

文章编号:1000-7598-(2002)03-0347-05

基于二阶段禁忌算法的边坡安全模型的识别

陈廷伟¹, 冯夏庭^{1,2}

(1. 东北大学, 辽宁 沈阳 110004; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要: 识别岩土力学经验模型的关键是如何寻找到一个全局最优解。禁忌算法是一种寻找全局最优解的算法。针对常规禁忌算法处理连续问题时搜索范围小,对初始点的依赖性强等不足,对算法进行了改进,并将禁忌算法的离散化过程进行了修改,提出了二阶段禁忌算法。用该算法对圆弧和楔体破坏边坡安全系数模型中的参数进行了搜索。结果表明,该方法是一种行之有效的全局优化算法。

关键词: 禁忌算法; 岩体边坡; 经验模型; 离散化; 邻域

中图分类号: TU 457 文献标识码: A

Identification of safety model of slopes based on a two-stage tabu search algorithm

CHEN Ting-wei¹, FENG Xia-ting^{1,2}

(1. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China;
2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The key of recognition of empirical geomechanical models is how to seek and find an global optimal solution. Tabu search is just one of effective algorithms for this. Considering the disadvantages of the very small searching area of conventional Tabu search and strong dependence upon initialization points at dealing with continuous problems, an improved tabu search algorithm was proposed. The parameters in the safety factor models for circular and failure slopes were searched by using the proposed algorithm. The results were compared with those of the maximum likelihood estimation. The algorithm proved to be powerful.

Key words: tabu search; rockmass slopes; empirical geomechanics model; data discretion; neighborhood

1 前言

近年来边坡工程已发展成为一个极为重要的工程领域,它向固体力学提出了一系列的重要研究课题。其中边坡岩体稳定性分析是边坡工程研究体系的重要环节,一直是工程地质学、岩石力学和相关学科的基本命题。它引起了国内外的许多学者和工程技术人员的广泛重视。直至今日,许多非常重要的高陡边坡稳定性分析仍停留在定性和半定量阶段,仍处于发展之中。

借助某种数学方法,通过对实测数据的拟合建立数学模型,是研究岩土工程问题的一种方法。模型的类型及模型参数都要用搜索方法确定,岩土力学的研究对象是复杂的地质体,在搜索过程中很容易陷入局

部最优。因此一种好的搜索方法是解决岩土工程问题的一个关键。

禁忌算法是局部邻域搜索算法的推广,是人工智能在组合优化算法中的一个成功应用。禁忌算法已经成功地应用于许多组合最优化问题,但是对于优化变量是连续的问题,这种方法应用却比较少。通过对禁忌算法的研究,并通过试验发现对算法进行适当的处理,能够很好地应用于连续变量优化问题。本文应用禁忌算法的基本思想,针对连续变量问题的特点,将离散方法和搜索策略进行改进,提出二阶段禁忌算法,对边坡安全模型进行识别。

2 常规禁忌算法

禁忌算法是由 Glover^[1]首先提出的,它采用了禁

收稿日期:2001-06-12

基金项目:高等学校优秀青年教师与科研奖励基金和霍英东教育基金会资助项目(71048)

作者简介:陈廷伟,男,1975年生,硕士研究生,从事智能岩石力学研究。

忌技术,即禁止重复前面的工作。为了回避邻域搜索陷入局部最优,禁忌算法用一个禁忌表记录已经达到的局部最优点,在下一次搜索中,利用禁忌表中的信息不再或有选择地搜索这些点,以此来跳出局部最优

点。禁忌算法是在处理离散问题的过程中发展起来的,因此应用禁忌算法处理连续问题的常规方法就是首先对解空间进行离散化,然后直接应用禁忌算法进行搜索,见图1。

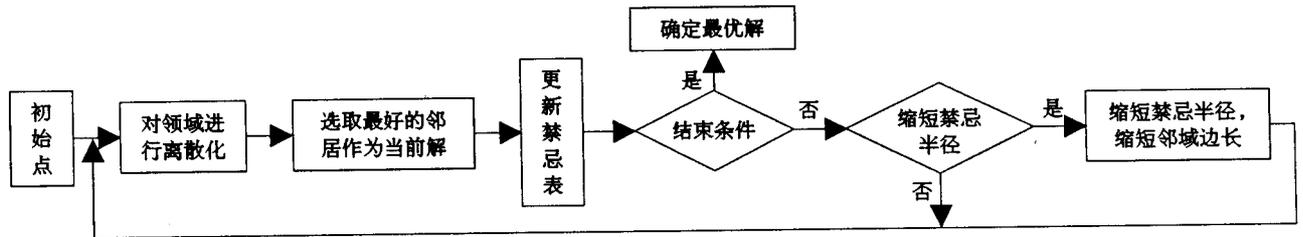


图1 常规禁忌算法

Fig.1 Conventional tabu search algorithm

3 二阶段禁忌算法

3.1 二阶段禁忌算法的提出

对于禁忌算法一个很难确定的参数就是搜索步长。搜索步长大,搜索的范围就大,但是相应的精度将降低,且容易将全局最优解遗失;搜索步长小可以使精度提高,但是搜索范围相应地减小。常规的禁忌算法主要考虑到问题的精度和收敛的速度,一般取很小的搜索步长,因而搜索范围小,在实际应用中初始点对搜索结果的影响很大。

为了使搜索过程不陷于局部最优解,笔者提出了二阶段禁忌算法。本算法的主要思想是算法的第一步是对可行域区间进行大步长搜索,将局部最优解区域作为禁忌对象,从中得到全局最优解存在的区域;算法的第二步从这个区域出发搜索全局最优解。同时算法对离散化过程也进行了修改,分别论述如下。

3.1 禁忌表产生方法及离散化过程

首先要介绍邻域和邻居的概念^[2]。在距离空间上,通常的邻域定义是以一点为中心的一个球体,而在这个球体中非中心点的任一点称为中心点的邻居。对于连续问题而言,邻居的个数是无限的,离散问题解的禁忌方法将不能使算法有效的搜索到全局最优。为此,本文对解采取邻域禁忌,所谓邻域禁忌就是如果当一个点被记忆而存放到禁忌表中,那么以这个点为中心,以禁忌半径为半径的球体中所有的点将被禁忌。

以当前点 s 为中心,以 h_0, h_1, \dots, h_n 为半径产生一系列邻域,这样将解空间分成 n 个同心球壳 $C_i(s, h_{i-1}, h_i)$, 即

$$C_i(s, h_{i-1}, h_i) = \{s' | h_{i-1} \leq ||s' - s|| \leq h_i\} \quad (1)$$

这样当前解 s 的 n 个邻居就可以通过随机地从

C_i 中选取一点而获得,从而将邻域离散化。而在实际应用中为了方便邻居的选取和控制将球体用立方体代替,这样只需将产生的点的坐标与边界坐标比较就能确定此点的位置。在二维平面上示意图见图2。

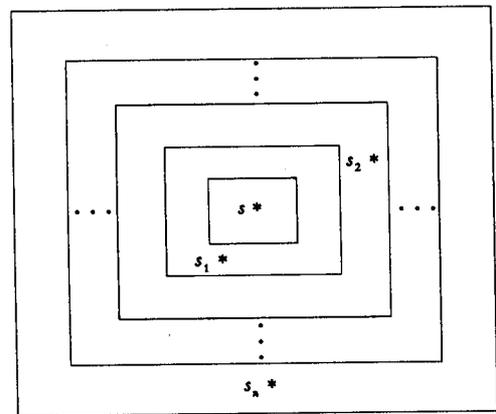


图2 邻域及邻居示意图(其中 s 表示当前解, s_1, s_2, \dots, s_n 为 s 的邻居)

Fig.2 Plot of adjacent domains and neighbors, where s represents current solution, s_1, s_2, \dots, s_n are neighbors of s

3.2 算法的步骤

算法从任一给定的初始点开始进行搜索,在搜索过程中对可能包含最优解的区域进行记忆,在禁忌表的基础上,又加入了局部最优解区域表,它的内容与禁忌表的内容类似,不同点是它的禁忌半径要比禁忌表的禁忌半径大得多(一般为十几倍到几十倍)。当产生的邻居的评价函数值发生了明显的退化,达到算法给出的一个限度,那么当前区域很可能是一个局部最优区域,因而被记忆。当达到局部最优解区域表禁忌长度后,表中评价函数差的区域将被新产生的区域所代替,一定循环次数后,没有发现局部最优解区域,说明全局最优解已经包含在这个区域表中。

在这里,发现最可能区域的准则是这样确定的:

$$\forall q_i \in N(p) \quad f(q_i) > f(p) \quad (2)$$

式中 p 为当前解; $N(p)$ 为当前解邻居的集合 $N(p) = \{q_i\}$; $f(x)$ 为评价函数值; $C(p, r_p)$ 表示以 p 为圆心, 半径为 r_p 的区域, 即局部最优解区域为 $C(p, r_p)$ 。

然后将局部最优解区域中评价函数值大于表中所有元素平均值的区域去除, 对于剩余的每一个区域产生邻居, 从中选取最好的代替当前区域。重复上述过程, 直到表中只有一个元素。这一区域即是全局最优解最有可能的区域, 流程见图 3。

第二阶段搜索最优解。这一阶段与常规的禁忌算法相同, 只是这一步以第一步搜索的最终区域作为初始条件进行搜索。

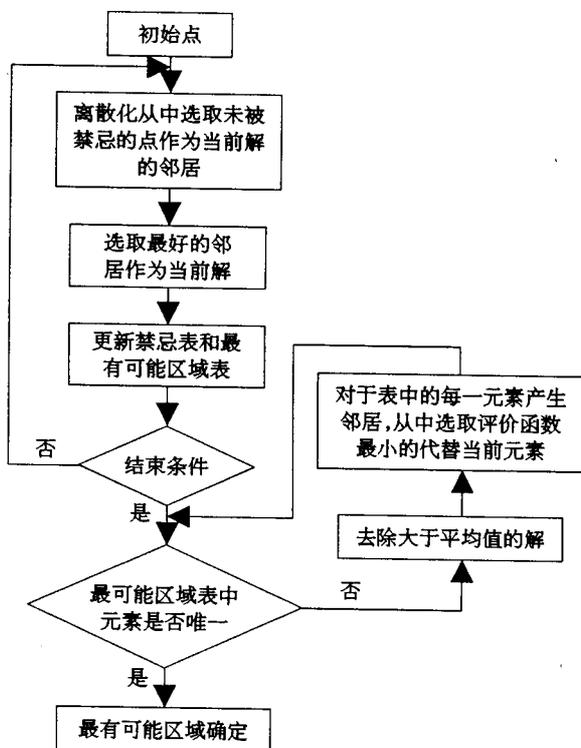


图 3 二阶段禁忌算法的第一阶段流程图
Fig.3 Flow chart for the first stage of two-stage tabu search algorithm

4 边坡安全模型中参数的搜索

根据智能岩石力学的思想^[3], 边坡稳定性分析是按可能破坏模式的不同而分别进行的。因此, 这里就露天矿高边坡的两种可能的破坏模式——圆弧破坏和楔体破坏, 应用本算法对这两个模型的参数进行搜索, 并对安全系数进行估计。

对于圆弧破坏边坡, 根据以往的实例分析和经验, 其安全系数可采用如下模型^[4]

$$F = \alpha \left(\frac{c}{\rho g H \sin^a \varphi_f} \right) + \beta (1 - r_u) (\tan \varphi / \tan \varphi_f) \quad (3)$$

式中 α, β, a 是待定参数; ρ 为密度 (kN/m^3); c 为内聚力 (kPa); φ 为内摩擦角 ($^\circ$); φ_f 为边坡角 ($^\circ$); H 为边坡高度 (m); r_u 为空隙压力比。

同样, 对于楔体破坏边坡, 其安全系数采用下列模型形式估计^[4]:

$$F = \alpha \left[\frac{c_m}{\rho g H (\cot \varphi_p - \cot \varphi_f) \sin^a \varphi_p} \right] + \beta \frac{\tan \varphi_m}{\tan \varphi_p} \quad (4)$$

式中 c_m 为两主要结构面的平均内聚力 (kPa); φ_m 为两主要结构面的平均内摩擦角 ($^\circ$); φ_p 为两结构面的交线的夹角 ($^\circ$)。

评价函数采取如下形式:

$$f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad (5)$$

式中 x_i, y_i, n 分别为实际测量值、模型预测值和样本总数。

应用二阶段禁忌算法对文献[4]中的边坡数据进行了全空间的搜索, 主要参数设定见表 1。

表 1 算法主要参数设定
Table 1 Main parameters determined for tabu search

参数	圆弧破坏边坡	楔体破坏边坡
禁忌表长度/	300	7
最优解可能区域表长度/	10	10
邻域矩形边长差/	3	1.5
邻域形边长差最小值/	10×10^{-17}	$2 \times (10 \times 10^{-18})$
缩短边长条件/	10×10^{-2}	10×10^{-3}
最大循环次数/次	150	150
产生邻居的个数/个	10	10
未发现可能区域的最大循环数/次	6	6

计算得圆弧破坏模型的最佳参数 α, β, a 分别为 1.435 823, 1.536 536, 1.649 569, 而楔体破坏的最佳参数 α, β, a 分别为 0.204 205, 1.423 957, 2.297 987。与极大似然法估计的结果^[4]的比较见表 2, 表 3。

为了检验算法对初始点的依赖程度, 对两种破坏模型分别选取了五组初始点进行了测试, 结果见表 4。

表 2 和表 3 列出了二阶段禁忌算法和极大似然估计方法对式(3)和(4)中的系数估计结果。结果表明本算法在全局空间搜索, 具有较好的拟合能力。

在表 4 中列出了由不同的初始点开始搜索, 得到的模型参数, 从中我们可以看出对于圆弧形破坏模型适应值在 0.14 左右, 而对于楔体破坏模型适应值在 0.18 左右, 可见初始点对算法的影响是很小的, 可以

表2 圆弧破坏边坡的安全系数估计结果的比较

Table 2 Comparison of safety factor estimated results for slopes of circular failure

编号	极限平衡法估计的安全系数	禁忌算法			极大似然估计		
		安全系数	绝对误差	相对误差%	安全系数	绝对误差	相对误差%
1	1.11	1.267	-0.16	14.14	1.269	-0.16	14.33
2	1	0.92	0.08	7.99	0.864	0.136	13.57
3	1.875	2.165	-0.29	15.47	2.143	-0.27	14.31
4	2.045	2.356	-0.31	15.23	2.207	-0.16	7.946
5	1.78	1.57	0.21	11.82	1.584	0.196	10.99
6	1.99	1.76	0.23	11.55	1.777	0.213	10.72
7	1.25	1.415	-0.17	13.23	1.423	-0.17	13.81
8	1.13	1.284	-0.15	13.61	1.296	-0.17	14.73
9	1.02	1.338	-0.32	31.19	1.348	-0.33	32.15
10	1.3	1.251	0.049	3.743	1.277	0.023	1.785
11	1.2	1.359	-0.16	13.22	1.381	-0.18	15.05
12	1.09	1.089	8×10^{-4}	0.075	1.023	0.067	6.133
13	0.78	0.523	0.257	32.97	0.491	0.289	37.04
14	2	2.069	-0.07	3.473	2.075	-0.07	3.732
15	1.7	1.662	0.038	2.214	1.671	0.029	1.72
16	1.02	1.164	-0.14	14.14	1.18	-0.16	15.66
17	0.89	1.11	-0.22	24.77	1.121	-0.23	25.99
18	1.46	1.26	0.2	13.69	1.273	0.187	12.84
19	0.8	0.882	-0.08	10.3	0.891	-0.09	11.39
20	1.44	1.26	0.18	12.49	1.273	0.167	11.63
21	0.86	0.882	-0.02	2.604	0.891	-0.03	3.614
22	1.08	1.267	-0.19	17.35	1.28	-0.2	18.5
23	1.11	0.792	0.318	28.66	0.804	0.306	27.58
24	1.4	1.4	0	0	1.267	0.133	9.533
25	1.35	1.183	0.167	12.34	1.131	0.219	16.25
26	1.03	1.079	-0.05	4.778	1.074	-0.04	4.308
27	1.28	1.233	0.047	3.698	1.133	0.147	11.48
28	1.63	1.641	-0.01	0.668	1.594	0.036	2.185
29	1.05	0.841	0.209	19.94	0.849	0.201	19.16
30	1.03	0.764	0.266	25.81	0.772	0.258	25.08
31	1.09	1.149	-0.06	5.448	1.159	-0.07	6.324
32	1.11	1.284	-0.17	15.67	1.254	-0.14	12.93
33	1.01	0.93	0.08	7.923	0.938	0.072	7.13
34	0.625	0.757	-0.13	21.14	0.761	-0.14	21.8
35	1.12	0.979	0.141	12.63	1.003	0.117	10.44
36	1.2	1.07	0.13	10.85	1.08	0.12	9.968
37	1.8	2.027	-0.23	12.62	2.114	-0.31	17.42
38	0.9	0.774	0.126	13.97	0.792	0.108	12.02
39	0.96	0.892	0.068	7.083	0.905	0.055	5.699
40	0.83	0.614	0.216	25.98	0.625	0.205	24.71
41	0.79	0.833	-0.04	5.419	0.841	-0.05	6.457
42	0.69	0.555	0.135	19.54	0.561	0.129	18.74
43	1.45	1.284	0.166	11.48	1.296	0.154	10.6
44	1.58	1.382	0.198	12.51	1.396	0.184	11.65
45	1.37	1.244	0.126	9.207	1.256	0.114	8.313
46	2.05	1.985	0.065	3.191	1.944	0.106	5.153
平均			0.145	12.52		0.151	13.1

表3 楔体破坏边坡的安全系数估计结果的比较

Table 3 Comparison of safety factor estimated results for slopes of wedge failure

编号	极限平衡法估计的安全系数	禁忌算法			极大似然估计		
		安全系数	绝对误差	相对误差%	安全系数	绝对误差	相对误差%
1	0.86	1.195	-0.33	38.94	1.225	-0.37	42.45
2	1.36	1.107	0.253	18.64	1.15	0.21	15.45
3	1	1.057	-0.06	5.732	1.09	-0.09	8.956
4	1.1	1.276	-0.18	16.02	1.308	-0.21	18.95
5	0.9	0.789	0.111	12.37	0.806	0.094	10.4
6	1.4	1.211	0.189	13.5	1.242	0.158	11.31
7	2.35	2.35	0	0	2.341	0.009	0.373
8	0.9	0.666	0.234	26.03	0.683	0.217	24.16
9	1.73	1.727	0.003	0.175	1.771	-0.04	2.352
10	2.48	2.034	0.446	18	2.085	0.395	15.92
11	1.9	1.562	0.338	17.77	1.605	0.295	15.54
12	0.78	1.071	-0.29	37.36	1.099	-0.32	40.84
13	1.12	1.243	-0.12	11	1.277	-0.16	14.05
14	1	0.999	1×10^{-3}	0.098	1.03	-0.03	3.039
			0.183	15.4		0.185	15.98

表4 初始点对估计结果的影响

Table 4 Effect of initial values of parameters to be determined on accuracy of the model

模型	α 的初值	β 的初值	a 的初值	α 的取值	β 的取值	a 的取值	适应值
圆弧	0	0	0	1.811 611	1.528 352	1.416 527	0.145 194 542 9
	21	4	16	2.271 080	1.562 748	1.091 509	0.147 318 411 3
	8	4	1	1.811 611	1.528 352	1.416 527	0.145 194 542 9
	0	2	0	1.811 611	1.528 352	1.416 527	0.145 194 542 9
楔体	0.3	0.8	0.4	1.814 916	1.574 178	1.246 095	0.149 619 772 6
	1	2	1	0.189 415	1.427 807	3.505 080	0.183 102 813 2
	0	0	0	0.204 305	1.423 957	2.297 987	0.182 589 711 9
	2	5	4	0.204 305	1.423 957	2.297 987	0.182 589 711 9
	10	20	14	0.227 105	1.532 340	0.329 467	0.187 590 085 3
	0.2	0.5	0.5	0.204 305	1.423 957	2.297 987	0.182 589 711 9

较好地做到大范围的全局搜索。

同时在表中我们还可以看到，对于不同的参数，可以使模型对建模数据的拟合结果相近似，说明经验模型存在不唯一性^[5]。与目前广泛采用的多元回归分析、多元判别分析、极大似然估计等方法相比，禁忌算法是在全局空间上搜索，因而可以较好的保证建模的合理性。

5 结 语

通过对常规禁忌算法的改进，笔者提出的二阶段禁忌算法成功地应用于边坡安全模型参数识别，弥补了常规算法的不足。

另外禁忌算法是一个多参数控制算法，实例中算法的参数是笔者经过大量的试验得到的，参数值的确

定将有待于进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Glover F. Tabu search: Part I[J]. **ORSA Journal on Computing**, 1989, 1(3):190-206.
- [2] Siarry P, Bertiaux G. Fitting of tabu search to optimize functions of continuous variables [J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 1997, 40:2 449-2 457.
- [3] Feng X T, Katsuyama K, Wang Y J, et al. A new direction-intelligent rock mechanics and rock engineering [J]. **Int J. of Rock Mech. Min. Sci.**, 1997, 34(1): 135-141.
- [4] Sah N K, Sheorey P R, Upadhyaya L N. Maximum likelihood estimation of slope stability[J]. **Int J Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.**, 1994, 31(1):47-53.
- [5] 冯夏庭,张治强. 岩石力学建模的唯一性问题[J]. **煤炭学报**, 1999, 24(2):127-131.
- [6] Francesco Franze, Nicolo Speciale, A tabu-search-based algorithm for continuous multim minima problems [J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 2001, 50:665-680.

