

基于性能导向的数字化设计和智能制造

殷澳奇 金光虎*

延边大学工学院, 吉林 延吉 133002

[摘要] 文章探讨了数字技术在建筑领域的实际应用, 尤其关注设计和建造的阶段, 使用基于性能的设计原理, 并结合算法和计算机模拟技术, 性能参数可以在设计初期阶段起到关键作用, 这使建筑师能够在项目初期确定出既有效又经济的解决方案, 进一步分析了如何通过数据分析, 模拟技术等手段, 优化建筑设计的过程, 这些技术的应用不仅提高了设计和生产过程的效率和精确性, 还提升了建筑项目的整体品质和执行效率, 文章还讨论了如何应用大数据和云计算技术来优化建筑的全生命周期管理, 在智能化的背景下进行建筑项目的优化管理, 通过这些现代技术的应用, 建筑项目能够更灵活地适应环境和需求变化, 最后文中提出并评估了几种创新的解决方案, 这些方案不仅推动了数字化设计的发展, 也为智慧城市的构建提供了技术支持, 实施这些新策略和理念预计将极大推动建筑行业的现代化和技术化。

[关键词] 数字设计; 智能建造; 性能导向; 设计与建造结合

DOI: 10.33142/ucp.v1i3.13973

中图分类号: TH164

文献标识码: A

Performance Oriented Digital Design and Intelligent Manufacturing

YIN Aoqi, JIN Guanghu*

College of Engineering, Yanbian University, Yanji, Jilin, 133002, China

Abstract: This article explores the practical application of digital technology in the field of architecture, with a particular focus on the design and construction stages. By using performance-based design principles and combining algorithms and computer simulation technology, performance parameters can play a key role in the early stages of design. This enables architects to determine effective and economical solutions in the early stages of a project. Furthermore, the article analyzes how to optimize the process of architectural design through data analysis, simulation technology, and other means. The application of these technologies not only improves the efficiency and accuracy of the design and production process, but also enhances the overall quality and execution efficiency of building projects. The article also discusses how to apply big data and cloud computing technology to optimize the full lifecycle management of buildings and optimize building projects in the context of intelligence. Management, Through the application of these modern technologies, construction projects can adapt more flexibly to changes in the environment and demands. Finally, several innovative solutions are proposed and evaluated in the article, which not only promote the development of digital design, but also provide technical support for the construction of smart cities. The implementation of these new strategies and concepts is expected to greatly promote the modernization and technologization of the construction industry.

Keywords: digital design; intelligent construction; performance oriented; integration of design and construction

引言

计算机辅助设计 (computer aided design) 提高了设计效率与设计精度^[1], 并使得实现复杂和独特建筑形态成为可能, 这项技术的普及导致建筑设计朝着非标准化方向发展, 产生了更多形态流畅, 结构复杂的建筑, 然而这类设计往往缺乏对材质特性的充分考量, 导致建筑项目往往只着重于视觉美感而忽略了材料和结构等基本要素的重要性, 使得这些要素仅仅成为追求形式的工具, 然而建筑项目中的各个构成要素实际上是互相关联和互相作用的, 因此研究如何在计算机辅助设计的环境下有效整合这些要素, 通过高效的计算, 优化和反馈性能数据至设计和建造过程中, 成了一个关键议题, 这种整合确保了设计决策, 性能评估与建筑技术之间的有效协调, 从而提高了建筑的整体质量和实用性, 这不仅有助于更经济, 更环保的

建筑实践, 而且提升了建筑的功能性和持续性。

1.1 研究背景与意义

前数字时代, 数字化设计更多的只是将形式表达计算机化^[3]。然而随着建筑行业在全球能源消耗和碳排放中所占比重的增加, 该行业对自然资源的需求以及对环境的压力也逐渐变大, 因此建筑设计与施工的方法逐渐从传统依赖转向了数字化技术的应用, 这样的转变主要是为了实现更高的建筑性能, 在实际建筑中, 建筑并不是自由悬浮的, 而是受到材料的重量、推力和阻力等因素的制约^[4]。因此注重性能优化的设计理念正变得日益重要, 这种设计理念不仅追求建筑的外观和实用性, 更加强调节能和环保等可持续发展的要求。

在全球尤其是发达国家, 数字化的设计和建造技术日益获得认可, 这类技术主要由建筑信息模型 (BIM), 参数

化设计, 以及性能模拟等组成, 与传统手段相比, 这些工具在提高信息管理的效率和增强团队间协作上展现出其独到之处, 此外, 基于性能的设计策略, 通过在项目初期应用模拟与优化技术, 能够显著提升建筑的功能性, 同时大幅降低能源使用与碳排放, 研究和实施这些数字技术对于推动建筑业的可持续性发展具有重要意义。

1.2 研究问题与目标

在本项研究中, 我们着重探讨了数字技术在提高建筑设计性能方面的作用, 文章全面考察了在建筑项目执行过程中, 基于性能的设计如何被应用, 涵盖性能分析工具的使用, 设计阶段的优化方法, 以及数字建设技术的成效, 研究的核心目的是将理论与实践结合, 分析数字化设计和建造如何助力提升建筑性能, 及其所面临的挑战, 从而为将来的建筑设计提供理论与实践的参考。

2 性能导向设计的理论基础

2.1 性能导向设计的定义与概念

性能导向设计 (Performance-based Design, PBD) 是一项侧重于建筑实用功能的设计理念, 其核心目标是确保建筑物在运营期间能够满足关于能源效率, 居住者的舒适性及建筑的结构安全等多方面的需求, 这种设计方法与传统的以规范遵循为主的设计方式有所不同, 性能导向设计更关注于建筑在实际使用过程中是否能够达到预期的性能标准, 此设计策略强调在设计过程中将实际的功能表现作为首要考虑因素, 不仅仅是简单地符合既定的规范要求。

建筑设计领域不断发展, 实现了技术与创新的融合, 特别是在性能优化方面, 设计师们越来越多地采用基于性能的设计策略, 这种策略通常依赖先进的计算工具和模拟技术以达到更好的设计效果, 具体来说, 设计团队通过详细的量化分析, 评估不同建筑设计方案的性能, 以促进建筑性能全面提升, 在探索降低建筑能源消耗的过程中, 利用能耗模拟工具对不同方案进行能源消耗预测变得尤为重要, 这种做法不仅能有效优化能源使用效率, 还可以在长远中减少建筑的运营开支。

2.2 主要理论与框架

在建筑设计性能分析中, 运用演化博弈理论考察不同设计方案如同在自然选择中的物种竞争一般, 这一理论框架下, 设计方案被视为各种不同的策略, 它们在减少能耗的维度上互相作用, 通过对这些互动进行模拟, 可以观察到这些方案如何在多次试验和调整中逐步优化发展, 以期找出最有效的建筑设计方案, 这种方法促使设计者深入理解哪些设计方案在实际应用中表现最优, 并据此作出决策。

下面是一段使用演化博弈模型的 Python 代码示例, 模拟不同建筑设计策略在能耗优化中的演化过程。

```
import numpy as np
定义初始参数
种群规模 = 100 # 种群中的设计方案数量
代数 = 50 # 进化的代数
```

```
变异率 = 0.1 # 每一代中随机变异的概率
```

```
随机初始化种群, 每个策略表示为[建筑面积, 窗户面积, 保温系数]
```

```
种群 = np.random.rand(种群规模, 3)
种群[:, 0] *= 500 # 建筑面积范围: 0-500 平方米
种群[:, 1] *= 100 # 窗户面积范围: 0-100 平方米
种群[:, 2] *= 2 # 保温系数范围: 0-2 W/(m2·K)
```

```
固定的环境参数
```

```
室内温度 = 22.0 # 摄氏度
室外温度 = -5.0 # 摄氏度
供暖天数 = 200
```

```
def 计算能耗(策略):
```

```
    """计算给定策略的能耗"""
```

```
    建筑面积, 窗户面积, 保温系数 = 策略
```

```
    传热量 = 保温系数 * 窗户面积 * (室内温度 - 室外温度)
```

```
    年能耗 = 传热量 * 建筑面积 * 供暖天数 / 1000 # 单位: kWh
```

```
    return 年能耗
```

```
def 适应度函数(策略):
```

```
    """适应度函数: 能耗越低, 适应度越高"""
```

```
    能耗 = 计算能耗(策略)
```

```
    return 1 / (1 + 能耗) # 适应度与能耗成反比
```

```
进化过程
```

```
for 代 in range(代数):
```

```
    计算每个策略的适应度
```

```
    适应度 = np.array([适应度函数(策略) for 策略 in 种群])
```

```
    根据适应度选择下一代的种群
```

```
    下代种群 = []
```

```
    for _ in range(种群规模):
```

```
        选择两个父代
```

```
        父代 1, 父代 2 = np.random.choice(种群规模, size=2, p=适应度/适应度.sum())
```

```
        交叉生成后代
```

```
        交叉点 = np.random.randint(3)
```

```
        后代 = np.concatenate((种群[父代 1][:交叉点], 种群[父代 2][交叉点:]))
```

```
        随机变异
```

```
        if np.random.rand() < 变异率:
```

```
            后代 += np.random.normal(, 0.1, 3)
```

```
确保参数在合理范围内
后代[0] = np.clip(后代[0], 0, 500)
后代[1] = np.clip(后代[1], 0, 100)
后代[2] = np.clip(后代[2], 0, 2)
下代种群.append(后代)
```

```
种群 = np.array(下代种群)
```

```
找到进化结束后能耗最低的设计策略
最佳策略 = min(种群, key=计算能耗)
最佳能耗 = 计算能耗(最佳策略)
```

输出结果

```
print(f"进化后最佳设计策略为: 建筑面积 = {最佳策略[0]:.2f} 平方米, 窗户面积 = {最佳策略[1]:.2f} 平方米, 保温系数 = {最佳策略[2]:.2f} W/(m2·K)")
print(f"对应的年能耗为: {最佳能耗:.2f} kWh")
代码说明:
```

种群初始化: 初始种群由一组随机生成的建筑设计策略组成, 每个策略包含建筑面积、窗户面积和保温系数。

适应度函数: 用能耗的倒数作为适应度, 能耗越低, 适应度越高。

进化过程: 通过选择、交叉和变异生成下一代种群, 不断优化设计策略。

最终输出: 在进化结束后, 输出能耗最低的设计策略及其对应的年能耗。

演化博弈思想:

在该策略下, 我们采用了仿生学的概念, 即模仿自然界的选择与变异机制, 来提升建筑设计的效率, 在众多设计方案中, 那些能耗更低的设计(表现出更好的适应性)会逐渐被优先考虑, 从而帮助我们斟酌和识别出最优解, 这种方法特别有利于解决那些结构复杂并涉及多种优化目标的项目, 使我们能够在追求卓越性能的同时, 确保选出最适合的设计方案。

2.3 国内外相关研究进展与趋势

全球范围内, 以性能为核心的建筑设计理念已被广泛采纳, 并成为建筑业的一项重要准则, 在美国, 德国和日本等国家, 关于绿色建筑和高性能建筑的探索和应用已经较为成熟, 而在中国, 这种以性能为导向的设计方法则相对起步较晚, 但是, 得益于政府对绿色建筑政策的大力支持, 这种设计方法开始在国内逐步流行, 目前, 研究的主要方向是如何将性能导向的设计方法与数字技术结合起来, 从而提升建筑设计的质量与效能。

3 性能导向数字化设计工具及技术

3.1 建筑信息模型(BIM)在性能导向设计中的应用

建筑信息模型(BIM)作为一种集成化的数字化设计

工具, 已成为性能导向设计的关键技术之一。BIM的核心优势在于其能够集成建筑物的几何、物理和功能信息, 为性能分析提供精确的数据支持。性能驱动设计则是从各要素的能动性中找到形式(form finding), 它从根本上颠覆了“先设计形式, 再分析结构, 最后填充材料”的序列式工作模式, 从而兼顾建筑设计的创新性和合理性^[6]。

在性能导向设计中, BIM的主要应用包括:

通过BIM技术整合能源管理软件如EnergyPlus和Green Building Studio, 建筑师能在设计初期进行能源效能分析, 这种方法不仅预测了建筑的能耗, 还允许通过优化设计来减少能源消耗, 在建筑的结构设计方面, 结合BIM技术和结构分析软件, 如SAP2000和ETABS, 使得设计师可以在设计过程中优化结构解决方案, 这不只提高了建筑的安全性, 也增强了其经济性, 同时, 利用BIM技术与环境分析工具, 例如Ladybug和Honeybee, 设计师能在设计阶段对建筑的自然光, 通风和噪音等进行详细评估, 这样的环境性能分析极大地提升了建筑的居住舒适度, 并促进了其环境的可持续发展。

脱离性能的数字化设计降低了加工精度并加重了施工难度。数控加工技术的发展使建造从标准化发展到定制化, 从模数化发展到模块化^[5]。但在此过程中, 由于缺乏对材料复杂性能的认知和处理技能, 缺乏对于结构表现与建造方式的深入思考, 在非线性作品中, 施工过程愈加被动、低效、高价, 并且精确性难以保证。

3.2 基于结构性能的数字化设计

在当今的数字化设计行业, 最初普及的方法强调以结构的效能作为设计的主导, 这一方式突显在建筑设计的早期阶段, 通过模拟和优化技术去发掘结构效能的特性及其与构造形态的有效协同^[7], 在过去, 结构效能通常仅被看作是实现建筑设计理念的一种工具, 其过程中常常需要进行事后的合理化调整^[8], 然而, 随着数字化技术的引入, 这种以结构效能为核心的设计方法已经发生了转变, 推动了结构设计向更加主动和预见性的方向发展。

在当代的建筑设计领域, 优化结构性能已经越来越依靠高科技的数码工具和深入的力学知识, 这种优化主要分为两类: 形态的数字化创造以及结构力学仿真^[9], 在形态的数字化创造过程中, 融合了图解静力学, 计算机技术与创新设计理念, 另一方面, 结构力学仿真则基于物理学中的力学定律和结构的拓扑优化技术, 针对这种优化, 业界已经研发了多种高效技术, 包括推力线网络分析法(TNA), 渐进结构优化法(ESO)以及双向渐进优化法(BESO), 推力线网络分析法是由菲利普·布洛克和他的团队开发, 利用图解静力学的原理, 此方法通过计算力密度来分析在各种规模的拱壳结构中力的分布, 并实时将这些力与建筑的形状关联起来, 至于渐进结构优化法和双向渐进优化法^[9], 则是通过将结构细分成众多小单元来进行分析, 确定哪些区域是

材料生长的关键, 哪些区域的应力低于某一特定阈值且应该被剔除, 这样的分析和调整有助于实现理想的结构形状, 使表面应力得到均匀分布^[10], 结合现代化的计算机仿真技术, 这些方法极大地提升了建筑设计的精度与工作效率。

3.3 于建造性能的数字化设计

建筑性能的定义涵盖了建筑在运行期间的多方面表现, 这些包括但不限于建筑的结构稳定性, 能源消耗量, 居住舒适度以及建筑的耐久性, 这些性能指标不仅关乎于建筑本身的功能性和使用寿命, 还紧密关联着资源利用和环境保护, 由此可见, 在建筑设计的初期阶段, 预测和优化这些关键性能指标是至关重要的, 它决定了提升建筑的整体性能, 是现代建筑设计中的重要目标。

在现代建筑业中, 数字化设计技术已成为设计过程中的重要工具, 与传统的手绘设计和以经验为基础的方法不同, 数字化设计依赖于复杂的数学模型和算法, 辅以先进的模拟技术, 从而显著提升设计的精确度和可变性, 这种技术的应用使得建筑师能够在项目初期就对建筑的功能和表现进行深入分析, 从而实现更优的设计成果。

在现代建筑设计领域, 数字化方法已成为一种重要工具, 它集合了美学与实用性, 使设计过程中的数字模拟和效能评估变得至关重要, 这种方法不仅确保了建筑设计既美观又功能全面, 还能符合预设的性能标准, 对于设计要求复杂的建筑项目, 如注重环保的绿色建筑以及对能效和耐久性有极高层或节能建筑, 应用数字化设计策略特别有效, 这种策略的实施有助于提升建筑项目的整体质量与性能。

自 1980 年以来, 机器人技术已经在建筑领域得到应用, 起初, 如早稻田建筑机器人集团和清水建设等日本领先企业开始探索在工厂和现场使用机器人来增强自动化效能, 这些早期的机器人系统通常很大, 像脚手架一样, 能够结合多种功能执行复杂的操作^[11], 进入 21 世纪初特别是 2005 年后, 机器人技术在建筑业的运用趋向于激发更多的创新和发展新的建设技术, 这种转变主要是由苏黎世联邦理工学院等学术机构所推动的。

性能分析的构建对于设计过程中的反馈至关重要, 它不仅帮助设计师优化他们的设计方案, 还使得机器人能够利用深度学习进行自主的设计创新, 世界顶级的教育与研究机构, 包括麻省理工学院, 苏黎世联邦理工学院和普林斯顿大学等, 已在这方面取得了一些开创性的研究成果, 这表明, 通过整合先进的学习技术, 创新的设计方法正在逐步发展并形成。

4 性能导向的数字化建造技术

4.1 数字化制造技术

3D 打印技术在建筑行业的应用带来了革命性的变化, 它通过电子模型直接制作建筑部件, 大幅度减少了建造所需的时间并提高了制作的精度, 例如许多小型建筑项目现

在可以完全依靠 3D 打印技术一次性完成, 这样不仅大大降低了成本, 还减轻了人力资源的需求, 此外, 随着技术的不断进步, 机器人的运用在建筑领域变得越来越普遍, 机器人技术通过提高建筑工程的自动化程度, 使建设过程更加高效, 它们能够进行砌砖, 喷射混凝土以及执行钢结构焊接等任务, 不仅提高了工作效率, 也优化了工作场所的安全性, 减少了施工过程中的风险。

4.2 智能施工管理

数字化技术不仅影响了建筑的设计和制造, 还在施工管理中发挥了重要作用。智能施工管理通过物联网、大数据、云计算等技术, 对施工过程进行实时监控和管理。数字化施工监控: 通过传感器、无人机等设备, 施工管理人员可以实时监控施工现场的进度、质量和安全状况, 及时发现并解决问题。建筑的结构变形、环境监测、人员安全都可以通过数字化手段进行监控, 确保施工的顺利进行。施工质量与安全保障: 智能施工管理系统可以自动化地进行质量检测和安全评估, 减少人为误差, 提高施工质量。自动化的结构检测可以及时发现建筑物的隐患, 避免施工过程中出现质量问题。

4.3 数字化建造的可持续性

技术发展已经使得建筑行业经历了显著的变革, 特别是数字化技术的应用, 它不仅优化了建筑过程的效率, 还在环境保护方面发挥了重要作用, 通过数字化设计工具, 建筑师能够精确预测建筑材料的需求量, 大大减少了资源的浪费, 采用 3D 打印技术和自动化机器人施工可以提高施工的准确性, 同时确保材料得到最佳利用, 此外, 数字化技术在减轻建筑对环境的负担方面也起到了关键作用, 它通过优化施工程序和改进能源利用效率, 有效减少了能源消耗与碳排放, 工地模拟技术等进一步优化了现场布局与物流安排, 有效减少了施工过程中对燃油和电力的依赖, 从而降低了环境污染, 这些进步表明, 现代建筑业正在迅速向着更环保, 更高效的方向发展。

5 性能导向数字化设计与建造的实际案例研究

在当代的建筑实践实践中, 采用高级设计工具和技术来创造创意空间结构已成为主流趋势, 例如, 扎哈·哈迪德诗所在策划伦敦奥运会游泳中心以及 MAD 建筑设计事务所在规划哈尔滨大剧院期间, 都运用了壳体结构技术以满足大跨度空间的需求, 这类结构不仅外观引人注目, 还体现了结构设计的创新性与实用性, 在不同的案例中, 设计师将结构性能视作设计进程中的核心元素, 比如, 在江苏省园艺博览会主题馆的设计过程中, 设计师袁烽就从项目伊始就将结构功能作为设计决策的重心, 他利用完全数字化的工作流程, 从早期的设计概念到最终的建造实施, 贯彻设计的每一个阶段, 具体而言, 袁烽在设计中通过确定建筑平面的边界和支撑点, 利用 RhinoVAULT 软件进行数字仿真, 形成独特的自由形态壳体结构, 这包括生成初

始的平面网格设计,并识别外部及内部的关键支撑点,在模拟与优化的阶段,设计进一步通过计算模拟分析结构在实际受力情况下的响应,以优化网格密度,方向和形状,这种策略不仅增强了结构的功能性,还为建造阶段的精确执行提供了重要指引,这些设计案例显示了数字技术在现代建筑设计领域的关键作用,特别是在解决复杂结构问题时的高效与精确。

6 结论

性能导向的数字化设计与建造技术在建筑行业中展现了巨大的潜力。对建筑学本体而言,性能化不再是与前期设计脱节的后评价形容词,而是建筑要素之间平等并相互影响的设计参数^[1]。通过将性能参数作为驱动因素在设计初期阶段参与方案设计,能够帮助建筑师探寻结构轻、耗材少、建造高效的建筑形式和建造途径。通过 BIM、参数化设计、性能模拟、数字化建造等技术,建筑师和工程师可以在设计阶段就优化建筑的能耗、结构和环境性能,从而提高建筑的整体表现。然而这一过程也伴随着技术整合、成本控制、人才培养等方面的挑战。未来,随着技术的进一步发展,性能导向设计有望成为推动建筑行业可持续发展的重要力量。在学科融合上,建筑师不再只考虑建筑形式,而是将数学、计算机科学、物理学和材料科学等学科的知识综合考虑在内,因此性能导向下的建筑设计,更具有现实的建造意义。

[参考文献]

- [1]袁烽,肖彤.性能化建构——基于数字设计研究中心(DDRC)的研究与实践[J].建筑学报,2014(8):14-19.
[2]SHI X,YANG W.Performance-driven architectural design and optimization technique from a perspective of

architects[J].Automation in Construction,2013(32):125-135.
[3]袁烽.从图解思维到数字建造[M].上海:同济大学出版社,2016.

[4]ANTOINE P. Architecture and the Virtual:Towards a New Materiality[J].PRAXIS,2004(6):114-121.

[5]张焯.智能建造引导下的建筑设计:数字技术·建筑全生命周期——2018年全国建筑院系建筑数字技术教学与研究学术研讨会论文集[C].北京:中国建筑工业出版社,2018.

[6]孙澄,韩昀松,庄典.“性能驱动”思维下的动态建筑信息建模技术研究[J].建筑学报,2017(8):68-71.

[7]袁烽,胡永衡.基于结构性能的建筑设计简史[J].时代建筑,2014(5):10-19.

[8]袁烽,柴华,谢亿民.走向数字时代的建筑结构性能化设计[J].建筑学报,2017(11):1-8.

[9]袁烽.数字化结构性能生成研究[J].西部人居环境学刊,2014,29(6):6-12.

[10]谢亿民,左志豪,吕俊超.利用双向渐进结构优化算法进行建筑设计[J].时代建筑,2014(5):20-25.

[11]ROL AND S,GW YLLIM J.C loseness:On the Relationship of Multi-agent Algorithms and Robotic Fabrication[J]. Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design,2016(1):218-229.

作者简介:殷澳奇(2003—),男,汉族,吉林梅河口人,本科在读,延边大学工学院,研究方向为建筑设计;*信作者:金光虎(1978—),男,朝鲜族,吉林延吉人,硕士,副教授,硕士生导师,国家一级注册建筑师,延边大学工学院,研究方向为建筑设计及其理论。