

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2009.05.011

基于集对分析的区域需水量组合预测模型

郭彦¹ 金菊良² 梁忠民¹

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室 江苏 南京 210098 ;
2. 合肥工业大学土木与水利工程学院 安徽 合肥 230009)

摘要 :在建立区域需水量预测的多元回归、神经网络和灰色系统模型的基础上 ,提出基于集对分析的区域需水量组合预测模型 (SPA-CF) ,从同、异、反 3 个方面对各单个预测模型的预测精度进行定性和定量的综合分析 ,合理确定各单个预测模型的权重。应用结果表明 ,SPA-CF 是一种直观、简便、通用的组合预测新模型 ,在区域需水量预测中具有推广应用价值。

关键词 :区域需水量 ;集对分析 ;需水量预测

中图分类号 :TV211.1 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2009)05-0042-04

Combined prediction model for regional water demand based on set pair analysis//Guo Yan¹ , Jin Ju-liang² , Liang Zhong-min¹(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;2. School of Civil Engineering , Hefei University of Technology , Hefei 230009 , China)

Abstract :Based on multiple regression , neural network and grey system models for regional water demand prediction , a combined prediction model for regional water demand using set pair analysis is presented. Qualitative and quantitative analysis of the prediction accuracy of every single forecast model were conducted from the aspects of identical , discrepant and contrary degrees , and the weight of every forecast model was reasonably determined. Application of the model shows that the SPA-CF is an intuitive convenient and general combined prediction method , which has extensive value in regional water demand prediction.

Key words : regional water demand ; set pair analysis ; water demand prediction

区域需水量预测是根据区域用水量历史数据的变化规律 ,综合考虑社会、经济和自然等影响因素 ,利用科学、系统或经验的数学方法 ,在满足一定精度要求的条件下 ,对该区域未来某时间段内的需水量进行估计和推测^[1]。长期以来 ,区域供水问题一直是制约区域经济发展的一个重要因素 ,并且随着经济的发展以及区域规模的不断扩大 ,区域供需矛盾将更加突出。因此 ,进行区域需水量预测可为合理配置水资源提供科学的依据 ,对区域供水规划和水务管理工作起着宏观指导作用^[2]。区域需水量预测系统是一个复杂的系统 ,它不仅受该区域水资源总量的影响 ,而且与区域的社会经济发展、人均生活水平、供水设施建设、供水价格以及境外引水等众多因素有关。目前 ,区域需水量的预测方法主要有时间序列分析法^[3-4]、结构分析法^[5-7]和系统分析法^[8-11] 3 大类型。不同需水量预测方法的预测结果往往各不相同 ,不同预测方法提供不同的有用信息 ,其预测精度往往也有差别。任何一种预测方法都有其适用

性和局限性 ,如果简单地将预测误差较大的一些方法舍弃掉 ,将会丢失一些有用的信息^[12]。组合预测就是将不同的预测方法进行适当的组合 ,综合利用各种方法所提供的信息 ,从而尽可能提高预测精度^[13]。近年来 ,组合预测方法已成为预测领域中一个重要的研究方向 ,引起了国内外众多学者的兴趣^[14-15]。组合预测的关键是确定各单个预测模型的权重 ,模型的预测精度越高 ,则该模型的权重应越大。基于此 ,笔者把区域需水量实测值系列作为集合 A_0 ,把区域需水量各单个预测模型的计算值系列作为集合 A_i ,集合 A_0 和 A_i 构成集对 $H_i=(A_0,A_i)$,用集对分析方法 (SPA)^[16] 计算集对 H_i 的联系度 $u_{A_0\sim A_i}$ 。把 $u_{A_0\sim A_i}$ 作为评估模型 B_i 预测精度的测度^[17] ,据此可确定各单个预测模型的权重 ,进而可建立基于集对分析的区域需水量组合预测模型 (SPA-CF) ,并进行应用研究。

1 SPA-CF 的建立

SPA-CF 的建立过程包括如下 4 个步骤 :

步骤 1 选择预测模型。首先利用模糊综合评判方法对多种常用的区域需水量预测方法进行评判,选出与实际被预测对象要求相符的若干预测模型,然后用选定的预测模型对被预测对象分别进行预测,得出一系列预测值。模糊综合评判的基本思路为^[18]。定义评判因素集 $X = \{\text{预测方法的精确度, 预测方法的可操作性, 预测方法的适用范围, 预测方法的稳定性, 预测方法的费用}\}$ 。5 级评语集合为 $y = \{\text{优, 良, 中, 一般, 差}\}$ 。根据模糊隶属关系原则,把评语集合中各级相对“最优”的程度分别用 0.9 0.7, 0.5 0.3 0.1 表示,则 $y = \{0.9, 0.7, 0.5, 0.3, 0.1\}$ 。这里选择 10 种常用的区域需水量预测方法,它们分别是特尔斐法、季节性指数平滑法、生长曲线模型、自回归滑动平均模型、多元线性回归模型、指标分析法、用水定额法、灰色系统模型、BP 神经网络和系统动力学法。根据各预测模型的有关研究成果,利用专家打分法,将各预测方法的特点和适用范围比较结果列于表 1。

表 1 预测方法的比较

序号	方法名称	专家打分				
		精确度	可操作性	适用范围	稳定性	费用
1	特尔斐法	0.7	0.1	0.5	0.3	0.1
2	季节性指数平滑法	0.5	0.9	0.3	0.5	0.9
3	生长曲线模型	0.5	0.7	0.5	0.5	0.7
4	自回归滑动平均模型	0.7	0.5	0.5	0.7	0.5
5	多元线性回归模型	0.7	0.5	0.7	0.7	0.5
6	指标分析法	0.7	0.3	0.1	0.3	0.7
7	用水定额法	0.1	0.5	0.3	0.3	0.7
8	灰色系统模型	0.7	0.5	0.9	0.7	0.5
9	BP 神经网络	0.9	0.5	0.3	0.7	0.5
10	系统动力学法	0.9	0.1	0.5	0.7	0.3

由表 1 可得模糊关系矩阵为

$$R = (R_1 \ R_2 \ R_3 \ R_4 \ R_5)^T =$$

$$\begin{bmatrix} 0.7 & 0.5 & 0.5 & 0.7 & 0.7 & 0.7 & 0.1 & 0.7 & 0.9 & 0.9 \\ 0.1 & 0.9 & 0.7 & 0.5 & 0.5 & 0.3 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.1 \\ 0.5 & 0.3 & 0.5 & 0.5 & 0.7 & 0.1 & 0.3 & 0.9 & 0.3 & 0.5 \\ 0.3 & 0.5 & 0.5 & 0.7 & 0.7 & 0.3 & 0.3 & 0.7 & 0.7 & 0.7 \\ 0.1 & 0.9 & 0.7 & 0.5 & 0.5 & 0.7 & 0.7 & 0.5 & 0.5 & 0.3 \end{bmatrix}$$

式中: R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 分别为精确度、可操作性、适用范围、稳定性和费用; R 矩阵中第 i 行第 j 列元素 r_{ij} 表示第 j 种方法在第 i 个单因素下的优劣程度,用相对于最优的隶属度来表示。

在确定了 R 和 y 的前提下,通过给定 X 中各因素的相对权重 A ,再采用模糊变换 $B = A \cdot R$,可得综合评判结果。 X 中各因素的相对权重 A 可用基于二元比较矩阵的层次分析法等主观赋权法、基于评价样本数据 $\{x_{ij}\}$ 的投影寻踪客观赋权法、基于加速遗传算法的模糊层次分析法(AGA-FAHP)^[19],或主客

观组合赋权法确定。笔者邀请专家对 X 中各因素就两两评判因素间的评判重要性做比较,建立模糊互补判断矩阵为

$$P = \begin{bmatrix} 0.5 & 1 & 1 & 0.5 & 1 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0 & 1 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0 & 1 \\ 0.5 & 1 & 1 & 0.5 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}$$

用 AGA-FAHP^[19]求解,得各因素的权重为 $A = (0.3600 \ 0.1114 \ 0.1110 \ 0.3599 \ 0.0577)$,并得到

$$B = A \cdot R = \begin{bmatrix} 0.3600 \\ 0.1114 \\ 0.1110 \\ 0.3599 \\ 0.0577 \end{bmatrix}^T$$

$$\begin{bmatrix} 0.7 & 0.5 & 0.5 & 0.7 & 0.7 & 0.7 & 0.1 & 0.7 & 0.9 & 0.9 \\ 0.1 & 0.9 & 0.7 & 0.5 & 0.5 & 0.3 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.1 \\ 0.5 & 0.3 & 0.5 & 0.5 & 0.7 & 0.1 & 0.3 & 0.9 & 0.3 & 0.5 \\ 0.3 & 0.5 & 0.5 & 0.7 & 0.7 & 0.3 & 0.3 & 0.7 & 0.7 & 0.7 \\ 0.1 & 0.9 & 0.7 & 0.5 & 0.5 & 0.7 & 0.7 & 0.5 & 0.5 & 0.3 \end{bmatrix}$$

$$= (0.4324 \ 0.5454 \ 0.5338 \ 0.6440 \ 0.6662, \\ 0.4449 \ 0.2734 \ 0.6884 \ 0.6938 \ 0.6599)$$

根据计算结果将各种方法的隶属度从大到小排列,从中选择隶属度最大的 3 个模型依次为 BP 神经网络^[10]、灰色系统模型^[9]和多元线性回归模型^[6],将它们作为此次区域需水量预测的模型,并用它们对被预测区域分别进行预测计算。

步骤 2 计算区域需水量实测值系列 $A_0 = \{x_{0,1}, x_{0,2}, \dots, x_{0,m}\}$ 与区域需水量各单个预测模型的计算值系列 $A_i = \{x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,m}\}$ 之间的联系度 $u_{A_0 \sim A_i}, i = 1 \sim m$ 。其中 n 和 m 分别为样本容量和预测模型的数目。SPA 的基本思想是在给定区域需水量预测问题背景情况下对所论的 2 个集合 A_0 和 A_i 的接近属性进行同、异、反的定量比较分析,用式(1)计算联系度^[16]:

$$u_{A_0 \sim A_i} = a_i + b_i I + c_i J \quad (i = 1 \sim m) \quad (1)$$

式中: a_i, b_i 和 c_i 分别为 SPA 的同一度、差异度和对立度,均为非负值且满足 $a_i + b_i + c_i = 1$; I 为差异度系数,在 $[-1, 1]$ 中取值,当 I 取 -1 和 1 时表示 b_i 是确定性的,而随着 I 接近于零, b_i 的不确定性随之增强; J 为对立度系数,一般恒取 -1 。

各单个预测模型的预测误差绝对值和相对预测误差绝对值分别为

$$d_{ij} = |x_{ij} - x_{0j}| \quad (i = 1 \sim m, j = 1 \sim n) \quad (2)$$

$$e_{ij} = \left| \frac{x_{ij} - x_{0j}}{x_{0j}} \right| \quad (i = 1 \sim m, j = 1 \sim n) \quad (3)$$

根据需水量预测问题的实际情况,选用绝对预测误差或相对预测误差描述集合 A_0 与 A_i 之间的接近属性^[20]。在具体计算 $u_{A_0 \sim A_i}$ 时,若 $d_{i,j}$ 或 $e_{i,j}$ 小于高要求的容许误差 α_1 ,则认为 $x_{0,j}$ 与 $x_{i,j}$ 相同;若 $d_{i,j}$ 或 $e_{i,j}$ 大于低要求的容许误差 α_2 ,则认为 $x_{0,j}$ 与 $x_{i,j}$ 相反;若 $d_{i,j}$ 或 $e_{i,j}$ 介于 α_1 与 α_2 之间,则认为 $x_{0,j}$ 与 $x_{i,j}$ 相异^[17]。统计集对 $H_i = (A_0, A_i)$ 中同、异和反的项数,它们与样本容量 n 的比值分别作为式(1)中的同一度、差异度和对立度值,进而求得联系度 $u_{A_0 \sim A_i}$ 。

步骤3 计算各单个预测模型的权重 $w_i, i = 1 \sim m$ 。显然,联系度 $u_{A_0 \sim A_i} \in [-1, 1]$ 。若预测模型的计算值系列 A_i 与实测值系列 A_0 间的差异性越大,则 $u_{A_0 \sim A_i}$ 越接近于 -1,模型 B_i 越倾向于不符合“接近属性”;若 A_i 与 A_0 间的同一性越大,则 $u_{A_0 \sim A_i}$ 越接近于 1,模型 B_i 越倾向于符合“接近属性”。可见联系度 $u_{A_0 \sim A_i}$ 就是模糊集“接近属性”的一种相对差异度,模型 B_i 隶属于模糊集“接近属性”的相对隶属度可表示为^[21]

$$v_i = 0.5 + 0.5u_{A_0 \sim A_i} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

式中 $u_{A_0 \sim A_i}$ 的差异度系数根据实际预测问题的情况按照一定的方法进行取值^[16],把 $u_{A_0 \sim A_i}$ 转化为联系数,然后对相对隶属度归一化,即得各单个预测模型的权重 w_i :

$$w_i = \frac{v_i}{\sum_{j=1}^m v_j} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

步骤4 用式(6)建立组合预测模型:

$$y_j = \sum_{i=1}^m w_i x_{i,j} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

表3 北京市1986~1999年生活用水量实际值与各模型预测结果及2008年生活需水量预测值

年份	实测需水量/ 万 m ³	模型预测需水量/万 m ³				各模型相对预测误差绝对值/%			
		BP神经网络 ^[10]	灰色系统模型 ^[9]	多元线性回归模型 ^[6]	SPA-CF	BP神经网络	灰色系统模型	多元线性回归模型	SPA-CF
1986	46474.9	46742.7	46474.9	43652.0	45947.1	0.58	0.00	6.07	1.14
1987	45744.1	47664.9	48316.6	46935.6	47744.5	4.20	5.62	2.60	4.37
1988	50904.4	49186.3	50278.7	50007.1	49779.5	3.38	1.23	1.76	2.21
1989	51428.7	51078.8	52370.3	52634.5	51911.9	0.68	1.83	2.34	0.94
1990	52852.8	53377.2	54600.8	54955.3	54189.9	0.99	3.31	3.98	2.53
1991	56619.5	56397.4	56980.7	57463.8	56855.5	0.39	0.64	1.49	0.42
1992	58376.6	59941.8	59521.1	59995.2	59796.5	2.68	1.96	2.77	2.43
1993	62571.9	62657.1	62234.2	62108.4	62375.5	0.14	0.54	0.74	0.31
1994	67295.2	65703.2	65133.1	64503.8	65220.1	2.37	3.21	4.15	3.08
1995	70540.5	68984.7	68232.0	69742.9	68873.8	2.21	3.27	1.13	2.36
1996	69860.5	72281.4	71546.3	72510.7	72058.1	3.47	2.41	3.79	3.15
1997	75573.5	75209.0	75092.7	74615.0	75031.9	0.48	0.64	1.27	0.72
1998	78731.5	78508.8	78889.1	77849.7	78502.7	0.28	0.20	1.12	0.29
1999	82715.5	82503.8	82955.1	82537.1	82680.1	0.26	0.29	0.22	0.04
2008		91245.7	135842.8	101183.3	110161.0				

注:1999年为检验预测结果,其余年份为预测结果。

2 实例分析

根据文献[6]的资料(表2)进一步说明基于集对分析的区域需水量组合预测模型的应用过程。

表2 北京市1986~1999年生活用水量及其影响因素^[6]

年份	生活用水量/ 万 m ³	非农业人口/ 万人	第三产业产值/ 万元	居住面积/ 万 m ²	人均居住面积/ (m ² ·人 ⁻¹)	绿地因子
1986	46474.9	621	99.97	3749.4	6.46	5.66361
1987	45744.1	637	119.92	4054.8	6.82	5.46717
1988	50904.4	650	151.88	4361.4	7.17	6.05080
1989	51428.7	664	165.20	4653.0	7.45	9.38489
1990	52852.8	673	194.55	4916.2	7.72	6.03757
1991	56619.5	683	261.84	5165.5	8.01	5.72189
1992	58376.6	692	314.52	5424.0	8.31	7.78024
1993	62571.9	707	395.17	5661.9	8.51	8.78646
1994	67295.2	725	509.42	5963.2	8.73	6.41819
1995	70540.5	815	698.28	6317.0	8.87	8.76245
1996	69860.5	829	849.13	6661.1	9.17	7.34399
1997	75573.5	826	986.68	7021.3	9.49	12.55048
1998	78731.5	838	1137.90	7428.5	9.87	8.67979
1999	82715.5	854	1246.75	8046.9	10.43	24.19258

表3为BP神经网络、灰色系统模型、多元线性回归模型及SPA-CF对北京市1986~1999年生活用水量的计算值与实际值的比较及对北京市2008年生活需水量的预测结果。这里,多元线性回归采用文献[6]的方法,根据本文精度要求,笔者选取非农业人口 x_1 和人均居住面积 x_2 这2个自变量来预测因变量(预测对象),得到北京市需水量预测方程:
 $y = 47.29313x_1 + 7019.092x_2 - 31060.34$,其复相关系数为 $R^2 = 0.987$ 。BP神经网络采用文献[10]的方法,为了与多元线性回归模型进行对比,输入神经元也选取 x_1 和 x_2 这2个影响因素,输出神经元为需水量(见表2)。BP神经网络的网络拓扑结构为2:3

:1 得出北京市需水量的训练结果及 2008 年需水量的预测结果(见表 3)。灰色系统模型采用文献[9]的方法,这是一种改变背景值的新方法——中心逼近法。其主要思想是:为弱化序列变化的幅度,先对序列 $x^{(0)}$ 累加成的序列 $x^{(1)}$ 开 m 次方,记为 $x_m^{\frac{1}{m}}$,用 $x_m^{\frac{1}{m}}$ 代替 $x^{(1)}$ 进行 GM(1,1)建模,得到时间响应函数,求出 $x_m^{\frac{1}{m}}$ 的预测值 $\hat{x}_m^{\frac{1}{m}}$,此值的 m 次方再累减就得到 $x^{(0)}$ 的预测值。本文序列 $x^{(0)}$ 大致呈指数规律,故可对 $x^{(0)}$ 直接建模,即:直接对序列 $x^{(0)}$ 开 m 次方,根据精度要求选取 $m = 2$,得到本次灰色系统模型为 $\hat{x}_2^{\frac{1}{2}} = 120.91211 + 94.66827e^{-0.043712i}$ 。为了检验模型的精度,采用后验差检验法和小误差概率检验法得出 $c = 0.12 < 0.35$, $p = 100\% > 95\%$,认为该预测模型为一级模型,等级为良好,满足要求。

根据区域需水量预测问题的实际情况,选用式(3)的相对预测误差描述集合 A_0 与 A_i 间的接近属性,在具体计算联系度 $u_{A_0 \sim A_i}$ 时,容许误差 α_1 与 α_2 分别取 1% 和 5%。于是由式(1)得到这 3 个预测模型的计算值系列相对于实测值系列的联系度 $u_{A_0 \sim A_i}$,如表 4 所示。

表 4 用 SPA 计算需水量组合预测模型的权重

模型名称	联系度表达式	联系数	相对隶属度	预测模型的权重
BP 神经网络	$0.538 + 0.462I + 0J$	0.787	0.894	0.401
灰色系统模型	$0.385 + 0.538I + 0.077J$	0.667	0.833	0.374
多元线性回归模型	$0.077 + 0.846I + 0.077J$	0.000	0.500	0.225

表 4 中的 I 根据需水量预测的实际情况按照比例取值法确定^[16]:

$$I = \frac{a_i - c_i}{a_i + c_i} \tag{7}$$

把表 4 中各预测模型的权重值代入式(6),即得到预测该区域需水量的组合预测模型(SPA-CF)。表 3 和表 4 结果表明:①从单个预测模型的相对预测误差看,BP 神经网络在拟合预测上取得了很好的效果,但其对未来年份的预测效果不太理想,说明 BP 神经网络的外延性不是很强;灰色系统模型对于呈指数规律的数列有较好的预测结果,但其对于所给信息的利用不是很全面,因此其对 2008 年需水量的预测结果是 3 个模型中最大的;多元线性回归模型预测精度高低的关键在于自变量的选取,若选取过多的自变量不仅会增加计算量、引起模型稳定性退化,还会把不可靠的自变量预测值引入模型,使误差累加到因变量上,造成很大的误差^[22]。②SPA-CF

在拟合预测误差上不如 BP 神经网络,但其检验预测结果的误差明显低于 BP 神经网络,弥补了 BP 神经网络外延性不好的缺点。③SPA-CF 综合了各单个预测模型的预测信息,是一种简单有效的组合预测模型。

3 结 论

a. 利用模糊综合评判方法对若干区域需水量预测模型的优劣程度进行排序,为特定区域需水量选择合理的预测方法提供了理论依据。

b. 为综合利用各单个预测模型提供的有用信息,提高区域需水量预测的精确度和预测结果的稳定性,提出了基于集对分析的区域需水量组合预测模型(SPA-CF)。用集对分析的联系度计算公式从同、异、反 3 个方面对区域需水量各种预测模型的预测结果进行了定性和定量的综合分析,较全面地刻画了预测模型的预测精度和预测性能,并且简明合理地确定了各个预测模型的权重。

c. 通过北京市生活需水量预测中的计算结果说明 SPA-CF 是一种直观、简便、通用的组合预测新模型,其在区域需水量预测中具有一定的应用价值。

参考文献:

[1] 尹学康,韩德宏.城市需水量预测[M].北京:中国建筑工业出版社,2006.

[2] 厉红梅,李适宁,林高松,等.深圳市供水量的最优组合预测[J].数理统计与管理,2005,25(4):18-22.

[3] 何文杰,王季震,赵洪宾,等.天津市城市用水量模拟方法的研究[J].中国给水排水,2001,27(10):43-44.

[4] 李靖,段青松,邱勇.灌区作物需水量预报的时间序列分析[J].云南农业大学学报,2000,15(2):102-104.

[5] ZHOU S L,Mc MAHON T A,WALTON A,et al. Forecasting operational demand for an urban water supply zone[J]. Journal of Hydrology,2002,259:189-202.

[6] 张雅君,刘全胜,冯萃敏.多元线性回归分析在北京城市生活需水量预测中的应用[J].给水排水,2003,29(4):26-29.

[7] 贾仁甫,陈守伦,丁鑫.需水量预测的线性测量误差模型[J].河海大学学报:自然科学版,2008,36(4):488-490.

[8] 申富生.基于灰色 GM(1,1)模型的农田灌溉需水量预测[J].水资源保护,2007,23(3):33-35.

[9] 王菊翠,曹明明,仵彦卿.预测陕西关中地区需水量的改进 GM(1,1)模型[J].干旱区地理,2006,29(1):35-40.

[10] 单金林,戴雄奇,李江涛.利用 BP 网络建立预测城市用水量模型[J].中国给水排水,2001,17(8):61-63.

(下转第 60 页)

[9] 郭炎,倪汉根.旋流竖井溢洪道的水流特性研究[J].水动力学研究与进展,1995,10(2):146-154.

[10] 董兴林,郭军,肖白云,等.高水头大泄量旋涡竖井式泄洪洞的设计研究[J].水利学报,2000(11):27-31.

[11] 刘善均,许唯临,王韦.高坝竖井泄洪洞、龙抬头放空洞与导流洞‘三洞合一’优化布置研究[J].四川大学学报:工程科学版,2003,35(2):10-14.

[12] 高鹏,杨永全,马耀,等.旋流式竖井涡室结构优化试验研究[J].人民长江,2006,31(11):121-123.

[13] 刘超,张光科,冯凌霄,等.泄洪洞反弧段上游掺气坎对反弧段下游侧墙的减蚀作用[J].水利水电科技进展,2007,27(1):46-49.

[14] 方卫红,孙保平.旋流消能及三洞合一出口型式在溪古水电站设计中的应用[J].西北水电,2007(4):25-33.

[15] MARTI S J. Pressure on a stepped spillway[J]. Journal of Hydraulic Research,2007,45(4):505-511.

[16] CHANSON H, GONZALEZ C A. Physical modeling and scale effects of air-water flows on stepped spillways[J]. Journal of Zhejiang University : Science,2005,6(3):243-250.

[17] PFISTER M, HAGER W. Stepped chutes :pre-aeration and spray reduction[J]. International Journal of Multiphase Flow,2006,32(2):269-284.

[18] STEPHENSON D. Energy dissipation down stepped spillways [J]. Intl Water Power and Dam Construction,1991,43(9):27-30.

[19] 吴守荣,张建民,许唯临,等.前置掺气坎式阶梯溢洪道体型布置优化试验研究[J].四川大学学报:工程科学版,2008,40(3):37-42.

[20] 张志昌,曾东洋,郝阿漫,等.台阶式溢洪道滑流水流压强特性的试验研究[J].水动力学研究与进展:A辑,2003,18(5):652-659.

[21] 张志昌,曾东洋,刘亚菲.台阶式溢洪道掺气特性的试验研究[J].应用力学学报,2003,20(4):97-100.

[22] 陈群,戴光清,朱分清,等.影响阶梯溢洪坝消能率的因素[J].水力发电学报,2003,83(4):95-104.

[23] 郭军,刘之平,刘继广,等.大朝山水电站宽尾墩阶梯式坝面泄洪水力学原型观测[J].云南水力发电,2002,18(4):16-20.

(收稿日期:2008-12-03 编辑:方宇彤)

+++++

(上接第 36 页)

参考文献:

[1] 顾晓鲁,钱鸿缙,刘惠珊,等.地基与基础[M].北京:中国建筑工业出版社,2003.

[2] JEONG S, LEE J, LEE C J. Slip effect at the pile-soil interface on dragload[J]. Computers and Geotechnics,2004,31:115-126.

[3] COMODROMOS E M, BAREKA S V. Evaluation of negative skin friction effects in pile foundations using 3D nonlinear analysis[J]. Computers and Geotechnics,2005,32:210-221.

[4] 刘汉龙,张晓健.负摩擦作用下 PCC 桩沉降计算[J].岩土力学,2007,28(7):1483-1486.

[5] 高绍武,王建华,毛娜.层状地基中单桩负摩擦问题积分方程解法[J].岩土力学,2005,26(9):1456-1460.

[6] TAKAHASHI K. Bending of a batter pile due to ground settlement[J]. Soils and Foundations,1985,25(4):75-91.

[7] SHIBATA T, SEKIGUCHI H, YUKITOMO H. Model test and analysis of negative friction acting on piles[J]. Soils and Foundations,1982,22(2):29-39.

[8] RAO S N, MURTHY T V B S S, VEERESH C. Induced bending moments in batter piles in settling soils[J]. Soils and Foundations,1994,34(1):127-133.

[9] ZHAO Hui-yang, JEREMIC B. Numerical analysis of pile behaviour under lateral loads in layered elastic-plastic soils [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,2002,26:1385-1406.

[10] GEORGIADIS M, ANAGNOSTOPOULOS C, SAFIEKOU S. Cyclic lateral loading of piles in soft clay[J]. Geotechnical Engineering,1992,23:47-60.

(收稿日期:2009-02-20 编辑:高建群)

+++++

(上接第 45 页)

[11] 张兴芳.城市需水量预测方法的研究[J].太原理工大学学报,2000,31(3):159-161.

[12] 王景,刘良栋,王作义.组合预测方法的现状和发展[J].预测,1997,16(6):37-38.

[13] 唐纪,王景.组合预测方法评述[J].预测,1999,18(2):42-43.

[14] ZHANG G P. Time series forecasting using a hybrid ARMA and neural network mode[J]. Neurocomputing,2003,50:159-175.

[15] TANG Xiao-wo, ZHOU Zong-fang, SHI Yong. The error bounds of combined forecasting [J]. Mathematical and Computer Modelling,2002,36(9):997-1005.

[16] 赵克勤.集对分析及其初步应用[M].杭州:浙江科学技术出版社,2000.

[17] 邓红霞,李存军,赵太想,等.基于 SPA 的水文预测模型评估[J].四川大学学报:工程科学版,2006,38(6):34-37.

[18] 曾珍香,谢素卿.常用预测方法的模糊综合评判模型[J].预测,1993,12(4):60-64.

[19] 金菊良,洪天求,王文圣.基于熵和 FAHP 的水资源可持续利用模糊综合评价模型[J].水力发电学报,2007,26(4):22-28.

[20] 王应明,傅国伟.基于不同误差准则和范数的组合预测方法研究[J].控制与决策,1994,9(1):20-28.

[21] 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.

[22] 张雅君,刘全胜.需水量预测方法的评析与择优[J].中国给水排水,2001,17(7):27-29.

(收稿日期:2008-10-31 编辑:高建群)