

电子电气设备的电路隔离技术

1 引言

电路隔离的主要目的是通过隔离元器件把噪声干扰的路径切断,从而达到抑制噪声干扰的效果。在采用了电路隔离的措施以后,绝大多数电路都能够取得良好的抑制噪声的效果,使设备符合电磁兼容性的要求。电路隔离主要有:模拟电路的隔离、数字电路的隔离、数字电路与模拟电路之间的隔离。所使用的隔离方法有:变压器隔离法、脉冲变压器隔离法、继电器隔离法、光电耦合器隔离法、直流电压隔离法、线性隔离放大器隔离法、光纤隔离法、A/D转换器隔离法等。

数字电路的隔离主要有:脉冲变压器隔离、继电器隔离、光电耦合器隔离、光纤隔离等。其中数字量输入隔离方式主要采用脉冲变压器隔离、光电耦合器隔离;而数字量输出隔离方式主要采用光电耦合器隔离、继电器隔离、高频变压器隔离(个别情况下采用)。

模拟电路的隔离比较复杂,主要取决于对传输通道的精度要求,对精度要求越高,其通道的成本也就越高;然而,当性能的要求上升为主要矛盾时,应当以性能为主选择隔离元器件,把成本放在第二位;反之,应当从价格的角度出发选择隔离元器件。模拟电路的隔离主要采用变压器隔离、互感器隔离、直流电压隔离器隔离、线性隔离放大器隔离。

模拟电路与数字电路之间的隔离主要采用模/数转换装置;对于要求较高的电路,除采用模/数转换装置外,还应在模/数转换装置的两端分别加入模拟隔离元器件和数字隔离元器件。

2 模拟电路的隔离

一套控制装置或者一台电子电气设备,通常包含供电系统,模拟信号测量系统,模拟信号控制系统。而供电系统又可分为交流供电系统和直流供电系统,交流供电系统主要采用变压器隔离,直流供电系统主要采用直流电压隔离器隔离。模拟信号测量系统相对来说比较复杂,既要考虑其精度,频带宽度的因素,又要考虑其价格因素;对于高电压、大电流信号,一般采用互感器(电压互感器、电流互感器)隔离法,近年来,又出现了霍尔变送器,这些元器件都是高电压、大电流信号测量常规使用的元器件;对于微电压、微电流信号,一般采用线性隔离放大器。模拟信号控制系统与模拟信号测量系统的隔离类似,一般采用变压器、直流电压隔离器。

2.1 供电系统的隔离

2.1.1 交流供电系统的隔离

由于交流电网中存在着大量的谐波,雷击浪涌,高频干扰等噪声,所以对由交流电源供电的控制装置和电子电气设备,都应采取抑制来自交流电源干扰的措施。采用电源隔离变压器,可以有效地抑制窜入交流电源中的噪声干扰。但是,普通变压器却不能完全起到抗干扰的作用,这是因为,虽然一次绕组和二次绕组之间是绝缘的,能够阻止一次侧的噪声电压、电流直接传输到二次侧,有隔离作用。然而,由于分布电容(绕组与铁心之间,绕组之间,层匝之间和引线之间)的存在,交流电网中的噪声会通过分布电容耦合到二次侧。为了抑制噪声,必须在绕组间加屏蔽层,这样就能有效地抑制噪声,消除干扰,提高设备的电磁兼容性。图1(a)、(b)所示为不加屏蔽层和加屏蔽层的隔离变压器分布电容的情况。

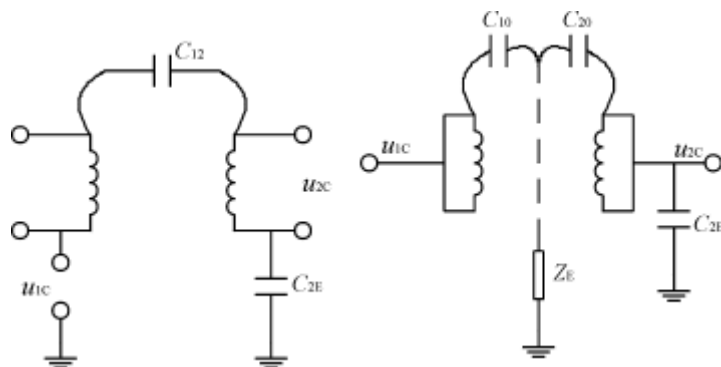
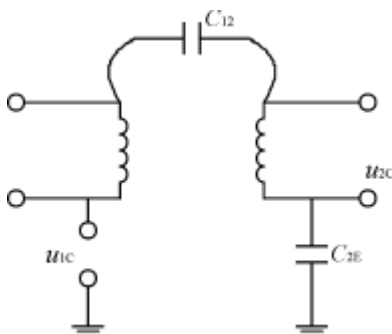
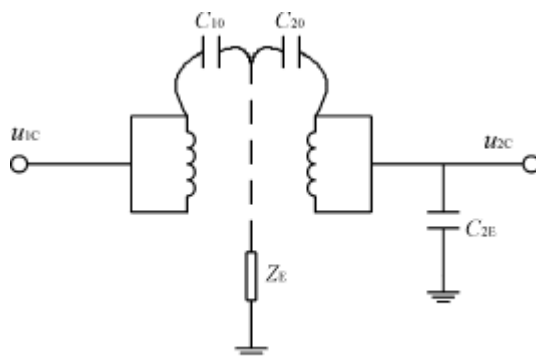


图1 变压器隔离



(a) 无屏蔽
(a) 无屏蔽



(b) 有屏蔽
(b) 有屏蔽

在图 1 (a) 中，隔离变压器不加屏蔽层， C_{12} 是一次绕组和二次绕组之间的分布电容，在共模电压 u_{1c} 的作用下，二次绕组所耦合的共模噪声电压为 u_{2c} ， C_{2E} 是二次侧的对地电容，则从图可知二次侧的共模噪声电压 u_{2c} 为：

$$u_{2c} = u_{1c} C_{12} / (C_{12} + C_{2E})$$

在图 1 (b) 中，隔离变压器加屏蔽层，其中 C_{10} 、 C_{20} 分别代表一次绕组和二次绕组对屏蔽层的分布电容， Z_s 是屏蔽层的对地阻抗， C_{2E} 是二次绕侧的对地电容，则从图可知二次侧的共模噪声电压 u_{2c} 为：

$$u_{2c} = (u_{1c} Z_s / (Z_s + 1/j\omega C_{10})) (C_{2E} / (C_{20} + C_{2E}))$$

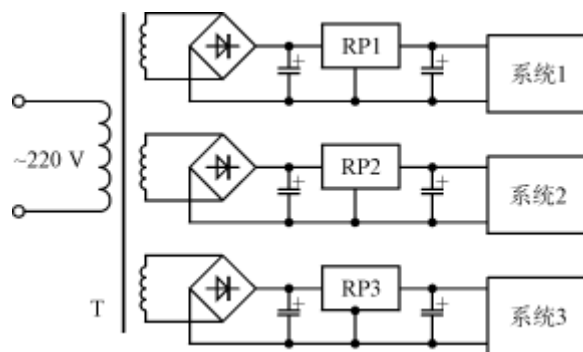
由于 Z_s 是屏蔽层的对地阻抗，在低频范围内， $Z_s \ll (1/j\omega C_{10})$ ，所以 $u_{2c} \rightarrow 0$ 。由此可见，采取屏蔽措施后，通过隔离变压器的共模噪声电压被大大地削弱了。

随着技术的进步，国外已研制成功了专门抑制噪声的隔离变压器(NoiseCutoutTransformer，简称 NCT)，这是一种绕组和变压器整体都有屏蔽层的多层屏蔽变压器。这类变压器的结构，

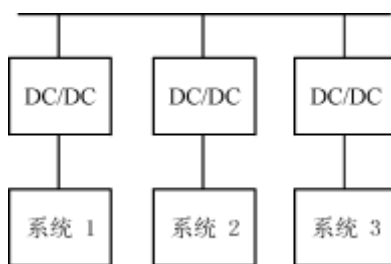
铁心材料，形状及其线圈位置都比较特殊，它可以切断高频噪声漏磁通和绕组的交链，从而使差模噪声不易感应到二次侧，故这种变压器既能切断共模噪声电压，又能切断差模噪声电压，是比较理想的隔离变压器。

2.1.2 直流供电系统的隔离

当控制装置和电子电气设备的内部子系统之间需要相互隔离时，它们各自的直流供电电源间也应该相互隔离，其隔离方式如下：第一种是在交流侧使用隔离变压器，如图 2（a）所示；第二种是使用直流电压隔离器（即 DC/DC 变换器），如图 2（b）所示。



(a) 交流侧隔离



(b) 直流隔离

图 2 直流电源系统的隔离

2.2 模拟信号测量系统的隔离

对于具有直流分量和共模噪声干扰比较严重的场合，在模拟信号的测量中必须采取措施，使输入与输出完全隔离，彼此绝缘，消除噪声的耦合。隔离对系统有如下好处：

- 防止模拟系统干扰，尤其是电力系统的接地干扰进入逻辑系统，导致逻辑系统的工作紊乱；
- 在精密测量系统中，防止数字系统的脉冲波动干扰进入模拟系统，尤其是前置放大部分，因为前置放大部分的信号非常微弱，较小的骚扰波动信号就会把有用信号淹没。

2.2.1 高电压、大电流信号的隔离

高电压、大电流信号采用互感器隔离，其抑制噪声的原理与隔离变压器类似，这里不再赘述。互感器隔离的应用如图 3（a）所示。

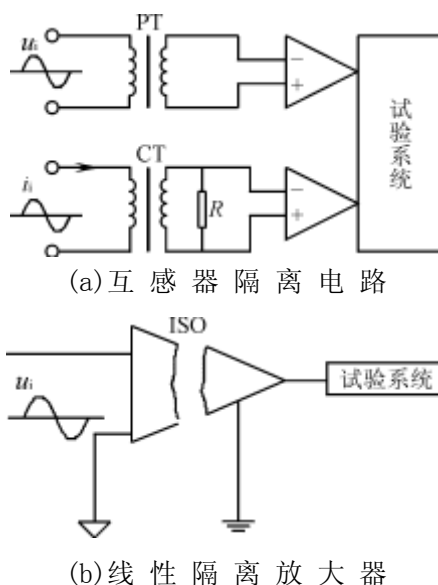


图3 模拟信号输入隔离系统

2.2.2 微电压、微电流信号的隔离

微电压、微电流模拟信号的隔离系统相对来说比较复杂，既要考虑其精度，频带宽度的因素，又要考虑其价格因素。一般情况下，对于较小量的共模噪声，采用差动放大器或仪表放大器就能够取得良好的效果，但对于具有较大量的共模噪声，且测量精度要求比较高的场合，应该选择高精度线性隔离放大器，如BB公司的IS0106，其主要参数如下：

- 交流耐压 3 5kV/1min, 60Hz;
- 直流耐压 4 95kV;
- 冲击耐压 8kVPK/10s;
- 非线性误差 0.007%;
- 隔离噪声抑制比交流 130dB, 直流 160dB。

IS0106 的优秀参数，使其大量地应用于精密测量系统中，线性隔离放大器的应用如图 3 (b) 所示。

2.3 模拟信号控制系统的隔离

如前所述，模拟信号控制系统的隔离与模拟信号测量系统的隔离类似，即交流信号一般采用变压器隔离，直流信号一般采用直流电压隔离器或线性隔离器隔离。

3 数字电路的隔离

与模拟系统类似，一套控制装置，或者一台电子电气设备，通常所包含的数字系统有：数字信号输入系统，数字信号输出系统。数字量输入系统主要采用脉冲变压器隔离，光电耦合器隔离；而数字量输出系统主要采用光电耦合器隔离，继电器隔离，个别情况也可采用高频变压器隔离。

3.1 光电耦合器隔离

这种隔离方法是用光电耦合器把输入信号与内部电路隔离开来，或者是把内部输出信号与外部电路隔离开来，如图 4 (a)、(b) 所示。

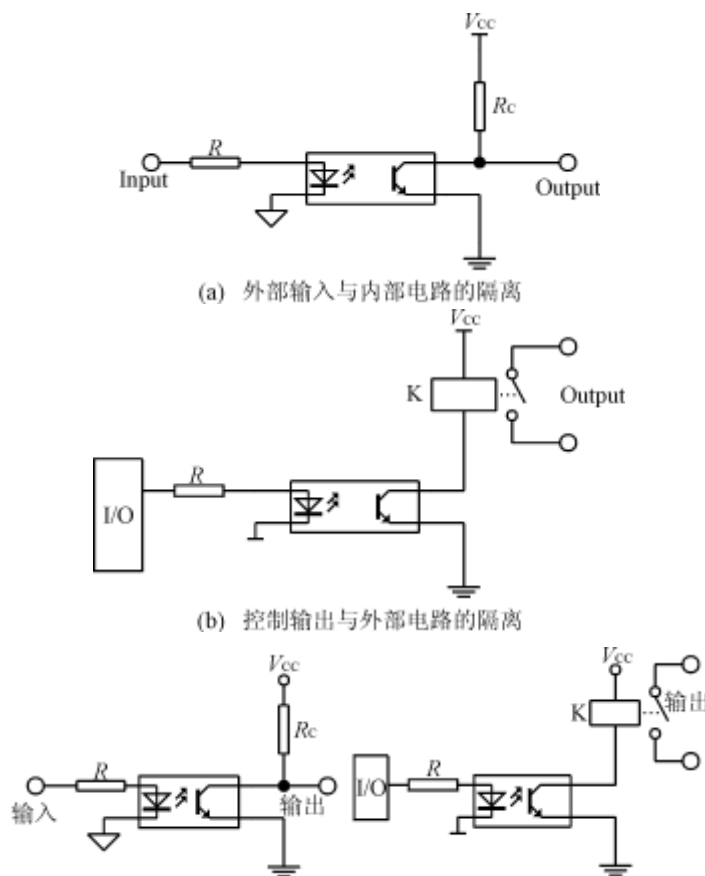
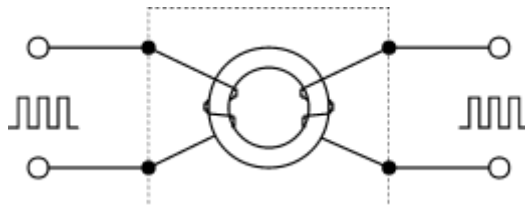


图4 光电耦合器电路

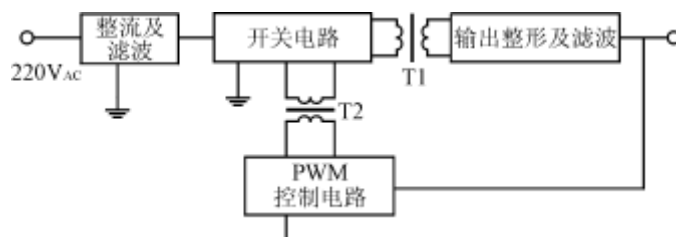
目前，大多数光电耦合器件的隔离电压都在 2.5kV 以上，有些器件达到了 8kV，既有高压大电流大功率光电耦合器件，又有高速高频光电耦合器件（频率高达 10MHz）。常用的器件如：4N25，其隔离电压为 5.3kV；6N137，其隔离电压为 3kV，频率在 10MHz 以上。

3.2 脉冲变压器隔离

脉冲变压器的匝数较少，而且一次绕组和二次绕组分别绕于铁氧体磁芯的两侧，这种工艺使得它的分布电容特小，仅为几个 pF，所以可作为脉冲信号的隔离元件。脉冲变压器传递输入、输出脉冲信号时，不传递直流分量，因而在微电子技术控制系统中得到了广泛的应用。一般地说，脉冲变压器的信号传递频率在 1kHz~1MHz 之间，新型的高频脉冲变压器的传递频率可达到 10MHz。图 5(a) 是脉冲变压器的示意图。脉冲变压器主要用于晶闸管 (SCR)、大功率晶体管 (CTR)、IGBT 等可控器件的控制隔离中。图 5 (b) 是脉冲变压器的应用实例。



(a) 脉冲变压器



(b) 脉冲变压器应用于开关电源中
图 5 脉冲变压器的应用

3.3 继电器隔离

继电器是常用的数字输出隔离元件，用继电器作为隔离元件简单实用，价格低廉。图 6 是继电器输出隔离的实例示意图。在该电路中，通过继电器把低压直流与高压交流隔离开来，使高压交流侧的干扰无法进入低压直流侧。

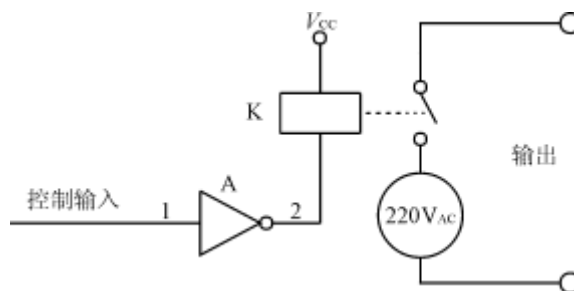
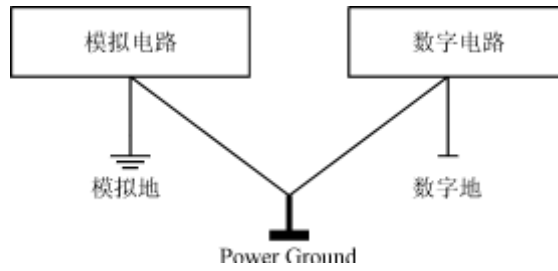


图 6 继电器隔离

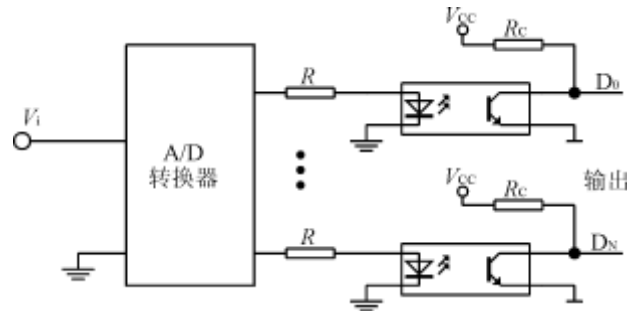
4 模拟电路与数字电路之间的隔离

一般地说，模拟电路与数字电路之间的转换通过模数转换器（A/D）或数模转换器（D/A）来实现。但是，若不采取一定的措施，数字电路中的高频振荡信号就会对模拟电路带来一定的干扰，影响测量的精度。为了抑制数字电路对模拟电路带来的高频干扰，一般须将模拟地与数字地分开布线，参见图 7（a）。这种布线方式不能彻底排除来自数字电路的高频干扰，要想排除来自数字电路的高频干扰，必须把数字电路与模拟电路隔离开来，常用的隔离方法是在 A/D 转换器与数字电路之间加入光电耦合器，把数字电路与模拟电路隔离开，参见图 7（b）。但这种电路还不能从根本上解决模拟电路中的干扰问题，仍然存在着一一定的缺陷，这是因为信号电路中的共模干扰和差模干扰没有得到有效的抑制，对于高精度测量的场合，还不能满足要求。对于具有严重干扰的测量场合，可采用图 7（c）所示的电路。在该电路中，把信号接收部分与模拟处理部分也进行了隔离，因为在前置处理级与模数转换器（A/D）之间加入线性隔离放大器，把信号地与模拟地隔开，同时，在模数转换器（A/D）与数字电路之间采用光电耦合器隔离，把模拟地与数字地隔开，这样一来，既防止了数字系统的高频干扰进入模拟部分，又阻断了来自前置电路部分的共模干扰和差模干扰。当然，这种系统的造价较高，一般只用于高精度的测量系统中。

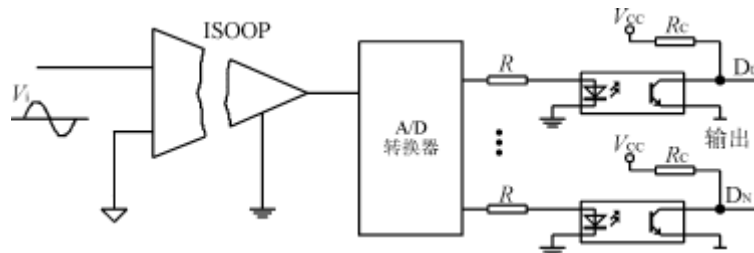
数模转换（D/A）电路的隔离与模数转换（A/D）电路的隔离类似，因而所采取的技术措施也差不多，图 7（d）是数模转换（D/A）电路的隔离方法之一。



(a)一点接地



(d)单端隔离的数模转换电路



(c)双端隔离的数模转换电路

图7 模拟电路与数字电路之间的隔离

5 结语

以上对电子电路的电气隔离问题作出了概括性的论述，在产品的研制实践中，还要对电子电气设备的内部噪声及外部干扰进行全面的分析，结合“接地问题”，“屏蔽问题”，选择合理的隔离方式及其恰当的隔离部位，进行统一部署，才能设计出满足电磁兼容性要求的合格产品，造福于社会。