直觉模糊集的包含度

路艳丽 雷英杰

（空军工程大学计算机工程系 陕西 713800）

摘 要 Atanassov直觉模糊集是对Zadeh模糊集最有影响的一种扩充和发展，而直觉模糊包含度是模糊包含度的直觉化扩展。针对文献[7]中Vague包含度仍然是一个模糊值的问题，提出一种新的直觉模糊集的包含度定义，该包含度取值于一个特殊格L，与直觉模糊集理论的基本思想相一致。验证了4类直觉模糊包含度公式，证明了直觉模糊R-蕴含可以生成一类直觉模糊包含度。

关键词 模糊集，直觉模糊集，包含度，直觉模糊蕴涵算子

中图法分类号 TP182 **文献标识码** A

Intuitionistic Fuzzy Inclusion Degree

LU Yan-li LEI Ying-jie

(Department of Computer Engineering, Air Force Engineering University, Shaanxi 713800, China)

Abstract Intuitionistic fuzzy set, proposed by Atanassov, is one of the most influential generalizations of Zadeh's fuzzy sets. Intuitionistic fuzzy inclusion degree is an extension of fuzzy inclusion degree. To the problem of the definition of vague inclusion degree with a fuzzy value in [7], a new definition of intuitionistic fuzzy inclusion degree with a value in a special lattice L coinciding with the basic notion of intuitionistic fuzzy set was proposed. Four classes of intuitionistic fuzzy inclusion degree formulas were verified and intuitionistic fuzzy R-implicator was proven to be able to produce a class of intuitionistic fuzzy inclusion degree.

Keywords Fuzzy set, Intuitionistic fuzzy set, Inclusion degree, Intuitionistic fuzzy implicator

1 引言

包含度是一种描述不确定性关系的有效度量方法[1-3]，是对已有的不确定性推理方法，如概率推理方法、证据推理方法、模糊推理方法以及信息推理方法等的抽象和概括。包含度不仅简洁、概括，而且便于进行信息的合成、传播和修正，已渗透到人工智能的各个分支，在专家系统、模式识别、数据挖掘等领域有着重要的应用。

在利用模糊集理论处理实际问题时，模糊集的包含关系过于苛刻，一般必须用模糊包含度加以代替。Atanassov直觉模糊集（Intuitionistic Fuzzy Set, IFS）[4,5]在Zadeh模糊集的基础上增加了一个新的属性参数——非隶度，进而可以描述"非此非彼"的"模糊概念"，更加细腻地刻画了客观世界的模糊性本质，是对Zadeh模糊集最有影响的一种扩充和发展。文献[6]已证明Vague集就是直觉模糊集。文献[7]将模糊集上的包含度概念扩展到Vague集上，给出了Vague包含度的定义和计算公式，但其中给出的Vague包含度仍然是区间[0,1]内的一个数，其本质与模糊包含度相类似。然而，正如文献[5]所提到的，模糊集一定是直觉模糊集，而直觉模糊集并不一定是模糊集。因此，直觉模糊集的包含度应具有新的形式，以体现直觉模糊集理论的拓展意义以及直觉模糊子集间包含关系的特点，为此，本文将模糊包含度的概念拓展到直觉模糊环境下，提出一种新的直觉模糊集的包含度定义，并对4种直觉模糊包含度计算公式进行了验证。

2 模糊包含度

设U是有限非空论域，$P(U)$表示论域U上的经典子集的全体，$FS(U)$表示论域U上的模糊子集的全体。模糊包含度，即模糊集$FS(U)$上的包含度，其定义如下。

定义 1[1]（模糊包含度） 设$FS_0(U)\subseteq FS(U)$，$\forall A,B,C\in FS(U)$，若有数$D(B/A)$对应，且满足：

(1)$0\leqslant D(B/A)\leqslant 1$；

(2)$A\subseteq B\Rightarrow D(B/A)=1$；

(3)$A\subseteq B\subseteq C\Rightarrow D(A/C)\leqslant D(A/B)$；

则称D为$FS_0(U)$上的包含度(inclusion degree)。

称D为$FS_0(U)$上的强包含度，若D满足(1)，(2)，(3)和以下的(4)：

(4)$A\subseteq B\Rightarrow D(A/C)\leqslant D(B/C)$；

称D为$FS_0(U)$上的弱包含度，若D满足(1)，(3)和以下的(2′)：

(2′)对于$\forall A,B\in FS_0(U)\cap P(U)$，$A\subseteq B\Rightarrow D(B/A)=1$。

从定义1可以看出，模糊包含度$D(B/A)$用区间[0,1]中

到稿日期：2008-01-16 本文受国家自然科学基金(60773209)，陕西省自然科学基金(2006F18)资助。

路艳丽(1980—)，女，博士，主要从事智能信息处理方法研究，E-mail：luyanlihgh@163.com；**雷英杰**(1956—)，男，教授，博士生导师，主要从事智能信息处理与智能决策研究。

的一个数来表征模糊集 B 与模糊集 A 具有包含关系的程度。

3 直觉模糊包含度

Atanassov 直觉模糊集的基本理论参见文献[4,5]。这里主要介绍直觉模糊集在一个特殊格 L^* 上的定义。这一定义简化了后续直觉模糊包含度的表示。本文使用 L 表示 L^*，用 $IFS(U)$ 表示 U 上直觉模糊子集的全体。

设 $\langle L,\leqslant_L\rangle$ 是一完备有界格，其中 $L=\{(x_1,x_2)\in[0,1]^2 \mid x_1+x_2\leqslant 1\}$，最大元 $1_L=(1,0)$，最小元 $0_L=(0,1)$，$\forall x,y\in L$，$x=(x_1,x_2)$，$y=(y_1,y_2)$，$\leqslant_L$ 定义为 $(x_1,x_2)\leqslant_L(y_1,y_2)\Leftrightarrow x_1\leqslant y_1$ 且 $x_2\geqslant y_2$。直觉模糊集合 A 定义为论域 U 到 L 的一个映射 $A:U\to L$，记为 $A(x)=(A(x)_1,A(x)_2)=(\mu_A(x),\gamma_A(x))$，$\forall x\in U$，$(\mu_A(x),\gamma_A(x))\in L$，$A(x)_1=\mu_A(x)$ 为 $x\in U$ 对 A 的隶属度，$A(x)_2=\gamma_A(x)$ 为 $x\in U$ 对 A 的非隶属度，$\pi_A(x)=1-\mu_A(x)-\gamma_A(x)$ 为 $x\in U$ 对 A 的犹豫度，也称为直觉指数。

设 A 和 B 是给定论域 U 上的直觉模糊子集，直觉模糊集的基本运算如下，

(1)$A\cap B=\{(\mu_A(x)\wedge\mu_B(x),\gamma_A(x)\vee\gamma_B(x))\mid\forall x\in U\}$；

(2)$A\cup B=\{(\mu_A(x)\vee\mu_B(x),\gamma_A(x)\wedge\gamma_B(x))\mid\forall x\in U\}$；

(3)$\overline{A}=A^c=\{(\gamma_A(x),\mu_A(x))\mid x\in U\}$；

(4)$A\subseteq B\Leftrightarrow\forall x\in U,[\mu_A(x)\leqslant\mu_B(x)\wedge\gamma_A(x)\geqslant\gamma_B(x)]$；

(5)$A=B\Leftrightarrow\forall x\in U,[\mu_A(x)=\mu_B(x)\wedge\gamma_A(x)=\gamma_B(x)]$。

文献[7]中给出了 Vague 集上的包含度定义，即直觉模糊集上的包含度，但其取值于区间$[0,1]$，这意味着直觉模糊包含度不能充分利用直觉模糊集 A,B 所提供的有效信息：非隶属度 $\gamma_A(x),\gamma_B(x)$ 与直觉指数 $\pi_A(x),\pi_B(x)$，从而直觉模糊集拓展所产生的优势也不能完整地体现。本文认为，直觉模糊集的包含度应该取值于集合 L，即取值为一个直觉模糊值，而不是取值于区间$[0,1]$。这样取值的优势在于，每一个数对(x_1,x_2)为决策者提供了更详细而精确的关于所分析对象的模糊边界信息，也正体现了直觉模糊集的拓展优势。因此，本文将模糊包含度的定义扩展到直觉模糊环境下，给出一种新的直觉模糊包含度定义如下。

定义 2(直觉模糊包含度) 对于 $\forall A,B,C\in IFS_0(U)\subseteq IFS(U)$，有直觉模糊值 $I(A,B)\in L$ 对应，且满足：

(I1)$0_L\leqslant_L I(A,B)\leqslant_L 1_L$；

(I2)$A\subseteq B\Rightarrow I(A,B)=1_L$；

(I3)$A\subseteq B\subseteq C\Rightarrow I(C,A)\leqslant_L I(B,A)$。

则称 $I(A,B)=(I(A,B)_1,I(A,B)_2)$ 为 $IFS_0(U)$ 上的包含度，其中 $I(A,B)_1$ 为隶属度，$I(A,B)_2$ 为非隶属度。

称 $I(A,B)$ 为 $IFS_0(U)$ 上的强包含度，若 I 满足(I1)，(I2)，(I3)和以下的(I4)：

(I4)$\forall A,B,C\in IFS_0(U)$，

$A\subseteq B\Rightarrow I(C,A)\leqslant_L I(C,B)$；

称 $I(A,B)$ 为 $IFS(U)$ 上的弱包含度，若 I 满足(I1)，(I3)和以下的(I2′)：

(I2′)$\forall A,B\in IFS_0(U)\cap P(U)$，

$A\subseteq B\Rightarrow I(A,B)=1_L$。

(I1)表明直觉模糊包含度取值于集合 L 的最小元 0_L 和最大元 1_L 之间，(I2)表明如果直觉模糊集 A 包含于直觉模糊集 B，则 B 包含 A 的程度为最大值 1_L，(I3)是直觉模糊包含度的单调性条件，表明较小的集合更容易被包含。直觉模糊强包含度在包含度定义的基础上增加了单调性条件(I4)，直觉模糊弱包含度将包含度的条件(I2)弱化为(I2′)。

根据定义 2，当直觉模糊集 A,B 均退化为模糊集时，即 $\forall x\in U$，满足 $\mu_A(x)+\gamma_A(x)=1,\mu_B(x)+\gamma_B(x)=1$，则容易证明，定义 2 的直觉模糊包含度退化为定义 1 的模糊包含度，即如下定理成立。

定理 1 若 $A,B\in FS(U)$，则 $I(A,B)=(I(A,B)_1,I(A,B)_2)$，$I(A,B)_1+I(A,B)_2=1$，$I(A,B)=D(B/A)$。

常用的模糊包含度比较多，具体见文献[2]。根据定义 2，可以证明式(1)和式(2)是直觉模糊包含度，如定理 2 和定理 3 所示。

定理 2 设 $A,B\in IFS(U)$，$I^0(A,B)$如式(1)所示，则 $I^0(A,B)$为 $IFS(U)$上的强包含度，

$$I^0(A,B)=\begin{pmatrix}\min\{L(A,B),H(A,B)\},\\ 1-\max\{L(A,B),H(A,B)\}\end{pmatrix}\tag{1}$$

其中，$L(A,B)=\sum\limits_{x\in U}\min\{A(x)_1,B(x)_1\}/\sum\limits_{x}A(x)_1$；$H(A,B)=\sum\limits_{x\in U}\min\{1-A(x)_2,1-B(x)_2\}/\sum\limits_{x\in U}(1-A(x)_2)$。

证明：(I1)显然。(I2)若 $A\subseteq B$，即 $A(x)\leqslant_L B(x)$，$A(x)_1\leqslant B(x)_1$，$A(x)_2\geqslant B(x)_2$，根据式(1)，

$$I^0(A,B)=\begin{pmatrix}\min\{L(A,B),H(A,B)\},\\ 1-\max\{L(A,B),H(A,B)\}\end{pmatrix}=(1,0)$$

(I3)若 $A\subseteq B\subseteq C$，即 $A(x)\leqslant_L B(x)\leqslant_L C(x)$，$A(x)_1\leqslant B(x)_1\leqslant C(x)_1$，$A(x)_2\geqslant B(x)_2\geqslant C(x)_2$，

$$\begin{aligned}L(C,A)&=\sum_{x\in U}\min\{C(x)_1,A(x)_1\}/\sum_{x}C(x)_1\\&=\sum_{x\in U}A(x)_1/\sum_{x}C(x)_1\\H(C,A)&=\sum_{x\in U}\min\{1-C(x)_2,1-A(x)_2\}/\sum_{x\in U}(1-C(x)_2)\\&=\sum_{x\in U}1-A(x)_2/\sum_{x\in U}(1-C(x)_2)\\L(B,A)&=\sum_{x\in U}\min\{B(x)_1,A(x)_1\}/\sum_{x}B(x)_1\\&=\sum_{x\in U}A(x)_1/\sum_{x}B(x)_1\\H(B,A)&=\sum_{x\in U}\min\{1-B(x)_2,1-A(x)_2\}/\sum_{x\in U}(1-B(x)_2)\\&=\sum_{x\in U}1-A(x)_2/\sum_{x\in U}(1-B(x)_2)\end{aligned}$$

可得，$L(C,A)\leqslant L(B,A)$，$H(C,A)\leqslant H(B,A)$，所以 $I^0(C,A)\leqslant_L I^0(B,A)$；

(I4)同理可证。

证毕。 □

定理 3 设 $A,B\in IFS(U)$，$I^1(A,B)$如式(2)所示，则 $I^1(A,B)$为 $IFS(U)$上的强包含度。

$$I^1(A,B)=\begin{pmatrix}\inf\limits_{x\in U}\min\{1,1-A(x)_1+B(x)_1,1+A(x)_2-B(x)_2\},\\ \sup\limits_{x\in U}\max\{0,\min\{A(x)_1-B(x)_1,B(x)_2-A(x)_2\}\}\end{pmatrix}\tag{2}$$

证明：(I1)由式(2)可得，

$\max\{0,\min\{A(x)_1-B(x)_1,B(x)_2-A(x)_2\}\}=1-\min\{1,\max\{1-A(x)_1+B(x)_1,1+A(x)_2-B(x)_2\}\}$

因为，

$\min\{1,\max\{1-A(x)_1+B(x)_1,1+A(x)_2-B(x)_2\}\}\geqslant\min\{1,1-A(x)_1+B(x)_1,1+A(x)_2-B(x)_2\}$

所以，

$$1-\min\{1,\max\{1-A(x)_1+B(x)_1,1+A(x)_2-B(x)_2\}\}+\min\{1,1-A(x)_1+B(x)_1,1+A(x)_2-B(x)_2\}\leqslant 1$$

即

$$\begin{pmatrix}\min\{1,1-A(x)_1+B(x)_1,1+A(x)_2-B(x)_2\}, \\ \max\{0,\min\{A(x)_1-B(x)_1,B(x)_2-A(x)_2\}\}\end{pmatrix}\in L$$

从而，

$$I^1(A,B)=\begin{bmatrix}\inf\limits_{x\in U}\min\{1,1-A(x)_1+B(x)_1,1+A(x)_2-B(x)_2\}, \\ \sup\limits_{x\in U}\max\{0,\min\{A(x)_1-B(x)_1,B(x)_2-A(x)_2\}\}\end{bmatrix}\in L$$

即，$0_L\leqslant_L I^1(A,B)\leqslant_L 1_L$。

(I2)设 $A,B\in IFS(U)$，若 $A\subseteq B$，即 $A(x)\leqslant_L B(x)$，$A(x)_1\leqslant B(x)_1$，$A(x)_2\geqslant B(x)_2$，由式(2)可得 $I^1(A,B)=1_L$。

(I3)设 $A,B,C\in IFS(U)$，若 $A\subseteq B\subseteq C$，即 $A(x)\leqslant_L B(x)\leqslant_L C(x)$，$A(x)_1\leqslant B(x)_1\leqslant C(x)_1$，$A(x)_2\geqslant B(x)_2\geqslant C(x)_2$，由式(2)可得 $I^1(C,A)\leqslant_L I^1(B,A)$。

(I4)对于 $\forall A,B,C\in IFS(U)$，若 $A\subseteq B$，由式(2)可得 $I^1(C,A)\leqslant I^1(C,B)$。

证毕。 □

例 1：若 $U=\{x_1,x_2,\cdots,x_{14}\}$，直觉模糊集 A 和 B 分别为，

$$\begin{aligned}A=\{&(0,1)/x_1,(0,1)/x_2,(0,1)/x_3,(0,1)/x_4,\\&(0,1)/x_5,(0,1)/x_6,(0,1)/x_7,(0,1)/x_8,\\&(0,0.4)/x_9,(0.87,0.08)/x_{10},(1,0)/x_{11},\\&(0.87,0.08)/x_{12},(0,0.4)/x_{13},(0,1)/x_{14}\}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}B=\{&(0,1)/x_1,(0,1)/x_2,(0,1)/x_3,(0,1)/x_4,\\&(0,1)/x_5,(0,1)/x_6,(0,0.5)/x_7,(0.74,0.18)/x_8,\\&(0.94,0.05)/x_9,(1,0)/x_{10},(0.94,0.05)/x_{11},\\&(0.74,0.18)/x_{12},(0,0.5)/x_{13},(0,1)/x_{14}\}\end{aligned}$$

根据式(1)和式(2)，可得 $I^0(A,B)=(0.9307,0.0619)$，$I^1(A,B)=(0.87,0.1)$。

根据定义 2，可以验证直觉模糊 R-蕴含对应一类直觉模糊强包含度。下面首先给出直觉模糊 R-蕴含的定义，进而证明其可生成一类直觉模糊包含度。

定义 3(直觉模糊 R-蕴含[8,9]) 设 T 为直觉模糊 t-模，映射 $\Psi_T:L\times L\to L$ 定义为 $\Psi_T(x,y)=\sup\{\lambda\in L\mid T(x,\lambda)\leqslant_L y\}$，则 Ψ_T 为一个直觉模糊蕴涵算子，称为直觉模糊 R-蕴涵。

若给定直觉模糊 t-模 T_L，

$$T_L(x,y)=(\max\{x_1+y_1-1,0\},\min\{x_2+y_2,1\}),$$

直觉模糊 R-蕴涵 Ψ_{T_L} 为

$$\Psi_{T_L}(x,y)=\begin{pmatrix}\min\{1,1+y_1-x_1,1+x_2-y_2\} \\ \max\{0,y_2-x_2\}\end{pmatrix}。$$

若给定直觉模糊 t-模 T_W，

$$T_W(x,y)=\begin{pmatrix}\max\{0,x_1+y_1-1\}, \\ \min\{1,1+x_2-y_1,1+y_2-x_1\}\end{pmatrix},$$

直觉模糊 R-蕴涵 Ψ_{T_W} 为

$$\Psi_{T_W}(x,y)=\begin{pmatrix}\min\{1,1+y_1-x_1,1+x_2-y_2\}, \\ \max\{0,y_2+x_1-1\}\end{pmatrix}。$$

定理 4 设 $A,B\in IFS(U)$，$\forall x\in U$，$\Psi_T(A(x),B(x))$ 为直觉模糊 R-蕴涵算子，则 $I(A,B)=\inf\limits_{x\in U}\Psi_T(A(x),B(x))$ 是一种直觉模糊强包含度。

证明：(I1)显然。现证明(I2)，(I3)。

(I2)设 $A,B\in IFS(U)$，若 $A\subseteq B$，根据直觉模糊 R-蕴涵的定义，可得

$$\Psi_T(A(x),B(x))=\sup\{\lambda\in L\mid T(A(x),\lambda)\leqslant_L B(x)\}$$

令其中的 $\lambda=1_L$，根据直觉模糊三角模 T 的边界性质可得，

$$T(A(x),1_L)=A(x)$$

又因为 $A(x)\leqslant_L B(x)$，所以有，

$$\Psi_T(A(x),B(x))=\sup\{\lambda\in L\mid T(A(x),\lambda)\leqslant_L B(x)\}=1_L\ \inf_{x\in U}\Psi_T(A(x),B(x))=1_L$$

(I3)设 $A,B,C\in IFS(U)$，若 $A\subseteq B\subseteq C$，即 $A(x)\leqslant_L B(x)\leqslant_L C(x)$，根据直觉模糊 R-蕴涵 Ψ_T 的左单调递减性，可得

$$\Psi_T(C(x),A(x))\leqslant_L\Psi_T(B(x),A(x))$$

$$\inf_{x\in U}\Psi_T(C(x),A(x))\leqslant_L\inf_{x\in U}\Psi_T(B(x),A(x))$$

(I4)对于 $\forall A,B,C\in IFS(U)$，根据直觉模糊 R-蕴涵 Ψ_T 的右单调递增性，若 $A\subseteq B$，则

$$\Psi_T(C(x),A(x))\leqslant_L\Psi_T(C(x),B(x))$$

$$\inf_{x\in U}\Psi_T(C(x),A(x))\leqslant_L\inf_{x\in U}\Psi_T(C(x),B(x))$$

得证。 □

根据定理 4，下面给出另外两种直觉模糊包含度公式。

例 2：设 $A,B\in IFS(U)$，$I^2(A,B)$ 如式(3)所示，则 $I^2(A,B)$ 为 $IFS(U)$ 上的强包含度。

$$I^2(A,B)=\inf_{x\in U}\Psi_{T_L}(A(x),B(x))=\begin{bmatrix}\inf\limits_{x\in U}\min\{1,1+B(x)_1-A(x)_1,1-B(x)_2+A(x)_2\}, \\ \sup\limits_{x\in U}\max\{0,B(x)_2-A(x)_2\}\end{bmatrix}\tag{3}$$

若论域 U 及直觉模糊集 A,B 的定义同例 1，根据式(4)可得 $I^2(A,B)=(0.87,0.1)$。

例 3：设 $A,B\in IFS(U)$，$I^3(A,B)$ 如式(4)所示，则 $I^3(A,B)$ 为 $IFS(U)$ 上的强包含度。

$$I^3(A,B)=\inf_{x\in U}\Psi_{T_W}(A(x),B(x))=\begin{bmatrix}\inf\limits_{x\in U}\min\{1,1+B(x)_1-A(x)_1,1-B(x)_2+A(x)_2\}, \\ \sup\limits_{x\in U}\max\{0,B(x)_2+A(x)_1-1\}\end{bmatrix}\tag{4}$$

若论域 U 及直觉模糊集 A,B 同例 1，根据式(4)，可得 $I^3(A,B)=(0.87,0.05)$。

例 4：$S_M(N(A(x)),B(x))$ 为一种直觉模糊 S-蕴涵[8,9]，下面通过一个例子验证直觉模糊 S-蕴涵不能对应一类直觉模糊包含度。

$$I^4(A,B)=\inf_{x\in U}S_M(N(A(x)),B(x))=(\inf_{x\in U}\max\{A(x)_2,B(x)_1\},\sup_{x\in U}\min\{A(x)_1,B(x)_2\})\tag{5}$$

设 $U=\{x_1,x_2,x_3,x_4,x_5\}$，直觉模糊集 A 和 B 分别定义为，

$$A=\{(0.1,0.9)/x_1,(0.2,0.8)/x_2,(0.3,0.7)/x_3,(0.4,0.6)/x_4,(0.5,0.5)/x_5\}$$

$$B=\{(0.2,0.8)/x_1,(0.3,0.7)/x_2,(0.4,0.6)/x_3,(0.5,0.5)/x_4,(0.6,0.4)/x_5\}$$

显然，$A\subseteq B$，根据定义 2 应该有 $I^4(A,B)=1_L=(1,0)$成

立，然而，根据式(5)，可得 $I^4(A,B)=(0.6,0.4)$，因此，$I^4(A,B)$不是直觉模糊包含度，也不是模糊包含度。

结束语 包含度在模糊集理论中有着重要应用。在应用模糊集理论处理实际问题时，模糊集的包含关系过于苛刻，一般必须用模糊包含度加以代替。直觉模糊包含度是对模糊包含度的直觉化扩展，本文针对文献[7]中 Vague 包含度定义仍然取值于区间[0，1]这一问题，重新定义了直觉模糊集的包含度，并验证了 4 类直觉模糊包含度公式 I^0-I^3。其中，由于直觉模糊 R-蕴含的良好性质，使得直觉模糊 R-蕴含可以生成一类直觉模糊包含度，而直觉模糊 S-蕴含则不能生成直觉模糊包含度，文中给出了反例验证。课题下一步计划将直觉模糊包含度引入模糊推理与基于粗糙集的决策分析，对其应用进行拓展研究。

参 考 文 献

[1] 张文修，徐宗本，梁怡，等．包含度理论[J]．模糊系统与数学，1996，10(4)：1-9

[2] 张文修，梁怡，徐萍．基于包含度的不确定推理[M]．北京：清华大学出版社，2007

[3] 曲开社，翟岩慧．偏序集、包含度与形式概念分析[J]．计算机学报，2006，29(2)：219-226

[4] Atanassov K. Intuitionistic fuzzy sets. Fuzzy Sets and Systems, 1986, 20: 87-96

[5] Atanassov K . Intuitionistic Fuzzy Sets : Theory and Applications. Heidelberg, Germany: Physica-Verlag, 1999

[6] Burillo P, Bustince H. Vague sets are intuitionistic fuzzy sets [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1996, 79(3): 403-405

[7] 黄国顺，刘云生．基于包含度的 Vague 集相似度量[J]．小型微型计算机系统，2006，27(5)：873- 877

[8] Cornelis C, Deschrijver G, Kerre E E. Implication in intuitionistic fuzzy and interval-valued fuzzy set theory: construction, classification, application[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2004, 35(1): 55-95

[9] 路艳丽，雷英杰，田野．直觉模糊逻辑算子研究[J]．计算机科学，2008，35(11)：151-153

(上接第 104 页)

[2] Amiri K S. Scalable and Manageable Storage Systems. Ph. D. Dissertation, CMU-CS-00-178. Carnegie Mellon, December 2000

[3] Gobioff H. Security for a High Performance Commodity Storage Subsystem. Ph. D. Dissertation, CMU-CS-99-160. Carnegie Mellon, July 1999

[4] Amiri K , Gibson G A , Golding R . Highly Concurrent Shared Storage// Proceedings of the International Conference on Distributed Computing Systems. Taipei, April 2000

[5] Gobioff H, Nagle D, Gibson G. Embedded Security for Network-Attached Storage. technical report CMU-CS-99-154. CMU SCS, June 1999

[6] Gobioff H, Gibson G, Tygar D. Security for Network Attached Storage Devices. technical report, CMU-CS-97-185. CMU SCS, 1997

[7] GoodsonG R , WylieJ J , GangerG R , et al. The Safety and Liveness Properties of a Protocol Family for Versatile Survivable Storage Infrastructures. Technical Report CMU-PDL-03-105. Carnegie Mellon University Parallel Data Laboratory, March 2004

[8] Pennington A, Strunk J, Griffin J, et al. Storage-based Intrusion Detection: Watching Storage Activity For Suspicious Behavior// 12th USENIX Security Symposium. Washington, D. C. , Aug. 2003

[9] Soules C A N, Goodson G R, Strunk J D, et al. Metadata Efficiency in Versioning File Systems// 2nd USENIX Conference on File and Storage Technologies. San Francisco, CA mar 31-Apr 2, 2003

[10] Strunk J D, Goodson G R, Pennington A G, et al. Intrusion Detection, Diagnosis, and Recovery with Self-Securing Storage. Technical Report, CMU-CS-02-140. CMU SCS, May 2002

[11] Ganger G R, Nagle D F. Better Security via Smarter Devices// HotOS-VIII (IEEE Workshop on Hot Topics in Operating Systems). May 2001

[12] Strunk J D, Goodson G R, Sheinholtz M L, et al. Self-Securing Storage: Protecting Data in Compromised Systems// 4th Symposium on Operating System Design and Implementation. San Diego, CA, Oct. 2000

[13] Somsysji A, Forrest S. Automated Response Using System-Call Delays// Proceedings of the 9th USENIX Security Symposium. Denver, Colorado: USENIX ASSOC, SUITE 215, 2560 NINTH ST, BERKELEY, CA94710 USA, 2000: 185-197

[14] Dasgupta D. Immune-based intrusion detection system: a general framework// Proceedings of the 22nd National Information Systems Conference. Virgina, USA, 1999

[15] 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．计算机学报，2005，28(10)

[16] 孙照焱．基于生物免疫机制的附网存储关键技术研究．博士学位论文．北京：清华大学精密仪器与机械学系，2004

[17] Forrest S, Perelson A S, Allen L, et al. Self-Nonself Discrimination in a Computer // Proceeding of IEEE Symposium on Research in Security and Privacy. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, 1994: 202-212

[18] Seiden P E, Celada F. A Model for Simulating Cognate Recognition and Research in the Immune System. J. theor. Biol, 1992, 158: 329-357

[19] de Castro L N, Von Zuben F J. Learning and Optimization Using the Clonal Selection Principle. IEEE Transaction on Evolution Computation, 2002, 6(3)

[20] Forrest S, Perelson A S, Allen L, et al. Self-Nonself Discrimination in a Computer // Proceeding of IEEE Symposium on Research in Security and Privacy. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, 1004: 202-212

[21] Balthrop J, Forrest S, Glickman M R. Revisting LISYS: Parameters and normal behavior// Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation CEC2002. USA: IEEE Press, 2002: 1045-1050

[22] Farmer J D, Packard N H, Perelson A S. The immune system, adaptation, and machine learning. Physica D, 1986, 22: 187-204

[23] Harmer P, Williams G, Gnusch P D, et al. An Artificial Immune System Architecture for Computer Security Applications. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(3): 252-280