

文章编号:1671-1637(2015)03-0034-07

基于灰色突变理论的隧道衬砌裂缝诊断模型

张素磊¹, 陈 淮¹, 王亚琼^{2,3}

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 长安大学 陕西省公路桥梁与隧道重点实验室, 陕西 西安 710064; 3. 弗吉尼亚理工大学 土木与环境工程系, 弗吉尼亚 黑堡 24061)

摘要:为了利用有限的监测数据评判隧道衬砌裂缝稳定性,应用小波变换对衬砌裂缝监测数据进行分析,去除因环境变化与测试误差而产生的高频部分,保留因围岩压力变化而产生的低频部分,实现了裂缝时效变形的分解。应用灰色理论建立了衬砌裂缝时效变形的GM(1,1)灰色预测模型,实现了利用前期监测数据预测衬砌裂缝后期发展。应用尖点突变模型的平衡条件建立了衬砌裂缝稳定性判据。构建了基于灰色突变理论的隧道衬砌裂缝诊断模型,并对2条典型衬砌裂缝进行了分析。分析结果表明:2条裂缝稳定性判据大于0,均未达到失稳条件;其实测宽度变化量小于0.2 mm,宽度变化速率小于 $0.002 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,处于稳定状态,因此,该诊断模型可准确预测衬砌裂缝发展趋势。

关键词:隧道工程;衬砌裂缝;小波变换;灰色理论;突变理论;诊断模型

中图分类号:U456.31 **文献标志码:**A

Diagnostic model of crack for tunnel lining based on gray and catastrophe theories

ZHANG Su-lei¹, CHEN Huai¹, WANG Ya-qiong^{2,3}

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China; 2. Key Laboratory for Highway Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 3. Department of Civil and Environmental Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg 24061, Virginia, USA)

Abstract: In order to evaluate the stability of crack for tunnel lining by using finite monitoring data, wavelet transform was applied to analyze the monitoring data of cracks for tunnel lining, the high frequency part caused by environmental change and test error was eliminated, and the low frequency part caused by surrounding rock pressure variation was kept, thus, the time-dependent deformation of lining crack was decomposed. The GM (1,1) gray prediction model of time-dependent deformation of lining crack was built based on gray theory to predict the later development of lining crack by using early monitoring data. The stability criterion of lining crack was established based on the equilibrium conditions of cusp catastrophe model. The diagnostic model of lining crack was established based on gray and catastrophe theories, and two typical lining cracks were analyzed based on the model. Analysis result indicates that the stability criterion values of two cracks are larger than 0, so, they do not meet the instability condition. The measured

收稿日期:2014-12-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51408554);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2013G1502027);河南省教育厅科学技术研究重点项目(14B560026)

作者简介:张素磊(1983-),男,山东临朐人,郑州大学讲师,工学博士,从事隧道健康诊断研究。

variations of crack widths are less than 0.2 mm, the variation rates are less than $0.002 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, which shows that two cracks are basically stable. Obviously, this diagnostic model can predict the development tendency of lining cracks correctly. 6 figs, 19 refs.

Key words: tunnel engineering; lining crack; wavelet transform; gray theory; catastrophe theory; diagnostic model

Author resume: ZHANG Su-lei(1983-), male, lecturer, PhD, +86-371-67781680, zhangsulei@126.com.

0 引言

随着隧道运营时间的延长,由于受衬砌材料劣化、围岩压力变异、温度、湿度等因素的影响,隧道衬砌结构产生了不同程度的裂损现象。Inokuma 等对日本公路隧道病害情况进行了统计分析,其中约 60% 的公路隧道存在各种病害现象,其中,衬砌开裂所占比例最大^[1];吴江滨等分析结果表明运营铁路隧道的 60% 以上存在不同程度的病害,1999 年铁路运营隧道失格率为 65.2%,2000 年隧道失格率为 65.7%,其中失格隧道均存在不同程度的衬砌开裂现象^[2]。

衬砌裂缝会导致隧道结构承载能力和耐久性下降,给隧道内行车和行人安全造成威胁。由于隧道衬砌结构处于复杂的地质环境中,只从理论上研究衬砌裂缝的稳定性问题并不能反映真实情况,因此,一些专家学者通过现场监测来评判衬砌裂缝的稳定性。叶飞等介绍了隧道衬砌裂缝的监测方法与三维裂缝监测原理,并结合工程实例对衬砌结构的承载状况与安全性进行了诊断和评价^[3-4];王建秀等通过对连拱隧道 30 处裂缝测点的监测认为衬砌裂缝运动具有时效特性,一般按照先增后减的规律变化,若出现突变或匀速单调发展则表明衬砌裂缝变化异常^[5];潘洪科等根据 22 处衬砌裂缝监测数据分析了偏压荷载作用下的衬砌裂缝变化规律^[6]。

隧道衬砌裂缝健康监测数据采集后,需要进行加工处理,并研究如何通过有限的监测数据评价与预测隧道衬砌裂缝的稳定性。采用趋势图或回归分析来处理衬砌裂缝健康监测数据虽然直观、简便,但要求样本量较大,且分布规律较好,对变量的依赖性较强,若回归因子选择不当,预测精度无法保证,因此,有必要寻求一种有效的隧道衬砌裂缝健康监测数据处理方法。Catbas 等采用模糊层次定权和概率可靠度相结合的方法对桁架桥梁长期监测数据进行处理,并据此对该桥的可靠性进行了量化分析^[7];

Posenato 等针对土木工程结构监测中存在的问题,提出了采用移动主成分分析与移动相关分析来判断结构的状态^[8];Weng 等采用随机子空间识别方法和频域分解法对大跨斜拉桥结构健康监测数据进行处理,通过对监测系统收集的动态数据进行分析得到了大跨斜拉桥各构件之间的动态交互关系^[9];Gul 等建立了监测数据的自回归模型,基于马氏距离对结构的异常监测算法进行了改进^[10];Li 等利用尖点突变理论建立了基于现场监测数据的滑坡时间预测模型^[11-12];Liu 等基于特殊地区实际地震活动时间序列提出了一种基于尖点突变理论的地震灾害评估和地震预测方法^[13];Xu 等结合 BP 神经网络和突变理论,建立了基于声发射时间序列的岩爆预测模型来预测岩爆^[14];王思长等应用尖点突变理论研究了岩质边坡开挖过程中的稳定性^[15]。

从上述分析可以看出,目前,针对衬砌裂缝健康监测数据的处理方法很多,但由于衬砌裂缝发展具有影响因素较多、灰色性与裂缝失稳突变等特点,上述各种方法单独应用于衬砌裂缝监测数据的处理均不能满足实际要求。为此,本文将小波理论、灰色理论和突变理论结合起来研究衬砌裂缝监测数据的变化规律,据此预测隧道衬砌裂缝的稳定性,从而建立一种基于有限监测数据的隧道衬砌裂缝稳定性评价预测方法。

1 基于小波变换的衬砌裂缝时效变形分解

隧道衬砌裂缝时效变形指的是衬砌裂缝宽度、长度、深度等参数随时间的改变量。衬砌裂缝的时效变形主要由 3 种因素引起:第 1 种因素为围岩压力,如塑性地压与胀性地压等,该因素的影响具有连续性、单调性和不可逆性;第 2 种因素为环境,如温度变化、大气降水等,该因素的影响具有间断性和周期性;第 3 种因素为测试误差,如监测仪器误差与读数误差等,该因素的影响具有随机性。通常而言,环境与测试误差对隧道衬砌裂缝时效变形

的影响相对较小,且短时间内一般不会致其突然失稳,而围岩压力对衬砌裂缝影响较大,是导致衬砌裂缝失稳的主要因素。在研究基于监测数据的裂缝稳定性时,重点研究围岩压力变化产生的衬砌裂缝时效变形,因此,需要寻找一种方法将这种时效变形从裂缝监测数据中剥离出来,而小波变换可为其提供理论依据。

小波变换是通过小波基函数 $\psi(t)$ 对信号 $F(t)$ 进行变换, t 为时间。信号 $F(t)$ 属于平方可积的实数空间,其连续小波变换可表示为

$$W(a,b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} F(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

式中: $W(a,b)$ 为小波变换函数; a 为尺度因子, $a \in \mathbf{R}$,且 $a \neq 0$; b 为时间平移因子, $b \in \mathbf{R}$ 。

小波变换的逆变换(或小波重构)可表示为

$$F(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} W(a,b) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) da db \quad (2)$$

式中: C 为小波变换系数。

Mallat 提出了信号的塔式多分辨率分析与重构的快速算法^[16],可表示为

$$c_0(n) = F(n) \quad (3)$$

式中: $F(n)$ 为 $F(t)$ 的离散采样序列; $c_0(n)$ 为 $F(t)$ 在离散小波变换后的尺度因子 $j=0$ 时的值, n 为离散阶数。

信号 $F(t)$ 的离散二进小波变换为

$$\begin{cases} c_{j+1}(n) = \sum_{k \in \mathbf{Z}} h(k-2n) c_j(k) \\ d_{j+1}(n) = \sum_{k \in \mathbf{Z}} g(k-2n) d_j(k) \\ g(k) = (-1)^{1-k} h(1-k) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $h(k-2n)$ 、 $g(k-2n)$ 为共轭滤波器系数; k 为离散小波变换后的平移因子; $c_j(k)$ 、 $d_j(k)$ 分别为 $F(t)$ 在 j 的近似部分和细节部分。

$c_0(n)$ 经过尺度因子可分解为 $d_1(n)$ 、 $d_2(n)$ 、 \dots 、 $d_j(n)$ 与 $c_j(n)$ 。设 $F(t)$ 的分析频率为 f ,则分解结果对应的各频带为 $(2^{-1}f \sim f)$ 、 $(2^{-2}f \sim 2^{-1}f)$ 、 \dots 、 $(2^{-n}f \sim 2^{-n+1}f)$ 与 $(0 \sim 2^{-n}f)$,该过程为多分辨率分析。

对应的小波重构公式为

$$c_{j-1}(n) = \sum_{k \in \mathbf{Z}} h(k-2n) c_j(k) + \sum_{k \in \mathbf{Z}} g(k-2n) d_j(k) \quad (5)$$

基于上述小波变换过程,将衬砌裂缝监测数据视为数字信号序列,且包含不同频率组分,分析时,首先对衬砌裂缝特征参数的监测数据序列进行多层

小波分解,去除因环境变化与测试误差而产生的裂缝变化,保留因围岩压力变化而产生的裂缝变化,进而实现了隧道衬砌裂缝时效变形的分解。

2 GM(1,1)灰色预测模型

隧道衬砌裂缝的影响因素很多,且均具有很大的不确定性与灰色系统的特征,因此,可用灰色理论^[17-18]来研究衬砌裂缝稳定性问题。衬砌裂缝监测数据随时间变化具有一定的规律性,可将其视为按照一定趋势变化的数据序列,应用灰色理论将衬砌裂缝影响因素视为灰色量,将规律性不强的初始监测数据累加生成明显单调变化的数据序列,从而构建灰色模型。

本文选取 GM(1,1)灰色预测模型分析衬砌裂缝监测数据,该模型具有适用性强、预测精度高、所需原始数据少、易实现电算等优点,其预测方程为仅含一个变量的一阶微分方程。该模型的实现过程如下

$$X_1(i) = \sum_{s=1}^i X_0(s) \quad (6)$$

式中: $X_0(s)$ 为第 s 个初始监测数据; $X_1(i)$ 为原始数据序列 X_0 的一次累加生成序列 X_1 (1-AGO 序列) 的第 i 个值。

对式(6)求导得 GM(1,1)预测模型的微分方程为

$$\frac{dX_1}{dt} + pX_1 = q \quad (7)$$

式中: p 为发展灰数; q 为内生控制灰数。

求解式(7)得 t 时 X_1 的值为

$$X_1(t) = \left[X_0(1) - \frac{q}{p} \right] e^{-pt} + \frac{q}{p} \quad (8)$$

通过最小二乘原理求得待估参数矩阵 D 为

$$D = \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (9)$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}[X_1(1) + X_1(2)] & 1 \\ -\frac{1}{2}[X_1(2) + X_1(3)] & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}[X_1(o-1) + X_1(o)] & 1 \end{bmatrix}$$

$$Y = \begin{bmatrix} X_0(2) \\ X_0(3) \\ \vdots \\ X_0(o) \end{bmatrix}$$

式(9)为 GM(1,1)灰色预测模型中 p 和 q 的矩阵辨识计算式。

当实际时间间隔为 l 时,式(8)的离散值为

$$X_1(l+1) = \left[X_0(1) - \frac{q}{p} \right] e^{-pl} + \frac{q}{p} \quad (10)$$

对式(10)求导得其还原解为

$$X_0(l+1) = -p \left[X_0(1) - \frac{q}{p} \right] e^{-pl} \quad (11)$$

以上为 GM(1,1)灰色预测模型的解算过程。

3 尖点突变模型

隧道衬砌结构处于正常围岩压力之下,衬砌裂缝变化一般具有渐变特征,若围岩压力出现异常,衬砌裂缝会由相对稳定的渐变状态变为失稳扩展状态,可见,衬砌裂缝失稳具备突变特点,因此,可借助突变理论^[19]研究裂缝的稳定性。本文选用尖点突变模型研究衬砌裂缝稳定性,其势函数为

$$V(x) = \frac{1}{4}x^4 + \frac{1}{2}ux^2 + vx \quad (12)$$

其相空间是三维的,其一阶导数为状态曲面

$$V'(x) = x^3 + ux + v = 0 \quad (13)$$

式中: x 为状态变量; u, v 为控制变量。

系统稳定性取决于式(13)确定的临界点,式(13)有 1 个实根或 3 个实根,实根的数目由判别式 Δ 的符号决定

$$\Delta = 4u^3 + 27v^2 \quad (14)$$

当 $\Delta > 0$ 时,式(13)仅有 1 个实根,系统处于稳定状态;当 $\Delta = 0$ 时,若 u 和 v 同时为 0,存在 3 重根,若 u 和 v 不同时为 0,存在 2 重根,对应于分歧点的 2 条曲线,系统有 2 个临界稳定状态,受扰动后会产生突变;当 $\Delta < 0$ 时,式(13)有 3 个互异实根,其中 2 个代表系统稳定,另 1 个代表系统不稳定,仅当系统进入分歧点时才发生突变。

将系统状态描述为以 x, u, v 为坐标的三维空间中的一点,而由 $V'(x)$ 确定的空间曲面称为突变流形(图 1)。突变流形的上叶和下叶表明系统处于渐进稳定状态,而中叶表明系统处于不稳定状态。势函数由上叶进入下叶或由下叶经过中叶进入上叶

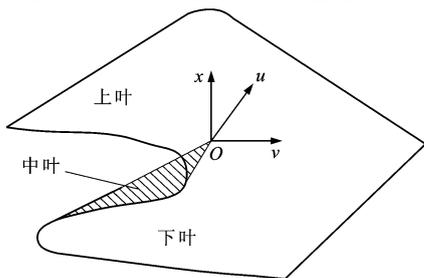


图 1 突变流形

Fig. 1 Catastrophe manifold

时,系统发生突变。

4 隧道衬砌裂缝稳定性的预测模型

隧道衬砌裂缝现场监测内容主要是裂缝宽度、长度和深度等,其中监测裂缝宽度的变化现场易操作,且能反映裂缝的发展趋势,实际应用较多。监测衬砌裂缝宽度时,变量仅有一个,可将 GM(1,1)模型 t 时刻的 1-AGO 序列值 $X_1(t)$ 按 Taylor 级数展开为幂级数形式

$$\delta(t) = A_0 + A_1t + A_2t^2 + \dots + A_e t^e \quad (15)$$

式中: $A_0 \sim A_e$ 为常系数,可用多元回归确定; e 为级数。

考虑精度与建模方便,取前 5 项,式(15)化为

$$\delta(t) = A_0 + A_1t + A_2t^2 + A_3t^3 + A_4t^4 + A_5t^5 \quad (16)$$

对式(16)求导得 GM(1,1)灰色预测模型还原解式(11)的 Taylor 级数展开式为

$$U = A_1 + 2A_2t + 3A_3t^2 + 4A_4t^3 + 5A_5t^4 \quad (17)$$

式中: U 为式(11)的时效分量序列,即隧道衬砌裂缝的时效分量。

$$\begin{aligned} \text{令} \quad & y_0 = A_1 \\ & y_1 = 2A_2 \\ & y_2 = 3A_3 \\ & y_3 = 4A_4 \\ & y_4 = 5A_5 \end{aligned}$$

则式(17)可化为

$$U = y_0 + y_1t + y_2t^2 + y_3t^3 + y_4t^4 \quad (18)$$

对式(18)进行 Tschirnhaus 变换,得

$$U = z_3S^4 + z_2S^2 + z_1S + z_0 \quad (19)$$

$$S = m + t$$

$$m = y_3/4y_4$$

$$z_0 = y_4m^4 - y_3m^3 + y_2m^2 - y_1m + y_0$$

$$z_1 = -4y_4m^3 + 3y_3m^2 - 2y_2m + y_1$$

$$z_2 = 6y_4m^2 - 3y_3m + y_2$$

$$z_3 = y_4$$

将式(19)变换为尖点突变模型势函数的标准形式,得

$$U = \frac{1}{4}T^4 + \frac{1}{2}w_1T^2 + w_2T + w_3 \quad (20)$$

$$T = \frac{S}{\sqrt[4]{1/4 | z_3 |}}$$

$$w_1 = z_2/\sqrt{| z_3 |}$$

$$w_2 = z_1/\sqrt[4]{4 | z_3 |}$$

$$w_3 = z_0$$

式(20)中的常数项不影响 U 的性质,可略去常

数项,得

$$U = \frac{1}{4}T^4 + \frac{1}{2}\omega_1 T^2 + \omega_2 T \quad (21)$$

式(21)为式(19)的标准势函数形式,这样就建立了基于现场监测数据的隧道衬砌裂缝稳定性预测模型。

5 隧道衬砌裂缝稳定性判据的确定

对式(21)求导并令其等于0,得标准势函数平衡曲面方程为

$$T^3 + \omega_1 T + \omega_2 = 0 \quad (22)$$

对式(22)求导得平衡曲面的突变点集方程为

$$3T^2 + \omega_1 = 0 \quad (23)$$

联立式(22)、(23)得分歧点集方程 Q 为

$$Q = 4\omega_1^3 + 27\omega_2^2 = 0 \quad (24)$$

在 ω_1, ω_2 构成的控制变量平面内,分歧点集表现为 2 条曲线(图 2)。可知,分歧点集将控制变量平面划分为 2 部分:当 $4\omega_1^3 + 27\omega_2^2 > 0$ 时,位于曲线上方,此时仅存在唯一极小值,衬砌裂缝处于稳定状态;当 $4\omega_1^3 + 27\omega_2^2 = 0$ 时,位于曲线上,衬砌裂缝处于不稳定状态;当 $4\omega_1^3 + 27\omega_2^2 < 0$ 时,位于曲线下方,此时衬砌裂缝存在 3 个平衡点,即平衡曲面方程的 3 个互异实根对应的临界点,其中 2 个对应稳定状态,另 1 个对应不稳定状态,若系统达到分歧点,则衬砌裂缝产生突变,判断衬砌裂缝是否发生突变失稳还应满足条件 $3T^2 + \omega_1 < 0$ 。

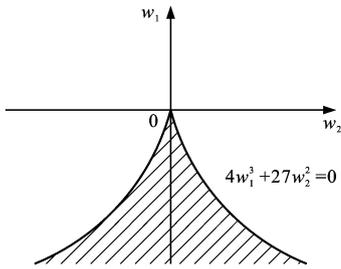


图 2 分歧点集
Fig. 2 Bifurcation set

可见,隧道衬砌裂缝发生突变失稳的判据为下述 2 个条件之一: $4\omega_1^3 + 27\omega_2^2 = 0; 4\omega_1^3 + 27\omega_2^2 < 0$ 且 $3T^2 + \omega_1 < 0$ 。衬砌裂缝稳定性预测流程见图 3。

6 工程实例分析

为了便于对比分析,本文选取文献[6]中 2 条典型衬砌裂缝的监测数据作为研究对象,验证本文提出的基于小波变换、灰色预测和尖点突变的隧道衬砌结构裂缝稳定性预测模型的实用性。

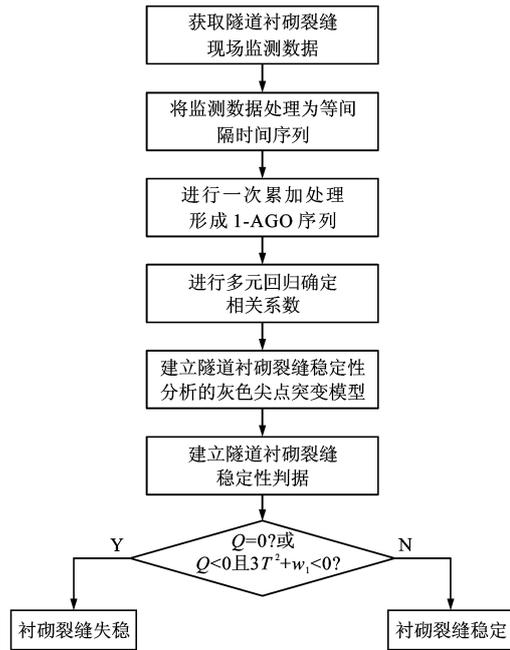


图 3 衬砌裂缝稳定性预测流程

Fig. 3 Prediction flow of lining crack stability

选取的 2 条衬砌裂缝分布于三公青隧道衬砌之上,隧道为上下分离式四车道连拱隧道,总长度为 255 m,最大埋深为 63 m,设计净宽为 10.525 m,净高为 7.200 m。隧道洞身围岩以强-中风化砂岩和泥岩为主,围岩较破碎,节理裂隙发育,地下水受大气降水补给明显,隧道洞口覆土深度较浅,洞身存在一定程度偏压。在隧道上行线施工完成后 3 个月左右,该隧道二次衬砌中出现了多条不同程度的裂缝。为研究衬砌裂缝的发展变化规律,文献[6]选取了 22 条裂缝进行了现场监测,本文选取了其中的 L1 裂缝和 L22 裂缝的原始监测数据进行分析,这 2 条裂缝的宽度变化原始监测数据见图 4。

基于小波变换理论对原始监测数据进行多层小波分解,去除因环境变化与测量误差而产生的高频变化部分,保留因隧道围岩压力变化而产生的低频变化部分,并进行小波重构,得到的 2 条裂缝宽度变化见图 5。

由此建立等间隔时间序列,时间间隔取为 5 d,并进行 1-AGO 序列生成,1-AGO 序列生成前后裂缝的宽度变化见图 6。由图 6 可见,经 1-AGO 序列生成后,2 条裂缝的监测数据呈现较好的单调递增规律。

利用式(9)计算出 p, q 的值,其中, L1 裂缝宽度变化的 1-AGO 序列预测模型为

$$X_1(l+1) = 4.752e^{0.0878l} - 4.562 \quad (25)$$

求其还原解,可得 L1 裂缝的预测模型为

$$X_0(l+1) = 0.417e^{0.0878l} \quad (26)$$

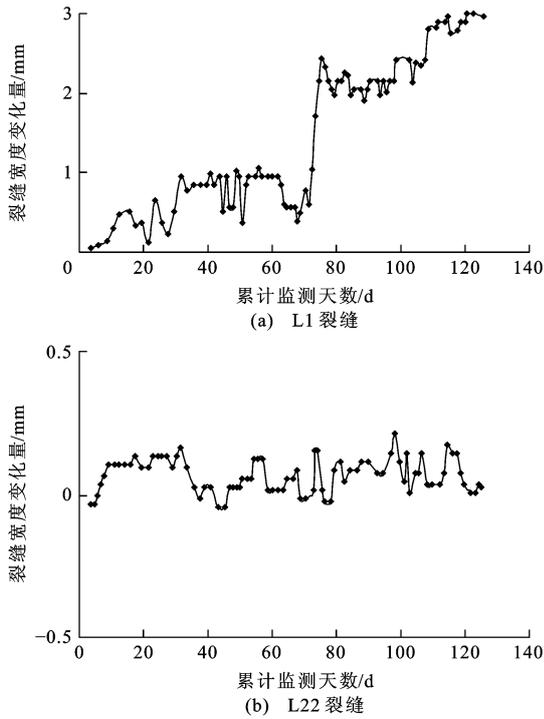


图 4 裂缝的宽度变化曲线

Fig. 4 Width variation curves of cracks

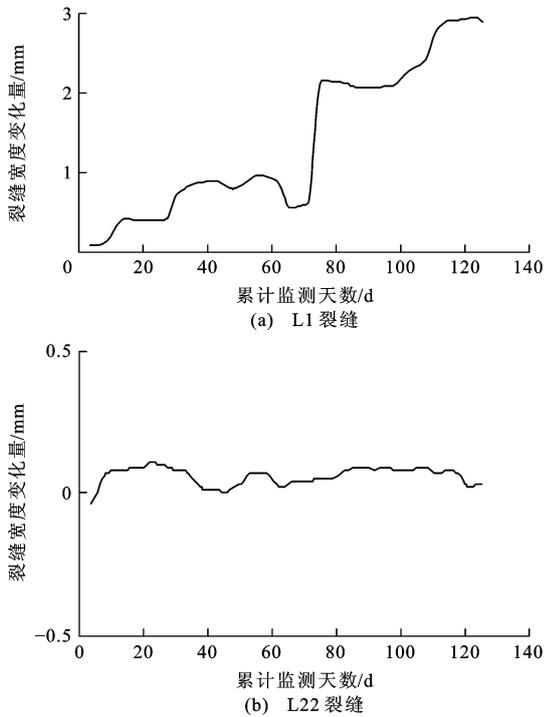


图 5 小波重构后裂缝的宽度变化曲线

Fig. 5 Width variation curves of cracks after wavelet reconstruction

L22 裂缝宽度变化的 1-AGO 序列预测模型为

$$X_1(l+1) = -29.844e^{-0.00211l} + 29.849 \quad (27)$$

求其还原解,可得 L22 裂缝的预测模型为

$$X_0(l+1) = 0.063e^{-0.00211l} \quad (28)$$

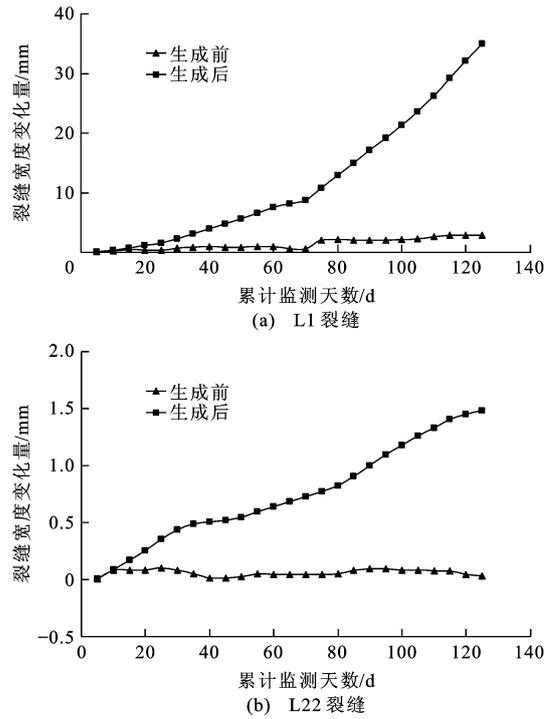


图 6 1-AGO 序列生成前后裂缝的宽度变化曲线

Fig. 6 Width variation curves of cracks before and after 1-AGO sequence generation

将衬砌裂缝宽度变化的 1-AGO 序列值展开为时间 t 的幂级数形式,为简化起见,令 t 为累计监测天数除以时间间隔 5 d,则对于 L1 裂缝有

$$\begin{aligned} \delta(t) = & 9.17 \times 10^{-2} - 1.50 \times 10^{-1}t + \\ & 1.57 \times 10^{-1}t^2 - 1.57 \times 10^{-2}t^3 + \\ & 8.10 \times 10^{-4}t^4 - 1.35 \times 10^{-5}t^5 \quad (29) \end{aligned}$$

由式(17)~(21)可得 L1 裂缝的尖点突变模型标准势函数为

$$U = 0.250T^4 + 0.697T^2 + 0.950T \quad (30)$$

L1 裂缝稳定性判别式计算结果为

$$4\omega_1^3 + 27\omega_2^2 = 35.17 \quad (31)$$

同样,可得 L22 裂缝稳定性判别式计算结果为

$$4\omega_1^3 + 27\omega_2^2 = 0.65 \quad (32)$$

对于 2 条裂缝,计算结果均大于 0,根据衬砌裂缝稳定性判据,可知 2 条裂缝均未达到失稳条件。后期监测数据表明 2 条裂缝的宽度变化量小于 0.2 mm,宽度变化速率小于 $0.002 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,裂缝未有明显扩展趋势,基本处于稳定状态。可见,本文提出的预测裂缝稳定性的方法与现场监测的结果一致。

7 结 语

(1)基于小波变换对衬砌裂缝监测数据进行分解,去除对裂缝稳定性影响较小的高频部分,保留对

裂缝稳定性影响较大的低频部分,实现了对衬砌裂缝监测数据的预处理。

(2)将衬砌裂缝影响因素视为灰色量,然后基于灰色理论将规律性不强的衬砌裂缝监测数据进行1-AGO序列累加运算后得到具有明显单调变化的数据序列,构建了衬砌裂缝的GM(1,1)灰色预测模型。

(3)根据尖点突变模型的平衡条件建立了衬砌裂缝稳定性判据,构建了一种基于现场监测数据的衬砌裂缝诊断模型。

(4)通过工程实例分析验证了本文提出的隧道衬砌裂缝诊断模型的实用性和有效性,并可为类似隧道裂缝诊断提供参考与借鉴。

参 考 文 献 :

References :

- [1] INOKUMA A, INANO S. Road tunnels in Japan: deterioration and countermeasures[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1996, 11(3): 305-309.
- [2] 吴江滨,张顶立,王梦恕. 铁路运营隧道病害现状及检测评估[J]. *中国安全科学学报*, 2003, 13(6): 49-52, 83.
WU Jiang-bin, ZHANG Ding-li, WANG Meng-shu. Current damage situation of railway operation tunnels and their inspection and evaluation [J]. *China Safety Science Journal*, 2003, 13(6): 49-52, 83. (in Chinese)
- [3] 叶 飞,何 川,夏永旭. 公路隧道衬砌裂缝的跟踪监测与分析研究[J]. *土木工程学报*, 2010, 43(7): 97-104.
YE Fei, HE Chuan, XIA Yong-xu. Post-construction monitoring and analysis for highway tunnel lining cracks[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2010, 43(7): 97-104. (in Chinese)
- [4] 叶 飞,朱合华,丁文其,等. 连拱隧道衬砌裂缝的三维监测研究[J]. *现代隧道技术*, 2006, 43(2): 30-33.
YE Fei, ZHU He-hua, DING Wen-qi, et al. Three-dimensional in-situ monitoring for the cracks on a multi-arch highway tunnel lining [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2006, 43(2): 30-33. (in Chinese)
- [5] 王建秀,朱合华,唐益群,等. 连拱隧道裂缝运动的监测与分析[J]. *土木工程学报*, 2007, 40(5): 69-73.
WANG Jian-xiu, ZHU He-hua, TANG Yi-qun, et al. Monitoring and analysis for movement of cracks of twin-arch tunnel[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2007, 40(5): 69-73. (in Chinese)
- [6] 潘洪科,杨琳德,黄 慷. 公路隧道偏压效应与衬砌裂缝的研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(18): 3311-3315.
PAN Hong-ke, YANG Lin-de, HUANG Kang. Research on unsymmetrical load effect and lining cracks of a highway tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(18): 3311-3315. (in Chinese)
- [7] CATBAS F N, SUSOY M, FRANGOPOL D M. Structural health monitoring and reliability estimation: long span truss bridge application with environmental monitoring data[J]. *Engineering Structures*, 2008, 30(9): 2347-2359.
- [8] POSENATO D, LANATA F, INAUDI D, et al. Model-free data interpretation for continuous monitoring of complex structures[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2008, 22(1): 135-144.
- [9] WENG J H, LOH C H, LYNCH J P, et al. Output-only modal identification of a cable-stayed bridge using wireless monitoring systems[J]. *Engineering Structures*, 2008, 30(7): 1820-1830.
- [10] GUL M, CATBAS F N. Statistical pattern recognition for structural health monitoring using time series modeling: theory and experimental verifications[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009, 23(7): 2192-2204.
- [11] LI Chang-dong, TANG Hui-ming, HU Xin-li, et al. Landslide prediction based on wavelet analysis and cusp catastrophe[J]. *Journal of Earth Science*, 2009, 20(6): 971-977.
- [12] QIN S, JIAO J J, WANG S. A cusp catastrophe model of instability of slip-buckling slope[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2001, 34(2): 119-134.
- [13] LIU D W, WANG J Y, WANG Y J. Application of catastrophe theory in earthquake hazard assessment and earthquake prediction research[J]. *Tectonophysics*, 1989, 167(2-4): 179-186.
- [14] XU Yun-yun, XU Dong-qiang. The study of forecasting model of rock burst for acoustic emission based on BP neural network and catastrophe theory[J]. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2010, 67: 11-19.
- [15] 王思长,折学森,李 毅,等. 基于尖点突变理论的岩质边坡稳定性分析[J]. *交通运输工程学报*, 2010, 10(3): 23-27.
WANG Si-chang, SHE Xue-sen, LI Yi, et al. Stability analysis of rock slope based on cusp catastrophe theory[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2010, 10(3): 23-27. (in Chinese)
- [16] MALLAT S G. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, 11(7): 674-693.
- [17] 蔡 新,严 伟,李 益,等. 灰色理论在堤防安全评价中的应用[J]. *水利发电学报*, 2012, 31(1): 62-66.
CAI Xin, YAN Wei, LI Yi, et al. Grey theory in comprehensive evaluation of dyke safety risk[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2012, 31(1): 62-66. (in Chinese)
- [18] KADALI B R, RATHI N, PERUMAL V. Evaluation of pedestrian mid-block road crossing behaviour using artificial neural network[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering; English Edition*, 2014, 1(2): 111-119.
- [19] 付成华,陈胜宏. 基于突变理论的地下工程洞室围岩失稳判据研究[J]. *岩土力学*, 2008, 29(1): 167-172.
FU Cheng-hua, CHEN Sheng-hong. Study on instability criteria of surrounding rock of underground engineering cavern based on catastrophe theory[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(1): 167-172. (in Chinese)