

基于混沌-分形理论的往复式活塞隔膜泵磨损故障分析*

史丽晨 段志善

(西安建筑科技大学机电工程学院, 西安 710055)

【摘要】 针对往复式活塞隔膜泵磨损故障,采用混沌理论和分形技术,对隔膜泵不同连接处磨损时的系统非线性表现形式加以研究。通过对不同故障类型振动信号的分析,绘制了相应的庞加莱截面图,并计算了各种磨损故障的最大李雅普诺夫指数和关联维数。研究表明当没有磨损故障时,系统为准周期态;而隔膜泵的各种磨损故障信号呈现混沌性态,且不同故障状态的最大李雅普诺夫指数和关联维数有着较大的差别,可以用作其状态监测和故障诊断的特征参数。

关键词: 往复式活塞隔膜泵 磨损 故障诊断 分形 混沌

中图分类号: TH165+.3; TH323 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)04-0222-05

Wearing Fault Diagnosis of Reciprocating Membrane Pump Based on Chaos and Fractal Theory

Shi Lichen Duan Zhishan

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract

The non-linear behaviour for wearing fault of reciprocating membrane pump was investigated with chaos theory and fractal technology. The vibration acceleration signals of the wearing in different joint were collected to analyse. Poincare sections were drew to study the status of the system. Correlation dimension and the largest Lyapunov exponent were calculated to recognize the different wearing. The results showed that non-abrasion pump system is in quasi-period state, while the fault status is in chaos. The research also indicated that different wearing fault has different largest Lyapunov exponent and different correlation dimension, which can be used as the characteristics for the pump's monitoring and fault diagnosis.

Key words Reciprocating membrane pump, Wearing, Fault diagnosis, Fractal, Chaos

引言

隔膜泵是动力输送的核心设备,对其工作状态的监测十分重要。但是目前对隔膜泵的状态监测基本上是以工艺参数监测为主。实际上往复式活塞隔膜泵常见故障不仅会发生在液力部分,在其机械动力部分也很容易出现故障。所以对隔膜泵的振动状态监测和故障诊断工作不可或缺。

往复式活塞隔膜泵系统具有典型的非平稳性,由于各部件之间的激励和响应的相互耦合而具有非

线性性。隔膜泵主要由传动部分、动力部分和液力部分组成,在工作时激励源众多,各部件之间的振动信号相互干扰,所以表现的总信号十分复杂,因此正确地隔膜的工作状态和故障类型进行判别是一个值得探讨的问题。

混沌研究的是非线性过程的内在随机性,而分形则探索了非线性系统中有序与无序的统一。因此将它们引入复杂机械系统进行状态的判断,有着其独特的优势,国内外学者也取得了一些研究成果^[1-6]。本文针对往复式活塞隔膜泵不同类型磨损

的振动信号,用混沌理论与分形技术进行状态分析。

1 混沌与分形理论

非线性动力学系统中的混沌可以理解为:聚散有法,周行而不殆,回复而不闭。即混沌轨道的运动完全受规律支配,但相空间中轨道运动不会终止,在有限空间中永远运动着,不相交也不闭合。混沌运动表面上是无序的,与纯粹的随机运动很相似,即都不可预测。但其在本质上是不同于随机运动的,混沌运动在动力学上是确定的,它的不可预测性是来源于运动的不稳定性。混沌系统的研究方法有定性和定量两大类,在定性方法中以庞加莱截面法较为常见,在定量研究方法中以最大李雅普诺夫指数和分形维数比较有效^[7]。

1.1 庞加莱截面

庞加莱截面是在多维相空间选取一适当的截面,截面与相轨迹的交点反映了动力系统的结构。其具体做法是:在相空间中适当选取一截面,即庞加莱截面,在此截面上对某一对共轭变量($x_n, dx_n/dt$)取固定值,通过计算机画出运动轨迹与庞加莱截面的截点,则原来相空间的连续轨迹在庞加莱截面上表现为一些离散分布形式,通过图形即可判断系统的性态。

当庞加莱截面上只有一个不动点或少数几个离散点时,运动是周期的;当庞加莱截面上是一闭曲线时,运动是准周期的;当庞加莱截面上是成片的密集点且有层次结构时,运动是混沌的。

1.2 最大李雅普诺夫指数

李雅普诺夫指数在混沌系统的研究中占有很重要的地位,它可以对系统是否混沌作出判断。李雅普诺夫指数的数学意义是在相邻两条相轨线相互发散或靠拢的平均速率。

Liouville 定理指出,对于保守系统相空间的体积不随时间变化而变化。但是对于一个耗散系统,其相体积一般要随时间而逐渐收缩,这是由于方程存在着耗散项。相体积的收缩可以是所有方向上都收缩;也可以是某个方向的伸长,其余方向的收缩,但最终体积比初始体积小。在整个过程中,相轨道一方面由于耗散的作用而收缩,另一方面在相互靠拢时又相互排斥,这样最终在有限的范围内经过无数次的来回折叠,形成复杂的运动状态——混沌。李雅普诺夫指数就是为了定量刻画两个无限靠近的点随时间分离的快慢而引入的。

假设系统的 Jacobi 矩阵处处存在,若在 t_0 时刻给定系统一个小的扰动量 $\Delta X(t_0)$,而在 t 时刻系统的扰动变为 $\Delta X(t)$,则李雅普诺夫指数定义为

$$\lambda = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t - t_0} \ln \frac{\|\Delta X(t)\|}{\|\Delta X(t_0)\|}$$

在一个 n 维的相空间中,由于扰动在 n 个方向上都所有变化,因此系统有 n 个李雅普诺夫指数。利用李雅普诺夫指数可以判定系统的运动是确定性运动还是混沌运动。若系统的最大李雅普诺夫指数为正,则系统的运动为混沌运动;而最大李雅普诺夫指数为负时为周期运动;最大李雅普诺夫指数等于零时,系统的运动则为周期运动或拟周期运动。

1.3 分形维数的计算

混沌吸引子具有不规则、非周期、错综复杂和自相似的结构特性,因此用以描述不规则图形的分形理论被引入混沌理论的研究中。分形理论中的主要参数是分形维数,从测度论的角度讲,分形维数度量了系统填充空间的能力,反映了复杂形体占有空间的有效性。分形维数的种类很多,本文选取反映相空间中各点距离接近程度的关联维数进行研究。

在实际操作中关联维数常用 G-P 算法得出,也就是由观测到的一维时间序列,利用相空间重构的办法直接计算得出,即利用 Grassberger 和 Procaccia 根据嵌入理论和重构相空间思想提出的一种算法^[5-6]。

2 隔膜泵诊断实例

2.1 隔膜泵结构及工作原理

图1为隔膜泵的结构及工作原理图。曲轴1、连杆2、十字头3、小连杆4、活塞缸5、活塞6组成了一个曲柄连杆机构。电动机通过减速机带动曲柄连杆机构使十字头3在滑道内作往复运动,再由十字头3带动小连杆4和活塞6在活塞缸5内作往复运动,活塞6借助油介质使隔膜10作凹凸运动,使隔膜室腔内容积周期变化,完成料浆的输送。当隔膜10向左运动时,进料阀12打开而吸入料浆;当隔膜10向右运动时,出料阀11打开而排出料浆,由此完成隔膜的一个往复运动。三缸单作用往复式活塞隔膜泵有3组曲柄滑块机构,有3个活塞缸,每个缸使隔膜室起始排料相位相隔120°,可使料浆输送流量

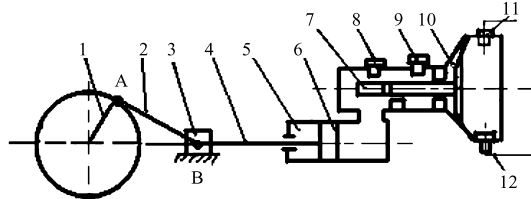


图1 往复式活塞隔膜泵结构及工作原理图

Fig.1 Structure diagram of membrane pump

1. 曲轴 2. 连杆 3. 十字头 4. 小连杆 5. 活塞缸 6. 活塞
7. 导杆 8. 补油探头 9. 排油探头 10. 隔膜 11. 出料阀
12. 进料阀

均匀。

本文研究对象是隔膜泵的动力端。实际上隔膜泵动力端的主要机构是由曲轴1、连杆2、十字头3、小连杆4、活塞缸5和活塞6所组成的部分。由于研究对象磨损处于图中的A、B两处,所以将十字头、活塞缸和活塞简化为一个固接的整体,于是整个机构可以看成是一个曲柄滑块机构。本文研究类型为:磨损仅发生在曲轴与连杆连接处A,磨损仅发生在连杆与十字头连接处B,以及磨损同时发生在A、B两处时机构的动力学特性。

2.2 振动信号的获取

用自行开发的隔膜泵状态监测系统对太钢集团尖山铁矿的矿精粉输送设备——隔膜泵进行数据采集,采集时设备的工况如下:输出流量 $199\text{ m}^3/\text{h}$,出口压力 14.6 MPa ,吸入压力 0.23 MPa ,活塞冲次

$63.6\text{ 次}/\text{min}$,冲程 509 mm ,设备总传动比20。

在采集数据时分别模拟不同连接处磨损时的3种情形,获得了3类信号。考虑到信号噪声的影响,在分析前,先将信号按如下步骤处理:

(1) 每类信号分别采集了10组数据。

(2) 每类信号的10组数据进行相加平均,以提高信噪比。

(3) 将相加平均后得到的信号进行小波消噪处理。本文采用的是Donoho提出的阈值法^[8],选择db4小波函数,分解层次为10层,阈值按照阈值自适应技术进行选取^[9]。

2.3 庞加莱截面分析

对不同连接处松动时十字头滑块的加速度信号进行分析。图2~5为各种情况的滑块位移-速度相图以及相应的庞加莱截面图。

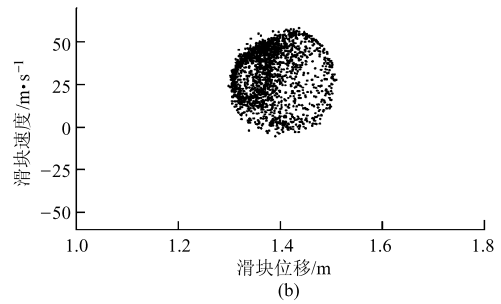
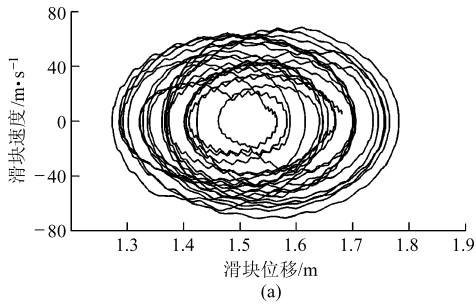


图2 A处磨损时诊断结果

Fig. 2 Diagnosis results of wearing in joint A

(a) 滑块位移-速度相图 (b) 滑块位移-速度庞加莱截面

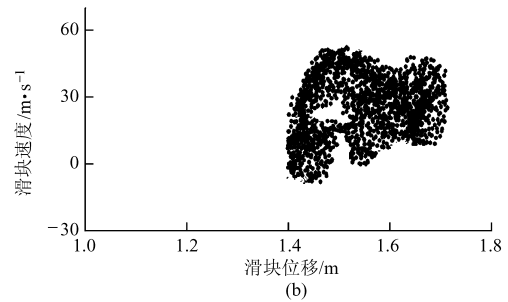
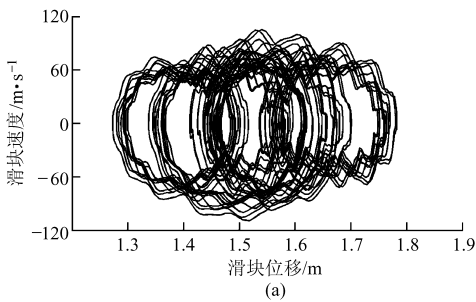


图3 B处磨损时诊断结果

Fig. 3 Diagnosis results of wearing in joint B

(a) 滑块位移-速度相图 (b) 滑块位移-速度庞加莱截面

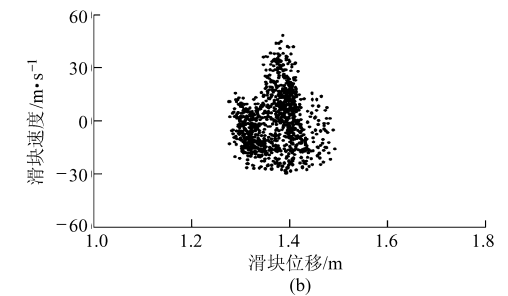
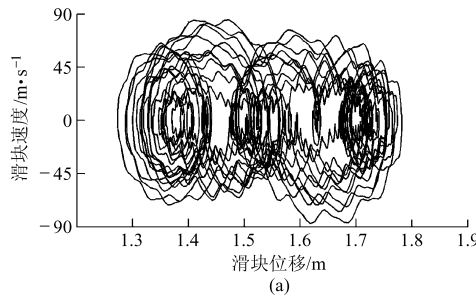


图4 A、B处同时磨损时诊断结果

Fig. 4 Diagnosis results of wearing in joint A and B

(a) 滑块位移-速度相图 (b) 滑块位移-速度庞加莱截面

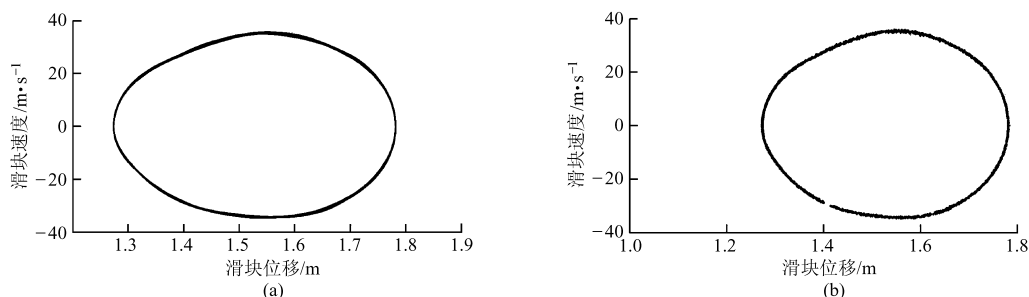


图 5 无磨损时诊断结果

Fig. 5 Diagnosis results of non-wearing

(a) 滑块位移-速度相图 (b) 滑块位移-速度庞加莱截面

观察不同磨损情况下的运动相图可以看到,相轨迹不重复且紊乱无序。在相应的庞加莱映射图中可以发现映射图上的点成片密集,出现混沌吸引子,说明系统处于混沌状态。且不同回转副处磨损,庞加莱映射图的结构不相同,也就是说混沌吸引子的形状发生了改变。当系统不存在磨损故障时(图 5),相轨迹图表现出轨迹均匀有序,庞加莱截面为封闭的曲线,说明这种情况为准周期状态。

2.4 混沌特性研究

为了进一步证实庞加莱截面的定性判断,同时为了提取磨损的故障诊断的特征参数,计算以上 4 种状态信号的最大李雅普诺夫指数。

李雅普诺夫指数计算采用 Wolf 算法。计算时每组信号取 8 192 个采样点,计算点数每次递增 16,在嵌入维数达到 28 维时算法收敛。从最大李雅普诺夫指数计算跟踪图(图 6)中看到,当采样点数大于 2 048 点时,李雅普诺夫指数计算曲线趋于平稳,从而得到相应的最大李雅普诺夫指数:A 处磨损时为 0.021 65, B 处磨损时为 0.049 85, A 和 B 处同时磨损时为 0.084 16,连接处无磨损时为 0.000 13。由此可以得到如下结论:

(1)在出现不同磨损状态时,各振动信号的最大李雅普诺夫指数大于零,说明系统处于混沌状态。当系统无磨损时,最大李雅普诺夫指数为 0.000 13,虽然为正数,但是已经接近于零,因此可以说此时系统处于准周期状态,但也可以说处于临界混沌状态。最大李雅普诺夫指数也验证了从相轨迹图线和庞加莱截面分析的结果:当磨损故障出现时,系统处于混沌状态。

(2)不同磨损状况以及系统无故障时的最大李雅普诺夫指数区分明显,所以可以通过该参数判断设备的状态。

(3)双副磨损的最大李雅普诺夫指数最大。由于李雅普诺夫指数是混沌系统的特性参数,其大小描述了系统的混沌程度,双副磨损时系统的混沌程度最大,这是因为其两处回转副都存在磨损间隙,副元素的运转更加不稳定。从另外一个角度说,李雅普诺夫指数又描述了相空间相邻轨道的平均发散率,反映了系统总能量的耗散程度,因此可以说双副磨损时,系统能量耗散最大,这是因为双副磨损时系统运动不稳定程度较高,副元素间的碰撞次数增多。

(4)系统无磨损故障时运行状态为拟周期而非

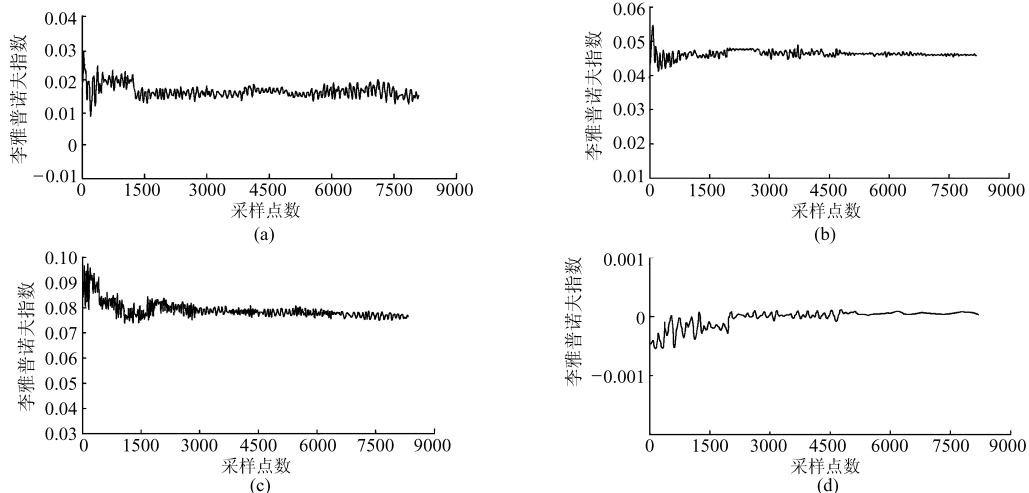


图 6 最大李雅普诺夫指数追踪计算图

Fig. 6 Largest Lyapunov index tracking calculation

(a) A 处磨损 (b) B 处磨损 (c) A、B 处同时磨损 (d) 无磨损

周期运转状态, 因为: 实际设备的回转副元素之间的接触为弹性接触, 所以在运转过程中, 由于外力, 副元素间会有弹性形变, 从而产生附件反力, 最终会影响系统的整体响应, 而在系统的工作过程中, 弹性形变的大小和方向是系统不可预期的; 隔膜泵工作时由于作用在活塞上的压力来自于液压系统, 流体压力为脉动状态, 这也对系统的无故障运行产生了一定的作用。

2.5 关联维数的计算与分析

对各种故障信号进行关联维数计算, 当嵌入维数大于 28 时, 各信号的关联维数稳定在 ± 0.02 的误差范围内。所以时间序列重构相空间的嵌入维数 $m \geq 28$ 。各种故障信号关联维数计算的双对数图见图 7, 关联维数分别为: A 处磨损时为 2.455 5, B 处

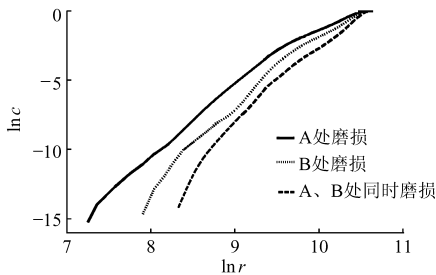


图 7 不同故障信号的双对数图

Fig. 7 Double logarithmic figure of different fault

磨损时为 3.651 3, A 和 B 处同时磨损时为 5.528 7, 连接处无磨损时为 1.025。由此可以得到如下结论:

(1) 在相同工况下, 双副磨损故障的关联维数最大, 为 5.528 7; 单副磨损故障时关联维数明显要

低, 分别为 2.455 5 和 3.651 3。因为关联维数的大小反映了系统激励源的丰富程度, 所以由计算数据可以说明双副磨损时, 系统工作状态更复杂, 信号的激励源更丰富。这一结论与通过最大李雅普诺夫指数进行分析得到的结论一致。

(2) 对于非线性系统, 分维描述了系统耗散能量的大小, 分维越大, 系统的耗散能量越大, 分维越小, 则耗散能量越小, 当分维为零时耗散系统则退化为保守系统。双副磨损的关联维数明显高于单副磨损的关联维数, 说明了双副磨损时系统耗散能量要大。

(3) 不同故障状态下和非故障状态的关联维数区分明显(图 8), 可以用以识别不同的往复活塞隔膜泵的运行状态。

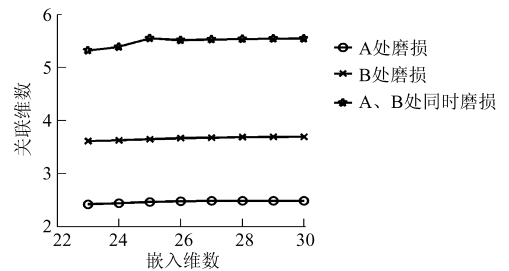


图 8 不同故障信号的关联维数对比图

Fig. 8 Correlation dimension comparison of different fault

3 结束语

往复活塞隔膜泵的磨损故障运行状态为混沌运动, 其振动信号的最大李雅普诺夫指数和关联维数可以作为隔膜泵运行状态监测的特征指标。

参 考 文 献

- 徐创文, 陈花玲, 刘彦国, 等. 铣削刀具不同磨损期振动信号的分维特征[J]. 农业机械学报, 2007, 38(6): 164 ~ 168.
Xu Chuangwen, Chen Hualing, Liu Yanguo, et al. Fractal characteristic of vibration signals in different milling tool wear periods[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(6): 164 ~ 168. (in Chinese)
- 许可君, 江龙平. 基于 Lyapunov 指数能谱熵的转子-机匣系统故障诊断研究[J]. 机械强度, 2007, 29(4): 557 ~ 561.
Xu Kejun, Jiang Longping. Fault diagnosis research of rotor-case system based on Lyapunov exponent energy spectrum entropy [J]. Journal of Mechanical Strength, 2007, 29(4): 557 ~ 561. (in Chinese)
- 李永强, 刘杰. 分形维数在大型旋转机械故障诊断中的应用[J]. 应用力学学报, 2007, 24(6): 302 ~ 305.
Li Yongqiang, Liu Jie. Application of fractal dimension to large rotating machinery fault diagnosis[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2007, 24(6): 302 ~ 305. (in Chinese)
- 张琪昌, 王洪礼, 竺致文, 等. 分岔与混沌理论及应用[M]. 天津: 天津大学出版社, 2005.
- 徐玉秀, 原培新, 杨文平. 复杂机械故障诊断的分形与小波方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- 侯荣涛. 基于现代非线性理论的复杂机械故障诊断技术研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2004.
Hou Rongtao. Study on fault diagnosis technique to complex machinery based on modern nonlinear theories[D]. Shenyang: Northeastern University, 2004. (in Chinese)
- 黄润生, 黄浩. 混沌及其应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005.
- Donoho D L. De-noising by soft-thresholding[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1995, 41(3): 613 ~ 627.
- 杨兴明, 吴永忠, 孙锐, 等. 基于小波多分辨率分析和新的阈值自适应的信号去噪[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2007, 30(12): 1580 ~ 1583.