

文章编号:1672-9331(2021)03-0055-07

基于结构方程模型的装配式混凝土建筑 增量成本控制研究

杨玉胜, 邹新雨

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 装配式建筑增量成本是制约装配式建筑发展的关键因素。为有效实现装配式建筑的推广,以装配式混凝土建筑增量成本为研究对象,从混凝土预制(precast concrete, PC)构件的设计、生产、运输和安装4个方面出发,通过文献研究法筛选出影响装配式混凝土建筑增量成本的14个因素;发放调查问卷,用收集到的有效数据构建结构方程模型(structural equation model, SEM),并对装配式混凝土建筑增量成本的影响因素进行评价分析;针对关键影响因素提出控制增量成本的措施。研究表明:装配式混凝土建筑增量成本受信息化技术、PC构件生产规模、PC构件装载方案、施工工艺水平的影响较为显著。

关键词: 装配式混凝土建筑;增量成本;SEM;成本控制;影响因素;PC构件

中图分类号: TU723.3

文献标志码: A

Research on incremental cost control of prefabricated concrete buildings based on structural equation model

YANG Yu-sheng, ZOU Xin-yu

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of
Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The incremental cost of prefabricated buildings is a key factor restricting the development of prefabricated buildings. In order to effectively realize the promotion of prefabricated buildings, taking the incremental cost of prefabricated concrete buildings as the research object, starting from four aspects including design, production, transportation and installation of precast concrete (PC) components, 14 factors that affected the incremental cost of prefabricated concrete buildings were screened out through the literature research method. The questionnaires were issued, and the collected effective data were used to construct a structural equation model (SEM) to evaluate and analyze the factors affecting the incremental cost of prefabricated concrete buildings. Aiming at the key influencing factors, measures to control incremental cost were proposed. The research results show that the incremental cost of prefabricated concrete buildings is significantly affected by information technology, the production scale and loading plan of PC components, technology level of construction.

Key words: prefabricated concrete building; incremental cost; SEM; cost control; influencing factor; PC component

收稿日期:2021-01-22

基金项目:湖南省交通科技项目(201840)

通讯作者:杨玉胜(1970—),男,副教授,主要从事工程项目管理方面的研究。E-mail:yysh7012@163.com

装配式建筑是一种绿色、节能、环保的建筑模式,国家也出台相关政策鼓励建筑企业积极参与到装配式建筑的建设中来。但目前我国装配式建设项目占比较小,增量成本过高也成为关键因素制约着装配式建筑的发展^[1]。

国内外已有许多学者从不同角度、用不同方法对装配式混凝土建筑增量成本展开了研究。赵艳丽等^[2]从房地产企业视角建立了成本链管理模型,并基于精细化理论探讨了房地产企业装配式建筑成本链的优化方向,为降低房地产企业装配式建筑的开发成本提供了一定参考。MAO 等^[3]、王佳琪^[4]基于案例研究发现预制构件装配成本是装配式建筑造价高于传统建筑造价的原因之一。余霞^[5]用系统分析的方法研究了装配式建筑的增量成本,并提出了降低增量成本的对策。潘敏华等^[6]通过对比装配式建筑成本与传统现浇建筑成本的异同点,总结出了导致装配式建筑成本过高的原因。装配式建筑成本是一个复杂且动态变化的系统。罗岚等^[7]通过构建模糊认知图(fuzzy cognitive map,FCM)模型深入分析了装配式建筑成本影响因素间的因果关系,并应用 FCM Analyst 1.0 软件进行模拟分析,得到了主要影响因素。吕哲琦等^[8]认为现有的研究大多局限于装配式建筑建设过程的某一阶段,难以全面地确定影响装配式建筑成本的影响因素,因而从预制构件的生产、运输、安装 3 个阶段,运用模糊层次分析法分析了装配式建筑成本的影响因素,并针对主要影响因素提出了相关建议。

综上所述,国内外对装配式建筑成本影响因素的研究尚处于一个不断深化的阶段,且大部分研究仍局限于单一因素,很少考虑装配式混凝土建筑在整个建造过程中各影响因素之间的耦合作用。基于此,本研究从 PC 构件的设计、生产、运输和安装 4 个阶段出发,研究装配式混凝土建筑增量成本的影响因素,建立结构方程模型(structural equation model,SEM),找出影响增量成本的关键因素,并提出相应措施以实现增量成本的有效控制,促进装配式混凝土建筑的发展。

1 指标选取与模型假设

1.1 指标选取

增量成本是指因采用装配式建筑模式而额外增加的成本^[9]。装配式混凝土建筑在施工流程、施工工艺方面与传统建造方式有所不同,两者的成本差异主要在混凝土预制(precast concrete, PC)构件的应用上^[10-11],因此 PC 构件对装配式混凝土建筑增量成本的影响较大。本研究根据装配式混凝土建筑的建造过程,从 PC 构件的设计、生产、运输和安装 4 个方面列出影响装配式混凝土建筑增量成本的指标。利用网络爬虫技术软件中的八爪鱼采集器抓取从 2018 年 4 月到 2020 年 12 月知网网站的文献数据,数据的配置参数包括“装配式建筑”“增量成本影响因素”,共抓取文献 40 篇。通过数据预处理,删除不相关和重复的文献,最终得到参与估计的 36 篇文献。通过文献梳理,根据各成本影响因素在文献中出现的频次,按照频次大于 2 的原则,归纳出装配式混凝土建筑增量成本影响因素指标体系 5 个潜在变量的 14 个指标(观察变量),如表 1 所示。

表 1 装配式混凝土建筑增量成本影响因素指标体系

Table 1 Influencing factors index system of incremental cost of prefabricated concrete buildings

潜在变量	观察变量
PC 构件设计成本(A)	设计单位资质(A ₁)
	集成化设计水平(A ₂)
	信息化技术的使用(A ₃)
PC 构件生产成本(B)	PC 构件的生产规模(B ₁)
	PC 构件的标准化程度(B ₂)
	产业工人的技术水平(B ₃)
	先进机器设备和技术(B ₄)
PC 构件运输成本(C)	装载方案(C ₁)
	运输路线(C ₂)
	运输距离(C ₃)
PC 构件安装成本(D)	塔吊选型、布局(D ₁)
	施工管理水平(D ₂)
	施工工艺水平(D ₃)
	操作人员技术能力(D ₄)

1.2 模型假设

SEM 是一种多元统计模型,包括因素分析与路径分析两种统计技术,能同时探讨多个变量的关系,允许变量存在测量误差,并能估计出整个模型的拟合度^[12]。基于 SEM 的上述特点,考虑到增量成本的影响因素之间可能存在复杂的交互关系,本研究利用 SEM 对装配式混凝土建筑增量成本的影响因素进行研究,其概化模型如图 1 所示。

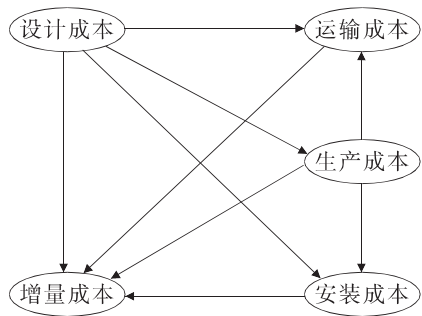


图 1 装配式混凝土建筑增量成本影响因素概化模型

Fig. 1 Conceptual model of factors affecting incremental cost of prefabricated concrete buildings

CHIN^[13]指出,SEM 在分析时需要建立因素间因果关系的路径图,并对每一条路径提出假设。根据概化模型中每个变量之间的相互关系,针对装配式建筑的实际情况及文献汇总,提出各路径的假设如下:

H_1 : PC 构件的设计成本越多,越能有效控制其生产成本、运输成本和安装成本。

H_2 : PC 构件生产成本越多,越能有效控制 PC 构件的运输成本和安装成本。

H_3 : PC 构件的设计成本越多,越能有效控制装配式混凝土建筑增量成本。

H_4 : PC 构件生产成本越多,装配式混凝土建筑增量成本越多。

H_5 : PC 构件运输成本越多,装配式混凝土建筑增量成本越多。

H_6 : PC 构件安装成本越多,装配式混凝土建筑增量成本越多。

2 问卷调研数据分析

在装配式混凝土建筑增量成本影响因素概化模型和指标体系的基础上,本研究编制调查问卷,并根据其结果分析 14 个指标对装配式混凝土建

筑增量成本的影响程度。采取线上与线下相结合的方式向装配式建筑领域的科研及工作人员发放调查问卷,共 326 份。其中,施工单位人员均参与过 1 个及以上装配式建筑项目的施工,占比为 25.96%;咨询单位人员均有 3 年以上的建筑咨询经验,占比为 18.59%;预制构件厂单位人员均有 2 年及以上的构件生产工作经验,占比为 10.26%;科研院校人员在装配式建筑方面均有 2 年及以上的学习与科研经验,占比为 18.27%;建设单位人员均开发过 1 个及以上装配式建筑项目,占比为 14.42%;设计单位人员均参与设计过 1 个及以上装配式建筑项目,占比为 12.50%。采用李克特 5 分量表法对各问题的答项进行设计,其中“1”代表影响很小,“2”代表影响较小,“3”代表影响一般,“4”代表影响较大,“5”代表影响很大。最终回收问卷共 317 份,在剔除具有答题不规范、关键信息缺失等问题的问卷后,有效问卷共 312 份。

利用 SPSS 25.0 软件对有效问卷进行数据检验。经分析,问卷的信度系数 Cronbach's α 为 0.921,效度 KMO 值为 0.886, Bartlett 球体检验值为 0.000 (<0.001)。这说明所获得的数据较可靠,且相关性较高。

3 SEM 分析与控制对策

3.1 一阶模型的建立与检验

结合以上调查问卷的数据,从设计、生产、运输、安装 4 个方面对装配式混凝土建筑增量成本进行分析,并运用 SEM 分析各变量之间的关系。以影响装配式混凝土建筑增量成本的 4 个方面作为潜在变量,调查的各项指标作为模型的观察变量,构建装配式混凝土建筑增量成本模型。

采用 Amos 24.0 建立 SEM,研究者需要检验模型是否通过“违规估计检验”。HAIR 等^[14]提出从 3 个准则进行判断,一是没有负的误差方差存在;二是标准化系数的绝对值不能太接近于 1;三是没有太大的标准误差存在。如果在模型的检验结果中无违规估计现象,则可以对整体模型的适配度进行估计。根据文献[12],整体适配度是否达到适配标准可从表 2 所示的统计指标进行判断。

表2 适配度统计指标

Table 2 Statistical indicators of fitness

统计指标	指标名称	可接受范围
χ^2/df	卡方自由度比	(1.000, 3.000)
R_{MSEA}	渐进残差均方和平方根	<0.080
I_{GF}	适配度指数	>0.900
I_{AGF}	调整后的适配度指数	>0.900
I_{IF}	增值适配指数	>0.900
I_{TL}	非规范适配指数	>0.900
I_{CF}	比较适配指数	>0.900

利用 Amos 24.0 软件进行运算,得到验证性因素分析的标准化模型,如图 2 所示。根据模型的输出情况,模型中的估计参数没有负的误差方差,14 个指标的因素负荷量介于 0.60~0.87,在 0.50~0.95 的适配标准范围内,标准化残差变量 $e_1 \sim e_{17}$ 的标准化残差值也在可接受的范围内。在整体模型适配度的拟合结果中, $\chi^2/df = 2.389 < 3.000$, $R_{MSEA} = 0.049 < 0.050$, $I_{GF} = 0.936 > 0.900$, $I_{AGF} = 0.910 > 0.900$, $I_{IF} = 0.943 > 0.900$, $I_{TL} = 0.930 > 0.900$, $I_{CF} = 0.943 > 0.900$ 。以上分析说明模型通过了估计检验,且模型整体的适配度指标均在可接受的范围内,说明整体拟合效果较好,模型内在质量较高。

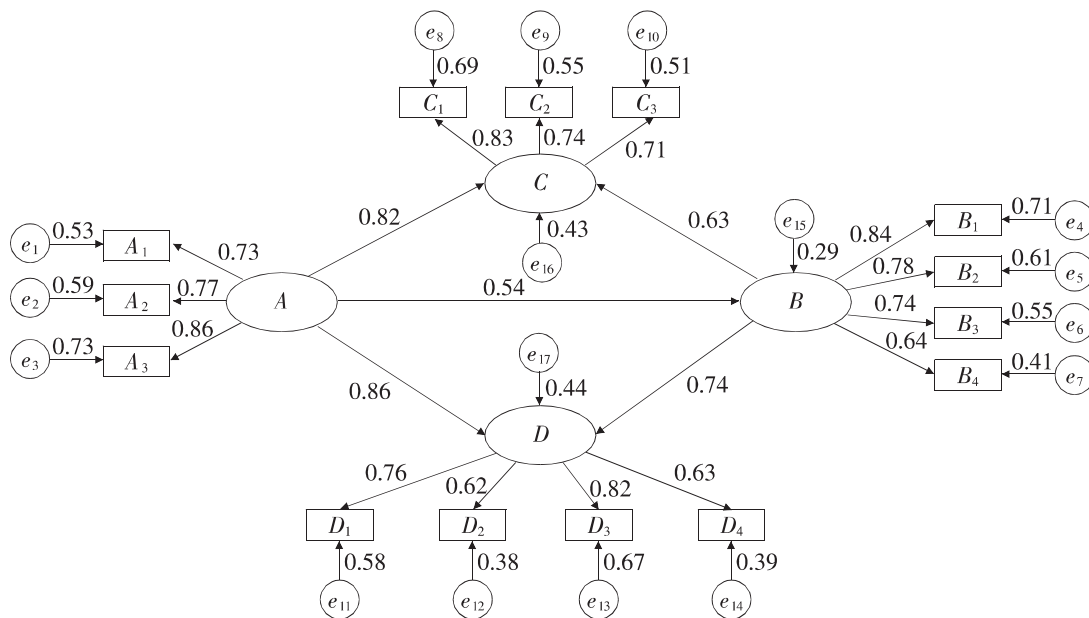


图2 装配式混凝土建筑增量成本一阶验证性因素分析模型

Fig. 2 The first-order confirmatory factor analysis model of incremental cost of prefabricated concrete buildings

采用 t 值作为判定潜在变量之间相关性的指标。若 $t > 1.96$, 表示达到 0.05 的显著性水平, 假设成立。表 3 所示为潜在变量的参数估计。分析表 3 可知, 4 个潜在变量的结构路径系数为 0.54~

0.86, 显著性水平 $P < 0.05$, 说明前述假设全部成立, 各潜在变量之间相互关联。此外, 4 个潜在变量受高阶潜在特质的影响, 需进一步建立二阶验证性因素分析模型对其进行计算和分析。

表3 潜在变量的参数估计

Table 3 Parameter estimation of latent variables

潜在变量	参数估计值	标准误差	临界比	P	假设是否成立
生产成本 $\leftarrow$ 设计成本	0.537	0.098	5.477	<0.05	H ₁ 成立
运输成本 $\leftarrow$ 设计成本	0.823	0.109	7.567	<0.05	H ₁ 成立
安装成本 $\leftarrow$ 设计成本	0.860	0.132	6.509	<0.05	H ₁ 成立
安装成本 $\leftarrow$ 生产成本	0.628	0.105	5.987	<0.05	H ₂ 成立
运输成本 $\leftarrow$ 生产成本	0.743	0.094	7.863	<0.05	H ₂ 成立

3.2 二阶模型的建立与检验

通过上述研究可以发现,一阶验证性因素分析模型与样本数据适配良好,4 个潜在变量之间的关联性较强。因此,以增量成本作为二阶内生潜在变量,设计、生产、运输和安装成本作为外生潜在变量,进一步分析设计、生产、运输和安装成本与增量成本之间的关联程度,把调查问卷数据代入所构建的验证性因素分析模型中进行运算。二阶验证性因素分析模型如图 3 所示,二阶结构模型适配度数据的拟合结果如表 4 所示。表 4 中显示模型的检验结果均符合统计标准,且模型各变量均满足显著性水平 $P<0.05$ 的要求,说明二阶验证性因素分析模型整体适配良好。

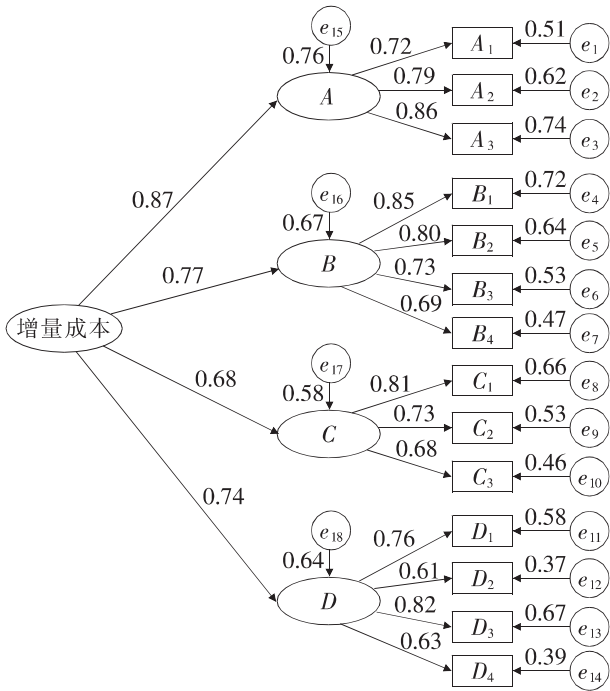


图 3 装配式混凝土建筑增量成本二阶 SEM 标准化估计值

Fig. 3 Standardized estimates of the second-order SEM of incremental cost of prefabricated concrete buildings

表 4 二阶结构模型适配度数据

Table 4 Fitness data of the second-order structural model

统计指标	统计标准	检验结果
χ^2/df	(1.000,3.000)	1.935
R_{MSEA}	<0.080	0.055
I_{GF}	>0.900	0.944
I_{AGF}	>0.900	0.922
I_{IF}	>0.900	0.962
I_{TL}	>0.900	0.954
I_{CF}	>0.900	0.962

由此可见,本研究所构建的装配式混凝土建筑增量成本影响因素模型表现出了较好的适配性,该模型总体上较为科学合理。

3.3 结果分析

分析以上所建模型的计算结果可知,装配式混凝土建筑增量成本受 PC 构件设计、生产、运输和安装各方面的影响。表 5 所示为装配式混凝土建筑增量成本指标的影响结果。

表 5 装配式混凝土建筑增量成本指标的影响结果
Table 5 Influencing results of incremental cost indexes of prefabricated concrete buildings

潜在变量	潜在变量结构路径系数	观察变量	观察变量的因素负荷量
PC 构件设计成本(A)	0.87	设计单位资质(A ₁)	0.72
		集成化设计水平(A ₂)	0.79
		信息化技术的使用(A ₃)	0.86
PC 构件生产成本(B)	0.77	PC 构件的生产规模(B ₁)	0.85
		PC 构件的标准化程度(B ₂)	0.80
		产业工人的技术水平(B ₃)	0.73
		先进机器设备和技术(B ₄)	0.69
PC 构件运输成本(C)	0.68	装载方案(C ₁)	0.81
		运输路线(C ₂)	0.73
		运输距离(C ₃)	0.68
PC 构件安装成本(D)	0.74	塔吊选型、布局(D ₁)	0.76
		施工管理水平(D ₂)	0.61
		施工工艺水平(D ₃)	0.82
		操作人员技术能力(D ₄)	0.63

将表 5 中的潜在变量按结构路径系数的大小,从大到小排列依次为 PC 构件设计成本、生产成本、安装成本和运输成本。由表 5 中各观察变量的因素负荷量可知,信息化技术的使用、PC 构件的生产规模、装载方案、施工工艺水平是装配式混凝土建筑在建造过程中应重点考虑的因素。通过分析表 5 还可得出如下结论:

1) 设计成本作为影响装配式混凝土建筑增量成本最大的潜在变量,是控制增量成本增长的主要因素,其中信息化技术的使用是最关键的影响因素。信息化技术使用不充分有可能导致各协作部门因沟通不畅而无法高效协同工作、出现设计误差而需要设计变更等,增加装配式混凝土建筑的增量成本。

2) 生产、安装成本对装配式混凝土建筑增量成本的影响大致相同,PC构件的生产规模和施工工艺水平是最重要的因素。目前,我国装配式建筑市场仍处于初期建设阶段,PC构件生产规模较小,构件单价较高,使成本增量增大,直接影响了装配式建筑的发展。此外,施工工艺水平低,无法保证装配式混凝土建筑的施工质量,如吊装和现浇的施工顺序安排不妥当降低了施工效率,进而导致成本增加,最终使装配式混凝土建筑增量成本无法达到预期控制目标。

3) 运输成本对装配式混凝土建筑增量成本的影响最小,PC构件装载方案是运输成本中需首要解决的问题。我国装配式建筑预制构件具有种类多、标准化程度低的特点,预制构件的运送多采用一车一挂的运送方式,难以适应装配式建筑发展的需要。装载方案考虑不科学、预制构件运输效率不高都会使运输成本增加。因此,选择、优化PC构件的装载方案是控制装配式混凝土建筑增量成本的重要环节。

3.4 控制对策

根据以上分析结果,针对装配式混凝土建筑增量成本的主要影响因素,提出以下控制对策:

1) 信息化技术的使用。

首先,政府要加强信息化技术政策改革,更新信息化技术制度体系,促进信息化技术的普及,进而提高装配式建筑的设计质量;其次,各企业应积极开发基于BIM平台的装配式设计软件,通过云平台实现各环节的信息交互,实现全过程的协同作业,提高各部门的工作效率和设计的准确性,减少因设计变更引起的增量成本的增加;最后,加强现有设计人员对信息化技术使用的业务培训,提高其设计水平。

2) PC构件的生产规模。

要扩大预制构件的生产规模,关键在于构建规模化市场。政府应给予预制构件厂一定的财政扶持,加大各地预制构件厂的建设,引导市场良性竞争,推动预制构件厂积极参与预制构件的工业化推广,从而扩大预制构件的生产规模。同时,政府应鼓励行业内的上下游企业合力完善装配式建筑的标准体系,加快建立统一的预制构件标准规范,从源头解决预制构件成本高的问题。

3) 装载方案。

在运送PC构件之前,要做好准备工作。首先,根据PC构件的大小、类型,结合计算机算法进行运输调度,合理选择车辆类型,科学规划运输空间。同时了解施工现场构件的安装情况,满足现场安装的需求量,避免多次运输,提高运输效率。更新国内运输构件的方式,改进运输车辆的配置。此外,在装载过程中,做好构件的保护与固定措施,在构件上加衬缓冲材料,加强构件运输的安全稳定性,避免构件破损,达到降低运输成本的目的。

4) 施工工艺水平。

PC构件的安装是装配式混凝土建筑施工过程的重要一环,而预制构件连接节点的施工又是装配式混凝土建筑安装过程的重点,也是薄弱环节。因此,需要加强钢筋灌浆连接整体加固技术的研究和灌浆材料的研发,以提高预制构件连接节点的受力性能,使结构更加稳定和安全。对于技术人员的培训,要重点提高装配人员的施工技术,同时完善施工方法,避免由于操作不熟练而造成的返工。

4 结论

本研究从PC构件的设计、生产、运输和安装4个层面出发,构建装配式混凝土建筑增量成本影响因素指标体系,采用调查问卷收集有效数据,建立SEM对各指标进行分析评价,并得出如下结论:

1) 关于潜在变量路径关系的假设全部成立。PC构件的设计、生产、运输和安装成本对装配式混凝土建筑增量成本的影响程度分别为0.87, 0.77, 0.68和0.74,均超过0.50,说明各潜在变量对增量成本的影响显著。将PC构件的设计、生产、运输和安装成本按其影响程度的大小,从大到小排列依次为设计成本、生产成本、安装成本和运输成本。

2) 信息化技术的使用、PC构件的生产规模、装载方案及施工工艺水平是影响增量成本的关键因素。

本研究通过对装配式混凝土建筑增量成本的影响因素进行评估,明确了关键影响因素,提出相

应措施,为装配式混凝土建筑增量成本的有效控制提供了一定的依据,这将有助于实现装配式建筑的推广和应用,提高其市场竞争力。

〔参考文献〕

- [1] 王广明,武振.装配式混凝土建筑增量成本分析及对策研究[J].建筑经济,2017,38(1):15-21.
WANG Guang-ming, WU Zhen. Incremental cost analysis and countermeasures of prefabricated concrete buildings[J]. Construction Economy, 2017, 38(1):15-21.
- [2] 赵艳丽,张春生,刘一帆.装配式建筑成本链构成及优化方向研究:基于房地产企业视角[J].建筑经济,2020,41(11):57-62.
ZHAO Yan-li, ZHANG Chun-sheng, LIU Yi-fan. Research on the cost chain composition and optimization direction of prefabricated buildings: based on the perspective of real estate enterprises[J]. Construction Economy, 2020, 41(11):57-62.
- [3] MAO C, XIE F, HOU L, et al. Cost analysis for sustainable off-site construction based on a multiple-case study in China[J]. Habitat International, 2016, 57: 215-222.
- [4] 王佳琪.装配式建筑增量成本分析与控制[J].江西建材,2020(5):195-196,198.
WANG Jia-qi. Analysis and control of the incremental cost of prefabricated buildings[J]. Jiangxi Building Materials, 2020(5):195-196,198.
- [5] 余霞.装配式混凝土建筑的增量成本分析[J].居舍,2017(11):165-166,161.
YU Xia. Incremental cost analysis of prefabricated concrete buildings[J]. Ju She, 2017(11):165-166,161.
- [6] 潘敏华,吴天宇,谭江山.通州台湖保障房装配式施工成本分析[J].建筑结构,2020,50(S1):658-660.
PAN Min-hua, WU Tian-yu, TAN Jiang-shan. Analysis on construction cost of assembly residential building in Tongzhou Taihu[J]. Building Structure, 2020, 50(S1):658-660.
- [7] 罗岚,吴霞,黄伟.基于FCM的装配式建筑成本影响因素分析[J].建筑经济,2020,41(S2):77-82.
LUO Lan, WU Xia, HUANG Wei. Analysis of the influencing factors of prefabricated building cost based on FCM[J]. Construction Economy, 2020, 41(S2):77-82.
- [8] 吕哲琦,张丹.青海省装配式建筑成本影响因素研究[J].青海大学学报,2020,38(6):56-63.
LYU Zhe-qi, ZHANG Dan. Research on the influencing factors of the cost of prefabricated buildings in Qinghai Province[J]. Journal of Qinghai University, 2020, 38(6):56-63.
- [9] 张晓晨.装配式建筑增量成本分析研究[D].济南:山东建筑大学,2020.
ZHANG Xiao-chen. Incremental cost analysis of prefabricated buildings [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2020.
- [10] 毛宁宁.装配式混凝土建筑成本分析与控制对策[D].福州:福建工程学院,2018.
MAO Ning-ning. Cost analysis and control countermeasures of prefabricated concrete buildings [D]. Fuzhou: Fujian Institute of Technology, 2018.
- [11] 尚围围.装配式建筑PC构件的计价研究与成本预测[D].鞍山:辽宁科技大学,2019.
SHANG Wei-wei. Pricing research and cost forecast of prefabricated building PC components [D]. Anshan: Liaoning University of Science and Technology, 2019.
- [12] 吴明隆.结构方程模型 Amos 实务进阶[M].重庆:重庆大学出版社,2013.
WU Ming-long. Structural equation modeling advanced Amos practice[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2013.
- [13] CHIN W W. Issues and opinions on structural equation modeling [J]. Embo Journal, 1998, 22 (1): 4 261-4 272.
- [14] HAIR J F, BLACK W C, BABIN B J, et al. Multivariate data analysis[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1998.