

MF-DFA 在大坝安全监测序列分析和 整体性态识别中的应用

胡江¹, 苏怀智², 马福恒¹, 李子阳¹

(1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;

2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要:为更好地分析监测序列的波动特征进而识别大坝整体性态演变规律,将多重分形消除趋势波动分析(MF-DFA)方法应用到大坝监测序列分析,并以一混凝土坝垂线监测序列为例,通过单个测点、环境量的长程相关性和多重分形特征分析及3个不同坝段测点比较,结果表明:坝体变形序列具有较强的多重分形特征,大波动受温度和库水位的周期性变化影响,小波动则受水位的频繁涨落控制;同时,溢流坝段和挡水坝段又因其环境荷载条件和工作机理不同波动特征略有差异;总体看,变形序列受环境量控制,大坝整体性态正常。实例分析结果表明 MF-DFA 可以从局部和整体两个层面评价大坝的工作性态及其演变规律。

关键词:大坝监测;多重分形;消除趋势波动分析;变形;时间序列

中图分类号:TV698.1

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2014)03-0050-06

The application of MF-DFA in time series analysis and global state recognition of dam safety monitoring//HU Jiang¹, SU Huaizhi², MA Fuheng¹, LI Ziyang¹ (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to analyze the fluctuant features of monitoring series for recognize the evolution pattern of dam performance, we apply the Multifractal Detrended Fluctuation Analysis (MF-DFA) to time series analysis of dam safety monitoring. Taking the vertical monitoring series of a concrete dam as an example, we analyze the long-range correlations and multifractal characteristics of a single monitoring point and environmental variables as well as compare three different dam monitoring points. The results show that there exists stronger multifractal characteristics in dam deformation series. The periodic change of temperature and reservoir water level produce large fluctuation and frequent ebbs and flows of water level control small fluctuation. The fluctuation characteristics of overflow dam section and water retaining dam section are different because of their environmental loading conditions and working mechanism. Overall, the environmental variables control the dam deformation series and the dam performance is normal. The analysis of the examples shows that MF-DFA can evaluate the dam's working state and its evolution pattern from the part and the global.

Key words: dam monitoring; multifractality; detrended fluctuation analysis; deformation; time series

变形和应力是水压力、温度、渗流、材料和地质特性等多因素的综合反映,其中变形观测直观可靠,国内外普遍将其作为大坝监测最主要效应量^[1-3]。大坝与基岩有机组合成为一个复杂的动力系统,多因素的共同作用使大坝变形观测时间序列(位移和挠度倾斜等)具有显著的时空非线性特征。依据实测变形时间序列,借助先进的数学模型,分析其中蕴含的复杂物理机理,是大坝安全监控的重要手段。

一般采用统计模型、灰色系统理论和模糊数学

模型等分析大坝原型观测时间序列,但由于时间序列的复杂非线性动力特性,很难用参数形式描述其中的数字特征。苏怀智等^[4-5]应用分形学分析法挖掘观测时间序列的内在规律性,采用 Hurst 指数 H 和分形维数 D 分析大坝结构的工作性态和发现病害隐患,然而采用单一的 Hurst 指数从整体上识别整个时间序列的结构特征过于笼统,缺乏对时间序列中的小波动的细节分析。

多重分形消除趋势波动分析(multifractal detrended

fluctuation analysis, MF-DFA) 方法是在单分形的基础上提出的,是定量描述复杂序列非线性演化过程及其形成自相似结构特征的有效手段,最先被广泛应用于自然现象、生命科学和医学等多个领域^[6-7]。通过 MF-DFA,不仅可以根据广义 Hurst 指数检测序列的长程相关性和确定标度不变性,还可以根据多维分形谱区别不同时间序列演变规律的差异。近年来, MF-DFA 方法的潜力被逐步挖掘, Telesca 等^[8]将 MF-DFA 方法应用到大地电磁场的研究中,由不同场地的大地电磁数据序列的多重分形分析,辨识了环境因素对序列波动的影响,由此解释序列的动态变化。本文运用 MF-DFA 方法研究大坝监测时间序列的长程相关性和多重分形特征,通过多测点的异同分析,探索大坝系统整体监控模型,以此对大坝健康进行诊断。

1 MF-DFA 方法

消除趋势波动分析(detrended fluctuation analysis, DFA)方法最初是由 Peng 等^[9]在研究 DNA 序列机理时提出的一种分析幂律函数关系的方法,该方法可有效滤去各阶趋势成分,适合分析非平稳时间序列的长程相关性。在 DFA 方法的基础上, Kantelhardt 等^[10]提出了 MF-DFA 方法, MF-DFA 方法提高了非平稳序列波动奇异性的多重分形结构度量度的准确性,很快被被运用于时间序列蕴含的多重分形性质的研究。

假定长度为 N 的原位监测序列为 $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, MF-DFA 方法的计算过程如下:

- a. 计算序列的累积离差:
$$Y_i = \sum_{k=1}^i (x_k - x_{ave}) \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

式中: x_{ave} 为序列的均值。
- b. 把序列 Y_i 分割成长度为 s 的 $N_s = \text{int}(N/s)$ 个互不重叠的等长区间(图 1), 由于长度 N 通常不是尺度 s 的整数倍, 序列尾部可能剩余部分。为了不丢弃这一序列部分, 从序列尾部重复这一分割过程。因此, 共分割得到 $2N_s$ 个区间。
- c. 采用最小二乘拟合法计算序列 $2N_s$ 个区间中每个区间的局部趋势。定义时间尺度 s 对应的消除趋势时间序列 $Y_{s,i}$, 与原始时间序列和拟合序列不同, 消除趋势时间序列 $Y_{s,i}$ 表示为相对局部平均的波动:
$$Y_{s,i} = Y_i - y_{v,i} \quad (2)$$

式中: $y_{v,i}$ 是第 v 个区间的拟合多项式。图 1 表示了 s 分别为 100 和 200 时采用二次多项式拟合(即 DFA2)的情形。拟合过程还可采用线性、三次式或

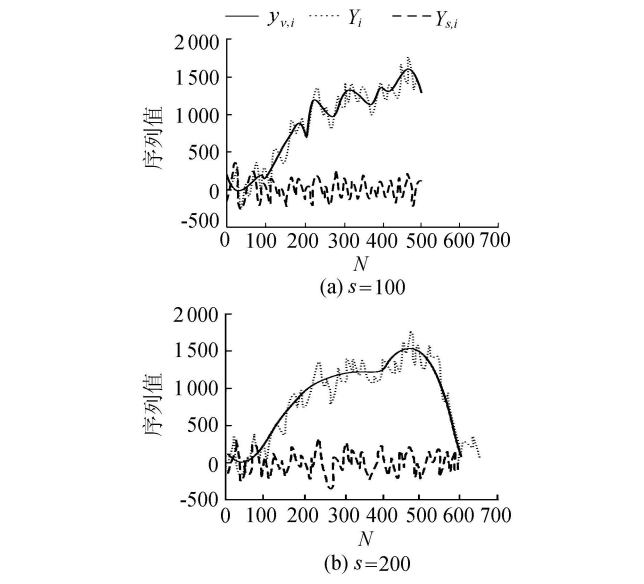


图 1 消除趋势波动分析中去趋势程序示意图

更高阶多项式,相应地,被记为 DFA1、DFA3 和高阶 DFA。确定 $2N_s$ 个区间中每个区间 v 的均方差, 当 $v = 1, 2, \dots, N_s$ 时, 有

$$F^2(v, s) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s (Y_{(v-1)s+i} - y_{v,i})^2 = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s Y_{s, (v-1)s+i}^2 \quad (3)$$

当 $v = N_s + 1, N_s + 2, \dots, 2N_s$ 时

$$F^2(v, s) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s (Y_{N-(v-N_s)s+i} - y_{v,i})^2 = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s Y_{s, N-(v-N_s)s+i}^2 \quad (4)$$

d. 计算所有区间的平均值得到整个序列的 q 阶波动函数:

$$F_q(s) = \left\{ \frac{1}{2N_s} \sum_{v=1}^{2N_s} [F^2(v, s)^{q/2}] \right\}^{1/q} \quad (5)$$

式中: 下标 q 可以取 0 之外的任何的实值, 当 $q = 0$ 时, 由洛必达法则有

$$F_0(s) = \exp \left\{ \frac{1}{4N_s} \sum_{v=1}^{2N_s} \ln [F^2(v, s)] \right\} \quad (6)$$

e. 在 $s_{\min} \approx 6$ 和 $s_{\max} \approx N/4$ 的范围内变换尺度 s 的值, 确定消除趋势波动函数 $F_q(s)$ 和尺度 s 大小间的标度关系, 即

$$F_q(s) \sim s^{h(q)} \quad (7)$$

一般地, 指数 $h(q)$ 随 q 不同而变化, 对于非平稳序列, $h(2)$ 等于 Hurst 指数, 因此, 将 $h(q)$ 定义为广义 Hurst 指数。对于单分形序列, $h(q)$ 不随 q 不同而变化。这是因为对于所有分割区间 v , 均方差 $F^2(v, s)$ 相等, 且由式(4)表示的平均过程计算得到的波动函数也相等。只有当大、小波动明显不同时, $h(q)$ 才会随 q 显著变化。当 q 为正值时, 由大的均

方差 $F^2(v,s)$ (即与相应的拟合值偏差大) 的区间 v 决定均值 $F_q(s)$; 相反地, 当 q 为负值时, 由小的均方差 $F^2(v,s)$ 的区间 v 决定均值 $F_q(s)$ 。换句话说, q 为正值, $h(q)$ 刻画了大波动区间的分形行为; q 为负值, $h(q)$ 则刻画了小波动区间的分形行为^[10]。

f. 对于多重分形序列, MF-DFA 的最后结果是一系列的 分形指数 $h(q)$, 是 q 的减函数。根据标准多重分形分析, 由 MF-DFA 方法计算得到的 $h(q)$ 与标度指数 $\tau(q)$ 的解析式^[10]为

$$\tau(q)=qh(q)-1 \tag{8}$$

式(8)表明, MF-DFA 中由式(7)定义的广义 Hurst 指数 $h(q)$ 与传统的多重分形标度指数 $\tau(q)$ 直接相关。另一种描述多重分形序列的方法是奇异谱 $f(\alpha)$, 通过 Legendre 转换得到 $f(\alpha)$ 和 $\tau(q)$ 间的关系

$$\alpha=\tau'(q) \quad f(\alpha)=q\alpha-\tau(q) \tag{9}$$

式中: α 为奇异强度, 或称为 Hölder 指数; 而奇异谱 $f(\alpha)$ 则表示了由 α 描述的序列子集的维数。由式(8)可得

$$\alpha=h(q)+qh'(q) \quad f(\alpha)=q[\alpha-h(q)]+1 \tag{10}$$

奇异谱 $f(\alpha)$ 的形状和延伸长度包含了分析序列的分布特征的显著信息。通常奇异谱 $f(\alpha)$ 有一个下凹的曲率, 分形谱宽度 $\Delta\alpha$ ($\Delta\alpha=\alpha_{\max}-\alpha_{\min}$) 增加, 意味着分布的奇异性增大。

2 应用实例

2.1 工程背景和数据来源

某工程属 I 等枢纽工程, 主要由碾压混凝土重力坝、坝顶开敞式溢洪道、泄水底孔、左岸输水建筑物等组成。碾压混凝土重力坝最大坝高 113.0 m,

坝顶长 308.5 m, 坝顶高程为 179.0 m, 水库正常蓄水位 173.0 m, 属不完全调节水库。主体工程于 2000 年 12 月 18 日下闸蓄水。

为确保大坝及地下厂房的安全运行, 在主要建筑物表面(或内部)布置了变形、渗流、温度和应力应变等较为全面的监测项目。大坝变形监测项目主要有正垂线(PL)、倒垂线(IP)、引张线和视准线, 垂直位移监测采用水准测量。大坝正、倒垂线用于监测坝顶及坝体内部的水平顺河向、垂直水流向位移量, 布置方案如图 2 所示。为提高可比性, 本文选取悬挂点均位于坝顶 179.0 m 高程的 4 号坝段(溢流坝段)、2 号坝段(挡水坝段)和 5 号坝段(挡水坝段)的正垂线 PL7、PL5 和 PL6 的自动化监测时间序列进行多重分形分析。为方便分析, 顺河向水平位移以向下游为正, 向上游为负。可用的时间序列自 2002 年 10 月开始, 选取 2003 年 1 月 1 日至 2008 年 12 月 31 日间的 3 个测点的顺河向位移序列进行分析, 实测的环境量和位移时间序列如图 3 所示。

2.2 统计描述与正态检验

从图 3 可以看出, 变形呈一定程度的增加趋势, 但并非单调增加, 而是有涨有落, 且变形波动过程呈一定的周期性。计算 PL5、PL6 和 PL7 测点径向位移序列的标准差、峰度和偏度等基本统计量, 结果见表 1, 可看出, 各序列的偏度都不为 0, 且峰度都小于 0, 因此均属于非正态分布。PL7 和 PL5 测点位移序列分布的偏度均大于 0, 这表示其数据分布形态与正态分布相比为右偏; PL6 测点位移序列分布的偏度小于 0, 其数据分布形态与正态分布相比为左偏。同时, 所有测点序列的峰度均小于 0, 这表示测点序列的整体分布与正态分布相比较为平缓, 为宽顶峰。由此可知, 测点序列为呈右偏或左偏的非正态分布。

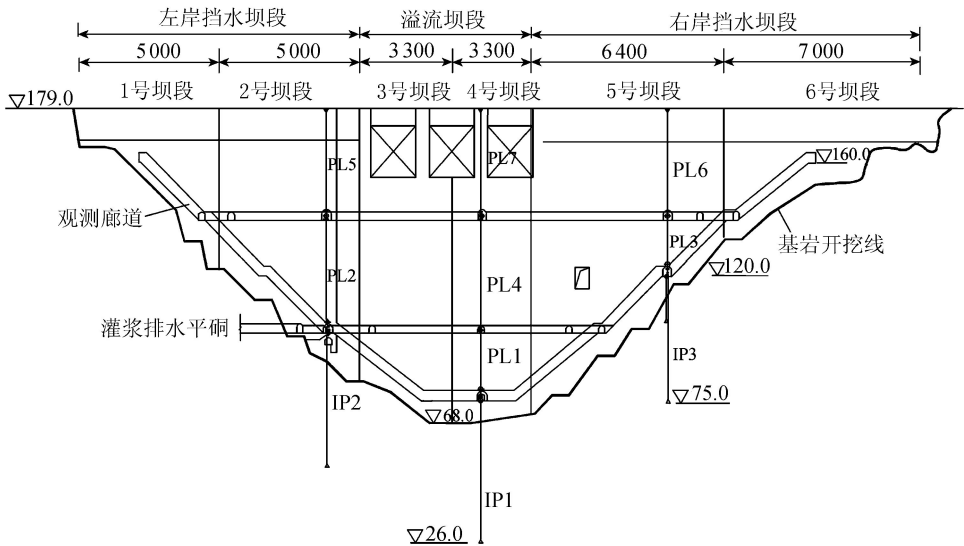


图 2 大坝垂线的布置方案(单位:m)

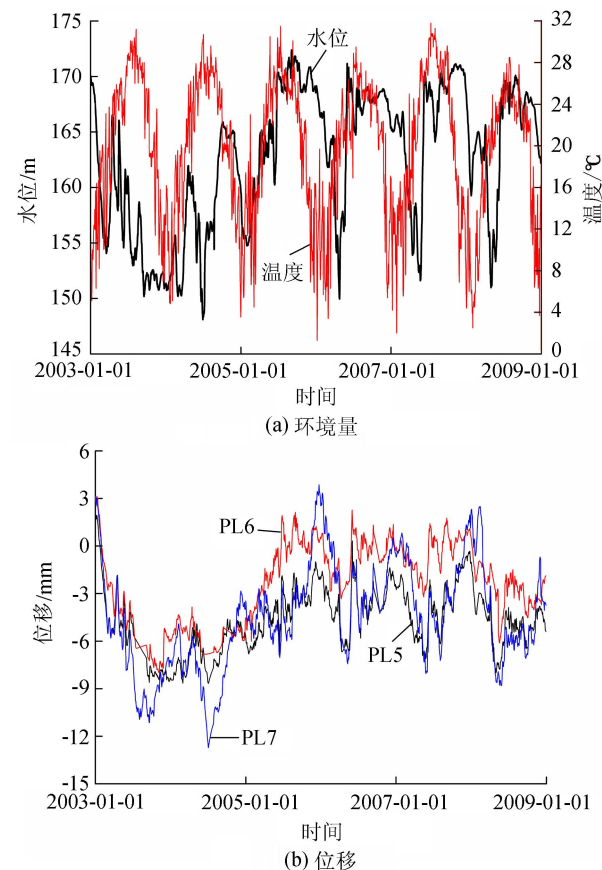


图3 环境量和正垂线顺河向位移实测时间序列

表1 正垂线径向位移时间序列的基本统计量

测点	平均值/ mm	标准差/ mm	峰度	偏度	最小值/ mm	最大值/ mm	序列 长度
PL5	-4.585	2.041	-0.127	0.148	-9.14	2.43	1967
PL6	-2.158	2.459	-0.771	-0.366	-7.98	3.29	1884
PL7	-4.334	3.273	-0.374	0.191	-12.717	3.859	2047

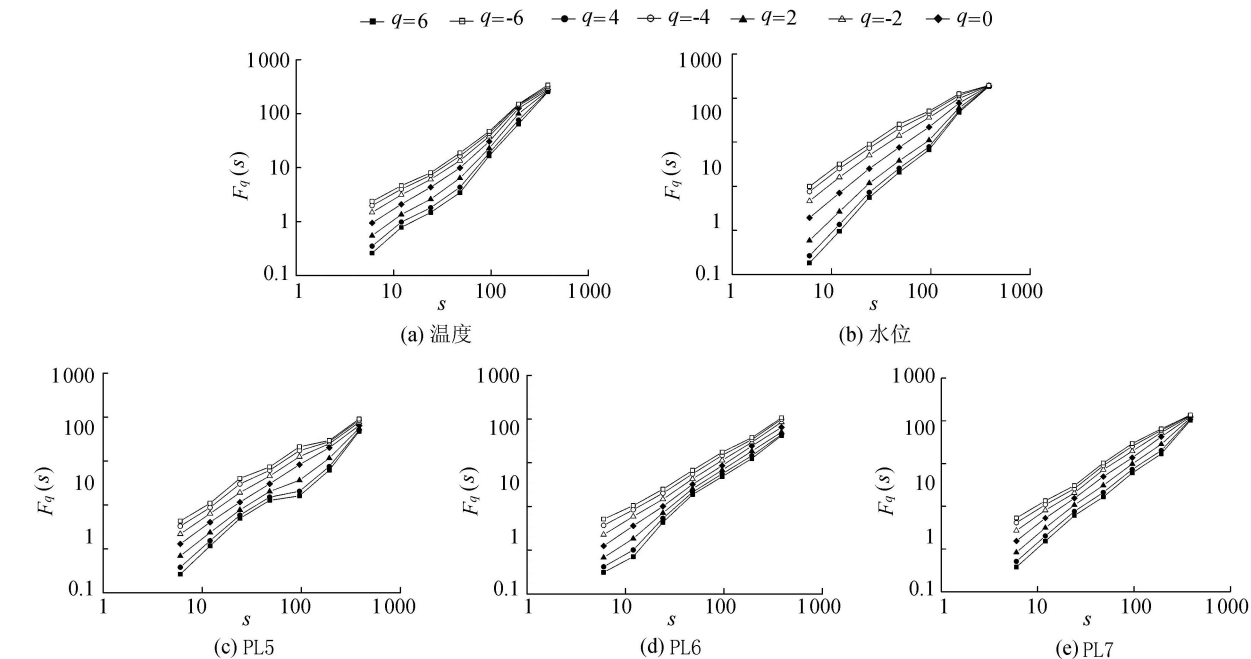


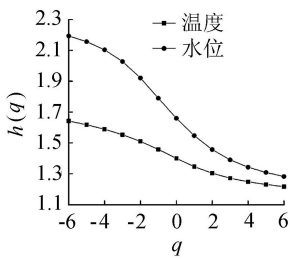
图4 波动函数和时间尺度的对数关系

2.3 多重分形分析结果

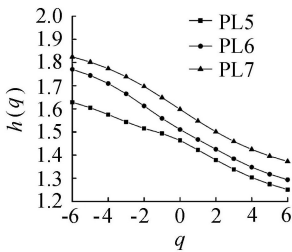
根据式(1)~(4)计算波动函数 $F_q(s)$, 参照文献[10], 这里波动函数的阶数取值范围为 $-6 \leq q \leq 6$; 对于时间尺度 s , 取值需适中, 取值太小没有实际意义, 过大, 则分割的区间数太少, 结果将与单分形结果相似, 一般地, 时间尺度 s 的范围为 $5 \leq s \leq N/4$, 根据大坝变形监测资料的周期性波动趋势, 这里选取 $s = \{6, 12, 24, 48, 96, 192, 384\}$ 。图4为采用MF-DFA1计算得到的 $q = \pm 6, \pm 4, \pm 2, 0$ 时温度和库水位及PL5、PL6和PL7测点径向位移的 $F_q(s)$ - s 对数图。整体来说, 小的时间尺度对应的 q 阶波动函数的差异较大的时间尺度显著, 小尺度能够识别局部时间内的大小波动; 相反, 大尺度在一定程度上均化了大小波动的幅度。

图5为广义Hurst指数 $h(q)$ 随 q 的变化情况, $h(q)$ - q 曲线能反映序列是否存在多重分形行为。当 $h(q)$ 不随 q 变化时, 表明序列是单分形; 反之, 序列为多重分形。由图5可以看出, 由环境量序列和各测点位移序列计算得到的广义指数 $h(q)$ 均随 q 增加而单调减少, 这意味着环境量序列和各测点位移序列都存在较显著的多重分形特征。当 $q = 2$ 时, 计算得到的温度和库水位序列 $h(2)$ 的值分别为 1.31 和 1.46, 各测点位移序列 $h(2)$ 的值分别为 1.38、1.43 和 1.5。

图5说明位移序列存在明显的分形特征, 因此有必要进行多重分形谱分析。由式(8)和式(9)分别计算得到多重分形标度指数 $\tau(q)$ 和分形谱宽度 $\Delta\alpha$ 、奇异谱高度 $\Delta f(\alpha)$, 得到的 $\tau(q)$ - q 和 $f(\alpha)$ - α 曲线分别如图6和图7所示。其中, 温度和库水位序

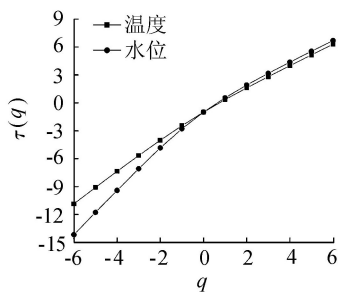


(a) 环境量

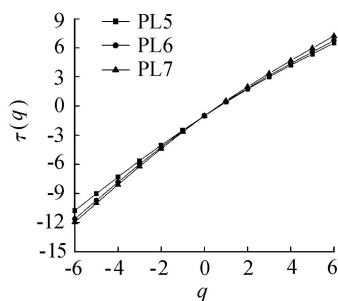


(b) 垂线测点

图5 广义 Hurst 指数和 q 的关系



(a) 环境量



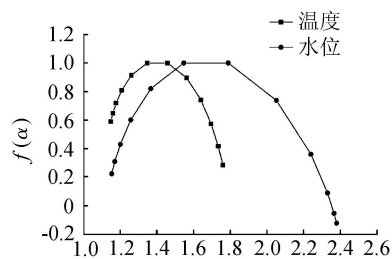
(b) 垂线测点

图6 位移日测值序列质量指数谱曲线

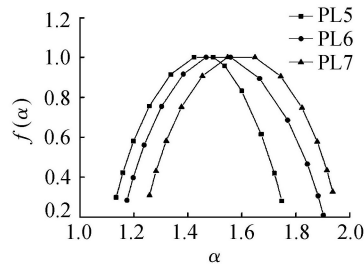
列的分形谱宽度 $\Delta\alpha$ 分别为 0.612 和 1.227, 奇异谱高度 $\Delta f(\alpha)$ 分别为 0.715 和 1.122; PL5、PL6 和 PL7 测点序列的分形谱宽度 $\Delta\alpha$ 分别为 0.614、0.728 和 0.679, 奇异谱高度 $\Delta f(\alpha)$ 分别为 0.72、0.79 和 0.69。

2.4 结果讨论和大坝的整体性态识别

从图 4(a)(b) 可以看出, 温度序列的 $F_q(s)$ - s 曲线在 $s=96$ 处扭曲, 对应时间尺度大约为一个季度; 水位序列在 $s=192$ 处扭曲, 对应时间尺度大约为半年周期。从图 4(c)(d)(e) 可以看出, PL5 测点序列的 $F_q(s)$ - s 曲线都在 $s=96$ 处扭曲; PL6 测点序列有所不同, 在 $s=24$ 处接近月周期附近扭曲; PL7 测点曲线扭曲发生在 $s=384$ 接近年周期处。同时, 由图 3(b) 可以看出, 各测点位移序列大小波动存



(a) 环境量



(b) 垂线测点

图7 位移日测值序列多重分形奇异谱曲线

在一定的差异, $F_q(s)$ - s 曲线较好地反映了测点序列局部时间内和较大尺度范围内的日测值的波动情况。

对测点序列进行统计分析, 其中水压因子取 3 次方, 温度取半年周期, 时效取对数形式^[1], 统计模型分析得到 2007 年典型测点年变幅的结果(表 2), 计算得到 PL5、PL6 和 PL7 测点序列的温度分量约占总位移年变幅的 61.7%、63.5% 和 63.0%, 温度变化对坝体上下游方向水平位移变化影响最大, 其次为库水位变化; 时效分量相对较小, 表明坝体变形趋于稳定。

表2 统计模型分析结果

测点	实测值	拟合值	水压分量	温度分量	时效分量
PL5	7.120	6.743	2.180	4.155	0.408
PL6	5.070	5.408	1.690	3.432	0.286
PL7	10.119	10.288	3.305	6.48	0.503

测点序列的 $h(2)$ 值大于 1 且接近于 1.5, 这说明测点序列的波动相关性和布朗运动有一定相似性, 换句话说, 监测序列存在较大的不确定性。同时, 各序列 $h(2)$ 值接近, 由文献[4]可知, 整体上大坝结构处于弹性状态。由 $h(q)$ - q 曲线 $q>0$ 和 $q<0$ 两段可以区分各测点的大小波动的差异。图 5(a) 表明温度序列的大波动标度无显著变化, 库水位序列的大波动标度相对较大; 温度和库水位序列尤其是库水位序列的小波动标度单调递减较显著。图 5(b) 表明 PL7 测点序列波动较显著, 其次为 PL6 测点系列, PL5 测点序列波动较小; 各测点序列的大波动标度单调递减较明显, 这是由于蓄水和运行初期, 环境量和坝体自身引起的, 各测点递减的趋势基本相同, 表明整体变化趋势相同; PL6 和 PL7 测点序列的小波动标度单调递减趋势也基本相同; PL5 测点序列 $h(q)$ 序列小波动的标度较其他两测点小, 表明

PL5 测点序列的波动较小。

$f(\alpha)$ - α 曲线可以反映位移序列在分形结构上不均匀分布的性质。由图 7(a) 可见温度和库水位序列尤其是库水位序列的奇异谱呈明显的右钩状,小波动的影响在库水位序列中占显著优势。由图 7(b) 可见各测点序列尤其是 PL5 和 PL7 的奇异谱基本对称;而 PL6 测点序列奇异谱则呈不明显的右钩状,即对于 PL6 测点序列,小波动的影响在日测值序列中稍占优势。如前所述,分形谱宽度 $\Delta\alpha$ 的值可以反映大坝性态演变复杂度的空间差异,各测点分形谱宽度 $\Delta\alpha$ 相差不大,相对而言,PL6 测点序列的奇异谱谱宽 $\Delta\alpha$ 最大,PL5 次之,PL7 最小。从图 2 可以看出,PL6 测点高程较低,水位波动相对坝段坝高在 3 个测点中最大;PL7 测点位于河床,水位波动相对坝段坝高在 3 个测点中最小。初步推断,各坝段不同的运行机理是导致坝顶变形测点序列多重分形特征差异的根本原因。

由以上分析和讨论可以看出,整体上,大坝结构变形处于正常状态,坝体处于弹性状态;对比来看,岸坡 5 号坝段的 PL6 测点序列表现出较为复杂的性态,河床 4 号坝段的 PL7 测点序列较为稳定。综上,统计模型方法能够得到监测效应量的主要影响因子;MF-DFA 方法可以识别监测效应量序列不同时间尺度上的分形特征和大坝整体性态时空差异和演变规律。

3 结 论

a. 各垂线测值序列分别在月、季度和年周期时间尺度上,波动函数存在一个转折点,反映了各测点测值时间序列在不同时间尺度上的波动特征,说明各坝段运行机理具有一定的差异。环境量的波动函数表明温度和水位存在较为显著的季度和年周期波动,同时广义 Hurst 指数说明水位大小波动较为显著;通过统计模型分析表明,温度分量和水位分量占变形量年变幅的大部分。综合统计模型分析和 MF-DFA 方法分析结果,整体上,温度和库水位的大波动决定了坝体变形幅度,水位频繁涨落控制各坝段尤其是岸坡坝段变形的小波动。

b. 广义 Hurst 指数 $h(q)$ 均随 q 的增加而减小,大坝变形测值序列呈显著的多重分形特征。由 Hurst 指数大于 1 且接近于 1.5 说明运行初期大坝整体上处于正常线弹性状态。测点序列波动具有较大的不确定性,这与大坝运行初期受到较为复杂的环境、水文和运行管理等多重因素影响有关。

c. 综合环境量和测点序列的奇异谱形状和宽度,可以刻画大坝不同坝段和局部运行性态的动力学特征,其物理意义明确,为此通过大坝多个测点的

奇异谱宽度分析可反映大坝长期性态演变的时空差异。进一步挖掘造成不同测点复杂程度差异的可能原因,如坝段的工作条件和材料的衰变等,可以指导大坝的运行管理和维护。

参考文献:

- [1] 顾冲时,吴中如. 大坝与坝基安全监控理论和方法及其应用[M]. 南京:河海大学出版社,2006.
- [2] 远近,郑东健,李波,等. 模糊可拓模型在坝体变形评价中的应用[J]. 水利水电科技进展,2009,29(1):23-25. (YUAN Jin, ZHENG Dongjian, LI Bo, et al. The application of fuzzy extension model in dam deformation evaluation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2009,29(1):23-25. (in Chinese))
- [3] 胡江,苏怀智. 再生缝对拱坝变形的影响分析与预测[J]. 水电能源科学,2008,26(5):96-100. (HU Jiang, SU Huaizhi. Influence of regenerated crack to arch dam deformation and displacement forecast [J]. Water Resources and Power, 2008, 26 (5): 96-100. (in Chinese))
- [4] SU Huaizhi, HU Jiang, WU Zhongru. A study of safety evaluation and early-warning method for dam global behavior [J]. Structural health Monitoring: An International Journal,2012,11(3):269-279.
- [5] 赖道平,吴中如,周红. 分形学在大坝安全监测资料分析中的应用[J]. 水利学报,2004(1):100-104. (LAI Daoping, WU Zhongru, ZHOU Hong. Application of fractal theory to analyze dam safety monitoring data[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004 (1): 100-104. (in Chinese))
- [6] TELESKA L, PIERINI J O, SCIAN B. Investigating the temporal variation of the scaling behavior in rainfall data measured in central Argentina by means of the detrended fluctuation analysis[J]. Physica A,2012,391(4):1553-1562.
- [7] 陈莹,许有鹏,尹义星,等. 长江干流日径流序列的多重分形特征[J]. 地理研究,2008,27(4):819-828. (CHEN Ying, XU Youpeng, YIN Yixing, et al. Multifractal characteristics of daily discharge series in the Yangtze River[J]. Geographical Research,2008,27(4):819-828. (in Chinese))
- [8] TELESKA L, LOVALLO M., HSU H. L., et al. Analysis of site effects in magnetotelluric data by using the multifractal detrended fluctuation analysis[J]. Journal of Asian Earth Sciences,2012,54-55:72-77.
- [9] PENG C K, BULDYREV S V, HAVLIN S S, et al. Mosaic organization of DNA nucleotides[J]. Physical Review E, 1994,49(2):1685-1689.
- [10] KANTELHARDT J W, ZSCHIEGNER S A, KOSCIELNY-BUNDE E, et al. Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series[J]. Physica A,2002,316(1):87-114.

(收稿日期:2013-04-10 编辑:熊水斌)