

隧道爆破振动信号的混沌特征分析

谢全民^{1,2}, 贾永胜^{1,2}, 丁凯³, 张杰⁴, 凌正东⁴, 刘鼎盛⁵

(1. 江汉大学 省部共建精细爆破国家重点实验室, 武汉 430056; 2. 江汉大学 爆破工程湖北省重点实验室, 武汉 430056;
3. 陆军研究院五所, 江苏 无锡 214025; 4. 四川交博环境检测公司, 成都 610031; 5. 陆军工程大学军械士官学校, 武汉 430075)

摘要: 基于混沌理论, 将邻近隧道爆破、上跨坑道爆破作用下既有隧道振动响应时间序列进行相空间重构, 通过吸引子、Lyapunov 指数、关联维数等核心参量计算, 分析隧道爆破振动响应信号混沌特征。经过计算, 邻近隧道爆破作用下既有隧道振动响应信号相空间重构后具有奇怪吸引子, 且 Lyapunov 指数均大于 0, 可判定其具有混沌特征; 上跨坑道爆破作用下既有隧道振动响应信号的 Lyapunov 指数也均大于 0, 表明其也具有混沌特征。研究表明, 隧道爆破振动信号具有混沌特征, 随着钻爆作业面与既有隧道爆心距减小, λ 值变大, 隧道爆破振动响应的混沌特征增强, 应更加强钻爆参数的合理优化和爆破振动实时监测, 确保施工质量和爆破安全。

关键词: 隧道爆破; 爆破振动; 混沌; 相空间重构

中图分类号: TD235.1 文献标志码: A DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2022.03.029

Chaotic characteristics analysis of tunnel blasting vibration signals

XIE Quanmin^{1,2}, JIA Yongsheng^{1,2}, DING Kai³, ZHANG Jie⁴, LING Zhendong⁴, LIU Dingshen⁵

(1. State Key Laboratory of Fine Blasting, Jianghan University, Wuhan 430056, China;
2. Hubei Key Laboratory of Blasting Engineering, Jianghan University, Wuhan 430056, China;
3. The Fifth Research Institute of Army Academy, Wuxi 21402, China; 4. Sichuan Jiaobo Environmental Testing Co., Ltd., Chengdu 610031, China; 5. Ordnance NCO Academy, Army Engineering University, Wuhan 430075, China)

Abstract: Here, based on the chaos theory, the phase space of the existing tunnel vibration response time series under actions of adjacent tunnel blasting and upper span tunnel blasting was reconstructed. Chaotic characteristics of tunnel blasting vibration response signals were analyzed by calculating core parameters, such as, attractor, Lyapunov exponent and correlation dimension. The study results showed that the reconstructed phase space of the existing tunnel vibration response signals under action of adjacent tunnel blasting has strange attractors, its Lyapunov exponents all are larger than 0, so it can be judged for it to have chaotic characteristics; all Lyapunov exponents of the reconstructed phase space of the existing tunnel vibration response signals under action of upper span tunnel blasting are also larger than 0, so this reconstructed phase space also has chaotic characteristics; thus, tunnel blasting vibration signals have chaotic characteristics; with decrease in blasting center distance between drilling and blasting working face and the existing tunnel, λ value increases, and chaotic characteristics of tunnel blasting vibration response enhance, reasonable optimization of drilling and blasting parameters and real-time monitoring of blasting vibration should be strengthened to ensure construction quality and blasting safety.

Key words: tunnel blasting; blasting vibration; chaos; phase space reconstruction

采用钻爆法开挖隧道时, 经常会遇到既有隧道爆破安全问题。如何控制爆破开挖产生的爆破振动危害效应, 确保既有隧道结构安全、邻近隧道爆破项目高效

施工, 是建设部门、施工单位、行政主管部门等多方共同面临的重大技术难题。其中在邻近爆破施工对既有隧道影响研究方面, 国内不少专家学者开展了专项研究。钟冬望等^[1-2]采用动力有限元程序, 对邻近隧道掘进爆破作用下既有隧道的质点振动速度和应力分布情况进行了计算。蒋楠等^[3]通过现场试验和数值模拟, 分析爆破振动作用下既有隧道结构动力响应特性。刘冬等^[4]基于原有隧道改扩建拱顶塌腔段扩建开挖, 系

基金项目: 国家自然科学基金(51808554); 湖北省重点研发计划

(020BCA08); 国铁集团科技研究开发计划课题(K2019G056)

收稿日期: 2020-05-06 修改稿收到日期: 2020-06-13

第一作者 谢全民 男, 博士, 讲师, 1983年生

通信作者 丁凯 男, 博士, 工程师, 1983年生

统研究了多临空面条件下岩体爆破振动规律。叶培旭等^[5]实时监测近距离交叉隧洞爆破施工对既有隧道的振动影响。杨明宇等^[6]研究了邻近隧道爆破开挖对既有隧道影响及控制技术。

时间序列分析是探究复杂动力系统机理、建立系统模型的重要手段。爆破振动时域测试信号特征提取,对准确掌握既有隧道结构在邻近隧道爆破作用下的结构动力响应规律具有重要作用。近年来小波、提升小波、尔伯特-黄变换、分形、多重分形、支持向量机等数字信号分析技术在爆破振动实测信号分析中得到了广泛应用^[7]。

非线性科学是主要研究非线性现象的共性,其中混沌和分形构成非线性科学的主体。近年来混沌时间序列研究也是信号分析领域中的热点^[8]。受系统演化及外界干扰影响,爆破振动实测数据呈现非平稳、含噪声等特点。本文基于混沌理论,将邻近隧道爆破及上跨坑道爆破作用下既有隧道振动响应时间序列进行相空间重构,通过吸引子、Lyapunov 指数、关联维数等核心参量计算,分析隧道爆破振动响应信号混沌特征,可为下一步开展邻近隧道爆破作用下既有隧道振动响应的动力学机制研究奠定重要的基础。

1 邻近隧道爆破作用下既有隧道振动响应试验

1.1 试验地点

某山岭隧道设计为双洞单线隧道,上行线全长 23 468.5 m,下行线全长 23 441 m。由于复杂地质构造、地下水变化等特殊地质灾害因素导致隧道灾害。上行线隧道需要整治段落共计 4 490 m,下行线整治在上行线整治完成后进行。隧道灾害处置采取全环拆换处理,按照先加固后拆换的原则,对拆换段落围岩采用钻爆法进行扩挖,增大二次衬砌净空横断面及仰拱混凝土厚度。上行线钻爆作业面与既有运行铁路隧道相平行,隧洞间距仅 30 m。本次邻近隧道爆破对既有隧道振动影响试验依托该隧道整治项目 K298 + 180 ~ K299 + 400 施工段进行,如图 1、图 2 所示。

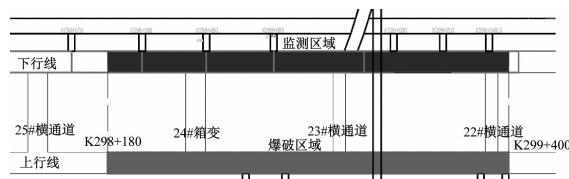


图 1 爆区与保护区的位置关系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of location relationship between explosion area and protection area

1.2 试验设备

试验采用 L20-N 爆破测振仪,属于远程无线网络

爆破测振仪,可无人值守、远程监控的数字爆破测振设备。隧道爆破时,对既有隧道在邻近隧道爆破作用下的振动信号进行采集,并将结果通过网络传输至指定的数据中心,如图 3 所示。

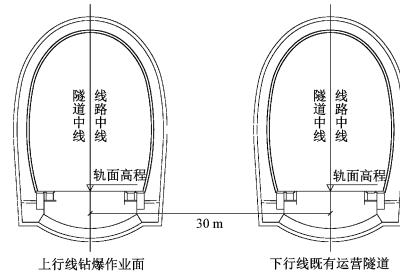


图 2 爆区与保护区的位置关系剖面图

Fig. 2 Section diagram of location relationship between explosion area and protection area

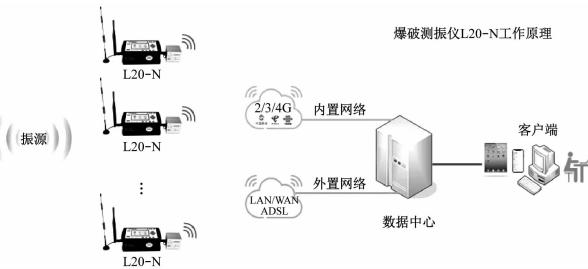


图 3 L20-N 爆破测振仪

Fig. 3 L20-N blasting vibration measuring equipment

1.3 试验方案

(1) 传感器安装:传感器布设在邻近隧道内迎爆侧边墙墙脚位置。传感器通过膨胀螺栓固定,信号线沿墙脚牵引至控制箱,监测点胀螺栓采用 M6 × 60 安装,钻孔深度 40 mm,清孔后按照 JGJ 145—2013《混凝土结构后锚固技术规程》要求进行安装,监测点布置,如图 4 所示。

(2) 测点间距:20 m,监测点平面布置,如图 5 所示。

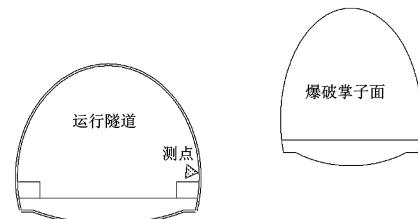


图 4 爆破振动监测点平面布置示意图

Fig. 4 Layout of blasting vibration monitoring points

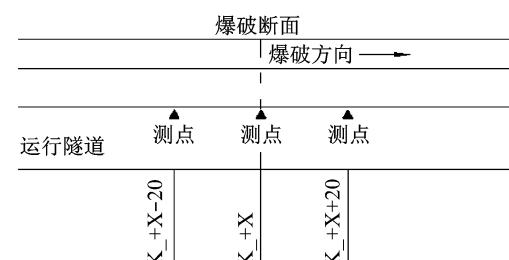


图 5 爆破振动测点纵断面布置示意图

Fig. 5 Vertical section layout of blasting vibration measuring points

- (3) 传感器数量:每个爆破作业面配置3台爆破测振仪,该组监测点随爆破掌子面里程而平移。
 (4) 测试范围:K298+180~K299+400。
 (5) 采样率:2 K。

2 隧道爆破振动信号的相空间重构

2.1 相空间重构

为研究邻近隧道爆破作用下既有隧道振动响应的动力学机制,分析隧道爆破振动响应时间序列的非线性特征,需将振动实测信号的一维单变量时间序列映射到多维空间,由矢量点重构成新的状态空间(相空间)。原爆破振动动力系统的规律将呈现为高维特征空间的一种轨迹,可通过提取其中某个分量的一批时间序列数据,从中得以恢复。

Takens^[9]研究表明,设延迟坐标维数为m,若m>2d(d为动力系统的维数),则可找到一个合适的嵌入维数m,在该嵌入维空间中恢复吸引子运动轨迹。

2.2 C-C法基本原理

设一维爆破振动时间序列{x₁,x₂,...,x_N},把它分成t个互不相交的子序列(t∈N),则

$$\begin{aligned} & \{x_1, x_{t+1}, x_{2t+1}, \dots\} \\ & \{x_1, x_{t+2}, x_{2t+2}, \dots\} \\ & \dots \\ & \{x_t, x_{2t}, x_{3t}, \dots\} \end{aligned} \quad (1)$$

(1) 根据Takens嵌入定理,定义关联积分函数^[10]

$$C(m, N, r, t) = \frac{2}{M(M-1)} \cdot \sum H(r - \|x_i - x_j\|), \quad r > 0 \quad (2)$$

式中:H(r)为Heaviside阶跃函数

$$H(r) = \begin{cases} 1, & r \geq 0 \\ 0, & r < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$\|x_i - x_j\|$ 为直线上两点间欧式距离;N为时间序列点数;M为m维相空间中嵌入的点数,M=N-(m-1)r;r为搜索半径。

(2) 定义关联积分的统计量

$$s(m, N, r, t) = C(m, N, r, t) - C^m(1, N, r, t) \quad (4)$$

当N→∞时,则

$$S(m, r, t) = \frac{1}{t} \sum_{s=1}^t [C_s(m, r, t) - C^m(1, r, t)] \quad (5)$$

(3) 定义差量ΔS(m,t),表示S(m,r,t)关于r的变化。

$$\Delta S(m, t) = \max\{S(m, t_j, t)\} - \min\{S(m, r_j, t)\} \quad (6)$$

(4) 对所有S(m,r_j,t)求平均得

$$\bar{\Delta S}(t) = \frac{1}{\|m\|} \sum_m \Delta S(m, t) \quad (7)$$

2.3 重构相空间的延迟时间

Brock等^[11]通过多种渐近分布产生时间序列的相

空间重构分析表明,当m∈[2,5],r∈[0.5δ,2δ]时(δ代表时间序列的均方差),S(m,N,r,1)能够代表在数据长度范围N以内的连续相关性。为判断某时间序列是否具备混沌性质,N通常取100~500即可;对该时间序列进行相空间重构时,N建议取值3000以上。

重构时取m=2,3,4,5,r=0.5δ,δ,1.5δ,2δ,则

$$\bar{S}(t) = \frac{1}{16} \sum_{m=2}^5 \sum_{j=1}^4 S(m, r_j, t) \quad (8)$$

$$\Delta \bar{S}(t) = \frac{1}{4} \sum_{m=2}^5 \Delta S(m, t) \quad (9)$$

$\Delta \bar{S}(t)$ 出现的第一个极小值点即为延迟时间τ,统计量Scor(t)=ΔS(t)+|S(t)|的全局极小值作为延迟时间窗τ_w的最优值,则最小嵌入维数m为

$$m = \left\lceil \frac{\tau_w}{\tau} \right\rceil + 1, \text{向下取整} \quad (10)$$

2.4 混沌吸引子的关联维

选取适当的r使得C(r)=r^D,D为相空间中混沌吸引子的关联维数。

当不断提高嵌入维数m时,线性部分斜率不再随m的增大而发生改变,这时维数达到饱和,称m为饱和嵌入维数,相应斜率即是所要求的关联维数D。

$$\text{具体分析过程中计算方法 } D = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln C_m(r)}{\ln r} \quad (11)$$

3 邻近隧道爆破作用下既有隧道振动信号的混沌特征分析

对上行线爆破开挖过程中,为不失一般性将其中K298+560、K298+940、K299+360 3个不同爆破掌子面上分别采用一个测点数据进行隧道爆破振动混沌特征分析。

所选取的3个爆破振动速度时程信号,如图6所示,均具有隧道爆破过程中微差爆破振动响应信号的典型特征。所选取的试验数据具有代表性。

3.1 典型爆破振动信号的延迟时间

采用MATLAB平台,基于一维时域信号相空间重构理论和C-C法基本原理,根据式(1)~公式(10)编制用于隧道爆破振动时域信号混沌特性分析的专用计算程序,分析隧道爆破振动信号在嵌入维m的新状态空间下的动力特性。分别采用s、delt-s、s-cor表示隧道爆破振动信号相空间重构过程中的参数 $\bar{S}(t)$ 、 $\Delta \bar{S}(t)$ 、 $S_{cor}(t)$ 。对图6中3个隧道爆破振动响应信号进行计算,相空间重构统计量参数计算结果,如图7所示。

分析图7(a),delt-s曲线的第一个极小值点对应t=10,s-cor曲线的全局极小值点对应t=10,因此确定信号X的延迟时间τ为10,延迟时间窗τ_w为10,最小嵌入维数m为|10/10|+1=2。

分析图7(b), delt-s 曲线的第一个极小值点对应 $t = 12$, s-cor 曲线的全局极小值点对应 $t = 21$, 因此确定信号 Y 的延迟时间 τ 为 12, 延迟时间窗 τ_w 为 21, 最小嵌入维数 m 为 $|21/12| + 1 = 2$ 。

分析图7(c), delt-s 曲线的第一个极小值点对应 $t = 13$, s-cor 曲线的全局极小值点对应 $t = 17$, 因此确定信号 Z 的延迟时间 τ 为 13, 延迟时间窗 τ_w 为 17, 最小嵌入维数 m 为 $|17/13| + 1 = 2$ 。

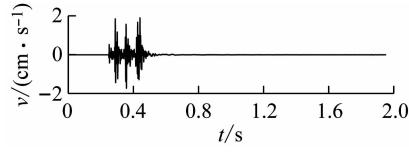
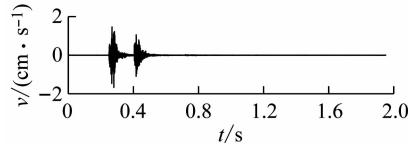
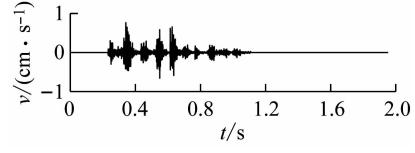
(a) 信号 X : K298 + 560, 垂向(b) 信号 Y : K298 + 940, 垂向(c) 信号 Z : K299 + 360, 垂向

Fig. 6 Time history curve of typical tunnel blasting vibration

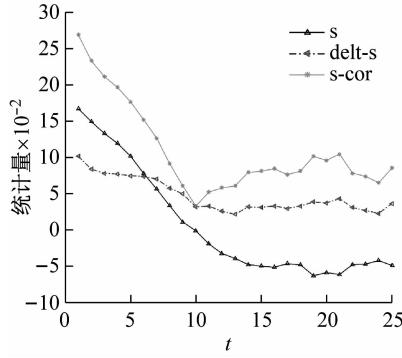
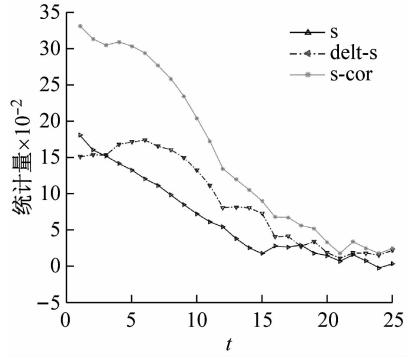
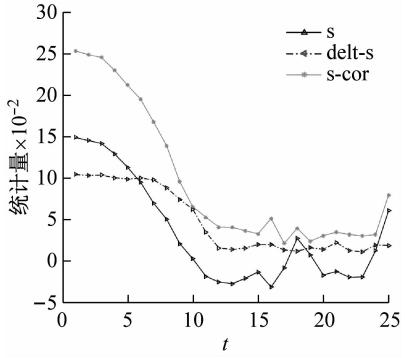
(a) K298 + 560/信号 X (b) K298 + 940/信号 Y (c) K299 + 360/信号 Z

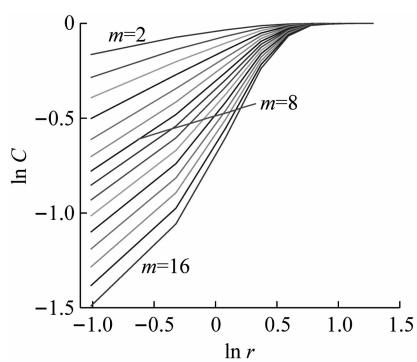
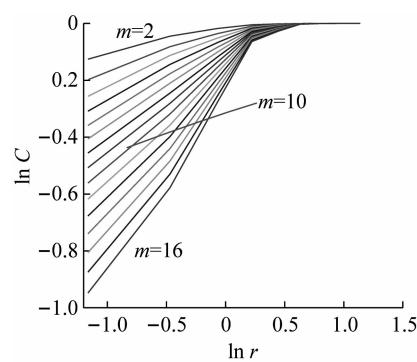
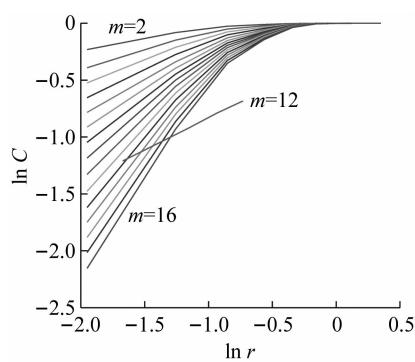
Fig. 7 Reconstruction parameters of phase space

3.2 关联维数特征

对图6中 X 信号使用采样点数 $N = 4000$, 嵌入维数 $m \in [2, 16]$, 延迟时间 $\tau = 10$ 进行相空间重构。根据 G-P 算法^[12]可得到该信号的累积能量时间序列 $\ln C \sim \ln r$ 的双对数曲线, 如图8(a)所示。随着嵌入维数 m 变大, 双对数曲线斜率逐渐变大。 $m = 8$ 之后, 双对数曲线趋于平行, 关联维数趋于饱和。采用最小二乘法进行拟合后得到直线斜率即关联维数 $D = 1.09$ 。

对图6中 Y 信号使用采样点数 $N = 4000$, 嵌入维数 $m \in [2, 16]$, 延迟时间 $\tau = 12$ 进行相空间重构, 得到该信号的累积能量时间序列 $\ln C \sim \ln r$ 的双对数曲线, 如图8(b)所示, 可得 $m = 10, D = 1.45$ 。

对图6中 Z 信号使用采样点数 $N = 4000$, 嵌入维数 $m \in [2, 16]$, 延迟时间 $\tau = 13$ 进行相空间重构, 得到该信号的累积能量时间序列 $\ln C \sim \ln r$ 的双对数曲线, 如图8(c)所示, 可得 $m = 12, D = 1.76$ 。

(a) 信号 X (b) 信号 Y (c) 信号 Z Fig. 8 $\ln C \sim \ln r$ double logarithmic curve

3.3 相轨迹图变化特征

判别信号混沌特征可采用吸引子轨迹法^[13]。对图

6 中对应的 3 个隧道爆破振动时域信号进行相空间重构, 绘制相空间轨迹图可直观清晰地体现出各个振动

信号系统状态的演变过程,图9为计算得到相应信号的混沌吸引子演化过程。

分析图9可以发现,3个典型的隧道爆破振动信号

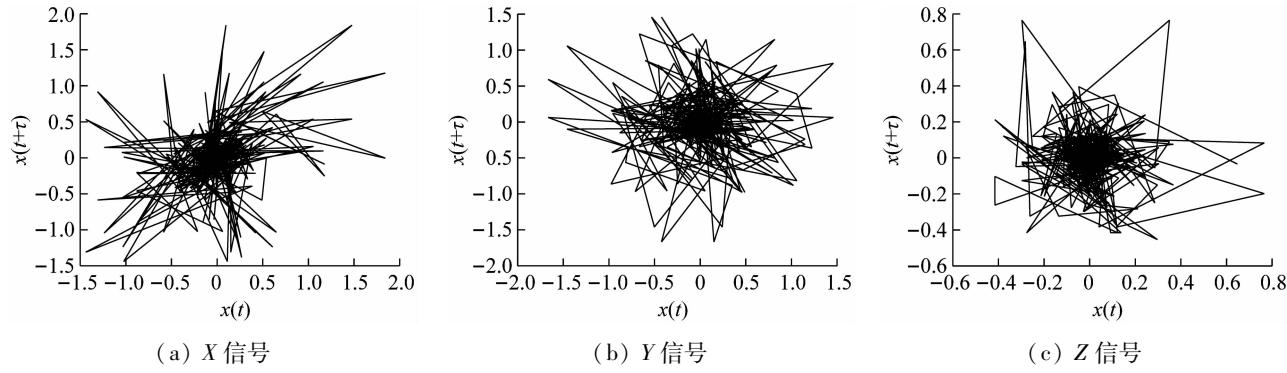


图9 隧道爆破振动信号吸引子

Fig. 9 Attractor of vibration signal in tunnel blasting

3.4 Lyapunov 指数特征

混沌特征量是描述动力系统混沌特性的参数,对混沌现象研究有重要意义,主要包含 Lyapunov 指数、分维数和熵。Lyapunov 指数是三者中最直接描述系统混沌现象的参量。

对初始条件极为敏感是混沌运动的基本特征之一。两个距离很近的初值产生的轨道,随时间的变化按照指数方式分离,可以用 Lyapunov 指数来定量描述这一物理现象。

设由平均每次迭代产生的指数分离中的指数为 λ ,经过 n 次迭代后初始距离为 ε 的两点间距变为

$$\varepsilon e^{n\lambda(x_0)} = |F^n(x_0 + \varepsilon) - F^n(x_0)| \quad (12)$$

令 $\varepsilon \rightarrow 0, n \rightarrow \infty$, 式(12)变为

$$\lambda(x_0) = \lim_{n \rightarrow \infty} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{1}{n} \ln \left| \frac{F^n(x_0 + \varepsilon) - F^n(x_0)}{\varepsilon} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \times \ln \left| \frac{dF^n(x)}{dx} \right|_{x=x_0} \quad (13)$$

经过变形简化计算,可得

$$\lambda = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \ln \left| \frac{dF(x)}{dx} \right|_{x=x_i} \quad (14)$$

Wolf 等^[14]提出了可直接基于相空间内的轨线、平面及体积等演化途径来进行 Lyapunov 指数估计的算法,被称作 Wolf 法,在时间序列混沌研究领域得到了广泛的应用。因此采用 Wolf 方法分别计算图6中3个爆破振动信号的 Lyapunov 指数,结果如表1所示。

表1 Lyapunov 指数计算结果

Tab. 1 Calculation results of Lyapunov index

序号	信号	λ	特征
1	X	0.298 4	>0
2	Y	0.094 5	>0
3	Z	0.707 4	>0

的混沌吸引子形态均为具有无穷嵌套自相似结构的不相交环面组成,且都聚集在相空间的有限区域内,表明3个信号呈现混沌弥散状态。

3.5 混沌特征分析

混沌常出现在确定性系统中,被认作一种看似无规则、类似随机的现象。混沌看不出明显周期性和对称性,并非简单的无序结构,实际是一种有序结构,内部包含丰富的层次,是非线性系统中一种新的存在形式^[15]。

从邻近隧道爆破作用下既有隧道爆破振动信号重构吸引子图9可以看出,3个吸引子都是振荡曲线。可以看出,这种振荡是非周期的,且包含随机性,不管经历多长时间它们不会与之前某时刻的振荡发生完全重复,且这3个轨迹是有限的,被限制在有限的相空间中。因此,这3个吸引子属于奇怪吸引子。混沌运动就是具有奇怪吸引子的运动,从试验得到的一维时域信号相轨迹图变化特征可判定邻近隧道爆破作用下既有隧道振动响应具有混沌特征。

由一维时域信号的 Lyapunov 指数定义及求解方法可看出,当 $\lambda < 0$ 时,轨道对初始条件不敏感,相空间会渐渐收缩,相邻点最终聚集成一个点,属于稳定的不动点或周期运动系统;当 $\lambda = 0$ 时,初始误差保持不变,系统处于临界状态;当 $\lambda > 0$ 时,表示相邻点会逐渐分离,相应的是局部轨道不稳定状态。判定某动力系统是否存在混沌行为,可由 λ 是否大于 0 来作为判据^[16]。经过相空间重构,从邻近隧道爆破作用下既有隧道爆破振动试验数据的 Lyapunov 指数计算结果表1可以看出隧道爆破振动信号的 Lyapunov 指数均大于 0,进一步证明邻近隧道爆破作用下既有隧道振动响应信号具有混沌特征。

4 上跨坑道爆破作用下既有隧道振动混沌分析

在隧道整治项目 K298 + 180 ~ K299 + 400 施工段中,4#工区辅助上跨坑道是垂直于既有运营铁路隧道

的直线通道。辅助坑道与4#斜井交界处距离下行线既有铁路隧道水平最远距离106.7 m, 坑道底部距离下行线既有铁路隧道顶部11 m。辅助坑道采用钻爆法开挖, 爆破区域里程为DK312+616, 对应运营隧道保护区域里程为K299+000, 爆破区域与既有铁路隧道保护区域的位置关系, 如图10、图11所示。传感器布置, 如图12所示。采样率设置为2 K。

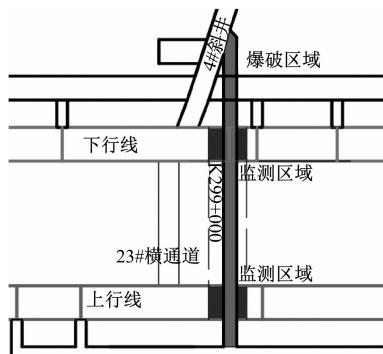


图10 上跨坑道与既有铁路位置关系示意图

Fig. 10 Schematic diagram of location relationship between upper crossing tunnel and existing railway

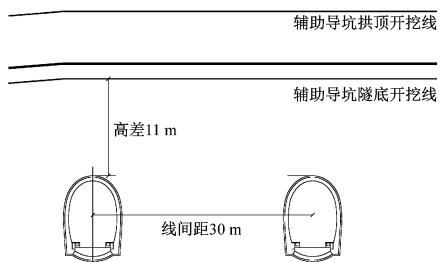


图11 上跨坑道与既有铁路位置关系剖面图

Fig. 11 Section diagram of location relationship between upper crossing tunnel and existing railway

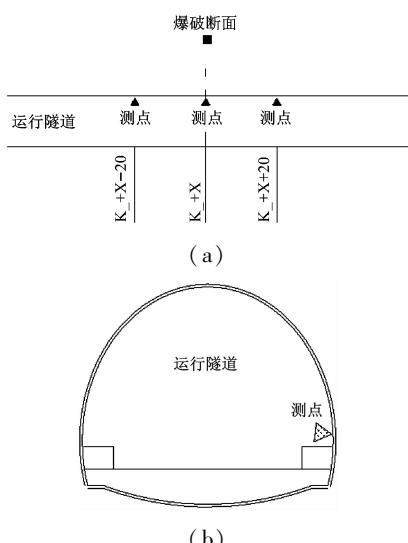


图12 测点布置示意图

Fig. 12 Layout of measuring points

对上跨坑道掘进爆破过程中产生的爆破地震波作用下下行线既有隧道结构的振动响应采用L20-N爆

破测振仪进行测试, 其中K298+980、K299+000、K299+020 3个测点处分别采集到3个炮次的爆破振动信号。X方向为水平径向, Y方向为水平切向, Z方向为垂直向。

为系统分析上跨坑道爆破作用下既有隧道动力系统的混沌特性, 对试验采集的9组时域信号(X、Y、Z向)分别进行相空间重构, 采用C-C法计算得到27个信号延迟时间、嵌入维数 m , 在此基础上基于Wolf法计算混沌重要特征量Lyapunov指数如表2所示。

分析表2可知, 9组27个信号进行相空间重构后所得到的Lyapunov指数均大于0, 表明上跨坑道钻爆法开挖地震波作用下其正下方11 m距离的下行线既有铁路隧道的振动响应也具有混沌特征。

对K0+00、K0+15、K0+25 3个位置爆破作用下, K298+980、K299+000(垂直)、K299+020 3个测点的Lyapunov指数计算结果表2分别进行分析可看出:

(1) 每次爆破作用下, K298+980、K299+020两个测点爆心距相等, 两个测点的X、Y、Z向振动信号的 λ 值也几乎相等; K299+000测点爆心距小于左右两个测点, λ 值大于左右两个测点。

(2) K0+25位置爆破作用下的9个信号 λ 值大于K0+15、K0+00位置爆破作用下的18个信号 λ 值, K0+15位置爆破作用下的9个信号 λ 值大于K0+00位置爆破作用下的9个信号 λ 值, 表明随着钻爆作业面与既有隧道爆心距减小, λ 值变大, 隧道爆破振动响应的混沌特征增强。

(3) 爆破作业面上岩石力学性质、掏槽方式、掏槽孔、辅助孔、周边孔钻孔参数、炸药种类、炸药单耗、起爆方式、循环进尺等爆源条件作为上跨坑道掘进爆破的重要初始条件, 直接影响着钻爆法开挖上跨坑道的质量和效率, 也是与之垂直相交的既有下行线铁路隧道爆破振动混沌动力系统的主要初始条件和重要影响因素。混沌系统的本质特点是对于初始条件极为敏感, λ 值变大则动力系统初始条件敏感性增强。因此随着爆心距的减小, 上跨坑道爆源参数对既有隧道爆破振动影响加大。为确保爆破安全, 随着爆心距减小应更加强钻爆参数的合理优化和爆破振动实时监测, 确保既有隧道爆破振动响应控制在GB 6422—2014《爆破安全规程》规定的安全阈值范围之内。

5 结论

(1) 对邻近隧道爆破作用下平行既有隧道结构的振动响应典型时程信号进行相空间重构, 分别计算得到了延迟时间 τ 、关联维数、嵌入维数、重构吸引子和Lyapunov指数。研究表明, 邻近隧道爆破作用下既有隧道爆破振动具有奇怪吸引子的运动, 且计算得到的

表2 上跨坑道爆破振动混沌特征值计算

Tab. 2 Calculation of chaotic eigenvalues of blasting vibration in upper span tunnel

序号	爆破位置	爆心距/m	测点位置	方向	PPV/(cm·s ⁻¹)	m	τ	λ
1				X	0.567 9	2	11	0.146 0
2		106.7	K298 + 980	Y	0.459 0	2	11	0.105 5
3				Z	0.538 1	2	11	0.159 7
4				X	0.648 4	3	10	0.158 4
5	K0 + 00	104.8	K299 + 000	Y	0.515 0	3	10	0.076 8
6				Z	0.689 1	3	10	0.188 2
7				X	0.560 9	3	10	0.127 6
8		106.7	K299 + 020	Y	0.417 9	3	10	0.117 1
9				Z	0.526 5	3	10	0.143 0
10				X	1.537 0	2	10	0.309 4
11		74.2	K298 + 980	Y	1.407 1	2	10	0.282 2
12				Z	1.767 2	2	10	0.329 4
13				X	1.654 1	3	10	0.327 2
14	K0 + 15	72.3	K299 + 000	Y	1.287 7	3	10	0.294 2
15				Z	2.031 3	3	10	0.369 4
16				X	1.502 7	3	11	0.292 0
17		74.2	K299 + 020	Y	1.318 2	3	11	0.272 9
18				Z	1.802 3	3	11	0.313 5
19				X	1.932 6	4	10	0.680 9
20		56.4	K298 + 980	Y	1.766 2	4	10	0.657 1
21				Z	2.080 9	4	10	0.734 8
22				X	2.054 1	3	12	0.807 6
23	K0 + 25	54.3	K299 + 000	Y	1.687 4	3	12	0.717 1
24				Z	2.231 3	3	12	0.843 0
25				X	1.986 1	3	10	0.673 8
26		56.4	K299 + 020	Y	1.822 3	3	10	0.591 7
27				Z	1.971 7	3	10	0.738 0

Lyapunov 指数均大于 0, 具有混沌特征。

(2) 对上跨坑道爆破作用下垂直相交的既有隧道结构的 9 组 27 个振动响应信号进行相空间重构后所得到的 Lyapunov 指数均大于 0, 表明上跨坑道钻爆法开挖地震波作用下其正下方既有铁路隧道的振动响应也具有混沌特征。

(3) 隧道爆破振动具有混沌特征。爆源条件作为邻近隧道爆破、上跨坑道掘进爆破的重要初始条件, 是既有线铁路隧道爆破振动混沌动力系统的主要初始条件和重要影响因素, 是振动混沌特征的敏感因素。随着爆心距减小, 应更加强钻爆参数的合理优化和爆破振动实时监测, 确保施工质量和爆破安全。

参考文献

- [1] 钟冬望, 吴亮, 余刚. 邻近隧道掘进爆破对既有隧道的影响 [J]. 爆炸与冲击, 2010, 30(5): 456–462.
ZHONG Dongwang, WU Liang, YU Gang. Effect of tunneling blasting on an existing adjacent tunnel [J]. Explosion and Shock Waves, 2010, 30(5): 456–462.
- [2] 吴亮, 钟冬望. 不同布置条件下邻近隧道掘进爆破对既有隧道的影响 [J]. 煤炭学报, 2009, 34(10): 1339–1343.
WU Liang, ZHONG Dongwang. Effect of tunneling blasting on the existing adjacent tunnel under different conditions [J].

Journal of China Coal Society, 2009, 34(10): 1339–1343.

- [3] 蒋楠, 周传波. 爆破振动作用下既有铁路隧道结构动力响应特性 [J]. 中国铁道科学, 2011, 32(6): 63–68.
JIANG Nan, ZHOU Chuanbo. Dynamic response characteristic of existing railway tunnel structure subjected to blasting vibration [J]. China Railway Science, 2011, 32(6): 63–68.
- [4] 刘冬, 高文学, 孙宝平. 既有隧道扩建爆破振动数值模拟研究 [J]. 岩土力学, 2016, 37(10): 3011–3016.
LIU Dong, GAO Wenxue, SUN Baoping. Numerical simulation of blasting vibration on existing tunnel extension [J]. Rock and Soil Mechanical, 2016, 37(10): 3011–3016.
- [5] 叶培旭, 杨新安, 凌保林. 近距离交叉隧洞爆破对既有隧道的振动影响 [J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 537–541.
YE Peixu, YANG Xin'an, LING Baolin. Vibration effects on existing tunnel induced by blasting of an adjacent cross tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 537–541.
- [6] 杨明宇, 王晓宇, 江凯. 新建隧道爆破开挖对既有隧道影响及控制技术研究 [J]. 北方交通, 2019(1): 77–80.
YANG Mingyu, WANG Xiaoyu, JIANG Kai. Research on influence and construction technology of newly-built tunnel blasting excavation on existing tunnel [J]. Northern Communications, 2019(1): 77–80.
- [7] 曲广建, 龙源, 朱振海. 数字爆破测振 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 2015.

(下转第 306 页)

参考文献

- [1] 乐丛欢, 滕丽霞, 李彦娥, 等. 新型全潜式浮式风机在不同风况下的动力响应分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2019(增刊1): 120–127.
LE Conghuan, TENG Lixia, LI Yan'e, et al. Dynamic response analysis of a new type submersible floating wind turbines under different wind conditions [J]. Periodical of Ocean University of China, 2019(Suppl. 1): 120–127.
- [2] 邓露, 王彪, 肖志颖, 等. 钢筋混凝土浮式风机平台概念设计与性能研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2016(1): 11–15.
DENG Lu, WANG Biao, XIAO Zhiying, et al. Conceptual design and performance analysis of a reinforced concrete platform for floating wind turbines [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016(1): 11–15.
- [3] NJOMO W, NATARAJAN A, DIMITROV N. Development and design of a semi-floater substructure for multi-megawatt wind turbines at 50 m water depths[J]. Ocean Engineering, 2016, 125: 226–237.
- [4] PHILIP V, JSOEOPH A, JOY C M. Three-legged articulated support for 5 MW offshore wind turbine [J]. Aquatic Procedia, 2015, 4: 500–507.
- [5] ZHANG P, YANG S, LI Y, et al. Dynamic response of articulated offshore wind turbines under different water depths [J]. Energies, 2020, 13(11): 2784.
- [6] ZAHEER M, ISLAM N. Dynamic response of articulated towers under correlated wind and waves [J]. Ocean Engineering, 2017, 132: 114–125.
- [7] 中国船级社. 海上移动平台入级与建造规范[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [8] LI Y, ZHU Q, LIU L, et al. Transient response of a SPAR-type floating offshore wind turbine with fractured mooring lines [J]. Renewable Energy, 2018, 122: 576–588.
- [9] 郝佳姝. 铰接塔平台的动力响应分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
- [10] ZHANG P, YANG S G, LI Y, et al. Coupled response analysis of an offshore articulated wind turbine under different environmental loads [C]//11th International Workshop on Ship and Marine Hydrodynamics. Hamburg: IWSMH, 2019.
- [11] LI Y, TANG Y G, ZHU Q, et al. Effects of second-order wave forces and aerodynamic forces on dynamic responses of a TLP-type floating offshore wind turbine considering the set-down motion [J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2017, 9(6): 063302.
- [12] LUO T, TIAN D, WANG R, et al. Stochastic dynamic response analysis of a 10 MW tension leg platform floating horizontal axis wind turbine [J]. Energies, 2018, 11(12): 3341.

(上接第244页)

- [8] 韩敏, 任伟杰, 李柏松. 混沌时间序列分析与预测研究综述[J]. 信息与控制, 2020, 49(1): 24–35.
HAN Min, REN Weijie, LI Bosong. Survey of chaotic time series analysis and prediction [J]. Information and Control, 2020, 49(1): 24–35.
- [9] TAKENS F. Deceiving strange attractors in turbulence [J]. Lecture Notes in Math, 1981, 898: 361–381.
- [10] KIM H S, EYKHOLT R, SALAS J D. Nonlinear dynamics, delay times and embedding windows [J]. Physica D: Nonlinear Phenomena, 1999, 127: 48–60.
- [11] BROCK W A, DECHERT W D, SCHEINKMAN J A, et al. A test for independence based on the correlation dimension [J]. Econometric Reviews, 1996, 15(3): 197–235.
- [12] GRASSBERGER P, PROCACCIA I. Measuring the strangeness of strange attractors [J]. Physica D: Nonlinear Phenomena, 1983, 9: 189–208.
- [13] 丁凯. 基于非线性方法的装甲目标声信号特征提取与识别技术研究[D]. 南京: 解放军理工大学, 2013.
- [14] WOLF A, SWIFT J B, SWINNEY H L, et al. Determining Lyapunov exponents from a time series [J]. Physica D: Nonlinear Phenomena, 1985, 16: 285–317.
- [15] 吕金虎, 陆君安, 陈士华. 混沌时间序列分析及其应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.
- [16] 阮江军, 杨秋玉, 黄道春. 高压断路器机械振动信号混沌吸引子形态特性[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3): 187–193.
RUAN Jiangjun, YANG Qiuyu, HUANG Daochun. Shape characteristic analysis of chaotic attractor for mechanical vibration signal of high-voltage circuit breaker [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 187–193.