

第 5 章



传导发射和传导抗扰度

本章主要研究从设备中沿着交流电源线所传导出来的辐射及其产生机制。因为设备最终要被安装到公用的电力系统网上,电网又通过交流电源线连接着不同输出功率的设备,便形成了一个庞大的发射系统,能够使传导发射有效地辐射出去。因此,管理机构对每种设备都规定了强制的传导发射限值。传导发射测试的目的是测试设备工作时通过电源线、信号线和互连线向外发射的干扰信号,测试这些能量是否超过标准要求的界限值,从而保证在公共电网上工作的其他设备免受干扰。

同时,传导发射可能导致辐射发射,然后可能引起干扰。通常减少传导发射比减少辐射发射要简单一些,因为传导发射只需要控制设备的电源线。但是,需要重点关注的是,如果设备不符合传导发射的限制,那么遵守辐射发射限制就没有意义。因此,控制设备的传导发射与辐射发射具有同等的优先权。

不仅如此,从电磁兼容的角度来看,仅遵守传导发射和辐射发射的限值并不是一个完整的设计。设备必须对电力系统网络上存在的干扰具有合理的不敏感性,以确保产品的可靠运行。例如,闪电可能会撞击设备的输电线路,引起电源完全断供;或由于电源系统故障引起的电源暂时中断而导致瞬间功率损耗。对传导发射的限值旨在控制辐射发射的干扰可能性,这些干扰是由于沿着其交流电源线从产品导出而施加在商用电源线上的噪声电流。通常,这些噪声电流太小,只能通过沿着交流电源线传导到设备中而造成直接干扰。然而,诸如由闪电引起的干扰足以通过其交流电源线直接传导到设备中引起干扰。这种类型的干扰代表了传导抗扰度问题,并且是制造商意识到并研究的问题。



5.1 传导发射测试

本节主要介绍验证设备是否符合传导发射规定限值的传导发射测试过程。在进行传导发射测试时,需要在电源插座和被测设备的交流电源线之间插入线路阻抗稳定网络(Line Impedance Stabilization Network, LISN)来测量。典型的测试配置如图 5-1 所示。设备的交流电源线插入 LISN 的输入端,LISN 的输出端插入电源插座,交流电通过 LISN 为设备供电。频谱分析仪连接到 LISN 并测量设备的传导发射。

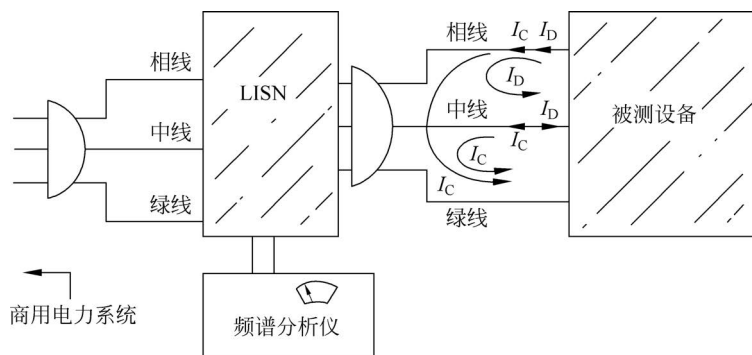


图 5-1 使用 LISN 测量产品传导发射

5.1.1 人工电源网络

传导发射测试的目的是测量产品交流电源线的噪声电流，可以使用电流探头简单地测量。然而，在测试场地中测试数据的一致性要求使这种简单的测试变得不切实际。

人工电源网络 LISN 具有两个目标：一是在传导发射测量频率范围内，给设备提供一个稳定的阻抗；二是隔离被测设备以外的传导发射。设定这两个目标的原因，其一是在测量频率范围内不同建筑、不同插座从交流电源系统墙壁插座中看到的阻抗变化很大，这种阻抗的变化影响到了电源线传出去的噪声电流大小；其二是电力系统网络上存在的噪声量会因站点而异，这种外部噪声会进入设备的交流电源线，需要对这些噪声以某种方式排除，否则将增强测量的传导发射。

用于传导发射测量的 LISN 电路组成如图 5-2 所示。电网电源侧的相线和地线之间以及中线和地线之间的 $1\mu\text{F}$ 电容的目的是转移电网上的外部噪声，防止噪声通过测量设备而污染测试数据。同样， $50\mu\text{H}$ 电感的目的是阻隔该噪声。另一个 $0.1\mu\text{F}$ 电容的目的是防止接收机的输入端过载。

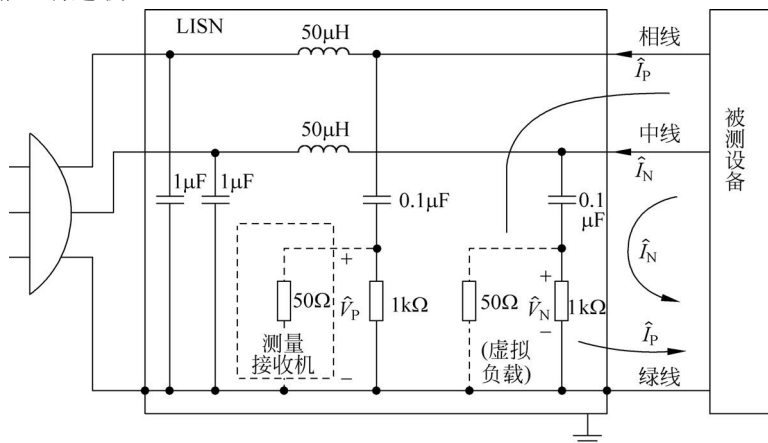


图 5-2 LISN 电路组成

在去掉 50Ω 电阻的情况下, $1k\Omega$ 电阻为 $0.1\mu F$ 电容提供静电放电通路; 50Ω 电阻与 $1k\Omega$ 电阻并联, 一个 50Ω 电阻是测量接收机(频谱分析仪)的输入阻抗, 另一个为虚拟负载, 保证相线和安全地线之间、中线和安全地线之间的阻抗一直为大约 50Ω 。

$\hat{V}_P$ 和 $\hat{V}_N$ 分别表示相线和地线之间以及中线和地线之间的测量电压。相线电压和中线电压必须在规定的传导发射限值的频率范围内进行测量, 并且都必须小于传导发射限值。现在来分析为什么传导发射限值是根据电压来规定的, 而实际上却对传导发射电流感兴趣。相线电流 $\hat{I}_P$ 和中线电流 $\hat{I}_N$ 与测量的电压的关系为

$$\hat{V}_P = 50\hat{I}_P \quad (5-1)$$

$$\hat{V}_N = 50\hat{I}_N \quad (5-2)$$

其中, 在测量频率范围内, LISN 的电容短路, 电感开路。因此, 测量的电压与相线和中线的噪声电流直接相关。

也正因为 LISN 的电容(电感)在传导发射测试的整个频率范围内基本上是短路(开路), LISN 的等效电路是相线和地线之间以及中线和地线之间的 50Ω 电阻, 如图 5-3 所示。在 $60Hz$ 电源频率下, 电感的阻抗为 $18.8m\Omega$, $0.1\mu F$ 电容的阻抗为 $2.7k\Omega$ 。因此, 在 $60Hz$ 工作频率下, LISN 几乎没有作用, 只给设备提供用于功能操作的交流电。

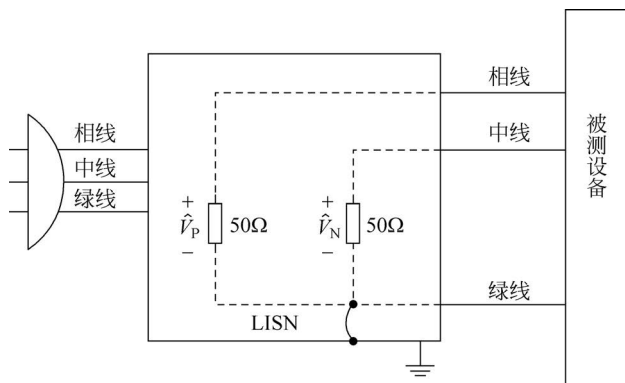


图 5-3 在传导发射调节频率范围内看到的 LISN 的等效电路

需要指出的是, 符合法规要求的设计目标是通过 LISN 的 50Ω 电阻防止监管限值频率范围内的电流流入。在监管限值频率范围之外的传导限值是无紧要的, 但是可能会引起对其他产品的干扰, 因此在设计优质产品的过程中不能完全忽视它们。通过 LISN 测量, 在规定频率范围内的存在于设备电源线上的任何电流都会导致设备不符合限值。一个常见的例子是电源线上存在的系统振荡器的时钟谐波。例如, 假设系统时钟为 $10MHz$, 如果此信号耦合到交流电源线上, 它将在规定的频率范围($10MHz$ 、 $20MHz$ 和 $30MHz$)内向 LISN 提供信号。尽管电源线无意承载这些电流, 但如果它们存在于电源线上, 它们将被 LISN 测量到, 并可能导致产品不符合法规限制。

LISN 实际上是一个双向低通滤波器, 对于 $50Hz$ 的工频电源, 仍然可以通过 LISN 向

网络测试设备(Equipment Under Test,EUT)供电。电网中的频率较高的骚扰由 $50\mu\text{H}$ 和 $1.0\mu\text{F}$ 的滤波器滤掉,不能进入骚扰测量仪,而 EUT 发射的骚扰由于 $50\mu\text{H}$ 滤波器的阻挡不能进入电网,只能通过 $0.1\mu\text{F}$ 电容进入骚扰测量仪。因此,LISN 的一个作用是隔离电网和 EUT,使测到的骚扰电压仅仅是 EUT 发射的骚扰,不会有电网的骚扰混入,其作用很像辐射发射测量时的电波暗室。

LISN 的另一个作用是为测量提供一个稳定的阻抗,因为电网的阻抗是不确定的,阻抗不一样,所测到的 EUT 的骚扰电压值也不同,所以要规定一个统一的 EUT 骚扰的负载阻抗。该负载阻抗有几种类型: $50\Omega/50\mu\text{H}$ (即 50Ω 电阻和 $50\mu\text{H}$ 电感并联,测量频率为 $150\text{kHz}\sim 30\text{MHz}$)、 $50\Omega/(50\mu\text{H}+5\Omega)$ (即 50Ω 和 $50\mu\text{H}$ 加 5Ω 的并联,测量频率为 $9\sim 150\text{kHz}$)、 $50\Omega/(5\mu\text{H}+1\Omega)$ (即 50Ω 和 $5\mu\text{H}$ 加 1Ω 的并联,测量频率为 $150\text{kHz}\sim 100\text{MHz}$)、 150Ω (测量频率为 $150\text{kHz}\sim 30\text{MHz}$)。测量仪的输入阻抗为 50Ω ,包含在负载阻抗中,随着频率的升高,EUT 骚扰的负载阻抗趋近 50Ω 或 150Ω 。

图 5-4 所示的 LISN 仅是一种基本结构,由两个基本结构可以组成 V 型 LISN,用于测量电源中相线 L-地线 PE 和零线 N-地线 PE 的不对称(共模)骚扰电压,如图 5-5 所示。应该注意的是,由于 LISN 的 V 型结构导致该不对称骚扰电压是设备的差模骚扰电流和共模骚扰电流在 50Ω 负载阻抗上共同作用的结果,一般高频成分以共模骚扰为主,低频成分以差模骚扰为主。

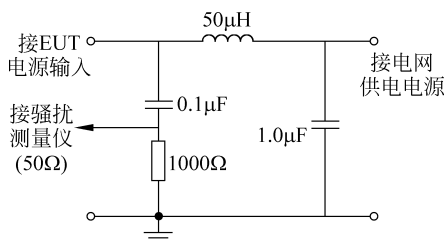


图 5-4 LISN 基本结构

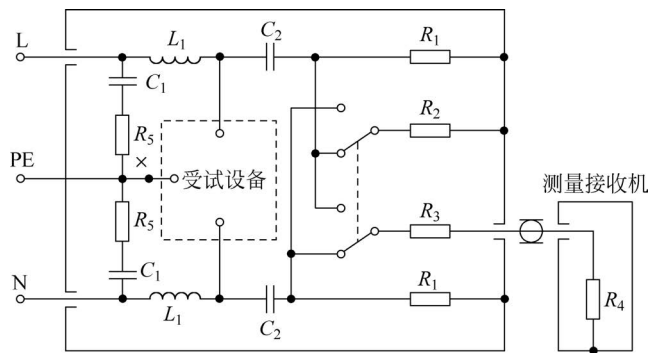


图 5-5 $50\Omega/50\mu\text{H}$ 的 V 型 LISN

由两个基本结构也可组成 150Ω 的 Δ 型 LISN, 如图 5-6 所示。除了测量线-地间的不对称(共模)骚扰电压外, 还可以测量相线-零线间的对称(差模)骚扰电压。这时线-地间的不对称(共模)骚扰电压仅由共模骚扰电流在 150Ω 负载阻抗上产生, 相线-零线间的对称(差模)骚扰电压仅由差模骚扰电流在 150Ω 负载阻抗上产生。

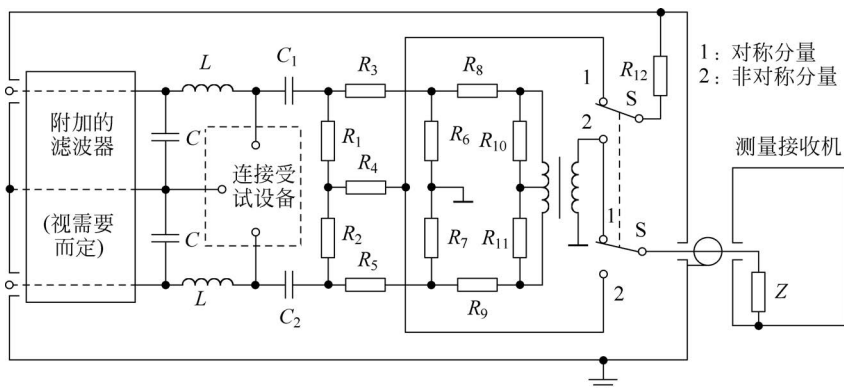


图 5-6 150Ω 的 Δ 型 LISN

例 5-1 连续骚扰电压传导发射测试时, 人工电源网络起什么作用?

解 (1) 对 EUT 低通滤波供电(低通滤波)。

(2) 把电网中的骚扰与 EUT 发生的骚扰相隔离(隔离)。

(3) 阻抗稳定。

5.1.2 共模电流和差模电流

在考查骚扰通过导线的传输途径相互干扰时, 应先搞清电流在导线上传输的两种方式: 共模方式和差模方式。一对导线上若流过差模电流, 则两根线上的电流大小相等, 方向相反, 驱动源是线-线之间的差模源。一般有用信号都是差模电流。一对导线上若流过共模电流, 则两根线上的电流方向相同, 但大小不一定相等, 驱动源是线-地之间的共模源。骚扰电流在传输线上既可能以差模方式出现, 也可能以共模方式出现。

图 5-3 中, 将 LISN 表示为相线和绿线、中线和绿线之间的 50Ω 电阻, 简化传导发射的分析。为了验证符合规定限值而要测量的电压是这些 50Ω 电阻上的电压, 表示为 $\hat{V}_P$ 和 $\hat{V}_N$ 。根据式(5-1)和式(5-2), 这些电压通过欧姆定律与发射电流联系起来, 与辐射发射的情况一样, 可以将这些电流分解为通过相线流出并返回到中线的差模电流以及通过相线和中线流出并返回到绿线的共模电流, 如图 5-7 所示。

$$\hat{I}_P = \hat{I}_C + \hat{I}_D \quad (5-3)$$

$$\hat{I}_N = \hat{I}_C - \hat{I}_D \quad (5-4)$$

解得

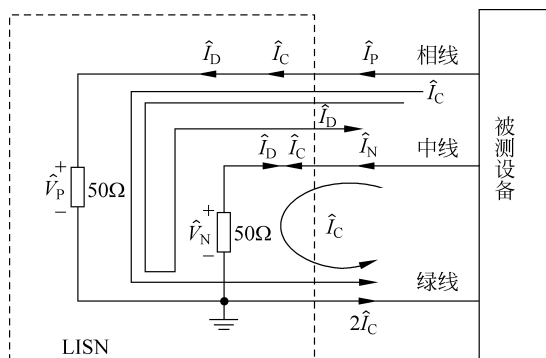


图 5-7 差模和共模电流分量对测量的传导发射的影响

$$\hat{I}_D = \frac{1}{2}(\hat{I}_P - \hat{I}_N) \quad (5-5)$$

$$\hat{I}_C = \frac{1}{2}(\hat{I}_P + \hat{I}_N) \quad (5-6)$$

测得的电压为

$$\hat{V}_P = 50(\hat{I}_C + \hat{I}_D) \quad (5-7)$$

$$\hat{V}_N = 50(\hat{I}_C - \hat{I}_D) \quad (5-8)$$

与辐射发射相反,传导发射中的共模电流可以与差模电流的量级一样或超过差模电流。因此,不应该假设共模电流在传导发射中是无关紧要的。接下来将展示并确认这一重要事实的实验结果。同样需要记住的是,传导发射符合性测试中的差模电流不是 60Hz 电源线上的工作电流。观察到差模电流从一个 50Ω 电阻流入,从另一个 50Ω 电阻流出,而共模电流通过两个 50Ω 电阻流入。由于每个电流的作用是加到 $\hat{V}_P$ 中和从 $\hat{V}_N$ 中减去,因此,如果共模电流和差模电流具有相同的幅度,则相线电压和中线电压将不相同。通常,某个分量占主要因素,那么相线电压和中线电压的大小近似相等,即

$$\hat{V}_P = 50\hat{I}_C, \quad \hat{I}_C \gg \hat{I}_D \quad (5-9)$$

$$\hat{V}_N = 50\hat{I}_C, \quad \hat{I}_C \gg \hat{I}_D \quad (5-10)$$

或

$$\hat{V}_P = 50\hat{I}_D, \quad \hat{I}_D \gg \hat{I}_C \quad (5-11)$$

$$\hat{V}_N = -50\hat{I}_D, \quad \hat{I}_D \gg \hat{I}_C \quad (5-12)$$

阻断共模电流路径的两种常用方法如图 5-8 所示。在许多电子设备中,电感放置在绿线上进入产品的入口处,如图 5-8(a)所示。电感对在传导发射规则限制的频率范围内的共模电流呈现高阻抗,但故障电流的通路仍然存在,用于给绿线提供雷击防护。出于安全原因,不希望在绿线中焊接电感,因为焊点可能变得有缺陷,导致绿线断开而留下潜在的电击危险。为了防止这种情况发生,把绿线在铁氧体环形线圈周围缠绕若干圈构造电感器(在传

导发射极限频率范围内具有合适的特性)。这种绿线电感的典型值为 0.5mH , 在规定限值 (150kHz) 的较低频率下具有约 471Ω 的阻抗。人们可能会认为这种阻抗会在 30MHz 的频率上限时增加, 但实际上并非如此。磁环线圈之间的分布电容会导致其高频性能变差。

另一种方法是构造所谓的双线产品。电源线仅包含相线和中线, 不存在安全线。双线产品具有潜在的电击危险, 因为配电系统的中线直接连接到地面 (在配电面板入口处), 并且相线与地面相比很“热”。因为无法保证用户会将产品插头插入电源插座的正确孔中, 所以不可能把中线与机壳相连。如果消费者将产品插入电源插座的错误孔中, 则机箱相对于地面会“热”, 从而产生明显的电击危险。双线产品通过在产品的电源入口处放置一个 60Hz 的变压器解决这个问题, 如图 5-8(b) 所示。机壳可以连接到变压器的次级侧, 不直接连接到相线或中线。在这种类型产品中去掉绿线通常被认为可以消除共模电流。但由于图 5-8(b) 所示的原因, 这不一定是正确的。产品机壳和测试场的金属墙之间的分布电容提供了返回 LISN (必须与测试场的接地平面相连) 的等效绿线。产品电子元件和产品框架之间的任何共模电压都会使共模电流通过该路径, 而且还存在变压器的初级和次级之间的分布电容。

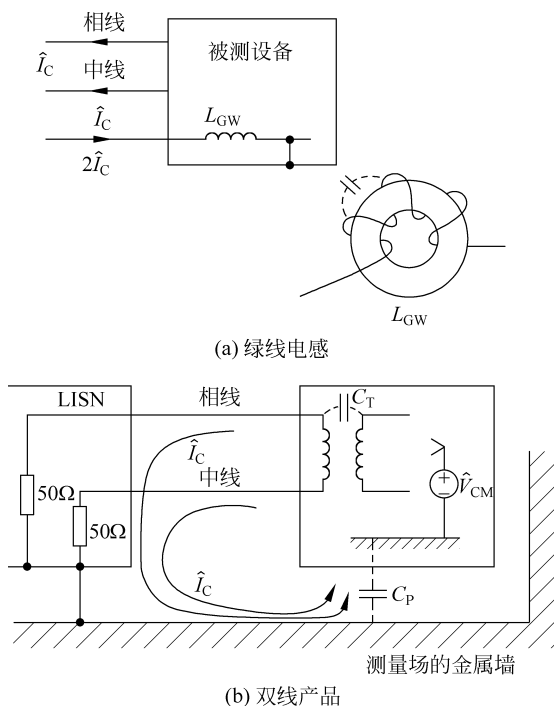


图 5-8 阻断共模电流路径的两种常用方法

例 5-2 如图 5-9 所示, 试求流经地回路的电流表示式和接地阻抗 Z_c 上产生的共模干扰电压表示式。

解 由图 5-9 可知, 接地阻抗上的地电流形成一个共模噪声电压 U_c , 此电压如同一个

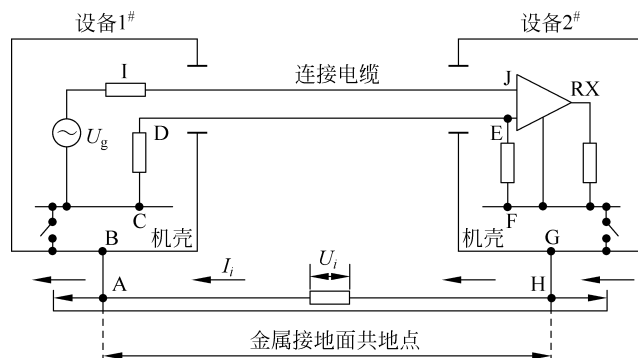


图 5-9 例 5-2 图示

电磁干扰源使回路 ABCDEFGHA 及 ABCIFGHA 上流动着噪声电流,此噪声电流会在放大器或逻辑电流输入端产生一个电位差,而此电位差即为电磁干扰的来源。

这两个设备的接地电阻可以为金属接地面(如船舶、飞机等)、安全地线或自来水管,也可能是数个放大器的共同接地回路。

流经这些共用阻抗的电流可能源自一个独立的信号源。地面电流 I_g 包括电流中性线上的电流和已接地负载时的地电流,其表示式为

$$I_g = \frac{U_g}{Z_g + Z_L + Z_w + Z_c} \quad (5-13)$$

其中, $U_g = U_{gu}$ 为激励电流电压; Z_g 为电源阻抗; Z_L 为负载阻抗; Z_w 为电源至负载间导线阻抗; Z_c 为接地阻抗。

电流 I_g 流经接地阻抗 Z_c 产生的共模干扰电压表示式为

$$U_c = I_g Z_c \quad (5-14)$$

直流或 50Hz、60Hz、400Hz 时,因 $Z_c \ll Z_g \ll Z_L$ 与 Z_w , I_g 可以化简为

$$I_g \approx \frac{U_g}{Z_L + Z_w} \quad (5-15)$$

例 5-3 60Hz, 115V 交流电源中性地线与其负载地线都接于 1mm 厚钢板中,试计算其接地阻抗上的电流及其共模干扰电压。负载的消耗功率为 1kW,电源的第 10 次谐波约为基频的 2%。

解 负载阻抗

$$Z_L = \frac{U^2}{P_L} = \frac{115^2}{1000} = 13.225 \Omega$$

根据

$$I_g \approx \frac{U_g}{Z_L + Z_w}$$

因为 $Z_w \ll Z_L$, 所以

$$I_g = \frac{U_g}{Z_L} = \frac{115}{13.225} \approx 8.7 \text{ A}$$

查得 1mm 钢板在 60Hz 时 Z_c 约为 $108\mu\Omega$, 在 600Hz 时 Z_c 约为 $300\mu\Omega$ 。所以在 60Hz 时共模干扰电压为

$$U_c = I_g Z_c = 8.7 \times 108 = 939.6 \mu\text{V}$$

第 10 次谐波, 在 600Hz 时:

$$U_c = I_g Z_c = 8.7 \times 2\% \times 300 = 52.2 \mu\text{V}$$

5.2 电源滤波器

电源滤波器又叫电源 EMI 滤波器、EMI 电源线滤波器等, 是由电容、电感和电阻组成的滤波电路, 是一种无源双向网络, 其一端是电源, 另一端是负载。其原理是一种阻抗适配网络: 电源滤波器输入侧、输出侧与电源和负载侧的阻抗适配越大, 对电磁干扰的衰减就越有效。电源滤波器可以对电源线中特定频率的频点或该频点以外的频率进行有效滤除, 得到一个特定频率的电源信号, 或消除一个特定频率后的电源信号。从频率选择的角度看, 电源滤波器实际上是一种低通滤波器, 它能毫无衰减地把直流电源和低频电源的功率输送到用电设备上去; 同时又能抑制经电源线的高频率干扰信号, 以保护设备免受损害。另外, 它也能抑制设备本身产生的干扰信号, 防止其进入电源, 污染电网中的电磁环境, 危害其他设备。

实际上, 如果不在电源线出口处添加某种形式的电源滤波器, 那么目前几乎没有任何电子产品能够符合传导发射规定的要求。某些设备看上去可能并不包含电源过滤器, 但实际上存在。所有产品都包含一个电源滤波器, 作为噪声电流通过电源线进入产品之前最后一个电路, 然后通过 LISN。将总电流分解为共模电流和差模电流是为了便于滤波器元件的实现, 这两种分量中只有其中一种是设计电源滤波器的关键。

5.2.1 常见滤波器电路

一般电源滤波器由 LC 低通网络构成, 针对不同性质的干扰, 分为共模滤波网络和差模滤波网络。共模滤波器由电源的相线和中线上分别串接一个电感 L_1 和 L_2 , 再分别对地线并接一个电容 C 构成。差模滤波器则由电源的相线和中线间跨接一个电容 C , 同时在相线和中线中分别串接一个电感 L_1 和 L_2 构成。实际上在电源线中往往共模干扰和差模干扰并存, 因此实用的电源滤波器均由共模滤波网络和差模滤波网络综合构成。

最常见的电源滤波器结构类似于 π 结构, 如图 5-10 所示。产品输出端的差模电流和共模电流(通常是产品电源的输入)表示为 $\hat{I}_D$ 和 $\hat{I}_C$, 而在 LISN 输入端(在滤波器输出端)表示为 $\hat{I}'_D$ 和 $\hat{I}'_C$ 。

滤波器的目的是减小 $\hat{I}_D$ 和 $\hat{I}_C$ 相对于初级电流的电平。初级电流电平所对应的测量

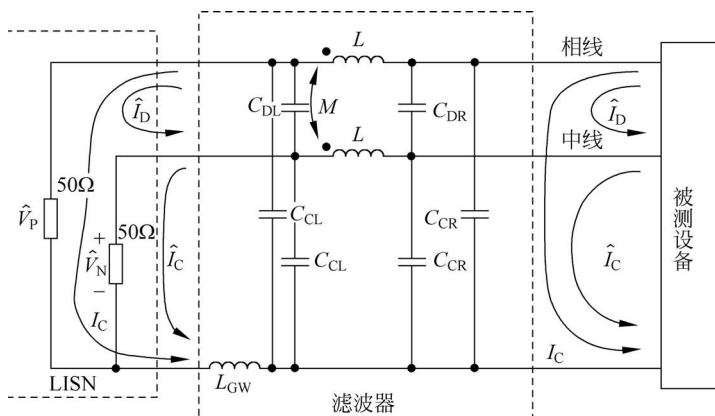


图 5-10 典型的电源滤波器结构

电压为

$$\hat{V}_P = 50(\hat{I}_C + \hat{I}_D) \quad (5-16)$$

$$\hat{V}_N = 50(\hat{I}_C - \hat{I}_D) \quad (5-17)$$

二者必须在规定限值频率范围内的所有频点上都小于传导发射限值。

5.2.2 插入损耗

滤波器的典型特征在于其插入损耗(Insertion Loss, IL),其通常以分贝表示。现在考虑向负载提供信号的问题,如图 5-11(a)所示。为防止源的某些频率分量到达负载,在源和负载之间插入一个滤波器,如图 5-11(b)所示。没有插入滤波器的负载电压用 $\hat{V}_{L,wo}$ 表示,插入滤波器的负载电压用 $\hat{V}_{L,w}$ 表示,滤波器的插入损耗定义为

$$IL_{dB} = 10 \lg \left(\frac{P_{L,wo}}{P_{L,w}} \right) = 10 \lg \left(\frac{\frac{V_{L,wo}^2}{R_L}}{\frac{V_{L,w}^2}{R_L}} \right) = 20 \lg \left(\frac{V_{L,wo}}{V_{L,w}} \right) \quad (5-18)$$

式(5-18)中的电压只表示电压的幅度。由于滤波器的插入,插入损耗会减小某频率处的负载电压。通常,插入损耗表现为频率的函数。

一些简单的过滤器如图 5-12 所示。例如,可以确定图 5-12(a)简单低通滤波器的插入损耗。没有滤波器的负载电压可以很容易地确定为

$$\hat{V}_{L,wo} = \frac{R_L}{R_S + R_L} \hat{V}_S \quad (5-19)$$

插入滤波器的负载电压为

$$\hat{V}_{L,w} = \frac{R_L}{R_S + j\omega L + R_L} \hat{V}_S = \frac{R_L}{R_L + R_S} \frac{1}{1 + \frac{j\omega L}{R_L + R_S}} \hat{V}_S \quad (5-20)$$

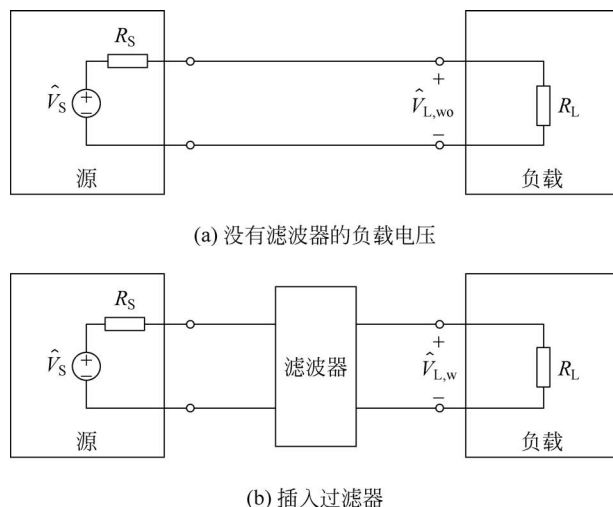


图 5-11 滤波器插入损耗的定义

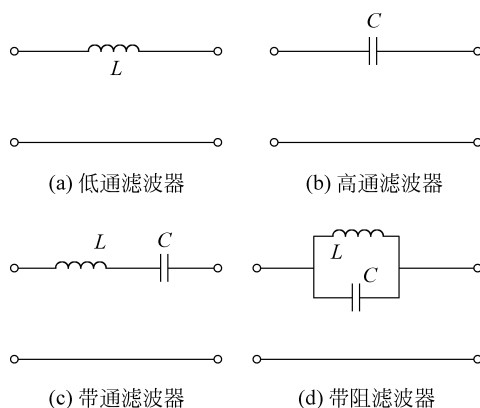


图 5-12 4 个简单滤波器

插入损耗是式(5-19)和式(5-20)之比,即

$$IL = 20 \lg \left| 1 + \frac{j\omega L}{R_S + R_L} \right| = 20 \lg [\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}] = 10 \lg [1 + (\omega\tau)^2] \quad (5-21)$$

其中, τ 为电路的时间常数。

$$\tau = \frac{L}{R_S + R_L} \quad (5-22)$$

插入损耗曲线将显示从直流的 0dB 到 $\omega_{3dB} = 1/\tau$ 的 3dB 点,并且之后以高于此值的 20dB/10 倍程频的速率增加。因此,低通滤波器能通过直流到 ω_{3dB} 的频率分量,其他较高的频率分量衰减很快。对于高于 3dB 点的频率,插入损耗表达式简化为

$$IL \cong 10 \lg [(\omega\tau)^2] = 20 \lg \omega\tau = 20 \lg \left(\frac{\omega L}{R_S + R_L} \right), \quad \omega \gg \frac{1}{\tau} \quad (5-23)$$

其他过滤器可以用类似的方式进行分析。

由以上举例可知,特定滤波器的插入损耗取决于源和负载阻抗,因此无法独立于终端阻抗进行说明。大多数滤波器制造商都提供了滤波器插入损耗的频率响应曲线图。由于滤波器的插入损耗取决于源和负载阻抗,在这些规范中假设源和负载阻抗的值是 $R_S = R_L = 50\Omega$ 。这种基于 50Ω 源和负载阻抗的插入损耗指标在传导发射测试中起什么作用呢?考虑在该测试中使用滤波器,负载阻抗对应于相线和绿线之间以及中线和绿线之间的 LISN 的 50Ω 阻抗。然而,在典型的配置中, R_L 是从电网中看过去的阻抗,是 50Ω 。源阻抗 R_S 是多少不得而知,因为源阻抗需要从设备电源输入端看过去,如果在传导发射测试的频率范围内保持 50Ω 恒定不变,是令人怀疑的。因此,使用制造商提供的插入损耗数据评估产品中滤波器的性能可能无法在典型应用中得到实际结果。

共模电流和差模电流必须减小,滤波器制造商通常为这些电流提供不同的插入损耗数据。对于绿线端差模插入损耗的测量,绿线不连接,相线和中线形成待测电路,如图 5-13(a) 所示,因为差模电流定义为经相线流出并通过中线返回,所以绿线上没有差模电流。对于共模电流的测试,将相线和中线连接在一起,并用绿线形成测试电路,如图 5-13(b) 所示。再次假设每个测试的源阻抗和负载阻抗为 50Ω 。

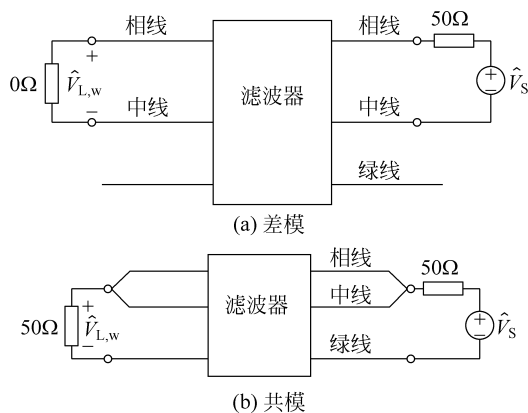


图 5-13 插入损耗测试

5.2.3 滤波器元件对电流的影响

本节设计了等效电路研究滤波器对共模和差模电流的影响。假设滤波器关于相线和中线对称,这意味着相线-绿线电路和中线-绿线电路是相同的,通常情况就是如此,因为构建不对称滤波器没有优势。

首先考虑对共模电流的影响。将共模电流模拟为电流源,由于结构的对称性,假设共模电流相同,写出网孔电流方程,可以证明每个共模电流的等效电路如图 5-14 所示,扼流圈表现为电感 $L+M$,线间电容不起作用,由于 $2I_C$ 流过绿线,可知绿线电感为原来的 2 倍。

假设左侧的线地电容不存在, $C_{CL} = 0$ 。图 5-14 中的等效电路表明,等效绿线电感 $2L_{GW}$ 将与共模扼流圈等效电感 $L+M$ 和 LISN 串联。这些电感的典型值为 $2L_{GW} = 2\text{mH}$ 和 $L+M = 55\text{mH}$ 。这表明相比于绿线电感的阻抗,共模扼流圈的阻抗起主要作用,因此绿线电感几

高于此频率时,曲线斜率为 $-20\text{dB}/10$ 倍程频。对于 $C_{\text{CL}} = 3300\text{pF}$,断点频率为 $f_1 = 965\text{kHz}$ 或低于 1MHz 。因此,当没有绿线电感时,左侧线地电容 C_{CL} 在高于约 1MHz 时起作用。这些结果表明,只有当滤波器 LISN 一侧存在线地电容 C_{CL} 时,绿线电感才能在传导发射的频率范围内显著降低传导发射。如果没有滤波器 LISN 一侧的线地电容,绿线电感将不起作用。如果滤波器 LISN 一侧的线地电容存在但绿线电感不存在,则线地电容仅在低于 1MHz 时起作用,且作用不大。

接下来考虑对差模电流的影响。将差模电流模拟为电流源,写出网孔电流方程,表明差模电流的等效电路如图 5-15 所示。注意,线间电容对差模电流表现为 2 倍,同时也存在线地电容,因此除了共模电流外, C_{CL} 和 C_{CR} 也会影响差模电流。这通常不明显,因为线地电容通常远小于线间电容。然而,如果不存在线地电容并联的线间电容,则线地电容将影响差模电流。理想的共模扼流圈 $L = M$,其对差模电流完全透明。这说明仔细设计共模扼流圈的重要性。

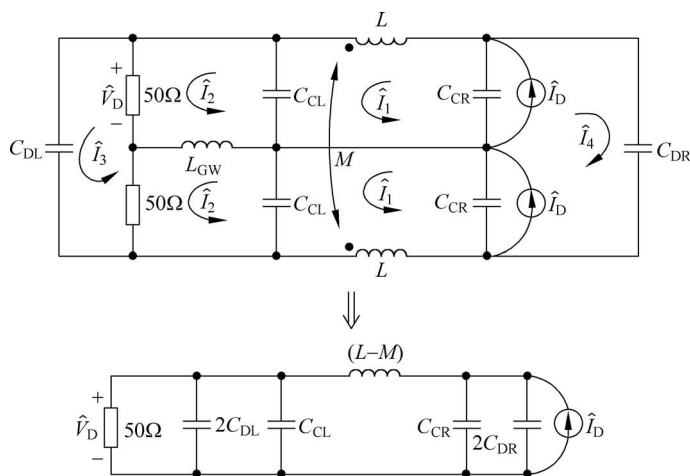


图 5-15 针对差模电流的滤波器和 LISN 的等效电路

5.3 电源

传导发射的主要来源通常是产品的电源。电源内有许多点会在 LISN 测量时产生噪声。每种特定类型的电源都具有其独特的噪声特性。前面讨论了使用电源滤波器减少传导发射的问题,这是一种方法。但是,电源滤波器仅仅能够在一定程度上减少传导发射。减少传导发射最有效的方法是在噪声源内部将其抑制。但噪声只能在一定程度上降低,并仍能保持电源的正常功能。上升/下降沿尖锐的脉冲具有高频分量,某些电源(如开关模式电源)依靠快速上升/下降脉冲操作减少电源中的能量损耗。这些类型的噪声源只能在某些频点上减少噪声,因此必须在保持所需的功能性能和降低噪声源之间进行折中。

采用线性电源将市电转换为电子器件所需的直流电压是主要方法。典型的线性稳压电

源如图 5-16 所示。忽略双极性晶体管,输入端的变压器用来升高或降低市电电压幅度。然后使用形成全波整流器的两个二极管进行整流。整流器将正弦市电电压转换为脉动直流电压。这种脉动直流类似于输入的交流波形,只是负半周期变为正的,其直流分量为 V_{dc} 。电容 C_B (表示“大容量电容”)用于平滑该脉动直流电压,给出基本恒定的波形 V_{in} ,其直流电平为 V_{dc} 。

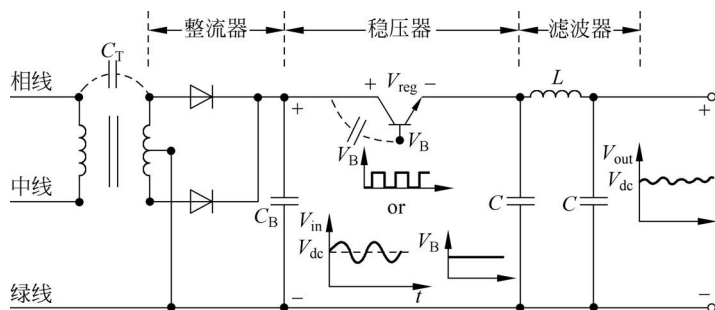


图 5-16 线性稳压电源

如果满足这个直流波形的电平,并且电源上的负载保持不变,那么就不需要晶体管。在存在电源负载变化的情况下,晶体管用于维持输出电压电平。随着电源(负载)的输出电流变化而保持恒定输出电压的过程称为调节。为了在变化的负载条件下保持所需的输出电压,晶体管充当可变电阻器,以在其集电极-发射极端降低一定电压。直流输出电压的样本被反馈到晶体管的基极端。

如果由于负载增加而使该直流输出电压变低,则晶体管导通更强,导致较低的 V_{reg} 在其端子上下降。电源的输出电压 V_{out} 和整流器的输入电压 V_{in} 相关,即

$$V_{out} = V_{in} - V_{reg} \quad (5-28)$$

因此,通过调节晶体管上降低的电压补偿输出电压的降低。如果由于负载较小而电源的输出电压增大,则晶体管在其端子上降低更多电压,从而将输出电压降低到其所需值。因此,在变化的负载条件下完成调节。这代表线性电源的一个不良特征——在调节晶体管中不断消耗功率,以保持电源的恒定直流输出电压。

正如前面所指出的,减少传导发射的最有效方法是在源头控制。例如,增大如图 5-17 所示的初级侧开关中栅极电阻 R_G 的值,将增大开关波形的上升/下降时间,从而降低其频谱成分。然而,这些上升/下降时间只能增大到一定程度,因为开关器件将在其有源区域中花费更多时间,这增加了其功耗。

开关中还有其他噪声源应该被控制。其中一个主要来自用于整流的二极管,特别是用于整流开关信号的二极管,如图 5-17 中初级变压器次级上的二极管。当二极管正向偏置时,电荷存储在结电容的结点处,而且一个区域中的电荷载流子被注入另一个区域。当二极管改变方向时,必须清除这些电荷。当电荷连接处移除时,二极管电流经过零值。一些二极管,如快速恢复的二极管可快速切换,这指的是硬恢复,如图 5-18(a)所示。其他一些类型的二极管恢复较慢,二极管电流逐渐回到零值。很明显,当二极管电流回到零值时,由于电流

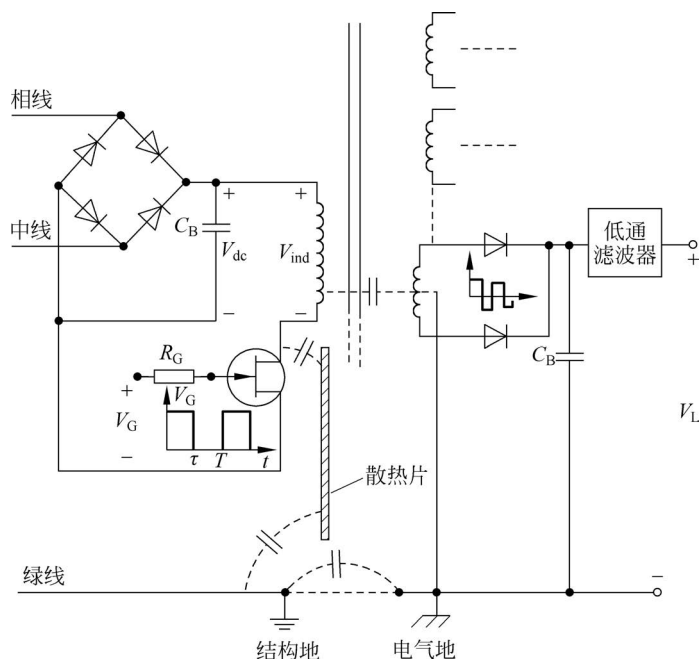


图 5-17 典型的反馈或初级开关电源

波形的尖锐边沿,硬恢复二极管将会产生比软恢复二极管更高的电流频谱分量。从有效性角度出发,硬恢复二极管比软恢复二极管更合适。为了减小不需要的由二极管关断所产生的噪声,如图 5-18(b)所示的 RC 缓冲电路常与二极管并联放置。缓冲电路由电容、电阻的串联构成,作为当二极管关断时存储在二极管结电容中的电荷的放电电路,能平滑二极管电流波形,从而减小高频分量。

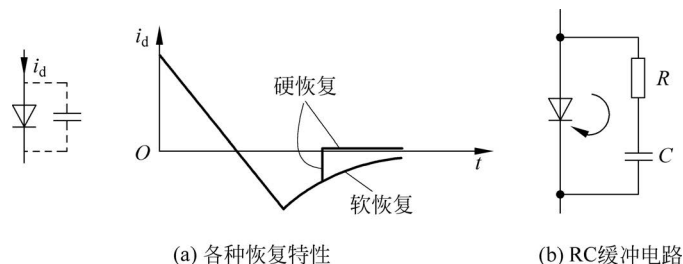


图 5-18 二极管中非理想效应的说明

5.4 传导抗扰度

对传导发射的监管要求旨在控制噪声电流的辐射发射,这些噪声电流通过产品的交流电源线传导到当地的电网。通常这些信号很小,不会通过交流电源线从电网直接传导到其他产品而造成干扰。但是,由雷击等现象引起的配电网路上大的瞬时信号可能会直接传导

到产品的交流电源线中,从而导致电磁兼容问题。设备制造商意识到这一点,并通过直接在产品的交流电源线上注入典型的此类干扰测试其产品的传导抗扰度,以确保产品能够在这些干扰下令人满意地运行。

本章小结

本章研究传导发射的产生及其沿着产品的交流电源线传导出产品的原理。因为产品安装在市电中,所以管理机构规定强制性传导发射限值。一个设备的电力分配系统是一个庞大的网络,连接着各种电能输出装置,这个设备的其他电子系统通过这些输出装置获取交流电,因此形成了一个巨大的天线系统,使得这些传导发射能有效地辐射出去,对该设备中的其余电子系统形成干扰。因此,传导发射能够引起辐射发射,从而引起干扰。通常来说,减少传导发射比减少辐射发射稍微简单一些,因为只需要控制这些发射的一条路径,即电源线。然而,一个产品不能符合传导发射限值时,却能符合辐射发射限值,意识到这一点很重要。因此,控制产品的传导发射和辐射发射同等重要。

电子产品生产商还意识到,仅仅满足规定的传导发射和辐射发射限值不能达到理想的电磁兼容状态。一个产品必须能够抵抗来自电网的干扰,确保产品能正常运行。例如,闪电会袭击给设备供电的电能传输线,这可能产生一系列的干扰,以及市电的完全中断(所有产品都不能承受)、由于电力系统开关试图闭合而导致瞬间电能中断(产品能承受,数据和功能不丢失)。传导发射限值是为了控制存在于商业电网中且沿商业电网传播的噪声电流引起的辐射发射的干扰电压而制定的。通常这些噪声电流很小,不会通过设备的电源线传入设备而产生直接干扰。这种干扰反映了一个传导抗扰度问题,生产厂商意识到并且努力让产品能够承受这种干扰。

习题 5

1. 设备抗扰度测试时,设备性能下降的判据是什么?
2. 浪涌和振铃波浪涌如何加入 EUT 的电源线和信号线中? 加入的方式是什么?
3. 连续骚扰功率测量时,为什么被测设备的电源线长度要大于 6m? 功率吸收钳为什么要沿电源线移动?
4. 什么是电压波动及闪烁?
5. 传导干扰测试用什么设备? 画出系统组成框图。