

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201906025



多智能体仿真的装配式项目 风险对策选择

汪鑫^{1,2}, 杜娟^{1,2}, 景恒青^{1,2}

(1. 上海大学 悉尼工商学院, 上海 201800;
2. 上海大学 上海城建集团建筑产业化研究中心, 上海 200072)

摘要: 从动态、系统的角度探究装配式建筑项目的风险对策选择问题. 梳理装配式建筑项目中主要的风险问题, 并建立基于多智能体仿真(MAS)技术的风险控制机制. 采用 MAS 技术构建风险对策选择模型, 建立了 Agent 间的交互关系及参数设置. 选取实际案例中的风险对策代入模型, 仿真结果验证了模型的可行性. 研究表明: 该模型从动态的角度考虑装配式建筑项目的风险, 更加贴合实际情境, 且能够准确地衡量不同风险对策的实施对项目目标的影响, 有利于合理选择风险对策.

关键词: 装配式建筑; 多智能体仿真; 风险对策; 风险控制

中图分类号: TU 712.1; F 284 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2020)02-0199-09

Multi-Agent Simulation Based on Selection of Risk Strategy for Prefabricated Construction Projects

WANG Xin^{1,2}, DU Juan^{1,2}, JING Hengqing^{1,2}

(1. SHU-UTS SILC Business School, Shanghai University, Shanghai 201800, China;
2. SHU-SUCG Research Center, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: The selection of risk strategies for prefabricated construction projects was explored from dynamic and systematic perspectives. Through reviewing major risks in prefabricated construction projects, multi-agent simulation (MAS) based on risk control mechanism was designed. The model of selecting risk strategies was established, including the interaction relationship between agents, and the parameters. The feasibility of model was verified by inputting risk strategies in actual cases into the model. The simulation results show that the model can consider actual risks of prefabricated construction projects from dynamic perspectives, which is more suitable for actual situation. The model can accurately measure the impact of different risk strategies on project objectives, which is conducive to select risk strategies reasonably.

Keywords: prefabricated construction; multi-agent simulation; risk strategy; risk control

装配式建筑(prefabricated construction, 简称 PC)在质量、效率和环保方面具有潜在优势, 已在城市住宅和交通设施等领域得到广泛的应用. 与传统浇筑工程相比, PC 项目包括设计、构件生产、运输、装配等多个阶段, 其各参与方主体之间呈现出交互性、动态性和复杂性的特点, 并且在整体项目执行中面临着诸多风险问题^[1], 项目风险控制的难度较大. 尤其是在项目执行过程中, 风险应对与控制需要在相对动态的环境中进行, 对应对策略的选择提出了新的需求. PC 项目的风险控制主要包括风险识别、风

收稿日期: 2019-06-21

通信作者: 杜娟(1981-), 女, 讲师, 博士, 主要从事装配式建筑产业链协同与控制的研究. E-mail: ritadu@shu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71701121); 教育部人文社科基金资助项目(17YJC630021)

险评估、风险应对 3 个阶段.

当前,已有不少学者针对风险的识别和评估进行了探究^[2-5],但涉及风险应对的研究相对匮乏. 风险应对旨在以尽可能低的成本获得尽可能高的风险应对收益^[6],针对风险对策进行科学合理的选择,兼具理论和现实意义. 风险对策的选择可通过专家经验、案例借鉴等方法实现^[7-8]. 此外,也有不少学者通过定量分析开展研究,如风险分类矩阵、权衡法、工作分解结构(WBS),以及优化模型法^[9-16]等. 上述方法从不同的视角为风险对策的选择做出了重要贡献,也存在不少局限性. 如风险分类矩阵和权衡法只能考虑两个评估标准;专家经验法、案例借鉴法和 WBS 缺乏更精确的求解;优化模型法大多假设风险之间是相互独立的,忽略了现实情境中风险之间的关联. 因此,有必要开发一种新的方法来选择风险对策. 与传统的风险管理工具相比,多智能体自主性、协作性和学习性的特点^[17]更符合 PC 风险的特征. 鉴于此,本文将从动态的视角考虑 PC 项目的风险,利用多智能体仿真(multi-agent simulation, MAS)选择风险对策;然后,选取实例项目进行仿真分析,展示模型的应用并验证模型的有效性.

1 PC 项目风险控制

1.1 PC 项目执行过程中的风险分析

PC 项目执行过程从设计、生产、运输到安装、验收的不同阶段包含多种风险问题. 文中通过文献调研^[2-5,11],以 PC 项目流程为视角,总结出发生概率较高的 12 种风险事件,以及触发这些风险事件的 21 种潜在风险因素,如图 1 所示. 例如,在构件安装阶段,“恶劣的天气”与“缺乏熟练、有经验的装配工人”等潜在的风险因素,在一定条件下可能会触发“吊装操作失误”这一风险事件.

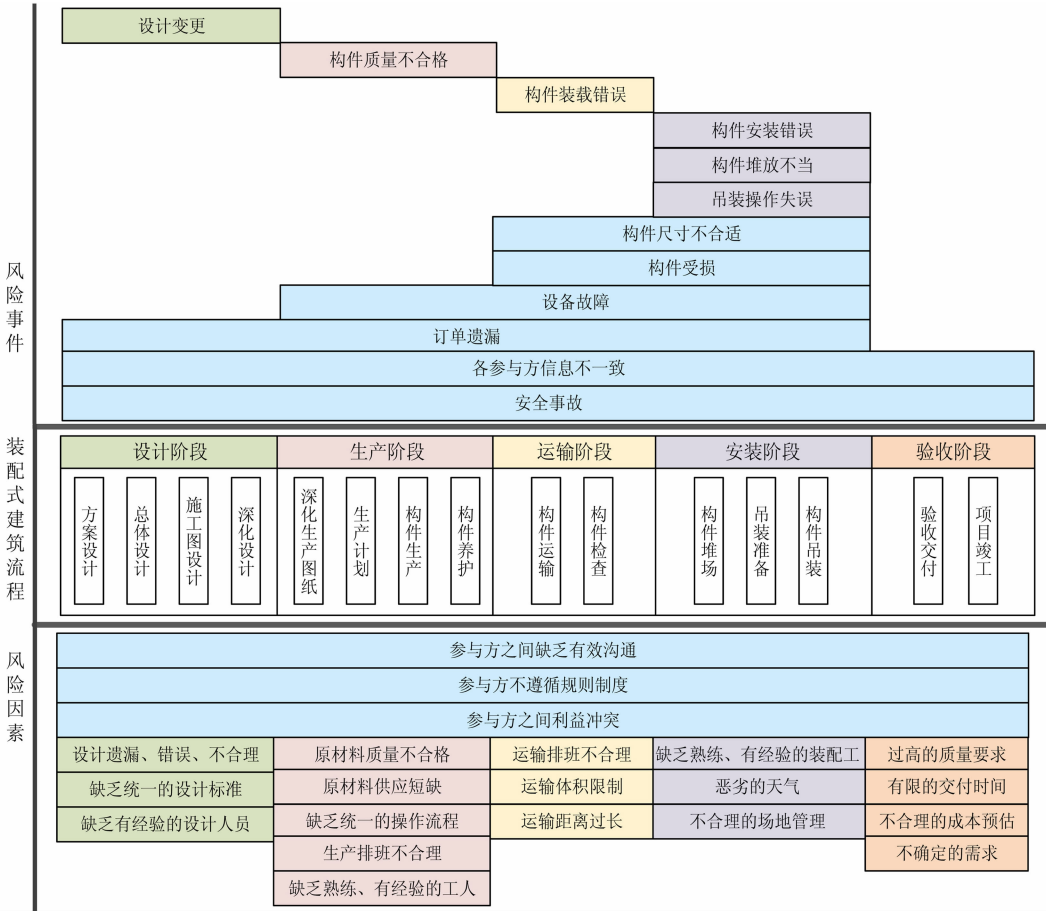


图 1 PC 项目执行过程中的风险事件及风险因素

Fig. 1 Risk events and factors of PC projects in progress

1.2 基于 MAS 的 PC 项目风险控制机制

围绕 PC 项目的风险对策制定、选择与实施,文中提出了基于 MAS 的风险控制机制,如图 2 所示. 针对风险控制中的风险识别和风险评估,已有大量研究涉及,不再赘述,将重点关注风险应对.

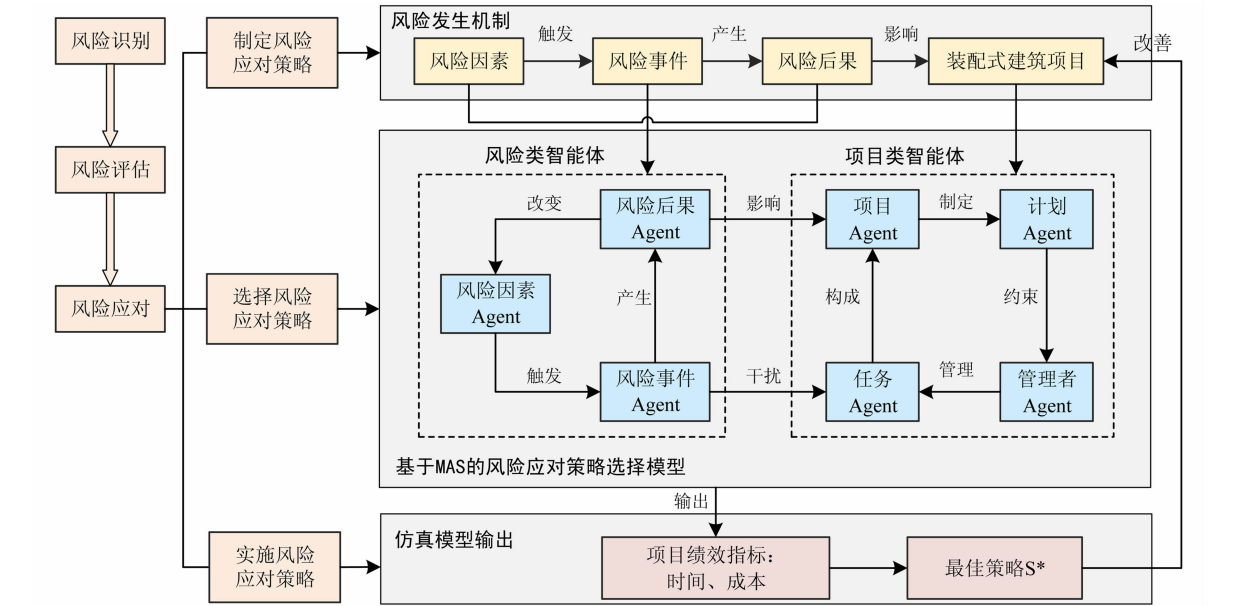


图 2 PC 项目中的风险控制机制

Fig. 2 Risk control mechanism of PC projects

- 1) 制定风险对策. 风险因素源于项目的某个变量值超出阈值,它在一定条件下触发风险事件,进而引起风险后果、改变项目的变量值,最终影响项目目标的实现.项目实施过程中发生风险时,基于风险发生机制,管理者根据已发生的风险事件所相关的风险因素制定风险对策.
- 2) 选择风险对策.将利用 MAS 构建风险对策选择模型.基于风险发生机制,构建风险类 Agent 及与项目运行有关的 Agent.这些 Agent 之间进行交互,模拟 PC 项目的运行.风险对策被映射为相关变量值的改变,将调整过后的变量值输入模型中,模拟策略的实施.
- 3) 实施风险对策.仿真结束后,模型输出项目绩效指标值.不同的风险对策代入模型中输出的指标值不同,通过比较这些数值得到最佳策略 S^* . S^* 的实施可以有针对性地调整风险因素起源的实体的变量值,从而实现风险控制.

2 基于 MAS 的 PC 项目风险对策选择模型

2.1 Agent 及变量描述

在风险对策选择模型中,PC 项目涉及的实体将被映射为 Agent,将每个实体的特征抽象为 Agent 中的变量.如表 1 所示.该模型包含如下 7 类 Agent:1) 项目 Agent,统筹整个项目的执行情况;2) 任务 Agent,描述了任务的执行情况;3) 计划 Agent,包含任务的约束条件;4) 管理者 Agent,包含管理者的偏好指标;5) 风险因素 Agent;6) 风险事件 Agent;7) 风险后果 Agent.后三类 Agent 的设计将用于风

表 1 PC 项目中的 Agents 及其变量

Tab. 1 Agents and variables of PC projects

Agent 类型	变量	描述	数据类型
项目 Agent	STa	任务集合	{任务 ID}
	T_p	项目消耗的时间	整数
	T_M	项目消耗的资金	浮点型
任务 Agent	Pri	任务优先级	浮点型[0,1]
	Pr	任务进度	浮点型[0,1]
	PrTa	前置任务	{任务 ID}
	R_i	分配的人力资源	整数
	M_d	每天分配的资金	浮点型
	T_s	任务消耗的时间	整数
	S	任务状态	{可执行,已完成}

续表

Continue table

Agent 类型	变量	描述	数据类型
计划 Agent	R_{\min}, R_{\max}	人力资源的最小、最大需求量	整数
	T_D	任务的规定完成时间	整数
	M	任务的所需资金量	浮点型
管理者 Agent	I_c	成本偏好	浮点型[0,1]
	I_p	生产率偏好	浮点型[0,1]
	I_q	质量偏好	浮点型[0,1]
风险因素 Agent	RE	触发的风险事件	{风险事件 ID}
	T_h	风险因素起源的变量阈值	浮点型
	Sig	风险因素对事件影响的正负性	{-1,1}
	Val	风险因素对事件的影响	浮点型[0,1]
风险事件 Agent	I_e	风险事件对项目的影响	浮点型[0,1]
	P	风险事件发生的概率	浮点型[0,1]
	P_e	风险事件发生的初始概率	浮点型[0,1]
风险后果 Agent	δ	风险对项目产生的综合影响	浮点型[-1,1]

险交互过程的仿真.

2.2 模型构建

除设计 Agent 外,还需对 Agent 的个体决策和交互行为进行建模. 在仿真过程中,每项任务的完成都需要 Agent 相互协作,执行下述 7 个步骤. 模型运行流程,如图 3 所示. 图 3 说明了每天的工作流程,以及每个步骤的输入和输出变量.

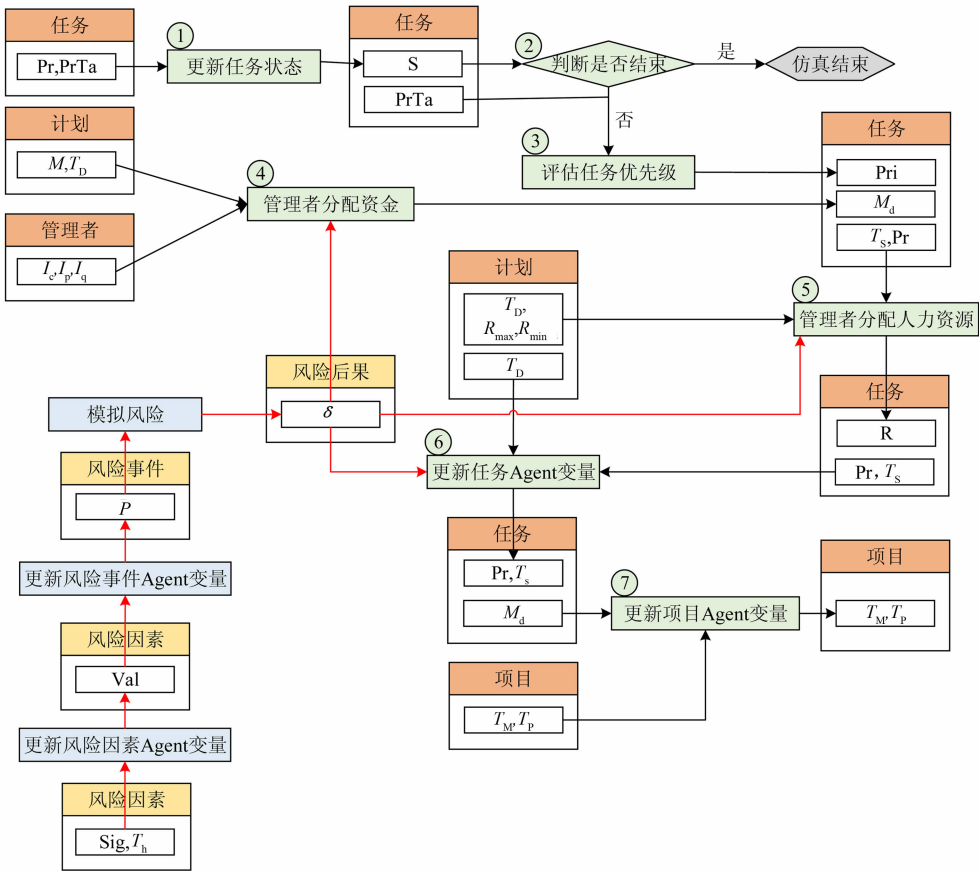


图 3 模型运行流程

Fig. 3 Flowchart of model process

1) 更新任务状态. 更新任务 Agent 中状态 S 的属性值,判断该任务是否可执行. 当任务进度 Pr 为 1 时,表示该任务已完成(finished);任务进度 Pr 不等于 1,且任务的前置任务 PrTa 已完成,则该任务处

于可执行的状态(executable), 即

$$\left. \begin{aligned} &\text{If } Pr = 1 \Rightarrow S = \text{finished}, \\ &\text{If } Pr \neq 1 \text{ and Task} \in \{PrTa\} \Rightarrow S = \text{executable}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

2) 判断是否结束. 检查该项目包含的所有任务 Agent 的状态 S , 若所有任务的 S 均为“finished”, 则项目完成, 一次仿真结束; 否则, 仿真继续. 即

$$\left. \begin{aligned} &\text{If } \forall \text{ Task } S(\text{Task}) = \text{finished} \Rightarrow \text{simulation ends}, \\ &\text{or else} \Rightarrow \text{simulation continues}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

3) 评估任务优先级. 依据关键路径法计算各项任务优先级 Pri , 以决定各任务完成的先后顺序. 关键路径上的任务优先级最高, 非关键路径上的任务则可延迟. Pri 取决于最晚开始时间与最早开始时间之间的差值 D . 即

$$Pri = 1 - D/\max(1, D_m). \quad (3)$$

式(3)中: D_m 是中间变量, 表示所有可执行任务的 D 中的最大值.

4) 管理者分配资金. 管理者每天为某任务所分配的资金 M_d 取决于该任务所需的资金量(M)和任务的规定完成时间(T_D). 由于管理者需要结合主观偏好和现实情境在项目各环节之间权衡资金的调度. 因此, 引入修正系数, 对资金的分配略作调整. 即

$$M_d = \frac{M}{T_D}(1 + K_c + K_p + K_q + K_r). \quad (4)$$

式(4)中: K_c, K_p, K_q 均是中间变量, 分别表示管理者为节约成本、缩短工期、提高质量而产生的修正系数. K_c, K_p, K_q 的计算为

$$K_c = 1/3 - I_c, \quad K_p = I_p - 1/3, \quad K_q = I_q - 1/3. \quad (5)$$

式(5)中: I_c, I_p, I_q 分别代表管理者的成本偏好、生产率偏好、质量偏好, $I_c + I_p + I_q = 1$. 管理者对于成本、生产率、质量的偏好程度相同时, 那么 $I_c = I_p = I_q = 1/3$, 无需调整资金量; 若管理者对成本偏好程度较高, 成本修正系数 $K_c < 0$, 资金 M_d 也因此减少. K_p, K_q 的计算同理. 此外, 当风险事件发生时, 管理者需要考虑风险后果 δ , 利用 $K_r = \delta$ 对资金分配量进行调整.

5) 管理者分配人力资源. 分配资金后, 管理者还需分配任务所需的人力资源 R , 即

$$\forall i \in \{r, c\}, \quad R = \text{INT}\{\theta \cdot R_{\max} + (1 - \theta) \cdot R_{\min}\}. \quad (6)$$

$$\theta = (\max(\min(1, \frac{T_s}{T_D} - Pr + \delta), 0)). \quad (7)$$

式(6), (7)中: $\text{INT}()$ 是取整函数; R_{\max}, R_{\min} 是完成该项任务所需的人力资源的最大、最小量; 系数 θ 是中间变量, θ 的大小取决于任务实际消耗的时间(T_s)、任务的规定完成时间(T_D)、任务的完成进度(Pr)和风险后果(δ).

6) 更新任务 Agent 变量. 任务 Agent 每天都要更新其当前进展 Pr . 该任务每天取得的进展 PrD 累计加总即为该任务的 Pr . 其中, PrD 的大小取决于任务规定的完成时间 T_D . 此外, 考虑风险后果 δ , 每日进展 PrD 将会减少. Pr 的计算公式为

$$Pr = \min(1, \max(0, Pr + PrD)), \quad PrD = (1 - \delta)/T_D. \quad (8)$$

每天结束后, 还需更新该任务消耗的时间 T_s , 即 $T_s = T_s + 1$.

7) 更新项目 Agent 变量. 同理, 项目 Agent 每天要更新其变量值, 包括该项目消耗的资金 T_M 、时间 T_P , 有 $T_M = T_M + M_d, P = T_P + 1$.

为考虑风险对项目运行的影响, 在该仿真模型中引入风险发生机制, 风险类 Agent 参与到项目执行中的关键环节.

1) 更新风险因素 Agent 变量. 每次仿真均需计算风险因素对事件的影响 Val , 其取决于风险因素起源的实体的变量值 V_{ar} 与阈值 T_h 之间的差距, Sig 代表风险因素对事件影响的正负性.

$$Val = (\max(0, Sig \times (V_{ar} - T_h)))/(1 - T_h). \quad (9)$$

2) 更新风险事件 Agent 变量. 根据引发风险事件的风险因素计算风险事件发生的概率 P , 其计算式为

$$P = P_e \times (1 + \sum_{i \in \{factor \ linked \ to \ theevent\}} V_{al_i}). \tag{10}$$

式(10)中: P_e 是风险事件发生的初始概率.

3) 模拟风险. 随机环境下判定是否有风险事件的发生,如果发生则更新并评估风险后果 δ ,同时更新涉及到的其他 Agent 的变量值. δ 是所有已发生的风险事件对项目产生的综合影响,其计算式为

$$\delta = \sum_{i \in \{riskeventslist\}} (x_i \times I_{e_i}). \tag{11}$$

式(11)中: I_{e_i} 是风险事件 i 发生对项目产生的影响;在仿真系统中利用 rand 函数生成一个随机 $\sigma \in [0, 1]$,若 $\sigma \leq P_i$,则代表风险事件 i 发生, $x_i = 1$;若 $\sigma \geq P_i$,则代表风险事件 i 不发生, $x_i = 0$.

3 实例应用分析

3.1 实例描述

为验证文中所提出模型的可行性,将选取实例项目进行仿真分析,展示风险对策选择模型的应用过程.实例项目为上海某幢高层 PC 带电梯式住宅,工程位于上海市嘉定区南翔镇.该项目的建筑面积为 33 166 m²,地下 1 层、地上 18 层,建筑总高度 54.45 m.设计单位为上海中星志诚建筑设计有限公司,施工单位为上海建工四建集团有限公司.该项目预算为 2 600 万元,预计工期为 512 d.通过采访该项目的高级经理和工程师,了解到该项目实际成本为 2 813 万元,超出了预计成本;在实施过程中出现吊装操作失误,导致工期延误 3 d.

针对该项目,将采用多策略验证的方式,基于建立的风险对策选择模型,对不同策略下项目总体工期及成本进行测算,从而验证本模型的有效性,并为新项目在进行风险对策的选择时提供有效的方法.

3.2 多智能体模型的建立

通过实地调研、专家访谈,以及问卷调查获取了该项目的相关数据.这些数据将作为多智能体模型中变量的初始值.

首先,建立一个项目 Agent,用于统筹该项目的基本信息.由于仿真尚未开始,项目消耗的时间(T_p)、资金(T_m)的初始值为 0.该项目按流程划分为 18 项任务,因此,建立了 18 个任务 Agent,按照执行的先后顺序进行编号(T1~T18).由于任务尚未执行,所有任务 Agent 的优先级 Pri、进度 Pr、分配的人力资源 Ri、资金 M_d 、消耗的时间 T_s 均赋值为 0;状态 S 为“executable”;变量 PrTa 为前置任务的 ID.同时,建立 18 个计划 Agent,与任务 Agent 一一对应,规定每项任务的基本要求,包括任务的规定完成时间(T_D)、人力资源的最大最小需求量 R_{max}, R_{min} ,以及所需的资金量 M .通过采访该项目的合作伙伴,获得各项任务相关的数据,作为对应 Agent 变量的初始值,如表 2 所示.

表 2 任务相关数据

Tab. 2 Relevant data of tasks

ID 号	任务	T_D/d	$M/\text{万元}$	$R_{min}/\text{人}$	$R_{max}/\text{人}$	ID 号	任务	T_D/d	$M/\text{万元}$	$R_{min}/\text{人}$	$R_{max}/\text{人}$
T1	可行性研究	5	6	2	5	T10	制定生产计划	2	3	2	4
T2	初步技术研究	5	25	6	12	T11	构件生产	125	1 950	50	80
T3	招标	15	50	3	6	T12	构件养护	28	60	2	3
T4	方案报审	30	2	1	3	T13	构件检查	5	6	2	2
T5	方案设计	15	3	2	4	T14	构件运输	40	122	5	6
T6	施工图设计	15	5	2	4	T15	构件堆场	7	0	0	0
T7	深化设计	30	16	16	8	T16	吊装准备	10	25	5	7
T8	模具加工	40	8	6	8	T17	构件吊装	126	293	11	22
T9	绘制钢筋翻样图	7	6	2	4	T18	竣工验收	7	5	2	4

每项任务都有一位负责人,因此,需要建立 18 个管理者 Agent(M1~M18).针对 18 位任务负责人进行问卷调查,统计出他们的偏好指标值,结果如表 3 所示.表 3 中: $I_c + I_p + I_q = 1$.

风险随机发生于 PC 项目运行的任意流程中,并对项目产生影响,因此需要构建风险类 Agent.基于参与该项目的合作伙伴的反馈,确定了该项目涉及的 17 种风险因素和 11 种风险事件,据此构建了 17 个风险因素 Agent(F1~F17),11 个风险事件 Agent(E1~E11).它们的变量初始值是通过专家意见

表 3 管理者偏好指标数据
Tab.3 Data of preference of managers

管理者	I_c	I_p	I_q	管理者	I_c	I_p	I_q	管理者	I_c	I_p	I_q
M1	0.37	0.25	0.38	M7	0.26	0.43	0.31	M13	0.50	0.25	0.25
M2	0.57	0.22	0.21	M8	0.43	0.29	0.28	M14	0.28	0.37	0.35
M3	0.31	0.37	0.32	M9	0.34	0.43	0.23	M15	0.43	0.24	0.33
M4	0.36	0.38	0.26	M10	0.41	0.23	0.36	M16	0.38	0.30	0.32
M5	0.41	0.21	0.38	M11	0.35	0.27	0.38	M17	0.36	0.29	0.35
M6	0.28	0.46	0.26	M12	0.26	0.33	0.41	M18	0.39	0.36	0.25

法确定的.邀请 PC 行业内的 8 位专家(PC 设计师、结构工程师、构件设计师、构件模具设计师、监理工程师、安全工程师、安全评价师、设备监理师),通过现场深度访谈确定每种风险因素触发的风险事件(RE),如表 4 所示.

表 4 风险因素触发的风险事件
Tab.4 Risk events triggered by risk factors

ID 号	风险因素	RE	ID 号	风险因素	RE
F1	设计遗漏、错误	E1,E3	F10	运输距离过长	E6,E7
F2	缺乏统一的设计标准	E1,E3	F11	缺乏熟练的装配人员	E6,E8,E9,E11
F3	缺乏有经验的设计人员	E1,E3	F12	恶劣的天气	E9,E11
F4	质量不合格的原材料	E4	F13	构件堆放不当	E6,E9,E11
F5	原材料供应短缺	E4,E5	F14	有限的交付时间	E2,E4,E5,E11
F6	制造排班不合理	E2,E4,E5	F15	不合理的成本预估	E4
F7	缺乏有经验的制造人员	E2,E4	F16	不确定的需求	E1,E5
F8	运输排班不合理	E6,E7	F17	参与方之间缺乏有效沟通	E1,E5,E10
F9	运输体积限制	E6,E7			

再请专家针对风险事件的相关属性值进行评定,经过统计分析,得到的数据将作为风险事件 Agent 对应变量的初始值,如表 5 所示.同时,为了衡量 11 种风险事件对项目产生的综合影响,建立 1 个风险后果 Agent.由于风险尚未发生,其变量 δ 初值为 0.

表 5 风险事件 Agent 的变量初始值
Tab.5 Initial values of Agents of risk events

ID 号	风险事件	I_e	P_e	ID 号	风险事件	I_e	P_e
E1	设计变更	0.82	0.32	E7	构件装载错误	0.68	0.27
E2	设备故障	0.67	0.27	E8	构件安装错误	0.81	0.16
E3	构件尺寸不合适	0.54	0.34	E9	吊装操作失误	0.65	0.39
E4	构件质量不合格	0.63	0.22	E10	信息不一致	0.79	0.45
E5	订单遗漏	0.51	0.13	E11	安全事故	0.62	0.28
E6	构件受损	0.83	0.11				

3.3 仿真实验结果与分析

利用 AnyLogic 仿真工具构建上述多智能体模型并进行风险对策选择的仿真实验. AnyLogic 是一款应用广泛的建模和仿真的工具,提供了大量模板和不同领域的专业库,用户可快速构建仿真模型;同时,用户也可采用 Java 语言完成代码块,实现灵活的仿真功能.仿真过程中的流程建模图,如图 4 所示.该图展示了“管理者分配资源”这一环节的流程.

为验证仿真模型的有效性,实验中设定了 3 种风险对策.

- 1) 策略 S0. 未对实际项目做任何改变,该策略用作对照.
- 2) 策略 S1. 针对构件的生产环节,建立成本监督与考核体系.分析该项目各环节的实际成本发现,构件的生产成本增

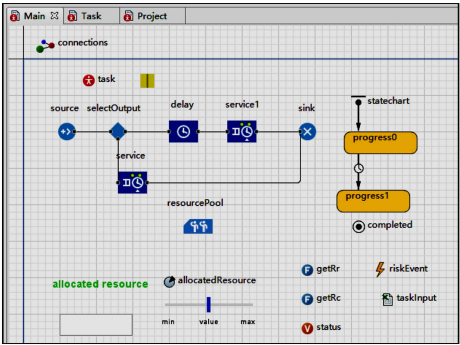


图 4 流程模型图
Fig.4 Process modeling

量占比最高,因此,提出该策略. S1 映射在仿真中,意味着任务 T11(构件生产)的预算 M 将减少 1%,该任务的管理者 M11 的成本偏好系数 I_c 将增加 1%.

3) 策略 S2. 加强装配工人的操作培训,严格监控构件吊装环节. 由于负责该项目吊装环节的操作人员专业知识水平不高,工作经验不足,导致“吊装操作失误”,因此,提出该策略. S2 映射在仿真中,意味任务 T16(吊装准备),T17(构件吊装)的规定完成时间 T_D 将增加 5%. 这两项任务的管理者 M16, M17 的质量偏好系数 I_q 将增加 1%. 此外,风险事件 E9 的初始概率 P_e 降低 10 倍.

将上述 3 种风险对策代入模型中,在 AnyLogic 仿真平台中进行 100 次仿真循环. 仿真结束后得到项目时间、成本的统计分布图,如图 5 所示. 图 5 中: T_P , T_M 分别代表该项目的总时间和成本; F 代表频率; S0, S1 和 S2 分别表示实施 S0, S1 和 S2 的仿真结果.

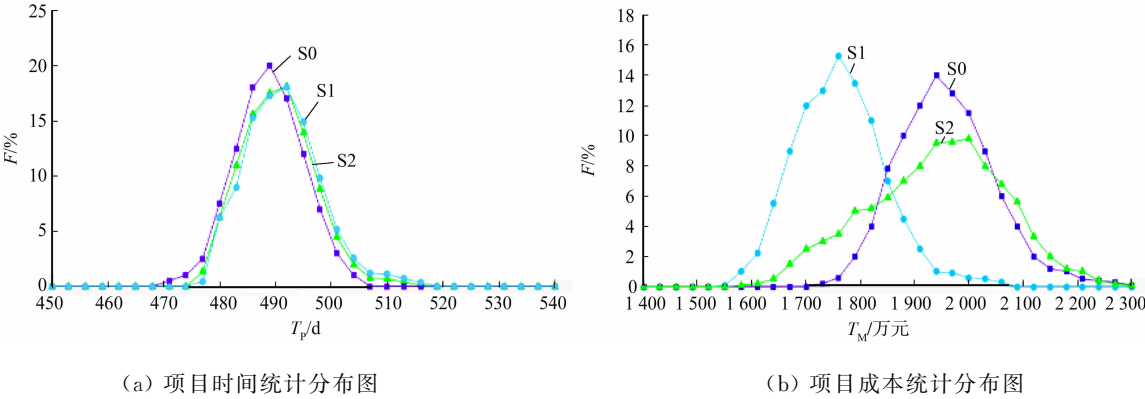


图 5 风险对策选择的仿真结果图

Fig. 5 Simulation result of risk strategy selection

由图 5(a)可知,相比于无风险应对策略的情境,执行了风险应对策略 S1 和 S2 后项目时间略有增加. 这主要源于实施风险应对策略后关键环节的任务执行时间增加,导致项目总时间增加. 由图 5(b)可知,实施 S1 后项目成本为 1 55~200 万元,实施 S2 后项目成本为 1 600~2 200 万元,而实施 S 后项目成本在 1 600~2 200 万元之间. 由此可见,实施 S1 可以有效降低项目成本. 对于该项目的管理者而言,可以针对构件的生产环节,建立成本监督与考核体系进行风险应对与控制.

4 结 论

将针对 PC 项目的风险对策选择问题进行研究,包括文献调研,以厘清 PC 项目执行过程中主要的风险问题,并建立相应的风险控制机制. 采用 MAS 技术构建风险对策选择模型,选取实例项目进行仿真分析,展示模型的应用并验证模型的有效性,仿真结果验证了模型的有效性.

虽然本研究取得了一定成果,但还存在不少局限性:1) 仿真模型中部分变量初始值的确定依赖专家经验,主观性较强,相较于实际情况难免存在误差;2) 案例研究中仅通过采访调研 17 个风险因素、11 个风险事件进行研究,涵盖不够全面. 后续的研究将扩大调研范围,使得模型中参数的设定更加科学,并建立更加全面的风险因素、风险事件清单.

参考文献:

[1] 王玉娜,谢梦平,李晓婷. 建筑工业化多主体系统风险网络研究综述[J]. 工程管理学报,2017,31(6):29-33. DOI: 10.13991/j.cnki.jem.2017.06.006.

[2] MAO Chao, SHEN G Q, PAN Wei, *et al.* Major barriers to off-site construction: The developer's perspective in China[J]. Journal of Management in Engineering, 2015, 31(3): 04014043. DOI: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000246.

[3] LUO Lizi, MAO Chao, SHEN Liyin, *et al.* Risk factors affecting practitioners' attitudes toward the implementation of an industrialized building system: A case study from China[J]. Engineering Construction & Architectural Management, 2015, 22(6): 622-643. DOI: 10.1108/ECAM-04-2014-0048.

[4] ARASHPOUR M, ABBASI B, ARASHPOUR M, *et al.* Integrated management of on-site, coordination and off-site

- uncertainty: Theorizing risk analysis within a hybrid project setting[J]. *International Journal of Project Management*, 2017, 35(4): 647-655. DOI:10.1016/j.ijproman.2017.02.016.
- [5] LI C Z C, HONG Jingke, FAN Cheng, *et al.* Schedule delay analysis of prefabricated housing production: A hybrid dynamic approach[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 195: 1533-1545. DOI:10.1016/j.jclepro.2017.09.066.
- [6] FRANCISCO J C. Risk control measures in payment systems[J]. *Quarterly Review of Economics and Finance*, 2009, 49(1): 1-25. DOI:10.1016/j.qref.2007.06.001.
- [7] 袁剑波, 刘苇, 刘伟军. 工程建设项目风险对策应用[J]. *中外公路*, 2006, 26(1): 14-16. DOI:10.3969/j.issn.1671-2579.2006.01.004.
- [8] 李永海. 考虑风险关联的项目风险应对的案例决策分析方法[J]. *系统工程*, 2016, 34(6): 136-143.
- [9] SUMIT D, MUKHERJEE S K. Developing a risk management matrix for effective project planning: An empirical study[J]. *Project Management Journal*, 2001, 32(2): 45-57.
- [10] MARCELINO-SÁDABA S, PÉREZ-EZURDIA A, LAZCANO A M E, *et al.* Project risk management methodology for small firms[J]. *International Journal of Project Management*, 2014, 32(2): 327-340. DOI:10.1016/j.ijproman.2013.05.009.
- [11] KUJAWSKI E. Selection of technical risk responses for efficient contingencies[J]. *Systems Engineering*, 2002, 5(3): 194-212. DOI:10.1002/sys.10025.
- [12] ZHANG Yao, FAN Zhiping. An optimization method for selecting project risk response strategies[J]. *International Journal of Project Management*, 2014, 32(3): 412-422. DOI:10.1016/j.ijproman.2013.06.006.
- [13] SEYEDHOSEINI S M, NOORI S, HATEFI M A. An integrated methodology for assessment and selection of the project risk response actions[J]. *Risk Analysis*, 2009, 29(5): 752-763. DOI:10.1111/j.1539-6924.2008.01187.x.
- [14] ZHANG Yao. Selecting risk response strategies considering project risk interdependence[J]. *International Journal of Project Management*, 2016, 34(5): 819-830. DOI:10.1016/j.ijproman.2016.03.00.
- [15] CHERAGHI E, KHALILZADEH M, SHOJAEI S, *et al.* A mathematical model to select the risk response strategies of the construction projects: Case study of Saba tower[J]. *Procedia Computer Science*, 2017, 121: 609-616. DOI:10.1016/j.procs.2017.11.080.
- [16] FAN Zhiping, LI Yonghai, ZHANG Yao. Generating project risk response strategies based on CBR: A case study [J]. *Expert Systems with Applications*, 2015, 42(6): 2870-2883. DOI:10.1016/j.eswa.2014.11.034.
- [17] LIANG Xin, SHEN G Q P, BU Shanshan. Multiagent systems in construction: A ten-year review[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2016, 30(6): 04016016. DOI:10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000574.

(责任编辑: 黄仲一 英文审校: 方德平)