

地线设计是电磁兼容设计中大家都注意，却又不知道应该怎样去做的一个问题。了解了地线造成干扰问题的机理之后，在设计和实施地线时就有了一个明确的思路。本期从介绍地线造成干扰的原理入手，使读者了解设计地线的关键和原则。

1 什么是地线？

地线有安全地和信号地两种。前者是为了保证人身安全、设备安全而设置的地线，后者是为了保证电路正确工作所设置的地线。造成电路干扰现象的主要是信号地，因此这里仅讨论信号地的问题。

信号地的一般定义是：电路的电位参考点。

更恰当地说，这个定义是我们设计电路时的一个假设。从这个定义是无法分析和理解一些地线干扰问题的。从现在开始，我们在分析电磁兼容问题时，使用下面的定义。

地线是信号电流流回信号源的地阻抗路径。

既然地线是电流的一个路径，那么根据欧姆定律，地线上是有电压的；既然地线上有电压，说明地线不是一个等电位体。这样，我们在设计电路时，关于地线电位一定的假设就不再成立，因此电路会出现各种错误。这就是地线干扰的实质。

2 地线的阻抗有多大？

一个难以理解的问题是，我们在设计地线时，都使地线的电阻很小，那么地线上的电位差怎么会大到导致电路出错的程度。理解这个问题，要理解地线阻抗的组成。

地线的阻抗 Z 由电阻部分和感抗部分两部分组成，即： $Z = R_{AC} + j\omega L$ 。

电阻成分：导体的电阻分为直流电阻 R_{DC} 和交流电阻 R_{AC} 。对于交流电流，由于趋肤效应，电流集中在导体的表面，导致实际电流截面减小，电阻增加，直流电阻和交流电阻的关系如下：

$$R_{AC} = 0.076rf^{1/2}R_{DC}$$

式中： r =导线的半径，单位 cm ， f =流过导线的电流频率，单位 Hz ， R_{DC} =导线的直流电阻，单位 Ω 。

电感成分：任何导体都有内电感（这区别于通常讲的外电感，外电感是导体所包围的面积函数），内电感与导体所包围的面积无关。对于圆截面导体如下：

$$L = 0.2S[\ln(4.5/d) - 1] \quad (\mu H)$$

式中 S =导体长度(m)， d =导体直径(m)

表 1 说明了直流电阻与交流阻抗的巨大差异。频率很低时的阻抗可以认为是导体的电阻，从表中可以看出，随着频率升高，阻抗增加很快，当频率达到 100MHz 以上时，直径 6.5mm 长度仅为 10cm 的导线也有数十欧姆的阻抗。

| 频率 | d=0.65cm | | d=0.27cm | | d=0.06cm | | d=0.04cm | |
|--------|------------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|
| | 10cm | 1m | 10cm | 1m | 10cm | 1m | 10cm | 1m |
| 10Hz | 51.4 $\mu\Omega$ | 517 $\mu\Omega$ | 327 $\mu\Omega$ | 3.28m Ω | 5.29m Ω | 52.9m Ω | 13.3m Ω | 133m Ω |
| 1kHz | 429 $\mu\Omega$ | 7.14m Ω | 632 $\mu\Omega$ | 8.91m Ω | 5.34m Ω | 53.9m Ω | 14m Ω | 144m Ω |
| 100kHz | 42.6m Ω | 712m Ω | 54m Ω | 828m Ω | 71.6m Ω | 1.0 Ω | 90.3m Ω | 1.07 Ω |
| 1MHz | 426m Ω | 7.12 Ω | 540m Ω | 8.28 Ω | 714m Ω | 10 Ω | 783m Ω | 10.6 Ω |
| 5MHz | 2.13 Ω | 35.5 Ω | 2.7 Ω | 41.3 Ω | 3.57 Ω | 50 Ω | 3.86 Ω | 53 Ω |
| 10MHz | 4.26 Ω | 71.2 Ω | 5.4 Ω | 82.8 Ω | 7.14 Ω | 100 Ω | 7.7 Ω | 106 Ω |
| 50MHz | 21.3 Ω | 356 Ω | 27 Ω | 414 Ω | 35.7 Ω | 500 Ω | 38.5 Ω | 530 Ω |
| 100MHz | 42.6 Ω | | 54 Ω | | 71.4 Ω | | 77 Ω | |
| 150MHz | 63.9 Ω | | 81 Ω | | 107 Ω | | 115 Ω | |

表 1 不同直径、长度的导线的阻抗

3 地环路干扰及对策

地环路干扰是一种较常见的干扰现象,常常发生在通过较长电缆连接的相距较远的设备之间。其产生的内在原因是设备之间的地线电位差。地线电压导致了地环路电流,由于电路的非平衡性,地环路电流导致对电路造成影响的差模干扰电压(图 1)。

由于地环路干扰是由地环路电流导致的,因此在实践中,有时会发现,当将一个设备的地线断开时,干扰现象消失,这是因为地线断开时,切断了地环路。这种现象往往发生在干扰频率较低の場合,当干扰频率高时,短开地线与否关系不大。

地环路干扰形成的原因 1: 两个设备的地电位不同,形成地电压,在这个电压的驱动下,“设备 1-互联电缆-设备 2-地”形成的环路之间有电流流动。由于电路的不平衡性,每根导线上的电流不同,因此会产生差模电压,对电路造成干扰。地线上的电压是由于其他功率较大的设备也用这段地线,在地线中引起较强电流,而地线又有较大阻抗产生的。

地环路干扰形成的原因 2: 由于互联设备处在较强的电磁场中,电磁场在“设备 1 - 互联电缆 - 设备 2 - 地”形成的环路中感应出环路电流,与原因 1 的过程一样导致干扰。

解决地环路干扰的方法: 解决地环路干扰的基本思路有三个: 一个是减小地线的阻抗,从而减小干扰电压,但是这对第二种原因导致的地环路没有效果。另一个是增加地环路的阻抗,从而减小地环路电流。当阻抗无限大时,实际是将地环路切断,即消除了地环路。例如将一端的设备浮地、或将线路板与机箱断开等是直接的方法。但出于静电防护或安全的考虑,这种直接的方法在实践中往往是不允许的。更实用的方法是使用隔离变压器、光耦合器件、共模扼流圈、平衡电路等方法。第三个方法是改变接地结构,将一个机箱的地线连接到另一个机箱上,通过另一个机箱接地,这就是单点接地的概念。

4 公共阻抗耦合及对策

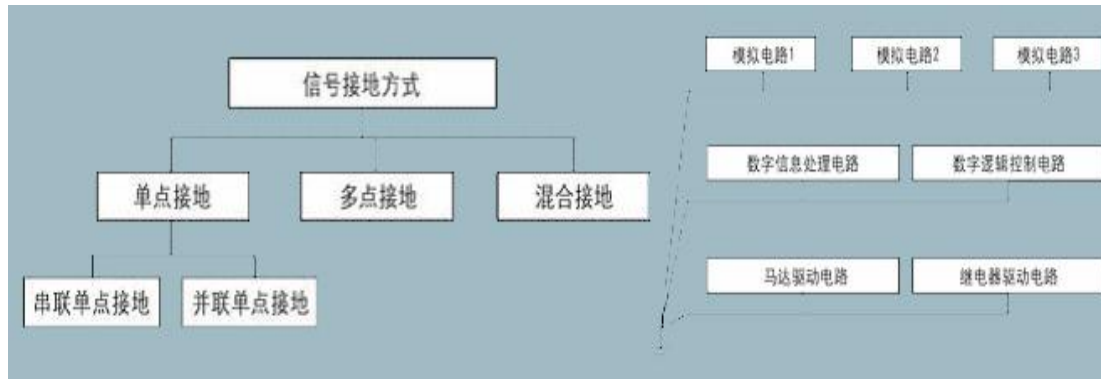
当两个电路的地电流流过一个公共阻抗时,就发生了公共阻抗耦合,如图 2(a) 所示。

一个电路的地电位会受到另一个电路工作状态的影响,即一个电路的地电位受另一个电路的地电流的调制,另一个电路的信号就耦合进了前一个电路。

放大器级间公共地线耦合问题：图 2(a) 中的放大器，由于前置放大电路与功率放大电路共用一段地线，功率放大电路的地线电流很大，因此在地线上产生了较大的地线电压 V 。这个电压正好在前置放大电路的输入回路中，如果满足一定的相位关系，就形成了正反馈，造成放大器自激。

解决办法：可以有两个解决办法，一个是将电源的位置改变一下，使它靠近功率放大电路，这样，就不会有较大的地线电压落在前置放大电路的输入回路中了，如图 2 (b) 所示。另一个办法是功率放大电路单独通过一根地线连接到电源，这实际是改成了并联单点接地结构，如图 2 (d) 所示。

5 接地策略



信号地有图 3 所示的几种方式。

单点接地：所有电路的地线接到公共地线的同一点，进一步可分为串联单点接地和并联单点接地。最大好处是没有地环路，相对简单。但地线往往过长，导致地线阻抗过大。

多点接地：所有电路的地线就近接地，地线很短，适合高频接地。问题是存在地环路。

混合接地：在地线系统内使用电感、电容连接，利用电感、电容器件在不同频率下有不同阻抗的特性，使地线系统在不同的频率具有不同的接地结构。

串联单点接地容易产生公共阻抗耦合的问题，解决的方法是采用并联单点接地。但是并联单点接地往往由于地线过多，而没有可实现性。因此，灵活的方案是，将电路按照信号特性分组，相互不会产生干扰的电路放在一组，一组内的电路采用串联单点接地，不同组的电路采用并联单点接地。如图 4 所示。这样，既解决了公共阻抗耦合的问题，又避免了地线过多的问题。