

基于关联维数的交流接触器故障噪声起因分析

黄莉, 杨建红, 黄宜坚

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要:将关联维数法引入交流接触器的故障噪声分析,采用互信息法和Cao方法来确定相空间重构的2个重要参数——延迟时间和嵌入维数,利用G-P算法分别计算短路环断裂、磨损、异物入侵、复位弹簧过硬4种不同原因产生的交流接触器故障噪声的关联维数,并与交流接触器正常运行的关联维数进行比较,判断交流接触器故障噪声的起因.实验结果表明,不同故障造成的交流接触器噪声的关联维数是不同的,交流接触器故障噪声关联维数能作为运行噪声起因的一个判据.

关键词:关联维数;互信息法;Cao方法;交流接触器;故障噪声

中图分类号:TM572.2;TH165+.3 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.02.009

Cause analysis of AC contactor fault noise based on correlation dimension

HUANG Li, YANG Jian-hong, HUANG Yi-jian

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The correlation dimension method was introduced into the causes of the AC contactor fault noise analysis. The mutual information and Cao method decided two important parameters of the phase space reconstruction—delay time and embedded dimension. G-P algorithm separately calculated AC contactor correlation dimension with short circuit ring fracture, wear, foreign matter invasion, stronger reset spring and compared with under normal operation to judge the causes of different AC contactor fault noise. The experimental results showed that correlation dimensions are different in the different fault state. The correlation dimension of AC contactor fault noise can be used as criterion to analyses the causes of running noise.

Key words: correlation dimension; mutual information method; Cao method; AC contactor; fault noise

0 引言

作为一种电路的执行电器,交流接触器起着接通或断开电器的作用.交流接触器在工作异常时,往往会产生令人心烦的噪声.国家标准规定:接触器达到额定吸合电压的85%~110%时,在距离0.5 m处,测量其噪声应在40 dB(A)以下^[1],超过该噪声值即为异常故障噪声.吴晓梅等^[2]开发了交

流接触器运行噪声在线测量系统,但是仍无法判断运行噪声异常的起因.

交流接触器的噪声主要来自以下几个方面^[3]: 1)铁芯接触面上的短路环断裂或者掉下; 2)动、静铁芯极面磨损过度而导致不平整; 3)交流接触器吸合线圈的动、静铁芯极面有异物; 4)铁芯的复位弹簧过硬造成弹力过大.交流接触器故障噪声产生原因有多种,目前针对故障噪声起因判断还没有较好

的方法,主要是根据熟练工人的经验进行故障诊断,在实际故障检测中必须通过逐一检测来进行排除,最后才能得出故障原因,耗费人力物力.混沌分析理论中分形维数是定量刻画混沌吸引子的一个重要参数,它被广泛应用于非线性系统行为的定量描述中.该方法不需要知道系统的具体数学模型,只需测得交流接触器运行状态下系统的振动信号,就可以判断出交流接触器是否出现了故障以及主要出现了哪种类型的故障.由于交流接触器出现故障时,其工作正常状态和异常状态振动信号以及不同起因造成的异常状态振动信号的分形维数有区别,因此,可以将分形理论引入交流接触器噪声起因的故障诊断.本文通过采集不同故障状态下的交流接触器振动信号,计算振动信号的关联维数,以关联维数为判据对噪声起因进行分析.

1 关联维数计算的基本原理

Grassberger-Procaccia^[4]算法(简称G-P)是一种比较普遍的求取系统关联维数的方法,其中的关联维数指的是吸引子真正维数的估计值.相空间重构是关联维数分析方法的理论基础,其思想源于Takens的嵌入维理论,即系统中任意一个变量的演化都是由系统其他变量相互作用所决定的,任意一个变量的演化过程中都隐含着系统的演化信息.

设以采样间隔 T_s 对连续信号 $v(t)$ 进行采样,获得时间序列 $\{v(t) | k=1,2,\dots,N\}$, $v(k)$ 为 $v(kT_s)$ 的简写.相空间重构过程如下:

$$x(1)^T = \{v(1), v(1+\tau), \dots, v[1+(M-1)\tau]\}$$

$$x(2)^T = \{v(2), v(2+\tau), \dots, v[2+(M-1)\tau]\}$$

...

$$x(N_m)^T =$$

$$\{v(N_m), v(N_m+\tau), \dots, v[N_m+(M-1)\tau]\} \quad (1)$$

其中, τ 为时延参数; M 为嵌入维数;坐标矢量个数 $N_m = N - (M-1)\tau$.重构相空间过程相当于将时间序列 $\{v(k) | k=1,2,\dots,N\}$ 映射到 M 维的欧氏空间 R^M 中,并希望 R^M 空间中的点能保持原有的未知吸引子的拓扑特性.时延参数 τ 和嵌入维数 M 是利用延迟坐标重构相空间的2个重要参数.关联维数由下列关联函数导出:

$$C_d(r) = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N H(r - |X_i - X_j|) \quad (2)$$

$i, j = 1, 2, \dots, N$

其中, H 为Heaviside单位函数,即当 $s > 1$ 时 $H(s) =$

$1, s < 0$ 时 $H(s) = 0$; r 为相空间超球半径; $C_d(r)$ 为时间序列的累积分布函数,表示相空间中吸引子上两点之间距离小于 r 的概率.

关联积分 $C_d(r)$ 在 r 足够小, N 足够大时得到系统关联维数

$$D_m = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln C_d(r)}{\ln r} \quad (3)$$

实际计算时,通常让嵌入维 d 不断增大,使得关联维 D_m 不变,即双对数关系 $\ln C_d(r) : \ln r$ 曲线中线性部分的斜率接近于不变量.然后,通过最小二乘回归方法所求的曲线线性部分的斜率,即为系统关联维数 D_m .

2 试验平台搭建

试验的硬件平台是由一台工控机、加速度传感器、减振台和测试台搭建起来的,其中交流接触器及其夹紧工装安放在减振台上,防止其他振动源对振动测试数据的影响.交流接触器试验样本选的是宏美电子有限公司生产的XMCO—321—EBBC型号的交流接触器.

试验的软件测试平台是基于LabView编写的测试程序,其中测试界面包括数据采集、数据保存、波形显示、噪声异常起因统计分析等.交流接触器噪声检测系统的硬件结构框图如图1所示.

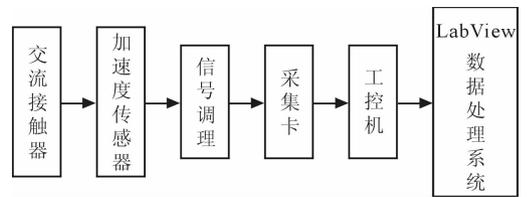


图1 试验系统测试硬件框图

3 交流接触器故障噪声关联维数计算

3.1 数据预处理

测试开始时,首先测试正常交流接触器的振动信号,然后分别测量交流接触器在4种故障下的振动信号,采样频率为50 kHz,采样时间为3 s.由于现场存在各种因素的干扰,因此在数据处理之前先要消除趋势项减少或消除采样数据的干扰.中数法是一个很好的滤波算法,通过三次均值的方法消除趋势项.由于篇幅有限,本文以上述第2种故障类型为例消除趋势项,数据处理结果如图2所示.

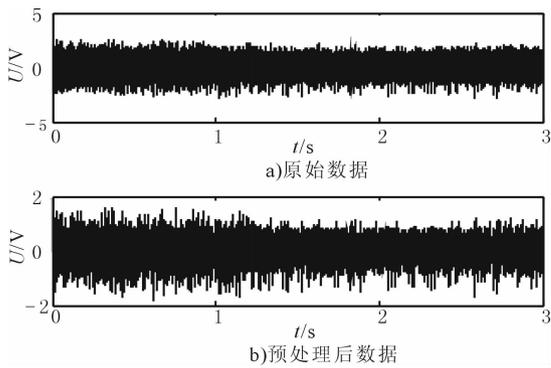


图2 故障2的原始数据和预处理后数据

为了获取较为可靠的分维估计值,数据的长度必须大于某一最小值 N_{\min} . 对数据长度的确定, H. Kantz 等^[5] 给出了公式 $N_{\min} = 10^{(D_2+2)/2}$ 来估计最小样本容量. 论文经过大量计算, 该系统的关联维数为 $0.01 \leq D_2 \leq 5$, 所以 $N \geq 10^{3.5} = 3\ 163$, 因此本文数据长度选取 $N = 3\ 500$.

3.2 互信息函数法确定时延参数

在相空间重构过程中, 时延参数 τ 的大小对计算关联维数影响较大, τ 过小将导致信息冗余, 失去独立性; τ 太大将使延迟坐标之间毫不相关, 不能反映真实的动力系统. 时延参数可根据自相关函数法、互信息和经验法则等^[6] 确定. 自相关函数法只是描述变量间线性相关程度的一种方法, 所以它并不合适于非线性动力系统. 而互信息法与自相关法相比虽然需要较大的计算量, 但互信息法包含了时间序列的非线性特征, 因此在非线性时间序列分析中计算结果明显优于自相关法. 根据互信息函数方法, 把互信息第 1 次达到最小时滞时的值作为相空间重构的最佳时延参数.

这里以交流接触器正常工作状态为例, 用互信息法求取 τ , 计算结果如图 3 所示. 从图 3 可以看出, 当 $\tau = 5$ 时, 互信息第一次达到最小, 因此最佳时延参数为 $\tau = 5$.

3.3 Cao 方法确定最佳嵌入维数

一般情况下, 嵌入维数可根据塔肯斯定理、Cao 方法确定. Cao 方法是判断伪邻近点 (FNN) 的改进方法^[7], 该方法计算时只需要时延参数 τ , 并且能够有效区分随机信号和确定性信号, 使用较小的数据量就可以求得嵌入维数, 即在 d 大于某一特定值时, 两邻近点距离 E_1 不再变化, 此时得到的嵌入维数 M 是最佳的. 本文以上述第 4 种故障类型为例计算嵌入维数, 计算结果如图 4 所示. 从图 4 可以看出, 当

$d = 9$ 时, E_1 已经基本收敛, 当 $d > 9$ 时, E_1 不再变化, 因此最佳嵌入维数 $M = 9$.

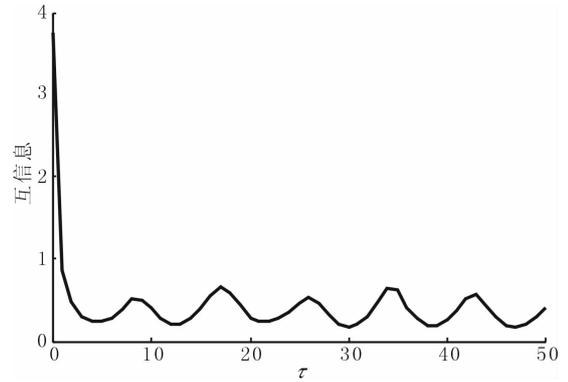


图3 正常状态下互信息图

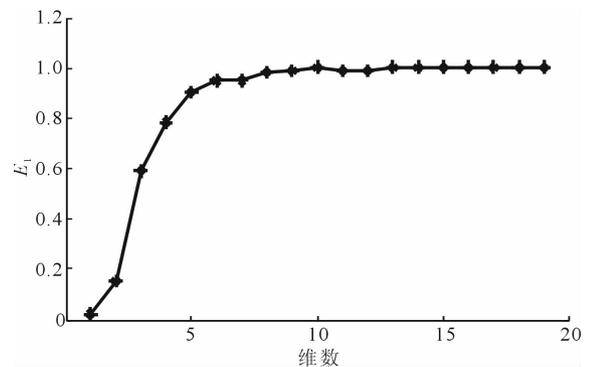


图4 故障4状态下的最佳嵌入维数

3.4 关联维数计算

计算交流接触器振动信号关联维数的步骤如下: 1) 读取每组的振动信号数据; 2) 对交流接触器振动信号数据, 按照式①进行相空间重构; 3) 根据不同的超球面半径 r , 按式②计算对应的 $C(r)$; 4) 根据 $\ln C(r) : \ln r$, 按式③计算 D_m ; 5) 系统的关联维数为 D_m .

分别对 5 组采样数据进行研究, 采样数据分别为正常、短路环断裂 (故障 1)、磨损 (故障 2)、异物入侵 (故障 3)、复位弹簧过硬 (故障 4). 试验结果如图 5 所示.

用最小二乘法拟合曲线上收敛比较好的数据段, 所求得的拟合直线的斜率即为关联维数. 计算结果如表 1 所示.

由图 5 和表 1 可知, 根据互信息法和 Cao 法计算的时延参数和最佳嵌入维数重构相空间计算关联维数. 试验结果表明, 不同起因的交流接触器振动噪声的关联维数是不相同的, 4 种故障引起的交流接触器噪声的关联维数和正常的交流接触器振动

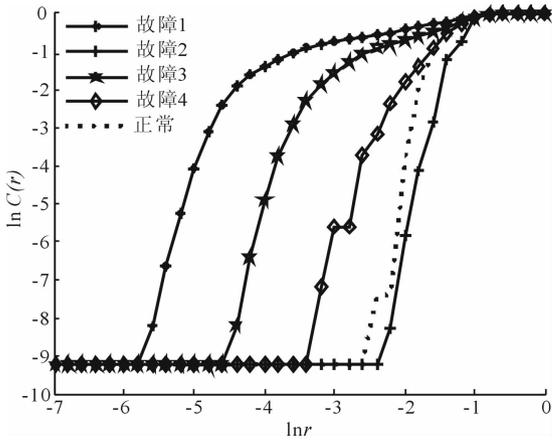


图5 $\ln C(r) : \ln r$ 曲线图

表1 不同故障状态下的关联维数

工作状态	时延参数 τ	最佳嵌入维数 m	关联维数
正常	5	17	0.371 1
故障1	5	10	1.270 8
故障2	12	18	0.097 8
故障3	4	14	3.489 4
故障4	21	9	2.277 1

信号的关联维数差别比较大,且不同故障引起的交流接触器噪声的关联维数也不相同,较易通过关联维数进行区别. 交流接触器正常工作时,其关联维数为 0.35 ± 0.05 ; 当关联维数为 1.25 ± 0.05 时,可能发生短路环断裂故障; 当关联维数为 0.05 ± 0.05 时,可能发生磨损故障; 当关联维数为 3.45 ± 0.05 时,可能发生异物入侵故障; 当关联维数为 2.25 ± 0.05 时,可能发生复位弹簧过硬故障. 因此在实际交流接触器振动噪声故障起因分析中,根据关联维数来判定交流接触器故障噪声的起因,可以作为工业生产查找故障原因,改进技术工艺的一个依据,也为提高交流接触器故障噪声起因诊断的准确率提供一种有效的新方法.

4 结论

本文采用互信息法和 Cao 法来确定重构相空间

的 2 个重要参数,即时延参数 τ 和嵌入维数 M ,通过计算不同起因的交流接触器故障噪声的关联维数,对实际工作中交流接触器的噪声起因进行识别,及时查找造成运行噪声异常的原因,提高产品的合格率. 实验证明,不同故障状态下噪声信号的关联维数明显不同,可以将其作为判断交流接触器噪声故障起因的一个特征量,从而为交流接触器异常噪声的检测、诊断和分类提供一种新的准确可靠的定量方法.

采用关联维数作为故障信号的特征参数,来对故障噪声的起因做初步判断,克服了传统方法在故障起因判断上的困难. 然而,该方法只能大致确定交流接触器出现故障的主要原因,对于几类故障同时出现,如何利用混沌分形理论提取系统运行故障特征参数进行故障诊断,将是今后研究的主要方向.

参考文献:

- [1] JBT 7435—2006, CJX 系列交流接触器[S].
- [2] 吴晓梅,张认成,杨建红. 交流接触器振动噪声性能的在线检测[J]. 低压电器,2011(18):21.
- [3] 薛福连. 交流接触器运行噪声的消除方法[J]. 大众用电,2005(8):34.
- [4] Peter Grassberger, Itamar Procaccia. Characterization of strange attractors[J]. Phys Rev Lett,1983,50:346.
- [5] Kantz H, Schreiber T. Nonlinear Time Series Analysis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [6] 党建武,黄建国. 基于 G.P 算法的关联维计算中参数取值的研究[J]. 计算机应用研究,2004(1):48.
- [7] 张淑清,贾健,高敏,等. 混沌时间序列重构相空间参数选取研究[J]. 物理学报,2010,59(3):1576.
- [8] 高宇,黄宜坚. 采用关联维的溢流阀故障诊断[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2012,33(3):241.
- [9] 王旭平,王汉功,陈小虎. 关联维数在齿轮泵故障诊断中的应用[J]. 机床与液压,2009,37(7):252.
- [10] 孟祥海,王金全,刘渊,等. 基于关联维数的柴油机声音信号特征分析[J]. 内燃机,2011(1):56.