

# 基于不确定型 AHP 的网络生存能力模糊综合评估<sup>\*</sup>)

王 健<sup>1</sup> 王慧强<sup>1</sup> 赵国生<sup>1,2</sup>

(哈尔滨工程大学计算机科学与技术学院 哈尔滨 150001)<sup>1</sup>

(哈尔滨师范大学网络信息中心 哈尔滨 150001)<sup>2</sup>

**摘要** 对网络系统的生存能力进行量化评估,有助于对不同系统以及同一系统在不同环境下的可生存性做出准确的评价和比较。本文提出了将不确定型 AHP 和模糊综合评估技术相结合的方法,建立网络生存能力评估模型。利用不确定型 AHP 学习得到系统中各因素权重,然后依据隶属度函数对指标评语进行模糊化处理并构建模糊矩阵,再应用模糊综合评估技术得到网络生存能力的综合量化评估结果。通过实例分析,表明应用该方法对网络生存能力进行评估是有效和可行的。

**关键词** 网络生存能力,层次分析法,模糊评估,指标体系

## Fuzzy Comprehensive Assessment in Network Survivability Based on the Uncertain AHP

WANG Jian<sup>1</sup> WANG Hui-Qiang<sup>1</sup> ZHAO Guo-Sheng<sup>1,2</sup>

(Institute of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University of China, Harbin 150001)<sup>1</sup>

(Center of Computer Network and Information, Harbin Normal University, Harbin 150001)<sup>2</sup>

**Abstract** Quantifying survivability of the network system helps to evaluate it exactly for either different systems or the same system in different environments. This paper puts forward a new method that combines uncertain AHP with fuzzy comprehensive assessment technology to build an assessment model of network survivability. Using uncertain AHP acquire the weight value of each factor, and then the comment scores are fuzzed through membership function of fuzzy theory and construct fuzzy matrix. Finally we will gained the quantities evaluating result by adopting fuzzy comprehensive assessment technology. An instance is given to prove the validity and feasibility of using the method in network survivability assessment.

**Keywords** Network survivability, Analytic hierarchy process, Fuzzy assessment, Index system

## 1 引言

可生存性研究是目前国内外网络安全技术发展所处的一个新阶段。可生存性是指在遭受攻击、故障或意外事故时,系统能够及时地完成其关键任务的能力<sup>[1]</sup>。这种能力意味着网络可以被入侵,可以部分组件受损,乃至某些部件并不可靠,但只要系统能在结构上合理配置资源,能在攻击下资源重组,具有自优化、自维护、自身调节和功能语义冗余等自我保护能力,就仍可完成关键任务。Internet 的现实状况是网络中的任何一个节点都可能因为攻击、故障和意外事故等而失效,为了保障网络系统在面临攻击的时候能够稳定、可靠地提供服务,必须考虑网络系统自身的生存能力。通过对网络系统生存能力的量化评估有助于对系统的生存性进行准确的评价和对比,从而进行合理的维护和技术改造,并进一步实现可生存性系统的分析和设计<sup>[2]</sup>。

目前提出的网络信息系统可生存性分析还未有统一的评估标准,也尚未取得突破性进展。其中,比较有代表性的是 CMU/SEI CERT/CC 研究中心提出的 SSA (Survivable Systems Analysis) 方法<sup>[3]</sup>,但它是一种定性的分析方法,未能提出一个可靠的综合各性能评估的数学模型,因而难以对网络系统的生存能力做出准确的评价和比较。

本文以 SSA 方法中的可生存系统关键属性为基础,提出

了一种基于不确定型 AHP-Fuzzy 的网络生存能力定量综合评估模型。模糊评估方法<sup>[4]</sup>善于处理不精确的、模糊的信息,具有模拟人的综合判断推理能力的特点,能够在定性分析与定量分析之间建立联系,并具有较强的综合判断能力。但应用模糊综合评估的方法,对于评估模型的各指标权重不能通过学习而获得,仅凭经验来确定指标的权重集则会缺乏应有的说服力,从而影响评估结果的可靠性。AHP (Analytical hierarchy Process) 方法<sup>[5]</sup>善于把研究对象作为一个系统进行处理,按照分解、比较、判断、综合的思维方式进行决策,通过对统计数据的学习,得到系统中各因素相应的权重。而且,由于实际问题比较复杂,影响指标间重要性程度的因素很多,采用不确定型 AHP 方法,更能反映事物的实际状态。因此,本文将不确定型 AHP 方法与模糊综合评估方法相结合来构造相应的评估模型,能够取长补短、相得益彰,使该模型的评估效果更具科学性。文章后续内容安排如下:第 2、3 节详细介绍了所提出的基于不确定型 AHP 的网络生存能力模糊评估方法;第 4 节通过实例测试验证该方法的有效性;最后是结论,并指出未来的可能研究方向。

## 2 评估模型的建立

模糊综合评估的运算公式为:  $V=W \cdot R$ , 所以客观地确立权重向量  $W$  和模糊矩阵  $R$  成为网络生存能力评估的关键。

<sup>\*</sup>)国防“十五”重点预研基金资助项目(413150702)。王 健 博士生,研究方向为高可信网络及体系结构;王慧强 教授、博士生导师,研究方向为网络与信息安全;赵国生 博士生,研究方向为可信网络。

下面,我们将基于这两个问题来研究评估模型的建立。

## 2.1 利用不确定型 AHP 方法计算指标权重

不确定型 AHP 法计算指标权重的基本步骤是:建立层次结构,构造不确定型判断矩阵。在构造的不确定型判断矩阵中隐含了各指标的权重区间。在满足一致性检验要求后,利用极限测量误差(即误差的最大估计)来进行综合误差的合成,并计算出不确定型判断矩阵的权重向量。对于计算出不确定型判断矩阵的权重区间,再利用优化算法获得区间权重的最优值  $W^*$ 。

**定义 1** 设  $R$  为实数域,称闭区间  $[a^l, a^u]$  为区间数,其中  $a^l, a^u \in R, a^l \leq a^u$ 。以区间数为元素的矩阵或向量称为区间数矩阵或区间数向量。

**定义 2** 称  $\bar{A} = (\bar{a}_{ij})_{n \times n}$  为不确定型判断矩阵,其中元素  $\bar{a}_{ij}$  为第  $i$  个因素指标与第  $j$  个因素指标的相对重要性程度,用区间数  $[a_{ij}^l, a_{ij}^u]$  表示,  $n$  为指标的个数,且应满足:

- (1) 对于  $\forall i, \bar{a}_{ii} = [a_{ii}^l, a_{ii}^u] = [1, 1]$ ;
- (2) 对于  $\forall i, j, \frac{1}{9} \leq a_{ij}^l \leq a_{ij}^u \leq 9$ ;
- (3) 对于  $\forall i, j, \bar{a}_{ji} = \frac{1}{\bar{a}_{ij}} = [1/a_{ij}^u, 1/a_{ij}^l]$ 。

根据上述定义构造的不确定型判断矩阵中隐含了各指标的权重区间。但由于人们对事物的认识存在主观片面性和模糊性,可能会构造出一个混乱的判断矩阵而导致权重计算错误。为了保证权重计算的可靠性,需对判断矩阵进行一致性检验<sup>[6]</sup>。在满足一致性检验要求后,根据文[7]提出的误差分析方法计算出不确定型判断矩阵的权重区间。为求解区间最优权重,构造单目标优化模型:

$$\min F(w) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n D^2(A_{ij}, W_{ij})$$

其中,  $D(A_{ij}, W_{ij}) = \sqrt{(a - W_{ij})^2 + (b - W_{ij})^2}$ ,  $A_{ij} = [a, b]$ ,  $W_{ij} = w_i/w_j$ ,  $w_i$  为某一指标的权重,且  $0 \leq w_j \leq 1, j = 1, 2, \dots, n, \sum_{i=1}^n w_i = 1$ 。

对于上述目标函数,利用计算智能中的遗传算法进行优化搜索,得到最优权重向量  $W^*$ 。

## 2.2 模糊矩阵的构建

先对底层各个指标计算其隶属函数值,即构建底层评语模糊向量。由于评估指标体系中的指标类型不同,因此其隶属函数值的计算方法也不同,主要可分为两类:定性指标和定量指标。对于定性指标,采用模糊统计方法计算其隶属函数关系。模糊统计的做法是让参与评估的各位专家(假设有  $n$  位专家)按事先给出的评估集  $V$  对各评估指标划分等级,再依次统计各评估指标属于各评估等级的频数,把统计出的各个频数和专家数  $n$  相比则可计算出各评估指标隶属于各评估等级的隶属度,并得到相应的模糊向量;对于定量指标,由于指标间的评定标准又各不相同,分为效益型指标(越大越好)和成本型指标(越小越好),因此需进行无量纲化处理来统一度量标准<sup>[6]</sup>。获得无量纲得分后,再利用模糊隶属度函数进行模糊化处理,获得相应的模糊向量,从而可形成模糊矩阵  $R$ ,其中  $r_{ij}$  为第  $i$  个指标在评估集中对应第  $j$  个等级的比重,反映了该指标的状态等级。

## 2.3 评估模型基本框架

(1) 将指标集  $U$  划分  $m$  为个不同的要素集  $U_1, U_2, \dots, U_m$ , 且满足  $U_i \cap U_j = \emptyset, i, j = 1, 2, \dots, m$ 。

(2) 利用不确定型 AHP 方法,计算指标的权重集,包括

各要素的权重集  $W = \{W_1, W_2, \dots, W_m\}$  和各要素集中指标的权重集  $w_i = \{w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{is}\}, i = 1, 2, \dots, m, s$  为第  $i$  个要素集中的指标个数。

(3) 建立评价等级集合  $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ 。其中,  $V_i$  表示第  $i$  个评价等级,  $n$  表示评价等级的个数。

(4) 定义评价等级的对应决策值集  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 。其中,  $X_i$  表示第  $i$  个评价等级所对应的决策值。

(5) 对要素集  $U_i (i = 1, 2, \dots, m)$  中的每个指标进行单指标评估,按模糊矩阵  $R$  构建方法,可得评估矩阵:  $R_i = (r_{ijk})_{s \times n} (i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, s, k = 1, 2, \dots, n)$ 。其中,  $r_{ijk}$  表示第  $i$  个要素集中的第  $j$  个指标属于第  $k$  个等级的隶属度。再应用 Fuzzy 合成运算,可计算出第  $i$  个要素的模糊综合评估向量:  $B_i = w_i \circ R_i = (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{in}), i = 1, 2, \dots, m$ 。其中  $\circ$  为模糊合成算子。

(6) 对  $U$  的  $m$  个要素均作出上述评估后得到总评估矩阵  $B = (B_1, B_2, \dots, B_m)^T$ , 则综合评估模糊集为  $A = W^T \circ B$ 。

(7) 根据综合评估模糊集  $A$ , 由  $G = A \circ X^T$  计算出相应的综合评估值。

## 3 网络生存能力量化评估的实现

可生存系统的关键特征是在面对攻击、故障、意外事故时完成基本服务的能力。为了保证完成基本服务的能力,系统必须具有 4 个关键属性<sup>[9]</sup>,即抵抗攻击、识别攻击及其影响范围、在攻击后修复基本的和所有的服务、自适应以减少未来攻击的影响。可将这 4 个关键属性定义为网络生存能力评估体系要素集中的元素,并依据其对指标集  $U$  进行划分,建立如图 1 所示的网络生存能力评估指标体系层次结构分析图。

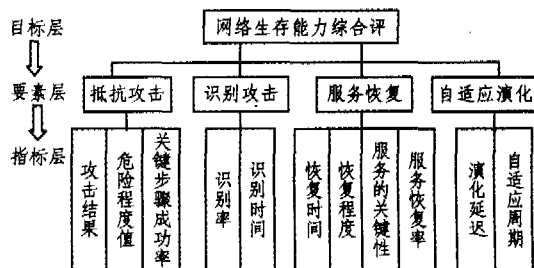


图 1 评估指标体系层次结构分析图

根据指标体系层次结构,应用不确定型层次分析法,得到各要素、各指标的相对权重。然后采用典型的 5 级制的评定方法,建立如下 5 个评估等级  $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\}$ , 分别对应网络系统生存能力的优、较好、一般、较差和很差 5 级。定义评价等级的对应决策值集为  $X = \{95, 85, 60, 35, 20\}$ 。网络生存能力模糊综合评估是一个多目标决策问题。解决多目标决策的一个主要问题就是建立目标之间的可公度性,即用各目标之间的一个统一度量标准进行比较。所以,在进行综合评估前,应先解决指标体系中各个指标的评估值的计算问题,即求隶属函数值的问题。如前所述,图 1 中指标层的各评估指标的类型不同,因此其隶属函数值的计算方法也应不同。对于定性指标,如恢复程度、服务的关键性等,可采用模糊统计法计算其隶属函数关系;对于评估指标体系中的定量指标的评估值,其确定方法又分为效益型指标(如识别率、服务恢复率等)和成本型指标(如恢复时间、自适应周期等)两种情况考虑,需进行无量纲化处理。对获得的无量纲得分,利用模糊隶属度函数进行模糊化处理。再应用 Fuzzy 合成运算计算出底

层(二级)模糊评估向量。利用二级模糊运算结果,对要素层进行分析,计算出模糊综合评估结果和网络可生存能力的综合评估得分。

#### 4 算例

现以评估某网络系统在给定环境下的生存能力为例,说

表1 原始数据表

评估 指标 指标值	抵抗攻击		识别攻击		服务恢复			自适应演化			
	攻击结果	危险值	关键步骤成功率	识别率	识别时间	恢复时间	恢复程度	服务关键性	恢复率	演化延迟	自适应周期
	降级服务	较高	15%	78%	0.5	0.8	较好	高	100%	0.3	0.5

表2 各指标及相应权重示意表

要素			评估指标	
编号	名称	权重	名称	权重
U <sub>1</sub>	抵抗攻击	0.324	攻击结果	0.312
			危险程度值	0.487
			关键步骤成功率	0.201
U <sub>2</sub>	识别攻击	0.280	识别率	0.500
			识别时间	0.500
U <sub>3</sub>	服务恢复	0.221	恢复时间	0.313
			恢复程度	0.053
			服务的关键性	0.397
			服务恢复率	0.237
U <sub>4</sub>	自适应演化	0.175	演化延迟	0.320
			自适应周期	0.680

建立评估集  $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4\}$  {优, 较好, 一般, 较

明上述模型的具体应用。假设该网络各性能指标的初始评估值由表1给出。

根据图1所示的网络生存能力评估指标体系层次结构分析图,应用不确定型AHP,假定计算出的要素层和指标层的权重向量如表2所示。

差,很差),及相应决策值集  $X = \{95, 85, 60, 35, 20\}$ 。对各要素  $U_1, U_2, U_3, U_4$  的底层各个评估指标进行单指标评估,对于定性和定量指标,根据其初始评估值分别计算其隶属函数值并构建模糊化向量,从而形成各要素底层评语模糊矩阵  $R_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 。再应用Fuzzy合成运算公式  $V = W \cdot R$  计算出各要素的二级模糊评估向量  $B_1, B_2, B_3, B_4$ 。令计算结果如表3所示。

经过两级模糊运算,最终得出该网络系统生存能力的模糊综合评估,结果如表4所示。

计算出网络生存能力的综合评估得分为:  $G = A \cdot X^T (0.34, 0.61, 0.05, 0, 0) \cdot (95, 85, 60, 35, 20)^T = 87.15$ 。

根据最大隶属度邻近判别法,该网络系统在给定环境下的可生存能力达到较好级别(0.61)偏优(0.34)。评估结果基本与专家估计一致,说明了采用此评估方法的可行性。

表3 模糊评估过程

编号	二级因素集	权重最优值	模糊化向量	二级模糊运算结果
U <sub>1</sub>	攻击结果	0.312	(0.26, 0.74, 0, 0, 0)	(0.51, 0.49, 0, 0, 0)
	危险程度值	0.487	(0.66, 0.34, 0, 0, 0)	
	关键步骤成功率	0.201	(0.53, 0.47, 0, 0, 0)	
U <sub>2</sub>	识别率	0.500	(0.1, 0.9, 0, 0, 0)	(0.05, 0.95, 0, 0, 0)
	识别时间	0.500	(0, 1, 0, 0, 0)	
U <sub>3</sub>	恢复时间	0.313	(0, 0.3, 0.7, 0, 0)	(0.63, 0.15, 0.22, 0, 0)
	恢复程度	0.053	(0.7, 0.3, 0, 0, 0)	
	服务的关键性	0.397	(0.9, 0.1, 0, 0, 0)	
	服务恢复率	0.237	(1, 0, 0, 0, 0)	
U <sub>4</sub>	演化延迟	0.320	(0.3, 0.7, 0, 0, 0)	(0.1, 0.9, 0, 0, 0)
	自适应周期	0.680	(0, 1, 0, 0, 0)	

表4 模糊综合评估结果

一级因素集	权重最优值	二级模糊运算结果	一级模糊运算结果
抵抗攻击	0.324	(0.51, 0.49, 0, 0, 0)	(0.34, 0.61, 0.05, 0, 0)
识别攻击	0.280	(0.05, 0.95, 0, 0, 0)	
服务恢复	0.221	(0.63, 0.15, 0.22, 0, 0)	
自适应演化	0.175	(0.1, 0.9, 0, 0, 0)	

**结论** 对网络系统的生存能力进行量化评估,是可生存网络系统分析和设计的前提和基础。我们运用了不确定型AHP-Fuzzy方法,是一种定性分析与定量分析相结合、专家评估与科学计算互为补充的系统分析方法,具有系统全面、科学可靠、简单实用且便于计算机快速实现等特点,为评估网络(网络上的应用系统)的可生存能力提供了一定的理论指导。在今后的研究中,还需进一步对评估模型进行更科学的量化。而且在量化分析中,各种指标的确定未必准确合理,还需要经过大量成功的评估实例才能提高评估结果的可靠性。

#### 参考文献

- Westmark R. A Definition for Information System Survivability [C]. In: Proceeding of the 37th Hawaii Internal Conference on System Sciences(HICSS'04), IEEE, 2004. 2086~2096
- Somesh Jha. Survivability Analysis of Networks Systems. <http://www.cs.wisc.edu/~jha/jha-papers/security/icse-2001.pdf>
- Ellison R, Linger R. Survivable Network System Analysis, a case study [J]. Software, IEEE, 1999, 16(4): 70~77

(下转第 111 页)

由于  $Q(a, f(a))$  不属于数据库实例, 因此右侧分枝封闭, 在活动的数据库域中不存在  $x$  使得  $r$  中包含  $Q(a, x)$ , 根据 CWA 假设, 对于任意  $x, r$  中包含  $\neg Q(a, x)$ , 因此分枝中包含  $Q(a, f(a))$  封闭,  $r$  是关于 IC 不相容的。

将数据库实例改成  $\{P(a), Q(a, d)\}$ , 它对于同一 IC 是相容的。可以得到如图 3 所示的 tableau 过程。

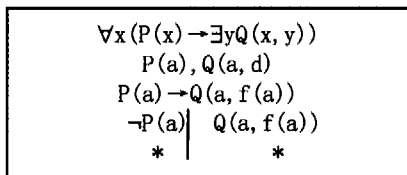


图 3 修正后的相容 tableau

可以定义  $f(a)=d$ , 使得  $Q(a, f(a))$  成为数据库中的一个成员, 修正后的 tableau 右侧分枝是开放的。

**引理 1** 令  $S$  为公式集, 并且  $\gamma$  和  $\delta$  为公式。

1) 如果  $S \cup \{\gamma\}$  是可满足的, 那么  $S \cup \{\gamma, \gamma(t)\}$  对于任意封闭项  $t$  也是可满足的。

2) 如果  $S \cup \{\delta\}$  是可满足的, 那么  $S \cup \{\delta, \delta(p)\}$  对于任意对  $S$  和  $\delta$  是新的常量符号  $p$  也是可满足的。

**证明:** 1) 假设在模型  $M = \langle D, I \rangle$  中,  $S \cup \{\gamma\}$  是可满足的。只要证明在同一模型下  $S \cup \{\gamma, \gamma(t)\}$  是可以满足的。

因为  $\gamma$  在模型中为真, 所以  $(\forall x)\gamma(x)$  也为真, 这里  $x$  对  $\gamma$  来说也是新变量, 那么对任何赋值  $A, [\gamma(x)]^{I, A}$  为真。现在, 令  $A$  为一个赋值, 使得  $x^A = t^A$ , 可得  $[\gamma(t)]^{I, A} = [\gamma(x/t)]^{I, A} = [\gamma(x)]^{I, A} = t$ , 即  $S \cup \{\gamma, \gamma(t)\}$  在模型  $M = \langle D, I \rangle$  中是可以满足的。

2) 假设在模型  $M = \langle D, I \rangle$  中,  $S \cup \{\delta\}$  是可满足的。  $p$  是对  $S$  和  $\delta$  为新的常量符号, 只要证明在任意模型下  $S \cup \{\delta, \delta(p)\}$  是可以满足的。

因为  $\delta$  在模型中为真, 所以  $(\exists x)\delta(x)$  ( $x$  对于  $\delta$  是新的) 且  $[\delta(x)]^{I, A}$  对于某一赋值  $A$  也为真。

构造新的模型  $M^* = \langle D, J \rangle$ , 有同样的定义域, 一个解释  $J$  除了  $p$  外与  $I$  完全相同, 作为特例设  $p^J = x^A$ , 因此这两个模型只是在常量符号  $p$  处不同, 这样  $S \cup \{\delta\}$  在模型  $M^*$  中是可以满足的, 且  $[\delta(x)]^{J, A}$  也是真的。又因  $x^A = p^J$ , 有  $[\delta(x)]^{J, A} = [\delta(x/p)]^{J, A} = [\delta(x)]^{I, A} = t$ 。因此  $S \cup \{\delta, \delta(p)\}$  在  $M^*$  中是可以满足的, 因此在  $M$  中也是可以满足的。

**引理 2** 如果任何 tableau  $TP(IC \cup r)$  扩展规则被应用到可满足的表, 其结果为另一个可满足的表。

**证明:** 假设  $T$  是一个可满足的 tableau  $TP(IC \cup r)$ , 对于  $T$  的分枝  $\theta$  应用表扩展规则产生  $X$ , 生成一个 tableau  $T^*$ 。下面证明  $T^*$  也是可以满足的。

因为  $T$  是可以满足的,  $T$  至少有一个可满足的分枝, 选择这一分枝, 记为  $\tau$ 。

1)  $\tau \neq \theta$ 。规则应用到  $\theta$  上,  $\tau$  仍为  $T^*$  的分枝, 因此  $T^*$  是

可以满足的。

2)  $\tau = \theta$ 。  $\theta$  本身是可满足的, 布尔赋值  $\nu$  将  $\theta$  中的所有公式映射为  $t$ 。

2a)  $X = \alpha$ 。那么  $\theta$  被扩展为  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  而产生  $T^*$ 。由于  $\alpha$  产生在  $\theta$  上, 有  $\nu(\alpha) = t, \nu(\alpha) = \nu(\alpha_1) \wedge \nu(\alpha_2)$ , 因此  $\nu$  必将  $\nu(\alpha_1)$  和  $\nu(\alpha_2)$  都映射为  $t$ 。这样  $\nu$  将在  $T^*$  的  $\theta$  扩展的每个公式都映射为  $t$ , 因此  $T^*$  是可以满足的。

2b)  $X = \beta$ 。那么将左右儿子加到  $\theta$  的最后节点上, 标记为  $\beta_1$  和  $\beta_2$ , 而产生  $T^*$ , 由于  $\beta$  产生在  $\theta$  上,  $\nu(\beta) = t$ , 但  $\nu(\beta) = \nu(\beta_1) \vee \nu(\beta_2)$ ,  $\nu$  将  $\beta_1$  或  $\beta_2$  映射为  $t$ ,  $\nu$  将左侧或右侧的扩展分枝映射为  $t$ 。只要存在其一,  $T^*$  就有可满足的分枝, 因此  $T^*$  是可以满足的。

其它情况:  $X$  是  $\neg \neg Z, \neg \top$  或  $\neg \perp$ , 易证  $T^*$  是可以满足的。

另外, 含量词的二种情况, 引理 1 已证。

**定理 1** 对于一个数据库实例  $r$  和完整性约束  $IC$ , 如果  $TP(IC \cup r)$  是封闭 tableau 的, 那么  $r$  是关于  $IC$  不相容的, 即  $r$  不满足  $IC$ 。

**证明:** 假设公式集  $S = IC \cup r$  存在一个 tableau,  $S$  是可满足的。

对  $S$  构造一个开始于  $S$  封闭的 tableau, 由于  $S$  是可满足的, 那么初始标记为  $S$  的 tableau 是可满足的, 根据引理 2,  $S$  的 tableau 的每个子 tableau 都是可满足的, 包括最后封闭的 tableau, 这显然是矛盾的, 因此,  $S$  是不可满足的, 即  $IC \cup r$  是不可满足的, 那么  $r$  是关于  $IC$  不相容的, 即  $r$  不满足  $IC$ 。

**结论** 本文给出了一种对不相容数据库修正的逻辑方法, 利用该方法对数据库修正, 可以避免传统方法信息丢失等问题。这种逻辑修正方法可以应用到数据仓库和数据挖掘中, 对于保证数据库完整性具有重要的意义。

### 参考文献

- 1 Arenas M, Bertossi L, Chomicki J. Consistent query answers in inconsistent databases. In: Proceeding ACM Symposium on Principles of Database Systems (ACM PODS'99), ACM Press, 1999. 68~79
- 2 Greco S, Zumpano E. Computing repairs for inconsistent databases. In: Proceedings 3<sup>th</sup> Intl. Symposium on Cooperative Database Systems for Advanced Applications (CODAS01), Beijing, China, 2001
- 3 刘全, 孙吉贵. 提高一阶多值逻辑 tableau 推理效率的布尔剪枝方法. 计算机学报, 2003, 26(9): 1165~1170
- 4 Fitting M C. First-order logic and automated theorem proving. New York: Springer Verlag, 1996
- 5 Fitting M C. Types and Tableau. New York: Springer Verlag, 2000
- 6 Davey B A, Priestley H A. Introduction to lattices and order. Cambridge Mathematical Textbooks. Cambridge University Press, Cambridge, 1990
- 7 刘全, 孙吉贵. 非经典逻辑的语义 tableau 方法. 计算机科学, 2002, 29(5): 72~75
- 8 Bertossi L, Schwind C. Analytic tableaux and database repairs. In: Foundations of Information and Knowledge Systems, Springer LNCS 2284, 2002
- 9 刘全, 孙吉贵, 于万钧. 自由变量语义 tableau 中(-规则的一种改进方法. 计算机研究与发展, 2004, 41(7): 1068~1073

(上接第 75 页)

- 4 胡宝清. 模糊理论基础[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004
- 5 许树柏. 层次分析法原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1987
- 6 魏毅强, 刘进生, 王绪柱. 不确定型 AHP 中判断矩阵的一致性概念及权重. 系统工程理论与实践, 1994, 14(4): 16~22
- 7 尤天慧, 樊治平. 不确定性多属性决策中确定熵权的一种误差分

- 析方法. 系统工程, 2003, 21(1): 101~104
- 8 朱孔来. 评价指标的非线性无量纲模糊处理方法. 系统工程, 1996, 14(6): 58~62
- 9 Ellison R J, Fisher D A, Linger R C, et al. An Approach to Survivable Systems. http://www.cert.org/easel/natol.doc