第41卷 第4期 太 阳 能 学 报 Vol. 41, No. 4
2020年4月 ACTA ENERGIAE SOLARIS SINICA Apr., 2020

文章编号:0254-0096(2020)04-0221-08

分数阶混沌系统风电机组间歇故障成长状态检测

高丙朋，王维庆，蔡 鑫

（新疆大学电气工程学院可再生能源发电与并网技术教育部工程研究中心，乌鲁木齐 830047）

摘 要：风电机组的特殊工况使得对其微小间歇故障的检测十分困难，针对该问题提出一种微小间歇故障成长状态检测方法，通过实验寻找微小间歇故障幅值与大尺度周期状态分数阶混沌系统内置信号振幅之间的关系，计算出不同采样时刻微小间歇故障成长因子的值，进而得到微小间歇故障成长率，以此来表征微小间歇故障的发生、成长乃至最终演变成永久性故障的全过程，微小间歇故障成长率同时也反映故障的严重程度，仿真结果证明该方法可行、可靠。该方法可揭示微小间歇故障发生的内部规律，使间歇故障和永久性故障有机联系在一起，为间歇故障的理论研究提供一个新的思路。

关键词：风电机组；故障检测；混沌系统；分数阶；微弱信号检测

中图分类号：TK83；TM935.2 **文献标志码**：A

0 引 言

近年来，风能已成为可再生能源中增长最快的能源，2018 年全球风力发电总装机容量增长了 9.1%，达到 597 GW[1]，风电机组的机械故障诊断技术是有效降低运行成本的重要手段之一，专家学者在这方面做了许多工作[2-4]。随着对现场设备安全性能要求的不断提高，一种不同于永久故障和瞬态故障的特殊故障即间歇故障（intermittent fault）逐渐引起人们的兴趣。间歇故障是一类持续时间短、可反复出现、未经处理可自行消失的非永久故障[5-6]。间歇故障具有累积效应，系统发生间歇故障的频率会逐渐增加，最终演变成永久故障，从而导致整个系统的失效[5]。然而，大部分间歇故障的前期属于微小故障，以微弱信号的形式淹没于其检测信号中。传统微弱信号检测方法使得有用信号被放大的同时，背景噪声也随之放大，而采用滤波器滤去噪声的同时，信号会有所损失。混沌类微弱信号检测方法充分利用混沌系统具有的初值敏感性、噪声免疫性和非线性放大特性来实现信号检测，可检出信噪比低的微弱信号[7]。此类方法自 20 世纪 90 年代被提出后，很多学者对其展开了深入研究[8]，文献[9-11]主要是对混沌系统检测机理的分析和探讨；文献[12-13]主要是对混沌系统相空间运行轨迹计算和运行状态判定方法的研究；文献[14-16]主要是对构建检测系统应用于工程实际方面的研究；文献[17-19]主要是对频率未知微弱信号检测方法的研究。上述方法受参数设定、相轨迹求解、运行状态判定等因素影响，仍存在检测效率偏低、状态转换易误判等不足。

由于分数阶微分方程很适合刻画具有记忆和遗传性质的过程，对复杂系统的描述具有建模简单、物理参数清楚、描述准确等优势[20-22]，本文将分数阶算子引入混沌检测系统，提出一种基于分数阶混沌系统的风电机组间歇故障检测方法，通过分数阶混沌系统检测混杂在原始信号里的间歇故障信号，并设置其成长因子及相关参数，计算出不同采样时刻微小间歇故障成长因子的值，进而得到微小间歇故障成长率，以此来表征微小间歇故障的发生、成长乃至最终演变成永久性故障的全过程，仿真结果表明该方法可行、可靠，能有效表征微小间歇故障的成长状态。

1 分数阶 Duffing 系统状态变化规律

混沌检测是以混沌系统对参数的敏感性、对噪声的免疫性，周期摄动对混沌的抑制性为基础，从本质上区别于传统的检测方法，也突破了原有限制，达到极低的

收稿日期：2019-01-31
基金项目：国家自然科学基金（51667020）
通信作者：王维庆（1959—）男，硕士、教授、博士生导师，主要从事电力系统自动化和风力机组智能控制方面的研究。wwq59@xju.edu.cn

检测门限[23]，因此利用混沌振子检测微弱周期信号的方法是近年来兴起的一个新的研究方向[24]，考虑到上文中提到的分数阶系统对微弱信号检测具有的独特优势，本文采用分数阶混沌系统对间歇故障进行检测，其中经典的 Duffing-Holmes 方程为：

$$\ddot{x}+k\dot{x}-x+x^3=\gamma\cos(\omega t) \tag{1}$$

对于信号检测混沌系统如果其恢复力项由 $(-x+x^3)$ 改为 $(-x^3+x^5)$ 则方程变为式(2)，构成一个耗散系统[25]。同时为获得更低的检测门限，适当选取系统的分数阶数[20]后，将式(2)转化为式(3)。

$$\ddot{x}+k\dot{x}-x^3+x^5=\gamma\cos(\omega t) \tag{2}$$

$$D^2x+kDx-x^3+x^5=\gamma\cos(\omega t) \tag{3}$$

式中，k ——阻尼系数，取 0.5；D ——一阶微分算子；D^2 ——二阶微分算子。

将分数阶引入方程，将式(3)中的一阶微分算子变成分数阶，得：

$$D^2x+kD^qx-x^3+x^5=\gamma\cos(\omega t),\ 0<q<1 \tag{4}$$

由分数算子的性质可将式(4)转换为含有分数阶的方程组：

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}^qx}{\mathrm{d}t^q}=y\\[2ex]\dfrac{\mathrm{d}^{1-q}y}{\mathrm{d}t^{1-q}}=z\\[2ex]\dfrac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}=\gamma\cos(\omega t)-ky+x^3-x^5\end{cases} \tag{5}$$

采用由 Charef 等[26]研究的图形逼近方法来进行计算，经过比较发现 q 在 0.3~0.6 之间变化时，$q=0.5$ 时的系统临界混沌相图的混沌程度与大尺度周期状态最为接近，由于系统处于临界状态时的混沌程度越高越容易准确判断出系统从混沌向大尺度周期转换的状态，因此本文采用 $q=0.5$ 的分数阶系统作为进行幅值检测的混沌系统[27]，其表达式如式(6)所示。

$$\frac{1}{s^{0.5}}=\frac{s^5+134.3s^4+1072s^3+543.4s^2+20.1s+0.1259}{15.97s^4+593.2s^3+1080s^2+135.4s+1} \tag{6}$$

针对分数阶数 $q=0.5$，$k=0.5$，$\omega=1$ rad/s 的 Duffing 系统，其初值选取 $x=0$，$\dot{x}=0$，当系统内置信号振幅 γ 从小到大发生改变时，系统状态也在周期与混沌状态之间发生有规律的变化。通过多次完整的反复实验发现，0.5 阶 Duffing 系统状态随系统内置信号振幅 γ 从小到大逐渐变化的规律如表 1 所示。

表 1 0.5 阶 Duffing 系统状态随 γ 变化规律

Table 1 0.5 order Duffing system state change rule with γ

序号	γ 取值范围	系统状态
1	(0, 0.12)	周期
2	[0.12, 0.525)	混沌
3	[0.525, 3.61)	大尺度周期
4	[3.61, 4.35)	混沌
5	[4.35, +∞)	准周期

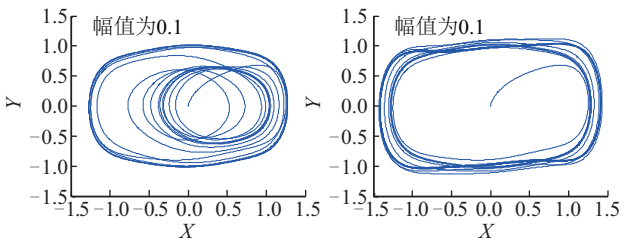
从表 1 可看出，Duffing 系统的周期和混沌状态出现并非连续的，而是间隔出现的，同时 γ 取值对于系统状态的变化很敏感。通过反复实验发现，0.5 阶 Duffing 系统状态在内置信号振幅 γ 从区间[0.12，0.525)的混沌状态发展到区间[0.525，3.61)的大尺度周期状态的相图特征相对比较明显，易于判断。因此，在本文中系统从混沌状态到大尺度周期状态的 γ 临界值取 0.525。

2 信号幅值检测与γ的关系

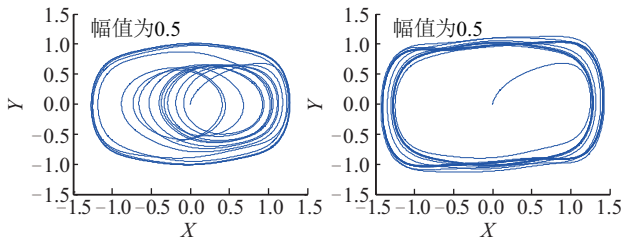
Duffing 系统在混沌状态(系统相轨迹为在一定区域内随机分布的曲线)和大尺度周期状态(系统周期运动的相轨迹为一条封闭的曲线)之间存在一个过渡的临界混沌状态。根据微弱信号混沌检测的原理可先通过调节原混沌系统的参数，使其进入临界混沌状态，然后把待测信号加入该混沌系统，若系统的临界混沌状态发生改变，则可检测微弱信号的存在[28]。

在 Matlab 2014a 中搭建幅值混沌检测方法，即式(6)所示的 Simulink 仿真平台，在实验过程中设置完成采样时间为 100 s，采样周期为 0.01 s，噪声方差为 0.001。当加入 0 均值噪声和被检测信号后，被检测信号幅值从小到大变化时，系统由混沌状态进入大尺度周期状态内置信号振幅 γ 值也随之有规律变化，图 1 为 2 个不同幅值输入信号下的混沌系统相图。

令 A 为输入信号的幅值，γ 为系统内置信号的幅值。从实验中可得出，当输入信号的幅值发生变化时，进入大尺度周期状态的内置信号幅值 γ 也随之变化，



a. $\gamma=0.4775$ 系统混沌相图　　b. $\gamma=0.4776$ 系统大周期相图



c. $\gamma=0.3499$ 系统混沌相图　　d. $\gamma=0.3500$ 系统大周期相图

图1　幅值为1.0、0.5时系统混沌与大周期状态

Fig. 1　Chaos and large periodic state of system at 1.0 or 0.5 AMP

即输入信号的幅值越小，进入大尺度周期状态的内置信号幅值越大，输入信号的幅值越大，进入大尺度周期状态的内置信号幅值越小。详细数据如表2所示。

表2　被检测信号幅值与 γ 值

Table 2　Tested signal amplitudes and γ values

序号	被测信号幅值/V	大尺度周期 γ 值
1	0.01	0.5202
2	0.05	0.5004
3	0.10	0.4776
4	0.15	0.4568
5	0.20	0.4377
6	0.30	0.4040
7	0.40	0.3751
8	0.50	0.3500
9	0.60	0.3281
10	0.70	0.3088
11	0.80	0.2916
12	0.90	0.2763
13	1.00	0.2624

在Matlab 2014a中对表2中的实验数据通过多项式拟合得到被测信号幅值 A 与内置信号幅值 γ 的关系表达式为：

$$A=-23.97\gamma^3+37.88\gamma^2-22.07\gamma+4.611 \quad (7)$$

式中，SSE为0.00005951；R^2 为1；Adjusted R^2 为1；RMSE为0.001575。

若令内置信号幅值 γ 值作为输入，根据式(7)可计算得到拟合函数值，其与实际真实信号幅值之间虽有差异，但也呈现出一定的规律，具体对比及差异数据如表3所示。

表3　拟合函数计算数据与真实值对比

Table 3　Comparison between calculated data of fitting function and real value

序号	被测幅值/V	公式计算幅值/V	绝对误差	相对误差/%
1	0.01	0.0066	0.0034	34.46
2	0.03	0.0280	0.0020	6.57
3	0.05	0.0489	0.0011	2.23
4	0.07	0.0694	0.0006	0.81
5	0.09	0.0895	0.0005	0.52
6	0.11	0.1095	0.0005	0.50
7	0.13	0.1292	0.0008	0.59
8	0.15	0.1489	0.0011	0.73
9	0.17	0.1685	0.0015	0.89
10	0.19	0.1882	0.0018	0.95
11	0.20	0.1981	0.0019	0.97
12	0.30	0.2968	0.0032	1.07
13	0.40	0.3972	0.0028	0.70
14	0.50	0.4991	0.0009	0.18
15	0.60	0.6010	0.0010	0.16
16	0.70	0.7021	0.0021	0.30
17	0.80	0.8020	0.0020	0.25
18	0.90	0.8993	0.0007	0.08
19	1.00	0.9949	0.0051	0.51

由表3可看出，该方法检测出来的幅值与真实值之间的相对误差是收敛的，除第12组数据以外，相对误差从第4组开始均小于1%，产生该现象的原因有2个：1)第1~3组相对误差较大，但其呈收敛的状态，主要是因为待测信号幅值太小，仅为内置信号幅值的1%~5%，由于其数据存在收敛的趋势，故并不影响对故障成长趋势的判断；2)在第12组出现相对误差大于1%的情况，究其主要原因是混沌系统的随机共振引起的，由于其波动幅度较小，并不影响对故障成长趋势的判断。

综上所述，寻找样本输入信号与系统内置信号幅值负相关关系的步骤为：

1)以0.5阶Duffing系统由混沌状态进入到大尺度周期状态的内置信号幅值变化作为输入信号幅值检测的相关依据，记录临界混沌状态时的内置信号幅值 γ_0；

2)将含有噪声的周期信号输入临界状态的Duffing系统中，若信号只含有噪声，则系统的状态不改变，若含

有周期信号，即使其幅值很小，此时系统仍会从混沌状态进入到周期状态，减小 γ_0，使系统重新回到混沌临界状态，此时的内置信号幅值记为 γ_1，若幅值再次变大则重复上述过程，并依次记录下 γ_i（i 为检测幅值的次数）的值；

3）最后通过回归算法找到被测信号幅值与内置信号幅值的负相关关系表达式并检验。

3 间歇故障检测原理

间歇故障不同于永久故障或瞬时故障，它出现的时间短、可重复出现，未经处理又可自行消失。因此，对于这类故障的检测，以传统的基于残差生成机制的检测方法显得力不从心，无法正常检测出该故障[29]。由于间歇故障自身的特点，以传统检测方法很难“抓住”它，也无法实时判断间歇故障的危害程度，只有等到其发展成永久性故障才能检测出来，而此时永久性故障已形成，必然造成系统或机组的损坏。若能在间歇故障发展成永久性故障之前检测出来，并能测量出其发展成永久性故障的状态值，这不仅能大大降低系统维护维修成本，同时还可提高工作效率，而且可改变目前定期维护的工作方式，形成以事件驱动的维护维修方式，不仅解放了人力，也让维护、维修工作变得更加精准。然而永久性故障阈值是判断系统是否产生永久性故障的重要依据，本文充分利用系统故障的先验知识，采用参数均值和标准方差对数据进行处理，得到残差序列的分布规律，以此确定固定频率的永久性故障阈值（即为间歇故障成熟阈值）。

本文提出的间歇故障成长状态检测的原理为：采用当前微小故障检测的原理，检测出混杂在信号源中的间歇故障信息，针对不同的被检测信号，采用式（8）计算故障成熟度函数 G_r。$G_r \in (-100\%, \infty)$，当 $G_r < 0$ 时，系统处于微小故障状态，G_r 值越小间歇故障越小，被检测系统越健康；当 $G_r > 0$ 时，系统发生永久性故障，G_r 值越大永久性故障越严重，对系统的危害也越大。

$$G_r = \left[\frac{A\left(x(k)\right)_{\max}}{F_v} - 1 \right] \times 100\% \tag{8}$$

式中，$x(k)$ ——被检测信号一次采样过程中的第 k 个检测值；A ——故障成长因子；F_v ——间歇故障成熟阈值；$A(x(k))_{\max}$ ——被检测信号每个采样周期内故障成长因子的最大值；由于故障的类型不一而足，A 可根据现场实际情况进行设定，相应的 F_v 与之匹配。

4 间歇故障成熟度检测方法

针对风电机组中的间歇故障或微小故障信号，可采用模型或基于数据的方法测量其频率，然而对于固定频率微小故障成长的主要标志就是微小故障幅值的大小，因此，在本文中令间歇故障的幅值为故障成长因子，当待检测信号的频率一定时，间歇故障成熟度检测步骤为：

1）通过回归算法寻找成长因子 A 与 Duffing 混沌分数阶系统内置信号幅值 γ 之间的关系表达；

2）寻找被检测信号每个采样周期内的最大故障成长因子 $A(x(k))_{\max}$；

3）设定间歇故障成熟阈值（即为永久性故障阈值）F_v；

4）根据式（8）计算成熟度函数 G_r；

5）绘制故障成长曲线；

6）检测结果分析。

该方法是动态的连续过程，既可实现在线检测，也可离线运行。

5 实验仿真

在新疆大学“可再生能源发电与并网技术教育部工程研究中心”实验室，以 10 kW 永磁同步发电机、SKF6205 型滚动轴承和 1 台 15 kW 的三相异步电动机组成永磁风电机组模拟发电系统作为实验平台，如图 2 所示。其中 SKF6205 型深沟球滚动轴承具体参数如表 4 所示。



图2 滚动轴承故障模拟实验平台

Fig. 2 Rolling bearing fault test-bed

在该平台上进行滚动轴承正常运行和 3 次微小故障采样的模拟实验，采集正常运行及各种故障状态下轴承的振动信号。通过电火花技术在轴承上形成单点多次轻微灼伤故障，灼伤直径分别为 0.16、0.18 和 0.21 mm。在转速 $r = 1680$ r/min 下采集正常运行和 3 次滚动体故障的振动数据，以 16 通道数据记录仪和加速度传感器实现振动加速度参量的数据采集，采样频率为 12 kHz。针对 4 种不同状态，从采集信号中各选

取一组长度为 2000 的数据作为样本进行分析，原始振　　动信号波形如图 3 所示。

表 4　SKF6205 型轴承的相关参数

Table 4　Related parameters for SKF6250 bearing

滚动体数量 n/个	接触角 α/(°)	内径 D_n/mm	外径 D_w/mm	节径 D/mm	滚动体直径 d/mm
9	0	25	52	39	8

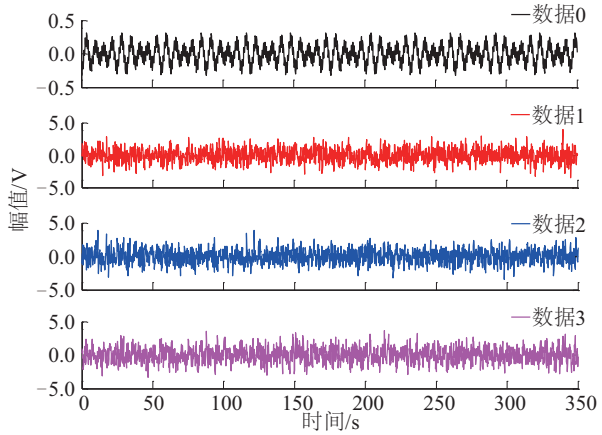


图 3　原始振动信号时域波形图

Fig.3　Original vibration signals time domain wave

图 3 中数据 0~数据 3 分别为轴承正常运行和 3 次微小故障采样数据曲线。由图 4 可知，随着故障程度的加深，检测振动信号时域波形虽有变化，但故障特征信息不是很明显，因此针对采集的正常时域信号，首先通过小波包进行分解，然后再对其进行系数重构，进而完成对 3 次轻微故障信号特征进行分离，波形如图 4 所示。针对 3 次轻微故障采集处理后的信号，加入系统后通过调整 γ 得到系统进入大尺度周期状态的临界值，其系统相轨迹变化如图 5~图 7 所示。

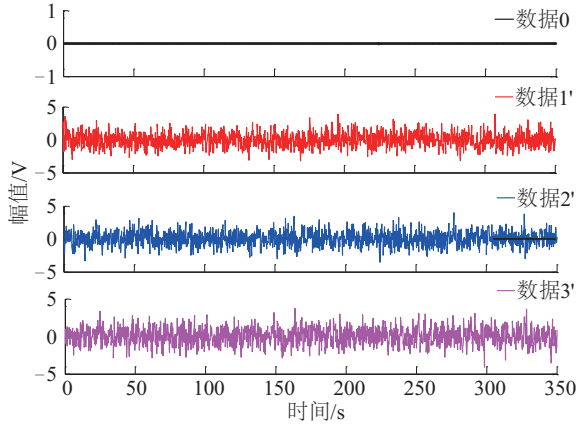
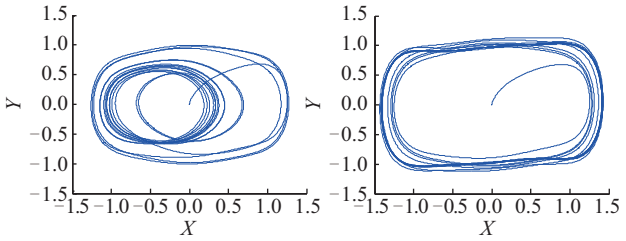


图 4　屏蔽正常信号后的故障信号

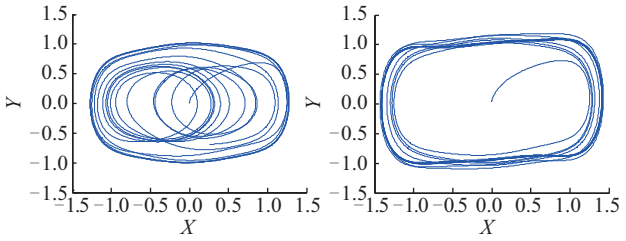
Fig. 4　Fault signal after shielding normal signal



a. $\gamma=0.318476$ 混沌相图　　b. $\gamma=0.318477$ 大周期相图

图 5　第 1 次采样 γ 变化的系统混沌与大周期状态

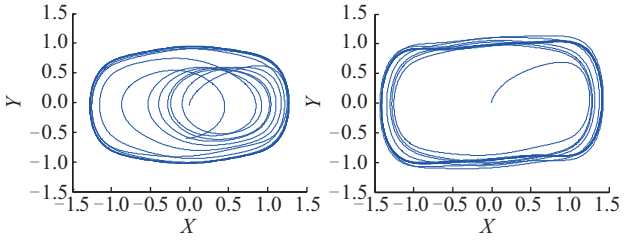
Fig. 5　System chaos and large periodic state of the first sampling with γ change



a. $\gamma=0.309177$ 混沌相图　　b. $\gamma=0.309178$ 大周期相图

图 6　第 2 次采样时 γ 变化的系统混沌与大周期状态

Fig. 6　System chaos and large periodic state of the second sampling with γ change



a. $\gamma=0.300344$ 混沌相图　　b. $\gamma=0.300345$ 大周期相图

图 7　第 3 次采样时 γ 变化的系统混沌与大周期状态

Fig. 7　System chaos and large periodic state of the third sampling with γ change

由图 5~图 7 不难得出，3 次轻微故障采集处理后的信号输入分数阶混沌检测系统后，输出相图从混沌状态进入大尺度周期状态的临界值分别为 $\gamma=0.318477$、0.309178、0.300345；根据式(7)得到其幅值，$A=0.65$、0.70、0.75 。同时，对分离的数据采用信号幅值与故障

阈值的比进行归一化处理，然后通过式(8)计算间歇故障成熟度函数，并绘制其成长曲线，如图 8 所示。图 8 中 1 号线代表故障信号曲线，2 号线代表故障成长函数 G_r 历史曲线，3 号线代表故障警戒阈值 F_v 曲线。

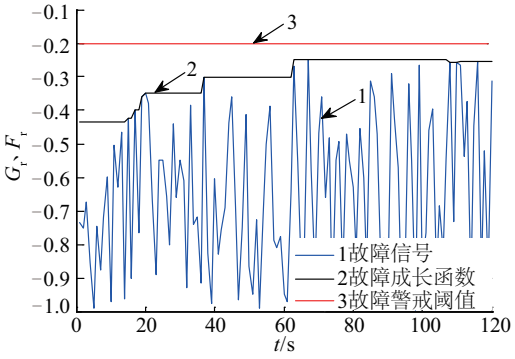


图8 警戒阈值为80%间歇故障成长趋势图

Fig. 8 Intermittent fault growth detection with 80% alert threshold

图 8 中故障成熟度函数值 $G_r<0$，说明间歇故障未达到永久故障的最低阈值，但已接近故障信号警戒阈值的 80%。其中，故障成长曲线体现出故障的发生成长过程及变化激烈程度，通过判断故障成长曲线与故障阈值曲线的关系进而判断该间歇故障的危害程度，同时该数值已通过 G_r 表示出来，即 G_r 既可表征故障成熟度，也可表征故障危害程度。

6 结 论

1)本文提出一种基于分数阶混沌系统的风电机组微小间歇故障检测方法，首先通过分数阶混沌系统检测混杂在现场原始信号里的微小间歇故障信号幅值，定义了故障成熟度函数 G_r，并设置其成长因子及故障阈值参数，计算出微小间歇故障的成熟度，以此监测微小间歇故障成长状态，反映出故障成长的动态趋势。

2)该方法成功将间歇故障和永久性故障联系起来，不仅揭示了故障从发生到成长的发展规律，同时也表征出故障的严重程度。这不仅为人们制定维护维修策略提供了精确的数据支撑，也为进一步研究间歇故障的内部规律提供了一种新思路。

3)本文仅对固定频率的间歇故障检测进行探讨，对于混合间歇故障的检测还有待研究；同时，该方法中间歇故障成熟阈值的确定需系统故障的先验知识，为了动态检测系统间歇故障成长状态，在线自适应间歇故障成熟阈值的确定将是进一步研究的重点。

[参考文献]

[1] Bonn. Wind power capacity worldwide reaches 597 GW, 50, 1 GW added in 2018[EB/OL]. http://wwindea.org/bl-og/2019/02/25/wind-power-600-gw-539-gw-added-in-2018/.

[2] 谭媛，孙文磊，温广瑞，等. 基于EWT-MDS的风力机轴承劣化趋势识别及故障诊断[J]. 太阳能学报，2018，39(12)：3511-3518.
TAN Y，SUN W L，WEN G R，et al. Wind turbine bearing deterioration trend identification and fault diagnosis based on EWT-MDS[J]. Acta energiae solaris sinica，2018，39(12)：3511-3518.

[3] 褚景春，王飞，汪杨，等. 基于故障树和概率神经网络的风电机组故障诊断方法[J].太阳能学报，2018，39(10)：2901-2907.
CHU J C，WANG F，WANG Y，et al. Fault diagnosis method of wind turbine based on fault tree and probabilistic neural network[J]. Acta energiae solaris sinica，2018，39(10)：2901-2907.

[4] 赵洪山，刘辉海. 基于深度学习网络的风电机组主轴承故障检测[J]. 太阳能学报，2018，39(3)：588-595.
ZHAO H S，LIU H H. Fault detection of wind turbine main bear based on deep learning network[J]. Acta energiae solaris sinica，2018，39(3)：588-595.

[5] CORRECHER A，GARCIA E，MORANT F，et al. Intermittent failure dynamics characterization[J]. IEEE transactions on reliability，2012，61(3)：649-658

[6] LIU J X，ZHANG X. Detection method of intermittent faults in electronic systems based on Markov model[C]// Proceedings of the 4th international symposium on computational intelligence and design，Hangzhou，China，2011：216-219.

[7] 李国正，谭南林，苏树强，等. 基于 Lorenz 混沌同步系统的未知频率微弱信号检测[J]. 振动与冲击，2019，38(5)：155-161.
LI G Z，TAN N L，SU S Q，et al. Unknown frequency weak signal detection based on Lorenz chaotic synchronization system[J]. Journal of vibration and shock，2019，38(5)：155-161.

[8] WANG G Y，CHEN D J，LIN J Y，et al. The application of chaotic oscillators to weak signal detection[J]. IEEE transactions on industrial electronics，1999，46(2)：440-444.

[9] 王永生，杜文超，安昕，等. 驱动输入白噪声对Duffing振子运动影响分析[J]. 振动与冲击，2007，26

(3)：131-134.
WANG Y S, DU W C, AN X, et al. Analysis of drive input white noise effect on movement of a Duffing oscillator[J]. Journal of vibration and shock, 2007, 26(3)：131-134.

[10] 吴彦华，马庆力. Duffing振子微弱信号盲检测方法[J]. 系统工程与电子技术，2017，39(11)：2414-2421.
WU Y H, MA Q L. Blind detection method of weak signals with Duffing oscillator[J]. Systems engineering and electronics, 2017, 39(11)：2414-2421.

[11] 孙文军，芮国胜，张驰，等. 混沌检测系统对噪声的免疫性分析及稳健建模[J]. 电子科技大学学报，2017，46(3)：492-497.
SUN W J, RUI G S, ZHANG C, et al. Analysis on noise immunity of chaotic detection system and robustness modeling approach [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2017, 46(3)：492-497.

[12] RASHTCHI V, NOURAZAR M. Detecting the state of the duffing oscillator by phase space trajectory autocorrelation[J]. International journal of bifurcation and chaos, 2013, 23(4)：1350065.

[13] AWREJCEWICZ J, PYRYEV Y. Chaos prediction in the duffing-type system with friction using Melnikov's function[J]. Nonlinear analysis-real world applications, 2006, 7(1)：12-24.

[14] ZHAO Z, WANG F L, JIA M X, et al. Intermittent chaos and cepstrum analysis based early fault detection on shuttle valve of hydraulic tube tester[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2009, 56(7)：2764-2770.

[15] 张伟伟，马宏伟. 利用混沌振子系统识别超声导波信号的仿真研究[J]. 振动与冲击，2012，31(19)：15-20.
ZHANG W W, MA H W. Simulations of ultrasonic guided wave identification using a chaotic oscillator[J]. Journal of vibration and shock, 2012, 31(19)：15-20.

[16] 陈志光，李亚安，陈晓. 基于Hilbert变换及间歇混沌的水声微弱信号检测方法研究[J]. 物理学报，2015，64(20)：200502.
CHEN Z G, LI Y A, CHEN X. Underwater acoustic weak signal detection based on Hilbert transform and intermittent chaos[J]. Acta physica sinica, 2015, 64(20)：200502.

[17] 李国正，张波. 基于Duffing振子检测频率未知微弱信号的新方法[J]. 仪器仪表学报，2017，38(1)：181-189.
LI G Z, ZHANG B. A novel method for detecting weak signal with unknown frequency based on Duffing oscillator[J]. Chinese journal of scientific instrument, 2017, 38(1)：181-189.

[18] LI G Z, ZHANG B. A novel weak signal detection method via chaotic synchronization using Chua's circuit [J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2017, 64(3)：2255-2265.

[19] 孙自强，陈长征，谷艳玲，等. 基于混沌和取样积分技术的大型风电增速箱早期故障诊断[J]. 振动与冲击，2013，32(9)：113-117.
SUN Z Q, CHEN C Z, GU Y L, et al. Incipient fault diagnosis of large scale wind turbine gear box based on chaos theory and sampling integral technology[J]. Journal of vibration and shock, 2013, 32(9)：113-117.

[20] 周薛雪，赖莉，罗懋康. 基于分数阶可停振动系统的周期未知微弱信号检测方法[J]. 物理学报，2013，62(9)：090501-1-12.
ZHOU X X, LAI L, LUO M K. A new detecting method for periodic weak signals based on fractional order stopping oscillation system[J]. Acta physica sinica, 2013, 62(9)：090501-1-12.

[21] 张芷芬，丁同仁，黄文灶. 微分方程的定性理论[M]. 第2版. 北京：科学出版社，1997.
ZHANG Z F, DING T R, HUANG W Z. Qualitative theory of differential equations[M]. Second Edition. Beijing：Science Press, 1997.

[22] 朱位秋. 非线性随机动力系统与控制-Hamilton理论体系框架[M]. 北京：科学出版社，2003.
ZHU W Q. Nonlinear stochastic dynamics and control - Hamilton theory system framework[M]. Beijing：Science Press, 2003.

[23] 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 Y, YANG B J. Introduction to chaotic oscillator detection[M]. Beijing：Electronic Industry Press, 2004.

[24] 王永生，姜文志，赵建，等. 一种Duffing弱信号检测新方法及仿真研究[J]. 物理学报，2008，57(4)：2053-2059.
WANG Y S, JIANG W Z, ZHAO J, et al. A new method of weak signal detection using Duffing oscillator and its simulation research[J]. Acta physica sinica, 2008, 57(4)：2053-2059.

[25] 李月，杨宝俊，林红波，等. 基于特定混沌系统微弱谐波信号频率检测的理论分析与仿真[J]. 物理学报，2005，54(5)：1994-1999.

LI Y, YANG B J, LIN H B, et al. Simulation and theoretical analysis on detection of the frequency of weak harmonic signals based on a special chaotic system [J]. Acta physica sinica, 2005 , 54(5): 1994-1999.

[26] CHAREF A, SUN H H, TSAO Y Y, et al. Fractal system as represented by singularity function [J]. IEEE transactions on automatic control, 1992, 37(9): 1465-1470.

[27] 陈立恺. 混沌系统抗噪声性能及微弱信号检测研究[D]. 广州: 暨南大学, 2017.
CHEN L K. Research on anti-noise performance and weak signal detection of chaotic system [D]. Guangzhou: Ji'nan University, 2017.

[28] 冀常鹏, 郭伟平, 姬红红. 混沌振子微弱未知信号检测方法的改进[J]. 噪声与振动控制, 2013, 33(4): 207-211.
JI C P, GUO W P, JI H H. Improvement of unknown weak-signal detection method based on Duffing chaotic oscillator[J]. Noise and vibration control, 2013, 33(4): 207-211.

[29] 周东华, 史建涛, 何潇. 动态系统间歇故障诊断技术综述[J]. 自动化学报, 2014, 40(2): 161-171.
ZHOU D H, SHI J T, HE X. Review of intermittent fault diagnosis techniques for dynamic systems [J]. Acta automatica sinica, 2014, 40(2): 161—171.

INTERMITTENT FAULT GROWING STATE DETECTION OF CHAOTIC SYSTEM WIND TURBINE BASED ON FRACTIONAL ORDER

Gao Bingpeng, Wang Weiqing, Cai Xin

(*Engineering Research Center of Education Ministry for Renewable Energy Power Generation and Grid Technology, College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi* 830047, *China*)

Abstract: Due to wind turbine working at the special environment, it is very difficult to detect the weak intermittent fault. In order to solve this problem, a kind of weak fault growing state detection method is proposed in this paper. First, the relationship between the amplitude of weak intermittent fault and the built-in signal amplitude of the large scale periodic status in the fractional order chaotic system is found through the experiments. Second, the value of the weak intermittent fault growth factor at the different sampling times can be calculated, and then the weak intermittent fault growth rate can be obtained, which can be used to characterize the weak intermittent fault occurrence, growth, and even the whole process that eventually evolved into a permanent fault. At the same time the weak intermittent fault growth rate also reflects the fault severity. Last, the simulation results show that the method is feasible and reliable. This method reveals the internal law of the weak intermittent fault occurrence, makes intermittent fault link with permanent faults, and provides a new idea for the theoretical research of intermittent fault.

Keywords: wind turbine; fault detection; chaotic system; fractional order; weak signal detection