

电缆的屏蔽与接地

Cable Shield and ground

User Guide

Edition (2009—6)

<https://support.industry.siemens.com/cs/cn/zh/view/109481350>

摘要 西门子通信电缆的屏蔽与接地

关键词 西门子系统、屏蔽、接地

Key Words Siemens cable Shield Ground

目录

1 骚扰源的传输路径	4
1.1 导线的传导干扰.....	4
1.1.1 传输线-短线与长线	4
1.1.2 共阻抗耦合	6
1.1.3 传输线的反射	8
1.1.4 共模干扰与差模干扰.....	10
1.2 骚扰通过空间传输	13
1.2.1 天线效应.....	13
1.2.2 近场电场耦合	17
1.2.3 近场磁场耦合	18
2 屏蔽.....	20
2.1 电场屏蔽	21
2.2 磁场屏蔽	23
3 电缆的屏蔽接地	27
3.1 电场的屏蔽接地	27
3.1.1 屏蔽层不接地	27
3.1.2 屏蔽层单端接地.....	27
3.2 磁场的屏蔽接地	28
3.2.1 屏蔽层单端接地或不接地	28
3.3 电缆屏蔽接地总结	31
4 PROFIBUS 的安装要求	34
4.1 PROFIBUS 的布线	34
4.2 PROFIBUS 的屏蔽接地	36
5 PROFINET 的安装要求.....	38
5.1 PROFINET 的布线	38
5.2 PROFINET 的屏蔽接地	40

1 骚扰源的传输路径

产生干扰的三个要素：干扰源、耦合路径、潜在的易受干扰的器件。骚扰源可以通过空间的辐射、电磁耦合传递到敏感设备，也可以通过导线的传输进入敏感设备。

1.1 导线的传导干扰

信号通过导线传输，通常在理想情况下只考虑导线的电阻，但实际的传输导线都存在分布电容和电感，尤其在传送频率高的情况下，就要考虑分布参数的影响。分布电容与电感的乘积等于常数，它们与导体间介质的相对磁导率 μ 和介电常数 ϵ 有关：

$$L C = \mu\epsilon = \text{常数},$$

特性阻抗为 $Z_0 = \sqrt{L/C}$ 是电缆的物理特征，与传输线的电压电流无关。导线的传导干扰绝大部分也是由导线的分布参数引起得的。图 1-1 列出几种传输线的布置，(a) 为导线对；(b) 为轨线与板；(c) 为平行板，假设导线间距相同，三者的分布参数比较为： $L_a > L_b > L_c$ ； $C_a < C_b < C_c$ ； $Z_a > Z_b > Z_c$ ；

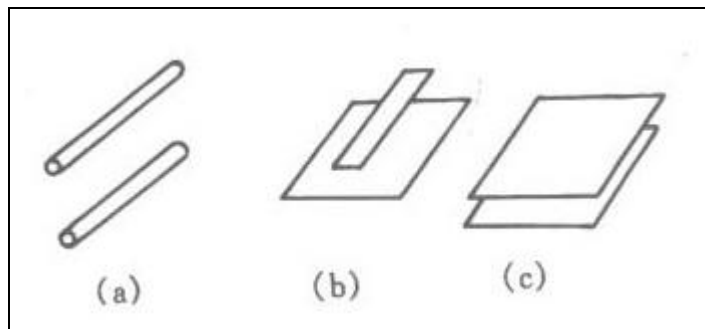


图 1-1 几种传输线的布置

1.1.1 传输线-短线与长线

线路中的分布电感、分布电容、分布电阻影响信号及电源的传输，根据传输线的长度与传输信号频率的关系，将传输线分为短线（有的资料为电短）和长线（有的资料为电长），如图 1-2 所示，如果 $s < \lambda/10$ （有的参考资料为小于等于 $\lambda/4$ ）或者信号的传播时间 t_{QZ} （源到目的地） < 0.5 倍的沿上升时间 t_r ，就是短线。例如导线或者机械尺寸比波长小都可以视为短线，系统内部的连续通常也视为短线。短线的特性为：在一条短线上，除了电流流动带来的电压降外，各点电势相等，适用于集总等效电路分析。如果 $s > \lambda$ （有的参考资料为大于 $\lambda/4$ ）就是长线，例如机械尺寸比波长大，适用于分布参数电路分析，基耳霍夫电压定律不再适用，因为电路中的电压和电流除了是时间的函数外，还是空间坐标的函数。同样一段传输线，由于传输信号频率不同，有可能是短线，也有可能是长线。计算波长的公式如下：

$$\lambda = \frac{V}{f}$$

λ : 波长

V: 速度

f: 信号频率

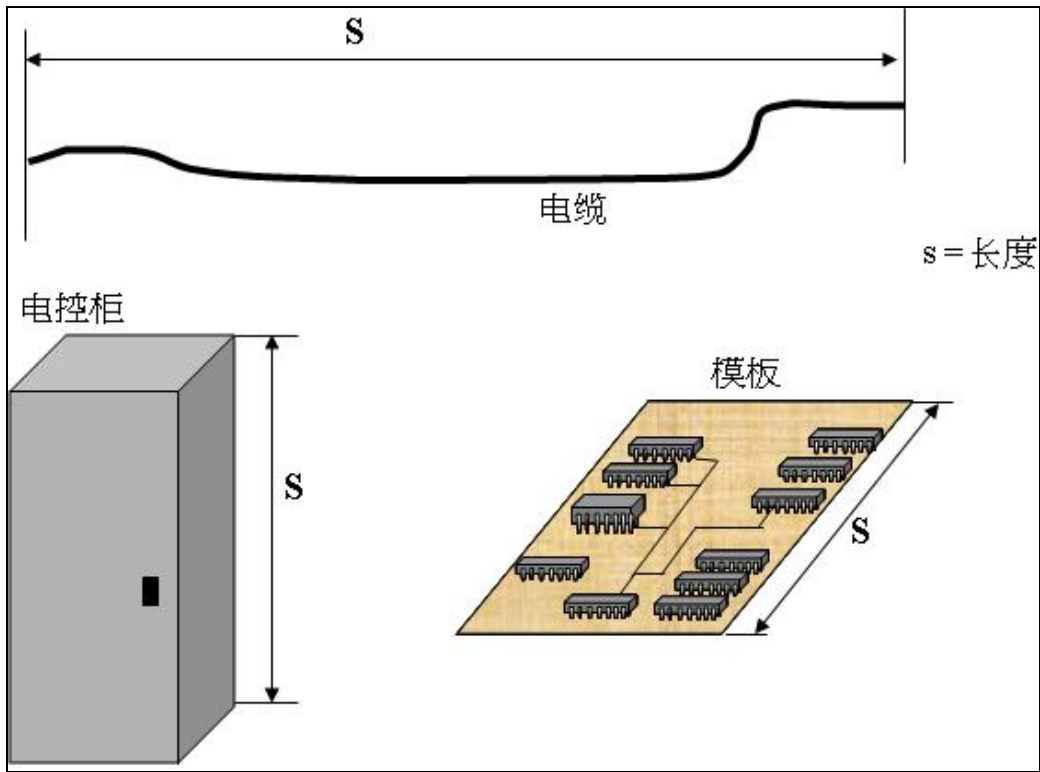


图 1-2 短线与长线

理想情况下，一截传输导线只考虑线上的电阻，但在实际情况下还要考虑到线上的分布参数，如图 1-3 所示的等效电路：

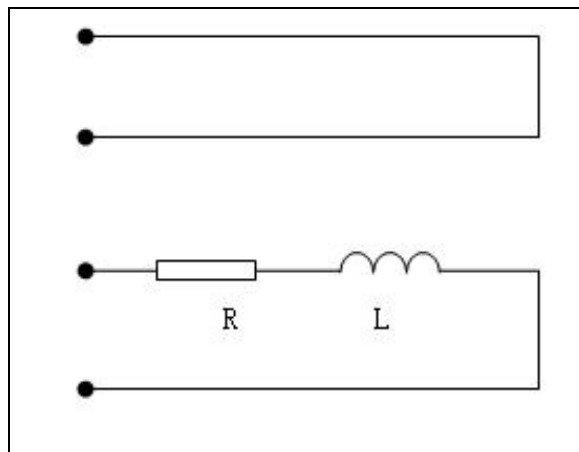


图 1-3 传输线的等效电路

线上总的阻抗为：

$$Z = R + j2\pi fL$$

$$R > 2\pi fL \quad (f < 3\text{kHz})$$

$$R < 2\pi fL \quad (f > 3\text{kHz})$$

短线电路只考虑负载的阻抗，长线电路传输线的特征阻抗主导电路的特性，参考下面的试验如图 1-4 所示：

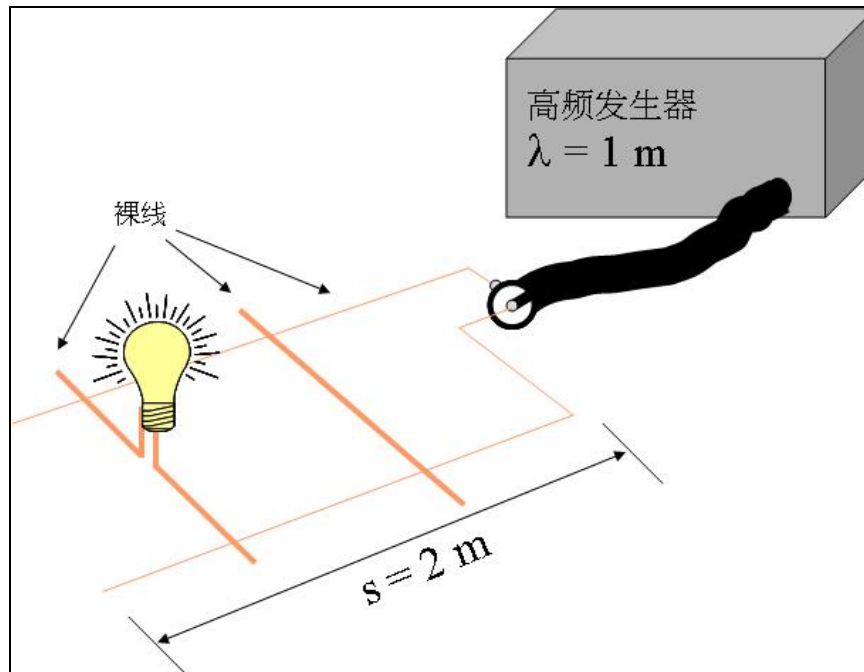


图 1-4 长线短线试验示例

高频信号发生器给 S 等于 2 米远的电灯供电，使用一根裸线靠近灯泡处与电灯组成短线回路，由于短线只考虑负载电阻，裸线电阻非常小，灯泡被短路而熄灭，如果将裸线向电源处移动，当与灯泡连线距离超过短线 ($\lambda/10$) 距离后，线路上的感抗渐渐起主导作用，负载电阻被忽略，灯泡逐渐由暗变亮，如果裸线与电源距离逐渐接近，直至小于短线距离，线路上负载电阻渐渐起主导作用，感抗被忽略，电源被短路，灯泡逐渐由亮变暗，直到熄灭。一条短的电路不会影响整个线路，所以干扰抑制元件要就近安装在干扰源端或被保护设备端 (距离 $< \lambda/10$) 。

1.1.2 共阻抗耦合

当设备或元件共用电源或地线时，会产生共阻抗耦合。

1) 共电源阻抗耦合

两个或多个相互独立的电路使用相同的电源线会产生共电源阻抗耦合，如图 1-5 所示：

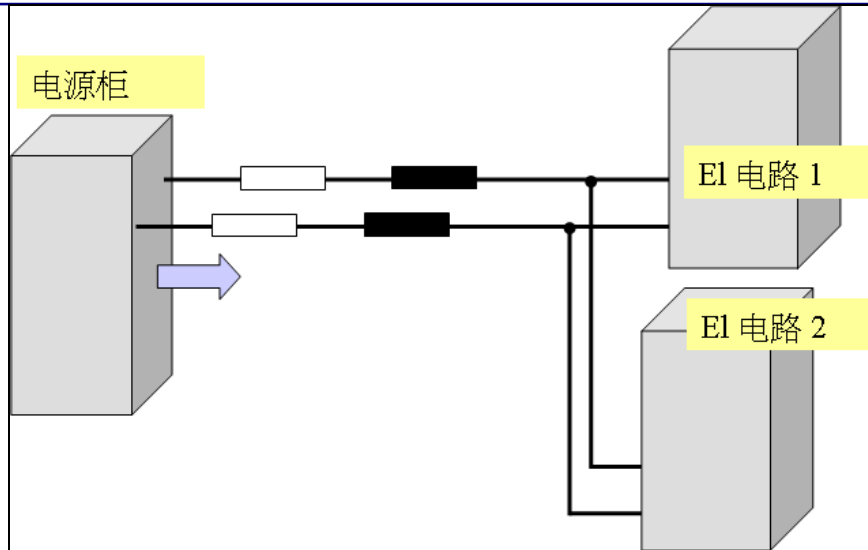


图 1-5 共电源阻抗耦合

假设电源的内阻及线上阻抗为 Z_s ，回路电流为 I_s ，电源电压为 E_s ，那么电路 1、2 的电压为：

$$U = E_s - I_s Z_s$$

如果在电路 1 中频率升高，电源内阻与线阻 Z_s 将增加（感抗起作用），这样电路 1 中的高频噪声、脉冲噪声以及浪涌产生压降叠加在电源上送给电路 2，同样电路 2 也会对电路 1 产生干扰。这种情况下电路必须各自供电。

2) 共地线耦合

多个回路共用一个地线会产生共地线耦合，如图 1-6 所示：

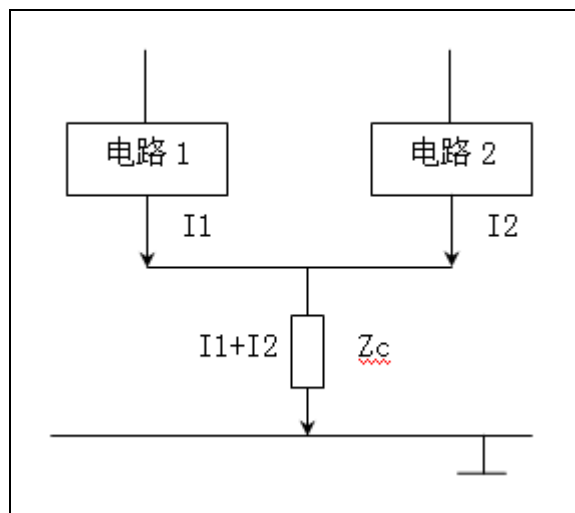


图 1-6 共阻抗耦合

接地线的功能是保持零电位，应该没有电流，电路 1、2 不会产生干扰，但是实际上接地线也有阻抗，电阻很小可以忽略不计，主要是高频产生的感抗，图 1-6 中 Z_c 为接地阻抗，

如果电路 1 产生高频噪声引起接地阻抗 Z_c 的升高，在接地导线产生压降而影响电路 2。同样电路 2 的高频噪声也会影响电路 1。这种情况下应将地线分开或就近接地，使接地线尽量短。

1.1.3 传输线的反射

当脉冲信号沿传输线传播，如果满足 t_f （沿上升时间） $< 2 * t_{QZ}$ （源到目的地时间，PROFIBUS 的 t_{QZ} 接近 5 ns/m）条件时，信号会发生波反射。反射会改变正常信号，产生多个正负脉冲和有危害的冲击电压（例如：对电机）。信号的反射与信号源阻抗 R_q 、传输线的特性阻抗 Z 以及负载阻抗 R_v 有关，源端的反射系数为：

$$r_q = \frac{R_q - Z}{R_q + Z}$$

负载端的反射系数为：

$$r_v = \frac{R_v - Z}{R_v + Z}$$

如果使 r_v 和 r_q 这两个反射系数中的一个或者全部为零，则称为负载匹配，这样信号将不会产生反射，负载匹配的条件为 $R_q = Z$ 、 $Z = R_v$ 或 $R_q = Z = R_v$ 。

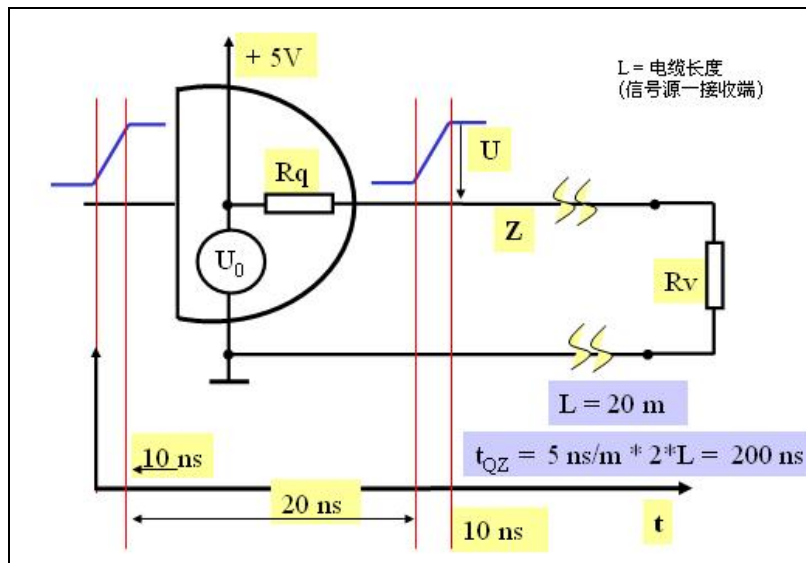


图 1-7 信号反射

图 1-7 为信号反射示例，信号的入射电压为：

$$U = Z / (R_q + Z) * U_0$$

以上实例说明输出电压 U 的大小只和特性阻抗 Z 有关，而与负载阻抗 R_v 无关，如果有高频干扰脉冲影响系统，它与系统的外部接地无关。它和外部环境是隔离的。如果源端与负载端的阻抗与传输线特性阻抗都不匹配时，信号将在源端与负载端来回反射，反射波与信号信号叠加，信号的反射过程如图 1-8 所示：

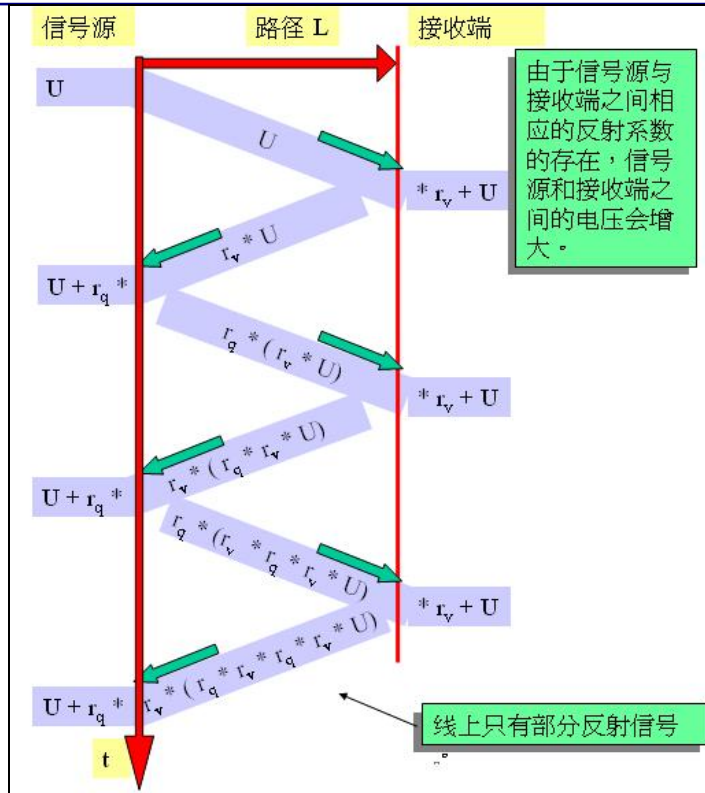


图 1-8 信号反射过程

最终反射信号衰减而变得可以忽略。为了减少信号的反射需要在传输线的终端加入终端电阻，下面的图例解释终端电阻的配置。

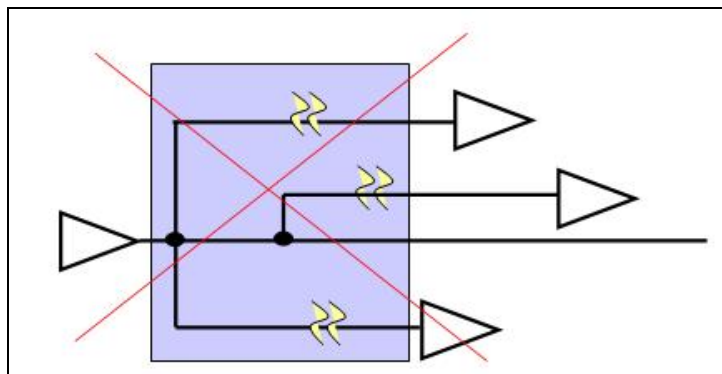


图 1-9 终端电阻的配置 1

避免图 1-9 配置，在这种情况下很难作到匹配。在并联情况下，特性阻抗是变化的。内部耦合有可能造成干扰。

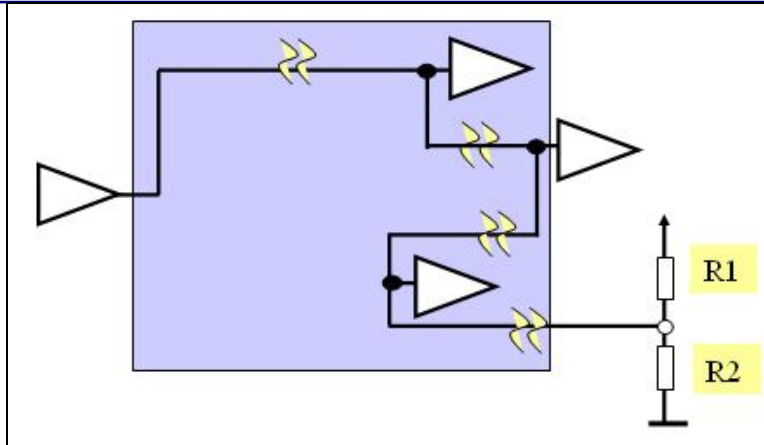


图 1-10 终端电阻的配置 2

正确的连接如果图 1-10 所示，将各个输出串联并且在终端连接电阻 R1，R2。

1.1.4 共模干扰与差模干扰

干扰源通过磁场耦合在两根导线和设备构成的回路上产生感应电压，进而产生差模干扰电流如同 11 所示：

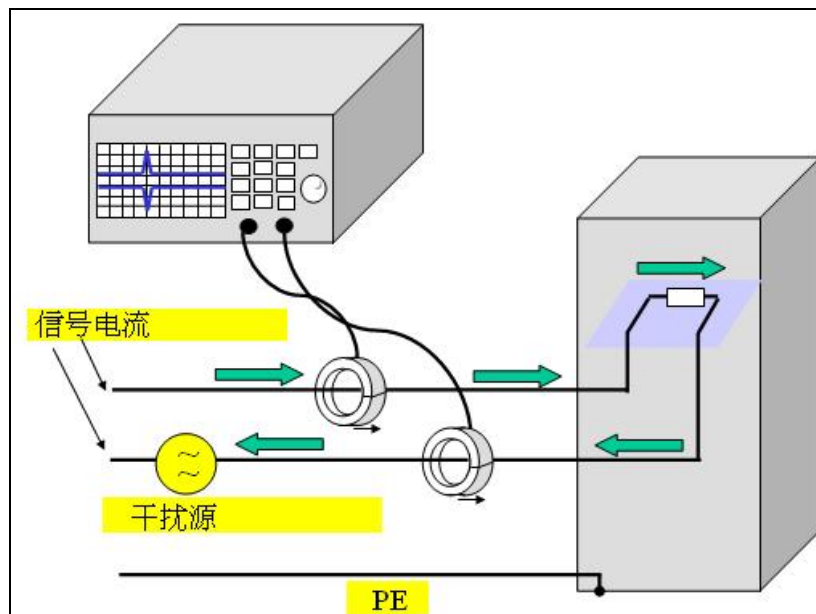


图 1-11 差模干扰

如图 1-11 所示，通过示波器可以看到差模电流大小相等、方向相反，差模电流直接叠加在有用信号上。减少回路的面积及屏蔽可以减少差模干扰。

干扰源通过电场耦合在一根导线与系统地构成的回路上产生的感应电压，进而产生共模干扰电流如同 12 所示：

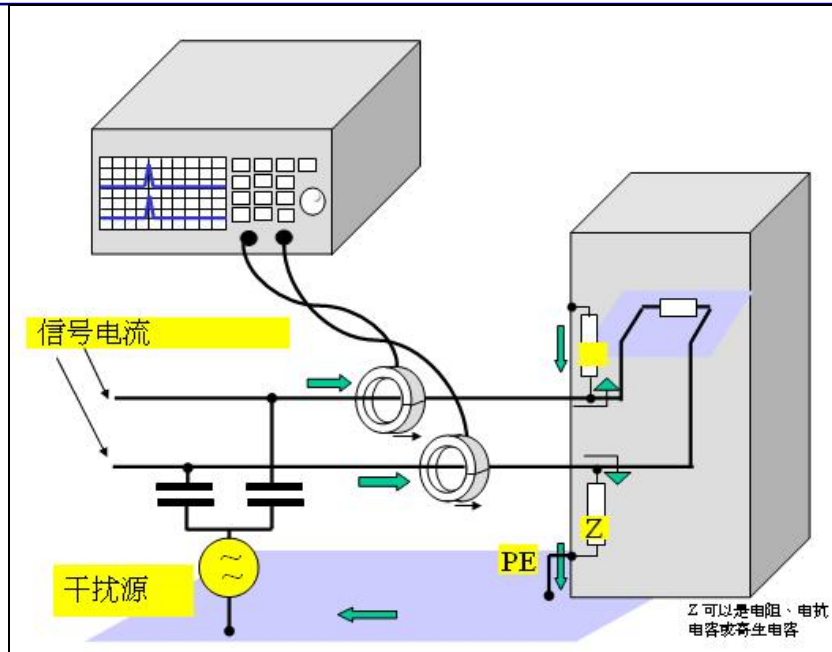


图 1-12 共模干扰

如图 1-12 所示，通过示波器可以看到差模电流方向相同，由于回路的阻抗不同，在负载端产生差模电压而影响有用信号。使用屏蔽线可以减少共模干扰。共模干扰也可以由地环路干扰引起(感应或电位差)，采用平衡电路、隔离变压器、共模扼流圈光电耦合器、光纤传输可以抑制地环路引起得到共模干扰。

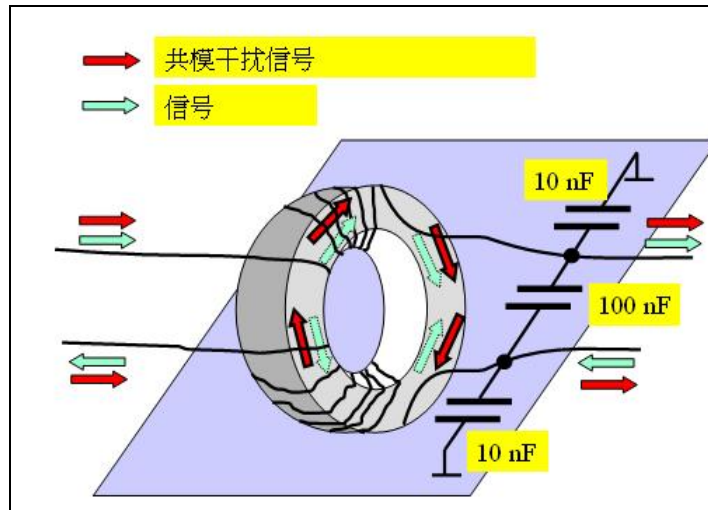


图 1-13 使用共模扼流圈抑制地环路高频干扰

如图 1-13 所示，高频共模信号在线圈中产生的磁通相互叠加，具有很高的电感量，抑制共模干扰信号，共模干扰信号具有高阻抗。信号电流在线圈中产生的磁通作用相互抵销，几乎没有阻抗。

差动电路也可以抑制共模干扰。例如 RS232 是全双工通信，以电压方式传输，发送端 TX、接收端 RX 都是以信号地 GND 作为基准点（信号返回回路），这是一个非平衡电路，如图 1-14 所示：

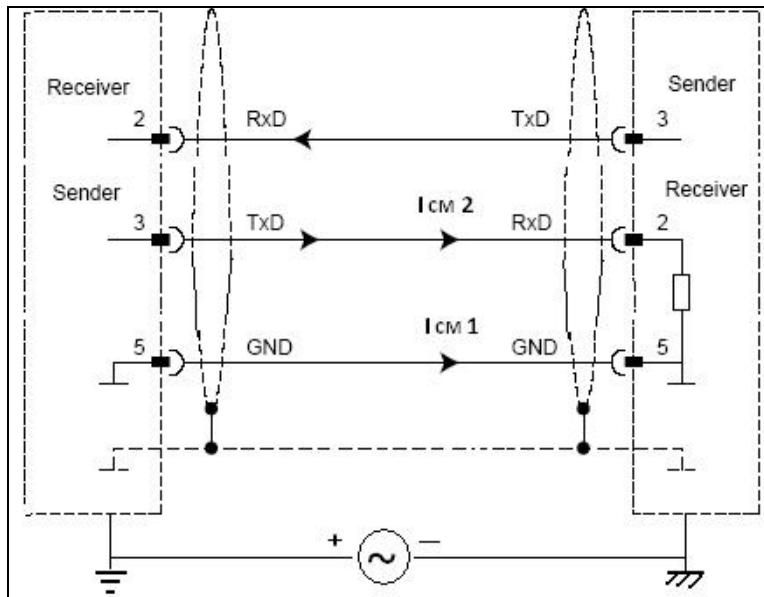


图 1-14 RS232 (CP340)的通信接口示意图

共模噪声在通信线 TXD 与 GND 产生共模电流 ICM1 和 ICM2，由于在两条路径阻抗不同，共模电流不同，将在负载侧产生常模噪声电流，从而影响通信信号，为了减少共模干扰，要求 RS232 通信线路非常短，西门子 RS232C 之间通信电缆最长为 15 米。

如果使用差动电路例如 RS422/485 网络如图 1-15 所示，共模电压在平衡回路（阻抗相等）产生的共模电流 ICM1 和 ICM2 相等，这样在接收端不会产生压降，采用平衡传输可以减少共模干扰，增加通信距离，西门子 RS422、485 之间通信电缆最长为 1200 米。

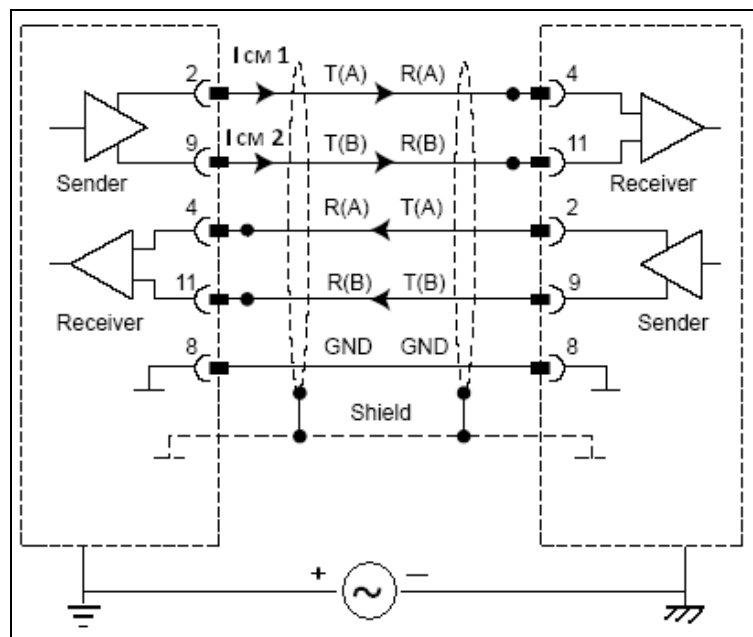


图 1-15 RS422、485 (CP340)的通信接口示意图

1.2 骚扰通过空间传输

骚扰源的电磁能量以场的方式向四周传播, 与辐射源的距离半径 $r < \lambda/10$ (有些资料为 $r < \lambda/2\pi$) 的区域叫做近场, 与辐射源的距离半径 $r > \lambda$ (有些资料为 $r > \lambda/2\pi$) 的区域叫做远场。

近场的性质与场源有关, 如果是高电压小电流则近场的场源为电场, 如果是大电流低电压则近场的场源为磁场, 通过波阻抗描述电场与磁场的关系:

$$Z_0 = E/H$$

骚扰源为电场时, 电场远大于磁场, 所以电场为高阻抗场源, 随离天线距离的增加电场和磁场都将衰减, $E \sim 1/r^3$, $H \sim 1/r^2$, 波阻抗随距离增加而减少。骚扰源为磁场时, 磁场远大于电场, 所以磁场为低阻抗场源, 随离天线距离的增加电场和磁场都将衰减, $H \sim 1/r^3$, $E \sim 1/r^2$, 波阻抗随距离增加而增加, 不管近场是电场还是磁场, 敏感设备离开骚扰源最开始位置一点都将大大减少电磁干扰, 所以在电气柜内设备布置时敏感设备与骚扰源保持一定得到间距, 如图 1-16 所示步话机产生的骚扰源:

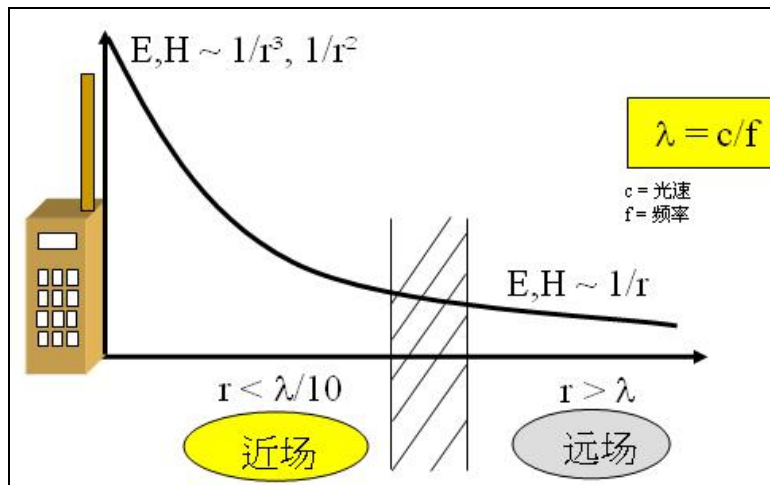


图 1-16 步话机产生的骚扰源

一个 3 瓦的步话机可以生成接近 50 V/m 的电场. 一般的设备会产生 10 V/m 的电场, 所以有的设备明确规定离步话机的距离。

远场中电场与磁场的比值是一个固定值 $E/H = \pi * 120 \text{ ohm} = \text{常数}$, 电场与磁场的衰减近似等于 $1/r$ 。

1.2.1 天线效应

电场、磁场的骚扰源通过天线发送出去, 在设备的安装和布线时要注意天线效应。由信号源—传输线—负载组成电流环路, 相当于磁场天线, 所有信号环路、电源供电环路、输入和输出环路, 都相当于磁场天线, 例如图 1-17 平行双线产生的磁场天线:

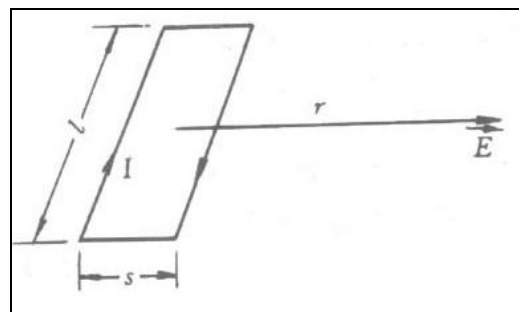


图 1-17 平行双线形成的磁场天线

辐射的强度为：

$$E = \frac{120\pi^2 IA}{r\lambda^2}$$

可以看出平行双线形成的磁场天线辐射的强度与电流 I 、回路面积 A 及频率 f ($\lambda = v/f$) 成正比。所以在柜内布线时尽量减少干扰回路的面积，例如图 1-18 中的布线：

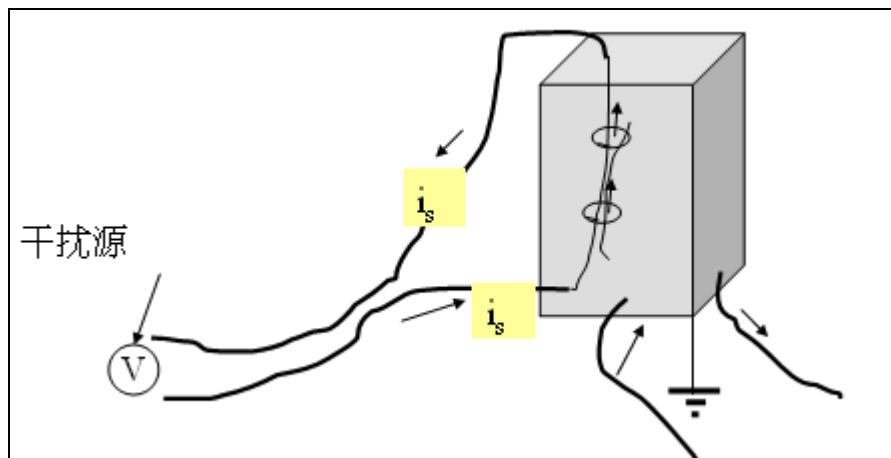


图 1-18 错误的电气柜布线

图 1-18 中干扰电流流经电控柜，造成其磁场干扰内部电缆。应将所有输入电缆都安排在电控柜的一侧，如图 1-19 所示。同样天线还具有接收功能，一个大回路也容易受到干扰。

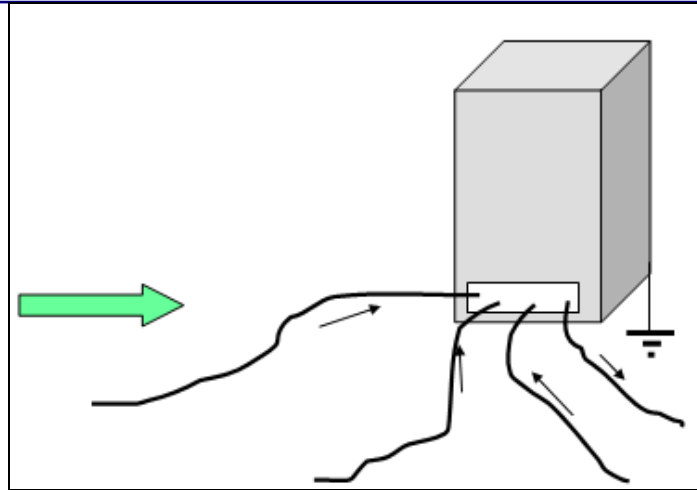


图 1-19 正确的电气柜布线

任何两点间有电位差就是干扰源，如果二点有引线就会形成天线，图 1-20 中，如果负载 Z_Y 不等于源阻抗 R_Q 和导线特性阻抗将产生电磁波，如果将负载去除将变成一个双极子天线。

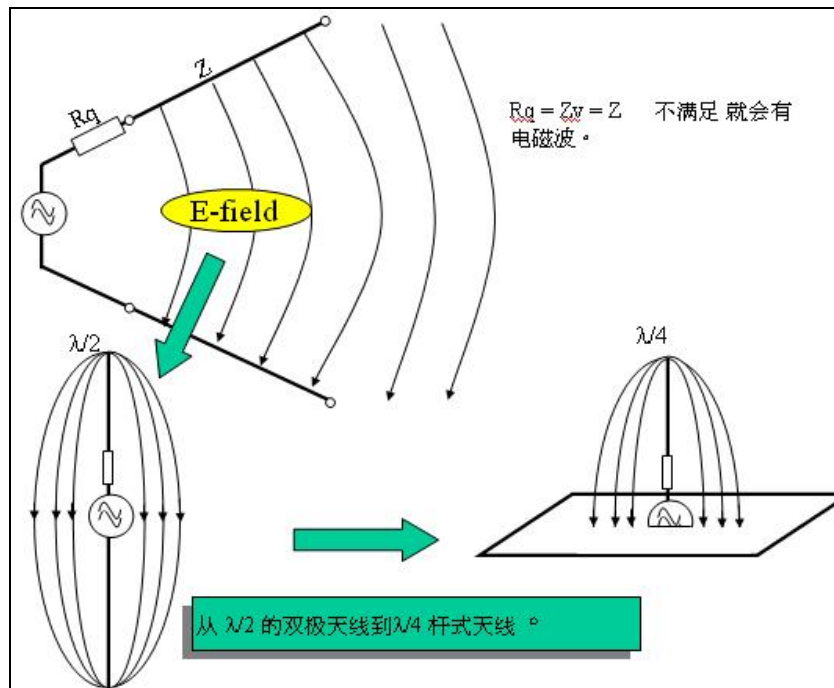


图 1-20 电场天线

一个杆式天线通常是在底端带有阻抗的线性物体。如果是发射天线，它把电流沿着线性物体转换成电场强向外辐射。如果是接收天线，该过程相反。电控柜内的导体就象杆式天线，在电控柜内不希望有天线效应，所有柜内的导体要尽可能的短，此外导体与地平行比与地有夹角要好，如图 1-21 所示：

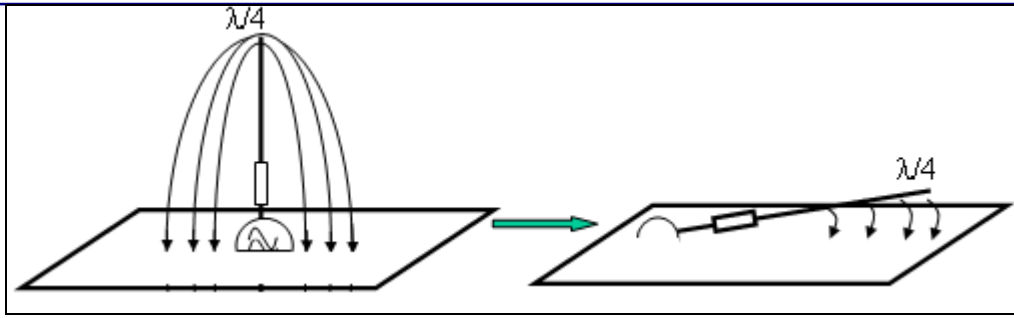


图 1-21 削减天线效应

电气柜中多个相互绝缘的金属组合在一起会产生天线效应，如图 1-22 所示，相互绝缘的铝杆组成一个带有导向偶极子的定向天线。正确的做法是将所有金属部分都可靠连接以避免天线效应。

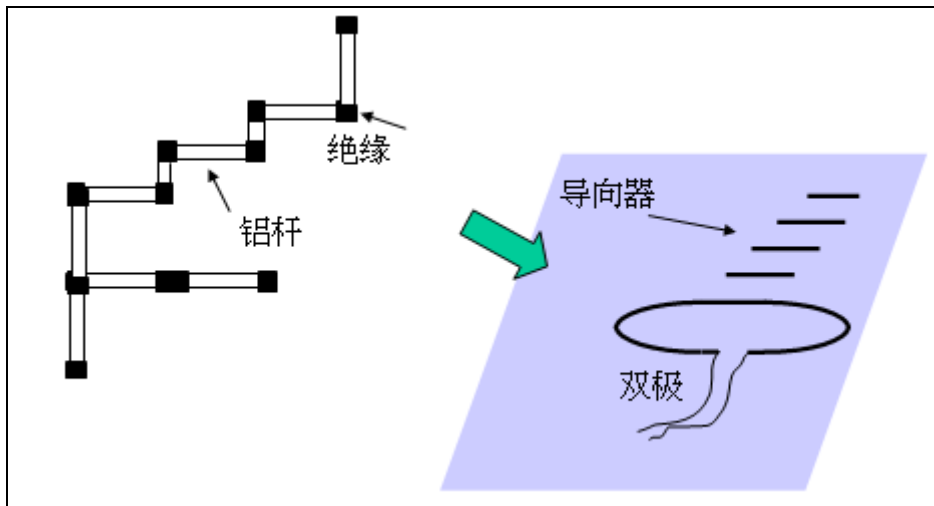


图 1-22 绝缘的铝杆

在平板导体上的电流变化时会产生电磁波，开槽的金属板，会产生一个与槽的形状一样的缝隙天线，如图 1-23 所示，

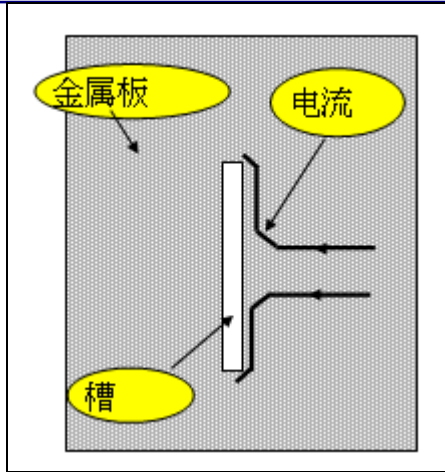


图 1-23 缝隙天线

因此两块相邻的金属相接时要有较大的接触面积，而不要点、线连接，这样可以避免缝隙天线效应，如图 1-24 所示：

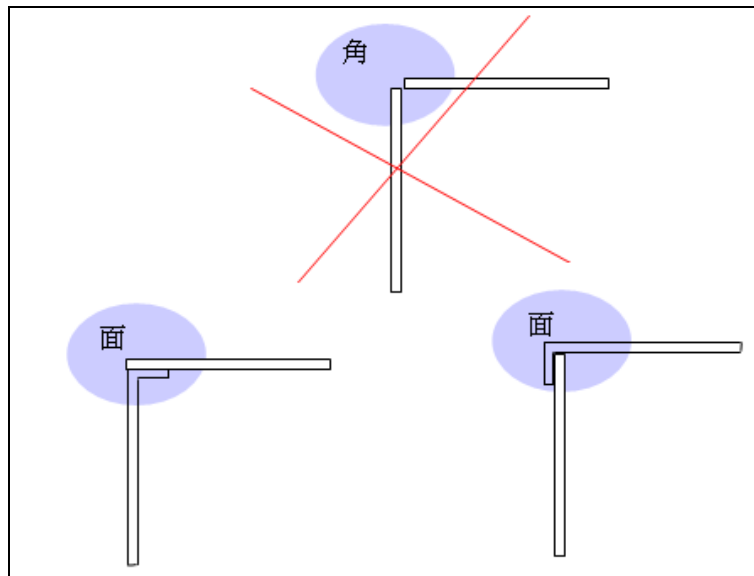


图 1-24 避免缝隙天线

1.2.2 近场电场耦合

设备内各个环路之间的电距离较短，一般为近场，近场的场型很复杂，不易计算，因此相互间的电磁干扰常用分布电容耦合描述电场干扰，分布电感耦合描述磁场干扰，从而把场的问题转化为路的问题，简化了计算。电磁耦合的典型问题：线-线间的串扰。

频率较高时，骚扰信号可以通过导线间的分布电容从一个回路传导到另一个回路，这是电容耦合（电场耦合），两根平行导线的电容耦合如图 1-25 所示：

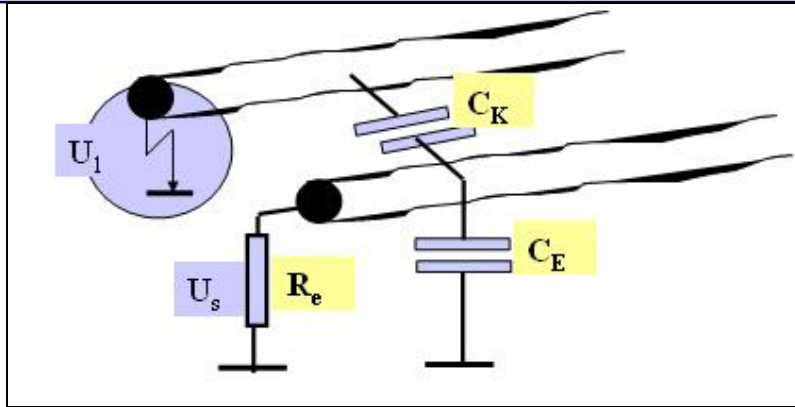


图 1-25 两平行导线的电场耦合

其中 U_1 为骚扰源电压， R_e 为接收电路的输入阻抗， C_K 为两条导线的耦合电容， C_E 为接收回路对地的耦合电容， U_s 为耦合电压，这样耦合电压为：

$$U_s / U_1 = (X_E \parallel R_e) / (X_E \parallel (R_e + X_K)) \quad (1-1)$$

式中 X_E 、 X_K 分别为 C_E 、 C_K 容抗，(1-1) 式中可以转化为：

$$U_s / U_1 = (j * 2 * \pi * f * R_e * C_K) / (1 + j * 2 * \pi * f * R_e * (C_K + C_E)) \quad (1-2)$$

在低频时： $2 * \pi * f * R_e * (C_K + C_E) \ll 1$ ，(1-2) 式等效为：

$$|U_s| = j * 2 * \pi * f * R_e * C_K * U_1 \quad (1-3)$$

耦合电压随频率的增加而增加。

在高频时： $2 * \pi * f * R_e * (C_K + C_E) \gg 1$ ，(1-2) 式等效为：

$$|U_s| = C_K / (C_K + C_E) * U_1$$

耦合电压保持不变。电容耦合主要发生在高频范围内，减小耦合电压的方法可以增加接收回路对地耦合电容 C_E ，这样就要求接收回路尽量接近金属部分或者金属表面。

1.2.3 近场磁场耦合

骚扰信号通过导线间的分布电感，从一个回路传到另一个回路为电感性耦合或磁场耦合，骚扰回路对接收回路的磁场耦合可以通过电路间的互感进行分析如图 1-26 所示：

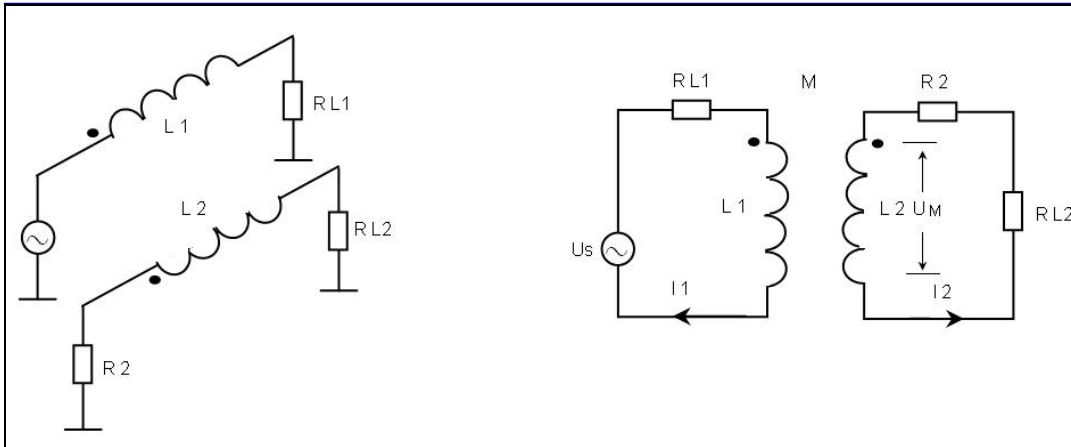


图 1-26 平行导线间的电感耦合及等效电路

骚扰回路在接收回路产生的电动势为：

$$U_M = j\omega MI_1 \quad (1-4)$$

在接收回路产生的电流为：

$$I_2 = \frac{j\omega MI_1}{j\omega L_2 + R_2 + R_{L2}} \quad (1-5)$$

当低频时， $R_2 + R_{L2} \gg j\omega L_2$ 式 (1-5) 可以表示为 $I_2 = \frac{j\omega MI_1}{R_2 + R_{L2}}$ 磁场耦合量随频率的升高而增加。

当高频时， $R_2 + R_{L2} \ll j\omega L_2$ 式 (1-5) 可以表示为 $I_2 = \frac{MI_1}{L_2}$ 磁场耦合量保持不变。

同样磁场耦合主要发生在高频范围内，尤其是在电源线相互邻近的情况下（例如：电机）。

电场耦合和磁场耦合常常同时存在，根据上面的分析电场耦合、磁场耦合相当接收回路分别引入了电压源和电流源。

2 屏蔽

屏蔽的作用是将电磁场噪声源与敏感设备隔离，切断噪声源的传播路径。屏蔽分为主动屏蔽和被动屏蔽，主动屏蔽目的是为了防止噪声源向外辐射，是对噪声源的屏蔽；被动屏蔽目的是为了防止敏感设备遭到噪声源的干扰，是对敏感设备的屏蔽。

通过屏蔽衰减 S_e （电场）和 S_m （磁场）表示屏蔽效果：

$$S_e = \frac{|E_a|}{|E_i|}$$

$$S_m = \frac{|H_a|}{|H_i|}$$

E_a 、 H_a 为未屏蔽待测点的电场和磁场强度；

E_i 、 H_i 为加屏蔽后待测点的电场和磁场强度；

通过对数表示：

$$a_{se} = 20 \lg S_e$$

$$a_{sm} = 20 \lg S_m$$

S_e 、 S_m 、 a_{se} 、 a_{sm} 分别为电场屏蔽效能和磁场屏蔽效能，对于远场的辐射主要为电磁场。电场、磁场以及低频、高频屏蔽的方法不同，参考图 2-1 所示：

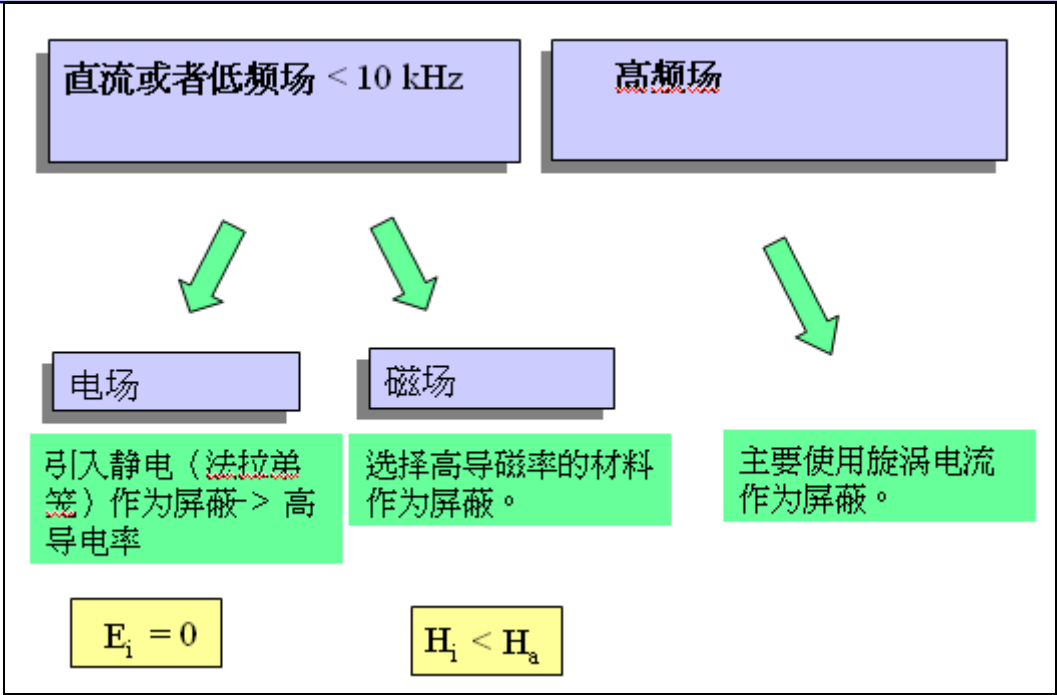


图 2-1 电磁噪声的屏蔽

2. 1 电场屏蔽

如果空间存在一静电场，将一个封闭的金属盒放入该静电场中，根据静电感应原理，在金属盒的两侧分别感应出等量的正负电荷，金属盒中没有电荷，是等电位的，金属盒无论是否接地，在金属盒内都没有感应的静电场， $E_i=0$ ，如图 2-2 所示：

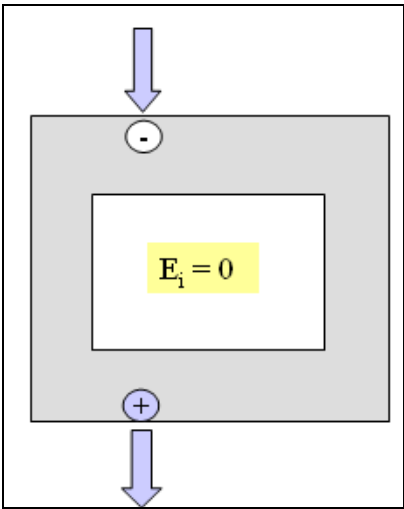


图 2-2 静电场的屏蔽

图 2-2 是被动屏蔽，如果金属盒连接有缝隙，则达不到屏蔽的效果，如图 2-3 所示：

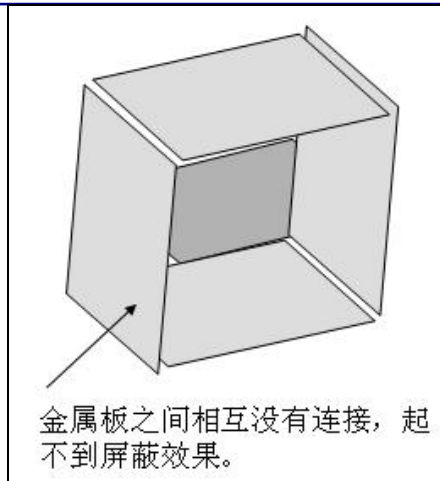


图 2-3 不好的电场的屏蔽

如果是主动屏蔽，使用金属盒将一孤立带有电荷的导体包住，在金属盒外仍然会有感应电荷，如果将金属盒接地则金属盒外感应电荷消失，所以对静电场的主动屏蔽，屏蔽体必须接地。

在实际的应用中电场的干扰主要是交变电场，通过下面的示例可以分析交变电场的屏蔽，例如骚扰源 A 和被干扰设备 B 置于大地上方，如图 2-4 所示：

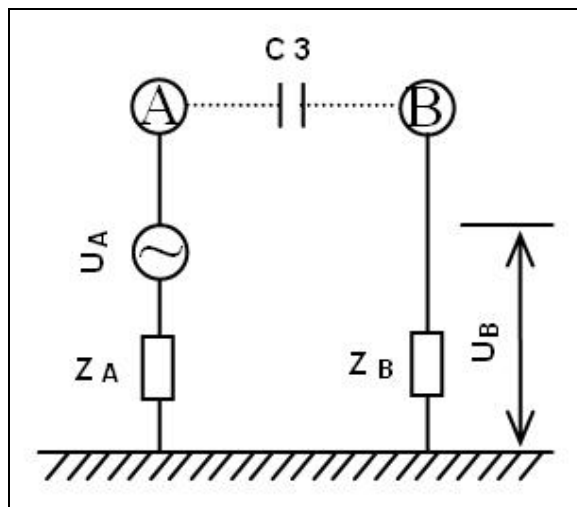


图 2-4 交变电场的屏蔽

骚扰电压通过 C_3 耦合到 B 的电压为：

$$U_B = \frac{j\omega C_3 Z_B}{1 + j\omega C_3 (Z_B + Z_A)} U_A \quad (2-1)$$

当频率较低时，式 (2-1) 可以表示为：

$$U_B = j\omega C_3 Z_B U_A \quad (2-2)$$

从式 (2-2) 可以看到骚扰源在 B 上产生的干扰电压 U_B 与频率和耦合电容成正比, 耦合电容越大干扰电压越大。如果在 A B 间插入一个金属隔板分析一下是否可以起到屏蔽效果, 如图 2-5 所示:

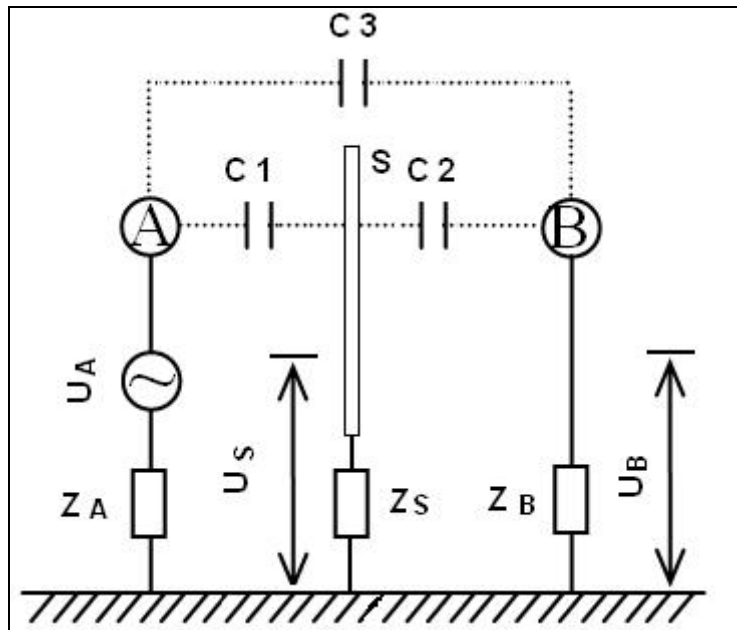


图 2-5 金属板的电场屏蔽

在骚扰源 A 与 B 间加入金属板 S, 那么在金属板上产生的干扰电压为:

$$U_S = \frac{j\omega C_1 Z_S}{1 + j\omega C_1 (Z_S + Z_A)} U_A \quad (2-3)$$

C_3 很小可以忽略, 那么金属板 S 在 B 上产生的干扰电压为:

$$U_B = \frac{j\omega C_2 Z_B}{1 + j\omega C_2 (Z_B + Z_S)} U_S \quad (2-4)$$

由于耦合电容与导体的面积成正比, 与距离成反比, 这样 C_1 、 C_2 大于 C_3 , 加入一金属板在 B 上产生的干扰电压可能会更大, 如果将金属板 S 接地, 则 Z_S 为 0, $U_S=0$, 那么 $U_B=0$, 可见, 屏蔽在交变电场中必须接地。

2. 2 磁场屏蔽

在直流或者低频场 $< 10 \text{ kHz}$ 的情况下, 选择低磁阻抗的材料作为屏蔽 (高导磁率)。用它们传导磁力线削弱内部场强, 如图 2-6 所示:

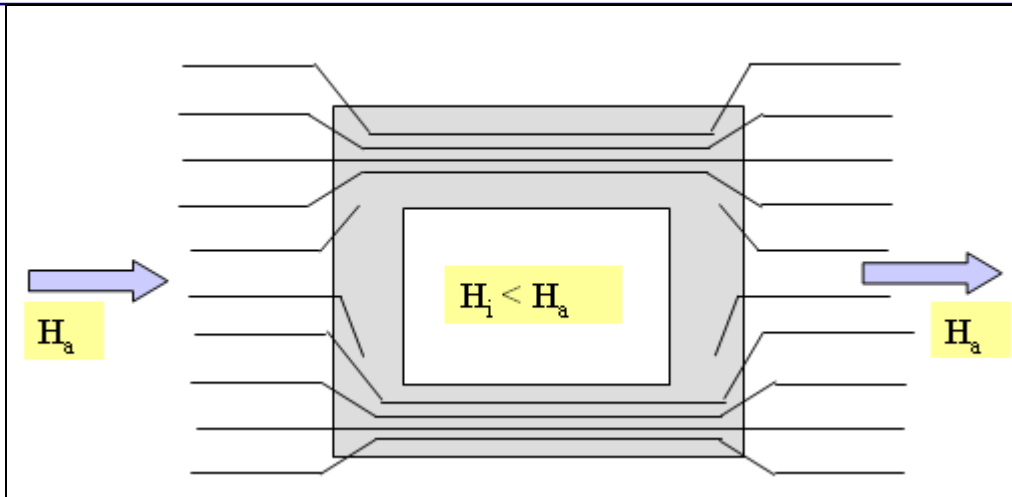


图 2-6 磁场的被动屏蔽

磁力线总是闭合的，尽管大部分磁力线通过屏蔽体内通过，但还会有一部分磁力线穿过屏蔽体包围的空间，削弱低频磁场是困难的！图 2-6 所示为被动屏蔽，主动屏蔽也是对骚扰源的磁力线进行分流，使空气中的漏磁通减少。

在高频情况下使用涡流产生反磁场抵消骚扰源产生的磁场，从而达到屏蔽作用。如图 2-7 所示：

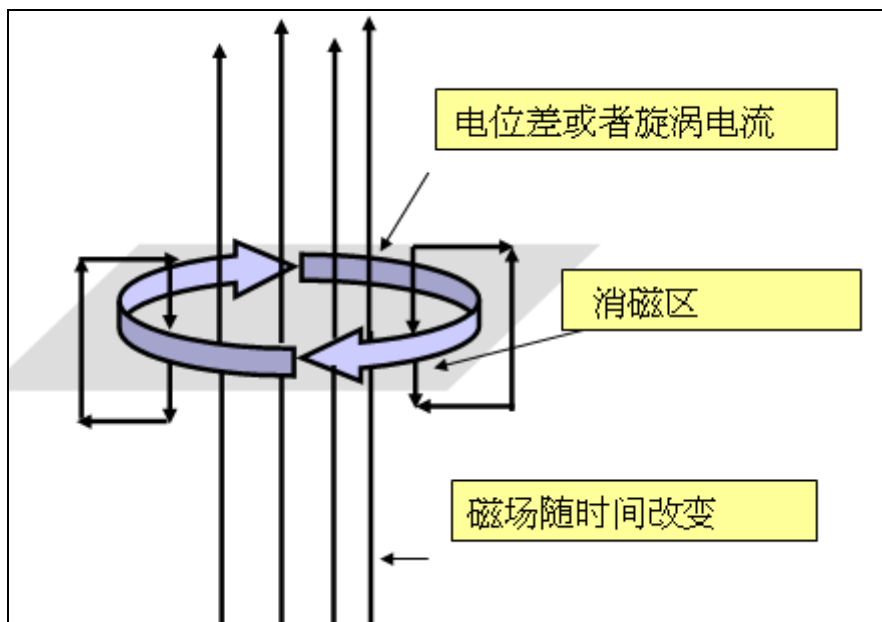


图 2-7 金属板的磁场屏蔽

任何时候磁场（准确的说是磁感应强度 B ）随时间改变，就会在垂直磁场的方向上产生电位差。如果电位差遇到导电平面或者导体，就会产生旋涡电流。按照伦兹定律，旋涡电流会产生一个磁场，并且会因此而削弱原有的磁场，从图 2-7 中可以看出磁力线穿过金属板后

产生涡流，涡流产生的反向磁场削弱原有的磁场。屏蔽体的电阻越小，产生的涡流越大，屏蔽的效果越好，所以在高频使应选择导电好的良导体。

如果需要在屏蔽盒上开孔，开孔的位置必须顺着涡流方向，如果开孔阻断涡流的通路，将大大影响屏蔽的效果，如图 2-8 所示：

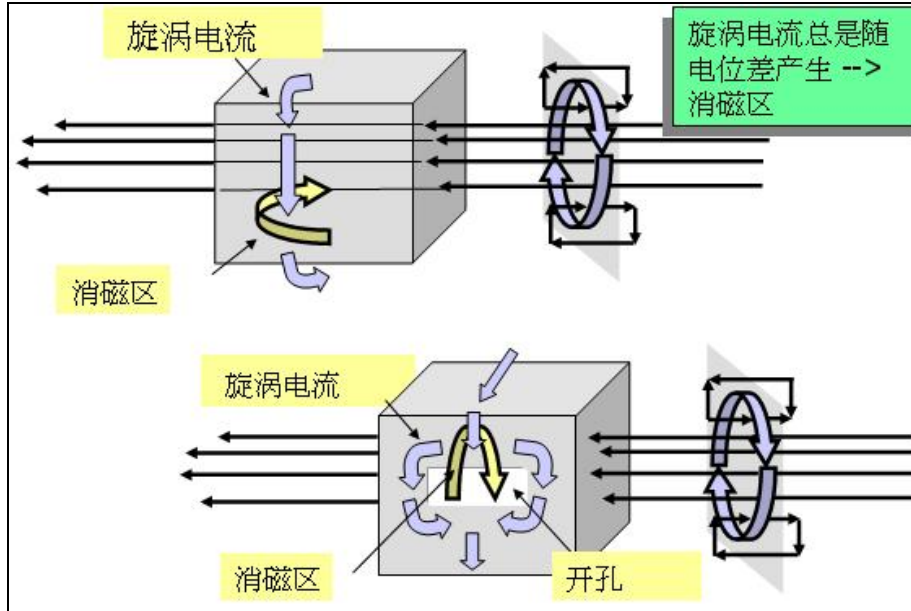


图 2-8 金属盒的开孔位置 1

图 2-8 中涡流会绕过开孔 --> 磁场的形成方向会发生错误 --> 从而无法削弱原磁场，将开孔旋转 90 度效果会好些。如果开孔大，可以使用小孔替代,如图 2-9 所示：

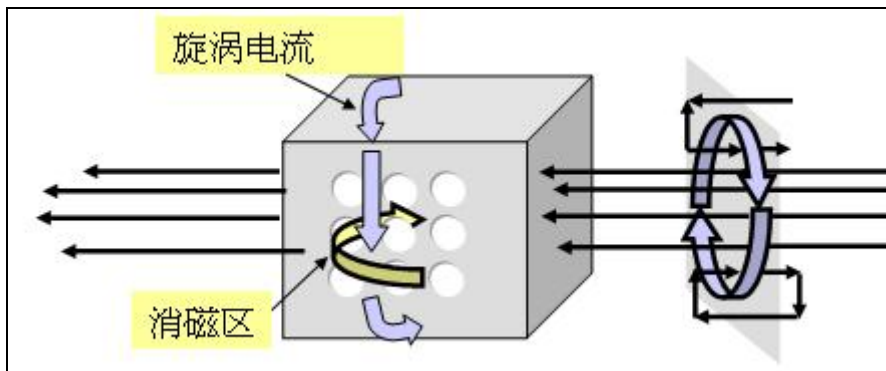


图 2-9 金属盒的开孔位置 2

图 2-9 中在金属盒开的小孔尽可能地不改变涡流的方向，保持原有屏蔽效果，所以在电气柜得到安装中尽量将开孔面积减小，如果在柜门安装玻璃也会影响电场、磁场屏蔽效果。

当环路中有电流流过，环路将向外产生辐射，辐射的大小与环路的面积成正比，同样将回路放置于磁场中，环路也将感应出电流，感应电流得到大小与环路的面积成正比，减少环路的面积既能减少干扰的辐射又可以抑制环路受外界的干扰，图 2-10 列出了正确的不布线方式。

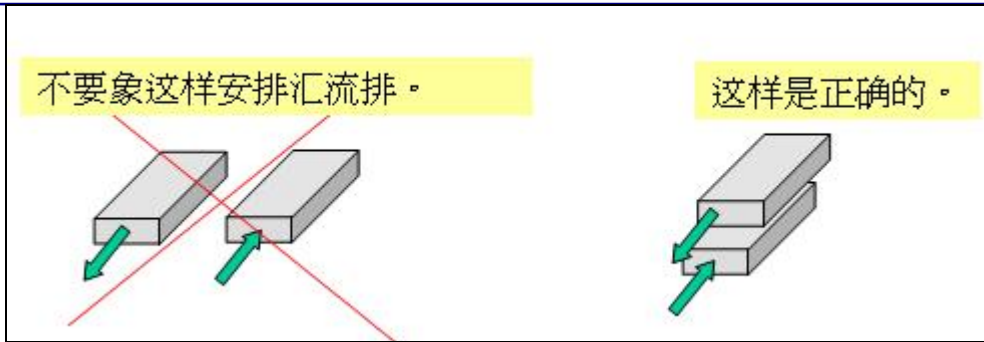


图 2-10 正确的布线

使用双绞线也可以达到很好的磁场屏蔽效果，如图 2-11 所示，干扰源的磁力线穿过双绞线的每个绞合结，每个绞合结的面积相等，产生的感应电压相同，但是方向相反，感应电压相互抵消。同样主动屏蔽时，每个绞合结在被感应侧产生的感应电压大小相等、方向相反而相互抵消，所以双绞线在主动、被动屏蔽的方式下都可以对磁场进行屏蔽。但是邻近的电路不应该用完全相同的双绞信号线在一起(也就是说每米的双绞次数不能相同)，以避免不希望的信号放大。

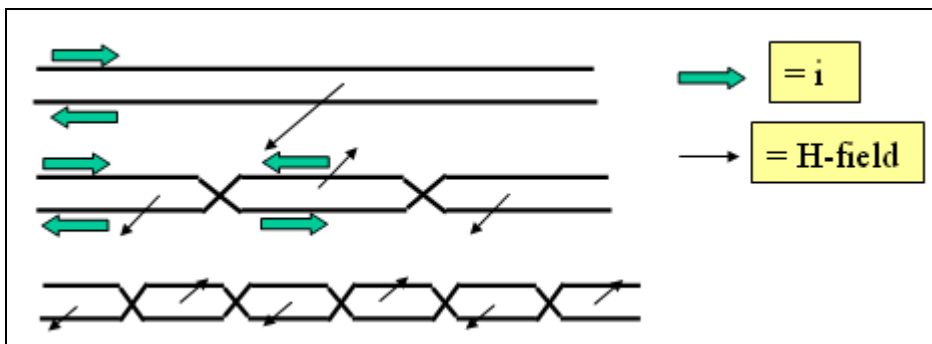


图 2-11 双绞线的磁场屏蔽作用

3 电缆的屏蔽接地

屏蔽电缆的屏蔽层主要由铜、铝等非磁性材料制成，并且厚度很薄，远小于使用频率上金属材料的集肤深度，屏蔽层的效果主要不是由于金属体本身对电场、磁场的反射、吸收而产生的，而是由于屏蔽层的接地产生的，接地的形式不同将直接影响屏蔽效果。对于电场、磁场屏蔽层的接地方式不同。

3.1 电场的屏蔽接地

在 1.2.2 中已经介绍了平行线近场的电场耦合，干扰源通过分布电容对敏感设备进行串扰，如果敏感设备使用屏蔽电缆，屏蔽层是否能够对电场产生干扰源进行屏蔽，下面进行分析。

3.1.1 屏蔽层不接地

使用屏蔽电缆进行被动屏蔽以保护有用信号的传输，如图 3-1 所示：

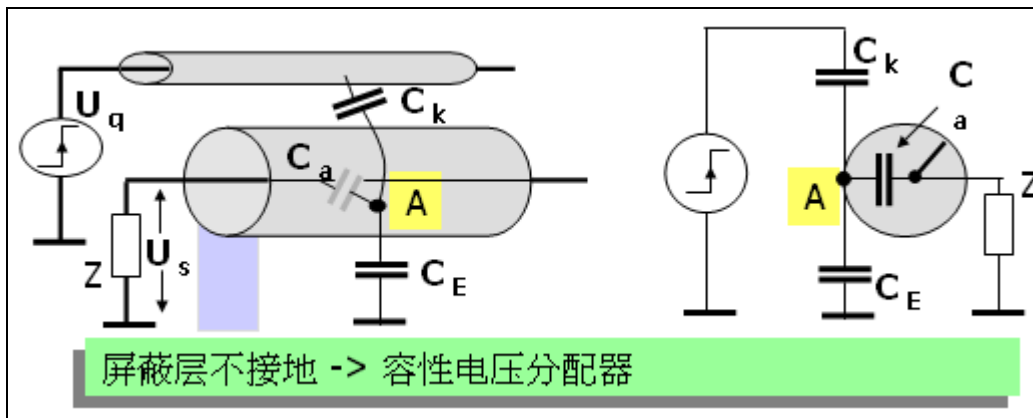


图 3-1 电场干扰—屏蔽层不接地

在前面已经分析电容耦合，图 3-1 中骚扰源电压 U_q 通过 C_k 耦合到 A 点， U_A 再通过 C 耦合到导线的线芯上，从而干扰有用信号，这跟图 2-31 描述的内容是一致的，由于屏蔽层采用多芯屏蔽网，增加了耦合量，反而增加信号的干扰。

3.1.2 屏蔽层单端接地

如果将屏蔽层上的点 A 接地，则 U_A 为 0，则 U_s 为 0，不会再耦合导线的线芯，从而达到屏蔽的效果，如图 3-2 所示：

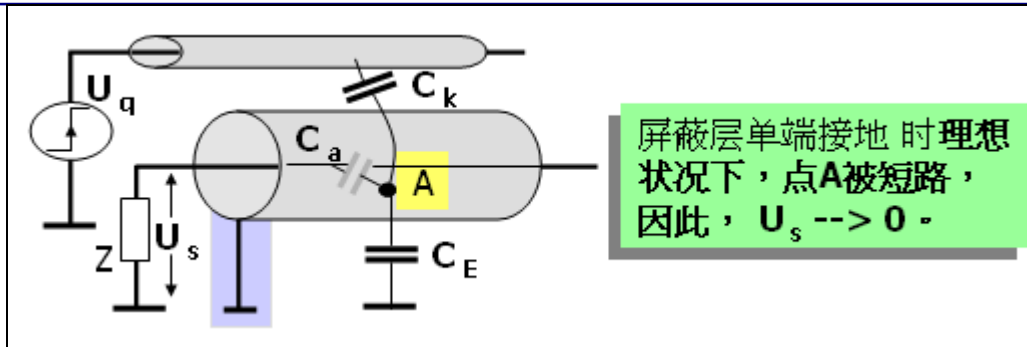


图 3-2 电场干扰—屏蔽层单端接地

在低频的情况下单端接地的可以达到很好的屏蔽效果，如果频率升高（大于 20kHz）或导线过长，屏蔽层的阻抗（高频时感抗远远大于线上的阻抗）不能不考虑，这样 U_A 将不再为 0，则 $U_s > 0$ ，屏蔽的效果被消减，这时需要多点接地或每隔 $\lambda/20$ 接一次地，从而保证屏蔽层零电位。

通常低频得到模拟信号采用单端接地，以防产生地环路，单端接地应保证屏蔽层与信号线间的电压降相等，连接方法参考图 3-3:

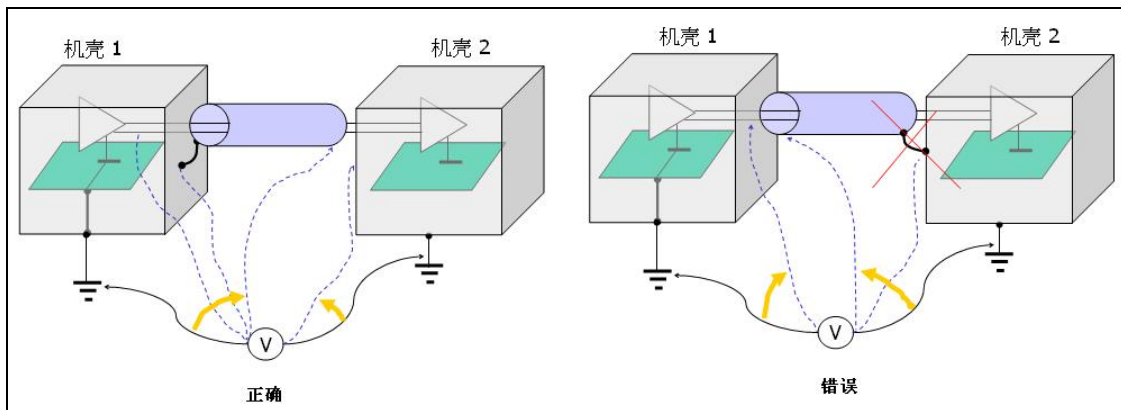


图 3-3 单端接地方式

错误的屏蔽层连接会造成屏蔽层和信号源的地之间电位差，从而在分布电容上产生一个变化的电流，在两根信号线上产生一个电压差

3.2 磁场的屏蔽接地

在 2.2 中已经介绍选择低磁阻抗的材料作为屏蔽（高导磁率）。利用它们传导磁力线以削弱内部场强,频率高的情况下利用涡流效应以削弱源磁场达到屏蔽的作用。下面分别介绍磁场中屏蔽层的接地。

3.2.1 屏蔽层单端接地或不接地

在干扰源产生的磁场中，电缆屏蔽层通过其产生的感应电动势，在屏蔽层产生反向电流，形成反向磁场，从而消减干扰源产生的磁场，达到屏蔽作用，如果屏蔽层单端接地或不接地，感应电动势在屏蔽层不能反向电流，达不到屏蔽作用，图 3-4 所示为主动屏蔽， I_1 为

干扰电流，屏蔽层单端接地，屏蔽层没有电流流过，干扰电流从参考地返回，屏蔽层没有屏蔽效果，不会减少干扰源回路的磁场辐射。

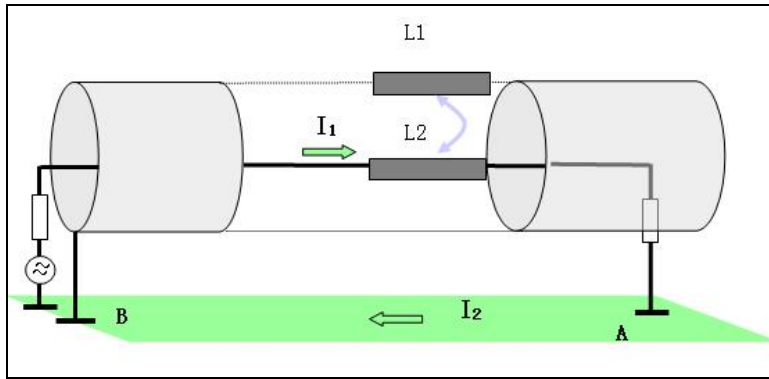


图 3-4 磁场屏蔽层单端接地

屏蔽层双端接地如图 3-5 所示，干扰电流在 A 点分流为 I3（经参考地）、I2（屏蔽层）流回源端。

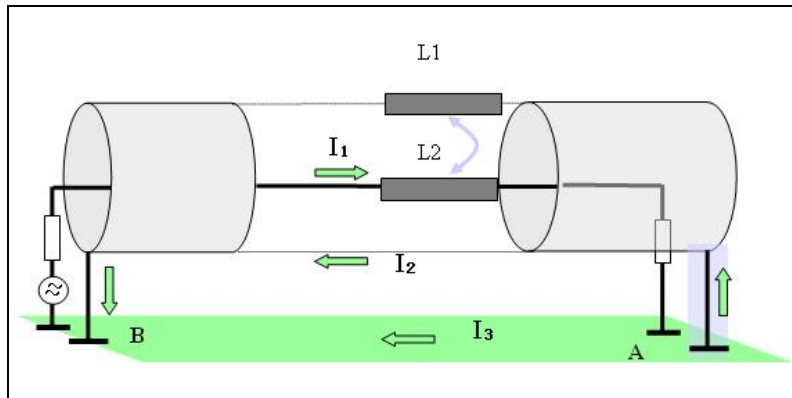


图 3-5 磁场屏蔽层双端接地-1

干扰电流流经线芯时通过屏蔽层与线芯的互感 M 在屏蔽层回路产生感应电动势为 $j\omega MI_1$ ，那么在屏蔽层上产生的电流为：

$$I_2 = \frac{j\omega MI_1}{Z_2} \quad (3-1)$$

Z_2 为屏蔽层的阻抗， $Z_2 = j\omega L_2 + r_2$ ，在屏蔽电缆中自感等于互感，所以 $M = L_2$ ，式 (3-1) 可以转化为，

$$I_2 = \frac{j\omega L_2 I_1}{j\omega L_2 + r_2} = \frac{j\omega I_1}{j\omega + \omega_0} \quad (3-2)$$

$\omega_0 = L_2 / r_2 = 2\pi fc$ (fc 为屏蔽体截止频率)

低频时，由式(3-2)可知，

$$I_2 \leq I_1 \quad (3-3)$$

随着频率升高， I_3 越来越大，当 $\omega > 5\omega_0$ 时， $I_2 \approx I_1$ ，此时流经参考地的电流 $I_3 \approx 0$ 。

屏蔽层双端接地同样适合被动屏蔽，如图 3-6 所示：

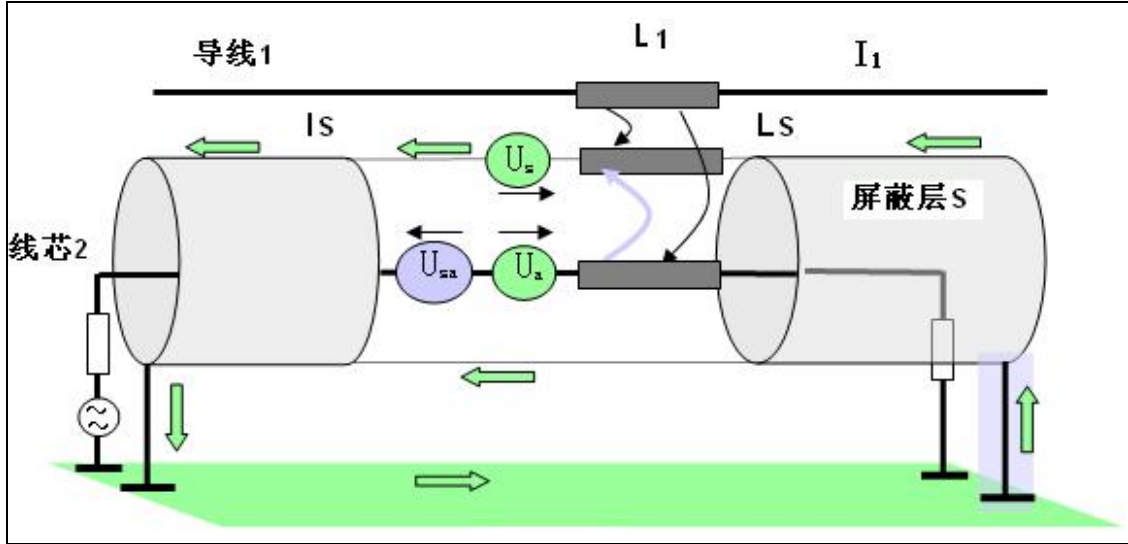


图 3-6 磁场屏蔽层双端接地-2

干扰源导线 1 在屏蔽层上产生的骚扰电压为：

$$U_s = j\omega M_{1s} I_1 \quad (3-5)$$

其中 M_{1s} 为导线 1 与屏蔽层的互感系数

I_1 为导线 1 的骚扰电流

干扰源导线 1 在线芯 2 上产生的骚扰电压为：

$$U_a = j\omega M_{12} I_1 \quad (3-6)$$

其中 M_{12} 为导线 1 与线芯 2 的互感系数

I_1 为导线 1 的骚扰电流

屏蔽层 S 在线芯 2 上产生的骚扰电压为：

$$U_{sa} = j\omega M_{sa} I_s \quad (3-7)$$

其中 M_{sa} 为屏蔽层 S 与线芯 2 的互感系数

I_s 为屏蔽层 S 的骚扰电流

那么在线芯 2 上产生的骚扰电压和为：

$$U_N = Usa + Ua \quad (3-8)$$

式 (3-7) 可以转换为:

$$Usa = j\omega Msa \frac{Us}{Rs + j\omega Ls} \quad (3-9)$$

其中 Rs 为屏蔽层 S 阻抗, 由于互感等于自感, $Msa = Is$

式 (3-9) 可以转换为:

$$Usa = j\omega \frac{Us}{Rs/Ls + j\omega} \quad (3-10)$$

理想情况下屏蔽导线中导线 1 对线芯 2 与屏蔽层的互感相等, 所以 $M_{1S} = M_{12}$, 式 (3-10) 可以转换为:

$$Usa = j\omega \frac{Ua}{Rs/Ls + j\omega} \quad (3-11)$$

由于 Usa 为屏蔽层 S 在线芯 2 上产生的耦合电压, 方向与 Ua 相反, 所以式

(3-8) 表达为:

$$U_N = Ua - Usa = Ua[(Rs/Ls)/(j\omega + Rs/Ls)] \quad (3-12)$$

对于低频信号, $j\omega Ls \ll Rs$

$U_N = Ua$ 感应电压与没有屏蔽时效果相同;

对于频率较高的信号, $j\omega Ls \gg Rs$

$$U_N = M_{12} I_1 Rs / Ls$$

感应电压为常数, 与频率无关, 这个数与没有屏蔽时的数值差即为屏蔽效果, 频率越高, 屏蔽效果越好。对于电缆长度 L 大于四分之一波长时的高频干扰, 以上的公式不再适用, 只能使用分布电路参数的理论来求解干扰耦合。

3.3 电缆屏蔽接地总结

电缆接地总结如图 3-7 所示:

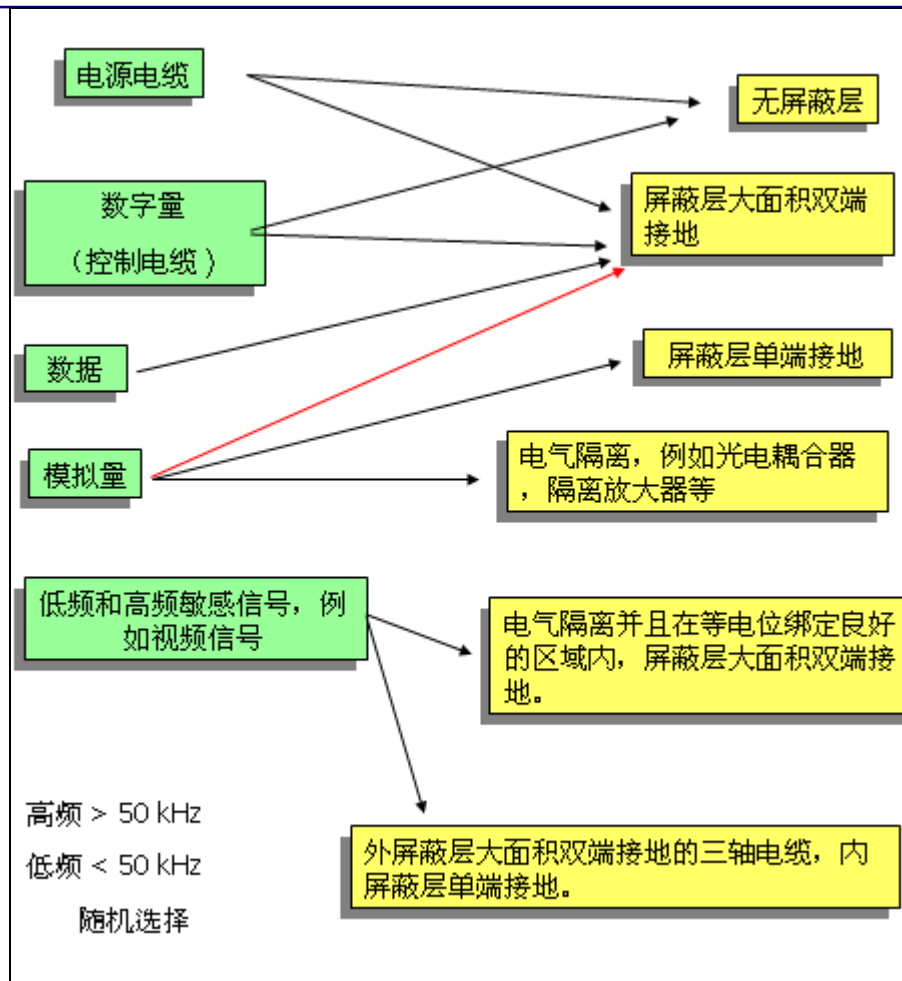


图 3-7 电缆屏蔽接地总结

单端接地:

- 1) 屏蔽电缆的单端接地对于避免低频电场的干扰是有帮助的。或者说它能够避免波长 λ 远远大于电缆长度 L 的频率干扰。 $L < \lambda / 20$
- 2) 电缆屏蔽层单端接地能够避免屏蔽层上的低频电流噪声。这种电流在内部导致共模干扰电压并且有可能干扰模拟量设备。
- 3) 屏蔽层的单端接地对于那些对低频干扰敏感的电路（模拟量电路）来说是可取的。
- 4) 连续测量值的上下波动和永久偏差表示有低频干扰。

双端接地:

- 1) 确保到电控柜或者插头（圆形接触）的连接经过一个大的导电区域（低感应系数）。选择金属在金属上比非金属在非金属上要好。
- 2) 由于有些模拟量模块使用了脉冲技术（例如：处理器和 A/D 转换器集成在同一模块中），建议将模拟量信号彼此间屏蔽，确保正确的等电位连接，只有在这种情况下进行双端接地。

-
- 3) 通常金属箔屏蔽层的传输阻抗远远大于铜编织线的屏蔽层，其效果相差 5—10 倍，不能用作数字信号电缆。
 - 4) 偶尔的功能失灵表明有高频干扰。这是导线等电位连接无法消除的。
 - 5) 除去电缆的端点以外，屏蔽层多点接地是有利的。
 - 6) 不要将屏蔽层接在插针上,避免“猪尾巴”现象。
 - 7) 要时刻注意屏蔽层的并联阻抗应该小于自身阻抗的 1/10。电缆桥架、机械框架、其它屏蔽层或者其它并行电缆都能够使系统作到等电位。
 - 8) 如果当屏蔽层双端接地时电缆屏蔽层发热，或者屏蔽层碰到电控柜外壳或者屏蔽总线时打火，说明等电位连接不可靠。

4 PROFIBUS 的安装要求

4.1 PROFIBUS 的布线

为了减少电场、磁场耦合，PROFIBUS 与其它电源电缆的骚扰源并行的间距越长越好，如图 4-1 所示：

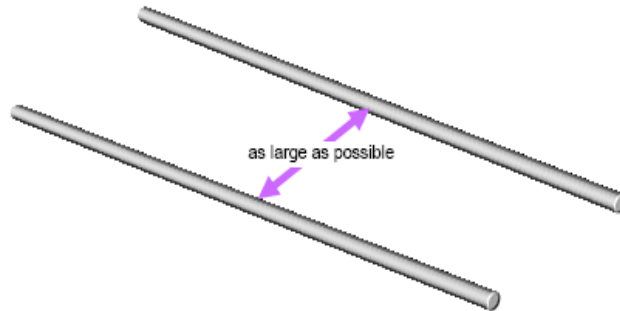


图 4-1 PROFIBUS 电缆与干扰源远越好

规范中定义的 PROFIBUS 与其它电缆最小距离参考表 4-1，PROFIBUS 可以与其它数据线、网线、屏蔽的模拟量电缆一起布线，如果是无屏蔽的电源线最小间距是 200mm。

表 4-1 PROFIBUS 与其它电缆的最小距离

PROFIBUS cable and cable for	Spacing		
	Without partition or with non-metallic partition	Partition made out of aluminum	Partition made out of steel
Signal transmission			
<ul style="list-style-type: none"> • Network signals such as PROFIBUS. • Digital data signals for PCs, programming devices, printers, etc. • Shielded analog inputs or outputs 	0 mm	0 mm	0 mm
Power supply			
<ul style="list-style-type: none"> • Unshielded 	200 mm	100 mm	50 mm
<ul style="list-style-type: none"> • Shielded 	0 mm	0 mm	0 mm

与不同类型的电缆必须交叉布线时，交叉角度最好为 90 度，减少线线间串扰，如果不能满足最小间距，也可以应选择屏蔽保护，如带有隔离的电缆桥架，如图 4-1 所示。

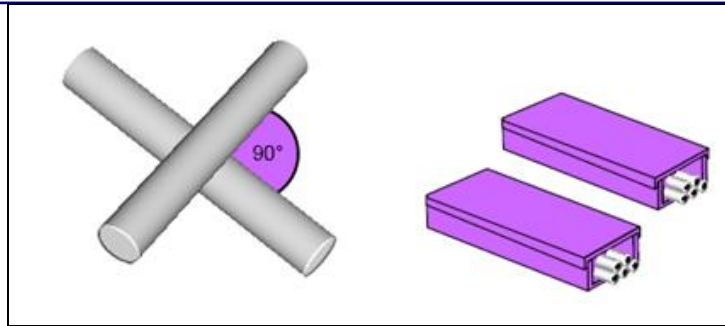


图 4-2 PROFIBUS 电缆布线 1

在没有隔离的条件下，在一个电缆槽中应隔离，并将隔离金属板接地，如图 4-3 所示：

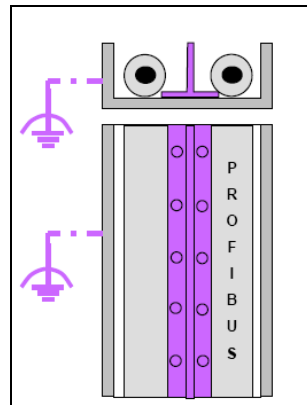


图 4-3 PROFIBUS 电缆布线 2

如果与外部相连接,必须使用等电位导线连接,PROFIBUS 线与等电位导线越近越好。如图 4-4 所示：对等电位导线的要求：

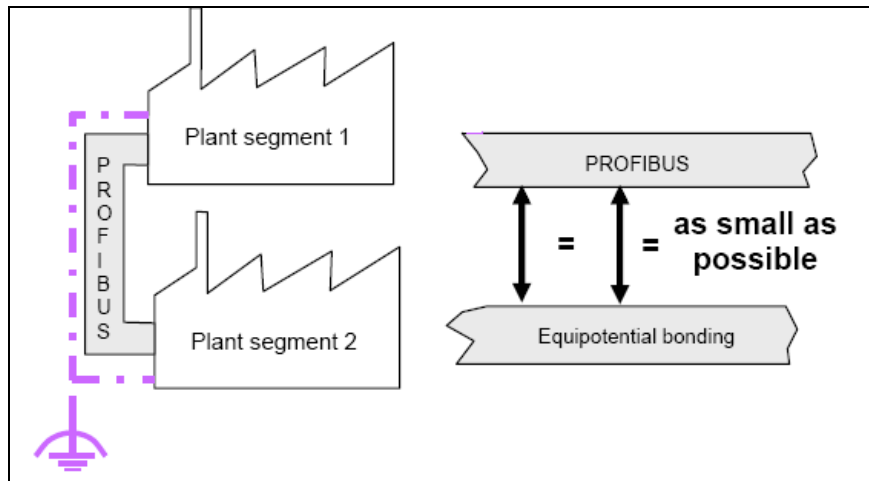


图 4-4 PROFIBUS 电缆布线 3

对等电位导线的要求：

铜线 $6mm^2$

铝线 $16mm^2$

铁线 $50mm^2$

如果远距离通信不能保证等电位连接，建议使用光纤通信。

4. 2 PROFIBUS 的屏蔽接地

PROFIBUS 的屏蔽层要求多端大面积接地以保证屏蔽层等电位，使用 PROFIBUS 接头可以避免“猪尾巴”现象，如图 4-5 中所示，PROFIBUS 接头的屏蔽线必须良好接地，如果不需要 PROFIBUS 接头的地方，也要保证屏蔽线良好接地。

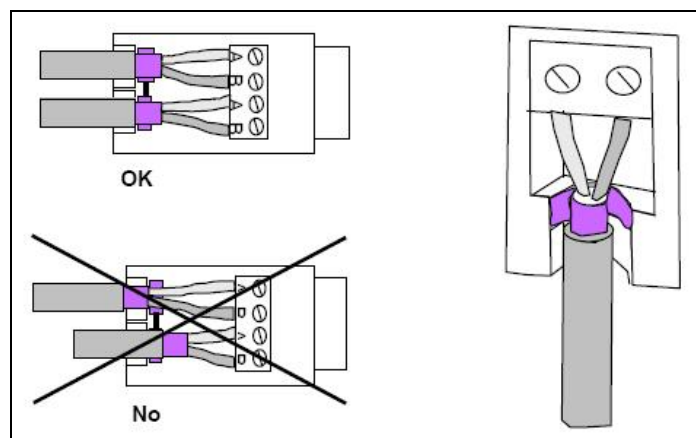


图 4-5 PROFIBUS 屏蔽层接地 1

所有标识接地符号的点都需要接地，电缆在进入电气柜后应先连接屏蔽汇流排，减少干扰电流流经 PLC 整体如图 4-6 所示：

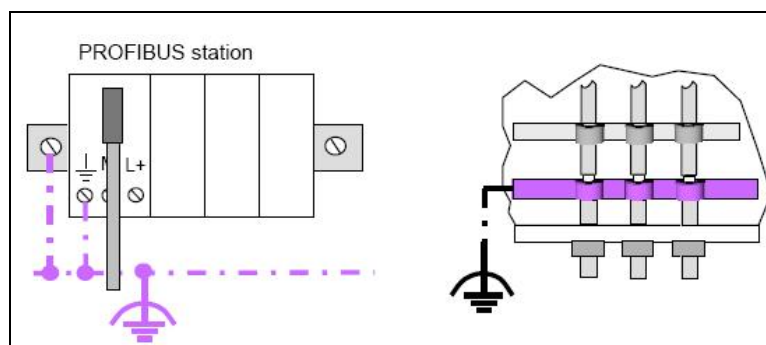


图 4-6 PROFIBUS 屏蔽层接地 2

较远电气柜间的 PROFIBUS 连接，为了避免地环流，应使用等电位导线连接，并将 PROFIBUS 靠近等电位导线布线，如图 4-7 所示：

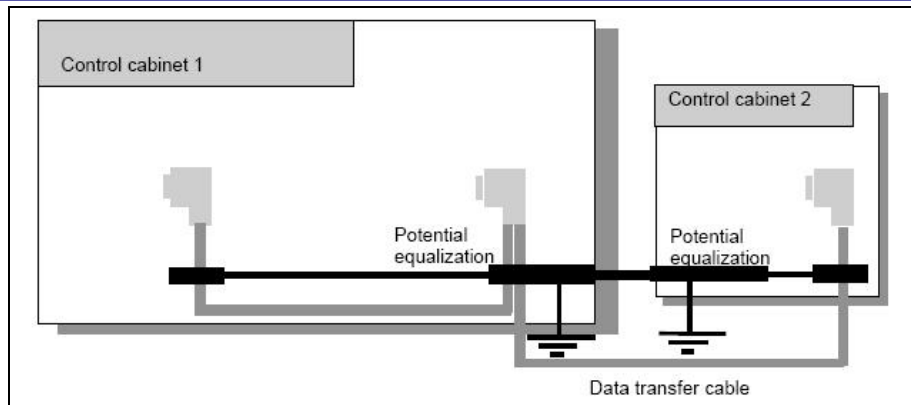


图 4-7 PROFIBUS 屏蔽层接地 3

如果 PROFIBUS 经过车间连接，除了使用等电位连接外，还要对 PROFIBUS 进行防雷保护，如图 4-8 所示。

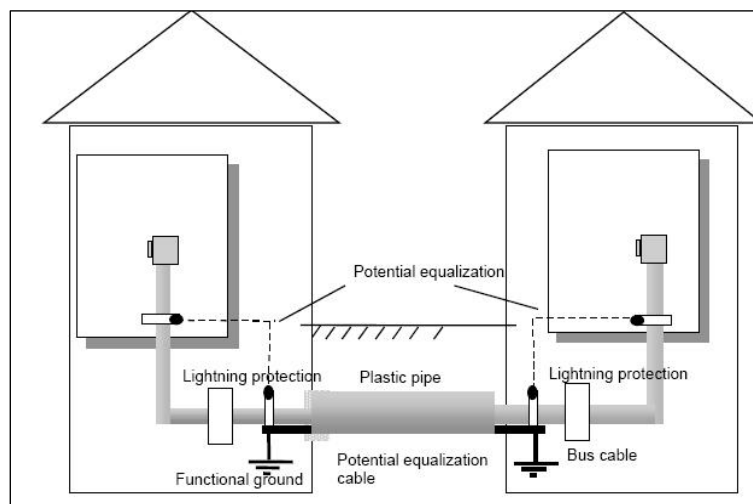


图 4-8 PROFIBUS 屏蔽层接地

5 PROFINET 的安装要求

PROFINET 作为 PROFIBUS 国际组织的一种实时工业以太网,进行高速数据传送, 布线、接地的方式大体与 PROFIBUS 相同。

5.1 PROFINET 的布线

为了减少电场、磁场耦合, PROFINET 与其它电源电缆的骚扰源并行的间距越大越好,符合 IEC 61918 的规定, PROFINET 屏蔽电缆与其它电缆最小距离参考表 5-1, PROFIBUS 可以与其它数据线、网线、屏蔽的模拟量电缆一起布线, 如果是无屏蔽的电源线最小间距是 200mm。

表 5-1 PROFINET 与其它电缆的最小距离

	Spacing to PROFINET cable		
	Without or with non-metal cutoff bridge	Aluminum cutoff bridge	Steel cutoff bridge
Signal transmission cable			
Bus signals such as e.g. other PROFINET cables, PROFIBUS cables, Data cables for PCs, programming devices, printers Shielded analog inputs	0 mm	0 mm	0 mm
Power supply cables			
Unshielded power supply cables	200 mm	100 mm	50 mm
Shielded power supply cables	0 mm	0 mm	0 mm

与不同类型的电缆必须交叉布线时, 交叉角度最好为 90 度, 减少线线间串扰, 如果不能满足最小间距, 也可以应选择屏蔽保护,如带有隔离的电缆桥架, 如图 5-1 所示。

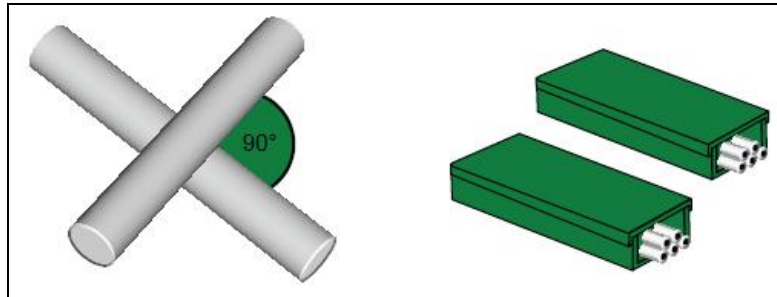


图 5-1 PROFINET 电缆布线 1

在没有隔离的条件下，在一个电缆槽中应隔离，并将隔离金属板大面积可靠接地，如图 5-2 所示：

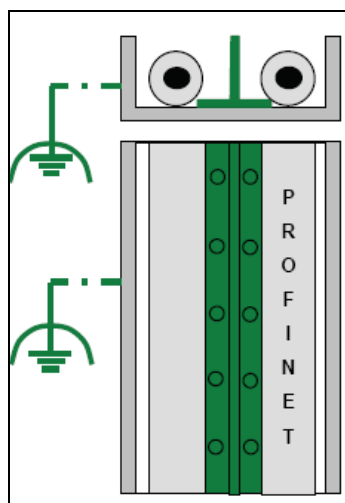


图 5-2 PROFINET 电缆布线 2

如果距离较远的两个车间连接,由于 PROFINET 电缆从交换机到设备终端允许的最大距离为 100 米，如果增加距离需要使用更多的交换机作为中继器，这种情况下强烈推荐使用光纤进行连接。如图 5-3 所示：

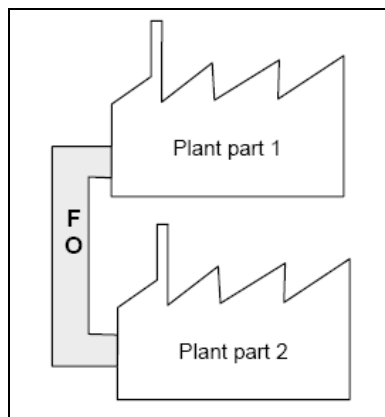


图 5-3 PROFINET 电缆布线 3

5. 2 PROFINET 的屏蔽接地

PROFINET 的屏蔽层要求多端大面积接地以保证屏蔽层等电位，所以应连接所有屏蔽层以及标有接地符号的连接器的连接器到整个车间的等电位系统（功能地），避免地环流流过 PROFINET 的屏蔽层，建筑物的等电位系统与整个车间的等电位系统应尽可能多次连接，如图 5-4 所示：

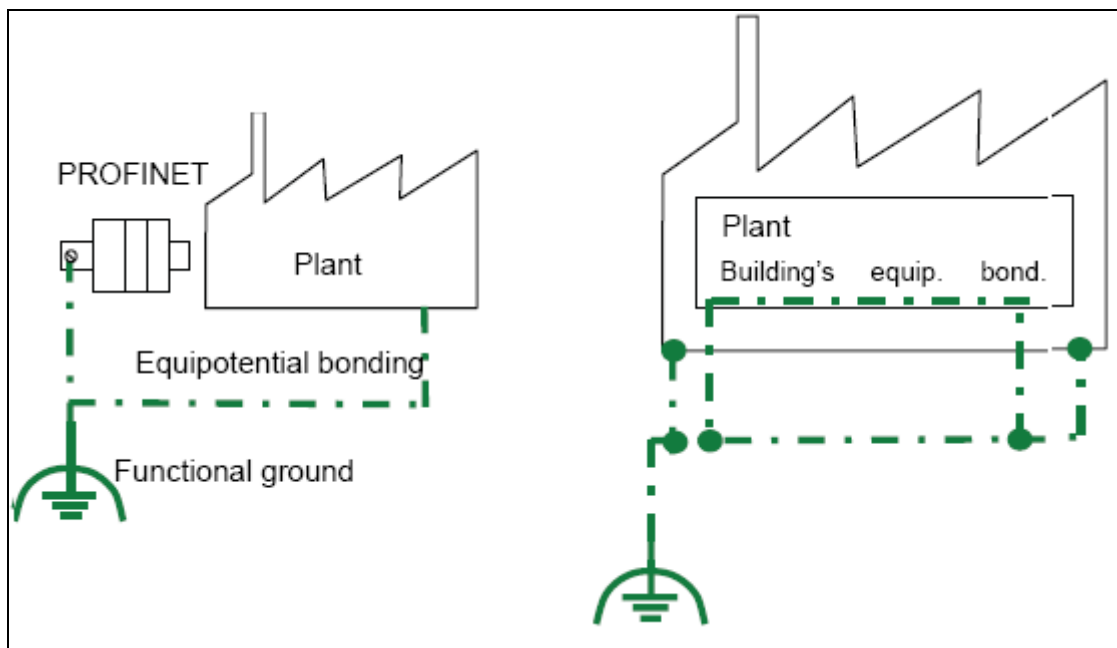


图 5-4 PROFINET 屏蔽层接地 1

电缆在进入电气柜后应先连接屏蔽汇流排,减少干扰电流流经 PLC 整体如图 5-5 所示：

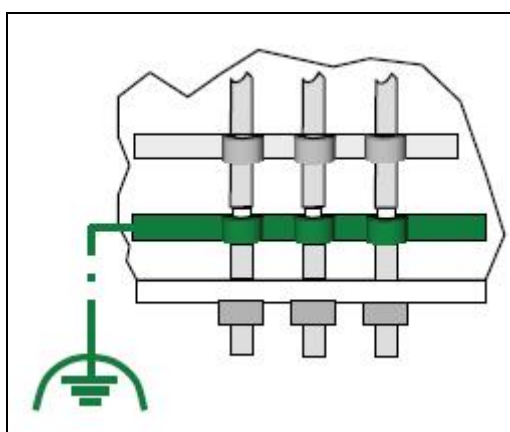


图 5-5 PROFINET 屏蔽层接地 2