

# CP-nets 的可满足性序列求解算法研究

孙雪姣 刘惊雷

(烟台大学计算机与控制工程学院 烟台 264005)

**摘要** CP-nets 是一种简单、直观的图形化偏好表示工具,成为近几年人工智能的一个研究热点。然而对于 CP-nets 的基础性质——可满足性序列的研究却较少。通过构造 CP-nets 导出图,利用改进的图的深度优先遍历算法实现二值网的强占优测试,对强占优测试得到的可达矩阵进行分析,得出任意结构 CP-nets 的可满足性序列个数关系;给出了生成全部可满足性序列的算法;强化和扩充了 CP-nets 的基本概念,深化了 CP-nets 的基础理论研究。

**关键词** 条件偏好网(CP-nets),条件偏好表(CPT),CP-nets 导出图,强占优测试,偏好的可满足性,可满足性序列

**中图分类号** TP301 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.5.054

## Research on Algorithm of Satisfiability Ranking Generation for CP-nets

SUN Xue-jiao LIU Jing-lei

(School of Computer and Control Engineering, Yantai University, Yantai 264005, China)

**Abstract** CP-nets(condition preference networks) is a simple and intuitive graphical tool for representing conditional ceteris paribus preference statements over the values of a set of variables, and it has been a studying hotspot in artificial intelligence recently. The satisfiability ranking of CP-nets is studied. By constructing induced graph of CP-nets and solving the strong dominance testing with respect to binary-valued CP-nets, the number of satisfiability ranking was derived. And the algorithm of generating all satisfiability rankings was designed by analyzing the reachability matrix acquired from strong dominance testing. What's more, the syntax, semantics and some definitions were collated and introduced.

**Keywords** Condition preference networks, Condition preference table, Induced graph of CP-nets, Strong dominance testing, Preferences satisfiability, Satisfiability ranking

偏好决定着选择<sup>[1]</sup>。在多 Agent 系统中,Agent 的偏好决定了双方合作求解的方式及速度;信息处理中,使用偏好可以在信息过滤和提取时显著减少数据量;通过跟踪用户配置文件(提取偏好信息)及制定策略(偏好处理)可以实现自动决策;在日常生活中,偏好也引导着人们的选择。对同一类决策问题,不同的人具有不同的偏好,因此得到的答案也不同,如有人可能喜欢黑色的商务用轿车,有人则喜欢白色的家庭用轿车,即相同的数据源施加的个人偏好不同,得到的决策结果不同,这就是典型的个性化决策。

用户的偏好分为定量偏好和定性偏好两种。定量偏好基于效用函数表示方式<sup>[2]</sup>,把用户的特定选择货币化为一个数值。这种方法简单、直观,通过数值比较就能得出用户的最优选择。然而,并不是所有直观的、合理的偏好关系都可以用效用函数来描述,特别是面对自动化决策问题时,无法采用这种定量的知识表示方法。

现实生活中的许多决策问题都具有如下特征:

①多属性原则,即决策对象具有多属性,根据多个属性(变量)进行决策。如一个人在确定买书时,需要关注供应商、类型、作者和价格等属性,每个人对决策对象的属性关注点不

同导致他们最终的选择也不同。

②属性间存在依赖关系,即某人对属性取值的偏好依赖于其他属性的取值。比如喜欢哪个作者的书取决于书的类型,选择什么颜色的车取决于车的用途等。这种具有依赖关系的多属性定性偏好不只出现在日常生活中,在政治中的社会选择、数据库的查询和协同过滤系统及推荐系统中都存在很广泛的应用<sup>[3]</sup>。

③无最优答案,即没有完全满足用户需求的答案或者存在多个满足条件的答案。比如喜欢传记且供应商为 Lowest-Prices 同时价格低于 10 元,苛刻的条件导致查无结果,但是采用软约束则可能会有多个答案。

所以,在目前的研究中,人们更倾向于采用定性的方法来描述更广泛范畴的偏好<sup>[4]</sup>。CP-nets(Condition preference networks)能够被用来描述在那些相对严密的、直观的、结构化的条件偏好信息中隐含的定性偏好关系。运用这个工具主要的优势在于它是一个定性的图形化的描述工具,能够反映偏好之间的依赖关系,在许多实际环境中它的描述显得更加严密和自然。

对 CP-nets 的研究,经典的是文献[5,6]的工作,他们对

到稿日期:2014-06-11 返修日期:2014-10-11 本文受山东省高等学校科技计划项目(J14LN23),山东省自然科学基金(ZR2014FL009, ZR2013FM011),山东省自然科学基金青年项目(ZR2013FQ023)资助。

孙雪姣(1979—),女,硕士,讲师,主要研究方向为网络搜索技术、约束满足问题求解, E-mail: sunxuejiao6@tom.com;刘惊雷(1970—),男,博士生,副教授,主要研究方向为程序理论和计算方法。

前人工作进行了总结,详细描述了 CP-nets 的语法、语义及应用。近几年还出现了一些 CP-nets 子类的研究问题——TCP-nets(Tradeoff-enhanced CP-nets)<sup>[7]</sup>和 CI-net(Condition important networks)<sup>[8]</sup>,它们主要是在处理属性之间的偏好关系的基础上,增加了反映属性重要性的元素,然而它们的分析技术与 CP-nets 一样。Ciaccia<sup>[9]</sup>使用 CP-nets 作为数据库的偏好查询语言,设计出一种带有偏好的 SQL 语句;Endres<sup>[10]</sup>使用 TCP-nets 作为数据库的偏好查询语言,实现了如何将 TCP-nets 的查询转化为对数据库的查询;Bosc<sup>[11]</sup>探讨使用 CP-nets 和其他带权的布尔条件实现偏好查询等。

作为一种表示定性偏好的模型,其必定需要完成一些推理任务,比如可满足性、一致性、连通性及有界性、导出图的结构特性等,这些都是 CP-nets 进行定性偏好决策的关键内容,却很少有人研究。刘惊雷<sup>[12,13]</sup>研究了 CP-nets 的基础问题,分析其表达能力,证明了其完备性和一致性定理。孙雪姣<sup>[14]</sup>给出了 CP-nets 一致性与可满足性等价的结论并进行了 CP-nets 的一致性推理。但是,还有大量的基础理论问题没有解决,比如如何求取 CP-nets 的全部可满足序列及可满足性序列个数关系等,而对于具有偏好信息查询处理能力的主要运算 Skyline 查询和 Top-*n* 查询都是以 CP-nets 的可满足性序列为基础的。因此,求取 CP-nets 的可满足性序列对于实现个性化的数据库查询及个性化的推荐系统都具有重要的意义。由于这些理论问题还没有彻底解决,CP-nets 并没有在实际应用中很好地发挥作用。

本文主要研究 CP-nets 的可满足性序列的生成。作为理论基础,首先系统总结了前期研究工作中的 CP-nets 的可满足性的定义和相关定理,然后着重介绍如何得到一个 CP-nets 的全部可满足性序列。Skyline 查询和 Top-*n* 查询为实现个性化数据库查询技术及自动推荐系统中的关键定性运算奠定了基础,本文的工作以文献<sup>[12-15]</sup>为基础,所以文中先对前期的工作进行简要的说明。

## 1 CP-nets 的语法与语义

### 1.1 偏好的相关定义

**定义 1**<sup>[15]</sup> 设  $V = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  是决策属性的集合,  $dom(X_i)$  代表属性  $X_i \in V$  的有限定义域  $\{x_1^i, \dots, x_{n_i}^i\}$ , 则决策空间  $\Omega$  是各个属性定义域的笛卡儿积, 即  $\Omega = dom(X_1) \times \dots \times dom(X_n)$  表示所有属性的可能组合。  $o \in \Omega$  是决策空间的一个配置, 代表决策属性的一种组合。若两个配置  $o$  和  $o'$  仅有一个属性值不同, 而其它属性值都相同, 则称  $o$  和  $o'$  为可交换的配置。

现实中决策的两个属性之间若有依赖关系, 即决策者对属性  $X_i$  的偏好取决于  $X_j$ , 称  $X_j$  是  $X_i$  的父亲, 用  $pa(X_i)$  来表示。

**定义 2**  $>$  是决策空间  $\Omega$  上的二元关系, 具有自反性、传递性和反对称性, 即  $>$  是严格偏序关系时, 称  $>$  为  $\Omega$  上的严格偏好关系。它反映了决策者对两个配置  $o, o'$  的偏好强弱关系, 即  $o > o'$  表示决策者对  $o$  的偏好强于对  $o'$  的偏好。

(1) 若对两个配置  $o, o' \in \Omega$ , 有  $o \not> o'$  且  $o' \not> o$ , 则称  $o$  和  $o'$  不可比。

(2) 若对两个配置  $o, o' \in \Omega$ , 有  $o > o'$  或  $o'$  与  $o$  不可比较, 则含义是  $o'$  不比  $o$  强, 表示为  $o >_{no} o'$ 。即  $>_N$  为 CP-nets 所能

表达的偏好集合。

### 1.2 条件偏好图——CP-nets

**定义 3**<sup>[15]</sup> CPT( $X_i$ ) 为属性  $X_i$  的条件偏好表(Condition Preference Table), 表示属性  $X_i$  在  $pa(X_i)$  的不同取值下, 决策者对  $dom(X_i)$  集合的一个偏好排序。由决策者所提供的  $pa(X_i)$  的一种取值称为属性  $X_i$  的一个决定条件。那么, 在所有的决定条件下, 决策者对属性  $X_i$  的取值的偏好排序构成了属性  $X_i$  的条件偏好表 CPT( $X_i$ )。

**定义 4**<sup>[15]</sup> CP-nets 是一个有向图  $N = \langle V, CE \rangle$ , 其中  $V$  是顶点集, 每一个顶点  $X_i$  都有一个条件偏好表 CPT( $X_i$ ) 与其关联。  $CE$  为有向边集, 代表所有属性顶点之间的依赖关系, 即一条有向边起点的取值影响着终点取值的偏好。

例 1 “我的客厅装饰”实例。我要布置客厅, 主要考虑窗帘、墙壁和沙发, 分别用  $C, W$  和  $S$  表示。对于窗帘和墙壁, 我更偏爱浅色( $C_l, W_l$ )而不是深色的( $C_d, W_d$ )。而沙发的选择取决于窗帘和墙壁颜色的组合: 当窗帘和墙壁都是浅色或都是深色时, 我偏好皮质沙发( $S_c$ )而不是布艺沙发( $S_f$ ); 而当窗帘和墙壁采用不同色系时, 我偏好布艺沙发而不是皮质沙发。

图 1(a) 为对应的 CP-nets 图  $N = \langle V, CE \rangle$ 。其中  $V = \{C, W, S\}$ ,  $Dom(C) = \{C_l, C_d\}$ ,  $Dom(W) = \{W_l, W_d\}$ ,  $Dom(S) = \{S_c, S_f\}$ ,  $CE = \{\langle C, S \rangle, \langle W, S \rangle\}$ ; 图 1(b) 为对应的 CPTs。

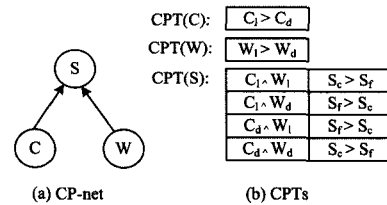


图 1 “我的客厅装饰”的 CP-nets

### 1.3 CP-nets 导出图

**定义 5**<sup>[15]</sup> 设  $N = \langle V, CE \rangle$  是一个 CP-nets, 则有向图  $G = \langle \Omega, IE \rangle$  是  $N$  的导出图, 其中  $\Omega$  是顶点集合,  $IE$  是可交换的配置所构成的有向边集。每一条有向边记为  $\langle o_i, o_j \rangle$ , 表示由顶点  $o_i$  指向  $o_j$ , 满足  $o_j > o_i$ 。

例 1 中 CP-nets 对应的导出图如图 2 所示。对于二值 CP-nets, 每一条有向边  $\langle o_i, o_j \rangle$  表示将配置  $o_i$  中某个属性值翻转(即两个配置位置颠倒)得到配置  $o_j$ , 即满足  $o_j > o_i$ 。

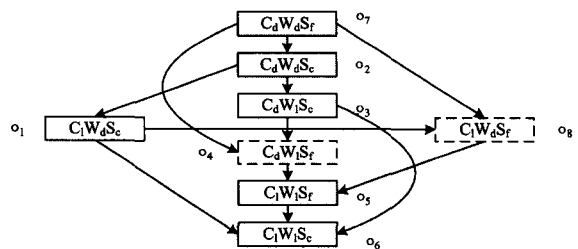


图 2 “我的客厅装饰”的 CP-nets 对应的导出图

对于  $o, o' \in \Omega$ , 若从顶点  $o'$  到顶点  $o$  不可达, 从顶点  $o$  到顶点  $o'$  也不可达, 则称  $o$  与  $o'$  不可比较。例如, 图 2 中  $o_4 = “C_d W_l S_f”$ ,  $o_8 = “C_l W_d S_f”$  就是一对不可比较的配置。

### 1.4 CP-nets 的强占优测试

CP-nets 是偏处理好元模型的偏好表示元素, 其目的是在其基础上实现各种查询操作。那么, 在 CP-nets 上定义的一

些运算就成为偏好描述语言。例如对配置空间中的配置进行比较运算。

**定义 6**<sup>[15]</sup> 设  $N = \langle V, CE \rangle$  是一个 CP-nets, 导出图  $G = \langle \Omega, IE \rangle$ , 若两个配置  $o, o' \in \Omega$ , 有  $o > o'$ , 表示  $o$  与  $o'$  之间具有强占优关系, 且为:  $o$  强占优于  $o'$ 。判断  $o$  与  $o'$  之间强占优关系是否成立的测试称作强占优测试(Dominance Testing)。

若  $o$  强占优于  $o'$ , 说明配置  $o$  比配置  $o'$  优, 即导出图  $G$  中顶点  $o'$  到顶点  $o$  可达。

**定义 7**<sup>[15]</sup> 设  $G = \langle \Omega, IE \rangle$  是 CP-nets 图  $N$  的导出图, 其中  $\Omega = \{o_1, o_2, \dots, o_n\}$ , 则矩阵  $B(G) = [b_{ij}]_{n \times n}$  称为  $G$  的可达矩阵。其中  $b_{ij}$  表示顶点  $o_i$  到顶点  $o_j$  是否可达(当  $b_{ij} = 1$  时, 可达; 当  $b_{ij} = 0$  时, 不可达)。

**例 2** 求图 2 中的强占优关系。其中  $\Omega = \{o_1, o_2, o_3, o_4, o_5, o_6, o_7, o_8\}$ ,  $o_1 = "C_l W_d S_c"$ ,  $o_2 = "C_d W_d S_c"$ ,  $o_3 = "C_d W_l S_c"$ ,  $o_4 = "C_d W_l S_f"$ ,  $o_5 = "C_l W_l S_f"$ ,  $o_6 = "C_l W_l S_c"$ ,  $o_7 = "C_d W_d S_f"$ ,  $o_8 = "C_l W_d S_f"$ 。

**解:** 利用改进的深度优先遍历算法进行强占优测试, 得到顶点可达矩阵如下所示<sup>[15]</sup>:

$$B(G) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

## 2 CP-nets 的可满足性

CP-nets 是一种偏好表示语言, 一个自然的问题就是它是否具有可满足性, 即通过 CP-nets 能否将所有的配置进行排序, 而且保证这个排序不违背决策者的偏好意图。

### 2.1 CP-nets 的可满足性的含义

**定义 8**<sup>[14]</sup> 设  $\Omega$  是一个包含  $n$  个顶点的 CP-nets 图  $N$  的决策空间, 若存在一个排序序列  $>_N$  包含了  $\Omega$  中的全部配置, 则称  $N$  是可满足的。

$$\text{即 } o_1 >_{N} o_2 >_{N} o_3 >_{N} \dots >_{N} o_i \dots >_{N} o_k$$

其中,  $o_i \in \Omega, k = 2^n$ , 称这个序列为可满足性序列。

**定理 1**<sup>[14]</sup> 每一个无环的 CP-nets 都是可满足的, 而有环的 CP-nets 不一定是可满足的。

### 2.2 可满足性的实现

根据定理 1, 我们知道有环的 CP-nets 是否具有可满足性与条件偏好表相关。那么, 对于一个任意结构的 CP-nets, 如何去判断是否具有可满足性? 如果可满足, 又怎样来生成可满足性序列呢?

**定理 2**<sup>[14]</sup> CP-nets 的可满足性等价于一致性。

这样, 判断一个 CP-nets 的可满足性就转化为判断一个 CP-nets 的一致性。而一致性可以通过 CP-nets 导出图有环路和无环路来判断。所以, 对 CP-nets 导出图进行拓扑排序, 如果排序不成功, 则该 CP-nets 不可满足; 否则该 CP-nets 可满足。

**定理 3**<sup>[14]</sup> 若一个 CP-nets 图  $N$  是可满足的, 那么它一

定具有可满足性序列, 而且可满足性序列不唯一。

对可满足的 CP-nets 进行拓扑排序的过程中生成的排序序列就是该 CP-nets 的一个可满足性序列。

## 3 可满足性序列求取算法

### 3.1 可满足性序列的意义

Skyline 运算和 Top- $n$  运算是数据库领域中的两个主要的定量偏好运算, 实现 CP-nets 可表达的定性偏好上的 Skyline 和 Top- $n$  决策也是实现 CP-nets 应用的一个主要目标。

**定义 9** 给定 CP-nets  $N = \langle V, CE \rangle$ , 其导出图  $G = \langle \Omega, IE \rangle$ , 则  $N$  的 Skyline 配置集定义为:

$$\text{Skyline}(\Omega) = \{o \mid o \in \Omega \ \exists o' \in \Omega (o' >_{NO} o)\}$$

Skyline 配置集又称为帕累托集, CP-nets 的 Skyline 集是 CP-nets 导出图  $G$  中的所有极大元的集合。

**定义 10** 给定 CP-nets  $N = \langle V, CE \rangle$ , 其导出图  $G = \langle \Omega, IE \rangle$ ,  $n$  为给定的正整数, 则  $N$  的 Top- $n$  配置集定义为:

$$\text{Top-}n(\Omega) = \{o_i \mid o_i \in \Omega \wedge (1 \leq i \leq n) \wedge (\forall o_j \in \text{Top-}n(\Omega)) (\forall o' \in \Omega - \text{Top-}n(\Omega)) (o_i >_{NO} o')\}$$

Top- $n$  决策是指 CP-nets 所能表达的配置中, 根据占优关系, 确定序排在前面的  $n$  个配置, 比如搜索引擎中的前  $n$  个网页等。所以, Top- $n$  决策的本质就是得到 CP-nets 的可满足性序列。比如在个性化的产品推荐系统中或者在个性化的数据库查询系统中, 根据用户的定性偏好信息, 将所有产品进行排序, 给用户推荐或提供满足用户需求的产品列表。而满足用户偏好需求的产品排序可能有多个, 所以有必要求出所有满足的产品排序, 以满足用户的多元化需求, 更好地实现个性化决策任务。

任意一个可满足的 CP-nets 都具有可满足性序列, 那么它的可满足性序列的个数是多少? 又如何来得到全部的可满足性序列呢?

### 3.2 多支图的定义及性质

**定义 11** 在一个 CP-nets 导出图中, 若出现由某一个顶点出发, 分出多个分支, 最后这些分支又汇集到一个顶点, 除起始点和汇集点外, 再无相交顶点且每条分支上至少有一个内结点; 不同分支的内结点之间不可达, 那么由起始点到汇集点及其所有分支上的顶点和有向边所构成的最小局部图称为一个多支图, 记作  $g$ 。

**定理 4** 多支图上除去起始点和汇集点后, 不同分支上的结点之间是不可比较的关系, 同一分支上的结点之间是可比较的关系, 且在多支图包含的配置集中, 起始点为最差配置, 汇集点为最优配置。

**说明:** 按照多支图的定义, 去掉起始点和汇集点, 每一个分支上顶点和和其他分支上的顶点都是不可达的关系。不可比较的配置正是包含在这些多支图里面。

**例 3** 图 3 为例 1 中 CP-nets 导出图中的唯一一个多支图。不可比较的配置对集  $I$  为  $\{(o_1, o_3), (o_1, o_4), (o_8, o_3), (o_8, o_4)\}$ 。

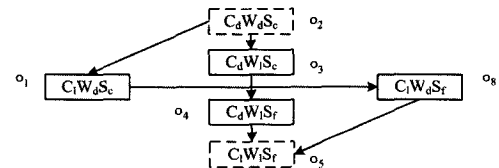


图 3 多支图一

**定义 12** 设配置对集  $I = \{(o_1, o_2), (o_3, o_4), \dots, (o_m, o_n)\}$  包含了 CP-nets 导出图上一个多支图的全部不可比较的配置对。L 为 I 中包含的全部配置, 若存在两个配置  $o_i, o_j \in L, o_i$  到  $o_j$  可达, 则称该多支图中有制约关系, 记作 C, 制约关系描述为  $o_j > o_i$ ; 否则称该多支图中无制约关系。

图 4 模拟了一个多支图, 其中包含的制约关系为:  $C = \{4 > 2, 5 > 3\}$ 。

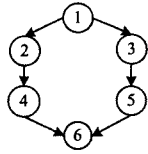


图 4 多支图二

**定理 5** 若一个可满足的 CP-nets 共有  $m$  对不可比较的配置, 且每个多支图中均无制约关系, 那么该 CP-nets 的可满足性序列的个数为  $2^m$ ; 若某个多支图中有制约关系, 那么此 CP-nets 的可满足性序列的个数少于  $2^m$ , 且制约个数越多, 可满足性序列的个数越少。

证明: 实质上, 一对不可比较的配置意味着它们在可满足性序列中的位置可以相互颠倒, 即对应 2 个可满足性序列。但是, 若不可比较的配置对所在的多支图里存在制约关系, 不可比较的配置就不能任意颠倒位置, 因为位置的颠倒有可能导致其他配置违背制约关系。如图 4 所示, 不可比较配置对 (2, 3) 对于可满足性序列  $6 >_N 5 >_N 3 >_N 4 >_N 2 >_N 1$  而言, 就不能颠倒 2 和 3 的位置, 因为 2 和 3 颠倒位置后就违背了制约关系  $4 > 2$ 。所以, 若所有多支图中均无制约关系,  $m$  对不可比较配置均可以相互颠倒位置, 共生成  $2^m$  个可满足性序列。若某个多支图中有制约关系, 则 CP-nets 的可满足性序列的个数少于  $2^m$ 。

### 3.3 全部可满足性序列生成算法

要得到一个 CP-nets 全部的可满足性序列, 实现方法如下所示:

1) 根据 CP-nets 的强占优测试算法, 得到对应的可达矩阵  $B(G)$ 。

2) 依次取可达矩阵中的每个元素  $b_{ij}$ ;

若  $b_{ij} = 1$ , 且  $b_{ji} = 1$ , 输出该 CP-nets 不可满足, 无可满足性序列;

若  $b_{ij} = 0$ , 判断  $b_{ji}$  的取值, 若  $b_{ji} = 0$ , 则输出不可比较的配置对  $(o_j, o_i)$ , 否则接着取下一个元素。

3) 若无不可比较的配置对, 则 CP-nets 只有一个可满足性序列, 对 CP-nets 导出图进行拓扑排序即可得到该可满足性序列。

4) 若有不可比较的配置对, 对 CP-nets 导出图进行拓扑排序得到一个可满足性序列  $L_1$ , 统计 2) 中得到的不可比较的配置对集 I 及配置对的个数  $m$  (这里  $(o_j, o_i)$  与  $(o_i, o_j)$  相同, 为 1 个)。

5) 求取 CP-nets 导出图中的所有多支图  $g$  并得出多支图中包含的制约关系 C。

6) 对每个多支图  $g_i$ , 分别按照每一对不可比较的配置对已经得到的可满足性序列实行翻转, 若翻转后得到新的序列且不违背制约关系, 那么翻转成功, 得到一个新的可满足性序列  $L'$ 。

7) 对新得到的序列  $L'$  重复 6), 直到再无新的可满足性序列生成为止。

8)  $L_1$  加上翻转过程中得到的所有新序列即为对应 CP-nets 的全部可满足性序列。

### 3.4 可满足性及可满足性序列求解实例

问题: 求取例 1 中 CP-nets 的全部可满足性序列。

求解:

1. 通过例 2 和例 3 可以得到下列信息:

(1) 不可比较的配置对集:  $I = \{(o_1, o_3), (o_1, o_4), (o_8, o_3), (o_8, o_4)\}$ ;

(2) 制约关系集:  $C = \{o_8 > o_1, o_4 > o_3\}$ 。

2. 拓扑排序得到一个可满足性序列  $L_1: o_6 >_N o_5 >_N o_8 >_N o_1 >_N o_4 >_N o_3 >_N o_2 >_N o_7$ 。

3. 根据全部可满足性序列生成算法, 操作过程如表 1 所列。

4. 最后得到全部的可满足性序列集为:  $L = \{L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6\}$ 。

表 1 一个 CP-nets 的全部可满足性序列生成过程

集合 U	翻转对象	I[m]				K
		(o <sub>1</sub> , o <sub>3</sub> )	(o <sub>1</sub> , o <sub>4</sub> )	(o <sub>3</sub> , o <sub>8</sub> )	(o <sub>4</sub> , o <sub>8</sub> )	
初值 {L <sub>1</sub> }	L <sub>1</sub>	×	L <sub>2</sub>	×	×	1
{L <sub>1</sub> , L <sub>2</sub> }	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	—	×	L <sub>4</sub>	2
{L <sub>1</sub> , L <sub>2</sub> , L <sub>3</sub> , L <sub>4</sub> , L <sub>5</sub> }	L <sub>3</sub>	—	×	×	L <sub>5</sub>	3
	L <sub>4</sub>	—	×	×	—	
{L <sub>1</sub> , L <sub>2</sub> , L <sub>3</sub> , L <sub>4</sub> , L <sub>5</sub> , L <sub>6</sub> }	L <sub>5</sub>	—	×	L <sub>6</sub>	—	4
{L <sub>1</sub> , L <sub>2</sub> , L <sub>3</sub> , L <sub>4</sub> , L <sub>5</sub> , L <sub>6</sub> }	L <sub>6</sub>	×	×	—	×	5

说明: 算法执行过程中生成的新序列保存在集合 U 中, I[m] 为全部不可比较配置对集合, K 为翻转趟数, “翻转对象”集存放上一趟翻转成功得到的全部新序列。每一趟都是实现对该行“翻转对象”集中的序列分别按照 I[m] 中的每一对不可比较配置对进行翻转操作; 若翻转成功, 即得到新的序列且不违背制约关系, 将该序列并入 U 集, 并写入下一行的“翻转对象”集。其中, 符号“×”表示翻转违背制约关系, 符号“—”表示得到的不是新序列。整个过程进行到第 5 趟, 再没有新的序列生成, 结束, 最后得到全部的序列集 L。

$L_1: o_6 >_N o_5 >_N o_8 >_N o_1 >_N o_4 >_N o_3 >_N o_2 >_N o_7$

$L_2: o_6 >_N o_5 >_N o_8 >_N o_4 >_N o_1 >_N o_3 >_N o_2 >_N o_7$

$L_3: o_6 >_N o_5 >_N o_8 >_N o_4 >_N o_3 >_N o_1 >_N o_2 >_N o_7$

$L_4: o_6 >_N o_5 >_N o_4 >_N o_8 >_N o_1 >_N o_3 >_N o_2 >_N o_7$

$L_5: o_6 >_N o_5 >_N o_4 >_N o_8 >_N o_3 >_N o_1 >_N o_2 >_N o_7$

$L_6: o_6 >_N o_5 >_N o_4 >_N o_3 >_N o_8 >_N o_1 >_N o_2 >_N o_7$

对结果进行分析, L 中的序列全部满足可满足性序列的定义。

**结束语** CP-nets 作为一种定性的图形化偏好表示工具, 在人工智能、数据库技术以及推荐系统中的应用越来越广泛。可满足性是 CP-nets 的重要性质之一, 研究可满足性及求取可满足性序列是实现个性化查询及自动产品推荐的关键运算。

本文主要研究了 CP-nets 的可满足性, 系统总结了可满足性的相关定义及定理, 分析了与可满足性相关的定性计算即强占优测试, 提出了 CP-nets 的多支图的定义并借助于多支图来求取 CP-nets 的全部可满足性序列, 为实现实际应用中的 Skyline 查询和 Top-n 查询奠定了基础。

(下转第 285 页)

- Analysis and Machine Intelligence, 1993, 15(11):1148-1161
- [6] Daugman J. Probing the Uniqueness and Randomness of IrisCodes: Results From 200 Billion Iris Pair Comparisons [J]. *Proceeding of the IEEE*, 2006, 94(11):1927-1935
- [7] Wildes R P. Iris recognition: an emerging biometric technology [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1997, 85(9):1348-1363
- [8] Wildes R P, Asmuth J C, Green G L, et al. A system for automated iris recognition[C]//*Proceedings of the 2<sup>nd</sup> IEEE Workshop on Applications of Computer Vision Sarasota*. IEEE Computer Society, 1994: 121-128
- [9] Boles W W, Boashan B. A human identification technique using images of the iris and wavelet transform [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1998, 46(4):1186-1188
- [10] Ma L, Tan T, Wang Y, et al. Efficient iris recognition by characterizing key local variations[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(6):739-750
- [11] Sun Z, Wang Y, Tan T, et al. Improving iris recognition accuracy via cascaded classifiers [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2005, 35(3):435-441
- [12] Sun Z, Tan T, Qiu X. Graph matching iris image blocks with local binary pattern[C]//*Proceedings of the 2006 International Conference on Biometrics*. 2006:366-372
- [13] Pillai J K, Patel V M, Chellappa R, et al. Secure and robust iris recognition Using random projections and sparse representations [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(9):1877-1893
- [14] Hamilton W R. *Elements of Quaternions* [M]. London, UK: Longman, 1866
- [15] Hamilton W R. *Lectures on Quaternions: Containing a Systematic Statement of a New Mathematical Method*[M]. Dublin: Hodges and Smith, 1853
- [16] Ell T A. Quaternion-Fourier Transforms for Analysis of Two-Dimensional Linear Time-Invariant Partial Differential Systems [C]//*Proc. 32nd IEEE Conference on Decision and Control*. San Antonio, Texas, USA, Dec 1993, 2:1830-1841
- [17] Bülow T, Sommer G. Local hypercomplex signal representations and applications[C]//*Geometric Computing with Clifford Algebras*. London: Springer-Verlag, 2001:255-289
- [18] Bülow T, Sommer G. Hypercomplex signals—a novel extension of the analytic signal to the multidimensional case [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2001, 49(11):2844~2852
- [19] Bülow T, Sommer G. Local hypercomplex signal representations and applications[C]//*Geometric Computing with Clifford Algebras*. London: Springer-Verlag, 2001:255-289
- [20] 崔峰, 曹学光, 彭思龙. 新的四元数解析信号相位定义[J]. *中国图像图形学报*, 2006, 11(2):251-258
- [21] 肖志涛, 何澄明, 于明, 等. Log Gabor 函数在人类视觉系统特性研究中的应用[J]. *信号处理*, 2002, 18(5):399-402
- [22] 姚鹏, 叶学义, 张文聪, 等. 基于改进的 Log-Gabor 小波的虹膜识别算法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2007, 19(5):563-568
- [23] Field D J. Relation between the statistics of natural images and the response properties of cortical cells[J]. *J. of The Optical Society of America A*, 1987, 4(12):2379-2394
- [24] 姚鹏. 复杂条件下的虹膜识别算法的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2005
- [25] ICE 2005 Iris Database[OL]. <http://www.nist.gov/itl/iad/ig/ice.cfm>
- [26] ICE\_2005\_Results\_30March2006.pdf[OL]. <http://www.nist.gov/itl/iad/ig/ice-presentations.cfm>
- [27] CASIA 虹膜数据库(V 4. 0)[OL]. <http://www.cbsr.ia.ac.cn/china/Iris%20Databases%20CH.asp>

(上接第 273 页)

## 参考文献

- [1] Pitkou J E, Schutze H, Cass TA, et al. Personalized search[J]. *Comm. ACM*, 2002, 45(9):50-55
- [2] Abbas A E, Bell D E. One-Switch Independence for Multiattribute Utility Functions[J]. *Operations Research*, 2011, 59:764-771
- [3] Bobadilla J, Hernande A, Ortega F, et al. Preference Elicitation Techniques for Group Recommender Systems[J]. *Information Sciences*, 2012, 189(1):155-175
- [4] Kießling W, Hafenrichter B, Fischer S, et al. Preference XPATH: A query language for E-commerce[C]//*Proceedings of the 5th International Conference Wirtschaftsinformatik*. Augsburg, Germany, 2001:43-62
- [5] Boutilier C, Brafman R, Domshlak C, et al. CP-nets: a tool for representing and reasoning with conditional ceteris paribus statements[J]. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2004, 21:135-191
- [6] Goldsmith J, Lang J, Truszczynski M, et al. The computational complexity of dominance and consistency in CP-nets[J]. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2008, 33(1):403-432
- [7] Brafman R, Domshlak C, Shimony E. On graphical modeling of preference and importance[J]. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2006, 25:389-424
- [8] Bouveret S, Endriss U, Lang J. Conditional Importance Networks: A Graphical Language for Representing Ordinal, Monotonic Preferences over Sets of Goods[C]//*Proceedings of the 21st Int Conf on Artificial Intelligence*. San Francisco, USA: Morgan Kaufmann Publishers, 2009:67-72
- [9] Ciaccia P. Querying databases with incomplete CP-nets [C]//*Multidisciplinary Workshop on Advances in Preference Handling*, 2007:1-8
- [10] Endres M, Kießling W. Transformation of Tcp-net queries into preference database queries[C]//*Proceedings of the ECAI 2006 Multidisciplinary Workshop on Advances in Preference Handling*. 2006:23-30
- [11] Bosc P, Hadjali A, Pivert O. On database queries involving competitive conditional preferences [J]. *International Journal of Intelligent Systems*, 2011, 26(3):206-227
- [12] 刘惊雷. CP-nets 及其表达能力研究[J]. *自动化学报*, 2011, 37(3):290-302
- [13] 刘惊雷, 廖士中, 张伟. CP-nets 的完备性及一致性研究[J]. *软件学报*, 2012, 23(6):1531-1541
- [14] 孙雪姣, 刘惊雷. CP-nets 的可满足性及一致性研究[J]. *计算机研究与发展*, 2012, 49(4):754-762
- [15] 孙雪姣, 刘惊雷. CP-nets 的定性偏好决策及一致性推理[J]. *计算机科学*, 2013, 40(2):274-278