第 34 卷第 1 期 通 信 学 报 Vol.34 No. 1
2013 年 1 月 Journal on Communications January 2013
doi:10.3969/j.issn.1000-436x.2013.01.018

否定选择算法综述

金章赞[1]，廖明宏[2]，肖刚[3]
(1. 厦门大学 信息科学与技术学院，福建 厦门 361005；
2. 厦门大学 软件学院，福建 厦门 361005；3. 浙江工业大学 计算机科学与技术学院，浙江 杭州 310014)

摘 要：对否定选择算法进行了综述，首先回顾了否定选择算法的产生与发展；接着按照不同技术标准对其进行分类，并列举否定选择算法的实际应用情况；最后讨论了该算法所存在的问题以及未来的发展方向。

关键词：否定选择算法；人工免疫系统；匹配规则；检测器生成；异常检测
中图分类号：TP301 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-436X(2013)01-0159-12

Survey of negative selection algorithms

JIN Zhang-zan[1], LIAO Ming-hong[2], XIAO Gang[3]
(1. School of Information Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China;
2. Software School, Xiamen University, Xiamen 361005, China;
3. College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: A review of NS was given. Firstly, the basic principle of negative selection algorithm and its history were introduced. Secondly, various negative selection algorithms were grouped into different categories by different criteria and the application of NS was described. Besides, some open problems in the development of NS algorithms were presented and analyzed. Finally, a discussion of future trends was conclued.

Key words: negative selection algorithms; artificial immune system; matching rule; detector generation; anomaly detection

1 引言

生物免疫系统是一个高度复杂、自组织自适应的并行分布式系统，能够区分自体与非自体，抵御外界病菌的入侵与感染，维持机体自身生理活动的稳定与平衡。受生物免疫系统启发，研究人员将生物免疫系统相关优秀特性应用于解决各类实际问题中，并由此形成了人工免疫系统(AIS, artificial immune system)。近年来，由于其强大的信息处理能力，人工免疫系统得到了长足发展，成为人工智能中继神经网络、进化算法之后的又一个研究热点。

目前，主要的人工免疫方法包括：否定选择算法(NSA, negative selection algorithms)、克隆选择算法、免疫网络模型[1,2]。其中作为核心的否定选择算法（又称阴性选择）由于其独有特性已经发展成为人工免疫学的主要方法，对整个系统具有重要意义。此外，由于无需先验知识，只需利用有限数量的正常样本便能检测出无限的异常数据，使得 NS 算法逐渐成为入侵检测、故障诊断、计算机安全等研究领域最受欢迎的工具之一，并已被广泛应用。

自从 NS 算法提出以来，众多科研单位对其进行了研究，如新墨西哥大学、孟菲斯大学、西安电子科技大学以及中国科学技术大学等，这些科研机构研究了一系列新的算法，并发表了大量论文，然而关于否定选择算法的综述性论文较少。近年来只有 ZHOU J 对否定选择算法进行了综述[2]，按照不

收稿日期：2011-08-30；修回日期：2012-12-20
基金项目：国家自然科学基金资助项目（61272310）；福建省自然科学基金资助项目（2010J01342）；中央高校基本科研业务费基金资助项目
Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61272310); The Natural Science Foundation of Fujian Province (2010J01342); The Fundamental Research Funds for the Central Universities

同技术点对否定选择算法进行了分类，但其分类较为简单，且未介绍国内的相关研究情况。

鉴于当前否定选择算法的不断发展和深入，有必要对该领域在国内外的工作及进展情况做详细的回顾和分析。

2 否定选择算法的产生与发展

受否定选择原理的启发，FORREST S 最初于 1994 年提出了否定选择算法[3,4]。该算法步骤如下：1)在一个有限字符表上，将需要保护与监测的自体集数据定义成由长为 L 的字符串所组成的多重集 S；2)产生检测器集合 R，其中检测器为一串串不与受保护数据 S 匹配的字符串；3)将 R 中的检测器与 S 进行比较来监测 S 的改变。如果 S 中的字符串与检测器发生匹配，则表示 S 发生了异常变化，其中步骤 2)、3)如图 1 和图 2 所示。

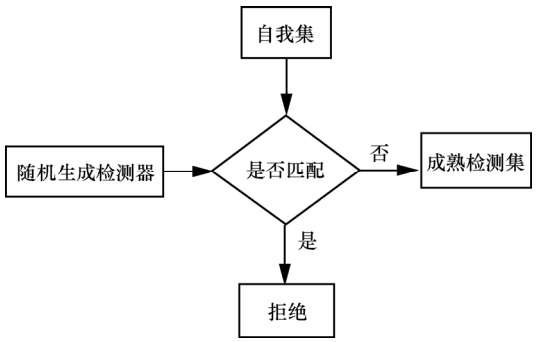


图 1 生成成熟检测器

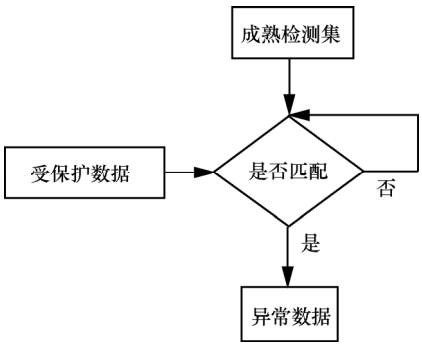


图 2 监测受保护的数据

该算法模仿否定选择过程，随机产生检测器，通过删除那些检测到自体的检测器，从而保留那些能检测任何非自体的检测器。其优点是无需先验知识，只需利用有限数量的自体便能检测出无限数量的非自体[5,6]。

自其提出以来，由于其独有特性，近年来 NS 算法在国内外得到了迅速发展，衍生出多种变种，并逐渐形成了 NS 算法簇。其技术要点主要包括：数据和检测器表示、匹配规则、检测器生产机制以及存储结构等。

3 否定选择算法的关键技术

3.1 数据表示

数据表示是 NS 算法簇的一个显著差异，它对匹配规则、检测器生成有着重要影响。其涉及数字数据、分类数据、布尔数据、文本数据等 4 种数据类型[2]，表示方式大致可分为字符串、实值向量以及矩阵表示。

3.2 检测器表示

检测器有不同的表示方式，在论域空间中呈现不同的形状，其类型如表 1 所示。

表 1 检测器表示类型

表示方式	检测器模型类型	文献
字符串表示	字符串模型	[3,7,8,9]
实值向量表示	超方体模型	[10~13]
	超球体模型	[5,14~18]
	超椭球体模型	[19,20]
	多形状模型	[21]
矩阵表示	矩阵模型	[22]

3.2.1 字符串表示

字符串是检测器最早最普遍的表示方法，其表示方法主要是将检测器定义为字母表 m 上长度为 l 的字符串[3,7,8,9]。

3.2.2 实值向量表示

字符串表示具有一定的局限性，难以充分表述论域空间，而采用实值向量表述，不但接近原始问题空间，并可使用计算几何的相关特性来加速算法。

1) 超球体模型

GONZALEZ F 等人[14,15]将检测器定义成中心为 n 维实数向量、半径固定的超球体。随后，ZHOU J、DASGUPTA D 等人[5,17,18]对该模型进行了扩展，提出了半径可变的超球体模型，减少了检测器数量。

2) 超椭球体模型

由于球体是椭球体的特殊形式，故 JOSEPH M[19,20]在超球体模型基础上提出了更具普遍性的超椭球体模型，该模型不但保留了超球体模型的优点，而且通过伸展和调整检测器大小，使得检测器更加灵活多变。

3) 超方体模型

针对论域空间中非自体往往具有多种特征属性，研究人员[10~13,23]提出了特征向量型检测器，其每一特征包含上、下界 2 个属性，在几何上表现为超方体。

4) 多形状模型

Balachandran S 等人[21]进一步将上述检测器模型进行综合，提出了多形状检测器模型，该模型包括超方体、超球体、超椭球体等检测器，实验结果显示其所需的检测器数量少于基于单一检测器模型的表示方式。

3.2.3 矩阵表示

张雄美[22]、YI Z X[24]等人认为无论自体还是非自体常常具有多重样本特征，而单个实数向量只能表示部分特征信息，故将多个实数向量相结合组成矩阵来描述问题空间可以更好地包含样本内在特征，进而提出了基于矩阵形式的检测器模型，其检测器表示为 $m \times n$ 矩阵。

3.3 匹配规则

匹配规则也称亲和力计算，描述抗体抗原之间的相似性，主要用于检测器生成阶段与数据检测阶段。检测器 d 与数据 x 的匹配规则如下[2]：如果 d 与 x 之间的匹配程度小于某个阈值，则 d 与 x 匹配，表示为 dMx，其中，M 表示匹配规则，这里匹配阈值代表了部分匹配的概念。按照表示方式的不同，可分为基于字符串的匹配规则与基于实数向量的匹配规则。其典型匹配规则如表 2 所示。

表 2　匹配规则类型

类型	匹配规则名称	文献
基于字符串的匹配规则	r 连续位匹配规则	[3,25]
	r-chunks 匹配规则	[8]
	海明距离及其变体	[12,26,27]
	基于概率统计的匹配规则	[26,28]
	Landscape-affinity matching	[26]
基于实值向量的匹配规则	闵可夫斯基距离	[5,18]
	隶属函数	[14]
	空间包含匹配规则	[13]
	双向匹配规则	[22]

3.3.1 基于字符串表示的匹配规则

1) r 连续位(rcb)匹配规则

r 连续位匹配规则最初由 PERCUS[25]提出。并由 FORREST S[3]将其用于 NS 算法。该规则通过比较 2 个字符串 x 和 y 在对应位上连续匹配的个数与预先设定的阈值 r 相比来判断它们的匹配程度，即任意 2 个字符串 x 和 y，如至少有连续 r 个对应符号相同则匹配。KIM J 等人[10]分析了 rcb 规则针对复杂网络入侵检测的低效性问题，指出需要采用更加复杂的匹配规则来衡量检测器与自体之间的相关程度。为此，许多学者对其进行了改进，如 HOU H Y 等人[12]提出了类似 rcb 规则的 r-contigaous-interval 匹配规则。也有学者[29]提出了结合其他规则的 rcb 混合匹配规则。

2) r-chunks 规则

2002 年, BALTHROP J 等人在基于 rcb 规则的基础上提出了 r-chunks 匹配规则[8], 该规则对起始位置进行限定, 要求 x、y 从相同位置开始的连续 r 位相同, 并将基于 r-chunks 匹配规则的检测器称为 r-chunks 检测器，r-chunks 检测器可以被看作是一个有特定指向窗口的 r 位字符串，如图 3 所示，其中，d_{fl} 为全长检测器，而 d_{c1} d_{c2} d_{c3} 为 r-chunks 检测器。

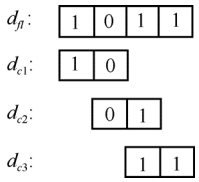


图 3　r-chunks 检测器

由于 rcb 规则包含了交叉漏洞(crossover holes)和限长漏洞(length-limit holes), 而 r-chunks 规则避免了限长漏洞，故研究人员对其进行了进一步的研究分析，给出了检测器、漏洞数量的计算公式[30~32]。然而相关研究表明[32,33]r-chunks 规则只适用于字符串长度较小的异常检测问题，并不适用于高维字符集，使得其使用范围存在局限性。

3) 海明距离(Hamming distance)

2 个字符串对应位取值不同的位数称为它们的海明距离。海明距离匹配规则[26,27]是指当 2 个字符串之间的海明距离大于某阈值 r 时即匹配。字符串 x，y 之间的匹配规则如下公式所示：

$$d = \sum_{i=1}^{L} \delta \begin{cases} \delta = 1, x_i \neq y_i \\ \delta = 0, \text{其他} \end{cases}, xMy = d \geq r \qquad (1)$$

4) 海明距离变体

a) 海明扩展规则

海明距离是测量字符串距离最普遍的方法之一，为了更合理地应用于具体领域，学者们对其进行改进，提出了一些扩展规则[26]，其中相应参数定义如下：$X, Y \in \{0,1\}^N$

$$a=\sum_{i=1}^{N}\varsigma_i,\varsigma_i=\begin{cases}1,X_i=Y_i=1_i\\0,\text{其他}\end{cases}$$

$$b=\sum_{i=1}^{N}\xi_i,\xi_i=\begin{cases}1,X_i=1,Y_i=0\\0,\text{其他}\end{cases}$$

$$c=\sum_{i=1}^{N}\gamma_i,\gamma_i=\begin{cases}1,X_i=0,Y_i=1\\0,\text{其他}\end{cases}$$

$$d=\sum_{i=1}^{N}\psi_i,\psi_i=\begin{cases}1,X_i=Y_i=0\\0,\text{其他}\end{cases}$$

根据以上参数，便产生以下扩展规则：

Russel and rao:$f=\dfrac{a}{a+b+c+d}$

Jaccard and Needham:$f=\dfrac{a}{a+b+c}$

Kulzinski:$f=\dfrac{a}{b+c+1}$

Sokal and Michener:$f=\dfrac{a+d}{a+b+c+d}$

Rogers and Tanimoto:$f=\dfrac{a+d}{a+d+2(b+c)}$

Yule:$f=\dfrac{ad-bc}{ad+bc}$ (2)

b) R&T 距离

该规则由 ROGERS 和 TANIMOTO 提出, 给定字符串 x，y 之间的 R&T 匹配规则[27]为

$$yMx=\frac{\sum_i\overline{x_i\oplus y_i}}{\sum_i\overline{x_i\oplus y_i}+2\sum_i x_i\oplus y_i}\geq r \quad (3)$$

其中，$\oplus$ 为异或操作，r 为匹配阈值，相关实验表明该规则具有较好的信噪比。

c) Any-*r*-intertals

针对具有多个特征属性的检测器与自体, HOU H Y 等人[12]提出了类似于海明距离的 Any-*r*-intertalsl 匹配规则，其中自体与检测器由特征值与特征域组成。如果自体至少有 r 个特征落入相应检测器的 r 个特征域，则认为它们匹配。

5) 基于概率统计的匹配规则

a) 相关系数(correlation coefficient)

相关系数是衡量 2 个变量线性相关密切程度的指标，其定义如下[26]：

$$\rho=\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(x_i-\bar{x})^2\sum_{i=1}^{N}(y_i-\bar{y})^2}} \quad (4)$$

其中，$x,y\in\{0,\cdots,255\}^N,N=\dfrac{l}{8}$。

b) 核估计(kernel estimated)

STIBOR T 通过核估计[28]建立自体集概率分布规律，将那些服从该规律的个体定义为自体，由于采用了相关数学机制，克服了传统基于免疫机制匹配规则的不足。其中，核估计、自体集概率分布公式如下所示

$$K_h(x\mid y)=\begin{cases}h^{l-d(x,y)}((1-h)^{d(x,y)}),\dfrac{1}{2}\leq h<1\\\begin{cases}1(x=y)\\0(x\neq Y)\end{cases},h=1\end{cases}$$

$$\hat{P}(X\mid S)=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}K_h(X\mid X_i) \quad (5)$$

6) Landscape-affinity matching

在人工免疫系统中还有一些扩展的匹配方法，都是对抗原、抗体绑定过程的高度抽象，如 Difference Matching、Slope Matching 和 Physical Matching[26]。这些规则首先将检测器与输入字符串转换成正整数, 然后通过一个滑动窗口, 采用差别、坡度、物理等距离公式计算亲和力值，当该值大于给定阈值时则认为匹配。输入的字符串与检测器采用如下序列形式：$X,Y\in\{0,\cdots,255\}^N$。

a) Difference Matching：

$$f_{\text{difference}}=\sum_{i=1}^{N}\left|(X_i-Y_i)\right| \quad (6)$$

b) Slope Matching：

$$f_{\text{slpoe}}=\sum_{i=1}^{N-1}|(X_{i+1}-X_i)-(Y_{i+1}-Y_i)| \quad (7)$$

c) Physical Matching：

$$f_{\text{physical}}=\sum_{i=1}^{N}(X_i-Y_i)+3|\mu|,\mu=\min(\forall_i,(X_i-Y_i)) \quad (8)$$

3.3.2 基于实值向量的匹配规则

虽然基于字符串的匹配规则可以通过增加参数 r 来改善检测器的覆盖效果，然而其并不能真实地反应实值向量之间的相关联系, 不适用于实值数据空间[27]，故研究人员提出了基于实值向量表示的匹配规则。

1) 闵可夫斯基距离(Minkowsky distance)

闵可夫斯基距离是曼哈顿、欧几里德等距离公式的概括性表述，是实数向量之间最常用的距离公式。字符串 x，y 之间的闵可夫斯基距离为[18]

$$D(x,y)=(\sum|x_i-y_i|^{\lambda})^{\frac{1}{\lambda}} \tag{9}$$

当 $\lambda=1$ 时，即为曼哈顿距离，当 $\lambda=2$ 时即为欧几里德距离[5]。

2) 隶属函数(membership function)

GONZALEZ F 等人[14]将匹配规则表达为检测器 d 与自体 x 之间的隶属函数：

$$\mu_d(x)=\mathrm{e}^{-\frac{\|d-x\|^2}{2r^2}} \tag{10}$$

3) 空间包含匹配规则

蔡淘等人将检测器是否包含抗愿作为其匹配标准，提出了基于空间包含的匹配规则[13]。由于仅需要统计检测器和抗原在各轴上投影存在重叠的次数即可判断两者是否匹配，减少了选择检测器和检查抗原的时间与空间开销。

4) 双向批判规则

张雄美等人认为现有匹配规则中检测器生成与监测采用同一半径，限制了对自体和非自体空间的分辨能力，故将匹配规则从单一宽展到双向，提出了双向匹配规则[22]。该规则先用自体集半径生成检测器，再根据每个检测器和自体集之间的距离范围来检测非自体。其检测非自体时利用检测器内在的距离特征，将自体集空间限制于环形区域之内，增大了对非自体空间的覆盖，因而通过少量检测器就可以较好地划分自体与非自体。其匹配规则如图 4 所示。

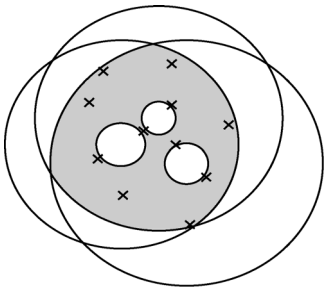


图 4　双向匹配规则

3.4　检测器生成机制(detector generation mechanism)

检测器生成机制是 NS 算法的核心技术，如何在短时间内生成少量优质的检测器也就成为 NS 算法成功的关键。按其表示方式的不同，可分为基于字符串的生成机制和基于实值向量的生成机制。下面介绍其中较为典型的生成算法。

3.4.1　基于字符串表示的检测器生成机制

1) 穷举法(exhaustive)

最初的 NS 算法采用穷举法生成检测器[3]，穷举法随机产生候选检测器，并将其与自体集匹配，若不匹配，则将其保留，否则丢弃，重复这个过程，直至生成规定数目的检测器集合。该方法适用于任意匹配规则，然而由于其时间复杂度与自体集成指数关系增长[7]，导致其时间开销过大。

2) 线性(linear)法、贪婪(greedy)法

为降低检测器生成时间，D'haeseleer 等人提出了线性法与贪婪法[7]。线性法在匹配长度 l 和连续位长度 r 一定的情况下，使得其时间复杂度与自体和检测器集合的大小成线性关系。而贪婪法消除了一些冗余检测器，并使检测器尽量覆盖非自体区域。2 种算法在一定程度上减少了时间开销，然而它们只适用于 rcb 匹配规则，缺乏通用性。

3) 模板(template)法

2000 年，Wierzchon 提出了基于 rcb 规则的二进制模板检测器生成算法[9,34,35]。首先提出了用于构建检测器的模板串，接着对模板串构造二叉树，从而求出检测器集合，消去了冗余检测器个数。随后，国内学者罗文坚等人也提出了类似算法[36]。

4) 进化法(ENS)

不少学者将进化思想运用于检测器生成过程，通过进化机制生成更加优秀的检测器。如 Timmis 在穷举法的基础上提出了结合变异的 NSMutation 算法[37]，该算法随机产生候选检测器集合，并将其与自体集匹配，若匹配，则对其进行有导向性的变异，使之远离自体。其优点是参数可调、消除多余检测器并且适用于任意匹配规则。同时，程永新等人采用对自体集高频变异、非自体集低频变异来生成初始检测器[38]，通过高频变异，产生大量新型数据，用于识别未知异常，通过低频变异，保留原有检测器的特征，用于识别出已知异常的变异体。杨宁等人[39]引入“小生境”策略，提高算法的全局搜索能力，增强了检测器的多样性。此后，罗文坚等人对 ENS 算法的收敛性[40]和平均时间复杂度[41]进行综合分析，结果显示，变异算子和自我集形状对 ENS 的收敛性具有显著影响，并总结其时间复杂度与自体集的规模密切相关。

5) 否定数据库

2004 年，ESPONDA F 等人提出了一种高效的信息表示方法：否定数据库(NDB, negative database)[42]，主要存储那些用于异常检测、表示否定信息的检测器，如图 5 所示。并提出了 2 种 NDB 生

成算法：prefix 算法与 Randomize_NDB 算法。接着，又提出了在线更新的 NDB 生成算法[43]。

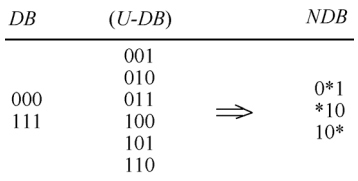


图 5 NDB 示意

6) *r* 可变法(*r*-adjustable)

为减少漏洞数量，张衡等人于 2005 年提出了一种 *r* 可变否定选择算法[44]，其核心思想是通过调整匹配阈值来降低黑洞数量，算法不仅生成检测器还包括其对应的匹配阈值，使得检测器具有不同的检测范围，大幅度地降低了漏洞数量。此后，何申[45]、王辉等人[46~48]也分别提出了相似算法，其成熟检测器检测范围较大，不仅减少了漏洞，还降低了冗余检测器数量。

7) 其他方法

近年来一些新的基于字符串表示的生成方法不断提出，如 ELBERFELD M 等[49]针对传统 NS 算法生成检测器集耗时过多的问题，提出了压缩法，该方法将检测器集进行压缩使得其生成时间从指数级降为多项式级，即采用 *r*-chunk 模式来表示 *r*-chunk 检测器，用 *r*-pattern graph 来表示 rcb 检测器，大大减少了检测器表示数量。LISKIEWICZ M 等[50]对穷举法进行了分析和改进，认为穷举法的计算开销问题本质上是一个决策问题，并由此提出了非穷举法，该方法只需生成有限数量的检测器就可以实现对数据的异常检测。

表 3 对以上检测器生成机制进行了总结分析，其中压缩法和非穷举法在多个方面表现较为突出。

表 3 典型字符串检测器生成机制分析

算法名称	匹配规则	时间开销	检测器半径	漏洞数量	检测器数量
穷举法	任意	多	不变	较多	多
线性法	rcb	较少	不变	较多	较多
贪婪法	rcb	较少	不变	较少	较少
模板法	rcb	较多	不变	较少	较多
EMS	任意	较少	不变	少	少
NDB	rcb	较少	不变	较少	较少
r 可变	rcb	较少	可变	少	少
压缩法	rcb *r*-chunks	少	不变	少	少
非穷举法	rcb *r*-chunks	少	不变	少	少

3.4.2 基于实值向量表示的检测器生成机制

由于基于字符串的否定选择算法在生成检测器集合中存在计算开销、存储开销过大的问题，一些学者相继提出了基于实值向量表示的检测器生成机制。

1) 实值否定选择算法(RNS)

2002 年，GONZALEZ F 针对二进制 NS 算法所存在的问题，提出了实值否定选择算法[14,16]，该算法采用实值表述，不但接近原始问题空间，而且使用计算几何的相关特性来加速算法。然其匹配公式不够科学，检测器移动效果且佳，并且算法中变异率是一个定值，虽然增加了抗体的多样性，但同时也可能破坏亲和度高的抗体，降低收敛速度，此外，RNS 需预先设定检测器数量且半径固定，限制了算法的扩展性。此后，GONZALEZ F 针对 RNS 算法缺少理论支撑的问题提出随机实值否定选择算法(RRNS)[15]，该算法通过门特卡罗积分估计自体体积从而计算出所需的检测器个数，并使用模拟退火优化检测器分布方式。同年 DASGUPTA D 等人提出了半径可变的 RNS 算法[18]。相比 RNS 算法，该算法的检测器移动公式更加科学且利用检测器重叠率计算公式，使得检测器能够均匀分布。此外该算法中检测器大小可变，降低了检测器数量，同时引入克隆操作，保留优秀检测器。然而该算法只保留大半径检测器，抛弃小半径检测器，导致检测器无法覆盖小漏洞，并且该算法利用检测器半径大小来评价检测器优劣，并不科学。

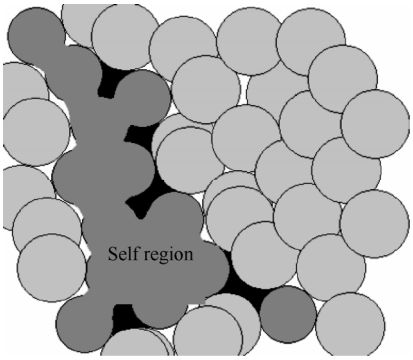
2) 肯定选择算法

2005 年，STIBOR T 等人提出了基于肯定选择原理的肯定选择(PS)算法[33]，该算法训练自体样本产生自体检测器，并利用 ROC 分析技术求出最优自体检测器半径，最后通过计算新样本与自体检测器的欧几里德距离来对样本进行分类。实验表明其在分类测试方面要优于传统 RNS 算法。随后洪征等人[51]将 PS 算法运用于蠕虫检测系统，在模型中，自体字符串充当自体检测器的角色，自体字符串集合被用于实现对自体空间的覆盖。

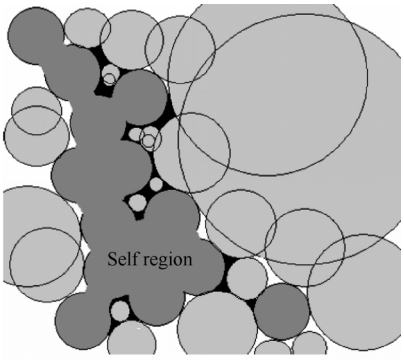
3) V-detector 算法

1996 年，HAESELEER D[6]首次提出了半径可变的检测器思想。2004 年，ZHOU J 对检测器概念进行推广，提出了 V-detector 算法[5,17]。该算法利用自体样本集，生成检测器集合，覆盖非自体区域。检测器定义为包含中心点和半径的二元组，中心点

为 n 维向量，对应非自体空间的某一点。与中心点距离小于半径的样本被认为是非自体。算法生成检测器时，随机选择中心点 x。在确定 x 为非自体的情况下，根据 x 与自体样本的最短距离 d，生成以 x 作为中心点，$d - r_s$ 为检测半径的检测器。如图 6 所示，其中，黑色区域表示漏洞，深灰色区域表示自体，浅灰色区域表示检测器。



(a)半径固定大小的检测器



(b)半径可变大小的检测器

图 6　检测器对比

由于检测器半径可变，使得大半径检测器可以覆盖大部分非自体空间，减少了检测器数量，不但使得存储空间大为降低，而且时间开销也随之减少。此外，小半径检测器能够覆盖“漏洞”，进一步减少了“漏洞”数量。同年董永贵[52]等人也提出类似算法，通过增加描述检测器覆盖半径的参数 r，来更有效地发挥检测器的覆盖作用。

基于 V-detector 算法的众多优点，自提出以来大量学者对其进行了深入研究。针对原算法期望覆盖 c_0 并没有科学反应检测器覆盖率的问题，ZHOU J 采用了区间估计、假设检验等统计方法来对检测器覆盖进行分析估计，使得检测器个数得到了较好的控制[53]。面对“边界困境”问题，ZHOU J[17,54]对其进行了详细描述，并提出 boundary-aware NSA 算法解决该问题。由于传统 V-detector 算法采用线性链表结构存储，导致检测时间较长，CHMIELEWSKI A 等人[55]提出了采用树结构的检测器存储方式，极大地降低了检测时间。此外，一些学者[56~58]对 V-detector 在处理高维数据集上所表现出的低效性问题进行了分析，认为其在高维数据集上失效的主要原因在于检测器生成机制，并分别提出了改进算法。为进一步提高检测能力，GUI M 等人[59]提出了 Procreating V-detectors 与 Multiplase Procreating V-detectors 算法，在第一阶段产生一个初始检测器集合，并在第二阶段对该集合进行“生殖”操作产生新的检测器，能有效地填充那些难以被覆盖的非自体缝隙。为降低算法时间复杂度，CHEN W 等人[60]对自体集进行分层聚类，不但减少了自体匹配个数，而且还进一步消除了检测器冗余数量。

4) 逐级法(MNS)

2005 年，潘峰等人在假设自体分布高度集中的前提下给出了逐级 NS 算法[61]，方法首先生成大尺度探测子集合，接着对大尺度探测子进行反向选择，如果通过，就保留；否则用小尺度探测子覆盖该探测子识别空间，这些小尺度探测子再次反向选择，重复上述过程，直到满足误差标准，最后生成各种尺度探测子集合。随后，胡亮等人[62]对逐级 NS 算法进行了改进，通过为每个域设置单独尺度使检测器更加灵活地覆盖非自体，解决了原算法中检测器数量过多的问题，提高了检测器生成效率和检测效率。然而逐级法较难适应自体空间动态变化的情况。

5) 自适应法(ANS)

罗文坚等人针对检测器生成算法只能针对特定匹配规则，检测器生成时间过长等问题，提出了自适应检测器生成法[63]。该算法依据实际情况不断调整检测器集合，在使用较小检测器集合就能够快速检测到大规模非我空间中的异常变化的同时，也保证算法的普适性。ZENG J Q 等人[64,65]认为论域空间是随着时间动态变化的，故针对传统 NS 算法缺乏动态适应性的问题，提出了自适应性的 NS 算法，该方法通过反馈技术调整自体、检测器半径以及数量，使其能适应动态变化的论域空间。实验表明该方法优于 V-detector 方法。

6) 进化法(ENS)

进化思想同样适用于实值空间。OSTASZEWSKI M[23]等人通过小生境遗传算法和协同进化机制生成超方体检测器，实验表明其有效性优于基于超球

体模型的检测器生成机制。杨东勇等人针对现有算法存在检测率低、匹配阈值固定、检测器集合庞大等问题,提出了基于多种群遗传的 NS 算法[66]。该方法根据特征划分自体集,对不同的自体集进行独立进化,从而保持了检测器的多样性特征，降低了检测器的冗余度。胡荣华等人针对文献[67]存在早熟收敛和成熟检测器集合非最优的问题，将拟随机序列作为搜索空间，通过克隆和变异选择操作优化检测器集，然后引入高斯变异算子，通过邻域搜索获得最优检测器集合。不但检测器集很好地覆盖非自体空间，且其数量也大幅减少[68]。

7) 切割法(CNS)

2009 年，蔡淘等人[13]针对传统 NS 算法未利用自体在论域空间分布信息的缺陷，提出了基于切割的检测器生成与匹配算法。依据自体在论域空间中的位置信息，引入切割空间的方法生成检测器，消除了冗余信息，减少了检测漏洞，降低了算法在时间和空间上的开销。

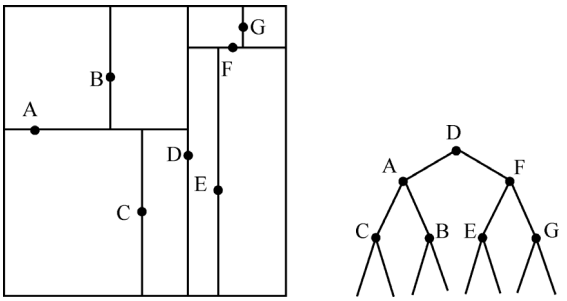
表 4 总结分析了以上几个代表性的检测器生成机制，其中，V-detector、ANS、ENS 等算法在各个方面表现较为优秀。

表 4　典型实数向量检测器生成机制分析

算法名称	匹配规则	时间开销	检测器半径	漏洞数量	检测器数量
RNS	隶属函数	较多	不变	多	多
PS	Euclidean	较多	不变	较少	较多
V-detector	Euclidean	较少	可变	较少	较少
MNS	任意	较多	可变	较少	较多
ANS	任意	较少	可变	较少	较少
ENS	Minkowsky	较少	可变	少	少
CNS	空间包含	较少	可变	较少	较少

3.5 检测器存储结构

为实现对新数据的检测，成熟检测器集合需进行有效存储，不同的存储方式其检测效率也各不相同。标准 NS 算法采用线性链表结构存储、管理检测器，每次匹配采用顺序遍历，检测效率低。同时检测器之间可能包含相同的子串，在检测时存在重复比较子串的问题，降低了检测效率。对此，CHMIELEWSKI A[55]、蔡淘等人[69]分别提出了基于树结构的检测器存储结构，消除了重复检测器，减少了检测时间，并且避免了子串反复提取以及重复比较等问题。图 7 表示检测器在空间的分布情况及其树存储结构。



(a)检测器在空间的分布情况　(b)树存储结构

图 7　检测器存储结构

4 否定选择算法的典型应用

随着 NS 算法的发展其实际应用也不断扩展。由于生物免疫系统的初次免疫相当于对病原体的异常检测，而其二次免疫则等价于对病原体的滥用检测，与入侵检测具有高度的相似性。受此启发，DASGUPTA D[4]、董永贵等人[52]分别将 NS 算法应用于时间序列数据的异常检测。DASGUPTA D[11,70]、公茂果等人[56]将 NS 算法应用到网络入侵检测领域，提出了多种网络免疫模型以及检测方法。张鹏涛等人提出了带惩罚因子的 NS 算法恶意程序检测模型[71]，实验表明其对恶意程序具有较高的识别率，泛化能力较强，通过调整惩罚因子，模型可以权衡并调整识别率和虚警率从而取得较好的检测结果。洪征等人[51]开发了基于肯定选择的蠕虫检测系统。王维等人[72]结合否定选择和代码相关性，将 NS 算法成功应用于病毒特征提取，实现了对未知病毒的高效识别。金章赞等人[73]将改进的 V-detector 算法成功的运用于水质异常检测。CHEN Li-Fei 等人[74]提出了基于马氏距离的 NS 算法，并有效地将其运用于医疗诊断和质量检测。

NS 算法的另一重要应用是故障诊断。刘树林等人[75]将改进的 NS 算法用于往复压缩机气阀故障检测，取得良好效果。陶新民等人[76]提出改进的 NS 算法，并用于轴承故障检测，证明了其可行性。DASGUPTA D[18]、岑建等人[77]将 NS 算法成功的运用于飞机故障检测。朱福根[78]、孟庆华[79]等实现了基于 NS 的汽车故障检测。

由于异常检测问题本质上是一种分类问题，故 NS 算法同样适用于分类领域。GONZALEZ F[14,16]、STIBOR T 等人[33]分别提出了结合否定选择与分类技术的异常检测方法。实验结果表明在分类测试方面要优于传统方法。IGAWA K 等人[80]实现了 NS

算法从单类别分类问题到多类别分类问题的跨越。邱江涛等人[81]将否定选择算法应用与文本分类，大幅度降低了分类错误。

近年来，NS 算法在地质工程[82]、在线监测[83]、优化[84]、信息恢复[85]、航班状态诊断[86]等多个领域得到了进一步的发展，其发展正呈现不断扩大的趋势。

5　否定选择算法的问题分析以及研究展望

5.1　问题分析

自从否定选择算法提出以来，许多学者围绕其做了大量研究，取得了一些令人振奋的成果。但是该模型还存在许多不足之处。

1) 算法模型缺乏动态性。研究表明，生物免疫系统中的抗体集是一个不断动态更新的集合，并不是一成不变的。而传统 NS 算法的自体集在第一次定义后，就几乎没有任何变化，并且，传统算法也只是利用已知的部分自体来训练检测器，有些自体还随着环境的变化而变为非自体。此外成熟检测器集也缺乏动态性，通过一次性产生检测器集显然存在着明显的不足之处，由于其长期存在并缺乏更新，导致系统对新型入侵数据无法有效检测。

2) 数据表示以及匹配规则的局限性。无论是字符串表示还是实值向量表示法；无论是基于字符串的匹配规则还是基于实值向量的匹配规则，都只能针对特定问题，存在着局限性。

3) 检测器生成机制还需改进。如何生成高效的检测器集是 NS 算法的核心。当前检测器生成算法面临的问题：检测器集生成时间较长，不利于实时应用；某些算法只针对特定匹配策略；检测器数量过大，存在大量冗余检测器，导致检测时间过长[63]。

4) 漏洞问题。在生物免疫系统中，病原体总是向漏洞方向进化，以增加免疫系统的检测难度。同样在目前的否定选择算法中或多或少都存在着漏洞，导致检测率降低。

5.2　研究展望

目前针对否定选择算法的研究正处于进一步发展阶段，存在着许多问题，本文认为现阶段的否定选择算法在解决其存在问题的基础上，应着重对以下方向进行研究。

1) 进一步研究否定选择算法的免疫机理。只有对否定选择免疫机理进行深入认识，才能为算法构造提供保障与支持，而且，新机理的发现必将有助于新算法的产生。

2) 对已有的否定选择算法的改进。在匹配规则、检测器生成机制、漏洞消除等方面，算法还可以做大量的改进。如检测器生成方面，若能将检测结果反馈给检测器产生过程，使得检测器不断地更新来产生一些更有效的检测器不失为一种更加有效的方法。也可将其他技术与否定选择算法结合，来改进否定选择算法：即通过一种技术对问题进行预处理，或利用一种技术加强另外一种技术。此外，基于否定选择的异常检测是一个系统的工程，应该着重研究整个算法模型的构建。

3) 开辟新的应用领域。与其他算法一样，应用是检验算法优劣的标准，是方法研究的价值体现。虽然否定选择算法在近十几年来获得了广泛的应用，但其在工程应用中，还未取得和其他智能算法一样的地位。

4) 加强否定选择算法数学理论的分析。研究算法的一般框架，提供一种通用的算法范式，并对其性能进行深入的分析，包括参数分析、收敛性分析、稳定性分析等，为算法的进一步发展提供理论依据。

6　结束语

本文对否定选择算法进行了综述，研究了否定选择算法的技术要点，对典型算法进行了分析，列举了否定选择算法的应用情况，阐述了所存在问题，并预期了发展方向。由于篇幅有限，本文不可能涵盖所有算法，希望这篇综述能为了解否定选择算法研究的现状和开展相关工作提供有益的参考。

总而言之，作为一种新兴的仿生智能算法，否定选择算法已经取得了一定的发展并得到了相应的应用，随着研究的深入，必将在理论和实践应用上取得新的突破以及在各个领域发挥重大的作用。

参考文献：

[1] DASGUPTAA D, YUA S,NINO F. Recent advances in artificial immune systems: models and applications[J]. Applied Soft Computing, 2011, 11:1574-1587.

[2] ZHOU J, DASGUPTA D. Revisiting negative selection algorithms[J]. Evolut Comput, 2007, 15(2):223-251.

[3] FORREST S, PERELSON A S, ALLEN L, *et al*. Self-nonself discrimination in a computer[A]. Proceedings of the 1994 IEEE Symposium on Research in Security and Privacy IEEE[C]. Los Alamitos, CA, 1994. 221-231.

[4] DASGUPTA D, FORREST S. Novelty detection in time series data using ideas from immunology[A]. Proceedings of the 5th International Conference on Intelligent Systems[C]. Cancun, Mexico: Springer, 1996. 82-87.

[5] ZHOU J, DASGUPTA D. Real-valued negative selection algorithm with variable-sized detectors[A]. Proceedings of GECCO[C]. Springer, 2004. 287-298.

[6] D'HAESELEER P. An immunological approach to change detection: theoretical results[A]. Proceedings of the 9th IEEE Computer Security Foundations Workshop. IEEE[C]. 1996. 18-27.

[7] D'HAESELEER P, FORREST S, HELMAN P. An immunological approach to change detection: algorithms, analysis, and implications[A]. Proceedings of the 1996 IEEE Symposium on Computer Security and Privacy[C]. Washington, DC, USA, 1996. 110-120.

[8] BALTHROP J, ESPONDA F, FORRREST S, *et al*. Coverage and generalization in an aritificial immune system[A]. Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO 2002)[C]. New York, USA, 2002. 3-10.

[9] WIERZCHON S T. Generating optimal repertoire of antibody strings in an artificial immune system[A]. Intelligent Information Systems. Heidelberg New York[C]. New York, USA, 2000. 119-133.

[10] KIM J, BENTLEY P J. An evaluation of negative selection in an artificial immune system for network intrusion detection[A]. Proceedings of The Genetic and Evolutionary Computation Conference[C]. 2001. 1330-1337.

[11] D'HAESELEER P, GONZALEZ F. An immunity-based technique to characterize intrusion in computer networks[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(3):1081-1088.

[12] HOU H Y, DOZIER G. An evaluation of negative selection algorithm with constraint-based detector[A]. ACM Southeast Regional Conference 2006[C]. Melbourne, Florida, USA, 2006. 134-139.

[13] 蔡涛,鞠时光,仲巍.基于切割的检测器生成与匹配算法[J].电子学报,2009,37(B04):131-134.
CAI T, JU S G, ZHONG W. A cutting based detector generating and matching algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(B04): 131-134.

[14] GONZALEZ F, DASGUPTA D. Anomaly detection using real-valued negative selection[J]. Genetic Programming and Evolvable Machines, Kluwer Academic Publishers, 2003, 4(4):383-403.

[15] GONZALEZ F, DASGUPTA D, NINO L F. A randomized real-value negative selection algorithm[A]. Proceedings of Second International Conference on Artificial Immune System(ICARIS 2003)[C]. Edinburgh, UK, 2003.261-272.

[16] GONZALEZ F, DASGUPTA D, KOZMA R. Combining negative selection and classification techniques for anomaly detection[A]. Congress on Evolutionary Computation(CEC 2002)[C]. 2002.261-272.

[17] ZHOU J, DASGUPTA D. Augmented negative selection algorithm with variable-size detectors[A]. IEEE Congress of Evolutionary Computation(CEC 2004)[C]. Washington: IEEE Press, USA, 2004. 1081-1088.

[18] DASGUPTA D, KRISHNA K. Negative selection algorithm for aircraft fault detection[A]. Proceedings of Third International Conference on Artificial Immune Systems(ICARIS 2004)[C]. 2004. 1-13.

[19] JOSEPH M, SHAPIRO, GARY B. An evolutionary algorithm to generate ellipsoid network intrusion detectors[A]. GECCO Workshops[C]. 2005. 178-180.

[20] JOSEPH M, SHAPIR O, GARY B. An evolutionary algorithm to generate hyper-ellipsoid detectors for negative selection[A]. GECCO 2005[C]. Washington DC, USA, 2005. 337-344.

[21] BALACHANDRAN S, DASGUPTA D, NINO F. A framework for evolving multishaped detectors in negative selection[A]. Proceedings of IEEE Symposium Series on Computational Intelligence[C]. Honolulu, 2007. 401-408.

[22] 张雄美, 易昭湘, 宋建社等. 基于矩阵形式的否定选择算法研究[J]. 电子与信息学报,2010,32(11):2701-2706.
ZHANG X M, YI Z X, SONG J S, *et al*. Research on negative selection algorithm based on matrix representation[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(11):2701-2706.

[23] OSTASZEWSKI M, SEREDYNSKI F, BOUVRY P. Immune anomaly detection enhanced with evolutionary paradigms[A]. GECCO[C]. Washington, USA, 2006.

[24] YI Z X, MU X D, ZHANG L. A matrix negative selection algorithm for anomaly detection[A]. 2008 IEEE Congress on Evolutionary Compution (CEC 2008)[C]. 2008. 978-983.

[25] PERCUS J K, PERCUS O, PERELSON A S. Predicting the size of the antibody combining region from consideration of efficient self/non-self discrimination[A]. Proceedings of the National Acadeny of Science[C]. 1993.1691-1695.

[26] HARMER P K, WILLIAMS P D. An artificial immune system architecture for computer security applications[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(3):252-280.

[27] GONZALEZ F, DASGUPTA D, GOMEZ J. The effect of binary matching rules in negative selection[A]. Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference(GECCO 2003)[C]. Chicago, 2003.198-209.

[28] STIBOR T. An empirical study of selfnon-self discrimination in binary data with a kernel estimator[A]. Proceedings of the 7th International Conference on Artificial Immune Systems (ICARIS)[C]. Phuket, Thailand, Springer, 2008.352-363.

[29] 肖赤心,蔡自兴,王勇.进化策略用于阴性选择算法[J].小型微型计算机系统, 2008, 29(11):2091-2094.
XIAO CX, CAI Z X, WANG Y. Application of evolutionary strategy to negative selection algorithm[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2008, 29(11):2091-2094.

[30] F ESPONDA, FORREST S, HELMAN P. The crossover closure and partial match detection[A]. Proceedings of the 2nd International Conference on Artificial Immune Systems(ICARIS)[C]. Edinburgh, UK, Springer, 2003. 249-260.

[31] ESPONDA F, FORREST S, HELMAN P. A formal framework for positive and negative detection schemes[J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part B-Cybernetics, 2004, 34(1): 357-373.

[32] STIBOR T, BAYAROU K M, ECKERT C. An investigation of r-chunk detector generation on higher alphabets[A]. Proceedings of the Conference on Genetic and Evolutionary Computation[C]. Springer, 2004, 299-307.

[33] STIBOR T, MOHR P, TIMMIS J, *et al*. Is negative selection appropriate for anomaly detection[A]. Proc of GECCO'05[C]. USA: ACM Press, 2005. 321-328.

[34] WIERZCHON S T. Deriving concise description of non-self patterns in an artificial immune system[A]. New Learning Paradigms in Soft Computing[C]. Physica-Verlag, 2001. 438-458.

[35] WIERZCHON S T. Discriminative power of the receptors activated by k-contiguous bits rule[J]. Journal of Computer Science and Technology, 2000,1(3):1-13.

[36] LOU W J, ZHANG Z, WABG X. A heuristic detector generation algorithm for negative selection algorithm with hamming distance partial matching rule[A]. Proceedings of ICARIS[C]. 2006. 229-243.

[37] AYRA M, TIMMIS J, LIMOS L DE. Negative selection: how to generate detectors[A]. Proceedings of the 1st International Conference

onArtificial Immune Systems (TCARIS)[C]. Canterbury, UK, 2002. 89-98.

[38] 程永新, 许家珀, 陈科. 一种新型入侵检测模型及其检测器生成算法[J]. 电子科技大学学报, 2006, 35(2):235-238.
CHENG Y X, XU J Y, CHEN K. A novel ids model and the arithmetic to Get the detection[J]. Journal of UEST of China, 2006, 35(2): 235-238.

[39] 杨宁, 王茜. 一种基于小生境策略的阴性选择算法[J]. 计算机科学, 2011, 38(1):181-184.
YABG N, WANG Q. Negative selection algorithm based on niche strategy[J]. Computer Science, 2011, 38(1):181-184.

[40] LOU W J, GOU P, WANG X F. On convergence of evolutionary negative selection algorithms for anomaly detection[A]. IEEE Congress on Evolutionary Computation[C]. 2008, 2933-9.

[41] XU B L, LOU W J, PEI X X. On average time complexity of evolutionary negative selection algorithms for anomaly detection[A]. GEC[C]. 2009. 631-638.

[42] ESPONDA F, FORREST S, HELMAN P. Enhancing Privacy Through Negative Representations of Data[R]. Univerity of New Mexico, 2004.

[43] ESPONDA F, ACKLRY E S, FORRES T. Online negative databases[A]. Proceedings of Third International Conference on Artificial Immune Systems(ICARIS 2004)[C]. Springer, 2004. 175-188.

[44] 张衡, 吴礼发, 张毓森等. 一种 *r* 可变阴性选择算法及其仿真分析[J]. 计算机学报, 2005, 28(10):1614-1619.
ZHAN H, WU L F, ZhANG G Y, *et al*. An algorithm of *r*-adjustable negative selection algorithm and its simulation analysis[J]. Chinese Journal of Computers, 2005, 28(10):1614-1619.

[45] 何申, 罗文坚, 王熙法. 一种检测器长度可变的非选择算法[J]. 软件学报, 2007, 18(6):1361-1368.
HE S, LOU W J, WANG X F. A negative selection algorithm with the variable length detector[J]. Journal of Software, 2007, 18(6): 1361-1368.

[46] 王辉, 于立君, 王科技. 一种可变模糊匹配阴性选择算法[J]. 智能系统学报, 2011,6(2):178-184.
WANG H, YU L J, WANG K J. An adjustable fuzzy matching nnegative selection algorithm[J]. Transactions on Intelligent Systems, 2011, 6(2):178-184.

[47] 王辉, 于立君, 毕晓君. 具有疫苗算子的可变模糊匹配阴性选择算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(6):141-144.
WANG H, YU L J, BI X J. Adjustable fuzzy matching negative selection algorithm with vaccine operator[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011,43(6):141-144.

[48] 王辉, 毕晓君, 于立君. 基于疫苗理论的变阈值免疫阴性选择算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32(1):69-72.
WANG H, BI X J, YU L J. An adjustable threshold immune negative selection algorithm based on vaccine theory[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2011, 32(1):69-72.

[49] ELDERFELD M, TEXTOR J. Efficient algorithms forstring-based negative selection[A]. Proc of ICARIS2009,volume 5666 of LNCS[C]. Springer, 2009.109-121.

[50] LISJUEWICZ M, TEXTOR J. Negative selection algorithms without generating detectors[A]. GECCO2010 ACM[C]. Portland, Oregon, USA, 2010.1047-1054.

[51] 洪征,吴礼发.基于阳性选择的蠕虫检测系统[J].软件学报，2010, 21(4):816-826.
HONG Z, WU L F. Worm detection system based on positive selection[J]. Journal of Software, 2010, 21(4):816-826.

[52] 董永贵,孙照焱,贾惠波.时间序列中异常值检测的负向选择算法[J]. 机械工程学报, 2004, 40(10):30-34.
DONG Y G, SUN Z Y, JIA H B. Negative selected algorithm for anomaly detection in time series data[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(10):30-34.

[53] ZHOU J, DASGUPTA D. Estimating the detector coverage in a negative selection algorithm[A]. Proceedings of the 2005 Conference on Genetic and Evolutionary Computation ACM[C]. Washington DC, USA, 2005. 281-288.

[54] ZHOU J. A boundary-aware negative selection algorithm[A]. Proceedings of the international conference on artificialintelligence and soft computing[C]. Benidorm, Spain, 2005.

[55] CHMIELEWSKI A, WIERZCHON STV-detector algorithm with tree-based structures[A]. Proccedings of the International Multiconference on Computer Science and Information Technology. Wis?a (Poland)[C]. 2006. 9-14.

[56] GONG M G, JIAO L C, ZHANG K. Dynamic V-detector negative selection algorithm for intrusion detection[A]. Proceedings of the Fourth International Conference on Humanized Systems, ICHS'08[C]. Beijing, China, 2008.

[57] 郭文忠, 陈国龙, 陈庆良. 高维数据环境下网络异常检测的改进否定选择算法[J]. 计算机应用, 2009, 29(3):805-808.
GUO W Z, CHEN G L, CHEN Q L. Improved negative select ion algorithm for network anomaly detect ion on high-dimensional data[J]. Journal of Computer Applications, 2009, 29(3):805-808.

[58] WEN C, TAO L, ISN Q. A new cluster based real negative selection algorithm[J]. Communications in Computer and Information Science, 2011, 86:125-131.

[59] GUI M, DAS S, PAHWA A. Procreating V-detectors for nonself recognition:an application to anomaly detection in power systems[A]. Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computing Conference[C]. London, UK, 2007. 261-268.

[60] CHEN W, LI T, LIU X J. A negative selection algorithm based on hierarchical clustering of self set[J]. Science China Information Sciences, 2011, 54.

[61] 潘峰等. 基于逐级反向选择算法的入侵检测[J].上海交通大学学报, 2005, 39(4):582-584.
PAN F, *et al*. Multi-level negative selection algortihm and its application to network intrusion detection[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2005, 39(4):582-584.

[62] 胡亮, 王程明, 赵阔. 基于人工免疫模型的入侵检测系统中检测器生产算法的分析与改进[J]. 吉林大学学报, 2010, 48(1):67-72.
HU L, WANG C M, ZHAO K. Research and improvement of detector generation algorithm in intrusion detection system based on artificial immune model[J]. Journal of Jilin University, 2010, 48(1):67-72.

[63] 罗文坚, 曹先彬, 王煦法. 检测器自适应生成算法研究[J]. 自动化学报, 2005, 31(6):907-916.
LUO W J, CAO X B, WANG X F. Research on adaptively generating detector algorithm[J]. Acta Automatica Sinica, 2005, 31(6):907-916.

[64] ZENG J Q, LIU X J, LI T, *et al*. A self-adaptive negative selection algorithm used for anomaly detection[J]. Progress in natural Science, 2009, 19(2):261-266.

[65] ZENG J Q, LIU X J, LI T. A feedback negative selection algorithm to anomaly detection[A].Third International Conference on Natural Computation(ICNC 2007)[C]. 2007.

[66] 杨东勇, 陈晋音. 基于多种群遗传算法的检测器生产算法研究[J]. 自动化学报, 2009,35(4):425-432.
YANG D Y, CHEN J Y. Research on detector generation algorithm based on multiple populations GA[J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(4):425-432.

[67] JORGE L, AMARAL M, JOSE F A. Real-valued negative selection algorithm with a quasi-mntecarlo genetic detector generation[A]. Proceedings of the 6th International Conference on Artificial Immune System[C]. Barcelona, Spain: ICARIS, 2007. 156-167.

[68] 胡荣华, 楼佩煌, 唐敦兵. 基于克隆选择和邻域搜索的改进阴性选择算法[J]. 中国机械工程, 2011, 22(9):1076-1080.
HU R H, LOU P H, TANG D B. Improved negative selection algorithm based on clone selection and neighborhood search[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(9):1076-1080.

[69] 蔡涛, 鞠时光, 牛德姣. 快速否定选择算法的研究与分析[J]. 小型微型计算机系统, 2009, 6:1171-1174.
CAI T, JU S G, NIU D J. Efficient negative selection algorithm and its analysis[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2009, 6:1171-1174.

[70] DASGUPTA D. Immunity-based intrusion detection systems: a general framework[A]. Proceedings of the 22 nd National Information Systems Security Conference(NISSC)[C]. 1999. 18-21.

[71] 张鹏涛,王维,谭营.基于带有惩罚因子的阴性选择算法的恶意程序检测模型[J].中国科学,2011,41(7):798-812.
ZHANF P T,WANG W,TAN Y. A malware detection model based on a negative selection algorithm with penalty factor[J].Science China, 2011, 41(7):798-812.

[72] 王维, 张鹏涛, 谭营. 一种基于人工免疫和代码相关性的计算机病毒特征提取方法[J]. 计算机学报, 2011, 34(2):204-214.
WANG W, ZhANG P T, TAN Y. A feature extraction method of computer viruses based on artificial immune and code relevance[J]. Chinese Journal of Conputers, 2011, 34(2):204-214.

[73] 金章赞, 肖刚, 陈久军. 基于视觉感知与 V-detector 的水质异常检测方法[J]. 信息控制, 2011, 40(1):130-136.
JIN Z Z, XIAO G, CHEN J J. Anomaly detection of water quality based on visual perception and V-detector[J]. Information and Control, 2011, 40(1):130-136.

[74] CHEN L F. An improved negative selection approach for anomaly detection:with applications in medical diagnosis and quality inspect[J]. Neural Computing & Applications, 2011,20:1-10.

[75] 刘树林, 黄文虎, 夏松波等. 基于免疫机理的往复压缩机气阀故障检测方法[J]. 机械工程学报, 2004, 40(7):156-160.
LIU S L, HUANG W H, XIA S B, *et al*. Fault detection approach based on immune mechanism for gas valves of reciprocating compressors[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(7): 156-160.

[76] 陶新民, 杜宝祥, 徐勇. 基于高阶统计特征实值阴性克隆选择算法的轴承故障检测[J]. 机械工程学报, 2008, 44(7):230-236.
TAO X M, DU B X, XU Y. Bearing fault detection using real—valued negative clone selection algorithm based on higher order statistics[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(7):230-236.

[77] 岑建, 胥布工, 张清华. 免疫检测器证据理论集成的机组复合故障诊断[J]. 控制与决策, 2011, 26(8):1248-1259.
CEN J, XU B G, ZHANG Q H. Complex fault diagnosis of machine unit based on evidence theory and immune detector integrated[J]. Control and Decision, 2011, 26(8):1248-1259.

[78] 朱福根. 基于免疫机理的汽车故障检测技术研究[J]. 传感技术学报, 2006, 19(3):645-651.
ZHU F G. Study for automobile fault testing based on immune mechanics[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuator, 2006, 19(3): 645-651.

[79] 孟庆华, 赵文礼, 樊志华等. 基于改进型阴性选择算法的车辆故障检测方法研究[J]. 兵工学报, 2009, (12):1722-1726.
MENG Q H, ZHAO W L, FAN Z H, *et al*. Research on vehicle fault diagnosis method based on improved negative selection algorithm[J]. Acta Armamentarii, 2009, (12):1722-1726.

[80] IGAWA K, OHASHI H. A negative selection algorithm for classification and reduction of the noise effect[J]. Applied Soft Computing, 2009, 1(9):431-438.

[81] 邱江涛, 唐常杰, 曾涛等. 关联文本分类的规则修正策略[J]. 计算机研究与发展, 2009, 26(4):683-688.
QIU J T, T C J, ZENG T, *et al*. Strategy of revising rules for association text classification[J]. Journal of Computer Research and Development, 2009, 26(4):683-688.

[82] 袁勇, 许强, 郭科. 应用带变异的否定选择算法寻找滑坡突变点[J]. 工程地质学报, 2005, 13(4):447-450.
YUAN Y, XU Q, GUO K. Search for the jump spot of a landslide using the NSmutaion algorithm[J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(4):447-450.

[83] 刘占生, 窦唯, 王晓伟. 基于人工免疫的直升机传动系统在线异常监测方法[J]. 航空学报, 2007, 28(3):739-744.
LIU Z S, DOU W, WANG X W. On line monitoring approach based on artificial immune system for transmission system of helicopter[J]. Acta Aeronautica Etastronautica Sinica, 2007, 28(3):739-744.

[84] 邹彤, 李宁, 孙德宝. 带阴性选择的粒子群优化算法[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2006, 34(2):87-90.
ZOU T, LI N, SUN D B. Algorithm of particle swarm optimization with negative selection[J]. Journal Huazhong University of Science and Technology(Nature Science Edition), 2006, 34(2):87-90.

[85] 莫宏伟, 唐娜, 金鸿章. 免疫阴性选择分类器在信息恢复中的应用[J]. 计算机学报, 2005, 28(8):1314-1319.
MO H W, TANG N, JIN H Z. Application of immune negative selection classifier in information retrieval[J]. Chinese Journal of Computers, 2005, 28(8):1314-1319.

[86] 丁建立, 仝冠生, 徐涛. 基于免疫否定选择算法的机场航班延误状态检测与实现[J]. 高技术通讯, 2008, 18(4):387-391.
DING J L, TO G S, XU T. Detecting and implementing of airport scheduled flight delay state base on immune negative selection algorithm[J].High Technology Letters,2008,18(4):387-391.

作者简介：

金章赞（1984-），男，浙江乐清人，厦门大学博士生，主要研究方向为人工免疫系统。

廖明宏（1966-），男，福建泉州人，厦门大学教授、博士生导师，主要研究方向为网络智能、智能嵌入式软件和普适计算等。

肖刚（1965-），男，浙江上虞人，浙江工业大学教授、博士生导师，主要研究方向为图形图像处理和智能信息系统等。