

文章编号 : 1672-2892(2010)01-0049-04

基于频响函数测量脉冲磁场屏蔽效能的新方法

郭东义, 石立华, 郭曜华, 张 杰

(解放军理工大学 工程兵工程学院, 江苏 南京 210007)

摘 要: 脉冲磁场屏蔽效能测量是在时域通过对脉冲波形进行测量并按峰值衰减量确定的。从连续波频率响应出发, 研究了一种基于频率响应函数构建系统模型, 并根据建立的模型计算屏蔽体脉冲磁场屏蔽效能的方法。对该方法的可行性进行了实验分析, 结果表明, 该方法测量结果与时域测量结果吻合得较好, 从而为脉冲磁场屏蔽效能的测量提供了新的测试手段。

关键词: 屏蔽效能; 脉冲磁场; 连续波; 建模

中图分类号: TN4; TM153⁺.5

文献标识码: A

Measurement for shielding effectiveness of pulsed magnetic field based on frequency response function

GUO Dong-yi, SHI Li-hua, GUO Yao-hua, ZHANG Jie

(Engineering Institute of Corps of Engineers, PLA University of Science & Technology, Nanjing Jiangsu 210007, China)

Abstract : In order to assess pulse wave shielding effectiveness of shielding room from the traditional Continuous Wave(CW) test results, a frequency response function method was proposed. Taking the measurement of shielding effectiveness for pulsed magnetic field as an example, experiments and analysis were carried out to verify the effects of the above-mentioned approach. The result showed that the estimated pulse inside shielding enclosure was close to the real measured waveforms. This technology provides an effective method for the conversion of CW measurement results to pulsed field shielding effectiveness.

Key words : shielding effectiveness; magnetic field of pulse; Continuous Wave; modeling

电磁脉冲在频域范围覆盖了较宽的频带: 一方面, 军事上核弹爆炸、高功率微波武器产生的电磁脉冲, 峰值场强极高, 上升时间极短, 其能量很大, 作用范围广, 对各种军用和民用的电子、电气设备与系统构成了严重威胁^[1]; 另一方面, 人们在生产和生活中使用的电气及电子设备的数量越来越多, 产生的瞬态电磁脉冲直接影响电子设备的正常工作。因此在很多电子设备和产品中都进行了相应的防电磁脉冲设计。由于相关规范针对特定波形规定了脉冲场屏蔽效能的要求, 因此屏蔽效能的时域测量成为检验产品质量的必要途径。一般的单位并不具备专用脉冲屏蔽效能测量系统^[2], 因此由连续波屏蔽效能估计脉冲场屏蔽效能成为一种替代方案。以往是将系统看成一个最小相位系统, 根据系统幅频特性曲线, 利用 Hilbert 变换重构其相频特性, 得到其时域特性^[3-4]。本文在此基础上提出了一种根据系统连续波测量结果, 利用信号处理的方式, 建立该系统的参数化模型, 并估计系统脉冲磁场屏蔽效能的新方法。

1 传递函数的基本理论

在信号处理系统中经常用到传递函数的概念, 传递函数是描述线性定常系统的输入输出关系的复数域表达式^[5]。引入传递函数, 便有可能采用代数的方法来简化系统特性, 用传递函数的形式表示一个系统比其他形式的系统描述更为方便, 它可以更加简洁直观地分析系统, 见图 1, 它非常清晰地反映了输入信号在系统中的传递过程, 最终实现系统对输入信号的处理。

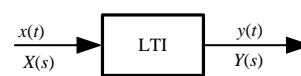


Fig.1 LTI system diagram
图 1 线性时不变系统框图

收稿日期: 2009-08-11; 修回日期: 2009-09-17

基金项目: 新世纪优秀人才支持计划资助项目

一个线性时不变系统(Linear Time Invariant, LTI)的传递函数与描述其微分方程是对应的。其输入-输出关系可由一个常系数线性微分方程表征,并由该微分方程求出其传递函数。设系统的微分方程是:

$$a_n y^{(n)}(t) + a_{n-1} y^{(n-1)}(t) + \dots + a_1 y_1(t) + a_0 y(t) = b_m x^{(m)}(t) + b_{m-1} x^{(m-1)}(t) + \dots + b_1 x_1(t) + b_0 x(t) \quad (1)$$

式中: n 和 m 分别称为 $H(s)$ 的分母和分子多项式的次数; 系数 a_i 和 $b_k (i=0,1,\dots,n; k=0,1,\dots,m)$ 是只依赖于系统参数的一组实数, 不等式 $n \geq m$ 是由系统的物理属性所决定的。

单输入、单输出线性系统的传递函数, 也可以表示为输出变量 $y(t)$ 的拉普拉斯变换 $Y(s)$ 与输入变量 $x(t)$ 的拉普拉斯变换 $X(s)$ 之比。用 $H(s)$ 表示系统的传递函数, 则有 $H(s) = Y(s)/X(s)$ 。相应的传递函数则是:

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (n \geq m) \quad (2)$$

式(2)是由微分方程式经过拉氏变换得来的, 而拉氏变换是一种线性变换, 只是将变量从时间域变换到复数域, 将微分方程变换为 s 域中的代数方程来处理, 所以不会改变所描述的系统动态本质。如果传递函数给定, 则系统的输出特性完全由传递函数决定, 因此传递函数 $H(s)$ 表征了系统本身的动态本质。应用 Z 变换, 传递函数可以类似地表示为:

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} \quad (3)$$

式中 $H(z)$ 表示线性时不变系统输入量(或激励)与输出量(或响应)关系的一种函数。传递函数中各环节的参数完全取决于系统本身, 与输入信号的具体形式和大小无关, 它表示系统的一种数学模型, 表达了系统把输入量转换成输出量的数学关系。因此对于任何系统来讲, 一旦得到了其传递函数, 就建立了系统模型。

在测量屏蔽体屏蔽效能中应用传递函数的基本思想进行分析, 把屏蔽体当作一个系统进行研究。当其内部结构非常复杂时, 不需要清楚具体的内部结构, 只需从外部观测所获得的数据研究系统的固有特性, 即通过系统的输入和系统的输出, 建立系统的数学模型。这样就把复杂的问题变成求解系统传递函数的问题。

2 基于频响函数测量脉冲磁场屏蔽效能可行性分析

2.1 验证过程

建立系统模型是根据连续波频响测量脉冲磁场屏蔽效能方法的基础。为此进行实验, 通过实验建立系统模型, 来验证该方法的可行性。在实验过程中, 以一个视频滤波器(低通滤波器)作为被研究的系统, 实验步骤: a) 用连续波测量系统的频率响应, 并根据此结果建立系统模型; b) 在时域上测量系统的脉冲响应, 并把该响应转换到频域; c) 把脉冲信号注入系统模型, 获得结果和实际测量结果进行比较。主要过程见图 2。

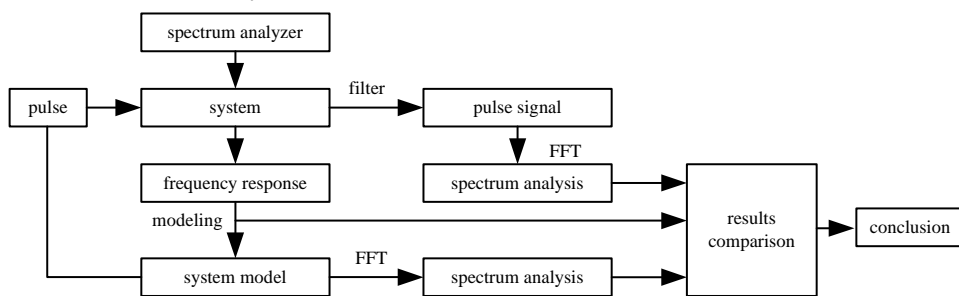


Fig.2 Experiment design idea
图2 试验设计思路

连续波测量系统的频率响应是通过利用频谱分析仪扫频源对视频滤波器直接测量获得的, 该测量的频响结果作为系统的传输函数。图 3 是实验测量滤波器实际脉冲响应的连接示意图。实验采用的脉冲源是 GMF-8E 型毫秒级高压脉冲信号发生器。该信号发生器可以通过不断地调节电压旋钮来预调脉冲源的峰值电压, 本文实验中让它产生峰值电压为 1 800 V 的脉冲信号。

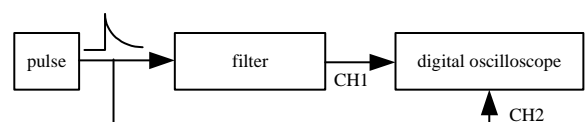


Fig.3 Pulse signal acquisition diagram
图3 脉冲信号采集示意图

脉冲信号采集示意图中脉冲源产生脉冲信号, 信号分 2 路: 一路注入待研究的系统(滤波器), 经由滤波器后, 数字示波器的一号通道(CH1)采集该滤波信号送至示波器显示; 另一路信号直接进入数字示波器, 由数字示波器二号通道(CH2)对这个脉冲源信号进行采集, 这样就采集到了 2 路时域信号。

2.2 验证结果

高压脉冲源产生的脉冲信号注入视频滤波器，使用数字示波器同时对源信号和输出信号进行采集，可以直接获得在时域的比较波形。图 4 是数字示波器采集到的脉冲源信号和经过滤波的脉冲信号时域波形，对比二者测量结果，可以看出，经过滤波器滤波后的脉冲信号波形发生了很大程度的变化。

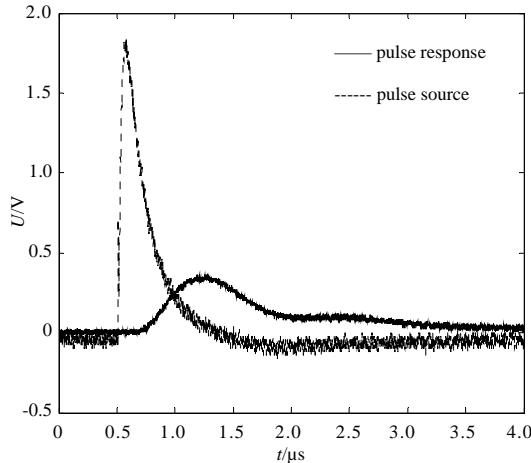


Fig.4 Pulse source and pulse response
图4 源脉冲与脉冲响应的对比波形图

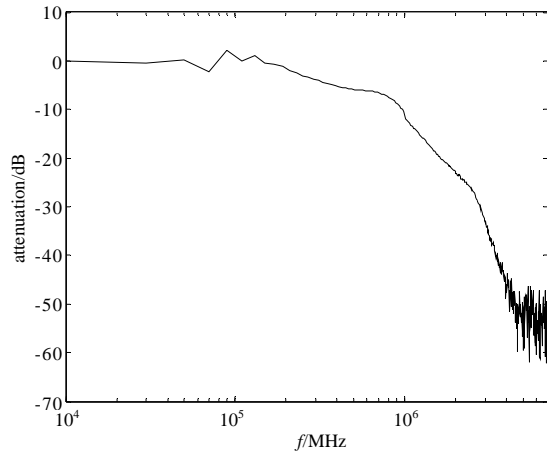


Fig.5 Spectrum response curve of filter
图5 滤波器频率幅度响应图

通过型号为 AT6030D 的频谱分析仪测量滤波器的频响，获得滤波器的频率幅度响应。如果频率轴是线性的，则不容易看到滤波器的通带和阻带之间的明显跌落。为了观察方便，特将横坐标的频率轴进行取对数处理，图 5 就是频率轴取对数处理后的波形。可以明显看出，滤波器的通带、阻带更加清晰，在低频段有比较平滑的通带，但在滤波器工作频率范围内高频部分却出现了较大的损耗，显示出此滤波器在高频段的工作性能比较差，6 MHz 以后部分基本呈阻带状态，这与已知的滤波器参数情况基本一致。同时把采集到的数据和数字示波器采集到的数据导入到 Matlab 软件工作空间中进行数据处理，并获得相关结果。

根据频响结果可以拟合出传递函数的滤波器模型，模型的参数见表 1。因为该滤波器是根据实际滤波器的频响特性构造出来的，同时由图 4 已经知道经过实际滤波器后的时域波形发生了较大变化，峰值变得平缓，那么可以判断出经过构造滤波器的脉冲信号的时域波形也应发生较大变化，和经过实际滤波器的情况比较接近。向构造出来的滤波器和实际滤波器中注入脉冲信号，使脉冲源信号经过滤波器滤波。图 6 为脉冲信号经过实际滤波器和滤波器模型滤波后的时域波形。

表1 系统的离散传递函数模型的参数结果

Table1 Parameters of filter model

k	0	1	2	3	4	5	6	7	8
a_k	1.000 0	2.126 8	1.332 4	-0.868 6	0.694 1	0.726 5	-0.973 1	0.226 6	-0.011 1
b_k	0.002 3	-0.015 6	0.022 9	-0.011 7	0.010 4	-0.004 9	-0.012 2	0.009 1	-0.000 3

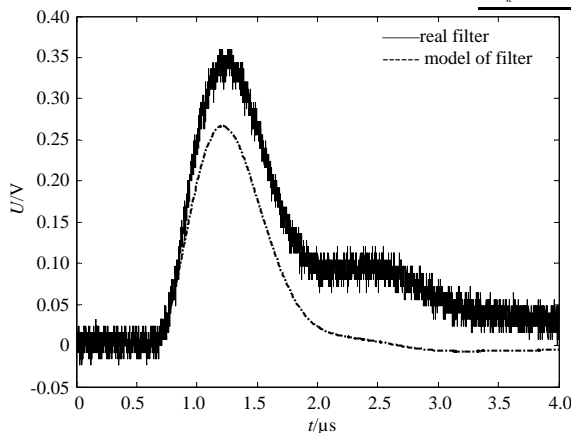


Fig.6 Real filter and filter model pulse response
图6 实际滤波器和滤波器模型脉冲响应图

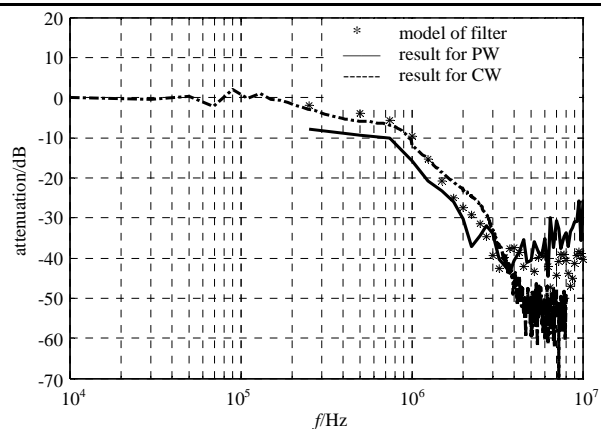


Fig.7 Comparing the results of frequency spectrum
图7 频谱结果比较图

为了更加直观、全面观察经过 2 种滤波器脉冲信号频率响应的相似度，把时域信号转换到频域，对 2 个时域信号进行频谱分析，并与实际测得的滤波器频率响应进行比较。图 7 中虚线是频谱分析仪连续波测得的滤波器频率幅度响应，星号是构造出来的滤波器脉冲响应，实线表示滤波器的脉冲响应。图中表明：构造出滤波器的频率响应与实际脉冲波频率响应结果非常接近，相差不大，而且总体趋势非常一致；构造的滤波器基本反映了实际

滤波器的真正脉冲响应情况。因此采用连续波频率响应建模测量脉冲波屏蔽效能的方法是可行的。

3 测量实例

为进一步验证该方法的实效性,以屏蔽柜作为屏蔽体,应用该方法对其进行屏蔽效能测试实验。使用连续波点频源测量屏蔽柜频响,建立屏蔽柜的滤波器模型;由电磁脉冲模拟设备产生电磁脉冲,测得屏蔽柜的脉冲响应。

实验中得到连续波的测试结果和由构建滤波器估计的结果,为了便于比较,把2个结果放在同一张图中,结果见图8。可以看出在整个频段上2条曲线吻合得很好,基本上是重合的,只是个别点有一定偏差。因此估计出的结果如实地反映了屏蔽体的连续波测量结果,证明了构建出的滤波器模型是有效的。图9为实际测量得到的微分结果和通过滤波器模型滤波后估计出来的结果对比图,二者波形形状与峰值均十分接近,脉冲波响应估计结果中有较强噪声,主要是因为所设计的数字滤波器高频部分的阻带衰减尚不足,还可以通过进一步增加低通数字滤波器予以去除。

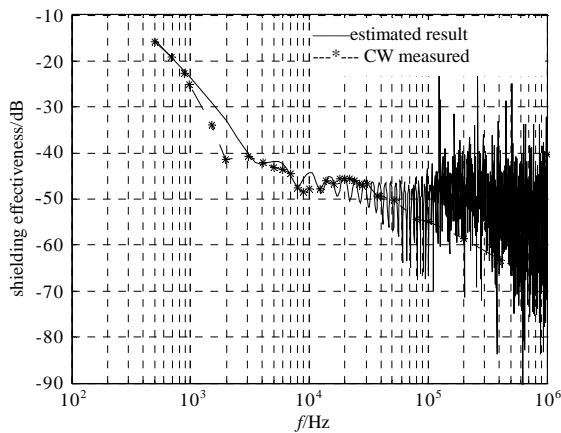


Fig.8 Real result and estimated result
图8 连续波实测结果和估计结果对比图

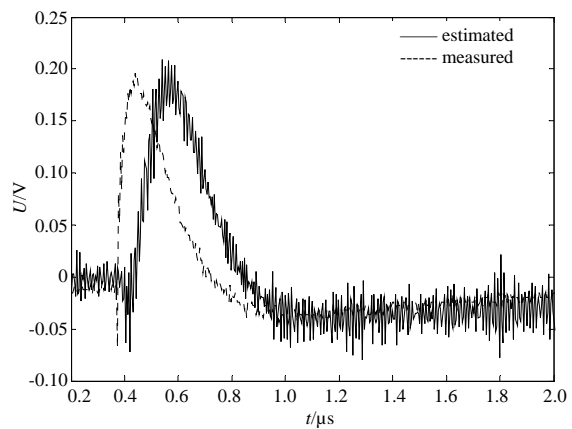


Fig.9 Real result and estimated result
图9 实测微分波形和滤波后波形

4 结论

本文提出了一种基于连续波频率响应函数的脉冲磁场屏蔽效能测量方法,根据连续波频率响应建立系统滤波器模型,通过模型估计屏蔽体的脉冲磁场屏蔽效能。通过实验实测可以发现,该方法可以很好地估计出脉冲磁场的屏蔽效能。

参考文献:

- [1] 周璧华,石立华,高成,等. 国防工程电磁防护[M]. 北京:国防工业出版社, 2005.
- [2] 陆峰,陈彬,万海军,等. 小型脉冲电场屏蔽效能测试设备[J]. 高电压技术, 2006,32(8):49-51.
- [3] 高成,石立华,周璧华,等. 电磁屏蔽效能连续波测量结果与脉冲波测量结果的对比与分析研究[C]// 第十二届电磁兼容会议. 2002:246-251.
- [4] 石立华,周璧华,陈彬,等. 基于幅-频曲线的系统时域响应特性评价方法[J]. 电波科学学报, 2000,15(4):467-471.
- [5] Sanjit K Mitra. 数字信号处理—基于计算机的方法[M]. 2版. 北京:电子工业出版社, 2006.

作者简介:



郭东义(1980-),男,辽宁朝阳人,在读硕士研究生,主要研究方向为电磁波理论、磁场测量.email:guo_dongyi@163.com.

石立华(1969-),男,河北邢台人,教授,主要研究方向为数字信号处理及检测技术。

郭曜华(1982-),男,陕西宝鸡人,在读硕士研究生,主要研究方向为电磁波理论、电磁防护。

张杰(1982-),男,河北邯郸人,在读硕士研究生,主要研究方向为电磁波理论、电磁防护。