

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202011029



采用文献计量可视化知识图谱分析的 装配式建筑预制供应链管理

秦旋, 张赵鑫, 朱倩影

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 为掌握装配式建筑预制供应链管理的发展现状和挖掘未来研究机会,以 Web of Science 核心合集数据库为数据来源,通过严格定义检索关键词,收集 2000—2019 年装配式建筑预制建设管理活动相关英文文献 105 篇.从发文量和年度分布、期刊和作者影响力、关键术语共现和主题分类等几个方面展开分析,并基于 VOSviewer 软件实现可视化知识图谱.根据聚类色谱图选取每个主题的典型文献进行讨论,检视和分析预制供应链管理的现状、空白和关键研究.结果表明:生产调度在资源配置、动态扰动、优化目标之间的平衡和求解算法等方面还需做更深入探索;预制供应链的动态管理包括动态扰动的风险评估、预防和响应等,是改善预制供应链管理绩效的重要切入点;基于建筑信息模型(BIM)、无线射频识别(RFID)技术、物联网等信息技术的智能供应链将是未来主流方向;预制供应链风险管理研究对完善预制供应链管理理论起到很好的补充作用.

关键词: 装配式建筑; 预制供应链管理; 文献计量; 知识图谱

中图分类号: TU 9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2021)06-0709-11

Prefabricated Building Precast Supply Chain Management of Visual Knowledge Map Using Bibliometric Method

QIN Xuan, ZHANG Zhaoxin, ZHU Qianying

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to grasp the development status of prefabricated building precast supply chain management and explore future research opportunities, taking the core collection database of Web of Science as data source, 105 English literatures related to prefabricated building precast construction management activities during 2000-2019 years were collected by defining search keywords strictly. Based on VOSviewer software, the visualization knowledge map was realized by analyzing the numbers of papers and annual distribution, the influence of journals and authors, co-occurrence of key terms and the classification of topics. Typical literatures on each topic were selected based on cluster chromatograms to review and analyze the status, blanks and key research of precast supply chain management. The result shows that, further exploration is needed in resource allocation, dynamic disturbance, balance between optimization objectives and solving algorithm of production scheduling. The dynamic management of precast supply chain includes risk assessment, prevention and response of dynamic disturbance. It is an important entry point to improve the performance of precast supply chain management. Based on the information technologies such as building information modeling (BIM), radio frequency

收稿日期: 2020-11-13

通信作者: 秦旋(1969-),女,教授,博士,博士生导师,主要从事建筑业可持续发展的研究. E-mail:hdwq@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2019J01050)

identification (RFID) technology and internet of things, intelligent supply chain will be the mainstream direction in the future. Precast supply chain risk management research plays a good complementary role in improving the prefabrication supply chain management theory.

Keywords: prefabricated building; precast supply chain management; bibliometrics; knowledge mapping

作为国民经济支柱产业的建筑业,长久以来存在着能耗高、污染多、生产方式粗放、资源浪费严重等问题.这些弊端与我国现阶段力求经济高质量发展的大方向相背离,因此,绿色建筑的理念应运而生.装配式建筑作为绿色建筑理念的重要构成部分,在国外已经取得了较大发展并形成一定的产业规模,但在我国依旧处于起步阶段.因此,国家出台政策,大力发展装配式建筑^[1].预制构件是装配式建筑的核心元素,在时间上,它将建筑项目施工过程的某些阶段提前;在空间上,它将建筑部件的生产过程转移到工厂内,以流水线生产方式代替原来落后的现场湿作业过程.构件由预制厂根据订单要求生产出来;在指定的日期将其运输到施工现场,通过可靠的连接方式进行装配,完成一个供应链循环^[2].预制供应链不同于传统制造业供应链,兼具建筑业独有要求,预制供应链管理就是反复执行接收订单-生产-运输-装配过程,直至项目按调度计划完成,从而提高建设效率并保证预期效益的实现.目前,预制供应链上各环节(如生产阶段的次优排产计划、延迟/提前交付的惩罚成本、库存及装配阶段的现场需求等)效率低,导致装配式建筑项目目标的实现不尽如人意,从业者日益认识到预制供应链管理的重要性^[3].

本文为掌握装配式建筑预制供应链管理的发展现状,科学、量化地总结和分析预制供应链管理领域的发展概貌,选用知识图谱工具对从 Web of Science(WOS)核心合集数据库中筛选出的预制供应链管理相关文献进行科学计量,进而从各个角度全面审视该领域的热点研究,并梳理每个主题下的典型文献,在此基础上,讨论预制供应链管理理论的现有优秀成果及未来的研究机会,以期对我国预制供应链管理研究发展和推广装配式建筑具有借鉴意义.

1 数据来源及研究方法

1.1 数据来源

WOS 核心合集数据库是全球最大、覆盖学科最多的综合性学术信息资源库,收录了自然科学、工程技术、生物医学等各个研究领域 12 000 多种世界权威且影响力高的学术期刊,具有较强的学术代表性^[4].因此,以 WOS 核心合集数据库为文献数据来源,为确保文献来源的全面与准确,严格定义文献检索关键词,并限定以下 4 个检索条件.

- 1) 目标文献全部为同行评审且发表见刊的英文文献.
- 2) 为避免数据库收录学科的差异,设定建筑工程、工程管理等相应学科.
- 3) 研究内容为预制生产建设活动或预制供应链管理相关工作内容,涉及生产、存储、运输交付和装配等阶段,且不完全排除包含有技术等方面的研究.
- 4) 文献为近 20 a(2000—2019 年)发表,以论文(Article)为主,即不考虑会议论文(Conference Paper),编辑点评(Editor's Comment)等.

首先,在 WOS 界面选择数据库“Web of Science Core Collection”,设置“Topic”为检索方式,按照所设定检索条件和定义的关键词进行检索. WOS 检索关键词列表,如表 1 所示.

1.2 研究方法

采用定量与定性分析相结合的方法,其中,定量研究采用文献计量学方法,借助科学知识图谱工具 VOSviewer. VOSviewer 在共现分析方面,图形化展示方式较为丰富,显示较为清晰,使得文献计量学的分析结果易于解释.定性分析是通过对各研究主题下文献(尤其是典型文献)主要内容进行梳理,剖析当前预制供应链管理的研究现状、热点和空白.

表 1 WOS 检索关键词列表

Tab. 1 Keywords list for WOS searching

项目	内容
时间范围	2000—2019 年
检索方式	主题检索
学科分类	建筑工程类、工程管理类 production & off-site construction precast production scheduling precast inventory precast components delivery precast supply chain supply chain & precast components
文献类别	论文
检索结果	105 篇

2 文献数据分析

文献数据分析包括文献的出版年及发文量统计、影响力(期刊、作者影响力)分析、关键术语共现及研究主题分类。文献的出版年及发文量统计可以从某种程度上反映目标研究领域的热门程度和走势;影响力分析有助于了解该领域的重点研究平台、主要研究者及研究团队;关键术语共现及研究主题分类则有助于进一步挖掘研究现状与未来研究机会。

2.1 出版年及发文量

年度发文量在研究年限中的分布(2000—2019 年),如表 2 所示。由表 2 可知:2000—2012 年,有关预制供应链管理的发文量很少,年发文量均在 5 篇以下;2012 年后研究升温,成果逐年递增,并从 2017 年开始发文量突破个位数。从近 20 a 看,伴随着装配式建筑发展而新兴的预制供应链管理发文量从无到有,但总体数量还较少,表明预制供应链管理相关研究仍处于发展阶段;而近 5 a 文献发表数量显著上升,显示了装配式建筑的加速推广,以及对预制供应链管理理论的日益需求。随着未来智慧工地、智能供应链等的不断兴起,对预制供应链管理的研究将会继续掀起热潮。

表 2 年度发文量在研究年限中的分布(2000—2019 年)

Tab. 2 Distribution of publications per year across studied period (2000-2019 year)

年份	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
发文量	0	4	3	2	1	0	2	2	1	3
年份	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
发文量	4	2	4	5	5	6	8	11	23	19

2.2 影响力分析

检索得到的 105 篇文献来自 35 种不同期刊,文献来源分散表明预制供应链管理相关研究还未形成比较集中的重点期刊平台支撑。由于期刊的载文量和被引次数可以从一定程度上反映期刊在该研究领域的影响力,表 3 列出预制供应链管理相关研究载文量 4 篇及以上的期刊。

表 3 相关文献期刊影响力排名

Tab. 3 Influence ranking of related literature journals

影响力排名	期刊名	载文量	被引次数
1	《Automation in Construction》	23	729
2	《Journal of Cleaner Production》	15	387
3	《Journal of Construction Engineering and Management》	15	370
4	《Journal of Computing in Civil Engineering》	4	70
5	《Architectural Engineering and Design Management》	4	39

由表 3 可知:这 5 种期刊共载文 61 篇,占被统计文献数量的 58%;《Automation in Construction》刊载了 23 篇相关文章,总被引次数高达 729 次,载文量和被引次数均排第 1 位,具有最高的影响力,其次分别是《Journal of Cleaner Production》《Journal of Construction Engineering and Management》《Journal of Computing in Civil Engineering》等,这些刊物刊载的文章涉及的预制供应链管理研究主题包括预制构件的生产调度、装配式建筑信息化技术、预制供应链绩效优化等方面,展示了预制供应链管理研究内容的多样性。

相关文献作者影响力排名,如表 4 所示。

基于论文成果提取的作者合作网络包含了各作者所属研究领域中的重要性指标(中心度大小)及相互之间的合作关系(链接强弱),表达了现有研究成果的作者之间合作紧密程度、研究团队规模和成熟度。

通过 VOSviewer 软件提取作者共现网络,相关文献研究作者合作网络,如图 1 所示。由图 1 可知:3 个紧密聚集区域的节点中心度较大,即作者成果较多且作者之间合作频次较高。因此,目前预制供应链

表 4 相关文献作者影响力排名

Tab. 4 Infulence ranking of related literatures author

排序	作者名	文章总数	被引次数
1	SHEN G Q	6	267
2	HONG Jingke	5	248
3	HU Hao	10	212
4	ARASHPOUR M	7	148
5	WAKEFIELD R	6	132
6	KO C H	6	119
7	WANG Zhaojing	7	102

管理领域研究具有一定规模有 3 个研究团队。

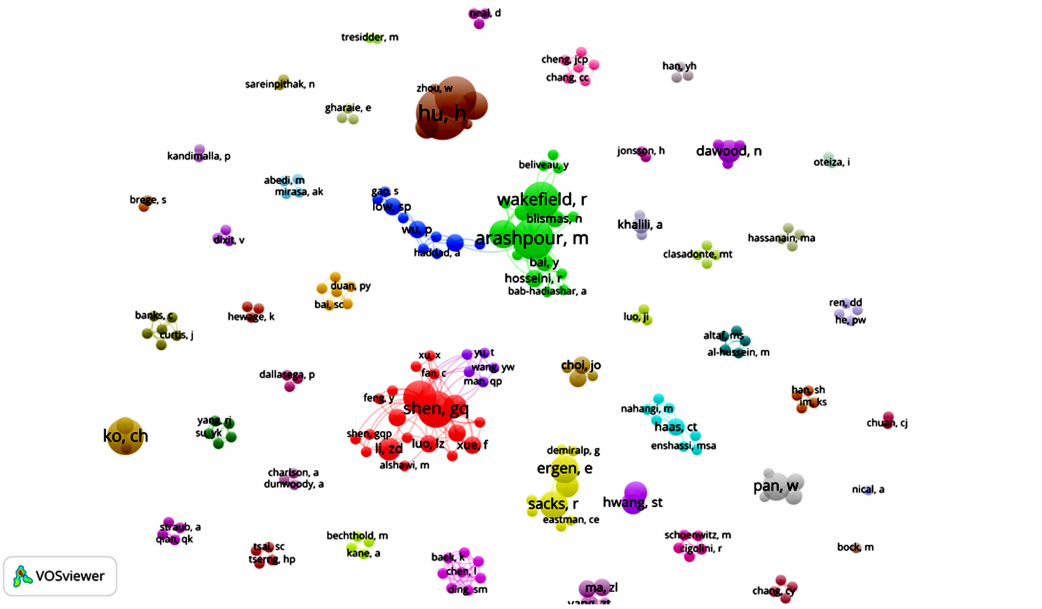


图 1 相关文献研究作者合作网络

Fig. 1 Co-operation network of related literature research authors

1) 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院的 HU Hao 教授是最早开展预制构件车间内生产研究的学者之一,他的研究团队(包括 WANG Zhaojiang)长期致力于预制构件的生产调度优化、准时交付、预制供应链管理理论等的研究。

2) 墨尔本皇家理工大学房地产及土木工程学院的 ARASHPOUR M,他们的研究团队致力于预制构件的生产调度、资源配置、最优决策的研究。

3) 香港理工大学建设与房地产学院的 SHEN G Q 的研究团队致力于供应链管理的风险、效益。

HU Hao(10)(作者(出现频次)),WANG Zhaojiang(7),ARASHPOUR M(7),SHEN G Q(7),KO C H(6)等成果较多的作者构成该合作网络视图的主要节点,这也印证了文献计量学中衡量学科文献作者分布规律的普赖斯定律,即在同一主题下,半数的论文由一批高产能作者撰写^[5]。这些主要团队和作者的研究动态在一定程度上反映了预制供应链管理领域的研究重点,他们在该领域的研究值得关注和追踪。

2.3 关键术语共现及主题分类

文章标题、摘要和关键字中出现的学科术语对表述文章中心内容思想有实质意义,学科术语出现的频率代表该术语所指向研究主题的热度。通过 VOSviewer 软件进行高频学科术语共现分析,选择 All keywords 作为分析对象,并显示出现频次为 60 的关键学科术语。标题、摘要和关键字中的高频学科术语共现网络,如图 2 所示。图 2 中:每个节点表示一个主题词(主题词标签已显示);主题词节点中心度大小表示该词出现的频次;节点间的连线表示两个词之间存在共现关系(文中由 300 条最强的共现连接);连线粗细代表两个词之间共现的强度(次数);以不同颜色进行聚类显示,分别是预制构件生产调度优化(蓝色)、预制供应链绩效管理(绿色)和预制供应链风险管理(红色)。

部分高频学科术语列表,如表 5 所示。由表 5 可知:model(22)(高频词(出现频次)),prefabrication(21),management(21),construction(20),optimization(19),off-site production(18)代表对预制供应链管理的研究主要是从场外预制生产最优化的角度出发,运用数学建模的思维方法改善预制供应链管理;Hong Kong 为迅速发展地区;与管理相关的重要共现词包括 design,performance,framework,system,表明预制供应链管理的主要诉求是合理的框架、系统的设计及绩效;涉及预制供应链管理最重要环节生产调度阶段的研究,optimization 作为高频词与 model,genetic algorithms,simulation,scheduling 重要共现词联系紧密,展示了遗传算法和仿真等计算机辅助运算是该部分的主要研究方法,用来评估预制构件生产计划、资源分配、布局优化及准时交付等目标,帮助预制供应链管理者进行决策。

表 6 预制构件生产调度研究优化典型文献
Tab. 6 Typical literatures of precast production scheduling optimization

类型	文献	研究内容	数学模型	优化目标	求解方法
单流水线生产调度	Hu 等 ^[7] (2002 年)	资源受限与预制构件生产优先级下的流水车间调度	预制构件流水车间排序模型	最小化完工时间、提前或延迟惩罚成本	遗传算法
	Leu 等 ^[8] (2002 年)	资源受限下的混合生产流水车间调度	混合流水作业预制生产调度模型	最小化完工时间、优化排产计划、资源利用率	遗传算法
	Li 等 ^[16] (2010 年)	模具、人工、存储、缓冲区的资源成本优化	预制构件生产计划模型	最小化总生产成本	遗传算法及分支定界算法
	Ko 等 ^[9-10] (2010—2011 年)	缓冲区大小限制下的多目标预制构件调度计划	考虑缓冲区大小的流水车间排序模型	最小化完工时间、提前/延迟惩罚成本	遗传算法
	Khalili 等 ^[11] (2014 年)	基于预制构件分组思想的模具资源利用优化	混合整数线性规划模型	降低模具成本	混合整数线性规划
	Wang 等 ^[3] (2018 年)	弥补以往研究中对排队等待过程、操作特性和加工时间不确定性的缺点	两层模拟-遗传算法混合的预制生产模型	准时交付与生产成本目标的平衡、资源优化	仿真及遗传算法
	Wang 等 ^[13] (2017 年)	原有生产工序的改进并考虑运输过程	考虑供应链视角的 9 工序生产调度模型	最小化完工时间、提前/延迟惩罚成本	遗传算法
多流水线生产调度	Wang 等 ^[12] (2018 年)	考虑工人学习率、专业技能、操作经验和操作规范等因素,以确定预制生产中每个过程的持续时间	考虑工人能力的两层调度优化模型	短期(面向时间)和长期(面向能力)两方面优化调度	遗传算法
	Yang 等 ^[14] (2016 年)	预制构件多流水线生产调度问题	多预制流水线生产调度模型	最小化完工时间、惩罚成本、存储成本、构件类型变化	遗传算法
	Wang 等 ^[15] (2018 年)	需求变化导致的交付计划、构件生产的优先级、工作时间和非工作时间的改变	多生产线预制构件两级生产再新调度模型	最小化调整成本(模具转换成本、流水线限制时间)	遗传算法

一直以来,预制构件的准时交付与生产成本最低是两个互相矛盾的目标,为了在这两个矛盾目标之间进行权衡,Wang 等^[3]弥补了以往研究中对排队等待过程、操作特性和加工时间不确定性的不足,提高了预制生产调度方法在实际目标优化中的适用性。

以上研究均为单一流水线调度问题.为解决多流水线排产计划,Yang 等^[14]综合了预制构件生产组织的全过程,提出生产调度相关计划和管控的关键技术,开发优化管理系统优化生产决策.Wang 等^[15]则考虑需求变化下的动态生产计划,从生产线选择和基于预制构件优先级两个层次出发,最大限度降低需求产生变化时的再调整成本。

3.2 预制供应链绩效管理

与预制构件的生产调度优化研究相比,其存储、运输阶段研究较少^[17-24],文中将预制构件的存储、运输阶段的研究纳入整个供应链视角下的预制供应链绩效管理研究中.供应链绩效管理研究典型文献,如表 7 所示.Ko^[17]为了实现现场装配要求的准时交付目标,提出一个 3 组件框架,可以为预制厂商显著减少库存.准时化(JIT)理念是一种管理技术,它有助于消除生产过剩、等待、运输、库存和生产缺陷所造成的浪费.Kong 等^[18-19]将准时化策略带入到预制供应链管理理论中,提高了预制供应链的可持续性.Anvari 等^[20]认为装配式建筑的生产部门、运输部门、现场装配部门是紧密联系的,但是大部分研究讨论调度问题时,将 3 个部门分开考虑,首次提出一种多目标搜索技术解决项目全过程资源调度问题。

供应链管理依赖信息,预制构件实时信息的缺乏导致供应链利益相关者对生产调整、交付、装配计划干扰因素出现时的无效反应.Yin 等^[21]采用基于无线射频识别(RFID)技术的管理模型检查进料、生产、运输和交付等过程,提高调度效率.Wang 等^[22]分别模拟基于人工、条形码和 RFID 支持的预制供应链的 3 种模型,探讨数据驱动机制和 RFID 在预制供应链中的应用效益.在动态扰动因素管理上,现有研究集中于单一干扰分析或预防措施评估。

Wang 等^[23]提出一个整体扰动评价模型,评价预制供应链的环境不确定性,考虑来自供应商、制造

商、物流和客户的 4 类共 11 种不同程度的干扰水平场景,从操作和经济两方面评估各个扰动因素的重要性,给出了各预防措施实施成本的上限.

表 7 预制供应链绩效管理研究典型文献

类型	文献	研究内容	优化目标	方法
存储	Ko ^[17] (2010 年)	评估需求变化对生产时间缓冲的影响,并利用多目标遗传算法对生产顺序进行安排	不改变生产资源情况下减少库存	多目标遗传算法
运输交付	Kong 等 ^[18-19] (2017 年,2018 年)	生产调度、准时化策略、批量交付理论	最小化惩罚成本、资源浪费和环境影响	动态规划
整条供应链的绩效	Yin 等 ^[21] (2009 年)	进料、生产、运输和交付的管理	调度效率	RFID 技术
	Wang 等 ^[22] (2017 年)	对比基于人工、条形码和 RFI 支持的预制供应链 3 种模型	运营成本	RFID 技术
	Arashpour 等 ^[24] (2017 年)	平衡多供应商最小化中断风险和总供应成本	优化决策参数,从而达到以较小的总投资提高供应网络性能	数学规划
	Anvari 等 ^[20] (2016 年)	整合生产部门、运输部门、现场装配部门为一个资源约束的扩展柔性作业车间调度问题	最小化工期和生产资源成本,同时最大化安全性	基于遗传算法的多目标搜索技术
	Wang 等 ^[23] (2018 年)	基于仿真的两级供应链扰动评价模型	各类扰动因素的影响能力大小评估	离散事件仿真

3.3 预制供应链风险管理

预制供应链风险管理研究的典型文献,如表 8 所示.

表 8 预制供应链风险管理研究的典型文献

类型	文献	研究内容	优化目标	方法
系统	Luo 等 ^[25] (2015 年)	分析及改善中国工业化建筑系统推广实施的风险因素	确定风险排序	专家访谈、问卷调查、案例分析
技术	Arashpour 等 ^[26] (2015 年)	比较交叉培训策略,以创建多技能劳动力资源	确定非现场施工活动网络的过程集成决策	仿真
	Arashpour 等 ^[27] (2017 年)	提出一种创新方法评估过程集成架构的性能,以确定在各种生产环境下的最优过程集成架构	确定非现场施工最优工艺集成体系结构	模糊理论+理想解相似程度排序
进度	Li 等 ^[28] (2016 年)	对利益相关者风险潜在网络进行研究,识别出直接或间接对其他风险具有较高影响的关键风险及它们之间相互作用	针对风险进行评估并制定相应策略	社会网络分析
	Li 等 ^[29] (2017 年)	辨识各种风险对项目进度的潜在影响	确定风险敏感度排序	系统动力学
	Li 等 ^[30] (2018 年)	通过开发有效的混合动态模型深入了解预制产品进度性能受到各种风险变量之间相互关系的动态影响	确定评估调度风险	系统动力学、离散事件仿真
订单	Mostafa 等 ^[31] (2018 年)	客户订单行为对澳大利亚住宅建筑环境中非现场制造系统性能的影响	确定完工时间和订单数量	离散事件仿真
成本	Xue 等 ^[32] (2018 年)	探讨利益相关者协同管理与非现场施工成本绩效之间的关系	确定成本绩效	半结构化访谈、问卷调查、社会网络分析

预制供应链的性能往往受到固有的风险干扰和不确定性的限制.传统制造业与预制建筑的融合使得预制供应链在不确定环境中特别脆弱,潜在风险难以被发现,高效的预制供应链管理离不开良好系统的支撑.Luo 等^[25]论证了工业化建筑系统在中国的发展前景,提醒从业者加强重视预制构件生产,并讨论了推广实施的风险因素.Arashpour 等^[26]提出创建多技能劳动力资源,将未充分利用的过剩资源直

接转移到过度利用的资源中,解决非现场施工活动网络中劳动力资源不平衡的问题. Arashpour 等^[27]确定了非现场施工的最优工艺集成体系结构.

从设计、制造、物流到现场装配的整条预制供应链管理都存在各种进度风险. 文献[28-30]认为以往对预制建筑项目风险的研究主要集中在施工阶段,没有考虑与利益相关者风险及其因果关系,提出以建筑信息模型(BIM)为中心的策略,促进利益相关者的沟通,减轻关键进度风险和风险网络下的相互影响. Mostafa 等^[31]验证了客户订单信息在非现场建造系统中的重要性. Xue 等^[32]认为利益相关者协同管理正向影响成本绩效,且成本绩效是利益相关者合作管理的最重要驱动因素.

4 研究空白与未来展望

4.1 预制构件生产调度优化

4.1.1 研究空白 从表 6 典型文献的发表年份可知,有关预制构件生产调度优化的研究是在整个预制供应链管理研究中最早开始的. 经过学者对模型的不断改进和完善,模型不断接近预制构件厂内的真实生产情形. 现有研究以遗传算法为主构建数学模型,大多数满足完工时间最小化、生产成本控制的优化目标,未来预制构件生产调度优化研究还需要考虑以下 4 个内容.

1) 与生产计划研究相比,资源分配的研究较少,当前研究只局限于某几种有限的资源,并未全部考虑包括流水线、模具、劳动力和设备等资源,从而限制了所构建优化模型的应用范围.

2) 研究静态因素较多,缺乏对预制构件生产过程动态干扰因素(机器故障、订单变化等)的研究,模型无法接近真实的生产环境.

3) 目前,研究尚未找到不同资源约束条件下成本和工期两个相互矛盾目标之间平衡的最优方案.

4) 在模型优化求解的研究方面,大多数研究以遗传算法或改进的遗传算法为主,但是作为元启发式算法的遗传算法有一定的局限性,最终的调度方案只是基于目标函数值而不是基于真实的生产系统^[33],且无法保障解的准确性.

4.1.2 未来展望 在资源限制方面,资源分配制约生产计划的实现,如劳动力、模具等,因此,需进一步根据车间实际情况优化资源配置以拓展现有的研究.

在求解模型的算法上,目前,一些研究已经开始采用结合了 NEH(Nawaz Ensore Ham)法和优先规则的新颖元启发式算法解决流水车间调度问题. 文献[34-35]提出利用改进布谷鸟搜索(ICS)算法、混合猴群搜索(HMSA)算法求解流水车间调度问题. 秦旋等^[36]在预制构件流水车间的多目标生产调度优化中,设计一种新颖的多目标混合共生生物搜索(MOHSOS)算法. 这些新颖算法结合局部搜索策略的改进提升了算法的效率和质量,为未来生产调度模型的求解提供了借鉴. 在动态管理方面,生产过程中的不确定因素会打乱原有安排,为了应对实际生产环境下的各种突发车间干扰情况,如机器故障、紧急插单,交货期变更、订单取消等^[37-39],对其中产生较大损失的干扰进行预先控制,或在干扰因素发生后能够及时启动重调度方案^[40],这也将是未来研究的重点.

4.2 预制供应链绩效管理

4.2.1 研究空白 目前,在整个预制供应链环节中,对存储与运输交付的研究较少. 基于 RFID 的运输跟踪方法确保预制供应链管理者获得准确的库存、运输和接收实时信息,构成未来智能预制供应链的重要部分. 整条预制供应链绩效研究在未来将是主要研究方向,但应突破目前 3 个局限.

1) 在实际的预制供应链中,存储与生产密切相关,在不影响交付期的前提下,可以通过生产计划降低库存,但现有研究优化目标大多集中于最小化最大完工时间,较少从成品库存方面进行考虑.

2) 对于整个供应链的监管,预制构件实时信息的获取主要是为了追踪进度,方便管理人员对生产过程进行监控,但目前实时信息利用率低,并未达到改善预制供应链运营效果的预期.

3) 现有对预制供应链扰动响应的研究局限于单一扰动类型,其响应或预防措施针对的是单个阶段,但在实际预制供应链中,干扰程度是由多个阶段的不同因素共同影响决定的.

4.2.2 未来展望 预制供应链的各个环节及参与方都紧密联系、相互制约,因此,供应链管理整体绩效存在多个扰动因素. 与静态约束相比,动态因素的不确定性会产生更大的风险,建立整条预制供应链的动态扰动机制,将各阶段干扰的优先级评估、预防措施评估和干扰发生时的响应能力优化评估相结合,

可以降低预制供应链的潜在风险。

智能供应链将是新的研究方向,基于 BIM 的协作平台、RFID 等信息技术能够为预制供应链的各参与方提供项目的实时信息,能够提高供应链的运营绩效。在生产阶段的进度控制、存储阶段的成品保护,以及保证准时交付过程中,智能供应链能够实现项目的全过程监控,极大降低了项目的完工风险。因此,最大限度开发所获取信息以供决策者使用是未来研究的方向。

4.3 预制供应链风险管理

4.3.1 研究空白 从不同方面提出的改善预制供应链脆弱性方法对完善预制供应链管理理论起到了很好的补充作用,为了有效应用于工程实践,预制供应链风险管理研究还需要考虑以下 3 个内容。

1) 基本的人类行为问题(如动机、学习曲线和沟通),对整合存在人为因素的管理过程的成功有重要影响,有待进一步研究。

2) 预制供应链管理过程风险识别需进一步研究,同时,需要研究风险缓解策略及方法,以确定其应对风险的有效性。

3) 对非现场施工管理系统或成本管理系统的开发,案例样本容量较少且缺乏比较研究,开发的系统一般只应用于特定的环境和标准下,不具有普适性。

4.3.2 未来展望 系统的构建过程应纳入利益相关者的风险,不仅需要识别风险,而且需要进一步研究风险应对策略,开发具有普遍适用性的预制供应链管理系统。虽然高自动化是预制供应链管理发展的追求,但某些阶段对人为因素导致的风险同样不可忽视。因此,技术人员和管理人员的心理、行为等影响可作为拓展预制供应链系统开发的补充研究。

5 结束语

以 Web of Science 核心合集数据库的 2000—2019 年相关装配式建筑预制建设活动文献为对象,对发文量年度分布及影响力进行分析。通过 VOSviewer 软件提取了该研究领域作者合作网络、关键术语共现网络及主题分类可视化网络,呈现预制供应链管理理论的研究现状和热点。对预制构件生产调度优化、预制供应链绩效管理和预制供应链风险管理分别选取典型文献进行综述,分析主要研究者的代表性工作,梳理预制供应链管理各主题的研究现状。针对现有研究总结研究空白,指出未来可能的研究机会和改善方向,这将对中国的预制供应链管理实践和装配式建筑推广起到重要的引导作用。

参考文献:

- [1] 国务院办公厅.关于大力发展装配式建筑的指导意见[J].建材发展导向,2016,14(24):14-16.
- [2] 郭正兴,朱张峰,管东芝.装配整体式混凝土结构研究与应用[M].南京:东南大学出版社,2018.
- [3] WANG Zhaojing, HU Hao, GONG Jie. Framework for modeling operational uncertainty to optimize offsite production scheduling of precast components[J]. Automation in Construction, 2018, 86(4): 69-80. DOI: 10. 1016/j. autcon. 2017. 10. 026.
- [4] 管文玉,凌卫青.基于文献计量的数字孪生研究可视化知识图谱分析[J].计算机集成制造系统,2020,26(1):18-27. DOI:10. 13196/j. cims. 2020. 01. 002.
- [5] 丁学东.文献计量学基础[M].北京:北京大学出版社,1992.
- [6] CHAN W T, HU Hao. An application of genetic algorithms to precast production scheduling[J]. Computers and Structures, 2001, 79(17): 1605-1616. DOI: 10. 1016/S0045-7949(01)00036-0.
- [7] HU Hao, CHAN W T. Production scheduling for precast plants using a flow shop sequencing model[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2002, 16(3): 165-174. DOI: 10. 1061/(ASCE)0887-3801(2002)16:3(165).
- [8] LEU S, HWANG S. GA-based resource-constrained flow-shop scheduling model for mixed precast production[J]. Automation in Construction, 2002, 11(4): 439-452. DOI: 10. 1016/S0926-5805(01)00083-8.
- [9] KO C H, WANG Shufan. GA-based decision support systems for precast production planning[J]. Automation in Construction, 2010, 19(7): 907-916. DOI: 10. 1016/j. autcon. 2010. 06. 004.
- [10] KO C H, WANG S F. Precast production scheduling using multi-objective genetic algorithms[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(7): 8293-8302. DOI: 10. 1016/j. eswa. 2011. 01. 013.

- [11] KHALILI A, CHUA D K. Integrated prefabrication configuration and component grouping for resource optimization of precast production[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2014, 140(2): 4013051-4013052. DOI:10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000798.
- [12] WANG Zhaojing, HU Hao, GONG Jie. Modeling worker competence to advance precast production scheduling optimization[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2018, 144(11): 4018091-4018098. DOI:10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001556.
- [13] WANG Zhaojing, HU Hao. Improved precast production-scheduling model considering the whole supply chain[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2017, 31(4): 4017011-4017013. DOI:10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000667.
- [14] YANG Zhitian, MA Zhiliang, WU Song. Optimized flowshop scheduling of multiple production lines for precast production[J]. *Automation in Construction*, 2016, 72: 321-329. DOI:10.1016/j.autcon.2016.08.021.
- [15] WANG Zhaojing, HU Hao. Dynamic response to demand variability for precast production rescheduling with multiple lines[J]. *International Journal of Production Research*, 2018, 56(16): 5386-5401. DOI:10.1080/00207543.2017.1414970.
- [16] LI S H A, TSERNG H P, YIN S Y L, *et al.* A production modeling with genetic algorithms for a stationary precast supply chain[J]. *Expert Systems with Applications*, 2010, 37(12): 8406-8416. DOI:10.1016/j.eswa.2010.05.040.
- [17] KO C H. An integrated framework for reducing precast fabrication inventory[J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2010, 16(3): 418-427. DOI:10.3846/jcem.2010.48.
- [18] KONG Liulin, LI Heng, LUO Hanbin, *et al.* Optimal single-machine batch scheduling for the manufacture, transportation and JIT assembly of precast construction with changeover costs within due dates[J]. *Automation in Construction*, 2017, 81: 34-43. DOI:10.1016/j.autcon.2017.03.016.
- [19] KONG Liulin, LI Heng, LUO Hanbin, *et al.* Sustainable performance of just-in-time (JIT) management in time-dependent batch delivery scheduling of precast construction[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 193: 684-701. DOI:10.1016/j.jclepro.2018.05.037.
- [20] ANVARI B, ANGELOUDIS P, OCHIENG W Y. A multi-objective GA-based optimisation for holistic manufacturing, transportation and assembly of precast construction[J]. *Automation in Construction*, 2016, 71: 226-241. DOI:10.1016/j.autcon.2016.08.007.
- [21] YIN S Y L, TSERNG H P, WANG J C, *et al.* Developing a precast production management system using RFID technology[J]. *Automation in Construction*, 2009, 18(5): 570-577. DOI:10.1016/j.autcon.2009.02.004.
- [22] WANG Zhaojing, HU Hao, ZHOU Wei. RFID Enabled knowledge-based precast construction supply chain[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2017, 32(6): 499-514. DOI:10.1111/mice.12254.
- [23] WANG Zhaojing, HU Hao, GONG Jie. Simulation based multiple disturbances evaluation in the precast supply chain for improved disturbance prevention[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 177: 232-244. DOI:10.1016/j.jclepro.2017.12.188.
- [24] ARASHPOUR M, BAI Y, ARANDA-MENA G, *et al.* Optimizing decisions in advanced manufacturing of prefabricated products: Theorizing supply chain configurations in off-site construction[J]. *Automation in Construction*, 2017, 84: 146-153. DOI:10.1016/j.autcon.2017.08.032.
- [25] LUO Lizi, CHAO Mao, SHEN Liyin, *et al.* Risk factors affecting practitioners' attitudes toward the implementation of an industrialized building system: A case study from China[J]. *Engineering Construction and Architectural Management*, 2015, 22(6): 622-643.
- [26] ARASHPOUR M, WAKEFIELD R, BLISMAS N, *et al.* Optimization of process integration and multi-skilled resource utilization in off-site construction[J]. *Automation in Construction*, 2015, 50: 72-80. DOI:10.1016/j.autcon.2014.12.002.
- [27] ARASHPOUR M, WAKEFIELD R, ABBASI B, *et al.* Optimal process integration architectures in off-site construction: Theorizing the use of multi-skilled resources[J]. *Architectural Engineering and Design Management*, 2017, 1(1): 1-14. DOI:10.1080/17452007.2017.1302406.
- [28] LI C Z, HONG Jingke, XUE Fan, *et al.* Schedule risks in prefabrication housing production in Hong Kong: A social network analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 134: 482-494. DOI:10.1016/j.jclepro.2016.02.123.
- [29] LI C Z, SHEN G Q, XU Xiaoxiao, *et al.* Schedule risk modeling in prefabrication housing production[J]. *Journal of*

Cleaner Production, 2017, 153: 692-706. DOI: 10. 1016/j. jclepro. 2016. 11. 028.

[30] LI C Z, XU Xiaoxiao, SHEN G Q, *et al.* A model for simulating schedule risks in prefabrication housing production: A case study of six-day cycle assembly activities in Hong Kong[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 185: 366-381. DOI: 10. 1016/j. jclepro. 2018. 02. 308.

[31] MOSTAFA S, CHILESHE N. Application of discrete-event simulation to investigate effects of client order behaviour on off-site manufacturing performance in Australia[J]. Architectural Engineering and Design Management, 2018, 14(1/2): 139-157. DOI: 10. 1080/17452007. 2017. 1301367.

[32] XUE Hong, ZHANG Shoujian, SU Yikun, *et al.* Effect of stakeholder collaborative management on off-site construction cost performance[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 184: 490-502. DOI: 10. 1016/j. jclepro. 2018. 02. 258.

[33] 刘义川, 刘贵文, 傅晏, 等. 装配式建筑预制构件生产调度文献综述[J]. 项目管理技术, 2019, 17(4): 20-25.

[34] MARICHELVAM M K, PRABAHARAN T, YANG X S. Improved cuckoo search algorithm for hybrid flow shop scheduling problems to minimize makespan[J]. Applied Soft Computing Journal, 2014, 19: 93-101. DOI: 10. 1016/j. asoc. 2014. 02. 005.

[35] MARICHELVAM M K, TOSUN Ö, GEETHA M. Hybrid monkey search algorithm for flow shop scheduling problem under makespan and total flow time[J]. Applied Soft Computing, 2017, 55: 82-92. DOI: 10. 1016/j. asoc. 2017. 02. 003.

[36] 秦旋, 房子涵, 张赵鑫. 混合共生生物搜索算法求解置换流水车间调度问题[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(4): 712-721. DOI: 10. 3785/j. issn. 1008-973X. 2020. 04. 010.

[37] 王艳, 丁宇. 动态柔性作业车间优化调度与决策方法[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(11): 2073-2083. DOI: 10. 16182/j. issn1004731x. joss. 20-0732

[38] 周圆圆, 陈辉. 基于 Witness 仿真的紧急订单插单问题研究[J]. 物流工程与管理, 2021, 43(4): 20-22. DOI: 10. 3969/j. issn. 1674-4993. 2021. 04. 007.

[39] 李珍萍, 李腾飞. 考虑交货期的生产运输联合优化问题研究[J]. 数学的实践与认识, 2021, 51(1): 265-276. DOI: 10. 16301/j. cnki. cn12-1204/f. 2020. 06. 046.

[40] 徐立云, 程赞, 宓宏, 等. 基于改进变邻域搜索算法的成型机分批重调度优化[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(10): 1460-1469. DOI: 10. 11908/j. issn. 0253-374x. 19406.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)