

基于自适应变异粒子群算法的装配式建筑施工安全投入优化

常春光,赵耀

(沈阳建筑大学管理学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要:针对装配式建筑施工安全投入问题,以实际工程项目为例,对装配式建筑施工风险因素进行了二级分解;基于数学规划理论建立了非线性规划模型,并引入3种函数关系进行拟合;采用自适应变异粒子群算法在Matlab中进行求解,得到了相对较优方案。结果表明:在安全风险主要因素中,物的风险因素对安全投入最为敏感;在二级风险因素中,预制构件吊装器具的选择最为敏感,该结论可为日后施工安全投入的方向提供参考依据。

关键词:自适应变异粒子群算法;非线性规划;装配式建筑;施工安全

中图分类号:F426;TU71 **文献标志码:**A

引用格式:常春光,赵耀.基于自适应变异粒子群算法的装配式建筑施工安全投入优化[J].沈阳建筑大学学报(社会科学版),2024,26(1):79-85.

随着建筑产业化的推进,装配式建筑在建筑施工中所占比例逐渐增加,政府通过将预制率和装配率纳入地块出让条件,使装配式建筑的推行范围逐渐扩大。根据现行装配式建设标准对于装配式建筑的定义,由预制构件(Precast Concrete, PC)在施工现场装配而形成的建筑称为“装配式建筑”^[1]。由于装配式建筑建造方式的特点,其安全风险因素相比于现浇建筑有所不同,所以识别装配式建筑中的风险因素,建立相应的数学规划模型以及进行施工安全投入的优化研究十分必要。

在施工安全风险因素识别方面,李明柱等^[2]通过对施工安全事故进行分析,识别出影响安全事故的主要因素,并采用ISM模型与MICMAC方法进行计算,得出管理、人员、设备为影响因素的3个主要方向。段永

辉等^[3]采用灰色关联度法建立指标体系,并运用SEM对各施工安全风险指标进行权重计算,并对潜在影响因素进行了分析。李皓燃等^[4]运用结构方程模型对影响装配式建筑各施工阶段的安全因素进行分析,得出各阶段的风险排序及其关联性。Jiang H等^[5]对施工过程中工人的不安全行为进行了识别,并运用SEM模型对施工风险因素与风险传播途径进行了分析。Jitwasinkul B等^[6]从管理因素方面对影响建设项目施工安全的高危行为进行了识别,确定风险影响因素为7种。Zhang W等^[7]采用模糊故障树方法建立了可靠性分析模型,从安全子系统中识别出9个安全影响因素。

在施工安全优化方面,吴溪等^[8]在考虑安全风险相关性的前提下,构建了施工安全损失-安全投入的双目标优化模型,并采用

粒子群算法进行优化求解,得到了不同风险下安全投入的非劣解。李万庆等^[9]以施工工序的持续时间为决策变量,构建了工期-成本-质量-安全水平多目标均衡优化模型,并采用了量子粒子群算法(Quantum-behaved Particle Swarm Optimization, QPSO)进行优化求解,得到各目标均衡优化的非劣解集。常春光等^[10]采用事故树对施工安全风险因素进行了分析,建立了装配式建筑施工安全优化模型,对各方面安全投入进行了求解优化。Shohet M 等^[11]采用实证分析法,建立了施工安全资源配置模型,通过蒙特卡洛仿真对不同场景下的建设项目进行模拟,确定了直接安全成本与间接安全成本的关系及最优安全投入水平。

现有研究主要集中在现浇建筑施工安全影响因素的识别、安全优化方面,笔者在已有研究的基础上以某装配式住宅项目为实例,对施工风险因素进行识别,并从安全投入与资源合理配置的角度出发,构建了装配式建设项目施工安全投入优化模型,采用自适应变异粒子群算法求得该工程的最优资源配置,为其他同类项目的施工安全投入提供了参考依据。

一、装配式建筑施工安全风险因素

装配式建筑施工安全是指在装配式建筑施工过程中为保证施工人员安全与施工作业环境安全,采取相应的管理措施与安全措施,从而避免及预防安全事故的发生。住房和城乡建设部发布了《关于2020年房屋市政工程生产安全事故情况的通报》,按照事故类型划分,2020年全国各类生产安全事故占比如图1所示。

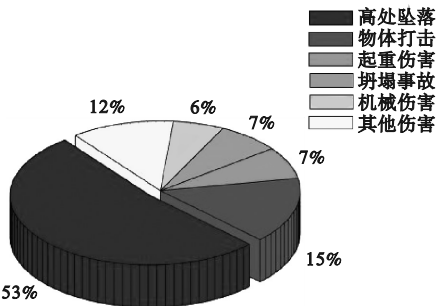


图1 各类型生产安全事故所占比例

本研究将导致建筑生产安全事故的主要

原因划分为3个方面的风险因素:人员的因素、物的因素、管理的因素。

1. 人员的因素

在装配式建筑施工安全事故中,人的风险因素是导致安全事故最直接的因素。开发商为了满足装配率通常会将项目的部分单位工程设为装配式建筑,但由于施工单位的操作人员只有一组,只有在完成传统建设项目施工后,才会继续进行装配式建设项目的施工,而施工人员的培训来自于装配式构件厂商的技术交底会,会议一般由建设单位、施工单位、监理单位的领导及技术人员参加,能否将会议交底内容传递给操作人员存在不确定性,这些因素都给建设项目的施工带来很大安全隐患,此风险因素记为从业资格教育培训;安全防护用具的能否正确佩戴也是工程项目建筑中出现频率最高、最明显的问题,此风险因素记为安全意识及责任心。

2. 物的因素

物的因素一般体现在吊装机械及器具的选择、临时支撑体系的稳定、预制构件的强度及精度、灌浆料的配比等方面。在进行装配式建筑与传统建筑混合的项目时,要合理评估现有吊装机械的起吊能力能否满足预制构件的重量,严禁超负载工作;预制构件吊装时应根据构件选择不同的吊具,如叠合板可选择八点吊具;预制构件应采用专门的构件支撑体系,如PC-V-GZC和PC-H-GZC;预制构件进场时应检查构件的预留孔洞位置是否精确。由于灌浆操作的不可逆性,技术人员应向施工工人做好技术交底,灌浆料宜采用1.2 kg水与10 kg干料的比例,否则会产生堵塞注浆孔或强度不满足要求等问题。

3. 管理的因素

装配式建筑由于构件体积大、重量大的特点,其预制构件存放与施工现场的安全检查是装配式建设项目中应考虑的重要问题。在存放位置选择上,要尽可能的避免二次搬运,避免产生较大的力矩;在构件存放要求上,为避免构件堆叠的自重破坏构件,应严格按出厂要求存放,根据项目管理人员对施工

现场的安全巡查情况,记本因素为施工项目安全生产检查。

以笔者引用项目为例,项目高层部分的内墙、楼梯、叠合板(板为 60 mm 预制构件 + 70 mm 现浇)采用预制构件,其中,70 mm 现浇叠合板应考虑管线交叉时能否保证避免露管问题,尤其在叠合板的端部大量管线的交汇能否满足实际施工。考虑“先板后梁”还是“先梁后板”的问题,若先吊装叠合板,则拉结筋会对梁钢筋的绑扎产生阻碍;反之,由于梁钢筋的绑扎会对板的吊装过程造成阻碍,此类由于装配式建筑采用新的施工工艺或施工方案而产生的问题,记为安全施工中施工新技术方案的选择。

同时,项目管理人员对于施工现场风险的管控态度也在很大程度上影响项目的安全,具体表现在供电棚及临边洞口的防护措施等方面。例如:改性沥青防水卷材 SBS 施工时,周围有无设置灭火器,这种情况如得到重视可能会避免高处坠落、触电、火灾等事故带来的损失,研究将这类风险因素记为管理人员对施工风险的管控态度。指标因素分解如表 1 所示。

表 1 装配式建筑施工风险因素分解

| 一级指标 | 二级指标 |
|-------|-------------------------|
| 人员的因素 | 安全意识及责任心 x_{11} |
| | 从业资格教育培训 x_{12} |
| 物的因素 | 吊装器具的选择 x_{21} |
| | 临时支撑体系的稳定程度 x_{22} |
| | 预制构件的强度及精度 x_{23} |
| | 灌浆设备及灌浆料比例 x_{24} |
| 管理的因素 | 施工项目安全生产检查 x_{31} |
| | 施工新技术方案的选择 x_{32} |
| | 管理人员对施工风险的管控态度 x_{33} |

二、优化模型的构建

1. 投入与安全关系函数拟合

考虑到不同投入要素与装配式建筑施工安全之间关系不同,故借鉴《建筑工程绿色施工规范》将施工安全投入分为一次增长型、指数增长型和等比增长型^[12]。一次增长型是指为降低安全影响因素而采用的新型施工技术、购入的机械设备^[13],初期需要一次性投入大量资金,后期仅需投入少量的资金

进行升级与优化,例如吊装器具、支撑体系、装配式构件的购入选择等;指数增长型是指只需要较低安全投入即可得到较大的改善的指标^[14],主要是指一些与员工素质、员工安全意识相关的指标,例如宣传标语、教育培训等;等比增长型是指投入多少成本即可得到相应的改善性指标,例如具体施工新技术方案的选择、施工项目安全生产检查等。

在研究构建的安全投入优化模型中,指标 x_{22} 、 x_{23} 、 x_{24} 属于一次增长型; x_{21} 、 x_{31} 、 x_{32} 属于等比增长型; x_{11} 、 x_{12} 、 x_{33} 属于指数增长型。通过 3 种已知近似函数关系,利用统计数据可在 Matlab 中拟合出 x_{ij} 与 $f(x_{ij})$ 的具体函数关系。

2. 安全投入优化模型的构建

安全投入优化是在既定投入约束条件下寻找最佳的安全投入组合,从而实现总效益最大化。

根据对安全影响因素的分析和各参数与变量的设置,构建装配式建筑安全投入模型

$$\max Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_j} f(x_{ij})$$

(1)

$$\text{s. t. } \alpha C \leq \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_j} x_{ij} \leq B$$

(2)

$$a \leq x_{ij} \leq b \quad (i = 1, 2, \cdots, n; j = 1, 2, \cdots, m_j)$$

(3)

$$f(x_{ij}) \geq g \quad (i = 1, 2, \cdots, n; j = 1, 2, \cdots, m_j)$$

(4)

$$\frac{\sum_{j=1}^{m_j} x_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_j} x_{ij}} \leq \eta, (i = 1, 2, \cdots, n)$$

(5)

式中: x_{ij} 为第 i 个一级影响因素下的第 j 个二级影响因素,即单个二级影响因素的安全投入; n 为一级影响因素的分解个数; m_j 为二级影响因素的分解个数;设工程造价为 C ,其系数 α 根据 2022 版《企业安全生产费用提取和使用管理办法》规定,取 3.0%;设企业安全投入上限为 B , a 、 b 分别为单个风险因素的安全投入下限、安全投入上限; g 为单个风险因素的安全度下限; η 为安全投资均衡系

数; a 、 b 、 g 、 η 分别根据实际工程项目取值。

在上述式中,式(1)为目标函数,表示安全度最大; $f(x_{ij})$ 为安全投入与安全度的函数关系;式(2)为安全投入总和的约束范围;式(3)为单个风险因素投入的约束范围;式(4)为单个风险安全度的约束范围;式(5)为用于各一级风险因素的安全投入与总安全投入的比值不超过一定系数。

3. 粒子群算法求解设计

粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 是一种基于群体搜索的处理连续或者离散空间内优化问题的启发式算法,应用于非线性问题的求解。由于标准粒子群算法容易陷入局部最优,研究采用自适应变异粒子群算法 (Adaptive Mutation Particle Swarm Optimization, AMPSO), 该算法分别从增加自适应的变异操作、采用非线性动态惯性权重与非线性动态学习因子 3 个方面对 PSO 算法进行了改进,从而达到更快的收敛速度与更高的精度^[15]。

为保证粒子群算法具有较好的全局搜索性,根据粒子群的群体适应度方差 σ^2 , 加入自适应的变异操作^[16]。通过 σ^2 反应群体的“收敛”程度,从而确定粒子的变异概率 P_t , σ^2 越大,表明粒子群处于随机搜索阶段;反之,粒子群趋于收敛,则表明粒子群更接近最优位置。粒子的变异概率计算如式(6)~式(8)所示。

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^m \left| \frac{f_i - f_a}{f} \right|^2 \tag{6}$$

$$f = \max \{ 1, \max_{1 \leq i \leq m} |f_i - f_a| \} \tag{7}$$

$$P_t = (P_{\max} - P_{\min}) (\sigma_t^2 / m)^2 + (P_{\min} - P_{\max}) (2\sigma_t^2 / m) + P_{\max} \tag{8}$$

式中: m 为粒子群规模; σ_t^2 为 t 次迭代时群体的适应度方差; f_i 为第 i 个粒子的适应度值; f_a 为当前粒子群的平均适应度值; f 为定标因子,用于控制粒子群体适应度方差 σ_t^2 的大小; P_t 为第 t 次迭代群体最优粒子的变异概率; P_{\max} 、 P_{\min} 分别为最大变异概率、最小变异概率,取值分别为 0.5 和 0。

算法采用根据正态分布增加随机扰动的

方法对粒子进行变异操作,具体操作如式(9)所示。

$$p_g^{k+1} = (1 + 0.5\varepsilon)p_g^k \tag{9}$$

式中: p_g^k 为第 k 次迭代中群体最优位置; ε 为服从标准正态分布的随机变量。

为使改进后粒子群算法在迭代前期具有较高的全局搜索能力,后期具备较高的局部搜索能力,惯性权重 ω 和学习因子 c 采用动态惯性权重与学习因子^[17] 如式(10)、式(11)所示。

$$\omega = \begin{cases} \omega_{\min} - \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min}) \times (f_i - f_{\min})}{f_a - f_{\min}}, & f_i \leq f_a \\ \omega_{\max}, & f_i > f_a \end{cases} \tag{10}$$

$$\begin{cases} c_1(t) = c_{1,s} + (c_{1,f} - c_{1,s}) \times \ln \left[\frac{(e-1) \times t}{T} + 1 \right] \\ c_2(t) = c_{2,s} + (c_{2,f} - c_{2,s}) \times \ln \left[\frac{(e-1) \times t}{T} + 1 \right] \end{cases} \tag{11}$$

式中: ω_{\max} 、 ω_{\min} 分别为惯性权重的最大值、最小值; f_{\min} 为当前粒子群中适应度的最小值; $c_1(t)$ 、 $c_2(t)$ 分别为第 t 次迭代中算法的个体学习因子、群体学习因子; $c_{1,s}$ 、 $c_{1,f}$ 分别为个体学习因子的起始值、终止值; $c_{2,s}$ 、 $c_{2,f}$ 分别为群体学习因子的起始值、终止值; t 为当前迭代次数; T 为最大迭代次数; e 为自然常数。

具体 AMPSO 算法实现步骤如下。

①参数设置及种群初始化。设置粒子群数量 m 、最大惯性权重 ω_{\max} 、最小惯性权重 ω_{\min} 、个体学习因子的起始值 $c_{1,s}$ 、终止值 $c_{1,f}$ 、群体学习因子的起始值 $c_{2,s}$ 、终止值 $c_{2,f}$; 初始化粒子位置 $x_i^{(0)} = [x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, x_3^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}]$, 初始化粒子速度 $v_i^{(0)} = [v_1^{(0)}, v_2^{(0)}, v_3^{(0)}, \dots, v_n^{(0)}]$, 初代粒子 r_1 、 r_2 取 $[0, 1]$ 均匀分布的随机数,计算适应度 f 和其他相关指标。

②迭代设置。设置最大迭代次数 T , 并令当前迭代次数 $t = 1$, 进入算法迭代。

③速度更新。根据迭代次数和粒子群体适应度动态更新各粒子的惯性权重和学习因子,并对粒子的速度向量进行更新。

$$v_i^{k+1} = \omega v_i^k + c_1(t) \times r_1 (p_i^k - x_i^k) +$$

$$c_2(t) \times r_2(p_i^k - x_i^k) \tag{12}$$

式中: v_i^k 为第 i 个粒子在第 k 次迭代的速度; p_i^k 为第 i 个粒子在第 k 次迭代的个体最优位置; x_i^k 为第 i 个粒子在第 k 次迭代的位置。

④位置更新。根据粒子的位置向量与速度向量更新各粒子的位置^[18]。

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \tag{13}$$

⑤个体最优粒子与群体最优粒子更新。根据各粒子位置,更新粒子的个体最优位置和群体最优位置,并根据变异概率对群体最优粒子执行式(9)中的扰动变异。

⑥输出全局最优解。达到最大循环迭代次数后输出全局最优解 Z 及此时各粒子的位置,否则返回步骤③继续迭代。

三、实例分析与求解优化

1. 实例分析

该项目为沈阳市某住宅类装配式建设项目,建筑总面积为 62 900 m²,主体结构为框架剪力墙结构,工程造价为 36 640 万元,建设工期为 537 d,以该项目为例进行研究分析。

通过调研 3 年内规模、体量相似项目资

料及询问相关专家,确定了该项目各指标安全投入—安全得分的对应点。以指标 x_{11} 为例,通过调研得到(0.1,1.3)、(0.8,4.98)、(2.3,7.2)、(4.9,8.7)、(8,9.8),通过 Matlab 拟合得到函数 $f(x_{11}) = 1.973\ln x_{11} + 5.631$,各指标具体拟合函数如下:

$$\begin{cases} f(x_{11}) = 1.973\ln x_{11} + 5.631 \\ f(x_{12}) = 1.692\ln x_{12} + 6.104 \\ f(x_{21}) = -0.010\ 21x_{21}^2 + 0.783\ 8x_{21} + 0.564\ 7 \\ f(x_{22}) = 0.287\ 3x_{22} + 2.53 \\ f(x_{23}) = 0.008\ 7x_{23} + 4.78 \\ f(x_{24}) = 0.045\ 68x_{24} + 5.432 \\ f(x_{31}) = -0.001\ 01x_{31}^2 + 0.238\ 1x_{31} + 0.660\ 6 \\ f(x_{32}) = -0.000\ 03x_{32}^2 + 0.039\ 4x_{32} + 0.607\ 8 \\ f(x_{33}) = 1.887\ln x_{33} + 5.652 \end{cases} \tag{14}$$

基于 Matlab 对该项目安全投入风险问题进行仿真,独立进行 20 次仿真实验,终止条件均为迭代 200 次,最终得出该项目用于安全投入为 933 万元,安全得分为 77.81,具体各安全影响因素指标得分如表 2 所示。

表 2 沈阳市某装配式建设项目各安全影响因素指标得分

| 一级指标 | 二级指标 | 安全投入/万元 | 安全得分/分 |
|-------|-------------------------|---------|--------|
| 人员的因素 | 安全意识及责任心 x_{11} | 6 | 9.17 |
| | 从业资格教育培训 x_{12} | 5 | 8.83 |
| 物的因素 | 吊装器具的选择 x_{21} | 8 | 6.18 |
| | 临时支撑体系的稳定程度 x_{22} | 18 | 7.70 |
| | 预制构件的强度及精度 x_{23} | 470 | 8.87 |
| | 灌浆设备及灌浆料比例 x_{24} | 80 | 9.08 |
| | 施工项目安全生产检查 x_{31} | 45 | 9.33 |
| 管理的因素 | 施工新技术方案的选择 x_{32} | 295 | 9.62 |
| | 管理人员对施工风险的管控态度 x_{33} | 6 | 9.03 |

2. 求解优化

该工程造价为 36 640 万元,则安全投入下限为 916 万元,企业可接受投入上限为 1 200 万元, a 、 b 、 g 、 η 分别取 1,500,6,2/3;用 AMPSO 算法设置标准:粒子数量 $m = 30$;迭代次数 $T = 200$; $\omega_{\max} = 0.95$ 、 $\omega_{\min} = 0.5$; $c_{1,s}$ 、 $c_{1,f}$ 分别为 2.5,0.5; $c_{2,s}$ 、 $c_{2,f}$ 分别为 0.6,2.4; P_{\max} 、 P_{\min} 分别为 0.5,0,使用该算法对模型优化求解。

为了验证 AMPSO 算法在装配式建筑施工安全风险优化问题上的适用性,研究重复运行程序 20 次,由此得到了目标函数的迭代收敛曲线图(见图 2)。从图 2 可以看出,在第 68 次迭代时,自适应粒子群算法找到了最优解,能够看出该算法收敛速度快,可以快速寻找到近似最优值,避免了结果的偶然性,为求解实际工程案例相关问题提供了新的方法。

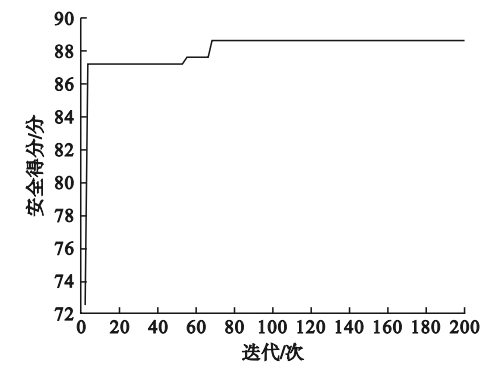


图2 AMPSO 算法求得的迭代收敛曲线

项目求解优化后各指标情况如表3所示。

表3 项目求解优化后安全投入及改进增加值

| 一级指标 | 二级指标 | 安全投入/万元 | 增加值/万元 | 安全得分/分 | 增加值/分 |
|-------|-------------------------|---------|--------|--------|-------|
| 人员的因素 | 安全意识及责任心 x_{11} | 9 | 3 | 9.97 | 0.80 |
| | 从业资格教育培训 x_{12} | 10 | 5 | 10.00 | 1.17 |
| 物的因素 | 吊装器具的选择 x_{21} | 14 | 6 | 9.54 | 3.36 |
| | 临时支撑体系的稳定程度 x_{22} | 26 | 8 | 10.00 | 2.30 |
| | 预制构件的强度及精度 x_{23} | 500 | 30 | 9.13 | 0.26 |
| | 灌浆设备及灌浆料比例 x_{24} | 100 | 20 | 10.00 | 0.92 |
| 管理的因素 | 施工项目安全生产检查 x_{31} | 49 | 4 | 9.90 | 0.57 |
| | 施工技术新方案的选择 x_{32} | 307 | 12 | 9.88 | 0.26 |
| | 管理人员对施工风险的管控态度 x_{33} | 10 | 4 | 10.00 | 0.97 |

四、结 语

根据实际工程项目,对装配式建筑施工风险因素进行了二级分解,得出影响施工安全的关键指标;根据风险指标不同,引入了3种不同安全投入的函数关系,构建了非线性的安全投入优化模型,并采用 AMPSO 算法进行优化求解。结果表明:预制构件吊装器具的选择因素对安全投入最为敏感,施工单位少量增加该方面安全投入即可取得较大安全提升效果;临时支撑体系的稳定程度、安全意识及责任心、管理人员对施工风险的管控态度、从业资格教育培训等因素对安全投入也较为敏感且程度相近,施工单位适当增加上述方面的安全投入,可使工程项目的安全性得到较高提升。预制构件的强度及精度因素在增加少量投入的情况下产生的变动最小,其对安全投入最不敏感,此现象可能是由于预制构件受构件供应商制作工艺与模具的影响较大。

施工安全指标的选取及量化受项目影响

项目改进前安全投入为 933 万元,改进后投入为 1 025 万元,安全得分从 77.81 增长至 88.42 有较大的安全提升。其中,吊装器具的选择因素安全改善最为明显,单位安全投入下安全得分变动最大,临时支撑体系的稳定程度、管理人员对施工风险的管控态度、安全意识及责任心、从业资格教育因素均在增加较小安全投入的情况下取得了较大的安全提升。

程度较大,求解优化建立在该项目安全指标量化后的拟合数据之上,由于不同项目的调研数据会有所偏差,因此采用合理的定量测度对施工风险进行量化、对多个不同项目进行优化分析,使优化所得结论更具参考性。

参考文献:

[1] 装配式建筑评价标准: GB/T 51129—2017 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.

[2] 李明柱,王文东,张智超. 基于 ISM 与 MICMAC 的建筑施工风险因素研究[J]. 安全与环境学报,2022,22(1):22-28.

[3] 段永辉,周诗雨,郭一斌,等. 基于 SEM 的装配式建筑施工安全风险及策略[J]. 土木工程与管理学报,2020,37(2):70-75.

[4] 李皓燃,李启明,陆莹. 基于 SEM 的装配式建筑施工安全关键风险分析[J]. 中国安全科学学报,2019,29(4):171-176.

[5] JIANG H, WANG J P, YIN H G, et al. Structural equation model analysis of factors in the spread of unsafe behavior among construction workers [J]. Information, 2018, 9(2):39-50.

[6] JIWASINKUL B, HADIKUSUMO W. Identification of important organizational factors influencing safety work behaviors in construction projects [J]. Journal of civil engineering and management, 2011, 17 (4) : 520 – 528.

[7] ZHANG W,ZHANG X,LUO X,et al. Reliability model and critical factors identification of construction safety management based on system thinking [J]. Journal of civil engineering and management, 2019, 25 (4) : 362 – 379.

[8] 吴溪,常春光,严昕. 基于粒子群算法的装配式建筑施工安全风险决策[J]. 科学技术与工程,2019,19(27):304 – 310.

[9] 李万庆,邱幸运,孟文清. 工程项目工期 – 成本 – 质量 – 安全水平综合优化研究[J]. 工程管理学报,2019,33(2):136 – 140.

[10] 常春光,苑俊丽,刘娇,等. 装配式建筑施工安全风险优化模型研究[J]. 建筑技术,2019,50(8):940 – 942.

[11] SHOHET M,LUZI M,TARSHISH M. Optimal allocation of resources in construction safety: analytical-empirical model [J]. Safety science, 2018,104:231 – 238.

[12] 卢锡雷,陈志超,牛凯丽,等. 基于改善成本的绿色施工优化研究[J]. 建筑经济,2021,42(6):48 – 52.

[13] 刘自昂,郭娟娟. 基于 BIM 的装配式建筑施工成本控制研究[J]. 建筑经济,2022,43(3):40 – 46.

[14] 林永民,王涵,赵德信,等. 基于 BIM 的装配式建筑全生命周期信息管理平台研究[J]. 建筑经济,2023,44(1):77 – 83.

[15] 常春光,吴溪. 装配式建筑施工安全风险评价研究[J]. 建筑经济,2018,39(8):49 – 52.

[16] 叶德意,何正友,臧天磊. 基于自适应变异粒子群算法的分布式电源选址与容量确定[J]. 电网技术,2011,35(6):155 – 160.

[17] 杨旭静,冯小龙,郑娟,等. SVM 和改进粒子群算法在冲压成形优化中的应用[J]. 汽车工程,2015,37(4):485 – 489.

[18] 常春光,董慧. 基于云模型的装配式建筑施工安全风险评价[J]. 沈阳建筑大学学报(社会科学版),2023,25(3):286 – 293.

Optimization of Construction Safety Investment in Prefabricated Buildings Based on Adaptive Mutation Particle Swarm Algorithm

CHANG Chunguang,ZHAO Yao
(School of Management,Shenyang Jianzhu University,Liaoning,Shenyang,100168,China)

Abstract:For addressing the safety investment issues in prefabricated buildings, firstly, an actual engineering project was used as a case study to decompose the risk factors of prefabricated building construction safety. Secondly, a nonlinear programming model was established based on mathematical planning theory, and then three functional relationships were used for fitting. Finally, the adaptive mutation particle swarm optimization algorithm was employed for solving in Matlab to obtain a relatively optimal solution. The results indicate that among the primary safety risk factors, the risk factor associated with materials is the most sensitive to safety investment. Among the secondary risk factors, the selection of lifting equipment for prefabricated components appears to be the most sensitive, providing a reference for future directions in construction safety investment.

Key words: adaptive mutation particle swarm optimization algorithm; nonlinear programming; prefabricated building; construction safety.

(责任编辑:王丽娜 英文审校:贾凡华)