实时洪水预报方法综述

杨小柳

(中国水利水电科学研究院)

引言

历经半个世纪的发展，见诸文献的实时洪水预报方法多不胜数。本文依据现有方法的特点，将它们划分成不同的流派。这些流派分别在实时洪水预报技术发展的不同时期起到过重要作用，都具有自身的理论和技术特点；在各流派之间存在着脉承关系。作者认为，一个较全面的对于实时洪水预报技术的回顾至少应包括五个流派：黑箱流派、概念流派、残差流派、滤波流派和统计流派。现逐一综述如下。

1　黑箱流派

这一流派的主要特点是以黑箱模型为基础，经过改造，使之具备实时预报的能力。目前主要有两种方法：输入—蓄量—输出法和输入—输出法。

1.1　输入—蓄量—输出法

这类方法的鼎盛时期是 70 年代，其代表人物有 Lambert（1969，1972），McKerchar（1975），Green（1979）等。他们从下面的连续方程和蓄量—输出方程出发：

$$\frac{dS}{dt}=p-e-q \tag{1a}$$

$$S=k\log(q/k_1) \tag{1b}$$

式中，t 表示时间；$S\equiv S(t)$ 为流域的平均蓄水深度；$p\equiv p(t)$ 为流域输入，即流域的面平均雨量；$e\equiv e(t)$ 和 $q\equiv q(t)$ 分别为流域的面平均蒸发量和出流量；k 和 k_1 是反映流域蓄泄关系的参数。以 $\triangle t$ 表示时段长，$p(t)$ 为时段平均雨量；并假定 $e\equiv 0$，对上式进行离散化后，在已知 $q(t)$ 及 $p(t)$ 条件下，可得 t 时刻的 $q(t+1)$：

$$q_{t+1}=\begin{cases}\dfrac{q_t}{\dfrac{q_t}{p}+(1-\dfrac{q_t}{p})e^{-p\triangle t/k}} & (p>0)\\[2ex] \dfrac{q_t}{1+\dfrac{q_t\triangle t}{k}} & (p\leqslant 0)\end{cases} \tag{2}$$

如果在上式中，以 $L\ (>\triangle t)$ 代替 $\triangle t$，则 $p=p_{t-L}$ 为时段 $(t-L,\ t)$ 的平均雨量，L 可作为待定参数处理。可以 q_{t+1} 替代式 (2) 中的 q_t，进行 $t+2$ 时刻的预报，对 $t+3$，$t+4$，…… 可依此类推。

Green（1979）对这类方法进行了较详尽的研究。其中有两点值得一提：① 以加权平均雨量代替式 (2) 中的 p_{t-L}，如下式：

$$\frac{1}{2}(1-\theta)P_{t-L-1}+\theta p_{t-L}+\frac{1}{2}\times(1-\theta)P_{t-L+1} \tag{3}$$

这是为了对雨量进行平滑处理。Green（1979）依据 Dee 河的研究认为，这一平滑处理的收益十分有限。② 将式 (2) 中的 k 看作流量 q 的函数：$k=k(q)$。在 Green（1979）提出了 k 的实时估计方法中，k 是按涨洪和退水分别处理的。Green 称这项改进措施可以显著地提高预报精度。

1.2　输入—输出法

这类方法一般包括两部分：建立简单水文模型和求解模型参数。后者实际上是这类方法的主要内容。通常考虑下面三种关系：

一是径流 q_t 与降雨系列（p_t，p_{t-1}，…，

p_{t-m}）的线性关系：

$$q_t = \alpha_0 p_t + \alpha_1 p_{t-1} + \cdots + \alpha_m p_{t-m} = \sum_{i=0}^{m} \alpha_i p_{t-i} \tag{4}$$

式中，α_i（$i = 1, \cdots, m$）为待定系数。也有人对雨量系列进行某种特殊处理，如为了考虑流域的蓄泄作用，在雨量系列中增加某一滞时 b，用系列（p_{t-b}，p_{t-b-1}，…，p_{t-b-m}）代替上式中的（p_t，p_{t-1}，…，p_{t-m}）。

二是径流 q_t 与前期径流系列（q_{t-1}，q_{t-2}，…，q_{t-n}）的线性关系：

$$q_t = \beta_1 q_{t-1} + \beta_2 q_{t-2} + \cdots + \beta_n q_{t-n} = \sum_{i=1}^{n} \beta_i q_{t-i} \tag{5}$$

式中，β_1，…，β_n 为待定系数。

三是径流 q_t 与前期径流系列（q_{t-1}，q_{t-2}，…，q_{t-n}）及降雨系列（p_t，p_{t-1}，…，p_{t-m}）的线性关系，实际上，这是式（4）和式（5）的结合，见下式：

$$q_t = \delta_1 q_{t-1} + \cdots + \delta_n q_{t-n} + \omega_0 p_t + \cdots + \omega_m p_{t-m} = \sum_{i=1}^{n} \delta_i q_{t-i} + \sum_{i=0}^{m} \omega_i p_{t-i} \tag{6}$$

式中，δ_i（$i = 1, \cdots, n$）为 n 个对应于前期流量的待定参数；ω_i（$i = 0, \cdots, m$）为 $m + 1$ 个对应于前期降雨量的待定参数。

有关文献中介绍了不少率定式（4）～（6）的方法，但主要者有三：

法一：最小二乘法可以直接用于推求式（4）～（6）中的参数，以式（4）为例，考虑到该式的误差 ε 后有：

$$q_t = \sum_{i=1}^{m} \alpha_i p_{t-i} + \varepsilon_t \tag{7}$$

最小二乘法有两个重要假设：①p_t 是确定性变量；②ε 是非自相关的随机变量。如能满足上述两个条件。则式（7）的估计就变成一个标准的线性回归分析问题。这样，普通最小二乘法可据式（8）的目标函数进行无偏估计：

$$J_t = \sum_{i=1}^{t} (q_t - H_i^T \Theta)^2 \tag{8}$$

式中，H_i^T 和 Θ 分别为前期降雨量向量和待定系数向量。

递推最小二乘法（Young，1974；Weiss，1980）也在研究之列。它可以随时间的延续逐时段地估算系数：$\Theta(t) = \Theta(t-1) + \Omega(t)$，其中 $\Omega(t)$ 为随机变量。对应于式（8），其目标函数可表达为：

$$J_t = \sum_{i=1}^{t} \lambda^{t-i} (q_t - H_i^T \Theta)^2 \quad 0 < \lambda < 1 \tag{9}$$

式中，λ 为权重因子。λ 越大，对前期资料的忽略程度越高，参数随时间的变化幅度越大。

法二：传输—噪声法需在式（4）～（6）中加入噪声项 η_t，然后求解式中的参数（Salas et al.，1980）。以式（6）为例，设 Q_t 为含噪声的 q_t，则有：

$$Q_t = q_t + \eta_t \tag{10}$$

式中 q_t 即为式（6），亦称传输函数；η_t 为白噪声系列 $\{a_t\}$ 的加权和：

$$\eta_t = \varphi_1 \eta_{t-1} + \varphi_2 \eta_{t-2} + \cdots + \varphi_n \eta_{t-n} + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \cdots - \theta_m a_{t-m} \tag{11}$$

为了书写文件，常使用滞后算子 $B_m q_t = q_{t-m}$ 和特征多项式来表示，如：

$$\delta_r(B) = 1 - \delta_1 B - \cdots - \delta_r B^r \tag{12a}$$

$$\omega_{S-1}(B) = 1 - \omega_1 B - \cdots - \omega_{S-1} B^{S-1} \tag{12b}$$

$$\varphi_n(B) = 1 - \varphi_1 B - \cdots - \varphi_n B^n \tag{12c}$$

$$\theta_m B = 1 - \theta_1 B - \cdots - \theta_m B^m \tag{12d}$$

因此，式（6）和式（11）可以改写成式（13）和式（14）：

$$\delta_r(B) q_t = \omega_{S-1}(B) p_t \tag{13}$$

$$\varphi_n(B) \eta_t = \theta_m(B) a_t \tag{14}$$

以式（13）和式（14）代换式（10）中的 q_t 和 η_t，可得：

$$Q_t = \frac{\omega_{S-1}(B)}{\delta_r(B)} p_t + \frac{\theta_m(B)}{\varphi_n(B)} a_t \tag{15}$$

式中，多项式 $\omega(B)$，$\delta(B)$，$\theta(B)$ 和 $\varphi(B)$ 可用参数辨识方法求解。Box 和 Jenkins（1970）推荐了一种“离线”辨识方法，该法将上述多项式表达为 p 和 q 的函数后，使用非线性最小二乘方法解之。Young（1974）也研究了递推型的求解方法，并将传输函数和噪声分开处理，还提出了 IVAML 估算程序。

法三：自适应算法源于自动控制理论。Ganendra（1980）将其应用到实时洪水预报方法的研究中。这一方法在引入随机误差的概念后，将式（6）表达为：

$$\zeta_m(B) q_t = \psi_n(B) p_t + \gamma_u(B) a_t \tag{16}$$

式中，B 为滞后算子，类似式（12a）～（12d）；$\zeta_m(B)$，$\psi_n(B)$ 和 $\gamma_u(B)$ 亦为特征多项式。

与众不同的是，自适应算法并不在于估计式（16）中的各参数，而是提供一个预报误差期望值最小的预报：

$$\hat{q}_{t/t-k} = \frac{\psi_n(B)}{\zeta_m(B)} p_t + \frac{G_S(B)}{\zeta_m(B) F_w(B)} \varepsilon_t \tag{17}$$

式中，$\hat{q}_{t/t-k}$ 为在 $t-k$ 时刻所作的 q_t 的预报；$G_S(B)$ 和 $F_w(B)$ 为特征多项式，ε_t 为预报误差：

$$\varepsilon_t = q_t - \dot{q}_{t/t-k} \tag{18}$$

式（17）中的参数可以用普通最小二乘方法率定。考虑到参数在涨洪和退洪过程中的变化和流域前期下垫面条件的影响，Ganendra（1980）还在方法中增加了“附加入流”的概念。

人们也注意到降雨和径流之间的线性关系与事实并不相符，因此设法减小非线性对计算结果的影响，为此，Whitehead 和 Young（1975）曾使用 $p_t^* = \mu_t p_t$（μ_t 为时变参数）代替式（17）中的 p_t；Todini 和 Wallis（1977）推荐了一种门槛方法，该法将实测降雨分成两级输人，以减小降雨的非线性影响。

2　概念流派

概念流派的研究工作是围绕概念性水文模型进行的。Tucci 和 Clarke（1980）提出了一个概念性水文模型参数的实时修正方法。一个五参数的降雨—径流模型被用作研究对象。这一参数修正方法包含如下几个要点：①预报过程中只保留 M（>0）个近期模型输入和输出测量值；②只考虑 $t-M$ 时刻的流域下垫面条件，t 为当前时段；③使用 $t-1$ 时段的模型参数值作为 t 时段模型参数估计初始值。Rosenbrock（1960）方法和最小二乘目标被用于参数的自动率定。Tucci 和 Clarke（1980）认为，模型参数修正的效果与所设计的参数修正方程式以及所使用的资料长度有密切的关系。

Brath 和 Rosso（1989）在这一领域作了有益的探讨。他们选用了一个六参数的降雨—径流模型进行研究。在他们的方法中，模型参数是利用本时段的实测资料进行修正的，然后用修正后的参数进行下一时段的预报。他们通过最小二乘和极大似然两种目标函数对比研究发现，当模型残差系列存在较强的自相关时，最小二乘目标函数显得更加有效。他们认为，对于模型参数实时修正，优化方法的选择十分重要。

3　残差流派

这一流派将研究的重点放在水文模拟模型的残差系列，这里主要提到两类方法：残差预报法和模型加权法。

3.1　残差预报法

Jones 和 Moore（1980）以及 Morre（1982）对这一方法作了较全面的介绍。这类方法依据了这样一个现象，模型误差在某一段时间里总呈现出系统性的正负变化，故此认为有可能对未来的误差进行预报。

以 $\hat{q}_t$ 表示在 $t-1$ 时对观测值 q_t 所作的

预报，ε_t 表示预报的误差，因此有：

$$q_t = \hat{q}_t + \varepsilon_t \tag{19}$$

自回归模型和自回归滑动平均模型是预报 ε_t 的主要方法，Box 和 Jenkins（1970）的著作已成为解决这类问题的经典著作。这里只列出它们的表达式。

残差系列的自回归模型 AR(m) 可表达成下述形式：

$$\Phi_m(B)\varepsilon_t = a_t \tag{20}$$

式中的参数与时间无关，a_t 为不相关的余差，$\Phi_m(B)$ 为 m 阶自回归算子。

残差系列的自回归滑动平均模型 ARMA（m，n）可表达为下述形式：

$$\Phi_m(B)\varepsilon_t = \Theta_n(B)a_t \tag{21}$$

式中的参数与时间无关，H_n（B）为 n 阶滑动平均算子。

用式（20）和（21）进行洪水预报，无需对原先率定好的水文模型做任何改动。这也许是残差预报法的主要优点。另外，新测到的水文信息较容易为这种方法所采用。这种方法的使用效果取决于残差系列的一致性，但正如 Moore（1982）指出的，这种一致性在实际中并不存在，一般而言，残差在洪峰部分的增长相当快。

3.2 模型加权法

这是另一种处理模型残差的方法。世上没有完美无缺的模型，每个得到公认的模型都有与众不同的优点。注意到这一事实后，就自然会产生这样的想法：是否可以集中各种模型的优点于预报？这一想法的首次实现是在经济领域里获得的（Bates 和 Granger，1969；Newbold 和 Granger，1974；Makridakis 和 Granger，1983）。经济领域的实践表明，模型加权法简单易行，可以大幅度提高预报精度。除此而外，Makridakis 和 Winkle（1983）指出，模型加权法可以使得预报的结果更加稳定，而且可以有效地避免使用单一模型时常遇到的预报波动现象。Roche 和 Tami（1987）也指出，模型加权法回避了最佳模型选择的争论，“最佳模型”隐含于预报过程之中。模型加权法的预报结果$\hat{q}_t$ 由下式给出：

$$\hat{q}_t = \sum_{i=1}^{n} w_i \hat{q}_t^{(i)} \tag{22}$$

式中，n 为模型数；$\hat{q}_t^{(i)}$ 为第 i 个模型对 t 时刻的预报；w_i 为第 i 个模型的权重。

应用于模型加权法的模型必须是不同类型的模型。用于每个模型的权重可相同也可不同。在后者，模型的权重取决于预报残差的协方差分析，如下面提到的两种方法：

平稳加权法是依据预报残差系列的方差最小原则确定模型权重的。在协方差矩阵已知的条件下，模型权重可由下式计算：

$$w_i = \frac{\left[\sum_{k=t-m}^{t-1} (\varepsilon_k^{(i)})^2\right]^{-1}}{\sum_{j=1}\left[\sum_{k=t-m}^{t-1} (\varepsilon_k^{(j)})^2\right]^{-1}} \tag{23}$$

式中，$\varepsilon_k^{(i)}$ 为第 i 个模型第 k 个时段的误差；n 为使用的模型数；m 为考虑模型误差的时段数；w_i 介于 0 和 1 之间，并有 $\sum_{i=1}^{n} w_i = 1$。

递推加权法是 Newbold 和 Granger（1974）提出的。该法采用实测资料，通过协方差矩阵的估算，实时推求模型的权重。此法可依据实际预报效果，加强预报效果好的模型的作用，同时减弱预报效果差的模型的作用。Newbold 和 Granger（1974）提出了如下公式：

$$w_{i,t} = \beta w_{i,t-1} + (1-\beta) w_{i,t} \tag{24}$$

$$w_{i,t} = \frac{\left[\sum_{l=t-m}^{t-1} (\varepsilon_l^{(i)})^2\right]^{-1}}{\sum_{j=1}\left[\sum_{l=t-m}^{t-1} (\varepsilon_l^{(j)})^2\right]^{-1}} \tag{25}$$

式中，$w_{i,t}$ 为 t 时段第 i 个模型的权重；β 为前

后相邻时段的模型权重的加权系数。其它符号的意义同式（23）。

McLeod 等（1987）应用了平稳权加法进行了洪水预报的尝试，他们考虑了三类模型：周期性 ARMA 模型、传输—噪声模型和 PREVIS 概念性降雨—径流模型（Kite，1978）。研究结果表明，模型加权法可在一定程度上提高预报精度。

Tamin（1986），Roche 和 Tamin（1987）应用了递推加权法进行河流上、下游预报，考虑了三类模型：上、下游实测水位相关模型，上、下游水位增量相关模型和下游水位自相关模型。通过研究发现了递推加权法的下述优点：①预报中无需参数率定；②可以利用各种类型的水文模型；③模型权重的修改是可逆的。

4 滤波流派

滤波流派兴起于 80 年代初，状态—空间和 Kalman 滤波是其核心技术。自从 Kalman（1960）以及 Kalman 和 Bucy（1961）在过程控制领域提出了 Kalman 滤波理论以来，这一理论在包括洪水预报等技术领域受到高度重视并得以广泛应用。它之所以能够用于洪水预报这一特殊目的，Bergman 和 Delleur（1985a）认为这决定于这项技术的四个优点：①它可以进行模型参数的实时最优估计；②它可以同时评价系统状态和预报精度；③它分开处理系统噪声和量测噪声；④它可以处理非稳定系统。

应注意到，状态—空间和 Kalman 滤波技术只是一种结构，它的应用必须辅以研究对象的数学描述（如数学模型），这种描述可精细可粗浅，但却不可缺少。另外，这一数学描述必须符合一种特殊的数学格式，以满足使用 Kalman 滤波技术的需要，进行这一数学格式化的工具就是状态—空间技术。状态—空间技术包括两项内容：一是在描述系统的时变过程中，要同时考虑确定成分和随机成分；二是要区别考虑系统噪声和量测噪声。后者与传统的方法大相径庭，因为传统方法总是将各种噪声笼统考虑。状态—空间技术的与众不同之处就是突出了确定性模型中没有反映的随机影响。

设 X_t 为状态变量，Y_t 为 X_t 的测量值，由于测量误差 v_t 的存在，故有 $Y_t=X_t+v_t$。这里要解决的问题就是如何从 Y_t 中"过滤"掉 v_t。Kalman 滤波的目的是依据过去的测量数据 Y_t，求得 X_t 的线性的、无偏的、方差最小的估计值。在这项技术中，一个线性系统可以简单地用一对系统方程和量测方程表达：

系统方程：

$$X_{t+1}=F_tX_t+B_t+\omega_t \tag{26}$$

量测方程：

$$Y_t=H_tX_t+v_t \tag{27}$$

式中，X_t 为状态向量；Y_t 为量测向量（如流量）；u_t 为系统的输入（如降雨）；ω_t 和 v_t 分别为状态噪声和量测噪声；B_t 和 H_t 为传输矩阵。ω_t 和 v_t 为独立一致的正态随机变量，即满足：

$$E(\omega_t)=0;\ E(v_t)=0;\ E(\omega_t\omega_k^T)=W\delta_{t,k};\ E(v_tv_k)=V\delta_{t,k};\ E(\omega_tv_k^T)=U\delta_{t,k} \tag{28}$$

$$\delta_{t,k}=\begin{cases}0 & t\neq k\\ 1 & t=k\end{cases} \tag{29}$$

式 (28) 中 U、V 和 W 为常数；当 $s\neq t$ 时，状态噪声 ω_s 与状态向量 X_t 之间相互独立；任意时刻都有量测噪声 v_t 状态向量 X_t 之间相互独立。

图 1 描述了式（26）和（27）在二维状态向量情形下的滤波。图 1 中，与预报有关的不确定因素用一椭圆表达，系统状态的量测伴有噪声，$\hat{Y}_{t+1}$ 和 $\hat{X}_{t+1/t}$ 经"滤波"后用于 $\hat{X}_{t+1/t+1}$ 的估计。

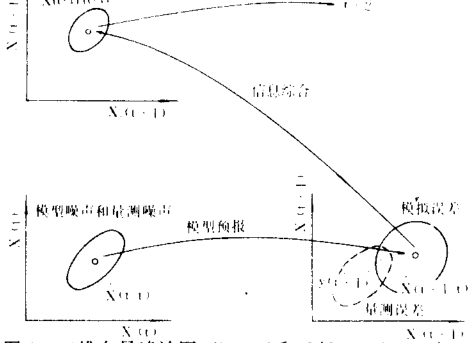

图 1 二维向量滤波图（Wood 和 O'Connell,1985）

状态—空间和 Kalman 滤波技术的重要特点在于它的通用结构。不同类型的水文模型可以因之统一在同一格式之下。当然，这种统一要经过适当的技术处理才能达到。Chiu (1980)，Wood (1980) 和 IAHS (1980) 提供了若干模型格式化的实例。

状态—空间和 Kalman 滤波技术将系统噪声和量测噪声分开考虑，这对于分析有较强量测干扰的水文系统来说有着特殊的意义。自从 Kalman 滤波技术在水文学领域应用以来，量测噪声问题在水文学的研究中受到了一定的重视。Sorooshian 和 Dracup (1980) 介绍了一种用于流量测量中具有变动方差的相关性噪声的分析方法。Potter 和 Walker (1981) 的研究揭示了不同量级的洪峰的量测噪声的不同特性。但正如 Bergman 和 Delleur (1985a) 指出的，水文学中的量测噪声的研究仍处于起步阶段。

理论上讲，获得状态变量最优估计的条件是知道传输矩阵以及系统噪声和量测噪声的统计特性。但正如 Jazwinski (1970) 指出的，对于一个工业自动控制问题，上述条件较易满足；但对于实时洪水预报问题，这些条件不可能得到满足，而且它们要作为未知因素与系统状态同时估计。这使得从自动控制理论将状态—空间和 Kalman 滤波技术移植到水文预报领域变得十分棘手。为解决这一问题，Mehra (1970)，Quigley (1973)，Todini (1978) 等人进行了大量研究，从中诞生了一些专以洪水预报为目的的改进型 Kalman 滤波方法。

非线性类的 Kalman 滤波方法在洪水预报的研究中也曾构成一个重要的分支。对比式 (26) 和式 (27)，可以将非线性 Kalman 滤波表达为：

$$X_{t+1}=F_t\ (X_t)\ +G_t\omega_t \tag{30}$$

$$Y_t=H_t\ (X_t)\ +v_t \tag{31}$$

式中，$F_t(\cdot)$和 $H_t(\cdot)$为非线性函数，G_t 是依赖于系统状态的传输矩阵，ω_t 和 v_t 的定义与式 (26) 和式 (27) 的相同。对式 (30) 和式 (31) 进行台劳展开，可得式 (30) 和式 (31) 的线性近似；这一线性近似被定义为扩展 Kalman 滤波。人们围绕扩展 Kalman 滤波做了很多工作，Duong 等人 (1975) 曾将其用于 PRASAD 水文模型，Moore 和 Weiss (1980) 也将该法用于非线性的降雨—径流模型。

Kitanidis 和 Bras (1980a 和 b) 在状态—空间和扩展 Kalman 滤波技术方面作出了出色的工作。从他们的工作中可管窥将概念性模型格式化成状态—空间形式的难度。颇具影响的概念性降雨—径流模型 NWSRFS (Peck, 1976) 被用于这项研究。原则上讲，这项研究的结论对概念性模型具有普遍意义。Kitanidis 和 Bras (1980a) 在分析了概念性模型的结构以后，认为概念性模型忽略了来自四个方面的不确定性：即模型自身的、模型参数的、模型输入的和模型初始状态的。并认为，将概念性模型嵌入一个可以考虑随机因素的形式是十分必要的。Kitanidis 和 Bras (1980a 和 b) 的工作包括三个部分：①将概念性模型格式化成状态空间形式；②将模型的成分线性化；③系统方程求积。

NWSRFS 模型的状态—空间形式可表达为关于状态变量 X 的一阶微分开式：

$$\dot{X}=f(X,u,t)+\omega(t) \tag{32}$$

并有状态方程：

$$Y(t)=h[X(t)]+\varepsilon(t) \tag{33}$$

式中，t 为时间，u 为系统输入，ω 为系统噪声，Y 为含有误差 ε 的量测向量，h ($\cdot$) 和 f ($\cdot$) 为非线性函数。

NWSRFS 在五个方面进行了线性化：①删除表土层的自由水面蒸发；②修改下土层的入渗公式；③删除自由水向张力水的转换；④忽略地表水的作用；⑤用线性方法替代非现行的河道演算方法。简化后的模型与原模型进行了对比，对比结果表明两者之间在模拟结果上没有显著差别 (Kitanidis 和 Bras, 1980a)。简化后的 NWSRFS 模型含 7 个产流参数，1 个汇流参数。线性化的目的是将式 (32) 和式 (33) 转化成与式 (26) 和式 (27) 类似的形

式:

$$X=F_tX(t)+B_tu(t)+\omega(t) \tag{34}$$

$$Y(t)=H_tX(t)+v(t) \tag{35}$$

式中，F，B 和 H 的意义与式（26）和式（27）相同。由于概念性模型中存在门槛类函数，致使台劳展开这一传统的线性化方法难以应用。因此，Gelb（1974）方法被用于线性化。Gelb 方法的特点是可以依据不同的输入水平将一个非线性函数线性化，这一方法并不要求非线性函数的可微性，并能在线性形式中最大程度地保留原有非线性函数的性质。

系统方程求积的目的是为了从式（34）中获得系统状态的估计。Kitanidis 和 Bras（1978a 和 b）曾提出了专门的求积方法，并提出了用于估计模型误差和模型输入误差的统计特性的方法；除此之外，还建议了一些用于高斯白噪声、不变协方差矩阵、不相关高斯随机变量等特殊条件的估计方法。

经过这一系列繁杂的处理，NWSRFS 模型可以被表示成式（34）和式（35）的形式，模型的参数和预报过程中随机影响的传播等都可以用 Kalman 滤波技术进行实时估计。而且，信息反馈技术也可用于实时洪水预报。

从 70 年代初到 80 年代末，水科学文献中可查阅到大量的关于状态—空间和 Kalman 滤波技术的论文。70 年代，Szollosi-Nagy（1976）将该技术应用于卷积形式的输入—输出模型进行流量预报；Wood 和 Szollosi-Nagy（1978）将该技术用于意大利 Ombrone 河的 6 小时预报。

Chiu(1978)总结了 70 年代期间 Kalman 滤波技术在水文学、水力学和水质等方面的研究情况。在 80 年代，除去前述的 Kitanidis 和 Bras 的工作外，Logan 等（1982）曾以 Kalman 滤波技术为基础，建立了非线性模型的预报系统；Bergman 和 Delleur（1985a 和 b）建立了日流量的算法；Jimenez 和 McLeod（1989）还对周期 ARMA 模型进行了 Kalman 滤波的研究。

5 统计流派

统计流派提出的洪水预报方法主要倚重统计方法。这类方法见诸文献的不多，这里以临近相似法为例。临近相似法是统计学中的无参数统计方法之一。Yakowitz（1985），Kalsson 和 Yakowitz（1987a 和 b）以及 Yakowitz 和 Kalsson（1987）将该法应用到洪水预报。对于洪水预报问题，通常考虑降雨径流随机系列$[(p_i,\ q_i),\ i=1,\ 2,\ \cdots,\ n]$，$p$ 和 q 分别为降雨和径流。临近相似法对降雨径流系列有一个重要假设，即降雨和径流系列是平稳的（与初始时间无关）和各态历经的（收敛于均值）。临近相似法涉及到下面三个重要定义。

定义一：设$[(p_i,\ q_i),\ i=1,\ 2,\ \cdots,\ n]$为一有限长的降雨径流随机系列，并且 M 为小于 n 的正整数，$X(n)$被称作特征向量的充分必要条件是 $X(n)$只与 M 个最近期的量测值相关，而且这一相关关系与时间 n 无关。例如，$X(n)=[q(n),\ q\ (n-1),\ p\ (n),\ p\ (n-1)\ ]$。设 $m(X)$为与当前特征向量 X 有关的未来流量期望值，有:

$$m(X)=E[q(n+1)\ /\ X(n)=x] \tag{36}$$

式中，$m(X)$是一非线性回归函数，也就是从当前时段进行预报的最优预报指标。临近相似法是一种求出 $m(X)$近似解的方法。

定义二：设 $k<<n$ 为历史资料的某一长度。用符号‖·‖表示欧几里德距离。则 $S(x,\ n)$为 k 个与 x 最为相似的向量的指标的集合。换言之，$S=S(x,\ n)$中包含 k 个分布于 1 到 n 之间的正整数；如果 i 属于 S，而 j 不属于 S，则有:

$$\| x-x_i \| \leqslant \| x-x_j \| \tag{37}$$

定义三：依据 k 个临近相似向量求解预报值 $m(X)$的近似解 $m_n(X)$的公式:

$$m_n(X)=\frac{1}{k}\sum_{i\in S(x,\ n)} q(i+1) \tag{38}$$

图 2 描述了一个应用临近相似法进行流量预报的例子，其中临近相似向量数是 4，向量维数是 3:

$$x(n)=[q(n),q(n-1),q(n-2)] \tag{39}$$

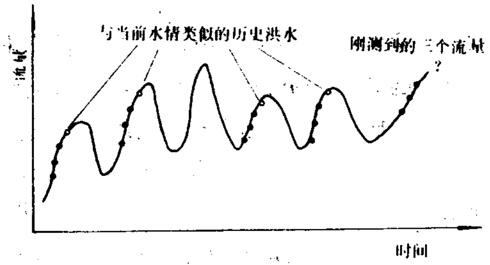

图 2 临近相似法示例（Kalsson 和 Yakowitz，1987a）

通俗地讲，上例中的临近相似法是在所有实测资料中寻找 3 个流量一组的 4 组流量，这几组流量应与当前刚刚测到的 3 个流量一一对应相似，预报值就是这 4 组流量后面的流量的平均值。原则上讲，临近相似法中还可以考虑到更多诸如土壤湿度和温度等信息，但这取决于这些信息在实时预报中的可用性（Yakowitz，1985）。Kalsson 和 Yakowitz (1987a) 对比了临近相似法和 ARMAX 与瞬时单位线法，他们认为前者优于后者。

6 对实时洪水预报技术现状的思考

参数辨识方法在黑箱流派的工作中占据着重要的位置，但应注意到对水文现象本身的忽视是这一流派的先天不足。这一点已逐渐得到人们的共识：参数辨识方法仅提供了模型参数识别的工具，它并不能代替对水文现象的研究。因此过分偏重参数辨识技术的做法，只能在很有限的范围内解决问题。但这些研究向人们明确了这样一点，有效的实时洪水预报方法至少应该具备递推运算和参数校正两个基本功能。

残差流派是非常务实的，它从现有水文模拟模型这一高起点出发，设法改善模型现有预报精度，虽然这一流派的方法在理论上简单，但在实际中却被广泛接受。这给人们一个重要启示，在实时洪水预报技术的研究中，不应偏废简单却有效的方法的研究。

概念流派为 Kitanidis 和 Bras（1980a）所肯定，因为概念性水文模型在充分考虑了人们对于水文现象的认识的同时，又顾及到实际应用的目的。但概念性水文模型的复杂结构，常使实时洪水预报的研究变得十分棘手。

滤波流派最大的贡献是提供了一个理想的实时洪水预报结构，并在结构中递推和反馈两个机制包含其中。但从现状来看，滤波流派的研究距实际应用尚有相当距离。

统计流派的工作是有益的尝试，但对于水文现象的过分忽视显然对解决问题不利。Kalsson 和 Yakowitz（1987a）指出了临近相似法的缺陷：①平稳的假定与水文现象并不相符，因此造成预报结果的不可靠性；②用式 (38) 不可能作出大于现有实测值的预报，这不利于稀遇洪水的预报。

与水文模型有关的因素有内外之分，模型之外是输入和输出；模型之内是结构、参数和状态。从水文模型的角度看，有些预报方法只与模型外部因素有关，如残差方法；而有些方法只与模型内部因素有关，如参数修正法。事实上，存在于模型输入和率定参数的误差是经过模型状态的演算后，最终在模型输出中得到反映。因此，虽然各种预报方法处理的因素不同，但它们在理论上却具有相同的合理性。

当研究实时洪水预报时，人们比较偏爱结构简单的模型。在线性模型和概念性模型之间，人们选择线性模型（如 Lambert，1972）；在概念性模型之间，人们或者选择结构简单的（如 Tucci 和 Clarke，1980；Brath 和 Rosso，1989），或者将现有模型进行简化（如 Kitanidis 和 Bras，1980a 和 b）。Sorooshian（1983）认为这种现象是很自然的，因为当前的参数估计水平还不足以应付所有遇到的问题。但也应当看到，目前应用的一些数学方法“迫使”模型进行了简化。

许多数学工具被尝试性地用于实时洪水预报，但研究中应充分注意到这些数学工具的应用条件是否与水文现象相符合。O′Connell 和 Clarke（1981）的研究表明，在大多数情况下，水文模型的残差是非平稳的和自相关的。

（下转第 65 页）

计算机教学录像带简介

孙洪林　曾　焱

(水利部水利信息中心)

随着国民经济信息化的高速发展，对水利系统应用计算机技术提出了更高的要求。为适应这一形势，更好地解决学习和应用计算机技术中的问题。水利信息中心本着普及与提高和学习与应用相结合的原则，与电子工业部计算机与微电子发展研究中心联合研制了一批计算机电视教学录像带。有关内容简介如下，供有关单位参考选用，以提高水利系统应用计算机技术的水平。电话：(010) 63202204，BP：(010) 62048888 呼 18515。

1. 《PowerBuilder 电视教程》：讲述 PowerBuilder 的基本技术，结合实例阐述如何开发 Windows 下的应用程序、管理数据库、管理源程序；调用其它高级语言编写的 DLL、使用 DDE 和 OLE 等技术。

2. 《Windows95 电视讲座》：讲述 Windows95 的操作、设置、附件程序、系统工具、汉字功能、网络通信等内容。

3. 《个人电脑讲座》：从原理入手讲述了计算机发展及应用；对名牌微机、兼容机的区别分析；对计算机流行软件及家用电脑问题的指导，计算机常见故障的判断与维修。

4. 《电脑基础一月通》：介绍计算机基础知识、基本操作，DOS、中文处理软件 WPS 和 CCED 的使用。

5. 《FoxPro2.5 版电视教程》：分 For Windows 和 For DOS 两部分，分别介绍 FoxPro 的概论、建立数据库文件、索引和排序、SQL 查询、FoxPro 程序设计。

6. 《VISUAL BASIC 语言电视教程》：讲述 VB 的基本概念、可视化开发工具、数据库管理工具、OLE 和 DDE。使程序员能使用 VB3.0 的高级功能。

7. 《Windows3.1 讲座》：采用边讲解边操作边演示的方式讲述如何使用 Windows3.1。

8. 《中文 Excel5.0 教程》：讲述 Excel 的制表、设计图文、数据计算和分析。

9. 《NOVELL 网络原理及应用》：介绍微型计算机 NOVELL 局域网络操作系统，Netware 的基本原理及应用、网络的构成、系统安全及数据保护生成网络应用；Netware 原理、驱动器管理、通信及一般命令、Netware 网络互联等。

10. 《Netware4.1 入门》：介绍从 Netware3 到 Netware4 的升级过程，Netware4.1 的安装、管理与配置，建立 NDS 的基本概念。

11. 《C 语言》。

12. 《微型计算机原理及应用》。

13. 《软件人员水平考试辅导讲座》。

14. 《SCO UNIX SYSTEM V 和 TCP / IP 网》。

15. 《中文 WORD6.0 实用教程》。

16. 《POWERPOINT 实用教程》。

(上接第 16 页) 也就是说，Kalman 滤波中关于模型误差的假定与事实出入较大。Yakowitz (1985) 分析了 Kalman 滤波和 ARMA 模型，他主张慎用正态分布的假定，因为水文系列看起来与正态分布相去甚远。虽然由于水文系列的非平稳性和自相关性，而无法检验它的正态性；但有足够的理由怀疑 Kalman 滤波和 ARMA 模型在实时洪水预报中的可用性。Rodriguez-Iturbe 等 (1978) 强调了这样一个观点，数学工具应被当做水文模型的补充，而不是替代。

总的来看，实时洪水预报的研究仍面临很多困难，仍处于艰难的探索阶段。限于篇幅，参考文献从略。

(收稿日期：1996-01-22)