

基于 S 变换的潘家口水库入库径流 时序多时间尺度分析

牛军宜

(郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 以 1956—2003 年间的潘家口入库径流时序为研究对象, 采用 S 变换对该径流时序的演变特征进行了时频分析, 得到了该水文时序频谱在时-频平面上的三维分布图, 它清晰地显示了该时间序列在不同时段内的多时间尺度演变特征。然后再对得到的频谱图进行拓扑结构分析, 总结了潘家口水库入库径流时序的宏观演变规律。结果表明, 潘家口水库的年入库天然年径流近 50 年来总体上呈减少的趋势, 其演变过程中存在 16 年和多个 10 年以下的多重变化周期; 时间尺度为 16 年的周期分量波动特征较为平稳; 但是对该径流时序演变特征起主要作用的是 3~10 年的周期分量, 并且 3~10 年的多个周期分量在不同时段内对该径流时序波动特征的贡献不同。

关键词: 径流时序; S 变换; 时频分析; 频谱; 拓扑结构

中图分类号: P333.6

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2011)02-0036-05

Multi-timescale Analysis of Inflow Time Series of Panjiakou Reservoir Based on S-transform

NIU Junyi

(College of Water Conservancy and Environmental Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China)

Abstract: Taking the inflow time series of Panjiakou reservoir from 1956 to 2003 as research object, the time frequency analysis for the evolution features of the inflow time series was made by means of S-transform, obtaining the 3-D distribution spectrogram of the hydrological time series on the time-frequency plane. The spectrogram clearly displayed the multi-timescale evolution features of the inflow time series in different time periods. Then, the analysis of topology structure for the spectrogram was carried out and the macroscopic evolution law of the inflow time series of Panjiakou reservoir was summarized. The result showed that the yearly inflow volume of Panjiakou reservoir was of a decreasing trend in the past 50 years, and there were 16 a and many 10 a multi-cycle oscillations in the time series evolution process, and the 3-10 a periodic components played a leading role in the evolution process. Moreover, each of 3-10 a periodic components had a different contribution to the fluctuating features of inflow time series of Panjiakou reservoir in different time periods.

Key words: inflow time series; S-transform; time frequency analysis; spectrum; topology structure

潘家口水库地处河北省迁西县境内, 防洪库容 9.7 亿 m^3 , 兴利库容 19.5 亿 m^3 , 总库容 29.3 亿 m^3 , 水库以供水为主, 兼顾防洪、发电。潘家口水库坝址以上控制流域面积 3.37 万 km^2 , 占滦河流域总面积的 75.3%。其中滦河在内蒙古自治区和河北省张家口市境内流域面积为 0.72 万 km^2 , 占潘家口水库以上总面积的 21.4%; 滦河在河北省承德市境内流域面积为 2.65 万 km^2 , 占潘家口水库以上总面积的 78.6%。潘家口水库是引滦入津供水的主体工程, 该工程是天津市城市供水的重要支柱, 自 1983 年建成至 2006 年, 已累计向天津市供水 170 亿 m^3 , 为天津市的社会经济发展作出了巨大贡献。然而近 10 年来潘家口水库流域的

收稿日期: 2010-11-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(50909069)。

作者简介: 牛军宜(1978—), 男, 河南宜阳人, 讲师, 博士, 主要从事水资源及水环境问题的研究。E-mail: njy1230@126.com.

水资源状况发生了明显的变化,特别是近几年潘家口水库入库水量大幅度衰减,多次造成天津市城市供水危机,已迫使天津市从 2000—2005 年连续 4 次实施引黄济津的应急调水。针对这种情况,利用时频分析的方法对滦河潘家口水库入库径流演变特征进行研究,从而为南水北调建成通水之前,合理安排天津市城市供水调度方案,科学规划天津市水资源供需配置,支持天津市社会经济可持续发展提供决策依据^[1]。

对时间序列时频特征分析的常用方法有 Fourier 分析^[2]、短时 Fourier 分析^[2]、Gabor 变换^[3]、Wigner-Hough 变换^[3]、小波变换^[4]及 Hilbert-Huang 变换等^[5],在分析时间序列时频特性方面取得了丰富的成果,但均有各自的不足之处^[6]。S 变换是近年来发展起来的现代时频分析工具,采用窗口宽度与频率成反向变化的可变高斯窗函数,吸收并发展了短时 Fourier 变换和连续小波变换的优点,具有多分辨率分析能力,并且由于它是一种线性变换,对于多分量信号具有可加性,不存在二次时频的交叉项,因而具有良好的时频分辨率^[7]。S 变换的突出特点是它对信号由时域转换到频域的过程中保留了信号的相位信息,能同时获得信号的幅值谱及相位谱,避免了小波变换丢失信号原始相位信息的弊端^[8-9]。S 变换的这些优良特性使得它在天文、气象、声纳、电力、地球物理学以及振动信号分析上都有很好的应用^[10-17],下面采用 S 变换对潘家口水库 1956—2003 年的年天然入库流量时序进行时频分析。

1 S 变换基本原理

1.1 一维连续 S 变换原理

S 变换思想起源于加窗 Fourier 变换及小波变换的窗口可调思想,从加窗 Fourier 变换开始,介绍一维 S 变换的基本原理。

对于连续时间信号 $x(t)$,做如下加窗 Fourier 变换:

$$S(\tau, f, \sigma) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)w(\tau - t, f) \exp(-i2\pi ft) dt. \quad (1)$$

式中: τ 为时窗函数的中心; f 为频率; σ 为调节因子; i 为虚数单位; $w(\tau - t, f)$ 为窗口函数,

$$w(\tau - t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{f^2(\tau - t)^2}{2}\right]. \quad (2)$$

这样的窗口函数就是可变高斯窗函数,窗口宽度与频率成反向变化,并且满足以下归一化条件:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} w(\tau - t, f) d\tau = 1. \quad (3)$$

时间信号 $x(t)$ 的一维连续 S 逆变换为

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\tau, f, \sigma) \exp(i2\pi ft) d\tau df. \quad (4)$$

1.2 一维离散 S 变换步骤

用 S 变换对时间序列进行时频分析,需要采用 S 变换的离散形式,下面是一维离散 S 变换的计算步骤。

第一步:计算 $x[kT]$ 的快速 Fourier 变换 $\mathbf{X}[\frac{n}{NT}]$,然后,把向量 $\mathbf{X}[\frac{n}{NT}]$ 与向量 $\mathbf{m} = [0, 1, 2, \dots, N-1]$ 做扩维加法运算,得到 $\mathbf{X}[\frac{m+n}{NT}]$ 矩阵。

第二步:计算矩阵 $w(m, n) = \exp(-\frac{2\pi^2 m^2}{n^2})$ 的 FFT,得到矩阵 $\mathbf{W}(m, n)$ 。

第三步:按频率采样点计算 $\mathbf{X}[\frac{m+n}{NT}]\mathbf{W}(k, n)$ 。

第四步:计算 $\mathbf{X}[\frac{m+n}{NT}]\mathbf{W}(k, n)$ 快速 Fourier 反变换,得到 S 变换矩阵。

离散的 S 变换 $\mathbf{S}[\tau, f]$ 可分解成两部分的乘积:

$$\mathbf{S}[\tau, f] = |\mathbf{S}[\tau, f]| \otimes \exp\{\boldsymbol{\theta}[\tau, f]\}. \quad (5)$$

式中: $|\mathbf{S}[\tau, f]|$ 称为时间序列 $x[kT]$ 的幅值频谱, $\boldsymbol{\theta}[\tau, f]$ 称为 $x[kT]$ 的相位频谱, \otimes 表示矩阵对应元素相乘。

对水文时间序列做时频分析时, $|S[\tau, f]|$ 是水文时序的幅值频谱, 反映水文时间序列观测量在不同时段内不同周期分量的变化幅度; $\theta[\tau, f]$ 为水文时序的相位频谱, 包含着水文时序观测量相位随频率的变化信息。本文仅研究潘家口水库年入库流量时间序列的幅值频谱 $|S[\tau, f]|$ 变化规律, 虽然它与时间域上时间序列的波动幅度不是同一量纲, 但它与时间序列的波动能量及该序列多时间尺度周期波动的振幅成正比关系。

1.3 S 时频变换的拓扑结构

图 1 是时-频拓扑结构分析图, 可以从时域和频域两个方面反映时序变化过程中的多时间尺度演变特征。时-频拓扑结构由四个分量构成: 第一类分量在图中用①表示, 该分量是在某时刻出现的一个冲击脉冲, 一般指水文系统在相对较短的时段内接受到了一个外界干扰而产生的响应。该分量刻画了这段时间内水文系统的多时间尺度变化特征及水文系统某项输入的剧变。第二类分量用②表示, 该分量表示水文系统的某个特性在较长时期内做周期比较稳定的波动, 系统的特性也相对稳定。第三类分量用③表示, 该分量表示水文系统的某一特性的频率随着时间增加越来越大, 即波动周期越来越短。第四类用④表示, 该分量说明水文系统的某一个特性的频率随着时间增加而变得越来越小, 即波动周期变得越来越长。

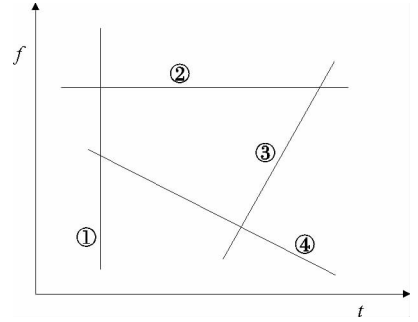


图 1 时-频拓扑结构分析图
Fig. 1 The topology structure analysis of time-frequency

2 潘家口水库年入库流量时序演变特征

2.1 基本资料及预处理

本项研究所采用的潘家口水库天然年径流时序取自海河流域水文年鉴整编资料, 符合一致性及代表性的要求, 图 2 是潘家口水库 1956—2003 年的天然年入库流量变化过程。虽然 S 变换可以用来分析非平稳时间序列, 但为了得到潘家口水库天然年入库水量变化的总趋势, 并重点研究此流量时序波动变化的多重周期特征, 有必要对天然年入库流量时序进行线性趋势项的提取。图 2 中的虚线是年入库流量时序的线性趋势项, 该线性趋势显示潘家口水库入库流量时序在 1956—2003 年间呈现出逐年减小的态势。图 3 是该流量时序去除趋势项后的波动过程, 2.2 将对图 3 所示流量时序的波动周期特性进行多时间尺度分析。

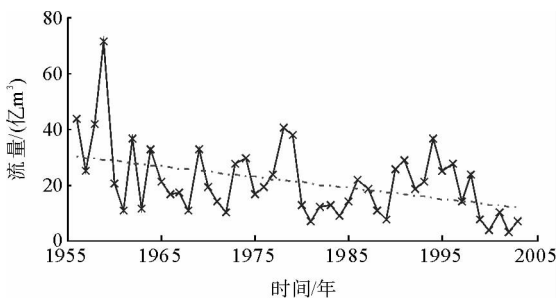


图 2 年入库流量时序及其线性趋势项

Fig. 2 The annual inflow series and its linear trend

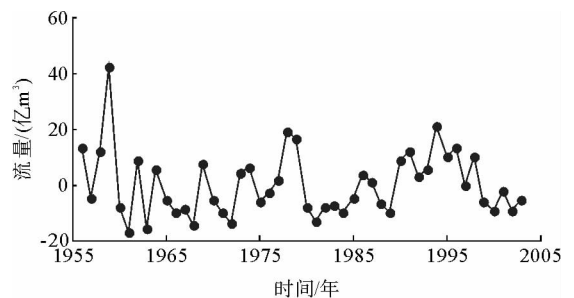


图 3 去除趋势后的年入库流量时序波动过程图

Fig. 3 The fluctuating process of annual inflow series after removing the trend

2.2 年入库流量时序的多时间尺度变化特征分析

运用文中所述的 S-transform 方法对潘家口水库的年入库流量时间序列进行时频分析, 绘制出流量时序的幅值频谱在时-频平面上的三维分布, 如图 4 所示。图中频率坐标用来度量流量时序的波动速度, 频率的倒数是流量时序的波动周期。

图 4 清晰地显示了潘家口水库年入库流量时序在时间域和频率域内的变化特征, 从中可得出以下结论。在频率为 0.02 和 0.062 5 处, 频谱幅值在 1956—2003 年的 48 年间基本保持不变且为峰值, 说明在

整个年入库流量时序中存在振幅稳定且时间尺度为 50 年和 16 年的周期分量。又因为 0.02 处的波峰峰值很小,所以时间尺度为 50 年的周期分量对整个径流时序影响很小,在时序演变特征分析中,可忽略此周期分量。

在 1956—1970 年间,频率大于 0.1 的频谱幅值不再平稳,即时间尺度小于 10 年的周期分量在时频平面上的频谱幅值不再平稳。将图 4 中的频谱图进行滤波处理,即将图 4 中频谱幅值大于 2.7 的区域提取出来,如图 5 所示。

图 5 中频谱幅值比较大的区域有 5 个,它们分别是在时段 1956—2003 年,频率为 0.062 5 的直线(1),由时段 1956—1966 年和频带 0.25~0.45 围成的区域(2),由时段 1967—1971 年和频带 0.375~0.5 围成的区域(3),由时段 1972—1993 年和频带 0.19~0.27 围成的区域(4),由时段 1994—2003 年和频带 0.3~0.5 围成的区域(5)。

对上述 5 个区域进行拓扑结构分析可以发现,这 5 个区域分别对应于图 1 中的②、①、③、②、④ 4 种类型,由此,可以得到潘家口水库年入库流量时序多重周期分量的宏观演变特征和发展趋势:

a) 区域(1)表明,在 1956—2003 年间,潘家口水库天然年入库径流时序中存在振幅稳定且时间尺度为 16 年的周期分量。

b) 区域(2)的振幅非常大,说明在 1956—1966 年间,潘家口水库天然年入库径流时序的变化特征主要由时间尺度为 2.2~4 年的多重周期分量的波动特征决定。

c) 区域(3)表明,在 1967—1971 年间,潘家口水库年入库径流时序的高频波动分量的变化周期呈逐年减小的趋势。

d) 区域(4)表明,在 1972—1993 年间,潘家口水库年入库流量时序的变化特征中存在时间尺度为 3~4 年且振动幅度相对比较稳定的周期分量。

e) 区域(5)表明,在 1994—2003 年间,潘家口水库年入库流量时序的高频波动分量的变化周期有逐年增大的趋势,并且其波动的幅度也有所增强。

3 结论

运用 S 变换方法对潘家口水库 1956—2003 年的入库天然径流量时序进行了时频分析,得到了潘家口水库天然入库径流时序的演变过程主要有以下三个特点:

1) 1956—2003 年的入库天然径流时序的线性趋势项表明,潘家口水库的年天然入库水量整体上呈减少的趋势;

2) 1956—2003 年的入库天然径流时序具有多时间尺度性,其中振幅稳定且周期分别为 16 年和 50 年的两个波动分量的振幅较小,对整个径流时序的变化特征影响很有限;

3) 1956—2003 年的入库天然径流时序的演变特征主要由周期小于 10 年的多重波动分量所决定,且由于周期小于 10 年的各个波动分量在不同的时间段内振幅变化较大,故此天然径流时序在不同时间段内呈现出不同的演变特征。

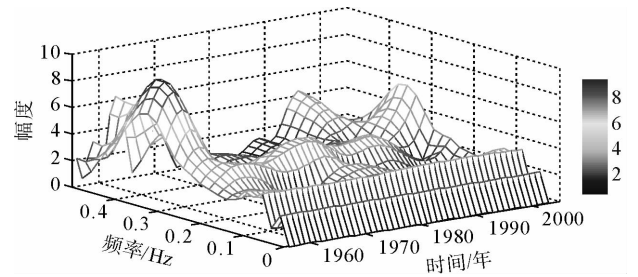


图 4 年入库流量的 S 变换频谱在时-频平面上的三维分布图

Fig. 4 The 3-D distribution spectrogram of annual inflow based on S-transform on time-spectrum plane

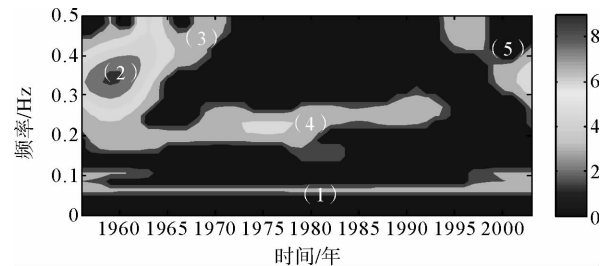


图 5 时-频平面上幅值大于 2.7 的 5 个区域图

Fig. 5 The five regions of amplitude bigger than 2.7 on the time-frequency plane

参考文献:

- [1]冯平,李建柱,徐仙.潘家口水库入库水资源变化趋势及影响因素[J].地理研究,2008,27(1):213-220.
FENG Ping,LI Jianzhu,XU Xian. Analysis of water resources trend and its causes of Panjiakou reservoir[J]. Geographical Research,2008,27(1):213-220.
- [2]张贤达,保铮.非平稳信号分析与处理[M].北京:国防工业出版社,1998.
- [3]吴正国.现代信号处理技术:高阶谱、时频分析与小波变换[M].武汉:武汉大学出版社,2003.
- [4]冉启文,王建贇.小波变换及其在时-频分析中的应用[J].数理统计与管理,1999,18(3):56-59.
- [5]胡劲松,杨世锡.基于HHT的旋转机械故障诊断方法研究[J].动力工程,2004,24(6):845-851.
HU Jinsong,YANG Shixi. Research on HHT-based fault diagnosis method for rotating machinery[J]. Power Engineering, 2004,24(6):845-851.
- [6]耿萌,石林锁.三种非平稳信号时频分析的方法[J].机械工程与自动化,2008(1):108-109,114.
GENG Meng,SHI Linsuo. Three methods of time-frequency analysis of nonstationary signal[J]. Mechanical Engineering & Automation,2008(1):108-109,114.
- [7]STOCKWELL R G,MANSINHA L,LOWE R P. Localization of the complex spectrum:The S transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing,1996,17:998-1001.
- [8]PINNEGAR C,MANSINHA L. Time-local Fourier analysis with a scalable, phase-modulated analyzing function: The S-transform with a complex window[J]. Signal Process,2004,84(7):1167-1176.
- [9]STOCKWELL R G. A basis for efficient representation of the S-transform[J]. Digital Signal Processing,2007,17:371-393.
- [10]FRITTS D C,RIGGIN D M,BALSLEY B B,et al. Recent results with an MF radar at McMurdo, Antarctica: Characteristics and variability of motions near 12-hour period in the mesosphere[J]. Geophysical Research Letters,1998,25(3):297-300.
- [11]STOCKWELL R G,LARGE W G,MILLIFF F. Resonant inertial oscillations in moored buoy ocean surface winds[J]. Tellus A,2004,56(5):546-547.
- [12]PINNEGAR C R,MANSINHA L. Time-local spectral analysis for non-stationary time series: The S-transform for noisy signals[J]. Fluctuation and Noise Letters,2003,3(3):357-364.
- [13]刘传武,张智军,毕笃彦.S变换在雷达目标识别中的应用[J].系统仿真学报,2008,20(12):3290-3292.
LIU Chuanwu,ZHANG Zhijun,BI Duyan. Radar targets recognition using S transform[J]. Journal of System Simulation, 2008,20(12):3290-3292.
- [14]辛欣,张效民.基于S变换的水中目标特征提取[J].电声技术,2007,31(1):10-12.
XIN Xin,ZHANG Xiaomin. Feature extraction of underwater target based on S-transform[J]. Audio Engineering,2007,31(1):10-12.
- [15]杨洪耕,刘守亮,肖先勇,等.基于S变换的电压凹陷分类专家系统[J].中国电机工程学报,2007,27(1):98-104.
YANG Honggeng,LIU Shouliang,XIAO Xianyong,et al. S-transform-based expert system for classification of voltage dips [J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(1):98-104.
- [16]樊剑,吕超,张辉.基于S变换的地震波时频分析及人工调整[J].振动工程学报,2008,21(4):381-386.
FAN Jian,LYU Chao,ZHANG Hui. Time-frequency analysis and artificial simulation of earthquake ground motions via S-transform[J]. Journal of Vibration Engineering,2008,21(4):381-386.
- [17]徐红梅,郝志勇,贾维新,等.基于S变换的内燃机气缸盖振动特性研究[J].内燃机工程,2008,29(3):68-71,75.
XU Hongmei,HAO Zhiyong,JIA Weixin,et al. Study on vibration characteristics of internal combustion engine cylinder head based on S transform[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering,2008,29(3):68-71,75.