

基于演化博弈理论的装配式建筑激励策略

王凡俊¹, 陈德凡¹, 赵宝库²

(1. 天津师范大学 管理学院, 天津 300387; 2. 中铁电气化局集团有限公司, 北京 100036)

摘要:为了解决装配式建筑发展缓慢的问题,从建筑产业链的角度考虑,运用演化博弈理论对目前装配式建筑产业链中 3 大主体(政府、开发商、制造商)的行为进行分析,构建“政府-开发商”“开发商-制造商”两两激励的演化博弈模型,得到各主体的最优策略。通过分析,博弈的稳定均衡与系统的初始状态密切相关,只有当政府进行积极的经济激励,直接给予开发商财政补贴,开发商积极配合政府政策开发装配式建筑并对下游制造商进行成本分担时,才能实现三方利益共赢,推动装配式建筑的发展。

关键词:装配式建筑;建筑产业链;激励行为;演化博弈

中图分类号:F426.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)09-0081-09

为了响应高质量、低碳、节能减排的发展要求,建筑业正进行着如火如荼的改革。为了弥补传统建筑建设工期长、成本高、污染严重、浪费多的缺点^[1],装配式建筑应运而生。装配式建筑是一种基于绿色、可持续发展理念而逐渐形成的现代化建筑形式^[2]。其建造过程是先在车间生产预制构件再运输到施工现场进行组装。装配式建筑优势明显。一方面,减少了现场湿作业工作量^[3],建筑垃圾少、浪费少,实现了建筑业的绿色发展^[4];另一方面,主体建造与装修可以同时进行,提高了建造效率,大大缩短了建设周期^[5]。最典型的例子就是武汉“雷神山”“火神山”医院,仅用 10 d 的时间完成了从设计到建造并投入使用的过程。

尽管装配式建筑有诸多优点,但其发展速度较为缓慢。可能有如下原因:①政府的激励不足,多是倡导倡议,缺乏经济上的激励措施^[6-7];②装配式建筑与传统建筑很大的不同在于,其生产过程逐渐由现场转向车间,与传统制造业有异曲同工之妙,故对预制构件工艺要求严格,而目前生产预制构件的工艺技术尚不成熟是制约装配式建筑发展的关键因素^[8-9];③尚未形成完善的产业链^[10],且产业链中的利益相关者之间不协调^[11],越来越多的利益相关者参与其中,协调各方关系变得复杂困难^[12]。基于此,有必要从产业链角度

出发,探讨装配式建筑产业链中政府、开发商、预制构件生产商之间的利益关系,寻求合适的方法促进装配式建筑的发展。

学者们对装配式建筑相关激励机制进行了研究。刘佳等^[13]、王磊等^[14]针对产业链上游中政府对开发商的经济激励进行了探索。凤亚红和王社良^[15]、杜宗阳^[16]分析了产业链中游的开发商与承包商之间的激励的演化博弈。陈颖玲等^[17]将研究视角拓展到产业链的下游消费者层面,研究了政府对开发商的经济激励以及政府对消费者的补贴激励,同样考虑了消费者的还有金倩^[18],但与前述学者不同的是将消费者和开发商作为研究的双方。再进一步的研究就是陈艳等^[19]、金占勇等^[20],研究了政府、开发商、消费者的三方博弈,分析出了三方的演化稳定策略。国外也不乏对该方面的研究。Olubunmi 等^[21]对激励政策进行了分类,提出优先考虑政府主导的激励政策,其他激励政策作为辅助参考。Cohen 等^[22]运用博弈论对消费者、开发商、中央政府、地方政府及非营利机构在推广绿色建筑中的策略行为进行分析,提出了推动建造高质量的绿色建筑的政策改革建议。Liu 等^[23]基于前景理论,分析了政府与施工单位的演化博弈模型,寻求双方稳定策略。

从上述研究可以发现,对于装配式建筑激励研究多集中在上游的政府、中游的开发商、下游的

收稿日期:2022-12-03

作者简介:王凡俊(1974—),男(满族),内蒙古凉城人,天津师范大学管理学院,教授,工学、管理学博士,研究方向为管理科学与工程;陈德凡(1997—),女,河南信阳人,天津师范大学管理学院,硕士研究生,研究方向为精益建造;赵宝库(1972—),男,河北保定人,中铁电气化局集团有限公司,会计师,研究方向为企业财务管理及内部审计。

消费者,而较少的涉猎产业链中的新环节——预制构件生产商。因此,本文基于装配式建筑参与方的复杂性,从装配式建筑产业链角度出发,分析产业链上游中政府-开发商,开发商-制造商 3 个主体之间的演化博弈,通过博弈结果提出相应的建议措施。

对于研究对象的选取,有以下几点考量:①装配式建筑作为一种新兴的建筑形式,其推广离不开政府的支持^[24],政府行为影响着开发商的积极性;②开发商开发建筑时具有较大的主动权与选择权,基于供给决定需求,需求影响供给的经济理论^[25],分析开发商的行为至为关键;③供应链的研究起源于制造业领域,将产业链拓展到建筑领域时,制造商扮演着一个崭新的角色,于是对于制造商的研究必不可少^[26]。并且预制构件是装配式建筑的一大特点,占装配式建筑成本的很大部分,预制构件生产需要制造商创新,其成本较高^[27]。所以制造商是否配合开发商行为生产预制构件是一项值得考虑的问题,制造商对装配式建筑最终落实的好坏也起到关键作用。将视角转移至制造商,选取制造商与开发商的博弈,也是为了区别于传统建筑开发商与总承包商之间紧密的合作关系。

根据已有文献以及产业链相关情况,首先分析政府与开发商之间的博弈,开发商的行为与政府的政策息息相关,与王磊等^[14]的研究的区别在于引入了对开发商的惩罚损失。而后续对开发商与制造商的博弈研究,是建立在政府与开发商博弈均衡的一个结论基础之上,即考虑的是前述博弈有利于推行装配式建筑的情况下,开发商为了完成开发任务,必须要与下游预制构件制造商之间进行博弈,选择激励或不激励制造商,制造商综合利益最大化

原则进行抉择。

1 装配式建筑供应链中政府与开发商演化博弈分析

1.1 模型的基本假设与构建

基本假设如下。

1)本模型研究选取政府和开发商作为博弈双方,假设双方的博弈顺序是政府选择是否对开发商进行经济激励,然后开发商选择是否开发装配式建筑。若政府选择经济激励且开发商选择开发,那么政府就必须兑现承诺,给予开发商一定的经济补贴;若政府选择经济激励但开发商选择不开发,那么政府就无须给予开发商经济补贴,并且开发商还会因为建筑环保等方面不达标而受到惩罚损失^[17],该损失小于政府激励开发商时付出的行政成本。

2)政府采取经济激励手段是指直接给予开发商财政补贴,政府若不采取经济激励手段,其作为政府,有倡导开发商开发装配式建筑的义务,所以一般以引导鼓励为主,无须耗费额外的经济和行政成本。

3)政府以实现社会公共利益、完善政府职能、落实国家层面的可持续发展政策为目标采取相关的激励手段。而开发商作为营利性企业,与政府在社会中所扮演的角色不同,所以开发商会根据政府的决策,考虑自身利益最大化,选择开发决策,与政府进行博弈互动。

4)政府采取经济激励手段的概率为 x ,不采取经济激励手段概率为 $1-x$;开发商选择开发装配式建筑的概率为 y ,不开发的概率为 $1-y$ 。

参数符号说明见表 1。根据政府和开发商的不同博弈行为选择,构建表 2 所示的收益矩阵。

表 1 政府与开发商演化博弈分析参数符号说明

符号	含义
C_{g1}	政府采取经济激励手段时付出的行政成本(如大力宣传,调研,研究政策等)
C_{g2}	政府采取经济激励手段时付出的经济成本(即直接给予开发商经济补贴)
R_{g1}	开发商开发时,政府获得的经济收益(一般指财税收益)
R_{g2}	开发商不开发时,政府获得的经济收益
R_{g3}	政府经济激励时,开发商开发,政府获得的增量收益(如履行政府职能,提升公信力,环境保护等方面的收益),由于双方积极合作,该收益是不可估量的
R_{g4}	政府不进行经济激励时,开发商主动开发,政府由此获得的增量收益
C_{d1}	开发商开发时付出的增量成本(如学习研究成本)
C_{d2}	政府经济激励时,开发商不开发的惩罚损失(如因环保等不达标的罚款), $C_{d2} < C_{g1}$
R_{d1}	开发商开发时获得的经济收益
R_{d2}	开发商不开发时获得的经济收益
R_{d3}	开发商开发时获得的增量收益(如获得品牌商誉以及承担社会责任的收益)

表 2 政府与开发商收益矩阵

政府	开发商	
	开发装配式建筑 y	不开发装配式建筑 $1-y$
经济激励 x	$(R_{g1}+R_{g3}-C_{g1}-C_{g2}, R_{d1}+R_{d3}+C_{g2}-C_{d1})$	$(R_{g2}+C_{d2}-C_{g1}, R_{d2}-C_{d2})$
非经济激励 $1-x$	$(R_{g1}+R_{g4}, R_{d1}+R_{d3}-C_{d1})$	(R_{g2}, R_{d2})

政府实施经济激励的期望收益、非经济激励的期望收益以及平均期望收益分别用 $E(G_1)$ 、 $E(G_2)$ 、 $E(\bar{G})$ 表示,则有如下结果:

$$\begin{aligned} E(G_1) &= y(R_{g1}+R_{g3}-C_{g1}-C_{g2}) + \\ &\quad (1-y)(R_{g2}+C_{d2}-C_{g1}); \\ E(G_2) &= y(R_{g1}+R_{g4}) + (1-y)R_{g2}; \\ E(\bar{G}) &= xE(G_1) + (1-x)E(G_2) = \\ &\quad xy(R_{g3}-C_{g2}-C_{d2}-R_{g4}) + \\ &\quad x(C_{d2}-C_{g1}) + y(R_{g1}+R_{g4}-R_{g2}) + R_{g2}。 \end{aligned}$$

开发商选择开发的期望收益、选择不开发的期望收益以及平均期望收益分别用 $E(D_1)$ 、 $E(D_2)$ 、 $E(\bar{D})$ 表示,则有如下结果:

$$\begin{aligned} E(D_1) &= x(R_{d1}+R_{d3}+C_{g2}-C_{d1}) + \\ &\quad (1-x)(R_{d1}+R_{d3}-C_{d1}); \\ E(D_2) &= x(R_{d2}-C_{d2}) + (1-x)R_{d2}; \\ E(\bar{D}) &= yE(D_1) + (1-y)E(D_2) = \\ &\quad xy(C_{g2}+C_{d2}) - xC_{d2} + \\ &\quad y(R_{d1}+R_{d3}-C_{d1}-R_{d2}) + R_{d2}。 \end{aligned}$$

1.2 双方演化稳定策略分析

政府选择实施经济激励的复制动态方程为

$$\begin{aligned} F(x) &= \frac{dx}{dt} = x[E(G_1) - E(\bar{G})] = \\ &\quad x(1-x)[y(R_{g3}-C_{g2}-C_{d2}-R_{g4}) + \\ &\quad \quad (C_{d2}-C_{g1})] \end{aligned} \quad (1)$$

令 $F(x) = 0$, 则 $x_1 = 0, x_2 = 1, y = \frac{C_{g1}-C_{d2}}{R_{g3}-C_{g2}-C_{d2}-R_{g4}}$ 。

$$\left\{ \begin{aligned} &(1-2x)[y(R_{g3}-C_{g2}-C_{d2}-R_{g4}) + C_{d2}-C_{g1}] \\ &y(1-y)(C_{g2}+C_{d2}) \end{aligned} \right.$$

情形 1: 政府采取经济激励时的收益小于采取非经济激励时的收益,且开发商选择开发装配式建筑的收益小于不开发时的收益,即 $R_{g3}-C_{g1}-C_{g2} < R_{g4}$ 且 $R_{d1}+R_{d3}+C_{g2}-C_{d1} < R_{d2}-C_{d2}$ 。

情形 2: 政府采取经济激励时的收益小于采取非经济激励时的收益,且开发商选择开发装配式建筑的收益大于不开发时的收益,即 $R_{g3}-C_{g1}-C_{g2} <$

开发商选择开发装配式建筑得复制动态方程为

$$\begin{aligned} G(y) &= \frac{dy}{dt} = y[E(D_1) - E(\bar{D})] = \\ &\quad y(1-y)[x(C_{g2}+C_{d2}) + (R_{d1}+R_{d3}-C_{d1}-R_{d2})] \end{aligned} \quad (2)$$

令 $G(y) = 0$, 则 $y_1 = 0, y_2 = 1, x = \frac{C_{d1}+R_{d2}-R_{d1}-R_{d3}}{C_{g2}+C_{d2}}$ 。

政府与开发商之间关于装配式建筑的演化博弈可以用式(1)、式(2)两个复制动态方程表示,由 $F(x) = 0, G(y) = 0$, 可以得到 5 个均衡点,其中 $O(0,0), A(0,1), B(1,0), C(1,1)$ 为边缘均衡点, $D(x^*, y^*)$ 为内部均衡点,满足如下方程组:

$$\begin{cases} x(1-x)[y(R_{g3}-C_{g2}-C_{d2}-R_{g4}) + (C_{d2}-C_{g1})] = 0 \\ y(1-y)[x(C_{g2}+C_{d2}) + (R_{d1}+R_{d3}-C_{d1}-R_{d2})] = 0 \end{cases}。$$

$$\begin{cases} x^* = \frac{C_{d1}+R_{d2}-R_{d1}-R_{d3}}{C_{g2}+C_{d2}} \\ y^* = \frac{C_{g1}-C_{d2}}{R_{g3}-C_{g2}-C_{d2}-R_{g4}} \end{cases}。$$

根据 Friedman^[28] 提出的方法,演化系统均衡点的稳定性可由系统的雅克比矩阵的局部稳定性分析得到。

对 $\frac{dx}{dt}$ 和 $\frac{dy}{dt}$ 分别关于 x, y 求偏导,可得到该系统的雅克比矩阵为

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} x(1-x)(R_{g3}-C_{g2}-C_{d2}-R_{g4}) & x(1-x)(C_{d2}-C_{g1}) \\ (1-2y)[x(C_{g2}+C_{d2}) + R_{d1}+R_{d3}-C_{d1}-R_{d2}] & y(1-y)(C_{g2}+C_{d2}) \end{bmatrix} \\ &R_{g4} \text{ 且 } R_{d1}+R_{d3}+C_{g2}-C_{d1} > R_{d2}-C_{d2}。 \end{aligned}$$

情形 3: 政府采取经济激励时的收益大于采取非经济激励时的收益,且开发商选择开发装配式建筑的收益小于不开发时的收益,即 $R_{g3}-C_{g1}-C_{g2} > R_{g4}$ 且 $R_{d1}+R_{d3}+C_{g2}-C_{d1} < R_{d2}-C_{d2}$ 。

该系统平衡点的局部演化稳定性见表 3。

表 3 前 3 种情形局部演化稳定性

均衡点	情形 1			情形 2			情形 3		
	det 符号	tr 符号	结果	det 符号	tr 符号	结果	det 符号	tr 符号	结果
$O(0,0)$	+	—	ESS	+	—	ESS	+	—	ESS
$A(0,1)$	—	不确定	鞍点	—	不确定	鞍点	+	+	不稳定
$B(1,0)$	—	不确定	鞍点	+	+	不稳定	—	不确定	鞍点
$C(1,1)$	+	+	不稳定	—	不确定	鞍点	—	不确定	鞍点

通过表 3 分析可知,当政府采取经济激励时的收益小于采取非经济激励时的收益,或开发商选择开发装配式建筑的收益小于不开发时的收益任何一种情况发生时,均存在 4 个局部均衡点,且演化博弈稳定点为 $O(0,0)$ 。即双方的博弈结果是政府不采取经济激励手段,开发商不开发装配式建筑。因为根据分析可见,政府和开发商均采取消极的战略时收益反而大,故双方都没有动力采取积极的策略或激励或开发装配式建筑。

情形 4:政府采取经济激励时的收益大于采取非经济激励时的收益,且开发商选择开发装配式建筑的收益大于不开发时的收益,即 $R_{g3}-C_{g1}-C_{g2}>R_{g4}$ 且 $R_{d1}+R_{d3}+C_{g2}-C_{d1}>R_{d2}-C_{d2}$ 。其演化稳定性见表 4。

表 4 情形 4 演化稳定性

局部均衡点	det 符号	tr 符号	演化结果
$O(0,0)$	+	—	ESS
$A(0,1)$	+	+	不稳定
$B(1,0)$	+	+	不稳定
$C(1,1)$	+	—	ESS
$D(x^*,y^*)$	—	0	鞍点

此时存在 5 个均衡点,演化稳定点是 $O(0,0)$ 和 $C(1,1)$ 。即双方的博弈结果是:政府不采取经济激励手段,开发商则不开发装配式建筑;政府选择采取经济激励手段,开发商则选择开发装配式建筑。

1.3 演化博弈结果分析

根据上述分析,可以得到政府与开发商关于装配式建筑的演化博弈相位图(图 1)。

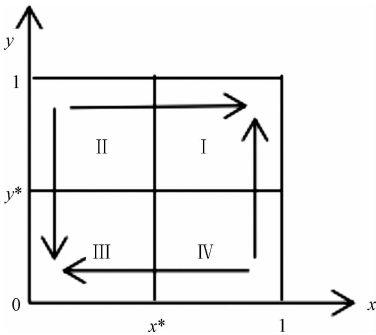


图 1 政府与开发商演化博弈相位图

由图 1 可以看到,该演化系统既可能收敛于 $(0,0)$ 点,也可能收敛于 $(1,1)$ 点,这取决于系统的初始状态。当初始状态落在 I 区域时,系统将收敛于 $(1,1)$ 点,即达到演化均衡状态,此时政府和开发商都会选择积极的策略,政府选择对开发商进行经济激励,而开发商也会相应选择积极开发装配式建筑。当初始状态落在 III 区域时,系统将收敛于 $(0,0)$ 点,此时政府将不会选择对开发商进行经济激励,给与补贴,而开发商在缺少政府补贴的情形下进行开发显然不理智,故也会选择不开发装配式建筑。这样一来,装配式建筑的发展将难以推动。很明显这和当代提倡可持续发展格格不入。

初始状态落在 II、IV 区域时,系统的收敛方向是不确定的。为了能使装配式建筑得到良好发展,必须使 I 区域的面积扩大,而 III 区域的面积缩小。即尽量使 (x^*,y^*) 向左下方移动。这样可使系统更大可能收敛于 $(1,1)$ 点。为使 (x^*,y^*) 向左下方移动,即要使 $x^*=(C_{d1}+R_{d2}-R_{d1}-R_{d3})/(C_{g2}+C_{d2})$ 和 $y^*=(C_{g1}-C_{d2})/(R_{g3}-C_{g2}-C_{d2}-R_{g4})$ 均尽量小。根据数学知识,则可行的办法是使 C_{d1} 、 R_{d2} 、 C_{g1} 、 R_{g4} 减小, R_{d1} 、 R_{d3} 、 C_{g2} 、 C_{d2} 、 R_{g3} 增大。鉴于此,可采取以下措施:

1)改善项目管理方式,针对装配式建筑的项目管理,已经不再适用于过去传统现浇建筑的管理方式,开发商要应用精益建造理论,在管理方式上进行突破。其次,加强施工人员在装配式建筑建设过程中的培训工作,根据泰勒的科学生产管理方法,要求施工单位进行科学化、标准化施工,进而降低开发商开发时的增量成本 C_{d1} 。

2)对消费者进行积极引导,让其了解装配式建筑的优点,通过市场需求端的作用力来影响开发商的开发决策。当消费者倾向于装配式建筑的选择时,若开发商还选择不开发装配式建筑,而是开发传统现浇建筑,那么较少的需求必定会影响开发商收益,使得 R_{d2} 减少,相反,若开发装配式建筑,需求增多, R_{d1} 也会增加,所以开发商迫于市场需求的压力,就会选择开发。而且当市场这只无形的手进入系统时,这种市场机制的运行自动地促使开发商开

发,政府的宣传等行政成本 C_{g1} 就会减少。

3)加大政府对开发装配式建筑的激励强度,对于积极响应政府政策的开发商给予大力支持,加大的财政补贴力度,即增大 C_{g2} 。同时,对于如若不开发装配式建筑的开发商,导致某些方面不能达标,给予严厉的惩罚,即加大 C_{d2} ,做到奖惩分明。

4)政府作为国家行政机关,在社会中具有较高的威慑力,因此不能鼠目寸光,而应有长远目光,以大局利益为重,积极响应落实国家权力机关制定的政策,将社会效益、环境效益,以及政府公信力等放在重要位置上,积极激励装配式建筑的发展,使这种长期的增量收益得到发挥,即增大 R_{g3} 。同时,降低开发商主动开发装配式建筑的期望值,即减小 R_{g4} 。

5)开发装配式建筑不仅是积极响应国家号召的体现,是积极践行绿色协调可持续理念的题中要义,也是企业承担社会责任的表现。企业承担社会责任不仅可以通过对弱势群体的资助,也可以在节能环保等方面贡献一分力量,积极开发装配式建筑就是后者的体现。因此,企业的声誉、品牌等增量收益 R_{d3} 也会大大增加。

2 装配式建筑产业链中开发商与制造商演化博弈分析

2.1 模型基本假设与参数符号

基本假设如下:

1)本模型是建立在前述模型基础之上,即假设前提条件是政府进行经济激励,且开发商选择开发装配式建筑。考虑供应链中开发商与装配式预制构件制造商之间的演化博弈。虽然实践中开发商通常与施工方、施工方与制造商建立直接联系,而开发商与预制构件制造商似乎是间接联系。但施工方是鉴于开发商要求进行施工,最大受益主体是开发商。而目前预制构件生产工艺不成熟,成本高,制造商很难主动生产,很难主动创新,借鉴常规供应链中制造商激励共享供应商创新的研究^[29],开发商应采取激励措施(如分担成本)激励预制构建生产商。故本模型研究

的是稳定供应链中仅有一个开发商和一个预制构件制造商的情形。双方的博弈顺序是:开发商决定是否对制造商进行激励,然后制造商决定是否生产,一旦制造商接受了开发商的激励,就必须进行预制构件的生产。若开发商决定激励,而制造商却选择不生产,那么就会打破原有供应链的平衡,开发商就必须在市场寻求其他制造商,此时需要耗费一定的额外成本了解市场信息。而原制造商因为不配合生产,就丧失了机会,遭受一定的机会损失。

2)开发商对制造商激励且制造商愿意生产时,双方合作关系稳定,给开发商带来长期效益,若制造商不生产,开发商不仅要耗费额外成本寻求其他制造商,长期效益也会受到损失。同理,即使开发商不激励,制造商也可能会因为自身利益选择主动生产,这时供应链依旧稳定,开发商也会获得长期效益。但后者的效益要小于前者。显然,当开发商激励且制造商生产时,双方是积极的互动行为,有利于建立良好的合作关系。而当开发商不激励时,制造商虽然可能会为自身利益选择主动生产,但只有一方的积极行为,却得不到另一方的积极回应,带给开发商的长期效益会减损。

3)开发商对制造商的激励方式是对其进行成本分担,通过分担一定比例的制造成本以激励制造商进行生产。倘若开发商对制造商激励但制造商选择不生产,开发商在市场寻求其他制造商时,不会对新制造商进行成本分担,因为双方不是稳定的供求关系,短暂的供应链很容易断开。

4)开发商和制造商均以自身利益最大化为原则进行决策。开发商激励制造商的概率为 m ,不激励的概率为 $1-m$;制造商愿意生产装配式建筑构件的概率是 n ,不愿意生产的概率为 $1-n$ 。

参数符号说明见表 5。其他出现的参数符号含义与 1.1 节相同。本处的 $R_{d4} > R_{d5}$ 。

根据开发商和制造商的不同博弈行为选择,可构建表 6 所示的收益矩阵。

表 5 开发商与制造商演化博弈分析参数符号说明

符号	含义
C_{d3}	开发商激励制造商时付出的成本(即对制造商进行成本分担)
C_{d4}	制造商不生产时,开发商向市场其他制造商订货的增量费用(如了解调查市场,价格对比分析)
R_{d4}	开发商激励且制造商生产时,供应链稳定给开发商带来的长期收益,若不生产,长期收益损失
R_{d5}	开发商不激励但制造商生产时,供应链稳定给开发商带来的长期收益,若不生产,长期收益损失
C_{m1}	制造商生产时付出的增量成本
C_{m2}	开发商激励但制造商不生产时,制造商的机会损失
R_{m1}	制造商生产时的经济收益
R_{m2}	制造商生产时的增量收益(如品牌,社会评价提升等的收益)

表 6 开发商与制造商收益矩阵

开发商	制造商	
	生产装配式建筑构件 n	不生产装配式建筑构件 $1-n$
激励 m	$R_{d1}+R_{d3}+C_{g2}+R_{d4}-C_{d1}-C_{d3}, R_{m1}+R_{m2}+C_{d2}-C_{m1}$	$R_{d1}+R_{d3}+C_{g2}-R_{d4}-C_{d1}-C_{d4}-C_{m2}$
非激励 $1-m$	$R_{d1}+R_{d3}+C_{g2}+R_{d5}-C_{d1}, R_{m1}+R_{m2}-C_{m1}$	$R_{d1}+R_{d3}+C_{g2}-R_{d5}-C_{d1}-C_{d4}, 0$

根据上述博弈模型,计算开发商激励制造商的期望收益、不激励制造商的期望收益以及平均期望收益,分别用 $E(W_1)$ 、 $E(W_2)$ 、 $E(\bar{W})$ 表示。

$$\begin{aligned} E(W_1) &= n(R_{d1}+R_{d3}+C_{g2}+R_{d4}-C_{d1}-C_{d3}) + \\ &\quad (1-n)(R_{d1}+R_{d3}+C_{g2}-R_{d4}-C_{d1}-C_{d4}) = \\ &\quad n(2R_{d4}-C_{d3}+C_{d4})+R_{d1}+R_{d3}+ \\ &\quad C_{g2}-R_{d4}-C_{d1}-C_{d4}; \\ E(W_2) &= n(R_{d1}+R_{d3}+C_{g2}+R_{d5}-C_{d1}) + (1- \\ &\quad n)(R_{d1}+R_{d3}+C_{g2}-R_{d5}-C_{d1}-C_{d4}) = n(2R_{d5}+ \\ &\quad C_{d4})+R_{d1}+R_{d3}+C_{g2}-R_{d5}-C_{d1}-C_{d4}; \\ E(\bar{W}) &= mE(W_1) + (1-m)E(W_2) = nm(2R_{d4}- \\ &\quad 2R_{d5}-C_{d3}) + m(R_{d5}-R_{d4}) + n(2R_{d5}+C_{d4}) + \\ &\quad R_{d1}+R_{d3}+C_{g2}-R_{d5}-C_{d1}-C_{d4}。 \end{aligned}$$

制造商装配式建筑构件的期望收益、不生产装配式建筑构件的期望收益、平均期望收益分别用 $E(M_1)$ 、 $E(M_2)$ 、 $E(\bar{M})$ 表示。

$$\begin{aligned} E(M_1) &= m(R_{m1}+R_{m2}+C_{d3}-C_{m1}) + \\ &\quad (1-m)(R_{m1}+R_{m2}-C_{m1}) = \\ &\quad mC_{d3}+R_{m1}+R_{m2}-C_{m1}; \\ E(M_2) &= -mC_{m2}; \\ E(\bar{M}) &= nE(M_1) + (1-n)E(M_2) = \\ &\quad mn(C_{d3}+C_{m2}) + n(R_{m1}+R_{m2}-C_{m1}) - mC_{m2}。 \end{aligned}$$

2.2 双方稳定策略分析

开发商选择激励制造商,进行成本分担的复制动态方程为

$$\begin{aligned} P(m) &= \frac{dm}{dt} = m[E(W_1)-E(\bar{W})] = \\ &\quad m(1-m)[n(2R_{d4}-2R_{d5}-C_{d3})+R_{d5}-R_{d4}] \end{aligned} \tag{3}$$

令 $P(m) = 0$, 则 $m_1 = 0, m_2 = 1, n = \frac{R_{d4}-R_{d5}}{2R_{d4}-2R_{d5}-C_{d3}}。$

制造商选择生产装配式建筑构件的复制动态方程为

$$\begin{aligned} Q(n) &= \frac{dn}{dt} = n[E(M_1)-E(\bar{M})] = \\ &\quad n(1-n)[m(C_{d3}+C_{m2})+R_{m1}+R_{m2}-C_{m1}] \end{aligned} \tag{4}$$

令 $Q(n) = 0$, 则 $n_1 = 0, n_2 = 1, m =$

$$\frac{C_{m1}-R_{m1}-R_{m2}}{C_{d3}+C_{m2}}。$$

开发商和制造商之间的演化博弈可以用式(3)、式(4)两个复制动态方程表示,由 $P(m) = 0, Q(n) = 0$ 可以得到 5 个均衡点,其中 $O(0,0), A(0,1), B(1,0), C(1,1)$ 为边缘均衡点, $D(x^*, y^*)$ 为内部均衡点,满足如下方程组:

$$\begin{cases} m(1-m)[n(2R_{d4}-2R_{d5}-C_{d3})+R_{d5}-R_{d4}] = 0 \\ n(1-n)[m(C_{d3}+C_{m2})+R_{m1}+R_{m2}-C_{m1}] = 0 \end{cases}。$$

解得

$$\begin{cases} m^* = \frac{C_{m1}-R_{m1}-R_{m2}}{C_{d3}+C_{m2}} \\ n^* = \frac{R_{d4}-R_{d5}}{2R_{d4}-2R_{d5}-C_{d3}} \end{cases}。$$

根据微分方程的稳定性原理及演化博弈均衡点稳定策略,当 $P'(m) < 0$ 或 $Q'(n) < 0$ 时为演化稳定策略。当 $n^* = \frac{R_{d4}-R_{d5}}{2R_{d4}-2R_{d5}-C_{d3}}$ 时, $P(m) = 0$ 恒成立,即制造商选择生产装配式建筑构件的概率达到 $(R_{d4}-R_{d5})/(2R_{d4}-2R_{d5}-C_{d3})$ 时,开发商的激励是稳定的。因为开发商激励制造商能够给开发商带来长期稳定的效益。故 $R_{d4}-R_{d5} < 2R_{d4}-2R_{d5}-C_{d3}$, 即 $R_{d4}-R_{d5}-C_{d3} > 0$ 。当 $n > n^*$ 时, $P'(0) > 0, P'(1) < 0, m = 1$ 是唯一稳定的演化策略。即开发商帮助制造商分担成本,制造商积极投入生产,双方合作形成良性互动,共建稳定的供应链条。当 $n < n^*$ 时, $P'(0) < 0, P'(1) > 0, m = 0$ 是唯一稳定的演化策略。即开发商若选择不分担成本,此时对制造商缺乏吸引力。因为制造商生产装配式建筑构件需要购买新设备,需要开发新技术,并且由于构件的多样性很难批量生产,故其生产成本低,对制造商来说无利可图,故没有动力生产装配式建筑构件。同理,当 $m^* = \frac{C_{m1}-R_{m1}-R_{m2}}{C_{d3}+C_{m2}}$ 时, $Q(n) = 0$ 恒成立,即开发商选择成本分担的概率达到 $(C_{m1}-R_{m1}-R_{m2})/(C_{d3}+C_{m2})$ 时,制造商生产装配式建筑构件的初始比例是稳定的。当 $m > m^*$ 时 $Q'(0) > 0, Q'(1) < 0, n = 1$ 是唯一稳定的演化策略。即制造商与开发商之间均积极向上,合作和谐,制造商进行生产装配式建

筑构件,并且开发商原意进行成本分担。当 $m < m^*$ 时 $Q'(0) < 0, Q'(1) > 0, n = 0$ 是唯一稳定的演化策略,即制造商不会主动生产装配式建筑构件,开发商也不激励,此时开发商只能在市场寻求其他不稳定的制造商。

2.3 演化博弈结果分析

根据上述分析,可以得到开发商与制造商之间关于装配式建筑构件生产之间的演化博弈相位图(图2)。

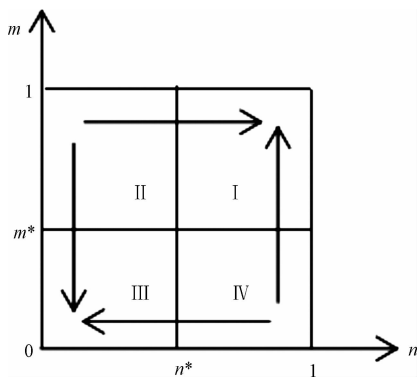


图2 开发商与制造商演化博弈相位图

当系统的初始状态落在 I 区域时,系统将收敛于(1,1)点,即均衡稳定策略是开发商选择激励制造商,且制造商也积极响应开发商的行为进行生产装配式建筑的预制构件。当系统初始状态落在 III 区域时,系统将收敛于(0,0)点,即均衡稳定策略是开发商选择不激励制造商,且制造商也不主动生产装配式建筑的预制构件。但当系统的初始状态落在 II、IV 区域时,系统可能收敛于(1,1)点,也可能收敛于(0,0)点。也即一种可能的状态是,即使开发商愿意向制造商分担成本,但制造商可能由于开发商开发的装配式建筑造型过于奇特,或者要求的绿色度过高,需要付出的制造成本极高,如果生产无利可言甚至亏损,进而选择失去合作机会也不生产。另一种可能的状态是,尽管开发商不激励制造商,制造商也积极主动生产,原因是当今企业在发展的过程中,不仅考虑经济效益,而且考虑社会效益。制造商考虑到生产可能给企业带来的良好声誉,积累经验等好处完全可以抵消因生产而付出的增量成本,进而选择生产。

为了促进装配式建筑的发展,必须在全行业营造积极建造装配式建筑的氛围,使得制造商更大意愿地生产装配式建筑构件。也即,使得图中 I 区域的面积尽可能的大。很明显, m^* 和 n^* 是最关键的两个阈值,当 m^* 和 n^* 越小时, I 区域的面积就越

大,系统初始状态落在 I 区域的概率也越大。若使 $m^* = (C_{m1} - R_{m1} - R_{m2}) / (C_{d3} + C_{m2})$ 和 $n^* = (R_{d4} - R_{d5}) / (2R_{d4} - 2R_{d5} - C_{d3})$ 尽量小,可能的数学办法是使 C_{m1} 、 R_{d5} 减小, R_{m1} 、 R_{m2} 、 C_{d3} 、 C_{m2} 、 R_{d4} 增大。基于此,可采取下列措施:

1)对于外形简单、成本低廉、需求量较多的构件,制造商可以进行批量生产,即使出现供大于求的情形,制造商也可以屯库存,虽然屯库存需要一定的保管成本,但是在急需时可以保证构件的及时供应,减少缺货成本。对于工艺复杂的构件,改进制作工艺,对复杂的构件进行有效分离,化繁为简,化难为易,进行流水线生产,使得每一个员工都能固定生产一个环节,保证熟练度和质量。定期对员工进行培养,让生产的一线员工在学习中不断进步,不断完善生产水平,降低 C_{m1} 。

2)加强供应链成员之间的互动,使得开发商意识到信任和合作给供应链稳定带来长期效益的重要性。在与制造商之间的博弈过程中,开发商的地位如同顾客,看似上帝,但其作为整个供应链的中间位置却又十分被动,要同时兼顾上游的政府行为和下游的制造商行为,任何一方的不配合都会导致自身利益的损失。在这样一个关系网的社会中,不仅要拥有雄厚的实力,还需要有稳定的关系。建立一条稳定的供应链并非易事,只有开发商加强与制造商之间的互动,积极与制造商合作,才能有利于自身发展。如此,使得 R_{d5} 减小, R_{d4} 增大。

3)制造商通过不断学习改进,研究低成本低能耗的生产工艺,获得开发商的信赖,可以提高销售价格,进而提高经济效益 R_{m1} 。与此同时,在全社会提倡使用装配式建筑,让消费者意识到其在环保、质量、工期、成本方面的优势,因而在制造商生产装配式构建后会获得良好的社会声誉,进而增加 R_{m2} 。

4)加大开发商对制造商的激励力度,例如直接给予资金分担制造商的生产成本,或者提供制造商学习的机会,也可以在自身利润的基础上给予分红,从而增大 C_{d3} 。

5)巩固供应链的稳定性,在市场营造诚信第一的氛围,使得市场供求关系相对稳定,一旦制造商在开发商激励的情况下仍不生产,则将丧失在市场上的声誉,不仅原开发商不会再与其合作,其他开发商也不会打破原有平衡与其合作。这样,制造商的机会损失 C_{m2} 就增大。

3 结论与建议

虽然中国大力提倡建设装配式建筑已有较长

时间,但由于缺乏成熟的经验,缺乏正确的理论指导,政府的激励仅仅停留在表层的引导,开发商对装配式建筑的实践甚少,施工单位的施工技术不娴熟,预制构件的制造工艺不完善,消费者对装配式建筑不了解,种种因素导致装配式建筑的发展如同纸上谈兵,尚处于发展的初期阶段。然而国外的实践证明,装配式建筑迎合全球绿色发展的理念,且工期短、成本低,是未来建筑行业发展的新趋势。因此,中国迫切需要开辟装配式建筑的发展道路。通过对政府与开发商之间以及开发商与制造商之间的演化博弈分析,可以知道若要开发商积极开发装配式建筑,政府除了要进行思想上观念上的引导外,还需要采取经济激励手段,对开发商给予一定补贴。而且开发商也应配合政府的指导,积极开发装配式建筑。同时,作为供应链的中间环节,也要承担起激励制造商的重任,制造商作为供应链的最下游,应该从自身及社会利益考虑,积极配合开发商生产预制构件。

基于此,为促进装配式建筑发展提出以下几点建议:

1)从政府方面来看,作为行政工作的领导者,要充分考虑社会、生态环境、节能发展的长期效益,从思想引导和经济投入两方面双管齐下。做好思想上的指导工作,利用电子信息化平台积极宣传,倡导装配式建筑。在经济硬水平上进行激励,对开发商主动采取增加财政补贴、减少税收、减少土地出让金、降低贷款门槛等方法激励渗透,形成开发商自愿开发,制造商主动生产的氛围。

另外,政府对于市场要进行适当干预,不仅使市场发挥自动调节的功能,要利用政府手段对其干预,因为装配式建筑作为新兴事物,市场接受度较低,此时仅靠市场的力量是薄弱的。政府可以从供应端出发,给开发商定制一定的开发指标,对未完成指标的开发商进行惩罚,并且降低其后续的政策优惠。从需求端出发,积极引导消费者购买装配式建筑产品,如对购买者减少房产税、按揭买房的降低贷款利率等手段。

2)从开发商角度来看,开发商要扩大视野,积极了解装配式建筑的发展状况,汲取国外发展的优点和经验,结合中国的基本国情、政策、地理位置,开发因地制宜的装配式建筑。调查市场,迎合客户需求,开发客户满意理想的户型,建设质量优良的精品房地产。考察市场,寻求稳定的制造商,对制造商进行适当激励,合理进行成本分担,建立稳定

的供求供应链。要看到装配式建筑未来的发展前景,将企业声誉品牌效益纳入业绩考察中去。

3)从制造商角度来看,要加强标准化制造工艺,完善技术体系,进行科学制造,进而解决目前装配式建筑发展的最大障碍,即成本高昂。与此同时,加强预制构件的生产研究,改进工艺,提高质量,提升绿色度。制造商要积极响应开发商的互动行为,并进行积极的回复,以形成良好的合作关系。

参考文献

- [1] 牛松,刘玉明,董继伟.发展装配式建筑及其对建筑业供给侧结构性改革的影响分析[J].工程经济,2018,28(5):40-44.
- [2] CHANG Y, LI X D, MASANET E, et al. Unlocking the green opportunity for prefabricated buildings and construction in China[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 11(7): 259-261.
- [3] HO A, AA B. Impact of prefabrication technology on profitability using Primavera p6-science direct[J]. Materials Today, 2020, 33(1): 345-352.
- [4] ZHAI X, REED R, MILLS A. Factors impeding the offsite production of housing construction in China: an investigation of current practice[J]. Construction Management and Economics, 2014, 32(1): 40-52.
- [5] TUMMINIA G, GUARINO F, LONGO S, et al. Life cycle energy performances and environmental impacts of a prefabricated building module[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 7(8): 272-283.
- [6] YUAN F. Main obstacles to prefabricated construction: the contractor's perspective in China[J]. International Conference on Construction and Real Estate Management, 2018, 1(1): 220-224.
- [7] 康晓辉,孙金颖,金占勇,等.装配式建筑发展效率影响因素分析[J].建筑经济,2019(3):19-22.
- [8] 任瑞杰,张宁.保定市装配式建筑发展制约因素及对策研究[J].住宅产业,2019(7):13-16.
- [9] HONG J, SHEN G Q, LI Z, et al. Barriers to promoting prefabricated construction in China: a cost-benefit analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 14(4): 649-660.
- [10] 李晴,李素蕾.发展装配式建筑的问题及对策探究[J].价值工程,2019(13):47-50.
- [11] 薛红.建造成本导向下装配式建筑项目利益相关者协作机制研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- [12] GAN X, CHANG R, WEN T. Overcoming barriers to off-site construction through engaging stakeholders: a two-mode social network analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 16(4): 735-747.
- [13] 刘佳,刘伊生,施颖.基于演化博弈的绿色建筑规模化发展激励与约束机制研究[J].科技管理研究,2016,36(4):239-243,257.

[14] 王磊,高申征,李玲玉. 基于演化博弈的建筑业绿色供应链激励优化策略研究[J]. 再生资源与循环经济,2019,12(1):6-12.

[15] 凤亚红,王社良. 建筑业绿色供应链构建中的博弈分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2010,42(5):674-678.

[16] 杜宗阳. 装配式建筑发展中利益相关者的博弈分析研究[D]. 成都:西华大学,2020.

[17] 陈颖龄,林树枝,施有志. 基于博弈论的装配式建筑激励政策[J]. 土木工程与管理学报,2018,35(2):155-160,169.

[18] 金倩. 基于演化博弈的装配式建筑应用研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.

[19] 陈艳,谢运慧,柴访等. 基于演化博弈的装配式建筑发展中主体行为选择分析及仿真研究[J]. 数学的实践与认识,2020,50(20):169-182.

[20] 金占勇,邱宵慧,孙金颖,等. 基于三方博弈的装配式建筑发展经济激励研究[J]. 建筑经济,2020,41(1):22-28.

[21] OLUBUNMI OA,XIA PB,SKITMORE M. Green building incentives:a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2016,4(9):1611-1621.

[22] COHEN C,PEARLMUTTER D,SCHWARTZ M. Promoting green building in Israel: a game theory-based analysis[J]. Building and Environment,2019,13(7):1-7.

[23] LIU Y,CAI D,GUO C X,et al. Evolutionary game of government subsidy strategy for prefabricated buildings based on prospect theory[J]. Mathematical Problems in Engineering,2020,5(5):1-10.

[24] 王凯,梁建楠,张思宇. 供给侧改革下装配式建筑产业化发展困局及对策[J]. 工程管理学报,2019(5):7-12.

[25] 冯金华. 价值规律、供求关系和市场机制:基于马克思主义劳动价值论的研究[J]. 上海经济研究,2020(5):5-21,31.

[26] 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.

[27] WANG Z,ZHANG M,SUN H,et al. Effects of standardization and innovation on mass customization:an empirical investigation[J]. Technovation,2016,3(4):79-86.

[28] FRIEDMAN D. Evolutionary game in economics[J]. Econometrica,1997,59(3):637-666.

[29] 刘丛,黄卫来,杨超,等. 竞争环境下制造商激励共享供应商创新的决策研究[J]. 系统工程学报,2020,35(1):105-119.

Incentive Strategy of Prefabricated Buildings Based on Evolutionary Game Theory

WANG Fanjun¹, CHEN Defan¹, ZHAO Baoku²

(1. School of Management, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China;
2. China Railway Electrification Engineering Group Co., Ltd., Beijing 100036, China)

Abstract: In order to solve the problem of the slow development of prefabricated buildings, from the perspective of building industry chain, the behaviors of the three main bodies (the government, developers and manufacturer) in the current prefabricated building industry chain are analyzed. An evolutionary game model of "government-developers" and "developers-manufacturers" pairwise incentives are constructed, so as to obtain the optimal strategy of each main body. Through analysis, the stability and equilibrium of the game is closely related to the initial state of the system. Only when the government gives positive economic incentives, directly grants financial subsidies to developers, and developers actively cooperate with government policies to develop prefabricated buildings and share the costs of downstream manufacturers can the three parties achieve a win-win situation and promote the development of prefabricated buildings.

Keywords: prefabricated building; construction industry chain; incentive behavior; evolutionary game