

径流中长期预报级别特征值特征展开模糊推理方法

李 敏*, 陈守煜

(大连理工大学 水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 针对现有径流中长期预报模糊推理方法在实际应用中存在的问题,提出了径流中长期预报级别特征值特征展开模糊推理方法,使原有的模糊推理法得到改进,从而增强了模糊推理预报方法在径流中长期预报以及其他实际工程预报中的应用效果;并将新方法应用于大伙房水库年径流预报中,实例应用研究表明应用该方法预报中长期径流可以得到较好的预报结果.

关键词: 中长期;径流;预报;级别特征值;模糊推理

中图分类号: TV124 **文献标志码:** A

0 引言

为缓解流域内防洪与兴利用水之间的矛盾,使水库同时获得较大的防洪与兴利效益,在工程实际中,常常需要进行中长期径流预报工作.中长期径流预报方法很多,但当待预报径流量与预报因子之间的定量关系很难用方程或模型来描述时,便无法应用数理统计方法(如历史演变法、周期叠加外推法等)进行预报,一般采用模糊推理方法可得到较好的预报结果^[1].

目前,模糊推理法用于径流中长期预报的基本思想是:首先根据统计资料确定预报因子和待预报量的论域;然后将论域上的预报因子和待预报量离散化,并划分级别,把每个预报因子和待预报量的实际值转换为所对应的级别,即模糊子集;以预报因子对应的模糊子集作为输入,以相应待预报量对应的模糊子集作为输出,确定预报因子与待预报量之间的模糊关系,即模糊推理模式;应用建立的模糊推理模式,由特征展开模糊推理方法,通过模糊控制器变换,由输入得到输出^[2~4].

应用上述方法进行径流预报时,常常遇到的一个关键问题是预报因子和待预报量的级别划分.若划分的级别数较少(如三级),一方面预报结果范围较大,对调度的指导或参考作用较小;另一方面得到的输出个数过多,这种情况下在对多个

输出进行综合判决时,常得到一个较平均的预报结果,对于偏低或偏高待预报量,难以得到准确的预报结果.若期望得到一个变动范围较小的预报结果,划分的级别个数较多时(如五级),可能出现在预报某些待预报量时输出过少或无输出现象.预报因子和待预报量的级别划分,往往需要根据实际资料来综合分析,有时需要尝试几种划分情况进行预报工作,这时重复工作量比较大.另外,将预报因子和待预报径流对应的级别作为模糊子集,本身会产生较大预报误差.因为不论预报因子或待预报量的实际值接近(或等于)区段的上限,还是接近(或等于)区段的下限,都对应同一个模糊子集,该方法存在的这一问题会影响特征系数的确定,这有可能使本应当有输出的子模式输出为零,使本应当没有输出(输出为零)的子模式产生输出(输出不为零),从而影响方法和预报结果的可靠性.

本文深入研究现有模糊推理预报方法,提出径流中长期预报级别特征值^[5]特征展开模糊推理方法,以克服原有径流预报模糊推理方法中存在的问题,并将其应用于大伙房水库年径流预报中.

1 基于级别特征值的特征展开模糊推理预报法基本步骤

特征展开模糊推理预报步骤如下:

步骤1 统计预报因子和待预报量 n 年历史资料,由其最大、最小值(或适当外延)确定论域 U ;将论域 U 上的径流 x 值离散化,分成 l 个级别,确定模糊子集隶属函数.

步骤2 确定 n 年所有预报因子和待预报量级别特征值.

(1) 计算预报因子和待预报量对各个级别的相对隶属度.根据陈守煜在可变模糊集理论中给出的考虑区间值的相对隶属函数^[6,7],得到计算相对隶属度 $\mu_{\tilde{A}}(u)$ 为

x 落入 M 点左侧时

$$\mu_{\tilde{A}}(u) = 0.5 \times \frac{x-a}{M-a} + 0.5; \quad x \in [a, M] \tag{1}$$

$$\mu_{\tilde{A}}(u) = -0.5 \times \frac{x-a}{c-a} + 0.5; \quad x \in [c, a] \tag{2}$$

x 落入 M 点右侧时

$$\mu_{\tilde{A}}(u) = 0.5 \times \frac{x-b}{M-b} + 0.5; \quad x \in [M, b] \tag{3}$$

$$\mu_{\tilde{A}}(u) = -0.5 \times \frac{x-b}{d-b} + 0.5; \quad x \in [b, d] \tag{4}$$

其中 x 为预报因子或待预报量的实测值; a 、 b 为预报因子或待预报量各分级区间(或区段)的上限和下限; c 、 d 为包含区间 $[a, b]$ 的变动范围区间的上限和下限; M 为预报因子或待预报量各分级区间中 $\mu_{\tilde{A}}(u) = 1$ 的点,需要按物理分析确定, M 不一定是 $[a, b]$ 的中点.

(2) 计算预报因子与待预报量的级别特征值 H ^[7].

$$H = \sum_{h=1}^c u_h h \tag{5}$$

u_h 为预报因子或待预报量对于级别 h 的相对隶属度的规格化数值.

步骤3 建立预报模式.以预报因子级别特征值 $H(\tilde{A}_{i,j})$ 作为输入,以相应的待预报量级别特征值 $H(\tilde{B}_i)$ 作为输出,确定预报因子级别特征值与待预报量级别特征值之间的模糊关系,即模糊推理模式.用公式描述为

$$\tilde{R} = \bigcup_{i=1}^n \left(\left(\prod_{j=1}^m H(\tilde{A}_{i,j}) \right) \times H(\tilde{B}_i) \right)$$

其中 $i = 1, 2, \dots, n$ 为子模式数; $j = 1, 2, \dots, m$ 为预报因子数.

步骤4 检验预报.将预报因子级别特征值作为输入(或小前提),应用建立的模糊关系,进行特征展开模糊推理^[4].

步骤5 将有效子模式输出的各级别特征值 $H(\tilde{B}_i)$ 转换为对应的待预报要素值 $\tilde{B}_i$,将其加权平均值作为待预报量的预报值.即

$$\tilde{B}^* = \bigcup_{i=1}^k (\tilde{B}_i)$$

其中 k 为有效子模式数.

2 应用实例

大伙房水库位于浑河中上游,坐落在抚顺市境内,距沈阳市 68 km,是一座防洪、工业及城市供水、灌溉、发电、养鱼等综合利用的大型水利枢纽工程,是我国第一个五年计划的重点建设项目之一.

水库控制流域面积 5 437 km²;水库总库容 21.87×10⁸ m³,其中防洪库容 11.87×10⁸ m³;兴利库容 12.96×10⁸ m³;死库容 1.34×10⁸ m³.水库坝址以上流域多年平均径流量 15.7×10⁸ m³,年径流系数 0.356,变差系数 0.38.

研究大伙房水库中长期径流预报,以提高水库兴利控制运用水平是一项十分重要的工作.

表 1 为大伙房水库 1935~2003 年共 69 a(水文年)年径流资料.

选择 1935~1993 年前 59 a 资料用于建模,1994~2003 年后 10 a 资料用于模型检验.经统计,用于建模的 59 a 资料中,年径流总量最大为 3 495.34×10⁶ m³,最小为 518.73×10⁶ m³,外延最大、最小值的 20%,从而确定论域 $U = [420, 4\ 200]$.

将论域 U 上的年径流总量 x 离散化:参照《水文情报预报规范》,以距平值为-20%和+20%对应的年径流作为分界点,将年径流划分为丰、平、枯 3 个模糊子集,即年径流量小于 1 210×10⁶ m³ 时视为枯水(1 级);年径流量在 1 210×10⁶ m³ 与 1 810×10⁶ m³ 时视为平水(2 级);年径流量大于 1 810×10⁶ m³ 时为丰水(3 级)(见表 2).

表 1 大伙房水库年径流量表
Tab.1 Yearly runoff of Dahuofang reservoir

年号	年径流量/10 ⁶ m ³	年号	年径流量/10 ⁶ m ³	年号	年径流量/10 ⁶ m ³
1935	1 639.44	1958	518.73	1981	665.66
1936	2 147.01	1959	1 668.09	1982	618.53
1937	1 589.55	1960	2 992.13	1983	1 733.19
1938	1 951.31	1961	1 173.08	1984	859.34
1939	2 088.38	1962	1 201.57	1985	3 495.34
1940	1 688.37	1963	1 512.02	1986	3 053.94
1941	1 598.75	1964	2 432.27	1987	1 459.01
1942	1 604.74	1965	943.11	1988	602.94
1943	538.94	1966	1 570.43	1989	701.67
1944	697.34	1967	1 857.91	1990	1 338.74
1945	1 887.68	1968	1 343.67	1991	1 155.32
1946	1 242.43	1969	1 313.68	1992	582.78
1947	2 433.93	1970	1 069.60	1993	1 285.08
1948	598.02	1971	2 769.78	1994	1 465.01
1949	1 730.95	1972	1 362.66	1995	4 014.25
1950	1 457.40	1973	2 009.47	1996	1 952.94
1951	2 272.05	1974	977.65	1997	443.39
1952	785.23	1975	1 832.58	1998	1 703.23
1953	2 439.51	1976	1 020.47	1999	625.11
1954	2 943.11	1977	1 073.43	2000	542.55
1955	1 647.35	1978	601.86	2001	1 248.73
1956	1 885.27	1979	1 206.32	2002	768.26
1957	1 703.83	1980	1 640.40	2003	1 263.12

表 2 大伙房水库年径流模糊分级
Tab.2 Levels for yearly runoff of Dahuofang reservoir

模糊子集	区段/10 ⁶ m ³	级别特征值
枯(1 级)	[420,1 210)	[1.0,1.5)
平(2 级)	[1 210,1 810]	[1.5,2.5]
丰(3 级)	(1 810,4 200]	(2.5,3.0]

$$[c,d]_1=[1.0,2.5],$$
$$[c,d]_2=[1.0,3.0],$$
$$[c,d]_3=[1.5,3.0]$$

由式(1)或式(2)、(3)、(4)计算各模糊子集的相对隶属度(见表 3)。

由式(1)或(2)、(3)、(4)和式(5),计算 1935~1993 年 59 a 所有年份年径流的级别特征值,确定预报因子数 $m=6$,归纳出如表 4 所示的模糊推理模式。

依据给出的级别特征值模糊子集可变模糊隶属函数(表 3)和模糊推理模式(表 4),进行检验预报(截集水平 $\lambda\geqslant 0.5$,根据预报年份输出的数目确定),预报结果列入表 5。

据此,可得 3 个级别标准值区间分别为

$$[a,b]_1=[1.0,1.5),$$
$$[a,b]_2=[1.5,2.5],$$
$$[a,b]_3=(2.5,3.0]$$

确定各区间相对隶属度为 1(即 $\mu_{\sim A}(u)=1$) 的点 M 值分别为

$$M_1=1,M_2=2,M_3=3$$

确定各变动的范围区间分别为

表 3 级别特征值模糊子集可变模糊隶属函数
Tab.3 Variable fuzzy membership function of fuzzy subset of rank feature value

	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	…	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0
1.0	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	…	0.05	0	0	0	0	0	0
1.1	0.9	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	…	0.1	0.05	0	0	0	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2.5	0	0	0	0	0	0	…	0.9	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
3.0	0	0	0	0	0	0	…	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0

表 4 模糊推理模式
Tab.4 Modes of fuzzy reasoning

年份	序号	if $H(\tilde{A}_{i,1})$ and $H(\tilde{A}_{i,2}) \cdots$ and $H(\tilde{A}_{i,6})$ then $H(\tilde{B}_i)$							对应
		$H(\tilde{A}_{i,1})$	$H(\tilde{A}_{i,2})$	$H(\tilde{A}_{i,3})$	$H(\tilde{A}_{i,4})$	$H(\tilde{A}_{i,5})$	$H(\tilde{A}_{i,6})$	$H(\tilde{B}_i)$	的年份
		$H(\tilde{A}_{i,1})$	$H(\tilde{A}_{i,2})$	$H(\tilde{A}_{i,3})$	$H(\tilde{A}_{i,4})$	$H(\tilde{A}_{i,5})$	$H(\tilde{A}_{i,6})$	$H(\tilde{B}_i)$	
1935	1	2.2	2.6	2.1	2.5	2.6	2.2	2.1	1941
1936	2	2.6	2.1	2.5	2.6	2.2	2.1	2.1	1942
1937	3	2.1	2.5	2.6	2.2	2.1	2.1	1.1	1943
1938	4	2.5	2.6	2.2	2.1	2.1	1.1	1.2	1944
1939	5	2.6	2.2	2.1	2.1	1.1	1.2	2.5	1945
1940	6	2.2	2.1	2.1	1.1	1.2	2.5	1.6	1946
1941	7	2.1	2.1	1.1	1.2	2.5	1.6	2.6	1947
1942	8	2.1	1.1	1.2	2.5	1.6	2.6	1.1	1948
1943	9	1.1	1.2	2.5	1.6	2.6	1.1	2.3	1949
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

表 5 年径流预报结果

Tab.5 The results of annual runoff forecast

年份	实测年径 流量/ 10^6 m^3	预报年径流量 区间/ 10^6 m^3	实测值是否 在预报区间
1994	1 465.01	[1 014,2 048]	是
1995	4 014.25	[1 172,2 168]	否
1996	1 952.94	[1 347,2 203]	是
1997	443.39	[420,1 210]	是
1998	1 703.23	[1 147,2 406]	是
1999	625.11	[1 347,3 203]	否
2000	542.55	[683,1 430]	否
2001	1 248.73	[783,1 808]	是
2002	768.26	[420,1 210]	是
2003	1 263.12	[1 162,2 257]	是

3 结 论

(1)本文提出了径流中长期预报级别特征值特征展开模糊推理方法,使原有的模糊推理法得到了改进,从而增强了模糊推理预报方法在径流中长期预报以及其他实际工程预报中的应用效

果;详细介绍了新方法的基本原理及步骤,并将其应用于大伙房水库年径流预报中。

(2)该方法改进了原有特征展开模糊推理方法,使推理在满意模式选择环节更加理想,从而使推理预报结果更加可靠。

(3)实例应用研究表明应用该方法预报中长期径流可以得到较好的预报结果.本实例对大伙房水库 1994~2003 年 10 a 的年径流进行了检验预报,有 7 a 的实测年径流在预报区间内,较传统的径流预报模糊推理方法(仅 5 a 的实测年径流在预报区间内)的预报效果好。

参考文献：

[1] 许海军,孟凡玲. 径流中长期预报的粗集模糊推理-神经网络模型[J]. 华北水利水电学院学报, 2007, 28(2):15-18

[2] 王本德. 水文中长期预报模糊数学方法[M]. 大连:大连理工大学出版社, 1987

[3] 陈守煜. 水利水文水资源与环境模糊集分析[M]. 大连:大连工学院出版社, 1987

[4] 陈永义,陈图云. 特征展开近似推理方法[J]. 辽宁师范大学学报(自然科学版), 1984(3):40-42

[5] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用[M]. 北京:国防工业出版社, 1998

[6] 陈守煜. 工程可变模糊集理论与模型——模糊水文水资源学数学基础[J]. 大连理工大学学报, 2005, 45(2):308-312

(CHEN Shou-yu. Theory and model of engineering variable fuzzy set — Mathematical basis for fuzzy hydrology and water resources [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2005, 45(2):308-312)

[7] 陈守煜. 水资源与防洪系统可变模糊集理论与方法[M]. 大连:大连理工大学出版社, 2005

Fuzzy reasoning method of rank feature value characteristic expanding for forecasting mid-long runoff

LI Min*, CHEN Shou-yu

(School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: According to the problems in the application of existing fuzzy reasoning methods for forecasting mid-long runoff, a new method, named fuzzy reasoning method of rank feature value characteristic expanding, is proposed to improve the existing fuzzy reasoning methods, which enhances the applicability of fuzzy reasoning method for forecasting mid-long runoff and other values in engineering fields. The newly proposed method is used to forecast the yearly runoff of Dahuofang Reservoir. The effectiveness of this method is verified by the case study.

Key words: mid-long term; runoff; forecasting; rank feature value; fuzzy reasoning