

基于概念格模型的角色提取

韩道军^{1,2} 侯彦娥² 贾培艳²

(河南大学数据与知识工程研究所 开封 475001)¹ (河南大学计算机与信息工程学院 开封 475004)²

摘 要 角色工程研究基于角色的访问控制模型(RBAC)中角色的提取与优化,但在应用的场景中忽视了复杂信息系统(CIS)这一重要对象。RBAC是CIS中的重要访问控制模型,但由于现有的角色及其权限之间的关系由人工指定,导致成本较高。针对此问题,将角色工程引入至CIS中,使用概念格模型和主谓宾需求获取方法,通过数据变换,从系统的需求中直接提取分层角色及其权限关系,以降低成本。最后,通过实验验证了本方法的有效性。

关键词 概念格,角色工程,角色提取,复杂信息系统

中图法分类号 TP309 **文献标识码** A

Roles Acquisition Based on Concept Lattice Model

HAN Dao-jun^{1,2} HOU Yan-e² JIA Pei-yan²

(Institute of Data and Knowledge Engineering, Henan University, Kaifeng 475001, China)¹

(School of Computer and Information Engineering, Henan University, Kaifeng 475004, China)²

Abstract Role engineering focuses on the role mining and optimizing of Role-Based Access Control(RBAC), but it omits the scenario of complex information system(CIS) among those applications. The popular model for access control in CIS is RBAC, where relations between roles are assumed to have been built by humans beforehand. However, building these relations is time-consuming, even for experts. We introduced the role engineering into CIS, exploited concept lattice model and subject-predicate-object method to generate roles and their corresponding hierarchical relations from the requirement information acquired from domains, and the costing is lower. In the end, our experimental results show that our algorithm is effective.

Keywords Concept lattice, Role engineering, Role acquisition, Complex information system

1 引言

角色工程以基于角色的访问控制模型(Role Based Access Control, RBAC)中的角色为研究对象,采用数据分析的方法,从已有的数据中挖掘出角色,并对角色进行优化和评估^[1-4]。例如,文献[1]使用图优化技术对分解后的矩阵进行处理,提取出具有层次关系的角色;文献[2]介绍了一种可以使用领域专家知识进行聚类的角色提取方法;文献[3]则对常见的角色提取方法进行了评价。观察到以前的方法中对权限的处理未加区分,Xiaopu Ma等提出一种考虑权限权重(权重表示权限对系统的影响程度)的角色挖掘算法,该算法能够找出频繁权限集合,与传统的方法需要多次扫描数据库不同,该算法仅仅扫描数据库一次^[4]。以上这些方法针对不同的应用场景提出了相应的算法,取得了较好的效果,但是,忽视了一种常见的系统——复杂信息系统(Complex Information System, CIS)中的应用问题。CIS的研究和使用过程中均离不开访问控制,并且广泛使用的是RBAC模型^[5-7]。但是,在现有的CIS中的RBAC建模过程中,对于角色与权限之间的关系处理有两种方式:(1)参照业务操作或流程人工指定角色及其

权限关系。显然,这种方式需要需求获取人员和需求提供人员进行大量的沟通和交互,代价较高。(2)参考信息系统使用方的组织机构图,并根据组织机构图设置情况对应的角色,然后分派相应的权限。但是组织机构图中树形结构居多,因此其不能精确地反映实际中的某些情况,如职能交叉等。除此之外,以上两种方式都过分依赖于系统的需求获取状况,也即过分依赖系统分析员的经验。我们通过观察发现:角色及操作权限信息仅仅是整个系统需求中的一类特殊的需求,具有较强的独立性,可以不依赖于业务流程及流程之间的关系(同步、异步;并发、并行等)等一些其他信息。因此,可以采取某种方式将这类信息从整个需求中提取出来或有针对性地采集这类需求,单独分析,从中找出角色及权限之间的关系作为系统中访问控制模型的一个基本框架。根据需求获取和描述现状,本文使用一种基于多视点的需求获取与分析方法——主谓宾方法来获取和描述CIS中的需求。该方法便于从整个需求中抽取角色及权限相关信息,并以表格形式表示,易于处理^[9]。并且,这种表格方式描述的需求可以使用数据分析工具——概念格^[10,11]进行结合。概念格建立在偏序之上,可以与RBAC中的角色及角色具有的权限关系自然地结合;同

到稿日期:2012-02-15 返修日期:2012-06-08 本文受国家自然科学基金项目(60773201)资助。

韩道军(1979—),男,博士,讲师,主要研究领域为访问控制技术、软件工程、空间数据处理, E-mail: hdj@henu.edu.cn; 侯彦娥(1980—),女,硕士,讲师,主要研究领域为软件工程、空间数据处理; 贾培艳(1979—),女,硕士,讲师,主要研究领域为形式概念分析、空间数据处理。

时,概念格中形式概念之间的泛化 (generalization) 与例化 (specialization) 关系非常自然地反映了角色之间的层次关系。图 1 表示一个概念格的 Hasse 图。图 2 是一个 FTP 系统中不同角色的权限关系图,并按照权限的包含关系,分层表示。从图 1 和图 2 中可以看出,二者在结构上相同,可以建立映射关系。也就是说,可以使用概念格表示角色及权限关系。

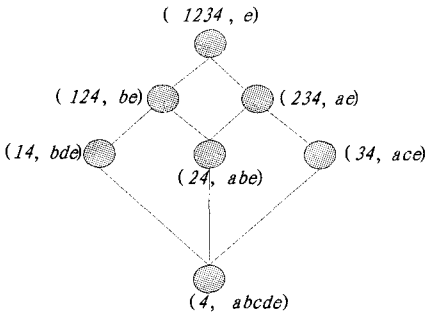


图 1 概念格的 Hasse 图

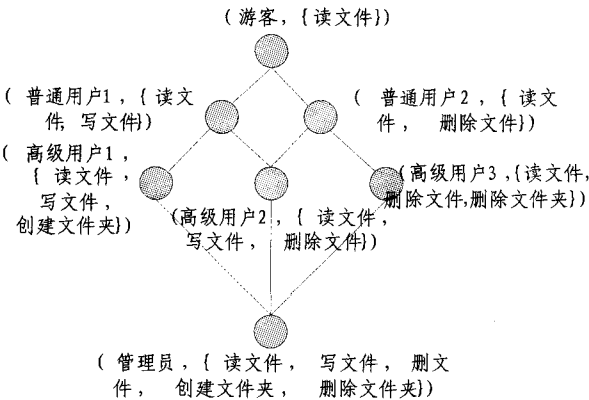


图 2 FTP 系统中角色关系示意图

本文以 CIS 为研究对象,在使用主谓宾需求获取与描述方法的基础上,使用概念格模型对需求信息进行分析并提取出系统中的角色及角色间的层次关系。与传统方式相比,本文方法能够使得 CIS 中角色的层次描述和提取变得自然且成本较低。

2 背景

2.1 概念格、RBAC、主谓宾方法简介

2.1.1 概念格简介

假设给定形式背景(context)为三元组 $K = (G, M, R)$, 其中 G 是实例(对象)集合, M 是描述符(属性)集合, R 是 G 和 M 之间的一个二元关系,则存在唯一的一个偏序集合与之对应,并且根据这个偏序集合产生一种格结构,这种由背景 (G, M, R) 所构造的格 L 就称为一个概念格。表 1 表示了一个形式背景,图 1 则是由 K_1 生成的概念格,以 Hasse 图表示。

表 1 形式背景 K_1 示例

	a	b	c	d	e
1		1		1	1
2	1	1			1
3	1		1		1
4	1	1	1	1	1

2.1.2 RBAC 简介

访问控制模型中,RBAC 是发展比较成熟的一种模型,提出的扩展模型较多,且应用广泛^[8]。RBAC 在用户(User)和访问权限(Rights)之间引入角色(Role)的概念,用户与特定的一个或多个角色相关联,角色同一个或多个访问权限相关联。图 3 描述了常见的分层角色 RBAC 模型图。

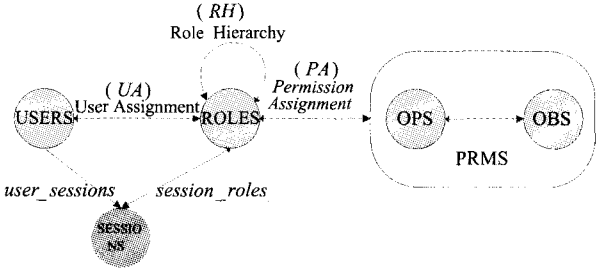


图 3 角色分层 RBAC 示意图

从图 3 中可以看出,角色是 RBAC 中的一个关键概念,与图中的许多元素存在联系,具有重要的作用。其中的角色分层方法建立在偏序基础之上,能够描述绝大部分 CIS 中的角色间的权限关系。在传统的分层 RBAC 使用过程中,角色往往是由人工指定,具有较强的主观性与依赖性,且代价昂贵。因此,提供一种自动的角色分层方法是必要的。

2.1.3 基于主谓宾的需求获取方法简介

在需求获取与表示的各种方法中,本文使用一种理解自然,操作简单的基于主谓宾逻辑需求获取与分析方法^[9]。该方法使用句子成分分析中的各种称谓(主语、谓语和宾语等),来使需求获取方和提供方均有共同的背景知识,这可以看作是一种无障碍的交流方式。为便于讨论,基于主谓宾逻辑需求获取与分析方法简称为主谓宾方法。其中,主谓宾方法中的对象分别指主语、谓语和宾语,以下是说明性解释。

(1) 主语(subject)。主语是指功能的使用者,也称为角色。

为与提取出来的角色区分,本文称主语代表的角色为基本角色,从基本角色中提取出来的角色为泛化角色。基本角色与泛化角色的实质相同,区别在于来源不同,基本角色源自需求,泛化角色则经过分析得到。

(2) 谓语(predicate)。谓语是指主语所做的操作。

(3) 宾语(object)。宾语是指主语做完操作之后所产生的副作用(Side-effects)或效果的数据表示,也称为数据。

按照主谓宾方法获取需求后,可以将获取的信息按照所属成分分类,并按照主语-主语、主语-宾语、谓语-宾语、宾语-宾语、主语-谓语等不同视点分析和描述需求,分别表示系统中不同的信息。例如通过分析主语同宾语的关系,可以得到系统的基本访问权限问题。

2.2 RBAC、概念格、主谓宾方法三者之间的联系

如前文所述,访问控制模型、概念格、主谓宾方法三者之间存在内在联系,如图 4 所示。

从图 4 中可以看出,访问控制和主谓宾方法在描述方式上相似,与概念格在描述对象的包含关系(结构)上相似;而概念格与主谓宾方法联系的桥梁是操作对象为二维表。显然,我们能够以主谓宾方法描述需求中的基本访问控制信息,使用概念格进行分析和处理信息,显示描述需求中的角色及权限关系。

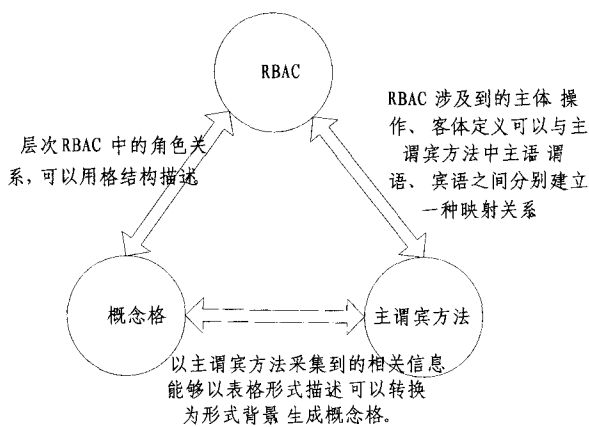


图4 访问控制模型、概念格、主谓宾方法联系示意图

3 权限分析及角色提取

按照主谓宾方法获取到信息(需求描述)后,可以将获取的信息分类,并以表格的形式描述。以表格形式描述的信息除了具有推导和演绎功能之外,在描述形式上与信息系统及形式概念分析中的形式背景相同,可以使用以上领域中的相关理论,从中挖掘出隐含的信息。本文的主要工作就是通过分析主语同宾语的关系,得到基本的访问权限关系及泛化角色等。

权限分析及角色提取的算法描述如表2所列。

表2 权限分析与角色提取算法框架式描述

输入:系统需求 O
输出:角色集合 R_s 及角色之间的层次关系 R_r
Begin
1. 从需求 O 中抽取主语同宾语之间的关系,用 Sob 表描述;
2. 检测 Sob 表中基本角色的必要性,挖掘可能存在的隐式需求;
3. 将 Sob 表转换为形式背景 K ;
4. 从形式背景中构造概念格 $CS(K)$,将 $CS(K)$ 中的节点映射为角色集合 (R_s),同时根据形式概念之间的偏序关系构造角色之间的层次关系 (R_r)。
End

下面按照算法步骤,分别介绍相关内容。

3.1 主语同宾语之间的关系分析

3.1.1 主语同宾语之间的关系描述

主语同宾语之间的关系,可以用一个四元组 $X = (Su, Ob, Au, D)$ 表示。其中, Su 表示主语的集合, Ob 表示宾语的集合, Au 表示谓语集合, $I: Su \times Ob \rightarrow 2^{Au}$ 。主语同宾语之间的关系用一个二维表描述,简称 Sob 表,其中行表示主语,列表示表单信息,行列交叉处表示谓语,也即主语(角色)对宾语(资源)的操作方式(动作)。表3为一个 Sob 表示例。

表3 一个 Sob 示例

	Ob_1	Ob_2	...	Ob_j	...	Ob_n
Su_1	Au_{11}	Au_{21}				
...						
Su_i				Au_{ij}		
...						
Su_m						Au_{mn}

其中, Su_i 表示基本角色(主语), Ob_j 表示宾语(表单), Au_{ij} 表示角色 Su_i 对于表单 Ob_j 具有 Au_{ij} 访问权限集合,可以视为一组操作或动作。Sob 表的自然语义为:在不考虑访问条件的前提下,主体与对应权限之间的关系。

3.1.2 角色必要性检测

CIS 中涉及的用户与角色众多,需要管理的资源名目繁

多,这给需求获取带来不便,不能保证已经获取到的需求是正确的,需要对其进行检测和推导,判断其是否包含矛盾或冗余信息。在基于 Sob 表描述的前提下,通过一些简单操作,可以得到一些有意义的结论。

定理1 若 Sob 表中存在某个主语 Su_i 对应的所有列的取值为空,则表明该主语多余,可以不用考虑。

证明:由 Sob 的构造方式可知,某个主语 Su_i 对应的所有列的取值为空,则说明 Su_i 没有任何权限,此时主语 Su_i 没有存在的必要,定理1显然可得。

定理2 若 Sob 表中存在某个宾语 Ob_i 对应的所有行的取值为空,则表明该宾语多余,可以不用考虑。

证明:由 Sob 的构造方式可知,若宾语 Ob_i 对应的所有行的取值为空,则说明 Ob_i 没有被任何一个对象能够或需要访问,则这个表单没有存在的必要,定理2显然可得。

需要说明的是,定理1和定理2成立的一个前提是假定当且的需求描述是完全的。假设当且的需求描述不完全,则可以得出类似的结论,即有定理3。

定理3 若 Sob 表中存在某个主语 Su_i 对应的所有列的取值为空,则表明该主语的操作信息遗漏,需要补充采集 Su_i 的相关信息项。

证明:由定理1显然可得。

定理4 若 Sob 表中存在某个宾语 Ob_i 对应的所有行的取值为空,则表明该宾语的对应操作对象信息遗漏,需要补充采集 Ob_i 的相关信息项。

证明:由定理2显然可得。

3.2 权限分析及角色提取

3.2.1 形式背景获取

对于以四元组 X 形式描述的 Sob 表,不符合信息系统和形式背景的描述方式,需要将其转换为三元组形式描述。本文为统一处理,将 Sob 转换为形式背景,因为形式背景也是信息系统的一种描述方式。

将 Sob 转换为形式背景的算法如表4所列。

表4 由 Sob 生成形式背景

输入: $X(Su, Ob, Au, D)$
输出: $K(G, M, R)$
Begin
1. 构造三元组 $K = (G, M, R)$;
2. $G = Su$;
3. $M = \bigcup (Au_i \times Ob_i)$, Au_i 为表单 Ob_i 对应的操作集合;
4. R 为 G 和 M 之间的一个二元关系,按照如下规则产生:如果 $(Su_i, Ob_j) \in I_{au}$, 则 $(g, m) \in R$, 其中 $Su_i \in Su, Ob_j \in Ob, au \in Au, g = Su_i$ 且 $g \in G, m = (au, Ob_j)$ 且 $m \in M$ 。
End

显然,按照从 X 到 K 的转换可知, K 中的 $M = \bigcup (Au_i \times Ob_j)$ 。则对于同一个实例,从 Sob 表转换为形式背景之后,表格中的行数(对象数目)不变,列数(属性数目)可能增加。表5为一个形式背景示例,其中的 $m_i \in M, N \geq n$ 。

表5 由 Sob 生成的形式背景

	m_1	m_2	...	m_j	...	m_N
Su_1	1	1				
...						
Su_i				1		
...						
Su_m						1

3.2.2 分层角色提取

从 Sob 表或者形式背景中,我们仅能得到单个主语具有的权限关系,主语之间的权限关系不能够通过显式方式得到。显然,如果某几个主语(角色)对于宾语(表单)都具有相同的权限,则可以定义更高级概念的角色,也即,假设某几个主语具有一些相同的权限,可以将公共的权限提取出来,独立成为一个泛化角色供相关基本角色继承,体现一种层次关系。这是分层角色提取的直接动机。此外,概念格模型与分层角色 RBAC 在描述集合的包含关系上,表现形式相同,且格节点信息能够表示角色及角色具有的权限集合信息,能够在概念格上提取分层角色及权限关系。也即,在 RBAC 中,单个角色的常规描述方式为 $R=(Role, Rights)$, $Role$ 为角色名(由人工定义,常见方式为参考某个属性,如部门、岗位名称等), $Rights$ 为权限集合。在概念格中,形式概念的描述为 $C=(G_x, M_x)$, G_x 为外延集合, M_x 为内涵集合。显然,二者的描述方式相同。因此,对于一个形式概念 $C=(G_1, M_1)$, M_1 可以表示权限集合, G_1 可以表示角色(基本角色或泛化角色)集合。

基于概念格的分层角色自动提取过程包括两步:(1)从概念格中提取角色;(2)从概念格中提取角色的分层关系。相应的解决方案描述如下。

对于步骤(1),可以直接把概念格中的每个形式概念视为一个角色。假设 C 为一个形式概念,则可以将 $Intent(C)$ 作为角色的操作权限, $Extent(C)$ 作为拥有这个操作的角色名称。也即由形式概念 $X(G_x, M_x)$ 经过变换 f 可以得到角色 $Y(Role, Rights)$, $f(X)=Y$, 同时满足: $Role=G_x, Rights=M_x$ 。这里,直接使用形式概念的外延表示提取的角色名称。例如,在图 1 和图 2 中,可以很容易找到角色与形式概念间的映射关系,如图 5 所示;并且可以认为图 2 中的角色及权限关

系可以经由图 1 中的形式概念自动提取得到。

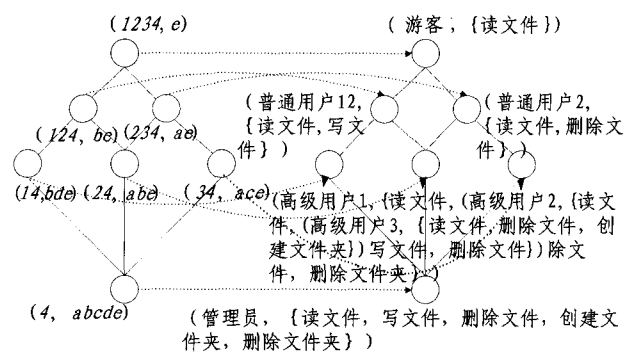


图 5 形式概念与角色节点映射图

对于步骤(2),可以通过一次映射变换得到角色的层次关系。在概念格中,概念的外延越大,内涵越小,也即具有的属性越少。而在 RBAC 中,角色的大小与角色具有的权限大小成正比,与形式概念中相反。显然,提取的角色之间的偏序关系可由形式概念之间的大小关系的逆关系得到。也即,对于 $CS(K)$ 中的 C_1 和 C_2 ,若存在 $C_1 > C_2$,则有 $f(C_1) < f(C_2)$ 。

通过以上两步,可以实现一种基于概念格的角色集合及角色分层关系的自动提取,能够降低软件系统开发代价,易于制定系统的安全访问控制策略。

4 实验及分析

本文以某省新华书店集团区店教材系统为实验场景,使用主谓宾方法获取系统需求。该系统主要实现包括客户预订、向供货商预订、收货、分发、发货调度、运输、结算等一系列的过程,以主谓宾方法获取和描述系统的需求,且系统的需求描述是完全的。限于篇幅,抽取其中的部分需求,使用 Sob 表示,如表 6 所列。

表 6 区店教材系统部分需求的 Sob 表

	征订 书目单	客户 报订单	供货商 报订单	收货单	发货单	客户 发货单	运输 批次单	运输 反馈单	客户 结算单	供货商 结算单	付退单	客户 退货单	库存 表单	盘点单	损益单
管理	查询	查询	查询	查询	查询	查询	查询	查询	查询	查询	查询	查询	查询	查询	查询
业务	录入	录入、 导入	订数 汇总		生成								查询		
仓管			查询	录入、 查询	查询						录入	录入	修改、 查询	录入	生成
调度						汇总、 查询									
运输							生成	录入							
财务				查询	查询				生成	生成	查询	查询			
客户	报订	录入、 导出							结算	结算					
供货商			接收								付退				

从表 6 中可知, $Su=\{\text{管理, 业务, 仓管, 调度, 运输, 财务, 客户, 供货商}\}$, $Ob=\{\text{征订书目单, 客户报订单, 供货商报订单, 收货单, 发货单, 客户发货单, 运输批次单, 运输反馈单, 客户结算单, 供货商结算单, 付退单, 客户退货单, 库存表单, 盘点单, 损益单}\}$, $Au=\{\text{录入, 导入, 订数汇总, 生成, 查询, 修改, 汇总, 导出, 结算, 接收, 付退}\}$ 。由 Sob 表可以执行一系列操作,挖掘出隐藏需求和提取角色,其分别描述如下。

(1) 角色必要性检测。

根据表 6,执行角色必要性检测操作,即检测是否存在某个基本角色不具备任何操作。易知,表 4 中不存在空行,

则 Su 中的基本角色都是必要的。同理, Ob 中的表单也是必要的。

(2) 形式背景获取。

根据表 6,产生等价的形式背景 K_2 ,其中, $G=\{\text{管理, 业务, 仓管, 调度, 运输, 财务, 客户, 供货商}\}$, $M=\{(\text{录入, 征订书目单}), (\text{报订, 征订书目单}), (\text{查询, 征订书目单}), (\text{导入, 客户报订单}), \dots, (\text{查询, 损益单})\}$, $|M|=37$ 。为便于表示,分别用编号表示 G 和 M 中的元素。按照常规,用数字 1-8 表示 G 中元素,用字符 $a-z$ 和 $A-K$ 表示 M 中的元素。则, R 中的元素如表 7 所列。

表7 由 Sob 生成的形式背景 K_2

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K		
1			1				1	1	1	1	1	1		1		1	1	1	1			1			1	1		1			1	1			1	1		1	1
2	1			1	1			1				1																				1							
3									1			1		1													1			1		1	1	1		1			
4																1	1																						
5																	1		1																				
6												1		1								1		1				1			1								
7		1		1		1																	1		1														
8										1																							1						

(3) 分层提取角色

对 K_2 , 根据概念格构造算法^[12] 得到概念格, 如图 6 所示。

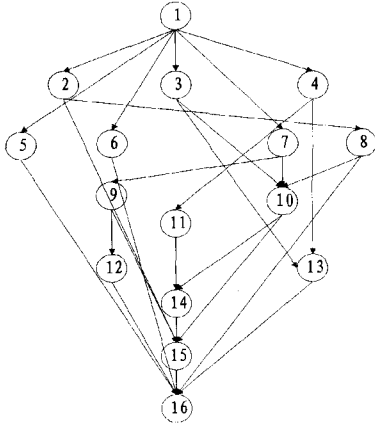
图6 概念格 $CS(K_2)$ 的 Hasse 图

图 6 中每个形式概念的编号及外延和内涵分别为: 1 (12345678, $\emptyset$), 2 (14, p), 3 (123, F), 4 (27, d), 5 (5, qs), 6 (8, jC), 7 (136, ln), 8 (4, op), 9 (16, $lnBE$), 10 (13, $ilnF$), 11 (7, $bdfvy$), 12 (6, $linuxBE$), 13 (3, $ilnADFGHJ$), 14 (2, $adehmF$), 15 (1, $cgiklnprt看zBEFIK$), 16 ($\emptyset$, $a-K$)。按照形式概念的外延大小, 可以将 $CS(K_2)$ 分为 3 个集合 S_1 、 S_2 和 S_3 , $S_1 = \{5, 6, 8, 11, 12, 13, 14, 15\}$, $S_2 = \{2, 3, 4, 7, 9, 10\}$, $S_3 = \{1, 16\}$ 。易知, $CS(K_2) = S_1 \cup S_2 \cup S_3$, 其中 S_1 表示基本角色集合, 由 Sob 可以直接得到; S_2 表示泛化角色集合, 通过概念格中的形式概念转换得到; S_3 表示冗余角色集合。

由以上分析可知, 这种方式可以使用概念格模型对需求信息进行分析并提取出系统中的角色及角色间的层次关系, 能够与 CIS 中的需求紧密结合, 降低系统开发成本。

结束语 本文在基于主谓宾方法获取需求与表示的基础上, 引用形式概念分析中的概念格模型, 将以主谓宾形式表示的与权限相关的需求转换为形式背景, 然后构造出概念格, 从概念格中提取出具有层次关系的角色及权限。通过实验可以看出, 概念格模型在角色提取中是有效的, 提取角色方式简单、直观。

本文实验中的角色依靠部门属性作为角色名称, 这不够全面, 在有些场合不适用。进一步的研究工作将考虑把角色作为一种普通的属性利用主语的各种属性构造概念格, 并与权限概念格之间建立映射, 找出影响主语的权限的关键属性集合。同时, 考虑引入信息粒度度量方式, 对提取出的角色进行评估。

参考文献

- [1] Zhang D, Ramamohanrao K, Ebringer T. Role Engineering using Graph Optimisation[C]// Symposium on Access Control Models and Technologies (SACMAT). 2007; 139-144
- [2] Schlegelmilch J, Steens U. Role mining with orca[C]// Symposium on Access Control Models and Technologies (SACMAT). ACM, June 2005
- [3] Molloy I, Li N, Li T, et al. Evaluating role mining algorithms[C]// Proceedings of the 14th ACM Symposium on Access Control Models and Technologies (SACMAT). 2009; 95-104
- [4] Ma Xiao-pu, Li Rui-xuan, Lu Zheng-ding. Role Mining Based on Weights[C]// SACMAT'10. Pittsburgh, Pennsylvania, USA, June 2010; 65-74
- [5] 姚莉, 张维明, 王长缨, 等. 基于多智能体的复杂信息系统开发方法研究[J]. 管理科学学报, 2002, 5(5): 44-54
- [6] 王琨, 袁峰, 周利华. 复杂信息系统模型研究[J]. 计算机科学, 2006, 33(10): 119-123
- [7] Focardi R, Gorrieri R, et al. Access Control: Policies, Models, and Mechanisms[C]// FOSAD 2000, LNCS 2171. 2001; 137-196
- [8] Sandhu R, Coyne EJ, Feinstein H L, et al. Role based access control models[J]. IEEE Computer, 1996, 29(2): 38-47
- [9] Zheng Yun-xiang, Wan Hai, Li Lei, et al. A new software requirement method based on subject, predicate and object Logic [C]// Software Process Workshop 2005 (SPW2005). Beijing, China, May 2005; 25-27
- [10] 何云强, 李建凤. RBAC 中基于概念格的权限管理研究[J]. 河南大学学报: 自然科学版, 2011, 41(3): 308-311
- [11] Ganter B, Wille R. Formal concept analysis: Mathematical foundations[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1999
- [12] 沈夏炯. 概念格同构生成方法研究及 IsoFCA 系统实现[D]. 上海: 上海大学, 2006

(上接第 144 页)

- [12] Jason B, Chris B, Corbett J C, et al. Megastore: Providing Scalable, Highly Available Storage for Interactive Services[C]// Proceedings of the 5th Biennial Conference on Innovative Data Systems Research. Asilomar, California, USA, 2011; 223-234
- [13] Marton T, Attila G. Keyspace: A consistently replicated, highly-available key-value store[R/OL]. <http://scalien.com/pdf/Keyspace.pdf>, 2011-11-15

- [14] Leslie L, Robert S, Marshall P. The Byzantine generals problem [J]. ACM Transactions on Programming Languages and Systems, 1982, 4(3): 382-401
- [15] 杨磊, 黄浩, 李仁发, 等. P2P 存储系统拜占庭容错机制研究[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(1): 4-8
- [16] 苟彦, 李华. 存储区域网络在联机事务处理下的性能研究[J]. 计算机科学, 2011, 38(Z10): 172-174