

基于工程总进度计划的装配式建筑优化方法研究

汤子为 吕金刚 李 豪 练博洋 俞 刚

中建八局第二建设有限公司 上海 200135

【摘要】我国装配式住宅的发展还处于起步阶段，在实际应用过程中大型装配式建筑存在生产成本低、装配难等诸多问题，与传统建筑相比，在综合成本方面没有突出的优势。因此，对大型装配式建筑全局进行合理优化成为解决以上问题的重要一步。本文通过实际的装配式工程项目为背景，总结了装配式建筑优化的一般方法，为大型装配式建筑优化提供辅助工具。

【关键词】装配式建筑优化；生产排序；生产提前期；优化人工鱼群算法

1 绪论

1.1 研究背景及意义

中国装配式建筑与发达国家相比，在技术、产业配套、管理模式等都还存在差距，主要表现在 PC 构件的标准化有待提高，现在主要的装配式构件属于定制产品，与传统建造方式相比，在成本方面没有突出优势。因此，装配式建筑优化成为国内外许多学者研究的课题，研究出许多装配式建筑优化的方法，大多数方法局限性较强，对这些方法抽丝剥茧，归纳总结出一套装配式建筑优化的体系指导生产，对节约成本、提高效益有着重要意义。

1.2 研究方法概述

1.2.1 研究思路

首先，明确优化的对象（问题），对优化背景进行分析并发掘主要矛盾；其次，明确优化的目标，梳理优化主次顺序，解决优化对象中的主要包括如何生产，生产计划安排，生产排序，车辆调度，构件装配等问题，以达到资源优化配置的目的；最后，分析假设条件下建立的相关数学模型的适应性，从布局规划、规模结构或者计划排序等方面进行决策，总结合理配置资源、降低成本的目标方法。

1.2.2 研究技术路线

本文的研究技术路线如图 1-1 所示：

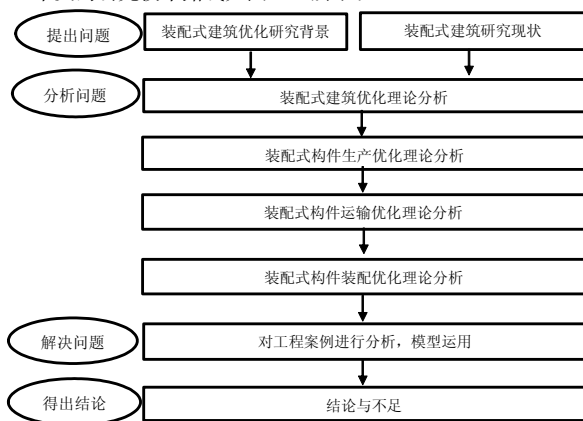


图 1-1 技术路线

2 装配式建筑优化理论分析

2.1 装配式构件生产优化

2.1.1 构件结构优化

对项目的工期-成本-质量建立优化模型，通常在项目的设计阶段建立基于工程的 BIM（建筑信息模型 Building Information Modeling）各专业核心模型。要保证装配式建筑全生命周期的精细化管理和效益最大化，就意味着 BIM 作为一种集中工具同样需要优质的设计思维。首先，制定标准化的设计流程，采用统一规范的设计方式，各专业设计人员遵从统一的设计规则；其次，构件的多样性必将会加大生产的难度和成本，进行模数化的构件组合设计，事先确定好所采用的工业化结构体系，按统一模数进行构件拆分；最后，运用 BIM 族完善模块化的预制构件库和信息系统，比选优价构件。

2.1.2 进度计划编制

一般情况，施工现场进度管理过程中普遍存在施工计划偏差严

重、班组安排不合理、预制构件堆场不合理等问题。在装配式构件生产过程中，PC 生产必须根据施工实际情况编制进度计划、确认关键线路。首先确定工作量，计算各道工序所需要时间；然后根据工程进度与施工工艺要求，确定施工工序，根据关键线路调整安排其他非关键线路的作业时间。最后将系统资源的约束作为主要考虑因素，用有限能力计划法，优先对在瓶颈资源上加工的最主要的预制构件进行生产进度的安排，将瓶颈资源作为基础，为瓶颈资源前后和中间的生产工序分别按照不同的方式排列，对其优化以后再对非主要部件的作业计划进行编制^[1]。

2.1.3 构件生产排序

PC 构件生产主要流程依次为：模具组装、涂刷脱模剂、钢筋加工绑扎、预埋件及水电线预埋、钢筋及预埋件隐蔽工程检查、混凝土浇筑、养护、脱膜、表面检查和处理、成品验收入库或运输。项目部一般会根据实际情况安排流水施工，去平衡生产能力，可能造成供货库存积压，寻求生产的物流平衡，生产过程中每一个工序的完成量、工作量稳定增加，避免装配施工时松时紧，为协调预制构件的供应方和装配施工方的协调配合创立条件。依据平衡生产的思想，需要对构件生产进行排序，通常先对主要构件进行分类生产，需要统计主线构件每天的生产数量，以单个项目每天剩余构件数量为容量，计算各种构件的平均需求量和与平均生产量的方差，以最小作为依据排产，每日更新。

2.1.4 构件生产提前期应用

为了避免盲目生产导致预制构件生产过程的库存不足或者构件积压，需结合装配施工进度计划与装配施工排序情况，设置合理的提前期来适应变化，动态计算预制构件生产提前期，建立预制构件生产提前期计算模型。大多数项目都有许多标准层，标准层结构基本相同，同项目不同楼栋的标准层结构也基本相似，可以考虑生产时间基本相同。根据预制构件的作业时间和生产所需要的间隔时间，可以预估单种构件的每道工序的安全生产作业时间和间隔时间；每天用于生产构件的极限时间是一定的，预制构件的生产数量按计划已经确认，就可以确认每种预制构件每道工序的安全存量；根据每道工序的安全存量以及各类预制构件的需求量，计算构件序号，并在装配线下预制构件生产与安全存量；根据各部分所需要的预制构件的数量，得到各工序中预制构件生产的提前期，应用到每个关键部位的预制构件中直到工期结束。

2.2 装配式构件运输优化

2.2.1 装配式 PC 构件配送综述

目前国内建筑工业化程度不高，在建筑业物流发展程度不高的情况下，装配式 PC 构件的配送基本上是生产企业自营配送为主，不借助第三方或其他组合形式。配送方式具有以下几个明显特点：各工地需求总量确定、按需配送；配送周期短且时间要求严格；配送范围受限；配送环节简单。受交通情况影响、路程远近、载重与否、预制场内是否有可供调度的车辆、施工场地是否能及时接货的影响，在装卸车、运输环节、收货环节所花费的时间是不一样的，在这个过程中主要存在车辆和施工方等待的问题，在充分考虑车辆可供调度数量、施工方吊装时间的约束条件下，其最终目的是通过合理调配车辆，尽可能降低企业物流成本，将构件按时送往施工工地。

2.2.2 装配式 PC 构件车辆调度分析

施工企业接到工程后，再向供应商提交预制构件的订单，供应商组织生产、运输，施工单位组装，一般项目有严格的施工进度计划，对构件进场时间限制条件不一样，PC 构件本身库存成本是大于普通建筑材料，为降低自身的成本支出，工地会根据自己需求多批次、具备时间限制条件向厂家进货，这种需求方式类似以时间限制为主的配送成本最低的车辆调度问题。

关于求解物流配送带时间约束的车辆调度问题，结合 PC 构件配送的特点，目前应用算法比较符合实际情况的为优化的人工鱼群算法^[9]。根据算法的基本原理，由于 PC 构件配送成本优化问题的求解是配送成本最低时对应的各个施工工地派送车辆的次序和时间安排，在人工鱼位置状态与本次研究问题建立一种映射关系，通过人工鱼位置状态的解码计算目标函数值，间接产生配送车辆的出场顺序，利用人工鱼模拟其在自然状态下的行为，安排配送车辆的出场时间。

2.3 装配式构件装配优化

为了匹配装配施工，每个 PC 构件都编制序号或者在图纸上标明了安装顺序，但在考虑配送成本最优的前提下，构件厂会根据自己的车辆配置和配送工地数量、距离的情况下发货，送到工地的货一般会出现错乱的情况，这就导致施工现场将存有一定数量未吊装的构件。同时，构件到达工地后一般要进行二次搬运，受起重运输设备的能力范围的限制，构件的进场卸点应该不超过目标装配点最佳起重运输设备的能力范围；进行装配式施工阶段一般处于抢工阶段，现场其他作业工种较多，场地条件限制，容纳的预制构件数量有限。目前市场上的 PC 构件是供不应求的，构件生产厂家一般会承接超过当前产能的生产任务通过后续产能提升来谋求利益最大化，通常在施工现场会出现装配空档期，造成短暂停工的现象。

通过以上分析，影响正常装配的主要因素有厂家的供货、施工现场装配条件。在产能基本稳定的情况下，影响装配速度的主要因素是现场的装配条件，施工现场尽可能提供堆放构件场地，对进场构件进行严格排序，确保吊装方便有序，合理部署其他传统支模、钢筋绑扎、混凝土浇筑的工序，尽可能给与装配构件的足够提前期，为后续装配计划提供保障。

3 装配式建筑优化案例分析

3.1 工程概况

本项目位于上海市松江区洞泾镇中部现场结构施工采用预制装配式方法，柱、楼梯、叠合板、叠合梁采用预制成品构件。

3.2 生产优化应用

3.2.1 构件结构优化

设计预制构件的设计过程中，运用 BIM 技术，事先对预制构件的拼装进行模拟，核对设计中预制构件的偏差，避免安装过程中的冲突。项目场地空间有限，采用了三台 TC7052，在满足最低预制率的前提下，取消一层 PC 柱改为现浇结构，取消部分预制次梁改为现浇结构；重新计算梳理节点钢筋数量，减少节点数量，确保安装方便。

3.2.2 进度计划编制和生产排序

根据项目总的进度计划安排及现场实际生产情况，PC 生产的总工期为 45 天，构件总数为 3605 个，每天需要平衡生产 81 个构件才能满足现场需要，为了满足现有模台、模具的全部利用，以及其他项目的生产需求，初步确定了本项目各种类构件日生产量计划，见表 3 - 1。

表 3-1 构件日生产量计划表

构件名称	预制梁	预制板	预制柱	预制楼梯
每日生产量 (N)	30	40	10	2
注：每日产量将根据实际情况变化				

在 PC 构件实际生产中，发现预制柱、预制楼梯、预制板的生产进度实际需要，但预制梁的生产不足。在预制梁生产线饱和的情况下，扩大生产线的同时只能压缩其他生产线的工作，同时为保证其他工作正常运转，考虑到生产预制柱的生产线同样满足预制梁的生产，故将滞后的预制梁的生产穿插在生产预制柱的生产线中，解决瓶颈资源上加工的最主要的预制构件生产。

3.2.3 构件生产提前期应用

在接到订单到具体生产需要根据本项目土建施工图纸、装饰图纸进行 PC 图纸初步深化，然后经设计院审核给出意见回复后再深化出具蓝图，送模具生产单位进行模具深化设计生产，同时完成灌浆套筒的试验和其他相关工作。其中，按照工程量及图纸难度初步估计 80 天出具蓝图和模具需求计划表，和模具厂协调 25 天完成所有模具生产，5 天完成模具拼装。结合五年来 PC 厂生产日均各类构件数量和日平均产能，考虑生产效能提高率以及受资金、政策影响的突发情况，得到本项目可支配生产的浮动范围，见表 3 - 2。

表 3-2 构件日生产量浮动范围

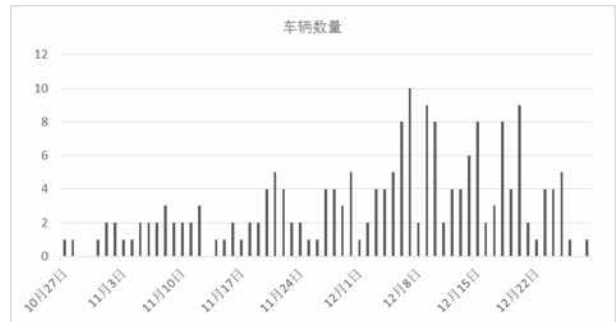
构件名称	预制梁	预制板	预制柱	预制楼梯
日均量 (N)	31	42	9	2
生产范围 (N)	27-35	37-47	7-11	1-3

从而得出在最低产能情况下的日均产量为 72，需要 5 天的最低生产提前期，考虑到构件堆场场地大小、构件质量等其他因素的影响，实际 PC 厂家确定两倍最低生产提前期作为最终生产提前期，以此编制出项目 PC 整体进度计划表。

3.3 模型应用

本项目合作的 PC 厂家拥有半挂车总数 27 辆，均能满足所有构件运输要求，并且装载率高；包括本项目在内该厂共承接 15 家单位的 PC 生产任务，达到配送条件的单位有 9 家，按平均供给要求，每日给各工地送货安排至多 3 辆车。进行优化鱼群的算法后整理对应总配送成本最低的车辆出场顺序和出车时间表，筛选出本项目的配送表 3-4。

表 3-4 配送表



结合项目实际开展情况，通过人工鱼群算法优化后表 3-4 的配送安排匹配现场施工的实际需要，未出现重大延误情况。在构件进场之前，项目部规划了构件的堆放、运输和吊装区域，对架子搭设、模板安装、混凝土进行精准时间控制，最大化 PC 构件安装的提前期，按进度计划完成结构封顶。

4 结语

本文在大量阅读书籍和查阅国内外文献的基础上，认真分析混凝土大型装配式建筑优化的各个流程，得到的主要结论如下：

- (1) 预制构件生产企业与装配施工企业不能协调组织起来，对预制构件的库存管理和生产提前期管理混乱，盲目生产导致预制构件积压或者未设置提前期导致供货不及时，合理编制生产计划达到均衡生产匹配装配平衡。确定合适生产提前期的计算模型，完善解决库存积压和工期延误的问题解决机制。
- (2) PC 构件运输类似配送带时间约束的车辆调度问题，利用优化的人工鱼群算法来对装配式构件的配送车辆出场顺序和时间安排进行模拟，取得了良好的实际效果。
- (3) PC 构件装配单位应合理安排构件堆场、给到场构件合理排序并设置提前期，确保装配各工序不间断。

【参考文献】

[1]周遵红. 装配式住宅预制构件生产优化方法研究 [D].重庆: 重庆交通大学, 2018: 10-48.
 [2]王乐媛. 基于改进人工鱼群算法的 PC 构件运输车辆调度优化研究 [D]. 重庆大学, 2019.
 作者简介: 汤子为, 1996 年生, 助理工程师, 从事房屋建筑类工程管理工作。现供职于中建八局第二建设有限公司。