

描述数据库的双层描述逻辑

马东媛^{1,2} 陆跃飞¹

(中国科学院计算技术研究所智能信息处理重点实验室 北京 100190)¹

(中国科学院研究生院 北京 100039)²

摘 要 为了表示元组和属性值的逻辑区别,引入了一个双层描述逻辑,其中概念分为两类:元组概念和属性值概念。给出双层描述逻辑的语言、语法和语义;然后定义从数据库中的关系到双层描述逻辑的知识库以及双层描述逻辑的模型的转换;最后扩展双层描述逻辑,使得其中的角色分为 3 类:元组之间的角色、元组与属性值之间的角色以及属性值之间的角色。

关键词 描述逻辑,数据库,概念,角色,属性

中图法分类号 TP182 **文献标识码** A

Dual Description Logic for the Relations in Databases

MA Dong-yuan^{1,2} SUI Yue-fei¹

(Key Laboratory of Intelligent Information Processing, Institute of Computing Technology, CAS, Beijing 100190, China)¹

(Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)²

Abstract To represent the logical difference of tuples and attribute values, a dual description logic for databases was introduced, in which concepts are classified into two classes: tuple concepts and attribute-value concepts. The logical language, syntax and semantics of the dual description logic for databases were introduced; two transformations from the relations in databases into knowledge bases or models in DDL were defined; and finally an extended dual description logic for databases was introduced, in which roles are classified into three classes: the roles between tuples, the roles between tuples and attribute values and the roles between attribute values.

Keywords Description logic, Database, Concept, Role, Attribute

1 引言

有许多关于利用描述逻辑表示数据库和查询的文献^[8]。例如,为了用描述逻辑表示 ER 模型和 ER 模式,Calvanese^[9,10]引入了 DLR 描述逻辑,其中包括原子角色 P 和原子概念 A ,原子角色的元数可以是 2 到 $n_{\max}$,这里 $n_{\max}$ 是大于等于 2 的自然数。DLR 的语法如下:

$$R \rightarrow T_n | P | (\$ i / n ; C) | \neg R | R_1 \sqcap R_2$$

$$C \rightarrow T_1 | A | \neg C | C_1 \sqcap C_2 | \exists [\$ i] R | \leq k [\$ i] R$$

利用 DLR 可以将一个 ER 模式转换为 DLR 的一个知识库。

在这些用于表示数据库的描述逻辑中,概念的实例是关系中的元组。也就是说,只有当 C 解释为元组的集合并且 a 解释为元组时, $C(a)$ 在这样的描述逻辑中才是有意义的。

一个基本事实是:在一个关系中,存在两种概念:(1) 事例为元组的概念;(2) 事例为属性值的概念。例如, R 表示学校中研究生的信息系统, R 具有属性 age ,并假定 D_{age} (age 的论域) 是 0 到 100 间的自然数集合。我们定义一个用于描述年龄大于 18 岁的学生的概念(叫做元组概念),这些概念的

实例的 age 属性都是大于 18 岁的;并且年龄大于 18 岁的是属性 age 论域中的一个概念(叫做属性值概念)。

为了描述信息系统所隐含的信息,我们将定义双层描述逻辑。其中概念分为两类:元组概念和属性值概念。角色为元组和属性值间的关系。在扩展的双层描述逻辑中,角色分为 3 类:元组角色(元组间的角色)、属性值角色(属性值间的角色)和角色(元组与属性值间的角色,即关系中的属性)。对于双层描述逻辑,可以利用上述双层描述逻辑将数据库中的关系看作双层描述逻辑中的知识库,并且可以作为双层描述逻辑中的模型。本文将给出两种从数据库到双层描述逻辑的转换:一种是从数据库中的关系到双层描述逻辑的知识库的转换,另一种是从数据库中的关系到双层描述逻辑的模型的转换。

本文第 2 节介绍描述逻辑和数据库中的基本定义;第 3 节给出双层描述逻辑的定义:它的语言、语法和语义;第 4 节给出从数据库中的关系到双层描述逻辑的知识库以及到双层描述逻辑的模型的转换,其中角色是数据库关系中属性;第 5 节给出扩展的双层描述逻辑的语言、语法和语义,其中角色分为 3 类:表示元组间关系的角色、表示关系中属性的角色和表

示属性取值域上关系的角色;最后总结全文。

2 基本概念

本节将给出描述逻辑和数据库中的基本定义^[1,13]和概念。

2.1 描述逻辑 ALC

ALC 是最基本的描述逻辑,其语言 L_{ALC} 包含以下符号:

- 对象名称: $c_0, c_1, \dots$;
- 概念名称: $\top, A_0, A_1, \dots$;
- 角色名称: $R_0, R_1, \dots$;
- 概念构造子: $\neg, \sqcap, \sqcup$;
- 包含关系: $\sqsubseteq$, 以及
- 逻辑连接符: $\neg, \rightarrow$ 。

所有的概念名称和 $\top$ 是原子概念;如果 C 和 D 是概念, c , d 是对象名称, ϕ 和 ψ 是断言, R 是角色名称, 那么:

- $C \sqcap D, \neg C, \exists R. C$ 是概念;
- $C(c), R(c, d), C \sqsubseteq D, \neg \phi, \phi \rightarrow \psi$ 是断言。

在元语言中使用以下符号:(1) A 表示原子概念;(2) C 表示概念;(3) R 表示角色;(4) c 表示对象。

模型 M 是一个二元组 (Δ, I) , 其中 Δ 是一个非空的集合(论域); I 是一个解释函数, 使得对每一个概念名称 $A, A' \sqsubseteq \Delta$; 对每一个角色名称 $R, R' \sqsubseteq \Delta \times \Delta$; 并且对每一个对象名称 $c, c' \in \Delta$ 。

用 x, y 来表示论域 Δ 中的元素。

概念被解释为论域的子集, 其中

$$\top^I = \Delta$$

$$A^I = I(A)$$

$$(C \sqcap D)^I = C^I \cap D^I$$

$$(\neg C)^I = \Delta - C^I$$

$$(\exists R. C)^I = \{x; \exists y \in \Delta (y \in C^I \& (x, y) \in R^I)\}$$

注意:在语法中,使用 $\neg, \rightarrow, \forall, \exists$ 来表示逻辑连接符和量词;在语义中,用 $\sim, \Rightarrow, A, E$ 来表示相应的连接符和量词。

断言的可满足性定义如下:

$$M \models C(c) \text{ iff } c^I \in C^I$$

$$M \models R(c, d) \text{ iff } (c^I, d^I) \in R^I$$

$$M \models C \sqsubseteq D \text{ iff } C^I \subseteq D^I$$

$$M \models \neg \phi \text{ iff } M \not\models \phi$$

$$M \models \phi \rightarrow \psi \text{ iff } M \models \phi \Rightarrow M \models \psi$$

知识库 KB 是一个二元组 $(ABox, TBox)$, 其中 $ABox$ 是形如 $C(c)$ 或 $R(c, d)$ 的断言集合, $TBox$ 是形如 $C \sqsubseteq D$ 的断言集合。

2.2 关系数据库

设 $D = \{R_1, \dots, R_n\}$ 是一个数据库, 其中每个 R_i 都是一个关系 (U_i, A_i, J_i) , 而

- U_i 是元组的集合, 我们用 r^R 表示元组;
- A_i 是属性的集合, 我们用 a 表示属性; 并且假定属性 a 的论域为 D_a ;
- J_i 是一个函数, 使得对每个 $r^R \in U_i$ 和 $a \in A_i, J_i(r^R, a) \in D_a$ 。

用元语言符号 r, a, U, D 表示任何的元组、属性、元组集合和论域。

D 中的断言 θ 定义如下:

$$\theta := U(r) \mid r(a, v) \mid D(v)$$

2.3 表示 ER 模式的描述逻辑 DLR

DLR 语言包括以下符号:

- 对象符号: $c_0, c_1, \dots$;
- 泛概念名称: $\top$;
- 原子概念符号: $A_0, A_1, \dots$;
- 原子角色符号: $P_0, P_1, \dots$; 假定每个 P 均是某个 n 的

n -元组的集合;

- 对于每个自然数 n, n -元泛角色名称为 $\top_n$;
- 概念构造子: $\neg, \sqcap, \exists [\$ i], \leq k [\$ i]$;
- 角色构造子: $\$ i/n, \sim, \sqcap$, 其中 $i \leq n$ 。

DLR 的语义中的角色和概念分别定义如下:

$$R \rightarrow \top_n \mid P \mid (\$ i/n; C) \mid \sim R \mid R_1 \sqcap R_2$$

$$C \rightarrow \top_1 \mid A \mid \neg C \mid C_1 \sqcap C_2 \mid \exists [\$ i] R \mid \leq k [\$ i] R$$

DLR 的语法: 一个模型 M 是一个二元组 $(\Delta^I, \cdot^I)$, 其中 Δ^I 是一个非空论域, $\cdot^I$ 是一个解释函数, 使得 $\cdot^I$ 将每个对象符号 c 映射到 Δ^I 中的元素 c^I , 将每个原子概念 A 映射到 Δ^I 的子集 A^I , 并且将每个 n -元原子关系 P 映射到 $(\Delta^I)^n$ 的子集 P^I 。

我们归纳地定义概念、关系以及断言的可满足性:

$$\top_n^I \subseteq (\Delta^I)^n$$

$$(\sim R)^I = \top_n^I - R^I$$

$$(R_1 \sqcap R_2)^I = R_1^I \cap R_2^I$$

$$(\$ i; C)^I = \{(d_1, \dots, d_n) \in \top_n^I \mid d_i \in C^I\}$$

$$\top_1^I = \Delta^I$$

$$(\neg C)^I = \top_1^I - C^I$$

$$(C_1 \sqcap C_2)^I = C_1^I \cap C_2^I$$

$$(\exists [\$ i] R)^I = \{d \in \top_n^I \mid \exists (d_1, \dots, d_n) \in R^I (d_i = d)\}$$

$$(\leq k [\$ i] R)^I = \{d \in \top_n^I \mid \{(d_1, \dots, d_n) \in R^I \mid d_i = d\} \mid \leq k\}$$

其中 R, R_1 和 R_2 是 n -元的; 并且

$$M \models C(a) \text{ iff } a^I \in C^I$$

$$M \models R(a_1, \dots, a_n) \text{ iff } (a_1^I, \dots, a_n^I) \in R^I$$

$$M \models \neg \phi \text{ iff } M \not\models \phi$$

$$M \models \phi \rightarrow \psi \text{ iff } M \models \phi \Rightarrow M \models \psi$$

3 描述数据库的双层描述逻辑

描述数据库的双层描述逻辑 (DDL, dual description logic for databases) 的语言 L 包含以下符号:

- 元组常量符号, 用 $c_0, c_1, \dots$ 表示;
- 元组概念名称, 用 $C_0, C_1, \dots$ 表示;
- 属性值 (AV) 对象符号, 用 $v_0, v_1, \dots$ 表示;
- 属性值 (AV) 概念名称, 用 $V_0, V_1, \dots$ 表示;
- 角色名称, 用 $a_0, a_1, \dots$ 表示;
- 概念构造子: $\neg, \sqcap, \sqcup, \forall, \exists$;
- 角色构造子 (逆角色): $^-$ 。

注意: 角色 a 不仅仅是一个关系, 而且是一个属性。也就是说, 用双层描述逻辑描述的知识库中, 对于任何元组 c , 至多存在一个属性值对象符号 v 使得 $a(c, v)$ 也在知识库中。

定义 1 (元组概念和属性值概念)

- 每一原子元组概念名称都是元组概念;

如果 C, D 是元组概念, 那么 $\neg C, C \sqcap D, C \sqcup D$ 也是元组概念;

如果 V 是属性值 (AV)-概念并且 a 是角色, 那么 $\exists a.V$ 和 $\forall a.V$ 是元组概念;

(ii) 每一原子 AV-概念名称是 AV-概念;

如果 V, W 是 AV-概念, 那么 $\neg V, V \sqcap W, V \sqcup W$ 也是 AV-概念;

如果 C 是一个元组概念并且 a 是角色, 那么 $\exists a^-.C$ 和 $\forall a^-.C$ 是 AV-概念;

(iii) 如果 a 是一个角色, 那么 a^- 也是一个角色。

定义 2 DDL D 中的断言分为:

元组断言:

$$C(c) \mid a(c, v) \mid C \sqsubseteq D \mid \neg \phi \mid \phi \rightarrow \psi$$

属性值 (AV)-断言:

$$V(v) \mid a^-(v, c) \mid V \sqsubseteq W \mid \neg \phi \mid \phi \rightarrow \psi$$

其中, c 是元组常量并且 v 是 AV-常量。

用 $C \equiv D$ 来表示元组断言 $C \sqsubseteq D \wedge D \sqsubseteq C$, 并用 $V \equiv W$ 来表示 AV-断言 $V \sqsubseteq W \wedge W \sqsubseteq V$ 。

一个模型 M 是一个三元组 (Δ, Σ, I) , 其中 Δ, Σ 是两个不交的非空论域, I 是一个解释函数, 使得对每一个元组常量 $c, I(c) \in \Delta$; 对每一个元组概念名称 $C, I(C) \subseteq \Delta$; 对每一个 AV-常量 $v, I(v) \in \Sigma$; 对每一个 AV-概念 $V, I(V) \subseteq \Sigma$; 对每一个角色 a , 有:

$$I(a) \subseteq \Delta \times \Sigma$$

并且满足以下条件: 对任何角色 a 和任意 $x \in \Delta, \{y: (x, y) \in I(a)\}$ 只含一个元素。

归纳地定义元组概念、AV-概念和角色的解释如下:

$$I(\neg C) = \Delta - I(C)$$

$$I(C \sqcap D) = I(C) \cap I(D)$$

$$I(C \sqcup D) = I(C) \cup I(D)$$

$$I(\exists a.V) = \{x \in \Delta: \exists y \in \Sigma((x, y) \in I(a) \& y \in I(V))\}$$

$$I(\forall a.V) = \{x \in \Delta: \forall y \in \Sigma((x, y) \in I(a) \Rightarrow y \in I(V))\}$$

$$I(\neg V) = \Sigma - I(V)$$

$$I(V \sqcap W) = I(V) \cap I(W)$$

$$I(V \sqcup W) = I(V) \cup I(W)$$

$$I(\exists a^-.C) = \{y \in \Sigma: \exists x \in \Delta((y, x) \in I(a^-) \& x \in I(C))\}$$

$$I(\forall a^-.C) = \{y \in \Sigma: \forall x \in \Delta((y, x) \in I(a^-) \Rightarrow x \in I(C))\}$$

$$I(a^-) = \{(v, x) \in \Sigma \times \Delta: (x, y) \in I(a)\}$$

定义 3 断言的可满足性定义如下:

$$M \models C \sqsubseteq D \text{ iff } I(C) \subseteq I(D)$$

$$M \models C(c) \text{ iff } I(c) \in I(C)$$

$$M \models a(c, v) \text{ iff } (I(c), I(v)) \in I(a)$$

$$M \models V \sqsubseteq W \text{ iff } I(V) \subseteq I(W)$$

$$M \models V(v) \text{ iff } I(v) \in I(V)$$

$$M \models \neg \phi \text{ iff } M \not\models \phi$$

$$M \models \phi \rightarrow \psi \text{ iff } M \models \phi \Rightarrow M \models \psi.$$

其中, $M \models \phi$ 表明 ϕ 在模型 M 中是真的。

定义 4 如果对于任意模型 $M, M \models \phi$, 那么断言 ϕ 称为有效的 (valid)。

命题 1 以下两个断言是等价的。

(i) 对任意元组概念 C 和 AV-概念 $V, C \sqcap V \equiv \perp$ 是有效的;

(ii) 对任意模型 $M, \Delta \cap \Sigma = \emptyset$ 。

4 用 DDL D 知识库表示数据库

任何一个数据库中的关系都可以表示为 DDL D 中的一个模型; 一个 DDL D 中的模型可以表示为一个数据库中的关系。用 σ 和 τ 分别表示数据库关系到 DDL D 模型中的转换函数和 DDL D 模型到数据库关系的转换函数。

考虑到关系 $R = (U, A, J)$, 用 R 表示 DDL D 中模型 $M = (\Delta, \Sigma, I)$ (用 $\sigma(R)$ 表示), 其中

$$\Delta = U$$

$$\Sigma = \bigcup_{a \in A} D_a$$

并且 I 定义如下:

(i) 对任意元组常量 $c, I(c) \in U$;

(ii) 对任意 AV-常量 $v, I(v) \in \bigcup_{a \in A} D_a$;

(iii) 对任意元组概念名称 $C, I(C) \subseteq U$;

(iv) 对任意 AV-概念名称 $V, I(V) \subseteq \bigcup_{a \in A} D_a$;

(v) 对任意角色 $a, I(a) \in A$ 。

这样, 有: 对任意 $(x, y) \in \Delta \times \Sigma, (x, y) \in I(a)$ iff $(x, y) \in J$ 。

考虑到 DDL D 的一个模型 $M = (\Delta, \Sigma, I)$, 构造一个关系 $R = (U, A, J)$ (用 $\tau(M)$ 表示), 使得:

$$U = \Delta; A = \{I(a): a\}$$

并且 J 定义如下: 对任意 $x \in U$ 和 $a = I(a) \in A, x(a, v) \in J$ 当且仅当存在一个元组常量 c 和一个 AV-常量 v , 使得:

$$I(c) = x$$

$$I(v) = v$$

$$(x, v) \in I(a)$$

考虑到关系 $R = (U, A, J)$, 用 R 表示 DDL D 中的一个知识库 K , 其中

(1) K 的语言包括以下符号: 元组泛概念名称 T^i , 对每个 $a \in A$ 的 AV-泛概念名称 T^a ; 对每个 $x \in U$ 的元组常量 $f: \sigma(R) \rightarrow M$; 对每个 $v \in D_a (a \in A)$ 的 AV-常量 v ; 对每个 $a \in A$ 的角色 a ;

(2) K 包含以下断言: 对每个 R 中的 $r(a, v) \in J$, 有 $a(r, v)$ 。

命题 2 对任意关系 $R = (U, A, J)$, 假定 K 是 R 的 DDL D 知识库, 那么

$$R = (U, A, J)$$

命题 3 对任意关系 $R = (U, A, J)$, 假定 K 是 R 的 DDL D 知识库, 那么对任意模型 $M = (\Delta, \Sigma, I)$, 如果 $M \models K$, 那么存在从 $\sigma(R)$ 到 M 的映射 $f: \sigma(R) \rightarrow M$, 使得对任意角色 a , 任意 $x \in U$ 和 $v \in D_a$, 都有:

$$(x, v) \in I^{(\sigma(R))}(a) \text{ iff } (f(x), f(v)) \in I(a)$$

5 扩展的双层描述逻辑

下面扩展双层描述逻辑, 使得在允许 AV-概念的论域 (即属性值域) 中可以含有角色。

考虑到关系 $R = (U, A, J)$, 假定每一个 D_a 都存在一些关系。例如, a 是高度属性, 并且 D_a 是实数集合 R 。 R 上存在大小关系 $\leq$ 。因此, 假定存在一系列属性值域上的角色, 记为 $q_0, q_1, \dots$ 。

DDL D 的语言 L 被扩展为语言 L' , 其中包含以下额外符

号:

- 元组角色,用 $s_0, s_1, \dots$ 表示;
- 属性值(AV)-角色,用 $q_0, q_1, \dots$ 表示。

定义 5 (i) 每一元组概念名称都是元组概念;

如果 C, D 是元组概念,那么 $\neg C, C \sqcap D, C \sqcup D$ 也是元组概念;

如果 C 是元组概念并且 s 是元组角色,那么 $\exists s. C$ 和 $\forall s. C$ 是元组概念;

如果 V 是 AV-概念并且 a 是角色,那么 $\exists a. V$ 和 $\forall a. V$ 是元组概念;

(ii) 每一 AV-概念名称都是 AV-概念;

如果 V, W 是 AV-概念,那么 $\neg V, V \sqcap W, V \sqcup W$ 也是 AV-概念;

如果 V 是一个 AV-概念并且 q 是 AV-角色,那么 $\forall q. V$ 和 $\exists q. V$ 是 AV-概念;

如果 C 是概念并且 a 是角色,那么 $\exists a^-. C$ 和 $\forall a^-. C$ 是 AV-概念;

(iii) 如果 a 是角色,那么 a^- 也是角色。

一个模型 M 是一个三元组 (Δ, Σ, I) ,使得对每一元组角色 s ,有:

$$I(s) \in \Delta^2$$

并对 AV-角色 q ,有:

$$I(q) \subseteq \Sigma^2$$

归纳地定义概念、AV-概念和角色的解释如下:

$$I(\exists s. C) = \{x \in \Delta; \exists y \in \Sigma((x, y) \in I(s) \& y \in I(C))\}$$

$$I(\forall s. C) = \{x \in \Delta; \forall y \in \Sigma((x, y) \in I(s) \Rightarrow y \in I(C))\}$$

$$I(\exists q. V) = \{v \in \Sigma; \exists w \in \Delta((v, w) \in I(q) \& w \in I(V))\}$$

$$I(\forall q. V) = \{v \in \Sigma; \forall w \in \Delta((v, w) \in I(q) \Rightarrow w \in I(V))\}$$

在这种描述逻辑中,可以定义概念高于 2m 的学生为 $\exists a. (\exists gt. \{2\})$,其中 a 是角色属性 height, gt 是 AV-角色高于, $\{2\}$ 是只有实例 2 的概念(假定对于每一常量 v , $\{v\}$ 都是 AV-概念)。

结束语 本文给出了两种双层描述逻辑:一种中的角色联系的是元组和属性值,另一种中的角色分为 3 类:联系元组之间关系的角色、元组和属性值之间关系的角色以及属性值之间关系的角色。

本文试图表明:为了用形式逻辑(像描述逻辑)来形式化计算机科学与技术中的系统,应存在多种表示形式。通常,给出一个实际系统的完全的逻辑描述表示是很难的。可以看出,即使是数据库关系这种简单系统,用描述逻辑表示时也存在几种可选择的形式表示。

根据知识表示的粒度,为了表示数据库中的查询、关系代数运算和关系,需要不同的动态描述逻辑,这与文献[14-16]中给出的是非常不同的。我们将在未来的论文中讨论这些不

同的动态描述逻辑。

参考文献

- [1] Baader F, Calvanese D, McGuinness D L, et al. The Description Logic Handbook[M]. Cambridge University Press, 2002
- [2] Baader F, Laux A. Terminological Logics with Modal Operators [C]//Proceedings of the International Workshop on Description Logics-DL-95. Roma, Italy, 1995; 6-12
- [3] Baader F, Laux A. Terminological Logics with Modal Operators [C]//Proceedings of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence. Morgan Kaufman, Montreal, Canada, 1995; 808-814
- [4] Beneventano D, Bergamaschi S, Lodi S. Terminological logics for schema design and query processing in OODBs[C]//Proceedings of 1st Workshop KRDB'94. Saarbrücken, Germany, 1994
- [5] Beneventano D, Bergamaschi S, Sartori C. Subsumption for Semantic Query Optimization in OODB[C]//Proceedings of the International Workshop on Description Logics-DL-94. Bonn, Germany, 1994
- [6] Borgida A. Description Logics for Querying Databases [C] // Proceedings of the International Workshop on Description Logics-DL-94. Bonn, Germany, 1994
- [7] Borgida A. Description Logics in Data Management [J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 1995, 7: 671-682
- [8] Borgida F, Lenzerini M, Rosati R. Description logics for data bases[M]//Baader F, Calvanese D, McGuinness D L, et al., eds. The Description Logic Handbook. Cambridge University Press, 2002; 472-494
- [9] Calvanese D, De Giacomo G, Lenzerini M, et al. Source Integration in Data Warehousing[C]//Proceedings of the Ninth International Workshop on Database and Expert Systems Applications. Vienna, 1998; 192-197
- [10] Calvanese D, Lenzerini M, Nardi D. Description logics for conceptual data modeling [M] // Chomicki J, Saake G, eds. Logics for Databases and Information Systems. Kluwer Academic Publisher, 1998; 229-263
- [11] Lenzerini M. Description logics and their relationships with databases[C]//ICDT'99. LNCS 1540. 1998; 32-38
- [12] Lutz C. Reasoning with concrete domains[C]//Proceedings of the Sixteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence. Stockholm, Sweden, 1999; 90-95
- [13] Simovici D A, Tenney R L. Relational Database Systems[M]. Academic Press, 1995
- [14] Wolter F, Zakharyashev M. Modal description logics: Modalizing roles[J]. Fundamenta Informaticae, 1999, 39: 411-438
- [15] Wolter F, Zakharyashev M. Temporalizing description logics [C]//Proceedings of Fro-CoS'98. Amsterdam, 1998
- [16] Wolter F, Zakharyashev M. Dynamic description logics[C]//Advances in Modal Logic II. Stanford: CSLI Publications, 2000; 449-463
- [7] Hofmeyr S A, Forrest S. Architecture for an artificial immune system[J]. Evolutionary Computation, 2000, 8(4): 443-473
- [8] 李涛. 网络安全概论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004; 1-458
- [9] Bass T. Intrusion Detection Systems and Multisensor Data Fusion; Creation Cyberspace Situation Awareness[J]. Communications of the ACM, 2000(43): 99-105
- [10] Steinburg A N. Revision to the JDL Data Fusion Model[C]//Joint NA TO/IRIS Conference. Quebec, October 1998
- [11] Bass T. Intrusion Detection Systems and Multi-sensor Data Fusion; Creating Cyberspace Situational Awareness[J]. Communications of the ACM, 2000, 43(4): 99-105

(上接第 129 页)

- [4] Jerne N K. Towards a Network Theory of the Immune System [J]. Annual Immunology, 1974, 24(3): 125-134
- [5] Forrest S, Perelson A S, Allen L, et al. Self-Nonspecific Discrimination in a Computer[C]//Proceedings of IEEE Symposium on Research in Security and Privacy. Oakland, 1994; 54-64
- [6] Hofmeyr S A, Forrest S. Immunity by design: an artificial immune system[A]//Proc. of the Genetic and Evolutionary Computation Conference [C]. Morgan-Kaufmann, San Francisco, 1999; 1289-1296