

家用电器电磁干扰（EMI）及其控制

柳光福 方国兴 上海埃德电磁技术有限公司（上海 201103）

摘要：本文分析了常用家用电器产生电磁干扰（EMI）的原因、传播途径和控制方法，阐述了 EMI 电源滤波器网络结构和工作原理。

叙词：电磁干扰（EMI） 电磁兼容（EMC） EMI 电源滤波器

1 前言

家用电器、电动工具和类似器具在工作时所产生的无线电干扰在国内外早已引起人们的高度重视。电器产品的抗电磁干扰能力已成为衡量产品质量的重要指标。

常用家用电器主要包括吸尘器、电风扇、洗衣机、电冰箱、空调、电脑、电子游戏机、电磁灶、微波炉等。这类器具工作时所产生的电磁干扰的主要原因，一部分器具由于有整流子电动机，其绕组和整流子电刷换向所带来接触电阻变化，产生电磁场辐射而带来的干扰；另一部分器具是由于开关、继电器反复动作而产生的瞬态干扰。当开

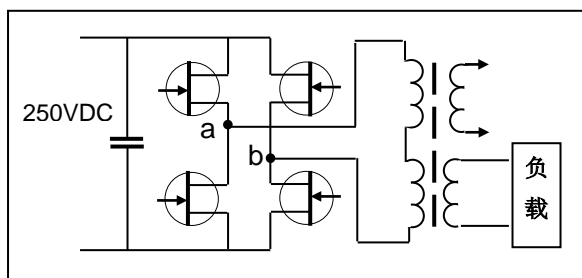


图1 变频器原理框图

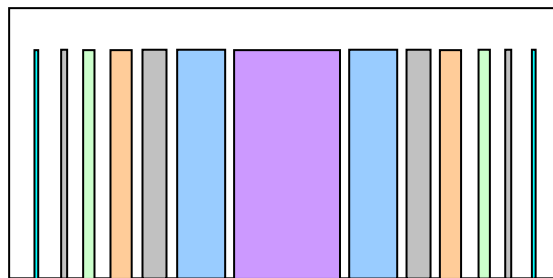


图2 a-b 间的方波

关切断负载电流时，电流从额定值迅速降到零，此时 di/dt 变化很大，在电感电路中产生很大的脉冲电压，这种脉冲电压使开关触头在断开时产生电弧，由此而产生电磁干扰。尤其是各式各样的变频空调、变频冰箱、变频洗衣机、变频微波炉、变频电磁灶等等。我们都知道，变频技术的一个重要特点，就是其采用的功率器件（如：GTR、GTO 和 MOSFET 等）是在开关状态下工作。如图 1 所示 PWM 控制的变频控制电路，在其 a 与 b 点之间的电压波形如图 2 所示，是一系列宽度不等的方波。由于种种原因，方波的前后沿总是有一定的上升和下降时间。为方便分析，假定上升和下降时间相等，方形为等腰梯形，如图 3 中右上角所示。

按照福里衰级数的分析方法，可以算出其各次谐波的幅值为：

$$V_n = 2V \frac{\tau}{T} \left(\frac{\sin \frac{n\pi \tau_r}{T}}{\frac{n\pi \tau_r}{T}} \right) \left(\frac{\sin \frac{n\pi \tau}{T}}{\frac{n\pi \tau}{T}} \right) \quad (1)$$

式中： V_n ---- n 次谐波的幅值，V；
 V ---- 方波的幅值，V；
 τ_r ---- 上升和下降的时间，s；
 τ ---- 方波宽度，s；
 T ---- 周期，s。

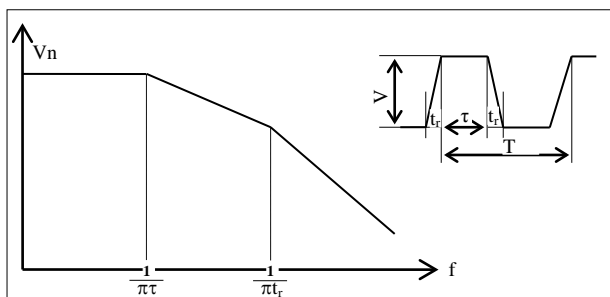


图3 方波及其谐波包络

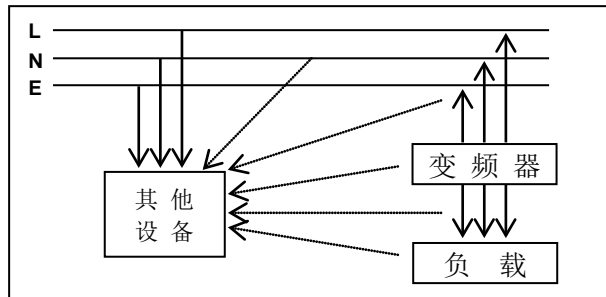


图4 EMI 路径示意图

在一定的重复频率下，其各次谐波幅度的包络如图 3 所示。由于图 2 所示的方波宽度是各不相同的。于是，其生成的谐波幅度的包络就更加的复杂了。由于实际应用中的方波幅度很高，有的甚至高达几千伏，这样一来，由 (1) 式估算出的高次谐波直到移动通讯的频率范围 (900MHz 和 1800MHz) 仍然是十分可观。从电磁兼容性 (EMC) 的观点来分析，它就是一个必须加以控制的强烈干扰源。

2 电磁干扰 (EMI) 路径分析

为了能有效控制家用电器正常运行时产生的 EMI 信号。首先要分析其 EMI 信号的传播路径。

图 4 为家用电器的单相电网框图。图中家用电器产生的 EMI 会沿导线和空间辐射的路径传播，这就是我们所说的传导干扰和辐射干扰，由此对同一电网上邻近电子设备的正常运行构成威胁。图 4 中用实线箭头的线表示 EMI 信号沿导线传播的路径，以虚线箭头的线表示 EMI 信号经空间传播路径。无论 EMI 信号沿导线还是经空间的路径传播，均可分为差模 (DM) EMI 信号和共模 (CM) EMI 信号。其中，差模是指在相线 (L) 和中线 (N) 之间的 EMI 信号，见图 5；共模是指在相线 (L) 与地线 (E) 之间和中线 (N) 和地线 (E) 间的 EMI 信号，见图 6。

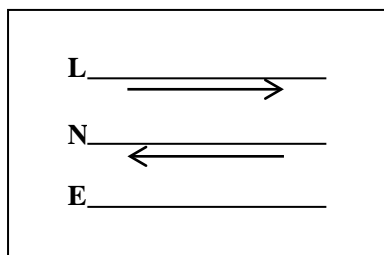


图 5 EMI 信号中的差模(DM)分量

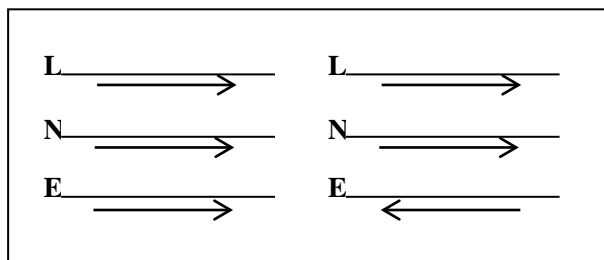


图 6 EMI 信号中的共模(CM)分量

关于差模 EMI 信号产生的辐射是由差模电流流经导体形成环路而生成，可用图 7 所示的等效环形天线的模型来表示。在远场范围内的 r 点处生成的最大场强为：

$$E=131.6 \times 10^{-16} [f^2 AI] [1/r] \quad (2)$$

E---在远场范围内 r 点处的场强，V/m；

f---差模 EMI 信号的频率，Hz；

A---差模信号等效环路面积， m^2 ；

I---差模信号电流，A；

r---到等效环路中心的距离，m。

只要等效环路周长小于所计算的差模 EMI 信号的四分之一波长，由 (2) 式估算出的结果是相当准确的。

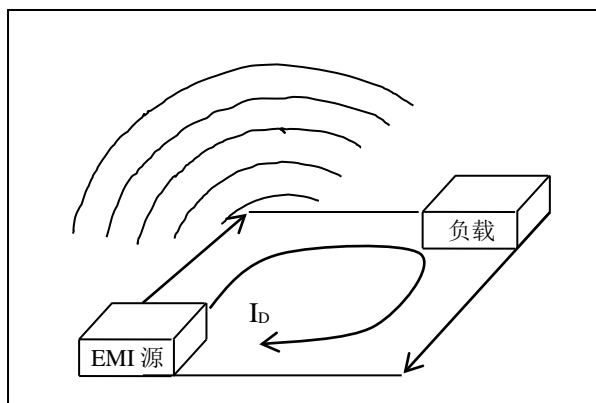


图 7 EMI 差模信号的空间传播

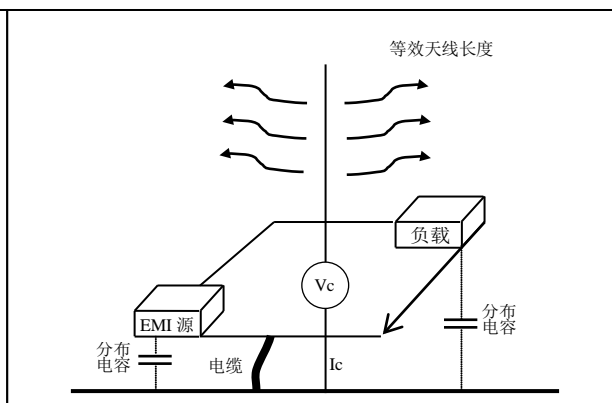


图 8 EMI 共模信号的空间传播

另一方面，由于电流流过时，会在导体上面产生电压降。当用电缆把有关地线和设备（或系统）的“地”连接起来后，某些部位的电位会比设备（或系统）的“地”电位高，这就是共模电位。在一定的条件下，这个电位所生成的电流会以电场辐射的方式向外辐射电磁干扰能量，我们可用图 8 所示的等效单极天线的模型来说明，在远场范

围内 r 点处生成的最大场强为:

$$E=4\pi \times 10^{-7} [fIL][1/r]$$

式中: E---在远场范围内 r 点处的场强, V/m;

f---共模 EMI 信号的频率, Hz;

I---接地电缆中的共模电流, A;

L---等效单极天线的长度, m。

只要等效单极天线的长度小于所估算的干扰信号的四分之一波长, 由 (3) 式估算出的最大场强 E 是相当准确的。

大家都知道, EMI 要污染环境, 也可能会对电器内和其他电器的一些敏感电子电路的正常运行造成危害。那么, 如何把 EMI 控制到一定的电平才能保护环境, 确保电器内和其他电器的一些敏感电子电路的正常运行呢? 这个问题一直在引起人们的关注。为了控制 EMI, 世界各国都制定有相应的标准, 即电磁兼容性标准。这些标准中规定的 EMI 电平限值, 是根据电波传播理论和实际测得的数据, 结合当时科技发展的水平来规定的。例如美国的 FCC 标准, 欧共体的 CE 标准, 我国也有相应的电磁兼容性标准。这些标准就是控制 EMI 的法律。如欧共体规定, 从 1997 年 1 月 1 日起, 所有进入欧共体的电子、电器产品必须符合 CE 规定的要求, 否则, 不允许销售, 对违规销售处以重罚。我国从八十年代初开始起草这方面的标准, 并于 1984 年发布了 GB4343-84《电动工具、家用电器和类似器具无线电干扰特性测量方法允许值》, 九十年代初, 在等效采用 C. I. S. P. R. 第 14 号出版物第三版的基础上对其作了重大修改, 现在新版标准 GB4343-95 作为家用电器、电动工具以及类似器具产品无线电干扰合格认证的依据, 在无线电干扰标准体系中占有重要的位置。该标准的贯彻与实施涉及千家万户能否正常收看电视、收听广播、进行无线电通讯, 关系着我国家用电器能否溶入国际市场。图 9 即为 GB4343-95 标准规定的家用电器传导干扰限值, 图 10 是 GB4343-95 标准规定的家用电器辐射干扰的限值。当然, 标准也规定了严格的测量方法。要满足标准规定的 EMI 限值, 就必须采取控制 EMI 的相应措施和设计方法。

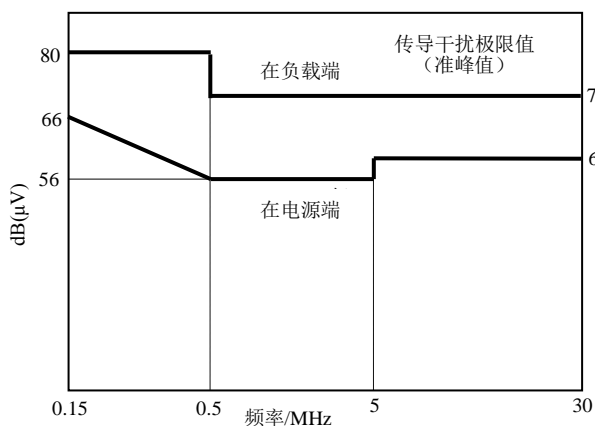


图 9 GB4343-95 标准家用电器传导干扰限值

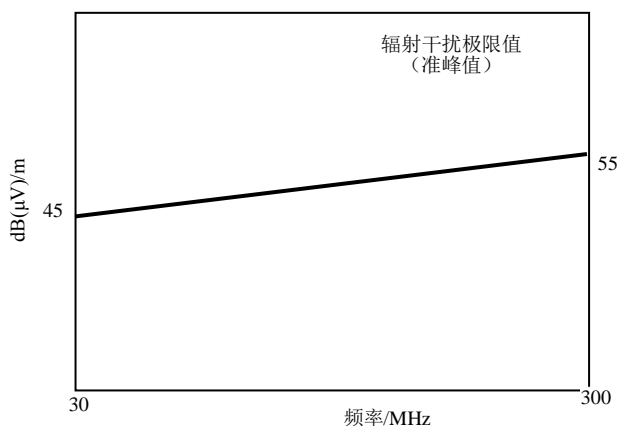


图 10 GB4343-95 标准家用电器辐射干扰限值

一方面, 我们知道了干扰源的特性和相关的估计方法。另一方面, 按照实际情况能分析综合出有关的电路模型。这样一来, 便可用计算机算出有关电磁干扰的幅值。科技人员长期的努力已经开发出了很多可供实用的软件, 只要输入有关干扰源和电路元件结构的数据, 便可显示出干扰信号幅度和场强的分布。有了这些相关的信息, 为控制电磁干扰提供了可靠的依据。

3 EMI 的控制与 EMI 滤波器

要使电器产品满足有关电磁兼容性 (EMC) 标准的要求, 必须在产品的开发设计阶段做大量控制 EMI 的工作。首先要选取适当的元件和电路, 使之在实现电路功能的同时, 能够达到控制 EMI 的目的; 其次, 要根据电路的特点来设计电路的走线和元件排布, 这方面有很多控制 EMI 行之有效的经验。由很多印刷电路板组成设备, 由设备集成为系统的时候, 电缆敷设、接地、滤波和屏蔽就成了控制电磁干扰的关键技术。其中, 屏蔽是控制 EMI 经由空间传播的有效措施。EMI 滤波器主要是控制 EMI 经导线传播的最有效措施。若能把滤波和屏蔽这两项技术有机地结合起来, 应用得恰到好处, 把 EMI 控制到有关标准规定的限值以内肯定能实现。到目前为止, 还未发现不用 EMI 滤波器的设备或系统能满足有关电磁兼容性标准的例子。合理选用和正确安装 EMI 滤波器后, 它除了能控制沿导线传播的 EMI 信号外, 还能有效控制 EMI 信号从电缆产生的辐射传播。

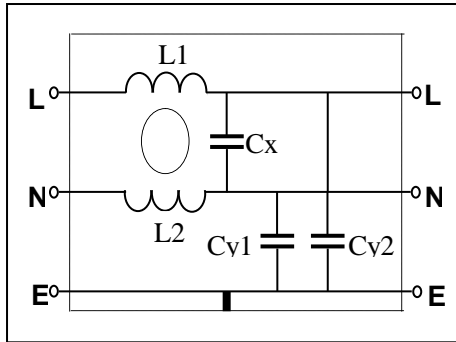


图 11 EMI 滤波器的原理图

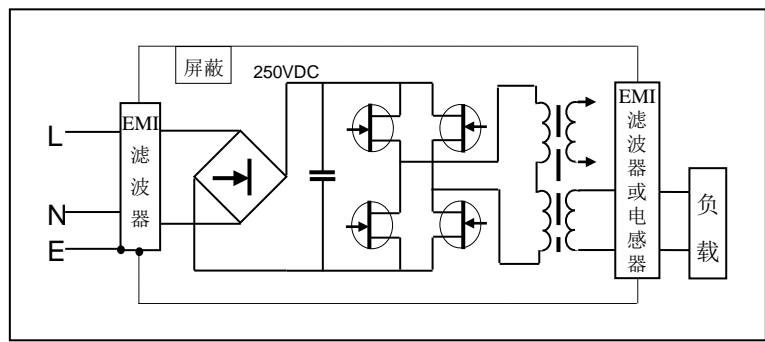


图 12 安装滤波器后的变频器原

图 11 是单相 EMI 滤波器的基本网络结构。它都是由集中参数元件组成的无源网络，虚线框表示滤波器外面的金属屏蔽外壳，它的作用是控制 EMI 信号经空间辐射传播。在图 11 的电路中，只有两只电感 L1 和 L2，三只电容器 Cy1, Cy2 和 Cx。如果把 EMI 滤波器插到图 1 所示的变频控制电路的输入电路上，如图 12 所示。这样，L1 和 Cy2、L2 和 Cy1 分别构成 L 与 E 之间和 N 与 E 之间的低通滤波器，用来抑制电器运行时产生的共模 EMI 信号。其中，L1 和 L2 的电感是绕在磁环上两组线圈，由于多种原因，L1 和 L2 的电感量是不相等的，于是，L1 和 L2 之差便是差模电感，它和 Cx 又组成 L 与 N 之间的一只低通滤波器，用来抑制电器运行时产生的差模 EMI 信号。从而实现对 EMI 信号的控制。

由于图 11 的电路是无源网络，它具有互易性。当 EMI 滤波器安装在家用电器变频控制电路的电源入口处后，它既能有效地抑制图 1 所示变频电路运行时产生的 EMI 信号传入电网污染电磁环境，去干扰接在同一电网上的其他电子设备，又能大大衰减电网上传播的其他干扰信号对家用电器变频控制电路等的影响。

4 EMI 滤波器的应用

电源 EMI 滤波器是无源网络，具有互易性，即把负载接在 EMI 滤波器的（电源）端，还是接在（负载）端都是可以的。在实际应用中，要达到有效地抑制 EMI 信号的目的。必须根据滤波器两端将要连接的 EMI 源阻抗和负载阻抗的特性来合理选取网络结构，无论怎样复杂的电源 EMI 滤波器，都可以把它的共模和差模滤波网络抽象出来，简化为图 11 中所示的低通滤波网络。按源阻抗和负载阻抗的组合原则，来选择 EMI 滤波器的网络结构和参数。才能得到满意的抑制效果。这是电源 EMI 滤波器的应用技巧。

大家知道，当滤波器的输出阻抗 Z_o 和与它端接的负载阻抗 R_L 不相等时，在这个端口上会产生反射。反射系数定义为 $\rho = (Z_o - R_L) / (Z_o + R_L)$ ， Z_o 与 R_L 相差越大， ρ 就越大，端口产生的反射也就越大。当 EMI 滤波器两端阻抗都处于失配状态时，EMI 信号会在它的输入和输出端口产生很强的反射。这样一来，滤波器对 EMI 信号的衰减，等于滤波器的固有插入损耗加上反射损耗。在 EMI 滤波器的实际使用中，可用此技巧来实现对 EMI 信号更加有效的抑制。这就是为什么选用 EMI 滤波器时，一定要仔细分析其端口阻抗的正确搭配，使产生尽可能大的反射，达到对 EMI 信号的有效控制。

十多年来，我们在用 EMI 滤波器来解决家用电器电磁干扰方面积累了一些经验，为国内多家品牌家用电器进行电磁兼容性(EMC)设计改装，产品涉及有空调、洗衣机、洗碗机、干衣机、吸尘器、微波炉等，并设计开发了多种配套 EMI 电源滤波器（见附表 1）。有关此方面的经验，将逐步在以后发表的文章中继续探讨。

5 后记

虽然在控制家用电器 EMI 方面积累有一些经验，但是家用电器发展日新月异，所以笔者对家用电器产生的干扰和控制仍知之甚少。我们十分愿意与同行切磋技艺，拜各位为师，继续深入学习，争取与大家合作开发更多价廉物美的 EMI 滤波器，为我国家用电器在电磁干扰控制方面多出一点力。

附表 1：上海埃德电磁技术有限公司为家用电器配套的部分 EMI 滤波器一览表

EMI 滤波器型号	额定电流	适用家电类型
DNF05-H-3/5/10A	3/5/10A	空调器
DNF06-16A	16A	洗衣机、洗碗机、干衣机
DNF055-G-20A	20A	空调器

DNF250-HX-20A	20A	空调器
PNF221-G-1/2/3/5/6/10A	1/2/3/5/6/10A	洗衣机、、洗碗机、干衣机
MH-01	6A	洗衣机、洗碗机、微波炉、吸尘器、电冰箱

参考文献

- [1] Cor van de Water, Inverter design basics & waveforms;
- [2] 柳光福, EMI 滤波器的选用和安装;
- [3] 陈穷等, 电磁兼容性工程设计手册;
- [4] H. W. Off, Controlling EMI by proper PCB;
- [5] R. F. German, Use of a ground grid to reduce PCB radiation.
- [6] GB4343-95 家用和类似电动、电热器具, 电动工具以及类似电器无线电干扰测量方法和允许值

作者简介:

柳光福, 男, 研究员, 中国电源协会安全与电磁兼容分会主任委员, 毕业于成都电讯工程学院, 现主要从事电子设备电磁兼容性设计和微波通信方面的研究工作。

方国兴, 男, 高级工程师, 毕业于西安电子科技大学, 现主要从事电子设备电磁兼容性设计和 EMI 电源滤波器设计、工艺方面的研究工作。