

小波分析及其在电磁兼容研究中的应用

梁淑芬¹, 吕宏丽²

(1. 五邑大学 信息学院, 广东 江门 529020; 2. 唐山学院 信息工程系, 河北 唐山 063000)

摘要: 采用二进尺度小波变换的 Mallat 算法, 应用 Daubechies 小波, 讨论了小波分析理论在电子电器设备电磁兼容研究中的应用. 从实验仿真的结果表明, 由于小波变换具有多分辨率特性, 能迅速有效地提取某一频率的信号, 从而说明了这种新的理论分析方法用于电磁兼容研究的有效性.

关键词: 小波分析; 电磁兼容性; Fourier 变换; 二进尺度 Mallat 算法

中图分类号: TM835 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007- 855X(2004)06- 0079- 05

Wavelet Analysis and Its Application to Electromagnetic Compatibility

LIANG Shu-fen¹, LU Hong-li²

(1. Information School of Wuyi University, Jiangmen, Guangdong 529020, China; 2. Department of Information Engineering, Tangshan College, Tangshan, Hebei 063000, China)

Abstract: Mallat's algorithm of dyadic wavelet and Daubechies wavelet being used, a new method for the test and diagnosis of Electromagnetic Compatibility based on wavelet transform is put forward. The result of computer simulation of EMI signal is presented. Because the feature of multi-scales the wavelet transform can extract EMI signal in some frequency quickly and efficiently, this method proves more suitable for research on Electromagnetic Compatibility.

Key words: wavelet analysis; electromagnetic compatibility; Fourier transform; dyadic Mallat algorithm

0 引言

越来越多的家用电器的电子控制器采用了微处理器, 如家用电动洗衣机、家用空调器、电饭锅、电冰箱及一些小型家用电器产品, 因此从 EMC 的角度看, 研究微处理器的电磁兼容问题就显得十分重要了. 由于家用电器采用微处理器技术, 这使得它们受静电放电、浪涌、电快速瞬变等电磁骚扰的影响越来越明显, 甚至出现器具信息传递出错, 动作失误, 工作反常. 研究电磁兼容的传统数学工具——傅立叶变换, 对于一些非平稳突变信号的处理, 如静电放电、电快速脉冲串信号等, 较难获得理想的结果. 本文主要介绍应用于电磁兼容研究中的一种新的理论分析方法——小波分析. 由于小波变换通过伸缩(膨胀)和平移等运算功能对函数或信号进行多尺度细化分析, 是空间(时间)和频率的局部变换, 能有效地从信号中提取信息, 具有多分辨率特点, 可在时间和频率上进行分析, 更适合分析非平稳信号, 而 EMI 检测信号实际是一种非平稳信号, 本文也通过仿真例子来证明小波分析方法应用于电磁兼容研究的可行性.

1 小波(Wavelet)变换基本原理

1.1 小波及小波变换^[1]

对于 $\Psi_{ab}(t) \in L^2(R)$, 形如

$$\Psi_{ab}(t) = |a|^{-1/2} \Psi |t - b/a| \quad (1)$$

且满足“容许性”条件:

收稿日期: 2004- 04- 27. 基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(项目编号: 600061).

第一作者简介: 梁淑芬(1975~), 女, 讲师, 硕士研究生. 主要研究方向: 信息与控制. E-mail: liangshufen@eyou.com.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$C_{\Psi} = \int_0^{\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \tag{2}$$

则称 $\Psi_{a,b}(t)$ 为一个容许小波或基小波. 小波变换定义为:

$$(Wf)(a,b) = |a|^{-1/2} \int_0^{\infty} f(t) \Psi|t-b/a| dt$$

$$a, b \in R, a \neq 0 \tag{3}$$

显然, 小波函数 $\Psi(t)$ 的放缩和平移表现了它对信号不同频率和不同时间位置的限制. 容许性条件(2)式是保证 $\Psi_{a,b}$ 和 $\Psi_{ab}(\omega)$ 都具有快速衰减性的条件之一, $\Psi_{a,b}(t)$ 可作为时间窗函数, $\Psi_{ab}(\omega)$ 可作为频窗函数.

$\Psi_{a,b}(t)$ 可作为时窗函数, 若记 $\phi(t)$ 的窗口中心与窗口半径分别为 t^*_{Ψ} 和 Δ_{Ψ} , 则可得:

$$t^*(\Psi_{ab}(t)) = at^*_{\Psi} + b, \Delta(\Psi_{ab}(t)) = a\Delta_{\Psi}$$

$\Psi_{ab}(\omega)$ 可作为频窗函数, 若记 $\Psi(\omega)$ 的频窗中心和频窗半径分别为 ω^*_{Ψ} 和 Δ_{Ψ} , 则可得

$$\omega^*(\Psi_{ab}(\omega)) = \frac{1}{a}\omega^*_{\Psi}, \Delta(\Psi_{ab}(\omega)) = \frac{1}{a}\Delta_{\Psi}$$

于是矩形时间-频率窗(参见图1)可表示为:

$$[b + at^*_{\Psi} - a\Delta_{\Psi}, b + at^*_{\Psi} + a\Delta_{\Psi}] \times [\frac{1}{a}\omega^*_{\Psi} - \frac{1}{a}\Delta_{\Psi}, \frac{1}{a}\omega^*_{\Psi} + \frac{1}{a}\Delta_{\Psi}]$$

这个时-频窗的重要性在于: 对于检测高频现象(即小的 $a > 0$), 窗会自动变窄; 对于检测低频特性(即大的 $a > 0$), 窗会自动变宽(见图1). 这种自适应“变焦”功能决定了小波变换在突变信号处理上的特殊地位.

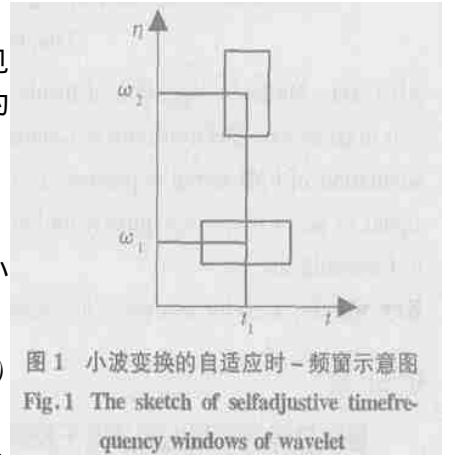


图1 小波变换的自适应时-频窗示意图
Fig.1 The sketch of selfadjustive timefrequency windows of wavelet

1.2 信号的离散二进小波分解

实际中通常需把基小波及其变换离散化, 令 $a = 2^m, b = na,$ m, n 为整数, 即 $m, n \in Z, z = 1, 2, 3, \dots, k$. 信号 $f(t)$ 经离散二进小波变换可写为:

$$C_{mn} = \int_{-\infty}^{\infty} \Psi(2^{-m}t - n)f(t) dt \tag{4}$$

当 $a = 2^j$ 时, 即相当于连续小波只在尺度上进行了二进制离散, 位移仍取连续变化, 称为二进尺度小波变换. 1986年, Mallat 基于函数

多分辨率空间分解概念, 将二进尺度小波变换与多分辨率分析联系起来, 提出小波快速算法——Mallat 算法^[1]. 多分辨率分析是将信号在 $L^2(R)$ 的两个正交子空间上逐级分解, 每级输入被分解为低频概貌和高频细节部分, 输出采样率减半. 此种算法的基本关系式为:

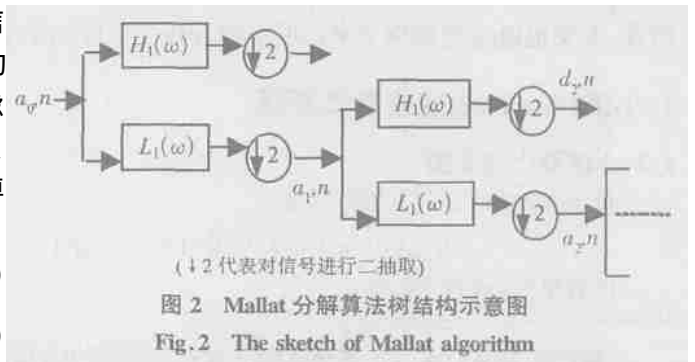
$$a_{m,n} = \sum_k h_0(k-2n) a_{m-1,k} \tag{5}$$

$$d_{m,n} = \sum_k h_1(k-2n) a_{m-1,k} \tag{6}$$

式中, $a_{m,n}$ 代表第 m 级 ($j = m$) 时的概貌信号, 即对 $f(t)$ 的平滑逼近; $d_{m,n}$ 代表同一级下的细节差异信号. 上述关系可用图2中多分辨率滤波器组说明^[1], 图中 $H_0(\omega), H_1(\omega)$ 分别是低、带通滤波器 ($j = 1$ 时为高通), 由 h_0, h_1 经离散傅里叶变换取得

$$H_0(\omega) = \sum_k h_{0,k} e^{-jk\omega} \tag{7}$$

$$H_1(\omega) = \sum_k h_{1,k} e^{-jk\omega} \tag{8}$$



($\downarrow 2$ 代表对信号进行二抽取)
图2 Mallat 分解算法树结构示意图
Fig.2 The sketch of Mallat algorithm

因此, 数字信号的离散二进尺度小波变换相当于信号经过一组数字带通滤波器.

小波分析应用于电磁兼容诊断的基本思想是用不同尺度下小波变换寻找感兴趣的频率, 这些频率可能来自某个子系统、部件或元件的 EMI, 如微处理器电路中的晶振频率及其谐波; 用不同位移因子寻找某些频率的发生时间, 以确定是系统的哪个部件产生了超过标准的电磁辐射。

2 小波分析理论在电磁兼容性 EMI 测量中的应用

电磁兼容^[2](Electromagnetic Compatibility, 即 EMC) 是指设备或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. 因此它包含两个方面要求: 一方面是指设备在运行时对环境的电磁骚扰(Electromagnetic Disturbance) 不能超过一定的限值; 另一方面是指设备对其所在电磁环境中存在的电磁骚扰具有一定的抗扰度, 即电磁敏感性(Electromagnetic Susceptibility, 即 EMS). 所谓电磁骚扰是指任何能使设备或系统性能下降的电磁现象, 而所谓电磁干扰(Electromagnetic Interference, 即 EMI) 是指因电磁骚扰而引起的设备或系统的性能下降. 故 EMC 包含 EMI 和 EMS 两个方面.

多分辨率小波分析可以作为电磁兼容 EMI 诊断测试的数学分析工具, 通过上节对多分辨率小波的理论分析, 多分辨率小波对空间进行了二分割, 用一个尺度函数平滑逼近可以得到信号的概况, 而用一个带通函数(小波) 可以得到信号的细节.

通过多分辨率小波可以把信号逐步细分, 从而可以找到感兴趣的频率及其时间特性. 这种寻找是一个由粗到细的用多种不同的分辨率浏览- 细分信号的过程.

一个电子设备由许多的子系统、部件和元器件, 以及它们之间的联系组成, 当系统出现了严重的干扰时, 需要对干扰源进行诊断, 不同的子系统、部件和元器件工作频率不相同, 工作时序也可能不相同, 对重点怀疑的对象, 可以用多分辨率小波分析方法确定它是否是造成严重 EMI 干扰的原因, 或是对 EMI 干扰的贡献, 从而为 EMI 改进提供依据.

例如, 在一个微处理器系统中, 频率最高的元件是晶振器件, 在印刷线路板(PCB) 设计时都会给予特别的关照, 随着微处理器的处理速度越来越高, PCB 板的辐射强度也越大, 此外电路中其他高速数字元器件、功率元件和继电器等等, 这些器件或部件以它们自身的基本工作频率及其谐波组成了 EMI 干扰源的频率和强度.

通过 Fourier 分析, 可以了解在一段检测信号内某些频率成分及其强度, 但 Fourier 不能给出某些频率的时间特性. 在下面的仿真例子中, 我们给出了一个不同频率的波形实例, 以说明多分辨率小波的应用.

假设被试系统由三个子系统组成, 每个子系统的频率和 EMI 的幅值不相同, 并且在时间上顺序延迟了 τ_1 和 τ_2 ($\tau_1 < \tau_2$), 因此在时域内检测到信号:

$$f(t) = \sin(10\pi t) + 2\sin(20\pi t + \tau_1) + 3\sin(30\pi t + \tau_2) \tag{9}$$

该信号的 Fourier 级数为

$$F(t) \approx \sum_{n=-\infty}^{\infty} c(k) e^{2\pi i k t} \tag{10}$$

其中 Fourier 系数为

$$c(k) = \int_0^1 f(t) e^{-2\pi i k t} dt \tag{11}$$

$f(t)$ 的时域波形及其 Fourier 变换如图 3 所示, 采样间隔为 0.01 s, 样本数据长度为 600 点. 从图中可以看出, $f(t)$ 中频率为 20 Hz 的正弦波起始时刻是 200 采样点并持续到 600 点结束, 而频率 30 Hz 的正弦波的起始时间是 400 点并持续到 600 点. 对仿真信号的 Fourier 分析频谱表明了 $f(t)$ 有 3 条频率, 分别是 10 Hz、20 Hz 和 30 Hz 的三条明显谱线. 若假设 EMI“标准”中对所有频率的频谱幅值合格标准是 10 Hz, 显然频率为 20 Hz 和 30 Hz 时幅值超过标准, 故可以

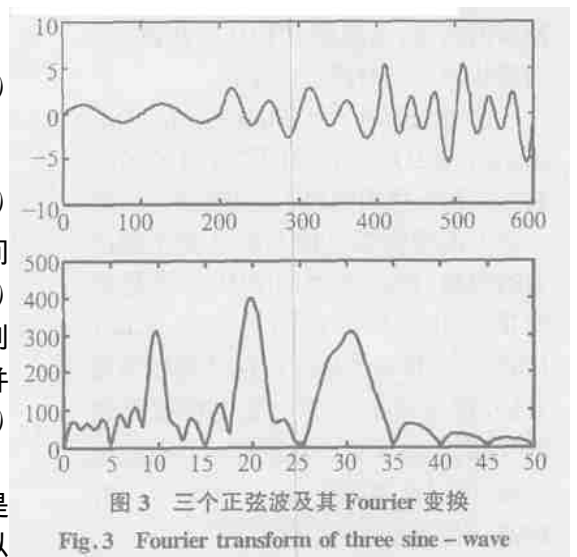


图 3 三个正弦波及其 Fourier 变换

Fig.3 Fourier transform of three sine-wave

判定系统 EMI“不合格”,但在进一步要求根据工作时序判定三个子系统中哪个系统 EMI 不合格以及三种“干扰”频率持续的时间时,Fourier 根本无法提供有参考价值的信息.

图 4 是用多分辨率小波对式(9)的三层频率的划分树状图(图中 $f = 100\text{ Hz}$),图中每个节点是对上一个节点的频率二分:分成高频部分 d 和低频部分 a ,低频部分可以看成是用平滑函数对信号所作的趋势逼近,因此可以看到信号的趋势;高频部分是小波变换,可以看到信号的细节.

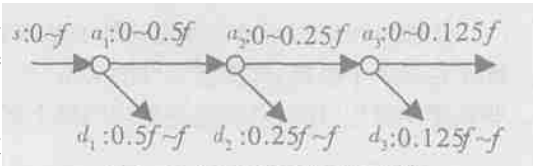


图 4 多分辨率小波对频率的划分

Fig.4 The partition of frequency by multi-scale wavelet

图 5 是多分辨率小波的分析结果.从图中可以看出,式(9)中含有三种频率成分,在 d_1 层中,即在: $0 \sim 100\text{ Hz}$ 频率范围中,已经没有任何频率成分了;在 d_2 中,含有 20 Hz 和 30 Hz 的频率成分,且 20 Hz 、 30 Hz 的频率成分分别起始于 200 采样点和 400 采样点的时间;这表明通过信号的小波分析,可以了解到骚扰源中不同频率(不同骚扰源)的时间特性,进一步可以对 EUT 进行 EMI 诊断.

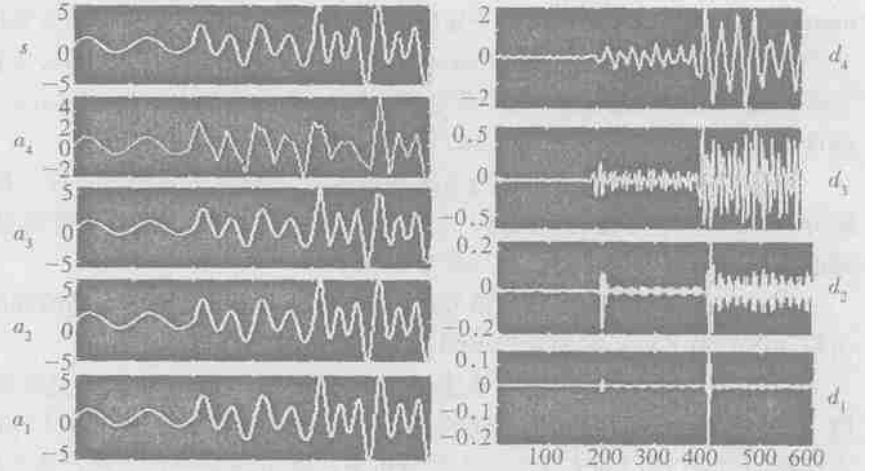


图 5 多分辨率小波的分析结果

Fig.5 The result analyzed of multi-scales wavelet

从图 5 中可以明显看到不同频率的信号的时域表现.若不同器件或系统在不同频率段内有着不同的表现,小波分析可以给出比 Fourier 分析更清楚的表达:不仅给出了频率,而且给出了这些频率的时间特性,这些将有助于对系统进行 EMI 预诊断测量,进而找出 EMI 骚扰源,对骚扰源进行时间上的定位.

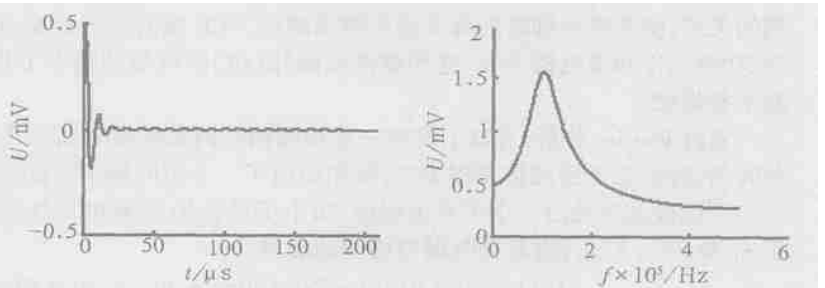


图 6 放电模拟信号的时域波形和幅频特性

Fig.6 The time-domain wave and frequency feature of ESD signal

静电放电^[3] (Electrostatic Discharge, ESD) 是指带电体周围的场强超过周围介质的绝缘击穿场强时,由于介质电离而使带电体上的电荷全部消失的现象.ESD 产生的 EMI 干扰是电磁兼容中主要研究问题之一,GB/T 17626.2-1998《电磁兼容试验和测量方法》第 2 部分:“静电放电抗扰度试验”特别提出了对设备进行的静电放电试验.该标准等同于 IEC61000-4-2, 1995 国际标准.

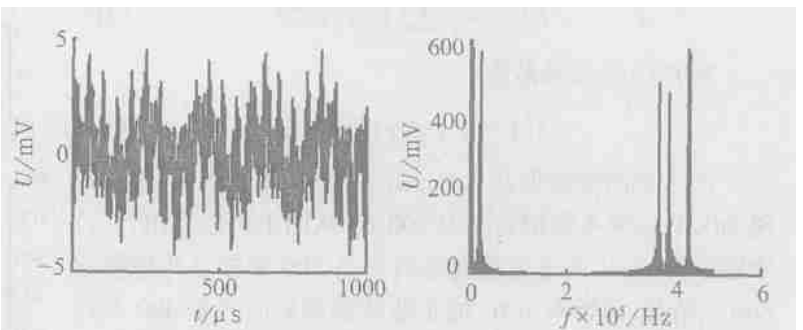


图 7 叠加背景信号的放电信号的时域波形和幅频特性

Fig.7 The time-domain wave and frequency feature of ESD signal with some disturbance signals

ESD 放电也广泛存在于设备或系统中,与其他干扰在一起,形成 EMI 干扰.由于 ESD 的持续时间极短,频谱范围极广,在频谱分析中很难与其他干扰区分出来.静电放电的电流脉冲是一个振荡衰减波,因此

可用衰减振荡函数作为放电模拟信号^[4], 即:

$$\begin{cases} x(t) = 0 & t < t_0 \\ x(t) = Ae^{-\frac{t-t_0}{\tau}} \cos[2\pi C(t-t_0)] & t > t_0 \end{cases} \quad (12)$$

式中, t_0 , A , τ 分别是放电脉冲的起始时间(即延时时间)、幅值和衰减系数; C 是放电信号的主频. 图 6 是式(12)的时域波形及其相对应的频谱, 其中参数为($A = 0.5$, $\tau = 5 \mu\text{s}$, $C = 100 \text{ kHz}$, $t_0 = 600 \mu\text{s}$), 频谱显示放电振荡频率为 100 kHz.

为了更好地模拟电气设备 EMI 干扰, 在式(12)中叠加了若干不同频率的正弦干扰波信号, 线性叠加后所得信号的时域波形及其相对应的频谱特性. 图 7 是加入十个背景信号的静电放电信号的时域波形及其频谱, 其中参数为($A = 0.5$, $\tau = 5 \mu\text{s}$, $C = 100 \text{ kHz}$, $t_0 = 600 \mu\text{s}$). 从图中看出, 放电信号已经被淹没在背景信号中, 频谱图中也显示不出放电信号.

下面借助 Matlab 工具箱中的小波变换分析工具, 采用 Daubechies (db6) 小波对此放电信号进行 3 层小波分解, 样本点为 1200 点, 采样时间间隔为 $1 \mu\text{s}$, 分解结果如图 8 所示. 在图 8 中, 原始信号 s 分解成低频逼近信号 a_3 和 3 组高频细节信号, 在第 2 层小波细节中可以清楚地看到在 $600 \mu\text{s}$ 的放电信号, 这表明用小波分析能从窄带干扰中正确提取了衰减振荡 ESD 信号, 对 EMI 中的 ESD 作出了测量诊断, 并且, 如果能知道电气设备或系统的工作时序, 则可以进一步对 EMI 进行时间上的诊断定位, 从而可对设备进行更好的整改.

图 9 是用 TDC3210 记忆示波器试验了上述同一台空调器的一段包含室内机开机、室外机停止, 室内机、室外机同时工作的测试电路记录和实际测量数据波形.

图 10 是上述试验数据的多分辨率小波分析结果, 从分析结果来看, 骚扰频率在小波分析划分的每个频带都存在, 这和所做的频谱分析是相同的; 空调器不同的工作状态下几乎含有相同的频率, 这也符合频谱分析结果; 但在小波分析 d_1 和 d_2 中可以清楚地看到在不同地工作状态下频率幅值有明显差别: 在室外机工作时, 骚扰幅度增加, 并且可以清楚地看到室外机工作起始时刻, 若反过来, 已知室外机的开机时刻, 通过小波分析可以确定是室外机的骚扰幅值超过了标准, 从而实现了 EMI 诊断. (下转第 87 页)

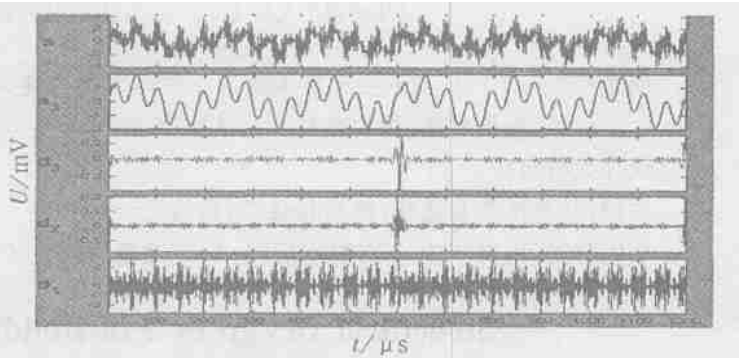


图 8 放电信号的小波变换示意图
Fig.8 The sketch of ESD wavelet transform

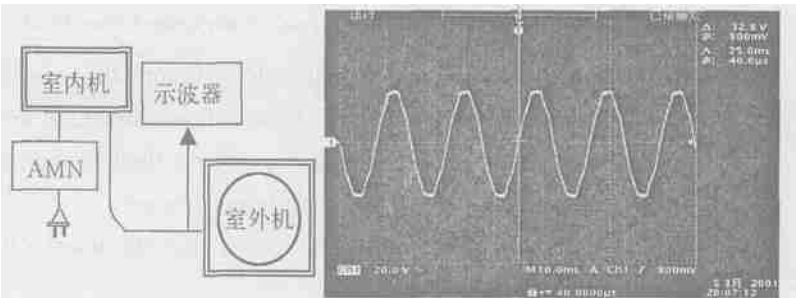


图 9 EMI 试验布置图和试验波形
Fig.9 The structure EMI test and test wave

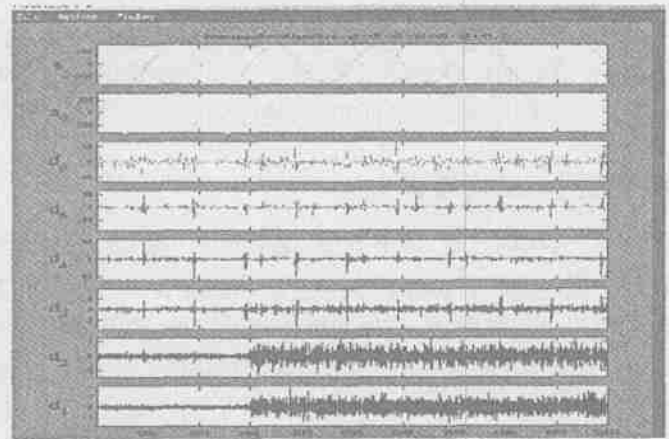


图 10 变频空调器 EMI 的小波分析
Fig.10 The EMI wavelet analysis of frequency - converting air - condition

层下一层楼板平面内刚度, 板厚取为 150 mm; 结构布置尽量左右对称, 加强薄弱部位楼板的厚度及配筋; 在结构整体分析中, 考虑薄弱部位楼板平面内变形对结构受力的影响; 通过调整剪力墙的布置方式, 使结构质心和刚心接近, 避免扭转; 平面尽量布置规则。

(3) 按《工程场地地震安全性评价报告》提供的人工合成地震波加速度和选择两条典型的地震波加速度记录, 进行结构弹性时程分析; 采用两个不同力学模型的结构空间分析程序进行计算, 一个采用空间杆—薄壁杆系模型, 另一个采用空间杆—墙板元模型; 计算中考虑双向地震作用下的扭转影响; 除计算正交的 X 、 Y 向外, 还计算可能受力不利的 45° 和 135° 方向。

(4) 控制风荷载和地震作用下结构层间位移角, 地震作用要满足规范对地震基底剪力与重力荷载代表值的比值限制; 控制结构底部加强区剪力墙及其他部分剪力墙、框支柱及非框支柱轴压比。

(5) 适当加强框支剪力墙转换层以下竖向构件的配筋率。按《高规》^[1] 验算结构抗倾覆和整体稳定; 采用现浇钢筋混凝土楼板, 增强结构整体性; 核心筒内部楼板厚采用 150mm, 双层双向配筋; 围护材料选用新型轻质材料, 有利于减轻建筑自重, 减小地震反应。

参考文献:

[1] 中华人民共和国行业标准. JGJ3—2002 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
 [2] 中华人民共和国国家标准. GB50011—2001 建筑抗震设计规范[S]. 中国建筑工业出版社, 2001.
 [3] 广州市超限高层建筑工程抗震设防审查专家委员会. 超限高层建筑工程抗震设防审查细则(送审稿)[Z]. 广州市超限高层建筑工程抗震设防审查专家委员会, 2004.
 [4] 李少云. 广州东晖花园第四组团结构初步设计研究[Z]. 瀚华建筑设计有限公司, 2002.
 [5] 建设部. 建质[2003]46号: 超限高层建筑工程抗震设防专项审查技术要点[Z], 2003.

(上接第 83 页)

3 结 论

利用 Fourier 变换进行频谱分析是目前电磁兼容性 EMI 测量分析的基本理论和方法, 广泛应用于电磁兼容测试和电磁兼容预测分析。但由于电磁骚扰信号是一种频带很宽的信号, 并且信号的构成非常复杂, 属于非平稳随机信号, 因而 Fourier 分析在数学上的一些局限性使它在进行电磁兼容预测测试诊断、瞬变信号、突变信号的提取上遇到很大的困难。小波分析作为时频分析工具, 通过小波窗口的变化和平移, 可以对信号进行时间和频率的同时分析, 可以给出频率的时间特性, 而这些时间特性在 EMI 分析中有着重要的作用。因此, 本文提出了用小波分析理论方法分析 EMI 信号, 在理论上具有重要的意义, 仿真实例研究表明这种方法是可行的。

参考文献:

[1] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 5~ 10, 42~ 64.
 [2] 高攸刚. 展望 21 世纪的环境电磁学及电磁兼容技术[C]. 北京: 99EMC 学术委员会, 第五届全国电磁兼容学术会议论文集, 1999, 1~ 15.
 [3] Masao Masugi, Kazuo Murawa, et al. Measurement and Analysis of Electromagnetic Pulse Caused by Electrostatic Discharge [J]. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1992, 361~ 365.
 [4] 周力行, 李卫国. 小波分析用于局部放电信号特征分析[J]. 高电压技术, 1999, 25(2): 15~ 17.

表 6 转换层上、下剪力墙剪应力水平 V/fbh_0

Tab. 6 The coefficient of V/fbh_0 of Transfer storey and the upper one

		多遇地震		罕遇地震	
		X 向	Y 向	X 向	Y 向
转换层上一层		0.011	0.010	0.063	0.061
转换层	考虑柱共同承受剪力	0.011	0.010	0.066	0.061
	不考虑柱共同承受剪力	0.017	0.018	0.106	0.110