

开关电源的骚扰抑制问题

钱振宇

1. 产品认证与开关电源的电磁兼容性测试

尽管开关电源没有作为一个大类产品出现在我国的强制性产品认证目录中，但在目录的信息技术类设备提到的12种产品中，将计算机的内置电源和电源适配器与微型计算机、便携式计算机、与计算机连用的显示设备、与计算机连用的打印设备、多用途打印复印机、扫描仪、充电器、电脑游戏机、学习机、复印机、服务器、金融及贸易结算电子设备等一起列为强制认证的产品。

此外，在需要强制性认证的音视频设备、音视频设备-卫星电视广播接收机、电信终端设备中，虽没有把开关电源列为一种独立产品，但是在这些产品的认证实施细则中却把开关电源作为一种对电磁兼容性能有影响的主要零部件出现在认证产品的零部件清单中。

事实上，还有更多的电子设备，尽管在认证的实施细则中没有直接提到开关电源的问题，但是在它的认证中（这里指的是广义“认证”，尽管有一些产品不需要3C认证，但有“入网”认证要求）都无一例外提到了要做电磁兼容性试验。由于开关电源作为这些设备中与电网连接的关键部件，所以这些试验都和开关电源的电磁兼容性有关。因此，无论开关电源是不是作为一个独立产品参加强制产品认证，但作为电子设备与电网连接的一个首当其冲的部件，只要这个产品需要参加认证，那么开关电源都必须经受电磁兼容性试验。

2. 开关电源的电磁兼容性试验

根据“电磁兼容”的基本定义：“设备或系统在其电磁环境中能正常工作，且不对该环境中的任何事物构成不能承受的电磁骚扰的能力”。可以看出设备的电磁兼容性包含两层意思：设备要有一定的抗干扰能力，使其在电磁环境中能够正常工作；同时，设备在工作中自身所产生的电磁骚扰应该抑制在一定水平下，不能对同处于一个电磁环境中的任何事物（包括同一电磁环境中的其他设备和系统）构成不能承受的电磁骚扰量。所以，对开关电源的电磁兼容性测量也应当包含对开关电源的抗干扰能力和对开关电源自身骚扰抑制这两方面的测量。

迄今为止，开关电源电磁兼容性测试的国家标准尚未出台，但是在参加强制性产品认证的信息技术设备类产品，在“机内开关电源的认证试验项目一览表”（国家认证认可监督管理委员会颁布）中列出了3个电磁兼容测试项目，分别是0.15MHz ~ 30MHz电源端传导骚扰电压测试；30MHz ~ 1000MHz辐射骚扰场强测试；暂态谐波电流测试。十分明显，这几项试验都是测试开关电源自身工作中所产生的电磁骚扰，分别是对射频性质的传导骚扰电压和辐射骚扰场强测试；以及对电网污染的谐波电流测试。

此外，在包括音视频设备、音视频设备的部件、卫星电视广播接收机、金融及贸易结算设备、电信终端设备等等产品在内的所有需要认证的电子产品除了有测试产品自身工作中所产生的电磁骚扰的要求外，还有抗扰度测试的要求（包括对静电放电、射频辐射电磁场、电快速瞬变脉冲群、雷击浪涌、由射频场感应所引起的传导注入、电压暂降与短时中断等抗干扰能力的测试要求）。

根据国内外电子产品的认证情况看，通常电子产品本身的电磁骚扰发射是强制性的测试项目，因为电子产品的电磁骚扰发射对确保世界范围内通讯和广播畅通有决定性的作用，也对保证同一电磁环境内的其他电子设备和系统的正常运行有积极意义。同样，电子产品工作时所产生的暂态谐波电流实际上是对整个公共电网的污染。对谐波电流发射的限制，实际上也就保证了公共电网的供电质量。

相形之下，抗干扰能力是说明电子产品性能高低的重要指标，是评价同类产品好坏的主要指标之一，也是客户选购电子设备的主要依据。

这样看来，电子产品的电磁骚扰发射和谐波电流发射是必须实施强制检查的项目，而电子产品的抗干扰性能则应当根据产品认证与入网的需要进行必须的检查。

因此，对作为信息技术设备类产品参加强制性产品认证的机内开关电源的3个电磁兼容测试项目（即对机内开关电源所作的传导骚扰电压测试、辐射骚扰场强测试，以及谐波电流测试）是适当的，也是必须的。

而对广大电子产品所作的抗干扰性能测试，实际上不全部是针对开关电源的一种试验，从更深的层面来说，是对整个设备和系统的抗干扰性能试验。无数的事实说明，即使一台设备的开关电源通过了全部的抗干扰试验项目，也不等于这台设备也能通过相应的抗干扰试验。这里面有经由开关电源漏过去的干扰信号，设备的其他功能线路在这些干扰下产生了误动作，甚至导致功能线路中的元器件损坏或程序的丢失。此外，设备内部的布局和布线不当也可能将干扰越过开关电源直接进入其他功能线路，导致设备产生误动作等受干扰现象。基于这一原因，这里只讨论开关电源的电磁骚扰的发射问题。

3. 开关电源的电磁骚扰发射问题

开关电源采取将市电直接整流、滤波成为高压直流，然后通过逆变将高压直流转换成低电压的高频交流，再经过高频整流和滤波变成所需要的直流低电压。其间，通过对直流输出电压的测量，反过来对晶体管的开关时间进行控制，最终可以保持输出电压不变。这种线路的好处是取消了笨重的工频变压器；工作在开关状态下的晶体管的功耗要比线性状态低得多，所以不需要庞大的散热器；再者，逆变器的工作频率较高（几十kHz至200kHz），只要用较小容量的电容器就可获得低压侧的平滑滤波效果。由此可见，开关电源的根本优点是小型化、轻量化和高效化。

但是开关电源也有它固有的问题：例如，输入侧的谐波电流大、功率因数低、电源本身的电磁骚扰发射也大；另外，开关电源输出端的纹波电压大、输出噪声也大。其中，特别是开关电源的电磁骚扰的发射问题对于同一电磁环境的电子设备正常运行构成了潜在的威胁。事实证明，只有提高了开关电源的电磁兼容性能（当然包括要尽可能地减小电磁骚扰的发射，同时还要最大限度地提高其抗干扰的能力），才能使开关电源能在更多场合下获得应用。

下面讨论开关电源的电磁兼容问题由来。

开关电源的种类很多，按电路结构可分为串联式和直流变换式两种；按激励方式可分为自激和他激两种；按开关管的组合可分为单管、全桥、半桥、推挽等等。然而不论何种类型的开关电源，都是利用半导体器件作开关，以开和关的时间比例来控制输出电压的高低。由于开关电源的工作频率都在几十至几百kHz，所以线路里的电流和电压变化率都很大，产生了很大的电磁骚扰，它们会通过电源线以共模和差模的方式向外传导骚扰，同时也会向周围空间辐射骚扰。

图1 是开关电源的主要部分，用于说明电源中电磁骚扰的产生与耦合途径。

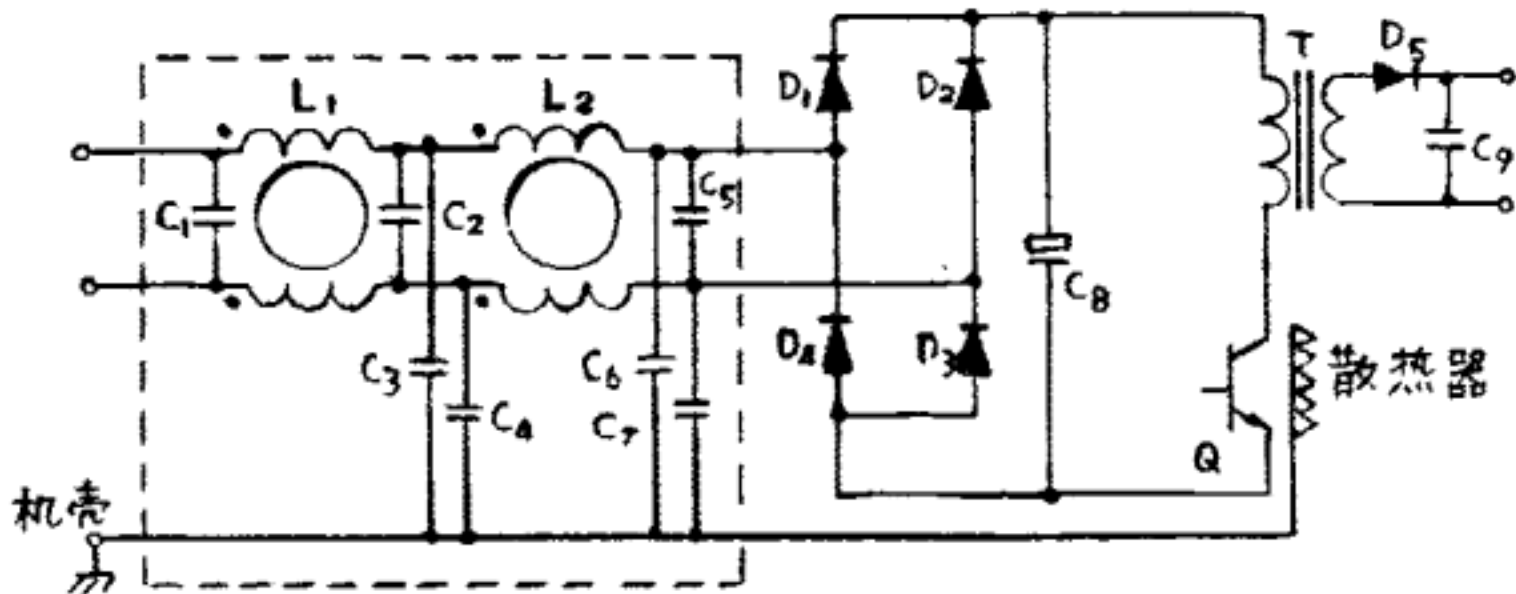


图1 开关电源线路简图

3.1 输入整流回路

在输入整流回路中，整流管 $D_1 \sim D_4$ 只有在脉动电压超过输入滤波电容 C_8 上的电压的时候才能导通，电流才从市电电源输入，并对 C_8 进行充电。一旦 C_8 上的电压高于市电电源的瞬时电压，整流管便截止。所以输入整流回路的电流是脉冲性质的，有着丰富的高次谐波电流。输入电流与市电电源电压的不同步，还导致了开关电源的功率因数低下，一般只在0.65左右。

3.2 开关回路

开关电源工作时，开关管Q处在高频通断状态，经由高频变压器T初级线圈、开关管Q和输入滤波电容 C_8 形成了一个高频电流环路。这个环路的存在，就可能对空间形成电磁辐射。辐射骚扰的强度（包括电场和磁场骚扰）与 $I Af^2$ 的乘积成正比，其中I是高频电流环路中的电流强度；A是环路所包围的面积；f是电流频率。注意，运用上述关系的条件是回路的尺寸远小于频率分量的波长。此外，式中电流是由配套电子设备对电源的要求而定；频率则由电源的重量、滤波要求和系统效率来确定。

输入滤波电容 C_8 对电磁骚扰的形成也有一定影响，如果 C_8 的电容量不够大，则对输入滤波就感不足，这时高频电流还会以差模方式传导到交流电源中去。

此外，开关回路中，开关管驱动的负载是高频变压器的初级线圈，是电感性的。由于高频变压器结构不是完全理想，除了初级电感外，还存在一定的漏电感。所以在开关管关断的瞬间，变压器中贮存的能量不能100%地传送到次级，结果在高频变压器的漏电感上感应了出一个尖峰高电压，如果尖峰有足够高的幅度，那么很有可能会造成开关管Q的击穿。

3.3 次级整流回路

开关电源在工作时，次级整流回路的 D_5 也处于高频通断状态。由高频变压器次级线圈、整流二极管 D_5 和滤波电容 C_9 构成了高频开关电流的环路。由于有这个环路的存在，同样也有可能对空间形成电磁辐射。

次级整流回路中的二极管在正向导通时的PN结被充电；在加反向电压时，积累电荷将被抛散，并因此产生反向电流，这个过过程非非常的短暂。所以在有分布电容（如变器的漏感等）和分布电路（如二极管的结电容等）存在的回路里，二极管截止瞬间的电流变化会产生高频振荡。其后果是：1) 如果振荡的幅度超过整流二极管的击穿电压，就可能造成二极管的击穿。2) 即使不造成整流二极管的击穿，在次级回路中的高频振荡现象也会成为对外的差模辐射。3) 在开关电源输出端的直流滤波电容，由于滤波电容本身的存在等效串联电感，削弱了源输出端的衰减振荡（见

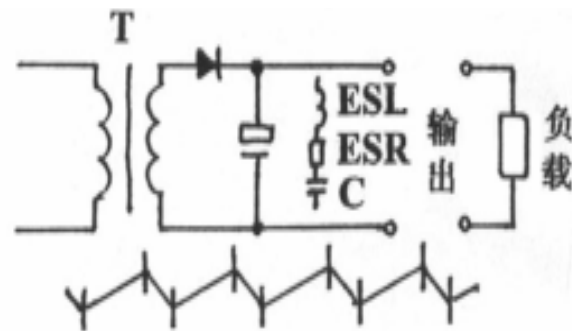


图2 开关电源输出端的噪声

3.4 控制回路

在控制回路中，脉冲控制信号则是主要的骚扰源，只不过与其他各项骚扰信号比较起来，控制回路的这点骚扰也就算不了什么了。

3.5 由分布电容引起的骚扰

· 初级回路开关管外壳与散热器的容性耦合引起的共模传导骚扰

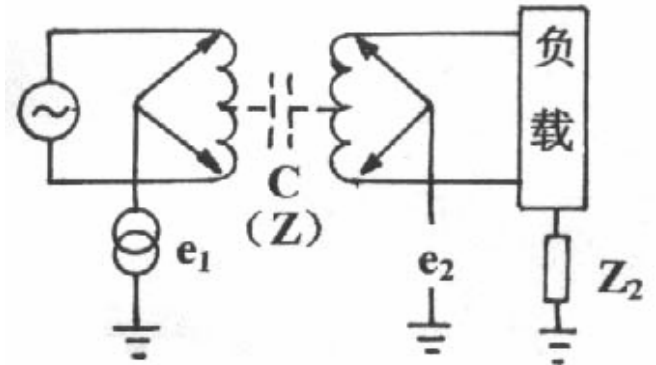
初级回路中开关管外壳与散热器之间的容性耦合会在电源输入端产生传导的共模骚扰。该共模传导的途径形成一个环路，该环路始于高dv/dt的散热器和安全接地线，通过交流电源的高频导纳和输入电源线（相线和中线）返回。

对初级电路来说，经整流后的直流电压为300V左右，直流变换器就在这个电压下工作。对于开关电源中的开关管来说，开关波形上升与下降时间做到100ns的情况并不困难，因此，开关波形的电压变化率实际上达到了300V/100ns或3kV/1 μ s。当用硅酯涂复的聚酰胺片垫在开关管与散热器之间时，开关晶体管的管壳与散热器之间的分布电容大约与50pF，所以波形瞬变时经过分布电容流到散热器，最后进入安全地的共模瞬变电流要达到

$$I = C \times dv/dt = 50 \times 10^{-12} \times (3000/10^{-6}) = 150\text{mA}$$

高频变压器初次级之间分布电容引起的共模传导骚扰。共模干扰是一种相对大地的干扰，它以它不会通过变压器“电生磁和磁生电”的机理来传递，而必须通过变压器绕组间的耦合电容传递。而在开关电源的高频变压器的初次级之间存在着分布电容是个不争的事实，我们用一个个装置电容（装置对地的分布电容）来与整个开关电源等效，我们就得到了如图3的干扰通路，共模干扰通过变压器的耦合电容，经过装置电容再返回大地的。于是我们就得到一个由变压器耦合电容与装置电容构成的分压器，共模电压就按照分压器中电容量的大小来分压，分到的电压为

$$e_2 = e_1 Z_2 / Z$$



- C：绕组间的分布电容；
 - Z：绕组间的耦合阻抗；
 - e_1 ：初级干扰（共模电压）；
 - e_2 ：次级干扰（共模电压）。
- $$e_2 = e_1 Z_2 / Z$$

图3 普通隔离变压器共模抑制能力分析

至此，我们简略地讨论了开关电源的电磁骚扰起因，由此形成的电磁骚扰有射频辐射性质的，也有射频传导性质的，当然也还有谐波电流的发生问题。

但是从开关电源的工作情况看，电磁骚扰发射的起因主要还是来源于晶体管的逆变工作状态（开关晶体管、高频变压器和输出整流回路在工作时产生的这种 dv/dt 和 di/dt 变化率很大和幅度很大的电压和电流脉冲）。就目前的晶体管开关速度看，逆变器的工作频率大体上都设计在几十kHz至几百kHz范围内，即使考虑了逆变器工作所形成的高次谐波，其谐波的主要高频成分也只有几十MHz，因此是属于“窄频”性质的骚扰，而且骚扰的频率相对偏低。

从电磁骚扰发射的测试标准看，试验方法以30MHz为界，对30MHz以上的频率，由于测试的频率较高，电磁波的波长较短，容易从设备（包括从线路上）逸出，成为电磁辐射进入空间，因此标准对于30MHz以上的电磁骚扰发射采用测试其辐射电磁场场强的方法。对30MHz以下的频率，由于电磁波的波长较长，不容易形成电磁波的空间辐射，而是以传导传输为其主要形式，因此对30MHz以下电磁骚扰采用测试传导骚扰电压的方法。

只是大多数小功率开关电源由于它的几何尺寸远小于30MHz所对应的波长（10m），所以大多数的开关电源即有辐射骚扰的发射，其表面向外的辐射效率也很低，在开关电源中考虑得更多的也还是传导骚扰的发射。

对于开关电源的谐波电流发射的问题，在GB 17625.1标准中规定对于额定功率达到75W（今后可能会规定为50W）以上的开关电源要测试其谐波电流的发射情况。GB 17625.1标准还专门提出了开关电源的谐波电流发射限值要求。

在开关电源的谐波电流抑制问题上，除了采用无源滤波器外，目前发展迅速，使用也更多的便是开关电源的有源功率因数控制了。目前有大量的文章发布在各种科技刊物上，这里不予讨论。

在余下的篇幅中只讨论开关电源的传导和辐射骚扰测试和对策。

4. 开关电源的传导骚扰测试

4.1 开关电源交流电源输入端口的传导骚扰的限值

GB9254-1998《信息技术设备无线电骚扰限值和测量方法》标准将设备（信息技术类设备）分为A、B两类，其中B类是在生活环境中使用的设备。属于B类的环境有：住宅区、商业区、商务区、公共娱乐区、户外场所和轻工业区。标准将不属于B类环境使用的信息技术类设备认定是A类环境的设备。表1是标准对开关电源交流电源输入端口的传导骚扰的限值要求。

表1 开关电源交流电源输入端口的传导骚扰的限值要求

频率范围 MHz	A级设备		B级设备	
	准峰值 dB μ V	平均值 dB μ V	准峰值 dB μ V	平均值 dB μ V
0.15 ~ 0.50	79	66	66 ~ 56	56 ~ 46
0.50 ~ 5	73	60	56	46
5 ~ 30	73	60	60	50

注：1.在过渡频率处应采用较低的限值；2. B类设备在0.15 ~ 0.50MHz范围内随频率对数线性递减。

4.2 测试传导骚扰发射的试验配置

按照GB9254标准的要求，受试设备的传导骚扰发射试验在屏蔽室中进行，基本的试验仪器是两件：人工电源网络和带有准峰值检波和平均值检波的干扰接收机。

. 试验配置

图4是典型的传导骚扰预测试验的试验配置。

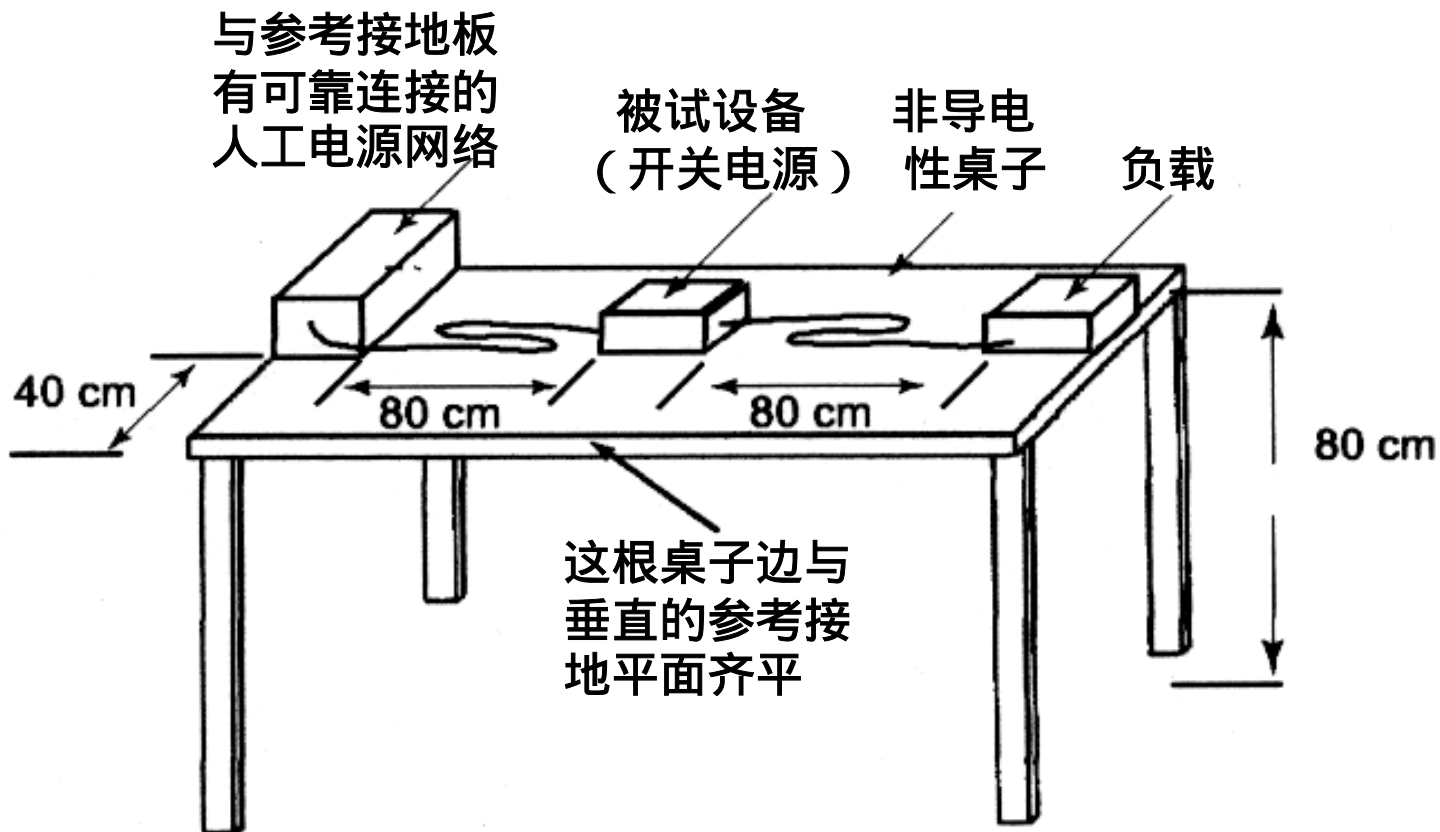


图4 典型的传导骚扰发射试验的配置 (图中垂直的参考接地平面未画, 位于桌前, 与桌子边齐平)

· 传导骚扰测量的试验技巧：

- 1) 人工电源网络所体现的实际阻抗是取决于被试设备与人工电源网络的连接情况，为了避免出现试验过程中的阻抗不稳定，两者之间的连接必须牢靠。
- 2) 为了保证测试结果有重复性和可比性，被试设备至少要预热足够长的时间，要让被试品的工作状态达到稳定。
- 3) 试验仪器的扫描速度要足够低，以便能捕捉每一次谐波的峰值。
- 4) 试验过程中，一般先用峰值测量法对整个试验频段进行扫描，如果峰值测量已经低于准峰值测量，则应改用准峰值测量。在测量过程中，应使峰值测量仪的扫描速度足够慢，以便能捕捉到每一个峰值。在测量过程中，应使峰值测量仪的扫描速度足够慢，以便能捕捉到每一个峰值。在测量过程中，应使峰值测量仪的扫描速度足够慢，以便能捕捉到每一个峰值。

· 试验中的注意事项（同样适用于对开关电源的辐射骚扰测试）

- 1) 试验应在产品（这里指开关电源）的正常使用情况下，以能产生最大电磁骚扰发射的工作方式进行。试验中还要适当地改变试品（开关电源）的布局，以便使骚扰发射为最大。
- 2) 试验应将试验中用到的试验仪器、试验方法、试验配置和试验布局等明确记录在案，以备试验能重复进行，试验结果可以追溯。
- 3) 除非另有说明，试验应在试品（开关电源）额定电压和规定工作条件下进行。

. 对传导骚扰测量结果的数值分析
图5是传导骚扰测量线路的等效线路。

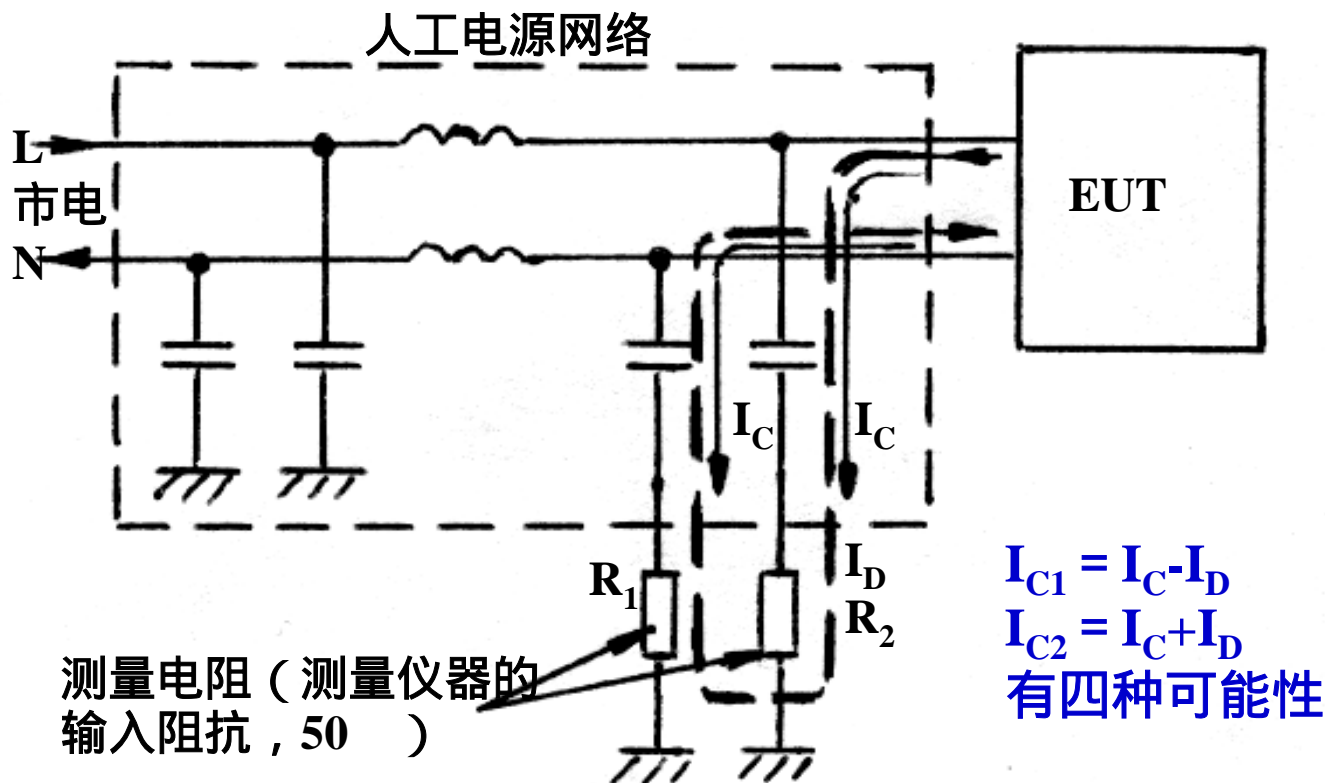


图5 传导骚扰测量的等效线路

从图5可见，被试设备在两根电源线上（一根是相线L，另一根是中线N）的传导骚扰发射电压实际上是由电流 I_{C1} 和 I_{C2} 在测量电阻上的压降造成的。而这两个电流又是被试设备在工作时产生的差模电流 I_D 和共模电流 I_C 迭加而成。由于在两个测量电阻上的 I_D 和 I_C 的电流流向不同，导致测量电阻上实际的电流 I_{C1} 和 I_{C2} 不等。

在 R_1 上的电流为

$$I_{C1} = I_C - I_D$$

在 R_2 上的电流为

$$I_{C2} = I_C + I_D$$

我们利用测量仪器测到了测量电阻上的压降，实际上也就测到了电阻上的骚扰电流 I_{C1} 和 I_{C2} 的情况。

实际的测量结果有如下几种可能：

- 1) 在 R_1 和 R_2 上的测量电压大体上相等，而且测量电压在标准所规定的限值范围内；
- 2) 在 R_1 和 R_2 上的测量电压大体上相等，但测量电压超出标准所规定的限值范围；
- 3) 在 R_1 和 R_2 上的测量电压不等，但测量电压在标准所规定的限值范围内；
- 4) 在 R_1 和 R_2 上的测量电压不等，而测量电压超出标准所规定的限值范围。

对于1)、3)两种结果，由于测量结果已经在标准所限定的范围内，所以我们不必作过多辨别，已经可以认定被试设备通过这项试验了。

对于2)，有两种可能的情况：要么差模电流 I_D 很小， $I_{C1} \approx I_{C2}$ ；要么差模电流 I_D 很大，使得 $I_{C1} \approx -I_{C2}$ ，只是测量仪器无法辨别相位，使得测值的大小大体相等。

对于4)，都是共模电流 I_C 和差模电流 I_D 共同作用的结果，只是成份的比例与 不同。

作为一般规律，如果测量结果是在1 ~ 2MHz以下超标的，通常是差模超标的可能性比较大；反之，在1 ~ 2MHz以上超标，则是共模超标的可能性比较大。

为了使企业内部的摸底试验与试验站的测试结果相符（即到试验站试验时能够一次通过），在摸底试验阶段的测试结果至少要比标准规定的限值压低2dB（最好能达到6dB）。这2dB意味着我们已经考虑了试验仪器和试验方法不一致时带来的测试误差，而6dB代表设计中的余量。

5. 开关电源传导骚扰的抑制技术

通过本文第3部分《开关电源的电磁骚扰发射问题》的叙述可以看出，开关电源产生的骚扰是多途径多方式的，所以采取的应对措施也是多方面的，包括差模滤波、共模滤波、EMI磁芯吸收和变压器的结构设计等等。作为开关电源传导骚扰的抑制技术这里重点介绍采用输入滤波和接地等措施来抑制其电源输入部分的传导骚扰。

5.1 差模滤波的分析

开关电源的差模传导骚扰的发射是由开关电源和交流输入之间的环流所造成的，这意味着差模电流将经过电源进线流入开关电源，经过中线流出开关电源。

大部分的差模传导发射是由功率晶体管集电极电流波形的基波和谐波造成的。在进行EMI测试的时候，差模电流在人工电源网络的L线上的测量电阻 R_{SL} 的压降，与它在人工电源网络N线上的测量电阻 R_{SN} 的压降幅值相同、但相位相反。

对差模骚扰的分析将用图6的等效电路来代替实际电路。初级电流用电流源 I_{PRI} 代表；贮能电容 C_{IN} 在100kHz ~ 1MHz频率范围内的有效阻抗用等效串联电阻ESR代表；桥式整流器导电期间用短路代表；交流电源的阻抗用人工电源网络的两个50Ω的测量电阻代表；差模滤波器用差模滤波电容 C_D 和两个差模电感 L_D 组成的LC滤波器代表。这个模型在频率高至1MHz左右有效。

人工电源网络的电阻

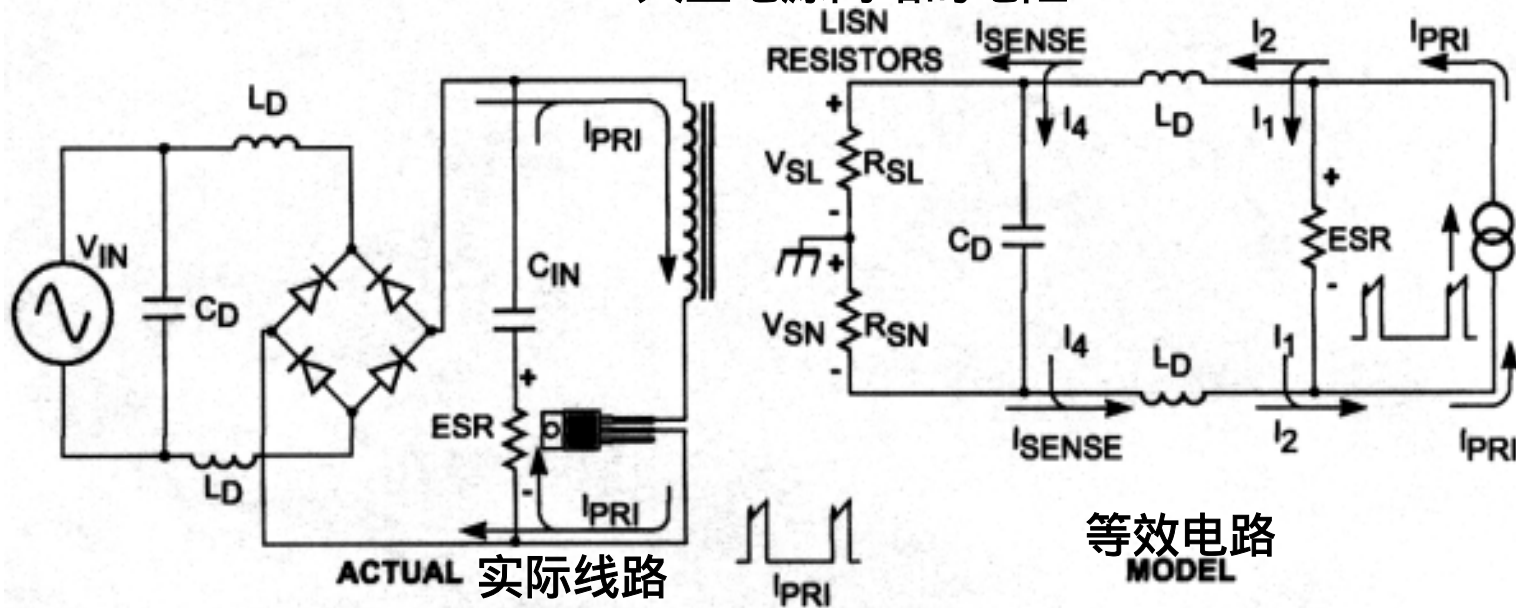


图6 差模发射的线路组成

针对100kHz ~ 1MHz频率范围内差模骚扰电压的测试与调整，我们就可以利用图6的等效电路进行。由于滤波电容 C_D 的典型值为 $0.1 \mu F \sim 1.0 \mu F$ ，在讨论的100kHz ~ 1MHz频率范围内阻抗远小于人工电源网络测量电阻值的总和，所以对差模骚扰电压的测试与调整只和滤波电容 C_D 、滤波用差模电感 L_D 有关。只要在调试中有了前一次的测试结果，我们可以估算出要换用什么参数的新滤波元件，便能做到大体达标。

注意，为了与正规电源滤波器的滤波元器件的符号相一致，我们习惯上把差模滤波电容 C_D 称为X电容。

5.2 共模传导骚扰抑制分析

共模传导骚扰发射是由共模电流造成的，它并不在交流电源中流通，也不在电源输入之间形成环流。平衡的共模电流同时在相线L和中线N上流动，两者相位相同、幅度的相等。正如本文在关于开关电源中电磁骚扰的由来中叙述的那样，共模传导骚扰的发射主要是由开关晶体管集电极电压变动所引起的：初级电路中功率晶体管外壳与散热器之间的容性耦合会在电源输入端产生传导的共模噪声源。该共模传导的途径形成一个环路，环路始于高 dv/dt 的晶体管外壳，经过该晶体管外壳与散热器之间的寄生电容耦合，再经过散热器与开关电源外壳的连接，以及安全接地线，由交流电源的高频导纳和输入电源线（相线和中线）返回。

对于220VAC输入的开关电源，当开关波形的上升与下降沿达到100ns时，因开关晶体管集电极与散热器存在的分布电容，所以开关波形瞬变时会由电流经过分布电容流到散热器，最后进入安全地，瞬变电流的值要达到150mA（见本文第3部分《开关电源的电磁骚扰发射问题》中的3.5节）。

为了克服晶体管外壳与散热器之间因分布电容带来的有害影响，可以在晶体管外壳与散热器之间安装屏蔽层的绝缘垫片，并把屏蔽层接到开关电源初级的地回路。这样，晶体管开关时由 dv/dt 所引起的容性电流进入开关回路，而不是进入外壳或安全接地线。图7是屏蔽层的接线示意和实物图。晶体管的散热器仍接开关电源外壳，开关电源的外壳仍可接安全地。此法可大大减小进入交流电源的共模传导骚扰。

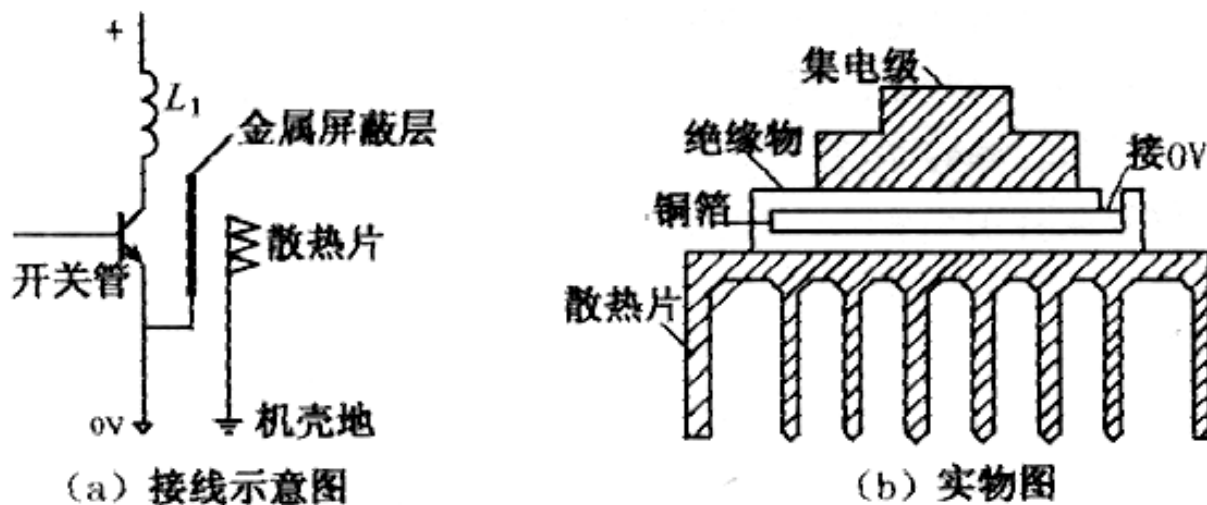


图7 晶体管管壳与散热器之间的屏蔽层接法

加接市电输入电路电源滤波器中的共模电容是抑制开关电源共模传导骚扰的又一主要措施。图8线路中的共模电容（ C_4 和 C_5 ）为共模电流返回开关电源初级的回路提供了捷径；滤波器的共模电感（ L_C ）则阻止了共模电流进入相线与中线。

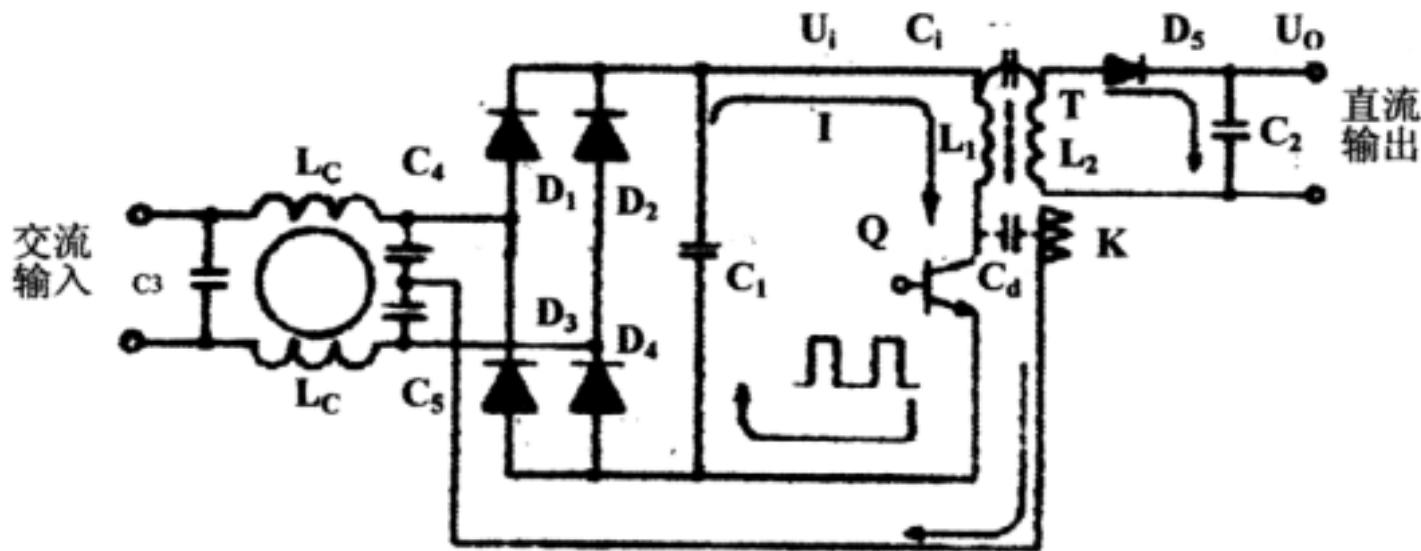


图8 加接共模电容（ C_4 和 C_5 ）为共模电流返回开关电源初级的回路提供了捷径

在图8这个例子里，开关电源的外壳不要直接接安全地。如果要接安全地（例如设备内部的配套电源），应该接一个电感器之后再接安全地，以免高频共模电流趁机逸出。在这种情况下可以再加一级共模滤波电容来进一步衰减共模电流，见图9。

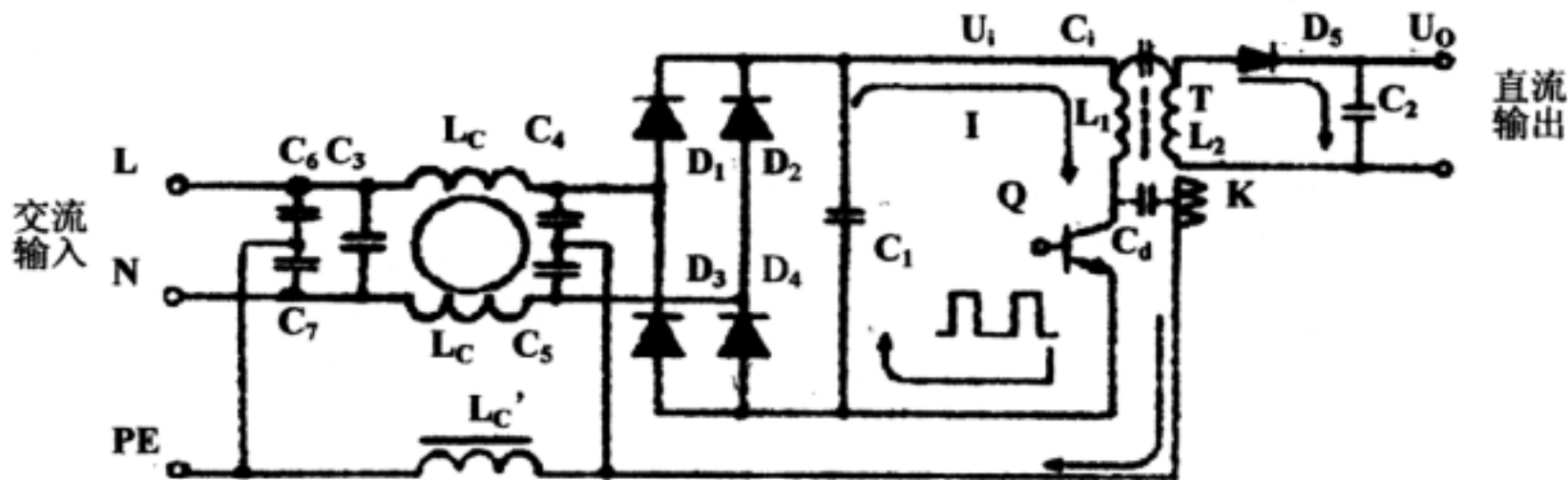


图9 增加一级共模滤波电容来进一步衰减共模电流

如果开关电源设计中给开关晶体管配备了足够大的散热器，因此散热器不用与电源的外壳连接，可以将散热器直接接到初级回路的地去，这时电源外壳可以直接接到安全地去，而不必担心共模电流的逸出。当然，如果能在开关电源输入滤波部分再加一级共模电容，将使共模传导骚扰的抑制能力有更进一步的提高，见图10。

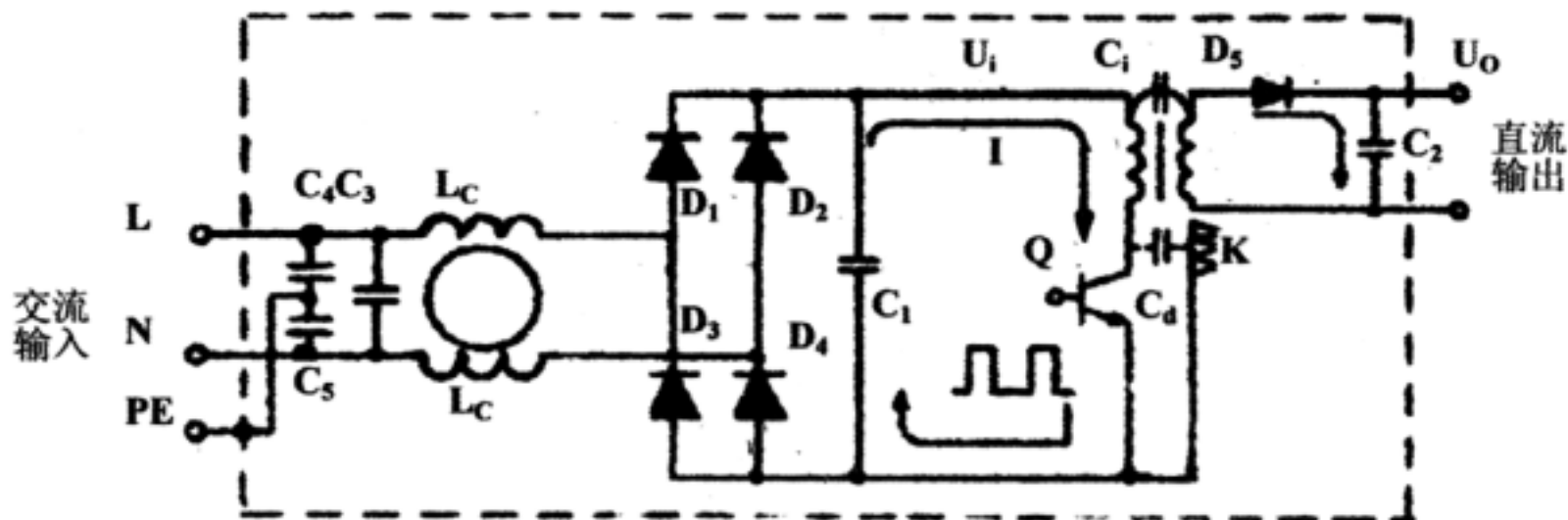


图10 用外壳接地和共模滤波来抑制共模骚扰

顺便指出，由开关晶体管集电极电压变动所引起的共模传导骚扰的发射不仅仅出现在交流电源的输入电源线上（相线和中线）。其实开关晶体管集电极电压的 dv/dt 变动还可以通过脉冲变压器初级和次级绕组之间的分布电容 C_d 出现在次级的两根直流输出线上，产生共模骚扰的输出。作为解决方案，可以在初级和次级回路的地线之间跨接一个电容 C_Y ，这个电容将为共模电流返回初级侧提供通路，从而抑制次级输出线上的共模骚扰，见图11所示。

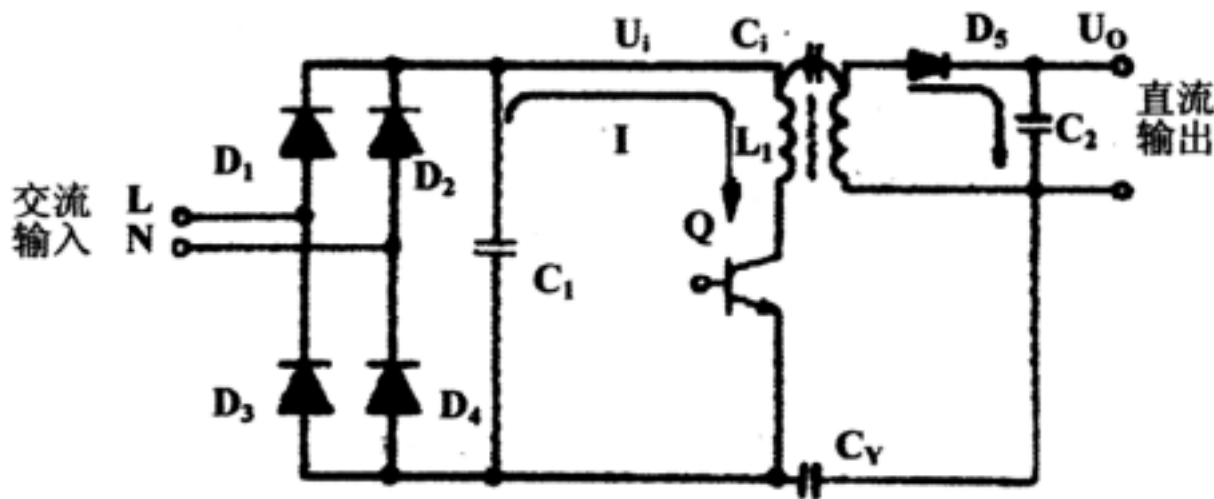


图11 通过初、次级回路地线间跨接电容来抑制直流输出线上的共模骚扰

同样，为了与正规电源滤波器的滤波元器件的符号相一致，我们习惯上把共模滤波电容称为Y电容。这样我们把输入滤波器中的共模滤波电容、初级与次级回路的地线之间的跨接电容都称为Y电容。

最后，一个完整的、对共模和差模骚扰都有抑制能力的滤波器电路见图12所示。图中，没有专门设置差模电感，而是利用共模电感绕制中的不完全对称所形成的一个寄生的差模电感来担当的。如果一节滤波不够，可以采用两节滤波电路。如果一节滤波，共模指标达标，差模尚有欠缺时，可以在滤波器输出端再增加两个差模电感。

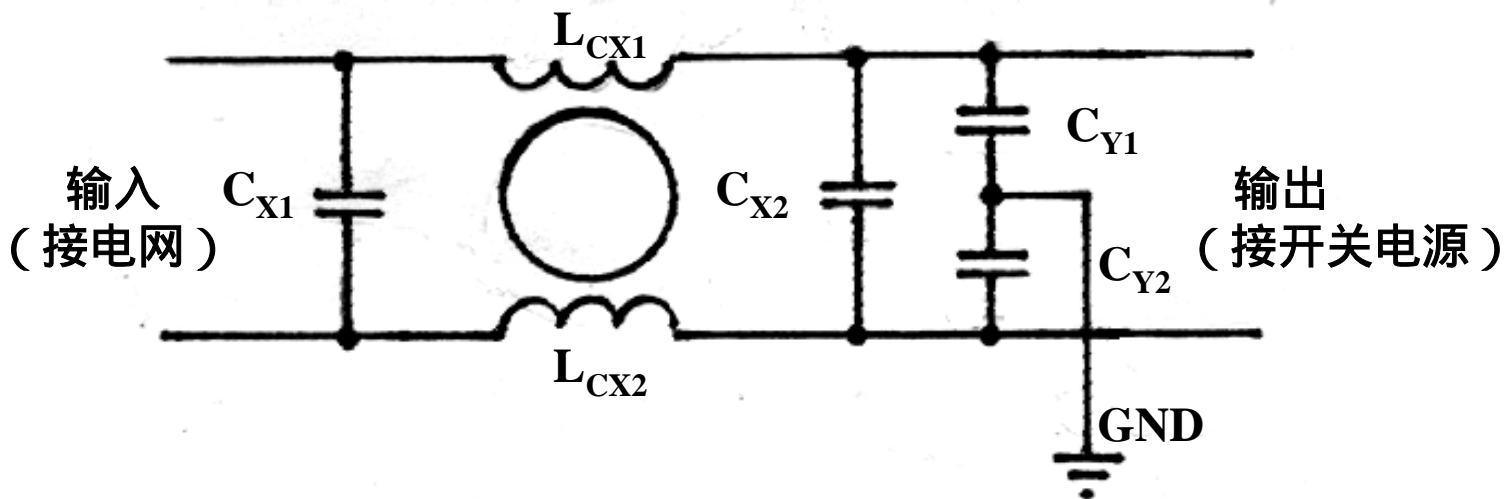


图12 开关电源的实用滤波器

5.3 开关电源输入滤波电路的基本参数和安全要求

. X电容

X电容跨接在电源线上，是滤波器中主要用来抑制差模干扰的部件。X电容的额定电压应当与电网电压相当；X电容的失效不会造成人员电击，故实用中X电容可以选得大些，典型值是零点几 μF 至 $1\mu\text{F}$ 。若考虑到被试设备有不同安全要求，则应选择不同脉冲耐压的电容器。下表是X电容的分级要求。其中X2级最常使用；X1级也常使用，但价格较高。

表2 X电容的分级

分级	峰值脉冲电压要求	IEC-664安 装类别	应用场合	在老化试验前应施加 的峰值脉冲电压
X1	> 2.5kV , 4.0kV		有高压脉冲	C 1.0 μF , UP = 4kV
X2	2.5kV		一般用途	C 1.0 μF , UP = 2.5kV

. Y电容

Y电容用在电源进线对地；初级地对次级地，或机架、屏蔽及大地之间。Y电容用来对付共模干扰电压。但要注意：Y电容失效会导致人员电击；Y电容有最大漏电限制（其范围在0.25mA ~ 3.5mA之间，由产品标准定）。故对Y电容除了有耐压要求外，对电容量也有一定要求（常选1 ~ 4.7nF，2.2nF为典型值）。表3是对Y电容的分级要求。

表3 Y电容的分级

分级	绝缘类型	额定电压(VAC)	试验电压	老化试验前要施加的峰值脉冲电压
Y1	双层绝缘或加强绝缘	250V	3000VAC	8.0kV
Y2	基本绝缘或附加绝缘	150V , 250V	1500VAC	5.0kV

Y1电容用在AC输入线与次级地，或初级地与次级地之间。Y1电容必须满足耐压的要求（对进线电压为230VAC的，要用3000VAC，试验1分钟）。

Y1电容通常不用在三线输入的情况下。

Y2电容不满足加强绝缘的要求，在两线输入开关电源中要用两只2200pF的Y2电容串起来，用在初级地与次级地之间。这样即使有一个Y2电容产生短路失效，也不致产生危险。串联联接的两个Y2电容也必须满足耐压的要求（对进线电压为230VAC的，要用3000VAC，试验1分钟）。

对3线输入的开关电源，Y2电容可以用在AC输入线与次级地，或初级地与次级地之间。因为接大地线能够旁路掉Y2电容短路失效所产生的故障电流。

实用中，可以用两只Y2电容串联起来代替一个Y1电容，此时每个Y2电容的容量要加倍。

从开关电源要顺利取得3C认证的角度出发，开关电源内部涉及到安全要求的一些器件首先要取得安全的认证，其中电源的输入滤波器首当其冲。因此，滤波电容必须符合安全认证的要求，开关电源的制造商必须要能出示滤波电容制造商所提供的认证证明，否则开关电源制造商就得承担所用滤波电容的安全检测费用。另外，在产品认证时，要申报安规电容的生产厂、产品的品牌及型号。今后生产中如变更厂牌，则要向认证机关重新申报。产品生产中如要变更安规电容的规格,则只允许换小，不可以换大，否则要重新申报。

· 滤波电感

对电感器要关注三个关键参数：有效的阻抗特性；电流额定值和通过浪涌电流的能力。

将差模电感器用在滤波器中，作为抑制差模与共模干扰的手段，一般仅见于5W以下的小功率电源。使用时要考虑到通过电流的峰值，常将分离电感放到每一边，以平衡高频阻抗。

在大功率情况下经常采用共模电感器（如图13所示），这是专为抑制共模干扰而设计的一种电感器。共模电感在一个铁芯绕了两个相同的绕组，这样，在差模电流作用下，它们所产生的磁场是相互抵消的，因而磁芯材料不受任何影响，不用担心磁芯会发生饱和现象。基于这一原因，共模电感器通常都采用频率特性好、导磁率高的铁氧体材料作为其制作材料。

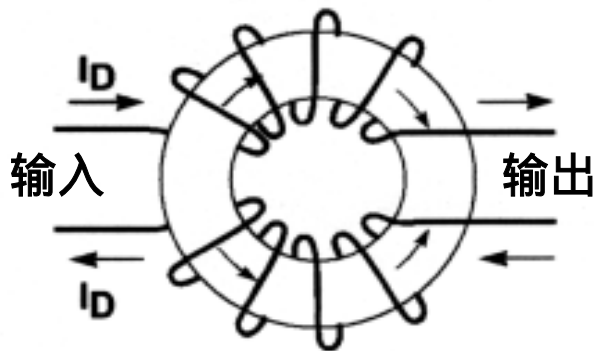


图13 理想的共模电感器

共模滤波器要求采用相对较大的电感量。大多数应用场合中的共模电感在几个mH ~ 二、三十mH，共模电感的电感量不受差模电流的影响。

需要指出的，从制作工艺上来说，共模电感上的两个线圈，不可能做到完全对称，故共模电感器本身也残留了部分差模电感的成分，因此共模电感器对抑制差模干扰也有一定作用，应该说是增加了共模电感器的功能，同对又不增加其成本。只是对于这种共模电感，当其通过的电流足够大时，仍有可能引起磁芯一定程度的饱和，从而引起共模抑制能力的减弱。

除了环形磁芯制成的共模电感器外。在开关电源中用得较多的是类似图14和图15是两种分别称为“U型磁芯”和“管筒磁芯”的共模电感器，具有绕制方便，电感量大的特点。为了减小寄生电容，这两种共模电感器都采用了分段绕制的办法。

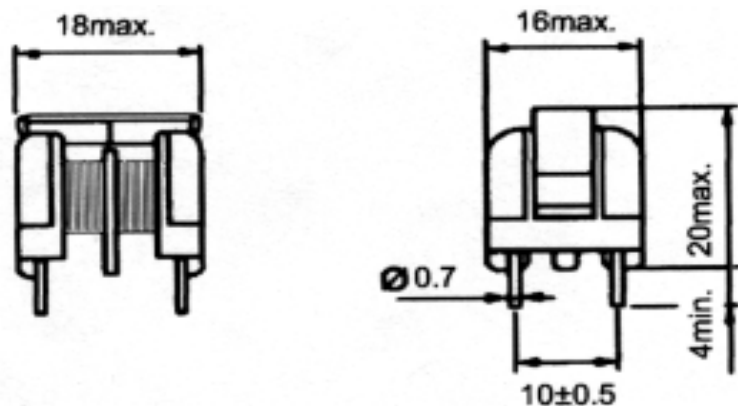


图14 U型磁芯共模电感器图

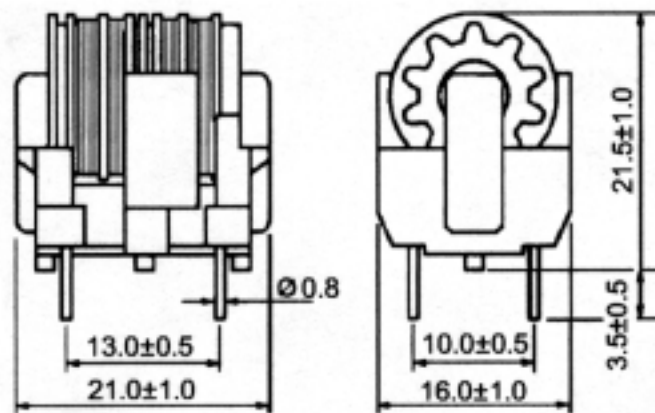


图15 管筒磁芯共模电感器

. 滤波元器件的安装

最后要指出的是，当需要抑制的传导骚扰的频率比较高的时候（超过1MHz），元件的布局变得非常重要，不适当的布局会导致电容的ESL增高，引起传导骚扰的抑制情况变差，甚至有可能使噪声电压直接耦合到交流电源线上。通常要求滤波元器件的布局要比较紧凑，特别是共模电容的引脚必须非常地短，直接接到需要接电容的地方去。

图16是一个普通滤波器的内部结构，这一结构和布局的构思同样适用于开关电源输入滤波器的布局。这种滤波器具有共模和差模两种电感的，以衰减两种噪声为目标的。共模电感采用铁氧体环形磁芯；差模电感采用铁粉芯磁芯。由于铁粉芯磁芯抗饱和的能力较强，即使开关电源输入电流有强脉冲电流通过，电感量也不会下降太多，所以用它做差模电感最合适。图中结构另一值得借鉴的地方是，输入与输出的彻底分开，避免了已经滤过波的输出线重新被输入端的干扰所玷污。

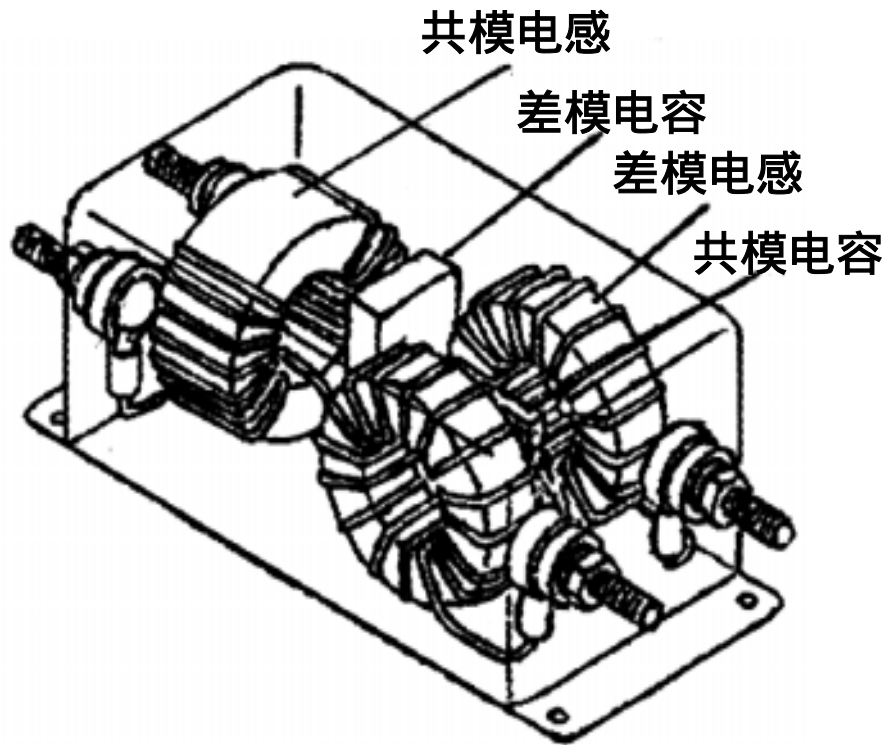


图16 商品化电源滤波器的内部结构

6. 开关电源的辐射骚扰测试

6.1 开关电源的辐射骚扰限值

按GB9254-1998《信息技术设备无线电骚扰限值和测量方法》的要求。不同频率范围的A级和B级设备辐射骚扰限值见表4所示。

表4 开关电源的辐射骚扰的限值要求

频率范围 MHz	A级设备	B级设备
	准峰值 dB μ V/m	准峰值 dB μ V/m
30 ~ 230	40	30
230 ~ 1000	47	37

在标准中，限值是以测试距离为10m给出的，但试验常常会在3m测量距离的实验室进行，这时用 $20\lg(10/3) = 10\text{dB } \mu\text{V/m}$ 来修正。举例说，B级设备在10m处、频率为100MHz时，3m测量距离的限值为40dB μ V/m。

6.2 测试辐射骚扰发射的试验配置

按照GB9254标准的要求，受试设备的辐射骚扰发射试验在电波暗室中进行（图17），基本的试验仪器是两件：接收天线和带有准峰值检波的干扰接收机。测试距离通常为3m。

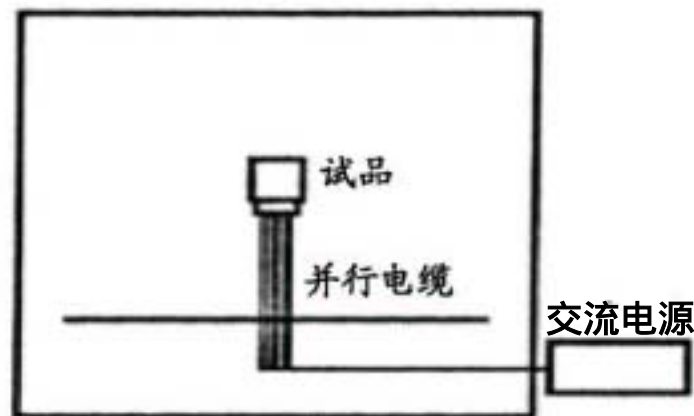
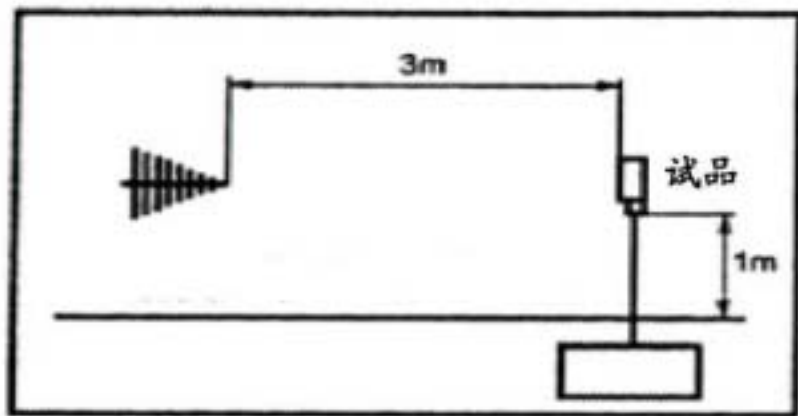


图17 在电波暗室进行辐射骚扰发射的测试

7. 开关电源辐射骚扰的抑制技术

通过本文第3部分《开关电源的电磁骚扰发射问题》的叙述可以看出，造成开关电源产生辐射骚扰的主要原因是初级开关调整回路和次级高频整流回路的布局 and 布线不当所造成的。辐射骚扰的强度与 IAf^2 的乘积成正比。其中 I 是高频电流环路中的电流强度； A 是环路所包围的面积； f 是电流频率。

因此，作为辐射骚扰的抑制措施，要特别注意开关电源的布局 and 布线。作为补救，在开关电源的结构上和器件的采用上也可采取适当措施（如屏蔽和滤波等）。

7.1 印刷电路板的设计

电子设备（包括开关电源在内）设计对所有的信号线都实现最佳布线是不可能的，应首先考虑最重要的部分。从电磁骚扰发射的角度考虑，最重要的信号是高电流和电压变化率（ di/dt 和 dv/dt ）信号，如时钟线、数据线、大功率方波振荡器等。从敏感度的角度考虑，最重要的信号是前后沿触发输入电路、时钟系统、小信号模拟放大器等。针对开关电源设备来说，开关调整回路和整流输出回路是最重要的电磁骚扰发射线路；而反馈控制则是最重要的敏感线路。一旦把这些重要信号分离出来，就可以把重点放到这些线路的设计上。

7.2 一个抑制电子线路辐射骚扰发射的实例（实验例）

为了给大家以直观的感觉，特地借用日本村田制作所部分资料。利用一个简单的电路（几片IC电路）和布局，进行辐射骚扰测试。相信其结论也能用在开关电源的线路设计上。

图18中IC1（74HCU04）和石英晶体构成一个时钟发生器，产生16MHz信号输入IC2（74HC04），IC2的输出端开路，由于线路板的电源线已采取噪声抑制措施，故在试验中产生的辐射骚扰认为只来自数字集成电路及其布线。试验在电波暗室用“3米法”进行（下同）。就目前这个线路说，辐射噪声电平低于规定限值。

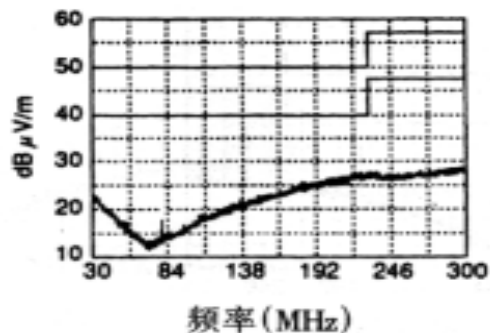
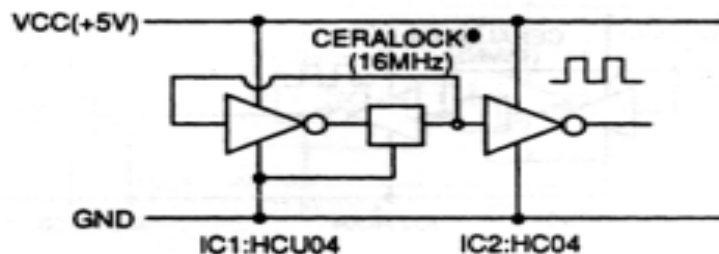


图18 电子线路的辐射骚扰发射试验

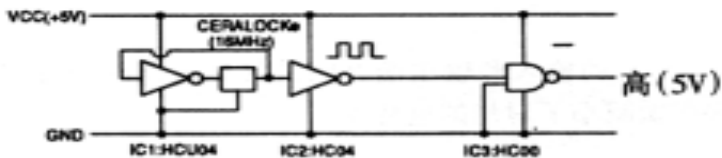
下面三张图（图19～21）分别给出保持信号线长度不变情况下，信号线与地线的距离对辐射噪声的影响；以及保持信号线与地线距离不变情况下，信号线长度对辐射噪声的影响。

在信号线长度不变的前提下，信号线距离地线越远，线路所产生的辐射噪声越大。

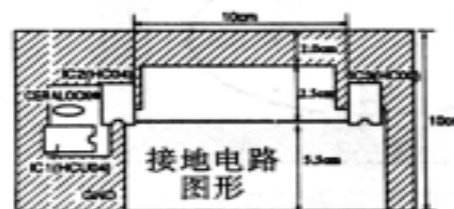
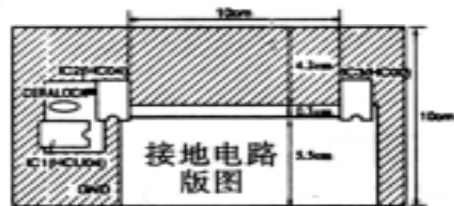
在信号线距离地线的尺寸保持不变的前提下，信号线越长，线路所产生的辐射噪声越大。

在保持信号线长度与相对地线距离不变的前提下，线路的工作频率越高，辐射噪声就越大

测试电路



电路板布局和噪声辐射



【辐射噪声】

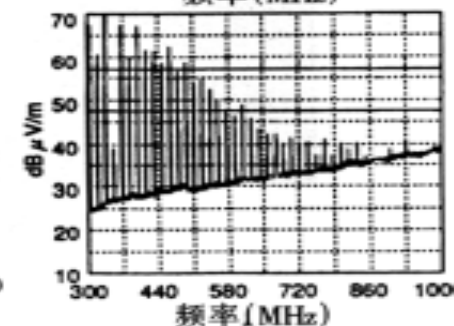
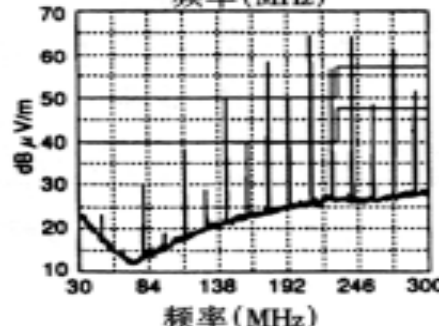
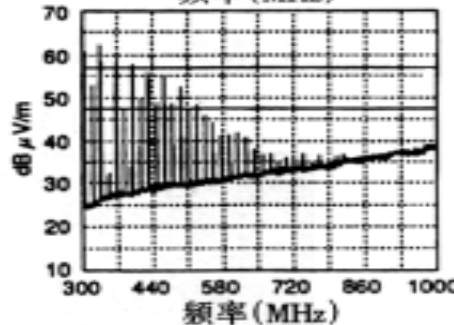
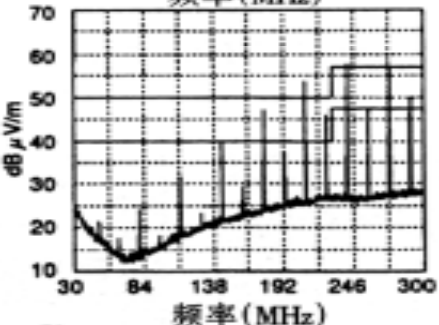
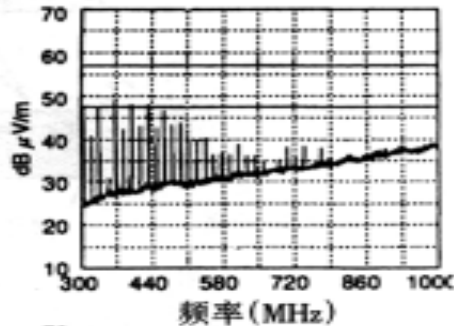
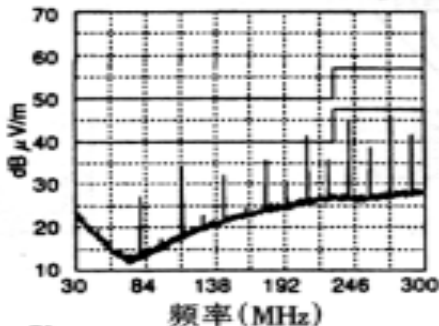
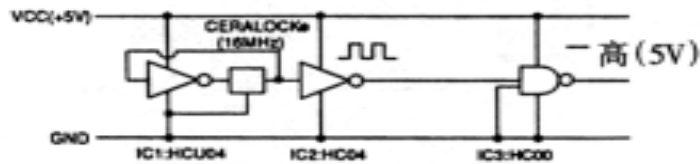


图19 信号线长度不变，信号线与地线距离不同对辐射骚扰测量的影响

■测试电路



■电路板布局



■辐射噪声

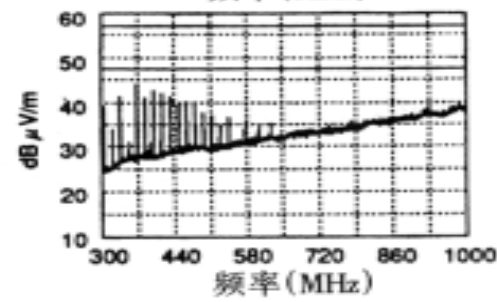
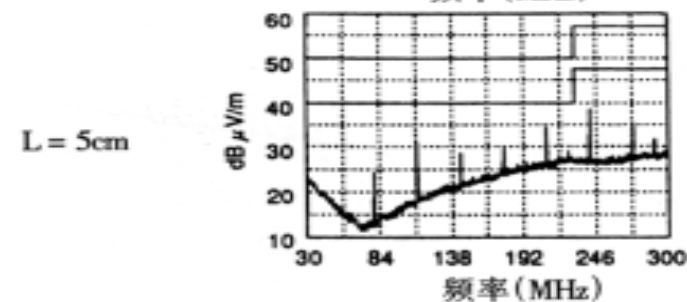
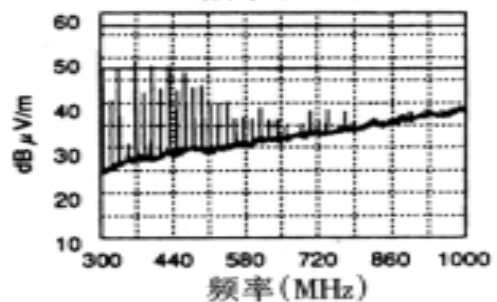
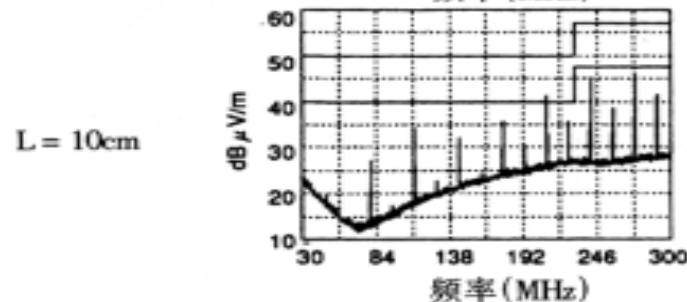
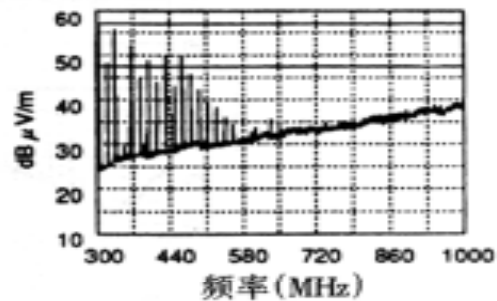
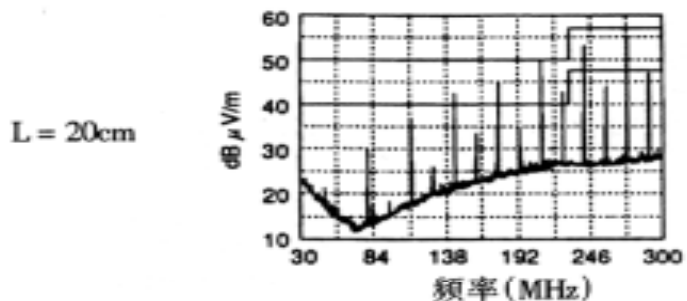
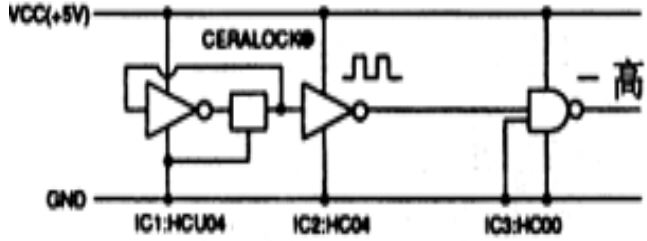
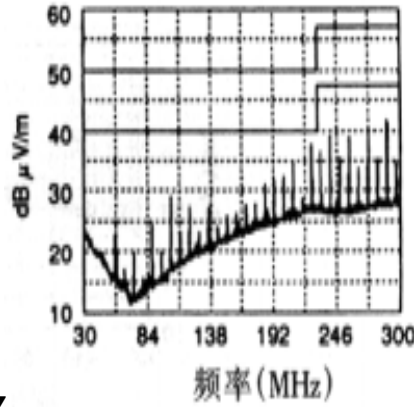


图20 信号线与距离不变前提下，信号线长度变化对辐射骚扰测量的影响

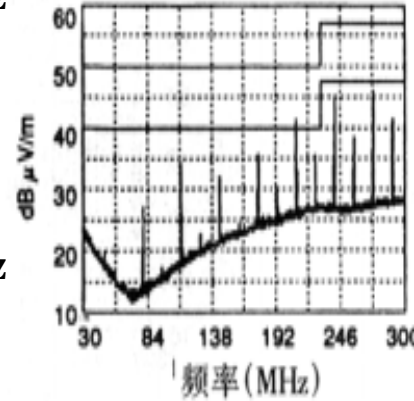
线路图：



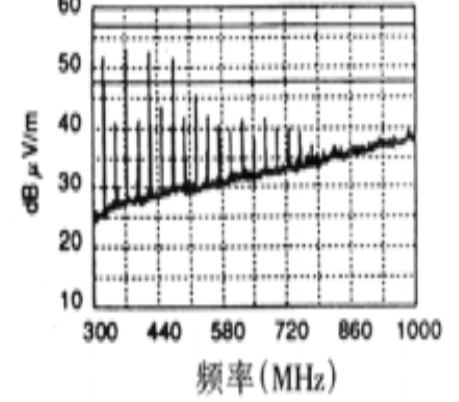
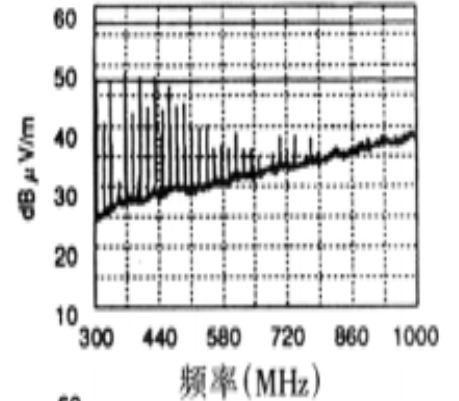
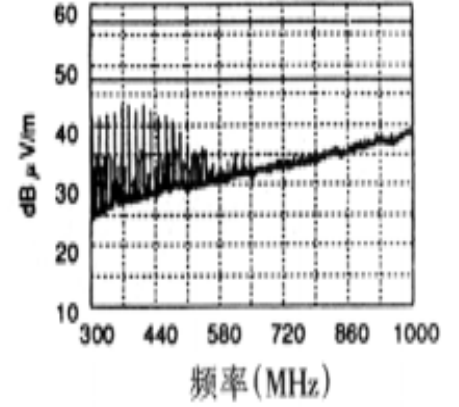
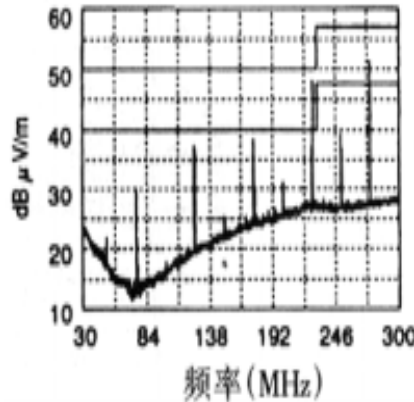
8MHz



16MHz



25MHz



线路板布局：

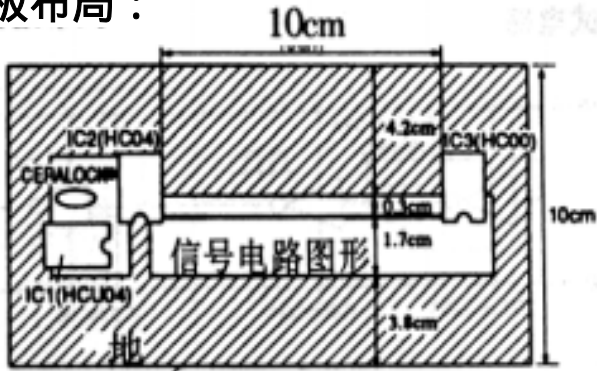
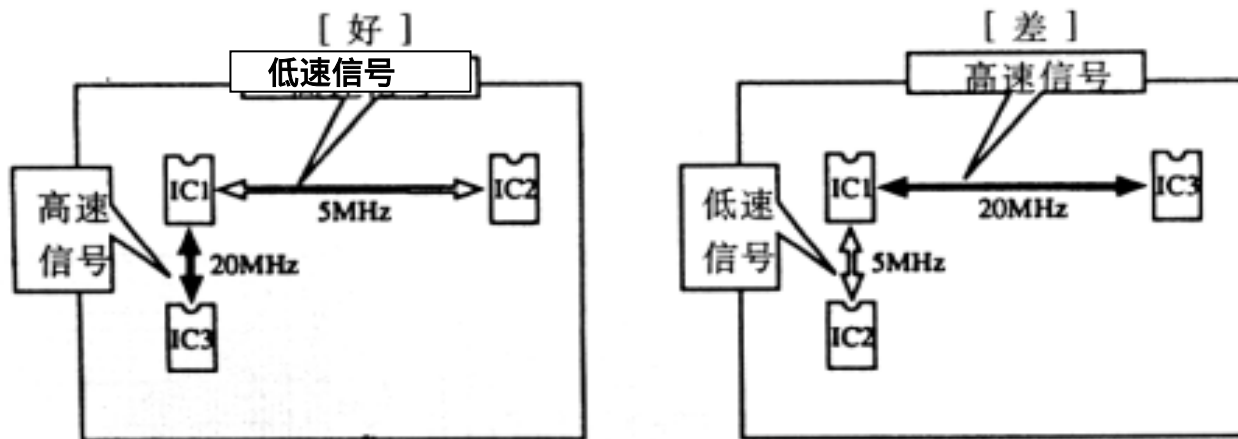


图21 信号线长度以及信号线与地线距离不变前提下，不同工作频率对辐射骚扰测量的影响

图22进一步说明高频、高速线路的排布要紧凑，要远离外接电缆，防止不必要的噪声辐射。

缩短高速信号线，以减小由此所产生的辐射噪声：



将噪声电平较高的电路与电缆隔离以减少噪声的耦合：

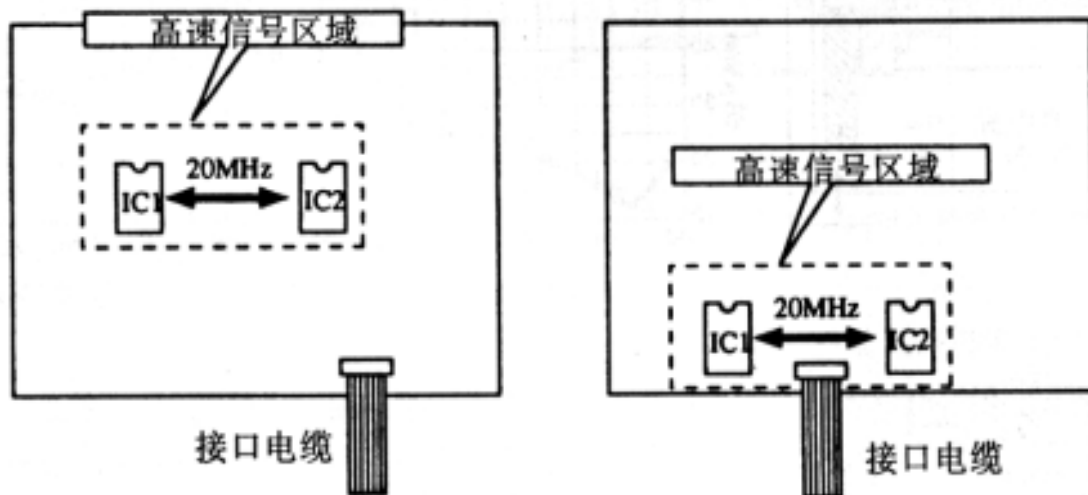
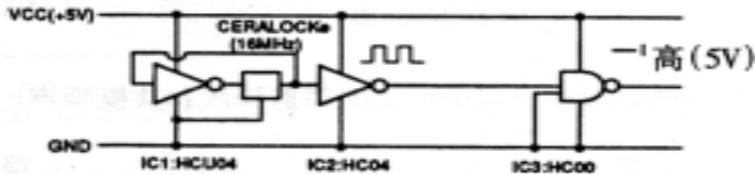


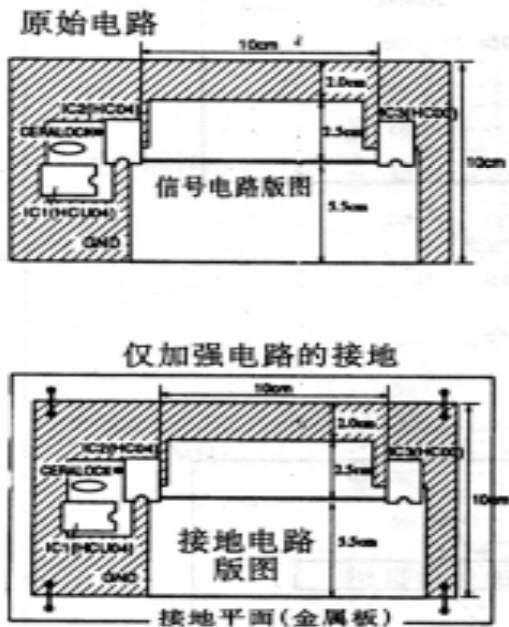
图22 印刷电路板布局 and 布线不同对辐射骚扰测量的影响

图23则说明在线路板下方复一块接地板可以抑制噪声的辐射。尽管这不是采用多层板来进行线路的试验，但同样可以说明多层板中地线层的作用。

■测试电路



■电路板布局和噪声辐射



【辐射噪声】

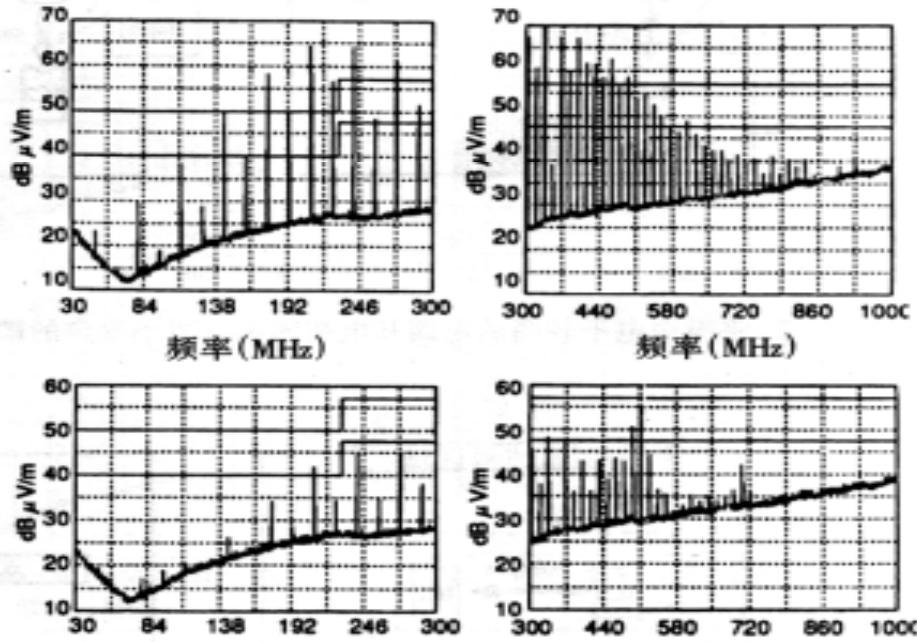


图23 在印刷线路板下复一块接地板对线路辐射骚扰测量的影响

如前所述，线路板上的数字集成电路及其布线是产生电磁骚扰的主要因素，但是通过对集成电路的合理布局和走线，以及安装参考接地板、降低线路的工作频率等措施，都有可能抑制线路工作中所产生的噪声。

除此之外，我们在线路板的适当部位插入一些表面贴装的EMI滤波器（包括EMI磁芯、RC滤波电路等等），同样有可能把电磁骚扰抑制到可以忍受的程度内，下面这些图片将用来说明这个问题。试验仍以图18线路为基础进行（两个IC电路，工作频率16MHz）。

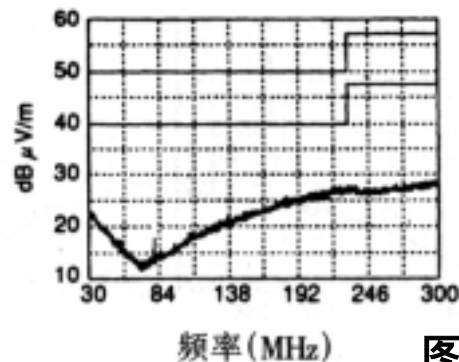
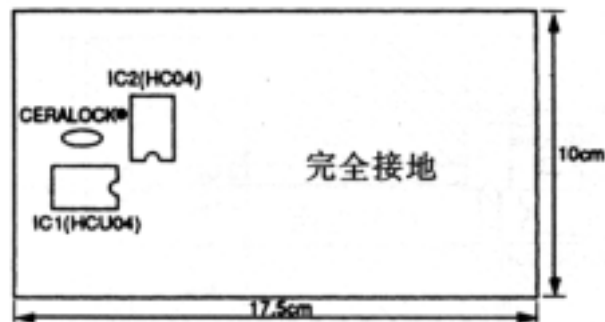
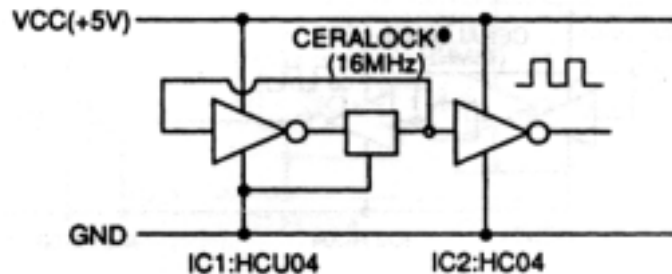


图18 (见 p.56)

再次做试验（图24）。在IC2原先开路的输出端上用10cm的信号线连至IC3（74HC00）。结果发现该线路板产生的辐射噪声超过了CISPR标准B级所规定的限值。十分显然这是由IC2输出至IC3的信号线，以及经地线返回IC2的电流所产生的。当然，就这个电流本身而言是差模电流，但是“3米法”测试中天线测到的则是共模发射。

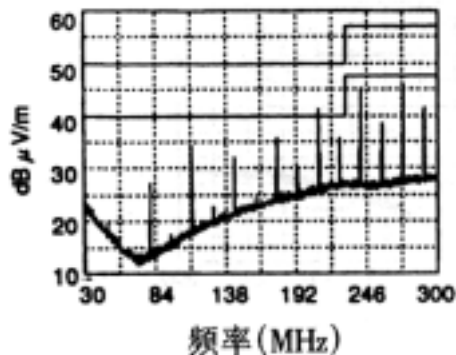
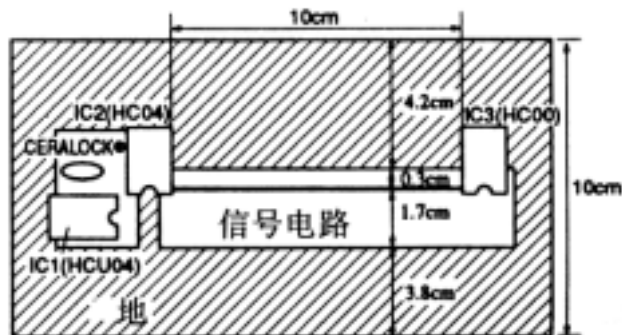
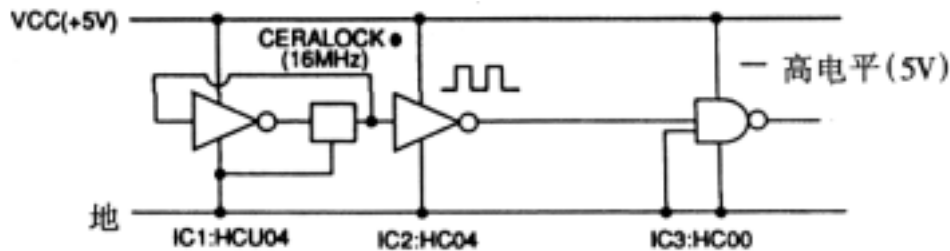


图24 线路板信号线“过长”所引起的辐射骚扰超标（1）

进一步做试验。在10cm信号线的始端加一个NFM51R系列的EMI滤波器来抑制充当噪声天线的信号线所辐射的噪声（图25），从测得的数据看，EMI滤波器确实能消除大部分的辐射噪声。

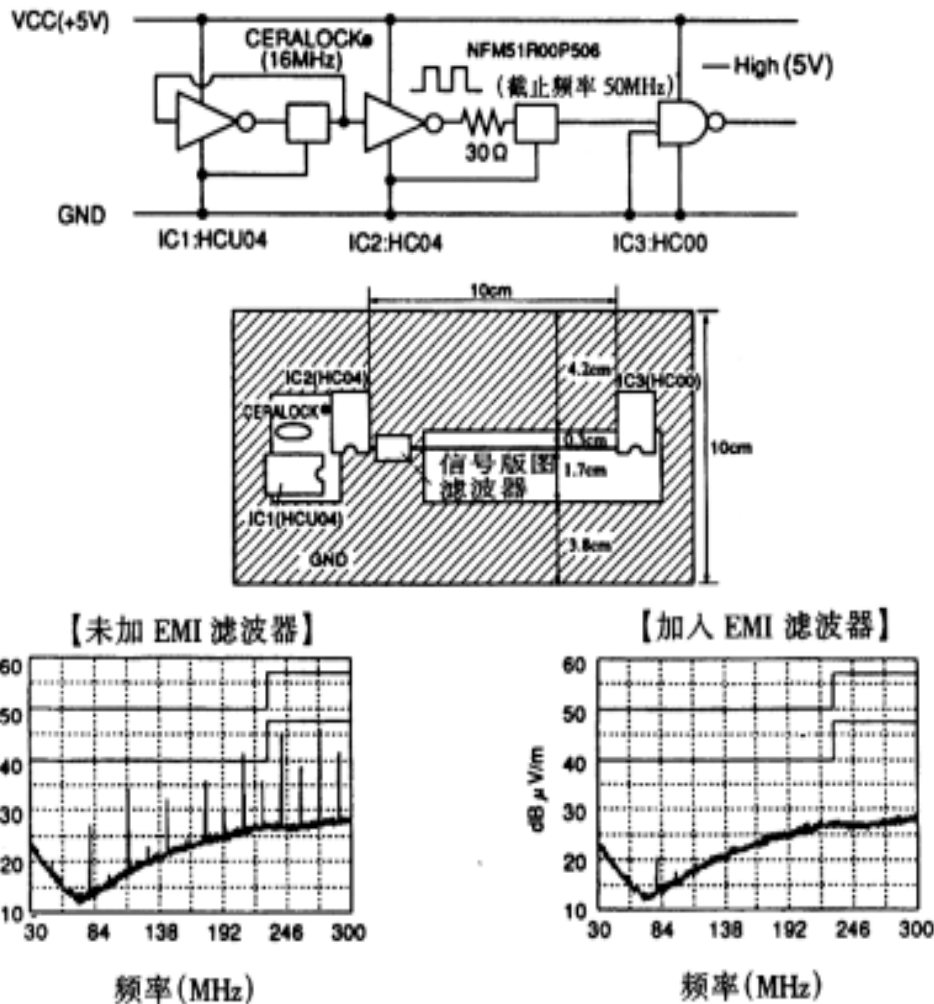


图25 采用EMI滤波器来抑制信号线的辐射骚扰（1）

继续做上面试验。将10cm信号线在始端处断开，另外再接一根10cm的导线（如图26），发现同样是10cm的线，新的连接方法比老的连接所产生的噪声要大得多，出现这一现象的原因是新的接线比老的可以更有效地辐射噪声（高速电路尤其）。

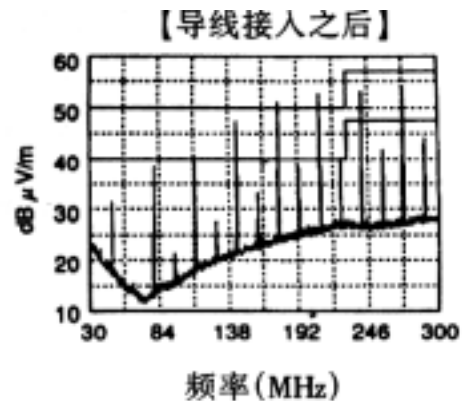
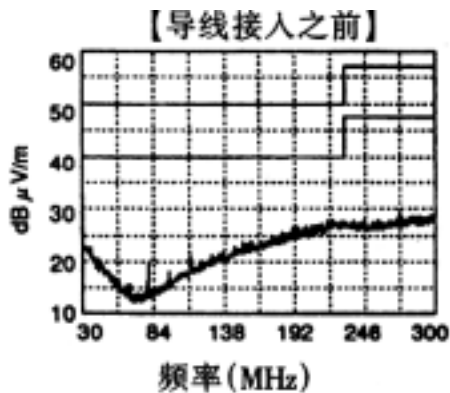
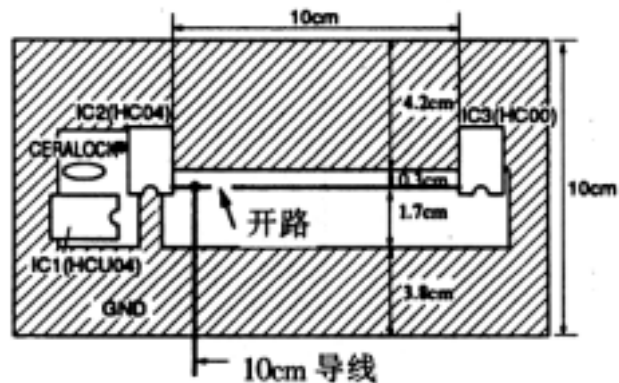
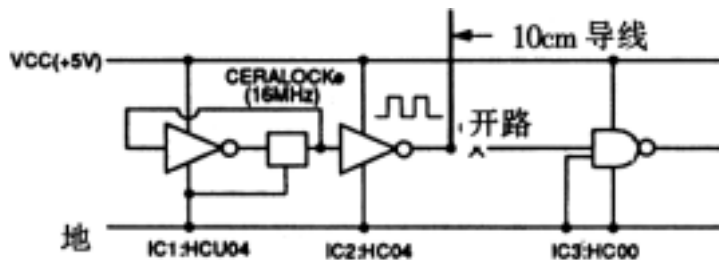


图26 线路板信号线“过长”所引起的辐射骚扰超标（2）

再次将EMI滤波器接在10cm导线的前面（亦即，放在IC2的输出脚与10cm导线之间，见图27），发现EMI滤波器阻断了噪声进入那条导线的通路，从而几乎彻底消除了辐射噪声。

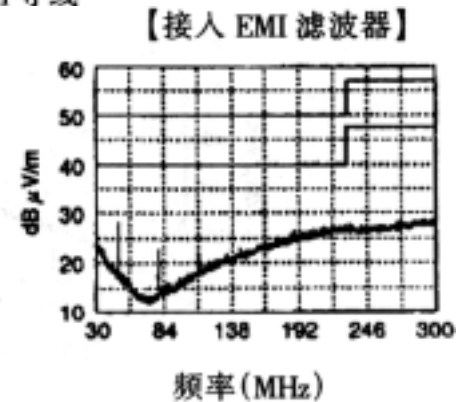
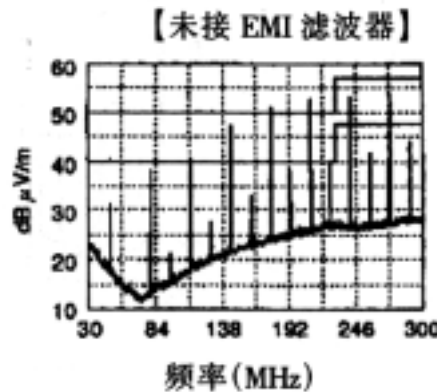
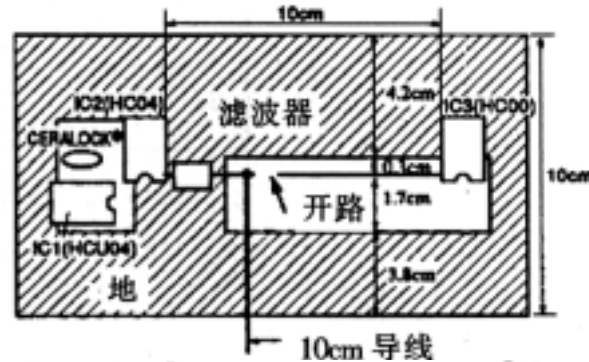
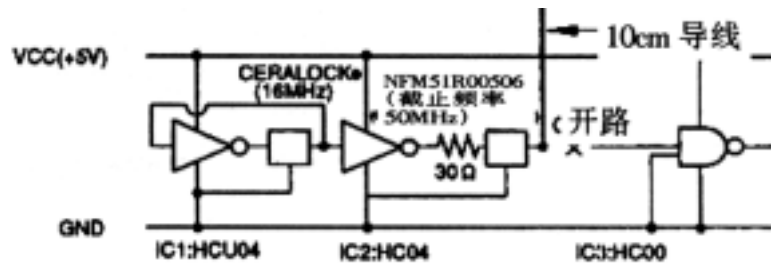


图27 采用EMI滤波器来抑制信号线的辐射骚扰（2）

在前述线路中，回复到第2次做试验的线路，再将一片 IC4 (74HC04) 置入图28所示位置，该电路输入接地电位，故输出为高电位，然后在 IC4 的输出与接地处各引出1根1m长的导线，结果发现测得的噪声大出10多dB，而且是16MHz（时钟频率）的谐波。

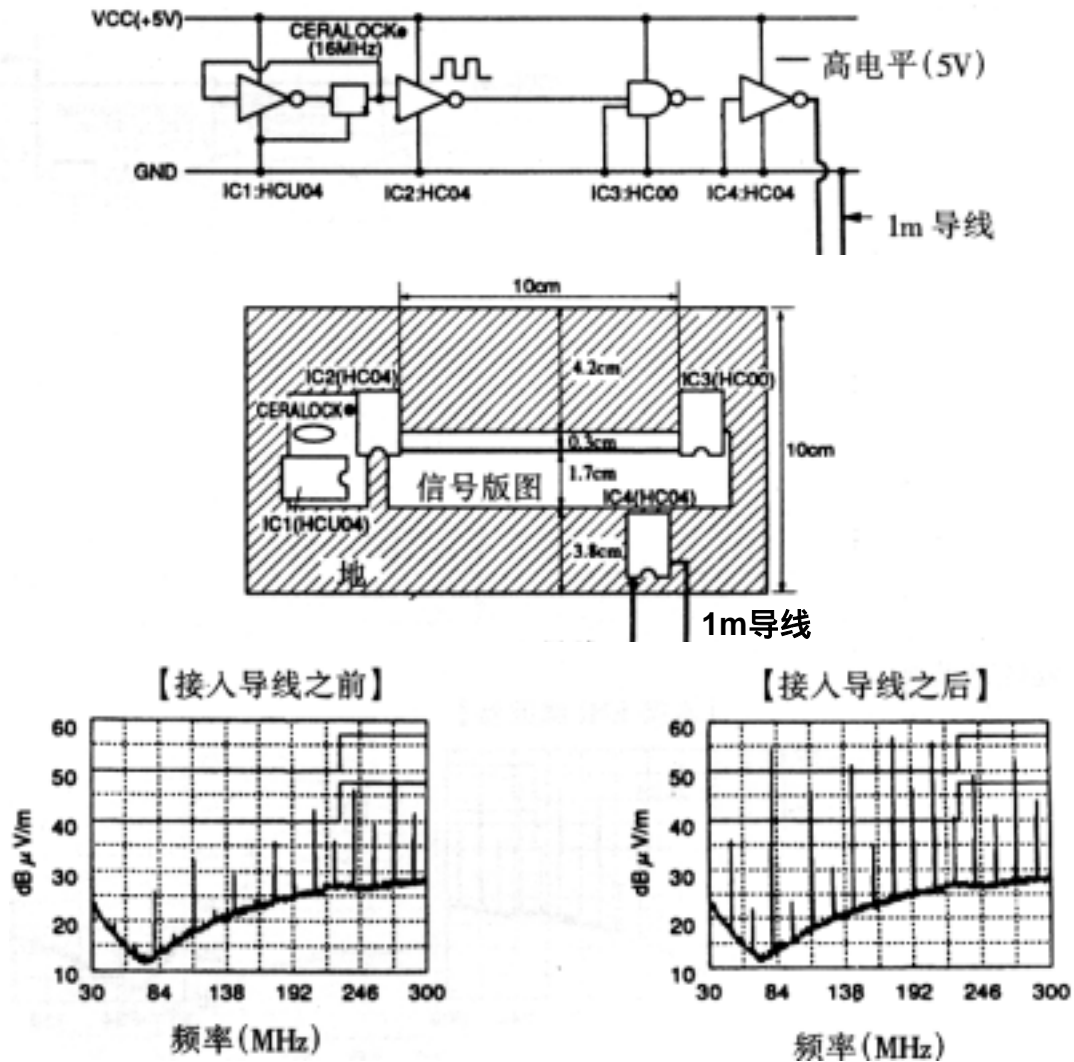


图28 线路板引线“过长”所引起的辐射骚扰超标 (3)

进一步判断上述噪声来自哪一根线，为此拆去IC4的输出线，保留接地导线，发现测结果几乎没有变化。这表明噪声是由接地点发出的，而接地线里的地线电流频率就是时钟电路的工作频率及其谐波频率，通过接地长线构成的发射天线向外辐射（图29）。

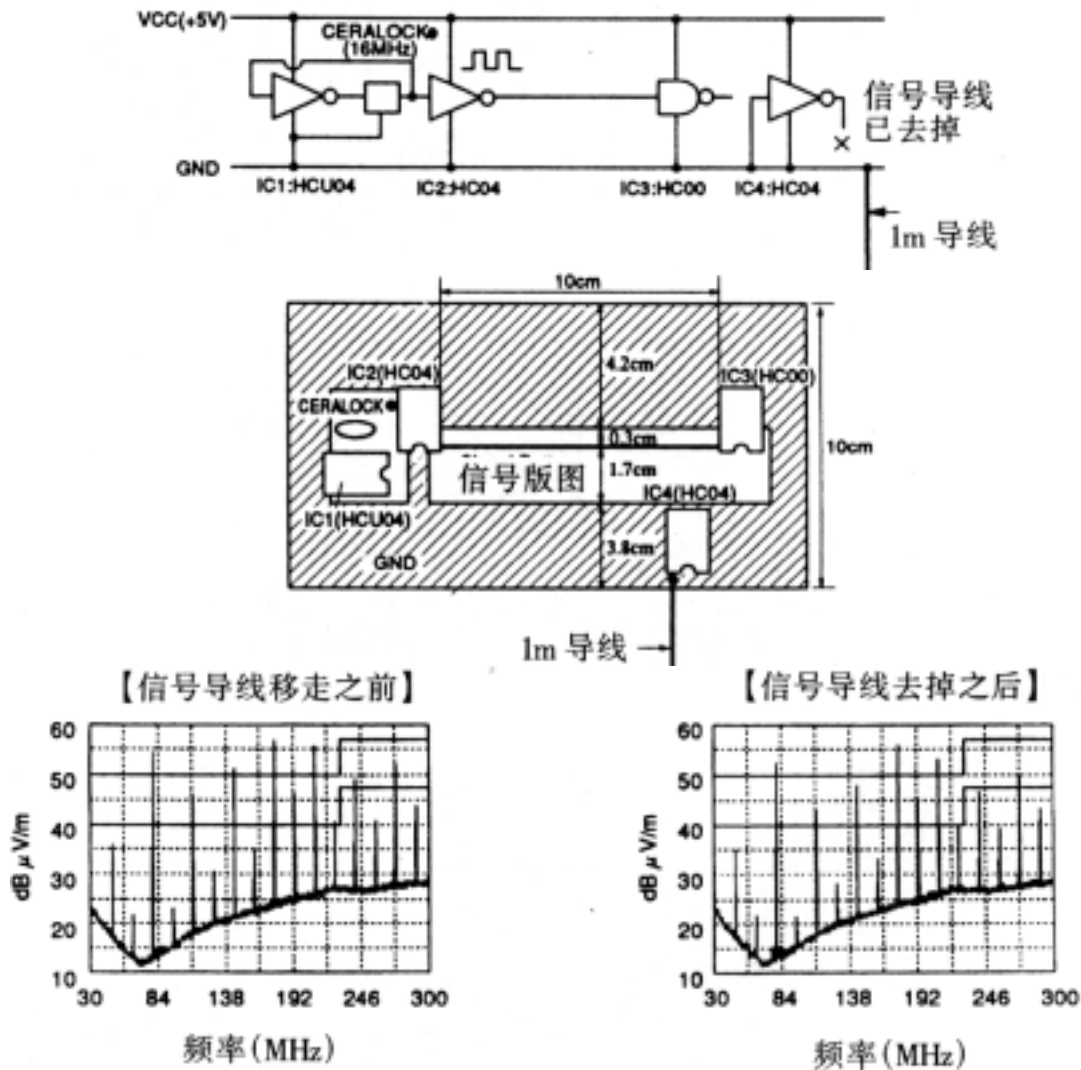


图29 对由引出线引起的辐射骚扰的判断（3）

作为处理的措施，方法之一是线路板下面接一块大的接地平面，可以比较有效地降低辐射噪声，但在个别频点上还不够。进一步在引出导线的前面再接入一个EMI的滤波器，发现几乎完全消除了先前所存在的辐射噪声（详见图30）。

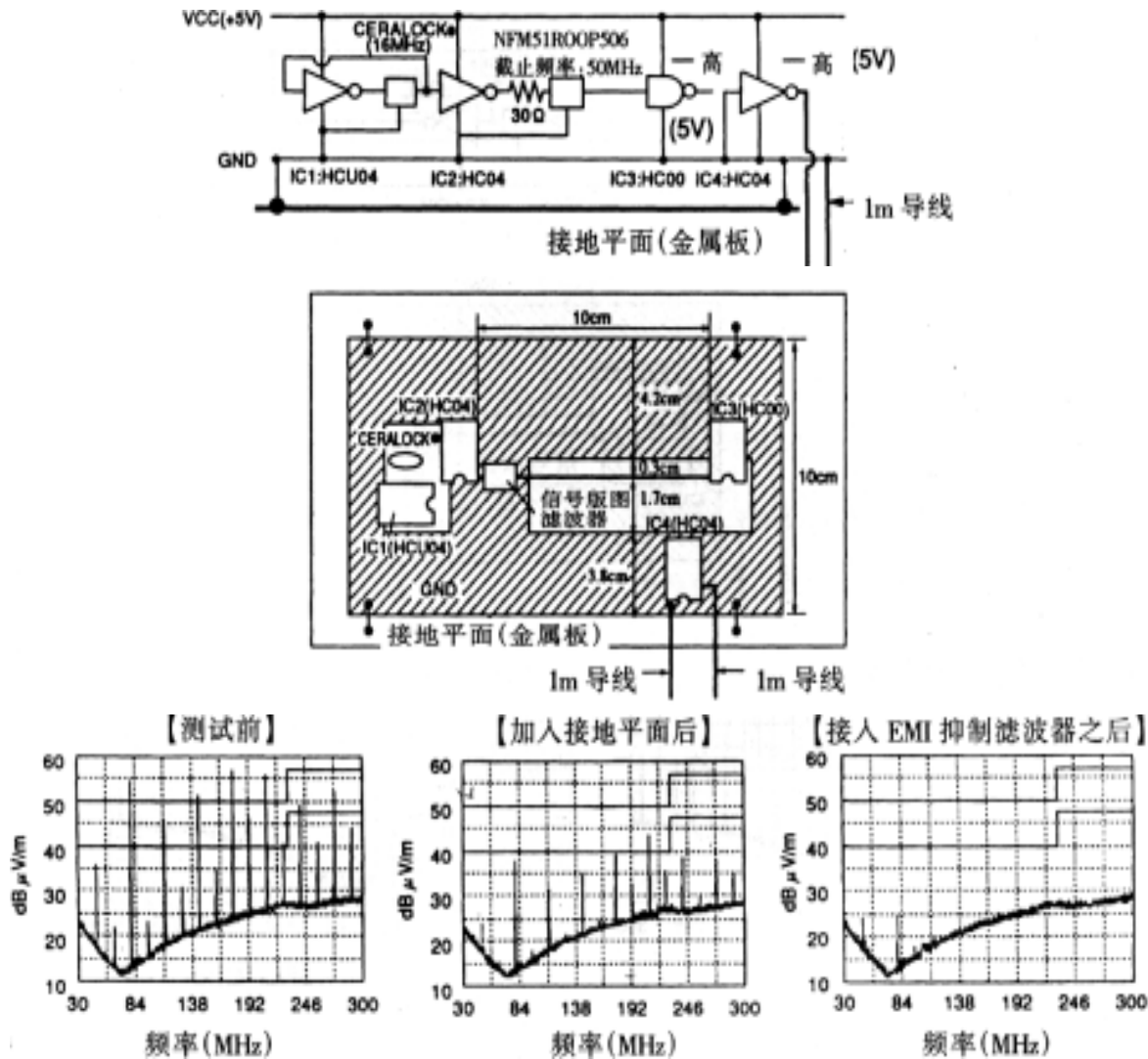
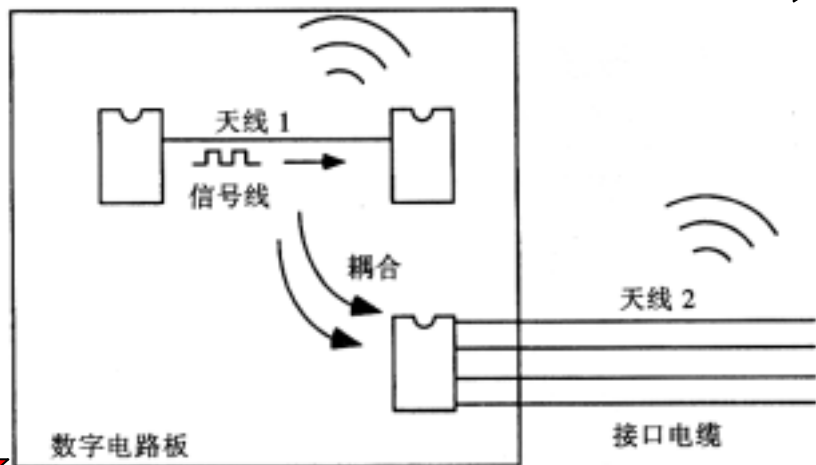


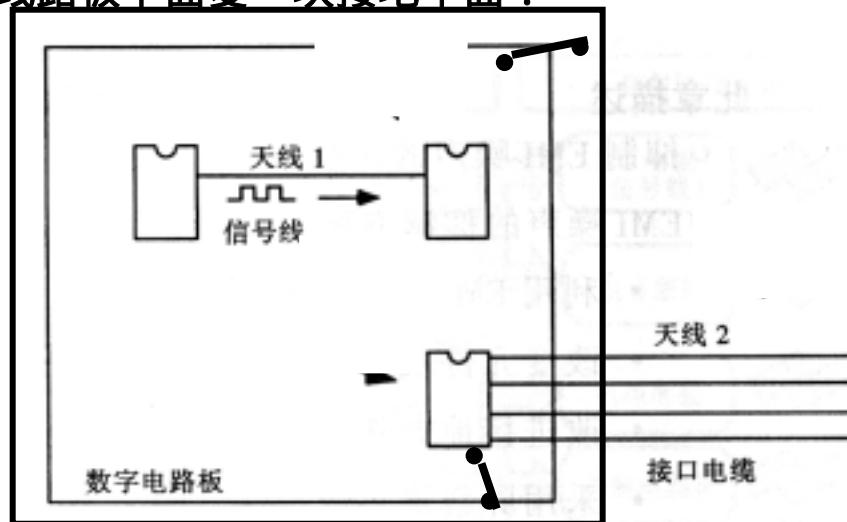
图30 采用接地板和EMI滤波器来抑制引出线的辐射骚扰 (3)

辐射噪声抑制小结 (图31) :

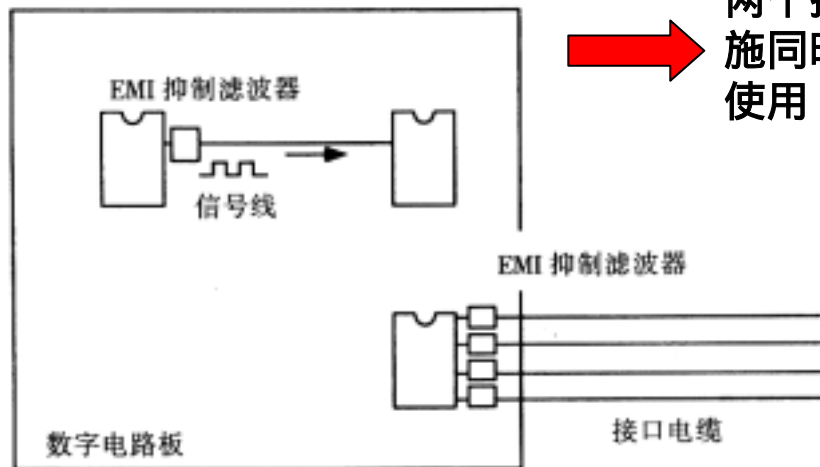
普通线路板 :



线路板下面复一块接地平面 :



运用EMI滤波器



两个措施同时使用 :

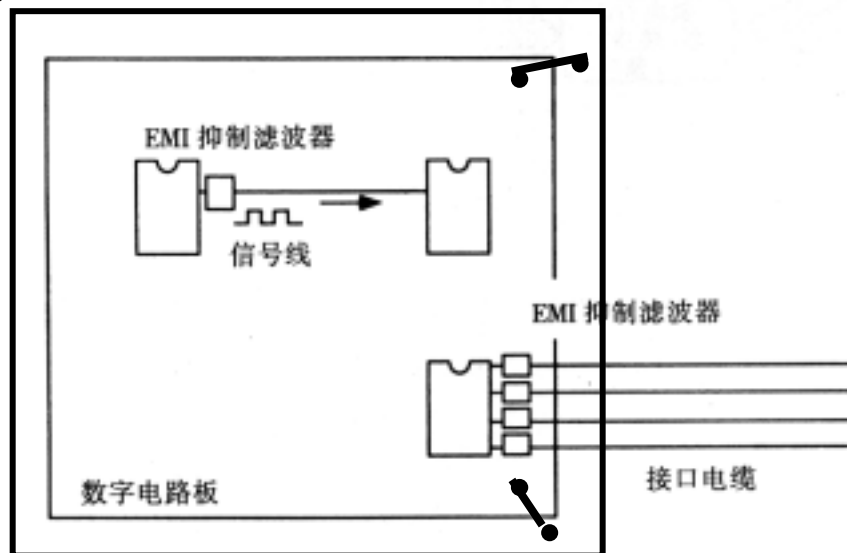
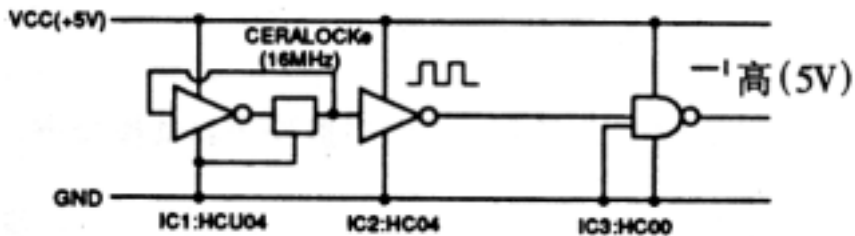
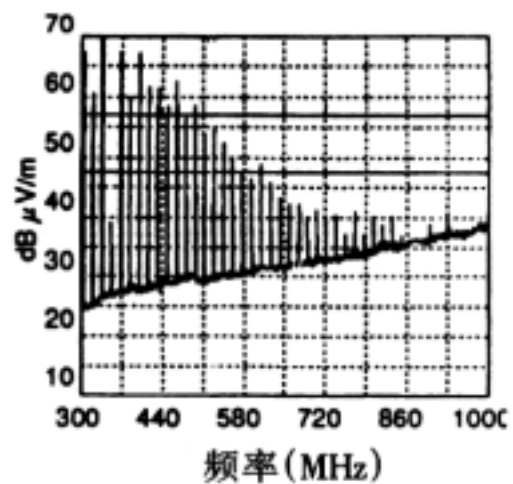
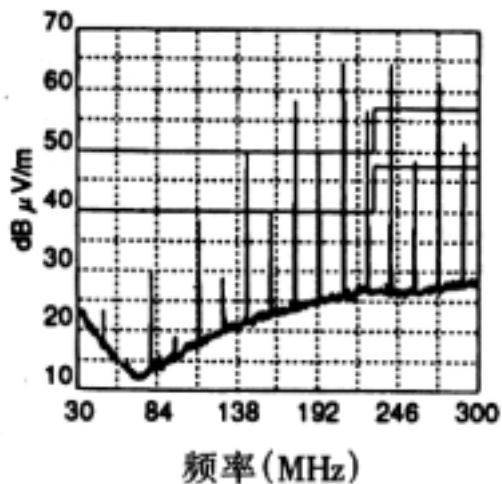
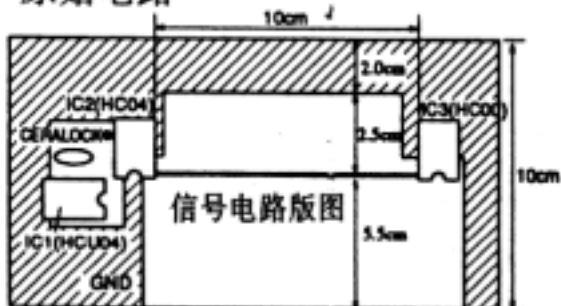


图31 线路板辐射噪声抑制方法小结

■ 测试电路



原始电路



仅加强电路的接地

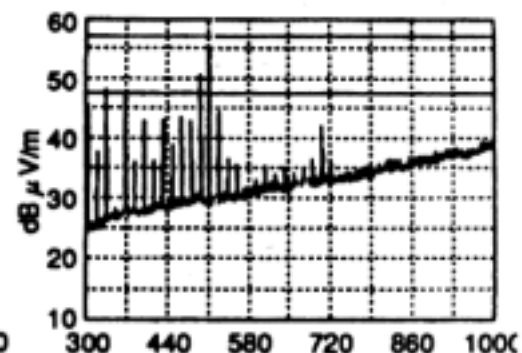
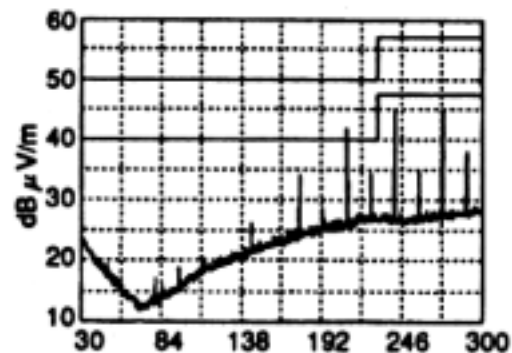
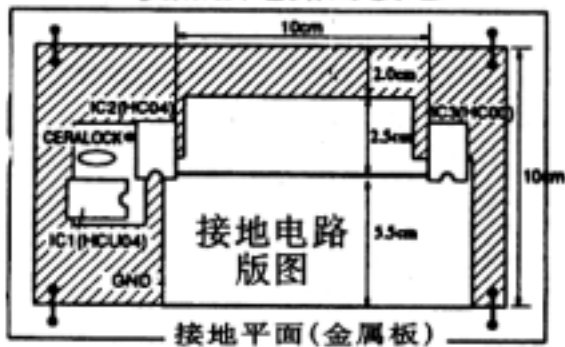
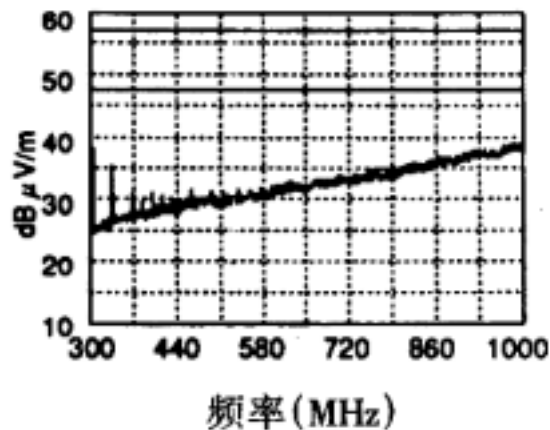
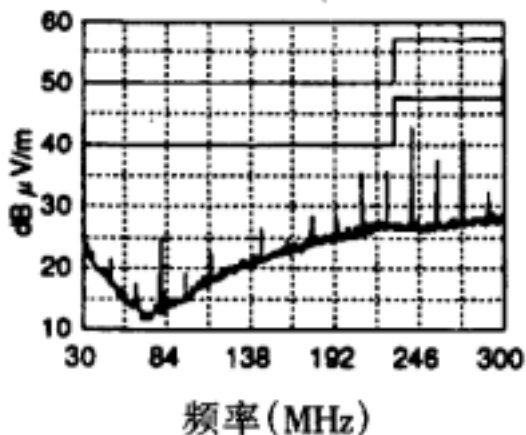
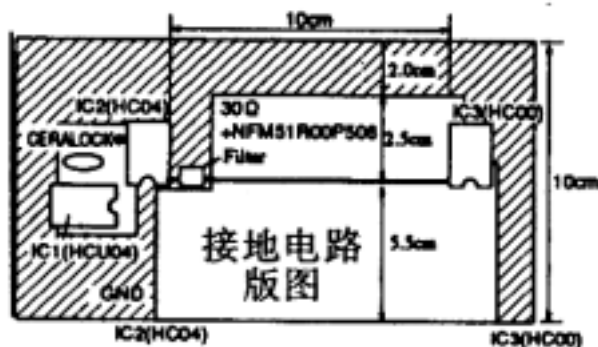


图32 线路板辐射骚扰抑制方法的又一例证(1)

仅接入 EMI 抑制滤波器



同时接入 EMI 抑制滤波器和加强接地

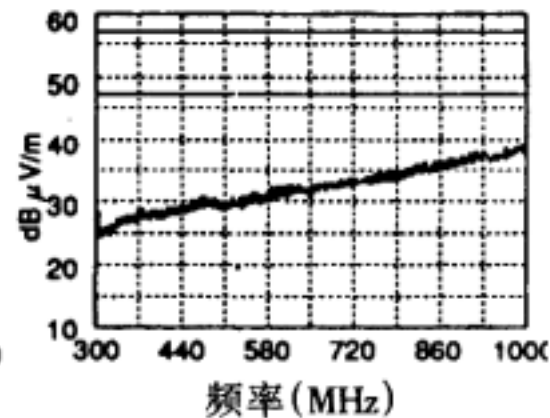
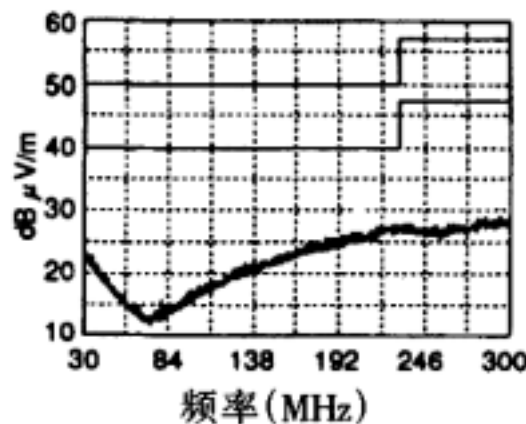
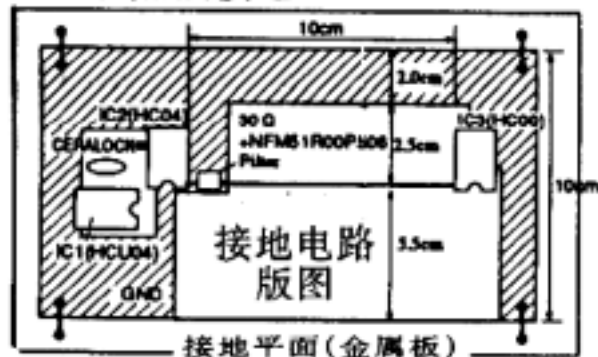
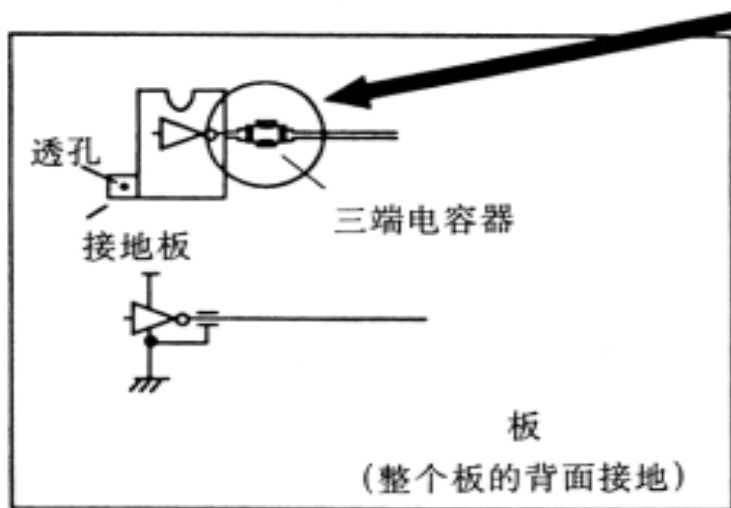


图33 线路板辐射骚扰抑制方法的又一例证 (2)

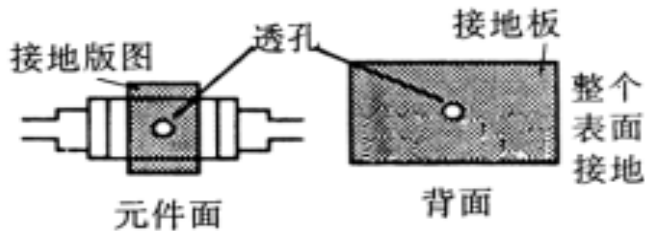
图34和图35说明怎样使用电容型的EMI滤波器。

[好]

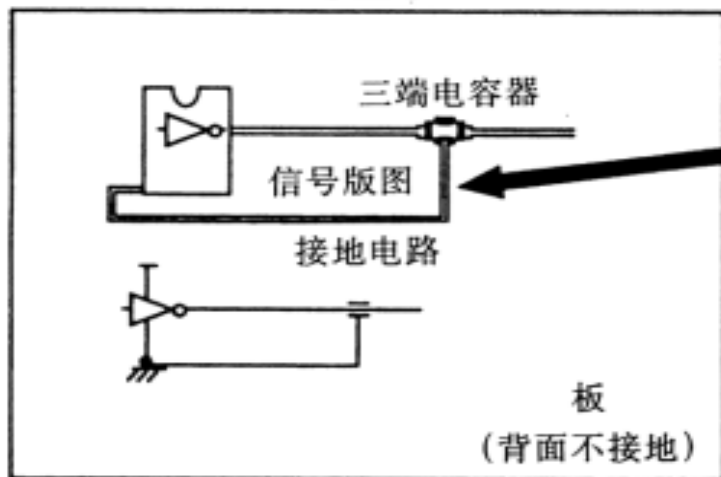


滤波器的接地端通过一个透孔与整个表面均接地的电路板背面相连。

- 接地端的高频阻抗很小
- 信号电路部分到地之间的回路长度很小



[差]



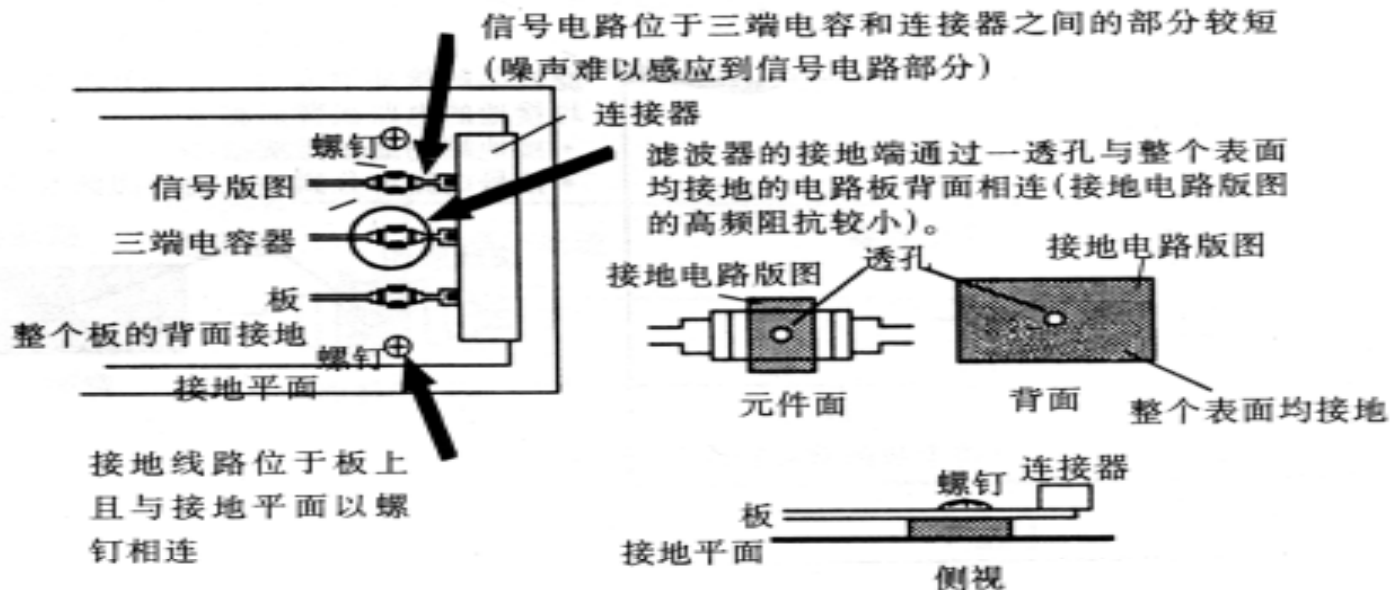
缺点：滤波器接地端与 IC 接地端之间的阻抗很大。（流入地的噪声电流很小。）

缺点：信号电路部分到地的回路较长。（噪声可通过此回路辐射出去。）

图34 贴片式EMI滤波器的使用方法

(1)

[好]



[差]

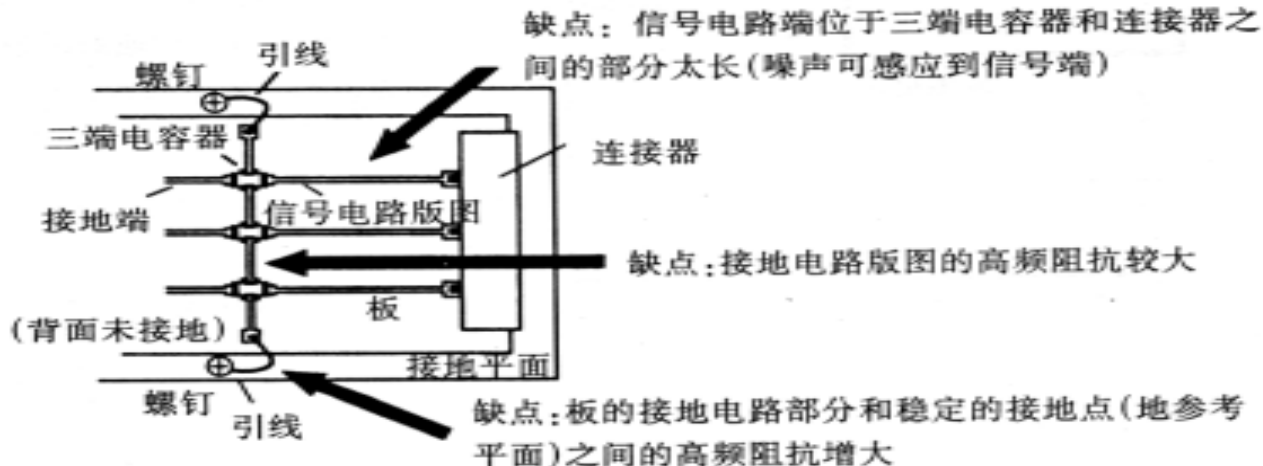


图35 贴片式EMI滤波器的使用方法(2)

7.3 采用屏蔽罩来抑制辐射噪声

为说明问题，仍用前节所述的试验方法，并采用屏蔽罩来抑制辐射噪声。从图36可以看出，随着屏蔽罩开口区域形状的改变，辐射噪声的发射率（25MHz）也随之发生变化。

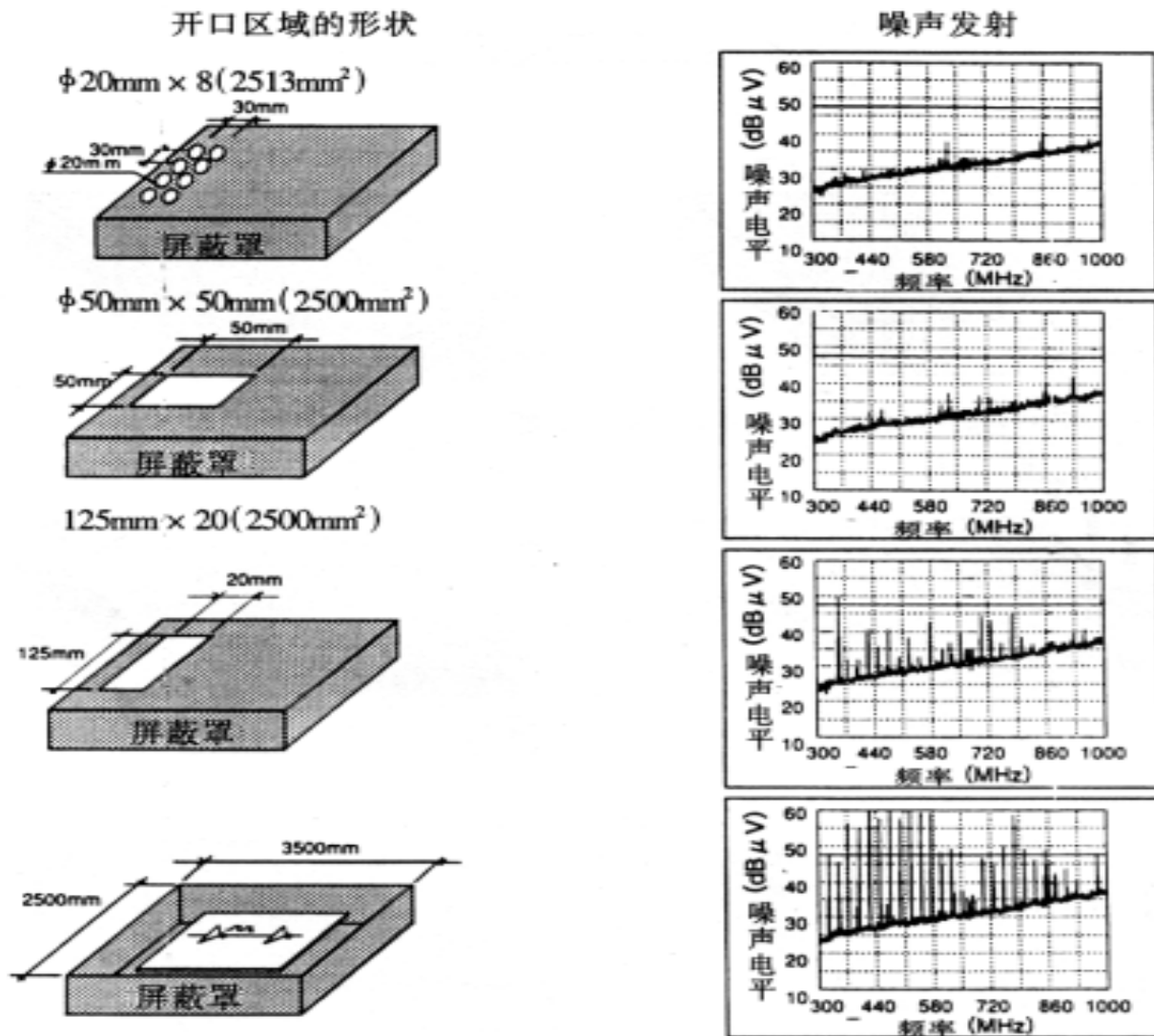


图36 用屏蔽罩来抑制辐射骚扰的发射（1）

屏蔽效应的原理是用屏蔽罩反射或吸收不需要的噪声。对高频段，主要是反射，常用铝、铜或其他低阻抗的材料。要求开孔尺寸和紧固件的间隔尽量小，还要避免由于覆盖涂层造成某些区域的绝缘（图37）。

2007-11-10

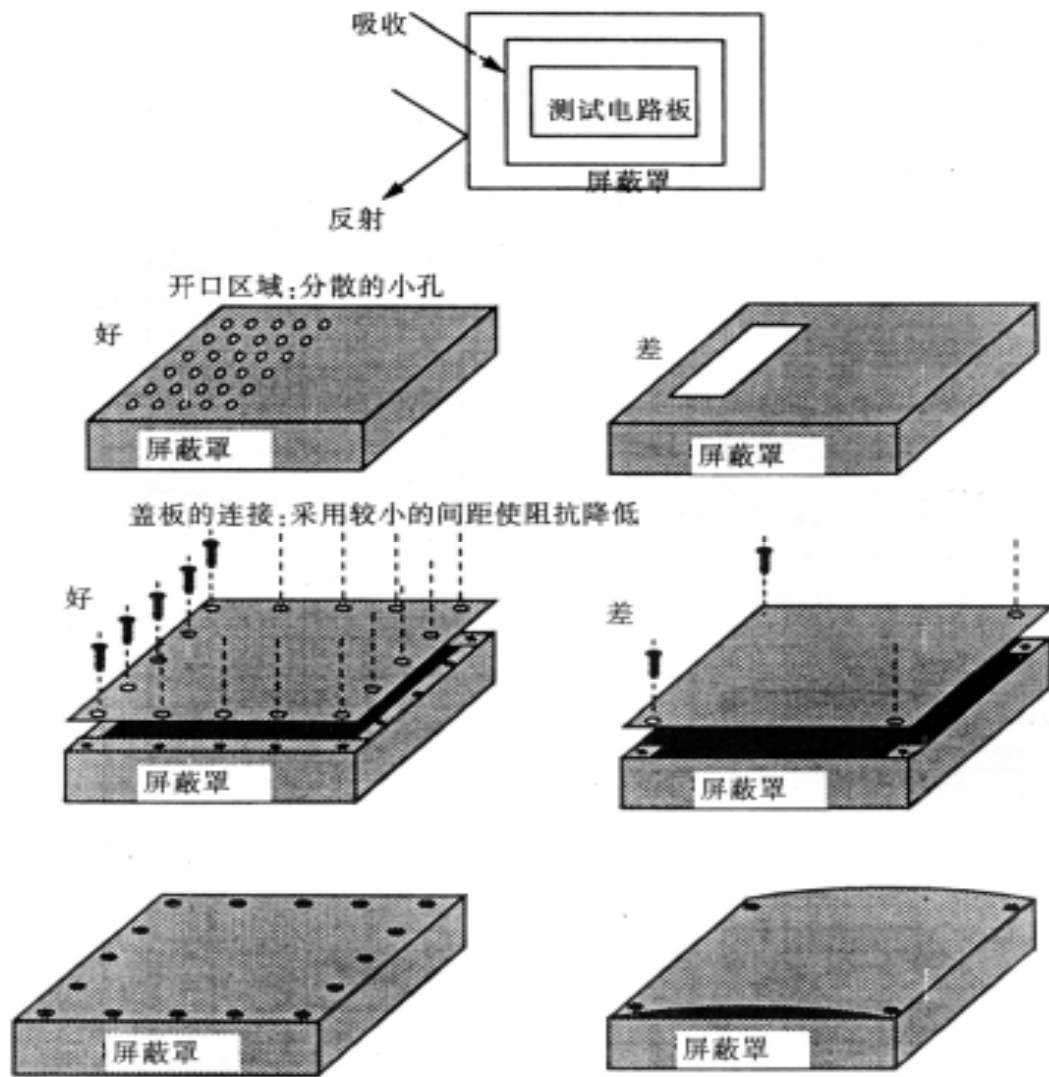


图37 用屏蔽罩来抑制辐射骚扰的发射（2）

7.4 线路板上的局部屏蔽

有时要考虑在局部屏蔽上对关键器件
有或电的要路进局线路板上对关键器
过蔽的区进行部屏蔽，这里选择件
对些导界面要，其原是：屏穿
对这些导线要进行滤波。导线要尽量少。

屏蔽盒要完整的面体，底面是线个
屏蔽板上的一路板整的完六面铜箔，其地个
扣点要在越路多越好，五面体，余的隔
小于被屏蔽电磁波波长的1/20。

滤波的方是对穿屏蔽区域线的板上
采用的通滤器（不三端合容路及贴片的
式走线波器。要贴片使效果显著，用抗
，对近屏蔽盒。按使用目的
，贴片安装在盒内。若用于
，贴片装在屏蔽盒外（图

2007-11-10

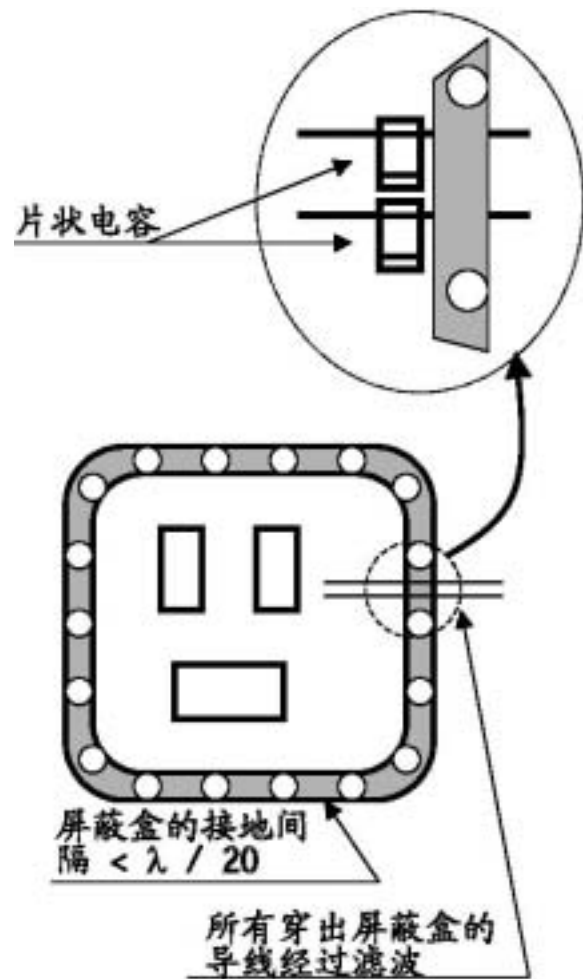
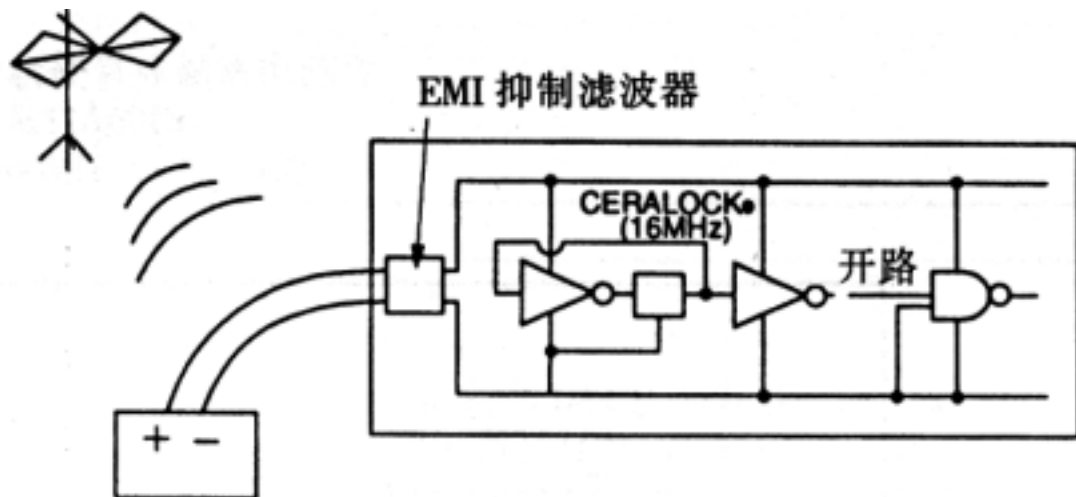
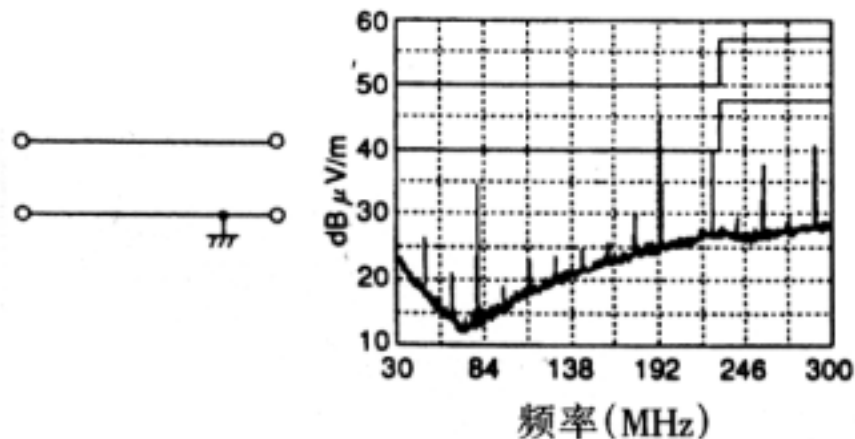


图38 线路板上的局部屏蔽

8. 设备（包括线路板）经由电源线的骚扰逸出抑制（图39）



• 不接入滤波器



• 仅针对共模噪声采取抑制措施

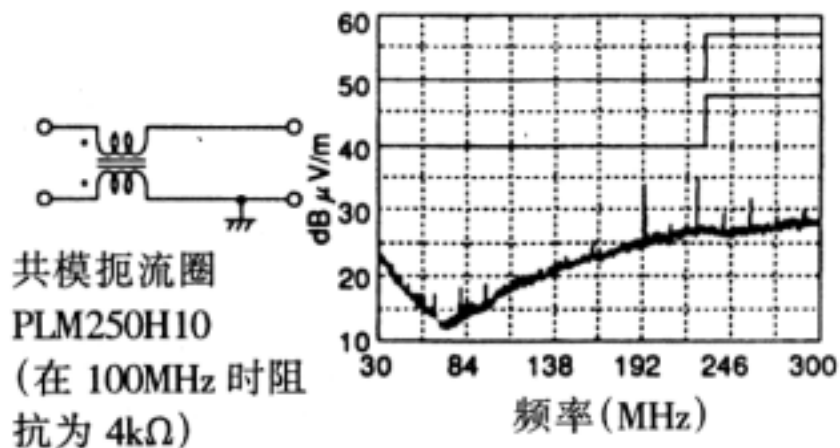
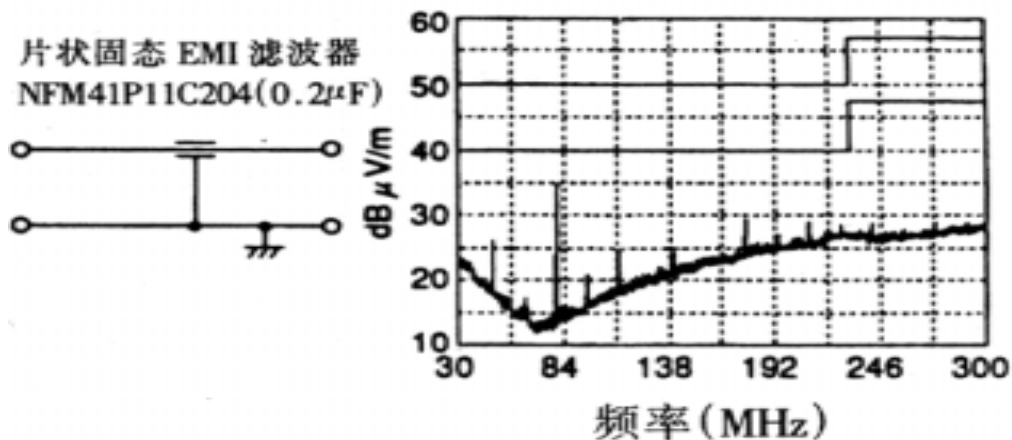


图39 设备（包括线路板在内）经由电源线的电磁骚扰抑制方法（1）

- 仅针对差模噪声采取抑制措施



- 针对差模和共模噪声均采取抑制措施

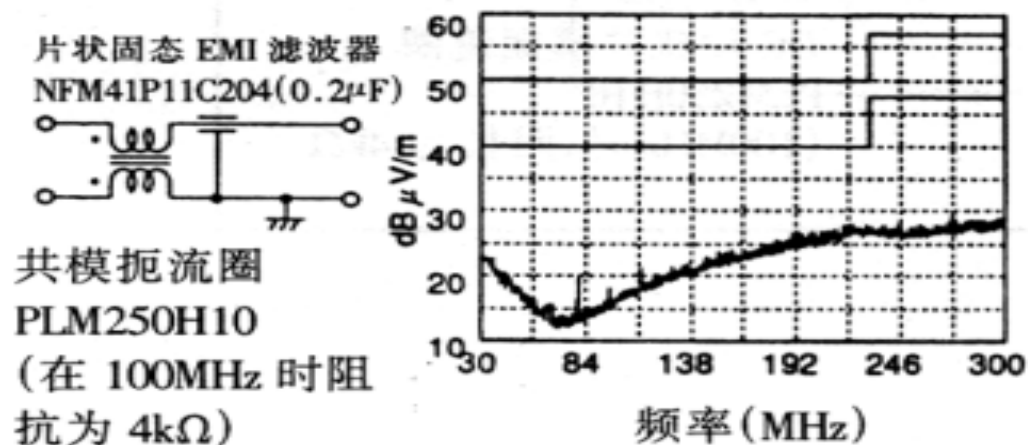


图40 设备 (包括电路板在内) 经由电源线的电磁骚扰抑制方法 (2)

9. 电磁骚扰抑制总结 (图41) :

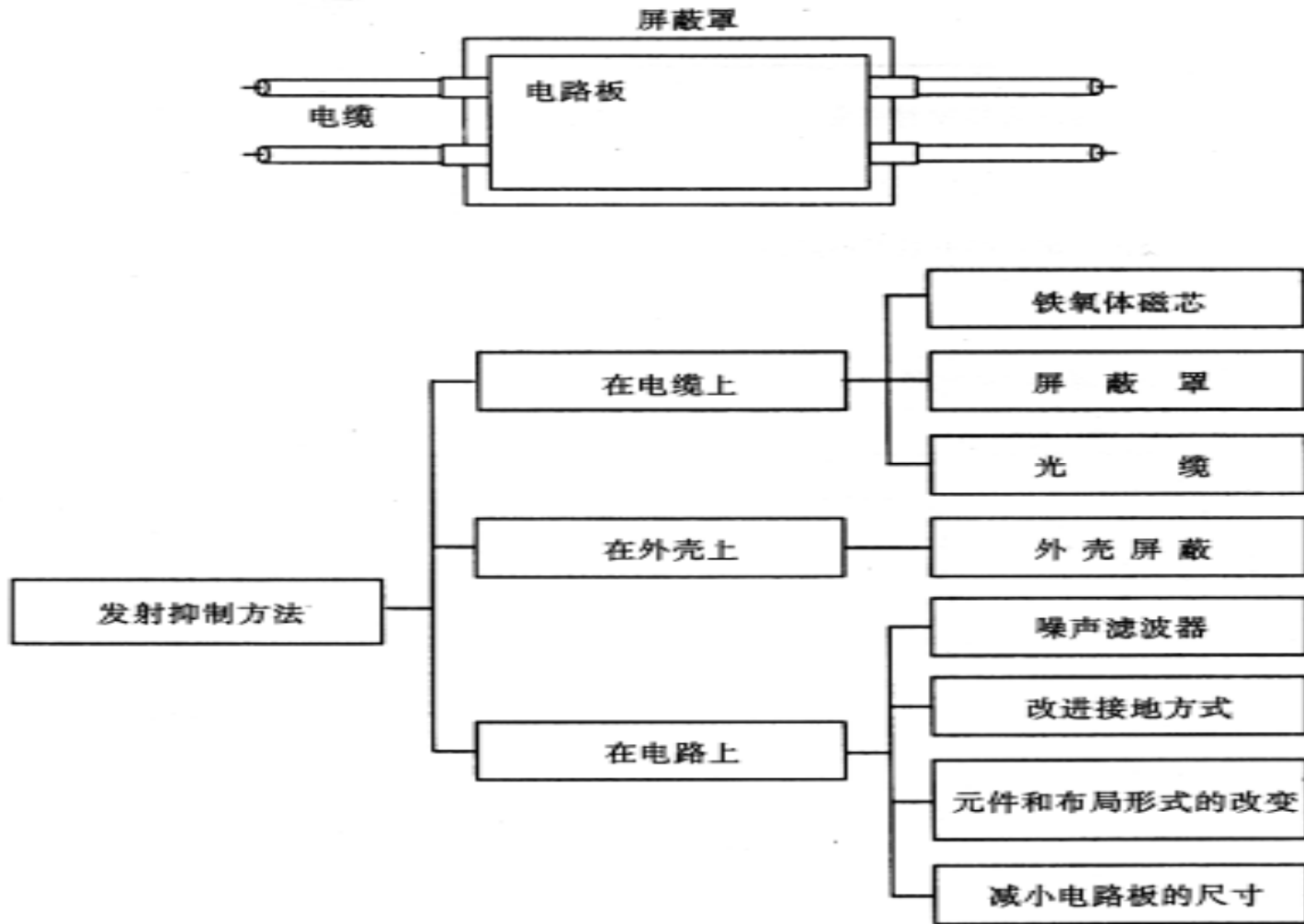


图41 开关电源电磁骚扰的抑制方法总结