

露天矿开采深度对边坡稳定性的影响*

常春 周德培

王泳嘉 卢世宗

(西南交通大学岩土所 成都 610031)

(东北大学采矿系 沈阳 110006)

摘要 提出了边坡应力分析的新方法,即离散元计算与神经网络预测相结合的模型。首先应用离散元计算不同的开采深度下的边坡岩体应力,将计算结果形成样本集,应用神经网络学习并进行推理,预测其他开采深度的边坡岩体应力。经已开挖的边坡岩体应力验证,该分析模型既方便又合理,并能进一步推广用于预测未开挖的边坡岩体应力。

关键词 离散元,神经网络,边坡岩体应力

分类号 TD824.7

1 前言

边坡稳定性研究一直是岩石力学的一个十分重要的研究课题。我国露天矿山众多,规模宏大,设计最终边坡高度一般为300~500 m,有的已达700 m。边坡工程地质条件比较复杂,边坡稳定性研究难度较大,由于人们的认识和科技发展水平的限制,在矿床地质勘探中很少提供矿山边坡设计所需的基础资料。因此,由于边坡设计不合理或管理不善,造成边坡大规模滑落,如抚顺西露天矿1914年投产至1985年间共发生滑坡60次,重大事故多次;为处理滑坡,清理岩石量近 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。攀钢石灰石矿1981年6月发生高245 m,滑落量 $4.16 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的大滑坡,造成矿山停产。金川磐石等露天矿也都发生过大规模滑坡,给矿山生产带来巨大危害和损失。

而且,露天矿山相继转入深凹开采,边坡高度逐年增大,开采条件越来越差,边坡稳定性问题日益突出。所以研究开采深度对边坡稳定性的影响具有重要意义,本文采用离散元计算与神经网络预测相结合的集成模型。

离散元方法在边坡稳定性分析中日显重要。因为边坡岩体大多为各种节理、断层等结构面所切割,呈非连续结构,所形成的岩石块体运动和受力情况多为几何或材料非线性。而离散元方法能充分考虑岩体结构不连续性,既能分析连续的、非连续的多个块体作用及物体断裂问题,又能处理大位移和转动问题,特别适用于求解边坡节理岩体力学问题。

神经网络是人脑的模型,是从经验中获取知识并解决问题的智能系统。神经网络具有类似大脑的某些功能,从实例中学习获取知识,排除了人为的主观因素的影响,在缺乏数

1996年10月16日收到初稿,1997年1月21日收到修改稿。

* 八五攻关项目资助。

作者常春简介:男,33岁,1996年获东北大学采矿系矿山工程力学专业博士学位,现做博士后,主要从事岩土力学方面的研究。

据与认识的情况下, 仍能取得合理的结果。

2 边坡应力分析集成模型

2.1 离散元法^[1]

离散元是将所研究的区域划分成一个个独立的多边形块体单元, 单元之间可以看成是角-角接触, 角-边接触, 边-边接触, 而且随着单元的平移和转动, 允许调整单元之间的接触关系。最终, 块体单元可能达到平衡状态, 也可能一直运动下去。单元间的作用力可以根据力和位移的关系求出, 而个别单元的运动则完全根据该单元所受的不平衡力和不平衡力矩的大小按牛顿运动定律确定。

动态松弛法是把非线性静力学问题转化为动力学问题进行求解的一种方法。该方法的实质是对临界阻尼振动方程进行逐步积分, 一般采用质量阻尼和刚度阻尼来吸收系统的动能, 当阻尼取值稍小于某一临界值时, 系统的振动将以尽可能快的速度消失, 同时函数收敛于静态值。这种带有阻尼项的动态平衡方程, 利用有限差分法按时步在计算机上迭代求解就是动态松弛法。每次迭代计算过程如图1所示。基本运动方程为

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = f(t) \tag{1}$$

式中: m 是单元的质量, u 是位移, t 是时间, c 是粘性阻尼系数, k 是刚度系数, f 是单元所受的外载荷。

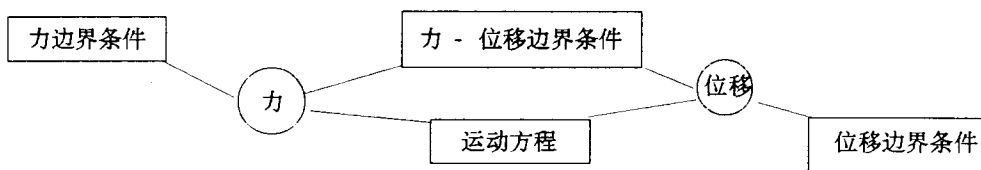


图1 离散元每次迭代计算过程

Fig. 1 Each reiteration process of discrete element method

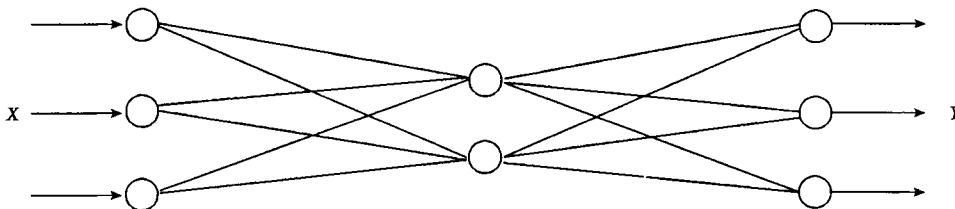


图2 BP 网络结构

Fig. 2 BP neural network

2.2 神经网络模型^[2]

BP 网络是目前应用最广泛、最成熟的一种人工神经网络模型, 其结构如图2所示。BP

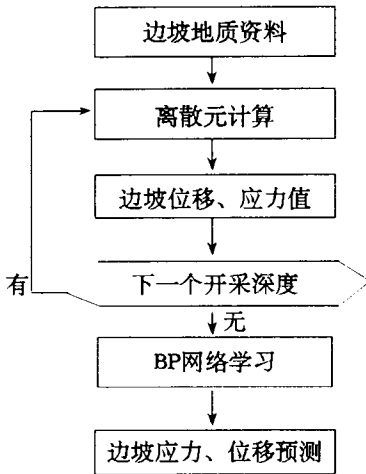


图3 边坡位移、应力分析流程图

Fig. 3 Flow diagram of slope stress-displacement analysis

神经网络中学习而获取知识，然后应用神经网络预测其他开采深度的位移及应力，以此来克服离散元法计算速度慢时间长的缺点。集成模型的应力、位移分析流程图如图3所示。

3 实例分析

我国某铁矿边坡岩体主要为二云母石英片岩，其材料参数为： $c = 0.3 \text{ MPa}$ ， $\varphi = 30^\circ$ ， $E = 3 \times 10^4 \text{ MPa}$ ， $\mu = 0.25$ ，法向刚度系数 $K_n = 4.5 \times 10^3 \text{ MPa/m}$ ，切向刚度系数 $K_t = 3.6 \times 10^3 \text{ MPa/m}$ 。岩体构造比较发育，断层节理可分为11组，并有发育的层间错动面。结构面以层间错动最为发育，起主要作用，其次有一组倾向采场的缓倾节理，倾角 $0 \sim 20^\circ$ 。

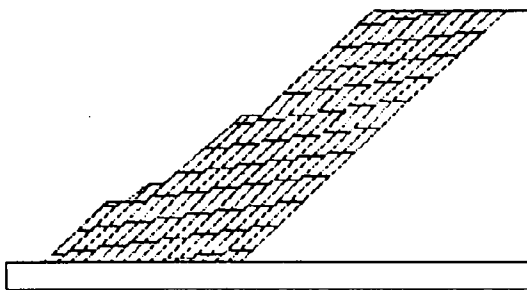


图4 边坡剖面离散单元网格图

Fig. 4 Mesh for slope section

随着边坡开挖，对于不同的深度，应用离散元法对边坡应力、位移进行分析。边坡开采深度选取为154 m，264 m，344 m，432 m和624 m 5个开采水平。当计算某一开采水平时，水平以下的块体固定，来模拟边坡开采到该水平。应力、位移计算分析如图5所示及表1所示。

网络由输入层、隐层、输出层组成，其中 $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)^T \in R^n$ 为输入矢量； $Y = (y_1, y_2, \dots, y_m)^T \in R^m$ 为输出矢量； W 为层与层间的连接权重矩阵。则网络的输出表示为

$$y_i = f\left(\sum_{j=0}^{n-1} W_{ij}x_j - \theta_i\right) \quad (2)$$

式中： $f(x)$ 为激发函数，可选为一连续单调增且有界的非线性函数，如 Sigmoid 函数，即 $f(x) = 1/[1 + \exp(-x)]$ ， θ_i 为节点 i 的阈值。

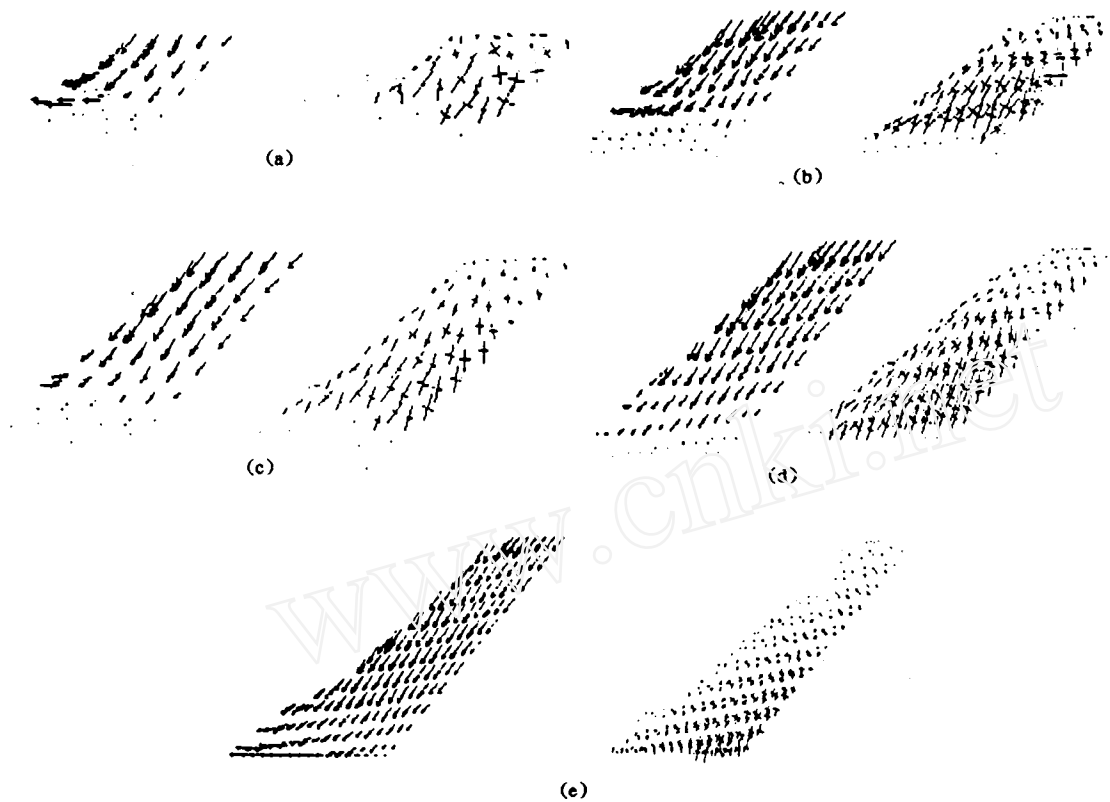
2.3 集成模型

随着边坡的开采，边坡将发生位移，且逐渐增大，直至位移不再增加而达到稳定，或位移继续增加而发生破坏。根据边坡的地质资料及开采情况，选择几个不同水平的开采深度，分别应用离散元法计算边坡的应力和位移。将计算结果作为学习样本，输入

神经网络中学习而获取知识，然后应用神经网络预测其他开采深度的位移及应力，以此来克服离散元法计算速度慢时间长的缺点。集成模型的应力、位移分析流程图如图3所示。

根据边坡岩体构造特性及离散元法特点，主要考虑层间错动面和近水平节理，对边坡剖面进行单元划分。层间错动面，按水平间距30 m 等距划分，倾角 46° ；近水平节理倾角取为 0° ，垂直间距为60 m，且切割全部层间错动面。单元划分网格图如图4所示。

随着边坡开挖，对于不同的深度，应用离散元法对边坡应力、位移进行分析。边坡开采深度选取为154 m，264 m，344 m，432 m和624 m 5个开采水平。当计算某一开采水平时，水平以下的块体固定，来模拟边坡开采到该水平。应力、位移计算分析如图5所示及表1所示。



开采深度: (a) 154 m, (b) 264 m, (c) 344 m, (d) 432 m, (e) 624 m

图5 边坡开采位移、应力图

Fig. 5 Stress and displacement induced by slope excavation

BP 网络结构选取为 $1 \times 4 \times 4 \times 2$ 。其中输入层取1个节点, 为开采深度; 输出层取2个节点, 为位移和应力; 隐层为双隐层, 各取4个节点。将离散元计算结果表2输入到网络中, 网络开始学习并将获取的知识贮存在网络中。然后应用神经网络可立即求出各开采深度的位移和应力值, 并能预测未开挖的边坡岩体应力和位移。边坡应力和位移神经网络拟合曲线见图6, 开采深度为700 m 时计算结果见表2。

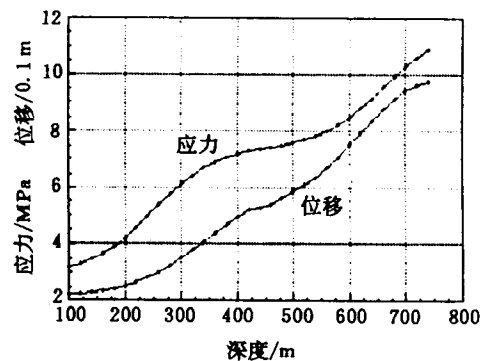


图6 边坡位移、应力神经网络拟合曲线

Fig. 6 Calculation curves of neural network for stress and displacement

表1 位移、应力值

Table 1 Values of stress and displacement

序号	深度/m	位移/m	应力/MPa
1	154	0.233	3.615
2	264	0.307	5.453
3	344	0.416	6.743
4	432	0.533	7.356
5	624	0.847	9.249

表2 边坡采深700 m 时计算结果

Table 2 Calculation results of excavation depth - 700 m

计算方法	位移/m	应力/MPa
离散元	0.946	9.91
神经网络	0.938	9.82

4 结论

(1) 边坡应力、位移随着开采深度的增加近似呈线性增加。

(2) 应用离散元计算与神经网络预测相结合的模型, 分析边坡的应力和位移, 既合理又快速方便。

参 考 文 献

- 1 王泳嘉, 邢纪波. 离散单元法及其在岩土力学中的应用. 沈阳: 东北大学出版社, 1991, 8~22
- 2 胡守仁. 神经网络应用技术. 长沙: 国防科技大学出版社, 1993, 30~55

THE EFFECT OF EXCAVATION DEPTH OF OPEN MINE ON SLOPE STABILITY

Chang Chun Zhou Depei

Wang Yongjia Lu Shizong

(Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031) (Northeastern University, Shenyang 110006)

Abstract A new method is presented for the analysis of slope stress which combines discrete element method and neural network. First the stresses of several levels of rock slope are calculated. Then the result is input into neural network for study. At last, the stress at other depth of rock slope can be predicted.

Key words discrete element method, neural network, stresses in rock slope