

DOI: 10.13791/j.cnki.hsfwest.20200603

许俊民. 绿色建筑结合BIM技术的最新发展[J]. 西部人居环境学刊, 2020, 35(6): 17-23.

HUI C M S. Latest Development of Integrating Building Information Modelling (BIM) for Green Buildings[J]. Journal of Human Settlements in West China, 2020, 35(6): 17-23.

绿色建筑结合BIM技术的最新发展

Latest Development of Integrating Building Information Modelling (BIM) for Green Buildings

许俊民 HUI Chun Man Sam

摘要: 建筑信息模型(BIM)是一个使用数字模型来支持虚拟设计和施工的协作工作流程,可以简化项目交付工作流程并提高建筑性能。使用BIM为能源绩效评估和可持续性评估提供数据,被称为绿色BIM。近年来,BIM的采用在世界上许多国家和城市显著增长。基于BIM的能效分析可以帮助项目设计团队检查和创建优化的能源效率。绿色BIM方法可以帮助专业人士预测建筑的结果,从而在整个生命周期中将其对环境的影响降至最低。如果能够收集有用的信息和数据并将其提供给设施管理员和最终用户,绿色BIM的潜力可以得到增强。本文将解释BIM的主要特征,描述可持续建筑环境的信息要求和管理,并探讨使用BIM和其他相关技术促进绿色建筑发展的新机会。

关键词: 建筑信息建模; 绿色建筑; 可持续设计; 虚拟设计和施工; 生命周期评估

Abstract: Building information modelling (BIM) is a collaborative working process using digital models to support virtual design and construction, which can streamline project delivery workflow and improve business performances and productivity throughout the total life cycle of building assets. In principle, BIM can be defined as the process of creating and using digital models for design, construction, and/or operations of building or infrastructure projects. A BIM model is a shared knowledge resource for information about a facility forming a reliable basis for decisions during its life cycle. In recent years, BIM adoption has grown significantly in many countries and cities around the world. BIM is considered a major driver for the digital transformation and innovation of the construction sector; also, it has good potential to enhance sustainable construction and environmental sustainability.

The use of BIM to provide data for energy performance evaluation and sustainability assessment is known as Green BIM. Usually, Green BIM includes building energy modelling dealing with project energy performance to identify options to optimize building energy efficiency during the life cycle. In addition, BIM can provide a decision support basis for evaluating the key carbon emission sources to achieve a holistic design and assessment of low carbon buildings. In practice, BIM-based energy analysis can help project design teams to examine and create optimized energy efficiency. A BIM-based approach to green building can assist professionals in predicting the outcomes of construction to minimize its impact on the environment throughout its life cycle. For green building projects, to facilitate modelling and analysis, four BIM capabilities are often applied including MEP (mechanical, electrical and plumbing) system modelling, energy and environment analysis, constructability analysis and structural analysis. With an integrated BIM-based design process, the necessary data for green building assessment can be extracted from BIM models for calculating the green rating and providing feedback for further evaluation. Also, the essential documentation necessary for obtaining green building certification can be generated timely and efficiently. Moreover, BIM has the potential to aid designers to select the right type of materials during the early design stage and to make vital decisions that have great impacts on the life cycle of sustainable buildings.

By integrating BIM with building simulation tools and optimization methods, it is possible to achieve building performance optimization and support the visualization and

中图分类号 TU201.5

文献标识码 A

文章 编 号 2095-6304 (2020) 06-17-07

作者简介

许俊民(通讯作者):香港大学工程学院,客席助理教授,cmhui@hku.hk

management of a building's operational performance. It is believed that BIM as a design iterative tool can offer new insights into the sustainable building design process in a multi-dimensional manner by considering the three important sustainability dimensions (economic, environmental and social). By linking BIM to sustainability analysis, it is possible to evaluate environmental impacts more effectively over the entire lifespan of building or infrastructure, therefore contribute to reduce waste and improve construction quality. Usually, the main BIM functions for sustainability analyses include energy consumption, carbon emissions, life cycle assessment, natural ventilation, solar and lighting analysis, acoustics, and water usage.

The Green BIM potentials can be enhanced when useful information and data are collected and provided to facilities managers and building end-users. The exchange of information between BIM and other tools is a critical factor affecting the integration of BIM and green buildings. It is believed that an efficient interoperability along the life cycle supported by BIM will allow an overall better management and help users to improve sustainability of projects. More efforts are needed to be put in collecting, analyzing and sharing the right data for Green BIM applications. For example, reliable data exchange protocol and standard of building information is needed for BIM-enabled operations and maintenance work processes. To explore the Green BIM development, this research paper will explain the key characteristics of BIM, describe the information requirements and management for sustainable built environment, and discuss the new opportunities of using BIM and other related technologies for promoting green buildings. It is hoped that the Green BIM potentials can be further developed and enhanced for environmental sustainability monitoring and management over the building life cycle.

Keywords: Building Information Modelling; Green Buildings; Sustainable Design; Virtual Design and Construction; Life Cycle Assessment

0 引言

建筑信息模型 (building information modelling, BIM) 是一个使用数字模型的协作工作流程, 以支持虚拟设计和施工 (virtual design and construction, VDC), 可以简化项目交付工作流程, 并在整个建筑的生命周期中提高业务绩效和生产力。如今, BIM 在全球许多国家和城市中的应用都有显著增长, 被认为是建筑行业数字化转型和创新的主要驱动力^[1]。近年来, 有关BIM在可持续建筑中的作用的研究和文献很多, 有关此主题的相关出版物呈指数增长^[2]。人们相信BIM具有良好潜力, 可以为绿色建筑发展提供一个广阔平台和有力支撑^[3], 也可以在建筑生命周期中增强环境可持续性^[4-5]。在实践应用中, 使用BIM为能源绩效评估和可持续性评估提供数据, 被称为绿色BIM^[6-9]。

图1显示了绿色BIM的基本概念^[10], 包括处理项目能源绩效的建筑能效模拟, 以识别在生命周期内优化建筑能效的选项。此外, BIM可以为评估关键碳排放源提供决策支持基础, 以实现对低碳建筑的整体设计和评估^[11]。基于BIM的绿色建筑方法可以帮助专业人士预测建筑的成果, 从而最大程度地降低其在整个生命周期中对环境的影响。为了探索绿色BIM的发展, 本文将解释BIM

的主要特点, 描述可持续建筑环境的信息要求和管理, 并探讨使用BIM和其他相关技术促进绿色建筑发展的新机会。

1 BIM的主要特点

BIM可以定义为创建和使用数字模型进行建筑或基础设施项目的设计、建造和/或运营的过程。这种数字模型旨在在虚拟环境中模拟建筑项目, 并可用于设施的规划、设计、建造和运营。BIM可用于可视化、增强文档、冲突、干扰和碰撞检测、建筑物性能和结构分析、代码审查、施工顺序、预制和自动组装、成本估算和设施管理^[12]。BIM技术的价值在于信息的解构、结合与高效利用^[13], 是一种共享的知识资源, 用于获

取有关设施的资讯, 从而在其生命周期中形成可靠的决策基础。图2显示了BIM在项目生命周期中不同阶段的典型应用。

1.1 BIM作为支持平台

BIM可以在建筑环境中充当数字化转型的推动者^[3], 并获得精益和绿色项目的成果^[14]。BIM的技术核心是支持3D建模和信息管理的软件工具。该技术的要点在于它使收集和共享数据变得更加容易。通过建立公共数据环境 (common data environment, CDE) 和单一信息源, BIM使相关者能够有效共享每条信息以增强协作与结合。为了促进建模和分析, 绿色建筑项目经常应用四种BIM功能, 包括机械、电气和管道系统建模, 能源和环境分析, 可施工性分析和结构

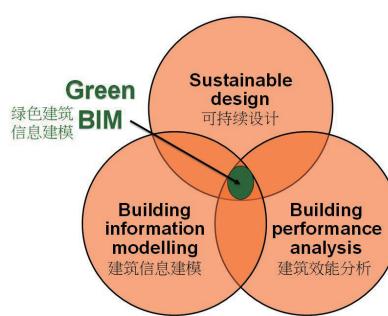


图1 绿色BIM的基本概念

Fig.1 basic concepts of green BIM



图2 项目生命周期不同阶段的BIM

Fig.2 BIM at different stages of the project life cycle

分析^[14]。BIM是VDC过程的重要元素,通过该过程,设计和施工合作伙伴可以在3D虚拟环境中协作模拟建筑项目中的所有工作,然后再在现实世界中现场执行。在BIM的支持下,VDC允许项目成员以通用语言工作,其中所有必要的信息都是透明且可以立即获得的。这样可以积极主动地解决挑战,以提高效率、生产率和质量。

1.2 合作和协调

BIM是创建3-D设计平台的过程,允许建筑师和工程顾问实时跨领域地参与设计过程。BIM最有价值的功能之一是它能够改善多个设计学科之间的协调从而减少错误。人们相信BIM可以为建筑规划、建造和维护提供数据驱动的方法^[15]。当一切通过BIM连接起来以管理交互时,它可以改善项目/问题管理以及设计/施工协调。通过在结合设计系统中使用BIM协作,可以提高设计质量和效率。在现实生活中,BIM可以通过多种方式实施,但本质上是建筑行业的相关者使用BIM软件促进工作过程。BIM的使用是一个结合过程,而设计人员和承包商可以从其中获得许多功能。作为增强所有项目相关者之间沟通与协作的结合设计和管理工具,BIM正在改变建筑师、工程师、测量师、承包商、建筑业主、设施经理和供应商之间的合作方式。

1.3 可视化

BIM可视化通过在项目和组件真正开始并正在构建之前就将它们变为现实,帮助简化项目和支援决策。在典型的建筑项目中,建筑可视化具有许多关键功能,以传达新结构的要求和意图、有关的美学、质量、功能和概念或最终设计的含义。与时间和进度表结合后,BIM启用了4D排序过程,可帮助项目团队改进潜在的进度表并优化施工作业。如今3D BIM技术和先进的可视化技术可以协同工作,以用于建筑物能效分析、采光模拟、施工计划和执行以及设施维护和节能。计算机图形、逼真的图像、动画、漫游/浏览模型可用于提高对不同设计、演示和分析任务的理解。BIM可以支持绿色建筑日光与遮阳的可视化和分析,帮助确定建筑物的方向或光伏系统的位置。

随着虚拟样机和可视化技术的更多

创新,例如虚拟现实(virtual reality, VR)、增强现实(augmented reality, AR)、混合现实(mixed reality, MR)和沉浸式可视化,预计应用BIM智能3D建模和实时可视化可以更有效地支持决策过程。最近BIM和可视化软件供应商之间的新合作关系(例如Autodesk和Unity; Graphisoft和Twinmotion)为未来BIM可视化功能提供了一些启示。此外,在宏观层面上,BIM和地理信息系统(geographical information system, GIS)及空间信息技术(spatial information technology, SIT)的结合可以在自然和建筑环境的背景下对结构进行可视化和空间分布动态量化分析^[16-17]。

1.4 建筑环境分析

过去,由于建筑设计和建筑能耗模拟之间复杂的数据交换导致的互操作性不足,阻碍了早期设计和后期阶段利用能效分析^[18]。特别是功能强大的建筑能效模拟(building energy modelling, BEM)工具在工程决策支持分析和可持续性评估中并未得到普遍使用和充分利用^[19]。目前,为了解决互操作性和数据交换问题,可以使用校正插件来克服BIM到BEM互操作性过程的缺点。例如插件工具可以在能效模拟中采用之前修改绿色建筑可延伸标记式语言(green building extensible markup language, gbXML)文件。但是此转换过程并不是没有错误和方便使用的。为了在设计过程中有效地将BIM用于建筑能效建模和分析,必须认真解决BIM-BEM过程和相关技术的结合问题^[20]。为了简化BIM-BEM结合过程,建议通过使用适当的详细程度(level of development/details, LOD)^[21]和通过模型视图定义(model view definition, MVD)获得信息要求,将BIM技术方法嵌入整个设计过程中。应该完善和增强BIM常用的数据交换格式或数据模式,例如行业基础类(industry foundation class, IFC)和gbXML,以满足信息管理的要求。

2 绿色建筑新趋势

绿色建筑设计不仅使用节能材料和设备,它还涉及在整个建筑生命周期中对环境的影响。因此,可持续建筑设计应被视为一

个过程,而不仅仅是一个目标,它应该允许对环境问题、建筑规划、建造和维护的经济和社会影响进行更广泛的评估和评估。

2.1 绿色建筑评估

BIM的各种好处,例如有效的决策、改进分析、更容易的信息获取和更简单的绿色建筑评估,为可持续设计和施工提供优化的解决方案^[22]。通过BIM结合设计流程,可以从BIM模型中提取绿色建筑评估所需数据,以计算绿色等级并提供反馈以进行进一步评估,同时可以及时有效地获得绿色建筑认证所必需的必要文件。一般而言,BIM可以帮助设计师在设计的早期阶段选择正确的材料类型,并做出对可持续建筑的生命周期产生重大影响的重要决策^[23]。当与绿色建筑评级系统(例如LEED和Green Mark)联系在一起时,BIM可以帮助自动执行基于所选认证类别的所需分数的识别过程,累积所选的积分/分数并建议合格的认证BIM平台中的类型^[24],这将促进BIM与可持续性评估的整合。

2.2 建筑性能分析

BIM不仅可以改善建设过程,还可以探索决策的替代方法^[25]。它可以帮助促进对提高能效和室内环境质量方面的建筑性能审查。一个例子是使用BIM进行建筑性能模拟和采光和通风分析^[26-27],这通常可以帮助设计师快速评估设计方案。另一个例子是使用BIM的参数研究对房屋和公寓建筑进行多组分能源评估,以识别关键变量并优化设计参数^[28]。通过将BIM与建筑物模拟工具和优化方法相结合,可以实现建筑性能优化,并支持建筑运行性能的可视化和管理^[29]。在处理大量数据的生产和采购以进行性能分析时,可以使用诸如Dynamo之类的参数化建模工具(parametric modelling tool)从BIM环境中提取基本建筑物的几何形状和与性能相关的信息,并将其转换为适合的数据交换格式,以用于建立模拟和优化工具。这可以大大提高BIM的性能分析和优的能力。

2.3 可持续建筑设计过程

为了实现可持续设计,需要一种能够评

估和优化各种可用工艺、系统、技术和材料选择使用的响应式设计过程^[30]。BIM作为设计迭代工具可以通过考虑以下三个重要的可持续性维度,以多维方式为可持续建筑设计过程提供新的见解^[31]。

一、经济:迅速的费用反馈和评价;
二、环境:采用BIM的生命周期影响分析(life cycle impact analysis, LCIA),生命周期评估(life cycle assessment, LCA)和其他绿色建筑评级系统;

三、社会:基于BIM的质量检查过程。

不仅是建筑项目,绿色BIM还可以应用于可持续的基础设施和规划场地的位置^[4]。原则上,可持续设计是指建筑物或基础设施的整个生命周期,包括最大限度地节约资源(能源、水、土地和材料),保护环境,减少污染,为人们提供健康、舒适和有效的使用空间,并建立自然与建筑环境的和谐。通过使用BIM可以减少浪费并提高施工质量。

2.4 评估对环境的影响和低碳建筑

通过将BIM与可持续性分析联系起来,可以在建筑或基础设施的整个生命周期中更有效地评估环境影响。典型的建筑项目生命周期阶段包括规划和设计、施工、调试、运行和维护、翻新和拆除。人们相信BIM有潜力在每个阶段中应用,以促进可持续建设^[32]。另一方面,BIM提供了建筑物的详细物理和功能特征,可以与各种环境建模方法结合在一起,以实现可持续性低碳建筑物的整体设计和评估^[11]。BIM提供了决策支持基础,用于评估建筑物整个生命周期中的关键碳排放源,并探索更加环境可持续的措施来改善建筑环境。例如,可以使用BIM框架进行具体化和可操作的碳量化和分析。

3 绿色BIM的潜力

许多人认为BIM技术的未来地图应集中在如何通过以下开发来使用BIM数据/信息来提高效率/有效性:BIM模型>结合>自动化>优化。当应用于绿色BIM时,这仍然是有效的(如前几节所述),并可为成功实现BIM的可持续设计设定策略和未来方向^[7]。BIM与绿色建筑之间的联系可以通过绿色BIM

三角形来描述,该三角形包括三个方面^[6]。

- 一、项目阶段: BIM支持绿色建筑的设计、建造、运营和改造过程;
- 二、绿色属性: BIM在绿色建筑分析中的各种功能,例如能效、排放和通风分析;
- 三、BIM属性: 例如支持绿色建筑评估的BIM。

表1总结了绿色BIM在整个绿色项目生命周期中的潜力。BIM在建筑工程行业内的应用不断延伸,从场地设计^[33]到建筑设计和施工,目前其中许多潜力尚未得到充分开发和利用,尤其是在建设、运营和翻新阶段^[34]。BIM在可持续性分析的主要功能包括能耗、碳排放、自然通风、太阳能和照明分析、声学和用水等。但是,对于绿色BIM应用的各个方面,现在仍然缺乏明确的行业标准或规范。

3.1 自动化绿色建筑评估

因为绿色建筑评级系统的重要性日益提高,BIM支持的绿色建筑评估在不同国家引起了很多关注^[35-36]。通过将绿色建筑评估方案与BIM结合在一起,人们可以利用BIM数据来评估和获得绿色建筑评分以促进评估过程。许多国家都在发展绿色建筑评估的完全结合和自动化,以增强BIM在绿色建筑认证中的应用。也可以将BIM和Web地图服务技术结合在一起,以进行站点定位和运输分析^[37]。使用BIM可以帮助自动化和优化建筑可持续性评估,并大大简化绿色建筑评估流程和认证^[38]。

3.2 优化建筑设计

BIM可以帮助设计师优化设计并提高建筑的可持续性^[39]。绿色BIM可以帮助设计人员在建筑设计的生命周期成本(life cycle cost, LCC)和生命周期碳排放量(life cycle carbon emissions, LCCE)之间进行权衡,以选择最佳的建筑材料替代品^[38]。研究发现^[5],当今大多数绿色BIM研究都集中在建筑生命周期的设计和施工阶段的环境绩效。很少有研究和BIM工具用于在建筑物维护、翻新和拆除阶段管理环境绩效。针对新开发项目和改造项目的可持续性分析对于社会中有效的低碳管理非常重要^[32, 40-41]。为了

表1 贯穿绿色项目生命周期的绿色BIM潜力

Tab.1 green BIM potentials throughout the lifecycles of green projects

设计阶段	促进数据交换和结合, 提供可视化的建筑性能分析和模拟, 评估设计方案
施工阶段	分析施工过程的各种环境影响, 有助于减少浪费, 提高施工生产率和性能
运营阶段	帮助监控建筑物的可持续性表现
改造和翻新	支持收回能源和资本投资, 使能源和废物管理受益

最大程度地发挥环境绩效,BIM系统应该与设施运营维护手册更好地结合在一起,并且还需要使用基于云的BIM技术来使用大数据来管理建筑物的可持续性。

3.3 结合BIM和生命周期评估

生命周期评估(LCA)方法通常用于评估建筑材料对环境的影响(例如在制造和运营阶段),并支持对建筑施工中环境改善潜力的评估^[42-43]。BIM和LCA的结合可以验证设计概念的发展,也可以为实现可持续建筑和增强建筑部门的决策过程提供最佳程序。通过BIM结合的方法,可以识别特定于设计的热点,这些热点可以在建筑模型上可视化以传达LCA结果和设计指南^[43]。BIM提供了一个将可持续性信息纳入建筑物设计的平台,但是BIM与LCA工具的互操作性需要进一步研究^[44]。例如,必须有效规划和链接BIM环境、数据分析工具、具体化的能源估算、LCA数据库和结果。为了简化评估,重要的是要确保BIM-LCA的互操作性并启用自动化或半自动化流程^[45]。在BIM模型和外部数据库之间提供便利的链接以保证无缝分析也是至关重要的^[46]。如果有效结合,BIM可以在可持续设计流程的LCA应用过程中简化数据输入,优化输出数据和结果^[47]。

4 讨论

当前缺乏合适的计算机工具以及BIM模型的复杂性阻碍了绿色BIM的采用。一些研究人员已经确定了主要挑战和研究差距^[2, 7],总结如下。

- 一、BIM工具和可持续性工具之间的互操作性问题;
- 二、BIM支持绿色项目建设和运营阶段的能力有限;

三、缺乏针对绿色BIM应用各个方面
的明确行业标准或规范;

四、缺乏适当的项目交付方法来利用
绿色BIM应用程序;

五、缺乏采用绿色BIM的激励措施和行
业接受度低。

BIM与其他工具之间的信息交换是影响BIM与绿色建筑整合的关键因素^[48]。在BIM支持的整个生命周期内,高效的互操作性将使整体管理水平更好,并帮助用户改善项目的可持续性^[49]。这种互操作性不仅必须考虑数据,还应考虑更广泛的方面,例如流程和指南、避免信息丢失并促进分析。例如,BIM的能效分析可用于现有建筑物的居住后评估、后期调试、连续调试和改造,以提供可靠的建筑物能效性能模型^[50-51]。整个生命周期能量评估可以纳入BIM进行翻新项目^[52]。此外,BIM可以促进建筑物的异地制造,以增强可持续性和成本效益^[53-54]。

为了加强整合,必须认真考虑绿色建筑
问题的信息要求,尤其是在建设、运营和翻
新阶段^[34]。应根据项目的详细程度(LOD)
以适当标准化的格式将诸如供应商的环境
产品声明(environmental product declaration,
EPD)之类的环境属性包括在BIM对象中^[22, 44]。这样可以确保在建筑物或设施的
整个生命周期中共享一致性,自动进行数据
交换并提供准确的建筑物资讯。在收集、分
析和共享适用于绿色BIM应用程序的正确
数据方面需要付出更多的努力。例如,启用
BIM的操作和维护工作流程需要可靠的数据
交换协议和建筑信息标准^[55]。

5 结论

到目前为止,BIM仍未普遍有效地面向
绿色和可持续发展的建筑,但它具有巨大的
潜力,能够在建筑的整个生命周期中支持和
增强对环境可持续性分析、监测、管理和优
化。如果收集有用的信息和数据并将其提供
给设施管理者和最终用户,则可以增强绿色
BIM的潜力。当BIM模型与绿色建筑设计和
分析完全结合时,它可以促进绿色建筑评估
的自动化,建筑性能的优化和监视以及生命
周期环境影响的评估。

参考文献:

- [1] HUI S C M. From BIM to VDC: Strategies for Innovation and Transformation[C]//Organizing Committee of the Symposium. In Proceedings of the Joint Symposium 2018: Innovative Technology Fusion for Next Challenging Century. Hong Kong: ASHRAE Hong Kong Chapter, CIBSE Hong Kong Branch and HKIE Building Services Division, 2018.
- [2] SANTOS R, COSTA A A, SILVERSTRE J D, et al. Informetric Analysis and Review of Literature on the Role of BIM in Sustainable Construction[J]. Automation in Construction, 2019, 103: 221-234.
- [3] 王博涵,王彦潮,仲美玲.基于BIM技术的
绿色建筑设计方法研究[J].中国建筑金
属结构,2020(8): 88-89.
WANG B H, WANG Y C, ZHONG M L. Research on Green Building Design Method Based on BIM Technology[J]. China Construction Metal Structure, 2020(8): 88-89.
- [4] BONENBERG W, WEI X. Green BIM in Sustainable Infrastructure[J]. Procedia Manufacturing, 2015(3): 1654-1659.
- [5] WONG J K W, ZHOU J. Enhancing Environmental Sustainability over Building Life Cycles Through Green BIM: A Review[J]. Automation in Construction, 2015, 57: 156-165.
- [6] KRYGIEL E, NIES B. Green BIM: Successful Sustainable Design with Building Information Modeling[M]. Indianapolis: Wiley Pub., Indianapolis, Ind., 2008.
- [7] LU Y, WU Z, CHANG R, et al. Building Information Modeling (BIM) for Green Buildings: A Critical Review and Future Directions[J]. Automation in Construction, 2017, 83: 134-148.
- [8] MALTESE S, TAGLIABUE L C, CECCONI F R, et al. Sustainability Assessment Through Green BIM for Environmental, Social and Economic Efficiency[J]. Procedia Engineering, 2017, 180: 520-530.
- [9] 陈阳,舒波,张睿智.国外绿色BIM研究
进展及对所说的启示[C]//工业建筑杂
志社. 2020年工业建筑学术交流会论文
集(中册). 北京: 工业建筑杂志社, 2020:
432-437.
CHEN Y, SHU B, ZHANG R Z. Review of Green Building Research at Domestic and Abroad and Its Enlightenment[C]// Industrial Construction Magazine. Proceedings of 2020 Industrial Building Academic Exchange Conference (Middle Volume). Beijing: Industrial Construction Magazine, 2020: 432-437.
- [10] 台湾地区内政主管部门建筑研究所.台湾
Green BIM绿建筑资讯建模应用架构研
究[R]. 台北: 台湾地区内政主管部门建筑
研究所, 2015.
Architecture and Building Research Institute (ABRI) of the Internal Affairs Authority of Taiwan. Research on the Application Framework of Taiwan Green BIM[R]. Taipei: Architecture and Building Research Institute (ABRI) of the Internal Affairs Authority of Taiwan, 2015.
- [11] GAN V J L, DENG M, TSE K T, et al. Holistic BIM Framework for Sustainable Low Carbon Design of High-Rise Buildings[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 195: 1091-1104.
- [12] AZHAR S. Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry[J]. Leadership and Management in Engineering, 2011, 11(3): 241-252.
- [13] 曾旭东,周鑫,张磊. BIM技术在建筑设
计阶段的正向设计应用探索[J].西部人
居环境学刊,2019,34(6): 119-126.
ZENG X D, ZHOU X, ZHANG L. Explorations on the Forward Design Application of BIM Technology in Architectural Design Stage[J]. Journal

- of Human Settlements in West China, 2019, 34(6): 119-126.
- [14] AHUJA R, SAWHNEY A, ARIF M. Driving Lean and Green Project Outcomes Using BIM: A Qualitative Comparative Analysis[J]. International Journal of Sustainable Built Environment, 2017, 6(1): 69-80.
- [15] EL-DIRABY T, KRIJNEN T, PAPAGELIS M. BIM-Based Collaborative Design and Socio-Technical Analytics of Green Buildings[J]. Automation in Construction, 2017, 82: 59-74.
- [16] WANG H, PAN Y, LUO X. Integration of BIM and GIS in Sustainable Built Environment: A Review and Bibliometric Analysis[J]. Automation in Construction, 2019, 103: 41-52.
- [17] 于洋, 王睿坤, 雷振东. 基于空间信息技术的村庄分布和消解特征定量化分析方法——以陕西省陕北地区为例[J]. 西部人居环境学刊, 2019, 34(6): 109-118.
YU Y, WANG R K, LEI Z D. Quantitative Analysis Method for the Distribution and Decrease Characteristics of Villages Based on Spatial Information Technology: A Case Study of Northern Shaanxi Province[J]. Journal of Human Settlements in West China, 2019, 34(6): 109-118.
- [18] KIM J B, JEONG W S, CLAYTON M J, et al. Developing A Physical BIM Library for Building Thermal Energy Simulation[J]. Automation in Construction, 2015, 50: 16-28.
- [19] KAMEL E, MEMARI A M. Review of BIM's Application in Energy Simulation: Tools, Issues, and Solutions[J]. Automation in Construction, 2019, 97: 164-180.
- [20] FARZANEH A, MONFET D, FORGUES D. Review of Using Building Information Modeling for Building Energy Modeling During the Design Process[J]. Journal of Building Engineering, 2019, 23: 127-135.
- [21] JIN R, ZHONG B, MA L, et al. Integrating BIM with Building Performance Analysis in Project Life-Cycle[J]. Automation in Construction, 2019, 106, Article 102861.
- [22] ILHAN B, YAMAN H. Green Building Assessment Tool (GBAT) for Integrated BIM-Based Design Decisions[J]. Automation in Construction, 2016, 70: 26-37.
- [23] JALAEI F, JRADE A. Integrating Building Information Modeling (BIM) and LEED System at the Conceptual Design Stage of Sustainable Buildings[J]. Sustainable Cities and Society, 2015, 18: 95-107.
- [24] LIU Z, CHEN K, PEH L, et al. A Feasibility Study of Building Information Modeling for Green Mark New Non-Residential Building (NRB): 2015 Analysis[J]. Energy Procedia, 2017, 143: 80-87.
- [25] HABIBI S. The Promise of BIM for Improving Building Performance[J]. Energy and Buildings, 2017, 153: 525-548.
- [26] KOTA S, HABERL J S, CLAYTON M J, et al. Building Information Modeling (BIM)-Based Daylighting Simulation and Analysis[J]. Energy and Buildings, 2014, 81: 391-403.
- [27] 侯叶, 孙一民. 我国体育建筑屋顶采光通风策略演变研究[J]. 西部人居环境学刊, 2019, 34(2): 20-28.
HOU Y, SUN Y M. Research on Evolution of Roof Lighting and Ventilation Strategies for Sports Buildings in China[J]. Journal of Human Settlements in West China, 2019, 34(2): 20-28.
- [28] SINGH P, SADHU A. Multicomponent Energy Assessment of Buildings Using Building Information Modeling[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 49, Article 101603.
- [29] GERRISH T, RUIKAR K, COOK M, et al. BIM Application to Building Energy Performance Visualisation and Management: Challenges and Potential[J]. Energy and Buildings, 2017, 144: 218-228.
- [30] AHMAD T, AIBINU A, THAHEEM M J. BIM-Based Iterative Tool for Sustainable Building Design: A Conceptual Framework[J]. Procedia Engineering, 2017, 180: 782-792.
- [31] SANTOS R, COSTA A A, SILVERSTRE J D, et al. Integration of LCA and LCC Analysis Within a BIM-Based Environment[J]. Automation in Construction, 2019, 103: 127-149.
- [32] CHONG H Y, LEE C Y, WANG X. A Mixed Review of the Adoption of Building Information Modelling (BIM) for Sustainability[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 142(Part 4): 4114-4126.
- [33] 刘雯. BIM技术在场地设计中的应用探索[J]. 绿色建筑, 2020(2): 72-77.
LIU W. BIM Technology in Site Planning[J]. Green Building, 2020(2): 72-77.
- [34] 王士军, 卜震, 黄薇. 基于BIM的绿色建筑后勤运营管理[J]. 绿色建筑, 2019(2): 66-68.
WANG S J, BU J, HUANG W. Green Building Operation by BIM[J]. Green Building, 2019(2): 66-68.
- [35] ANSAH M K, CHEN X, YANG H, et al. A Review and Outlook for Integrated BIM Application in Green Building Assessment[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 48, Article 101576.
- [36] SOLLA M, ISMAIL L H, SHAARANI A S M, et al. Measuring the Feasibility of Using of BIM Application to Facilitate GBI Assessment Process[J]. Journal of Building Engineering, 2019, 25, Article 100821.
- [37] CHEN P H, NGUYEN T C. Integrating BIM and Web Map Service (WMS) for Green Building Certification[J]. Procedia

- Engineering, 2016, 164: 503-509.
- [38] CARVALHO J P, BRAGANCA L, MATEUS R. Optimising Building Sustainability Assessment Using BIM[J]. Automation in Construction, 2019, 102: 170-182.
- [39] LIU S, MENG X, TAM C. Building Information Modeling Based Building Design Optimization for Sustainability[J]. Energy and Buildings, 2015, 105: 139-153.
- [40] MARZOUK M, AZAB S, METAWIE M. BIM-Based Approach for Optimizing Life Cycle Costs of Sustainable Buildings[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 188: 217-226.
- [41] KHADDAJ M, SROUR I. Using BIM to Retrofit Existing Buildings[J]. Procedia Engineering, 2016, 145: 1526-1533.
- [42] NAJJAR M, FIGUEIREDO K, PALUMBO M, *et al.* Integration of BIM and LCA: Evaluating the Environmental Impacts of Building Materials at an Early Stage of Designing a Typical Office Building[J]. Journal of Building Engineering, 2017, 14: 115-126.
- [43] RÖCK M, HOLLBERG A, HABERT G, *et al.* LCA and BIM: Visualization of Environmental Potentials in Building Construction at Early Design Stages[J]. Building and Environment, 2018, 140: 153-161.
- [44] NIZAM R S, ZHANG C, TIAN L. A BIM Based Tool for Assessing Embodied Energy for Buildings[J]. Energy and Buildings, 2018, 170: 1-14.
- [45] SHADRAM F, JOHANSSON T D, LU W, *et al.* An Integrated BIM-Based Framework for Minimizing Embodied Energy During Building Design[J]. Energy and Buildings, 2016, 128: 592-604.
- [46] ZHANG C, NIZAM R S, TIAN L. BIM-Based Investigation of Total Energy Consumption in Delivering Building Products[J]. Advanced Engineering Informatics, 2018, 38: 370-380.
- [47] SOUST-VERDAGUER B, LLATAS C, GARCÍA-MARTÍNEZ A. Critical Review of BIM-Based LCA Method to Buildings[J]. Energy and Buildings, 2017, 136: 110-120.
- [48] ANDRIAMAMONY A, SAELENS D, KLEIN R. A Combined Scientometric and Conventional Literature Review to Grasp the Entire BIM Knowledge and Its Integration with Energy Simulation[J]. Journal of Building Engineering, 2019, 22: 513-527.
- [49] MULLER M F, ESMANIOTO F, HUBER N, *et al.* A Systematic Literature Review of Interoperability in the Green Building Information Modeling Lifecycle[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 223: 397-412.
- [50] HAM Y, GOLPARVAR-FARD M. Mapping Actual Thermal Properties to Building Elements in gbXML-Based BIM for Reliable Building Energy Performance Modeling[J]. Automation in Construction, 2015, 49(Part B): 214-224.
- [51] MOTAWA I, CARTER K. Sustainable BIM-Based Evaluation of Buildings[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2013, 74: 419-428.
- [52] EDWARDS R E, LOU E, BATAW A, *et al.* Sustainability-Led Design: Feasibility of Incorporating Whole-Life Cycle Energy Assessment into BIM for Refurbishment Projects[J]. Journal of Building Engineering, 2019, 24, Article 100697.
- [53] ABANDA F H, TAH J H M, CHEUNG F K T. BIM in Off-Site Manufacturing for Buildings[J]. Journal of Building Engineering, 2017, 14: 89-102.
- [54] YIN X, LIU H, CHEN Y, *et al.* Building Information Modelling for Off-Site Construction: Review and Future Directions[J]. Automation in Construction, 2019, 101: 72-91.
- [55] HITCHCOCK R J, BUTTERFIELD J, WILKINS E F, *et al.* BIM-Enabled Operations and Maintenance Work Processes[J]. ASHRAE Transactions, 2017, 123(Part 1): 20-24.

图表来源:

图1-2: 作者绘制

表1: 作者绘制

收稿日期: 2020-11-27

(编辑: 苏小亭)