



南京工业大学  
NANJING TECH  
UNIVERSITY



南京工业大学  
土木工程学院 COLLEGE OF CIVIL ENGINEERING  
NANJING TECH UNIVERSITY

# 三度空间视角下的装配式建筑施工安全绩效评价

Safety performance evaluation of prefabricated building construction  
from perspective of three-dimensional space

报告人： 余健俊

日期：2022年12月 28日

# 目 录

1

研究背景与内容

2

研究方法

3

研究案例分析

4

研究结论与展望

# 1 研究背景与内容

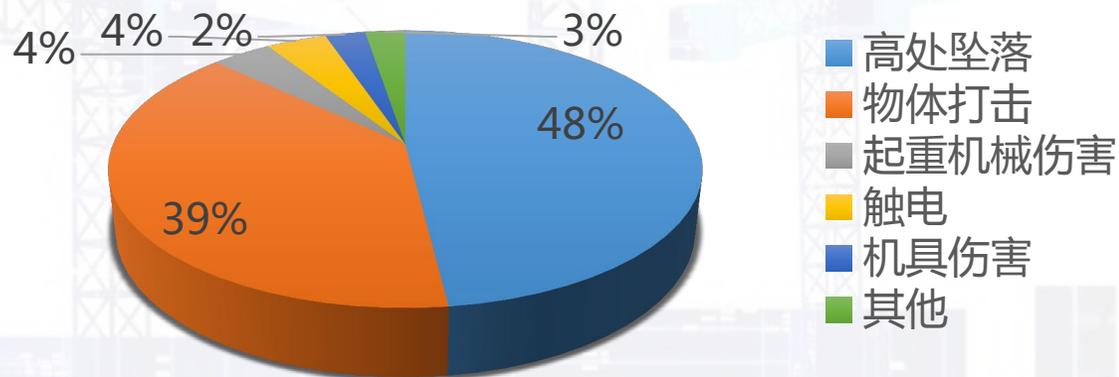
## 1、装配式建筑施工安全绩效

装配式建筑

装配式建筑施工安全绩效

- **2016年国务院大力倡导，2020年8月国家住建部颁布《关于加快新型建筑工业化发展的若干意见》**
- **建造方式：**标准化设计、工厂化生产、装配化施工和一体化装修
- **建造主要过程：**构件生产、构件运输、现场吊装和构件安装
- **优势：**施工过程大大简化、能源消耗可降低40%、建筑垃圾可减少70%、工期可缩短20%、施工扬尘和噪声污染显著降低，高度契合了绿色建筑的要求

- **装配式建筑施工安全绩效：**在装配式建筑施工过程中，施工单位对于安全管理目标实现程度的可测量结果
- **安全事故类别：**主要为高处坠落、物体打击、起重机械伤害、触电、机具伤害和其他

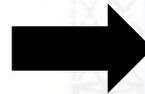


我国2018-2022年装配式建筑行业事故类别统计图

## 2、装配式建筑施工安全绩效评价

### 国内外关于安全绩效评价的研究现状

- 利用层次分析法（AHP）对绩效评价指标进行赋权，**但AHP方法强调独立性假设，忽视了人、物、信息及事件等多因素关联**
- 构建安全绩效评价六因素指标体系并利用AHP-熵权法以组合赋权其权重；基于三角模糊熵权法的物元可拓云构建安全绩效评价模型；**但忽视了灰色性与模糊性两方面对于绩效评价结果的影响**
- 将数据包络分析方法（DEA）计算综合效率值的思路应用于安全绩效评价中；同时将大数据环境考虑应用于安全绩效管理中，**但对数据体量要求较高**



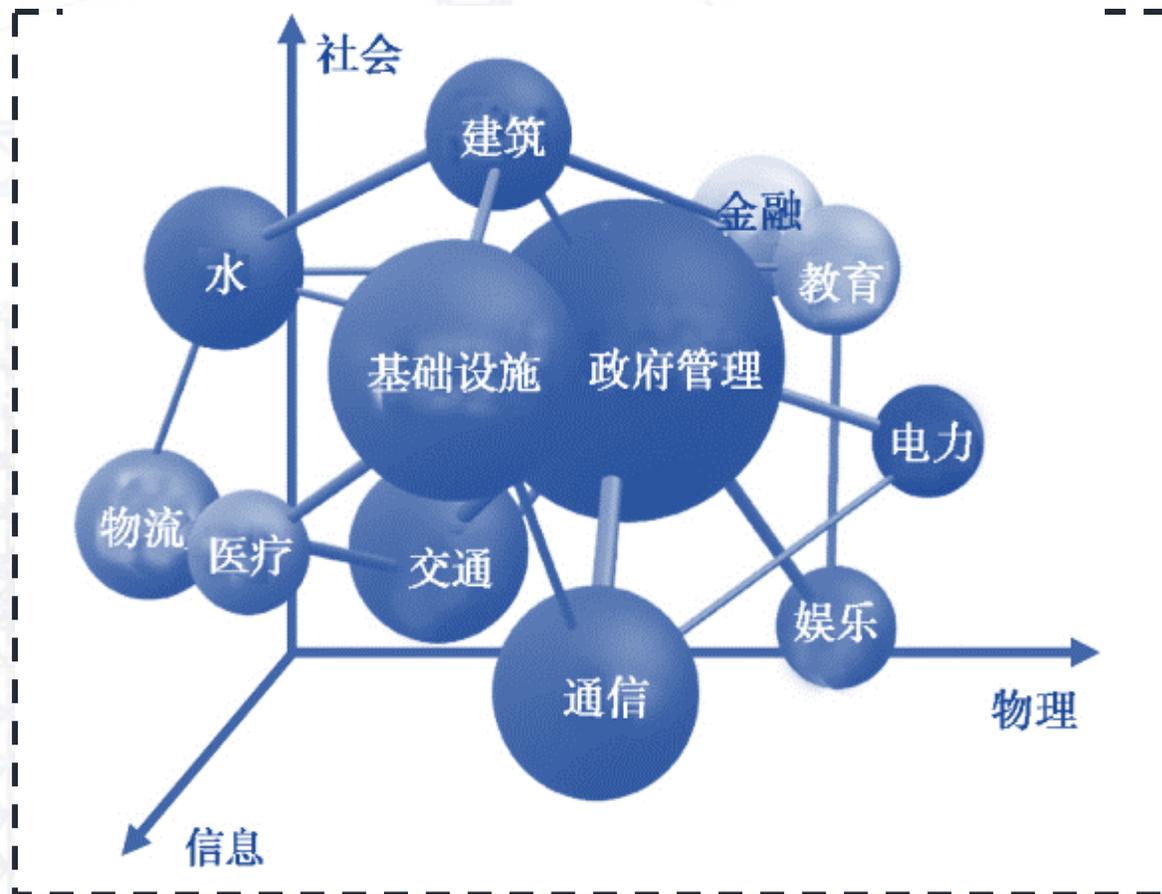
### 综合定量与定性的基于ANP-GCM的装配式建筑施工安全绩效评价方法

- 在信息化的大背景下，提出**三度空间**视角下的装配式建筑施工安全绩效评价体系
- 考虑在装配式建筑施工安全绩效评价指标之间**相互影响、相互反馈**的问题
- 提出利用**ANP和GCM相结合**的评价方法，有效地处理绩效评价过程中**模糊性与灰色性**两方面的影响
- 通过实际装配式建筑工程项目的**安全绩效评价案例**，提出针对性的绩效提升方法

## 2 研究方法

## 1、三度空间方法论

- 三度空间方法论是Kasai等提出的一种**理解城市化现状和前景的系统论方法**
- 在三度空间方法论视角下，城市不仅仅是**建筑的集群，人类的活动、组织的交流与沟通、信息的交互与传播**都是组成城市的重要元素
- 城市“三度空间”的组成包括**物理、社会和信息**三个要素。构成城市的所有系统均处于城市的“三度空间”中。每个系统均可在物理、社会和信息空间找到其相应的“投影”。



三度空间下系统的系统

## 2、装配式建筑工程项目的三度空间解释

- 装配式建筑工程项目作为为城市提供实体发展基础的子系统，**既组成并完善了城市功能，又保持一定的独立性发挥功能**。装配式建筑工程项目三度空间的概念界定如下

- 物理空间中的对象通常由自然科学方法、工程技术描述和处理
- 是包括装配式建筑工程项目**除人以外的所有实体和环境的直观空间**
- 如装配式建筑施工现场中的作业设备、建筑构件、安全物品等正常施工的**必要物品及施工现场环境**

### 物理空间

- 社会空间中的对象通常由社会科学方法、管理学方法描述和处理
- 区别于工程实体和环境，**由工程相关人员及其活动构成的空间**
- 具体组成包括人员、施工工艺及技术、组织管理等方面

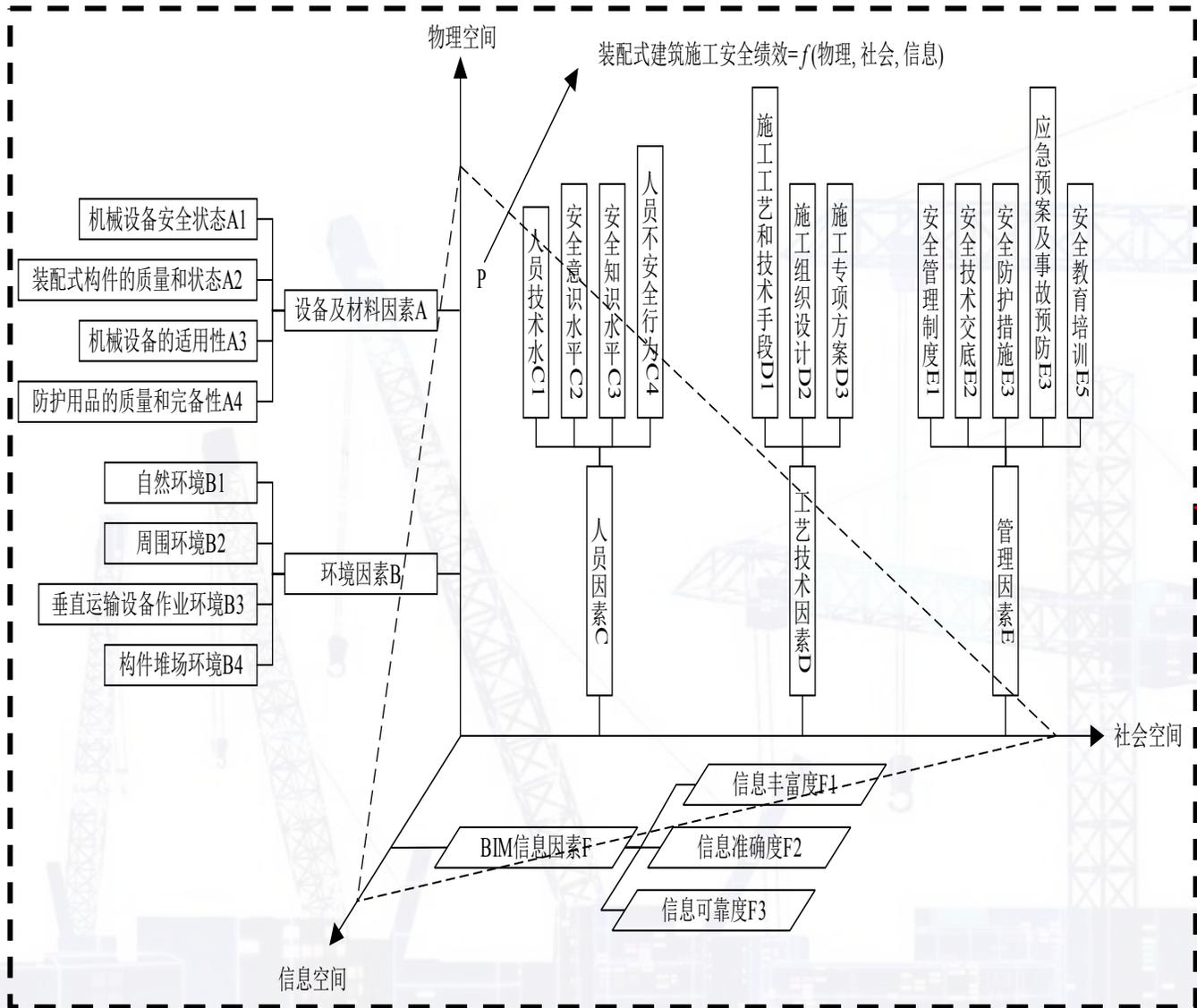
### 社会空间

- 由各类包括BIM、GIS、BigData和AI等**信息技术及其信息流构成的空间**
- 不同于传统的解释方法论，三度空间方法论认为信息对于装配式建筑工程项目的现代化和智能化不可或缺

### 信息空间



## 3、装配式建筑施工安全绩效评价指标体系



## ■ ANP-GCM安全绩效评价模型——1、基于ANP的指标权重确定；2、基于灰色聚类的安全绩效评价

- 利用**网络分析法ANP**分析：1、对不同指标之间的影响关系进行定性描述；2、计算其评价指标权重。
- 运用**灰色聚类法GCM**以定量化评估各指标对应各个等级（不及格、及格、中等、良好、优秀）的隶属度，得到项目与对应指标的评价等级

### 网络分析法 (Analytic Network Process)

- ANP由美国的T.L.Saaty教授提出，**用于解决层次分析法(AHP)在决策时不能处理的非独立递阶层次结构的问题**
- 将风险体系中的影响因素分为控制层和网络层。控制层包含决策准则与风险目标，对于全部决策准则只由风险目标元素主导且相互间独立。受控制层主导的元素集组成了网络层，内部互相依存、互相影响

### 灰色聚类法 (Grey Cluster Method)

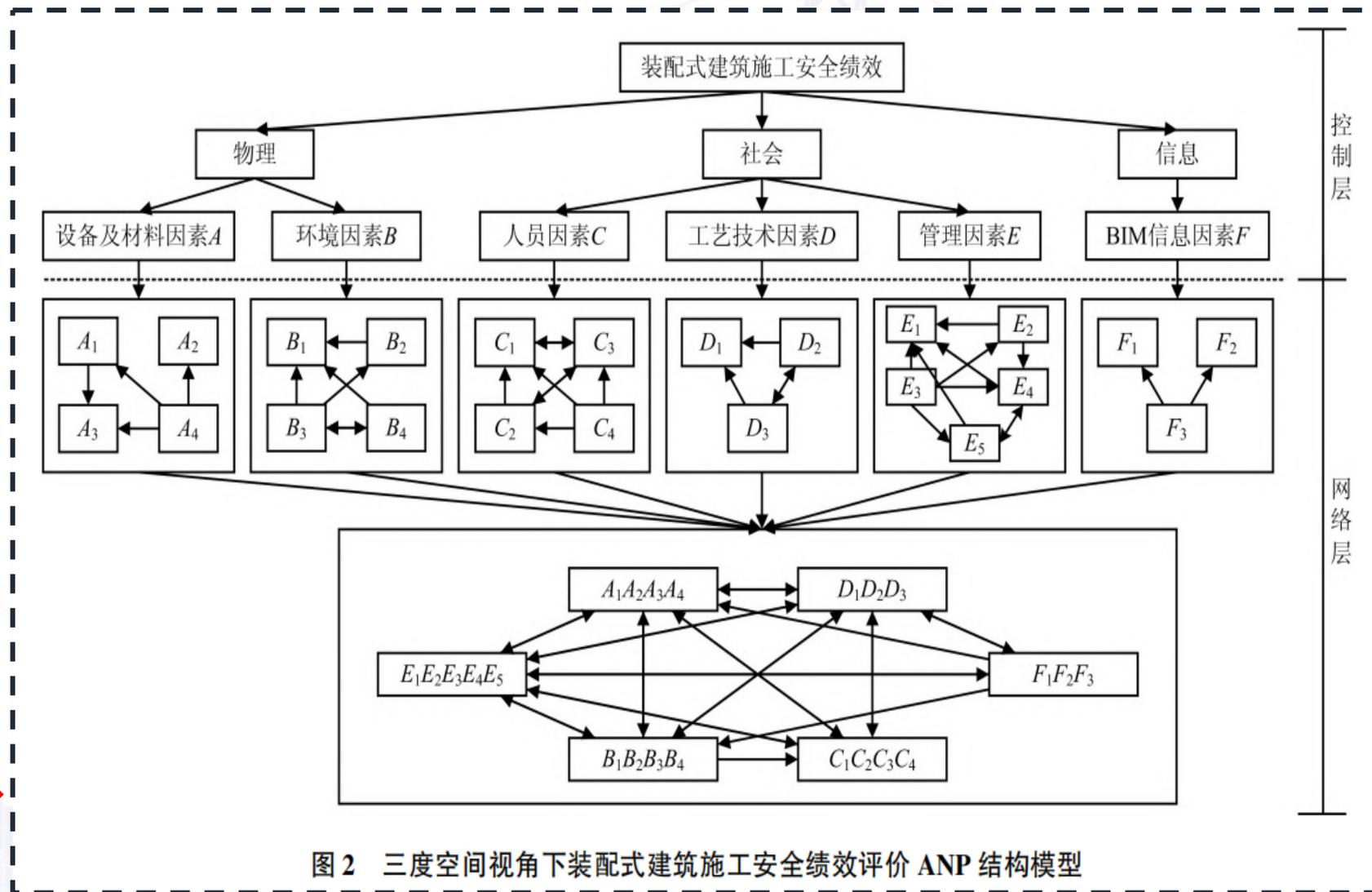
- 灰色聚类法由我国邓聚龙教授依照“灰箱”概念于1982年首次提出，将风险信息不清楚、表述不完整的因素按照不同的性质进行分类，建立相对应性质的白化权函数，**对风险因素聚类分析得到综合评价值，进而确定风险等级**
- 广泛应用于水质分析、大气污染评价，尤其在地质灾害评价领域广泛发展

## 1、基于ANP的指标权重确定——(1) ANP网络建构关系构建

采取德尔菲法咨询意见，结合对南京某装配式建筑项目的实地调查和实证分析

通过判断调查表确定评价准则、网络节点即指标之间的相互影响关系

创建三度空间视角下的装配式建筑施工安全绩效评价 ANP 网络结构模型



## (2) 构建未加权初始超矩阵

- 采用九分法比较评价指标的相对优势度，构建判断矩阵并进行一致性检验以验证此时权重向量为  $w' = (w'_1, w'_2, \dots, w'_n)$ ，记  $W_{ij}$  如式 (1)

$$W_{ij} = \begin{pmatrix} w_{i1}^{j1} & \cdots & w_{i1}^{jn} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{in_i}^{j1} & \cdots & w_{in_i}^{jn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

- 式中： $W_{ij}$  为判断矩阵，其列向量为安全绩效评价指标  $P_{ini}$  对  $P_{jn}$  的影响度排序向量



- 评价指标相互影响的未加权超矩阵，如式 (2)

$$W = \begin{pmatrix} w_{11} & \cdots & w_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{N1} & \cdots & w_{NN} \end{pmatrix} \quad (2)$$

## (3) 计算加权超矩阵

- 对  $W$  进行归一化处理，计算  $W_{ij}$  的归一化特征向量  $(a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{Nj})$ ，得到加权矩阵，如式 (3)

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N1} & \cdots & a_{NN} \end{pmatrix} \quad (3)$$

- 对超矩阵  $W$  的元素加权，得到加权超矩阵，如式 (4)

$$\bar{W}_{ij} = a_{ij} W_{ij} \quad (4)$$

- 对超矩阵做稳定性处理，得到极限超矩阵，如式 (5)

$$W^\infty = \lim_{k \rightarrow \infty} W^k \quad (5)$$

- $W^\infty$  的列向量即为装配式建筑施工安全绩效评价指标  $P_{ini}$  权重向量  $W'$ ，如式 (6)

$$W' = (W'_{11}, W'_{12}, \dots, W'_{Nn})^T \quad (6)$$

- 则各安全绩效评价指标  $P_{ij}$  在各自所属类别  $P_i$  中规范化权重向量，如式 (7)

$$W'_i = (W'_{i1}, W'_{i2}, \dots, W'_{in_i})^T \quad (7)$$

## 2、基于灰色聚类的安全绩效评价

### ■ (1) 安全绩效评价灰类的确定

- 将安全绩效评价等级划为5个灰类，具体灰类区间相应百分制取值如左图所示

|          |        |         |         |         |          |
|----------|--------|---------|---------|---------|----------|
| 安全绩效评价等级 | 不及格    | 及格      | 中等      | 良好      | 优秀       |
| 分值范围     | (0,60] | (60,70] | (70,80] | (80,90] | (90,100] |

### ■ (2) 构建指标中心点三角白化权函数

- 设 $\lambda$ 为第 $k$ 个灰类的中心点，并连接第 $k$ 个灰类中心点 $(\lambda, 1)$ 与 $k-1$ 个灰类中心点 $(\lambda_{k-1}, 1)$ 和第 $k+1$ 个灰类中心点 $(\lambda_{k+1}, 1)$ ，得到 $j$ 指标关于 $k$ 灰类的三角白化权函数 $f_j^k(x)$ ， $(j = 1, 2, \dots, m; k = 2, 3, 4)$

$$f_j^1(x) = \begin{cases} 0, & x \notin [0, 65] \\ 1, & x \in [0, 30] \\ \frac{65-x}{65-30}, & x \in (30, 65] \end{cases} \quad (8)$$

$$f_j^k(x) = \begin{cases} 0, & x \notin (\lambda_{k-1}, \lambda_{k+1}] \\ \frac{x - \lambda_{k-1}}{\lambda_k - \lambda_{k-1}}, & x \in (\lambda_{k-1}, \lambda_k] \\ \frac{\lambda_{k+1} - x}{\lambda_{k+1} - \lambda_k}, & x \in (\lambda_k, \lambda_{k+1}] \end{cases} \quad (9)$$

$$f_j^5(x) = \begin{cases} 0, & x \notin (85, 100] \\ \frac{x - 85}{95 - 85}, & x \in (85, 95] \\ 1, & x \in (95, 100] \end{cases} \quad (10)$$

### ■ (3) 构造模糊隶属度矩阵并进行模糊综合评价

- 计算得出装配式建筑施工安全绩效评价指标的权重 $W'_i$
- 模糊综合评价矩阵 $X$ 的组成元素计算方法，如式(11)

$$\sigma_i^k = \sum_{i=1}^5 f_i^k(x_{ij}) W'_i \quad (i=1, 2, \dots, 5; k=1, 2, 3, 4) \quad (11)$$

- 计算综合评价系数，如式(12)

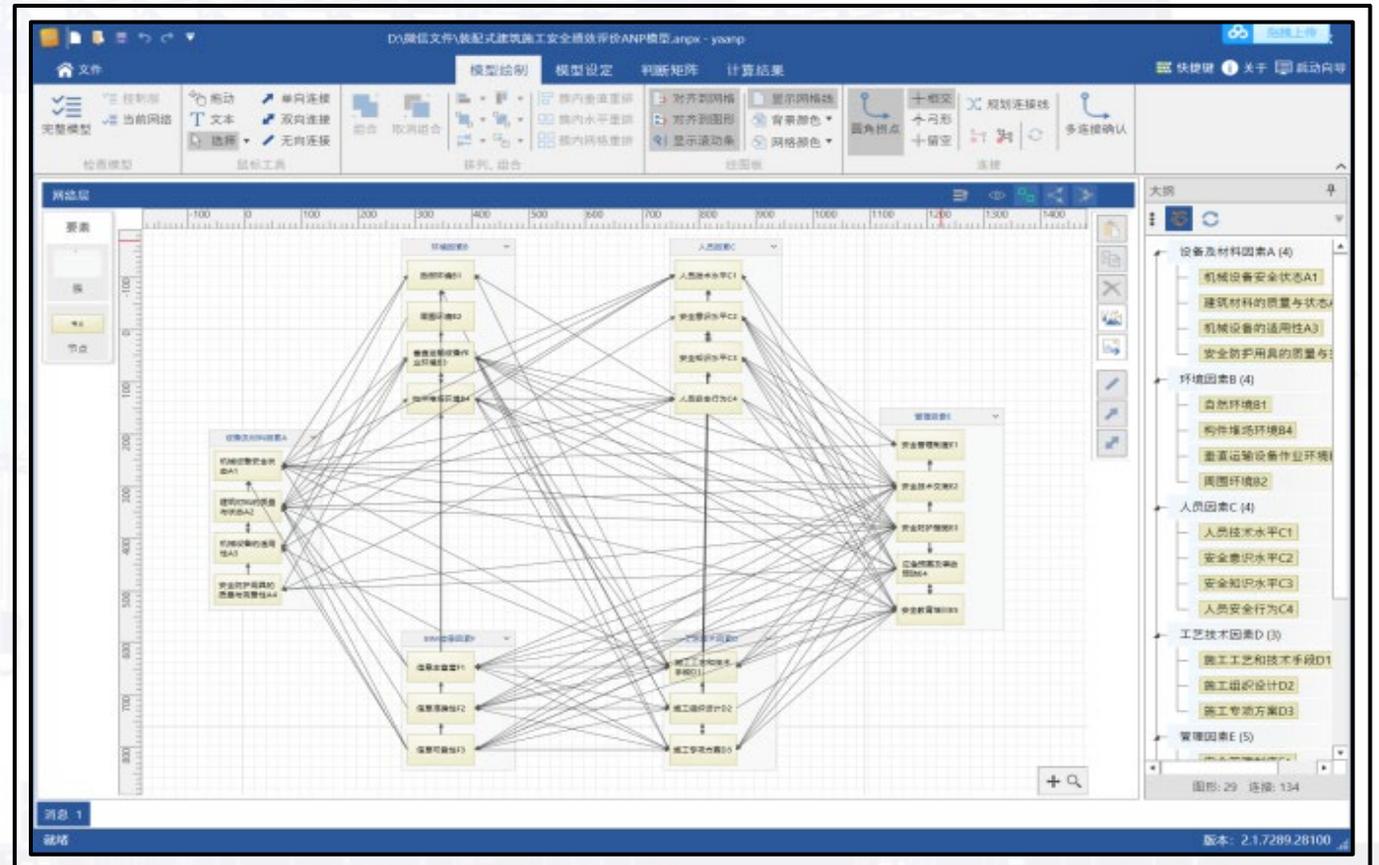
$$\gamma^k = \sum_{i=1}^5 \sigma_i^k W'_i \quad (i=1, 2, \dots, 5; k=1, 2, 3, 4) \quad (12)$$

# 3 研究案例分析

- 公司名称：中建A公司
- 项目地点：南京
- 建筑类型：医疗科研中心装配式建筑项目
- 项目概况：含地下车库2层，地上建筑11层，局部3~4层，总建筑面积35140.77m<sup>2</sup>
- 结构形式：预制装配整体式框架结构
- 预制构件：预制构件为预制叠合梁、预制叠合板
- 预制比率：项目预制率为19.02%，预制装配率为41.17%

## ■ 1、采用yaanp软件构件ANP模型

- 采用**Yet Another ANP软件**（简称yaanp软件）对指标权重进行计算和确定，构建**ANP模型**，如下图所示



## 2、基于ANP确定安全绩效评价指标权重

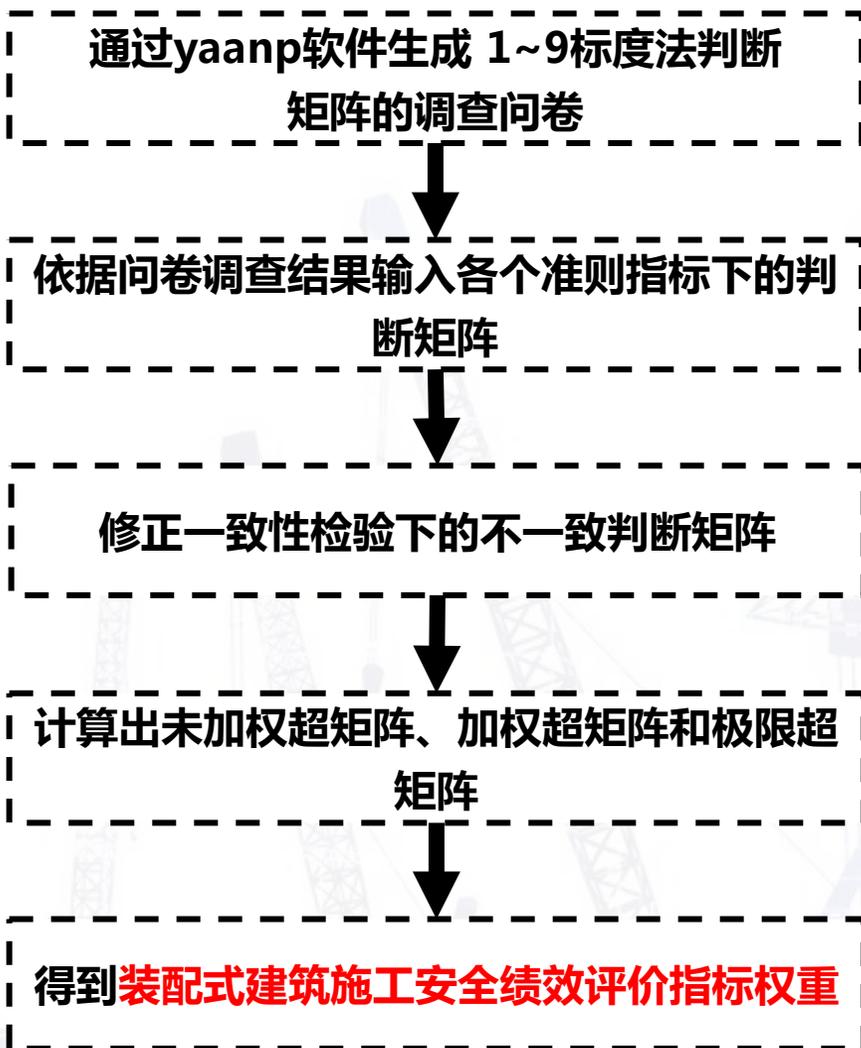


表3 装配式建筑施工安全绩效评价指标权重

Table 3 Weight of safety performance evaluation index of prefabricated building construction

| 1级指标      | 1级指标权重  | 2级指标                       | 2级指标权重  | 1级指标       | 1级指标权重  | 2级指标                     | 2级指标权重  |
|-----------|---------|----------------------------|---------|------------|---------|--------------------------|---------|
| 设备及材料因素 A | 0.084 6 | 机械设备安全状态 A <sub>1</sub>    | 0.01    | 工艺技术因素 D   | 0.142 4 | 施工工艺和技术手段 D <sub>1</sub> | 0.078   |
|           |         | 装配式构件的质量和状态 A <sub>2</sub> | 0.052 9 |            |         | 施工组织设计 D <sub>2</sub>    | 0.019 5 |
|           |         | 机械设备的适用性 A <sub>3</sub>    | 0.014 2 |            |         | 施工专项方案 D <sub>3</sub>    | 0.044 9 |
|           |         | 防护用品的质量和完备性 A <sub>4</sub> | 0.007 5 |            |         | 安全管理制度 E <sub>1</sub>    | 0.073 7 |
| 环境因素 B    | 0.033 3 | 自然环境 B <sub>1</sub>        | 0.009 8 | 管理因素 E     | 0.301 3 | 安全技术交底 E <sub>2</sub>    | 0.082   |
|           |         | 周围环境 B <sub>2</sub>        | 0.000 3 |            |         | 安全防护措施 E <sub>3</sub>    | 0.012   |
|           |         | 垂直运输设备作业环境 B <sub>3</sub>  | 0.015 1 |            |         | 应急预案及事故预防 E <sub>4</sub> | 0.026 9 |
|           |         | 构件堆场环境 B <sub>4</sub>      | 0.008 1 |            |         | 安全教育培训 E <sub>5</sub>    | 0.106 7 |
| 人员因素 C    | 0.356 3 | 人员技术水平 C <sub>1</sub>      | 0.095 8 | BIM 信息因素 F | 0.082 1 | 信息丰富度 F <sub>1</sub>     | 0.033   |
|           |         | 安全意识水平 C <sub>2</sub>      | 0.067 8 |            |         | 信息准确性 F <sub>2</sub>     | 0.034 3 |
|           |         | 安全知识水平 C <sub>3</sub>      | 0.172 8 |            |         | 信息可靠性 F <sub>3</sub>     | 0.014 8 |
|           |         | 人员不安全行为 C <sub>4</sub>     | 0.019 9 |            |         |                          |         |

### 3、基于灰色聚类的安全绩效评价

- **评分对象**：项目资料和工程实际情况对ANP模型中的23个二级指标
- **评分依据**：本项目在所列的安全绩效评价指标方面的落实和完成情况
- **成果**：中建A公司在南京某装配式建筑施工安全绩效指标评分及安全绩效评价测算表
- 结合利用ANP网络和判断矩阵求得的安全绩效评价指标权重，**求出各指标的灰类隶属度**
- 依据最大隶属度原则，计算出该项目的安全绩效位于 **“良好”灰类等级**

| 安全绩效评价<br>评价指标 | 安全绩效指标专家评分 |     |     |     |     |      | 安全绩效评价测算 |       |       |       |       | 所属灰<br>类等级 |
|----------------|------------|-----|-----|-----|-----|------|----------|-------|-------|-------|-------|------------|
|                | 专家1        | 专家2 | 专家3 | 专家4 | 专家5 | 平均分  | 不及格      | 及格    | 中等    | 良好    | 优秀    |            |
| A <sub>1</sub> | 86         | 77  | 72  | 80  | 83  | 79.6 | 0        | 0     | 0.260 | 0.460 | 0.020 | 良好         |
| A <sub>2</sub> | 98         | 93  | 96  | 95  | 97  | 95.8 | 0        | 0     | 0     | 0     | 0.720 | 优秀         |
| A <sub>3</sub> | 90         | 92  | 95  | 97  | 93  | 93.4 | 0        | 0     | 0     | 0     | 0.720 | 优秀         |
| A <sub>4</sub> | 68         | 71  | 74  | 73  | 75  | 72.2 | 0        | 0.080 | 0.720 | 0     | 0     | 中等         |
| B <sub>1</sub> | 92         | 90  | 88  | 89  | 85  | 88.8 | 0        | 0     | 0     | 0.320 | 0.380 | 优秀         |
| B <sub>2</sub> | 96         | 86  | 88  | 92  | 94  | 91.2 | 0        | 0     | 0     | 0.240 | 0.560 | 优秀         |
| B <sub>3</sub> | 93         | 87  | 84  | 89  | 90  | 88.6 | 0        | 0     | 0     | 0.340 | 0.380 | 优秀         |
| B <sub>4</sub> | 83         | 77  | 73  | 78  | 80  | 78.2 | 0        | 0     | 0.360 | 0.360 | 0     | 中等         |
| C <sub>1</sub> | 70         | 72  | 79  | 75  | 81  | 75.2 | 0        | 0     | 0.480 | 0.200 | 0     | 中等         |
| C <sub>2</sub> | 77         | 69  | 78  | 72  | 73  | 73.8 | 0        | 0.040 | 0.580 | 0.100 | 0     | 中等         |
| C <sub>3</sub> | 61         | 68  | 62  | 65  | 70  | 65.2 | 0.040    | 0.540 | 0.160 | 0     | 0     | 及格         |
| C <sub>4</sub> | 83         | 77  | 74  | 80  | 75  | 77.8 | 0        | 0     | 0.500 | 0.300 | 0     | 中等         |
| D <sub>1</sub> | 94         | 89  | 88  | 91  | 90  | 90.4 | 0        | 0     | 0     | 0.120 | 0.540 | 优秀         |
| D <sub>2</sub> | 79         | 75  | 73  | 79  | 82  | 77.6 | 0        | 0     | 0.440 | 0.300 | 0     | 中等         |
| D <sub>3</sub> | 92         | 82  | 85  | 87  | 86  | 86.4 | 0        | 0     | 0     | 0.620 | 0.200 | 良好         |
| E <sub>1</sub> | 93         | 87  | 85  | 88  | 90  | 88.6 | 0        | 0     | 0     | 0.400 | 0.360 | 良好         |
| E <sub>2</sub> | 76         | 82  | 84  | 80  | 81  | 80.6 | 0        | 0     | 0.160 | 0.560 | 0     | 良好         |
| E <sub>3</sub> | 97         | 92  | 93  | 90  | 95  | 93.4 | 0        | 0     | 0     | 0     | 0.720 | 优秀         |
| E <sub>4</sub> | 93         | 89  | 86  | 88  | 90  | 89.2 | 0        | 0     | 0     | 0.280 | 0.420 | 优秀         |
| E <sub>5</sub> | 91         | 82  | 87  | 85  | 84  | 85.8 | 0        | 0     | 0     | 0.640 | 0.160 | 良好         |
| F <sub>1</sub> | 65         | 70  | 68  | 72  | 69  | 68.8 | 0        | 0.320 | 0.380 | 0     | 0     | 中等         |
| F <sub>2</sub> | 74         | 81  | 80  | 79  | 83  | 79.4 | 0        | 0     | 0.220 | 0.460 | 0     | 良好         |
| F <sub>3</sub> | 69         | 75  | 76  | 73  | 79  | 74.4 | 0        | 0     | 0.040 | 0.640 | 0     | 中等         |
| 项目综合绩效评价等级     |            |     |     |     |     |      | 0        | 0.174 | 0.213 | 0.234 | 0.171 | 良好         |

某项目装配式建筑施工安全绩效指标评分及安全绩效评价测算表

## 4、评价结果分析

- 在隶属度最大原则下项目各类安全绩效指标评价结果，如表所示

| 安全绩效等级 | 包含绩效评价指标  |
|--------|---|
| 不及格    |   |
| 及格     | C <sub>3</sub>  |
| 中等     | A <sub>4</sub> , B <sub>4</sub> , C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> , C <sub>4</sub> , D <sub>2</sub> , F <sub>1</sub> , F <sub>3</sub> |
| 良好     | A <sub>1</sub> , D <sub>3</sub> , E <sub>1</sub> , E <sub>2</sub> , E <sub>5</sub> , F <sub>2</sub>                                   |
| 优秀     | A <sub>2</sub> , A <sub>3</sub> , B <sub>1</sub> , B <sub>2</sub> , B <sub>3</sub> , D <sub>1</sub> , E <sub>3</sub> , E <sub>4</sub> |

➢ 施工安全绩效整**总体评价结果为良好**，各类指标整体优良率61%

➢ 具体到各类安全绩效2级指标的评价中，**人员因素绩效水平较低**

➢ 行业发展水平较低、工作人员流动性大、一线人员受教育水平低

- C<sub>3</sub> ( 人员安全知识水平 ) 仅仅处于**及格**等级
- C<sub>3</sub>人员**安全知识水平**是减少对装配式建筑施工项目安全状态产生人为影响的重要保证
- **高专业知识水平**可以使人员安全意识得到提升，减少不安全行为的发生，从而提高施工人员总体素质和项目安全生产水平

- 评价结果显示 **F1 ( BIM信息丰富度 ) 和 F3 ( BIM信息可靠性 ) 指标评分较低**
- 我国缺乏系统的BIM信息技术安全管理方案
- BIM信息技术应用能力参差不齐
- 建筑行业需要进一步推动BIM等信息化技术在装配式建筑施工安全管理领域的**应用框架开发与理论研究**

## 4 研究结论与展望

## ■ 1、研究结论

- 提出三度空间视角下的装配式建筑施工安全绩效评价体系。融合信息化背景，从物理、社会、信息3个层面构建设备及材料因素、环境因素、人员因素、工艺技术因素、管理因素和BIM信息因素6个方面的评价模型
- 考虑在装配式建筑施工安全绩效评价指标之间相互影响、相互反馈的问题，提出利用ANP和GCM相结合的评价方法，有效地处理绩效评价过程中的模糊性与灰色性2方面影响
- 通过实际案例，提出针对性的绩效提升方法，符合装配式建筑的安全管理实际需求，指出三度空间视角下的装配式建筑施工安全绩效评价体系具有较强的拓展性，并提出信息化技术(如BIM等)的价值与潜力仍需在后期的研究中继续充分挖掘

## ■ 2、展望

- 数据收集存在一定的局限性。研究中建筑施工项目安全绩效评价指标体系是以近年来建筑施工行业安全事故类型为基础，结合新闻报道的事故原因总结、提炼，并与专家交流讨论确定的，可能考虑得不够全面，今后可收集更大量的信息形成庞大的数据库，使得数据更可靠
- 研究结果仍存在主观因素。采取德尔菲法向专家咨询意见，虽根据各专家受教育程度、工作年限等基本信息赋予了权重，尽可能降低主观因素对结果的影响，但仍无法完全消除，还存在一定的主观因素

**谢谢！**