

# 基于 EEMD-AR 模型的丹江口水库年径流随机模拟与预报

练继建, 孙萧仲, 马 超, 赵 明, 唐志波

(天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 基于水库历史年入库径流序列组分分析和识别, 采用线性趋势回归检验法、有序聚类法、方差谱法等方法, 推求出序列趋势项、跳跃项及周期项等确定性成分, 提出基于集合经验模态分解法 (EEMD 方法) 的水库年径流自回归随机模拟模型 (EEMD-AR), 并应用于丹江口水库的年径流随机模拟和预报中。通过 EEMD 分解, 解决了当丹江口水库历史年径流序列为非平稳序列时不能直接应用自回归模型 (AR) 进行随机模拟和预报的问题。模拟结果表明, EEMD-AR 模型能较好地模拟丹江口水库年径流序列并保持原历史序列的统计特性, 且模型预报精度符合要求。

**关键词:** 径流序列成分识别; EEMD-AR 模型; 径流随机模拟; 丹江口水库

中图分类号: TV124

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2017)05-0016-06

**Stochastic simulation and prediction of annual runoff in the Danjiangkou Reservoir based on EEMD-AR model** // LIAN Jijian, SUN Xiaozhong, MA Chao, ZHAO Ming, TANG Zhibo (*State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

**Abstract:** Based on the analysis and identification of the annual runoff sequence components of the Danjiangkou Reservoir, deterministic components such as the trend term, the jumping term and the periodic term were derived by using linear trend regression analysis method, sequential cluster method and variance spectrum method, etc. A stochastic auto-regression model of annual runoff based on Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD) was proposed (EEMD-AR) and it was applied to the stochastic simulation and prediction of the annual runoff in the Danjiangkou Reservoir. Through the EEMD decomposition, the problem that stochastic simulation and prediction by auto-regression (AR) model cannot be directly applied due to the non-stationary historical runoff sequence of the Danjiangkou Reservoir has been solved. The simulation results show that EEMD-AR model can simulate and predict the annual runoff sequence of the Danjiangkou Reservoir in a good forecast accuracy and it maintain the statistical characteristics of the original historical sequence.

**Key words:** Runoff sequence components identification; EEMD-AR model; runoff stochastic simulation; Danjiangkou Reservoir

随着计算机技术的发展, 水文随机模拟技术除最初的线性平稳随机模型之外, 人工神经网络<sup>[1]</sup>、小波分析<sup>[2]</sup>、混沌理论<sup>[3]</sup>、Copula 方法<sup>[4]</sup>亦被引入到随机模型中, 并取得了较好的模拟效果。相较近来广泛应用于径流模拟的分布式水文模型<sup>[5-6]</sup>, 传统的线性平稳随机模型由于构造简单, 在水文模拟中备受青睐, 但一般仅适用于平稳序列的随机模拟, 具有一定的局限性。集合经验模态分解法 (EEMD 方法) 因其对非平稳序列具有较强的处理能力, 被不少学者引入到径流随机模拟和预报领域<sup>[7-10]</sup>。章国勇等<sup>[7]</sup>通过建立基于 EEMD 方法的 LSSVM 组合预测模型和基于动态逼近搜索粒子群的 LSSVM 参数

寻优方法, 进行了江垭站的年径流预测和模型验证。Wang 等<sup>[9]</sup>将 EEMD 方法结合人工神经网络模型进行年径流序列的随机模拟和预报研究, 取得了较为理想的预报精度。

目前针对丹江口水库入库径流方面的研究主要集中于径流特征分析<sup>[11-12]</sup>和以月为时间尺度<sup>[13-15]</sup>的预报模型研究。然而, 随着丹江口水库大坝加高和南水北调工程通水, 针对丹江口水库月尺度入库径流模拟和预报方面的已有研究不能完全满足水库多年调节的径流输入要求。此外, 由于丹江口水库历史年径流序列为非平稳序列, 不能直接采用传统自回归模型进行随机模拟。基于此, 本文考虑水库

基金项目: 国家重点研发计划水资源高效利用专项 (2016YFC0402203)

作者简介: 练继建 (1965—), 男, 教授, 主要从事水利水电工程安全研究。E-mail: jilian@tju.edu.cn

通信作者: 马超 (1981—), 男, 副教授, 主要从事水文水资源研究。E-mail: mac\_tju@126.com

年径流年际间变化规律,在识别丹江口水库年入库径流序列成分的基础上,建立基于 EEMD-AR 的随机模拟和预报模型,开展丹江口水库非平稳年径流序列随机模拟和预报研究,以期对丹江口水库多年优化调度提供可靠径流数据。

## 1 研究思路和方法

### 1.1 研究思路

首先,对水库历史年径流序列进行成分分析和识别。其中,非周期成分中的趋势项采用线性趋势回归检验法、Spearman 秩次相关检验法和 Mann-Kendall 检验法;跳跃项采用有序聚类法、秩和检验法和 Mann-Kendall 检验法;周期成分采用方差线谱法和累积解释方差图法进行检验。其次,对剔除趋势、跳跃及周期等确定性成分后的随机成分进行 EEMD 分解,并对分解后的各阶固有模态函数 IMF (intrinsic mode functions) 序列进行 AR 模型建模,残差序列进行多项式模拟,形成基于 EEMD-AR 的丹江口水库年径流随机模拟模型和预报模型,研究技术路线见图 1。

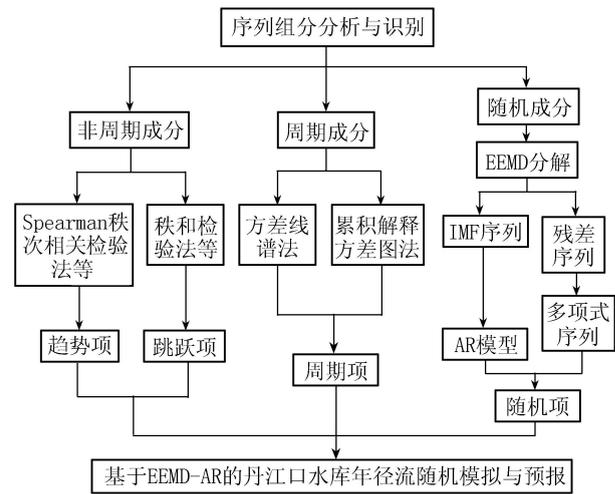


图 1 研究技术路线

### 1.2 研究方法

EEMD 方法是在传统经验模态分解法 (EMD 方法) 的基础上,通过添加有限的且非无穷小振幅的白噪声序列,从而改善传统经验模态分解法中的模态混叠<sup>[16]</sup>,其分解步骤如下:

**步骤 1** 进行第  $i$  次分解,将服从正态分布的、有限幅值的白噪声序列  $w_i(t)$  加入到原始序列  $x(t)$  中,从而得出新的合成序列  $y_i(t)$ ,其中  $w_i(t)$  的幅值可采用 Huang 等<sup>[17]</sup> 的建议设定为原始输入序列标准差的 20%:

$$y_i(t) = x(t) + w_i(t) \quad (1)$$

**步骤 2** 将新合成序列  $y_i(t)$  进行 EMD 分解并

得到对应的各 IMF 分量  $c_{ij}$  和残差  $r_i$ :

$$y_i(t) = \sum_{j=1}^n c_{ij} + r_i \quad (2)$$

式中: $c_{ij}$  为第  $i$  次 EMD 分解后的第  $j$  阶 IMF 分量; $n$  为第  $i$  次 EMD 分解对应的 IMF 分量数; $r_i$  为第  $i$  次 EMD 分解得到的残差。

**步骤 3** 重复前 2 个步骤  $N$  次 ( $N$  为总体平均次数),得到  $N$  组新的合成序列及相应的各 IMF 分量和残差。

**步骤 4** 将  $N$  组新合成序列分解后的各 IMF 分量取总体平均,得到最终的各 IMF 分量:

$$c'_j = \sum_{i=1}^N c_{ij} / N \quad (3)$$

式中: $c'_j$  为最终 EEMD 分解的第  $j$  阶 IMF 分量。

## 2 基于 EEMD-AR 的丹江口水库年径流随机模拟和预报模型

将 1956—2009 年丹江口水库年径流序列 (图 2) 分成 1956—2003 年和 2004—2009 年两组,采用 1956—2003 年径流序列建立基于 EEMD-AR 的径流随机模拟和预报模型,采用 2004—2009 年径流序列进行模型预报精度检验。

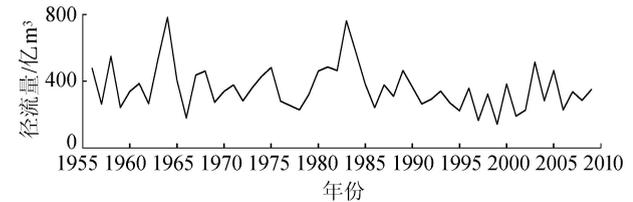


图 2 丹江口水库年径流序列 (1956—2009 年)

### 2.1 丹江口水库年径流序列成分分析

#### 2.1.1 非周期成分识别

**a. 趋势项诊断。**采用 Mann-Kendall 检验法、Spearman 秩次相关检验法及线性趋势回归检验法对丹江口水库年径流序列 (1956—2003) 进行趋势项检验,结果表明:Mann-Kendall 检验法下丹江口水库年径流序列标准统计变量  $Z < 0$  ( $Z = -1.73$ ) 且其绝对值小于临界值  $Z_{1-\alpha/2} = 1.96$ 。因此,丹江口水库年径流序列有一定的减小趋势,但是该趋势不显著。此外,Spearman 秩次相关检验法计算得统计量  $T = 1.75$ ,线性趋势回归检验法计算得到统计量  $d = -0.42$ ,其绝对值均小于自由度为  $n-2$  的  $t$  分布在 5% 显著水平下的临界值  $t_{1-\alpha/2, n-2} = 2.01$ ,表明 Spearman 秩次相关检验法及线性趋势回归检验法的检验结果与 Mann-Kendall 检验法一致 (标准统计变量  $Z$ 、统计量  $T$  和统计量  $d$  的计算可参考王文圣等的《随机水文学》<sup>[18]</sup>)。

**b. 变异项诊断。**采用有序聚类法、滑动秩和检

验法及 Mann-Kendall 检验法对丹江口水库年径流序列 (1956—2003) 进行跳跃诊断, 各检验结果见图 3~4。其中, 有序聚类法选取检验结果中统计量  $S$  值的最小值点作为最可能变异点; 滑动秩和检验法选取统计量  $U$  值超过临界值最多的点作为最可能变异点; Mann-Kendall 检验法则选取统计曲线  $UB$  和  $UF$  在临界区间内的交点作为最可能变异点。由图 3~4 可知, 3 种不同检验方法识别的变异结果一致, 丹江口水库年径流序列的最可能变异点为 1990 年。

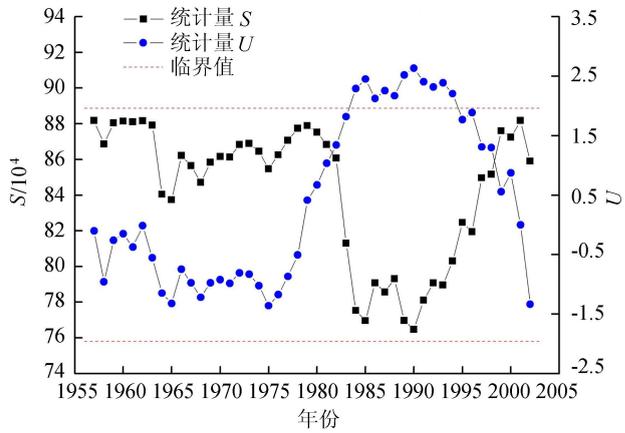


图 3 有序聚类法和滑动秩和检验法检验结果

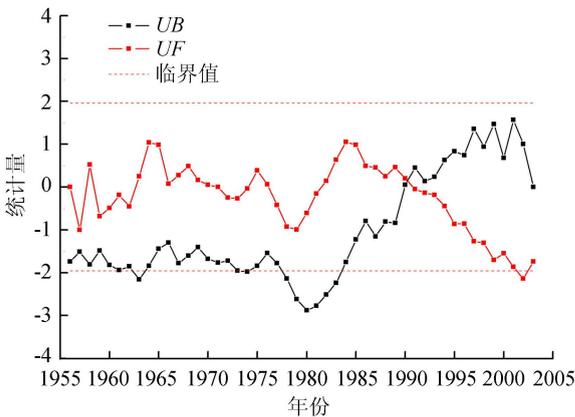


图 4 Mann-Kendall 检验法检验结果

根据变异项诊断结果, 对存在跳跃变异的序列进行预处理, 即将变异点之后的序列加上变异前后两序列均值之差, 从而剔除确定性成分中的跳跃项部分, 使序列具有一致性<sup>[18]</sup>。

### 2.1.2 周期成分识别

对经过预处理后的丹江口水库年径流序列 (1956—2003) 采用方差线谱法和累积解释方差图法进行周期分析, 见图 5 和图 6。图 5 中占明显优势的振幅  $A_j$  所对应频率  $w_j$  的倒数即为周期, 图 6 中转折点对应的谐波个数即为周期数 (横坐标标目  $m$  为谐波个数, 纵坐标标目  $B_m$  为累积解释方差)。确定序列周期后, 可根据式 (4) 确定序列的傅里叶系数 ( $a_0$ 、 $a_j$  和  $b_j$ ), 如表 1 所示, 并将其代入式 (5) 中

以确定序列中的周期成分。

$$\begin{cases} a_j = \frac{2}{n'} \sum_{i=1}^{n'} x_i \cos \omega_j t \\ b_j = \frac{2}{n'} \sum_{i=1}^{n'} x_i \sin \omega_j t \end{cases} \quad (4)$$

$$x_t = a_0 + \sum_{j=1}^l (a_j \cos \omega_j t + b_j \sin \omega_j t) \quad (5)$$

式中:  $a_0$ 、 $a_j$  和  $b_j$  均为序列傅里叶系数;  $w_j$  为频率;  $l$  为谐波总个数;  $n'$  为序列长度。

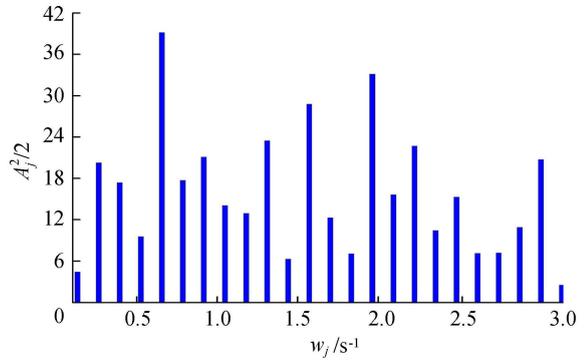


图 5 方差线谱

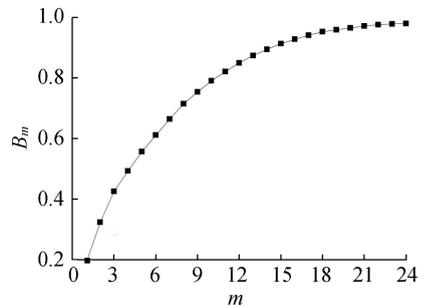


图 6 累积解释方差

表 1 剔除跳跃项后的序列周期计算结果及相应傅里叶系数

周期/a	$a_0$	$j$	$a_j$	$b_j$
9.6	394.70	5	68.95	-37.10
3.2	394.70	15	53.84	-38.74

## 2.2 丹江口水库年径流序列 EEMD 分解

根据确定性成分识别成果, 将原始丹江口水库年径流序列先进行跳跃项剔除预处理, 即将跳跃变异点后序列值加上前后序列均值之差; 在此基础上减去由式 (5) 得出的周期成分, 从而剔除周期项, 最终可得序列随机成分 (趋势项不显著, 不作处理)。对剔除确定性成分后的序列随机项进行 EEMD 分解和 ADF 平稳性检验, 结果如下:

**a. EEMD 分解结果。**采用 EEMD 法对处理后的丹江口水库年径流序列 (1956—2003) 随机项进行分解, 总体平均次数  $N$  取为 1000 次, 噪声标准差为原始序列标准差的 20%。经 EEMD 分解后的各阶固有模态函数 IMF1~IMF4 序列及残差如图 7 所示。

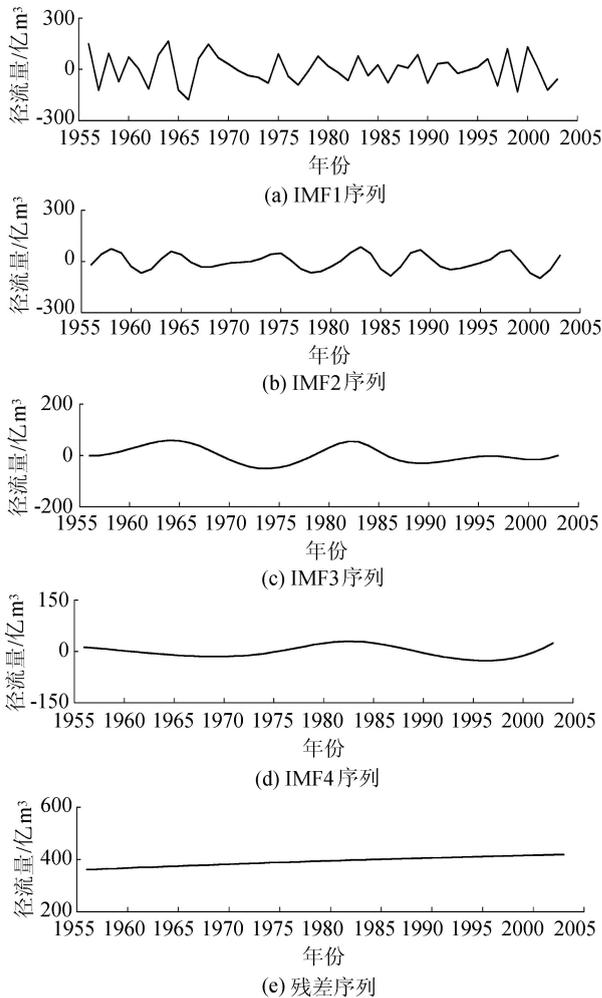


图7 丹江口水库年径流序列随机项 EEMD 分解结果

**b. ADF 平稳性检验。**将 IMF1 ~ IMF4 序列采用 Eviews 软件进行 ADF 单位根法检验,检验结果显示经成分剔除后的丹江口水库年径流序列的  $t$  值 (-0.42) 大于显著性水平为 5% 时对应的临界值 (-1.95), 且  $p$  值 (0.53) 大于 0.05, 因此其为非平稳序列, 不能直接采用 AR 模型进行模拟。而经 EEMD 分解后的 IMF1 ~ IMF4 序列的  $t$  值 (分别为 -7.06、-2.54、-3.26 和 -3.41) 均小于显著性水平为 5% 时对应的临界值, 且  $p$  值均小于 0.05, 即 IMF1 ~ IMF4 均为平稳序列, 可采用 AR 模型进行随机模拟。

### 2.3 基于 EEMD-AR 的丹江口水库年径流随机模拟

#### 2.3.1 残差序列的多项式模拟

采用多项式对 EEMD 分解后的残差序列进行模拟, 模拟结果如下:

$$R_t = 6 \times 10^{-5} t^3 - 0.0127 t^2 + 1.7212 t + 358.87 \quad (6)$$

式中:  $R_t$  为残差项模拟值;  $t$  为年份序号。

#### 2.3.2 IMF1 ~ IMF4 序列 AR 模型建立

在建立 AR 模型前, 对 IMF1 ~ IMF4 序列进行独

立性检验, 检验结果显示分解后的 IMF 序列均为相依序列, 可采用 AR 模型进行随机模拟。

**a. AR 模型阶数确定。**采用 AIC 准则对 IMF1 ~ IMF4 序列进行模型阶数选择, 并根据 AIC 值最小原则及相应的偏态系数  $C_s$ , 最终选定 IMF1 序列采用正态 AR(3) 模型, IMF2 序列采用偏态 AR(4) 模型, IMF3 序列采用偏态 AR(3) 模型, IMF4 序列采用偏态 AR(4) 模型进行随机模拟。

**b. IMF1 ~ IMF4 序列 AR 模型建立。**建立 IMF1 ~ IMF4 序列对应的 AR 模型, 其中 AR( $p$ ) 模型的数学表达式见式 (7)<sup>[14]</sup>, 各 IMF 序列 AR 模型参数见表 2, 表中  $\sigma$  为序列标准差。

$$x_t = \mu + \varphi_1(x_{t-1} - \mu) + \varphi_2(x_{t-2} - \mu) + \dots + \varphi_p(x_{t-p} - \mu) + \varepsilon_t \quad (7)$$

式中:  $\mu$  为序列均值;  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p$  为自回归系数;  $\varepsilon_t$  为纯随机序列。

表2 IMF1 ~ IMF4 序列 AR 模型参数

序列	$\mu/亿 m^3$	$\sigma/亿 m^3$	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$\varphi_4$	模型
IMF1	1.26	84.38	-0.43	-0.38	-0.33		AR(3)
IMF2	-0.27	48.98	0.55	-0.44	-0.23	-0.14	AR(4)
IMF3	1.90	31.54	2.31	-1.86	0.49		AR(3)
IMF4	-0.77	16.79	1.10	-0.029	-0.019	-0.20	AR(4)

**c. 最终模拟序列生成。**将各阶 IMF1 ~ IMF4 序列的 AR 模型采用 Monte Carlo 法进行随机模拟, 并将模拟结果与残差项模拟结果求和, 并在此基础上还原原序列中的确定性成分, 即可得到大量丹江口水库年径流随机模拟序列, 如式 (8) 和式 (9) 所示:

$$x = x_{qd} + \sum_{i=1}^4 y_{IMFi} + R \quad (8)$$

$$\begin{cases} y_{IMF1} = 1.26 - 0.43(x_{t-1} - 1.26) - 0.38 \cdot (x_{t-2} - 1.26) - 0.33(x_{t-3} - 1.26) + \varepsilon_t \\ y_{IMF2} = -0.27 + 0.55(x_{t-1} + 0.27) - 0.44(x_{t-2} + 0.27) - 0.23(x_{t-3} + 0.27) - 0.14(x_{t-4} + 0.27) + \varepsilon_t \\ y_{IMF3} = 1.90 + 2.31(x_{t-1} - 1.90) - 1.86 \cdot (x_{t-2} - 1.90) - 0.49(x_{t-3} - 1.90) + \varepsilon_t \\ y_{IMF4} = -0.77 + 1.1(x_{t-1} + 0.77) - 0.029 \cdot (x_{t-2} + 0.77) - 0.019(x_{t-3} + 0.77) - 0.20(x_{t-4} + 0.77) + \varepsilon_t \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $x$  为最终模拟序列;  $x_{qd}$  为确定性成分;  $y_{IMFi}$  为第  $i$  阶 IMF 模拟序列;  $R$  为残差模拟序列。

#### 2.3.3 模拟结果检验

表 3 为 100 组模拟序列的统计参数均值与丹江口水库实测年径流序列 (1956—2003 年) 均值与统

计参数比较。由表3可知,对于均值 $\bar{x}$ 、标准差 $\sigma$ 、变差系数 $C_v$ 、偏态系数 $C_s$ 及一阶自相关系数 $r_1$ 等,模拟序列与实测序列的绝对误差和相对误差均较小,其中相对误差均不超过9%,序列均值 $\bar{x}$ 的相对误差仅-0.18%。因此,模拟序列能较好地保持原序列的统计特性,所提出的基于EEMD-AR的丹江口水库年径流随机模拟模型能较好地模拟丹江口水库年径流序列。

表3 模拟结果检验

项目	$\bar{x}/\text{亿 m}^3$	$\sigma/\text{亿 m}^3$	$C_v$	$C_s$	$r_1$
实测序列	364.70	114.62	0.29	0.66	-0.045
模拟序列	364.02	112.68	0.29	0.64	-0.049
绝对误差	-0.68	-1.94	0	-0.02	0.004

## 2.4 基于EEMD-AR的丹江口水库年径流预报

基于EEMD-AR的丹江口水库年径流预报模型与随机模拟模型表达形式大致相同,预报值为确定性成分(跳跃成分、周期成分)、IMF1~IMF4序列和残差 $R$ 预报值的叠加之和,唯一区别是IMF1~IMF4序列的AR预报模型不包含随机项 $\varepsilon_t$ 。采取预留的2004—2009年丹江口水库实测年径流来检验预报模型。丹江口水库2004—2009年的年径流预报结果如表4所示,预报精度均满足GB/T 22482—2008《水文情报预报规范》的精度要求,平均误差为9.54%,最大误差不超过18%。预报结果表明基于EEMD-AR的丹江口水库年径流预报模型可较好地预报未来年径流情况。

表4 年径流量预报结果检验

年份	实测值/亿 m <sup>3</sup>	预测值/亿 m <sup>3</sup>	绝对误差/亿 m <sup>3</sup>	相对误差/%
2004	283.51	288.13	4.62	1.63
2005	463.58	405.21	-58.37	12.59
2006	228.03	193.18	-34.85	15.28
2007	337.16	278.03	-59.13	17.54
2008	284.57	299.23	14.66	5.15
2009	348.92	366.70	17.78	5.10

## 3 结论

本文基于历史年径流序列进行序列成分识别,开展基于EEMD-AR的丹江口水库年径流随机模拟和预报。丹江口水库历史年径流序列(1956—2003)成分识别结果显示:①丹江口水库年径流有一定的减小趋势,但不显著;②水库年径流序列跳跃显著且最可能变异点为1990年;③水库年径流序列存在3.2a和9.6a的周期变化。

剔除趋势、跳跃及周期等确定性成分后的随机序列通过EEMD分解,较好地解决了非平稳序列不能直接进行AR模型随机模拟的问题。通过对EEMD分解后的IMF1~IMF4序列进行AR模型建

模以及残差序列进行多项式拟合,建立基于EEMD-AR的丹江口水库年径流随机模拟模型和预报模型。结果表明,模拟序列各统计指标相对误差绝对值最大值不超过9%,能较好地保持原序列的统计特性;预报序列平均误差9.54%,最大误差不超过18%。因此,所提出的模型能较好地适应丹江口水库年入库径流序列的模拟和预报。

## 参考文献:

- [1] 阎俊爱,钟登华. 基于遗传算法的神经网络优化预测模型及其在年径流预报中的应用[J]. 水利水电技术, 2003, 34(6): 1-4. (YAN Junai, ZHONG Denghua. Forecasting method of neural network optimization based on genetic algorithm and its application in annual runoff forecast [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2003, 34(6): 1-4. (in Chinese))
- [2] 杜富慧. 基于小波分析-模糊神经网络的径流预报模型[J]. 水利水电技术, 2013, 44(2): 5-8. (DU Fuli. Wavelet analysis-fuzzy neural network based runoff forecasting mode [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44(2): 5-8. (in Chinese))
- [3] 计亚丽. 基于混沌理论的呼伦湖流域降雨径流时间序列预测分析[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2012.
- [4] 周研来,梅亚东,张代青,等. 一种新的径流过程随机模拟方法[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(3): 9-12. (ZHOU Yanlai, MEI Yadong, ZHANG Daiqing, et al. A new stochastic method for streamflow hydrographs [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(3): 9-12. (in Chinese))
- [5] 刘柏君,权锦,杨超慧,等. 基于SWAT模型的青海省主要流域径流模拟[J]. 水资源保护, 2016, 32(6): 39-44. (LIU Bojun, QUAN Jin, YANG Chaohui, et al. Simulation of runoff of major basins in Qinghai Province based on SWAT model [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(6): 39-44. (in Chinese))
- [6] 李致家,屈晨阳,黄鹏年,等. CASC2D模型与GSSHA模型在栾川流域的径流模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(1): 1-6. (LI Zhijia, QU Chenyang, HUANG Pengnian, et al. Simulation of runoff in Luanchuan Basin using CASC2D and GSSHA models [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(1): 1-6. (in Chinese))
- [7] 章国勇,伍永刚,杨林明,等. 基于参数优化的EEMD-LSSVM年径流组合预测模型[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(6): 1-5. (ZHANG Guoyong, WU Yonggang, YANG Linming, et al. EEMD-LSSVM model of combined forecast of annual runoff based on parameter optimization [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2013, 24(6): 1-5. (in Chinese))
- [8] ZHAO X, CHEN X. Auto regressive and ensemble

- empirical mode decomposition hybrid model for annual runoff forecasting [J]. *Water Resources Management*, 2015, 29(8): 2913-2926.
- [9] WANG W, CHAU K, QIU L, et al. Improving forecasting accuracy of medium and long-term runoff using artificial neural network based on EEMD decomposition [J]. *Environmental Research*, 2015, 139: 46-54.
- [10] 马超, 姜璇. 基于 EEMD-ANN 的水库年径流预测[J]. *水电能源科学*, 2016, 34(8): 32-35. (MA Chao, JIANG Xuan. Annual reservoir runoff forecasting using ensemble empirical mode decomposition and artificial neuron network[J]. *Water Resources and Power*, 2016, 34(8): 32-35. (in Chinese))
- [11] 郑晓东, 鲁帆, 严登华, 等. 基于小波分析的丹江口水库水文年度入库径流变化特征[J]. *水科学与工程学报*, 2011(2): 1-3. (ZHENG Xiaodong, LU Fan, YAN Denghua, et al. Variation characteristics of the Danjiangkou Reservoir hydrological annual runoff based on the morlet wavelet [J]. *Water Sciences and Engineering Technology*, 2011(2): 1-3. (in Chinese))
- [12] 李响, 邹宁, 吕孙云. 丹江口水库天然入库径流演变规律研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(2): 206-210. (LI Xiang, ZOU Ning, LÜ Sunyun. Variation of natural inflow runoff in the Danjiangkou Reservoir [J]. *South-to-North Transfers and Water Science & Technology*, 2015, 13(2): 206-210. (in Chinese))
- [13] 冉笃奎, 李敏, 武晟, 等. 丹江口水库中长期径流量的多模型预报结果分析及综合研究[J]. *水利学报*, 2010, 41(9): 1069-1073. (RAN Dukui, LI Min, WU sheng, et al. Research on multi-model forecasts in mid-long term runoff in Danjiangkou Reservoir [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(9): 1069-1073. (in Chinese))
- [14] 王元超. 丹江口水库中长期径流预报及水质水量联合模拟技术[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2015.
- [15] 冯小冲, 王银堂, 刘勇, 等. 基于物理统计方法的丹江口水库月入库径流预报[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(3): 242-247. (FENG Xiaochong, WANG Yintang, LIU Yong, et al. Monthly runoff forecast for Danjiangkou Reservoir based on physical statistical methods [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2011, 39(3): 242-247. (in Chinese))
- [16] WU Z, HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method[J]. *Advance in Adaptive Data Analysis*, 2009, 1(1): 1-41.
- [17] 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]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 1998, 454: 903-995.
- [18] 王文圣, 丁晶, 金菊良, 等. 随机水文学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 41, 165-167. (收稿日期: 2016-10-19 编辑: 骆超)
- 
- (上接第 15 页)
- [40] CUI Y, WOOSTER J K, BRAUDRICK C A, et al. Lessons learned from sediment transport model predictions and long-term postremoval monitoring: Marmot Dam removal project on the Sandy River in Oregon [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 140(9): 04014044.
- [41] ORR C H, STANLEY E H. Vegetation development and restoration potential of drained reservoirs following dam removal in Wisconsin [J]. *River Research and Applications*, 2006, 22: 281-295.
- [42] 杨国清, 刘耀林, 吴志峰. 基于 CA-Markov 模型的土地利用格局变化研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2007, 32(5): 414-418. (YANG Guoqing, LIU Yaolin, WU Zhifeng. Analysis and dimulation of land-use temporal and spatial pattern based on CA-Markov model [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan*, 2007, 32(5): 414-418. (in Chinese))
- [43] 赵进勇, 董哲仁, 孙东亚. 河流生物栖息地评估研究进展[J]. *科技导报*, 2008, 26(17): 82-88. (ZHAO Jinyong, DONG Zheren, SUN Dongya. State of the art in the field of river habitat assessment [J]. *Science & Technology Review*, 2008, 26(17): 82-88. (in Chinese))
- [44] BURROUGHS B A, HAYES D B, KLOMP K D, et al. The effects of the Stronach Dam removal on fish in the Pine River, Manistee County, Michigan [J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2010, 139(5): 1595-1613.
- [45] HARO A, CHELMINSKY M, DUDLEY R. Computational fluid dynamics-habitat suitability index (CFD-HSI) modeling as an exploratory tool for assessing passability of riverine migratory challenge zones for fish [J]. *River Research and Applications*, 2015, 31(5): 526-537.
- [46] TOMSIC C A, GRANATA T C, MURPHY R P, et al. Using a coupled eco-hydrodynamic model to predict habitat for target species following dam removal [J]. *Ecological Engineering*, 2007, 30(3): 215-30.
- [47] CASPER A F. Ecological responses of zoobenthos to dam removal on the Kennebec River, Maine, USA [J]. *Archiv Fur Hydrobiologie*, 2006, 16(4): 541-555.
- [48] MARZIN A, ARCHAIMBAULT V, BELLARD J, et al. Ecological assessment of running waters: do macrophytes, macroinvertebrates, diatoms and fish show similar responses to human pressures? [J]. *Ecological Indicator*, 2012, 23(4): 56-65. (收稿日期: 2016-11-18 编辑: 熊水斌)