

级联三稳态随机共振的特性研究及应用

张 刚 高俊鹏 李红威

(重庆邮电大学信号与信息处理重庆市重点实验室 重庆 400065)

摘 要 针对强噪声环境下存在的微弱信号检测困难的问题,以级联三稳态随机共振系统为研究对象,利用信噪比增益和特征频率的频谱峰值作为判断指标,对三稳态随机共振的特性进行分析。仿真结果验证了通过调节级联三稳态随机共振系统的相关参数,能够获得比单级三稳态随机共振系统更好的随机共振输出特性。此外,针对弱信号在实际的齿轮故障诊断中难以提取的问题,提出级联三稳态随机共振齿轮故障的诊断方法。结果表明,该方法可以有效提取齿轮故障的微弱特征,进而实现齿轮的早期故障诊断,具有广泛的工程应用前景。

关键词 微弱信号检测,级联三稳态随机共振系统,参数调节,故障诊断,齿轮

中图分类号 TN911.23 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.09.023

Research on Stochastic Resonance Characteristics of Cascaded Three-steady-state and Its Application

ZHANG Gang GAO Jun-peng LI Hong-wei

(Chongqing Key Laboratory of Signal and Information Processing, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract In order to solve the problem of weak signal detection difficulties in strong noise environment, using SNR gain and the spectral height of characteristic frequency as the measurement indexes, this paper studied the cascaded tri-stable stochastic resonance system and analyzed its characteristics. The simulation results show that the cascaded tri-stable stochastic resonance system can achieve better output than single-stage tri-stable resonance system through tuning the parameters. In addition, in order to solve the problem that the weak signal in the actual gear fault diagnosis is difficult to extract, this paper proposed a gear fault diagnosis method by using cascaded tri-stable stochastic resonance system. The results show that this method can effectively extract the weak characteristics of gear fault, and realize the early gear fault diagnosis. Therefore, it has a wide range of engineering application prospects.

Keywords Weak signal detection, Cascaded tri-stable stochastic resonance system, Parameter tuning, Fault diagnosis, Gear

1 引言

1981年,意大利科学家 Benzi 等^[1]在研究古气象冰川问题时,提出了随机共振概念。随着这个领域的理论研究的深入,随机共振得到了快速的发展、应用以及推广。学者们相继把随机共振理论引入微弱信号检测领域,使其成为近年来相关领域的研究热点。随机共振系统通过调试系统参数、输入驱动信号周期和噪声,使得三者达到一种协同作用,从而出现随机共振现象^[2-3]。Leng 等^[4]提出了级联双稳态系统理论,并分析了级联双态稳系统的特性,有效拓宽了微弱信号检测的方法。曲媛等^[5]发现在级联双稳态系统随机共振下,在每级系统中加入第二个周期信号后,会出现随机共振的加强现象。赖志慧等^[6]研究了级联双稳 Duffing 系统的随机共振特

性。随着对级联系统的深入研究,其逐步被应用到现实生产和生活中。周玉飞等^[7]将级联双稳态系统提取微弱信号的方法实际运用到轴承故障诊断上,具有十分现实的应用意义。在大参数(大频率、大噪声强度)情况下,由于不能满足绝热近似理论^[1-2],因此采用二次采样的方法^[8-10]。当前对双稳态的研究已比较成熟,且已逐步发展到对三稳态的研究,如赖志慧等^[11]对三稳态系统随机共振进行了初步研究。目前,国内外对于级联方式的三稳态随机共振系统还没有相关研究成果见诸报道。本文在已有的级联双稳态随机共振系统研究成果的基础上,结合了单级三稳态的一些特性,对级联三稳态系统的随机共振特性进行了研究。研究表明:在合适的系统参数条件下,级联三稳态随机共振系统不仅能实现随机共振,而且具有比单级三稳态随机共振更好的随机共振输出特性。同时本

收稿日期:2017-08-09 返修日期:2017-12-15 本文受国家自然科学基金项目(61671095,61371164,61275099),重庆市教育委员会科研项目(KJ1600427,KJ1600429)资助。

张 刚(1976—),男,博士,副教授,主要研究方向为混沌保密通信、微弱信号检测;高俊鹏(1988—),男,硕士,主要研究方向为微弱信号检测, E-mail:752343533@qq.com(通信作者);李红威(1989—),男,硕士,主要研究方向为微弱信号检测, E-mail:752343533@qq.com。

文研究了级数对三稳态随机共振输出特性的影响以及针对大参数的随机共振。将此系统应用到滚动轴承故障诊断中,能很好地实现齿轮的早期故障诊断,具有很高的理论和实用价值。

2 级联三稳态随机共振理论

2.1 随机共振的基础原理

最初在势场中布朗粒子^[12]的轨迹是由 Langevin 方程来描述,其表征了布朗粒子的速度、加速度和随机力三者之间的关系。其运动轨迹方程为:

$$\frac{dx}{dt} + \frac{du(x)}{dx} = s(t) + n(t) \quad (1)$$

其中, $u(x)$ 为势函数, $s(t)$ 表示周期驱动力, $n(t)$ 表示强度为 D 的高斯分布的白噪声,且满足 $\langle n(t) \rangle = 0, \langle n(t)n(t') \rangle = 2D\delta(t-t')$ 。 $u(x)$ 是三稳态势函数,如图 1 所示。取表达式 $u(x) = \frac{1}{2}ax^2 - \frac{1}{4}bx^4 + \frac{1}{6}cx^6$, 其中 $a, b, c > 0$ 。图 1 中有两个不稳定点和 3 个稳定点的非线性三稳态势场,并且形成了被两个势垒分隔开的 3 个势阱。

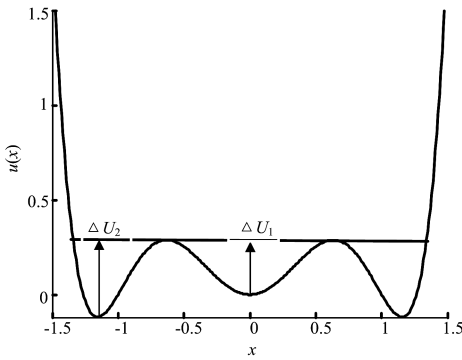


图 1 三稳态势阱函数

Fig. 1 Tri-stable potential function

令 $u'(x) = 0$, 得到式(2), 求出势函数的两个稳定点即两个极小值点, 3 个不稳定点即 3 个极大值点。

$$ax - bx^3 + cx^5 = 0 \quad (2)$$

解得:

$$x_{\min} = \pm \sqrt{\frac{b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2c}} \quad (3)$$

$$x_{\max} = 0, \pm \sqrt{\frac{b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2c}} \quad (4)$$

将上述求解代入势函数 $u(x)$, 可以计算出中间势垒峰值 ΔU_1 和两边势垒峰值 ΔU_2 。

$$\Delta U_1 = U(x_{\max}) - U(0) = \frac{1}{24c^2} [(b^2 - 4ac)^{\frac{3}{2}} + b(b^2 - 6ac)] \quad (5)$$

$$\Delta U_2 = U(x_{\max}) - U(x_{\min}) = \frac{1}{12c^2} (b^2 - 4ac)^{\frac{3}{2}} \quad (6)$$

将 $U'(x)$ 代入式(1), 方程变为有周期驱动信号 $s(t)$ 和噪声信号 $n(t)$ 共同作用的三稳态系统方程:

$$\frac{dx}{dt} = -ax + bx^3 - cx^5 + s(t) + n(t) \quad (7)$$

方程(7)中, 驱动信号、噪声和系统三者达到协同作用时, 噪声在这个非线性三稳态系统中起着积极作用, 使得一部分噪声能量转化到信号能量, 进而信号能量有所增强。假定信号幅值很小 ($A \ll 1$), 在无噪声的前提下, 粒子将处于 3 个势阱中的任意一个势阱, 此时, 系统不足以使粒子从一个势阱跃迁到其余的势阱, 通过施加周期驱动力, 使得粒子能够越过 ΔU_1 和 ΔU_2 势垒峰值, 从而使系统输出形成 3 个势阱间的大范围连续跃迁运动, 出现随机共振现象。

2.2 级联三稳态随机共振特性

如果若干个单个三稳态系统进行串联(见图 2), 则当系统输入为周期驱动信号 $s(t) = a \sin(2\pi f_0 t)$ 和高斯分布白噪声 $n(t)$ 时, 该级联三稳态随机共振系统可表示为:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= -a_1 x_1 + b_1 x_1^3 - c_1 x_1^5 + s(t) + n(t) \\ \frac{dx_2}{dt} &= -a_2 x_2 + b_2 x_2^3 - c_2 x_2^5 + x_1(t) \\ &\dots \\ \frac{dx_n}{dt} &= -a_n x_n + b_n x_n^3 - c_n x_n^5 + x_{n-1}(t) \end{aligned} \quad (8)$$

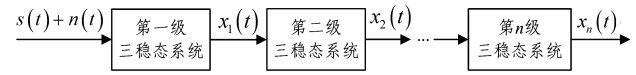


图 2 级联三稳态系统

Fig. 2 Cascaded tri-stable system

当 $n \geq 2$ 时, $x_n(t)$ 不仅仅是上一级三稳态系统的输出, 也是该级三稳态系统的输入。方程组(8)中第 i 个方程是第 i 级的三稳态系统。研究两级级联三稳态系统的随机共振特性, 取信号特征参数幅值 $A = 0.04$, 周期频率 $f_0 = 0.01$ Hz, 噪声强度 $D = 0.2$, 系统参数 $a = 1.05, b = 4.8, c = 4.5$, 系统中的采样频率 $f_s = 5$ Hz, 此时单级三稳态系统的输出达到随机共振, 如图 3 所示, 其中非线性微分方程采用四阶 Runge-Kutta 法进行数值求解。若将单级三稳态系统的输出 $x_1(t)$ 输入到第二级三稳态系统中, 则可得到第二级三稳态系统的输出 $x_2(t)$ 。取第二级系统的参数 $a_1 = 1.05, b_1 = 4.75, c_1 = 4.5$, 得到输出波形图和频谱图(见图 4), 将其与图 3 中的输出波形图和频谱图作对比, 得出第二级系统的检测频率的输出特性优于第一级系统的输出特性。

本节的主要研究对象是两级级联方式, 采用四阶龙格库塔法进行数值仿真。取步长 $h = 0.2$, 仿真模型迭代公式如式(9)所示。该仿真实验分两步: 1) 将 $s(t) + n(t)$ 作为第一级的输入, 调用一次四阶龙格库塔法函数并同时调节系统参数 (a, b, c), 使得随机共振系统在特征频率处能够产生较高的频谱峰值, 达到最佳的第一级随机共振效果, 其算法复杂度为 $O(N)$; 2) 把第一步的最后输出作为第二步的第二级系统输入, 通过第二次调用四阶龙格库塔法函数并调节系统参数, 产生第二级随机共振效果, 其复杂度为 $O(N)$ 。两步骤的算法复杂度相同, 取两者中的较大值, 所以最终的算法复杂度为 $O(N)$ 。因此级联方式的算法复杂度没有提高, 但是对于整个系统而言, 级联方式的输出特征频率的频谱比单级随机共振系统的特征频率的频谱峰值效果更佳。

$$\begin{cases} k_1 = f(x_n, y_n) \\ k_2 = f(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2} k_1) \\ k_3 = f(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2} k_2) \\ k_4 = f(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2} k_3) \\ y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \end{cases} \quad (9)$$

如图3所示,输入信号中的特征频率的峰值较小,其频谱特征不太明显。经过单级三稳态系统后,其频谱中 $f_0 = 0.01$ Hz 处的频谱值 147.8 得到明显的增大,容易在频谱中得到识别。再通过如图4所示的第二级三稳态系统的作用后,该频谱值增加到 325.7,特征频率的可识别性得到进一步增强。通过二级级联的方式说明在合适的参数条件下,级联三稳态系统不仅能实现随机共振,还能获得比单级三稳态系统更好的随机共振输出特性。图中 sn 表示 $s(t) + n(t)$,是信号与噪声的混合信号。

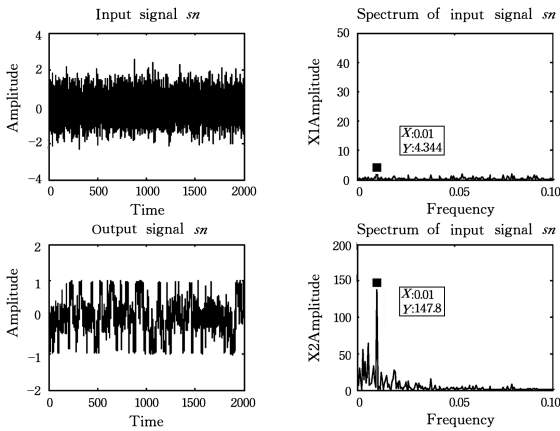


图3 第一级三稳态系统输入 x_1 与输出 x_2 的时域和频谱图的对比

Fig. 3 Comparison of time domain and frequency spectrum of input x_1 and output x_2 of first stage tri-stable system

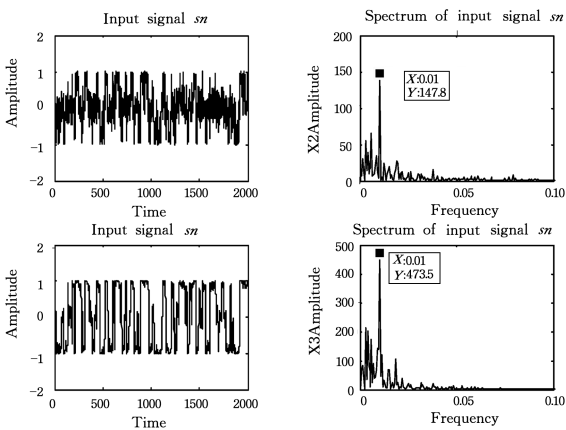


图4 第二级三稳态系统输入 x_2 与输出 x_3 的时域和频谱图的对比

Fig. 4 Comparison of time domain and frequency spectrum of input x_2 and output x_3 of second stage tri-stable system

在小参数条件下,第一级三稳态系统具有随机共振特性,在保证第一级其他参数不变的情况下,调节噪声强度大小,对

第二级三稳态系统进行数值仿真。如图5所示,随噪声强度的增加,第二级三稳态系统的输出信噪比增益先增加后减少,并在某一个最优的噪声强度达到信噪比增益最大,因此第二级三稳态系统也具有随机共振的特性。

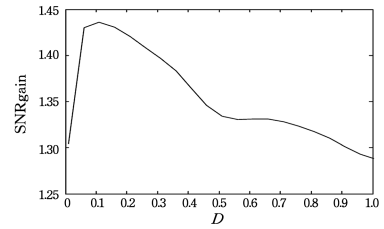


图5 第二级三稳态随机共振系统信噪比增益随输入噪声强度的变化规律

Fig. 5 Variation of signal-to-noise ratio gain of second-stage tri-stable stochastic resonance system with input noise intensity

依据绝热近似理论可知,第一级稳态系统输出的功率谱中主要包含两种成分:1)第一级输入的正弦信号引起的,并且与正弦信号同频;2)由第一级输入高斯白噪声引起的,具有洛伦兹分布形式。虽然第一级的输出包含这两种成分,但是不同于之前的第一级输入形式。每一级的转换条件可以归纳为两个方面。一方面是第一级输出的时域周期波形不再是正弦波形,而是近似于方形波,含有丰富的高频分量;并且由于产生了随机共振现象,其基频时域信号幅值比 $s(t)$ 的幅值更大。另一方面,噪声中的成分不再是高斯白噪声,而是具有洛伦兹分布的色噪声,这些噪声聚集在低频范围内。只有满足这两个条件,通过调节系统参数才可以达到随机共振效果。可以定性分析^[4],第二级稳态系统输入与第一级稳态系统中的最大不同就是噪声成分,即由第一级输入的高斯白噪声变成色噪声,这也是引导功率谱改变的主要原因。而改变第二级稳态系统输入周期信号的类型,只会影响信号频率处的谱高,这是由三稳态系统中周期信号的幅值敏感性所决定的,这也是第一级稳态系统参数和第二级稳态系统参数变化不大的原因,以及第一级的输出峰值比第二级的输出峰值高的原因。

上节具体分析了两级系统通过合适的参数调节可以达到随机共振的现象,并且通过数值仿真验证了多级的三稳态系统比单级的三稳态系统的输出特征频率幅值性能效果好。即第一级达到随机共振的现象,第二级只是对第一级三稳态系统的输出特征信号在频谱幅值方面起到一个增强作用,与此同时,两级级联系统对原始噪声信号的时域波形具有整形滤波特性。本文在第一级三稳态系统未能达到随机共振的情况下,根据输出特征频率值的大小对第二级三稳态系统进行相应的研究。这对以后多个级联系统的相关研究有着非常重要的意义。

本节分析信号频率 f_0 在多个三稳态系统中输出的特征频率峰值的特性。在方程(8)中,取信号频谱 $A = 0.04$, f_0 从 0.01 开始递增至 0.1 结束,步长设为 0.005。取 $D = 0.05, 0.2, 0.3$ 。对两级三稳态系统进行数值仿真,得到 $f_0 - A_m$ 关系曲线图,如图6所示。对3个不同噪声的 $f_0 - A_m$ 曲线进行对比分析。对于任何噪声强度,第一级和第二级三稳态系统输出特征频率的峰值都会在某一个频率点相交。在噪声强度小于最优的噪声强度时,图6(b)的交点 f_0' 比 $D = 0.2$ 时的图6(a)的交点 f_0 频率右移,而在噪声强度大于最优的噪声强度

时,图 6(c)的交点 f_0' 比图 6(a)的交点 f_0 频率左移。因此,在相交前,第二级三稳态系统比第一级三稳态系统输出的特征频率的频谱峰值更大,并且第二级三稳态系统比第一级三稳态系统的峰值减少得更快。而相交之后,第二级三稳态系统输出的特征频率的频谱峰值略小于第一级三稳态系统输出的特征频率的频谱峰值,并趋于一条线。这种现象说明了在第一级未达到随机共振的情况下,第二级三稳态系统并不是总比第一级三稳态系统输出的特征频率的频谱幅值高,而是存在一个频率范围,在这个低频频率范围内才能增强特征频率的峰值强度。由图 6 可以得出结论,频率的范围大小取决于噪声的强度,噪声强度越大,频率范围越大;噪声强度越小,频率范围越小。

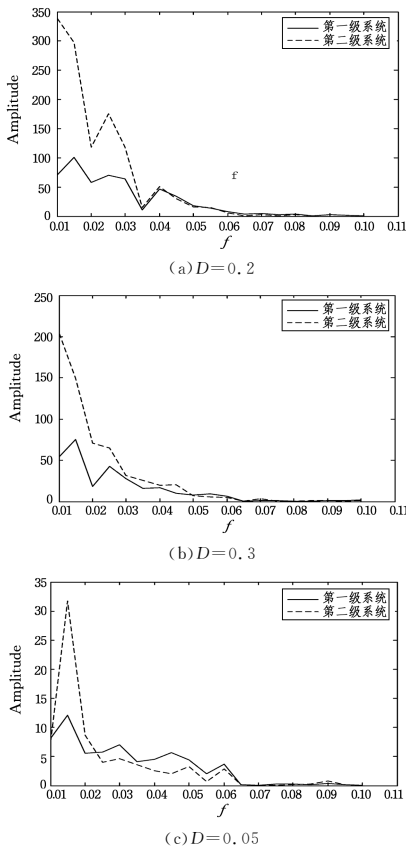


图 6 级联三稳态随机共振系统的输出频率的频谱峰值与信号频率的变化规律

Fig. 6 Variation between peak spectral frequency of cascaded tri-stable stochastic resonance system output and signal frequency

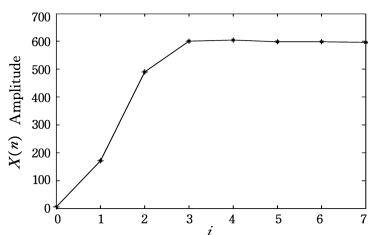


图 7 级联三稳态随机共振系统特征频率的峰值与级数 i 的变化规律
Fig. 7 Variation of the spectral height of characteristic frequency of cascaded tri-stable stochastic resonance system with series number i

下面讨论多级数对于级联三稳态系统输出特性的影响。对于方程组(8),在其他参数不变情况下,取七级三稳态随机

共振系统进行仿真实验。如图 7 所示,第二级到第三级系统的输出频谱峰值增加的倍数相对第一级到第二级的较小,第三级以后,系统的输出频谱峰值基本上趋于一条直线。由此可知,级数的增加不与输出频谱峰值成正比,说明了级数增加并不是越多越好。其原因是第一级输入的高斯白噪声经过第二级的输出噪声变成了具有洛伦兹分布的色噪声,噪声的能量逐步向低频转移,这也说明经过一级三稳态系统的输出特征频率峰值较高。经过多级三稳态系统以后,高频成分已经很少,因此频谱的峰值也就不再增加。

本文以级联三稳态系统为研究对象,驱动周期信号均以正弦信号为基准,以检测级联具有时域波形的滤波整形特性。通过图 4 的第二级的时域输出波形可以看出,在保持图 3 中第一级输出时域波形整体轮廓不改变的条件下,对高频小幅毛刺进行滤除,可使时域波形更加平滑。因此,级联三稳态系统具有整形和滤波的特性。对图 3、图 4 中系统输出的时域波形进行推断可知,由于三稳态系统输出信号具有瞬时跃迁的特性,且这一特性与时域矩形波特性相仿,因此级联三稳态系统可以对时域矩形波进行滤波整形处理。

设置一个幅值为 1、周期为 100 s、占空比为 50% 的周期矩形波,通过傅里叶级数展开,矩形波的表达式为:

$$x(t) = \frac{4}{\pi} \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(2n\pi ft) \right) \quad (10)$$

其中, $f = \frac{1}{T}$, $n = 1, 3, 5, \dots$ 。采用的高斯白噪声强度分别为 $D = 0.2, D = 6$ 。将矩形波与高斯白噪声相混代入方程组(8)所示的级联三稳态系统中,采样频率 $f_s = 25$ Hz, 计算点数 $N = 10000$, 分别通过数值仿真得到 $D = 0.2$ 时的周期方波的整形滤波,如图 8 所示。

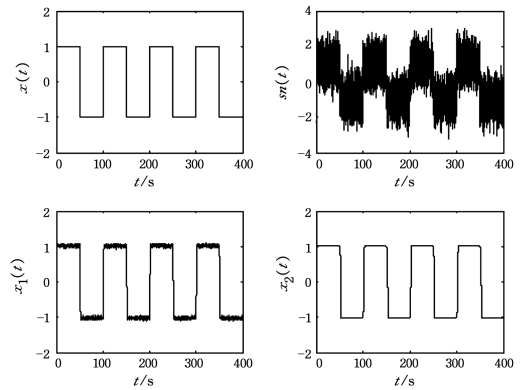


图 8 $D = 0.2$ 时的周期方波的整形滤波

Fig. 8 Periodic square wave shaping filter when $D = 0.2$

第一级三稳态系统输入混合噪声信号 $sn(t)$ 时,输出的信号 $x_1(t)$ 还是以矩形波为主的整体轮廓。通过第二级三稳态系统后,输出的矩形波信号 $x_2(t)$ 与原始矩形波信号 $x(t)$ 十分相似,图 8 说明了经过两级级联之后,输出的矩形波具有非常好的恢复性能,表明级联系统具有整形和滤波特性。随着级数的增加,级联三稳态系统的整形平滑作用变得不太明显,而输出波形由于系统级数的增加而产生延迟效果,反而不利于矩形波形的恢复。对于图 8,分析小噪声下级联三稳态系统对矩形波信号的整形和滤波特性,并在大噪声下对矩形波的滤波整形特征进行下一步研究。图 8 中其他的参数不变,只将噪声强度 D 设为 6,如图 9 所示,信号与噪声混合后,已

经不能分辨混合信号 $sz(t)$ 中的驱动信号的周期性,通过二级级联三稳态系统后,输出波形与原始单纯的矩形波整体轮廓大致一样,十分接近单纯的矩形波信号,这说明强噪声和小噪声下,级联系统具有相同的整形和滤波性能。

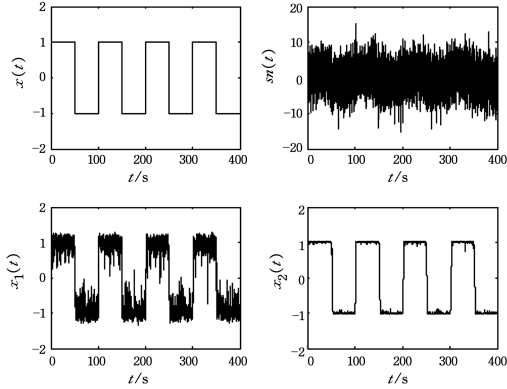


图9 $D=6$ 时的周期方波的整形滤波

Fig.9 Periodic square wave shaping filter when $D=6$

3 大参数级联三稳态随机共振

上文体讨论的是小参数的情况,而在实际的工程实践中,通常处于大参数(大频率、强噪声)的环境中,在这种情况下(大频率、强噪声)下,由于还没有直接处理高频信号的方法,一般采用二次采样的方法^[8-10]。对 $f_0=10\text{ Hz}$, $f_1=20\text{ Hz}$ 两个频率进行尺度变换,二次采样频率 $f_{sr}=5\text{ Hz}$,取样点 10000。迭代步长 $h=0.2$,噪声 $D=0.2$,两个信号频率经过尺度变换 $R=1000$ 后,作为输入的待测信号经过级联三稳态系统,通过调节系统参数达到随机共振,得到特征信号频率值,再按尺度变换 $R=1000$ 进行信号尺度的还原,从而得到实际的特征信号频率值。通过数值仿真,设置级联三稳态系统的参数 $a=a_1=1.05$, $b=4.8$, $b_1=4.35$, $c=c_1=4.5$ 。输出待测信号 $s=0.04\sin(20\pi t)+0.04\sin(40\pi t)$ 。如图 10 所示,在第一级输入频率 10 Hz, 20 Hz 处的频谱峰值分别是 5.53, 7.65。经过第一级后在频率 10 Hz, 20 Hz 处增加到 191.8, 92.42。再如图 11 所示经过第二级后在特征频率 10 Hz, 20 Hz 处增加到 503.8, 204.2。图 10、图 11 中的现象表明了级联三稳态系统对多频信号也具有一样的检测效果。

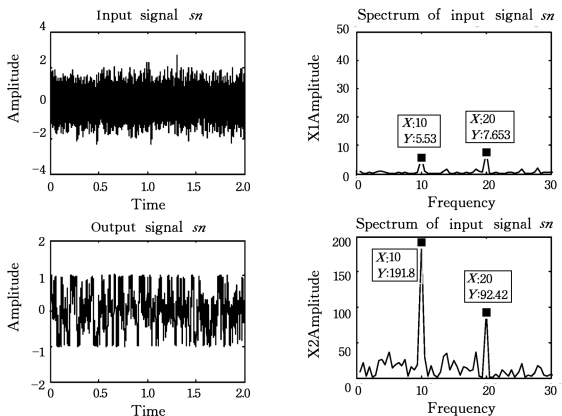


图 10 大参数下第一级级联三稳态随机共振系统输入与输出时域和频域图

Fig.10 In large parameters, first stage cascaded tri-stable stochastic resonance system input and output time and frequency domain

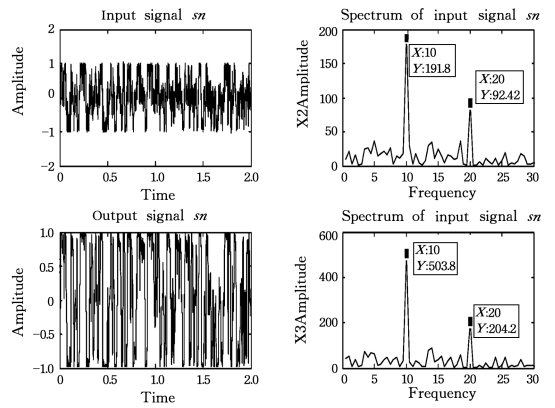


图 11 大参数下第二级级联三稳态随机共振系统输入与输出时域和频域图

Fig.11 In large parameters, second stage cascaded tri-stable stochastic resonance system input and output time and frequency domain

4 实际工程应用

滚动轴承是机械工业不可或缺的一部分,应用范围较广,也是最容易出现故障的部件,因此把级联三稳态系统的特性分析应用到故障诊断中是十分必要的。本节采用的是美国 CWRU(凯斯西储大学)实验平台公布的相关数据,其型号是 6205RS, $r=1796\text{ r/min}$,滚动轴承主要规格信息如表 1 所列。

表 1 滚动轴承主要规格信息

Table 1 Main specifications of rolling bearings

轴承规格	内圈直径/cm	外圈直径/cm	厚度/cm	滚珠直径/cm	节径/cm	滚珠个数/cm	接触角/°
6205RS	2.5001	5.1999	1.5001	0.7940	3.9040	9	0

通过计算,轴承外圈故障频率为 107.3。滚动轴承转速故障频率是大频率,而随机共振理论只在小参数的情况下才能检测出相关的微弱信号。因此首先需要对初始信号进行预处理,本文采用的是二次采样的方法,设置采样压缩比 $R=4500$,二次采样频率为 5 Hz,采样点为 12000。其次利用级联三稳态系统随机共振的原理提取微弱特征频率。最后再利用相关尺度还原得到原始的特征频率。通过龙格库塔法数值仿真,取参数 $a=0.23$, $a_1=2.6$, $b=2.9$, $b_1=4.2$, $c=2.5$, $c_1=3.5$ 进行相关故障频率信号检测,如图 12 所示,在频率 107 Hz 和二倍频 214 Hz 处都有尖峰存在。

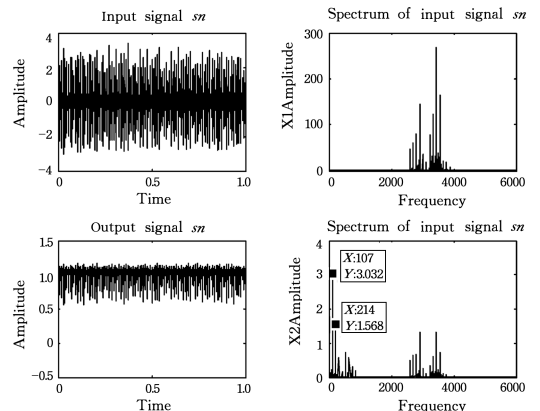


图 12 第一级级联三稳态系统输入与输出时域和频域对比图
Fig.12 Comparison of time domain and frequency spectrum of input and output of first stage tri-stable system

如图13所示,级联三稳态系统107 Hz频率处的峰值增加了0.816,在二倍频214 Hz频率处的峰值增加了0.273。因此将级联三稳态系统应用于滚动轴承诊断,能检测到相关故障频率信号,具有良好的工程应用价值和前景。

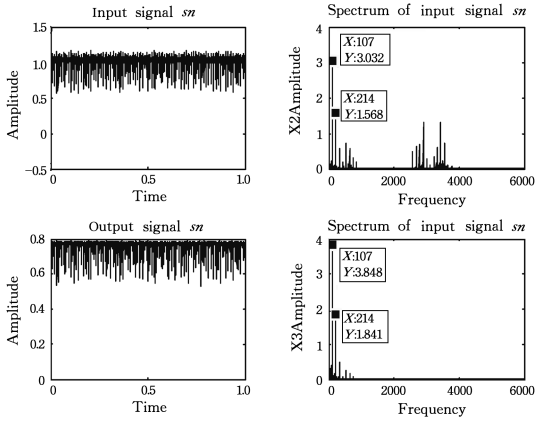


图13 第二级级联三稳态系统输入与输出时域和频域对比图

Fig. 13 Comparison of time domain and frequency spectrum of input and output of second stage tri-stable system

结束语 本文首先对三稳态系统进行了理论分析,然后以级联的方式结合两个三稳态系统,并将其作为研究对象,讨论了小参数下第一级三稳态系统没有随机共振的情况下,第二级三稳态系统的频率特性。研究发现,在一定低频范围内,第一级三稳态系统的输出特征频率的峰值大于第二级三稳态系统的输出特征频率的峰值。超出这个低频范围时,第二级三稳态系统的输出特征频率小于或等于第一级三稳态系统的输出特征频率的峰值。同时,本文分析了级数大小对级联系统的输出特征频率频谱峰值的影响,并且以矩形波为研究对象,通过仿真实验对级联三稳态系统滤波整形特性进行分析验证。最后在大参数情况下,采用了二次采样的方法,对多频大参数信号进行处理和检测,将本文方法实际应用到滚动轴承故障诊断检测中。说明了双级的三稳态系统的检测性能比单级的三稳态系统的检测性能更好。

参考文献

[1] BENZI R, SUTERA A, VULPIANI A. The mechanism of stochastic resonance[J]. Journal of Physics A General Physics, 2015, 14(11): L453.

[2] GAMMAITONI L, HÄNGGI P, JUNG P, et al. Stochastic resonance[J]. Review of Modern Physics, 1998, 70(1): 45-105.

[3] LENG Y G. High frequency resonance mechanism of bistable parametric tuning[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(2): 1-7. (in Chinese)

冷永刚. 双稳态调参高频共振机理[J]. 物理学报, 2011, 60(2): 1-7.

[4] LENG Y G, WANG T Y, GUO Y, et al. Stochastic resonance behaviors of bistable systems connected in series[J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(3): 1118-1125.

[5] QU Y, WANG F Z, SUN J J. Enhancement of stochastic resonance in cascades bistable systems[J]. Chinese Science: Physics, Mechanics, Astronomy, 2011, 41(10): 1190-1197. (in Chinese) 曲媛, 王辅忠, 孙静. 级联双稳系统随机共振的加强[J]. 中国科学: 物理学力学天文学, 2011, 41(10): 1190-1197.

[6] LAI Z H, LENG Y G, FAN S B. Study on stochastic resonance of cascaded bistable Duffing systems[J]. Acta phys Sinica, 2013, 62(7): 61-69. (in Chinese) 赖志慧, 冷永刚, 范胜波. 级联双稳 Duffing 系统的随机共振研究[J]. 物理学报, 2013, 62(7): 61-69.

[7] ZHOU Y F, WANG H J, ZUO Y B. Acquisition of characteristic information of weak faults based on cascaded stochastic resonance system[J]. Journal of Beijing Information Science & Technology University, 2016, 31(3): 32-36. (in Chinese) 周玉飞, 王红军, 左云波. 基于级联随机共振系统的微弱故障信息特征获取[J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版), 2016, 31(3): 32-36.

[8] LENG Y G, LAI Z H, FAN S B, et al. Study on large parameter stochastic resonance and weak signal detection of two dimensional Duffing oscillator[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(23): 230502. (in Chinese) 冷永刚, 赖志慧, 范胜波, 等. 二维 Duffing 振子的大参数随机共振及微弱信号检测研究[J]. 物理学报, 2012, 61(23): 230502.

[9] LENG Y G, WANG T Y. Numerical study of two sampling for stochastic resonance extraction of weak signals from strong noise[J]. Acta Physica Sinica, 2003, 52(10): 2432-2437. (in Chinese) 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.

[10] ZHANG G, HU T, ZHANG T Q. Detection of weak periodic signals with large parameters based on stochastic resonance[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(35): 189-192. (in Chinese) 张刚, 胡韬, 张天骐. 基于随机共振大参数微弱周期信号检测[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(35): 189-192.

[11] LAI Z H, LENG Y G. Dynamic response and stochastic resonance of three stable system[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(20): 200503. (in Chinese) 赖志慧, 冷永刚. 三稳态系统的动态响应及随机共振[J]. 物理学报, 2015, 64(20): 200503.

[12] 胡岗. 随机力与非线性系统[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 1996.