

# 装配式建筑质量行为博弈研究

## ——基于施工方和预制构件厂视角

胡龙伟,黄宝伦,王雪

(青岛理工大学管理工程学院,山东 青岛 266520)

**摘要:**选取预制构件厂和施工方作为装配式建筑质量链进行研究,为提高预制构件的质量,基于微分的思想,讨论了二者在 Nash 非合作博弈、Stackelberg 主从博弈与协同合作博弈中最优质量行为以及最优收益的关系,并得到相应的结果。最后,通过对参数进行赋值,运用 Matlab 软件对3种博弈情形下的产品质量水平以及最优收益进行了比较,模拟结果表明,在协同合作博弈的情形下,双方的质量水平以及最优收益达到最大值。

**关键词:**质量链;微分方程;博弈理论;装配式建筑;质量管理

**中图分类号:**F283;F224.32

**文献标志码:**A

对于装配式建筑而言,质量是根,是其他管理活动的基础。装配式建筑与传统建筑最大的不同在于,预制构件的制作须在工厂进行,然后运送至现场进行组装,质量涉及因素多、范围广。因此,预制构件以及构件施工的质量是影响装配式建筑整体质量的关键。在这样的背景下,对预制构件厂与施工方所组成的质量链进行质量管理,对双方企业都尤为重要。

基于此视角,为进一步提高预制构件的质量,笔者以预制构件厂和施工方所组成的二级质量链为研究对象,运用微分博弈的思想,研究其在不同博弈情形下的最优质量管理行为及最优收益,最终提升装配式建筑的整体质量。

通过查阅与分析,发现将质量链这一概念运用到建筑工程项目的相关文献研究大多围绕质量协同以及优化等开展。黄莹等<sup>[1]</sup>

基于质量链和协同管理理论,通过构建“动态战略联盟”实现组织协同,为建设单位提供了完整的建设工程项目质量链运行模型;乌云娜等<sup>[2]</sup>从质量链管理视角出发,并结合层级协同优化理论研究了大型复杂项目多个参建方的质量管理问题;黄恒振<sup>[3]</sup>从装配式建筑质量形成的独特性入手,提出装配式建筑质量链的概念和结构,构建了装配式建筑质量链管理模型,设计了典型质量链管理流程。

而与装配式建筑相关的博弈研究多集中在激励政策上。王志强等<sup>[4]</sup>在自然人有限理性观点的基础上,就地方政府补贴策略对建设单位应用策略的影响构建了演化博弈分析模型,并对双方的稳定状态和选择策略进行了分析;杨益晟等<sup>[5]</sup>基于质量链管理理论和博弈理论,构建了工程建设项目静态和动态博弈模型,建立和求解具有承包商质量制

约特性的参建方博弈模型,对模型结果进行了深入分析;齐宝库等<sup>[6]</sup>基于装配式建筑成本高、推广使用困难的特点,提出装配式建筑政府补偿机制,为政府设定合理的补偿机制提供了依据;康骁<sup>[7]</sup>从政府和开发商的角度构建了演化博弈模型,结果表明政府应当制定相应的激励政策。

综上所述,与现有对质量链的质量协同研究不同的是,笔者注重突出两个特点:一是将装配式建筑作为研究对象,将装配式建筑质量链中的施工方和预制构件厂抽出,单独分析其质量协调机制,使分析更为精细化;二是对预制构件厂和施工方二者在 Nash 非合作博弈、Stackelberg 主从博弈以及协同合作博弈<sup>[8]</sup>3种不同得情形下的质量管理策略进行深入研究,探讨双方如何建立最优的质量管理协调机制,从而提高装配式建筑的整体质量。

## 一、质量链描述与研究假设

### 1. 质量链描述

从宏观角度,装配式建筑的质量链管理可分解为设计链、生产链、施工链以及装配链等方面的管理。考虑装配式建筑参与方的多维性与代表性以及现有研究的不足,笔者选取装配式建筑质量链中的预制构件厂和施工方来讨论其之间的质量行为关系。基于以上分析,笔者为研究装配式建筑中预制构件厂与施工方之间的质量管理行为协调机制,参考相关文献对宏观质量链的研究,构建了一个由预制构件厂和施工方组成的二级质量链系统(见图1)。

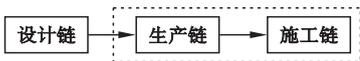


图1 装配式建筑质量链

笔者仅考虑由1个预制构件厂和1个施工方所构成的二级质量链系统。预制构件厂一方在对原材料进行加工之前应先对其进行检验,再进行加工生产,最后将加工预制成型的构件运送至施工现场;而施工企业一方则在施工现场对预制构件进行与非预制部分的

浇筑。基于上述分析,笔者做出基本假设。

### 2. 研究假设

假设1:预制构件厂和施工方的目标都是追求自身的最大利益,且双方之间的博弈属于完全信息的博弈关系。

假设2:预制构件厂提供的预制构件如果无法达到施工方的质量要求,那么施工企业应当进行拒收处理。因此,装配式建筑在此阶段的质量水平很大程度上取决于预制构件厂和施工方的质量行为协调程度,且随时间而动态变化。参考夏兆敏等<sup>[9]</sup>的研究思想,可以利用微分方程对质量的动态变化规律进行描述

$$Q(t) = \alpha x(t) + \beta y(t) - \mu Q(t) \quad (1)$$

式中: $t$ 为时间, $Q(t)$ 为某一时刻装配式建筑的质量,装配式建筑质量的初始值为 $Q(0)$ ;  $x(t)$ 、 $y(t)$ 分别为预制构件厂和施工方对于质量管理所作努力的程度; $\alpha$ 、 $\beta$ 为预制构件厂和施工方的质量行为对于装配式建筑的质量影响系数; $\mu$ 为由于技术落后等原因所造成的质量链质量的衰减系数, $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\mu$ 都大于零。

假设3:预制构件厂和施工方的质量管理成本函数均为关于各自质量管理程度的二次函数,即质量管理成本与质量管理程度成正比,因此,其成本函数分别为

$$C_1(t) = \frac{1}{2}ax^2(t) \quad (2)$$

$$C_2(t) = \frac{1}{2}by^2(t) \quad (3)$$

式中: $a$ 、 $b$ 分别为预制构件厂和施工方的质量行为系数; $C_1(t)$ 、 $C_2(t)$ 分别为预制构件厂和施工方的成本函数。

假设4:借鉴洪江涛等<sup>[10]</sup>关于产品质量与收益关系的假设,假设装配式建筑二级质量链的收益是装配式建筑质量的线性函数

$$\pi(t) = \eta Q(t) + \omega \quad (4)$$

式中: $\pi(t)$ 为质量链的收益; $\eta$ 为构件质量对整体收益的影响程度; $\omega$ 为常数。

假设5:预制构件厂和施工方按照一定的比例对二级质量链上的总收益进行分配,并假设预制构件厂和施工方具有相同的贴现

率  $\gamma$ , 预制构件厂获得的收益为  $P_1$ , 而施工方获得的收益则为  $P_2$ 。同时, 施工方对预制构件厂所进行的成本分担系数为  $\xi, \xi \in [0, 1]$ 。

## 二、博弈模型的构建与分析

### 1. Nash 非合作博弈

在该博弈过程中, 预制构件厂和施工方均为独立个体, 为达到自身利益最大化而独立决定自己在质量管理中的行为, 此时作为理性的决策人, 施工方不分担预制构件厂的成本, 即  $\xi = 0$ 。预制构件厂和施工方的质量行为决策的目标函数分别为

$$G(x) = \int_0^\infty e^{-\gamma t} [P_1(\omega + \eta Q(t)) - \frac{1}{2}ax^2(t)] dt \quad (5)$$

$$G(y) = \int_0^\infty e^{-\gamma t} [P_2(\omega + \eta Q(t)) - \frac{1}{2}by^2(t)] dt \quad (6)$$

由静态的纳什均衡条件可知, 预制构件厂和施工方的最优值函数  $V_s$  和  $V_h$  需满足哈密顿 - 雅可比 - 贝尔曼方程 (The Hamilton Jacobian Behrman Equation, HJB)。

$$\gamma V_s = \max_x [P_1(\omega + \eta Q) - \frac{1}{2}ax^2 + V'_s(\alpha x + \beta y - \mu Q)] \quad (7)$$

$$\gamma V_h = \max_y [P_2(\omega + \eta Q) - \frac{1}{2}by^2 + V'_h(\alpha x + \beta y - \mu Q)] \quad (8)$$

运用 HJB 方程并结合式(4)、式(7)和式(8)可得 Nash 非合作博弈过程中预制构件厂与施工方的最优质量管理行为, 分别为

$$x^* = \frac{P_1\alpha\eta}{a(\gamma + \mu)} \quad (9)$$

$$y^* = \frac{P_2\beta\eta}{b(\gamma + \mu)} \quad (10)$$

由式(4)、式(7) ~ 式(10)可得 Nash 非合作博弈过程中预制构件厂、施工方以及二级质量链的最优收益函数关系, 分别为

$$V_s^* = Q \left[ \frac{P_1\eta}{\gamma + \mu} \right] + \frac{1}{\gamma} \left[ P_1\omega + \frac{(P_1\alpha\eta)^2}{2a(\gamma + \mu)^2} + \frac{P_1P_2\beta^2\eta^2}{b(\gamma + \mu)^2} \right] \quad (11)$$

$$V_h^* = Q \left[ \frac{P_2\eta}{(\gamma + \mu)} \right] + \frac{1}{\gamma} \left[ P_2\omega + \frac{(P_2\beta\eta)^2}{2b(\gamma + \mu)^2} + \frac{P_1P_2(\alpha\eta)^2}{a(\gamma + \mu)^2} \right] \quad (12)$$

$$V^* = Q \left[ \frac{\eta}{(\gamma + \mu)} \right] + \frac{1}{\gamma} \left[ \omega + \frac{\alpha^2\eta^2P_1(1 + P_2)}{2a(\gamma + \mu)^2} + \frac{P_1\beta^2\eta^2}{2b(\gamma + \mu)^2} \right] \quad (13)$$

### 2. Stackelberg 主从博弈

在 Stackelberg 主从博弈情形下, 施工方作为领导者, 预制构件厂作为跟随者。施工方由于更为重视预制构件厂所提供预制构件的质量, 因此, 对预制构件厂所付出的质量管理成本提供一定的补贴, 即确定成本分担比例, 而预制构件厂在看到施工方的决策后, 再进一步决定自己在质量管理以及质量改进工作上的努力程度。

预制构件厂的目标函数为

$$G(x) = \int_0^\infty e^{-\gamma t} [P_1(\omega + \eta Q(t)) - \frac{1}{2}(1 - \xi)ax^2(t)] dt \quad (14)$$

施工方则根据预制构件厂所做出的决策, 本着自身利益最大化的原则来确定其自身的质量行为

$$G(y) = \int_0^\infty e^{-\gamma t} [P_2(\omega + \eta Q(t)) - \frac{1}{2}by^2(t) - \frac{1}{2}\xi a(x^*)^2(t)] dt \quad (15)$$

运用 HJB 方程并结合式(4)、式(14)和式(15)可得 Stackelberg 主从博弈过程中预制构件厂与施工方的最优质量管理行为, 分别为

$$x^{**} = \frac{\alpha\eta(1 + P_2)}{2a(\gamma + \mu)} \quad (16)$$

$$y^{**} = \frac{P_2\beta\eta}{b(\gamma + \mu)} \quad (17)$$

$$\xi^{**} = \begin{cases} \frac{2 - 3P_1}{1 + P_2} & 0 < P_1 < 2/3 \\ 0 & 2/3 \leq P_1 \leq 1 \end{cases} \quad (18)$$

由式(4)、式(14) ~ 式(18)可得 Stackelberg 主从博弈过程中预制构件厂、施工方以及二级质量链的最优收益函数关系, 分别为

$$V^{**}_s = Q \left( \frac{P_1 \eta}{\gamma + \mu} \right) + \left\{ \frac{1}{\gamma} [ P_1 \omega + \frac{1}{2a} \frac{(P_1 \alpha \eta)^2}{(\gamma + \mu)^2} + \frac{1}{8b} \frac{[P_2 \eta \beta]^2}{(\gamma + \mu)^2} ] \right\} \quad (19)$$

$$V^{**}_h = Q \left( \frac{\eta P_2}{\gamma + \mu} \right) + \left\{ \frac{1}{\gamma} [ P_1 \omega + \frac{P_1 P_2}{a} \frac{(\alpha \eta)^2}{(\gamma + \mu)^2} + \frac{1}{4b} \frac{[P_2 \eta \beta]^2}{(\gamma + \mu)^2} ] \right\} \quad (20)$$

$$V^{**} = Q \left( \frac{\eta}{\gamma + \mu} \right) + \left\{ \frac{1}{\gamma} [ \omega + \frac{P_1}{2a} \frac{\alpha^2 \eta^2 (1 + P_2)}{(\gamma + \mu)^2} + \frac{\eta^2 \beta^2 (3 + 3P_1^2 - 2P_1)}{8b(\gamma + \mu)^2} ] \right\} \quad (21)$$

### 3. 协同合作博弈

协同合作博弈是一种理想的博弈情形,在该种情形下,施工方和预制构件厂从装配式建筑整体的质量出发,本着整体收益最大化的原则,进行协同合作的质量管理博弈。受篇幅影响,仅给出预制构件厂和施工方的最优质量管理行为以及最优收益的函数关系。

预制构件厂和施工方的最优质量行为分别为

$$x^{***} = \frac{\alpha}{a} \frac{\eta}{\gamma + \mu} \quad (22)$$

$$y^{***} = \frac{\beta}{b} \frac{\eta}{\gamma + \mu} \quad (23)$$

同理可得协同合作博弈过程中二级质量链的最优收益函数关系

$$V^{***} = Q \frac{\eta}{\gamma + \mu} + \frac{1}{\gamma} \left[ \omega + \frac{1}{2a} \frac{\eta^2 \alpha^2}{(\gamma + \mu)^2} + \frac{1}{2b} \frac{\eta^2 \beta^2}{(\gamma + \mu)^2} \right] \quad (24)$$

### 4. 比较分析

由式(9)、式(10)、式(16)和式(17)进行比较可得

$$x^{**} - x^* = \begin{cases} \frac{\alpha \eta (2 - 3P_1)}{2a(\gamma + \mu)} > 0, P_1 \in (0, 2/3) \\ \frac{\alpha \eta (2 - 3P_1)}{2a(\gamma + \mu)} < 0, P_1 \in [2/3, 1] \end{cases} \quad (25)$$

$$y^{**} - y^* = \frac{P_2 \beta \eta}{b(\gamma + \mu)} - \frac{P_2 \beta \eta}{b(\gamma + \mu)} = 0 \quad (26)$$

由式(9)、式(16)和式(22)进行比较可得

$$x^{***} - x^{**} = \frac{\alpha}{a} \frac{\eta}{\gamma + \mu} - \frac{\alpha \eta (1 + P_2)}{2a(\gamma + \mu)} > 0 \quad (27)$$

$$x^{***} - x^* = \frac{\alpha}{a} \frac{\eta}{\gamma + \mu} - \frac{P_1 \alpha \eta}{a(\gamma + \mu)} = \frac{P_2 \alpha \eta}{a(\gamma + \mu)} > 0 \quad (28)$$

由式(10)、式(17)和式(23)进行比较可得

$$y^{***} - y^{**} = y^{***} - y^* = \frac{\beta}{b} \frac{\eta}{\gamma + \mu} - \frac{P_2 \beta \eta}{b(\gamma + \mu)} = \frac{\beta P_1 \eta}{b \gamma + \mu} > 0 \quad (29)$$

对于施工方而言,在 Nash 非合作博弈以及 Stackelberg 主从博弈中的质量管理协调方面所做出的努力程度相同;而在协同合作博弈下,在质量管理协调方面所做出的努力程度优于非合作博弈情形。

对于预制构件厂而言,若质量链的收益分配系数  $P_1$  的取值在  $(0, 2/3)$  时,施工方将会对其进行成本分担,那么在 Stackelberg 主从博弈中要比在 Nash 非合作博弈中有更优的质量行为。

由式(13)、式(21)和式(24)进行比较可得

$$V^{***} - V^* = \frac{1}{\gamma} \left[ \frac{\alpha^2 \eta^2 P_2^2}{2a(\gamma + \mu)^2} + \frac{\eta^2 \beta^2 P_1 (1 + P_2)}{2b(\gamma + \mu)^2} \right] > 0 \quad (30)$$

$$V^{***} - V^{**} = \frac{1}{\gamma} \left[ \frac{\alpha^2 \eta^2 P_2^2}{2a(\gamma + \mu)^2} - \frac{3P_1^2 \eta^2 \beta^2}{2b(\gamma + \mu)} + \frac{\eta^2 \beta^2 (2P_1 + 1)}{2b(\gamma + \mu)} \right] > 0 \quad (31)$$

可以看出,在协同合作博弈过程中,由预制构件厂和施工方所构成的质量链整体收益要高于 Nash 非合作博弈以及 Stackelberg 主从博弈。

### 三、产品质量和最优收益的模拟仿真

为更为直观地看出3种不同博弈过程中预制构件厂和施工方的质量管理行为以及收益,笔者调查了青岛市某一在建装配式建筑中预制构件厂与施工方的实际情况,并依据调查结果对参数值进行假设。参数的取值为: $\gamma = 0.15, a = 0.30, b = 0.60, Q(0) = 2.00, \alpha = 0.20, \beta = 0.40, \mu = 0.10, \omega = 0.60,$

$\eta = 0.30, P_1 = 0.40, P_2 = 0.60$ , 将参数值代入3种博弈过程, 通过计算可得预制构件厂和施工方在3种博弈情形中的纳什均衡值(见表1)。

表1 不同博弈情形下的纳什均衡值

博弈情形	$x$	$y$	$Q$	$V$
Nash 非合作博弈	0.32	0.48	$2.56 - 0.56e^{-0.1t}$	$1.2Q + 4.87$
Stackelberg 主从博弈	0.64	0.48	$3.20 - 1.2e^{-0.1t}$	$1.2Q + 5.54$
协同合作博弈	0.80	0.80	$4.80 - 2.8e^{-0.1t}$	$1.2Q + 5.92$

由表1可知, 对于两方的质量行为而言,  $x^* < x^{**} < x^{***}, y^* = y^{**} < y^{***}$ , 此结果与比较分析相契合; 对于收益而言,  $V^{***} > V^{**}, V^{***} > V^*$ , 同样与比较分析中的结果相符。基于数据分析, 运用 Matlab 软件描述产品质量的变化趋势以及质量链整体的收益水平(见图2、图3)。

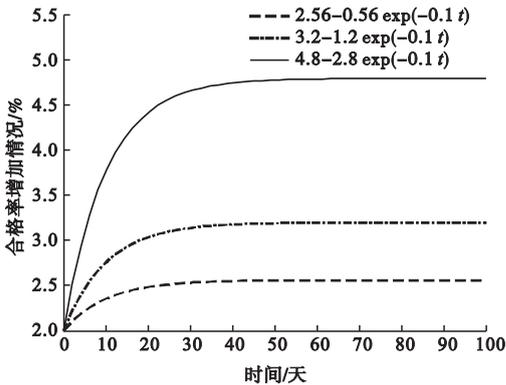


图2 3种博弈情形下的产品质量水平变化趋势

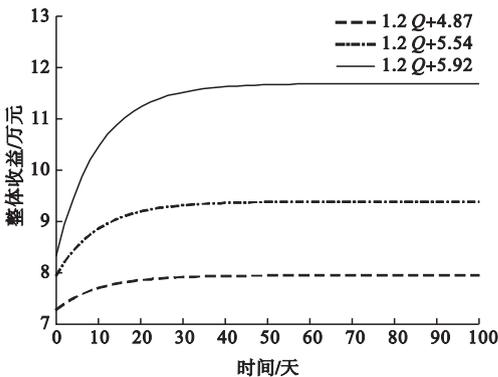


图3 3种博弈情形下的整体收益变化趋势

## 四、结果分析

就图2中产品质量水平变化趋势而言, 3种博弈情形下的产品质量一方面随时间的推进而提高; 另一方面, 随着双方质量管理工作的进行, 产品质量提高的幅度逐渐降低, 3种博弈情形下的产品质量无限趋近于各自所对应的最优值, 且在协同合作博弈的情况下达到最优。由图3可以看出, 在协同合作的博弈情形下, 质量链的整体收益均优于 Nash 非合作博弈以及 Stackelberg 主从博弈, 即质量链的整体收益在协同合作博弈的情形下达到最优, 契合比较分析中的结论。

笔者针对由预制构件厂和施工方所组成的二级质量链质量管理协调行为进行了探讨, 得到了如下结论。

(1) 在非协同合作模式下, 施工方通过分担预制构件厂的质量管理成本来改善其质量管理行为。所以分担的比例越高, 预制构件厂质量管理行为的改善强度越大, 产品的质量越好。

(2) 在协同合作模式下, 预制构件厂和施工方为最大化质量链的整体收益, 双方均采用科学有效的收益分配方案进行质量管理决策, 以保证在质量链整体收益提高的同时, 质量链中的各参与方都能增加收益。因而, 质量链双方采取协同合作的方式是质量链发展的最优形式。但是, 该种博弈作为一种理想化的博弈情形, 应当由非合作博弈过渡而实现, 其过渡的关键双方通过协商的方式来确定合理的收益分配系数, 这样有利于增强双方合作意识, 逐步朝着理想化的方向前进。

## 五、结语

研究不同的博弈情形下的产品质量和收益对于预制构件厂和施工方的质量管理协调具有重要的意义。当博弈双方意识到在协同合作的情形下才能取得最优的产品质量以及最优收益时, 预制构件厂会与施工方在施工的各环节逐步形成更为信任的合作关系, 各环节的衔接将更为紧密, 最终使装配式

建筑整体施工质量得到提升。

为使预制构件厂能够在构件的生产、运输以及协同施工等方面采取更为积极的质量管理措施,施工方作为该二级质量链的核心企业,可以对预制构件厂进行的质量管理以及质量改进提供合理的成本分担,以此来提高预制构件厂对质量管理活动的积极性,如根据构件在现场施工的精准度来给予预制构件厂一定的奖励,即间接成本分担。施工方通过确定相应的成本分担系数,针对预制构件厂内部进行的质量管理以改善质量管理行为的成本进行直接分担。除双方所签订的合同外,通过以上措施一方面可以进一步提高预制构件厂的构件生产质量,另一方面还可以提高其工作效率,可以看出这不仅能提高装配式建筑整体的质量,也可以在缩短工期方面起到积极的作用。

在后续的研究中,可以引入设计方或者业主方,构建装配式建筑三级质量链,进而研究在三级装配式建筑质量链的情形下各方质量管理协调问题。

#### 参考文献:

[1] 黄莹,周福新,李清立. 基于质量链的建设工

项目质量协同管理研究[J]. 工程管理学报,2016(4):116-120.

[2] 乌云娜,杨益晟,冯天天. 大型复杂项目宏观质量链构建及协同优化研究[J]. 软科学,2013(7):1-7.

[3] 黄恒振. 装配式建筑质量链管理研究[J]. 建筑经济,2019(9):90-94.

[4] 王志强,张樵民,有维宝. 装配式建筑政府激励策略的演化博弈与仿真研究:基于政府补贴视角下[J]. 系统工程,2019(3):151-158.

[5] 杨益晟,乌云娜. 大型复杂项目质量链视角下参建方博弈研究[J]. 建筑经济,2015(1):122-125.

[6] 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(8):835-837.

[7] 康骁. 基于演化博弈的中国住宅产业化激励政策研究[D]. 北京:北京交通大学,2018.

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

[9] 夏兆敏,孙世民. 基于微分博弈的二级猪肉供应链质量行为协调机制研究[J]. 运筹与管理,2014(2):198-205.

[10] 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(2):100-107.

## Game Study of Quality Behavior in Prefabricated Building Based on the Perspectives of Construction Side and Prefabricated Component Factory

HU Longwei, HUANG Baolun, WANG Xue

(School of Management Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

**Abstract:** In order to improve the quality of prefabricated components, the prefabricated component factory and the construction side are selected for research as the quality chain of the prefabricated components; and based on the idea of differentiation, the relationship between the best quality behavior and the best profit of the two sides is discussed and concluded in Nash non-cooperative game, Stackelberg master-slave game and cooperative game. Finally, the product quality level and the optimal income under the three games are compared by assigning the parameters and using Matlab software. The simulation results show that the quality level and the optimal income of the two sides reach the maximal value under the cooperative game.

**Key words:** quality chain; differential equation; game theory; prefabricated building; quality management

(责任编辑:郝雪 英文审校:林昊)