

基于进化—支持向量机的地下洞室可靠性分析

熊 峰, 伍法权

(中国科学院地质与地球物理研究所工程地质力学重点实验室, 北京 100029)

摘 要: 将地下洞室围岩测线的相对位移值及相对位移极限值分别作为施与结构的应力和结构自身强度, 从而构造地下洞室可靠性分析的功能函数显式表达式。使用数值方法计算符合概型分布的不同岩体物理力学参数条件下的相对位移值并将其作为训练样本, 采用遗传算法优化支持向量机的惩罚因子及核参数, 用优化得到的支持向量机进行相对位移值的预测, 最后利用系统可靠度理论及网络概率估算技术 (PNET 法) 求解地下洞室开挖可靠度。以锦屏一级水电站主变室为例, 尝试采用上述方法对各层开挖的可靠性进行分析, 结果表明: 第一层开挖可靠度最低, 随着开挖的进行, 系统可靠度逐渐升高, 最终趋于一个稳定状态。

关键词: 可靠性; 地下洞室; 遗传算法; 支持向量机

中图分类号: TV222.2 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 4548(2010)07 - 1035 - 07

作者简介: 熊 峰(1981 -), 男, 博士研究生, 从事岩石力学与地下工程研究。E-mail: zhjxzh@163.com。

Reliability of underground caverns based on genetic algorithm and support vector machine

XIONG Zheng, WU Fa-quan

(Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: The genetic algorithm (GA) and support vector machine (SVM) are applied to analyze the reliability of underground caverns. The explicit form of performance function is established by use of the relative displacement values and relative displacement limit values of surrounding rock. The learning samples of the relative displacement values are built by numerical simulation; then the relative displacement values are predicted by the support vector machine that is optimized by the genetic algorithm. An example in Jinping Hydropower Station is given for illustrating the application of the proposed approach. The new method is proved effective in the reliability analysis of underground caverns.

Key words: reliability; underground cavern; genetic algorithm; support vector machine

0 引 言

由于岩土介质的复杂性、随机性, 采用可靠性理论对岩土工程进行可靠性分析已成为十分重要并需要研究的问题。边坡工程的可靠性理论研究已取得较多成果, 并在实际工程中得以应用。然而地下工程, 特别是水电站大型地下洞室, 由于很难找到一种统一的可靠性评判标准, 其可靠性研究仍然处于起步阶段。

文献[1]在弹塑性有限元分析的初应力法基础上, 推导了弹塑性随机有限元增量初应力法的计算迭代格式, 结合可靠度理论, 给出了围岩稳定的可靠度分析方法; 文献[2]采用 D - P 准则, 构建了映秀湾水电站地下厂房洞室结构的功能函数, 推导了响应面函数、应力分量偏导函数、顶拱混凝土各随机变量偏导函数、地下洞室岩体随机变量偏导函数, 并应用 JC 法计算了其结构可靠度指标; 文献[3]提出一种基于数值模拟、BP 网络和优化技术三者相结合的地下洞室可靠度

分析方法。功能函数不能显式表达是求解地下洞室可靠度遇到的最大问题。实践证明, 位移是岩土结构在开挖或变形过程中反馈出的重要信息之一, 利用岩石的变形行为对岩土结构的可靠性研究是一种简单、易行的途径。因此, 本文提出将地下洞室开挖测线相对位移极限值作为围岩强度, 将数值计算得到的测线相对位移值作为围岩应力, 以此建立功能函数的显式表达式, 并通过进化—支持向量机方法学习数值计算构造的少量样本, 最终采用结构系统可靠度理论求解大型地下洞室开挖可靠度。

1 理论依据

1.1 结构系统可靠度

水电站大型地下洞室需要分层开挖, 可将开挖过

程看作一个结构系统，而每一层开挖则为结构系统中的元件。

结构系统可靠度取决于构成系统的元件可靠度，各元件在系统中的联结方式，各元件互相间的相关性及结构系统可能处于的极限状态等。

(1) 单个原件可靠度计算

设结构系统由 n 个元件或失效模式组成，施与元件 i 的应力为 S_i ，该元件的强度为 R_i ，则正常工作的判断准则为 $R_i \geq S_i$ 。设它们的分布函数分别为 $F_{S_i}(x)$ 和 $F_{R_i}(y)$ ，并假设 S_i 和 R_i 相互独立，可知元件的可靠度表达式为

$$P_r = P(R_i > S_i) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} dF_{R_i}(y) dF_{S_i}(x) \quad (1)$$

只要 S_i 和 R_i 的概率密度函数存在，即可由式 (1) 求出各元件的可靠度。若 S_i 和 R_i 分别为正态变量 $N(m_R, s_R^2)$ 和 $N(m_S, s_S^2)$ ，则元件或失效模式 i 的可靠度为

$$P_{ri} = P(R_i \geq S_i) = f(b_i) \quad (2)$$

式中， b_i 为该元件或失效模式的可靠度指标，

$$b_i = \frac{m_{Ri} - m_{Si}}{\sqrt{s_{Ri}^2 + s_{Si}^2}} \quad (3)$$

(2) 结构系统可靠度计算

一般来说，不管结构的形式是简单还是复杂，总可以看成是由若干个失效模式串联组成，任一失效模式的发生都将导致结构的整体破坏。

串联结构系统失效概率的计算大都采用近似方法，如最宽界限估计法、双界限估计法和 PNET 法等^[4]。

宽界限估计法认为结构系统失效概率为

$$\max P_{fi} \leq P_f \leq 1 - \prod_{i=1}^k (1 - P_{fi}) \quad (4)$$

式 (4) 左端对应于失效要素完全相关，式 (4) 的右端对应于失效要素完全独立，这是两种极端情况。

PNET 法又称为网络概率估算技术，其基本原理是所有主要的元件可以用其中的 m 个所谓代表元件来代替。

这些代表元件是由所有主要元件通过下述原则选择出来的，即把主要元件分为几个组，若在同一组中各元件与某一个代表元件高级相关，且这个代表元件是该组所有元件中失效概率最高的元件，从相关条件知，它便可以代表该组所有元件的失效概率。在计算时，假定不同组间的代表元件是统计独立的。

根据上述原则，设 m 个代表元件中，第 i 个元件的破坏概率为 P_{fi} ，则结构体系的可靠度为

$$P_r = \prod_{i=1}^m (1 - P_{fi}) = \prod_{i=1}^m P_{ri} \quad (5)$$

对应的失效概率为

$$P_f = 1 - P_r = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - P_{fi}) = 1 - \prod_{i=1}^m P_{ri} \quad (6)$$

当每一个结构元件的失效概率 P_{fi} 很小时，式 (6) 可简化为

$$P_f = \sum_{i=1}^m P_{fi} \quad (7)$$

运用 PENT 法时，最关键的是如何选定代表元件，即限定相关系数 r_0 的取值，一般来说，当主要元件少，设计的工程重要时， r_0 可取高些，反之可取低些，有文章建议 r_0 取 $0.7 \sim 0.8$ ^[5]。

1.2 地下洞室可靠度功能函数的构建

结构位移的发生和发展是该结构力学行为的综合反映。地下洞室是隐蔽工程，难以观察到破坏的全貌，只能看到围岩表面的变形破坏现象。不管地下洞室承受的作用如何复杂，其经受各种作用后的反应总可以由围岩位移体现出来，而围岩位移可以通过仪器测得。通过围岩位移观测以了解地下洞室的力学动态是比较直观也易于实施的办法，地下洞室的稳定性也应该从围岩位移变化和发展得到体现。

利用位移来判别地下洞室的稳定性，通常是在施工过程中若发现量测到的位移超过某一限值或预计最终位移将超过某一限值时，便意味着围岩或支护系统不稳定，需要加强支护系统或采取其他措施。然而这一限值并不容易确定，各国和各工程提出的限值也很不一致。

2001 年发布的国家标准^[6]，在参照国外有关资料并对中国一些工程实测数据进行统计分析基础上，制订了洞周允许相对位移值，见表 1。

表 1 隧道周边允许相对位移值

Table 1 Allowable relative displacement values of tunnel %			
围岩级别	埋深		
	<50 m	50~300 m	>300 m
III	0.10~0.30	0.20~0.50	0.40~1.20
IV	0.15~0.50	0.40~1.20	0.80~2.00
V	0.20~0.80	0.60~1.60	1.00~3.00

注：①周边位移相对值系指两测点间实测位移累计值与两侧点间距离之比；②本表适用于高跨比 $0.8 \sim 1.2$ 的下列地下工程，III 级围岩跨度不大于 20 m，IV 级围岩跨度不大于 15 m，V 级围岩跨度不大于 10 m。

规范^[6]所列的隧道周边允许相对位移值在使用过程中存在许多问题，如不少隧道、地下洞室均不符合 $0.8 \sim 1.2$ 的高跨比。鉴于此，铁道部组织各高校及设计院对标准断面单线、双线隧道进行了大量的模拟计算，得出了各级围岩在不同埋深条件下，毛洞及初期支护隧道周边各测线位移极限值与相对位移极限值及

其分布规律, 见表 2, 3^[4], 并将部分结果写入铁路隧道设计规范^[7]。

单线直墙隧道标准断面部分测线布置如图 1 所示, 其中 $H = 8.2 \text{ m}$, $L = 5.7 \text{ m}$ 。

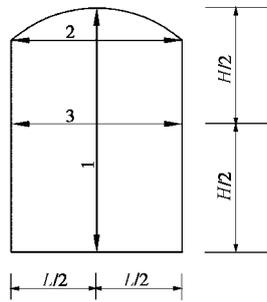


图 1 标准隧道断面测线布置

Fig.1 Measuring lines of standard tunnel section

表 2 为 IV 级围岩单线隧道初期支护各测线位移极限值及其分布规律埋深 $h \leq 300 \text{ m}$, 测线 1 位移值为拱顶下沉值, 测线 2, 3 位移值为洞壁两侧对称点位移值之和, 并规定向洞内的位移为正, 反之为负。

表 2 IV 级围岩单线隧道初期支护各测线位移极限值及其分布规律

Table 2 Displacement values and distribution in initial support of different measuring lines

测线	均值	标准差	最大值/mm	最小值/mm
1	30.3750	10.8137	56.3124	18.6034
2	71.1787	27.8134	142.5714	36.1340
3	95.2181	37.5954	189.8412	46.8180

由于洞室大小并不一致, 采用无量纲值——测线相对位移值, 即测线的位移值与两测点间距离之比, 来衡量洞壁周边位移大小, 以便于不同尺寸洞室应用, 如表 3 所示。

表 3 IV 级围岩单线隧道初期支护各测线相对位移极限值及其分布规律

Table 3 Relative displacement limit values and distribution in initial support of different measuring lines

测线	均值	标准差	最大值/mm	最小值/mm
1	0.2126	0.0807	0.4171	0.1313
2	1.1647	0.5385	2.6486	0.5706
3	1.3874	0.6354	3.1355	0.6707

将表 3 中各测线相对位移极限值看作元件的强度为 R_i , 将洞室开挖过程中该位置测线实际的相对位移值看作施与元件 i 的应力为 S_i , 构建功能函数 $Z = R_i - S_i$, 便可根据单个元件可靠度理论计算该测线可靠度指标 b_i , 进而可求得地下洞室开挖这个结构系统的可靠度指标 b 。

关键问题就在于测线实际相对位移值的获得。地下洞室开挖通过监测手段所测得的位移值是一个定值, 可根据“位移—约束”原理^[4]判别洞室及支护系统的稳定性, 并不能用于计算元件可靠度。

采用数值模拟计算测线的相对位移值是一个可能的手段, 然而要对不同的岩体物理力学参数进行数值计算从而统计其分布规律, 工作量非常巨大, 将耗费相当多的时间而不具有实用性。但是, 采用数值计算构造少量(如 20~30)的样本是比较容易的, 利用这些样本, 对支持向量机进行训练, 从而代替数值计算来预测不同岩体参数条件下的测线相对位移值。这为地下洞室开挖系统的可靠性分析提供了一个可能的途径。

1.3 支持向量机理论

支持向量机是基于统计学习理论的创造性机器学习方法, 是由 Vapnik 和他在 AT&T 贝尔实验室的合作者提出的。其基本思想^[3]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, 在这个空间中求最优分类面(广义)。

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; 支持向量机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, 目前主要应用于模式识别、回归分析等领域。

在岩土工程中, 运用支持向量机已经成功解决了工程岩体的分类^[8]、回归岩体强度指标^[9]及边坡可靠性^[10]等问题。

支持向量机的核心问题是核函数, 目前采用较多的核函数主要有 3 类。

(1) 多项式核函数

$$K(u, v) = [a \langle u, v \rangle + b]^d; \quad (8)$$

(2) 径向基 (RBF) 核函数

$$K(u, v) = \exp \left\{ -\frac{\|u - v\|^2}{2s^2} \right\}; \quad (9)$$

(3) Sigmoid 核函数

$$K(u, v) = \tan h[a \langle u, v \rangle + b]。 \quad (10)$$

任何一种核函数, 均需要设置惩罚因子 C 及核参数。例如, 多项式核函数的阶数 d , 径向基核函数的宽度 s^2 , 以及 Sigmoid 核函数的宽度 a 和偏移 b 等, 这些参数的设置对预测结果有极大的影响, 它们的合理确定直接影响模型的精度和泛化能力。但目前并没有研究证明采用什么样的惩罚因子和核参数能得到最好的预测结果, 往往需要多次尝试, 而尝试的结果也未必是最优的。

鉴于此，将遗传算法用于优化支持向量机的惩罚因子和核参数，将减少人为选择的盲目性，提高支持向量机的推广预测能力。

1.4 基于遗传算法的进化支持向量机(GA-SVM)

遗传算法的运算基础是字符串，先将搜索对象编码为字符串形式，字符串就相当于生物学中的染色体DNA。构成字符串的每个字符都有特定的含义，反映所解决问题的某个特征，这就相当于基因，即染色体DNA的片段，每个字符串结构被称为个体，每个个体都可以通过问题本身所具有的适应度函数来计算反映其适应性好坏的适应值。然后对一组字符串结构（被称为一个群体）进行循环操作，每次循环操作被称为一代，其中的遗传操作包括：①保存字符串组中适应性较好的那些字符串到下一代，使上一代中的优良个体得以生存下去，这类似于生物进化论中的自然选择；②通过有组织的然而又是随机的字符串间的信息交换来重新结合那些适应性好的字符串，在每一代中，利用上一代字符串结构中尝试新的位和段来替代原来的部分。其理论及具体实现方法参见相关文献^[12]。

采用遗传算法搜索全局最优值需要设定适应度函数 f 。本文所述 GA-SVM 将采用径向基 (RBF) 核函数，优化的参数为函数宽度 s^2 和惩罚因子 C 。假设采用岩体参数 ($r_i, c_i, f_i, E_i, G_i, s_{ii}$) 计算地下洞室开挖后某测线的相对位移值 S_i 为已知，则适应度函数为

$$f(C, s^2) = SVM(C, s^2) - S_i = SJ_i - S_i, \quad (11)$$

式中， $SVM(C, s^2)$ 以 C 和 s^2 为参数的支持向量机预测结果，即 $SVM(C, s^2) = SJ_i$ 。

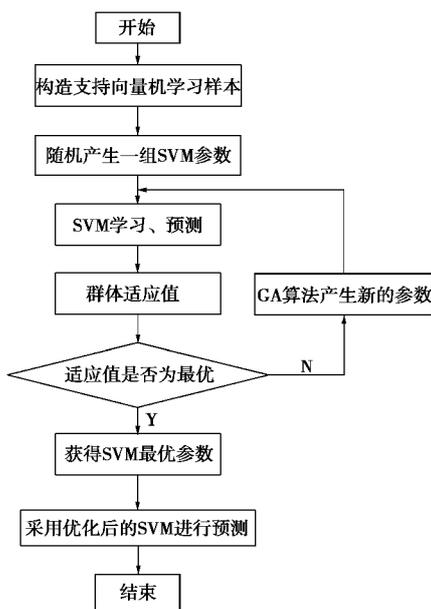


图2 GA-SVM 流程

Fig. 2 Flow chart of genetic algorithm-support vector machine

通过遗传算法的选择、交叉及变异操作，最终求得适应度函数的最小值(应为零)，将此时的 C, s^2 值作为 SVM 参数，预测不同岩体物理力学参数条件下各测线相对位移值。

GA-SVM 主要步骤：①由数值计算得到一定数量的学习样本；②随机产生一组 SVM 参数；③利用该组参数进行学习、预测，得到适应值；④判断适应值是否为最优，若是，采用该组参数作为 SVM 最优参数，若不是，利用遗传算法构造新的 SVM 参数；⑤重复以上步骤，直到找到最优；⑥采用优化后的 SVM 进行预测。

其流程如图 2 所示。

2 工程应用

2.1 工程概况

锦屏一级水电站是雅砻江水能资源最富集的中下游河段五级水电开发的第一级，是雅砻江水电规划中的龙头水库梯级之一，以发电为主，兼顾防洪、拦沙，其经济效益十分显著。坝址区位于四川省木里、盐源两县毗邻处的普斯罗沟峡谷段。电站装机容量 3600 MW，多年平均年发电量 1.662×10^{10} kW·h。

其地下洞室主要由引水发电系统、尾水系统及泄洪洞工程构成，均位于右岸大理岩山体中。主变室为厂房系统的重要工程，位于厂房下游，顶拱中心线与主厂房轴线间距 67.35 m，洞形为圆拱直墙型，长 201.60 m，宽 19.30 m，高 32.5 m，高跨比为 1.7，顶拱高程 1679.00 m，底板高程 1646.50 m。

主变室开挖分为 5 层，开挖后初期采用锚杆支护，包括普通锚杆和 120 kN 的预应力锚杆。第一层锚杆为 $\Phi 32$ mm，长度 9 m 或 7 m；第二层和第三层锚杆为 $\Phi 32$ mm，长度 9 m 或 6 m；第四层和第五层锚杆分别为 $\Phi 32$ mm 和 $\Phi 28$ mm，长度 9 m 或 6 m；开挖及支护方案见图 3。

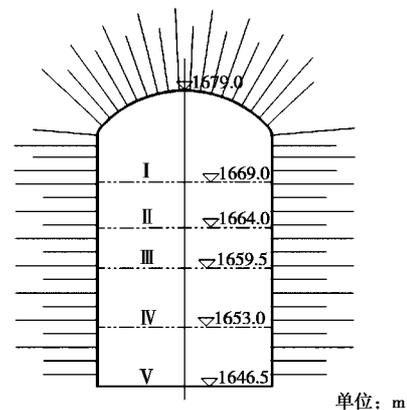


图3 主变室开挖及初期支护图

Fig. 3 Excavation and initial support of main transformer chamber

主变室围岩以III₂类为主,其物理力学参数:黏聚力 0.7~1.5 MPa,内摩擦角 35°~42°,变形模量 5~11 GPa,泊松比 0.25~0.3。但锦屏一级水电站强度应力比 1.5~3.0,为高一极高地应力区,因此,采用IV级围岩单线隧道初期支护测线相对位移极限值作为围岩的强度 *R*。

计算采用的围岩物理力学参数服从正态分布,重度 =27 kN·m⁻³,黏聚力均值=1.1 MPa,标准差=0.2 MPa;内摩擦角均值=38.5°,内摩擦角标准差= 1.75°,变形模量均值=8 GPa,变形模量标准差=1.5 GPa。产生服从正态分布 $N-(m,s^2)$ 的参数方法:取两个独立的位于 [0, 1] 区间均匀分布的随机数 m_1 和 m_2 ,利用二元函数变换得到两个服从上述正态分布且互为正交、独立的随机数 x_1 和 x_2 [13]:

$$x_1 = m + s(-2 \ln m_1)^{1/2} \cos(2\pi m_2), \quad (12)$$

$$x_2 = m + s(-2 \ln m_1)^{1/2} \sin(2\pi m_2)。 \quad (13)$$

2.2 计算结果

对主变室各层开挖布置 3 条测线,见图 4。利用式 (12)、(13) 构造 23 组 *c*, *j* 及 *E* 数据,采用 FLAC 作为数值计算软件。将前 20 组数据及其结果作为样本,对 GA—SVM 进行优化训练,后 3 组作为已知值来检验经 GA—SVM 优化训练后的预测推广能力。

为说明 GA—SVM 的预测推广能力,特做如下对比:①将惩罚因子 *C* 及核函数宽度 *s*² 分别取初始值为 0.1, 0.2,采用 SVM 对后 3 组数据进行预测;②利用 GA 对参数进行优化,得到惩罚因子 *C* 及核函数宽度 *s*² 分别为 4.478, 5.8549,采用优化后的 SVM 进行预测。该 3 组样本数值计算的结果,SVM 预测结果以及 GA—SVM 预测结果进行对比,结果如表 4。采用随意设置的参数值,SVM 已经可以得到与计算值较接近

的预测值,但采用经过优化后的 SVM 所得的预测值与计算值之间的差值小于 0.001。由此可见,GA—SVM 方法具有较强的推广及预测能力。

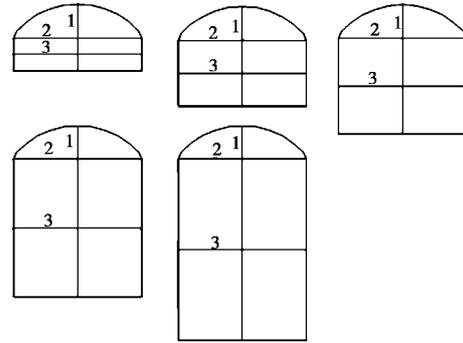


图 4 主变室分层开挖测线布置图

Fig. 4 Measuring lines in different layers of main transformer chamber

利用式 (12)、(13) 构造 1000 组 *c*, *j* 及 *E* 数据,GA—SVM 预测。各层测线相对位移值及其分布规律如表 5 所示,可靠度指标 *b* 由式 (3) 求得。

以主变室第 I 层开挖所得各测线结果说明 PNET 法求解系统可靠度的步骤:

(1) 求各元件间的相关系数

测线 1 与测线 2 的相关系数为 $r_{12}=0.531$,测线 1 与测线 3 的相关系数为 $r_{13}=0.553$,测线 2 与测线 3 的相关系数为 $r_{23}=0.9945$ 。

(2) 确定代表元件

由相关系数可知,测线 2 与测线 3 为高级相关,但测线 2 的可靠度指标 b_2 小于测线 3 的可靠度指标 b_3 ,测线 2 的可靠度就代表了测线 2 与测线 3 这个分组的可靠度。因此,测线 2 与测线 1 构成第 I 层开挖可靠性分析的代表元件。

表 4 样本相对位移值及 SVM 和 GA—SVM 预测值

Table 4 Relative displacement values of samples and predictive values by SVM method or GA—SVM method

编号	方法	Table 4 Relative displacement values of samples and predictive values by SVM method or GA—SVM method															%
		第 I 层			第 II 层			第 III 层			第 IV 层			第 V 层			
		测线 1	测线 2	测线 3	测线 1	测线 2	测线 3	测线 1	测线 2	测线 3	测线 1	测线 2	测线 3	测线 1	测线 2	测线 3	
21	数值计算	0.185	0.044	0.057	0.139	0.065	0.088	0.122	0.082	0.141	0.104	0.106	0.206	0.091	0.123	0.241	
	SVM	0.193	0.050	0.062	0.146	0.074	0.098	0.129	0.094	0.156	0.110	0.121	0.225	0.096	0.141	0.260	
	GA—SVM	0.185	0.044	0.057	0.138	0.065	0.088	0.121	0.082	0.140	0.103	0.105	0.205	0.090	0.123	0.240	
22	数值计算	0.194	0.050	0.064	0.147	0.074	0.098	0.129	0.093	0.155	0.110	0.119	0.224	0.097	0.139	0.262	
	SVM	0.198	0.053	0.066	0.150	0.079	0.103	0.133	0.099	0.163	0.114	0.128	0.235	0.100	0.149	0.271	
	GA—SVM	0.193	0.049	0.060	0.146	0.073	0.097	0.128	0.092	0.154	0.110	0.118	0.223	0.096	0.137	0.260	
23	数值计算	0.201	0.054	0.068	0.152	0.080	0.106	0.134	0.100	0.165	0.115	0.129	0.239	0.101	0.150	0.277	
	SVM	0.202	0.055	0.069	0.153	0.082	0.107	0.136	0.104	0.170	0.117	0.134	0.244	0.102	0.156	0.280	
	GA—SVM	0.200	0.054	0.069	0.151	0.080	0.104	0.134	0.100	0.164	0.115	0.128	0.238	0.100	0.149	0.275	

表5 1000组数据预测结果及可靠度指标 b

Table 5 Predictive results and reliability indices for 1000 data

层数	测线	相对位移值/%		相对位移极限值/%		b
		均值	标准差	均值	标准差	
第I层	测线1	0.196	0.033	0.2126	0.0807	0.19
	测线2	0.051	0.021	1.1647	0.5385	2.07
	测线3	0.063	0.023	1.3874	0.6354	2.08
第II层	测线1	0.149	0.027	0.2126	0.0807	0.75
	测线2	0.078	0.030	1.1647	0.5385	2.01
	测线3	0.102	0.035	1.3874	0.6354	2.02
第III层	测线1	0.132	0.026	0.2126	0.0807	0.95
	测线2	0.099	0.038	1.1647	0.5385	1.97
	测线3	0.162	0.052	1.3874	0.6354	1.92
第IV层	测线1	0.113	0.024	0.2126	0.0807	1.18
	测线2	0.128	0.049	1.1647	0.5385	1.92
	测线3	0.234	0.071	1.3874	0.6354	1.80
第V层	测线1	0.099	0.022	0.2126	0.0807	1.36
	测线2	0.150	0.057	1.1647	0.5385	1.87
	测线3	0.268	0.073	1.3874	0.6354	1.75

(3) 计算系统可靠度

由式(5)可求得第一层开挖的失效概率为 $P_f = 43.6\%$ 。

根据上述方法,求得各层开挖的失效概率及可靠度如表6所示。

表6 各层开挖失效概率及可靠度

Table 6 Failure probability and reliability of excavation in different layers

层数	失效概率 P_f /%	可靠度 P_r /%
第I层	43.6	56.4
第II层	22.7	77.3
第III层	17.1	82.9
第IV层	11.9	88.1
第V层	8.7	91.3

地下洞室开挖是一个能量释放的过程,岩体原始平衡被打破的时候是洞室最危险的时候。计算结果也说明,第I层开挖可靠度最小,是整个施工过程最危险的时候,而每一层开挖顶拱的稳定性又比边墙稳定性差;随着施工的进行,支护结构的实施,主变室系统可靠度逐渐升高,最终达到一个稳定状态。

3 结 论

本文以地下洞室围岩相对位移极限值作为岩体的强度 R ,将数值计算所得围岩测线相对位移值作为施与岩体的应力 S ,构建功能函数得显式表达式 $Z = R - S$ 。利用数值计算构建测线相对位移值样本,采用遗传算法对支持向量机的惩罚因子和核参数进行

优化,使用优化得到的支持向量机进行训练,并预测不同岩体物理力学参数条件下的测线相对位移值,最终利用系统可靠度理论及网络概率估算技术(PNET法)求解地下洞室开挖的系统可靠度。通过上述研究,得到如下主要结论:

(1)利用地下洞室围岩相对位移值与相对位移极限值构建功能函数的显式表达式求解系统可靠度是可行的,利用该方法可有效的分析地下洞室系统开挖的可靠性。

(2)支持向量机方法用于代替力学模型相同但岩体物理力学参数不同的数值计算具有广泛的运用价值和工程前景。而使用遗传算法对支持向量机参数进行优化使得这种方法具有更强的推广预测能力。

参考文献:

- [1] 徐 军, 郑颖人. 隧道围岩弹塑性随机有限元分析及可靠度计算[J]. 岩土力学, 2003, 24(1): 70 - 74. (XU Jun, ZHENG Ying-ren. Elastoplastic stochastic finite element analysis of surrounding rock of tunnel and its application to reliability calculation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(1): 70 - 74. (in Chinese))
- [2] 陈建康, 朱殿芳, 赵文谦. 基于响应面法的地下洞室结构可靠度分析[J]. 岩石力学工程学报, 2005, 24(2): 351 - 356. (CHEN Jian-kang, ZHU Dian-fang, ZHAO Wen-qian. Structure reliability analysis of underground cavern based on response surface method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(2): 351 - 356. (in Chinese))
- [3] 徐 军, 张利民, 郑颖人. 基于数值模拟与BP网络的可靠度计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(3): 395 - 399. (XU Jun, ZHANG Li-min, ZHENG Ying-ren. Reliability calculation method based on numerical simulation and BP network[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(3): 395 - 399. (in Chinese))
- [4] 景施庭, 朱永全, 宋玉香. 隧道结构可靠度[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002. (JING Shi-ting, ZHU Yong-quan, SONG Yu-xiang. Reliability of tunnel structural[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2002. (in Chinese))
- [5] 邵光信, 亚海斌, 朱绳武. 基于GA和PNET的一种可靠度计算新方法[J]. 金属矿山, 2002(8): 51 - 53. (SHAO Guang-xin, YA Hai-bin, ZHU Sheng-wu. A GA and PNET based new algorithm for solving system reliability[J]. Metal Mine, 2002(8): 51 - 53. (in Chinese))
- [6] 彭新俊. 支持向量机若干问题及应用研究[D]. 上海: 上海

- 大学, 2008. (PENG Xin-jun. On issues and applications for support vector machine[D]. Shanghai: Shanghai University, 2008. (in Chinese))
- [9] 赵洪波, 冯夏庭, 尹顺德. 基于支持向量机的岩体工程分级[J]. 岩土力学, 2002, **23**(6): 698 - 701. (ZHAO Hong-bo, FENG Xia-ting, YIN Shun-de. Classification of engineering rock based on support vector machine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, **23**(6): 698 - 701. (in Chinese))
- [10] 张 贵, 乔春生. 应用支持向量机回归确定岩体强度指标[J]. 北方交通大学学报, 2004, **28**(1): 51 - 54. (ZHANG Gui, QIAO Chun-sheng. Using support vector machine to regress and determine the rock mass strength index[J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2004, **28**(1): 51 - 54. (in Chinese))
- [11] 赵洪波. 基于支持向量机的边坡可靠性分析[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(6): 819 - 823. (ZHAO Hong-bo. Reliability analysis of slope based on support vector machine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(6): 819 - 823. (in Chinese))
- [12] 万 文, 曹 平, 冯 涛. 基于加速混合遗传算法搜索复杂边坡的最危险滑动面[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(4): 475 - 479. (WAN Wen, CAO Ping, FENG Tao. Searching for the most dangerous failure surface of complex slope based on accelerating hybrid genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(4): 475 - 479. (in Chinese))
- [13] 祝玉学. 边坡可靠性分析[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993. (ZHU Yu-xue. Slope reliability analysis[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993. (in Chinese))

茅以升科学技术奖—土力学及岩土工程大奖奖励条例

(2009年8月28日修改)

第一条 根据《茅以升科技教育基金管理办法》，为奖励在我国土力学及岩土工程学科领域做出突出贡献的科技工作者，促进我国土力学及岩土工程科学和技术的进步以及人才的成长，特设立“茅以升土力学及岩土工程大奖（含茅以升土力学及岩土工程青年奖）”（下称茅以升土力学及岩土工程奖），并制定本条例。

第二条 茅以升土力学及岩土工程奖每两年评选一次，大奖和青年奖每次各评选获奖人员1~3名，由北京茅以升科技教育基金会颁发荣誉证书、奖牌和奖金。

青年奖候选人年龄应在45周岁以下（至评选年度10月31日未满45周岁）。

第三条 本奖奖励范围：在土力学及岩土工程方面的科研、设计和施工建设中取得重大成果和做出突出贡献的优秀科技工作者。

第四条 具备本条例第五、六、七、八条及下列条件之一的可以申请土力学大奖、青年奖：①在土力学和岩土工程理论和学术研究中取得重要成果，具有突出的学术水平，对促进岩土工程学科发展有较大的效益或实际指导意义者；②在岩土工

程设计中有显著创新，完成重要工程的优秀设计并付诸实施者；③在主持岩土工程施工建设中，创造并运用先进的科学技术和施工方法，对提高工程质量和经济效益方面取得重大成绩者。

以上成果均须属于国内首创或具有领先水平。

第五条 申报人应热爱祖国、具有优良品德。

第六条 反映请奖贡献与水平的工作项目，一般应是曾获得国家科技成果或科技进步二等奖以上（含二等奖）或省（部）级一等奖的优秀项目，青年奖一般应是获得省（部）级奖励以上的优秀项目。

第七条 请奖项目必须由请奖人所在单位学术委员会（或相应组织）的推荐与申报。

第八条 在茅以升科技教育基金会统一领导下，由中国土木工程学会设立茅以升土力学及岩土工程大奖评选委员会，负责本奖的评选工作。评审委员会的日常工作，委托中国土木工程学会土力学及岩土工程分会办理。

第九条 本条例的解释权属北京茅以升科技教育基金会。