

基于灰色故障树的装配式建筑设计风险

刘 凯^{1,2}, 丁晓欣¹, 刘春伟², 王 鑫³, 侍 文¹

(1. 吉林建筑大学 经济与管理学院, 吉林 长春 130118; 2. 吉林工商学院 工商管理学院, 吉林 长春 130507; 3. 吉林建筑科技学院 市政与环境工程学院, 吉林 长春 130114)

摘 要: 装配式建筑设计是实现产业化住宅的前提, 装配式建筑作为一整个产业链, 利于住宅规模的扩大, 提供崭新住宅产品, 增加社会价值, 开创新时代住宅模式, 达到节能减排的目的。为了加快产业化进程, 满足住宅结构方案和设计的要求, 符合构造与计算假定相一致, 必须对装配式建筑的设计风险进行管理。利用灰色模型故障树对装配式建筑设计风险进行评估, 筛选对于设计风险产生的基本事件。通过确定基本事件关联度的大小, 确定在设计阶段需要重视的基本事件, 对基本事件的关联度大小进行排序, 判断在装配式设计中设计经验不足、预制率和装配率计算不明、节点性能等是需要高度重视的问题。并采取有效措施进行风险规避, 确保装配式建筑设计的顺利进行, 以达到传统建筑产业的转型升级。

关键词: 装配式建筑; 设计风险; 故障树; 关联度

中图分类号: TU201 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-0985(2020)03-0162-06

Risk of Prefabricated Building Design Based on Grey Fault Tree Model

LIU Kai^{1,2}, DING Xiao-xin¹, LIU Chun-wei², WANG Xin³, SHI Wen¹

(1. College of Economics and Management, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China;
2. College of Business Administration, Jilin Business and Technology College, Changchun 130507, China; 3. School of Municipal and Environmental Engineering, Jilin University of Architecture and Technology, Changchun 130114, China)

Abstract: The design of prefabricated buildings is the premise to realize industrialized houses. As an entire industrial chain, prefabricated buildings provide new residential products, increase social value, and create a new era of residential buildings to achieve the purpose of energy conservation and emission reduction. In order to speed up the industrialization process, meet the requirements of the residential structure plan and design, and conform to the structure and calculation assumptions, the design risk of the prefabricated buildings must be managed. The gray model fault tree is used to assess the risk of prefabricated building design and screen the basic events that arise from the design risk. By determining the correlation degree of basic events, the basic events that need to be paid attention to during the design stage are determined. In the assembly design, the problems that need to be paid great attention are the lack of design experience, the unknown calculation of prefabrication rate, assembly rate and node performance. And effective measures are taken to avoid risks, ensure the smooth progress of the prefabricated building design, and achieve the transformation and upgrading of the traditional building industry.

Key words: prefabricated building; design risk; fault tree; correlation degree

随着我国建筑行业发展形式发生转变, 装配式建筑因其在节能环保、施工快捷、成本可控、安

收稿日期: 2019-02-22 修回日期: 2019-06-18
作者简介: 刘 凯 (1992-), 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 研究方向为工程项目管理 (Email: 747737599@qq.com)
通讯作者: 丁晓欣 (1964-), 女, 吉林长春人, 硕士, 教授, 研究方向为工程项目管理 (Email: 554730420@qq.com)
基金项目: 吉林省科技厅重点研发项目 (20180201028sf)

全耐久等方面突出的特点在全国范围内得到广泛推广^[1]。装配式建筑虽具有绿色施工、环保高效的特点,但是因为采用预制构件进行组装建设,需要满足标准化、模数化、模块化的要求,达到工业化生产部品、构件交换通用、构件尺寸协调的标准,由此则会加大设计的风险^[2]。目前我国对于装配式建筑设计风险的研究还处于探索阶段,关于装配式建筑设计风险的研究相对较少,为了保证装配式建筑产业化进程的顺利推进,装配式建筑的风险管理尤为重要。

作为项目全生命周期前期准备工作的重要一环,充分识别项目设计风险有利于对设计风险影响因素进行客观评价和实施有效管理,实现对建筑工程项目增值的核心目的。国内外学者针对装配式建筑设计风险研究提出了许多不同的观点。Yuan等^[3]将设计-生产-装配(Design for Manufacture and Assembly, DFMA)引入BIM参数化模型,通过深化设计团队进行装配式建筑深化正向设计,并对相关案例设计管理进行分析,以减少装配式建筑设计带来的风险影响。Naranje等^[4]对装配式建筑设计的时间效率和规划控制进行了详细研究;并提出利用RFID(Radio Frequency Identification)技术对预制构件进行跟踪、射频识别、施工现场安装等技术研发;能够很大程度上节省装配式建筑设计时间并降低成本,并利用管理信息系统可靠地降低装配式建筑在设计过程中的风险概率。He Qiang^[5]提出利用BIM技术在装配式建筑设计中进行系统化、信息化管理,以求全面地规避可能出现的风险事件。Sun Qianqian^[6]对装配式建筑设计的节能、环保等方面进行分析,提出了“模块化单元”的概念以便减小装配式建筑在后期运营维护管理方面的风险损失。Anonymous^[7]对装配式木结构设计过程中的工艺效率、内外部环境、投资回报率、材料利用效率等方面进行探讨,从设计到施工进行全方位的风险识别,以便更好地服务于业主,满足建筑功能需求。Wesz等^[8]利用ETO(Engineer-To-Order)模型对装配式建筑在规划、结构、工厂预制和现场组装进行模拟,以规范性设计为准则在装配式建筑设计团队中实施,鼓励协作规划,创造不同专业间相互学习的机会,提高流程透明度,并根据项目状态灵活调整;引入解耦点设计概念,并提出Last Planner系统新指标,利用可视化管理减少装配式建筑设计在规划和质量控制方面的潜在风险。赵辉^[9]根据装配式建筑的特点,对装配式建筑设计中的体系和要点进行分析,以望改善施工现场组装过程中的

风险。马立等^[10]以实际工程项目为例,详细阐述了装配式建筑设计过程中的构建拆分等不合理现象,并基于开放建筑理论、模度理论对装配式建筑纵向、横向设计进行优化。郭子豪等^[11]针对装配式建筑外墙保温设计进行探讨,保证寒冷地区装配式建筑的使用要求,总结了对于寒冷地区保温系统的设计方案。吴成龙等^[12]对预制装配式混凝土框架节点的最新研究进展情况进行了阐述,提出一种新型模块化的预制装配式框架节点,能够满足节点内力传递合理、受力机理明确的抗震设计原则。丁晓欣等^[13,14]为解决装配式建筑预制构件在运输吊装中存在的风险问题,提出了优化吊装的措施以及吊点设置位置,为装配式建筑预制构件吊装风险控制提供了参考价值。田东等^[15]根据全生命周期理论对装配式混凝土建筑设计进行系统性分析,提出构建BIM(Building Information Modeling)族库的原则分析产业链中设计、施工、生产、安装等环节对预制构件设计的影响权重,并提出了基于BIM技术的装配式建筑深化设计的方法。

上述文献利用不同的技术手段对装配式建筑设计风险管理提供了解决策略,但是研究仍存在以下不足之处:

(1)在研究领域方面,国外专家^[4~6]主要是针对设计、生产、吊装、运输、组装等一个方面或者一段过程进行分析其风险,未从装配式建筑项目的系统性出发,全方位地探究在设计过程中对后期的影响。依据概念性设计对装配式建筑进行定性、宏观方面的研究。国内专家^[9~11]仅对预制构件拆分、吊装过程进行研究,未考虑到预制构件在现场施工、后期运维以及外部环境的影响。

(2)在研究思路方面,国内外专家^[7,8,14,15]仅对设计这一阶段进行规范讨论,未从装配式建筑全生命周期出发,结合构件拆分、工厂预制、施工现场组装、后期运维在其设计阶段对整个项目的影响。为此,本文提出基于灰色故障树模型对装配式建筑设计风险进行系统性分析,通过结合文献资料综述、装配式建筑发展报告、项目部开展的装配式建筑存在问题进行风险识别和归纳。在装配式建筑设计全生命周期管理中提炼出内部风险事件13个,外部设计风险2个,构建了故障树模型。其次通过与资深装配式建筑设计、管理专家沟通协商,确立了各基本事件的发生概率;并利用层次分析法确立设计人员在对待不同基本事件风险的权重,根据现代建筑全寿命周期的特点结合定性分析与定量计算确立装配式建筑设计风险管

理的要点。通过利用灰色模型故障树对装配式建筑设计风险进行评估,筛选对于设计风险产生的基本事件。通过确定基本事件关联度的大小,确定在设计阶段需要重视的基本事件及其主要风险影响事件,为装配式建筑设计风险控制提供了切实可行的解决思路。

1 灰色故障树模型建立

故障树^[16-18] (Fault Tree Analysis, FTA) 是基于系统性思维利用逻辑判断的方法对系统可能发生的风险事故进行预测。顶事件是在故障树模型中由不同基本事件共同作用而发生的事件,将装配式建筑设计方案中可能发生的事故作为顶事件,记为“ T ”。任何系统产生变化的原因都是由于系统内外部影响因素支配,而在装配式建筑设计方案中,产生设计事故可能是由设计本身造成的,也有可能是设计所处的外部环境引起的,将这两个方面作为故障树的主要模块记为 M_1, M_2 。设计风险基本事件根据吉林省装配式建筑发展报告、国家统计局统计数据、前瞻产业研究院整理数据、住建部 2018 年全国装配式建筑市场研究报告、国内外专家的研究成果^[4,7,8,10,12,19],并结合北

京装配式建筑设计研究院 2018 年鼎湖庄项目实际过程^[20]对装配式建筑设计过程中的风险事件进行识别、归纳,确立装配式建筑设计风险内外部基本事件。其中基本事件类型如表 1 所示,设计风险内部原因如表 2 所示。

表 1 基本事件的类型

编号	基本事件原因	编号	基本事件原因
X_1	设计经验不足 ^[21]	X_9	构件吊装难以实施 ^[17]
X_2	系统集成设计	X_{10}	节点性能 ^[18]
X_3	预制率、装配率计算不明 ^[22,23]	X_{11}	构件质量
X_4	功能使用要求不足	X_{12}	装配式设计耗时长
X_5	引用新技术难以实施	X_{13}	后期管理不到位 ^[25]
X_6	选用材料性能不稳定	X_{14}	政策、法规调整
X_7	具体施工环境不符	X_{15}	外币汇率
X_8	构件厂生产困难 ^[24]		

表 2 设计风险内部原因

编号	内部原因
M_3	方案设计问题 ^[26]
M_4	预制生产问题
M_5	建设工程质量问题
M_6	全寿命周期成本问题 ^[27]

根据装配式建筑设计风险中出现的基本事件,考虑到系统的内外因素,建立装配式建筑设计风险故障树模型如图 1 所示。

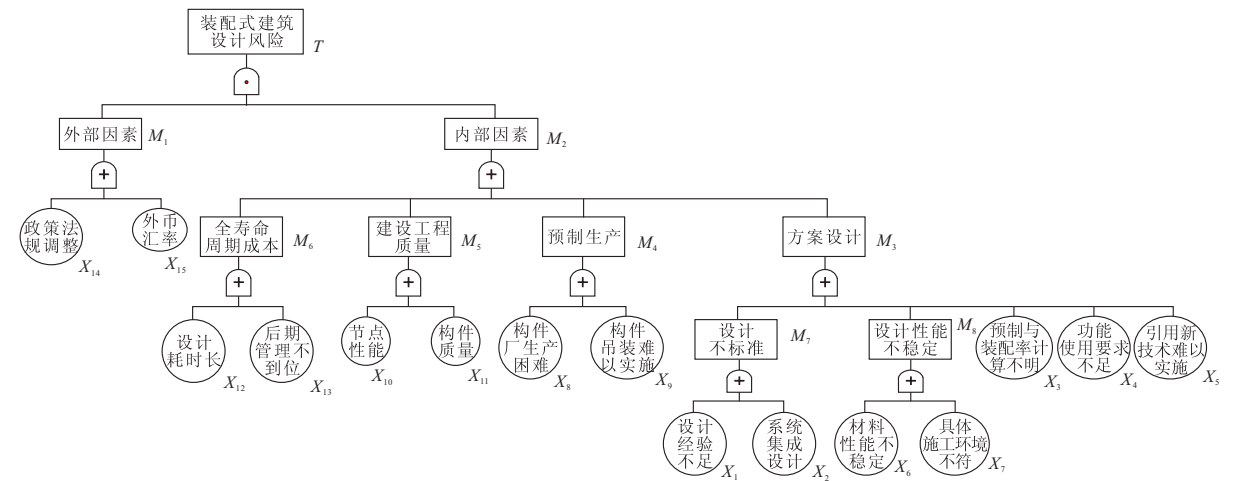


图 1 装配式建筑设计风险故障树

2 装配式设计风险故障树分析

2.1 基本事件与设计风险的关联度确定

因为在整个装配式设计风险故障树中,若构成系统的基本事件一个或者多个发生时,那么设计风险顶事件就必然发生,由发生的基本事件组成的集合则称为割集^[28]。消除任意个数基本事件后,顶事件却不发生,则此类割集被称为最小割集。在装配式设计风险故障树模型中,假设设计

故障树中共有 n 个基本事件,其中最小割集的个数为 m ,任意最小割集 L_i 表示由 n_i 个基本事件组成的第 i 个数据,根据装配式建筑设计风险的基本事件建立特征矩阵 X_L :

$$X_L = \begin{bmatrix} X_{L_1} \\ X_{L_2} \\ \vdots \\ X_{L_m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{L_1}(1) & X_{L_1}(2) & \cdots & X_{L_1}(n) \\ X_{L_2}(1) & X_{L_2}(2) & \cdots & X_{L_2}(n) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ X_{L_m}(1) & X_{L_m}(2) & \cdots & X_{L_m}(n) \end{bmatrix} \quad (1)$$

根据每个基本事件的贡献度不同,建立待检模式向量 X_T :

$X_T = \{X_T(1), X_T(2), X_T(3), \dots, X_T(n)\}$ (2)

将典型故障特征矩阵 X_L 与待检模式向量 X_T 进行关联度计算。在得出的关联度中, 首先根据关联度大小进行排序, 关联度较大的基本事件就是需要在装配式建筑设计中高度注意风险。

2.2 装配式建筑设计故障树求解

2.2.1 确定基本事件发生概率

对于基本事件发生概率的确定, 可以采用专家库对造成装配式建筑设计风险的基本事件概率 P_i 进行评测, 根据 $P_i = 0.5(a_i + b_i)$ ($i = 1, 2, \dots, 15$; a_i, b_i 分别为专家进行打分的最高值和最低值), 计算基本事件的概率, 基本事件的概率如表 3 所示。

表 3 基本事件的概率

编号	基本事件原因	概率
X_1	设计经验不足	0.65
X_2	系统集成设计	0.30
X_3	预制率、装配率计算不明	0.65
X_4	功能使用要求不足	0.45
X_5	引用新技术难以实施	0.55
X_6	选用材料性能不稳定	0.40
X_7	具体施工环境不符	0.55
X_8	构件厂生产困难	0.50
X_9	构件吊装难以实施	0.60
X_{10}	节点性能	0.65
X_{11}	构件质量	0.40
X_{12}	装配式设计耗时长	0.60
X_{13}	后期管理不到位	0.55
X_{14}	政策、法规调整	0.35
X_{15}	外币汇率	0.55

2.2.2 AHP 权重

在关于装配式设计人员的基本事件中, 根据 AHP 权重构造判断矩阵如下:

$U' =$

1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\frac{1}{2}$	1	2	3	4	5	6	7	8
$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	1	2	3	4	5	6	7
$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	1	2	3	4	5	6
$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	1	2	3	4	5
$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	1	2	3	4
$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	1	2	3
$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	1	2
$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	1

U' 为九阶正反矩阵, 经过计算得出的最大特

征值 $\lambda_{\max} = 9.327$, 相应的特征向量归一化处理得: $W = (0.317161474, 0.233829026, 0.172095682, 0.126378821, 0.084921850, 0.065613147, 0.045383299, 0.030445171, 0.020521136)$ 。

对应随机一致性指标 $RI = 1.46$, 一致性指标 $CI = (\lambda_{\max} - 9) / (9 - 1) = 0.0408809$, 一致性比率指标 $CR = CI / RI = 0.0324452 < 0.1$ 。数据判断结果为可以接受, 可作为权重向量。

在灰色理论中结构函数 $\varphi(x)$ 可以表示为:

$$\varphi(x) = x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n \tag{3}$$

装配式建筑设计故障树的结构函数为:

$$\varphi(x) = A_1 + A_2 = (B_1 + B_2 + B_3 + B_4) + (X_{14} + X_{15}) \tag{4}$$

式中: A_i 为内外部基本事件的概率值; B_i, X_i 分别为内外部基本事件对应的风险概率值。

在装配式建筑设计风险故障树模型中, 假设最小割集可以由任意一个基本事件单独构成。在构建的特征矩阵中, 将发生的基本事件在最小割集里的值设为“1”, 并且将其余没有发生的基本事件的值设为“0”, 那么单位矩阵可以表示为:

$$X_L = I \tag{5}$$

2.2.3 待检模式向量求解

根据上文限定的条件在装配式设计风险故障树中的任意基本事件均可以作为最小割集, 任意基本事件发生的概率相互独立, 互不影响。模型中顶事件的发生概率可以求得:

$$P_T = \begin{cases} 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i), \varphi(x) = \bigcup_{i=1}^n X_i \\ \prod_{i=1}^n P_i, \varphi(x) = \bigcap_{i=1}^n X_i \end{cases} \tag{6}$$

当存在基本事件发生个数 $m \geq 1$ 时, 就需要评价任意基本事件对于整个系统的贡献度, 任意基本事件的贡献度 I_j 为:

$$I_j = \sum_{j \in L_i} P_i / P_T \tag{7}$$

对装配式建筑设计故障树基本事件的贡献度 I_j 的求解如表 4 所示。

表 4 任意基本事件贡献度

编号	贡献度	编号	贡献度	编号	贡献度
X_1	0.650008236	X_6	0.400005069	X_{11}	0.400005069
X_2	0.300003801	X_7	0.550006969	X_{12}	0.600007603
X_3	0.650008236	X_8	0.500006336	X_{13}	0.550006969
X_4	0.450005702	X_9	0.600007603	X_{14}	0.350004435
X_5	0.550006969	X_{10}	0.650008236	X_{15}	0.550006969

对 X_T 进行归一化处理得: $X_T = (1, 0.461538462, 1, 0.692307692, 0.846153846, 0.615384615, 0.846153846, 0.769230769, 0.923076923,$

0.615384615, 0.923076923, 0.846153846, 0.538461538, 0.846153846)

2.2.4 计算两极差

根据序列差得出最大差 Δ_{\max} 和最小差 Δ_{\min} :
 $\Delta_{\max} = 1; \Delta_{\min} = 0$ 。

2.2.5 计算关联系数

在 $\rho=0.5$ 时,关联系数 $\varepsilon_{ij}(K)$ 为:
 $\varepsilon_{ij}(K) = (\Delta_{\min} + \rho\Delta_{\max}) / (\Delta_{ij}(K) + \rho\Delta_{\max})$ (8)
式中: $\Delta_{ij}(K)$ 为风险因素 K 的序列差值。

2.2.6 计算关联度

根据下式计算基本事件的关联度 r_{ij} :
$$r_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n \varepsilon_{ij}(L)$$
 (9)

式中: $\varepsilon_{ij}(L)$ 为基本事件特征矩阵 X_L 中序列差计算的关联系数值。

并对关联度大小进行排序。根据计算结果可以推断出在装配式建筑设计中 X_1 (设计经验不足)、 X_3 (预制率、装配率计算不明)、 X_{10} (节点性能)是需要高度重视的问题。

3 装配式建筑设计风险管理的建议

(1) 依托于大数据平台。针对设计经验不足、预制率和装配率计算不明等问题,需要设计人员加强自身理论和实践的完善,在实际工程中提升自身业务素质。国内的装配式建筑发展如火如荼,仍有许多没有完善的地方。可以借鉴国外装配式建筑相对成熟的技术和管理方法,总结国内先进企业的成功案例并将所有数据进行汇总整理。可以通过建立的大数据快速了解已完工程与目前设计的异同,缩短设计时间,节约成本。要根据具体问题具体分析的原则,充分了解项目的具体情况,可以借鉴经验,但不要盲目套用。

(2) 保证协同设计。装配式建筑设计应注意系统性思维,对于设计初期应组织各专业交底,确保设计方案的衔接。结构方案应注意平面规则、管线避开边缘构件,同时考虑到构件吊装能力,充分考虑各方的功能要求,注意与业主、施工单位、构件生产厂家、供货方的相互联系以及相互作用。可靠地实现全寿命周期项目管理的目的。

(3) 假定预制构件的构造与计算定向符合。对于特殊构件,避免约束边缘构件连接不当,竖向荷载传递连续问题,强约束带来整体刚度变化。设计单位在设计过程中应建立逆向思维,首先考虑各方利益最大化,预制构件制作质量可靠且成本较低,接下来结构方案技术可行,同时满足各专

业相关技术条件,最后设计相对完善的建筑方案。

(4) 深化设计阶段考虑施工技术参数,根据实际施工技术水平选择合适的结构深化设计方案。还需注意构件编码、制作、脱模、运输、存放、吊装、临时支护、施工技术要求等实际需要。

(5) 加强节点位置设计控制。装配式建筑的节点质量以及缝隙处理一直是困扰其发展的难点,可以采用节点模块化设计。预应力拼接节点及缝隙处理参照现浇建筑节点性能设计,建成等效节点形式。多采用干式连接形式从而缩短工期,提高效率。在处理柔性连接问题时,可采用延性杆和延性阻尼器连接节点设计,保证其延性性能和耗能能力。

4 结 语

(1) 本文采用利用灰色模型故障树对装配式建筑设计风险进行评估,筛选对于设计风险产生的基本事件。通过确定基本事件关联度的大小,确定在设计阶段需要重视的基本事件,对基本事件的关联度大小进行排序,判断在装配式设计中设计经验不足、预制率和装配率计算不明、节点性能是需要高度重视的问题。采取有效措施进行风险规避,确保装配式建筑设计的顺利进行,达到对于传统建筑产业转型升级的目的。

(2) 对装配式建筑事前风险管理是保证住宅产业化的前提。明确系统集成原则,满足标准化设计、工厂化生产、装配化施工、一体化装修、信息化管理、智能化应用,以达到满足适用性能、环境性能、经济性能、安全性能、耐久性能等要求。本文的研究成果为装配式建筑设计单位的风险管理提供了新思路,从装配式建筑设计的系统性出发确立了主要风险基本事件,以及需要重视的风险事件,解决了装配式建筑设计过程中单一性、片面性的设计理念,可为加快装配式建筑工业化进程提供指导。

参 考 文 献

[1] Matic D, Calzada J R, Todorovic M S, et al. Chapter 16: Cost-Effective Energy Refurbishment of Prefabricated Buildings in Serbia [M]//Materials, Technologies, Optimization and Case Studies. Elsevier Ltd: 2017: 455-487.

[2] Bonamente E, Merico M C, Rinaldi S, et al. Environmental impact of industrial prefabricated buildings: carbon and energy footprint analysis based on an LCA approach [J]. Energy Procedia, 2014, 61: 2841-

- 2844.
- [3] Yuan Z, Sun C, Wang Y. Design for manufacture and assembly-oriented parametric design of prefabricated buildings[J]. Automation in Construction, 2018, 88: 13-22.
- [4] Naranje V, Swarnalatha R. Design of tracking system for prefabricated building components using RFID technology and CAD model[J]. Procedia Manufacturing, 2019, 32: 928-935.
- [5] He Q. Research on the Application of BIM Technology in Prefabricated Building Construction[C]//Proceedings of 2019 5th International Workshop on Education, Development and Social Sciences. Francis Academic Press, 2019: 71-76.
- [6] Sun Q. Design of prefabricated old-age Building based on modularization: a case study of institutional elderly houses design in Taigou Village, Xi'an City[J]. Journal of Landscape Research, 2018, 10(5): 84-87.
- [7] Think Wood. Designing Sustainable, Prefabricated Wood Buildings [EB-OL]. [2020-02-01]. <https://www.thinkwood.com/our-ceus/designing-sustainable-prefabricated-wood-buildings>.
- [8] Wesz J G B, Formoso C T, Tzortzopoulos P. Planning and controlling design in engineered-to-order prefabricated building systems[J]. Engineering, Construction and Architectural Management, 2018, 25(2): 134-152.
- [9] 赵辉. 预制装配式建筑结构体系与设计[J]. 科学技术创新, 2019, (14): 131-132.
- [10] 马立, 周典, 贾建东. 西安交通大学人居学院科研楼装配式建筑设计优化[J]. 工业建筑, 2019, 49(4): 200-205.
- [11] 郭子豪, 贾志峰. 寒冷地区装配式混凝土建筑外墙保温设计研究[J]. 中外建筑, 2019, (4): 220-222.
- [12] 吴成龙, 刘继明, 赵凯常. 预制装配式混凝土框架节点抗震性能研究进展[J]. 混凝土, 2019, (3): 130-133.
- [13] 丁晓欣, 刘凯. 装配式建筑预制构件吊装吊点的优化选择[J]. 黑龙江工业学院学报, 2018, 18(8): 41-47.
- [14] 丁晓欣, 刘凯, 焦延韬. 有限元分析装配式建筑构件的吊装管理[J]. 江苏建筑职业技术学院学报, 2018, 18(2): 5-8.
- [15] 田东, 李新伟, 马涛. 基于 BIM 的装配式混凝土建筑构件系统设计分析与研究[J]. 建筑结构, 2016, 46(17): 58-62.
- [16] 吴利丰. 分数阶灰色预测模型及其应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- [17] Wu Z, Shen R. Safety evaluation model of highway construction based on fuzzy grey theory[J]. Procedia Engineering, 2012, 45: 64-69.
- [18] Wu L, Gao X, Xiao Y, et al. Using a novel multi-variable grey model to forecast the electricity consumption of Shandong Province in China[J]. Energy, 2018, 157: 327-335.
- [19] Tvrzníková D, Pašek J. Economic analysis of energy saving measures in current prefabricated panel buildings[J]. Applied Mechanics and Materials, 2016, 861: 457-465.
- [20] 黄桂林, 胡明路. 基于可拓学理论的装配式住宅施工过程安全风险评价研究[J]. 工业安全与环保, 2017, 43(2): 33-38.
- [21] Guo Z, Gao S, Liu J. Application of BIM technology in prefabricated buildings[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, 81: 012139-1-6.
- [22] 舒欣, 张奕. 基于 BIM 技术的装配式建筑设计与建造研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(23): 123-126.
- [23] Silva P C P, Almeida M, Bragança L, et al. Development of prefabricated retrofit module towards nearly zero energy buildings[J]. Energy and Buildings, 2013, 56: 115-125.
- [24] 齐宝库, 朱娅, 范伟阳. 装配式建筑全寿命周期风险因素识别方法[J]. 沈阳建筑大学学报(社会科学版), 2016, 18(3): 257-261.
- [25] 刘凯, 丁晓欣, 丁奥, 等. 基于 Dematel 模型装配式建筑造价影响因素分析[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版), 2019, 35(5): 51-57.
- [26] 桑培东, 李金晓. 基于结构方程的装配式建筑项目开发建设风险评价[J]. 土木工程与管理学报, 2017, 34(4): 89-95.
- [27] El-Abidi K M A, Ghazalia F E M. Motivations and limitations of prefabricated building: an overview[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 802: 668-675.
- [28] 刘静乐, 王恩茂. 基于灰色关联故障树的绿色建筑设计风险研究[J]. 工程管理学报, 2014, 28(2): 17-21.