

# 谱分析型多频涡流检测的激励信号设计与优化

高军哲, 潘孟春, 罗飞路, 陈棣湘

(国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 长沙 410073)

**摘要:** 基于虚拟仪器技术, 设计了一种用于谱分析的多频涡流检测系统, 重点对其激励信号的设计和 optimization 问题进行了研究。激励信号通过软件方式进行合成, 包括同步加法合成激励和调制频率合成激励。在同步加法合成激励方式中, 对各频率分量的初始相位进行优化, 降低峰值因数。在调制频率合成激励方式中, 选择 Tukey 窗函数, 可有效抑制检测信号频谱中的纹波。

**关键词:** 多频涡流检测; 谱分析; 同步加法合成激励; 调制频率合成激励

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2011)07-0056-04

## Design and Optimization of Excitation Signal in Multi-Frequency Eddy Current Testing Based on Spectrum Analysis Method

GAO Jun-Zhe, PAN Meng-Chun, LUO Fei-Lu, CHEN Di-Xiang

(College of Mechatronics and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** A multi-frequency eddy current testing system based on spectrum analysis method is designed with virtual instrument technique. Design and optimization of testing system's excitation signals are studied. The excitation signal is generated with software in simultaneously synthesized method or in frequency modulation method. The initial phases of each frequency component are optimized to reduce crest factor in the former method. Tukey window function is adopted to eliminate ripples of testing signal's spectrum in the latter method.

**Keywords:** Multi-frequency eddy current testing; Spectrum analysis method; Simultaneously synthesized excitation; Frequency modulation excitation

多频涡流检测(MFECT)是一种能有效实现多参数检测和干扰抑制的无损检测方法<sup>[1]</sup>。常常通过提取每个频率分量的两个参数进行混合运算, 如采用相位旋转相减法、线性代数法等, 从而实现多参数检测或者干扰抑制<sup>[2-3]</sup>。当多频涡流检测系统中激励信号包含较多个(如 8 个或更多)频率分量, 如果仍然逐个提取每个频率分量的两个参数, 检测系统复杂且不易实现。根据电磁感应原理, 涡流检测信号的频率成分与激励信号相同。在检测过程中, 可以直接对检测信号进行离散傅里叶变换(DFT), 观

察其频谱变化特点, 从频域提取特征量进行被检对象特性分析。

基于虚拟仪器技术, 实现了一种用于谱分析的多频涡流检测系统, 重点讨论其激励信号的设计和 optimization 方法。

### 1 多频涡流检测系统

谱分析型多频涡流检测系统中激励信号的频率分量较多, 若采取逐个频率发生然后再合成, 将导致系统电路过于复杂。基于虚拟仪器技术, 通过软件合成多频信号, 然后将其 D/A 转换后输出。在输出端采用模拟低通滤波器, 抑制量化噪声。该方法中, 多频信号各频率分量参数调节方便, 系统电路简单。

检测系统基于 PXI 总线的虚拟仪器技术设计。选用 ADLINK 公司的 PXI 机箱 PXI2506、嵌入式主

收稿日期: 2010-12-01

基金项目: 国家“十一五”预研资助项目(51317030106)

作者简介: 高军哲(1980—), 男, 博士研究生, 研究方向为电磁无损检测及其信号处理。

控机 PXI3800 和多功能卡 PXI2204 等实现,主要包括信号发生模块、功率放大模块、信号放大模块、涡流传感器和检测软件等。检测系统结构如图 1。

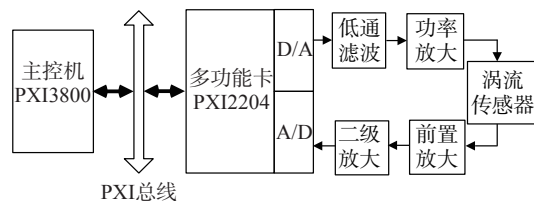


图1 检测系统结构

多功能卡 PXI2204 具有 12 位任意信号模拟输出能力,输出 FIFO 为 1 k 样点,输出更新率最高达 1 M;具有 12 位模拟输入,输入 FIFO 为 1 k 样点,输入采样率最高达 3 MS/s。信号发生模块利用 PXI2204 的模拟输出功能实现,理论最高输出频率可达 500 kHz。功率放大模块采用电流反馈性放大器 LT1206,其具有较大的工作带宽(60 MHz)和较高的输出电流驱动能力(250 mA)。涡流检测信号的放大模块分为两级,第一级为差分-单端转换和放大,采用精密差分放大器 AMP03 实现;第二级为高倍率放大,采用低噪声精密运算放大器 OP37 实现。涡流检测信号利用多功能卡 PXI2204 采集。

检测软件采用虚拟仪器开发平台 NI LabWindows/CVI 8.0 设计。根据多频激励信号要求,计算输出信号样点数组,然后将样点数组装载入模拟输出 FIFO,循环输出,产生多频激励信号。在程序控制过程中,采用多线程技术实现激励信号的发生和检测信号的采集处理。检测系统工作流程如图 2 所示。

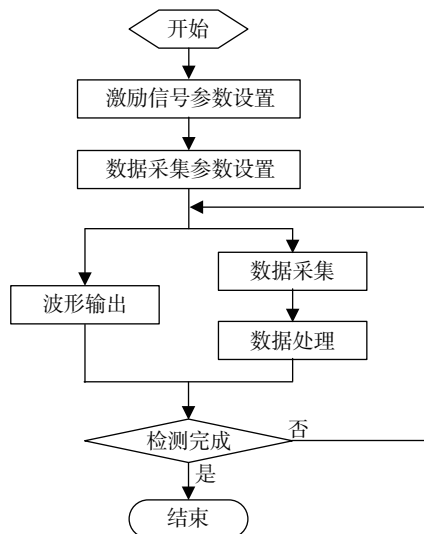


图2 检测系统工作流程

## 2 同步加法合成激励

### 2.1 激励信号发生

在同步加法合成激励方式下,多频激励信号的波形计算公式为:

$$s(t) = \sum_{i=1}^N A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \quad (1)$$

式中  $N$  为频率分量的数目;  $A_i$  为第  $i$  个频率分量的幅值;  $\omega_i$  为第  $i$  个频率分量的角频率;  $\varphi_i$  为第  $i$  个频率分量的初始相位;  $t$  为时间。

在一般情况下,假定各频率分量的幅值  $A_i$  取值相等,信号的幅频谱较为平坦,但也可以对幅值进行优化选择以适应具体应用对象。

当采用多个频率正弦信号同步合成时,随着频率个数的增加,必然导致激励信号的峰值过大,对激励信号驱动电路工作电压范围要求更宽。因此,一般需对各频率分量的初始相位进行优化,降低激励信号的峰值因数,以有利于检测系统驱动电路的设计实现。

式(1)所示多频激励信号的峰值因数 CF 的定义为:

$$CF = \frac{|S|_{\max}}{S_{\text{rms}}} \quad (2)$$

式中  $|S|_{\max}$  为激励信号绝对值的最大值;  $S_{\text{rms}}$  为激励信号的有效值。定义为:

$$S_{\text{rms}} = \left( \sum_{i=1}^N \frac{A_i^2}{2} \right)^{1/2} \quad (3)$$

频率个数较少时,可通过直接搜索算法,优化激励信号峰值因数,得到初始相位。频率个数较多时,直接搜索算法时间复杂度呈指数级增加,求解过程非常耗时。下文采用遗传算法对峰值因数进行优化。

### 2.2 峰值因数优化

遗传算法对一个个体(解)的好坏用适应度函数值来评价。适应度函数值越大,解的质量越好。适应度函数是遗传算法进化过程的驱动力,也是进行自然选择的唯一标准<sup>[4]</sup>。在多频激励信号峰值因数优化过程中,各个频率分量的幅值和频率是已知量,需要优化的参数为初始相位,定义适应度函数为:

$$f(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N) = -\max\{\text{abs}[s(t)]\} = -\max \left\{ \text{abs} \left[ \sum_{i=1}^N A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \right] \right\} \quad (0 \leq t \leq T) \quad (4)$$

由于遗传算法搜索适应度函数的最大值,所以,式(4)中增加了一个负号。个体为需要优化的各个

频率分量的初始相位。在遗传算法计算之前随机生成多个个体构成种群,通过计算个体的适应度,对个体进行选择与遗传生成新的个体,循环操作直至满足要求。对于式(4)所示的适应度函数,利用遗传算法对峰值因数的优化流程如图3所示。

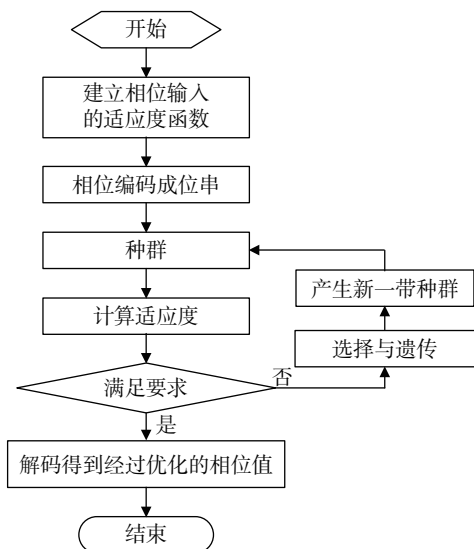


图3 基于遗传算法的峰值因数优化

在基于遗传算法的多频激励信号峰值因数优化计算过程中,各运行参数设置为:群体大小  $M$  取 500,终止进化代数  $G$  取 100,交叉概率  $P_c$  取 0.8,变异概率  $P_m$  取 0.01。多频激励信号峰值因数优化属于多极值优化问题,通过遗传算法并不一定可以搜索到峰值因数的最优相位,但可以得到有效降低峰值因数的优化相位。

假定多频涡流检测系统采用的激励信号为 100,300,500,700,900,1 100,1 300,1 500,1 700 和 1 900 Hz 共 10 个频率分量同步合成输出。各频率分量幅值相等,当设定不同初始相位时,生成多频激励信号波形如图4所示。

当各频率分量的初始相位  $\varphi_i$  均为 0 时,多频激励信号  $s(t)$  的绝对值峰值  $|S|_{\max}$  为 7.262 6 V,峰值因数 CF 为 3.247 9;当各频率分量的初始相位  $\varphi_i$  为

最差相位时,多频激励信号  $s(t)$  的绝对值峰值  $|S|_{\max}$  为 9.999 8 V,峰值因数 CF 为 4.472 1;当各频率分量的初始相位  $\varphi_i$  为优化相位时,多频激励信号  $s(t)$  的绝对值峰值  $|S|_{\max}$  为 3.260 3 V,峰值因数 CF 为 1.458 1。可见,优化后的初始相位有效降低了多频激励信号的峰值和峰值因数,在同样放大倍数的情况下,优化初始相位后的激励信号对驱动电路的电压范围要求降低。

### 3 调制频率合成激励

#### 3.1 激励信号发生

线性调频是常见的频率调制方式,广泛应用于雷达、声纳和通信等领域。线性调频信号发生方便,具有矩形包络的线性调频信号的时域表达式为:

$$s(t) = A \cdot \text{rect} \frac{t}{T} \cdot \sin[2\pi(f_0 t + \frac{1}{2} K t^2)] \quad (5)$$

式中  $A$  为信号幅度; $t$  为时间; $T$  为信号时间长度; $\text{rect}(t/T)$  为矩形函数; $f_0$  为信号中心频率; $K = B/T$  为信号调频斜率。

根据式(5),计算该线性调频信号的瞬时频率为  $f_0 + Kt \left(-\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2}\right)$ ,式中  $K$  为固定值,瞬时频率随着时间线性增加。

线性调频信号可以通过软件合成方式发生。在确定线性调频信号的幅度  $A$ 、时间长度  $T$ 、中心频率  $f_0$  和调频斜率  $K$  等参数后,结合涡流检测系统的模拟输出更新率,根据式(5)计算出波形数组,通过 D/A 转换输出。

参照涡流检测系统的常用频率值,假定线性调频信号的频率范围为 1~20 kHz。发生的线性调频信号时域波形如图5所示。

计算图5所示线性调频信号的时频谱,得图6。可见,频率随时间线性变化。

#### 3.2 检测信号频谱改善

当检测系统采用线性调频信号激励时,涡流传

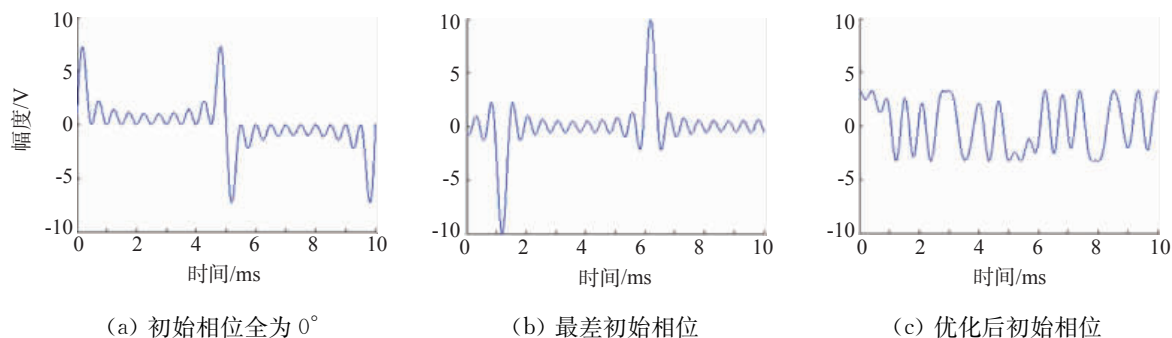


图4 不同初始相位的激励信号比较



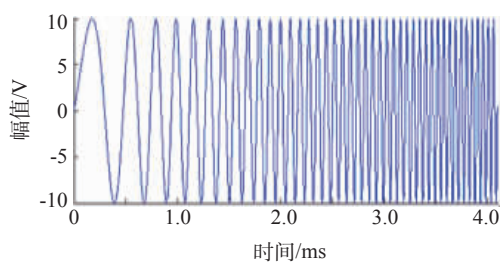


图5 线性调频信号时域波形

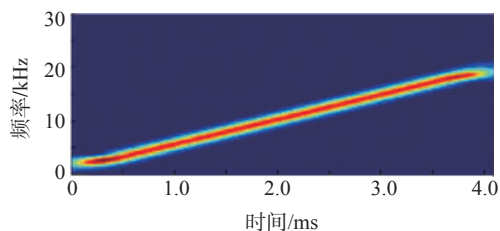


图6 线性调频信号时频谱

传感器响应信号的时域波形如图7所示。

对图7所示信号直接进行DFT变换,得到其频

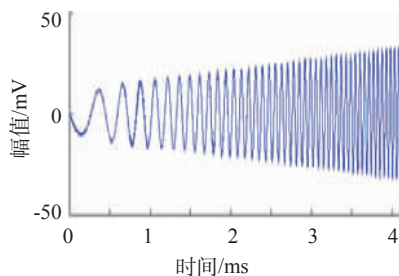


图7 涡流传感器响应信号

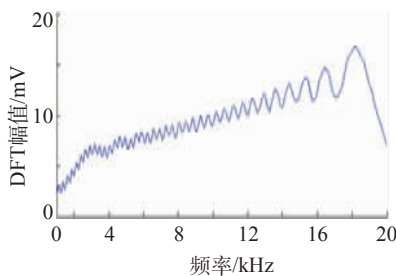


图8 涡流传感器响应信号频谱

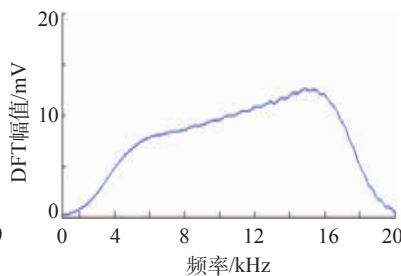


图9 加 Tukey 窗响应信号频谱

## 参考文献:

- [1] LIBBY H L. Introduction to electromagnetic nondestructive test methods[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1971.
- [2] 任吉林, 林俊明. 电磁无损检测[M]. 北京: 科学出版社, 2008.

谱(图8),此时的频谱可认为是对原信号加了矩形窗。

采用DFT得到响应信号的频谱曲线存在较大纹波,不利于频谱特征的提取。经过比较各种窗函数后,确定对响应信号加Tukey窗函数,然后进行DFT,得到改善后的信号频谱如图9所示。

比较图8和图9,可以明显看到,加Tukey窗函数后,信号的频谱不但在很大程度上保持了原有频谱的形状,而且纹波明显减小。

## 4 结论

基于虚拟仪器技术,笔者实现了一种谱分析型多频涡流检测系统,系统工作频率最高为500 kHz。检测系统激励信号的发生可采用同步加法合成激励或者调制频率合成激励。当采用同步加法合成激励时,对激励信号中各频率分量的初始相位进行优化,降低了峰值因数。当采用调制频率合成激励时,选择合适的窗函数,可对检测信号的频谱进行改善。

社,2008.

- [3] 美国无损检测学会,编. 美国无损检测手册·电磁卷[M]. 《美国无损检测手册》译审委员会,译. 上海: 世界图书出版公司, 1999.
- [4] 王小平, 曹立明. 遗传算法—理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.

(上接第55页)

字技术的飞速提高,这方面优势正在逐步消失。由于人眼的视觉特性及示波管10~20 ms的余辉时间,模拟机的前两个优点也就局限在这个水准上,性能优良的数字机差不多也能达到此水准,而且数字机的亮度远高于模拟机,这对发现缺陷波是很有帮助的。至于失真问题,随着A/D采样速度不断提高和高分辨显示屏的使用,差距可以忽略不计。

欧标中对数字机的显示响应时间要求,作为仪器制造商应重视起来,并尽量把这个指标做得同模拟机一样好。笔者认为:作为一台合格的数字机,在任意重复频率下其 $N$ 必须等于1,它比欧标中的显

示响应时间更能全面表征仪器内在的性能。对于用户,更应知道所使用的数字机有效最高重复频率是多少,以免让重复频率误导,过快地移动探头,造成漏检事故。另外,数字机报警闸门对瞬间信号的响应能力可能也存在类似问题,尽管欧标中对此没有测试要求,但报警的可靠性更加重要,望数字机用户重视此问题。最后,关于有效最高重复频率这种提法是否科学、合理、直观,还望各位专家及读者指正。

## 参考文献:

- [1] 夏纪真. 无损检测 超声检查设备的表征及验证 仪器[J]. 无损探伤, 2009, 32(1): 40.