

文章编号: 1000-5013(2011)04-0368-05

关联维数的超声波电机故障诊断

王理停, 黄宜坚

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 利用关联维数分析方法对超声波电机进行故障诊断,并针对故障诊断的实际情况,建构特殊实验平台采集故障振动信号.通过互信息法及Cao方法来确定相空间重构的2个重要参数,然后计算超声波电机在不同故障状态下的关联维数.结果表明,不同故障状态产生机制不同,其关联维数也不同,关联维数可用于故障的特征提取.通过分析不同状态下超声波电机的关联维数,可以判断超声波电机是否出现故障.

关键词: 超声波电机; 故障诊断; 延迟时间; 嵌入维数; 关联维数

中图分类号: TM 307⁺.1

文献标志码: A

超声波电机(Ultrasonic Motor,简称USM)是一种非电磁电机,它利用压电陶瓷片的逆压电效应,将电能转化为具有特殊轨迹的超声频率微观振动,进而通过振动摩擦、声悬浮将微观振动耦合成转子或移动体的连续宏观转动或移动^[1].超声波电机具有很多传统电磁电机无法比拟的优越性,如低速大转矩、体积小、无电磁干扰、定位精度高、设计自由度大等,在非连续运动、精密控制等领域有广阔的应用前景^[2],其卓越的性能是其他电磁电机无法替代的.但因其为精密设备,出现故障或故障所表现出来的特征很难被察觉出来,需要寻找一种行之有效的方法来监测其运行状态是否正常.超声波电机典型故障有电源供应不平稳、过载及定子与转子磨损等引起的故障,这些故障会加剧超声波电机运行时的噪声,表现出微小位移振动.传统的电机故障分析方法是采用给电机一定的激励,建立输入输出模型,求出传递函数,再与正常运行时的电机传递函数进行分析,得出其故障原因.然而,超声波电机是一个非线性系统,求取精确的电机模型非常困难,因而采用经典的分析方法来判断故障较麻烦.混沌分形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.该方法不需要知道超声波电机的具体数学模型,只需测得超声波电机运行状态下系统的振动信号,就可以判断出超声波电机是否出现了故障.由于超声波电机出现故障时,故障信号中往往含有大量的时变、突发性质的成分,其工作正常状态和异常状态振动信号的分形维数是有区别的.因此,可以通过超声波电机运行状态振动信号的分形维数的变化来判断超声波电机是否发生故障.本文采用关联维数来描述超声波电机振动信号的分形特征.

1 关联维数分析原理^[3-5]

在众多的分形维中,关联维对吸引子的不均匀性反应敏感,更能反应吸引子的动态结构.关联维数可以利用实验数据来计算分维,即能在不知道背景相空间维数的情况下,从少数甚至单一数据序列中提取关联维数的信息.1983年,Grassberger等^[6]根据延时嵌入相空间重构的思想,提出从时间序列直接计算关联维数和关联积分的算法——G-P算法.

在关联维数的G-P算法中,相空间重构是核心,合理的相空间重构能保持一维时间序列所对应的原动力系统内在结构的几何不变性,通过对一维振动信号进行相空间重构,重构后的相空间能保持原一维振动信号所有的内在特征.

收稿日期: 2010-10-11

通信作者: 黄宜坚(1945-),男,教授,主要从事机械电子的研究. E-mail: yjhuang@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50975098)

令一维时间序列 x_1, x_2, \dots, x_N , N 是序列的点数, 基于嵌入维数 m 和延迟时间 τ , 得到 m 维空间中的一系列向量. 其中, 第 k 个向量为

$$\mathbf{Y}_k(m, \tau) = [x_k, x_{k+1}, \dots, x_{k+(m-1)\tau}],$$

则用一维时间序列重构得到 m 维相空间为 $\{\mathbf{Y}_1(m, \tau), \mathbf{Y}_2(m, \tau), \dots, \mathbf{Y}_M(m, \tau)\}$. 其中: $M = N - \tau(m - 1)$ 为重构的相空间点数.

基于 m 维相空间, 相应的关联积分计算式为

$$C(r) = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{M^2} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M [H(r - r_{i,j})], \quad i \neq j. \tag{1}$$

式(1)中: r 为观测尺度; $r_{i,j}$ 为 $\mathbf{Y}_i(m, \tau)$ 到 $\mathbf{Y}_j(m, \tau)$ 的距离; $H(x)$ 为 Heaviside 函数. 定义 $H(x)$ 为

$$H(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0, \\ 0, & x < 0, \end{cases}$$

则当 r 值在一定范围内时, 满足

$$\lim_{x \rightarrow \infty} C(r) = r^d, \tag{2}$$

对关系式(2)两边取对数, 可得关联维数(d)为

$$d = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\ln C(r)}{\ln r}. \tag{3}$$

2 USM 故障实验设计方案

图 1 为实验系统的硬件框图. 实物平台是由工控机、直接驱动直线电机(DDL, 美国 Kollmorgen 公司)、HR2 型超声波直线电机(以色列 Nanomotion 公司)和 AB1A 型驱动器搭建起来的, 如图 2 所示.

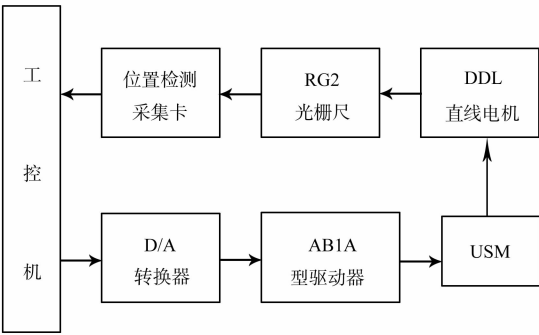


图 1 实验系统硬件框图

Fig. 1 Hardware block diagram of experiment system

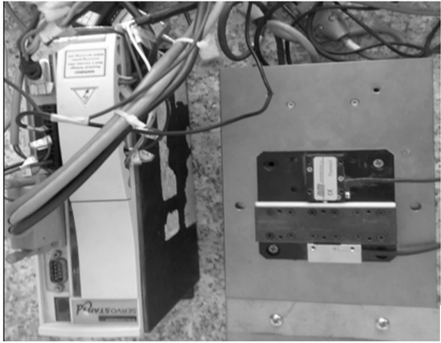


图 2 实验系统平台

Fig. 2 Experiment platform

由图 2 可以看出, 超声波电机具有一自由度并作直线运动, 下端高精度直线电机同样作一自由度直线运动, 方向互为 90° . 当超声波电机运行时, 其振动信号包含系统的各种噪声干扰或故障振动信号转化为下端的高精度直线电机体的位移信号, 再通过高精度位置测量反馈元件——RG2 系列光栅尺, 将超声波电机振动位移测量出来并发送到工控机, 由工控机记录保存数据.

实验采用 DOS6.22 操作系统, 使用 Borland C++ 3.0 语言进行程序设计. 程序包括超声波电机的驱动控制, 数据采集、保存、界面波形显示等子程序. 然后, 将采集到的数据通过 USB 接口拷到 Windows 系统下用 Matlab 进行处理.

实验中, 人为设置 3 种故障: (1) 供给超声波电机的电源不稳定; (2) 超声波电机负载预压力过大; (3) 超声波电机转子堵塞. 首先测量超声波电机正常运行下的振动信号, 然后测量超声波电机故障状态下的振动信号. 在每组的采样中, 采样频率为 1 kHz, 采样时间为 10 s. 通过分析高精度直线电机的光栅尺测得的振动位移信号, 判断超声波电机是否出现故障.

3 USM 关联维数的计算

对于实验系统来说, 如果超声波电机偏离了正常的工作状态, 系统的吸引子就会发生变化, 相应的

关联维数也会跟着发生变化. 所以,把关联维数作为反映系统故障的特征量,通过系统关联维数的变化来判断超声波电机是否出现故障^[4].

3.1 数据预处理

光栅尺所记录到的超声波电机微弱振动信号,由于现场各种噪声干扰存在,可能会使测量数据发生某种缓慢的位移趋势,导致频谱的误差加大并使频谱的低频段发生变形. 这将给计算相关维数带来较大的误差. 因此,必须对数据进行滤波,消除趋势项,减少或消除采样数据的干扰成分. 中数法是一个很好的滤波算法,通过 3 次均值的方法消除趋势项,使数值处于零均值附近,从而得到比较真实的振动数据. 超声波电机正常运行及故障状态下测得的振动信号数据图及预处理后的图形,如图 3 所示.

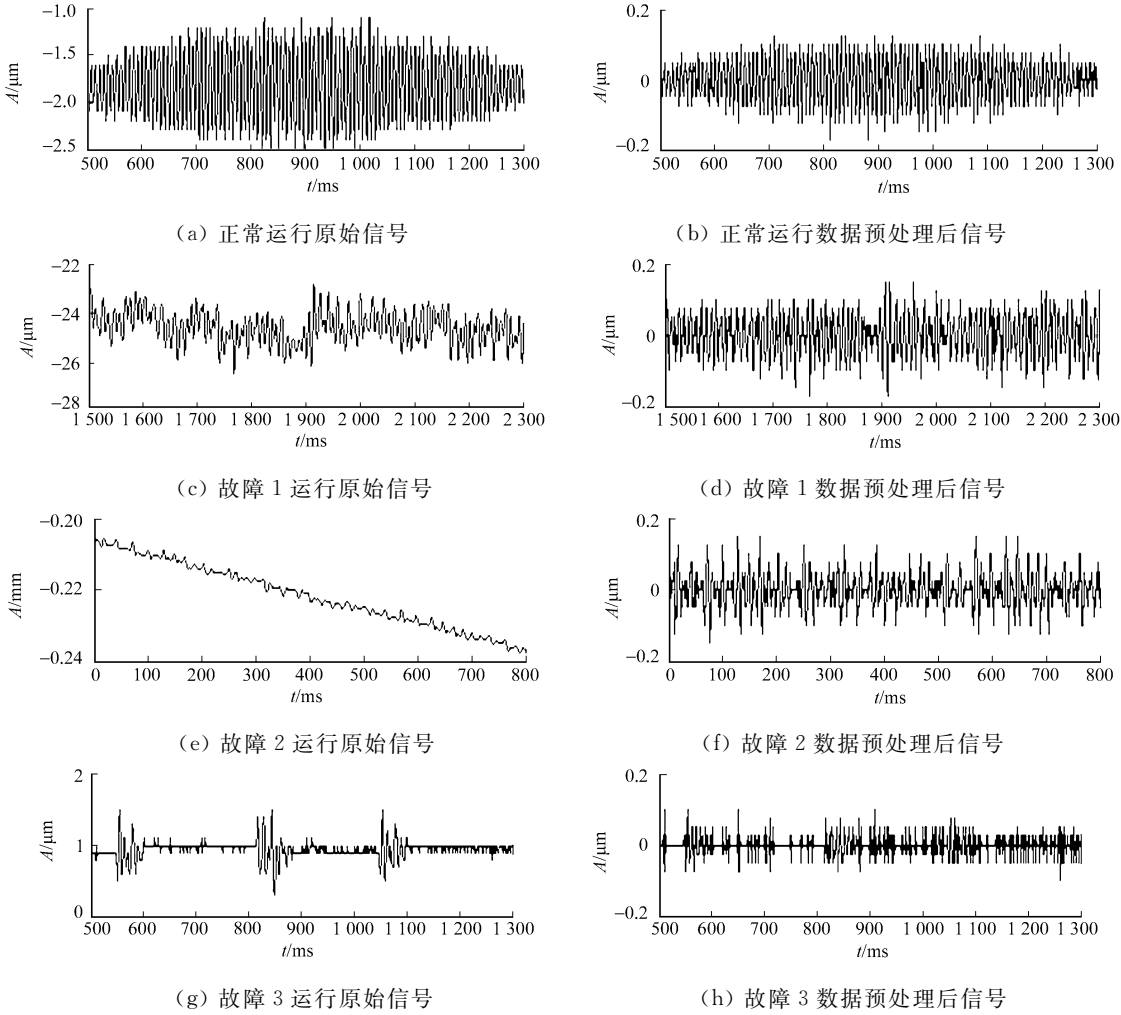


图 3 超声波电机不同状态下的原始信号及预处理后信号

Fig. 3 Original signal and pretreated signal of USM in different states

关于数据长度的确定,Kantz 等^[7]给出式 $N_{\min}=10^{(D_2+2)/2}$,以估计最小样本容量. 经过计算,系统的关联维数 $1\leq D_2\leq 5$,故 $N\geq 10^{3.5}=3\ 163$,即数据长度(N)选取 3 500.

3.2 延迟时间的选取

相空间重构过程中,延迟时间(τ)的选择影响着重构相空间所包含的信息量. 如果延迟时间太小,相空间矢量的相邻延迟坐标元素间差别太小,即冗余度较大,重构相空间的样点所包含的关于原吸引子的信息偏小,表现在相空间形态上,即信号轨迹向相空间主对角线压缩;如果延迟时间太大,相空间内延迟坐标元素间的相互信息丢失,即各元素不相关,信号轨迹可能出现折叠现象. 所以,延迟时间的选取原则是,在不丢失数据信息的情况下,使数据的自相关程度尽可能小.

计算延迟时间的方法很多,但是从计算的复杂性和使用的简便性等角度来看,比较常用的方法主要有自相关函数法^[7]和互信息法^[8]. 互信息方法比自相关法计算量大,但互信息法包含了时间序列的非线性特征,在非线性时间序列分析计算结果明显优于自相关法. 因此,采用互信息法来计算延迟时间^[8].

下面,以超声波电机正常状态为例,利用互信息法求取延迟时间(τ),计算结果如图 4 所示.由图 4 可知,当 $\tau=2$ 时,互信息第 1 次达到最小,故最佳延迟时间 τ 为 2.

3.3 嵌入维数的选择

嵌入维数(m)可根据很多方法来求取,如塔肯斯定理、G-P 算法、Cao 方法等. Cao 方法是判断伪邻近点(FNN)的改进方法,其计算方法可详见文献[9]. 该方法计算时只需要延迟时间 τ 一个参数,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.用 Cao 方法确定嵌入维,以超声波电机故障 2 为例,计算其最佳嵌入维数 m ,如图 5 所示.从图 5 可知,当 $d=12$ 时, $E(1)$ 已基本上收敛,故其最佳嵌入维数 m 为 12.

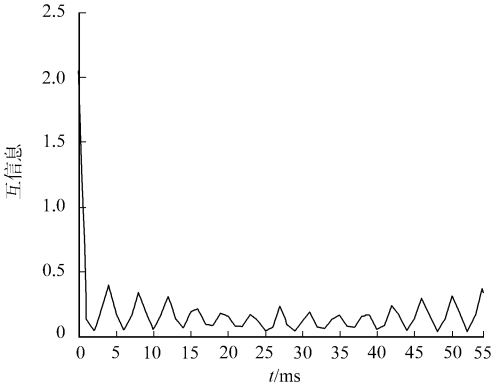


图 4 正常状态下的互信息图
Fig. 4 Mutual information under the normal state

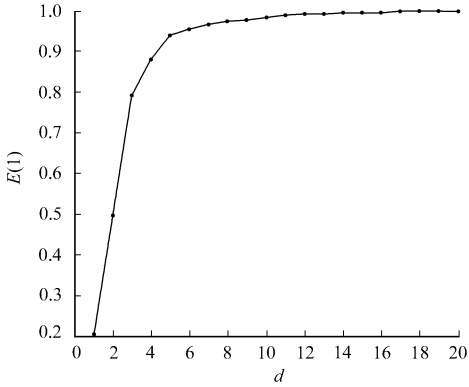


图 5 利用 Cao 方法求故障 2 嵌入维数
Fig. 5 Find the best embedded dimension based on Cao method under the flaut state 2

3.4 计算关联维数

利用上述计算方法,分别求出 4 种状态下延迟时间(τ)和最佳嵌入维数(m);然后,对其振动数据进行相空间重构,用式(1)计算相应的 $\ln r-\ln C(r)$ 曲线,如图 6 所示.

用最小二乘法拟合图 6 曲线上收敛比较好的数据段,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.

表 1 不同故障状态下的关联维数

Tab.1 Correlation dimension of different flaut states			
状态	τ	m	d
正常	2	12	1.460 8
故障 1	2	15	2.143 0
故障 2	3	12	3.397 0
故障 3	3	13	2.173 6

从表 1 可知,超声波电机在正常运转状态下的关联维数最小,而在超声波电机运行异常时,关联维数都不同程度的变大.这是因为系统状态在相空间总是收敛于一定的吸引子,系统发生故障时,其吸引子的结构就会发生变化^[10],而关联维数是定量刻划混沌吸引子“奇异”程度的重要特征量.

此外,关联维数又是耗散系统能量变化的标志,耗散能越大,关联维数值越大.随着故障程度的加剧,系统克服故障所耗散的能量呈递增的趋势^[11].因此,3 种故障信号的关联维数值呈增大的趋势.关联维数可以敏感地反映系统的不同故障状态,所以,将其作为超声波电机故障诊断方法是可取的.

4 结论

提出基于关联维数的超声波电机故障诊断方法,通过中数法对数据进行预处理后,利用相空间重构和关联维数对超声波电机故障信号进行分析.结果表明:不同故障状态下振动信号的关联维数明显不

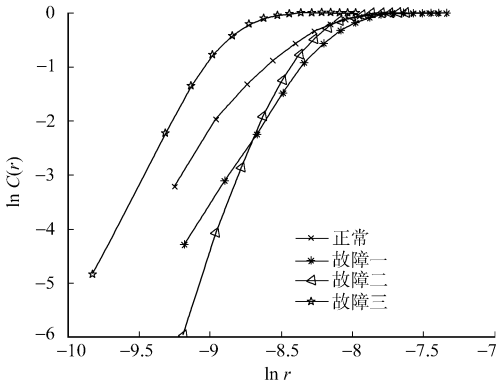


图 6 $\ln r-\ln C(r)$ 曲线
Fig. 6 Curve of $\ln r-\ln C(r)$

同,可以将关联维数作为非线性故障诊断的特征量,为系统的运行状态的判别提供了重要依据,这种方法简单有效,直观、易行.

采用关联维数作为故障信号的特征参数,克服了传统方法在故障信号特征提取和分析上的困难.然而,该方法只能大致确定系统是否出现故障或者出现哪几类故障,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,将是今后研究的重要方向.

参考文献:

[1] 郭萍萍. 浅谈超声波电机[J]. 科技创新导报, 2010(9):103.

[2] 金龙, 褚国伟, 胡敏强, 等. 超声波电机速度与定位控制系统[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1):132-135.

[3] 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):252-254.

[4] 陈俊杰, 朱晓峰, 罗安旗, 等. 筛分机械试验台磁流变减振的关联维数分析[J]. 混凝土, 2010, 243(1):142-144.

[5] LOGAN D, MATHEW J. Using the correlation dimension for vibration fault diagnosis of rolling element bearings (I): Basic concepts[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1996, 10(3):241-250.

[6] GRASSBERGER P, PROCACCIA I. Charaterization of strange attractors[J]. Physical Review Letters, 1983, 50(5): 346-349.

[7] KANTZ H, SCHREIBER T. Dimension estimates and physiological data[J]. Chaos, 1995, 5(1):143-154.

[8] 张涛, 吴令红. 相空间重构中参数的优化选取[EB/OL]. 中国科技论文在线[2009-02-06]. <http://www.paper.edu.cn>.

[9] 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):1576-1582.

[10] 赵吉文, 冯志华, 刘志刚, 等. 混沌理论与小波包分析相结合的状态监测方法研究[J]. 振动与冲击, 2004, 23(4):21-25.

[11] 王浩, 张来斌, 王朝晖, 等. 基于关联维数的烟气轮机故障诊断研究[J]. 石油机械, 2008, 36(3):65-67.

Fault Diagnosis of Ultrasonic Motor
Based on Correlation Dimension
WANG Li-ting, HUANG Yi-jian

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: The analysis method of correlation dimension is used in the fault diagnosis of ultrasonic motor, and a special experiment platform is built to collect fault vibration signal according to the actual conditions in fault diagnosis. The correlation dimensions of the different fault of ultrasonic motor were calculated through two important parameters of reconstruction of the phase space which were determined by the mutual information and Cao method. The results show that the mechanism of different faults for ultrasonic motor are related with their different correlation dimensions, so the correlation dimension can be used to extract the feature of the faults. By the analysis of the correlation dimension of different fault vibration signals, it can be judged whether there is a fault for ultrasonic motor or not.

Keywords: ultrasonic motor; fault diagnosis; delay time; embedded dimension; correlation dimension

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 崔长彩)