

文章编号:1003-207(2016)01-0134-09

DOI:10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2016.01.016

具有高投标成本的多属性逆向拍卖博弈模型

周学广^{1,2}, 任 龙^{1,2}

(1. 教育部人文社会科学重点研究基地清华大学现代管理研究中心, 北京 100084;
2. 清华大学经济管理学院现代管理研究中心, 北京 100084)

摘要:越来越多像 GE 这样的大型企业在利用多属性逆向拍卖选择新的供应商采购产品时,通常会设定较高的固定投标成本。针对此情况,建立了三阶段的非合作博弈模型,并利用求解子博弈纳什均衡策略的方法,推导出了供应商的最优投标价格。并得到以下两个主要结论:一是供应商的最优投标策略是按照生产产品真实的质量和交货期进行投标,且投标价格为最优投标价格;二是采购商的最优策略是选择投标价格最高的供应商作为拍卖获胜者,这一违反直觉的结论。这是合理的,因为投标价格最高的供应商也是类型最优的供应商,也即投标质量和投标交货期组合最优的供应商。最后,利用数值实验验证了模型的有效性,并显示出设定相对较高的固定投标成本对采购商来说是有利的。

关键词:电子逆向拍卖;多属性投标;非合作博弈;高投标成本;最优拍卖机制

中图分类号:F724.59 **文献标识码:**A

1 引言

据 Hawkins 等^[1]数据分析显示,美国政府运用电子逆向拍卖(E-Reverse Auctions, ERA)进行采购为美国空军节省的开支在 \$ 25.9 亿和 \$ 253.3 亿之间,而为国防部节省的开支在 \$ 119 亿和 \$ 1170 亿之间。同样,像通用电气、IBM、The Sun Soft System 和戴尔等大型企业也正在扩大使用这种采购工具。正像 Pinker 等^[2]所论述的那样,ERA 可以大幅度降低采购成本,可以使购买组织通过多标准(价格、质量、交货期和付款项目等)来选择合适的供应商^[3]。因此,ERA 已经成为政府或是企业获取资源的一种重要工具。

但是,ERA 并不能够保证对采用它的组织都能够获得大规模的成本节约^[3],因为供应商中标后提供的产品质量和交货期等都影响着采购商的采购效率^[4]。因此,采购商需要设计具有高效率的拍卖机制,该机制既能够保证邀请一些具有资格的供应商

参与到拍卖中^[5];又能够保证优质的供应商获得采购合同和较高的期望利润^[6]。对于 ERA 的采购效率,Wan Zhixi 等^[7]研究指出对供应商资格的审查,放在拍卖结束后比放在拍卖开始张贴采购需求计划时要好。

为提高 ERA 的采购效率,采购企业不仅要求供应商提交投标价格,同时需要提交投标质量和交货期等产品特性。一般称这种包含投标价格、投标质量和投标交货期等投标多属性的采购拍卖为多属性逆向拍卖。正如 Jeffrey 等^[8]论述的多属性投标机制比单属性的价格机制更能够为采购商带来更多剩余;而 Huang He 等^[9]也对 ERA 机制进行研究,指出包括价格和和质量谈判的拍卖机制比只有价格的谈判更能够为供应链带来更多剩余。这些研究主要从采购者的角度出发来研究采购机制的设计问题,而没有从供应商的角度对多属性采购拍卖进行研究。

李军和刘树林^[10]运用 Cobb-Douglas 效用函数研究了多属性采购拍卖中供应者的利润和赢得合同问题,而曾宪科和冯玉强^[11]对具有非对称投标人的反向多属性拍卖进行研究,并给出了结构化的最优投标策略。这些对多属性逆向拍卖的研究都没有考虑供应商的固定投标成本。Lorentziadis^[12]指出在采购拍卖中投标者可能产生固定成本;进一步,Snir

收稿日期:2013-08-22;修订日期:2015-01-22

基金项目:教育部人文社会科学研究资助重大项目(14JJD630008)

通讯作者简介:周学广(1983-),男(汉族),山东临沂人,清华大学经济管理学院现代管理研究中心博士,研究方向:经济博弈论,E-mail:zhouxg.12@sem.tsinghua.edu.cn.

等^[13]对 IT 服务的高投标成本进行研究,而姚升保^[14]对供应商边际成本可变的物品多属性逆向拍卖给出了卖方的投标策略。这些研究一般只对投标价格和投标质量两个属性进行研究,而我们把投标属性继续扩展加上了投标交货期。此外,这些研究没有给出具体的多属性逆向拍卖的参与者应该如何进行决策。

针对以上问题,我们利用完全信息下的动态博弈思想建立了具有高投标成本的多属性逆向拍卖模型。首先,我们的研究不同与 Wan Zhixi 等^[7]、Jeffrey 等^[8]和 Huang He 等^[9]主要从采购商的角度研究如何设计最优拍卖机制,而是从供应商的角度来研究他们如何进行投标以实现期望利润最大化,并进一步分析出采购商如何选择拍卖获胜者以获得最大剩余。其次,我们的研究也并不是在李军和刘树林^[10]、Snir 等^[13]等投标价格和投标质量的两属性投标基础上,把多属性拍卖简单扩展加上投标交货期,而是把投标价格看作投标质量和投标交货期的函数,推导出了供应商的最优投标策略以及采购商选择供应商的标准——供应商的类型,也即投标质量和交货期的组合。最后,在模型中考虑了 Lorentzidis^[12]和 Snir 等^[13]所指出的投标会产生固定投标成本,并分析出采购商适度提高投标的固定成本是合理的。这些研究成果对指导供应商是否应该参与到拍卖中以及如何投标具有重要的现实意义,同时为采购商如何设计更有效率的采购拍卖机制提供了重要的借鉴意义。

2 高投标成本的多属性逆向拍卖博弈

2.1 问题描述

通用电器公司(GE)利用 ERA 采购法律服务始于 2003 年,每年的采购金额为 30 亿美元。GE 为了节省采购的服务成本,通过一些程序要求法律公司除了提交投标价格以外,还需要提交投标的服务质量^[15]。同样,GE 也利用 ERA 对需求的原材料进行大规模的采购,并要求投标的供应商不仅提交投标价格,还需要提交投标的质量和投标交货期等信息。此外,GE 通过设定相对较高的固定投标成本来限制参与到采购拍卖中的供应商数目。我们以 GE 这样的大型采购商利用多属性逆向拍卖方式来选择合适的供应商采购产品为例建立博弈模型。

假定大型采购商在自己的网站公布具体的采购需求计划(Request for Proposal, RFP),拍卖方式为降价密封方式的单轮拍卖。采购商和供应商之间

的拍卖过程可以看作一个三阶段的博弈,其博弈流程如下图 1 所示。第一阶段,大型采购商在自己的网站公开采购项目的 RFP,拍卖的方式、投标固定成本 F_i 以及详细的采购需求标准等;并暗示出采购项目的质量价值系数 v_1 ,交货期价值系数 v_2 ,以及最迟交货期 L 。这有助于供应商评估是否应该参与到拍卖中。第二阶段,供应商根据采购商的 RFP,以及生产产品的单位质量成本 c_1 ,单位交货期成本 c_2 ,产品质量 q 和交货期 l 等来决定是否参与投标?如果参与拍卖,需要决定投标向量,也即由投标价格 p 、投标质量和投标交货期的值形成的行向量。第三阶段,投标结束,采购商根据供应商的投标向量选出能够给它带来最大剩余的供应商作为拍卖的获胜者。

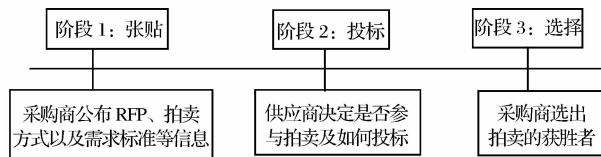


图 1 采购拍卖博弈流程

当采购商公布出具体的 RFP 后,具有资格的供应商是否应该参与投标?如果投标,如何决定最优投标向量的具体值?采购商又应该如何从众多投标中选择一个供应商作为拍卖的获胜者?为解决这些问题建立下面的博弈模型。

2.2 假设和模型建立

当采购商公布具体的 RFP 后,具有投标资格的供应商数目设为 n ,具体供应商的数目由采购商决定。在参考 Snir 等^[13]和 Carr^[6]的模型基础上,建立如下的高投标成本多属性逆向拍卖博弈模型。在建立模型之前,需要对现实的 ERA 进行假设。

假设 1 供应商生产产品的质量和交货期是对称的,也即供应商 i , ($i = 1 \cdots n$) 提供产品的质量 q_i 和交货期 l_i 是相互独立,且分别服从 $[q_l, q_h]$ 和 $[l_l, l_h]$ 上的一个连续递增的分布,其累积分布函数分别为 $F(q_i)$ 和 $G(l_i)$,且其概率密度 $f(q_i)$ 和 $g(l_i)$ 。(其中 q_l, q_h, l_l, l_h 分别代表供应商所能提供的最低质量,最高质量,最慢交货期,最快交货期。)

假设 2 供应商的投标价格是其生产产品质量和交货期的函数,而且这些都是私有信息。

在拍卖理论中私有信息是指只有投标者自己知道,而不为其他投标者所知的信息。此处的私有信息是指:不同类型的供应商拥有着不同的不为其他

供应商所知的生产信息。

由上面两个假设知, 供应商只知道自己供应产品的质量和交货期, 以及其它供应商投标质量和交货期的分布函数, 而不知道其它供应商具体的投标质量和投标交货期。

假设 3 采购商和供应商都是风险中性者; 且都在信息完全且完美的情况下做决策。

故采购商的剩余函数 S 为价值系数 v_1, v_2 的线性函数, 并表示为:

$$S(p_i, q_i, l_i) = v_1 q_i + v_2(L - l_i) - p_i \quad (1)$$

同理, 供应商的利润也是 c_1 和 c_2 的线性函数。

$$\pi_i = p_i - c_1 q_i - c_2(L - l_i) \quad (2)$$

任何投标的供应商能够赢得拍卖都具有一定的概率, 把它记为 $P_r(q_i, l_i, S^*, n)$, 表示有 n 个供应商参与投标, 且投标组合为 (q_i, l_i) 的供应商能够给采购商提供最多剩余 S^* 的概率, 因此供应商的最大期望利润可以表示为:

$$\text{Max } E(\pi_i) = [(p_i - c_1 q_i - c_2(L - l_i))]P_r(q_i, l_i, S^*, n) - F_c$$

$$s. t. \quad \pi_i > 0 \quad (3)$$

其中 c_1, c_2 是常数且满足 $c_1 < v_1, c_2 < v_2$ (否则, 供应商将不会参与投标)。

供应商的类型通过生产产品的质量和交货期来区分。在后面定理 5 中我们证明了供应商的最优投标策略是按照真实的产品质量和交货期来进行投标, 所以供应商的类型也可以利用供应商的投标质量和投标交货期来区分, 故得到下面的假设:

假设 4 供应商 $i, (i = 1 \dots n)$ 的类型 w_i , 通过供应商的投标质量 q_i 和投标交货期 l_i 来进行区分; 且采购商对供应商的类型评价函数为:

$$w_i = (v_1 - c_1)q_i + (v_2 - c_2)(L - l_i) \quad (4)$$

这是合理的, 因为 $(v_1 - c_1)$ 表示单位质量的边际收益, $(v_2 - c_2)$ 表示单位交货期的边际收益, 因此采购商可以由式子(4)中供应商的投标质量和交货期, 来判定供应商的类型。根据假设 1, 供应商的质量 q_i 和交货期 l_i 相互独立, 且累积分布函数分别为 $F(q_i), G(l_i)$, 因此供应商的类型分布函数 $H(w_i) = F(q_i)G(l_i)$ 。又因为 w_i 分布的区间在 $[q_l, q_h]$ 和 $[l_l, l_h]$ 组成的矩形内, 故需要讨论 $w_i = (v_1 - c_1)q_i + (v_2 - c_2)(L - l_i)$ 与各边界的关系, 才能够求出 $H(w_i)$ 的具体表达式。

不妨考虑 $(v_1 - c_1)q_l + (v_2 - c_2)(L - l_h) \leq w_i, w_i \leq (v_1 - c_1)q_l + (v_2 - c_2)(L - l_l)$ 和 $w_i \leq (v_1 - c_1)q_h + (v_2 - c_2)(L - l_h)$, 根据(4)式, 利用卷积公

式, 可以得到供应商的类型 w_i 的概率分布函数:

$$H(w_i) = F(q_i)G(l_i) = \int_{(v_2 - c_2)(L - l_h)}^{w_i - (v_1 - c_1)q_l} \int_{(v_1 - c_1)q_l}^{w_i} (v_1 - c_1)f[(v_1 - c_1)q_i]g[u - (v_1 - c_1)q_i]dq_i du \quad (5)$$

故 $H(w_i)$ 是一个关于供应商的类型 w_i 连续增函数且大于 0。

假设 5 供应商之间不存在共谋行为。

Jin Mingzhou 等^[16] 研究指出供应商为了获得更多收益通常会结成联盟, 这个联盟能够激励更多的供应商参与到拍卖中。但共谋行为可能会损害采购商的利益, 故采购商会采取措施避免共谋。这就保证了所有参与到拍卖中的供应商都是非合作的。

假设 6 供应商 i 的多属性投标向量 $S_i = (p_i, q_i, l_i)$ 由投标函数 B 来决策, 且 B 是单调增函数。

也即任何一个供应商 i 的多属性投标向量为 $S_i = (p_i, q_i, l_i)$, 那么 i 将投标 $B(S_i)$ 。因为投标价格是投标质量和交货期的函数, 也即 $p_i = (q_i, l_i)$, 所以投标价格越高, 供应商的类型越好, 故 B 为单调增函数。

3 非合作博弈行为分析

由假设 3 可知, ERA 的参与者在完全且完美信息情况下做决策, 故可以采用逆推法来求解子博弈纳什均衡策略。

首先考虑第 3 阶段, 当采购商具有完美且完全信息时, 子博弈纳什均衡解是采购商选择能够给她带来最大剩余的供应商。我们假定供应商 i 的投标能够使采购商获得最大剩余, 也就是说供应商 i 的多属性投标应该满足下式:

$$S_i = v_1 q_i + v_2(L - l_i) - p_i = \text{Max } S_j (j = 1 \dots n) \quad (6)$$

在第 2 阶段, 每个供应商根据采购商的 RFP 以及自己的产品质量和交货期等, 选择一个实现利润最大化的投标价格。同时, 能够获得采购合同的供应商投标必定能够给采购商带来最多剩余, 也即供应商的投标满足(6)式。故同时满足以上两个条件的投标才是子博弈纳什均衡解。

把(6)式和(4)式代入(3)式, 可以得到, 采购商的最优目标函数:

$$\text{Max } \pi_i(w_i, S_i) = (w_i - S_i)P_r(q_i, l_i, S^*, n) - F_c \quad (7)$$

对(7)运用最优化理论, 并根据纳什均衡解得含义, 推导出的供应商的最优投标价格如下面定理所示。

定理 1 在建立的高投标成本多属性逆向拍卖博弈模型中,参与拍卖供应商的最优投标价格为:

$$p_i = \begin{cases} \text{不投标} & \text{当 } \omega_i < \omega_m \\ v_1 q_m + v_2(L - l_m) & \text{当 } \omega_i = \omega_m \\ c_1 q_i + c_2(L - l_i) + \frac{\int_{\omega_m}^{\omega_i} (H(\xi))^{n-1} d\xi}{(H(\omega_i))^{n-1}} + \frac{F_c}{(H(\omega_i))^{n-1}} & \text{当 } \omega_i > \omega_m \end{cases} \quad (8)$$

其中 $\omega_m = (q_m, l_m)$ 为均衡投标时,供应商的质量和交货期,具体由 $\omega_m H(\omega_m)^{n-1} - F_c = 0$ 来确定。

证明 当供应商 i 的投标为均衡投标 ω_m 时,采购商和供应商获得的收益必定都为 0。也即(6)(7)式的值为 0,此时可得:

$E(\pi_m) = \omega_m P_r(q_i, l_i, S^*, n) - F_c = 0$ 。因 ω_m 是由 $\omega_m H(\omega_m)^{n-1} - F_c = 0$ 来确定,故在均衡处的供应商获胜的概率 $P_r(\cdot) = H(\omega_m)^{n-1}$, 供应商的期望利润改写为 $E(\pi_i) = \omega_i (H(\omega_i))^{n-1} - F_c$ 。

(1) 当 $\omega_i < \omega_m$ 时,供应商的期望利润为:
 $E(\pi_i) = \omega_i (H(\omega_i))^{n-1} - F_c < \omega_m (H(\omega_m))^{n-1} - F_c = 0$ (因为 $H(\omega_i)$ 是 ω_i 的增函数),故此时的固定投标成本超过了期望利润,因此供应商最优策略是不投标;也即,当供应商的类型低于均衡类型时应该退出拍卖。换句话说,供应商的投标质量和交货期不能够同时满足采购商的采购标准,即使投标也不会中标,只会浪费投标的固定成本 F_c 。

(2) 当 $\omega_i = \omega_m$ 时,供应商的投标恰好为均衡投标,此时供应商的投标成本恰好等于期望利润。同时,供应商能够为采购商带来的剩余值为 0,也即

$$S(p_i, q_i, l_i) = v_1 q_i + v_2(L - l_i) - p_i = 0 \quad (9)$$

由(9)知最优的投标价格为:

$$p_i = v_1 q_i + v_2(L - l_i) = v_1 q_m + v_2(L - l_m) \quad (10)$$

(3) 当 $\omega_i > \omega_m$ 时,根据参考文献^[17]的求解方法可得最优投标价格。

由假设 6 可知,如果供应商 i 多属性投标向量 $S_i = (p_i, q_i, l_i)$ 成为拍卖的获胜者,则 i 获胜的概率为所有的投标 $S_k, k \neq i$, 满足 $B(S_k) < B(S_i)$, 显然这个概率为: $P_r(\cdot) = [H(B^{-1}(S_i))]^{n-1}$, 其中 $B^{-1}(\cdot)$ 是 $B(\cdot)$ 的反函数。因此多属性投标为 $S_i = (p_i, q_i, l_i)$ 且类型为 ω_i 的供应商的期望收益为:

$$\pi_i(\omega_i, S_i) = (\omega_i - S_i) [H(B^{-1}(S_i))]^{n-1} - F_c \quad (11)$$

供应商 i 必然选择最优的多属性投标 S_i^* 满足:

$$\frac{\partial \pi_i}{\partial S_i} \Big|_{S_i=S_i^*} = 0 \quad (12)$$

另一方面,对 $\pi_i(S_i, \omega_i)$ 关于 ω_i 求导得:

$$\frac{d\pi_i}{d\omega_i} = \frac{\partial \pi_i}{\partial \omega_i} + \frac{\partial \pi_i}{\partial S_i} \frac{dS_i}{d\omega_i} \quad (13)$$

把 $S_i = S_i^*$ 代入(13)式得:

$$\frac{d\pi_i}{d\omega_i} \Big|_{S_i=S_i^*} = \frac{\partial \pi_i}{\partial \omega_i} \Big|_{S_i=S_i^*} + \frac{\partial \pi_i}{\partial S_i} \Big|_{S_i=S_i^*} \frac{dS_i}{d\omega_i} = \frac{\partial \pi_i}{\partial \omega_i} \Big|_{S_i=S_i^*} = \{H[B^{-1}(S_i)]\}^{n-1} \quad (14)$$

由假设 1 知,供应商是对称的,所以其他供应商的投标函数 B 同样满足期望利润最大化。故具有同样投标价格的供应商将有相同的类型,也即在纳什均衡条件下有 $S_i = B(\omega_i)$ 。把该式代入(14)式得:

$$\frac{d\pi_i}{d\omega_i} = (H(\omega_i))^{n-1} \quad (15)$$

对(15)式两边进行积分,且由(2)的证明知 $\pi_i(\omega_m) = 0$, 故得:

$$\pi_i = \int_{\omega_m}^{\omega_i} (H(\xi))^{n-1} d\xi + \pi_i(\omega_m) = \int_{\omega_m}^{\omega_i} (H(\xi))^{n-1} d\xi \quad (16)$$

由(11)式和纳什均衡条件得:

$$\pi_i(\omega_i, S_i) = (\omega_i - S_i) (H(\omega_i))^{n-1} - F_c \quad (17)$$

联立(16)和(17)式可以推出:

$$p_i = c_1 q_i + c_2(L - l_i) + \frac{\int_{\omega_m}^{\omega_i} (H(\xi))^{n-1} d\xi}{(H(\omega_i))^{n-1}} + \frac{F_c}{(H(\omega_i))^{n-1}} \quad (18)$$

由证明过程知,(18)式投标价格为供应商的极大值点。现在证明它也是全局最大值点,也即为最优的投标价格。由(11)式,我们可以得到供应商的期望利润函数为:

$$\pi_i(\omega_i, S_i) = (\omega_i - S_i) [H(\omega_i)]^{n-1} - F_c \quad (19)$$

可以判定其海塞矩阵为半负定,因此 $\pi_i(\omega_i, S_i)$ 是凹函数,故它的极大值点也即为最大值点。所以(18)式的投标价格,能够给供应商带来最大期望利润,也即它是供应商的最优投标价格。综上(1)(2)(3),命题得证。

由定理 1 知,当供应商的类型小于均衡值时,供应商的最优策略是退出拍卖,也即不投标。当供应商的类型等于均衡值时,供应商的最优投标价格恰好等于均衡时的投标组合。也就是说,当供应商的类型小于等于均衡投标值,供应商获得的最大期望利润为 0;当供应商的类型大于均衡值时,供应商投标才会盈利。另外,通过求解供应商的最优投标价

格的过程可知,供应商的最优投标价格也是供应商的子博弈纳什均衡解。

定理 2 在子博弈纳什均衡解处,随着固定投标成本和投标供应商数量的增加,均衡投标的阈值有上升的趋势。

证明 在均衡投标 w_m 处,供应商的利润函数为:

$$\pi(w_m) = w_m (H(w_m))^{n-1} - F_c = 0 \quad (20)$$

由于 $H(w_m)$ 为供应商的投标分布函数,故 $0 \leq H(w_m) \leq 1$ 。因此随着 n 的增加,投标 w_m 将变好。同理随着 F_c 的增加,投标 w_m 也变好。

由定理 2 知,随着供应商数量的增加,竞争的程度增加,其投标均衡将上升,也即提高了均衡状态下供应商的类型。因此吸引越多具有资格的供应商参与到拍卖中,越能够提高采购商的采购效率。另外,随着固定投标成本升高,投标均衡将变好,这主要是因为高固定投标成本能够阻碍一部分类型较差的供应商参与到拍卖中;同时,暗示着当投标成本为 0 时, $H(w_m) = 0$, 也即类型最差的供应商也参与到了拍卖中,这会降低投标均衡状态下供应商的类型。故采购商设定相对较高的固定投标成本是合理的。

定理 3 在子博弈纳什均衡处,随着采购商价值系数的增加,供应商生产成本系数的减小,投标均衡的阈值都有下降的趋势。

证明 把均衡时的投标质量和交货期代入(4)式得:

$$w_m = (v_1 - c_1)q_m + (v_2 - c_2)(L - l_m) \quad (21)$$

随着采购商采购价值系数 v_1, v_2 的增加,若使 w_m 的值不变。则供应商的投标质量 q_m 有下降而交货期 l_m 有上升的趋势。而随着 c_1, c_2 的增加供应商的投标正好相反。

由定理 3 知,当采购商的采购合同价值较大时,虽能吸引更多优质的供应商,但同时也吸引更多类型差的供应商,从而造成供应商的类型在均衡处的下降。因此,当采购商的采购规模较大时,采购商可以通过设定相对较高的交货期和较短的交货期等项目来限定参与到拍卖中的供应商类型。显然,随着供应商生产成本的增加,产品的质量和交货期都会增加,供应商的类型明显会提高,从而使得均衡处供应商的类型上升。

定理 4 在建立的具有高投标成本的多属性逆向拍卖博弈模型中,当供应商按最优价格进行投标时,随着供应商的类型的提高,采购商的剩余和供应商的期望利润都会增加。

证明 当 $w_i \leq w_m$ 时,供应商不投标或者投标时采购商剩余为 0,因此可以不考虑。故把(18)代入采购商剩余函数(6)式得:

$$S_i(p_i, q_i, l_i) = v_1 q_i + v_2 (L - l_i) - p_i = w_i - \frac{\int_{w_m}^{w_i} (H(\xi))^{n-1} d\xi}{(H(w_i))^{n-1}} - \frac{F_c}{(H(w_i))^{n-1}} \quad (22)$$

对(22)式的 w_i 求导得:

$$\frac{dS_i}{dw_i} = \frac{(\int_{w_m}^{w_i} (H(\xi))^{n-1} d\xi + F_c)(n-1)H(w_i)}{(H(w_i))^n} > 0 \quad (23)$$

由(23)可知,采购商的剩余是供应商的类型的增函数,故随着供应商的类型变好,供应商能够给采购商带来的剩余也将会增加。

同理当 $w_i \leq w_m$ 时,供应商的期望利润为 0,因此可以不考虑。故把(18)代入供应商的期望利润函数(3)式,得到下式(24):

$$E(\pi_i(p_i, q_i, l_i)) = [p_i - c_1 q_i - c_2 (L - l_i)]P_r(\cdot) - F_c = \int_{w_m}^{w_i} (H(\xi))^{n-1} d\xi \quad (24)$$

对(24)式的 w_i 求导得:

$$\frac{d\pi_i}{dw_i} = H^{n-1}(w_i) > 0 \quad (25)$$

由(25)可知,供应商的期望利润是供应商的类型的增函数,故随着供应商的类型提高,类型越优的供应商获得的期望利润就越多。

由定理 4 知,采购商为获得最大剩余必然会选择类型最优的供应商作为拍卖的获胜者,也即采购商的最优策略是选择具有产品质量高和交货期短的供应商作为拍卖的获胜者,而不是选择具有低投标价格的供应商。同时,类型最优的供应商将赢得采购合同且获得最大期望利润,显然,这能够吸引类型优的供应商参与到拍卖中。

定理 5 在建立的具有高投标成本的多属性逆向拍卖博弈模型中,供应商的最优投标策略是按真实的生产质量、交货期和最优投标价格参与到拍卖中。

证明 假设某个供应商的类型为 $w_i = (q_i, l_i)$, 而他却假装为 $w'_i = (q'_i, l'_i)$ 类型,其余的 $n-1$ 个供应商将按(18)式的进行投标。类型为 w_i 的供应商假装为 w'_i 类型进行投标赢得拍卖的最优反应,必定是提供给采购商的剩余与按真实类型投标时的相等。因为 $p_i(q_i, l_i)$ 为均衡解,作为类型为 w_i 的供应商假装为 w'_i 时,也获得最大利润,即满足:

$$\frac{\partial \pi_i(w_i, w'_i)}{\partial w_i} = 0 \quad (26)$$

正如前面所讨论一样,假装的供应商能够赢得拍卖必须给采购商带来最多剩余。故它赢得拍卖概率为 $(H(w'_i))^{n-1}$, 供应商的利润改写为:

$$\pi_i(w_i, w'_i) = [p_i - c_1 q_i - c_2(L - l_i)](H(w'_i))^{n-1} - F_c = w_i(H(w'_i))^{n-1} - S_i(w'_i)(H(w'_i))^{n-1} - F_c \quad (27)$$

对(27)式的 w'_i 求偏导得:

$$\frac{\partial \pi_i(w_i, w'_i)}{\partial w'_i} = w_i \frac{d}{dw'_i} [(H(w'_i))^{n-1}] - \frac{d}{dw'_i} [S(w'_i)(H(w'_i))^{n-1}] \quad (28)$$

另外,在 w_i 处采购商的剩余记为:

$$R_i = S_i(w_i)H(w_i)^{n-1} \quad (29)$$

把 p_i 代入(29)式整理可得:

$$R_i = [v_1 q_i + v_2(L - l_i) - p_i]H(w_i)^{n-1} = w_i(H(w_i))^{n-1} - \int_{w_m}^{w_i} (H(\xi))^{n-1} d\xi \quad (30)$$

对(30)式的 w_i 求导得:

$$\frac{dR_i}{dw_i} = (H(w_i))^{n-1} + w_i \frac{d}{dw_i} [(H(w_i))^{n-1}] - (H(w_i))^{n-1} = w_i \frac{d}{dw_i} [(H(w_i))^{n-1}] \quad (31)$$

把(31)式代入(28)式可得:

$$\frac{\partial \pi_i(w_i, w'_i)}{\partial w'_i} = w_i \frac{d}{dw'_i} [(H(w'_i))^{n-1}] - \frac{d}{dw'_i} [S(w'_i)(H(w'_i))^{n-1}] = (w_i - w'_i)(n-1)(H(w'_i))^{n-2} H'(w'_i) \quad (32)$$

因为 $H(w_i)$ 为连续单调递增函数,所以 $H(w'_i) > 0, H'(w'_i) > 0$; 又由于 $n-1 > 0$, 故由(32)式可知满足(26)式的值只有一个 $w'_i = w_i$ 。故 w_i 为供应商投标价格的全局最优解。因此任何供应商都不会假装为其它类型,而是按照自己真实的价格和交货期投标。

由定理 5 知,供应商参与到多属性逆向拍卖中,就需要提供自己的真实质量和交货期。显然,供应商是心甘情愿的把生产信息透露给采购商的。因此,供应商是否参与到拍卖中主要取决于生产产品的质量和交货期,当大于均衡的供应商的类型就参与拍卖,且投标的最优策略为真实的产品质量和交货期,以及最优投标价格。

最优的拍卖机制满足两个基本条件:一个是个体理性条件,二是激励相容条件^[17]。由定理 4 知,这种降价密封单轮的多属性逆向拍卖方式能够吸引优质的供应商自愿参与到拍卖中,这满足了个体理

性;而由定理 5 知,参加拍卖的供应商都愿意真实地报出了自己的生产情况而不撒谎,这满足激励相容条件。因此得到下面的定理:

定理 6 在投标的供应商之间不存在共谋、供应商是风险中性且对称的情况下,风险中性采购商的降价密封单轮的多属性采购拍卖方式是该拍卖的最优机制。

4 算例

假定采购商张贴出了一个采购需求计划,最大的交货延迟时间分别为 $L = 1$, 并暗示出价值系数 $v_1 = 3, v_2 = 2$; 设定的固定投标成本为 $F_c = 0.0625$ 。假定采购材料的生产成本系数 $c_1 = 2, c_2 = 1$, 并有供应商的类型 q_i 和 l_i 分别服从 $[0, 1]$ 上的均匀分布。根据式子(4)以及卷积公式,可以得到供应商的类型分布函数:

$$H(w_i) = \begin{cases} \frac{1}{2} w_i^2 & \text{当 } 0 \leq w_i \leq 1 \\ 2w_i - \frac{1}{2} w_i^2 - 1 & \text{当 } 1 \leq w_i \leq 2 \end{cases} \quad (33)$$

根据均衡条件 $w_m H(w_m)^{n-1} - F_c = 0$, 当 $n = 2$ 时, 供应商的均衡类型 $w_m = 0.5$, 然后代入公式(8)可以得到, 供应商最优的投标价格:

$$p_i = \begin{cases} \text{不投标} & \text{当 } 0 \leq w_i \leq 0.5 \\ 2q_i + 1 - l_i + \frac{w_i^3 + 0.25}{3w_i^2} & \text{当 } 0.5 \leq w_i \leq 1 \\ 2q_i + 1 - l_i + \frac{6w_i^2 - w_i^3 - 6w_i + 2.25}{12w_i - 3w_i^2 - 6} & \text{当 } 1 \leq w_i \leq 2 \end{cases} \quad (34)$$

按(34)式计算供应商的最优投标价格示于表 1 (注: N0 表示不投标)。从表 1 可以看出, 类型越优的供应商, 也即质量越高且交货期越短的供应商, 其投标的最优价格也会越高。显然, 在采购商选择类型最优的供应商作为拍卖的获胜者时, 势必也选择了投标价格最高的供应商。进一步, 可以根据均衡条件画出图 2。由图 2 可知, 随着供应商数目的增加, 供应商的均衡类型将逐渐变好, 但当 n 增大到一定程度时, 均衡类型提高的会很缓慢。虽然对于采购商而言, 参与拍卖的供应商数目越多越好, 但是随着供应商数目的增加, 对其进行资格审查所花费的成本也将增加, 因此采购商可选择一定数目的供应商参与到拍卖中即可。

表 1 当 $n=2$ 时, 供应商的最优投标价格

最优投标价格	交货期					
	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0
0	NO	NO	NO	1.03	1.97	1.42
0.2	NO	NO	1.23	1.40	1.62	1.88
0.4	NO	1.43	1.60	1.82	2.08	2.38
0.6	1.63	1.80	2.02	2.28	2.58	2.91
0.8	2.00	2.22	2.48	2.78	3.11	3.46
1	2.42	2.68	2.98	3.31	3.66	4.04

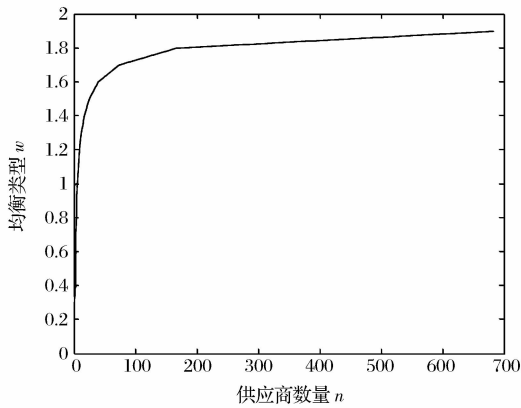


图 2 供应商数目对均衡供应商的类型影响

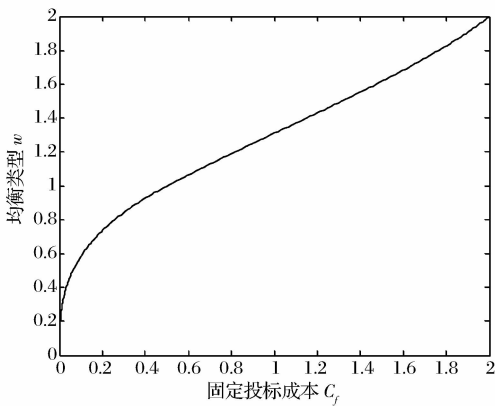


图 3 固定投标成本对均衡供应商的类型影响

同理, 由均衡条件可以画出图 3, 从图 3 中可以看出随着固定投标成本的上升, 在均衡状态处, 供应商的类型逐渐变好。因此采购商在采购拍卖中, 适当的提高固定投标成本对采购商而言是有利的。这

也验证了定理 2 中的内容, 随着参与拍卖供应商数目的增加和固定投标成本的上升, 均衡供应商的类型将逐渐提高。

把均衡条件代入(6)式, 可以得到采购商的剩余; 同理, 把均衡条件代入(7)式, 可以得到供应商的期望利润。把结果列于表 2。由表 2 知, 随着供应商的类型变优, 供应商能够给采购商带来更多剩余的同时, 自己也能够获得更多的期望利润, 这也验证了定理 4 的内容。进一步可以发现, 随着供应商的类型变优, 采购商获得的剩余将加速增加; 同时, 供应商获得的期望利润增加却在减慢。表 2 反映了供应商投标质量和投标交货期各自对供应商期望利润和采购商剩余的影响。结合表 1 可知, 采购商会选择类型最优(也即投标价格最高)的供应商作为拍卖的获胜者, 这进一步吸引了更多优质的供应商参与到多属性逆向拍卖中。

5 结语

正像 Pinker 等^[2]论述的那样, 只利用投标价格单属性选择拍卖的获胜者, 采购拍卖并不一定能够降低总采购成本。因此, 采购组织为了提高采购的效率, 通常运用 ERA 的多属性投标来选择最优的供应商。同时, 很多研究表明多属性投标明显优于单属性的价格投标。但是, 还没有研究指出, 当采购商利用 ERA 的多属性拍卖进行采购时, 供应商应该如何投标, 采购商又应该如何选择获胜的供应商。此外, 大部分研究在研究多属性逆向拍卖时都没有考虑投标的固定成本。因此, 针对这种情况, 建立了一个三阶段的具有高投标成本的多属性逆向拍卖博弈模型, 并得出一些有意义的结论。

首先, 提出通过质量和交货期对供应商的类型进行区分, 并把供应商多属性中的投标价格看作是投标质量和交货期的函数, 推导出了供应商的最优投标价格。进一步, 指出此价格也是该博弈模型子博弈纳什均衡解。其次, 在均衡状态下, 通过证明和算例的相关图都可以分析得出, 随着供应商数量

表 2 当 $n=2$ 时, 采购商的剩余和供应商的期望利润

(剩余, 期望利润)	投标交货期					
	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0
0	(0,0)	(0,0)	(0,0)	(0.17,0.04)	(0.40,0.09)	(0.58,0.15)
0.2	(0,0)	(0,0)	(0.17,0.04)	(0.4,0.09)	(0.58,0.15)	(0.72,0.26)
0.4	(0,0)	(0.17,0.04)	(0.40,0.09)	(0.58,0.15)	(0.72,0.26)	(0.82,0.42)
0.6	(0.17,0.04)	(0.40,0.09)	(0.58,0.15)	(0.72,0.26)	(0.82,0.42)	(0.89,0.59)
0.8	(0.40,0.09)	(0.58,0.15)	(0.72,0.26)	(0.82,0.42)	(0.89,0.59)	(0.94,0.78)
1	(0.58,0.15)	(0.72,0.26)	(0.82,0.42)	(0.89,0.59)	(0.94,0.78)	(0.96,0.98)

的增多或固定投标成本的增加,供应商的均衡类型会变好,因此采购商设定较高的固定投标成本是合理的。此外,采购商应该邀请合适数目的供应商参与到拍卖中。接着,分析得出随着供应商的类型提高,供应商的期望利润和采购商的剩余都会增加。再次,推导出了供应商的最优投标策略是按真实的生产质量、交货期和最优价格进行投标;采购商的最优策略是根据供应商的类型来选择拍卖的获胜者,也即选择投标质量和投标交货期组合最优的供应商作为拍卖的获胜者。最后,指出在投标的供应商之间不存在共谋、供应商是风险中性且对称的情况下,风险中性的采购商降价密封单轮方式的多属性采购拍卖机制是该拍卖的最优机制。

通过数值实验,揭示了采购商实际上选择了投标价格最高的供应商。这虽然违背了直觉,但却是合理的,因为投标价格最高的供应商也是类型最好的供应商,也即投标质量和投标交货期组合最优的供应商。因此,采购商不再仅以投标价格作为选择供应商的标准,而会综合考虑产品质量和交货期等项目。这些研究结论揭示了高固定投标成本和多属性逆向拍卖给供应链上企业决策带来的影响,同时为研究服务产品的采购拍卖提供借鉴。

参考文献:

[1] Hawkins T G, Coyne A V, Hudgens B J. Electronic reverse auctions: removing barriers to unleash savings in federal procurement [J]. Air Force Journal of Logistics, 2011, 34(3):3-15.

[2] Pinker E J, Abraham S, Yaniv V. Managing online auctions: Current business and research issues [J]. Management Science, 2003, 49(11):1457-1484.

[3] Hur D, Vincent A M, Hartley J L. Getting the most out of reverse e-auction investment [J]. Omega, 2007, 35(4):403-416.

[4] Tunca T I, Zenios A S. Supply auctions and relational contracts for procurement [J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2006, 8(1):43-67.

[5] Millet I, Diane H P, John L F, et al. Metrics for managing online procurement auctions[J]. Interfaces, 2004, 34(3): 171-179.

[6] Carr S M. Note on online auctions with costly bid evaluation [J]. Management Science, 2003, 49 (11):1521-1528.

[7] Wan Zhixi, Beil D R. RFQ Auctions with Supplier Qualification Screening [J]. Operations Research, 2009, 57 (4):934-949.

[8] Jeffrey E T, Wallenius H, Wallenius J, et al. A multi-attribute e-auction mechanism for procurement: Theoretical foundations [J]. European Journal of Operational Research, 2006, 175(1):90-100.

[9] Huang He, Kauffman R J, Xu Hongyan, et al. Mechanism design for e-procurement auctions: On the efficacy of post-auction Negotiation and quality effort incentives [J]. Electronic Commerce Research and Applications, 2011, 10(6): 650-672.

[10] 李军,刘树林. 基于 Cobb-Douglas 效用函数的多属性采购拍卖[J]. 管理科学学报, 2012, 15 (3):54-59.

[11] 曾宪科,冯玉强. 基于非对称投标人的反向多属性英式拍卖模型与最优投标策略[J]. 系统工程理论与实践, 2012,32(4):769-775.

[12] Lorentziadis P L. Pricing in multiple-item procurement auctions with a common to all items fixed cost [J]. European Journal of Operational Research, 2008, 190(3): 790-797.

[13] Snir E M, Hitt L M. Costly bidding in online markets for IT services [J]. Management Science, 2003, 49 (11):1504-1520.

[14] 姚升保. 卖方边际成本可变的物品多属性逆向拍卖研究[J]. 中国管理科学, 2010,18(1):113-119.

[15] Tunca T I, Wu D J, Zhong Fang. An empirical analysis of price, quality, and incumbency in procurement auctions [J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2014,16(3):346-364.

[16] Jin Mingzhou, David S W. Supplier coalitions in on-line reverse auctions: Validity requirements and profit distribution scheme [J]. International Journal of Production Economics, 2005, 100(2):183-194.

[17] 陈剑,陈熙龙,宋西平. 拍卖理论与网上拍卖[M]. 北京:清华大学出版社,2005.

Game Model on Multi-Attribute Reverse Auctions with Costly Bid

ZHOU Xue-guang^{1,2}, REN Long^{1,2}

(1. Key Research Institute of Humanities and Social Sciences at Universities,
Research Center for Contemporary Management, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. School of Economics Management, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Many large companies like GE often utilize multi-attribute (including bid price, quality and lead time) reverse auction to select new suppliers and procure products, and set higher fixed bidding costs in order to improve the efficiency of the online procurement auction. Thus, when the buyer posts up the request for proposal (RFP), the suppliers will decide how to bid to obtain maximum expected revenue depending on the quality and lead time of their own production and fixed bidding costs? Then, the buyer will decide how to select a supplier as the winner of auction to obtain the maximum surpluses according to the bid vector of the suppliers? To solve the above questions, third-stage non-cooperative game model is constructed, and the method which solving the sub-game Nash equilibrium under the perfect information in dynamic game is used. Considering the bid price as the function of bid quality and lead time, the optimal bid price of suppliers is deduced. Furthermore, two results are concluded. First, the optimal bid strategy of suppliers is true production quality and lead time, and bid price is the optimal bid price. Second, the optimal strategy of the buyer is to choose one supplier which has the highest bid price as the winner of the auction. Although this counters intuitive, it is reasonable because that the supplier with the highest bid price is also the best type of supplier which optimal combination of bid quality and lead time. At last, the numerical experiments show that it's benefit to the buyer when the number of suppliers is large or the fixed bidding price is high. In addition, the suppliers can obtain more expected revenue with the improvement of their types, which brings more surpluses for the buyer. This paper reveals that the costly fixed bid costs and multi-attribute reverse auction how to affect the decisions of the firms in supply chain, and provides a reference to research the procurement auction of services products.

Key words: electronic reverse auctions; multi-attribute bid; non-cooperative game; costly bid; optimal auction mechanism