

基于BIM技术的装配式结构设计流程研究

李彦苍, 韩沐轩

河北工程大学土木工程学院, 河北 邯郸
Email: liyancang@hebeu.edu.cn, hmxdmn@163.com

收稿日期: 2020年10月2日; 录用日期: 2020年10月20日; 发布日期: 2020年10月27日

摘要

随着现代工程建设的高效性、信息化和工业化程度等方面要求的不断提高, BIM技术在建筑结构设计流程中的作用也不断地展现。与此同时, 新型装配式建筑形式的出现, 有效地带动了工业化建筑的发展, 运用BIM技术对装配式结构设计流程管理不断成为研究的热门课题之一。本文通过对国内外BIM技术和装配式结构的发展历程、研究现状、相关技术等方面进行了探讨和分析, 总结了国内外近年来主要的研究成果, 对BIM技术在装配式设计过程中的应用进行了探讨。

关键词

装配式, BIM技术, 设计流程

Research on the Design Process of Prefabricated Structure Based on BIM Technology

Yancang Li, Muxuan Han

College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei
Email: liyancang@hebeu.edu.cn, hmxdmn@163.com

Received: Oct. 2nd, 2020; accepted: Oct. 20th, 2020; published: Oct. 27th, 2020

Abstract

With the high efficiency of modern engineering construction and the continuous improvement of its requirements of informatization and industrialization, the key of BIM technology in the process of architectural structure design has been constantly demonstrated. At the same time, the emergence of new prefabricated building forms effectively drives the development of industrial build-

ings. However, as prefabricated buildings are not widely used in high-rise buildings, the application of BIM technology to prefabricated structure design process management has become one of the hot topics of research. This paper discusses and analyzes the development history, research status and relevant technologies of BIM technology and fabricated structure at home and abroad, and summarizes the main research achievements at home and abroad in recent years. This paper discusses the application of BIM technology in the process of prefabricated design.

Keywords

Assembly Type, BIM Technology, Design Flow

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

装配式建筑对提升我国建筑业生产效率、节能减排等具有重要意义[1], 是国家“十三五”战略规划之一。发展装配式建筑是建造方式的重大变革, 是推进供给侧结构性改革和新型城镇化发展的重要举措[2] [3] [4], 有利于节约资源能源、减少施工污染、提升劳动生产效率和质量安全水平, 有利于促进建筑业与信息化工业化深度融合、培育新产业新动能、推动化解过剩产能[5]。2016年9月, 国务院发布实施《国务院办公厅关于大力发展装配式建筑的指导意见》后, 装配式建筑等新技术得到广泛应用[6] [7]。2017年11月和2020年9月住建部先后确认了第一批、第二批装配式建筑范例城市和装配式建筑产业基地, 进一步推动了装配式在我国建筑业的发展[8]。

建筑信息模型(Building Information Model, BIM)的出现在一定程度上促进了建筑工业化的进程, 使得工程设计、工程建设、材料运输与施工等流程的效率和成本消耗得到了一定程度的控制, 通过加快工业化与信息化密切结合, 达到工程建设的可持续化发展的目的[9]。

本文通过对国内外装配式建筑结构设计发展历程及研究现状进行分析总结, 对比出传统现浇式建筑与基于BIM技术的装配式建筑优劣势, 对装配式建筑发展的经验进行总结, 归纳出未来发展趋势, 为该领域研究提供新思路。

2. 国内外装配式结构设计发展历程

2.1. 国外发展历程

建筑的工业化最早兴起于上世纪20年代的欧洲[10] [11] [12]。战争对社会的影响作为外部因素加剧了对建筑工业化的需求, 而工业化技术的发展则是建筑工业化发展的内部条件, 促使劳动密集型的传统建筑行业像建筑工业化转型升级[13]。

1) 德国

德国的建筑工业化理念出现的最早, 始于20世纪20年代。德国拥有完整全面的建筑业标准规范体系, 装配式建筑要满足建筑通用综合性技术要求和生产、安装方面的要求, 企业的产品(装配式系统、部品等)必须根据相关规范要求通过质量检测方可使用[14]。近几年, 德国大力发展被动式节能建筑, 绿色建筑与装配式建筑具有很多共通点, 故很多被动式建筑应用装配式建造方式, 并在进一步研究二者更好地融合统一[15]。德国还是BIM技术应用较为先进的国家之一, BIM也促使其装配式建筑的产业化水平不断提高。

2) 英国

英国的建筑工业化理念同德国一样也出现的较早。英国政府对于建筑工业化转型的推动方式是明确的提出成果目标,“成本降低 10%,时间缩短 10%,缺陷率降低 20%,事故发生率降低 20%,劳动生产率提高 10%,最终实现产值利润率提高 10%”等,来促进该领域中新技术的研发、管理水平的提升及生产方式的工业化[16] [17]。英国的装配式建筑多采用钢结构,钢结构建筑、模块化建筑,在新建项目中占到 70%以上的比例。钢结构工业化水平高是支持其钢结构装配式建筑发展的基础,其中装配式建筑设计、预制构件部品的工厂化制作和供应的成套技术及有效的供应链管理是实现其装配式建筑产业化的关键[18]。英国 BIM 标准在 2010 年 4 月首次发布,从项目 BIM 策略、协作式 BIM 数据共享、模型拆分、建模方法、文件夹结构与命名和成图等方面对 BIM 技术的系统应用进行了讲解[19]。

3) 法国

20 世纪 50 年代是法国的建筑工业化初期,最初的装配化建造主要局限于形式单一的住宅建筑,大部分为预制混凝土结构体系,这期间逐渐建立起数量基础上的标准化、模数化的构件体系[20] [21]。20 世纪 70 年代,法国政府开始关注建筑工业化中的产品多样性,以求在标准化生产的基础上开发预制构件、部品的通用化潜质,由此编制了《通用体系产品目录》,供设计师进行既具有标准化又具有个性化的建筑产品设计。目前,法国的装配式建筑仍以预制混凝土结构为主,少量应用钢结构、木结构体系。实现构件的工厂化生产、部品预制化及装修一体化,装配率可达 80%,节能达 70%,生产和施工质量较高[22]。

4) 美国

美国从上世纪 30 年代开始大力推进工业化发展[23]。美国国际预制与预应力混凝土协会编制了《PCI 设计手册》,就涉及装配式结构设计的相关内容,该手册当时在国际上引起了广泛的影响[24]。美国城市住宅以装配式建筑为主,包括预制构件工厂化的混凝土结构装配式住宅和钢结构装配式住宅。1976 年,国家工业化住宅建造及安全法案得到通过,同年出台了一系列行业规范标准,为美国的装配式住宅进一步发展打下基础。美国于 2004 年首次颁布《国家 BIM 标准》,从技术层面对 BIM 的应用进行了指导和规范,并于 2009 年颁布《BIM 项目实施计划指南》,BIM 在美国已经获得较为广泛和成功的应用[25] [26]。

2.2. 国内发展历程

20 世纪 90 年代,我国引入住宅产业化理念,政府也采取一系列措施推动住宅产业化发展(见表 1)。2015 年 10 月,国家住房和城乡建设部正式发布了《工业化建筑评价标准》,该《标准》首次定义了如“工业化建筑”、“预制率”、“装配率”和“建筑部品”等专业术语[27]。《标准》的发布和实施,标志着我国工业化建筑基础理论体系的进一步完善,对我国建筑工业化发展的质量、水平的提高起到促进作用[28] [29]。截至 2018 年年底,全国 31 个省市自治区全部出台了本地的发展实施意见和规划,甚至一些县城也出台了发展措施,这对于装配式建筑发展顶层设计、方向引领有重要的作用[30]。2019 年 5 月,住房和城乡建设部科技与产业化发展中心文林峰副主任在论坛上指出,2018 年全国新开工装配式建筑面积达到 2.9 亿平方米,较 2017 年增长了 81%。此外,许多企业开始研究建筑主体的工业化技术,做出了一些有益的尝试[31] [32] [33]。近年来我国装配式建筑评价标准及行业规程见表 1。

BIM 技术近些年在国内的高校和研究机构得到了高度的关注并取得了一定的研究成果,但是在建筑业的实际推广还很有限,只应用于某些重大项目或示范项目[34]。近几年,我国承办多项国际性赛事或展会,BIM 首先在大型场馆和标志性建筑项目中获得了应用,如上海中心大厦、奥林匹克公园瞭望塔、世博会场馆、中钢国际广场等[35]。国家方面也颁布了多项推进 BIM 应用的文件,见表 2。

Table 1. Evaluation standard and industry regulations of assembly building in China
表 1. 我国装配式建筑评价标准及行业规程

级别	类型	名称	编号	发布时间
住建部	行业标准	建筑工业行业标准: 住宅轻钢装配式构件	JG/T 1B2-2008	2009年3月
行业	技术规程	整体预应力装配式板柱结构技术规程	CECS 52-2010	2011年3月
行业	设计规程	装配式混凝土结构技术规程	JGJ1-2014	2014年2月
国家	评价标准	工业化建筑评价标准(废止)	GB/T51129-2015	2015年8月
住建部	验收规范	混凝土结构工程施工质量验收规范	GB 50204-2015	2015年9月
国家	实施指南	装配式建筑系列标准应用实施指南 (钢结构建筑; 装配式混凝土结构建筑; 木结构建筑)	2016SSZN-HNT	2016年4月
行业	技术规程	装配式混凝土结构技术规程	JGJ 1-2014	2016年4月
住建部	工程定额	装配式建筑工程消耗定额	建标[2016]291号	2016年10月
行业	技术规程	钢筋机械连接装配式混凝土结构技术规程	CECS 444 2016	2016年10月
住建部	技术审查	装配式混凝土结构建筑工程施工图设计文件技术审查要点	建质函[2016]287号	2016年12月
住建部	国家标准	装配式混凝土建筑技术标准	GB/T 51231-2016	2017年6月
住建部	国家标准	装配式钢结构建筑技术标准	GB/T 51232-2016	2017年6月
住建部	国家标准	装配式木结构建筑技术标准	GB/T 51233-2016	2017年6月
国家	评价标准	装配式建筑评价标准	GB/T 51129-2017	2017年12月
住建部	行业标准	装配式整体卫生间应用技术标准	JGJT 467-2018	2018年1月
住建部	行业标准	装配式整体厨房应用技术标准	JGJT 477-2018	2018年1月
住建部	行业标准	装配式环筋扣合锚接混凝土剪力墙结构技术标准	JGJT 430-2018	2018年1月
住建部	行业标准	装配式住宅建筑检测技术标准	JGJT 485-2019	2019年11月

Table 2. Development opinions and application standards of BIM technology in China
表 2. 我国 BIM 技术的发展意见及应用标准

时间	发布机构	名称	政策要点
2011年5月	住建部	《2011-2015 建筑业信息宗华发展纲要》	“十二五”期间, 加快 BIM、基于网络的协同工作等新技术在工程中的应用行成一批信息化技术应用达到国际先进水平的建筑企业。
2013年8月	住建部	《关于征求关于推荐 BIM 技术在建筑领域应用的指导意见》	2016年以前政府投资的 2 万 m ² 以上大型公共建筑以及省报绿色建筑项目的设计、施工采用 BIM 技术。截至 2020 年, 在有关奖项(如全国优秀工程勘察设计奖、鲁班奖及各行业、各地区勘察设计奖和工程质量最高评审)设计中应用 BIM 技术。
2014年7月	住建部	《关于推进建筑业发展和改革的若干意见》	推进 BIM 等信息技术在工程设计、施工和运行维护全过程中的应用, 提高综合效益, 推广建筑工程减震技术, 探索开展白图代替蓝图、数字化审图等工作。
2015年6月	住建部	《关于推进建筑信息模型应用的指导意见》	到 2020 年末, 建筑行业甲级勘察、设计单位以及特、一级房屋建筑工程施工企业应掌握并实现 BIM 与企业管理系统和其他信息技术的一体化集成应用, 集成应用 BIM 的项目比率达到 90%。
2017年5月	住建部	《建筑信息模型施工应用标准》	批准《建筑信息模型施工应用标准》为国家标准, 从深化设计、施工模拟、预制加工、进度管理、预算与成本管理、质量与安全管理、施工监理、竣工验收等方面提出了 BIM 的创建、使用和管理要求。

3. 国内外装配式结构设计研究现状

Wisson D. G. Smith [36]通过总结英国的装配式建造的发展过程, 认为装配式建筑有别于传统的建筑形式, 是在专业的生产工厂预制加工并提供服务的一种新型建造方式, 而 BIM 在承包商的项目管理中的相关效用包括减少错误和返工。

Alistair G.F. Gibb [37]认为装配式建筑是建筑业和工业融合的产物, 将装配式建筑定义为新型的建造过程, 此过程涵盖了设计、生产制作、运输以及安装阶段。

Richard [38]认为装配式建筑主要是通过建筑标准化, 构配件生产工厂化, 施工机械化和组织管理科学化, 进而提高劳动生产率, 降低工程成本的建造系统。

Hass [39]教授通过对系统分类, 得到 16 种装配式建筑类型, 并提出预制类型涵盖主体结构和非主体结构预制的观点。

Bell [40]从装配式建筑空间维度的出发, 将装配式建筑分为容纳体积预制(volumetric prefabrication)、非容纳体积预制(volumetric prefabrication)以及混合式容纳体积预制三种类型。

Dong [41]在 Bell 研究的基础之上对装配式建筑进行重新分类, 共分为两种类型即 2D 和 3D。2D 类型主要包含构件于面板, 其主要特征是这些构件和面板先期在预制生产车间经过切割、浇筑、养护后成型后, 通过物流运输系统运送到施工现场。3D 类型意为三维空间立体部品部件, 主要包含一体化厨房以及盥洗室等。

Shahzad [42]等学者将装配式建筑构件划分为预制构件、嵌入式预制构件、模块化预制构件以及整体式预制。

袁鹏飞[43]针对保障房工业化建设水平的评价进行研究, 力图充分发挥装配式建筑优势, 满足保障房标准化高、成本低的要求。从建筑设计标准化、构配件部品生产工厂化、施工建造装配化、生产经营信息数字化、绿色节能化五个方面进行了评价体系的建立, 指标框架清晰。

姚刚[44]从基于 BIM 的工业化住宅协同设计角度出发, 对工业化住宅协同设计的关键要素进行了详细的研究, 并对各要素间的冲突点进行了消解研究, 最终提出了协同设计的整体流程, 研究作为 BIM 在装配式建筑中应用的理论内容, 有重要的参考意义。

吴琨[45]等研究了如何将预制装配式技术应用到传统风格建筑的设计和施工中, 给出了传统风格建筑关键节点及关键构件的装配式节点的构造处理; 郟禄文[46]等借助 Revit 强大参数化建模功能对装配式混凝土剪力墙结构中拆分设计进行研究, 提出了基于 Revit 的装配式混凝土剪力墙构件拆分设计的流程。。

4. 相关技术的对比分析

4.1. 传统建筑与基于 BIM 的装配式建筑对比分析

由于装配式构件大多数是在工厂完成的, 现场施工时仅需要通过吊装和搭接处理等完成, 施工效率较高, 在能源的使用和消耗方面也比较低, 有效改善了传统工程建设的粗放型与劳动密集型的生产模式, 是当前和未来工程建设的重要发展趋势。以往工程建设的主要模式和现代大规模工程建设的形式和工业程度存在着很大差别, 见表 3。

Table 3. Comparison of the main forms of traditional engineering construction and prefabricated construction

表 3. 传统工程建设的主要形式和装配式建设的对比

区别	传统建筑	基于 BIM 的装配式建筑
消耗资源情况	耗费能源、占地大、不可持续利用	节约资源、占地小、可持续利用
生产效率	现场人工作业多、机械使用率低、建设速度慢	劳动力需求低、机械化程度高、建设速度快

Continued

环境保护	噪声大、环境污染严重	装配式构件工厂生产、噪声低、污染小
生产力占用情况	工作强度大、现场人员占有量大	工业化生产、机械化程度高、技术人员素质要求高
设计内容	各专业设计内容符合相关规范要求	除现浇设计内容外, 需对构件节点、连接做法等细节进行深化设计, 且将各专业设计内容整合在一起
设计流程	立项→设计→施工→使用	立项→策划→设计→生产→施工→装修→使用→更新
多专业协同	各专业密切配合后各自深化	各专业在同一平台上深化设计工作
协同工具	CAD、相关插件	Revit、Archive、Midas、Lumion
图纸表达	二维	二维+三维
工地验收	施工现场验收	对构件厂和施工现场均进行验收

4.2. BIM、SEM、RFID 与 IBMS 对比分析

BIM 是建筑信息模型的简称, BIM 技术是利用各种 BIM 软件, 例如 Revit 利用系统族或自制族将工程建设各个构件组合成一个构件库。然后对这些族添加各种材料, 图形信息, 以及构件组装先后信息等各种信息。构建多维信息模型, 模型信息动态变化, 建设各个阶段丰富信息, 改进信息, 实现实时动态控制[47], 见图 1。

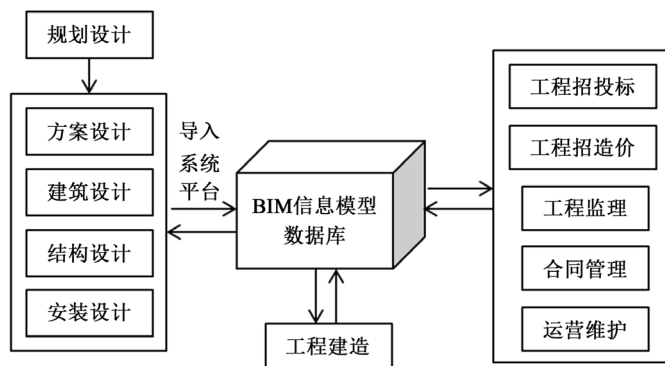


Figure 1. The prefabricated building management model based on BIM
图 1. 基于 BIM 的装配式建筑管理模型

结构方程模型(Structural Equation Modeling, SEM)作为一种多元统计技术, 能够同时处理多个原因、多个结果的关系, 容许变量存在测量误差, 并且能够测量整体模型的拟合程度。因此, 考虑到装配式建筑成本影响因素间可能具有的复杂交互关系, 选取结构方程模型作为工具进行研究, 概念模型见图 2。

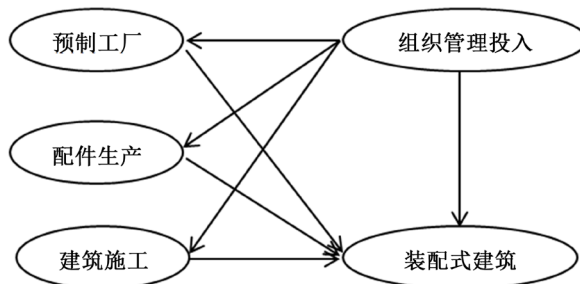


Figure 2. Conceptual model of prefabricated building based on SEM
图 2. 基于 SEM 的装配式建筑概念模型

射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)技术, 俗称电子标签, 可通过无线电讯号识别特定目标并读写相关数据, 而无需识别系统与特定目标之间建立机械或光学接触。将 RFID 标签附着于目标物上, 通过扫描读写器读取数据(见图 3)。RFID 技术可识别高速移动的物体并可同时识别多个标签, 操作快捷方便。每个标签具有唯一的电子编码, 进而识别目标对象。阅读器用来读取标签信息, 天线传递射频信号。

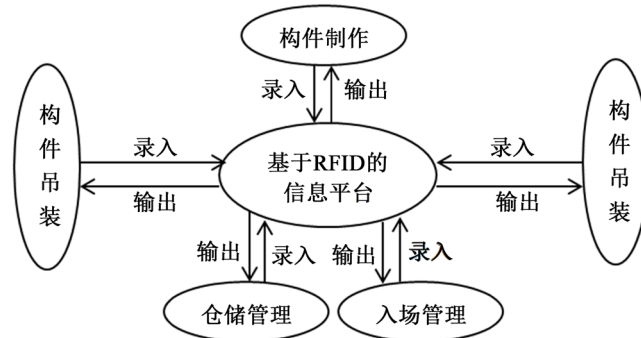


Figure 3. Prefabricated building information platform based on RFID
图 3. 基于 RFID 的装配式建筑信息平台

智能建筑管理系统(Intelligent Building Management System, IBMS)主要包括楼宇自控系统、消防系统和监控系统等, 对相关系统应进行优化设计, 可提升运维管理能力(见图 4)。IBMS 通过统一的管理平台, 对建筑物设备进行自动控制与管理, 实现对空调、给排水和供电设备综合管理与控制, 确保建筑物实现节能、经济和生态效益, 满足决策管理工作需求。通过对相关管理措施应用, 可提升建筑运维管理的智能化与信息化, 使得建筑管理工作更加安全、高效。

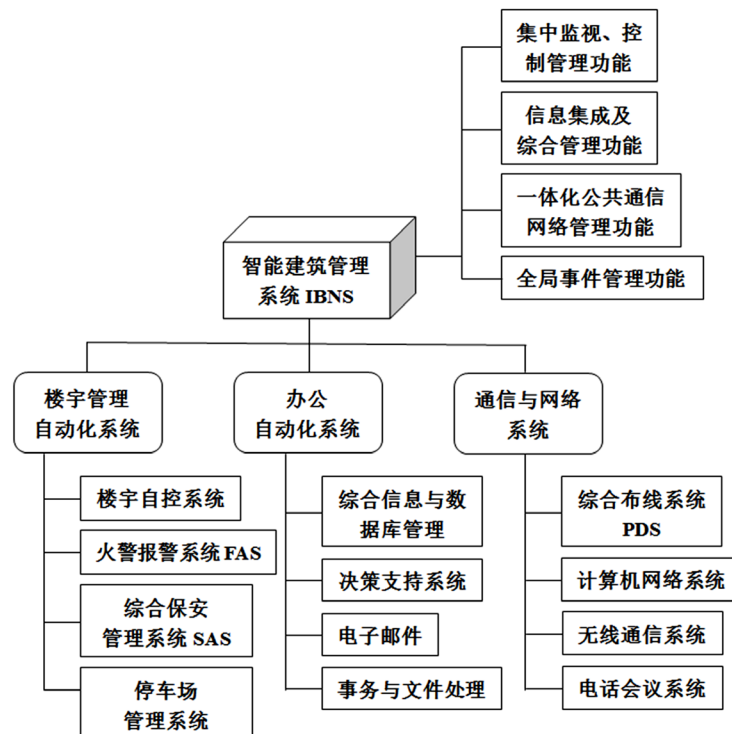


Figure 4. Structure diagram of IBMS system
图 4. IBMS 系统结构图

5. BIM 技术在装配式结构设计中的应用分析

BIM 模型是一个动态的三维数据模型, 具有可视化、模拟性、协调性、优化性、可出图性、一体化、参数化和信息完备性等特点。因此把 BIM 技术作为辅助手段可以解决装配式建筑生产建造过程的关键技术问题(见表 4)。

Table 4. Application of BIM in structural design of prefabricated Buildings
表 4. BIM 在装配式建筑结构设计中的应用

BIM 参与过程	应用	关键技术问题	相关文献
规划阶段	信息整合、场地布置	运用 BIM 技术把模型导入地图进行场地规划和建模, 以帮助决策者实现合理的建筑规划	涂劲松[47]、Amir [48]、赵霞[49]
设计阶段	参数化建模、协同设计、建筑能耗分析与模拟	利用 BIM 可以进行正向的三维设计, 这样可以极大地提高建筑设计效率, 减少甚至消除二维设计所带来的错、漏、碰、缺现象。建立构件标准族库, 与构件生产厂商对接, 可实现人工智能拼装设计、智能生产和建造。	黄立新[50]、Gilbert [51]、Afsari [52]
生产施工阶段	数字化加工、成本管理、施工进度管理	运用 BIM 技术可以实现设计方将所有的设计数据以及参数通过条形码的形式直接转化为装配式结构加工参数, 实现设计信息和生产系统的直接对接, 避免生产错误、提高预制构件生产的自动化程度和生产效率。	乔长江[53]、朱丽玲 [54]、吴平[55]
工程造价	估算、概算、施工预算、进度款支付、竣工结算	利用 BIM 技术进行精准建模在造价预算方面可以实现准确校核、查验、快速提取工程量, 减少工程造价人员的计算强度, 提高工程造价精度和效率。	李静[56]、张树捷 [57]、方芳[58]
运维阶段	信息集成平台	BIM 技术与装配式建筑的结合可以在工程的全生命周期中进行跟踪维护, 与模型对接后可以实现自动监测, 可以防止重大安全隐患的发生, 以实现 BIM 技术在工程全生命周期阶段的管理应用。	项兴彬[59]、王信信 [60]、王茹[61]

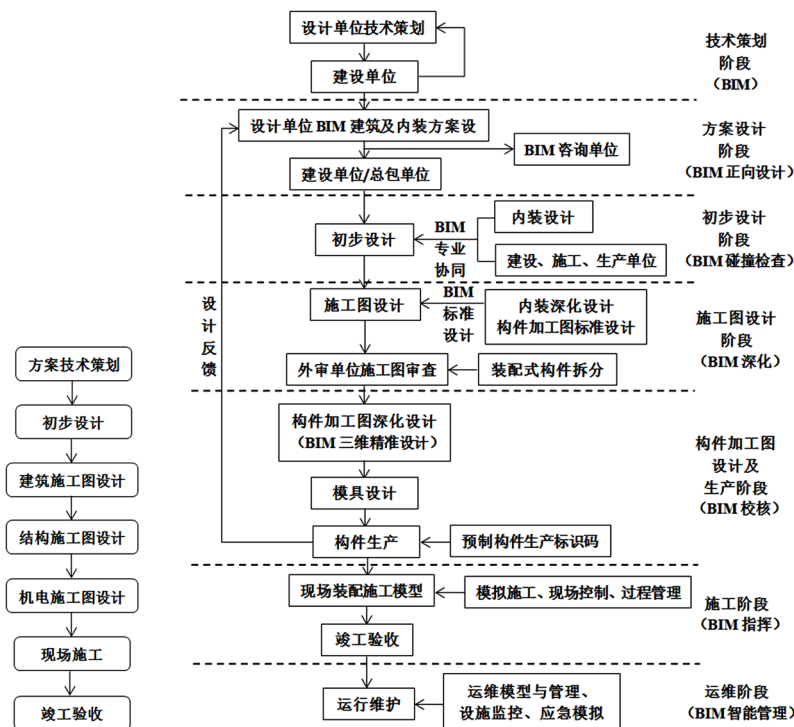


Figure 5. Comparison of structural design of traditional building and BIM prefabricated building
图 5. 传统建筑与 BIM 装配式建筑结构设计对比图

装配式建筑建造过程与传统现浇式建筑相比具有明显不同(见图5),其使用的建造技术也发生了根本性的变化,这些变化贯穿于装配式建筑设计、生产、物流和装配等整个建造过程。基于BIM的装配式建筑项目信息管理平台有利于加强各参建单位之间协同工作,对项目工程量信息进行精确处理,对项目相关信息进行集成管理同时可以对项目数据信息进行积累与共享,加快装配式建筑实现标准化、工业化和产业化,改变传统建造方式,实现节能环保和经济效益。

6. 结论与展望

装配式结构作为当前国内外大力发展的重要结构形式之一,有效地提高了建筑工程产业的工业化进程,为建筑工程建设的高效率和经济性提供了可能。BIM技术在装配式结构设计、施工、建设运营等阶段的应用,有效提高了装配式结构的适用性、高效性和各专业之间的协调性。通过BIM技术能够全面实现设计管理、3D施工模拟、运营管理等,为工程项目的顺利建设提供了保障。本文通过BIM技术和装配式结构国内外研究现状、理论基础等的研究,并借助BIM技术在项目设计流程中的分析,为实体工程项目的实施提供了技术支持。

随着信息化技术的不断发展,一方面,可以将BIM技术与无线射频识别(REID)技术、物联网、全球定位系统(GPS)等信息技术相结合,将装配式建筑整个建造过程形成一个可以系统,自动、实时对预制构件进行识别、定位、监控的体系,将更有效的对装配式建筑造价进行控制。另一方面,BIM技术在装配式建筑应用过程中的信息传递与共享的信息交换方法还需进一步深入研究,在一定程度上影响了BIM技术优势的发挥,所以,未来应该在这一方面进行积极探索。

基金项目

河北省创新能力提升计划项目(19456102D)。

参考文献

- [1] 周梓珊. 基于BIM的装配式建筑产业化效率评价的指标体系研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [2] 刘若南. 中国装配式建筑发展背景及现状[J]. 住宅与房地产, 2019(32): 33-47.
- [3] 李红豫. BIM+3D打印技术的装配式建筑研究进展[J]. 施工技术, 2019(6): 276-279.
- [4] 袁明伟. 基于BIM技术的结构设计方法研究[D]: [硕士学位论文]. 锦州: 辽宁工业大学, 2017.
- [5] 渠立朋. BIM技术在装配式建筑设计及施工管理中的应用探索[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [6] 姜琳. 装配式建筑全寿命周期BIM技术应用问题及应对措施研究[J]. 建筑结构, 2019(S2): 558-561.
- [7] 唐洪刚. BIM技术在装配式建筑设计中的应用[J]. 贵州大学学报, 2020, 37(2): 61-65.
- [8] 李伟, 程琳, 何晓宇. BIM技术在装配式混凝土结构深化设计中的应用[J]. 土木建筑工程信息技术, 2020, 12(4): 85-91.
- [9] 周胜利. BIM技术在装配式住宅中的实践应用——以某保障性住房项目为例[J]. 广东建材, 2019, 35(7): 77-79.
- [10] 熊少伟, 周传福. 预制装配式住宅中BIM技术的应用研究[J]. 中华建设, 2019(2): 136-137.
- [11] 闫艺文. BIM技术在预制装配式住宅中的应用研究[J]. 居舍, 2019(3): 76.
- [12] Jrade, A. and Lessard, J. (2015) An Integrated BIM System to Track the Time and Cost of Construction Projects: A Case Study. *Journal of Construction Engineering*, 2015, Article ID: 579486. <https://doi.org/10.1155/2015/579486>
- [13] 刘金典, 张其林, 张金辉. 基于建筑信息模型和激光扫描的装配式建造管理与质量控制[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 33-41.
- [14] 李希胜, 刘勤文, 王军. 基于BIM的装配式建筑协同设计方法[J]. 土木建筑工程信息技术, 2020, 12(1): 76-83.
- [15] 马辉. 试论BIM技术在装配式住宅设计中的应用[J]. 住宅产业, 2018(11): 55-57.

- [16] 邹婷婷. 预制装配式住宅中 BIM 技术的应用研究[J]. 智能建筑与智慧城市, 2018(4): 59-60.
- [17] 郑向东. 装配式住宅设计中 BIM 技术的应用[J]. 住宅与房地产, 2018(12): 82-83.
- [18] 张金辉, 张其林, 常治国. BIM 引擎及其应用研究[J/OL]. 土木工程信息技术, 1-7. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5823.TU.20200527.1131.002.html>, 2020-10-12.
- [19] 刘照球, 金昊鹏, 宗震宇, 仲明明. 装配式混凝土梁柱节点区 BIM 与点云的应用价值[J]. 建筑技术开发, 2020, 47(4): 74-76.
- [20] 林佳瑞, 张建平, 钟耀锋. 基于 4D-BIM 的施工进度-资源均衡模型自动构建与应用[J]. 土木工程信息技术, 2014, 6(6): 44-49.
- [21] 江帆. 基于 BIM 和 RFID 技术的建设项目安全管理研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [22] 周文波, 蒋剑, 等. BIM 技术在预制装配式住宅中的应用研究[J]. 施工技术, 2012(22): 72-74.
- [23] 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): 76-78.
- [24] 王兰芝. 装配式建筑施工 BIM 仿真模拟[J]. 中国住宅设施, 2015(3): 81-83.
- [25] 沙俊丽. 分析 BIM 技术在预制装配式建筑中的应用[J]. 建材与装饰, 2019(30): 36-37.
- [26] 沙娜. 探析 BIM 技术在装配式建筑深化设计中的应用[J]. 科技创新导报, 2018, 15(3): 97-99.
- [27] 任福东, 穆智琼, 解康, 等. BIM 技术与预制装配式建筑发展与应用[J]. 江西建材, 2018(1): 40-43.
- [28] 胡江飞. BIM 技术在预制装配式建筑施工中的应用研究[J]. 居舍, 2018(32): 36.
- [29] Liang, Y. and Chuang, C. (2013) Variable Neighborhood Search for Multi-Objective Resource Allocation Problems. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **29**, 73-78. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2012.04.015>
- [30] 张建平, 李丁, 林佳瑞, 等. BIM 在工程施工中的应用[J]. 施工技术, 2012(16): 10-17.
- [31] 周率. 基于装配式建筑的探讨[J]. 建筑工程技术与设计, 2016(12): 1291-1292.
- [32] 周宁. 浅谈装配式建筑的发展现状与前景[J]. 建筑工程技术与设计, 2016(14): 2661.
- [33] 吴国华. 预制装配式建筑施工技术探讨[J]. 建筑工程技术与设计, 2016(27): 387.
- [34] 梅娟. 基于数字技术的装配式建筑建造研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 2015.
- [35] 孙链钦. BIM 技术在我国建筑工业化中的研究与应用—以某 PC 住宅建筑为例[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [36] Marchesi, M. and Matt, D.T. (2017) Design for Mass Customization: Rethinking Prefabricated Housing Using Axiomatic Design. *Journal of Architectural Engineering Technology*, **23**, 1-20. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000260](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000260)
- [37] Cheung, F.K.T. and Rihan, J. (2012) Early Stage Multi-Level Cost Estimation for Schematic BIM Models. *Automation in Construction*, **27**, 67-77. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.05.008>
- [38] Richard, R. (2005) Industrialised Building Systems: Reproduction before Automation and Robotics. *Automation in Construction*, **14**, 442-451. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2004.09.009>
- [39] Park, H. and Ock, J.-H. (2016) Unit Modular In-Fill Construction Method for High-Rise Building. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **20**, 1201-1210. <https://doi.org/10.1007/s12205-015-0198-2>
- [40] Wang, Z.C. and Johngrace, J.K.S. (2017) The Development Trend of American Assembly Construction Industry. *Metal Structure of Chinese Architecture*, **9**, 24-31.
- [41] Dong, Y.C., Eun, Y.A. and Jae, W.K. (2011) Understanding and Implementation of the Digital Design Modules for HANOK. *Multimedia, Computer Graphics and Broadcasting*, **262**, 127-134. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27204-2_15
- [42] Jaillon, L. and Poon, C.S. (2014) Life Cycle Design Prefabrication in Buildings: A Review and Case Studies in Hong Kong. *Automation in Construction*, **39**, 195-202. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.09.006>
- [43] 袁鹏飞. 保障房工业化建设水平评价体系构建研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [44] 姚刚. 基于 BIM 的工业化住宅协同设计的关键要素与整合应用研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2016.
- [45] 吴琨, 车顺利, 贾俊明, 韦孙印, 董凯利. 预制装配式技术在传统风格建筑中的应用[J]. 建筑结构, 2017, 47(22): 66-69 + 65.
- [46] 郗禄文, 许璐璐, 韩彦欣, 刘备战. 基于 Revit 技术装配式混凝土剪力墙结构拆分设计研究[J]. 住宅产业, 2017(10): 50-55.
- [47] 涂劲松, 刘运林, 谢轩, 卞祝, 周明. 基于 BIM 技术的装配式混凝土结构设计施工流程及应用研究[J]. 安徽建筑

大学学报, 2019, 27(1): 1-5.

- [48] Behzadan, A.H., Iqbal, A. and Kamat, V.R. (2011) A Collaborative Augmented Reality Based Modeling Environment for Construction Engineering and Management Education. *Proceedings Winter Simulation Conference*, Phoenix, 11-14 December 2011, 3568-3576. <https://doi.org/10.1109/WSC.2011.6148051>
- [49] 赵霞. 建筑工业视角下基于 BIM 建筑集成设计方法研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [50] 黄立新, 马恩成, 张晓龙, 等. PKPM 的“BIM 数据中心及协同设计平台” [J]. 建筑科学, 2018, 34(9): 42-49.
- [51] Gilbert, T., Barr, S., James, P., Morley, J. and Ji, Q.Y. (2018) Software Systems Approach to Multi-Scale GIS-BIM Utility Infrastructure Network Integration and Resource Flow Simulation. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7, 310. <https://doi.org/10.3390/ijgi7080310>
- [52] Afsari, K., Eastman, C.M. and Castro-Lancouture, D. (2017) JavaScript Object Notation (JSON) Data Serialization for IFC Schema in Web-Based BIM Data Exchange. *Automation in Construction*, 77, 24-51. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.01.011>
- [53] 乔长江, 周子璐. BIM 技术在深化设计与施工阶段的应用[J]. 广东土木与建筑, 2020, 27(7): 72-75.
- [54] 朱丽玲, 黄庆明, 孟馨. BIM 技术在施工阶段的应用探究[J]. 价值工程, 2020, 39(20): 239-241.
- [55] 吴平, 刘尚, 宋千军. BIM 技术在施工投标阶段的应用特点[J]. 上海建设科技, 2020(4): 68-71.
- [56] 张树捷. BIM 在工程造价管理中的应用研究[J]. 建筑经济, 2012(2): 20-24.
- [57] 李静, 方后春, 罗春贺. 基于 BIM 的全过程造价管理研究[J]. 建筑经济, 2012(9): 96-100.
- [58] 方芳, 刘月君, 李艳芳, 许彬. 基于 BIM 的工程造价精细化管理研究[J]. 建筑经济, 2014, 35(6): 59-62.
- [59] 项兴彬, 余芳强, 张铭. 建筑运维阶段的 BIM 应用综述[J]. 中国建设信息化, 2020(9): 76-78.
- [60] 王信信, 金坚强, 周慧. BIM 技术在装配式建筑运维阶段的应用[J]. 建筑与文化, 2020(1): 178-179.
- [61] 王茹, 黄鑫. 基于 BIM 的运维阶段设备构件预警管理系统研究[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(19): 231-235.