

基于排列熵的泵站压力管道运行状态监测*

张建伟^{1,2,3}, 马晓君^{1,2,3}, 侯 鸽^{1,2,3}, 王立彬^{1,2,3}

(1. 华北水利水电大学水利学院 郑州, 450046)

(2. 水资源高效利用与保障工程河南省协同创新中心 郑州, 450046)

(3. 河南省水工结构安全工程技术研究中心 郑州, 450046)

摘要 为实现泵站管道工作状态的在线监测,保障其安全稳定运行,提出一种基于排列熵算法(permutation entropy,简称 PE)的泵站压力管道监测方法。该方法充分发挥排列熵算法计算简单和敏感度高优点,适用于处理非线性、非平稳信号,通过在关键部位设置传感器获取泵站管道的振动信号,利用信号子序列熵值的变化判断泵站管道振动状况。将该方法应用于景电工程二期七泵站管道的运行监测,通过设置不同的运行工况进行实例验证。结果表明,在开关机组瞬间,振动信号子序列熵值的最大幅差达到 0.37,机组稳定运行期间子序列熵值的最大幅差仅为 0.07,根据其熵值的变化可快速方便地识别出泵站管道的运行状态,具有较高的精度与可靠度。该方法为泵站管道运行状况的在线监测提供了新思路,为结构下一步安全诊断工作提供基础,具有较好的工程实用性和推广价值。

关键词 振动;排列熵;信号分析;泵站管道;在线监测

中图分类号 TH17;TV32

引 言

近年来,大型梯级输水泵站的兴建为我国水利事业的发展起到重要作用,压力管道作为梯级泵站长距离流体运输的基本载体,在农业和水利等领域中至关重要,其安全稳定备受关注^[1-4]。大幅振动若长期作用于压力管道,即使设计满足强度要求也容易产生疲劳破坏,影响系统的正常运转,尤其在结构应力集中处和主支管的焊接处易引发管道破裂及介质外泄,造成严重的设备事故、经济损失甚至生命危险。为此,必须对管道的健康状况加以重视,预防事故发生,确保管道的安全运行。

引起管道振动的因素包括机械失稳、液击、流体脉动和管道共振等。根据管道振动的理论得知,管道和与之相连的各种机械设备形成了一个彼此影响的结构系统,一旦受到激振力,系统就会产生响应。目前,国内外学者在管道无损检测上进行了长期研究并取得了突出进展。美国 OakRidge 国家实验室将电磁超声应力腐蚀裂纹检测系统应用于天然气运

输管道中,并证明其能有效地识别有无裂痕^[5]。Questar 公司推出 ITI 视频内窥镜,可清晰呈现出管道状况的彩色图像^[6-8]。奥斯博公司推出的 AR300 声波管道探测器通过向管道内发射声波讯器,由接受仪器进行接收信号并分析从而确定管道损伤。无损检测多采用超声波技术、磁场探测技术及渗透探伤等方法,这些方法的应用解决了一些工程问题,获得了很好的社会效益与经济效益,但是管道检测装置大多价格昂贵、检测对象有限、专用性强且不能实现实时检测。随着计算机科学及信号处理技术的发展,小波理论的应用解决了管道缺陷识别微局部分析与奇异性检测^[9-10]。其特点是开挖面积小且可实现动态监测,但局限于高频信号的辨识,造成辨识结果不完整。因此,寻找自动化、小型化的管道安全健康监测方法,被国际学术界和工程界广泛关注^[11]。

结构状态监测首先是对振动、射线和噪声等信号进行采集,然后对采信号进行处理,最后辨识处理后的信号确定结构是否存在异常。信号处理是对信号进行转换分析,目的是改变信号的形式,使不明

* 国家自然科学基金资助项目(51679091);河南省高校科技创新人才计划资助项目(18HASTIT012);广东省水利科技创新项目(2017-16)

收稿日期:2017-02-18;修回日期:2017-03-27

显、不突出的信号转换为便于识别的有用信息,根据有用信号特性对研究的状态信息做出评判。排列熵算法是近年提出的一种新的检测动力学突变和时间序列排列的方法,具有计算简单、敏感度高和抗噪声能力强的特点,能有效反映非线性、非平稳信号时间序列的微小变化^[12-15],被广泛应用在气候、生物和医学等领域^[16-18]。文献[19-21]将其运用到滚动轴承的损伤检测中。

压力管道受机组振动和机组内部水流激励等影响,使各运行工况下激励源不同,导致管道振动复杂。尤其在水流激励作用下,低频水流振动、中高频涡流和高频水体-管道耦合振动互相干扰,使管道振动更为复杂。为保障压力管道安全运行,准确捕捉到振动信号突变的时间位置,便于及时查看管道运行状况,笔者试图利用排列熵算法对压力管道振动特性进行研究。

1 基本原理

1.1 排列熵算法

排列熵算法是 Christoph Bandt 等提出的一种新的动力学突变检测方法,具有计算速度快、灵敏度高和实时性高等优点,在信号突变领域有较高的利用价值。具体运算过程如下。

设一维时间序列 $\{X(i); i=1, 2, \dots, n\}$, 令嵌入维数为 m , 延迟时间为 λ 。对其进行相空间重构, 得到矩阵为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_{(1)} & x_{(1+\lambda)} & \cdots & x_{(1+(m-1)\lambda)} \\ x_{(2)} & x_{(2+\lambda)} & \cdots & x_{(2+(m-1)\lambda)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{(r)} & x_{(r+\lambda)} & \cdots & x_{(r+(m-1)\lambda)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: r 为重构分量的数目。

对重构分量各元素进行升序排列, 提取各元素在原重构分量中所在列的索引, 构成一个符号序列, 并对 x_i 各种可能出现的排列状况进行统计, 共有 $m!$ 种符号序列。第 k 种排列状况出现的相对频率即第 k 种排列状况出现次数占 $m!$ 为其概率 P_k 且 $k \leq m!$ 。其排列熵公式为

$$H_{P(m)} = - \sum_{i=1}^k P_i \ln P_i \quad (2)$$

当 $P_i = \frac{1}{m!}$ 时, 熵值 $H_{P(m)}$ 达到最大, 令其值为 $\ln(m!)$ ^[22]。将上述排列熵进行归一化处理可得

$$0 \leq H_p = \frac{H_{P(m)}}{\ln(m!)} \leq 1 \quad (3)$$

其中: H_p 即 PE 的值, 其大小代表时间序列 $x(i) = 1, 2, \dots, n$ 的随机程度。值越小, 表明时间序列越规律, 复杂度越小; 反之表明该时间序列越具有随机性, 复杂度越大。

根据数据滑动的方式提取子序列, 通过排列熵算法计算出各子序列的熵值, 从而分析各子序列之间的动力学结构异同, 对管道安全运行和在线健康监测提供参考。具体步骤如下:

- 1) 在管道关键部位布置传感器并获取管道振动信号;
- 2) 在获取信号中选取一长度为 N 的长时间序列, 并截取 N 的前 L 个数据点作为子序列;
- 3) 将子序列 L 以步长 h 沿 N 向后滑动, 直至取到第 N 个点;
- 4) 确定嵌入维数 m 及延迟时间 λ , 得到矩阵(1);
- 5) 根据式(2)计算每个子序列的 H_p 值, 观看 H_p 值随时间的变化情况;
- 6) 通过 H_p 值变化实现对管道结构的实时监测, 若稳定运行中熵值出现突变, 则管道运行出现异常。

在 L 的选取上需慎重, 取值太小便失去了其统计学意义, 太大则会导致信号突变处不明显。文献[23]对 L, h 取值的有效性进行了探讨。

1.2 熵参数的选取

在排列熵的计算中, 延迟时间 λ 和嵌入维数 m 等参数的选择对结构异常状态的检测有一定影响, 因此选择合理的参数 λ 及 m 成为相空间重构的重要部分。若 λ 值过小, 会导致多数点汇聚在对角线方向, 使关联程度过大, 不能成为重建空间的坐标; 取值太大又会使所有点的相关性太小, 不能反映所测对象的动力特性。在 m 值的确定上, 若取值太小, 则重构的向量中包含的状态过少, 不能准确反映系统特性, 算法失去了有效性, 不能切实呈现出检测序列的动力学突变; 取值太大时, 相空间重构又会均匀化时间序列, 这种情况下不仅计算耗时且无法反映时间序列的细微变化。针对该问题, 饶国强等^[24]指出利用互信息法和伪近邻点法分别确定 λ 和 m 值的方式, 相较于关联积分法更适用于非线性分析, 结合管道结构振动信号的特点, 分别取 $m=3 \sim 10$, $\lambda=2 \sim 8$ 进行组合计算。排列熵对管道运行状态监测流程如图1所示。

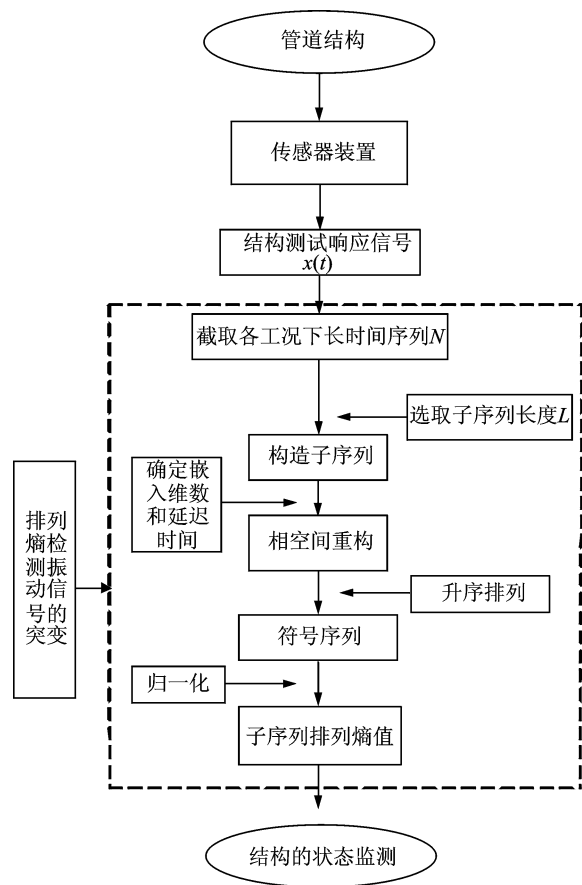


图1 排列熵对管道运行状态监测流程图

Fig. 1 Flow chart of pipeline operation state monitoring based on permutation entropy

2 工程实例应用

2.1 景电工程概况

甘肃景泰电力提灌工程(以下简称“景电工程”)是大Ⅱ型提水灌溉工程,具有扬程高、流量大和多梯级等特点。经过长期运行,结构受到高速水流冲击和温度荷载等影响,产生了不同程度的损伤,对工程的安全稳定运行产生了一定威胁。以景电二期七泵压力管道为研究对象,现场测点布置图及压力管道拾振器具体布置如图2所示。

2.2 振动信息采集

信号采集是通过安装在管道上的传感器来实现的,为最大程度的获取结构实际的振动响应,提高状况监测的精准度,正确恰当的选择测点数目与位置至关重要^[25]。一般按以下原则选取测点:根据管路的长度和分布,尽量测试整个管道系统;为得到具体的信号特征,测点位置要处于管道重要部位。其中进水管支管与总管交汇处最容易引起振动,极易造

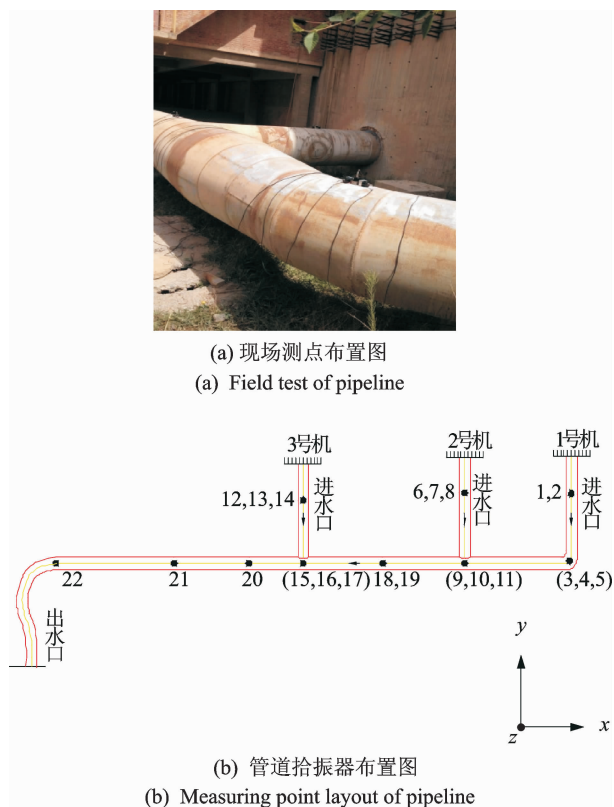


图2 景电7泵压力管道现场测试和拾振器布置图

Fig. 2 Field test and measuring point layout of 7 pumping station in Jingtai

成损伤,在对二期七泵管道振动进行检测时支管与主管连接处分别设置了水平 x 方向、水平 y 方向、铅锤 z 方向的速度传感器,其他位置则放置了不同数量的速度传感器,依次设编号1~22以方便区分。为获取排列熵算法对突变状况的监测效果,管道振动测试的激励以开关泵的方式获得。为反映管道振动特性的完整性,设置6种工况,每种工况下采样频率为512 Hz,采样时间为1 200 s。以15,16,17号传感器(分别对应 x, y, z 3个方向)在不同的工况下子序列熵值的变化为例,说明该方法对管道结构动力特性的监测过程。实验工况如下。

工况1:全停;

工况2:2#泵正常运行,1#和3#泵未运行;

工况3:2#泵正常运行,3#泵开启,1#泵未运行;

工况4:2#,3#泵正常运行,1#泵开启;

工况5:1#,2#泵同时关,3#泵正常运行;

工况6:关闭3#泵(全停)。

2.3 子序列的选取

为检验子序列的选取在排列熵算法中对特征信号分析是否有效,特选取不同长度的子序列对同一

振动信号进行分析。在 $N=1\ 024, m=5, \lambda=3, h=1$ 时分别选取子序列 $L=300, L=400$ 检验排列熵对状态监测的有效性。图 3(a) 为泵从开启到稳定运行压力管道的振动信号特征。图 3(b) 为两种子序列选取方式下排列熵变化情况。由图可知: 同一特征信号下, 子序列为 300 时, 熵值的最大幅差为 0.9, 能明显看到振动信号的突变状况; 子序列为 400 时, 熵值的最大幅差仅为 0.55, 与前种选取方式

相比, 排列熵对信号检测的敏感度降低, 导致突变处熵值模糊化, 不利于状态识别。

结果表明: 在确定长时间序列 $N=1\ 024$, 嵌入维数 $m=5$, 延迟时间 $\lambda=3$, 步长 $h=1$ 后, 选取子序列长度 $L=300$, 熵值能有效反映出振动信号特点。

2.4 算例分析

在泵的关闭与开启的瞬间, 压力管道会受到较大的来自系统自身的激振力, 即泵的振动会对压力管道的运行产生明显影响, 随着机器运行平稳, 水流激励的影响减小, 管道振幅也随之减小。在开关泵的瞬间以及各工况正常运行时, 分别在 15, 16, 17 号传感器上选取 3 组长时间序列 N 长度为 1 024, 子序列 L 长度为 300, 步长 h 为 1 的数据点。具体选取区间如表 1 所示, 其中, 各工况为连续采集, 因其时段较长, $A \sim K$ 为各工况中的代表性时间片段。

图 4 分别为 15, 16, 17 号传感器 (x, y, z) 在以上 11 种 ($A \sim K$) 运行状态下熵值的变化情况, $A_1 \sim K_1, A_2 \sim K_2, A_3 \sim K_3$ 分别为 x, y, z 方向上 $A \sim K$ 工况下管道结构的振荡状况。由图可知, 不同的运行模式下管道振动信号的熵值有不同的波动区间, 且波动强度也不同。无论是 x 方向, 还是 y 和 z 方向, 任一泵开启与关闭的 50 s 内 (B, D, F, H, J 状态) 熵值变动幅度大, 产生跳变, 其最大幅值差别为 0.37, 说明管道振动出现剧烈变化, 运行状态改变; 而在泵站机组稳定运行期间 (A, C, E, G, I, K 状态), 信号随机程度大致相同, 熵值上下浮动的最大差值仅为 0.07, 小于开关机瞬间熵值变化幅度的 1/5, 说明此时管道振动平稳, 运行状态良好。

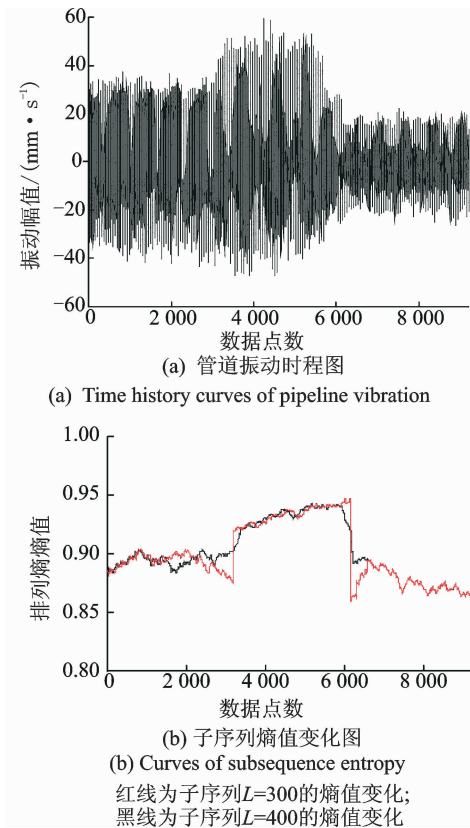


图 3 振动信号及排列熵在开泵瞬间变化图

Fig. 3 Curves of vibration signal and subsequence entropy

表 1 管道原型试验测试工况

Tab. 1 Test conditions of pipeline prototype

工况	工况状态	采样时间/s	采样频率/Hz
A	全停状态(工况 1)	100	512
B	2# 泵开启瞬间	50	512
C	2# 泵稳定运行状态	100	512
D	2# 泵稳定运行, 3# 泵开启瞬间	50	512
E	2#, 3# 泵稳定运行状态	100	512
F	2#, 3# 泵稳定运行, 开 1# 泵瞬间	50	512
G	1#, 2#, 3# 泵均正常稳定状态	100	512
H	3# 泵稳定运行, 1#, 2# 泵同时关闭瞬间	50	512
I	3# 泵稳定运行状态	100	512
J	3# 泵关闭瞬间	50	512
K	全停状态(工况 6)	100	512

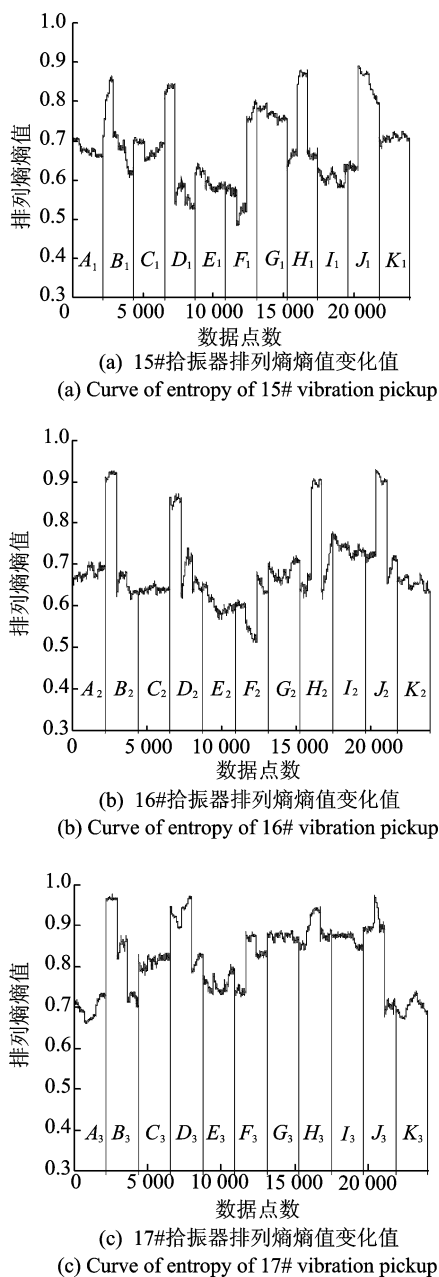


图4 15#, 16#, 17#方向排列熵变化图

Fig. 4 Permutation entropy curves at points 15#, 16# and 17#

其原因是:机组开启瞬间,大量紊流突然流入管道,此时水流对压力管道的激励达到最大,使压力管道振动信号的熵值波动性大,有明显的跳跃性;随着机组运行平稳,水流对管道的激励减小,振动信号的复杂度逐渐趋于一个水平,熵值波动性随之减小;机组关闭瞬间,高速水流撞击压力管道形成旋转涡进而导致高频振动,引起管道结构振动状态突变,熵值也随之产生明显起伏。以上分析表明,排列熵能够较好地衡量压力管道振动信号的复杂度,监测压力管道的运行状态。

引起泵站管道振动的主要原因是水流冲击、机械振动和电磁振动^[26]。根据排列熵在不同状态下的变化可知,在排除机组正常开关机等因素后,若监测点熵值依旧不稳定,说明结构振动存在异常。此时,应该查看管道结构是否存在安全隐患,查看机器的设计、制造和安装是否合理等,进而加强对机械设备和该段管道的维护,及时处理系统故障。在排除以上安全问题后,还可利用排列熵对突变的敏感性,在某段熵值不十分稳定的结构测点处,对管道结构进行合理的调整,避免常见的低频共振、弯管角度过大等现象^[27]。为此,运用排列熵算法对管道采取实时监测,可为管道系统的合理优化设计提供理论依据,避免事故发生,对保证社会生产及人民的生命财产有重大的实际意义。

3 结论

1) 利用排列熵算法对管道结构动力特性进行在线监测,相较于国外许多学者和检测公司提出的利用微型机器人进行在线监测的方法,更具有实用性;相较于利用价格昂贵且有局限性的设备对管道结构进行不定期检测与诊断的方法,更具有经济性。

2) 通过测点 x, y, z 3 方向的熵值波动现象,证明该方案在管道信号检测方面行之有效,对实际结构的监测有良好的实用性,且算法简单、快捷,可推广至管道安全运行与健康在线监测领域。

3) 由于管道振动信号的特点,排列熵算法参数的选取决定着结果的有效性,笔者基于传统的试算法方法,通过维数 m 、子序列 L 延迟时间 λ 不同的组合进行试算,得出管道运行状态监测最佳组合为 $L=300, m=5, \lambda=3$,在参数选取方面有待于进一步研究。

4) 排列熵算法虽然能够较好地检测到管道振动状态的突变,但振动突变的原因及产生突变的精确位置无法从中获取,有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 吴登昊,袁寿其,任芸,等. 管道泵不稳定压力及振动特性研究[J]. 农业工程学报, 2013, 29(4): 79-86.
Wu Denghao, Yuan Shouqi, Ren Yun, et al. Study on unsteady pressure pulsation and vibration characteristics of in-line circulator pumps[J]. The Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(4): 79-86. (in Chinese)
- [2] 张建伟,江琦,朱良欢,等. 基于改进 HHT 的泵站管

- 道工作模态辨识[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 71-76.
- Zhang Jianwei, Jiang Qi, Zhu Lianghuan, et al. Modal parameter identification for pipeline of pumping station based on improved Hilbert-Huang transform[J]. The Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(2): 71-76. (in Chinese)
- [3] 吴荔清, 李波, 刘润华. 小波去噪和奇异性分析方法在输油管道泄漏检测中的应用[J]. 科学技术与工程, 2008, 8(9): 2450-2453.
- Wu Liqing, Li Bo, Liu Runhua. Application of the denoising and singularity analysis based on wavelet transform in the oil pipeline leakage detection[J]. Transactions of the Science Technology and Engineering, 2008, 8(9): 2450-2453. (in Chinese)
- [4] 徐存东, 史国坤, 常周梅. 基于 DASP 的高扬程泵站压力管道模态识别[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(34): 10208-10212.
- Xu Cundong, Shi Guokun, Chang Zhoumei. Modal parameter identification of high pump station pressure pipe based on DASP[J]. The Science Technology and Engineering, 2013, 13(34): 10208-10212. (in Chinese)
- [5] Masahiko H, Hirotsu G O. A SH-wave EMAT technique for gas pipeline inspection [J]. NDT&E International, 1999, 32(3): 127-132.
- [6] Battelle U S Corporation. Implementing current in-line inspection technologies on crawler systems [R]. Battelle: Technology Research Report, 2004.
- [7] 宋振华, 王志华, 黄世清, 等. 基于纵向超声导波信号特性的管道损伤检测研究[J]. 机械强度, 2011, 33(1): 55-61.
- Song Zhenhua, Wang Zhihua, Huang Shiqing, et al. Study on damage detection in pipes based on signal characteristics of longitudinal ultrasonic guided waves [J]. The Journal of Mechanical Strength, 2011, 33(1): 55-61. (in Chinese)
- [8] 杨智荣. 基于振动模态分析管道腐蚀损伤监测方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [9] 张景川, 曾周末, 赖平, 等. 基于小波能谱和小波信息熵的管道异常振动事件识别方法[J]. 振动与冲击, 2010, 29(5): 1-4.
- Zhan Jingchuan, Zeng Zhoumo, Lai Ping, et al. A recognition method with wavelet energy spectrum and wavelet information entropy for abnormal vibration events of a petroleum pipeline[J]. The Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(5): 1-4. (in Chinese)
- [10] 潘虹, 郑源, 于洋. 基于小波包的泵站机组振动信号特征分析[J]. 水电能源科学, 2007, 25(6): 109-112.
- Pan Hong, Zheng Yuan, Yu Yang. Feature analysis of the unit vibration signal of pump station based on wavelet packet [J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2007, 25(6): 109-112. (in Chinese)
- [11] 史东锋, 许锋, 申凡, 等. 结构在环境激励下的模态参数识别[J]. 航空学报, 2004, 25(2): 125-129.
- Shi Dongfeng, Xu Feng, Shen Fan, et al. Modal parameter identification of structure in ambient excitation [J]. The Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2004, 25(2): 125-129. (in Chinese)
- [12] Bandt C, Pompe B. Permutation entropy: a natural-complexity measure for time series [J]. Physical Review Letters, 2002, 88(174102): 1-4.
- [13] Cao Y, Tung W, Gao J B, et al. Detecting dynamical-changes in time series using the permutation entropy [J]. Physical Review E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2004, 4(7): 1-7.
- [14] 冯辅周, 饶国强, 司爱威, 等. 排列熵算法研究及其在振动信号突变检测中的应用[J]. 振动工程学报, 2012, 25(2): 221-224.
- Feng Fuzhou, Rao Guoqiang, Si Aiwei, et al. Research and application of the arithmetic of PE in testing the sudden change of vibration signal [J]. The Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(2): 221-224. (in Chinese)
- [15] 刘永斌, 龙潜, 冯志华, 等. 一种非平稳、非线性振动信号检测方法的研究[J]. 振动与冲击, 2007, 26(12): 131-134, 176.
- Liu Yongbin, Long Qian, Feng Zhihua, et al. Analysis on dynamic characteristics of torsional micromirror model with consideration of edge effects [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(12): 131-134, 176. (in Chinese)
- [16] 姚文坡, 刘铁兵, 戴加飞, 等. 脑电信号的多尺度排列熵分析[J]. 物理学报, 2014, 63(7): 427-433.
- Yao Wenpo, Liu Tiebing, Dai Jiafei, et al. Multiscale permutation entropy analysis of electroencephalogram [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(7): 427-433. (in Chinese)
- [17] 郝成元, 吴绍洪, 李双成. 排列熵应用于气候复杂性度量[J]. 地理研究, 2007, 26(1): 46-52.
- Hao Chengyuan, Wu Shaohong, Li Shuangcheng. Measurement of climate complexity using permutation entropy [J]. The Geographical Research, 2007, 26(1): 46-52. (in Chinese)
- [18] 李五勤, 王义民, 孙东永, 等. 基于排列熵的径流突变识别[J]. 水力发电学报, 2014, 26(2): 19-22. (in Chinese)
- Li Wuqin, Wang Yimin, Sun Dongyong, et al. Application of permutation entropy to runoff mutation anal-

- ysis[J]. The Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 26(2):19-22. (in Chinese)
- [19] 冯辅周, 司爱威, 饶国强, 等. 基于小波相关排列熵的轴承早期故障诊断技术[J]. 机械工程学报, 2012, 48(13): 73-79.
Feng Fuzhou, Si Aiwei, Rao Guoqiang, et al. Early fault diagnosis technology for bearing based on wavelet correlation permutation entropy[J]. The Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(13): 73-79. (in Chinese)
- [20] 郑近德, 程军圣, 胡思宇. 多尺度熵在转子故障诊断中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(2):294-297.
Zheng Jinde, Cheng Junsheng, Hu Siyu. Method of adaptive blind source separation based on dynamic fault source number estimation [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(2):294-297. (in Chinese)
- [21] 郑近德, 程军圣, 杨宇. 基于 LCD 和排列熵的滚动轴承故障诊断[J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34(5):802-806.
Zheng Jinde, Cheng Junsheng, Yang Yu. A rolling bearing fault diagnosis method based on LCD and permutation entropy[J]. The Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 34(5):802-806. (in Chinese)
- [22] 刘永斌. 基于非线性信号分析的滚动轴承状态检测诊断研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2011.
- [23] 侯威, 封国林, 董文杰, 等. 利用排列熵检测近 40 年华北地区气温突变的研究[J]. 物理学报, 2006, 55(5): 2663-2668.
Hou Wei, Feng Guolin, Dong Wenjie, et al. A technique for distinguishing dynamical species in the temperature time series of north china [J]. The Acta Physica Sinica, 2006, 55(5):2663-2668. (in Chinese)
- [24] 饶国强, 冯辅周, 司爱威, 等. 排列熵算法参数的优化确定方法研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(1):73-79.
Rao Guoqiang, Feng Fuzhou, Si Aiwei, et al. Method for optimal determination of parameter in permutation entropy algorithm[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(1):73-79. (in Chinese)
- [25] 张建伟, 暴振磊, 刘晓亮, 等. 适用于梯级泵站压力管道的传感器优化布置方法[J]. 农业工程学报, 2016, 32(4):113-118.
Zhang Jianwei, Bao Zhanlei, Liu Xiaoliang, et al. Sensor placement optimization method for pressure pipeline suitable for grading pumping station[J]. The Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(4):113-118. (in Chinese)
- [26] 张建伟, 江琦, 王涛. 基于原型观测的梯级泵站管道振源特性分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1):77-83.
Zhang Jianwei, Jiang Qi, Wang Tao. Analysis of vibration characteristics of pipeline of pumping station based on prototype observation[J]. The Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(1):77-83. (in Chinese)
- [27] 付永领, 荆慧强. 弯管转角对液压管道振动特性影响分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(13):165-169.
Fu Yongling, Jing Huiqiang. Elbow angle effect on hydraulic pipeline vibration characteristics[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(13):165-169. (in Chinese)



第一作者简介: 张建伟, 男, 1979 年 3 月生, 博士、教授。主要研究方向为水工结构耦联振动与安全。曾发表《考虑不同库水耦合模式的拱坝振动特性分析》(《振动、测试与诊断》2016 年第 36 卷第 6 期) 等论文。

E-mail: zjwcivil@126.com

