

隧道涌水长期记忆特性 R/S 与 DFA 法实证

安永林, 彭立敏

(中南大学土木建筑学院, 长沙 410075)

[摘要] 为了研究隧道涌水长期记忆特性, 利用某隧道的涌水监测数据, 基于 R/S 理论(重标极差方法)进行分析, 并用 V_n 检验 R/S 分析的稳定性, 进一步和 DFA 法(消除趋势波动法)分析的结果进行对比研究, 同时, 采用“正反划分法”对涌水数据进行处理以保证涌水序列信息不丢失, 表明: 隧道涌水的 Hurst 指数具有分时段和长期记忆特征, 未来隧道涌水量将减少; 负 Hurst 指数的出现可能与天气突变等因素有关, 其代表隧道涌水具有反持续性; 越大尺度的隧道涌水系统越具确定性特征; 若隧道涌水监测数据具有波动离散性, 采用 DFA 方法分析将优于 R/S 分析。研究结论可为隧道的涌水预测和涌水的非线性动力特性提供参考。

[关键词] 隧道工程 涌水 R/S DFA V_n 检验

[中图分类号] P641.2 [文献标识码] A [文章编号] 0495-5331(2009)01-0095-04

隧道涌水是施工中常见的主要地质灾害, 涌水的发生不但给施工带来严重困难, 还会增加成本, 延误工期, 更严重的是还会威胁施工人员的安全^[1], 如 2007 年的沪蓉西高速公路野三关长大隧道的涌水。

目前, 对隧道涌水进行研究的较多^[2-5], 但是应用非线性理论进行分析的较少。尽管许多现象表现得非常“随机”, 却往往存在着内在规律性^[6]。

鉴于隧道涌水具有高度不确定的非线性系统的特征, 且影响隧道涌水的因素很多, 各个因素之间有着比较复杂的关系, 文章利用非线性学科中的 R/S 方法及 DFA 方法, 初步研究隧道涌水的长期记忆特性, 这对隧道涌水地段的施工具有非常重要的指导意义和现实意义。

1 隧道涌水长期特性的 R/S 分析

1.1 R/S 分析原理

R/S 分析法(Rescaled Range Analysis, 即重标极差方法)最早是英国水文学家 Hurst 在 19 世纪 50 年代对尼罗河的多年水温观测的时间序列数据的标度行为进行研究时, 发现时间序列记录的结果具有自仿射特征而创立的一门非线性科学, 后来美籍法国数学家 Mandelbort 等人又对该方法进行补充和完善, Mandelbrot 把它称作分数布朗运动, 目前也称之

为分形时间序列。

R/S 分析的基本思想是改变所研究对象的时间尺度的大小, 研究其统计特性变化规律, 从而可以将小尺度的规律用于大的时间尺度范围, 或者将大的时间尺度得到的规律用于小尺度。

对于隧道涌水的 R/S 分析过程如下:

设涌水时间序列为: $\xi(t), t=1, 2, \dots, n$ 。

a. 对于任意正整数 $\tau \geq 1$, 定义涌水的均值序列为:

$$(\xi)_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \xi(t), \quad \tau = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

b. 确定累积离差:

$$X(t, \tau) = \sum_{u=1}^t (\xi(u) - (\xi)_\tau), \quad 1 \leq t \leq \tau \quad (2)$$

c. 计算极差:

$$R(\tau) = \max X(t, \tau) - \min X(t, \tau) \quad (3)$$

d. 计算标准差:

$$S(\tau) = \frac{1}{\sqrt{\tau}} \sqrt{\sum_{i=1}^{\tau} (\xi(i) - (\xi)_\tau)^2} \quad (4)$$

e. Hurst 经验关系式为:

$$(R(\tau)/S(\tau)) \propto (\tau)^H \quad (5)$$

式中: H 即为 Hurst 指数。

因此, 绘制 $R(\tau)/S(\tau)$ 和 τ 的双对数坐标图,

[收稿日期] 2008-05-04; [修订日期] 2008-07-31。

[基金项目] 铁道部科技研究开发计划课题(2005K002-D-3)资助。

[第一作者简介] 安永林(1981年—), 男, 2004年毕业于中南大学, 获学士学位, 在读博士生, 现主要从事隧道与地下工程结构与防灾方面的研究工作。

其直线斜率即为 Hurst 指数。

f. 根据 H 的取值可进行如下分析:

1) $0 < H < 0.5$, 表明时间序列具有长期相关性, 但将来的总体趋势与过去相反, 过程具有反持续性 (Anti-persistence)。

2) $H = 0.5$, 表明隧道涌水发生是随机的和不相干的, 现在不会影响未来。

3) $0.5 < H < 1$, 表明时间序列具有长期相关的特征, 即过程具有持续性 (Persistence)。对隧道涌水而言, 表明将来隧道涌水的整体变化将与过去的变化趋势一致, 且 H 值越接近 1, 持续性就越强。

1.2 隧道涌水 R/S 分析

某隧道的涌水监测数据^[7]见表 1 和图 1 (阴影部分表示涌水发生变化)。从表 1 中分析可知: 每次大雨时, 隧道内涌水量显著增大, 表明降雨对隧道涌水的影响明显, 这是因为降雨通过地表入渗到围岩, 特别是在裂隙十分发育的地方, 容易形成地表至隧道的通道。

表 1 隧道涌水监测结果

日期	涌水	天气	日期	涌水	天气
7月9日	180	晴	7月20日	60	阴
7月10日	124	晴	7月21日	64	小雨
7月11日	72	晴	7月22日	93	大雨~阴
7月12日	64	晴	7月23日	60	晴
7月13日	61	阴	7月24日	58	晴
7月14日	210	大暴雨	7月25日	60	晴
7月15日	90	小雨	7月26日	57	晴
7月16日	70	阴	7月27日	49	晴
7月17日	58	小雨	7月28日	45	晴
7月18日	96	大雨	7月29日	44	晴~阵雨
7月19日	76	中雨转晴	7月30日	43	晴

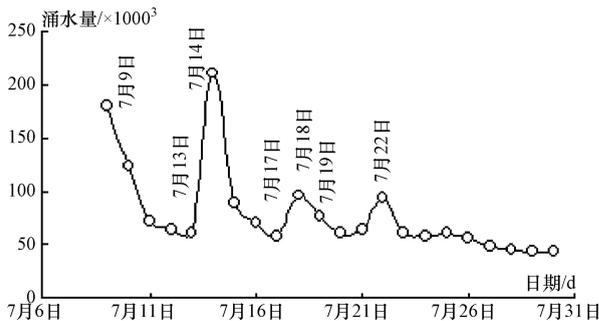


图 1 隧道涌水的时程曲线

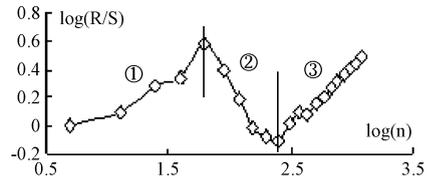


图 2 隧道涌水 R/S 分析

表 2 各涌水监测时段的 Hurst 指数

分段	监测时段	Hurst 指数	相关系数
①	7月9日~7月14日	0.509	0.923
②	7月14日~7月19日	-1.217	0.971
③	7月19日~7月30日	0.810	0.984
整体	7月9日~7月30日	0.070	0.059

表 1 数据的 R/S 分析结果见图 2 和表 2, 对其进行进一步分析可知:

1) 曲线明显的分为 3 段, 并且都是在暴雨的附近进行分段, 如第 ① 时段和第 ② 时段以 7 月 14 日为分界, 而该日的天气为大暴雨;

2) 各局部时段的 Hurst 指数不同, 其中第 ① 时段 Hurst 指数为 0.509, 略大于 0.5, 表明该时段隧道涌水随机性较强, 长期记忆性不强, 对下时段影响较小, 从而下时段隧道涌水量继续减少的持续性不强, 这正好印证了图 1 中该时段的涌水时程为“V”型, 具有波动性; 第 ③ 时段 Hurst 指数为 0.810, 表明该时段对下时段影响较大, 长期记忆性强, 从而下时段隧道涌水量将继续减少, 这也与该时段天气持续晴好相符合; 并且下时段涌水减少有利隧道的安全施工;

3) 值得注意的是: 第 ② 时段 Hurst 指数为 -1.2127, 相关系数为 0.971, 相关性较好, 但是其为负值, 这与 2.1 节中的 Hurst 指数范围相违背, 负的 Hurst 指数具有什么特性? 这将在 2.3 节中进行论述; 隧道涌水的整体 Hurst 指数为 0.07, 但相关系数仅为 0.059, 相关程度很小, 不能以其作为下时段趋势的预测, 从而也验证了当涌水序列包含短期记忆或序列非平稳时, R/S 法对整个序列分析将产生误差。

1.3 隧道涌水 R/S 分析的稳定性的 V_n 检验

1951 年, Hurst 提出了用于检验 R/S 分析稳定性的统计量 V_n ^[8]:

$$V_n = \frac{(R/S)_n}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

如果隧道涌水时间序列是由一个独立的随机过

程产生的,则 $V_n \sim \log(n)$ 图线是一条水平线;如果时间序列具有状态持续特征,则其是一条向上倾斜的直线;如果时间序列具有反持续特征,则其图线是一条向下倾斜的直线。

隧道涌水的 V_n 检验见图 3,图中 $V_n \sim \log(n)$ 曲线也明显的分为 3 段:第①段为波动的近似一条水平,同样表明该时段为一随机过程,第③时段为一条向上倾斜的直线,也表明该时段具有持续特征,下一时段的隧道涌水将继续减少,这同 R/S 分析结果一致;第②时段为一条向下倾斜的直线,表明该时段具有反持续特征,下时段的涌水将和该时段相反,这正好印证了图 1 中 9 月 19 日~9 月 22 日间的涌水出现上涨趋势。

对比 V_n 检验和 Hurst 指数,并鉴于 Hurst 指数的物理意义不明确,可以推断 Hurst 指数为负数代表隧道涌水具有反持续性;负数的出现可能与涌水的突变有关,如 7 月 14 日的大暴雨使得涌水大幅增大。

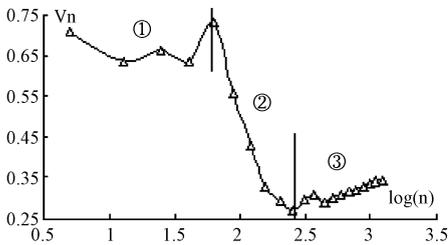


图 3 R/S 分析的 V_n 检验

2 隧道涌水长期特性的 DFA 分析

2.1 DFA 分析原理

DFA 分析法 (Detrended Fluctuation Analysis, 消除趋势波动分析法) 是 Peng C K 等物理学家和生物学家于 1994 年探测 DNA (脱氧核糖核酸) 内部分子链的相关可能性的程度时首先提出的。这是一种标度分析方法,用于定量分析非平稳 (nonstationary) 时间序列的长程相关性,或称长程幂律相关性 (long-range power-law correlations)。由于它对时间序列的要求远低于 R/S 法对时间序列的要求,不需要考察序列是否存在短程相关,是否存在异质性等^[9]。

对于隧道涌水的 DFA 分析过程如下:

- a. 设涌水时间序列为: $\xi(t), t=1, 2, \dots, n$ 。
- b. 建立一新序列:

$$Y(i) = \sum_{t=1}^i (\xi(t) - \bar{\xi}), \quad t = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

式中: $\bar{\xi} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \xi(t)$, 为序列 $\xi(t)$ 的平均值。

c. 将新序列 $Y(i)$ 划分为长度为 s 的 $N_s \equiv \text{int}(n/s)$ 个不相交的等长子区间 (即 N_s 为序列 $Y(i)$ 的区间数, s 为区间长度)。因序列长度 N 不一定被 s 整除,为保证涌水序列信息不丢失,采用“正反划分法”:即先从序列的前端开始向后划分,然后从序列末端开始反向前再划分一次,这样共得到 $2N_s$ 个等长子区间。

c、对每个子区间 $v (v=1, 2, \dots, 2N_s)$ 的数据进行多项式回归拟合,得到局部趋势函数 $y_v(i), y_v(i)$ 可以是一次、二次或更高次多项式 (一般分别记为 DFA1, DFA2, ...), 然后,消除各子区间内趋势,计算其方差均值,文章按照通常的二次进行拟合:

$$F^2(v, s) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s (Y((v-1)s+i) - y_v(i))^2, \quad v = 1, 2, \dots, N_s$$

$$F^2(v, s) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s (Y(n - (n - N_s)s + i) - y_v(i))^2, \quad v = N_s + 1, \dots, 2N_s \quad (8)$$

d、确定全序列的波动函数 $F(s)$:

$$F(s) = \left(\frac{1}{2N_s} \sum_{v=1}^{2N_s} (F^2(v, s)) \right)^{1/2} \quad (9)$$

e. 对不同长度 s 重复上述计算;

f. 如果隧道涌水是长程幂律相关的,则:

$$F(s) \propto s^a \quad (10)$$

式中: a 即为标度指数。

因此,绘制和的双对数坐标图,其直线斜率即为标度指数。

g. 根据 a 的取值可进行如下分析: $a < 0.5$, 表示隧道涌水是反相关的;当 $\alpha = 0.5$ 时,隧道涌水为白噪声; $0.5 < \alpha < 1.0$ 时为长程相关; $\alpha = 1.0$ 时为 $1/f$ 噪声;当 $\alpha > 1$ 时,时间序列具有持久性的长程相关,但不是幂律相关。当 $\alpha = 1.5$ 时为布朗运动,即随机游走。

2.2 隧道涌水 DFA 分析

同样,对表 1 隧道涌水的数据进行 DFA 分析,结果见图 4 (图中 r 表示拟合曲线和原隧道涌水离散点的相关系数)。从图中分析可知: 1) 当分割长度 $s < 10$ 时 (即 $\log(s) < 2.3$), 曲线出现波动; 而当 $s > 10$ 时, 曲线近似为直线, 揭示越大尺度的隧道涌水系统, 越具确定性特征; 2) 整体上, 曲线的斜率为 $0.537 > 0.5$, 表明隧道涌水具有长期记忆特征, 将来隧道涌水量和现在的趋势一致。将持续减少。

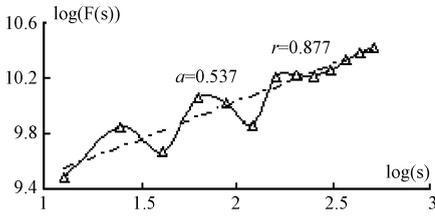


图4 隧道涌水 DFA 分析

3 两种分析方法对比

隧道涌水的整体 Hurst 指数 < 0.5 , 但相关系数仅为 0.059, 相关程度很小, 若以其作为判据, 可得隧道涌水具有反长期记忆性, 未来隧道的涌水将和现在相反, 即要增大; 而 DFA 分析表明, 隧道涌水具有长期记忆性, 并且相关系数为 0.877 较大, 未来隧道的涌水将和现在一致; 另外, 从 R/S 和 V_n 对隧道涌水的局部时段分析中可知将来(7月30日后)的涌水具有长期记忆特性, 亦将持续减少。

综合上述可断定: 隧道涌水具有长期相关性, 未来隧道涌水将持续减少; 并且 DFA 方法能够消除原始数据的波动性, 能更好地研究隧道涌水的特性。

4 结论

1) R/S 分析表明隧道涌水的 Hurst 指数具有分时段特征, 其中第①时段为随机波动, 现在隧道涌水对下一时段的涌水无影响; 第②时段为反长期记忆性, 下一时段的涌水趋势和现在相反; 第③时段为正长期记忆特性, 下一时段涌水趋势和现在保持一致;

2) 对 R/S 分析稳定性 V_n 的检验进一步表明, 隧道涌水具有分时段特征, 并且推断 Hurst 指数为负数代表隧道涌水具有反持续性。负 Hurst 指数的出现可能与天气突变等因素有关。

3) 为了消除数据的趋势波动性, 用 DFA 法对

隧道涌水进行分析, 同时, 为保证涌水序列信息不丢失, 采用对原涌水序列进行正反划分法, 结果同样表明隧道涌水具有长期记忆特性, 未来隧道的涌水将持续减少; 越大尺度的隧道涌水系统越具确定性特征; 若隧道涌水监测数据具有波动离散性, 采用 DFA 方法分析将优于 R/S 分析。

本文借鉴非线性科学中的相关理论对隧道涌水进行了长期相关性的初步分析, 结合(多重)分形论、系统论(隧道涌水属于灾害系统, 其是由承灾体、致灾因子、孕灾环境以及灾情等子系统组成的, 受围岩、天气和隧道开挖支护共同影响的复杂系统)、隧道涌水的力学机理(流-固耦合)进行研究将能更全面了解涌水的特性与实质, 这也是下一步研究的重点; 另外, 仍需对隧道涌水长期记忆特性的物理意义进行深入挖掘。

[参考文献]

- [1] 刘洪伟, 李建华. 不同围岩条件下大跨隧道的施工方案探讨[J]. 地质与勘探, 2000, 36(5): 91-94.
- [2] 黄润秋, 王贤能, 陈龙生. 深埋隧道涌水过程的水力劈裂作用分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 573-576.
- [3] Hwang Jin-hung, Lu Chih-chieh. A semi-analytical method for analyzing the tunnel water inflow[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007, 22(1): 39-46.
- [4] 王建秀, 杨立中, 何静. 深埋隧道涌水量数值计算中的试算流量法[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1776-178.
- [5] 何发亮, 李苍松, 陈成宗. 岩溶地区长大隧道涌水灾害预测预报技术[J]. 水文地质工程地质, 2001(5): 21-23.
- [6] 黄润生. 混沌及其应用[M]. 湖北武汉: 武汉大学出版社, 2000.
- [7] 姜汶泉, 张运良, 安永林. 灰色理论预测隧道涌水与实例分析[J]. 路基工程, 2008(2): 14-15.
- [8] 都国雄, 宁宣熙. 基于 R/S 分析的我国股票市场标度特性研究[J]. 南京工业职业技术学院学报, 2006, 6(2): 87-92.
- [9] 何越磊, 姚令侃, 苏凤环. 强沙尘暴时序的标度不变性分析[J]. 系统工程理论与实践, 2005(7): 125-130.

Long-term Memory of Water Gush in Tunnel Based on R/S & DFA: A Case Study

AN Yong-lin, PENG Li-min

(College of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075)

Abstract: R/S (Rescaled Range Analysis) was applied to study long-term memory of water gush in tunnel using monitoring data with the stability of R/S analysis checked by V_n . Furthermore, DFA was also used to research the long-term memory with data preprocessed by positive-negative division method for avoiding information loss. Results show that: (1) Hurst exponent of water gush in tunnel has a feature of long-term memory and divided periods, and water gush will reduce in future; (2) negative Hurst exponent may have a relation to the weather catastrophe, and it means water gush has anti-persistence; (3) water gush has a certain characteristics in a more large scale; (4) if the monitoring data fluctuate, DFA is better than R/S in long-term memory analysis. These conclusions can offer some advice to water gush prediction and non-linear dynamic characteristics research.

Key words: tunnel engineering, water gush, R/S , DFA, V_n check method