

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2020.01.015

装配式建筑施工安全评价 ——基于离差最大化及五元联系数

陈美华, 陈英存

(福建工程学院 管理学院, 福建 福州 350118)

摘要:为解决装配式建筑施工安全评价指标赋权的主观性以及评价的复杂性,提出基于离差最大化及五元联系数的装配式建筑施工安全评价方法。该方法利用专家评价各个指标对应五个安全等级的隶属度,运用离差最大化法确定评价指标的权重,并利用五元联系数的运算法则计算综合五元联系数,根据综合五元联系数的系数分量大小关系判断态势排序,最后根据态势排序确定安全评价的结果。实证分析表明,该方法在装配式建筑施工安全评价上是有效的和可操作的,能够为装配式建筑施工安全管理提供决策依据。

关键词:装配式建筑; 施工安全评价; 离差最大化; 五元联系数; 态势排序

中图分类号: U407.9

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2020)01-0081-06

Construction safety evaluation of the prefabricated buildings: based on maximization of deviation and five-element connection number

CHEN Meihua, CHEN Yingcun

(School of Management, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: In order to solve the subjectivity in determining index weights and the complexity of evaluation of prefabricated building construction safety evaluation, a method is proposed for evaluating the construction safety of prefabricated buildings based on the maximization of deviation and the five-element correlation. The membership of the five security levels corresponding to each evaluation index was evaluated by invited experts. The weight of each evaluation index was determined with the deviation maximization method; the comprehensive five-element connection number was calculated by using its own algorithm. The state sequence was determined by the size of the contact component of comprehensive five-element connection number. The results of safety evaluation were determined according to the state sequence. Empirical analysis shows that the method is effective and operable in the construction safety evaluation of prefabricated buildings. Therefore, it can provide decision-making basis for the construction safety management of the prefabricated buildings.

Keywords: prefabricated buildings; construction safety evaluation; maximization of deviation; five-element connection number; state sequence

在装配式建筑施工过程中,施工安全问题成为政府部门、建筑企业非常关心的一个问题。由于装配式建筑在我国起步比较晚,技术还不怎么成熟,在构件运输、保管、吊装、临时支撑、高处作

业、构件连接等施工环节中都可能发生安全事故,给相关企业和个人带来不可挽回的财产损失和人员伤亡。目前国内外学者有关装配式建筑施工安全评价的研究成果还比较少,国外学者主要从防

收稿日期: 2019-10-28

基金项目: 福建工程学院社会科学项目(GY-S16073)

第一作者简介: 陈美华(1977-),女,福建莆田人,实验师,硕士,研究方向: 工程管理。

火性、抗震性、技术可靠性等角度展开研究^[1-3],国内学者主要运用未确知测度、粒子群算法、IC-UOWGA-RBF 神经网络等方法对装配式建筑施工安全评价进行研究^[4-6]。虽然这些方法能够在装配式建筑施工安全评价中起到一定的作用,但是在评价过程中存在确定评价指标权重主观性太强、评价结果难以量化等问题,所以有必要探索能够克服赋权法主观性以及便于量化的评价方法。

离差最大化是我国学者王应明提出的一种客观确定评价指标权重的方法^[7],五元联系数是我国学者赵克勤提出一种分析不确定性系统的方法^[8],这两种方法已经在各个领域得到很好的应用。鉴于此,本文将利用离差最大化来求解装配式建筑施工安全评价指标的权重,利用五元联系数的联系分量分别代表 5 个安全等级的隶属度,利用五元联系数的乘法和加法计算加权的综合五元联系数,从而根据综合五元联系数各个系数分量的大小关系确定装配式建筑施工安全态势排序,最后根据态势排序确定安全评价的结果。

1 离差最大化和五元联系数理论概述

1.1 离差最大化赋权法理论

假设多属性决策问题中一共有 m 个属性 n 个方案,假设 r_{ij} 表示第 i 个属性第 j 个方案对应的属性值, $w = (w_1, w_2, \dots, w_m)$ 为 m 个属性的权重向量,并且满足 $\sum_{i=1}^m w_i^2 = 1$ 。用 $P_{ij}(w)$ 表示属性 v_i 下第 j 个方案与其余方案的离差,即 $P_{ij}(w) = \sum_{t=1}^n |r_{ij} - r_{it}| w_i, (i \in M, t \in N, j \in N)$,那么对属性 v_i 来说,所有方案总离差 $P_i(w) = \sum_{j=1}^n P_{ij}(w) = \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^n |r_{ij} - r_{it}| w_i, (i \in M, t \in N, j \in N)$ 。显然最优的方案排序是使得所有属性的总离差最大化,因此构造最优化模型如下:

$$\begin{cases} \max \sum_{i=1}^m P_i(w) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{ij}(w) \\ = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^n |r_{ij} - r_{it}| w_i \\ \text{s.t. } w_i > 0, \quad \sum_{i=1}^m w_i^2 = 1 \end{cases} \quad (1)$$

通过构造拉格朗日函数求得最优解为:

$$w'_i = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^n |r_{ij} - r_{it}|}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \left[\sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^n |r_{ij} - r_{it}| \right]^2}}, i \in M \quad (2)$$

向量归一化得:

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^n |r_{ij} - r_{it}|}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^n |r_{ij} - r_{it}|}, i \in M. \quad (3)$$

通过以上几个计算步骤就可以完成确定指标权重工作。显然,离差最大法是直接利用专家的评价数据求解权重,这跟传统的层次分析法需要另请专家赋权相比,赋权工作更加简化而且结果更加客观。

1.2 五元联系数简介

五元联系数是一种研究确定性信息和不确定性信息的工具^[8]。记为 $u = a + bi + cj + dk + el$, 5 个系数 $a, b, c, d, e \in [0, 1]$ 称为联系分量。当 $a > e$ 时称为集对同势,当 $a = e$ 时称为集对均势,当 $a < e$ 时称为集对反势。在装配式建筑施工安全评价中,5 个联系数分别代表“很安全”“较安全”“安全”“较不安全”“很不安全”这 5 个安全等级,5 个联系分量数值分别代表 5 个安全等级的隶属度,这种方法跟传统的评价方法相比更加直观易于理解。

定义 1 五元联系数乘法公式和加法公式

若常数 t 为实数, $u = a + bi + cj + dk + el$, 则有

$$tu = ta + tbi + tcj + tdk + tel \quad (4)$$

若 $u_1 = a_1 + b_1i + c_1j + d_1k + e_1l, u_2 = a_2 + b_2i + c_2j + d_2k + e_2l$, 则有

$$u_1 + u_2 = (a_1 + a_2) + (b_1 + b_2)i + (c_1 + c_2)j + (d_1 + d_2)k + (e_1 + e_2)l, \quad (5)$$

2 基于离差最大化-五元联系数的装配式建筑施工安全评价模型

2.1 装配式建筑施工安全评价指标体系构建

根据国内外相关的研究成果以及装配式建筑施工安全事故的诱因以及特征,笔者依据福建省装配式建筑施工的现实情况,从管理因素、人为因素、物的因素、技术因素、环境因素五个方面确定了 27 个二级评价指标,构建了装配式建筑施工安全评价指标体系。

2.2 确定装配式建筑施工安全评价等级

根据装配式建筑施工安全评价要求,将安全等级分为“很安全”“较安全”“安全”“较不安全”“很不安全”5 个等级。

2.3 确定装配式建筑施工安全评价隶属度矩阵

通过向 10 位装配式建筑施工方面的专家发放调查表,对某装配式建筑施工安全进行评价。

利用公式 $r_{ij} = \frac{Y_{ij}}{Y}$ 表示第 i 个属性第 j 个安全等级的隶属度,其中 Y_{ij} 表示将第 i 个属性安全评价归为第 j 个安全等级的专家人数, Y 表示参与评价的专家总人数。若第 s 个一级指标支配 g 个二级指标,由此可得到第 s 个一级指标隶属度矩阵如下:

$$R_s = (r_{ij})_{g \times 5} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{g1} & r_{g2} & r_{g3} & r_{g4} & r_{g5} \end{pmatrix} \circ$$

$$u_s = w'_s R_s \begin{pmatrix} 1 \\ i \\ j \\ k \\ l \end{pmatrix} = (w_{s1}, w_{s2}, \dots, w_{sg}) \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{g1} & r_{g2} & r_{g3} & r_{g4} & r_{g5} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ i \\ j \\ k \\ l \end{pmatrix} =$$

$$\sum_{q=1}^g w_{sq} r_{q1} + \sum_{q=1}^g w_{sq} r_{q2} i + \sum_{q=1}^g w_{sq} r_{q3} j + \sum_{q=1}^g w_{sq} r_{q4} k + \sum_{q=1}^g w_{sq} r_{q5} l. \tag{6}$$

最后可计算加权的综合联系数如下:

$$u = \sum_{s=1}^m w_s u_s = \sum_{s=1}^m w_s \left(\sum_{q=1}^g w_{sq} r_{q1} \right) + \left(\sum_{s=1}^m w_s \left(\sum_{q=1}^g w_{sq} r_{q2} \right) \right) i + \left(\sum_{s=1}^m w_s \left(\sum_{q=1}^g w_{sq} r_{q3} \right) \right) j + \left(\sum_{s=1}^m w_s \left(\sum_{q=1}^g w_{sq} r_{q4} \right) \right) k + \left(\sum_{s=1}^m w_s \left(\sum_{q=1}^g w_{sq} r_{q5} \right) \right) l. \tag{7}$$

2.6 根据联系数联系分量的大小确定态势排序级别

五元联系数根据系数的大小关系,可以查阅

2.4 用离差最大化对装配式建筑施工安全评价进行赋权

为了充分利用专家评价的隶属度矩阵数据,本文借鉴离差最大化的思想将 5 个安全等级看作 5 个决策方案,那么如果某一个属性权重比较大,那么该属性下 5 个安全等级离差也会比较大,反之如果某一个属性权重比较小,那么该属性下 5 个安全等级离差也会比较小。利用隶属度矩阵的数据由式 (1) - (3) 可计算得一级权重向量 $w = (w_1, w_2, \dots, w_m)$,第 s 个一级指标支配 g 个二级指标对应的权重向量记为 $w'_s = (w_{s1}, w_{s2}, \dots, w_{sg})$ 。

2.5 计算加权的综合联系数

将计算所得的权重向量与隶属度矩阵相乘作为一级评价指标五元联系数的分量,计算得第 s 个一级指标的五元联系数如下:

五元联系数态势表确定态势排序级别,见表 1。本文只列出与本文结果有关的几个态势排序,详细的态势表查阅文献^[9]。

表 1 五元联系数态势

Tab.1 State of the five-element connection number

态势级别	系数关系	态势级别	系数关系
同势 7 级	$a > e, a > b, b > c, c < d, d > e$	同势 61 级	$a > e, a < b, b < c, c > d, d > e$
同势 20 级	$a > e, a > b, b < c, c > d, d = e$	均势 77 级	$a = e, a > b, b < c, c > d, d = e$
同势 29 级	$a > e, a = b, b > c, c > d, d = e$	均势 104 级	$a = e, a < b, b > c, c < d, d > e$
同势 40 级	$a > e, a = b, b = c, c = d, d > e$	均势 112 级	$a = e, a < b, b < c, c > d, d > e$
同势 43 级	$a > e, a = b, b < c, c < d, d = e$	反势 153 级	$a < e, a < b, b < c, c < d, d = e$
同势 47 级	$a > e, a < b, b > c, c > d, d > e$	反势 157 级	$a < e, a < b, b > c, c < d, d < e$
同势 48 级	$a > e, a < b, b > c, c > d, d = e$	反势 166 级	$a < e, a < b, b = c, c > d, d < e$

续表 1

态势级别	系数关系	态势级别	系数关系
同势 50 级	$a > e, a < b, b > c, c = d, d > e$	反势 167 级	$a < e, a < b, b = c, c = d, d > e$
同势 53 级	$a > e, a < b, b > c, c < d, d > e$	反势 174 级	$a < e, a < b, b < c, c > d, d = e$
同势 60 级	$a > e, a < b, b = c, c < d, d > e$	反势 175 级	$a < e, a < b, b < c, c > d, d < e$

根据上述计算所得的结果得到加权系数的联系分量数值,根据联系分量的大小关系确定评价指标的态势排序。态势排序级别越前面越安全,态势排序级别越后面越不安全。当安全评价处于同势区时说明安全态势较高,当安全评价处于均势区时说明安全态势中等需要随时关注事态发展,当安全评价处于反势区时说明安全态势越低,需要排查不安全的指标因素,有针对性的采取整改措施。

3 实证分析

以福建省某装配式建筑试点项目为例展开实

证分析,该项目建筑总面积为 17 096 m²,预制率达 54.5%。

因为装配式建筑受管理水平、技术水平、专业人才缺乏等因素限制,在实际施工过程中存在不少安全问题,所以装配式建筑项目施工安全评价工作是一项非常重要的工作。邀请 10 位专家对评价指标体系各个指标按照“很安全”“较安全”“安全”“较不安全”“很不安全”5 个安全等级进行评价,得到各个指标的对应各个安全等级的隶属度,结果见表 2 第 4 列到第 8 列。

表 2 福建省装配式建筑试点项目施工安全评价隶属度

Tab.2 Membership degree of construction safety evaluation of pilot projects of prefabricated buildings in Fujian Province

一级指标	二级指标	权重	五元联系数对应的安全等级					态势排序 级别
			很安全	较安全	安全	较不安全	很不安全	
管理因素 0.2922	施工安全措施	0.061 9	0.15	0.25	0.2	0.25	0.15	均势 104 级
	高处作业外围防护措施	0.164 9	0.15	0.4	0.25	0.15	0.05	同势 47 级
	外悬挑防护措施	0.113 4	0.25	0.3	0.1	0.25	0.1	同势 53 级
	现场易燃物保管措施	0.072 2	0.15	0.3	0.2	0.15	0.2	反势 157 级
	构件运输固定措施	0.082 5	0.15	0.3	0.15	0.25	0.15	均势 104 级
	构件堆码支撑措施	0.175 3	0.05	0.35	0.35	0.1	0.15	反势 166 级
	构件吊装安全措施	0.195 9	0.05	0.35	0.4	0.1	0.1	反势 174 级
	构件质量安全检测	0.134 0	0.15	0.4	0.2	0.15	0.1	同势 47 级
	合计	1	0.12	0.35	0.26	0.16	0.11	同势 47 级
人为因素 0.259 1	施工人员身体状况	0.116 3	0.2	0.25	0.1	0.3	0.15	同势 53 级
	施工人员安全意识	0.174 4	0.1	0.25	0.4	0.15	0.1	均势 112 级
	施工人员技术熟练度	0.186 0	0.1	0.3	0.35	0.05	0.2	反势 175 级
	吊车司机熟练度	0.197 7	0.15	0.45	0.2	0.15	0.05	同势 47 级
	施工现场安全人员配置	0.174 4	0.25	0.3	0.3	0.15	0	同势 60 级
	构件厂监理人员配置	0.151 2	0.25	0.35	0.2	0.1	0.1	同势 48 级
	合计	1	0.17	0.32	0.27	0.14	0.10	同势 47 级
物的因素 0.159 7	预制构件质量	0.245 3	0.15	0.3	0.2	0.3	0.05	同势 53 级
	吊装机械设备	0.113 2	0.25	0.2	0.25	0.15	0.15	同势 20 级
	设备定期安全检查	0.150 9	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	同势 40 级
	吊装连接部位强度	0.264 2	0.4	0.2	0.1	0.2	0.1	同势 7 级
	临时支撑承载强度	0.226 4	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	反势 153 级
	合计	1	0.24	0.20	0.18	0.24	0.14	同势 7 级

续表 2

一级指标	二级指标	权重	五元联系数对应的安全等级					态势排序 级别
			很安全	较安全	安全	较不安全	很不安全	
技术因素 0.1868	构件准确定位技术	0.129 0	0.2	0.1	0.3	0.2	0.2	均势 77 级
	构件连接节点技术	0.161 3	0.15	0.3	0.25	0.2	0.1	同势 47 级
	外墙连接件技术	0.258 1	0	0.3	0.3	0.3	0.1	反势 167 级
	构件安全防护技术	0.225 8	0.1	0.2	0.4	0.2	0.1	均势 112 级
	预留预埋件设计技术	0.225 8	0.2	0.2	0.4	0.1	0.1	同势 43 级
	合计	1	0.12	0.23	0.34	0.20	0.11	同势 61 级
环境因素 0.1024	气候条件	0.411 8	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	同势 53 级
	运输环境	0.235 3	0.2	0.3	0.2	0.2	0.1	同势 50 级
	现场道路状况	0.352 9	0.3	0.3	0.2	0.1	0.1	同势 29 级
	合计	1	0.24	0.34	0.16	0.16	0.10	同势 53 级
总合计			0.16	0.29	0.25	0.18	0.11	同势 47 级

运用式(1)–(3)可计算得一级权重向量,见表 2 第 1 列,二级指标权重见表 2 第 3 列。运用式(6)计算出综合五元联系数以及 5 个一级指标的五元联系数,分别为:该装配式建筑项目施工安全评价综合五元联系数为 $u_{\text{综合}}=0.16+0.29i+0.25j+0.18k+0.11l$,施工安全评价结果为同势 47 级,处于“较安全”级别;其中 5 个一级指标的五元联系数分别为

$u_{\text{管理因素}}=0.12+0.35i+0.26j+0.16k+0.11l$,施工安全评价结果为同势 47 级,

$u_{\text{人为因素}}=0.17+0.32i+0.27j+0.14k+0.10l$,施工安全评价结果为同势 47 级,

$u_{\text{物的因素}}=0.24+0.20i+0.18j+0.24k+0.14l$,施工安全评价结果为同势 7 级,

$u_{\text{技术因素}}=0.12+0.23i+0.34j+0.20k+0.11l$,施工安全评价结果为同势 61 级,

$u_{\text{环境因素}}=0.24+0.34i+0.16j+0.16k+0.10l$,施工安全评价结果为同势 53 级。

根据以上分析结果表明装配式建筑试点项目施工安全评价结果为:该项目综合施工安全评价结果为同势 47 级,总体安全等级为“较安全”级别。其中管理因素和人为因素这两项评价结果也位于同势 47 级;物的因素位于同势 7 级明显优于其他因素;技术因素评价结果位于同势 61 级,环境因素评价结果位于同势 53 级,显然技术因素和环境因素评价结果明显落后于其他指标但也还在同势区,安全态势较高。

根据以上计算所得结果并以 5 个一级指标的系数以及综合五元联系数的系数分量作为纵轴,以 5 个安全等级为横轴,建立如下的安全等级曲线,见图 1。

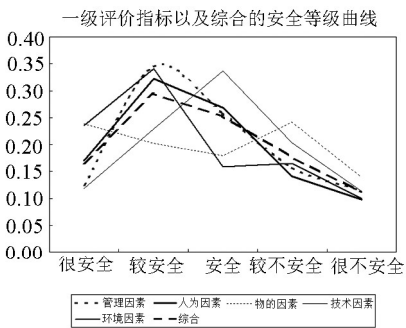


图 1 一级评价指标以及综合的安全等级曲线
Fig.1 Curves of first grade evaluation index and comprehensive safety grade

通过观察安全评价曲线发现:综合五元联系数的安全曲线与管理因素、人为因素、环境因素这 3 个一级指标的安全曲线较接近,与技术因素、物的因素差异比较大。进一步比较二级指标的五元联系数分量的大小,从而可以判断各个二级指标对应的态势,见表 2 第 9 列。通过分析二级指标的安全评价态势发现:管理因素中现场易燃物保管措施、构件堆码支撑措施、构件吊装安全措施 3 个指标评价结果为反势;人为因素中施工人员技术熟练度评价结果为反势;物的因素中临时支撑

承载强度评价结果为反势;技术因素中外墙连接件技术评价结果为反势。针对评价结果中几个安全态势排序处于反势的二级指标,装配式建筑施工安全管理人员应该及时发现,找出所有可能发生安全事故的诱因,及时商讨应对措施,最大限度地降低发生安全事故的概率。

4 结论

通过建立基于离差最大化-五元联系数的装配式建筑施工安全评价模型,对装配式建筑施工安全进行合理评价,结合该模型评价计算所得的综合五元联系数和态势排序结果,对装配式建筑施工企业提出如下建议:

1)增设专职安全管理人员实行施工全过程监控。由于影响装配式建筑施工安全的因素既多

又杂,施工安全管理不到位造成的后果又非常严重,因此施工企业有必要安排专职的安全管理人员,负责定期完成装配式建筑施工安全因素的识别、评价、控制等工作。

2)及时根据评价结果制定应对措施。安全管理人员邀请专家对相关施工项目进行评价,最后运用该模型计算评价的结果,及时梳理出态势排序比较低的各级安全指标,从而有的放矢地制定有针对性的安全应付措施。

3)合理优化装配式建筑施工安全管理模式。装配式建筑施工企业应当通过合理优化安全管理模式,规避施工过程中可能出现的安全事故,比如通过购买工程保险等方式尽可能减少安全事故造成的严重损失。

参考文献:

- [1] WRÓBLEWSKI R, GIERCZAK J, SMARDZ P, et al. Fire and collapse modelling of a precast concrete hall[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2016, 12(6): 714-729.
- [2] ERCOLINO M, MAGLIULO G, MANFREDI G. Failure of a precast RC building due to Emilia-Romagna earthquakes[J]. *Engineering Structures*, 2016, 118: 262-273.
- [3] VIDJEAPRIYA R, JAYA K. Experimental study on two simple mechanical precast beam-column connections under reverse cyclic loading[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2013, 27(4): 402-414.
- [4] 刘娇,苑俊丽,常春光. 基于未确知测度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)*, 2017, 19(4): 387-393.
- [5] 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.
- [6] 闫帅平,张杰. 基于ICUOWGA-RBF神经网络的装配式建筑施工安全评价[J]. *安全与环境工程*, 2019, 26(3): 121-126.
- [7] 王应明. 应用离差最大化方法进行多指标决策与排序[J]. *系统工程与电子技术*, 1998, 20(7): 24-26.
- [8] 李聪,陈建宏,杨珊,等. 五元联系数在地铁施工风险综合评价中的应用[J]. *中国安全科学学报*, 2013, 23(10): 21-26.
- [9] 王国平,杨洁,王洪光. 五元联系数在地表水环境质量评价中的应用[J]. *安全与环境学报*, 2006, 6(6): 21-24.

(责任编辑:王圆圆)