

皮尔 - 自适应免疫算法在隧道围岩智能计算中的 研究与应用

王晓睿^{1, 2, 3}, 王元汉^{1, 2}, 余 飞⁴

(1. 华中科技大学 土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074; 2. 华中科技大学 控制结构湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074;
3. 南阳理工学院 土木工程系, 河南 南阳 473004; 4. 中国科学院 岩土力学重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 提出适用于隧道工程智能预测的基于皮尔曲线的自适应免疫算法, 以皮尔曲线较准确地描述隧道围岩收敛趋势, 采用免疫系统的方法把非线性序列的趋势项偏移量建模外推, 以影响围岩稳定性的各种因素作为入侵抗原进行有效解决, 通过提高交叉概率和变异概率等参数的方法实现免疫系统的自适应调整, 并以分布规律性和动态稳定性保证系统的稳定和全局优化, 使该系统成为随环境改变而不断完善的一个自适应鲁棒进化系统。通过对云岭隧道工程的应用研究, 实现在复杂地质环境下对于非确定性系统的预测, 较好地解决在隧道智能计算中由于建模的不确定性造成的困难, 而这种困难是用传统计算方法难以解决的。研究结果显示, 基于皮尔曲线的自适应免疫算法在隧道工程智能预测应用中的优越性和实用性。

关键词: 隧道工程; 自适应免疫算法; 皮尔曲线; 围岩收敛

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)增 1 - 3410 - 06

STUDY AND APPLICATION OF PEARL-ADAPTIVE IMMUNE ALGORITHM FOR INTELLIGENT CALCULATION OF SURROUNDING ROCKMASS

WANG Xiaorui^{1, 2, 3}, WANG Yuanhan^{1, 2}, YU Fei⁴

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;
2. Hubei Key Laboratory of Control Structure, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;
3. Department of Civil Engineering, Nanyang Institute of Technology, Nanyang, Henan 473004, China;
4. Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: As a powerful and complicated defensive system in the organism, immune system is provided with advantages of the self-adaptability and it can be used to resolve different disturbances and uncertain questions. Based on the Pearl curve, the adaptive immune algorithm that is proposed for the tunnel engineering prediction is put forward. The Pearl curve could describe the convergence of the tunnel surrounding rockmass accurately, and can predict the nonlinear deformation tendency by the immune system. Taking each factor that will influence the stability of the tunnel surrounding rockmass as antigen to settle it effectively, through the increase of across and mutation probability, the adaptive of immune system could be realized. The distributing rule and dynamic stability

收稿日期: 2007 - 04 - 17; **修回日期:** 2007 - 05 - 23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50609028)

作者简介: 王晓睿(1975 -), 男, 1999 年毕业于郑州工业大学水环学院道桥专业, 现为博士研究生, 主要从事深埋长隧道围岩变形方面的研究工作。
E-mail: wxrui203@163.com

could guarantee the system stability and the whole optimization. From this point, it can enable the whole system to be a self-adaptive robustness system that can perfect itself with changing conditions. This method has been applied to the engineering of Yunling tunnel; the prediction of the uncertain system predication in the complex geological conditions could be realized. Some problems in the traditional methods have been solved with this method in intelligent calculation for tunnels. The research results show that the adaptive immune algorithm of the Pearl curve has superiority and effectiveness for intellectuality prediction of tunnel engineering.

Key words: tunneling engineering; adaptive immune algorithm; Pearl curve; surrounding rock mass convergence

1 引 言

山区隧道多以高地应力场、千枚岩、膨胀岩、断层及其破碎带、破碎岩体、地下水富集带和高地温等复杂地质条件为基本特征,使得山区越岭隧道工程出现许多特殊的工程地质问题,如塌方、冒顶、涌水突水甚至地下泥石流、岩爆及隧道大变形等。在以喷射混凝土、锚杆支护和现场量测为三大要素的新奥法(NATM)施工过程中,核心之一就是现场量测,根据量测结果的解释和反馈,及时调整支护措施来控制围岩变形。但由于围岩压力要受到岩石节理、破碎带、岩石的流变性及地下水渗入等多方面的影响,新奥法在使用过程中也遇到了复杂的理论问题,例如建模和模型的不确定性使得在智能计算研究中,分布环境下的自治多艾真体在执行过程中也具有不确定性,这就直接造成了分布控制方式也是不确定的。在离散型多艾真体系统的鲁棒性研究中,以生物系统机制启发的各种计算,已经成为近几十年来隧道工程智能化的研究热点,目前对隧道工程的智能研究中,基本以模糊分类方法、遗传算法和人工神经网络模型为主^[1]。

免疫系统作为生物体内一种强大复杂的防卫体系,近几年来也越来越引起生物计算研究者的兴趣,涌现出许多新型的基于自然免疫系统的人工智能方法^[2]。

隧道施工过程的围岩应力重分布过程有着极其复杂的影响因素,而免疫系统具有较强的自适应性和处理各种扰动及不确定性问题的优越性,所以作者尝试将人工免疫系统应用于实际工程,结合工程实例,运用皮尔曲线提取趋势线,进行隧道围岩的智能预测,从而提出了适用于隧道工程智能预测的皮尔 - 自适应免疫算法。

2 免疫系统简介

作为一个复杂的智能信息处理系统和并行的分布自适应系统,生物免疫系统能够识别自己和非己,能够通过学习和记忆解决识别、优化和分类问题^[3]。免疫系统能识别体内所有的细胞,并将其分类为自己和非己,能识别侵入机体的任何抗原,并快速反应,消灭抗原^[4]。它把要解决的问题和约束条件当作抗原,把问题的解当作抗体,通过免疫操作使抗体在解空间不断搜索进化,按照亲合度对抗体与抗原之间的匹配程度以及抗体之间的相似程度进行评价,直至产生最优解^[5]。免疫算法在解决大空间、非线性、全局寻优等复杂问题时具有独特优越性,已经应用于优化计算、系统工程和计算机安全等多个工程领域,是继人工神经网络系统和遗传算法之后的又一研究热点^[6]。20世纪90年代初,用之于科学和工程实践中的人工免疫模型和算法得到了发展,其中较成功的实例有:日本学者Ishida在1990年利用免疫系统解决传感器网络故障问题;美国学者Forres于1994年将免疫系统的反向选择原理用于计算机安全和病毒检测等;1997和1998年IEEE Systems, Man and Cybernetics国际会议组织了人工免疫系统专题讨论,自此以后,人工免疫系统得到科学工作者广泛的认同和关注,计算机科学家、电子工程师、数学家等研究人员分别从不同角度对人工免疫系统进行研究^[7]。

近年来发展并用于实践的免疫模型和算法主要包括独特型免疫网络模型、互联耦合免疫网络模型、反向选择算法、克隆选择算法、免疫遗传算法等。这些模型和算法被应用于机器人、自动控制、计算机安全、异常检测、模式识别、机器学习、优化计算、数据挖掘以及车间调度等众多领域,但人工免疫系统用于土木工程领域的尚未多见^[8~11]。

本文提出的基于皮尔模型的自适应免疫算法能

够以其抗体库的多样性确保个体的多样性，改善早熟现象，有效地消除不同的入侵抗原；能够以抗体的分类和响应中的容错性包容小错误的发生；能以分布规律性和动态稳定性保证系统的稳定，避免进化算法中容易陷入局部极值的缺陷；而系统的自适应鲁棒性使之成为能随环境改变而不断完善的一个自适应鲁棒进化系统。通过实际应用隧道工程智能计算中表现出较强的优越性。

3 基于皮尔曲线的自适应免疫算法

简单的免疫算法存在 2 个严重的缺陷：(1) 搜索容易陷入局部最优平衡状态；(2) 由于抗原的隐蔽，容易导致局部抗原被解决后的后期搜索停滞不前。简单免疫算法的最终搜索结果往往会出现局部最优解而不是全局最优解^[12, 13]。为了改进免疫算法中过早收敛等缺陷，提出了适用于隧道工程的皮尔-自适应免疫算法。

在简单免疫算法中，交叉概率 p_c 和变异概率 p_m 是决定免疫算法性能的最主要因素。但交叉概率和变异概率的选取却容易导致矛盾的产生，概率过大，优良基因块很容易被破坏，甚至成了纯粹的随机搜索；概率过小，则不利于产生新个体，搜索速度缓慢，以至于停滞不前。为了采用适合于问题的最佳参数，本文提出适用于隧道工程智能预测的基于皮尔曲线的自适应免疫算法(adaptive immune algorithm, AIA)。以皮尔曲线较准确地描述隧道围岩收敛趋势，而趋势项的偏移量仍然为一个复杂的非线性序列，采用免疫系统的方法建模外推，在免疫系统中自动调整参数，当种群个体亲和度趋于一致或陷入局部最优时，提高交叉概率和变异概率等参数，以跳出局部最优；当群体多样性保持得较好时，则降低交叉概率和变异概率等参数，有利于优良个体的保存。而且，对于亲和度高于群体平均亲和度的个体，采用较低的交叉概率和变异概率等参数，使其以更大概率延续到下一代；对于亲和度低于群体平均亲和度的个体，采用较大的交叉概率和变异概率等参数，使它们被淘汰掉。

3.1 皮尔曲线趋势建模

本文采用等时距皮尔预估模型参数的求解，求解皮尔模型参数时要求：(1) 沉降时间序列中的数据项数 n 是 3 的倍数，则计算时可以将时间序列顺序分为 3 段，每段含 $m/3=r$ 项；(2) 自变量 t 的时间间隔相等或时间长短相等、前后连续，即为等间

隔时间序列。

皮尔曲线预估模型的数学表达式^[14]为

$$y(t) = \frac{L}{1 + ae^{-bt}} \tag{1}$$

式中： b ， L ， a 为模型的 3 个待定参数，且有

$$b = \frac{\ln \frac{s_1 - s_2}{s_2 - s_3}}{r} \tag{2}$$

$$L = \frac{r}{s_1 - \frac{(s_1 - s_2)^2}{(s_1 - s_2) - (s_2 - s_3)}} \tag{3}$$

$$a = \frac{(s_1 - s_2)^2(1 - e^{-b})L}{[(s_1 - s_2) - (s_2 - s_3)]e^{-b}(1 - e^{-rb})} \tag{4}$$

式中： r 为利用 3 次样条插值法来实现非等时距沉降时间序列等时距变换的时间段； s_1 ， s_2 ， s_3 为这 3 个段内各项数值的倒数之和，且有

$$s_1 = \sum_{t=1}^r \frac{1}{y(t)} = \frac{r}{L} + \frac{a}{L} \sum_{t=1}^r e^{-bt} = \frac{r}{L} + \frac{ae^{-b}(1 - e^{-rb})}{L(1 - e^{-b})} \tag{5}$$

$$s_2 = \sum_{t=r+1}^{2r} \frac{1}{y(t)} = \frac{r}{L} + \frac{ae^{-(r+1)b}(1 - e^{-rb})}{L(1 - e^{-b})} \tag{6}$$

$$s_3 = \sum_{t=2r+1}^{3r} \frac{1}{y(t)} = \frac{r}{L} + \frac{ae^{-(2r+1)b}(1 - e^{-rb})}{L(1 - e^{-b})} \tag{7}$$

3.2 免疫计算实现过程

3.2.1 编码

在识别抗原(问题)的基础上，对问题及其解的特性进行分析和了解，进行抗体编码。本文实用实体编码，不再需要与二进制进行转换，适合于精度要求较高的工程项目计算。

3.2.2 种群繁殖

产生群体解。首先以隧道现场原始监测数据为解空间，从中随机产生 n 个抗体，以规范限定数据范围为记忆库，提取 m 个抗体(满足种群数 $N = m + n$)构成初始抗体群体，其中 m 为记忆库中抗体的数量；然后对原有抗体群体进行交叉、变异操作得到新群体以及从记忆库中取出记忆的抗体，从中按比例选择出优良群体，对优良群体中的个体进行自适应扩展操作，得到新一代群体。

在该算法中，为了防止种群在基本遗传算子的操作后发生退化而设置了按“远亲指针”设置免疫算子，对于改进算法性能起着尤为重要的作用，具体操作为设算法进行到第 t 代种群， $p_{(t)} = \{x_i\}$ ，若某个体被重复选中进入 $t+1$ 代，记录其在 $t+1$ 代的个体序号，设置“远亲指针”。首先保证它们即使都

被选中进行交叉, 也要位于交叉的同一侧, 即这一个体不会相互交叉, 而是与不同基因的个体进行交叉。随后令其以较高的概率被选中进行接种疫苗与免疫选择。

3.2.3 接种疫苗与免疫选择

免疫算子就是由接种疫苗和免疫选择 2 个部分操作构成的, 疫苗指的是依据人们对待求问题所具备的或多或少的先验知识, 从中提取出的一种基本的特征信息, 在实际计算中, 通常为最佳个体中的某几位基因; 而抗体是指根据这种特征信息而得出的一类解。前者可以看作是对待求的最佳个体所能匹配模式(schema)的一种估计; 后者则是对这种模式进行匹配而形成的样本。疫苗的正确选择对算法的运行效率具有十分重要的意义。它如同通用遗传算法中的编码一样, 是免疫操作得以有效发挥作用的基础与保障。

免疫选择作用下, 若疫苗使抗体适应度得到提高, 且高于当前群体的平均适应度, 则疫苗所对应的模式将在群体中呈指数级扩散; 否则, 它将被遏制或呈指数级衰减。免疫选择在加强接种疫苗的积极作用, 消除其负面影响方面具有鲁棒性。参考遗传算法中有关模式定理的证明可以验证上述定理的正确性。

影响隧道围岩变形的因素及其参数比较复杂多变, 现以公路隧道设计规范中根据不同围岩类别规定的允许相对位移值为选取疫苗。接种疫苗的过程为在种群中以一定概率随机抽取 $m(m \leq n)$ 个个体, 比较其与最佳个体的特定某几位基因, 当与最佳个体不同时, 则将被覆盖, 使所得新个体以较大的概率具有更高的适应度, 这称为接种疫苗。

设算法进行到第 t 代种群, $p_{(t)} = \{x_i\}$, 随机抽取 $m(m \leq n)$ 个个体(包括“远亲指针”标志的个体)进行接种。检测上一步接种了疫苗的个体, 若其适应度不如父代, 说明在交叉变异过程中出现退化, 则该个体将被其父代个体取代; 若适应度优于父代, 则将其保留在新一代种群中。

3.2.4 自适应策略

自适应策略能够使 p_c, p_m 随适应度自动改变。当种群中个体适应度趋于一致或趋于局部最优时, 可使 p_c, p_m 增加, 而当适应度比较分散时, 则令 p_c, p_m 减少。同时对于适应值高于群体平均适应值的个体, 给予较低的 p_c, p_m , 使它得以保护进入下一代, 而低于平均适应值的个体, 就给予较高的 p_c, p_m , 使之被淘汰。因此, 自适应策略可以提供相对于某个解的最佳 p_c, p_m ^[15]。

p_c, p_m 按下式进行自适应调整:

$$p_c = \begin{cases} \frac{k_1(f_{\max} - \dot{f})}{f_{\max} - \bar{f}} & (f \geq \bar{f}) \\ k_2 & (f < \bar{f}) \end{cases} \quad (8)$$

$$p_m = \begin{cases} \frac{k_3(f_{\max} - \dot{f})}{f_{\max} - \bar{f}} & (f \geq \bar{f}) \\ k_4 & (f < \bar{f}) \end{cases} \quad (9)$$

式中: f_{\max} 为群体中的最大适应度值; \bar{f} 为每代群体的平均适应度值; \dot{f} 为进行交叉的 2 个个体中较大的适应度值; k_1, k_2, k_3, k_4 均为取(0, 1)区间的待定值。

3.2.5 AIGA 的运行机制及流程

该算法免疫算子可以防止种群中个体在交叉、变异中出现退化, 自适应策略则在保持种群多样性的同时保证了算法的收敛性。自适应免疫算法的流程如图 1 所示。

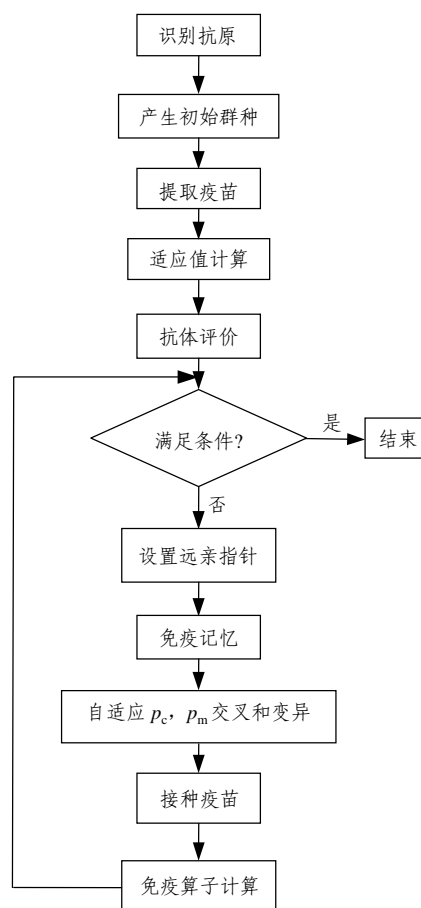


图 1 自适应免疫算法的流程

Fig.1 Flowchart of adaptive immune algorithm

4 工程实例

云岭隧道位于湖北省十漫高速公路郧西县上津

镇丁家湾村境内，为一座上、下分离的四车道高速公路长大隧道。左线处于 ZK104+760~ZK106+940 段，全长约 2 180 m，右线处于 YK104+755~YK106+940 段，长 2 185 m。隧道地处两郟断裂带，地质条件复杂，存在大量的软弱岩层和断裂破碎带，受地形、构造应力的影响，导致人工开挖后常常出现滑坡、坍塌、大变形等问题，给隧道正常施工带来极大困难，使得隧道进口施工从 2005 年 3~8 月中旬期间，左洞仅进尺 27 m，右洞仅进尺 51 m。其原因是围岩很差，为强风化的炭质千枚岩，遇水软化。大变形又影响到滑坡体产生滑移趋势。图 2 为云岭隧道进口左洞 ZK104+783 处初期支护大变形情况。



图 2 ZK104+783 初期支护大变形图

Fig.2 Larger distortion in early days of support for section ZK104+783

隧道自开工以来，按照新奥法要求进行施工监测，并对围岩收敛资料进行分析，已取得了大量的现场实测资料，取 ZK104+785 为观测点，记录开挖后前两周的围岩收敛观测资料，对观测数据进行等时间序列的转换，然后对数据进行皮尔曲线趋势建模，其模式为

$$y(t) = \frac{10.5061}{1 - 0.011e^{-0.1455t}} \quad (10)$$

通过趋势线和实测线，可以得到趋势值的偏离量(见图 3、表 1)。确定初始种群量 100 个，以皮尔模型为目标函数，以外推偏移量作为亲和度函数，采用如下公式：

$$(A_g)_k = \frac{1}{1 + t_k} \quad (11)$$

式中：(A_g)_k 为抗原 t_k 和抗体 k 间的亲和力。按照自适应免疫算法的实现过程进行 MATLAB 编程计算，预测围岩后期收敛过程，如表 2 所示。

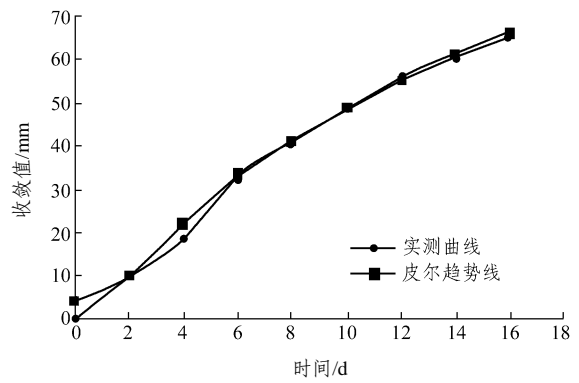


图 3 皮尔趋势线和实测曲线比较图

Fig.3 Comparison of the Pearl curve and practiced measured values

表 1 实际观测值与模型样本值

Table 1 Values of the measured and those from model samples

时间 /年月日	观测值 /m	累计收敛值 /mm	趋势值 /m	实际偏离量 /mm
20050930	10.603 52	0.00	10.607 43	-3.91
20051002	10.593 84	9.68	10.593 55	0.29
20051004	10.585 28	18.24	10.581 61	3.67
20051006	10.570 41	33.04	10.571 33	0.92
20051008	10.562 94	40.58	10.562 52	0.42
20051010	10.555 36	48.16	10.554 86	-0.50
20051012	10.547 12	56.40	10.548 28	-1.16
20051014	10.542 88	60.46	10.537 52	0.35
20051016	10.538 33	65.19	10.537 52	0.81

表 2 实际观测值与模型预测值比较

Table 2 Comparison of measured values and model prediction values

时间 /年月日	观测值 /m	累计收敛值 /mm	趋势值 /m	实际偏离量 /mm	免疫计算外推偏离量 /mm	预测值 /m	预测误差 /mm
20051018	10.534 27	69.21	10.533 35	0.92	0.33	10.533 68	0.59
20051020	10.530 64	72.84	10.529 67	0.97	0.48	10.530 15	0.52
20051022	10.526 76	76.72	10.526 42	0.34	0.13	10.536 55	0.21
20051024	10.523 32	79.79	10.523 71	-0.39	-0.26	10.536 55	0.17
20051026	10.520 25	82.86	10.521 39	-1.14	-1.21	10.523 15	0.07
20051028	10.517 39	85.72	10.519 23	-1.84	-1.52	10.520 18	-0.32
20051030	10.515 11	88.00	10.517 53	-2.42	-1.87	10.517 71	-0.55
20051101	10.513 63	89.48	10.515 94	-2.31	-2.37	10.515 66	-0.06
20051103	10.513 16	89.95	10.514 67	-1.51	-1.87	10.513 57	0.27

5 结 论

本文建立了基于皮尔曲线的自适应免疫系统，

并通过对该系统在云岭隧道的工程应用进行研究, 经过分析得到如下研究成果:

(1) 生物免疫系统能感知、预测非自体对自体的侵袭干扰, 并自我调整产生抗体适应连续变化的环境, 这种自适应性与模糊识别能力与隧道施工过程的围岩应力重分布的力学过程有极其相似之处, 作为一种新兴的智能计算方法, 本文就为生物免疫系统在隧道工程中的应用进行了尝试。

(2) 与传统遗传算法相比, 本算法避免了在初试群体分布不均匀时易于出现未成熟收敛, 陷入局部优化的问题。在自适应策略下, 通过基于亲和度的群体更新来实现对抗体的刺激和抑制, 从而保持抗体的多样性, 确保快速收敛于全局最优解, 在求解多参数非线性复杂模型问题时, 求解精度高。

(3) 隧道围岩收敛监测和超前预报是新奥法施工中的关键, 由于围岩破坏是一个非常复杂的非线性动态演化过程, 其识别和预报也是一项复杂的系统工程, 是目前隧道施工中急需得到更好解决方案的难题, 本文通过皮尔模型提取趋势, 以具有自适应策略的自适应免疫算法得到较为精确的围岩收敛值, 显示了免疫算法在隧道工程智能计算中的优势。

(4) 人工免疫算法作为智能计算研究中的一个新的重要研究领域只是刚刚开始, 目前多数研究还处在探索阶段, 现有的算法没有统一的标准, 而且开放性的问题不断涌现。随着人类对免疫系统的深入研究, 人工免疫算法将在理论和实践上有待取得新的突破和广泛应用。

参考文献(Reference):

- [1] 冯夏庭. 智能岩石力学(3)——智能岩石工程[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(4): 475 - 479.(FENG Xiating. Intelligent rock mechanics(3)—intelligent rock engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(4): 475 - 479.(in Chinese))
- [2] CASTRO L N, TIMMIS J. Artificial immune system: a new computational intelligence approach[M]. [S. l.]: Springer-Verlag, 2002.
- [3] 王登刚, 刘迎曦, 李守巨. 岩土工程位移反分析的遗传算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增): 979 - 982.(WANG Denggang, LIU Yingxi, LI Shouju. Genetic algorithms for inverse analysis of displacements in geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(Supp.): 979 - 982.(in Chinese))
- [4] 谈英姿, 沈炯, 肖隽, 等. 人工免疫工程综述[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2002, 32(14): 676 - 682.(TAN Yingzi, SHEN Jiong, XIAO Juan, et al. Overview of artificial immune engineering[J]. Journal of Southeast University(Natural Science), 2002, 32(14): 676 - 682.(in Chinese))
- [5] 莫宏伟. 人工免疫系统原理与应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002.(MO Hongwei. Principles and applications of artificial immune system[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2002.(in Chinese))
- [6] 高玮, 冯夏庭, 郑颖人. 地下工程围岩参数反演的仿生算法及其工程应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增2): 2 521 - 2 526.(GAO Wei, FENG Xiating, ZHENG Yingren. Bionics algorithm for parameter inversion in underground engineering and engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(Supp.2): 2 521 - 2 526.(in Chinese))
- [7] 苏彩红, 朱学锋, 毛宗源. 一种免疫优化算法及其应用[J]. 西南交通大学学报, 2002, 37(6): 677 - 680.(SU Caihong, ZHU Xuefeng, MAO Zongyuan. An immune optimal algorithm and its application[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2002, 37(6): 677 - 680.(in Chinese))
- [8] DE CASTRO L N, VON ZUBEN F J. The clonal selection algorithm with engineering applications[R]. Las Vegas: Workshop on Artificial Immune Systems, 2000.
- [9] LISANTOSO D, KHOO L P, JIANG P Y. An immune algorithm approach to the scheduling of a flexible PCB flow shop[J]. Int. J. Advanced Manufacturing Technology, 2003, 22(6): 819 - 827.
- [10] LIN C H, CHEN C S, WU C J, et al. Application of IA to optimal switching operation for distributed ion-loss mini and loading balance[J]. IEEE Proc-Gener. Transm. Distrib., 2003, 150(2): 183 - 189.
- [11] CHUEH C H. An immune algorithm for engineering optimization[Ph. D. Thesis][D]. Taipei: Tatung University, 2004.
- [12] 葛红, 毛宗源. 免疫算法的改进[J]. 计算机工程与应用, 2002, 38(14): 47 - 49.(GE Hong, MAO Zongyuan. Improvement for immune algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2002, 38(14): 47 - 49.(in Chinese))
- [13] 焦李成, 杜海峰. 人工免疫系统进展与展望[J]. 电子学报, 2003, 31(10): 1 540 - 1 548.(JIAO Licheng, DU Haifeng. Development and prospect of the artificial immune system[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(10): 1 540 - 1 548.(in Chinese))
- [14] 叶宗裕. 皮尔曲线模型的推广及其应用[J]. 数学的实践与认识, 2004, 34(11): 72 - 75.(YE Zongyu. The popularization of the Pearl curve model and their application[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2004, 34(11): 72 - 75.(in Chinese))
- [15] SCINIVIVASM, PATNAIK L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms[J]. IEEE Trams SMC, 1994, 24(4): 656 - 666.