



第2章

避错技术之电磁兼容设计

如第1章所述，避错技术是防卫系统故障的第一道防线，以防止物理失效。随着电子信息技术的飞速发展及各类电气、电子、信息设备的日益广泛应用，人类生存、活动空间中存在着越来越复杂的电磁场，充溢着越来越大的电磁能量。据专家预测，空间电磁能量将以每年7%~14%的速度增长。这必将给空间环境带来越来越严重的电磁污染，对人类的生存、活动和各种仪器设备的工作产生越来越重大的影响。那么，就计算机系统而言，我们应如何防卫电磁污染对其的影响呢？为此，本章将介绍计算机系统中广泛使用的一种避错技术——电磁兼容设计，它的目的，是使系统在复杂的电磁环境中能正常工作，同时也不影响电磁环境中其他任何系统的正常工作。

本章内容，首先介绍电磁干扰形成三要素与电磁干扰效应等电磁兼容基本概念及其设计要点；然后，相继介绍屏蔽、滤波、搭接/接地三种基本的电磁兼容技术。

2.1 电磁兼容概述

2.1.1 电磁兼容与电磁兼容性

所谓兼容，通常指的是处于同一环境、状态中的万事万物能够和谐共存，互不伤害。电磁兼容则是针对电磁环境而言的。按我国军用标准 GJB72—85 给出的定义，电磁兼容系指设备（分系统、系统）在共同的电磁环境中能一起执行各自功能的共存状态。即该设备不会由于受到处于同一电磁环境中的其他设备的电磁发射而导致或遭受不允许的降级，它也不会使同一电磁环境中其他设备（分系统、系统）因受其电磁发射而导致或遭受不允许的降级。这就是说，处于同一电磁环境中的所有电子设备和系统，均能按照设计的功能指标要求满意地工作，互不产生不允许的干扰，就认为它们是电磁兼容的；否则，就是电磁不兼容。从电磁兼容的观点出发，在设计电子设备、系统时，除按要求进行功能设计外，还必须基于设备、系统所在的电磁环境进行电磁兼容设计，一方面使它具有规定的抗电磁干扰能力，另一方面使它不产生超过限值的电磁干扰。

电磁兼容性指的是电子设备、系统在规定的电磁环境中，按照设计要求而工作的能力，即电磁兼容能力。它表征的是共存于同一电磁环境中的设备、系统间互相兼容的程度好坏，是设备、系统的一种重要的技术性能。

在分析中，通常把系统内电磁兼容性和系统间电磁兼容性区分开来。前者指的是给定系统内部各分系统、设备及部件相互之间的电磁兼容程度，后者则指的是给定系统与其所在电磁环境中的其他系统之间的电磁兼容程度。

从上述电磁兼容性的观点出发，电子设备、系统（分系统）可分为兼容、不兼容和临界兼容三种状态，并用电磁干扰裕量 (M_I) 来定量衡量其兼容性能。电磁干扰裕量（用分贝表示）定义为：

$$M_I = I - S \text{ (dB)} \quad (2.1)$$

式 (2.1) 中， I 为干扰电平， S 为敏感度门限电平，单位均为 dB。当 $M_I > 0$ 时，表示设备或系统处于不兼容状态； $M_I < 0$ 时，表示设备或系统处于兼容状态； $M_I = 0$ 时，表示设备或系统处于临界兼容状态。 $|M_I|$ 越大，说明兼容性越好或不兼容问题越严重。

2.1.2 与电磁兼容有关的常用术语

电磁兼容作为一个新的学科领域，必然要统一定义一系列名词术语，并且作为电磁兼容标准的重要内容之一，以保证该领域中叙述、论证问题的统一性和设计、测量结果的可比性。遗憾的是，各国际标准化组织以及各国制定的相应标准中，对同一名词术语的定义也不完全相同。本书主要根据我国军用标准《电磁干扰与电磁兼容名词术语》(GJB72—85)，列出一部分较常用名词术语供读者参考使用。

1. 有关噪声与干扰方面的术语

- (1) 电磁噪声 (Electromagnetic noise) ——与任何信号都无关的一种电磁现象。通常是脉动和随机的，但也可以是周期性的。
- (2) 自然噪声 (Natural noise) ——由自然电磁现象产生的电磁噪声。
- (3) 人为噪声 (Man-made noise) ——由机电或其他人工装置产生的电磁噪声。

(4) 无线电噪声 (Radio noise) ——射频频段的电磁噪声, 即具有无线电频率分量的电磁噪声。

(5) 电磁干扰 (Electromagnetic interference) ——任何能中断、阻碍、降低或限制通信电子设备有效性能的电磁能力。

(6) 干扰源 (Interference source) ——任何产生电磁干扰的元件、器件、设备、分系统、系统或自然现象。

(7) 工业干扰 (Industrial interference) ——由输电线、电网以及各种电气或电子设备工作时引起的电磁干扰。

(8) 宇宙干扰 (Cosmic interference) ——由银河系 (包括太阳) 的电磁辐射引起的电磁干扰。

(9) 天电干扰 (Atmospheric interference) ——由大气中发生的各种自然现象所产生的无线电噪声引起的电磁干扰。

(10) 辐射干扰 (Radiated interference) ——由任何部件、天线、电缆或连接线辐射的电磁干扰。

(11) 传导干扰 (Conducted interference) ——沿着导体传输的电磁干扰。

(12) 宽带干扰 (Broadband interference) ——一种能量频谱分布相当宽的不希望有的发射。当测量接收机在 ± 2 个脉冲带宽内调谐时, 它对接收机输出响应的影响不大于 3dB。

(13) 窄带干扰 (Narrowband interference) ——一种主要能量频谱落在测量接收机通带内的不希望有的发射。

(14) 电磁脉冲 (Electromagnetic pulse) ——指围绕整个系统 (它犹如一个天线), 具有宽带大功率效应的脉冲, 例如在核爆炸时就会对系统产生这种影响。

(15) 电磁环境 (Electromagnetic environment) ——设备、分系统或系统在执行规定任务时, 可能遇到的辐射或传导电磁发射电平在不同频率范围内功率和时间的分布。电磁环境有时也可用场强表示。

(16) 电磁环境电平 (Electromagnetic ambient level) ——在规定的试验地点和时间内, 当试验样品尚未通电时, 已存在的辐射和传导的信号与噪声电平。环境电平是由人为和自然电磁能量共同形成的。

(17) 系统内干扰 (Inter-system interferences) ——由本系统内部原因引起的电磁干扰。

(18) 系统间干扰 (Intra-system interferences) ——由其他系统对本系统造成的电磁干扰。

(19) 静电放电 (Electrostatic discharge, ESD) ——具有不同静电电位的物体相互靠近或直接接触时引起电荷转移的现象。

2. 有关发射与接收的术语

(1) 发射 (Emission) ——以辐射或传导形式从源向外发出的电磁能的现象。

(2) 辐射发射 (Radiated emission) ——以电磁波形式通过空间传播的电磁发射。

(3) 传导发射 (Conducted emission) ——沿电源线或信号线传输的电磁发射。

(4) 宽带发射 (Broadband emission) ——带宽大于某一特定测量接收机带宽的发射。

(5) 窄带发射 (Narrowband emission) ——带宽比测量接收机带宽小的发射。

(6) 发射带宽 (Band width of an emission) ——任一外频谱分量的电平都不超过参考电平的某一规定百分比的频带宽度。

(7) 带外发射 (Out of band emission) ——由调制过程引起的紧靠必要带宽的单个或多个带

外频率点上的发射。

(8) 脉冲发射 (Impulse emission) ——由重复频率不超出所用接收机脉冲带宽的脉冲所产生的发射。

(9) 谐波发射 (Harmonic emission) ——发射机发出频率为载波频率整数倍但不是信息信号组成部分的一种电磁辐射。

(10) 寄生发射 (Parasitic emission) ——发射机发出的由电路中不希望有的振荡引起的一种电磁辐射。它既不是信息信号的组成部分，也不是载波的谐波。

(11) 乱真发射 (Spurious emission) ——在必须发射带宽以外的一个或几个频率上的电磁发射。这种发射电平降低时不会影响相应信息的传输。乱真发射包括谐波发射、寄生发射以及互调制的产物，但不包括为传输信息而进行的调制过程在紧靠必须发射带宽附近产生的发射。乱真发射又称杂散发射。

(12) 信噪比 (Singal-to-noise ratio) ——规定条件下测得的有用信号电平与电磁噪声电平之间的比值。

(13) 选择性 (Selectivity) ——接收机分辨给定的有用信号与无用信号的能力或这一能力的度量。

(14) 有效选择性 (Effective selectivity) ——在规定的特殊条件下 (例如接收机输入电路过载时) 的选择性。

(15) 邻频道选择性 (Adjacent channel selectivity) ——用与频道间隔相等的信号间隔所测得的选择性。

(16) 灵敏度降低 (Desensitization) ——因无用信号引起的接收机有用输出的减小。

(17) 交调 (Crossmodulation) ——非线性设备、电网或传播媒介中信号的相互作用所产生的无用信号对有用信号的调制。

(18) 互调 (Intermodulation) ——发生在非线性的器件或传播媒介中的一种现象。由于一个或多个输入信号的频谱分量相互作用，产生出新的分量，其频率等于各输入信号分量频率的整数倍的线性组合。互调可以是由单个非正弦输入信号或多个正弦/非正弦信号作用于同一或不同输入端引起的。

(19) 中频抑制比 (Intermediate frequency rejection ratio) ——接收机上使用的任一中频频率上的规定信号电平与产生同样输出功率的有用信号电平之比。

(20) 镜频抑制比 (Image rejection ratio) ——接收机镜频频率上的规定信号电平与产生同样输出功率的调谐频率的有用信号电平之比。

3. 有关干扰控制与电磁兼容性能方面的术语

(1) 干扰抑制 (Interference suppression) ——通过滤波、搭接、屏蔽和接地或这些技术的任意组合，削弱或消除电磁干扰发射的行为。

(2) 屏蔽 (Screen) ——用来减少交变电磁场向指定区域穿透的措施。

(3) 屏蔽效能 (Shielding effectiveness) ——对给定外来源进行屏蔽时，在某一点上屏蔽加上前后的电磁场强度之比，通常以 dB 表示。

(4) 屏蔽体 (Shield) ——为了阻止或减少电磁能传输而对装置进行封闭或遮蔽的一种阻挡层。它可以是导电的、导磁的或带有非金属吸收材料的。

(5) 电磁敏感性 (Electromagnetic Susceptibility) ——设备、分系统或系统暴露在电磁辐射

下所呈现的不希望有的响应程度。

(6) 降级 (Degradation) ——任何设备、分系统或系统的工作性能偏离预期的指标, 使工作性能出现不希望有的偏差。

(7) 辐射敏感度 (Radiated susceptibility) ——对造成设备降级的辐射干扰场的度量。

(8) 传导敏感度 (Conducted susceptibility) ——当引起设备不希望有的响应或造成其性能降级时, 对在电源、控制或信号引线上的干扰信号电流或电压的度量。

(9) 敏感度门限 (Susceptibility threshold) ——使试验样品呈现最小可辨别的不希望有的响应的信号电平。

(10) 抗扰性电平 (Immunity level) ——装置、设备或系统面临电磁干扰不降低运行性能的最大干扰电平。

(11) 抗扰性限值 (Immunity limit) ——规定的最小抗扰性电平。

(12) 发射电平 (Emission level) ——用规定方法测得的由特定装置、设备或系统发射的某给定干扰电平。

(13) 发射限值 (Emission limit) ——规定的电磁干扰源的最大发射电平。

(14) 电磁兼容电平 (Electromagnetic compatibility level) ——预期加在工作于指定条件的装置、设备或系统上的规定的最大电磁干扰电平。

(15) 抗扰性裕量 (Immunity margin) ——装置、设备或系统的抗扰性限值与电磁兼容电平之间的差值。

(16) 发射裕量 (Emission margin) ——装置、设备或系统的电磁兼容电平与发射限值之间的差值。

(17) 电磁兼容裕量 (Electromagnetic compatibility margin) ——装置、设备或系统的抗扰性电平与干扰源的发射限值之间的差值。

(18) 耦合系数 (Coupling factor) ——给定电路中, 电磁量 (通常是电压或电流) 从一个规定位置耦合到另一个规定位置, 目标位置与源位置相应电磁量之比。

(19) 电磁干扰控制 (Electromagnetic interference control) ——对辐射和传导能量进行控制, 使设备、分系统或系统运行时尽量减小不必要发射的行为。所有辐射和传导的电磁发射不论它们来源于设备、分系统或系统都要进行控制。若在控制敏感度的同时还能成功地控制电磁干扰, 就能实现电磁兼容。

(20) 电磁易损性 (Electromagnetic vulnerability) ——系统在人为的恶劣环境中遭到一定程度的机理性威胁后, 在执行任务时经常出现有限程度降级的一种特性。

(21) 电磁兼容性故障 (Electromagnetic compatibility malfunction) ——由于电磁干扰或敏感性原因, 使系统或有关的分系统、设备失灵, 从而导致使用寿命缩短或系统效能发生不允许的永久性下降等。

2.1.3 电磁干扰形成三要素与电磁干扰效应

电磁干扰的形成必须同时具备以下三个因素:

(1) 电磁干扰源, 指产生电磁干扰的元件、器件、设备、分系统、系统或自然现象。

(2) 敏感设备, 指对电磁干扰发生响应的设备。

(3) 耦合通道, 指把能量从干扰源耦合 (或传播) 到敏感设备上, 并使该设备产生响应的通

路或媒介。

由电磁干扰源发出的电磁能量, 经过某种耦合通道传输至敏感设备, 导致敏感设备出现某种形式的响应并产生效果。这一作用过程及其效果, 称为电磁干扰效应。为了说明电磁干扰源是否对敏感设备造成干扰, 从而产生电磁干扰效应, 通常引入电磁干扰安全系数 S_I , 它定义为敏感度门限电平 S 与出现在关键试验点或信号线上干扰电平 I 之比值, 即

$$S_I = \frac{S}{I} \quad (2.2)$$

当 $S_I < 1$, 即 $S < I$ 时, 表示存在潜在干扰效应; 当 $S_I > 1$, 即 $S > I$ 时, 表示无干扰效应, 电磁兼容; 当 $S_I = 1$, 即 $S = I$ 时, 表示处于临界兼容状态。如果 S 、 I 、 S_I 均用 dB 表示, 则式 (2.2) 可改写为:

$$S_I = S - I \quad (2.3)$$

这样, 当 $S_I < 0$ dB 时表示有潜在干扰, $S_I > 0$ dB 时表示无干扰效应, $S_I = 0$ dB 时表示处于临界状态。式 (2.3) 与前面的式 (2.1) 本质上是一样的, 只不过那里表示的是电磁干扰裕量, 而这里表示的是电磁干扰安全程度。为了避免电磁干扰效应产生, 保证系统和设备的电磁兼容性, 一般应取 $S_I = (3-6)$ dB。若电磁干扰效应十分严重, 设备或系统出现失灵, 甚至引起严重事故, 则说明出现了“电磁兼容性故障”。

2.1.4 电磁兼容的实施

电磁兼容实施的目的是保证系统的电磁兼容性。从总体上看, 电子、电气设备或系统的电磁兼容性实施, 必须采取技术和组织两方面的措施。所谓技术措施, 包括系统工程方法、电路技术方法、设计和工艺方法的总和, 其目的是改善电子、电气设备的性能。采用这些方法是为了降低干扰源产生的干扰电平, 增加干扰在传播途径上的衰减, 降低敏感设备对干扰的敏感度(或提高抗扰度)等等。所谓组织措施, 包括对各设备和系统进行合理的频谱分配、选择设备或系统分布的空间位置, 还包括制定和采用某些限制性规章, 目的在于整顿电子、电气设备的工作, 以便消除非有意干扰。就技术措施而言, 在现代电子技术发展过程中先后出现了三种实施电磁兼容的方法。

1. 问题解决法

问题解决法是先进行设备或系统的研制, 然后根据研制成的设备和系统在联试中出现的电磁干扰问题, 运用各种抑制干扰的技术去逐个解决。这是一种早期普遍采用的方法, 现在依然在实际中被广泛应用。这种方法的弊端和局限性是显然的。系统已经装配好, 要彻底解决电磁干扰问题是困难的, 可能要进行大量的拆卸和修改, 也许还要重新设计。对于大规模集成电路, 可能要严重地损坏其版图, 甚至要作大量返工。这不但会造成人力和物力的浪费, 延长系统研制周期, 而且会使系统性能下降。

2. 按规范设计法

这种方法是按颁布的电磁兼容性标准和规范进行设备和系统设计制造。这种方法可以在一定程度上预防电磁干扰问题的出现, 比用问题解决法更为合理。但由于标准和范围不可能是针对某个设备和系统制定的。因此, 企图解决的问题不一定是真正存在的问题, 只是为了适应规范而已。另外, 规范是建立在电磁兼容实践经验的基础上的, 没有进行电磁干扰的分析和预测, 因而往往导致过量的预防储备, 可能使系统成本增加。

3. 系统设计法

系统设计法是用计算机技术按预测程序针对某个特定系统的设计方案进行电磁兼容性预测和分析。这种方法从设计开始就预测和分析设备或系统的电磁兼容性，并在设备或系统设计、制造、组装和试验过程中不断对其电磁兼容性重新进行预测分析。若预测结果表明存在不兼容问题或存在太大的过量设计，则可修改设计后再进行预测，直到预测结果表明完全合理，才进行硬件生产和系统安装。用这种方法进行系统设计和研制，基本上可以避免一般出现的电磁干扰问题或过量的电磁兼容性设计。系统设计法体现的是一种并行工程、系统工程的先进设计思想和设计理念，是现代电子系统电磁兼容性设计的总趋势。

2.2 电磁兼容设计的主要内容与基本参数

电磁兼容设计一般为系统内和系统间两部分，主要以实现电磁兼容和最佳效费比为出发点，对系统内部和系统之间的电磁兼容性进行分析、预测、控制和评估。

2.2.1 系统内电磁兼容设计

系统内电磁兼容设计通常可归纳为图 2.1 所示的五个方面，即：有源器件选用、布线、接地、屏蔽和滤波。

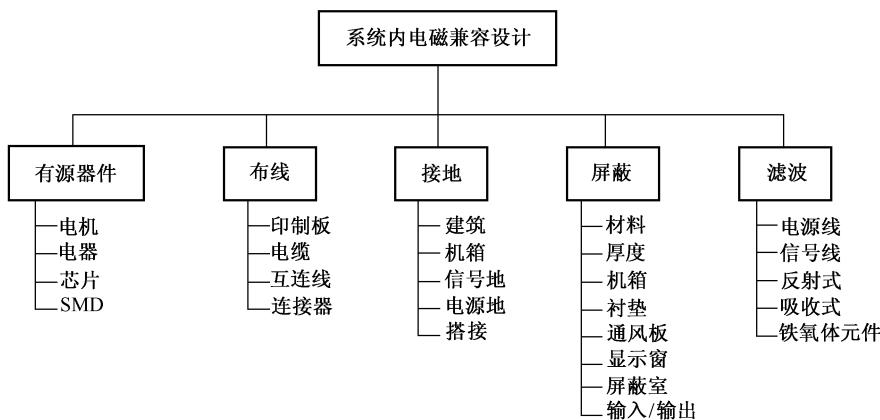


图 2.1 系统内 EMC 设计

2.2.2 系统间电磁干扰控制

1. 有用信号的控制

对有用信号的控制，一般来说，应从两个方面着手，其一，运用行业管理手段来对有用信号进行控制，主要包括：频谱管理和规定发射功率、信号类型（调制和带宽）、天线的空间覆盖范围、方向性和极化、使用时间和地点等；其二，运用先进的设计技术来控制有用信号的非线性效应，减小镜像频率响应、谐波频谱电平以及乱真发射和乱真响应等。

2. 人为干扰的控制

对人为干扰的控制通常主要是按照相关的 EMC 标准来进行控制。

3. 自然干扰的控制

对自然干扰源的控制，主要是在功能设计中来加以考虑的。例如接收机灵敏度指标应按内部噪声和天电噪声来确定，以及采取适当的电磁脉冲和静电放电的防护措施等。

2.2.3 电磁兼容设计的基本参数

对电磁兼容设计的要求和电磁兼容性能的好坏，主要表现在电磁兼容性参数上。必须考虑的基本参数有：

1. 敏感度阈值

敏感度阈值是系统、分系统或设备不能正常工作的干扰临界电平值，是衡量敏感体受电磁干扰的易损性参数，敏感度阈值越低，说明敏感体越容易受干扰。因此，它是进行电磁兼容性设计、决定折衷选择、确定干扰极限值的基本出发点。在保守设计时，敏感度阈值考虑敏感体工作于最恶劣的电磁环境时，在其受干扰最敏感的频率段或频率点上的最小起作用干扰电平；而在概率设计时，敏感度阈值是在一定置信度下，敏感体受电磁干扰电平影响的概率。

2. 敏感度门限电平值

敏感度门限电平值是指敏感设备受电磁干扰所呈现的不希望的响应的最小电平。敏感度门限电平值越大，表明设备的抗干扰能力就越强。因此敏感度门限电平值是进行防护性设计时确定干扰允许值的基本出发点，干扰允许值必须小于能在敏感设备中引起响应的电平值，而且每个干扰允许值应该是在最敏感的频率和最危险的状态下获得的。

3. 电磁干扰值

设备或分系统在电磁环境中感受到的无用信号电平值称为电磁干扰值。电磁干扰值小于敏感度门限值时，设备或分系统能正常工作，但是小于敏感度阈值而大于敏感度门限值时，安全裕度不一定能满足要求。

4. 电磁发射限值

电磁发射限值是允许干扰设备或分系统在工作时给周围环境带来的电磁发射电平值，设计时对干扰源设备或分系统规定电磁发射限值指标是控制电磁干扰源、保护电磁环境、实现电磁环境与设备或分系统兼容工作的有力措施。电磁发射限值包括辐射发射和传导发射，在规范法的设计中，它按标准规定的指标设计。

5. 失效干扰电平

失效干扰电平也称为失效准则，它指系统和设备不允许接受的电磁干扰电平。系统和设备在受到强电磁干扰后将产生性能恶化和失效现象，当不允许的强电磁干扰电平进入系统后，会使接收机电路或元器件发生故障，这种故障的后果可能使系统永久性失效或永久性恶化。因此失效干扰电平是系统和设备所能接受的电磁干扰电平的极限值。

6. 电磁兼容性安全系数

电磁兼容性安全系数也叫电磁干扰安全系数，它是衡量系统、分系统或设备电磁兼容性水平高、低的重要参数，它反映了敏感体实际接收的电磁干扰量低于阈值的程度。

2.3 电磁兼容设计要点

电磁兼容设计所涉及的内容极其广泛，而且，不同的系统在设计方法上也可能完全不一样，因此，目前并没有经典的、包罗万象的设计方法可循。一般认为，可将电磁兼容设计大致分为抑制干扰源的设计、抑制干扰耦合的设计、敏感设备的设计、搭接的设计、接地的设计以及屏蔽设计等六个方面。所以，下面就从这六个方面来介绍做好电磁兼容设计工作所需注意的问题，我们不妨称之为电磁兼容设计的六大要点。

2.3.1 抑制干扰源的设计要点

(1) 减少潜在干扰源的个数。例如，高速逻辑电路、高速时钟电路、视频电路、以及一些含有电接点的电器等都是一些潜在的干扰源。

(2) 恰当地选择工作模式，尽量使电子设备工作在线性区，以最大可能的减少输出谐波分量。例如对于振荡器，尽量少用倍频的方法来产生发射机的载频，以减少发射机的谐波输出；其输出级，在满足输出功率的前提下，尽量采用甲类或乙类工作状态；为了抑制输出级产生载波的各次谐波，输出级最好采用双调谐回路等等。

(3) 对有用的发射要进行功率和频带控制，根据国际无线电规则规定：“所有电台只应发射保证业务令人满意所必需功率”，因此发射功率一定要选择恰当，不是越大越好，否则不仅造成功率浪费而且还要引起有害的干扰。同时发射信息的带宽应尽量接近必需的原信息的带宽，尽量应用窄带技术，以降低带外干扰。

(4) 根据服务区的大小、形状，恰当地选择天线的型式和天线的高度。首先根据服务区的特殊形状要求来设计天线的方向图，以免天线方向图覆盖非工作区而造成干扰；用于点对点通讯的天线，应是方向性强的高增益天线，其旁瓣电平小可降低干扰电平，同时应根据服务区的大小及场强要求来确定天线的架设高度，其高度应以到达服务边界的最小场强正好满足要求为准，不是天线越高越好，更不能不顾服务区的大小抢先占领高山架设天线，以免对邻近区域造成干扰。

(5) 恰当选择电子设备的工作脉冲形状。一般来说，当脉冲上升较慢、持续时间较长时，则产生的电磁干扰小；当脉冲的宽度减小、上升时间缩短时，则脉冲的高频成分增加，频谱宽度增大，将会在很宽的频带内造成干扰。因此，对于一个控制设备，其脉冲的上升时间只需快到能在指定的时间内保证可靠工作即可。

(6) 尽量避免出现电弧放电。对于放电工作开关，应选择触点的闭合形式和适当的工作电平，以尽可能减少所产生的电磁干扰。

2.3.2 抑制干扰耦合的设计要点

(1) 把携带噪声的元件和导线与连接敏感元件的布线隔离起来，把有噪声的元件回线与敏感元件的回线隔离开来，例如把电源线、控制线、高电平线与低电平线隔离，并尽量避免彼此平行。

(2) 使连线尽可能短，以尽量缩短干扰耦合路径的长度，并用粗的屏蔽套以尽量减少导线间的电容耦合。

(3) 要注意布线和结构件的天线效应。电路中的每根导线及印刷电路上的每根金属线，在某种程度上，既可以起发射天线作用又可以起接收天线作用，频率越高这种作用越明显。对于通过

磁场耦合的辐射，低阻抗的环形电路更为显著，因此减小这种干扰耦合的方法应该是增加电路的阻抗。而对于通过电场耦合的辐射，又是高阻抗的直导线较显著，因此为减小干扰耦合，又应减小电路的阻抗。

(4) 通过屏蔽来实现隔离，在源和敏感部件之间进行屏蔽可以明显地减少辐射耦合，当使用实体屏蔽材料来完全包围干扰源和敏感部件时，屏蔽效果最好；使用网状屏蔽或在主要辐射途径上用屏蔽体造成辐射屏障，也能达到良好的屏蔽效果。

2.3.3 敏感设备的设计要点

对于敏感设备，可以采用滤波、整体屏蔽、内部屏蔽、机内走线与电路的隔离、内部电路去耦及结构的合理布局等措施来抑制电磁干扰；在设计中应尽量少用低电平器件，去掉那些不十分需要的敏感部件；敏感设备的灵敏度不必设计的过高，只要满足工作要求即可。

2.3.4 搭接的设计要点

(1) 良好搭接的关键在于金属表面之间的紧密接触。被搭接表面的接触区应该光滑、清洁、没有非导电物质，紧固方法应有足够的压力将搭接处夹紧，以保证即使在机械扭曲、冲击和振动时表面仍然接触良好。

(2) 采用同类金属搭接是最好的，在不同类金属搭接时，特别要注意腐蚀存在的可能，可在其间插入可换的垫片，搭接完成后外面应加一层保护层。

(3) 不要靠焊料来增加机械强度。

(4) 在搭接处应采取防潮和防其他腐蚀的保护措施。

(5) 跨接片只是直接搭接的代用方法，为减小搭接条的阻抗，应使它尽量短，并尽量减小搭接条的长宽比（保证长宽比小于或等于 5），不要使跨接片在电化学序列中低于被搭接件材料。应直接与主结构搭接，而不要通过邻近部件，不要使用自攻丝螺栓或任何其他以螺纹为主的搭接方法。

(6) 要保证直接搭接处或搭接片能够承受所预计的最大电流。

2.3.5 接地的设计要点

(1) 当所考虑的电路或元件尺寸小于 0.05λ 时，使用单点接地；大于 0.15λ 时，采用多点接地；介乎 0.05λ 和 0.15λ 之间时，则应根据接地线的实际配置以及接地电路的传导发射和传导敏感度容限来决定接地方式。对于那些工作频率范围很宽的电路，还要采用混合接地。

(2) 出现地线环路问题时，可采用浮地隔离方法（例如，使用变压器隔离）。

(3) 使所有接地线尽可能短而且尽可能直接连接。

(4) 所设计的接地参考平面应具有较高的电导率，而且要便于维护，以保持良好的导电性能。

(5) 对信号回线、信号屏蔽层回线、电源系统回线以及底板或机壳都要有单独的电路接地系统。所有这些接地回线可以一起连接到单一接地参考点上。

(6) 对那些产生大的突变电流的电路，应有单独的接地系统，或单独的接地回线，以减小对其他电路的瞬态干扰。

(7) 低电平电路的接地线要与所有其他接地线隔离开来。

(8) 使用平衡差分电路，以尽量减小接地电路干扰的影响。

(9) 用双绞合线作电源的母线和它的回线是最好的。而且要避免把信号线和电源线捆成一束或相互靠得很近。在信号线与电源线必须交叉的地方, 要使导线互相垂直。

(10) 对于工作频率 1MHz 以下的电路, 使用单点接地的紧绞合线 (是否需要屏蔽视实际情况而定) 是降低设备敏感度最好的办法。

(11) 端接电缆屏蔽时, 避免使用屏蔽层辫状引出线。

(12) 需要用同轴电缆传输信号时, 要通过屏蔽层提供信号回路。低频电路可在信号源端单点接地, 高频电路则采用多点接地。

(13) 低电平传输线要多层屏蔽, 各屏蔽层用单点接地较好。

2.3.6 屏蔽设计要点

(1) 对于良好导体如铜、铝和镁等应该用于高频的电场屏蔽, 以获得最高的反射损耗。

(2) 磁性材料如铁、镍铁、高导磁率合金等应该用于低频磁场的屏蔽, 以获得最高的透入损耗 (吸收损耗)。

(3) 对电场屏蔽的屏蔽体其厚度只要能保证屏蔽体本身有足够的强度就可以了。一般电屏蔽体对各种频率的电场均具有良好的电屏蔽作用。

(4) 对于薄层屏蔽, 当材料的厚度小于 $1/4$ 波长时, 其屏蔽效果为一常数。当厚度超过 $1/4$ 波长时, 屏蔽效果随厚度的增加而增加。

(5) 多层屏蔽 (对于屏蔽壳体或电缆) 能够提供高的屏蔽效果可展宽其屏蔽的频率范围。但是, 在多种可供选择的电磁兼容方式中, 是否采用多层屏蔽, 主要由它的成本来决定。此外, 电缆线采用双层编织线屏蔽后, 其柔软性将要降低, 这也是是否选用的一个考虑因素。

(6) 为保持屏蔽体的屏蔽完整性, 在设计时应该认真考虑它上面可能存在的所有开口和不连续处的问题, 以保证屏蔽效果受到的影响最小。同时在材料的选择上亦要特别注意, 不仅应从屏蔽的观点考虑, 还应从电化学腐蚀的观点来考虑确定最合适材料。

(7) 当系统设计的其他方面条件允许时, 采用连续对焊或互搭对焊的焊接方法是最好的。应尽可能使两金属板的结合面有更多部分紧密接触。

(8) 接缝的配合表面, 在接合前必须净化, 将其表层的非导电物质彻底清除干净, 除非在接合过程中, 能够可靠地和有效地切除表面涂覆层。表面涂覆应满足电磁兼容规范要求。

(9) 导电衬垫、指形接触簧片、波导衰减器、金属丝网、百叶窗和导电玻璃等是主要的可用于保持屏蔽壳体屏蔽效果的元件和结构。在具体情况下, 究竟采用哪种方法, 涉及的因素很多。除了屏蔽能力本身的要求外, 还涉及到从空间利用率到成本, 从通风要求到可见度要求等许多问题, 在设计选用时必须认真考虑。

(10) 电缆屏蔽的一个关键性因素是屏蔽覆盖率。如军用覆盖率一般不低于 85%, 在驾驶舱内则要求不低于 94%。电缆屏蔽层应该沿边缘周界与连接器外壳尾部搭拉, 以保持接合面处屏蔽效果。

总之, 屏蔽是降低设备电磁干扰的一种可行的办法, 需要与屏蔽一起考虑的或者可作为它的代替方法的是滤波、接地和搭接。如果接地和滤波都很好, 就可以减小对屏蔽的要求, 甚至可以不需要屏蔽。

2.4 屏蔽技术

2.4.1 屏蔽与屏蔽分类

屏蔽是以某种导电材料或导磁材料制成的屏蔽体将需要防护的区域封闭起来，形成电磁隔离，达到阻隔或减少电磁能传播目的的一种技术，是抑制电磁干扰的有效措施之一。从电磁场理论的观点看，可以这样来理解屏蔽：若有两个电磁场，在其分界面上有一物体使它们可看作是相互独立、互不影响的，则该分界面就被称为屏蔽，而分界面上的物体则被称为屏蔽体。

屏蔽抑制的是以场的形式沿空间传播的干扰，它既可以限制内部辐射的电磁能量泄漏出该内部区域，又可以防止外来的辐射干扰进入某一区域。

屏蔽的形式可以是隔板、金属盒，以及电缆和接口屏蔽等。屏蔽的类型有实体的、非实体的（如屏板）、编织线的（如在屏蔽电缆中使用的）等多种。

屏蔽的作用原理是利用屏蔽体对电磁能量的反射、吸收和引导作用。而这些作用是与屏蔽结构表面上和屏蔽体内感生的电荷、电流与极化现象密切相关的。

屏蔽有多种不同的分类方法。

按屏蔽对象的不同，屏蔽可分为主动屏蔽和被动屏蔽。主动屏蔽是屏蔽干扰源。由于干扰源与屏蔽体一般相距很近，所要屏蔽的电磁辐射强度大，所以屏蔽体必须良好接地。被动屏蔽是屏蔽敏感器。被动屏蔽时不一定将屏蔽体接地，但考虑到电容性耦合等因素，一般也以接地为好。

按屏蔽源性质或屏蔽原理的不同，屏蔽可分为电屏蔽、磁屏蔽和电磁屏蔽。电屏蔽用于减少设备/电路/组件间的电场感应，防止电场的影响。磁屏蔽用于抑制设备/电路/组件的磁场耦合，防止磁场的影响。电磁屏蔽则用于同时防止电场和磁场的影响，通常主要用于防止高频电磁场影响。下节将简单阐述这几种屏蔽的工作原理。

2.4.2 电屏蔽原理

电屏蔽利用与大地相连接的导电性良好的金属容器，使导体内部的电力线不外传，外部的电力线不内传，起到隔离内外电场的作用。

图 2.2 给出的是主动屏蔽的电屏蔽原理。图 2.2 (a) 表示空间孤立存在的导体 A 上带有电荷 $+Q$ 时的电力线分布情况，这时电荷 $-Q$ 可认为是位于无穷远处。图 (b) 表示用导体容器 B 将导体 A 包围起来后的电力线分布情况，这时在导体 B 的内侧面感应出电荷 $-Q$ ，外侧面感应出电荷 $+Q$ ，导体 B 内部不出现电力线，即电力线在导体 B 处中断。这时，若把导体 A 和 B 看作一个整体，其空间电力线分布情况与图 2.2 (a) 没什么分别，只是其电力线始于导体 B 的外侧面，而图 2.2 (b) 中则始于导体 A。可见，单用屏蔽体（导体 B）将带电导体（导体 A）包围起来，并不能起到屏蔽的作用。

图 2.2 (c) 所示的是将屏蔽体 B 接大地时的电力线分布情况。这时，导体 B 外侧面的电荷 $+Q$ 被引到大地，因此导体 B 与大地等电位，其指向无穷远处的外部电力线消失。也就是说，由于导体 A 产生的电力线被封闭在导体 B 所包围的内侧空间，导体 B 真正起到了电屏蔽作用。

要说明的是，上面从图 2.2 (b) 转向图 2.2 (c) 的过渡过程中，在导体 B 和接地线之间会有电流流过。若导体 A 带的是静电荷，则图 2.2 (c) 表示的是过渡过程结束，达到稳定状态后的屏

蔽效果；若导体 A 带的是随时间变化的电荷，则对应于电荷的变化，接地线中必定有电流流过。另外，由于导体 B 和接地线均不可能是理想导体，在 B 和外侧面不可避免地还会有残留电荷，使 B 的外部空间不可避免地还会出现残留的静电场和感应电磁场，因此，实际上不可能达到完全的屏蔽。

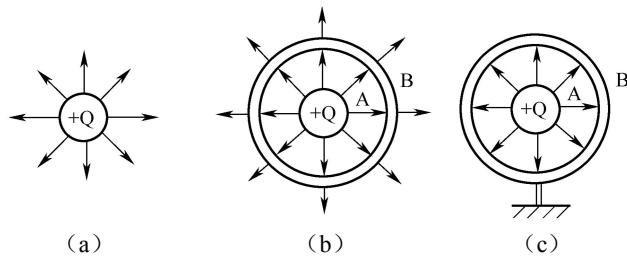


图 2.2 主动电屏蔽原理

图 2.3 进一步给出了被动屏蔽的电屏蔽原理。当屏蔽体外有电场干扰时，由于屏蔽体内的导体为等电位体，屏蔽体内部空间不会出现电力线（即不存在电场），使屏蔽体外的电力线全部终止于屏蔽体上，从而实现了对外界电场的屏蔽作用。这时，在外部电力线的终端将有面电荷出现于屏蔽体的外侧面，并在两侧出现等量的正、负电荷。当屏蔽体是完全封闭的时，不管它是否接地，屏蔽体内部的电场均为零，所以从理论上说，被动屏蔽的屏蔽体可不必接地。但实际上，屏蔽体不可能完全封闭，其内部空间的被屏蔽体同外部不可能完全隔绝，因此，如果不接地，或多或少总会有外部电力线侵入，造成直接或间接的静电耦合。为防止可能存在的电力线泄漏，确保屏蔽效能，被动屏蔽时最好也能将屏蔽体接地。

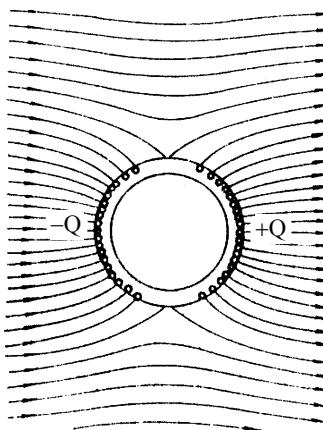


图 2.3 被动电屏蔽原理

由于干扰源与被干扰对象（敏感器）之间的电场感应可用二者之间的分布电容耦合来等效描述，所以可以用电路理论来对电屏蔽原理进行分析。以被动电屏蔽为例，图 2.4 给出了相应的原理等效电路图。图 2.4 (a) 表示干扰源与敏感器之间未加屏蔽时的等效电路，其中 V_s 为干扰源电压， C_R 为敏感器对地分布电容， C_{SR} 为干扰源与敏感器间的耦合分布电容。

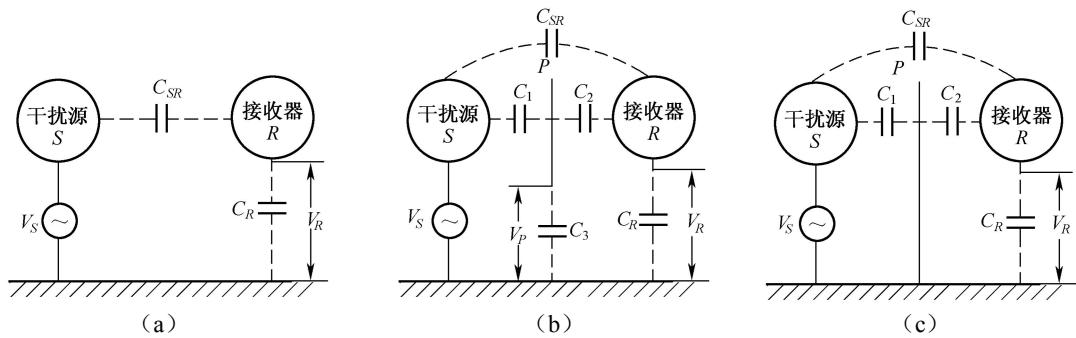


图 2.4 电屏蔽等效电路图

不难看出, 由干扰源耦合到敏感器输出端的感应电压为:

$$V_i = \frac{C_{SR}}{C_{SR} + C_R} \cdot V_S \quad (2.4)$$

由式 (2.4) 可看出, 要减少感应电压 V_i , 必须尽可能减小 C_{SR} 和增大 C_R , 为此可把敏感器中的敏感组件及导线尽可能贴近底板, 而把敏感器和干扰源间的距离尽可能拉大。当采取这样一些措施仍满足不了要求时, 则要采用屏蔽技术。

图 2.4 (b) 表示的是干扰源与敏感器之间加入屏蔽体 P, 但 P 未接地时的等效电路。其中 C_1 、 C_2 分别为干扰源和敏感器与屏蔽体之间的分布电容, C_3 为屏蔽体对地分布电容, C_{SR} 为加屏蔽体后干扰源与敏感器间的剩余耦合电容。因 C_{SR} 很小, 故分析计算时可不予考虑, 这样, 便不难求得屏蔽体 P 和敏感器输入端被感应的电压 V_p 和 V_{ip} 分别为:

$$V_p = \frac{C_1}{C_1 + C_3 + C_2 // C_R} \cdot V_S = \frac{C_1}{C_1 + C_3 + C_2 C_R / (C_2 + C_R)} \cdot V_S \quad (2.5)$$

$$V_{ip} = \frac{C_2}{C_2 + C_R} \cdot V_p = \frac{C_1 C_2}{(C_2 + C_R)[C_1 + C_3 + C_2 C_R / (C_2 + C_R)]} \cdot V_S \quad (2.6)$$

由式 (2.6) 可看出, 若 $C_1 \gg C_3$ 且 $C_1 \gg C_2 // C_R$, 则有

$$V_{ip} \approx \frac{C_2}{C_2 + C_R} \cdot V_S \quad (2.7)$$

比较式 (2.4) 和式 (2.7), 由于 $C_2 > C_{SR}$ (因为屏蔽体 P 比干扰源更靠近敏感器, 且屏蔽体面积比干扰源面积大), 故 $V_{ip} > V_i$ 。这说明加了屏蔽体却不接地时, 不但未起到屏蔽作用, 反而增加了干扰效应。

图 2.4 (c) 表示的是将屏蔽体 P 良好接地时的等效电路, 这时相当于图 (b) 中的 C_3 等于无穷大。由式 (2.6) 可看出, 这时 $V_{ip} \approx 0$, 说明良好接地的屏蔽体起到了良好的屏蔽作用。当然, 实际上屏蔽体接地再好也不可能使接地的阻抗为 0, 且当屏蔽体是通过导线接地时, 接地阻抗还与频率有关, 使时变电场产生的电流流过接地线时, 必然在接地阻抗上产生电压降, 从而使屏蔽体上的感应电压 V_p 不可能为 0。另外, 屏蔽体的尺寸也不可能无穷大, 干扰源与敏感器之间必然存在剩余电容 C_{SR} , 使干扰电压 V_S 通过它或多或少会耦合到敏感器输入端, 而产生 V_{ip} 。由于这两个方面原因, 实际的屏蔽效能不可能完全像图 2.4 (c) 所示的这样理想。

根据上述电屏蔽原理, 实际工程中布线时, 若在两导线 (导线 A 和导线 B) 之间敷设一条接地导线, 将使导线 A 与导线 B 之间的电容性耦合明显削弱; 若将具有电容性耦合的两个导体在保

持间隔不变的条件下靠近大地，其间耦合也会减弱。这都相当于在一定程度上起到了屏蔽的作用。

2.4.3 磁屏蔽原理

磁屏蔽是用于抑制磁场耦合，实现磁隔离的技术措施。我们知道，任何载流导线或线圈周围都存在磁场。若导线或线圈中的电流是时变的，则磁场也是时变的，处在时变磁场中的其他导线或线圈就会受到干扰。为防止这种干扰，最好的办法是采用磁屏蔽。磁屏蔽包括低频磁屏蔽和高频磁屏蔽，两者的屏蔽原理大不相同。

1. 低频磁屏蔽原理

低频磁屏蔽，是利用铁磁性材料的导磁率高、磁阻小、对磁场有分路作用的特性来实现屏蔽，达到保护磁敏器件不受低频磁场的干扰，或防止磁场干扰源对其外界环境产生磁漏影响的目的。图 2.5 给出的是低频磁屏蔽原理示意图。载流线圈被导磁材料做成的屏蔽体包围后，由于铁磁材料的磁阻比空气磁阻小得多（通常小数十倍至几千倍），磁力线绝大部分都集中于屏蔽体中通过，从而使低频电流线圈产生的磁场基本上不越出屏蔽层。同理，为了保护磁敏器件不受外界低频磁场的干扰，可把该器件置于用铁磁材料制成的屏蔽罩内，使磁力线主要通过磁阻小的屏蔽层，而基本上不进入屏蔽罩内的器件中。

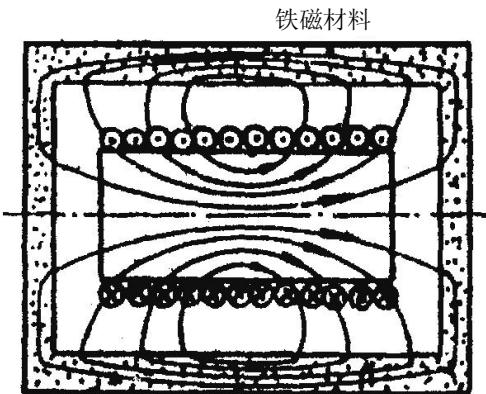


图 2.5 低频磁屏蔽原理示意

同理，为了保护磁敏器件不受外界低频磁场的干扰，可把该器件置于用铁磁材料制成的屏蔽罩内，使磁力线主要通过磁阻小的屏蔽层，而基本上不进入屏蔽罩内的器件中。要说明的是，用高导磁率铁磁材料做的屏蔽罩，在垂直于磁力线的方向上不应开口或留有缝隙，否则会切断磁力线，使磁阻增大，磁屏蔽效果变差。关于低频磁屏蔽的定量分析计算，既可用磁路分析法，也可用场分析法。分析时既与屏蔽体材料有关，也与屏蔽体结构有关。有兴趣的读者可参考相关文献。

2. 高频磁屏蔽原理

高频磁屏蔽是利用良导电材料做成的屏蔽体在高频干扰磁场作用下会产生涡流，涡流产生的反磁场对高频干扰磁场有抵消/抑制作用的原理，来达到屏蔽的效果。图 2.6 给出的是高频磁屏蔽原理示意图。中间为一个高频干扰源，在其 $r > \frac{\lambda}{2\pi}$ （ r 为辐射（干扰）源到观测点的距离； λ 为辐射波波长）处存在辐射磁场；为阻止它的传播，外面罩了一个金属屏蔽盒。高频干扰磁场在穿过屏蔽层(H_p)的同时，将在屏蔽体中产生高频感应涡流 i_e ，涡流又产生方向与 H_p 相反的磁场 H_e ，

使屏蔽盒外面的磁场相互削弱和抵消, 从而起到了磁屏蔽的作用。注意, 这时在屏蔽盒体内壁附近, 反而因 H_e 与原高频磁场的方向相同, 而使总磁场得到了加强。这恰恰说明了, 内部高频干扰源所产生的磁场, 被屏蔽盒阻隔在其内部空间, 而不对其外部空间产生影响。同样, 外界磁场也将被屏蔽盒的涡流反磁场排斥而不能进入屏蔽盒内, 从而达到对高频磁场屏蔽的目的。

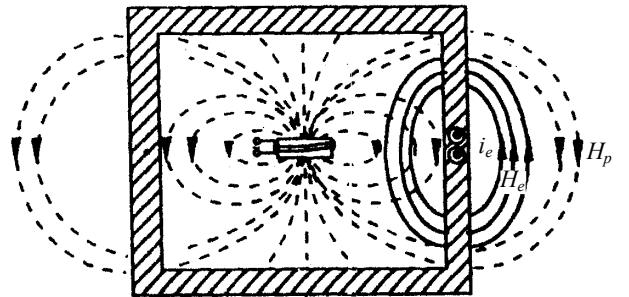


图 2.6 高频磁屏蔽原理示意

上述高频磁屏蔽的原理可以利用等效电路概念通过定量分析来加以说明。我们可以把屏蔽盒看成是一匝线圈, 其等效电路如图 2.7 中的右边回路所示。该图左边回路为高频干扰磁场等效电路。图 2.7 中, i_s 为产生高频干扰磁场的线圈电流, M 为线圈与屏蔽盒间的互感, r_s 、 L_s 分别为屏蔽盒的电阻和电感, i_s 为屏蔽盒上产生的涡流。根据磁路理论, 有:

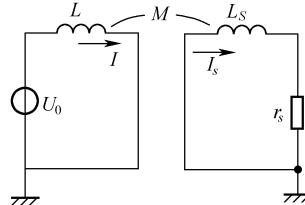


图 2.7 高频磁屏蔽等效电路分析图

$$i_s = \frac{j\omega M}{r_s + j\omega L_s} i \quad (2.8)$$

在高频条件下, 可认为 $r_s \ll \omega L_s$, 于是有:

$$i_s \approx \frac{M}{L_s} i \quad (2.9)$$

由式 (2.9) 可看出, 高频时屏蔽盒上产生的涡流 i_s 与频率几乎无关。但在低频时, 有 $r_s \gg \omega L_s$ 和 $r_s \gg \omega M$, 于是有:

$$i_s \approx \frac{j\omega M}{r_s} i \quad (2.10)$$

这说明, 低频时产生的涡流既小又与频率成正比。

综上所述, 可以说明以下几点:

(1) 利用感应涡流产生的反磁场进行磁屏蔽, 只能用于高频场合, 而对低频磁场的屏蔽效果甚微。

(2) 屏蔽体的电阻 r_s 越小, 产生的涡流 i_s 越大。所以, 高频磁屏蔽要用良导电金属如铜、铝等作屏蔽材料。

(3) 涡流 i_s 与互感 M 成正比, M 越大, 涡流越大, 屏蔽效果越好。为了尽量增大 M , 减小损耗, 屏蔽层上开口的方向应尽量不切断电流。

(4) 屏蔽体是否接地对屏蔽效果没什么影响, 这与电屏蔽时必须良好接地有很大不同。但实际中往往也将磁屏蔽盒接地, 这样做的好处是可同时起到高频屏蔽和电场屏蔽的作用, 使整体屏蔽效果良好。

2.4.4 电磁屏蔽原理

通常电场和磁场是同时存在的, 实际中很难分得开, 只能说哪个是主要矛盾, 哪个是次要矛盾。因此, 通常所说的屏蔽, 一般指的是电磁屏蔽, 即对电场和磁场同时加以屏蔽。在实际交变电磁场中, 电场分量和磁场分量究竟哪个是主要矛盾, 与交变场频率直接相关。频率较低时, 干扰一般发生在近场, 而近场中随着干扰源特性的不同, 电场分量和磁场分量大不相同: 低压大电流干扰源以磁场为主, 电场分量可忽略, 这时可只考虑磁屏蔽; 高压小电流干扰源则以电场为主, 磁场分量可忽略, 这时可只考虑电屏蔽。随着交变场频率增高, 电磁辐射能力增强, 将产生辐射电磁场, 并趋向于远场。远场中的电场、磁场都不能忽略, 因而需要对两者同时加以屏蔽, 即实施电磁屏蔽。可见, 电磁屏蔽一般是针对高频电磁场干扰而言的。高频时, 即使在设备内部也可能出现远场干扰, 因而也需要考虑电磁屏蔽。

如前所述, 采用良导电材料作屏蔽体, 就能同时对高频电场和磁场起到屏蔽的作用。高频电磁屏蔽的原理, 一般认为有三种理论解释:

(1) 感应涡流效应。这种理论解释与前面对高频磁屏蔽原理的解释相同, 即高频干扰电磁场在屏蔽体内会产生涡流, 涡流产生的磁场对高频干扰电磁场有抵消/削弱作用。这种原理解释物理概念清楚, 比较形象易懂。但用它难于作定量分析, 且解释不清干扰源特性、传播介质、屏蔽材料导磁率等因素对屏蔽效果的影响。

(2) 电磁场理论。严格说来, 它是分析电磁屏蔽原理和计算屏蔽效能的经典理论, 但是由于电磁场的边界问题, 使得分析复杂, 解算烦琐。

(3) 传输线理论。它是根据这样一个事实: 电磁波在金属屏蔽体中传播的过程与行波在传输线中传输的过程很相似。因此, 可用传输线方程来对电磁屏蔽机理作等效分析计算。利用这一理论和方法, 不仅可简明地分析屏蔽机理, 而且能便捷地计算屏蔽效果。

我们不妨用传输线理论来分析一下电磁屏蔽原理。图 2.8 给出的是按传输线理论分析电磁屏蔽原理的示意图。当干扰电磁波入射到厚度为 d 的金属板屏蔽体时, 假设金属板两侧均为空气介质, 则在金属板入射界面(第一界面)上, 由于波阻抗突变, 必将有一部分被反射回空气中, 而其余部分透射到金属板内。从电磁屏蔽的机理看, 被反射的这部分电磁波能量, 就是屏蔽体对干扰电磁波造成的第一衰减, 通常称之为表面反射损耗, 用 R 表示; 透射进金属板内的这部分电磁波能量, 在板内继续传播时, 还会衰减, 通常将这个衰减过程带来的损耗称为吸收损耗, 用 A 表示。经过吸收损耗后, 剩余的电磁波能量到达金属板的另一界面(第二界面)时, 又要产生反射, 并在金属板内两个界面之间多次来回反射, 最后真正能透过第二界面进入被屏蔽空间的电磁波能量已很小。通常将在金属板两个界面之间来回反射所带来的电磁波能量损耗叫作多次内反射损耗。可见, 电磁屏蔽的作用就是体现在表面反射损耗、吸收损耗和内反射损耗上, 所以我

们不妨将这三者分别称为电磁屏蔽效能的第一机理、第二机理和第三机理。上述电磁波在金属屏蔽体内的传播过程可用麦克斯韦方程来进行定量分析。鉴于篇幅, 这里就不一一介绍。

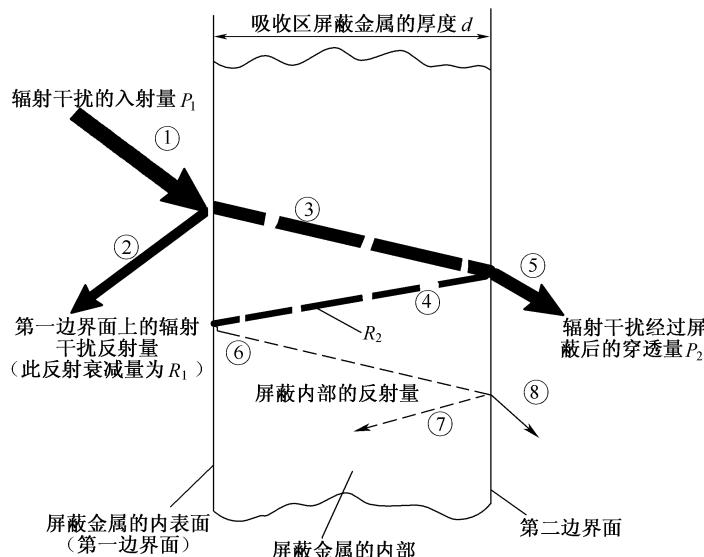


图 2.8 电磁屏蔽原理示意

2.4.5 几种实用屏蔽技术

1. 多层实心体屏蔽

在有些情况下, 为了得到全频段屏蔽良好的特性, 可采用双层甚至三层屏蔽材料作成屏蔽体。有三种类型的多层实心体屏蔽: 电磁屏蔽、多层电屏蔽、多层磁屏蔽。表 2.1 给出了双层主动磁屏蔽 (辐射磁场源位于屏蔽箱里面) 的内、外层参数。

表 2.1 双层主动磁屏蔽参数

参数名	内层材料	外层材料
材料类型	Netic S3-6	Co-Netic AA
μ_r 起始值	300	20000
0.02T 时 μ_r	500	80000
磁饱和值 (T)	2.2	0.75

由表 2.1 可见, 在靠近磁场源的第一层屏蔽中, 材料的磁饱和值 (对 Netic S3-6 而言) 为 2.2T, 磁导率 μ_r 为 500, 经过它的屏蔽作用, 可将场强降至足够低。这样, 在第二层屏蔽处, 场强将不会达到饱和值 0.75T。又由于第二层材料具有比第一层高得多的磁导率 μ_r , 所以可提供十分良好的屏蔽效果。

2. 孔隙屏蔽

如前所述, 屏蔽体上不可避免地会存在或多或少的孔隙结构, 如通风散热孔、接缝中的缝隙、各种显示观察窗口、控制调节旋钮安装孔、接插件安装孔、窗盖或活动盖体的链接件, 以及信号

缆线的出入口等等。为了最大限度地减小孔隙结构对屏蔽效能的影响，实际中应努力寻求改进孔隙结构、提高孔缝屏蔽效果的方法。根据孔隙的屏蔽原理分析，工程实例中可采取以下一些实用的方法。

(1) 增加缝隙深度。缝隙深度主要取决于屏蔽体的壁厚。此外，在接缝处加上傍边（如图2.9所示）和增加接缝处的重叠量（即接合面的搭接宽度），也是增加缝隙深度的重要途径。

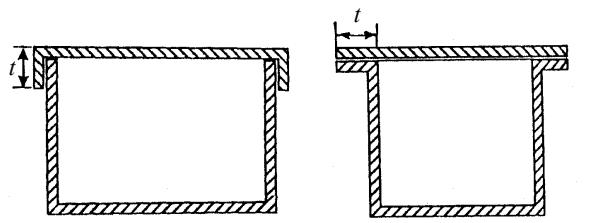


图 2.9 接缝外加傍边

(2) 提高接合面加工精度。这是减少漏缝的有效方法。采用精密加工方法固然可提高加工精度，但这样会使成本骤增。通常更可行的办法是利用铸造成型、端口切削磨平和电焊接等加工方法来提高接合面加工精度。例如在航天领域的机载设备，为提高屏蔽效能，其中不乏使用整体精密铸造和焊接连接的机箱的。

(3) 加装导电衬垫。一般用薄板材料以钣金加工制成的屏蔽盒箱，其结合面很难做到不留缝隙，因而只有通过在缝隙中加装导电衬垫来提高屏蔽效果。导电衬垫是一种夹衬在两层接合端面处的导电材料，它富有弹性，易于变形，通过压紧变形可以填满缝隙，使两个结合表面有良好的电气接触。同时，要求导电衬底应有良好的导电性和机械弹性，而且耐腐蚀，还应耐高低温变化，在工作温度范围内不致发生老化。常用的导电衬垫材料有编织金属网线、软金属、导电橡胶、橡胶外包裹金属箱和梳状簧片等。

(4) 填抹导电涂料。常用的导电涂料有导电胶、导电填胶和导电脂。导电胶是用环氧树脂和银粉混合配制而成的，它能牢固粘附在金属、塑料、陶瓷表面，可用于粘结屏蔽箱体永久性接缝，减小缝隙电磁泄漏。导电胶在固化前是液体状，流动性好，容易渗透进入结合面以填充缝隙；固化后（常温下固化）却很坚固，难以拆卸，成为永久连接。导电填胶是一种不固化的导电胶，呈粘稠糊状。主要用于作为各种屏蔽体的非永久性接缝的密封填充。它可用专门注射器注入缝隙中，也可用刮刀将它嵌入缝隙。导电脂是一种银-硅粘液，可用于涂抹在屏蔽箱体的活动端面接触处的铰链轴承中，改善活动接触缝隙的电接触，减小电磁泄漏。

(5) 调整紧固钉间距。使用螺钉、铆钉来紧固结合面是屏蔽箱体制作中常用的紧固方法。每两个钉之间距离决定了缝可能的最大长度。从提高屏蔽效能的角度看，要求紧固钉间距越小越好，但从机械强度角度看，间距又不能太小。因此，应在这两者之间很好地寻找折衷点。总的原则应是：在结构设计允许的条件下尽量减小紧固钉间距；该间距决定的缝隙长度 l 应小于电磁波波长 λ ，一般不能大于 $\lambda/20$ 。理论和实践表明，当 $l > \lambda/100$ 时，就会产生电磁泄漏，且泄漏随着 l 增大而增大，当 l 增至 $\lambda/10$ 以上时，泄漏便显著增加，使屏蔽效能显著降低。

(6) 在通风孔上加装金属丝网罩。这样做的好处是将原本大口径、大面积的通风孔通过网丝划分成许多小孔来减少电磁泄漏。金属丝网的屏蔽作用主要靠反射损耗。实验证明，对于孔隙率不小于 50%、在所需衰减的电磁波的每个波长上有 60 根以上金属网丝的网罩，可得到与金属板大

体相同的反射损耗 (当然, 金属丝网的吸收损耗远比金属板的小, 所以总的屏蔽效能肯定是前者比后者低)。

金属丝网的网孔越密 (孔径越小), 网丝越粗, 材料导电性越好, 其屏蔽性能就越好。但网孔过密, 网丝过粗, 对空气的阻力就越大, 通风效果就越不好。金属丝网的安装可采用周边焊接或螺钉压紧两种方式, 关键是使丝网与屏蔽箱体接触良好。

(7) 用打孔金属板做通风孔。这也就是用孔径较小的多孔阵列来代替面积较大的通风孔。其结构形式, 可以直接在屏蔽体的壁上打孔, 也可将打好孔阵列的金属板安装在屏蔽体的通风孔上。孔眼的形状常用的有方形和圆形两种。

(8) 采用波导衰减器式通风孔。波导衰减器简称波导管, 它是由铜、铝等良导体做成的空心圆形、六角形或矩形导管。根据波导理论, 波导管在引导电磁波在其中传输的过程中, 当电磁波频率低于波导管截止频率 f_c 时, 电磁波在传输中将产生很大的衰减。正是利用波导管的这一特性, 可做成波导衰减器式通风孔来减小电磁泄漏。设计波导管衰减器式通风孔时, 应根据要屏蔽的电磁波的最高频率 f , 首先确定波导管截止频率 f_c , 再选择波导管形状, 确定其口径尺寸和长度。为使波导管对电磁波有足够的衰减 (即有良好的屏蔽效能), 由波导管传输特性知, 应使 $f_c \gg f$, 工程上一般取 $f_c = (5 \sim 10) f$ 。

通风孔口径尺寸, 根据不同波导管形状, 可按下列一组公式计算:

$$\text{对圆形孔, } D = (35.5 \sim 17.6) \frac{1}{f} \quad (2.11)$$

$$\text{对矩形孔, } W = (15 \sim 30) \frac{1}{f} \quad (2.12)$$

$$\text{对六角形孔, } M = (75 \sim 30) \frac{1}{f} \quad (2.13)$$

波导管的长度 l 则由衰减损耗设计指标 SA 和已确定的孔口径尺寸计算:

$$\text{对圆形波导管, } l = 3.2 \times 10^{-2} D \cdot SA \text{ (cm)} \quad (2.14)$$

$$\text{对矩形波导管, } l = 3.7 \times 10^{-2} W \cdot SA \text{ (cm)} \quad (2.15)$$

$$\text{对六角形波导管, } l = 3.7 \times 10^{-2} M \cdot SA \text{ (cm)} \quad (2.16)$$

由此可见, 当 SA 设计值在 100dB 以上时, 一般要求波导管长度必须为波导管口径的三倍以上。单管结构的波导管, 如图 2.10 (a) 所示。实际中, 在一些要求屏蔽性能高、通风散热量大的大型设备或屏蔽室的通风孔设计中, 常将很多个波导管排列成蜂窝状的通风孔阵列, 如图 2.10 (b) 所示。

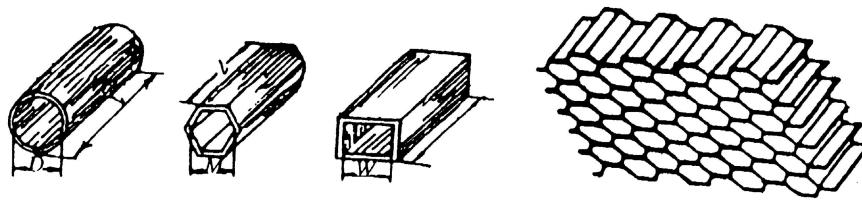


图 2.10 波导管通风孔结构

这种蜂窝状通风孔的屏蔽效能可用下式估算:

$$SE = 27 \frac{l}{g} - 20 \lg N \text{ (dB)} \quad (2.17)$$

式(2.17)中, l 为波导管长度 (cm), g 为波导管通风口径 (cm), N 为波导管数目。

采用蜂窝状通风孔陈列与用穿孔金属板作通风孔或在通风孔上覆盖金属丝网相比, 具有工作频带宽、对空气阻力小、风压损失小、机械强度高和工作稳定可靠等优点。

蜂窝状通风孔阵列有普通型和高性能型两种。普通型在 1GHz 频率时可提供 60dB 以上的屏蔽效能; 高性能型能满足军标和 TEMPEST、NEMP 等标准的要求, 并能满足湿热、盐雾、高低温、冲击振动等环境要求, 在 1GHz 频率时可达到 120dB 的屏蔽效能。

3. 电缆及接口屏蔽

实践证明, 对于由多台设备构成的电气、电子系统, 即使每个单台设备都进行了完美的屏蔽设计, 具有良好的屏蔽性能, 但若设备间连接电缆的屏蔽层不理想, 或电缆两端的连接器不能提供连续的屏蔽或滤波, 仍有可能为电磁干扰的辐射/接收提供路径, 导致系统整体电磁兼容性的降低。

(1) 电缆屏蔽。

电缆可以等效为电偶极子发射/接收天线, 电缆屏蔽层上流过的干扰电流能在电缆内导体上感应出干扰电压, 同理, 电缆内导体上干扰电流的变化也会在电缆外部产生辐射场, 其辐射场强是干扰电流、电缆长度和距离的函数。由于电缆总有一定长度, 其接收/辐射的能力往往比机箱内部各种引线和 PCB 板走线更强。因此, 电缆是现代电子系统中仅次于天线, 且令人烦恼的辐射/接收器。另外, 在同一电缆内导线之间或不同电缆之间也存在串扰引起的电磁耦合现象。当耦合长度不超过 1/16 波长时, 属低频耦合。这时, 若与电缆两端相接的电路工作于低阻抗, 则以线间互感引起的低频磁场耦合为主, 耦合强度与电磁干扰频率、导线间距、离地面高度、耦合长度、线路阻抗和电缆屏蔽层的接地方式有关; 若与电缆两端相接的电路工作于高阻抗, 则以线间互电容引起的低频电场耦合为主, 耦合强度与电磁干扰频率、导线间距以及屏蔽、滤波的措施有关。当电缆长度大于 1/4 波长时, 串扰引起的耦合属高频耦合, 由于这时电缆中会出现电压和电流的驻波, 所以会使耦合增强。

抑制电缆辐射/接收能力的主要手段是屏蔽和滤波。所谓屏蔽就是采用屏蔽电缆。屏蔽电缆的常见结构有: ①单层编织丝网电缆。这种屏蔽电缆能提供 80%~95% 的覆盖率, 能对低阻抗干扰源提供防护, 例如对来自电动机控制电路、磁性线圈、过程控制设备和一般家用电器的干扰提供防护。②双层编织丝网电缆。这种屏蔽电缆具有比单层编织丝网电缆更好的高频屏蔽效能, 对来自计算机、CAD/CAM 系统和局域网系统等的较高干扰或泄露, 能提供较好的防护。③编织丝网和金属箔组合封装电缆。这种屏蔽电缆使高频特性得到更大改善, 能对工作频率接近 1GHz 或需要全屏蔽的设备提供防护, 常用于军事通信和安全部门。④软管屏蔽电缆。这种屏蔽电缆性能在干扰波长接近于连接之间的缝隙尺寸时会降低, 这种缝隙的作用就如缝隙天线一样。当出现这种情况时, 可对内部的导线进行个别屏蔽。⑤硬管屏蔽电缆。硬管电缆与软管电缆的屏蔽性能相似, 主要是适应的环境、场合不同。两者的屏蔽效果与实心金属板的相同。⑥缠绕的高导磁金属片屏蔽电缆。当屏蔽材料采用高导磁率金属片时, 由于它在冷处理时会降低导磁率, 不能拉成管状结构, 所以必须螺旋缠绕。为可靠起见, 有时还需要加一保护性的橡胶覆盖层。

值得一提, 要使电缆获得良好的屏蔽效果, 不仅电缆本身需要屏蔽好, 而且电缆终端及接口处也要屏蔽好。

(2) 电缆屏蔽终端的处理。

一般说来, 针对不同电路与电缆, 可有以下几种屏蔽终端处理方法: ①对于传输高频信号的同轴电缆屏蔽的终端处理, 其多点屏蔽的系统应在电缆的信号传输线两端接地, 如方便的话, 最好在传输线中间的接口处也接地。②对于音频敏感电路的屏蔽终端处理, 其屏蔽接地只需在一端进行。③对于同时具有音频和射频敏感特性的电路, 应使用具有屏蔽的绞线, 并在屏蔽两端都接地。④对于同轴电缆和音频敏感引线以外的其他屏蔽电缆, 通常均可通过一个共同的卷边圆环或等效装置进行终端屏蔽, 如图 2.11 所示。其中共同的卷边环或等效装置采用了两个地线: 一个从卷边环到连接器外壳, 另一个通过接线器的接地针脚。

无论采用上述哪种屏蔽终端处理方法, 有几点是要共同注意的: 所有电缆屏蔽与被屏蔽的信号线都应当是绝缘的, 以防止出现信号线接地; 二是所有屏蔽不应该作为四路导线; 三是屏蔽终端与接口 (连接器) 周围必须有完全的搭接。另外, 当不只一个屏蔽的接口必须与一根电缆及接口相连时, 为确保每个屏蔽都完好无损, 对穿过多个针脚同轴接口导线的每个屏蔽应分别进行终端处理。

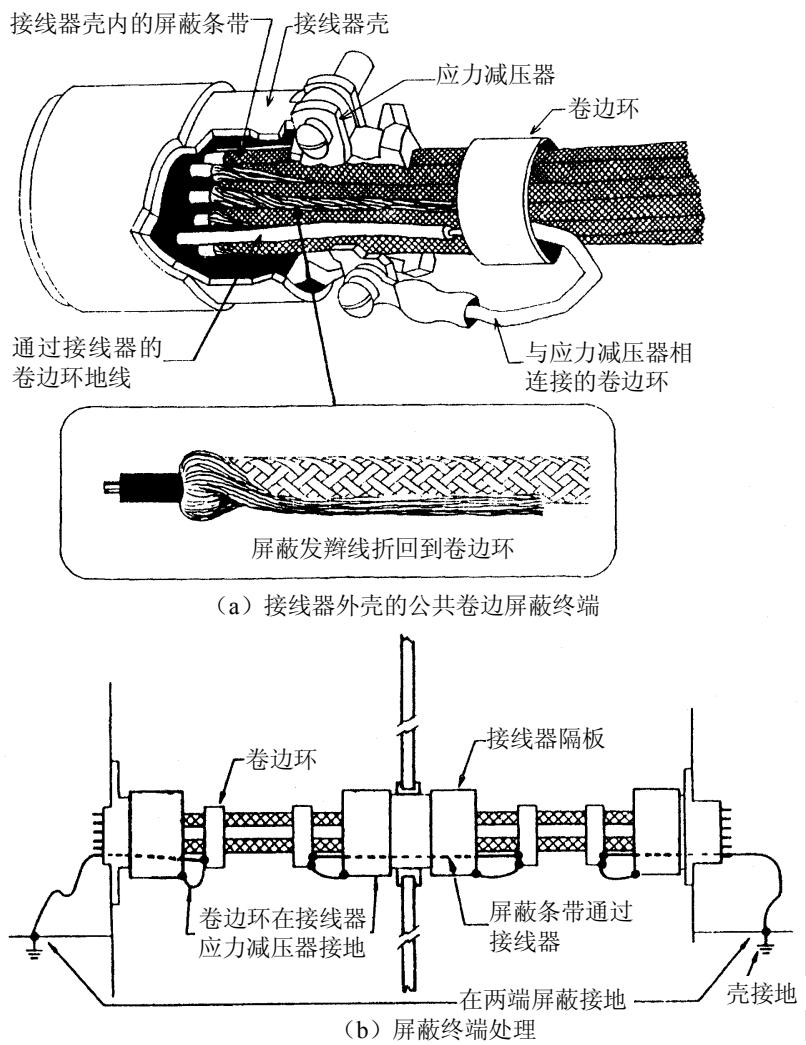


图 2.11 通过公共卷边环进行终端屏蔽

(3) 屏蔽电缆终端连接器。

为了进一步抑制电缆及连接器的干扰辐射/接收能力, 还必须阻止干扰电流流入/流出电缆的芯线和屏蔽层, 一种简单可行的办法就是采用滤波器连接器。滤波器连接器是一种在每个插孔中安装了低通滤波器的带屏蔽壳连接器, 如图 2.12 所示。插孔中安装的低通滤波器有电容型、电感型、LC 型、 π 型、T 型等。

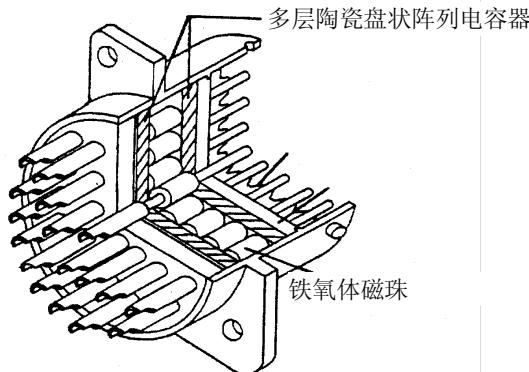


图 2.12 滤波器连接器

滤波器连接器按性能高低可分成以下 4 种类型: ①普通经济型 D 型滤波器连接器。适用于电磁兼容性要求不高的民用电子产品。②高性能、高密度 D 型滤波器连接器。适用于电磁兼容性要求较高的产品, 如欲销往欧洲市场的民用电子产品、工业控制设备和军用设备等。还适用于个人计算机、图形工作站、蜂窝式移动通信系统和医学电子设备等。③超高性能 D 型滤波器连接器。适用于高速脉冲信号系统或对电磁兼容性要求特别高的场合, 如需要满足军用标准和 TEMPEST 标准的设备。这类连接器为获得理想的干扰抑制效果而多采用 π 型滤波器。⑤军用滤波器连接器。这是专为军用装备生产的一类高性能连接器。

值得指出, 无论哪种滤波器连接器, 使用时最重要的是要保证良好接地, 而为了保证它能良好接地, 在连接器与屏蔽机箱之间一定要有良好接触, 最好使用焊接方式或射频密封衬垫。

综上所述可以看出, 屏蔽与滤波、接地实际中是不可分割的。

2.5 滤波技术

2.5.1 滤波器的特性与分类

滤波技术的基本用途是选择信号和抑制干扰, 以这两种不同功能为目标而设计的网络分别称为信号选择滤波器和电磁干扰滤波器 (EMI 滤波器)。

实践表明, 即使一个经过很好设计并且具有合适的屏蔽与接地措施的系统, 也仍然会有传导干扰发射或有传导干扰进入此系统。滤波是压缩信号回路干扰频谱的一种方法, 当干扰频谱的成分不同于有用信号的频带时, 就可以用滤波器将无用的干扰过滤减小到一定程度, 使传出系统的干扰不至于超出给定的规范, 使传入系统的干扰不至于引起系统的误动作。滤波器将有用信号和干扰频谱隔离得越充分, 它对减小有用信号回路内干扰的效果就越好。因此, 恰当地设计选择和

正确地使用滤波器对抑制传导干扰是极为重要的。实际中，电磁干扰滤波器 (EMI 滤波器) 主要应用于以下一些场合：

- ① 在高频系统中，用于抑制工作频带以外的任何频带上的干扰；
- ② 在各种信号电路中，用于抑制频谱成分不同于有用信号频谱的干扰；
- ③ 在电源电路、操纵电路、控制电路和转换电路中，用于抑制沿这些电路的干扰。

但有一点要说明，滤波器在许多情况下只是作为一种临时的措施，用于弥补先前设计不周所带来的缺陷。在设计初期进行周密考虑，往往可以避免使用这类临时引入的滤波器。例如，充分地满足电路的线性要求有可能避免使用谐波滤波器，改进延迟电路的隔离性可以避免使用瞬变抑制滤波器，等等。由于电磁干扰滤波器的可靠性一般低于屏蔽和接地，加之成本因素的考虑，实践上应尽量减少使用作为临时措施的干扰滤波器，只有在绝对必要时才引入它。

滤波器的设计既可以用电抗组件实现，也可以用吸收组件实现，前者将不需要的干扰信号反射回去，后者将不需要的干扰信号吸收掉。

滤波器的主要特性参数有额定电压、额定电流、输入输出阻抗、插入损耗、功率损耗、相位延迟、重量大小、可靠性、工作温度和其他环境条件等。其中最重要、最有意义的是作为频率函数的插入损耗。插入损耗定义为：

$$L_{in} = 20 \lg \frac{V_1}{V_2} \quad (2.18)$$

式 (2.18) 中， V_1 和 V_2 分别为接入和不接入滤波器时信号源在接收端 (负载阻抗上) 建立的电压。插入损耗的大小是随工作频率的不同而变化的，通常把插入损耗随频率的变化曲线称为滤波器的频率特性。按频率特性，可以把滤波器大体分为低通、高通、带通、带阻 4 种类型滤波器，如图 2.13 所示。

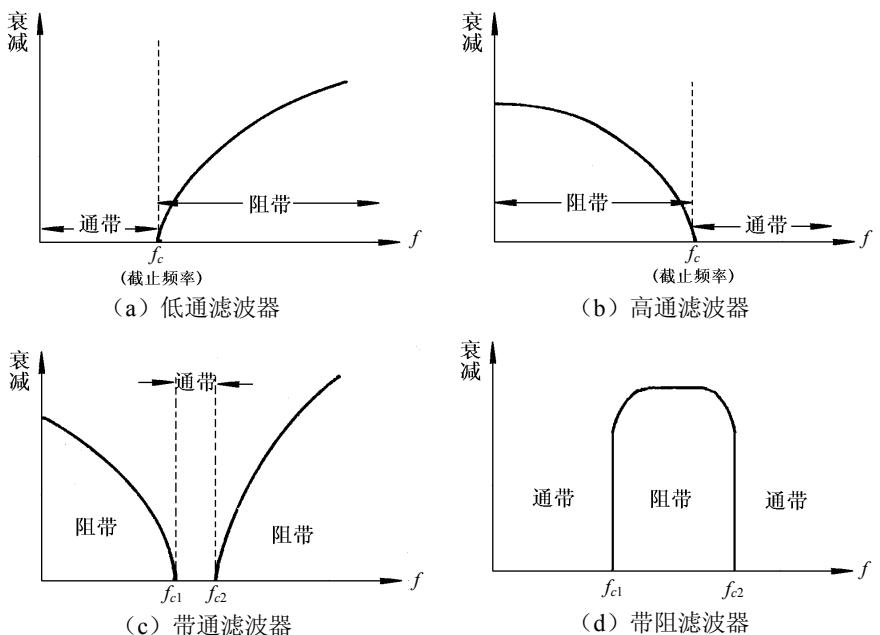


图 2.13 4 种滤波器的频率特性

当然,滤波器也可以按其他原则分类。例如,按滤波机理分,可分为反射型滤波器和吸收型滤波器,其中反射型滤波器按结构形式又可分为T型、 π 型、C型、L型等;按频率动态响应特性分,可分为巴特沃斯滤波器、贝塞尔滤波器、巴特沃斯-汤普森滤波器和椭圆响应滤波器等;按滤波器应用目的分,可分为电源滤波器、EMI滤波器和信号选择滤波器等。

2.5.2 EMI滤波器的特点

EMI滤波器相比于信号选择滤波器,在技术要求上有其明显特点:

(1) EMI滤波器往往工作在阻抗不匹配的条件下,干扰源的阻抗特性变化范围很宽,其阻抗通常是整个频带的函数。由于经济和技术上的原因,不可能设计出全频带都匹配的滤波器,因此在设计或选用EMI滤波器时,应首先明确工作频率和所要抑制的主要干扰频率,如两者非常接近,则需应用频率特性非常陡峭的滤波器,才能把两者分离开来。所采用的EMI滤波器应在宽频带范围内,对共模和差模干扰均有很大的插入损耗,以抑制所有的乱真信号。

(2) 干扰源的电平变化幅度往往比较大,因此EMI滤波器必须有足够高的耐压(额定电压),以保证在输入电压为脉冲电压或变化范围较大时,其内部部件不会出现饱和效应,更不会被击穿或烧毁,仍能可靠的工作。

(3) EMI滤波器连续通以最大额定电流时,其温升要低,以保证在该额定电流下连续工作时,不降低滤波器中器件的工作性能。

(4) 为使在线工作的EMI滤波器的频率特性与设计值相符,要求与它连接的信号源阻抗和负载的数值等于设计时的规定值,若干扰源输出阻抗未知,或其值在一个很大范围内变化,则可在滤波器的输入端和输出端同时并接一个固定电阻以使它具有比较稳定的滤波特性。

(5) EMI滤波器在阻带内应对干扰,有足够的衰减量,而对有用信号的损耗则应降低到最小限度,以保证有用电磁能量的最大传输效率。

(6) EMI滤波器必须具有屏蔽结构,且屏蔽箱盖和本体应有良好的电接触。滤波器的电容引线应尽量短,最好选用引线电感小的穿心电容器。

(7) EMI滤波器的故障往往比系统中其他元器件的故障更难检测和诊断,所以要求他比其他元器件有更高的工作可靠性。

(8) EMI滤波器的安装质量对其滤波效果影响很大,只有安装位置恰当,安装方法正确,才能对干扰起到预期的滤波作用。安装时要注意以下几点:

① 安装位置要依据干扰的侵入途径确定。当只有一个或很少几个干扰源影响多个敏感设备时,应在干扰源一侧接入滤波器,这样不仅可以减少使用滤波器的数目,而且可以使干扰局限于干扰源附近,降低对低电平线的屏蔽要求。反之,当只有一个敏感设备而有多个干扰源时,则滤波器应安装在敏感设备一侧。而如果干扰来自电源线辐射,则应在电源出口处安装滤波器,否则辐射干扰将通过各种途径侵入敏感设备。

② 滤波器的输入配线和输出配线应尽量远离,且屏蔽隔离,以最大限度地减小输入输出之间的耦合电容,减小其旁路作用引入的传导干扰与辐射干扰。

③ 滤波器必须设有良好的高频接地,否则,当滤波电容与地线阻抗谐振时,将产生很强的干扰,降低高频滤波效果。为此,滤波器多采用机壳直接接地。

④ 滤波器的所有连线特别是地线应尽量短,并按顺序布置,如图2.14所示。

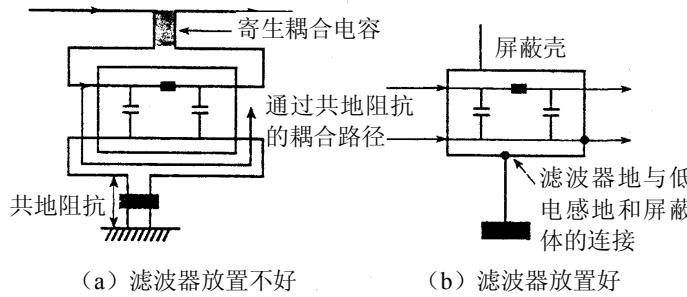


图 2.14 滤波器连线的布置

2.5.3 EMI 滤波器的特殊组件

在电磁兼容设计中, EMI 滤波器多数情况下指的是低通滤波器, 其目的是使低频成分通过, 而高频成分被衰减。例如, 在放大电路和发射机输出电路中使用的滤波器, 通常是要使基波频率信号通过, 而谐波信号和其他乱真信号被衰减; 电源线滤波器, 应使直流或市电频率电流通过, 没有明显的功率损失, 而对高于这些频率的信号则要进行衰减。图 2.15 所示的是几种简单的低通滤波器结构, 实际滤波器电路通常由这些简单电路组合而成。

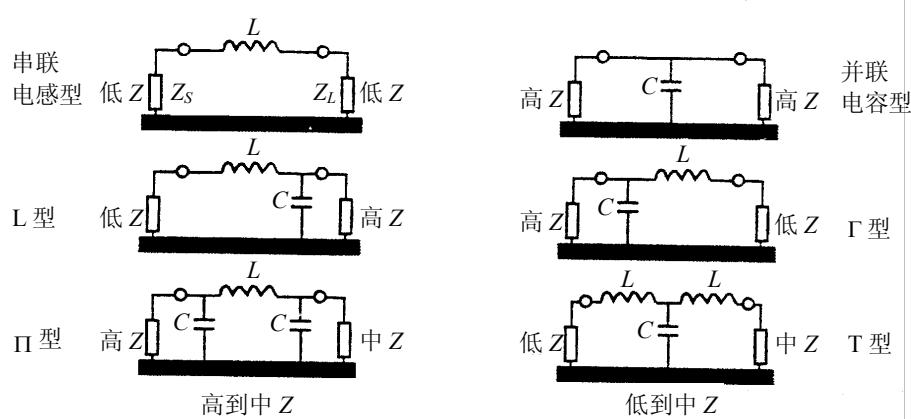


图 2.15 几种简单低通滤波器的结构及其与阻抗的关系

滤波器的有效性取决于与滤波器连接的前后网络的阻抗: 在前后均为低阻抗的电路中, 使用简单的电感滤波电路效果很好, 衰减可超过 40dB; 但在前后均为高阻抗的电路中, 却要使用电容滤波电路才能获得好的衰减效果, 使用简单的电感滤波电路可能一点效果都没有。对于前后网络的阻抗一个为高一个为低的电路, 采用多组件构成的滤波器才会获得良好效果, 但前提是必须构造正确, 原则是使电容器面向高阻抗, 使电感面向低阻抗。

由图 2.15 可以看出, EMI 滤波器 (低通滤波器) 除少数情况可采用简单的电感型滤波器外, 一般都要使用旁路电容。理想的旁路电容的衰减具有随频率的升高以 20dB/十倍频程规律增加的特性。但是任何有引线的电容器的滤波效果都会受到引线电感的限制, 其阻抗特性在某个频率点上呈现最小, 超过这个频率后阻抗将增加, 使高频滤波效果变差。为了改善高频衰减特性, 在 EMI 滤波器中多使用一些特殊的电容组件, 例如:

(1) 三端电容器。这种电容器将输入端和输出端分开, 与引线电感一起构成 T 型滤波器, 如

图 2.16 所示。三端电容器通过合理利用引线电感，使构成的滤波器的高频特性得到极大改善。当应用在源阻抗和负载阻抗都比较低的电路中时，在上面两根引线上串两个磁珠将进一步增大引线的电感，从而提高其滤波效果。三引线结构能将小磁盘电容频率范围从 50MHz 以下扩展到 200MHz 以上，这对于抑制 VHF 频段的干扰是很有用的。为了获得最好的效果，在使用时应将中间的导线（地线）直接接到低电感地上，否则这根引线上的电感将破坏电容器的滤波效果。



图 2.16 三端电容器示意

(2) 馈通电容器。这种电容器通过将其外表面直接用焊接或螺纹的方式接到金属屏蔽体或面板上而构成电容器的接地，如图 2.17 所示。由于地电流分散在中心导体周围 360 度的范围内，因此实际上不存在电感，电容可以在 GHz 以上的频域内保持良好的性能。通过将陶瓷金属化，并增加一个磁珠，以增加穿心导体的电感，便可构成 π 型滤波器。若要在 UHF 或更高的频段内获得良好的滤波效果，特别是要保护屏蔽体不被穿透，必须使用馈通电容器。馈通电容器的电容值和电压值可以在很宽的范围内选择，但其价格随着电容值的增大而上升。

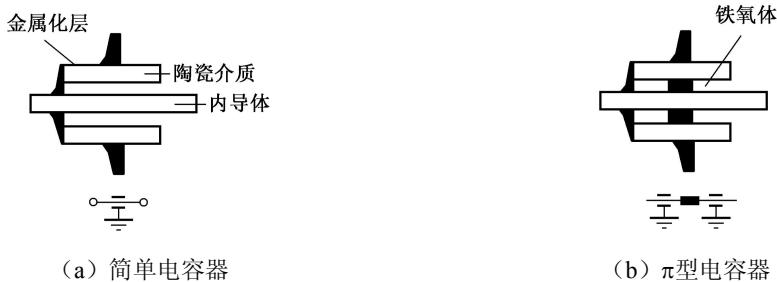


图 2.17 馈通电容器示意

(3) 片状电容器。这种电容器的引线电感几乎为零，使它总的电感可以减小到只有组件本身的电感效应，而组件本身的电感通常只有传统电容器引线电感的 $1/5 \sim 1/3$ ，因此，其自谐振频率可以达到同等容量的带引线电容器的 2 倍以上。这就决定了片状电容器可以作为抑制电磁干扰的理想组件。为了避免走线的附加电感破坏片状电容器的上述优点，连接滤波器和去耦电容器的引线应尽量短和直。

2.5.4 滤波器的选择与使用

电磁干扰滤波器的设计或选择，主要依据是干扰特性和系统要求。因此，在设计或选择滤波器时，应该知道干扰的频率范围及大致量级，明确要求抑制的效果即插入损耗，了解滤波器的使用环境，包括使用电压、负载电流、插入前后的源/负载阻抗、环境温度、振动和冲击强度等。另外还需对滤波器在设备上的安装位置和允许占用的空间及外形尺寸有所考虑。一般可按以下原则

来选择或自行设计滤波器：

(1) 电磁干扰滤波器在相应工作频率内，应能满足负载要求的衰减特性。若一种滤波器衰减量不能满足要求，则可采用多级滤波器串联。相同滤波器的级联，可以获得比单级更高的衰减；不同的滤波器级联，可以获得在宽频带内良好的衰减特性。

(2) 滤波器应满足负载电路工作频率和需抑制频率的要求。如果要抑制的频率与有用信号的频率非常接近，则需用频率特性非常陡峭的滤波器，才能把需抑制的干扰频率滤掉，而只允许有用频率信号通过。

(3) 在所要求的频率上，滤波器的阻抗必须与它连接的干扰源或负载阻抗相匹配：如果负载是高阻抗，则滤波器的输出阻抗应低，反之相反；如果电源或干扰源是低阻抗，则滤波器的输入阻抗应高，反之也相反；如果源阻抗或负载阻抗未知，或在很大的范围内变化，则很难得到稳定的滤波特性，这时，为了获得比较稳定的良好的滤波特性，可在滤波器的输入端和输出端同时并接一个固定电阻。

(4) 滤波器必须具有一定的耐高电压能力，以保证在所有预期工作的条件下都能可靠的工作，能经受输入瞬时高电压的冲击。

(5) 滤波器允许通过的额定电流应与电路中连续运行的额定电流一致。额定电流定得高，会加大滤波器的体积和重量；定得低，又会降低滤波器的可靠性。

(6) 滤波器应与特定的用途相适应。例如，屏蔽室用的电源滤波器，应使其抑制频带与屏蔽室的防护频带相同，使插入损耗与屏蔽室的屏蔽效能有相同的数量级；又如，用于抑制工业干扰或消除电子设备向电网发射干扰的滤波器，则应在工业干扰的频谱范围（数十兆赫）内保持一定的插入损耗值；等等。目前已经有为各种用途设计的不同类型的商品滤波器出售，实际中可以从应用需求出发正确选用。

(7) 滤波器应具有足够的机械强度，在满足要求的前提下，尽量结构简单，体积小，重量轻，安装方便，还要安全可靠。对于滤波器中应用较多的铁氧体 EMI 抑制组件，在使用空间允许的条件下，为了提高 EMI 抑制效果，一般以选择尽量长、尽量厚和内孔尽量小的铁氧体为原则。

除了按上述原则选择或设计合适的滤波器外，使用时还要注意正确安装，才能获得预期的滤波特性。安装时，通常应注意以下几点：

(1) 滤波器最好安装在干扰源出口处，再将干扰源和滤波器完全屏蔽在一个盒子里。若干扰内腔空间有限，则应安装在靠近干扰源电线出口处外侧，滤波器壳体与干扰源壳体进行良好搭接。对于电源滤波器，则应安装在尽量靠近设备电源入口的地方（如入口面的壁上），不要让未通过滤波器的电源线在设备框体内迂回；而且滤波器应加屏蔽，使屏蔽壳与接地的设备机壳良好接合。图 2.18 和图 2.19 给出了 EMI 滤波器的几种不正确和正确的安装方法。

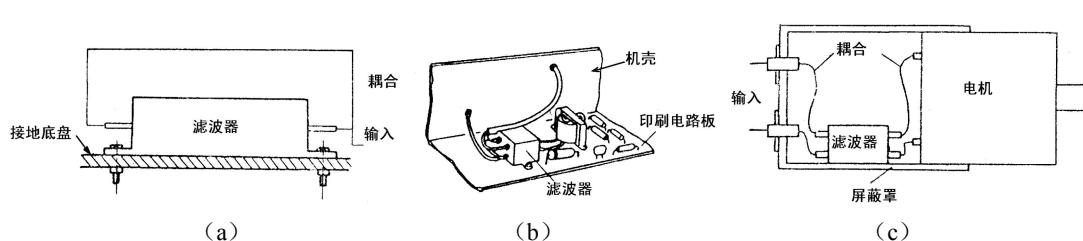


图 2.18 EMI 滤波器的不正确安装方法

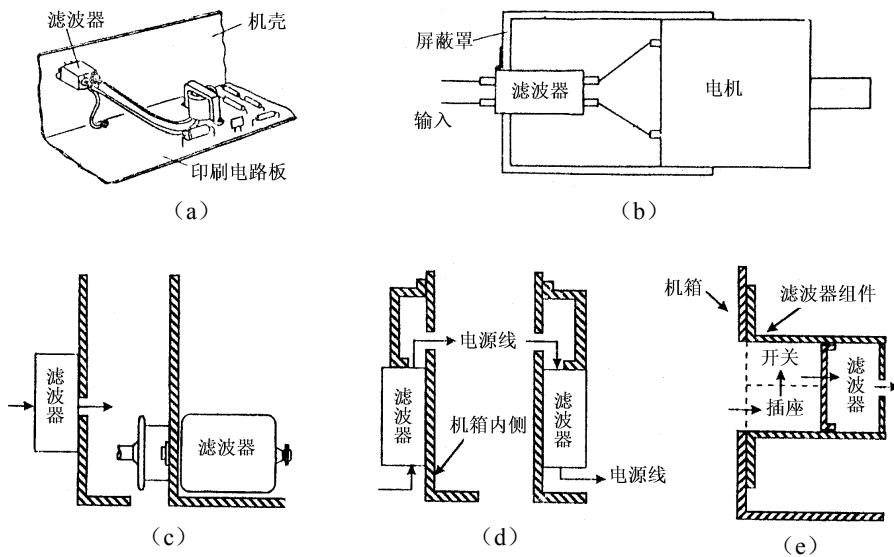


图 2.19 推荐使用的 EMI 滤波器安装方法

图 2.18 中三种安装方法的问题在于：滤波器的输入引线和输出引线之间存在有明显的电磁耦合路径，致使存在于某一端的 EMI 信号会逃脱滤波器的作用而直接耦合到另一端去。另外，这几种安装都是把滤波器置于屏蔽壳的内部，使设备内部电路及组件上的 EMI 信号会因辐射而在电源引线上生成 EMI 信号，直接耦合到设备外面去，使设备屏蔽丧失对其内部 EMI 辐射的抑制作用；同样，若滤波器电源端上存在有 EMI 信号，也会因辐射而耦合到设备内部的组件和电路上去，从而破坏滤波器和屏蔽壳对 EMI 信号的抑制作用。

图 2.19 所示的各种推荐使用的安装方法的共同特点是借助设备机壳的屏蔽，把 EMI 滤波器的源端和负载端隔离开来，将输入输出之间可能存在的电磁耦合控制到最低程度，既能实现滤波器对 EMI 信号的抑制，又不破坏屏蔽结构对 EMI 信号的控制。

(2) 滤波器的电容器引线应尽可能短，以免引线的等效感抗和容抗在某个较低频率上形成谐振。像穿心电容器和三端电容器就是两种为减少引线电感而设计的电容器，前者无需专门引线，后者引线很短，因此它们的自谐振荡频率可以高达 1GHz，是常用的干扰抑制组件。

(3) 滤波器的输入线和输出线必须分开，以防出现输入端和输出端之间的电磁耦合现象，而降低滤波器的衰减特性。通常应用隔板或底盘固定滤波器，若无法实施隔离，则采用屏蔽引线必须可靠。

(4) 滤波器的接地线上有很大的短路电容，会引发较强的附加电磁辐射干扰，因此滤波器的抑制组件必须进行良好的屏蔽和接地处理。

(5) 焊接在同一插座上的每根导线都必须进行滤波处理，否则会使滤波器的衰减特性完全丧失。

(6) 套管滤波器必须完全同轴安装，使电磁干扰电流呈辐射状流经电容器。若能把套管电容器通过法兰盘直接安装到干扰源上与设备组成一体，接地电流就会呈辐射状流过，抑制频率范围将可以扩展到几千兆赫。如果安装不当，抑制效果将会大打折扣。

2.5.5 几种实用滤波方法

1. 交流电源进线端的对称滤波方法

对高频干扰和低频干扰，对称滤波方法分别如图 2.20 和图 2.21 所示。

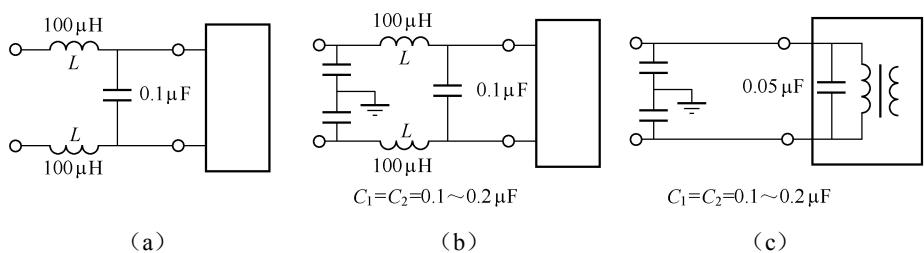


图 2.20 高频干扰的对称滤波方法

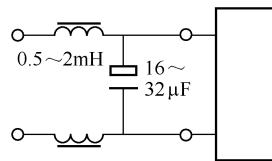


图 2.21 低频干扰的对称滤波方法

2. 直流电源输出滤波方法

直流电源往往供多个电路共享，因此为了减弱电源内阻在电路之间形成的噪声耦合，对直流电源输出一般还应加高、低频成分滤波器，如图 2.22 所示。

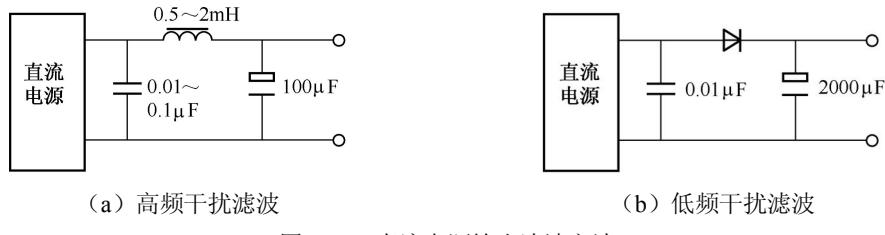


图 2.22 直流电源输出滤波方法

3. 退耦滤波方法

当一个直流电源对几个电路同时供电时,为了避免通过电源内阻造成几个电路之间互相干扰,应在每个电路的直流电源进线与地之间加装如图 2.23 所示的 RC 或 LC 退耦滤波器。

对一台设备的多级放大器，各放大级之间也会通过电源的内阻产生耦合干扰，因此供电和各级间都需如图 2.24 所示的那样加装 RC 退耦滤波器。其中供电退耦电容常用一个容量较大的电解电容和一个小电容的非电解电容组成，前者起低频退耦作用，后者起高频退耦作用。

4. 带换向器的电动机干扰滤波方法

如图 2.25 所示。

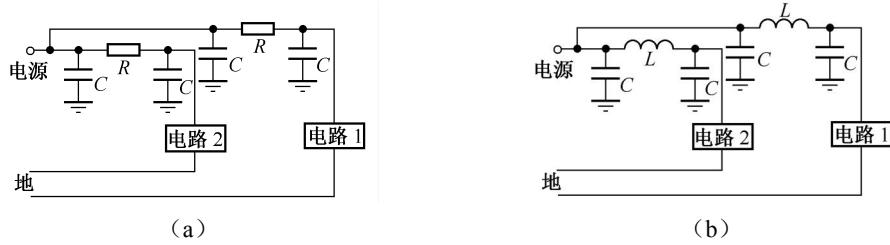


图 2.23 直流电源退耦滤波

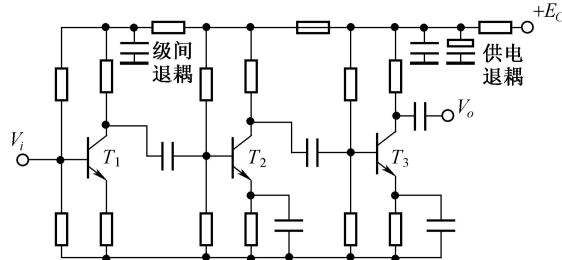


图 2.24 多级放大器退耦滤波

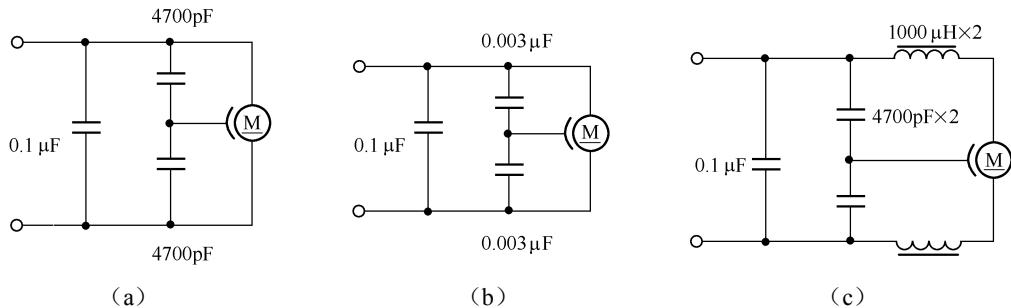


图 2.25 电动机干扰滤波方法

5. 电气开关和继电器触点干扰滤波方法

如图 2.26 所示。

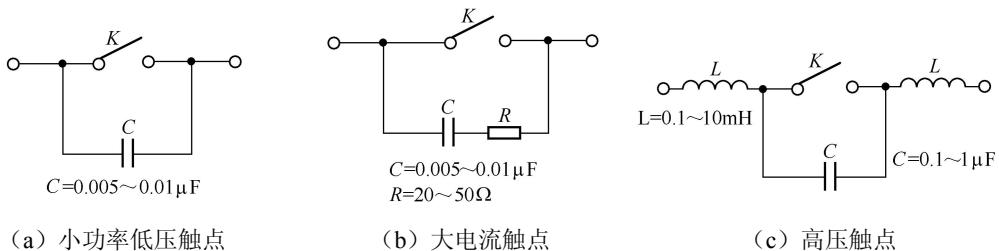


图 2.26 开关/继电器触点干扰滤波方法

2.6 接地与搭接技术

接地与搭接技术是防止电磁干扰、增加电子设备电磁兼容能力的重要方法之一。如果接地方

法使用恰当，搭接可靠，既可减少设备产生的对外干扰，又可使设备免受外来干扰。

2.6.1 搭接与接地概念

所谓搭接，是指将两个等电位导体连接在一起。而接地是指将一个导体与另一个零电位基准的导体搭接在一起。可见，接地是搭接的特例，或者说，接地是一个电路的概念，而搭接是接地概念的物理实现。例如，一个电路接地到设备的外壳，可以通过电路地线和设备外壳上两点之间的搭接完成；一个设备外壳和一个建筑物之间也可以通过搭接建立接地。

电子设备中的“地”通常有两种含义：一种是“大地”，真正的地；另一种是“系统基准地”。通常我们将地作为系统的零电位点。理想的“地”必须是一个零电位、零阻抗的理想导体；其上各点之间不应存在电位差，它可以在系统中作为所有信号电平的参考点。

电子设备接地的目的主要有两个：一是为了安全，称为保护接地或安全接地；二是为信号电压提供一个稳定的零电位参考点，称为信号地或系统地。

搭接和接地的基本原则是实现低阻抗连接，最好是零阻抗连接（当然，实际不可能）。

2.6.2 接地线类型

各种电子设备和电子系统中的接地线类型较多，通常分成以下两大类。

1. 保护接地线

指机壳与屏蔽层接地用的地线，与大地连接在一起。保护接地线的目的是防止机壳或屏蔽层上由于电荷积累、电压上升而造成人身伤害，或引起火花放电，给设备造成高频干扰而遭致损坏。所以保护接地线也叫安全接地线。

实际中，这类接地线除了设备安全接地线外，还有防雷接地线。

2. 信号地线

指电路系统中作为电信号基准电位的地线。电子系统的接地是一种抑制干扰、保证电路工作性能稳定可靠的关键。信号地线既是各级电路中静态、动态电流的信道，又是各级电路通过某些共同的接地阻抗而相互耦合，从而引起内部干扰的环节，因而，对于电子电路来说，简单地沿用电气工程中仅以通路为要求的习惯接地方法是不通的。

信号地线按照不同的分类原则，又可以分成多种不同信号性质的地线。在复杂的大系统中，既有弱电信号电路又有强电信号电路，既有低频信号电路又有高频信号电路，既有模拟信号电路又有数字信号电路，既有信号极为微弱的传感器电路又有信号电流很大的负载电路。这样的综合性系统，仅按一种接地方式设置信号地线，是绝对无法满足电磁兼容性要求的，而必须采用分门别类的方法，将不同性质的信号电路分成若干类别，按同类电路构成接地系统。这样，实际信号地线又常分成小信号地、大信号地和干扰源设备地，信号源地和负载地，模拟地和数字地等等。不同信号地线一般应分别设置，然后在电位需要连通时再选择合适的位置作一点连接，以消除各地线之间的相互干扰。

2.6.3 安全接地

为避免高压直接接触用电设备外壳或因设备内部绝缘损坏而造成漏电打火使机壳带电，防止人体触及机壳而导致人身伤亡事故，任何高压电气设备、电子设备的机壳、底座均需要安全接地。

一般用电设备在使用中会由于绝缘老化、磨损、浸水、潮湿等原因导致带电导线或部件与机

壳之间漏电，或者由于设备超负荷工作引起严重发热，烧损绝缘造成漏电，还会因环境气体污染、灰尘沉积等原因导致漏电和电弧击穿打火。

若人体触及机壳，相当于机壳和大地之间接了一个人体电阻 Z_b ，人体的电阻有很大的变化范围：在人体的皮肤处于干燥洁净和无破损情况下可高达 $40k\Omega \sim 100k\Omega$ ；如果人体处于出汗潮湿状态，可降至 1000Ω 左右。而流经人体电流的安全值，对于交流为 $15mA \sim 20mA$ ，对于直流为 $50mA$ 。当流经人体的电流高达 $100mA$ 时，人就可能死亡。因此我国规定的安全电压为 $36V$ 和 $12V$ 。一般家用电器的安全电压为 $36V$ ，以保证触电时流经人体之电流小于 $40mA$ 。

我国设备上用电电压为 $22V$ 或 $380V$ ，当电源频率为 $50Hz \sim 60Hz$ 时，对人体有最严重的触电危害，更低或更高的频率反而不易引起人体触电死亡。为了保证安全，应将在正常情况下不带电的金属外壳与接地体连接，这样，当人体接触带电外壳时，大部分电流将从接地电阻旁路流入大地。因此电阻规定为 $5\Omega \sim 10\Omega$ ，则流经人体的电流将减小到原先的 $1/200 \sim 1/100$ 。对于由 $380V$ 或 $220V$ 三相四线制电网供电的动力设备如电动机等，为安全起见，其金属外壳除正常接地外，还应与电网零线相连接，称之为接零保护。接零保护的原理为：外壳接地电阻和电网零线接地的电阻基本相当，当某相电压因故偶然与机壳短路时，接地线上的压降（即机壳对地的电压）大约为相电压的一半，即 $110V$ ，该电压显然超过安全电压，使接触外壳的人体电流超过安全电流而存在危险。这时，在将机壳接地的同时还应将它接到电网零线上，如图 2.27 所示。这种人身危险就可以消除。



图 2.27 三相四线制供电设备的接零保护

在设备安全接地时，还应特别注意接地棒附近的跨步电压危险。当电流从接地棒流入大地时，在接地棒周围必然存在杂散电流和杂散电场，如图 2.28 所示。若接地棒半径为 a ，高度为 h ，并完全埋于大地中。任何流入接地棒的电流为 I_0 ，接地电阻为 r_0 ，则在接地棒插入处地面将建立电压：

$$V_0 = I_0 r_0 \quad (2.19)$$

与此同时，经接地棒流入大地的电流将沿棒的径向扩散，从而在接地棒表面形成的杂散电流密度：

$$J_a = \frac{I_0}{2\pi a h} (\text{A/m}^2) \quad (2.20)$$

同理，在距接地棒中心 r 的圆柱面上的电流密度：

$$J_r = \frac{I_0}{2\pi r h} (\text{A/m}^2) \quad (2.21)$$

随着 r 由大到小，接地棒附近的地电位将升高。若人体跨步之间的地电位差（也称为跨步电压）太高，将产生人身触电危险。而对于用电设备来说，其连接于地的两点也可能使设备遭受损坏或干扰。

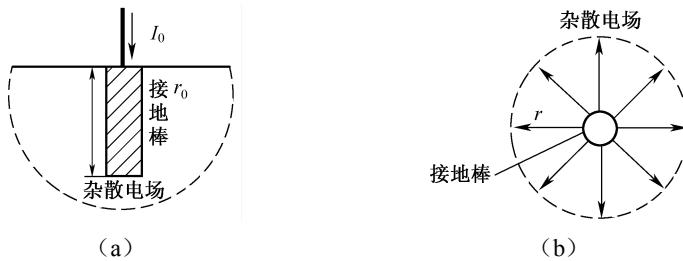


图 2.28 接地棒周围的杂散电场

2.6.4 信号接地

信号接地除遵循按电路信号性质不同分类接地的一般原则外，在同类信号中，根据接地点的连接方式不同，可以构成 4 种不同的接地系统。

1. 单点接地系统

单点接地系统用于为许多接在一起的单元电路提供共同参考点。在这种接地系统中，所有单元电路只有一个接地点。具体又有两种单点接地形式：

(1) 并联一点接地。这种单点接地形式的特点是系统中各设备（分系统）的接地线均通过一独立的接地排，各自引向同一主接地板上，如图 2.29 (a) 所示。其等效电路如图 2.29 (b) 所示，其中 R_1 、 R_2 、 R_3 分别为三条接地引线的等效电阻，这时各分系统的地线电位分别为： $U_A=R_1I_1$ ， $U_B=R_2I_2$ ， $U_C=R_3I_3$ 。

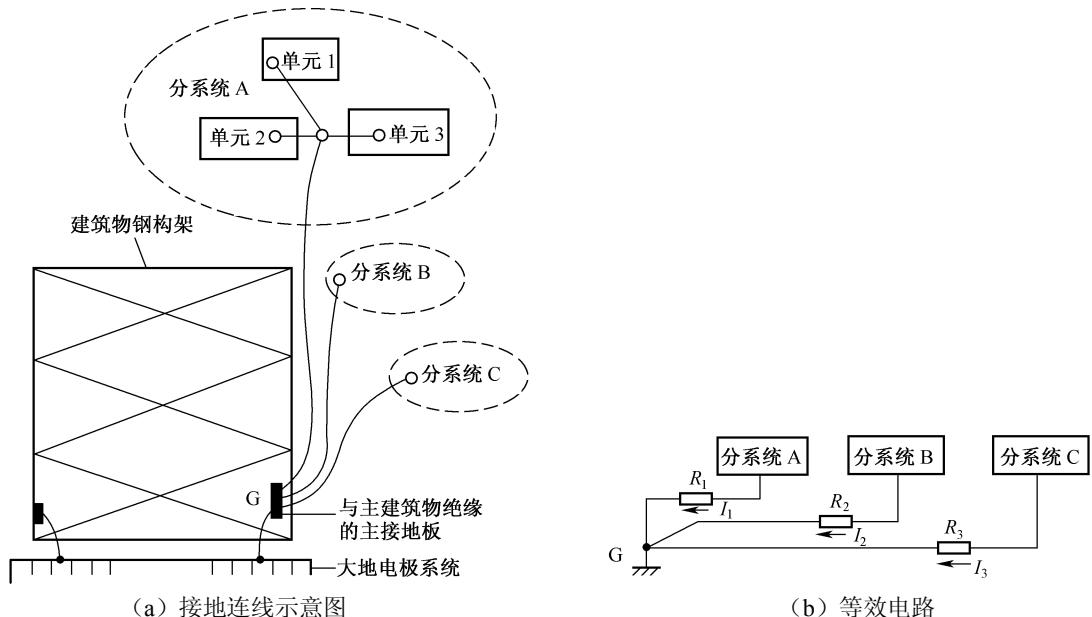


图 2.29 并联一点接地

按这种方式连接，各分系统的地电位仅与各目的地线电阻 R 和地电 I 有关，不受其他分系统的影响，对防止各分系统之间的相互干扰和地回路干扰是很有效的。特别是对连线较短、工作频率较低的电路系统，这种接地方式更适合。它的缺点是每个分系统（设备）需要一根地线，当分系统（设备）较多时，不仅需要很多根地线，使布线不方便，地线导线加长，导致地线电阻增大，

而且由于各地线间相互耦合，使线间电容耦合和电感耦合增大，在高频时反而会引起较大的耦合干扰。所以，并联一点接地方式一般只在频率低于1MHz时才采用。

(2) 串联一点接地。单点接地系统的另一种接地形式是如图2.30(a)所示的串联一点接地。

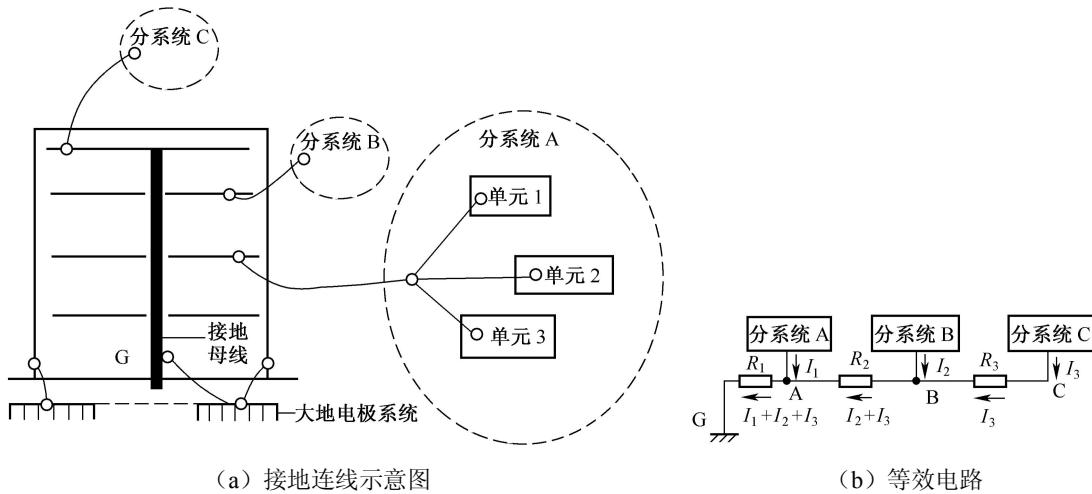


图2.30 串联一点接地

它的特点是每个分系统内的各单元是单点接地，然后利用单根绝缘导线把每个分系统的接地点连接到树叉状的接地母线。其等效电路如图2.30(b)所示。

由于各单元接地点的地电位不仅不为零，而且受其他单元电路的影响。因此，从防噪声和抗干扰角度看，这种串联一点接地方式不可取。但是因其结构简单，各单元电路的接地线短，电阻较小，所以在各种电子设备机柜中依然很常用，尤其在级数不多、各级电平相差不大以及抗干扰能力较强的数字电路系统中应用更多。

为了扬长避短，在采用串联一点接地方式时，应注意两点：①使各接地线尽可能短而粗，以最大限度减小其等效电阻；②使最低电平、最小电流的单元电路放在离接地点G最近的地方，以避免受大信号电路的干扰。

2. 多点接地系统

多点接地是指系统中各单元电路的接地点都就近直接连到接地平面上，形成多个接地点，如图2.31(a)所示。这里所说的接地平面，可以是设备的底板，也可以是连通整个系统的地导线，在比较大的系统中，还可以是设备的结构框架等等。如有可能，还可以用一个大型导电物体作为整个系统的公共地。

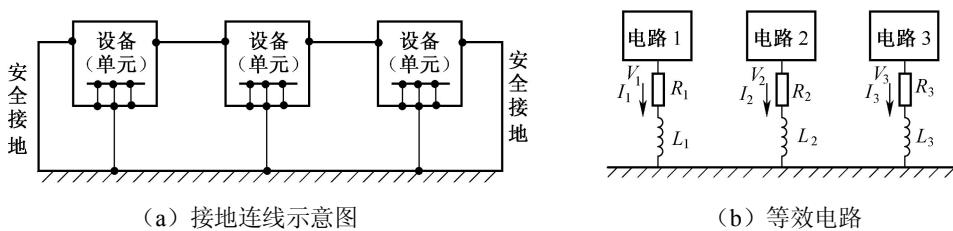


图2.31 多点接地系统

多点接地的优点是电路结构比单点接地简单，而且由于接地线短，接地线上可能出现的高频驻波现象显著减小，因此它是高频信号电路的唯一实用的接地方式。但是多点接地后，设备内部会增加许多地线回路，它们对低电平的电路会形成传导耦合干扰，带来不良影响，因此提高接地系统的质量就显得格外重要。

多点接地的等效电路如图 2.31 (b) 所示。图中 R_i 和 L_i ($i=1, 2, 3$) 分别为每个单元电路接至接地平面的地线电阻和等效电感， I_i 为相应地电流。由图可知，各单元电路对地的电位为： $u_i=(R_i+j\omega L_i)I_i$ 。为了降低 u_i ，应使地线阻抗尽量小。而为了减小地线阻抗，一方面尽量可能缩短地线长度，另一方面尽可能增大地线截面积。在截面积相同的情况下，矩形截面导体比圆形截面导体具有更小的阻抗，因此，实际中常用矩形截面导体作地线带。为了提高地线带表面的电导率，通常还在其表面镀银。

3. 混合接地系统

理论和实践都表明，对于工作频率低于 1MHz 和公共接地面尺寸小于 $\lambda/20$ (λ 为接地线上的驻波波长) 的电路系统，宜采用单元接地方式；对于工作频率高于 10MHz 和公共接地面尺寸大于 $\lambda/20$ 的电路系统，宜采用多点接地方式。而对于介于这两者之间的系统，工作频率为 $1\text{MHz} \sim 10\text{MHz}$ 。公共接地面尺寸为 $\lambda/20$ 左右时，一般可采用单点和多点结合的混合接地方式。例如电视放大电路中，其工作频率覆盖音频到视频 (约 6MHz)，因此只能采用混合接地方式：主放大器外壳直接接地，负载端的外壳通过电容 (有时利用分布电容) 接地，同轴电缆屏蔽层则经同轴连接器与两个外壳连接。这样在低频时因负载的外壳对地呈高阻抗，相当于仅主放大器外壳一点接地；而在高频时，因负载端外壳被电容旁路到地，相当于系统两点接地。

对于既有低频电路又有高频电路的电子设备，也应采用混合接地方式。

混合接地的实施方法是：低频部分采用单点接地，高频部分采用多点接地。或将各单元电路分成若干组，组内单点接地，组间多点接地。在信号地中，根据电路工作频率的不同，又采用不同的接地方式，如射频、中频放大器和中放、视放部分采用多点接地方式，而显示器，扫频电路和记录仪等低频电路则采用单点接地方式。

实际的电路系统往往比较复杂，很难通过某一种简单的单点或多点接地方式解决问题，因此混合接地系统应用更为普遍。

4. 悬浮接地系统

悬浮接地简称为浮地，它是将信号地与安全地相隔离，如图 2.32 所示。

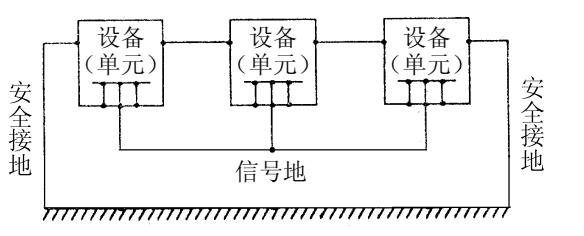


图 2.32 悬浮接地系统示意

浮地系统中各单元电路的参考地通过低阻抗导线连接在信号地，但信号地与建筑物结构地及其他导电物体隔离。这种浮地连接可避免机壳中的干扰电流直接耦合到信号电路。它主要应用于结构地线中或附近导体中有大干扰电流影响的电路系统中。但当浮地信号系统靠近高压线时，可

能在浮地信号地线上堆积感应静电荷形成危害，或引起静电放电，形成干扰电流；雷电和电源漏电还可以在机壳与信号地之间产生电火花，损害设备和人身安全。

2.6.5 接地设计

实际电路系统的接地设计，应包括接地方式选择，接地位置选择，地回路干扰抑制和接地工艺等几个方面，通过几方面的综合设计，来确保系统中作为各部分电路公共地回路的接地平面，应对系统内的所有工作频率都呈现可忽略的低阻抗，最大限度地减小因接地平面引入的耦合干扰。

1. 单元电路的接地

一般单元电路的接地方式和前述信号接地的方式一样，也有单点接地、多点接地、混合接地和悬浮接地四种方式。但对一个单元电路来说，最好采用单点接地。如多点接地，不同接地点之间不可能是理想的零阻抗，因此势必造成各接地点的电位不相等，从而导致在电路的输入回路中引入由电流形成的干扰电压，使电路工作不稳定甚至失误。而单点接地时，地电流对输入回路没有影响。

2. 多级电路的接地

多级电路是电子电路中广泛应用的典型电路，它普遍采用的是由多级放大电路组成的高增益放大器。如果接地方法不正确，接地点位置选择不当或者接地不良，都将使放大器产生增益失真，甚至引起自激振荡，破坏设备工作的稳定性。多级电路的接地，关键是要避免各级电路之间通过公共阻抗而形成干扰。为此，一般应遵循以下几条原则：

- (1) 低频单元电路应采用单点接地。
- (2) 高频单元电路应采用多点接地。若由于某种原因高频电路采用了单点接地方式，则一定要采用低电阻、低电感导线，即矩形横截面导线（俗称扁线）。
- (3) 各单元电路的接地点最终必然要汇总到一个公共接地点。而公共接地点应选择在低电平级电路的输入端，且按从前级到末级（即小信号到大信号级）的次序作接地连接，如图 2.33 所示。这样才能保证地线中的电流的流向是由小信号流向大信号，而不是相反，从而最大限度地减小地电流对电路的干扰。

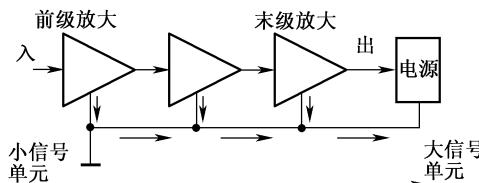


图 2.33 多级道路的公共接地点选择

(4) 应尽量避免环形接地电路。图 2.34 (a) 所示的多级放大器接地系统形成了一个环形接地电路，在这种情况下，一方面无法避免大信号电路电流进入小信号电路，造成对小信号电路的干扰，另一方面地线环容易接受外界磁场的干扰，影响放大器的正常工作。正确的接法应该如图 2.34 (b) 所示的那样。

- (5) 应保持屏蔽电流的畅通。

3. 电缆屏蔽层的接地

电缆屏蔽层接地正确与否关系到屏蔽作用的好坏。不正确的接地会使屏蔽无效。甚至比不屏

蔽更糟糕。屏蔽电缆一般分为低频电缆和高频电缆，对低频信号电缆屏蔽层通常应单点接地；对高频信号电缆和电力电缆的屏蔽层至少应在电缆两端接地，最好应多点接地。

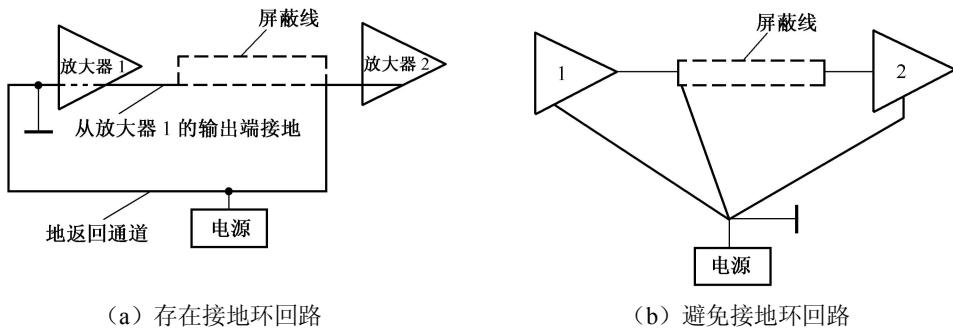


图 2.34 有无接地环回路的比较

(1) 屏蔽层的单点接地。对于单点接地的低频电路，其屏蔽层也应采用单点接地，如图 2.35 (a) 所示。其接地点可以像图中这样选择信号源端，也可选择放在电路输出端（负载端）。如果屏蔽层在信号源和负载两端都接地，如图 2.35 (b) 所示，就会在屏蔽层中形成噪声电流，并通过电感性耦合进入信号电缆，对电流产生干扰。所以对单点接地的低频电路不能两端同时接地。

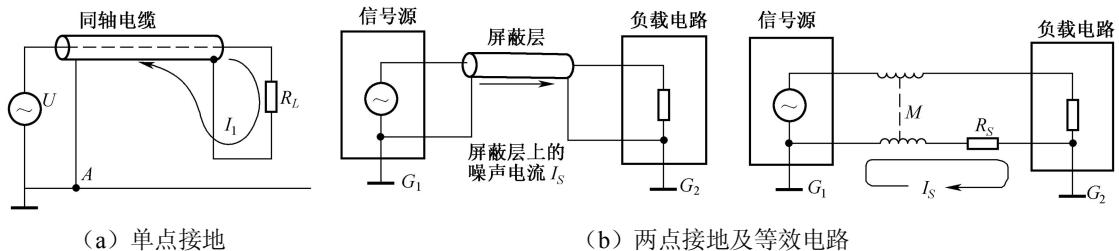


图 2.35 电缆屏蔽层的单点接地

下面针对信号电缆连接电路的屏蔽层单端接地问题再做进一步的讨论。

图 2.36 (a) 为单端接地的信号电缆连接电路，信号线可用双绞线、始端悬浮不接地，因而不存在接地环，磁感应有明显减小。双绞线绞合程度越高，抗磁干扰效果越好。如果给图 2.36 (a) 所示电路增加屏蔽层，如图 2.36 (c) 所示，显然可比原来增加一些屏蔽作用。但图 2.36 (b) 电路由于屏蔽层有两点接地而存在接地环，使磁屏蔽作用增加不明显；图 2.36 (c) 电路屏蔽层是一点接地，避免了接地环，使磁干扰衰减量可比原来增加 15dB 左右，磁屏蔽作用比较显著。图 2.36 (d) 为可用同轴电缆的单端接地传输电路。因同轴电缆的屏蔽层与中心导线形成的环面积很小，使磁干扰性能得到显著改善。图 2.36 (e) 所示单端接地传输电路中，其信号线采用双绞线，而在屏蔽层采用同轴电缆的接法，综合了双绞线和同轴电缆在磁屏蔽方面的优点，所以磁干扰衰减量比图 2.36 (c) 电路又有所增加。

要说明的是，上面的分析讨论是对低频而言的，如对高频数据和结论将有很大不同。由上面分析可看出，低频电路接地关键应考虑如何避免接地环。而高频时，由于趋肤效应使信号电路在屏蔽层上分层流动，因此同轴电缆屏蔽层与地面构成接地环的时候对信号影响不大，不会形成干扰。

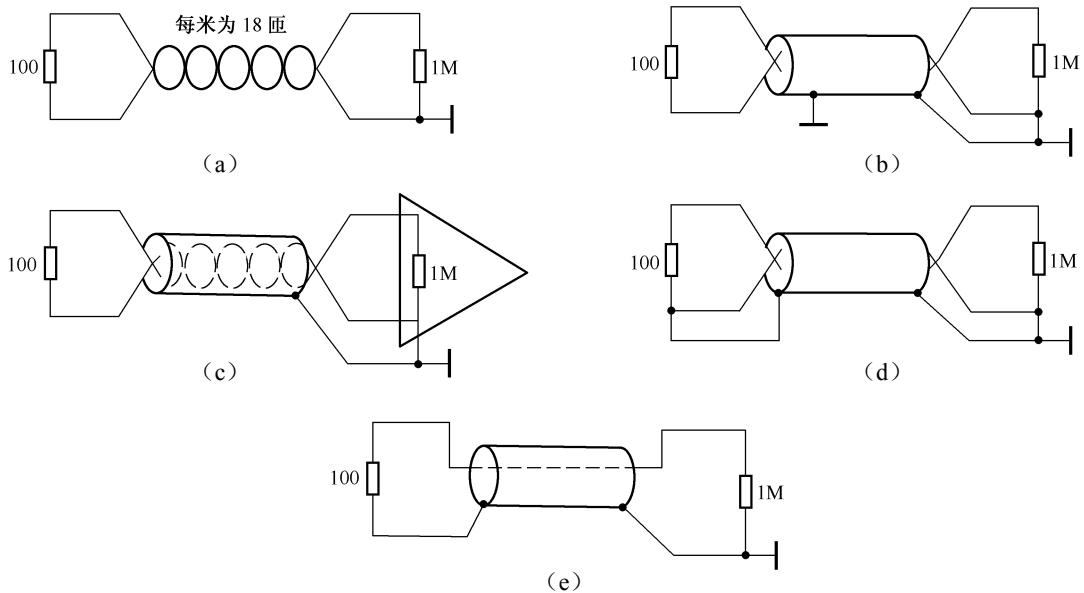
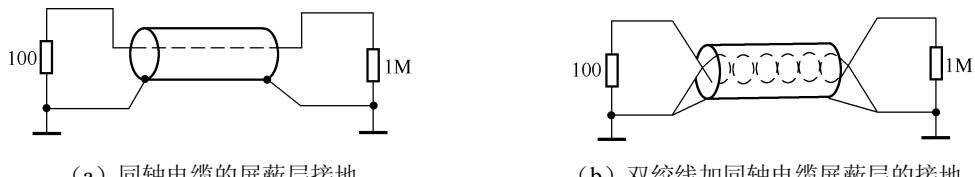


图 2.36 信号电缆连接道路的屏蔽层单端接地分析

(2) 屏蔽层的两点接地。有些低频信号的电缆连接电路，也有采用两端接地电路的。对于这种两端接地电路的信号电缆，其屏蔽层也应采用两点接地方案，如图 2.37 所示。其中图 2.37 (a) 为同轴电缆屏蔽层两端接地，图 2.37 (b) 为采用双绞线传输信号，采用同轴电缆屏蔽的屏蔽层两端接地。这两种接地方案都能利用屏蔽层的低阻抗特性，分流一部分磁感应的环路电流，起到衰减磁干扰的作用。但毕竟它们都构成了接地环，其抗磁干扰性能不可能很满意，所以低频电路，还是应强调尽量采用一点接地方案，只有必须在两端接地时，才提倡采用图 2.37 所示的方案。当然，在频率高于屏蔽层截止频率时，这种两端接地方案还是可取的。



(a) 同轴电缆的屏蔽层接地

(b) 双绞线加同轴电缆屏蔽层的接地

图 2.37 两端接地电流的屏蔽层接地

2.6.6 地环路干扰及抑制

上述各种接地方案选择或设计时，都谈到要通过消除地环路来抑制干扰。实际上，只要电路系统中存在多点接地，这种地环路就无法消除。而任何接地平台或地线都不可可能是零电阻的理想实体，而是既有电阻又有电抗的物理导体，当有地电流流过时，两个不同接地点之间必然产生压降，形成地电压。另外，由于地环路的存在，当外部时变电磁场耦合到环路时，必然在其外产生感应电动势。上述地电压和感应电动势的出现，都将由地回路通过一定的耦合方式，对信号电路形成干扰。

为了最大限度地抑制接地环路带来的干扰，除了应尽可能避免接地环或可能减小接地环面积外，往往还要采用一些专门技术，如引入隔离变压器、中和变压器、光电耦合器和使用浮地方法、

差分放大电路等。

1. 引入隔离变压器

如图 2.38 (a) 所示的那样在信号电路中引入隔离变压器, 是通过阻隔地环路的形成来抑制地环路干扰的。

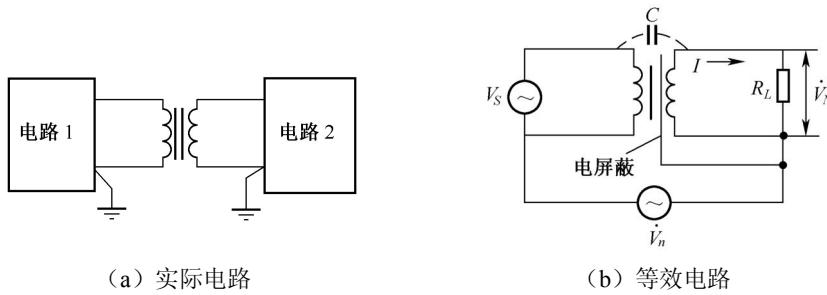


图 2.38 引入隔离变压器阻隔地环路

图中的电路 1 输出信号经变压器耦合到电路 2, 而地环路由变压器所隔断。但是, 由于变压器绕组之间存在分布电容, 地电压仍可通过此分布电容对电路形成干扰, 其等效电路如图 2.38 (b) 所示。等效电路中, C 为变压器绕组间的分布电容, R_L 为电路 2 的输入电阻, V_S 为电路 1 输出的信号电压 (等效电压源), 其内阻仍设为零, V_G 为地环路干扰电压, V_L 为 R_L 两端电压。显然, 根据电路分析中的线性迭加定理, V_L 是 V_S 和 V_G 在 R_L 上产生的响应电压之和。在分析隔离变压器阻隔地环路干扰的效果时, 我们可以不考虑 V_S 的传输 (即令 $V_S=0$), 而只考虑地环路电压 V_G 的作用。设 R_L 对 V_G 的响应电压分量为 V_{LG} , 则由等效电路可知:

$$\frac{\dot{V}_{LG}}{\dot{V}_G} = \frac{R_L}{R_L + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega CR_L}} \quad (2.22)$$

对式 (2.22) 取模, 得

$$\left| \frac{\dot{V}_{LG}}{\dot{V}_G} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega CR_L} \right)^2}} < 1 \quad (2.23)$$

式 (2.23) 说明, 采用隔离变压器后, 地环路干扰电压 V_G 加到 R_L 上的电压 V_{LG} , 小于未用隔离变压器时加到 R_L 上的干扰电压 V_G (全部加上)。两者比值越小, 说明抑制干扰的能力越强。所以式 (2.23) 常用来表示隔离变压器抑制地环路干扰的能力。

由式 (2.23) 可看出, 为了提高隔离变压器抑制干扰的能力, 应尽量减小 ωCR_L 的值, 使之远小于 1。而频率 ω 对一种特定的应用电路是无法改变的, 减小 R_L 也不可取 (小了会影响信号的传输), 因而最有效的办法是减小变压器绕组间的分布电容 C 。为此, 往往在变压器原、副边之间加以电屏蔽。为了防止地环路电压 V_G 通过电屏蔽层与绕组之间的分布电容耦合到负载 R_L 造成干扰, 电屏蔽层应连接到 R_L 的接地端, 如图 2.38 (b) 所示。

2. 引入中和变压器

上述隔离变压器只能传输频率较高的交流信号, 它对地线中的直流或低频干扰具有很好的抑制作用。当传输的信号中有直流分量或很低的频率分量时, 就不能用隔离变压器, 这时可将变压

器以纵向扼流圈的形式接入信号传输线中，称之为中和变压器，如图 2.39 (a) 所示。

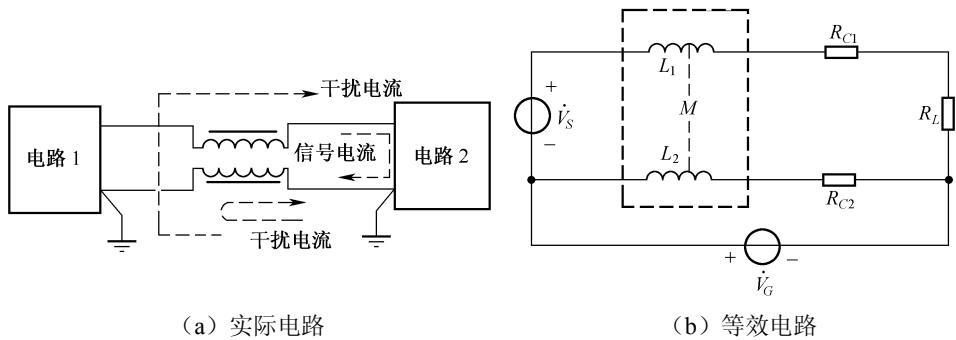


图 2.39 引入中和变压器阻隔地环路

中和变压器（又称纵向扼流圈）是由两个绕向和匝数都相同的绕组所构成，一般常以双线并绕而成。由图 2.39 (a) 可看出，信号电流在两个绕组中流动的方向相反（此称为差模电流），产生的磁场相互抵消，呈现低阻抗，可见中和变压器对信号电流不起扼流作用，也不切断直流回路；相反，地线中的干扰电流流经两个绕组的方向相同（此称共模电流），产生的磁场同向相加，说明中和变压器对地回路干扰电流呈现高阻抗，起到抑制作用。

中和变压器的上述特性，请有兴趣的读者通过图 2.39 (b) 所示的等效电路进行定量分析，在此就不一一赘述。值得说明的是，在该等效电路中， V_S 和 V_G 分别为信号源电压（电路 1 输出电压）和地环路电压， R_{C1} 、 R_{C2} 为两根信号传输线电阻， R_L 为负载电阻（电路 2 输入电阻）， L_1 、 L_2 为变压器两根信号传输线的电感， M 为互感。在两个绕组完全相同、且在同一铁芯上构成紧耦合的情况下，有 $M=L_1=L_2$ 。

3. 引入光电耦合器

切断两电路之间的环路，还可以采用另一种方法——引入光电耦合器，如图 2.40 所示。

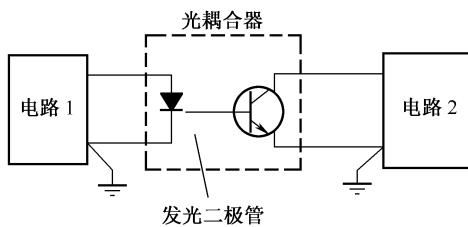


图 2.40 引入光电耦合器阻隔地环路

光电耦合器的输入端为发光二极管，发光的强弱随输入电流而变化；输入端为光敏三极管，随着光的强弱变化而改变输出电流的大小。将发光二极管和光敏三极管封装在一起，便构成了光电耦合器芯片。光电耦合器通过光强传输来控制电信号，完全切断了两个电路的地环路。这样，即使两个电路具有不同的地电位，也不会造成干扰。

光电耦合器主要适用于数字信号的传输，而不适于模拟信号的传输。原因是光电耦合器的光强与电流之间的线性不好，利用它传输模拟信号会产生较大的非线性失真。另外，光电耦合器的输入—输出端之间较大的杂散电容（通常在 $0.3\text{pF} \sim 10\text{pF}$ 之间）也限制了它在高频电路中的应用。例如， 3pF 的杂散电容在 1GHz 时具有约 50Ω 阻抗，此值已很容易形成新的干扰电流传

导路径。

随着光电耦合器技术的提高和发展,采用光纤来传输信息,是从根本上消除地环路耦合、抑制其带来的电磁干扰的一种先进方法,因此在强电磁干扰环境中和微弱信号检测系统中,常采用光纤作为信号传输线。

4. 使用浮地方法

浮地是一种将电路或设备与公共接地平台或可能引起回路电流的公共导线进行电隔离的方法。这种接地方法的特点是各级电路的接地面互相隔离而无公共的接地平面,如图 2.41 所示,因而可消除各级电路间的接地电位差的干扰。

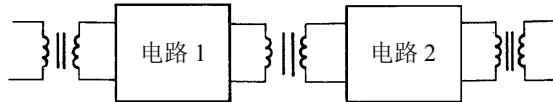


图 2.41 通过浮地消除地环路干扰

浮地的效果取决于是否能做到完全的浮地隔离。实际上,在很多情况下是很难做到完全浮地隔离的。例如,对大的系统要隔离得非常好以保持真正的浮地就难以做到。使用浮地方式,由于设备不与大地相连,容易出现静电累积现象,当电荷积累到一定程度时,在设备和大地之间将会产生具有强大放电电流的静电击穿现象。这种放电现象对设备中的电路是一种破坏性很大的强干扰源。为此,实际中往往在采用浮地的设备与大地之间接入一个大阻值泄放电阻,以消除静电积累的影响。这样,也就使得在设备与大地之间不可能实现真正的浮地隔离。

这种通过浮地来抑制地环路干扰的方法,和引入隔离变压器一样,只适用于低频干扰的抑制,而不适用于高频干扰,原因是干扰频率升高时,分布电容的作用可使多级耦合变压器旁路而失去隔离作用。

5. 使用差分放大电路

差分放大电路又称平衡输入放大电路或差分平衡电路,它具有两个信号输入端和一个公共端构成的信号入口,其输出电压与两个输入端的电压差值成正比。图 2.42 (a) 给出了使用差分放大电路抑制地环路干扰的连接图,图 2.42 (b) 所示的是其等效电路。图中 K 表示增益为 K 的差分放大器, R_{L1} 和 R_{L2} 为差分放大器的输入电阻, \dot{V}_s 和 R_s 分别为电路的信号源电压和电阻, \dot{V}_G 和 R_G 分别为接地点 A、B 之间的电位差 (地环路干扰电压) 和地线电阻, R_{C1} , R_{C2} 为两根信号传输线的电阻, \dot{V}_1 和 \dot{V}_2 分别为差分放大器两输入端的电压。

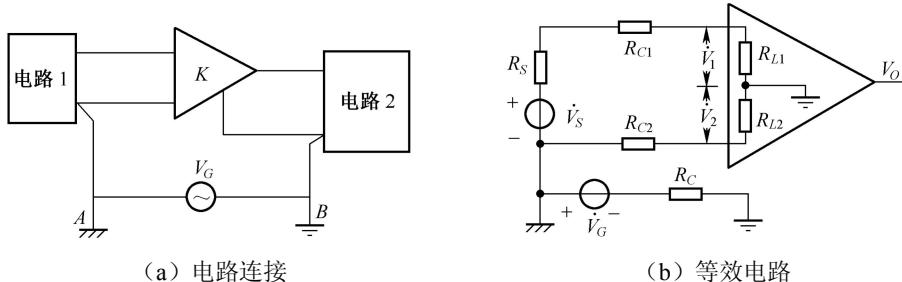


图 2.42 使用差分放大电路抑制地环路干扰

为了分析差分放大器对地回路电压 \dot{V}_G 干扰作用的影响,可不考虑 \dot{V}_s (即令 \dot{V}_s 短路),而将图

2.42 (b) 所示的等效电路简化为图 2.43 的形式。

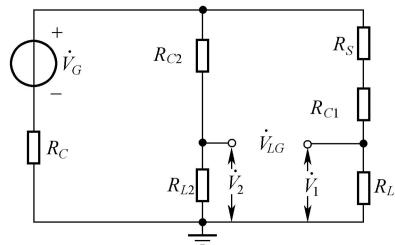


图 2.43 分析差分放大器对 \dot{V}_G 的影响

由图 2.43 可见, \dot{V}_G 在差分放大器输入端引起的干扰电压为

$$\dot{V}_{LG} = \dot{V}_1 - \dot{V}_2 = \frac{R_{L1}}{R_G + R_{L1} + R_{C1} + R_S} \dot{V}_G - \frac{R_{L2}}{R_G + R_{L2} + R_{C2}} \dot{V}_G \quad (2.24)$$

由于差分放大器的输入端对地电阻很高, 一般都满足 $R_{L1}, R_{L2} \gg R_G$, 故式 (2.24) 可近似写为

$$V_{LG} = \frac{R_{L1}}{R_{L1} + R_{C1} + R_S} V_G - \frac{R_{L2}}{R_{L1} + R_{C2}} V_G \quad (2.25)$$

因为差分放大器是平衡对称的, $R_{L1} = R_{L2}$, $R_{C1} = R_{C2}$, 若信号源内阻 R_S 又足够小, 则 $V_G \approx 0$, 这样使差分电路的输出 $V_0 = K \cdot V_{LG}$ 也近似为零。可见, 接入差分放大器后, 地线环路电压 \dot{V}_G 对电路的输出基本没影响, 说明其干扰作用被大大削弱了。当然, 实际上在差分放大器及其相关电路中总不可能完全平衡对称, 这样, 干扰电压 \dot{V}_G 中的一部分就将作为差分电压出现在放大器两输入端对地的漏电阻之差 R 上 (完全对称时 $R=0$), 从而引入干扰。为了增强对这种干扰的抑制能力, 由式 (2.25) 可以看出, 应尽量增大差分放大器的输入电阻 R_{L1} 、 R_{L2} 或减小电路的信号源内阻。

2.6.7 搭接技术

搭接可以是两物体表面的直接接触, 也可以是通过使用搭接片或其他中间件来使两物体连接。前者称为直接搭接, 后者称为间接搭接。无论直接搭接或间接搭接, 都要求金属件对金属件的裸面接触。实现两金属件的永久接合可以通过焊接、熔接、锻压等方法来实现; 对于半永久性结合则可以采用螺栓、铆钉等方法连接。为了得到尽可能满意的结合效果, 在搭接前需对搭接表面进行必要的处理, 有时还需要在其表面镀金或镀银来覆盖一层良导电层。

1. 搭接处理

(1) 搭接面处理。为了保证金属表面的紧密接触, 要求搭接的两金属表面要平整、光滑和清洁, 确保没有氧化层。为此, 需要进行磨光、净化等处理。

(2) 防腐蚀、防熔合处理。当不同的金属互相接触时, 会出现腐蚀和熔合两种影响搭接效果的现象。

所谓腐蚀, 是指来自电化学序列中不同组的两种金属, 在有电解液存在的情况下相接触所形成的一种化学电池效应, 它将使相接触的金属逐渐产生原电池腐蚀和电解腐蚀。

腐蚀的程度取决于两种不同金属在电化学序列中的组别和接触时所处的环境, 适当地改变这

两个因素, 可使搭接的腐蚀减小。一般来说, 处于同一组中的两种金属接触时不会发生明显的腐蚀现象。因此, 两种相接触的材料, 应尽量选择同一组或相邻组的金属。如需将相隔较远的两组中的金属(例如铝和不锈钢)相搭接, 为了减轻腐蚀, 可在两金属表面间放入一个中间组金属(例如锡)的垫圈, 这样即使保护层损坏, 受腐蚀的也是垫圈, 而不是相搭接的金属。另外, 当两种不同金属搭接时, 阴极和阳极的相对面积选择也很重要, 阴极越大, 意味着电子流量越大, 对阳极的腐蚀作用越严重, 因此减小阴极面积可以减轻腐蚀。

熔合是两种不同金属在没有电解液的情况下相接触时出现的一种现象。有些金属在熔合时会形成一种易脆的合金, 例如金和铝在300°C时就会形成一种非常脆的合金, 虽然这种合金的导电性非常好, 但是任何振动都会使合金破裂成一些碎粒, 从而使接触点处于分离状态, 使搭接电阻增大。

熔合与腐蚀比, 后者对搭接效果的影响远大于前者。因此, 实际中应尽量保持搭接件的干燥和减少对电解液的暴露。通常能起电解液作用的液体有盐水、盐雾、雨水、汽油等。

(3) 涂覆处理。为了保护搭接件, 在接缝表面往往要附加涂覆处理, 比如涂油漆、环氧树脂、填缝剂、密封混合剂或电镀等。当不同金属体搭接时, 特别应对阴极表面进行涂覆, 当然对两种金属体表面都加涂覆更好, 如图2.44所示。

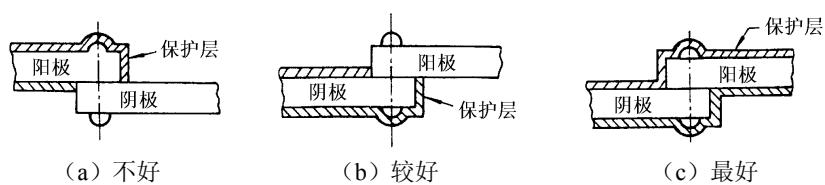


图2.44 不同金属搭接件的涂覆

2. 搭接安全考虑

搭接时还必须考虑搭接点承受突变电流的能力, 因为搭接点有时要通过很强的电流, 例如电动机的启动电流有时高达几百安培以上。若搭接点的额定电流值很小, 当有很大电流流过时, 该点将发热而成为一个“热点”, 严重时可达到白炽程度, 使附近金属熔化, 甚至引燃附近的易燃气体而酿成事故。因此, 在搭接时必须考虑搭接点的电流容量。如用螺栓实现搭接时, 若承受100A电流, 螺栓的直径至少为0.65cm; 若承受200A电流, 螺栓直径至少应为1.0cm。

3. 搭接的有效性

搭接的有效性主要表现在搭接阻抗的大小上。对直流情况, 最关心的是搭接的欧姆电阻。随着频率的增加, 一方面, 由于趋肤效应而使得电阻值增大, 另一方面对不同的搭接结构还会表现出一定的电感和电容。通常以搭接电阻作为搭接质量的主要指标。当直流电阻在0.25~2.5mΩ范围时, 可以得到较好的射频搭接效果。因此, 在搭接完成以后, 常通过测量直流电阻来测试搭接的有效性。测量应使用能够检测到0.001Ω电阻的电桥, 所用连接导线的电阻应小于0.001Ω。一般说来, 连线是由编织线构成的, 编织线与一个夹子相连, 夹子用来连接一个待测的搭接点。

当然, 通过测量直流电阻尽管可以了解金属表面之间连接的结合程度, 但并不能直接得到搭接的射频性能。若要直接得到搭接的射频性能, 可以通过扫频仪测量。通过射频测量可在搭接性能经常恶化的频率段确定搭接阻抗。

习题二

- 2.1 什么叫电磁兼容和电磁兼容性？一般用哪些参数来表示电磁兼容性？
- 2.2 何谓电磁兼容三要素？从电磁兼容三要素能否推知实现电磁兼容的基本途径有哪些？
- 2.3 实施电磁兼容的常用方法有哪几种？从提高效果效率的角度看，以哪种实施方法最科学合理？其基本思路是什么？
- 2.4 电磁兼容设计的主要内容和基本参数有哪些？
- 2.5 屏蔽抑制的是以什么形式传播的电磁干扰？其基本作用原理是什么？
- 2.6 试说明主动屏蔽和被动屏蔽，电屏蔽、磁屏蔽和电磁屏蔽的区别所在。
- 2.7 高频磁屏蔽和低频磁屏蔽的原理有什么不同？为什么说电磁屏蔽一般是针对高频电磁场干扰而言的？
- 2.8 按频率特性，滤波器可以分为哪几种？请画出它们的频率特性示意图。
- 2.9 接地与搭接有什么联系和区别？
- 2.10 在电气电子和计算机应用系统中，通常有哪几种接地类型？它们各起什么作用？
- 2.11 根据信号接地点连接方式的不同，通常可构成哪几种信号接地系统？它们各有什么特点？
- 2.12 为了最大限度地抑制接地环路带来的干扰，实际中常采用哪些专门技术？它们各有什么特点和主要适用范围？