

电磁干扰合规性测量与诊断论述

一、电磁干扰概述

电磁干扰 (EMI) 是一种不希望存在的信号, 它对电子设备或系统的正常工作会造成有害影响。电磁干扰源有多种, 有的来自自然界, 有的是人为造成的。来自自然界的电磁干扰主要是由雷电产生的大气噪声 (频率主要分布在 10MHz 以上) 以及有宇宙射电噪声和太阳辐射 (10MHz 以上) 引起的。人为造成的又分为有意干扰和无意干扰两种。所谓有意干扰是指那些必须发射电磁波的设备, 如调幅、调频、电视广播发射机、雷达和导航发射机、高频加热设备和移动无线电通讯机等产生的电磁信号, 它对特定方是有用的, 而对其它方面则可能成为干扰。所谓无意干扰源包括计算机设备、继电器、开关、电机高压线、照明设备、汽车的点火装置等。

近年来, 随着传播媒体和自动化技术的进步, 不仅在工厂、办公室、商业部门, 而且在一般家庭中自动化、电气化程度都在迅速提高, 各种家用电器迅速普及, 个人计算机、文字处理机和各种装有 CPU 的家用数字电气设备拥有量在迅速增长。这些设备, 特别是数字设备会在很宽的频率范围内的辐射电磁能量, 从而使包括普通家庭在内的电磁环境复杂化。这些电磁干扰信号, 可能以电磁辐射的形式发射出来, 也可能通过电缆进行传导。同样, 几乎所有的电子设备对其它设备产生的干扰信号都很敏感。其结果是由这些电磁能量引起的问题, 不仅会干扰收音机、电视机的接收, 也会诱发其它设备的误动作, 从而造成一个社会问题, 成为新的社会公害。

电磁干扰源产生的电磁发射, 必须通过耦合通道才能到达受到干扰设备的接收器。电磁干扰按其传播途径大致可分两大类: 传导干扰和辐射干扰。沿电源线、公共地线和互连电缆传输的电磁干扰称为传导干扰。电磁干扰的产生必须具备三个因素: 即传导或辐射电磁波的源、电磁波借以发射的传播媒介、从接收到的信号中接收干扰的接收器。三者之中只要消除其一, 电磁干扰就不会发生。为了使电子设备和系统能在电磁环境中正常工作, 做到电磁兼容性, 只要设法减弱干扰发射源的信号电平, 或者切断传播路径、或者对接收器进行保护而使器免受干扰。

对于由电磁干扰引起的影响, 还与干扰的形态有关。干扰源产生的干扰有的是连续性的, 有的是脉冲性的, 也有的是由偶然单次开关切换引起的瞬变干扰。非常明显, 它们对电子设备和系统的影响是不相同的。测量电磁干扰除了需要某些必需的测量仪器之外, 还必须考虑一些共同的因素, 比如测量场地、仪器配置和某种形式的转换器或检测器件等。测量场地有屏蔽室、开阔场等。

提供用于鉴定 EMC 测试的仪器, 必须符合 CISPR16-1 的规定。这个标准要求很严格, 使得符合这个标准的测试仪器价格非常贵, 而且还要有专用的鉴定测试实验室。事实证明满足 EMI 标准的代价未必很高, **北京海洋兴业科技有限公司**推荐的 EMC 预检合规性测试方案, 提供了一些很实用的测量, 在某些特点上它胜过专用的鉴定测量设备, 而且价格便宜得多, 成套方案最低成本不超过 1 万元人民币。而且我们只要从产品设计之初做好相关 EMI 计划, 在产品设计过程中完成必要的 EMI 测试, 则 EMI 组件的原料成本仅占总原料成本的 3 - 5%。而如果忽视 EMI 合规性的测量, 则需要付出高昂的代价, 尤其在设计结束时才进行设计之初就应该完成的 EMI 测试, 此时由于采取预防 EMI 措施占

用的成本约占设计总成本的 30 - 50%。有时甚至需要从头再来,由于需要进行大量的测试工作,因而成本会更高,而且还要请求外部专业机构的帮助。

合规性测量由专业、设备精良的实验室来完成,所需的测量设备非常昂贵,步骤也非常繁琐。因此生产厂商有必要在设计期间自己进行测试,保证测量结果满足规定要求,所使用的仪器价格也合理,操作要相对比较方便。厂商实质没有必要花钱购置昂贵的测量仪器,严格按照标准规定建立测量设施,而是把工作重点放在快速查找存在严重干扰问题的电路和连接上,从而帮助确定最佳、经济、高效的 EMI 控制方案。

总之,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。通过频谱分析仪预认证 EMI 合规性测试产品我们可以用较少的成本很方便找到电磁干扰的幅度和发生源。

二、频谱分析仪 EMI 合规性预认证测试方案的原理

你的产品重新设计、改进、新产品的开发,为了取得 EMC 认证,常常在鉴定实验室和单位之间奔走。如果第一次 EMC 鉴定失败后,往往会想得到:假如把整个设备放在屏蔽盒内将有什么样的结果?谁来告诉你,只有等到下一次全面 EMC 测试才得知它的效果如何。假如下次认证再次失败怎么办?每一次认证的费用,来回跑的时间,以及产品一时不能上市所带来的损失,已经能买我们许多倍的产品。所以北京海洋仪器推荐的合规性 EMC 预测试仪器,只需要一种简单易行的检测步骤,就知道你的改进是否已经相对地获得了改善。

在你一种新产品的研发阶段就用这些产品进行预应性测试 用符合要求的频谱分析仪和电场、磁场等各种侦测探头进行辐射干扰测试; 用符合要求的频谱分析仪和线性阻抗稳定网络(LISN)传导干扰测试接口进行传导干扰测试,去检测发射和泄漏点,找出其源头,加以屏蔽和电路改进,而后再测再改,直到效果最满意为止。

到了这里,你肯定会问,这种测试测的准不准,辐射和传导干扰信号通过我们的仪器测试小到什么程度才是最满意的效果,或者是否可以通过 EMC 认证。因为 EMC 认证测试的过程非常严格,使用不同的仪器和测试方法、不同的产品类型、引用不同 EMC 认证标准是不同的,所以我们负责任地告诉您,我们使用这些产品测试的结果是准确的。但是否是被测信号的真实大小,跟测量的方法相关联。

您的产品是否能一次通过 EMC 认证,我们不能给你一个肯定的答案。看到这里,也许您比较失望。您的产品通过我们的测试进行预检合规性测试,您把设计方案和屏蔽等进行改进,先期做到自己心中有数,再送专业鉴定部门认证,一次认证通过的可能性就大很多。假如第一次认证没有通过,认证部门同时给出一个产品测试报告,拿回预认证产品,用这个测试方案再测试此产品,记下此测试结果,和测试报告进行比较分析,应用对比的方法对您的产品不能通过的部分进行改进,直到合格为止。不断积累经验,EMC 认证对您来说将逐渐变成容易的事情了。

三、EMI 合规性预认证测量仪器

3.1 频谱分析仪

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。

尽管示波器的用途很广，但它并不是进行EMI测量的最佳选择，原因如下：

1、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。

2、电磁干扰相对于电路的工作信号往往较小，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，示波器无法进行测量。

3、由于在测量有源干扰（即辐射）时，涵盖的测量频率范围在 150kHz 到 1GHz 之间，因而为了满足该频率范围的信号测量需要，测量设备必须具有非常高的灵敏度，必须能够测量只有几个 μV 大小的信号。示波器灵敏度在 mV 级。

4、EMI 标准要求测量信号的“平均值”和“准峰值”，而选择性频率测量的带宽取决于频率的高低。

测量电磁干扰更合适的仪器是频谱分析仪。它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。

频谱分析仪是一台在一定频率范围内扫描接收的接收机，原理图如图 1 所示。

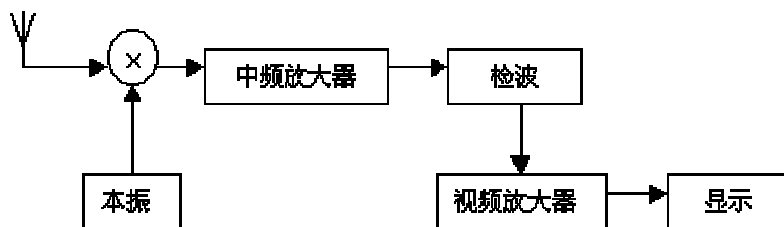


图 1 频谱分析仪原理框图

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。

3.1.1 频谱分析仪的参数和使用方法

要获得正确的测量结果，必须正确地选择和使用频谱仪，正确使用频谱分析仪的关键是正确设置频谱分析仪各个参数，下面解释频谱分析仪中主要参数的意义和设置方法：

频率扫描范围

频谱分析仪的价格主要由该参数决定，规定了频谱分析仪扫描频率的上限和下限。频率上限为1GHz的仪器可以测量绝大多数业务波段、ISM波段（433MHz）、手机频率范围、GSM低频波段、地面无线和电视波段、EMI测量。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。

中频分辨带宽 (IF)

这项指标决定了仪器的选择性和扫描时间，分辨率高低决定频谱分析仪区分两个相邻信号的能力大小，而该能力又取决于仪器对 IF 波段的响应质量。调整分辨带宽可以达到两个目的，一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。另一目的是提高仪器灵敏度。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。

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。

动态范围/压缩能力

动态范围是频谱分析仪的重要指标之一，它决定着频谱分析仪可显示的振幅范围。其最大值受混频电路的线性度制约，原因是后者可能产生失真和虚假信号。仪器的最低可用信号电平以噪声电平的形式给出，通过降低滤波器带宽可以降低噪声，从而提高仪器的动态范围。

振幅测量准确度

一般频率分析仪的垂直（振幅）标度都是采用对数形式表示，假设屏幕上显示的振幅大小为80dB，则相当于1:10000大小的电压比。振幅测量的准确度受频率响应和对数放大器质量的影响。测量准确度的总误差最好在±1dB之间。

输入灵敏度

该灵敏度大小决定可测量信号的最低频率大小，其大小受噪声电平限制，只有频率大小超过噪声波段的信号才能被仪器测量到，噪声有热噪声和非热噪声之分。热噪声的计算公式如下：

$$P_{\text{therm}} = K \times T \times B \quad (P_{\text{therm}} : \text{噪声功率, 单位瓦}; K : \text{玻尔兹曼常数} = 1.38 \times 10^{-23} \text{ VAs/deg.}; T : \text{绝对温度}; B : \text{带宽, 单位 Hz})$$

$$B(\text{dB}) = 10 \lg B(\text{IF})(\text{Hz})$$

从公式可以看出，噪声功率与带宽成正比，即如果滤波器带宽降低十倍，则噪声功率降低 10dB，灵敏度相应的增加 10dB。所有其他噪声源都可当作非热噪声源处理。

扫描时间

频谱分析仪可扫描频率范围非常宽的信号，仪器接收的信号从扫描频率范围最低端扫描到最高端所使用时间叫做扫描时间。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。

频率稳定性

当然，频谱分析仪的频率稳定性必须高于被测信号的频率稳定性，整个仪器的稳定性取决于本地振荡器的稳定性，其长期和短期稳定性应满足一定的规格。

3.1.2 用频谱分析仪分析干扰的来源

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。

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。

3.2 用线路阻抗稳定网络（LISN）测量电源传导干扰

又称人工电源网络，需要在对频率范围为9kHz-30MHz的电源线进行的传导发射测量中用作耦合/去耦网络。在DUT的两相馈电中可提供高达16A的电流，在三相馈电中可提供高达200A的电流。对称的LISN可用于日益重要的数据线路的RFI电压测量中。

在所有设计和合规性测试试验室内，该仪器常常和频谱分析仪一起使用，它的作用是在150kHz到30MHz频率范围内隔离、识别、量化传导干扰。合规性测试实验室将LISN和一个特殊测试接收机一起使用，如果需要进行合规性前期测试，LISN可与频谱分析仪一起使用，这种测试方法速度快，更为实用。典型产品为[HM6050](#)，既具有遥控和人工手功能，又具有瞬态限幅器。

辐射发射 30MHz频率测量时需要使用已校正的天线、电流卡钳、近场探头和吸收钳，通过它们在近场区查找辐射源可以直接发现干扰源。检查电缆上的发射源使用电流卡钳；检查机箱缝隙的泄漏使用近场探头；在RFI功率测量中使用吸收钳。

3.3 用近场探头测试方法确定干扰源和泄露

近场侦测探头对于测量EMI控制措施的效果特别有帮助，侦测探头分为有源探头（含电场探头、磁场探头、uH场探头、高阻抗探头、低容抗探头）和无源辐射探头可帮助设计人员选择适当的EMI控制措施。辐射干扰的测量需要使用天线和接收机，整个装置要在没有辐射和第三方干扰的环境下进行，这种测量多数在电波暗室内进行。

如果在产品设计阶段采用这种测量方法，则效率低、时间长、成本高实际上，我们所需要的是一种能够快速确定电路内部尤其是导体和线束干扰源的方法，虽然我们说自由场辐射，但是多数情况下都是导体和线束产生的辐射，它们就如同天线一样。在设计实验室内，多数 EMI 测量工作都与测量导线产生的干扰有关。通过采取适当的方法，我们可以直接测量携带信号、电能等的导线或其屏蔽层。干扰电磁场一般沿着金属导体高效传播。在设计实验室内，要想确定此类干扰的存在，只要使用一台频谱分析仪和一支合适的近场探头就足够了。

有源电场探头

有源电场探头是一种高带宽、高灵敏度的测量设备，使用它可以判断整台设备或设备中各模块的总辐射情况，其测量距离一般在 0.5~1.5m 之间，它可以测量屏蔽层的有效性和滤波器对所有与被测设备相连导体和导线的影响。

由于电场探头灵敏度很高，因而它有可能接收到来自试验内其他设备的干扰。为了消除此类干扰对测量的影响，通常采取两次测量方法。第一次测量时先关闭被测设备，这样就只接收到干扰信号；然后打开被测设备进行第二次测量，观察信号此时的表现。

有源电场探头的测量与远场天线测量相似，因而测量结果取决于测量装置本身，布线方式非常重要，如果需要提高测量结果的可重复性，测量装置的设计必须精确，最好都安装于配电盘上进行。

有源电场探头可用于分析周围环境产生的干扰，如果此类干扰存在的话，使用一支有源电场探头和一台频谱分析仪就可充分进行检测。由于分析是在频域中进行的，因而可快速发现干扰源，从而提高被测设备的 EMI 特性，为通过正式的合规性测试做好准备。

有源磁场探头

寻找干扰电流的来源是问题诊断的关键，为了在测量干扰电流时不拆卸电路板或影响电路工作，有源磁场探头将是最佳选择。有源磁场探头是用来测量磁场的近场探头，在近场内磁场与电流之间存在直接关系。磁场探头对于外部干扰（第三方干扰）的敏感度相当低，当靠近干扰源时，其输出会明显增大，因而能够准确的查找此类干扰源。利用磁场探头可很容易的查找屏蔽层或外壳的裂缝所产生的泄漏。

对于机箱而言，靠近滤波器安装位置的缝隙最容易产生电磁泄漏。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。对于机箱的泄漏，非常适合使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，有利于对辐射源进行精确定位。使用时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。在测量时要将频谱分析仪的灵敏度调得尽量高，根据前面讨论，减小频谱分析仪的分辨带宽能够提高仪器灵敏度。但是要注意当分辨带宽很窄时，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，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。这样做好处是不会将背景干扰误判为泄漏信号。

随着电子电路板集成度的提高，使用普通的磁场探头查找干扰源变得越来越困难。这时可以使用 HZ554 μH 场探头，这种探头可以深入到毫米级大小的区域查找干扰源，因而是理想的电路板测试工具。

所有金属电缆都可以看作是发射和接收干扰辐射信号的天线。如果使用磁场探头和频谱分析仪对电缆进行测试，你会惊奇的发现甚至在电源线、电话线、慢速数据传输线上都存在相当大的射频干扰信号，比如时钟频率谐波。利用磁场探头和频谱分析仪的对数标度振幅显示，我们会很容易辨别是否所有电缆中都携带同样程度的干扰信号还是有些电缆携带的更多一些，从而采取相应的控制措施。利用上述装置，我们可以快速、高效的完成实验室测量工作，不需要使用屏蔽箱，而且测量装置也不复杂。

高阻抗探头

利用高阻抗探头，我们可以连接比如说集成电路的管脚或单根导线进行测量，并且不必像平常测量那样被迫给被测管脚加上 50 Ω 频谱分析仪输入电阻。惠美高阻抗探头产品的带宽 > 1GHz，所含阻抗主要为电容性的，并且 < 2pF。这种高阻抗探头还可以通过 50 Ω 阻抗或 50 Ω 端接电阻与示波器相连，同样也可以获得上述带宽和阻抗。

如果还需要降低测量点处的负载，可以使用 < 0.3pF 和 3GHz 带宽的 HZ555 低容抗探头，这样低的负载甚至允许测量许多关键性的 RF 电路，其主要优势在于测量点处实际不存在负载，否则低阻抗探头可能需要抑止或降低振荡，防止影响测量结果，而随着感兴趣频率的增加，该问题还会加剧。每 1pF 都至关重要，使用 HZ555 则可将该问题消除在带宽极限以内。这种低容抗探头有着非常细微的针尖，使用时无需进行接地连接，电路通过探头阻抗和测试人员的身体构成回路，所以它完全能够测量集成电路管脚或单根导线产生的个别干扰信号。由于这种探头采用容抗和高阻抗相结合的方式，因而可以测量普通干扰信号并查找其根源。

3.4 用电流卡钳检测共模电流

电流探头利用变压器原理，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，导线相当于变压器初级，探头中线圈相当于变压器次级。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：

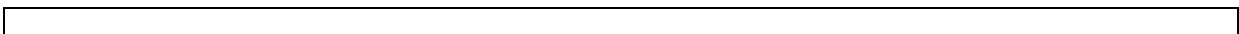
$$I = V / Z_T$$

如果公式中的所有物理量都用 dB 表示，则直接相减。被测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。

四、EMI 故障排除易犯的错误

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：

- 1、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
- 2、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
- 3、机箱面板与机箱基体之间的缝隙（开口 1）产生的泄漏
- 4、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 2 所示。

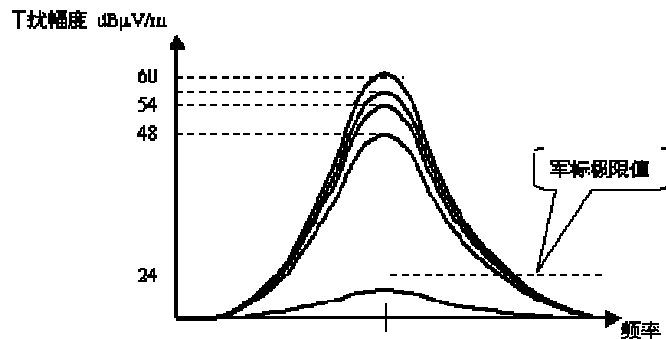


图 2 抑制 4 个泄漏源时干扰幅度的变化

在前面叙述中，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规定后，如果为了降低产品成本，减少不必要器件，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。

五、EMI 测量中的实际应用

尽管电子电路设计人员早就知道设计过程中要防止出现 EMI 问题，但是措施的效果如何常常只有经过辐射测量之后才能知道，由于此类测量的时间和成本较高，因而个别电路变化所产生的影响很少被测量，这样经过几次电路变化之后，其中某一预防措施的效果好坏就不得而知了。所以，如果在送到实验室之前先用前面所说的近场探头测量一遍将是非常有帮助的。其中电场探头用来测量交流电场，而磁场探头则对于测量磁通量的变化非常敏感。

在使用这些探头产品之前，首先需要了解电路板中主要存在哪些电磁场，如果电压较高而电流较低，则主要是电场干扰；而如果电压较低但电流较高，则主要是磁场干扰。其中前一种情况主要存在于电子管电路中。

现代集成电路的工作特点是低电压、高电流。当然，其中起到决定作用的不是电流的高低，而是其变化率（频率）。如果有电磁波产生，单位时间内磁场的变化率将是决定性因素。对于此类元件，采用磁场探头最为合适。由于探头信号的幅度与磁通量变化成正比，因而与产生该磁场的电流的变化也成正比。因而这些探头产品非常适合进行 EMI 控制措施有效性的初步测量。

此类探头多数存在以下缺点：其空间分辨率非常有限，因而就给干扰信号来源的查找带来了困难。所以，在购买探头时，建议购买磁场分辨率较高的探头。而随着电路板集成度的提高，个别干扰源的查找要求探头分辨率达毫米级，选择分辨率较高的探头就显得益发重要。

四层电路板的测量

下面我们介绍如何通过探头信号获取所需测量信息。信号的显示主要有时域和频域两种形式，其中时域显示更为直观。下面我们以大小为 100x160mm 见方的 4 层欧标电路板为例说明。该板各层均单独供电，Vcc 层和接地层之间的距离是 100 μm ，板子中间是一组电容器，用来实现两层和 AC 电源之间的连接。

图3所示为 74AC163 的 Vcc 脚附近电流信号，信号幅度与磁场变化率成正比，进而与该层该位置的电流变化率成正比，上升和下降时间在亚纳秒范围内。其原因是因为高频电流多数都流向了 Vcc 管脚，此类高频组件的使用不能太多，以避免阻抗变得过高。Vcc 管脚处不能使用旁路电容器，因为后者不允许使用高频电流。虽然板子中间的Vcc层和接地层之间有一系列电容器，但是它们只能通过低频分量。

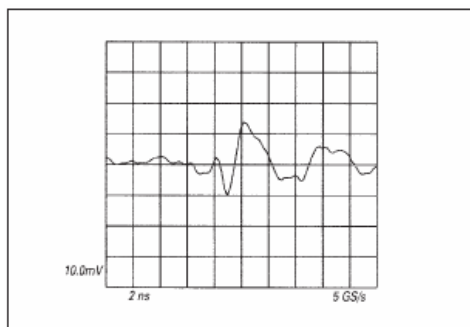


图3：74AC163的Vcc层和Vcc管脚附近电流信号。

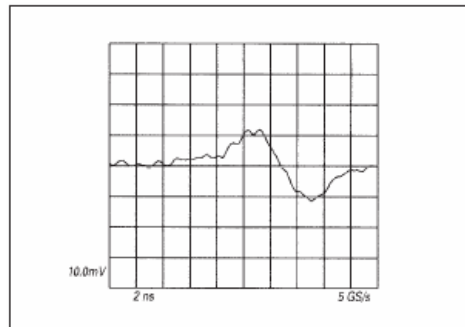


图 4：靠近电容器组的配电层电流变化。

图4所示为该组电容器附件的电流变化情况，很明显与图3 相比，该信号要慢的多，

其上升和下降时间约为 3ns。该组电容性只能以较慢的速度向各层传递电流，而这样的细节只能用 μ H 场探头这样的高分辨率探头才能观察到。

通过下面的例子我们可以观察吸收措施的效果。图5中的信号是利用 μ H 场探头从 74AC00 的 Vcc 管脚处直接采集的，该集成电路的电源由无阻尼 Vcc-接地系统提供，磁场的变化很强。与之相比，图6中信号具有同样的接收点，但是现在集成电路是由一个双阶阻尼配电系统供电。Vcc 管脚通过一个带宽较大的滤波器扼流圈与 Vcc 层连接，同时该层由一层碳材料提供阻尼。可以看出，振幅明显降低。这样我们仅用该探头而不必使用任何其他设备就能确定EMI控制措施的效果如何。

最后让我们来看一下从欧标电路板的时钟信号分配点处采集的信号情况，该信号是直接来自时钟信号发生器的输出端采集的，图 7 中显示的信号没有采取任何阻尼措施，信号振幅经测量高达 60mV。对于这种情况，我们常用的应对方法是在时钟信号发生器的输出端插入一个串联电阻，本例中使用的电阻大小为 82 Ω 。从图 8 中可以看出：信号的幅度减小了一半，该措施的效果一眼就可以看出来。

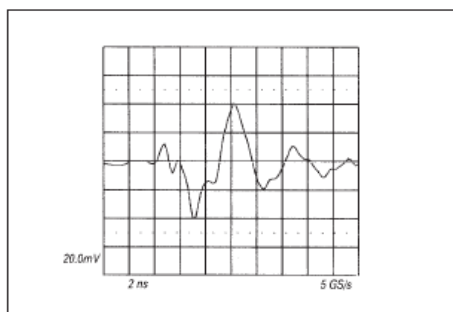


图 5：直接靠近 74AC00 的 Vcc 管脚附近信号。

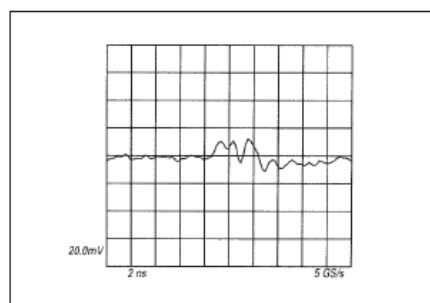


图 6：采用 2 阶阻尼的配电系统内信号。

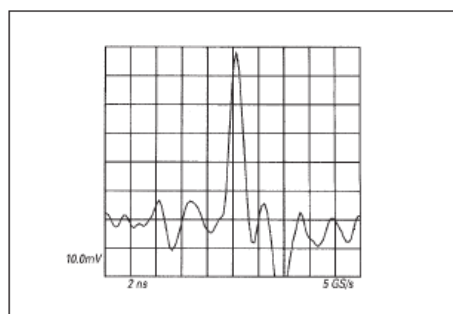


图7 从未采取EMI控制措施电路中采集的 μ H 场探头信号

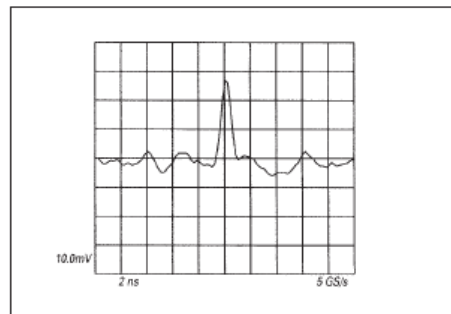


图8在时钟信号发生器输出端串联一个电阻器可将信号振幅降低一半

六、海洋仪器 EMI 测试方案

传导干扰测试方案

频谱分析仪+LISN 线性阻抗稳定网络（或电源网络）+限幅器+EMC 软件

辐射干扰测试方案

频谱分析仪+各种近场侦测探头+放大器（或衰减器）+EMC 软件