

文章编号: 1000-7598-(2005)增刊-231-04

支持向量机对采空区稳定时间的预计

李爱兵, 尹彦波

(长沙矿山研究院, 长沙 410012)

摘要: 支持向量机是基于结构风险最小化原理的机器学习技术, 在广泛收集金属矿山采空区失稳塌陷时间资料的基础上, 建立了基于支持向量机的采空区稳定时间的预计模型。通过对采空区稳定时间测试样本的预测研究表明, 用支持向量机来预计采空区的稳定时间是可行的。

关键词: 采空区; 支持向量机; 失稳时间; 回归

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

Estimation of worked-out area stable time by support vector machines

LI Ai-bing, YIN Yan-bo

(Changsha Institute of Mining Research, Changsha 410012, China)

Abstract: Support vector machine (SVM) is a machine learning technique based on the structural risk minimization principle. Based on collected data of worked-out area stable time from many metallic mines, the model method of SVM is set up for evaluating worked-out area stable time. Through the test to the testing samples, the results show that the SVM for predicting worked-out area stable time is effective.

Key words: worked-out area; support vector machines; stable time; regression

1 引言

地下开采所形成的一定体积的采空区, 若不及及时处理, 对矿山来说是一个潜在的灾害危险因素。当空区范围超过一定界限之后, 就会导致空区、采矿场、巷道等发生大量岩石冒落, 岩体错动并伴有巨响, 空气冲击波和矿震, 可能引起地表开裂、下沉和地面建筑物陷落、倒塌等地压灾害, 特别是在一些硬岩矿山普遍存在悬顶问题, 采空区大面积暴露的坚硬顶板易产生大面积的区域性冒顶, 严重威胁着矿山的安全生产。为了减少岩石和地表移动幅度, 减慢其移动的发生和发展, 防止大面积的地压活动, 一方面必须对采空区采用崩落法、充填法、留矿柱等支撑法、封闭和隔离法联合进行处理^[1,2]; 另一方面随着对采空区认识的提高, 合理利用地下采空区的重要性和紧迫性日益增加, 采空区可作为贮存水、油、气, 埋藏尾矿、废石等工业与生活垃圾, 建地下生活与工作空间的场所^[3]。这些都涉及到采空区的塌陷与稳定性问题, 特别是一些采空区

的长期稳定问题, 如采空区在一段时间后是否冒落塌陷?

在长期的矿山开采实践过程中, 由大面积地压活动等所引起的众多的采空区塌陷与稳定的实例, 为人们提供了许多的工程类比数据, 蕴含了采空区影响因素、塌陷机理等大量的知识, 如何从这些数据中提取出内在的规律性的东西, 以利于为类似矿山采空区研究借鉴参考和总结发展, 便成为工程技术人员面临的艰巨任务, 说到底, 其本质就是数据挖掘问题。基于此, 许多专家学者将神经网络、遗传算法等人工智能方法引入到现代岩土工程领域中。但这些方法本身存在着一定的缺陷, 在学习样本数量有限时, 精度难以保证, 学习样本数量很多时, 又陷入“维数灾难”, 泛化性能不高。如何找到一种在有限样本情况下, 精度既高同时泛化性能也强的机器学习算法便显得很迫切。作为一种以结构风险最小化原理为基础的新算法, 支持向量机 (Support Vector Machines, 简称 SVM) 具有其他以经验风险最小化原理为基础的算法难以比拟的优

收稿日期: 2005-04-29

作者简介: 李爱兵, 1964年生, 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事矿山岩石力学方面的研究工作。E-mail: rocklab@163.com

越性,同时由于它是一个凸二次优化算法,能够保证得到的极值解是全局最优解^[4, 5]。

本文基于这种新的算法,充分利用已有的工程实例数据资料来确定采空区的稳定时间,它并不需要研究各个影响因素对采空区稳定时间的作用,而是通过执行结构风险最小化原理对已知的数据样本进行学习和回归,建立 SVM 模型,进而对未知样本做出预测。

2 支持向量机的基本原理

2.1 支持向量机的基本思想^[6-8]

支持向量机是 Vapnik 等人基于统计学习理论提出的一种新的通用学习方法,它是建立在统计学习理论的 VC 维(Vapnik-Chervonenks Dimension)理论和结构风险最小原理基础上的,既有严格的理论基础,又能较好地解决小样本、非线性、高维数和局部极小点等实际问题。该方法已成为机器学习界的研究热点,并成功的应用于分类、函数逼近和时间序列预测等方面,如人脸检测、手写体汉字识别、文本自动分类等。

支持向量机的基本思想可以概括为:通过定义适当的内积函数的非线性变换,将输入空间变换到一个高维空间,然后在这个新空间中求取最优信息分类面,即寻找输入变量与输出变量之间的非线性关系,其基本结构可见图文献[5]。

2.2 支持向量机的算法^[4-8]

支持向量机算法主要用于解决模式识别问题和函数拟合回归问题,本文主要说明基于支持向量机的回归问题。下面以回归问题为例说明支持向量机用于函数拟合问题的算法。

对回归问题,设样本为 n 维向量,考虑用函数 $f(x)=w \cdot x+b$ 拟合数据 $\{x_i, y_i\}$, $i=1, 2, \dots, n$, $x_i \in R^n$, $y_i \in R$ 的问题,其中“ $\cdot$ ”表示向量的点积。假设某区域的 k 个训练样本都可以在精度 ε 下无误差地用线性函数拟合,即:

$$\left. \begin{aligned} y_i - w \cdot x_i - b &\leq \varepsilon \\ w \cdot x_i + b - y_i &\leq \varepsilon \end{aligned} \right\} \quad (i=1, \dots, k) \quad (1)$$

优化目标是最小化 $\frac{1}{2} \|w\|^2$ 。根据统计学习理论,在这个优化目标下可取得较好的推广能力。考虑到允许误差的情况,引入松弛因子 $\xi_i \geq 0$ 和 $\xi_i^* \geq 0$,则式(1)变为:

$$\left. \begin{aligned} y_i - w \cdot x_i - b &\leq \varepsilon + \xi_i \\ w \cdot x_i + b - y_i &\leq \varepsilon + \xi_i^* \end{aligned} \right\} \quad (i=1, 2, \dots, k) \quad (2)$$

优化目标为 $\frac{1}{2} \|w\|^2 + c \sum_{i=1}^k (\xi_i + \xi_i^*)$, 其中常数 $c >$

0, 控制对超过误差 ε 的样本的惩罚程度。采用优化方法可以得到其对偶问题。在式(3)条件下

$$\sum_{i=1}^k (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0, \quad 0 \leq \alpha_i, \alpha_i^* \leq c, \quad i=1, 2, \dots, k \quad (3)$$

对 Lagrange 因子 α_i , α_i^* 最大化目标函数:

$$W(\alpha, \alpha^*) = -\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^k (\alpha_i - \alpha_i^*)(\alpha_j - \alpha_j^*)(x_i \cdot x_j) + \sum_{i=1}^k y_i (\alpha_i - \alpha_i^*) - \varepsilon \sum_{i=1}^k (\alpha_i + \alpha_i^*) \quad (4)$$

这是一个典型的凸二次优化问题,求解可得到支持向量机拟合函数为

$$f(x) = w \cdot x + b = \sum_{i=1}^k (\alpha_i - \alpha_i^*)(x \cdot x_i) + b \quad (5)$$

式中, α_i , α_i^* 只有小部分不为 0, 它们对应的样本就是支持向量,一般是在函数变化比较剧烈的位置上的样本,而且这里只涉及内积运算。

对于非线性问题,可以通过非线性变换将原问题映射到某个高维特征空间中的线性问题进行求解。在高维特征空间中,线性问题中的内积运算可用核函数来代替,即 $K(x_i, x_j) = \phi(x_i) \cdot \phi(x_j)$, 核函数可以用原空间中的函数来实现,没有必要知道非线性变换的具体形式。这样式(3)~(5)变为如下形式。

最大:

$$W(\alpha, \alpha^*) = -\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^k (\alpha_i - \alpha_i^*)(\alpha_j - \alpha_j^*) K(x_i, x_j) + \sum_{i=1}^k y_i (\alpha_i - \alpha_i^*) - \varepsilon \sum_{i=1}^k (\alpha_i + \alpha_i^*) \quad (6)$$

令:

$$\sum_{i=1}^k (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0, \quad 0 \leq \alpha_i, \alpha_i^* \leq c, \quad i=1, 2, \dots, k \quad (7)$$

$$f(x) = w \cdot x + b = \sum_{i=1}^k (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x, x_i) + b \quad (8)$$

对于特定问题,如何确定合适的核函数是非线性回归的关键,支持向量机中选取不同的核函数将形成不同的算法,如有内点算法、SMO 方法、分解方法等。目前研究最多的核函数主要有:

(1) 多项式核函数

$$K(x, y) = (x \cdot y + 1)^d \quad d=1, 2, \dots, k \quad (9)$$

(2) 径向基函数核函数

$$K(x, y) = \exp \left(-\frac{|x - y|^2}{\sigma^2} \right) \quad (10)$$

(3) Sigmoid 核函数

$$K(x,y)=\tanh[\phi(x\cdot y)+\theta] \quad (11)$$

3 基于支持向量机的采空区稳定时间预计

3.1 采空区稳定性的影响因素的确定

本文的采空区稳定时间定义为：采空区在拉开后，在无支护情况下，从发生第一次掉块到地面形成塌坑的一段时间。按常规的矿山地压预报工作，都是根据实测资料按经验方法或理论分析方法来推断岩层移动及其对应的时刻。从我国部分金属矿山产生大面积地压活动的时间就可以知道矿山地下开采引起岩层冒落的时间效应。

影响采空区稳定时间的因素很多且错综复杂，既与矿岩体本身的力学参数有关，又与矿岩体的结构构造有关。从现有研究成果看，很难找到某一个或几个因素或指标和采空区稳定时间具有确切的定量关系，同时囿于实例相关资料的缺乏，本文研究选择顶板围岩的 f 值、矿体 f 值、矿体倾角、埋深、采空区高度、采空区体积等6个影响因素作为输入参数来回归预测采空区的稳定时间。

3.2 学习样本和测试样本的选择

从文献[1~3], [9~21]中收集了19组金属矿山的采空区稳定时间的实例，其结果见表1。矿山实例主要的采矿方法为崩落法、空场法，为分析方便，

到目前为止，仍未跨塌的采空区稳定时间定为35年。表1中前17组为学习样本，最后2组为测试样本。

3.3 模型参数的选择及测试预测结果

支持向量机在确定学习样本后，影响其预测模型是否正确的决定因素是对核函数与 c 的选择，它们的合理确定直接影响模型的精度与推广能力。通过对各种核函数的测试，最终确定：采空区稳定时间预测模型中，预测模型的核函数为多项式核函数且 $d=1$ ；对大量 c 值的测试中，确定 $c=10$ 。利用建立的预测模型对表1中最后2组测试样本的稳定时间的预测分析结果分别为：7.42年与0.82年，其误差均在半年以内，精度是比较高的。将此支持向量机预测模型进行推广应用，可用于其它矿山的采空区稳定时间的预计。

4 结 论

采空区稳定时间受多种因素的影响，很难在稳定时间与因素间建立一种确定性的数学模型。支持向量机作为一种优秀的学习和搜索算法，具有很好的推广能力，以大量矿山工程实例为学习预测的基础，对采空区稳定时间的预测具有较好的适用性，为解决采空区稳定时间的分析开辟了一条新的途径。

参 考 文 献

- [1] 中国有色金属工业总公司采矿情报网. 我国有色金属地下矿山矿柱回采、空区处理及利用[R]. 1985.
- [2] 李俊平, 钱新明, 郑兆强. 采空场处理的研究进展[J]. 中国铝业, 2002, 26(3): 10—15.
- [3] 李俊平, 冯长根, 曾庆轩. 采空场应用综述[J]. 金属矿山, 2002, 10: 4—7.
- [4] 田执祥, 乔春生, 滕文彦, 等. 基于支持向量机的隧道变形预测方法[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(1): 86—90.
- [5] 赵洪波, 冯夏庭. 支持向量机函数拟合在边坡稳定性估计中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 241—245.
- [6] Vladimir N. Vapnik. 统计学习理论的本质[M]. 张学工译. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [7] Alex J. Smola, Bernhard Schoelkopf. A tutorial on support vector regression[R]. NeuroCOLT2 Technical Report Series NC2- TR-1998030, 1998.
- [8] Steve Gunn. Support vector machines for classification and regression[R]. Technical Report of University of Southampton, 1998.

表1 矿山采空区稳定时间实例
Table 1 Example cases of worked-out area stable time

序号	顶板围岩 f^*	矿体 f^*	矿体 倾角 /(°)	埋深 /m	采空区 高度 /m	采空区 体积 /10 ⁴ m ³	稳定时间 /year
1	12~18	12~16	45~65	70~160	120	103.0	35
2	12~18	12~16	45~65	>70	105	234.0	35
3	10~12	8~10	5~30	150~200	20~60	68.39	12
4	10~12	8~10	10~30	54~150	90	193.45	2.5
5	10~12	8~12	6~40	40~230	30~40	4.0	20
6	3~5	12~18	5~50	200~250	4	7.3	7-8
7	3~5	12~18	3~20	120~150	6	5.0	11
8	3~5	12~18	5~50	30~200	8	12.3	15
9	7	6~7	30~70	216	156.4	5.4	10
10	9	8~15	80~85	60~90	20~50	16.7	18
11	9	8~15	80~85	107~137	67~99	75.4	18
12	10~12	10~12	5	10~80	3~12	92.6	21
13	8~10	10~12	3-17	55~340	30	1.65	25
14	12~15	10	15	340	45	10.61	8
15	12~15	10	15~20	330	22	3.725	6
16	8~10	8~12	70~90	240	350	140.0	10
17	6	7	80	90~150	150	19.25	6
18	12~15	10	15-20	350	38	6.35	7
19	7	6~7	30~70	207	124.5	12.58	1

注：* f 为坚固性系数。

- [9] 晏从高, 叶粤文. 矿山岩层冒落的监测预报[J]. 矿业研究与开发, 1995, 15(4): 11—14.
- [10] 《采矿手册》编辑委员会编, 采矿手册第 4 卷[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990.
- [11] 李江, 王喜兵. 邯邢矿山崩落采矿法空区下的安全回采[J]. 金属矿山, 1998, 8: 1—3, 16.
- [12] 李清望, 任凤玉, 侯建光, 等. 西石门铁矿南区采空区的冒落规律分析[J]. 中国矿业, 2001, 10(3): 42—44.
- [13] 赵文, 任凤玉, 刘乔, 等. 西石门铁矿中区采空区地表塌落及防护对策[J]. 金属矿山, 2000, 3: 14—16.
- [14] 廖春恒, 刘伟强, 蹇兴仁. 水口山鸭公塘矿区闭坑后采空区稳定性研究[J]. 采矿技术, 2002, 2(2): 63—65.
- [15] 郭金峰, 张传信. 狮子山铜矿特大空区安全监测与稳定性研究[J]. 江西有色金属, 2003, 17(4): 14—18.
- [16] 魏连海, 赵刚, 张志明. 寿王坟铜矿特大空区下部矿体采矿方法及回采顺序研究[J]. 矿冶, 1999, 8(4): 1—5.
- [17] 罗一忠, 余阳先, 等. 大厂铜坑矿地压活动预报准则探讨[J]. 有色金属(矿山部分), 2001, 2: 28—30, 20.
- [18] 朱卫东. 试论实现空场法到崩落法的过渡[J]. 金属矿山, 1994, 1: 32—36.
- [19] 傅军. 兴隆 4 号联合空区地压活动分析[J]. 江西有色金属, 1994, 8(2): 6—9, 5.
- [20] 王志方. 红透山铜矿的系统空区处理与地压观测[J]. 有色矿山, 1996, 1: 9—13.
- [21] 周崇仁. 矿柱回采与空区处理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1989.