

展览类建筑施工工期成本风险评价

刘思成¹, 周亦威^{1,2,3*}

¹上海理工大学管理学院, 上海

²上海理工大学智慧应急管理学院, 上海

³上海理工大学智慧城市交通研究院, 上海

收稿日期: 2025年8月20日; 录用日期: 2025年9月22日; 发布日期: 2025年12月2日

摘要

随着各类大型展览类建筑的施工项目的不断推进, 针对其施工工期成本风险尚未建立起一套全面且完善的评价指标体系。通过研究系统分析施工工期遇到的各种潜在风险因素, 以问卷调查为基础, 通过随机森林算法对风险因素进行筛选。构建了由4个一级指标、20项具体二级指标的综合施工成本风险评价体系。运用层次分析法(AHP)和改进后的ICUOWGA算子确定各个指标的综合权重, 并采用灰色聚类模型对项目整体风险及每个二级指标风险进行等级评估。以B市某在施展览类项目为例, 在项目整体层面上评估的风险等级属于“中风险”, 对属于“中风险”、“较高风险”的指标因素进行具体归类说明。

关键词

展览类建筑施工项目, 成本管理风险, AHP, ICUOWGA算子, 灰色聚类模型

Cost Risk Assessment during Construction of Exhibition Buildings

Sicheng Liu¹, Yiwei Zhou^{1,2,3*}

¹Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²School of Intelligent Emergency Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

³Smart Urban Mobility Institute, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: August 20, 2025; accepted: September 22, 2025; published: December 2, 2025

Abstract

With the continuous promotion of the construction projects of various large-scale exhibition buildings, a comprehensive and perfect evaluation index system has not been established for the cost

*通讯作者。

文章引用: 刘思成, 周亦威. 展览类建筑施工工期成本风险评价[J]. 运筹与模糊学, 2025, 15(6): 62-73.

DOI: 10.12677/orf.2025.156257

risk during the construction period. Various potential risk factors encountered during the construction period are systematically analyzed through research. Based on the questionnaire survey, the risk factors are screened through random forest algorithm. A comprehensive construction cost risk assessment system consisting of 4 first-class indicators and 20 specific second-class indicators is constructed. The analytic hierarchy process (AHP) and the improved ICUOWGA operator are used to determine the comprehensive weight of each index, and the grey clustering model is used to evaluate the overall risk of the project and the risk level of each secondary index. Taking an exhibition project under construction in B city as an example, the risk level assessed at the overall level of the project is “medium risk”; the indicator factors belonging to “medium risk” and “higher risk” are classified and explained in detail.

Keywords

Exhibition Related Construction Projects, Cost Management Risk, AHP, ICUOWGA Operator, Grey Clustering Model

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

随着时代的发展, 展览类建筑不仅是中国对外贸易、招商引资的舞台。同时也承担着展现城市文化自信、地域文化特色以及历史文脉气息的重要使命[1]。

然而既有展览类建筑的功能局限性日益凸显, 亟需新建以满足大规模会议、展览与科技展示等需求。除单件性、体量大等一般性质外, 更因其结构复杂、艺术性以及功能多元化而具有特殊性。加之新材料、新工艺与新展览设备的涌现以及绿色施工的要求, 施工专业领域愈发广泛, 相较于普通民用建筑更易受外部不确定性影响, 导致成本超支风险显著。因此, 构建一套针对性的施工期成本风险评价体系刻不容缓。

目前我国很多施工项目仍处于粗放化、碎片化[2]的管理模式当中。现有的研究主要集中在控制方法上, 大多忽略了结合实际项目中的应用。如 Touran [3]提出使用蒙特卡洛模拟结合风险因素对建设项目成本进行预测; Esfahani [4]设计了搜索全阶动态输出反馈控制器来解决不确定时延系统下的成本控制问题; 这些方法在实际应用中存在很大的问题, 操作过于复杂, 故不能作为施工项目成本风险控制的依据。

而结合实际项目管理理论上, 目前的研究还不够完善。廖倩羚等人[5]针对造价预算层面上给出成本控制措施。Temitope [6]认为工程造价的控制重心是在现场材料消耗上。和希顺[7]等人考虑到建设项目的复杂性在成本管理中的影响, 提出要结合项目的复杂性, 对不同的阶段的成本控制进行充分考虑和预测。胡梦尧[8]等人运用调查问卷法和解释结构模型(ISM)对某在施工程项目造价风险进行风险评价, 得出竣工结算和工程变更是工程造价风险中两大直接要素。刘长滨[9]结合全寿命周期成本理论, 通过分析某既有建筑节能改造项目中全寿命周期成本的组成后建立了既有建筑节能改造项目的经济效益评价指标。

本研究旨在构建出一套适用于展览类建筑施工期成本风险评价的体系。结合层次分析法(AHP) - 改进 ICUOWGA 算子法确定权重, 应用灰色聚类模型进行风险等级评估。以 B 市某展览类施工项目为实际工程案例验证其适用性和科学性, 在得出该项目施工期成本风险等级后, 给出相关风险控制措施与建议。

2. 案例简介

某展览类项目位于 B 市 S 区, 由两家大型国企施工单位组成施工联合体联合承建。该项目于 2022 年 3 月正式开工, 当前仍处于施工赶工阶段。作为国家级样板工程, 该施工项目兼具结构复杂、施工工艺难度大, 工程体量庞大的特点。项目占地面积约 61 万平方米, 包含 9 座展馆、3 座登录厅、1 座会议中心和 1 个酒店, 签约合同价格超过 69 亿元。本项目现场管理人员对于施工现场的实际情况难以全面把控, 两家施工单位的项目部经常联合组织开展阶段性成本分析会。但现场仍然具有较大的成本风险隐患, 为本文提供了强有力的研究参考。

3. 风险评价指标体系的识别与选择

本文在参考施工项目成本风险评价指标体系研究的基础上, 综合分析展览类建筑的特点, 结合相关文献分析、现场工程情况调研与专家访谈的结果, 初步构建了一个由现场商务风险、现场技术风险、现场施工风险、现场其他风险四个一级指标以及 28 个二级指标构成的展览类建筑施工期成本管理风险的评价指标体系。为了保证整理后的指标体系能够简洁、并且有一定的代表性。本研究以发放问卷的形式, 对 204 名在施工单位、设计院、咨询单位、建设单位的从业人员进行问卷发放, 邀请他们对上述指标重要度进行打分评价, 按照 1~5 分标准来评价指标的重要程度, 经过数据清洗筛选后, 最后回收有效问卷 100 份。

随机森林(Random Forest, RF) [10]实际上是回归树和分类树的扩展, 通过重采样技术[11], 利用初始样本集中的数据信息计算每个样本的特征值来判断样本对拟合结果的贡献度, 将多颗树的结果整合到一起, 以此来提高分类或回归的准确度。本研究将使用 Python 中的 scikit-learn 库实现随机森林算法, 在 28 个因素中选择了 20 个因素形成最终的展览类建筑施工期成本风险评价指标体系, 如表 1 所示。

Table 1. Evaluation factors for construction period cost risk of exhibition projects
表 1. 展览类项目施工期成本风险评价因素表

一级风险因子	编号	二级风险因子	编号
现场商务风险	A ₁	合同外新增材料与新工艺	A ₁₁
		施工单位索赔处理能力不足	A ₁₂
		造价工程师对展览类建筑缺乏经验	A ₁₃
		联合体单位施工合同存在争议点	A ₁₄
		市场价格波动影响	A ₁₅
		分包单位违约	A ₁₆
现场技术风险	A ₂	施工质量不合格	A ₂₁
		因展览需要而导致的施工变更	A ₂₂
		专项施工方案不合理	A ₂₃
		BIM 建模的不准确	A ₂₄
		施工技术标准与验收要求不明确	A ₂₅
		设计方图纸深化不清晰	A ₂₆
现场施工风险	A ₃	特殊工种人员的短缺	A ₃₁
		专用材料供应链中断	A ₃₂
		现场施工安全管理疏漏	A ₃₃

续表

		现场多工种交叉作业, 协调低效	A ₃₄
		现场临时增加的施工安排频繁	A ₃₅
		自然灾害预案不完善	A ₄₁
现场其他风险	A ₄	现场信息管理混乱	A ₄₂
		后期功能转换需求未预留, 存在改造风险	A ₄₃

4. AHP-ICUOWGA 算子确定指标权重

4.1. 项目风险识别的 AHP 模型构建

AHP 即层次分析法, 是一种用于多准则决策分析的方法, 它通过将复杂的问题分解成多个层次结构来简化决策过程。可以帮助明确各个层次中各因素的重要性和权重, 从而为决策提供科学依据[12]。

依据第二节中随机森林筛选后的结果, 对风险因素进行归类, 构建的 B 市某展览类项目施工期成本管理风险 AHP 模型如图 1 所示。

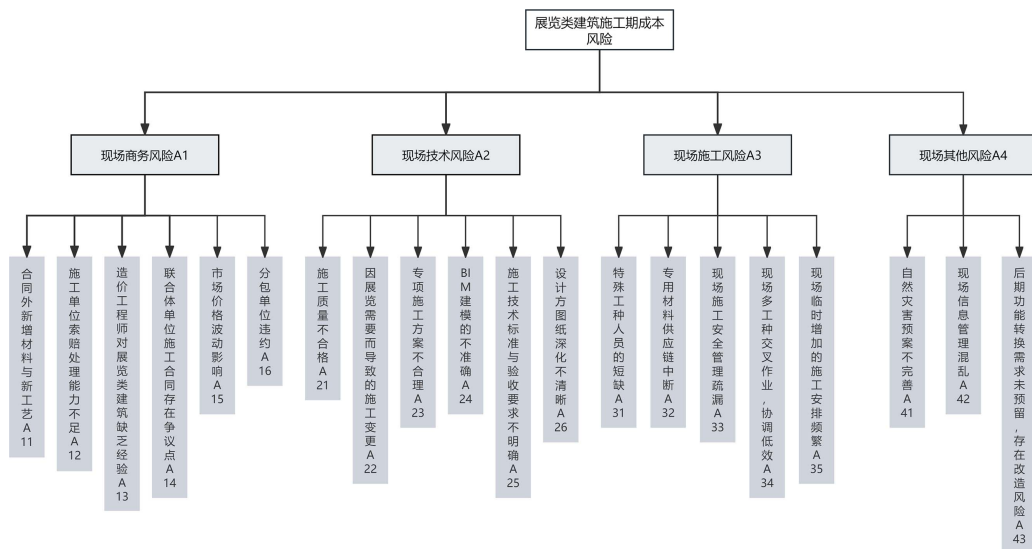


Figure 1. Project construction period cost management risk AHP model

图 1. 项目施工期成本管理风险 AHP 模型

邀请施工现场来自施工单位、建设单位、监理单位、分包单位的 10 位专家对表 1 中经随机森林筛选后的各个指标进行两两比较, 并给出相关评分, 评价分值规则为采用 1~9 标度法。根据每名专家的评价结果以及构建的评价体系, 对一级指标以及每个一级指标下的二级指标建立判断矩阵 A 。10 位专家的工作单位、职称如图 2、图 3 所示。

对构建好的判断矩阵, 必须要满足一致性检验, 否则会出现因评价专家个人主观原因和判断能力的局限性, 导致各个评价指标重要性排序出现前后不一致的问题。针对划分好的一级和二级指标层, 10 位专家对构建的层次模型进行两两比较评分。以某位专家为例, 对一级指标 A_3 下的二级指标权重计算。具体计算过程略。

通过上述方式计算, 10 位专家两两因素比较评分后的所有指标均通过一致性检验。AHP 二级指标权

重为(0.0298, 0.0225, 0.0225, 0.0343, 0.0624, 0.0414, 0.0380, 0.0184, 0.0249, 0.0168, 0.0194, 0.0361, 0.0305, 0.0210, 0.0231, 0.0120, 0.0266, 0.0188, 0.0227, 0.0320)。

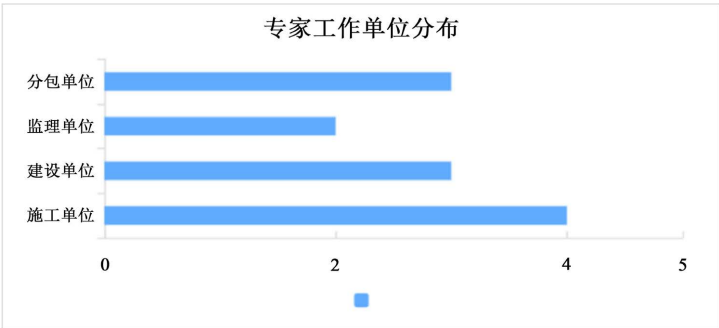


Figure 2. Distribution of work units of scoring experts
图 2. 评分专家工作单位分布

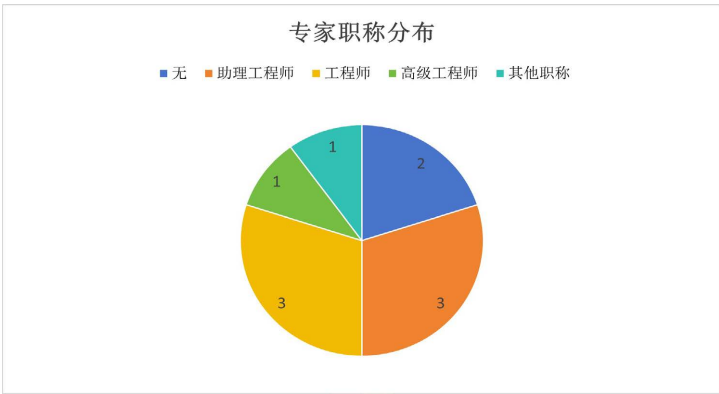


Figure 3. Distribution of professional titles of scoring experts
图 3. 评分专家职称分布

4.2. 改进的 CUOWGA 算子(ICUOWGA)赋权法

在指标评价的方法中, 层次分析法、专家访谈法都是依据专家的主观认知来对指标的权重进行评价。其缺点在于过于依赖专家的经验, 无法做到客观公正地评价指标, 具有很大的主观不确定性。而熵权法 [13]虽然依据信息熵的大小来衡量指标的重要性, 可以避免专家主观因素的干扰, 但当数据存在噪声的时候会对熵值计算的结果产生很大的影响。和熵权法类似, CUOWGA 算子 [14]也是一种客观赋权方法, 将专家带有个人主观的决策结果负面影响降低到可以接受的范围内, 对于 CUOWGA 算子, 具体的计算步骤如下:

1) 确定加权向量 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$, 其中

$$w_i = Q\left(\frac{i}{n}\right) - Q\left(\frac{i-1}{n}\right), i \in N \quad (1)$$

这里的 Q 为模糊语义量化算子。

$$Q(r) = \begin{cases} 0, & 0 \leq r < a \\ \frac{r-a}{b-a}, & a \leq r < b \\ 1, & b < r \leq 1 \end{cases} \quad (2)$$

其中 $a, b, r \in [0,1]$, 分别对应模糊语义量化准则[15][16]的“大多数”、“至少半数”、“尽可能多”, 参数则分别对应 $(a,b)=(0.3,0.8)$, $(a,b)=(0,0.5)$, $(a,b)=(0.5,1)$ 。

2) 将决策数据 a_j 进行两两比较, 构建可能度矩阵 $P=(P_{ij})_{m \times n}$, 其中 $P_{ij}=P(a_i \geq a_j)$, 可能度定义如下:

设 $a=[a^L, a^U]$, $b=[b^L, b^U]$ 为两个区间数, 令 $l_a=a^U-a^L$, $l_b=b^U-b^L$, 则称

$$P(a \geq b) = \min \left\{ 1, \max \left(\frac{a^U - a^L}{l_a + l_b}, 0 \right) \right\} \quad (3)$$

为区间 $a \geq b$ 的可能度。

3) 根据(2)中得到的可能度矩阵, 计算其互补判断矩阵:

$$v_i = \frac{1}{n(n-1)} \left(\sum_{j=1}^n P_{ij} + \frac{n}{2} - 1 \right), i \in N \quad (4)$$

得到排序向量 $v=(v_1, v_2, \dots, v_n)^T$ 。再按照 v_i 的大小对 a_i 进行排序, 得到一组有序的数据 d_j 。

4) 计算 CUOWGA 算子

$$\text{CUOWGA}(a_1, a_2, \dots, a_n) = \prod_{j=1}^n (d_j)^{w_j} \quad (5)$$

由于 CUOWGA 算子存在主观设定条件的缺点, 因此本文提出一种改进版的 ICUOWGA 算子, 此算子应用模糊语义量化算子的同时, 将决策矩阵中的具体元素指标分为成本型指标和效益型指标, 构建规范化决策矩阵以消除运算过程中算子自身主观因素不足[17]带来的缺陷。

具体运算过程如下:

1) 同 CUOWGA 算子运算步骤(1)。

2) 将决策矩阵 A 转化为规范化矩阵 $R=(a_{ij})_{m \times n}$, 其中 $a_{ij}=[a_{ij}^L, a_{ij}^U]$, 并且有根据决策矩阵中具体元素的性质, 将其分为成本型指标和效益型指标。分别按照下面的两个公式进行规范化。

成本型指标是用于衡量达成某个目标所需要付出的代价、消耗的资源或产生负面的效果, 通常数值越低, 代表其效果越好。具体表达式如下

$$\begin{cases} a_{ij}^L = \frac{a_{ij}^L}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^U} \\ a_{ij}^U = \frac{a_{ij}^L}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^L} \end{cases} \quad (6)$$

效益型指标是用于衡量一个系统、项目或行动所产生的正面成果、收益和价值, 通常数值越高, 代表其效果越好。具体表达式如下

$$\begin{cases} a_{ij}^L = \frac{\frac{1}{a_{ij}^U}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{a_{ij}^L}} \\ a_{ij}^U = \frac{\frac{1}{a_{ij}^L}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{a_{ij}^U}} \end{cases} \quad (7)$$

3) 将规范化矩阵 R 中的决策数据 a_j 进行两两比较, 构建可能度矩阵, 具体定义过程同 CUOWGA 算子可能度矩阵定义步骤(2)

4) 由(3)中得到的可能度矩阵计算互补判断矩阵:

$$v_i = \frac{1}{n(n-1)} \left(\sum_{j=1}^n P_{ij} + \frac{n}{2} - 1 \right), i \in N \tag{8}$$

得到排序向量 $v = (v_1, v_2, \dots, v_n)^T$ 。

5) 按照排序向量 v_i 大小对 a_{ij} 进行排序, 得到一组有序的数据 $d_j (j \in N)$ 。利用模糊语义量化矩阵 w 对数据进行加权运算, 得到改进后的 ICUOWGA 算子:

$$\text{ICUOWGA}(a_1, a_2, \dots, a_n) = \prod_{j=1}^n (d_j)^{w_j} \tag{9}$$

依据评价指标的性质, 本文的评价指标分类如表 2 所示:

Table 2. Secondary risk indicator classification
表 2. 二级风险指标分类

一级风险因子	编号	二级风险因子	编号	指标类型
现场商务风险	A ₁	合同外新增材料与新工艺	A ₁₁	成本型指标
		施工单位索赔处理能力不足	A ₁₂	效益型指标
		造价工程师对展览类建筑缺乏经验	A ₁₃	效益型指标
		联合体单位施工合同存在争议点	A ₁₄	成本型指标
		市场价格波动影响	A ₁₅	成本型指标
		分包单位违约	A ₁₆	成本型指标
现场技术风险	A ₂	施工质量不合格	A ₂₁	效益型指标
		因展览需要而导致的施工变更	A ₂₂	成本型指标
		专项施工方案不合理	A ₂₃	效益型指标
		BIM 建模的不准确	A ₂₄	效益型指标
		施工技术标准与验收要求不明确	A ₂₅	效益型指标
		设计方图纸深化不清晰	A ₂₆	效益型指标
现场施工风险	A ₃	特殊工种人员的短缺	A ₃₁	成本型指标
		专用材料供应链中断	A ₃₂	成本型指标
		现场施工安全管理疏漏	A ₃₃	成本型指标
		现场多工种交叉作业, 协调低效	A ₃₄	成本型指标
		现场临时增加的施工安排频繁	A ₃₅	成本型指标
现场其他风险	A ₄	自然灾害预案不完善	A ₄₁	效益型指标
		现场信息管理混乱	A ₄₂	成本型指标
		后期功能转换需求未预留, 存在改造风险	A ₄₃	效益型指标

邀请 3.1 中的 10 位专家对上述的全部二级指标风险影响程度进行区间化评价, 每位专家对每个二级指标同时给出一个最高分和一个最低分, 以 0.5 分为标度, 评分范围为 0~10 分。

通过上述改进的 ICUOWGA 算法, 在 VS Code 中编写相关算法程序进行计算, 最终得到的标准化综合权重为(0.0484, 0.0521, 0.0478, 0.0496, 0.0516, 0.0525, 0.0474, 0.0510, 0.0508, 0.0489, 0.0501, 0.0492, 0.0500, 0.0485, 0.0501, 0.0503, 0.0522, 0.0475, 0.0526, 0.0494)。

4.3. AHP 与 ICUOWGA 算子确定的最终评价指标综合权重

综合基于专家主观方面的 AHP 评价结果与 ICUOWGA 算子得到的评价结果, 取中间系数 0.5 作为 AHP 的权重系数, 将主观与客观权重进行线性组合来确定最终评价的综合权重。得到的最终综合权重(0.0391, 0.0373, 0.0351, 0.0420, 0.0570, 0.0470, 0.0427, 0.0347, 0.0379, 0.0329, 0.0348, 0.0427, 0.0403, 0.0348, 0.0366, 0.0311, 0.0394, 0.0331, 0.0377, 0.0407)。

5. 灰色聚类模型

5.1. 划分风险评价等级

对于评价体系的量化, 将二级评价指标的语言描述精细划分为五个层次: 低风险、较低风险、中风险、较高风险、高风险。这些等级对应着一个从 0 到 10 的连续得分区间, 并进一步细化五个评价区间: 低风险区间涵盖了[0, 2]; 较低风险区间涵盖了[2, 4]; 中风险区间涵盖了[4, 6]; 较高风险区间涵盖了[6, 8]; 高风险区间涵盖了[8, 10]。每个评价指标的具体得分反映了其处于风险的等级。评分由前文的十位专家共同给出, 评价等级表如表 3 所示。

Table 3. Comprehensive evaluation level table for cost control risks during the construction period of exhibition buildings
表 3. 展览类建筑施工工期成本控制风险综合评价等级表

风险等级	低风险	较低风险	中风险	较高风险	高风险
分值	[0, 2]	[2, 4]	[4, 6]	[6, 8]	[8, 10]

5.2. 灰色聚类分析

灰色聚类模型[18]是一种分类的评估方法, 其基本思想是根据白化权函数聚类, 通过计算灰数的白化权函数确定指标所在的灰色类别进行归类。通常适用于不确定性系统。针对展览类项目现场风险因素的不确定性, 采用灰色聚类模型分析的方法确定风险等级可以获得较高的准确率。

针对相同性质的指标之间, 灰色变权聚类方法表现得很适宜。而在前面提到, 评价体系中存在“成本型”、“效益型”两种指标类型, 存在一定的差异。因此灰色变权函数聚类的方法不够合适。基于所设定的评价指标评分准则以及灰色聚类理论的相关原理, 本文采用一种新的混合中心点白化权函数来构建更为合理的灰类等级划分体系。

设有 m 个聚类对象, n 个评价指标, s 个不同的灰类, 根据对象 i 关于指标 j 的样本观测值 x_{ij} ($i=1, 2, \dots, m$; $j=1, 2, \dots, n$) 进行评估, 评估方法具体步骤如下:

首先, 根据评价指标的要求来划分灰类数 s , 将每个评价指标的取值范围相应划分成 s 个灰类。即对于 j 指标, 其取值范围为 $[\varepsilon_1, \varepsilon_{s+1}]$, 划分为如下子区间:

$$[\varepsilon_1, \varepsilon_2], [\varepsilon_2, \varepsilon_3], \dots, [\varepsilon_{k-1}, \varepsilon_k], \dots, [\varepsilon_s, \varepsilon_{s+1}] \quad (k=1, 2, \dots, s, s+1)$$

ε_k 的值可以根据实际情况来确定。

其次, 令 $\lambda_k = (\varepsilon_k + \varepsilon_{k+1})/2$ 属于第 k 个灰类的白化权函数值为 1, 连接 $(\lambda_k, 1)$ 与第 $k-1$ 个灰类的起点 ε_{k-1} 和第 $k+1$ 个灰类的终点 ε_{k+2} , 得到第 j 个指标关于 k 灰类的三角白化权函数 $f_j(\cdot)$ 、其中 $j=1, 2, \dots, n$;

$k=1,2,\dots,s$ 。对于端点的两个三角白化权函数, 可以分别将 j 指标取值域分别向左、向右延展到 $\varepsilon_0, \varepsilon_{s+2}$ 。对于指标 j 的一个观测值 x_{ij} , 可由下面的公式计算出其属于灰类 k ($k=1,2,\dots,s$) 的白化权函数 $f_j(x)$ 。

$$f_j(x) = \begin{cases} 0 & x \notin [\varepsilon_{k-1}, \varepsilon_{k+2}] \\ \frac{x - \varepsilon_{k-1}}{\lambda_k - \varepsilon_{k-1}} & x \in [\varepsilon_{k-1}, \lambda_k] \\ \frac{\varepsilon_{k+2} - x}{\varepsilon_{k+2} - \lambda_k} & x \in [\lambda_k, \varepsilon_{k+2}] \end{cases} \quad (10)$$

根据前文的评价等级所示, 一共有五个灰类, 分别用 $s=1, 2, 3, 4, 5$ 表示为“低风险”到“高风险”。根据对应的评价区间, 每个灰类中心转折点的值分别为 1、3、5、7、9, 得出了各个灰类的白化权函数如下所示:

1) 第一灰类:

$$f_j(x) = \begin{cases} 0 & x \notin (0, 3) \\ \frac{3-x}{3-1} & x \in [1, 3] \\ 1 & x \in [0, 1) \end{cases} \quad (11)$$

2) 第二灰类:

$$f_j(x) = \begin{cases} 0 & x \notin (1, 5) \\ \frac{x-1}{3-1} & x \in [1, 3] \\ \frac{5-x}{5-3} & x \in [3, 5] \end{cases} \quad (12)$$

3) 第三灰类:

$$f_j(x) = \begin{cases} 0 & x \notin (3, 7) \\ \frac{x-3}{5-3} & x \in [3, 5] \\ \frac{7-x}{7-5} & x \in [5, 7] \end{cases} \quad (13)$$

4) 第四灰类:

$$f_j(x) = \begin{cases} 0 & x \notin (5, 9) \\ \frac{x-5}{7-5} & x \in [5, 7] \\ \frac{9-x}{9-7} & x \in [7, 9] \end{cases} \quad (14)$$

5) 第五灰类:

$$f_j(x) = \begin{cases} 0 & x \notin (7, 10) \\ \frac{x-7}{9-7} & x \in [7, 9] \\ 1 & x \in [9, 10] \end{cases} \quad (15)$$

5.3. 计算综合聚类系数

对象 i 关于第 k 个灰类 ($i=1,2,\dots,m; k=1,2,\dots,s$) 的综合聚类系数 σ_i^k 计算如下:

$$\sigma_i^k = \sum_{j=1}^n f_j(x_{ijk}) \cdot \mu_j^k \quad (16)$$

其中 $f_j(x_{ijk})$ 为第 j 个评价指标关于第 k 个灰类的白化权函数, μ_j^k 为评价指标 j 在综合聚类中的权重。聚类结果详见表 4。

Table 4. Gray clustering result analysis
表 4. 灰色聚类结果分析

	第一灰类	第二灰类	第三灰类	第四灰类	第五灰类
A ₁₁	0.0000	0.0000	0.0117	0.0274	0.0000
A ₁₂	0.0000	0.0000	0.0336	0.0037	0.0000
A ₁₃	0.0000	0.0000	0.0351	0.0000	0.0000
A ₁₄	0.0000	0.0000	0.0063	0.0357	0.0000
A ₁₅	0.0000	0.0000	0.0171	0.0399	0.0000
A ₁₆	0.0000	0.0000	0.0446	0.0023	0.0000
A ₂₁	0.0000	0.0000	0.0406	0.0021	0.0000
A ₂₂	0.0000	0.0052	0.0295	0.0000	0.0000
A ₂₃	0.0000	0.0000	0.0057	0.0322	0.0000
A ₂₄	0.0000	0.0000	0.0164	0.0164	0.0000
A ₂₅	0.0000	0.0000	0.0295	0.0052	0.0000
A ₂₆	0.0000	0.0000	0.0000	0.0427	0.0000
A ₃₁	0.0000	0.0000	0.0101	0.0302	0.0000
A ₃₂	0.0000	0.0017	0.0330	0.0000	0.0000
A ₃₃	0.0000	0.0000	0.0256	0.0110	0.0000
A ₃₄	0.0000	0.0078	0.0234	0.0000	0.0000
A ₃₅	0.0000	0.0000	0.0020	0.0374	0.0000
A ₄₁	0.0000	0.0000	0.0166	0.0166	0.0000
A ₄₂	0.0000	0.0000	0.0169	0.0207	0.0000
A ₄₃	0.0000	0.0000	0.0203	0.0203	0.0000

6. 最终灰类的确定

由 $\max\{\sigma_i^k\} = \sigma_i^{k^*}$, 判断对象 i 属于灰类 k ; 当有多个对象同属于 k^* 灰类的时候, 可以进一步根据综合聚类系数的大小来确定同属于 k^* 灰类的对象指标。

计算得

属于第一灰类的对象有: 无

属于第二灰类的对象有: 无

属于第三灰类的对象有: A₁₂、A₁₃、A₁₆、A₂₁、A₂₂、A₂₄、A₂₅、A₃₂、A₃₃、A₃₄、A₄₁、A₄₃

属于第四灰类的对象有: A₁₁、A₁₄、A₁₅、A₂₃、A₂₆、A₃₁、A₃₅、A₄₂

属于第五灰类的对象有: 无

那么根据最大隶属度原则, 可以确定 B 市某展览类项目施工期成本风险的综合评价等级, 隶属于中

风险水平。

7. 结论

根据第六节聚类的结果,对属于第四灰类的“较高风险”对象进行根源分析,并提出针对性的风险控制对策。可以看出,隶属于“现场商务风险”的二级指标最多,隶属于“现场技术风险”和“现场施工风险”的二级指标其次,“现场其他风险”最少。

对于现场商务风险下的三个二级指标,集中反映了项目在合同管理和市场应对上的不足。由于展览类建筑的艺术性与创新性的要求,导致施工阶段出现大量合同未覆盖的新增内容。同时两家国企施工单位组成的联合体之间架构复杂,内部权责界面模糊,必然存在一定的合同争议。最后则是展览类建筑所需的人材机基本要素受市场波动的影响很大,难以控制成本支出。因此可以采用以下对策:

1) 风险共担:在主合同中,明确设立主要材料的价格调差条款,约定当市场价格波动超过一定幅度的时候,双方按照约定公式调整合同价款,合理分担市场风险。

2) 联合体补充协议:这个补充协议只针对联合体内部进行,进一步能够明确内部的管理流程、决策机制以及成本分摊与收益分配。当出现相应争议点时,内部可以快速进行协调仲裁,避免了因频繁的内部会议而导致的低效决策与长期搁置的争议点。

3) 合同前置管控:针对不可预见的合同外新增项与变更,施工单位可以与业主方、设计方、监理方组成“变更管理委员会”,对于发生的任何新增与变更项必须在技术、经济双重可能性进行分析论证,并出具相关报告,明确在施工技术可行的情况下对成本和工期的影响,严格履行审批签字的程序流程。

由于展览类建筑体量大,内部结构复杂,对专项施工方案的要求极高。对于现场技术风险和现场施工风险,主要根源在于技术方案的不成熟与现场施工组织管理混乱。因此可以采用以下对策:

1) 设计-施工联合评审会:施工单位应定期与设计单位进行联合技术协调会,让现场施工经验、施工实况反馈到设计环节,从源头上减少图纸遗漏与深化不清的问题。

2) 资源备案:对于项目的特殊工种需求,施工单位可以进行提前评估。与合作的信誉良好的专业分包单位签订框架协议与战略合作资源库,确保关键资源“召之即来”。

3) 计划管控:依据精益生产中“最后计划者系统”[19]理论,通过例会制度让现场所有一线参与方共同商讨阶段性工作计划,大幅度提升计划的可靠性与执行力,从根源上减少临时性的工作安排。

对于最后现场信息管理混乱的问题,虽然隶属于“现场其他风险”,但其对成本的影响依然不容小觑。可以借助NAS网络系统在项目部设置统一的信息管理平台,将所有施工文件在平台上集中管理,确保所有参建单位获取的信息是唯一且时常更新的。同时利用平台管理流程,将项目内审批、验收、支付等流程一并内部线上化,保证信息的透明化管理,极大提升沟通效率。

8. 展望与不足

本文依托处于施工期的展览类建筑施工项目,以B市某展览类施工项目为例。同时利用主观(层次分析法)+客观(ICUOWGA算子)的方法,结合灰色聚类分析对该项目进行了综合评价。得出该展览类项目施工期成本管理风险的等级为“中风险”,并对“中风险”和“较高风险”的因素分别进行说明分析。该研究不仅是对展览类建筑施工期成本风险评价的首次尝试,构建的风险模型具有一定的应用价值,也为其他大型综合联合体施工项目在施工阶段的风险评估提供了方法参考与借鉴。

对于该评价模型,依旧存在不足之处。本研究所进行的均基于某一时间点的静态风险评估,对于动态的风险变化预判依旧无能为力,无法随着项目进程更新数据、实现全面动态风险机制预警控制。

基于上述总结与局限,未来的研究可以如下展开:

1) 扩大实证研究范围: 本研究可以说是首次对展览类建筑进行成本风险评价的尝试, 在未来可以将本评价体系扩大到各个地区不同规模的展览类项目。通过大数据样本来不断修正与优化指标权重, 形成更有普适性的行业标准。

2) 引入动态评估机制: 可以探索将本评价模型与项目管理系统(PMIS)或建筑信息模型(BIM)相结合, 利用施工过程中产生的进度、成本、质量等实时数据开动态风险预警平台。

3) 探索智能算法的深度应用: 进一步研究如何利用机器学习、自然语言处理等技术, 自动从历史项目中的合同文本、进度计划、现场签证、技术方案等文件中识别和量化风险因素, 提升风险识别的自动化和智能化水平。

基金项目

教育部人文社会科学青年基金项目(22YJC790189); 上海汽车工业科技发展基金会课题(2401); 上海理工大学智慧应急管理学院培育课题(24SIEMPY_ZYW)。

参考文献

- [1] 刘莹. 苏州地域文化影响下的展览类建筑设计特征研究[J]. 中国建筑装饰装修, 2023(6): 96-98.
- [2] 刘泳奇, 吴环宇, 陈珂. 智能建造技术在工程造价管理中的应用研究综述[J]. 建筑经济, 2022, 43(S1): 245-252.
- [3] Touran, A. (1993) Probabilistic Cost Estimating with Subjective Correlations. *Journal of Construction Engineering and Management*, **119**, 58-71. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9364\(1993\)119:1\(58\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(1993)119:1(58))
- [4] Esfahani, S.H. and Petersen, I.R. (2000) An LMI Approach to Output-Feedback-Guaranteed Cost Control for Uncertain Time-Delay Systems. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, **10**, 157-174. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1099-1239\(200003\)10:3<157::aid-rnc484>3.0.co;2-k](https://doi.org/10.1002/(sici)1099-1239(200003)10:3<157::aid-rnc484>3.0.co;2-k)
- [5] 廖倩羚, 兰瑛菲. 建筑工程概预算控制措施的探讨[J]. 江西建材, 2016(13): 226.
- [6] Omotayo, T.S., Kulatunga, U. and Bjeirmi, B. (2018) Critical Success Factors for Kaizen Implementation in the Nigerian Construction Industry. *International Journal of Productivity and Performance Management*, **67**, 1816-1836. <https://doi.org/10.1108/ijppm-11-2017-0296>
- [7] 和希顺, 林汉, 胡合林, 等. 全过程造价管理模式下的工程造价控制分析[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2009(6): 73-76.
- [8] 胡梦尧, 卓平山, 吴寒, 等. 基于 ISM 的工程项目造价风险分析[J]. 中国建筑金属结构, 2023, 22(6): 17-20.
- [9] 刘玉明, 刘长滨. 基于全寿命周期成本理论的既有建筑节能经济效益评价[J]. 建筑经济, 2009(3): 58-61.
- [10] 杜继龙, 徐元进. 基于随机森林和卷积神经网络的滑坡易发性评价[J]. 世界核地质科学, 2025, 42(4): 884-894.
- [11] 沙盟, 陈高华, 郭燕飞, 等. 基于改进随机森林的电机轴承故障诊断研究[J]. 太原科技大学学报, 2025, 46(4): 346-351.
- [12] 母丹丹, 徐骁, 马西祥. 基于层次分析法的高校实验动物机构服务绩效评价[J]. 实验技术与管理, 2025, 42(7): 260-267.
- [13] 牛犇, 邱勇军, 韩松涛. 基于改进熵权法的立体停车设备系统风险评价研究[J]. 起重运输机械, 2024(20): 37-43.
- [14] 陈茸, 韩宝安, 韩宝华, 等. 基于 CUOWGA 算子赋权的建筑施工安全灰色聚类评价[J]. 安全与环境工程, 2020, 27(5): 98-105.
- [15] Yager, R.R. (1992) Applications and Extensions of OWA Aggregations. *International Journal of Man-Machine Studies*, **37**, 103-122. [https://doi.org/10.1016/0020-7373\(92\)90093-z](https://doi.org/10.1016/0020-7373(92)90093-z)
- [16] Yager, R.R. (1993) Families of OWA Operators. *Fuzzy Sets and Systems*, **59**, 125-148. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(93\)90194-m](https://doi.org/10.1016/0165-0114(93)90194-m)
- [17] 申建红, 孙小宁, 刘丽丹. “互联网 + PPP”模式下建设项目风险度预测[J]. 土木工程与管理学报, 2017, 34(5): 27-31+45.
- [18] 单晓霖, 焦朋朋. 基于灰色聚类分析法的城乡公交运营质量评价[J]. 北京建筑大学学报, 2021, 37(1): 16-24.
- [19] 韩美贵, 王卓甫, 张云清. 最后计划者系统与关键链协同模式[J]. 土木工程与管理学报, 2017, 34(1): 16-23.