

机车主极裂纹检测的数字相关测量方法

周继惠, 宋京伟, 曹青松

(华东交通大学 机电学院, 南昌 330013)

摘要: 涡流检测信号中的相位信息能反映检测系统的某些特性, 讨论用数字相关法提取相位特征信息。介绍了采用相关分析法测量两路同频率正弦信号相位的数字化方法基本原理。以电力机车主极为研究对象, 将数字测相法和统计分析相结合提取主极裂纹的特征信息, 并成功用于识别主极上是否有裂纹。

关键词: 涡流检测; 相关分析; 相位; 裂纹

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2006)03-0116-03

Digital Correlation Method for Detecting the Crack in Locomotive Electrode

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

(School of Mechanical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Digital correlation method was used to extract phase information as the phase information of eddy current testing signals could reflect the characteristics of detecting system. The principle of utilizing digital correlation method to detect the phases of the two sine signals with the same frequency was discussed. Digital correlation method combined with statistical analysis was applied to pick up the characteristic information of the crack in electric power locomotive electrode, by which crack was identified successfully.

Keywords: Eddy current testing; Correlation analysis; Phase; Crack

电力机车牵引电机主极断路已经成为影响电力机车安全运行的惯性故障, 该故障是由于牵引电机主极接头在热应力、振动冲击、电磁力以及加工缺陷等共同作用下, 经过列车长时间运行形成疲劳裂纹并扩展而形成的^[1]。因此对牵引电机主极接头进行探伤, 并对存在裂纹的主极快速进行处理或更换, 防止断路事故的发生, 具有经济价值和实际意义。

涡流检测通过测量电涡流信号的幅值与相位来判别或识别有关参数, 但是影响涡流检测的因素很多, 包括被测金属的电导率、磁导率、厚度、检测频率以及提离、边缘和裂纹等^[2]。对于待测电机主极, 其材料为黄铜, 电导率、磁导率和厚度固定不变, 检测频率通过实验确定为 8 kHz, 而且检测时将主极固定在两探头中间, 提离效应大大减小, 不再是主要的影响因素。因此, 为了达到对电力机车主极进行有效探伤, 就必须能够准确区分裂纹、正常和边缘引起

的检测信号与激励信号的相位差的变化。

以下通过数字相关测量方法来测量主极的正常、裂纹及边缘检测信号与激励信号之间的相位差, 以及探头依次经过主极边缘、正常、裂纹、正常到边缘整个过程时相位差变化的动态过程。最终实现了通过相位信息来获得被检测对象的特性, 识别主极上是否有裂纹。

1 数字相关法相位差测量原理

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为相关分析法。该法可进行信号特征的检测和提取, 互相关函数还可消除随机噪声和干扰。以下利用两个正弦信号的互相关函数提取其相位信息^[3]。

不同类型的信号, 其相关函数定义不同。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 有限的信号, 即

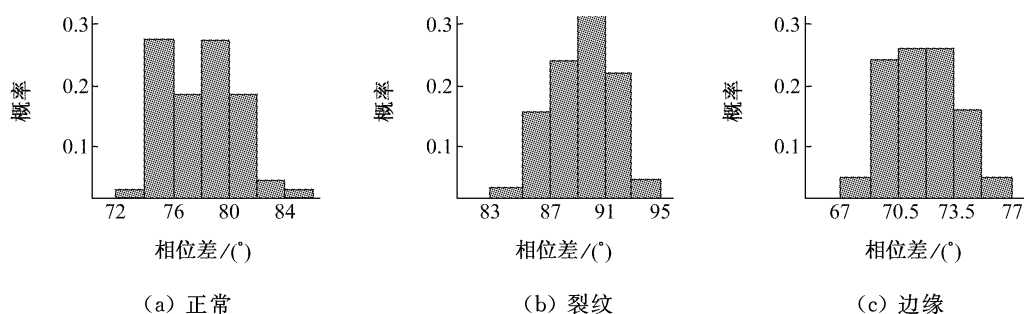


图1 主极在不同状态下相位差概率分布直方图

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

功率信号由于其总能量无穷大,一般研究其平均功率 P

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

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

能量信号

$$r_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)y(t+\tau) dt$$

功率信号

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

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 $x(t) = A \sin(\omega t + \phi_1), y(t) = B \sin(\omega t + \phi_2)$, 其互相关函数定义如式(1),经过积分运算得到

$$\begin{aligned} r_{xy}(\tau) &= \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{2L} \int_{-L}^{+L} A \sin(\omega t + \phi_1) \cdot \\ &\quad B \sin[\omega(t + \tau) + \phi_2] dt = \\ &= \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{2L} \int_{-L}^{+L} \frac{1}{2} AB [\cos(\omega\tau - \phi_1 + \phi_2) - \\ &\quad \cos(2\omega t + \omega\tau + \phi_1 + \phi_2)] dt = \\ &= \frac{1}{2} AB \left[\lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{2L} \int_{-L}^{+L} \cos(\omega\tau - \phi_1 + \phi_2) dt - \right. \\ &\quad \left. \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{2L} \int_{-L}^{+L} \sin(2\omega t + \omega\tau + \phi_1 + \phi_2) dt \right] = \\ &= \frac{1}{2} AB [\cos(\omega\tau - \phi_1 + \phi_2) - \\ &\quad \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{\cos(\omega\tau + \phi_1 + \phi_2) \sin(2L\omega)}{2L\omega}] \end{aligned}$$

从极限理论可知

$$\lim_{L \rightarrow \infty} \frac{\cos(\omega\tau + \phi_1 + \phi_2) \sin(2L\omega)}{2L\omega} = 0$$

所以

$$r_{xy}(\tau) = \frac{1}{2} AB \cos[\omega\tau - (\phi_1 - \phi_2)] \quad (2)$$

由式(2)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^[4]。

2 数字相关法测量主极的试验数据分析

试验采用自行设计制作的双探头传感器。激励探头线圈直径为 $\phi 12$ mm,内径为 $\phi 4$ mm,轴向厚度为 8 mm,外部加了电磁屏蔽管;检测探头线圈直径为 $\phi 8$ mm,内径为 $\phi 3$ mm,轴向厚度为 6 mm。两探头固定在支撑框架上,间距为 25 mm;激励频率为 8 kHz。检测时将主极固定在两探头中间,以克服提离效应,然后分别对主极处于边缘、正常和裂纹三种状态进行检测。通过 AC1856 四路并行高速采集卡对激励信号和检测信号进行两路并行高速采集并存储,最后运用数字相关测量方法得出其相位差^[5]。三种状态各计算了 50 组数据,相位差统计见表 1。将图 1 三种状态用高斯分布拟合后得图 2。

由以上统计可知道,当主极正常时,采集到的检测信号滞后于激励信号的相位角为 $73.75^\circ \sim$

表1 三种状态下的相位差统计 (°)

状态	最小值	最大值	均值	方差
正常	73.750 0	85.766 8	78.113 4	2.503 7
裂纹	84.137 3	94.534 6	89.382 6	2.375 5
边缘	68.515 1	76.193 3	71.879 2	1.861 1

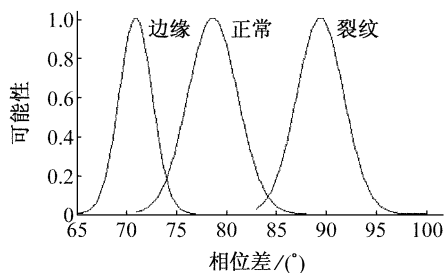
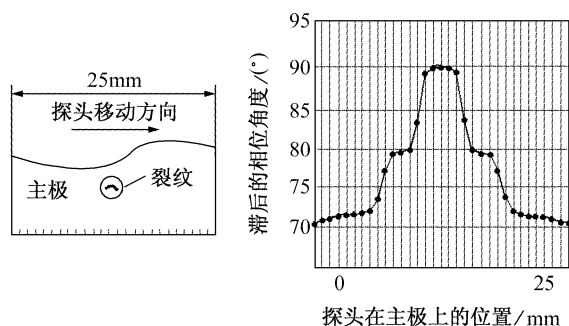


图2 相位差的可能性分布函数

85.77°;主极上存在裂纹时,相位角增加,为 84.14°~94.53°;采集到主极边缘时相位差减小,为 65.52°~75.19°。这是因为主极上裂纹打破了涡流规则的流动,造成电涡流的损耗,由此导致涡流的贯穿深度降低,因而透过主极到达接收探头的信号的相位滞后角度增加;当检测到主极边缘时,由于部分磁力线没有经过主极而直接到达接收探头,因而其相位滞后的角度又有所减小。由图 2 可见,三种状态的相位差分布函数是不同的,只有极小部分出现相互交叉现象。因此,通过测得检测信号与激励信号的相位差就可判断主极是否存在裂纹。

用数字相关法做测量检测信号与激励信号的相位差试验。所有参数不变,检测时,探头从距主极 4 mm 处开始,每次移动 1 mm,慢慢向主极靠近,直到最后离开主极。已知主极中央有一长约 1.5 mm 的微裂纹,探伤过程见图 3a,检测结果见图 3b。



(a) 探伤示意 (b) 相位变化曲线

图 3 主极探伤过程示意及相位差变化曲线

由图 3 可见,主极处于边缘、正常和裂纹三种状

态时,测得的检测信号与激励信号的相位差不同,边缘最小,为 69°~72°;正常次之,为 78°~81°;裂纹最大,为 88°~91°。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。因此,利用数字相关测量检测信号与激励信号的相位差可以识别主极的状态及其变化过程。

3 结论

将数字相关测相位法和统计分析相结合可准确提取研究对象的电涡流相位信息,说明数字相关法用于涡流检测信号的相位差分析是有效的,实际应用也给予了验证。在此研究基础上,可以进一步讨论材质及传感器等与相位的关系,为人工智能方法应用中的特征提取和模式识别打下基础,从而为智能相位涡流仪的进一步研究奠定基础。该研究成果已在铁路机车上得到了应用。

参考文献:

- [1] 黄捍才. SS₃ 型电力机车牵引电机主极断路的故障分析与检测[J]. 机车电传动, 2000, (2): 44—45.
- [2] 雷银照, 马信山. 涡流法缺陷识别的研究现状[J]. 无损检测, 1999, 18(3): 81—83.
- [3] 高金峰, 王 俊, 黄俊杰, 等. 正弦量频率相位测量的新方法[J]. 郑州工业大学学报, 1997, 18(2): 2—6.
- [4] 张毅刚, 付 平, 王 丽, 等. 采用数字相关法测量相位差[J]. 计量学报, 2000, 21(3): 216—221.
- [5] 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.

(上接第 115 页)

关分布,有故障时,幅度 100 dB 的波击数由低于 5 次猛增到 65 次,且低幅度的信号也有增加。因此,即使没有听到摩擦磨损产生的声音,也可以监测到该故障。经分解球形铰链,发现有明显的磨损损伤。后经润滑处理,该故障现象消失。

4 结论

声发射技术是对起落架附属零部件疲劳损伤进行实时监测的一种行之有效的办法。虽然没有疲劳裂纹产生,但监测到了相对较弱的泄漏故障及干摩擦和磨损故障。

声发射信号典型参数如波击数能够提供关于目

标状态的非常有价值的信息,声发射信号参数的趋势分析方法和相关分析方法,具有简单、直观、分析速度快、实时性好的特点,实现了对于多目标、动态对象的实时监测,可以保证试验的顺利进行,对后续的全机疲劳试验有指导性意义。

参考文献:

- [1] Matthew G, Rhys BP. Detection of fatigue crack growth in aircraft landing gear[A]. DGZfP-Proceedings BB 90-CD, EWGAE 2004.
- [2] 耿荣生, 沈功田, 刘时风. 声发射信号处理和分析技术[J]. 无损检测, 2002, 24(1): 23—28.
- [3] 耿荣生, 景 鹏, 雷 洪, 等. 飞机主梁疲劳裂纹萌生声发射信号的识别方法[J]. 航空学报, 1996, (5): 368.