

基于 HHT 方法的洪家渡水电站 年平均流量多尺度演变分析

曹丽青^{1 2} 林振山¹ 纪玲玲^{1 3}

(1. 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210046; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098;
3. 解放军理工大学气象学院, 江苏 南京 211101)

摘要 应用基于经验模态分解(EMD)的 Hilbert-Huang 变换(HHT)方法对洪家渡水电站 1951~2005 年的天然年平均流量系列进行了分析研究,并对未来洪家渡水电站年平均流量变化进行了预测。结果表明,洪家渡站年平均流量存在准 3a、准 9a、准 11a 及准 30a 的波动周期,各时间尺度振荡的方差贡献以 3a 和 9a 的为最大,未来 5 年,洪家渡水电站年平均流量减少的趋势将逐渐扭转,年平均流量将逐年增加。

关键词 经验模态分解; Hilbert-Huang 变换; 洪家渡水电站; 年平均流量; 演变分析

中图分类号 P338 **文献标识码** A **文章编号** 1000-198X(2008)04-0462-04

径流量时间序列具有非线性和非平稳特征,年平均流量时间序列研究一直是水文中长期预报中的重要课题。以往研究通常采用多元线性回归法预报未来年平均流量变化趋势,采用滑动平均法揭示其长期变化规律,采用傅立叶谱分析和小波分析^[1]方法找寻年平均流量的周期。这些方法虽然在发现年平均流量的变化趋势或准周期方面是有效的,但是对于非线性和非平稳的时间序列来说不完全适合。为此, Huang 等^[2-3]提出了一种可以将不同时间尺度的波动,即本征模函数(IMF)逐级分离出来的经验模态分解(EMD)法,并对各 IMF 进行了 Hilbert 变换。这种变换称为 Hilbert-Huang 变换(HHT)。HHT 方法适用于非线性、非平稳的信号。本文采用基于 EMD 的 Hilbert-Huang 变换(HHT)方法,对洪家渡水电站近 50 年来的年平均流量进行了多尺度分析。

1 方法和资料

1.1 Hilbert-Huang 变换(HHT)方法

首先利用经验模态分解(EMD)方法^[2-6]将不同时间尺度的波动逐级分离出来。经验模态分解(EMD)方法是一种全新的数据处理非线性、非平稳序列的方法。它将时间信号 $f(t)$ 分解成一系列的本征模态函数(IMF),每个 IMF 分量都具有如下特征:(a)从全局特性上看,极值点数必须和过零点数一致或者至多相差 1 个;(b)在某一个局部点,极大值包络和极小值包络在该点的值的算术平均和是 0。

EMD 的分解过程为:找出序列 $f(t)$ 所有的极大和极小点,分别用三次样条函数合成上下包络线,得到平均包络线 m_1 ,将原序列减去 m_1 可得到去掉低频率序列的新序列 h_1 。一般 h_1 是非平稳的,可多次重复上述过程,使平均包络线趋近于 0,得到第一个 IMF 分量 c_1 。 c_1 代表原始序列中最高频的分量。即

$$r_1 = f(t) - c_1 \quad (1)$$

对 r_1 继续进行上述分解,直到剩余部分为单一信号或其值小于预先给定的值,分解结束。原始的时间序列 $f(t)$ 可表示为

$$f(t) = \sum_{k=1}^n c_k(t) + R \quad (2)$$

式中: $f(t)$ ——原始时间序列; $c_k(t)$ ——各 IMF 分量; R ——趋势项; t ——时间变量。

再对每一个 IMF 分量 $c_k(t)$ 进行 Hilbert 变换,即

$$b_k(t) = \frac{1}{\pi} p \int_{-\infty}^{\infty} \frac{c_k(t')}{t - t'} dt' \quad (3)$$

p 为 Cauchy 主值, $c_k(t)$ 和 $b_k(t)$ 可以构成一个复序列

$$z_k(t) = A_k(t) \exp[i\varphi_k(t)]$$

式中: $A_k(t)$ ——瞬时振幅, $A_k(t) = \sqrt{c_k^2(t) + b_k^2(t)}$; $\varphi_k(t)$ ——瞬时位相, $\varphi_k(t) = \arctan[b_k(t)/c_k(t)]$; 相应瞬时频率为

$$\omega_k(t) = d\varphi_k(t)/dt$$

EMD 方法存在着边界效应, 本文采用镜像对称延伸方法对边界效应进行处理^[7]。

1.2 资料

乌江发源于贵州省威宁县香炉山, 横穿贵州省中部, 在东北部出境, 入重庆, 于涪陵汇入长江, 是长江上游南岸的最大支流, 是贵州第一大河, 全长 1037 km, 流域面积 8.79 万 km², 天然落差 2 123.5 m, 多年平均水量 534 亿 m³, 与黄河水量相当。洪家渡水电站位于乌江北源六冲河下游黔西和织金两县交界处, 是乌江梯级开发的龙头水电站。电站以发电为主, 兼有防洪、供水、养殖、旅游等综合效益。水库正常蓄水位 1 140 m, 总库容 49.25 亿 m³, 调节库容 33.61 亿 m³, 是乌江流域梯级中唯一具有多年调节性能的水库。本文采用洪家渡水电站 1951~2005 年的天然年平均流量系列。

2 洪家渡水电站 1951~2005 年年平均流量的多尺度分析

对洪家渡水电站 1951~2005 年天然年平均流量进行 EMD 分解得出的 4 个 IMF 分量及其趋势分量 R 如图 1 所示, 各 IMF 的方差贡献率即其 HILBERT 变换结果如表 1 和表 2 所示。

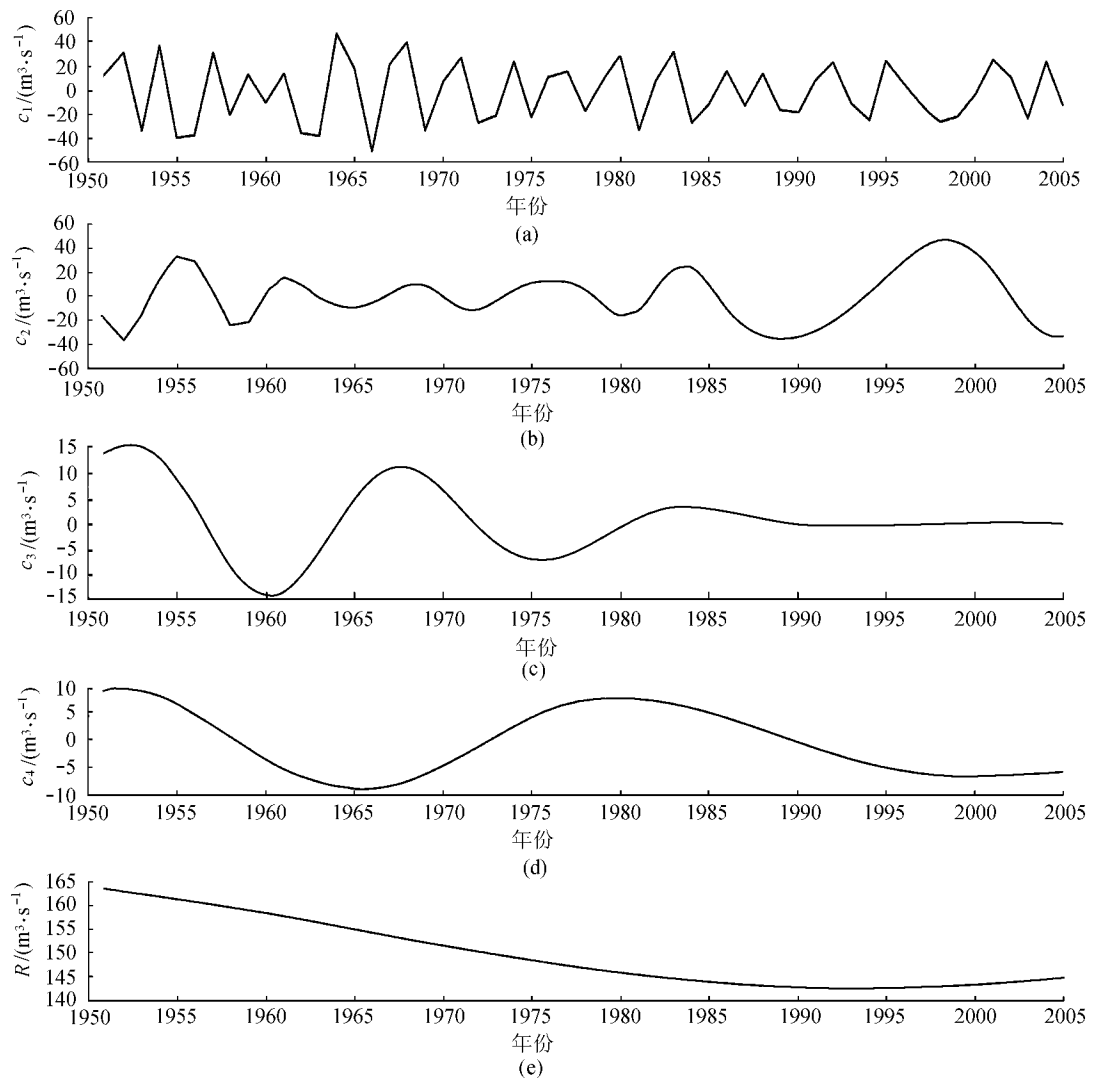


图 1 洪家渡水电站 1951~2005 年年平均流量分解的所有 IMF 分量及其趋势分量 R
Fig.1 Four decomposed components IMF_s and a trend R of annual average streamflow
at the Hongjiadu Hydropower Station from 1951 to 2005

表1 IMF各分量的方差贡献率

Table 1 Variance explained by components c_1 - c_4 and trend component R

IMF 分量	c_1	c_2	c_3	c_4	R
方差贡献率/%	49.46	40	3.7	2.78	4.06

一般而言,IMF各分量反映了不同时间尺度的变化情况,每个IMF分量只是一个窄波段的信号^[8-11]。 c_1 反映的是一个准3a尺度的振荡, c_2 反映的是准9a左右尺度的波动, c_3 反映的是11a左右的波动, c_4 反映的是准30a尺度的波动(表2)。由各分量的方差贡献率(表1)可以看出: c_1 分量贡献率最大,约为50%; c_2 分量其次,为40%; c_3 、 c_4 及趋势项 R 占10%左右。这说明洪家渡水电站年平均流量的波动周期以准3a和准9a为主。

准3a尺度的波动,即 c_1 分量,在该尺度的波动中主要存在2a、3a和4a的周期振荡,其平均周期为3.18a,平均振幅为32.08m³/s。该尺度波动周期在20世纪90年代有所增大,波动振幅在20世纪50年代中期和60年代中期相对较大。准9a尺度的波动,即 c_2 分量,其平均周期为8.95a,平均振幅为28.12m³/s。20世纪80年代中期以后,该尺度的波动周期明显加大,波动振幅在20世纪60年代至80年代较小,90年代以后振幅有所增大(图1)。

洪家渡水电站1951~2005年的年平均流量距平及分解的 c_1+c_2 和 c_2 如图2所示。

从图2可知,洪家渡水电站天然年平均流量的变化主要是受 c_1 和 c_2 的控制,其中 c_1 主要控制3a尺度的年平均流量的变化,而 c_2 则对9a左右的周期变化起主要作用。自2002年以来,洪家渡水电站年平均流量的下降与 c_2 处于下降阶段关系很大。从图1和图2分析 c_1 与 c_2 的未来变化趋势及其与流量变化的关系,可以推断:在未来的5年中,洪家渡水电站年平均流量减少的趋势将会逐渐扭转,年平均流量将会逐年增加。

表2 IMF各分量 Hilbert 变换后的统计特征量

Table 2 Statistics of components c_1 - c_4 after Hilbter-Huang transform

IMF 分量	平均振幅/ (m ³ ·s ⁻¹)	中心频率/ a ⁻¹	平均 周期/a
c_1	32.08	0.31	3.18
c_2	28.12	0.11	8.95
c_3	7.42	0.09	11.04
c_4	7.75	0.03	30.14

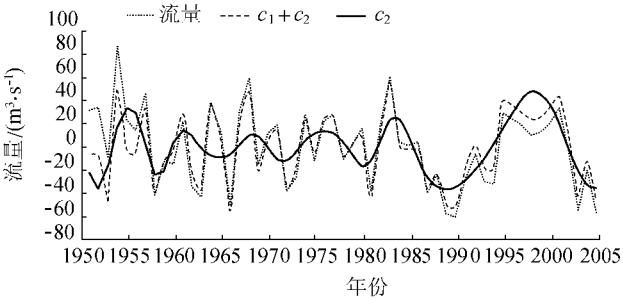


图2 洪家渡水电站1951~2005年年平均流量距平及分解的 c_1+c_2 和 c_2

Fig.2 Anomaly of annual average streamflow at the Hongjiadu Hydropower Station from 1951 to 2005 and decomposed components c_1+c_2 and c_2

3 结 论

- a. 本文应用基于经验模态分解(EMD)的Hilbert-Huang变换(HHT)方法对洪家渡水电站1951~2005年的天然年平均流量系列进行了分析研究,发现洪家渡水电站年平均流量的波动周期为3a、9a、11a和30a,其中3a和9a为主要的振荡周期。
- b. IMF各分量方差贡献率计算结果表明: c_1 分量贡献率最大,约为50%; c_2 分量其次,为40%; c_3 、 c_4 及趋势项 R 占10%左右。
- c. 在未来的5年中,洪家渡水电站年平均流量减少的趋势将会逐渐扭转,年平均流量将会逐年增加。

参考文献:

[1] 林振山,邓自旺.小波气候诊断技术[M].北京:气象出版社,1999:6-35.

[2] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proc R Soc Land A, 1998, 454: 899-955.

[3] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R. A new view of nonlinear water waves: the Hilbert spectrum[J]. Ann Rev Fluid Mech, 1999, 31: 417-457.

[4] FLANDRIN P, RILLING G, GONCALVES G. Empirical mode decomposition as a filter bank[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, (2): 112-114.

[5] WU Z, HUANG N E. A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method[J]. Proc R Soc

London Ser A 2004 460 :1597-1611.

[6] WU Zhao-hua ,HUANG N E ,LONG S R et al. On the trend ,detrending and variability of nonlinear and nonstationary time series[J]. PNAS 2007 ,104(38) :14889-14894.

[7] 邓拥军,王伟,钱成春,等. EMD 方法及 Hilbert 变换中边界问题的处理[J]. 科学通报 2001 46(3) :257-263.

[8] 林振山,汪曙光. 近四百年北半球气温变化的分析: EMD 方法的应用[J]. 热带气象学报 2004 20(1) :90-96.

[9] 林振山,汪曙光. 天天气候学 10 万年问题的研究[J]. 地球物理学报 2004 47(6) :971-975.

[10] 孙娴,林振山. HHT 新技术及其对 ENSO 的诊断[J]. 气象 2006 32(9) :17-22.

[11] LIN Zhen-shan, SUN Xian. Multi-scale analysis of global temperature changes and trend of a drop in temperature in the next 20 years[J]. Meteorol Atmos Phys 2007 95 :115-121.

Multi-scale analysis of annual average streamflow at Hongjiadu Hydropower Station based on HHT method

CAO Li-qing^{1, 2}, LING Zhen-shan¹, JI Ling-ling^{1, 3}

- (1. College of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210044, China ;
2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China ;
3. College of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

Abstract : The Hilbter-Huang Transform (HHT) based on Empirical Mode Decomposition (EMD), a new multi-scale analysis method , was applied to the annual average streamflow at the Hongjiadu Hydropower Station. The results show that the annual average streamflow time series has four fluctuation periods , with approximate durations of 3a , 9a , 11a and 30a , and that the periods of about 3a and 9a are more frequent. It is also concluded that the annual average streamflow will increase in the next 5 years.

Key words : Empirical Mode Decomposition (EMD) ; Hilbter-Huang Transform (HHT) ; Hongjiadu Hydropower Station ; annual average streamflow ; evolution analysis

· 简讯 ·

岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室(河海大学)
建设计划通过专家论证

2008 年 6 月 22 日, 教育部科技司组织的专家组对岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室(河海大学) 建设计划进行了可行性论证. 专家组审查了实验室建设计划任务书, 听取了实验室建设负责人刘汉龙教授所作的建设计划报告, 现场考察了实验室. 专家组认为: 该实验室依托岩土工程国家重点建设学科, 集河海大学优势力量, 整合学校相关学科优势资源组建而成, 具有扎实的学科基础和科研积累, 定位准确, 内容合理, 特色鲜明, 在人才队伍建设和人才培养方面, 目标明确, 措施可行; 实验室设备先进, 平台建设计划明确、先进可行, 提出的运行管理机制和开放制度符合教育部重点实验室的要求和管理规范. 专家组一致同意通过了“ 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室(河海大学) 建设计划 ” 论证.

(本刊编辑部供稿)