

基于 Hilbert 变换的相位测量法与数字相关测相法的比较

周继惠, 曹青松, 宋京伟

(华东交通大学 机电工程学院, 江西南昌 330013)

摘要:介绍了希尔伯特(Hilbert)变换测量相位差和数字相关法测量相位差的原理,进行了比较研究和试验分析,讨论了各自使用效果、优缺点及其适用的场合。结果表明,在动态检测方面,利用 Hilbert 变换法更能对两路同频信号的相位差进行有效的检测,是今后的研究方向。

关键词:相位差测量; Hilbert 变换; 数字相关法; 裂纹检测

中图分类号: TG115.28; TP391

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2006)07-0341-03

A New Method of Phase Measuring based on Hilbert and its Comparison with Digital Correlation Method

ZHOU Ji-hui, CAO Qing-song, SONG Jing-wei

(School of Mechanical and Electrical Engineer, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The phase difference measuring principles of using Hilbert transform and digital correlation method are introduced, and the comparative research and experimental analysis are carried out based on their principles. Moreover, their respective application field and effectiveness, advantages and disadvantages are discussed. The results show utilizing Hilbert transform to measure the phase difference of two signals with the same frequency is more effective in dynamic testing, and is a research direction in the future.

Keywords: Phase difference measuring; Hilbert transform; Digital correlation method; Crack test

由于相位在测量领域中的重要地位,由此而发展起来的测相技术也层出不穷,大体可以分为两类^[1],一是以过零鉴相法为基础的模拟方法。其基本原理是依据两个同频正弦信号的相位差与其相应的过零时间差成正比;其代表方法有单向过零鉴相法、双向过零鉴相法、波变换法以及 $\varphi-V$ (相位-电压)和 $\varphi-T$ (相位-时间差)变换技术等相位差信息处理技术;二是以数据采集为基础的数字测相法。该方法是对输入信号进行离散采样、量化编码,得到数据序列,利用相位与幅值的关系,并通过一定的算法得到相位差。其代表方法有线性内插过零检测法(一种基于过零检测法的软件处理算法)、取样积分法(直接将序列相乘寻求相位的方法)、最小二乘法(LMS)和快速傅里叶变换(FFT)方法等。但是和

以过零鉴相法为基础的模拟方法相比,后者在硬件上只需一个通用的数据采集系统和处理系统,而无需复杂的、要求较高的专用硬件电路,它抛开了传统模拟方法的限制,尤其是不需要对周期信号过零点的硬件检测,加强了计算机、数据通信及数字信号处理等技术的结合,为低成本、高性能数字相位计的实现提供了一个新的方法和思路。

数字测相法主要是利用信号处理算法进行计算得出特征信息,一般有数字相关法^[2,3]和希尔伯特(Hilbert)变换测量法等方法,前者目前应用较多,下面将针对基于 Hilbert 变换的数字相位测量方法和数字相关相位测量法进行比较,讨论各自使用效果、优缺点及其适用场合。

1 Hilbert 变换法测量相位差的原理

Hilbert 变换可从实数据序列中得到,有时称为解析信号的复螺旋线序列。解析信号由实部和虚部

收稿日期: 2005-01-11

作者简介: 周继惠(1978~),女,讲师,从事测控技术的教学工作。

构成,其实部为原来的序列,虚部为其 Hilbert 变换,虚部由实部加上 90° 相移构成。相移 90° 后,由正弦变换成余弦,余弦变换成正弦,因此,Hilbert 变换后的数据与原始数据具有相同的幅值和频率范围,并且包含了原始数据中的相位信息。

Hilbert 变换可以计算时间序列的瞬时特性,特别是对分析幅度和频率特性非常有用。复 Hilbert 变换的幅度是瞬时幅度,瞬时相角的时间变化率是瞬时频率。因此,利用 Hilbert 法对动态采集到的接收信号进行解调,可以得出涡流检测中检测探头在检测过程中,接收信号滞后于激励信号的相位差的动态变化过程。

涡流检测裂纹时,采集到的信号是与线圈激励信号同频率的正弦信号,设激励信号为以 ω 为圆频率的正弦函数,采集到的检测信号则为 $x(t) = A\sin[\omega t + \varphi(t)]$,两者存在相位差 $\varphi(t)$ 。

将 $x(t)$ 进行 Hilbert 变换后得

$$y(t) = -A\cos[\omega t + \varphi(t)] \quad (1)$$

式中 $\varphi(t)$ 为检测信号与激励信号的相位差。

$$\text{令 } X_1 = A\sin[\omega t + \varphi(t)]\sin\omega t \quad (2)$$

$$Y_1 = -A\cos[\omega t + \varphi(t)]\cos\omega t \quad (3)$$

$$X_2 = A\sin[\omega t + \varphi(t)]\cos\omega t \quad (4)$$

$$Y_2 = -A\cos[\omega t + \varphi(t)]\sin\omega t \quad (5)$$

则有

$$\begin{aligned} X &= X_1 - Y_1 = A\sin[\omega t + \varphi(t)]\sin\omega t + \\ &A\cos[\omega t + \varphi(t)]\cos\omega t = \\ &\frac{1}{2}A\cos[\omega t + \varphi(t) - \omega t] = \\ &\frac{1}{2}A\cos[\varphi(t)] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} Y &= X_2 + Y_2 = A\sin[\omega t + \varphi(t)]\cos\omega t - \\ &A\cos[\omega t + \varphi(t)]\sin\omega t = \\ &\frac{1}{2}A\sin[\omega t + \varphi(t) - \omega t] = \\ &\frac{1}{2}A\sin[\varphi(t)] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{所以得 } \varphi(t) = \arctg \frac{Y}{X} \quad (8)$$

从以上推导可知,分别以标准正弦和余弦与采集到的信号及 Hilbert 变换后的信号相乘后,经过运算就能使采集到的信号经过处理后只是关于相位角的时间函数。因此,通过将检测动态过程采集的接收信号和激励信号,分别利用 Hilbert 变换法解调得出它们的相位变化情况,从而实现相位差的动态测量。

2 数字相关法测量相位差的原理

相关函数描述的是信号本身的某些特征(自相关函数)或表征两个信号之间的相似程度(互相关函数)。利用相关函数来分析信号的方法称之为相关分析法。利用相关分析法可以进行信号特征的检测和提取,互相关函数还可以消除随机噪声和干扰。相关分析已广泛应用在天文、仪器、通信、医学及一些图像信号处理中,成为数字信号处理中一种非常实用的技术。笔者研究的是利用两个正弦信号的互相关函数提取其相位信息的方法。

不同类型的信号,其相关函数定义也不同。工程实际中的物理信号 $x(t)$ 可以分为能量信号和功率信号。能量信号为总能量 E 为有限的信号,即

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2(t) dt < \infty \quad (9)$$

对于功率信号由于其总能量无穷大,一般研究其平均功率 P ,且

$$P = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{2L} \int_{-L}^{+L} x^2(t) dt < \infty \quad (10)$$

式中 L 是在 $x(t)$ 上截取的时间区间。那么对于两个信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的互相关函数 $r_{xy}(\tau)$ 定义如下

$$r_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)y(t+\tau) dt \quad (\text{能量信号}) \quad (11)$$

$$r_{xy}(\tau) = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{2L} \int_{-L}^{+L} x(t)y(t+\tau) dt \quad (\text{功率信号}) \quad (12)$$

周期信号、阶跃信号、符号函数及随机信号等持续时间无限,但功率有限所以属于功率信号。

设 $x(t) = A\sin(\omega t + \varphi_1)$, $y(t) = B\sin(\omega t + \varphi_2)$, 则将此两式代入式(12),经过积分运算得到

$$\begin{aligned} r_{xy}(\tau) &= \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{2L} \int_{-L}^{+L} A\sin(\omega t + \varphi_1) \cdot \\ &B\sin[\omega(t+\tau) + \varphi_2] dt = \\ &\lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{2L} \int_{-L}^{+L} \frac{1}{2} AB [\cos(\omega\tau - \varphi_1 + \varphi_2) - \\ &\cos(2\omega t + \omega\tau + \varphi_1 + \varphi_2)] dt = \\ &\frac{1}{2} AB \left[\lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{2L} \int_{-L}^{+L} \cos(\omega\tau - \varphi_1 + \varphi_2) dt - \right. \\ &\left. \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{2L} \int_{-L}^{+L} \sin(2\omega t + \omega\tau + \varphi_1 + \varphi_2) dt \right] = \\ &\frac{1}{2} AB [\cos(\omega\tau - \varphi_1 + \varphi_2) - \\ &\lim_{L \rightarrow \infty} \frac{\cos(\omega\tau + \varphi_1 + \varphi_2) \sin(2L\omega)}{2L\omega}] \end{aligned} \quad (13)$$

因为从极限理论可知

$$\lim_{L \rightarrow \infty} \frac{\cos(\omega\tau + \varphi_1 + \varphi_2) \sin(2L\omega)}{2L\omega} = 0$$

$$\text{所以 } r_{xy}(\tau) = \frac{1}{2} AB \cos(\omega\tau - \varphi_1 + \varphi_2) \quad (14)$$

设 $\theta = \varphi_2 - \varphi_1$, 则

$$r_{xy}(\tau) = \frac{1}{2} AB \cos(\omega\tau - \theta) \quad (15)$$

由式(15)可知,两个同频正弦信号的互相关函数仍然是一个正弦或余弦信号,且频率和原信号相同,其初相角正是原来两个信号的相位差。这就是相关函数测量相位差的原理。

3 两种方法在涡流裂纹检测中的应用

SS3 型电力机车牵引电机的主极,使用中经常发生主极断路故障,为了避免此种故障的发生,希望在机车定期检修过程中对主极进行探伤,早期发现微小裂纹并及时更换。主极宽度为 25 mm,厚度为 5 mm(图 1),裂纹常出现的地方是图中的 ABCD 扇形区,裂纹一般从 A 点开始,斜向弧形边 CD 处发展,发生裂纹的区域长度约为 30 mm。主极材料是黄铜,主极的表面包裹了聚酰亚胺(俗称黄金薄膜)、云母带和玻璃丝带等多层绝缘材料,表面凹凸不平。所以,要想使用常规涡流检测方法对主极进行有效的检测,必须解决提离效应、边缘效应等问题。为此,采用了透射式涡流探伤法^[4],并从裂纹检测信号的相位上提取特征量进行识别,通过试验研究发现,在正常、裂纹、提离和边缘等情况下,检测信号与激励信号的相位差变化分别处于不同区间,因此,能够识别被测主极是否存在裂纹,较好地解决了机车牵引电机的主极裂纹的检测和识别。

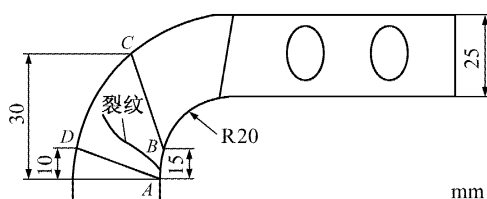


图 1 牵引电机主极示意图

现对主极从边缘→正常→裂纹→正常→边缘进行动态扫描,同时采集其接收信号和激励信号,再分别利用上述数字相关方法和 Hilbert 变换法对检测信号进行计算处理,得出其检测信号与激励信号的相位差变化情况均如图 2 所示,其中,横轴为探头扫描过程中在试件上的位置,纵轴为测得的检测信号相对激励信号的滞后相位差。

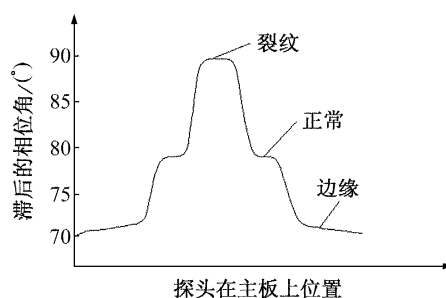


图 2 利用数字相关法和 Hilbert 变换法得到的相位差变化曲线

由试验结果可见,用数字相关法和 Hilbert 变换法得出的相位差变化曲线形状均相同,主极处于边缘、正常、裂纹三种状态时,其测得的检测信号与激励信号的相位差是不同的,边缘处最小,大致在 $69^\circ \sim 72^\circ$,正常处次之,大致在 $78^\circ \sim 81^\circ$;裂纹处最大,大致在 $88^\circ \sim 91^\circ$,而且,主极由一种状态过渡到另一种状态,如从边缘到正常,或正常到裂纹时,滞后的相位角度均有一个瞬间的跳跃过程。由此可见,该两种方法均可对主极状态,如裂纹进行有效的检测。

4 两种方法的比较

通过两种方法的结果比较,可以看出数字相关法不能一次就完成整个动态过程的检测,只能在试验过程中的探头移动方向上取离散的点,但是在检测电力机车主极裂纹时,能非常准确地检测出相位滞后的角度,从而能很准确地判断出主极在检测时的状态(裂纹、边缘或正常),因此当探头慢速移动时,还是能准确地得出整个动态过程的数据。然而, Hilbert 变换解调动态信号的包络线能反映整个过程中的状态变化,有瞬态特性,但是它对计算机的速度、存储能力、计算能力和实时性均有一定要求,并且移动过程中,要保证移动的速度均速且适中,否则动态结果很差,反映不了动态的情况,在主极裂纹检测的实际应用中,就不容易实施检测。根据上述的分析,笔者认为前种方法较适合于试验研究,但单点采集数据单点计算,计算量大而繁琐;后者随着计算机和信号处理等技术的进步,将会不断克服仪器设计上的困难和提高检测精度, Hilbert 变换动态测相法将是今后的研究方向,更适用于智能检测仪器等现代化检测设备。

综上所述,该两种相位差测量方法的比较与应用,是针对涡流裂纹检测提取相位信息而进行的,仅

(下转第 354 页)

吸附的磁粉颗粒也就越多^[5~7],所以带圆形通孔销钉圆柱面上将出现图2右图所示形状的奇特磁痕,与试验结果完全一致。

3.3 带矩形通孔销钉圆柱面上的磁痕

与带圆形通孔销钉一样,在完整圆柱体内均匀分布的磁偶极子链将从通孔处挤过减小的横截面积($\beta \leq 1$ 时),若 $\beta > 1$,则必有一部分磁偶极子链在横截面突然改变处的显磁线(图6)上断裂,而在圆柱面上显现出正、负磁极(荷)来。沿显磁线出现的磁荷 Q_m 分布也和带圆形通孔销钉完全相同,但磁偶极子两极点间的场强远高于两极点外的场强^[5,6],故两条显磁线之间吸附的磁粉颗粒要比显磁线外多,因而磁痕在显磁线内外不对称。由于矩形通孔尺寸与销钉半径的多样性,圆柱面上的奇特磁痕可能有多种不同的形态,如图6所示,其中一种与试验结果(图2左图)完全一致,其它的则大同小异,有待今后的试验验证。但无论是哪一种都存在着磁场空白区。

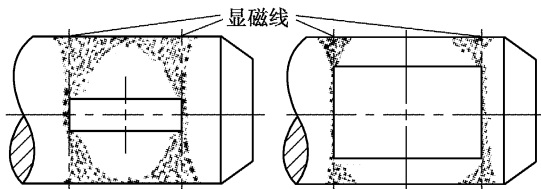


图6 带矩形通孔销钉圆柱面上的磁痕

4 结论

(1) 销钉上的通孔减少了销钉的横截面积,迫使原先均匀分布的磁偶极子链挤过剩余的横截面积。如其显漏率 $\beta \leq 1$,则所有的磁偶极子链都能顺

利通过减小了的横截面积;但 $\beta > 1$ 时必有部分磁偶极子链断裂,而在圆柱面上显现出正、负磁极(荷)。

(2) 磁偶极子链必沿显磁线(圆形通孔为最小横截面和圆柱面的交线,矩形通孔为横截面积的突变面与圆柱面的交线)断裂,显现出的磁荷量为—常量与—变量之和。

(3) 带圆形通孔销钉圆柱面上的磁痕沿通孔直径(销钉最小横截面)呈扇形向两边延伸。

(4) 带矩形通孔销钉圆柱面上的磁痕沿通孔四角向两边延伸,可以形成互相连接的两个浓密磁痕区和四个不吸附任何磁粉颗粒的空白区,也可能形成四个互不相连的浓密磁痕区和两个空白区。

(5) 带通孔销钉圆柱面上的奇特形状磁痕实际上是磁偶极子链原理推论的必然结果。

向黄永巍工程师致以深切的谢意。

参考文献:

- [1] 欧义同,吴维翰.画法几何及工程制图[M].长沙:国防科技大学出版社,1994.
- [2] 仲维畅.磁偶极子链的横向排斥——磁粉探伤原理之二十三[A].第八届全国无损检测大会暨国际无损检测技术研讨会论文集[C/CD].中国苏州:2003.
- [3] 原北京矿业学院高等数学教研组.数学手册[M].北京:燃料化学工业出版社,1973.
- [4] 仲维畅.磁偶极子链的断裂和表面磁极的显现——磁粉探伤原理之二十四[A].第八届全国无损检测大会暨国际无损检测技术研讨会论文集[C/CD].中国苏州:2003.
- [5] 仲维畅.磁偶极子与磁粉探伤[J].无损检测,1990,12(3):66—70.
- [6] Zhong Wei-Chang. Magnetic particle inspection——A new theory [J]. British Journal of Non-destructive Testing,1993,35(2):68—74.
- [7] 仲维畅.工件表面点状缺陷磁痕的形状和大小[J].无损检测,2000,22(1):25—27.

(上接第343页)

是利用该方面的课题与试验进行研究而已,在比较两种方法时并没有利用到涡流检测本身的特性,因此,这两种相位信息的获取方法对其它种类检测也是可以适用,可根据实际情况慎重选用。

参考文献:

- [1] 任冠众,宁永兰.相位测量技术[J].电测与仪表,1999,

(9):41—45.

- [2] 张毅刚,付平,等.采用数字相关法测量相位差[J].计量学报,2000,21(3):216—221.
- [3] 岳瑞华,许化龙.基于数据采集板的相位测量新方法[J].计量技术,2001,(11):8—10.
- [4] 任吉林.电磁检测[M].北京:国防工业出版社,1999.