

## 城市空气质量评价中的模糊支持向量机方法

杨志民<sup>1</sup> 田英杰<sup>2</sup> 刘广利<sup>3</sup>

(1. 浙江工业大学之江学院, 杭州 310024; 2. 中国科学院数据技术与知识经济研究中心, 北京 100080;  
3. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

**摘要** 传统的评价方法不能处理带有模糊信息的城市空气质量的评价问题。基于结构风险最小化原则建立了带有模糊信息的支持向量分类模型和算法,在此基础上提出基于模糊支持向量机的城市空气质量评价方法;根据空气中的总悬浮颗粒物、二氧化硫、二氧化氮、空气综合污染指数4个指标,对我国50个主要城市2003年空气质量进行了综合评价,选择10个城市的评价结果进行了测试,结果表明:根据2003年数据采用本方法得到的邢台、张家口和沧州的空气污染指数与河北省环保专家提供的数据误差小于0.1;西宁、银川、乌鲁木齐、汕头、南京、大连、武汉的综合空气污染指数与国家环保总局提供的数据误差均小于0.5。

**关键词** 支持向量机;模糊规划;空气质量;评价

**中图分类号** TP 13; O 159

**文章编号** 1007-4333(2006)05-0092-06

**文献标识码** A

### Fuzzy support vector machine method for city air quality assessment

Yang Zhimin<sup>1</sup>, Tian Yingjie<sup>2</sup>, Liu Guangli<sup>3</sup>

(1. College of Zhijiang, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310024, China;

2. Research Center on Data Technology and Knowledge Economy, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China;

3. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract** The traditional evaluating methods can not deal with the evaluation problem of city atmosphere quality with fuzzy information. Based on the principle of structural risk minimization, authors constructed a support vector classification model, as well as its algorithm with fuzzy information and proposed a new city atmosphere quality evaluating method based on the fuzzy support vector machine. According to the four indexes, the total amount of suspending granules, sulfur dioxide, nitrogen dioxide and atmosphere synthetical pollution index, the atmosphere qualities of 50 main cities in China in the year 2003 were estimated.

**Key words** support vector machine; fuzzy programming; air quality; assessment

支持向量机是一类新型机器学习方法<sup>[1-4]</sup>,由于出色的学习性能,该技术已成为机器学习界的研究热点,并在很多领域得到了成功的应用;但作为一种新技术,其目前仍存在许多局限,对于客观世界存在的大量的模糊信息的表达和处理,传统支持向量机就无能为力。FSVM(模糊支持向量机)方法<sup>[5-6]</sup>虽然在支持向量机(算法)二次规划的惩罚参数中添加了模糊隶属度,但没有从算法的数学本质上建立模糊支持向量机,最终得到的分类函数的函数值(测

试点的输出)还是确定值1或-1。2004年笔者在模糊机会约束规划和遗传算法的基础上,从线性角度建立了“模糊线性支持向量分类机”和“模糊线性支持向量回归机”<sup>[7-8]</sup>,解决了线性情况下模糊分类和模糊回归问题,但上述方法无法解决非线性情况下的模糊分类和模糊回归问题。本研究拟在此基础上,从非线性角度构造“模糊支持向量机”。

空气质量评价是用科学的方法对空气污染情况进行的综合评价。空气污染综合指数是环保专家根

收稿日期: 2005-11-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10371131)

作者简介: 杨志民,教授,博士,主要从事支持向量机和不确定性信息处理研究, E-mail: yzm9966@126.com; 刘广利,讲师,博士,通讯作者,主要从事数据挖掘和支持向量机研究, E-mail: liugl@cau.edu.cn

据污染指标数据,经过复杂的计算,加之环保专家的经验 and 知识得出的量纲一数据,它可以直观、简明、定量地描述和比较空气污染的程 度。国家环保总局对全国 113 个大中城市作了 2003 年空气综合污染指数排名报告,然而,全国还有 554 个地级以上中小城市,其空气质量评价也是一项相当重要的工作。城市空气质量的多指标可拓综合评价法<sup>[10-11]</sup>,是一种将多指标可拓综合评价方法应用于城市环境空气质量评价的方法。此方法分析城市环境 质量的影响因素,建立了环境空气质量评价的物元模型,将多污染物空气质量要素的目标评价归结为单目标决策,比较简明确切地反映出城市某区域环境空气质量的综合水平状况;但此方法的应用受多种因素(比如:若评价指标数据中含有模糊参数,则评价将无法进行)限制,而且评价结果误差偏大。为此,本研究从非线性角度构造“模糊支持向量机”,并将模糊支持向量分类机应用于中小城市空气质量评价,用隶属度表示城市空气污染的程 度,用模糊支持向量机确定城市空气质量评价的模糊决策函数,力求客观准确地反映测试城市的空气污染程 度。

### 1 模糊支持向量机

设模糊训练集

$$S = \{ (x_1, \gamma_1), \dots, (x_p, \gamma_p), (x_{p+1}, \gamma_{p+1}), \dots, (x_l, \gamma_l) \} \quad (1)$$

式中:  $x_j \in R^n$ ;  $\gamma_j$  为式(2)中的三角模糊数,  $j = 1, \dots, l$ ;  $(x_t, \gamma_t)$  为模糊正类点,  $t = 1, \dots, p$ ;  $(x_i, \gamma_i)$  为模糊负类点  $i = p + 1, \dots, l$ 。

$$\gamma = (r_1, r_2, r_3) = \begin{cases} \left( \frac{2^2 + -2}{2}, 2 - 1, \frac{2^2 + 3 + 2}{2} \right) & 0.5 \quad 1 \\ \left( \frac{2^2 + 3 + 2}{2}, 2 + 1, \frac{2^2 - -2}{2} \right) & -1 \quad -0.5 \end{cases} \quad (2)$$

表示对于模糊线性可分<sup>[3]</sup>的模糊训练集(式(1)),在置信水平  $(0 < \alpha < 1)$  下,模糊分类问题转化为求解以  $(w, b)^T$  为决策变量的模糊机会约束规划问题,即

$$\begin{cases} \min_{w, b} \frac{1}{2} \|w\|^2 \\ \text{s.t. Pos}\{ \gamma_j((w \cdot x_j) + b) \geq 1\} \quad j = 1, \dots, l \end{cases} \quad (3)$$

式中  $\text{Pos}\{ \cdot \}$  为模糊事件  $\{ \cdot \}$  的可能性测度。

模糊机会约束规划(式(3))的清晰等价规划为二次规划,即

$$\begin{cases} \min_{w, b} \frac{1}{2} \|w\|^2 \\ \text{s.t.} \\ ((1 - \alpha) r_{t3} + r_{t2})((w \cdot x_t) + b) \geq 1 \quad t = 1, \dots, p \\ ((1 - \alpha) r_{i1} + r_{i2})((w \cdot x_i) + b) \leq 1 \quad i = p + 1, \dots, l \end{cases} \quad (4)$$

二次规划(式(4))式的对偶规划是以  $(t, i)^T$  为决策变量的二次规划,即

$$\begin{cases} \min_{t, i} \frac{1}{2} (A + 2B + C) - \left( \sum_{t=1}^p t + \sum_{i=p+1}^l i \right) \\ \text{s.t.} \\ \sum_{t=1}^p t((1 - \alpha) r_{t3} + r_{t2}) + \sum_{i=p+1}^l i((1 - \alpha) r_{i1} + r_{i2}) = 0 \\ t \geq 0 \quad t = 1, \dots, p \\ i \geq 0 \quad i = p + 1, \dots, l \end{cases} \quad (5)$$

式中:

$$\begin{aligned} A &= \sum_{t=1}^p \sum_{s=1}^p t_s((1 - \alpha) r_{t3} + r_{t2}) \cdot ((1 - \alpha) r_{s3} + r_{s2})(x_t \cdot x_s) \\ B &= \sum_{t=1}^p \sum_{i=p+1}^l t_i((1 - \alpha) r_{t3} + r_{t2}) \cdot ((1 - \alpha) r_{i1} + r_{i2})(x_t \cdot x_i) \\ C &= \sum_{i=p+1}^l \sum_{q=p+1}^l i_q((1 - \alpha) r_{i1} + r_{i2}) \cdot ((1 - \alpha) r_{q1} + r_{q2})(x_i \cdot x_q) \\ &= (\alpha_1, \dots, \alpha_p)^T R_+^p, \quad (\alpha_{p+1}, \dots, \alpha_l)^T R_+^{l-p} \end{aligned}$$

$(t, i)^T$  为决策变量。

式(5)为一凸二次规划,解得其最优解  $(t^*, i^*)^T = (\alpha_1^*, \dots, \alpha_p^*, \alpha_{p+1}^*, \dots, \alpha_l^*)^T$ ,便可得到确定性的分类超平面<sup>[11]</sup>

$$(w^* \cdot x) + b^* = 0 \quad x \in R^n \quad (6)$$

式中:

$$\begin{aligned} w^* &= \sum_{t=1}^p t^* ((1 - \alpha) r_{t3} + r_{t2}) x_t + \sum_{i=p+1}^l i^* \cdot ((1 - \alpha) r_{i1} + r_{i2}) x_i \\ b^* &= ((1 - \alpha) r_{s3} + r_{s2}) - \left( \sum_{t=1}^p t^* ((1 - \alpha) r_{t3} + r_{t2}) + \sum_{i=p+1}^l i^* ((1 - \alpha) r_{i1} + r_{i2}) \right) \end{aligned}$$

$$r_{i2})(x_t \cdot x_s) + \left. \begin{matrix} i \\ i=p+1 \end{matrix} \right\} \begin{matrix} * \\ * \end{matrix} ((1 - ) r_{i1} + r_{i2})(x_i \cdot x_s) \right\} s \{s| s^* > 0\}$$

$$) r_{i3} + r_{i2}) K(x_t, x_q) + \left. \begin{matrix} i \\ i=p+1 \end{matrix} \right\} \begin{matrix} * \\ * \end{matrix} ((1 - ) r_{i1} + r_{i2}) K(x_i, x_q)$$

或

$$b^* = ((1 - ) r_{qi} + r_{q2}) - \left( \begin{matrix} p \\ t=1 \end{matrix} \right. \begin{matrix} * \\ * \end{matrix} ((1 - ) r_{i3} + r_{i2})(x_t \cdot x_q) + \left. \begin{matrix} i \\ i=p+1 \end{matrix} \right\} \begin{matrix} * \\ * \end{matrix} ((1 - ) r_{i1} + r_{i2})(x_i \cdot x_q) \right) q \{q| q^* > 0\}$$

$$4) \text{构造函数 } g(x) = \begin{matrix} p \\ t=1 \end{matrix} \begin{matrix} * \\ * \end{matrix} ((1 - ) r_{i3} + r_{i2}) \cdot K(x, x_t) + \begin{matrix} i \\ i=p+1 \end{matrix} \begin{matrix} * \\ * \end{matrix} ((1 - ) r_{i1} + r_{i2}) K(x, x_i) + b^* .$$

令函数  $g(x) = (w^* \cdot x) + b^*$ , 建立回归问题的训练集

$$\{(g(x_1), 1), \dots, (g(x_p), p)\} \quad (7)$$

选择适当的  $\gamma > 0$ , 惩罚参数  $C > 0$ , 且为了合理构造最优分类函数, 此处选择核函数为线性核, 构造  $\gamma$ -支持向量回归机, 得到回归函数  $\hat{g}(u)$ ; 同理可得回归函数  $\hat{h}(u)$ . 因此模糊最优分类函数为

$$\hat{f}(u) = \begin{cases} \hat{g}(u) & 0 < u < \hat{h}^{-1}(1) \\ 1 & u > \hat{h}^{-1}(1) \\ -\hat{h}(u) & \hat{h}^{-1}(1) < u < 0 \\ -1 & u < \hat{h}^{-1}(1) \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\hat{h}^{-1}(1)$  和  $\hat{h}^{-1}(1)$  分别为函数  $\hat{g}(u)$  和  $\hat{h}(u)$  的反函数在 1 处的函数值。

通过以上分析, 得到算法(模糊支持向量机):

1) 给定模糊训练集式(1), 选择适当的置信水平  $(0 < \gamma < 1)$ , 惩罚参数  $C$ , 以及适当的核函数  $K(x, x)$  构造与式(5)类似的二次规划, 其中内积  $(x_t, x_s)$ 、 $(x_t, x_i)$ 、 $(x_i, x_q)$  分别用  $K(x_t, x_s)$ 、 $K(x_t, x_i)$ 、 $K(x_i, x_q)$  代替。

2) 求解上述二次规划, 得最优解  $(w^*, b^*)^T = (w_1^*, \dots, w_p^*, w_{p+1}^*, \dots, w_l^*)^T$ 。

3) 选择  $w^*$  的正分量  $0 < w_s^* < C$  或  $w^*$  的正分量  $0 < w_q^* < C$ , 据此计算

$$b^* = ((1 - \gamma) r_{i3} + r_{i2}) - \left( \begin{matrix} p \\ t=1 \end{matrix} \right. \begin{matrix} * \\ * \end{matrix} ((1 - \gamma) r_{i3} + r_{i2}) K(x_t, x_s) + \left. \begin{matrix} i \\ i=p+1 \end{matrix} \right\} \begin{matrix} * \\ * \end{matrix} ((1 - \gamma) r_{i1} + r_{i2}) K(x_i, x_s) \right)$$

或

$$b^* = ((1 - \gamma) r_{qi} + r_{q2}) - \left( \begin{matrix} p \\ t=1 \end{matrix} \right. \begin{matrix} * \\ * \end{matrix} ((1 - \gamma) r_{i3} + r_{i2}) K(x_t, x_q) + \left. \begin{matrix} i \\ i=p+1 \end{matrix} \right\} \begin{matrix} * \\ * \end{matrix} ((1 - \gamma) r_{i1} + r_{i2}) K(x_i, x_q) \right)$$

5) 分别以  $\{(g(x_1), 1), \dots, (g(x_p), p)\}$  和  $\{(g(x_{p+1}), -p+1), \dots, (g(x_l), -l)\}$  为训练集, 构造  $\gamma$ -支持向量回归机(选择适当  $\gamma$  和惩罚参数  $C$ , 选择核函数为线性核), 得到回归函数  $\hat{g}(u)$  和  $\hat{h}(u)$ 。

6) 构造模糊最优分类函数式(8)。

## 2 城市空气质量评价中的模糊支持向量机方法

1) 确定评价指标。根据空气质量评价标准和我国城市空气污染的具体情况, 确定影响我国城市空气质量的 10 项污染指标<sup>[10-11]</sup>: 总悬浮颗粒物、可吸入颗粒物、二氧化硫、二氧化氮、氮氧化物、一氧化碳、臭氧、铅、苯并芘和氟化物。通过特征选择, 确定 3 项影响最大且相互独立的指标: 总悬浮颗粒物、二氧化硫和二氧化氮。

2) 选择训练数据。从国家环保总局 2003 年综合污染指数排名 113 个大中城市中选出具有代表性的 40 个城市的数据作为训练样本。

3) 确定模糊训练集。根据以上讨论, 得到模糊训练集

$$S = \{(x_1, \gamma_1), \dots, (x_5, \gamma_5), (x_6, \gamma_6), \dots, (x_{40}, \gamma_{40})\}$$

其中

$$x_1 = (0.269, 0.234, 0.068)^T, \dots,$$

$$x_5 = (0.141, 0.050, 0.072)^T,$$

$$x_6 = (0.133, 0.073, 0.051)^T, \dots,$$

$$x_{40} = (0.135, 0.067, 0.035)^T;$$

$$\gamma_1 = 1 = (1, 1, 1), \dots,$$

$$\gamma_5 = (-1.940, 0.008, 1.976),$$

$$\gamma_6 = (-1.649, -0.140, 1.368), \dots,$$

$$\gamma_{40} = (-1.431, -0.262, 0.900)$$

三角模糊数  $\gamma_j (j = 1, 2, \dots, 40)$ , 由表 1 中的隶属度按式(1)转换得到。

表 1 2003 年我国部分城市空气污染指标数据集

Fig. 1 Data set of atmosphere pollution indexes of some cities in China (in 2003)

序号	城市	质量浓度/(mg/m <sup>3</sup> )			空气综合 污染指数	隶属度
		总悬浮颗粒物	二氧化硫	二氧化氮		
1	临汾	0.269	0.234	0.068	7.46	1.000
2	石家庄	0.175	0.152	0.044	4.83	0.647
3	重庆	0.147	0.115	0.046	3.96	0.531
4	兰州	0.174	0.086	0.050	3.80	0.509
5	太原	0.172	0.099	0.030	3.76	0.504
6	邢台	0.149	0.125	0.043	4.58	0.614
7	张家口	0.176	0.150	0.042	5.06	0.678
8	天津	0.133	0.073	0.051	3.21	0.570
9	济南	0.148	0.064	0.046	3.13	0.580
10	广州	0.099	0.059	0.078	2.87	0.615
11	杭州	0.119	0.048	0.056	2.71	0.635
12	成都	0.118	0.052	0.046	2.62	0.649
13	上海	0.097	0.048	0.057	2.40	0.680
14	苏州	0.119	0.031	0.042	2.20	0.705
15	青岛	0.096	0.075	0.023	2.17	0.709
16	昆明	0.085	0.045	0.033	2.02	0.729
17	烟台	0.074	0.048	0.031	1.97	0.736
18	深圳	0.070	0.020	0.057	1.75	0.765
19	合肥	0.100	0.012	0.025	1.52	0.796
20	长春	0.098	0.012	0.088	1.46	0.804
21	珠海	0.049	0.024	0.036	1.34	0.820
22	海口	0.030	0.009	0.015	0.61	0.918
23	秦皇岛	0.088	0.040	0.025	1.66	0.777
24	呼和浩特	0.150	0.038	0.046	3.20	0.571
25	沈阳	0.135	0.051	0.046	2.67	0.642
26	哈尔滨	0.121	0.042	0.059	2.74	0.633
27	南通	0.100	0.041	0.030	2.04	0.727
28	连云港	0.096	0.041	0.046	1.85	0.752
29	宁波	0.078	0.011	0.058	2.19	0.706
30	温州	0.078	0.060	0.062	2.45	0.672
31	福州	0.060	0.038	0.034	1.35	0.819
32	厦门	0.058	0.025	0.064	1.55	0.792
33	南昌	0.100	0.051	0.014	2.28	0.694
34	郑州	0.107	0.050	0.033	2.32	0.689
35	长沙	0.135	0.081	0.039	3.18	0.574
36	湛江	0.058	0.017	0.014	1.04	0.861
37	南宁	0.072	0.046	0.032	1.90	0.745
38	桂林	0.044	0.005	0.027	1.26	0.831
39	北海	0.049	0.005	0.012	0.73	0.902
40	贵阳	0.104	0.069	0.010	2.76	0.630

续表 1

序号	城市	质量浓度/(mg/m <sup>3</sup> )			空气综合 污染指数	隶属度
		总悬浮颗粒物	二氧化硫	二氧化氮		
41	拉萨	0.137	0.002	0.025	1.91	0.744
42	西安	0.135	0.067	0.035	2.75	0.631
43	西宁	0.139	0.091	0.031	3.03	0.594
44	银川	0.132	0.063	0.033	3.29	0.559
45	乌鲁木齐	0.127	0.097	0.055	2.56	0.657
46	汕头	0.049	0.091	0.042	1.82	0.756
47	南京	0.120	0.03	0.049	2.21	0.704
48	大连	0.081	0.013	0.029	1.93	0.741
49	武汉	0.123	0.049	0.052	2.20	0.705
50	沧州	0.061	0.030	0.049	2.75	0.631

注:数据来自国家环保总局和河北省环保局。

4) 训练模糊训练点,构造最优分类函数及其隶属函数。以  $S$  为模糊训练集,根据模糊支持向量分类机(算法),对模糊训练点进行训练(根据交叉试验结果选取线性核  $K(x, x) = x \cdot x$ , 惩罚参数  $C = 10$ , 置信水平  $\gamma = 0.9$ ), 得函数

$$g(x) = 42.046[x]_1 + 40.040[x]_2 + 6.482[x]_3 - 10.084$$

即为模糊最优分类函数。

构造模糊最优分类函数的隶属函数。根据模糊正类点的输入  $x_i (i = 1, 2, \dots, 5)$ , 函数  $g(x)$  以及模糊训练点属于正类的隶属度, 得到训练集

$$S_1 = \{(11.037, 1.000), \dots, (0.687, 0.504)\}$$

选择  $\gamma = 0.1$ ,  $C = 10$  并且选择线性核, 构造支持向量回归机, 得到回归函数  $f_+(u) = 0.031u + 0.570$ ; 同理, 根据模糊负类点的输入  $x_i (i = 6, 7, \dots, 40)$ ,  $g(x)$  以及模糊训练点属于负类的隶属度, 得到训练集

$$S_2 = \{(-1.238, 0.570), \dots, (-1.498, 0.631)\}$$

选择  $\gamma = 0.1$ ,  $C = 10$  并且选择线性核, 构造支持向量回归机, 得到回归函数  $f_-(u) = -0.026u + 0.610$ 。最优分类函数的隶属函数为

$$f(x) = \begin{cases} 0.031g(x) + 0.570 & 0 < g(x) < 13.870 \\ 1 & g(x) > 13.870 \\ 0.026g(x) - 0.610 & -15.000 < g(x) < 0 \\ -1 & g(x) < -15.000 \end{cases}$$

5) 测试。在未被国家环保总局列入空气综合污染指数排名的 554 个中小城市中选出河北省的 3 个城市邢台、张家口、沧州(表 1)进行测试, 同时为了

检验方法的正确性, 在 113 个大中城市中(20 个作为训练样本的城市除外)选出 7 个城市(西宁、银川、乌鲁木齐、汕头、南京、大连、武汉)进行测试, 将结果与原数据比较。将表 1 中 6、7、43~50 号城市前 3 项数据  $x_{41}, x_{42}, \dots, x_{50}$  代入最优分类函数及其隶属函数, 得

$$\begin{aligned} (g(x_{41})) &= 0.615, & (g(x_{42})) &= 0.681, \\ (g(x_{43})) &= -0.620, & (g(x_{44})) &= -0.657, \\ (g(x_{45})) &= -0.623, & (g(x_{46})) &= -0.717, \\ (g(x_{47})) &= -0.701, & (g(x_{48})) &= -0.765, \\ (g(x_{49})) &= -0.678, & (g(x_{50})) &= -0.766. \end{aligned}$$

6) 测试结果评价。将以上 10 个测试点的输出结果(属于正类或负类的隶属度)转换为空气综合污染指数进行评价:

a. 河北省环保局专家对本研究得到的邢台、张家口、沧州的空气综合污染指数(4.59、5.08、2.83)进行了评价, 认为此数据符合这 3 个城市 2003 年空气污染情况, 客观地反映了其空气质量的实际情况。将此数据与河北省环保局提供的这 3 个城市的空气综合污染指数(4.58、5.06、2.75)(表 1)比较, 误差均小于 0.1。

b. 将计算得到的西宁、银川、乌鲁木齐、汕头、南京、大连、武汉空气综合污染指数(2.56、2.81、2.11、2.23、1.75、2.40、1.75)与国家环保总局提供的 2003 年空气综合污染指数(3.03、3.29、2.56、1.82、2.21、1.93、2.20)(表 1)比较, 误差均小于 0.5。

综合 a. 和 b. 可看出, 10 个测试点的测试结果误差都小于 0.5。

### 3 结 论

本研究在支持向量机和模糊规划基础上建立了模糊支持向量机(算法),提出城市空气质量评价中的模糊支持向量机方法。根据2003年数据,采用本方法得到的邢台、张家口和沧州的空气污染指数与河北省环保专家提供的数据误差小于0.1;西宁、银川、乌鲁木齐、汕头、南京、大连、武汉的综合空气污染指数与国家环保总局提供的数据误差均小于0.5。

本文得到邓乃扬教授的指导,在此谨致谢意。

### 参 考 文 献

- [1] 邓乃扬,田英杰. 数据挖掘中的新方法——支持向量机[M]. 北京:科学出版社,2004
- [2] 崔伟东,周志华,李星. 支持向量机研究[J]. 计算机工程与应用,2001(1):58~61
- [3] 杨志民. 模糊支持向量机及其应用研究[D]. 北京:中国农业大学,2005
- [4] Cristianini N. An Introduction to Support Vector Machines [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000
- [5] Lin C F, Wang S D. Fuzzy support vector machines[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2002(2): 464~471
- [6] Shigeo A, Takuya I. Fuzzy support vector machines for multiclass problems[C]. ESANN 2002 proceedings- European Symposium on Artificial Neural Networks, Bruges (Belgium): d-side publi, 2002:113~118
- [7] Yang Z M. Review of the monograph mathematical treatment and application of uncertain information [J]. Chinese Science Bulletin, 2001(7): 615~616
- [8] Yang Z M, Wang L, Deng N Y. Fuzzy linear support vector machines [J]. Proceedings of WCICA (IEEE), 2004: 1865~1868
- [9] 杨志民,邓乃扬. 模糊线性支持向量回归机[M]. 计算机工程与应用,2004(36):54~57
- [10] 蔡国梁,邢桂芬,李玉秀,等. 城市环境空气质量的多指标可拓综合评价法[J]. 城市环境与城市生态,2003,16(5):4~6
- [11] 刘咸德. 城市空气质量的管理[J]. 环境监测管理与技术,2000,12(1):1~4
- [12] 邓乃扬,诸梅芳. 最优化方法[M]. 沈阳:辽宁教育出版社,1987
- [13] 刘宝碇. 随机规划与模糊规划[M]. 北京:清华大学出版社,1998