

混沌理论在滚动轴承故障诊断中的应用

吴参^{1,2,3}, 李兴林¹, 孙守迁³, 张燕辽¹, 张仰平¹

(1. 杭州轴承试验研究中心 博士后工作站 杭州 310022; 2. 杭州电子科技大学 机械工程学院 杭州 310018;
3. 浙江大学 现代工业设计所 杭州 310027)

摘要:混沌系统对初始条件和参数极度敏感,这一特点可以用于检测早期检测噪声背景下的滚动轴承故障信号。从几个方面综述了混沌理论在轴承故障诊断中的应用现状,即滚动轴承故障诊断技术的分类与特点,混沌理论在滚动轴承故障诊断中的应用基础,混沌振子系统在轴承故障诊断中的应用,混沌动力学分析在滚动轴承故障诊断中的应用。并通过分析总结,预测了混沌理论在轴承故障诊断中的下一步研究方向。

关键词:滚动轴承;混沌理论;故障诊断;工程应用

中图分类号:TH133.33 **文献标志码:**B **文章编号:**1000-3762(2013)01-0060-05

Application of Chaos Theory in Fault Diagnosis of Rolling Bearings

Wu Can^{1,2,3}, Li Xing-lin¹, Sun Shou-qian³, Zhang Yan-liao¹, Zhang Yang-ping¹

(1. Post-Doctoral Working Station, Hangzhou Bearing Test & Research Center, Hangzhou 310022, China; 2. School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China; 3. Institute of Industrial Design, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The chaos system is extremely sensitive to initial conditions and parameter. This feature is able to be used for testing rolling bearing fault signal under early detection noise background. The application status of chaos theory in fault diagnosis for rolling bearings is summarized from several aspects, namely classification and characteristics of fault diagnosis technology for rolling bearings, application basis of chaos theory in fault diagnosis for rolling bearings, application of chaotic oscillator system in fault diagnosis for rolling bearings, application of chaotic dynamics analysis in fault diagnosis for rolling bearings. Through the analysis, the next research direction of chaos theory in fault diagnosis for rolling bearings is forecasted.

Key words: rolling bearing; chaos theory; fault diagnosis; engineering application

振动分析法是通过安装在轴承座或箱体适当位置的振动传感器监测轴承振动信号,并对此信号进行分析与处理来判断轴承工况与故障的方法。由于滚动轴承早期故障振动信号容易湮没在大量噪声背景下,使得振动分析法的应用受到极大的制约。一般来说,振动烈度、峰值因子、偏态和峭度是判断滚动轴承故障的常用特征值。但实际上,当轴承出现微弱故障时,其振动烈度不一定突然变大,很难在测量得到的振动信号中分辨提

取出故障特征。近年来,一批国外学者采用了先进的信号处理方法和技术,以期达到更好的检测效果^[1-5],但是仍没有得到较好较稳定的效果。

混沌故障诊断是振动分析法中的一个重要分支。混沌是指确定性系统中出现的一种貌似无规则的、类似随机的现象^[6]。混沌系统对初始条件的敏感依赖,是系统内在的、固有的随机性引起的,这是非线性系统在一定条件下表现出的特有现象。由于混沌系统对初始条件和参数的极度敏感,只要将被测的微弱信号加入到混沌系统中,就会导致该混沌系统的动力学行为发生本质的变化,应用这一特点可以检测噪声背景下的微弱信号。

收稿日期:2012-05-03; 修回日期:2012-07-10

基金项目:浙江省教育厅资助项目(Y201120741); 广东省教育部产学研结合项目(2011B090400503); 浙江省社会科学界联合会研究课题(2012Z51)

1 轴承工作中的混沌振动

滚动轴承在工作过程中会产生大量的混沌振动。文献[7]研究了游隙对滚动轴承振动形式的影响,提出了包含游隙的滚动轴承振动模型,分析了游隙大小和轴承转动频率对最大 Lyapunov 指数、Poincaré 截面的影响。文献[8]研究了空气动力学影响下带偏心力的四叶径向轴承的振动情况,从功率谱密度图以及分叉图中可以发现大量的混沌现象。文献[9]基于试验研究了滚动轴承通向混沌的路径,数据表明有分谐波道路和拟周期道路两大类。

除了轴承本身以外,轴承座、轴、负载情况都会造成轴承的混沌振动。文献[10]研究了齿轮负载下考虑动力学冲击和摩擦的滚动轴承振动模型及其混沌振动情况。文献[11-12]研究了轴承座的弹性阻尼对轴承混沌振动的影响。

由此,可以看到轴承的工作中包含了大量的混沌振动信号,轴承的混沌故障检测是可行的。

2 混沌故障检测

混沌故障检测是由美国学者 Birx 在 20 世纪 90 年代首先提出的设想和设计^[13]。而后国内、外众多学者在混沌故障检测上深入探索,并与其他信号处理方法交叉,取得了较理想的理论成果。在方法上,文献[14-15]分别研究了基于混沌粒子群优化算法(CPSO)和支持向量机(SVM)的故障诊断算法。文献[14]测试了冲击、偏置、短路和漂移 4 种信号情况下的诊断结果,研究表明在大量试验的基础上该算法可以通过自学习得到较准确的诊断结果。文献[15]对多故障并发状态进行了检测,结果表明在经过适当数据量的训练后,该算法能够较好地并发故障进行分类。另外,文献[16]提出了一种根据引入混沌振子系统中二维近似熵变化来判定故障模式的故障诊断方法。在应用上,文献[17]将阵发混沌与滑窗符号序列结合,用于液压泵的故障诊断,取得了良好的效果。此外,混沌故障诊断技术也被广泛用于医学信号分析,如文献[18]研究了一种时空小波混沌方法应用于脑电波图的老年痴呆症诊断。

目前,对滚动轴承振动信号的检测基本依赖于压电式加速度传感器,该类传感器体积小、精度高,能够满足工业现场安装的要求。其安装方式一般如图 1 所示,图中 2 个压电式加速度传感器

分别安装在轴承座的 12 点和 9 点方向,测量轴承平面内垂直方向和水平方向的振动情况。在某些精度要求较高的场合,会安装一个光学探针来测量滚动体的运动情况,从而更精确地估计轴承的故障频率。

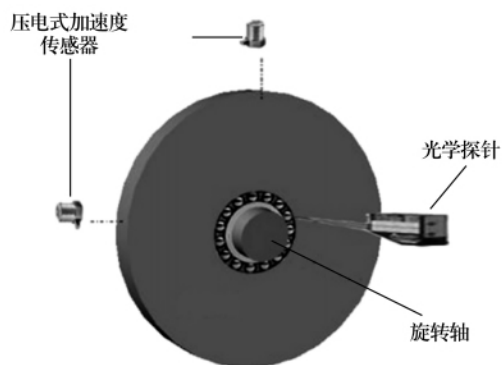


图 1 轴承检测传感器布置图

3 混沌理论在轴承故障诊断中的应用

从现有文献看,将混沌理论应用于滚动轴承故障诊断的方法主要有两种:(1)引入混沌振子系统,通过临界状态的变化判定故障模式;(2)用混沌动力学方法提取特征值,标识各种故障模式。

3.1 混沌振子系统的应用

目前,混沌振子系统在滚动轴承故障振动检测中的运用主要是混沌检测模型相变的检验,即将混沌检测模型参数调至阈值点,使系统处于一种临界状态,将待测微弱信号作为系统周期策动力的摄动,引入到检测模型中,依据系统从混沌状态到周期状态发生的相变,检测出微弱信号的存在。

国内众多学者在利用混沌振子检测微弱信号方面作出了重大贡献。如文献[19]用混沌振子检测湮没在高噪声背景下的方波信号。文献[20]提出了一种强噪声背景下的频率测量方法。此外,文献[21]采用 Melnikov 方法作为混沌判据,利用混沌振子阵列实现对噪声背景下微弱信号的检测,并通过仿真试验表明其检测方法简单、有效,检测的精度也比较高。文献[22]利用混沌振子检测出淹没在强噪声背景中的微弱三角波信号。文献[23]将混沌系统检测弱信号方法与自相关方法和滤波方法相结合,得到了弱信号检测的新方法(联合检测)。文献[24]对淹没在强分形噪声中的信号进行多尺度小波变换,根据分形噪声信号小波系数的平稳性,建立状态方程和观测方程,利用模糊自适应 Kalman 滤波和 Duffing 振子对噪声

的免疫力,来检测微弱信号。

混沌检测模型最常见的是 Holmes 型 Duffing 系统^[25-27],其方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = \omega_0 y \\ \dot{y} = \omega_0 [-cy + x - x^3 + F_0 \cos(\omega_0 t)] \end{cases}, (1)$$

式中: ω_0 为任意频率; c 为阻尼比; $F_0 \cos(\omega_0 t)$ 为 Duffing 系统内部周期驱动力。当加入被测周期信号和噪声干扰后, (1) 式变为

$$\begin{cases} \dot{x} = \omega_0 y \\ \dot{y} = \omega_0 [-cy + x - x^3 + F_0 \cos(\omega_0 t) + F_1 \cos(\omega_1 t + \theta) + N(t)] \end{cases}, (2)$$

式中: ω_1 , θ 分别为被测周期信号的频率和相位; N 为服从正态分布的随机噪声。如果将 c 固定,随着 F_0 的增大,该系统经历了小尺度周期运动、分叉、混沌运动和大尺度周期运动 4 种状态。一般选择混沌运动和大尺度周期运动的临界点作为检测点,具体方法如下。

(1) 将 Duffing 系统内部驱动频率 ω_0 设为被测信号频率 ω_1 , 即 $\omega_0 = \omega_1$ 。 ω_1 取值为轴承内圈、滚动体或外圈故障频率等轴承故障特征频率。

(2) 应用 Melnikov 方法等计算系统从混沌运动到大尺度周期运动的临界点 F_d 值。

(3) 将 F_0 设为略小于临界点 F_d 。此时,若被测信号输入为 0,则系统处于混沌运动状态。当被测信号输入不为 0,只要 $F_0 + F_1 > F_d$,该系统就会由混沌运动转变为大尺度周期运动。根据系统运动状态的改变,监测信号中是否含有频率为 ω_1 的轴承故障信号。

但是这种运用混沌振子系统的方法对于不同的检测对象有其适用的前提条件: (1) 由于需要预先确定 ω_0 , ω_1 的值,因此在检测前轴承可能的故障频率(即被测周期信号频率)必须是已知的。而在实际情况中,该信号频率只能通过动力学理论公式大致计算得到,其值并不精确。同时,对于不同的检测对象要调整不同的诊断系统参数,需要“一机一调”,给工程实际应用带来较大不便。(2) 通过动力学理论公式计算得到的轴承故障频率应贴近实际故障频率,并在其邻域内不存在其他周期成分,否则会影响诊断结果。而实际工程中由于外部噪声原因可能引入周期信号,比如电网波动周期信号,在实际工程应用上存在不可避免的缺陷。

3.2 混沌动力学分析的应用

混沌动力学分析是将被测数据赋值给一个单变量时间序列 $\{x_n\}$,对该时间序列进行相空间重构,提取该序列的混沌特征量。由于混沌特征量是混沌动力系统最根本的几何不变量,因此只有当轴承发生故障时,即该混沌动力系统发生变化,其混沌特征量才会随之发生变化。其基本思想是:任意混沌系统在经过初始的收敛过程后,会产生一种规则的轨迹,即混沌吸引子。由于系统中的任意变量都是与其他的变量相互作用,相互影响的。因此,所有这些相关变量的信息都包含在一个变量的变化过程当中。所以,可以通过观察足够长度的某一变量的变化,从该时间序列中提取和再现原有系统的动力学规律^[6]。

对被测数据作以下相空间重构

$$x_n = (\dot{x}_n, x_{n-\tau}, \dots, x_{n-(m-1)\tau})^T. (3)$$

从而形成 m 维状态空间,在重构的 m 维状态空间中可以建立数学模型

$$x_{n+1} = G(x_n). (4)$$

形成 m 维空间,只要 $m \geq 2d + 1$,动力系统的几何结构就能完全打开,其中 d 为系统中吸引子的维数, τ 为时间延迟间隔。由于状态空间 R^m 中的吸引子的几何特征与原动力系统的几何特征完全等价,所以原动力系统的任意微分或拓扑不变量可以在重构的状态空间中计算。

目前,在故障诊断中常用的混沌特征值主要有最大 Lyapunov 指数、关联维数和 Kolmogorov 熵等。

3.2.1 最大 Lyapunov 指数

从时间序列中计算最大 Lyapunov 指数的最早工作是轨线法。文献[28]提出了小数据量法求最大 Lyapunov 指数的方法,该方法在相空间重构后,其基本步骤如下:

(1) 找相空间中每个点 x_n 的最近邻点 $x_{\hat{n}}$,并限制短暂分离,即

$$d_n(0) = \min \|x_n - x_{\hat{n}}\|, |n - \hat{n}| > P; (5)$$

(2) 对相空间中每个点 x_n ,计算出该一对邻点的 i 个离散时间步后的距离 $d_n(i)$ 为

$$d_n(i) = \|x_{n+i} - x_{\hat{n}+i}\|, i = 1, 2, \dots, \min(M - n, M - \hat{n}); (6)$$

(3) 对每个 i ,求出所有 n 的 $\ln d_n(i)$ 平均值 $y(i)$,即

$$y(i) = \frac{1}{q\Delta t} \sum_{n=1}^q \ln d_n(i), (7)$$

q 为非零 $d_n(i)$ 的数目,并用最小二乘法作出回归直线,该直线的斜率就是最大 Lyapunov 指数。

3.2.2 关联维数

关联维数是分形维数的一种,能定量地描述混沌吸引子的分形特征,由于计算方便,在轴承故障诊断中应用较为广泛。在相空间重构后,其基本步骤如下:

(1) 计算相空间各向量间的距离

$$r_{ij} = |Y_i - Y_j|; \quad (8)$$

(2) 在 $\min(r_{ij})$ 和 $\max(r_{ij})$ 间取一适当的 r , 计算得

$$C(r) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N H(r - |Y_i - Y_j|), \quad (9)$$

式中: $C(r)$ 为距离小于 r 的向量对在所有向量对中所占的比例; r 为吸引子自相似结构的无标度区; $H(x)$ 为

$$H(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0 \\ 1 & x > 0 \end{cases}; \quad (10)$$

(3) 计算关联维数

$$D_c(m, r) = \frac{\ln C(r)}{\ln r}. \quad (11)$$

3.2.3 Kolmogorov 熵

Kolmogorov 熵定义为信息的平均损失率,但在不知系统动力学方程时, Kolmogorov 熵难以计算得到。由于 $K_2 \leq K_1 \leq K_0$, 其中 K_2 为 Renyi 熵, K_1 为 Kolmogorov 熵, K_0 为拓扑熵。因此通常计算 K_2 熵作为 Kolmogorov 熵的近似。其计算方法与关联维数的步骤(1)、(2)相同,而后计算

$$K_2(m, r) = \frac{1}{\tau_0} \ln \frac{C_m(r)}{C_{m+1}(r)}. \quad (12)$$

混沌动力学分析方法目前已经引起众多学者的关注,但是也存在着不可避免的问题:(1)混沌动力学方法在时间序列赋值前一般需要进行滤波,该滤波频率及方法与后续混沌动力学分析之间的关系缺少理论指导,目前的文献中该滤波一般凭研究人员经验自行决定。(2)混沌特征量包含众多参数形式,如何选择及选择多少个混沌特征量都是悬而未决的问题。

4 结束语

到目前为止,对于混沌理论在滚动轴承故障诊断中的应用,国内还主要停留在理论研究或实验室阶段,在市场上还没有以混沌理论为基础的滚动轴承故障诊断设备问世。混沌理论在滚动轴承故障诊断中的应用在以下方面有待进一步研

究。

(1) 混沌理论的应用能够通过检测故障特征判定滚动轴承故障。但是相同的特征量变化对于不同的滚动轴承可能意味着不同的故障模式,因此需要明确故障模式与混沌故障特征的映射关系。

(2) 目前混沌理论在故障诊断中的应用基本都是对单一故障提出的,而实际工程应用中,故障模式往往是并发甚至是多发的,因此在并发或者多发情况下混沌故障特征的变化能否满足故障识别的要求还要进一步探索。

(3) 混沌理论的应用主要起到了滚动轴承故障特征提取的作用,仍需要进行诊断决策算法的研究。

参考文献:

- [1] 中国机械工程学会. 超声波检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [2] 李兴林. 滚动轴承故障诊断技术现状及发展[C]. 全国青年摩擦学学术会议, 2009: 56-62.
- [3] Sheen Y T. An Envelope Analysis Based on the Resonance Modes of the Mechanical System for the Bearing Defect Diagnosis [J]. Measurement, 2010, 43(2): 912-934.
- [4] Hu Qiao, He Zheng-jia, Zhang Zhou-suo, et al. Fault Diagnosis of Rotating Machinery Based on Improved Wavelet Package Transform and SVMs Ensemble [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(2): 688-705.
- [5] Zhang Y X, Randall R B. Rolling Element Bearing Fault Diagnosis Based on the Combination of Genetic Algorithms and Fast Kurtogram [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(3): 1509-1517.
- [6] 刘小河. 非线性系统分析与控制引论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [7] Karthik K, Nataraj C. Nonlinear Modeling and Analysis of a Rolling Element Bearing with a Clearance [J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2011, 16: 4134-4145.
- [8] Reza R M, Ardeshir K M, Firooz B N. Numerical Analysis of a Rigid Rotor Supported by Aerodynamic Four-Lobe Journal Bearing System with Mass Unbalance [J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2012, 17: 454-471.
- [9] Mevel B, Guyader J L. Experiments on Routes to Chaos in Ball Bearings [J]. Journal of Sound and Vibra-

- tion 2008 ,318: 549 – 564.
- [10] Chen Si – yu , Tang Jin – yuan , Luo Cai – wang , et al. Nonlinear Dynamic Characteristics of Geared Rotor Bearing Systems with Dynamic Backlash and Friction [J]. Mechanism and Machine Theory , 2011 , 46: 466 – 478.
- [11] Wan C , Jian C. Strong Nonlinearity Analysis for Gear – Bearing System Under Nonlinear Suspension Bifurcation and Chaos [J]. Nonlinear Analysis: Real World Applications , 2010 , 11: 1 760 – 1 774.
- [12] Wan C , Jian C , Chen C K. Chaos of Rub – Impact Rotor Supported by Bearings with Nonlinear Suspension [J]. Tribology International , 2009 , 42: 426 – 439.
- [13] Birx D L. The Design of a Neural Network that Performs a Complex Mapping for Phase Sensitive Detection and Characterization of Eddy Current Impedance Plane Data [D]. University of Dayton: Ph. D Dissertation , 1990.
- [14] Zhao C L , Sun X B , Sun S L , et al. Fault Diagnosis of Sensor by Chaos Particle Swarm Optimization Algorithm and Support Vector Machine [J]. Expert Systems with Applications , 2011 , 38(4) : 9 908 – 9 912.
- [15] Tang Xian – lun , Zhuang Ling , Cai Jun , et al. Multi – Fault Classification Based on Support Vector Machine Trained by Chaos Particle Swarm Optimization [J]. Knowledge – Based Systems , 2010 , 23: 486 – 490.
- [16] Wang Wei , Li Qiang , Zhao Guo – jie. Novel Approach Based on Chaotic Oscillator for Machinery Fault Diagnosis [J]. Measurement , 2008 , 41: 904 – 911.
- [17] Zhao Z , Jia M X , Wang F L , et al. Intermittent Chaos and Sliding Window Symbol Sequence Statistics – Based Early Fault Diagnosis for Hydraulic Pump on Hydraulic Tube Tester [J]. Mechanical Systems and Signal Processing , 2009 , 23(3) : 1 573 – 1 585.
- [18] Hojjat A , Samanwoy G D , Nahid D. A Spatio – Temporal Wavelet – Chaos Methodology for EEG – Based Diagnosis of Alzheimer’s Disease [J]. Neuroscience Letters , 2008 , 444: 190 – 194.
- [19] 李月 杨宝俊 石要武 ,等. 用混沌振子检测淹没在强噪声背景下的方波信号 [J]. 吉林大学自然科学学报 , 2001 , 136(2) : 65 – 68.
- [20] 聂春燕 石要武 衣文索 ,等. 强噪声下利用混沌系统测量频率的新方法 [J]. 传感器技术 , 2004 , 23(3) : 57 – 59.
- [21] 朱志宇 姜长生 张冰 ,等. 基于混沌理论的微弱信号检测方法 [J]. 传感器技术 , 2005 , 24(5) : 65 – 68.
- [22] 吴新杰 孟然 陈跃宁. 基于混沌振子探测微弱动态周期测量信号 [J]. 辽宁大学学报 , 2006 , 33(4) : 292 – 592.
- [23] 史建锋 王可人. 基于混沌振子的低信噪比条件下信号检测研究 [J]. 探测与控制学报 , 2006 , 28(5) : 39 – 42.
- [24] 苏理云 马洪 唐世福. 用混沌振子和 Kalman 滤波检测强分形噪声中的弱信号 [J]. 四川大学学报 , 2007 , 39(3) : 149 – 154.
- [25] 张勇 纪国宜. 基于混沌振子和小波理论的轴承故障诊断方法 [J]. 轴承 , 2010(5) : 53 – 55.
- [26] 李强 王太勇 胥永刚. 基于混沌和二维近似熵的滚动轴承故障诊断 [J]. 振动工程学报 , 2007 , 20(3) : 268 – 272.
- [27] 关贞珍 郑海起 杨云涛. 基于经验模态分解和 Duffing 振子的轴承故障诊断 [J]. 农业机械学报 , 2010 , 41(9) : 214 – 217.
- [28] 吕金虎. 一个统一混沌系统及其研究 [D]. 北京: 中国科学院 2002.

(编辑:张旭)

(上接第 59 页)

- [3] Harris T A. 滚动轴承分析 [M]. 罗继伟 马伟 ,译. 北京: 机械工业出版社 2010.
- [4] Ehrenstein G W. 聚合物材料——结构·性能·应用 [M]. 张萍 赵树高 ,译. 北京: 化学工业出版社 , 2007.
- [5] 何平笙. 新编高聚物的结构与性能 [M]. 北京: 科学出版社 2009.
- [6] 丁孟贤. 聚酰亚胺——化学、结构与性能的关系及材料 [M]. 北京: 科学出版社 2005.
- [7] 陈祥宝. 高性能树脂基体 [M]. 北京: 化学工业出版社 , 1998.
- [8] 牛永平 王亮 杜三明 ,等. 不同温度下 PTFE 纳米复合材料摩擦学性能的研究 [J]. 塑料工业 , 2011 , 39(7) : 83 – 85.
- [9] 丛培红 李同生 刘旭军 ,等. 温度对聚酰亚胺摩擦磨损性能的影响 [J]. 摩擦学学报 , 1997 , 17(3) : 220 – 226.
- [10] 陈碧波. 聚四氟乙烯蠕变性能研究 [D]. 西安: 西北工业大学 2007.
- [11] 赵纯 张玉龙. 聚醚醚酮 [M]. 北京: 化学工业出版社 2008.

(编辑:赵金库)