

DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201907029



装配式建筑施工建筑信息模型 应用成熟度评价

董娜, 弓成, 熊峰

(四川大学 建筑与环境学院, 四川 成都 610065)

摘要: 针对目前装配式建筑信息模型(BIM)应用水平差异大、应用效果不明显的问题,从施工阶段入手,建立装配式建筑施工 BIM 的成熟度评价模型. 首先,结合熵权法和灰色关联聚类综合确定指标权重,引入云模型进行成熟度评价;其次,建立装配式建筑施工 BIM 应用成熟度评价指标和方法. 工程案例表明:模型具有可行性,可为装配式建筑的 BIM 推广和成熟度评价提供参考.

关键词: 装配式建筑; 施工建筑信息模型; 成熟度; 熵权法; 灰色关联聚类; 云模型

中图分类号: TU 71 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2020)01-0050-10

Maturity Evaluation of Building Information Modeling Applications in Prefabricated Building Construction

DONG Na, GONG Cheng, XIONG Feng

(College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Aiming at the problems that the current application level of building information modeling (BIM) differs greatly and the application effect is not obvious, starting from the construction stage, a maturity evaluation model for BIM is established. Combining the entropy weight method and grey relational clustering, the index weights are comprehensively determined; and introducing the cloud model, the maturity evaluation is conducted. The maturity evaluation indexes and methods for BIM application of prefabricated building construction are established. The engineering case shows that the model is feasible and can be used as a BIM popularization of prefabricated building and maturity evaluation.

Keywords: prefabricated building; construction building information model; maturity; entropy weight method; grey relational clustering; cloud model

与传统建筑相比,装配式建筑因质量好、效率高、污染少、受气候环境约束小等特点,已经成为我国建筑业发展的重点方向^[1]. 建筑信息模型(building information modeling, BIM)技术作为提高建筑业信息化水平的重要手段,能够实现全过程、全方位的信息化集成与管理,装配式建筑的 BIM 应用也成为当前的研究热点^[2]. 施工阶段的 BIM 应用直接影响装配式建筑的施工效率、质量和费用等关键问题. 因此,有必要对装配式建筑的施工 BIM 应用成熟度进行评价. Lee 等^[3]通过总结不同的成熟度模型,研究适用于其所处环境的 BIM 成熟度评估程序和指标,用于评估设计公司 BIM 成熟度指标; Abanda 等^[4]论证了 BIM 在装配式建筑中的作用,同时探讨 BIM 技术应用在装配式建筑 and 传统建筑中的效益差别;

收稿日期: 2019-07-12

通信作者: 董娜(1976-),女,副教授,博士,主要从事建筑信息化及工程项目管理领域的研究. E-mail: dongna@scu.edu.cn.

基金项目: 国家重点研发资助项目(2016YFC0701400)

曹新颖等^[5]研究了装配式建筑构件生产的工艺流程与质量影响因素, 建立 BIM-RFID 技术的构件质量管理信息系统及流程体系; 李开^[6]从业主方的角度出发, 总结 BIM 在项目全生命周期中共有 20 个具体运用, 并运用层次分析法和模糊综合评价法对国内 10 个典型项目进行 BIM 应用成熟度评价; 张健等^[7]研究了基于 BIM 的装配式建筑集成体系, 提出装配式建筑中 BIM 成熟度发展层级. 综上所述, 当前研究主要集中在传统建筑领域的 BIM 应用成熟度和装配式建筑的 BIM 应用点上, 而对装配式建筑施工 BIM 应用成熟度的研究尚未起步. 本文在文献综述和装配式建筑 BIM 应用现状分析的基础上, 构建装配式建筑施工 BIM 应用成熟度评价指标, 并利用熵值法和灰色关联聚类, 综合确定指标权重, 引入云模型, 建立装配式建筑施工 BIM 应用成熟度评价模型.

1 装配式建筑施工 BIM 成熟度评价指标的建立

1.1 指标建立思路

从装配式建筑的施工特点及装配式建筑施工项目管理需求出发, 结合装配式建筑施工阶段 BIM 应用情况, 建立装配式建筑施工 BIM 的评价指标体系. 成熟度评价指标体系的构建思路, 如图 1 所示.

1.2 装配式建筑施工特点分析

装配式建筑具有人工成本低、效率高、工期短、质量高、对环境污染小、浪费少等优点^[8]. 与传统建筑施工相比, 装配式建筑施工现场构件多、吊装平面布置困难, 同时现场存在大量装配作业, 且对构件吊装要求高^[7]. 装配式建筑现场吊装施工过程, 如图 2 所示.

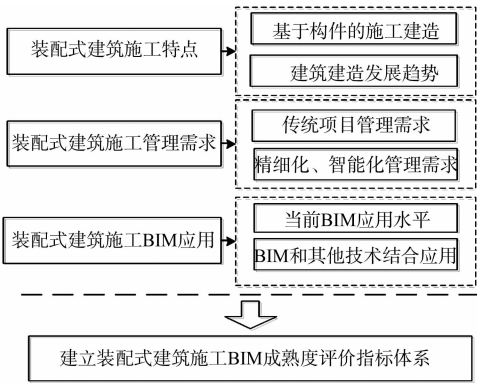


图 1 成熟度评价指标体系的构建思路

Fig. 1 Establishment path of maturity evaluation index

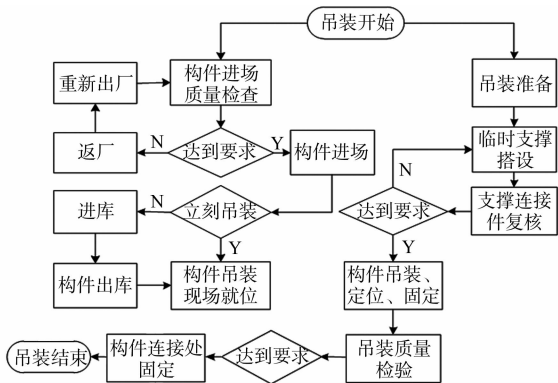


图 2 装配式建筑现场吊装施工过程

Fig. 2 Assembly process of prefabricated building construction

1.3 装配式建筑施工项目管理需求分析

装配式建筑对各个管理目标下的实际管理需求, 如表 1 所示. 基于项目管理视角, 装配式建筑项目管理应满足进度、成本、质量、安全等四大基本管理目标, 且项目管理目标应与项目建造特点相适应. 考

表 1 装配式建筑的管理需求

Tab. 1 Management requirements of prefabricated building

管理目标	管理需求分析
进度管理	能够对装配式建筑的构件运输及构件施工吊装计划信息和实际信息进行收集分析, 判断实际进度和计划进度差异情况
质量管理	能够对装配式建筑构件及构件吊装拼接进行质量管理, 重点在于对质量偏差的记录及分析
成本管理	随着项目施工进展, 将项目动态成本与目标成本进行对比分析, 判断费用使用情况, 并据此进行优化, 重点对项目实施过程中的变更进行管控
施工方案管理	对装配式建筑施工过程进行模拟, 包括吊装节点工艺模拟、吊装机械施工模拟等内容
安全管理	对施工现场人员进行安全教育, 危险逃生培训等; 能够及时发现环境安全问题并预警
现场管理	实现对施工现场的模拟布置, 并能够对场地布置进行优化; 能够对现场各参与方进行统筹管理, 提高沟通协调效率
空间管理	能够对构件位置进行管理, 包括构件运输过程中的地理信息收集, 以及对构件现场及仓库内的堆放排布管理

考虑到装配式建筑构件多、场布难、吊装要求高等施工特点,以及装配式建筑施工管理信息化、智能化、精细化的要求,装配式建筑施工 BIM 应用还应实现对项目的施工方案管理、现场管理、空间管理^[9].

1.4 装配式建筑施工 BIM 应用

装配式建筑施工阶段应用 BIM 能够提高施工的效率和质量.当前,装配式建筑施工阶段的 BIM 应用有如下 8 个主要方面.

1) 构件信息化管理方面.装配式建筑构件数量繁多,将构件信息集成到 BIM 模型中,实现构件状态的记录、追踪、监控和管理,能够保证工程的顺利实现^[10].

2) 场地布置方面.装配式建筑现场吊装构件及机械放置复杂,将 BIM 模型与场地模型集成,并结合吊装方案和进度计划,可以合理、高效地进行现场平面布置^[11].

3) 吊装机械和复杂节点模拟方面.对于装配式建筑,节点处的连接是影响工程质量的关键因素,吊装方案合理可行是保证顺利吊装的基础;吊装机械模拟和复杂节点模拟有利于施工机械的合理选用和复杂节点的质量保证^[12].

4) 虚拟施工方面.将构件的吊装进度与 3D-BIM 模型集成,形成 4D-BIM 模型进行虚拟吊装,可以优化吊装进度计划,确保吊装过程的顺利进行^[13].

5) 资金使用计划和三算对比分析方面.将成本信息与 4D-BIM 模型集成建立 5D-BIM 模型,建立资源和资金需求计划并与实际信息进行对比分析,有效实现成本动态过程控制^[14].

6) 安全培训及预警方面.基于 BIM 进行人员安全和现场安全教育培训,制定有效的安全管理措施,并将人员及现场实际信息与 BIM 集成,实现施工安全实时预警^[15].

7) 沟通协调平台方面.基于 BIM 的可视化特点,通过 BIM 模型和协同平台,把项目中的业主、设计、施工、监理等各方有效连接在一起,实现实时高效的沟通^[14].

8) BIM 与其他技术结合方面.通过将 BIM 与企业资源计划(ERP)、3D 扫描、混合现实技术(MR)、射频识别(RFID)、地理信息系统(GIS)等技术结合应用,实现建筑管理的精细化、智能化管理^[16].

1.5 装配式建筑施工 BIM 成熟度评价指标

基于前述装配式建筑施工项目管理需求分析,将 BIM 应用点与需求相匹配,建立装配式建筑施工阶段的 BIM 技术应用成熟度评价指标体系,如图 3 所示.

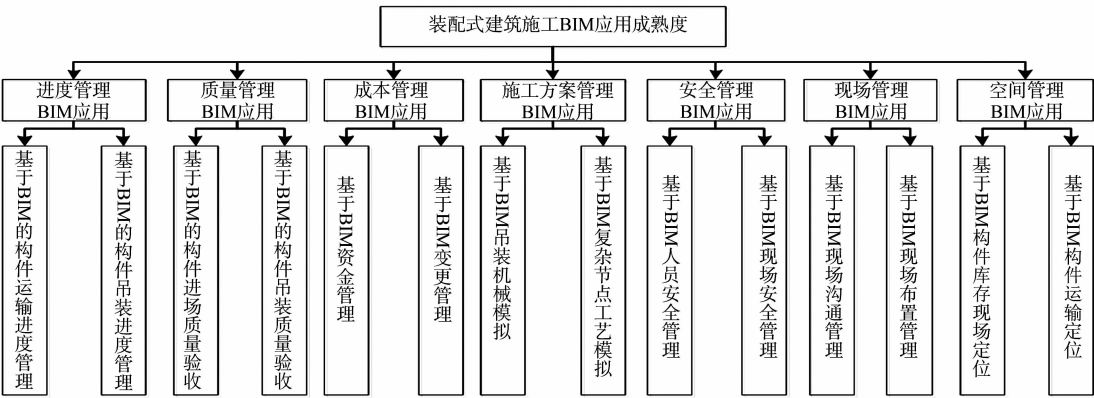


图 3 装配式建筑施工阶段的 BIM 技术应用成熟度评价指标体系

Fig. 3 BIM application maturity evaluation index system of prefabricated building

1.6 成熟度等级评价标准

不同评价模型的成熟度等级划分不同^[17].能力成熟度模型(CMM)将成熟度划分为初始级、可重复级、已定义级、已管理级、优化级;Kerzner 项目管理成熟度模型(K-PMMM)将成熟度划分为通用术语、通用过程、单一方法、基准比较、持续改进;组织项目管理成熟度模型(OPM3)成熟度模型分为标准化、测量、控制、持续改进 4 个级别;美国项目管理解决方案公司的项目管理成熟度模型(PMS-PM3)中,成熟度分为初始过程、结构和标准过程、组织和制度过程、管理过程、优化过程.

参考其他评价模型的成熟度等级划分,结合 BIM 应用水平差异大的实际情况,将装配式建筑施工 BIM 应用成熟度等级分为 5 个阶段.考虑到装配式建筑中 BIM 应用还处于起步阶段,与成熟阶段的差

距较大,因此,在初始阶段和成熟阶段间设置成长阶段和提高阶段.在成熟阶段后设置优化阶段,此阶段能够实现基于 BIM 的智能化、自动化管理,是基于 BIM 的装配式施工管理的理想化状态^[18].

基于当前的 BIM 技术水平和 BIM 应用情况,确定各成熟度等级评价标准,如表 2 所示.

表 2 装配式建筑施工 BIM 成熟度等级评价标准
Tab. 2 Prefabricated building construction BIM maturity level standard

准则层	指标层	成熟度等级评价标准		指标层	成熟度等级评价标准
进度管理 BIM 应用 U ₁	基于 BIM 的 构件运输 进度管理 U ₁₁	运输计划进度与 BIM 模型集成		基于 BIM 的 构件吊装 进度管理 U ₁₂	吊装计划进度与 BIM 模型集成
		运输实际进度与 BIM 模型集成			应用 4D-BIM 对构件吊装 进行施工进度模拟
		计划进度与实际进度对比			吊装实际进度与 BIM 模型集成
		基于 BIM 的运输进度主动预警 基于 BIM 的运输计划优化			基于 BIM 的计划进度与 实际进度对比分析 基于 BIM 的吊装进度主动预警
质量管理 BIM 应用 U ₂	基于 BIM 的 构件进场 质量验收 U ₂₁	构件实际质量信息与 BIM 模型的集成		基于 BIM 的 构件吊装 质量验收 U ₂₂	构件吊装质量信息与 BIM 模型的集成
		构件验收标准与 BIM 模型的集成			构件吊装质量标准与 BIM 模型的集成
		基于 BIM 的构件质量偏差分析			基于 BIM 的构件吊装质量偏差分析
		构件验收质量信息自动录入 基于 BIM 的构件质量 情况自动反馈			构件吊装质量信息自动录入 基于 BIM 的构件吊装 质量情况自动反馈
成本管理 BIM 应用 U ₃	基于 BIM 的 资金管理 U ₃₁	5D-BIM 模型建立		基于 BIM 的 变更管理 U ₃₂	建立变更部位模型 变更部分资金计划
		基于 5D-BIM 的资金 使用计划制定			将变更部分资金实际使用 情况与 BIM 模集成
		资金实际使用情况与 BIM 模型的集成			工程变更统计(变更次数、 时间、原因、处理方、费用)
		资金使用情况对比分析 基于 BIM 的资金主动预警			工程变更分析(变更次数、 时间、原因、处理方、费用)
施工方案管理 BIM 应用 U ₄	基于 BIM 的 吊装机械模拟 U ₄₁	吊装机械三维模型		基于 BIM 的 复杂节点 工艺模拟 U ₄₂	复杂节点三维模型
		建立吊装机械运行模拟			建立复杂节点工艺模拟
		基于 BIM 的吊装机械需求计划			复杂节点实际信息集成
		面向项目的机械运行模拟 基于 BIM,结合吊装安排, 自动完成吊装机械的设置			复杂节点计划信息与 实际信息对比分析 基于 BIM 的复杂节点方案优化
安全管理 BIM 应用 U ₅	基于 BIM 的 人员安全管理 U ₅₁	基于 BIM 的人员安全培训		基于 BIM 的 现场安全管理 U ₅₂	基于 BIM 的现场安全管理培训
		基于 BIM 的人员安全风险分析			基于 BIM 的现场安全风险分析
		人员信息与 BIM 模型集成			现场实际信息与 BIM 集成, 实时查看现场安全管理情况
		基于模型实时查看人员分布情况 基于 BIM 的人员安全自动预警			基于 BIM 的现场安全风险自动识别 基于 BIM 的现场安全自动预警
现场管理 BIM 应用 U ₆	基于 BIM 的 现场沟通管理 U ₆₁	基于 BIM 模型的现场沟通		基于 BIM 的 场地布置管理 U ₆₂	场地三维模型建立
		BIM 模型实时查看			场地模型与 BIM 模型集成
		现场沟通信息与 BIM 模型实时集成			基于场地模型的资源需求分析
		基于 BIM 云平台的各方沟通 各方沟通平台化流程化标准化			基于模型的场地优化 场地模型动态展示与优化
空间管理 BIM 应用 U ₇	基于 BIM 的 构件现场 库存定位 U ₇₁	基于 BIM 的构件库存计划制定		基于 BIM 的 构件运输定位 U ₇₂	基于 BIM 的构件运输计划制定
		构件实际库存信息集成			构件实际运输信息集成
		基于 BIM 的构件 库存信息查询			基于 BIM 的构件运输信息查询
		基于 BIM 的构件 库存统计与管理			基于 BIM 的构件 运输状态统计与管理
		基于 BIM,实现自动进行 构件堆放安排			结合 RFID 技术实现 位置信息的自动上传

通过对各指标的成熟度等级评价标准进行具体描述,有利于确定各指标成熟度等级的隶属情况,提高评价指标体系在实际应用中的可行性,并根据成熟度评价标准确定成熟度提高路径.

2 BIM 应用成熟度指标权重

2.1 基于层次分析法的初始权重

当前,我国装配式建筑的 BIM 应用相关标准及制度还不够完善,相关应用数据的收集存在困难.装配式建筑中的 BIM 应用仍处于探索阶段,利用客观数据确定指标权重可能会导致某些现在应用较少,对整个装配式建筑施工管理起到重要作用的指标权重偏低,因此,选取主观赋权法确定指标权重.

层次分析法(AHP)通过两两比较的方式确定层次中诸因素的相对重要性,并给出定量表示,最后确定各指标权重及重要性.层次分析法适用于当前数据收集困难,需要专家经验判断的研究情况^[19].在层次分析法的基础上,通过熵权法和灰色关联聚类,对指标数据进行进一步的处理,综合考虑各专家的决策信息,权重确定更加合理. AHP 是将与决策总是有关的元素分解成目标、准则、方案等层次,在此基础上进行定性和定量分析的决策方法^[20].层次分析法的基本步骤如下:1)构造判断矩阵;2)计算权重向量;3)一致性检验.通过层次分析法确定每一位专家的初始权重.

2.2 基于熵值法和灰色关联聚类的权重

在层次分析法的基础上,利用熵值法和灰色关联度聚类法相结合,综合考虑各个专家的决策数据,更合理地确定专家权重.先通过灰色关联度聚类法对参与判断的多位专家聚类,再根据熵值法确定类内各个专家的权重,最终形成专家权重^[21],从而使看法相同、不确定性小的专家获得较大权重,确保专家信息的合理利用.

1) 灰色关联度聚类分析^[19].设某专家利用 AHP 法给出的权重向量 $W=(\omega_1,\omega_2,\omega_3,\cdots,\omega_n)^T$,其中, $\omega_1,\omega_2,\omega_3,\cdots,\omega_n$ 表示该专家各个指标赋予的权重值. m 个专家的权重向量构成标准矩阵 Q 为

$$Q=[W_1,W_2,\cdots,W_m]=\begin{bmatrix}\omega_{1,1}&\omega_{1,2}&\cdots&\omega_{1,m}\\\omega_{2,1}&\omega_{2,2}&\cdots&\omega_{2,m}\\\vdots&\vdots&&\vdots\\\omega_{n,1}&\omega_{n,2}&\cdots&\omega_{n,m}\end{bmatrix}.$$

(1)

对 $W_k(i\leqslant j;i,j,k=1,2,\cdots,m)$,计算 W_i 与 W_j 的绝对关联度 $e_{i,j}$,得到关于专家变量的上三角矩阵 R ,即

$$R=\begin{bmatrix}e_{1,1}&e_{1,2}&\cdots&e_{1,m}\\&e_{2,2}&\cdots&e_{2,m}\\&&&\vdots\\&&&e_{n,m}\end{bmatrix},$$

(2)

$$\left. \begin{aligned} e_{i,j} &= \frac{1+|s_i|+|s_j|}{1+|s_i|+|s_j|+|s_i-s_j|}, \\ |s_i| &= \left| \sum_{k=2}^{n-1} [\omega_i(k)-\omega_i(1)] + \frac{1}{2} [\omega_{ni}-\omega_i(1)] \right|, \\ |s_j| &= \left| \sum_{k=2}^{n-1} [\omega_j(k)-\omega_j(1)] + \frac{1}{2} [\omega_{nj}-\omega_j(1)] \right|, \\ |s_i-s_j| &= \left| \sum_{k=2}^{n-1} [\omega_i(k)-\omega_i(1)-(\omega_j(k)-\omega_j(1))] + \frac{1}{2} [\omega_{ni}-\omega_i(1)-(\omega_{nj}-\omega_j(1))] \right|. \end{aligned} \right\}$$

(3)

取定临界值 $t\in[0,1]$,当 $e_{i,j}\geqslant t(i\neq j)$ 时,则可认为 W_i 与 W_j 可以归为同类. 阈值 t 越接近 1,分类就越细,一般要求 $t>0.5$.

类间赋权重时,考虑类的容量,对专家数量多的类,赋予的权重大;而对专家数量少的类,赋予的权重小.假设 m 个专家被分成 q 类,第 k 类($k=1,2,\cdots,q$)包含 $\epsilon_k(\epsilon_k\leqslant m)$ 个专家,则

$$\alpha_k=\epsilon_k^2/\sum_{k=1}^q\epsilon_k^2.$$

(4)

式(4)中: ϵ_k 为第 k 类专家个数; α_k 为第 k 类专家类间权重.

2) 熵值法确定类内权重. 熵是系统无序程度的度量, 熵值越小, 表明决策数据的混乱程度越小, 逻辑更清晰, 起的作用也更大. 因此, 应对在同类的所有专家中, 给出权重向量的信息熵值越小的专家赋予更大的权重. 在有 n 个指标, m 个评价者的评估问题中, 将第 j 个评价者的信息熵定义为

$$H(j) = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n \omega_{i,j} \ln \omega_{i,j}, \quad j = 1, 2, \dots, m. \tag{5}$$

式(5)中: $\omega_{i,j}$ 为 AHP 得出的各个专家赋予的指标权重.

第 k 类专家的类内权重 $\beta_{k,j}$ 为

$$\beta_{k,j} = \frac{1 - H_k(j)}{\sum_{j=1}^{\epsilon_k} [1 - H_k(j)]}, \quad j = 1, 2, \dots, \epsilon_k.$$

3) 专家权重确定. 专家权重由类间权重和类内权重共同确定, 则第 j 位专家权重 λ_j 为

$$\lambda_j = \alpha_k \beta_{k,j}, \quad j = 1, 2, \dots, m.$$

构成的 m 位专家的综合权重矩阵为 $\mathbf{A} = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$.

2.3 指标综合权重确定

指标综合权重由专家的指标权重按照专家权重线性加权构成, 最后形成综合权重向量 \mathbf{P} , 即

$$\mathbf{P} = (p_1, p_2, \dots, p_n)^T = \mathbf{Q} \cdot \mathbf{A}^T. \tag{6}$$

2.4 权重确定及其结果

通过专家访谈对指标进行两两比较确定权重, 参与本次访谈的专家共计 6 名, 包括高校专家 2 名, 施工企业现场管理人员 2 名, 业主方项目管理人员 1 名, 工程咨询企业 BIM 管理人员 1 名. 采用五标度打分法, 其中某一专家的指标权重序列为

$$\mathbf{W}_j = [0.038\ 5, 0.115\ 6, 0.028\ 4, 0.141\ 8, 0.038\ 5, 0.115\ 6, 0.047\ 0, 0.028\ 4, 0.124\ 8, 0.017\ 3, 0.141\ 8, 0.025\ 7, 0.086\ 4, 0.047\ 0]^T.$$

按照同样方法计算出各个专家给出的指标权重, 得出标准矩阵 \mathbf{Q} 为

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_1 \\ \mathbf{W}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{W}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.022\ 6 & 0.039\ 3 & 0.026\ 1 & 0.206\ 0 & 0.094\ 5 & 0.038\ 5 \\ 0.067\ 8 & 0.117\ 8 & 0.078\ 4 & 0.206\ 0 & 0.077\ 0 & 0.115\ 2 \\ 0.008\ 1 & 0.022\ 6 & 0.021\ 2 & 0.027\ 9 & 0.063\ 0 & 0.028\ 4 \\ 0.040\ 7 & 0.022\ 6 & 0.021\ 2 & 0.083\ 7 & 0.090\ 0 & 0.141\ 8 \\ 0.041\ 9 & 0.035\ 1 & 0.052\ 3 & 0.071\ 5 & 0.040\ 0 & 0.038\ 5 \\ 0.125\ 7 & 0.007\ 0 & 0.010\ 5 & 0.023\ 8 & 0.022\ 5 & 0.115\ 6 \\ 0.052\ 9 & 0.057\ 4 & 0.155\ 6 & 0.047\ 7 & 0.065\ 0 & 0.047\ 0 \\ 0.082\ 9 & 0.057\ 4 & 0.010\ 7 & 0.023\ 8 & 0.115\ 5 & 0.028\ 4 \\ 0.037\ 8 & 0.159\ 5 & 0.089\ 1 & 0.065\ 8 & 0.143\ 0 & 0.128\ 4 \\ 0.006\ 5 & 0.234\ 9 & 0.118\ 5 & 0.051\ 3 & 0.077\ 0 & 0.017\ 3 \\ 0.419\ 3 & 0.057\ 4 & 0.053\ 4 & 0.071\ 5 & 0.110\ 0 & 0.141\ 8 \\ 0.007\ 6 & 0.053\ 2 & 0.089\ 1 & 0.021\ 9 & 0.040\ 0 & 0.025\ 7 \\ 0.032\ 3 & 0.078\ 3 & 0.118\ 5 & 0.051\ 3 & 0.027\ 5 & 0.086\ 4 \\ 0.052\ 9 & 0.057\ 4 & 0.155\ 6 & 0.047\ 7 & 0.035\ 0 & 0.047\ 0 \end{bmatrix}.$$

1) 求类间权重. 由标准矩阵 \mathbf{Q} 求得专家群组的灰色关联矩阵 \mathbf{R} 为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1.000\ 0 & 0.991\ 5 & 0.976\ 5 & 0.950\ 7 & 0.969\ 7 & 0.994\ 4 \\ & 1.000\ 0 & 0.982\ 6 & 0.952\ 5 & 0.975\ 3 & 0.996\ 7 \\ & & 1.000\ 0 & 0.963\ 9 & 0.995\ 6 & 0.979\ 8 \\ & & & 1.000\ 0 & 0.963\ 3 & 0.951\ 0 \\ & & & & 1.000\ 0 & 0.972\ 2 \\ & & & & & 1.000\ 0 \end{bmatrix}.$$

取定临界值 $t=0.985$,得到 $\{(1,2,6),(3,5),(4)\}$ 三类,进而求得类间权重: $\alpha_1=0.643;\alpha_2=0.286;\alpha_3=0.071$.

2) 求类内权重. 各类内权重熵: 第一类为 $(1,2,6), H_1=[0.478,0.281,0.241]$; 第二类为 $(3,5), H_2=[0.560,0.440]$; 第三类为 $(4), H_3=[1]$. 则最终各个专家权重为

$$\mathbf{A} = [0.308 \quad 0.181 \quad 0.160 \quad 0.071 \quad 0.126 \quad 0.154].$$

3) 求综合权重. 按照式(6),求得各个指标综合权重,如表 3 所示.

表 3 指标综合权重
Tab.3 Comprehensive weight of index

序号	一级指标	权重	二级指标	权重
1	进度管理 BIM 应用 U_1	0.147 5	基于 BIM 的构件运输进度管理 U_{11}	0.050 7
			基于 BIM 的构件吊装进度管理 U_{12}	0.096 8
2	质量管理 BIM 应用 U_2	0.083 4	基于 BIM 的构件进场质量验收 U_{21}	0.024 3
			基于 BIM 的吊装构件质量检查 U_{22}	0.059 1
3	成本管理 BIM 应用 U_3	0.107 7	基于 BIM 的资金管理 U_{31}	0.064 0
			基于 BIM 的变更管理 U_{32}	0.043 7
4	施工方案管理 BIM 应用 U_4	0.137 0	基于 BIM 的吊装机械模拟 U_{41}	0.070 4
			基于 BIM 的复杂节点工艺模拟 U_{42}	0.066 6
5	安全管理 BIM 应用 U_5	0.247 2	基于 BIM 的现场安全管理 U_{51}	0.058 3
			基于 BIM 的人员安全管理 U_{52}	0.188 9
6	现场管理 BIM 应用 U_6	0.134 1	基于 BIM 的现场沟通 U_{61}	0.036 9
			基于 BIM 的场地布置 U_{62}	0.097 2
7	空间管理 BIM 应用 U_7	0.143 1	基于 BIM 的构件现场库存定位 U_{71}	0.079 5
			基于 BIM 的构件运输定位 U_{72}	0.063 6

由表 3 可知:在 7 个一级指标中,安全管理权重最大,质量管理权重最低,其他各指标差异不大. 由指标权重可以看出,当前基于 BIM 的安全管理尤为重要,而质量管理效益有待提升. 在二级指标中,基于 BIM 的人员安全管理所占权重最大,对施工现场人员安全的重视程度极高,应当利用好 BIM 进行人员安全管理;基于 BIM 的场地布置和基于 BIM 的构件吊装进度管理的权重值都超过了 0.095 0,其 BIM 应用情况对最后的成熟度评价等级有较大的影响. 装配式建筑现场施工人员少,各参与方大量沟通协调工作在前期进行,基于 BIM 的现场沟通管理在装配式建筑施工中的重要性程度较于传统建筑施工阶段有所降低. 装配式建筑构件大部分在工厂预制生产,生产条件好且需要通过出厂质量检验,因此,基于 BIM 的构件进场质量权重较小.

基于 BIM 的装配式建筑变更管理处探索阶段,其重要性在所有指标中靠后. 除此之外的二级指标权重处于 0.050 0~0.080 0 区间内,当 BIM 在人员管理、场地布置和构架吊装进度管理方面的应用水平提升程度有限时,应当考虑通过提高 BIM 在这一区间内的应用水平,从而实现装配式建筑施工 BIM 成熟度等级的提升.

3 基于云模型的 BIM 应用成熟度评价

3.1 云模型

云模型主要是利用期望 E_x 、熵 E_n 、超熵 H_e 等 3 个特征数值来描述一个定性概念,并通过云发生器实现定性和定量的相互转换. 应用云模型进行成熟度评价能够体现评价过程存在的模糊性和随机性,也能较为全面地利用评价信息,减少评价结果的偏差.

3.2 评语云模型

建立评价等级集合 $V=\{V_1,V_2,V_3,V_4,V_5\}$,将对应的评分标准区间定义为 $(0,1],[1,2],[2,3],[3,4],[4,5]$. 通过区间数和正态云模型的转换关系式,得到反映各等级定性概念云模型的数字特征 $(E_x,E_n,H_e)^{[22]}$.

文中采用二阶正态云模型. 正态分布中,对于某一概念,其对应的云对象位于 $[E_x-3E_n,E_x+3E_n]$

之外的云滴为小概率事件,一般不予考虑. 故 E_x, E_n, H_e 的计算式分别为

$$\left. \begin{aligned} E_x &= \frac{(C_{\min} + C_{\max})}{2}, \\ E_n &= \frac{(C_{\max} - C_{\min})}{6}, \\ H_e &= S. \end{aligned} \right\} \tag{7}$$

式(7)中: S 为常数,根据评价语言模糊程度确定; C_{\min}, C_{\max} 分别为分值区间的左、右边界.

S 取 $0.01^{[23]}$, 设置云滴数 N 为 1 000, 由各成熟度等级的评分标准和数字特征得到成熟度等级评语云模型, 如表 4 所示.

3.3 确定隶属度

将第 k 位人员指标评分 $x_{i,j}^k (i=1,2,\cdots,7; j=1,2; k=1,2,\cdots,n)$ 代入评语云中, 通过正向云发生器, 利用 Matlab 软件计算其隶属度矩阵, 即

$$\mu_{i,j}^k = (\mu_{i,j,1}^k, \mu_{i,j,2}^k, \mu_{i,j,3}^k, \mu_{i,j,4}^k, \mu_{i,j,5}^k).$$

综合考虑所有评价人员的评价结果, 可得到综合单一指标成熟度隶属度 $\mu_{i,j,l}$ 为

$$\mu_{i,j,l} = \frac{\sum_{k=1}^n \mu_{i,j,l}^k}{\sum_{l=1}^5 \sum_{k=1}^n \mu_{i,j,l}^k}, \quad l = 1, 2, \cdots, 5. \tag{8}$$

式(8)中: $\mu_{i,j,l}^k$ 为第 k 位专家的单一指标成熟度隶属度. 则单一指标的综合隶属度矩阵为

$$\mu_{i,j} = (\mu_{i,j,1}, \mu_{i,j,2}, \mu_{i,j,3}, \mu_{i,j,4}, \mu_{i,j,5}).$$

3.4 确定成熟度等级

建立二级指标成熟度隶属度矩阵 $C_i = (\mu_{i,1}, \mu_{i,2}), i=1,2,\cdots,7$. 对应指标层的权重矩阵分别为 $P_i = (p_{i,1}, p_{i,2}), i=1,2,\cdots,7$. 准则层隶属度矩阵为 $D = (D_1, D_2, \cdots, D_7), D_1, D_2, \cdots, D_7$ 为一级指标的各成熟度等级隶属度矩阵, 则

$$D_i = P_i C_i, \quad i = 1, 2, \cdots, 7. \tag{9}$$

一级的指标权重矩阵为 $E = (E_1, E_2, \cdots, E_7), E_1, E_2, \cdots, E_7$ 为一级指标的权重, 则项目综合隶属度矩阵 G 为

$$G = ED = (g_1, g_2, g_3, g_4, g_5). \tag{10}$$

式(10)中: g_1, g_2, g_3, g_4, g_5 为评价结果对成熟度各个等级的隶属度, 根据最大隶属度原则确定项目成熟度等级.

4 工程案例

4.1 案例背景

该项目为地上 6 层, 地下 1 层的办公楼用房, 框架结构, 建筑面积为 6 500 m². 地下部分采用传统混凝土现浇方式施工, 地上部分采用装配式施工方式, 预制范围包括柱、叠合梁、叠合楼板、外墙板、楼梯、女儿墙, 单体预制率约为 65%.

4.2 成熟度评价

邀请参与该项目的 10 位专家进行评分, 其中, 施工项目管理人员 3 名、施工企业管理人员 2 名、业主方管理人员 2 名、工程咨询人员 1 名, BIM 研究专家 2 名. 依据表 4 建立的评语云模型计算, 得到成熟度等级隶属度, 即

$$C_1 = [0.102\ 1, 0.303\ 3, 0.295\ 3, 0.199\ 1, 0.100\ 1, 0.153\ 0, 0.404\ 0, 0.295\ 3, 0.099\ 5, 0.050\ 0],$$

$$C_2 = [0.203\ 5, 0.403\ 6, 0.294\ 2, 0.098\ 7, 0.000\ 0, 0.203\ 8, 0.504\ 6, 0.291\ 7, 0.000\ 0, 0.000\ 0],$$

$$\begin{aligned} C_3 &= [0.000\ 0, 0.100\ 9, 0.248\ 6, 0.399\ 7, 0.250\ 7, 0.102\ 1, 0.252\ 7, 0.296\ 6, 0.248\ 6, 0.100\ 0], \\ C_4 &= [0.102\ 3, 0.404\ 8, 0.393\ 6, 0.099\ 3, 0.000\ 0, 0.303\ 9, 0.502\ 8, 0.193\ 3, 0.000\ 0, 0.000\ 0], \\ C_5 &= [0.051\ 1, 0.151\ 8, 0.348\ 8, 0.348\ 1, 0.100\ 2, 0.102\ 1, 0.303\ 3, 0.295\ 3, 0.199\ 2, 0.100\ 1], \\ C_6 &= [0.051\ 1, 0.151\ 7, 0.298\ 5, 0.348\ 5, 0.150\ 2, 0.000\ 0, 0.106\ 2, 0.314\ 5, 0.367\ 3, 0.212\ 1], \\ C_7 &= [0.303\ 5, 0.402\ 4, 0.196\ 0, 0.098\ 1, 0.000\ 0, 0.253\ 6, 0.403\ 0, 0.245\ 0, 0.098\ 4, 0.000\ 0]. \end{aligned}$$

对应指标层的权重矩阵为 $P_i(i=1, \cdots, 7)$, 则指标层的成熟度等级隶属度为

$$\begin{aligned} D_1 &= P_1C_1 = [0.135\ 5, 0.369\ 4, 0.294\ 0, 0.133\ 7, 0.067\ 2], \\ D_2 &= P_2C_2 = [0.203\ 7, 0.475\ 1, 0.292\ 4, 0.028\ 8, 0.000\ 0], \\ D_3 &= P_3C_3 = [0.041\ 4, 0.162\ 5, 0.268\ 1, 0.338\ 4, 0.189\ 6], \\ D_4 &= P_4C_4 = [0.200\ 3, 0.452\ 4, 0.296\ 2, 0.051\ 0, 0.000\ 0], \\ D_5 &= P_5C_5 = [0.090\ 1, 0.267\ 5, 0.308\ 0, 0.234\ 3, 0.100\ 1], \\ D_6 &= P_6C_6 = [0.037\ 0, 0.139\ 2, 0.302\ 9, 0.353\ 7, 0.167\ 2], \\ D_7 &= P_7C_7 = [0.281\ 3, 0.402\ 6, 0.217\ 8, 0.098\ 3, 0.000\ 0]. \end{aligned}$$

总的评价结果为

$$G = [0.136\ 4, 0.316\ 0, 0.285\ 1, 0.185\ 0, 0.077\ 5].$$

根据最大隶属度原则, 该项目的施工 BIM 应用成熟度等级处于成长阶段, 其对于提高阶段的隶属度 0.285 1 大于初始阶段的隶属度 0.136 4, 可以看出该项目的 BIM 应用水平由成长阶段向提高阶段发展的趋势。

相较于其他方面, BIM 装配式建筑施工管理下的质量管理、施工方案管理和空间管理中应用水平总体较低。该项目想要提高装配式建筑施工 BIM 应用成熟度, 首先, 应当考虑提高 BIM 在质量管理、施工方案管理和空间管理中的应用水平; 然后, 结合各二级指标的隶属度情况和成熟度等级评价标准, 确定其所处阶段及提升路径。

以施工方案管理中基于 BIM 的吊装机械模拟为例, 由 C_4 可以得出, 其目前处于成长阶段。根据成熟度等级评价标准, 可以判断该项目应用 BIM 能够实现吊装机械运行模拟, 而下一成熟度阶段要求该项目应用 BIM 实现吊装机械需求计划的制定。由此可以得出, 基于 BIM 的吊装机械模拟成熟度提升路径, 将吊装机械运行模拟模型和装配式建筑实际建造模型相结合, 进行施工模拟; 确定吊装机械的基本需求如数量、型号、类型等, 并根据时间信息, 确定各个阶段现场实际施工机械的种类及数量; 最后, 安排合理机械进出场, 实现基于 BIM 的吊装机械需求计划制定, 使基于 BIM 的吊装机械模拟成熟度由成长阶段向提高阶段发展。

5 结束语

BIM 与装配式建筑结合有助于建筑业转变传统的粗放型生产方式。针对当前装配式建筑 BIM 应用水平差异大、应用效果不明显的问题, 从施工阶段入手, 建立装配式建筑施工 BIM 的成熟度评价模型。该模型能够全面量化评价项目的 BIM 应用情况, 并根据成熟度评价标准, 确定提升路径。同时, 还可以作为新建项目 BIM 应用目标和实施规划的参考, 有助于促进 BIM 在装配式建筑中的深度应用, 从而实现建筑业的精益建造。

参考文献:

[1] 张仲华, 孙晖, 刘瑛, 等. 装配式建筑信息化管理的探索与实践[J]. 工程管理学报, 2018, 32(3): 51-56. DOI: 10.13991/j.cnki.jem.2018.03.009.

[2] 朱记伟, 蒋雅丽, 翟昱, 等. 基于知识图谱的国内外 BIM 领域研究对比[J]. 土木工程学报, 2018, 51(2): 113-120. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2018.02.013.

[3] LEE J S, OCK J H. A study on the evaluation items of BIM process maturity measurement model[J]. Korean Journal of Computational Design and Engineering, 2016, 21(3): 281-295. DOI: 10.7315/CDE.2016.281.

[4] ABANDA F H, TAH J H M, CHEUNG F K T. BIM in off-site manufacturing for buildings[J]. Journal of Building

- Engineering,2017,14:89-102. DOI:10.1016/j.job.2017.10.002.
- [5] 曹新颖,鲁晓书,王钰.基于 BIM-RFID 的装配式建筑构件生产质量管理[J].土木工程与管理学报,2018,35(4):102-106,111. DOI:10.13579/j.cnki.2095-0985.2018.04.016.
- [6] 李开.业主方工程项目 BIM 应用成熟度研究[D].北京:北方工业大学,2017.
- [7] 张健,陶丰烨,苏涛永.基于 BIM 技术的装配式建筑集成体系研究[J].建筑科学,2018,34(1):97-1023. DOI:10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2018.01.017.
- [8] 高洋.装配式建筑构件信息产业链联动方法研究[D].北京:北京建筑大学,2019.
- [9] 薛茹,王新渊,史科.基于建筑信息建模技术的装配式建筑施工问题及对策分析[J].工业建筑,2018,48(11):207-210. DOI:10.13204/j.gyz201811038.
- [10] LI C Z D,ZHONG R Y,XUE Fan,*et al.* Integrating RFID and BIM technologies for mitigating risks and improving schedule performance of prefabricated house construction[J]. Journal of Cleaner Production,2017,165(1):1048-1062. DOI:10.1016/j.jclepro.2017.07.156.
- [11] 齐宝库,李长福.基于 BIM 的装配式建筑全生命周期管理问题研究[J].施工技术,2014,43(15):25-29. DOI:10.7672/sgjs2014150025.
- [12] 于龙飞,张家春.基于 BIM 的装配式建筑集成建造系统[J].土木工程与管理学报,2015,32(4):73-79. DOI:10.3969/j.issn.2095-0985.2015.04.012.
- [13] 曹红江.基于 BIM 的装配式建筑施工应用管理模式研究[D].济南:山东建筑大学,2017.
- [14] 刘平,李启明.BIM 在装配式建筑供应链信息流中的应用研究[J].施工技术,2017,46(12):130-133. DOI:10.7672/sgjs2017120130.
- [15] 戴文莹.基于 BIM 技术的装配式建筑研究:以“石榴居”为例[D].武汉:武汉大学,2017.
- [16] IRIZARRY J,KARAN E P,JALAEI F. Integrating BIM and GIS to improve the visual monitoring of construction supply-chain management[J]. Automation in Construction,2013,31(5):241-254. DOI:10.1016/j.autcon.2012.12.005.
- [17] 黄园.建设项目 BIM 应用成熟度评价研究[D].深圳:深圳大学,2017.
- [18] 郭红领,潘在怡.BIM 辅助施工管理的模式及流程[J].清华大学学报(自然科学版),2017,57(10):1076-1082. DOI:10.16511/j.cnki.qhdxxb.2017.25.048.
- [19] 郗恩田,李勇,熊凯,等.基于 AHP 的建筑施工企业 BIM 应用影响因素分析[J].桂林理工大学学报,2016,36(3):526-532. DOI:10.3969/j.issn.1674-9057.2016.03.017.
- [20] 徐吉辉,梁颖,元尧.装备研制中的技术成熟度评价方法研究[J].科技管理研究,2016,36(2):66-70. DOI:10.3969/j.issn.1000-7695.2016.02.012.
- [21] 孙少楠,沈春.基于灰色系统理论的水利水电工程 BIM 信息交互成熟度模型研究[J].水力发电,2017,43(12):45-48. DOI:10.3969/j.issn.0559-9342.2017.12.011.
- [22] 刘康.基于 M-CM 的建筑施工企业现场安全管理成熟度评价研究[D].西安:西安建筑科技大学,2017.
- [23] 李庆,董庆宽,赵蕾.云模型中正向云算法的修正[J].西安电子科技大学学报,2013,40(5):169-174,180. DOI:10.3969/j.issn.1001-2400.2013.05.027.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)