

# 模糊加权优化适线法的改进及统计特征分析

王文川<sup>1</sup>, 雷冠军<sup>2</sup>, 刘 宽<sup>1</sup>

(1.华北水利水电大学水利学院,河南 郑州 450045;2.中国水利水电科学研究院水资源研究所,北京 100038)

**摘 要:**水文序列长度有限,频率曲线参数估计存在抽样误差,采用加权适线法能够很好地减小误差。模糊加权优化适线法的诺模图长度有限,而且隶属度函数不是以样本无穷大为前提,对模糊加权优化适线法改进,提出半降正态分布的隶属度函数,运用大样本统计试验方法延长诺模图。以理想数据、蒙特卡洛随机数和实测序列对改进的方法检验,以无偏性和有效性为评价指标,运用评分法和百分率法对统计结果分析评价。结果表明改进的模糊加权优化适线法的统计特性好,适线精度高,能够促进模糊加权优化适线法在实际工程中的推广应用。

**关键词:**模糊加权;诺模图  $B$  值;隶属度函数;统计分析

中图分类号:P333.9

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2017)05-0001-07

水文频率计算成果直接关系到水利工程建设规模<sup>[1]</sup>,我国《水利水电工程设计洪水计算规范》<sup>[2]</sup>中规定,我国洪水的频率曲线线型一般采用  $P$ - 分布,对于特殊情况,经分析论证后可采用其他线型<sup>[3-4]</sup>。水文序列长度有限,采用拟合的方法展延,目估适线法存在较大的主观性,优化适线法逐渐被广泛应用<sup>[5]</sup>。在优化适线中,由于适线目的、点据精度和样本容量的不同,将样本点作为等权导致适线结果存在较大的抽样误差。水文工作者对加权适线法做了深入的研究。谢平<sup>[6]</sup>认为影响点据权重的是资料点据的精度、适线的目的和图解适线的结果,通过数值试验分析求得以权重级别为参数的经验公式,确定点据的权重,权重级别的确定主观性较强。邱林<sup>[7]</sup>、谢崇宝<sup>[8]</sup>、邓育仁<sup>[9]</sup>先后独立对模糊加权优化适线法进行了研究,分别采用隶属度函数确定点据权重,进行加权适线。邓育仁<sup>[9]</sup>首先提出将目估适线的不确定性程度运用隶属度函数衡量的思想,观测资料的误差大小采用梯形法,对设计值、设计频率采用正态分布的方法建立隶属度函数,采用统计试验的方法对模糊加权优化适线法进行了研究,然

而隶属度函数参数的估计精度取决于水文工作者的经验,难以有效获得。邱林<sup>[7]</sup>假定适线中存在一条理想的拟合最优的频率曲线,基于经验点据偏离最优曲线的波动程度服从正态分布的思想建立隶属度函数,运用理想数据和工程实际数据进行检验。谢崇宝<sup>[8]</sup>采用次序统计量的思想推导出隶属度函数的形式,运用理想数据检验。

邱林<sup>[7]</sup>、谢崇宝<sup>[8]</sup>的方法有两点值得进一步探讨,一是由于诺模图长度限制,只能计算频率 0.01%、0.1%、1%、5%、10%、20%的点<sup>[10]</sup>,二是模糊隶属函数不符合样本无穷大的前提,拟合效果很难达到整体最优。本文在大样本前提下推导分析,提出一个新的隶属度函数;运用大样本统计试验的方法延长诺模图。对于改进后的模糊加权优化适线法,运用理想数据、蒙特卡洛随机数、实际序列对改进的模糊加权适线法的有效性和无偏性检验,并对统计试验结果采用打分法和百分率的方法评价,结果表明改进后的方法对应频率设计值的无偏性和有效性都有较大幅度提高。

收稿日期:2016-09-25

基金项目:国家自然科学基金项目(51509088);水利部公益性行业科研专项(201501008);河南省高校科技创新团队(14IRTSTHN028);水资源高效利用与保障工程河南省协同创新中心项目(2013CICWP- HN)

作者简介:王文川(1976-),男,河南鹿邑人,教授,博士,主要从事水文水资源系统分析、优化建模方面的研究。E-mail:wangwen1621@163.com

## 1 模型简介及改进

### 1.1 群居蜘蛛优化算法

群居蜘蛛优化算法(SSO)是一种新兴的随机全局优化技术,它是由 Cuevas 等人<sup>[11]</sup>提出,对群居蜘蛛的协作行为进行模拟,搜索个体按雌、雄性别分为两类,寻优过程中依照不同的搜索准则,该搜索模式有效避免个体在优势群体周围的聚集,能够进行全局搜索,有效避免了早熟收敛和搜索结果的不稳定,函数优化的结果表明该方法对初值和参数选择不敏感、稳健性强、收敛速度快。王文川等<sup>[12-13]</sup>将其运用到皮尔逊-型曲线参数估计中,并对其进行了系统分析与比较,结果表明能获的较好的效果。本文的寻优算法都采用该方法建立模型。

### 1.2 模糊加权优化适线法

根据文献[7]中的描述,假定存在一条最优频率曲线,以次序统计量与最优频率曲线的接近程度出发,基于模糊数学的基本理论,引进隶属度的概念建立目标函数。若随机变量  $X$  的理想最优频率曲线为  $f(x, E_x, C_v, C_s)$ ,则某经验点据  $(x_m, p_m)$  对  $f(x, E_x, C_v, C_s)$  的相对隶属度为下式:

$$FW_m(x_m, p_m) = 1 - 2 \int_b^a \frac{1}{\sigma_m \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x(p_m))^2}{2\sigma_m^2}} dx \quad (1)$$

模糊加权适线法的数学模型:

$$\min \sum_{m=1}^n FW_m |x_m - x(p_m)|^c \quad (2)$$

式中:  $a, b, c, \sigma_m$  为待估参数。以下为了将其与改进后的模型加以对照,对该模型简称为原方法。

### 1.3 模糊加权优化适线法的改进

#### 1.3.1 隶属度函数的改进

对于隶属度函数(1),经过数值积分变换可得积分区间的上下限为  $a, b$ :

$$a = [x_p + NB(p, C_s) - x_{pm}] / \sqrt{2} \sigma_m \quad (3)$$

$$b = [x_p - NB(p, C_s) - x_{pm}] / \sqrt{2} \sigma_m \quad (4)$$

采用蒙特卡洛模拟发现,当样本容量  $n$  的数量级大于  $10^3$  时,  $\sigma_m$  的数量级在  $10^{-2} \sim 10^{-3}$  之间,代入式(1)

中变形所得  $FW_m(x_m, p_m) \approx 1 - 2/\sqrt{\pi} \sum e^{-\frac{(x-x(p_m))^2}{2\sigma_m^2}}$  接近 1,即表明该频率的点正位于最优理想曲线上,结论不符合实际。因此采用代换法,排除  $\sigma_m$  对积分的干扰,令  $X = \sqrt{2} \sigma_m \cdot x$ ,得到新的分布-降半正态分布作为隶属

度函数:

$$FW_m(x_m, p_m) = 1 - 2 \int_b^a \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{(x-x(p_m))^2}{2\sigma_m^2}} dx \quad (5)$$

式中:  $a = x_m \vee x(p_m)$ ;  $b = x_m \wedge x(p_m)$ ;  $f(x, E_x, C_v, C_s)$  为理想最优频率曲线密度函数。

假定每个频率的值点估计值的两侧服从正态分布,采用置信概率  $1-\alpha$  计算设计值的区间估计值。分别求得置信区间的上下限  $a, b$ :

$$a = x_p + NB(p, C_s) - x_{pm}; \quad b = x_p - NB(p, C_s) - x_{pm} \quad (6)$$

$$NB(p, C_s) = \sigma / \sqrt{n} \cdot z_{\alpha/2} \quad (7)$$

$$\sigma = S / \sqrt{n} \cdot B \quad (8)$$

其中:  $x_p$  为频率是  $p$  的实际值;  $NB(p, C_s)$  为设计值的波动范围;  $p$  为设计频率;  $C_s$  为已知水文序列的偏态系数;  $x_{pm}$  为设计频率  $p$  的理论值;  $S$  为序列的标准差;  $z_{\alpha/2}$  为正态分布  $\alpha/2$  点对应的分位数,本研究取  $\alpha = 0.05$ ,计算置信概率为 0.95 的置信区间,  $z_{\alpha/2} = 1.96$ ;  $n$  为单一序列的容量;  $B$  为由  $p, C_s$  查诺莫图所得的值。

#### 1.3.2 诺莫图延长

对式(8)反求得:

$$B = \sigma \cdot \sqrt{n} / S \quad (9)$$

式中:  $B$  为诺模图取值;  $S$  为  $X$  系列标准差;  $n$  为样本容量;  $\sigma$  为频率是  $p_m$  的序列对应的点的标准差。

$$\begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdot & \cdot & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdot & \cdot & x_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ x_{M1} & x_{M2} & \cdot & \cdot & x_{Mn} \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$S_i = 1/(n-1) \sum_{j=1}^n \sqrt{(x_{ij} - \bar{x}_i)^2}, i=1, 2, 3, \dots, M \quad (11)$$

$$\sigma_j = 1/(M-1) \sum_{i=1}^M \sqrt{(x_{ij} - \bar{x}_j)^2}, j=1, 2, \dots, n \quad (12)$$

参数  $S, \sigma_m, n$  可通过统计试验的方法求得,  $C_s$  值取 0~6.0 范围内离散化处理后的值,步长取为 0.5,即  $C_s = (0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0)$ ,为了保证计算结果的一致性和有效性,取  $C_v = 1, \bar{x} = 1$ ,本文采用容量是  $n = 20, 50$  和 100 的序列,每组生成 500 个随机序列作为 1 个小组,  $M = 500$ 。运用文献[13]中的方法分别求得每组序列的最优参数,生成各自对应的理论频率曲线,如矩阵(10)。计算 500 个序列组对应的  $S, \sigma_m$ ,分别求均值后代入式(9)中求得  $B$  值,如表 1 所示。

表1 修改后最小二乘法诺模图B值表  
Table1 The modified normograph B values of the least squares method

P	0.01%	0.1%	1%	5%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	99%
0	3.2	2.6	2.0	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.7
0.5	7.2	5.2	3.4	2.3	1.9	1.5	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9	0.9	0.8	0.8
1	11.2	7.6	4.6	2.9	2.3	1.8	1.5	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8	0.8
1.5	16.1	10.6	6.2	3.8	3.0	2.2	1.9	1.6	1.4	1.3	1.1	1.1	1.0	0.9
2	30.6	19.0	10.2	5.8	4.3	3.0	2.4	2.0	1.7	1.5	1.3	1.2	1.1	1.0
2.5	36.0	21.6	11.1	6.0	4.3	2.9	2.2	1.8	1.5	1.3	1.2	1.0	0.9	0.8
3	42.9	25.3	12.6	6.5	4.5	3.0	2.2	1.8	1.5	1.3	1.1	1.0	0.9	0.8
3.5	55.3	30.9	14.1	6.7	4.5	2.8	2.1	1.6	1.3	1.1	0.9	0.8	0.7	0.6
4	58.4	32.0	14.2	6.4	4.2	2.5	1.8	1.3	1.1	0.9	0.8	0.6	0.6	0.5
4.5	60.8	33.2	14.5	6.4	4.1	2.4	1.6	1.2	1.0	0.8	0.6	0.5	0.5	0.4
5	67.2	35.8	15.0	6.3	3.9	2.2	1.4	1.1	0.8	0.6	0.5	0.4	0.4	0.3
5.5	73.0	38.0	15.2	6.0	3.6	1.9	1.2	0.9	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3	0.2
6	93.8	47.6	18.2	6.8	3.8	1.9	1.2	0.8	0.6	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2

2 改进的模糊加权优化适线法

2.1 数据处理

对样本数据:

$$X=(x_1,x_2,\cdots,x_{1n}) \tag{13}$$

变换后数据为:

$$x_{0m}=x_m/\bar{X},m=1,2,\cdots,n \tag{14}$$

式中: $\bar{X}$ 为序列的均值。容易证明,转化后的序列特征参数值  $C_v,C_s$  不变。

2.2 目标函数

对归一化后的水文序列,运用式(5)~(8)计算点据的隶属度。改进后的每个频率点据的隶属函数值表示该点据在适线过程中的重要程度,对  $FW_m(x_m,p_m)$  进行归一化处理,将隶属度转化为权重,采用公式(15)计算:

$$s_m=FW_m(x_m,p_m)/\sum_{m=1}^nFW_m(x_m,p_m), (m=1,2,\cdots,n) \tag{15}$$

式中: $s_m$  为点的权重; $FW_m(x_m,p_m)$  为点的不确定性大小; $n$  为序列长度。

目标函数为:

$$T=\sum_{m=1}^ns_m(x_m-x(p_m))^2 \tag{16}$$

式中: $x_m$  为频率  $p_m$  对应的经验点据; $x(p_m)$  为频率  $p_m$  对应的理论频率点据。

2.3 建模步骤

步骤 1:设置初始值。对已知数据从大到小排序,计算出各自对应的经验频率,用矩法计算出均值 $\bar{x}$ 、变

差系数  $C_v$ 、偏态系数  $C_s$ ,将初始值设定步长和范围,离散化处理,作为初值;

步骤 2:确定积分上下限。利用公式(6)~(8)计算出按降半正态分布 95%置信区间上下限值;

步骤 3:计算目标函数。不同频率的值分别代入隶属度函数(5)和权重计算公式(15),计算频率点的隶属度,确定频率点的权重;

步骤 4:迭代寻优。依据式(16)建立目标函数,利用群居蜘蛛优化算法寻优计算,直到满足迭代终止条件,搜索到对应的变差系数  $C_v$ 、偏态系数  $C_s$ ,作为最终的参数值。

3 统计试验分析

3.1 评价标准

模糊加权优化适线法点据偏差乘以权重建立目标函数,本文采用水文频率曲线延展性,即万年一遇、千年一遇、百年一遇、十年一遇的偏差判断;实际序列的拟合效果采用点据的拟合偏差作为评价指标。

对设计值的无偏性和有效性分别采用相对偏差的均值  $B_{xp}$  和相对根均方误  $S_{xp}$  表示,相对偏差的均值  $B_{xp}$  表征着拟合的设计值与真实值的偏离程度, $B_{xp}$  越小,表明该方法对不同的水文序列的无偏性越好;相对根均方误  $S_{xp}$  表示寻优方法对不同序列的拟合提高效果的波动性, $S_{xp}$  越小,表示波动越小,方法对水文序列的适应性越强。

$$S_{xp}=\frac{1}{n}\sqrt{\sum_{i=1}^{N_i}(\hat{x}_p^i-x_p^0)^2/(x_p^0)^2}\times100\% \tag{17}$$

$$B_{sp} = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} (\hat{x}_p^i - x_p^0) \times 100\%}{N x_p^0} \quad (18)$$

式中:  $p$  为设计保证率;  $x_p^0$  为相应设计保证率  $p$  的总体设计值;  $\hat{x}_p^i$  为第  $i$  试验样本相应设计保证率  $p$  的设计值估计值;  $N$  为统计试验次数。

### 3.2 评价方法

#### 3.2.1 评优法

对参数计算结果两两比较, 即同一组序列数的  $X_{p原}, X_{p改1}, X_{p改2}, X_{p改3}$  对应频率的设计值两两比较, 偏差越小越优, 较小者的方法得 1 分, 相等者得 0 分, 较大者得 -1 分, 将每个方法四个对应频率的得分相加即得该组序列的对应得分。

#### 3.2.2 百分率法

改进方法的相对误差比原方法的相对误差的改进程度, 同一组序列数的  $X_{p原}, X_{p改1}, X_{p改2}, X_{p改3}$  对应频率的设计值两两比较, 分别计算不同频率对应的设计值改进的百分率的统计结果。

### 3.3 理想数据检验

采用文献[7]中的理想数据, 对隶属度函数和延长  $B$  值诺模图检验, 样本容量  $n=19, 29$ , 利用公式  $X_p = \bar{x} (1 + C_v \Phi_p)$  ( $\bar{x}$  为均值;  $C_v$  为变差系数;  $\Phi_p$  为偏态系数  $C_s$  与频率  $p$  的函数) 生成严格服从  $P$ -型分布的序列, 共 20 组理想数据。选择设计频率为 0.01%、0.1%、1%、10% 的设计值计算, 得出计算结果的相对误差, 分别进行评价。

### 3.4 随机数据检验

采用 Monte-Carlo 方法生成随机数的方法作为

试验数据, 与文献[7]中理想数据相对应, 序列长度  $n$  取 19, 29, 总体参数  $EX_0=1.0$ ,  $C_{v0}$  取 1/2, 3/4, 2/3, 1,  $C_{s0}$  取 1, 3/2, 2, 5/8, 3, 生成相对应的随机序列, 共计 40 个方案, 取统计试验次数  $N=1\ 000$ 。分别采用改进的模糊加权优化适线法-平方和准则适线, 求得优化所得参数所对应的点数据, 采用不同的评价标准评价。对统计试验结果分析评价结果如表 2、表 3, 统计试验建模流程图 1 所示。

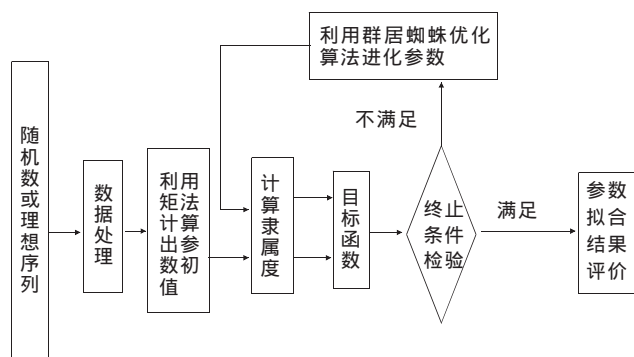


图 1 统计试验建模流程图

Fig.1 The flow of the statistical test model

表2 随机数得分

Table2 The score of the random number

容量	特征值	方法			
		原方法	改进隶属函数后	延长 $B$ 值后	综合改进后
19	无偏性	-3.9	3.4	-3.6	4.1
	有效性	-3.1	1.7	-2.3	3.7
29	无偏性	-4.8	4.5	-3.4	3.7
	有效性	-3.7	3.5	-3.2	3.4

表3 随机数改进百分比

Table3 The improved percentage of the random number

序号	频率	特征值	容量 19			容量 29		
			改进隶属函数后	改进 $B$ 值后	全部改进后	改进隶属函数后	改进 $B$ 值后	全部改进后
1	0.01%	无偏性	8.63	-7.51	17.24	12.91	-4.65	11.58
		有效性	2.99	-0.87	6.34	6.65	-0.96	7.14
2	0.1%	无偏性	8.45	-5.71	18.10	12.59	-3.68	11.93
		有效性	2.60	-0.23	5.67	5.61	-0.57	6.40
3	1%	无偏性	7.66	-2.21	19.29	12.32	-1.36	12.84
		有效性	1.93	0.61	4.47	3.89	0.01	5.19
4	10%	无偏性	3.82	6.53	20.95	13.97	6.41	15.63
		有效性	0.91	1.11	2.12	1.13	0.84	3.70



表4 理想数据得分  
Table4 The score of the ideal data

序号	容量 19				容量 29			
	原方法	改进隶属函数后	改进 $B$ 值后	全部改进后	原方法	改进隶属函数后	改进 $B$ 值后	全部改进后
特征值								
无偏性	-11.4	1.2	-1.8	12	-11	4	-5	12
有效性	0.95	2.35	1.48	0.0	1.70	0.0	1.70	0.0

表5 理想数据改进百分比  
Table5 The improved percentage of the ideal data

序号	频率	特征值	容量 19			容量 29		
			改进隶属函数后	改进 $B$ 值后	全部改进后	改进隶属函数后	改进 $B$ 值后	全部改进后
1	0.01%	无偏性	51.13	7.09	74.31	42.80	1.31	66.21
		有效性	12.10	4.24	20.21	13.79	2.49	22.92
2	0.1%	无偏性	27.28	8.34	67.11	30.66	2.46	56.42
		有效性	6.81	4.50	23.05	10.55	2.10	25.33
3	1%	无偏性	13.88	9.18	48.47	22.27	3.25	45.99
		有效性	6.35	4.80	19.87	7.77	2.57	21.51
4	10%	无偏性	2.98	9.96	33.01	15.13	3.92	37.17
		有效性	7.03	5.17	17.63	5.24	3.20	17.85

3.5 结果分析

3.5.1 理想数据分析

(1)由表 4 可知,改进隶属度函数和延长  $B$  值诺模图,设计值的无偏性都有提高,改进隶属度函数的提高程度较改进  $B$  值诺模图大,同时改进隶属度函数和延长  $B$  值诺模图,参数值的拟合效果达到最优。

(2) $B$  值影响积分区间,隶属度函数决定区间上积分值,不同的积分区间会有相等的积分结果,则  $B$  值对积分结果影响隶属度函数较小。控制积分区间且对积分值进行改进,效果最好。利用数值积分求隶属度时存在误差,则单一改进隶属度函数和延长  $B$  值诺模图对精度的提高程度存在波动。

(2)由表 5 知,对方法分别改进后试验结果的无偏性都有所提高,单一改进隶属度函数对结果的改进较单一延长  $B$  值诺模图的效果明显,与结论(1)保持一致。两者同时改进后改进程度最高,改进的百分比超过两者分别改进结果提高的百分比的和,说明二者对频率曲线参数的影响不是线性关系。

3.5.2 随机数据分析

(1)由表 2 可知,改进模糊加权优化适线法的无偏性、有效性都有提高,全部改进后无偏性得分最高。

(2)无偏性分析:容量是 19 的样本,改进隶属度函数和延长  $B$  值,方法的无偏性都有所改进,延长  $B$  值的无偏性提高程度较小,而改进隶属度函数则对参数

的无偏性有较大改进,综合改进后无偏性改进效果明显。容量是 29 的样本,改进后方法的无偏性都有所提升,单一改进隶属函数后的提升程度大于全部改进的情况,即隶属度函数对参数确定有较大的作用。

(3)有效性分析:方法改进后对设计值的有效性有较大提高,其中延长诺模图  $B$  值对有效性的改进程度较小,改进隶属度函数对设计值的有效性的改进程度较大;在容量是 29 时,改进隶属度函数后对有效性的改进和全部改进后的得分结果相近但略有偏小。

(4)改进百分比分析:只延长  $B$  值会使设计值的无偏性减小,由于统计实验方法计算所得  $B$  值诺模图的均匀性比原方法差。改进隶属度函数和延长  $B$  值在样本容量为 19 时,设计值最优;而在样本容量为 29 时,延长  $B$  值诺模图对设计值的改进程度较小。

4 实际数据结果评价

4.1 评价方法

采用文献[14-15]中的水文序列,利用模糊加权优化适线方法分别求出相对应的参数值,分别计算出单个点的拟合偏差,对相应的频率两两比较,计算出一般洪水和历史洪水的拟合偏差的得分的统计值。统计试验结果见表 6,序列 1、2 表示一般序列,序列 3、4 表示特大洪水系列。

表6 实际序列改进百分比的特征值  
Table6 The characteristic values of the improved percentage with actual scequence

序列	方法			
	原方法	改进隶属函数后	延长B值后	综合改进后
序列 1	-1.25	1.08	-0.42	0.58
序列 2	-1.06	0.16	-0.16	1.06
序列 3	-0.56	-0.56	-0.56	1.69
序列 4	-0.38	0.17	-1.48	1.69

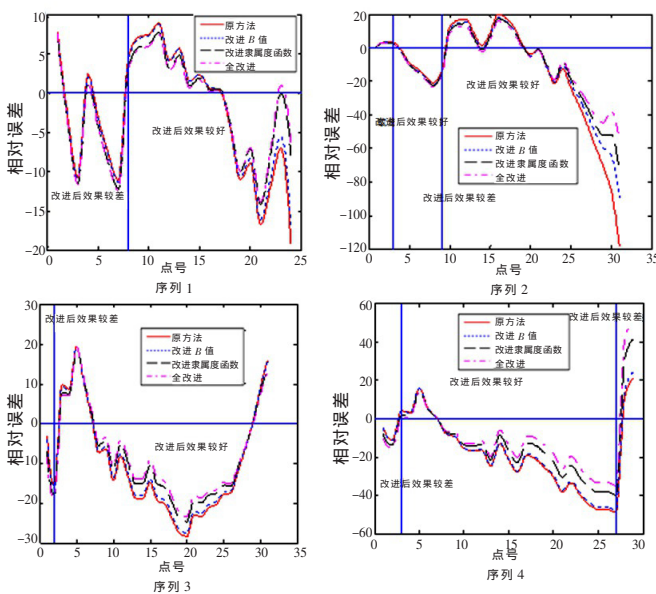


图2 实测序列相对偏差对比图

Fig.2 The relative deviation comparison of the observed data series

## 4.2 结果分析

(1) 由表6可知对于一般洪水改进隶属函数和延长诺模图B值后都对拟合效果有所改进,改进隶属函数对拟合效果改进程度较大;对于历史洪水系列,同时改进隶属度函数和延长诺模图B值对拟合效果的改进程度较大。由图2可知,不同的参数估计方法对拟合点数据的拟合偏差的趋势相同,因为参数估计方法都以纵坐标方向离差平方和最小准则为优化准则,目标函数一致。

(2) 由折线图可知,频率较小的点据拟合偏差比原方法大,后部的拟合效果最佳,对一般洪水序列方法改进后能够提高一年一遇的拟合效果;特大洪水序列方法改进后对十年一遇、五年一遇、一年一遇的拟合效果较好。由于在延长B值诺模图后,序列后部的点据给以更大的拟合权重,因而使适线结果更加客观,可以很好

地处理特大点据在适线过程中的重要性。

## 5 结语

本文对模糊加权优化适线法的隶属度函数和诺莫图改进,并运用统计试验的方法,以理想数据、蒙特卡洛随机数和工程实际数据为例,对改进的模糊加权适线法进行有效性和无偏性检验,通过评分法和百分率法对统计结果进行评价,结果表明改进的模糊加权优化适线法的有效性和无偏性得到了提高。绘制工程实际数据优化适线结果相对误差的折线图,表明改进的模糊加权适线法具有较好的拟合度,适线效果较好,具有实际工程运用价值。

参考文献:

- [1] 唐亦汉,陈晓宏,叶长青,等. 考虑历史洪水的混合分布对不同尾型分布的应用对比研究[J]. 水力发电学报, 2015,34(4):31-37. (TANG Yihan, CHEN Xiaohong, YE Changqing, et al. Application of historical flood-concerned mixed distribution with different tail types of PDFs[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015,34(4):31-37. (in Chinese))
- [2] SL44-2006, 水利水电工程设计洪水计算规范[S]. (SL44-2006, Regulation for Calculating Design Flood of Water Resources and Hydropower Projects[S]. (in Chinese))
- [3] 张家鸣,陈晓宏,叶长青. Pearson-型频率曲线对负偏水文序列的计算[J]. 水利学报, 2012,43(11):1296-1301. (ZHANG Jiaming, CHEN Xiaohong, YE Changqing. Calculation of negative-skewness hydrological series with Pearson-type frequency curve [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012,43(11):1296-1301. (in Chinese))
- [4] 李扬,宋松柏. P-分布高阶概率权重矩及其在洪水频率分析中的应用[J]. 水力发电学报, 2014,33(3):10-18. (LI Yang, SONG Songbai. Application of higher probability weighted moments of P-distribution to flood frequency analysis [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014,33(3):10-18. (in Chinese))
- [5] 宋松柏,康艳,荆萍. 水文频率曲线参数优化估计研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008,36(4):193-198. (SONG Songbai, KANG Yan, JING Ping. Parameter optimum estimation for hydrological frequency curve[J]. Journal of Northwest A&F University (Nat.Sci.Ed), 2008,36(4):193-198. (in Chinese))
- [6] 谢平,郑泽权. 水文频率计算有约束加权适线法[J]. 武汉水利电力大学学报, 2000,2,33(1):49-52. (XIE Ping, ZHENG Zequan. A constrained and weighted fitting method for hydrologic frequency calculation[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 2000,2,33(1):49-52. (in Chinese))
- [7] 邱林,陈守煜,潘东. P-型分布参数估计的模糊加权优化适线法[J]. 水利学报, 1998,29(1):33-38. (QIU Lin, CHEN Shouyu, PAN Dong. Weighed optimum curve fitting method for estimating the parameters of Pearson type- distribution[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998,29(1):33-38. (in Chinese))

- [8] 谢崇宝,袁宏源,郭元裕. P—型理论频率曲线参数估计—模糊极值法[J].水文,1997,(1):1-7.(XIE Chongbao, YUAN Hongyuan, GUO Yuanyu. A new estimation way of Pearson type—distribution parameter of frequency curve—fuzzy maximum value method[J]. Journal of China Hydrology, 1997,(1):1-7. (in Chinese))
- [9] 邓育仁,丁晶,韦雪艳.水文计算中的模糊优化适线法[J].水电站设计, 1995,11(4):43-47.(DENG Yuren, DING Jing, WEI Xueyan. Fuzzy optimal curve fitting method in frequency analysis [J]. Design of Hydroelectric Power Station, 1995, 11(4):43-47. (in Chinese))
- [10] 金光炎,费永法. $\Gamma$ 分布保证修正值系数B的确定[J].水文,1991,11(6):1-3.(JIN Guangyan, FEI Yongfa. The determination of  $\Gamma$  distribution to ensure the revised coefficient B[J].Journal of China Hydrology,1991,11(6):1-3. (in Chinese))
- [11] Cuevas E, Cienfuegos M, Zaldívar D, et al. A swarm optimization algorithm inspired in the behavior of the social-spider [J]. Expert Systems with Applications, 2013,40(16):6374-6384.
- [12] 王文川,雷冠军,刘惠敏,等. 基于群居蜘蛛优化算法的自适应数值积分皮尔逊—型曲线参数估计[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015,S1:122-133.(WANG Wenchuan, LEI Guanjun, LIU Huimin, et al.The Adaptive numerical integral pearson—curve parameters estimation based on SSO[J].Journal of Basic Science And Engineering, 2015,S1:122-133. (in Chinese))
- [13] 王文川,雷冠军,刘灿灿,等.群居蜘蛛优化算法在水文频率分析中的应用[J].水文, 2016,36(3):34-39.(WANG Wenchuan, LEI Guanjun, LIU Cancan, et al. Hydrologic frequency analysis using SSO algorithm[J]. Journal of China Hydrology,2016,36(3):34-39. (in Chinese))
- [14] 王文川,邱林,徐冬梅,等. 工程水文学[M]. 北京:中国水利水电出版社,2013. (WANG Wenchuan, QI U Lin,XU Dongmei, et al. Hydrology Engineering [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2013. (in Chinese))
- [15] 宋孝玉,马细霞. 工程水文学 [M]. 河南: 黄河水利出版社,2009. (SONG Xiaoyu, MA Xixia.Hydrology Engineering [M]. Henan: Yellow River Water Conservancy Press,2009. (in Chinese))

## Improvement and Statistical Performance of Fuzzy Weighted Optimum Curve-fitting Method

WANG Wenchuan<sup>1</sup>, LEI Guanjun<sup>2</sup>, LIU Kuan<sup>1</sup>

(1. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China;

2. Water Resources Research Institute, IWHR, Beijing 100038, China)

**Abstract:** Hydrological sequence length is limited, so that frequency curve parameter estimate of sampling exists error which can be effectively reduced by weighted optimum line method. Normograph length of weighted fuzzy optimization optimal line method is limited, and the membership function is not on the base of the infinite sample. The fuzzy weighted optimization optimal line method was improved by proposing half normal distribution of membership functions and using large sample statistical test method for extension of normograph. The ideal data, Monte Carlo random number and the practical sequence were used to test with unbiasedness and efficiency as evaluation index by using the method of grading method and the percentage of statistic analysis for the evaluation. The result shows that the improved fuzzy weighted optimization optimal line has good statistical properties, high precision of optimum line. And the improved method can promote the fuzzy weighted optimization optimal line method to be applied in practical engineering.

**Key words:** fuzzy weighting; value of B nomogram; membership function; statistical analysis

(上接第 83 页)

## Analysis of Groundwater Monitoring Station Network in Dianzhong Area

LI Yun, LI Baofen, YANG Qiuping

(Hydrology and Water Resources Bureau of Yunnan Province, Kunming 650106, China)

**Abstract:** Dianzhong is the core economic area in Yunnan Province, and is also one of the biggest water demand areas. This paper made analysis of the density, function and layout of the existing groundwater monitoring station network, and found out the problems and put forward the rationalization suggestions according to the groundwater function zoning, condition of groundwater development and utilization, status of groundwater overdraft, and vulnerability of shallow groundwater, so as to provide technical basis for the regional groundwater monitoring station network planning.

**Key words:** groundwater; monitoring station network; analysis; Dianzhong Area