

基于递归理论的泵站压力管道运行状态监测^{*}

张建伟^{1,2,3}, 程梦然^{1,2,3}, 马晓君^{1,2,3}, 王立彬^{1,2,3}, 张翌娜⁴

(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) (4. 黄河水利职业技术学院土木与交通学院 开封, 475004)

摘要 针对不利因素导致的管道运行异常问题, 提出一种基于递归理论的泵站管道运行状态监测方法。首先, 通过振动传感器提取压力管道关键部位的实测信息, 并将同一位置不同方向的数据信息进行融合, 得到一组反映结构整体动力特性的综合数据; 其次, 利用伪近临法与互信息法分别选取相空间重构参数 m 和 τ ; 最后, 绘制并计算代表管道动力特性的递归图及递归量化指标。将该方法应用于景泰川工程二期七泵站管道运行监测, 通过设置不同的运行工况进行验证, 结果表明: 机组开关瞬间与稳定运行工况下, 管道结构振动信号的递归图呈现不同模式, 递归量化指标-确定性、对角线平均长度 L 、递归率及递归熵也呈现明显差异, 能有效区分管道振动状态。该方法为压力管道的无损动态监测提供了新思路。

关键词 泵站管道; 振动; 递归图; 递归量化指标; 信号分析; 在线监测
中图分类号 TH17

引 言

随着水利事业的蓬勃发展, 大型梯级泵站的修建迅速展开, 压力管道作为关键组成部分, 其运行质量对整个系统的重要性不言而喻, 因此, 管道的安全稳定备受关注^[1]。由于水力学条件的复杂性及结构自身动力特点, 压力管道在不同运行状态下所受激励大不相同, 导致水工结构存在不同程度的损伤累积和抗力衰减问题, 进而引发安全事故。因此, 面对压力管道为农业、石油、化工等方面带来巨大经济效益的同时, 对结构采取安全监测, 提高管道运行质量势在必行。

管道系统的组成部件较多, 各元素之间相互干扰, 大幅振动在所难免, 一定程度上影响了管道的使用寿命^[2], 因此关于管道健康检测的研究从未停止。早期的管道健康监测通过人力周期巡检完成。李宇庭等^[3]利用场指纹法对金属管道缝隙的腐蚀状况进行监测, 并证明了其在缺陷定位、测量上的优越性。杭利军等^[4]利用分布式光纤法对

管道泄漏进行监测, 结果证实了该方法在实时管道监测和定位上的有效性。以上方法在管道安全监测方面成效显著, 但大多存在价格昂贵、监测距离短、效率较低等问题, 对长距离输水管道进行大范围、长时间的健康诊断困难较大^[5]。近年来, 随着我国综合技术的发展, 新型的管道检测及监测技术逐渐崛起, 如小波理论、希尔伯特-黄变换 (Hilbert-Huang transform, 简称 HHT) 等, 但小波理论的应用局限于高频信号, 辨识结果的完整度较低^[6]。HHT 变换中的坐标变换必然导致有效信息的丢失, 进而影响分析结果, 故寻找体积小、效率高、适用范围广的管道安全监测方法, 成为状态监测领域的关注焦点^[7]。

递归理论作为一种适用于非平稳、非线性信号的重要处理方法, 具有处理过程简便、抗噪性强、对信号平稳程度要求较低等优点^[8]。最先将递归图理论应用于实际的是生物医学领域。随后, 生命科学、化学领域将其引入, 用于信号处理。近年来, 工程领域将递归图和递归量化分析应用于信号的消噪与分析过程^[9-10]。为保证压力管道

^{*} 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资助项目(2017-16)

收稿日期: 2018-07-12; 修回日期: 2018-11-16

的稳定运行,避免大幅振动,笔者以数据级融合方式-方差贡献率为辅助,将递归理论引入到压力管道的状态监测中,对不同工况下的结构振测信号进行检测,并以递归图(recurrence plot,简称RP)、确定性(determinism,简称DET)、对角线平均长度 L 、递归率(recurrence rate,简称RR)以及递归熵(recurrence entropy,简称RE)等递归量化指标反映各工况下的信号特征,以监测管道振动状态,保证工程安全运行。

1 方差贡献率理论

基于方差贡献率^[11]的数据融合方法,在汲取了传统融合方法^[12-14]的优势后,为避免融合系数固定这一弊端,提出了系数动态化的融合方式。该方法不仅能减少单组错误数据导致的误诊现象,还可降低噪声与位置对单一传感器精度的干扰。此外,该方法的突出优势是:每一传感器所采数据的融合系数随时间而自动变化,增加了信号融合的普适性,并保证所采信号的完整性和准确性,同时提高了信号评价的有效性。具体步骤如下。

假定某一传感器在采样时间 t 内得到一组由离散信号值 $s(1), s(2), \dots, s(h)$ 构成振测数据 $S(h)$,定义点 $s(i)$ 对此序列的贡献率为

$$K_i = (s_i - \mu)^2 / h\sigma^2 \quad (1)$$

其中: $\mu = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^h s_i$ 为此组数据 h 个数值的均值; $\sigma^2 = \frac{1}{h-1} \sum_{i=1}^h (s_i - \mu)^2$ 为此组数据 h 个数值的方差。

若 p 个同类传感器在同一时段内一同测得 p 组数据序列,各组序列包含 h 个数据点,令第 p 组数据中的第 q 个数据点的值为 s_{pq} ,由式(1)可知, s_{pq} 对本组全部数据的贡献率为 K_{pq}

$$K_{pq} = (s_{pq} - \mu_p)^2 / h\sigma_p^2 \quad (2)$$

其中: μ_p, σ_p^2 为第 p 组数据序列的期望值和方差。

若第 p 组数据序列的第 q 个数据 s_{pq} 分配到的融合系数为 a_{pq} ,则 a_{pq} 的求取公式为

$$a_{pq} = K_{pq} / \sum_{p=1}^p K_{pq} \quad (3)$$

融合后 q 点的值 s_q 为

$$s_q = \sum_{p=1}^p a_{pq} s_{pq} \quad (4)$$

方差贡献率的数据融合过程如图1所示。

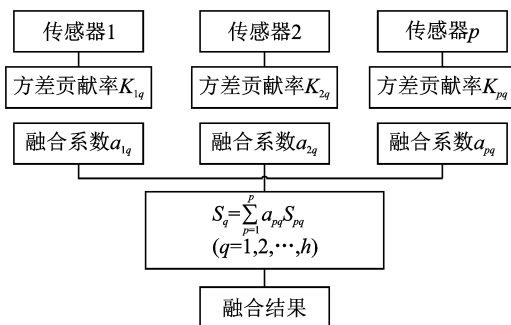


图1 基于方差贡献率的数据级融合流程图

Fig. 1 Flow chart of data fusion on the basis of variance contribution rate

2 递归图基本理论

2.1 递归图

递归图思想由递归图(RP)和递归量化分析(recurrence quantification analysis,简称RQA)两部分组成,以相空间重构为前提,其目的是用来展现时间序列的内在规律。

递归图具有可预测性,体现的是信号递归性,即一定时间段内某一结构运行特征的频发或复发,由大量黑白点及两条时间轴组成,并利用二维平面将这种递归性直观地展现出来,以定性的方式表示信号的时间平稳性。递归图具体建立方法如下

$$\mathbf{R}_{i,j} = \Theta(\epsilon - D_{i,j}^{m,\tau}) = \begin{cases} 0 & (D_{i,j}^{m,\tau} > \epsilon) \\ 1 & (D_{i,j}^{m,\tau} \leq \epsilon) \end{cases} \quad (i, j = 1, 2, \dots, N) \quad (5)$$

且有

$$D_{i,j}^{m,\tau} = \| \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j \| \quad (6)$$

其中: $\mathbf{R}_{i,j}$ 为 $N \times N$ 方阵; N 为状态向量 \mathbf{x}_i 的个数; ϵ 为阈值; $\Theta(x)$ 为Heaviside函数; $\| \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j \|$ 为Euclidean范数; m, τ 分别为嵌入维数和延迟时间。

阈值 ϵ 为某一预先设定的临界距离,选取原则一般为原始数据标准差的15%,其大小改变图中黑点的疏密,但依旧会使图形保持原本状态。若 $D_{i,j}^{m,\tau}$ 小于 ϵ ,表示 $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j$ 两者之间存在递归特性,以黑点的形式显现在二维图形上;反之,表示 $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j$ 之间不递归,以白点的形式出现在图形上。

2.2 递归图模式

递归图存在不同的模式,每一模式都代表信号

不同的演变规律,依据图形呈现的递归特性,从宏观和微观两个角度,便可定性得出信号特征。递归图模式及宏观分析见表 1。

表 1 递归图模式及其宏观含义

Tab. 1 Patterns and meanings of recurrence plot

模式	图形分布	系统特点	平稳/非平稳性	举例
均匀模式	各孤立点均匀分布,图中几乎不存在较长线段	由随机系统产生	平稳性信号	白噪声信号
周期模式	线条较均匀,随时间变化主对角线方向呈现一定规律,如网格状	系统包含一定的周期性	周期性非平稳信号	正弦信号
漂移模式	左上角与右下角大体呈白色,其中包含了一个趋势	具有非平稳特征,主要由参数随时间而发生的渐变所引起	非平稳信号	布朗运动
突变模式	黑点分布极为不均匀,出现大区域黑白块	系统短时间内出现大幅度变动	明显的非平稳信号	调幅信号

表 2 递归图微观分析

Tab. 2 Microscopic analysis of recursive plot

研究对象	具体含义
独立点	说明信号有较大波动,图中仅有单点时,代表此信号为随机信号
平行于主对角线的线段	线段长度反映了相邻轨道的分离速度,说明系统的某一状态变化是相似的,信号具有确定性
垂直于主对角线的线段	某种程度上意味着嵌入维数不合适
垂直(水平)线	表明信号的某一状态在短时间内无变化

2.3 递归量化分析

递归量化分析(RQA)是以各种递归指标,从不同侧面以定量的方式反映信号特征,主要包含以下几种参数。

1) 确定性(DET):指主对角线上递归点的百分比,反映轨迹周期递归的程度,其值越小随机性越大,即

$$DET = \sum_{l=l_{min}}^N lP(l) / \sum_{i,j=1}^N R_{i,j} \quad (7)$$

其中: $P(l)$ 为长度等于 l 的对角线的分布概率; l_{min} 为最小对角线长度,一般为 2。

2) 对角线平均长度(L):指系统中两时间序列相互靠近的平均时长,又称平均预测时间,即

$$L = \left(\sum_{l=l_{min}}^N lP(l) \right) \left(\sum_{l=l_{min}}^N P(l) \right) \quad (8)$$

3) 递归率(RR):在设定的阈值下,递归点在递归图中所有点的比例,系统动力特性越相似,RR 值越大,即

$$RR = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N R_{i,j}^{m,\tau} \quad (9)$$

4) 递归熵(RE):指在递归图中与主对角线平

行的线段长度分布的复杂性,其值越大表明系统的复杂性越大,即

$$ENTR = - \sum_{l=l_{min}}^N P(l) \ln P(l) \quad (10)$$

递归理论对泵站压力管道的振动状态监测流程如图 2 所示。

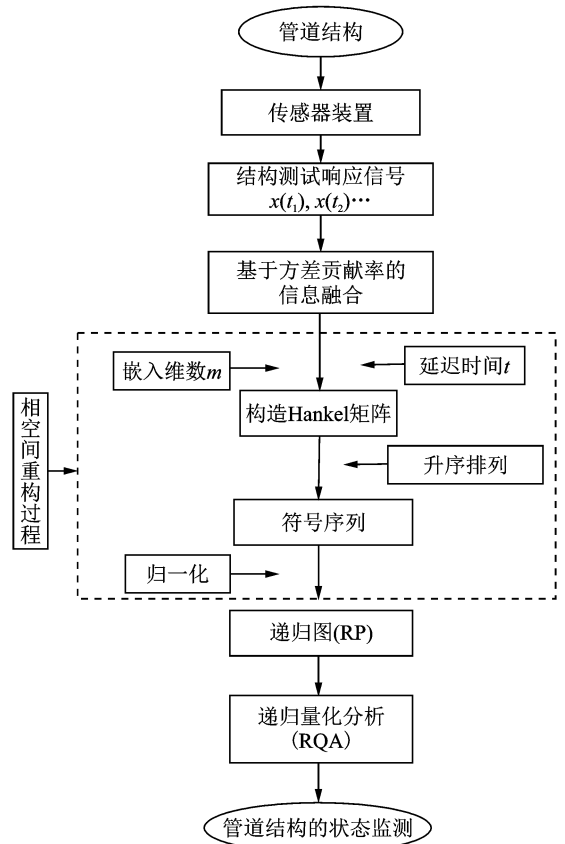


图 2 递归理论对泵站压力管道的状态监测流程图
Fig. 2 Flow chart of state monitoring of pressure pipe by recursion theory

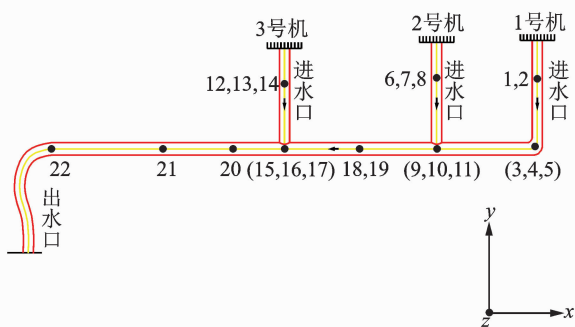
3 工程实例

3.1 工程概况

甘肃景泰川工程,是一项分期建设的高扬程、大流量、多梯级电力提水灌溉工程,多年运行后,管道结构存有一定程度的损坏和老化问题,直接影响其运行安全。以景泰川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传感器放置点如图3所示。



(a) 现场测点布置图
(a) Field test of pipeline



(b) 管道拾振器布置图
(b) Measuring point layout of pipeline

图3 景泰川7泵压力管道现场测试及拾振器布置图
Fig.3 Field test and measuring point layout of 7 pumping station in Jingtai Sichuan

3.2 振动信息采集

信息采集由安装在结构表面的传感器完成,为保证收集效果,泵站压力管道共放置了22个传感器。开关机组瞬间,压力管道的主支管连接处受水流激励和自身的激振力尤为复杂,因此,在连接处重点放置了3个速度传感器,分别为水平 x 方向、水平 y 方向和铅锤 z 方向,其他位置则分别布置了不同数量的传感器。管道振动测试激励以开关泵的方式获得,总体分为开关机瞬间与机组稳定运行期间两类振动状态,共划分为(A~K)11种状态。各状态下的振测数据为连续采集,鉴于其时长过大,A~K

工况为所测数据的代表性时间片段。

为全面反映各工况下管道振动特性,选取1~3号机开关瞬间均受影响较为明显的交叉口处的振测信号为研究对象,即以15,16和17号传感器(分别对应 x,y,z 三方向)在不同工况下所测信号的递归图与递归测度的变化为例,说明该方法对管道结构振动信号监测的有效性。具体实验工况如表3所示。

表3 管道原型试验测试工况

Tab.3 Test conditions of pipeline prototype

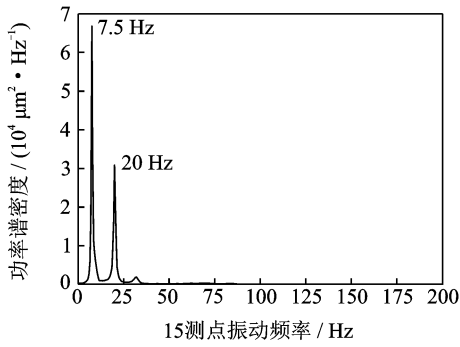
工况	工况状态	采样时长/s	采样频数/Hz
A	全停状态(工况1)	100	512
B	2#泵开启瞬间	50	512
C	2#泵稳定运行状态	100	512
D	2#泵稳定运行,3#泵开启瞬间	50	512
E	2#,3#泵稳定运行状态	100	512
F	2#和3#泵稳定运行,开1#泵瞬间	50	512
G	1#,2#,3#泵均正常稳定状态	100	512
H	3#泵稳定运行,1#和2#泵同时关闭瞬间	50	512
I	3#泵稳定运行状态	100	512
J	3#泵关闭瞬间	50	512
K	全停状态(工况6)	100	512

3.3 信息融合

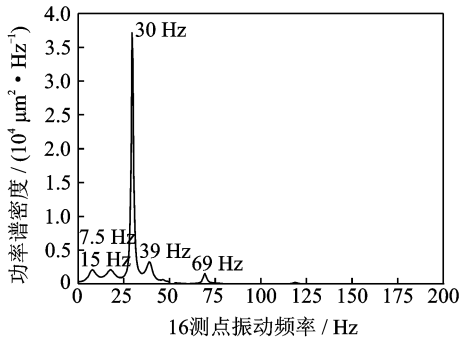
为得到一组全面反映结构振动特性的综合信号,并简化对同一位置不同方向信号的监测过程,对15,16,17测点三方向信息实施递归图分析与递归量化分析之前,将其以方差贡献率的方式进行数据融合。以15,16,17测点在工况E状态下的融合效果为例,图4为 x,y,z 三方向及数据融合后的功率谱密度曲线。

3.4 参数 m 和 τ 的确定

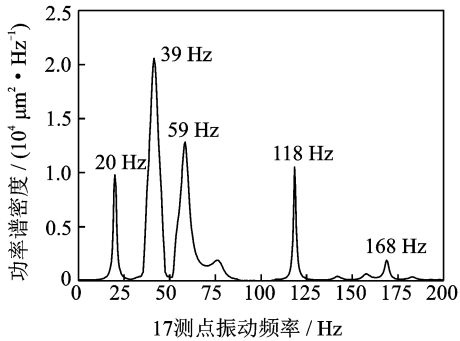
相空间重构是绘制递归图、计算量化指标必不可少的部分,因此,选取合理的 m 和 τ 成为相空间重构的关键一步。采用伪近临法与互信息法分别选取相空间重构参数 m 和 τ 。恰当的维数 m 为相空间中伪近临点的百分比趋于零(至少小于5%)时对应的维数,且该维数之后,伪近临点百分比不再变动,最佳延迟时间 τ 为第1次达到最小值所对应的延迟时间,实测数据中 m 不小于2, τ 不小于1。



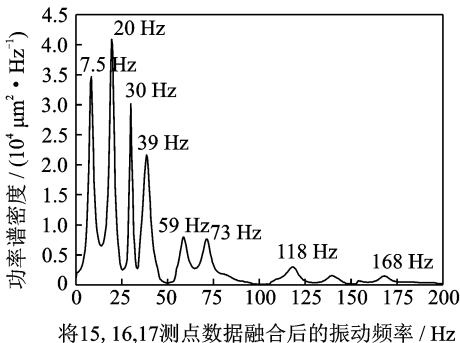
(a) x方向振动信号的功率谱密度曲线
(a) The power spectral density curve of the x directional vibration signal



(b) y方向振动信号的功率谱密度曲线
(b) The power spectral density curve of the y directional vibration signal



(c) z方向振动信号的功率谱密度曲线
(c) The power spectral density curve of the z directional vibration signal

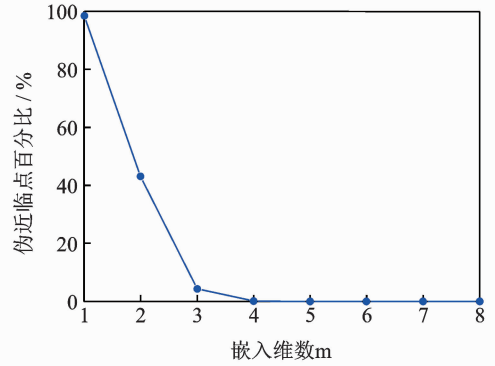


(d) 数据融合后振动信号的功率谱密度曲线
(d) The Power spectral density curve of vibrationsignal after data fusion

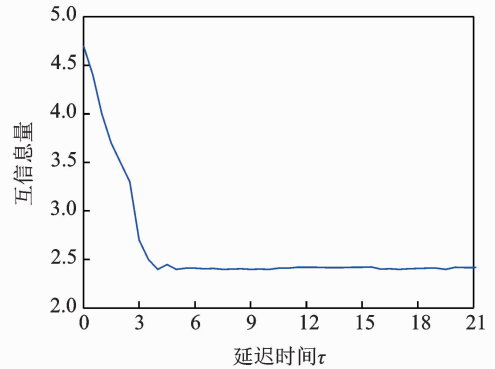
图 4 E 工况下的振动信号功率谱密度曲线

Fig. 4 Power spectral density curve of vibration signal under E condition

经计算,景泰川二期七泵站压力管道在以上(A~K)11种状态下的相空间重构参数相差甚微,分别稳定在 $m=4, \tau=4$ 状态,限于篇幅,给出数据融合后工况 E 状态下参数选取图,如图 5 所示。



(a) 伪近邻法确定嵌入维数 m
(a) The determination of the embedding dimension by false nearest neighbor method



(b) 互信息法确定延迟时间 τ
(b) Determination of delay time by mutual information method

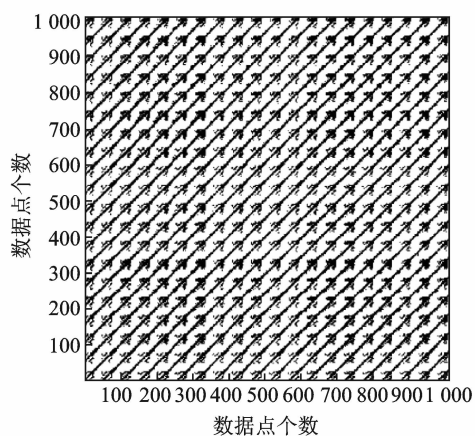
图 5 相空间重构参数的选取

Fig. 5 The Selection of parameters for phase space reconstruction

3.5 基于递归图的状态监测

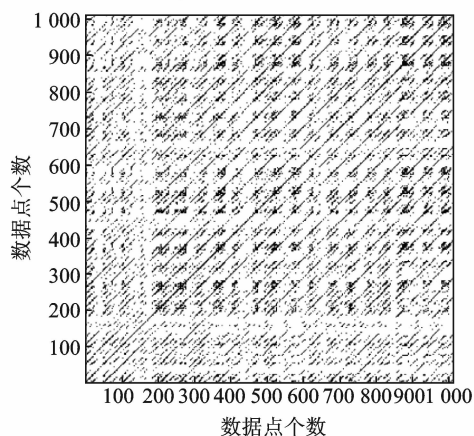
压力管道的运行状态总体分为开关机瞬间(B, D, F, H, J 工况)与平稳运行(A, C, E, G, I, K 工况)两大类状态,为检验递归图方法在压力管道不同振动状态下对信号的评估效果,分别从开机瞬间与稳定运行期间各选取一种工况绘制递归图。其中,嵌入维数 $m=4$,延迟时间 $\tau=4$,阈值取融合后原始信号标准差的 15%,递归图形态如图 6 所示。

由图 6 可知:D 工况下的递归图中递归点汇聚成条状与块状,且分布较均匀,随时间变化在主对角线方向呈现一定规律,几乎不存在独立递归点,平行于主对角线的线段多且长,属于周期模式;E 工况下的递归图的线条分布不均匀,独立递归点较多,平行于主对角线的线段模糊且较短,存在极为模糊的



(a) D工况(开机瞬间)下的管道振动信号递归图

(a) Recursive plot of vibration signal of pipe in D working condition



(b) E工况(稳定运行)下的管道振动信号递归图

(b) Recursive plot of vibration signal of pipe in E working condition

图6 两种工况下压力管道振动信号递归图

Fig. 6 Recursive plot of vibration signal of the pipe under two operating conditions

“十”字带状区域,属于飘移与突变的混叠模式。由此可知,两种工况下的振动信号均属于非平稳信号,相对于E工况,D工况振测信号的随机性差,确定性较强,呈现一定的周期性,复杂度较小。

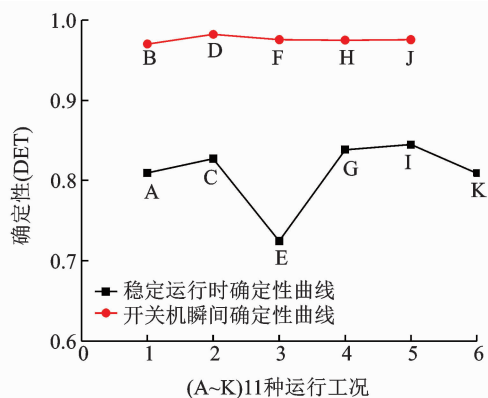
3.6 基于递归量化指标的状态监测

递归图虽能直观辨别管道剧烈振动与平稳运行两种状态,但在图形识别上需要一定的经验,为此,在管道振动信号实施递归图识别的基础上,从周期性、非线性角度对信号进行量化分析。分别作出开关机瞬间(B,D,F,H,J工况)与平稳运行(A,C,E,G,I,K工况)两类状态的递归量化指标变化曲线,并将各指标浮动区间归一化,对比得出不同运行状态下的结构特征。

3.6.1 管道信号的周期性监测

图7为管道(A~K)11种状态下的周期性指标

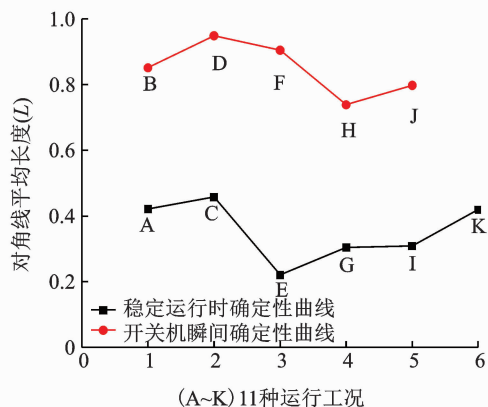
变化曲线,由图可知:开关机瞬间,DET值位于0.97左右, L 值位于0.72~0.98之间,管道信号的确定性较强,对角线平均长度较大;稳定运行期间,两值随管道振幅的减小而减小,DET位于在0.82左右, L 值位于0.72~0.98之间,管道信号的确定性较差,对角线平均长度较小。两振动状态下管道信号的确定性指标DET相差约为0.15,最大差值为0.24;对角线平均长度 L 最大相差0.78。



(A~K)11种运行工况

(a) 确定性对比曲线

(a) The contrast curve of the index of deterministic



(A~K)11种运行工况

(b) 对角线平均长度对比曲线

(b) The contrast curve of the index of the average diagonal length

图7 开关机瞬间与平稳运行两工况下的周期性指标对比图

Fig. 7 Index comparison diagram of periodicity under two types of working conditions

分析可知,周期性指标DET值与 L 值在管道剧烈振动与稳定运行两类状态下有明显差距,两者均能有效区分结构的振动状态,可作为管道振动状态监测中的参考指标。其原因是:泵机开关的短时间内,水体拍击与泵机振动均明显影响管道自身振动,促使管道振动呈现一定周期性,因此,信号的周期递归程度与平均预测时间增加,即DET值、 L 值增大;泵机稳定运行期间,水体拍击、泵机振动相对较弱,两者对管道的影响减小,进而结构振动信号的

随机性升高,此时,信号的周期递归程度与平均预测时间降低,DET 值、L 值随之减小。

3.6.2 管道信号的非线性监测

管道结构在不同运行状态下,振动信号的非线性存在一定差异,因此,非线性指标递归率(RR)、递归熵(RE)也可作为监测结构振动特性的参考指标。图 8 中,开关机瞬间,RR 值位于 0.5 左右,ENTR 值稳定在 0.35,系统振动的相似性较高,复杂度较低;随着泵机的稳定运行,水流对管道的激励减小,使系统振动的相似性降低,复杂度升高,RR 值减小至 0.05,RE 值升高至 0.88。两工况下信号的递归率 RR 最大相差 0.5,递归熵 RE 最大相差 0.53。

分析可知:在管道不同运行状态下,非线性指标 RR 值与 ENTR 值能以数值大小显示结构的振动幅度,当 RR 值偏高、ENTR 值偏低时,说明结构振动较为剧烈;相反,则代表管道稳定运行。

随时间变化在递归图 45° 对角线方向呈现一定规律,且平行于该对角线的线段多且长,同时 DET, L 和 RR 三值均较大,而 RE 较小,说明此时管道结构的振幅偏大,其运行状态极有可能不利于自身的安全稳定。一段时间后,若递归图及各指标仍保持上述状态,应尽快检查管道安全,及时解决各种不利因素导致的异常振动。除检测管道损伤外,还可利用递归图与递归量化指标的敏感性,布置合理的管道转角,避免个别工况下的低频共振,监测泵站机组稳定性等。

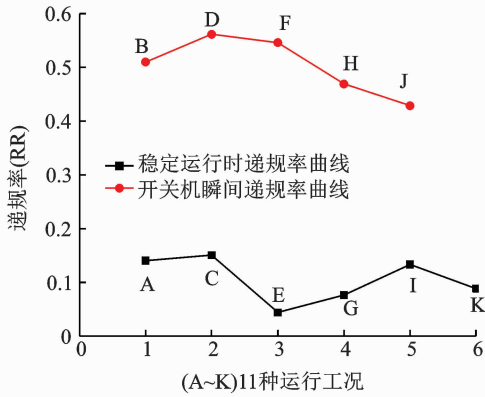
4 结 论

1) 利用递归理论对管道的振动特性进行在线监测,相较于诸多学者提出的局限性较强的监测方法,更具有推广性和实用性。相较于利用诸多价格昂贵的机械设备对结构进行不定期检测的方法,经济性与自动化程度更高。

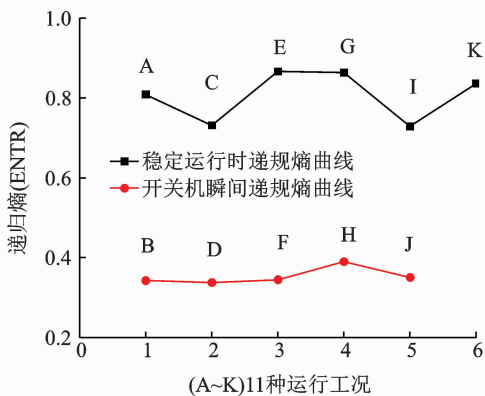
2) 将方差贡献率方法应用于压力管道的数据融合,能精准提取结构 x, y, z 三方向振动信号的特征信息,较大程度上提高了状态监测效率,且过程简单、快捷,在管道结构安全监测中有良好的实用性。

3) 递归图与递归量化分析皆能有效识别管道振动的剧烈程度,其中,递归图以不同的图形模式体现其振动程度,递归量化分析以各指标在 0~1 之间的不同幅值辨识管道振动状态。图形与指标分析相结合的监测方式,提高了状态识别的准确性,可推广至管道损伤诊断与在线监测领域。

4) 递归图与递归量化指标虽能有效监测管道运行状态,及时发现结构异常状态,但结构从“健康”到“不健康”发展过程中,图形及量化指标的变化状况并未涉及,有待进一步研究。



(a) The contrast curve of the index of recursion rate



(b) The contrast curve of the index of recursive entropy

图 8 开关机瞬间与平稳运行两类工况下的非线性指标对比图

Fig. 8 Index comparison diagram of nonlinear indexes under two types of working conditions

根据前面递归图与递归量化指标在不同振动状态下的变化可知,排除人为及偶然因素后,若递归点

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]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(4): 79-86. (in Chinese)

[2] 张建伟,马晓君,侯鹤,等. 基于排列熵的泵站压力管道运行状态监测[J]. 振动、测试与断, 2018, 38(1): 148-154.
ZHANG Jianwei, MA Xiaojun, HOU Ge, et al. Monitoring the operating condition of pipeline of pumping

- stations based on permutation entropy[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2018, 38(1): 148-154. (in Chinese)
- [3] 李宇庭,甘芳吉,李文强,等. 基于交流场指纹法的金属管道缝隙腐蚀监测方法[J]. *仪器仪表报*, 2015, 36(3):545-551.
LI Yuting, GAN Fangji, LI Wenqiang, et al. Monitoring method for crevice corrosion of metal pipeline based on alternating current field signature method[J]. *Chinese Journal of Scientific and Instrument*, 2015, 36(3):545-551. (in Chinese)
- [4] 杭利军,何存富,吴斌,等. 新型分布式光纤管道泄漏检测技术及定位方法研究[J]. *光学学报*, 2008(1):123-127.
HANG Lijun, HE Cunfu, WU Bin, et al. Research on novel distributed optical fiber pipeline leakage detection technology and location method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008(1):123-127. (in Chinese)
- [5] 马书义,武湛君,刘科海,等. 管道变形损伤超声导波检测试验研究[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(14):1-8.
MA Shuyi, WU Zhanjun, LIU Kehai, et al. Experimental investigation of deformation damage detection in pipes using ultrasonic guided wave[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(14):1-8. (in Chinese)
- [6] 张建伟,暴振磊,江琦. 小波-ICA 联合技术在水工结构应变损伤识别中的应用[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(11): 180-185.
ZHANG Jianwei, BAO Zhenlei, JIANG Qi. Application of a combined technique of wavelet and ICA in stain damage identification of hydraulic structures[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(11): 180-185. (in Chinese)
- [7] 张建伟,江琦,朱良欢,等. 基于改进 HHT 的泵站管道工作模式辨识[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]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(2):71-76. (in Chinese)
- [8] 杨栋,任伟新. 基于递归分析的振动信号非平稳性评价[J]. *振动与冲击*, 2011, 30(12): 39-43.
YANG Dong, REN Weixin. Non-stationarity evaluating for vibration signal using recurrence plot[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(12):39-43. (in Chinese)
- [9] 蒲晓川,肖涵. 基于 EMD 降噪的递归图分析方法在齿轮故障诊断中的应用[J]. *机床与液压*, 2015, 43(5): 160-163.
PU Xiaochuan, XIAO Han. Application of recurrence plot analysis method to fault diagnosis based on EMD[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2015, 43(5): 160-163. (in Chinese)
- [10] 孙斌,梁超,尚达. 基于递归复杂网络的滚动轴承故障诊断[J]. *振动、测试与诊断*, 2015, 35(3):578-584.
SUN Bin, LIANG Chao, SHANG Da. Rolling bearing fault diagnosis based on recurrence complex network[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2015, 35(3):578-584. (in Chinese)
- [11] 李火坤,刘世立,魏博文,等. 基于方差贡献率的泄流结构多测点动态响应融合方法研究[J]. *振动与冲击*, 2015, 34(19):181-191
LI Huokun, LIU Shili, WEI Bowen, et al. Study on multi-sensor data-level fusion method of high arch dam vibration signal[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(19):181-191. (in Chinese)
- [12] 焦莉,李宏男,孙威. 基于数据融合和“能量-损伤”的结构状态特征提取[J]. *振动、测试与诊断*, 2010, 30(1): 83-86.
JIAO Li, LI Hongnan, SUN Wei. Feature extraction of structure status based on data fusion and wavelet analysis[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2010, 30(1):83-86. (in Chinese)
- [13] 王海军,李康,练继建. 基于数据融合和 LMD 的厂房结构动参数识别研究[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(2): 175-181.
WANG Haijun, LI Kang, LIAN Jijian. Dynamic parametric identification for a hydropower house based on data fusion and LMD[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(2):175-181. (in Chinese)
- [14] 李学军,李萍,褚福磊. 基于相关函数的多振动信号数据融合方法[J]. *振动、测试与诊断*, 2009, 29(2): 179-183.
LI Xuejun, LI Ping, CHU Fulei. Data fusion of multi-sensor vibration signal using correlation function[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2009, 29(2):179-183. (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《Operation conditions monitoring of flood discharge structure based on variance dedicaion rate and permutation entropy》(《Nonlinear Dynamics》2018, Vol. 93, No. 4)等论文。

E-mail: zjwcivil@126.com

