计算机研究与发展
Journal of Computer Research and Development

ISSN 1000-1239/CN 11-1777/TP
43(7):1135～1141, 2006

一种递增叫价的多属性拍卖方法

金 □　　石纯一
(清华大学计算机科学与技术系　北京　100084)
(jinxing@cn.ibm.com)

An Ascending Bid Multi-Attribute Auction Method

Jin Xing and Shi Chunyi
(*Department of Computer Science and Technology*, *Tsinghua University*, *Beijing* 100084)

Abstract　Use auction methods to allocate resources among self-interested agents efficiently and reasonably is one of the challenges of multi-agent systems. Multi-attribute auctions extend traditional auction settings to allow negotiation over non-price attributes such as weight, color, size in addition to price. Based on a generalized multi-attribute auction model, an auction method—MAE is provided. MAE is an extension for English auction from single attribute to multi-attribute. Strategies and profits of buyer and sellers in MAE. Some main properties of MAE are proved. Buyers and sellers are individually rational in MAE. Buyers and sellers have nearly optimal strategies. The total profit of buyers and sellers is nearly optimal with the given strategies. Compared with Esther David's works, MAE has a more generalized model. Compared with the MAV auction, MAE is more transparent for sellers. Seller's strategy in MAE is more intuitive than in MAV.

Key words　multi-agent system; multi-attribute auction; bid; seller; buyer

摘　要　采用拍卖方法来进行资源分配是多 Agent 系统研究中的重要问题. 基于广义的多属性拍卖模型,提出了一种递增叫价的多属性拍卖方法——MAE. 对 MAE 中卖方和买方的策略和效用进行了分析,进而证明了 MAE 的一些重要性质. 例如卖方和买方满足独立理性,且都有接近最优的策略,在这一组策略下买方和卖方的总效用接近最大. 将 MAE 与已有的多属性拍卖方法进行了比较,结果表明 MAE 改进了 Esther David 的工作,并且说明 MAE 是一种可以取代 MAV 的递增叫价多属性拍卖方法.

关键词　多 Agent 系统;多属性拍卖;叫价;卖方;卖方

中图法分类号　TP18

1　引　　言

在动态开放的计算机网络环境中,理性的 Agent 代表了用户的意志,其目标是为了使自身利益最大化,资源分配是多 Agent 系统中的重要问题. 拍卖是一种快速有效的资源分配方法,可操作性强,可使资源在短时间内被合理分配,获得系统范围内最优解或较优解. 评价拍卖方法性能的标准有总效用最大、买卖方的计算量、对私有信息的保护、独立理性等.

通常意义的单一物品拍卖中,买卖双方只对物品的价格感兴趣,而不考虑物品的其他属性,或说认为所有参与拍卖的物品没有区别. 而在实际交易时,往往需要考虑物品更多的属性. 例如产品的提交时间、各种质量参数、售后服务的内容等. 买方对

收稿日期:2005-03-04;修回日期:2005-11-28
基金项目:国家自然科学基金项目(60373079,60496323)

不同属性的物品评价值不同,而卖方生产不同属性的商品所需的成本也不同,买方估价函数和买方成本函数的多样性使得这一类问题复杂化.

目前多属性拍卖方法的理论性研究并不多. Bichler 等人对多属性拍卖进行了实验分析,随机产生若干个多属性拍卖问题,并利用单属性拍卖方法对这些问题求解,结论是用单属性拍卖方法求解多属性拍卖问题会使效用大打折扣[1]. Teich 等人给出了基于两个属性模型的递增叫价暗标拍卖[2]. Gimenez-Funes 等人开发了一个多属性正拍卖系统[3],并假定买方 Agent 采用基于实例的决策理论选择策略. 跳蛙法是对英国式拍卖的推广,采用反拍卖描述,认为估价值函数在每个属性方向上都是增函数,每次叫价时必须在现有叫价的基础上降低价格或提高某个属性值,且其他属性值不能降低,跳蛙法将多维空间内的搜索简化为在一条路径上的搜索,不能保证总效用最大. Che 考虑物品的价格和数量两种属性,并给出了综合两种属性的评分标准,基于评分标准给出了一种最高叫价暗标拍卖方法和一种第二高叫价暗标拍卖方法[4]. Esther David 等人给出了一种多属性拍卖模型,并在此模型下给出了一种最高叫价拍卖方法和 4 种递增叫价拍卖方法,分别是对传统的最高叫价拍卖方法和递增叫价拍卖方法在多属性意义下的推广[5,6],并在文献[7]中分析了卖方的策略. 但在 Esther David 等人的模型中,限定只有两个非价格属性,且限定卖方的成本函数为两个属性的线性组合,买方的估价值函数为两个属性倒数的线性组合,具有较大的局限性. 此外, Esther David 等人没有分析买方策略,而是假定买方一定采用坦诚策略. Bichler 还给出了一种多属性拍卖叫价语言,以此来描述 Agent 对各个属性的偏好程度,并给出了基于这种叫价语言的胜者决定算法[1]. Bichler 等人的工作降低了多属性拍卖的通信量. 文献[8]扩展了文献[5,6]的模型,并给出了一种暗标叫价的多属性拍卖方法 MAV,证明了 MAV 中卖方有最优策略,且满足激励相容性,买方具有次优策略,买方选取次优策略时,可保证总效用最大.

2 多属性拍卖模型

由于文献[5,6]中多属性拍卖模型的局限性,本文采用文献[8]中扩展的多属性拍卖模型,即不限定属性的个数,买方评价函数和卖方成本函数可是从属性空间到实数的任意函数. 模型如下:

多属性拍卖模型 $M=\langle A,B,S,V,C,Res\rangle$,其中:

(1) $\boldsymbol{A}$ 为属性空间,$\boldsymbol{A}=A_1\times\cdots\times A_m$. 拍卖的物品包含 m 个属性 $a_1,\cdots,a_m$,取值范围分别为 $A_1,\cdots,A_m$. $\boldsymbol{a}=(a_1,\cdots,a_m)$ 为物品的属性向量,$\boldsymbol{a}\in A$.

(2) B 为拍卖中惟一的买方,B 需要购买一个物品.

(3) S 为卖方集合,包含 n 个卖方($n\geqslant 2$),$S=\{1,\cdots,n\}$,每个卖方都可以提供不同属性的物品.

(4) $V:\boldsymbol{A}\rightarrow\mathbb{R}$ 为买方 B 的属性估价函数($\mathbb{R}$ 为实数集合),即买方 B 对属性为 $\boldsymbol{a}$ 的物品的估价值 $V(\boldsymbol{a})\in\mathbb{R}$.

(5) $\boldsymbol{C}=(C_1,\cdots,C_n)$,其中 $C_i:\boldsymbol{A}\rightarrow\mathbb{R}$ 为卖方 i 的属性成本函数,即卖方 i 对属性为 $\boldsymbol{a}$ 的物品的成本 $C_i(\boldsymbol{a})\in\mathbb{R}$.

(6) Res 为成交方案,$Res=(P,\boldsymbol{a})$,其中成交价格 $P\in\mathbb{R}$,$\boldsymbol{a}$ 为成交属性向量.

若买方与卖方 i 在方案 $Res=(P,\boldsymbol{a})$ 下成交,则买方 B 的效用

$$U=V(\boldsymbol{a})-P,$$

卖方 i 的效用

$$U_i=P-C_i(\boldsymbol{a}).$$

3 多属性拍卖方法 MAE

3.1 引入 MAE 的目的

文献[5,6]最高叫价多属性拍卖和英国式多属性拍卖可以解决多属性拍卖问题,但其模型具有较大的局限性. 文献[8]虽然扩展了文献[5,6]的模型,提出了一种多属性 Vickrey 拍卖方法 MAV,保持了 Vickrey 拍卖在效用、效率和策略上的优秀特性,但同时也继承了 Vickrey 拍卖的一些缺陷,如:

(1) 叫价者必须将私有的真实估价告诉拍卖者,拍卖者可利用这些信息,在以后的拍卖或其他决策活动中获利,使叫价者蒙受损失.

(2) 需假设拍卖者是公正可信的. 由于 Vickrey 拍卖时一种暗标拍卖,拍卖者可以虚构一个叫价而不被叫价者发现,这样可增加拍卖者自身的效用,获胜叫价者的效用相应降低.

(3) 很多叫价者不理解 Vickery 拍卖中叫价者的激励相容性,从而不能叫出最优策略或根本不知道该如何叫价.

与 Vickrey 拍卖相比,递增叫价拍卖方法具有

叫价过程透明、策略简单的优点．因而需要找到一种递增叫价的多属性拍卖方法，克服 MAV 拍卖的上述缺点．

3.2　MAE 拍卖规则

MAE 拍卖流程如下：

Step1．由买方公布估价函数 $V'(\boldsymbol{a})$（V'可与 V 有所区别）、最小叫价增幅 d．

Step2．由卖方 1 到 n 轮流叫价．

（1）设置当前最高叫价 $B_{\max}=0$，当前时间 $t=0$，活动卖方集合 $S_{\text{act}}=S$，当前胜者 $w^t=0$．

（2）$t=t+1$．在 S_{act}中按顺序选取一个卖方 i，i 在 t 时刻叫价，并将叫价记为 B_i^t．B_i^t 可以是“pass”，称为退出；也可以是大于等于 $B_{\max}+d$ 的任意实数，称为加叫．若 B_i^t 为‘pass’则将卖方 i 从 S_{act}中删除，$w^t=w^{t-1}$；否则设 $B_{\max}=B_i^t$，$w^t=i$．

（3）若 $S_{\text{act}}\neq\varnothing$，重复（2）．

Step3．若 $w^t=0$ 则无人成交，拍卖结束，否则卖方 $w=w^t$ 获胜，称为成交卖方，最终叫价 $B^*=B_{\max}$．

Step4．由成交卖方 w 提出成交方案$(P_t,\boldsymbol{a}_t)$，合法成交方案需满足 $V'(\boldsymbol{a}_t)-P_t=B^*$，成交卖方与买方以此成交方案成交，拍卖结束．

4　MAE 拍卖中策略及效用分析

4.1　卖方策略及效用

MAE 拍卖中卖方的策略包括在每一轮中如何叫价和成为成交卖方后如何提出成交方案．定理 1 给出了理性卖方叫价时应遵循的准则，给出了最优的提案策略，并说明了在最优提案策略下如何计算成交卖方的效用．

定理 1． 在 MAE 中，当买方提出估价函数 $V'(\boldsymbol{a})$ 后，存在如下叫价准则和提案策略：

（1）叫价准则．集合 $\mathbb{B}_i^t$ 定义为

$$\mathbb{B}_i^t=\begin{cases}\{\text{pass}\}, & \text{if } B_{\max}+d\geqslant D_i,\\ \{B_i^t\mid B_{\max}+d\leqslant B_i^t\leqslant D_i\}, & \text{if } B_{\max}+d<D_i,\end{cases}$$

其中 $D_i=\max\limits_{\boldsymbol{a}\in A}(V'(\boldsymbol{a})-C_i(\boldsymbol{a}))$．当 $B_i^t\in\mathbb{B}_i^t$ 时，称卖方 i 在 t 时刻的叫价 B_i^t 满足叫价准则．

（2）提案策略．若卖方被确定为成交卖方，成交方案为$(P_i^*,\boldsymbol{a}_i^*)$，其中 $\boldsymbol{a}_i^*$ 为 $\arg\max\limits_{\boldsymbol{a}\in A}(V'(\boldsymbol{a})-C_i(\boldsymbol{a}))$中某一元素，也就是使$(V'(\boldsymbol{a})-C_i(\boldsymbol{a}))$取值最大的 $\boldsymbol{a}$，$P_i^*=V'(\boldsymbol{a}_i^*)-B^*$．

叫价准则是对卖方叫价的限制条件，所有理性的卖方叫价时都应满足这个条件．也就是说，对于任意卖方 i 在 t 时刻的两个任意的可选叫价 B_{i1}^t和 B_{i2}^t，若 $B_{i1}^t\in\mathbb{B}_i^t$ 且 $B_{i2}^t\notin\mathbb{B}_i^t$，则 $U(B_{i1}^t)\geqslant U(B_{i2}^t)$．其中 $U(B_{i1}^t)$和 $U(B_{i2}^t)$分别为叫价 B_{i1}^t和 B_{i2}^t后获得的效用．并且 $\mathbb{B}_i^t$ 中的叫价都是合法的，即符合 MAE 拍卖的规则．

当卖方获胜后，上述提案策略是卖方合法的、惟一的、最优的提案策略．

卖方 i 在某次的叫价 B_i^t 成为最终叫价 B^* 的充分必要条件是$B_i^t\geqslant D_{-i}-d$．其中$D_{-i}=\max\limits_{j\in S,j\neq i}(D_j)$．继而卖方 i 的效用

$$U_i=D_i-B^*=D_i-B_i^t.$$

证明．

卖方 i 的策略分为叫价策略和提案策略两部分，首先考虑提案策略．

提案的合法性显然成立，只需证明最优性和惟一性．

最优性：当卖方获胜后，对任意成交方案$(P',\boldsymbol{a}')$，卖方 i 的效用

$$U_i(P',\boldsymbol{a}')=P'-C_i(\boldsymbol{a}')=V'(\boldsymbol{a}')-B^*-C_i(\boldsymbol{a}')\leqslant\max_{\boldsymbol{a}\in A}(V'(\boldsymbol{a})-C_i(\boldsymbol{a}))-B^*=V'(\boldsymbol{a}_i^*)-C_i(\boldsymbol{a}_i^*)-B^*=P_i^*-C_i(\boldsymbol{a}_i^*)=U_i(P_i^*,\boldsymbol{a}_i^*).$$

惟一性：若卖方 i 提出的成交方案为$(P',\boldsymbol{a}')$，$\boldsymbol{a}'\notin\arg\max\limits_{\boldsymbol{a}\in A}(V'(\boldsymbol{a})-C_i(\boldsymbol{a}))$，则

$$U_i(P',\boldsymbol{a}')=V'(\boldsymbol{a}')-B^*-C_i(\boldsymbol{a}')<\max_{\boldsymbol{a}\in A}(V'(\boldsymbol{a})-C_i(\boldsymbol{a}))-B^*=U_i(P_i^*,\boldsymbol{a}_i^*).$$

故成交卖方 i 采用最优策略后的效用

$$U_i=P_i^*-C_i(\boldsymbol{a}^*)=V'(\boldsymbol{a}_i^*)-B^*-C_i(\boldsymbol{a}^*)=D_i-B^*=D_i-B_i^t.$$

下面考虑叫价准则，显然 $\mathbb{B}_i^t$ 中的叫价都是合法的，只需证明若 $B_{i1}^t\in\mathbb{B}_i^t$ 且 $B_{i2}^t\notin\mathbb{B}_i^t$，则 $U_i(B_{i1}^t)\geqslant U_i(B_{i2}^t)$．这里假定成为成交卖方后采用最优的提案策略．

首先考虑 $B_{\max}+d\geqslant D_i$ 时的情况．$B_{i1}^t=\text{pass}$，$U_i(B_{i1}^t)=U_i(\text{pass})=0$．若加叫 B_{i2}^t，则有 $B_{i2}^t\geqslant B_{\max}+d\geqslant D_i$．此时若成为成交卖方，则 $U_i(B_{i2}^t)=D_i-B_{i2}^t\leqslant0$；否则 $U_i(B_{i2}^t)=0$．

再考虑 $B_{\max}+d<D_i$ 时的情况．$B_{\max}+d\leqslant B_{i1}^t\leqslant D_i$，若成交，则 $U_i(B_{i1}^t)=D_i-B_{i1}^t\geqslant0$，若不成交，则 $U_i(B_{i1}^t)=0$．如果 $B_{i2}^t=\text{pass}$，则 $U_i(B_{i2}^t)=0$．如果 $B_{i2}^t>D_i$，若成交，则 $U_i(B_{i2}^t)=D_i-B_{i2}^t\leqslant0$；否则 $U_i(B_{i2}^t)=0$．

表 1 中列出了两种情况下 B_{i1}^t, B_{i2}^t, $U_i(B_{i1}^t)$, $U_i(B_{i2}^t)$ 的取值范围. 可见无论那种情况下, 都有 $U_i(B_{i1}^t) \geqslant U_i(B_{i2}^t)$.

Table 1 Values of $U(B_{i1}^t)$ and $U(B_{i2}^t)$ for Different B_{i1}^t and B_{i2}^t

表 1 B_{i1}^t 和 B_{i2}^t 不同取值时 $U(B_{i1}^t)$ 和 $U(B_{i2}^t)$ 的值

Condition	B_{i1}^t & B_{i2}^t	$U_i(B_{i1}^t)$ & $U_i(B_{i2}^t)$
if $B_{\max}+d \geqslant D_i$, $B_i^t=\{\text{pass}\}$	$B_{i1}^t=\text{pass}$	$U_i(B_{i1}^t)=0$
	$B_{i2}^t \geqslant B_{\max}+d \geqslant D_i$	$U_i(B_{i2}^t)=\begin{cases}0, & \text{not trade} \leqslant 0,\\ D_i-B_{i2}^t \leqslant 0, & \text{trade} \leqslant 0.\end{cases}$
if $B_{\max}+d < D_i$, $B_i^t=\{B_i^t \mid B_{\max}+d \leqslant B_i^t \leqslant D_i\}$	$B_{\max}+d \leqslant B_{i1}^t \leqslant D_i$	$U_i(B_{i1}^t)=\begin{cases}0, & \text{not trade} \geqslant 0,\\ D_i-B_{i1}^t \geqslant 0, & \text{trade} \geqslant 0.\end{cases}$
	$B_{i2}^t=\text{pass}$	$U_i(B_{i2}^t)=0$
	$B_{i2}^t > D_i$	$U_i(B_{i2}^t)=\begin{cases}0, & \text{not trade} \leqslant 0,\\ D_i-B_{i2}^t \leqslant 0, & \text{trade} \leqslant 0.\end{cases}$

下面证明卖方 i 的某次的叫价 B_i^t 成为最终叫价 B^* 的充分必要条件是 $B_i^t \geqslant D_{-i}-d$. 这里假定所有卖方都遵循叫价准则. 若卖方 i 的某次叫价 B_i^t 满足 $B_i^t \geqslant D_{-i}-d$, 则对于 $\forall j \neq i$, 都有 $D_j \leqslant B_i^t+d$, 故根据叫价准则, 所有除 i 以外的其他卖方都叫 pass, 从而 B_i^t 成为最终叫价, 卖方 i 获胜. 若卖方 i 的某次叫价 B_i^t 满足 $B_i^t < D_{-i}-d$, 则 $\exists j \neq i$, 使 $D_j < B_i^t+d$, 这时 B_i^t 不能成为最终叫价. 证毕.

定理 1 说明, 所有理性的卖方都会在叫价准则允许的范围内叫价, 并且都会采用定理 1 中的最优提案策略. 但叫价准则只给出了一个范围, 还不能最终指导卖方该如何叫价. 定理 2 给出了在由理性的卖方参加的 MAE 拍卖中任意卖方 i 效用的理论上限和下限, 并给出了一种叫价策略, 采用这种叫价策略时, 卖方 i 的效用 U_i 与理论上限的差距不超过 $2d$.

定理 2. 在由理性的卖方参加的 MAE 拍卖中, 任意卖方 i 的效用 U_i 满足 $0 \leqslant U_i \leqslant \max(D_i-D_{-i}+d, 0)$, $\overline{U_i}=\max(D_i-D_{-i}+d, 0)$ 称为 U_i 的理论上限. 对于任意卖方 i, 下面的叫价策略称为最小加叫策略:

$$B_i^t=\begin{cases}\text{pass}, & \text{if } B_{\max}+d \geqslant D_i,\\ B_{\max}+d, & \text{if } B_{\max}+d < D_i,\end{cases}$$

采用此叫价策略获得的效用 $U_i \geqslant \overline{U_i}-2d$.

证明. 由表 1 可知, 叫价准则可保证在任意情况下卖方 i 的效用 $U_i \geqslant 0$. 又由定理 1 可知, 若叫价 B_i^t 成为最终叫价, 卖方 i 是成交卖方, 则 $B^*=B_i^t \geqslant D_{-i}-d$, 从而 $U_i=D_i-B^* \leqslant D_i-D_{-i}+d$; 若卖方 i 不是成交卖方, 则 $U_i=0$. 所以 $U_i \leqslant \max(D_i-D_{-i}+d, 0)$.

当 $D_i-D_{-i}>d$ 时, 根据叫价准则, 其他理性卖方的叫价不超过 D_{-i}. 将其他卖方的最后一次叫价记为 B_{-i}^*, 有 $B_{-i}^*+d \leqslant D_{-i}+d < D_i$, 再根据叫价准则, 卖方 i 可叫价 $B_i^t=B_{-i}^*+d$ 从而成为成交卖方. 此时 $U_i=D_i-B_i^t=D_i-B_{-i}^*-d > D_i-D_{-i}-d \geqslant \overline{U_i}-2d$.

当 $D_i-D_{-i} \leqslant d$ 时, $\overline{U_i} \leqslant 2d$, 此时 $U_i \geqslant 0 \geqslant \overline{U_i}-2d$.

所以, $U_i \geqslant \overline{U_i}-2d$. 证毕.

由于通常情况下卖方公布的最小叫价增幅 $d \ll D_i$, 故可认为采用最小加价策略时有 $U_i \approx \overline{U_i}$, 即卖方采用最小加价策略获得的效用 U_i 与理论效用上限接近. 并当 $d \to 0$ 时, $U_i \to \overline{U_i}$.

C_i 是卖方 i 的私有信息, 所以 D_i 也是卖方 i 的私有信息, 由于在叫价时不知道其他卖方 j 的 D_j, 所以可以保证达到 $\overline{U_i}$ 的叫价策略是不存在的, 下面的反例说明了这一点.

例 1. 在 MAE 拍卖中, $d=3$, $D_i=140$. 当前状态 $B_{\max}=95$, $S_{act}=\{i, j\}$, 轮到 i 叫价. 如果 $D_j=101$, 则 $\overline{U_i}=D_i-D_j+d=140-101+3=42$, 此时 i 叫价 $B_i^t=98$ 可以获胜, 获得效用 $U_i=140-98=42=\overline{U_i}$. 如果 $D_j=102$, 则 $\overline{U_i}=D_i-D_j+d=140-102+3=41$, 此时 i 叫价 $B_i^t=99$ 可以获胜, 获得效用 $U_i=140-99=41=\overline{U_i}$. 卖方 i 不知道 D_j 的值, 故不能保证达到效用上限 $\overline{U_i}$.

不存在可以保证达到 $\overline{U_i}$ 的叫价策略, 使得保证效用接近 $\overline{U_i}$ 的最小加价策略被广泛采用.

采用最小加价策略的卖方只需进行简单的函数最大值运算, 便可做出接近理论效用上限的决策.

这说明 MAE 拍卖对卖方 Agent 的计算能力要求很低. 并且卖方的叫价和提案只与卖方本身的成本函数、买方公布的估价函数以及拍卖过程中其他卖方的叫价有关，而与买方的真实估价函数和其他卖方的成本函数以及他们采取的拍卖策略都无关，这说明 MAE 拍卖中卖方无需对其他参与拍卖者建立模型即可做出接近最优的决策.

4.2 买方策略及效用

在研究买方策略及效用时，假定卖方都采用最小加价策略，于是买方公布的属性估价函数 V' 和最小叫价增幅 d 完全决定了拍卖的过程和结果，这样可以将拍卖过程中的数据都看做是 V' 和 d 的函数. 买方公布 V' 和 d 后，将最终叫价记为 $B^*(V',d)$，将成交提案记为 $(a_t(V',d),P_t(V',d))$，买方效用记为 $U(V',d)$. 对买方策略及效用的分析实际上就是对效用函数 $U(V',d)$ 的分析.

根据叫价准则，当且仅当对于 $\forall i, D_i\leqslant 0$ 时，所有卖方都不加叫，拍卖最终以不成交结束. 排除这个简单的情况便于下面的分析，故以下假设 $\exists i$ 使 $D_i>0$.

定理 3. 在由理性的卖方参加的 MAE 拍卖中，买方的效用 $U(V',d)$ 满足

$$V(a_t(V'))-V'(a_t(V'))+D^*-d\leqslant U(V',d)\leqslant V(a_t(V'))-V'(a_t(V'))+D^*+d,$$

其中 $D^*=\max_{i\in S}{}_2(D_i)=\min_{i\in S}(\max_{j\in S-\{i\}}(D_j))$.

证明. 首先证明 $D^*-d\leqslant B^*(V',d)\leqslant D^*+d$.

根据 D^* 的定义，有对 $\forall i, D_{-i}\geqslant D^*$. 再由定理 1，若卖方 i 获胜，则有

$$B^*=B_i^t\geqslant D_{-i}-d\geqslant D^*-d.$$

不妨设 $D_i=\max_{j\in S}(D_j)$，则有 $D_{-i}=D^*$. 根据叫价准则，对 $\forall t, \forall j\in S$ 且 $j\neq i$，有 $B_j^t\leqslant D_j\leqslant D_{-i}=D^*$，因为 i 采用最小加价策略，所以对 $\forall t$，有 $B_i^t\leqslant D^*+d$. 故对 $\forall t, \forall j\in S$，有 $S_j^t\leqslant D^*+d$. 所以 $B^*=\max_{t\in T,j\in S}(B_j^t)\leqslant D^*+d$.

故 $D^*-d\leqslant B^*(V',d)\leqslant D^*+d$.

确定最终叫价 $B^*(V',d)$ 后，即可计算出买方效用.

$$U(V',d)=V(a_t(V',d))-P_t(V',d)=V(a_t(V',d))-V'(a_t(V',d))+B^*(V,d),$$

所以 $V(a_t(V'))-V'(a_t(V'))+D^*-d\leqslant U(V',d)\leqslant V(a_t(V'))-V'(a_t(V'))+D^*+d$. 证毕.

特别地，当买方公布的估价函数为 V 时，即买方叫出自己真实的属性估价函数时，其效用为

$$U(V,d)=V(a_t(V',d))-V(a_t(V',d))+B^*(V',d)=B^*(V,d),$$

$$D^*-d\leqslant U(V,d)\leqslant D^*+d.$$

此时，若 $d\to 0$，则有买方效用 $U\to D^*$.

5 MAE 的一些性质

性质 1. MAE 满足卖方独立理性，即 MAE 可以保证任何一个理性卖方效用为非负.

证明. 由定理 1 知，遵循叫价准则的卖方 i 的效用 $U_i\geqslant 0$. 证毕.

性质 2. 在 MAE 中，买卖方获得的总效用为 $U_{\text{total}}=D_w$，其中 w 为获胜卖方.

证明. 根据拍卖模型，买方公布 V' 和 d 后，获得的效用为

$$U(V',d)=V(a_t(V',d))-P_t(V',d).$$

不成交卖方的效用为 0，成交卖方 w 的效用为 $U_w(V',d)=P_t(V',d)-C_w(a_t(V',d))$.

故买卖方总效用为

$U_{\text{total}}=U(V',d)+U_w(V',d)=V(a_t(V',d))-C_w(a_t(V',d))=D_w$. 证毕.

性质 3. 若买方公布的属性估价函数为 V，则买卖方总效用 $U_{\text{total}}\geqslant\overline{U_{\text{total}}}-d$，其中 $\overline{U_{\text{total}}}$ 为买卖方总效用的理论上限.

证明. 根据性质 2，当 $w\in\arg\max_{i\in S}(D_i)$ 时，U_{total} 可取到最大值 $\max_{i\in S}(D_i)$，故 $\overline{U_{\text{total}}}=\max_{i\in S}(D_i)$.

根据定理 1，对 $\forall i\in S, B^*\geqslant D_{-i}-d$. 再根据叫价准则，有对 $\forall i\in S, D_w\geqslant B^*\geqslant D_{-i}-d$. 令 $i=w$，得 $D_w\geqslant D_{-w}-d$，所以 $U_{\text{total}}=D_w\geqslant\max_{i\in S}(D_i)-d=\overline{U_{\text{total}}}-d$. 证毕.

性质 3 说明，若买方公布的属性估价函数为 V，且 d 接近 0 时，买卖双方的总效用可接近理论上限.

性质 4. MAE 拍卖的叫价过程可在 $\left\lceil\frac{D^*}{d}\right\rceil+n$ 个回合内结束.

证明. MAE 叫价过程中每次加价不低于 d，又由定理 3 知 $B^*\leqslant D^*+d$，故至多加价 $\left\lceil\frac{D^*+d}{d}\right\rceil$ 次可叫到最终叫价 B^*. 除获胜卖方 w 外，每个卖方退出需要 1 回合，所以至多需要

$$\left\lceil\frac{D^*+d}{d}\right\rceil+n-1=\left\lceil\frac{D^*}{d}\right\rceil+n$$

个回合即可完成叫价. 证毕.

叫价过程相对较长是递增叫价拍卖的一个普遍缺点. 性质 4 说明在 MAE 中可以通过调整最小加价增幅 d 将叫价过程控制在可以承受的范围内.

6 结 论

表 2 将 MAE 的主要性能指标与其他多属性拍卖方法做了比较. 在 Esther David 的最高叫价多属性拍卖和英国式多属性拍卖所选取的拍卖模型中，将属性数目限定为两种，并对成本函数和估价函数的形式做了限定，给这两种拍卖方法带来了局限性. MAE 采用广义的多属性拍卖模型，提高了以上两种拍卖方法的适用性. 同样采用广义多属性拍卖模型的 MAV，满足卖方激励相容性，因而获得了良好的实时性能，并且能够保证获得总效用最大. 但 MAV 存在 3 个主要问题：卖方必须暴露私有评价函数；卖方不能检查买方是否作弊；最优策略不易理解. MAE 采用递增叫价的方式，克服了上述 3 个问题：卖方叫价时不必叫出私有评价函数；买方不能通过虚构叫价的方式损害卖方的利益；卖方的叫价准则容易理解，并被广泛接受. 同时，MAE 拍卖中卖方具有接近最优的策略，满足独立理性，买方也存在较优的策略，并且买方可保证总效用接近最大，叫价的回合数也可以控制. MAE 是对已有多属性拍卖方法的改进.

Table 2　MAE and Other Multi-Attribute Auctions

表 2　MAE 与其他多属性拍卖方法的性能比较

Evaluating Criteria	First Price (David)	English (David)	MAV	MAE
Number of Attributes	2	2	Not limited	Not limited
Cost Function of Sellers	Limited	Limited	Not limited	Not limited
Valuation Function of Buyers	Limited	Limited	Not limited	Not limited
Optimal Strategy of Sellers	Not exist	Nearly optimal	Exist, but not intuitive	Nearly optimal, intuitive
Computational Complexity of Sellers	High	Low	Low	Low
Buyer Cheat	Easy	Difficult	Easy	Difficult
Seller's Valuation Function	Not revealed	Not revealed	revealed	Not revealed
Auction Speed	Fast	Slow	Fast	Medium
Optimal Total Profit	Not Guaranteed	Not Guaranteed	Guaranteed	Nearly optimal

参 考 文 献

1 M. Bichler, J. Kalagnanam. Bidding languages and winner determination in multi-attribute auctions [J]. European Journal of Operational Research, 2005, 160(2): 380～394

2 J. Teich, H. Wallenius, J. Wallenius. Multiple-issue auction and market algorithms for the World Wide Web [J]. Decision Support Systems, 1999, 26(1): 49～66

3 E. Gimenez-Funes, L. Godo, J. A. Rodriguez-Aguilar, *et al*. Designing bidding strategies for trading agents in electronic auctions [C]. In: Proc. 3rd Int'l Conf. Multi-Agent Systems (ICMAS-98). Piscataway, NJ: IEEE Press, 1998. 136～143

4 Y. K. Che. Design competition through multidimensional auctions [J]. RAND Journal of Economics, 1993, 24(4): 668～680

5 Esther David, Rina Azoulay-Schwartz, Sarit Kraus. Protocols and strategies for automated multi-attribute auctions [C]. In: AAMAS 2002. New York: ACM Press, 2002. 77～85

6 Esther David, Rina Azoulay-Schwartz, Sarit Kraus. An English auction protocol for multi-attribute items [G]. In: LNAI 2531. Berlin: Springer, 2002. 52～68

7 Esther David, Rina Azoulay-Schwartz, Sarit Kraus. Bidders' strategy for multi-attribute sequential English auction with a deadline [C]. In: AAMAS 2003. New York: ACM Press, 2003. 457～464

8 Jin Xing, Shi Chunyi. A sealed bid multi-attribute vickrey auction [J]. Chinese Journal of Computers, 2006, 29(1): 145～152 (in Chinese)
(金□，石纯一. 一种暗标多属性拍卖方法[J]. 计算机学报, 2006, 29(1): 145～152)

Jin Xing, born in 1980. Research professor in IBM China Research Lab. His main research interests include distributed artificial intelligence, multi-agent system, auction method design, etc.

金□，1980 年生，IBM 中国研究中心研究员，主要研究方向为分布式人工智能、多 Agent 系统、拍卖方法.

Shi Chunyi, born in 1935. Professor and Ph. D. supervisor of Department of the Computer Science and Technology, Tsinghua University, senior member of CCF. His main research interests include multi-agent system, distributed AI.

石纯一，1935 年生，教授，博士生导师，中国计算机学会高级会员，主要研究方向为多 Agent 系统、分布式人工智能(scy@tsinghua.edu.cn).

Research Background

The work in this paper is supported by the National Natural Science Foundation of China under grant No. 60373079 and 60496323. Auctions are important mechanisms for resource and task allocation in multi-agent systems (MAS). Auction methods have explicit rules, require less agent abilities and achieve fast and efficient mutual agreements. According to the computational ability, communication ability and rational level of agents, MAS designers or agents can select different kinds of auction methods for one-to-one and one-to-many negotiation. Multi-attribute auctions extend traditional auction settings to allow negotiation over non-price attributes such as weight, color, size in addition to price. Based on a generalized multi-attribute auction model, this paper provides an auction method named MAE. MAE is an extension for English auction from single attribute to multi-attribute. We discuss strategies and profits of buyers and sellers in MAE. Some main properties of MAE are proved. Buyers and sellers are individually rational in MAE. Buyers and sellers have nearly optimal strategies. The total profit of buyers and sellers is nearly optimal with the given strategies. Compared with Esther David's works, MAE has a more generalized model. Compared with MAV auction, MAE is more transparent for sellers. Seller's strategy in MAE is more intuitive than in MAV.