



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103471870 A

(43) 申请公布日 2013. 12. 25

(21) 申请号 201310464600. 9

(22) 申请日 2013. 10. 08

(71) 申请人 中国矿业大学(北京)
地址 100083 北京市海淀区学院路丁 11 号

(72) 发明人 程晓涵 孟国营 汪爱明 李伟
翟宇 张海涛 贺凯 李栋 刘剑
杜岩

(51) Int. Cl.
G01M 99/00(2011. 01)
G01M 7/02(2006. 01)

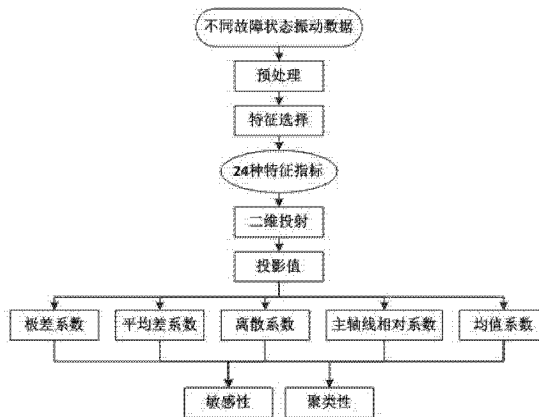
权利要求书4页 说明书10页 附图3页

(54) 发明名称

基于二维投射的特征指标对煤矿设备状态识别的敏感性和聚类性研究方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于二维投射的特征指标对煤矿设备状态识别的聚类性和敏感性研究方法,涉及煤矿主扇风机和提升机。本发明的研究方法是采集不同设备状态下的振动信号并加工处理得到 24 种特征指标,所述 24 种特征指标包含 13 个时域特征指标和 11 个频域特征指标,然后利用二维投射方法将所述 24 个特征指标投射到二维空间,提出最佳投射方向矩阵有效的避免了单一投射方向下在寻优过程中对新空间的探索能力有限、容易收敛到局部最优解、结果稳定性可靠性差的缺点,研究在最佳投影方向矩阵下所述 24 种特征指标的投影分布特点;提出用极差系数、平均差系数、离散系数、主轴相对系数和均值系数来研究 24 种特征指标的投影值,从而实现所述 24 种特征指标对不同故障的敏感性和聚类性的衡量和评价。



1. 一种基于二维投射的特征指标对煤矿设备状态识别的聚类性和敏感性研究方法,其特征在于,该方法包括以下步骤:

(1) 在煤矿设备关键部位——轴承的水平、垂直、轴向三个方向上安装加速度振动传感器,不间断地将监测设备运行过程中的振动数据并将所述振动数据发送至后端接收和处理系统,并存入相关数据文件;

(2) 对加速度振动传感器中提取的振动数据 $\{a_i, i = 1, 2, \dots, n\}$ 进行处理,具体步骤为:

①对所述振动数据 $\{a_i, i = 1, 2, \dots, n\}$ 进行傅里叶变换得到 $\{x_i, i = 1, 2, \dots, n\}$;

②按下列公式计算出设备某运行状态的 24 特征指标的样本: $\{x_{avi}\}, \{x_{pi}\}, \{x_{rmsi}\}, \{x_{ri}\}, \{D_{xi}\}, \{x_{p-pi}\}, \{\alpha_i\}, \{\beta_i\}, \{C_{fi}\}, \{S_{fi}\}, \{I_{fi}\}, \{CL_{fi}\}, \{K_{vi}\}, \{f_{avgi}\}, \{f_{bi}\}, \{f_{bbi}\}, \{f_{vi}\}, \{f_{rvi}\}, \{S_i\}, \{E_{r1i}\}, \{E_{r2i}\}, \{E_{r3i}\}, \{E_{r4i}\}, \{E_{r5i}\},$

$$\text{绝对均值: } x_{av} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i|;$$

$$\text{峰值: } x_p = \max |x_i|;$$

$$\text{有效值(均方根值): } x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2};$$

$$\text{方根幅值: } x_r = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{|x_i|} \right)^2;$$

$$\text{方差: } D_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{av})^2;$$

$$\text{峰-峰值: } x_{p-p} = \max(x_i) - \min(x_i);$$

$$\text{偏态指标: } \alpha = \sqrt{\frac{1}{6n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - x_{av}}{\sqrt{D_x}} \right)^3};$$

$$\text{峭度指标: } \beta = \sqrt{\frac{n}{24} \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - x_{av}}{\sqrt{D_x}} \right)^4 - 3 \right]};$$

$$\text{峰值指标: } C_f = \frac{x_p}{x_{rms}};$$

$$\text{波形指标: } S_f = \frac{x_{rms}}{x_{av}};$$

$$\text{脉冲指标: } I_f = \frac{x_p}{x_{rms}};$$

$$\text{裕度指标: } CL_f = \frac{x_p}{x_r};$$

$$\text{变异系数: } K_v = \frac{\sqrt{D_x}}{x_{av}};$$

$$\text{重心频率(平均频率): } f_{\text{avg}} = \frac{\int_0^{\infty} fp(f)df}{\int_0^{\infty} p(f)df} ;$$

$$\text{均方频率: } f_b = \frac{\int_0^{\infty} f^2 p(f)df}{\int_0^{\infty} p(f)df} ;$$

$$\text{均方根频率: } f_{bb} = \left(\frac{\int_0^{\infty} f^2 p(f)df}{\int_0^{\infty} p(f)df} \right)^{1/2} ;$$

$$\text{频率方差: } f_v = \frac{\int_0^{\infty} (f - f_{\text{avg}})^2 p(f)df}{\int_0^{\infty} p(f)df} ;$$

$$\text{频率标准差: } f_{rv} = \left[\frac{\int_0^{\infty} (f - f_{\text{avg}})^2 p(f)df}{\int_0^{\infty} p(f)df} \right]^{1/2} ;$$

$$\text{谱峰稳定指数: } S = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n/2} \{f_i^2 \cdot P(f_i)\}}}{\sum_{i=1}^{n/2} P(f_i)} ;$$

$$\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n/2} \{f_i^4 \cdot P(f_i)\}}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n/2} f_i^2 \cdot P(f_i)}} ;$$

$$\text{第一频带相对能量: } E_{r1} = \frac{\int_0^{B_f} p(f)df}{\int_0^{F_s} p(f)df} ;$$

$$\text{第二频带相对能量: } E_{r2} = \frac{\int_{B_f}^{2B_f} p(f)df}{\int_0^{F_s} p(f)df} ;$$

$$\text{第三频带相对能量: } E_{r3} = \frac{\int_{2B_f}^{3B_f} p(f)df}{\int_0^{F_s} p(f)df} ;$$

$$\text{第四频带相对能量: } E_{r4} = \frac{\int_{3B_f}^{4B_f} p(f)df}{\int_0^{F_s} p(f)df} ;$$

$$\text{第五频带相对能量: } E_{r5} = \frac{\int_{4B_f}^{5B_f} p(f) df}{\int_0^{F_s} p(f) df};$$

所述 24 个特征指标计算公式中 f 表示信号的频率, $p(f)$ 表示信号的功率谱, B_f 表示 1/5 频段值, F_s 表示最高频率值;

(3) 寻求 24 特征指标最佳投影方向矩阵的具体步骤为:

① 24 特征指标向量 X^* 的训练样本的预处理:

设备处于某一工作状态, 所述状态可为正常状态或某一典型故障状态, 步骤(2)②所述 24 特征指标的样本构成训练样本空间可以用 $p \times n$ 的矩阵 $X^* = \{x^*(i, j) | i = 1, 2, \dots, p; j = 1, 2, \dots, n\}$ 来表示, p 表示训练样本的容量, n 表示特征指标的数量;

为消除各特征指标量纲的影响并统一其值的波动范围, 需要对样本数据进行归一化处理: $x(i, j) = \frac{x^*(i, j) - x_{\min}(j)}{x_{\max}(j) - x_{\min}(j)}$, 其中, $x_{\max}(j)$, $x_{\min}(j)$ 分别表示原始数据 $x^*(i, j)$ 第 j 个指标的最大值和最小值, $X = \{x(i, j) | i = 1, 2, \dots, p; j = 1, 2, \dots, n\}$ 表示 $X^* = \{x^*(i, j) | i = 1, 2, \dots, p; j = 1, 2, \dots, n\}$ 归一化处理后的序列;

② 将 24 特征指标向量 X^* 进行投射, 分析其投射值分布特点:

所述投射就是把 p 维数据 $\{x(i, j) | i = 1, 2, \dots, p; j = 1, 2, \dots, n\}$ 转化为以矩阵 $a = \{a(1), a(2), a(3), \dots, a(p)\}$ 为投射方向的一维投射值 $z(j)$:

$$z(j) = \sum_{i=1}^p a(i)x(i, j), \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

其中 a 表示单位长度向量, 然后按照投射值 $\{z(j) | j = 1, 2, \dots, n\}$ 的分布特点进行归类;

③ 为了将所述步骤(3)②中各特征指标的投射值区域分开来, 构造投射目标函数以寻求最佳的投射方向矩阵 $A = [a_1, a_2, \dots, a_m]$ (其中包含最优投射方向 a_0),

投射目标函数指标可表达成: $Q(a) = S_z D_z$, 其中, S_z 用投射值 $z(i)$ 标准差来描述类间距离; D_z 用投射值 $z(i)$ 局部密度来描述类内密度, 即

$$S_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z(i) - E(z))^2}{n-1}},$$

$$D_z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (R - r(i, j)) \cdot u(R - r(i, j)),$$

其中, $E(z)$ 为序列 $z = \{z(i) | i = 1, 2, \dots, n\}$ 的平均值; R 为局部密度的窗口半径, 它的取值范围一般为: $r_{\max} + \frac{p}{2} \leq R \leq 2p$, p 为特征指标的数量; $r(i, j)$ 表示样本之间的距离,

$$r(i, j) = |z(i) - z(j)|; \text{单位阶跃函数 } u(t) = \begin{cases} 1, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases},$$

最大化目标函数: $\text{Max}: Q(a) = S_z \cdot D_z$,

约束条件： $\sum_{j=1}^p a^2(j)=1$ ，

在最佳投射方向矩阵 $A = [a_1, a_2, \dots, a_m]$ 下，每个特征指标的投射值 $w_i (i = 1, 2, \dots, s)$ 都相对集中成带状分布，借助所述带状分布特点衡量特征指标对设备状态识别的聚类性和敏感性；

(4) 利用所述投影值带状分布实现 24 特征指标对煤矿设备状态识别的敏感度和聚类性的衡量和评价的具体步骤：

① 计算衡量各特征指标敏感度和聚类性的五种离散性指标：

$$\text{极差系数：} XD_{JC_i} = \frac{JC_i - JC}{JC}$$

$$\text{平均差系数：} XD_{PJC_i} = \frac{PJC_i - PJC}{PJC}$$

$$\text{离散系数：} XD_{LS_i} = \frac{LS_i - LS}{LS}$$

$$\text{主轴线相对系数：} XD_{z_i} = \frac{Z_{z_i} - Z_z}{Z_z}$$

$$\text{均值系数：} XD_{m_i} = \frac{Z_{m_i} - Z_m}{Z_m}$$

其中，极差 $JC = \max(z(i)) - \min(z(i))$ ； $z(i)$ 表示各特征指标在最佳投影方向矩阵上的投影值；平均差 $PJC = \frac{\sum |z - Z_z|}{n}$ ； Z_z 表示特征指标在最佳投影方向矩阵下的投影值主轴线；离散度 $LS = \sqrt{\frac{\sum (z - Z_z)^2}{n}}$ ；投影值平均值 $Z_m = \frac{\sum z}{n}$ ； JC 、 PJC 、 LS 、 Z_z 、 Z_m 分别表示正常

状态下的极差、平均差、离散度、主轴线和平均值；而 JC_i 、 PJC_i 、 LS_i 、 Z_{z_i} 、 Z_{m_i} 分别表示某一状态下的极差、平均差、离散度、主轴线和平均值。

② 判断特征指标的敏感性和聚类性

如果步骤(4)①中计算得到的极差系数 $XD_{JC_i} > 0.2$ 、平均差系数 $XD_{PJC_i} > 0.4$ 、离散度系数 $XD_{LS_i} > 0.3$ 、主轴线相对系数 $XD_{z_i} > 2$ 和平均值系数 $XD_{m_i} > 2$ ，说明所述特征指标对煤矿设备的状态改变敏感性强，否则说明所述特征指标对煤矿设备的状态改变敏感性不强；

当离散度 $LS > 1.5$ 时，说明所述特征指标对煤矿设备的状态改变聚类性强，说明所述特征指标对煤矿设备的状态改变聚类性不强；

在工程中可以针对不同设备的不同故障状态，分别计算得到相应的极差系数、平均差系数、离散度系数、主轴线相对系数和平均值系数，判断特征指标是否对所述故障状态具有较强的敏感性和聚类性。

基于二维投射的特征指标对煤矿设备状态识别的敏感性和聚类性研究方法

技术领域

[0001] 本发明属于煤矿设备故障诊断技术领域,具体涉及一种利用设备振动数据计算 24 特征指标向量,提出经寻优计算得到最佳投射方向矩阵,然后根据最佳投射方向矩阵下各典型状态的投射分布形成带状,研究在最佳投影方向矩阵下所述 24 种特征指标的投影分布特点;提出用极差系数、平均差系数、离散系数、主轴线相对系数和均值系数来研究 24 种特征指标的投影值,实现所述 24 特征指标对不同故障的敏感性和聚类性的衡量和评价。

背景技术

[0002] 设备故障从存在异常到故障是一个逐渐劣化的过程,利用时域特征指标进行故障识别存在严重的时间相滞后性和故障应对被动性;经大量研究证明在所述劣化过程中频域信号比较敏感,目前主要是借助典型频率分量来判断,但典型频率分量经常会有波动或偏差,而且与不同故障类型的对应关系难以确定。

[0003] 信号的能量谱反映了信号中各频率成分的能量分布情况,即元件状态发生变化时,信号中的频率成分、各频率成分能量分布的离散程度以及功率谱主能量的谱峰位置也将随之发生变化,因此也可以较好地描述信号频域特征的变化。

[0004] 因此,为实现故障诊断功能,寻找一组能准确识别设备运行状态并且对状态变化能快速反应的指标非常关键。本发明同时结合时域指标、频率指标和能量谱指标三方面的特征指标,研究所述指标对不同煤矿设备不同故障类型和故障程度的聚类性和敏感性的衡量和判断方法,从而为煤矿设备不同类型的故障识别提供最佳的衡量指标。

发明内容

[0005] 本发明的目的是针对描述煤矿设备运行状态的特征指标繁杂且对设备状态改变的敏感性和聚类无法判断的不足,提出一种基于二维投射的特征指标对煤矿设备状态识别的聚类性和敏感性研究方法,并具有很强的自适应能力,

[0006] 本发明的技术方案是:

[0007] (1) 在煤矿设备关键部位——轴承的水平、垂直、轴向三个方向上安装加速度振动传感器,不间断地监测设备运行过程中的振动数据并将所述振动数据发送至后端接收和处理系统,并存入相关数据文件;

[0008] (2) 对加速度振动传感器中提取的振动数据 $\{a_i, i = 1, 2, \dots, n\}$ 进行处理,具体步骤为:

[0009] ① 对所述振动数据 $\{a_i, i = 1, 2, \dots, n\}$ 进行傅里叶变换得到 $\{x_i, i = 1, 2, \dots, n\}$;

[0010] ② 按下列公式计算出设备某运行状态的 24 特征指标的样本: $\{x_{avi}\}, \{x_{pi}\}, \{x_{rmsi}\}, \{x_{ri}\}, \{D_{xi}\}, \{x_{p-pi}\}, \{\alpha_i\}, \{\beta_i\}, \{C_{fi}\}, \{S_{fi}\}, \{I_{fi}\}, \{CL_{fi}\}, \{K_{vi}\}, \{f_{avg_i}\}, \{f_{bi}\}, \{f_{bbi}\}, \{f_{vi}\}, \{f_{rvi}\}, \{S_i\}, \{E_{r1i}\}, \{E_{r2i}\}, \{E_{r3i}\}, \{E_{r4i}\}, \{E_{r5i}\},$

- [0011] 绝对均值： $x_{av} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i|$ ；
- [0012] 峰值： $x_p = \max |x_i|$ ；
- [0013] 有效值(均方根值)： $x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}$ ；
- [0014] 方根幅值： $x_r = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{|x_i|} \right)^2$ ；
- [0015] 方差： $D_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{av})^2$ ；
- [0016] 峰-峰值： $x_{p-p} = \max(x_i) - \min(x_i)$ ；
- [0017] 偏态指标： $\alpha = \sqrt{\frac{1}{6n}} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - x_{av}}{\sqrt{D_x}} \right)^3$ ；
- [0018] 峭度指标： $\beta = \sqrt{\frac{n}{24}} \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - x_{av}}{\sqrt{D_x}} \right)^4 - 3 \right]$ ；
- [0019] 峰值指标： $C_f = \frac{x_p}{x_{rms}}$ ；
- [0020] 波形指标： $S_f = \frac{x_{rms}}{x_{av}}$ ；
- [0021] 脉冲指标： $I_f = \frac{x_p}{x_{rms}}$ ；
- [0022] 裕度指标： $CL_f = \frac{x_p}{x_r}$ ；
- [0023] 变异系数： $K_v = \frac{\sqrt{D_x}}{x_{av}}$ ；
- [0024] 重心频率(平均频率)： $f_{avg} = \frac{\int_0^{\infty} f p(f) df}{\int_0^{\infty} p(f) df}$ ；
- [0025] 均方频率： $f_b = \frac{\int_0^{\infty} f^2 p(f) df}{\int_0^{\infty} p(f) df}$ ；
- [0026] 均方根频率： $f_{bb} = \left(\frac{\int_0^{\infty} f^2 p(f) df}{\int_0^{\infty} p(f) df} \right)^{1/2}$ ；

[0027] 频率方差： $f_v = \frac{\int_0^{\infty} (f - f_{avg})^2 p(f) df}{\int_0^{\infty} p(f) df}$ ；

[0028] 频率标准差： $f_{rv} = \left[\frac{\int_0^{\infty} (f - f_{avg})^2 p(f) df}{\int_0^{\infty} p(f) df} \right]^2$ ；

[0029] 谱峰稳定指数： $S = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n/2} \{f_i^2 \cdot P(f_i)\}}{\sum_{i=1}^{n/2} P(f_i)}}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n/2} \{f_i^4 \cdot P(f_i)\}}{\sum_{i=1}^{n/2} f_i^2 \cdot P(f_i)}}}$ ；

[0030] 第一频带相对能量： $E_{r1} = \frac{\int_0^{B_f} p(f) df}{\int_0^{F_s} p(f) df}$ ；

[0031] 第二频带相对能量： $E_{r2} = \frac{\int_{B_f}^{2B_f} p(f) df}{\int_0^{F_s} p(f) df}$ ；

[0032] 第三频带相对能量： $E_{r3} = \frac{\int_{2B_f}^{3B_f} p(f) df}{\int_0^{F_s} p(f) df}$ ；

[0033] 第四频带相对能量： $E_{r4} = \frac{\int_{3B_f}^{4B_f} p(f) df}{\int_0^{F_s} p(f) df}$ ；

[0034] 第五频带相对能量： $E_{r5} = \frac{\int_{4B_f}^{5B_f} p(f) df}{\int_0^{F_s} p(f) df}$ ；

[0035] 所述 24 个特征指标计算公式中 f 表示信号的频率, $p(f)$ 表示信号的功率谱, B_f 表示 1/5 频段值, F_s 表示最高频率值；

[0036] (3) 寻求 24 特征指标最佳投影方向矩阵的具体步骤为：

[0037] ① 24 特征指标向量 X^* 的训练样本的预处理：

[0038] 设备某一工作状态, 所述状态可为正常状态或某一典型故障状态, 步骤(2)②所述 24 特征指标的样本构成训练样本空间可以用 $p \times n$ 的矩阵 $X^* = \{x^*(i, j) \mid i = 1, 2, \dots, p; j = 1, 2, \dots, n\}$ 来表示, p 表示训练样本的容量, n 表示特征指标的数量；

[0039] 为消除各特征指标量纲的影响并统一其值的波动范围, 需要对样本数据进行归一

化处理： $x(i, j) = \frac{x^*(i, j) - x_{\min}(j)}{x_{\max}(j) - x_{\min}(j)}$ ，其中， $x_{\max}(j)$ ， $x_{\min}(j)$ 分别表示原始数据 $x^*(i, j)$ 第 i 个指标的最大值和最小值， $X = \{x(i, j) \mid i = 1, 2, \dots, p; j = 1, 2, \dots, n\}$ 表示 $X^* = \{x^*(i, j) \mid i = 1, 2, \dots, p; j = 1, 2, \dots, n\}$ 归一化处理后的序列；

[0040] ②将 24 个特征指标向量进行投射，分析其投射值分布特点：

[0041] 所述投射就是把 p 维数据 $\{x(i, j) \mid i = 1, 2, \dots, p; j = 1, 2, \dots, n\}$ 转化为以矩阵 $a = \{a(1), a(2), a(3), \dots, a(p)\}$ 为投射方向的一维投射值 $z(j)$ ：

$$[0042] \quad z(j) = \sum_{i=1}^p a(i)x(i, j), \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

[0043] 其中 a 表示单位长度向量，然后按照投射值 $\{z(j) \mid j = 1, 2, \dots, n\}$ 的分布特点进行归类。

[0044] ③为了将所述步骤(3)②中各典型设备状态下的投射值区域分开来，构造投射目标函数以寻求最佳的投射方向矩阵 $A = [a_1, a_2, \dots, a_m]$ (其中包含最优投射方向 a_b)。

[0045] 投射目标函数指标可表达成： $Q(a) = S_z D_z$ ，其中， S_z 用投射值 $z(i)$ 标准差来描述类间距离； D_z 用投射值 $z(i)$ 局部密度来描述类内密度，即

$$[0046] \quad S_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z(i) - E(z))^2}{n-1}},$$

$$[0047] \quad D_z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (R - r(i, j)) \cdot u(R - r(i, j)),$$

[0048] 其中， $E(z)$ 为序列 $z = \{z(i) \mid i = 1, 2, \dots, n\}$ 的平均值； R 为局部密度的窗口半径，它的取值范围一般为： $r_{\max} + \frac{p}{2} \leq R \leq 2p$ ， p 为特征指标的数量； $r(i, j)$ 表示样本之间的距离， $r(i, j) = |z(i) - z(j)|$ ；单位阶跃函数 $u(t) = \begin{cases} 1, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases}$ ，

[0049] 最大化目标函数： $\text{Max}: Q(a) = S_z \cdot D_z$ ，

$$[0050] \quad \text{约束条件: } \sum_{j=1}^p a^2(j) = 1,$$

[0051] 在最佳投射方向矩阵 $A = [a_1, a_2, \dots, a_m]$ 下，每个特征指标的投射值 w_i ($i = 1, 2, \dots, s$) 都相对集中成带状分布，借助所述带状分布特点衡量特征指标对设备状态识别的聚类性和敏感性；

[0052] (4) 利用所述投影值带状分布实现 24 特征指标对煤矿设备状态识别的敏感度和聚类性的衡量和评价的过程：

[0053] ①计算衡量各特征指标敏感度和聚类性的五种离散性指标：

$$[0054] \quad \text{极差系数: } XD_{JC_i} = \frac{JC_i - JC}{JC}$$

[0055] 平均差系数： $XD_{PJC_i} = \frac{PJC_i - PJC}{PJC}$

[0056] 离散系数： $XD_{LS_i} = \frac{LS_i - LS}{LS}$

[0057] 主轴线相对系数： $XD_{z_i} = \frac{Z_{z_i} - Z_z}{Z_z}$

[0058] 均值系数： $XD_{m_i} = \frac{Z_{m_i} - Z_m}{Z_m}$

[0059] 其中,极差 $JC = \max(z(i)) - \min(z(i))$; $z(i)$ 表示各特征指标在最佳投影方向矩阵上的投影值;平均差 $PJC = \frac{\sum |z - Z_z|}{n}$; Z_z 表示特征指标在最佳投影方向矩阵下的投影值

主轴线;离散度 $LS = \sqrt{\frac{\sum (z - Z_z)^2}{n}}$; 投影值平均值 $Z_m = \frac{\sum z}{n}$ 。JC、PJC、LS、 Z_z 、 Z_m 分别表示

正常状态下的极差、平均差、离散度、主轴线和平均值;而 JC_i 、 PJC_i 、 LS_i 、 Z_{z_i} 、 Z_{m_i} 分别表示某一状态下的极差、平均差、离散度、主轴线和平均值。

[0060] ②判断特征指标的敏感性和聚类性

[0061] 如果步骤(4)①中计算得到的极差系数 $XD_{JC_i} > 0.2$ 、平均差系数 $XD_{PJC_i} > 0.4$ 、离散度系数 $XD_{LS_i} > 0.3$ 、主轴线相对系数 $XD_{z_i} > 2$ 和平均值系数 $XD_{m_i} > 2$,说明所述特征指标对煤矿设备的状态改变敏感性强,否则说明所述特征指标对煤矿设备的状态改变敏感性不强;

[0062] 当离散度 $LS > 1.5$ 时,说明所述特征指标对煤矿设备的状态改变聚类性强,说明所述特征指标对煤矿设备的状态改变聚类性不强;

[0063] 在工程中可以针对不同设备的不同故障状态,分别计算得到相应的极差系数、平均差系数、离散度系数、主轴线相对系数和平均值系数,判断特征指标是否对所述故障状态具有较强的敏感性和聚类性。

[0064] 相对于现有技术,本发明具有以下显著优点:

[0065] 1、本方法中对 24 个特征指标和目标函数的选择,是建立在实验室对设备故障振动信号特征的研究结论并结合专业人员多年的实践经验所筛选出来的,所选择的各项特征指标针对性强;

[0066] 2、本方法中诊断所采用的 24 个特征指标均经归一化处理转化为无量纲指标,因而在设备运行状态识别过程中,对不同的环境和设备具有同样的自适应能力,对各种类型的煤矿均可使用;

[0067] 3、本方法提出利用最佳投射方向矩阵建立设备运行状态评价指标体系,有效的避免了单一投射方向下在寻优过程中对新空间的探索能力有限、容易收敛到局部最优解、结果稳定性可靠性差的缺点,24 特征指标投射的主轴线位置清晰且呈带状分布简单明了易观察。

附图说明

[0068] 图 1 为轴承振动传感器安装方式；

[0069] 图 2(a)、图 2(b)、图 2(c)、图 2(d) 为内圈故障时 24 种特征指标投影值分布情况；

[0070] 图 3 为基于二维投射的特征指标对煤矿设备状态识别敏感性和聚类性判断流程图。

具体实施方式

[0071] 下面结合附图和具体实施方式对本发明作进一步说明。

[0072] (1) 轴承作为大型旋转机械设备的关键零部件,其故障类型分为滚动体故障、内圈故障、外圈故障、保持架故障四大类,另外所述四大类故障根据不同的损伤程度又进一步划分为不同的小类,可根据具体情况进行划分。在待评估的轴承的水平、垂直、轴向三个方向上安装加速度振动传感器(如图 1 所示),不间断地监测设备运行过程中轴承的振动数据,并将所述振动数据发送至后端接收和处理系统,并存入相关数据文件中以供后端分析使用。

[0073] (2) 对加速度振动传感器中提取的振动数据 $\{a_i, i = 1, 2, \dots, n\}$ 进行处理,具体步骤为:

[0074] ①对振动数据 $\{a_i, i = 1, 2, \dots, n\}$ 进行傅里叶变换得到 $\{x_i, i = 1, 2, \dots, n\}$;

[0075] ②按下列公式计算出设备某运行状态的 24 特征指标的样本: $\{x_{avi}\}, \{x_{pi}\}, \{x_{rmsi}\}, \{x_{ri}\}, \{D_{xi}\}, \{x_{p-pi}\}, \{\alpha_i\}, \{\beta_i\}, \{C_{fi}\}, \{S_{fi}\}, \{I_{fi}\}, \{CL_{fi}\}, \{K_{vi}\}, \{f_{avgi}\}, \{f_{bi}\}, \{f_{bbi}\}, \{f_{vi}\}, \{f_{rvi}\}, \{S_i\}, \{E_{r1i}\}, \{E_{r2i}\}, \{E_{r3i}\}, \{E_{r4i}\}, \{E_{r5i}\},$

[0076] 绝对均值: $x_{av} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i|$;

[0077] 峰值: $x_p = \max |x_i|$;

[0078] 有效值(均方根值): $x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}$;

[0079] 方根幅值: $x_r = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{|x_i|} \right)^2$;

[0080] 方差: $D_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{av})^2$;

[0081] 峰-峰值: $x_{p-p} = \max(x_i) - \min(x_i)$;

[0082] 偏态指标: $\alpha = \sqrt{\frac{1}{6n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - x_{av}}{\sqrt{D_x}} \right)^3}$;

[0083] 峭度指标: $\beta = \sqrt{\frac{n}{24} \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - x_{av}}{\sqrt{D_x}} \right)^4 - 3 \right]}$;

[0084] 峰值指标: $C_f = \frac{x_p}{x_{rms}}$;

[0085] 波形指标: $S_f = \frac{x_{rms}}{x_{av}}$;

[0086] 脉冲指标: $I_f = \frac{x_p}{x_{rms}}$;

[0087] 裕度指标: $CL_f = \frac{x_p}{x_r}$;

[0088] 变异系数: $K_v = \frac{\sqrt{D_x}}{x_{av}}$;

[0089] 重心频率(平均频率): $f_{avg} = \frac{\int_0^{\infty} fp(f)df}{\int_0^{\infty} p(f)df}$;

[0090] 均方频率: $f_b = \frac{\int_0^{\infty} f^2 p(f)df}{\int_0^{\infty} p(f)df}$;

[0091] 均方根频率: $f_{bb} = \left(\frac{\int_0^{\infty} f^2 p(f)df}{\int_0^{\infty} p(f)df} \right)^{1/2}$;

[0092] 频率方差: $f_v = \frac{\int_0^{\infty} (f - f_{avg})^2 p(f)df}{\int_0^{\infty} p(f)df}$;

[0093] 频率标准差: $f_{rv} = \left[\frac{\int_0^{\infty} (f - f_{avg})^2 p(f)df}{\int_0^{\infty} p(f)df} \right]^{1/2}$;

[0094] 谱峰稳定指数: $S = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n/2} \{f_i^2 \cdot P(f_i)\}}}{\sum_{i=1}^{n/2} P(f_i)}$; 第一频带相对能量:

$\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n/2} \{f_i^4 \cdot P(f_i)\}}}{\sum_{i=1}^{n/2} f_i^2 \cdot P(f_i)}$

$E_{r1} = \frac{\int_0^{B_f} p(f)df}{\int_0^{F_s} p(f)df}$;

[0095] 第二频带相对能量: $E_{r2} = \frac{\int_{B_f}^{2B_f} p(f)df}{\int_0^{F_s} p(f)df}$;

$$[0096] \quad \text{第三频带相对能量} : E_{r3} = \frac{\int_{2B_f}^{3B_f} p(f) df}{\int_0^{F_s} p(f) df} ;$$

$$[0097] \quad \text{第四频带相对能量} : E_{r4} = \frac{\int_{3B_f}^{4B_f} p(f) df}{\int_0^{F_s} p(f) df} ;$$

$$[0098] \quad \text{第五频带相对能量} : E_{r5} = \frac{\int_{4B_f}^{5B_f} p(f) df}{\int_0^{F_s} p(f) df} ;$$

[0099] 所述 24 个特征指标计算公式中 f 表示信号的频率, $p(f)$ 表示信号的功率谱, B_f 表示 1/5 频段值, F_s 表示最高频率值。

[0100] (3) 对 24 特征指标向量 X^* 进行处理, 实现轴承运行状态的识别和故障预警, 具体步骤为:

[0101] ① 24 特征指标向量 X^* 的训练样本的预处理:

[0102] 设备某一工作状态, 所述状态可为正常状态或某一典型故障状态, 步骤(2)②所述 24 特征指标的样本构成训练样本空间可以用 $p \times n$ 的矩阵 $X^* = \{x^*(i, j) \mid i = 1, 2, \dots, p; j = 1, 2, \dots, n\}$ 来表示, p 表示训练样本的容量, n 表示特征指标的数量。

[0103] 为消除各特征指标量纲的影响并统一其值的波动范围, 需要对样本数据进行归一化处理:

$x(i, j) = \frac{x^*(i, j) - x_{\min}(j)}{x_{\max}(j) - x_{\min}(j)}$, 其中, $x_{\max}(j)$, $x_{\min}(j)$ 分别表示原始数据 $x^*(i, j)$ 第 i 个指

标的最大值和最小值, $X = \{x(i, j) \mid i = 1, 2, \dots, p; j = 1, 2, \dots, n\}$ 表示 $X^* = \{x^*(i, j) \mid i = 1, 2, \dots, p; j = 1, 2, \dots, n\}$ 归一化处理后的序列。

[0104] ②将 24 个特征指标向量进行投射, 分析其投射值分布特点:

[0105] 所述投射就是把 p 维数据 $\{x(i, j) \mid i = 1, 2, \dots, p; j = 1, 2, \dots, n\}$ 转化为以矩阵 $a = \{a(1), a(2), a(3), \dots, a(p)\}$ 为投射方向的一维投射值 $z(j)$:

$$[0106] \quad z(j) = \sum_{i=1}^p a(i)x(i, j), \quad j = 1, 2, \dots, n$$

[0107] 其中 a 表示单位长度向量, 然后按照投射值 $\{z(j) \mid j = 1, 2, \dots, n\}$ 的分布特点进行归类。

[0108] ③为了将所述步骤(3)②中各典型轴承状态下的投射值区域分开来, 构造投射目标函数以寻求最佳的投射方向矩阵 $A = [a_1, a_2, \dots, a_m]$ (其中包含最优投射方向 a_0)。

[0109] 其中, S_z 用投射值 $z(i)$ 标准差来描述类间距离; D_z 用投射值 $z(i)$ 局部密度来描述类内密度, 即

$$[0110] \quad S_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z(i) - E(z))^2}{n-1}}$$

$$[0111] \quad D_z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (R - r(i, j)) \cdot u(R - r(i, j))$$

[0112] 其中, $E(z)$ 为序列 $z = \{z(i) | i = 1, 2, \dots, n\}$ 的平均值; R 为局部密度的窗口半径, 它的取值范围一般为: $r_{\max} + \frac{p}{2} \leq R \leq 2p$, p 为特征指标的数量; $r(i, j)$ 表示样本之间的

距离, $r(i, j) = |z(i) - z(j)|$; 单位阶跃函数 $u(t) = \begin{cases} 1, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases}$ 。

[0113] 最大化目标函数: $\text{Max}: Q(a) = S_z \cdot D_z$

[0114] 约束条件: $\sum_{j=1}^p a^2(j) = 1$

[0115] 在最佳投射方向矩阵 $A = [a_1, a_2, \dots, a_m]$ 下, 每个特征指标的投射值 $w_i (i = 1, 2, \dots, s)$ 都相对集中成带状分布, 借助所述带状分布特点衡量特征指标对设备状态识别的聚类性和敏感性。

[0116] 如图 2(a)、图 2(b)、图 2(c)、图 2(d) 所示为轴承内圈故障时 24 种特征指标的投影值分布情况。

[0117] (4) 利用所述投影值带状分布实现 24 特征指标对煤矿设备状态识别的敏感度和聚类性的衡量和评价的过程:

[0118] ① 计算衡量各特征指标敏感度和聚类性的五种离散性指标:

[0119] 极差系数: $XD_{JC_i} = \frac{JC_i - JC}{JC}$

[0120] 平均差系数: $XD_{PJC_i} = \frac{PJC_i - PJC}{PJC}$

[0121] 离散系数: $XD_{LS_i} = \frac{LS_i - LS}{LS}$

[0122] 主轴线相对系数: $XD_{z_i} = \frac{Z_{z_i} - Z_z}{Z_z}$

[0123] 均值系数: $XD_{m_i} = \frac{Z_{m_i} - Z_m}{Z_m}$

[0124] 其中, 极差 $JC = \max(z(i)) - \min(z(i))$; $z(i)$ 表示各特征指标在最佳投影方向矩阵上的投影值; 平均差 $PJC = \frac{\sum |z - Z_z|}{n}$; Z_z 表示特征指标在最佳投影方向矩阵下的投影值

主轴线; 离散度 $LS = \sqrt{\frac{\sum (z - Z_z)^2}{n}}$; 投影值平均值 $Z_m = \frac{\sum z}{n}$ 。 JC 、 PJC 、 LS 、 Z_z 、 Z_m 分别表示

正常状态下的极差、平均差、离散度、主轴线和平均值; 而 JC_i 、 PJC_i 、 LS_i 、 Z_{z_i} 、 Z_{m_i} 分别表示某一状态下的极差、平均差、离散度、主轴线和平均值。

[0125] ② 判断特征指标的敏感性和聚类性

[0126] 按照步骤 (4) ① 中的表达式分别计算五种离散性指标, 如极差系数 $XD_{JC_i} > 0.2$ 、

平均差系数 $XD_{PjCi} > 0.4$ 、离散度系数 $XD_{LSi} > 0.3$ 、主轴线相对系数 $XD_{zi} > 2$ 和平均值系数 $XD_{mi} > 2$ 时,说明所述特征指标对煤矿设备的状态改变敏感性强,说明所述特征指标对煤矿设备的状态改变敏感性不强;当离散度 $LS > 1.5$ 时,说明所述特征指标对煤矿设备状态的聚类性强,否则表示所述特征指标对煤矿设备状态的聚类性不强。

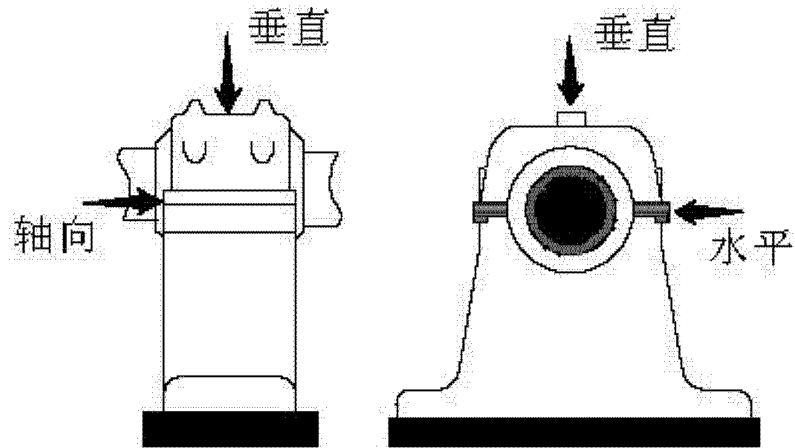


图 1

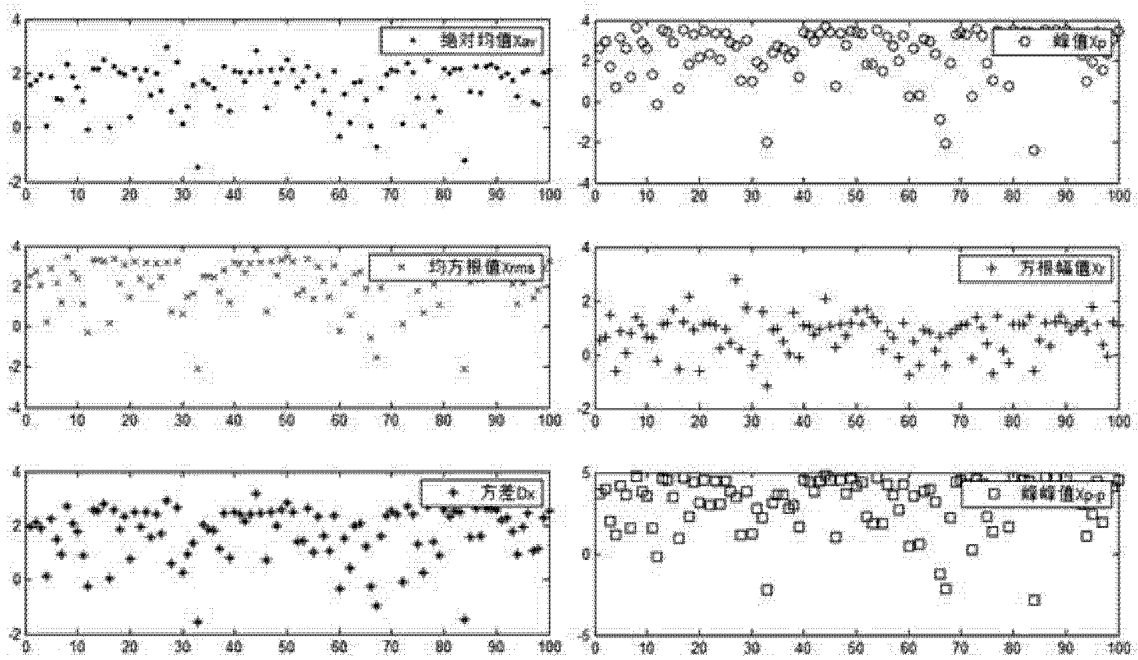


图 2(a)

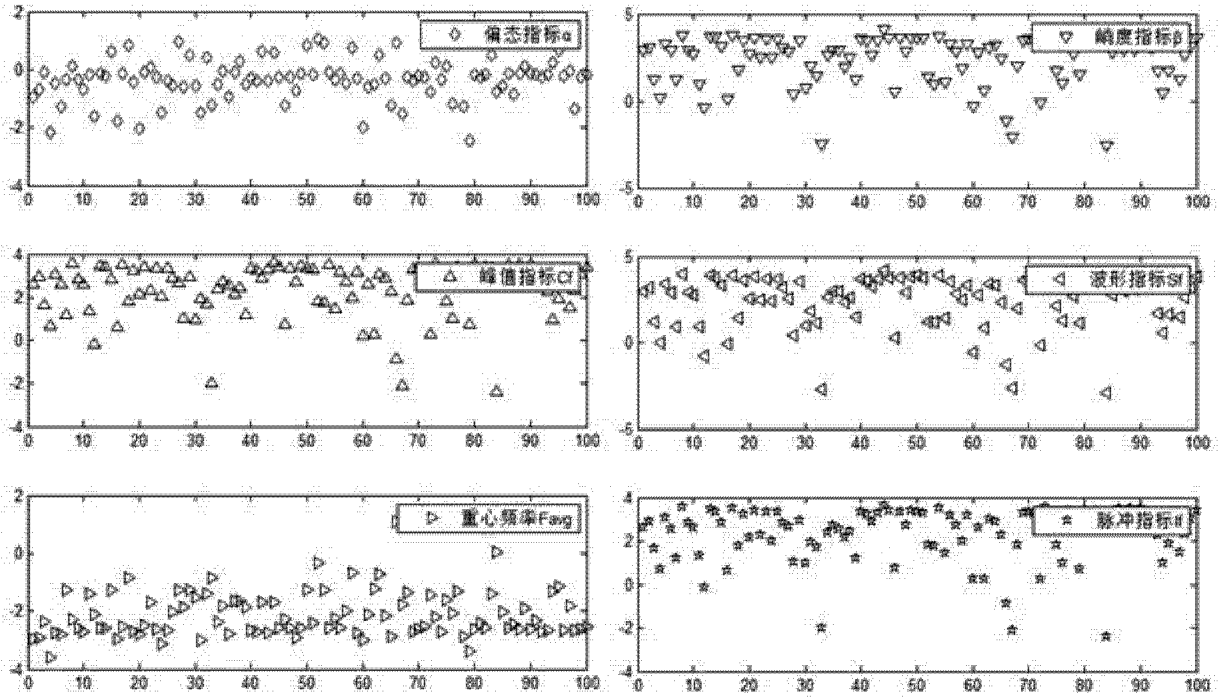


图 2(b)

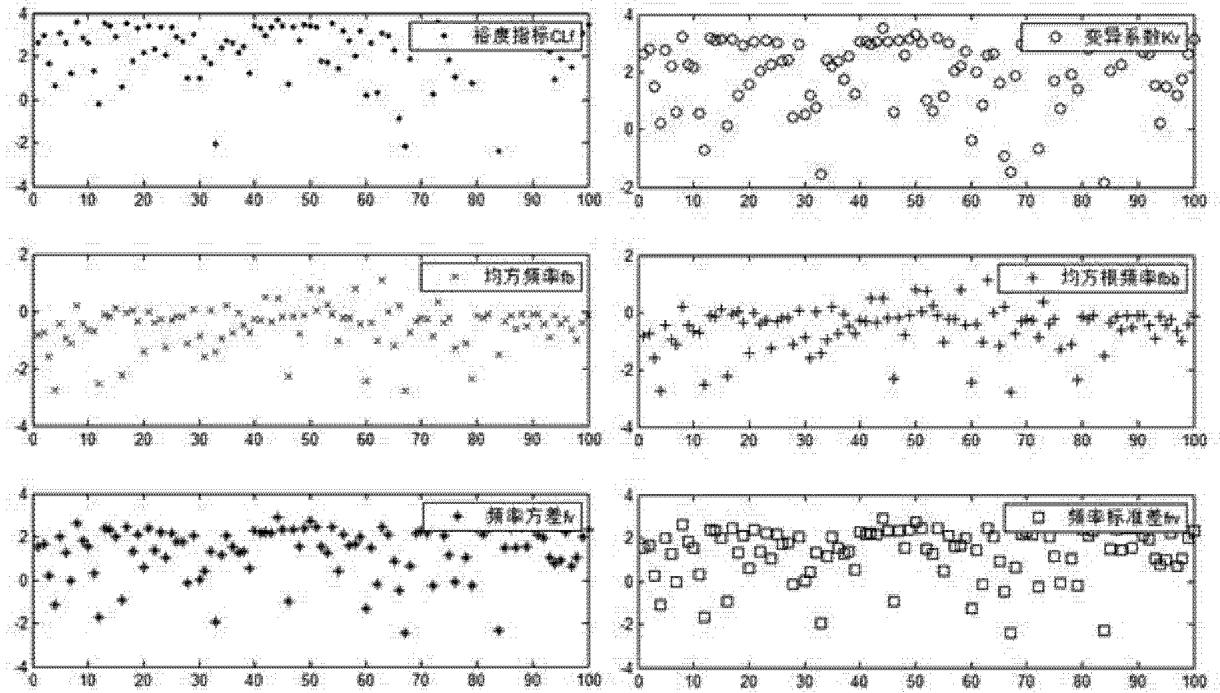


图 2(c)

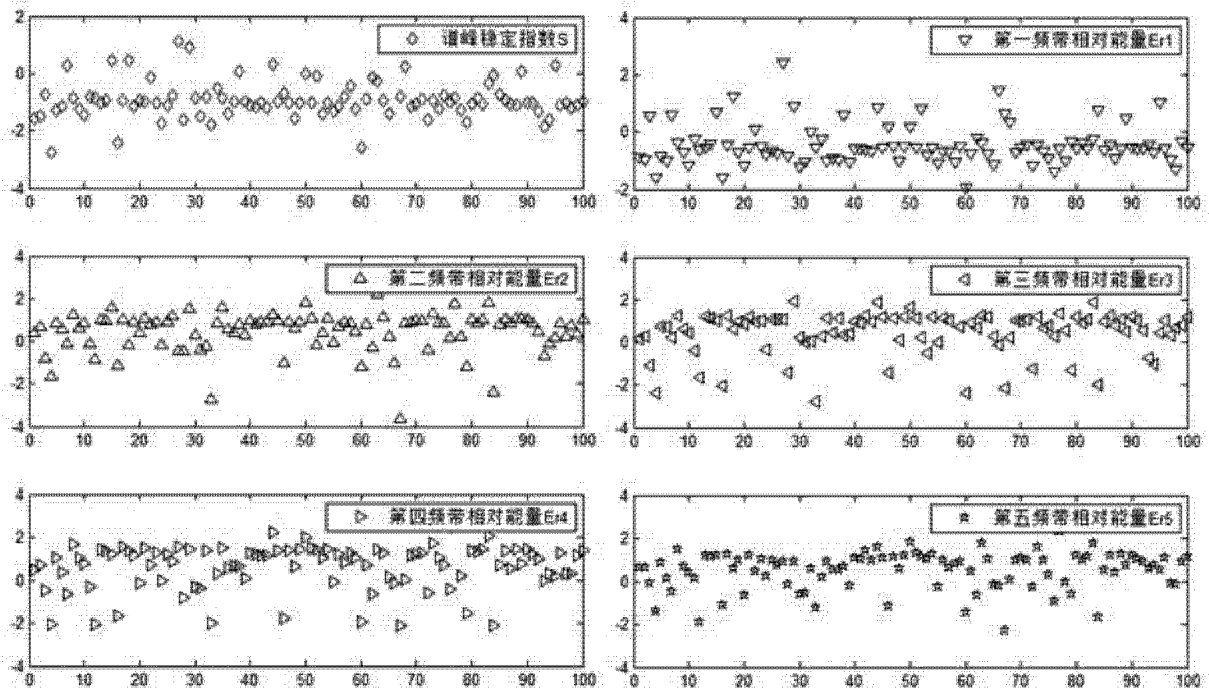


图 2(d)

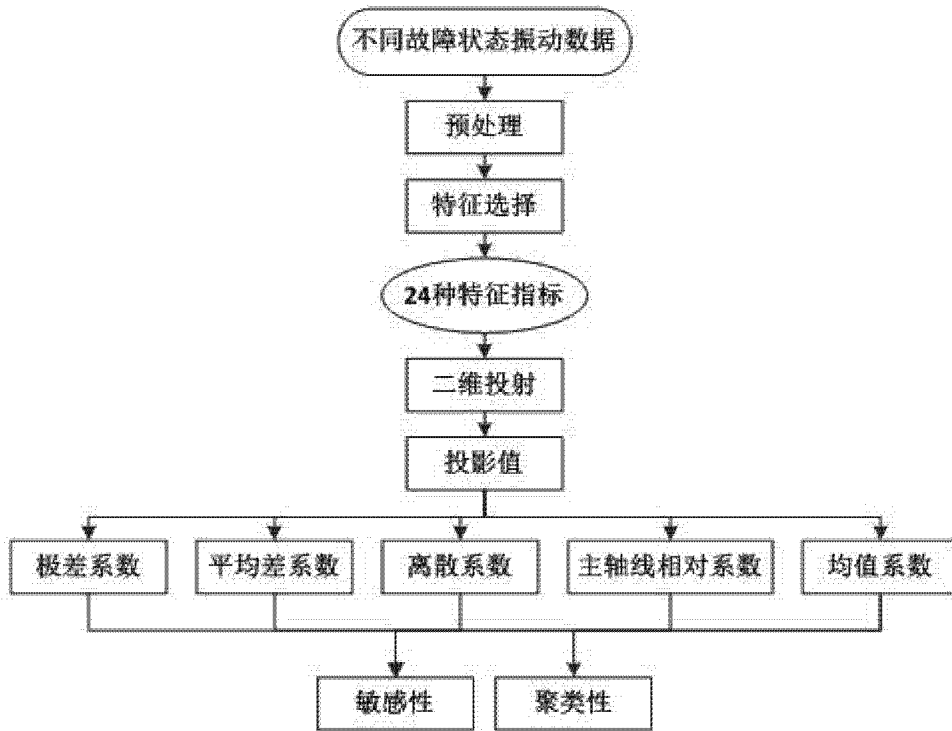


图 3