

# 基于 ANP-FUZZY 的建筑施工现场安全风险评价方法

滑维杰<sup>1</sup>, 周铁军<sup>1</sup>, 翟越<sup>2</sup>, 倪敬雪<sup>3</sup>, 王会峰<sup>3</sup>

(1. 重庆大学 建筑城规学院, 重庆 400045; 2. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710064;

3. 长安大学 电子与控制工程学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 针对当前建筑施工现场安全管理存在的问题, 通过对施工现场的风险源的辨识, 构建基于现场物和施工人员的建筑施工风险评价指标体系, 通过改进的层次分析法结合模糊综合评价, 即网络层次分析-模糊综合评价(ANP-FUZZY)实时评价施工现场施工状态的安全状态, 并设计出了一套基于物联网的建筑现场施工风险因素智能监测系统. 施工现场 ANP-FUZZY 风险评价模型改善了传统关联分析中主观性强的缺陷, 使评价结果更具客观性和科学性; 以施工现场脚手架为例, 在施工现场 30 组小样本实验中, ANP-FUZZY 算法风险识别率 100%, 状态误判率 7%, 而在 60 组小样本实验中, 风险识别率为 100%, 状态误判率降低至 1.7%, 验证了建筑施工风险评价模型的可行性和准确性.

**关键词:** 建筑施工安全; 风险源辨识; ANP-FUZZY; 风险源监测; 施工现场风险评价

中图分类号: TU714

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)06-0912-06

## Building construction site safety-risk evaluation method based on ANP-FUZZY

HUA Weijie<sup>1</sup>, ZHOU Tiejun<sup>1</sup>, ZHAI Yue<sup>2</sup>, NI Jingxue<sup>3</sup>, WANG Hui Feng<sup>3</sup>

(1. School of Architecture and Urban Planning, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

3. School of Electronic & Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** Aiming at the problems existing in the construction site safety management for construction, the construction site risk source is identified. Based on scaffolding and construction personnel of construction risk evaluation index system, are improved analytic hierarchy process (AHP) is combined with FUZZY comprehensive evaluation. The network hierarchy analysis and FUZZY comprehensive evaluation (ANP - FUZZY) real-time evaluation of construction site construction safety state is carried out, and a set of construction site construction risk factors are defined based on Internet of things intelligent monitoring system. The construction site ANP-FUZZY risk evaluation model can improve the defects of strong subjectivity in the traditional correlation analysis and make the evaluation results more objective and scientific. Take scaffolding as an example, in 30 groups of small sample experiments on the construction site, the scaffold risk identification rate of ANP-Fuzzy algorithm is 100% and the state misjudgment rate is 7%, while in 60 groups of small sample experiments, the scaffold risk identification rate is 100% and the state misjudgment rate is reduced to 1.7%, which verifies the feasibility and accuracy of the construction risk evaluation model.

**Key words:** safety in construction; risk source identification; ANP-FUZZY; risk source monitoring; risk assessment of construction site

近年来我国建筑领域从产值、规模和速度方面都取得了飞速发展. 建筑工程安全管理同企业管理一样, 需要人、物和环境三者和谐, 管理人员应当对三要素进行管理控制, 消除潜在的不安全因素<sup>[1]</sup>. 施工现场环境具有复杂性和多变性, 这是造成安全事故的主要原因. 其复杂性和多变性体现在

以下三点: 一是生产要素密集, 施工场地受限; 二是施工现场涉及的工种较多, 交叉作业也大量存在; 三是人员室外作业和设备受天气及气候的影响<sup>[2]</sup>. 将物联网技术应用到施工现场监测上, 实时监测施工过程中人员、机械的安全状态, 能够有效保障施工安全进行. 当前国内的物联网技术广泛已

收稿日期: 2020-06-23

修改稿日期: 2020-11-16

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(51878082, 51678084, 41772277); 中央高校基本科研业务费创新团队培育基金资助项目(300102329401)

第一作者: 滑维杰(1994—), 女, 硕士研究生, 主要从事建筑安全、绿色建筑方面的研究. E-mail: 14164626@qq.com

通信作者: 周铁军(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事城市及建筑安全、地域建筑和绿色建筑等方面的研究

E-mail: arch-ztj@cuq.edu.cn

经应用到智能交通、智能消防、环境监测等多个领域,应用技术也相对比较成熟,但其在建筑施工领域的应用还相对较少。

针对建筑施工现场安全评价与应用,国外学者的研究偏向于事故案例致因分析、安全状态评价及设计建模等理论,文献[3]提到了一种建筑施工“零事故”技术,即在项目实施前就确定好事故安全管理方案,以及相应的应急预案等安全保障措施;文献[4]设计了可进行人员定位与安全预警的监控系统,一旦人员进入事先设定的危险区域,系统将发出报警。国内方面,崔晓强等人开发了基于 BIM 技术的专家系统,实现了悬挑脚手架系统的自动化处理<sup>[5]</sup>;张泾杰基于建筑信息模型和无线传感网络技术,研发了建筑工人高处坠落事故智能预警系统<sup>[6]</sup>;贾广社基于跨层次的系统视角构建了建筑工人安全行为预警体系<sup>[7]</sup>。

综合国内、外建筑施工安全管理方面的研究现状,主要集中于通过对风险源辨识,构建风险评价模型并进行评价,以及对风险评价算法的改进方面,缺少针对建筑施工安全系统性的软硬件监测系统的研究,缺少实际现场应用价值。本文针对建筑施工现场采集信息并通过风险源筛选,构建施工现场风险评价模型,通过改进的层次分析方法结合模糊综合评价,实现对施工现场设备、人员及现场环境的实时监测和状态评估。

## 1 ANP-FUZZY 风险评价算法

基于 ANP-FUZZY 的建筑施工现场安全风险评价方法,依据网络层次分析结构原理计算施工现场物和施工人员风险指标权重,并应用模糊关系合成原理进行因素权向量模糊合成运算与归一化处理得到模糊评判结果。

### 1.1 网络分析法

ANP 非线性结构由控制层和决策层构成,其中控制层包含目标层和准则层,所有受控制层支配的元素构成网络层,元素之间互相影响,是一个互相依存、反馈的网络结构<sup>[8]</sup>。

#### 1.1.1 无权重超矩阵构建

设 ANP 系统控制层有元素  $C_1, C_2, \dots, C_m$ , 网络层有元素组  $E_1, E_2, \dots, E_n$ , 元素组  $E_n$  中有元素  $m_1, m_2, \dots, m_j (j=1, 2, \dots, N)$ , 首先以控制层作为主准则,以元素组  $E_n$  中  $m_k (k=1, 2, \dots, N)$  为次准则,对  $E_n$  中元素按照对  $m_k$  的影响力大小进行间接程度比较,得到判断矩阵  $P$ 。

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1N} \\ p_{21} & p_{22} & & p_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{N1} & p_{N2} & \cdots & p_{NN} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$p_{ij}$  表示  $E_m$  中元素  $m_j$  和  $m_i$  对  $m_k$  的影响力度。依据判断矩阵进行特征向量归一化处理得到排序向量  $(w_1^k, w_2^k, \dots, w_N^k)^T$ , 其中  $w_i^k (i=1, 2, \dots, N)$  表示  $E_m$  元素组中元素  $m_k (k=1, 2, \dots, N)$  准则下,  $E_m$  元素组中元素  $m_i$  的影响力大小。

同理,可得元素组  $E_m$  在控制层  $C_s$  为主准则和以元素组  $E_m$  中其他元素为次准则的判断矩阵及对应的特征向量。将控制层下所有元素组的排序向量矩阵归一化处理构成超矩阵,即可得到  $C_s$  准则下无权超矩阵:

$$W_{ij} = \begin{bmatrix} w_1^1 & w_2^1 & \cdots & w_N^1 \\ w_1^2 & w_2^2 & \cdots & w_N^2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_1^N & w_2^N & \cdots & w_N^N \end{bmatrix} \quad (2)$$

控制层有  $m$  个元素,并且所有的超矩阵均为非负矩阵,整个超矩阵的列并不是归一化的,  $W$  无法显示各元素的优先权。因此需要在元素组之间进行结对比较,得到权重矩阵,从而将无权超矩阵转化为加权超矩阵。

#### 1.1.2 加权超矩阵的构建

以控制层作为主准则,以任一元素组  $E_j$  为次准则,对各个元素组的重要程度进行比较判断,得到判断矩阵  $a_j$ , 对  $a_j$  进行归一化处理,求得归一化特征向量  $(a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{nj})^T$ , 其中  $a_{ij}$  是第  $i$  元素对第  $j$  元素的影响权重,由此得到准则下权重矩阵  $A$ :

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{N1} & a_{N2} & \cdots & a_{NN} \end{bmatrix} \quad (3)$$

随后用加权矩阵  $A$  对超矩阵  $W$  中的元素进行加权得  $W' = A \times W$ , 加权后处理后的矩阵  $W'$  即为加权超矩阵,其各列之和为 1。

#### 1.1.3 极限加权超矩阵

加权超矩阵  $W'$  中的元素表示指标元素间的一次优势度,将  $W'$  进行自乘,当  $n$  趋于无穷大且收敛唯一时,计算可得极限加权超矩阵  $(W')^\infty$  其列向量即为指标的权重,表示在控制层下网络层各元素间的极限优势度,取极限时,一般将加权超矩阵自乘 4~6 次得到收敛的极限加权超矩阵。

## 1.2 模糊综合评价

### 1.2.1 确定因素集、评判集

根据风险源辨识结果,确定因素集,其中  $m$

是因素个数.

$$U = \{u_1, u_1, \dots, u_m\} \quad (4)$$

选取合适的评价等级数, 并为评价等级进行赋值, 得到模糊评判集, 其中  $s$  为评语等级个数.

$$V = \{v_1, v_1, \dots, v_s\} \quad (5)$$

### 1.2.2 建立隶属度矩阵

在构造等级模糊子集后, 要从每个因素上对被评事物进行量化, 得到第  $i$  个因素  $u_i$  对评价  $v_j$  的隶属度  $r_{ij}$ , 同理可得到大小为  $m \times s$  的模糊关系矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1s} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2s} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{ms} \end{bmatrix} \quad (6)$$

### 1.2.3 建立评价指标的权重向量

选取指标权重分析方法, 对每个指标的权重进行确定, 通过对权重矩阵进行归一化处理可得到评价系统的权向量<sup>[9]</sup>.

$$W = (w_1, w_2, \dots, w_m) \quad (7)$$

### 1.2.4 合成模糊综合评价矩阵

实际应用场景中, 通常采取加权平均方法求解隶属等级, 能够很好兼顾系统的整体性. 因此利用加权平均算子将评价系统的权向量与各被评事物隶属度矩阵  $R$  进行合成, 即可求得各待评目标的模糊综合评价结果矩阵  $Z$ , 其中  $z_i$  表示被评目标从整体上看对  $v_j$  模糊子集的隶属度.

$$Z = W \times R \quad (8)$$

### 1.2.5 建筑施工现场风险综合分值

施工现场安全评价体系多个风险因子之间相互联系、相互影响, 且评价过程中存在大量模糊性描述语言. 本文对建筑施工现场的风险源分别采用 ANP 法求得各因素的权重  $W_1$ 、 $W_2$ , 确定隶属度矩阵  $R_1$ 、 $R_2$ , 最终利用公式(8)得到各自的评价综合分值, 能够有效克服专家法等直接给出权重方法的缺点, 评判结果更客观、更准确.

## 1.3 超级决策软件辅助网络分析

由于 ANP 法的计算过程比较复杂, 人工计算方式不具备可行性, 借助计算机功能能够大大减少计算时间且计算准确度较高. 决策软件 SD 是 ANP 的应用软件, 主要用于辅助计算任何状态的 ANP 模型, 还能将计算结果以表格、图像等方式进行显示与另存为到本地. 若不输入相关元素之间的关系, 该软件具有操作简单的可视化界面, 还可用于计算 AHP 模型. 使用 SD 进行决策的基本步骤如图 1 所示.

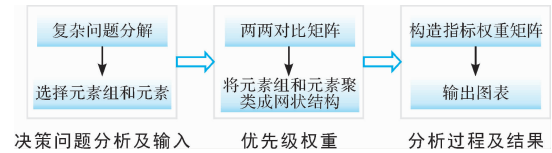


图 1 SD 软件决策步骤

Fig. 1 SD software decision steps

## 2 应用系统框架

### 2.1 系统设计框架

物联网建筑施工现场远程环境监测系统主要分为环境信息、脚手架姿态、人员信息采集子节点, 远程数据传输和上位机软件, 多个子节点采集数据后通过无线数据传输到上位机进行数据处理、存储, 并上传至云端网络, 多个监测端子节点通过无线网络访问云端并进行数据交换. 以某一子节点为例, 建筑施工现场监测系统, 包含硬件设备和软件平台两部分, 用于实现施工现场“人和物”状态信息采集、无线传输、安全评价、信息存储以及上位机发布, 由以下几个部分构成: 1、传感器模块; 2、微处理器; 3、无线通信模块; 4、供电系统; 5、信息发布平台. 系统软硬件工作框图如图 2 所示.

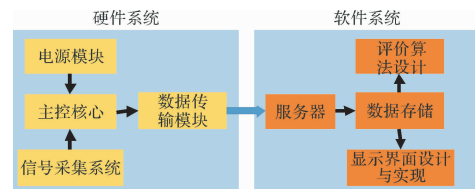


图 2 系统框图

Fig. 2 System block diagram

### 2.2 安全监测指标体系

建筑施工工程中常采用系统安全分析方法有: 风险清单法<sup>[10]</sup>、SWOT 分析方法<sup>[11]</sup>、专家调查法<sup>[12]</sup>等. 安全评价指标体系建立的好坏, 将会直接影响评价结果的优劣. 若评价体系中指标选取得过多, 会使得指标体系过于复杂, 增加了评价步骤和难度; 若是指标个数选取的较少, 评价过程虽简单易操作, 却不能全面反映出施工现场的客观状况.

根据建筑施工事故类型统计数据, 对各项事故造成主要影响的对象为人和物两个因素, 本文在对影响脚手架和施工人员安全性的因素进行调查、分析及总结的基础上, 综合考虑影响因素实际影响力大小、设备可行性以及实际操作的难易程度, 对现场影响因素进行筛选, 从而构建施工现场安全智能监测系统, 施工现场安全监测指标体系如图 3 所示.

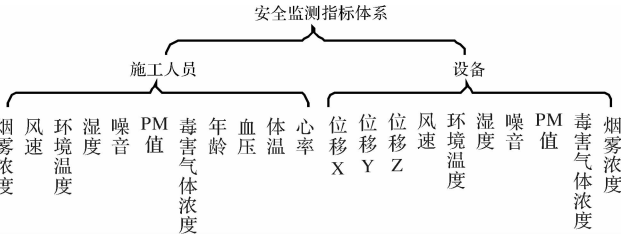


图 3 施工现场安全监测指标体系

Fig. 3 Safety monitoring index system of construction site

施工现场的各种风险因素并非相互独立的，它们相互影响、相互作用，因此在风险因素识别完成后，需要研究各风险源之间的相互关系。因此，从安全评价方法的预防性、科学化、综合性、适用性和可操作性出发，本文选择改进的层次分析方法结合模糊综合评价，即网络层次分析-模糊评价法(ANP-FUZZY)进行现场环境及施工人员的风险性分析，并利用超级决策软件(Super decision, SD)辅助计算，弥补 ANP-FUZZY 计算量庞大的缺点。

3 应用实例与测试

基于 ANP-FUZZY 评价算法、硬件检测系统和软件系统各部分的研究，设计了建筑施工现场风险智能监测平台，实现施工人员和环境参数及脚手架多维度智能网联在线监测。为了能够客观的验证施工现场监测方案中对脚手架和施工人员的实时监测功能，对检测目标进行设计。

施工人员监测对象：在不干扰正常工作的条件下，确保监测对象身体健康，进行监测前应避免食用的功能性饮品、药物等，确保监测期间精神状况良好。参照确定的危险因素阈值，在监测过程中，监测对象若出现任一危险状态或检测对象主动停止监测，进行示意后，监测终止。

环境参数及脚手架监测对象：为更好验证系统的功能，选择八层以上的悬挑外架作为监测对象，根据脚手架安装规范和施工人员经验，将监测箱固定于某一横杆上，要求监测箱尽量避开塔吊碰撞区域及人员施工区域，且不可影响脚手架本身结构。

环境参数监测箱设计示意图如图 4 所示，箱底部采用扣件与脚手架连接。经过专业管理人员确认，将建筑环境参数监测箱通过螺栓等扣件固定在人员作业面、机械作业较频繁的外架横杆上。

3.1 指标权重的确定

初始超矩阵由组内判断矩阵构成，采用间接优势度方法求得各风险因素判断矩阵，以 B1(环境因素)组内元素 C0(风速)为例，在 C0 准则下，对 B2 中各个风险因素的重要性进行比较，构建判断矩阵

如表 1 所示。

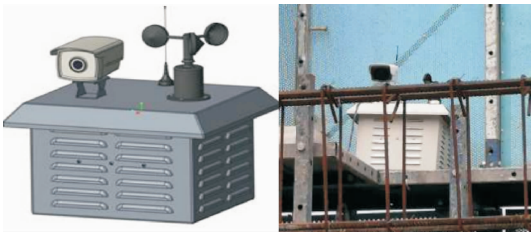


图 4 监测箱设计图及安装现场图

Fig. 4 Design of monitoring box

表 1 风速对于位移变化的重要性

Tab. 1 Importance of wind speed todisplacement variation

C0	C7	C8	C9
C7	1	8	9
C8	1/ 8	1	1/ 5
C9	1/ 9	5	1

元素组 B1, B2 间判断矩阵权重描述示例如表 2 所示。

表 2 组间判断矩阵权重描述

Tab. 2 The weight description of inter group judgement mathx

B1	B1	B2	B2	B1	B2
B1	1	6	B1	1	1
B2	1/ 6	1	B2	1	1

根据公式(3)可得判断权重矩阵：

$$A=\begin{bmatrix}0.857, & 0.5 \\ 0.142, & 0.5\end{bmatrix} \tag{9}$$

代入公式可得加权超矩阵 W'，根据矩阵的收敛特点，选择自乘 4 次得到稳定的极限超矩阵。根据建筑环境和施工人员风险评价指标体系，在决策软件 SD 中建立施工环境因素及脚手架 ANP 风险评价结构和施工人员 ANP 风险评价结构。

将建筑施工环境因素及脚手架极限超矩阵输入 SD 软件的 ANP 模型中，SD 软件生成的指标权重表整理后如表 3 所示。

表 3 建筑施工环境及脚手架指标权重

Tab. 3 Construction environment and scaffold index weight

风险类别	风险因素	权重
环境因素 0.935	风速	0.247
	环境温度	0.064
	湿度	0.301
	噪声	0.103
	PM 值	0.054
	有害气体浓度	0.109
物的因素 0.064	烟雾浓度	0.057
	水平位移 X	0.040
	水平位移 Y	0.006
	竖直位移	0.018

同理可得主准则下施工人员风险因素权重。

### 3.2 安全状态确定

根据表3中建筑施工环境因素及脚手架各因素全局权重数据,可得其二级指标权向量。风险评价一级指标的权向量为 $W=(0.935, 0.064)^T$ ,将施工现场检测系统采集到现场各被监测指标信息数据进行归一化处理,记为

$$R_1=(d_{10}, d_{11}, \dots, d_{16}) \quad (10)$$

$$R_2=(d_{21}, d_{22}, \dots, d_{23}) \quad (11)$$

根据公式(8)即求出各指标对风险状态的贡献程度和。理论分析中,根据各指标综合评分在评价标准中所处位置可判断评价状态,但在实际的施工中,任何一个影响因素超出临界值都将处于危险状态,因此本文建筑施工现场安全综合评价建立在各

评价指标“一票否决”的基础上,当有任一影响因素超出阈值即进行危险预警。

评价标准值的求解在控制其他指标保持在安全状态下,使其中一个指标分别取两个安全值、一个临界值进行安全评价,共得到30组评价数据,将评价结果划分为安全、不安全和危险三个安全等级,建筑施工环境及脚手架评价数据如表4所示。脚手架状态表中,所有30组安全状态的综合评分的平均值为3.648,标准差为0.214。结合实际工程经验,选取2倍的标准差作为评价范围,选取2.5倍标准差作为状态危险的基准。最终的状态评价结果通过比较实时评分 $Z$ 和评价标准 $Z_0$ 的结果得到,评价标准如表5所示。

表4 建筑施工环境及脚手架参数状态表

Tab. 4 Construction environment and scaffold parameter status table

	指标取值	综合评分	实际状态	评价状态		指标取值	综合评分	实际状态	评价状态
风速 D1	5	3.58	安全	安全	毒气 D6	40	3.62	安全	安全
	10	4.04	安全	安全		50	3.7	安全	安全
	20	4.96	不安全	危险		70	4.13	不安全	不安全
温度 D2	24	3.85	安全	安全	烟雾 D7	0.05	3.54	安全	安全
	16	3.6	安全	安全		0.10	3.76	安全	安全
	-5	3.14	不安全	不安全		0.15	3.19	不安全	不安全
湿度 D3	0.5	3.8	安全	安全	位移 $x$ D8	0	3.77	安全	安全
	0.45	3.32	安全	安全		20	3.19	不安全	不安全
	0.7	4.99	不安全	危险		10	3.7	安全	安全
噪声 D4	30	3.68	安全	安全	位移 $y$ D9	0	3.64	安全	安全
	10	3.32	安全	安全		10	3.29	安全	安全
	70	4.09	不安全	不安全		20	3.06	不安全	不安全
PM D5	100	3.45	安全	安全	位移 $z$ D10	0	4.11	安全	安全
	60	3.5	安全	安全		10	3.29	安全	安全
	200	3.07	不安全	不安全		20	2.84	不安全	不安全

表5 安全等级评价

Tab. 5 Safety level evaluation

安全等级	分值
安全	(3.22, 4.076)
不安全	[2.792, 3.22] $\cup$ [4.067, 4.506]
危险	$(-\infty, 2.792) \cup (4.506, +\infty)$

同理可求得施工现场人员的安全等级和状态评价结果。根据风险评价模型的分析结果,对比实际监测中环境、脚手架和施工人员的状态,评价方法能够识别出危险状态和不安全状态,其30组和60组小样本风险评价实验结果如表6所示,其风险识别率均为100%。30组实验时,脚手架状态误判率7%,工人状态误判率3%,而在60组小样本实验中,脚手架状态误判率降低至1.7%,工人状态误

判率0,综合识别率和状态误判率,验证了风险评价模型的可行性和准确性。

表6 小样本风险评价实验结果

Tab. 6 Small sample risk evaluation experiment results

	数据组	安全组	不安全	识别 危险	识不 安全	识别 率	误判 率
脚手架	30	18	12	2	10	1	7
	60	46	24	1	23	1	1.7
工人	30	18	12	1	11	1	3
	60	46	24	0	24	1	0

## 4 结语

本文在对建筑施工现场安全管理现状研究的基础上,通过风险源辨识构建了施工现场“人和物”安

全管理评价指标体系,提出了基于物联网技术的施工现场安全管理系统解决方案,并结合监测实例,对监测系统应用效果进行验证,实现了对建筑施工环境、脚手架状态和施工人员的状态监测和评价。整个施工现场智能网联监测系统结构简单,操作简单安装方便,稳定性好,能实现全天候监测。下一步研究应集中于研究相关风险预警;同时结合现有分析考虑其可预测性,增加预测模型。

## 参考文献 References

- [1] AKERSTEN P A. Loss control management [J]. IEEE, 2011.
- [2] 熊超华, 骆汉宾. 施工现场作业环境监测数据融合预警方法研究[J]. 施工技术, 2018, 47(23):130-134.  
XIONG Chaohua, LUO Hanbin. Research on data fusion and early warning method of construction site operation environment monitoring [J]. Construction Technology, 2018, 47 (23): 130-134.
- [3] 刘继东. 建筑工程施工安全管理研究[D]. 北京:北京建筑大学, 2019.  
LIU Jidong. Research on construction safety management of construction engineering [D]. Beijing:Beijing University of Architecture, 2019.
- [4] ABDERRANIM M, GARCIA E, DIEZ R, et al. A mechatronics security system for the construction site[J]. Automation in Construction, 2005, 14(4):460-466.
- [5] 崔晓强, 季方, 李自可. 基于 BIM 的悬挑脚手架专家系统开发[J]. 建筑施工, 2017, 39(5):673-675.  
CUI Xiaoqiang, JI Fang, LI Zike. Development of cantilever scaffold expert system based on BIM[J]. Construction, 2017, 39 (5): 673-675.
- [6] 张泾杰, 韩豫, 马国鑫, 等. 基于 BIM 和 RFID 的建筑工人高处坠落事故智能预警系统研究[J]. 工程管理学报, 2015, 29(6):17-21.  
ZHANG Jingjie, HAN Yu, MA Guoxin, et al. Research on intelligent early warning system for falling accidents of construction workers based on BIM and RFID [J]. Journal of Engineering Management, 2015, 29(6): 17-21.
- [7] 贾广社, 何长全, 陈玉婷, 等. 跨层次视角下建筑工人安全行为预警[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(4): 568-574.  
JIA Guangshe, HE Changquan, CHEN Yuting, et al. Safety behavior early warning of construction workers from a cross level perspective [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2019, 47 (4): 568-574.
- [8] 张琪, 江青文, 张瑞奇. 基于多级模糊综合评价方法的绿色施工指标体系研究[J]. 施工技术, 2017, 46(S2): 1320-1322.  
ZHANG Qi, JIANG Qingwen, ZHANG Ruiqi. Study on green construction index system based on multi-level fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Construction Technology, 2017, 46 (S2): 1320-1322.
- [9] GÜLCN Büyükö zkan, DA Ruan. Evaluation of software development projects using a fuzzy multi-criteria decision approach[J]. Mathematics & Computers in Simulation, 2008, 77(5-6):464-475.
- [10] HUDOKLIN A , ROZMAN V . Safety analysis of the railway traffic system[J]. Reliability Engineering & System Safety, 1992, 37(1):7-13.
- [11] ADEL HM, MADJID T, VAHID H, et al. An extended compromise ratio method for fuzzy group multi-attribute decision making with SWOT analysis [J]. Applied Soft Computing Journal, 2013, 13(8).
- [12] HAROLD A Linstone, MURRAY T. The delphi method: techniques and applications[J]. Journal of Marketing Research, 1975, 18(3)

(编辑 吴海西 沈 波)