

电磁干扰测量与诊断

当你的产品由于电磁干扰发射强度超过电磁兼容标准规定而不能出厂时,或当由于电路模块之间的电磁干扰,系统不能正常工作时,我们就要解决电磁干扰的问题。要解决电磁干扰问题,首先要能够“看”到电磁干扰,了解电磁干扰的幅度和发生源。本文要介绍有关电磁干扰测量和判断干扰发生源的方法。

1. 测量仪器

谈到测量电信号,电气工程师首先想到的可能就是示波器。示波器是一种将电压幅度随时间变化的规律显示出来的仪器,它相当于电气工程师的眼睛,使你能够看到线路中电流和电压的变化规律,从而掌握电路的工作状态。但是示波器并不是电磁干扰测量与诊断的理想工具。这是因为:

- A. 所有电磁兼容标准中的电磁干扰极限值都是在频域中定义的,而示波器显示出的时域波形。因此测试得到的结果无法直接与标准比较。为了将测试结果与标准相比较,必须将时域波形变换为频域频谱。
- B. 电磁干扰相对于电路的工作信号往往都是较小的,并且电磁干扰的频率往往比信号高,而当一些幅度较低的高频信号叠加在一个幅度较大的低频信号时,用示波器是无法进行测量。
- C. 示波器的灵敏度在 mV 级,而由天线接收到的电磁干扰的幅度通常为 V 级,因此示波器不能满足灵敏度的要求。

测量电磁干扰更合适的仪器是频谱分析仪。频谱分析仪是一种将电压幅度随频率变化的规律显示出来的仪器,它显示的波形称为频谱。频谱分析仪克服了示波器在测量电磁干扰中的缺点,它能够精确测量各个频率上的干扰强度。

对于电磁干扰问题的分析而言,频谱分析仪是比示波器更有用的仪器。而用频谱分析仪可以直接显示出信号的各个频谱分量。

1.1 频谱分析仪的原理

频谱分析仪是一台在一定频率范围内扫描接收的接收机,它的原理图如图 1 所示。

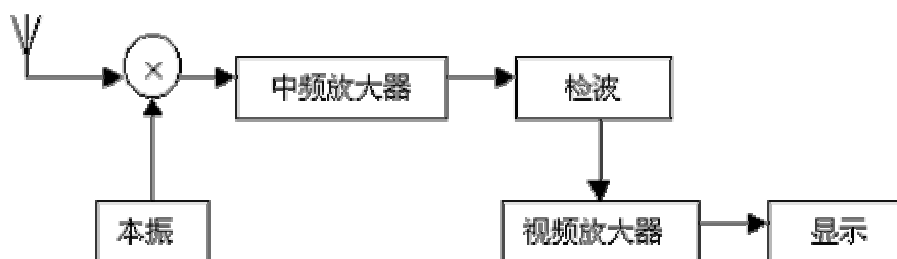


图 1 频谱分析仪的原理框图

频谱分析仪采用频率扫描超外差的工作方式。混频器将天线上接收到的信号与本振产生的信号混频，当混频的频率等于中频时，这个信号可以通过中频放大器，被放大后，进行峰值检波。检波后的信号被视频放大器进行放大，然后显示出来。由于本振电路的振荡频率随着时间变化，因此频谱分析仪在不同的时间接收的频率是不同的。当本振振荡器的频率随着时间进行扫描时，屏幕上就显示出了被测信号在不同频率上的幅度，将不同频率上信号的幅度记录下来，就得到了被测信号的频谱。

根据这个频谱，就能够知道被测设备是否有超过标准规定的干扰发射，或产生干扰的信号频率是多少。

1.2 频谱分析仪的使用方法

要获得正确的测量结果，必须正确地操作频谱分析仪。本节简单介绍频谱分析仪的使用方法。正确使用频谱分析仪的关键是正确设置频谱分析仪的各个参数。下面解释频谱分析仪中主要参数的意义和设置方法。

A. 频率扫描范围：

规定了频谱分析仪扫描频率的上限和下限。通过调整扫描频率范围，可以对感兴趣的频率进行细致的观察。扫描频率范围越宽，则扫描一遍所需要时间越长，频谱上各点的测量精度越低，因此，在可能的情况下，尽量使用较小的频率范围。在设置这个参数时，可以通过设置扫描开始频率和终止频率来确定，例如：start frequency = 1MHz, stop frequency = 11MHz。也可以通过设置扫描中心频率和频率范围来确定，例如：center frequency = 6MHz, span = 10MHz。这两种设置的结果是一样的。

B. 中频分辨带宽：

规定了频谱分析仪的中频带宽，这项指标决定了仪器的选择性和扫描时间。调整分辨带宽可以达到两个目的，一个是提高仪器的选择性，以便对频率相距很近的两个信号进行区别。另一个目的是提高仪器的灵敏度。因为任何电路都有热噪声，这些噪声会将微弱信号淹没，而使仪器无法观察微弱信号。噪声的幅度与仪器的通频带宽成正比，带宽越宽，则噪声越大。因此减小仪器的分辨带宽可以减小仪器本身的噪声，从而增强对微弱信号的检测能力。

分辨带宽一般以 3dB 带宽来表示。当分辨带宽变化时，屏幕上显示的信号幅度可能会发生变化。若测量信号的带宽大于通频带带宽，则当带宽增加时，由于通过中频放大器的信号总能量增加，显示幅度会有所增加。若测量信号的带宽小于通频带带宽，如对于单根谱线的信号，则不管分辨带宽怎样变化，显示信号的幅度都不会发生变化。信号带宽超过中频带宽的信号称为宽带信号，信号带宽小于中频带宽的信号称为窄带信号。根据信号是宽带信号还是窄带信号能够有效地定位干扰源。

C. 扫描时间：

仪器接收的信号从扫描频率范围的最低端扫描到最高端所使用的时间叫做扫描时间。扫描时间与扫描频率范围是相匹配的。如果扫描时间过短，测量到的信号幅度比实际的信号幅度要小。

D. 视频带宽：

视频带宽的作用与中频带宽相同，可以减小仪器本身的带内噪声，从而提高仪器对微弱信号的检测能力。

2. 用频谱分析仪分析干扰的来源

2.1 根据干扰信号的频率确定干扰源

在解决电磁干扰问题时，最重要的一个问题是判断干扰的来源，只有准确将干扰源定位后，才能够提出解决干扰的措施。根据信号的频率来确定干扰源是最简单的方法，因为在信号的所有特征中，频率特征是最稳定的，并且电路设计人员往往对电路中各个部位的信号频率都十分清楚。因此，只要知道了干扰信号的频率，就能够推测出干扰是哪个部位产生的。

对于电磁干扰信号，由于其幅度往往远小于正常工作信号，因此用示波器很难测量到干扰信号的频率。特别是当较小的干扰信号叠加在较大的工作信号上时，示波器无法与干扰信号同步，因此不可能得到准确的干扰信号频率。

而用频谱分析仪做这种测量是十分简单的。由于频谱分析仪的中频带宽较窄，因此能够将与干扰信号频率不同的信号滤除掉，精确地测量出干扰信号频率，从而判断产生干扰信号的电路。

2.2 根据干扰信号的带宽确定干扰源

判断干扰信号的带宽也是判断干扰源的有效方法。例如，在一个宽带源的发射中可能存在一个单个高强度信号，如果能够判断这个高强度信号是窄带信号，则它不可能是从宽带发射源产生的。干扰源可能是电源中的振荡器，或工作不稳定的电路，或谐振电路。当在仪器的通频带中只有一根谱线时，就可以断定这个信号是窄带信号。

根据傅立叶变换，单根的谱线所对应的信号是周期信号。因此，当遇到单根谱线时，就要将注意力集中到电路中的周期信号电路上。

3. 用近场测试方法确定辐射源

除了上述的根据信号特征判断干扰源的方法以外，在近场区查找辐射源可以直接发现干扰源。在近场区查找辐射源的工具具有近场探头和电流卡钳。检查电缆上的发射源要使用电流卡钳，检查机箱缝隙的泄漏要使用近场探头。

3.1 电流卡钳与近场探头

电流探头是利用变压器原理制造的能够检测导线上电流的传感器。当电流探头卡在被测导线上时，导线相当于变压器的初级，探头中的线圈相当于变压器的次级。导线上的信号电流在电流探头的线圈上感应出电流，在仪器的输入端产生电压。于是频谱分析仪的屏幕上就可以看到干扰信号的频谱。仪器上读到的电压值与导线中的电流值通过传输阻抗换算。传输阻抗定义为：仪器 50 Ω 输入阻抗上感应的电压与导线中的电流之比。对于一个具体的探头，可以从厂家提供的探头说明书中查到它的转移阻抗 Z_T 。因此，导线中的电流等于：

$$I = V / Z_T$$

如果公式中的所有物理量都用 dB 表示，则直接相减。

对于机箱的泄漏，要用近场探头进行探测。近场探头可以看成是很小的环形天线。由于它很小，因此灵敏度很低，仅能对近场的辐射源进行探测。这样有利于对辐射源进行精确定位。由于近场探头的灵敏度较低，因此在使用时要与前置放大器配套使用。

3.2 用电流卡钳检测共模电流

设备产生辐射的主要原因之一是电缆上有共模电流。因此当设备或系统有超标发射时，首先应该怀疑的就是设备上外拖的各种电缆。这些电缆包括电源线电缆和设备之间的互连电缆。

将电流探头卡在电缆上，这时由于探头同时卡住了信号线和回流线，因此差模电流不会感应出电压，仪器上读出的电压仅代表共模电流。

测量共模电流时，最好在屏蔽室中进行。如果不在屏蔽室中，周围环境中的电磁场会在电缆上感应出电流，造成误判断。因此应首先将设备的电源断开，在设备没有加电的状态下测量电缆上的背景电流，并记录下来，以便与设备加电后测量的结果进行比较，排除背景的影响。

如果在用天线进行测量时将频谱分析仪的扫描频率局限感兴趣的频率周围很小的范围内，则可以排除环境中的干扰。

3.3 用近场探头检测机箱的泄漏

如果设备上外拖电缆上没有较强的共模电流，就要检查设备机箱上是否有电磁泄漏。检查机箱泄漏的工具是近场探头。将近场探头靠近机箱上的接缝和开口处，观察频谱分析仪上是否有感兴趣的信号出现。一般由于探头的灵敏度较低，即使用了放大器，很弱的信号在探头中感应的电压也很低，因此在测量时要将频谱分析仪的灵敏度调得尽量高。根据前面的讨论，减小频谱分析仪的分辨带宽能够提高仪器的灵敏度。但是要注意的是，当分辨带宽很窄时，扫描时间会变得很长。为了缩短扫描时间，提高检测效率，应该使频谱分析仪的扫描频率范围尽量小。因此一般在用近场探头检测机箱泄漏时，都是首先用天线测出泄漏信号的精确频率，然后使仪器用尽量小的扫描频率范围覆盖住这个干扰频率。这样做的另一个好处是不会将背景干扰误判为泄漏信号。

对于机箱而言，靠近滤波器安装位置的缝隙是最容易产生电磁泄漏的。因为滤波器将信号线上的干扰信号旁路到机箱上，在机箱上形成较强的干扰电流，这些电流流过缝隙时，就会在缝隙处产生电磁泄漏。

4. 容易犯的错误

当设备不能满足有关的电磁兼容标准时,就要对设备产生超标发射的原因进行调查,然后进行排除。在这个过程中,经常发现许多人经过长时间的努力,仍然没有排除故障。造成这种情况的原因是诊断工作陷入了“死循环”。这种情况可以用下面的例子说明。

假设一个系统在测试时出现了超标发射,使系统不能满足电磁兼容标准中对电磁辐射的限制。经过初步调查,原因可能有4个,它们分别是:

- 主机与键盘之间的互连电缆(电缆1)上的共模电流产生的辐射
- 主机与打印机之间的互连电缆(电缆2)上的共模电流产生的辐射
- 机箱面板与机箱基体之间的缝隙(开口1)产生的泄漏
- 某显示窗口(开口2)产生泄漏

在诊断时,首先在电缆1上套一个铁氧体磁环,以减小共模辐射,结果发现频谱仪屏幕上显示的信号并没有明显减小。于是试验人员认为电缆1不是一个主要的泄漏源,将铁氧体磁环取下,套在电缆2上,结果发现频谱仪屏幕上显示的信号还没有明显减小。结果试验人员得出结论,电缆不是泄漏源。

于是再对机箱上的泄漏进行检查。用屏蔽胶带将开口1堵上,发现频谱仪屏幕上显示的信号没有明显减小。试验人员认为开口1不是主要泄漏源,将屏蔽胶带取下,堵到开口2上。结果频谱仪上的显示信号还没有减小。试验人员一筹莫展。之所以会发生这个问题,是因为试验人员忽视了频谱分析仪上显示的信号幅度是以dB为单位显示的。下面我们看一下为什么会有这种现象。

假设这4个泄漏源所占的成分各占1/4,并且在每个辐射源上采取的措施能够将这个辐射源完全抑制掉。则我们采取以上4个措施中的一个时,频谱仪上显示信号降低的幅度A为:

$$A = 20 \lg (4 / 3) = 2.5 \text{ dB}$$

幅度减小这么少,显然是微不足道的。但这却已经将泄漏减少了25%。

正确的方法是,当对一个可能的泄漏源采取了抑制措施后,即使没有明显的改善,也不要将这个措施去掉,继续对可能的泄漏源采取措施。当采取到某个措施时,如果干扰幅度降低很多,并不一定说明这个泄漏源是主要的,而仅说明这个干扰源是最后一个。按照这个步骤对4个泄漏源逐个处理的结果如图1所示。

在前面的叙述中,我们假定对某个泄漏源采取措施后,这个泄漏源被100%消除掉,如果这样,当最后一个泄漏源去掉后,电磁干扰的减小应为无限大。实际这是不可能的。我们在采取任何一个措施时,都不可能将干扰源100%消除。泄漏源去掉的程度可以是99%,或99.9%,甚至99.99以上,而决不可能是100%!所以当最后一个泄漏源去掉后,尽管改善很大,但仍是有限值。

当设备完全符合有关的规定后,如果为了降低产品成本,减少不必要的器件,可以将采取的措施逐个去掉。首先应该考虑去掉的是成本较高器件/材料,或在正式产品上难于实现的措施。如果去掉后,产品的电磁发射并没有超标,就可以去掉这个措施。通过试验,使产品成本降到最低。

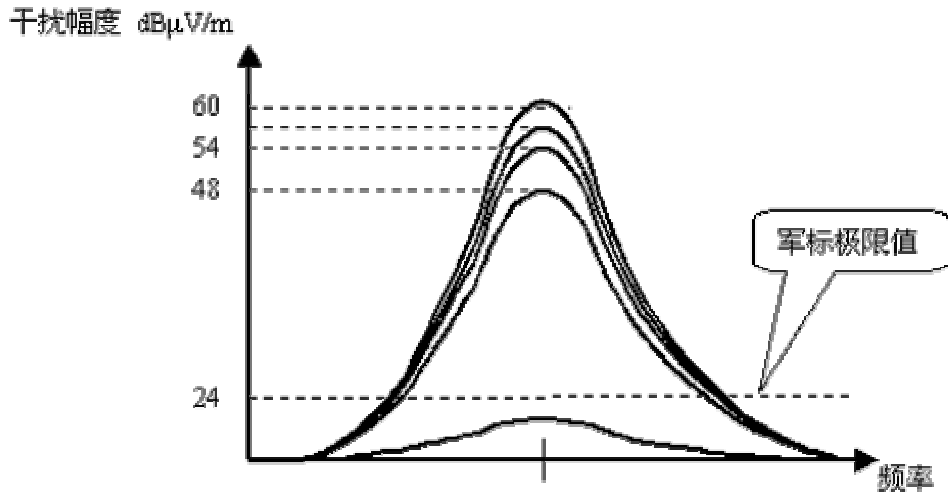
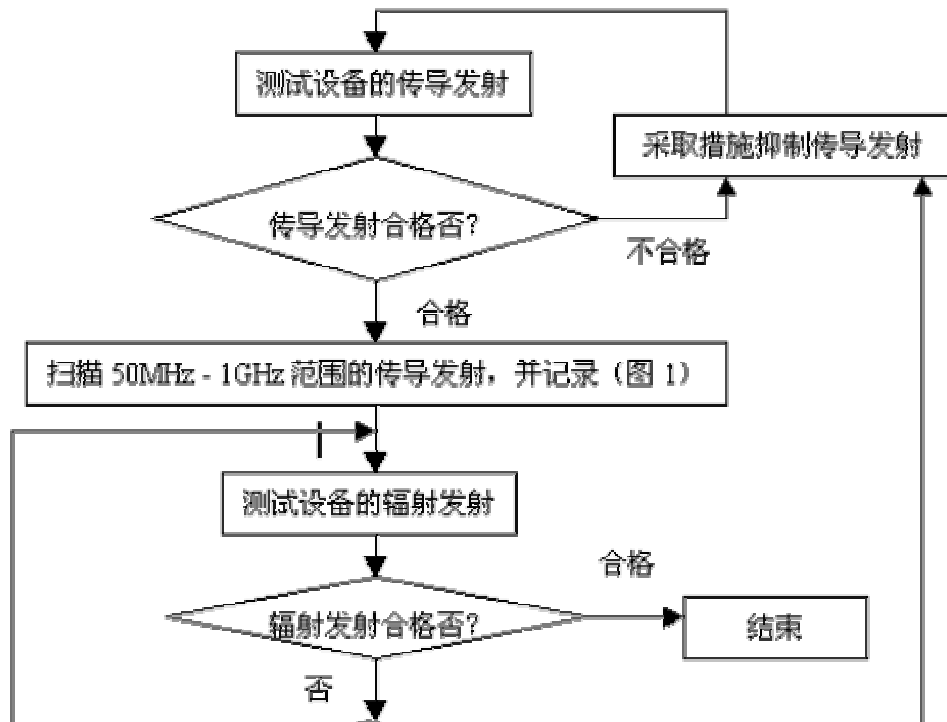


图 2 抑制 4 个泄漏源时干扰幅度的变化

5 . 产品电磁兼容测试诊断步骤

图 3 给出了一个设备或系统的电磁干扰发射与故障分析步骤 ,按照这个步骤进行可以提高测试诊断的效率。



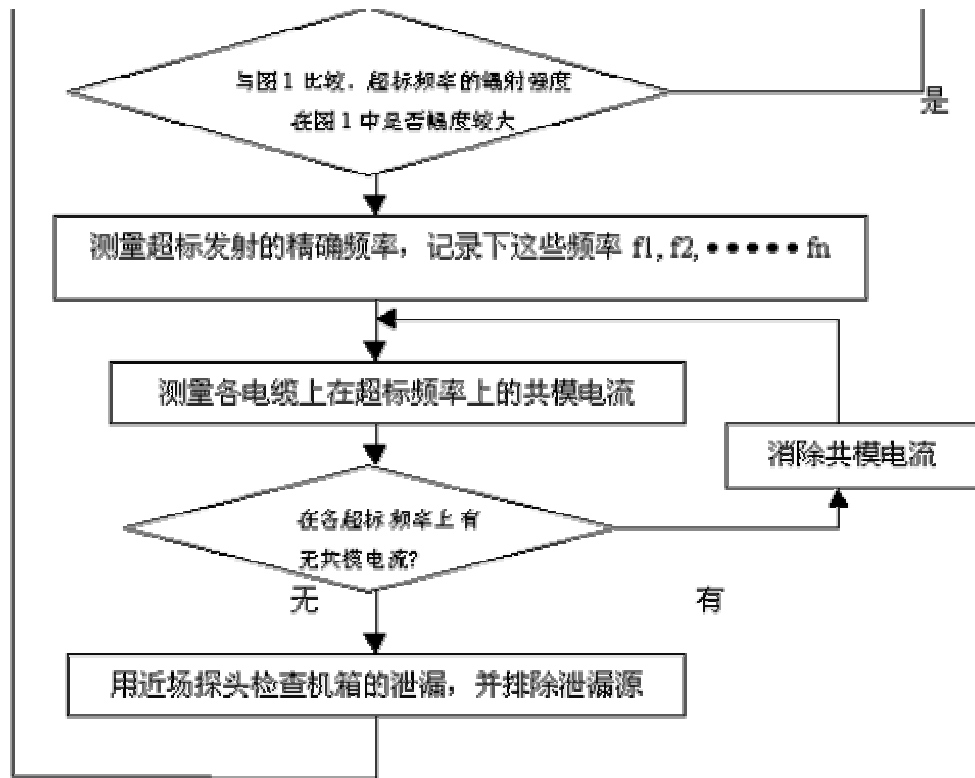


图 3 电磁兼容测试诊断步骤

关于图 3 的说明如下：

- 电磁兼容测试一般首先测量干扰发射, 因为干扰发射的试验费用一般比敏感度试验费用低。另外当设备的干扰发射能够满足要求时, 往往敏感度也不会有大的问题。因为几乎所有的解决干扰发射的措施同样对改善敏感度有效。
- 测量干扰发射时要先测量传导发射, 不仅要在标准规定的频率范围内测量, 还要对更高的频率进行摸底测量。当电源线上有较强的干扰电流时, 要先解决这个问题。因为这些传导干扰电流会借助导线的天线作用产生辐射, 导致辐射发射不合格。
- 当传导发射完全合格后, 再进行辐射发射测试。对于辐射发射不合格的频率, 要记录下精确频率, 便于在用近场探头查找问题时, 将频谱分析仪的扫描范围设置在干扰频率附近。

6 . 附录

测量仪器配件供应厂商：

- **惠普公司：**
提供频谱分析仪, 前置放大器, 近场探头, 电流卡钳等, 能够构成一套完整的干扰发射诊断系统。

- **Electro –metrics :**
生产电磁干扰接收机与测试系统 ,天线 ,近场探头 ,阻抗稳定网络等。
Web: www.electro-metrics.com
Email: info@emihq.com
- **Tektronix :**
电磁干扰测试接收机 , 频谱分析仪。
www.tek.com
- **Solar Electronics Company :**
满足 GJB-151A 要求的各种电流卡钳和干扰注入卡钳 , 脉冲发生器 , 扫频功率源。
www.solar-emc.com
- **A. H. System :**
各种测试天线。
www.ahsystems.com
- **ETS :**
各种测试天线 , 电流卡钳 , 干扰注入卡钳 , 近场探头 , GTEM 小室 , 测试转台 , 天线塔 , 阻抗稳定网络 ;
www.emctest.xom
- **Amplifier Research :**
能满足各种标准中敏感度试验的功率放大器。
www.ar-amps.com
- **CPI:** www.cpii.com/satcom/industry/index.htm
- **Fischer Custom Communications :**
满足 EN50082-2, IEC 1000-4-6, ENV 50141 等标准要求的传导敏感度测量附件 , 如耦合解耦网络 , 干扰注入钳等。
www.fischercc.com
- **Thermo Voltek :**
功率放大器。
www.kalmus.com
- **Noise Laboratory :**
测量线路板上的近场辐射的线路板辐射扫描测试仪
www.noiseken.com
- **Haefely :**
满足 IEC 和 EN 标准要求的各种干扰发生器 , 如静电放电模拟器 , 电

快速脉冲模拟器，浪涌模拟器等。

www.haefely.com

- KeyTek :

满足 IEC 和 EN 标准要求的各种干扰发生器，如静电放电模拟器，电快速脉冲模拟器，浪涌模拟器等。

www.keytek.com