

基于扩展关系模型的多 Bayesian 网依赖结构的合并^{*}

李维华 刘惟一 张忠玉 郭祥文 张燕峰

(云南大学计算机科学系 昆明650091)

摘要 贝叶斯网是一个每个结点都带有一张概率表的有向无环图,它可以有效地表示不确定性知识并进行知识推理。知识系统在很多时候不得不将来自不同信息源或者同一信息源不同时刻的知识合并起来。Bayesian 网作为一个知识系统,所以也会面临将多个 Bayesian 网提供的信息结合起来。本文提出一个基于扩展的关系数据模型和条件独立的算法,该算法将多个 Bayesian 网合并成为一个 Bayesian 网,并且尽可能地保留每一个 Bayesian 网的信息。

关键词 Bayesian 网,条件独立,扩展关系模型,扩展的多值依赖,合并

Integrating Multi Dependency Structure of Bayesian Network Based on Generalized Relation Model

LI Wei-Hua LIU Wei-Yi ZHANG Zhong-Yu GUO Xiang-Wen ZHANG Yan-Feng

(Department of Computer Science, Yunnan University, Kunming, 650091)

Abstract A Bayesian Network is a directed acyclic graph (DAG) with conditional probabilities for each node. Bayesian network is a powerful common knowledge representation and reasoning tool for partial beliefs under uncertainty. However, Knowledge-based system sometimes must be able to "intelligently" manage a large amount of information coming from different sources and at different moments in times. Based on generalized relation and the conditional independences defined by the Bayesian Network we present an algorithm that integrates multi Bayesian network and construct a large Bayesian Network preserving as much information as possible.

Keywords Bayesian network, Conditional independences, Generalized relation, Generalized multivalued dependence, Combination

1 引言

知识系统在很多时候不得不将来自不同信息源或者同一信息源不同时刻的知识合并起来。在人工智能和数据库的相关文献中均已经对这一问题有一定的讨论,提出了一些原则性的策略,其中信度更新就是动态系统中结合新知识改变旧知识的一个比较成功的例子。C. E. Alchourron 等人对信度更新进行了比较系统的研究,提出了更新操作应该满足的一系列假设条件,在这些条件中最基本的条件就是假设新信息是完全可靠的^[5]。但是如果我们没有理由断定其中某一个信息源是完全可靠的,或者其中之一完全覆盖其它知识的话,就只有将两个信息合并起来,并且希望能最大限度保留个体的信息。

Bayesian 网^[6-8,11]表示概率知识,本质上就是一个专家系统,所以也会面临将多个 Bayesian 网提供的信息结合起来。期望通过专家用手工作将各个 Bayesian 网得来的信息结合起来是不现实的,因为整个系统涉及到的面可能很广,并且可能很复杂。一个可行的办法就是从数据中学习,但数据未必可以得到,所以创建结合多 Bayesian 网的依赖网络就在于将各个 Bayesian 网从不同领域得到的概率知识(条件独立信息)结合起来。合并之后得到的 Bayesian 网更接近客观实际,使推理更合理。除了可以进一步改善 Bayesian 网,还可以使 Bayesian 网具有更好的适应能力,使得网络满足时间改变带来的改变要求。

1997年 S. K. M. Wong 对传统的关系模型进行了扩充,

提出扩展的关系模型,使得传统关系模型与概率关系结合起来,她证明了扩展的多值依赖等价于条件独立,扩展的无环连接依赖等价于弦化的 Markov 网^[10]。基于扩展的关系模型 S. K. M. Wong[2001]提出了一个算法来创建 Multi-Agent 的 Markov 网^[9],提出了一个合并多个弦化的 Markov 网的方法。她使用扩展的多值依赖来表示每一个弦化的 Markov 网提供的条件独立,利用传统关系数据库成熟的理论,将各个弦化的 Markov 网提供的信息结合起来,并消除依赖信息之间的冗余与冲突,并构造整个网络。该算法基于传统关系数据库中已经成熟的理论,但是该算法只能处理多个弦化 Markov 网的结合。

本文所做的工作就是基于扩展的关系模型,将来自不同信息源的 Bayesian 网或者同一信息源不同时刻的 Bayesian 网结合起来,使 Bayesian 网更接近客观实际,推理更符合实际。除了可以进一步改善 Bayesian 网,还可以使 Bayesian 网具有更好的适应能力,使得网络满足时间改变带来的改变要求。

本文第2节简单介绍几个概念;第3节简单介绍扩展的关系数据理论;第4节提出基于扩展关系数据理论的多 Bayesian 网合并算法;第5节用一个例子进一步说明本文提出的多 Bayesian 网合并算法;最后总结全文。

2 基本概念

一个图是一个二元组 $G=(V,E)$, 其中 V 是一个结点的有限集合, $E \subseteq E^*(V) := \{(u,v) \in (V \times V) | u \neq v\}$ 是一个二

^{*} 国家自然科学基金项目:No. 60263006;中国科学院计算机智能信息处理协会重点实验室项目:No. I p2002-2;云南自然科学基金项目:No. 2002F0063M 资助。李维华 助教,硕士,主要研究方向:数据与知识工程;刘惟一 教授,博士生导师,主要研究方向:数据与知识工程;张忠玉 副教授,主要研究方向:决策与多 agent 系统。

元关系的集合,表示图 G 中的边。如果 $(u,v) \in E$, 且 $(v,u) \in E$, 称无向边 $u-v$ 出现在图 G 中; 如果 $(u,v) \in E$, 但 $(v,u) \notin E$, 就称有向边 $u \rightarrow v$ 出现在图 G 中; 如果 $(u,v) \in E$ 或者 $(v,u) \in E$ 就称 u, v 是相邻的, 即 u, v 中存在有向边或者无向边。为了方便, 我们分别用“ $u-v \in G$ ”、“ $u \rightarrow v \in G$ ”和“ $u \cdots v \in G$ ”来表示。一个只包含有向边的图称为有向图; 一个只包含无向边的图称为无向图(UDG)。将一个图 G 的所有有向边转化为无向边得到的无向图称为图 G 的构架。

Bayesian 网和 Markov 网都是表示概率知识的图形模型, 概率知识主要指条件独立和一些条件概率(或边缘概率)。一个 Bayesian 网是每个结点都带有一张概率表的有向无环图, 有向无环图表示条件独立, 概率表表示条件概率。Markov 网就是用无向图来表示变量之间的条件独立关系。弦化 Markov 网是一个每一个最大完全图可以表示一个边缘概率分布的弦化无向图。

因为在 Bayesian 网、Markov 网和弦化 Markov 网中分别用有向无环图、无向图和弦化无向图来表示概率知识中的条件独立, 所以有向无环图、无向图和弦化无向图也分别称为 Bayesian 网、Markov 网和弦化 Markov 网的依赖结构。在有向无环图中用 D-分离来表示概率知识中的条件独立, 在无向图中用结点分割来表示条件独立。

3 扩展的关系模型^[10,11]

1997年 S. K. M. Wong 对传统的关系模型进行扩充提出扩展的关系模型, 使得传统关系模型与概率关系结合起来。传统的关系模型就是一张包含 n 个属性 $U = \{X_1, \dots, X_n\}$ 的关系表, 扩展的关系模型中除了 n 个属性外, 还增加了一列概率 P , 即 $R = U + P$ 。

设 $R(U+P)$ 为扩展的概率关系模式, $XY \subseteq U, Z = U - XY, r^*$ 是 $R(U+P)$ 上的概率实例, r 为 r^* 在 U 上的投影, $r_1 = \prod_{xy}(r), r_2 = \prod_{xz}(r)$ 。如果 r^* 满足扩展的多值依赖 $X \Rightarrow Y$, 它应该满足:

$$(1) r = r_1 > r_2; (2) p(xyz) = \frac{p(xy)p(xz)}{p(x)},$$

其中 $p(xyz) = p_{t[XYZ]=xyz}(t), p(xy) = p_{t[XY]=xy}(t), p(xz) = p_{t[XZ]=xz}(t)$ 。

经证明, 传统关系模型是扩展的关系模型的一个特例, 所以扩展的关系模型具有传统关系模型所具有的类似性质。此外, 她证明了扩展的多值依赖等价于条件独立; 扩展的无环连接依赖等价于弦化的 Markov 网。也就是说, 一个弦化的 Markov 网可以表示一个扩展的无环连接依赖。类似于传统的关系模型, 扩展的无环连接依赖等价于一组扩展的多值依赖, 一个弦化的 Markov 网可以表示一组扩展的多值依赖。

例1 考察图1中的 G , 设 G 表示的是一个弦化的 Markov 网的依赖结构。该依赖结构所表示的扩展多值依赖集为:

$$M = \{ \{A_2\} \Rightarrow \{A_1\} \mid \{A_1 A_3 A_5 A_6\}, \{A_2 A_3\} \Rightarrow \{A_1\} \mid \{A_4 A_5 A_6\}, \{A_5\} \Rightarrow \{A_6\} \mid \{A_1 A_2 A_3 A_4\} \}$$

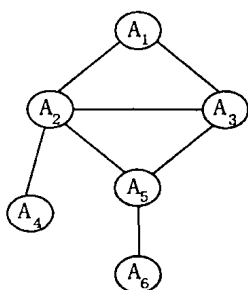


图1 一个弦化的无向图 G_2

4 多 Bayesian 网的合并

合并多个 Bayesian 网的依赖结构(即有向无环图)本质上就是从多个 Bayesian 网的依赖结构所定义的条件独立集 $M = (M_1^+ \cup M_2^+ \cup \dots \cup M_n^+)$ 中找出一个条件独立子集 M' , M' 可以用一个有向无环图表示出来, 且 M' 能尽量地保持 M 中的信息。由 M' 能建造一个 Bayesian 网的依赖结构, 则这个 Bayesian 网的依赖结构就是结合 n 个 Bayesian 网的依赖结构。

4.1 Bayesian 网、Markov 网和弦化的 Markov 网之间的关系

下面引入三个引理来说明 Bayesian 网、Markov 网和弦化的 Markov 网的依赖结构之间的关系。

引理1 设 D 是一个有向无环图, G 是 D 的 moral 图, M_D, M_G 分别是有向无环图 D 和无向图 G 定义的条件独立集, 则 $M_G \subseteq M_D$ 。(证明略)

引理2 设 G_1 是一个无向图, G_2 是 G_1 的弦化图, M_{G_1}, M_{G_2} 分别是无向图 G_1, G_2 定义的条件独立集, 则 $M_{G_2} \subseteq M_{G_1}$ 。(证明略)

引理3^[1~3] 设 G 是弦化无向图, D 是一个有向无环图, 且 D 和 G 有相同构架, M_D, M_G 分别是 D 和 G 定义的条件独立集, 则 $M_D = M_G$ 。

从这三个引理可以看出一个有向无环图的 moral 图所定义的条件独立, 是有向无环图所定义的条件独立的子集。一个无向图的弦化图所定义的条件独立集是无向图所定义的条件独立集的一个子集。一个弦化无向图所定义的条件独立集和相同构架的有向无环图所定义的条件独立集等价。基于上面的三个引理我们考虑到将多个 Bayesian 网的有向无环图转化为无向图进行合并, 因为在转化的过程中不会增加系统以外的信息。也就是说, 将 Bayesian 网的依赖结构 moral 化, 再弦化得到的弦化无向图。弦化无向图定义的条件独立和原来有向无环图定义的条件独立集有关系: $(M_1^+ \cup \dots \cup M_n^+) \subseteq (M_1^+ \cup M_2^+ \cup \dots \cup M_n^+)$ 。此外, 只要合并之后建立一个弦化的无向图, 而弦化的无向图定义的条件独立集等价于一个具有相同构架的有向无环图定义的条件独立集。将弦化的无向图转化为有向无环图就可以完成多 Bayesian 网的依赖结构的合并工作。

下一节就介绍如何将多个弦化无向图表示的知识结合起来并用一个弦化的无向图来表示。

4.2 扩展的多值依赖集合扩展的连接依赖之间关系

一个弦化的 Markov 网可以表示一组扩展的多值依赖集合, 那么是不是能表示任意一个扩展的多值依赖集合? 在传统的关系数据理论中, 我们知道: 给定一个非圈连接依赖, 总可以找到一个多值依赖集与之等价。反之, 给定一个多值依赖集 M , 则未必存在一个无环连接依赖 ADJ 使 $M \equiv ADJ$ 。类似地, 在扩展的关系数据理论中, 给定一个扩展的非圈连接依赖, 总可以找到一个扩展的多值依赖集与之等价。反之, 给定一个扩展的多值依赖集 M , 则未必存在一个扩展的无环连接依赖 $PADJ$ 使 $M \equiv PADJ$ 。但是我们可以找到一个 $M' \subseteq M$, 使 M' 与一个 $PADJ$ 等价, 而这个 $PADJ$ 又等价于一个弦化的 Markov 网。

设 $R(U+P)$ 是一个扩展的关系模型, M 是 R 上的扩展多值依赖集, 总可以找到一个扩展的无环连接依赖 $PADJ$, 使 $M' \equiv PADJ$, 那么如何在一个扩展的多值依赖集 M 中, 找到

一个 M' , 且 M' 能尽量地保持 M 中的信息? 下面就介绍如何找到一个极大的 M' 。

定义1^[11] 设 $R(U+P)$ 是一个扩展的关系模型, M 是 R 上的扩展多值依赖集, 设 $M' \subseteq M$, 且 $M' \equiv PADJ \otimes R$, 如果不存在这样的 $M'' \subseteq M$, $PADJ \otimes S = M''$, $|M'| < |M''|$, 其中 $|M'|$ 表示 M' 中扩展多值依赖的数目, 则称 $\otimes R$ 是关于 M 的极大 $PADJ$ 。

定义2^[11] 设 $R(U+P)$ 是一个扩展的关系模型, M 是 R 上的扩展多值依赖集, M 的联系图 $G_M = (V, E)$, V 是结点集, E 是边集, M 中的每一个属性是 V 中的一个结点, 如果 $AB \Rightarrow C \in M$, 则 A 和 B 都有一条边指向 C , 边的标志为 ab 。

一个联系图 G_M 中可能有环, 不同环之间有公共边, 如果 k 个环之间有公共边 e , 则边 e 的权为 k , 当然不在环中的边权为 0。只出现在依赖集的右部的属性称为反码, 具有相同右部的依赖集合记为 $RI()$, 例如具有相同右部 B 的依赖集合记为 $RI(B)$ 。联系图 G_M 中结点 A 的不同标志的进线数记为 $IN | A |$, 表示结点 A 的入度。

算法1^[11] $PADJ(M)$

输入: $R(U+P)$ 上的扩展多值依赖集 M , 属性集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$

输出: M 的极大 $PADJ, M'$

1. 构造 M 的联系图 G_M ;
 2. 为 G_M 中每一条边标上权值;
 3. 计算 G_M 中每个结点的入度;
 4. 求 G_M 的最小权生成树 T (选取权小的边, 权相等时选取入度小的边);
 5. 从 T 中取出边集 E ;
 - (1) 求 E 中的一个反码 K^{-1} ;
 - (2) 将 E 中的一条边 $e = (X \Rightarrow K^{-1})$ 加到集合 M' , 记为 m'_i ;
 - (3) $E = E - RI(K^{-1})$;
 6. 按 m'_i 的顺序输出 M' ;
- RETURN (M')

定理1^[11] 设 $R(U+P)$ 是一个扩展的关系模型, M 是 R 上的扩展多值依赖集, 算法1总可以找到 $M' \subseteq M$, $M' \equiv PADJ \otimes R$, 且 $\otimes R$ 是关于 M 的极大 $PADJ$ 。

定理1说明了给出一个扩展的多值依赖, 算法1总可以找到一个极大的多值依赖子集, 该多值依赖子集等价于一个弦化的 Markov 网。

4.3 合并算法

既然总可以在一个扩展多值依赖集中找到一个极大 M' , 那么可以将多个 Bayesian 网的依赖结构所表示的条件独立用扩展的多值依赖表示, 得到一个扩展的多值依赖集合, 再在其中找到一个等价于弦化的无向图的极大 M' 。而且弦化无向图总和相同构架的有向无环图所表示的条件独立一致。只要将弦化无向图转化为有向无环图就可以完成多 Bayesian 网的依赖结构的合并。

其次, 将一个有向无环图 moral 化、弦化之后得到弦化无向图所表示的条件独立集是原有向无环图所表示的一个子集。也就是说, 将一个有向无环图 moral 化、弦化操作不会增加系统以外的条件独立。

基于以上的知识, 我们提出基于扩展关系模型的多个 Bayesian 网合并算法。首先将 Bayesian 网的依赖结构 moral 化, 再弦化得到弦化无向图。弦化无向图定义的条件独立和原有向无环图定义的条件独立有关系: $(M_1 \cup \dots \cup M_n) \subseteq (M_1^+ \cup M_2^+ \cup \dots \cup M_n^+)$ 。其次, 利用算法1在 $(M_1 \cup \dots \cup M_n)$ 中求解到一个极大扩展多值依赖集, 而且该子集等价于一个扩展的无

环连接依赖, 即弦化的 Markov 网。最后, 使用 Meek 提出的算法^[5]可以容易地将 Markov 网转化为 Bayesian 网, 从而完成整个合并工作。

算法2 $\text{Integration}(D_1, \dots, D_n)$

输入: $\{D_1, \dots, D_n\}$, 结点集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$

输出: G

1. 分别 moral 化并弦化 $D_1, \dots, D_n$, 得到弦化的 Markov 网 $D_1^+, \dots, D_n^+$;
2. 取出弦化的 Markov 网上的条件独立 (即扩展的多值依赖) $M = (M_1^+ \cup M_2^+ \cup \dots \cup M_n^+)$;
3. $M' = PADJ(M)$;
4. $Z = V$;
5. FOR M' 中的每一个 $m'_i = X \Rightarrow Y$ DO
 $Q_i = X \cup Y$; $Z = Z - Y$;
6. $Q_{i+1} = Z$;
7. FOR each Q_i DO
 FOR each $v_i, v_j \in Q_i, v_i \neq v_j$ DO
 使 $v_i - v_j \in G$ 成立;
8. WHILE 如果 G 包含无向边 DO
 (1) 任意选一条边 e , 并任意给一个方向;
- (2) While 如果 D 包含满足下面条件的无向边 DO
 Rule 1: IF $a \rightarrow b \in G, b \rightarrow c \in G$ and $a \rightarrow c \notin G$ THEN 使 $b \rightarrow c \in G$;
- Rule 2: IF $a \rightarrow b \in G, b \rightarrow c \in G$ and $a \rightarrow c \in G$ THEN 使 $a \rightarrow c \in G$;
- Rule 3: IF $a \rightarrow d \in G, d \rightarrow c \in G, a \rightarrow c \in G, b \rightarrow a \in G, b \rightarrow d \in G, b \rightarrow c \in G$, THEN 使 $b \rightarrow d \in G$;
- Rule 4: IF $c \rightarrow d \in G, d \rightarrow b \in G, a \rightarrow c \in G, a \rightarrow b \in G, a \rightarrow d \in G$ THEN 使 $a \rightarrow b \in G$;

RETURN (G)

5 合并实例

以图2中两个 Bayesian 网的依赖结构为例说明如何来合并 Bayesian 网。

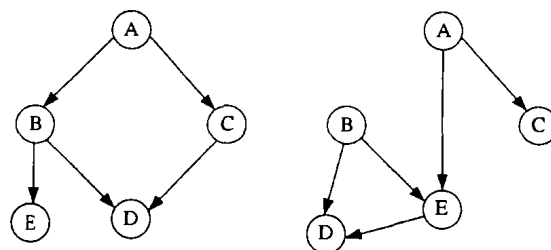


图2 (a) G_1

(b) G_2

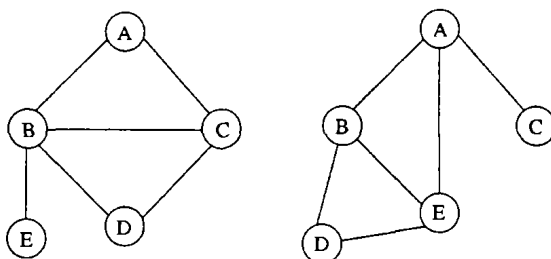


图3 (a) G_1

(b) G_2

(1) 经过 moral 化和弦化得到的是图3中的结果, 分别取出两个弦化无向图表示的扩展多值依赖为: $M_1 = \{BC \Rightarrow A, B \Rightarrow E\}$, $M_2 = \{A \Rightarrow C, BE \Rightarrow A\}$ 。

(2) 合并两个扩展的多值依赖得到的扩展的多值依赖集合为: $M = \{BC \Rightarrow A, B \Rightarrow E, A \Rightarrow E, A \Rightarrow C, BE \Rightarrow A\}$ 。

(3) 建立该扩展的多值依赖的联系图, 并在上面加上边的权值和结点的入度得到图4的结果。

(4) 在图4的基础上求最小生成树, 得到图5的结果。

(5) 取出该树对应的极大依赖子集得到: $M' = \{m_1 = B \Rightarrow A, m_2 = B \Rightarrow E\}$ 。

对应的扩展无环连接依赖为 $AB \otimes (BE \otimes BCD)$, 即三个圈为: $Q_1 = \{AB\}$, $Q_2 = \{BE\}$, $Q_3 = \{BCD\}$ 。对应的弦化

Markov 网为图6中的结果。

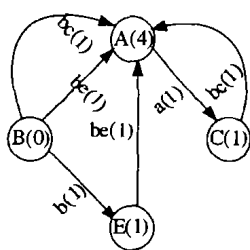


图4

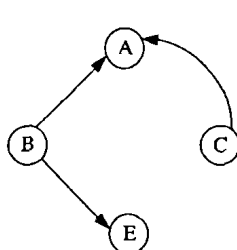


图5

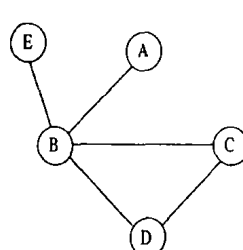


图6

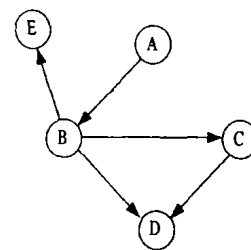


图7

(6)转化为有向无环图得到图7中的结果。

到此就完成了图中两个 Bayesian 网的依赖结构的合并,合并得到的 Bayesian 网的依赖结构所定义的条件独立是结合两个系统而得到的一个新系统。

结束语 知识系统在很多时候不得不将来自不同信息源或者同一信息源不同时刻的知识合并起来。Bayesian 网作为一种知识系统,也会面临这样的问题。本文所做的工作就是基于扩展的关系模型,将来自不同信息源的 Bayesian 网或者同一信息源不同时刻的 Bayesian 网结合起来,使 Bayesian 网更接近客观实际,推理更加合理。除了可以进一步改善 Bayesian 网,还可以使 Bayesian 网具有更好的适应能力,使得网络满足时间改变带来的改变要求。

参考文献

- Andersson S, Madigan, Perlman M D. A Characterization of Markov equivalence classes for acyclic digraphs. *Annals of statistics*, 1997(25): 505~541
- Chickering D M. Learning equivalence classes of Bayesian network structures. *Journal of Machine Learning Research*, 2002

- (2): 445~498
- Chickering D M, Geiger D, Heckerman D. Learning Bayesian Networks is NP-Hard. [Technical Report MSR-TR-94-17]. Microsoft Research, 1994
- Liberatore P, Scharf M. Arbitration (or how to merge knowledge bases). *IEEE transactions on knowledge and data engineering*, 1998, 10(1): 76~89
- Meek C. Causal inference and causal explanation with background knowledge. In: *Proc. of the Eleventh Conf. on uncertainty in artificial intelligence*, Morgan Kaufmann, 1995
- Pearl J. Bayesian Networks. UCLA Cognitive Systems Laboratory: [Technical Report (R-277)]. November, 2000. M. Arbib ed. *Handbook of Brain Theory and Neural Networks*, MIT Press, 2001
- Pearl J. Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference. Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, 1988
- Stephenson M T A. An introduction to Bayesian network theory and usage. [IDIAP research Report 00-03]. Feb. 2000
- Wong S K, Butz C J. Constructing the Dependency Structure of a Multi-Agent Probabilistic Network. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2001, 13(3): 395~415
- Wong S K M. An extended relational data model for probabilistic reasoning. *Journal of intelligent information systems*, 1997, 9(2): 181~202
- 刘惟一,田雯.数据模型.北京:科学出版社,2001

(上接第109页)

用户直接交互的界面为表现层;各种中间件,如 CGI、EJB,以及与企业内部管理系统的连接接口等为业务处理层;数据服务层是指后台数据和企业后台管理系统。第二代电子商务平台称为交互式电子商务平台。

第三阶段的平台是一个新的概念,不同的人观点不同,我认为可以把基于 Agent 技术和 Web 服务的电子商务软件平台视为第三阶段的平台。从技术上讲,第三代平台可以克服第二代平台中不具备开放性和智能性,不能动态地进行商务集成的不足。

第三阶段的平台结构图如图4所示。

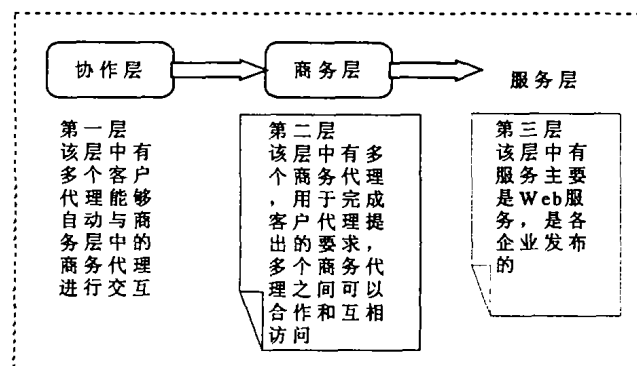


图4 基于 Agent 技术和 Web 服务的电子商务平台

由图4可见,这种平台由三层组成,其中客户代理与商务代理之间的通信满足 B2C 电子商务要求,而第二层中的多个

商务代理之间的通信和合作又可满足 B2B 电子商务的要求,它们共享的是 Web 服务,故要建立 UDDI 注册中心,用于管理和提供各种 Web 服务。

结束语 电子商务的发展可谓日新月异,从1996年到现在,已经发展了三代^[5](分别是信息发布阶段、交互型电子商务阶段、事务处理阶段),现在正在向第四代(集成处理阶段)过渡。以后的电子商务要体现个性化、智能化和集成化,同时要满足开放性,就要运用上面介绍的一系列技术来建构安全、合理、适用的电子商务平台。强大的技术含量相信会给电子商务带来更加广阔的发展空间。

参考文献

- 刘军,季常照,曾洁琼 编著.电子商务系统的规划与设计.人民邮电出版社,2001
- 张云勇 编著.移动 agent 及其应用.清华大学出版社,2002
- 张维明 主编.语义信息模型及应用.电子工业出版社,2002
- 张维明 主编.智能协作信息技术.电子工业出版社,2002
- 陈月波 主编.电子商务解决方案.电子工业出版社,2002
- IFoster, CKesselman. TheGrid: BlueprintforaFutureComputingInfrastructure. SanFrancisco, USA: MorganKaufmannPublishers, 1999
- Papers By Borys Omelayenko, Borys Omelayenko, Dieter Fensel. ScalableDocument Integration for B2B Electronic Commerce [EB/OL]. <http://WWW.cs.vu.nl/~borys/publications.html>, 2002/06/05