

文章编号: 1000-8055(2008)12-2219-05

基于互相关和混沌振子阵列的 转子早期碰擦故障检测

郭阳明, 翟正军, 姜红梅, 马捷中
(西北工业大学 计算机学院, 西安 710072)

摘 要: 为了提高早期故障检测的准确性和有效性, 提出了运用互相关去噪和构建混沌振子阵列, 通过阵列扫描实现早期微弱故障的多个特征频率信号检测的方法. 该方法将经过互相关去噪后的信号送入到混沌振子检测阵列中, 让其作为混沌检测系统周期策动力的一部分, 通过混沌检测系统相轨迹变化检测出表征同一微弱故障的多个频率信号. 飞机转子系统早期碰擦故障检测为例验证了该方法的可行性.

关 键 词: 互相关; 混沌振子阵列; 微弱信号检测; 转子碰擦; 故障检测

中图分类号: TP277; TN 911.7; TH113

文献标识码: A

Fault detection of early rotor rub-impact based on cross-correlation and chaos oscillator array

GUO Yang-ming, ZHAI Zheng-jun, JIANG Hong-mei, MA Jie-zhong
(School of Computer Science,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to improve the veracity and effectiveness of the early fault detection, the method of early detection method of weak fault signals with multi-character frequencies was proposed through array scan, by employing cross-correlation for denoising and building chaos oscillators array. In this method, the denoised signals were sent to the chaos oscillator detection array to act as a part of the chaos detection system's periodical driving force, and then the weak fault signals could be detected from the system's phase locus change. Its feasibility is verified by the example of an aircraft rotor system's early rub-impact fault detection.

Key words: cross-correlation; chaos oscillators array; weak signal detection;
rotor rub-impact; fault detection

飞机发动机是飞机的心脏, 它的可靠性和安全性直接影响到飞机的安全性能和飞行. 因此, 及时发现并确诊其早期故障对保障发动机安全可靠工作具有重要意义. 在对发动机转子系统进行早期故障检测时, 由于故障信号非常微弱, 且常被强烈的背景噪声所淹没. 因此, 要实现其早期故障的

检测和诊断, 最重要的工作就是实现在强噪声背景下微弱信号的检测^[1-2].

近年来, 将混沌理论应用于微弱信号检测成为研究的热点, 取得了许多成果. 但是, 这些方法的检测信噪比往往有限, 而且检测信号频率单一. 同时, 远远大于微弱故障信号的强噪声会使混沌

收稿日期: 2007-11-29; **修订日期:** 2008-04-28

基金项目: 国防“十一五”基础研究(B2720060300); 航空科学基金(2007ZD53040); 西北工业大学青年科技创新基金(W016231); 西北工业大学研究生创业种子基金(Z200753).

作者简介: 郭阳明(1978-), 男, 湖北襄樊人, 讲师, 博士生, 主要从事测控技术、智能信息处理、故障诊断与预测的研究.

检测系统的无序增加、系统状态转变门限值提高,亦即使得混沌检测系统状态发生转变的待测周期信号的最低幅值提高,甚至造成检测系统性能严重下降,进而不能很好地完成检测任务。

研究表明,飞机转子系统早期故障往往具有一种故障表征为多个特征信号,同一特征信号还可能反映了不同故障的特点。为了提高故障检测的准确性和有效性,往往需要同时检测表征同一微弱故障的多个特征信号。因此,利用单一混沌振子进行单一微弱信号的检测已不能满足要求。

本文提出将传统的相关去噪与混沌理论相结合,采用混沌振子阵列扫描的方法实现对微弱故障的多个特征频率信号的同时检测,并将该方法应用于转子系统发生早期碰擦时存在 $1/3, 2/3$ 等工频分量的检测,取得了良好效果。

1 互相关去噪原理

由于信号和噪声是相互独立的过程,信号与噪声不相关,同时噪声一般也不相关。相关去噪技术就是应用信号周期性和噪声随机性的特点,选取与噪声中信号有某种相关性的参考信号,通过互相关运算,达到去噪的目的。

互相关去噪原理如图1所示。

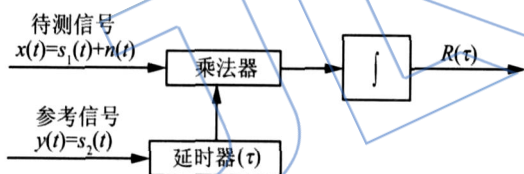


图1 互相关去噪原理图

Fig. 1 Theoretic figure of cross-correlation denoising

设待测信号为 $x(t) = s_1(t) + n(t)$, 选取参考信号 $y(t) = s_2(t)$, 则输出为

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{T/2}^{T/2+\tau} x(t) y(t - \tau) dt = R_{s_1 s_2}(\tau) + R_{s_2 n}(\tau) \quad (1)$$

根据互相关函数性质,若 $T \rightarrow \infty$, 由于信号 $s_2(t)$ 与噪声 $n(t)$ 不相关,且噪声的平均值为零,可得 $R_{s_2 n}(\tau) = 0$, 对于充分大的 τ , 则可以得到 $R(\tau) = R_{s_1 s_2}(\tau)$ 。但是由于积分运算时间 T 以及 τ 都不会无限长,故实际计算的 $R_{s_2 n}(\tau)$ 只是接近于零而不为零,表现为剩余的噪声。

2 微弱信号的混沌振子检测原理

混沌系统对噪声有很强的免疫力,但对微小信号极其敏感,即使幅值很小,也会使混沌系统发

生本质的相变。因此,通过辨识系统相轨迹的转变就可以判断待测信号是否存在。

本文选用 Duffing 振子^[3]建立对微弱正弦信号敏感的混沌检测系统。Duffing 振子方程是一类典型非线性振动方程,在周期外来策动力下的表达式是

$$x'' + kx' + \alpha x^3 + \beta x = \gamma \cos(\omega t) \quad (2)$$

式中 k 为阻尼比; α, β 为实数因子; γ, ω 为周期策动力的幅值和频率。

经推导可得到可检测任意频率周期信号的 Duffing 方程形式如下:

$$x'' + \omega_k x' + \omega^3 (x^3 - x) = \omega \gamma \cos(\omega t) \quad (3)$$

取 $k = 0.5, \omega = 1 \text{ rad/s}$, 可得

$$x'' + 0.5x' + x^3 - x = \gamma \cos(t) \quad (4)$$

在 k 固定的情况下,系统的状态将随 γ 的变化,经历同宿轨道、分叉、混沌、混沌临界和大尺度周期等各个状态。

在通过辨识相轨迹来检测微弱信号时,系统的两个状态的相轨迹相差越大,则模式识别的出错率越低。实验和理论分析发现,系统从混沌状态到大尺度周期状态的相轨迹截然不同。(4)式的混沌状态相轨迹和大尺度周期状态相轨迹分别如图2和图3所示。因此,利用混沌振子进行微弱信号检测,关键是要要求出系统从临界周期状态到大尺度周期状态的 γ 阈值。

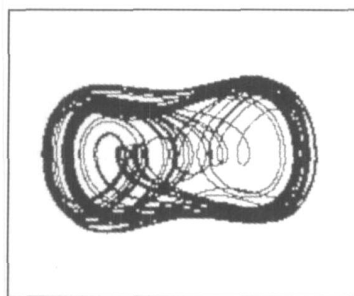


图2 混沌状态相轨迹

Fig. 2 Phase orbit of chaotic state

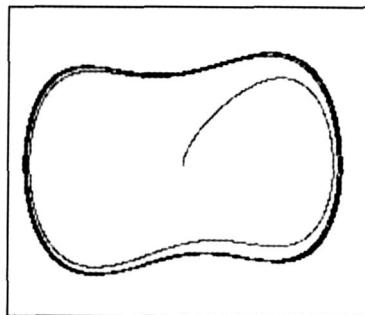


图3 大尺度周期状态相轨迹

Fig. 3 Phase orbit of large scale cycle state

γ 阈值的确定可以先通过 Melnikov 方法^[4]求得理论阈值,再通过仿真来确定.建立(4)式的系统仿真模型,如图 4 所示.

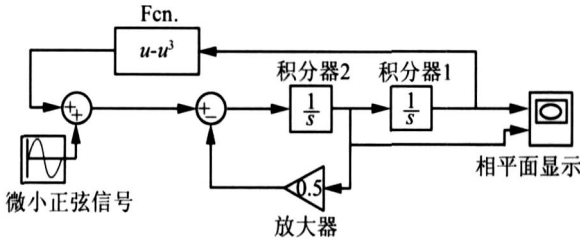


图 4 系统仿真模型

Fig. 4 System simulation model

由 Melnikov 方法求得 γ 的理论阈值为 0.8389809169089.通过仿真实验,可以确定 γ 的阈值为 0.8261507.该阈值确定后,调整系统处于临界状态,加入待测信号.若待检测信号是纯噪声,则混沌系统仍处在混沌状态.若待测信号含有与周期策动力频率相同/相近的周期信号,则混沌系统相轨迹由临界周期状态跃变到大尺度周期状态.

3 基于互相关和混沌振子阵列的微弱信号检测

基于互相关和混沌振子阵列的微弱信号检测原理是:首先将含噪信号经过互相关计算去噪,然后将相关函数送入到混沌振子检测阵列中,让其作为混沌系统周期策动力的一部分,通过混沌系统相轨迹变化可知待检信号中是否含有周期信号了.其基本原理如图 5 所示.

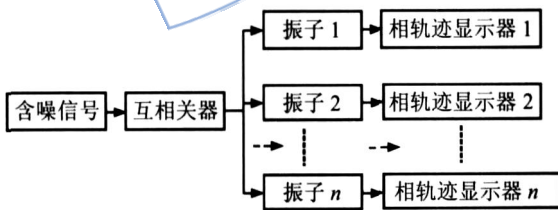


图 5 本文检测方法基本原理图

Fig. 5 Basic theoretic figure of the method proposed

该方法的基本思想是基于以下 3 点:

1) 提高待测信号的信噪比是提高系统检测能力的首要工作,所以,在信号进入 Duffing 振子阵列前要初步去噪.

混有噪声的微弱正弦信号输入到互相关器,经过互相关运算之后,通过前面的理论分析,噪声虽得到了一定的抑制,但是仍然含有噪声.

本文讨论同时存在多个已知频率的待检信号

的情况.设输入为 $x(t) = s_i + n(t) = \sum_i^m a_i \cos(\omega_i t) + n(t)$, m 为信号的个数.

选取参考信号为 $y(t) = s_2(t) = \lambda \sum_i^m \cos(\omega_i t)$, λ 为可变参数,则互相关器的输出为

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{T/2}^{T/2} x(t) y(t - \tau) dt = \sum_{i,j}^m [R_{s_i s_i}(\tau) + R_{s_i n}(\tau) + R_{s_i s_j}(\tau)] \quad (5)$$

其中 $i, j = 1, \dots, m, i \neq j$, $R_{s_i s_i}(\tau) = \frac{\lambda a_i}{2} \cos(\omega_i \tau)$

.将(5)式的 $R(\tau)$ 送入到 Duffing 振子阵列检测系统中.

这里,选择合适的 λ 可以不减小 $R_{s_i s_i}(\tau)$ 的幅值和不提高检测门限,但过大的 λ 会同时提高剩余噪声能量和互相关函数 $R_{s_i s_j}(\tau)$ 的幅值,影响 Duffing 振子的检测性能.

2) Duffing 振子检测系统对噪声有免疫力,且只对 $\omega_{\text{被测}} = \omega_{\text{策动力}} \pm 0.03\omega_{\text{策动力}}$ 的信号非常敏感^[5].因此,送入混沌系统中的信号只有 $R_{s_i s_i}(\tau)$ 能使相轨迹发生变化.

3) 策动力角频率 ω 改变后,混沌振子相轨迹由混沌转为周期状态的阈值并不改变^[4-6].在检测不同频率的待检信号幅值时,只要将仿真模型中有关比例参数稍加改变即可.因此,(3)式和(4)式应具有相同的阈值.

4 实验验证

工程应用发现,转子系统发生早期碰擦时有 1/3, 2/3 工频分量稳定存在这一特征,但幅值微弱,在实际工况下很难将其检测出来.本文在飞机转子系统模拟实验台上对工频为 60 Hz 的转子进行早期碰擦故障模拟实验,检测其中是否含有 1/3 和 2/3 分频信号.

选取参考信号为

$$y(t) = 2(\cos(\omega_1 t) + \cos(\omega_2 t)) \quad (6)$$

其中 $\omega_1 = 2 \times \pi \times 20 \text{ rad/s} = 40\pi \text{ rad/s}$, $\omega_2 = 2 \times \pi \times 40 \text{ rad/s} = 80\pi \text{ rad/s}$.

利用(3)式的 Duffing 振子建立 ω_1 和 ω_2 两个频率下的 Duffing 混沌振子方程如(7)式、(8)式所示.

$$x'' + 40\pi kx' + 1600\pi^2 (x^3 - x) = 40\pi y \cos(40\pi t) \quad (7)$$

$$x'' + 80\pi kx' + 6400\pi^2 (x^3 - x) = 80\pi y \cos(80\pi t) \quad (8)$$

式中 $k = 0.5$. 由以上两个混沌振子构成检测阵列.

采用图 4 所示的仿真模型确定 γ 的阈值, 可得 $\gamma = 0.8261507$. 将振子阵列调整到临界状态.

图 6、图 7 分别是待测原始信号的波形图和功率谱图. 可以看到, 表征碰摩故障的 $1/3$ 和 $2/3$ 分频信号被现场的噪声所淹没, 无法识别.

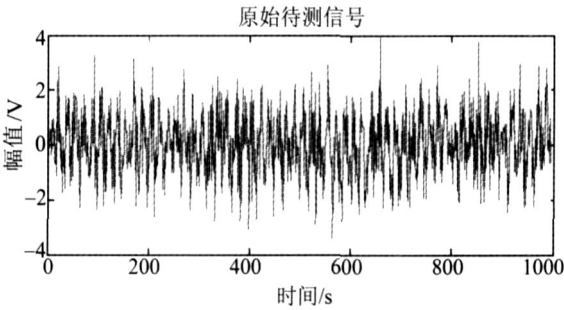


图 6 待测原始信号波形图
Fig. 6 Waveform of original signal

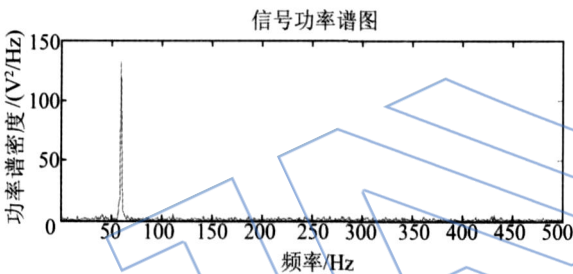


图 7 原始信号的功率谱图
Fig. 7 Power spectrum of original signal

经过相关计算后, 从图 8 所示的功率谱图中可以隐约看到在 20 Hz 和 40 Hz 处有故障特征存在.

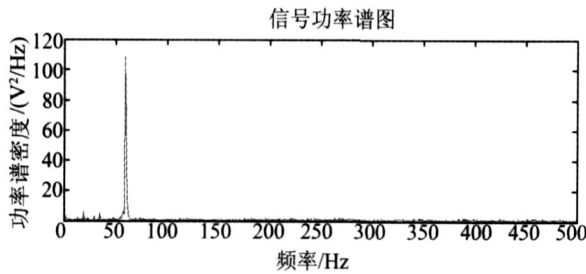


图 8 原始信号相关计算后的功率谱图
Fig. 8 Power spectrum of original signal with cross-correlation computation

ω_1 检测振子和 ω_2 检测振子在待测信号加入前后的相轨迹如图 9~图 11 所示.

由图 9~图 11 可以看出, 加入待测信号后, 相应检测振子的相轨迹发生了明显的变化, 即从

混沌状态跳变到了大尺度周期状态, 说明本文方法有效地检测出待测信号中含有 20 Hz 和 40 Hz 微弱正弦信号, 从而可以更加准确地判断出转子碰擦故障的存在.

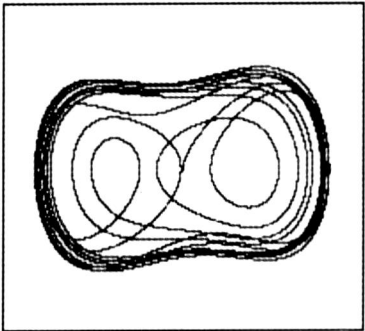


图 9 信号加入前 ω_1 检测振子和 ω_2 检测振子的相轨迹
Fig. 9 Phase orbit of ω_1 detection oscillator and ω_2 detection oscillator without signal introduced

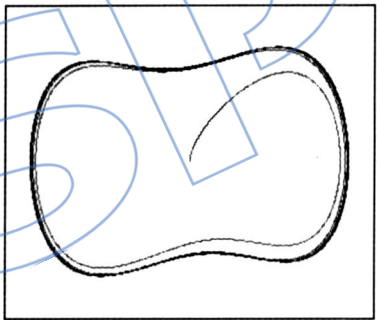


图 10 信号加入后 ω_1 检测振子的相轨迹
Fig. 10 Phase orbit after oscillator detection with signal introduced

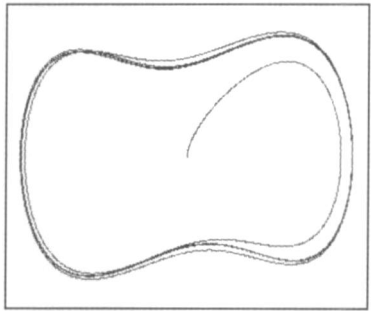


图 11 信号加入后 ω_2 检测振子的相轨迹
Fig. 11 Phase orbit of ω_2 detection oscillator with signal introduced

5 结 论

由于早期故障征兆还没有对系统造成破坏, 多数情况下被强烈的背景噪声所淹没, 且幅值较小, 难以用一般的方法检测出. 因此, 早期的故障

检测的核心工作应是在强噪声背景下,对相对微弱的故障征兆信号进行有效的检测.

论文针对传统混沌检测方法所能检测微弱信号的频率单一、信噪比有限,而且强噪声过大会降低微弱信号混沌检测系统性能,以及飞机转子系统早期故障检测中信号微弱、噪声强烈、多个微弱特征信号频率共存的特点,提出了运用互相关去噪和构建混沌振子阵列,通过阵列扫描来实现对故障的多个特征频率信号的检测,从而达到提高早期故障检测准确率的方法,并以飞机转子系统早期碰擦故障检测为例验证了该方法的可行性和有效性.

该方法简单、直观,检测精度较高,物理意义明确,易于工程实现,有较大的发展潜力.

参考文献:

- [1] 任辉,裴承鸣,贺尔铭,等. 转子碰摩振动响应的非线性时间序列分析[J]. 航空动力学报, 2002, 17(4): 437-441.
REN Hui, PEI Chengming, HE Erming, et al. Nonlinear time series analysis of the rub-impacting rotor vibration response[J]. Journal of Aerospace Power, 2002, 17(4): 437-441. (in Chinese)
- [2] 陈敏,胡葛庆,温熙森. 混沌振子在转子系统早期碰摩故障检测中的应用[J]. 国防科技大学学报, 2001, 23(1): 36-39.
CHEN Min, HU Niaoqing, WEN Xisen. The application of chaotic oscillators in early detecting rub-impact fault of rotor system[J]. Journal of National University of Defence Technology, 2001, 23(1): 36-39. (in Chinese)
- [3] WANG Guanyu. The application of chaotic oscillators to weak signal detection[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2001, 46(2): 440-444.
- [4] 李月,杨宝俊. 混沌振子检测引论[M]. 北京:电子工业出版社, 2004.
LI Yue, YANG Baojun. Introduction to chaotic oscillators detection[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004. (in Chinese)
- [5] 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.
ZHU Zhiyu, JIANG Changsheng, ZHANG Bing, et al. Weak signal detection based on chaotic theory[J]. Journal of Transducer Technology, 2005, 24(5): 65-68. (in Chinese)
- [6] 聂春燕,石要武. 基于互相关检测和混沌理论的弱信号检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(1): 32-35.
NIE Chunyan, SHI Yaowu. The reaserch of weak signal detection based on cross-orrelation and chaos theory[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2001, 22(1): 32-35. (in Chinese)