

电器中交流电磁机构的故障诊断

沈申生, 杨 奕

(南通大学 电气工程学院, 江苏 南通 226007)

摘要: 基于 LabVIEW 的小波包分析和能量检测应用于电器中交流电磁机构故障诊断。在时域范围内, 故障振动信号幅值虽有变化, 但难以确定电器中交流电磁机构故障类型和程度。建立“能量比值-故障”的电磁机构故障辨识系统, 即构造能量比值和电磁机构故障的映射关系, 用小波包对振动信号分解与重构, 获得振动信号的突变信息及与电磁机构故障相关的特征信息, 试验结果可以看出该方法能有效地判断交流电磁机构故障类型和程度。

关键词: 交流电磁机构; LabVIEW; 小波包; 能量

中图分类号: TP 206*.3

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)09-0053-04

0 引言

电磁机构是电磁式继电器和接触器的主要组件之一, 作为电器的感测元件、驱动机构^[1], 它将电磁能转换成机械能, 操动触头, 使之迅速可靠地闭合或断开。因此, 电磁机构具有能量转换和控制的双重作用。

电磁机构故障是电磁式继电器和接触器的主要故障, 在其振动信号中, 夹杂着各种各样的噪声干扰和随机振动, 是非平衡信号。应用美国 NI 公司 LabVIEW 开发平台的小波包分析和能量检测等应用软件构建虚拟仪器, 通过 PC 机屏幕展示特征波形, 并且检测故障频率段的总能量, 通过运算得到故障信号的能量比值, 使电磁机构故障的特征量得以辨识, 从而可有效确定其故障类型和程度。

1 LabVIEW 环境下小波包分析和能量计算

LabVIEW 是一种非常优秀的图形化编程语言^[2],

不但具有一般的数学运算与逻辑运算功能, 还携带数据采集和仪器控制库函数和开发工具。它具有强大的接口能力, 通过程序接口可以方便地调用 Matlab 的应用程序, Matlab 的小波工具箱被越来越广泛地应用于信号处理、图像处理、语音识别等领域。

1.1 小波包分析

小波包算法是一种先进的时频分析方法, 小波包分析信号时, 低频部分和高频部分同时进行正交分解, 它将频带多层次分割, 能根据分析信号的特征自适应地选择频带, 匹配于信号频谱, 不仅可以看到信号的概貌, 也能观察信号的细节^[3]。在分析处理信号时可以方便地提取信号特征; 小波包分解信号后, 信号的时域分辨率降低, 采用重构算法能提高时域分辨率; 小波包分解和重构信号时无冗余、无泄漏, 信息量是完整的。

1.2 能量计算

在 LabVIEW 的开发环境中, 信号能量在时域和频域内都可以计算, 根据泊斯瓦尔定律, 同一信号在两种区域内的能量是相等的。

其数学表达式为

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} x^2(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} |X(f)|^2 df \quad (1)$$

Asynchronous motor interior fault simulation based on equivalent circuit parameters

WEI Zhen-zhu¹, JIANG Jian-dong¹, CAI Ze-xiang²

(1. Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China;

2. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The quantitative relations between squirrel cage rotor broken-bar fault and parameter change and between stator winding turn-to-turn short fault and parameter change are established. An asynchronous motor interior fault simulation method is presented based on equivalent circuit parameters. This method is compatible with traditional motor model and can be easily realized in general simulation software. The fault simulation on an asynchronous motor model in EMTDC / EMTP is carried out and compared with the experimental data of a test motor.

Key words: asynchronous motor; interior fault; equivalent circuit parameters

收稿日期: 2005-03-02
基金项目: 南通市工业科技创新计划基金资助(A4032)

式中 $x(t)$ 为时域信号; $X(f)$ 是 $x(t)$ 的傅里叶变换。如果信号是离散的, 则该信号的能量为

$$E = \sum_{n=0}^{N-1} |x(n)|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |X(k)|^2 \quad (2)$$

式中 $x(n)$ 为时域信号的 N 点采样序列; $X(k)$ 是该序列的傅里叶变换。

2 交流电磁机构故障诊断原理

交流电磁机构的各种故障主要表征形式为振动或脉动, 只是振幅和能量不同而已。交流电磁机构的振动或脉动是电磁吸力和机械反力共同作用的结果。小气隙时, 可以用麦克斯韦公式计算电磁吸力, 公式为

$$F = \phi^2 / (2\mu_0 A) \quad (3)$$

式中 ϕ 为磁通; μ_0 是空气的磁导率; A 是极面的表面积。

交流电磁机构的磁通是正弦交变量, 即

$$\phi = \Phi_m \sin \omega t \quad (4)$$

式中 Φ_m 是正弦磁通的幅值; ω 是交流电磁机构励磁电压或电流的角频率。

把式(4)代入式(3)得到单相交流电磁吸力的瞬时值为

$$F = \frac{\Phi_m^2}{4\mu_0 A} (1 - \cos 2\omega t) \quad (5)$$

显然, 电磁吸力的瞬时值是以 2 倍电源频率按正弦规律随时间变化^[4,5]。对单相交流电磁机构而言, 由于交流电瞬时值为零时, 吸力也为零, 此时衔铁在机械反力作用下脱离静铁芯。交流电每周期内衔铁吸力 2 次为零, 所以电磁机构所产生的振动频率是电频率的 2 倍。衔铁加装短路环后, 只要电磁力合力最小值大于机械反力, 衔铁就不会发生机械振动。然而合力仍含有交变分量, 电磁机构会产生脉动现象, 频率仍为电源频率的 2 倍。除短路环松动、短路环裂纹、衔铁或铁芯夹紧螺丝松动 3 种工况的电磁机构振动频率约为 1 kHz 外, 其他故障的振动频率均处于 2 倍电源频率的低频段。利用基于辨识系统的小波包分解算法对信号进行精确细分, 建立一个能够表征电磁机构系统状态的特征向量, 以使用模式识别的方法对电磁机构故障进行检测和定位, 确定故障类型^[6,7]。

通过压电传感器对正常电磁机构和故障电磁机构的振动信号各采集一组数据, 信号频率为 0~1 000 Hz, 如设定小波包对信号的分解为 3 层, 对于正常电磁机构可采用函数 $t1 = \text{wpdec}(s1, 3, 'db1', 'shannon')$, 其中 $s1$ 是被分解的信号, 3 表示分解层次, 'db1' 为分解时所用的小波类型, 'shannon' 表示所取的熵值, 分别提取第 3 层从低频到高频的 8 个频率成分的信号特征; 而对于故障电磁机构则可采用函数 $t2 = \text{wpdec}(s2, 3, 'db1', 'shannon')$ 。这样分别将正常和故

障电磁机构振动信号所包含的频率分割为 8 段, 即 8 个小波包。每个频段所含的频率成分为 125 Hz。重构小波包分解系数, 就可以得到各频段的信号。重构分解系数采用函数 $S_{3i} = \text{wprcoef}(t, N)$, t 表示被重构的信号, N 为所重构的节点 (即小波包), S_{3i} 为信号 t 重构后的结果, $i = 0, 1, 2, \dots, 7$ 。则 8 个小波包所代表的 8 个频率范围如表 1 所示。

表 1 小波包所代表的频率范围

Tab.1 The frequency scopes contained in wavelet packets

m	f/Hz	m	f/Hz
1	0~125	5	500~625
2	125~250	6	625~750
3	250~375	7	750~875
4	375~500	8	875~1 000

注: m 为小波包序号; 表 2、表 3 同。

前面已分析, 故障电磁机构的振动频率基本是 2 倍电源频率或约 1 kHz, 处于 1 号或 8 号小波包所包含的 2 个频率范围内, 其中 1 号小波包是低频区域, 8 号小波包是高频区域。正常电磁机构的振动信号在每个频段的能量分布是基本确定的, 可按式(2)采用 LabVIEW 的图形化程序计算。如发生故障, 则其振动特性会发生一定变化, 具体表征为: 不同频率的幅频特性会有不同程度的变异, 致使不同频段的振动信号或衰减或增强, 所以各频段的信号能量随之改变^[8]。8 个小波包内隐含着丰富的故障特征信息, 其中 1 号或 8 号小波包产生强烈的冲击波, 其频段的能量骤增, 而其他小波包的信号能量变化很小。基于这一点, 可以建立“能量比值-故障”的电磁机构故障辨识系统, 即构造能量比值和电磁机构故障的映射关系。

设 8 个小波包对应的能量为 $E_{3i} (i = 0, 1, 2, \dots, 7)$ 。针对某种工况, 计算 1 号和 8 号小波包故障电磁机构与正常电磁机构的信号能量比值为

$$k = E'_{30} / E_{30} \quad (6)$$

或

$$k = E'_{37} / E_{37} \quad (7)$$

式中 E'_{30}, E'_{37} 分别是故障电磁机构 1 号小波包和 8 号小波包的振动信号能量; E_{30}, E_{37} 分别是正常电磁机构 1 号小波包和 8 号小波包的振动信号能量。

单相交流电磁机构故障约有 8 种工况, 用人工模拟的方法制造故障, 每种工况都经过多次试验与统计, 取得测试数据, 也即电磁机构系统状态的特征向量:

$$T = [k_1, k_2, \dots, k_8]$$

式中 $k_1, k_2, \dots, k_8$ 分别是故障电磁机构 8 种工况的

信号能量比值。
电磁机构振动故障信号特征如表 2 所示。

表 2 电磁机构振动故障信号特征
Tab.2 The vibration signal characters of electromagnetic machines

工况	故障类型	振动频率/Hz	T	m	频段/Hz
1	线圈匝间短路	2倍电源频率	0.89	1	0~125
2	电器基座螺丝松动	2倍电源频率	3.58	1	0~125
3	衔铁与铁芯接触不良	2倍电源频率	2.89	1	0~125
4	衔铁歪斜	2倍电源频率	2.56	1	0~125
5	线圈电压低于工作电压 85%	2倍电源频率	2.12	1	0~125
6	衔铁或铁芯夹紧螺丝松动	1k	3.23	8	875~1 000
7	短路环松动	1k	5.01	8	875~1 000
8	短路环断裂	1k	4.35	8	875~1 000

构建了系统状态的特征向量后,可以利用欧氏距离函数实现模式分类和识别,即计算待检模式与标准模式(特征向量)之间的距离,从而判断待检模式的归属^[9],即识别电磁机构故障类型。

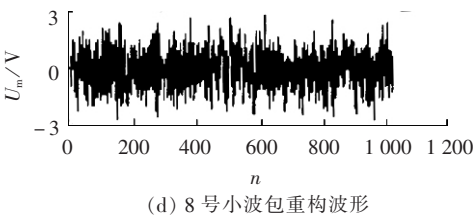
至此,一个基于小波包分析算法的电磁机构故障辨识系统得以建立。

3 试验研究与分析

试验在一个有故障的 CJ12B-100 型交流接触器上进行,电磁机构的振动信号由压电传感器采集,由于信号易受电磁辐射,加上电子元件的热噪声、散粒噪声等影响,容易产生干扰,所以检测信号中往往伴随着大量噪声,严重影响在线检测。在转换为数字量前,先要将微弱信号放大、滤波,然后输入至数据采集卡进行 A/D 转换。

图 1 为故障电磁机构振动波形(图中纵坐标 U_m 为振幅;横坐标 n, m 分别为采样点数和小波包序号)。

交流接触器通电后,即发出强烈的振动和噪声,



(d) 8 号小波包重构波形

图 1 故障电磁机构振动波形
Fig.1 The vibration waves of faulty electromagnetic machine

将采集的振动信号进行小波包 3 层分解,从图 1(b)小波包分解图上可以清晰地看到 1 号和 8 号小波包具有大能量冲击波;另外从图(c)和(d)上可以看到 1 号、8 号小波包重构后再现的 2 个频率成分的时域振动形式,说明该交流接触器同时出现低频和高频段故障。

按式(6)和(7)分别计算 1 号和 8 号小波包故障信号能量比值,然后运用欧氏距离法进行故障模式的分类和识别,诊断结果见表 3。

表 3 欧氏距离法诊断结果
Tab.3 The diagnostic results by Euclidean distance method

工况	m	T	h	工况	m	T	h
1	1	0.89	1.97	5	1	2.12	0.74
2	1	3.58	0.72	6	8	3.23	1.16
3	1	2.89	0.03	7	8	5.01	0.62
4	1	2.56	0.30	8	8	4.35	0.04

注: T 为系统状态特征向量; h 为能量比值与 T 的距离。

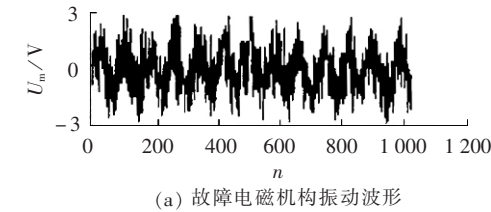
1 号小波包包容 2 倍电源频率,所以工况 1~5 的故障振动频率与 1 号小波包相关;8 号小波包包容 1 kHz 频率成分,则工况 6~8 的故障振动频率与 8 号小波包相关。经检测,1 号小波包距离最短的是 0.03,对应工况 3,表 2 中故障类型显示为衔铁与铁芯接触不良;8 号小波包最短距离是 0.04,对应工况 8,故障是短路环断裂。打开接触器检查,衔铁与铁芯极面严重锈蚀,短路环确已断裂。更换衔铁与铁芯,通电后噪声和振动趋于正常。

该系统还可以有效判断电磁机构故障程度。CJ12B-100 型交流接触器线圈的额定电压是 380 V,通过调压器逐步降低线圈的励磁电压,检测工况 5 在不同电压下的 k_5 值,从表 4 中不难看出, k_5 值与电磁机构的故障程度成正比。

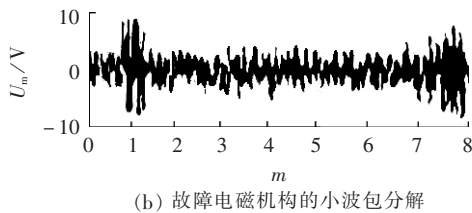
表 4 工况 5 的 k_5 值测量数据
Tab.4 The measurements of k_5 in operating condition 5

U/V	k_5		U/V	k_5	
	行程正	行程反		行程正	行程反
380	1.00	1.01	314	2.33	2.31
320	2.12	2.10	312	2.41	2.38
318	2.18	2.11	310	2.53	2.42
316	2.26	2.21	308	2.61	2.49

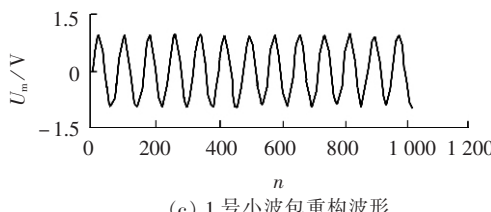
注: U 为电磁机构工作电压。



(a) 故障电磁机构振动波形



(b) 故障电磁机构的小波包分解



(c) 1 号小波包重构波形

4 结语

电磁机构故障发生后将产生一系列危害,严重影响设备的正常运行。对其故障诊断使用的传统方法是参照老经验进行排查^[10],如此操作带有很大的盲目性,容易发生误诊,难以找到故障症结,往往更换电器了之,造成很大浪费。基于 LabVIEW 的电磁机构故障辨识系统,运用小波包分析及能量谱处理数字信号,对故障电器的电磁机构进行在线诊断,故障识别准确率高、且便利快捷,使电器电磁机构的故障诊断实现了智能化。

参考文献:

- [1] 夏天伟,丁明道. 电器学[M]. 北京:机械工业出版社,1999.
- [2] 石博强,赵德永,李 畅,等. LabVIEW6.1 编程技术实用教程[M]. 北京:中国铁道出版社,2002.
- [3] 冉启文. 小波变换与傅立叶变换理论及应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2001.
- [4] 陈德桂. 交流接触器技术发展动态[J]. 低压电器,2003,(4):8-12,46.
CHEN De-gui. Technical development of AC contactor[J]. **Low Voltage Apparatus**,2003,(4):8-12,46.
- [5] 苏秀苹,陆俭国,李 奎. 考虑铁损时交流电磁机构动态特性的计算[J]. 低压电器,1999,(3):13-16.
SU Xiu-ping,LU Jian-guo,LI Kui. Calculation of dynamic characteristic of AC electromagnetic mechanism considering iron loss[J]. **Low Voltage Apparatus**,1999,(3):13-16.
- [6] 汲胜昌,刘味果,单 平,等. 小波包分析在振动法监测变压器铁芯及绕组状况中的应用[J]. 中国电机工程学报,2001,21(12):24-27.

- Ji Sheng-chang,LIU Wei-guo,SHAN Ping,*et al.* The application of the wavelet packet to the monitoring of the core and winding condition of transformer[J]. **Proceedings of the CSEE**,2001,21(12):24-27.
- [7] 刘世元,杜润生,杨叔子. 小波包改进算法及其在柴油机振动诊断中的应用[J]. 内燃机学报,2000,18(1):11-16.
LIU Shi-yuan,DU Run-sheng,YANG Shu-zi. An improved algorithm for wavelet packets and its applications to vibration diagnosis in diesel engines[J]. **Transactions of CSICE**,2000,18(1):11-16.
- [8] 杨国安,钟秉林,黄 仁,等. 机械故障信号小波包分解的时域特征提取方法研究[J]. 振动与冲击,2001,20(2):25-28,31.
YANG Guo-an,ZHONG Bing-lin,HUANG Ren,*et al.* Research on the extraction method of time-domain symptoms based on wavelet packet decompositions of mechanical fault signal[J]. **Journal of Vibration and Shock**,2001,20(2):25-28,31.
- [9] 任 震,黄雯莹,石志强. 小波分析及其在电力系统中的应用(三)工程应用技术[J]. 电力系统自动化,1997,21(3):9-12.
REN Zhen,HUANG Wen-ying,SHI Zhi-qiang. Wavelet analysis and applications to power systems. Part three:Engineering application[J]. **Automation of Electric Power Systems**,1997,21(3):9-12.
- [10] 徐 敏. 设备故障诊断手册——机械设备状态监测和故障诊断[M]. 西安:西安交通大学出版社,1998.

(责任编辑:柏英武)

作者简介:

沈申生(1949-),男,上海人,技师,主要从事测控实验教学和研究(E-mail:shen.ss@ntu.edu.cn);

杨 奕(1963-),女,江苏南通人,副教授,硕士,主要从事电气自动化教学和研究。

Fault diagnosis of alternating electromagnetic machine in apparatus

SHEN Shen-sheng,YANG Yi

(Nantong University,Nantong 226007,China)

Abstract: LabVIEW-based wavelet packet analysis and energy measuring is used to diagnose faults of alternating electromagnetic machines in apparatus. Although the amplitude of the defective vibration signal changes in time domain,the fault type and degree of the alternating electromagnetic machine cannot be determined. A fault identification system based on energy ratio and fault type for the electromagnetic machine is brought forward,which constructs the mapping relationship between energy ratio and fault type. By using the wavelet packet,the vibration signal is decomposed and reconstructed to achieve its abrupt change information and the associated fault character information. The experimental results show that the proposed method is effective to diagnose the fault type and degree of alternating electromagnetic machine.

This project is sponsored by Industrial Science and Technology Creative Plan Fund of Jiangsu Nantong(A4032).

Key words: alternating electromagnetic machine; LabVIEW; wavelet packet; energy