

文章编号: 1673-193X(2011)-03-0016-06

基于核校准和 SVM 的煤矿安全组织管理因素分析^{*}

金 珠, 马小平

(中国矿业大学 信息与电气工程学院, 徐州 221008)

摘 要: 组织管理因素与煤矿安全生产密切相关。该文从人的管理、组织机构管理、企业环境管理、现场及技术管理四个方面详细分析了煤矿组织管理中的主要影响因素, 提出一种基于核校准和支持向量机(SVM)的组织管理安全评价等级预测方法, 构建了影响因素形成的输入空间到评价等级空间的非线性映射, 并详尽分析了组织管理的安全评价等级与各影响因素的关联关系。在此基础上, 本文深入研究煤矿安全中各组织管理因素的作用规律, 并探讨了相应的预防措施与控制方法。实例分析结果表明, 该方法能够合理地反映煤矿企业的组织管理安全评价状况, 有助于煤矿企业采取相应措施预防或减少安全事故的发生, 同时, 也为企业提高本质安全管理水平提供了参考, 有较强的实用性。

关键词: 核校准; 支持向量机; 组织管理因素; 安全评价

中图分类号: X92

文献标识码: A

Analysis of organizational administrative factors in coal mine safety based on kernel alignment and SVM

JIN Zhu, MA Xiao-ping

(The School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Organizational administrative factors are closely related to the safety in production of coal mine. From the perspectives of human management, organization institution management, enterprise environment management, scenes and technique management, this paper analyses the main influencing factors of organization and management of coal mine in detail. Then, based on kernel alignment and Support Vector Machines(SVM), a method for predicting the safety evaluation level of organization and management was presented. At the same time, the nonlinear mapping from the input space formed by the influencing factors to evaluation level space was constructed, and the relationships between safety evaluation level of organization & management and the influencing factors were also analyzed. On these bases, a deep study was conducted on the functionary mechanism of organization & management factors of coal mine, and then the corresponding preventive strategies and manipulative measures were discussed. Experiment results showed that this algorithm could not only reflects the evaluative situation of mine coal safety management more reasonably, but also helps the coal mining enterprises taking corresponding measures to prevent or lessen safety accidents, as well as provides references for raising the level of inherent safety management. So, this approach is more practical.

Key words: kernel alignment; support vector machines; organizational administrative factors; safety assessment

收稿日期: 2011-01-16

作者简介: 金珠, 博士研究生。

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金(编号: 60974126, 60974050); 江苏省自然科学基金(编号: BK2009094)

1 引言

近些年,我国煤矿重大事故频繁发生。据统计,这些事故的直接原因中人所占比率高达97.67%,而其中由管理失误导致的事故占45.96%^[1];与此同时,对全国工矿企业伤亡事故的调查发现,其中近一半是由人员“三违”造成,而“三违”现象本质上也是一种组织管理错误,是管理失误的间接体现^[2]。可见,组织管理因素已成为影响煤矿安全的关键因素。由于组织错误是系统中不易察觉的、危险最大的“潜在错误”^[3]。研究系统的组织管理安全状态及与其影响因素间的关系,对于有效控制和预防煤矿事故、促进安全生产有重要的理论价值和实际意义。现有关于煤矿组织管理因素的关联分析一般采用模糊数学、层次分析、神经网络等方法^[4-6],由于组织管理影响因素繁多,数据样本相对较少,这些方法往往存在主观随意性、易陷入“过学习”、难于推广等不足。

核校准^[7](Kernel Alignment)是Cristianini等人于2002年提出的一种核映射评价方法,通过优化核矩阵和类标矩阵形成的向量夹角衡量核函数的性能优劣,巧妙解决了核函数的模型选择问题^[8]。支持向量机^[9-10](Support Vector Machines, SVM)是建立在统计学习理论基础上的新的机器学习方法,它基于结构风险最小化原则,通过最大化分类间隔以获得最好泛

化性能,在解决小样本、高维和非线性模式识别问题时性能卓越。本文考虑利用核校准构建系统组织管理安全评价等级与其影响因素之间的映射,采用支持向量机基本思想,最大化等级间隔以获得较好推广能力,并建立煤矿组织管理安全评价等级预测模型,给出组织管理各影响因素与安全等级的关联关系。

2 煤矿安全评价中的组织管理因素

从系统工程角度考虑,煤矿生产系统是一个人、机、环境等多因素交织作用的复杂系统。煤矿事故表面上看是由人的不安全行为、机器设备的不安全状态以及生产环境中的不安全条件造成的系统状态失衡,本质上却是组织管理缺陷在系统状态上的表现形式。依据管理的对象和主体不同,我们将组织管理因素划分为人的管理、组织机构管理、企业环境管理、现场及技术管理四个方面。人的管理主要指人的资质及与人直接相关的各种管理措施安排,如人员的教育培训、人员的资质、管理人员和技术人员比例、职工工伤保险等;现场及技术管理指生产现场的管理措施,包括操作规程及其落实、图纸及合格率管理等;企业环境管理主要指对煤矿企业的各种资质、安全文化、安全制度、安全投入的管理等;组织机构管理主要指煤矿企业的机构设置、权力划分、信息沟通等情况。煤矿组织管理对事故作用如图1所示。

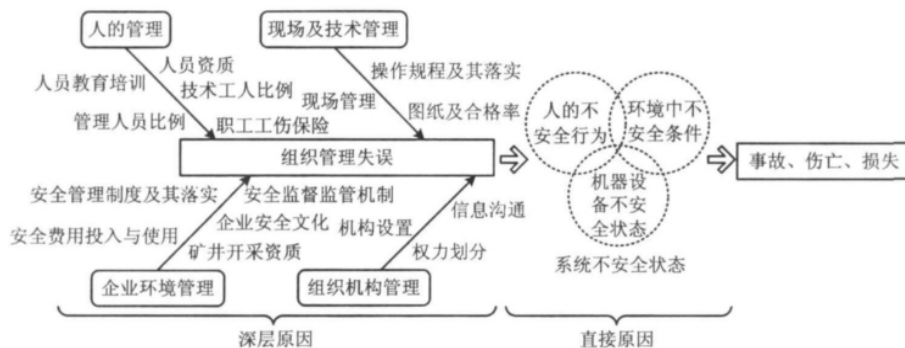


图1 煤矿事故因果图

3 基于核校准和支持向量机的组织管理安全评价等级预测

3.1 核校准与支持向量机

给定输入空间中二分类数据集 $S = \{x_1, \dots, x_l\}$,

l 为样本数目,假定有核函数 $k(x_j, x_k)$,核矩阵 K 为一 $l \times l$ 维矩阵,其第 j 行第 k 列元素为样本 x_j 和 x_k 形成的核函数值,即 $K(j, k) = k(x_j, x_k)$, $j, k = 1, \dots, l$,令 $Y = [y_1 \dots y_l]^T$ 为各样本对应类标形成的矩阵(类标 y_j 取为“ ± 1 ”,“ \cdot ”表示矩阵的转置), $J = YY^T$

称为校准矩阵 J 指示了样本类别之间的相似关系,若校准矩阵的第 j 行第 k 列元素为“+1”,则样本 x_j 和 x_k 同类,否则 x_j 和 x_k 异类。从而定义核校准 $A^{[11]}$ 为

$$A(S, K, J) = \frac{\langle K, J \rangle_F}{\sqrt{\langle K, K \rangle_F \langle J, J \rangle_F}}, \quad (1)$$

上式为一标量,其中 $\langle K, J \rangle_F = \sum_j \sum_k K(j, k) J(j, k)$ 。将不同核映射对应的核矩阵作为待校准矩阵,则核校准可以看作以校准矩阵为基准对核矩阵的校正评估。分别将 K 和 J 的每一行串联形成行向量 a 和 b ,则上式可以看作 a 和 b 之间向量夹角的余弦 $(a \cdot b) / (\|a\| \|b\|)$,“ \cdot ”为内积运算符,“ $\|$ ”为向量的 2-范数。核校准 $A(S, K, J)$ 体现了各类样本在高维特征空间中的相互关系,核矩阵和校准矩阵形成的向量夹角越小, A 越大,则高维特征空间中同类样本靠的更近而异类样本离的更远,反之亦然。

非线性 SVM 将输入空间的样本映射到高维特征空间,然后使用线性函数作为假设集进行判别分类,在最小化经验风险的同时最大化分类间隔,从而确保学习器的推广能力最大。本文利用核校准和支持向量机基本思想构建组织管理安全评价等级预测模型。

3.2 组织管理评价等级预测算法模型

为了便于描述,假设煤矿组织管理系统有 n 个影响因素,形成输入空间 R^n , R 为实数域。给定 N 个煤矿样本,假设全体样本分为 L 个安全评价等级, $L \geq 2$,第 i 等级的样本集 $S^{(i)} = \{(x_j^{(i)}, y^{(i)}) \mid j = 1, \dots, N_i\}$, $N = \sum_{i=1}^L N_i$,其中 $(x_j^{(i)})_{1 \times n} \in R^n$ 为影响因素组成的 $1 \times n$ 维行向量, N_i 为第 i 等级样本的数目,等级 $y = \{1, \dots, L\}$, $y^{(i)} \in y$ 为第 i 个评价等级,全体样本映射到 L 个等级上形成的 L 元组的全体构成了 R 上 L 维的等级空间 R^L 。为了研究组织管理因素对安全评价等级的关系,利用映射矩阵 $(W)_{n \times L} = [W_1 \dots W_L]$,将输入空间样本 $x_j^{(i)}$ 映射到等级空间 R^L , $x_j^{(i)}$ 在 R^L 的像 $(z_j^{(i)})_{1 \times L} = (x_j^{(i)} \cdot W_1, \dots, x_j^{(i)} \cdot W_L)$, $z_j^{(i)}$ 为 L 维行向量,其在每个等级维度的属性值表示该样本与相应等级的关联程度。我们希望找到一个最优映射矩阵 W ,使得样本在等级

空间的像在其实际等级维度上的属性值最大,而在其它等级维度的属性值较小,并最大化像在不同等级维度之间的间隔,以获得较好的推广能力。

首先给出样本与评价等级之间相关性矩阵的定义,样本在等级空间中的像在每个维度上的属性值表示该样本与相应等级的关联程度,定义样本 $x_j^{(i)}$ 的相关性矩阵 $T_j^{(i)}(x_j^{(i)})$ 为其像 $z_j^{(i)}$ 在 L 个等级上的 2-范数构成的矩阵:

$$(T_W^{(i)}(x_j^{(i)}))_{1 \times L} = [z_{j1}^{(i)} z_{j1}^{(i)} \dots z_{jL}^{(i)} z_{jL}^{(i)}] \\ = [W_1^T(x_j^{(i)} x_j^{(i)}) W_1 \dots W_L^T(x_j^{(i)} x_j^{(i)}) W_L],$$

等级 i 的相关性矩阵为该等级中所有样本在各个等级上的关联程度构成的矩阵:

$$(T_W^{(i)})_{1 \times L} = \sum_{j=1}^{N_i} T_W^{(i)}(x_j^{(i)}) = [W_1^T(\sum_{j=1}^{N_i} (x_j^{(i)} x_j^{(i)})) W_1 \dots W_L^T(\sum_{j=1}^{N_i} (x_j^{(i)} x_j^{(i)})) W_L] \quad (2)$$

除第 i 等级之外其它等级的相关性矩阵为:

$$(\widehat{T_W^{(i)}})_{1 \times L} = \sum_{r=1, r \neq i}^L \sum_{j=1}^{N_r} T_W^{(r)}(x_j^{(r)}) = [W_1^T(\sum_{r=1, r \neq i}^L \sum_{j=1}^{N_r} (x_j^{(r)} x_j^{(r)})) W_1 \dots W_L^T(\sum_{r=1, r \neq i}^L \sum_{j=1}^{N_r} (x_j^{(r)} x_j^{(r)})) W_L]$$

将等级 i 的相关性矩阵作为待校准矩阵,令其校准矩阵为 $(Y^{(i)})_{1 \times L} = (Y_1^{(i)} \dots Y_L^{(i)})$,这是一个 $1 \times L$ 维的行向量,若 $i=r$, $Y_r^{(i)} = 1$,否则 $Y_r^{(i)} = -1$, r 指示了该类样本的实际评价等级。为了简化计算,利用相应向量的内积代替式(1)中向量夹角余弦,从核校准考虑,寻找 $R^n \rightarrow R^L$ 的最优映射矩阵 W ,就是要使各等级样本对应的校准矩阵与相应等级的相关性矩阵形成的核校准值最大,同时与其它等级的相关性矩阵形成的核校准值最小,最大化等级间隔以获得较好推广性,即如下的最优化问题:

$$H(W) = \arg \max_W (\sum_{i=1}^L (T_W^{(i)} Y^{(i)}) / \sum_{i=1}^L (\widehat{T_W^{(i)}} Y^{(i)})) \quad (3)$$

这是一个无约束的最优化问题,有很多最优化方法可以求解。由上式得到最优映射矩阵 W^* 后,便可在等级空间建立决策规则,对于给定的待评价样本 x ,将等级 $r(r=1, \dots, L)$ 的校准矩阵 $Y^{(r)}$ 作为待校准矩阵,将相关性矩阵 $T_W^{(r)}(x)$ 作为校准矩阵,则 $T_W^{(r)}(x)$ 与期望等级对应的待校准矩阵的核校准值最

大样本 x 对应的等级为

$$r^* = \arg \max_r \{ T_{W^*}^r(x) | Y^{(r)}, r = 1, \cdots, L \} \quad (4)$$

映射矩阵 W 体现了影响因素与组织管理评价等级之间的关联关系,将其第 i 维 W_i 看作输入空间的向量,则像的第 i 维 $(x_j^{(i)} \cdot W_i)$ 可以看作样本在该向量方向上的投影,从而最优映射矩阵的 W_i^* 为影响因素与组织管理第 i 评价等级关联最大的方向。

4 实例研究

为验证本文方法的有效性,在文献[12]中 33 个煤矿样本数据集上进行实验。从人的管理、组织机构管理、企业环境管理、现场及技术管理四个方面考虑,选取“矿井证照齐备率”(GL1)、“机构设置合格率”(GL2)、“管理人员资格合格率”

(GL3)、“矿井技术人员比例”(GL4)、“矿井技术工人比例”(GL5)、“特殊工种人员持证率”(GL6)、“工月平均培训时间”(GL7)、“安全管理制度及落实程度”(GL8)、“安全操作规程及落实情况”(GL9)、“职工工伤保险率”(GL10)、“安全费用提取与使用合格率”(GL11)、“矿图及合格率”(GL12)为主要影响因素。定量影响因素(如矿井证照齐备率、矿井技术人员比例等)主要通过实际收集获得,对于安全管理制度及落实程度、安全操作规程及落实情况等定性因素主要通过专家打分法进行评定。全部样本的安全评价结果被量化为五个等级:安全(5)、较安全(4)、一般(3)、较不安全(2)、不安全(1),在每个等级内随机选取一个样本,组成测试样本集,剩下的为训练样本。原始数据如表 1、表 2 所示。

表 1 原始训练数据集

序号	GL1	GL2	GL3	GL4	GL5	GL6	GL7	GL8	GL9	GL10	GL11	GL12	等级
1	100	100	90	4.2	77	100	7	79	89	85	60	100	5
2	100	100	92	3.9	56	100	8	76	73	82	65	100	5
3	100	100	78	2.6	58	100	7	88	73	76	56	100	5
4	100	100	66	2.5	55	100	6	76	70	76	61	85	4
5	100	80	86	3.9	56	100	9	66	63	73	53	86	4
6	100	100	94	1.8	46	100	7	61	62	73	50	79	4
7	100	90	74	1.7	46	100	10	87	58	72	51	77	3
8	100	100	85	2.1	44	100	7	76	66	69	30	72	3
9	100	90	79	1.9	43	93	8	69	61	63	40	69	3
10	75	85	68	1.8	42	85	9	68	58	62	45	65	2
11	50	80	60	1.65	41	86	12	70	50	61	45	80	2
12	100	70	80	1.6	40	90	14	69	57	60	40	79	2
13	50	75	75	1.8	34	85	11	62	60	61	36	65	2
14	75	85	72	1.6	32	80	10	54	53	57	42	70	2
15	100	80	88	1.9	35	80	6	53	53	56	36	56	3
16	100	100	86	2.1	28	75	12	60	50	55	36	55	2
17	100	80	86	0.75	22	76	6	50	43	53	33	48	2
18	50	70	95	1.1	26	60	5	50	47	41	34	46	2
19	100	60	94	0.9	29	71	3	41	42	40	33	53	1
20	75	80	64	1.9	35	69	4	40	44	42	32	52	1
21	100	85	71	1.6	31	67	6	53	46	41	31	51	2
22	50	75	65	1.5	20	64	4	61	46	40	30	44	1
23	50	50	59	0.8	15	53	3	45	41	31	32	48	1
24	50	80	60	1.1	10	71	1	50	50	33	32	50	1
25	50	50	80	1.5	14	60	1	49	47	31	30	52	1
26	50	50	50	0.8	16	54	1	43	48	30	26	41	1
27	50	50	60	0.9	12	75	1	40	51	35	22	44	1
28	50	50	50	0.5	15	50	1	38	47	35	20	46	1

表2 原始测试数据集

序号	GL1	GL2	GL3	GL4	GL5	GL6	GL7	GL8	GL9	GL10	GL11	GL12	等级
1	100	100	95	3.5	66	100	6	66	80	86	60	100	5
2	100	100	95	2.5	52	100	6	55	67	74	50	75	4
3	100	80	81	2.5	43	100	8	86	56	68	48	66	3
4	75	60	80	1.6	40	92	9	51	59	65	42	75	2
5	50	80	50	0.9	18	52	2	43	38	35	30	36	1

所有影响因素都为“极大型”,取值越大越好。将所有指标无量纲化以消除不同单位及量级对评价等级的影响。将样本映射到等级空间,按式(3)计算后得到最优映射矩阵 W^* ,计算待评价样本的相关性矩阵在各等级上的核校准值分别为:待测样本1{127.85,163.46,175.22,184.86,190.10},待测样本2{100.53,126.48,139.20,142.99,139.15},待测样本3{76.84,91.77,99.48,99.24,92.23},待测样本4{52.10,53.35,51.69,53.07,51.34},待测样本5{35.47,31.66,25.00,23.14,21.65},由式(4)可知待评价样本的等级分别为5、4、3、2、1,与样本的实际等级是一致的,测试正确率为100%。

样本在 W^* 各维上的变化体现了样本与相应等级的关联程度。最优映射矩阵 W^* 的长度是无关紧要的,仅相当于乘以一个比例因子,将最优映射矩阵正规化并求其在各维属性上的绝对值得到 W^a :

$$W^a = [W_1^a W_2^a W_3^a W_4^a W_5^a] = \begin{pmatrix} 0.2773 & 0.4415 & 0.5604 & 0.4854 & 0.4226 \\ 0.2422 & 0.3757 & 0.4817 & 0.4876 & 0.5748 \\ 0.4704 & 0.4885 & 0.3532 & 0.4814 & 0.4284 \\ 0.2975 & 0.4247 & 0.3831 & 0.4819 & 0.5934 \\ 0.3381 & 0.4131 & 0.4315 & 0.4953 & 0.5324 \\ 0.2129 & 0.2920 & 0.5272 & 0.5801 & 0.5051 \\ 0.6204 & 0.5115 & 0.3904 & 0.3381 & 0.2944 \\ 0.6204 & 0.5115 & 0.3904 & 0.3381 & 0.2944 \\ 0.5748 & 0.4739 & 0.3617 & 0.3133 & 0.4647 \\ 0.5758 & 0.4747 & 0.3623 & 0.3138 & 0.4620 \\ 0.5763 & 0.4752 & 0.3626 & 0.4200 & 0.3662 \\ 0.3249 & 0.4175 & 0.4187 & 0.4753 & 0.5647 \end{pmatrix}$$

W_j^a 为 W^a 的第 j 列 ($j=1, \dots, 5$), 其第 i 行 W_{ij}^a 表示第 i 个影响因素与评价等级 j 的关联程度。从上式中可以看出,在等级1(不安全)上, $W_{7,1}^a$ 、 $W_{8,1}^a$ 都

达到最大值0.6204,其次是 $W_{11,1}^a$ 、 $W_{10,1}^a$ 和 $W_{9,1}^a$, $W_{6,1}^a$ 相对较小,说明职工月平均培训时间、安全管理制度及落实程度对于等级1(不安全)的作用最大,安全费用提取与使用合格率、职工工伤保险率和安全操作规程及落实情况对系统安全也有较大影响,特殊工种人员持证率的影响相对较小,对于这类矿井应着重强化安全教育培训,健全安全管理制度,安全生产监督管理部门和煤矿安全监察机构要加强监督、检查,加大监察工作力度,狠抓相关安全措施的落实,同时要加大安全投入,完善相关保险体系,该等级样本特殊工种人员持证率相对较好,但与其它等级相比还有一定差距,仍有待进一步提高;等级2(较不安全)中 $W_{7,2}^a$ 、 $W_{8,2}^a$ 也达到最大值,为0.5115,说明相近的评价等级的主要影响因素较为相似, $W_{6,2}^a$ 为0.392,相对较小,相比等级1,管理人员资格合格率的作用明显增加,因此除上述措施外,还需重点加强管理人员的培训与监管,强化管理人员素质;在第3等级(一般)中, $W_{1,3}^a$ 值最大, $W_{3,3}^a$ 相对较小,说明该等级中矿井证照齐备率的影响最大,应该进一步加强煤矿企业相关资质审核力度;等级4(较安全)、5(安全)的安全情况较好,等级5(安全)中,矿井技术人员比例和机构设置合格率影响最大,分别为0.5934和0.5748,说明煤矿中的技术人员对于保障安全生产作用重大,应加强对技术人员培训考核,加大技术人员比例,同时加强组织机构管理,合理设置组织结构。

5 结论

详尽分析了煤矿组织管理因素及其与安全评价等级间的关系,将支持向量机基本思想与核校准相结合,提出一种煤矿组织管理安全评价等级预测方

法 给出系统安全评价等级与其影响因素间的关联分析。该方法能够合理反映煤矿的组织管理安全评价状况,有利于煤矿企业根据分析结果采取相应措施,为企业提高本质安全管理水平提供了参考。

参考文献

- [1] 陈红,祁惠,宋学峰,等. 煤矿重大事故中管理失误行为影响因素结构模型[J]. 煤炭学报, 2006, 10(5): 689-696
CHEN Hong, QI Hui, SONG Xue-feng, et al. The structural model of affecting factors of management misconduct in coalmine fatal accidents in China[J]. Journal of China Coal Society 2006, 10(5): 689-696
- [2] 刘铁忠,李志祥. 煤矿安全管理能力影响因素结构方程建模[J]. 煤炭学报, 2008, 33(12): 1452-1456
LIU Tie-zhong, LI Zhi-xiang. Affectiong Factors of safety management capability about coal mine based on structural equation model[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(12): 1452-1456
- [3] 谭斌,曹庆仁,岳文静. 煤矿安全管理中的常见组织错误及其防控途径[J]. 中国安全生产科学技术, 2010, 6(4): 149-152
TAN Bin, CAO Qing-ren, YUE Wen-jing. Common organization error and its prevent-control approaches of coalmine safety management[J]. Journal of Safety Science and Technology 2010, 6(4): 149-152
- [4] 杜春宇,陈东科,杜翠凤,等. 煤矿本质安全管理综合评价体系模型与应用[J]. 重庆大学学报, 2008, 31(2): 197-201
DU Chun-yu, CHEN Dong-ke, DU Cui-feng, et al. Application and model of comprehensive evaluation of coal mine inherent safety management system[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition) 2008, 31(2): 197-201
- [5] 陈静,曹庆贵,李润之. 煤矿生产中人失误的预测与评价[J]. 矿业安全与环保, 2007, 34(1): 78-81
CHEN Jing, CAO Qing-gui, LI Run-zhi. Prediction and evaluation of personal faults in production of coal mine[J]. Mining Safety & Environmental Protection 2007, 34(1): 78-81
- [6] 朱川曲. 基于神经网络的综采工作面人-机-环境系统的可靠性研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25(3): 268-272
ZHU Chuan-qu. The study on reliability of man-machine-environment system of fully-mechanized face based on neural network[J]. Journal of China Coal Society 2000, 25(3): 268-272
- [7] N. Cristianini, J. Shawe-Taylor, A. Elisseeff, et al. On kernel-target alignment[C]. In Advances in Neural Information Processing Systems 14. MIT Press 2002: 367-373
- [8] A. Howard, T. Jebara. Transformation learning via kernel alignment[C]. ICMLA, International Conference on Machine Learning and Applications 2009: 301-308
- [9] V. N. Vapnik. The nature of statistical learning theory[M]. New York: Springer-Verlag, 1995
- [10] 李娟,李翠平,李春民,等. 支持向量回归机在尾矿坝浸润线预测中的应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2009, 5(1): 76-78
LI Juan, LI Cui-ping, LI Chun-min, et al. Forecasting of infiltration route in tailing dam by Support Vector Regression[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2009, 5(1): 76-78
- [11] 刘向东,骆斌,陈兆乾. 支持向量机最优模型选择的研究[J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(4): 576-581
LIU Xiang-dong, LUO Bin, CHEN Zhao-qian. Optimal model selection for support vector machines[J]. Journal of Computer Research and Development, 2005, 42(4): 576-581
- [12] 许满贵. 煤矿动态综合安全评价模式及应用研究[D]. 西安科技大学, 博士学位论文, 2006
XU Man-gui. Study on models and application of dynamical over all safety evaluation in coal mines[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology 2006