

5.1 电子设备接地的目的

在电子设备中,接地是抑制电磁噪声和防止干扰的重要手段之一。在设计中如能把接地和屏蔽正确地配合使用,对实现电子设备的电磁兼容性将起着事半功倍的作用。

电子设备中各类电路均有电位基准,对于一个理想的接地系统来说,各部分的电位基准都应保持零电位。设备内所有的基准电位点通过导体连接在一起,该导体就是设备内部的地线。电子电路的地线除了提供电位基准之外,还可能作为各级电路之间信号传输的返回通路和各级电路的供电回路。可见电子设备中地线涉及面相当广。

“地”可以是指大地,陆地使用的电子设备通常以地球的电位作为基准,并以大地作为零电位。“地”也可以是电路系统中某一电位基准点,并设该点电位为相对零电位,但不是大地零电位。例如,电子电路往往以设备的金属底座、机架、机箱等作为零电位或称“地”电位,但金属底座与机架、机箱有时不一定和大地相连接,即设备内部的“地”电位不一定与大地电位相同。但是为了防止雷击对设备和操作人员造成危险,通常应将设备的机架、机箱等金属结构与大地相连接。电子设备的“地”与大地连接有如下作用:

(1) 提高电子设备电路系统工作的稳定性。电子设备若不与大地连接,则它相对于大地将呈现一定的电位,该电位会在外界干扰场的作用下变化,从而导致电路系统工作不稳定。如果将电子设备的“地”与大地相连接,使它处于真正的零电位,就能有效地抑制干扰。

(2) 泄放机箱上积累的静电电荷,避免静电高压导致设备内部放电而造成干扰。

(3) 为设备和操作人员提供安全保障。

5.2 接地系统

有许多接地的方法,它们的使用常常依赖于所要实现的目标或正在开发的系统的功能。

不考虑安全接地,仅从电路参考点的角度考虑,接地可分为悬浮地、单点接地、多点接地和混合接地。

5.2.1 悬浮地

对电子产品而言,悬浮地是指设备的地线在电气上与参考地及其他导体相绝缘,即设备悬浮地。另一种情况是在有些电子产品中,为了防止机箱上的骚扰电流直接耦合到信号电路,有意使信号地与机箱绝缘,即单元电路悬浮地。图 5-1 中分别给出了这两种悬浮地。

悬浮地容易产生静电积累和静电放电,在雷电环境下,还会在机箱和单元电路间产生飞弧,甚至使操作人员遭到电击。设备悬浮地时,当电网相线与机箱短路时,会引起触电的危险,所以悬浮地不宜用在通信系统和一般电子产品中。

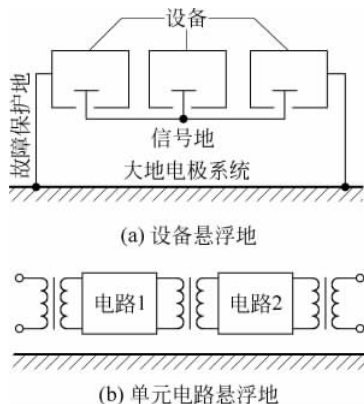


图 5-1 悬浮地

5.2.2 单点接地

单点接地是为许多接在一起的电路提供共同参考点的方法。并联单点接地最简单,它没有共阻抗耦合和低频地环路的问题。如图 5-2 所示,每一个电路模块都接到一个单点地上,每一个子单元在同一点与参考点相连。地线上其他部分的电流不会耦合进电路。这种结构在 1MHz 以下能工作得很好,但当频率升高时,由于接地的阻抗较大,电路上会产生较大的共模电压。当地线的长度超过 $1/4$ 波长时,电路实际上与地是隔开的。单点接地要求电路的每部分只接地一次,并都是接在同一点上。该点常常以大地为参考。由于只存在一个参考点,因此可以相信没有地回路存在,因而也就没有骚扰问题。

并联单点接地的一种改进方式是将具有类似特性的电路连接在一起,然后将每一个公共点连接到单点地,如图 5-3 所示。这样既有单点接地可以避免共阻抗耦合的优点,又使高频电路有良好的局部接地。为了减少共阻抗耦合,骚扰最大的电路应最靠近公共点。当一个模块中有一个以上的地时,它们应该通过背对背二极管连接到一起,避免当电路断开时造成电路损坏。

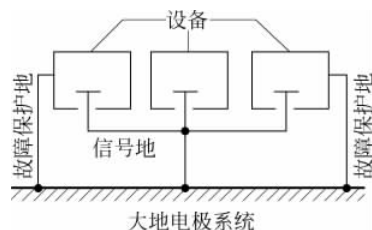


图 5-2 并联单点接地

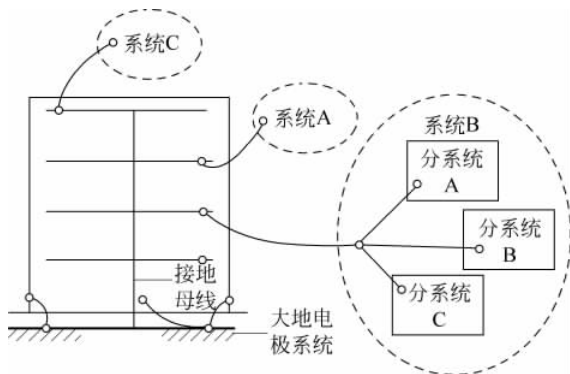


图 5-3 改进的并联单点接地

低频设备信号地线的敷设,应力求减小地线的长度,如果有两个以上独立的低频电路单元或插箱装入机柜时,应安装一条与机架绝缘的接地母线,每个单元或插箱的信号地线通过搭接条连接到该接地母线上,如图 5-4 所示。为了保证足够的机械强度和低阻抗通路,应选用长宽比小的搭接条,并带绝缘,以避免与机柜或插箱等短接。

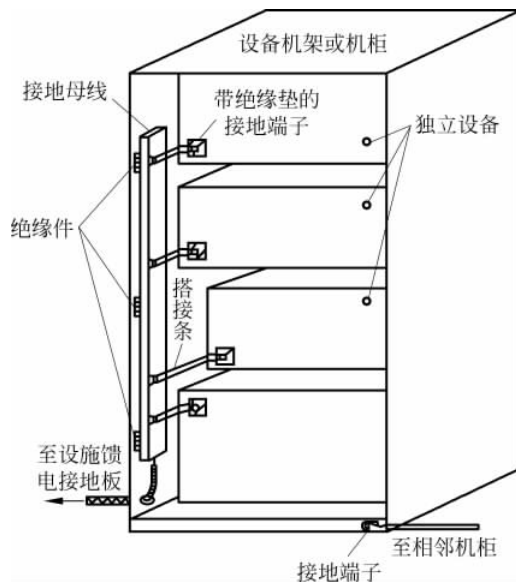


图 5-4 装有接地母线的机柜

5.2.3 多点接地

多点接地如图 5-5 所示。从图中可以看到,设备中的内部电路都以机壳为参考点,而所有机壳又以地为参考。有一个安全地把所有的机壳连在一起,然后再与地或辅助信号地相

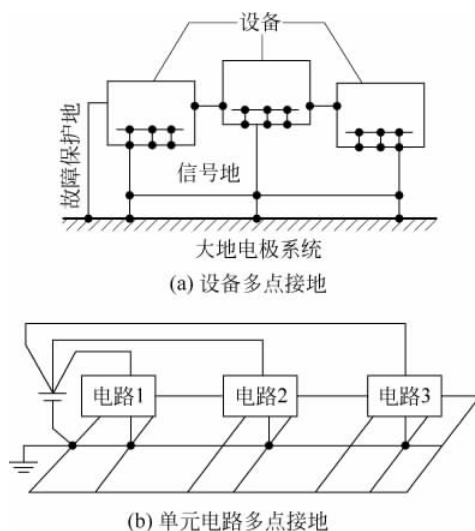


图 5-5 多点接地系统

连。这种接地结构的原理在于为许多并联路径提供了到地的低阻抗通路,并且在系统内部接地很简单。只要连接公共参考点的任何导体的长度小于骚扰波长的几分之一,多点接地的效果都很好。

多点接地能够避免单点接地在高频时的问题。在数字电路和高速大信号电路中必须使用多点接地。模块和电路通过许多短线($<0.1\lambda$)连接起来,以降低地阻抗产生的共模电压。同样,子单元通过许多短线与机架、地平面或其他低阻抗导体连接起来。这种方式不适合敏感模拟电路,因为这样连接形成的环路容易受到磁场的影响。在这种结构中,要避免 50Hz 交流电产生的骚扰是十分困难的。多点接地的子系统在整个系统中,可以与其他子系统单点接地。

5.2.4 混合接地

混合接地既包含了单点接地的特性,也包含了多点接地的特性。例如,系统内的电源需要单点接地,而射频部分则需要多点接地。

混合接地使用电抗性器件使接地系统在低频和高速时呈现不同的特性。这在宽带敏感电路中是必要的。在图 5-6 中,一条较长的电缆的屏蔽外层通过电容接到机壳上,避免射频驻波的产生。电容对低频和直流有较高的阻抗,因此能够避免两模块之间的地环路形成。

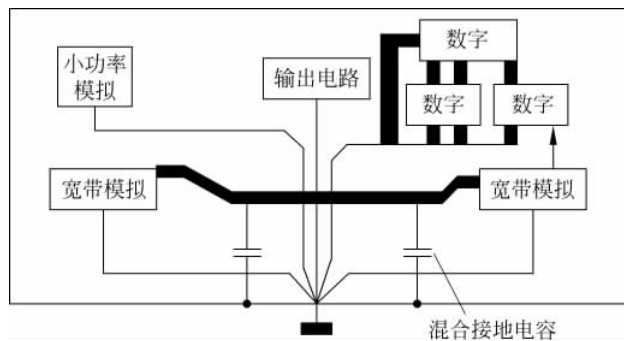


图 5-6 混合接地

在使用电抗元件作接地系统的一部分时,应注意寄生谐振现象,这种谐振会使骚扰增强。例如,当在一条自感为 $0.1\mu\text{H}$ 的电缆上使用电容量为 $0.1\mu\text{F}$ 的电容器时,将在 1.6MHz 处产生谐振。在这个频率上,电缆的屏蔽层根本没有接地。

当将直流地和射频地分开时,将每个子系统的直流地通过 $10\sim 100\text{nF}$ 的电容器连到射频地上,这两种地应在一点有低阻抗连接起来,连接点应选在最高翻转速度(di/dt)的信号存在的点。

图 5-7 为电子设备的混合接地,它把设备的地线分成两大类:电源地与信号地。设备中各部分的电源地线都接到电源总地线上,所有信号地都接到信号总地线上。两根总地线最后汇集到公共的参考地。

5.2.5 大系统接地

大系统所以不好处理,是因为系统中的距离在较高频率上往往与波长接近,这可以通过在机箱内使用屏蔽电缆或将电缆靠近机箱壁来克服。电缆和机箱之间的寄生电容能够在高

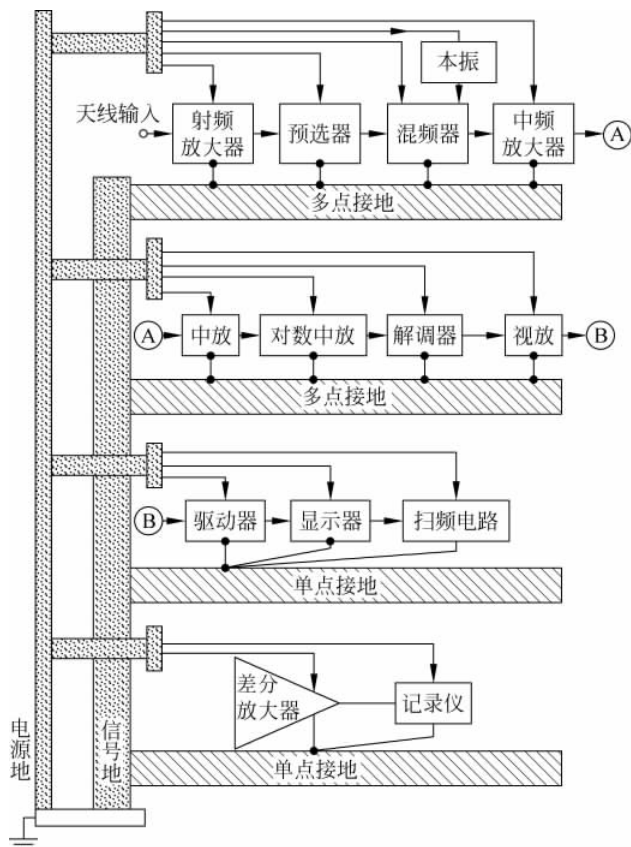


图 5-7 电子设备的混合接地

频时提供一个低阻抗接地,而机箱的作用是接地平面。

复杂电子设备中往往包含有多种电子电路和各种电机、电器等元、部件。这时地线应分组敷设,除应按电源电压分组外,还应分为信号地线(包括数字地线、模拟地线、高频地线、低频地线、高速地线、低速地线、高电平地线、低电平地线等)、噪声地线(骚扰源地线)和金属件地线(机壳地)等,如图 5-8 所示。其中,信号标志部分属于高电平骚扰源,容易对其他电路产生骚扰,所以单独设地线 5;保持、比较、折叠等皆为低电平模拟电路,对骚扰敏感,故单独设信号地 2;发话路与收话路分别设信号地 1 和信号地 4,以免高电平地线与低电平地线之间产生共地阻抗耦合;插箱内屏蔽盒与插箱绝缘,通过多芯连接器接入信号地线;每个插箱与机架之间仅有一点相连接,机架设金属件地线 6;整个设备各类地线汇集于一点接参考地。

因此,地线系统的设计步骤如下:

- (1) 分析设备内各类部件的骚扰特性和敏感特性;
- (2) 搞清楚设备内各类电路的工作电平、信号种类和电源电压;
- (3) 将地线分类、划组;
- (4) 画出总体布局框图;
- (5) 排出地线网。

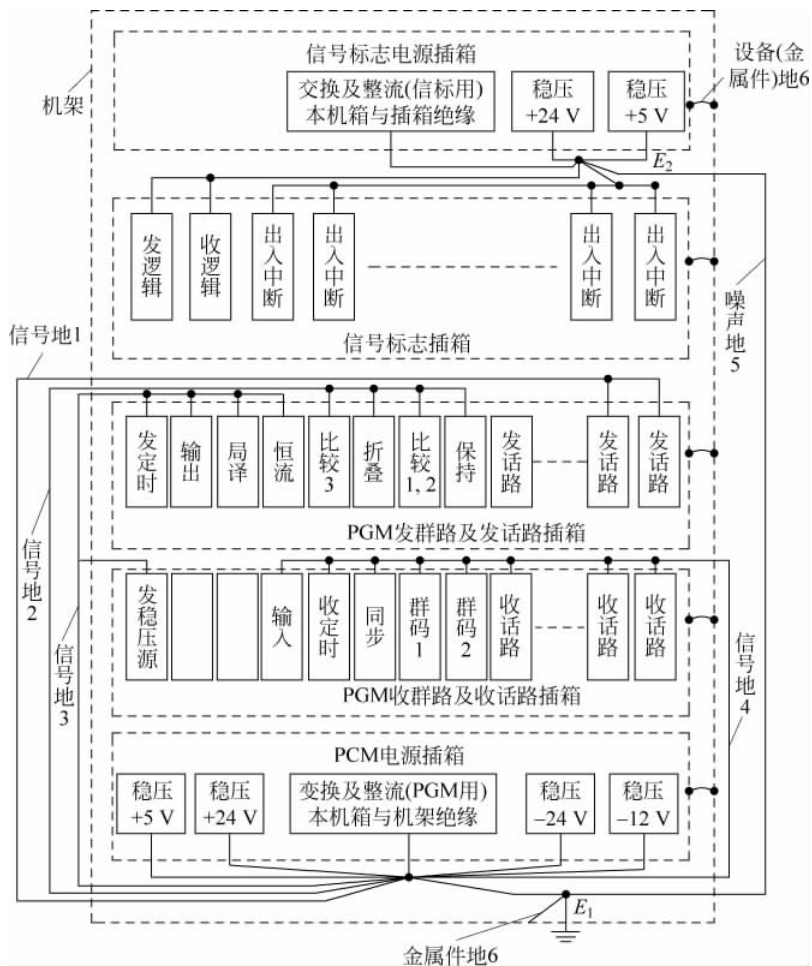


图 5-8 大系统接地

最后,还应指出,大系统除了安全地以外至少应有两个分开的地,如图 5-9 所示,一个电路地和一个机壳地。这些地应仅在电源处相连。机箱为高频提供了一个很好的回路,电路地应通过一个 $10\sim 100\text{nF}$ 的电容器与机壳相连。各个单元的安全地可以连到金属件上。金属件之间必须有可靠的搭接。对于接地而言,铰链连接、滑动连接和临时性的连接都不能

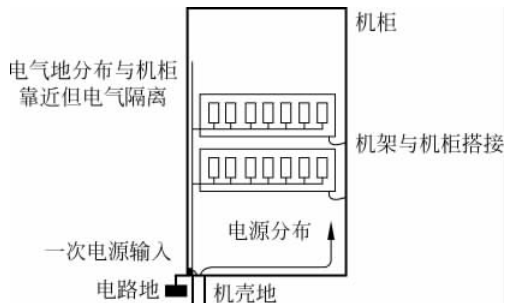


图 5-9 机架系统的接地

满足要求。对于永久性的搭接,最理想的是焊接,当确认接触面上没有油漆或其他影响导电性的物质时,也可以用螺钉连接或铆接。对于滑动的部件,可以用单独的短连接条实现搭接。

5.3 安全地线

5.3.1 设置安全地线的意义

电子设备之所以要设置安全地线,是基于下列三个原因。

(1) 绝缘破坏时安全地线能起保护作用。

在交流电网供电的电子设备中,如果机箱不接大地,一旦电源与设备机箱间的绝缘破坏,或电源变压器初级绕组与铁心间的绝缘击穿,如图 5-10 所示,设备机箱就会带上电网电压,对操作人员的安全构成威胁。

(2) 防止设备感应带电而造成电击。

对于一些机箱不接地的高频、高压大功率电子设备,其内部的高频、高压电路与机箱间总存在杂散耦合阻抗,如图 5-11 所示,因而会使机箱上感应出危险的高频高电压,此电压值为

$$U_f = Z_2 U_1 / (Z_1 + Z_2) \quad (5-1)$$

式中 U_f ——机箱上的感应电压(V);

Z_1 ——高压部件与机箱间的杂散阻抗(Ω);

Z_2 ——机箱与大地间的阻抗(Ω);

U_1 ——高压部件的电压值(V)。

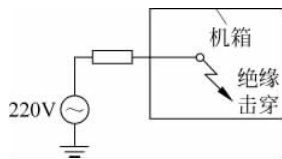


图 5-10 机箱因绝缘击穿带电

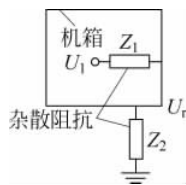


图 5-11 机箱因杂散阻抗带电

电子设备的机箱带有上述电压后,对操作和维修人员将构成威胁。一般人体能感觉到刺激的电流值大约是 1mA;当人体通过的电流值为 5~20mA 时,肌肉就产生收缩抽搐现象,使人体不能自离电线;电流达数十毫安以上时,将使心肌丧失扩张和收缩能力,直至死亡。

当设备机箱或按键上的电压超过规定的电压后,就有触电的危险。为了保证操作和维修人员的安全,应把设备的机箱或底座等金属件与大地连接。以图 5-10 为例,如果机箱已接大地,在电源线及变压器等器材的绝缘被击穿时,电源线中通过的大电流首先将保险丝熔断,使设备的机箱与电网脱离。保险丝一定要串联在电网的相线中,中线串入保险仍不能排除触电危险。

对于图 5-11 的情况,机箱接大地后, $Z_2=0$,结果 $U_f=0$,这就消除了对人产生电击的可能。若机箱内有一强干扰源,则将机箱接大地,还可抑制其电磁能量的辐射。

(3) 防止雷击事故。

电子设施或设备受雷击可分两种情况,即直接雷击和感应雷击。

夏日的雷云往往带有大量电荷,当雷云接近电子设施上空时,它可能通过电子设施对大地放电。雷电的放电电流达数千安,可在瞬间将电子设施或其他设备完全烧毁。防止直接雷击的有效办法是采用具有良好接地装置的避雷针。若电子设备为悬浮的不接地系统,则雷云接近设备上空时可能在设备中感应产生大量电荷。当雷云通过其他物体放电后,在电子设备上感应的电荷可能对地或其他设备进行放电,导致电子设备故障或损坏。设备接地后,机箱上感应的电荷将随之流入大地,不至于因电荷大量积聚而产生高压。

5.3.2 设置安全接地的方法

上述分析表明,为防止电子设备机箱带电或免遭雷击,都须接大地。因此在进行电子设备机箱结构设计时,必须在机箱上设置接地端子。对于小型电子设备,机箱的接地可直接经安全电源插座中的接地插孔连接到大地。

1. 单相供电

为便于电子设备的机箱与安全地线连接,试验室或安装电子设备的工作室常采用单相三线制供电,如图 5-12 所示。图中相线是 Y 形三相供电系统中任一相,中线即 Y 形供电系统的回线,而安全地线就是机箱接入大地的导线。正常工作时安全地线不通过电流,无电压降,与之相连接的机箱都是“地”电位。功率不太大的电气、电子设备,安全地线不一定与配电房的中线接地桩相接,可在试验室就近埋入接地桩,供安全地线接地用。

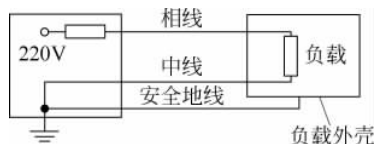


图 5-12 单相三线制供电线路

2. 三相供电

当设备采用三相供电时,安全地线的设置有下列两种方案可供选探。

(1) 三相五线制。设备的金属机箱及其金属件的接地线除通过接地桩就近接大地外,再引一根地线到变压器或发电机中心点与三相电源的零线相接,如图 5-13 所示。这里三相不平衡电流不会通过设备地线,既保证了设备安全,也有利于消除工频附加干扰。

(2) 三相四线-五线制。有些场所无法专设一根地线至供电变压器或发电机,这时可采用图 5-14 所示的三相四线-五线制接地系统。把设备机箱的接地线接入地桩后,再在总线入口处与电源零线端接,这样可兼顾安全,并防止三相不平衡电流引起工频干扰。

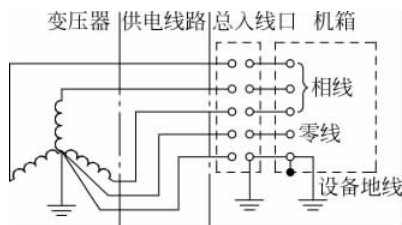


图 5-13 三相五线制接地系统示意图

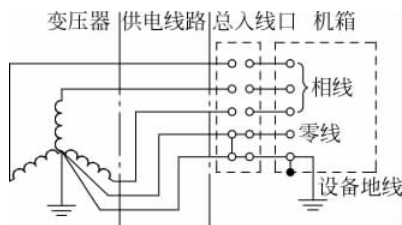


图 5-14 三相四线-五线制接地系统示意图

5.3.3 接地装置

接地装置是指埋入地下的板、棒、管、线等导体,要求它们具有良好的抗腐蚀性及小的接地电阻。不同的设施和场所对接地电阻有不同要求,例如电磁屏蔽室的接地电阻一般应小于 4Ω 。对于雷电保护的接地电阻一般应小于 10Ω ,但以地下管线等电位搭接为前提。

(1) 埋设铜板。将钢板或用扁铜条围成框埋入地下,然后用多股钢线或铜带引出地面与试验室地线连接。

(2) 打入地桩。将包铜钢棒(管)打入地下 2m 左右作为接地桩。当一根桩的接地电阻太大时,可用多根同样粗的钢棒打入地下,再用导体并联连接成一体,连接导体与地桩应采用熔焊接头。为进一步减小接地电阻,可在地桩周围埋入降阻剂。最简单的降阻剂是木炭,以及土、水、盐混合的浆土,其配方比例为 $1:(1\sim 2):0.2$ 。但这种浆土易受到雨水和地下水的冲刷,其降阻效果不能长久。现在有一种降阻剂是在电介质的水溶液中加入滞留剂,从而在地桩周围形成凝胶状或固体物质,使其降阻效果持久不变。其配方之一为:

氯化钾 0.8kg,硫酸氢钠 0.4kg,聚乙烯醇溶液 4.0kg,尿素 0.88kg,氧化镁 1.0kg,尿醛树脂 4.0kg,含聚乙烯醇 0.44kg,水 2.7kg

(3) 钻孔法。钻孔法即用钻机直接往地下打孔,一般深度 $10\sim 30\text{m}$,孔径 6cm 左右,然后把与孔深等长的接地棒埋入。对一般土壤来说,深度 $5\sim 15\text{m}$ 时,其接地电阻可小于 10Ω 。

(4) 埋设导线。在地面挖深 $0.6\sim 1\text{m}$ 、长几十米的沟,在沟内埋入铜导线,且在导线周围填入上述降阻剂,对山区或冻土地带来说,临时敷设地线比较方便、现实。

(5) 地下管道。城市中的地下水管网是一种简单方便的接地装置,其接地电阻可能小于 3Ω 。一般仅能利用地下管道作为辅助接地装置,必须以专门埋设的接地桩为主。而且还应注意,当接地线中有直流电流时,管道材料会加速电化学腐蚀。

5.4 地线中的干扰

本节所讨论的地线是指电子设备中各种电路单元电位基准的连接线,即电源地线或信号地线。理想地线是一个零阻抗、零电位的物理实体,它不仅是各相关电路中所有信号电平的参考点,而且当有电流通过时也不产生压降。在具体电子设备内,这种理想地线是不存在的。一方面,任何地线既有电阻又有电抗,有电流通过时地线上必然产生压降;另一方面,地线还可能与其他线路(信号线、电源线等)形成环路,一旦交变磁场与此环路交连,就会在地线中产生感应电势。无论是地电流在地线上产生的压降还是地环路所引起的感应电势,都可能使共用该地线的各电路单元产生相互干扰。

5.4.1 地阻抗干扰

地电流在地线阻抗上引起的干扰可用图 5-15 说明。图中 U_1 为干扰电路 1 中的干扰源电压, U_2 为受干扰电路 2 中的信号电压, Z_g 为两电路之间公共阻抗。下面分析电压 U_1 在受干扰电路负载 R_{L2} 上的干扰响应。

根据电路 1 和电路 2 两个回路写出下列方程:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= I_1(R_{i1} + R_{L1}) + (I_1 + I_2)Z_g \\ U_g &= (I_1 + I_2)Z_g \end{aligned} \right\} \quad (5-2)$$

由于仅讨论电路1对电路2的干扰, I_2 在公共阻抗 Z_g 上的作用不予考虑, (式5-2)可简化为

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= I_1(R_{i1} + R_{L1} + Z_g) \\ U_g &= I_1Z_g \end{aligned} \right\} \quad (5-3)$$

可得

$$U_g = \frac{Z_g U_1}{R_{i1} + R_{L1} + Z_g}$$

$$R_{i1} + R_{L1} \gg Z_g$$

一般
则

$$U_g = \frac{Z_g U_1}{R_{i1} + R_{L1}} \quad (5-4)$$

U_g 在电路2负载 R_{L2} 上形成的骚扰电压 U_n 为

$$U_n = \frac{R_{L2}}{R_{i2} + R_{L2}} U_g \quad (5-5)$$

将式(5-4)带入式(5-5)可得

$$U_n = \frac{Z_g R_{L2} U_1}{(R_{i1} + R_{L1})(R_{i2} + R_{L2})} \quad (5-6)$$

可见, 电路2负载 R_{L2} 上的噪声电压 U_n 是干扰电压 U_1 、公共地线阻抗 Z_g 及负载 R_{L2} 的函数。

5.4.2 地环路干扰

电子设备中的地线犹如人体的血管, 分布到设备内部的各级电路单元, 难免会与其他线路构成环路。如在不对称馈电的信号电路中, 地线与信号线可构成环路; 地线作为直流供电电源的馈线之一时, 它与另一电源线也会构成环路; 地线本身也可能构成环路。当交变磁场与这些环路交连时, 环路中产生的感应电势就有可能叠加到传输信号上形成干扰。

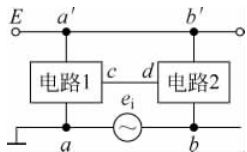


图 5-16 级连的两电路单元

图5-16为两个级连的电路单元, 其中 cd 是信号传输线, 地线 ab 既是信号的返回通路, 又是电源馈线之一。由图5-16可见, 电源的正极馈线与地线在电路1和电路2间构成一个环路 $aa'b'b$, 信号线 cd 与地线在电路1和电路2间又构成另一

环路 $cdba$ 。当交变磁场穿过这些环路时, 环路中产生的感应电势为

$$e_i = - \frac{d\Phi}{dt} = - S \frac{dB}{dt} \quad (5-7)$$

式中 e_i ——环路中的感应电势(V);

S ——环路在磁场垂直方向上的投影面积(m^2);

B ——穿过环路的磁通密度(T, $1T = V \cdot s/m^2$)。

由图5-16可见, 地环路中的感应电势 e_i 与传输信号电压串联后输送到下一级电路的

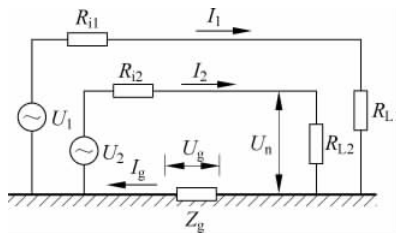


图 5-15 公共地阻抗引起的干扰

输入端,造成干扰。要减小地环路干扰,就得减小地环路面积,最好在线路布局时避免构成地环路。

5.4.3 地线中的等效干扰电动势

综上所述,从电磁兼容性的角度出发,地线已不能看成是等电位的。假设某一段地线的电阻为 R_g ,电感为 L_g ,流过的电流为 i_g ,则在这段地线上产生的压降 U'_g 为

$$U'_g = i_g(R_g + j\omega L_g) \quad (5-8)$$

假设这段地线与电源正极馈线(或信号线)构成的环路面积为 S ,则在这段地线上产生的总的干扰电动势为

$$e_g = U'_g + e_i = i_g(R_g + j\omega L_g) - S \frac{dB}{dt} \quad (5-9)$$

可见在分析地线给电路所造成的干扰时,只需在地线中加一等效干扰电动势 e_g ,如图 5-17 所示。

总之,地线干扰是造成设备(或系统)内部各单元之间耦合的重要因素之一。如何抑制地线干扰是电磁兼容性设计的一个重要课题。根据地线中干扰形成的机理,减小地线干扰的措施可归纳为:减小地线阻抗和电源馈线阻抗,正确选择接地方式和阻隔地环路。

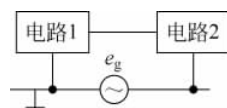


图 5-17 地线中的等效干扰电势

5.5 低阻抗地线的设计

地线中的干扰电压除与流过地线的电流有关外,还与地线的阻抗有关。地线阻抗 Z_g 包括电阻分量及 R_g 和电感分量 L_g ,可记为

$$Z_g = R_g + j\omega L_g \quad (5-10)$$

5.5.1 导体的射频电阻

圆形截面导体的低频电阻表达式为

$$R_g = l/(\sigma S) = l/(\pi a^2 \sigma) \quad (5-11)$$

式中 l ——导体的长度(m);

σ ——导体的电导率(S/m);

a ——导体的半径(m);

S ——导体的横截面积(m²)。

式(5-11)中导体的横截面积应理解为有效载流面积。在直流情况下,电流在导体截面上均匀分布,导体的横截面积就是它的几何截面积。但对于射频电流,由于集肤效应,导体的有效载流面积将远小于导体的几何截面积,即导体的射频电阻高于直流电阻。

1. 实心圆截面导体的射频电阻

如果集肤深度远小于导体的半径 a ,则单位长度的射频电阻为

$$R_{RF} = 1/(2\pi a \delta \sigma) \quad (5-12a)$$

式中, δ 为集肤效应(m), $\delta = 1/\sqrt{\pi \mu f \sigma}$ 。

将 $\delta = 1/\sqrt{\pi \mu f \sigma}$ 及 $\sigma = \sigma_r, \sigma_{Cu} = 5.82 \times 10^7 \sigma_r$ 代入式(5-10a),可得

$$R_{RF} = \frac{4.14}{a} \sqrt{\frac{f\mu_r}{\sigma_r}} \times 10^{-8} \quad (5-12b)$$

图 5-18 表示了孤立圆截面直导体的射频与直流电阻之比(R_{RF}/R_{dc})和频率、直径的关系,图中横坐标参变量为

$$x = \sqrt{8\pi\mu_r f / (R_{dc} \times 10^9)} \quad (5-13a)$$

式中 R_{dc} ——长 1cm 的圆导体直流电阻(Ω);

f ——导体中电流的频率(Hz)。

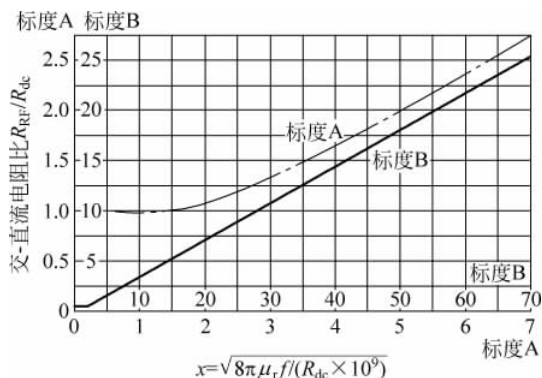


图 5-18 孤立圆直导体的射频电阻与直流电阻之比和频率、直径的关系

对铜导体而言,参变量 x 可简化为

$$x = 1.07d \times 10^{-2} \sqrt{f} \quad (5-13b)$$

式中 d ——铜导体的直径(mm)。

由图 5-18 和式(5-13b)可见,当参变量 x 较小,集肤效应可忽略时, R_{RF} 等于 R_{dc} ; 随着频率升高,射频电阻很快增加;导体半径愈大,集肤效应愈明显。在工程上用相互绝缘的多股漆包线代替单根导线绕制射频电感线圈,以延缓射频电阻的增长。

2. 矩形截面的射频电阻

若导体横截面不呈圆形,式(5-12)中的半径 a 可按下式求得

$$a = \text{横截面周长} / (2\pi) \quad (5-14)$$

在截面积相同的情况下,截面的周长与截面形状有关。式(5-14)表明改变截面形状可以改变导体的等效半径。图 5-19 所示为三种形状不同的横截面。在截面积相等的条件下,矩形截面的周长大于圆截面,而且宽厚比越大,截面周长越长,其等效半径也越大。由式(5-13)可知,导体等效半径增大将导致射频电阻下降。设备地线和搭接条采用扁铜带的原因就在于此。

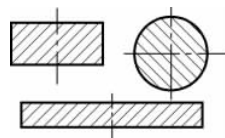


图 5-19 导体的三种常用截面形状

5.5.2 导体的电感

圆截面铜直导体的电感可按下式求得

$$L_g = 0.002l \left(2.3021g \frac{4l}{d} - 0.75 \right) \quad (5-15)$$

式中 l ——导体的长度(cm);
 d ——导体的直径(cm)。

矩形铜直导体的电感为

$$L_g = 0.002l \left(2.3021 \lg \frac{2l}{\omega + t} + 0.5 + 0.2235 \frac{\omega + t}{t} \right) \quad (5-16)$$

式中 ω ——矩形导体横截面的宽度(cm);
 t ——矩形导体横截面的厚度(cm)。

式(5-16)表明,在截面积一定的情况下,增加宽度可减小导体的电感量。因此,无论从导体的射频电阻还是电感方面考虑,采用宽厚比值大的扁铜带制作地线都是合理的。

5.5.3 实心接地平面的阻抗

在电子设备,特别是高频电子设备中,往往把设备或电子电路的金属底座作为接地平面(相当于地线)使用。这种实心平面状地线(如图 5-20 所示)可按下式近似计算其表面阻抗:

$$Z_g = R_f \left(1 + \tan \frac{2\pi l}{\lambda} \right) \cdot \frac{l}{b} \quad (5-17)$$

式中 l ——接地平面上两点间的距离;
 λ ——工作波长;
 b ——接地平面的宽度。

射频表面电阻 R_f 按下式计算:

$$R_f = 0.28 \times 10^{-6} \sqrt{\frac{\mu_r f}{\sigma_r}} \quad (5-18)$$

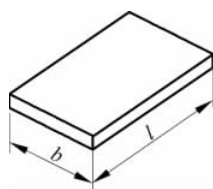


图 5-20 平面状地线

5.5.4 低阻抗电源馈线

电子设备内部多个电路单元往往共用同一直流供电电源。为避免共用电源成为电路间的噪声耦合通道,希望负载中通过的任何交流电流在直流供电电缆上都不产生显著响应电压,为此应尽可能降低电源馈线的阻抗。电源馈线的特性阻抗 Z_C 为

$$Z_C = \sqrt{L_0/C_0} \quad (5-19)$$

式中 L_0 ——电源馈线的分布电感(H/m);
 C_0 ——电源馈线的分布电容(F/m)。

当负载电流突变时,负载两端瞬时电压变化值为

$$\Delta U_L = \Delta I_L Z_C$$

此瞬态电压波动极为有害。降低电源馈线的特性阻抗,就可降低馈线上的瞬态压降。为此需减小馈线的分布电感,增加分布电容;采用长宽比小的扁导体,在满足耐压的条件下,尽量减小正负馈线的间距。低阻抗馈线还可减小馈线的环路面积,有利于抑制地环路干扰。图 5-21 是低阻抗馈线结构。

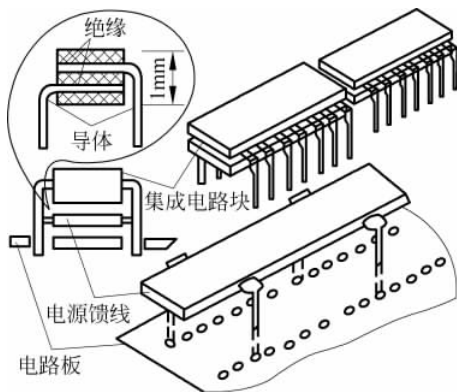


图 5-21 集成电路用低阻抗电源线

5.6 阻隔地环路干扰的措施

图 5-22 所示的电路单元 1 输出信号电压 U_s ，经信号线输至电路单元 2，再由地线构成信号电流回路，结果信号线和地线构成地环路。设地线中等效干扰电压为 U_g ，则电路 2 的输入电压为 $U_s + U_g$ 。为有效地传输信号、抑制干扰，就需要采取措施使信号 U_s 能顺利地输至电路 2，而地线中的干扰 U_g 在输至电路 2 时受到阻挡。这种措施称为阻隔地环路。

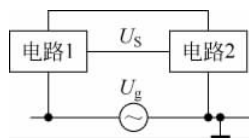


图 5-22 电路间的地环路干扰

5.6.1 变压器耦合

图 5-23 示出了采用变压器阻隔地环路干扰的措施及其等效电路。电路 1 的信号经变压器耦合至电路 2，而地线中干扰电压的回路被变压器隔断。假定电路 1 的内阻为 0，变压器绕组间的分布电容为 C ，电路 2 的输入内阻为 R_L ， U_g 在 R_L 上的响应电压为 U_n 。由于只分析变压器阻隔地环路的能力，所以按电路分析中的叠加原理，可以不考虑信号电压 U_s ，即将信号电压短路。由交流电路的欧姆定律可得

$$\dot{U}_n = iR_L \quad \frac{\dot{U}_n}{\dot{U}_g} = \frac{R_L}{R_L - j/(2\pi fC)}$$

取上述复数之模得

$$\left| \frac{\dot{U}_n}{\dot{U}_g} \right| \approx \frac{1}{\sqrt{1 + 1/(2\pi fCR_L)^2}} \quad (5-20)$$

当直接由信号线传输时，地线中干扰电压 U_g 全部加到 R_L 上；采用变压器后，加到 R_L 上的电压减为 U_n ，所以式(5-20)表示变压器减小干扰的能力。图 5-24 的曲线表示变压器抑制干扰的能力与频率、分布电容和输入内阻间的关系。在输入内阻和地线中干扰电压的频率确定之后，为提高抑制地线干扰能力，只有减小变压器绕组间的分布电容 C 或减小电路 2 的输入内阻 R_L 。

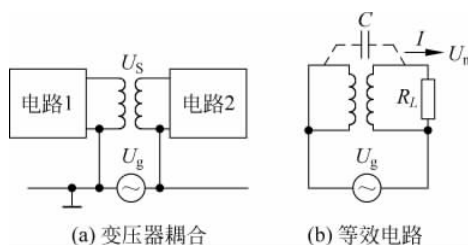


图 5-23 采用变压器阻隔地环路

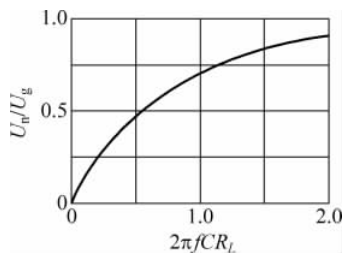


图 5-24 变压器抑制干扰的能力

5.6.2 纵向扼流圈(中和变压器)传输信号

当传输的信号中含有直流分量时,变压器失效,应采用如图 5-25(a)所示的纵向扼流圈。扼流圈两个绕组的绕向与匝数都相同(双线并绕)。信号电流在两个绕组流过时,产生的磁场恰好抵消,见图 5-25(b),它可几乎无损耗地传输信号。地线等效干扰电压 U_g 所引起的干扰电流(也称纵向电流)流经两个绕组时,产生的磁场同相叠加,扼流圈对干扰电流呈现较大的感抗,如图 5-25(c)所示,起到抑制地线干扰的作用。需注意的,只有当工作频率高到一定程度时,纵向扼流圈两个绕组之间的磁耦合才足以迫使信号返回电流流回次级绕组。

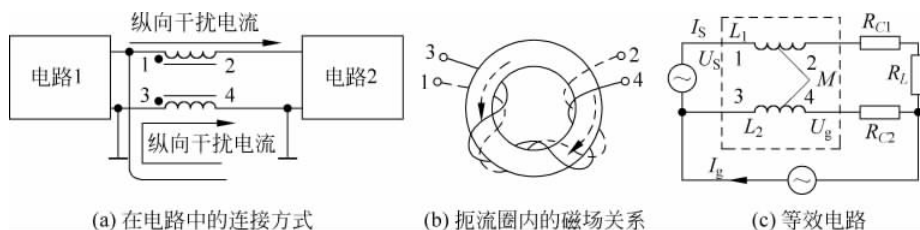


图 5-25 纵向扼流圈阻隔地环路干扰

纵向扼流圈等效电路 U_s 表示需传输的信号电压, U_g 表示地线中的干扰电压, R_{C1} 、 R_{C2} 为连接电阻, R_L 为负载。对纵向扼流圈而言, $L_1=L_2=M=L$ 。用电路理论的叠加原理分别讨论在信号电压 U_s 和干扰电压 U_g 在电路负载上的响应,即可求出纵向扼流圈对干扰的抑制能力。经分析,存在如下关系:

$$(R_L \cdot I_s) / U_s \approx 1 \quad (5-21)$$

表明负载上的信号电压近似于信号源电压,即纵向扼流圈对信号几乎是无损耗传输。

$$(R_L \cdot I_s) / U_s \approx 1 / \sqrt{1 + (2\pi f L / R_{C2})^2} = 1 / \sqrt{1 + (f / f_c)^2} \quad (5-22)$$

式中 $f_c = R_{C2} / (2\pi L)$ 是纵向扼流圈自身参数确定的截止频率,其物理意义表示:当传输频率等于截止频率时,信号电流将有 70% 流过地线。

设 U_g 负载 R_L 的响应为 U_n ,经分析同样可得

$$U_n / U_g = \frac{1}{\sqrt{1 + (f / f_c)^2}} \quad (5-23)$$

图 5-26 是按上式绘制的纵向扼流圈对干扰的抑制特性。当 $f > 5f_c$ 时,地线中的干扰在负载上所反映的电压仅为 20%,表明纵向扼流圈将对地线干扰起到有效的抑制作用。纵

向扼流圈有如下特点：

- (1) 它既能传输交流信号,又可传输直流信号。
- (2) 扼流圈对地线中高频干扰的抑制能力强。
- (3) 扼流圈可有效地抑制线路中所传输的高频信号对其他电路单元的干扰。

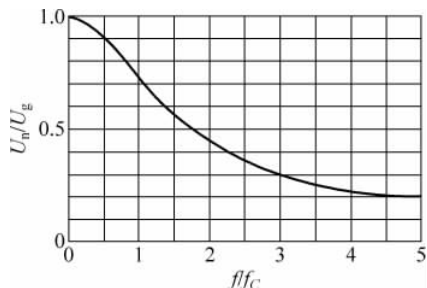


图 5-26 纵向扼流圈对地线干扰的抑制

5.6.3 电路单元间用同轴电缆传输信号

两电路单元间的信号传输采用同轴电缆(见图 5-27),能有效地抑制地环路干扰。其等效电路与纵向扼流圈类似。

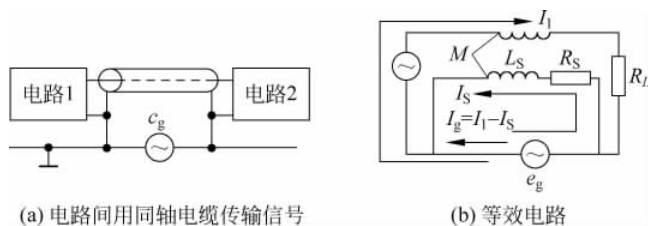


图 5-27 同轴电缆传输信号及其等效电路

从电磁场的概念讲,由于高频时的集肤效应,信号电流只沿同轴电缆内导体的外表面和外导体的内表面流过,理想的同轴电缆不应出现能量泄漏。实际同轴电缆屏蔽层存在电气上的不连续,总有一些能量外泄,外界干扰同样也可能有部分串入同轴电缆内部。单层屏蔽同轴电缆的截止频率在 0.6~2kHz 的范围,双层屏蔽同轴电缆的截止频率为 0.5~0.7kHz,屏蔽效能通常小于 60dB。

5.6.4 光耦合器

切断两电路单元间地环路的有效方法是采用光耦合器(见图 5-28)。电路 1 的信号电流使发光二极管的发光强弱随它而变化,这样就把电路 1 的信号电流变成强弱不同的光信号。再由电路 2 前的光电晶体管把强弱不同的光信号转化成相应的电流,实现电路间的信号传输。发光二极管和光电晶体管通常封装在一起构成光耦合器。这种光耦合器可把两电路间的地环路完全隔断,可有效地抑制地线干扰。它适用于传输数字

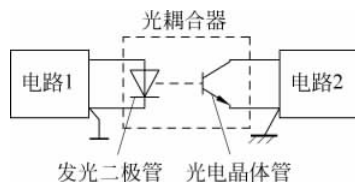


图 5-28 断开地环路的光耦合器

信号,如固态继电器内部借助它隔离负载对控制信号的干扰。使用光耦合器时,电路1和电路2必须分别供电,以免电源馈线在同一电源变压器中构成新的干扰耦合途径。光耦合器中电流与发光强度的线性关系较差,传输模拟信号易产生失真,应用受到限制。

5.6.5 光缆传输信号

光缆传输信号已被成功地用于通信等领域。用光缆代替电子系统内的普通信号线缆,可免除外界的电磁干扰和电磁脉冲的影响,提供良好的电气隔离,有利于传输数据的保密。与同轴电缆和双绞线相比,光缆的损耗小得多,特别是在远距离传输时。

光缆传输信号的原理见图5-29。用发光二极管或固态激光器件把电信号转化成光信号后注入光纤电缆;在接收端,光电二极管将探测到的光信号还原为电信号。在电磁兼容性测试领域常用光缆作为强电磁场环境下信号的传输线。如电磁场传感器所捡拾到的微弱电信号在传输到测量仪的过程中易受环境电磁场干扰,出入屏蔽室的信号线和监控线会导致屏蔽室屏蔽效能的下降,都可用光缆取代传统信号电缆。在核电磁脉冲试验中光缆更是必不可少的器材。

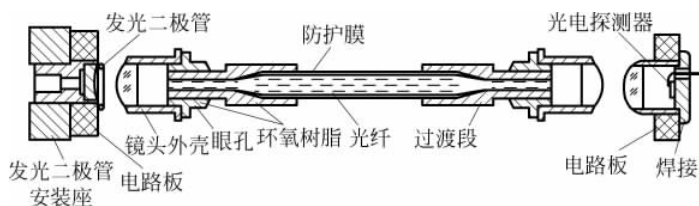


图 5-29 光缆传输原理

5.6.6 用差分放大器减小由地电位差引起的干扰

地线总有一定的阻抗,地线电流会在信号电路两接地点之间产生电位差 U_g ,该电位差会在非平衡输入的放大器负载上输出一个放大的了的干扰电压。而在平衡输入的差分放大器负载上(见图5-30), U_g 所引起的干扰电压基本被抵消,达到了抑制共模干扰的目的。

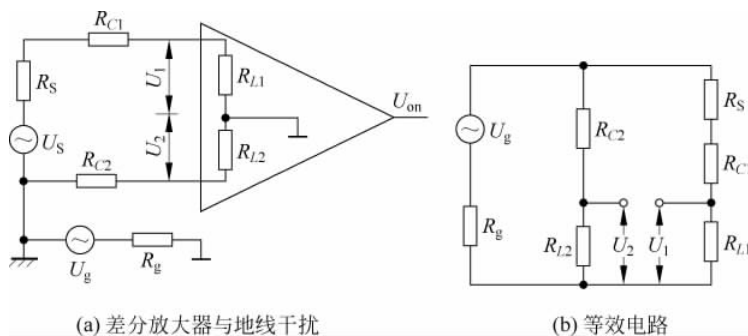


图 5-30 差分放大器抑制共模干扰

5.7 屏蔽电缆的接地

屏蔽电缆由绝缘导线外面再包一层金属薄膜(即屏蔽层)构成。屏蔽层通常是金属编织网或金属箔。如果屏蔽层是金属管,则成为同轴电缆。屏蔽电缆的屏蔽层只有在接地以后才能起屏蔽作用。

5.7.1 屏蔽层接地产生的电场屏蔽

由于两根平行导线之间的电场耦合会产生串扰,如图 5-31 所示,设其中一根为屏蔽电缆,并接在敏感电路中。则源电路导线对屏蔽电缆屏蔽层的耦合电容为 C_{ms} ,而屏蔽层对芯线的耦合电容为 C_s ,屏蔽层对地的耦合电容为 C_{2s} 。可见,源导线上的骚扰电压 U_1 会通过 C_{ms} 耦合到屏蔽层上,再通过 C_s 耦合到芯线上。如果屏蔽层接地, C_{2s} 被短路,则 U_1 通过 C_{ms} 被屏蔽层短路至地,不能再耦合到芯线上,从而起到了电场屏蔽的作用。屏蔽层的接地点通常选在屏蔽电缆的一端,称为单端接地。如果屏蔽层不接地,由于其面积比普通导线大,故耦合电容也大,产生的耦合量也大,将会比不用屏蔽电缆时产生更大的电场辐射,这是需要注意的。此外,当频率较高或电缆较长时,还应每隔 $\lambda/10$ 的距离接一次地。

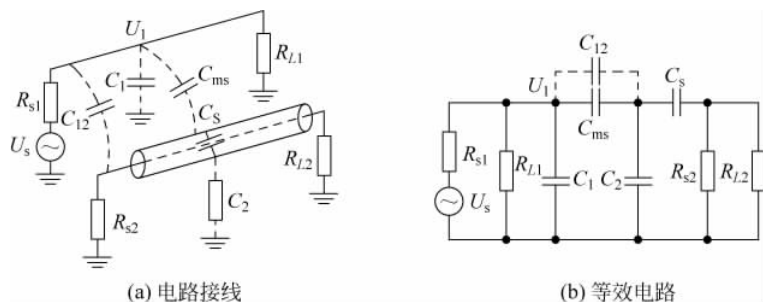


图 5-31 屏蔽电缆的电场屏蔽

5.7.2 屏蔽层接地产生的磁场屏蔽

设屏蔽层中流有均匀的轴向电流 I_s ,如图 5-32 所示。则磁力线在管外,屏蔽层电感可表示为

$$L_s = \Phi / I_s \quad (5-24)$$

式中, Φ 为 I_s 产生的全部磁通。由于磁通 Φ 同样包围着芯线,根据互感的定义,屏蔽层和芯线之间的互感应为

$$M = \Phi / I_s \quad (5-25)$$

故

$$M = L_s \quad (5-26)$$

设 U_s 是骚扰电压源,电流 I_1 流过芯线,如图 5-33 所示。 I_s 和 r_s 分别为屏蔽层的电感和电阻。如果屏蔽层不接地或只有一端接地,屏蔽层上无电流通过,故电流经地面

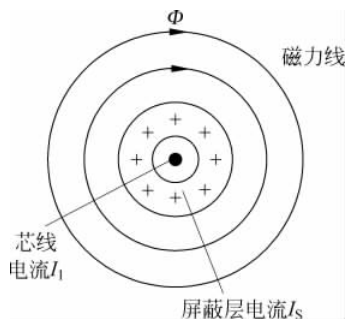


图 5-32 屏蔽层和芯线的磁耦合

返回屏蔽层不起作用。当屏蔽层两端接地,接地点为 A 点和 B 点, I_1 在 A 点将分两路到达 B 点,再回到源端,屏蔽层中的电流 I_s 为

$$I_s = \frac{j\omega MI_1}{j\omega L_s + r_s} \quad (5-27)$$

由式(5-26),则有

$$I_s = \frac{j\omega L_s I_1}{j\omega L_s + r_s} = \frac{j\omega I_1}{j\omega + \omega_0} \quad (5-28)$$

式中, $\omega_0 = r_s/L_s$ 为屏蔽层截止频率。当 $\omega \geq \omega_0$ 时, $I_s = I_1$, $I_G \approx 0$, I_1 几乎全部经由屏蔽层流回源端,屏蔽层外由 I_1 和回流产生的磁场大小相等,方向相反,因而互相抵消,抑制了骚扰源的向外辐射。

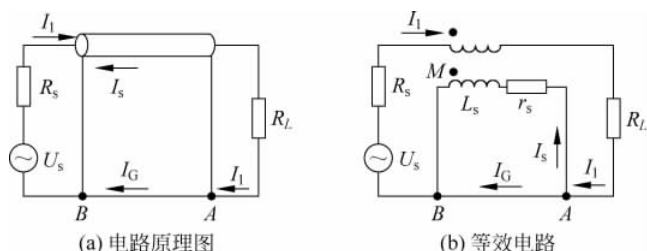


图 5-33 屏蔽电缆的磁场屏蔽

5.7.3 地环路对屏蔽的影响

如果电缆两端屏蔽层接地点 A 和 B 之间存在地电压,如图 5-34 所示,则屏蔽层中就会有噪声电流 I_s 流过。一方面 I_s 在 L_s 和 r_s 上产生压降;另一方面也会通过互感 M 在芯线上产生感应电压。设信号源电压为 E ,则负载上的电压为

$$U_L = -j\omega MI_s + j\omega L_s I_s + r_s I_s + E = r_s I_s + E \quad (5-29)$$

可见,地环路引起的噪声电压被串联在信号回路中。采用三轴式屏蔽电缆可较好地解决这个问题。这是因为这种电缆在芯线外有两个互相绝缘的屏蔽层,内屏蔽层用作信号回流线;外屏蔽层两端接地,流过地环路电流,不会影响信号回路。

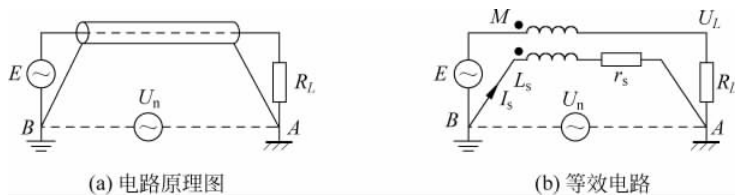


图 5-34 地环路对屏蔽的影响

5.8 附加实例

由于系统或其子系统接地不当,导致在实际中遇到了很多电磁干扰问题,下面叙述几个实际例子,其中包括解决问题的方法。

(1) 点字模(Dot Matrix)印刷机。在一次对点字模印刷机的静电放电试验中,在设备表面的不同处加上静电放电脉冲,当加上一个 6kV 的静电放电脉冲时此系统失灵。经过分析,发现这是由于静电放电电流通过共阻抗通路耦合至内部电路的缘故。作为一种补救办法,对整体支撑点、接口卡面板、纸盘都提供分开的接地导体,并与安全地进行单点接地。这样处理可将静电放电抗扰度基准由 6kV 提高至 10kV。

(2) 纺织计数器。当按 IEC801—4 标准(见附录 A)将纺织计数器对电力线的 EFT(电快瞬态)抗扰度进行计算时,发现设备在低至 0.5kV 的 EFT 基准下就已失灵。作为解决这一问题的措施,可用一个电磁干扰电力线滤波器连至设备的功率输入点。这样可将抗扰度基准提高至 1kV。滤波器的外壳屏蔽体再适当地连至设备箱,而屏蔽体则以 0.7Ω 的接地电阻连至接地面。这样处理后,系统就可以耐受高至 4kV 的电快瞬态脉冲群。

(3) 计算机打印机。当一个 8kV 的脉冲以气体放电形式加到计算机打印机的牵引杆上进行静电放电试验时,可观测到一个有趣的事件。牵引杆由金属制成并用一个塑料传动装置与打印机其他所有金属部分电气隔离,当静电放电脉冲加到牵引杆的一端时,可以看到在杆的另一端与附近的打印机金属部分之间会出现火花。这导致辐射发射并将由电子电路拾取,使打印机失灵。要解决这个问题,可以在隔离的金属杆与打印机金属底盘间用一低弹性金属簧片接触器来提供一个接地通道。这样抗扰度基准可由 8kV 提高至 15kV。

习题

1. 基本接地技术有哪些?
2. 接地分类有哪些? 其内容如何?
3. 信号接地与安全接地有哪些不同?
4. 简述悬浮地和信号隔离的关系。
5. 下列论断是否正确,简要地证明答案。
 - (1) 良好的 EMC 接地也是良好的安全接地,但良好的安全接地未必是良好的 EMC 接地。
 - (2) 对良好的 EMC 接地而言,垂直埋入地中的金属棒和与其紧邻的土壤间的电阻通常比周围土壤的电阻率更重要。
 - (3) 2m 正方形的接地栅的接地电阻与直径为 5cm、长度为 2cm、彼此间隔 2m 的两根垂直接地棒构成的线状接地系统的接地电阻相同。
 - (4) 对电缆接地来说,当入射磁场激励时将电缆两端接地会更好。