

基于尖点突变理论和 MWMPE 的围岩稳定监测*

张建伟¹, 李香瑞¹, 严鹏², 王勇³

(1. 华北水利水电大学水利学院 郑州, 450046)

(2. 武汉大学水工岩石力学教育部重点实验室 武汉, 430072)

(3. 珠江水利委员会珠江水利科学研究院 广州, 510635)

摘要 为实时监测水电站地下厂房围岩运行情况, 提出一种尖点突变理论和多通道加权多尺度排列熵(multi-channel weighted multi-scale permutation entropy, 简称 MWMPE)相结合的监测方法。首先, 结合某电站地下厂房围岩变形监测数据, 将不同时间段日平均位移作为一系列特解, 反演得到非线性动力模型; 其次, 采用尖点突变理论, 建立围岩变形速率尖点突变模型, 提出围岩稳定判据; 然后, 运用 MWMPE 的方法, 对不同测点的变形监测信息进行动态融合, 提取围岩变形特征值, 确定围岩安全范围; 最后, 通过对比融合后熵值的变化, 与传统多尺度排列熵(multi-scale permutation entropy, 简称 MPE)方法作比较, 提出一种新的稳定预警线, 对围岩进行在线安全监测、预警。结果表明: 该方法能够有效提取地下厂房围岩变形特征值, 并根据实时 MWMPE 值对围岩进行在线安全监测, 为地下厂房等结构的围岩维持安全稳定提供了新的思路。

关键词 围岩; 稳定; 突变理论; 多通道加权多尺度排列熵; 安全监测

中图分类号 TV731.6

引言

地下厂房的围岩稳定分析一直以来备受关注, 洞室围岩稳定性及安全监测对于水电站的正常运行、工程设计具有十分重要的指导意义。

围岩稳定性评价是判定围岩安全状态的核心与前提。在地下厂房实际开挖过程中, 受岩体强度极限及地下水位突变等因素影响, 岩体变形往往会从稳定连续跳跃到不连续状态的情况^[1]。同时, 围岩失稳常伴有非均匀性和大位移变形, 是一个具有高度非线性问题。如何依据围岩监测数据, 运用非线性分析方法判定围岩稳定性尤为重要。

依据围岩变形监测数据分析围岩稳定性被现行规范所采用^[2]。20 世纪 70 年代以来, 随着各种非线性理论的逐步发展, 突变理论已成为研究围岩非线性问题的有力手段。Yang 等^[3]运用突变理论分析了岩溶地区隧道底板安全厚度。Yang 等^[4]基于突变理论建立了隧道底板与岩溶相互作用模型, 分析了围岩破坏机理和安全厚度。穆成林等^[5]提出了基于突变理论的层状岩体屈曲破坏模型。除此之外, 突变理论还广泛应

用于岩土工程的各个方面^[6-7]。突变理论作为对不连续现象和突变过程进行定性研究的一种方法, 已成为洞室围岩稳定性的重要分析工具之一, 但是为确保围岩时刻处于安全状态, 围岩的在线监测不可或缺。

Bandt 等^[8]提出排列熵(permutation entropy, 简称 PE)方法来检测随机信号的突变, 该方法计算简单而快速。但是, 围岩不同位置的监测数据性质复杂, 包含多种时间尺度, 因此基于单一尺度结构的排列熵方法对这类复杂数据的分析效率不佳。为了解决这个问题, 文献[9-10]引入了多尺度排列熵, MPE 抗噪能力强, 计算量小, 能有效反映围岩的非线性动力学特性。然而, MPE 在实际应用中仍存在以下不足: ①MPE 算法中的粗粒度处理会减少时间序列的长度, 进而导致信息的缺乏, 特别是对于较短的时间序列, 影响尤为明显; ②MPE 方法只考虑了重构分量中元素之间的差值差异, 忽略了嵌入在幅值中的信息; ③MPE 算法仅适用于对局部区域即单个测点进行监测分析, 缺乏对多个测点进行整体性分析的能力。

为了克服 MPE 的这些不足, 并保留其优点, 根

* 教育部重点实验室开放基金资助项目(RMHSE1902);广州市科技计划资助项目(2020-ky34)

收稿日期:2020-10-19;修回日期:2020-11-28

据围岩的非线性变形特点,同时考虑到围岩变形监测中多个测点的分析,提出了突变理论和多通道加权多尺度排列熵的方法。结合某抽水蓄能电站地下厂房围岩监测数据,利用突变理论,对围岩进行稳定性分析评价,采用MWMPE的方法,提取围岩安全特征值,最后进行围岩稳定的多源信息融合^[11-12],从而实现基于数据驱动、信息融合的地下厂房围岩稳定在线监测。与基于MPE的稳定性安全监测方法相比,该方法能有效地对厂房围岩稳定性问题进行安全在线监测,具有更高的实用价值。

1 围岩稳定判据理论

1.1 非线性动力模型反演

将不同时间的位移速率作为模型的特解,反演由监测数据得到的围岩位移速率的非线性动力模型。以位移速率 X 作为系统变量,得到一个动力系统为

$$dX/dt = f(X) \tag{1}$$

采用向量和矩阵形式, $f(X)$ 为由位移变化速率矩阵 G_k 及所对应的矩阵 $P_k^{[11]}$ 组成的突变特征值矩阵 D ,表达式为

$$D = GP \tag{2}$$

保留3阶阶次^[12]后反演得到非线性动力学模型为

$$dX/dt = a_0 + a_1X + a_2X^2 + a_3X^3 \tag{3}$$

1.2 尖点突变理论

突变是岩土工程中最常见的现象,突变理论分析了事物变化过程中从一种状态到另一种状态跳跃变化的普遍规律,为判别围岩稳定性提出了一种新的准则^[13]。

尖点突变模型的势函数是控制变量为 i 和 j ,状态变量为 x 的双参数函数,表示为

$$V(x) = x^4 + ix^2 + jx \tag{4}$$

势函数的1阶导函数为状态曲面,2阶导函数为突变点集,得到尖点突变模型,如图1所示。

1.3 围岩稳定状况判别

通过监测位移数据反演出的非线性动力学模型,在满足 $(\partial V/\partial X)_{x'} = 0$ 情况下进行积分,得到方程

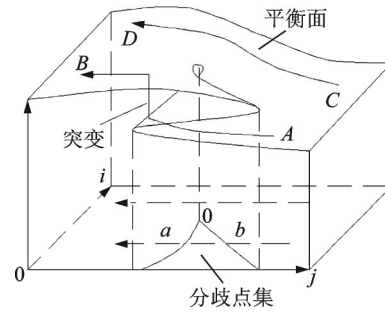


图1 尖点型突变模型

Fig.1 Cusp catastrophe model

$$V = b_0 + b_1X + b_2X^2 + b_3X^3 + b_4X^4 \tag{5}$$

对式(5)进行Tschirnhaus变换,令 $X = Y - L$,其中 $L = b_3/4b_4$,则式(5)变换为

$$V = d_0 + d_1Y + d_2Y^2 + d_4Y^4 \tag{6}$$

令式(6)中的 $V = d_4V^*$, E, Q, P 分别为 d_0, d_1, d_2 与 d_4 的比值,可以建立出判断地下洞室围岩稳定性的尖点突变模型,势函数表示为

$$V^* = Y^4 + PY^2 + QY + E \tag{7}$$

即判断围岩失稳的充要判据,判别式为

$$\Delta = 8P^3 + 27Q^2 \tag{8}$$

系统的稳定性可以通过 Δ 值的正负来判断,即

$$\Delta \begin{cases} > 0 & (\text{围岩处于稳定状态}) \\ = 0 & (\text{围岩处于临界状态}) \\ < 0 & (\text{围岩处于失稳状态}) \end{cases} \tag{9}$$

2 特征信息提取理论

2.1 多尺度排列熵

排列熵算法是一种用于描述时间序列复杂程度的非线性分析方法^[8],文献^[9-10]基于此提出了多尺度排列熵算法,具体运算如下。

对时间序列 $X(i)$ 进行粗粒化处理

$$Y(j) = \frac{1}{S} \sum_{i=(j-1)s+1}^{js} X(i) \quad (j=1, 2, \dots, n/s) \tag{10}$$

对新的时间序列 $Y(j)$ 进行相空间重构,得到重构矩阵^[14]

$$\begin{bmatrix} Y(1) & Y(1+\tau) & \dots & Y(1+(m-1)\tau) \\ Y(2) & Y(2+\tau) & \dots & Y(2+(m-1)\tau) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Y(K) & Y(K+\tau) & \dots & Y(K+(m-1)\tau) \end{bmatrix} \tag{11}$$

其中: m, τ 分别为嵌入维数和延迟时间; $K = n/s - (m-1)\tau$ 。

将每一行重构分量中的元素按其大小根据升序

进行重新排列,若存在大小相等的情况时,按其原本所处的相对位置排列,如式(12)所示

$$y[i+(u_m-1)\tau] \geq \dots \geq y[i+(u_1-1)\tau] \quad (12)$$

其中: u 为重构分量中各个元素所在列的索引。

因此,对于任意一个重构分量,其元素的排列方式可有 $m!$ 种。计算每种序列出现的概率 P_1, P_2, \dots, P_k ,得多尺度排列熵为

$$H_p(m) = - \sum_{u=1}^{m!} P_u \ln P_u \quad (13)$$

进行归一化处理后可得

$$0 \leq H_p = H_p(m) / \ln(m!) \leq 1 \quad (14)$$

H_p 的大小代表了时间序列 Y 的随机性,其值越趋近于1,表明数据越复杂没有规律。

2.2 多通道加权多尺度排列熵

多通道的原理,就是将所有时间序列同一时间的每一个值与所在时间所有值的均值的方差作为权重,每一时间求取每一个加权平均值,计算如下

$$X(i) = \frac{\sum_{e=1}^v X_e(i) D_e(i)}{\sum_{e=1}^v D_e(i)} \quad (15)$$

其中: v 为时间序列个数; $X_v(i)$ 为原时间序列; $D_v(i)$ 为方差; $X(i)$ 为融合后的时间序列。

多尺度加权排列熵的原理,就是在不同尺度下,将时间序列进行粗粒化处理,再进行相空间重构、各分量加权,并计算排列熵值。由于原始的粗粒化方法会大量减少序列长度,导致信息缺乏,故采用改进的粗粒化方法,运算过程如下。

对时间序列 $X(i)$ 进行改进的粗粒化处理,得到

$$Z_i = \frac{1}{s} \sum_{t=i}^{i+s-1} X(t) \quad (i=1, 2, \dots, n-s+1) \quad (16)$$

将处理后的 Z_i 进行相空间重构,再计算出每个子序列的权重^[15]

$$\omega_i = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (Z_{u+(k-1)\tau} - \bar{Z}_u)^2 \quad (17)$$

其中: \bar{Z}_u 为每一个子序列的算术平均值。

每一种排列方式出现的概率为

$$P_\omega(Q_u) = \sum \omega_i^{Q_u} / \sum \omega_i \quad (18)$$

其中: Q_u 为任意相同排列方式。

有几种排列方式, Q 就有几种可能的值^[16]。某一尺度下的多通道加权排列熵值为

$$H_{m,\tau} = - \frac{1}{\ln(m!)} \sum_{u=1}^{m!} P_\omega(Q_u) \ln P_\omega(Q_u) \quad (19)$$

所以,某个子序列下多通道加权多尺度排列熵为多个尺度下多通道加权排列熵的集合

$$H_{s,m,\tau} = \{H_{s,m,\tau}|s\} \quad (20)$$

其中: s 取某一值。

以集合中所有元素的均值 \bar{H} 作为某一子序列下的MWMPE值

$$\bar{H} = \frac{H_{1,m,\tau} + H_{2,m,\tau} + \dots + H_{s,m,\tau}}{s} \quad (21)$$

以各个子序列的 \bar{H} 作为元素,观察它们随时间的变化情况,确定围岩稳定特征值。

2.3 参数选取

在计算MWMPE值时,合理选取嵌入维数 m 和延迟时间 τ 同样重要。在 m 值的确定上, m 过小会导致重构的每个向量蕴含的信息过少,偶然性增加,不能准确反映系统特性; m 过大会使得时间序列均匀化,不仅更加耗费时间,而且无法凸显出异常数据带来的影响。在 τ 值的确定上,当 τ 过大时,各重构分量的相关性太小,无法反映出时间序列的动力特性;当 τ 过小时,使得相邻重构分量之间重复元素过多,关联程度过大,不利于构建新的空间坐标。参考张建伟等^[17]的计算方法,选取 $m=4, \tau=2$ 。

2.4 围岩稳定性特征值提取

通过MWMPE算法提取围岩稳定性特征值的步骤如下:

1) 在围岩的关键位置布设传感器采集围岩变形信息,根据数据滑动的方式提取子序列,以所有数据的前 N 个数作为一个子序列,并按步长 h 沿 N 向后滑动,依次取子序列;

2) 选取合适的尺度因子(一般大于10),将时间序列(围岩变形数据)进行粗粒化处理;

3) 利用互信息法与伪近临法分别确定参数 τ 和 m ;

4) 采用MWMPE的方法,分析计算多个测点的监测数据,得到一系列在各时间序列下计算出来的MWMPE值 $\bar{H}_1, \bar{H}_2, \dots, \bar{H}_T$,观察它们随时间的变化情况;

5) 通过 \bar{H} 值的变化情况分析围岩的安全状态,提取围岩稳定性特征值。

通过MWMPE算法提取围岩变形特征值的流程如图2所示。

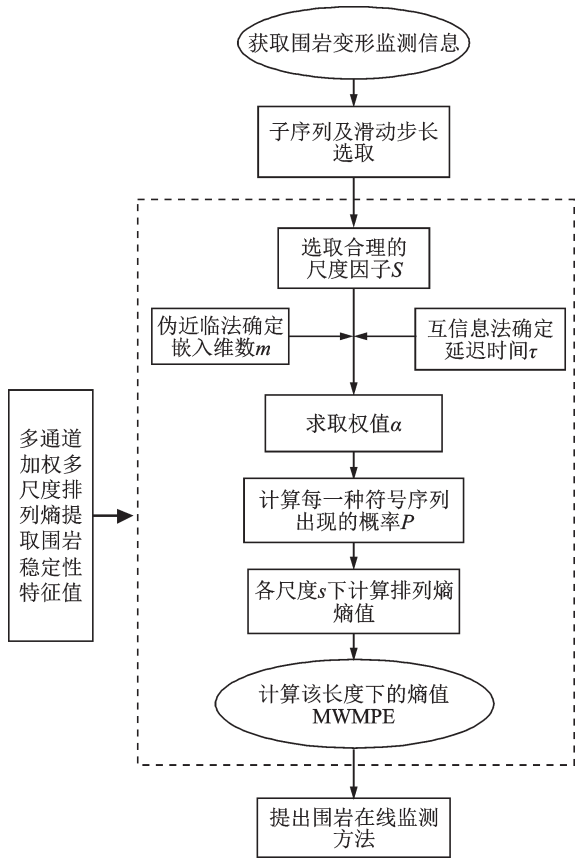


图2 提取围岩稳定性特征值流程图

Fig.2 Flow chart of extracting characteristic value of surrounding rock stability

3 工程实例

3.1 工程概况

某抽水蓄能电站具有高水头、大流量等特点。由于水库的存在,岩体中裂隙水压力偏高,降低了岩体的物理力学性质,对工程的安全稳定运行产生了一定威胁。为及时了解围岩稳定情况,主厂房分别在1#机和3#机及安装场附近均设主观测断面并布置各种监测仪器。厂房系统断面平面布置如图3所示。厂房多点位移计布置如图4所示。

3.2 地下厂房围岩稳定分析

多点位移计监测了围岩内部4个不同深度的绝对位移量(0,1.5,3.5和8.5 m)。根据实际情况,围岩变形由岩体内部向临空面方向,位移逐渐增大,每根锚杆在不同深度监测的绝对位移变形量在围岩的表面最大,即孔口处最危险,孔口处的安全状态往往代表着整根锚杆的安全状态。

对地下厂房围岩变形进行监测,其中I-I断面拱顶处一个典型测点 M_4 的累计变形如图5所示。

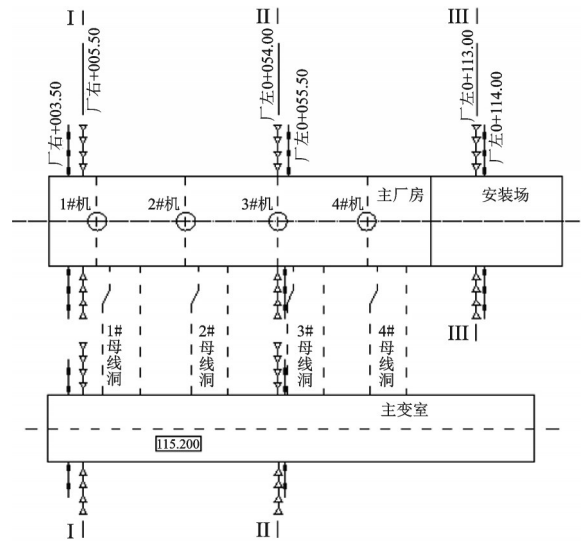


图3 厂房系统观测平面布置图(单位:m)

Fig.3 Layout of plant system observation (unit:m)

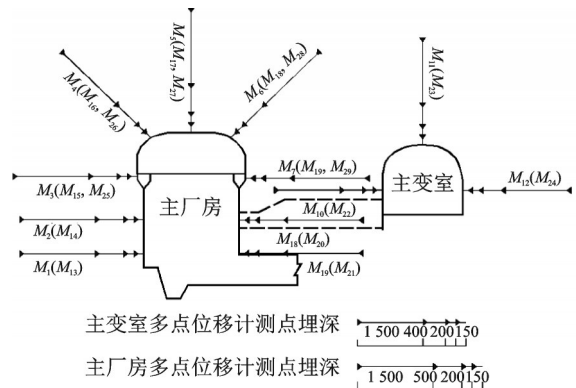


图4 多点位移计布置图(单位:cm)

Fig.4 Layout of multipoint displacement meter (unit:cm)

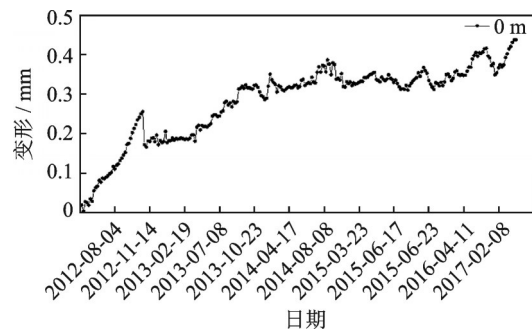


图5 M_4 位移变形曲线

Fig.5 M_4 displacement deformation curve

将I-I断面 M_4 测点监测数据进行整理,得到测杆 M_4 测点位移速率,如表1所示。

根据1.1节的计算方法,反演出非线性动力模型并积分,可得

$$V = -0.226X^4 + 0.177X^3 - 0.171X^2 - 0.052X \quad (22)$$

对式(22)进行Tschirnhaus变换,令

表 1 M_4 位移变形速率

Tab.1 M_4 displacement deformation rate

日期	位移速率/(mm·d ⁻¹)
20120302~20120430	0.001 0
20120430~20120529	0.000 2
20120529~20120629	0.001 4
20120629~20120729	0.000 9
20120729~20120829	0.001 0
20170829~20120929	0.002 1
⋮	⋮
20161221~20170129	-0.000 8
20170129~20170222	0.000 8
20170222~20170321	0.000 0
20170321~20170423	0.000 9
20170423~20170521	0.000 5
20170521~20170622	0.000 4

$X = Y - L$, 其中 $L = b_3/4b_4 = -0.195 8$, 则

$$V = d_0 + d_1Y + d_2Y^2 + d_4Y^4 \quad (23)$$

其中: d_4, d_2, d_1, d_0 分别等于 $-0.226 3, -0.118 6, -0.105 5, -0.012 7$ 。

得到 $P = 0.523 9, Q = 0.466 0, E = 0.056 0$ 。依据判别式可得其 $\Delta = 7.013 4 > 0$, 说明, M_4 孔口附近区域处于稳定状态。

根据尖点突变理论, 计算得到 I-I 断面测点 $M_1 \sim M_9$ 各参数及 Δ , 如表 2 所示。

表 2 I-I 断面各测点监测计算结果

Tab.2 Monitoring and calculation results of each measuring point of I-I section

测点	P	Q	E	Δ	判别
M_1	0.966 9	-0.487 2	-0.039 9	13.64	稳定
M_2	0.967 8	0.403 0	0.036 1	11.64	稳定
M_3	0.602 9	-0.040 9	0.051 2	1.80	稳定
M_4	0.523 9	0.466 0	0.056 0	7.01	稳定
M_5	1.599 4	-0.310 1	0.003 0	35.33	稳定
M_6	0.590 2	0.218 0	0.009 1	2.93	稳定
M_7	0.599 9	0.251 1	0.028 9	3.43	稳定
M_8	-0.979 5	0.981 7	1.012 1	18.50	稳定
M_9	0.901 1	-0.398 6	-0.060 7	10.14	稳定

由表 2 可知, 各个测点位移尖点突变模型的判别式均大于零, 可判定 I-I 断面处于稳定状态。

3.3 围岩稳定预警线选取

根据变形监测数据, 分别计算测点 MPE 与 MWMPE 值, 确定预警区间。

图 6 分别为 I-I 断面各测点孔口处围岩 MPE 值变化情况。由图可知, 围岩不同测点的熵值曲线整体平稳, 其最大特征值为 0.785, 最小特征值为 0.735。由尖点突变理论可知, 围岩处于安全状态, 运行平稳。对应围岩的安全状态, 可以将特征值包含的区间 0.735~0.785 视为围岩 MPE 值的安全预警区间。

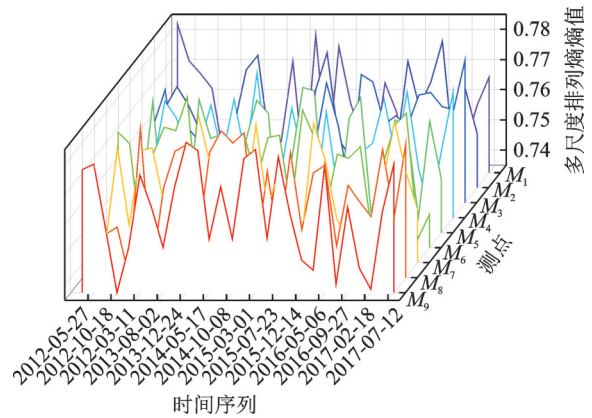


图 6 断面各测点孔口熵值变化值

Fig.6 Entropy change value of orifice at each measuring point of cross section

利用 MWMPE 对 $M_1 \sim M_9$ 通道的监测数据进行信息融合, 提取围岩整体的特征信息。多通道加权信息融合的关键在权值的确定, 然后通过权值计算出融合后的时间序列。根据式 (15)~(21) 可计算得到多个情况的 MWMPE 值, 如图 7 所示。

MWMPE 方法是结合了数据具有相关性的多通道的非线性分析方法, 由图 7 可知: ①熵值始终在一个范围波动, 这是由于地下厂房围岩在无外界扰动时, 围岩受到的作用无较大变化, 围岩变形趋势基本不变, 熵值也基本不变。但是, 外界环境条件并非恒定不变, 一般情况下, 伴随着地下水水位的小幅度上下波动等客观原因, 熵值也会存在一定波动, 但只要处于安全区间内, 围岩仍处于稳定状态。但若由于外界环境突变, 或围岩的累进性破坏, 使得熵值超出了安全区间范围, 应及时预警, 并视情况采取应对措施; ②图 7(a) I-I 断面各部位 MWMPE 值曲线整体平稳, 最大特征值为 0.823, 最小特征值为 0.786。图 7(b) 围岩断面整体 MWMPE 值曲线平稳, 最大特征值为 0.820, 最小特征值为 0.790。将特征值包含区间 0.790~0.820 视为围岩整体 MWMPE 值的安全预警区间, 超出该范围的值视为围岩处于欠稳定状态, 应及时报警; ③图 7(b) 的波动区间在图 7(a) 的波动区间内, 且 MWMPE 值略大于 MPE 值, 这是

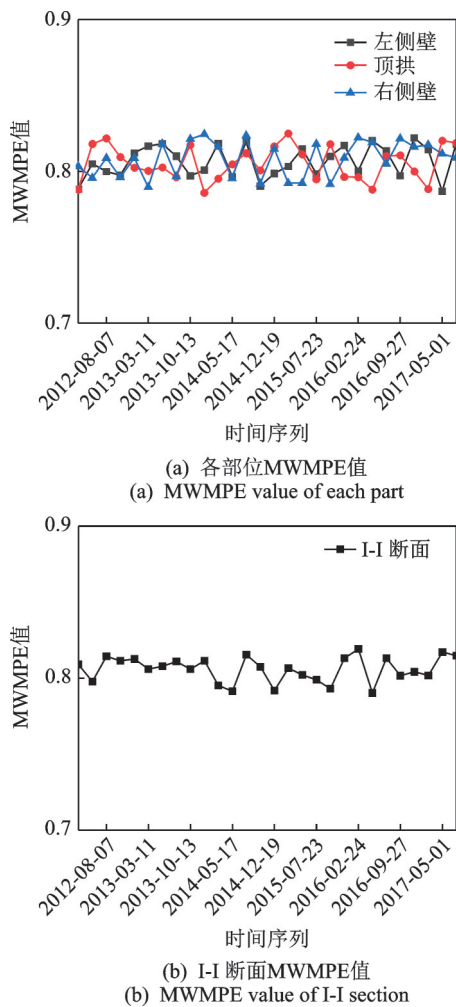


图7 I-I断面孔口MWMPE值变化值

Fig.7 Change value of MWMPE value at the orifice of section I-I

特征信息提取特点导致的客观结果,即熵值的大小反映振动信号的复杂与随机性,熵值越大,说明其信号的复杂性和随机性越大,其信号愈能反映结构自身特性;MWMPE熵值曲线整体较MPE熵值往上抬,即融合后的特征信息更加丰富。

以往的监测多采用单通道的分析方法,单点监测只能反映局部状态,只适用于由单一测点判断单一结构或多个通道间相互独立的情况。但是在实际工程中,整体结构的监测需多个通道共同分析,不同通道之间并非相互独立、毫无关联。MWMPE能够解决单测点测量范围有限、各通道间结构的整体运行状况监测的问题。MWMPE算法通过各个通道所占整体结构的占比进行特征信息融合后得到一条熵值曲线,即可监测厂房围岩整体结构的运行状态。相比于传统的单通道分析方法,更能反映并综合评价围岩的整体变形情况,将融合后的围岩稳定特征值0.790~0.820视为安全预警线,更加方便快捷。

4 结论

1) 围岩变形是一种复杂的演化过程,受外界环境和人为因素影响,具有非线性特征,将突变理论与监测数据相结合,提出通过尖点突变模型的判别式来判别围岩稳定状态的方法是可行的。

2) MWMPE作为一种非平稳信号分析方法,具有自适应好及鲁棒性好等特点,有效解决了MPE方法粗粒化导致信息缺乏、相空间重构未考虑权重影响等缺点,对多个通道信息进行融合分析,结果更可靠。

3) 基于突变理论和MWMPE算法,提出一种新的稳定特征向量-安全预警线,该指标能够有效反映厂房围岩结构运行特征,实现厂房围岩的安全在线监测,该方法为地下厂房围岩稳定监测提供了新思路,为结构的运行状态评价及预警提供了依据。

参 考 文 献

- [1] 赵瑜,张建伟,院淑芳.基于突变理论的地下厂房围岩稳定性安全评价[J].岩石力学与工程学报,2014,33(S2):3973-3978.
ZHAO Yu, ZHANG Jianwei, YUAN Shufang, et al. Safety evaluation of surrounding rock stability of underground powerhouse based on catastrophe theory [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S2):3973-3978. (in Chinese)
- [2] 国家能源局.NB/T 35090—2016 水电站地下厂房设计规范[S].北京:中国电力出版社,2017.
- [3] YANG X L, XIAO H B. Safety thickness analysis of tunnel floor in karst region based on catastrophe theory [J]. Journal of Central South University, 2016, 23(9): 2364-2372.
- [4] YANG X L, LI Z W, LIU Z B, et al. Collapse analysis of tunnel floor in karst area based on Hoek - Brown rock media [J]. Journal of Central South University, 2017, 24(4):957-966.
- [5] 穆成林,裴向军,路军富,等.基于尖点突变模型巷道层状围岩失稳机制及判据研究[J].煤炭学报,2017,42(6):1429-1435.
MU Chenglin, PEI Xiangjun, LU Junfu, et al. Study on instability mechanism and criterion of roadway layered surrounding rock based on cusp catastrophe model [J]. Journal of Coal Industry, 2017, 42(6): 1429-1435. (in Chinese)
- [6] CHEN Y H, CHEN L, WANG X Q, et al. Critical buckling load calculation of piles based on cusp catastrophe theory [J]. Marine Georesources &

- Geotechnology, 2015, 33(3):222-228.
- [7] KANG Z Y. The cusp catastrophe model of instability of the quasi static rock movement[J]. Acta Seismologica Sinica, 1984(3):352-360.
- [8] BANDT C, POMPE B. Permutation entropy: a natural complexity measure for time series [J]. Physical Review Letters, 2002, 88(17):1-4.
- [9] YE Y G, ZHANG Y X, WANG Q B, et al. Fault diagnosis of high-speed train suspension systems using multiscale permutation entropy and linear local tangent space alignment [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 138:1-19.
- [10] LI H M, HUANG J Y, YANG X W, et al. Fault diagnosis for rotating machinery using multiscale permutation entropy and convolutional neural networks [J]. Entropy, 2020, 22(8):1-23.
- [11] 李火坤, 张宇驰, 邓冰梅, 等. 拱坝多传感器振动信号的数据级融合方法[J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(6): 1075-1082.
LI Huokun, ZHANG Chiyu, DENG Bingmei, et al. Data level fusion method for multi-sensor vibration signals of arch dam [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(6): 1075-1082. (in Chinese)
- [12] 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, et al. Dynamic parameter identification of workshop structure based on data fusion and LMD [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(2):175-181. (in Chinese)
- [13] 潘岳, 王志强, 张勇. 突变理论在岩体系统动力失稳中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008:1-3.
- [14] 赵荣珍, 李霁蒲, 邓林峰. EWT多尺度排列熵与GG聚类的轴承故障辨识方法[J]. 振动、测试与诊断, 2019, 39(2):416-423.
- ZHAO Rongzhen, LI Jipu, DENG Linfeng. Bearing fault identification method based on EWT multi-scale permutation entropy and GG clustering [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39(2): 416-423. (in Chinese)
- [15] 马晓君. 泵站管道振动状态监测研究与应用[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2019.
- [16] 陈柯宇, 高金凤, 吴平. 基于多尺度加权排列熵的管道泄漏检测[J]. 测控技术, 2019, 38(2):118-122.
CHEN Keyu, GAO Jinfeng, WU Ping, et al. Pipeline leakage detection based on multi-scale weighted permutation entropy pipeline leakage detection based on multi-scale weighted permutation entropy [J]. Measurement & Control Technology, 2019, 38(2):118-122. (in Chinese)
- [17] 张建伟, 侯鸽, 赵瑜, 等. 排列熵算法在水工结构损伤诊断中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(2): 234-239.
ZHANG Jianwei, HOU Ge, ZHAO Yu, et al. Application of permutation entropy algorithm in damage diagnosis of hydraulic structures [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(2): 234-239. (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 dedication rate and permutation entropy》(《Nonlinear Dynamics》2018, Vol. 93, No. 4) 等论文。

E-mail: zjwcivil@126.com