

枯水流量演进方法及其应用

苏茂林

(河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 将枯水期河段槽蓄水量表示为上断面多个时刻流量的线性组合,考虑河段引水、加水和损失等因素的影响,建立了枯水流量演进的线性方程模型,并用优化方法率定了模型参数;以河段上断面流量、河段用水量、区间加水量、河段损失量作为网络输入因子,河段下断面流量作为网络输出因子,构建了一个 3 层 BP 神经网络模型;将线性方程模型、BP 神经网络模型和水力学方法应用于黄河下游河段枯水流量演进模拟计算,并对其模拟结果进行了比较。结果表明:线性方程模型稳定性好,便于演进计算和反馈控制计算;BP 神经网络模型具有较好的泛化能力,计算精度也较高,但难以进行反馈控制计算;水力学方法在进行流量演进和反馈控制时,存在计算稳定性和收敛性问题,其应用有一定困难。

关键词 线性方程模型;BP 神经网络模型;水力学方法;黄河下游河段;流量演进;反馈控制

中图分类号 P338 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2006)03-0267-05

流量演进规律研究是水文预报研究中的重要课题^[1-4]。近年来,国内外对河道流量演进,尤其是洪水演进问题进行了大量的理论和应用研究,并取得了许多研究成果^[5-10]。由于枯水测验相对误差较大、损失水量确定困难、引水量对枯水演进规律的影响较大等原因,枯水期小流量演进规律研究方面的成果不多,特别是复杂河槽、长距离、长历时的枯水期小流量演进规律研究方面的成果则更少。而在黄河水量统一调度中,黄河中下游河道枯水流量演进模拟计算结果是很重要的理论依据。为此,本文采用线性方程模型、神经网络模型及水力学方法研究了枯水流量演进模拟计算问题,并对黄河中下游河段进行了枯水流量演进模拟计算。

1 演进方法

1.1 线性方程模型

天然河道中的水流一般属非恒定流,可用圣维南方程组来描述。对圣维南方程组进行简化和概化后,则可得水量平衡方程与槽蓄方程^[1]

$$\frac{1}{2}(Q_{上,1} + Q_{上,2})\Delta t - \frac{1}{2}(Q_{下,1} + Q_{下,2})\Delta t = S_2 - S_1 \quad (1)$$

$$S = f(Q) \quad (2)$$

式中: $Q_{上,1}, Q_{上,2}$ ——上断面时段始、末入流量, m^3/s ; $Q_{下,1}, Q_{下,2}$ ——下断面时段始、末入流量, m^3/s ; Δt ——计算时段, d ; S_1, S_2 ——河段时段始末蓄水量, m^3 。在稳定流状态下,任一断面流量与槽蓄量之间具有单值关系,即槽蓄量 $S = KQ$ (K 为槽蓄常数)。在非稳定流状态下,由于存在附加比降,随着水面比降的变化, S 与 $Q_{下}$ 呈多值关系,此时槽蓄量 $S = f(Q, i)$ 。在天然河道中,槽蓄关系一般为非线性的多值关系。事实上,枯水期河段槽蓄水量可表示为上断面多个时刻流量的线性组合,即

$$SW_t = \sum_{i=0}^n \beta_i Q_{t-i}^s \quad \sum_{i=0}^n \beta_i = 1 \quad (3)$$

将式(3)代入式(1),可得

$$Q_t^{s+1} = \sum_{i=0}^n \alpha_i Q_{t-i}^s \quad \sum_{i=0}^n \alpha_i = 1 \quad (4)$$

式中: α_i, β_i ——线性组合系数; n ——河段演进方程系数的个数。

由上可知,枯水期河段槽蓄方程与流量演进方程具有相似性,并且当获得其中一个方程系数后,即可获得另一个方程的系数.系数 α_i 与河段的流量级有关,不同的流量级有不同的 α_i ,考虑河段引水、加水、损失等因素对 α_i 系数的影响后,河段流量演进方程可写为

$$Q_t^{s+1} = \sum_{i=0}^n \alpha_i (Q_{t-i}^s - L_t^{s,s+1} - W_t^{s,s+1} + R_t^{s,s+1}) \tag{5}$$

$$\sum_{i=0}^n \alpha_i = 1 \tag{6}$$

式中: $L_t^{s,s+1}$ ——河段损失量; $W_t^{s,s+1}$ ——河段区间用水量; $R_t^{s,s+1}$ ——河段区间加水量.

1.2 BP神经网络模型

设BP网络由输入层、隐层、输出层组成,样本数为 p ,输入节点为 x_j ,隐层节点为 y_i ,输出节点为 o_l ,输入层与隐层间的连接权值为 w_{ij} 、阈值为 θ_i ,隐层与输出层间的连接权值为 T_{li} 、阈值为 θ_l , n 为输出样本数, η 为常数, k 为迭代次数,根据BP网络理论,隐层节点的输出为

$$y_i = f(\sum_j w_{ij} x_j - \theta_i) \tag{7}$$

输出节点的输出为

$$o_l = f(\sum_i T_{li} y_i - \theta_l) \tag{8}$$

所有样本的误差为

$$E = \sum_{k=1}^p e_k < \varepsilon \tag{9}$$

其中

$$e_k = \sum_{l=1}^n |t_l^{(k)} - o_l^{(k)}| \tag{10}$$

输出节点到隐节点的误差公式为

$$\delta_l = (t_l - o_l) o_l (1 - o_l) \tag{11}$$

权值修正公式为

$$T_{li}(k+1) = T_{li}(k) + \eta \delta_l y_i \tag{12}$$

阈值修正公式为

$$\theta_l(k+1) = \theta_l(k) + \eta' \delta_l' \tag{13}$$

隐节点到输入节点的误差公式为

$$\delta_i = y_i (1 - y_i) \sum_l \delta_l T_{li} \tag{14}$$

权值修正公式为

$$w_{ij}(k+1) = w_{ij}(k) + \eta' \delta_i' x_j \tag{15}$$

阈值修正公式为

$$\theta_i(k+1) = \theta_i(k) + \eta' \delta_i' \tag{16}$$

要使网络的实际输出尽可能地接近期望输出, E 和 e_k 必须达到最小.这可以通过调节网络各节点的连接权系数和阈值来实现.此外,可利用规则化方法来调整网络的性能函数,以提高网络的泛化能力.

2 模型应用

黄河小浪底水库至利津水文站断面距离约 788 km,深槽断面距离约 795 km,落差 89 m,平均比降为 1/8 000.近十多年来,黄河水量持续偏枯,水少沙多,加剧了主河道的淤积,有些河段已形成二级地上悬河,水流在河槽中摆动频繁,河槽形态剧烈调整,河道水流传播规律更加复杂多变,加大了水量调度特别是枯水水量调度工作的难度.目前,下游河段有引黄涵闸 92 座,其中河道南岸 39 座、河道北岸 53 座,设计引水流量大于 100 m³/s 的涵闸 11 座.

2.1 线性方程模型的应用

式(5),(6)为枯水期河段流量演进方程模型.当无断面流量控制或区间引水等人为因素对枯水流量演进

规律造成的影响较小时,可直接应用该模型进行流量演进模拟;当河段引水比重较大或进行断面流量控制时,则需对该模型进行修正.

约束方程 $\sum_{i=0}^n \alpha_i = 1$ 保证了枯水演进过程河段内的水量平衡,说明演进方程遵循了质量守恒原理.对于冰凌期,可增加一个冰凌模型计算的河段冰凌槽蓄量,以保持河段的水量平衡.

2.1.1 线性方程模型的修正

冻利(冻口—利津)河段区间引水及不确定耗水等因素在本河段入流量中所占比重较大,对枯水流量演进规律的影响较大.例如,2002 年 4 月,口门引水量占入流水量的 50%,利津断面出流量仅占入流水量的 25.6%,其他不确定耗水量占入流水量的 24.4%.另外,利津断面为防断流监控断面,当发生断流预警时,首先会对邻近河段用水进行压缩调控.这时,冻利河段的流量演进规律会较大地受到人为控制因素的影响,从而会使利津断面当天或未来枯水流量与本断面历史时刻流量相关.由此可见,冻利河段的引水量、不确定耗水量和河段用水量的防断流控制等因素对枯水流量演进规律有较大影响.式(5),(6)不能很好地满足冻利河段流量演算的需要.为了更好地反映本河段的水量演进规律,对式(5),(6)进行了修正.于是,

$$Q_t^{s+1} = \sum_{i=0}^n \alpha_i (Q_{t-i}^s - L_t^{s,s+1} - W_t^{s,s+1} + R_t^{s,s+1}) + \sum_{j=1}^m \alpha_j Q_{t-j}^{s+1} \quad (j = 1, 2, \cdots, m)$$

(17)

$$\sum_{i=0}^n \alpha_i + \sum_{j=1}^m \alpha_j = 1 \quad (j = 1, 2, \cdots, m)$$

(18)

式中: Q_{t-j}^{s+1} —— $s+1$ 断面前 j 天的实测流量; α_j ——本断面前 j 天实测流量线性组合成为本断面当天流量的系数(演进参数); m ——河段数; n ——天数.式(17),(18)的物理意义是,本断面的当天流量是上断面各历史时刻实测流量与本断面各历史时刻实测流量的线性组合.

2.1.2 参数优选方法

根据式(17),(18),利用历史实测资料,由上断面 n 个历史时刻流量(n 与流量传播时间有关)多元线性拟合计算下断面当前流量.拟合时以下式(即拟合误差平方和最小)作为目标函数,以式(18)作为约束条件.

$$\min \epsilon^2 = \min \sum_{t=1}^m (\hat{Q}_t^{s+1} - Q_t^{s+1})^2$$

(19)

式中: $\hat{Q}_t^{s+1}$ —— $s+1$ 断面 t 时段的计算流量.

根据上述方法建立了小浪底以下河段枯水流量演进方程参数自动优化模型.该模型根据上下断面流量、区间用水、区间加水等概化节点的实测资料信息,先对各河段下断面流量进行还原,然后根据设计的优化算法计算各河段水量演进方程参数.在实际调度过程中,随着河段实测资料信息的更新和延长,实时运行该参数优化模型,可达到动态计算演进参数,提高流量演算精度的目的.

2.1.3 模拟计算

首先采用参数优选方法对 2001 年 11 月~2002 年 10 月实测资料系列中符合枯水流量条件的资料分河段进行流量演进参数的优选(表 1),然后应用流量演进方程演算断面流量,以验证枯水演进参数优化算法和流量演进方程的合理性,最后把参数优选结果应用于 2002 年~2003 年的流量演进模拟中.从各断面的流量演算结果与实测结果的拟合效果来看,本文所建立的枯水流量演进方程和演进参数优选模型是合理的、可行的.

2.2 BP 神经网络模型的应用

以河段上断面流量 Q_{t-i}^{s+1} 、河段用水量 $W_{t-i}^{s,s+1}$ 、区间加水量 $I_{t-i}^{s,s+1}$ 、河段损失量 $L_{t-i}^{s,s+1}$ (i 为天数)作为网络输入因子,以河段下断面流量 Q_t^s 作为网络

表 1 2001 年 11 月~2002 年 10 月小浪底以下部分河段枯水流量演进参数优选结果

Table 1 Calibrated parameters for discharge routing of low reaches of Xiaolangdi Reservoir during the low water period from Nov. 2001 to Oct. 2002						
河段	季节	流量分级/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	演进参数			
			a_0	a_1	a_2	a_3
小花	冬		0.02	0.24	0.48	0.26
	春	0 ~ 250	0.12	0.27	0.42	0.19
		250 ~ 500	0.02	0.56	0.42	
		500 ~ 800	0.02	0.78	0.20	
	夏		0.02	0.74	0.22	0.02
	秋		0.06	0.62	0.30	0.02
花夹	冬		0.28	0.54	0.18	
	春	0 ~ 250	0.01	0.23	0.76	
		250 ~ 500	0.30	0.60	0.10	
		500 ~ 800	0.20	0.72	0.08	
	夏		0.28	0.58	0.12	0.02
	秋		0.22	0.62	0.14	0.02

输出因子.其中河段用水、加水和损失3项之和可合并为 $V_{t-i}^{s,s+1}$.

根据所选取的输入、输出因子构建BP神经网络.即:对于小花河段,输入层设置 $Q_{t-i}^{s+1}, Q_{t-1}^{s+1}, Q_{t-2}^{s+1}, V_t^{s,s+1}, V_{t-1}^{s,s+1}$ 5个节点,隐层设置5个节点,输出节点为 Q_t^s ,形成5-11-1网络结构;对于冻利河段,输入层设置 $Q_{t-i}^{s+1}, Q_{t-1}^{s+1}, Q_{t-2}^{s+1}, Q_{t-3}^{s+1}, V_t^{s,s+1}, V_{t-1}^{s,s+1}, V_{t-2}^{s,s+1}$ 7个输入节点,隐层设置5个节点,输出节点为 Q_t^s ,形成7-5-1网络结构.

网络训练样本选用小花河段、冻利河段2002年3月22日~2002年6月30日的资料系列,检验样本选用小花河段、冻利河段2003年3月22日~2003年6月30日的资料系列.

BP网络结构、网络输入输出及隐层节点确定后,应用MATLAB工具箱中的trainbr性能函数训练网络.经过约1000次的网络训练后,MU(马跨特调整系数)达到最大,训练停止,此时误差平方和SSE(sum of squared error)一般小于10.0.

本文应用训练后的BP网络模型对黄河下游花园口断面和利津断面枯水日流量进行了预测.结果表明,BP神经网络模型与线性方程模型精度相近.

2.3 水力学方法的应用

小浪底至花园口(统测断面位置,约在花园口水文站下游1.8 km处)长约128 km,大致可分为上游峡谷段和下游宽浅段.上段从小浪底坝下到焦枝铁路桥,长约10 km,比降为0.007 0%;下段长约118 km,比降为0.002 5%.根据河道地形特征,结合模型计算要求,流量演进时共划分了16个计算断面,断面平均间距8 km.其中上游峡谷段划分为4个断面,下游宽浅段划分为13个断面.利用2002年、2003年3月22日~6月30日小浪底泄流过程,模拟计算至花园口,在考虑区间来水的情况下,其流量过程如图1所示.从流量变化形态来看,峰谷值吻合较好.其中,2002年流量模型计算结果与实测结果的最大相对正负偏差分别为20.7%, -18.3%,2003年流量模型计算结果与实测结果的最大相对正负偏差分别为25.8%, -17.5%.总体来讲,采用水力学方法可以较好地模拟2002年和2003年的流量演进过程.

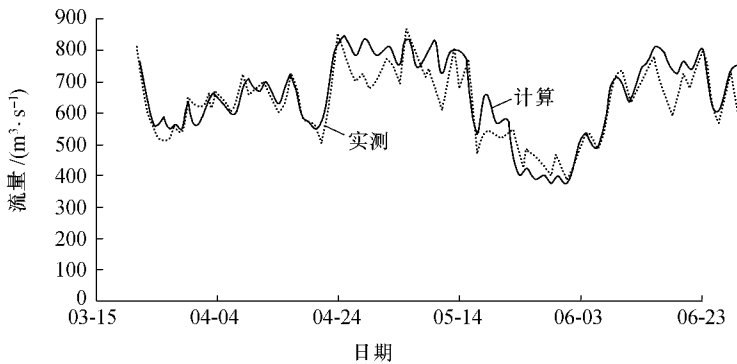


图1 花园口2002年3月22日~6月30日计算流量与实测流量的对比

Fig.1 Comparison of observed and simulated discharges at Huayuankou from Mar. 22 to Jun. 30 of 2003

3 结 论

- a. 将枯水期河段槽蓄水量表示为上断面多个时刻流量的线性组合,考虑河段引水、加水、损失等因素的影响,建立了线性方程模型,并导出了可考虑本断面各历史时刻实测流量影响的修正线性方程模型,同时还应用历史实测资料确定了模型参数.
- b. 以河段上断面流量、河段用水量、区间加水量、河段损失量作为网络输入因子,以河段下断面流量作为网络输出因子,构建了BP神经网络模型,并利用MATLAB神经网络工具箱中trainbr函数和Levenberg-Marquardt优化方法进行了网络权值和阈值的最优化搜索,同时利用Bayesian正则化方法自适应地调节性能函数比例系数的大小.应用结果表明,trainbr函数训练后的BP网络具有较强的泛化能力.
- c. 线性方程模型稳定性高,便于进行演进计算和反馈控制计算;BP神经网络模型计算精度也较高,用于流量演进模拟具有一定的优越性,但难于进行反馈控制计算.水力学方法需要大量的河道比降和断面等方面的信息,而且在进行流量演进和反馈控制计算时,存在求解稳定性和收敛性方面的问题,其应用有一定困难.

参考文献：

[1] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京 中国水利水电出版社, 2004 58-204.

[2] MAIDMENT D R. Handbook of hydrology[M]. New York McGraw-Hill, INC., 1993 230-270.

[3] 林三益. 水文预报[M]. 北京 中国水利水电出版社, 2001 71-234.

[4] 芮孝芳, 陈界仁. 河流水文学[M]. 南京 河海大学出版社, 2003 47-97.

[5] 李致家. 具有行蓄洪区的河道洪水演算方法探讨[J]. 水科学进展, 1997 (3) 65-70.

[6] 李致家. 河道洪水实时预报的半自适应模型[J]. 水科学进展, 1998 (4) 367-372.

[7] 李致家. 卡尔曼半自适应模型在复杂河道实时洪水预报和行蓄洪调度中的应用[J]. 河海大学学报 : 自然科学报, 2001, 29 (2) 107-110.

[8] 李致家. 通用一维河网不恒定流软件的研究[J]. 水利学报, 1998 (4) 13-18.

[9] 汪德 . 计算水力学——理论与应用[M]. 南京 河海大学出版社, 1989 158-170.

[10] LI Zhi-jia, WENG Ming-hua. Real-time flood forecasting modeling of 1D unsteady channel flow and Kalman filter [J]. Journal of Hydrodynamics Ser. B, 2001 (1) 64-69.

Low water discharge routing method and its application

SU Mao-lin

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract According to linear combination of different discharges during the low water period, a linear equation model for discharge routing of the low water period was established. The model parameters were calibrated by use of the optimization method. Then, a three-layer BP neural network with a hidden layer was developed, with the discharge of the upper profile, water consumption, regional water recharge, and water loss of the river section taken as the input factors, and the discharge of the lower profile taken as the output of the network. Finally, the hydrodynamic method was adopted for simulating the discharge process. Through comparison of the calculated results of the above three methods, some conclusions were drawn: the linear equation model is of high stability, and it is convenient for discharge routing and feedback control calculation; the artificial neural network is of high capacity of generalization and high accuracy of calculation, but it is difficult for discharge feedback control calculation; the hydrodynamic method is not a practical method due to some problems on stability and convergence when it is used for discharge routing and feedback control.

Key words model of linear equation; BP neural network model; hydrodynamic method; lower Yellow River; discharge routing; feedback control