

BIM技术在陕北新型窑洞设计中的应用

刘杰, 郝艳娥*, 曾若溪, 柴旺, 杨星, 田健

延安大学建筑工程学院, 陕西 延安

收稿日期: 2024年3月13日; 录用日期: 2024年4月3日; 发布日期: 2024年4月15日

摘要

为了使具有地域特色的陕北独立式砖石窑洞得以传承和发展, 对现存独立式窑洞状况和存在问题进行总结, 并提出相应的改进策略和措施, 旨在提出陕北新型窑洞的设计。BIM技术具有可视化、协同化、参数化、模拟化的设计优势, 将其引入到新型窑洞设计中, 对于以前全凭工匠施工经验, 毫无设计理念的窑洞建筑而言, 发挥着积极的作用。既能保证设计效果, 扬长避短, 满足住户要求; 又能提升设计效率, 打破传统设计模式, 对后续窑洞施工提供强有力的技术支持。通过分析BIM技术在窑洞三维呈现、场地分析、朝向确定、能耗分析和施工图设计中的具体应用, 明确BIM技术在新型窑洞设计中的技术价值, 促进信息时代下传统民居设计的成熟与完善。

关键词

BIM技术, 新型窑洞, 设计, 应用

The Applications of BIM Technology in Designing New Cave-Dwelling in Northern Shaanxi

Jie Liu, Yan'e Hao*, Ruoxi Zeng, Wang Chai, Xing Yang, Jian Tian

School of Architectural Engineering, Yan'an University, Yan'an Shaanxi

Received: Mar. 13th, 2024; accepted: Apr. 3rd, 2024; published: Apr. 15th, 2024

Abstract

In order to make the inheritance and development of independent masonry cave dwellings with regional characteristics in northern Shaanxi, we summarize the status and problems of the exist-

*通讯作者。

ing independent cave dwellings and put forward corresponding improvement strategies and measures, aiming at proposing the design of new cave dwellings in northern Shaanxi. BIM technology has the design advantages of visualization, collaboration, parametrization, and simulation, and its introduction into the design of new cave dwellings plays a positive role in the construction of cave-dwelling buildings that used to be built entirely by the construction experience of skilled craftsmen and without any design concepts. It can guarantee the design effect, avoid the shortcomings and meet the requirements of the residents; it can also improve the design efficiency, break the traditional design mode, and provide strong technical support for the subsequent cave-dwelling construction. By analyzing the specific application of BIM technology in the three-dimensional presentation of cave dwellings, site analysis, orientation determination, energy consumption analysis and construction drawing design adjustment, we clarify the technical value of BIM technology in the design of new cave dwellings, and promote the maturity and perfection of traditional residential design in the information age.

Keywords

BIM Technology, New Cave-Dwelling, Design, Applications

Copyright © 2024 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

窑洞是陕北黄土高原地区一种传统而具特色的民居建筑，主要分布于延安、榆林等地。其最大特点是就地取材，因地制宜，经济实用，造型美观，有利于生态保护与可持续发展。由于窑洞上部覆盖着一层厚厚的夯实黄土，与其他民居相比，保温储热功能显著，具有冬暖夏凉，防火抗震、隔音隔热等无可比拟的优势。陕北窑洞建筑历史悠久，形式多样，常见的窑洞类型有靠崖式窑洞、接口子窑洞和独立式窑洞(在平地上用砖或石箍起的窑洞，又叫四明空窑)，选用的建筑材料是黄土或砖石。窑洞民居以其特有的风格和魅力吸引着中外游客，是一种非常宝贵的文化遗产，已被列为国家级重点保护文物。近年来，随着社会经济的发展与人民生活水平的提高，陕北地区的窑洞建筑被人们逐渐遗弃，窑洞资源正不断减少并逐渐趋于枯竭。窑洞是黄土高原上人类发展历史的重要见证，承载着陕北地区的乡村的风貌、地域文化特征以及生产经济的时代演变过程，具有丰富的历史文化与艺术科学价值，保护和利用黄土高原上这种特有的民居建筑，具有重要的社会意义。因此，窑洞民居的保护和发展传承已迫在眉睫。

BIM (Building Information Modeling)，即建筑信息模型，依托于三维信息技术，从建筑的设计、施工、运行直至建筑全寿命周期的终结，记录各个环节的数据信息并汇聚于一个信息数据库中，为建设、设计、施工、监理、设施运营等单位及业主提供协同工作平台，实现了对建筑工程全生命周期的管理。从 2000 年起至今，BIM 技术在中国经历了从起步到推广再到规范化应用的过程，在国家政策的支持下，已在新建、改建、扩建房屋建筑和市政基础设施项目进行了全面全过程的推行应用，这有力推动了建设领域信息化、数字化、智能化的进程。目前，我国有众多学者已将 BIM 技术引入历史建筑的保护与传统民居的建设之中。王茹等[1]将 BIM 技术应用于古建筑的数字化保护中，研究成果可用于保护修缮方案模拟与评价；邓梨方等[2]将 BIM 技术应用于广西柳州市三江侗族自治县传统民居中，阐述了应用 BIM 技术对传统民居进行建模的思路、方法和过程；王瑞阳等[3]利用 BIM 技术对土家族三合水传统民居的建筑能耗进行了分析，以便对地域性建筑设计方案进行优化；黄丽[4]应用 BIM 技术创建陕县庙上

村地坑院信息模型，让 BIM 技术应用到地坑院室内环境改善设计过程中，帮助建筑师进行更准确有效的空间设计；孙旭阳[5]以内蒙古和福建两地的乡村住宅原型设计为例，基于 BIM 技术对两地被动式低能耗乡村住宅原型的设计过程展开了深入设计研究，为乡村住宅原型的设计提供一些借鉴与参考；董杨[6]借助 BIM 技术对景德镇古窑区清代天井式民居建筑的营造技术进行了研究，建立了信息化模型。尽管研究者将 BIM 技术应用于形式各异的民居建筑，从建模、设计及营造等方面开展了一定的研究，但研究各有侧重，不够深入全面，也未见 BIM 技术在窑洞民居方面的应用。BIM 技术在建筑工程项目中的应用首先应重点关注于设计环节，只有确保工程设计较为合理可行，才能够对于后续相关工作和环节予以有效支持和引导[7]。基于此，本文尝试将 BIM 技术应用到陕北窑洞民居的设计中，以期在传统民居的保护、传承与发展提供技术支持。

2. 现存窑洞现状、问题与改进策略

2.1. 窑洞的现状

传统的黄土窑洞虽然造价低廉且冬暖夏凉，但由于侧方和后壁不开窗，导致采光差、通风不畅，容易潮湿。加之黄土属离散结构，在风吹日晒下会出现风化剥落，若大量降雨入渗时，则会产生窑洞坍塌的不良后果。因此，人们纷纷搬离黄土窑洞，将其用来储藏粮食、杂物以及养殖牲畜。砖石窑洞克服了黄土窑洞的一些缺点，比黄土窑洞更加美观坚固，采光通风和排水更加科学合理，在改革开放后逐渐被居民广泛采用，但是它造价较高，需占用空地，与黄土窑洞的冬暖夏凉效果相比逊色了不少[8]。目前，随着居民经济状况的好转，人们将黄土窑洞视为贫穷和落后的象征，加之黄土窑洞自身难以改变的缺点，终将被废弃并退出大众视野。如今，大多数居民所居住的窑洞均为独立式的砖石窑洞，见图 1。这里仅讨论陕北独立式窑洞。

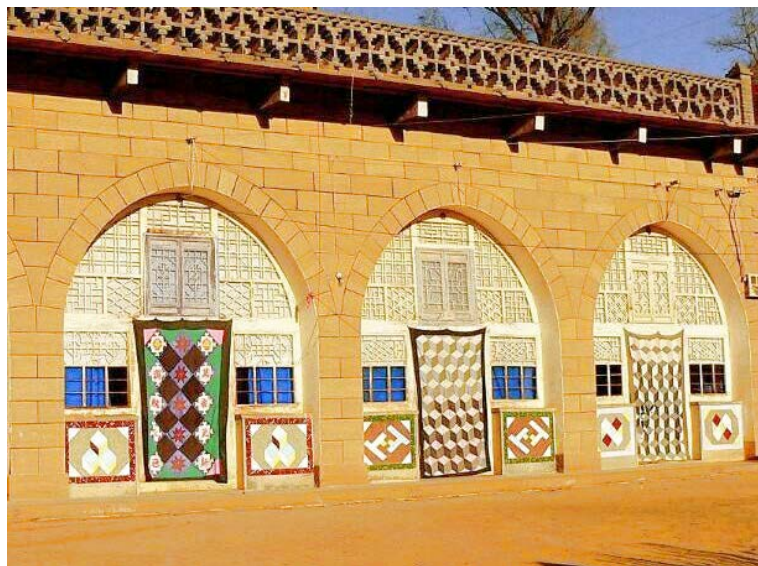


Figure 1. Independent stone cave-dwelling
图 1. 独立式砖石窑洞

2.2. 现有独立式窑洞存在的问题

2.2.1. 选址与建设问题

窑址选择在地势相对陡峭的边坡地带，易发生边坡失稳、土泥石流等自然灾害。窑洞的地基土质为

湿陷性黄土，遇水侵蚀，地基容易产生湿陷性不均匀沉降，导致地面变形对窑洞造成的结构性破坏。窑址朝向不够好，使得窑洞采光通风不佳。在建窑时，未结合当地土地利用规划，及其附近所设有的水、电和互联网等基础设施，导致生活基础设施配备不良，人居环境较差，没有良好的给排水系统、缺乏卫生间，道路不成体系等。

2.2.2. 结构问题

独立式窑洞在建造时，全凭工匠经验，未进行任何设计，有的将边窑腿宽度设置太小，导致边腿抗水平推力不足，造成窑腿或窑体变形开裂。也就是说在砌筑独立式窑洞拱圈时，拱圈的高度和跨度之比太小，拱脚处产生了很大的水平推力，此推力再传递给窑腿，窑腿太窄，抗力不足，导致窑洞结构破坏[9]。

2.2.3. 室内物理环境问题

窑洞存在屋顶防水效果差，雨季容易渗漏水，导致窑洞墙体开裂、坍塌；室内通风质量差，采光日照不足，出现潮湿阴暗，容易发霉现象；冬季室内温度较低，热舒适性体验度不好。

2.2.4. 空间功能布局问题

独窑洞居住空间功能混乱，客厅、餐厅、厨房、卧室等空间糅合在一起，功能未能很好地划分开，私密性较差[10]。

2.3. 现有独立式窑洞改进策略与措施

针对独立式窑洞存在的以上问题，提出相应的改善策略与改进措施如下：

- 正确选址。窑洞选址要综合考虑到地形地质、气候水位、位置朝向以及交通与基础设施等多个方面。首先，应选择地势相对平坦，避免滑坡、泥石流、强风、弱电、雷击等自然灾害的影响。其次，选择较好的地下土质，保证天然地基有较强稳定性，避免窑洞洞室塌陷的风险。再次，应优先考虑地下水位较低、不会影响出入口舒适度的地段；选定合适的建筑朝向，确保窑洞具有良好的采光通风条件。最后，在建设时，还要考虑当地土地与交通规划，接入附近水、电、互联网及道路等基础设施，确保生活便利。
- 为解决拱脚处产生的很大水平推力，可在拱跨一定时，适当增加拱圈的矢高，以有效降低拱脚处的水平推力。若拱圈采用合理拱轴线，可使拱圈受力状态由压弯转化为轴压状态，从而提高窑洞结构的整体承载力。根据以往经验，针对独立式砖箍窑洞的设计建议[11]：独立式砖箍窑洞设计矢跨比为 5/12 及以上，中腿高宽比为 2.43 及以下，上部覆土厚度为 1.0 m 左右，中腿开孔率不宜超过 35%，边腿为实心更有利于结构抗震。
- 通过采用适宜的围护结构构造以提升所改造窑洞围护结构的热工性能，对窑洞墙体、门窗、地面进行合理的保温隔热设计，进而提高室内热舒适状况[10]。这些围护结构(如外墙、门窗、地面、屋顶)的原有做法与具体改造策略见表 1。改善窑洞是单侧通风方式，在窑洞北墙上开高窗以增强风压自然通风；选用合理的屋顶构造防水排水系统、窑洞内表面涂刷防水涂料等措施改善室内潮湿情况，全面解决窑洞室内的物理环境问题。
- 合理设计窑洞尺寸，优化窑洞室内功能布局。独立式窑洞孔数一般为三孔或者五孔，单孔窑洞的室内进深一般在 7~8 m，开间 3.2~4 m 左右，窑洞层高一般为 4.3~4.6 m，窑洞顶部必须覆土 1~2.5 米，以保证窑洞的稳固性。通过考虑居民的居住需求，优化客厅、餐厅、厨房、卧室等空间布局，提高了居住舒适度。

Table 1. Original construction practices and improvement strategies for envelope structures
表 1. 围护结构原有做法及改进策略

围护结构部位	原有做法	改进策略
墙体	砖石外墙 + 水泥砂浆或石灰砂浆抹面。 中间窑腿约在 60~80 cm 左右, 而边窑窑腿厚度取 80~140 cm 以上, 窑掌和窑脸墙厚度一般在 50~70 cm 左右。	对外墙改造采用外保温方式, 保温材料选用 EPS 板
门	木门	金属保温门
窗	木制窗框单玻窗	塑钢窗框中空玻璃平开窗
地面	水泥或瓷砖地面	使用架空地面保温构造, 具体做法是在原有地面上铺设两层普通烧结砖(120 mm), 其上设纤维增强水泥板(60 mm), 最后砂浆抹平后铺瓷砖。
屋顶	平屋顶: 石材 + 夯实黄土层; 坡屋顶: 在窑洞夯实黄土上架起的坡形彩钢板或者树脂瓦屋顶	卷材涂膜防水平屋面或加建坡屋顶

3. BIM 技术在新型窑洞设计中的应用分析

BIM 技术在设计阶段中的应用主要体现在三维模型建构、建筑性能模拟分析、三维管综与碰撞检查、专业协同设计等方面。将上述改进现有独立式窑洞的策略和方法通过 BIM 技术引入到新型窑洞设计中, 除了可以实现新型窑洞在设计阶段的三维效果呈现, 为不同专业的设计人员与业主之间交流提供方便, 达到在可视化的操作下完成新型窑洞的设计与施工的目的; 还可以根据不同的专业需求, 将窑洞模型导入软件内完成相应的计算与分析, 如场地分析与建筑朝向分析, 不同围护结构条件下的能耗分析; 同时对于窑洞设计施工图纸的调整、管线碰撞检测以及虚拟施工也有着不可忽视的良好效果。

3.1. 三维效果呈现

BIM 技术具有超强的三维可视化设计功能, 应用这个技术手段可将传统的二维图纸转变为三维立体模型[12], 能够将新设计的窑洞更加直观立体地展现在设计人员和业主面前, 为新型窑洞后续建设的顺利推进提供可靠保障。Autodesk RevitArchitecture 是基于 BIM 技术的一款三维参数化建筑设计软件, 它是以建筑构件如墙、柱、门、窗、屋顶、楼梯等为基本图元进行建模的。建立建筑信息模型的过程实际上就是不断将建筑构件对象添加到模型中的过程, 同时记录下了每个建筑构件的尺寸、材质、位置及相关文字说明等信息。在进行新型窑洞的信息模型制作中, 将窑腿和前后窑脸视作墙体, 通过编辑墙体的材料、厚度和截面类型等参数, 完成窑腿和窑脸的创建; 门窗在自带的门窗族库直接选择利用; 拱圈通过拉伸屋顶编辑建立; 拱圈上部不规则厚度的覆土利用构件中的内建模型创建。这里设计的新型窑洞为开有后窗的两层三孔外廊式独立窑洞。具体尺寸为: 首层每孔窑洞的进深为 7.8 m, 二层进深为 6.0 m; 每层开间均为 3.6 m; 窑洞拱圈采用半径为 1.8 m 半圆弧拱, 厚度为 300 mm; 窑洞层高为 4.8 m; 窑洞顶部覆土 1 m; 边窑腿宽度为 1.2 m, 中间窑腿为 0.6 m; 外廊宽度 1.8 m。图 2 为用 RevitArchitecture 所建立的新型窑洞三维立体信息模型。在设计阶段时, BIM 技术的可视化功能促使设计人员能够根据使用者的具体需求, 在不同的专业阶段以及不同参数变化下快速产生可视化效果, 让业主将自己的设计理念和用户需求与设计师得以快速沟通, 可以更好地满足业主的需要。同时, BIM 技术更明确地呈现了新型窑洞建筑、结构与设备设施的实际状况, 为不同专业的工作人员之间交流提供了便利, 解决了原有二维平面

不能全方位展示新型窑洞的建筑、结构和水电暖通等方面细节问题，避免了技术层面存在的设计隐患，有效提升了新型窑洞设计的合理性。可见，通过 BIM 技术手段，新型窑洞设计中的建筑空间功能布局问题与窑洞结构问题的改进策略得以虚拟实现与快速优化。

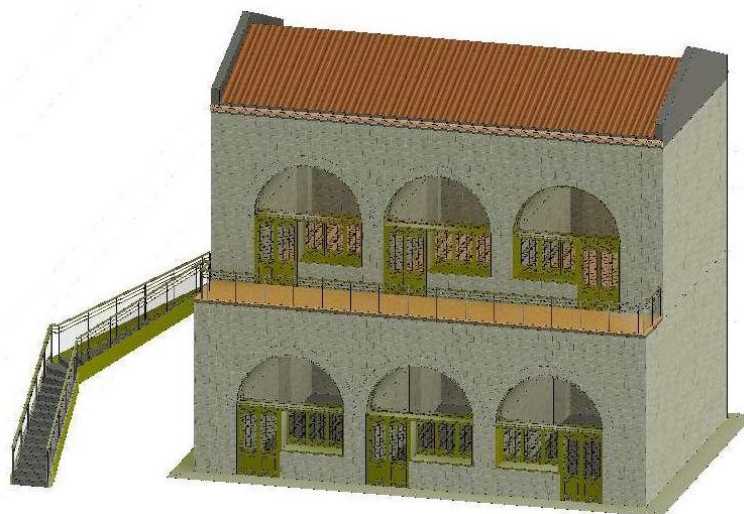


Figure 2. 3D model of a new cave dwelling created by Revit
图 2. Revit 创建的新型窑洞三维模型

3.2. 场地分析

场地分析是建筑物定位的主要影响因素，是对建筑物的空间方位和外观、建筑物和周边环境的关联性进行评价分析的过程。在工程的规划阶段，场地的地貌、植被、气候条件都是影响设计决策的重要因素[13]。传统的场地分析存在诸如定量分析不足、受设计人员主观判断影响较大、无法科学采集和处理应用数据信息等弊端。将 BIM 技术与 GIS 地理信息系统相结合，根据生成三维地形数据进行窑洞场地环境模拟分析，能够为后期窑洞群的场地规划与布局、交通流线组织关系给予设计指导。利用相关软件对场地地形条件和日照阴影情况进行模拟分析，帮助业主更好把握窑洞选址与建设决策，使得窑洞工程项目依山而建、顺势而为[14]。

3.3. 窑洞朝向的精确确定

建筑朝向是指建筑物正立面所对的方向，对建筑节能具有重要影响。科学的建筑朝向能保证建筑物夏季室内自然通风、冬季热量流失的减少，实现建筑节能设计目标。窑洞朝向的选定与窑洞室内物理环境问题的改善息息相关，利用 BIM 技术精确计算窑洞最佳朝向十分必要。为提高建筑朝向分析的科学性，利用 BIM 技术，以中国气象局记录的陕北地区当地气象数据为依据，选择当地全年气温最高和最低两个月的数据作为主要参考，通过 Weather Tool 工具明确新型窑洞日照时长及所获取的太阳辐射量[15]，确定出窑洞的最佳朝向，出具规划模型。

3.4. 能耗分析

BIM 技术对建筑物进行能耗分析所用的工具是 Ecotect Analysis 软件。Ecotect Analysis 是一种建筑物物理模拟工具，分析范围广泛，从太阳辐射、日照、遮阳、采光、照明到热工、室内声场、室内外风场等均可模拟[13]。该软件的操作方法是从建模软件 Revit Architecture 中导出 gbXML 或 DXF 文件格式，再

直接导入 Ecotect 软件中进行物理环境的各种模拟；或者是直接在 Ecotect 软件中建立与 3D 信息模型相同数据信息的模型直接进行后续的能耗分析。运用 Ecotect 软件进行能耗模拟分析过程如图 3 所示[16]。通过 Ecotect 软件模拟分析来计算建筑物总能耗，在符合节能标准的前提下尽可能的选择能耗最低的材料。依照表 1 中所列的窑洞围护结构(如外墙、门窗、地面、屋顶)的改造策略，通过 BIM 技术，把围护结构的材料构造和数据信息全面植入三维模型中，模拟窑洞中不同围护结构部位采用不同建筑材料的保温隔热性能，通过评估不同材料对能源消耗的影响结果，选择具有良好隔热性能的建筑材料与构造，合理设计窑洞围护结构的热工性能，减少能源消耗，提高窑洞室内舒适度。

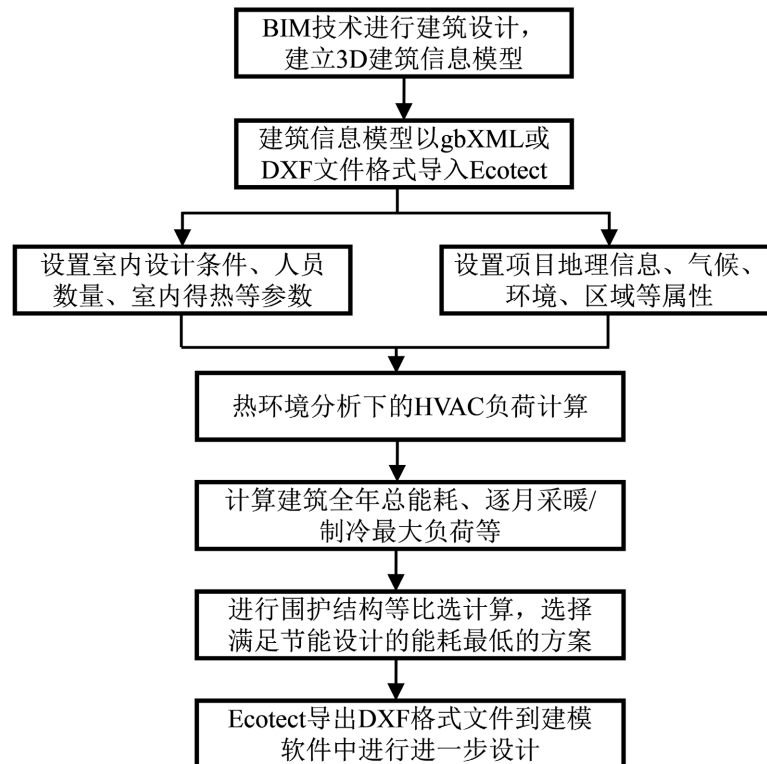


Figure 3. Energy consumption simulation and analysis process using Ecotect software
图 3. 运用 Ecotect 软件进行能耗模拟分析流程

3.5. 施工图设计及调整

首先，在施工图设计环节，除了进行建筑与结构设计外，还要确定施工材质，明确施工构造，使得整个设计方案符合施工需求，BIM 技术的引入让施工图设计前置，减少了施工图绘制工作量和绘制难度[14]；其次，BIM 技术给不同专业的设计人员的高度协同处理提供了统一平台，促使建筑结构和其它相关联的部分更为协调，针对建筑、结构与水电暖通系统等可能存在的冲突问题予以及时调整处理[7]，以保障整套施工图设计的效果；最后，应用 BIM 技术可完成管线碰撞检测以及虚拟施工等，及时发现其中存在的异常问题和冲突点，对施工图设计不合理之处采取最佳策略进行调整改进，避免了可能出现的严重设计偏差问题，增强设计的可行性。传统窑洞无设计图纸，全凭工匠经验，应用 BIM 技术进行新型窑洞设计，不仅能够深化施工图设计过程，便于准确地把握所设计的窑洞内容，而且可以及时修改和完善窑洞模型，出具一整套完整的建筑结构与水电暖通施工图纸，有利于窑洞建筑与信息技术的有机融合，符合时代发展要求与特色民居的传承需要。

4. 结语

陕北传统黄土窑洞这种具有地域风格的特色民居由于自身所存缺点正濒临废弃,而独立式砖石窑洞仍被大量居民使用,为了传承和发展这种具有保护意义和科学价值的民间建筑,针对独立式窑洞现状和存在问题提出改进策略和方法,旨在设计陕北新型窑洞。为适应信息时代发展步伐,在设计阶段引入 BIM 技术,结合 BIM 技术的三维可视化、各专业设计协同化、设计参数修改一步化、施工场景模拟化等优势,提出将 BIM 技术应用在新型窑洞设计中发挥积极作用。可得出以下结论:

1) 利用 BIM 技术,各参与方可实时获取新型窑洞的各部分构造、材质、尺寸等信息内容,并直观地展现设计的 3D 效果及细部模型,实现信息共享与管理,便于各专业设计师准确地把握所设计的内容,及时修改和完善新型窑洞设计模型。

2) 利用 BIM 技术直接修改需要改进的围护结构内容,与其相关联的信息数据也将随之自动进行实时更新,将大大提升建筑性能模拟分析和设计效率,使得设计方案得到最佳优化。

3) BIM 技术在新型窑洞设计中具有非常强大的应用价值,为传统民居的建筑信息化提供支持,促进了传统民居设计的成熟与完善,并使 BIM 技术的应用得到进一步推广。

基金项目

陕西省大学生创新创业训练计划项目(S202210719066);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2022JM-266)。

参考文献

- [1] 王茹,张祥,韩婷婷.基于 BIM 的古建筑保护方案经济指标体系构建与评价方法研究[J].建筑经济,2014,35(6):110-114.
- [2] 邓梨方,冯光澍.基于 BIM 技术的三江典型传统民居建模思路、方法与过程[J].广西城镇建设,2022(11):80-86.
- [3] 王瑞阳,曾旭东. BIM 技术在传统民居建筑能耗分析中的应用研究——以土家族三合水民居为例[J].建筑技艺,2022,28(12):104-107.
- [4] 黄丽.基于 BIM 的陕县地坑院建筑信息模型的研究及应用[D]:[硕士学位论文].郑州:郑州大学,2016.
- [5] 孙旭阳.基于 BIM 的被动式低能耗地域乡村住宅原型设计研究[D]:[硕士学位论文].天津:天津大学,2017.
- [6] 董杨.基于 BIM 的景德镇古窑区清代天井式民居营造技术研究[D]:[硕士学位论文].北京:北方工业大学,2019.
- [7] 刘涛.基于 BIM 技术的建筑结构设计优化方法[J].建材发展导向,2022,20(24):44-46.
- [8] 刘小军,王铁行,于瑞艳.黄土地区窑洞的历史、现状及对未来发展的建议[J].工业建筑,2007(S1):113-116.
- [9] 郝艳娥.力学视角下陕北窑洞建筑研究与保护[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2023.
- [10] 吴磊.基于热舒适提升的陕北窑洞适宜改造技术研究[D]:[硕士学位论文].西安:西安建筑科技大学,2023.
- [11] 刘钊.西北地区独立式砖箍窑洞地震响应及易损性分析[D]:[硕士学位论文].西安:西安建筑科技大学,2019.
- [12] 王姗姗,张帅.基于 BIM 技术的建筑结构设计优化方法[J].居舍,2023(9):111-113.
- [13] 张邻.基于 BIM 与 GIS 技术在场地分析上的应用研究[J].四川建筑科学研究,2014,40(5):327-329.
- [14] 严陈. BIM 技术在建筑结构设计优化中的应用分析[J].四川水泥,2023(3):106-108.
- [15] 杨连杰,夏吉勇,刘辉,等.基于 BIM 技术的装配式建筑结构设计及探究[J].砖瓦,2022(8):60-62.
- [16] 国连斌.基于 BIM 技术的建筑能耗分析与典型案例研究[D]:[硕士学位论文].沈阳:沈阳建筑大学,2018.