

# 基于 BIM 和规则推理的施工进度计划自动编排

郭红领， 叶啸天， 任琦鹏， 罗柱邦

（清华大学 建设管理系，北京 100084）

**摘 要：**进度计划是施工管理、施工过程模拟的重要依据，自动生成进度计划能够提高编制准确性和效率。但是，现有相关研究大多采用基于案例或模板的方式，无法实现项目的精确匹配，且仅考虑了空间上的约束关系，未梳理详细的知识规则。该研究面向建筑工程中常见的装配整体式项目，分解适用于进度计划自动生成的施工基本活动，建立编码体系，分析各类构件或施工活动之间的约束规则，推理各施工活动间的逻辑顺序，并基于工业基础类(IFC)格式的建筑信息模型(BIM)提取工程量来计算施工活动持续时间，最终实现构件级进度计划的自动生成。该研究结果可为施工过程模拟及施工自动化提供施工进度，支持智能施工机械的有效运行。

**关键词：**施工进度计划；自动生成；建筑信息模型(BIM)；规则推理；约束关系

中图分类号：TU72

文献标志码：A

DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2022.22.001

## Automatic generation of construction schedules based on BIM and rule reasoning

GUO Hongling, YE Xiaotian, REN Qipeng, LUO Zhubang

(Department of Construction Management,  
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Construction schedules are key to effective construction management and construction process simulations. Automatically generated schedules can improve scheduling accuracy and efficiency. However, most relevant research has focused on case-based or model-based approaches which cannot accurately match the conditions in other projects and only consider spatial constraints without detailed knowledge rules. This research focuses on the most common hybrid concrete structures. This article describes the coding system and the decomposition of the construction activities suitable for automatic scheduling. The constraint rules between various components or construction activities are then analyzed to infer the logical sequences between them. The building quantities extracted from the building information modeling (BIM) based on the industry foundation classes (IFC) are used to calculate the duration of each

construction activity to automatically generate component-level schedules. This then provides the time sequence for construction simulation and automation for intelligent construction equipment.

**Key words:** construction schedule; automatic generation; building information modeling (BIM); rule reasoning; constraint relationships

施工进度是项目管理的三大目标之一，进度计划的合理编制是工程项目成本和质量目标实现的重要基础<sup>[1]</sup>。工程项目施工进度计划编制不合理，会使其对工程指导作用降低，导致工期延误、施工成本增高，影响项目质量<sup>[2-3]</sup>，而详细合理的施工计划对于工程的执行、追踪以及阶段报告都具有重要意义<sup>[4]</sup>。同时，施工进度计划是施工过程模拟的基础<sup>[5]</sup>，施工人员依据进度计划进行施工过程模拟的展示和推进，从而有效发现并解决问题。

近年来，在施工管理相关研究中，进度计划是出现频率最高的词汇<sup>[6]</sup>。传统的进度计划主要通过人工计算和编排，工作量较大，且过于依赖施工技术人员经验，准确性不高、效率较低<sup>[7]</sup>。针对这些问题，许多学者借助计算机等辅助工具，利用智能化的方式自动生成施工进度计划<sup>[8]</sup>。任桂娜<sup>[1]</sup>提出基于建筑信息模型（building information modeling, BIM）的进度计划自动生成模型的构建思路，并对功能模块进行了设计，但没有对推理规则进行深入分析。胡文发等<sup>[3]</sup>通过建筑计算机辅助设计（computer-aided design, CAD）系统接口获取建筑项目相关数据，分析施工活动持续时间及逻辑

收稿日期：2021-08-15

基金项目：国家自然科学基金项目(51578318)；

清华大学国强研究院项目(2019GQI0003)

作者简介：郭红领(1978—)，男，副教授。

E-mail: hlguo@tsinghua.edu.cn

关系,提出了一种基于知识系统的施工进度编排方法,但仅考虑了类与类之间的逻辑关系。谢琳琳等<sup>[2]</sup>通过构建专家知识库存储规则,建立了进度计划自动编排模型,但只从概念上分析了工序逻辑,没有梳理出规则。Tauscher 等<sup>[9]</sup>基于各施工活动先决条件建立进度计划生成软件框架,但对于建筑元素分类不够细致,且对规则描述不够详细。Weldu 等<sup>[10]</sup>对 BIM 模型中的建筑元素之间的空间拓扑关系进行空间推理来生成施工次序,但仅考虑了空间关系,对于构件的工艺和组织关系考虑较少。Yue 等<sup>[11]</sup>针对预制建筑吊装过程,以施工消耗时间和劳动力成本作为约束条件,采用遗传算法从所有满足初始约束的施工顺序中找出最优的约束,但该研究仅针对构件吊装过程且初始约束较为简单。Kim 等<sup>[12]</sup>提出了进度计划的生成框架,但是侧重于数据的提取和施工活动的转化,对于施工活动的顺序生成只考虑了物理层面的约束。张天琪<sup>[13]</sup>研究了装配式建筑的进度计划编制,利用遗传算法生成预制构件安装序列,形成施工进度计划,但仅考虑了层间预制和现浇部分的关系,并没有考虑层内的预制和现浇构件同时出现该如何处理。Faghihi 等<sup>[14]</sup>从 BIM 模型中提取信息,基于遗传算法实现了建筑结构部分的施工顺序生成与优化,但仅考虑了构件之间的物理约束,需要搜寻很多无用的可能性,消耗大量的计算时间,而最终产生的施工顺序并不能够贴合施工实际。郭爱婷<sup>[15]</sup>结合人工智能思想提出了进度计划自动编排的思路流程和应用假设,并建立进度计划框架,但该研究主要基于案例和模板,然后对生成的计划进行修正,无法解决工程项目唯一性的问题。此外,4D BIM 技术通过给 BIM 模型元素赋予时间序列属性进行可视化模拟,在施工进度管理中得到了较多应用,但模型中的时间属性通常基于关键路径法等进行确定,且需要人工输入施工活动开始和结束时间<sup>[16]</sup>。Park 等<sup>[17]</sup>建立了一个基于网络的框架,从施工日程报告中自动获取信息,更新 4D BIM 模型并进行进度可视化,但仍需从传统施工进度计划及工程日志中提取信息。García de Soto 等<sup>[18]</sup>通过从 BIM 模型中提取信息,利用禁忌搜索算法改善了 4D 模拟中的施工进度自动生成问题,但仅提取了模型的空间约束信息,且没有对构件元素进行分类。

综上,现有的进度计划自动生成方法可分为以下几类:基于案例推理、基于知识的方法、基于模板的方法、遗传算法、专家系统和神经网络等<sup>[19]</sup>。

其中:基于案例或模板推理的方式较为常见,通常利用遗传算法或神经网络进行优化,但此类方法不能实现案例的精确匹配,且无法较好地解决工程项目唯一性的问题;而基于知识或规则推理的研究相对较少,且缺少相关模型或系统的具体应用方法以及施工活动之间逻辑关系的详细推理规则,难以用于实践。此外,现有进度计划自动编排和 4D BIM 施工时间序列生成的研究主要从三维模型中提取信息,仅考虑了结构和空间上的关系,对于组织和工艺等约束关系考虑较少,且对于施工活动之间的逻辑约束关系,没有进一步细化形成系统的规则<sup>[20]</sup>。因此,进度计划的生成结果不够精细,通常只是较大尺度下的进度计划,不足以支撑施工过程模拟以及未来施工自动化的实现。

针对现有进度计划自动生成研究与实践中的问题,本文将面向常见的预制与现浇并存的建筑工程项目,结合 BIM 和规则推理构建施工进度计划自动生成方法。一方面,分解适用于进度计划生成的施工基本活动,建立属性编码体系,分析各类构件或施工活动之间的约束规则,从而推理各施工活动间的逻辑顺序;另一方面,基于工业基础类(industry foundation classes, IFC)格式的 BIM 模型提取工程量来计算施工活动持续时间,最终实现进度计划的自动编排。

## 1 施工基本活动分解

建设工程项目进度计划的编制本质上是对项目施工活动的分解与组织。因此,施工活动的分解是编制施工进度计划的前提和基础,而施工活动的分解需要依据一定的建设项目信息分类标准。目前,国外建设项目信息分类体系主要有 Unifomat II、Master Format TM、OmniClass 等,国内建筑项目信息分类主要包含在工程量清单、工程定额中<sup>[21]</sup>。但现有的分类体系均是为不同的应用目的而建立的,且分类划分不够细致,不足以支持详细进度计划生成。

为此,本文根据施工进度计划编排的实际需求,参考现有信息分类体系,提出了适用于施工进度计划自动生成的分解规则。具体如下:

1) 按工程施工所需专业分类。专业分类内容包括:地基基础、主体结构、建筑安装工程、装饰装修工程、室外工程等。由于不同专业的施工进度计划所需资源以及进度计划的细致程度不同,因此项目分解需按专业进行。

2) 按施工层、施工段分类。在实际工程中,为提高施工效率和质量,或由于施工资源受限,通常需要安排分层分段流水施工。

3) 按施工方法分类。由于不同的施工方案采用的施工工艺、方法不同,因此需按施工方法进行分类。本文主要针对装配整体式混凝土结构,需考虑建设项目中的预制和现浇两部分的施工工艺不同。

4) 主体结构分解精度至构件级别,便于施工进度细化,和进度计划精度的调整。例如,通过对同类构件的整合,可以在满足关键节点控制要求下,简化进度计划、便于施工管理;与之相对应,

将施工活动分解至更高精度,有利于分析不同构件之间的逻辑关系,以便于精益施工。对于建筑安装工程和装饰装修工程,由于占用工期以及资源比例都较小,可以按照房间为单元进行分类,以避免进度计划冗杂而降低效率。

基于上述分解规则,形成了图 1 所示的常见工程项目的分解结构。在项目分解之后,可以根据进度计划本身的精度需求和施工方面的共性,对构件进行整合。例如,同一施工层(段)、同一尺寸进行归类;相同施工层(段)中,同类但不同位置的构件进行整合归类,从而实现进度计划精细程度的调整,以便于施工关键节点控制和施工过程管理。

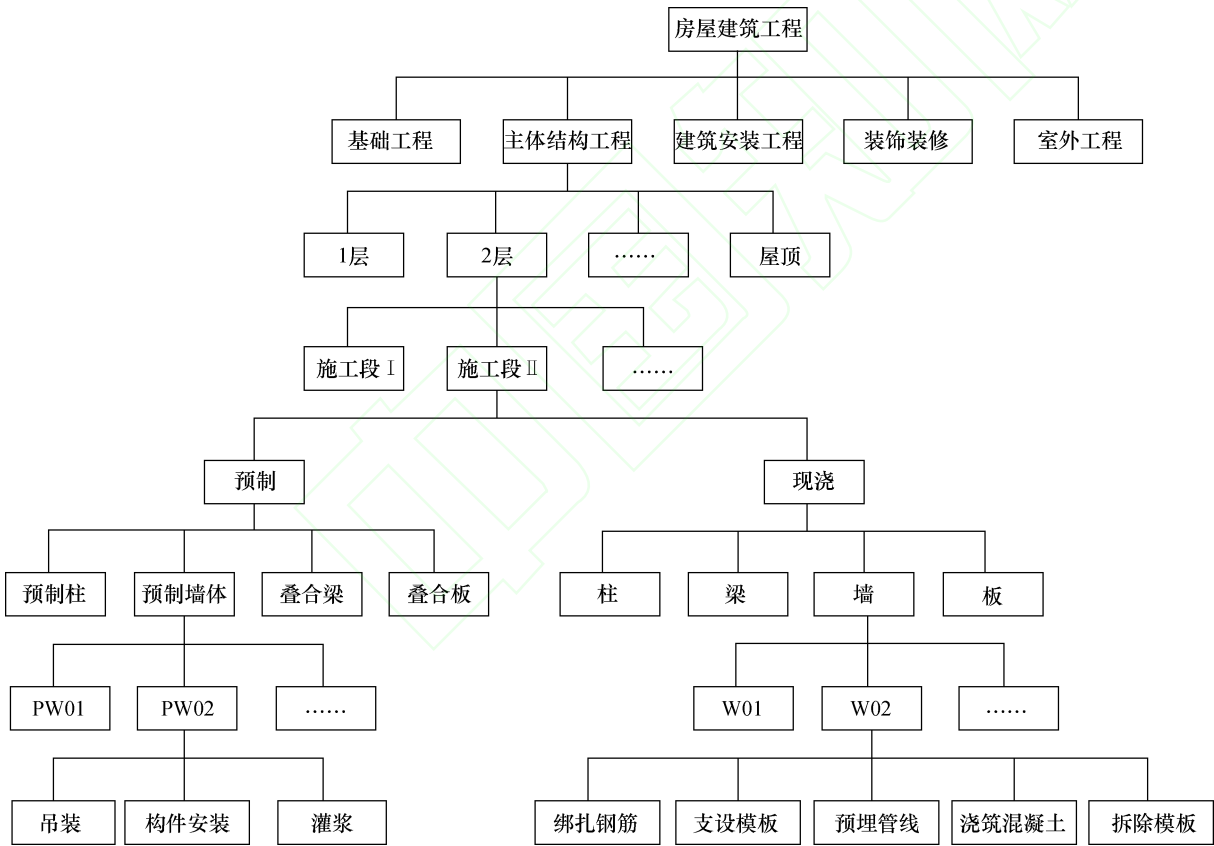


图 1 常见工程项目的工作分解结构

2 施工基本活动逻辑关系确定

主体结构施工是整个施工过程的关键,在整个施工周期中占用工期和资源比例最大,通常也是其他专业施工的前提和基础;与之相比,建筑设备安装及装饰装修工程,具有楼层间独立性,可以在主体结构完工后依据流水逐层逐间施工,逻辑较为清晰简洁。因此,本文选取主体结构部分作为研究对象,描述施工基本活动间的逻辑约束关系,以及施工进度计划的自动生成方法。

2.1 编码体系建立

在施工活动分解后,需要将其转化为计算机可以识别的语言,从而建立施工基本活动之间的逻辑关系。本文采用属性编码方式,基于 BIM 模型本身提供的信息,将其进一步完善,并使其满足本文进度计划编制的需求。例如,施工段流水、预制和现浇类型、构件类别、同类构件所在位置等,均是进度计划编制所需考虑的信息。

传统的进度计划编制方案需要专业的进度计划管理人员编制和解读,且不能够建立构件或施工活

动与时间的一一对应关系,对于某一确定构件,无法从施工进度计划中直接获取其施工开始及持续时间。为此,本文基于构件属性建立编码体系,即每一项编码均代表构件的某一类属性,构件的所有属性编码共同组成构件的编码组合名称,熟悉此编码的施工人员可以通过解读编码直接获取构件的全部信息。通过从建设项目 IFC 文件中提取属性信息,可以将构件全局 ID 与构件编码组合名称一一对应,从而实现构件属性的完善和对应。

基于以上需求,建立表 1 所示的进度计划属性编码体系。

表 1 进度计划属性编码体系

编码符号	符号含义
Global ID	IFC 文件中构件的唯一识别代号
$P_0$	编码组合名称
$P_1$	专业类别
$P_2$	施工层
$P_3$	施工段
$P_4$	构件施工类型
$P_5$	构件类别
$P_6$	构件位置编号
$P_7$	构件体积
$P_8$	施工开始时间
$P_9$	施工持续时间
$P_{10}$	其他可拓展属性

表 1 中,  $P_0$  代表编码组合名称,由  $P_1$  到  $P_{10}$  编码依次组合而成,表示形式为  $P_1-P_2-P_3-P_4-P_5-P_6-P_7-P_8-P_9-P_{10}$ 。例如, JG-03-II-0-wall-wq001-T3.5T-S20210408-16:30S-L0.5hL。

$P_1$ : 代表所属专业类别,采用两位大写拼音首字母表示,即 JC、JG、JZ、ZS、SW。例如, JG 表示结构工程、ZS 表示装饰装修工程。

$P_2$ : 代表所属施工层,常见民用建筑多以自然层为施工层,以两位数字形式表示,其范围为 01 至 99。例如, 03 代表第 3 施工层。

$P_3$ : 代表所属施工段,以罗马字母表示,即 I、II、III、IV、V。例如, III 表示第 3 个施工段。

$P_4$ : 代表构件施工类型,即为预制构件或现浇构件,分别以数字 1 或 0 表示,1 代表预制构件,0 代表现浇构件。

$P_5$ : 代表构件类别名称,以 4 位及以内小写字母表示,如 wall 表示墙体、colu(column) 表示柱、beam 表示梁、slab 表示楼板。

$P_6$ : 代表基于构件坐标的位置编号,对于墙、

梁、板、柱,根据位置分别进行分类。其中:墙体分为外墙和内墙,分别以两位小写字母 wq 和 nq 表示;梁分为主梁和次梁,分别以两位小写字母 zl 和 cl 表示;柱分为角柱、边柱和中柱,分别以两位小写字母 jz、bz 和 zz 表示;板不进行进一步分类,以一位小写字母 b 表示。各分类下构件按照距离材料堆放区由远及近进行排序编号,以两位或一位小写字母+三位数字编号表示。例如, wq001 表示离材料堆放区最远的一块外墙, zl002 表示离材料堆放区最远的第 2 根主梁, jz004 表示距材料堆放区最远的第 4 根角柱。

$P_7$ : 代表构件体积,以“T+数字+T”形式表示,单位为  $m^3$ 。例如, T3.5T 表示该构件体积为  $3.5 m^3$ 。

$P_8$ : 代表施工开始时间,以“S+数字+S”形式表示。例如, S20210408-16:30S 表示 2021 年 4 月 8 日 16 时 40 分开始施工。

$P_9$ : 代表施工持续时间,以小时(h)或天(d)计数,根据定额计算得出,以“L+数字+L”形式表示。例如, L1dL 表示该项施工活动持续一天; L4hL 表示该项施工活动持续 4 h。

$P_{10}$ : 代表其他可拓展属性。

2.2 基于逻辑约束关系的推理规则构建

施工进度计划的编制需要考虑施工活动或者构件之间的逻辑约束关系。本文构建逻辑约束关系如图 2 所示,包括物理约束关系、工艺约束关系和组织约束关系。3 种逻辑约束关系之间存在互相参照关系,即物理约束关系是工序和组织约束关系的前提与基础,组织约束关系需在同时满足物理和工艺约束关系的前提下实现。例如,梁的施工需在与其搭接的柱完工后进行,组织约束关系中流水施工的前提是先保证物理和工艺约束关系得到满足<sup>[22]</sup>。

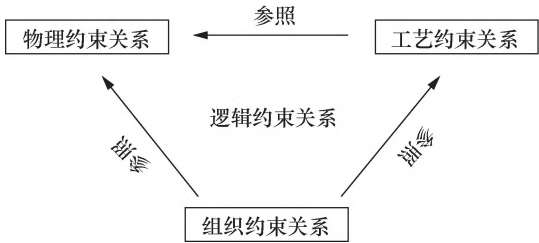


图 2 逻辑约束关系

2.2.1 物理约束关系

物理约束关系主要指工程项目的分部分项工程或建筑构件等实体之间,由几何空间位置或结构受力需求而产生的约束关系。常见的物理约束关系有



以下几种：结构关系、植入关系、覆盖关系和附着关系<sup>[3]</sup>。例如，梁构件必须在与其对应的柱构件施工完成后，才可以继续施工(结构关系)；门窗必须在墙体施工完成后安装(植入关系)；大面积开挖基坑需要填土覆盖(覆盖关系)；装饰装修工程需在结构及安装工程完成后开始(附着关系)。

基于物理约束关系，可以产生如下施工规则：

1) 专业之间的施工顺序规则：基础工程、上部主体结构(分为装配和现浇)、安装工程(包括砌体、墙、门和窗)、装饰装修、室外工程。

2) 不同受力类型构件的施工顺序规则：先施工竖向构件，以受压为主，主要包括墙和柱等；然后施工水平构件，以受弯为主，主要包括梁和板等。

2.2.2 工艺约束关系

工艺约束关系主要是指根据工程施工技术、施工方法和施工规范要求，为完成某一施工活动具体所需的工艺流程及其顺序关系。例如，钢筋混凝土墙体的施工工艺顺序一般为：绑扎钢筋—支设模板—浇筑混凝土—养护拆模等。

基于工艺约束关系，可以产生如下施工规则：

1) 对于相同施工层、施工段和类型构件，先施工预制构件，后施工现浇构件。部分现浇构件需要预制构件和模板共同组成封闭的空间以用于混凝土浇筑。例如，同层同施工段中编号为 JG-03-II-1-wall-wq003 的预制外墙，施工顺序要高于编号为 JG-03-II-0-wall-wq003 的现浇外墙。

2) 现浇构件施工需考虑模板搭设、钢筋绑扎、混凝土浇筑的工艺流程。对于竖向构件，先绑扎钢

筋，再支模，再浇筑混凝土，最后拆模；对于水平构件，先支模，再绑扎钢筋，再浇筑混凝土，最后拆模。例如，对于现浇框架结构，可采用的施工顺序为：测量放线—柱绑扎钢筋—柱支模—柱浇筑混凝土—梁板支模—梁板绑扎钢筋—浇筑混凝土—养护拆模。

3) 预制构件的施工顺序需考虑吊装、安装等工艺过程。以预制墙体为例，常见的施工流程为：测量放线—吊装—安装—灌浆。

2.2.3 组织约束关系

组织约束关系主要是指在满足物理约束和工艺约束关系下，为了提高施工活动组织效率、施工质量，或在项目资源(如劳动力、施工机械等)受限条件下，对施工活动顺序的合理调整与安排。例如，流水施工中施工层段之间的顺序安排，多个柱同时浇筑或一块板分流水段浇筑等。

基于组织约束关系，可以产生如下施工规则：

1) 施工过程在施工段上进行流动，施工段采用人工方式划分。

2) 预制构件之间的施工组织顺序规则。常见的预制构件包括：预制柱、预制墙体、叠合梁、叠合板，以下是各类构件的组织规则。

预制柱：先施工角柱，然后边柱，最后中柱，各类型柱依据距离材料堆放地由远到近依次施工。例如，相同施工层、施工段内代号为 zz007、zz015、bz012、bz023、jz002、jz004 的各类预制柱(见图 3)，其施工顺序为 jz002—jz004—bz012—bz023—zz007—zz015。

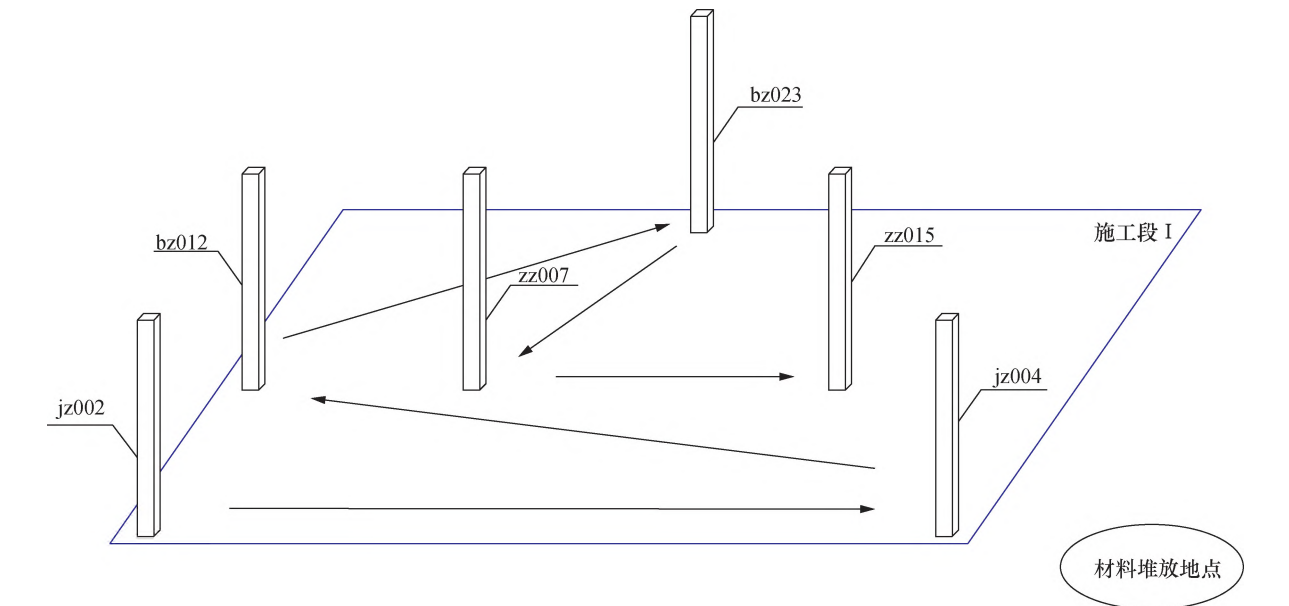


图 3 预制柱施工顺序示意图

预制墙体：先外墙后内墙，各类墙的吊装顺序依据距离材料堆放地由远到近依次施工。例如，相同施工层、施工段内代号为 nq012、nq023、wq007、wq015 的各类墙体，其施工顺序为 wq007—wq015—nq012—nq023。

叠合梁：先主梁后次梁，先低后高，各类型梁依据距离材料堆放地点由远到近依次施工。例如，相同施工层、施工段内代号为 cl002、cl013、zl013、zl021 的各类梁，其施工顺序为 zl013—zl021—cl002—cl013。

叠合板：根据施工需求，采取依次铺开的方式逐个吊装施工，避免间隔吊装。

3) 现浇构件之间的施工组织顺序规则。对于钢筋绑扎，同一施工层段内竖向构件钢筋绑扎顺序与预制柱和预制墙体的施工顺序相同，水平构件的钢筋默认依次绑扎；对于混凝土浇筑，同一施工层段内，竖向构件默认一起浇筑，水平构件默认一起浇筑。

2.2.4 约束关系的建立

可以通过解析 IFC 文件获取构件的类别属性、空间坐标位置等信息，进而建立构件之间的物理约束关系；工序约束关系的建立需要借助已有的工艺数据库，不同类型构件的施工工艺所包含的工序不尽相同，例如现浇工艺中墙体是先绑扎钢筋后支模板，而梁板构件则是先支模板后绑扎钢筋；组织约束关系的建立可以通过给构件增加属性来定义，以合理安排施工顺序或者不同施工作业间的衔接。

3 施工基本活动持续时间测算

根据施工基本活动之间的逻辑约束关系，可以推理出各施工活动的先后顺序或搭接关系，此外还需计算每一项施工基本活动所持续的时间，从而形成完整的施工进度计划。传统的施工活动工期，通常由人工基于定额计算或者过往工程经验估算得出，而本文在传统计算方法的基础上，通过构件自动匹配定额等数据来自动计算施工活动的持续时间。构件的工程量通过 IFC 解析的文件获得，定额从定额数据库获得，并基于定额库转化为更为精确的每人每工时工作量。本文按每工日 8 工时进行计算，且暂不考虑工人施工熟练程度，即工人类型均假设为普通工人。对于 1 位普通工人，表 2 展示了定额中部分现浇构件数据，从而支持构件施工(基础活动)持续时间自动计算<sup>[22]</sup>。

表 2 现浇构件定额及工日工时转化

类型	工程量/ m <sup>3</sup>	工日数/d	工时数/h	单个工人单位
				工时工作量 S/(m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup> )
现浇矩形梁	10	1.493	11.944	0.837
现浇板	10	1.651	13.208	0.757
现浇墙	10	2.252	18.016	0.555
现浇柱	10	1.651	13.208	0.757

构件施工持续时间可以利用式(1)计算，

$$t = \frac{Q}{SR} \tag{1}$$

其中： $t$  为构件施工持续时间，精确至 min； $Q$  为构件的工程量，可根据 IFC 文件解析获得； $S$  为施工量定额，即每人或设备每工时可完成的工程量； $R$  为投入的资源量，即人或设备数量，可根据施工现场情况进行设置输入。

对于新工艺、新方法，在没有定额的情况下，通常采用经验估计法来估算获得构件施工持续时间，

$$t = \frac{t_a + 4t_m + t_b}{6} \tag{2}$$

其中： $t_a$  为乐观情况下所用时间； $t_b$  为悲观情况下所用时间； $t_m$  为最可能时间。

在计算出每一项施工基本活动的持续时间后，将其作为构件的属性之一，添加至构件属性中，根据本文编码规则，即  $P_9$  的值。由此，可以生成工程项目的施工进度计划，同时每个构件会完善其所有基本属性以及编码组合名称，这样既可以通过进度计划读取每日的进度安排，也可以通过编码组合名称获取每一个构件的施工顺序以及时间等属性。例如，编码组合名称为 JG-03-II-0-wall-wq001-T3.5T-S20210408-16:40S-L1.5hL，代表含义为主体结构中第 3 层第 2 个施工段中的某一块现浇外墙，其距离材料堆放区域最远，体积为 3.5 m<sup>3</sup>，施工开始时间为 2021 年 4 月 8 日 16 时 40 分，施工持续时间为 1.5 h。

综上，本文进度计划自动生成的原理如图 4 所示。首先根据 IFC 文件解析和用户输入信息对施工活动进行分解，并基于空间拓扑信息获得构件之间的物理约束关系，然后对于每个构件通过工艺数据库匹配相应的工序序列，结合施工流水等组织约束关系得到各项施工活动间的顺序关系；构件的工程量可以从 IFC 文件中的构件属性获取，根据定额数

据和现场资源投入量计算各项施工活动作业持续时间,进而生成施工进度计划。

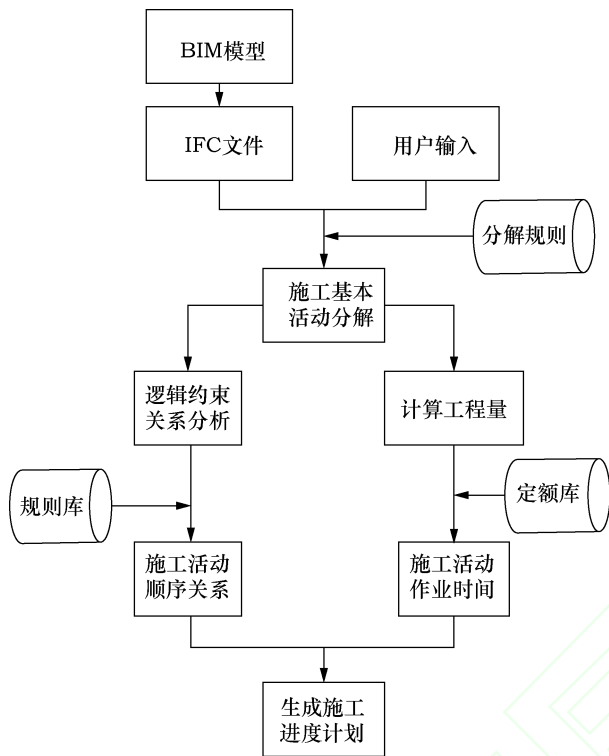


图 4 进度计划自动生成原理

4 案例分析

本文以某建筑工程为例分析上述施工进度计划自动编排方法的有效性。该工程为装配整体式框架剪力墙结构,建筑面积约 1000 m<sup>2</sup>,地上共 3 层。为了充分展示不同类型以及同类型构件之间的施工逻辑顺序,建立其 BIM 模型,如图 5 所示,包含预制墙、预制柱、叠合梁、叠合板等预制构件,以及现浇墙体、现浇柱、现浇梁板等现浇构件。

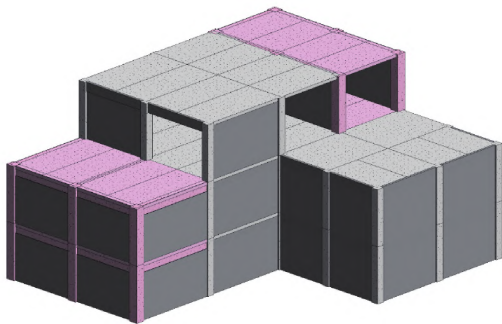


图 5 案例的 BIM 模型

首先,通过 IFC 格式的 BIM 模型文件,提取构件信息,对构件进行分解、分类,根据本文编码规

则建立构件属性列表。如图 6 所示,选中构件的 Global ID 为“2fSySfkOfF18TrEPsj8vLL”,构件类型为现浇外墙,体积为 4.95 m<sup>3</sup>,位于第 3 施工层、第 1 施工段,是该施工层段中距离材料堆放区最远的外墙。图 6b 中施工开始时间  $P_8$ 、持续时间  $P_9$  均由算法自动计算所得,编码组合名称  $P_0$  在所有属性确定后,由属性值组合而成。

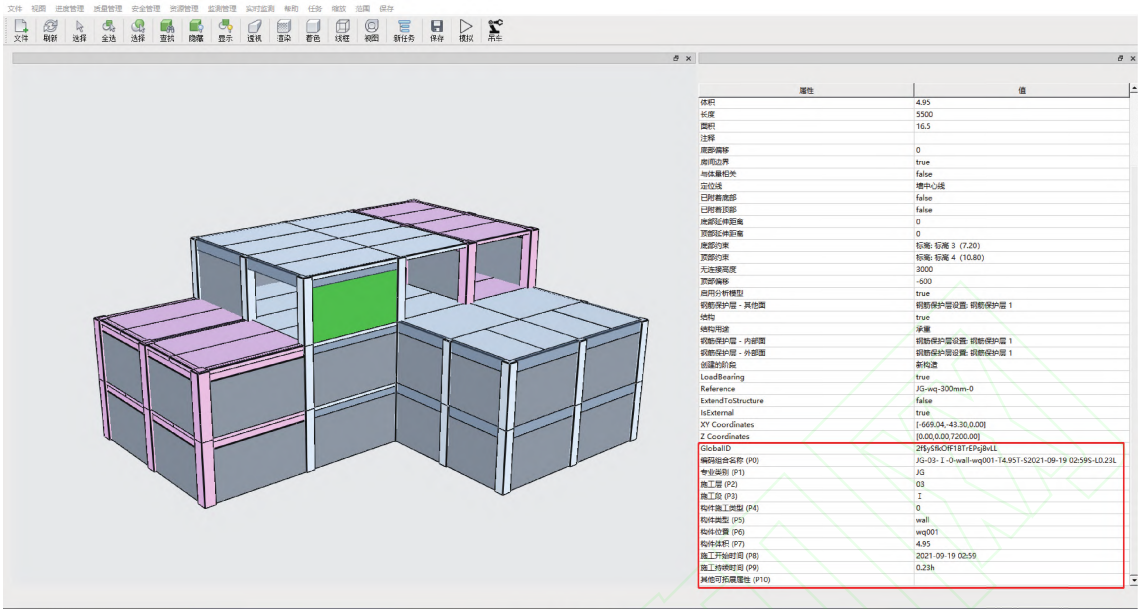
然后,生成施工流程,如图 7 所示。由于篇幅限制,仅展示了每个类型构件之间的施工顺序。例如,图 7 展示了各层施工流程,包括预制柱、现浇柱、外墙和内墙。其中,每一个构件的施工持续时间  $P_8$  根据式(1)计算得出,而构件的先后施工顺序则由施工活动间的逻辑约束关系来确定。因此,只要确定了第 1 个构件的施工开始时间,再根据施工活动间的逻辑约束关系和计算所得的持续时间,就可以得到每个构件的施工开始时间。案例项目的施工开始时间设定为项目导入的时间,即 20210917-16:00(2021 年 9 月 17 日 16 时开始施工)。

最后,基于属性列表中得到的各个构件的施工开始时间和持续时间,生成该工程主体结构的施工进度计划横道图,如图 8 所示。在选中构件后,根据每个构件属性列表中的编码组合名称,可以解读每个构件的基本属性和施工时间,便于工人施工安排,也为施工自动化以及智能化设备应用提供信息基础。任选某一构件,其构件编码组合名称为 JG-03-I-0-wall-wq001-T4.95T-S20210919-02:59S-L0.23 hL,表示该墙构件为现浇构件,将于 2021 年 9 月 19 日 2:59 分在第 3 施工层第 1 施工段开始施工。对于预制构件,可将构件组合编码集成至构件二维码中或写在构件表面,便于工人对构件属性解读;对于现浇构件,可以在模型中解读其各项属性,从而安排具体施工流程。

5 结 论

本文提出了一个基于 BIM 和规则推理的施工进度计划自动编排方法。该方法首先基于 IFC 格式的 BIM 文件实现施工基本活动的分解,并提取其属性信息、建立构件的属性编码体系,然后基于属性编码分析构件之间的逻辑约束关系、推理构件施工顺序规则,最后通过计算各构件施工持续时间参数,实现了建筑工程主体结构施工的进度计划自动生成。案例分析表明,该方法可以生成构件级精度的施工进度计划,不仅能够减少人工编制计划的成本,也能够为施工过程模拟以及未来自动化施工、





(a) 构件页面

GlobalID	2f\$ySfkOff18TrEPsj8vLL
编码组合名称 (P0)	JG-03- I -0-wall-wq001-T4.95T-S2021-09-19 02:59S-L0.23L
专业类别 (P1)	JG
施工层 (P2)	03
施工段 (P3)	I
构件施工类型 (P4)	0
构件类型 (P5)	wall
构件位置 (P6)	wq001
构件体积 (P7)	4.95
施工开始时间 (P8)	2021-09-19 02:59
施工持续时间 (P9)	0.23h
其他可拓展属性 (P10)	

(b) 墙构件属性编码

图 6 墙构件及其属性编码 (计算施工时间后)

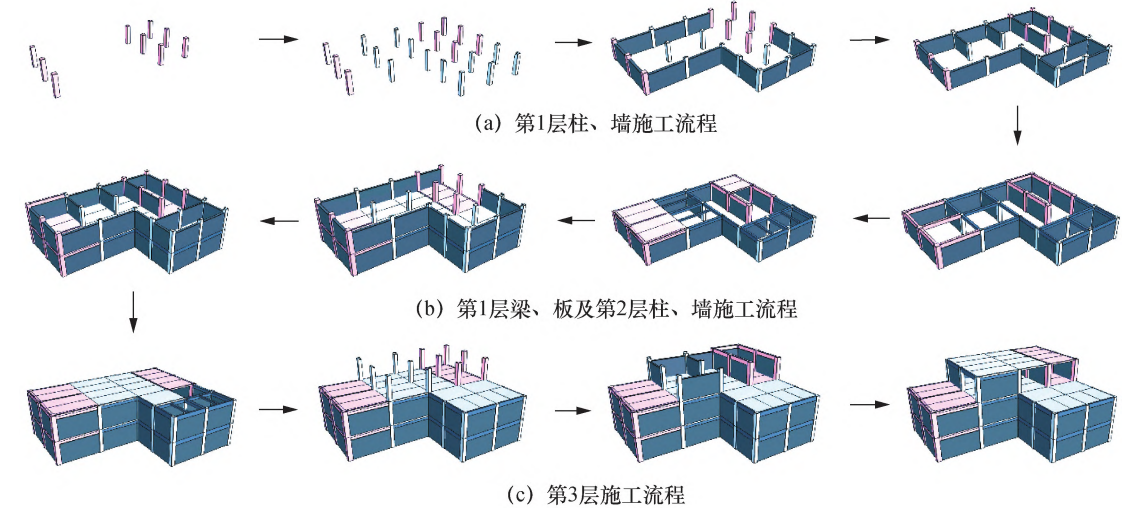


图 7 施工流程示意图



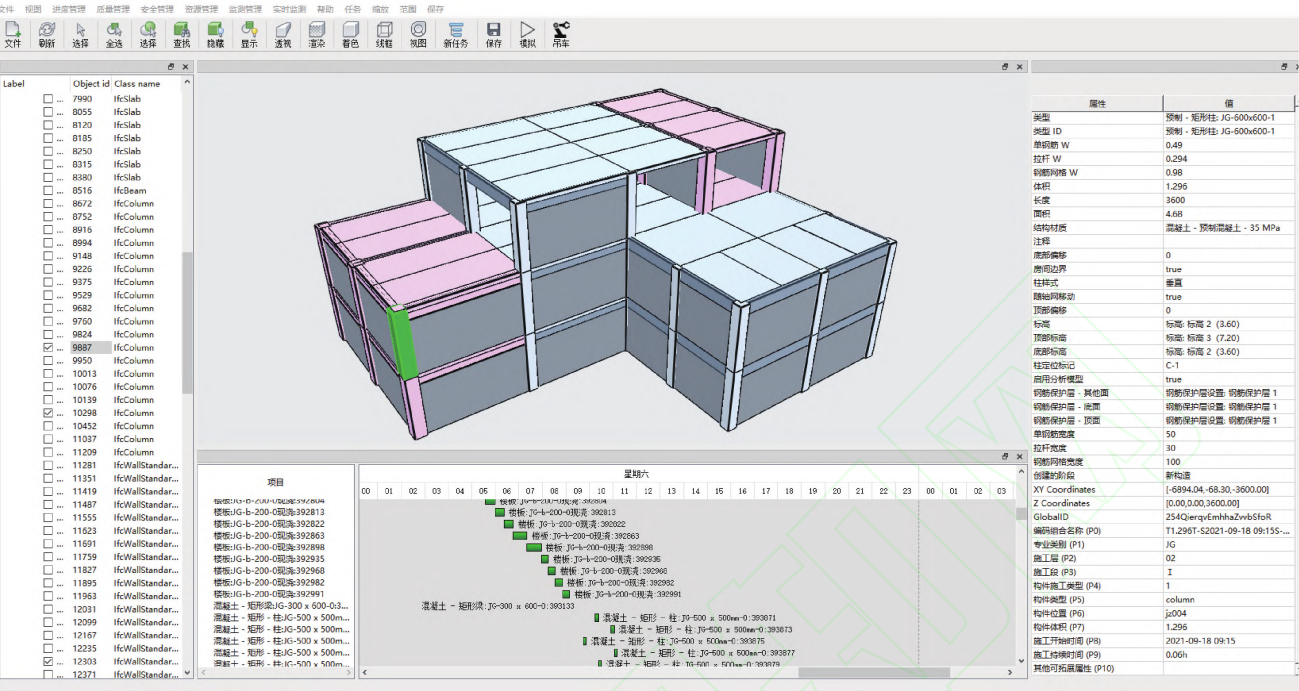


图 8 施工进度计划横道图

智能施工设备应用等提供基础信息。此外，本文建立的编码体系，可以帮助施工人员快速获取构件施工相关信息，保证构件施工顺序的准确性。

本研究仍存在一定的局限性，如暂未将主体工程之外的专业施工加进来，且施工段的划分以人式方式为主。未来研究可以对此深入探究，并进行更多的工程案例测试。

参考文献 (References)

[1] 任桂娜. 基于 BIM 的工程项目进度计划自动生成模型研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.  
REN G N. Research on the automatic generation of project schedule model based on BIM [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)

[2] 谢琳琳, 贺迪, 乐云. 基于 BIM 的建设工程项目进度计划自动编排研究 [J]. 施工技术, 2019, 48(6): 40 - 44.  
XIE L L, HE D, LE Y. Automatic patching research based on construction project schedule plan of BIM [J]. Construction Technology, 2019, 48(6): 40 - 44. (in Chinese)

[3] 胡文发, 何新华. 基于知识系统的施工进度自动安排 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(7): 980 - 984.  
HU W F, HE X H. Integrated knowledge-based system for construction scheduling automatically [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2005, 33(7): 980 - 984. (in Chinese)

[4] FARZAD M, MOSELHI O. Review of detailed schedules in building construction [J]. Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction, 2014, 6(3): 05014001.

[5] LAI K C, KANG S C. Collision detection strategies for virtual construction simulation [J]. Automation in Construction, 2009, 18(6): 724 - 736.

[6] 邹贻权, 张浩, 王淑娟. 进度计划管理领域研究文献综述 [J]. 价值工程, 2020, 39(8): 280 - 284.  
ZOU Y Q, ZHANG H, WANG S Q. Research review on project schedule management [J]. Value Engineering, 2020, 39(8): 280 - 284. (in Chinese)

[7] 卢高阳. 基于 BIM 的施工进度计划编制方法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.  
LU G Y. Research on construction scheduling method based on BIM [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)

[8] DESGAGNÉ-LEBEUF A, LEHOUX N, BEAUREGARD R, et al. Computer-assisted scheduling tools in the construction industry: A systematic literature review [J]. International Federation of Automatic Control, 2019, 52(13): 1843 - 1848.

[9] TAUSCHER E, SMARSLY K, KÖNIG M, et al. Automated generation of construction sequences using building information models [C]// Proceedings of Computing in Civil and Building Engineering. Orlando, USA, 2014: 745 - 752.

- [10] WELDU Y W, KNAPP G M. Automated generation of 4D building information models through spatial reasoning [C]//Proceedings of Construction Research Congress 2012: Construction Challenges in a Flat World. West Lafayette, USA, 2012: 612–621.
- [11] YUE G Y, HUANG K L, YANG J J. Research on hoisting sequence optimization for prefabricated components based on genetic algorithm [C]//Proceedings of International Conference on Construction and Real Estate Management. Guangzhou, China, 2017: 217–223.
- [12] KIM H, ANDERSON K, LEE S H, et al. Generating construction schedules through automatic data extraction using open BIM (building information modeling) technology [J]. *Automation in Construction*, 2013, 35: 285–295.
- [13] 张天琪. 基于 BIM 的装配式建筑施工进度计划编制研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- ZHANG T Q. Research on preparation of prefabricated building schedule based on BIM [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [14] FAGHIHI V, REINSCHMIDT K F, KANG J H. Construction scheduling using genetic algorithm based on building information model [J]. *Expert Systems with Applications*, 2014, 41(16): 7565–7578.
- [15] 郭奕婷. 基于 BIM 的进度计划自动编排研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- GUO Y T. Research on automatic arrangement of schedule based on BIM [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [16] KIM K, PARK J W, CHO C H. Framework for automated generation of constructible steel erection sequences using structural information of static indeterminacy variation in BIM [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2020, 24(11): 3169–3178.
- [17] PARK J, CAI H B. Framework of dynamic daily 4D BIM for tracking construction progress through a web environment [C]// Proceedings of ASCE International Workshop on Computing in Civil Engineering. Seattle, USA, 2017: 193–201.
- [18] GARCÍA DE SOTO B, ROSARIUS A, RIEGER J, et al. Using a tabu-search algorithm and 4D models to improve construction project schedules [J]. *Procedia Engineering*, 2017, 196: 698–705.
- [19] FAGHIHI V, NEJAT A, REINSCHMIDT K F, et al. Automation in construction scheduling: A review of the literature [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 81(9): 1845–1856.
- [20] DANG T, BARGSTÄDT H J. 4D relationships: The missing link in 4D scheduling [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2016, 142(2): 04015072.
- [21] 芦思文. 基于建筑信息分类体系的建设项目工作分解结构研究 [D]. 南昌: 华东交通大学, 2011.
- LU S W. Research on work breakdown structure of construction project based on construction information classification system [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [22] 任琦鹏. 基于 BIM 和 VR 技术的施工过程智能化模拟机理研究 [D]. 北京: 清华大学, 2016.
- REN Q P. The mechanism of construction process intelligent simulation based on BIM and VR technology [D]. Beijing: Tsinghua University, 2016. (in Chinese)

(责任编辑 李丽)