

装配式建筑产业链绿色建造协同策略研究

——基于政府补贴视角

胡龙伟,王 雪,黄宝伦

(青岛理工大学管理工程学院,山东 青岛 266520)

摘 要:运用微分博弈的相关理论,研究装配式建筑产业链中预制构件厂和建设单位双方实现绿色建造的合作协调问题,通过对比分散式决策、集中式决策和引入成本分担策略的决策3种情形的分析,得出了3条结论,最终确定政府补贴可以促使建筑产业链双方达成合作,是当下打造绿色建筑的必然选择。研究结论可为政府制定相应补贴策略提供理论基础。

关键词:建筑产业链;装配式建筑;绿色建造;微分对策

中图分类号:TU741.2 **文献标志码:**A

2019年3月,中华人民共和国住房和城乡建设部重新颁布了《绿色建筑评价标准》,说明绿色建筑已成为建筑业发展的重要趋势。装配式建筑作为一种新型建筑,在节能减排等方面有着明显的优势,对实现绿色建筑发展模式有很大的促进作用。中国工程院院士肖绪文等^[1]认为:装配式建筑虽然能够减少噪声、扬尘和废弃物排放等带来的污染,但仍需现场施工,如果不严格按照项目管理要求,加强各单位合作,运用装配式建筑模式仍不能实现绿色建造。秦璇等^[2]认为绿色建筑的开发需要优先解决各参与方之间的协调问题,政府作为绿色建造模式的鼓励者,还应给予各单位一定补贴。因此,从政府补贴视角研究建筑产业链的绿色建造协同策略问题有很重要的现实意义。

部分学者从装配式建筑角度出发研究绿色建筑发展问题,徐驰等^[3]认为装配式建筑对绿色建造起到了促进作用;于淼等^[4]通过

构建装配式建筑绿色评价指标体系,提供了新的评价思路;李辉山等^[5]根据绿色评价标准,运用价值工程相关理论建立了装配式建筑最优配置模型。但目前装配式建筑绿色建造技术仍处于探索阶段,与传统模式相比需要耗费更多的时间和财力,随着时间的推移,各单位对发展绿色建造的积极性逐渐降低。王波^[6]认为在政府补贴下,建设单位和施工单位双方更倾向于选择绿色建造模式;齐宝库等^[7]也认为建立完善的装配式建筑补偿机制有助于装配式建筑的实施。另一方面,微分博弈是指在求解有两个或多个决策对象的动态系统中,每个参与者同时施加于一个随着时间演变的微分方程,并最终实现各自最优目标的对策过程理论^[8]。王道平等^[9]借助微分博弈理论研究了供应商和制造商合作减排的策略问题;刘伟等^[10]借助微分博弈理论研究了网络众包系统的平台和参与者的违约控制行为博弈模型。

综上所述,学者们的研究都侧重于政府、建设单位和施工单位之间的协同策略问题,鲜有学者分析建设单位和预制构件厂之间协同实现绿色建造的情况。预制构件厂作为装配式建筑特有的参与方,在其协同参与下的绿色建造最优策略研究也应该是人们关注的重点。因此,笔者运用微分博弈的相关理论,研究在政府补贴下,装配式建筑建设单位与预制构件厂之间协同实现绿色建造的问题。

一、绿色建造协同策略模型的构建

1. 问题描述

装配式建筑的建设是实现绿色建造的有效途径。装配式建筑产业链以建设单位为主体,还包括预制构件厂、消费者等,而政府作为绿色建筑的推行者,也会参与进来(见图 1)。要实现装配式建筑绿色建造,需要各参与方协调配合。笔者选取建设单位和预制构件厂两个参与单位,研究在政府补贴条件下双方实现绿色建造的最优策略问题。

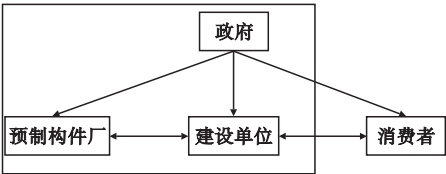


图 1 装配式建筑各参与方的关系

2. 研究假设

参考文献[9-12]的研究内容,笔者列出以下 5 个假设:

(1) 预制构件厂与建设单位都是为了自身利益最大化的理性决策者,在时刻 t 预制构件厂的绿色建造努力程度为 $G_{m1}(t)$,建设单位的绿色建造努力程度为 $G_{m2}(t)$, $t \in [0, +\infty)$ 。

(2) 装配式建筑绿色建造的程度取决于预制构件厂和建设单位的绿色建造努力程度,且随时间动态变化。假设用下述微分方程表示装配式建筑绿色建造程度随时间推移的变化规律

$$\begin{cases} \dot{M}(t) = \sigma G_{m1}(t) + \omega G_{m2}(t) - \rho M(t) \\ M(t) = M_0 \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ 为预制构件厂绿色建造努力程度的

敏感系数, $\sigma > 0$; ω 为建设单位绿色建造努力程度的敏感系数, $\omega > 0$; ρ 为技术落后、设备老旧等原因导致的绿色建造自然衰减率, $\rho > 0$; $M(t)$ 为时刻 t 装配式建筑的绿色建造程度; M_0 为装配式建筑绿色建造水平初始程度。

(3) 考虑装配式建筑实现绿色建造研发成本与企业低碳研发成本均符合企业边际成本递增原则,呈现上凸特征,说明越符合绿色建造要求,各单位为之所付出的成本就越大。借鉴文献[13]中企业低碳研发成本的二次函数,可假设预制构件厂和建设单位绿色建造成本是关于其绿色建造努力程度的二次函数

$$\begin{cases} C(G_{m1}(t)) = \frac{\mu_{m1}}{2} G_{m1}^2(t) \\ C(G_{m2}(t)) = \frac{\mu_{m2}}{2} G_{m2}^2(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中: μ_{m1}, μ_{m2} 分别为预制构件厂和建设单位的绿色建造成本系数。

(4) 考虑市场价格及项目最终质量对装配式建筑产品需求影响的关系,借鉴文献[14]中产品质量与供应链收益呈线性函数关系的研究假设,可假设时刻 t 装配式建筑产品需求量为

$$N(M(t), t) = N_0 + \eta M(t) \quad (3)$$

式中: N_0 为装配式建筑产品的初始需求量, $N_0 \geq 0$; η 为装配式建筑产品需求对装配式建筑绿色建造程度的敏感系数, $\eta > 0$ 。

(5) 假设预制构件厂和建设单位的信息是完全的,具有相同的贴现率 $\lambda, \lambda > 0$,建设单位与预制构件厂之间可以相互激励,其中,预制构件厂对建设单位的绿色建造成本的分担比例为 $\alpha(t)$,建设单位对预制构件厂的绿色建造成本分担比例为 $\beta(t)$, $\alpha(t), \beta(t) \in [0, 1]$ 。

通过上述假设,得出预制构件厂、建设单位以及建筑产业链的长期利润分别为

$$R_{m1}(M) = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} [P_{m1} N(M(t), t) - \frac{\mu_{m1}}{2} G_{m1}^2(t) + \theta_{m1} \frac{\mu_{m1}}{2} G_{m1}^2(t)] dt \quad (4)$$

$$R_{m2}(M)=\int_0^{\infty}e^{-\lambda t}[P_{m2}N(M(t),t)-\frac{\mu_{m2}}{2}G_{m2}^2(t)+\theta_{m2}\frac{\mu_{m2}}{2}G_{m2}^2(t)]dt\tag{5}$$

$$R_T(M)=\int_0^{\infty}e^{-\lambda t}[(P_{m1}+P_{m2})N(M(t),t)-(1-\theta_{m1})\frac{\mu_{m1}}{2}G_{m1}^2(t)-(1-\theta_{m2})\frac{\mu_{m2}}{2}G_{m2}^2(t)]dt\tag{6}$$

式中: P_{m1},P_{m2} 分别为预制构件厂和建设单位的边际利润; $\theta_{m1}、\theta_{m2}$ 分别为政府给予预制构件厂和建设单位的绿色建造成本补贴率。

下文将时间 t 省略。

二、绿色建造协同策略模型求解

1. 分散式决策

假设预制构件厂和建设单位地位相互平等,同时,行动、独立决策可以实现自身利益最大化,则分散式决策(上角标'表示)下预制构件厂和建设单位以自身利润为目标进行的绿色建造决策问题为

$$R'_{m1}(M')=\max_{G'_{m1}\geq 0}\int_0^{\infty}e^{-\lambda t}[P_{m1}(N_0+\eta M')-\frac{\mu_{m1}}{2}(G'_{m1})^2+\theta_{m1}\frac{\mu_{m1}}{2}(G'_{m1})^2]dt\tag{7}$$

$$R'_{m2}(M')=\max_{G'_{m2}\geq 0}\int_0^{\infty}e^{-\lambda t}[P_{m2}(N_0+\eta M')-\frac{\mu_{m2}}{2}(G'_{m2})^2+\theta_{m2}\frac{\mu_{m2}}{2}(G'_{m2})^2]dt\tag{8}$$

定理 1 分散式决策下的均衡结果为:

(1) 预制构件厂绿色建造最优均衡策略

$$G'^{*}_{m1}=\frac{\omega P_{m1}\eta}{\mu_{m1}(1-\theta_{m1})(\lambda+\rho)}\tag{9}$$

(2) 建设单位绿色建造最优均衡策略

$$G'^{*}_{m2}=\frac{\sigma P_{m2}\eta}{\mu_{m2}(1-\theta_{m2})(\lambda+\rho)}\tag{10}$$

(3) 装配式建筑绿色建造程度的最优轨迹

$$M'^{*}=v'-(v'-M_0)e^{-\rho t}\tag{11}$$

式中:

$$v'=\frac{\omega^2P_{m1}\eta}{\rho\mu_{m1}(1-\theta_{m1})(\lambda+\rho)}+\frac{\sigma^2P_{m2}\eta}{\rho\mu_{m2}(1-\theta_{m2})(\lambda+\rho)}^{\circ}$$

(4) 装配式建筑产品需求量

$$N'^{*}=N_0+\eta M_0e^{-\rho t}+\frac{\omega^2P_{m1}(1-e^{-\rho t})\eta^2}{\rho\mu_{m1}(1-\theta_{m1})(\lambda+\rho)}+\frac{\sigma^2P_{m2}(1-e^{-\rho t})\eta^2}{\rho\mu_{m2}(1-\theta_{m2})(\lambda+\rho)}\tag{12}$$

(5) 预制构件厂、建设单位以及建筑链整体利润(下角标 T 表示)最大值

$$R'^{*}_{m1}=e^{-\lambda t}(x'^{*}_1M'^{*}+x'^{*}_2)\tag{13}$$

$$R'^{*}_{m2}=e^{-\lambda t}(y'^{*}_1M'^{*}+y'^{*}_2)\tag{14}$$

$$R'^{*}_T=e^{-\lambda t}[(x'^{*}_1+y'^{*}_1)M'^{*}+(x'^{*}_2+y'^{*}_2)]\tag{15}$$

式中:

$$x'^{*}_1=\frac{P_{m1}\eta}{\lambda+\rho};\quad x'^{*}_2=\frac{P_{m1}N_0}{\lambda}+\frac{\omega^2\eta^2P_{m1}^2}{2\lambda\mu_{m1}(1-\theta_{m1})(\lambda+\rho)^2}+\frac{\sigma^2\eta^2P_{m1}P_{m2}}{\lambda\mu_{m2}(1-\theta_{m2})(\lambda+\rho)^2};$$

$$y'^{*}_1=\frac{P_{m2}\eta}{\lambda+\rho};\quad y'^{*}_2=\frac{P_{m2}N_0}{\lambda}+\frac{\omega^2\eta^2P_{m1}P_{m2}}{\lambda\mu_{m1}(1-\theta_{m1})(\lambda+\rho)^2}+\frac{\sigma^2\eta^2P_{m2}^2}{2\lambda\mu_{m2}(1-\theta_{m2})(\lambda+\rho)^2}^{\circ}$$

2. 集中式决策

假设预制构件厂和建设单位构成一个统一的整体,以这个整体的利润最大化为目标,共同实现装配式建筑绿色建造,则集中式决策(上角标''表示)下该建筑产业链整体的决策问题为

$$R''_T(M'')=\max_{G''_{m1}\geq 0,G''_{m2}\geq 0}\int_0^{\infty}e^{-\lambda t}[(P_{m1}+P_{m2})N(M'')-(1-\theta_{m1})\frac{\mu_{m1}}{2}(G''_{m1})^2-(1-\theta_{m2})\frac{\mu_{m2}}{2}(G''_{m2})^2]dt\tag{16}$$

定理 2 在集中式决策下的均衡结果为:

(1) 预制构件厂绿色建造最优均衡策略

$$G''^{*}_{m1}=\frac{\omega(P_{m1}+P_{m2})\eta}{\mu_{m1}(1-\theta_{m1})(\lambda+\rho)}\tag{17}$$

(2) 建设单位绿色建造最优均衡策略

$$G''^{*}_{m2}=\frac{\sigma(P_{m1}+P_{m2})\eta}{\mu_{m2}(1-\theta_{m2})(\lambda+\rho)}\tag{18}$$

(3) 装配式建筑绿色建造程度的最优轨迹

$$M''^{*}=v''-(v''-M_0)e^{-\rho t}\tag{19}$$

式中:

$$v''=\frac{\omega^2(P_{m1}+P_{m2})\eta}{\rho\mu_{m1}(1-\theta_{m1})(\lambda+\rho)}+\frac{\sigma^2(P_{m1}+P_{m2})\eta}{\rho\mu_{m2}(1-\theta_{m2})(\lambda+\rho)}^{\circ}$$

$$\frac{\sigma^2(P_{m1}+P_{m2})\eta}{\rho\mu_{m2}(1-\theta_{m2})(\lambda+\rho)}\circ$$

(4) 装配式建筑产品需求量

$$N^* = N_0 + \eta M_0 e^{-\rho t} + \frac{\omega^2(P_{m1}+P_{m2})(1-e^{-\rho t})\eta^2}{\rho\mu_{m1}(1-\theta_{m1})(\lambda+\rho)} + \frac{\sigma^2(P_{m1}+P_{m2})(1-e^{-\rho t})\eta^2}{\rho\mu_{m2}(1-\theta_{m2})(\lambda+\rho)} \quad (20)$$

(5) 建筑链整体利润最大值

$$R_T^* = e^{-\lambda t} (z_1^* M^* + z_2^*) \quad (21)$$

式中: $z_1^* = \frac{(P_{m1}+P_{m2})\eta}{\lambda+\rho}, z_2^* = \frac{(P_{m1}+P_{m2})N_0}{\lambda} + \frac{\omega^2\eta^2(P_{m1}+P_{m2})^2}{2\lambda\mu_{m1}(1-\theta_{m1})(\lambda+\rho)^2} + \frac{\sigma^2\eta^2(P_{m1}+P_{m2})^2}{2\lambda\mu_{m2}(1-\theta_{m2})(\lambda+\rho)^2} \circ$

3. 引入成本分担策略的决策

引入成本分担策略后,预制构件厂和建设单位两个单位之间可以相互促进,实现装配式建筑绿色建造。在这种模式下,成本分担仅为两个单位之间的资金转移,因此,分担比例取值为 $[0,1]$,则预制构件厂和建设单位的决策问题为

$$R_{m1}(M) = \max_{G_{m1} \geq 0} \int_0^\infty e^{-\lambda t} [P_{m1}(N_0 + \eta M) - (1-\beta-\theta_{m1})\frac{\mu_{m1}}{2}G_{m1}^2 - \alpha\frac{\mu_{m2}}{2}G_{m2}^2] dt \quad (22)$$

$$R_{m2}(M) = \max_{G_{m2} \geq 0} \int_0^\infty e^{-\lambda t} [P_{m2}(N_0 + \eta M) - (1-\alpha-\theta_{m2})\frac{\mu_{m2}}{2}G_{m2}^2 - \beta\frac{\mu_{m1}}{2}G_{m1}^2] dt \quad (23)$$

定理 3 引入成本分担策略的决策下的均衡结果为:

(1) 建设单位为预制构件厂分担的绿色建造成本的最优比例以及预制构件厂为建设单位分担的绿色建造成本的最优比例

$$\beta^* = \frac{P_{m2}(1-\theta_{m1})}{P_{m1}+P_{m2}} \quad (24)$$

$$\alpha^* = \frac{P_{m1}(1-\theta_{m2})}{P_{m1}+P_{m2}} \quad (25)$$

(2) 预制构件厂和建设单位的绿色建造最优努力程度

$$G_{m1}^* = \frac{\omega(P_{m1}+P_{m2})\eta}{\mu_{m1}(1-\theta_{m1})(\lambda+\rho)} \quad (26)$$

$$G_{m2}^* = \frac{\sigma(P_{m1}+P_{m2})\eta}{\mu_{m2}(1-\theta_{m2})(\lambda+\rho)} \quad (27)$$

(3) 装配式建筑绿色建造程度的最优轨迹

$$M^* = v - (v - M_0)e^{-\rho t} \quad (28)$$

式中: $v = \frac{\omega^2(P_{m1}+P_{m2})\eta}{\rho\mu_{m1}(1-\theta_{m1})(\lambda+\rho)} + \frac{\sigma^2(P_{m1}+P_{m2})\eta}{\rho\mu_{m2}(1-\theta_{m2})(\lambda+\rho)} \circ$

(4) 装配式建筑产品需求量

$$N^* = N_0 + \eta M_0 e^{-\rho t} + \frac{\omega^2(P_{m1}+P_{m2})(1-e^{-\rho t})\eta^2}{\rho\mu_{m1}(1-\theta_{m1})(\lambda+\rho)} + \frac{\sigma^2(P_{m1}+P_{m2})(1-e^{-\rho t})\eta^2}{\rho\mu_{m2}(1-\theta_{m2})(\lambda+\rho)} \quad (29)$$

(5) 引入成本分担策略的条件下预制构件厂、建设单位以及建筑产业链整体利润的最大值

$$R_{m1}^* = e^{-\lambda t} (x_1^* M^* + x_2^*) \quad (30)$$

$$R_{m2}^* = e^{-\lambda t} (y_1^* M^* + y_2^*) \quad (31)$$

$$R_T^* = e^{-\lambda t} [(x_1^* + y_1^*) M^* + (x_2^* + y_2^*)] \quad (32)$$

式中: $x_1^* = \frac{P_{m1}\eta}{\lambda+\rho}; x_2^* = \frac{P_{m1}N_0}{\lambda} + \frac{\omega^2\eta^2(P_{m1}P_{m2}+P_{m1}^2)}{2\lambda\mu_{m1}(1-\theta_{m1})(\lambda+\rho)^2} + \frac{\sigma^2\eta^2(P_{m1}P_{m2}+P_{m1}^2)}{2\lambda\mu_{m2}(1-\theta_{m2})(\lambda+\rho)^2};$
 $y_1^* = \frac{P_{m2}\eta}{\lambda+\rho}; y_2^* = \frac{P_{m2}N_0}{\lambda} + \frac{\omega^2\eta^2(P_{m1}P_{m2}+P_{m2}^2)}{2\lambda\mu_{m1}(1-\theta_{m1})(\lambda+\rho)^2} + \frac{\sigma^2\eta^2(P_{m1}P_{m2}+P_{m2}^2)}{2\lambda\mu_{m2}(1-\theta_{m2})(\lambda+\rho)^2} \circ$

与分散式决策和集中式决策相比,引入成本分担策略后,建筑产业链整体利润与集中式决策的建筑产业链整体利润相同,比分散式决策的整体利润高,但预制构件厂和建设单位各自的利润较分散式决策下未必能够提高,为此,还需引入转移支付参数 S 来协调双方的利润, S 的取值与预制构件厂和建设单位之间的协调能力有关。在建筑产业链整体利润不变的情况下,预制构件厂和建设单位各自的利润为

$$R_{m1}^S = R_{m1}^* + S \quad (33)$$

$$R_{m2}^S = R_{m2}^* - S \quad (34)$$

此时的利润增加量为

$$\begin{cases} \Delta R_{m1} = R_{m1}^s - R_{m1}'^* \\ \Delta R_{m2} = R_{m2}^s - R_{m2}'^* \end{cases} \Delta R_{m1} \geq 0, \Delta R_{m2} \geq 0 \quad (35)$$

4. 比较分析

对以上 3 种模式(分散式决策、集中式决策、引入成本分担策略的决策)的均衡结果进行比较分析。

(1) $G_{m1}^* - G_{m1}'^* = \frac{\omega P_{m2} \eta}{\mu_{m1}(1 - \theta_{m1})(\lambda + \rho)} > 0$, $G_{m1}^* > G_{m1}'^*$, 预制构件厂的绿色建造最优努力程度得到提高。同理可得: $G_{m1}^{**} = G_{m1}^*$, $G_{m1}^{**} > G_{m1}'^*$ 。

$G_{m2}^* - G_{m2}'^* = \frac{\sigma P_{m1} \eta}{\mu_{m2}(1 - \theta_{m2})(\lambda + \rho)} > 0$, $G_{m2}^* > G_{m2}'^*$, 建设单位的绿色建造最优努力程度得到提高。同理可得: $G_{m2}^{**} = G_{m2}^*$, $G_{m2}^{**} > G_{m2}'^*$ 。

$M^* - M'^* = (1 - e^{-\rho t}) (\frac{\omega^2 P_{m2} \eta}{\rho \mu_{m1}(1 - \theta_{m1})(\lambda + \rho)} + \frac{\sigma^2 P_{m1} \eta}{\rho \mu_{m2}(1 - \theta_{m2})(\lambda + \rho)}) > 0$, $M^* > M'^*$, 装配式建筑项目绿色建造程度得到提高。同理可得: $M^{**} = M^*$, $M^{**} > M'^*$ 。

$N^* - N'^* = (1 - e^{-\rho t}) (\frac{\omega^2 P_{m2} \eta^2}{\rho \mu_{m1}(1 - \theta_{m1})(\lambda + \rho)} + \frac{\sigma^2 P_{m1} \eta^2}{\rho \mu_{m2}(1 - \theta_{m2})(\lambda + \rho)}) > 0$, $N^* > N'^*$, 装配式建筑产品需求量得到提高。同理可得: $N^{**} = N^*$, $N^{**} > N'^*$ 。

(2) $R_T^* - R_T'^* = \frac{(M^* - M'^*)(P_{m1} + P_{m2})\eta e^{-\lambda t}}{\lambda + \rho} + \frac{\omega^2 \eta^2 P_{m2}^2 e^{-\lambda t}}{2\lambda \mu_{m1}(1 - \theta_{m1})(\lambda + \rho)^2} + \frac{\sigma^2 \eta^2 P_{m1}^2 e^{-\lambda t}}{2\lambda \mu_{m2}(1 - \theta_{m2})(\lambda + \rho)^2}$, 因为 $\frac{\omega^2 \eta^2 P_{m2}^2}{2\lambda \mu_{m1}(1 - \theta_{m1})(\lambda + \rho)^2} > 0$, $\frac{\sigma^2 \eta^2 P_{m1}^2}{2\lambda \mu_{m2}(1 - \theta_{m2})(\lambda + \rho)^2} > 0$, $e^{-\lambda t} > 0$, $M^* - M'^* > 0$, 所以 $R_T^* - R_T'^* > 0$, $R_T^* > R_T'^*$, 建筑产业链整体利润与集中式决策的建筑产业链整体利润相同, 且比分散式决策下的整体利润要高。同理可得: $R_T^{**} = R_T^*$, $R_T^{**} > R_T'^*$ 。

引入转移支付 S 前后预制构件厂的利润差 $\Delta R_{m1} = R_{m1}^s - R_{m1}'^* \geq 0$, 所以 $R_{m1}^s \geq R_{m1}'^*$, 同理可得: $R_{m2}^s \geq R_{m2}'^*$ 。

综上所述, 3 种均衡结果都与时间参数 t 无关, 说明预制构件厂和建设单位的最优均衡结果不随时间的变化而变化。引入成本分担策略后, 装配式建筑的绿色建造程度得到了提升, 且各自利润也得到了提升, 说明这种模式下, 预制构件厂和建设单位可以实现长期合作, 签署的成本分担合同需双方核对无异议后方可实施。因此, 使用成本分担策略可以使预制构件厂和建设单位互利共赢, 有利于装配式建筑实现绿色建造。

(3) 关于政府补贴, 一般分为以下 3 种情况: 政府对两单位均进行补贴, $\theta_{m1} > 0$ 且 $\theta_{m2} > 0$; 政府仅给一方给予补贴, $\theta_{m1} = 0$ 或 $\theta_{m2} = 0$; 政府对两单位均不进行补贴, $\theta_{m1} = \theta_{m2} = 0$ 。对式 (26) 求关于 θ_{m1} 的一阶偏导, $\frac{\partial G_{m1}^*}{\partial \theta_{m1}} = \frac{\omega(P_{m1} + P_{m2})\eta}{\mu_{m1}(1 - \theta_{m1})^2(\lambda + \rho)} \partial G_{m1}^* / \partial \theta_{m1} > 0$, 同理可得: $\partial G_{m2}^* / \partial \theta_{m2} > 0$, $\partial R_{m1}^* / \partial \theta_{m1} > 0$, $\partial R_{m1}^* / \partial \theta_{m2} > 0$, $\partial R_{m2}^* / \partial \theta_{m1} > 0$, $\partial R_{m2}^* / \partial \theta_{m2} > 0$, $\partial M^* / \partial \theta_{m1} > 0$, $\partial M^* / \partial \theta_{m2} > 0$, $\partial N^* / \partial \theta_{m1} > 0$, $\partial N^* / \partial \theta_{m2} > 0$, 说明预制构件厂和建设单位的绿色建造努力程度与政府给予其绿色建造成本补贴率正相关。预制构件厂和建设单位最终绿色建造程度、装配式建筑产品需求量及各自利润与政府给予他们的绿色建造成本补贴率正相关。因此, 预制构件厂和建设单位实现装配式建筑绿色建造的意向及购房者对实现绿色建造的装配式建筑的购买意向取决于政府补贴率的大小。如果绿色建造的自然衰减率 ρ 较大, 预制构件厂和建设单位的利润降低, 合作意愿就会降低, 而政府补贴正好可以弥补这个缺陷, 通过加大政府补贴率, 预制构件厂和建设单位的合作意愿就会加大, 装配式建筑绿色建造程度就会加大, 最终达到装配式建筑绿色标准。

(4) 对式 (24) 求关于 θ_{m1} 的一阶偏导 $\frac{\partial \beta^*}{\partial \theta_{m1}} = -\frac{P_{m2}}{P_{m1} + P_{m2}}$, $\partial \beta^* / \partial \theta_{m1} < 0$, $\frac{\beta^* \mu_{m1}(E_{m1}^*)^2}{2}$ 与 $\frac{\theta_{m1} \mu_{m1}(E_{m1}^*)^2}{2}$ 负相关, 因此, 建设单位为预制构件厂分担的绿色建造成本

与政府给予预制构件厂的补贴负相关。同理, $\partial \beta^* / \partial \theta_{m2} < 0$, $\frac{\beta^* \mu_{m2} (E_{m2}^*)^2}{2}$ 与 $\frac{\theta_{m2} \mu_{m2} (E_{m2}^*)^2}{2}$ 负相关, 因此, 预制构件厂为建设单位分担的绿色建造成本与政府给予建设单位的补贴负相关。

引入成本分担策略与分散式决策相比, 预制构件厂的利润增加量为

$$R_{m1}^* - R_{m1}'^* = e^{-\lambda t} \left[\frac{P_{m1} \eta (M^* - M'^*)}{\lambda + \rho} + \frac{\omega^2 P_{m1} P_{m2} \eta^2}{2 \lambda \mu_{m1} (1 - \theta_{m1}) (\lambda + \rho)^2} + \frac{\sigma^2 (P_{m1}^2 - P_{m1} P_{m2}) \eta^2}{2 \lambda \mu_{m2} (1 - \theta_{m2}) (\lambda + \rho)^2} \right] \quad (36)$$

对式(36)求关于 θ_{m1} 的一阶偏导 $\frac{\partial (R_{m1}^* - R_{m1}'^*)}{\partial \theta_{m1}} = e^{-\lambda t} \left[\frac{\omega^2 P_{m1} P_{m2} \eta^2}{2 \lambda \mu_{m1} (1 - \theta_{m1})^2 (\lambda + \rho)^2} + \frac{\omega^2 P_{m1} P_{m2} \eta^2 (1 - e^{-\lambda t})}{\lambda \mu_{m1} (1 - \theta_{m1})^2 (\lambda + \rho)} \right]$, $\partial (R_{m1}^* - R_{m1}'^*) / \partial \theta_{m1} > 0$, 引入成本分担策略后, 预制构件厂的利润增加量与政府给予预制构件厂的补贴正相关。若出现 $R_{m1}^* - R_{m1}'^* < 0$ 的情况, 增大政府对预制构件厂的补贴, 就会加速缩小利润差, 直至利润差为正值并呈加速增长的趋势。所以, 政府补贴能够加速促进预制构件厂和建设单位达成合作, 更有利于实现装配式建筑绿色建造。

三、最优均衡策略的仿真模拟

为更直观地表示预制构件厂和建设单位在不同决策下最优均衡策略的对比结果, 笔者对上述参数进行赋值比较: 取 $P_{m1} = 800$, $P_{m2} = 1\ 000$, $\mu_{m1} = 20$, $\mu_{m2} = 25$, $\sigma = 0.5$, $\omega = 0.4$, $\rho = 0.2$, $\eta = 2.5$, $\lambda = 1$, $N_0 = 20$, $M_0 = 0$, $\theta_{m1} = 0.2$, $\theta_{m2} = 0.3$, $t = 1$ 。3 种决策情况下预制构件厂和建设单位的最佳均衡结果如表 1 所示。由表 1 可知, $G_{m1}^* = G_{m1}^* > G_{m1}'^*$, $G_{m2}^* = G_{m2}^* > G_{m2}'^*$, $M^* = M^* > M'^*$, $N^* = N^* > N'^*$, $R_T^* = R_T^* > R_T'^*$, 运用 Matlab 软件对上述数据进行仿真模拟, 得出分散式决策与引入成本分担策略的决策下绿色建造程度的变化轨

迹(见图 2~图 5)。

表 1 3 种决策模式的均衡结果

参数	分散式决策	集中式决策	引入成本分担策略的决策
G_{m1}	41.67	93.75	93.75
G_{m2}	59.52	107.14	107.14
α	—	—	0.31
β	—	—	0.44
$M(t)$	42.08	82.54	82.54
$N(t)$	125.2	226.35	226.35
R_{m1}	122 502.92	—	187 865.62
R_{m2}	141 960.20	—	234 831.52
R_T	264 463.12	422 697.14	422 697.14

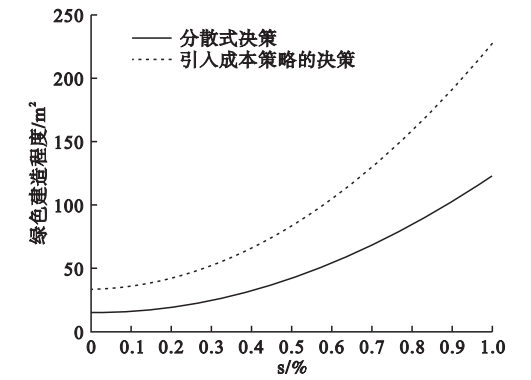


图 2 σ 对绿色建造程度的影响

由图 2 可知, 建筑最终绿色建造程度与建设单位绿色建造的努力程度呈正相关, 斜率逐渐变大, 说明建设单位的绿色建造努力程度的敏感系数越大, 建设单位的绿色建造程度就越明显, 即相同的努力过后越容易实现绿色建造。将分散式决策与引入成本分担策略的决策情况进行对比发现, 在相同的敏感系数 σ 下, 引入成本分担策略的决策后绿色建造程度比引入前高, 且建设单位绿色建造努力程度的敏感系数越大, 就越应该引入成本分担策略的决策来实现绿色建造。

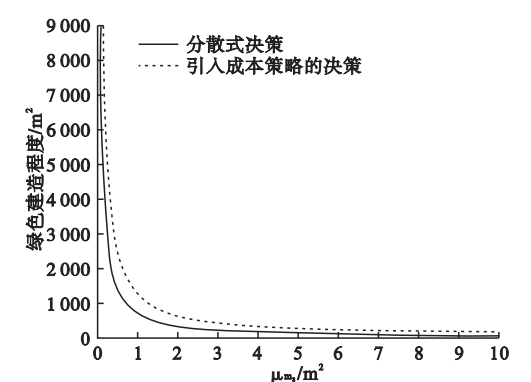


图 3 μ_{m2} 对绿色建造程度的影响

由图3可知,建筑最终绿色建造程度与建设单位绿色建造成本系数呈负相关,函数为凹函数,说明建设单位的绿色建造成本系数越大,建设单位的绿色建造程度就越低,即实现同样程度的绿色建造,占用的成本越多,建设单位绿色建造的意愿就越低。将分散式决策与引入成本分担策略的决策情况进行对比发现,在相同的成本系数 μ_{m2} 下,引入成本分担策略的决策后绿色建造程度比引入前高,说明即使建设单位绿色建造占用的成本较高,引入成本分担策略的决策仍然是实现绿色建造的最优选择。

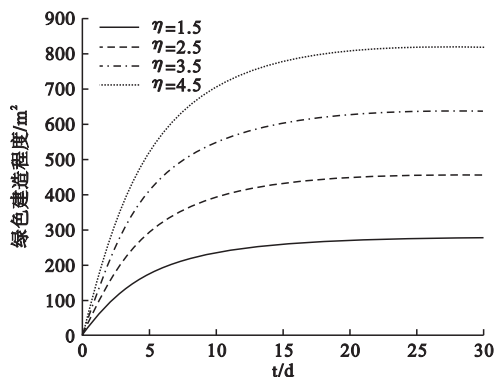


图4 η 对绿色建造程度的影响

由图4可知,引入成本分担策略后,装配式建筑最终绿色建造程度与装配式建筑产品需求的敏感系数 η 呈正相关,斜率逐渐变小,说明随着时间的变化,建筑的绿色建造达到一定程度后逐渐趋于稳定,即当装配式建筑的绿色程度达到消费者的需求后,消费者有意愿购买该绿色产品,该建筑的绿色建造程度可作为建筑产业链各参与方的目标程度。 η 越大,消费者对建筑绿色建造程度的要求越高,即消费者更热衷于购买绿色建造程度高的建筑。

由图5可知,引入成本分担策略后,建筑最终绿色建造程度与绿色建造的自然衰减率呈正相关,斜率逐渐变小,说明随着时间的变化,建筑的绿色建造达到一定程度后逐渐趋于稳定,合作双方均已达到均衡状态。当自然衰减率系数 ρ 变大后,建筑的绿色建造程度越小,相反,若 ρ 越小,合作双方越倾向于建造绿色建筑,绿色建造程度越明显。

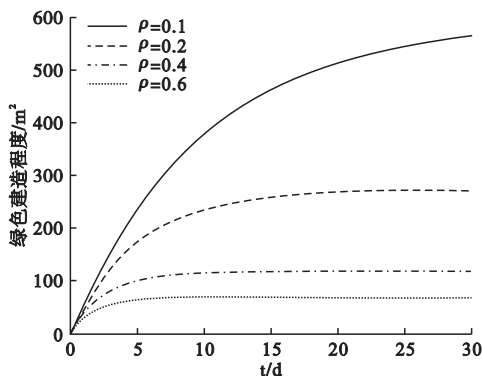


图5 ρ 对绿色建造程度的影响

四、结 论

(1)当建筑产业链整体引入成本分担策略后,预制构件厂和建设单位的绿色建造努力程度、绿色建造程度、顾客需求量及利润均得到相应提高,有利于预制构件厂和建设单位实现互利共赢,有助于双方长期合作。

(2)通过引入政府补贴策略,预制构件厂和建设单位的绿色建造努力程度、绿色建造程度、顾客需求量及利润均得到提高,政府补贴率越高,预制构件厂和建设单位双方的合作意愿就越大,装配式建筑的绿色化程度就越高。

(3)当政府给予预制构件厂一定补贴后,建设单位为预制构件厂分担的成本就可以相应减少,因此,政府补贴可以加速促进建筑产业链双方达成合作,是当下装配式建筑实现绿色建造的必然选择。

参考文献:

- [1] 肖绪文,冯大阔. 基于绿色建造的施工现场装配化思考[J]. 施工技术,2016,45(4):1-4.
- [2] 秦旋,李怀全,莫懿懿. 基于 SNA 视角的绿色建筑项目风险网络构建与评价研究[J]. 土木工程学报,2017,50(2):119-131.
- [3] 徐驰,庄二飞,苏京,等. 装配式建筑对绿色施工的影响[J]. 建筑安全,2018,33(8):13-15.
- [4] 于淼,饶潇潇,张梦婷. 基于组合赋权的装配式建筑绿色性灰色聚类测评模型[J]. 沈阳建筑大学学报(社会科学版),2020,22(2):137-143.

[5] 李辉山,赵倩. 基于价值工程装配式建筑绿色度研究[J]. 工程管理学报,2020,34(1):19 – 24.

[6] 王波. 政府补贴条件下绿色建筑发展关键主体博弈研究[J]. 技术经济与管理研究,2018(4):17 – 21.

[7] 齐宝库,靳林超,王丹,等. 基于博弈论的装配式建筑政府补偿机制设计研究[J]. 建筑技术,2017,48(8):835 – 837.

[8] HARRI E. Dynamic noncooperative game theory[J]. Journal of economic dynamics and control,1997,21(6):1113 – 1116.

[9] 王道平,王婷婷,张博卿. 基于微分博弈的供应链合作减排和政府补贴策略[J]. 控制与决策,2019,34(8):1733 – 1744.

[10] 刘伟,丁凯文,刘德海. 基于微分博弈的网络众包违约风险控制机制研究[J]. 系统工程理论与实践,2019,39(10):2559 – 2568.

[11] 洪江涛,黄沛. 基于微分博弈的供应链质量协调研究[J]. 中国管理科学,2016,24(2):100 – 107.

[12] 孙健慧,张海波,赵黎明. 三级装备制造业供应链质量管理行为研究[J]. 中国管理科学,2018,26(3):71 – 83.

[13] 杨磊,张琴,张智勇. 碳交易机制下供应链渠道选择与减排策略[J]. 管理科学学报,2017,20(11):75 – 87.

[14] 张雄会,陈俊芳,黄培. R & D 过程中供应商纵向知识溢出决策分析[J]. 工业工程与管理,2008(4):29 – 31.

Research on Green Construction Coordination Strategy of Industrial Chain in Prefabricated Building:Based on the Perspective of Governmental Subsidy

HU Longwei, WANG Xue, HUANG Baolun
(School of Management Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266500, China)

Abstract:By applying the relevant theory of differential game, this paper studies the cooperation and coordination between the prefabricated component factory and the construction unit in the industrial chain of prefabricated building to realize green construction. By comparing three situations of decentralized decision – making, centralized decision – making and the decision of introducing cost – sharing strategy, three conclusions are drawn. Finally, it is determined that government subsidies can accelerate the cooperation between the two sides of the building chain, which is the inevitable choice for currently constructing green buildings. The conclusion provides a theoretical basis for the government to formulate corresponding subsidy strategies.

Key words: industrial chain of building; prefabricated building; green construction; differential countermeasures

(责任编辑:郝 雪 英文审校:林 昊)