

基于奇异值分解技术的离心机故障诊断

彭培英¹ 申永军² 李黎阳²

(1. 河北科技大学机械电子工程学院, 石家庄 050000) (2. 石家庄铁道学院机械分院, 石家庄 050043)

摘要 在简单介绍 WH-800 型离心机基本结构及工作原理的基础上, 介绍了基于重构吸引子轨迹矩阵的奇异值分解技术, 并引入自相关函数对现有奇异值分解技术加以改进. 通过对现场实测故障信号的分析, 表明改进的奇异值分解技术具有很好的降噪效果, 能在强噪声背景环境下准确提取设备的故障特征信号, 为离心机的故障诊断提供了一种新的思路.

关键词 离心机, 奇异值分解, 降噪, 故障诊断

引言

目前 WH-800 型卧式单级活塞推料、连续操作的过滤式离心机是化肥生产企业的主要设备, 它的正常工作与否直接影响到企业的化肥产量及经济效益. 然而, 现有的文献表明利用先进信号处理技术对离心机进行故障诊断的很少, 大多只是维修工作经验总结^[1]. 本文介绍的奇异值分解技术在机械系统故障诊断领域已有应用^[2-8]. 吕志民等首先提出基于重构吸引子轨迹矩阵的奇异值分解技术的降噪方法, 并成功用于故障诊断中^[2]; 文献[3-4]分别利用奇异值分解技术对声音故障信号, 齿轮箱故障信号进行降噪处理, 都取得了较好的效果; 文献[5-6]通过奇异值降噪成功提取信号中的周期成分(奇异谱分析); 而刘献栋、何田^[7-8]等人反其道而行, 利用奇异值分解技术降低了平滑信号及噪声信号的影响, 成功地从噪声背景下提取出了所需的冲击信号.

在现有研究的基础上^[9-10], 对现有奇异值分解技术加以改进, 获得了更好的降噪效果, 并引入离心机故障诊断中. 针对石家庄某化肥厂碳化岗位应用的 WH-800 型卧式活塞推料离心机故障振动信号进行分析, 成功提取其中轴不对中引起的故障特征.

1 离心机主要结构及工作原理

1.1 主要结构

WH-800 型卧式活塞推料离心机主要由筛篮、主轴、推料器及机座等组成. 主轴安装在机座的前轴承和后轴承内, 由电机通过皮带轮带动旋转, 主轴是空心的, 在它的一端装有旋转的筛篮, 在筛篮内壁覆有筛网. 在空心轴里面放有推杆, 推杆的一端安装推料器, 另一端安装活塞. 活塞位于油缸内, 受油压作用做往复运动, 而使推料器在筛篮内做往复运动. 活塞、推杆和推料器随主轴一同旋转.

1.2 工作原理

从碳化主塔取出的悬浮液中, 含有 40% - 60% 的碳酸氢铵固体结晶, 为了把碳酸氢铵固体结晶出来, 需要把悬浮液连续地从加料管进入随筛网一同旋转的锥形布料斗内, 由于离心的作用, 悬浮液均匀地分布在筛网的内周. 母液在离心力作用下经筛网中缝隙和筛篮上的小孔被甩出, 从外壳下部的母液出口排出. 固体的碳酸氢铵结晶则沉积在筛网上形成滤渣区, 因推料器周期地往复移动, 将滤渣层沿筛篮的轴不断地向前推移, 最后被推至外壳前部的出料口而卸出.

1.3 主要的性能参数

(1) 转鼓内径 800 mm; (2) 转鼓转速 820 r/min; (3) 推料往复次数 25 次/min; (4) 油压系统工作压力 1.6 MPa; (5) 推料器最大行程 40 mm; (6) 离心机生产能力(以碳酸氢铵计) 5 t/h.

2 奇异值分解技术

2.1 奇异值分解技术

设 A 为一个 $m \times n$ 维实矩阵, 它的奇异值分解是指存在矩阵 $U \in R^{m \times m}$, $UU^T = I$ 和 $V \in R^{n \times n}$, $VV^T = I$, 以及矩阵 $\Lambda = [\text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p\}; 0]$ 使得:

$$A = U\Lambda V^T \quad (1)$$

式中: $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \dots \geq \lambda_p > 0$ 称为矩阵 A 的奇异值. 矩阵 A 的秩为 p , 且 $p \leq \min(m, n)$. U, V 分别称为矩阵 A 的左、右奇异矩阵.

2.2 时间序列重构的吸引子轨迹矩阵

假设具有含故障齿轮箱的某通道的振动信号为: $X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_N]$, 并且其故障信号是调制型的. 按照文献[8]重构的吸引子轨迹矩阵为如式(2)所示, 此时满足 $m + n - 1 = N$.

$$D_m = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ x_2 & x_3 & \dots & x_{n+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_m & x_{m+1} & \dots & x_{m+n-1} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (2)$$

但是, 由于能否成功进行重构吸引子轨迹矩阵奇异值分解的关键在于选择恰当的延迟步长 τ : 若 τ 过小, 则重构矩阵各行几乎相同, 不是独立坐标; 而若 τ 过大, 则各行之间虽然相关性减小, 但重构矩阵需要更长的时间序列. 因此, 选择一个适宜的延迟步长 τ , 使得延迟后的序列携带原序列所不具备的最多信息, 而且所需时间序列不至于太长.

具体方法是, 计算测试信号时间序列 $X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_N]$ 的自相关函数序列:

$$r_k \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N x_i x_{i+k}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

取 τ 为 r_k 获得第一个极小值时所对应的 k 值.

利用该方法对上述重构吸引子轨迹矩阵进行改进: 首先, 计算测试信号的自相关函数, 以确定对应的 k 值, 即最小延时步长 τ ; 然后以 τ 为延时进行重构吸引子矩阵. 改进后的吸引子矩阵如(4)式所示, 此时满足 $(m-1) \times \tau + n = N$.

$$D_m = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ x_{1 \times \tau + 1} & x_{1 \times \tau + 2} & \dots & x_{1 \times \tau + n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{(m-1) \times \tau + 1} & x_{(m-1) \times \tau + 2} & \dots & x_{(m-1) \times \tau + n} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (4)$$

将 D_m 表示成: $D_m = D + W + V$, 其中 D 是周期信号对应的在重构相空间中的吸引子轨迹矩阵, W

是由故障信号对应的轨迹矩阵, V 表示噪声对应的轨迹矩阵.

2.3 故障信息提取的奇异值分解技术

由于周期信号对应的重构吸引子轨迹矩阵是奇异的^[4], 即其秩 $k_D < \min(m, n)$, 一般取 $m \ll n$, 随着 k_D 的增大, 奇异值迅速衰减; 对于故障信号构成的轨迹矩阵 W , 是比周期信号秩要高的矩阵, 即它的秩 k_w ($k_D < k_w \leq m$), 且随着 k_w 的增大, 奇异值下降过程有一个过渡阶段; 噪声信号由于随机性, 其构成的轨迹矩阵是列满秩矩阵, 所以它的奇异值是逐渐变化的, 但其变化过程比较平缓, 也没有奇异值突变现象. 因此, 由含有故障信息和噪声的机械振动信号重构的吸引子轨迹矩阵 D_m 也必是列满秩矩阵. 对它进行奇异值分解后得到 m 个奇异值: $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \dots \geq \lambda_m > 0$.

根据 D, W 和 V 的各自的奇异值分布具有不同的规律, 可以推断: 周期信号、故障信号和噪声信号对应 $D_m = D + W + V$ 分解后的各奇异值也不一样: 即 D 主要对应 $0 \sim k_D$ ($k_D < k_w$) 阶, 故障信息对应 $0 \sim k_w$, ($k_w \leq m$) 阶, 而噪声对应的各阶几乎相等. 因此, 可以分别选择奇异值中与故障信息对应的某几个奇异值 λ_k ($k_D \leq k \leq k_w$), 其它奇异值置零, 然后再利用奇异值分解的逆过程及相空间重构反变换便可得到对应的 W' , 亦即所需的故障故障信号.

3 奇异值分解技术在离心机故障诊断中的应用

采用本文介绍的方法, 对 WH-800 型离心机机壳振动信号进行分析, 测量示意图见图 1. 根据测

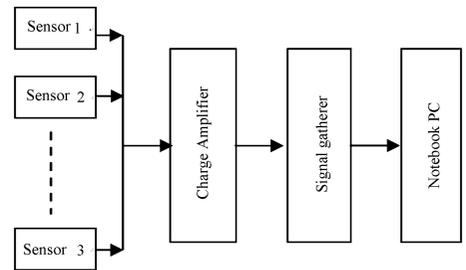


图1 测试装置布置示意图

Fig. 1 Illustration of measurement instrument

量时的转速可计算出离心机主轴轴频为 13.67 Hz. 图 2 为实测信号的时频曲线图, 可以看出测试信号具有很强的背景噪声, 频谱图中只能看出轴频及其二倍频. 图 3-a 为自相关函数曲线及奇异值分布

曲线,从图中可见取 $k=7$;图3-b为奇异值随重构维数的变化曲线。经过奇异值重构及反变换,可以很好的降低噪声信号的影响,突现故障信号(见图4),可以看出重构后的信号能够准确的观测到轴频及其二、三、四倍频,说明该离心机存在较强的轴不对中现象。

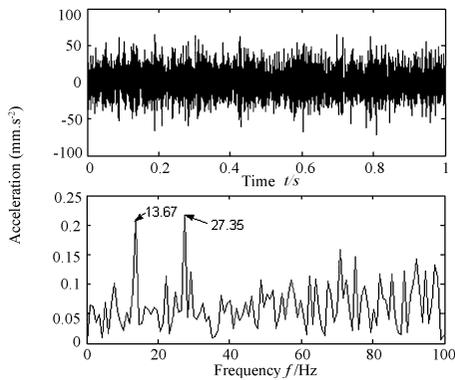


图2 (a)实测信号时域曲线;(b)实测信号频域曲线

Fig.2 (a)Time history of measured signal;

(b)Frequency curve of measured signal

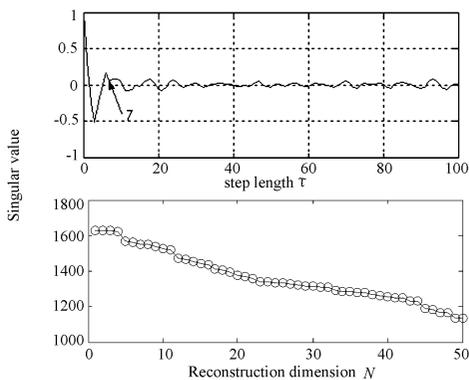


图3 (a)实测信号自相关函数曲线;(b)实测信号奇异值曲线

Fig.3 (a)Autocorrelation function of measured signal;

(b)Singular value of measured signal

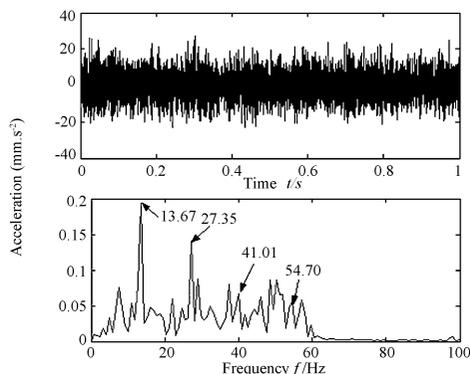


图4 (a)实测信号重构后时域曲线;

(b)实测信号重构后频域曲线

Fig.4 (a)Time history of reconstructed signal;

(b)Frequency curve of reconstructed signal

4 结论

本文首次将基于重构吸引子轨迹矩阵的奇异值分解技术引入离心机故障诊断,并对现有奇异值分解技术加以改进,引入自相关函数,进一步完善了奇异值分解技术;应用本文改进的奇异值分解技术,对实测离心机故障信号进行分析,成功分析出了离心机存在的主轴不对中故障,为离心机的故障诊断提供了一个新的思路。

参考文献

- 李栋. WH-800 离心机不推料故障分析判断. 山西冶金, 2005, 98(2): 39~41 (Li Dong. Analysis on malfunction of unfeeding of WH-800 centrifugal machine. *Shanxi Metallurgy*, 2005, 98(2): 39~41 (in Chinese))
- 吕志民, 张武军, 徐金梧, 翟绪圣. 基于奇异谱的降噪方法及其在故障诊断技术中的应用. 机械工程学报, 1999, 35(3): 85~88 (Lv Zhimin, Zhang Wujun, Xu Jinwu, Zhai Xusheng. A noise reduction method based on sigular spectrum and its application in machine fault diagnosis. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 1999, 35(3): 85~88 (in Chinese))
- 温广瑞, 张西宁, 屈梁生. 奇异值分解技术在声音信息分离中的应用. 西安交通大学学报, 2003, 37(1): 37~40 (Wen Guangrui, Zhang xining, Qu Liangsheng. Application of singular value decomposition and short time fourier transform in sound information separation. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2003, 37(1): 37~40 (in Chinese))
- 袁小宏, 史东峰. 奇异值分解技术在齿轮箱故障诊断中的应用. 振动、测试与诊断, 2000, 20(2): 91~96 (Yuan Xiaohong, Shi Dongfeng. Application of singular value decomposition in fault diagnosis of gear-box. *Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis*, 2000, 20(2): 91~96 (in Chinese))
- 李建, 刘红星, 屈梁生. 探测信号中周期性冲击分量的奇异值分解技术. 振动工程学报, 2002, 15(4): 415~418 (Li Jian, Liu Hongxing, Qu Liangsheng. Detection of periodic impulse components in signals using singular value decomposition. *Journal of Vibration Engineering*, 2002, 15(4): 415~418 (in Chinese))
- Kanjilal P P, Palit S, Saha G. Fetal ECG extraction from single channel maternal ECG using singular value decomposition. *IEEE Trans. on Biomedical Engineering*, 1997, 44(1):

51 ~ 59

- 7 刘献栋,杨绍普,申永军,李其汉. 基于奇异值分解的突变信息检测新方法及其应用. 机械工程学报,2002,38(6):102 ~ 105 (Liu Xiandong, Yang Shaopu, Shen Yongjun, Li Qihan. New method of detecting abrupt information based on singular value decomposition and its application. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2002, 38(6):102 ~ 105 (in Chinese))
- 8 何田,刘献栋,李其汉. 噪声背景下检测突变信息的奇异值分解技术. 振动工程学报,2006,19(1):399 ~ 403(He Tian, Liu Xiandong, Li Qihan. An improved method of detecting abrupt information based on singularity value decomposition in noise background. *Journal of Vibration Engineering*, 2006, 19(1):399 ~ 403 (in Chinese))
- 9 刘晓燕,申永军,张帆. 磁流变减振器的主共振研究. 动力学与控制学报,2006,4(1):49 ~ 53(Liu Xiaoyan, Shen Yongjun, Zhang Fan. Research on primary resonance of magnetorheological damper. *Journal of Dynamics and Control*, 2006, 4(1):49 ~ 53 (in Chinese))
- 10 李韶华,杨绍普. 滞后非线性模型的研究进展. 动力学与控制学报,2006,4(1):8 ~ 15(Li Shaohua, Yang Shaopu. Research status of hysteretic noniinear models. *Journal of Dynamics and Control*, 2006, 4(1):8 ~ 15 (in Chinese))

FAULTS DIAGNOSIS OF CENTRIFUGE BASED ON SINGULAR VALUE DECOMPOSITION

Peng Peiyang¹ Shen Yongjun² Li Liyang²

(1. Institute of Mechanical and Electronic Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050043, China)

(2. Department of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Railway Institute, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract The basic configuration and principle of WH-800 centrifuge were introduced. And then we introduced and improved the singular value distribution of the Singularity Value Decomposition about track matrix of attractor reconstructed by time series, which imported the autocorrelation function. The analysis of the test signals shows that the singular value distribution method is very effective in depressing noise and detecting faults of the centrifuge, which offers a new method to the faults diagnosis of the centrifuge.

Key words centrifuge, singular value decomposition, denoise, faults diagnosis