

滑坡加固方案优化的支持向量机方法研究

赵洪波^{1,2}, 尹顺德³, 张友良³, 冯夏庭³

(1. 绍兴文理学院 土木系, 浙江 绍兴 312000; 2. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310027; 3. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 提出了一种滑坡加固方案优化的新方法——支持向量机方法。在极限平衡法结合有限单元法的基础上, 构造出一定数量的加固方案, 并分别分析其治理后的稳定性和工程造价, 以此为学习样本, 建立设计参数与稳定性及加固方案造价之间的非线性映射关系, 利用遗传算法在全局范围内快速地搜索出最优的设计参数, 优化选择合理滑坡加固方案。本方法为滑坡防治工程的优化设计提供了新的思路。

关键词: 滑坡加固; 优化设计; 支持向量机; 遗传算法

中图分类号: P642.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-6099(2004)02-0013-03

Optimization of Landslide Solidification Schemes Using Supporting Vector Machine

ZHAO Hong-bo^{1,2}, YIN Shun-de³, ZHANG You-liang³, FENG Xia-ting³

(1. Department of Civil Engineering, Shaoxing College of Arts and Sciences, Shaoxing 312000, Zhejiang, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China; 3. Institute of Rock and Soil Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, Hubei, China)

Abstract: A new method supportig vector machine is presented for optimizing the schemes of landslide solidification. The limit equilibrium method combined with the finite element method to fom some schemes of slope solidification. The stability and cost of the slopes harnesssed using the schemes are evaluated, respectively. As an examples, the non-linear relationship of designing parameters with safety factors and engineering costs are established. Through genetic algorithm, the optimum designing parameters were searched out in the whole spectrum, achieving optimization of the schemes of landslide solidification. This method provides a new ways for landslide harnesssing.

Key words: landslide solidification; optimum design; support vector machine; genetic algorithm

滑坡作为一种地质灾害, 直接威胁着人们生命和财产安全。随着我国西部大开发建设的深入和三峡工程库区2003年蓄水, 西部滑坡防治问题显得更为突出。准确、高速地计算寻求滑坡加固的最经济的设计方案, 是有待解决的重要问题, 具有重大的经济意义和社会意义。

滑坡加固方案设计是一个复杂的系统工程, 在经济上, 工程造价随设计方案的各项参数的变化而变化; 在可靠性方面, 又受控于设计方案的各项技术指标。然而, 传统的滑坡治理方案往往不能做到最优化设计, 以致给国家的投资造成了一定程度上的浪费。既然滑坡加固是诸多因素相互制约、相互关联而又不断变化的复杂巨系统, 传统方法不能得到有效解决, 可以考虑

有效处理开放的复杂巨系统的方法, 采用多种方法从多方面进行分析、处理并与智能的定性研究方法综合集成^[1]。

针对滑坡加固方案优化的研究, 已有很多学者采用不同的方法进行了研究, 如层次分析法、灰色理论方法、进化神经网络方法等^[2-4]。本文采用智能岩石力学的思想, 基于最近发展起来的支持向量机方法, 提出了一种新的滑坡加固方案优化的支持向量机方法, 首先利用支持向量机建立设计参数与加固后的稳定性及加固方案造价之间的非线性映射关系, 然后以造价为目标函数, 以稳定性为约束条件, 利用遗传算法在给定的设计参数范围内搜索最优的设计参数, 优化选择合理滑坡加固方案。

① 收稿日期: 2003-11-17

作者简介: 赵洪波(1971-), 男, 博士, 河北柏乡人, 浙江大学在读博士后, 主要从事智能岩石力学与工程、位移反分析、边坡稳定性分析与优化等方面的教学和科研工作。

1 滑坡加固方案优化的支持向量机模型

1.1 支持向量机及其算法

支持向量机的基本思想是通过用内积函数定义的非线性变换将输入空间变换到一个高维空间,在这个高维空间中寻找输入变量和输出变量之间的一种非线性关系。支持向量机有着严格的理论基础,采用结构风险最小化原则,具有很好的推广能力。支持向量机算法是一个凸二次优化问题,保证找到的解是全局最优解;能较好地解决小样本、非线性、高维数等实际问题,因此支持向量机是当今研究的热点问题^[5-9]。

对于支持向量机函数拟合,首先考虑用线性拟合函数 $f(x) = w \cdot x + b$ 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,假设所有训练数据在 ϵ 精度下无误差地用线性函数拟合,即:

$$\begin{cases} y_i - w \cdot x_i - b \leq \epsilon \\ w \cdot x_i + b - y_i \leq \epsilon \end{cases} \quad i = 1, \dots, k \quad (1)$$

优化目标是使最小化 $\frac{1}{2} \|w\|^2$ 。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:

$$\begin{cases} y_i - w \cdot x_i - b \leq \epsilon + \xi_i \\ w \cdot x_i + b - y_i \leq \epsilon + \xi_i^* \end{cases} \quad i = 1, \dots, k \quad (2)$$

优化目标是使最小化 $\frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^k (\xi_i + \xi_i^*)$,其中常数 $C > 0$, C 表示对超出误差 ϵ 的样本的惩罚程度。采用优化方法可以得到其对偶问题。

MAX:

$$W(\alpha, \alpha^*) = -\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^k (\alpha_i - \alpha_i^*)(\alpha_j - \alpha_j^*)(x_i \cdot x_j) + \sum_{i=1}^k y_i (\alpha_i - \alpha_i^*) - \epsilon \sum_{i=1}^k (\alpha_i + \alpha_i^*) \quad (3)$$

S. T.

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^k (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0 \\ 0 \leq \alpha_i, \alpha_i^* \leq C, i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (4)$$

由上面的最大化函数可得到支持向量机拟合函数为:

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

其中 α_i, α_i^* 将只有小部分不为 0,他们对应的样本就是支持向量。

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)、(4)、(5)变形为:

MAX:

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

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

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

对于式(3)、(4)和(6)、(7)对应的二次优化问题,目前已有多种方法求解,在支持向量机问题中常用的方法有:内点算法、SMO 方法、分解方法等。本文采用 SMO 方法^[7]。

1.2 加固方案设计参数与稳定性及工程造价的非线性关系的支持向量机表示

滑坡的加固设计参数直接影响到工程造价和安全系数,并且它们之间的关系是非常复杂的非线性关系,很难用确定的数学模型来表达^[8]。依据支持向量机理论,它们之间的关系可以表示为:

$$f(x) = \sum_{i=1}^k (\alpha_i - \alpha_i^*)K(x \cdot x_i) + b \quad (9)$$

式中 $f(x)$ 为对应某加固方案的造价或安全系数; x 为加固方案设计参数; x_i 为 k 个样本中的第 i 个样本; $K(x, x_i)$ 为核函数。

样本可采用试验的方法进行构造,然后计算对应方案的工程造价和安全系数。首先,根据滑坡防治工程的实际情况选择初步的加固措施种类,然后进行稳定性分析和抗滑结构的内力计算。本文以有限元法和极限平衡法相结合的方法,建立了抗滑桩与土体相互作用的模型^[9],既快速又方便实用,分析确定抗滑桩长度、截面形状、桩间距、单价等。最后计算加固措施实施后的滑坡体的安全系数及防滑工程造价。通过对样本的学习,建立分别加固方案设计参数与稳定性、工程造价之间非线性关系的支持向量机模型。

1.3 遗传算法搜索最优加固方案

利用上面建立的支持向量机模型,记其输出项中

的安全系数为 $F(SVM)$ ，输出项中的防治工程造价为 $M(SVM)$ ，则滑坡加固方案的优化是在满足防治工程安全系数要求的前提下，以造价最低作为最优设计方案，可以归纳为这样一个数学模型：

$$\begin{aligned} \min f &= M(SVM) \\ s. t. \quad &F(SVM) \geq F_s \end{aligned}$$

式中 f 为滑坡加固工程的造价； F_s 为防治工程的安全等级要求的安全系数。

滑坡加固方案的优化问题是一个有约束的优化问题，可以利用遗传算法对加固方案进行优化，也就是在加固方案的可行设计参数范围内，搜索既满足安全系数要求工程造价又最低的设计参数，其对应的方案就是最优加固方案。

2 工程实例

三峡库区某滑坡在 1997 年雨季后缘开始出现明显的滑移变形，1998 年雨季变形明显加剧，危及滑坡后部，1998 年 8 月当地政府对该变形体实施了清方减载、设置截水沟等治理措施，但该滑坡体并没有得到彻底根治，1999~2001 年每年雨季，该滑坡又产生了局部的缓慢滑移变形，仍严重威胁下坡居民的生命财产安全，急需进行治理。

经勘察报告及可行性报告评审，专家组考虑到库区蓄水及锚索的抗腐蚀能力较差，建议施工项目以采用抗滑桩加固为佳。基于上述方法，分别以不同的设计参数（抗滑桩长度、抗滑桩截面宽、抗滑桩截面长、桩间距及主断面主筋数）构造出 50 种设计方案的造价及加固后滑体的稳定性。各样本方案的技术经济指标如表 1。

按照上述方法，通过对样本的学习，建立对应关系，通过遗传算法搜索到最优的加固方案为：抗滑桩长 26.5 m；截面宽 2.5 m；截面长 2.7 m；桩间距 6.0 m；主断面主筋数 85 根。对应的滑坡安全系数为 1.152，造价为 282.9 万元。优化后的设计参数满足抗滑桩设计计算检验，按照此优化方案设计参数实际计算的加固后滑坡体的稳定系数为 1.16，滑坡防治工程的造价为 284.2 万元。实际计算结果与进化神经网络估算的值的相对误差分别为 0.69% 和 1.10%，如表 2。

结果与工程的设计造价相比有一定程度的减少，这表明该方法是科学、可行的，并充分利用了支持向量机在处理高维数、非线性等问题的优良特性，有利用了遗传算法在全局优化方面的优点，具有很好的理论意义和重要经济效益。

表 1 各样本方案技术经济指标

样本方案	输入参数				输出参数		
	抗滑桩设计参数				防治工程		
	长度 /m	截面宽 /m	截面长 /m	桩间距 /m	主断面主筋数/根	安全系数	造价 /万元
1	28	1.9	2.3	5.4	88	1.215	297.7
2	30	2.4	2.9	6.5	80	1.159	323.8
3	27	1.8	2.2	5.1	79	1.094	272.7
4	25	2	2.4	6.4	88	1.079	230.8
5	28	2.4	2.8	6.9	92	1.256	296.7
6	31	2.2	2.4	6	87	1.252	312.5
7	26	1.7	2.3	5.9	77	0.871	208.6
8	29	2.3	2.5	5.6	102	1.644	383.2
9	32	2.5	3	7	89	1.247	347.4
10	30	1.9	2.5	5.5	86	1.166	316.2
11	25	1.7	2.6	5.4	78	0.964	254.4
12	27	1.6	2	5.6	75	0.841	198.1
13	34	2.5	2.8	5.8	99	1.674	462.4
14	26	2.6	3.1	6.4	95	1.514	363.0
15	27	2.1	2.4	6.9	84	1.003	217.8
16	29	2	2.5	7	80	0.897	216.1
17	24	1.8	2.3	5.2	76	1.032	245.4
18	28	2.2	2.8	5.7	78	1.181	326.5
19	31	2.4	2.7	6	75	1.177	337.7
20	32	2.5	2.9	6.8	91	1.313	354.9
21	28	1.5	1.9	6	83	0.814	186.1
22	30	1.6	1.8	5.9	72	0.766	175.5
23	32	2.3	2.7	5.1	89	1.575	450.1
24	28	1.9	2.3	6.4	95	1.107	248.5
25	27	2.1	3	5.4	102	1.556	406.7
26	30	1.8	2.5	4.8	88	1.295	370.9
27	23	2.2	2.9	5.8	94	1.399	318.7
28	25	1.7	2.4	5.6	87	1.036	250.2
29	28	1.8	3	4.8	93	1.368	413.2
30	33	2.4	2.8	5.8	86	1.396	408.9
31	27	2.6	3.1	5.9	98	1.695	421.4
32	26	1.5	2	4.9	85	1.021	255.2
33	30	2.3	2.9	5.4	78	1.304	393.8
34	29	1.7	1.9	5.7	95	1.112	250.4
35	27	1.9	2.4	5.3	81	1.139	288.9
36	25	2.2	2.5	6	105	1.511	316.0
37	31	2.5	3	6.5	76	1.147	346.1
38	27	2.3	2.6	6.2	91	1.325	304.4
39	29	1.8	2.4	5.6	82	1.034	273.1
40	32	1.5	2	5.4	74	0.807	222.0
41	27	2.6	3	5.8	79	1.390	376.5
42	28	2.1	2.5	5.6	83	1.221	308.1
43	34	1.8	2.6	5.3	90	1.199	368.7
44	29	2.5	2.8	6.1	87	1.399	359.7
45	28	2	2.5	6.5	85	1.026	245.2
46	24	2	3	5.8	90	1.218	305.5
47	32	1.7	1.9	4.8	85	1.181	307.2
48	30	1.6	2	5.2	98	1.183	296.6
49	34	1.8	2	5.7	84	1.041	266.9
50	30	1.9	2	4.7	79	1.253	318.0

表 2 优化参数对应的 SVM 结果与计算结果比较

优化设计参数对应的 SVM 输出参数	输出参数结果	优化设计参数对应的计算结果	相对误差
安全系数 F	1.152	1.16	0.69%
工程造价 M/万元	282.9	284.2	1.10%

(下转第 19 页)

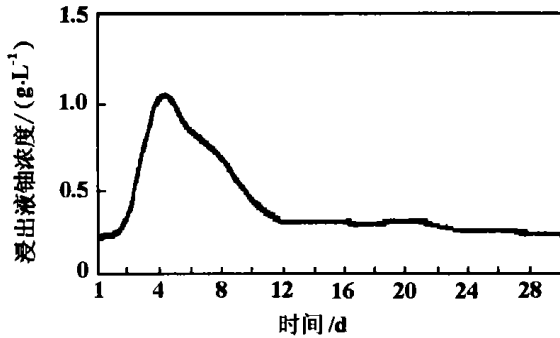


图4 试验块段浸出液浓度变化曲线

据矿方地质部门提供的储量计算资料, 试验块段原来保有矿量 4 748 t, 平均品位 0. 213%, 金属量 10. 324 t。从 1996 年 5 月至 10 月 26 日连续布液浸出近 6 个月, 阶段浸出率 42%, 浸出铀金属 4. 336 t。

试验块段因采用了 SKZ 型组合式钻具进行钻孔施工, 又应用微灌技术进行布液, 基本消灭了布液死角, 提高了布液均匀度, 从 1996 年 10 月 27 日至 11 月 26 日连续布液浸出 1 个月, 又浸出铀金属 0. 952 t, 与原保有金属相比, 该月浸出率为 9. 22%, 高于前 6 个月的平均浸出率 ($42\% \div 6 = 7\%$); 若按 10 月 26 日保有金属 ($10. 324 - 4. 336 = 5. 988$ t) 计算, 该月浸出率为 15. 9%。由此可知, 由于采用上述研究结果, 布液均

匀度达到 89. 72%, 由此带来的浸出率和经济效益的提高是显而易见的。如果在一个全新的原地爆破浸出采场应用上述研究结果, 不仅可提高浸出率、资源回收率, 同时还将缩短浸出周期。

5 小 结

1) 根据微灌技术原理, 在国内现有注液器的基础上引伸研制的注液器——多孔出流布液管, 适合原地爆破浸出钻孔布液的特点, 布液均匀稳定, 抗堵塞性能好, 工业试验的布液均匀度达 89. 72%。

2) 经过工业生产应用, 证明文中提出的关于管网阻力和流量的计算方法是符合实际的, 可在应用微灌技术的堆浸布液中应用。

3) 多孔出流布液管与 SKZ 型组合式钻具联合应用, 基本消灭布液死角, 对提高布液均匀度, 浸出率、资源回收率和缩短浸出周期有明显的促进作用。

参考文献:

- [1] 傅琳, 董文楚, 郑耀泉, 等. 微灌工程技术指南[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988, 9.
- [2] 李丛奎, 徐 健. 滴灌技术在大茶园铀矿万吨级堆浸中的应用[J]. 堆浸与地浸, 1994(1): 18-25.

(上接第 15 页)

3 结 语

1) 滑坡的加固是一个包含诸多因素及其不同组合形式的复杂系统, 本文采用支持向量机和遗传算法相结合的方法, 针对某一滑坡的若干加固方案在全局范围内进行优化搜索, 利用支持向量机建立滑坡加固方案中设计参数与稳定性及造价之间的复杂的非线性关系, 用遗传算法在全局进行优化设计, 并运用到工程实践中, 得到较好的经济效益, 为滑坡防治工程的优化设计提供了新的思路, 在实际工程中有着广阔的应用前景。

2) 本文提出的方法既利用了支持向量机在处理高维数、非线性等问题的优良特性, 又利用了并行遗传算法的高效高精度全局优化特性, 在处理变量与目标函数间无明显数学表达式的复杂岩土工程问题中, 具有较高的应用意义。

参考文献:

- [1] 冯夏庭. 智能岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [2] 夏元友, 朱瑞康. 病害边坡治理方案选择的智能辅助决策系统[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(4): 453-458.
- [3] 张绍波. 滑坡加固方案优化选择的灰色系统方法[J]. 灾害学, 1999, 14(4): 36-39.
- [4] 尹顺德. 滑坡加固方案优化的智能方法研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2003.
- [5] Alex J Smola, Bernhard Schoelkopf. A Tutorial on Support Vector Regression[R]. Neuro Colt2 Technical Report Series NC2-TR-1998030, October, 1998.
- [6] Bunge, C.J.C. A Tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition[J]. Data Mining and Knowledge Discovery 2, 121-167, 1998.
- [7] John C Platt. Sequential Minimal Optimization; A Fast Algorithm for training Support Vector machines[C]. Technical Report MSR-TR-98-14, April 21, 1998.
- [8] 赵洪波, 冯夏庭. 支持向量机函数拟合的边坡稳定性估计[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2), 241-245.
- [9] 张友良, 冯夏庭, 范建海, 等. 抗滑桩与滑坡体相互作用的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 839-842.