



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 1710401 B

(45) 授权公告日 2010.09.22

(21) 申请号 200510026878.3

(22) 申请日 2005.06.17

(73) 专利权人 上海宝钢工业检测公司  
地址 201900 上海市宝山区湄浦路 335 号

(72) 发明人 蔡正国

(74) 专利代理机构 上海东亚专利商标代理有限公司 31208

代理人 童素珠

JP 特开平 8-586 A, 1996.01.09, 全文.  
JP 特开平 8-292788 A, 1996.11.05, 全文.  
CN 2643283 Y, 2004.09.22, 全文.  
曹志彤 等. 电机运动系统的混沌特性. 中国电机工程学报 18(5), 1998, 319-322.  
张波 等. 利用 Lyapunov 指数和容量维分析永磁同步电机仿真中的混沌现象. 控制理论与应用 18(4), 2001, 589-592, 596.

审查员 胡金云

(51) Int. Cl.

G01M 19/00 (2006.01)

G01M 7/02 (2006.01)

F04D 27/00 (2006.01)

(56) 对比文件

JP 特开 2003-233601 A, 2003.08.22, 全文.

EP 1533669 A1, 2005.05.25, 全文.

CN 2511565 Y, 2002.09.18, 全文.

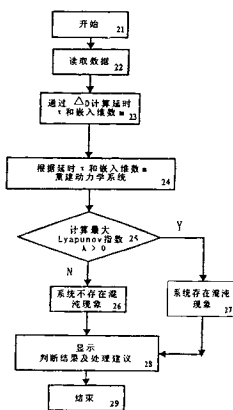
权利要求书 3 页 说明书 11 页 附图 4 页

(54) 发明名称

大型离心风机在线状态监测中的混沌控制方法

(57) 摘要

一种涉及大型离心风机在线状态监测中的混沌控制方法, 尤指一种应用于冶金行业所使用的除尘风机的离心式风机。该装置由电机、轴承座、联轴器、风机、传感器、磁带机、数据采集器及 A/D 转换板等部件组成, 该控制方法包括: 通过选择动力学系统延时常数  $\tau$  的方法, 运行过程中混沌现象的在线监测方法, 对监测风机振动的李雅普诺夫指数的测试方法, 调整风机流量调节阀、压力或者机速参数等。主要解决如何消除混沌产生的高振动值及抑制混沌现象的产生等有关技术问题。本发明的优点是: 可准确预报风机混沌状态的发生, 可以有效识别运行状态的混沌特征, 可以较好地消除混沌产生的高振动值, 有效抑制混沌产生的危害等。



1. 一种大型离心风机在线状态监测的装置,该装置有电机、轴承座、联轴器、风机、传感器、磁带机、数据采集器及 A/D 转换板,其特征在于:电机 (2) 的一侧与电机自由侧轴承座 (1) 相连接,其另一侧与电机负荷侧轴承座 (3) 相连接,风机 (6) 的一侧与风机负荷侧轴承座 (5) 相连接,其另一侧与风机自由侧轴承座 (7) 相连接,电机负荷侧轴承座 (3) 与风机负荷侧轴承座 (5) 之间由联轴器 (4) 相连接;

数据采集器传感器 (8) 的一端安装在电机自由侧轴承座 (1) 上,其另一端与数据采集器 (9) 模块的输入端相连接,数据采集器 (9) 模块的输出端与磁带机 (10) 的输入端相连接,磁带机 (10) 的输出端与 A/D 转换板 (11) 的输入端相连接,A/D 转换板 (11) 的输出端与 PC 机 (12) 的输入端相连接;

各测试点分别位于对应的电机 (2) 和风机 (6) 两侧的轴承座测点。

2. 一种大型离心风机在线状态监测中的混沌控制方法,其特征在于:该控制方法包括:

通过选择动力学系统延时常数  $\tau$  的方法,基于时间序列信息维数大于关联维数的特点,选取信息维数与关联维数的差  $\Delta D$  作为衡量指标,取极小值对应的  $\tau$  作为系统的延时常数,实现风机 (6) 振动信号的最大李雅普诺夫指数计算的延时嵌入法;

通过大型离心风机在运行过程中混沌现象的在线监测方法,采用非线性监测方法,实现准确预报风机 (6) 混沌状态的发生;

通过 PC 机的信号处理,对监测风机 (6) 振动的李雅普诺夫指数的测试方法,识别运行状态的混沌特征,正的李雅普诺夫指数表明风机 (6) 系统发生了混沌,实现克服混沌现象;

通过调整风机 (6) 流量调节阀、压力或者机速参数,改变风机系统的输入,实现消除混沌产生的高振动值及抑制混沌现象的产生;

所述的延时嵌入法算法的具体工作步骤是:

步骤 1. 从时间序列  $\{X_i\}$  中获得状态向量  $Y_i$ :

获得一个  $m$  维状态向量:

对于风机 (6) 振动信号的时间序列  $\{X_i, i = 1, 2, \dots, n\}$  是一个  $n$  维系统中的某一状态输出,给定整数  $m > 1$ ,  $\tau > 0$ ,得到一个  $m$  维状态向量:

$$Y_i = [X_i, X_{i+\tau}, \dots, X_{i+(m-1)\tau}] \quad (1);$$

式中  $i = 1, 2, \dots, k, k = n - (m-1)\tau$  为重构向量的个数; $m$  为嵌入维数; $\tau$  为延时常数,它是一个正整数,表示为相邻两次采样间隔的倍数;

步骤 2. 选取信息维数与关联维数的差作为衡量指标,取极小值对应的  $\tau$  作为系统的延时常数, $m$  作为嵌入维数:

$$I(q, e) = \frac{1}{1-q} \log \left\{ \sum_{e=1}^{N(e)} p(m, e)^q \right\} \quad (2);$$

式中  $P(m, e)^q$  是小盒子  $e$  的度量尺度, $N(e)$  是盒子的数目;

动力学系统维数  $D$  的定义为:

$$D(q) = \frac{I(q, e)}{\log(e)} \quad (3);$$

其中  $q = 0, 1, 2, D(q)$  分别对应于容量维数,信息维数和关联维数,显然,  $D(0) > D(1)$

> D(2) ;

步骤 3. 采用衡量指标  $\Delta D$  极小化确定系统的延时常数  $\tau$  和嵌入维数  $m$  :

$$\Delta D = D(1) - D(2) \quad (4) ;$$

步骤 4. 李雅普诺夫指数计算方法 :

a. 首先找出距离初始点  $Y_0$  最近的点, 用  $C_0$  表示这两点的距离,  $t_i$  时刻,  $C_i$  演化为  $C'_i$ ,  $t_{i+1}$  时刻,  $C_{i+1}$  演化为  $C'_{i+1}$ , 按照  $C'_i$  与  $C_i$  夹角和距离最小的原则搜索新的数据点 ;

b. 完成所有数据点的比较 ;

c. 最大李雅普诺夫指数计算, Lyapunov 指数  $\lambda$  的计算方法为 :

$$\lambda = \frac{1}{t_N - t_0} \sum_{i=1}^N \log_2 \frac{C'(t_i)}{C(t_i)} \quad (5) ;$$

所述的 PC 机的信号处理, 对监测风机 (6) 振动的李雅普诺夫指数的测试方法是 : 首先读取振动信号, 通过判别指标  $\Delta D$  极小化确定系统的延时常数  $\tau$  和嵌入维数  $m$ , 根据  $\tau$  和  $m$  重构动力学系统的时间序列模型, 再计算最大李雅普诺夫指数  $\lambda$ , 包括 : 测试方法和 PC 机的信号处理方法 ; 其中 :

测试方法的具体工作步骤是 :

步骤 1. 数据采集 :

将振动测量仪配置的传感器分别放置在轴承座电机自由侧轴承座 (1)、电机负荷侧轴承座 (3)、风机负荷侧轴承座 (5) 和风机自由侧轴承座 (7) 上, 使用振动测量仪依次测得电机测点 A 和测点 B, 风机两侧测点 C 和测点 D 的振动值, 并加以记录 ;

步骤 2. 振动信号录制 :

将磁带机 (10) 接到振动测量仪的信号输出端上, 依次录制设备的振动波形 ;

步骤 3. 模拟信号转换成数字信号 :

利用磁带机 (10) 的附件 A/D 转换板 (11), 将磁带机 (10) 录制的模拟信号转化为数字信号 ;

步骤 4. 数据处理 :

将振动数字信号加载到 PC 机 (12) 的混沌分析应用程序中, 对风机设备的状态进行识别 ; 其中 :

PC 机的信号处理方法的具体工作步骤是 :

步骤 1. 开始 (21) :

按启动键使计算机程序进入运行状态 ;

步骤 2. 读取数据 (22) :

进入开始 (21) 模块后, 则进入读取数据 (22) 模块 ;

步骤 3. 通过  $\Delta D$  计算延时常数  $\tau$  和嵌入维数  $m$  (23) :

读取数据 (22) 模块的输出信号, 进入到通过  $\Delta D$  计算延时常数  $\tau$  和嵌入维数  $m$  (23) 模块 ;

步骤 4. 根据延时常数  $\tau$  和嵌入维数  $m$  重构动力学系统 (24) :

通过  $\Delta D$  计算延时常数  $\tau$  和嵌入维数  $m$  (23) 模块的输出信号, 进入到根据延时常数  $\tau$  和嵌入维数  $m$  重构动力学系统 (24) 模块 ;

步骤 5. 判断计算最大李雅普诺夫指数  $\lambda$  是否大于 0(25) :

根据延时常数  $\tau$  和嵌入维数  $m$  重构动力学系统 (24) 模块的输出信号, 进入到计算最大李雅普诺夫指数  $\lambda > 0$ (25) 的判断模块 ;

如果  $\lambda > 0$ , 则进入系统存在混沌现象 (27) 模块 ; 如果  $\lambda \leq 0$ , 则进入系统不存在混沌现象 (26) 模块 ;

步骤 6. 显示判断结果及处理建议 (28) :

系统不存在混沌现象 (26) 模块的输出信号, 进入到显示判断结果及处理建议 (28) 模块 ;

系统存在混沌现象 (27) 模块的输出信号, 也进入到显示判断结果及处理建议 (28) 模块 ;

步骤 7. 结束 (29) :

显示判断结果及处理建议 (28) 模块的输出信号, 进入到结束 (29) 模块。

## 大型离心风机在线状态监测中的混沌控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种大型离心风机在线状态监测的装置及其监测中的混沌控制方法，尤指一种应用于冶金行业所使用的除尘风机的离心式风机。

### 背景技术

[0002] 离心式风机主要由叶轮、机壳、导流器、集流器、进气箱以及扩散器等组成。离心式风机的工作原理是叶轮高速旋转时产生的离心力使气体获得能量，即气体通过叶轮后，压能和动能都得到提高，从而能够被输送到远处。外界气体在气压的作用下，源源不断地沿着吸风管向叶轮中心处补充，而已从叶轮获得能量的气体则流入蜗壳内，并将一部分动能转变为压能，然后沿出风管道排出。由于叶轮连续转动，就形成了风机的连续工作过程。对于一些大型风机如烧结主排风机、高炉和焦炉除尘风机等是企业重要的除尘设备，承担了环境保护的重任，如果风机发生非正常停机将不能有效除去生产过程中的杂质，并给环境和安全生产造成重大的影响，因此对大型风机进行状态监测与诊断是确保现代化生产的有效途径。但是在实际运行中，大型离心风机除了产生常见的故障比如不平衡、不对中、转子裂纹、油膜涡动、喘振等外，对于机组呈现频繁报警甚至连锁停机时的故障分析，利用现有的线性分析方法显得力不从心，因此探索风机运行状态的非线性监测方法对于避免大型风机因振动值超标引发的连锁停机具有重要意义。

### 发明内容

[0003] 为了克服上述不足之处，本发明的主要目的旨在提供一种离心风机在线状态监测中的混沌控制方法，该控制方法包括：最大李雅普诺夫指数计算的延时嵌入法，非线性监测方法，对监测风机振动的李雅普诺夫指数的测试方法及调整风机流量调节阀、压力或者机速参数等，能实现消除混沌产生的高振动值及抑制克服混沌现象的产生，实现准确预报风机混沌状态的发生的大型离心风机在线状态监测中的混沌控制方法。

[0004] 本发明要解决的技术问题是：要解决如何通过选择动力学系统延时常数  $\tau$  的方法，取极小值对应的  $\tau$  作为系统的延时常数，实现风机振动信号的最大李雅普诺夫指数计算的延时嵌入法；

[0005] 要解决如何通过大型离心风机在运行过程中混沌现象的在线监测方法，实现准确预报风机混沌状态的发生；

[0006] 要解决如何通过 PC 机的信号处理，对监测风机振动的李雅普诺夫指数的测试方法，实现克服混沌现象；

[0007] 要解决如何通过调整风机流量调节阀、压力或者机速参数，实现消除混沌产生的高振动值及抑制混沌现象的产生等有关技术问题。

[0008] 本发明解决其技术问题所采用的技术方案是：该装置由电机、轴承座、联轴器、风机、传感器、磁带机、数据采集器及 A/D 转换板等部件组成，其电机的一侧与电机自由侧轴承座相连接，其另一侧与电机负荷侧轴承座相连接，风机的一侧与风机负荷侧轴承座相连

接,其另一侧与风机自由侧轴承座相连接,电机负荷侧轴承座与风机负荷侧轴承座之间由联轴器相连接;

[0009] 数据采集器传感器的一端安装在电机自由侧轴承座上,其另一端与数据采集器模块的输入端相连接,数据采集器模块的输出端与磁带机的输入端相连接,磁带机的输出端与 A/D 转换板的输入端相连接,A/D 转换板的输出端与 PC 机的输入端相连接;

[0010] 各测试点分别位于对应的电机和风机两侧的轴承座测点。

[0011] 一种大型离心风机在线状态监测中的混沌控制方法,该控制方法包括:

[0012] 通过选择动力学系统延时常数  $\tau$  的方法,基于时间序列信息维数大于关联维数的特点,选取信息维数与关联维数的差  $\Delta D$  作为衡量指标,取极小值对应的  $\tau$  作为系统的延时常数,实现风机振动信号的最大李雅普诺夫指数计算的延时嵌入法;

[0013] 通过大型离心风机在运行过程中混沌现象的在线监测方法,采用非线性监测方法,实现准确预报风机混沌状态的发生;

[0014] 通过 PC 机的信号处理,对监测风机振动的李雅普诺夫指数的测试方法,识别运行状态的混沌特征,正的李雅普诺夫指数表明风机系统发生了混沌,实现克服混沌现象;

[0015] 通过调整风机流量调节阀、压力或者机速参数,改变风机系统的输入,实现消除混沌产生的高振动值及抑制混沌现象的产生。

[0016] 所述的大型离心风机在线状态监测中的混沌控制方法,所述的延时嵌入法算法的具体工作步骤是:

[0017] 步骤 1. 从时间序列  $\{X_i\}$  中获得状态向量  $Y_i$

[0018] a. 获得一个  $m$  维状态向量

[0019] 对于风机振动信号的时间序列  $\{X_i, i = 1, 2, \dots, n\}$  是一个  $n$  维系统中的某一状态输出. 给定整数  $m > 1, \tau > 0$ , 得到一个  $m$  维状态向量

$$[0020] \quad Y_i = [X_i, X_{i+\tau}, \dots, X_{i+(m-1)\tau}] \quad (1)$$

[0021] 式中  $i = 1, 2, \dots, k, k = N - (m-1)\tau$  为重构向量的个数; $m$  为嵌入维数; $\tau$  为延时常数,它是一个正整数,表示为相邻两次采样间隔的倍数;

[0022] b. 延迟步长  $\tau$  与嵌入相空间维数  $d$  的选取

[0023] 延迟时间  $\tau$  的选择:若太小则两相邻状态空间向量的相关取值会偏大;若当  $\tau$  太大时,由于确定性混沌对初始条件的敏感性,会使相邻状态空间向量间的确定性关系丢失;

[0024] 延迟时间  $\tau$  的选取方法:用的是时间序列自相关系数的过零点来确定  $\tau$  的方法;

[0025] 步骤 2. 选取信息维数与关联维数的差作为衡量指标,取极小值对应的  $\tau$  作为系统的延时常数, $m$  作为嵌入维数

$$[0026] \quad I(q, e) = \frac{1}{1-q} \log \left\{ \sum_{m=1}^{N(e)} p(m, e)^q \right\} \quad (2)$$

[0027] 式中  $P(m, e)^q$  是小盒子  $e$  的度量尺度, $N(e)$  是盒子的数目;

[0028] 动力学系统维数  $D$  的定义为:

$$[0029] \quad D(q) = \frac{I(q, e)}{\log(e)} \quad (3)$$

[0030] 其中  $q = 0, 1, 2$ ,  $D(q)$  分别对应于容量维数, 信息维数和关联维数, 显然,  $D(0) > D(1) > D(2)$ ;

[0031] 步骤 3. 采用衡量指标  $\Delta D$  极小化确定系统的延时常数  $\tau$  和嵌入维数  $m$

$$[0032] \quad \Delta D = D(1) - D(2) \quad (4)$$

[0033] 步骤 4. 李雅普诺夫指数计算方法

[0034] a. 首先找出距离初始点  $Y_0$  最近的点, 用  $C_0$  表示这两点的距离,  $t_i$  时刻,  $C_i$  演化为  $C'_i$ ,  $t_{i+1}$  时刻,  $C_{i+1}$  演化为  $C'_{i+1}$ , 按照  $C'_i$  与  $C_i$  夹角和距离最小的原则搜索新的数据点;

[0035] b. 完成所有数据点的比较

[0036] c. 最大李雅普诺夫指数计算 Lyapunov 指数  $\lambda$  的计算方法为:

$$[0037] \quad \lambda = \frac{1}{t_N - t_0} \sum_{i=1}^N \log_2 \frac{C'(t_i)}{C(t_i)} \quad (5)$$

[0038] 所述的大型离心风机在线状态监测中的混沌控制方法的 PC 机的信号处理, 对监测风机振动的李雅普诺夫指数的测试方法是: 首先读取振动信号, 通过判别指标  $\Delta D$  极小化确定系统的延时常数  $\tau$  和嵌入维数  $m$ , 根据  $\tau$  和  $m$  重构动力学系统的时间序列模型, 再计算最大李雅普诺夫指数  $\lambda$ , 包括: 测试方法和 PC 机的信号处理方法; 其中:

[0039] 测试方法的具体工作步骤是:

[0040] 步骤 1. 数据采集

[0041] 将振动测量仪配置的传感器分别放置在轴承座电机自由侧轴承座、电机负荷侧轴承座、风机负荷侧轴承座和风机自由侧轴承座上, 使用振动测量仪依次测得电机测点①和测点②, 风机两侧测点③和测点④的振动值, 并加以记录;

[0042] 步骤 2. 振动信号录制

[0043] 将磁带机接到振动测量仪的信号输出端上, 依次录制设备的振动波形;

[0044] 步骤 3. 模拟信号转换成数字信号

[0045] 利用磁带机的附件 A/D 转换板, 将磁带机录制的模拟信号转化为数字信号;

[0046] 步骤 4. 数据处理

[0047] 将振动数字信号加载到 PC 机的混沌分析应用程序中, 对风机设备的状态进行识别; 其中:

[0048] PC 机的信号处理方法的具体工作步骤是:

[0049] 步骤 1. 开始

[0050] 按启动键使微处理器进入正常工作状态;

[0051] 步骤 2. 读取数据

[0052] 进入开始模块后, 则进入读取数据模块;

[0053] 步骤 3. 通过  $\Delta D$  计算延时  $\tau$  和嵌入维数  $m$

[0054] 读取数据模块的输出信号, 进入到通过  $\Delta D$  计算延时  $\tau$  和嵌入维数  $m$  模块;

[0055] 步骤 4. 根据延时  $\tau$  和嵌入维数  $m$  重构动力学系统

[0056] 通过  $\Delta D$  计算延时  $\tau$  和嵌入维数  $m$  模块的输出信号, 进入到根据延时  $\tau$  和嵌入维数  $m$  重构动力学系统模块;

[0057] 步骤 5. 判断计算最大李雅普诺夫指数  $\lambda > 0$ ?

[0058] 根据延时  $\tau$  和嵌入维数  $m$  重构动力学系统模块的输出信号,进入到计算最大李雅普诺夫指数  $\lambda > 0$  的判断模块;

[0059] 如果  $\lambda > 0$ ,则进入系统存在混沌现象模块;如果  $\lambda \leq 0$ ,则进入系统不存在混沌现象模块;

[0060] 步骤 6. 显示判断结果及处理建议

[0061] 系统不存在混沌现象模块的输出信号,进入到显示判断结果及处理建议模块;

[0062] 系统存在混沌现象模块的输出信号,也进入到显示判断结果及处理建议模块;

[0063] 步骤 7. 结束

[0064] 显示判断结果及处理建议模块的输出信号,进入到结束模块。

[0065] 本发明的有益效果是:提出了一种选择动力学系统延时常数  $\tau$  的方法,取极小值对应的  $\tau$  作为系统的延时常数;提出了大型离心风机在运行过程中混沌现象的在线监测方法;研究表明大型离心风机在运行过程中存在混沌现象,采用非线性监测方法,可准确预报风机混沌状态的发生;通过监测风机振动的李雅普诺夫 (Lyapunov) 指数,可以有效识别运行状态的混沌特征,正的李雅普诺夫指数表明风机系统发生了混沌;提出了大型离心风机的混沌控制方法,现场应用表明大型离心风机发生混沌现象时,主要体现在操作或工艺参数匹配不当,通过调整风机流量调节阀、压力或者机速(风机垂直烧结速度)等参数改变风机系统的输入,可以较好地消除混沌产生的高振动值,有效抑制混沌产生的危害等。

#### 附图说明

[0066] 下面结合附图说明和实施例对本发明进一步说明。

[0067] 附图 1 为本发明风机振动测点布置及连接关系示意图;

[0068] 附图 2 为本发明 PC 机信号处理流程示意图;

[0069] 附图 3 为本发明风机振动在线监测趋势示意图;

[0070] 附图 4 为本发明不同类型的典型故障 Lyapunov 指数和伪相图一览表示意图;

[0071] 附图标号说明:

[0072] 1—电机自由侧轴承座;

[0073] 2—电机;

[0074] 3—电机负荷侧轴承座;

[0075] 4—联轴器;

[0076] 5—风机负荷侧轴承座;

[0077] 6—风机;

[0078] 7—风机自由侧轴承座;

[0079] 8—数据采集器传感器;

[0080] 9—数据采集器;

[0081] 10—磁带机;

[0082] 11—A/D 转换板;

[0083] 12—PC 机;

[0084] 21—开始;

[0085] 22—读取数据;



- [0086] 23—通过  $\Delta D$  计算延时  $\tau$  和嵌入维数  $m$ ；
- [0087] 24—根据延时  $\tau$  和嵌入维数  $m$  重构动力学系统；
- [0088] 25—计算最大李雅普诺夫指数  $\lambda > 0$ ；
- [0089] 26—系统不存在混沌现象；
- [0090] 27—系统存在混沌现象；
- [0091] 28—显示判断结果及处理建议；
- [0092] 29—结束；

#### 具体实施方式：

[0093] 请参阅附图 1、2、3、4 所示，本发明由电机、轴承座、联轴器、风机、传感器、磁带机、数据采集器及 A/D 转换板等部件组成，其电机 (2) 的一侧与电机自由侧轴承座 (1) 相连接，其另一侧与电机负荷侧轴承座 (3) 相连接，风机 (6) 的一侧与风机负荷侧轴承座 (5) 相连接，其另一侧与风机自由侧轴承座 (7) 相连接，电机负荷侧轴承座 (3) 与风机负荷侧轴承座 (5) 之间由联轴器 (4) 相连接；

[0094] 数据采集器传感器 (8) 的一端安装在电机自由侧轴承座 (1) 上，其另一端与数据采集器 (9) 模块的输入端相连接，数据采集器 (9) 模块的输出端与磁带机 (10) 的输入端相连接，磁带机 (10) 的输出端与 A/D 转换板 (11) 的输入端相连接，A/D 转换板 (11) 的输出端与 PC 机 (12) 的输入端相连接；

[0095] 各测试点分别位于对应的电机 (2) 和风机 (6) 两侧的轴承座测点。

[0096] 一种大型离心风机在线状态监测中的混沌控制方法，该控制方法包括：

[0097] 通过选择动力学系统延时常数  $\tau$  的方法，基于时间序列信息维数大于关联维数的特点，选取信息维数与关联维数的差  $\Delta D$  作为衡量指标，取极小值对应的  $\tau$  作为系统的延时常数，实现风机 (6) 振动信号的最大李雅普诺夫指数计算的延时嵌入法；

[0098] 通过大型离心风机在运行过程中混沌现象的在线监测方法，采用非线性监测方法，实现准确预报风机 (6) 混沌状态的发生；

[0099] 通过 PC 机的信号处理，对监测风机 (6) 振动的李雅普诺夫指数的测试方法，识别运行状态的混沌特征，正的李雅普诺夫指数表明风机 (6) 系统发生了混沌，实现克服混沌现象；

[0100] 通过调整风机 (6) 流量调节阀、压力或者机速参数，改变风机系统的输入，实现消除混沌产生的高振动值及抑制混沌现象的产生。

[0101] 所述的大型离心风机在线状态监测中的混沌控制方法的延时嵌入法算法的具体工作步骤是：

[0102] 步骤 1. 从时间序列  $\{X_i\}$  中获得状态向量  $Y_i$

[0103] 获得一个  $m$  维状态向量

[0104] 对于风机 (6) 振动信号的时间序列  $\{X_i, i = 1, 2, \dots, n\}$  是一个  $n$  维系统中的某一状态输出。给定整数  $m > 1$ ,  $\tau > 0$ , 得到一个  $m$  维状态向量

[0105]  $Y_i = [X_i, X_{i+\tau}, \dots, X_{i+(m-1)\tau}]$  (1)

[0106] 式中  $i = 1, 2, \dots, k, k = N - (m-1)\tau$  为重构向量的个数； $m$  为嵌入维数； $\tau$  为延时常数，它是一个正整数，表示为相邻两次采样间隔的倍数；

[0107] 步骤 2. 选取信息维数与关联维数的差作为衡量指标,取极小值对应的  $\tau$  作为系统的延时常数,  $m$  作为嵌入维数

$$[0108] \quad I(q, e) = \frac{1}{1-q} \log \left\{ \sum_{m=1}^{N(e)} p(m, e)^q \right\} \quad (2)$$

[0109] 式中  $P(m, e)^q$  是小盒子  $e$  的度量尺度,  $N(e)$  是盒子的数目;

[0110] 动力学系统维数  $D$  的定义为:

$$[0111] \quad D(q) = \frac{I(q, e)}{\log(e)} \quad (3)$$

[0112] 其中  $q = 0, 1, 2$ ,  $D(q)$  分别对应于容量维数,信息维数和关联维数,显然,  $D(0) > D(1) > D(2)$ ;

[0113] 步骤 3. 采用衡量指标  $\Delta D$  极小化确定系统的延时常数  $\tau$  和嵌入维数  $m$

$$[0114] \quad \Delta D = D(1) - D(2) \quad (4)$$

[0115] 步骤 4. 李雅普诺夫指数计算方法

[0116] a. 首先找出距离初始点  $Y_0$  最近的点,用  $C_0$  表示这两点的距离,  $t_i$  时刻,  $C_i$  演化为  $C'_i$ ,  $t_{i+1}$  时刻,  $C_{i+1}$  演化为  $C'_{i+1}$ ,按照  $C'_i$  与  $C_i$  夹角和距离最小的原则搜索新的数据点;

[0117] b. 完成所有数据点的比较

[0118] c. 最大李雅普诺夫指数计算 Lyapunov 指数  $\lambda$  的计算方法为:

$$[0119] \quad \lambda = \frac{1}{t_N - t_0} \sum_{i=1}^N \log_2 \frac{C'_i(t_i)}{C(t_i)} \quad (5)$$

[0120] 所述的大型离心风机在线状态监测中的混沌控制方法的 PC 机的信号处理,对监测风机 (6) 振动的李雅普诺夫指数的测试方法是:首先读取振动信号,通过判别指标  $\Delta D$  极小化确定系统的延时常数  $\tau$  和嵌入维数  $m$ ,根据  $\tau$  和  $m$  重构动力学系统的时间序列模型,再计算最大李雅普诺夫指数  $\lambda$ ,包括:测试方法和 PC 机的信号处理方法;

[0121] 其中:

[0122] 测试方法的具体工作步骤是:

[0123] 步骤 1. 数据采集

[0124] 将振动测量仪配置的传感器分别放置在轴承座电机自由侧轴承座 (1)、电机负荷侧轴承座 (3)、风机负荷侧轴承座 (5) 和风机自由侧轴承座 (7) 上,使用振动测量仪依次测得电机测点①和测点②,风机两侧测点③和测点④的振动值,并加以记录;

[0125] 步骤 2. 振动信号录制

[0126] 将磁带机 (10) 接到振动测量仪的信号输出端上,依次录制设备的振动波形;

[0127] 步骤 3. 模拟信号转换成数字信号

[0128] 利用磁带机 (10) 的附件 A/D 转换板 (11),将磁带机 (10) 录制的模拟信号转化为数字信号;

[0129] 步骤 4. 数据处理

[0130] 将振动数字信号加载到 PC 机 (12) 的混沌分析应用程序中,对风机设备的状态进行识别;其中:

- [0131] PC 机的信号处理方法的具体工作步骤是：
- [0132] 步骤 1. 开始 (21)
- [0133] 按启动键使计算机程序进入运行状态；
- [0134] 步骤 2. 读取数据 (22)
- [0135] 进入开始 (21) 模块后, 则进入读取数据 (22) 模块；
- [0136] 步骤 3. 通过  $\Delta D$  计算延时  $\tau$  和嵌入维数  $m$ (23)
- [0137] 读取数据 (22) 模块的输出信号, 进入到通过  $\Delta D$  计算延时  $\tau$  和嵌入维数  $m$ (23) 模块；
- [0138] 步骤 4. 根据延时  $\tau$  和嵌入维数  $m$  重构动力学系统 (24)
- [0139] 通过  $\Delta D$  计算延时  $\tau$  和嵌入维数  $m$ (23) 模块的输出信号, 进入到根据延时  $\tau$  和嵌入维数  $m$  重构动力学系统 (24) 模块；
- [0140] 步骤 5. 判断计算最大李雅普诺夫指数  $\lambda > 0$ (25) ？
- [0141] 根据延时  $\tau$  和嵌入维数  $m$  重构动力学系统 (24) 模块的输出信号, 进入到计算最大李雅普诺夫指数  $\lambda > 0$ (25) 的判断模块；
- [0142] 如果  $\lambda > 0$ , 则进入系统存在混沌现象 (27) 模块；如果  $\lambda \leq 0$ , 则进入系统不存在混沌现象 (26) 模块；
- [0143] 步骤 6. 显示判断结果及处理建议 (28)
- [0144] 系统不存在混沌现象 (26) 模块的输出信号, 进入到显示判断结果及处理建议 (28) 模块；
- [0145] 系统存在混沌现象 (27) 模块的输出信号, 也进入到显示判断结果及处理建议 (28) 模块；
- [0146] 步骤 7. 结束 (29)
- [0147] 显示判断结果及处理建议 (28) 模块的输出信号, 进入到结束 (29) 模块；
- [0148] 本发明的技术原理和必要图表及计算公式：
- [0149] 大型离心风机在线监测中的混沌控制选用李雅普诺夫 (Lyapunov) 指数分析方法, 1985 年, Wolf 等人在总结前人研究成果的基础上, 提出了计算最大李雅普诺夫 (Lyapunov) 指数的方法。
- [0150] 本技术提出了一种基于时间序列信息维数与关联维数差极小原则确定动力学系统延时常数的方法, 利用 Matlab6.5 实现了风机振动信号的最大李雅普诺夫指数的计算。
- [0151] 具体算法如下：对于风机振动信号的时间序列  $\{X_i, i = 1, 2, \dots, n\}$  是一个  $n$  维系统中的某一状态输出。给定整数  $m > 1, \tau > 0$ , 可得到一个  $m$  维状态向量。
- [0152] 
$$Y_i = [X_i, X_{i+\tau}, \dots, X_{i+(m-1)\tau}] \quad (1)$$
- [0153] 式中  $i = 1, 2, \dots, k, k = N - (m-1)\tau$  为重构向量的个数； $m$  为嵌入维数； $\tau$  为延时常数, 它是一个正整数, 可表示为相邻两次采样间隔的倍数。这种从时间序列  $\{X_i\}$  中获得状态向量  $Y_i$  的方法称为延时嵌入法。
- [0154] 相空间重建要解决的首要问题是延迟步长  $\tau$  与嵌入相空间维数  $d$  的选取。在分析系统的动力学特性时延迟时间  $\tau$  的选择要适当, 太小则两相邻状态空间向量的相关取值会偏大；而当  $\tau$  太大时, 由于确定性混沌对初始条件的敏感性, 会使相邻状态空间向量间的确定性关系丢失。在  $\tau$  的选取方法上, 被人们大量引用的是时间序列自相关系数的过

零点来确定  $\tau$  的方法,对于高维嵌入 ( $m \geq 3$ ) 此方法不能保证给出的延迟步长是最佳的。

[0155] 本文利用时间序列信息维数大于关联维数的特点,选取信息维数与关联维数的差作为衡量指标,取极小值对应的  $\tau$  作为系统的延时常数,  $m$  作为嵌入维数。

$$[0156] \quad I(q, e) = \frac{1}{1-q} \log \left\{ \sum_{m=1}^{N(e)} p(m, e)^q \right\} \quad (2)$$

[0157] 式中  $P(m, e)^q$  是小盒子  $e$  的度量尺度,  $N(e)$  是盒子的数目;

[0158] 动力学系统维数  $D$  的定义为:

$$[0159] \quad D(q) = \frac{I(q, e)}{\log(e)} \quad (3)$$

[0160] 其中  $q = 0, 1, 2$ ,  $D(q)$  分别对应于容量维数,信息维数和关联维数。很显然,  $D(0) > D(1) > D(2)$ 。

[0161] 采用衡量指标  $\Delta D$  极小化确定系统的延时常数  $\tau$  和嵌入维数  $m$ 。

$$[0162] \quad \Delta D = D(1) - D(2) \quad (4)$$

[0163] 首先找出距离初始点  $Y_0$  最近的点,用  $C_0$  表示这两点的距离,  $t_i$  时刻,  $C_i$  演化为  $C'_i$ ,  $t_{i+1}$  时刻,  $C_{i+1}$  演化为  $C'_{i+1}$ ,按照  $C'_i$  与  $C_i$  夹角和距离最小的原则搜索新的数据点,完成所有数据点的比较。最大 Lyapunov 指数  $\lambda$  的计算方法为:

$$[0164] \quad \lambda = \frac{1}{t_N - t_0} \sum_{i=1}^N \log_2 \frac{C'_i(t_i)}{C(t_i)} \quad (5)$$

[0165] 本发明的关键技术和创造点

[0166] 通过研究大型离心风机状态监测中的非线性行为,基于时间序列信息维数大于关联维数的特点,提出了利用信息维数与关联维数的差作为衡量指标,取极小值对应的  $\tau$  作为系统的延时常数的方法;提出了利用李雅普诺夫 (Lyapunov) 指数分析可以有效识别大型离心风机设备运行中的混沌特征,正的李雅普诺夫 (Lyapunov) 指数表明风机系统发生了混沌。现场应用表明风机系统发生混沌现象时,主要体现在操作或工艺参数匹配不当,通过调整工作压力、风量或者机速等参数改变风机系统的输入,可以较好地消除混沌状态下的高振动值,该方法对于避免大型风机因振动值超标引发的连锁停机具有重要意义。

[0167] 2004年11月22日一台大型离心风机机组的电机负荷侧垂直方向振动值加剧并出现报警,图1是在线系统振动监测历史纪录,该风机电机功率9300KW,支撑为油膜轴承,采用双斜带式点火保温炉,送入保温炉第二段的空气流量最大可达80000Nm<sup>3</sup>/h,有两个流量调节阀可在0~100%范围内调整,流量容易控制。该机组安装了Bently3300在线监测保护系统,主要对风机和电机的振动以及温度进行在线监测,图1是该风机振动测点布置及连接关系示意图。

[0168] 测试仪器还包括:

[0169] 振动测试仪 VM3324(含传感器), SONY 磁带记录仪及 A/D 采样板, PC 机等;

[0170] 本发明的具体测试方法:

[0171] 数据采集:将振动测量仪配置的传感器分别放置在轴承座1、3、5和7上,使用振动测量仪 VM3324 依次测得电机测点①和测点②,风机两侧测点③和测点④的振动值,并加以记录;

[0172] 振动信号录制:将 Sony 磁带机 (10) 接到振动测量仪 VM3324 的信号输出端上,依

次录制设备的振动波形；

[0173] 模拟信号转换成数字信号：利用 Sony 磁带机的附件 A/D 采集板（11）将磁带机录制的模拟信号转化为数字信号；

[0174] 数据处理：将振动数字信号加载到 PC 机（12）的混沌分析应用程序中，对风机设备的状态进行识别。

[0175] PC 机信号处理流程如图 2 所示，首先读取振动信号，通过判别指标  $\Delta D$  极小化确定系统的延时常数  $\tau$  和嵌入维数  $m$ ，根据  $\tau$  和  $m$  重构动力学系统的时间序列模型，再计算最大李雅普诺夫 (Lyapunov) 指数  $\lambda$ 。如果  $\lambda > 0$ ，表明系统进入混沌状态，通过在线调整系统的输入参数，可有效防止混沌产生的危害；如果  $\lambda \leq 0$ ，表明系统未进入混沌状态，程序结束。

[0176] 在数据采集时，如果风机配备有在线监测保护系统，比如 Bently3300 或 3500 系统等，可以直接利用在线系统已有的传感器，通过 Bently 等二次仪表的信号输出端子采集振动信号。需要注意的是必需采用电容与二次仪表输出端子连接，避免因外接阻抗不匹配诱发的在线系统连锁跳机。

[0177] 通过大量原始数据积累，利用 CF-920 频谱分析仪对风机历史数据加以筛选，选取风机典型故障模下的振动信号进行分析，研究风机在不同故障模式下的非线性特征，表 1 是采用衡量指标  $\Delta D$  极小化确定风机系统不同故障模式下的延时常数  $\tau$  一览表。

[0178] 表 1 不同故障模式下风机振动信号的延时常数一览表

故障模式	延时常数 $\tau$	$\Delta D$ 极小值
SUR 喘振	40	0.021
CRK 裂纹	20	0.006
WHP 油膜涡动	70	0.098
MISALN 不对中	5	0.038

[0179] 现场实测数据研究：着重研究机组出现的典型故障模式下的非线性行为：喘振 (SUR)、裂纹 (CRK)、油膜涡动 (WHP) 和不对中 (MISALN)。表 2 给出了风机在喘振、裂纹、油膜涡动和不对中四种故障模式下的李雅普诺夫 (Lyapunov) 指数计算结果和伪相图 (Poincare 界面)。

[0180] 通过对风机在典型故障模式下的振动信号分析，风机在不平衡、裂纹等状态下呈现周期运行，在不对中、碰磨和油膜涡动等状态下呈现倍周期运动，李雅普诺夫 (Lyapunov) 指数小于零；风机机组在喘振状态下，风机振动的伪相图出现喘振吸引子，Lyapunov 指数大于零，表明风机系统跨越李雅普诺夫 (Lyapunov) 指数的零点出现分叉后进入混沌状态。通过调整风机入口的压力或流量，机组运行脱离喘振区域后，机组振动值恢复正常。

[0181] 将 2004 年 11 月 22 日 8:00 至 9:00 风机轴承座测得的振动信号进行李雅普诺夫 (Lyapunov) 指数分析，其最大李雅普诺夫指数为 0.0056，表明风机运行存在强烈的非线性行为，呈现混沌状态，将烧结机垂直烧结速度从 20mm/min 降至 16mm/min，电机负荷侧水平方向振动由  $200 \mu\text{m}$  下降到  $50 \mu\text{m}$ ，风机振动值明显下降，有效了避免因振动超标导致的连

锁停机。

[0182] 本发明的创造点：

[0183] 提出了基于  $\Delta D$  极小化（信息维数与关联维数的差）作为衡量指标，取极小值对应的  $\tau$  作为系统的延时常数和嵌入维数  $m$  的方法；通过大型离心风机在运行过程中振动加剧时的非线性行为研究，发现了机械系统存在的一种混沌现象；本技术提出了预报混沌现象的在线监测方法；

[0184] 通过监测风机振动的李雅普诺夫 (Lyapunov) 指数，可以有效识别运行状态的混沌特征，正的李雅普诺夫 (Lyapunov) 指数表明风机系统发生了混沌；

[0185] 提出了大型离心风机的混沌控制方法，现场应用表明大型离心风机发生混沌现象时，主要体现在操作或工艺参数匹配不当，通过调整风机流量调节阀、压力或者机速（风机垂直烧结速度）等参数改变风机系统的输入，可以较好地消除混沌产生的高振动值，有效抑制混沌产生的危害，满足设备正常生产的要求。

[0186] （下接 18 页）

[0187] 本发明成果特点和水准（要有比较）

序号	大型离心风机在线状态监测中的混沌控制技术特点	相关技术特点
1	提出了基于 $\Delta D$ 极小化（信息维数与关联维数的差）作为衡量指标，取极小值对应的 $\tau$ 作为系统的延时常数和嵌入维数 $m$ 的方法，避免因数据长度有限引起的高维空间分析时出现的“维数灾”问题。其优点是同时考虑 $\tau$ 和 $m$ 对动力学系统的影响，优化系统的动力学特性。	采用时间序列自相关系数的过零点来确定 $\tau$ 的方法，对于高维嵌入 $m \geq 3$ 此方法不能保证给出的延迟步长是最佳的。嵌入维从 $m = 2$ 开始逐次增加 $m$ 的值，并依次计算向量序列的李雅普诺夫 (Lyapunov) 指数，选 Lyapunov 指数趋于稳定的 $m$ 值作为最佳嵌入相空间维数。
2	研究表明大型离心风机在运行过程中存在混沌现象，采用非线性监测方法，可准确预报风机混沌状态的发生。	目前风机在线监测保护系统主要对机组的振动和温度等进行监测，通过与预先设置的报警值和停机值进行比较，达到报警和连锁停机的功能。

序号	大型离心风机在线状态监测中的混沌控制技术特点	相关技术特点
3	测试方法简单、只需监测风机轴承座振动的最大李雅普诺夫 Lyapunov 指数,即可判断风机运行是否处于混沌状态。	需监测风机的振动、温度等信号,并利用 FFT 频谱分析、趋势分析等完成对风机状态的评价,这些分析手段无法判断风机是否处于混沌状态。
4	利用混沌对系统输入初始条件敏感的特点,提出了风机系统发生混沌现象时,通过实时调整风机流量调节阀、压力或者机速(风机垂直烧结速度)等,能有效抑制混沌产生的危害。	在线监测保护系统不能预测风机系统的混沌状态,对连锁跳机无能为力。

[0188] 本发明的应用范围

[0189] 该技术可广泛应用于钢铁、化工、电力、造纸等行业的大型离心风机的在线监测和状态管理。

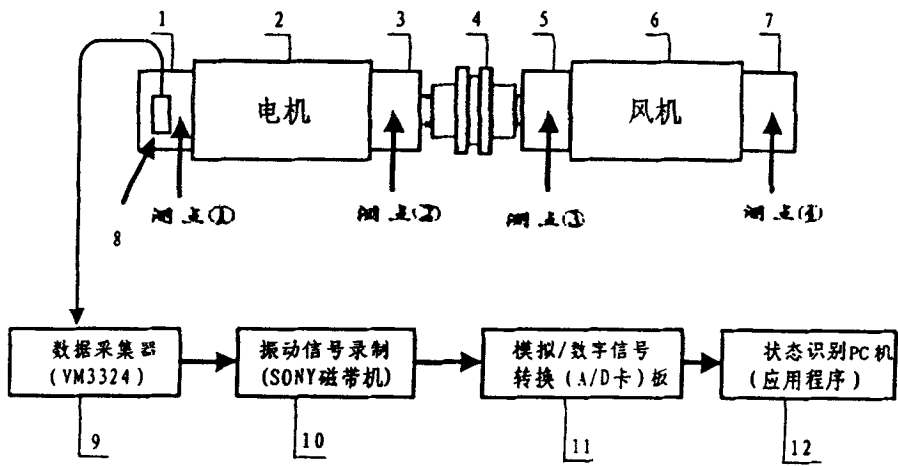


图 1



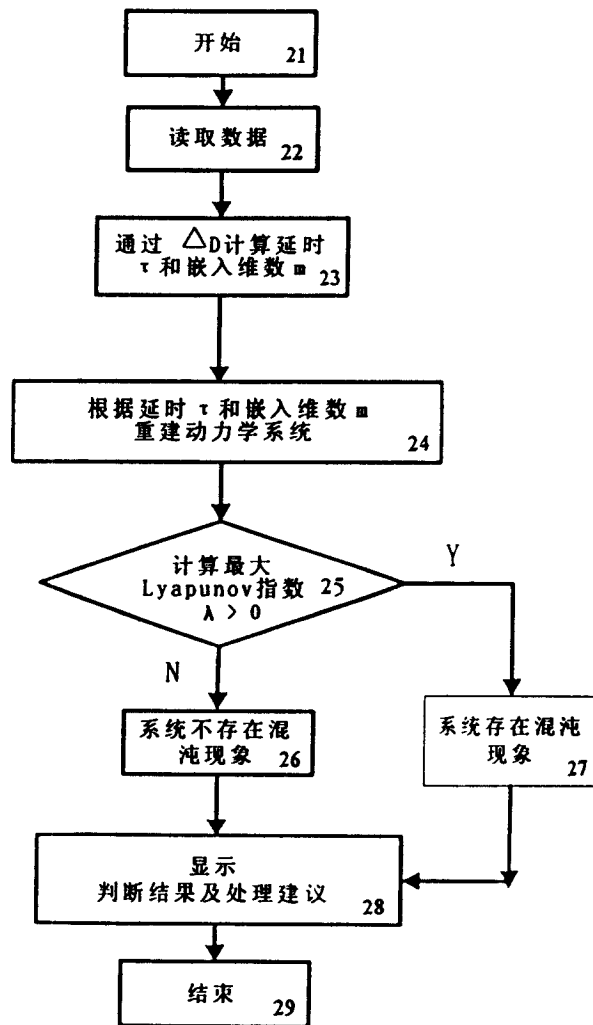


图 2

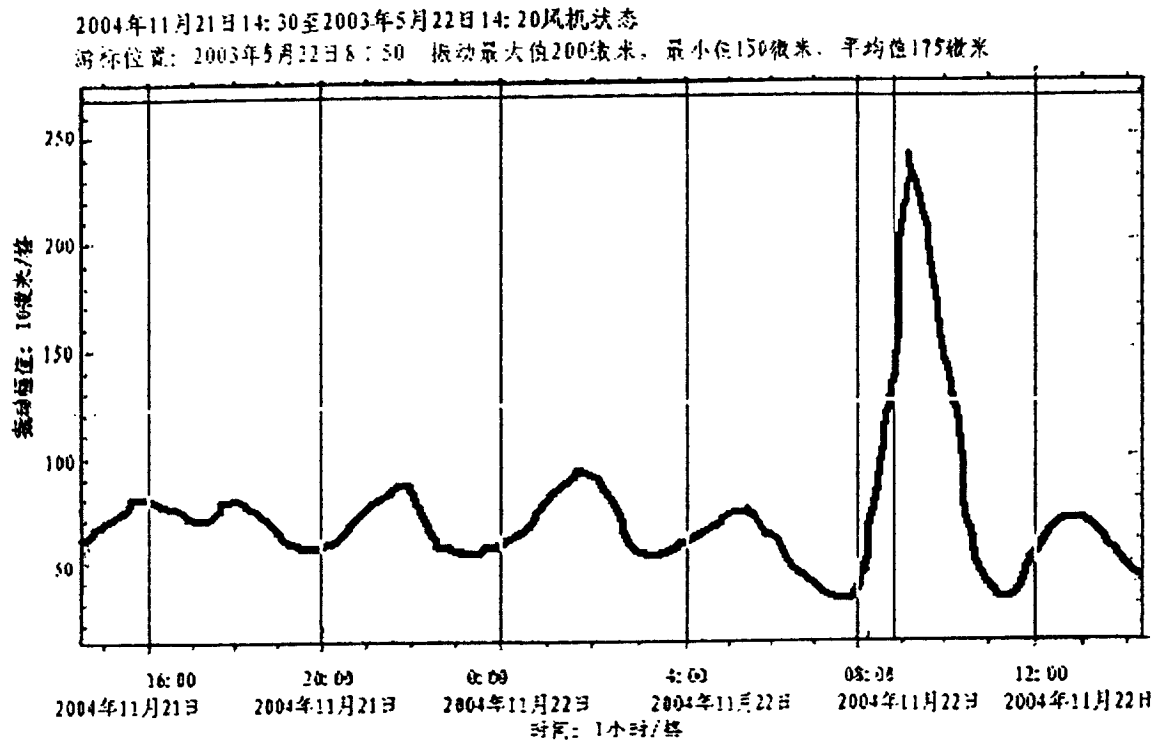
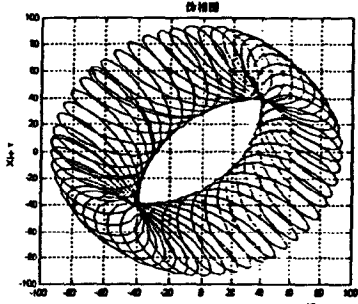
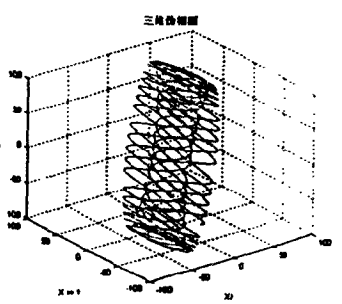
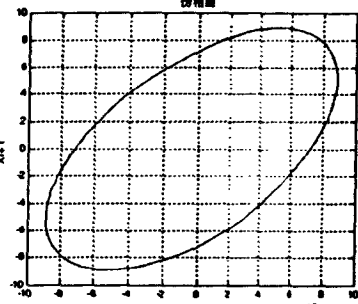
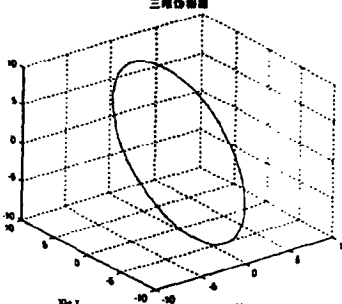
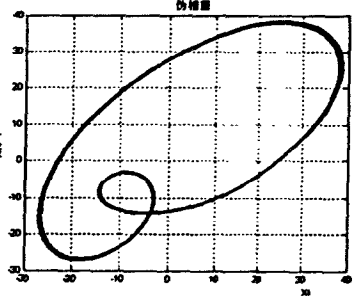
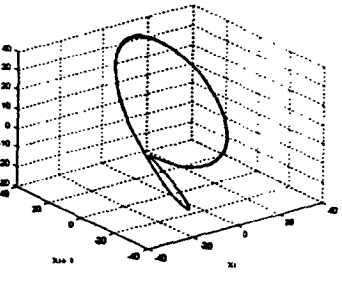
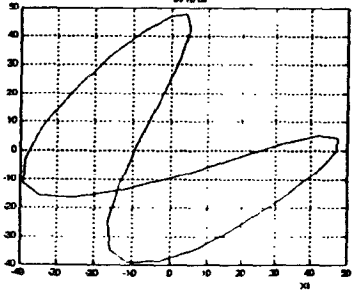
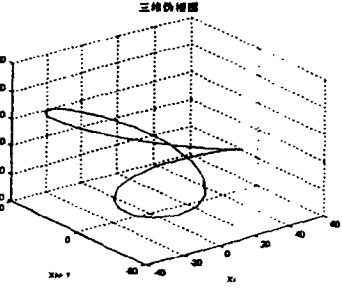


图 3

不同类型的典型故障 Lyapunov 指数和伪相图一览表

故障名称	2H 振动值 ( $\mu\text{m}$ )	$\lambda$	伪相图	三维伪相图
SUR 喘振	160	0.0036		
CRK 裂纹	100	-0.0016		
WHP 油膜涡动	90	-0.0040		
MISALN 不 对中	88	-8.02e-04		

注: 2H-第二测点(电机负荷侧)水平方向最大振动值  $\lambda$ -最大 Lyapunov 指数

图 4