Journal of Security and Safety Technology 安防技术, 2025, 13(1), 10-21
Published Online March 2025 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/jsst
https://doi.org/10.12677/jsst.2025.131002

Hans汉斯

建筑施工风险评价与模型研究

齐　龙

济南产业发展投资集团有限公司，山东 济南

收稿日期：2025年2月28日；录用日期：2025年3月24日；发布日期：2025年3月31日

摘　要

建筑施工作为高风险行业，其安全问题一直是社会关注的重点。本文基于人－机－环境系统的分析方法，构建了包括人、机、环及人机交互四个风险因素的一级指标体系，并设计了相应的二级指标，进而建立了建筑施工风险评价指标体系。通过运用主观赋权法G1法，确定了各指标的权重，并提出了一种基于云模型的风险评价方法。通过青岛某住宅建筑施工案例的实际应用，验证了该模型的有效性。根据评估结果，本文进一步提出了针对性的施工作业风险控制措施。研究为提升建筑施工安全管理水平提供了新的思路。

关键词

建筑施工，风险评价，云模型，指标体系，安全管理

Research on Construction Risk Assessment and Model

Long Qi

Jinan Industrial Development Investment Group Co., Ltd., Jinan Shandong

Received: Feb. 28th, 2025; accepted: Mar. 24th, 2025; published: Mar. 31st, 2025

Abstract

As a high-risk industry, safety issues in construction have always been a focus of social attention. This article is based on the analysis method of the human machine environment system, and constructs a first level indicator system that includes four risk factors: human, machine, environment, and human-computer interaction. Corresponding second level indicators are designed, and a construction risk evaluation indicator system is established. By using the subjective weighting method G1, the weights of each indicator were determined, and a cloud based risk assessment method was proposed. The effectiveness of the model was verified through the practical application of a residential construction case in Qingdao. Based on the evaluation results, this article further proposes targeted risk control measures for construction operations. The research provides new ideas for improving the level of

文章引用: 齐龙. 建筑施工风险评价与模型研究[J]. 安防技术, 2025, 13(1): 10-21.
DOI: 10.12677/jsst.2025.131002

construction safety management.

Keywords

Construction, Risk Assessment, Cloud Model, Indicator System, Security Management

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

随着我国城镇化进程的快速推进，建筑业的规模和产值逐年增长，建筑施工安全问题也日益成为社会关注的焦点。由于建筑行业具有施工环境复杂、从业人员安全意识不均、施工方式多样、人员流动性大、以及技术安全隐患等特点，尽管国家和相关部门高度重视并采取了一系列措施，各施工单位也在努力改进，但我国建筑施工安全形势依然严峻。

目前，国内外许多学者和机构将风险防范作为研究重点，从施工管理、危险源识别、风险评估等多角度对建筑施工安全展开了广泛研究，取得了丰硕的成果。例如，骆明真[1]通过文本分析与 N-K 模型，对旧工业建筑施工改造中的事故原因进行耦合分析，并计算出各类风险的耦合值；利用 SNA 模型分析了风险网络中各因素的中心度与可达性，评估了风险因素的关键性。王茹[2]针对建筑施工活动及事故风险类型，构建了施工安全知识图谱，利用图谱改进了作业条件的危险性评估方法(LEC)，实现了安全风险的定量计算，并基于图谱进行风险位置识别与不安全因素分析。缪季[3]通过 CMIM-Boruta 方法筛选出 26 个关键风险特征，进而构建了基于贝叶斯优化 XGBoost 的预测模型，评估了其预测精度。李树天[4]则利用差异度排比法从多个方面筛选影响因素，建立了装配式建筑施工安全风险评价指标体系，并提出了基于 Cov-AHP 和云模型的风险评估方法，并以某项目为例进行实证分析。张凡[5]利用突变理论构建了建筑工程安全事故模型，实现了安全事故的量化预测。周杨[6]则通过 BIM 技术分析了装配式建筑施工中的安全隐患，提出了风险评估体系和安全管理流程。

在国外，Louis Kumi [7]利用统计分析与数学建模方法，探讨了变量间的关系并量化了风险因素，结合 Monte Carlo 模拟分析了风险动态及 AI 技术的应用，并通过机器学习方法对建模及施工安全决策进行了预测。Jifei Fan [8]提出了一种基于文本数据的建筑施工安全风险预测方法，通过中文自动分词提取风险关键词，结合 XGBoost 算法开发了一个预测模型，达到了 86%的准确率与 F1 分数。Fang Chang [9]将 Fermatean 模糊集与 GLDS 方法结合，提出了一种新的风险优先级排名方法，用于识别潜在危害的风险级别。Fahirah F [10]通过 JHA 表对危害进行识别与评估，在 Sigi 区的道路施工项目中，识别出了 147 项来自不安全动作与不安全条件的危险，并进行了多层级的风险评估。George M. Rijo [11]则开发了一个集成机器学习技术的建筑工地风险评估预测模型，展示了其在不同模型中的优秀表现。

鉴于建筑施工行业的复杂性与高风险性，本文从人－机－环境系统的视角出发，提出了一种系统化的风险评估方法，旨在通过有效的风险管理，减少事故发生的可能性，提高施工安全管理水平。

2. 风险评价指标体系的构建

2.1. 基于“人－机－环”的评价指标的建立

“人－机－环”系统工程[12]主要是通过系统科学理论、安全人机工程和系统工程的方法，有机处理

人、机、环境三要素以及它们之间的关系。通过对人、机、环境三大要素以及要素之间的关系进行系统分析，确定事故的致因因素，从而有效地对人的不安全行为和物的不安全状态以及不良环境进行控制，使系统运行更安全可靠。

由于建筑施工地质条件相对复杂、施工作业活动多变、施工人员流动性大、大型机械设备较多且不易管理和员工专业水平存在很大的个体差异等等原因，很容易造成建筑施工事故，通过分析 2014~2023 年我国建筑施工的安全事故，得出事故类型分类表和事故类型分布图，如表 1 和图 1 所示。

Table 1. Classification of construction accident types in China from 2014 to 2023
表 1. 2014~2023 我国建筑施工事故类型分类表

年份 / 事故类型	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	平均值
高处坠落	43.37	53.31	52.77	55.47	52.87	53.17	54.23	53.18	51.90	51.79	52.206
坍塌	14.83	14.60	13.76	13.36	13.60	13.35	10.90	11.85	12.13	11.43	12.982
物体打击	16.75	12.05	12.11	13.02	12.07	14.93	15.80	14.31	14.03	14.46	13.953
起重伤害	7.02	8.32	10.27	8.07	9.58	7.24	9.12	9.68	10.08	12.40	9.178
触电	4.63	5.09	2.05	2.01	3.63	5.34	3.26	4.48	4.50	4.13	3.912
其他类型	9.40	6.63	9.04	60.7	7.45	5.94	6.68	6.50	7.36	5.79	7.086

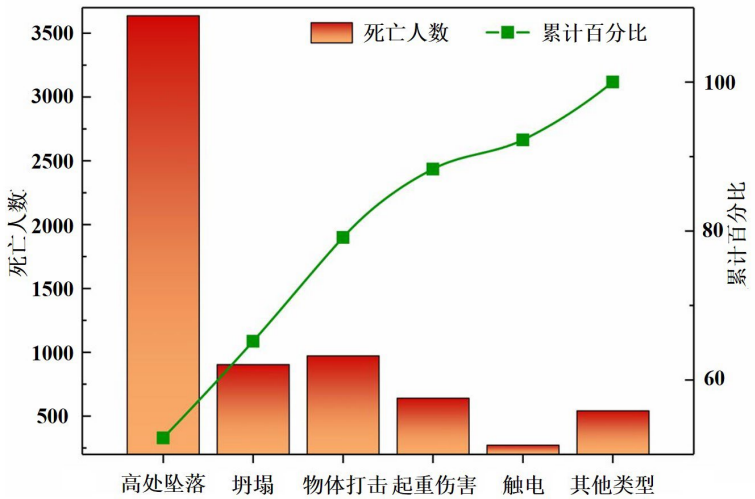

Figure 1. Primary and secondary types of construction accidents from 2014 to 2023
图 1. 2014~2023 年建筑施工事故类型主次图

本文以青岛某小区一住宅建筑施工为例，本工程场地面积 4650 平方米，首层建筑面积 2860 平方米，工程总建筑面积 28,642 平方米，其中地上为 24,632 平方米，地下为 4010 平方米。工程建筑施工主要涵盖五部分工程：脚手架作业、土方石作业、深基坑作业、模板工程作业和起重作业。

经过对五大伤害事故类型进行原因分析及人－机－环境分类，我们可以看出这些引发事故的因素经过分类都可以总结为：人的因素、机的因素、环境的因素，总结如图 2 所示。

在人－机－环境系统中，人的因素、机械设备的因素、人机交互的因素及环境因素共同作用于建筑施工的安全性。结合图二三大风险因素分析图，根据安全人机工程学原理，我们将这四个因素作为一级指标，并据此细分为二级指标。人的风险因素包括安全心理、安全行为和安全管理，这些因素直接关联到人的生理与心理功能，决定了信息的接收、处理和输出能力。不安全的行为和管理漏洞是引发事故的

主要原因。机械因素则涉及到设备的安装与拆卸、材料的强度、物料堆放的规范性以及安全防护装置的可靠性，所有这些都是施工现场安全管理的关键组成部分，任何缺陷都可能导致意外发生。人机交互因素侧重于设备显示器和控制器的设计，要求显示内容清晰且符合人体工程学，使操作人员能快速、准确地进行操作，从而保障施工安全。环境因素则直接影响施工活动的顺利进行，尤其是环境对人员和设备的双重作用，特别需要关注噪音、照明、振动、腐蚀以及极端天气对施工过程的影响。

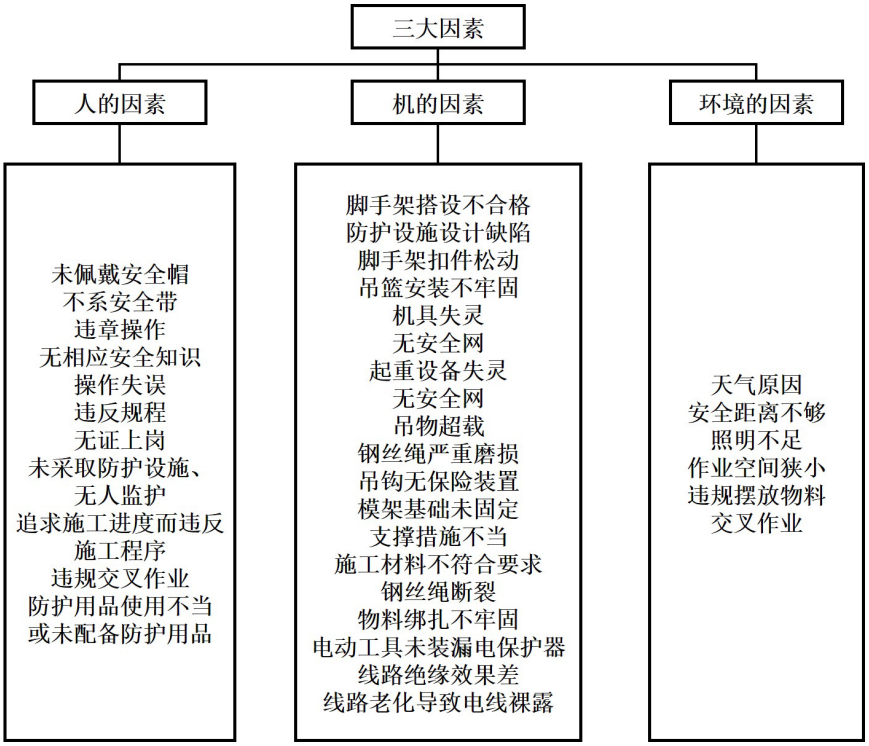

Figure 2. Analysis of three major risk factors
图 2. 三大风险因素分析图

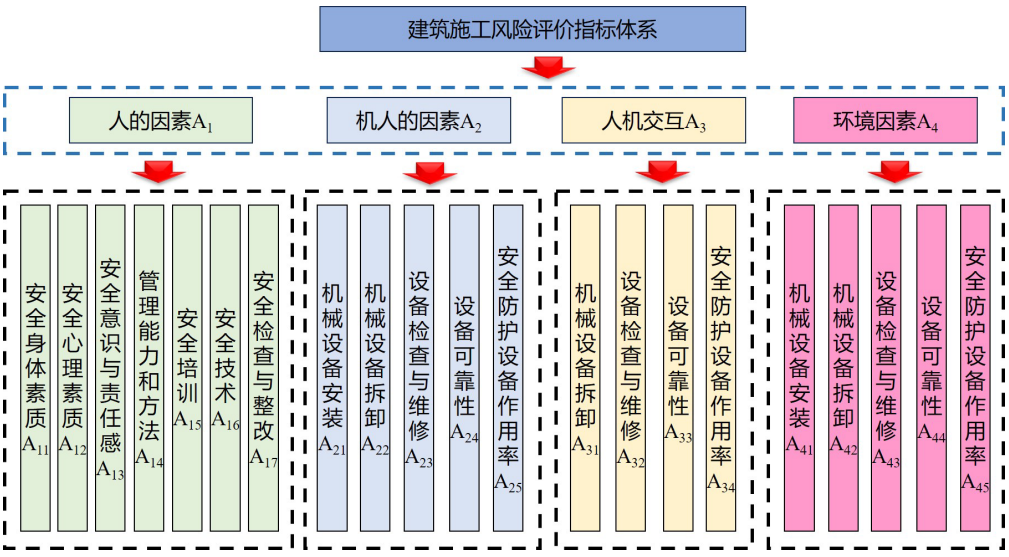

Figure 3. Construction risk assessment index system
图 3. 建筑施工风险评价指标体系

通过上述剖析，总结出该青岛某小区建筑施工风险评价指标体系如图 3 所示。

2.2. G1 法确定指标权重

G1 法是基于 AHP 的改进方法，无需一致性检验，解决了 AHP 方法在应用于复杂难题时不能满足统一性要求的问题[13]。该方法的基本原理是，首先对需要评价的指标体系按照评价的准则进行排序，其次根据特定的标准对临近的指标做出重要性判断赋值，最后对赋值的结果通过公式计算出权重。

G1 法确定权重步骤

(1) 重要性比较

若某评价指标 X_i 相对于评价准则的重要性程度小于 X_j 时，则认为 $X_j \geq X_i$；

若 n 个评价指标从 $X_1, X_2, \cdots, X_n$ 根据评价准则满足以下关系式：

$$X_1^* \geq X_2^* \geq X_3^* \geq \cdots \geq X_n^* \tag{1}$$

即认为 $X_1, X_2, \cdots, X_n$ 之间确定了重要性顺序，将 $X_1, X_2, \cdots, X_n$ 中最优的采用 X_1^* 表示，依次排序 X_1^* 表示重要性顺序的第 i 个评价指标 $(i = 1,2,3,\cdots,n)$。

(2) 对 X_{n-1} 与 X_n 之间的重要性判断进行赋值

将专家对 X_{n-1} 与 X_n 之间的重要性判断的程度之比设定为 r_k， r_k 赋值如表 2 所示。

$$r_k = W_{k-1} - 1/W_k \ (k = n, n-1, n-2, \cdots, 2) \tag{2}$$

Table 2. r_k assignment table
表 2. r_k 赋值表

$r_k = W_{k-1}/W_k$	含义
1.0	W_{k-1} 与 W_k 具有相同的重要性
1.2	W_{k-1} 比 W_k 具有稍微的重要性
1.4	W_{k-1} 比 W_k 具有明显的重要性
1.6	W_{k-1} 比 W_k 具有强烈的重要性
1.8	W_{k-1} 比 W_k 具有极端的重要性
1.1 1.3 1.5 1.7	表明两相邻赋值的中间值，如 1.1 表示具有相同或者略微重要性

(3) 计算权重系数 W_k

根据专家对 W_k 的赋值，则：

$$W_n = \left(1 + \sum_{k=2}^{n} \prod_{i=k}^{n} r_i\right)^{-1} \tag{3}$$

$$W_{k-1} = r_k W_k \ (k = n, n-1, n-2, \cdots, 3, 2) \tag{4}$$

一级指标权重的计算

一级指标各风险因素为 X_1= 的风险因素、X_2= 机的风险因素、X_3= 人机交互的风险因素和 X_4= 环境的风险因素。η_i 表示第 i 个指标的权重。

通过专家对 4 个一级指标进行排序具有如下关系：

$$X_1 \geq X_3 \geq X_2 \geq X_4 \Rightarrow X_1^* \geq X_2^* \geq X_3^* \geq X_4^*$$

根据公式(2)对以上关系式进行量化得到：

$$r_2=\frac{\eta_1^*}{\eta_2^*}=1.5, r_3=\frac{\eta_2^*}{\eta_3^*}=1.2, r_4=\frac{\eta_3^*}{\eta_4^*}=1.2$$

$$\sum_{k=2}^{4}\prod_{i=k}^{4} r_i=4.8$$

根据公式(3)计算得：

$$\eta_4^*=\frac{1}{1+4.8}=0.172$$

再根据公式(4)计算出其余的权重为：

$$\eta_3^*=\eta_4^*\times r_4=0.206$$

$$\eta_2^*=\eta_3^*\times r_3=0.247$$

$$\eta_1^*=\eta_2^*\times r_2=0.370$$

所以风险因素 X_1、X_2、X_3、X_4 的权重分别为：0.37、0.206、0.247、0.172。

同理，可计算出建筑施工作业的机的风险、人机交互的风险和环境的风险下各二级指标影响因素的权重，计算结果如表 3 所示。

Table 3. Weights of various risk factors in construction operations calculated by G1 method
表 3. G1 法计算得到的建筑施工作业各风险因素权重

1 级指标	2 级指标	1 级指标	2 级指标	1 级指标	2 级指标	1 级指标	2 级指标
$A_1=0.370$	$A_{11}=0.0537$ $A_{11}=0.0977$ $A_{11}=0.0696$ $A_{11}=0.0311$ $A_{11}=0.0407$ $A_{11}=0.0285$ $A_{11}=0.0488$	$A_2=0.206$	$A_{21}=0.0295$ $A_{22}=0.0268$ $A_{23}=0.0262$ $A_{24}=0.0692$ $A_{25}=0.0461$	$A_3=0.247$	$A_{31}=0.0669$ $A_{32}=0.0430$ $A_{33}=0.0803$ $A_{34}=0.0558$	$A_4=0.172$	$A_{41}=0.0409$ $A_{42}=0.0206$ $A_{43}=0.0341$ $A_{44}=0.0531$ $A_{45}=0.0227$

3. 基于云模型的风险评价方法

3.1. 云模型的定义

云模型是由李德毅教授提出的一种定性与定量结合的分析方法，该方法能更有效地分析评价对象的随机性、模糊性以及不确定性[14]。

设评价属性 $(x_1,x_2,\cdots,x_n)$ 是定量论域 U 上的精确表示，模糊概念 $\tilde{A}$ 是与之对应的定性描述。存在论域 U 中任意 $x_m\ (m=1,2,3,\cdots,n)$ 对应的隶属度 $C_T(x_m)$，其值稳定且随机，直接反映属性 x 对于描述 $\tilde{A}$ 的确定度。x 在 U 上的分布即为云模型，简称为云。任意元素 x_m 与其隶属度 $C_T(x_m)$ 组成的元组对称为 1 个云滴。

云模型内含 3 次正态分布规律，记为 $U^3(E_x,E_n,H_e)$，用以表征模糊概念 $\tilde{A}$，其中，E_x，E_n，H_e 分别被称为云模型的期望值、熵及超熵。E_x 能反映云重心的位置；E_n 能反映云滴的离散程度和定性概念的不确定性，E_n 越大，不确定性就越高，模糊性和随机性越大；H_e 跟云滴之间的距离和云滴的厚度有直接关系。

3.2. 基于云模型的风险评价

基于云模型的建筑施工风险评估方法是在构建指标体系并应用博弈论确定各项指标权重的基础上，利用云模型进行计算分析，从而得出最终的评估结果。具体的评估步骤如下：

(1) 构建建筑施工风险评估指标体系。

(2) 确定风险评估因子的评价标准，并邀请专家根据实际情况进行打分，评分采用百分制。

(3) 确定云评估标度，将该标度输入正向云发生器，设定云滴数量 M，输出云滴的位置及隶属度，生成 M 个云滴。

(4) 输入专家评分数据至改进后的逆向云发生器，通过 Matlab 运算得到各指标的数字特征值，进而计算 E_x、E_n 和 H_e，其中 x 表示对定性概念的量化值。

$$y = \exp\left[\frac{-(x-E_x)^2}{2E_x^2}\right] \tag{5}$$

$$E_n = \sqrt{\frac{\pi}{2}} * \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|X_i - E_x\right| \tag{6}$$

$$H_e = \sqrt{S^2 - E_n^2} \tag{7}$$

$$S^2 = \frac{1}{N-1}\sum_{r=1}^{n}\left(x_i - E_X\right)^2 \tag{8}$$

(5) 计算各指标的数字特征值后，结合相应的权重，使用公式(3)、(4)计算出综合结果的云特征参数，并通过正向云发生器生成综合结果的云图。

$$Y\left(E_x, E_n, H_e\right) = \sum_{r=1}^{n} Z_r W_r \tag{9}$$

(6) 将综合结果云图与标准云图相比较，通过观察云滴的致散程度等情况得出最终的评价结果。

3.3. 专家打分及实际云模型构建

基于专家打分法量化指标对建筑施工风险评价因素的评价标准。通过邀请 8 位专家根据本建筑施工项目的实际情况对各指标进行打分。8 名专家的信息如表 4 所示：

Table 4. Expert information table
表 4. 专家信息表

专家	性别	职称	领域
专家 1	男	高级工程师	安全科学与工程
专家 1	女	副教授	土木工程建造与管理
专家 1	男	高级工程师	安全科学与工程
专家 1	女	副教授	安全科学与工程
专家 1	男	高级工程师	土木工程建造与管理
专家 1	男	教授	安全科学与工程
专家 1	男	教授	安全科学与工程
专家 1	女	副教授	安全科学与工程

评分结果如表 5 所示。

本文运用黄金分割法确定云评价标度，根据具体案例不确定性及随机性相应调整。

黄金分割思想的核心在于充分利用 0.618 这一数值。在计算云评价标度时，通过考虑相邻云点的熵

值和超熵值，可以确保较高的数值与较低的数值按比例 0.618 进行调整，以此来制定合理的云评价标度。本文根据评价指标体系，将评价区间设定为[0, 100]，对应的论域为$[X_{\min}, X_{\max}]$。结合评价对象的特点，本文将超熵值设定为 0.5，并依据表 6 中的运算规则来制定具体的评价标度。

Table 5. Expert rating table
表 5. 专家评分表

一级指标	二级指标	专家							
		1	2	3	4	5	6	7	9
A_1	A_{11}	89	88	83	80	90	89	90	89
	A_{12}	83	91	86	82	90	90	86	83
	A_{13}	95	96	90	89	95	95	94	95
	A_{14}	80	90	88	85	92	90	85	85
	A_{15}	86	88	89	90	82	82	86	86
	A_{16}	92	85	83	85	92	91	87	89
	A_{17}	83	95	88	86	90	89	85	93
A_2	A_{21}	84	89	82	80	88	89	85	84
	A_{22}	80	77	79	79	80	80	79	78
	A_{23}	86	95	87	86	85	85	90	86
	A_{24}	89	80	83	85	86	80	88	89
	A_{25}	92	89	88	87	90	90	92	91
A_3	A_{31}	84	88	79	75	90	80	80	80
	A_{32}	86	85	77	79	89	83	78	86
	A_{33}	91	89	85	79	92	90	85	89
	A_{34}	87	78	79	84	90	90	80	87
A_4	A_{41}	82	85	80	83	87	84	80	82
	A_{42}	94	80	79	86	85	82	86	94
	A_{43}	83	77	75	76	80	82	77	83
	A_{44}	80	70	72	75	85	84	74	80
	A_{45}	89	70	79	76	80	78	76	89

Table 6. Calculation of cloud evaluation scale by golden ratio method
表 6. 黄金分割法计算云评价标度

云	期望值 E_x	熵 E_n	超熵 H_e
E2 优	$X_{\max}$	$E_{n1}/0.618$	$E_{e1}/0.618$
E1 良	$E_{x0}+0.382\left(X_{\min}+X_{\max}\right)/2$	$0.382\left(X_{\min}-X_{\max}\right)/6$	$E_{e0}/0.618$
E0 中	$\left(X_{\min}+X_{\max}\right)/2$	$0.618E_{n1}$	E_{e0}
E-1 差	$E_{x0}-0.382\left(X_{\min}+X_{\max}\right)/2$	$0.382\left(X_{\min}-X_{\max}\right)/6$	$E_{e0}/0.618$
E-2 极差	$X_{\min}$	$E_{n1}/0.618$	$E_{e0}/0.618$

根据评价指标体系，确定因素集为$U=\{I_1,I_2,\cdots,I_{21}\}$，依据之前云评价标度中将区间划分为[0, 100]，其对应为论域$[X_{\min},X_{\max}]$，可得评语集$V=\{V_1,V_2,V_3,V_4,V_5\}$，其中$V_1=[0,20)$、差；$V_2=[20,40)$、较差；$V_3=[40,60)$、中；$V_4=[60,80)$、良；$V_5=[80,100]$、优。

根据表 6 的运算规则，计算得到云模型标度，如表 7 所示。

Table 7. Cloud evaluation scale
表 7. 云评价标度

云	期望值 E_x	熵 E_n	超熵 H_e
E_2	100	10.30	1.31
E_1	69.1	6.37	0.81
E_0	50	3.93	0.5
E_{-1}	30.9	6.37	0.81
E_{-2}	0	10.30	1.31

在制作云图时，纵坐标为确定度，横坐标为评价值。在云模型理论中，云滴的数量越多，误差越小，对整体特征的反应越精确。因此，为了减少误差，应尽可能选择更多的云滴。在本文中，云滴的数量设定为 2000，生成的标准云图如图 4 所示。

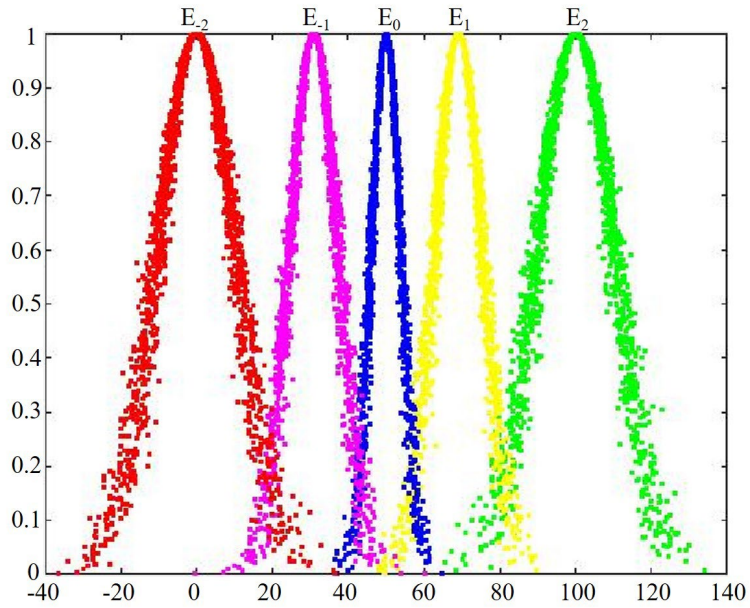

Figure 4. Standard cloud map
图 4. 标准云图

根据前文的式(5)到式(8)，将多名专家对各个指标的评分数据，分别代入改进的逆向云发生器中，运用 Matlab 进行计算。E_x，E_n 和 H_e。

Table 8. Cloud parameter values for various indicators
表 8. 各个指标云参数值

一级指标	二级指标	E_x	E_n	H_e
A_1	A_{11}	86	4.5119	2.0875
	A_{12}	86.4	4.1109	1.9848
	A_{13}	93	3.5093	2.8836
	A_{14}	87	4.5119	2.1546

续表

	A_{15}	89	2.0053	2.2313
A_1	A_{16}	87.4	4.6122	0.3352
	A_{17}	88.4	4.1109	3.7867
	A_{21}	84.6	3.9103	1.9315
	A_{22}	79	1.0027	0.0729
A_2	A_{23}	87.8	3.6095	2.2779
	A_{24}	84.6	3.1082	2.7751
	A_{25}	89.2	1.8048	1.6178
	A_{31}	83.2	6.2164	2.7561
A_3	A_{32}	83.2	5.2138	2.541
	A_{33}	87.2	2.0356	2.0356
	A_{34}	83.6	3.8486	3.8486
	A_{41}	83.4	2.4828	2.4828
	A_{42}	84.8	5.3103	5.3103
A_4	A_{43}	78.2	2.7763	2.7763
	A_{44}	76.4	6.0459	6.0459
	A_{45}	78.8	5.6902	5.6902

通过计算，得到指标 A_{11} 的云参数值分别为 $E_x = 86$、$E_n = 4.5119$、$H_e = 2.0875$。同理，求得其他各个指标的云参数值 E_x、E_n、H_e，具体数值如表 8 所示。

由公式(9)，求出综合结果的云参数为 91.83792115、4.365776744、2.648439866。

3.4. 综合评价云图

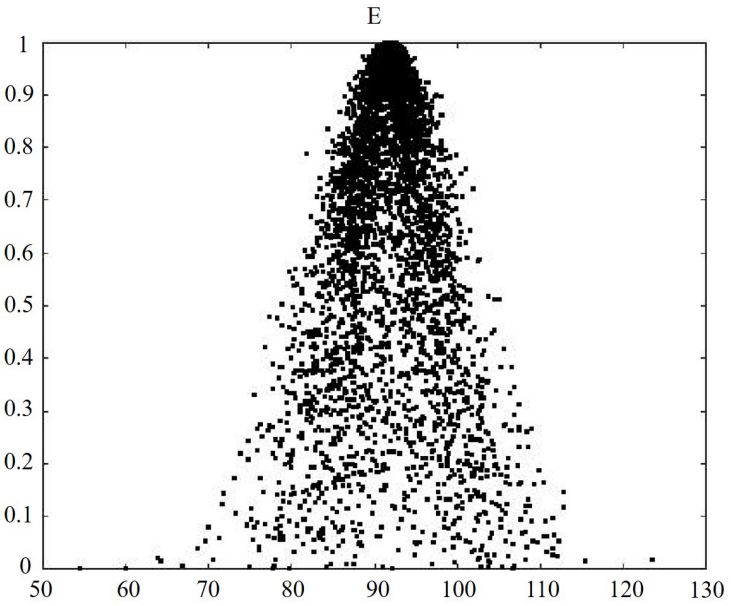

Figure 5. Cloud map E
图 5. 云图 E

将得出的综合结果的云参数数据放入正向云发生器中，得出综合结果的云图 E 如图 5 所示。将云图 E 与标准云图进行比较，得出最终的综合评价云图，如图 6 所示。

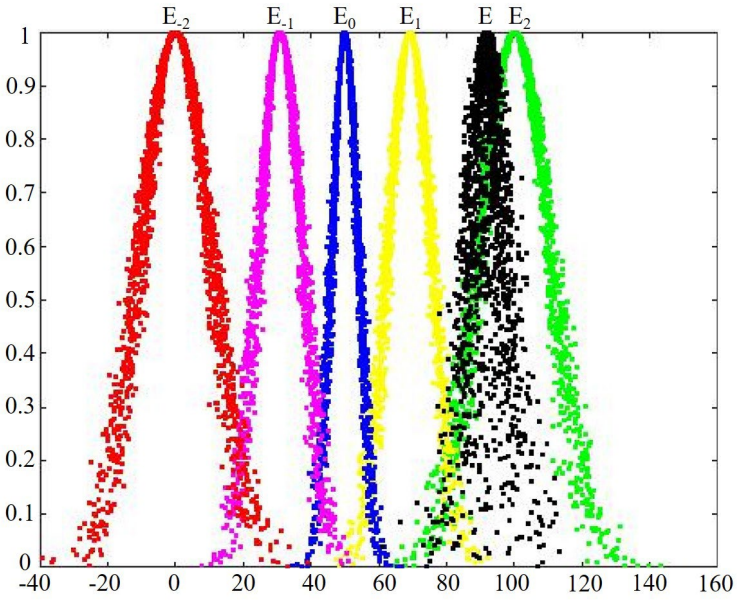

Figure 6. Comprehensive evaluation cloud map
图 6. 综合评价云图

3.5. 评价结果分析及应对措施

结果分析：

从综合评价云图中可以清楚地看到，实际云模型的云图 E 位于优(E_2)与良(E_1)两个标准云图之间，表明该建筑施工的整体安全状况良好。结合近年来建筑施工的实际作业情况，云模型的评价结果与实际情况高度一致，证明了基于云模型的建筑施工风险评价方法是有效的，为建筑施工安全评估的研究和应用提供了重要的参考价值。

此外，细致观察云滴分布可以发现，大部分云滴位于优与良两个标准云图之间，只有少数云滴恰好落在标准云图上，这表明实际云模型的一致性较高，反映出该建筑施工项目的环境水平处于较优状态，应继续保持。从云参数的分析中可以看出，熵值和超熵值较大，图 5 中实际云图的范围较广，云滴较“厚”，表明评价结果的不确定性较高。这也说明，尽管该建筑施工环境处于较高水平，但仍存在一定的不足，部分云滴位于良(E_0)标准云图中。因此，应根据安全评价结果，采取针对性的措施，通过提升技术和管理水平，加强安全管理，控制自然条件不利等风险因素，进一步提高安全等级。

应对措施：

随着科学技术的不断进步，建筑施工安全管理需要不断引入新技术、新方法和新设备，以提升施工安全性。针对建筑施工中的各种风险因素，本文提出了针对人员、设备和环境的三大风险控制措施。

首先，针对人员风险因素的控制措施包括提升员工能力，确保操作人员和安全管理人员持有必要的技能证书，并通过定期的安全教育和培训增强其安全意识。同时，对于高危作业人员，应配备必要的安全防护装备，以有效降低事故发生的风险。

其次，设备的正常运行对于施工安全至关重要。控制设备风险的措施包括全过程管理，确保设备符合安全标准并维持良好的技术状态。此外，利用现代技术手段，如视频监控、无人机监控和 RFID 技术，

对设备的运行状态进行实时监控，及时发现和处理潜在问题。

最后，针对环境风险的控制，主要包括应对自然环境风险，例如通过气象监测应对极端天气，以及加强项目环境的管理，确保施工现场空间布局合理、设备摆放规范，避免环境因素对施工安全造成不利影响。

通过实施上述措施，建筑施工的安全性将得到显著提升，确保人员安全、设备正常运行以及施工环境的适宜性。

4. 结论

本文以青岛某小区住宅建筑施工为例，构建了基于“人–机–环境”系统的风险评价指标体系，按照安全人机工程学原理，将风险划分为四个一级指标(人的因素、机的因素、人机交互因素、环境因素)及其对应的二级指标。结合 G1 法确定各指标权重，结果表明人的风险因素(权重 0.370)和人机交互风险因素(权重 0.247)是影响施工安全的主要因素，体现了施工过程中对人员行为和设备设计的高度依赖性。

基于云模型的综合评价方法，通过定性与定量相结合的方式处理风险中的模糊性与不确定性。评价结果显示，该施工项目整体安全状况较高，处于“优(E_2)”和“良(E_1)”之间。云模型的评价结果与实际施工安全状况高度一致，验证了方法的科学性和有效性。

针对评价结果，本文提出了具体的应对措施，包括加强人员安全培训、配备必要防护装备，优化设备全过程管理并引入现代监测技术，以及加强施工现场环境管理。研究成果不仅为建筑施工风险评价提供了科学依据，也为类似工程的安全管理提供了重要参考。

参考文献

[1] 骆明真, 李红星. 基于 N-K 和 SNA 模型的旧工业建筑施工改造风险耦合分析[J]. 铁道科学与工程学报: 1-10.

[2] 王茹, 赵俊浩, 黄炜, 等. 基于知识图谱的建筑施工安全风险量化与分析[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(6): 2138-2147.

[3] 缪季, 段立平, 刘吉明, 等. 基于贝叶斯优化 XGBoost 的建筑施工事故类型预测[J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20(5): 57-63.

[4] 李树天, 马斌, 王聪. 基于 Cov-AHP 与云模型的装配式建筑施工安全风险评价研究[J]. 西安理工大学学报, 2024, 40(3): 429-437.

[5] 张凡. 基于突变理论的建筑工程安全事故过程模型研究[J]. 安防技术, 2021, 9(1): 1-6.

[6] 周杨, 刘梦梦, 王宝雨, 等. 基于 BIM 技术与风险评估体系的装配式建筑施工安全管理研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(S2): 2089-2093.

[7] Kumi, L., Jeong, J. and Jeong, J. (2024) Systematic Review of Quantitative Risk Quantification Methods in Construction Accidents. *Buildings*, **14**, Article No. 3306. https://doi.org/10.3390/buildings14103306

[8] Fan, J., Wang, D., Liu, P. and Xu, J. (2024) Research on the Prediction of Sustainable Safety Production in Building Construction Based on Text Data. *Sustainability*, **16**, Article No. 5081. https://doi.org/10.3390/su16125081

[9] Fang, C., Chen, Y., Wang, Y., Wang, W. and Yu, Q. (2023) A Fermatean Fuzzy GLDS Approach for Ranking Potential Risk in the Fine-Kinney Framework. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, **45**, 3149-3163. https://doi.org/10.3233/jifs-230423

[10] Fahirah, F., Fadjar, A. and Madina, R. (2022) Assessment of Occupational Health and Safety Risk in the Road Construction Project in the Sigi Regency. *IOP Conference Series*: *Earth and Environmental Science*, **1075**, Article ID: 012048. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1075/1/012048

[11] George, M.R., Nalluri, M.R. and Anand, K.B. (2022) Application of Ensemble Machine Learning for Construction Safety Risk Assessment. *Journal of The Institution of Engineers* (*India*): *Series A*, **103**, 989-1003. https://doi.org/10.1007/s40030-022-00690-w

[12] 陶俊, 林志祥. 人-机-环境系统工程理论在 VTS 建设中的应用[J]. 中国海事, 2017(10): 41-43.

[13] 李刚. 基于标准差修正群组 G1 的组合赋权方法研究[J]. 系统工程学报, 2012, 27(1): 9-18.

[14] 李德毅, 孟海军, 史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展, 1995(6): 15-20.