

利用频域测量数据评价系统的时域响应特性

石立华 周璧华 陈彬 高成

南京工程兵工程学院电磁脉冲防护研究室, 南京, 210007

摘要:在电磁兼容测量中, 通常采用频率响应来描述一个系统的特性, 而系统的频响特性一般仅提供了响应幅度的频域分布, 很少给出响应的相位信息。在连续波测量时这种幅-频信息是足够的, 但在利用频域测量结果评价一个系统的脉冲响应特性时, 还必须知道系统的相位信息。本文假设系统为最小相位系统, 采用Hilbert变换根据系统响应的频谱幅度估计相位信息, 进而将系统的频域信息转换到时域, 用于评价系统的时域响应特性。根据一组磁场探头的标定数据, 对这一方法在系统时域建模、信号重构以及响应预测等方面的应用进行了试验, 取得了较好的效果。

1 引言

电磁兼容测量中的许多指标都是在频域通过连续波测量来描述和检验的, 这一方法通过逐一测量某个系统在各个频率点上的响应幅度, 以幅-频特性曲线的形式给出系统的指标。例如滤波器的插入损耗、屏蔽室的屏蔽效能以及测量探头的校正系数等等都是以这一形式描述的^[1]。究其原因, 一方面是因为连续波测量简便易行、结果的物理意义明确, 另一方面, 人们已长期习惯于系统的频域描述方法。然而在频域描述方法中却很少涉及系统的相-频特性。尽管这一缺陷在连续波测量中并无妨碍, 但从完全描述一个系统的角度来考虑, 相位信息同样是十分重要的。尤其是在时域测量中, 当我们希望由系统的频域响应特性来评价其对脉冲信号的时域响应时。一般来说, 电磁兼容测量中多数系统描述方法没有给出系统的相-频特性, 而且这一特性在频域测量也是不太容易实现的。为此, 我们对一定条件下利用系统的幅频特性估计其相频特性, 进而评估系统的时域响应进行了试验。这一研究的潜在用途有三个方面:

- (1) 由系统的频响特性反演其冲激响应, 或建立描述系统时域特性的参数模型;
- (2) 预测系统的脉冲响应, 例如根据一个系统的连续波指标评价其对电磁脉冲的响应情况;
- (3) 重构系统的输入信号, 例如对天线测量结果的修正等。

在电磁脉冲测量中, 频域测量结果与时域测量结果的等效问题一直困扰着人们。当然, 利用脉冲场的测量结果可以通过FFT获得频域信息, 但脉冲场辐射设备并不像连续波测量设备那么普及, 更多时候, 人们希望由厂家提供的或自行测量的幅-频特性估计系统的时域响应。本文的研究试图为解决这一问题提供一种方案。我们假定系统满足最小相位条件, 那么可以采用Hilbert变换由幅-频特性估计其相-频特性, 进而反演系统的冲激响应, 再采用系统辨识方法建立系统的时域模型。这一方法在电磁脉冲磁场探头的时域响应特性评价及波形校正中获得了成功的应用。

2 利用Hilbert变换重构相位信息的方法

传递函数满足某一幅—频特性的系统可以说有无穷多,因为其相—频特性是可以任意选择的。然而,可以证明在满足最小相位系统的情况下,系统的相—频特性可由其幅—频特性唯一确定^[2]。所谓最小相位系统是指离散传递函数在单位圆外没有任何零、极点的系统,其传递函数的实部和虚部可通过Hilbert变换相联系。若

$$H(\omega) = H_r(\omega) + jH_i(\omega) \quad (1)$$

则

$$H_r(\omega) = \hat{H}_i(\omega) \quad (2)$$

$$H_i(\omega) = -\hat{H}_r(\omega) \quad (3)$$

其中 $\hat{H}(\omega)$ 是 $H(\omega)$ 的Hilbert变换。将 $H(\omega)$ 写成幅度和相位的形式

$$H(\omega) = |H(\omega)|e^{j\theta(\omega)} \quad (4)$$

并取 $H(\omega)$ 的自然对数

$$\begin{aligned} \ln(H(\omega)) &= \ln(|H(\omega)|) + j\theta(\omega) \\ &= G(\omega) + j\theta(\omega) \end{aligned} \quad (5)$$

那么 $H(\omega)$ 的相角 $\theta(\omega)$ 和幅度的对数 $|H(\omega)|$ 也将由Hilbert变换相联系

$$\theta(\omega) = \hat{G}(\omega) \quad (6)$$

其中 $\hat{G}(\omega)$ 表示 $G(\omega)$ 的Hilbert变换。

Hilbert变换可利用FFT很实现^[3]。其运算过程如下:

(1) 对 $|H(\omega)|$ 采样并取采样长度为2的N次方:

$$|H(k)| = |H(\omega_k)| \quad k=0 \sim 2^N$$

(2) 计算 $|H(k)|$ 的自然对数并镜像延拓至长度 2^{N+1} , 记为 $G(k)$;

(3) 计算 $G(k)$ 的IFFT 得到时间序列 $g(n)$;

(4) 按下式组合 $g(n)$ 得到一个新的序列 $g'(n)$

$$g'(n) = \begin{cases} g(n) & n=1 \\ 2g(n) & n=2, \dots, 2^N \\ 0 & n=2^N+1, \dots, 2^{N+1} \end{cases} \quad (7)$$

(5) 计算 $g'(k)$ 的FFT, 得到相角 $\theta(\omega)$ 的离散采样估计值

$$G'(k) = \text{FFT}(g'(k))$$

(6) 利用估计的相位信息恢复 $H(k)$:

$$H(k) = \exp(G'(k))$$

3 系统时域模型的建立

因为并非每个系统均满足最小相位条件,上述相位信息的重构方法应用时似乎受到限制。但考虑到任何系统都可表示为一个最小相位系统和一个全通系统的级联^[2]。在满足系统幅-频特性的情况下,我们可以为系统建立一个最小相位系统的模型。在得到系统传递函数的幅度和相位信息后,还可进一步通过IFFT计算系统的冲激响应 $h(n)$ 。因 $H(k)$ 或 $h(n)$ 均为一种非参数模型,在使用时不太方便。为此我们提出利用系统的时域响应构造一个离散传递函数模型 $H(z)$

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_p z^{-p}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_q z^{-q}} \quad (8)$$

模型的具体构造方法可参见文献[4][5]。利用 $H(z)$,我们在引言中提出的三个问题可以得到解决:

- (1) 系统建模: $H(z)$ 就是系统的最小相位模型;
- (2) 脉冲响应预测: $H(z)$ 可通过IIR滤波器实现,那么利用数字滤波可估计系统对任意波形的响应;特别是在EMP测量中,这将为估计系统对EMP的信号响应提供一种方便的途径;
- (3) 信号重构: 同样可由系统响应建立其重构滤波器的模型 $H^{-1}(z)$, 采用数字滤波算法, 将失真波形恢复为真实输入^[5]。

4 应用实例

利用脉冲磁场传感器的一组标定数据,对上述方法的使用效果进行了检验。传感器的标定数据来自TEM小室中的时域测量结果。根据传感器的输入输出波形,可计算出传感器的幅-频特性曲线和相-频特性曲线,我们假设相-频曲线未知,由幅-频特性进行了重构相-频特性的试验。图1是计算得到的一条幅-频特性曲线,采用上述方法由此估计得到的相-频曲线与真实曲线的对比如图2所示,可见两者十分接近,估计的效果较好。由传递函数的IFFT计算了系统的冲激响应,与标定得出的冲激响应的比较见图3。根据所得的冲激响应,按Prony方法建立了传感器的离散传递函数模型,由这一模型计算了传感器对双指数波的响应,其与双指数波响应的实测值的比较见图4。图5是利用逆传递函数模型估计得到的传感器输入波形与真实波形的比较。

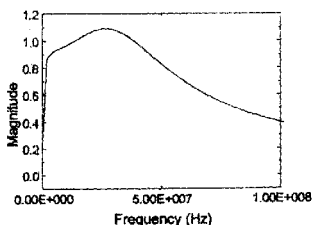


图1. 传感器传递函数的幅-频曲线

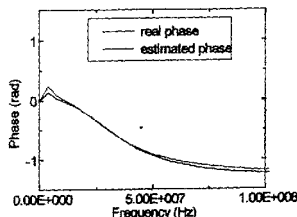


图2. 估计相位与实际相位的对比

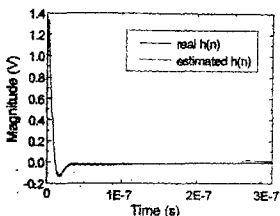


图3.冲激响应估计值与标定值的对比

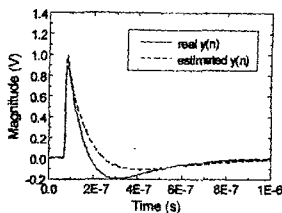


图4. 双指数波响应预测值与实测值的对比

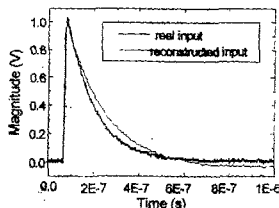


图5. 重构传感器输入与真实输入的对比

由于系统双指数脉冲响应以及重构波形估计是通过频响特性估计—冲激响应估计—离散传递函数建模—数字滤波的过程得到的,误差积累难以避免,故而存在一定的误差。但总的来说,图2—图5的估计结果表明,采用最小相位系统拟合脉冲磁场传感器的模型,具有较好的效果,可以基本满足评价系统时域响应特性的需要。

5 结论

本文提出了利用最小相位系统模型重构系统的相—频特性、进而构造系统时域模型的方法。该方法为利用系统传递函数的幅—频特性评价系统的时域响应特性提供了途径,尤其适于解决电磁脉冲测量中的一些实际问题。一组脉冲磁场传感器的试验表明,通过最小相位系统描述未知系统是可行的,提出的系统建模方法具有较好的效果。该方法也为系统频域指标与时域指标的相互指挥通过了一种可行途径。

参考文献

- [1] 曲长云, 蒋全兴, 吕仁清. 电磁发射和敏感度测量. 东南大学出版社, 1988
- [2] A.V.Openhiem, R.W.Schafer. 数字信号处理. 科学出版社, 1980
- [3] 李衍达, 常迥. 信号重构理论及其应用. 清华大学出版社, 1991
- [4] 石立华, 周璧华. 电磁脉冲磁场传感器的时域标定. 计量学报, 1998, 18(2): 140-144