

# 基于三稳态随机共振的滚动轴承早期故障诊断研究

郑煜<sup>1</sup>,王凯<sup>2</sup>,付兴娥<sup>1</sup>,李翊宁<sup>1</sup>,薛攀<sup>3</sup>

(1. 陕西工业职业技术学院 机械工程学院,陕西 咸阳 712042;

2. 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院,陕西 西安 710048;

3. 中国航发西安动力控制科技有限公司 技改规划项目部,陕西 西安 710077)

**摘要:**针对滚动轴承早期故障提出了三稳态随机共振故障诊断新方法。介绍了三稳态随机共振的基本理论,对比三稳态与双稳态系统说明其产生随机共振的可能性;采用小幅值正弦信号模拟故障输入信号,研究了不同频率下输出与输入信号频谱峰值比,得到了三稳态随机共振的诊断可行性。使用滚动轴承早期故障实测信号作为实验数据,实验结果表明三稳态随机共振对轴承早期故障具备良好的直接诊断能力,为滚动轴承早期故障诊断方法提供了一种新思路。

**关键词:**滚动轴承;早期故障诊断;三稳态随机共振

**中图分类号:**TP206+.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)03-0192-03

## Early Fault Diagnosis of Rolling Bearing Based on Tri-stable Stochastic Resonance

ZHENG Yu<sup>1</sup>, WANG Kai<sup>2</sup>, FU Xing'e<sup>1</sup>, LI Yining<sup>1</sup>, XUE Pan<sup>3</sup>

(1. Mechanical Engineering Institute, Shaanxi Polytechnic Institute, Xianyang 712042, China; 2. School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. Technical Renovation Planning Project Department, AECC Xi'an Engine Control Technology Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

**Abstract:** To early find the malfunction of the rolling bearing, a new method in which Tri-stable stochastic resonance (SR) is used to make a diagnosis is proposed. Tri-stable SR is introduced; then the differences between Tri-stable SR with normal SR is studied; the sine signal with small amplitude is chosen as input signal, by studying the spectrum amplitude rate of output/input signal, the potential diagnosis ability of Tri-stable SR is discovered. The signal and data in the rolling bearing early malfunction finding are used to prove the Tri-stable SR ability of diagnosis. This method can be used to provide a new idea for early finding the rolling bearing malfunction.

**Keywords:** rolling bearing; early malfunction finding; Tri-stable stochastic resonance

## 0 引言

滚动轴承的早期故障具有故障特征不明显、特征信号微弱等特点<sup>[1]</sup>,同时由于运行环境中大量背景噪声的引入,使得故障特征信号往往被噪声淹没,因此早期故障不易诊断。

随机共振是一种非线性现象,可应用于故障诊断。与传统诊断抑制噪声的思路不同,随机共振通过噪声、信号与非线性系统的某种匹配<sup>[2]</sup>,利用噪声增强信号,改善信噪比,突出信号频谱峰值,从而达到诊断的目的。

随着双稳态随机共振机理探讨的深入开展<sup>[3-6]</sup>,双稳态随机共振在航空轴承诊断、刀具监测、船舶辐射噪声检测、图像去噪等领域有诸多应用<sup>[7-10]</sup>,双稳态随机共振的技术应用日趋成熟。然而目前针对三稳态随机共振开展的相关研究还相对较少。因此,本文通过研究三稳态随机共振理论,将其作为故障诊断基本方法完成滚动轴承早期故障诊断。

## 1 三稳态随机共振

双稳态随机共振是布朗粒子在双稳态系统中,同时受周期策动力与噪声的协同作用下表现出的非线性现象<sup>[11]</sup>。具体可表现为,当周期策动力—噪声—非线性系统(双稳态系统)达到某种协同时,布朗粒子的输出信噪比可得到改善。

随机共振可由郎之万方程(Langevin's equation, LE)描述:

$$\dot{x}(t) = -U'(x) + s(t) + \xi(t) \quad (1)$$

上式对于传统双稳态随机共振  $U(x) = -(a/2)x^2 + (b/4)x^4$  为双稳态势函数,描述了非线性双稳态系统的势场,通常由两势阱与一势垒组成,  $a, b$  为结构参数,其决定了势函数  $U(x)$  的分布形式。  $x(t)$  为布朗粒子的位移即系统的输出;  $s(t)$  为周期策动力即输入信号;  $\xi(t)$  为强度

**基金项目:**陕西工业职业技术学院 2019 院级科研计划项目(ZK19-09)

**第一作者简介:**郑煜(1990—),男,陕西咸阳人,讲师,硕士,研究方向为机械系统状态检测与故障诊断。

为  $D$  的高斯白噪声,  $[\xi(t), \xi(0)] = 2D\delta(t)$ 。图 1 给出了  $U(x)$  随  $a, b$  取值的变化。

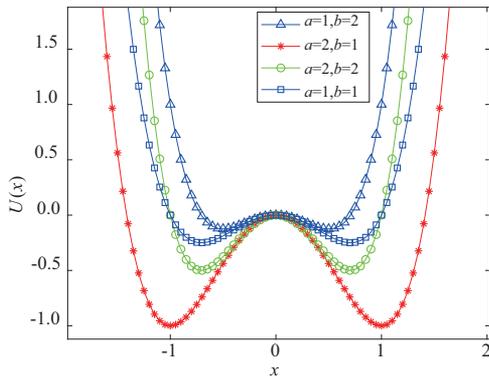


图 1 双稳态势阱分布形态

若势函数  $U(x) = (a/2)x^2 - (b/4)x^4 + (c/6)x^6$ , 此时双稳态系统提升为三稳态系统,  $U(x)$  一般由 3 个势阱、2 个势垒组成,  $a, b, c$  为结构参数。图 2 给出了不同结构参数  $a, b, c$  取值下的势阱形状。由于其结构形状较为复杂, 因此该系统可能包含丰富的非线性现象, 可能引发随机共振。

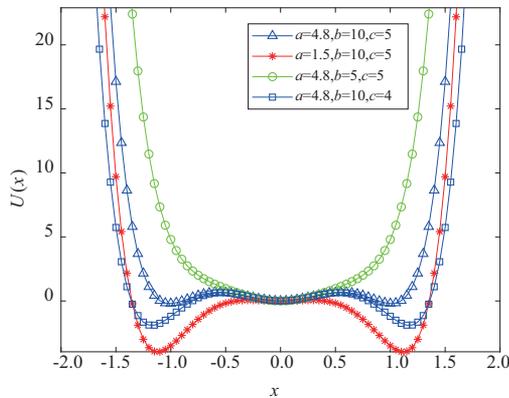


图 2 三稳态势阱分布形态

## 2 正弦信号试验

为验证三稳态系统具备产生随机共振的能力以及三稳态随机共振对早期特征信号的增强传输能力, 将小幅度正弦信号输入三稳态系统, 信号幅值 0.1, 参数  $a = 0.1, b = 1, c = 1$ , 连续改变输入信号频率, 使用 4 阶 Runge-Kutta 法求解 LE。如图 3 所示, 绘制不同频率下输出、输入特征信号的频谱峰值比。

从图 3 中可以看出, 在 90~225 Hz 之间, 三稳态系统输出没有发散且频谱峰值比  $> 1$ , 说明三稳态随机共振能够正常发生且输入信号得到了增强传输。通常滚动轴承的早期故障特征频率在 100~200 Hz 之间, 该特征频段下的频谱峰值比在 4.5~3.1, 说明三稳态随机共振对特征信号具备良好的潜在增强传输能力。

## 3 实测数据的诊断

### 3.1 实验数据介绍

本文采用的滚动轴承故障实测数据是美国凯斯西储

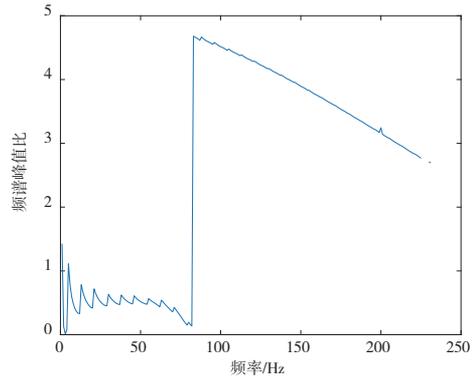


图 3 输出、输入谱峰值比随特征频率的变化

大学轴承数据中心的探伤测试数据, 实验轴承为深沟球轴承 6205-2RS JEM SKF<sup>[12]</sup>。通过电火花加工在该轴承上设置单点故障。使用加速度传感器采集振动信号, 该传感器放置在电机基座非驱动端和驱动端的 12 点钟方向处 (即轴承负荷区), 采用 16 通道数字录音记录器 (DAT) 采集加速度传感器数据, 采样频率为 12 kHz, 图 4 为实验装置。

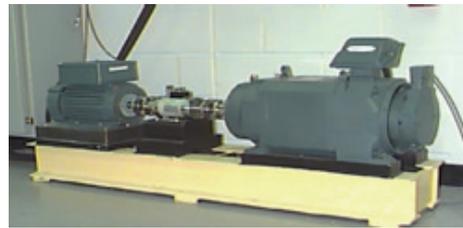
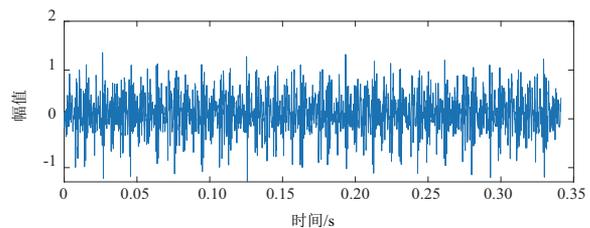


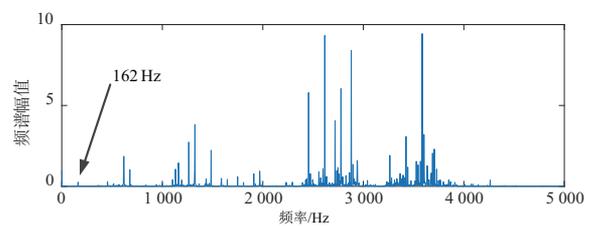
图 4 实验装置

### 3.2 实测数据诊断

设计三稳态系统, 选定系统参数  $a = b = c = 0.155$ , 选取点蚀凹坑直径 0.18 mm 的轴承振动数据作为早期故障数据。分别将不加载、1797 r/min 和载荷 1.47 kW、1750 r/min 的内圈故障数据输入三稳态系统, 使用 4 阶 Runge-Kutta 法求解郎之万方程, 输入、输出信号及频谱如图 5、图 6 所示。



(a) 输入信号时域图



(b) 输入信号幅值谱

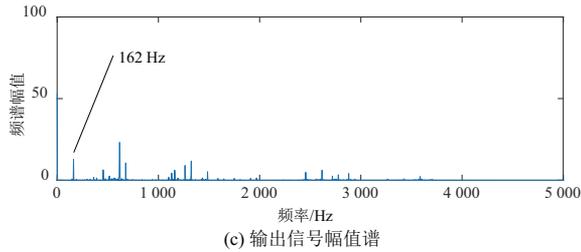


图5 不加载时输入、输出信号的对比

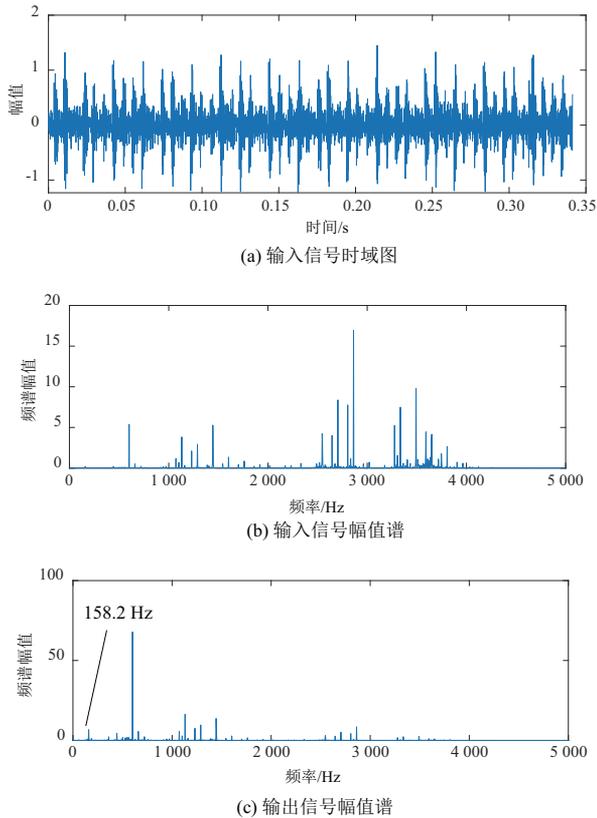


图6 加载时输入、输出信号的对比

从图5可以看出,不加载时输入信号幅值谱在特征频段范围内不存在明显频谱峰值,特征信号过于微弱,输出信号幅值谱则在162 Hz处存在较为明显的峰值;从图6可以看出,加载1.47 kW时输入信号在特征频段范围内几乎看不到任何峰值,输出信号幅值谱则在158.2 Hz处存在较为明显的峰值。由此可以说明三稳态随机共振对滚动轴承的早期故障具备诊断能力。

## 4 结语

本文选择三稳态随机共振作为滚动轴承早期故障的诊断方法;对比研究了三稳态系统的结构特点;通过不同频率小幅值正弦输入信号,初步探明三稳态随机共振对滚动轴承的早期故障具备潜在的诊断能力;使用实测滚动轴承早期故障数据,通过对比研究三稳态随机共振的输入、输出信号,证明该方法可以直接用于滚动轴承早期故障诊断。

### 参考文献:

- [1] 唐贵基,王晓龙. 自适应最大相关峭度解卷积方法及其在轴承早期故障诊断中的应用[J]. 中国电机工程学报,2015,35(6):1436-1444.
- [2] 陆思良. 基于随机共振的微弱信号检测模型及应用研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2015.
- [3] BENZI R, PARISI G, SUTERA A, et al. A theory of stochastic resonance in climatic change [J]. SIAM Journal on Applied Mathematics, 1983,43(3):565-578.
- [4] MCNAMARA B, WIESENFELD K. Theory of stochastic resonance [J]. Phys. Rev. A, 1989, 39(9):4854-4869.
- [5] 范剑,赵文礼,张明路,等. 随机共振动力学机理及其微弱信号检测方法的研究[J]. 物理学报,2014,63(11):119-129.
- [6] 李爽,李倩,李俊瑞. Duffing系统随机相位抑制混沌与随机共振并存现象的机理研究[J]. 物理学报,2015,64(10):71-77.
- [7] 田晶,周杰,王术光,等. 基于自适应双稳态随机共振的中介轴承故障诊断方法[J/OL]. 航空动力学报,2019(10):2237-2245. [2020-02-02]. <https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.2019.10.017>.
- [8] 姜增辉,谢峰,王海宁. 归一化变尺度随机共振的刀具状态监测[J/OL]. 机械科学与技术, 1-6. [2020-02-02]. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20190266>.
- [9] 杨文忠,张贤亮,谢晶. 基于随机共振的强噪背景下船舶辐射噪声检测[J]. 指挥控制与仿真,2018,40(3):98-103.
- [10] 徐蕾,彭月平,贺科宁. 基于改进双边滤波与随机共振的图像去噪算法研究[J]. 激光杂志,2018,39(8):142-148.
- [11] 郑煜,王凯. 基于Duffing-Lyapunov指数的滚动轴承早期故障诊断研究[J]. 机械制造与自动化,2019,48(3):77-79.
- [12] Case Western Reserve University Bearing Data Center. Bearing Data Center [DB/OL]//[2019-04-10]. <http://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/pages/download-data-file>

收稿日期:2020-03-10