

第14讲 搭接及常用电感计算

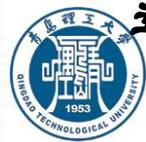
王绪虎

青岛理工大学

2017年12月11日

§ 7.1 搭接的一般概念

- 搭接形成了两导电体之间具有导电性的固定结合，实现了屏蔽、接地、滤波等抑制电磁干扰的技术措施和设计目的，是控制电磁兼容性的重要技术之一。
- 搭接(Bonding)是指两个金属物体之间通过机械、化学或物理方法实现结构连接，以建立一条稳定的**低阻抗电气通路**的工艺过程。
- 搭接的目的在于为电流的流动提供一个均匀的结构面和低阻抗通路，以避免在相互连接的两金属件间形成电位差。因为这种电位差对所有频率都可能引起电磁干扰。
- 搭接技术在电子、电气设备和系统中有广泛的应用。设备的机箱之间，从设备机箱到接地平面，信号回路与地回路之间，电源回路与地回路之间，屏蔽层与地回路之间，接地平面与连接大地的地网或地桩之间，都要进行搭接。



导体的搭接阻抗一般是很小的，在一些电路的性能设计中往往不予考虑。但是，在分析电磁骚扰时，特别是在高频电磁骚扰情况下，就必须考虑搭接阻抗的作用。

良好搭接是减小电磁干扰，实现电磁兼容性所必须的。良好搭接的作用在于：

- ①减少设备间电位差引起的骚扰。**
- ②减少接地电阻，从而降低接地公共阻抗骚扰和各种地回路骚扰。**
- ③实现屏蔽、滤波、接地等技术的设计目的。**
- ④防止雷电放电的危害，保护设备等的安全。**
- ⑤防止设备运行期间的静电电荷积累，避免静电放电骚扰。**

此外，良好搭接可以保护人身安全，避免电源与设备外壳偶然短路时所形成的电击伤害等。因此，搭接技术是抑制电磁干扰的重要措施之一。



图1中，干扰源(Interference Source)与敏感设备(Susceptible Equipment)之间接一Π型滤波器(Π-section Filter)。该滤波器是一个低通滤波器，其作用是滤除设备电源线中的高频骚扰分量。在高频情况下，旁路电容器的电抗呈低阻抗，出现在电源线上的干扰信号沿着通路①被旁路至地。因此，干扰信号不会到达敏感设备，达到了滤波目的。但是，如果搭接不良，搭接处(Join)就会形成搭接阻抗 $Z_B = R_B + j\omega L_B$ ，当搭接阻抗大到一定值时，将有干扰电流经图中通路②到达敏感设备，使滤波器起不到隔离干扰的作用。不良搭接影响抑制电磁干扰措施的实施效果。

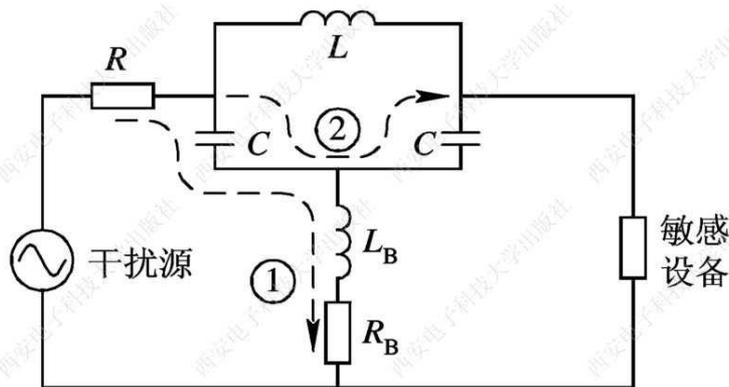


图1 不良搭接对电源滤波器性能的影响

- **电缆连接器与设备壳体的搭接能使电缆屏蔽获得最佳效果。如果没有搭接措施，或者搭接不良，连接器屏蔽效能将大为降低，不利于全部电缆的屏蔽完善性，不利于维持电缆的低损耗传输特性。**
- **电流通路上存在没有牢固连接的搭接点，或者由于振动使搭接点松动，这样的搭接点会起到间歇式触点的作用。即使直流电流或工频交流电流通过这样的搭接点，在此搭接点所产生的放电火花也可能形成频率高达几百 MHz 的骚扰信号。**
- **信号电路接地系统中，各个构件搭接不良会使接地措施形同虚设。不良搭接使搭接阻抗增加，会在搭接处形成干扰电压降，破坏理想接地等电位的要求。**
- **防雷电保护网络中，雷击放电电流通过不良搭接点时，会在搭接处产生几千伏的电压降，由此产生的电弧放电可能造成火灾或者引起其它危害。**



- **工频交流供电线路中，如果存在松动的搭接点，就会在某些用电负载上产生很高的电压降，足以损坏用电设备。同时大电流通过搭接点时，使搭接点处发热致使绝缘破坏，轻则造成线路故障，重则引起火灾。**
- **搭接方法(Bonding Methods)可分为永久性搭接(permanent Joints)和半永久性搭接(Semi-permanent Joints)两种。永久性搭接是利用铆接(Rivet)、熔焊(Welding)、钎焊(Soldering)、压接等工艺方法，使两种金属物体保持固定连接。永久性搭接在装置的全寿命期内，应保持固定的安装位置，不要求拆卸检查、维修或者做系统更改。永久性搭接在预定的寿命期内应具有稳定的低阻抗电气性能。半永久性搭接是利用螺栓、螺钉、夹具等辅助器件使两种金属物体保持连接的方法，它有利于装置的更改、维修和替换部件，有利于**测量**工作，可以降低系统造成成本。**

- ❑ **搭接类型(Bond Types)分为两种基本类型：直接搭接(Direct Bond)和间接搭接(Indirect Bond)。**
- ❑ **直接搭接是两裸金属或导电性很好的金属特定部位的表面直接接触，牢固地建立一条导电良好的电气通路。直接搭接的连接电阻的大小取决于搭接金属接触面积、接触压力、接触表面的杂质和接触表面硬度等因素。**
- ❑ **实际工程中，有许多情况要求两种互连的金属导体在空间位置上分离或者保持相对的运动，显然这一要求妨碍了直接搭接方式的实现。此时，就需要采用搭接带(搭接条，Bond Strap)或者其它辅助导体将两个金属物体连接起来，这种连接方式称为间接搭接。**

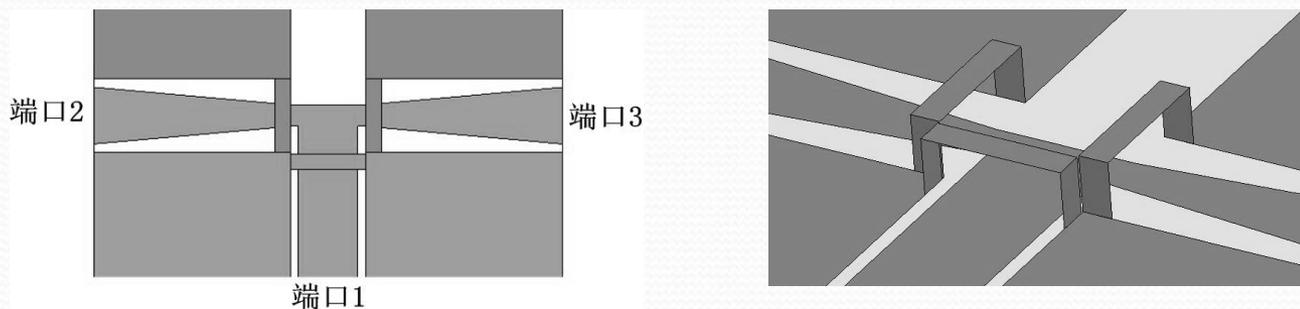


图2 CPW三端口功分器的间接搭接

间接搭接的连接电阻等于搭接条两端的连接电阻之和与搭接条电阻相加。**搭接条在高频时呈现很大的阻抗。所有高频时多采用直接搭接**；设备需要移动或者抗机械冲击时，需要用间接搭接。

熔接、焊接、锻造、铆接、栓接等方法都可以实现两金属间的裸面接触。搭接前需要对搭接体表面进行**净化处理**，有时还在搭接体表面镀银或金来覆盖一层良导电层。



§ 7.2 搭接的有效性

在直流情况下，我们只关心搭接的**直流电阻**。然而，随着频率的增大，集肤效应使这一电阻变大。同时，搭接处呈现的自感，搭接面之间存在的电容都会对搭接的有效性产生影响。因此，**射频段搭接的有效性(Bonding Effectiveness)不完全取决于其直流电阻**。当搭接长度 l 远小于波长，即 $l \ll \lambda$ 时，搭接的高频等效电路如图3所示。

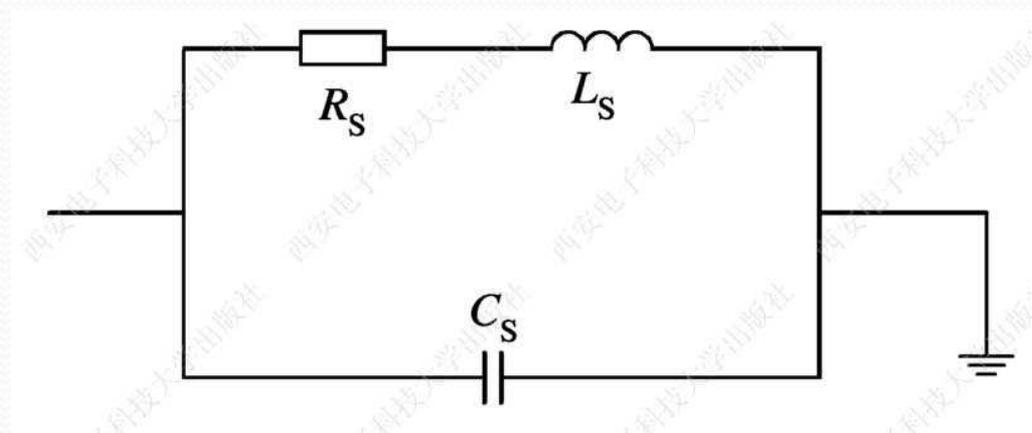


图3 搭接的高频等效电路

- 搭接电阻的值取决于搭接条的电阻率、半径和集肤深度，即

$$R_s = \frac{\rho l}{2\pi a \delta} \quad (12-1)$$

式中： ρ 为电阻率($\Omega \cdot m$)； a 为半径(m)； δ 为集肤深度(m)； l 为长度(m)。

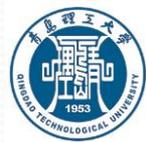
- 搭接条的电感 L_s 是搭接条物理结构的函数，
- 电容 C_s 是搭接面的面积及搭接面间距的函数。
- 以分贝为电位，搭接的有效性能够采用有搭接条与无搭接条时设备外壳上的感应电压的差来表示，它可能是负值。
- 搭接条的谐振频率是搭接有效性**最坏**时的频率。

- 通常用搭接条的直流电阻表示搭接质量。
- 如某些军事规范要求直流搭接电阻小于 0.1Ω ，以预防冲击危害。MIL-B-5087-B要求直流搭接电阻小于 $2.5\text{ m}\Omega$ 。在有闪电、爆炸、火灾危害倾向的区域，如果电源线对地短路，允许的电阻值取决于最大的故障电流。如果直流电阻大约为 $0.25\sim 2.5\text{ m}\Omega$ ，通常就能实现良好的射频搭接。
- 搭接直流电阻的基本表达式为

$$R_{\text{DC}} = \frac{\rho l}{A} \quad (12-2)$$

A 是搭接条的横截面面积(m^2)。

- 搭接条的射频电阻远大于直流电阻。



实例1：比较频率1 MHz时直径为1.29 mm的导线的射频电阻与其直流电阻。

【解】 设导线的电阻率 $\rho = 1.724 \Omega \cdot \text{m}$ 。当频率 $f = 1 \text{ MHz}$ 时，其集肤深度 $\delta = (2\rho/\omega\mu)^{1/2} = 6.608 \times 10^{-5} \text{ m}$ 。代入公式(12-1)，可得射频电阻：

$$R_s = \frac{\rho l}{2\pi a\delta} = 6.433 \times 10^{-2} l \quad (\Omega)$$

而导线的直流电阻为

$$R_{\text{DC}} = \frac{\rho l}{A} = 1.317 \times 10^{-2} l \quad (\Omega)$$

可见，1 MHz时直径为1.29 mm的导线的射频电阻约为其直流电阻的5倍。



搭接的有效性

许多接头的重要特性是由于它们具有携带突发的大故障电流的能力。在螺栓用于实现搭接的地方，对于100A的电流，螺栓的直径至少为0.65 cm；对于200 A的电流，螺栓的直径至少为1.0 cm。电动机的启动电流通常可达几百安培，如果搭接点的电流容量很小，那么当大电流通过此搭接点时，该点将发热而成为一个“热点”。严重时该点可达到白炽的程度，使附近金属熔化，甚至引燃附近的易燃气体而造成故障。因此，在搭接时必须考虑搭接点的电流量。图4给出对应不同故障电流时，搭接电阻的最大允许值及可能引燃易爆气体的电阻量级。

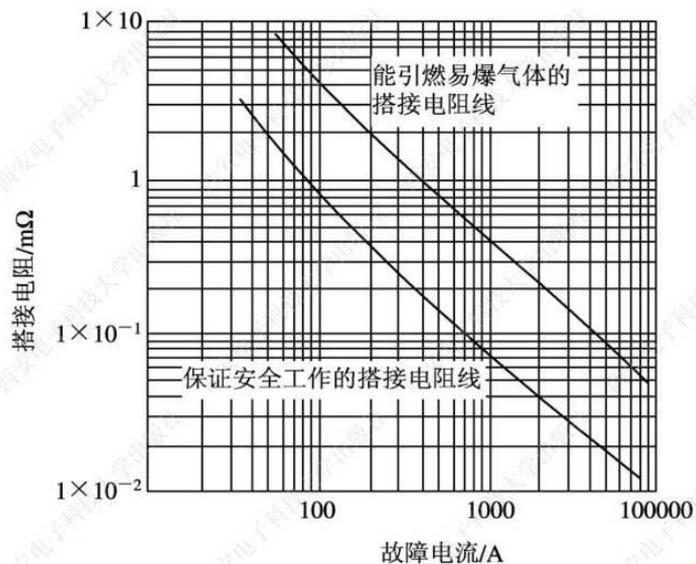


图4 对于设备与结构搭接，故障电流与最大允许电阻的关系

接头自身的感抗是感性的。 非磁性材料圆横截面的直搭接条 (Straight Bonding Strap) 的电感表示如下：

$$L_s = 0.002l \left[2.303 \lg \left(\frac{4l}{d} \right) - 0.75 \right] (\mu\text{H}) \quad (12-3)$$

式中： l 为搭接条长度(cm)； d 为导线直径(cm)。

在低频情况下，矩形横截面直搭接条 (Straight Rectangular Bar) 的电感 (设搭接条的集肤深度远大于搭接条的厚度，即 $\delta \gg c$) 为

$$L_s = 0.002l \left(2.303 \lg \frac{2l}{b+c} + 0.5 + 0.2235 \frac{b+c}{l} \right) (\mu\text{H}) \quad (12-4)$$

式中： b 为搭接条的宽度(cm)； c 为搭接条的厚度(cm)； l 为搭接条的长度(cm)。对于接头长度接近 $\lambda/4$ 的搭接条，接头起传输线的作用，驻波 (Standing Waves) 存在于接头上。

为了接头的阻抗最小化，通常采用减小设备外壳到地的间距，或者减小搭接条的长度与宽度的比，以尽可能使搭接条的电容与电感比值高。搭接条的长度最好不要超过其宽度的5倍。

在大多数情况下，**搭接电感不要超过 $0.025\mu\text{H}$ 。**



§ 7.3 常见电感计算

在第九讲中已指出**高频外电感远大于内电感**，**工程计算时可以忽略内电感**，本节讨论几种常见模型外电感计算的电磁场方法。

● 圆柱导线外电感计算

设有一段 AB 圆柱导线，长为 l ，半径为 ρ ，假定穿过导线的电流是均匀的单位电流。

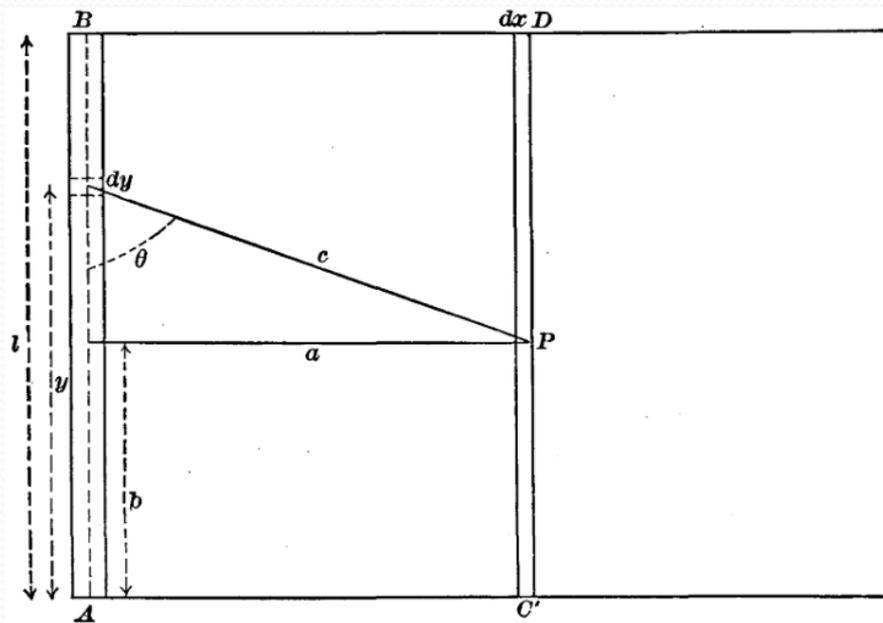


图5 柱形导线积分示意图

依据毕奥萨伐定律

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Id\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} \quad (12-5)$$

则P点垂直于纸面的磁场强度为

$$\frac{\mu_0}{4\pi} i \frac{dy}{c^2} \sin\theta = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{iady}{\left[a^2 + (y-b)^2\right]^{\frac{3}{2}}} \quad (12-6)$$

对整段导体进行积($y = 0 \sim l$)

$$H = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \int_0^l \frac{iady}{\left[a^2 + (y-b)^2\right]^{\frac{3}{2}}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \left(\frac{l-b}{a\sqrt{a^2 + (l-b)^2}} + \frac{b}{a\sqrt{a^2 + b^2}} \right) \quad (12-7)$$

此处使用了高数中基本的积分公式

$$\int \frac{dx}{\sqrt{(x^2 + a^2)^3}} = \frac{x}{a^2 \sqrt{(x^2 + a^2)}} + c \quad (12-8)$$



(12-7)为P点的总磁场。假设P点处有流通单位电流的导体，假设其为试探导线（长为 l ），及其电流不影响原磁场，试探导线上力微元为 $\vec{F} = \mu_0 I d\vec{l} \times \vec{H}$ ，当试探导线距离圆导线任意距离 a 的位置，在磁力作用下移动 dx 的距离，磁场力的做功微元为：

$$\begin{aligned} dN &= \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{dx}{a} \int_0^l \left[\frac{l-b}{\sqrt{a^2 + (l-b)^2}} + \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right] db \\ &= \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{2dx}{a} \left[\sqrt{a^2 + l^2} - a \right] \end{aligned} \quad (12-9)$$

此处使用了积分公式

$$\int \frac{x}{\sqrt{x^2 + a^2}} dx = \sqrt{x^2 + a^2} + c \quad (12-10)$$

从 ρ 到 ∞ ，源导线所做总功为

$$N = \frac{\mu_0}{2\pi} \int_{\rho}^{\infty} \left[\frac{\sqrt{x^2 + l^2}}{x} - 1 \right] dx = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\sqrt{x^2 + l^2} - x - l \ln \frac{l + \sqrt{x^2 + l^2}}{x} \right]_{\rho}^{\infty} \quad (12-11)$$



即

$$N = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[l \ln \frac{l + \sqrt{l^2 + \rho^2}}{\rho} - \sqrt{l^2 + \rho^2} + \rho \right] \quad (12-12)$$
$$\approx \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left[\ln \frac{2l}{\rho} - 1 \right]$$

此处用到了积分式

$$\int \frac{\sqrt{x^2 + a^2}}{x} dx = \sqrt{x^2 + a^2} + a \ln \frac{\sqrt{x^2 + a^2} - a}{|x|} + c \quad (12-13)$$

已知电流、磁通量和总功之间的关系为

$$N = i \Delta \Phi \quad (12-14)$$

此处 $\Delta \Phi$ 为源导线外整个空间的磁通量，由 $\Delta \Phi = iL$ ，可得外电感

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[l \ln \frac{l + \sqrt{l^2 + \rho^2}}{\rho} - \sqrt{l^2 + \rho^2} + \rho \right] \quad (12-15)$$

● 平行圆柱导线的外电感计算

将前面计算单圆柱导线外电感积分的积分域修改为积分从 d 到 ∞ ,
可得互电感公式为

$$M = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[l \ln \frac{l + \sqrt{l^2 + d^2}}{d} - \sqrt{l^2 + d^2} + d \right]$$
$$\approx 2l \left[\ln \frac{2l}{d} - 1 + \frac{d}{l} \right] \quad (12-16)$$

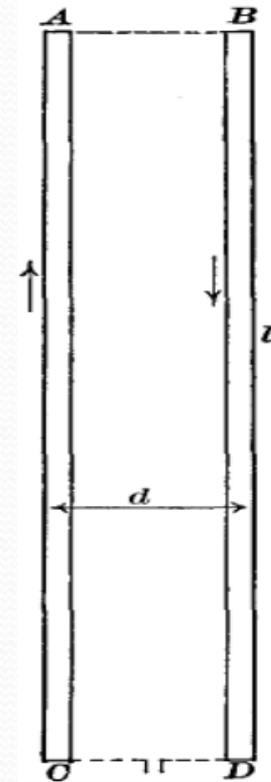


图6 平行圆柱导线外电感计算

●矩形导线的外电感计算

对于矩形导线的外电感，可将矩形结构等效为双导线结构，为保证计算精度，(12-16)中的导线间距离需要修正为矩形体的几何平均距离 R ，根据文献[1]有

$$R = 0.2235(w+t) \quad (12-17)$$

其中 w 为导体带的宽度， t 为导体带的厚度。

计及

$$\ln\left(\frac{1}{0.2235}\right) \approx 1.500$$

可得导体带的外电感为

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left[\ln \frac{2l}{w+t} + 0.5 + \frac{0.2235(w+t)}{l} \right] \quad (12-18)$$



●螺线管的外电感计算

根据电磁场理论可知，对于半径为 a ，载流为 I 的细圆环其轴线上一点产生的磁感应强度为

$$\vec{B} = \hat{a}_z \frac{\mu_0 I a^2}{2(a^2 + z^2)} \quad (12-18)$$

若长直螺线管由如上的电流环密绕而成，则其轴线上任意点的磁感应强度为

$$B = \frac{\mu_0 I n}{2} (\cos\beta_2 - \cos\beta_1) \quad (12-19)$$

其中 $n=N/l$ ， N 为总的线圈匝数， l 为螺线管总长度， n 为单位长度上的线圈匝数，则细长螺线管的电感为

$$L = \frac{\pi a^2 \mu_0 N^2}{l} \quad (12-20)$$