

洪水预报过程的交互式修正技术研究

章 四 龙^{1,2}

(1 河海大学, 江苏 南京 210098; 2 水利部水文局, 北京 100053)

摘要: 由于预报模型的局限性和实时信息的不完善, 洪水预报过程存在许多误差, 而基于图形交互式修正技术是消除预报误差的有效手段。分析了水文预报过程交互式修正技术在洪水预报工作中的重要性, 介绍了过程拟合平滑技术和样条插值技术, 基于此基础上研究实现了以橡皮筋形式交互式修正水文预报过程的技术, 并应用于洪水预报系统中。研究实例表明, 该技术使用方便, 有效地提高了洪水预报精度。

关 键 词: 洪水预报; 实时校正; 交互式修正

中图分类号: P338.8; P338.9 文献标识码: A 文章编号: 1001-6791(2006)05-0653-05

在洪水预报过程中, 预报过程修正是最重要的技术环节之一。通常作业洪水预报可分为两个相互连结的阶段: 预报计算和预报综合分析。由于洪水预报数学模型的局限性, 数据查错系统不完善等原因, 因此预报综合分析只能由预报员根据经验分析, 交互式对预报结果进行人工分析, 确定最终发布的预报值。

水文预报的结果是未来一定时间内的水位或流量过程。在实时作业预报中, 经常需要对拟发布的水位或流量过程进行人工修正或调整, 以期融入预报员的经验, 提高预报精度, 并满足洪水过程线连续和平滑的要求。预报水位或流量过程交互式修正, 就是提供一种直观、简单、高效的方法, 依据预报员的经验或其它信息, 用鼠标在图形化的界面上任意拖动需要修正的过程, 达到快速、准确、方便修正一系列数据的目的。

随着计算机技术的发展, 图形交互技术已越来越多地应用于作业洪水预报系统中, 而“橡皮筋技术”是修改矢量线画图的一种专门技术。它用鼠标拖动一条直线(或折线之部分), 使直线如同橡皮筋一样伸长并变成新的折线, 从而改变图形的形状。由于可以利用“橡皮筋技术”直接在图形画面上进行交互修改作业, 并且预报员可以根据自己的经验, 对预报水位、流量过程线进行直观判断和反复修正, 故而是一种很方便实用的交互技术。“橡皮筋技术”的核心是过程拟合及平滑技术、样条插值技术。通过耦合两种技术, 实现在人机界面上以橡皮筋形式修改水文过程。

1 水文过程拟合及平滑技术

过程拟合和平滑技术是设法消除误差的影响, 将过程修匀成一条光滑曲线。其基本思想是依据最小二乘原理, 使该光滑曲线与数据间的残差平方和最小。给定的等距数据, 如在数据点附件二阶导数为常数, 则可在数据点附近以二次曲线表示函数 y 的变化, 即有

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 \quad (1)$$

若拟修匀第 i 个数据值(y_0), 则可在其左右各取两个相邻点(即取 $x_i = -2, -1, 0, 1, 2$, 且 $\sum_i x_i = 0$), 可得到二次多项式拟合的正则方程:

收稿日期: 2006-01-15; 修订日期: 2006-04-10

作者简介: 章四龙(1967-), 男, 江西南昌人, 高级工程师, 博士, 主要从事水文情报预报工作。

E-mail: slzhang@mwr.gov.cn

$$\begin{bmatrix} 5 & 0 & 10 \\ 0 & 10 & 0 \\ 10 & 0 & 34 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum_{i=-2}^2 y_i \\ \sum_{i=-2}^2 i y_i \\ \sum_{i=-2}^2 i^2 y_i^2 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$5a_0 + 10a_2 = \sum_{i=-2}^2 y_i$$

即有

$$10a_1 = \sum_{i=-2}^2 i y_i \quad (3)$$

$$10a_0 + 34a_2 = \sum_{i=-2}^2 i^2 y_i^2$$

$$a_0 = \frac{1}{35}[-3(y_{-2} + y_2) + 12(y_{-1} + y_1) + 17y_0]$$

解方程得

$$a_1 = \frac{1}{10}(-2y_{-2} - y_{-1} + y_1 + 2y_2) \quad (4)$$

$$a_2 = \frac{1}{35}[5(y_{-2} + y_2) - 2 \cdot 5(y_{-1} + y_1) - 5y_0]$$

据此得到数据集内每一点的五点二次平滑公式

$$\bar{y}_0 = a_0 = \frac{1}{35}[-3(y_{-2} + y_2) + 12(y_{-1} + y_1) + 17y_0] \quad (5)$$

使用上式对数据点修匀时, 需要用到其左右各两个相邻点, 因此对数据开始的两点及最后的两点要另作处理。对开始的两点用数据开始的前 5 个点, 组成 5 个基点(即取 $X_i = -2, -1, 0, 1, 2$)进行修匀。开始的两点的修匀值应分别为

$$\begin{aligned} \bar{y}_{-2} &= a_0 - 2a_1 + 4a_2 = \frac{1}{35}(31y_{-2} + 9y_{-1} - 3y_0 - 5y_1 + 3y_2) \\ \bar{y}_{-1} &= a_0 - a_1 + a_2 = \frac{1}{35}(9y_{-2} + 13y_{-1} + 12y_0 + 6y_1 - 5y_2) \end{aligned} \quad (6)$$

类似地, 数据集最后两点的修匀值应为(取数据最后 5 个点组成基点: $X_i = -2, -1, 0, 1, 2$)

$$\begin{aligned} \bar{y}_1 &= a_0 + a_1 + a_2 = \frac{1}{35}(-5y_{-2} + 6y_{-1} + 12y_0 + 13y_1 + 9y_2) \\ \bar{y}_2 &= a_0 + 2a_1 + 4a_2 = \frac{1}{35}(3y_{-2} - 5y_{-1} - 3y_0 + 9y_1 + 31y_2) \end{aligned} \quad (7)$$

2 样条插值函数

设平面上给定 $n+1$ 个点, 假 $a = x_0 < x_1 < \dots < x_n < b$ 定, 通过这些点的曲线 $y = f(x)$ 在区间 $[a, b]$ 上有二阶连续导数存在, 则可在 $[a, b]$ 上构造 $f(x)$ 的样条函数 $s_3(x)$ 。如 $s_3(x)$ 有如下性质:

- (1) $s_3(x_i) = y_i, i = 0, 1, 2, \dots, n$
- (2) $s_3(x)$ 在 $[x_i, x_{i+1}]$ 上为不超过三次的多项式($i = 0, 1, 2, \dots, n-1$)。
- (3) $s_3(x), s'_3(x)$ 及 $s''_3(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, 就称 $s_3(x)$ 为 $f(x)$ 的三次样条插值函数。

为保证插值函数的唯一性, 除已知节点函数值, 再附加两个边界条件, 常见的边界条件有三种, 本文选择其中的一种:

$$s'_3(x_0) = y'_0, s'_3(x_n) = y'_n \quad (8)$$

这里 y'_0 、 y'_n 可以是 $f'(x_0)$ 、 $f'(x_n)$, 也可以是其他指定值。三次样条函数的求法如下:

由于 $s_3(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, 故可假设 $s_3(x)$ 在节点处的二阶导数为

$$s_3''(x) = M_i \quad (i = 0, 1, \dots, n) \quad (9)$$

又因 $s_3(x)$ 在 $[x_{i-1}, x_i]$ 上是三次多项式, 所以 $s_3''(x)$ 是线性函数, 且可表示为

$$s_3''(x) = \frac{x_i - x}{x_i - x_{i-1}} M_{i-1} + \frac{x - x_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} M_i \quad (10)$$

记 $h_i = x_i - x_{i-1}$, 且由于任意两点之间为等长, 即 $x_{i+1} - x_i = x_i - x_{i-1}$

则有

$$s_3''(x) = \frac{x_i - x}{h_i} M_{i-1} + \frac{x - x_{i-1}}{h_i} M_i \quad (11)$$

积分一次得

$$s_3'(x) = -\frac{(x_i - x)^2}{2h_i} M_{i-1} + \frac{(x - x_{i-1})^2}{2h_i} M_i + C_1 \quad (12)$$

再积分一次得

$$s_3(x) = \frac{(x_i - x)^3}{6h_i} M_{i-1} + \frac{(x - x_{i-1})^3}{6h_i} M_i + C_1 x + C_2 \quad (13)$$

由插值条件 $s_3(x_{i-1}) = y_{i-1}$, $s_3(x_i) = y_i$, 可定出

$$C_1 = \frac{y_i - y_{i-1}}{h_i} + \frac{h_i}{6}(M_{i-1} - M_i), \quad C_2 = \frac{y_{i-1}x_i - y_i x_{i-1}}{h_i} + \frac{h_i}{6}(M_{i-1}x_{i-1} - M_i x_i)$$

因此有

$$s_3'(x) = -\frac{(x_i - x)^2}{2h_i} M_{i-1} + \frac{(x - x_{i-1})^2}{2h_i} M_i + \frac{y_i - y_{i-1}}{h_i} - \frac{h_i}{6}(M_i - M_{i-1}) \quad (14)$$

$$s_3(x) = \frac{(x_i - x)^3}{6h_i} M_{i-1} + \frac{(x - x_{i-1})^3}{6h_i} M_i + \left[y_{i-1} - \frac{h_i^2}{6} M_{i-1} \right] \frac{x_i - x}{h_i} + \left[y_i - \frac{h_i^2}{6} M_i \right] \frac{x - x_{i-1}}{h_i} \quad (x_{i-1} \leq x \leq x_i, i = 1, 2, \dots, n) \quad (15)$$

于是只要知道 M_i , $s_3(x)$ 的表达式也就完全确定了。

由于 $s_3'(x)$ 在 $[a, b]$ 上是连续的, 故在内节点 x_i ($i = 1, 2, \dots, n-1$) 处应有左右导数相等:

$$s_3'(x_i + 0) = s_3'(x_i - 0) \quad (16)$$

在式(14)中令 $x = x_i$, 可得 $s_3'(x_i - 0) = \frac{h_i}{2} M_i - \frac{h_i}{6}(M_i - M_{i-1}) + \frac{y_i - y_{i-1}}{h_i}$

再利用 $s_3'(x)$ 在 $[x_i, x_{i+1}]$ 上的表达式, 可得 $s_3'(x_i + 0) = -\frac{h_{i+1}}{2} M_i + \frac{h_{i+1}}{6}(M_{i+1} - M_i) + \frac{y_{i+1} - y_i}{h_{i+1}}$

因此有 $(1 - \alpha_i)M_{i-1} + 2M_i + \alpha_i M_{i+1} = \beta_i \quad (i = 1, 2, \dots, n-1) \quad (17)$

式中 $\alpha_i = \frac{h_{i+1}}{h_i + h_{i+1}}, \beta_i = \frac{h_{i+1}}{h_i + h_{i+1}} \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{h_{i+1}} - \frac{y_i - y_{i-1}}{h_i} \right)$

式(17)是关于未知量 $M_0, M_1, \dots, M_{n-1}$ 的 $n-1$ 个方程。根据附加的边界条件式(8), 补充两个方程:

$$\begin{aligned} -\frac{h_1}{2} M_0 + \frac{y_1 - y_0}{h_1} - \frac{h_1}{6}(M_1 - M_0) &= y'_0 \\ \frac{h_n}{2} M_n + \frac{y_n - y_{n-1}}{h_n} - \frac{h_n}{6}(M_n - M_{n-1}) &= y'_n \end{aligned} \quad (18)$$

经整理得到下面两个方程:

$$2M_0 + M_1 = \frac{6}{h_1} \left[\frac{y_1 - y_0}{h_1} - y'_0 \right] \frac{1}{6} \beta_0 \quad (19)$$

$$M_{n-1} + 2M_n = -\frac{6}{h_n} \left[\frac{y_n - y_{n-1}}{h_n} - y'_n \right] \frac{1}{6} \beta_n \quad (20)$$

由式(17)、式(19)、式(20)组成关于未知量 $M_0, M_1, \dots, M_n$ 的 $n+1$ 个方程组

$$\begin{bmatrix} 2 & 1 & & & \\ 1-\alpha_1 & 2 & a_1 & & \\ & 1-\alpha_2 & 2 & a_2 & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots \\ & & & 1-\alpha_{n-1} & 2 & a_{n-1} \\ & & & & 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_0 \\ M_1 \\ M_2 \\ \vdots \\ M_{n-1} \\ M_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_{n-1} \\ \beta_n \end{bmatrix} \quad (21)$$

方程组(21)的系数矩阵是严格对角占优的三对角或拟三对角矩阵, 故方程有唯一解, 可用追赶法解此方程, 求出 $M_0, M_1, \dots, M_n$ 后, 将它们代入式(15), 便得到三次样条插值函数 $s_3(x)$ 的分段表达式。

3 基于交互式修正技术的水文预报系统

依据上述理论以及洪水预报业务的专业习惯, 使用 Microsoft VC++ 编制程序, 以动态库的形式提供系统集成者使用。

动态库名: sal.dll

函数定义: extern bool PASCAL EXPORT Zh (int N, double * px, double * py, double xe, double ye, int M)

函数功能: 根据被拖动点托动的结束位置, 计算原始时间序列的点位置变化后的相应位置。

参数说明: N, 整数, 原始时间序列点的个数;

px, 双精度型指针, 原始时间序列各点的横坐标(X)值;

py, 双精度型指针, 原始时间序列各点的纵坐标(Y)值;

xe, 双精度型实数, 被拖动点结束位置的横坐标(X)值;

ye, 双精度型实数, 被拖动点结束位置的纵坐标(Y)值;

M, 整数, 被拖动点在原始时间序列各点中的位置

返回值: TRUE 或 FALSE, TRUE 计算成功, 结果保存在 px, py 所指的数组中, FALSE 计算不成功, 输入的数据没有被修改。

使用说明:

(1) 单点修正 在图形界面上按下 Ctrl 键, 并用鼠标捕捉(按下鼠标左键并保持按下状态)预报曲线上的任意一点, 纵向拖动该点, 在操作者认为合适的位置松开鼠标及 Ctrl 键。每次只能修改一个点的数据。

(2) 过程线修正 在图形界面上用鼠标捕捉(按下鼠标左键并保持按下状态)预报曲线上的任意一点, 向任意方向拖动该点, 观察随着鼠标移动, 整个线条的变化情况, 在操作者认为合适的位置松开鼠标左键。周围过程线将会自动以橡皮筋形状进行适当调整, 保证修改后的过程线平滑。

4 应用实例

上述软件模块已集成于中国洪水预报系统中, 并应用于预报洪峰流量(水位)、预报退水过程、制作水位流量关系曲线等方面进行交互式修正。

以西江干流梧州水文站 2005 年 7 月 11 日 20 时洪水预报为例。7 月 11 日 20 时梧州水文站实测流量 $19\,700\text{ m}^3/\text{s}$, 预报方案计算梧州水文站 7 月 12 日 14 时洪峰流量为 $20\,800\text{ m}^3/\text{s}$ 。由于预报过程在 7 月 11 日 20 时流量为 $18\,800\text{ m}^3/\text{s}$, 与实测流量 $19\,700\text{ m}^3/\text{s}$ 相比, 其误差为 $900\text{ m}^3/\text{s}$ 。此时, 预报员可用鼠标捕捉(按下鼠标左键并保持按下状态)预报过程中的洪峰流量点, 垂直拖动该点, 则整个预报过程随鼠标移动, 观察预报过程移动情况, 在 7 月 11 日 20 时预报点和实测点重合时, 松开鼠标左键, 则整个预报过程线自动以橡皮筋形状进行适当调整, 保证修改后的过程线平滑。修改后预报洪峰流量为 $21\,600\text{ m}^3/\text{s}$, 与实际出现洪峰流量 $21\,400\text{ m}^3/\text{s}$ 非常吻

合, 详见图 1。整个修正过程方便、快捷、准确。

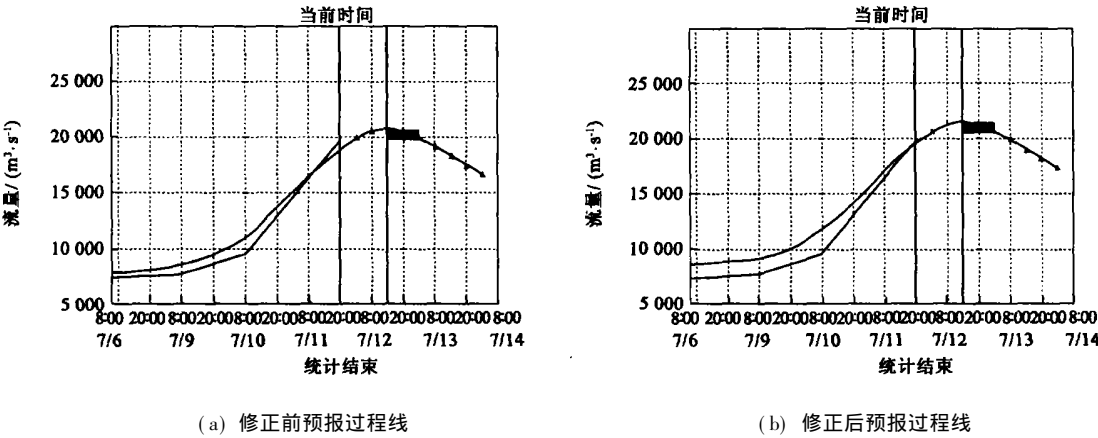


图 1 水位流量过程交互式修正
Fig. 1 Interactive correct for hydrograph

5 结 论

本文在综合国内外交互式洪水预报技术的基础上, 结合当前水文情报预报工作实际, 基于过程拟合和平滑技术, 实现了以橡皮筋形式交互式修改水文预报过程的技术。该技术已成功应用于水利部水文局主持开发的中国洪水预报系统中, 并推广至全国水文情报预报部门, 大大提高了洪水作业预报的速度, 为努力提高洪水预报精度、增长有效预见期提供了技术保障。

参考文献:

[1] 金廷赞. 计算机图形学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1988.
[2] 葛守西. 现代洪水预报技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
[3] 葛守西. 专家交互式模式的研究[J]. 人民长江, 1996(8): 27- 29.
[4] George F. Smith, Interactive forecasting with the national weather service river forecast system[A]. Flood Forecasting Symposium in Shanghai of Chian[C]. 1992.
[5] 徐贯午译, 交互式预报程序(IFP) 用户指南[M]. 北京: 水利部水利信息中心, 1994. 12.
[6] 章四龙. 中国洪水预报系统设计建设研究[J]. 水文, 2002(1): 22.

Interactive correct technology for flood forecasting

ZHANG Si long^{1,2}

(1. Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Bureau of Hydrology, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China)

Abstract: There is much error in flood forecasting process due to the limited model and the inadequate real-time information, however, it is an effective method based on the hydrograph interactive technology to reduce the forecasting error. This paper introduces the significance of the interactive correct technology applied to forecasting hydrograph, and the process-fit-smoothness and the cubic interpolation technology. Based on the technology above, it can be realized to correct the forecasting hydrograph interactively in the form of elastic which is applied to the flood forecasting system. The case study indicates that the technology can be used easily to improve effectively the accuracy of flood forecasting.

Key words: flood forecasting; forecasting updating; interactive correct