

[文章编号] 1009-2846 (2016) 10-0052-05

基于改进的贝叶斯算法的河流洪水 预报实时校正研究

宋浩然

(辽宁省朝阳水文局, 辽宁 朝阳 122000)

[摘要] 改进的贝叶斯方法可设置敏感函数对变量进行敏感性分析, 从而提高模型计算效率和计算精度, 改变传统贝叶斯方法计算效率慢, 收敛精度低的局限, 为此本文引入改进的贝叶斯方法, 将该方法用于辽宁某河流洪水预报实时校正中, 结合实测数据对比分析改进后的贝叶斯方法对河流洪水实时校正精度的影响, 研究结果表明: 相比于传统贝叶斯模型, 改进的贝叶斯方法计算效率得到提高, 模型实时校正的洪量和洪峰预测相对误差分别缩减 5.27% 和 4.69%, 洪水预测合格率提高 6.9%。研究成果对于河流洪水预报实时校正方法具有参考价值。

[关键词] 改进的贝叶斯方法; 敏感函数; 洪水预报实时校正; 辽宁河流

[中图分类号] P338; TV122

[文献标识码] B

DOI:10.15920/j.cnki.22-1179/tv.2016.10.017

度分析提供参考价值。

1 引言

河流洪水预报的准确性对于区域防汛预测预警十分重要, 而在河流洪水预报时, 较为重要的一项技术为洪水预报实时校正技术, 通过一定的计算方法对洪水预报值进行实时校正, 从而提高洪水预报的精度, 国内许多学者对洪水预报实时校正方法进行相关研究, 并取得一定的研究成果^[1-7], 在这些方法中, 贝叶斯方法由于可以考虑水文过程中的时变参数, 在洪水实时校正中运用较为广泛, 但是传统的贝叶斯方法由于考虑参数较多, 存在计算效率低, 计算收敛精度不高的局限, 因而有学者对传统的贝叶斯方法进行改进, 引入敏感函数, 对贝叶斯方法中的参数进行敏感分析, 进行优选计算, 提高模型计算效率和收敛精度, 当前, 改进的贝叶斯方法在水资源领域中得到具体应用^[8-11], 但是在河流洪水预报实时校正中运用还较少, 为此, 本文引入改进的贝叶斯方法, 并以辽宁某河流为研究实例, 结合该河流水文监测数据, 分析改进的贝叶斯方法对河流洪水预报实时校正精度的影响, 研究成果对于河流洪水预报实时校正的精

2 改进的贝叶斯方法计算原理

贝叶斯方法采用不确定性模型的原理进行变量预测, 该模型以变量后验概率为变量的权重系数, 对模型所有的变量进行加权计算, 从而确定模型计算的最佳计算方案。在模型设计中, 模型考虑变量观测数据系列, 各个变量的计算方程为:

$$y = x\beta + \varepsilon \quad (1)$$

方程(1)中, y 表示为变量计算矩阵的行向量, x 表示为模型计算的变量系数。将 X 设置为不同模型计算变量的, 设置向量的后验概率密度计算公式为:

$$P(\theta | y) = \sum_{k=1}^K P(M_k | y) P(\theta | M_k, y) \quad (2)$$

方程(2)中, K 表示贝叶斯模型计算的变量的个数, 变量 θ 表示模型计算的后检验概率密度的加权平均值, 对应的加权平均值的概率密度值为:

$$P(M_i | y) = \frac{P(y | M_i) P(M_i)}{\sum_{i=1}^K P(y | M_i) P(M_i)} \quad (3)$$

[收稿日期] 2016-06-12

[作者简介] 宋浩然(1983-), 男, 辽宁建平人, 工程师, 现从事水文测验、水资源评价工作。

©1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

方程(3) $P(M_i|y)$ 表示为模型计算后验概率密度函数加权值的边界极大似然函数, 似然函数计算的公式为:

$$P(y|M_i)=\int P(y|M_i,\sigma^2,\beta_i)P(\sigma^2,\beta_i|M_i)d\beta_id\sigma^2 \tag{4}$$

方程(4)中, $P(\sigma^2,\beta_i|M_i)$ 表示为模型计算后验概率分布值, $P(M_i)$ 表示为模型计算的前期概率分布密度函数值。结合公式(1)和公式(3)可以计算模型计算变量 β 的检验均值以及检验方差值, 计算公式如下:

$$E(\beta|y)=\sum_{i=1}^KE(\beta|y,M_i)P(M_i|y) \tag{5}$$

$$\text{Var}(\beta|y)=\sum_{i=1}^K\text{Var}(\beta|y,M_i)P(M_i|y)+\sum_{i=1}^KE(\beta|y,M_i)P(M_i|y)-E(\beta|y)^2 \tag{6}$$

方程(5)和(6)中均采用模型回归变量计算值进行估计计算。

在模型需要对前期样本数据系列进行前期检验, 前期检验计算公式为:

$$P(M_i)=\prod_{j\in M_i}(w_i)\prod_{j\notin M_i}(1-w_i) \tag{7}$$

在方程(7)中, $P(M_i)$ 表示模型前期概率先期检验概率密度函数值, j 表示模型计算的样本变量个数。

在传统贝叶斯模型计算的基础上, 本文引入参数自动优选算法对模型的变量进行优选计算, 参数自动优选算法的计算方程为:

$$X(j)=Y^T(j)^{(j-1)} \tag{8}$$

在方程(8)中, $X(j)$ 表示为预报变量, 在本文中即为预报的洪水因子, 同时在模型中增加增量因子进行计算, 计算公式为:

$$G(j)=\frac{P(j-1)Y(j)}{\lambda(j)+Y^T(j)P(j-1)Y(j)} \tag{9}$$

其中在方程(9)中, $\lambda(j)$ 为模型可变计算因子, 计算公式为:

$$\lambda(j)=1-\frac{X(j)-Y^T(j)(j-1)^2}{1+Y^T(j)P(j)Y(j)R} \tag{10}$$

其中在方程(10)中 $P(j)$ 表示为模型计算协方差矩阵值, 计算公式为:

$$P(j)=\frac{1-G(j)Y^T(j)P(j-1)}{\lambda(j)} \tag{11}$$

其中, 在模型中 $X(j)$ 表示为模型在第 j 时刻计算的估算值, $Y(j)$ 表示为模型计算的输入变量, R 表示为模型变量优选调整的参数。

此外, 在进行模型参数优选的基础上, 本文还引入不敏感函数对模型的参数进行敏感性分析, 敏感分析函数

$$L(f(x),z,\varepsilon)=\begin{cases} 0 & |z-f(x)|\leq\varepsilon \\ |z-f(x)-\varepsilon| & 0 \end{cases} \tag{12}$$

方程(12)中, $f(x)$ 表示模型敏感函数计算的预

改进的贝叶斯方法在河流洪水实时校正的精度分析								
洪号	实测径流深 (mm)	计算径流深 (mm)	径流相对误差 (%)	实测洪峰流量 (m³/s)	计算洪峰流量 (m³/s)	洪峰误差 (%)	确定性系数	峰现时差 (h)
20000602	39.4	41.8	-6.08	2890	2946	-1.94	0.771	-1
20000819	33.3	34.3	-3.11	2825	2764	2.17	0.804	0
20010625	21.1	18.7	11.57	2370	2646	-11.65	0.751	1
20020815	25.6	22.3	12.84	2575	2701	-4.89	0.762	-2
20030501	11.3	11.8	-4.34	679	651	4.12	0.767	1
20030712	28.7	26.2	8.78	2653	2686	-1.27	0.773	0
20040504	3.8	3.4	12.40	270	250	7.21	0.75	-1
20040922	28.4	28.5	-0.55	3208	3142	2.06	0.752	0
20050722	13.4	12.0	10.27	2009	2125	-5.78	0.757	-1
20060623	2.6	2.8	-7.36	355	357	-0.55	0.662	3
20070815	23.9	24.4	-2.25	2235	2260	-1.12	0.769	0
20080823	30.9	27.6	10.84	3186	3118	2.12	0.774	1
20090716	37.4	37.4	-0.08	3073	2932	4.61	0.764	0
20100520	40.8	41.9	-2.78	3642	3570	1.97	0.781	0
20100920	3.1	2.7	14.49	228	207	8.98	0.675	1

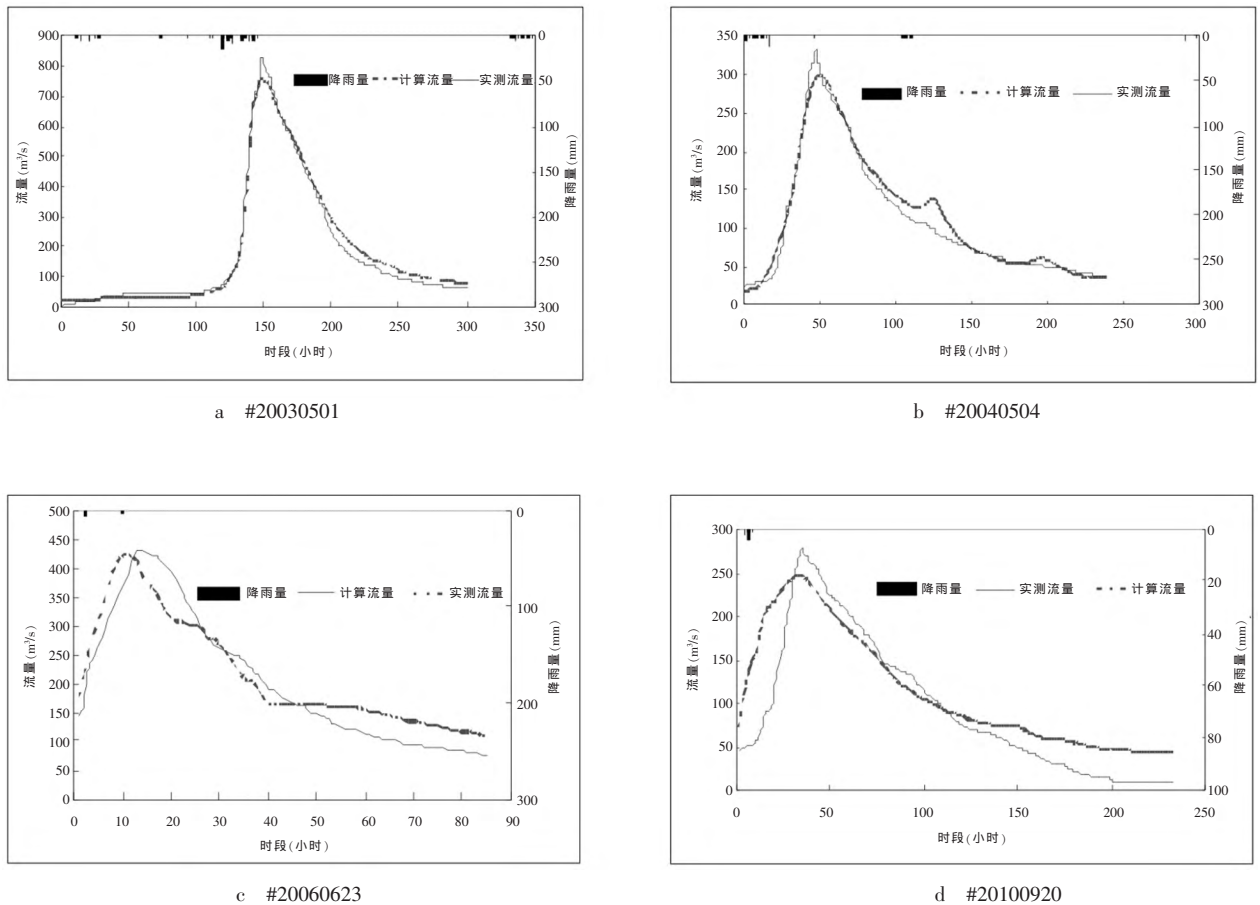


图 1 改进的贝叶斯模型实时洪水预测结果和实测洪水对比分析图

测值, Z 表示为实测数据样本。

3 改进的贝叶斯方法在河流洪水预报实时校正的应用研究

3.1 实时洪水校正精度分析

结合改进的贝叶斯模型,对辽宁某河流 15 场洪水数据进行洪水校正,并结合区域 15 场洪水对比分析改进的贝叶斯模型在实时洪水预报校正中精度,精度

分析结果见表 1 和图 1。

表 1 为应用改进的贝叶斯模型实时校正洪水和实测洪水之间的精度分析,从表 1 中可以看出,改进的贝叶斯实时洪水校正方案下洪水预测值和实测洪水之间的精度较高,模拟的 15 场洪水径流深和实测径流深之间的相对误差都较小,15 场预测洪水场次径流深相对误差在 15% 以下,从校正的洪峰流量指标也可以看出,改进的贝叶斯模型预测的洪峰流量和实测洪峰流量较为吻合,两者之间的误差值在 10% 以下,在场次洪水径流深和洪峰流量两者之间相对误差这一指标可以看出,

改进的贝叶斯方法可以对洪水进行较好的实时校正。从场次洪水过程确定系数也可看出,15 场洪水经过改进贝叶斯方法进行实时校正后,场次洪水过程的确定性系数也都在 0.7 以上,但是确定性系数不高,这主要是因为改进的贝叶斯模型实时洪水校正方案只是针对洪峰流量和洪峰径流总量进行校正,而这两个指标也是区域防洪预警最为重要的两个指标,因此改进的贝叶斯模型实时洪水校正洪峰和洪量上的校正效果要好于场次洪水过程的校正。其次从洪峰出现时间误差来看,改进的贝叶斯方法实时校正结果也较好,校正后的洪峰出现时间和实测洪峰出现时间误差均在 3 小时以内,具有较高的预测精度。图 2 为选取的 4 场典型洪水过程,从图中可以看出,改进的贝叶斯模型对实时洪水校正后模型结果和实测的洪水过程较为吻合。综上结果表明改进的贝叶斯模型对实时洪水精度校正有较好的适用性和精度。

3.2 不同实时校正方案下的精度对比分析

在改进的贝叶斯模型的基础上,结合区域 15 场实测洪水,对比分析改进的贝叶斯方法、传统贝

表 2 不同洪水校正方案对洪水预报精度的影响

实时校正方案	洪量预报相对误差 (%)	洪峰预报误差 (%)	确定性系数	洪水预报合格率 (%)
改进的贝叶斯模型	7.18%	4.03%	0.754	91.2%
传统的贝叶斯模型	12.45%	8.72%	0.651	84.3%
无校正方案	15.36%	9.42%	0.518	75.1%

叶斯方法两种实时洪水校正方案以及无洪水校正方案对洪水预报精度的影响分析，分析结果见表 2。

表 2 为不同校正方案对实时洪水校正精度的影响,从对比结果可以看出,在洪量预报相对误差上,改进的贝叶斯模型的洪量预报相对误差为 7.18%,而传统的贝叶斯模型的洪量预报相对误差为 12.45%,可以看出,在洪量预报相对误差上,相比于传统的贝叶斯模型,改进的贝叶斯模型洪量预报相对误差减少 5.27%,而没有采用校正方案的模型在洪量预报相对误差值达到 15.36%,均大于改进的贝叶斯模型和传统的贝叶斯模型,而在洪峰预报相对误差上,也可看出,相比于传统的贝叶斯模型,改进的贝叶斯模型洪峰预报相对误差减少 4.69%,而没有采用校正方案的模型在洪量预报相对误差值达到 9.42%,均大于改进的贝叶斯模型和传统的贝叶斯模型,在洪水预报合格率上,相比于传统的贝叶斯模型,改进的贝叶斯模型洪水预报合格率提高 6.9%,而没有采用校正方案的模型在洪量预报相对误差值达到 75.1%,均低于改进的贝叶斯模型和传统的贝叶斯模型。图 2 为不同实时校正方案下的洪水预报精度对比,从图中也可以明显看出改进的贝叶斯模型在洪量预测误差、洪峰预测误差以及洪水合格率都要好于传统贝叶斯模型和无校正方案的预测精度。

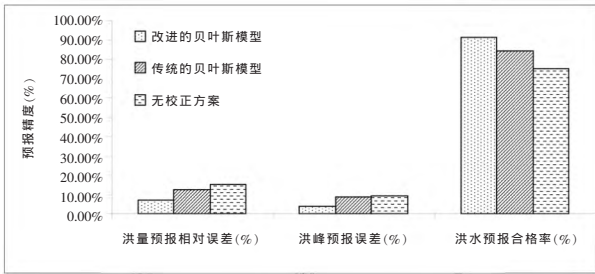


图 2 不同实时洪水校正方案下的精度对比图

4 结论

本文引入改进的贝叶斯模型,并结合改进的贝叶斯模型对河流洪水预测进行实时校正,并结合实测数据分析改进的贝叶斯模型在河流洪水预测实时校正的精度,研究取得以下结论:

- 1)改进的贝叶斯模型在洪量和洪峰实时校正精度上好于洪水过程的校正精度,针对场次洪量和洪峰具有较好的校正精度;
- 2)相比于传统贝叶斯模型,改进的贝叶斯模型在洪量预测误差、洪峰预测误差以及场地洪水合格率上都有明显改善。□

参考文献:

[1]李福仲,刘力真.郭家村水库洪水预报调度系统研究[J].水利技术监督,2008,02:46-48.

[2]王长海.观音阁水库洪水预报模型探析 [J]. 水利规划与设计, 2007,03:8-10.

[3]王槐南,邢向峰,陈太芳.广东省暴雨径流查算图表在宁远河水文预报中的运用[J].水利规划与设计,2012,05:24-26.

[4]李菁,王船海,张萍霞,王炎,柳园园,庄丽金.基于节点传播的河网水动力学模型的实时校正研究[J].水动力学研究与进展A辑, 2015,01:75-82.

[5]韩通,李致家,刘开磊,黄鹏年.山区小流域洪水预报实时校正研究[J].河海大学学报(自然科学版),2015,03:208-214.

[6]陈攀,姜志群.AR模型在宝珠寺水库实时洪水预报校正中的应用 [J].水利信息化,2014,03:41-44.

[8]顾令宇.沂沭泗流域洪水预报调度模型研究[D].河海大学,2004.

[9]韩京成.不确定性水文模拟与流域管理模型研究[D].华北电力大学,2014.

[10]钱云.非均衡数据分类算法若干应用研究[D].吉林大学,2014.

[11]彭兆亮.统计模型与动力多模式相结合的中国季度降水预测及应用研究[D].大连理工大学,2014.

Real-time correction study of River Flood Forecasting based on
Improved Bayesian Algorithm

Song Haoran

Abstract: Improved Bayesian method sets a sensitive function of the variable sensitivity analysis model to improve computational efficiency and accuracy, change the limitations of the traditional Bayesian method, such as slow calculation and low convergence precision. Therefore, the paper introduces improved Bayesian methods, and apply it to the real-time correction of a river flood forecasting to analyze its impact on correction accuracy. The findings show that: compared with traditional Bayeux Adams model, the calculation efficiency of the improved Bayesian method improved, the relative error of the forecasting on flood volume and peak reduced by 5.27% and 4.69% respectively, and forecasting pass rate increased by 6.9%. The research results have reference value for flood forecasting real-time correction method.

Keywords: Improved Bayesian method; sensitivity function; real-time flood forecasting correction; Inner Mongolia rivers

(上接第 40 页)

表 3 大连市主要河流水水平年限制排污
总量控制分解方案

序号	河流	化学需氧量(吨/年)		氨氮(吨/年)	
		2020 年	2030 年	2020 年	2030 年
1	湖里河	73.9	73.9	2.6	2.6
2	英那河	597.2	597.2	4.8	4.8
3	庄河	589.3	589.3	23.5	23.5
4	碧流河	772.6	772.6	25.4	25.4
5	大沙河	1757.2	1511.4	157.7	87.6
6	登沙河	344.9	265.5	9.7	9.7
7	复州河	587.3	473.7	21.4	21.4
8	浮渡河	29.5	29.5	0.37	0.37
合计		4751.9	4313.1	245.5	175.4

表 4 大连市各水功能区水平年限制
排污总量控制分解方案

水功能区类型	化学需氧量(吨/年)		氨氮(吨/年)	
	2020 年	2030 年	2020 年	2030 年
保护区	458.4	458.4	5.7	5.7
缓冲区	1149.7	1149.7	139.9	92.2
饮用水源区	2119.3	1873.4	59.8	37.4
农业用水区	1006.4	813.4	37.8	37.8
工业用水区	49.4	49.4	2.5	2.5
景观娱乐用水区	22.8	22.8	1.2	1.2
排污控制区	25.2	25.2	1.0	1.0
合计	4831.1	4392.3	247.8	177.7

低。氨氮限制排污总量缓冲区最高,饮用水源区次之,排污控制区最低。分解方案详见表 4。

5 结语

根据水功能区水质现状、水功能区达标状况、水功能区达标目标要求及限制排污总量控制方案,2020 年重点治理区域涉及 8 个行政区中的 18 条河流 24 个水功能区,主要为大连市中、小河流所在功能区。2030 年重点治理区域涉及庄河市庄河流域庄河市郊农业用水区和瓦房店市复州河流域复州河蔡房身饮用水源区、农业用水区。重点治理水功能区中涉及最多的行政区为普兰店市,瓦房店市次之。涉及最多的河流为大沙河,复州河次之,各中小河流治理任务也相当重。上述区域的达标情况决定了大连市水功能区水质目标是否能够实现。□

参考文献:

[1] 訾香梅. 陕西渭河流域水功能区水域纳污能力分析[J]. 水利水电快报, 2008, 29(28).
[2] 吴东芳, 魏民等. 松花江流域纳污能力核定及实例分析[J]. 水利发展研究, 2008, 9(15).
[3] 李原园. 全国水资源综合规划编制总体思路与技术路线. 中国水利, 2011.