

电磁干扰与电磁兼容浅谈

陶显芳

一年前，我曾在《电子工程专辑》杂志上发表过一篇名为“电子线路与电磁兼容设计”的文章。此文引起了读者的关注，下面文章的内容拟作为前一篇文章的继续或补充，希望再次引起读者的关注和兴趣。

一. 电磁干扰无处不在

1. 一个让人胆战心惊的星球

电磁干扰对人类危害最大的，实际上还是我们居住的地球，其中雷电干扰对人类的生活危害最大。雷电不但对人类的生存造成很大的威胁，对树木、森林、房屋、建筑，以及电器设备都会造成很大的损害和破坏。

据统计，地球每一秒钟就有 100 多次闪电，每次闪电产生的能量可供一个 100 瓦的灯泡点亮 3 个月；在雨季，平均每 6 分钟就有一个人被雷电击中；每年有成千上万的人因雷电击中而丧伤，还有大片的森林因雷电击中而起火烧毁，雷电还经常使高压电网、以及通信出现故障，使城市供电和通信中断，引起城市交通失控出现混乱；连英国的白金汉宫也曾遭受过雷电严重破坏，上个世纪 50 年代，白金汉宫就是因一块窗帘布被雷电击中而起火燃烧；上海电视台平均每年要遭受 33 次大的雷击，每次雷击都会使电子设备遭受不同程度的损坏；1992 年 6 月 22 日，北京国家气象中心多台计算机接口因感应雷击被毁，损失二仟多万元；1992 年 8 月 23 日，赣州市 60% 的有线电视和 50% 闭路电视遭受过雷击，其中 91 台电视机因感应雷击而毁于一旦；2006 年 6 月 9 日，南韩一架大型客机在空中遭受雷击，头部解体脱落，幸好没有人员伤亡。

很多人都不清楚，地球也是一个带电体。根据实验测试，在地球表面存在一个垂直向下的稳定电场，电场强度 E 约为 100 伏/米，场强的大小随高度的增加而减弱。另外，根据实验测试，在地面附近大气的电导率 σ_0 约为 3×10^{-14} 西蒙/米，且随高度的增加而增加。由此可知地球表面的电流密度 j 的方向指向地心，大小为

$$j = \sigma_0 E \quad (1)$$

故从大气流向地球表面的总电流强度 I 为

$$I = j 4\pi R^2 \quad (2)$$

R 为地球的半径，取 64×10^5 米，由此可求出 I 的值约为 1.4×10^3 (安)。

根据

$$V = \int_R^{\infty} E dl \quad (3)$$

可求出地球表面的电位约为 4×10^5 (伏)。

这里说的带电，严格来说是带电体相对于无限远处的电位差，或物体的电位中性而言。人们在进行理论分析的时候，都是把无限远处定义为零电位，但在实际应用中，人们已习惯于把地球当成零电位，这对于一般的实际应用，并不会造成很大的影响，但这种假设有时也会阻碍我们的视野。

任何带电物体都可以看成是一个电容，电容量 $C = Q/U$ ， Q 为带电物体的电荷量， U 为带电物体的电位，即指带电物体到无限远处的电位差。因此，地球也可以看成是一个大容量的电容，其电容量正好为 1

法拉。

这里说的电容与电容器是有区别的，电容器一般都由两块中间以介质绝缘的极板组成，当电容器被充电的时候，两块极板带的电荷量相等，但符号相反，在电容器两极板所带的电荷不改变的条件下，两块极板之间的电压，可因电容器两极板之间的距离改变而改变，其容量的大小也会跟着两极板之间的距离改变而改变，这是因为两极板之间电场互相作用的缘故。

而这里所指的电容，其容量是不会因带电物体的位置改变而改变的。因此，这里说的电容是相对于一个孤立带电物体而言，不受其它电场所影响，而电容器则是相对于两个或两个以上带电物体而言，电容大小要受两个或两个以上极板产生的电场互相影响。另外，电容充放电是不需要回路的，两个带电体互相接触，谁的电位高，谁就要放电，谁的电位低，谁就会被充电，而电容器充放电必须要有一个闭合回路。

实际上，地球不但是个电容（相对于无限远处），并且地球还相当于电容器的一个电极，电容器的另一个电极是电离层，而大气层就是电介质，如图 1 所示。

地球带电的原因，一个是由于地球作为一个冷星球长年都在接收大量带电宇宙射线微粒子的辐射，另一个是外层空间紫外线对空气照射产生电离层，并对地球表面产生感应，以及热气流互相摩擦带电而产生感应等等。

根据基尔克夫定理：流过任何导体电流的代数和都等于零，即：

$$\oint_S j ds = 0 \quad (5)$$

根据(5)式结果，地球不但有电流流入，而且也应该有电流流出，那么流出地球的电流到哪里去了呢？

前面已经指出，地球平均每一秒钟有 100 多次闪电，而闪电也是一个放电过程，由此可知，原来每秒中流进地球 1.4×10^3 安培的电流就是用来打雷放电的。如果地球不经常打雷放电，试想，地球电位正好是每秒要增加 1.4×10^3 伏特，一小时后地球电位就可以增加到 500 多万伏，一天之后地球电位又会增加到 12000 多万伏，这是一个多么巨大的数字，在此电场强度之下，任何东西都可能会被击穿。所以，地球时时刻刻都在放电才应该是正常的。

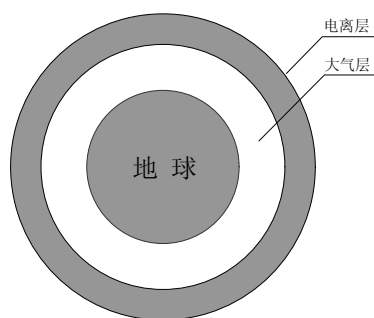


图1

防止雷电的最有效方法就是静电屏蔽，例如，高压电网为了避免雷击，除了电线塔的高度要求比高压电网线的高度高之外，在高压电网线的最上面还要设置一根屏蔽线，这根屏蔽线通过电线塔与大地连接。当遇到打雷时，屏蔽线首先与雷电接触，把产生雷电物体（云）的电荷通过屏蔽线，再经电线塔传入大地而被释放掉。避雷针也是这个道理，在物体的高处安装针状导体，并把它连接到大地，把空中带电物体（云）的电荷通过避雷针放电引入大地，以降低带电物体（云）对其它物体或人体感应产生放电的机会。还有，在高速公路两旁安装电线竿也是一种保护人类免遭雷击的有效方法。

除了屏蔽可以防止雷击以外，很多贵重电器设备还需要对雷电感应进行保护，因为，当雷电击中某个建筑物的机房，或某个供电设备的时候，瞬间几十万安培以上的电流通过这些建筑物或设备，也会对周围几十米范围内的电器设备产生电磁感应，使周围的电线或设备，不管是否与雷击物体直接接触或不接触，都会通过电磁感应产生高压脉冲，很容易把电器设备中的电子器件击穿损坏。因此，对那些与长电缆线连接的设备，如：电话机、传真机、电视机等，对它们进行过压保护还是必要的。目前，避免电器设备遭受雷击或雷电感应产生高压脉冲击穿损坏的最有效的方法，还是用放电管和压敏电阻。

对于交流供电系统设备的防雷，一般都是用压敏电阻跨接于电源线与地线之间，用于对雷电感应高压电脉冲进行放电，避免设备被高压电脉冲击穿损坏；而小电器设备或器件防雷电击穿损坏，可选用放电管或压敏二极管，也可以选用压敏电阻等跨接于输入线与大地之间，例如，一般家中的电话插座以及有线电视插座内部都应该连接一个或两个放电管到大地。放电管的工作原理是在玻璃管或陶瓷管中注入惰性气体，惰性气体平时不导电，当电场强度强到一定的时候，惰性气体开始电离导电；压敏二极管和压敏电阻的工作原理与稳压管的工作原理很接近，平时也不导电，当电压超过一定值后，压敏二极管或压敏电阻就击穿导通，不过这种击穿是可以恢复的。

图2是电视机防雷击电路，图中防雷击电路是在PCB电路板上直接制作放电间隙（6mm）装置，在外接天线端口就近与电网输入引线之间加接这种放电间隙装置。由于电视机本身没有金属机壳或机壳接地电气连接点，所以防雷放电间隙可直接利用电网输入电源引线代替地线使用。

另外，电视机的安全标准要求冷热地之间的耐压强度大于AC2000V，而绝缘距离要求大于6mm，选用其它放电器件反而难以符合安全要求，并且会提高成本。因为在正常气压下，每1万伏的正常放电距离正好是10mm，因此，2000伏的正常放电距离是2mm，而取3倍安全系数后正好就是6mm。图2中，电视机防雷击电路制作成锯齿状的原因，是让高压放电更容易发生，因为电极的尖端处电场强度最强，当尖端放电产生后，周围空气将变成导体，使放电更容易进行，这样，在很短时间内就可以把电放完。

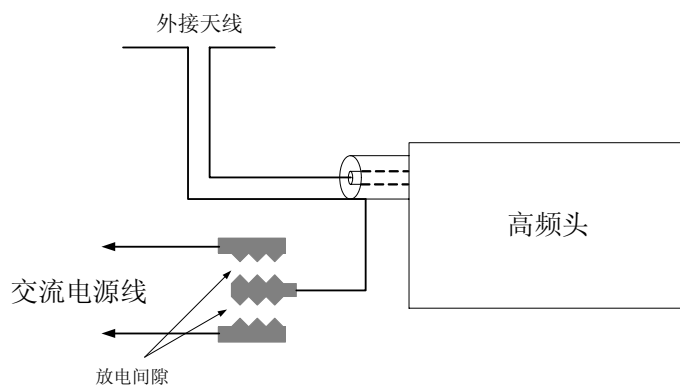


图2

2. 物体带电与电场感应

从原理上说，绝对不带电的物体是不存在的，任何物体都会不知不觉地就会带上电。每种物质都有一个代表自己性质的位能，两种不同性质的物体靠近在一起就会产生“接点电位差”。当两种不同性质的物体接触在一起时，这两种物质在其体内就要对电荷进行重新分布，使物体保持电中性，例如：P型半导体与N型半导体互相接触，在两物体的交界处就会产生PN结，在PN结内部会产生一个空间电荷区，这个空间电荷区的产生，必然要进一步使P型半导体和N型半导体——两个物体的内部都要对电荷进行重新分布。

这时，如果再把两个物体分开，两个物体都将会带电，一个带正电，另一个带负电。

物体带电，相当于自身的位能增加或降低了，若带电物体再次与其它不同性质的带电物体接触后又分开，两带电物体又会带上更多的电荷，即：位能在不断增加或降低，静电感应发电机就是根据这个原理制造的。

在两个用有机玻璃材料做成的轮子，按等分距离把两种不同性质的条状金属片分别镶在两个有机玻璃轮子的表面之中，相当于金属片一面绝缘，一面暴露。然后，把两个镶有条状金属片的有机玻璃轮子的绝缘面互相靠在一起，并按相反方向转动，两个轮子上不同性质金属片将互相感应带电，同时也使两个有机玻璃轮子局部极化带电，两个有机玻璃轮子上的金属片每对上一次，通过静电感应，一个金属片的电位会继续升高，而另一个却要降低。这样，两边金属片上积累的电荷将越来越多，最后，可以分别用两个金属毛刷把金属片上积累的电荷收集到莱顿瓶中（用玻璃瓶做成的电容器），当莱顿瓶中积累的电荷达到一定的数量后，即：电压超过某个值后，莱顿瓶的两个电极开始放电，并产生火光及响声。

图3是一个让物体产生高压电的原理图，在水龙头的下面安放一个用金属薄片制作的圆圈（用金属罐头盒改制），金属圆圈必须要与周围绝缘，然后让水龙头流出的水正好从金属圆圈的中央穿过，金属圆圈很快就会带电，并且电压非常高，一般可达一万伏以上。用试电笔做试验时，当试电笔离金属圆圈还很远的地方，就可以看到试电笔被点亮，甚至拿一个小荧光灯靠近，也可以看得到荧光灯微亮。这说明电压非常高，但对人体不存在被触电的危险，因为金属圆圈的电容很小，存储的能量有限。

这个原理与摩擦发电的原理是很接近的，首先是水与周围空气产生摩擦使空气带电（空气被电离成正、负离子，由于正离子比较重，很容易被水带走），然后带电空气会感应金属圆圈带电，或负离子直接与金属圆圈接触，使金属圆圈带负电。我们也会发现，在大瀑布附近的空气中负离子的浓度非常高，或下暴雨的时候，空气中负离子的浓度也很高，主要原因就是速度极高的流水或雨滴会让空气产生电离带电。

冬天人们走在地毯上也经常会发现，当手突然碰到楼梯金属扶手的时候，会感到手被麻电，这也是因为人体穿的皮鞋与地毯摩擦产生带电，然后传到人的身体上。其实人体带电一般自己是没有感觉的，哪怕人体带上几万伏的电压，一般人体也没有感觉，只有带电人体与其它物体接触产生放电时才会感觉麻电。例如：在冬天没有灯光的夜里，人们脱尼龙衫或毛线衣的时候，会发现衣服之间有蓝色火光，并且还伴随着啪、啪、啪的放电声，这证明衣服已经带上非常高的电压。

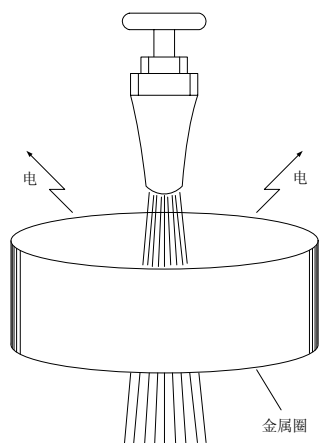


图3

带电物体是具有能量的，即：电场具有能量。带电体的能量为：

$$W = \frac{1}{2}CU^2 \quad (6)$$

上式中，C 为带电体的电容，U 为带电体的电位。带电体的能量属于位能，当要计算带电体的能量的时候，必须指出参考点，如果不特别指出，一般都把地球作为参考点，或把无限远处作为参考点，即：把地球作为零电位，或把无限远处作为零电位。把地球作为零电位比较方便，因为，我们所使用的一切物体都是来自地球，无论你怎样对它加工或运作，新产生的电荷总是在原有电荷的基础上进行叠加，所以不需要再用过问物体原来带的电荷是多少。带电物体的电容由下式求得：

$$C = \frac{S\epsilon}{4\pi kd} \quad (7)$$

上式中，电容C的单位为法拉， ϵ 为介电常数（在真空中为 1），S为带电物体与参照物体之间电力线互相照射的面积（与电场垂直，单位米²），在国际单位制中 $k = 9 \times 10^9$ 牛顿·米²/库仑²，d为带电物体到参照物的有效距离（单位米）。

实际上电场干扰，或电场感应，都是通过电容的工作原理进行的，电场对电子设备中其它电路的干扰，不但与电场强度有关，还与被干扰电路参考点的位置有关，以及带电物体的电容量有关。如果要精确计算某带电体对其它物体产生的电感应，就必须熟练地应用（6）式和（7）式来计算各个物体之间的电容。同一个带电体相对不同的其它物体，因为相对位置以及电场强度不同，其电容量也不同。知道了电容容量就可以计算电容的充放电过程，从而可以求出电压、电流、功率等各种参数。

图 4 是带电物体对其它物体产生感应的原理图。图 4 中，A 是带电物体，其电位为 U_0 ，E 表示电场强度或电场力线， Q_0 为其带电量；带电物体A对物体B和物体C均会产生电场感应， U_1 和 U_2 分别为物体B和物体C被物体A感应产生的对地电位； Q_1 和 Q_2 分别为物体B和物体C被物体A感应产生的电荷量。带电物体A的电荷 Q_0 越多，其电位 U_0 就越高，并且其对物体B或物体C产生感应影响的力度就越大。

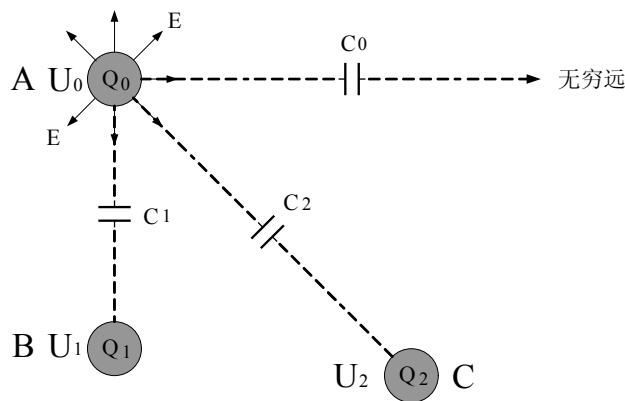


图4

因此，我们可以用电容来定义电荷与感应电压的关系，即：用电容表示单位电压感应产生的电量：

$$C = \frac{Q}{V} \quad (8)$$

上式中，电容 C 的单位为法拉，电荷 Q 的单位为库仑，电压 V 的单位为伏特。

设：物体 B 和物体 C 没受带电物体 A 感应之前，所带电荷以及对地电位均为零，则：电荷 Q_1 和 Q_2 ，

电压 U_1 和 U_2 都是由于带电物体 A 对物体 B 和物体 C 感应产生的电荷和电压； U_0 越高，感应产生的 U_1 和 U_2 对地电位就越高，以及电荷 Q_1 和 Q_2 就越多，由此可求得：

$$C_1 = \frac{Q_1}{V_1} \quad (9)$$

$$C_2 = \frac{Q_2}{V_2} \quad (10)$$

上式中， $V_1 = U_0 - U_1$ ， $V_2 = U_0 - U_2$ ， C_1 和 C_2 分别表示带电物体 A 对物体 B 和物体 C 产生电场感应互相影响的力度，电容量越大，表示两者产生电场感应互相影响力度就越大。因此，这里我们还可以把 (8)、(9)、(10) 式中的电容 C 定义为电荷感应系数，与磁感应中的互感系数（或磁感应系数） M 相对应。由此可知，电容 C 不但可以表示一个带电物体存储电荷的多少，而且可以表示带电物体对其它物体产生影响的力度。

在电子设备中，由于 MOS 电路的阻抗很大，而其电容非常小，因此，只要带电体产生很小能量的电荷转移，或静电感应，就能把 MOS 电路击穿。因此，在生产或调试含 MOS 电路的电子设备的时候，要注意静电感应和工作人员的身体不能带电。在没有采取任何措施的情况下，人体一般都带有几十伏甚至数百伏的静电电压，当人手触及还没有接入电路中的 IC 时，很容易会把 IC 击穿。对还没有使用的 IC 保存或者包装也要注意静电感应，最好把 IC 保存在金属盒或具有防止静电感应的塑料盒内。防静电感应塑料一般都是在塑料中混入导电物质。

3. 电磁感应与干扰

任何导体，只要有电流通过，在它的周围就会产生磁场，磁场又会对周围的导体产生感应，并产生感应电动势，因此导体中的电流同样也会对其它物体产生磁感应干扰。

我们知道电感 L 可以表示为：单位电流产生的磁通，即：

$$L = \frac{\phi}{I} \quad (11)$$

上式中， L 为电感，单位为亨利， ϕ 为磁通量，单位为韦伯， I 为电流，单位为安培。

但 (11) 式中要直接测量磁通量 ϕ 是非常困难的，在工程应用中一般都通过测量自感电动势的方法来测量电感量：即：当每秒钟流过电感线圈的电流为 1 安培，而电感线圈产生的自感电动势为 1 伏时，则电感线圈的电感量为 1 亨利。因此，电感量也被称为自感系数。由此，上面 (11) 式又可以表示为：

$$e = L \cdot di/dt \quad (12)$$

或

$$e = d\phi/dt \quad (13)$$

以及

$$e = SdB/dt \quad (14)$$

(14) 式中 S 是磁通穿过的面积， B 为磁感应密度，这里假设磁感应密度为均匀分布，但实际上是不可能的，但这里并不影响我们后面对问题的分析。

一般来说，恒定的电场或磁场对电路或电器设备造成的干扰是不会很大的。“干扰”这个词的本意就是指，对某个正处于稳定工作状态的系统产生不良的影响，因此，对电路或电器设备造成严重干扰的，主要是不断变化着的电场或磁场。

即：

$$i = C \cdot dv/dt \quad (15)$$

$$e = M \cdot di/dt \quad (16)$$

显然（15）式中， i 是表示干扰电流， C 为电容，或电荷感应系数， dv/dt 为电压变化率；（16）式中， e 是表示干扰电动势， M 为磁互感系数，或磁感应系数， di/dt 为电流变化率。

磁互感系数或磁感应系数 M ，表示流过某个电感 L 或导体中的电流所产生的磁场对另一个电感或电路产生影响的力度。如果我们把电感 L 称为电感器与电容器 C 进行对应的話，那么，磁互感系数或磁感应系数 M 同样也可以与电荷感应系数 C 进行对应，可惜人们很少把电容器 C 与电荷感应系数 C 分别进行理解。

图 5 是交变磁场产生互相感应（简称互感）的工作原理图。图 5 中 L_0 为产生磁力线的电感线圈，即：正在通电的线圈，它产生的磁力线一部分穿过磁感应线圈 L_1 ，使磁感应线圈 L_1 产生感应电动势 e_1 ， $e_1 = M_1 \cdot di/dt$ ；同时， L_0 产生的另一部分磁力线也在穿越印制板线路 L_2 ，使印制板线路 L_2 产生感应电动势 e_2 ， $e_2 = M_2 \cdot di/dt$ 。显然，感应电动势 e_1 和 e_2 都不是我们进行电路设计时所希望产生的，因此，把它们称为干扰电动势，或称为干扰信号。电子设备中，大部分干扰信号都是这样产生的。

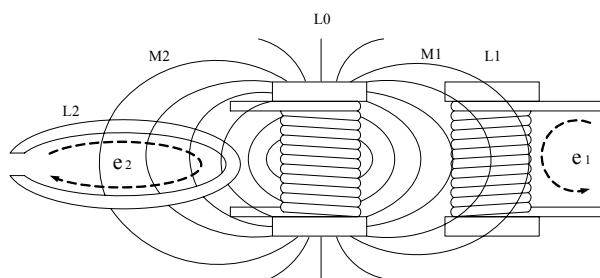


图5

二. 电磁干扰 EMI 与电磁兼容 EMC

电磁干扰（Electromagnetic Interference），简称 EMI，有传导干扰和辐射干扰两种。传导干扰主要是电子设备产生的干扰信号通过导电介质或公共电源线互相产生干扰；辐射干扰是指电子设备产生的干扰信号通过空间耦合把干扰信号传给另一个电网络或电子设备。为了防止一些电子产品产生的电磁干扰影响或破坏其它电子设备的正常工作，各国政府或一些国际组织都相继提出或制定了一些对电子产品产生电磁干扰有关规章或标准，符合这些规章或标准的产品就可称为具有电磁兼容性 EMC（Electromagnetic Compatibility）。电磁兼容性 EMC 标准不是恒定不变的，而是天天都在改变，这也是各国政府或经济组织，保护自己利益经常采取的手段。

1. 传导干扰

传导干扰一般是通过电压或电流的形式在电路中进行传播的，图 6 是测试电子设备产生传导干扰的基本方法，或表示传导干扰通过电源线传输的几种方式。图 6 中，电子设备表示干扰信号源，CI 表示共模干扰信号，DI 表示差模干扰信号；V1、V2、V3 分别表示用仪表对干扰信号进行测量的连接方法，低通滤波

器是为了便于对 V1、V2、V3 进行测试，而另外加接进去的；R1、R2、R3、R4 分别为各电子设备的接地电阻，也包括大地之间的电阻，接地电阻一般为几欧姆到几十欧姆，其阻值与地线的安装和地表面土壤结构有关；C1 为电子设备对大地的电容，其容量与电子设备的体积还有地面距离有关，一般为几微微法到几千微微法。从图 6 中我们可以看出：

$$V1 = CI - DI \quad (17)$$

$$V2 = CI + DI \quad (18)$$

$$V3 = DI \quad (19)$$

从图 6 中我们还可以看出，差模干扰信号 DI 是通过电子设备两根电源输送线传输的，因此，必须用低通滤波器对它进行隔离；而共模干扰信号 CI 是通过电子设备对大地的电容 C1 传输的，由于 C1 的容量一般都非常小，C1 对低频共模干扰信号的阻抗很大，因此，在低频段，共模干扰信号一般很容易进行抑制，但在的高频段，对共模干扰信号进行抑制，难度却要比差模干扰信号抑制的难度大很多。

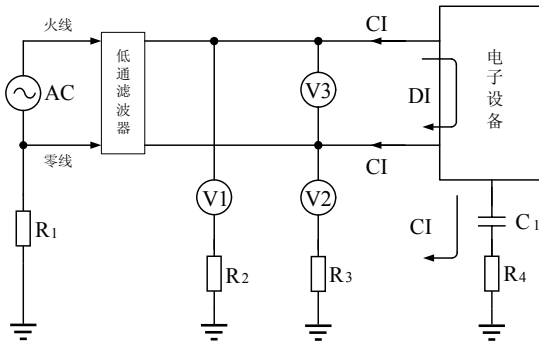


图6

1-1. 回路电流产生传导干扰

图 7 是一个开关电源电路的几个主要部分，图中，C1、C2、C3、C4 是各主要部分的对地电容或对机壳的电容，R1、R2、R3 是地电阻或机壳的电阻（机壳接地）；i1、i2、i3、i4 是开关电源电路中几个主要部分的回路电流，i1 是交流输入回路电流，i2 是整流回路电流，i3 是开关回路电流，i4 是输出整流回路电流。在这 4 个电流之中，i3 的作用是最主要的，因为它受开关管 Q1 控制，其它电流全部都受它牵动而发生变化。

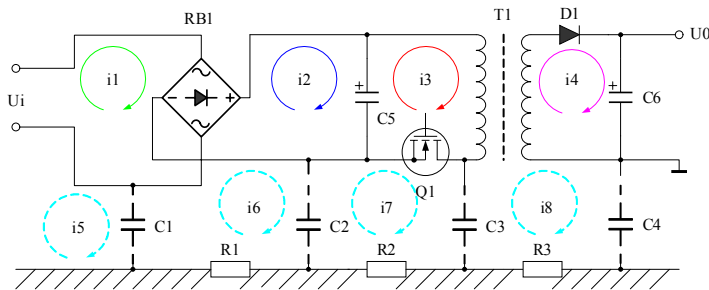


图7

从电路中我们可以看出，i1、i2、i3 所属的 3 个回路都是相互连接的，根据回路电流定律，i1、i2、i3 之间具有代数和的关系，因此，只要 3 个电流中有一个电流的高频谐波对其它电路产生干扰，那么，3 个电流都会对其它电路产生干扰，并且这种干扰主要是差模信号干扰。

i_4 与变压器初级的 3 个回路电流没有直接关系，它是通过磁感应产生的，因此它不会产生差模信号干扰，但它会产生共模信号干扰， i_4 产生共模信号干扰的主要回路一个是通过地对地电容 C_4 ，另一个是变压器 T_1 初、次级之间的电容（图中没有画出）。

另外，还有 4 个回路电流 i_5 、 i_6 、 i_7 、 i_8 ，这四个回路电流一般人是不会太注意的。这四个电流与前面的 3 个电流 i_1 、 i_2 、 i_3 基本没有直接联系，它们都是通过电磁感应（电场与磁场感应）产生的。在这几个电流中，其中以 i_7 最严重，因为，变压器初级线圈产生的反电动势一端正好通过 C_3 与大地相连，另一端经过其它 3 个回路与交流输入回路相连。

这里特别指出，凡是经过电容与大地相连回路的电流都是属于共模信号干扰电流，因此， i_5 、 i_6 、 i_7 、 i_8 全部都属于共模信号干扰电流。

1-2. 电磁感应产生传导干扰

我们知道，在开关电源里面，开关电源变压器是最大的磁感应器件。反激式开关电源变压器，就是通过把流过变压器初级线圈的电流转换成磁能，并把磁能存储在变压器铁心之中，然后，等电源开关管关断的时候，流过变压器初级线圈的电流为 0 的时候，开关电源变压器才把存储在变压器铁心之中磁能转换成电能，通过变压器次级线圈输出。开关电源变压器在电磁转换过程中，工作效率不可能 100%，因此，也会有一部分能量损失，其中的一部分能量损失就是因为产生漏磁，或漏磁通。这些漏磁通穿过其它电路的时候，也会产生感应电动势。感应电动势的大小可由（13）、（14）或（16）式求得。

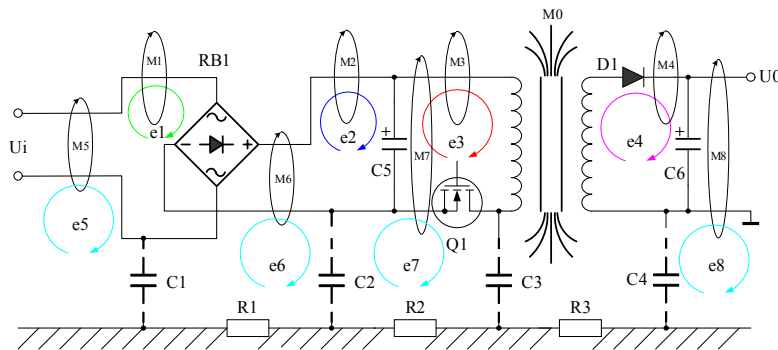


图8

图 8 是磁感应产生传导干扰的原理图，图 8 表示开关电源变压器产生的漏磁通穿过其它电路时，在其它电路中也产生感应电动势，其中漏磁通 M_1 、 M_2 、 M_3 产生的感应电动势 e_1 、 e_2 、 e_3 属于是差模干扰信号； M_5 、 M_6 、 M_7 、 M_8 产生的感应电动势 e_5 、 e_6 、 e_7 、 e_8 属于是共模干扰信号。

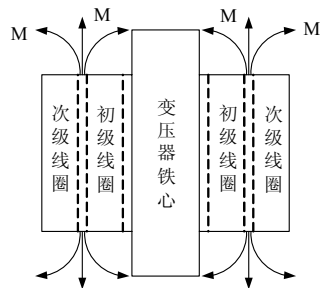


图9

图 9 是开关电源变压器产生的漏磁通的原理图。开关电源变压器的漏磁通大约在 5%~20%之间，反激式开关电源变压器为了防止磁饱和，在磁回路中一般都留有气隙，因此漏磁通比较大，即：漏感比较大。因此，产生漏感干扰也特别严重，在实际应用中，一定要用铜箔片在变压器外围进行磁屏蔽。从原理上来说，铜箔片不是导磁材料，对漏磁通是起不到直接屏蔽作用的，但铜箔片是良导体，交变漏磁通穿过铜箔片的时候会产生涡流，涡流产生的磁场方向正好与漏磁通的方向相反，是部分漏磁通被抵消，因此，铜箔片也可以起到磁屏蔽的作用。

检测漏磁通干扰的简便方法是，用示波器探头接成一个小短路环进行测量，最简便的方法就是把探头与地线端短路连在一起，相当于一个磁感应检测线圈。把磁感应检测线圈靠近变压器或干扰电路，很容易看到干扰信号的存在。

值得一提的是，开关电源变压器初级线圈的漏感产生的反电动势 e_t ，在所有干扰信号之中是最不容忽视的，如图 10 所示。当电源开关管关断的时候，开关电源变压器初级线圈的漏感产生的反电动势 e_t 几乎没有回路可释放，一方面，它只能通过初级线圈的分布电容进行充电，并让初级线圈的分布电容与漏感产生并联谐振；另一方面，它只能通过辐射向外进行释放，其中通过对地电容 C_3 与大地相连，也是反电动势 e_t 释放能量的一个回路，因此，它对输入端也会产生共模信号干扰。

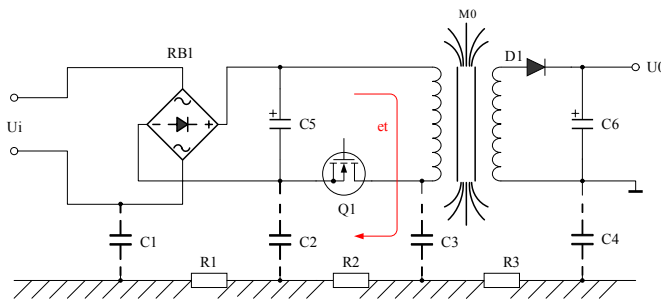


图10

2. 辐射干扰

辐射干扰一般是通过电磁感应的形式在空间进行传播的，图 11 是测试电子设备产生辐射干扰的基本方法，或表示电子设备产生的干扰信号通过电磁感应向空中辐射的原理。图 11 中，电子设备表示干扰信号源，V1 表示测量仪表，C1 表示电子设备对大地的电容，C2 表示电子设备与天线耦合的电容，即：电子设备通过电场对天线产生感应，这里的天线也可以看成是被干扰的设备。图 11 的测试方法就是测试电子设备周围规定距离某处的电磁场强度，由于干扰信号一般都是一个频率成份非常丰富的非正弦波，因此，无法对它进行直接测量，只能对它其中某一个频率信号单独进行测量。

电子设备与天线感应产生的电流是位移电流，一般频率很高的位移电流在电路中每处的电流方向以及电流大小和电压幅度都是不一样的，我们无法对它直接进行测量，因此，在进行信号测量的时候一般都使用谐振天线，使天线谐振回路对某个频率的干扰交流信号产生谐振，然后再检测谐振信号的电压幅度。在测试过程中，天线需要经常进行调谐，调谐就是调节天线振子的长度，或磁感应天线谐振回路中的电容，更多的是调谐选频放大器输入回路中的谐振电路参数。

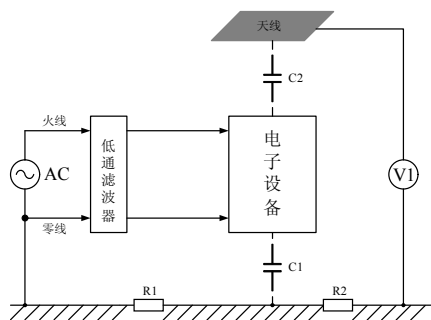


图11

图 12 是极化天线的工作原理图，图 12-a) 和图 12-b) 表示天线在电场中被感应产生极化的两种不同情形。所谓极化就是导体或物体在电场力的作用下产生带电，这种带电是极化带电，即：导体或物体的一端带正电，而另一端带负电。一般地说，导体或物体被极化带电，只是两端带电，而中心点是不带电的。由于，极化天线的电场是一个交变电场，所以，天线总是在图 12-a) 和图 12-b) 之间来回变化。12-a) 和图 12-b) 最左边的图形是表示电场方向和天线的电荷分布曲线，中间图形表示载流子在极化天线中流动，右边图形表示天线的等效电路。

天线来回极化的工作原理可以等效成一个串联谐振电路，当天线在电场力的作用下被极化带电时，它又相当于一个电容在充电；当天线中的载流子在电场力的作用下来回移动时，它又相当于一个电感，并且在天线的周围会产生磁场。

当天线谐振电路产生谐振时，在天线串联谐振电路中会产生很大的谐振电流和很高的谐振电压（假设谐振电路的品质因数非常高），但实际使用的测量天线品质因数都不高，因为天线还要输出能量，即：需要从天线中取出测试信号。要想从天线中取出信号，可以通过高频信号线（双线）把两根天线串联起来，相当于电缆线连接在两根天线的中间，然后把高频信号线（双线）的另一端作为输出；另一种方法是，高频信号线（双线）其中的一条接天线，另一条接大地，高频信号线（双线）的另一端作为输出。前一种天线一般叫半波双振子天线或全波双振子天线，后一种叫半波或全波单振子天线。显然，双振子天线性能要比单振子天线好很多。

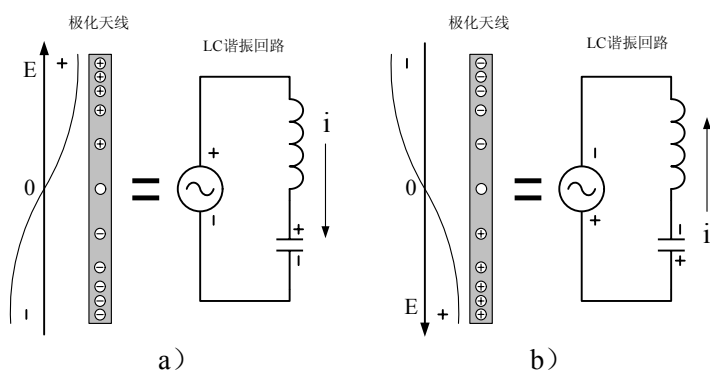


图12

这种测量方法是不很精确的，但没有其它更好的方法。因为，任何谐振回路都是一个储能电路，这种储能电路是一点、一点地把电能进行积累并存储起来的，在进行能量积累的过程中自身也会损耗能量，最后达到接收能量与损耗能量完全平衡的时候，谐振回路的电压幅度才停止增长，即：谐振回路的电压幅度与谐振回路品质因数 Q 值有关，但谐振回路品质因数 Q 值对于不同频率信号是不一样的，并且这种

谐振回路无法检测干扰脉冲的瞬时值。

图 13 是谐振回路产生谐振的工作原理图。图 13-a) 是一个含有谐波分量非常丰富的电压方波, 图 13-b) 是 LC 串联回路产生谐振时的电压波形。当电压方波作用于 LC 串联回路时, 方波的前后沿都会对 LC 串联回路产生激励 (即接收能量), 每次激励过后又会产生阻尼振荡 (即损耗能量), 当输入电压波形的上升率 dv/dt 值大于谐振回路波形 (正弦波) 的上升率时, 电路就会产生激励; 当输入电压波形的上升率 dv/dt 值小于谐振回路波形的上升率时, 电路就会产生阻尼。

由于每次激励过后振荡回路的能量还没有损耗完, 紧接着又来一次新的激励, 使振荡电压一次、又一次地进行叠加, 如果激励的相位与振荡波形的相位能保持同步, 则振荡电压的幅度会越来越高, 直到激励的能量与电路损耗的能量相等为止。因此, 当谐振回路的品质因数 Q 值很高时, 谐振电压也可以升得很高, 理想的情况是 Q 值无限高 (即天线没有损耗), 则产生谐振电压的幅度也会升得无限高, 但这种情况是不存在的。

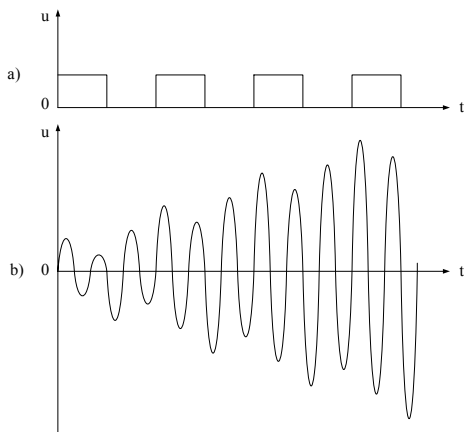


图13

从图 13 还可以看出, LC 串联回路产生谐振时的电压幅度与激励波形的相位密切相关, 而与激励波形的幅度反而相关不是特别大。如果图 13-a) 中的电压方波之间的相位或周期不是严格保持相等, 那么图 13-b) 中的波形就会产生严重抖动, 并且谐振电压的幅度也会下降很多。因此, 用图 11 中的测量方法并不能完全客观地测量出干扰信号在某空间处的电磁场强度。

另外还需指出, 测试用的接收天线还分电场感应天线和磁场感应天线, 还有电磁场感应天线。图 11 中仅以电场偶合天线为例进行分析。

图 13 中只是对干扰信号接收天线的原理进行了分析, 实际应用中天线是不具体区分接收天线和发射天线的, 两者都可以共用一根天线。因此, 电路中任何带电的导体或有电流流过的导体都可以看成是发射天线。从图 11 可以看出, 电子设备产生辐射干扰的大小除了干扰信号幅度之外, 还与感应电容 C_1 、 C_2 的大小有关, 即: 与电场辐射的面积有关 (电容与面积大小成正比), 与磁场辐射的面积也有关, 因此, 尽量减小干扰信号的辐射面积是一种降低辐射干扰的好办法。

3. 电磁兼容 EMC 设计

电磁兼容 EMC 设计的目的就是想办法使自己设计或生产的电子设备产生各种干扰信号的幅度符合别人的要求; 同时还要想办法让自己设计或生产的电子设备在受到其它电子设备产生干扰的情况下还能正常工作。因此, EMC 标准一般都是强制性的。

防止电子设备产生传导干扰和辐射干扰最好的方法，是采金属机壳对电磁场进行屏蔽，以及对电源输入电路用变压器进行隔离，并且还要对变压器也进行静电感应和磁感应屏蔽。但由于金属机壳比较笨重，并且成本很高，另外 50 周的电源变压器体积很大，并且对其进行静电感应和磁感应屏蔽也比较麻烦，因此，这两种方法只有一些要求特别高的场合才会使用，例如：精密测试仪表，对于一般的普通电器设备，目前已很少使用。

在塑料机壳内表面喷涂导电材料也是一种对电磁屏蔽很有效的方法，比如，在塑料机壳内表面喷涂石墨，对超高频电磁屏蔽效果就非常好，因为，石墨既导电又有电阻，是吸收电磁波的良好材料，它不容易对电磁波产生反射，并对电磁波产生衰减作用。如果只从屏蔽效果来比较，石墨对电磁场屏蔽的效果的确不如导电良好的金属，但金属屏蔽也有缺点，它最大的缺点就是产生电磁波反射，并使电磁反射波相互迭加，严重时会产生电磁振荡。

当被屏蔽干扰信号的波长正好与金属机壳的某个尺寸接近的时候，金属机壳很容易会变成一个大谐振腔，即：电磁波会在金属机壳内来回反射，并会产生互相迭加，其工作原理与图 13 基本相同。这种情况在电脑机壳内最容易实现，当电脑机壳的边长正好等于某干扰信号的半个波长，且干扰信号源正好位于电脑机壳的中央位置的时候，干扰信号很容易就会在机壳内部产生电磁振荡。当某一干扰信号频率正好在谐振腔中产生谐振的时候，电磁波的能量反而会被加强。被加强了干扰信号，一方面会破坏设备自身的正常工作，另一方面干扰信号也会从金属机壳的裂缝逃逸出去，产生辐射干扰，雷达设备经常使用的裂缝天线就是这个工作原理。特别指出，电磁波在金属机壳中产生辐射或谐振，与外壳接地或不接地无关。

大多数电器设备传导干扰都是由开关电源引起的，为了提高开关电源的工作效率，一般都希望开关管导通和关断速度越高越好，即：方波的前、后沿越陡越好，这样的结果会使开关电源产生的干扰更加严重，要进行抑制更加困难。因此，在对开关电源进行设计时，不要无条件地追求开关电源的工作效率为越高越好。

不管采用什么样的滤波电路来抑制电子设备产生的传导干扰，其主要目的都是要把图 6 中的 V1、V2、V3 等三个干扰信号的幅度降到最低。例如：要抑制 V1 干扰信号，最有效的方法是在 V1 的两端并联一个电容，由于这个电容连接的位置比较特殊，需要符合安全标准，因此，一般人们都称他为 Y 电容；同理，要抑制 V2 干扰信号，最有效的方法也是在 V2 的两端并联一个 Y 电容。由于 Y 电容会引起设备漏电或机壳带电，容易危及人身安全，所以这两个 Y 电容都是属于安全电容，其容量不能大，并且要求耐压很高，否则，机器将会漏电。安全标准规定，一般在亚热带机器对地漏电电流不能超过 0.7mA，在温带机器对地漏电电流不能超过 0.35mA，因此，Y 电容的总容量一般都不能超过 4700P。

特别提示，Y 电容为安全电容，必须经过安全检测部门人证过后才能使用。Y 电容的耐压一般都标有安全认证标志和 AC250V 或 AC275V 字样，但其真正的直流耐压高达 5000V 以上，因此，Y 电容不能随便用 AC250V，或 DC400V 之类的电容来代用。

抑制 V3 干扰信号最有效的方法，同样也是在 V3 的两端并联一个电容，由于这个电容连接的位置比较特殊，也需要符合安全标准，因此，一般人们都称他为 X 电容。X 电容同样也属于安全电容，其容量可以比 Y 电容大，但必须在 X 电容的两端并联一个安全电阻，用于防止电源线拔插时电源线插头长时间带电。安全标准规定，当正在工作之中的机器电源线被拔掉时，在两秒钟内，电源线插头两端带电的电压（或对

地电位) 必须小于原来电压的 30%。

X 电容也是安全电容, 必须经过安全检测部门认证过后才能使用。X 电容的耐压一般都标有安全认证标志和 AC250V 或 AC275V 字样, 但其真正的直流耐压达 2000V 以上, 使用的时候不要随便使用 AC250V, 或 DC400V 之类的电容来代用。

X 电容一般都选用纹波电流比较大的聚脂薄膜安全电容, 这种电容体积一般都很大, 但其允许瞬间充放电的电流也很大, 即: 内阻比较小。普通电容纹波电流的指标一般都很小, 动态内阻比较大, 用普通电容代替 X 电容, 除了耐压条件不能满足以外, 一般纹波电流指标也是难以满足要求的。

实际上, 光靠用 Y 电容和 X 电容就想把传导干扰信号完全滤除是不可能的。因为干扰信号的频谱非常宽, 基本覆盖了几十 KHz 到几百 MHz 甚至上千 MHz 的频率范围。对低端干扰信号的滤除需要很大容量的滤波电容, 但受到安全条件的限制, Y 电容和 X 电容的容量都不能用大; 对高端干扰信号的滤除, 大容量电容的滤波性能又极差, 特别是聚脂薄膜电容的高频性能一般都比较差, 因为它用卷绕工艺生产的, 并且聚脂薄膜介质高频响应特性与陶瓷或云母相比相差很远, 一般聚脂薄膜介质都具有吸附效应, 它会降低电容器的工作频率, 聚脂薄膜电容工作频率范围大约都在 1MHz 左右, 超过 1MHz 其阻抗将显著增加。

因此, 抑制电子设备产生的传导干扰除了选用 Y 电容和 X 电容进行滤波以外, 一般还要同时选用多个电感滤波器一起组合对干扰进行滤波。电感滤波器属于低通滤波器, 但电感滤波器也有很多种类和无数多种规格, 例如有: 差模、共模, 以及高频、低频等, 每种电感主要都是针对某一小段频率的干扰信号滤除而起作用, 对其它频率的干扰信号的滤除起作用不大。因为, 电感量很大的电感, 其线圈匝数很多, 分布电容也很大, 高频信号会通过分布电容旁路掉, 另外, 导磁率很高的磁芯, 其工作频率也不高。目前, 国内大量使用的电感滤波器磁芯的工作频率大多数都在 75MHz 以下, 对于工作频率要求比较高的场合, 必须选用高频环形磁芯, 高频环形磁芯导磁率一般都不高, 但漏感特别小。

图 14 是根据上面分析而设计的 EMC (电磁兼容) 滤波电路, EMC 滤波电路如虚线框内所示。

图 14 中, C1、C2 是 Y 安全电容, 其主要作用是对 V1、V2 进行旁路, V1、V2 属于共模干扰信号, 因此 C1、C2 的功能主要是对共模干扰信号进行抑制, 同时 C1、C2 对 V3 也有一定的旁路作用, 但因两个电容串联起来的容量很小, 因此, 其主要功能是高频差模干扰信号进行抑制; C3 是 X 安全电容, 其主要作用是对 V3 进行旁路, V3 属于差模干扰信号, 因此, C3 的主要功能是对差模干扰信号进行抑制; C4 也是 X 安全电容, 虽然它没有对 V3 直接进行旁路, 但它也是差模干扰信号抑制的滤波电容; R1 是残余电压释放电阻, 其阻值要与 C3、C4 等配合使用, 使时间常数 $\tau = R1 \bullet (C3+C4)$ 小于 2 秒, 但 R1 不能用得太小, 太小会损耗电源功率。当电容充放电时间等于 τ 时, 电容器两端的电压上升或下降的值是最大值的 63%。

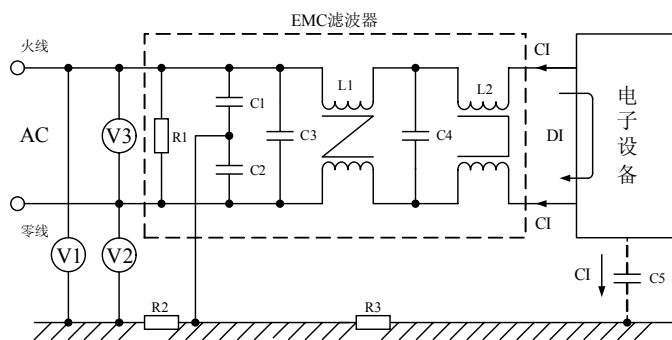


图14

图 14 中, L1、L2 是电感滤波器, L1 为差模干扰信号电感滤波器, L2 为共模干扰信号电感滤波器, 由于差模干扰信号电感滤波器很容易产生磁饱和, 以及电感滤波器的体积也比较大, 因此目前很少人使用, 基本上都是用共模电感滤波器来代替。实际应用中共模电感滤波器的两个线圈之间也存在很大的漏感, 因此, 它对差模干扰信号也具有一定的滤波作用。

根据 EMC 的定义或原理, EMC 滤波电路不但要抑制本电子设备产生的电磁干扰, 同时也要对外来的电磁干扰信号进行抑制, 因此, 图 14 所示的 EMC 滤波电路还不是十分完美的。为了提高 EMC 滤波电路对外来电磁干扰信号的抑制能力, 最好在输入端也安装一个低通滤波器, 并且这个低通滤波器对本电子设备产生的电磁干扰也有很强的抑制能力。

另外, 由于电磁干扰信号的频谱非常宽, 单独用一个电感滤波器是很难达到满意要求的, 因为, 目前采用的电感滤波器都不是理想的电感滤波器, 每种规格的电感滤波器只能对应某一频段滤波效果为最好, 因此, 最好同时把高、中、低三种不同频率滤波特性的电感滤波器同时都用上。图 15 是一种具有对外来传导干扰信号有很强抑制能力的 EMC 滤波电路, 同时, EMC 滤波电路还可以把高、中、低三种不同频率滤波特性的电感滤波器组合起来使用, 使性能进一步提高。

图 15 与图 14 相比, 多了一个 L0 低通电感滤波器, 目的是为了提高对外来传导干扰信号的抑制能力。如果只考虑提高抑制本电子设备干扰的能力, 可把 C1、C2 的连接位置移放到电源线的最前端, 即: 尽量靠近测试仪表的接入处, 抑制干扰效果会更显著。需要检查电子设备对外来电磁干扰信号的抑制能力, 可在电源线输入端输入一个干扰信号, 然后检测电子设备被干扰影响的程度, 如: 电视机出现行扫描不同步等。对不同的电子设备, 干扰信号也有不同的要求, 这些标准制定一般都是由行业协会提出, 最后由标准制定单位推荐使用。

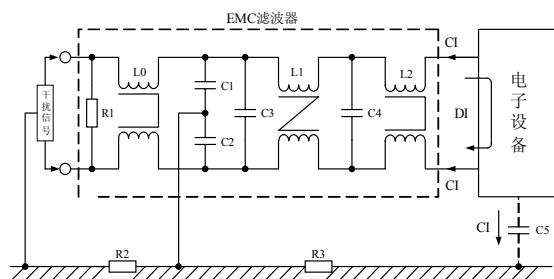


图15

3-1. 传导干扰 EMC 滤波电路设计

传导干扰分共模信号干扰和差模信号干扰, 我们先来分析共模信号干扰。

我们可以从图 6、图 7、图 8、图 10、图 12、图 14、图 15 等看出, 共模干扰信号主要是通过电子设备对地的分布电容构成回路传输的。如图 5 中的 C5 就是干扰设备对地的分布电容。C5 的容量与干扰设备的体积有关, 与地面的距离有关, 但检测时, 设备到地面的距离是固定的, C5 的容量大约在十几到几千微微法之间。由于 C5 的容量很小, 对低频信号的阻抗很大, 因此, 能够通过 C5 电容的共模干扰信号基本上都是属于高频信号。

在图 14、图 15 电路中, 为了降低共模干扰信号输出, 还在电路中串入 L0、L1、L2 等电感, 以及 C1、C2 等电容。与 C5 电容的特性相反, 电感滤波器对低频信号的阻抗很小, 而对高频信号的阻抗却很大。

图 16 表示 C5 电容与 L0、L1、L2 等电感滤波器的频率-阻抗特性图。图 16 中红线表示设备对地电容

C5 的频率阻抗曲线；蓝线是滤波电感 L0、L1、L2 的频率阻抗曲线。

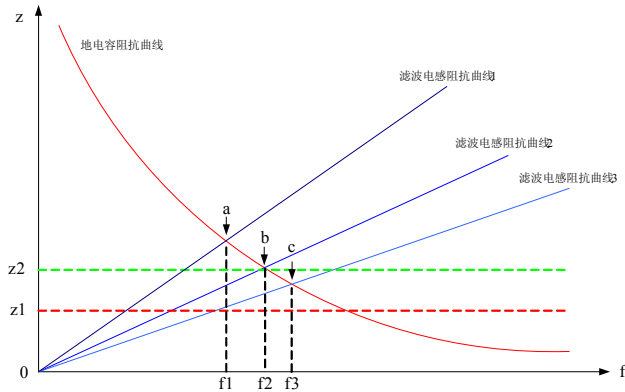


图16

对于电容来说，在频率的低端电容的阻抗很大，低频共模干扰信号一般难以通过；但当频率升高到一定某一个数值的时候，电容的阻抗就会降低，共模干扰信号就会很容易通过，因此，产生共模干扰的信号频率主要集中在红线的右端。但对于电感 L0、L1、L2 来说，在频率的低端电感的阻抗很小，低频共模干扰信号一般很容易通过，但当频率升高到某一个数值的时候，电感的阻抗会升高，使共模干扰信号难以通过，因此，出现共模干扰信号的频率主要集中在蓝线的左端。由此，可以得出结论，出现共模干扰信号的频率就是在电容阻抗曲线与电感阻抗曲线的交汇处，如图 16 中的 a、b、c 或对应频率 f1、f2、f3 附近。

图 16 中有三条蓝色电感滤波器的阻抗曲线，分别对应不同数值的电感。当符合标准的共模干扰信号对应的阻抗参考线为 Z1 时，图 16 中的三种电感参数全部合格；当符合标准的共模干扰信号对应的阻抗参考线为 Z2 时，选用的三种电感参数只有两种合格，其中第一个性能最优，但成本相应也会提高。另外我们还可以看出，选用不同的电感参数，对应出现共模干扰信号的频率也不一样。

我们再来分析差模干扰。

我们同样可以从图 6、图 7、图 8、图 10、图 12、图 14、图 15 等看出，差模干扰信号没有通过设备对地的分布电容构成回路，主要是通过电源输电线路进行传输。在图 14、图 15 中对差模干扰信号起抑制作用的主要是 L0、L1、L2、C3、C4，以及 C1、C2。一般 C1、C2 都是在安全标准允许的条件下把容量用到最大，参数可调的一般只有 C3、C4 两个电容，和 L0、L1、L2 三个电感滤波器。

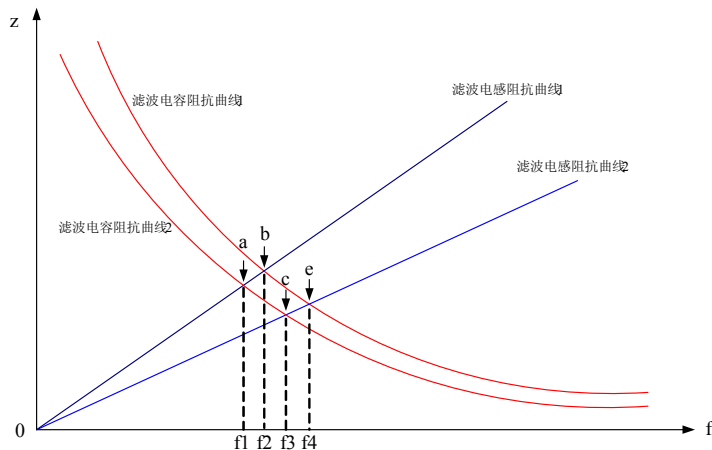


图17

图 17 表示 C3、C4 滤波电容器与 L0、L1、L2 等电感滤波器的频率-阻抗特性图。图 17 中的两条红线，表示滤波电容器 C3、C4 选取不同容量时的频率阻抗曲线；两条蓝线，表示滤波电感 L0、L1、L2 选取不同电感值时的频率阻抗曲线。对于电容来说，在频率的低端电容的阻抗很大，低频差模干扰信号一般难以通过；但当频率升高到一定范围的时候，电容的阻抗就会降低，差模干扰信号就很容易通过，因此，出现差模干扰信号的频率主要集中在红线的左端。

但对于电感 L0、L1、L2 来说，在频率的低端电感的阻抗很小，低频差模干扰信号一般很容易通过，但当频率升高到一定范围的时候，电感的阻抗也会升高，使差模干扰信号难以通过，因此，出现差模干扰信号的频率主要集中在蓝线的左端。由此，可以得出结论，出现差模干扰信号的频率全部都集中在电容阻抗曲线与电感阻抗曲线相交处的左端，如图 17 中的 a、b、c、e 或对应频率 f1、f2、f3、f4 的左边。因此，滤波电容器 C3、C4 与电感滤波器 L0、L1、L2 的数值，对于差模干扰信号抑制效果来说都是越大越好。

从图 16 和图 17 可以看出，出现共模干扰信号的频率既不是频率的低端，也不是频率的高端，而是在某个频率的附近；而出现差模干扰信号的频率全部都是集中在某个频率的低端。

特别指出，上面分析，完全是把电容器和电感器看成一个理想器件来进行分析的结果，实际应用中的电容器并不是一个理想的电容器，电感滤波器也不是一个理想的电感滤波器。因此，在进行实际电路设计时一定要反复查看自己所选择器件的参数，特别是各种器件的频率响应曲线。

3-2. 地线对 EMC 的影响

很多人都认为，电路中的地线或接地电路都是不带电的，实际上，这种认为是错误的。在一般的直流电路或低频电路中，当不考虑电磁感应时，可以认为电路中的地线或接地电路是不带电的，但在存在电磁感应的电路中，就不要轻易认为电路中的地线或接地电路是不带电的。

举个简单例子吧，谁会相信，几十万伏的高压输电线的正中心是不带电的。但事实上，由于电场的相互作用，导体中的电荷分布主要都是集中在导体的外表面，而导体的中心电荷几乎为 0，所以带电导体的中心是不带电的。这个原理可以用验电器在一个带电空心金属球的中心进行测试作证明，在一个带电空心金属球的中心电场强度的确为零，从而也可证明带电导体中心的电场强度为零，即不带电。

在具有电磁感应的电路中，无论电路是否闭合回路，或者是开路，在与电场方向一致的导体中都会产生位移电流，无论是导体或者是绝缘体在电场中都会产生极化带电；当电场的方向不断改变时，电流的方向也会跟随电场的方向改变而改变，电流将一会儿向前跑，一会儿向后跑。导体被极化带电的过程，可参考图 12 中的天线被极化的过程。另外，磁感应也会使导体或电路产生感应电动势，使导体或电路带电。

一个被充满电的电容器，它的两个电极就是带电体，一端带正电，另一端带负电，而真正不带电的地方是在电容器的中间；同理，一个被感应的变压器次级线圈，它的两个输出端口也会带电，而真正不带电的地方只有在变压器线圈的中间抽头处。严格来说，只有电位为零的物体，我们才能称它不带电；或者说，只要电位不为零的物体我们都应该称它为带电体。但这样一来，我们实际中接触到很多的具体电路就只能用等效电路来表示了，所以，有时把问题太复杂化了也不好，但过于简单有时也会把实质性的问题给掩盖住了。

一只小鸟，如果它站在电视发射天线的中间，它一般是不会产生触电危险的，但如果它站在电视发射天线的某一端，它可能会立刻被电死。这说明发射天线的中间是不带电的，而发射天线的两端都是带电的。

但为什么小鸟站在几十万伏的高压线上，它没有被触电，而站在只有几十伏电压的发射天线的某一端上却会被电死呢？这就是电磁感应的性质，微波炉就是根据电磁感应原理制造的。

小鸟站在高压线上没被电死的原因，是因为小鸟的电容很小，虽然几十万伏的高压对它来回充放电，电流很小 ($i = C \cdot dv/dt$)；而小鸟站在发射天线的某一端，因为发射天线电压信号的频率很高，电容来回充放电的电流很大，因此，小鸟很容易会被电死。

由此可知，如果把多个不是真正零电位的电路或带电体互相连接在一起，接点处将会出现电流。比如，三相变压器的中线一般都接地，当三相电源负载不平衡的时候，接地处就会产生电流；又如，把变压器次级线圈的一端接地，接地端也会产生电流，而电流的大小与变压器次级线圈的电容有关，与工作频率也有关，与输出电压也有关。

在进行电路设计的时候，对地线的连接和处理一定要特别慎重，否则将会出现严重的地线干扰。这里再次指出，一般电路中的地，不是大地，其电位并不等于零，它只不过是一根公共连接线，当它没有与大地连接时，我们更不应该把它看成地线。理想的地线应该是，电位处处为零，即：在理想的地线中是没有电流流动的，如果导体中有电流流动，我们就不能把它当成地线。

下面我们以图 18 为例来分析地线对 EMC 产生的影响。图 18 中 Q1 表示开关电源，T1 为开关变压器，D1 为整流二极管，C1、C2、C3 为滤波电容器，A1 为功率放大器，S1 为功率放大器输入信号，R1 为功率放大器输出负载，G1、G2、G3、G4、G5、G6、G7、G8 为各个器件的地； U_i 表示整流输出电压， U_o 表示经过滤波后的输出电压。

我们先来看 G1，G1 是开关电源变压器次级的地，这个 G1 地的电位不是 0，变压器次级真正的 0 电位是在变压器次级线圈的中心抽头处，如果变压器次级线圈的两个端子不接成回路，它相当于一个振子天线；如果把 G1 与大地相接，哪怕变压器次级线圈的另一端不与其它电路连接，G1 也会产生地电流，并且变压器次级线圈热端的电位会升高一倍，其工作原理与广播电台的中波发射天线的工作原理很类似。

变压器输出电压经二极管 D1 整流后为脉动直流，脉动直流含有非常丰富的高频谐波，不能直接向功率放大器供电，必须要经过储能滤波，使脉动直流变成一种纹波很小的直流后，再给功率放大器供电。

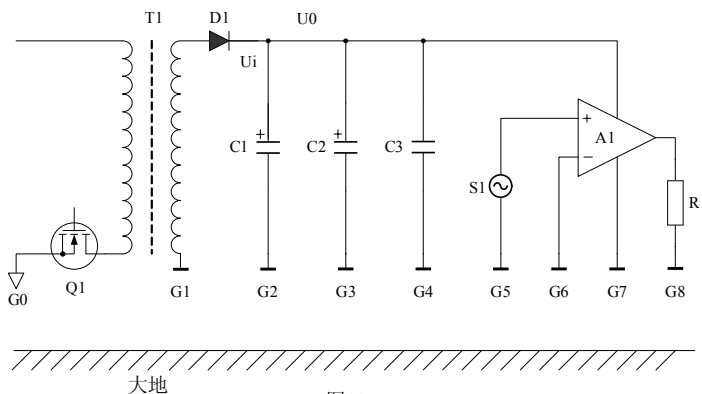


图18

图 18 中 C1 是储能滤波电容，它的功能是把开关电源输出的脉冲功率进行存储，然后再给负载提供稳定的功率和电压输出。电容 C1 充电的时候相当于功率存储，放电的时候，相当于功率输出。由于 C1 的充放电电流特别大，如果电路处理不当，充放电回路产生的电磁干扰将非常严重。根据 (12)、(13)、(14)、(15)、(16) 式可知：产生感应电动势的大小，与电流的变化律成正比，与磁通的变化率成正比，与产生

感应磁通回路的面积成正比，与互感的大小成正比；而充电回路电流的大小，与开关电源输出电压的变化率成正比，与充电电容器的大小成正比。

即：

$$e = L \cdot di/dt \quad (12)$$

$$e = d\phi/dt \quad (13)$$

$$e = SdB/dt \quad (14)$$

$$i = C \cdot dv/dt \quad (15)$$

$$e = M \cdot di/dt \quad (16)$$

图 19 是开关电源整流输出电压以及电源滤波电容的纹波电压和纹波电流波形。图 19 中红线表示电容器充电时的电压、电流变化曲线，蓝线表示电容器放电时的电压、电流变化曲线。其中 U_i 表示整流输出电压， U_o 表示经过滤波后的输出电压， u_c 表示滤波电容的纹波电压， i_c 表示滤波电容的纹波电流。

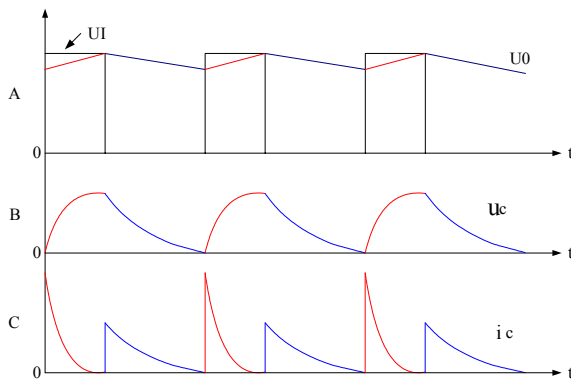


图19

由图 19 可以看出，电源滤波回路同时存在两种非常严重的电磁辐射，一个由变压器输出电压方波产生的高频电场辐射，另一个是由电源滤波回路电容器充放电电流产生的高频磁场辐射，统称电磁辐射。

为了减少电磁辐射，比较简便和有效的办法就是减少电磁辐射的面积，或减少电压和电流的上升率，减少电压上升率会增加电源开关管的损耗；减少电流上升率可以在电容充放电回路中串联一个小电感，但串联电感又会产生新的磁辐射，并且增加成本。为了减少电磁辐射的有效辐射面积，整流二极管 D1、电源滤波电容 C1 必须紧靠开关电源变压器的次级，电源滤波电容 C1 的地 G2 更应该就近与变压器次级的地 G1 连接，并且在 PCB 板上还要做到一点接地，即：在这两个接地点之间不要插入其它的接地点。变压器输出电压经过 C1 电容滤波后，脉动电压的成分以及高次谐波部分都将会大大减少，此时，G1 或 G2 与大地连接，流入大地的谐波电流也将会大大减小。

我们再看其它的地，G7 是功率放大器 A1 输出的地，同时 G7 还是功率放大器 A1 电源的负极。我们可以把功率放大器 A1 看成是一个软开关，功率放大器的输出级一般都是由两个推拉管组成，两个放大管受输入信号的控制来回导通，不断地向负载 R1 提供功率输出，并且不停地向电源索取能量——电流。流过功率放大器 A1 或负载 R1 的电流是脉动电流，因此，率放大器的电源输入回路以及功率输出回路也会向外产生很强的电磁辐射，为了减少电磁辐射，要尽量减少电源输入回路以及功率输出回路的面积。

对于功率放大器 A1 的供电回路来说，减少电磁辐射面积最好的方法，是把电源直接接到功率放大器

电源输入脚的两端。一个充满了电的电容可以把它看成是一个电源，因此，C2、C3 都可以看成是给功率放大器供电的电源，所以，C2、C3 应该尽量靠近功率放大器供电的输入端，并与电源输入的两端紧密相连。C3 是高频电容，它能在很短的时间内输出较大的电流，即高频响应好，并且体积比 C2 小，它靠近功率放大器的电源输入端更为便利，对减少电磁辐射很有利。因此，G4 应该优先与 G7 连接，其次是储能电容 C2 的地 G3，最好 G7、G4、G3 三个地能够接在一个点上，即在它们之间不要插入其它接地点，最后 G7 再与 G8 相连。C2 是一个大容量储能电容，但它瞬间不能提供出大电流，因此，需要并联一个高频电容 C3。

G5 是信号源的地，G6 是功率放大器输入信号的地，理所当然它们两个地应该连接在一起。功率放大器输入信号的回路很容易被其它电流回路产生电磁感应干扰，因此，输入信号回路的面积也要尽量地小，输入信号的输入地线与信号输入线要尽量要靠近，并且要平行一起走，使电磁感应在每根信号线上产生的干扰信号，对放大器来说，均为共模信号，这样可以互相抵消。如果 G5 和 G6 不是一点接地，G5 和 G6 之间产生的电位差将会成为放大器输入信号的一部分，即：干扰信号通过地线会串扰到输入信号之中，将会破坏放大器的正常工作，严重时还会使放大器出现自激。

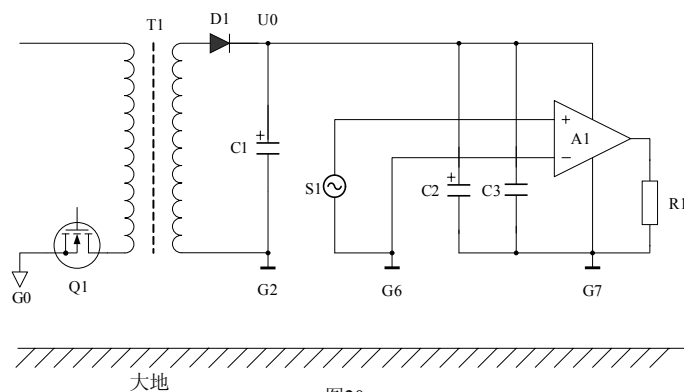


图20

图 20 是经过接地优化以后的原理图，经过接地优化以后，原来图 19 中的 8 个接地点现在减少 5 个，变成了 3 个，然后，这 3 个接地点之间不管用导线怎么样互相连通，在连接的导线（地线）中都不会出现大的脉动电流或者互相产生信号干扰，如果把其中任何一个接地点与大地连接，也不会产生大的脉动电流。因此，经过接地优化以后，不但可以降低设备中各部分电路之间通过地线产生的各种信号互相干扰，同时也可以降低本设备对其它设备产生的干扰。

三. 结束语

最后指出，抑制电磁辐射干扰的最有效方法是对电磁场进行屏蔽，用导体把两个带电体之间的电力线截断，或用高导磁率的磁性材料把产生干扰磁场的物体进行屏蔽。但用于电场屏蔽的导体需要良好接地才能有效，如果屏蔽电场的导体不能良好接地，屏蔽电场的导体不但起不到屏蔽作用，反而对电场辐射干扰起到接力赛的效果，因为电场也会通过感应使屏蔽导体带电。另外，用导体对磁感应干扰进行屏蔽，也会产生意想不到的作用。因为，磁力线穿过导体的时候，也会产生感应电流，即：涡流。涡流又会产生磁场，这个新产生的磁场的方向正好与干扰磁场的方向相反，两者正好可以互相抵消。

目前，对电磁兼容 EMC 电路设计，还没有一种有效的方法能像设计一个放大器那样，可以通过计算使放大器的放大倍数精确到百分之几以内。对电磁兼容 EMC 进行设计的主要方法还是靠经验或借助别人的经验，需要不断实践才会不断提高。