

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.040



工业化生产 PC 构件的 BIM 技术定位优化

姚刚^{a,b}, 秦蔚壑^{a,b}, 周梦^{a,b}, 刘文凯^c

(重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室; c. 计算机学院, 重庆 400045)

摘要:在预制混凝土(PC)构件工业化生产中,传统的定位多采用人工排布,存在平台生产面积利用率低、排布费工费时、生产漏排多排等缺点。将建筑信息模型(BIM)技术应用到 PC 构件工业化生产中,可提高管理的信息化程度,并能较好地解决传统定位中存在的问题。采用 Revit 软件,制定了 PC 构件信息模型的参数化建模标准,创建了 PC 构件信息模型,改进了最低水平线算法。在模型信息的基础上应用算法排布构件,从而提高了 PC 构件生产的信息化程度和生产效率。

关键词:预制混凝土构件;建筑信息模型;定位;最低水平线算法

中图分类号:TU721;TU17 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2019)02-0140-07

PC elements localization optimization with BIM technology in industrial production

Yao Gang^{a,b}, Qin Weihe^{a,b}, Zhou Meng^{a,b}, Liu Wenkai^c

(a. School of Civil Engineering; b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education; c. School of Computer Science, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: The manual arrangement, which has some defects such as low utilization rate of production area, time-consuming and low leakage, was mostly adopted in traditional localization of prefabricated concrete (PC) elements in industrial production. Building Information Modeling (BIM) technology is applied in the industrial production of PC elements to improve the degree of management informatization, and thus the problems mentioned above can be solved to some extent. A parametrized modeling standard was developed and a PC information model was created using Revit software and the minimum horizontal line algorithm was improved. On the basis of information, the algorithm was used to arrange components, so as to improve the degree of information and productivity of PC components.

Keywords: prefabricated concrete elements; building information modeling; localization; minimum horizontal line algorithm

作为预制混凝土(PC)构件工业化生产的开始环节,定位决定了每一批次中 PC 构件的生产数量、混凝土的尺寸及预留预埋的位置。定位不仅影响

PC 构件的生产效率,也影响 PC 构件的生产质量。传统的定位依靠技术人员的经验,存在生产效率低、费工费时、错误率高等缺点。

收稿日期:2018-03-16

基金项目:"十三五"国家重点研发项目(2016YFC0701909-1);重庆市社会事业与民生保障科技创新专项(cstc2015shms-ztx30017)

作者简介:姚刚(1963-),男,教授,博士生导师,主要从事建筑施工技术和管理研究,E-mail:yaocqu@vip.sina.com。

Received:2018-03-16

Foundation item: The National Key Research and Development Program During the 13th Five-year Plan Period (No. 2016YFC0701909-1); Special Project of Scientific and Technological Innovation for Social Undertakings and People's Livelihood Guarantee in Chongqing (No. cstc2015shms-ztx30017)

Author brief: Yao Gang (1963-), professor, doctoral supervisor; main research interests: construction technology and management, E-mail: yaocqu@vip.

美国在 2012 年将工程信息模型引入到土木领域,以提高工程数据的连续性^[1]。建筑信息模型(BIM)技术的兴起为弥补传统定位技术的缺点提供了新的思路。随着 BIM 技术的推广,其应用范围越来越广泛,很多学者也进行了大量研究。Kurdziel 等^[2]构建了智能建筑系统,以实现建筑工程全方位集成。Moghadam 等^[3]提出将 BIM 和精益相结合的管理模型。Javier 等^[4]也提出了基于 BIM-GIS 的建筑供应链监控系统。齐宝库等^[5]首先将 BIM 技术引入到装配式建筑全生命周期管理中。于龙飞等^[6]构建了基于 BIM 的装配式建筑集成建造系统的总体框架。曹江红等^[7]提出了基于 BIM 的装配式建筑三阶段质量管理体系,以统一工厂和现场的质量管理。刘平等^[8]构建了基于 BIM 的装配式建筑供应链信息流集成模型,并对模型架构和各阶段的应用进行分析。胡珉等^[9]提出了预制装配式建筑的 BIM 设计标准框架,为装配式产业链信息沟通提供路径。田东等^[10]提出了基于 BIM 技术的装配式建筑深化设计方法,让信息在产业链的各环节能够协同与传递。靳鸣等^[11]引入 BIM 技术进行装配式建筑深化设计,并制定相应标准。王爱兰等^[12]通过 BIM 技术模拟,提前制定 PC 构件施工方案。李广辉等^[13]利用 BIM 模型进行动态和静态碰撞,检查优化装配式结构。

为了解决传统定位技术中存在的问题,笔者提出了基于 PC 构件工业化生产的、应用 BIM 技术的定位方法,并对其进行优化。首先,根据深化设计图纸和生产方案建立 PC 构件的 BIM 模型;然后,结合定位的实际情况,提取 PC 构件模型中相关生产信息;最后,通过改进的最低水平线算法自动排布预生产的构件,对定位进行优化。

1 BIM 模型的创建及定位信息的提取

1.1 BIM 模型的创建

PC 构件 BIM 模型的创建与一般的 BIM 模型有所不同。以 Revit 软件建模为例,PC 构件不仅要作为族被项目文件运用,同时 PC 构件也是由多个元素组成。多层级的关系和建模软件的局限性,使得 PC 构件 BIM 模型的创建复杂而特殊。如何正确地建立信息模型,直接影响到构件的生产质量和生产效率。

笔者应用 Revit 软件,结合 PC 构件的多层级特点,采用嵌套族创建 PC 构件的 BIM 模型。同时,制定参数化建模标准,从模型信息和建模过程来规范信息模型。模型信息主要包括几何信息和非几何信

息;建模过程主要包括建模软件版本号、创建方式、模型的储存等。

PC 构件包括叠合板、叠合梁、预制柱、预制墙板等,其参数化建模标准包括 6 个方面,以叠合板族为例进行说明。

1)族的组成 首先分析 PC 构件的组成:PC 构件族为嵌套族,子族为各个零件,如钢筋、混凝土、预留预埋件等;父族为各个零件的集合。其中,划分零件既要种类完整,也要满足一定的通用性。

叠合板族的组成,父族为叠合板,子族为混凝土底板、预埋件等,见图 1。

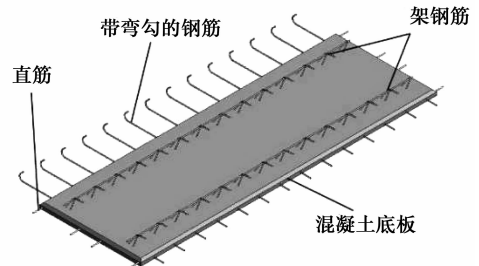


图 1 叠合板的组成

Fig. 1 Component of superimposed slab

2)族的命名 族的命名包括父族命名和子族命名,主要参考行业已有标准,结合 Revit 软件可变参数(参数化建模的参数)的设置,符合族的使用习惯。子族的命名也可以依据形状、功能等。

叠合板族的命名参考图集《桁架钢筋混凝土叠合板(60 mm 厚底板)》(15G366-1),结合宽度等可变参数;其子族的命名依据钢筋形状,具体命名见表 1。

表 1 族和类型名称的命名规则

Table 1 Naming rules for family and type names

| 族 | 族名称 | 示例 | 类型名称 | 示例 |
|----------|-------------|--------------|----------------------|-----------------|
| 叠合板 | 名称-位置-宽度 | 双向板-边板-1 200 | (双向板)DBSX-XX-XXXX-XX | DBS1-67-3620-31 |
| | | 单向板-中板-1 800 | (单向板)DBDXX-XXXX-X | DBD67-3620-2 |
| | | 混凝土底板 | 混凝土底板-厚度 | 混凝土底板-60 |
| 桁架钢筋 | 桁架钢筋-XXX | 桁架钢筋-A80 | | |
| 直筋 | 直筋 | 直筋 | 直筋-直径 | 直筋-8 |
| 一端带弯勾的直筋 | 一端带弯勾的直筋-直径 | 一端带弯勾的直筋-8 | | |
| 两端带弯勾的直筋 | 两端带弯勾的直筋-直径 | 两端带弯勾的直筋-8 | | |
| 预埋件 | 名称 | 螺栓 | | |

3)族的基本信息 族的基本信息根据应用目的分析确定,其主要应用于生产。PC 构件的 BIM 模型信息主要包括原材料、零件几何尺寸和位置尺寸,具体可分为总信息、混凝土信息、钢筋信息、预埋预埋件信息等。根据嵌套族的特点,细分父族和子族的信息。子族中应包括组成零件的原材料和几何尺寸信息;父族中应包括族的整体信息、零件数量、零件位置尺寸以及嵌套的关联参数。

叠合板族的子族信息包括混凝土底板尺寸、混凝土等级、钢筋等级、钢筋直径、钢筋形状尺寸、预埋件材料与生产尺寸等,桁架钢筋视为预埋件。叠合板族的父族信息包括跨度、宽度、厚度、总质量、混凝土体积、混凝土保护层厚度、各类钢筋的数量与位置尺寸、吊点信息、预留预埋件位置尺寸等。

4)Revit 软件建族的流程 Revit 软件的族分为系统族和自定义族,自定义族由用户根据实际需求创建,嵌套族为自定义族。嵌套族由父族嵌套子族组成,先创建各个子族,再创建父族,见图 2。

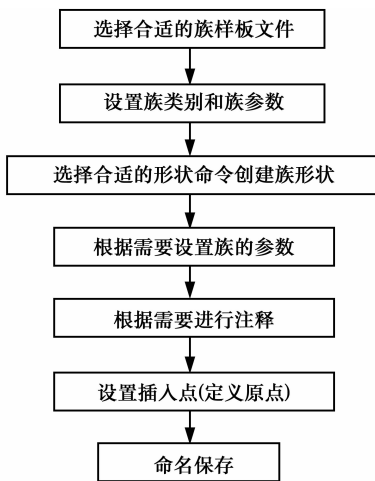


图 2 Revit 自定义族的创建流程

Fig. 2 Custom family creation process in Revit

5)族的创建过程 创建过程应统一族样板文件、族类别和同一种类构件的参数名称。不同种类构件根据自身特点设置可变参数,参数名称可参考族的基本信息名称。嵌套族还需确定父族与子族的关联参数,叠合板的关联参数见表 2。

表 2 叠合板父族与子族的关联参数

Table 2 Relation parameters of father and son family

| 子族名称 | 子族参数 | 父族参数 |
|--------|--------|--------|
| 桁架钢筋 | 桁架钢筋长度 | 桁架钢筋长度 |
| 跨度直筋 | 钢筋长度 | 跨度 |
| 端部直筋 | 钢筋长度 | 端部直筋长度 |
| 带弯勾的钢筋 | 平直段长度 | 宽度钢筋长度 |

6)其他 注释是对模型和参数信息表达的一个补充,有助于更快更全面地掌握熟悉构件。如叠合板族中子族位置尺寸的注释。

插入点是确定族引入新项目中的放置点,其设置应便于对族的使用,如,叠合板中的插入点可设置为叠合板的左下角。

1.2 定位的信息提取

定位是由机械设备划出拟浇筑混凝土的轮廓线,然后根据轮廓线组装模具。在创建构件的 BIM 模型后,由实际操作过程可知,排布构件所需要的信息有混凝土底板轮廓线、混凝土等级、最小矩形轮廓线。最小矩形轮廓线是包含 PC 构件和模具的最小面积的矩形,见图 3。混凝土等级信息用于判断不同的 PC 构件能否同一批次生产;混凝土底板轮廓线信息用于机械设备划线;最小矩形轮廓线的信息用于排布构件。

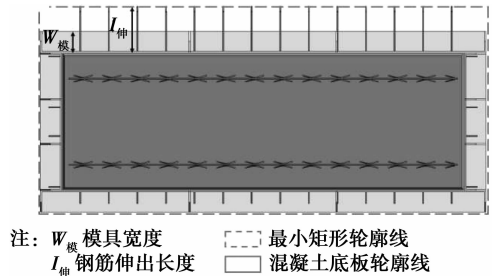


图 3 叠合板与模具

Fig. 3 Superimposed slab and templet

在排布构件之前,首先确定构件的模板面。考虑 PC 构件本身的特征,结合后续工艺的要求。流水生产中常见的 PC 构件有叠合板、叠合梁、预制柱、预制外墙板、预制内墙板等,其模板面的选择见表 3。

通过 Revit 的二次开发接口,开发信息导出附加模块,其主要功能是将 BIM 模型中的信息导出至排布构件的算法,导出的信息见表 4。某些信息可直接从 BIM 模型中获取,如混凝土等级;某些信息不能直接从 BIM 模型获取,需要经公式计算得到,如最小矩形轮廓线。

表 3 PC 构件的模板面

Table 3 Templet surface of PC elements

| PC 构件 | 模板面的选择 | 备注 |
|-------|---------|----------|
| 叠合板 | 底板底面 | |
| 叠合梁 | 梁底面 | |
| 预制柱 | 柱的正面或侧面 | 根据实际情况判断 |
| 预制外墙板 | 外墙面 | |
| 预制内墙板 | 墙面 | |

根据构件的生产计划,将构件的工期要求添加到信息表中,再进行算法的构件排布。

表 4 附加模块导出信息表

Table 4 Additional module export information

| 名称 | 信息来源 | 计算过程 | 用途 |
|----------|----------------------------------|--|------|
| 构件类型 | 族名称 | | 算法 |
| 混凝土底板轮廓线 | 长、宽 | | 定位划线 |
| 混凝土等级 | 混凝土等级 | | 算法 |
| 数量 | 统计表 | | 算法 |
| 最小矩形轮廓线 | 长、宽、钢筋伸出长度 $l_{伸}$ 、模具宽度 $w_{模}$ | 长 + $2\max(l_{伸}, w_{模})$ 宽 + $2\max(l_{伸}, w_{模})$ | 算法 |

2 基于最低水平算法的构件排布

PC 构件工业化生产的定位是一个矩形件排布问题,即在定宽定高的矩形平台上排布一系列矩形构件,构件之间不能重叠,且构件必须在平台内部,同时考虑生产工期等因素,找到一个较优的排布方案。影响排布方案的因素有构件面积、生产工期、生产工艺等。定宽定高的平台上排布构件,最优方案是使用平台次数最少的排布方式,可近似等效于每次排布对平台面积利用率最大。

2.1 最低水平线算法的改进

矩形件的排布是一个 NP (Non-deterministic Polynomial) 问题^[14],针对构件排布的限制条件,选择最低水平线算法^[15]排布构件,其过程如下。

首先,根据最低水平线算法将构件从左到右进行排布,形成高低不齐的水平线;构件排布时,选择最低水平线排布构件,若不能排布,则将最低水平线提高至相邻最低的水平线,同时更新最低水平线宽度,继续排布,见图 4。

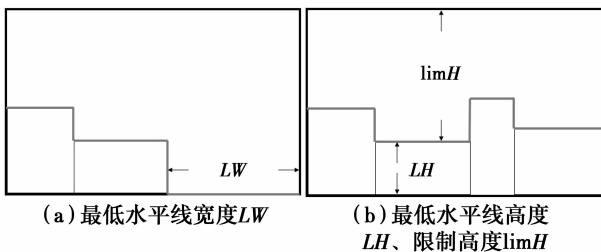


图 4 最低水平线算法

Fig. 4 Minimum horizontal line algorithm

其次,根据 PC 构件的实际生产情况,进行算法的优化,包括定高限制优化、工期等级优化、旋转状态优化等

1)定高限制优化。原有最低水平线算法是不限高,与实际情况不符。引入限制高度的参数 $limH = H - LH$,在每次更新水平线高度时,若所剩构件 $\min(l_i, w_i) > limH$,则停止排布。

2)工期等级优化。根据用户的工期要求,结合工厂的生产能力,制定生产计划,将不同构件按生产工期划分为不同的等级。构件排布时,选择优先级高的构件,无法满足要求时,再选择下一工期等级的构件,以提高平台面积利用率。

3)旋转状态优化。PC 构件的生产工艺不同,影响构件能否旋转排布。如:叠合板要拉毛,不能旋转排布;外挂墙板和固定台模的生产方式可以旋转。若考虑构件可旋转,则将构件旋转与不旋转的两种状态视为两个构件进行排布。

最后,通过定高限制、工期等级、旋转状态来体现构件排布的影响因素,得到一个最符合实际的排布方案。

2.2 算法的实现

优化的最低水平线算法可通过划分构件的工期等级和利用评价函数选择构件,更高效地完成构件排布,其具体流程见图 5。

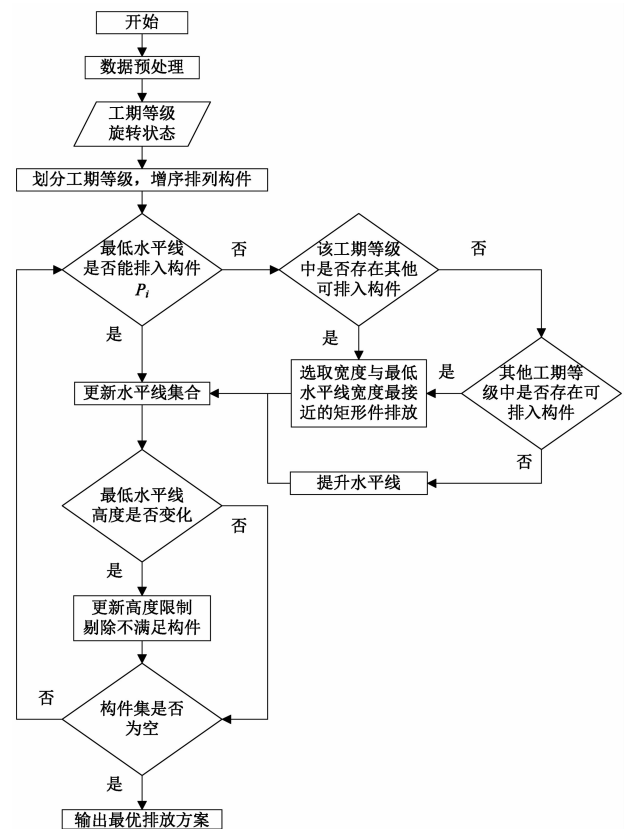


图 5 改进的最低水平线算法流程图

Fig. 5 Improved minimum horizontal line algorithm flowchart

1)数据预处理 先对构件的矩形尺寸数据进行

预处理,移除 $\min(l_i, w_i) > \min(H, W)$,将构件按混凝土等级进行分组。

2)确定工期等级和旋转状态 确定工期等级划分标准,即选择多少日为一级;同时,确定是否考虑旋转。

3)划分工期等级,增序排列构件 依据输入的等级划分标准对构件进行等级划分;同一工期等级构件按面积大小进行非增序排序 $f(1) \geq f(2) \geq \dots \geq f(n)$,再以先后排序每组工期等级,得到新的序列。

4)更新水平线集合 水平线集合是由平台中上部矩形的上边线或平台线组成。下述 4 种情况,水平线集合会变化:

①构件 P_i 能排入最低水平线上,构件宽度对应的水平线提高至构件上边线;

②构件 P_i 不能排入最低水平线上,在相同工期等级中,选择宽度最接近的构件排入,提高对应的水平线;

③在相同工期等级中,也没有构件能排入,扩大工期等级,选择宽度最接近的构件排入,提高对应的水平线;

④扩大工期等级后,仍没有构件能排入,直接提高水平线至相邻最低水平线。

5)判断最低水平线高度是否发生变化。若变化,则更新限制高度,剔除不满足条件的构件,即 $\min(l_i, w_i) > \lim H$ 的构件;若不变化,则判断构件集是否为空。

6)判断构件集是否为空,限制高度的剔除和构件的排入都会使构件集里的构件减少。若构件集为空,则表示已完成排布;若构件集不为空,则重复步骤 4)、5)。

7)最终输出最优排布方案,构件种类、数量及

位置。

笔者用 C++ 语言实现了图 5 的算法,通过 Revit 的二次开发接口读取 PC 构件模型数据,再将数据输入到算法中,最终形成 dwg 格式文件。

3 优化后的定位

3.1 优化后的定位流程

优化后的定位流程:创建/选择 PC 构件模型→编写生产计划→获取生产信息→自动排布构件→输出定位图纸。

创建/选择 PC 构件模型:根据项目需要,在企业 BIM 构件库中选择符合要求的构件,若没有,则按构件 BIM 模型参数化建模标准创建新的模型,并放入构件库中。

编写生产计划:根据项目进度和生产能力,安排拟生产构件的生产计划。

获取生产信息:在构件的信息模型中,获取构件混凝土的外轮廓、最大矩形投影、混凝土等级等信息。

自动排布构件:将所有拟生产构件信息导入自动排布程序,对构件进行排布。

输出定位图纸:将所有构件排布结束后,输出定位的 CAD 图纸,可直接用于指导构件定位,也可导入划线设备中进行定位。

3.2 数值分析

为比较改进的最低水平线算法的排布方法与人工排布方法的优劣,选取某工厂某一批次的 PC 构件,同时采用计算机排布和人工排布构件,比较两种方法的区别。

该工厂固定台模尺寸为 $6\text{ m} \times 10\text{ m}$,拟生产的 PC 构件相关信息见表 5。

表 5 某项目拟生产叠合板信息表

Table 5 Planning production information of the project superimposed slabs

| 编号 | 类型 | 最小矩形轮廓线 | 混凝土底板轮廓线 | 混凝土等级 | 数量 | 备注 |
|----|-----|-----------------|-----------------|-------|----|--------|
| 1 | 叠合梁 | 2 300 mm×700 mm | 1 500 mm×200 mm | C40 | 4 | |
| 2 | 叠合梁 | 2 300 mm×800 mm | 1 500 mm×300 mm | C40 | 8 | 一半构件在 |
| 3 | 叠合梁 | 4 000 mm×700 mm | 3 200 mm×200 mm | C40 | 4 | 一个月之内 |
| 4 | 叠合梁 | 4 000 mm×800 mm | 3 200 mm×300 mm | C40 | 8 | 完成,另一半 |
| 5 | 叠合梁 | 4 800 mm×700 mm | 4 000 mm×200 mm | C40 | 4 | 在两个月内 |
| 6 | 叠合梁 | 4 800 mm×800 mm | 4 000 mm×300 mm | C40 | 8 | 完成。 |

1)计算机排布 采用改进的最低水平线算法排布构件,数据输入见图 6,算法运行见图 7,排布结果

见图 8。

2)人工排布 人工排布主要依据技术人员的经

```

输入.txt
6000-10000
dieheliang1-2300-700-1-2
dieheliang1-2300-700-10-2
dieheliang2-2300-800-1-4
dieheliang2-2300-800-10-4
dieheliang3-4000-700-1-2
dieheliang3-4000-700-10-2
dieheliang4-4000-800-1-4
dieheliang4-4000-800-10-4
dieheliang5-4800-700-1-2
dieheliang5-4800-700-10-2
dieheliang6-4800-800-1-4
dieheliang6-4800-800-10-4

```

图 6 数据输入图

Fig. 6 Data input

调用算法

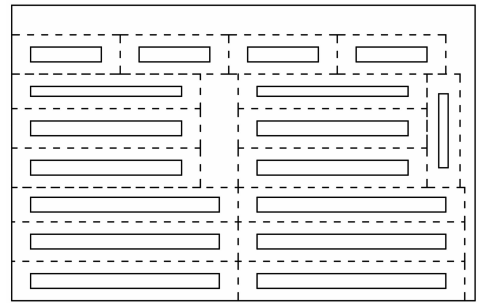
```

Workspace data initialize Over
Rectangle Date initialize Over
Rectangle was sorted by value over
One rectangle is laid
... ..
One rectangle is laid
One workspace is full
One rectangle is laid
... ..
One rectangle is laid
Lay out with minimum horizontal line algorithm over
Process returned 0 (0x0) execution time :0.024s
Press any key to continue.

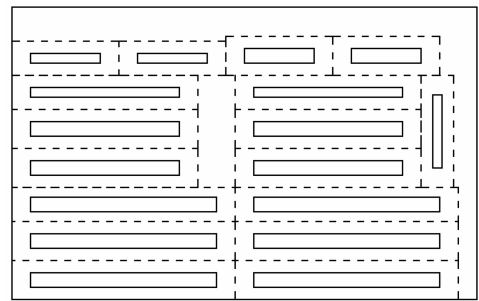
```

图 7 算法运行图

Fig. 7 Algorithm operation



(a) 第1块



(b) 第2块

图 9 人工排布图

Fig. 9 Manual Arrangement

3)结果比较 计算机排布:共 36 个构件,需要两块固定台模。第 1 块台模有 19 个构件,台模面积利用率为 90.7%;第 2 块台模有 17 个构件,台模面积利用率为 79.5%。

人工排布:共 36 个构件,共需要 3 块固定台模。第 1 块台模有 17 个构件,台模面积利用率为 82.4%;第 2 块台模也有 17 个构件,台模面积利用率为 82.4%;第 3 块台模有 2 个构件,台模面积利用率为 5.4%。

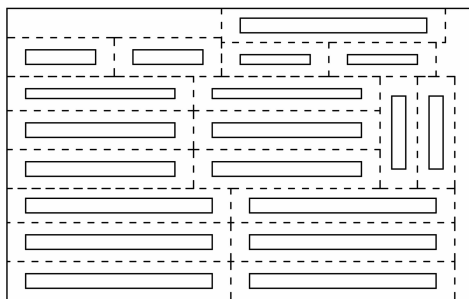
比较两种排布方法,整体来看计算机排布所用的台模总数降低了 33.33%,排布更紧密。再比较两者的第 1 台模面积利用率,计算机排布比人工排布高了 8.3%,具体结果比较见表 6。

表 6 人工与计算机排布结果比较

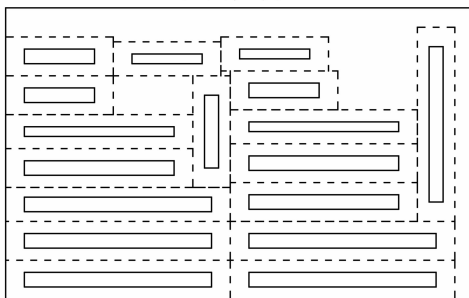
Table 6 Comparison of manual and computer arrangement results

| 排布方式 | 台模总数 | 第 1 块台模面积利用率/% | 排布时间 |
|------|------|----------------|--------|
| 人工 | 3 | 82.4 | >0.5 h |
| 计算机 | 2 | 90.7 | <0.1 s |

从以上分析可知,计算机排布极大地提高了工作效率和台模的利用率。随着构件的种类、个数和生产批次的增多,人工排布的时间会成几何性增长,平台面积利用率会下降。当构件达到一定数量时,人工排布无法考虑所有构件。与人工排布相比,计算机排布具有以下优点:



(a) 第1块



(b) 第2块

图 8 计算机排布图

Fig. 8 Computer arrangement

注:虚线表示最大矩形投影,实线表示混凝土的外轮廓。

验,经验越丰富,排布结果越好。3 名高级木工^[16]分别排布构件,选择平台利用率最高、排布时间较少的排布结果,见图 9。

- 1)排布耗时少,平台利用率高;
- 2)能适用于工程中构件数量大、多批次的生产情况;
- 3)操作简便,提高了构件工业化生产的自动化程度;
- 4)从源头上降低了构件重复生产、漏生产等错误率。

4 结论

对 BIM 技术在 PC 构件工业化生产中的运用进行了探索,制定了可行的参数化建模标准,优化了生产环节中的定位。通过对 BIM 模型的运用,结合最低水平线算法,对定位做了自动化改进。与人工排布相比,计算机排布更节省时间、更合理,尤其是在多批次构件生产的情况下。优化后的定位节省了人工、工期,提高了工作平台的利用率,也提高了装配式构件工业化生产的自动化程度。当该技术也是 BIM 技术应用于 PC 构件工业化生产的一种探索,为后续 BIM 技术的应用提供新思路。

参考文献:

- [1] SUZUKI N, AKIBA J, WHORLOW J R. A study on effective construction management utilising Civil Information Modeling/Management (CIM) [C] // 2014 International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, ASCE, June 23-25, 2014 Orlando, Florida, USA, 2014: 1489-1496.
- [2] KURDZIEL J M, NELSON C R, NYSTROM J A, et al. Intelligent construction systems; the convergence of computing, communication, and construction [C] // Joint Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning and Management, 2000, July 30-August 2, 2000, Minneapolis, Minnesota, USA, 2000.
- [3] MOGHADAM M, ALWISY A, AL-HUSSEIN M. Integrated BIM/Lean base production line schedule model for modular construction manufacturing [C] // Construction Research Congress 2012, May 21-23, 2012, West Lafayette, Indiana, UAS, 2012.
- [4] 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: 241-254.
- [5] 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. QI B K, LI C F. Research on the whole lifecycle of prefabricated construction management based on BIM technology [J]. Construction Technology, 2014, 43(15): 25-29. (in Chinese)
- [6] 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): 73-78, 89. YU L F, ZHANG J C. Computer integrated construction system based on BIM [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2015, 32(4): 73-78, 89. (in Chinese)
- [7] 曹江红, 纪凡荣, 解本政, 等. 基于 BIM 的装配式建筑质量管理[J]. 土木工程与管理学报, 2017, 34(3): 108-113. CAO J H, JI F R, XIE B Z, et al. BIM-based prefabricated construction quality management [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2017, 34(3): 108-113. (in Chinese)
- [8] 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. LIU P, LI Q M. Research on application of BIM in information flow of prefabricated building supply chain [J]. Construction Technology, 2017, 46(12): 130-133. (in Chinese)
- [9] 胡珉, 蒋中行. 预制装配式建筑的 BIM 设计标准研究[J]. 建筑技术, 2016, 47(8): 678-682. HU M, JIANG Z H. BIM design standard of prefabricated concrete building research [J]. Architecture Technology, 2016, 47(8): 678-682. (in Chinese)
- [10] 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. TIAN D, LI X W, MA T. Research on design and analysis of prefabricated concrete building component system based on BIM [J]. Building Structure, 2016, 46(17): 58-62. (in Chinese)
- [11] 靳鸣, 方长建, 李春蝶. BIM 技术在装配式建筑深化设计中的应用研究[J]. 施工技术, 2017, 46(16): 53-57. JIN M, FANG C J, LI C D. Research on the application of BIM in detailed design of prefabricated buildings [J]. Construction Technology, 2017, 46(16): 53-57. (in Chinese)
- [12] 王爱兰, 宋萍萍, 杨震卿, 等. BIM 技术在装配式混凝土结构工程中的应用[J]. 建筑技术, 2015, 46(3): 228-231. WANG A L, SONG P P, YANG Z Q, et al. Application of BIM technique in assembled monolithic concrete structure project [J]. Architecture Technology, 2015, 46(3): 228-231. (in Chinese)
- [13] 李广辉, 邓思华, 李晨光, 等. 装配式建筑结构 BIM 碰撞检查与优化[J]. 建筑技术, 2016, 47(7): 645-647.

- 2012,31(3):239-242. (in Chinese)
- [13] 韩如适,朱国庆,张国维,等. 实体建筑轰燃特性大涡模拟可靠性分析[J]. 消防科学与技术,2013,32(5):499-507.
HAN R S, ZHU G Q, ZHANG G W, et al. Reliability study on characteristics of flashover based on large eddy simulation [J]. Fire Science and Technology, 2013,32(5):499-507. (in Chinese)
- [14] 李镇江,段海娟,赵永峰,等. 窗墙面积比对高层住宅外墙外保温火灾蔓延的影响分析[J]. 防灾减灾工程学报,2014,34(4):479-484.
LI Z J, DUAN H J, ZHAO Y F, et al. Analysis of influence of window-wall ratio on exterior insulation fire spread of highrise residence [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(4):479-484. (in Chinese)
- [15] BISHOP S R, HOLBORN P G, BEARD A N, et al. Nonlinear dynamics of flashover in compartment fires [J]. Fire Safety Journal,1993,21(1):11-45.
- [16] GRAHAM T L, MAKHVILADZE G M, ROBERTS J P. The effects of the thermal inertia of the walls upon flashover development [J]. Fire Safety Journal, 1999, 32(1): 35-60.
- [17] 李乃文,王悦惠. 突变理论视角下突发群体事件演化机理研究[J]. 中国安全科学学报,2015,25(2):159-164.
LI N W, WANG Y H. Study on evolution mechanism of sudden mass incidents from perspective of catastrophe theory [J]. China Safety Science Journal, 2015,25(2):159-164. (in Chinese)
- [18] 翁文国,范维澄. 建筑火灾中轰燃现象的突变分析[J]. 火灾科学,2003,12(2):51-57.
WENG W G, FAN W C. Catastrophe analysis of flashover in building fires [J]. Fire Safety Science, 2003,12(2):51-57. (in Chinese)
- [19] YUEN W W, CHOW W K. The role of thermal radiation on the initiation of flashover in a compartment fire [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2004,47:4265-4276.
- [20] 王金平. 建筑火灾荷载[M]. 北京:化学工业出版社,2016.
WANG J P. Building fire load [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016. (in Chinese)
- (编辑 王秀玲)
-
- (上接第 146 页)
- LI G H, DENG S H, LI C G, et al. BIM conflict inspection and optimization of assembly building structure [J]. Architecture Technology, 2016, 47(7):645-647. (in Chinese)
- [14] HUANG W Q, WANG G Q. A quasi-mechanical method for solving the rectangle covering problem-An approach to tackling NP hard problems [J]. CVGIP: Graphical Models and Image Processing, 1994, 56(3): 267-271.
- [15] 王竹婷,刘林,程浩,等. 改进的最低水平线搜索算法求解矩形排样问题[J]. 工程设计学报,2009,16(2):98-102.
WANG Z T, LIU L, CHENG H, et al. Study on solving rectangular packing problem by utilizing improved lowest horizontal search algorithm [J]. Journal of Engineering Design, 2009, 16(2): 98-102. (in Chinese)
- [16] 房屋修建工人技术等级标准:CJJ 26—89 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,1989:4-5.
Technical Grade Standard for Building Workers; CJJ 26-89 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1989:4-5. (in Chinese)
- (编辑 胡英奎)