



电子产品的电磁兼容设计

EMC design techniques of electrical and electronic products

恩宁安全技术（上海）有限公司 徐强华

目 录

第一部分： 电磁兼容基础

1.1 电磁兼容定义

1.2实现电磁兼容三要素

1.3电磁兼容与安全

第二部分： 电子产品的电磁兼容性设计

2.1电磁兼容性设计应遵循的原则

2.2电源适配器EMC电路设计原理

2.3如何理解屏蔽

2.4滤波

2.5接地

2.6 X电容器、Y电容器3

2.7 电磁兼容性设计-总结

第三部分： 电磁兼容测试技术

3.1电磁兼容测试分类

3.2电磁骚扰（EMI）测试

3.3抗扰度（EMS）测试

第四部分： 如何适应用户需求

4.1 认证测试的局限性

4.2如何理解多变的负载特性

4.3如何适应多变的使用环境

第五部分： 常见问题及解决方法

5.1 EMC测试原理与干扰实质

5.2开关电源的骚扰源分析

5.3辐射骚扰的整改方法

5.4传导骚扰的整改方法

5.5如何实现电磁兼容

第六部分： 现场问题解答

第一部分：

电磁兼容基础

- 1.1 电磁兼容定义
- 1.2 电磁兼容三要素
- 1.3 电磁兼容与安全

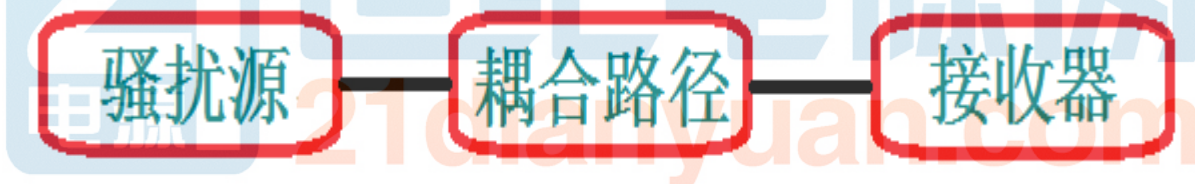
1.1 电磁兼容定义

电磁兼容Electromagnetic Compatibility（简称EMC），国际电工委员会（IEC）名词术语标准IEC60050（161）《电磁兼容术语》的解释为：

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能力。

1.2 电磁兼容三要素

- EMC系统可理解为：由骚扰源、耦合路径以及接收器（敏感电路）组成：



- 1、骚扰源抑制
- 2、在耦合路径抑制骚扰
- 3、提高接收电路抗干扰能力

1.3 电磁兼容与安全

- 几个标准规定的泄漏电流值：

Standard	Limit specification		
MIL-STD 461	Leakage current	\leq	3.5 mA
	capacitor C_Y	\leq	0.1 μF for 60 Hz
			0.02 μF for 400 Hz
Underwriter's Laboratories (UL)	Leakage current	\leq	5 mA
IEC 380	Leakage current	\leq	3.5 mA for equipment housed in grounded metal case (Class II)
		\leq	0.75 mA for Class-I portable (< 18 kg) equipment
		\leq	0.75 mA for double-insulated equipment (Class II)

第二部分：

电子产品电磁兼容性设计

2.1 电磁兼容性设计应遵循的原则

2.2 电源适配器EMC电路设计原理

2.3 如何理解屏蔽

2.4 滤波

2.5 接地

2.6 X电容器、Y电容器

2.7 电磁兼容性设计-总结

2.1 电磁兼容性设计应遵循的原则

- 通常一个电子设备电磁兼容性的实现要经过设计、试验、调整、工艺、应用等阶段。
- 电子设备的电磁兼容性的设计实质，是电磁兼容控制技术如何实施的问题。
- 电磁兼容控制技术包括：**PCB合理布局、屏蔽、滤波、合理接地等。**
- 随着电子系统的集成化、综合化程度的提高，各种措施的应用往往会与成本、质量、功能要求产生矛盾，所以我们必须权衡利弊研究出最合理的措施来满足电磁兼容性要求。

电磁兼容性设计应遵循的原则

- 1、电子、电器产品内部的干扰来源于寄生耦合，抑制电子设备内部干扰在于抑制形成寄生耦合公共电抗的那些寄生参数。
- 在电子、电器产品的同一个电磁空间内，电路布置应遵循强、弱电分开的原则。
- 在实际布线走向布置时，将各种工作频率的传输线分开。
- 改良产品的设计方略，从线路布置，外壳屏蔽等方面，控制噪声传输路径的数量，由多到少。

电磁兼容性设计应遵循的原则

- 2、在产品设计开始时应使噪声源在保证产品或设备所固有的电气性能的前提下，控制噪声源的直接发射强度，由强到弱。
- 选用先进的电子电气线路，去除产品不必要的附加性能，控制噪声源的数量，由多到少。
- 同时应考虑可能发生的各种不良电磁现象，采取相应的控制措施，如在电路板上留下抑制器件的位置等。
- 产品试制时，在产品符合电磁兼容性前提下，通过试验逐一将价格较为昂贵的元器件去除。

电磁兼容性设计应遵循的原则

- 3、产品处于强磁场中的地线不应形成闭合回路，以免感应出地环路电流而造成干扰。
- 产生电磁场较强的元件和对电磁场敏感的元件，在布置时，应互相垂直、远离或加以屏蔽，以防止或减小互感耦合。
- 4、各级电路最好按电原理图排列布置，尽量避免使各级电路交叉排列布置。
- 应使电原理图的各级电路自成回路。

电磁兼容性设计应遵循的原则

- 5、电路的电磁干扰就是电磁噪声造成的不良效应。一般来说噪声是很难消除的，但是我们可以设法降低噪声的强度，使其不致形成干扰。
- 通常我们应优先考虑传导控制措施，在传导措施无法控制时，再行考虑采取屏蔽控制措施。
- 小范围的屏蔽效果要比大范围的屏蔽效果好。
- 要使抑制有良好的效果，往往需要同时采取几种抑制干扰措施。
- 在干扰、抗干扰要求特别高的场合使用屏蔽电缆甚至光缆，进行电子、电器线路间信号或控制量的传输。

电磁兼容性设计应遵循的原则

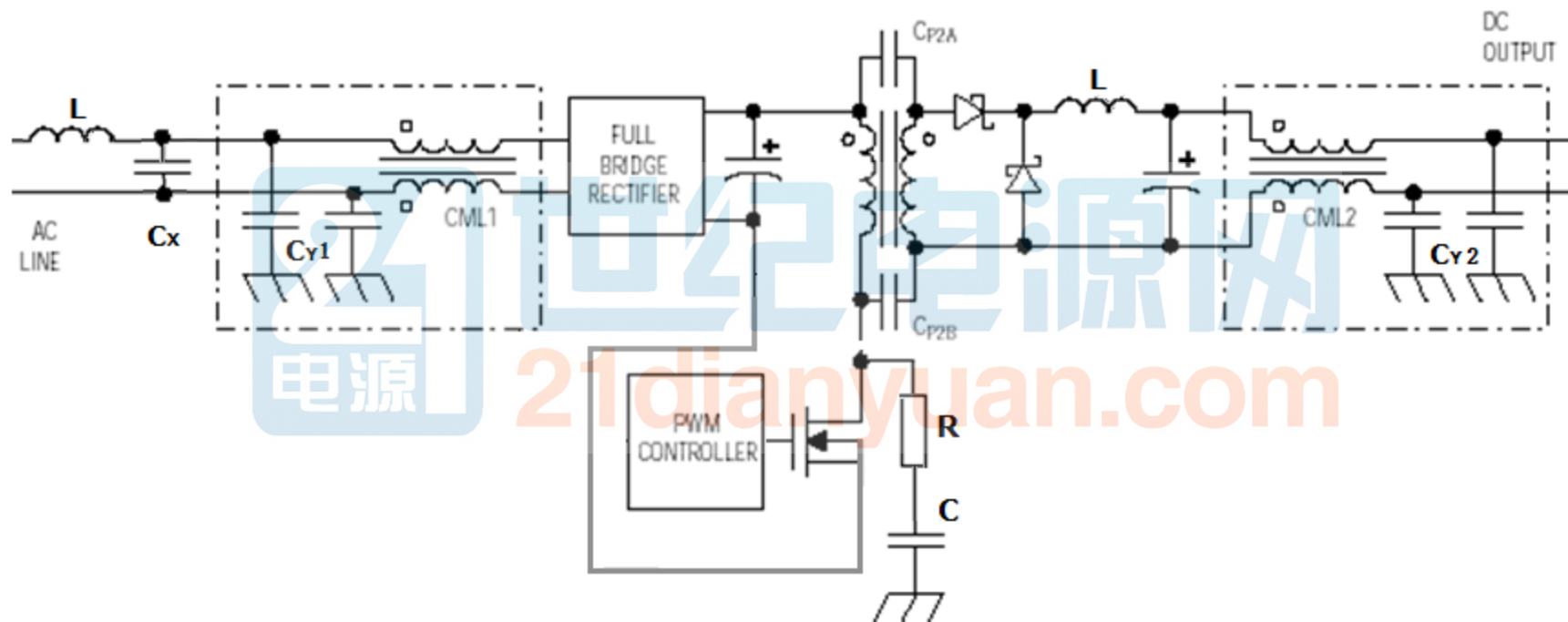
- 6、接地的意义可以理解为一个等电位或等电位面，它是电路或系统的基准电位，但不一定是大地电位。电路接地有以下两个原因：
 - 1) 为了安全；
 - 2) 对信号电压有一个基本参考点。
- 保护地线必须在大地上；而信号地线根据设计要求可以是大地电位，也可以不是大地电位。但需要特别注意的是：当保护地线的电位与信号地线配合不好时，就会引起噪声。所以，接地设计有两个基本目的：
 - 1) 消除各电路电流流经一个公共地线阻抗时所产生的噪声电压；
 - 2) 避免受磁场和地电位差的影响，即不是其形成地环路。
- 如果接地方式处理得不好就会形成噪声耦合。

电磁兼容性设计应遵循的原则

- 7、在生产、物流水平日益发达的今天，电子、电器产品设计时必须考虑产品的原材料、加工、贮存、运输及调试等诸多因素，掌握和合理利用生产、流通中的必然规律，并尊重事物其客观发展的原则等。

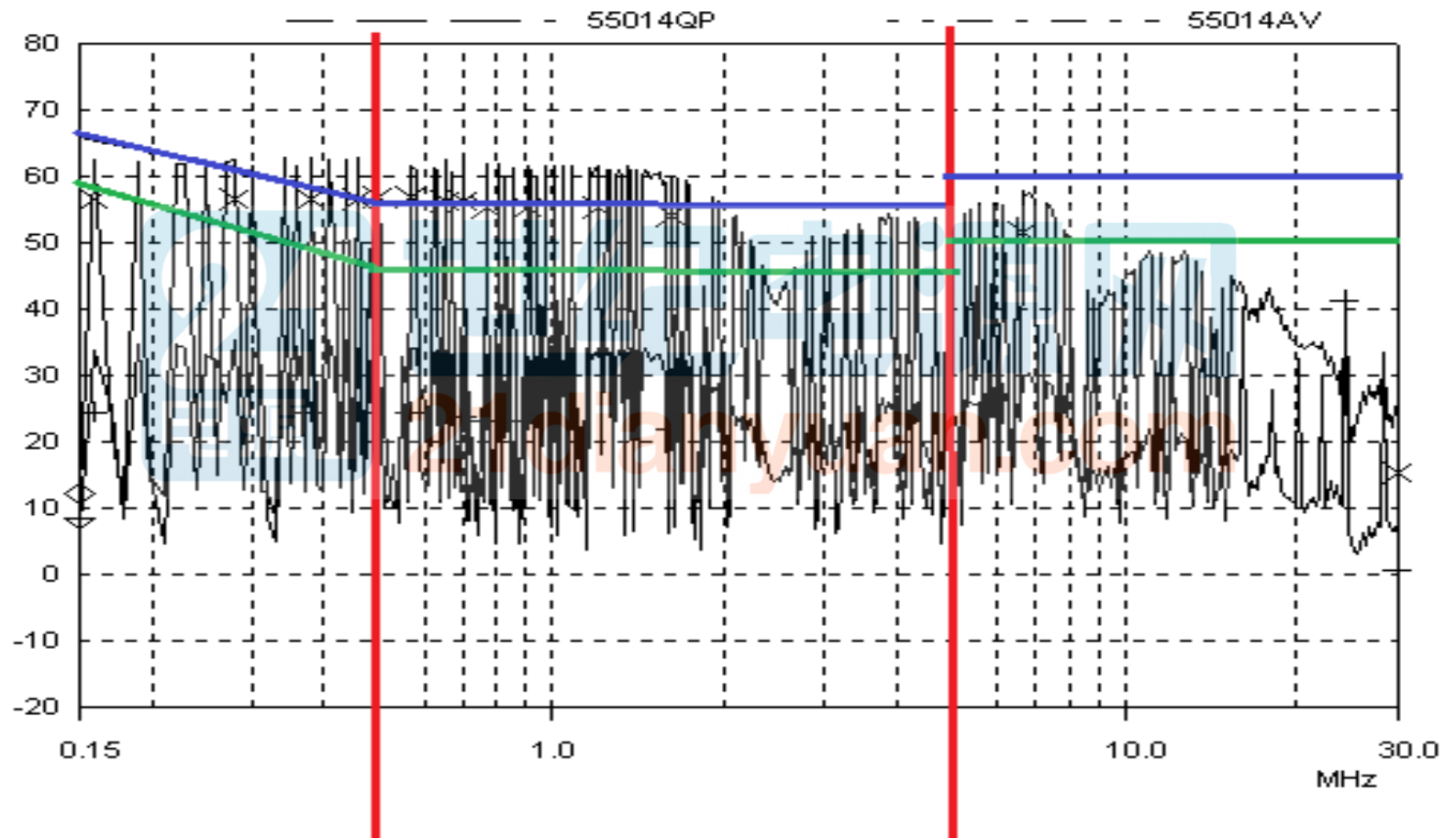


2.2 电源适配器EMC电路设计原理

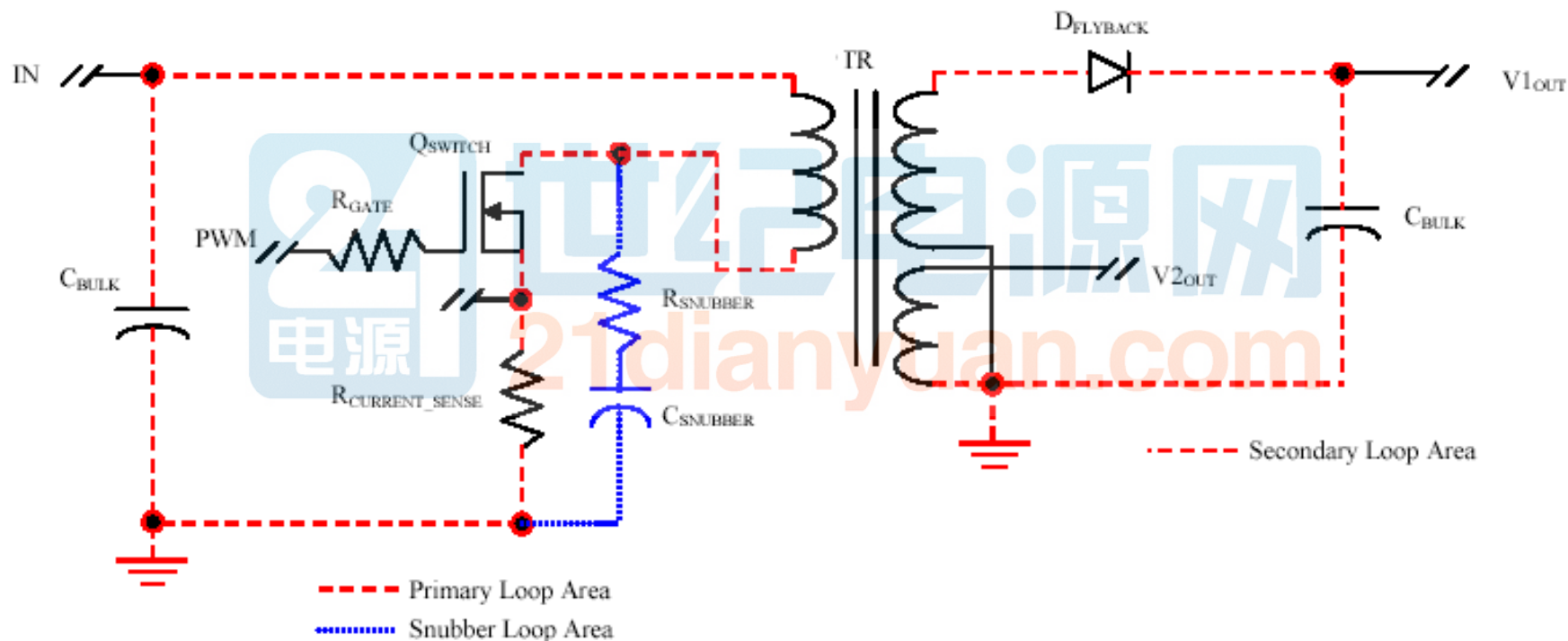


- 在这个典型的电源中，共模滤波器可降低输入、输出侧的噪声。

开关电源EMI 各个频段超标的对策



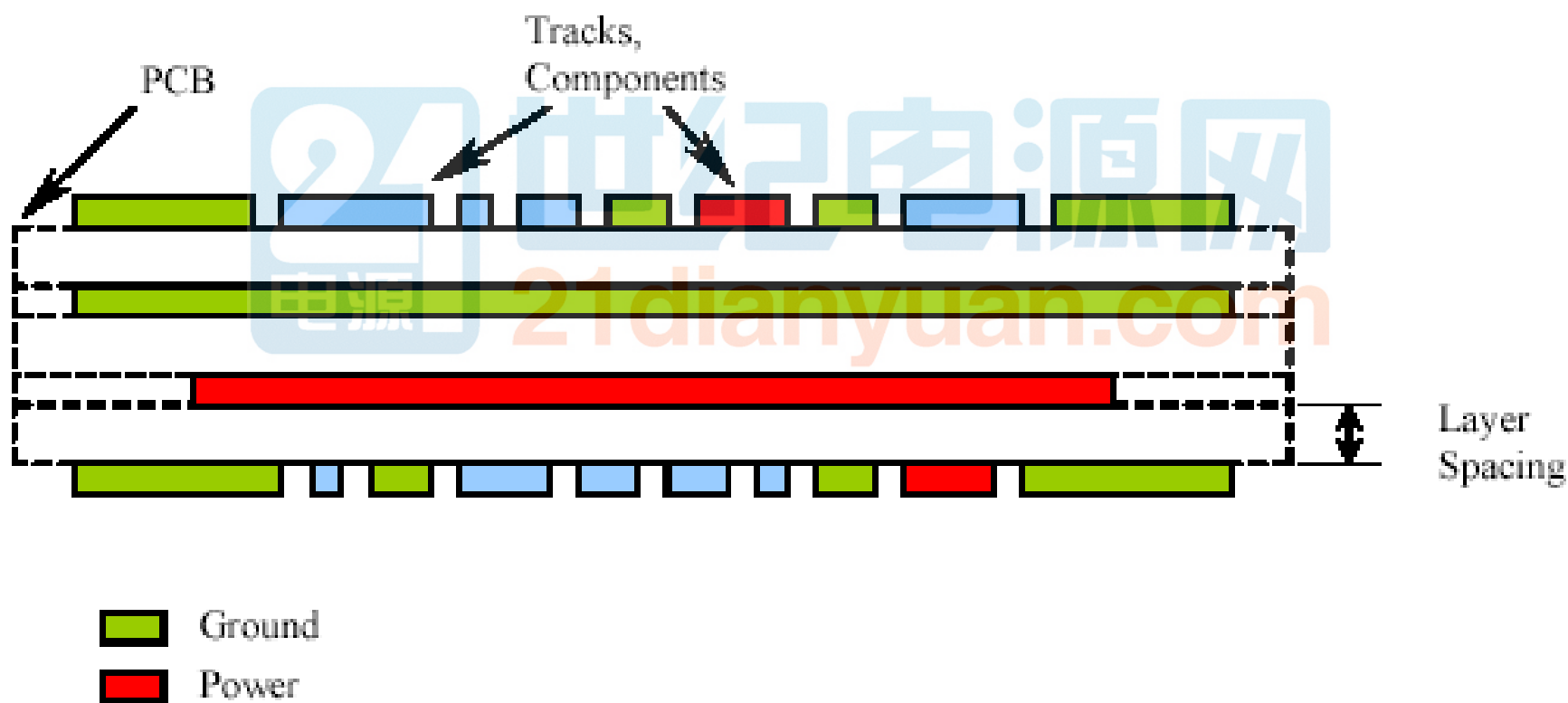
电源适配器电路骚扰抑制原理



为可能产生的干扰信号，提供合适的回路。

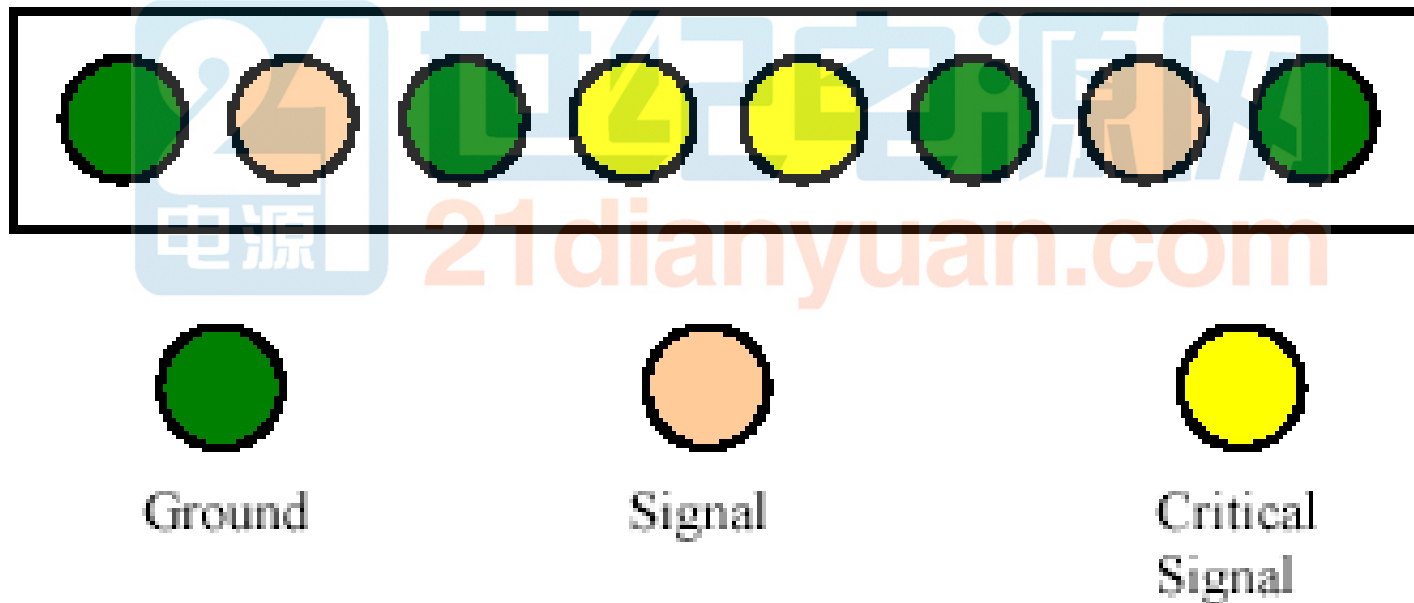
2.3 如何理解屏蔽

PCB板的屏蔽设计



2.3 如何理解屏蔽

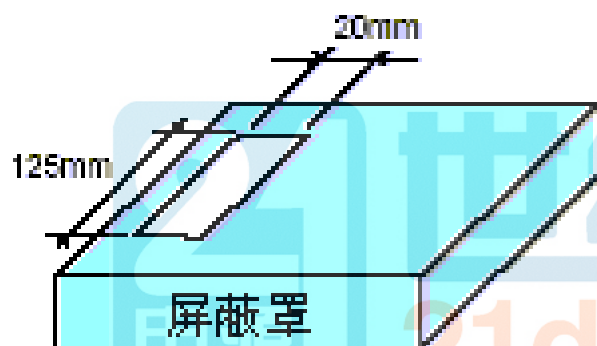
排线的屏蔽设计



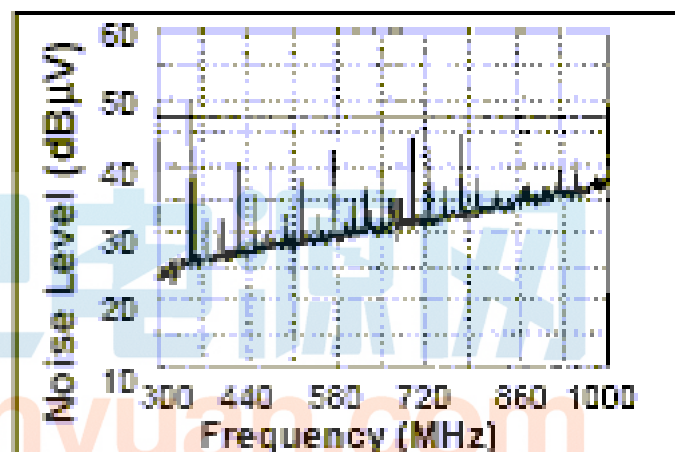
屏蔽罩开口形状与辐射噪声泄漏的关系

开孔面积

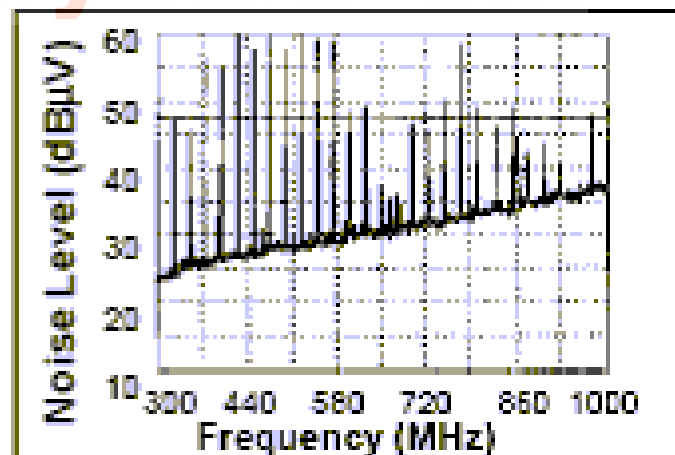
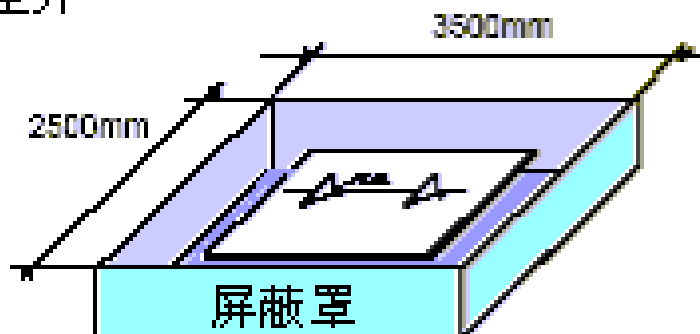
125mm X 20 (2500mm²)



辐射噪声 (信号频率: 25MHz)



全开



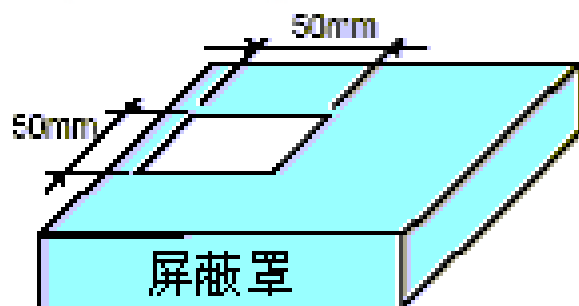
屏蔽罩开口形状与辐射噪声泄漏的关系

开孔面积

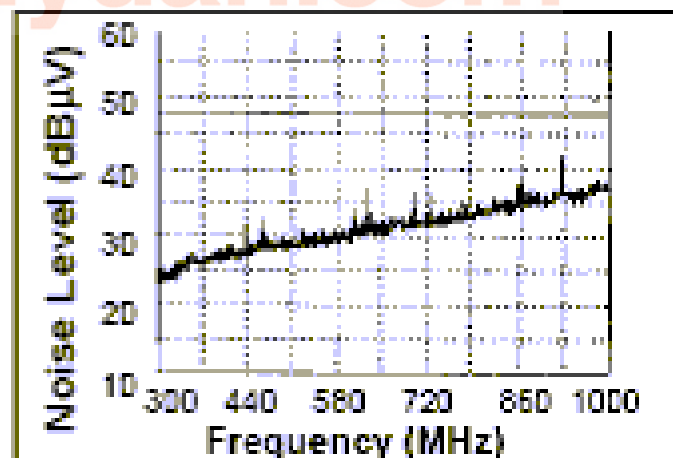
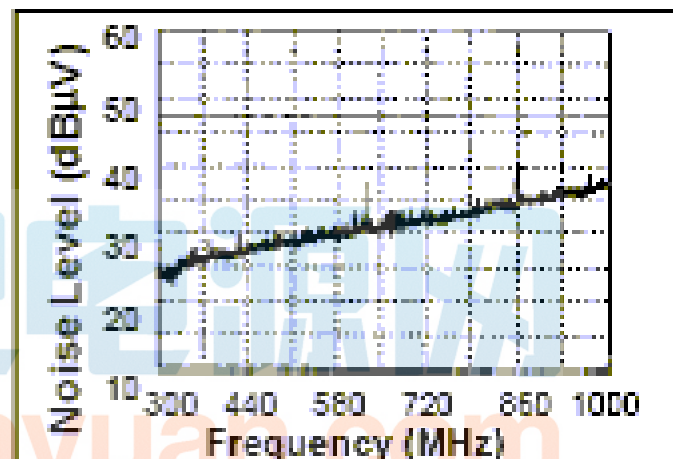
$\phi 20\text{mm} \times 8$ (2513mm^2)



$50\text{mm} \times 50\text{mm}$ (2500mm^2)



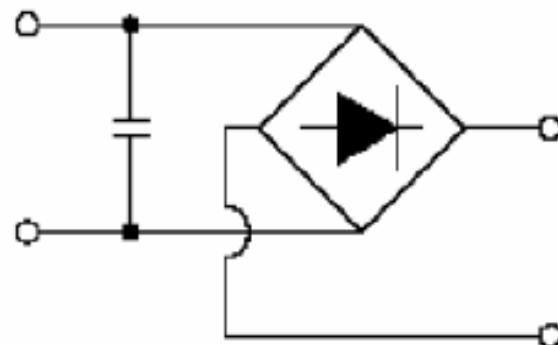
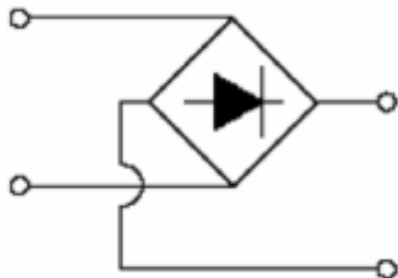
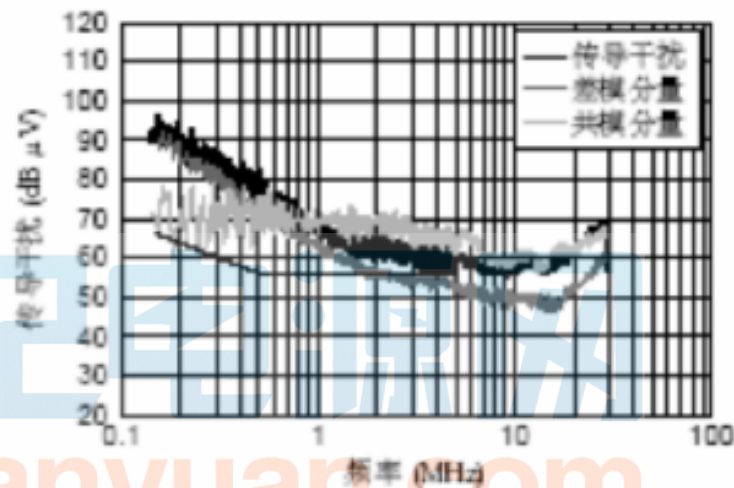
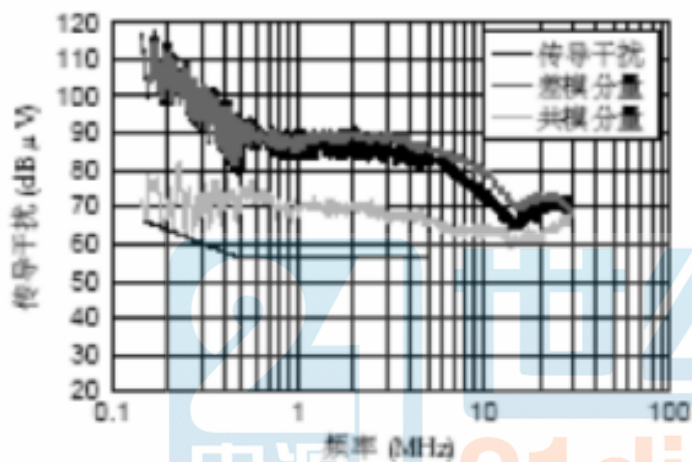
辐射噪声 (信号频率: 25MHz)



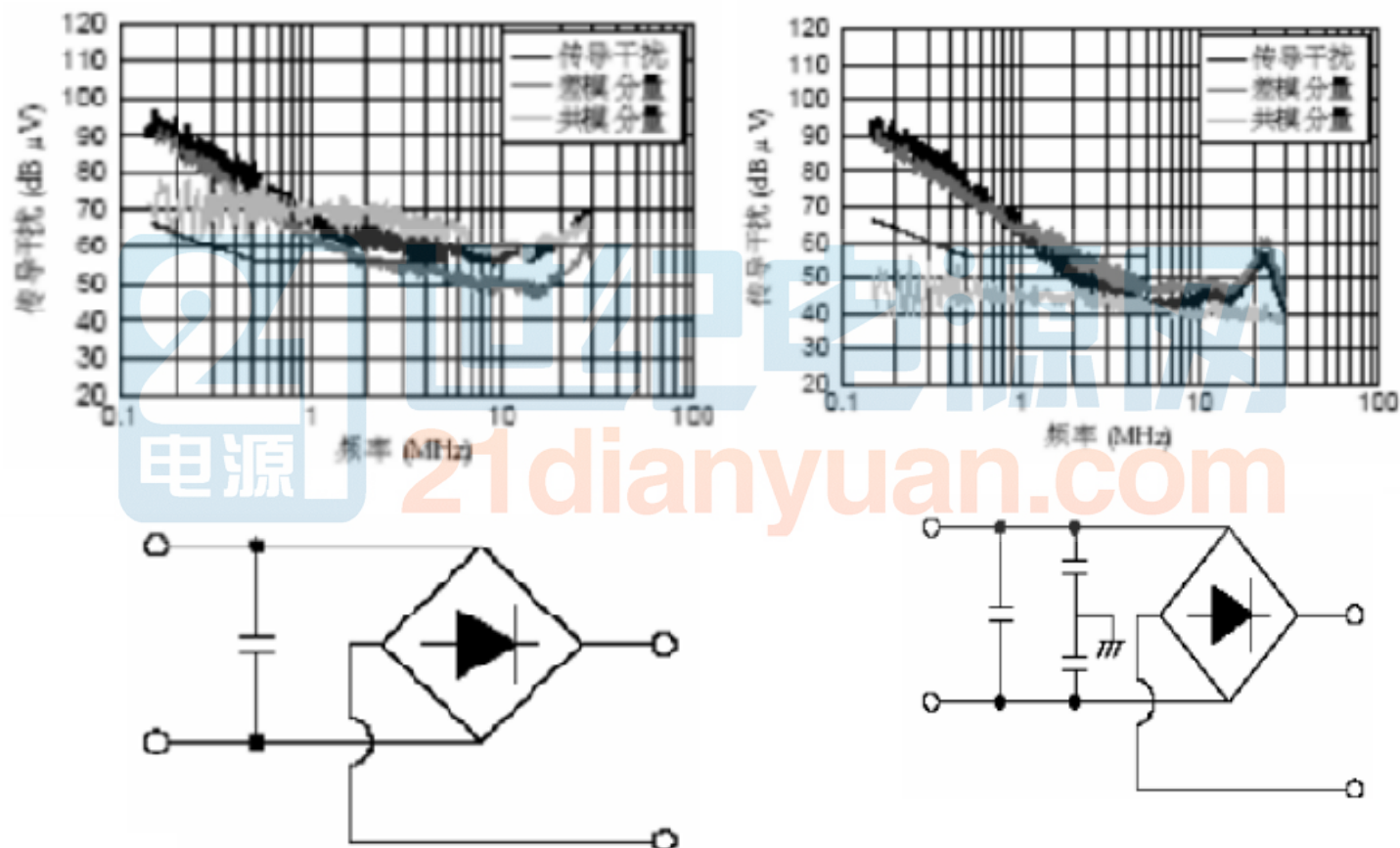
2.4 滤波

除了特别说明允许不接地的滤波器外，各类滤波器都必须接地。因为滤波器中的共模旁路电容只在接地时才能有作用。特别是 π 型滤波器，当接地不良时，等于将电容和电感并联，完全失去了滤波作用。此外，安装滤波器时，还应借助于屏蔽，将输入端和输出端完全隔离，才能发挥滤波器的抑制作用。所以滤波与接地、屏蔽都有密切的关系。

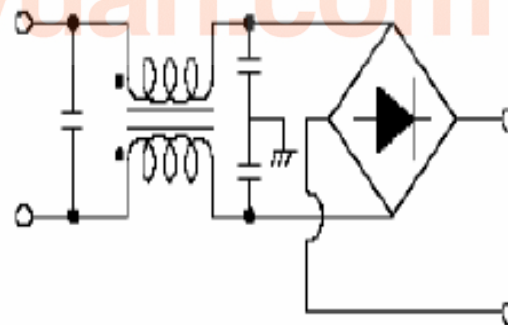
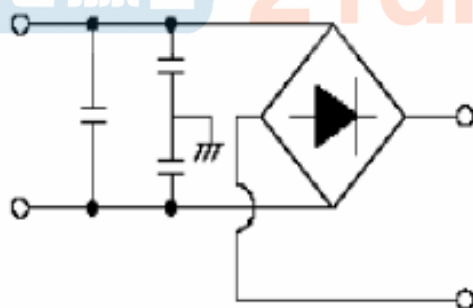
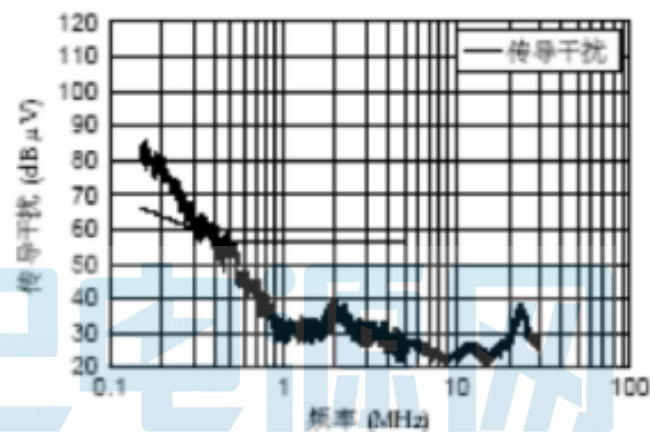
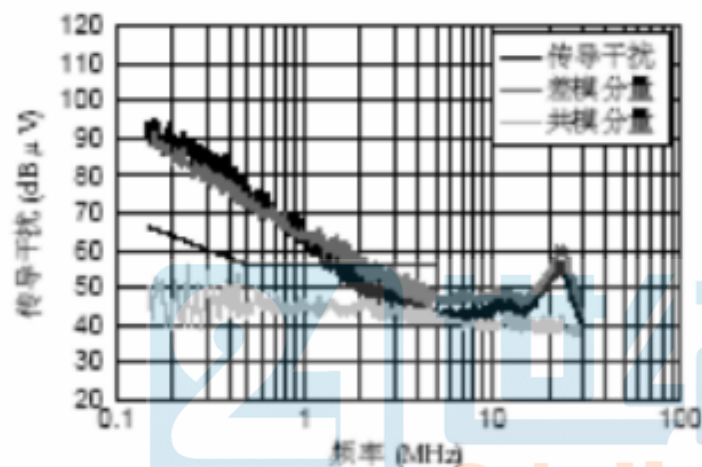
X电容滤波



X、Y电容滤波



X、Y电容L电感滤波



滤波器的选用1

- 1、首先在选用滤波器前应对用电器的EMI状况和输入（出）端阻抗等进行评估，然后按评估结果（如：测试值与标准给定限值之差值、扫描测试频谱形态等），
- 选择滤波器的插入损耗值（包括滤波器的级数）；
- 按评估（包括测试结果）的用电器的输入（出）端阻抗（如：高阻抗或低阻抗、容性阻抗或感性阻抗等），选择滤波器的型式。

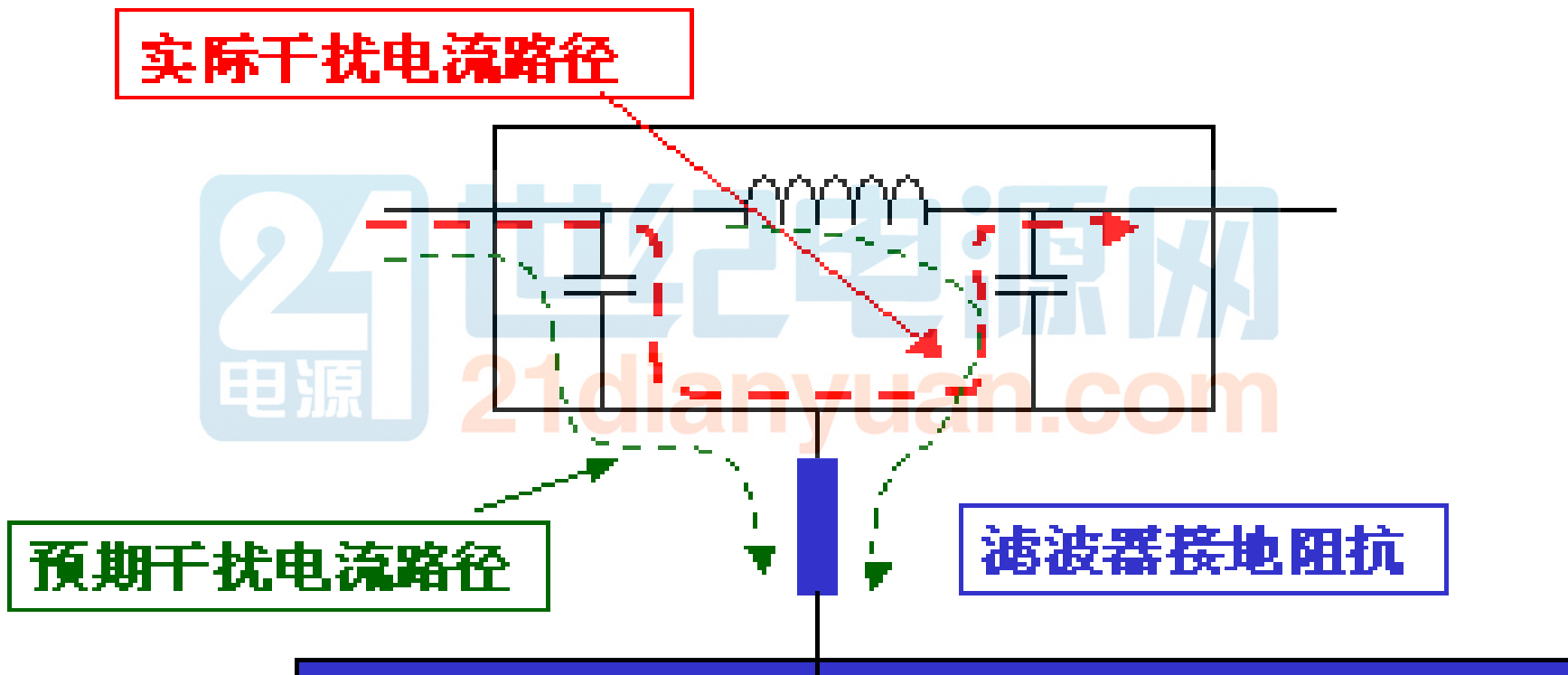
滤波器的选用2

- 2、在用电器的端口接入滤波器后，还必须通过测试来验证被选用滤波器的有效性。按测试结果对滤波器参数（如：电感、电容参数组合及其分布参数等）进行调整，直至其达到设计要求。

滤波器的选用3

- 3、在电路的EMI状况达到设计要求后，还应遵循价值原则对电路进行实用性、经济性、可操作性调整。由此，才能真正获得一个理想的EMI设计结果。
- 电源滤波器的插入损耗大小选用要适当，因为同一容量的滤波器插入损耗愈大其结构也愈复杂，价格也愈高。

使用 π 形滤波器的注意事项



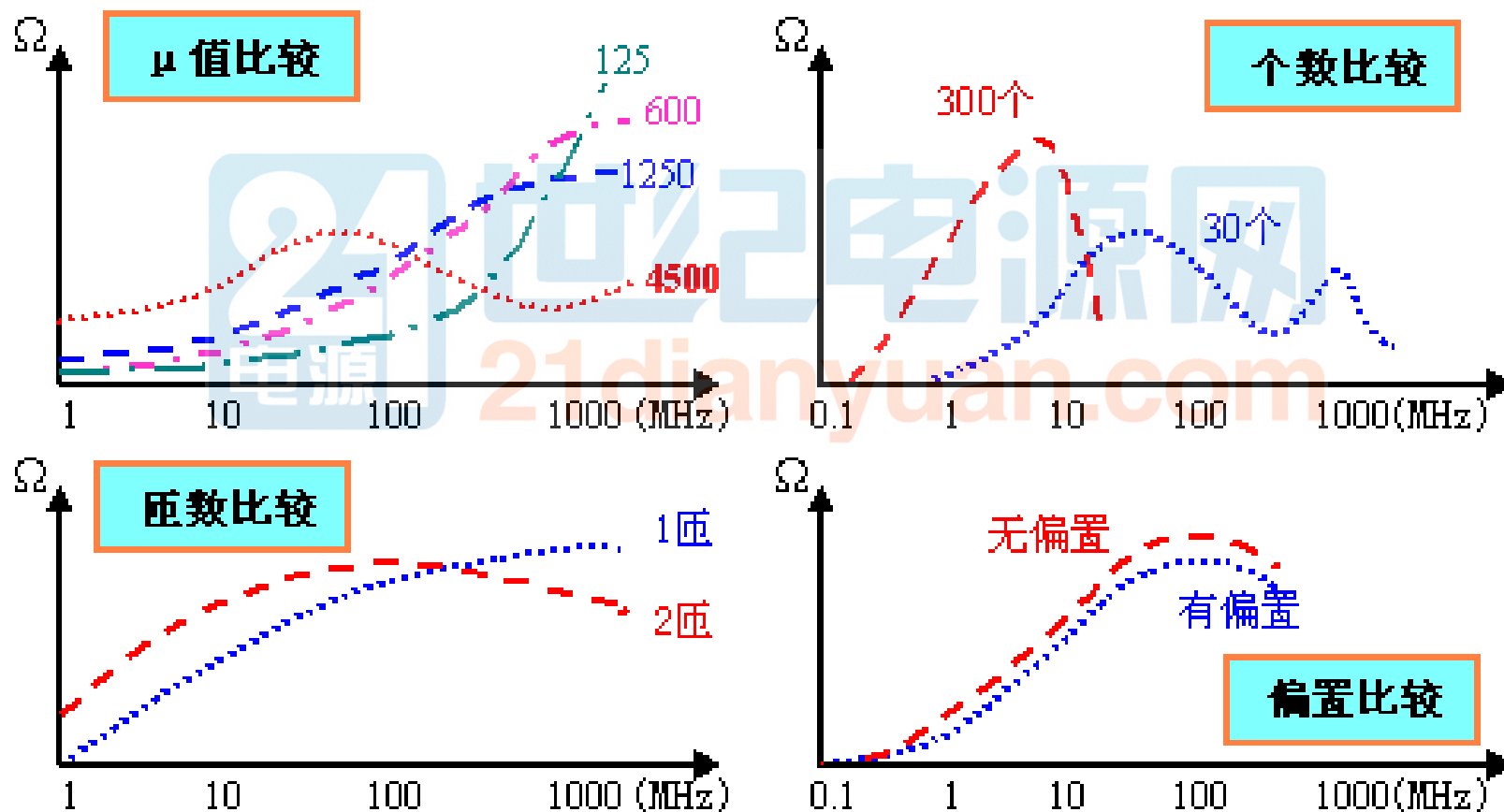
较大的共地阻抗，导致滤波电路失效。

如何使用电容

电容的谐振频率

电容值	通孔插装（0.25 引线）	表面贴装（0805）
1.0 μF	2.5 MHz	5 MHz
0.1 μF	8 MHz	16 MHz
0.01 μF	25 MHz	50 MHz
1000 pF	80 MHz	160 MHz
100 pF	250 MHz	500 MHz
10 pF	800 MHz	1.6 GHz

如何使用磁环



2.5 接地

- 接地是指将一个电路、设备或系统与一个被认为是基准的“地”电位连接的电气要求。
- 搭接是将电路、设备或系统的金属外壳或构架用机械方法连接在一起，形成一个电气上连续的整体。
- 搭接是实现接地的技术方法。

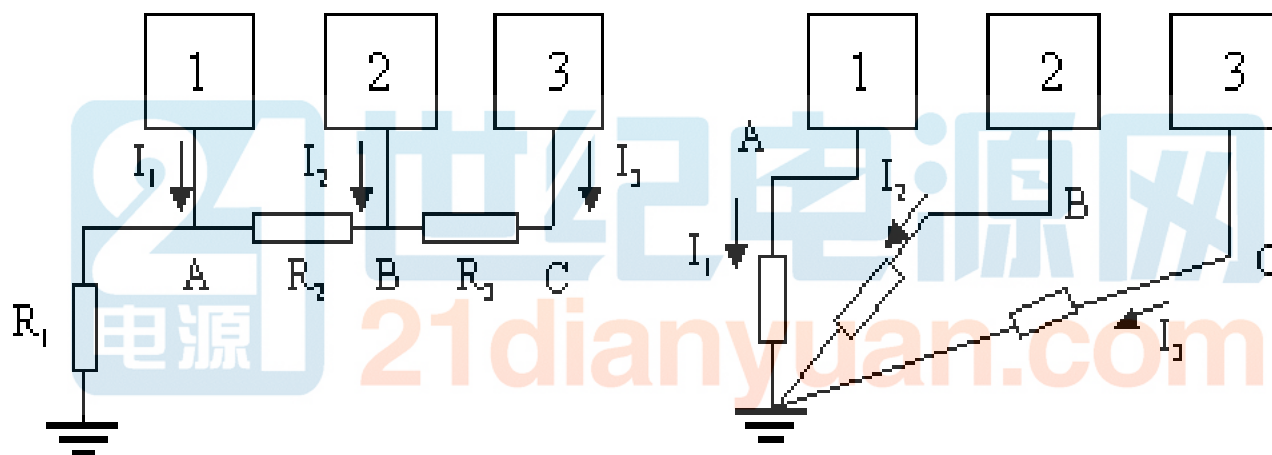
信号接地方式——浮地

- 采用浮地可将电路或设备与公共地或可能引起环流的公共导线隔离开来。
- 可以使不同电位的电路之间的配合变得容易。
- 浮地的优点是抗干扰性能好。
- 浮地的缺点是电路或设备容易产生静电积累。

信号接地方式——单点接地

- 单点接地是在一个电路或设备中只有一个物理点被定义为接地参考点。
- 单点接地的优点是适用于低频（由接地线的长度与电路或设备的最高工作频率的 $1/4$ 波长而定），接线方式单一可靠性好。
- 单点接地的缺点是接地线可能过长，在高频时接地效果不理想。

单点接地



串联单点接地

优点：简单

缺点：公共阻抗耦合

并联单点接地

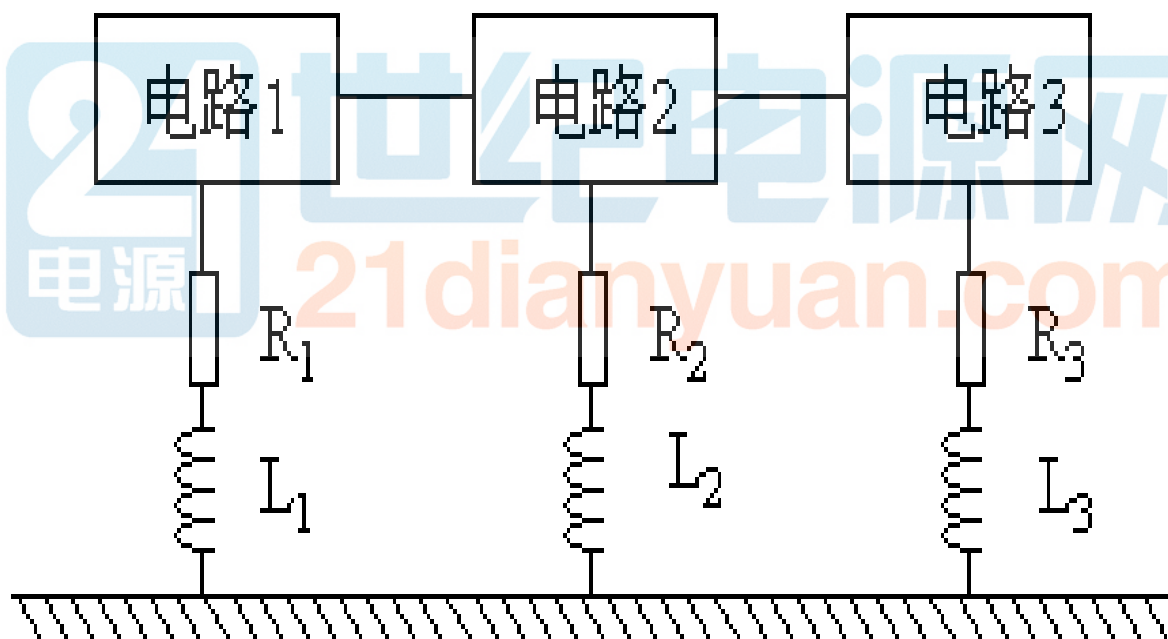
优点：无公共阻抗耦合

缺点：接地线过多

信号接地方式——多点接地

- 多点接地是设备或系统中的各个接地点都直接就近接地。
- 多点接地的优点是在接地线上出现的驻波现象少，接线简单。
- 多点接地的缺点是接地线回路多维护难度大，（受腐蚀、振动或温度、湿度的影响）可靠性差。

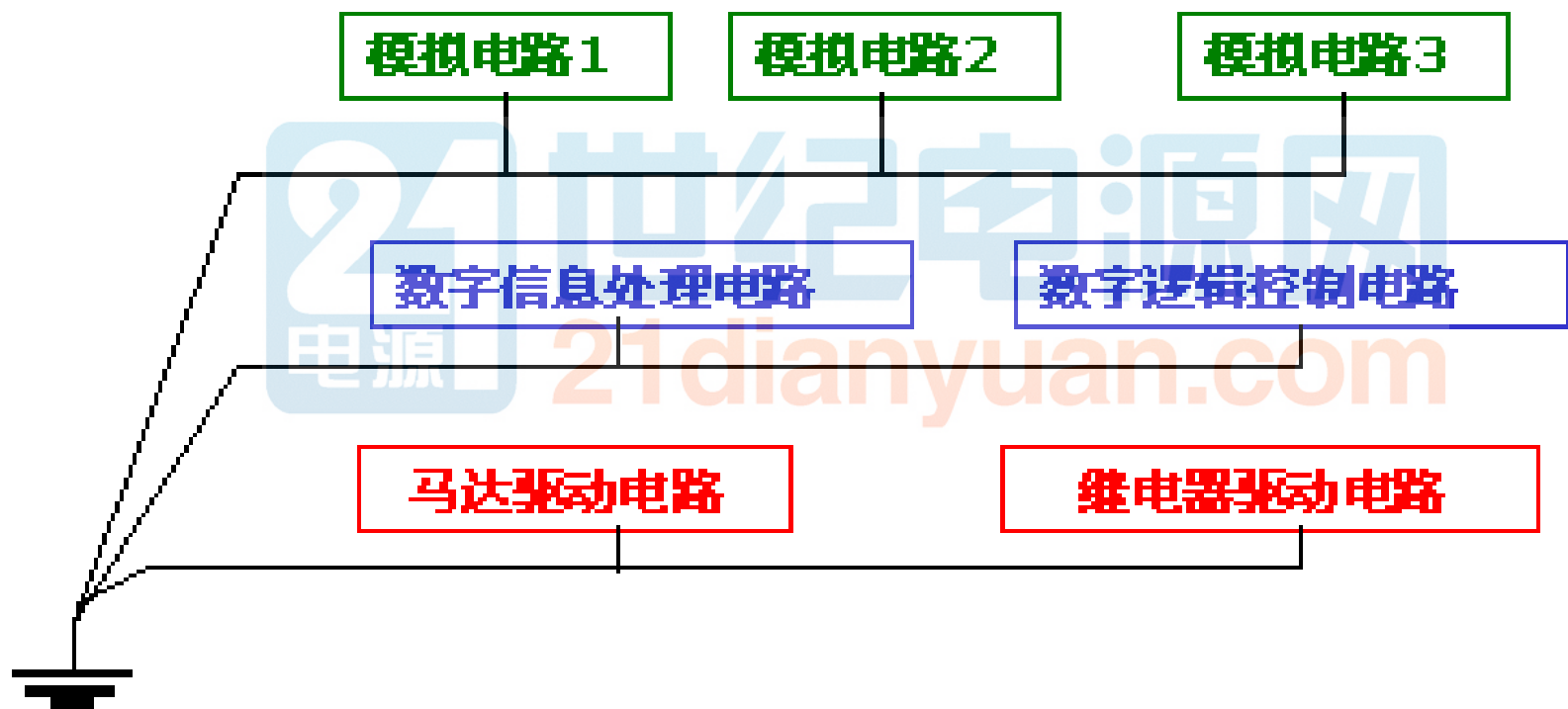
多点接地



信号接地方式——混合接地

- 混合接地在电路或设备中对高频系统进行多点接地，对其它系统采取单点接地的方法。
- 混合接地的优点是充分体现了多点接地和单点接地的优点。
- 混合接地对电路或设备的电磁兼容性设计要求高。
- 通常当设备的工作频率小于**1MHz**时采用单点接地的方法，大于**20MHz**时采用多点接地。

串联单点、并联单点混合接地



2.6 X电容器、Y电容器

X电容器是指电路中跨接在电源线两端相线一相线（中线）的滤波电容器。对**X电容器**的基本要求是：电容器的失效状态是两极开路。

- **Y电容器**是指电路中跨接在电源线与接地线两端的滤波电容器。对**Y电容器**的基本要求是：电容器的失效状态是两极开路，且在实际使用时应考虑用电器的耐压指标以及漏电流指标。

对X、Y电容的限制

- 为避免放电电流产生的电击危害， X电容器应小于 **$0.5\mu\text{F}$** ， 否则应增加一个泄放电阻，使交流插头上出现事故**1秒**后出现的电压小于 **34V** 。X电容器增加的极限约为 **$2\mu\text{F}$** （增加一个泄放电阻）；
- Y电容器增加的极限受线路的漏电流限制，在 **250VAC** 电路中， Y电容器值的极限为 **4700pF** 。

2.7 电磁兼容性设计-总结

- 产品的电磁兼容性设计从表面上看好象很复杂，不知从何下手。但如果能注意以上几个问题，正确运用防护措施，任何复杂的电磁兼容性设计难题都是可以迎刃而解的。

21dianyuan.com

骚扰源抑制

- 用屏蔽罩罩住噪声源;
 - 通过噪声环境的全部导线要经滤波;
 - 限制脉冲上升;
 - 时间继电器线圈应具有浪涌阻尼的性能;
 - 屏蔽并绞合有噪声的导线*;
 - 屏蔽体在两端接地以抑制辐射干扰*。
- 带“*”号的不用增加成本就可采用。

在耦合路径抑制骚扰

- 绞合低电平信号导线*；
- 低电平导线要挨近机架（特别是高阻抗电路）绞合并屏蔽信号导线（高频可用同轴电缆）；
- 用以防护低电平信号的屏蔽电缆在一端接地（用于高频的同轴电缆其屏蔽两端接地）*；
- 信号导线的屏蔽要绝缘当低电平信号线和带有噪声的线在同一插接件上时，要把它们分开，并在它们中间设置地线*；
- 在分立的插接件上要对通过接线柱的信号线加以屏蔽；
- 高电平和低电平设备之间应避免采用公共地线*；
- 金属件地线和电路地线要分开*；
- 地线应尽可能地短*；
- 有噪声的和无噪声的导线要分开*；
- 电路只在一点接地（高频电路除外）*，避免可能的或偶然的接地；
- 进入屏蔽体内连接灵敏设备的导线要滤波或去耦；
- 灵敏设备引线的长度应尽量地短*；
- 露出电缆屏蔽的导线长度要尽可能地短*；
- 带“*”号的不用增加成本就可采用。

提高接收电路抗干扰能力

- 仅用必需的带宽；
- 适当的应用选频滤波器；
- 适当的电源去耦；
- 用小的高频电容器旁路电解电容器分开信号地线、有噪声的地线和金属件地线*；
- 使用屏蔽罩；
- 用串芯电容器时，把连接外层金属箔的一端接地*。
- 带“*”号的不用增加成本就可采用。

第三部分：

电磁兼容测试技术

- 3.1 电磁兼容测试分类
- 3.2 电磁骚扰（EMI）测试
- 3.3 抗扰度（EMS）测试

3.1 电磁兼容测试分类

电子产品EMC测试是可靠性测试的组成部分，考核产品在电磁环境的可靠性。

电磁兼容试验可分为：

- a) 空间辐射试验；
- b) 线路传导试验。

从电磁干扰对象分类又可分为：

- a) 检测设备骚扰源特性的干扰试验；
- b) 检测设备抗干扰能力的抗扰度试验。

$$\text{EMC} = \text{EMI} + \text{EMS}$$

3.2 电磁骚扰（EMI）测试

- 电磁干扰（EMI）的测试项目包括：
- 传导干扰试验：谐波测量、电压波动、传导电压测量等。
- 辐射干扰试验：骚扰功率测量、空间辐射测量等。

3.3 抗扰度（EMS）测试

- 电磁抗扰度（EMS）的测试项目包括：
- 1) 传导抗扰度试验：电快速瞬变脉冲群抗扰度试验、浪涌（冲击）抗扰度试验、射频场感应的传导骚扰抗扰度、振荡波抗扰度试验、电压暂降、短时中断和电压变化抗扰度试验等。
- 2) 电磁场干扰的抗扰度试验：工频磁场抗扰度试验、射频电磁场辐射抗扰度试验、脉冲磁场抗扰度试验、阻尼振荡磁场抗扰度试验等。
- 静电放电抗扰度试验。
- 其它项目测试
- 如插入损耗测量、屏蔽效能测量等。

第四部分：

如何适应用户需求

- 4. 1 认证测试的局限性
- 4. 2 如何理解多变的负载特性
- 4. 3 如何适应多变的使用环境

4.1 认证测试的局限性

- 电源认证测试的局限性是：
 - 1、电源是在配置电阻负载的工况下测试的，与实际使用的负载有差距；
 - 2、认证测试时，负载电流是不变的，实际工作时电流可能是变化的；
 - 3、测试布置与实际使用的布局不一样。

4.2 如何理解多变的负载特性

- 电源设计者不可预知的负载特性；
- 理想测试状态的电阻负载与实际使用场合的容性或感性负载区别；
- 电源应该与负载进行二次匹配，然后进行EMC测试；
- 电源的轻载与额定负载的区别；
- 实际工作中电源的负载是多变的。

4.3 如何适应多变的使用环境

- 工业环境（等级A）与商住环境（等级B）的考核要求不一；
- 温度的影响（散热状况影响工作）；
- 供电电源的影响（电压、谐波等电能质量）；
- 网络谐振等。

第五部分：

常见问题及解决方法

- 5. 1 EMC测试原理与干扰实质
- 5. 2 开关电源的骚扰源分析
- 5. 3 辐射骚扰的整改方法
- 5. 4 传导骚扰的整改方法
- 5. 5 如何实现电磁兼容

5.1 EMC测试原理与干扰实质

- 开关电源传导电磁干扰：
- 由于功率开关管的高速开关动作，其电压和电流变化率都很高，上升沿和下降沿包含了丰富的高次谐波，所以产生的电磁干扰强度大；
- 开关电源的电磁干扰主要集中在二极管、功率开关器件以及与其相连的散热器和高频变压器附近；
- 由于开关管的开关频率从几十kHz到几MHz，所以开关电源的干扰形式主要是传导干扰和近场干扰。其中，传导干扰会通过噪声传播路径注入电网，干扰接入电网的其他设备。

5.1 EMC测试原理与干扰实质

- EMC测试原理（传导：差模与共模电压、电流；辐射：射频共模电流）
- 干扰实质（骚扰来自于突变）



开关电源传导干扰分为两大类

- **1)差模(DM)干扰。**DM 噪声主要由 di/dt 引起, 通过寄生电感, 电阻在L线和N线之间的回路中传播, 在两根线之间产生电流 I_{dm} , 不与地线构成回路。
- **2)共模(CM)干扰。**CM 噪声主要由 dv/dt 引起, 通过PCB的杂散电容在两条电源线与地的回路中传播, 干扰侵入线路和地之间, 干扰电流在两条线上各流过二分之一, 以地为公共回路;在实际电路中由于线路阻抗不平衡, 使共模信号干扰会转化为不易消除的串扰干扰。

耦合分析

- 高阻抗的容性耦合——电路的表面积有关
- 低阻抗的感性耦合——电路的环路面积有关
- 结构性耦合：
- 传导耦合——直接耦合；共模耦合。
- 发射耦合——电容性耦合；电感性耦合；电磁场耦合。

5.2 开关电源的骚扰源分析

- 开关电源的骚扰源分析
 - 1、工作频率（开关频率）
 - 2、脉冲前沿
 - 3、过冲（阻抗匹配）
 - 4、变压器的非线性工作区

5.3 辐射骚扰的整改方法

- 1、限值能量
- 2、阻断等效天线
- 3、阻抗匹配
- 4、骚扰源头抑制
- 5、端口抑制

世纪电源网
21dianyuan.com

5.4 传导骚扰的整改方法

- 1、如何区分共模、差模骚扰；
- 2、X电容的使用范围（频率抑制范围）
- 3、Y电容的使用范围（频率抑制范围）
- 4、滤波器件
- 5、滤波器

5.5 如何实现电磁兼容

- 一、电磁兼容基础
- 二、电磁兼容标准
- 三、电磁兼容试验
- 四、整改
- 五、设计
- 六、生产过程控制
- 七、电磁兼容环境
- 八、安全
- 九、实验室规划



第六部分： 现场问题解答





谢谢大家

徐强华

- 恩宁安全技术（上海）有限公司
- 上海市沪太路5018号梓坤科技园906室
- 电话：021-66780322 手机：13621858185
- 电子邮件：13621858185@139.com