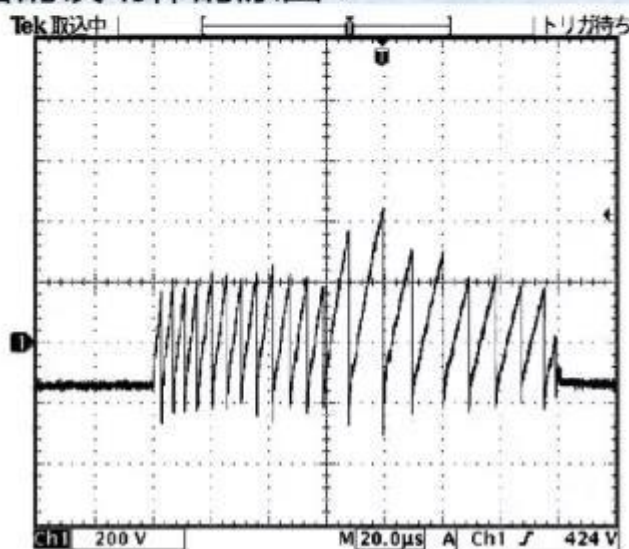
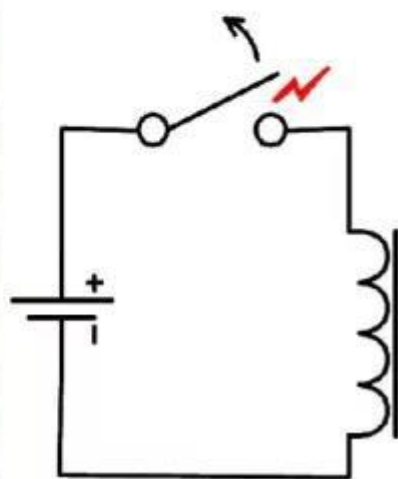


9. 电快速瞬变脉冲群抗扰度

9.1 电快速瞬变脉冲群成因:

- 由电感性负载（如继电器、接触器等）在断开时，由于开关触点间隙的绝缘击穿或触点弹跳等原因，在断开处产生的暂态骚扰。当电感性负载多次重复开关，则脉冲群又会以相应的时间间隙多次重复出现。
- 这种暂态骚扰能量较小，一般不会引起设备的损坏，由于其频谱分布较宽，会对电子、电气设备的可靠工作产生影响。
- 一般认为电快速瞬变脉冲群会造成设备的误动作的原因：

- 脉冲群对线路中半导体结电容充电，当结电容上的能量累积到一定程度，便会引起线路乃至设备的误动作。



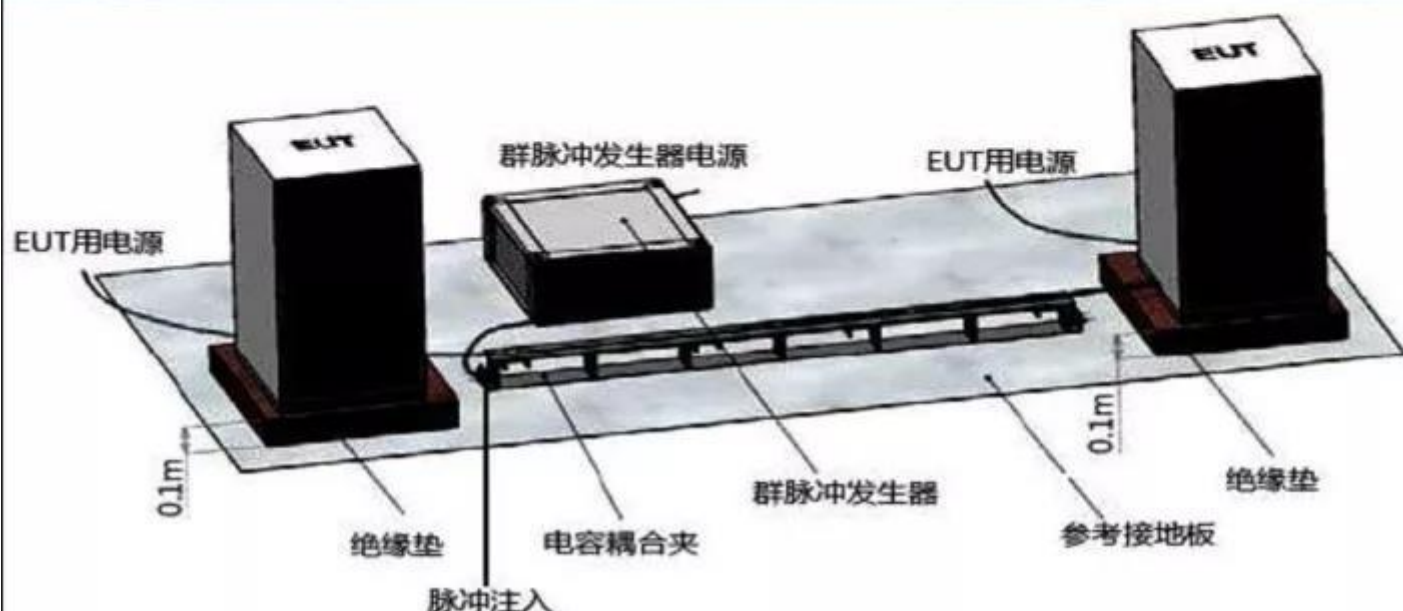
21:02

9.2 电快速瞬变脉冲群测试及相关要求

- 不同的电子、电气产品标准对电快速瞬变脉冲群抗扰度试验的要求是不同的。
- 这些标准关于电快速瞬变脉冲群抗扰度试验大多都直接或间接引用 GB/T 17626.4 (idt IEC 61000-4-4) :

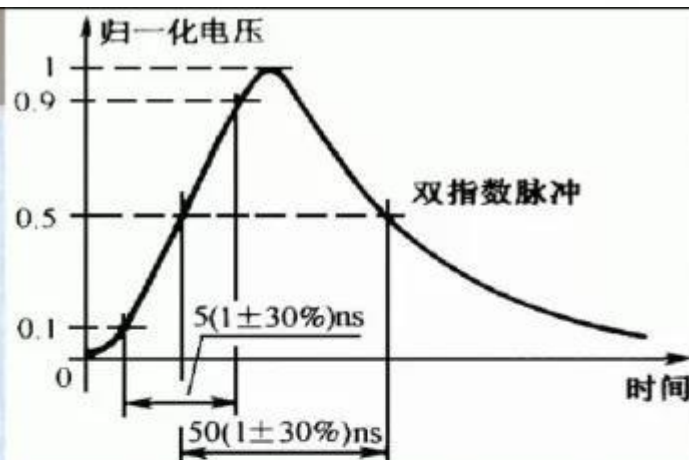
《电磁兼容 试验和测量技术 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验》
这一国家电磁兼容基础标准，并按其中的试验方法进行试验。

- 下面就简要介绍一下该标准的内容、试验方法及相关要求。

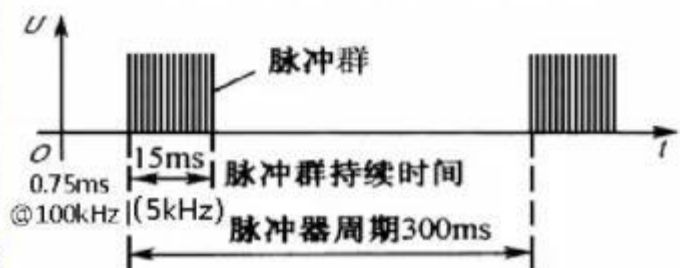
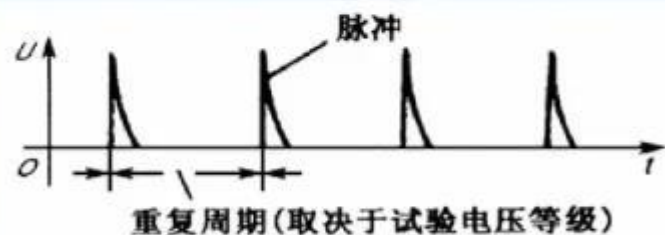


9.2.1 试验发生器

- 试验发生器及其电源耦合网络如下图所示，主要性能指标有三个：
- 单个脉冲波形、脉冲的重复频率和输出电压峰值。
- GB/T 17626.4 要求试验发生器输出波形应如右图所示。

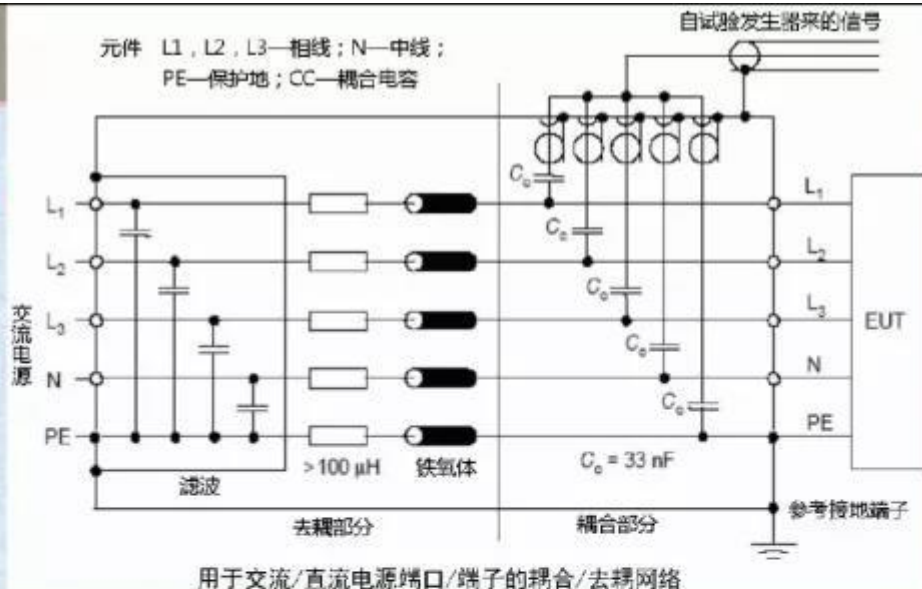


接50Ω负载时单个脉冲的波形

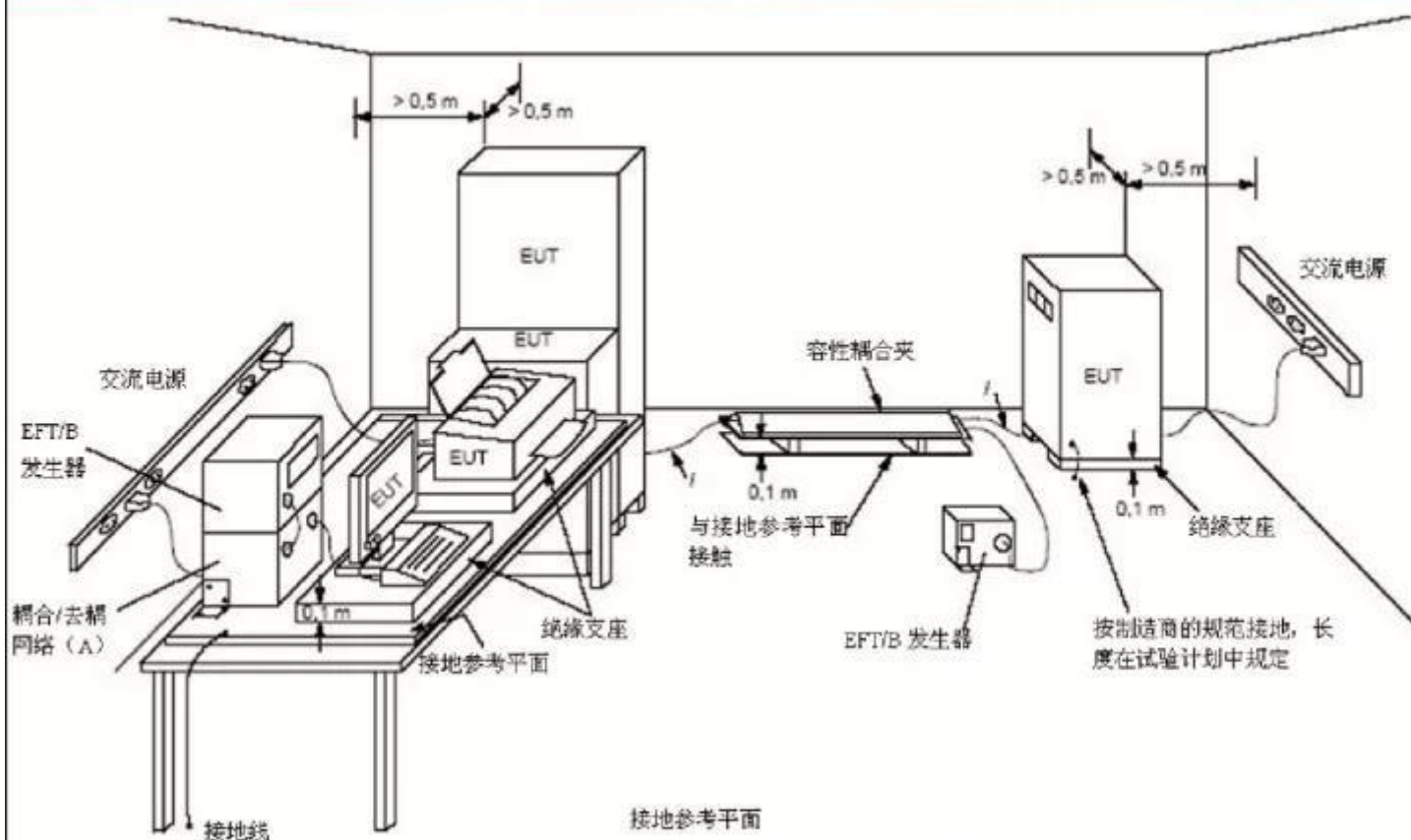


9.2.2 试验方法

- 对交/直流电源端子的选择电源端耦合/去耦网络来施加快速瞬变脉冲群干扰信号。
- 对I/O信号、数据和控制端口选择快速瞬变脉冲群测试专用的容性耦合夹来施加快速瞬变脉冲群干扰信号。



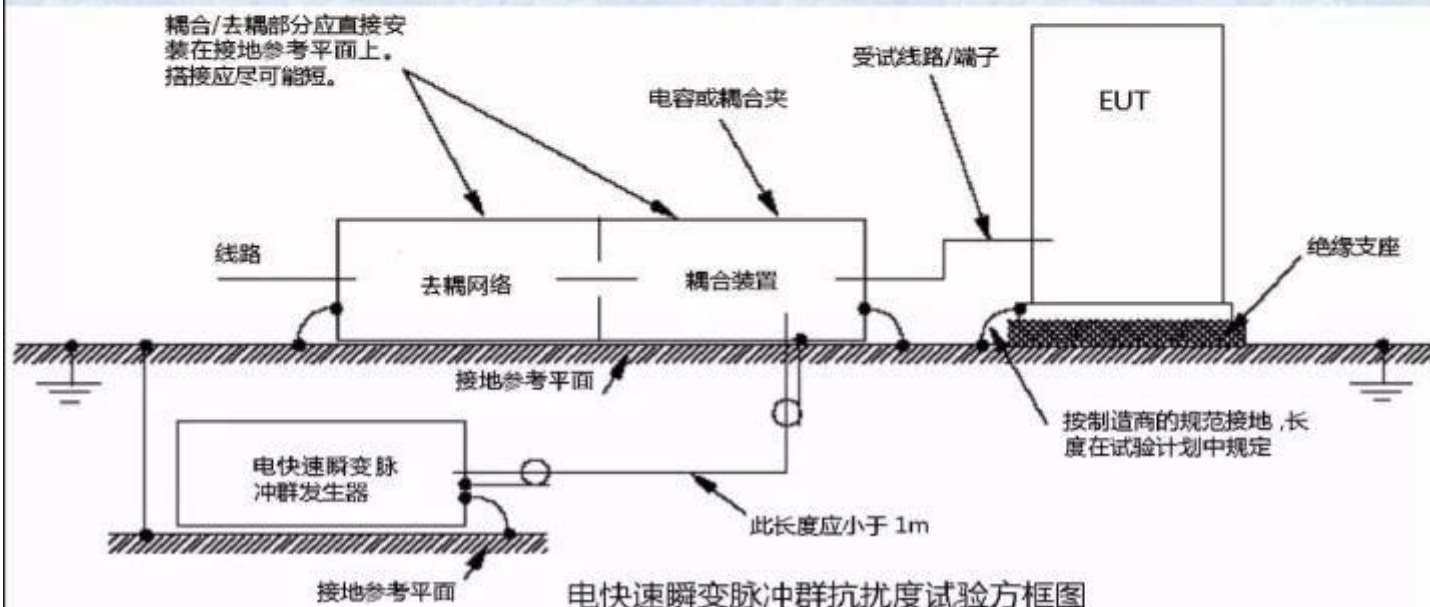
9.2.3 试验布置



用于实验室型式试验的一般试验配置

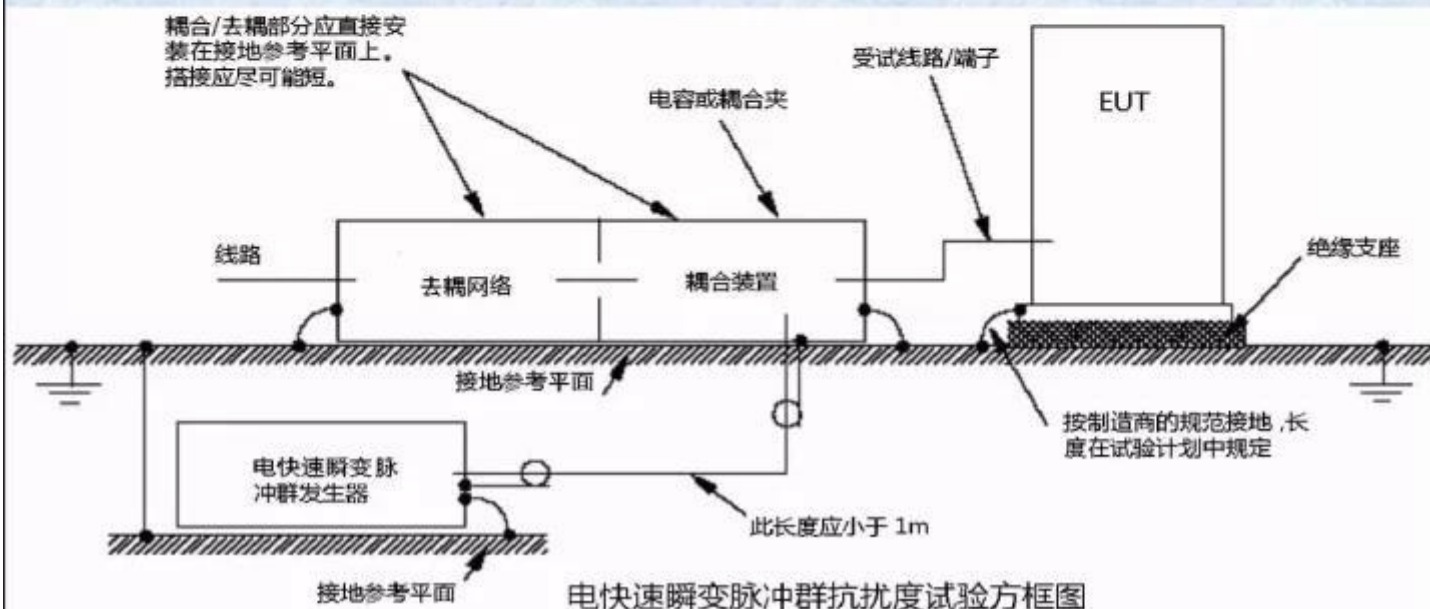
9.2.4 试验实施

- 电源、信号和其他功能电量应在其额定范围使用，并处于正常工作状态。
- 根据要进行试验的EUT的端口类型选择相应的试验等级和耦合方式。
- 使受试设备处于典型工作条件下，根据受试设备端口及其组合，依次对各端口施加试验电压。
- 每种组合应针对不同脉冲极性测试，每种状态试验持续时间不少于1min。
- 不同的产品或产品族标准对试验的实施可能根据产品的特点有特定的规定。



9.2.4 试验实施

- 电源、信号和其他功能电量应在其额定范围使用，并处于正常工作状态。
- 根据要进行试验的EUT的端口类型选择相应的试验等级和耦合方式。
- 使受试设备处于典型工作条件下，根据受试设备端口及其组合，依次对各端口施加试验电压。
- 每种组合应针对不同脉冲极性测试，每种状态试验持续时间不少于1min。
- 不同的产品或产品族标准对试验的实施可能根据产品的特点有特定的规定。



9.3 导致电快速脉冲试验失败的原因

- 脉冲群试验是进行电源线和信号/控制线的传导共模干扰试验。
- 只是电快速干扰脉冲的波形前沿非常陡峭，持续时间非常短暂，因此含有极其丰富的高频成分，这就导致在干扰波形的传输过程中，会有一部分干扰从传输的线缆中逸出，这样设备最终受到的是传导和辐射的复合干扰。
- 另外，由于试验脉冲是持续一段时间的脉冲串，因此它对电路的干扰有一个累积效应。
- 大多数电路为了抗电磁干扰，在输入端安装了积分电路，这种电路对单个脉冲具有很好的抑制作用，但是对于一串脉冲则不能有效地抑制。

21:02

电磁兼容整改及对策

89/161

■ 电快速脉冲对设备影响的原因有三种，包括：

- 1) 通过电源线直接传导进设备的电源，导致电路的电源线上有过大的噪声电压。

当单独对火线或零线注入时，尽管是采取的对地的共模方式注入，但在火线和零线之间存在着差模干扰，这种差模电压会出现在电源的直流输出端。当同时对火线和零线注入时，存在着共模干扰，但对电源的输出影响并不大。

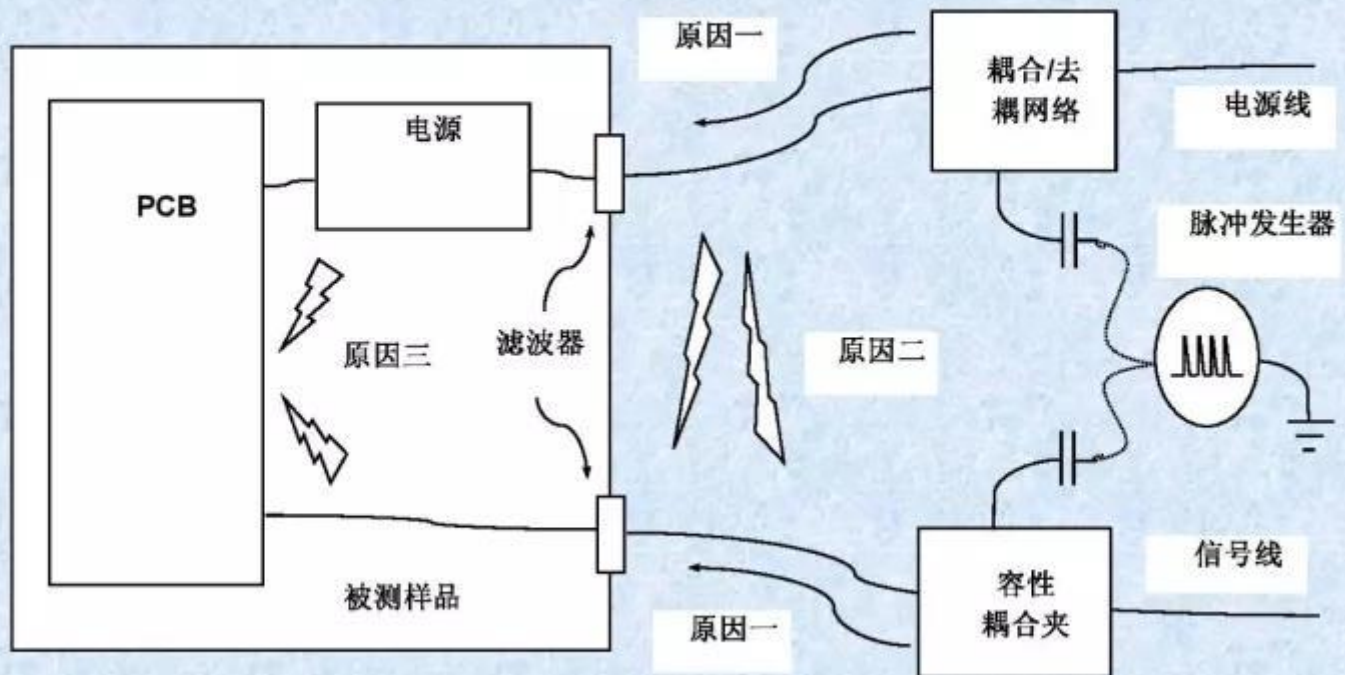
- 2) 干扰能量在电源线上传导的过程中，向空间辐射，这些辐射能量感应到邻近的信号电缆上，对信号电缆连接的电路形成干扰。
- 3) 干扰脉冲信号直接通过信号电缆进入设备电路或在电缆（包括信号电缆和电源电缆）上传输时产生的二次辐射能量感应进电路，对电路形成干扰。

21:02

电磁兼容整改及对策

90/161

快速脉冲对设备影响示意图



EFT测试失败原因分析示意图

21:02

电磁兼容整改及对策

91/161

9.4 通过电快速脉冲试验的整改措施

9.4.1 抑制EFT干扰的一般对策

■ EFT干扰有以下几个特点：

- (1) EFT干扰以**共模方式**侵入敏感设备；
- (2) EFT干扰在传递过程中通过**辐射和传导两种方式**影响EUT电路；
- (3) EFT干扰是由一组的密集的单极性脉冲构成，对敏感设备电路结点的影响具有**连续累积性**；
- (4) EFT干扰侵入敏感设备的**频率覆盖中高频段**，且**电源端口**的频谱分量比信号端口**低频分量更丰富**；
- (5) EFT干扰是一种**典型的高压快速脉冲**干扰；
- (6) EFT干扰主要通过三种路径影响敏感设备电路：直接通过干扰线传导进入敏感设备电路；通过干扰线辐射到相邻的干扰线，再从相邻干扰线进入敏感设备电路；通过干扰线辐射直接进入敏感设备电路。

21:02

电磁兼容整改及对策

92/161

针对这些特点，采取的对策包括：

- (1) 对直接传导干扰应以共模抑制为主；
- (2) 为抑制传导和辐射两者途径的干扰，除对端口线进行滤波外，还需对敏感电路进行屏蔽；
- (3) 为了有效抑制这种密集的单极性脉冲，单纯使用反射型电容、电感滤波会很快饱和，考虑到电源和信号传递，RC类的吸收滤波器未必适用，较好的方式是利用高频铁氧体对高频干扰呈高阻性，能直接吸收高频干扰并转化为热能的特性，来吸收此类干扰；
- (4) 选择传输线滤波电路应覆盖侵入的EFT干扰的频谱范围；
- (5) 对EFT类共模的高压快速脉冲干扰，若在干扰通道先采用对地的脉冲吸收器吸收大部分脉冲电压和能量，再配合吸收式共模滤波器，可起到事半功倍的效果；

21:02

电磁兼容整改及对策

93/161

- (6) 为了对EFT干扰侵入敏感设备的三条路径都有较好的防范，我们除对干扰直接传输通道采取脉冲吸收和滤波，对空间辐射采取屏蔽等措施外，为防止EFT干扰通过空间辐射到非EFT干扰直接侵入的端口线，再从这些端口线侵入敏感设备，应让这些端口线与其他端口线加以空间分隔，并对些端口也采取适当的共模干扰抑制措施。
- (7) 针对脉冲群干扰，主要采用滤波（电源线和信号线的滤波）及吸收（用铁氧体磁芯来吸收）。
 - 采用铁氧体磁芯吸收的方案非常便宜也非常有效。
 - 但要注意做试验时铁氧体磁芯的摆放位置，就是今后要使用铁氧体磁芯的位置，千万不要随意更改。因为脉冲群干扰不仅仅是一个传导干扰，更麻烦的是它还含有辐射的成分，不同的安装位置，辐射干扰的逸出情况各不相同，难以捉摸。
 - 一般将铁氧体磁芯用在干扰的源头和设备的入口处最为有效。下面根据端口的不同分别进行探讨。

21:02

电磁兼容整改及对策

94/161

9.4.2 其他EFT干扰抑制措施

■ 以上这些对策措施主要是在EFT注入端口及外壳和接口上采取相应的抑制措施。除了这些外部抑制措施，提高被测设备内部电路的抗干扰能力也是非常必要的，此处主要针对EFT干扰抑制特点提出几个设计要点：

- (1) 对PCB引出的模拟信号传输端口建议数字化或采用平衡传输或变压器隔离；
- (2) 对PCB引出的数字信号建议采用光耦隔离或变压器隔离或直接换光纤传输；
- (3) 对模拟电路，对称平衡放大器比单极性放大器具有更强的共模干扰抑制能力；
- (4) 对数字电路，所有的未使用的输入端口与地或电源连接，不可悬空；
- (5) 对智能芯片，电平触发比边沿触发抵抗脉冲干扰的能力强得多；
- (6) 与外部连接的接口，带选通功能的接口芯片比不带的具有更强的抗干扰能力；
- (7) 对有CPU的智能电路在软件中加入抗干扰指令并采用“看门狗电路”是必要的；
- (8) 任何时候都不要让外部信号没有经过接口芯片隔离直接进出CPU。

21:02

电磁兼容整改及对策

95/161

10. 浪涌冲击抗扰度测试



浪涌冲击抗扰度
测试问题及对策

浪涌冲击形成的机理

浪涌冲击测试及相关要求

导致浪涌冲击抗扰度试验失败的原因

通过浪涌抗扰度试验应采取的措施

21:02

电磁兼容整改及对策

96/161



10. 浪涌冲击抗扰度测试

- 虽然我们已经对直击雷和传导雷的灾害性破坏已经有较好的防护措施，但**间接雷**（如云层内、云层间的雷击，或邻近物体遭到的雷击）仍然可以在户外架空线上**感应出浪涌电压和电流**。
- 此外，在电站或开关站中，**大型开关切换瞬间**，也会在供电线路上**感应出大的浪涌电压和电流**。
- 这两种浪涌的共同特点是能量特别大（用能量作比较，**静电放电为皮焦耳级**，**快速脉冲群为毫焦耳级**，**雷击浪涌则为几百焦耳级**，是前两种干扰能量的百万倍），但**波形较缓（微秒级**，而**静电与快速脉冲群是纳秒级**，甚至**亚纳秒级**），重复频率低。
- **随着**科学技术的发展，半导体集成电路和微控制技术渗透到几乎所有的领域，由于半导体集成电路不能承受过电压和电流冲击，凡是使用这些元器件的设备，如智能家电、办公自动化产品、工业控制器、电子计算机、有线和无线通信系统等**电子设备的浪涌冲击损坏事故显著增加**。
- 雷灾主要对象已由对人和环境的灾害性破坏转移到对微电子器件设备损坏上。
- 电磁兼容领域所指的**浪涌冲击一般来源于开关瞬态和雷击瞬态**。

21:02

电磁兼容整改及对策

97/161

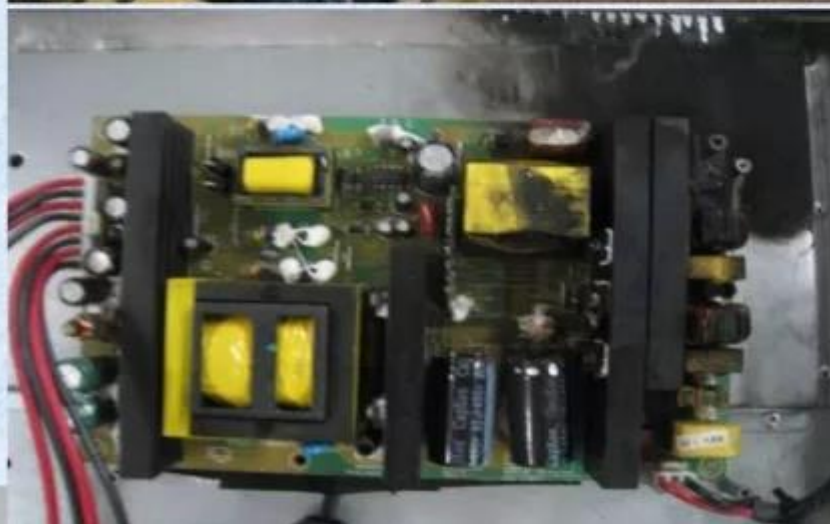
10.1.1 开关瞬态

- 系统开关瞬态与以下内容有关：
 - a) 主电源系统切换骚扰，如电容器组切换；
 - b) 配电系统内在仪器附近的轻微开关动作或者负荷变化；
 - c) 与开关装置有关的谐振电路，如晶闸管；
 - d) 各种系统故障，例对设备组接地系统的短路和电弧故障。



10.1.2 雷击瞬态

- 雷电产生浪涌（冲击）电压的主要原理如下：
 - a) 直接雷击于外部电路（户外），注入的大电流流过接地电阻或外部电路阻抗而产生电压；
 - b) 在建筑物内、外导体上产生感应电压和电流的间接雷击（即云层之间或云层中的雷击或击于附近物体的雷击，这种雷击产生的磁场）；
 - c) 附近直接对地放电地雷电入地电流耦合到设备组接地系统的公共接地路径。
- 当保护装置动作时，电压和电流可能发生迅速变化，并可能耦合到内部电路。



21:02

10.1.3 电子产品的浪涌（雷击）损坏机理

- 雷击电子设备的途径可分为两种情况：
 - 第一种是高能雷电冲击波通过户外传输线路、设备间的连接线以及电力线侵入设备，使串接在线路中间或终端的电子设备遭到损害。
 - 第二是雷击大地或接地导体，引起局部瞬间地电位上升，波及附近的电子设备，对设备产生冲击，损害其对地绝缘。
- 一般浪涌脉冲的上升时间较长，脉宽较宽，不含有较高的频率成分，多通过传导方式进入设备内部。
- **纵向（共模）**冲击对设备平衡电路元部件的影响有：
 - 损坏跨接在线与地间的元部件或其绝缘介质；
 - 击穿在线路和设备间起阻抗匹配作用的变压器匝间、层间或线对地绝缘等。
- **横向（差模）**冲击则同样可在电路中传输，损坏内部电路的电容、电感及耐冲击能力差的半导体器件。

21:02

10.2 浪涌冲击测试及相关要求

- 不同的电子、电气产品标准对浪涌（冲击）抗扰度试验的要求是不同的。
- 这些标准关于浪涌（冲击）抗扰度试验大多都直接或间接引用GB/T17626.5（idt IEC 61000-4-5）：《电磁兼容 试验和测量技术 浪涌（冲击）抗扰度试验》这一国家电磁兼容基础标准，并按其中的试验方法进行试验。
- 下面就简要介绍一下该标准的内容、试验方法及相关要求。

10.2.1 测试适用范围、内容及目的

- **适用范围**：于电气和电子设备在规定的工作状态下工作时，对由开关或雷电作用所产生的有一定危害电平的浪涌（冲击）电压的反应。
- 该标准不对绝缘物耐高压的能力进行试验。该标准不考虑直击雷。
- **内容**：对电气和电子设备的供电电源端口、信号和控制端口在受到浪涌（冲击）干扰时的性能进行评定。
- **目的**：评定设备在遭受到来自电力线和互连线上高能量浪涌（冲击）骚扰时产品的性能。

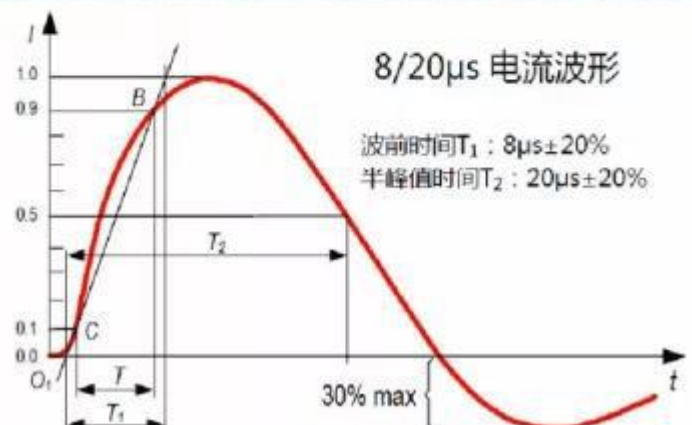
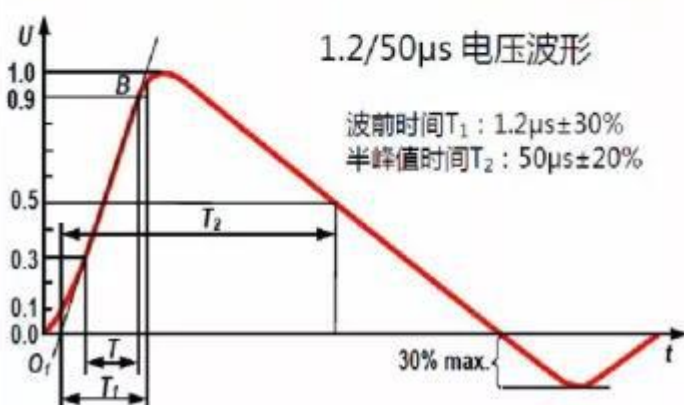
21:02

电磁兼容整改及对策

101/161

10.2.2 试验发生器

- a) 信号发生器特性应尽可能地模拟开关瞬态和雷击瞬态现象；
- b) 如果干扰源与受试设备的端口在同一路中，例如在电源网络中（直接耦合），那么信号发生器在受试设备的端口能够模拟一个低阻抗源；
- c) 如果干扰源与受试设备的端口不在同一路中（间接耦合），那么信号发生器能够模拟一个高阻抗源。
- 对于不同场合使用的产品及产品的不同端口，由于相应的浪涌（冲击）瞬态波形各不相同，因此对应模拟信号发生器的参数也不相同。
- 例如：对交流电源端口，通常采用的是1.2/50 μ s (8/20 μ s)组合波信号发生器；
- 对电信端口，通常采用的是10/700 μ s的符合CCITT要求的试验信号发生器。



10.2.4 试验方法:

- 浪涌（冲击）测试一般应在线进行。
- 测试时根据不同的端口选择对应的波形发生器和相应的耦合/去耦单元；
- 信号发生器源阻抗的选择取决于：
 - 电缆、导体、线路的种类（交流电源、直流电源、互连线等等）；
 - 电缆、线路的长度；
 - 试验电压的施加方式：线-线、线-地
- 2Ω 阻抗表示低压电网的源阻抗；
- 12Ω 阻抗表示低压电网对地的源阻抗；
- 42Ω 阻抗表示通信线路对地的源阻抗。
- **对交流电源线的浪涌注入：**
 - 浪涌脉冲使用交流电源浪涌耦合网络注入；
 - 应在电源交流波形峰值和过零点分别进行（ 0° 、 90° 、 180° 、 270° ）；
 - 每一相位应分别注入正、负浪涌波形各5次，每次间隔1min；
 - 线-线低阻抗（ 2Ω ）差模注入、线-地高阻抗（ 12Ω ）共模注入，分别进行；
 - 测试从低等级开始，逐级进行到规定测试等级。

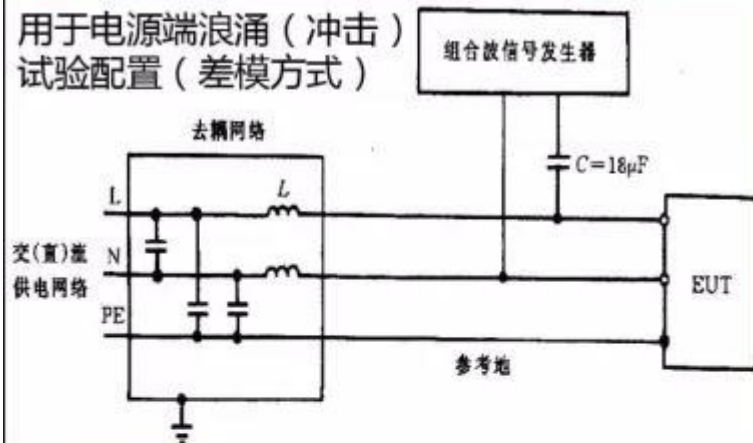
21:02

电磁兼容整改及对策

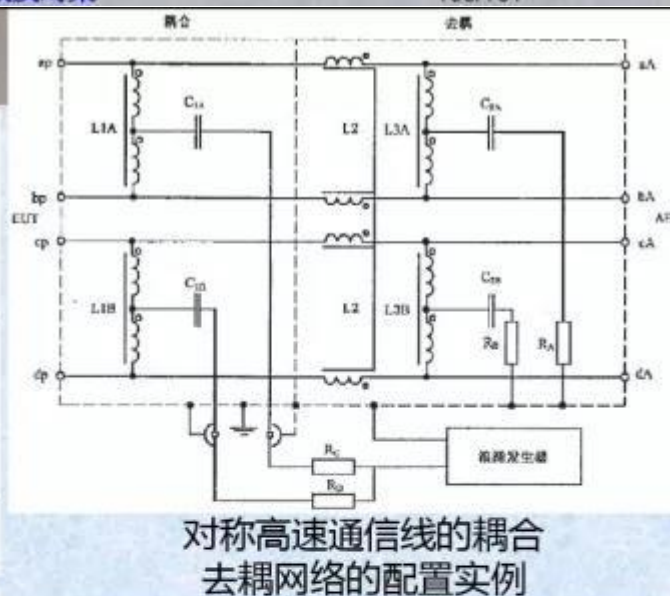
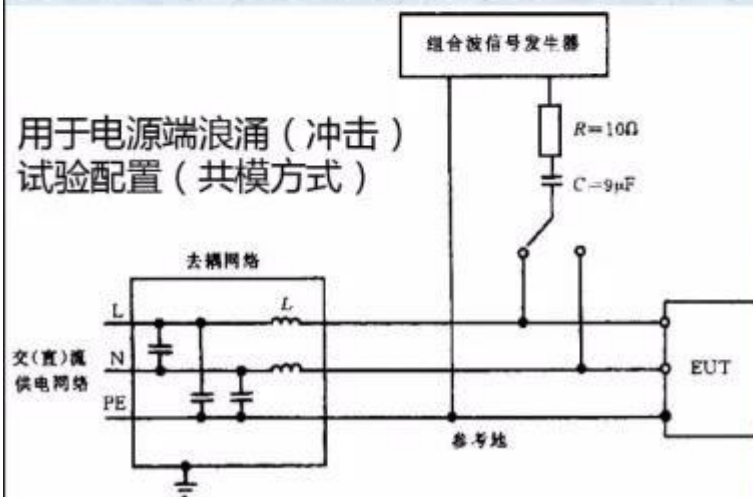
103/161

10.2.5 试验布置

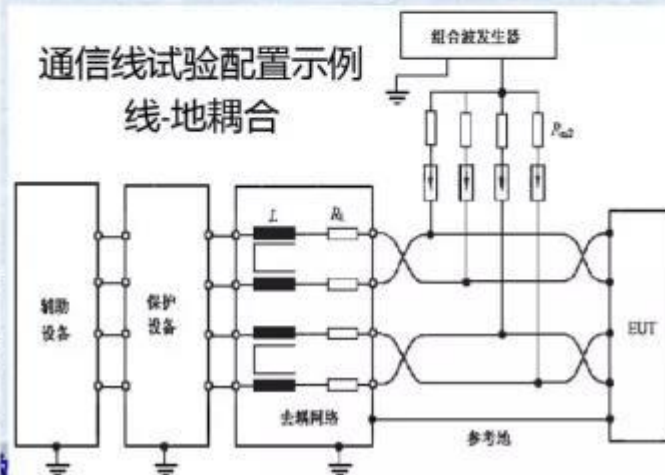
用于电源端浪涌（冲击）
试验配置（差模方式）



用于电源端浪涌（冲击）
试验配置（共模方式）



通信线试验配置示例
线-地耦合



10.2.6 试验实施

- 电源、信号和其他功能电量应在其额定范围内使用，并处于正常工作状态。
- 根据要进行试验的EUT的端口类型选择相应的试验试验波形发生器和耦合单元及相应的信号源内阻。
- 使受试设备处于典型工作条件下，根据受试设备端口及其组合，依次对各端口施加冲击电压。
- 每种组合应针对不同脉冲极性进行测试，两次脉冲间隔时间不少于1min。
- 对电源端子进行浪涌测试时，应在交流电压波形的正、负峰值和过零点分别施加试验电压。
- 对电源线和信号线应分别在不同组合的共模和差模状态下施加脉冲冲击。
- 每种组合状态至少进行5次脉冲冲击。
- 若需满足较高等级的测试要求，也应同时进行较低等级的测试。
- 只有两者同时满足，我们才认为测试通过。
- 不同的产品或产品族标准对试验的实施可能根据产品的特点有特定的规定。

21:02

电磁兼容整改及对策

105/161

10.2.7 试验环境

- 该标准规定的环境条件：
- 环境温度：15~35℃
- 相对湿度：10%~75%RH
- 大气压力：86kPa~106kPa

10.2.8 试验结果

- 若浪涌（冲击）抗扰度测试通不过，可能产生如下后果：
- （1）引起接口电路器件的击穿损坏。
- （2）造成设备的误动作。



21:02

电

10.3 导致浪涌冲击抗扰度试验失败的原因

- 浪涌脉冲的上升时间较长，脉宽较宽，不含有较高的频率成分，因此对电路的干扰以传导为主。
- 主要体现在过高的差模电压幅度导致输入器件击穿损坏，或者过高的共模电压导致线路与地之间的绝缘层击穿。
- 由于器件击穿后阻抗很低，浪涌发生器产生的很大的电流随之使器件过热发生损坏。
- 对于有较大平滑电容的整流电路，过电流使器件损坏也可能是首先发生的。
- 例如，对开关电源的高压整流滤波电路而言，浪涌到来时，整流电路和平滑电容提供了很低的阻抗，浪涌发生器输出的很大的电流流过整流二极管，当整流二极管不能承受这个电流时，就发生过热而烧毁。随着电容的充电，电容上的电压也会达到很高，有可能导致电容击穿损坏。

21:02

电磁兼容整改及对策

107/161



10.4 通过浪涌抗扰度试验应采取的措施

- 雷击浪涌试验有**共模**和**差模**两种。
- 因此浪涌吸收器件的使用要考虑到与试验的对应**共模和差模抑制**。
- 为保证使用效果，**浪涌吸收器件要用在进线入口处**。
- 由于浪涌吸收过程中的 di/dt 特别大，在**器件附近不能有信号线和电源线经过**，以防止因电磁耦合将干扰引入信号和电源线路。
- 浪涌吸收**器件的引脚要短**。
- 吸收器件的吸收**容量要与浪涌电压和电流的试验等级相匹配**。
- **浪涌试验的最大特点**是能量特别大：
 - 所以采用普通滤波器和铁氧体磁芯来滤波、吸收的方案基本无效；
 - 必须使用气体放电管、压敏电阻、硅瞬变电压吸收二极管和半导体放电管等专门的浪涌抑制器件才行。
- **浪涌抑制器件的一个共同特性**：
 - 就是阻抗在有浪涌电压与没浪涌电压时不同；
 - 正常电压下，阻抗很高，对电路的工作没有影响；
 - 当有浪涌电压时，阻抗变得很低，将浪涌能量旁路掉。
- 这类器件的**使用方法**：是并联在线路与参考地之间，当浪涌电压出现时，迅速导通，以将电压幅度限制在一定的值上。

21:02

电磁兼容整改及对策

108/161

10.4.1 瞬态干扰抑制原理

1) 瞬态干扰的频谱

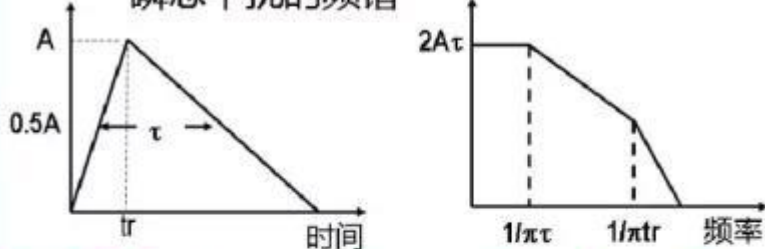
■ 从右图可知，对ESD、EFT、浪涌而言，其有效频谱范围差异很大，能量传递方式各不相同。

■ **对ESD脉冲**，主要能量频谱范围为~320MHz，上限频率可达1GHz，其干扰通过传导和辐射发射均很严重，需要从传导和辐射两方面加以抑制，缺一不可。

■ **对EFT脉冲**，主要能量频谱范围为~64MHz，上限频率可达一百多MHz，其干扰以通过传导和辐射发射，以传导发射为主，但辐射途径的发射不可忽略。因此，进行抑制处理是也需从传导和辐射两个方面加以抑制，以传导抑制为主。

■ **对浪涌脉冲**，主要能量频谱范围为~265kHz，上限频率可达MHz，其干扰频率较低，很难通过辐射发射传递。因此，浪涌抑制时一般无需考虑辐射抑制，只需从传导通道上加以抑制措施即可。

瞬态干扰的频谱



瞬态类型	t_r	τ	$1/\pi\tau$	$1/\pi t_r$	A	$2S\tau$
EFT	5ns	50ns	6.4MHz	64MHz	4kV	0.4V/MHz
ESD	1ns	30ns	10MHz	320MHz	30A	1.8μA/MHz
浪涌	1.2μs	50μs	6.3kHz	265kHz	4kV	0.4V/MHz

21:02

电磁兼容整改及对策

109/161

2) 瞬态干扰抑制方法

■ 当瞬态干扰能量较低，且不影响信号传递的情况下，我们可在信号端口使用串联分压法来抑制瞬态干扰，使用的器件包括正温度系数电阻、电阻、电感、电容等。

■ 当瞬态干扰能量较高，或像电源端口，工作电流较大，不适合使用串联抑制的场合，我们可采用并联分流法来抑制瞬态干扰，使用的器件包括负温度系数电阻（压敏电阻）、气体放电管、硅瞬变抑制二极管等。

瞬态干扰抑制方法

分压法：{ 正温度系数电阻
电阻
电感
电容

分流法：{ 负温度系数电阻（压敏电阻）
气体放电管
瞬态抑制二极管

低通滤波器：截止频率小于 $1/\pi\tau$

■ 与分压法相比，分流法可承受更大的脉冲能量和吸收大的脉冲电流。

■ 必要时可将分压法和分流法组合使用，得到更好的瞬态干扰抑制效果。

■ 当脉冲能量较低，脉冲电流较小时，低通滤波器也能起到较好的干扰抑制效果。

■ 使用时，需注意低通滤波器的低频截止频率应在脉冲干扰有效频谱范围，抑制效果才会比较明显。

21:02

电磁兼容整改及对策

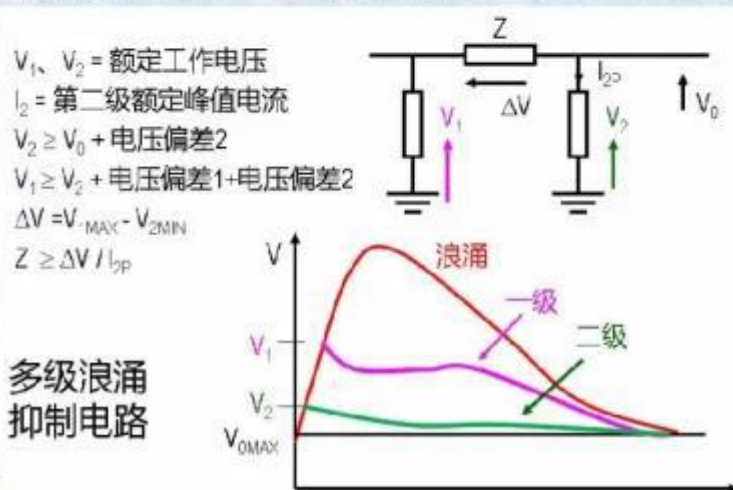
110/161

3) 多级浪涌抑制电路分析

- 在许多场合，单个浪涌抑制器件不能满足电路的要求：
 - 气体放电管能够承受大能量，但响应时间长，对上升沿很陡的浪涌不能有效抑制。
 - 瞬态抑制二极管响应时间很短，但是不能承受较大能量。
- 为了满足各种情况的要求，往往把不同性质的浪涌抑制器件结合起来使用。

基本原理如下：

- 将能够承受较大能量的器件（通常响应时间较长）放在最靠近浪涌入口处；
- 后续的器件在能量容量方面递减，而钳位电压逐渐靠近工作电压；
- 后续各级的导通电压递减；各级之间用串联的缓冲器（电阻或电感）隔开；
- 在双线传输中，不仅要考虑共模浪涌抑制，还要考虑差模浪涌抑制。
- 缓冲器将进入后级电流限制在后级额定电流值以内；
- 电阻缓冲的缺点是会衰减工作信号，因此不能用在电源中。
- 电阻是宽带衰减器，能够衰减长脉冲。
- 电源用电感缓冲，仅对快速短脉冲有较大衰减，对长脉冲几乎没衰减。
- 在实际中，可将电阻和电感串联起来，电阻取 10Ω ，电感取 $20\mu\text{H}$ 。



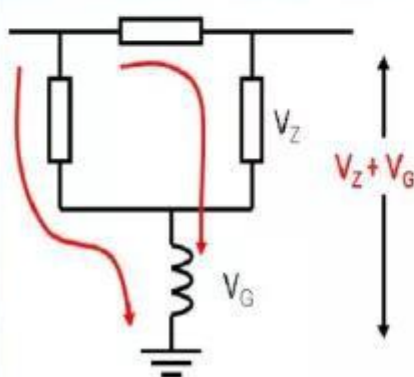
21:02

电磁

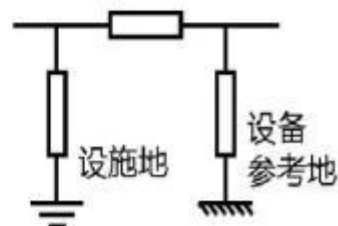
4) 地线反弹分析

地线反弹问题：

- 线路的浪涌抑制器的作用是为浪涌能量提供一个向大地的通路。
- 在实际使用中，一个常见的问题是没有注意控制这个通路的阻抗。
- 例如，发生一个电流强度为 5kA 的中等强度雷击，浪涌抑制器提供的泄放通路阻抗为 0.5Ω （相当低），这时在负载上产生的电压为 2500V ！
- 解决的方法：
 - 是在安装浪涌抑制器时尽量减小泄放通路上的阻抗；
 - 并将各级浪涌抑制器的地分开。
- 当设备为多个部分组成时，可将设备各个部分等电位连接，并一点接地。
- 对设备可能承受脉冲电压的端口均加以脉冲保护。



地线反弹与对策

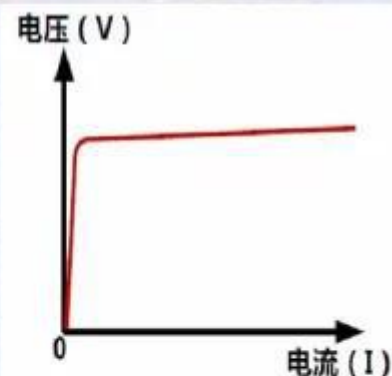


若电流为 5kA ，地线阻抗为 0.5Ω ，则反弹电压达到 2500V ！

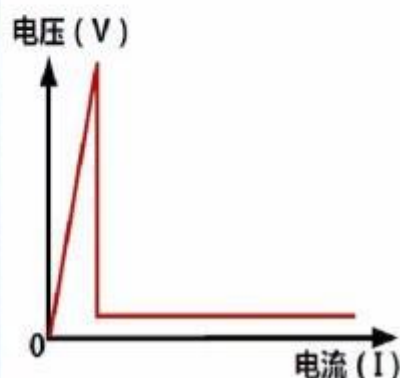
21:02

10.4.2 常见的浪涌抑制器件特点及应用

- 常见七大类浪涌抑制器件，分别为：
 - **瞬态电压抑制器** Transient Voltage Suppressors，简称TVS；
 - **压敏电阻** Metal Oxide Varistors 简称MOV；
 - **静电保护元件** Electrostatic Discharge Protection Devices 简称ESD；
 - **陶瓷气体放电管** Gas Discharge Tubes 简称GDT；
 - **玻璃气体放电管** Spark Gap Protectors 简称SPG；
 - **半导体放电管** Thyristor Surge Suppressors 简称TSS；
 - **自恢复保险丝** Polymer Positive Temperature Coefficient 简称PPTC。
- 保护器件按照伏安特性可分为三大类：**钳位型**过电压保护器件，**开关型**过电压保护器件，**过电流型**保护器件。
 - **钳位型**过电压保护器件有：TVS、ESD、MOV
 - **开关型**过电压保护器件有：GDT、SPG、TSS
 - **过电流型**保护器件是：PPTC
- **钳位型**：伏安特性曲线如右上图，当电压达到钳位型过电压保护器件的击穿电压时，其电阻瞬间减小为低阻抗，泄放大浪涌电流，从而将浪涌电压限制在一个较低的水平。
- 其特点是器件导通后，**钳位电压会高于器件的击穿电压**。
- **开关型**：伏安特性曲线如右下图，当电压达到器件的击穿电压后，其电阻瞬间减小为低阻态，泄放大浪涌电流，从而将浪涌电压限制在一个较低的水平
- 特点是器件导通后，其**两端的电压会低于器件的击穿电压**。
- **过电流型**：PPTC 是一种可反复应用的保护器件，常应用于小电流电源线过流保护，或**两级过压保护器件间退耦**。



钳位型过电压保护器件伏安特性



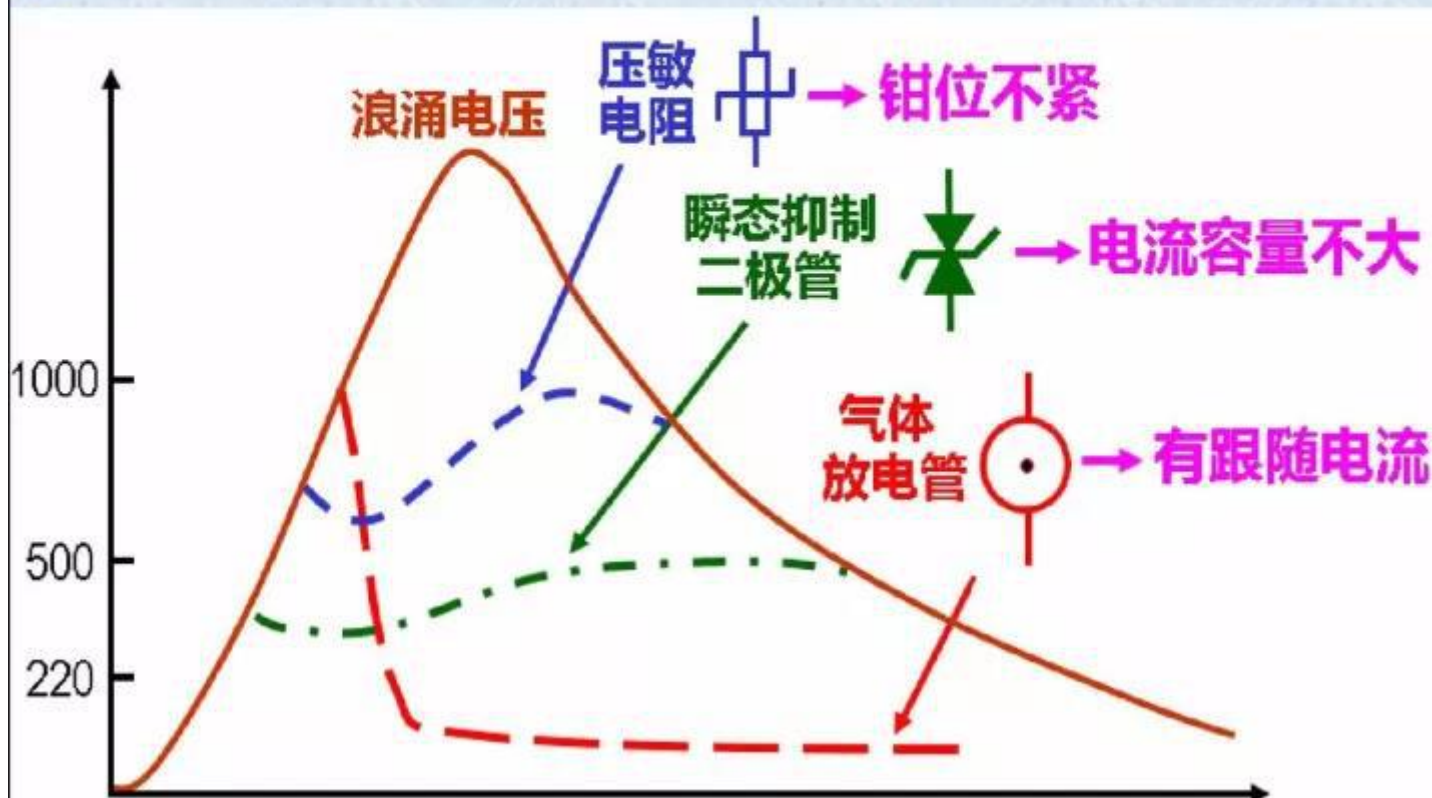
开关型过电压保护器件伏安特性

21:02

电磁兼容整改及对策

113/161

- 压敏电阻、瞬态抑制二极管和气体放电管具有不同的伏安特性，因此浪涌通过它们时发生的变化不同。
- 下图对浪涌电压通过这三种器件时的变化进行了比较。



9.4.2.1 压敏电阻（MOV）

- 压敏电阻由金属氧化物（主要是氧化锌）材料组成，属箝位型器件，其特性与两只背对背联接的稳压管非常相似，有着纳秒级的响应速度。
- 压敏电阻对瞬变信号的吸收能力与其体积成正比：其厚度正比于阈值电压；面积正比于吸收电流。
- 压敏电阻是目前在电子产品中使用最广泛的浪涌抑制器件。
- 当压敏电阻上的电压超过一定幅度（阈值）时，电阻的阻值大幅度降低，从而将浪涌能量泄放掉。
- 在浪涌电压作用下，导通后的压敏电阻上的电压（一般称为箝位电压），等于流过压敏电阻的电流乘以压敏电阻的阻值，因此在浪涌电流的峰值处箝位电压达到最高。



1) 压敏电阻的特点

(1) 优点：

- 电压范围很宽，可从几伏到几千伏，
- 吸收浪涌电流可从几十到几千安培，
- 反应速度快，
- 无极性，无续流，
- 峰值电流承受能力较大，
- 价格低。

(2) 缺点：

- 钳位电压较高，一般可以达到工作电压的2~3倍。
- 另外，压敏电阻随着受到浪涌冲击次数的增加，漏电流增加。
- 压敏电阻的其他缺点还有：响应时间较长，寄生电容较大。

(3) 适用场合：

- 直流电源线、低频信号线，
- 或者与气体放电管串联起来用在交流电源线上使用。



贴片压敏电阻



2) 压敏电阻的选择

(1) 阈值电压选择：

- 从抑制瞬变干扰的角度出发，压敏电压要尽量降低到接近被保护电路的工作电压；从提高元件寿命来看，又要拉开两者差距。
- 一般折中的选取方案为：
 - 对交流工作电路，压敏电阻阈值电压值为工作电压的2.2倍；
 - 对直流工作电路，压敏电阻阈值电压值为工作电压的1.5倍。
 - 对交流220V的低压供电系统，压敏电阻宜选择470V阈值电压的规格。

(2) 通流量的选取：

- 在实际应用中，压敏电阻所需吸收的最大浪涌电流应小于压敏电阻的最大通流量，以提高其可靠性。
- 对同一应用场合，当最大通流量增加一倍，压敏电阻寿命也至少同步增加一倍。

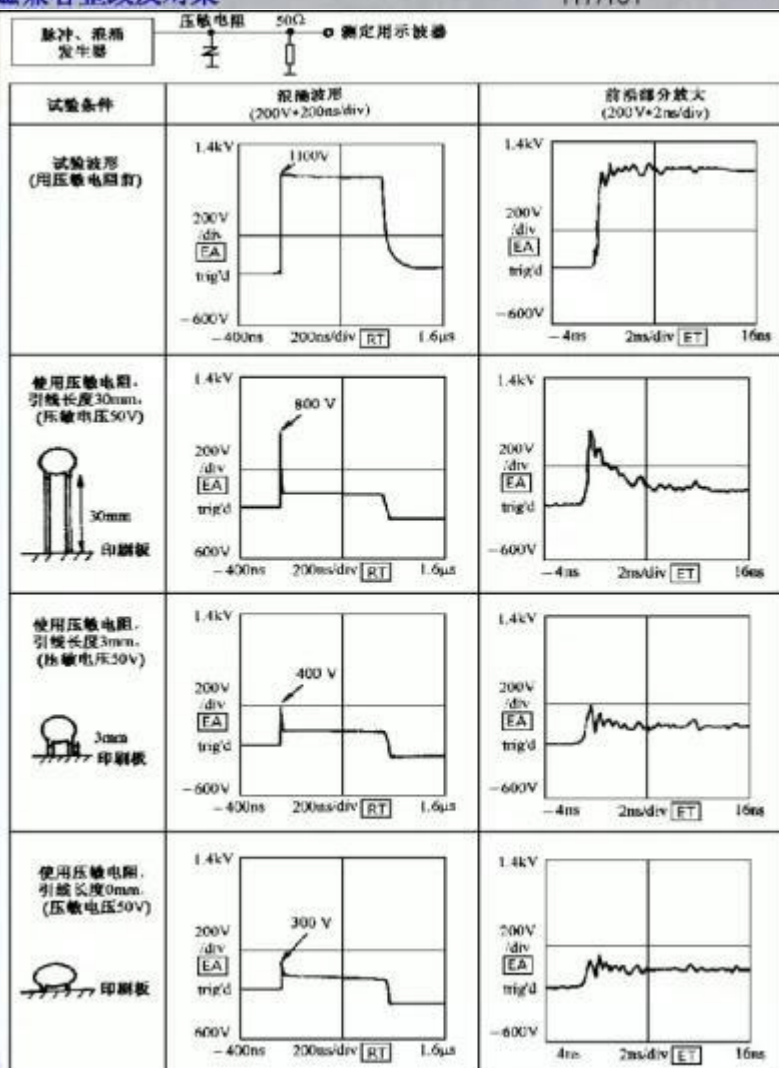
21:02

电磁兼容整改及对策

117/161

3) MOV响应速度

- 压敏电阻的动作与半导体元件的击穿导通非常相似，动作延时很小，一般认为是ns级的。
- 故压敏电阻对浪涌的箝位延迟极小。但是压敏电阻的引线电感会掩盖其高速响应的特点。
- 压敏电阻引线电感引起的感应电压与引线电感量及压敏电阻箝位瞬间吸收电流的变化率 (di/dt) 成正比。
- 其中电流变化率与压敏电阻本身的特性，干扰源的干扰幅度、干扰源的内阻有关，不由使用人员改变。
- 因此，感应电压的大小主要取决于引线电感的大小，亦即引线的长度。
- 右图是一个用压敏电阻做试验的实例。此图表明，使用中应该将压敏电阻的引线剪得越短越好，以加快MOV的响应速度。



21:02

电

4) 压敏电阻的失效方式

■ 常见的压敏电阻失效方式有如下几种：

- (1) **热击穿**：因压敏电阻的荷电率太高、已经劣化、内部均匀性差及吸收的脉冲能量过大等原因，会造成它的发热大于散热，引起热崩溃（或局部热崩溃），最终造成薄弱点穿孔而击穿。
- (2) **闪络**：指外部施加的瞬态电场强度太高，或外部绝缘水平差，在强电场作用下，沿元件侧表发生放电。
- (3) **开裂**：由于元件本身存在结构应力，在元件吸收大量能量时，因热应力作用而导致开裂。有时也有短路或开路情况发生。
- (4) **炸裂**：由于元件内部存在严重缺陷（如杂质、气孔等）在元件吸收了很大的脉冲能量时，局部电流集中，强大的热应力使元件炸裂。通常伴有开路失效情况。

■ 以上各种失效， 以短路失效较常见。



21:02

10.4.2.2 瞬态抑制二极管（TVS）

- 瞬态抑制二极管（Transient Voltage Suppressor）简称TVS，是一种二极管形式的高效能保护器件。
- 在电路中一般工作于反向截止状态，此时它不影响电路的任何功能。
- 当电路中由于雷电、各种电器干扰出现大幅度的瞬态干扰电压或脉冲电流时，TVS二极管的两极受到反向瞬态高能量冲击，它以皮秒量级的速度，将其两极间的高阻抗变为低阻抗，吸收高达数千瓦的浪涌功率，使两极间的电压箝位于一个预定值，有效地保护电子线路中的精密元器件，免受各种浪涌脉冲的损坏。干扰脉冲过去后，TVS又转入反向截止状态。
- 由于在反向导通时，其箝位电压低于电路中其它器件的最高耐压，因此起到了对其它元器件的保护作用。
- TVS能承受的瞬时脉冲功率可达上千瓦，其箝位时间仅为1ps。
- TVS根据极性可分为单向和双向TVS。
- 单向TVS一般适用于直流电路，双向TVS一般适用于交流电路中。
- 由于TVS起保护作用时动作迅速、寿命长、使用方便，因此在瞬变电压防护领域有着非常广泛的应用。

21:02

1) TVS的特点

(1) 优点：

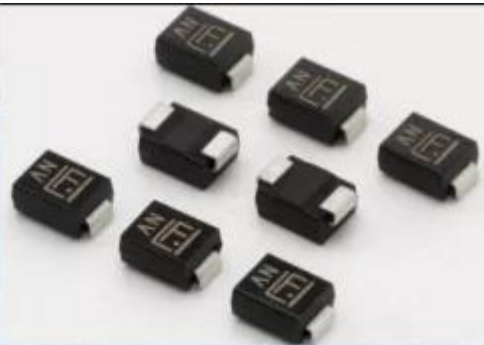
- 响应时间短，漏电流小，击穿电压偏差小，箝位电压低（相对于工作电压），
- 动作精度高，无跟随电流（续流），
- 体积小，每次经受瞬变电压后其性能不会下降，
- 可靠性高。

(2) 缺点：

- 由于所有功率都耗散在二极管的PN结上，因此它所承受的功率值较小，允许流过的电流较小。
- 一般的TVS器件的寄生电容较大，如在高速数据线上使用，要用特制的低电容器件，但是低电容器件的额定功率往往较小。

(3) 适用场合：

- 浪涌能量较小的场合。
- 如果浪涌能量较大，要与其他大功率浪涌抑制器件一同使用，把它作为后级防护。



21:02

电磁兼容整改及对策

2) TVS的选择

- (1) 最大箝位电压 $V_{\text{C}_{\text{MAX}}}$ 应不大于被保护电路的最大允许安全电压。
- (2) 最大反向工作电压 V_{RWM} 应不低于电路的最大工作电压，一般略高于电路的工作电压。
- (3) TVS额定的最大脉冲功率必须大于电路中出现的最大瞬态浪涌功率。
- (4) 对小电流负载的保护，可在TVS之前串接适当的限流电阻，从而可选用小峰值吸收功率的TVS来担任这一功能。
- (5) 对于数据接口电路的保护，还必须注意选取具有合适结电容 C 的TVS器件。
- (6) 根据用途选用TVS的极性及封装结构：
 - 直流电路宜选择单极性TVS；
 - 交流电路选用双极性TVS较为合理；
 - 多线保护选用TVS阵列更为有利；
 - 大功率保护选用TVS二极管专用保护模块。

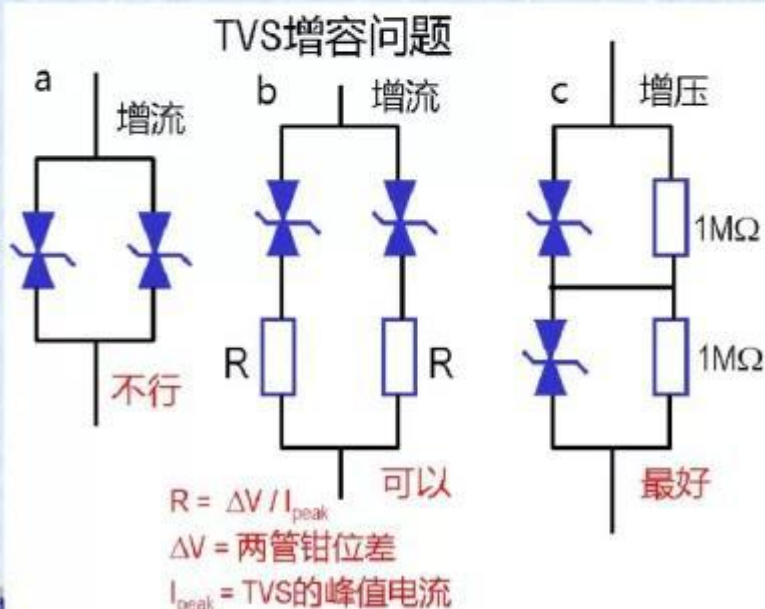
Small SMD Package TVS



深圳市百港电子有限公司

3) TVS增容问题

- TVS的最高限是电压不超过440V，表面贴装的TVS还不超过170V。
- 将TVS串联起来就可获得更高限压，如右下图c所示。
- TVS串联扩容，时解决高压TVS缺乏的有效手段。
- 只是等效管的最大吸收电流取决于电流最低的这个管子。
- 硅瞬变电压吸收二极管一般不宜通过直接并联方法来提高管子电流，因为在实用中难于找到几个特性完全一致的管子。
- 若直接并联，如图a所示，经常是一个TVS过载(甚至是严重过载)、另一个欠载，最终落得两败俱伤。
- 若坚持扩容，可考虑使用右下图b的方案，选择合适的匀流电阻，但实际效果并不理想。

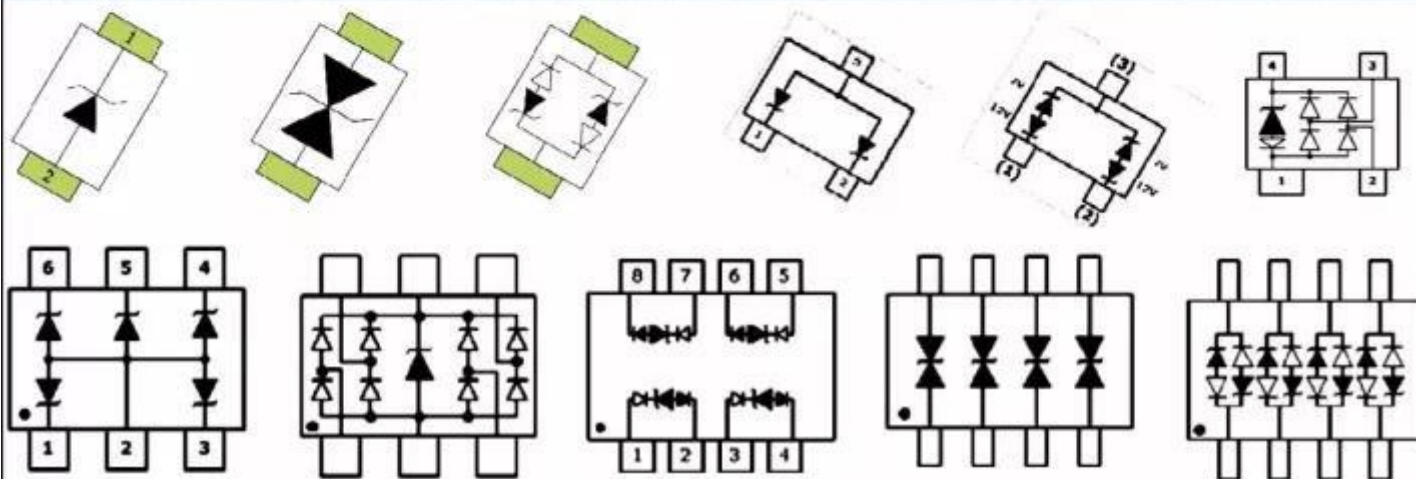


21:02

电磁

4) 阵列式瞬态电压抑制器

- TVS 阵列是一种快速抑制静电的一种保护元件。
- 它能以小于纳秒级响应速度将静电、浪涌电压限制箝位到一个安全的电压范围内，以保护后面电路不受损坏。
- 是一种限压型的专用于静电及较低的浪涌过电防护的过电压保护元件。
 - 反应速度快小于0.5ns
 - 一般电压规格大约只有2.8V、3V、5V、12V、15V、24V、36V
 - 导通击穿电压低
 - 体积小、集成度高能同时实现多条数据线保护
 - 电容值较低，可达0.4pF，是理想的高频数据线保护器件



10.4.2.3 气体放电管（GDT、SPG）

- 气体放电管采用陶瓷密闭封装（GDT）或玻璃封装（SPG），内部由两个或数个带间隙的金属电极充以惰性气体（氩气或氖气）构成。
- 当加到两电极端的电压达到使气体放电管内的气体击穿时，气体放电管便开始放电，器件变为短路状态，使电极两端电压不超过击穿电压。
- 气体放电管一旦导通后，它两端的电压会很低。
- 气体放电管有两极和三极之分，可分别用于线间和线-地间的保护。



21:02

电磁兼容整改及对策

126/161

1) 气体放电管的特点

(1) 优点：

- 承受电流大，
- 绝缘电阻高，
- 漏电流小，
- 寄生电容小。



(2) 缺点：

- 点火电压高，残压较高，
- 反应时间慢（ $\geq 100\text{ns}$ ），动作电压精度较低，
- 会慢性漏气、有光敏效应、离散性大。
- 有跟随电流（续流）。若跟随电流的时间较长，会导致放电管触点迅速烧毁，从而缩短放电管的寿命。
- 寿命约为50次（10/1000us，500A峰值电流），随后，导通电压开始降低。

(3) 适用场合：

- 信号线或工作电压低于导通维持电压的直流电源线上（一般低于10V）；
- 与压敏电阻组合起来用在交流电源线上。
- 它具有很强的冲击电流吸收能力，但有着较高的起弧电压，所以比较适合做一级粗保护。

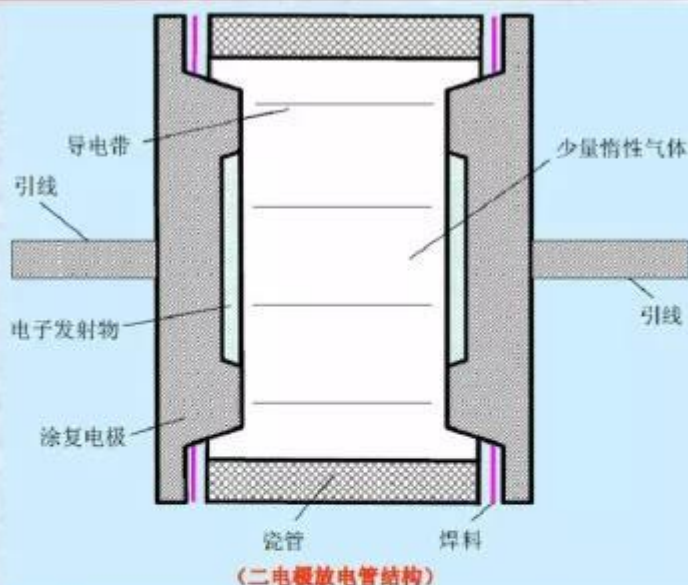
21:02

电磁兼容整改及对策

127/161

2) 气体放电管的选择

- 在直流电路中气体放电管的标称电压选择为工作电压的1.8倍；
- 在交流电路中选择为工作电压有效值的2.5倍。
- 气体放电管标称电流容量应大于被保护电路的可能最大浪涌冲击容量。
- 由于有跟随电流（续流），气体放电管一般不可使用在直流电路中，除非直流工作电压低于气体放电管的击穿维持电压。

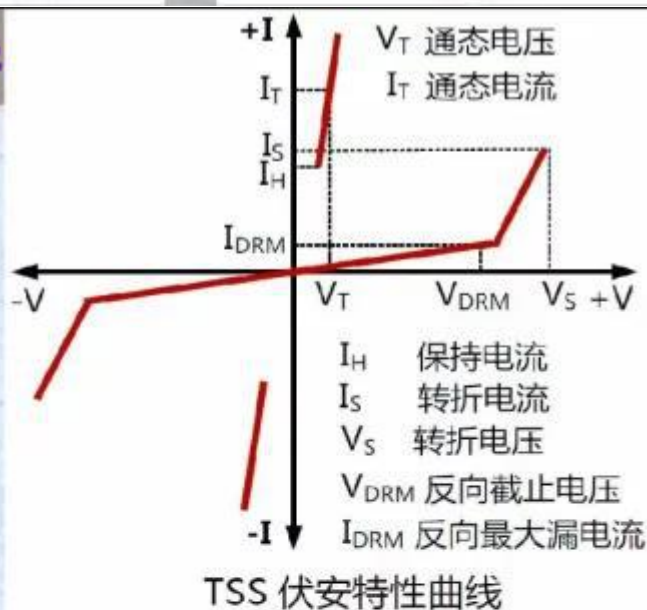


213

10.4.2.4 其他浪涌吸收器件

1) 固体放电管 (TSS)

- 是一种新的瞬变电压吸收器件，与气体放电管一样同属能量转移型保护器件，但性能更理想：
 - 通态压降仅3V左右，接近短路；
 - 纳秒级的响应速度；
 - 动作电压稳定；
 - 使用寿命长；
 - 能双向吸收正/负极性的瞬变电压。
- 固体放电管有一定的结电容；在脉冲状态下触发电压较直流击穿电压稍有提高（如200V的管子其脉冲触发电压为350V），比气体放电管要好得多。
- 与同尺寸芯片的TVS相比，TSS浪涌承受能力大几倍，同时具有较低的结电容，在信号线路中代替TVS管使用可获得较高的浪涌防护等级。
- TSS 选型注意事项：
 - **结电容 (Cj)**：通信线路要注意器件结电容不能对通信造成影响。
 - **续流问题**：不能直接应用于电源线的防护，存在续流问题。



10.4.3 浪涌抑制器件的正确选择和使用

1) GDT、MOV、TVS特点比较

- 选择SPD器件需要考虑的参数主要包括：击穿电压（保护电平）、通流能力、连续工作电压、响应时间等。

典型 SPD 器件特点比较

类型	通流能力	反应时间	残压	极间电容	续流现象	老化极限	价格
GDT	大	慢, 亚 μ s 级	高	小	有	有	便宜
MOV	较大	较快, ≤ 25 ns	较低	大	无	有	便宜
TVS	较小	快, ≤ 1 ns	低	较大	无	无	较贵

- GDT的通流能力很强，能够达到数十千安，但其响应时间较长，达数百纳秒至微秒级，且其失效模式为开路，不利于故障的发现，一般用在浪涌不敏感的设备防护或多级防护电路的第一级。且由于存在续流现象，限制了其在直流电路中的应用。

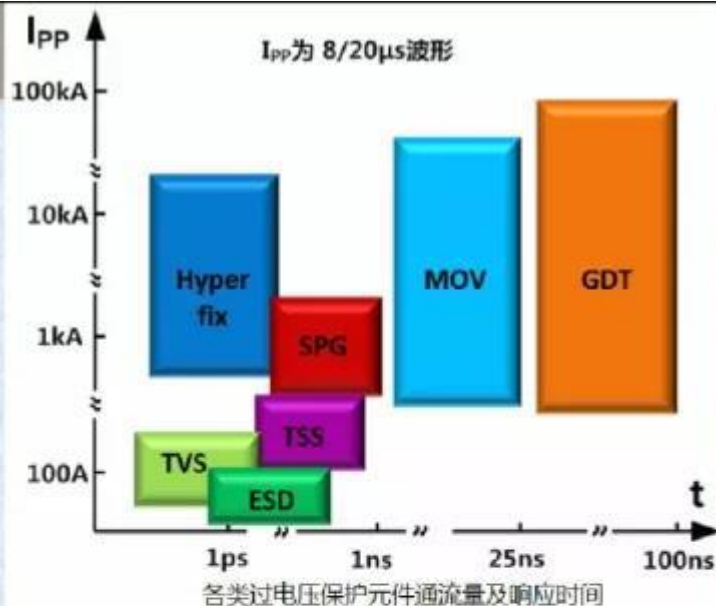
21:02

电磁兼容整改及对策

130/161

2) 各类防护器件综合比较

- **GDT**：为通流量最大器件，其响应时间最慢。GDT的优点是结电容低，绝缘阻抗大，可用于高速通信线路防雷保护，如同轴电缆，电话线接口，高清视频接口、以太网口等。
- **MOV**：通流量仅次于GDT，响应速度为纳秒级，广泛用于交流电源线，低频信号线防雷保护。其结构决定了它在应用过程容易老化。
- 在AC输入端，GDT常和MOV串联到保护地，以减缓MOV的老化。

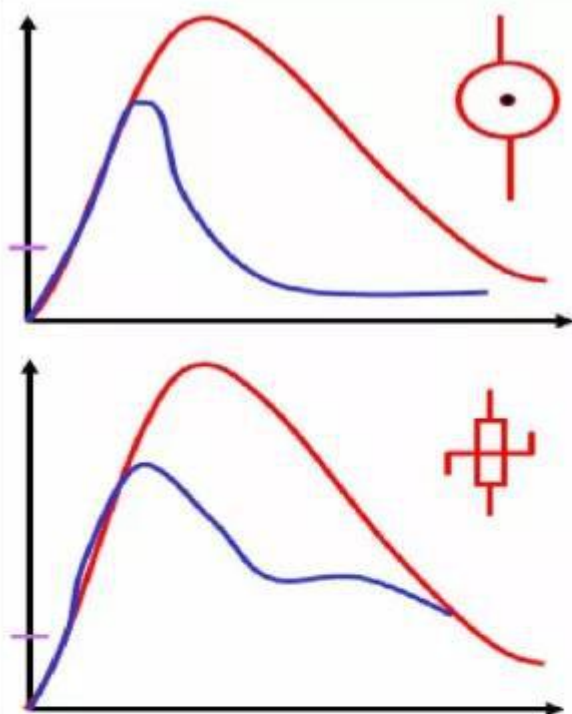
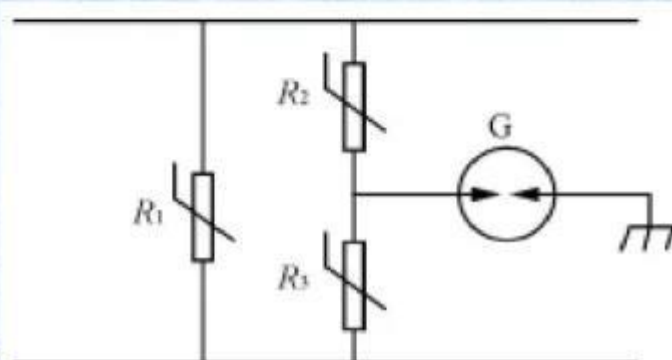
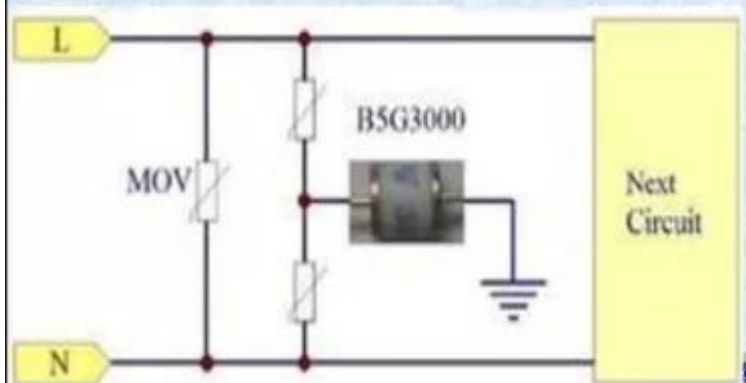


各类过电压保护元件性能对比

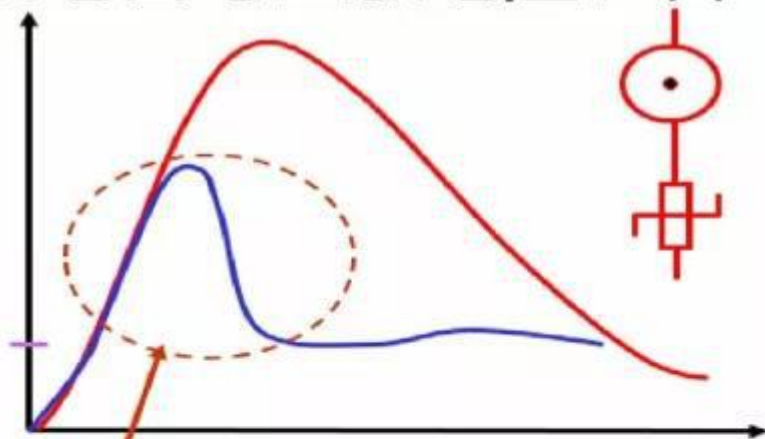
特性	器件	钳位型过压保护器件				开关型过压保护器件		
		MOV	Hyperfix	TVS	ESD	GDT	SPG	TSS
通流量 (8/20 μ s)		大	较大	一般	小	大	较大	一般
响应速度		慢	特快	特快	特快	较慢	快	快
电容		较大	较大	较大	较小	特小	特小	较小
直流击穿电压精度		一般	精准	精准	精准	一般	一般	精准
脉冲击穿电压		低	低	低	低	高	高	低

3) 气体放电管和压敏电阻组合应用

- 气体放电管和压敏电阻都不适合单独在交流电源线上：
 - 气体放电管的问题是它的电流效应。
 - 压敏电阻的问题是随着受浪涌作用的次数增加交流漏电流增加。
- 一个实用的方案是将气体放电管与压敏电阻串联起来使用。
- 如果同时在压敏电阻上并联一个电容，浪涌电压到来时，可以更快地将电压加到气体放电管上，缩短导通时间。
- 这种气体放电管与压敏电阻的组合除了可以避免上述缺点以外，还有一个好处就是可以降低限幅电压值。在这里可以使用导通电压较低（低于工作电压）的压敏电阻。从而可以降低限幅电压值。



放电管与压敏电阻组合



优点：

- 没有跟随电流
- 没有漏电流
- 钳位电压低

- 采用组合式保护能发挥不同保护器件各自特点，从而取得最好的保护效果。
- 浪涌经过压敏电阻和气体放电管后，会残留一个较窄的脉冲，这是由于气体放电管导通点较高所致。
- 由于这个脉冲较窄，因此很容易用低通滤波器滤除。
- 实用的浪涌防护电路是在浪涌抑制器的后面加低通滤波器。

4) 浪涌抑制器件的正确安装及其工作模式

- 需要注意的是，浪涌抑制器件的寿命不是永久的，总会失效。
- 因此，在结构设计上，应该便于更换浪涌抑制器件。
- 并且，当浪涌抑制器件失效时，应该有明显的显示，提醒维护人员进行更换。
- 浪涌抑制器件的失效模式一般为短路，这可以称为安全模式。
- 因为当浪涌抑制器短路时，线路会出现故障，从而提醒维修人员更换浪涌抑制器。
- 但是，也有开路失效模式的可能性，这时往往会给设备带来潜在危险：
 - 因为设备会直接处于没有保护的状态下。

21:02

电磁兼容整改及对策

134/161



4) 浪涌抑制器件的正确安装及其工作模式

- 需要注意的是，浪涌抑制器件的寿命不是永久的，总会失效。
- 因此，在结构设计上，应该便于更换浪涌抑制器件。
- 并且，当浪涌抑制器件失效时，应该有明显的显示，提醒维护人员进行更换。
- 浪涌抑制器件的失效模式一般为短路，这可以称为安全模式。
- 因为当浪涌抑制器短路时，线路会出现故障，从而提醒维修人员更换浪涌抑制器。
- 但是，也有开路失效模式的可能性，这时往往会给设备带来潜在危险：
 - 因为设备会直接处于没有保护的状态下。

21:02

电磁兼容整改及对策

134/161



11.2 射频场感应的传导骚扰抗扰度测试要求

- GB/T17626.6-2008 (IEC61000-4-6、EN61000-4-6) 《电磁兼容 试验和测量技术 射频场感应的传导骚扰抗扰度》为电磁兼容基础标准，产品的射频场感应的传导骚扰抗扰度测试一般按其中的试验方法进行。
- 该项目的测试方法是使受试设备在骚扰源作用下形成的电场和磁场来模拟来自实际发射机的电场和磁场，这些骚扰场是由试验配置所产生的电压或电流所形成的近区电场和磁场来近似表示的。
- 在实际测试时，由相对于参考接地平面（板）具有150Ω共模阻抗的耦合和去耦网络来模拟这种干扰方式。
- 用耦合和去耦装置提供骚扰信号给某一电缆，同时保持其他电缆不受影响，只近似于骚扰源以不同幅度和相位范围同时作用于全部电缆的实际情况。

21:02

电磁兼容整改及对策

137/161

11.3 射频场感应的传导骚扰抗扰度测试的实施

- 由射频场感应的传导抗扰度试验的频率范围：0.15MHz~80MHz。
- 按规定要求在上述频率范围内进行扫描，然而可能需要在所选择的有限频率点进行更综合更全面的功能试验。
- 所选择的频率点如下：0.2，1，7.1，13.56，21，27.12，40.68 MHz（±1%）
- 试验时，在频率范围内以不超过基频的4%步长进行扫描，并以规定试验电平两倍进行试验。
- 有争议时，应按规定试验电平，选择1%的步长进行试验。
- 在每一频率的驻留时间不少于使EUT动作并做出响应所必需的时间，然而扫描期间在每一频率上驻留时间不应超过5s。
- 适用端口:信号、控制端口，电信端口、AC电源端口、DC电源端口

21:02

电磁兼容整改及对策

138/161

11.4 传导抗扰度试验失败原因分析

11.4.1 射频干扰（RFI）传输途径

■ GB/T17626中规定测试干扰注入方法有：

- ①耦合/去耦网络注入（试验布置见该标准图2b）：常用于电源线抗扰度试验，当信号线数目较少时也常采用；
- ②钳（电流钳或电磁耦合钳）注入（试验布置见该标准图6）：特别适用于对多芯电缆试验；
- ③直接注入（试验布置见该标准图5b）：适用于同轴电缆的干扰注入。

- 耦合/去耦网络注入时，干扰信号通过电阻或电容直接注入到被测电缆上；
- 电流钳注入时，干扰信号通过电流钳感性耦合注入到被测电缆上；
- 电磁钳注入时，干扰信号通过电磁钳感性和容性耦合注入到被测电缆上；
- 直接注入时，干扰信号通过电阻注入到被测电缆的屏蔽层上。
 - 对于屏蔽电缆和同轴电缆，干扰只注入到屏蔽层；
 - 对于非屏蔽电缆，干扰注入到电缆中每一芯线上。

21:02

电磁兼容整改及对策

139/161

■ 根据不同的测试方法，RFI可经过多种路径进入EUT并对内部电路形成干扰，如右图所示。

■ 在规定测试频段内，不同频率骚扰信号的路径也不同：

■ 在RFI频率低端（150kHz~10MHz）：

■ RFI主要通过电缆直接进入EUT内部。

■ 在RFI频率的中端（10~50MHz）：

■ 沿被测电缆直接传递进入EUT内部是RFI的主要干扰形式；

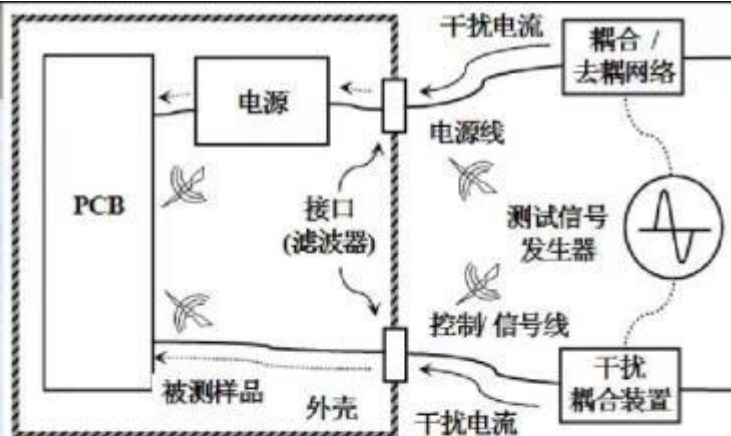
■ 被测电缆与EUT其他部分感容耦合效率已经较高，成为不可忽略的干扰因素。

■ 在RFI频率的高端（50~230MHz）：

■ 沿被测电缆直接传递进入EUT内部的RFI依然是主要干扰形式之一；

■ 被测电缆与EUT其他部分之间的感容耦合也成为产生干扰的重要因素；

■ 同时，RFI通过空间辐射传递的效率已经较高，特别是80~230MHz，RFI通过空间辐射传递已成为干扰的另一主要因素。



21:02

电磁兼容整改及对策

140/161

11.5 电子产品通过传导抗扰度试验的对策

- 为有效解决CS测试出现的敏感性问题，应从外部连接电缆处理、接口滤波、内部电路的抗扰性等几个方面着手。

11.5.1 对被测电缆的处理

- CS测试时，电缆是RFI传输主体，对电缆进行改进，可以有效减少RFI进入EUT内部，提高EUT抗干扰能力。
- 通用处理原则：
 - 将电缆内共地信号传输改为双线平衡双绞线传输；
 - 为电缆内共用返回线的多根信号线各配备一根返回线且信号线与返回线构成双绞线对。

1) 对电源电缆和低频控制或数字信号传输电缆的处理

- 若该类电缆测试不合格，加装滤波器可有效解决问题。
- 若原有滤波器，可通过改造或更换来解决。。
- 若EUT内部有微弱信号处理和放大电路，对通过接口引入的干扰可能非常敏感，被测电缆换成屏蔽电缆可能是必须的。
- 此时应注意屏蔽电缆的接地问题，否则效果可能适得其反。
- 同时必须牢记：非同轴的屏蔽电缆屏蔽层不可以当作信号回线使用！

21:02

电磁兼容整改及对策

141/161

2) 对中低频敏感信号传输电缆的处理

- 若此类电缆测试不合格，可按以下方式处理。
- 对金属机箱或内部可加装有金属参考接地板非金属机箱：
 - 应将非屏蔽电缆改为屏蔽电缆；
 - 若为屏蔽电缆应提高其屏蔽效能；
 - 电缆屏蔽层需与金属机箱或接地平板良好连接。
- 对其他类型机箱：
 - 可将电缆内信号传输改为双线平衡式或同轴电缆传输。
 - 若EUT及其接口不通过地线传输信号且不接地，使用屏蔽电缆，电缆屏蔽层在EUT端悬空并在辅助设备端接地。
- 无论使用哪种传输电缆或传输方式，信号电缆进入机箱后应在过壁处加装共模抑制滤波器。

3) 对高频信号传输电缆的处理

- 若此类电缆测试不合格，可采取措施包括：
 - 将非同轴电缆改为同轴电缆；
 - 若原为同轴电缆，应提高其屏蔽效能；
 - 电缆屏蔽层在穿过金属机箱时与机箱与360°环接，穿过机箱后依然用同轴电缆连接到内部PCB上。
 - 电缆进入机箱后可在机箱内靠近入口加装共模滤波器。

21:02

电磁兼容整改及对策

142/161

11.5.2 接口滤波

- 对CS测试，滤波器可以在电缆接口处建立一个屏障，将干扰隔离在接口外而让有用信号无阻碍传输，从而可有效防止干扰通过被测电缆进入EUT内部。

1) 电源线接口的滤波

对金属机箱：

在电缆进入机箱接口处安装电源滤波器。

- 滤波器采取过壁安装方式与金属外壳形成一个整体，并通过外壳将滤波器输入输出隔离。
- 不是所有的电源滤波器都能满足CS测试要求：
 - 部分抑制频率范围可能只到30MHz；
 - 部分只是单方向的干扰抑制能力比较强。
- 因此，若电源电缆CS测试不合格，可能需要对原有电源滤波器进行改造，扩展其抑制干扰频率范围，并提高对外部共模干扰抑制能力。

对非金属机箱：

- 若箱内可加装参考接地金属板，则滤波器要求与金属机箱相同，电源滤波器安装在该接地板上；
- 否则，滤波器应选择无需接地的共模扼流圈并安装在电源线进入机箱处。
- 若电源线中包括保护接地线，必要时该线也要滤波，以防止干扰通过该线传输。

21:02

电磁兼容整改及对策

143/161

2) 信号和控制线接口的滤波

- 对信号和控制线接口可使用共模扼流圈滤波。
- 若EUT为金属机箱可在共模扼流圈的两端安装对机箱高频滤波电容以构成 π 形滤波器，该滤波电容的大小应以不影响信号的正常传输为限。
- 若接口处原有滤波器，可通过改进以提高其共模抑制特性。

3) 同轴线接口的滤波

- 同轴电缆进入机箱后可在机箱内入口加装共模扼流圈（通过同轴电缆在磁环上并绕10~15圈获得），
- 若单个扼流圈对共模干扰衰减不够，可加装多个扼流圈以拓展其抑制频率范围，并提高共模衰减值。

21:02

电磁兼容整改及对策

144/161

11.5.3 提高EUT内部电路的抗扰性

- 仅通过以上措施可能无法完全解决CS问题，此时需要提高EUT内部电路抗扰性。

1) EUT内部互连电缆的处理

- 进出PCB的较长连接线应在PCB接口处滤波；
- 高频信号传输应采用同轴电缆；
- 敏感小信号传输应使用屏蔽电缆；
- 非屏蔽的数字/控制传输电缆可让输出线和返回线两两双绞；
- 扁平电缆尽量在每根信号线旁边配一根地线并两两双绞，条件不允许时，至少应为每两根信号线配一根地线；
- 电缆走线尽量紧贴金属外壳或接地平板且远离金属外壳上的缝隙、开口；
- 电缆在满足连接情况下尽可能短且尽量不要相互捆扎在一起。

21:02

电磁兼容整改及对策

145/161

2) EUT内部电路的处理：

对模拟电路：

- 在PCB布线时在敏感信号线旁应有地线保护并尽量缩短线长度以尽量减小敏感信号回路的环路面积。
- 对敏感信号采用平衡方式传输。
- 对小信号放大器应尽可能增大放大器的线性动态范围，减少非线性失真；
- 对PCB引出的模拟信号传输端口建议数字化或变压器隔离。
- 对直流放大器，建议采用斩波稳零放大器。
- 应设计和选用自身抗干扰能力强的电子线路(包括集成电路)作为设备的单元电路。

对数字电路：

- 对数字IC，所有未使用的输入端口与地或电源连接，不可悬空；
- 对输入信号，电平触发比边沿触发抗干扰能力强得多；
- 对智能芯片，在软件中加入抗干扰指令并采用看门狗电路是必要的；
- 与外部连接的接口，带选通功能的接口芯片比不带的具有更强抗干扰能力；
- 尽量使用大规模IC，以获得较小的信号传输环路面积，提高其抗扰性；
- 对PCB引出的数字信号建议采用光耦隔离、变压器隔离或直接用光纤传输。

21:02

电磁兼容整改及对策

146/161

PCB输入输出接口（I/O）：

- I/O接口上使用独立的地，这块独立地与PCB上的其他部分地仅通过一点连接，是专门为接口滤波和屏蔽层提供的“干净”地；
- 在I/O区域将“干净”地与机壳以非常低的阻抗连接起来；
- 将所有I/O电缆集中在PCB设定的I/O区域；
- I/O接口驱动电路排版时要靠近I/O连接器；
- 对所有I/O接口进行共模滤波；
- PCB上的I/O滤波器应安装在驱动电路和I/O连接器之间并尽量靠近I/O连接器。

3) EUT内部其他处理措施

结构与布局：

- 包括对总体布局的检验、电缆布线和分配、孔缝的位置检验和印制板布局方位的检验等。
- 应做到机箱上的缝隙或孔洞尽量远离敏感电路；
- 不要有任何金属物体直接穿过金属屏蔽机箱；
- 输出与输入端口妥善分隔，敏感电路和带干扰信号电路尽可能远离。

接地与搭接：

- 接地是抑制噪声和防止干扰的重要措施之一。
- 设计中应周密设计地线系统，并结合使用滤波和屏蔽等措施可有效提高设备的抗干扰能力。

21:02

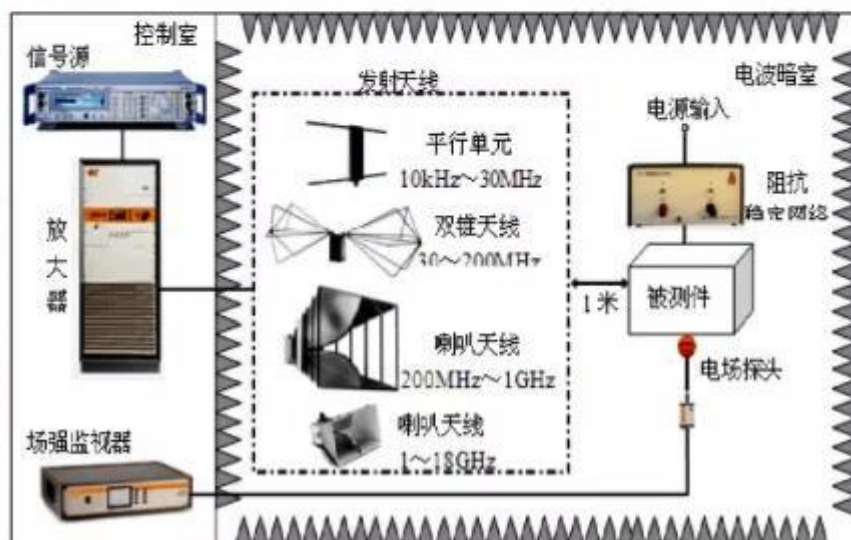
电磁兼容整改及对策

147/161

12. 射频连续波辐射抗扰度测试常见问题对策及整改措施

12.1 辐射射频电磁场形成机理

- 设备所遭受的射频电磁场可能影响设备和系统的可靠运行。
- 电磁辐射以某种方式影响大多数的电子设备。
- 如维修和保安人员操作着的小型手持无线电收发机、固定无线电广播、电视台的发射机、车载无线电发射机和各种工业电磁源均会频繁地产生这种辐射。
- 除了有意产生的电磁能以外，还有一些设备产生杂散辐射，例如电焊机、晶闸管整流器、荧光灯、感性负载的开关操作等。
- 射频电磁场辐射抗扰度测量就是对电气、电子设备抵抗电磁辐射能力的评价，以确定其是否满足标准要求。



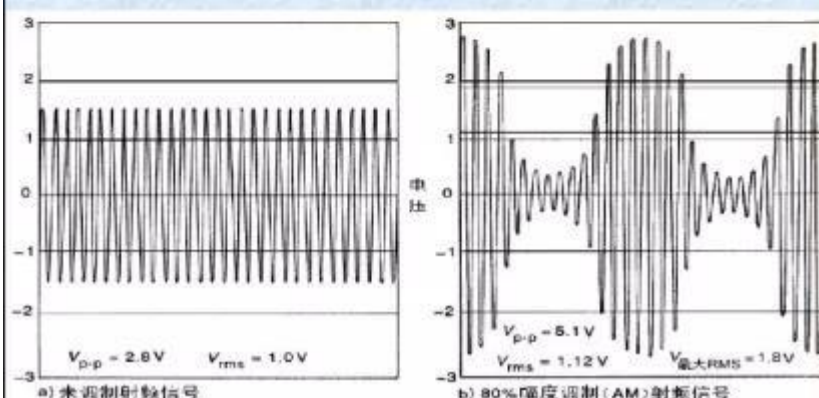
21:02

电磁兼容整改及对策

148/161

12.2 射频电磁场辐射抗扰度测试要求

- GB/T17626.3-2006 (IEC61000-4-3、EN61000-4-3) 《电磁兼容 试验和测量技术 射频电磁场辐射抗扰度试验》为电磁兼容基础标准，产品的辐射射频电磁场抗扰度测试一般按其中的试验方法进行。
- 射频辐射抗扰度试验的推荐频率范围：80MHz~2000MHz。
- 按规定要求在上述频率范围内进行扫描，然而可能需要在所选择的有限频率点进行更综合更全面的功能试验。
- 所选择的频率点如下：80，120，160，230，434，460，600，863，900MHz ($\pm 1\%$)



12.3 射频电磁场辐射抗扰度测试的实施

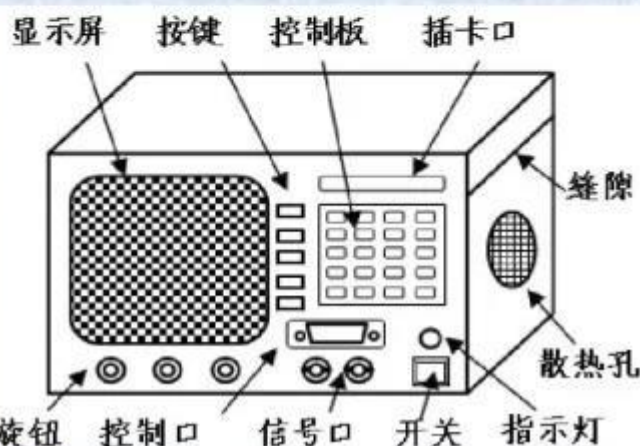
- 试验时，EUT放置应使其四个面按顺序暴露在电磁场中，并在每个位置考核EUT的性能。
- 如果在全频段内已知EUT最敏感的面，则可仅对其敏感面进行试验。
- 在有争议的情况下，应选择对EUT的四个侧面进行试验。如果EUT太大，天线不能充分辐照，应使用局部辐照方式进行试验。
- 局部辐照应按下列方法进行：
 - 为使EUT超出天线束的这些部位得到辐照，应改变EUT放置位置。
 - 当EUT由一些独立的模块组成，这些模块可分别在天线波束内进行试验。
- 在有争议的情况下，应选择对EUT全面辐照试验。
- 试验时，在频率范围内以不超过基频的4%步长进行扫描，并以规定的试验电平两倍的场强值进行试验。
- 在有争议的情况下，应按规定的试验电平，选择1%步长进行试验。
- 在每一频率的驻留时间不少于使EUT动作并做出响应所必需的时间，然而扫描期间在每一频率上驻留时间不应超过5s。

12.4 射频辐射抗扰度试验失败原因分析

- RS测试时干扰是通过空间辐射施加到EUT上的。当这些干扰进入EUT内部电路，会影响模拟信号的输入输出与预期输出偏离，造成数字电路的控制失效或误动作，以及微处理器的程序出错、存储和读取数据错误。

12.4.1 射频干扰（RFI）传输途径

- 首先，RFI会通过EUT外壳直接进入内部，被内部传输电缆、PCB布线和电子元器件所接收，对电路形成干扰。
- 当EUT为非金属外壳，RFI可以毫无阻拦地进入内部，此时若出现RS测试失败，应首先考虑外壳原因。
- 当EUT为金属外壳，外界RFI依然可以通过多种途径进入内部。
- 一般实际使用的电子设备外壳不可能完全封闭，都会存在各种孔、洞、缝隙等。
- 右图所示为一电子设备金属外壳示意图
- 存在的开口有：显示屏、旋钮、按键、控制面板、开关、指示灯、散热孔、控制和信号接口、插卡口、外壳各部分间连接缝隙等。
- 若这些开口设计不合理或使用不当，很容易成为外界RFI进入EUT内部的通道。

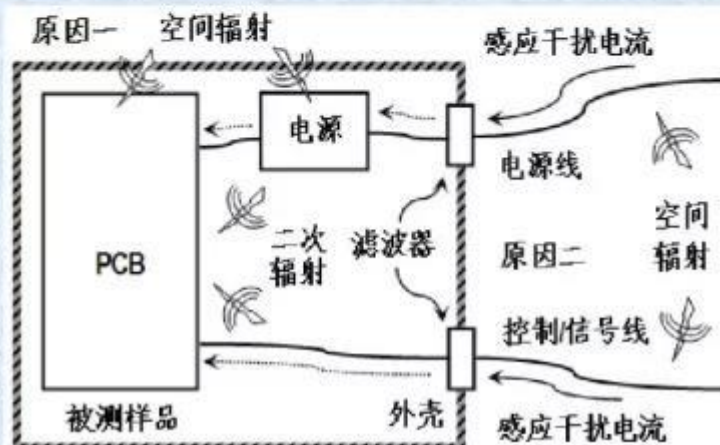


21:02

电磁兼容整改及对策

151/161

- 其次，EUT正常工作时会连有电源线和各种输入/输出控制、信号线缆，相对设备外壳，这些连接线一般都较长，会成为非常有效的RFI接收天线，这些感应有RFI的连接线进入设备时若没有良好滤波，必然会将外界RFI带入内部电路形成干扰。对带屏蔽的连接电缆，若屏蔽不良，或屏蔽层连接不当，RFI也会通过该电缆进入EUT内部。
- 第三，内部电缆与内部电路板（PCB）之间或内部PCB相互之间也会出现RFI辐射感应。部分EUT内部有较多或较长的连接电缆，若EUT外壳屏蔽不良，这些电缆也会感应到RFI，或者感应有外界RFI的连接线进入设备内部，这些线缆上的RFI也会通过二次空间辐射传输到PCB上形成干扰。
- 另外，若内部PCB之间无直接电气连接，或互连接口有滤波，若某一PCB感应有RFI，这些RFI也会通过二次空间辐射到其他PCB上形成干扰。



21:02

电磁兼容整改及对策

152/161

12.5 射频电磁场辐射抗扰度问题对策

- 为有效解决射频抗扰度 (RS) 问题, 应从连接电缆、外壳屏蔽和内部电路三个方面着手。

12.5.1 隔离EUT连接电缆的射频干扰感应

- 电缆感应是射频干扰进入EUT内部的主要通道, 当EUT有外部电缆时, 射频干扰在屏蔽电缆的屏蔽体, 非屏蔽电缆的所有导体上感应出射频共模电流。

1) 对电源电缆和低频控制或数字信号传输电缆的处理

- 电源电缆传输的是工频率交流或直流电源:
- 对金属机箱, 可通过在电源电缆机箱接入口处安装电源滤波器来解决, 该滤波器应在金属外壳上采取过壁安装的方式与外壳形成一个整体。该滤波器应具有良好的射频干扰抑制能力, 以抑制从外部进入EUT的共模射频干扰为主。
- 对非金属机箱, 可通过在电源线进入机箱处加装共模扼流圈来解决。
- 若测试不合格问题出在低频控制或数字传输电缆上:
- 可在电缆进入机箱处加装共模扼流圈。若接口处原有滤波器, 应改善其高频滤波特性。
- 通过将电缆的信号传输方式改为双线平衡传输, 并加上必要的共模滤波, 也可较好解决此类问题。

21:02

电磁兼容整改及对策

153/161

2) 对中低频敏感信号传输电缆的处理

- 若不合格由中低频敏感电缆引起, 可采取措施包括:
- 对金属机箱或内部可加装有参考接地板非金属机箱:
 - 应将非屏蔽电缆改为屏蔽电缆;
 - 若为屏蔽电缆应提高电缆屏蔽层的屏蔽效能;
 - 屏蔽电缆在进入金属机箱时屏蔽层应与外壳在入口处360°环接;
 - 或电缆在进入非金属机箱后用金属环将屏蔽层紧固在接地板上。
- 对非金属机箱: 应将电缆内信号传输方式改为双线平衡传输或同轴电缆传输。信号电缆进入机箱后应加装共模抑制滤波器。

21:02

电磁兼容整改及对策

154/161

3) 对高频信号传输电缆的处理

- 若RS测试不合格由高频电缆引起，可采取措施包括：
 - 将传输电缆改为同轴电缆；
 - 若原为同轴电缆，应提高电缆屏蔽层的屏蔽效能；
 - 单层屏蔽的同轴电缆在穿过金属机箱时，屏蔽层与机箱与360°环接，穿过机箱后依然用同轴电缆连接到内部PCB上，必要时可在内部同轴电缆靠近机箱入口处加装共模磁环；
- 对金属机箱可采取双层屏蔽的同轴电缆，两层屏蔽之间绝缘，外层屏蔽在入口处与机箱360°环接，内层屏蔽与信号线一起进入PCB；
- 对非金属机箱，电缆可在机箱内靠近入口处加装共模磁环，若单个磁环不够可加装多个。

21:02

电磁兼容整改及对策

155/161

12.5.2 加强EUT外壳的屏蔽

1) 金属机箱的处理

- 就机箱屏蔽来说，机箱本身导电结构的连续性是最重要的。
- 影响机箱导电连续性的因素有：
 - ①接缝的不平整、接缝表面污染及油漆等装饰性绝缘材料等。
 - ②机箱表面必要的孔洞，如操作、显示、输入输出接口及通风等。
 - 此外，与屏蔽无关的导体穿过机箱也会给屏蔽带来致命损失。
- a) 外壳孔洞的处理：外壳屏蔽性能取决于孔洞相对射频干扰波长的尺寸。应尽量减少孔洞尺寸。
- b) 外壳接缝的处理：对机箱不必拆卸的结构件，最好直接缝焊。对外壳不可避免的接缝，结合面应尽可能平整，紧固件数目要足够。要尽量避免接触面之间的原电池效应。
- c) 电磁密封处理：电磁密封衬垫可解决因缝隙小的凹凸造成的屏蔽问题。电磁密封衬垫安装在两块金属结合处，可充满缝隙，消除导电不连续点。

21:02

电磁兼容整改及对策

156/161

d) 显示窗口的处理：

- 对小显示器件（如LED）若存在问题，可将LED缩回外壳内部，通过穿过小孔的塑胶光导将其光线引出。
- 对较大显示器件，有两个办法：
 - 一种是在显示窗口使用透明屏蔽材料：如导电薄膜或夹有金属丝网的玻璃；
 - 另一种是使用屏蔽隔舱：将显示单元做一个与箱内屏蔽隔离的单独隔仓，显示单元与箱内连线均通过过壁滤波器连接。

e) 通风孔的处理：

- 通风口开孔不当时可将大开口改为密布小圆孔或小六角形孔。
- 必要时安装适当的电磁防护罩，如：防尘屏蔽通风板、截止波导通风板等。
 - 防尘通风板是由多层金属丝网（铝合金丝网）组成。
 - 高性能铜或钢制截止波导板由带框架蜂窝状介质构成，可以确保好的屏蔽性和通风效果。

f) 控制轴的处理：

- 电位器和控制元件的金属轴穿过外壳可将外部RFI引入EUT并影响外壳导电连续性。
- 为了达到屏蔽的完整性，可用非金属的轴代替金属轴；
- 若还存在开孔的泄漏，可在非金属轴与外壳之间使用圆柱形截止波导管。

2) 非金属机箱的处理

- 首先，对RS测试敏感的EUT尽量不要采用非金属机箱。
- 若因为美观或外壳开模，无法更换为金属机箱，可对非金属机箱内部电路加上金属外壳，使其成为事实上的金属机箱。
- 若内部空间有限，无法加装金属外壳，可在非金属外壳内壁喷涂高导电涂料，使其满足必要的屏蔽要求。
- 若只是局部电路敏感，也可只针对局部电路屏蔽，从而降低处理成本。

12.5.3 提高EUT内部电路的抗扰性

- 通过处理外壳屏蔽和连接电缆依然无法解决问题时，需采取措施提高EUT内部电路的抗扰性。

1) EUT内部互连电缆的处理

- 所有进出PCB的较长连线在接口处均应滤波（可在线缆接口处加共模扼流磁环、磁夹）。
- 所有较长高频信号线应使用同轴电缆；
- 所有较长小信号敏感线应使用屏蔽电缆；
- 数字和控制线可用双绞线。
- 所有内部走线尽量紧贴金属外壳或金属参考接地平板；
- 电缆应远离金属外壳上缝隙、开口；
- 所有走线在满足连接情况下尽可能短且尽量不要相互捆扎在一起；
- 扁平电缆尽量在每根信号线旁边配一根地线，至少每两根信号线间配一根地线。

21:02

电磁兼容整改及对策

159/161

2) EUT内部电路的处理：

■ 对模拟电路的措施：

- PCB上敏感信号线旁边紧邻铺设地线并尽量缩短其连线，以尽量减小环路面积。
- 对敏感电路采用平衡传输可有效抑制共模干扰。
- 应设计和选用防干扰能力强的电子线路或IC。
- 应尽可能增大放大器线性动态范围，以避免对射频干扰解调。
- 对模拟信号传输口建议数字化或变压器隔离。

■ 对数字电路的措施：

- 对数字IC，所有未用输入口与地或电源连接，不可悬空；
- 对智能芯片，电平触发比边沿触发抗干扰能力强得多；
- 智能电路在软件中加入抗干扰指令并采用看门狗技术是必要的；
- 与外部连接接口，带选通功能接口芯片比不带的具有更强抗干扰能力；
- 尽量使用大规模集成电路，这样可以获得很小环路面积以提高抗扰性；
- 对PCB引出的长线建议光耦或变压器隔离。

■ PCB输入输出接口（I/O）处理：

- I/O接口上使用独立地，该地与PCB上其他部分地仅一点连接，这块地专门为滤波和屏蔽提供“干净”地。
- 在I/O区域将逻辑地单独引出。
- 对所有I/O接口要靠近连接器。



医课汇
公众号
专业医疗器械资讯平台
WECHAT OF
HLONGMED



hlongmed.com
医疗器械咨询服务
MEDICAL DEVICE
CONSULTING
SERVICES



医课培训平台
医疗器械任职培训
WEB TRAINING
CENTER



医械宝
医疗器械知识平台
KNOWLEDG
ECENTEROF
MEDICAL DEVICE



MDCPP.COM
医械云专业平台
KNOWLEDG
ECENTEROF MEDICAL
DEVICE

I/O接口驱动排板时

21:02

160/161

