DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2019.04.046

基于混沌理论的滚动轴承故障信号检测

刘彬,戴焕云

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,四川 成都 610031)

摘　要:针对滚动轴承早期故障信号十分微弱的问题,提出采用 Duffing 混沌振子对故障微弱信号进行检测的方法。对 Duffing 方程进行改进,实现对任意频率微弱信号的检测。分析微弱周期信号相位角对检测系统的影响,提出采用多相位混沌振子阵列来消除微弱周期信号相位角对检测系统的影响。通过仿真实验,确定检测系统由 3 个混沌振子构成。使用该检测系统成功检测出轴承外圈故障微弱信号,相比传统的混沌振子检测系统,缩小了检测盲区,提高了检测信噪比。

关键词:Duffing 混沌振子;微弱信号检测;相位角;滚动轴承

中图分类号:TH911.7　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1671-5276(2019)04-0173-03

Weak Fault Signal Detection of Rolling Bearing Based on Chaos Theory

LIU Bin, DAI Huanyun

(State-Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Aiming at the problem that the early fault signal of rolling bearing is very weak, a method of detecting weak fault signal by using Duffing chaotic oscillator is proposed. The Duffing equation is improved, which is used to detect weak signals at any frequency. The influence of the phase angle of the weak periodic signal on the detection system is analyzed, and it is proposed that a multi-phase chaotic oscillator array is used to eliminate the influence of the weak periodic signal phase angle on the detection system. Through simulation experiments, it is determined that the detection system consists of 3 chaotic oscillators. The detection system is used to successfully detect the weak signal of the bearing outer ring. Compared with the detection system consisting of the traditional chaotic oscillator, this system can be used to effectively reduce the detection blind area and greatly improve the detection signal-to-noise ratio.

Keywords: Duffing chaos oscillator; weak signal detection; phase angle; rolling bearing

0　引言

滚动轴承为动车转向架的重要部件之一,也是机械设备中工作条件最为恶劣、最容易损坏的零件[1],其运行状态直接影响到列车的行车安全与稳定。轴承故障发生十分频繁,据统计,在旋转机械设备故障中,滚动轴承故障约为三分之一。如果能在故障发生的初期就将其检测出来,将大大降低故障带来的损失。在列车的实际运行过程中,滚动轴承发生故障初期,其故障信号相对于强烈的背景噪声来说是十分微弱的,使用传统的检测手段很难检测出微弱信号的存在。因此需要一种能有效检测出滚动轴承故障微弱信号的方法。

微弱信号检测技术近年来发展迅速,随着混沌理论的发展,利用 Duffing 混沌振子对微弱周期信号的敏感性及对噪声极强的免疫性,为微弱周期信号的检测提供了新的可能性。1992 年,Donald 对混沌理论用于微弱信号检测做了初步的探讨[2]。之后人们对 Duffing 混沌振子特性做了大量的仿真工作,研究了混沌振子的特性,做了相关改良工作,提高了混沌振子的检测性能[3-6]。任学平对混沌振子的非线性项作出改良,对美国凯斯西大学轴承实验数据进行验证,成功将 Duffing 混沌振子用于滚动轴承故障微弱信号检测[7]。李岭阳通过计算二阶不变矩随策动力幅值的变化来确定阈值,分别检测了轴承外圈、内圈、滚动体故障信号[8]。这些研究表明 Duffing 混沌振子在检测滚动轴承故障微弱信号上有很大的潜力。但是很少有文献考虑故障信号相位角对检测带来的影响。在检测滚动轴承故障信号时,其故障信号的相位角是未知的,而研究表明,故障信号的相位角与系统初始相位差超过一定范围时,将无法检测出故障信号,这就会造成检测系统误判。因此,本文分析了信号相位角对检测系统的影响,采用混沌振子阵列对故障信号进行检测。在保证检测信噪比的情况下,大大提高了检测的成功率与可信度。

1　Duffing 混沌振子系统

1.1　Duffing 方程

Duffing 方程是一类典型的非线性微分方程,本文采

基金项目:国家重点研发计划资助(2016YFB1200506);科技支撑计划(2015BAG13B01-03);牵引动力国家重点实验室自主课题(2015TPL_Z03)

作者简介:刘彬(1992—),男,福建福州人,硕士研究生,研究方向为车辆系统动力学。

用的 Duffing 方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}=y \\ \dot{y}=-ky+x^3-x^5+f\cos(\omega t+\theta) \end{cases} \tag{1}$$

式中:k 为阻尼系数;x^3-x^5 为非线性恢复力;$f\cos(\omega t+\theta)$ 为周期策动力,其中 f 为周期策动力幅值,ω 为策动力频率,θ 为初始相位。

取 $\omega=1$,$\theta=0$,$k=0.5$,改变 f 的值,系统的状态会随着改变。当 $f=0$ 时,系统的相平面鞍点为(0,0),焦点为(1,0)和(-1,0)。逐渐增大 f 的值,当 f 较小时,相轨迹表现为 poincare 映射意义下的吸引子,相点围绕着一个焦点作衰减的周期振荡运动;继续增大 f,相轨迹依次经历同宿轨道、周期倍分叉、混沌状态,系统在混沌状态的时间相对较长;再继续增大 f,当 f 接近某个阈值 f_d 时,系统临近大尺度周期状态,$f<f_d$ 时,系统还处于临界大尺度周期状态,相轨迹如图 1 所示。$f>f_d$ 时,系统立刻进入大尺度周期状态,相轨迹如图 2 所示。

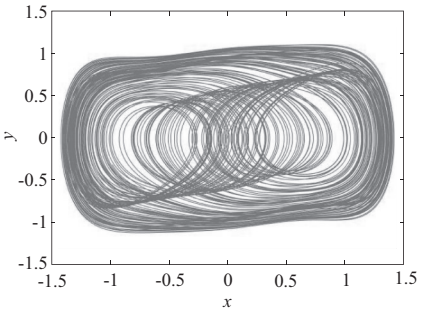


图 1　混沌状态相轨迹图

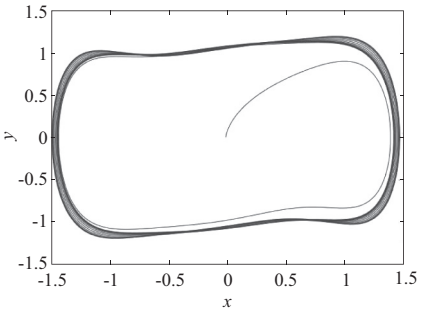


图 2　大尺度周期状态相轨迹图

1.2　Duffing 混沌振子检测原理

Duffing 混沌振子检测原理就是利用了混沌系统对周期策动力幅值 f 的变化,其相轨迹会发生明显改变这一特性。具体做法是将系统预先调整为相轨迹从混沌状态向大尺度周期状态转变的临界状态,即策动力幅值取 f_d,将待测信号加入混沌振子系统中,当待测信号中存在与系统周期策动力同频同相的微弱周期信号时,系统总周期策动力幅值将大于阈值 f_d,相轨迹进入大尺度周期状态,从而检测出微弱信号。当待测信号不存在与系统同频同相的信号时,系统仍为混沌状态。因此,通过判断系统是否进入大尺度周期状态,就能判断待测信号中是否含有微弱周期信号。

系统参数不同,阈值 f_d 也会不同。当混沌振子系统检测不同频率的微弱信号时,为了避免重复计算阈值 f_d,可以将系统作时间尺度上的变换 $t=\omega\tau$,则式(1)变形为:

$$\begin{cases} \dot{x}=\omega y \\ \dot{y}=\omega(-ky+x^3-x^5+f\cos(\omega t+\theta)) \end{cases} \tag{2}$$

式(2)是改进后的 Duffing 方程,这样阈值 f_d 确定之后,改变系统频率 ω 将不会影响阈值,从而实现对任意频率的微弱信号检测。

2　Duffing 混沌振子模型研究

将微弱周期信号 $a\cos(\omega t+\varphi)$ 加入混沌系统中,则系统中的总周期策动力为

$$F(t)=f\cos(\omega t)+a\cos(\omega t+\varphi)=f_2\cos(\omega t+\phi) \tag{3}$$

式中:

$$f_2=\sqrt{f^2+2f\alpha\cos\varphi+a^2} \tag{4}$$

$$\phi=\arctan[a\sin\varphi/(f+a\cos\varphi)] \tag{5}$$

从式(4)可以看出,叠加后总周期策动力幅值 f_2 的取值范围在 $f-a$ 与 $f+a$ 之间,令系统周期策动力幅值 $f=f_d$,则当待测信号中的相位角满足下式

$$-\pi+\arccos[a/(2f)]<\beta<\pi-\arccos[a/(2f)] \tag{6}$$

时,$f_2>f_d$,系统由混沌状态进入大尺度周期状态,否则系统仍保持混沌状态。

实际的微弱信号相位角往往是未知的。若微弱信号与系统周期策动力之间的相位差满足式(6),叠加后的总周期策动力幅值超过系统阈值,则该微弱信号能被检测出;若不满足,则该微弱信号不能检测出。显然,如果只用一个 Duffing 混沌振子来检测实际微弱信号,微弱周期信号可能因为相位角不满足条件而无法被检测出,检测系统的检测范围受到极大的限制。

因此,本文提出在检测实际的信号时,设计多相位混沌振子阵列来进行检测。具体做法是将 2π 区域分成 N 等分,初始相位分别取 0,$2\pi/N$,$4\pi/N$,$6\pi/N$,…,$2(N-1)\pi/N$,设计出 N 个不同相位的混沌振子。在系统周期策动力幅值取 $f=f_d$ 时,N 可取最小值 2,当 $N=2$ 时,初始相位分别为 0 和 π,即两个相位混沌振子阵。当待测信号中的相位角满足

$$-\arccos[a/(2f)]\ll\beta\ll\arccos[a/(2f)] \tag{7}$$

时,0 相位混沌振子进入大尺度周期状态,π 相位混沌振子仍为混沌状态;当待测信号中的相位角满足

$$\pi-\arccos[a/(2f)]\ll\beta\ll\pi+\arccos[a/(2f)] \tag{8}$$

时,π 相位混沌振子进入大尺度周期状态,0 相位混沌振子仍为混沌状态;当待测信号中的相位角均满足式(7)、式(8)时,它处于两个混沌振子交叉区域,此时两个相位混沌振子均进入大尺度周期状态。

因此,当系统周期策动力幅值 $f=f_d$ 时,只要将 2π 区域 2 等分,设计出两个相位的混沌振子,检测信号的相位角就能覆盖到整个 2π 区域。但是 f 的取值很难取到理想的临界阈值,f 与 f_d 差值越大,系统进入大尺度周期的条件就越严格,两个相位的混沌振子的检测范围可能无法覆盖到整个 2π 区域,此时可以增加混沌振子的个数。混沌振子个数越多,两个混沌振子之间的相位间隔就越小,与

微弱周期信号的相位误差就越小,越容易检测出微弱周期信号。混沌振子数量太多的缺点是增加了计算量以及计算时间。

3　仿真实验

根据文献[9],Duffing 混沌振子能检测到的信号信噪比为-111.46 dB。但这是在不考虑相位差时的检测门限。当微弱周期信号与系统的初始相位角存在相位差时,系统能检测到的信噪比将会受到影响。本文采用式(2)设计 Duffing 混沌振子,进行仿真试验,取 $k=0.5$, $\omega=10$, $f=0.725\,616\,118$, $\theta=0$。

设计一个仿真信号

$$S(t)=a\cos(10t+\varphi)+N(t)$$

其中:a 是微弱周期信号幅值;φ 为微弱周期信号相位角;$N(t)$为噪声信号。模型采用四阶龙格库塔算法计算,仿真时间为 100 s,固定步长为 0.001。

仿真步骤如下:

1) 令 $a=0$,仿真信号为纯噪声信号,噪声均值为 0,加入 Duffing 混沌振子系统中,当噪声方差为 10^{-8}时,混沌系统仍保持混沌状态,如图 3 所示。说明混沌系统对噪声的免疫性。

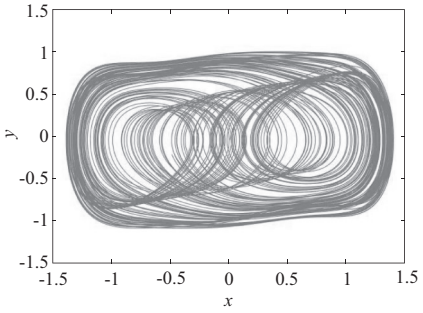


图 3　加入噪声后系统相轨迹图

2)改变微弱信号相位角 φ 的值,使之与混沌系统产生相位差。在每个相位差下,调整微弱信号周期的幅值 a,记录下能使混沌系统产生相变的最低门限。不同相位差下的信号幅值门限以及对应的信噪比如表 1 所示。

表 1　不同相位差的检测门限

相位差	幅值门限	信噪比/dB
0	1.00×10^{-9}	-103.01
π/6	1.17×10^{-9}	-101.65
π/3	2.00×10^{-9}	-96.99
π/2	3.81×10^{-5}	-11.39

从表 1 中可以看出,当相位差相差到 π/2 时,所能检测的信号信噪比大幅降低。如果将 2π 区域 2 等分,即 $N=2$,混沌振子阵列由初始相位分别为 0 和 π 的两个混沌振子组成。虽然混沌振子阵列能覆盖整个 2π 区域的范围,但是微弱信号与混沌振子阵列的最大相位差为 π/2,当相位差较大时,混沌振子阵列检测信噪比将大大降低,很难检测出微弱周期信号。因此,包含两个混沌振子的检测系统显然不适合实际运用。

当微弱周期信号与混沌振子相位差<π/3 时,混沌振子的检测门限以及信噪比相差不大,检测信噪比范围在-96.99 dB~-103.01 dB 之间。因此,本文提出将 2π 区域 3 等分,即 $N=3$,混沌振子阵列由初始相位分别为 0、2/3π、4/3π 的 3 个混沌振子组成,分别记为混沌振子 1、混沌振子 2、混沌振子 3。混沌振子之间相位间隔为2/3π,微弱周期信号与混沌振子的最大相位差为 π/3,即可实现在全 2π 区域内,混沌振子检测的信噪比>-96.99 dB。当 $N>3$,混沌振子的个数增多,增加了不必要的计算量,得到的检测能力提高十分有限。因此,在该参数下的 Duffing 混沌振子阵列取 $N=3$ 最为合适。

4　滚动轴承故障微弱信号检测

将 Duffing 混沌振子阵列用来检测滚动轴承故障微弱信号。本文数据采用牵引动力国家重点实验室振动测试试验台对某一正常轴承以及有外圈故障的轴承进行测试。采样频率为 5 kHz,采样时间为 10 s,轴承外圈转速为 570 r/min,滚动体个数为 17,滚动体直径为 28 mm,轴承节径为 185 mm,接触角为 12.083 33°,通过计算得到此轴承的外圈故障频率为 68.6 Hz。得到外圈故障信号的频域图,如图 4 所示。从频域图中,无法看出外圈故障信号的故障频率存在,使用普通的信号处理手段很难发现故障信号,于是构造 Duffing 振子系统检测信号中的故障频率。

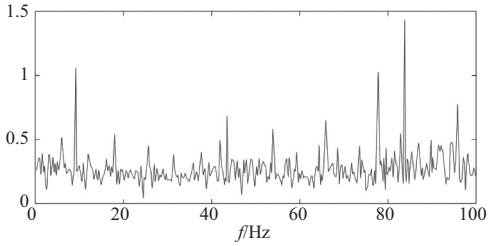


图 4　外圈故障信号频域图

根据上节,设 $N=3$ 时的 Duffing 混沌振子阵列用于检测,系统频率设置为 68.6 Hz。将采集到的正常轴承信号和外圈故障信号作去均值和等比例缩小等预处理后,分别加入 Duffing 混沌振子阵列中进行检测。检测结果如图 5、图 6 所示。图 5 为加入正常轴承信号后混沌振子 1、2、3 的相轨迹图,图 6 为加入轴承外圈故障信号后混沌振子 1、2、3 相轨迹图。

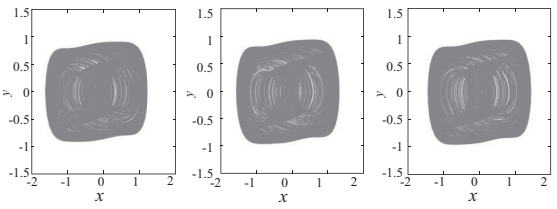


图 5　加入正常轴承信号系统相轨迹图

(下转第 191 页)

道公差　总则》执行。

由于GIL设备要求运输过程中加速度≤3g,这就对轨道平顺性和连续性要求较高,故最优方案就是采用无缝轨道。消除车轮经过轨道接头处,因缝隙而产生的冲击。上述两规范对钢轨接头处允许的最大错位的要求,如表3所示[4-5]。

表3　钢轨接头允许的最大错位

项目	标准要求	
	TB 10082-2017	GB/T 10183-2010
垂直/mm	0.5	1
水平/mm	0.5	1

由表3的对比不难看出TB 10082-2017《铁路轨道设计规范》对钢轨焊接接头的要求更为严格。故钢轨接头焊接要求应遵循此规范。

3　结语

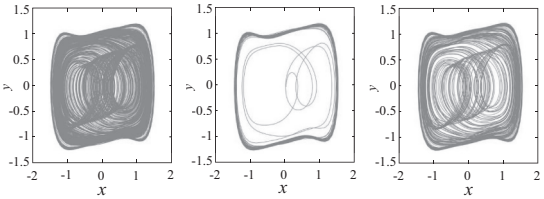
苏通GIL综合管廊轨道的设计工作是整个工程设计工作中一项重要的组成部分,其设计的合理与否将直接关系到轨道施工效率、敷设精度、工程进度。面对国内外尚无可借鉴实例的全新课题,在轨道设计工作中,需要充分发挥创造精神,大胆假设,小心求证,充分论证,确保轨道设计的合理,保证轨道施工的精度,为安全、高效、优质地完成苏通GIL综合管廊工程提供强有力的支撑。

参考文献:

[1] 张质文,王金诺,程文明,等. 起重机设计手册[M]. 北京:中国铁道出版社,2013.
[2] 李成辉,高等学校土木工程专业系列教材·轨道[M]. 第2版. 成都:西南交通大学出版社,2012.
[3] 李超雄,常光辉,曲玉福,等. 高速铁路线路养护维修[M]. 北京:中国铁道出版社,2012.
[4] GB/T10183.1-2010 起重机 车轮及大车和小车轨道公差 总则[S].
[5] TB10082-2017 铁路轨道设计规范[S].

收稿日期:2019-04-29

(上接第175页)



a) 混沌振子1　b) 混沌振子2　c) 混沌振子3

图6　加入外圈故障轴承信号系统相轨迹图

可以看到,当加入正常轴承信号时,3个混沌振子均未发生相变。当加入故障信号时,只有混沌振子2发生相变,说明该混沌振子阵列检测出了轴承中的故障信号。混沌振子1和3并未发生相变,原有故障信号与这两个混沌振子的相位差较大,故障信号幅值与混沌振子周期策动力幅值叠加后的总周期策动力幅值无法使系统产生相变。对比传统的混沌振子系统,其初始相位通常为0。进行检测后,其检测相轨迹图与混沌振子1相仿,系统未发生相变,未检测出故障频率的存在。显然传统的混沌振子系统在检测该故障信号时,有很大的概率无法检测出故障信号,系统检测结果可信度较低,而本文设计的混沌振子能检测出该故障频率,极大地提高了检测概率。

5　结语

利用Duffing混沌振子对微弱周期信号的敏感性以及对噪声的免疫力,实现了对滚动轴承故障微弱信号的检测。研究过程中得出以下结论:

1) 微弱周期信号与混沌系统之间的相位差会影响检测结果,当相位差超过一定限值时,混沌振子将无法检测出微弱周期信号。在系统周期策动力幅值取到理论临界值情况下,设计2个相位的混沌振子就能覆盖到整个检测范围。

2) 在本文使用参数下的Duffing混沌振子,使用3个相位的混沌振子既能保证检测相位覆盖整个2π区域,同时还能保证检测信噪比。

3) 使用3个相位的混沌振子阵列,成功检测出滚动轴承外圈故障微弱信号。该检测系统对于传统的Duffing混沌振子来说,能有效提高检测信噪比,大大减小了微弱信号漏检、误检的几率。Duffing混沌振子在检测滚动轴承故障信号上具有很大的应用前景。

参考文献:

[1] 朱琳,李贵子,雷小亚,等. 基于小波包去噪的循环自相关方法在轴承故障诊断中的应用[J]. 机械制造与自动化,2016,45(2):153-155.
[2] DonaldL. Birx. Chaotic oscillators and Complex Mapping Feed Forward Networks (CMFFNS) for signal detection in noisy environments[C]. IEEE International Joint Conference on Neural Networks, IEEE Conference, 1992,2:881-888.
[3] 朱来普, 张陆勇, 谢文凤, 等. 基于Duffing混沌振子的微弱信号检测研究[J]. 信号与信息处理, 2012, 42(1): 17-20.
[4] 谢涛,魏学业. 混沌振子在微弱信号检测中的可靠性研究[J]. 仪器仪表学报,2008,29(6):1665-1669.
[5] 魏新建. 基于Duffing混沌振子的微弱信号检测方法[D]. 天津:天津大学,2010.
[6] 姜海燕. 基于混沌理论的微弱信号检测系统的研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2011.
[7] 任学平,刘桐桐. 用改进的Duffing理论判断轴承故障的微弱信号[J]. 噪声与振动控制,2014,34(1):173-177.
[8] 李岭阳,王华庆,徐新韬,等. 混沌振子在滚动轴承故障特征提取中的应用[J]. 动力学与控制学报,2016,14(2):177-181.
[9] 李月,杨宝俊,石要武. 色噪声背景下微弱正弦信号的混沌检测[J]. 物理学报,2003,52(3):526-530.

收稿日期:2018-04-10