

露天转地下边坡变形 ν -SVR模型 及参数敏感性分析

王云飞^{1,2}, 郑晓娟³

(1. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083; 2. 北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083;
3. 焦作师范高等专科学校, 河南 焦作 454000)

摘要: 基于改进支持向量回归(ν -SVR)原理, 建立反映地下开采扰动影响下露天矿边坡变形非线性规律的 ν -SVR模型。将该模型应用于露天转地下开采的杏山铁矿, 结果表明变形预测精度高且计算方便, 验证改进支持向量回归原理研究二次开采扰动下边坡变形规律的有效性。并分析自由因子 C , ν 的敏感性, 直观反映 C , ν 对 MAE 和支持向量数目的影响程度, 且确定参数 C , ν 的合理取值区间, 即惩罚参数 C 应该在 [1 000, 5 000] 内取值, 取值范围较大, 但应同时考虑惩罚因子 C 对泛化性能的影响, 参数 ν 的取值区间为 [0.028, 0.125]。

关键词: 采矿工程; 变形; 露天矿边坡; 露天转地下开采; 支持向量

中图分类号: TD 325+.4

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)增1 - 2902 - 06

SENSITIVITY ANALYSIS OF MODEL PARAMETERS AND ν -SVR MODEL OF SLOPE DEFORMATION DUE TO EXCAVATING FROM OPEN-PIT TO UNDERGROUND MINING

WANG Yunfei^{1, 2}, ZHENG Xiaojuan³

(1. Civil and Environment Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of High-efficient Mining and Safety of Metal Mines, University of Science and Technology Beijing, Ministry of Education, Beijing 100083, China; 3. Jiaozuo Teachers College, Jiaozuo, Henan 454000, China)

Abstract: Based on the improved support vector regression(ν -SVR) principle, the open-pit mine slope deformation ν -SVR model is established which represents the nonlinear variation rule due to the disturbance of excavation from open pit into underground mine. ν -SVR model is applied to Xingshan iron mine excavating from open pit to underground mining. The results show that the forecast value which is close to true value and calculation is convenient, and the validity of the improved support vector regression principle is verified by studying the open-pit slope nonlinear deformation rule with virtue of the secondary mining perturbations. The sensitivity of the parameters is analyzed, intuitively reflecting the effect of C , ν on mean absolute error(MAE) and the number of support vectors, and the reasonable ranges of the parameters C , ν are determined, that is, [1 000, 5 000] for parameter C . The interval is larger, but the effect of parameter C on the generalization performance should be considered when selecting parameter C ; for parameter $\nu = [0.028, 0.125]$ is a rather reasonable range.

Key word: mining engineering; deformation; open-pit mine slope; excavation from open pit into underground mine; support vector

收稿日期: 2008 - 11 - 03; **修回日期:** 2009 - 02 - 08

基金项目: “十一五” 国家科技支撑计划项目(2006BAB02A17)

作者简介: 王云飞(1978 -), 男, 2002年毕业于焦作工学院矿井建设专业, 现为博士研究生, 主要从事边坡稳定、智能岩石力学与工程方面的研究工作。E-mail: wyf_ustb@126.com

1 引言

随着露天开采的加深, 露天开采在经济上已不再可行, 为了开采深部资源必然要转为地下开采。如加拿大的基德克里克多金属矿、奥地利爱兹贝尔格铁矿、芬兰皮哈萨米铜锌矿、原苏联克里沃罗格铁矿和高山铁矿, 我国的凤凰山铁矿、杏山铁矿、金岭铁矿、松树卯钼矿等。露天转地下开采的矿山稳定性问题既不同于单一的露天开采, 又不同于单纯的地下开采, 露天开挖末期或结束后进行的地下开采, 会对露天采动影响范围内的岩体产生二次扰动^[1~4]。地下开采条件下岩体变形和移动所诱发的露天边坡的稳定性问题, 是近年来关注的重要论题之一^[5, 6]。这个问题之所以被如此重视。其中最主要的原因是露天转地下开采的矿山, 地下开采引起的岩体变形不仅影响露天边坡稳定, 也严重影响到矿坑周边各种设施及众多工厂的安全, 而露天边坡失稳又可能反过来直接威胁地下开采。因此, 露天转地下开采的矿山对边坡稳定问题决不能忽视, 它对矿山安全生产具有重要意义。

国内外众多学者对此进行研究并取得了一定的进展^[7~10]。但主要局限于数值模拟方法和力学平衡模型, 且存在一些问题: 计算前所需的大量统计资料难于获取, 数值模拟中各参数和地质模型与实际相差较大; 力学模型中滑移体和破坏面的人为划分导致计算结果误差偏大等。

本文则是采用数据挖掘中的新方法—支持向量机原理^[11~13], 利用改进的支持向量回归法(ν -SVR), 学习现场的监测数据, 挖掘出在地下开采的二次扰动下露天矿边坡变形的非线性规律, 建立了 ν -SVR 模型并分析了模型参数的敏感性, 在露天转地下开采的杏山铁矿进行了应用, 取得了较好的效果。

2 ν -SVR 原理

2.1 基本原理

支持向量机在处理小样本学习问题上具有独到的优越性。支持向量机避免了神经网络中的局部最优解问题和拓扑结构难以确定问题, 并有效地克服了“维数灾难”。同时由于它是一个凸二次优化问题, 能够保证得到的极值解是全局最优解^[14]。且随着统

计学习理论的发展, 支持向量机作为一种新的机器学习技术, 受到了国内外不同研究领域的广泛关注^[15~22]。

支持向量机是在统计学习理论的 VC 维理论和结构风险最小化原理的基础上发展起来的, 是将输入向量映射到特征空间, 在特征空间中构造优化超平面来有效处理原空间中的问题。它具有理论严密、适应性强、全局优化、训练效率高和泛化性能好等优点, 在理论和应用方面均有光明的前景。

ν -SVR 是 ε -SVR 的一种变形, 它通过引入参数 ν 来自动计算 ε 。其优化问题如下:

$$\min Q(\mathbf{W}, b, \xi, \xi^*, \varepsilon) = \frac{1}{2} \|\mathbf{W}\|^2 + C \left[\nu \varepsilon + \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (\xi_i^p + \xi_i^{*p}) \right] \quad (1)$$

其中,

$$y_i - \mathbf{W}^T g(x_i) - b \leq \varepsilon + \xi_i \quad (i=1, 2, \dots, M) \quad (2)$$

$$\mathbf{W}^T g(x_i) + b - y_i \leq \varepsilon + \xi_i^* \quad (i=1, 2, \dots, M) \quad (3)$$

$$\xi_i \geq 0, \xi_i^* \geq 0 \quad (i=1, 2, \dots, M) \quad (4)$$

式(1)中的 ε 是作为优化问题的变量出现的, 其值将作为解的一部分给出。为求解式(1), 引入非负 Lagrange 乘子 $\alpha_i, \alpha_i^*, \eta_i, \eta_i^*, \beta$, 原来的约束优化问题可以转化为以下无约束问题

$$\begin{aligned} Q(\mathbf{W}, b, \xi, \xi^*, \varepsilon, \alpha, \alpha^*, \eta, \eta^*) = & \frac{1}{2} \|\mathbf{W}\|^2 + C\nu\varepsilon + C \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (\xi_i + \xi_i^*) - \\ & \sum_{i=1}^M \alpha_i [\varepsilon + \xi_i - y_i + \mathbf{W}^T g(x) + b] - \\ & \sum_{i=1}^M \alpha_i^* [\varepsilon + \xi_i^* + y_i - \mathbf{W}^T g(x) - b] - \\ & \beta \varepsilon - \sum_{i=1}^M (\eta_i \xi_i + \eta_i^* \xi_i^*) \end{aligned} \quad (5)$$

其对偶问题为

$$\begin{aligned} \max Q(\alpha, \alpha^*) = & -\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^M (\alpha_i - \alpha_i^*)(\alpha_j - \alpha_j^*) K(x_i, x_j) + \\ & \sum_{i=1}^M y_i (\alpha_i - \alpha_i^*) \end{aligned} \quad (6)$$

其中,

$$\sum_{i=1}^M (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0 \quad (7)$$

$$0 \leq \alpha_i, \alpha_i^* \leq \frac{C}{M} \quad (i=1, 2, \dots, M) \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^M (\alpha_i + \alpha_i^*) = Cv \tag{9}$$

式中： $K(x_i, x_j) = g^T(x_i)g(x_j)$ 为核函数， C 和 v 为常数，分析式(8)及 $\alpha_i \alpha_i^* = 0$ 可以得知，式(9)左边的边界取决于系数 C ，故 $v > 1$ 和 $v = 1$ 同解。因此可以选取 $0 \leq v \leq 1$ 。优化解还应满足(Karush-Kuhn-Tucker)KKT 互补条件。求解优化问题后可得

$$f(x) = \sum_{SV} (\alpha - \alpha^*) K(x_i, x) + b \tag{10}$$

式中： b 为各偏置项的平均值。

2.2 支持向量机中常用的核函数

(1) 线性核函数 $K(x_i, x) = x_i^T x$ 。

(2) 多项式核函数 $K(x_i, x) = (x_i^T x + 1)^d$ ，式中， d 为多项式核函数的阶数。

(3) RBF(radial basis function)核函数 $K(x_i, x) = \exp(-\gamma \|x_i - x\|^2)$ 式中， γ 为一个控制半径的正数。

3 露天转地下边坡变形的 ν -SVR 模型

地下开采对露天矿边坡的扰动具有随机性和模糊性，很难建立影响因素与变形之间的理论关系。从而建立地下开采对露天矿边坡变形的时间序列支持向量模型成为研究地下开采对露天矿边坡影响的有效手段。利用现场监测的数据构成非线性的时间序列 $\{x_i\} = \{x_1, x_2, \dots, x_i\}$ ，对该非线性位移序列进行预测，就是要寻找在 $i + p$ 时刻的位移值和前 p 个时刻的位移值 $x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+p-1}$ 的关系，即 $x_{i+p} = f(x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+p-1})$ ， $f(\cdot)$ 为一个非线性函数，表示位移时间序列之间非线性关系。根据支持向量机理论，地下开采影响下露天矿边坡变形的非线性变化规律可以通过支持向量机对若干组实测位移序列样本的学习，构建 ν -SVR 模型来表示。

4 工程应用

4.1 工程概况

以杏山铁矿为工程背景，研究露天矿边坡在地下开采扰动下的非线性变形规律。杏山铁矿位于河北省迁安市。地理坐标为：东经：118°31'53"~118°32'56"，北纬：39°55'51"~39°56'59"。位于华北地台北缘燕山沉降带中部迁安隆起西缘的褶皱带南部杏山复向斜构造中。矿床赋存于太古代迁西群三屯营组浅粒岩、黑云变粒岩、斜长角闪岩及混合岩中，属于鞍山式沉积变质贫铁矿床。露天采场最高标高

为 305 m，露天境界最低标高为 -33 m，封闭圈标高为 117 m。采矿方法为无底柱分段崩落法。

4.2 模型构建及应用

以支持向量机原理对首钢杏山铁矿露天转地下开采边坡(见图 1, 2)变形进行了分析建模。



图 1 D 监测点位置及边坡图

Fig.1 Position of D point and slope photo



图 2 边坡顶部裂缝

Fig.2 Cracks at the top of the slope

利用 D 点 2008 年 9 月 1 日~30 日实测数据进行建模，对 10 月 1~7 日的变形进行了预测。选择变形序列历史点数为 10，以前面的 30 d 实测数据(见表 1)构成 20 个学习样本，进行学习训练建立支持

表 1 D 点变形监测数据

Table 1 Monitored deformation data of D point

监测时间/d	累计变形值/m	监测时间/d	累计变形值/m
1	1.156	16	1.203
2	1.159	17	1.203
3	1.174	18	1.204
4	1.190	19	1.206
5	1.192	20	1.208
6	1.195	21	1.210
7	1.197	22	1.210
8	1.198	23	1.214
9	1.200	24	1.216
10	1.200	25	1.217
11	1.201	26	1.219

12	1.202	27	1.222
13	1.202	28	1.232
14	1.202	29	1.243
15	1.203	30	1.251

向量机模型, 对未来的 7 d 的变形进行预测, 通过交叉验证选择模型, 最终确定的支持向量机模型参数分别为: 核函数为 RBF 核函数, $\sigma = 0.6$, $C = 2\ 000$, $b = 1.279\ 952$, 模型的支持向量及其对应的 α_i , α_i^* 的值见表 2; 预测分析结果见表 3, 预测值与实测值的比较见图 3。

表 2 支持向量及其对应的 α_i , α_i^* 的值

Table 2 Support vector and the corresponding value of α_i , α_i^*

样本序号	α_i	α_i^*
1	3.213 1	0.000 0
2	0.000 0	0.000 0
3	0.000 0	0.000 0
4	0.000 0	0.000 0
5	0.000 0	0.000 0
6	0.000 0	0.000 0
7	0.000 0	0.000 0
8	0.000 0	0.000 0
9	0.000 0	0.000 0
10	0.000 0	0.000 0
11	0.000 0	0.000 0
12	0.000 0	0.000 0
13	13.878 9	0.000 0
14	0.000 0	0.000 0
15	0.000 0	0.000 0
16	0.000 0	22.331 1
17	0.000 0	37.668 8
18	7.996 9	0.000 0
19	34.910 9	0.000 0
20	0.000 0	0.000 0

表 3 支持向量预测值与实测值

Table 3 Prediction values using support vector and the monitored values

时间/d	实测值/m	预测值/m	绝对误差/m	相对误差/%
31	1.263	1.264 4	0.001 4	0.11
32	1.275	1.279 6	0.004 6	0.36
33	1.290	1.297 1	0.007 1	0.55
34	1.305	1.318 1	0.013 1	1.00
35	1.320	1.339 3	0.019 3	1.46
36	1.332	1.361 8	0.029 8	2.23
37	1.346	1.371 6	0.025 6	1.90

从表 2 可以看出, 20 个学习样本中有 6 个为支持向量极大地提高了计算效率, 操作非常便捷快速。表 3 反应出, 预测后 3 d 的相对误差在 0.55% 之内,

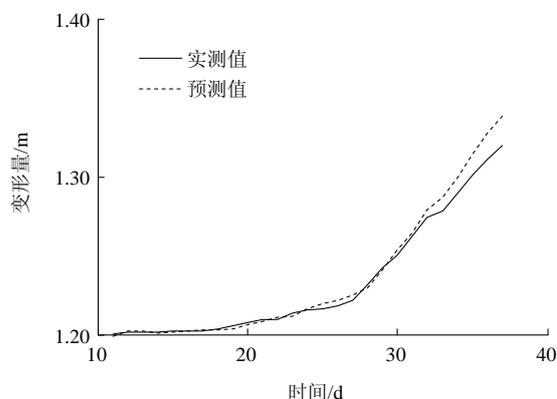


图 3 变形预测值与实测值的比较

Fig.3 Comparison predicted deformations using support vector with measured values

预测后 5 d 的相对误差在 1.5% 之内, 后 7 d 的预测中最后 2 d 的误差稍大在 2% 左右。这表明露天转地下边坡变形的 ν -SVR 模型对后 5 d 变形的预测具有较高的精度。

从图 3 可见, ν -SVR 对学习样本的拟合精度极高, 且 ν -SVR 预测精度也很高。

由以上分析结果可以看出, 露天转地下边坡变形 ν -SVR 模型, 有效表达了地下开采扰动下露天矿边坡的非线性变化规律, 且预测结果精度较高。

5 灵敏性分析

由于自由参数 C 和 ν 的取值对露天转地下边坡变形的 ν -SVR 模型的预测结果有一定影响, 本节将分析这 2 个自由参数对模型的预测误差绝对值的平均值 MAE (mean absolute error)和支持向量数目的灵敏度。 MAE 表达式为: $MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|$, y_i 为实测值, \hat{y}_i 为预测值。

图 4 是基于惩罚因子 C 的灵敏度分析结果。这里参数 C 的取值从很小的 0.01 到较大的 5 000, 而参数 ν 首先保持固定的 0.06 取值。图 4 显示在比较宽泛的范围之内, 参数 C 对误差 MAE 的影响不大。惩罚参数 C 在 [1 000, 5 000] 内, 误差 MAE 的波动范围很小, 且误差在因子 C 的整个取值范围内基本

达到了最小。惩罚因子 C 在[0.01, 1 000]范围之内, 误差 MAE 波动幅度很大。这就说明惩罚因子 C 应该在[1 000, 5 000]内取值, 取值范围较大, 但应同时考虑惩罚因子 C 对泛化性能的影响。

图 5 显示惩罚因子 C 对支持向量数目的影响。

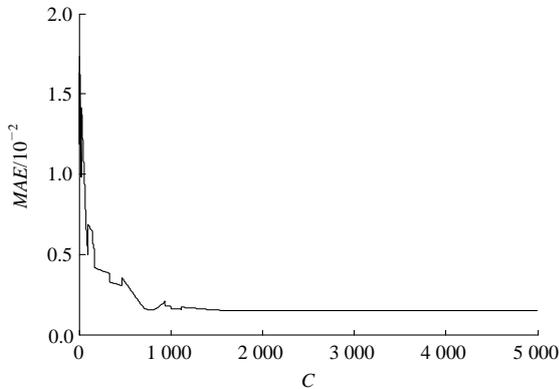


图 4 C 对 MAE 的影响

Fig.4 Relationship between MAE and C

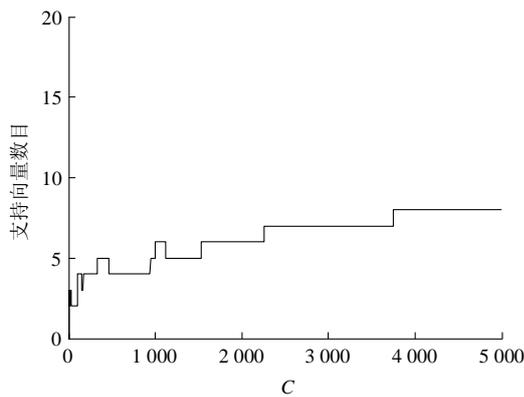


图 5 C 对支持向量数目的影响

Fig.5 Relationship between C and the number of support vector

随着惩罚因子 C 的增加支持向量数目基本成增加趋势, 但是增加幅度较小。 C 在[2 000, 5 000]范围内取值时, 支持向量数目从 6 个增加为 9 个, 小于训练样本总数的 1/2, 训练样本总数为 20。

图 6 则是参数 ν 对露天转地下边坡变形 ν -SVR 预测的灵敏度分析。这里固定 $C = 2 000$, 而 ν 的取

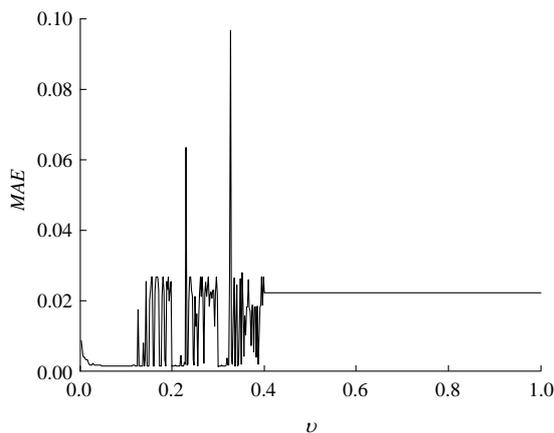


图 6 ν 对 MAE 的影响

Fig.6 Relationship between ν and MAE

值范围为[0, 1]。图 6 显示 ν 在[0, 0.028]范围内误差 MAE 逐渐减小, 在[0.028, 0.125]范围内误差 MAE 基本保持不变, 也是整个取值区间内误差 MAE 达到最小的稳定区间, 在[0.125, 0.404]范围内误差 MAE 波动剧烈, ν 的微小变化将会引起 MAE 的急剧增减, 在[0.404, 1.000]范围内误差 MAE 波动很小, 但误差较[0.125, 0.404]内大。图 6 反映出选择参数 ν 的区间应为[0.028, 0.125]。

从图 7 可见, 参数 ν 在[0, 0.4]之间支持向量数目总体保持增加趋势, 但局部区间波动较大。 ν 在[0.4, 1]之间支持向量数目保持不变约为总样本数的一半, 总样本数为 20。

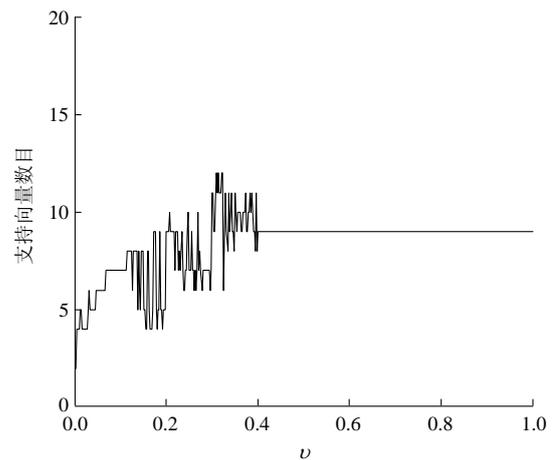


图 7 ν 对支持向量数目的影响

Fig.7 Relationship between ν and the number of support vector

6 结 论

(1) 从露天转地下开采杏山铁矿的实例应用中可以看出, 利用改进支持向量回归(ν -SVR)原理建立的模型, 有效表达了在露天转为地下开采时, 地下开采扰动影响下露天矿边坡变形的非线性变化规律。变形预测精度高且具有实时性, 对矿山安全生产具有重要意义。

(2) 对惩罚因子 C 和自由参数 ν 对预测误差绝对值的平均值(MAE)和支持向量数目的影响进行了讨论分析。给出了各参数变化对 MAE 和支持向量数

目的敏感性分析图, 指明了合理选择参数的范围, 即惩罚因子 C 应该在 [1 000, 5 000] 内取值, 取值范围较大, 但应同时考虑惩罚因子 C 对泛化性能的影响。参数 ν 的取值区间应为 [0.028, 0.125]。

(3) 研究表明支持向量机在岩土工程的应用分析中具有很好的应用前景, 提供了一新的研究途径。

参考文献(References):

- [1] HE M C, FENG J L, SUN X M. Stability evaluation and optimal excavated design of rock slope at Antaibao open pit coal mine[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(3): 289 - 302.
- [2] WANG J C, TAN W H, FENG S W, et al. Reliability analysis of an open pit coal mine slope[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(4): 715 - 721.
- [3] BYE A R, BELL F G. Stability assessment and slope design at Sandsloot open pit[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(3): 449 - 466.
- [4] MAKKAWIAI H, HASSANW W F, EABDULLA F A. Uncertainty and reliability analysis applied to slope stability[J]. Structural Safety, 2000, 22(2): 161 - 187.
- [5] 孙世国, 蔡美峰, 王思敬. 露天转地下开采边坡岩体滑移机制的探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(1): 126 - 129.(SUN Shiguo, CAI Meifeng, WANG Sijing. Study of sliding mechanism for slope due to excavation from open pit into underground mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(1): 126 - 129.(in Chinese))
- [6] SINGH P K. Blast vibration damage to underground coal mines from adjacent open-pit blasting[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(8): 959 - 973.
- [7] 韩现民, 李占金, 甘德清. 露天转地下矿山边坡稳定性的数值模拟与敏感度分析[J]. 金属矿山, 2007, (6): 8 - 12.(HAN Xianmin, LI Zhanjin, GAN Deqing. Numerical simulation and sensitivity analysis of slope stability in mine transferred from open pit to underground mining[J]. Metal Mine, 2007, (6): 8 - 12.(in Chinese))
- [8] ROSE N D, HUNGR O. Forecasting potential rock slope failure in open pit mines using the inverse-velocity method[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(2): 308 - 320.
- [9] 韩放, 谢芳, 王金安. 露天转地下开采岩体稳定性三维数值模拟[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(6): 509 - 514.(HAN Fang, XIE Fang, WANG Jin'an. 3D numerical simulation on the stability of rocks in transferred underground mining from open-pit[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, 28(6): 509 - 514.(in Chinese))
- [10] 刘辉, 陈文胜, 冯夏庭. 大冶铁矿露天转地下开采的离散元数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(9): 1 413 - 1 417.(LIU Hui, CHEN Wensheng, FENG Xiating, et al. Numerical modeling of Daye iron open-pit-mine transferring to underground mining by discrete element method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(9): 1 413 - 1 417.(in Chinese))
- [11] WANG W J, MEN C Q, LU W Z. Online prediction model based on support vector machine[J]. Neurocomputing, 2008, 71(4 - 6): 959 - 973.
- [12] 方瑞明. 支持向量机制论及其应用基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.(FANG R M. Base of application and theory of support vector machine[M]. Beijing: China Power Press, 2007.(in Chinese))
- [13] 苏金明, 阮沈勇. Matlab 6.1 实用指南[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.(SU Jinming, RUAN Shenrong. Guide of Matlab 6.1 Utility[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002.(in Chinese))
- [14] BULGE C J C. A tutorial on support vector machines for pattern recognition[J]. Data Mining and Knowledge Discovery, 1998, (2): 121 - 167.
- [15] 陈诗一. 非参数支持向量回归和分类理论及其在金融市场预测中的应用[M]. 北京: 北京大学出版社, 2008.(CHEN Shiyi. The nonparametric theory of support vector regression and classification with applications to forecasting for financial markets[M]. Beijing: Peiking University Press, 2008.(in Chinese))
- [16] LIU K Y, QIAO C S, TIAN S F. Design of tunnel shotcrete-bolting support based on a support vector machine[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(1): 768 - 773.
- [17] 于宁锋, 杨化超, 邓喀中, 等. 基于 PSO 和 SVM 的矿区地表下沉系数预测[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2008, 27(3): 365 - 367.(YU Ningfeng, YANG Huachao, DENG Kezhong, et al. Calculation of surface subsidence coefficient in mining areas using support vector machine regression[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2008, 27(3): 365 - 367.(in Chinese))
- [18] SAMUI P. Support vector machine applied to settlement of shallow foundations on cohesionless soils[J]. Computers and Geotechnics, 2008, 35(3): 419 - 427.
- [19] 王新洲, 范千, 许承权, 等. 基于小波变换和支持向量机的大坝变形预测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2008, 33(5): 469 - 471.(WANG Xinzhou, FAN Qian, XU Chenquan, et al. Based on wavelet transform and SVM dam deformation forecast[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2008, 33(5): 469 - 471.(in Chinese))
- [20] 姜谱男. 基于 PSO-SVM 非线性时序模型的隧洞围岩变形预报[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1 176 - 1 180.(JIANG Annan. Forecasting nonlinear time series of surrounding rock deformations of underground cavern based on PSO-SVM[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(6): 1 176 - 1 180.(in Chinese))

-
- [21] KANG F, LI J J, HU J. Combined forecasting model for slope stability based on support vector machines with particle swarm optimization[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27: 648 - 652.
- [22] LAMORSKI K, PACHEPSKY Y, SLAWINSKI C. Using support vector machines to develop pedotransfer functions for water retention of soils in Poland[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(5): 1 243 - 1 247.