

二阶系统普通变尺度随机共振及轴承故障诊断*

黄大文^{1,2}, 杨建华^{1,2}, 唐超权¹, 张景玲¹, 刘后广¹

(1. 中国矿业大学机电工程学院 徐州, 221116)

(2. 中国矿业大学江苏省矿山机电装备重点实验室 徐州, 221116)

摘要 针对传统随机共振方法难以实现系统最优输出的问题,提出了基于二阶欠阻尼和一阶过阻尼双稳态系统的普通变尺度随机共振方法,利用量子粒子群优化算法实现了自适应随机共振,提高了轴承故障诊断效率。基于数值模拟讨论了时间尺度、阻尼因子、噪声强度和系统参数对输出信噪比的影响。应用提出的方法对两组轴承故障振动信号进行了分析。结果表明,二阶欠阻尼系统普通变尺度自适应随机共振对微弱故障信号的检测效果优于一阶过阻尼系统普通变尺度自适应随机共振,且二阶欠阻尼系统对噪声的抑制和利用能力更强,故障频率处的幅值明显增大,提高了输出信噪比,在轴承故障诊断应用中具有优越性。

关键词 滚动轴承;参数优化;故障诊断;普通变尺度;自适应随机共振

中图分类号 TH113.1;TH165.3

引言

旋转机械故障是状态监测和故障诊断领域的重点内容。滚动轴承广泛应用于各种旋转机械设备,其通常工作在高速、重载、高温的环境中,轴承故障时有发生。工程中通常采用声发射诊断法^[1]、光纤监测诊断法^[2]和振动诊断法等对轴承故障进行诊断。基于随机共振(stochastic resonance,简称 SR)的振动诊断法因具有适用于多种轴承工况、能够诊断早期微小故障和诊断结果可靠的优点而被广泛研究。SR理论由 Benzi 等^[3]提出,即在非线性系统中,合适的噪声强度能够增强 SR 输出,获得最大输出信噪比。目前,SR 理论被广泛应用于机械设备微弱故障特征检测中^[4-6]。

由于 SR 的绝热近似理论与线性响应理论在做近似假设时有着极强的限制条件,因此经典 SR 理论只能处理频率远小于 1 的小参数信号。工程中反映机械设备状态的特征信号频率通常在几十至几千赫兹范围内。为了利用 SR 原理检测微弱高频特征信号,一些学者提出了有效的方法,如频率转移变尺度 SR^[7]、二次采样 SR^[8]、多尺度噪声调节 SR^[9]及多尺度双稳 SR 阵列^[10]等,成功提取了高频微弱特

征信息。笔者引入的过阻尼双稳态系统一阶普通变尺度(first-order general scale transformation,简称 FGST)自适应 SR 方法同样能够将大参数信号转化为小参数信号,实现 SR。

非线性系统参数、噪声强度和计算步长在传统 SR 中难以实现最佳匹配。为了使非线性系统输出最优,一些自适应 SR 方法得以发展^[11-13]。目前,自适应 SR 方法通常是基于一阶非线性 SR 系统,利用 SR 处理信号的过程相当于滤波。利用二阶欠阻尼非线性 SR 系统处理信号相当于对输入信号进行了二次滤波处理,能够得到更优的系统输出。基于二阶欠阻尼非线性 SR 系统,一些学者进行了相关研究。马正木等^[14]研究了由二值噪声和周期信号共同激励的欠阻尼系统 SR 现象,发现系统先抑制后共振,且输出信噪比随噪声增加出现单峰共振。Lu 等^[15]研究了二阶欠阻尼系统变步长 SR 对微弱信号检测的影响,提高了微弱信号的检测效率。文献^[16]展示了二阶欠阻尼非对称双稳态系统 SR,发现增大静态不对称系数和阻尼因子能够限制 SR 现象发生,增大信号幅值可以增强 SR 现象。

现有的基于二阶欠阻尼系统的研究成果难以实现非线性系统中系统参数、噪声强度和计算步长之间的最佳匹配。因此,笔者提出基于量子粒子群优

* 国家自然科学基金资助项目(11672325,61603394);江苏省自然科学基金资助项目(BK20150185);江苏高校优势学科建设工程和江苏高校品牌建设工程资助项目
收稿日期:2017-03-12;修回日期:2017-05-22

化(quantum particle swarm optimization,简称QP-SO)算法^[17]的欠阻尼双稳态系统二阶普通变尺度(second-order general scale transformation,简称SGST)自适应SR方法。通过数值仿真和故障实验分析SGST自适应SR方法在检测轴承微弱故障特征信息中的优越性,实现故障诊断,并提高输出信噪比。

1 普通变尺度原理

1.1 SGST 自适应 SR

由周期信号和高斯白噪声联合驱动的无量纲欠阻尼双稳态系统二阶 Langevin 方程可以写为

$$\frac{d^2x}{dt^2} = ax - bx^3 - \gamma \frac{dx}{dt} + S(t) + N(t) \quad (1)$$

其中: $a > 0$ 和 $b > 0$ 为系统参数; γ 为阻尼因子; $S(t) = A \cos(2\pi ft)$ 为周期信号, A 为信号幅值, f 为信号频率; $N(t) = \sqrt{2D}\xi(t)$ 为高斯白噪声, D 为噪声强度, $\xi(t)$ 是均值为 0、方差为 1 的标准高斯白噪声。

引入变量代换

$$\begin{cases} x(t) = z(\tau) \\ \tau = mt \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)中得

$$\frac{d^2z(\tau)}{d\tau^2} = \frac{a}{m^2}z(\tau) - \frac{b}{m^2}z^3(\tau) - \frac{\gamma}{m} \frac{dz(\tau)}{d\tau} + \frac{A}{m^2} \cos\left(2\pi \frac{f}{m}\tau\right) + \sqrt{\frac{2D}{m^3}}\xi(\tau) \quad (3)$$

$$\text{令 } \frac{a}{m^2} = a_1, \frac{b}{m^2} = b_1, \frac{\gamma}{m} = \gamma_1, \frac{f}{m} = f_1, \frac{A}{m^2} = A_1,$$

$\frac{\sqrt{D}}{m^2} = \sqrt{D_1}$, 代入式(3)中,式(3)可以写为

$$\frac{d^2z(\tau)}{d\tau^2} = a_1z(\tau) - b_1z^3(\tau) - \gamma_1 \frac{dz(\tau)}{d\tau} + A_1 \cos(2\pi f_1\tau) + \sqrt{2D_1m}\xi(\tau) \quad (4)$$

式(4)即为式(1)的欠阻尼双稳态系统二阶普通变尺度形式。式(4)表明:变尺度后的信号频率 f_1 转变为原频率的 $1/m$,通过选择合适的 m 值可使高频信号成功转化为低频信号,周期信号和高斯白噪声转变为原信号的 $1/m^2$,可满足经典 SR 对小参数的要求。在自适应 SR 中通过 QPSO 算法寻优得到最优系统参数 a_1 和 b_1 ,则原系统参数为 a_1 和 b_1 的 m^2 倍。系统参数 a_1 和 b_1 在寻优过程中时刻变化,因此 SGST 自适应 SR 方法总能以最优的系统参数匹配含噪声输入信号,得到最优的系统输出。

1.2 FGST 自适应 SR

在式(1)中若忽略惯性项,且系统为过阻尼系统,则式(1)中起主要作用的是阻尼项。式(1)的过阻尼形式一般写为

$$\frac{dx}{dt} = ax - bx^3 + S(t) + N(t) \quad (5)$$

式(5)即为一阶过阻尼双稳态系统经典 SR 模型。将式(2)代入式(5)中,则式(5)可以写为

$$\frac{dz(\tau)}{d\tau} = \frac{a}{m}z(\tau) - \frac{b}{m}z^3(\tau) + \frac{A}{m} \cos\left(2\pi \frac{f}{m}\tau\right) + \sqrt{\frac{2D}{m}}\xi(\tau) \quad (6)$$

令 $\frac{a}{m} = a_0, \frac{b}{m} = b_0, \frac{A}{m} = A_0, \frac{f}{m} = f_0, \frac{\sqrt{D}}{m} = \sqrt{D_0}$,代入方程(6)中得

$$\frac{dz(\tau)}{d\tau} = a_0z(\tau) - b_0z^3(\tau) + A_0 \cos(2\pi f_0\tau) + \sqrt{2D_0m}\xi(\tau) \quad (7)$$

式(7)即为式(5)的过阻尼双稳态系统一阶普通变尺度形式。一阶过阻尼系统经过普通变尺度后信号频率转变为原频率的 $1/m$,周期信号和高斯白噪声转变为原信号的 $1/m$ 。在 FGST 自适应 SR 方法中仍然通过 QPSO 算法获得最优的系统参数 a_0 和 b_0 ,则原系统参数为 a_0 和 b_0 的 m 倍。FGST 自适应 SR 方法总能以最优的系统参数获得最优的系统输出,以实现轴承故障信号的最优检测。

虽然 SGST 自适应 SR 原理与 FGST 自适应 SR 原理相同,但是数值仿真和实验验证将证明 SGST 自适应 SR 方法在微弱特征信号检测中具有明显的优越性。

笔者采用输出信噪比(signal-to-noise ratio,简称 SNR)作为 QPSO 算法的适应度函数,评价双稳态系统 SR 输出。其定义式^[18]为

$$\text{SNR} = 10 \lg \frac{P_0}{\left(\sum_{i=0}^n P_i - P_0\right)/n} \quad (8)$$

其中: P_0 为特征频率处功率谱; n 为特征频率附近噪声功率谱计算点数; P_i 为各计算点对应的功率谱。

2 数值仿真

为了验证 SGST 自适应 SR 方法检测微弱信号的优越性,选择幅值 $A=0.5$ 、频率 $f=100\text{Hz}$ 的简谐信号作为周期驱动力进行数值仿真。信号处理中

采样频率为 $f_s=10$ kHz, 采样点数为 $N=2\ 000$, 椭圆高通滤波器的阻带频率、通带频率、阻带衰减和通带波纹分别设置为 80, 85 Hz 和 80, 1 dB。SNR 计算点数 n 是以特征频率为中心对称取 40 点。

二阶欠阻尼系统中的阻尼因子通过影响布朗粒子在双稳态系统中的振荡效率进而影响二阶欠阻尼系统输出^[19], 最优的阻尼因子能够使系统输出最优 SNR。图 1 给出了阻尼因子对 SGST 自适应 SR 输出 SNR 的影响曲线。噪声强度 $D=8$, 时间尺度 $m=2\ 000$ 。由图 1 可知, 随着阻尼因子增大, 二阶欠阻尼系统输出 SNR 先增大后减小。在阻尼因子 $\gamma=0.65$ 时, 输出 SNR 最大, 最优的阻尼因子使二阶欠阻尼系统的输出达到最优。

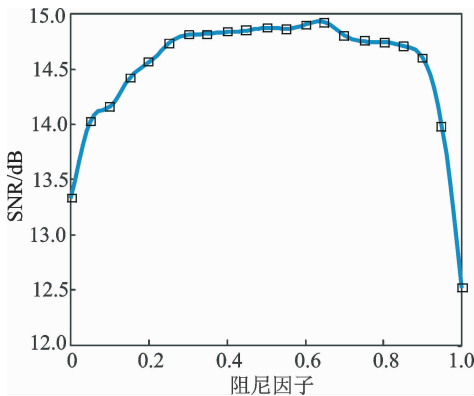


图 1 阻尼因子对输出 SNR 的影响

Fig. 1 Effect of the damping factor on the output SNR

普通变尺度 SR 方法能够满足经典 SR 的要求, 关键在于选择合适的时间尺度 m 。时间尺度 m 取值较小不能满足经典 SR 要求, 并且不能有效激发系统产生 SR 现象, 使系统输出达不到最优; m 取值过大又极易使系统响应发散, 致使特征信息无法成功提取。图 2 给出了 SGST 自适应 SR 输出 SNR 与时间尺度之间的关系曲线。噪声强度 $D=6$, 阻尼

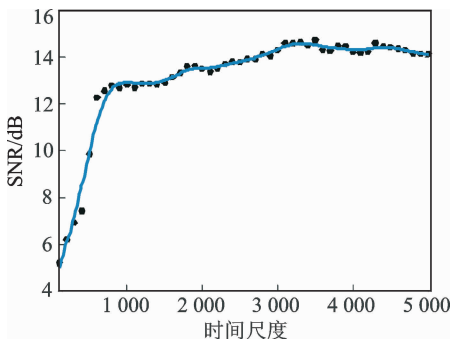


图 2 时间尺度 m 对 SGST 自适应 SR 输出 SNR 的影响

Fig. 2 Effect of the time scale m on the output SNR of the SGST adaptive SR

因子 $\gamma=0.65$ 。图中每个数据点都是经过 20 次平均得到。随着时间尺度 m 增大, SGST 自适应 SR 输出 SNR 先增大后趋于稳定。 $m>3\ 000$ 时系统输出 SNR 变化很小, 二阶欠阻尼系统响应容易发散; $m<1\ 000$ 时系统输出 SNR 变化较大, 二阶欠阻尼系统响应未能有效激发。为了能有效检测强噪声背景中的微弱特征信息, 后续研究中时间尺度 m 在 1 500~3 000 中取值。

SR 现象的出现是由于信号、噪声和非线性系统的相互作用。噪声强度较小时, 系统不能穿越阈值, 信号经过非线性系统不能得到明显的输出结果; 噪声强度较大时, 系统输出由噪声主导, 容易导致低 SNR, 甚至无法检测出微弱特征信息。图 3 给出了 SGST 自适应 SR 方法与 FGST 自适应 SR 方法在不同噪声强度下的输出 SNR 曲线。

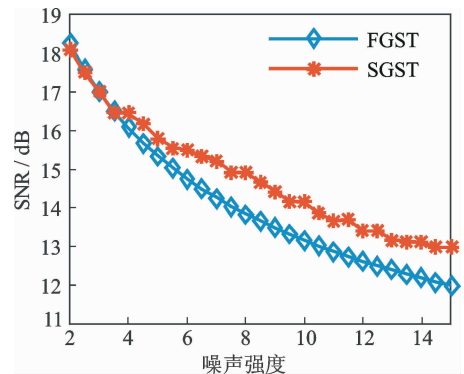


图 3 噪声强度对 FGST 和 SGST 自适应 SR 输出 SNR 的影响

Fig. 3 Effect of the noise intensity on the output SNR of FGST and SGST adaptive SR

图 3 表明随着噪声强度增加, FGST 和 SGST 自适应 SR 输出 SNR 均减小, 且输出 SNR 变化程度较大。噪声强度较小时, SGST 自适应 SR 方法和 FGST 自适应 SR 方法对信号的检测效果基本一致。随着噪声强度增大, SGST 自适应 SR 对微弱信号的检测效果优于 FGST 自适应 SR。这是由于二阶 SR 系统相当于对信号进行了二次滤波处理, 非线性系统中的噪声得到了较好抑制。

图 4 给出了双稳态系统参数对 SGST 自适应 SR 输出 SNR 的影响曲线, 图中每个数据点均是在 a_1 (或 b_1) 取定值时对 b_1 (或 a_1) 20 次寻优平均得到。 $a_1=0.4$ 是影响输出 SNR 的临界点。 $a_1<0.4$ 时, 输出 SNR 随 a_1 增大而减小, a_1 对系统势垒高度起主导作用; $a_1>0.4$ 时, 输出 SNR 不随 a_1 变化而变化, SGST 自适应 SR 系统总能以最优的参数 b_1 匹配 a_1 , 得到最优的输出 SNR, 此时 b_1 对系统势垒高

度起主导作用。参数 b_1 对 SGST 自适应 SR 输出 SNR 的影响与 a_1 恰好相反, $b_1 = 1.6$ 是影响输出 SNR 的临界点。 $b_1 < 1.6$ 时, b_1 对系统势垒高度起主导作用; $b_1 > 1.6$ 时, a_1 对系统势垒高度起主导作用。双稳态系统参数 a_1 和 b_1 对 SGST 自适应 SR 输出 SNR 的影响相反,对于优化算法中系统参数取值范围的选取具有重要的意义。

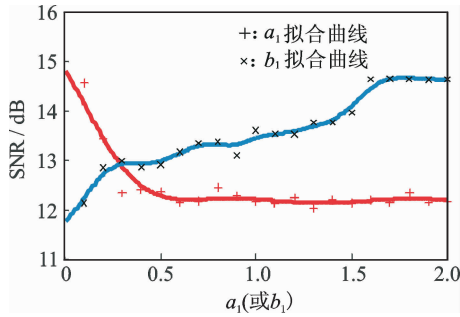


图 4 双稳态系统参数对 SGST 自适应 SR 输出 SNR 的影响
Fig. 4 Effect of the bistable system parameters a_1 and b_1 on output SNR of the SGST adaptive SR

选取噪声强度 $D=6, 8, 10$ 和 12 进一步研究二阶欠阻尼 SR 系统对微弱信号的检测效果,时间尺度 $m=2\ 000$,阻尼因子 $\gamma=0.6$ 。不同噪声强度下 FGST 自适应 SR 输出时域波形与频谱如图 5 所示,信号特征频率峰值突出,但出现在特征频率周围的其他尖峰频率在一定程度上干扰了特征频率的识别检测。不同噪声强度的频谱中特征频率峰值均较

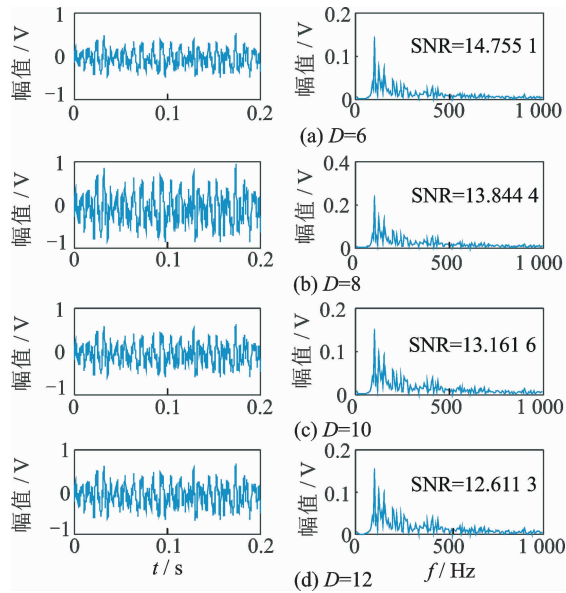


图 5 不同噪声强度下 FGST 自适应 SR 输出时域波形与频谱图

Fig. 5 The output time domain waveforms and spectrums of FGST adaptive SR with different noise intensities

小,图 5 中虽然出现了 SR 现象,但特征频率并未得到有效增强,强噪声环境在一定程度上甚至抑制了特征频率,故 FGST 自适应 SR 方法在提取强噪声背景中微弱特征信息时具有一定的局限性。

不同噪声强度下,相同的特征信号经 SGST 自适应 SR 处理后的时域波形与频谱如图 6 所示。频谱图中信号特征频率峰值异常突出,且在特征频率周围没有其他干扰频率成分。由图 6 可知,特征频率峰值大约是原始信号频率峰值的 3~5 倍,是图 5 中特征频率峰值的 11 倍,SGST 自适应 SR 方法能够明显增强微弱特征信号,提高输出 SNR。对比图 6 和图 5 不同噪声强度下的输出时域波形,不难发现 SGST 自适应 SR 方法能够有效恢复含噪谐波信号。SGST 自适应 SR 方法在微弱信号检测中具有优越性。

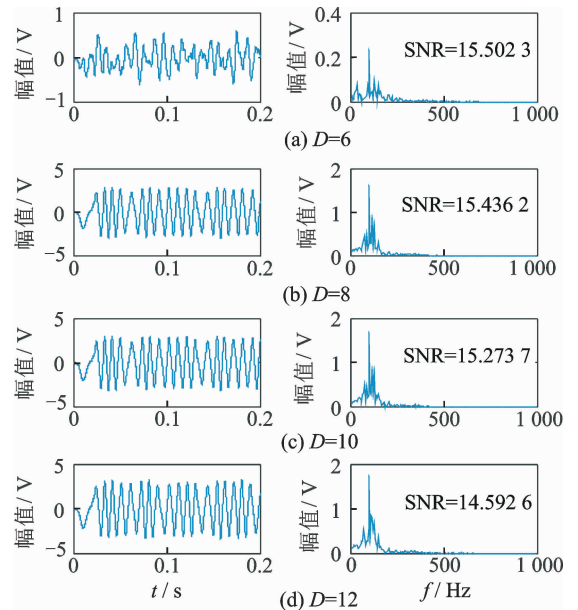


图 6 不同噪声强度下 SGST 自适应 SR 输出时域波形与频谱图

Fig. 6 The output time domain waveforms and spectrums of the SGST adaptive SR with different noise intensities

3 实验验证

本节选择两组轴承故障实验数据验证 SGST 自适应 SR 方法能有效提取强噪声背景中的微弱特征信息。

3.1 实验数据 1

实验数据选自美国西储石油大学滚动轴承故障

实验中心网站^[20]。根据 6205-2RS JEM SKF 深沟球轴承的结构尺寸,计算得到内圈故障频率为 161.7Hz。数据处理中采样频率 $f_s = 12\text{kHz}$ 、采样点数 $N = 120\ 000$,椭圆高通滤波器的阻带频率、通带频率、阻带衰减和通带波纹分别为 158,160Hz 和 158,0.1dB。SNR 计算点数 n 是以特征频率为中心对称取 3 234 点。

在信号处理中采用包络解调、高通滤波等技术对含噪实验信号进行预处理,其目的是提取信号中的调制信息,抑制低频成分对系统输出的干扰。相同的滤波信号经 FGST 自适应 SR 方法和 SGST 自适应 SR 方法处理后的输出频谱分别如图 7 和图 8 所示。时间尺度 $m = 2\ 000$,阻尼因子 $\gamma = 0.53$ 。

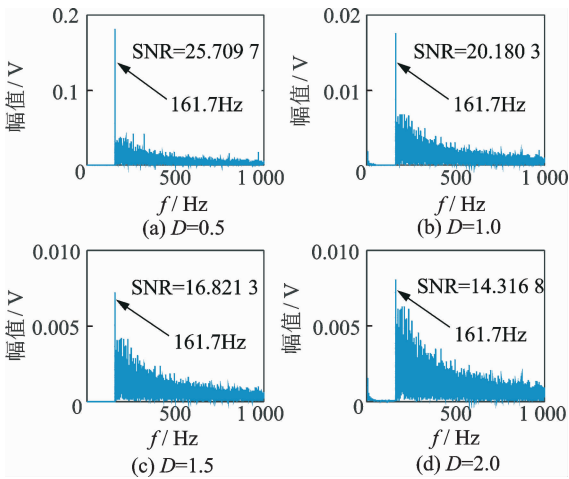


图 7 不同噪声强度下 FGST 自适应 SR 输出频谱
Fig. 7 The output spectrums of FGST adaptive SR with different noise intensities

图 7 表明,FGST 自适应 SR 方法能有效检测轴承故障特征频率,故障特征频率峰值突显,在特征频率周围及高频区域中存在大量未知频率成分,严重干扰了特征频率的检测识别。FGST 自适应 SR 方法未能将高频区域的噪声能量充分转化到特征频率处,对强噪声的抑制和利用能力较差,故障特征频率未得到有效增强。

在图 8 中,相同的滤波信号经 SGST 自适应 SR 方法处理后特征频率峰值异常凸出,在特征频率周围无其他干扰频率成分,且高频区域非常干净。高频区域中的噪声能量充分转化到了特征频率处,特征频率得到明显增强。随着噪声强度增大,SGST 自适应 SR 方法提高特征频率峰值的比例逐渐增大。不同噪声强度下,二阶欠阻尼系统输出 SNR 分别提高了 7.38,6.29,8.51 和 8.71dB。SGST 自适

应 SR 方法能有效利用噪声能量增强微弱特征信息,在提取强噪声背景中的微弱特征信息时有着非常明显的优越性。

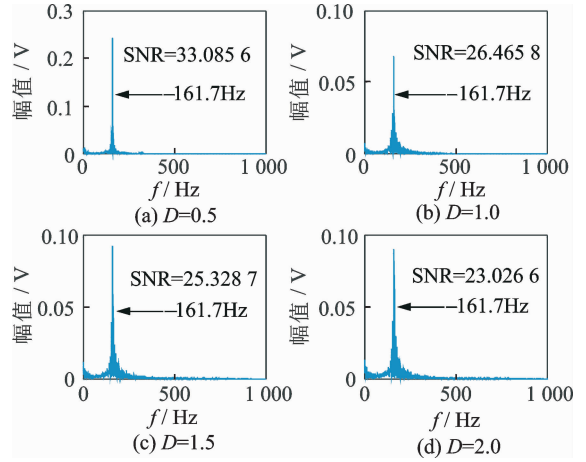


图 8 不同噪声强度下 SGST 自适应 SR 输出频谱
Fig. 8 The output spectrums of SGST adaptive SR with different noise intensities

3.2 实验数据 2

本节采用本单位实验室的轴承故障实验数据进行分析,实验平台如图 9 所示。实验中采用 1A206E 型加速度传感器、YVF2-0L-4 型电动机、NI9234 型采集卡以及磁粉制动器对 NU306E SKF 圆柱滚子故障轴承进行实验。实验中主轴转速为 1 494 r/min,滚动轴承内圈故障频率为 182.1Hz,采样频率 $f_s = 2\ 048\text{Hz}$,采样点数 $N = 20\ 480$ 。椭圆高通滤波器的阻带频率、通带频率、阻带衰减和通带波纹分别为 170,175Hz 和 80,1dB。SNR 计算点数 n 是以特征频率为中心对称取 3 642 点。

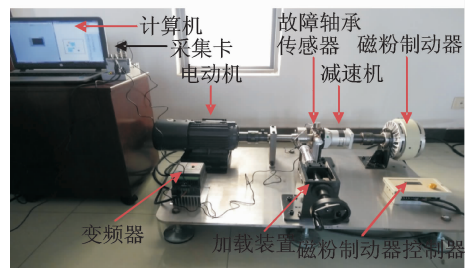


图 9 实验平台

Fig. 9 Experimental platform of the rolling bearing

不同噪声强度下的轴承故障信号经包络解调和高通滤波处理后结果如表 1 所示。时间尺度 $m = 2\ 000$,阻尼因子 $\gamma = 0.55$ 。由表 1 可知,SGST 自适应 SR 方法相比 FGST 自适应 SR 方法能有效检测轴承

故障特征频率。在 SGST 自适应 SR 方法中特征频率处幅值明显增强,高频区域的噪声能量充分转化到特征频率处,二阶欠阻尼系统输出 SNR 显著提高。

SGST 自适应 SR 方法对强噪声的利用能力较强,能够在强噪声背景中有效提取轴承微弱故障特征信息。

表 1 实验数据 2 经由 FGST 自适应 SR 方法和 SGST 自适应 SR 方法处理的结果
Tab. 1 The results of experimental data 2 processed by FGST and SUGST adaptive SR

噪声强度	FGST 自适应 SR		SGST 自适应 SR		频率幅值 增大倍数	提高的 SNR/dB
	频率幅值/V	输出 SNR/dB	频率幅值/V	输出 SNR/dB		
0.001	0.006 7	26.12	0.163 2	31.17	24.36	5.05
0.005	0.005 9	18.13	0.165 1	27.17	27.98	9.04
0.010	0.006 1	14.90	0.107 1	23.66	17.56	8.76
0.050	0.005 7	11.34	0.095 7	21.23	16.79	9.89

4 结束语

基于一阶过阻尼双稳态系统和二阶欠阻尼双稳态系统介绍了普通变尺度方法,通过 QPSO 算法实现了两种系统的自适应 SR,以最优的系统参数和计算步长实现系统的最优输出。讨论了阻尼因子、时间尺度、噪声强度和双稳态系统参数对 SGST 自适应 SR 输出 SNR 的影响,得到了最优的阻尼因子和较好的时间尺度取值范围。随着噪声强度增大,一阶过阻尼和二阶欠阻尼双稳态系统的输出 SNR 均逐渐减小,但 SGST 自适应 SR 输出 SNR 始终优于 FGST 自适应 SR。SGST 自适应 SR 方法能够显著提高系统输出 SNR。二阶欠阻尼 SR 系统对强噪声能量的利用和转化能力优于一阶过阻尼 SR 系统,在轴承故障实验信号检测中具有明显的优越性。笔者提出的 SGST 自适应 SR 方法可以在强噪声背景中有效提取轴承微弱故障特征信息,在工程应用中具有重要的参考价值。

参 考 文 献

[1] 郝如江,卢文秀,褚福磊. 声发射检测技术用于滚动轴承故障诊断的研究综述[J]. 振动与冲击,2008,27(3):75-79.
Hao Rujiang, Lu Wenxiu, Chu Fulei. Review of diagnosis of rolling element bearings defaults by means of acoustic emission technique [J]. Journal of Vibration and Shock, 2008,27(3):75-79. (in Chinese)

[2] 张小栋,谢思莹,牛杭,等. 光纤动态检测技术的研究

与进展[J]. 振动、测试与诊断,2015,35(3):409-416.
Zhang Xiaodong, Xie Siying, Niu Hang, et al. Research and development of optical fiber dynamic detection technology [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015,35(3):409-416. (in Chinese)

[3] Benzi R, Sutera A, Vulpiani A. The mechanism of stochastic resonance [J]. Journal of Physics A General Physics, 1999,14(11):L453-L457.

[4] Gao Shilong, Zhong Suchuan, Wei Kun, et al. Weak signal detection based on chaos and stochastic resonance [J]. Acta Physica Sinica, 2012,61(18):165-83.

[5] Li Qiang, Wang Taiyong, Leng Yonggang, et al. Engineering signal processing based on adaptive step-changed stochastic resonance[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2007,21(5):2267-2279.

[6] Zhang Xiaofei, Hu Niaoqing, Cheng Zhe, et al. Enhanced detection of rolling element bearing fault based on stochastic resonance [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012,25(6):1287-1297.

[7] Tan Jiyong, Chen Xuefeng, Wang Junying, et al. Study of frequency-shifted and rescaling stochastic resonance and its application to fault diagnosis [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2009, 23(3): 811-822.

[8] 冷永刚,王太勇. 二次采样用于随机共振从强噪声中提取弱信号的数值研究 [J]. 物理学报,2003,52(10): 2432-2437.
Leng Yonggang, Wang Taiyong. Numerical research of twice sampling stochastic resonance for the detection of a weak signal submerged in a heavy noise [J]. Acta Physica Sinica, 2003,52(10):2432-2437. (in Chinese)

- [9] Wang Jun, He Qingbo, Kong Fanrang. An improved multiscale noise tuning of stochastic resonance for identifying multiple transient faults in rolling element bearings [J]. *Journal of Sound & Vibration*, 2014, 333(26):7401-7421.
- [10] Zhang Xiaofei, Hu Niaoqing, Hu Lei, et al. Multi-scale bistable stochastic resonance array: a novel weak signal detection method and application in machine fault diagnosis [J]. *Science China Technological Sciences*, 2013, 56(9):2115-2123.
- [11] 雷亚国, 韩冬, 林京, 等. 自适应随机共振新方法及其在故障诊断中的应用[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(7):62-67.
Lei Yaguo, Han Dong, Lin Jing, et al. New adaptive stochastic resonance method and its application to fault diagnosis [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(7):62-67. (in Chinese)
- [12] 焦尚彬, 李鹏华, 张青, 等. 采用知识的粒子群算法的多频微弱信号自适应随机共振检测方法[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(12):1-10.
Jiao Shangbin, Li Penghua, Zhang Qing, et al. Multi-frequency weak signal detection method based on adaptive stochastic resonance with knowledge-based PSO [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(12):1-10. (in Chinese)
- [13] Lei Yaguo, Han Dong, Lin Jing, et al. Planetary gearbox fault diagnosis using an adaptive stochastic resonance method [J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2013, 38(1):113-124.
- [14] 马正木, 靳艳飞. 二值噪声激励下欠阻尼周期势系统的随机共振[J]. *物理学报*, 2015, 64(24):80-86.
Ma Zhengmu, Jin Yanfei. Stochastic resonance in periodic potential driven by dichotomous noise [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(24):80-86. (in Chinese)
- [15] Lu Siliang, He Qingbo, Kong Fanrang. Effects of underdamped step-varying second-order stochastic resonance for weak signal detection [J]. *Digital Signal Processing*, 2014, 36(2015):93-103.
- [16] Guo Yongfeng, Shen Yajun, Tan Jianguo. Stochastic resonance in second-order and underdamped asymmetric bistable system [J]. *Modern Physics Letters B*, 2015, 29(10):1550034.
- [17] 李一博, 张博林, 刘自鑫, 等. 基于量子粒子群算法的自适应随机共振方法研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(16):36-43.
Li Yibo, Zhang Bolin, Liu Zixin, et al. Adaptive stochastic resonance method based on quantum particle swarm optimization [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(16):36-43. (in Chinese)
- [18] Gandhimathi V, Murali K, Rajasekar S. Stochastic resonance in overdamped two coupled anharmonic oscillators [J]. *Physica A Statistical Mechanics & Its Applications*, 2005, 347(347):99-116.
- [19] Du Luchun, Mei Dongcheng. Stochastic resonance, reverse-resonance and stochastic multi-resonance in an underdamped quartic double-well potential with noise and delay [J]. *Physica A Statistical Mechanics & Its Applications*, 2011, 390(20):3262-3266.
- [20] <http://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/pages/download-data-file>



第一作者简介: 黄大文, 男, 1991年9月生, 硕士生。主要研究方向为设备状态监测和故障诊断。

E-mail: dawenhuang@cumt.edu.cn

