

BIM 技术在装配式建筑预制构件生产阶段的应用

徐 照, 占鑫奎, 张 星

(东南大学土木工程学院, 江苏 南京 210000)

摘 要: 为了能够对 BIM 技术在装配式建筑预制构件生产阶段的应用研究现状有较为系统清晰的掌握, 在大量文献阅读的基础上, 对装配式建筑预制构件生产过程及工艺流程进行梳理。首先结合文献的统计分析, 对 BIM 相关信息技术在预制构件生产阶段的应用进行介绍, 并对预制构件生产阶段信息交付研究现状进行系统归纳。最后对国内外相关研究存在的差距进行总结, 并提出相应研究建议。通过 BIM 为代表的信息技术在装配式建筑构件生产阶段的应用分析总结, 明确目前预制构件生产阶段信息化管理领域现存的挑战和瓶颈, 并针对性的提出 BIM 技术在这方面未来的发展方向。

关 键 词: 装配式建筑; 生产阶段; 构件; 建筑信息模型; 信息技术

中图分类号: TU 201.4

DOI: 10.11996/JGJ.2095-302X.2018061148

文献标识码: A

文 章 编 号: 2095-302X(2018)06-1148-08

Application of BIM Technology in the Manufacturing Stage of Precast Elements of Prefabricated Construction

XU Zhao, ZHAN Xinkui, ZHANG Xing

(Department of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210000, China)

Abstract: In order to have a systematic and clear understanding of the application of BIM technology in the production stage of prefabricated building components, based on a large number of literature, we reviewed the production process and process flow of prefabricated components. Combined with the statistical analysis of the literature, the application of BIM related information technology in the production stage of prefabricated components is introduced, and the research status of information delivery in the production stage of prefabricated components is systematically concluded. Finally, this paper summarizes the gap of related researches between home and abroad, and puts forward the corresponding research suggestions. By reviewing the previous study on the application of BIM and information technologies, the paper also discusses the challenges and bottlenecks for information management in the manufacturing stage of precast elements, as well as future orientation of BIM technology application.

Keywords: prefabricated construction; production stages; components; building information modeling; information technology

装配式建筑在构件层面可以拆分为梁、柱、楼板、窗体等部分, 通过工厂预制、构件运输和现场

拼装形成完整的装配式结构。因此针对装配式建筑的全过程控制中, 预制构件生产阶段的管理技术优

收稿日期: 2018-04-03; 定稿日期: 2018-06-01

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0702001-06)

第一作者: 徐 照(1982-), 男, 江苏徐州人, 副教授, 博士, 硕士生导师。主要研究方向为 BIM、工程管理等。E-mail: bernardos@163.com

化和工艺提升具有突出作用。目前以 BIM(building information modeling)为代表的信息技术与预制构件生产研究相结合是装配式建筑相关研究领域的热点之一,充分发挥 BIM 技术可视化、协同性、信息完备性等优势,可以有效解决构件生产阶段参与方多、信息量大、信息复杂等问题^[1]。在预制构件的生产过程中使用 BIM 相关技术,能够实现生产过程各利益相关方或参与方的有效协同工作,并在设计、施工、运维等工作阶段达到更好的综合效益。

BIM 技术在装配式建筑预制构件生产阶段的应用不仅指建立构件生产三维信息模型,更重要的是基于三维信息模型的生产过程协同管理^[2]。以三维信息模型为载体,通过使用 BIM 相关信息技术实现信息的快速收集^[3],在实现信息有效交付的基础上,对构件生产过程进行高效决策管理。

但现阶段国内将 BIM 技术与装配式建筑预制构件生产结合应用的研究较为分散,没有形成较为系统、清晰的应用研究总结。因此本文对装配式建筑预制构件生产过程及工艺流程进行梳理,结合相关文献的统计分析,对 BIM 相关信息技术在预制构件生产阶段的应用进行介绍,并对预制构件生产阶段信息交付研究现状进行系统归纳,最后对国内外相关研究存在的差距进行总结,并提出相应建议。

1 预制构件生产阶段过程分析

1.1 预制构件生产过程

装配式建筑相较于与传统建筑项目工程主要增加了构件设计、构件工厂预制及构件现场吊装等工序,其构件生产阶段、设计施工阶段与施工拼装阶段的工作关联图如图 1 所示。

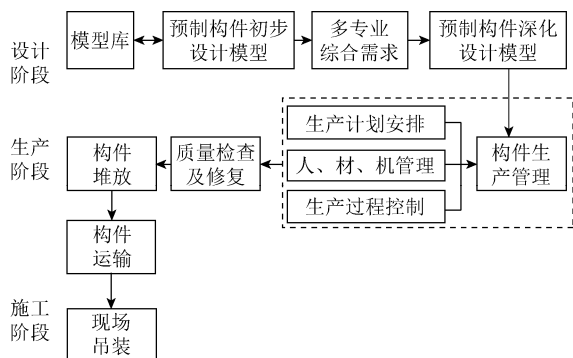


图 1 构件生产、设计、施工阶段工作关联图

(1) 预制构件深化设计。为了让构件模型所包含的生产相关信息,能够较为有效在构件生产过程

中使用,现阶段装配式建筑预制构件深化设计通常是以工厂为主体进行开展,在设计院形成的构件图纸基础上,结合工厂的实际生产工艺,运用 BIM 三维建模技术进行深化设计^[4]。构件深化设计是在满足结构力学设计的基础上,根据多专业提出建筑需求,结合工厂自身构件生产工艺的需求以及施工吊装过程的需求,对构件几何尺寸及各项预埋件进行深化设计。

(2) 预制构件生产管理。预制构件的生产管理主要包括:构件生产计划安排、构件生产过程中的人、材、机的管理和构件生产过程控制。构件生产计划安排主要根据工厂实际生产能力与建筑项目构件的施工进度需求,制定科学有效的生产进度安排。根据构件生产计划安排,对构件生产所需要的人工、材料、机械等进行管理,其次对构件生产过程进行控制,对构件生产过程中出现的问题及时调整。为了实现构件生产有效管理,信息化管理平台逐渐应用到构件生产管理过程中,文献[5-6]利用 BIM 技术设计预制构件生产管理系统,通过 BIM 数据支撑作用提升预制构件的质量水平和生产效率。其次针对预制构件生产信息的跟踪过程研究,文献[7-8]通过将射频识别技术(radio frequency identification, RFID)标签嵌入到预制构件中,并结合移动设备、互联网和数据库技术,实现信息采集、数据传递共享等功能,对构件生产进行全过程跟踪和快速预警。

(3) 预制构件检查及修复。针对构件生产完成之后的构件质量检查,理论上提出通过使用激光扫描技术,对构件成品进行扫描,形成三维模型与设计模型进行对比,从而对构件的生产质量进行判断^[9]。但现阶段构件工厂针对质量检查依旧采用人工检查的方式进行。

1.2 预制构件生产工艺流程

预制构件生产工艺通常包括模具清洁、模具组装、涂脱模剂、绑扎钢筋骨架、安装预埋件、混凝土浇筑振捣、拉毛、蒸养、拆模、检验修补及堆放等阶段^[10-11]。其中针对具体构件生产工艺会根据构件类型和构件厂生产能力有所调整。

现阶段国内外关于构件生产工艺方面的研究重点主要侧重于实现构件生产自动化,提高构件的生产效率。美国、日本和德国等发达国家的预制构件生产设备已经从单独的工艺环节自动化逐步进入整体协调的高自动水平,构件生产设备集成化和

机械化水平都较高。国内自动化生产线起步较晚，现阶段还处于只能对单独的工艺环节实现自动化，其中自动化工艺主要应用包括自动布置拆除模具、自动喷涂脱模剂、钢筋网片加工、混凝土浇筑及振捣、自动蒸养、墙体自动翻转等单独的方面，在整个生产过程中仍旧需要依靠人工协助来完成构件生产^[12-15]。图 2 可较为直观地展现现阶段我国预制构件各生产工艺所处生产阶段及自动化程度。

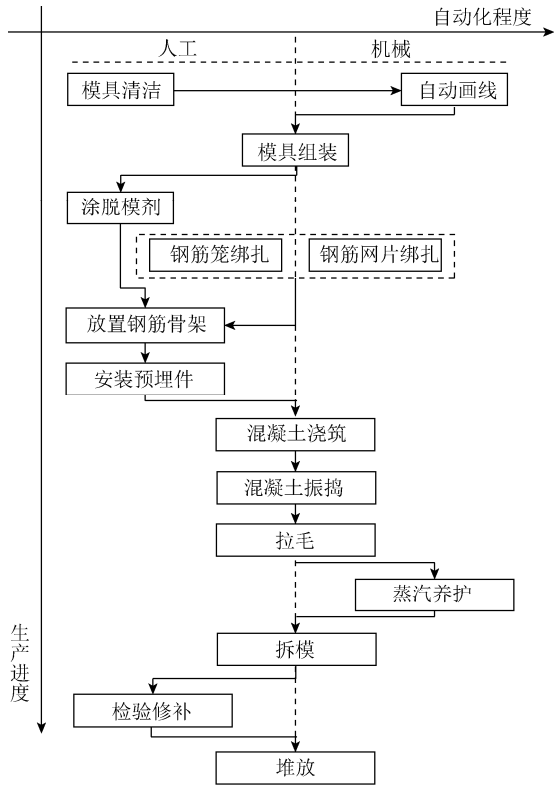


图 2 预制构件生产工艺流程

其中由于不同类型构件，形状、预埋及受力等存在差异导致各种构件在实际生产中会存在差别。预制构件通常包括预制柱、预应力叠合梁、普通叠合梁、预应力叠合板、预应力空心板、预制剪力墙、预制隔墙板、预制外挂板、预制空调板、预制阳台、预制飘窗、预制楼梯及其他造型构件等。以预应力叠合板为例，相较于普通叠合板增加预应力筋张拉过程。

2 BIM 相关信息技术应用分析

2.1 文献统计分析

本文分别以“BIM”、“管理信息系统”、“RFID”、“3D 扫描”与“装配式建筑”或者“PC”进行组合，来源类别选择“SCI 来源期刊”、“EI 来源期刊”、“核心期刊”，以此为条件对相关文章的摘要、关键词等进行检索，分别对 2007 年到 2017 年间发表的文章进行搜索，筛选与装配式建筑预制构件生产相关的论文进行统计。其中共筛选出 50 篇文章，如图 3 所示。分析发现国内关于相关信息技术的应用研究均起步较晚，近几年随着国家对装配式建筑政策上大力支持，相关研究呈现逐渐上升的趋势。其中 BIM 技术主要应用于设计方面，管理信息系统通常与 RFID 技术进行结合应用，而 3D 扫描技术在预制构件生产中的应用研究较少。

利用 Engineering Index(EI)数据库进行国外文献检索，分别以“BIM”、“management information system”、“RFID”、“3D scanning”与“prefabricated

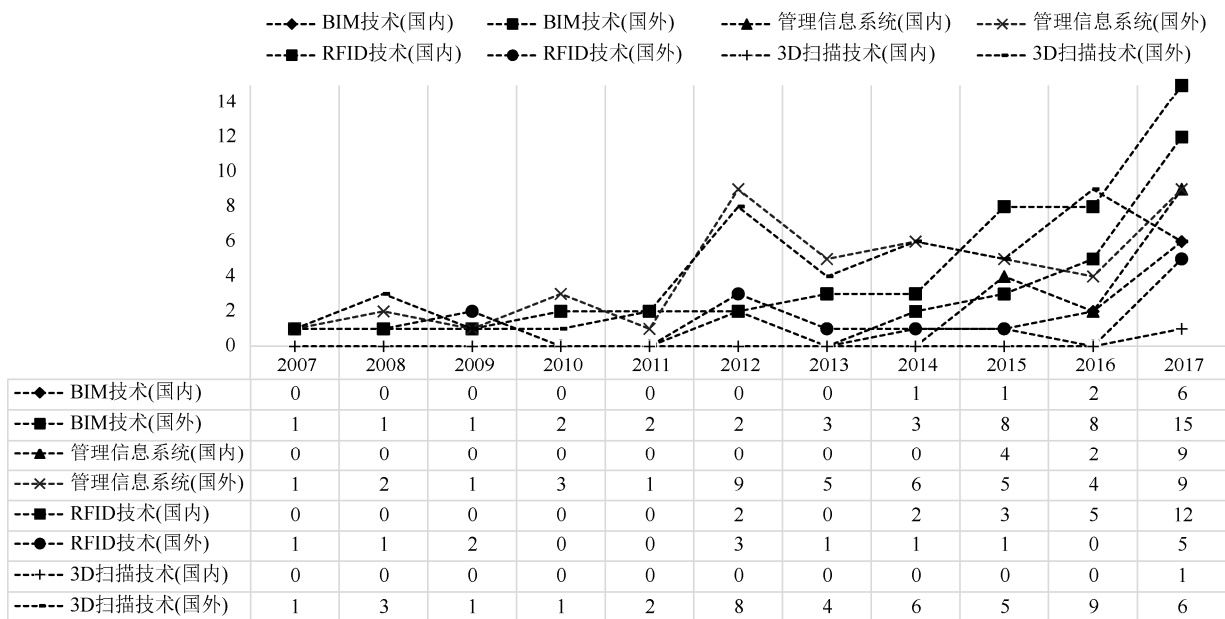


图 3 2007 年—2017 年国内外相关信息技术在预制构件生产阶段应用研究发文章数

construction”或者“PC”进行组合检索。语言选择“English”,文献类型选择“Journal article”,分别对2007年–2017年间发表的文章进行检索,筛选与预制构件生产相关论文进行统计,其中共筛选出153篇文章(图3)。分析发现国外针对相关信息技术在生产阶段的研究开始较早,相关的研究成果较多,且多偏向于智能化生产应用等方向,其中针对管理信息系统的研究侧重与信息传递和优化算法等方面,而对于RFID技术在装配式建筑生产阶段研究则较少。

对比国内外针对相关信息技术在装配式建筑预制构件生产阶段的应用,发现国内研究侧重于RFID技术与管理信息系统结合,而国外侧重于对自动化生产进行研究。由于我国现阶段针对预制构件的实际生产施工过程中,构件生产施工管理较为粗放,进行构件管理是现阶段重要问题之一,导致我国现阶段研究侧重于RFID技术和管理信息系统相结合。对于实现预制构件全自动化生产,需要在充分借鉴国外自动化、集成化生产经验基础上,研究适合我国的预制构件全自动生产线。

2.2 BIM 相关信息技术的应用

结合多维度可视化信息模型的生产管理平台是实现高效管理的重要方式。使用BIM技术进行预制构件深化设计,形成构件生产信息模型,与管理系统进行链接形成构件生产基础数据库;使用RFID及3D扫描等技术,对构件生产过程中的信息进行实时跟踪记录,反馈到生产管理系统中,从而实现生产管理者对构件生产各方面进行科学有效控制。图4为相关信息技术在预制构件生产阶段应用关联图。

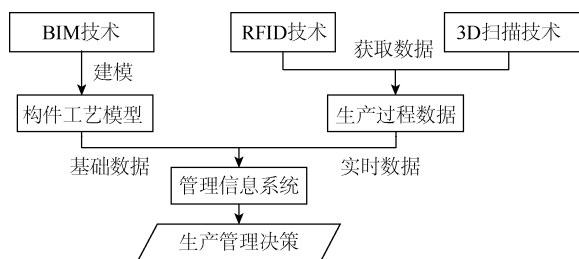


图4 相关信息技术在预制构件生产阶段应用关联图

(1) 基于BIM技术建立构件生产工艺模型。充分发挥BIM技术的协同性和可视化等优势进行预制构件初步设计和深化设计,将装配式建筑构件生产信息以BIM模型为载体进行存储。对生产

过程中的信息进行可视化表达,支持各参与方信息共享。根据构件实际生产过程中的需求,对构件的几何尺寸、钢筋位置及预埋件进行深化设计,形成构件生产工艺模型。所有与生产相关的信息均可从BIM模型中提取,让生产管理人员对生产信息进行直观、快捷管理。其次在与ERP系统进行对接时,BIM模型可作为生产管理计算交互基础数据,显著减少用户在ERP管理系统中数据的录入工作量^[16]。

(2) 借助RFID技术对构件生产进行实时跟踪。RFID技术的应用一般需要借助应答器、阅读器、中间件和软件系统等相关设备组件。在装配式建筑领域,针对预制构件生产,主要用于预制构件来料检查、生产过程跟踪、质量检查反馈及堆放管理等信息收集跟踪方面^[17-18]。相较于传统质量管理,在自动化数据收集和信息管理方面效率更高,并且确保了整个生产环节信息的完整。

实际使用过程中存在的问题主要包括:①标签的附着问题,采用直接粘贴容易损坏,采用预埋浇筑在构件里则存在读取或者更换不方便;②标签的识别问题,存在误读或者多读。现阶段实际生产过程中为了提高识别率,降低标签成本,多采用二维码的形式进行信息存储。文献[19]针对RFID与二维码的作用条件及效率进行对比分析,二维码使用成本更低,效率更高。

(3) 使用3D扫描技术对构件生产质量自动检测。3D扫描技术即通过扫描的形式,获取实物对象的点云信息,使用算法实现去噪和模型表面快速重建。将构件BIM模型与构件重建模型进行匹配,依据对比检查允许误差,从而实现对构件生产质量的自动化检查^[9]。由于工厂生产自动化程度低,及应用扫描技术成本过高,现阶段针对3D扫描技术在装配式建筑预制构件生产阶段的应用研究较少。

(4) 预制构件生产管理信息系统。通过BIM和ERP相结合,建立一体化数据化的装配式建筑信息交互平台,对预制构件生产过程进行信息化集成管理与预制构件跟踪管理,提高管理效率和效益^[20]。其中生产管理系统主要包括车间信息、订单、生产进度、生产质量、库存、车间报告和工序生产等管理模块^[16]。利用生产管理系统可以进行包括:构件生产计划管理;构件生产人工、材料及机械管理;构件生产成本管理;构件生产

进度管理; 构件生产质量管理; 构件库存管理和构件出厂管理^[5,21]。

3 装配式建筑预制构件生产阶段 BIM 信息交付

BIM 相关信息技术的应用实现基础是信息的有效交付, 为了保证信息在项目参与方之间实现有效传递, 需要对各项信息交付行为进行充分明确。其中所涉及内容包括统一的信息的格式、构件模型编码和信息交付标准等三个方面^[22]。

3.1 预制构件三维模型信息格式及扩展方法

现阶段针对三维信息模型交付通常采用 IFC (industry foundation classes) 标准, IFC 标准是 BIM 的一个数据存储标准, 其对建筑全生命周期的各种对象与类进行定义。但现阶段 IFC 标准难以满足装配式建筑预制构件的几何类型和生产相关属性信息的要求, 需要在 IFC 标准的基础上进行扩展。

IFC 标准扩展机制主要包括基于 IfcProxy 实体的扩展、基于属性集的扩展和基于增加实体定义的扩展。由于前两种方式无法产生新的实体, 只能在原有 IFC 标准的基础上采用关联属性的形式来增加对实体描述属性的种类, 难以对装配式建筑构件所包含的信息进行较为全面的描述, 且部分装配式建筑特有构件或零件不存在于原有的 IFC 标准, 导致在信息交互过程中无法识别或错误识别, 因此针对实现基于 IFC 的装配式建筑预制构件的描述, 其主要手段为在增加实体的前提下补充相应的构件属性信息。而且为了保证此方法扩展的新实体类型能跟 IFC 模型融合, 新实体一定要跟原有的实体建立派生和关联关系, 避免引起模型体系的歧义和冲突^[23]。

现阶段对于实现基于 IFC 装配式建筑构件实体的扩展, 国内外研究主要侧重于解决以下两方面关键问题:

(1) 明确扩展实体。明确 IFC 标准现有实体的描述方式, 及装配式建筑预制构件相对于传统建筑有待新增的构件类型。参照 IFC 实体关联架构规则, 对新增实体与已有实体的几何关系进行明确。构件实体的识别取决于构件的形状(3D geometry)、材料、机械性能(mechanical properties)、构件的功能分类、拓扑和聚合关系(Topological and aggregation relationship with other objects)、领域特征(domain

context)^[24]。其中实体与实体之间空间关联关系在构件的识别中起到关键作用。文献[25]通过分析新增构件的空间关系, 建立推理规则集, 形成新增构件实体组合空间拓扑关系矩阵, 通过相应的计算程序(spatial and topological relationships and operators)对构件的类型进行识别。但存在作用于任意领域规则集的产生效率较低和规则集过于冗杂等问题。简化实体之间的关联关系, 实现规则集的精细化, 也是重点研究方向。

对于实体之间的关联信息的获取分为: 对于构件实体的几何特征, 使用空间几何运算器(geometry operators)对构件实体的重心、表面、体积、方向及各种形状所占比例进行确定(centroid operators、face operators、volume operators、orientation、proportion as a shape characteristic); 对于构件实体的空间拓扑关系使用空间拓扑关系运算器(spatial topology operators)对实体之间的拓扑关系进行确定, 其中包括相邻、相连、包含、重叠 4 种关系(adjacent、contact、contained、overlapping)。

(2) 定义新增构件实体属性。IFC 标准中实体的属性通过继承关系进行描述, IFC 标准对于实体的描述包含 7 级, 其中包括 ifcRoot、ifcObjectDefintion、ifcObject、ifcProduct、ifcElement、ifcBuildingElement、ifcBeam(本文以 beam 为例)。IFC 实体的属性一部分是通过继承关系获得的, 一部分则是根据实体的类型或功能对其进行定义的属性, 新定义的属性则被下一级实体继承。其中对于属性描述方式将属性分为直接属性、导出属性和反属性。

IFC 标准对于构件属性信息的完整表达包含构件与空间的关系、构件的位置信息、构件的几何表现信息、构件的材料信息、构件的其他属性信息^[26]。其中构件与空间的关系需要明确构件与工程项目的关系及构件与构件之间的依附关系; 构件的位置信息需要以空间所在的坐标系为参考对构件进行定位; 构件的几何表现信息属性由 Representation 进行描述; 构件的材料信息属性属于反属性, 通过关联实体 IfcRelAssociateMaterial 引用 IfcMaterial 实体; 构件的其他属性可以通过关联实体 IfcRelDefinesByProperties 对所需要描述的属性进行定义。

IFC 标准通常采用增加实体类型的方法进行版

本更新,对于新增实体的属性定义的具体实现需要对 IFC 标准的框架进行填充,实现难度较大。因此为了提高效率,文献[27]通过对 IFC 标准的

EXPRESS-G 视图进行修改,实现在 IFC 标准框架中快速添加新实体图 5 为基于 IFC 标准的新增构件实体扩展内容。

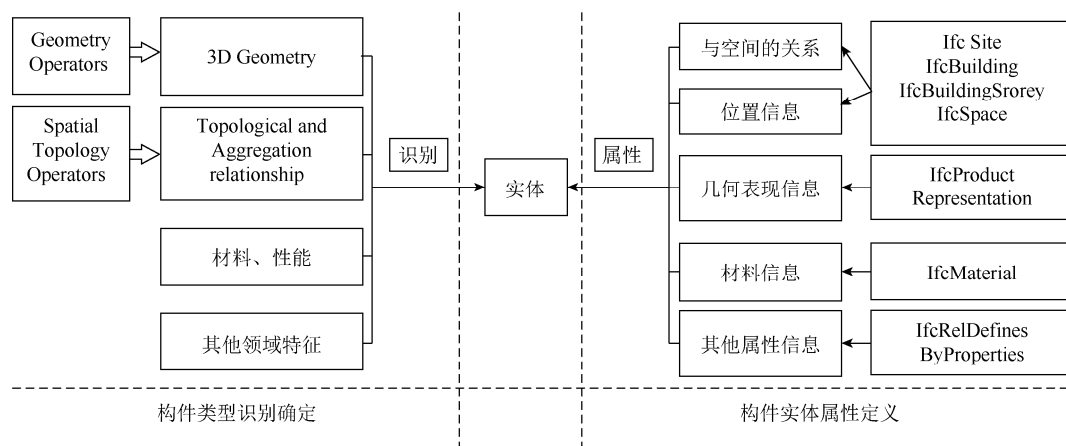


图 5 基于 IFC 标准的新增构件实体扩展内容

3.2 预制构件编码

Omniclass 编码体系是目前建筑信息领域应用较为成熟和广泛的标准体系,包括 NBIMS 标准也采用 Omniclass 分类编码标准^[28]。Omniclass 编码体系包括 15 张分类表,每张表针对指定类型的建筑信息分别描述,同时相关子类表格之间也可以相互结合使用,形成多层次分类,实现信息精确化目标。由于 Omniclass 分类标准较为成熟,在对装配式建筑构件编码中很多学者也将其作为重要参照对象,结合预制构件的具体特点,形成构件编码总体设计,实现对装配式建筑预制构件编码。

其中使用较多且实际操作性较强的编码方式为基于同一信息组织的柔性代码结构,单一构件编码由刚性码段、柔性码段和流水码段组成^[29]。在不同项目中,参与对象对构件的信息需求有所差异,因此装配式建筑构件编码分为基础的构件编码、构件生产材料编码及构件安装位置编码(图 6)。

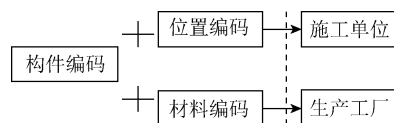


图 6 构件编码类型与用户对应关系

构件基础编码是根据装配式建筑预制构件的分类进行系统的编码,其重点是保证构件分类编

码的完整性。构件位置编码侧重于对构件在楼层中所在的具体位置信息进行说明,构件的生产材料编码则是对构件生产过程中涉及到的材料进行编码,方便构件工厂对于生产材料的信息化管理(图 7)。

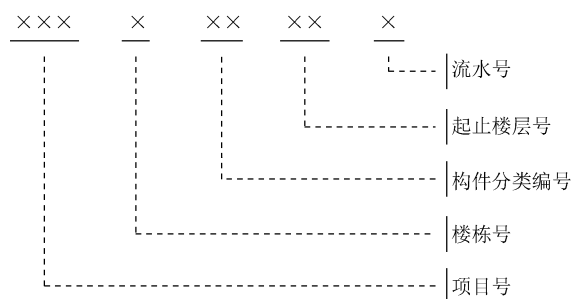


图 7 构件编码总体设计

现阶段针对不同类型建筑构件编码的研究都较为深入细致,编码的方式也较为成熟。但在实际操作中由于各研究单位或应用企业存在分类偏好,导致对于构件的编码总体设计存在差别,从而一定程度上阻碍了各单位之间的信息交付。为了实现信息有效传递,NBIMS 在 IFC 标准格式的基础上结合 Omniclass 分类体系形成装配式建筑构件分类标准。我国为了有效推动 BIM 技术在工程项目中的应用,在 2014 年发布《建筑工程设计信息模型分类和编码标准》,2017 年底发布《建筑信息模型分类和编码标准》,为了实现 BIM 与装配式的有效结合,多省已经在此基础上形成相应的装配式建筑构件编

码标准,但现阶段针对装配式建筑领域国家编码标准仍处于空缺阶段。

3.3 预制构件信息交付标准

在交付前需要根据交付对象、工程阶段及任务类型对交付内容进行明确,按照统一的信息交付标准进行交付。其中信息交付标准除了预制装配式建筑的 BIM 设计标准,还涉及到信息的格式、信息的分类标准、信息的范围与信息的信息深度要求(图 8)。

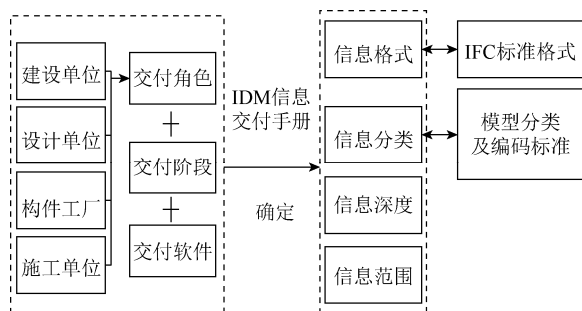


图 8 装配式建筑预制构件生产信息交付内容

IDM (information delivery manuals)信息交付手册可以实现在建设项目全生命周期中多参与方之间、多项目之间以及多业务流程之间特定需求信息及非完整 IFC 信息的交互和共享,从而达到针对特定阶段的信息需求和表达模式的标准化,并与 IFC 标准形成映射关系,为多源异构 BIM 模型和软件工具之间的协同工作提供信息标准基础^[30]。IDM 在传统项目全生命周期中的信息交付标准较为系统,并在近几年根据不同专业需要逐步向特殊领域形成相应的信息交付标准,目前 IDM 已经在预制混凝土领域有所应用。但针对装配式建筑全过程信息交付的信息深度和信息范围仍然处于研究阶段,其中就构件生产阶段,需要针对信息交付的不同对象和不同阶段对交付信息的范围和深度进行明确的定义。

4 结束语

近几年国内外对于 BIM 技术在装配式建筑预制构件生产阶段应用研究均呈逐渐增多的趋势,但国外对于相关信息技术在构件生产过程中的实际应用远提前于国内。其中:

(1) BIM 相关信息技术应用方面。国外已经能够实现利用相关信息技术实现构件生产自动化工艺流程及构件生产信息化管理,而国内对于相关

信息技术的应用研究主要侧重于 RFID 技术和管理信息系统,只能实现构件生产管理的初步信息化,对于实现构件自动化生产仍然是后续重点研究方向。

(2) 生产信息交付方面。国外针对基于 IFC 的预制构件的拓展及描述方法研究早于国内,并已经形成较为完善的扩展机制,国内对于基于 IFC 的扩展机制研究较少,且多为直接使用扩展机制进行 IFC 扩展。对于建筑构件编码现阶段国内研究较为成熟,但对于统一的装配式领域国家编码标准仍处于空缺阶段。对于信息交付标准方面,国际上 IDM 信息交付手册对于装配式建筑全过程信息交付的信息深度和信息范围仍处于研究阶段,对形成适合我国建筑行业标准的装配式建筑构件信息交付标准相关研究仍处于空白阶段。

针对以上两方面国内研究机构虽已经形成较多研究成果,但在实际生产过程中仍然面临生产管理杂乱、生产自动化程度低、信息传递效率低及 BIM 模型利用不充分等问题。因此在面对理论研究与实际应用脱节的情况下,除了进一步完善相关理论研究之外,如何有效的将各项研究应用到实际的构件生产过程中,提高各环节的效率,也是现阶段各研究单位和企业应该重点思考的问题。

参考文献

- [1] NATH T, ATTARZADEH M, TIONG R L K, et al. Productivity improvement of precast shop drawings generation through BIM-based process re-engineering [J]. Automation in Construction, 2015, 53: 54-68.
- [2] LI Z D, XUE F, LI X, et al. An internet of things-enabled BIM platform for on-site assembly services in prefabricated construction [J]. Automation in Construction, 2018, 89: 146-161.
- [3] KIM M K, WANG Q, PARK J W, et al. Automated dimensional quality assurance of full-scale precast concrete elements using laser scanning and BIM [J]. Automation in Construction, 2016, 72: 102-114.
- [4] 李浩, 李永敢. 工业化住宅预制构件深化设计流程及深化设计要点分析[J]. 上海建设科技, 2014(1): 1-5.
- [5] 胡振中, 陈祥祥, 王亮, 等. 基于 BIM 的管道预制构件设计技术与系统研发[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2015, 55(12): 1269-1275.
- [6] 马智亮, 杨之恬. 基于 BIM 技术的智能化住宅部品生产作业计划与控制系统功能需求分析[J]. 土木建筑工程信息技术, 2015, 7(1): 1-7.

- [7] 胡珉, 陆俊宇. 基于 RFID 的预制混凝土构件生产智能管理系统设计与实现[J]. 土木建筑工程信息技术, 2013, 5(3): 50-56.
- [8] 安然, 周东明, 张彦欢, 等. 基于BIM和RFID技术的PC建筑全生命周期应用研究[J]. 工程建设, 2017, 49(11): 24-27.
- [9] 苏杨月, 赵锦锴, 徐友全, 等. 装配式建筑生产施工质量问题和改进研究[J]. 建筑经济, 2016, 37(11): 43-48.
- [10] 靳华中, 邹贻权, 朱振帆, 等. 面向生产线级的PC构件排产模式研究[J]. 土木建筑工程信息技术, 2018, 10(2): 88-93.
- [11] 任成传, 杨思忠, 王爱兰, 等. 装配整体式混凝土剪力墙结构预制构件生产工艺研究[J]. 建筑技术, 2015, 46(3): 208-211.
- [12] 谢思聪, 陈小波. 基于多层编码遗传算法的两阶段装配式建筑预制构件生产调度优化[J]. 工程管理学报, 2018, 32(1): 18-22.
- [13] 孙红, 孙健, 吴玉厚, 等. 大型智能PC构件自动化生产线简介[J]. 混凝土与水泥制品, 2015(3): 35-38.
- [14] 倪雪峰. 预制混凝土构件自动化流水线研究[J]. 绿色建筑, 2017(1): 62-64.
- [15] 李永敢. 装配式建筑预制混凝土构件自动化生产线设计配置技术[J]. 施工技术, 2018, 47(4): 47-51.
- [16] 叶浩文, 周冲, 樊则森, 等. 装配式建筑一体化数字化建造的思考与应用[J]. 工程管理学报, 2017, 31(5): 85-89.
- [17] VALERO E, ADÁN A, CERRADA C. Evolution of RFID applications in construction: A literature review [J]. Sensors, 2014, 15(7): 15988-16008.
- [18] ALTAF M S, LIU H X, AL-HUSSEIN M, et al. Online simulation modeling of prefabricated wall panel production using RFID system [C]//Winter Simulation Conference. New York: IEEE Press, 2016: 3379-3390.
- [19] 常春光, 吴飞飞. 基于BIM和RFID技术的装配式建筑施工过程管理[J]. 沈阳建筑大学学报: 社会科学版, 2015, 17(2): 170-174.
- [20] WANG G B, SONG J L. The relation of perceived benefits and organizational supports to user satisfaction with building information model (BIM) [J]. Computers in Human Behavior, 2017, 68: 493-500.
- [21] 陈峰. 装配式构件信息管理系统技术与实践[J]. 预制混凝土, 2017(2): 80-83.
- [22] 陈超. 预制装配式建筑的BIM设计标准分析[J]. 建筑技术开发, 2017, 44(18): 8-9.
- [23] 王勇, 张建平, 胡振中. 建筑施工IFC数据描述标准的研究[J]. 土木建筑工程信息技术, 2011, 3(4): 9-14.
- [24] BLOCH T, SACKS R. Comparing machine learning and rule-based inferencing for semantic enrichment of BIM models [J]. Automation in Construction, 2018, 91: 256-272.
- [25] SACKS R, MA L, YOSEF R, et al. Semantic enrichment for building information modeling: procedure for compiling inference rules and operators for complex geometry [EP/OL]. [2018-03-05]. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29CP.1943-5487.0000705>
- [26] 施平望, 林良帆, 邓雪原, 等. 基于IFC标准的建筑构件表达与管理方法研究[J]. 图学学报, 2016, 37(2): 249-256.
- [27] 陈立春, 赖华辉, 邓雪原, 等. IFC标准领域层实体扩展方法研究[J]. 图学学报, 2015, 36(2): 282-288.
- [28] 朱纯瑶, 杨绪坤. 建筑信息分类编码体系对铁路BIM的借鉴作用[J]. 铁路技术创新, 2014(5): 35-38.
- [29] 张志伟, 王珩玮, 林佳瑞, 等. 面向全生命期管理的水电工程信息分类编码研究[J]. 工程管理学报, 2017, 31(4): 131-136.
- [30] 明星, 周成, 姚毅荣, 等. 基于IDM的建筑工程设计阶段流程图描述方法研究[J]. 图学学报, 2014, 35(1): 138-144.