

# 拍卖方法引入多 Agent 系统<sup>\*</sup>

金 津 石纯一

(清华大学计算机系 北京100084)

## The Auction and its Application in Multi-Agent System

JIN Xing SHI Chun-Yi

(Department of Computer Science, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract** Auction, an operational and effective resource allocation method, generally results in economical efficiency allocation between buyers and sellers. As a negotiation method, auction can be used in Multi-Agent Systems. With the consideration of computation ability and communication ability of agents, superadditive and subadditive property of goods, requirements of agents' revenue and real-time ability, proper auction methods can be selected to achieve one-many or many-many task assignments or resource allocation. In this paper, we systematically summarize bidding rules, buyers and sellers' strategies and the performances of current auction methods. A formal auction model, which fits most of the current auction methods, is also presented.

**Keywords** Multi-agent system, Auction

### 1. 概述

拍卖原本是发生在人类社会中的一种经济现象,卖方制定拍卖规则,买方按照规则出价,最后依据拍卖规则计算出成交的买方与价格,双方达成交易。针对网上拍卖的特性,提出了一系列新的拍卖方法,分析了这些拍卖方法适应的不同环境、各自的特点,以及参与拍卖者采取的行为策略。多 Agent 系统也试图引入拍卖机制来解决任务分配、资源配置等问题,来优化系统性能。近年来,拍卖已成为人工智能和分布式系统中的研究热点。拍卖的概念被扩充,拍卖的物品已不限于艺术品、收藏品、房地产等,在电子商务、网络带宽分配、电力调度、网上零售、电子图书馆等大型分布式系统中也引入拍卖机制。本文系统地总结了已有的拍卖方法,给出了一个统一的、能涵盖大多数拍卖方法的模型,并分析了拍卖方法在 MAS 中的应用前景。

#### 1.1 一种拍卖模型

在一个含有若干买方和卖方的市场中,拍卖方法以显示的规则(拍卖规则)指引卖方和买方进行交互,并最终达成交易,实现资源的合理分配。与固定价格买卖相比,拍卖可获得更大的效用,因为通过拍卖方法买卖物品,往往可以将资源分配给更需要它的人。作为一种资源分配方法,拍卖方法应考虑不同环境的需要,包括参与拍卖的买方卖方人数、拍卖的物品种类以及数目等,必须为各种环境分别定制拍卖方法。

根据对常见的拍卖方法的总结和归纳,本文给出一种较一般的拍卖的形式模型

Auction =  $\langle T, G, O, V, R, P, H \rangle$ , 其中:

•  $T$  为参加拍卖的交易者集合,由买方集合  $B$  和卖方集合  $S$  组成。

•  $G$  为物品集合。

•  $O: G \rightarrow S$  拍卖前物品所属关系,表明每个物品在拍卖前属于哪个卖方,并规定对  $\forall t \in T, t$  的所有物品集合  $o^{-1}(t) =$

$\{g \in G | o(g) = t\}$ 。于是对  $\forall b \in B, o^{-1}(b) = \emptyset$ 。

Bundle =  $2^G$  为物品组合集合。

•  $V: (B \cup S) \times \text{Bundle} \rightarrow R^+$  为评价函数,表示每个卖方或买方对物品组合的评价值。

$\forall t \in T, bun \in \text{Bundle}$ , 若  $V(b \times bun) = x$ , 则记为  $V_b(bun) = x$ 。

一般地,假设自由处置(free disposal)成立,即

$\forall t \in T, bun_1, bun_2 \in \text{Bundle}$ , 若  $bun_1 \subseteq bun_2$ , 则  $V_t(bun_1) \leq V_t(bun_2)$ , 即卖方和买方可以将物品无代价地自由丢弃。

•  $R$  为拍卖结果集合,包含物品分配结果  $RG$  和货币分配结果  $RM$ 。

$RG: G \rightarrow T$  表示拍卖结束后物品的所属关系。对  $\forall t \in T$ , 定义  $t$  的所有物品集合  $rg^{-1}(t) = \{g \in G | rg(g) = t\}$ 。  $rg^{-1}(t)$  为  $t$  在拍卖结束后所拥有的物品集合。

$RM: T \rightarrow R$  表示拍卖结束后买方付出和卖方得到的金钱数。

$rm \in RM$  需满足条件

$$\begin{aligned} \sum_{t \in T} rm(t) &= 0, \\ \forall b \in B, rm(b) &\leq 0 \\ \forall s \in S, rm(s) &\geq 0 \end{aligned}$$

•  $P$  为拍卖协议,可由有限状态机或  $\pi$  演算等工具定义。包含若干个状态,状态集合记为  $S$ ,  $S$  可分为中间状态  $S_m$  和结束状态  $S_e$ 。  $P$  中应定义每个状态下每个 Agent 可采取的动作(通信动作)以及各个 Agent 动作后的后继状态是什么。  $P$  中还定义每个结束状态对应的拍卖结果。

•  $H$  是拍卖历史集合,  $h \in H$  为一个拍卖历史,  $h = \langle o, v, r, sit \rangle$ , 其中  $o \in O, v \in V, r \in R$ , 分别表示这次拍卖中初始物品的所属关系、卖方和买方对物品组合的评价和拍卖结果。  $sit = s_1, \dots, s_n$  为拍卖所经历的状态。其中  $s_1, \dots, s_{n-1} \in S_m, s_n \in S_e$ 。对于  $\forall h \in H, \forall s \in S, \forall b \in B$ , 满足

$$h(r(s)) \subseteq h(o(s)) \quad \text{卖方的物品只能减少而不能增加}$$

\* 本课题受国家自然科学基金资助(60173011)。

$h(r(b)) \supseteq h(o(b))$  买方的物品只能增加而不能减少

## 1.2 拍卖方法的评价标准

为了实现合理、快速的资源分配,选取拍卖方法时需要考虑以下几个因素:

**效用** 是资源分配的核心问题。基于上面的模型,对  $\forall t \in T$ , 定义效用

$$pro(t) = V_i(rg^{-1}(t)) - V_i(o^{-1}(t)) + rm(t)$$

为 Agent 拍卖后与拍卖前物品评价价值之差,与拍卖货币收益之和。

理性的分配是对效用的基本要求,即对任意一个有限理性的交易者,拍卖后的效用都非负。由于交易者是自利的,故每一个交易者  $t$ , 都试图使自身效用  $pro(t)$  达到最大值,若拍卖方法可使总效用  $\sum_{t \in T} pro(t)$  达到最大值,则称其为效用最大的拍卖方法。简单地说,将物品卖给对其评价价值最高的买方,可获得最大效用。

**计算量和通信量** Agent 需要在有限时间内决定采取的动作,有时还需对实时情况做出反应。拍卖方法能否保证理性的决策者在较短的时间内完成所需的计算,以实现快速的资源分配,

是设计拍卖方法要考虑的另一个问题。Agent 之间的通信受网络资源的严格限制,如何利用有限的通信资源,达到满意的效用是拍卖方法面临的问题。

**鲁棒性** 在进行大规模的拍卖时,尤其是互联网上进行的拍卖,可能含有恶意的 Agent 试图扰乱拍卖或获取不正当利益,这是对拍卖方法鲁棒性的考验。例如,在英国式拍卖中,恶意的买方 Agent 可能联合起来,使卖方利益受损;GVA 中,恶意 Agent 可以利用假名叫价获取不正当的利益。

## 2. 拍卖方法分类

拍卖方法的种类有很多(见图1),各种不同的拍卖方法服务于不同的拍卖环境。首先,按照参与拍卖的买卖方人数,可分为单边拍卖(单个卖方、多个买方)、双边拍卖(多个卖方、多个买方)和单边反拍卖(单个买方、多个卖方)。单边拍卖按照拍卖物品的种类,又可分为单一物品拍卖(一种物品)和组合拍卖(多种物品)。由于单边反拍卖在现实中很少见,理论上又与单边拍卖很相似,因此很少有学者专门研究。下面分类讨论这几种拍卖方法。

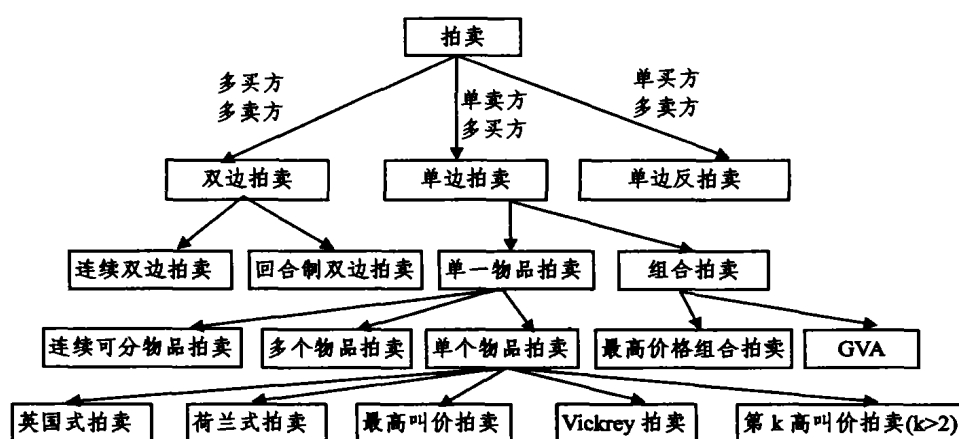


图1 拍卖方法的分类

### 2.1 单一物品拍卖

单一物品拍卖是在人类社会中最先出现、也是最早被人们研究的一种拍卖方法。卖方之所以不明码标价,主要原因是卖方不知道物品的准确价值,无法估计可以卖多少钱,于是通过拍卖的方式获取较高的效用。单一物品拍卖按照拍卖物品的数目,又可分为单个物品拍卖、多个物品拍卖和连续可分物品拍卖。

单个物品拍卖一次只卖出一件物品,是最简单的拍卖形式。显然,未能成交的 Agent 效用为0,若物品以价格  $p$  成交,则买方  $b$  的效用为  $V_b(g) - p$ , 卖方  $s$  的效用为  $p - V_s(g)$ 。根据效用理性的假设,当  $V_b(g) < V_s(g)$  时不应成交。当  $V_b(g) > V_s(g)$  时,成交后的总效用为  $(V_b(g) - p) + (p - V_s(g)) = V_b(g) - V_s(g)$ , 与成交价格无关,仅与买方的评价价值  $V_b(g)$  有关。可见,将物品卖给评价价值最高的买方,可使总效用最大。

常见的单个物品拍卖方法有英国式拍卖、荷兰式拍卖和第  $k$  高价拍卖。

英国式拍卖是最为人们熟知的拍卖方法。初始时卖方公布物品的底价,作为初始时的当前价格,买方的叫价必须超过当前价格才能被接受,接受后随即成为新的当前价格,当前价格维持给定的时间后,叫出当前价格的买方即以当前价格购

得物品。在英国式拍卖中,买方采取的最优策略为,当当前价格低于  $V_b(g)$  时,以尽可能低的价格叫价,否则不叫。若每个买方都采取最优策略,则评价价值最高的买方将以比第二评价价值稍高的价格买得物品,同时达到总效用最大。

最早采用荷兰式拍卖的是荷兰的海盗,他们利用这种方法卖掉抢夺来的财物,荷兰式拍卖也因此得名。拍卖初始,由卖方给出一个无人能接受的高价,然后以较小的间隔逐渐降低价格,直到某个买方应叫,则这个卖方以当前的价格得到物品。与英国式拍卖不同,荷兰式拍卖中不存在绝对的最优策略,买方需对其他买方的评价价值与策略进行猜测,从而决定自己的策略,此时,对物品评价价值最高的买方未必能得到物品,于是不能保证总效用最大。

第  $k$  高价拍卖是一种暗标拍卖。买方分别将自己的报价告知卖方,买方之间不知道对方的报价,待所有买方报价完成后,卖方将物品以第  $k$  高的出价卖给出价最高的人。当  $k=1$  时,第  $k$  高价拍卖也称为最高叫价拍卖。最高叫价拍卖中,买方为了获取效用,叫价需低于自己的评价价值,可以证明,最高叫价拍卖与荷兰式拍卖等价。当  $k=2$  时,第  $k$  高价拍卖称为 Vickrey 拍卖,由 Vickrey 在1961年提出<sup>[10]</sup>。容易验证,买方将自己的评价价值作为报价为最优策略,称满足这种性质的拍卖方法具有激励相容性(incentive compatitive)。在满足激励相

容性的拍卖方法中,买方只需叫出自己的评价价值,即可获得最大的效用,因而买方的计算量为0。当  $k > 2$  时,有趣的是,第  $k$  高价拍卖中理性的买方可能叫出比评价价值高的价格,这使得买方可能获得负效用,因而这种拍卖方法较少使用。

$n$  个相同的物品同时拍卖,称为线性拍卖( $n > 1$ )。买方需以暗标的方式分别报出买  $k$  个( $k = 1, 2, \dots, n$ )个物品出的总价。所有买方报价结束后,卖方通过计算,确定使得自身效用达到最大的分配方案,并以买方的报价将物品卖给买方。例如,两个买方竞买3个物品,甲乙两个买方的出价分别为(¥5, ¥15, ¥20)(表示第一个买方买一件物品愿意出¥5,买两件愿意出¥15,买3件愿意出¥20)和(¥6, ¥12, ¥18)。则卖方将2个物品卖给甲,1个物品卖给乙,可使效用最大,为  $15 + 6 = ¥21$ 。计算如何分配物品的算法称为胜者决定算法,可以证明线性拍卖的胜者决定算法可在多项式时间内完成。

有时卖方需要拍卖一定数量连续可分的物品,此时每个买方的叫价为一个需求函数  $P_b(q)$ ,表示买方  $b$  愿意为数量  $q$  的物品付出的价钱为  $B_b(q)$ 。设拍卖物品总数为  $q$ ,买方人数为  $n$ ,卖方根据所有买方的报价函数,计算出分配方案  $Q = (q_1, \dots, q_n)$ ,满足  $\sum_{i=1}^n q_i = q$ ,并使  $\sum_{i=1}^n B_i(q_i)$  达到最大值。若不对报价函数  $B_b(q)$  做出限制,则一般情况下将无法求解。若将叫价函数限定为不超过  $k$  段的分段线性函数,可在多项式时间内求得最优解。

## 2.2 组合拍卖

各种拍卖的物品之间存在互补性和可替换性,使得买方对物品组合的评价价值  $V(\text{bun})$  往往不等于对物品组合中各物品单独评价价值之和  $\sum_{g \in \text{bun}} V(g)$ 。这种性质使得单一拍卖难以达到效用最大,例如将两个不可分割的物品分别拍卖,根据单一拍卖的这一缺陷,1982年提出了组合拍卖,可将所有待拍卖的物品同时进行拍卖。

通常意义下的组合拍卖是一种暗标的最高价拍卖方法,类似于单个物品拍卖中的最高叫价拍卖。拍卖初始每个买方对所有物品组合进行暗标叫价,  $B_i(\text{bun})$  为第  $i$  个买方对物品组合  $\text{bun}$  的叫价。收集到所有买方的叫价后,卖方利用胜者决定算法,确定拍卖的结果。胜者决定算法可以保证即尊重买方的叫价,并使卖方获得最大效用。买方  $i$  为物品组合  $\text{bun}$  付出的价格为  $B_i(\text{bun})$ ,与最高价拍卖类似,为了获得较大的效用,通常  $V_i(\text{bun}) \geq B_i(\text{bun})$ 。组合拍卖的优点是可以充分考虑每个买方对各种物品组合的评价价值,继而得到较高的总效用。但买方需要将所有物品组合的叫价全部通知卖方,才能完全刻画买方的偏好。对于  $n$  个物品的组合拍卖,物品组合数为  $2^n - 1$ ,这意味着通信量对物品数量及其敏感。另一方面,已经证明卖方的胜者决定算法为 NP 问题。通信量和计算量的限制已经成为组合拍卖能否得到广泛应用的首要问题。

为了降低胜者决定算法的复杂度,学者们做了一系列的研究。文[7]提出了一种基于分支与界法的组合拍卖胜者决定算法,算法利用将叫价分类、排序、将搜索的部分结果写入缓存,给出每个物品的价值上限等方法提高效率。该算法是一种任意时间算法。文[8]对一些特殊情况做专门的处理,将上一算法进行了改进。文[11]将 Sandholm 的算法扩展为多数量组合拍卖的胜者决定算法。同时加入单独处理单一物品叫价,将分类后的叫价二次分类,确定支配叫价等方法进一步提高了算法的效率。文[11]除了提出组合拍卖的最优胜者决定算法 CASS 外,还提出了次优胜者决定算法 VSA,次优算法

VSA 总能得到接近最优的结果。文[1]提出了一种新的最优胜者决定算法 CPLEX,实验说明,CPLEX 6.5在绝大多数情况下都明显优于 CASS 算法。文[9]提出了一种新的最优胜者决定算法 CABOB。实验说明 CABOB 在绝大多数情况下都明显优于 CPLEX 7.0算法。

为减小组合拍卖中的通信量,Tuomas 在2002年提出了一种部分报价方法,利用自由处置假设得出的组合叫价间的关系,买方先将少部分叫价传给卖方,根据计算的需要,再向买方询问必要的叫价。实验表明,10个物品组合拍卖时算法所需通信开销不足全部叫价通信开销的1/10。文[2]提出了一种基于逻辑的报价语言,这种语言在一般情况下大大简化了报价的复杂度,有效地减小了通信量。作者还提出了一种基于这种拍卖语言的胜者决定算法。

文[6]绕开 NP 问题的组合拍卖胜者决定算法,提出了一系列限制买方叫价的方法,使得在这些限制下,存在可在多项式时间内完成的胜者决定算法。文[4]提出当一个买方利用多个身份参与组合拍卖时可以获得更多的收益,即通常的组合拍卖不具有抗假名叫价的性质。文中提出了一种将叫价分层的拍卖方法,使得使用假名叫价的买方不能获得利益,卖方的利益无法保证达到最大。文[3]将上一方法扩展到多数量组合拍卖中。文[5]讨论了利用上一方法时如何分层。

文[10]注意到暗标最高价组合拍卖不满足激励相容性,根据 Vickrey 拍卖的思想,提出了一种满足激励相容性的组合拍卖方法 GVA(Generalized Vickrey Auction)。

## 2.3 双边拍卖

多个卖方和多个买方参加的拍卖为双边拍卖。最常见的双边拍卖为连续双边拍卖(CDA),连续双边拍卖对多个相同的物品进行拍卖。卖方和买方可以在任意时刻对任意数量物品叫价,叫价提交给拍卖中心,拍卖中心负责匹配买方和卖方的叫价,匹配成功后以买方和卖方叫价的平均值成交。最典型的双边拍卖市场为股票市场。Rajarshi 在2001年给出了一种连续双边拍卖中 Agent 的策略,并在同一个市场中与人进行了比较,实验结果表明,Agent 获得比人更多的效用。

Abdolkarim 在1998年提出了一种回合制的双边拍卖。每个卖方都有一个相同的物品,而每个买方都需要一个这样的物品。卖方和买方轮流叫价,直至一个买方和一个卖方达成交易。文章还对 Agent 采取的策略进行了分析。

从经济学角度分析,在一个含有多个买方和多个卖方的市场,市场的价格必然收敛与需求曲线与供给曲线的交点,这个交点是价格的平衡点。不同的双边拍卖方法决定了 Agent 的收益和市场价格收敛的速度,好的双边拍卖算法可使市场价格迅速收敛到平衡点。

## 3. MAS 中引入拍卖机制

在开放、动态的 MAS 中,自利的 Agent 有着自身的目标和偏好。Agent 通过观察、协商与推理,确定采取什么样的行为。单 Agent 往往不能独立完成目标,需要其它 Agent 的帮助,也就是多个 Agent 通过合作来共同求解问题。而协商无疑多 Agent 合作求解中的重要手段,Agent 之间是否能进行有效的协商决定了能否合理地分配资源,分派任务,以及合理地制定规划。

协商是一些 Agent 通过通信针对某问题试图达到共同可接受的协定的过程。由于 Agent 的自利性,多个 Agent 只能通过交互达成共同可接受的协议,因而协商问题也可以看

作是一个给定空间内的搜索问题。但是,与普通的搜索问题不同,参与协商的 Agent 既是相互合作,也是相互竞争,它们之间的交互既要交换信息,同时交换的信息中也含有欺骗,这使得协商过程复杂化。

近年来,拍卖方法作为一种规则明确、便于操作的协商协议逐渐受到研究者的关注。Jenings 在 2002 年将协商分为三类:基于拍卖的协商、一对一协商和劝说式协商,并认为拍卖是 MAS 中最主要的协商手段。拍卖方法可以快速有效地完成一对多和多对多的协商。

Rina 在 2000 年为解决多服务器(每个服务器为一个 Agent)之间的数据分配问题,引入组合拍卖方法,提高了系统的性能。将组合拍卖应用于多 Agent 旅行商问题,也取得了一定的效果。

**结语** 拍卖是一种快速有效的资源分配方法,具有较强的可操作性,可使参与拍卖的卖方和买方均获得理想的效用。本文系统地介绍了已有的拍卖方法,并提出了一个可以涵盖大多数拍卖方法的形式化拍卖模型。拍卖方法的研究包括拍卖规则、买方和卖方采取的策略和对拍卖方法性能的分析。作为一种主要的协商手段,拍卖方法可以应用于 MAS 完成一对多和多对多的任务分配、资源分配。不同的拍卖方法具有不同的特点,应根据不同多 Agent 系统的具体环境选择合适的拍卖方法。选择时主要考虑效用、实时性、Agent 的计算能力、Agent 的通信能力、资源与任务的互补性与可替换性等因素。例如单边拍卖时,若资源与任务互补性与可替换性强、卖方计算能力较强时则选取组合拍卖,否则选择单一物品拍卖方法;若多个 Agent 具有共同目标,互相信任并合作求解问题,则可以放宽对抗假名叫价鲁棒性的要求。

(上接第 87 页)

行业的元数据标准的集合。其中在地理空间领域,北京大学数字地球工作室、国家信息中心和国家基础地理信息中心在空间元数据标准研究和实践方面做了大量的工作。在非空间领域,北京数字图书馆和北京大学图书馆等单位对中文元数据标准进行了研究和探索。但至今尚未有一个国家级的元数据标准颁布,因此在元数据标准建设方面相对滞后,基本还停留在探索和科研阶段。针对北京市信息资源网的建设情况,我们认为,元数据标准体系的建设内容应该包括:

1. 元数据目录体系的标准化建设。元数据的目录是元数据的元数据,是对元数据提供的服务进行的分类,是支持元数据服务的重要方面。目前,我们将元数据从总体上划分为空间元数据和非空间元数据,并对这两类元数据进一步分类以期形成数字城市的元数据目录分类体系。

2. 核心元数据标准的建设。核心元数据是描述节点数据库的基本注册信息和元数据类别以及节点元数据服务内容的描述信息的集合。可以参照 Dublin 核心元数据标准并根据元数据服务内容进行扩展以制定符合数字城市信息资源特征的核心元数据标准。

3. 内容元数据的标准化建设。内容元数据标准确定了某种信息进行规范化描述的基本内容和模式。它需要提供关于所描述的信息的可用性、适用性、获取或使用方式的详细信息,为用户查找、理解、获取和使用数据提供方便。内容元数据标准是根据元数据服务对象和领域,针对特定的元数据服务内容进行的元数据标准化建设,如空间元数据内容标准、税务元数据内容标准等。

但拍卖方法也有局限性。考虑 Agent 策略时,可将拍卖看作一种博弈。较复杂的拍卖方法中虽然博弈存在 Nash 平衡点,但由于 Agent 的计算能力有限与信息的不完全,求解最优策略往往是不现实的。一般只能通过各种学习方法辅助 Agent 决策,希望在多次行为后接近或收敛到最优解。拍卖方法不适合多问题的协商,也不能完成一对一的协商。此外,单边拍卖尤其是组合拍卖中过分依赖卖方(Auctioneer),导致这样的多 Agent 系统不能看作是完全分布式的系统。

## 参考文献

- 1 Andersson A, Tenhunen M. Integer Programming for Combinatorial Auction Winner Determination, ICMAS, 2000. 39~46
- 2 Boutilier C, Goldszmidt M, Sabata B. Sequential Auctions for the Allocation of Resources with Complementaries, IJCAI, 2001
- 3 Yokoo M, Sakurai Y, Matsubara S. Robust Multi-unit Auction Protocol against False-name Bids, IJCAI, 2001. 1089~1094
- 4 Yokoo M, Sakurai Y, Matsubara S. Robust Combinatorial Auction Protocol against False-name Bids, AAAI, 2000. 110~115
- 5 Yokoo M, Sakurai Y, Matsubara S. Bundle Design in Robust Combinatorial Auction Protocol against False-name Bids, IJCAI, 2001. 1095~1101
- 6 Tennenholtz M. Some Tractable Combinatorial Auctions, AAAI, 2000. 90~97
- 7 Sandholm T. An Algorithm for Optimal Winner Determination in Combinatorial Auctions, IJCAI, 1999. 542~547
- 8 Sandholm T, Suri S. Improved Algorithms for Optimal Winner Determination in Combinatorial Auctions and Generalizations, AAAI, 2000. 90~97
- 9 Sandholm T, Suri S. CABOB: A fast optimal algorithm for combinatorial auctions, IJCAI, 2001
- 10 Vickrey. Counterspeculation, auctions and competitive sealed tenders. Journal of Finance, 16, 8~37
- 11 Fujishima Y, Leyton-Brown K, Shoham Y. Taming the Computational Complexity of Combinatorial Auctions: Optimal and Approximate Approaches, IJCAI, 1999. 548~553

**结论** 基于 Web 服务的元数据服务体系的构建将支持数字城市的信息资源的管理、综合开发和利用,对实现城市多源、分布和异构的信息资源的共享、整合和交换有着重要的现实意义。针对我国数字城市元数据建设的状况,需要进一步加快元数据标准的研究和制定的步伐,在管理上、法律上和技术上共同推进元数据服务体系的建立和实施。

## 参考文献

- 1 王洪,李琦,承继成. 数字城市与城市可持续发展[J]. 中国人口、资源与环境, 2001(2): 114~119
- 2 中国可持续发展共享示范项目组. 地理信息 Metadata 研究、标准和实施(论文集). 1998
- 3 <http://www.webservice.org>
- 4 <http://www-106.ibm.com/developerworks/webservices>
- 5 <http://www.uddi-china.org>
- 6 北京市信息资源管理中心. 北京市信息资源网中心工程研究报告. 2002.4
- 7 北京市信息资源管理中心元数据项目组. 北京市信息资源网元数据共享网络体系总体设计报告. 2002
- 8 国家信息中心. 国家空间信息基础设施(NSII)空间元数据标准(草案). 2000
- 9 承继成,王宏伟,等. 走向城市信息化时代—数字城市的理论、方法及应用[M]. 中国城市出版社, 2001
- 10 承继成,林晖,等. 数字地球导论[M]. 北京:科学出版社, 2000
- 11 李琦,吴少岩. 数字地球—人类认识地球的第三次飞跃[M]. 北京:北京大学出版社, 1999
- 12 陈爱军. 空间信息共享与标识语言研究.[北京大学博士论文]. 2000
- 13 赵永平. 基于国家空间信息基础设施的 Metadata 研究及其共享示范体系的建立.[北京大学博士论文]. 1998
- 14 <http://www.digitalbeijing.gov.cn>
- 15 <http://www.cybergis.org.cn>
- 16 <http://www.w3.org>
- 17 <http://www.opengis.org>
- 18 <http://msdn.microsoft.com/webservices/>