

人工演进的元城市系统：城市空间形态的一种智能生成

Meta Urban System of Artificial Evolution: A Kind of Intelligent Generation of Urban Morphology

杨滔 罗维祯 林旭辉 邓成汝 YANG Tao, LUO Weizhen, LIN Xuhui, DENG Chengru

摘要 为探究城市空间形态的生成如何更能反映城市作为复杂巨系统的本质,从理论上初步探讨复杂系统的可持续建构、多专业优化协同、多尺度网络建构等理念,探索城市空间形态生成的内在逻辑,提出自我优化迭代的城市空间形态生成的算法演进模式。借鉴复杂系统和网络科学的理论成果,提出基于图网络的空间形态生成、运筹优化下的实体形态生成和参数化的系统生成的方法体系,建构包含空间与行为形态网络分析、用地功能与公共服务设施网络分析、三维形态生成、专业协同评估、人机互动调整等基本功能的系统。最后介绍该系统在深圳前海妈湾片区规划设计工作中的应用,以及深圳大学和清华大学的工作营活动中的实践尝试,对未来城市发展的价值动力的探索给予一定的启示。

Abstract To investigate how the way of generating urban spatial morphology reflects the essence of the cities as mega systems, this paper, from the perspective of theories, seeks to discuss the ideas on sustainable construction of complex systems, collaborative optimization of different disciplines, and multi-scaled network formation, explores the basic logics of generating urban spatial forms, and makes the initial proposition of establishing the pattern of the evolutionary algorithm for producing urban spatial forms via the process of self-optimizing iteration. The paper draws on the theoretical achievements of complex systems and network science, and proposes the methodology which consists of the graph-based generation of spatial forms, generation of building forms via operations research, and parametric-aided generation of systems. In this way, a platform emerges with basic functions such as analysis of relationships between space and human behaviours, network analysis of land use and public facilities, 3D shape generation, multi-disciplinary assessment, and design adjustment via human-computer interaction. Finally, this paper introduces the practice in the planning and design of Mawan in Shenzhen, as well as the workshops at Shenzhen University and Tsinghua University, which gives some insights to the exploration of the driving force of future urban development.

关键词 新陈代谢;可持续发展;空间句法;形状语法;数字孪生;未来城市

Key words metabolism; sustainable development; space syntax; shape grammar; digital twins; future city

文章编号 1673-8985 (2022) 03-0014-09 中图分类号 TU984 文献标志码 A

DOI 10.11982/j.supr.20220303

作者简介

杨滔
清华大学建筑学院
副教授,博士, taoyang128@qq.com
罗维祯
中规院(北京)规划设计有限公司
中级规划师,硕士
林旭辉
中规院(北京)规划设计有限公司
初级规划师
邓成汝
中规院(北京)规划设计有限公司
初级规划师,硕士

0 引言

随着我国城镇化由外延式扩张向内涵式提升方向转型发展,城市更新过程中对于土地容量与价值的判断变得越来越迫切,而这又与建成环境的几何形态构成密切相关。这在本质上回归到剑桥大学马丁研究中心于20世纪60年代提出的研究问题,即怎样的建设形态才能最好地利用土地价值。他们讨论诸如大街坊、小街坊及院落等不同的建筑物布局形态(见图1),同时也辨析了街道空间

结构对于土地价值的影响^[1]。这对于后续各种流派的城市空间形态研究都有深刻影响。从我国实践角度而言,控制性详细规划重点关注用地结构、空间结构、交通市政构成、公共服务设施布局等,城市设计则从日照、行为模式、微环境、美学、业态运营等角度对三维几何形态进行更为深入的剖析,而这两方面又彼此关联互动,并都对土地容量与价值有直接影响。这可回归到地块上构筑物的三维形态与更大范围的空间形态结构的抽象互动

中,也可探讨城市形态与城市功能的多元联动,还可辨析城市中跨专业、跨行业、跨部门的协同设计。

本文试图从理论上回归到城市这个复杂巨系统的本源,探究跨专业的子系统基于人的行为对城市空间形态的互动性作用力,同时强调在数字模拟环境中,人对各种变量或参数的选择而仿真各个子系统的彼此演进,在人机互动的过程中优化城市巨系统的涌现机制。在这种意义上,本文引入信息科学中人工演进(artificial evolution)的概念,即计算模型或仿真可根据人对变量与参数的选择,形成自动演进的算法,从而模拟人干预下的系统演进过程^[2];研究人机互动下人工城市系统的演进模式,试图建立起科学的洞察力,明晰城市原初系统的核心要素及其关联,即元城市系统。

基于此,本文期望以数字化的方式去模拟城市空间形态的生成,而其过程又依赖于人参与建构和运行城市各个系统的内在规律。从方法角度,本文力图从城市空间形态入手,逐步建构城市其他系统与之的联动关系,搭建初步的元城市系统。

1 理论基础

元城市系统的建立基于对城市科学经典理论的深入研究,从复杂系统、新陈代谢、可持续发展到网络理论、空间句法、形状语法等,试图建构不同尺度的城市空间形态生成与社会经济环境动态交互的理论模型,强化“空间—实体—规则”之间的多维度联动,试图让城市科学与城市艺术有机融合。

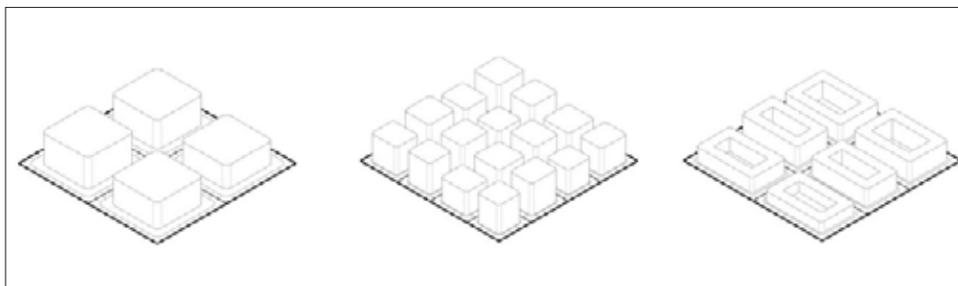


图1 大街坊、小街坊和院落的布局形式

Fig.1 The layout of the main street, the small street, and the courtyard

1.1 生成式设计

借助计算机算法,人们对城市空间形态的生成进行了一定的探索,如生成式设计。一般而言,这是指使用者在定义设计目标和条件约束后,运用算法快速生成设计方案,为设计师等相关利益方提供决策辅助^[3]。其中开发人员对业务场景进行探索,把设计生成的逻辑结构化和规则化,并提供可视化平台^[4]。

目前生成式设计主要有两大类。

第一类是将城市设计方案抽象为大量相关变量的未知函数。该技术路径借助城市设计方案和对应相关变量的大规模训练数据,通过长时间的模型训练,得到稳定的输入与输出关系,并结合城市设计场地的具体信息生成方案,辅助决策^{[4]10}。案例包括小库科技的xkool和谷歌公司的Delve。小库科技于2017年5月开发SaaS产品小库xkool系统^[5],根据设计师导入的场地信息对设计场地进行多维分析、智能测算,并自动生成排布方案。谷歌公司旗下的AI生成式设计工具Delve^[6]可通过机器学习算法生成大量设计方案,并快速评估。但该方法前期依赖极大规模的训练样本,且模型训练时间也较为漫长。由于方案生成规则仅依靠机器对训练样本的学习,其自动生成的建筑和城市设计方案仍难免存在不符合形态生成逻辑的问题。

第二类是基于实际业务逻辑,通过人工直接把城市设计方案梳理为相关变量明确的函数关系,通过运筹学算法寻找最优解,快速生成符合输入条件的结果。这类也有广泛应用的案例。KPFui开发的XIM天际线工具^[7]基

于用户描绘的天际线生成建筑大致轮廓,并辅助用户平衡容积率与城市天际线的矛盾; Doraiswamy等^[8]通过建立建筑设计方案与视觉参数之间的函数关系,产生大量建筑设计体块方案。但是大部分研究仍仅基于较为单一维度的参数自动生成方案。

本文不是从技术方法角度来切入城市空间形态生成,而是回归到与之相关的城市作为系统的科学理论,先探究其可能的内在建构式的系统机制。

1.2 复杂系统的可持续建构

首先,本文探究城市作为复杂系统论的理论。这是研究系统各组件之间关系如何引起系统的集体行为,以及系统与其周边环境的相互作用。在1960年代, Mumford^[9]将城市比喻为机器,这曾是系统论在城市领域的重要应用。在随后的研究中,将城市类比为有机生命体的论述^[10]得到业内广泛认同。这种转变是系统论向复杂系统论的递进,同时更符合城市复杂多变的特点。复杂系统强调系统之间的动态联系和协同,比如交通系统和能源系统的关系等。通过对各开放系统内部和系统之间反馈循环关系的建模,城市中不同客体、组团、系统之间可形成紧密关联^[11]。

在复杂系统论的基础上,城市新陈代谢理论(urban metabolism)将城市看作类似人体的有机生命体。此生命体通过从系统外部摄入资源进行本体活动,最后产生废品作为输出端从系统排出(见图2)。此理论强调,原料、能源、水、食物等在城市生态系统中的流动方式定义了城市健康指数和可持续性。

作为有机生命体,城市各个系统之间需建立可协同优化的机制。哈佛大学可持续规划导则(ZOFNASS)项目提出一种可持续规划导则框架,包括5大发展目标地主、7大城市系统和4大空间层级。其中,7大城市系统为:景观、交通、水资源、能源、固态垃圾、信息和食物供给系统^[13],通过将各系统与城市用地方案接驳,构建城市规划多维协同模型。

资料来源:笔者自绘。

1.3 网络理论下的形态生成机制

城市复杂系统的优化协同机制从网络理论角度更具有操作性和解释性。网络理论是图论 (graph theory) 的一部分,可用于解释城市内部非空间的交流,包括万维网、社会网络、知识论网络等^[14]。城市是人类社会经济环境等活动的集合体,以流动和场所为主体的各类活动,都可被抽象为要素之间的联系和节点,共同构成复杂的网络系统。无论是传播于社交网络中的信息 (见图3),还是传播于城市微环境中的疫情病毒,都可基于网络理论进行模拟和解释。

从图网络的角度,空间句法认为城市空间形态不是社会经济活动的静态背景,而是社会经济活动的一部分,即城市空间形态的设计、建构、体验、更新、拆除等就是社会经济活动的自然组成部分^[16]。在此理论下,空间句法提出“空间—非空间”一体化模型,即自然地理空间、市政基础设施空间、房屋立面空间、社会经济空间、文化习俗空间、乃至游戏故事与自然气候等非空间因素,通过多层次的网络系统彼此联系起来^[17],从而用于揭示物质空间网络形态与功能运行网络之间的关系,解释城市中空间环境行为、非空间影响机制、形式与功能互动模式等。基于大量的实证案例研究,空间句法认为人们对社会、经济、环境的平衡发

展追求将会以独特的空间结构建设与运行过程体现出来,即“空间结构的可持续性”^[18]。

在更微观的层面上,基于建筑实体的形式逻辑规则,形状语法 (shape grammar) 提出自动生成建筑物和城市实体的路径 (见图4)。该方法通过规则构建、形状选择和模块组合等步骤,快速生成符合需求的几何形态^[19]。形状语法通常遵循自下而上的顺序,以最小形状单元为起点,按照预设规则进行组合和变化,最终构成一个完整的几何图形^[20],其中所设定的规则集和生成步骤是一种建筑内在逻辑的表达^[21]。近年来,形状语法在城市规划设计领域的应用逐渐增多^[22]。

2 方法框架

基于上述理论研究,本文提出3种形态生成方法,包括图网络下的物质空间形态生成、运筹优化的实体形态生成和参数化的城市系统生成。在生成过程中,设计师进行方案创作的要素将被充分考虑,作为系统生成的必要因素。

2.1 图网络下的空间形态生成

进行方案创作时,物质空间几何形态的构思是出发点之一;同时,此构思与用地、交通、市政、社会经济、环境等方面的互动也是必不

可少的,但这一部分的关联性构思仍然存在很大的感性认知成分。该系统借鉴了空间句法的理论基础,即几何形态本身也能体现行为模式;同时也强调空间形态的生成可来自人们的方案构思本身。

对于空间要素,系统采用空间句法的定义,体现为4种常用表达模式,即像素点、轴线或线段、凸空间和等视域 (isovist)。像素点是空间分割的方格块,对应于个体、物体或事件所占据的空间,一般根据分析对象的大小来确定。轴线为最长的且最少遍历覆盖空间的直线集合,对应于视线或行走趋势;而线段则是两交叉口之间的线段,对应于行走轨迹或趋势。凸空间作为从每个局部点出发延伸出去所占据的最大空间,且任意两点之间的直线连线与其边长不交叉,对应于人们的对视、聚集、交谈。等视域是从每个局部点向四周看出去,由空间边界和视线所围合的最大空间,对应于个人看周边环境的行为。这些空间要素都可抽象为一个点,而它们之间的交叉或重叠等则抽象为连接,共同构成了图网络,用于分析每个空间要素在网络之中的重要程度,如距离其他空间要素的远近等^[24]。

根据实证研究,城市空间形态在扩张过程中遵循双参数的韦伯函数。其中,一个参数用

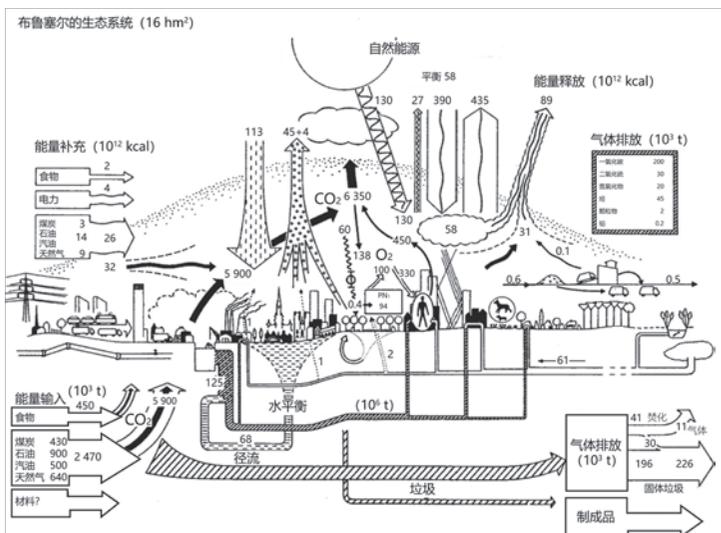


图2 城市新陈代谢理论模型
Fig.2 Urban metabolism theoretical model

资料来源:参考文献[12]。



图3 表达社交网络上千个用户的结构图
Fig.3 Graph representing thousands of users on social network

资料来源:参考文献[15]。

于描述每条街道到达其他街道的拓扑距离;另一个参数描述每条街道在分析半径增加情况下连接到其他街道的数量。它们彼此制约,前者体现空间形态线性延伸的增长动力,后者体现团状聚集的增长动力^[25]。

同时,空间句法的研究也表明街道网络构成方式影响着交通出行,进而影响用地的分布情况;而用地本身的吸引力又影响着空间形态结构的调整。这是一个反复迭代的过程,其结果使得特定的交通流和用地在特定的半径下分布在对应的街道中^[26]。例如,中小规模商业用地将会对应于在大尺度与小尺度可达性都较高的街道等^[27]。以此,街道网络、出行交通、用地性质等将会彼此关联起来,共同构成空间形态,作为下一步实体形态生成的基础。

2.2 运筹优化的实体形态生成

针对实体形态生成,本文参考了两种方法:一是依托建筑逻辑的规则建模,二是生成对抗神经网络(GAN)的方法。两种方法最终目的都是应用算法自动生成建筑空间形态,且遵守建筑规范,满足规划要求。但这两种方法由于底层逻辑的差别而明显不同。规则式生成遵循建筑设计的内在明确逻辑,是建筑师和算法工程师可自主控制的,但缺点是该方法通常需要使用迭代方法进行多次生成和判断。GAN建筑生成方法的优势在于生成结果非常生动,且速度较快,不需做多次迭代。但该方法需要进行长时间的模型训练和参数调整,且生成结果的形态和质量极大程度取决于样本质量。

本文试图研发另一种自生成算法,该算法满足如下要求:(1)遵循建筑设计和城市规划的内在逻辑;(2)生成结果的重点指标需尽可能接近规划方案所设定的地块目标参数;(3)生成速度快,排除迭代算法在生成过程的应用;(4)以数生形,建立参数与形态的强因果关系,降低空间形态的不确定性。

为满足上述要求,首先需要城市规划 and 建筑设计的核心逻辑进行总结归纳,构建相关数据库(包括面宽、进深、标准层面积、层

高、功能活跃度等)和各类功能的建筑、用地性质的空间组织结构规则库。其次,提出“算量”概念,其目标是保证所生成的建筑体块满足规划要求。实现此功能的思路是将问题抽象为限定条件下的优化问题,使用运筹学的相关算法快速解决。该方法与以遗传算法为代表的迭代生成方法在逻辑层面最大的不同是:遗传算法是在每一代中寻找接近目标的基因组,并不断进行变异和选择,直到找见小于所设定容差的组合,属于启发式发展^[28],有较大几率落于局部最优,且寻优的难度会随着自变量数量的增加而显著增加;而基于运筹学的方法则是通过构建问题模型,在限定条件下求目标函数极值的过程,因此该方法速度极快且准确率高。最后是“生形”,该方法极大地继承了形状语法规论,应用计算机图形学中的相关算法,自下而上分层次生成地块中的建筑体块。

总体而言,该算法包括3个模块,分别是基于规划建筑专业的业务规则库、基于运筹学的优化定量和基于形状语法的形态生成。

2.3 参数化的系统生成

参数化概念可以很好地解决参数可控这个问题。提起参数化生成设计,人们更多地会联想到其美学上的识别性,即有序复杂的优雅和无缝流动感^{[29]10},而这只是其原则性内核的一种外在表现形式。参数化的实质是将一个物体中每个部分的约束条件,以及各部分之间的关系用可变的数值表示^{[29]11},任何一个部分的改变都会引发其他部分的关联性改变。因而,任何用数学关系连接的自变量(自然因素、社会因素和技术因素)和因变量(建筑的几何形态)^[30]均属于参数化生成设计。

参数化设计属于技术层面的概念,面对城市规划设计应用,则还需其他经典理论支撑,如模式语言(pattern language)^[31]和精明准则(smart code)^[32]。本文探索了如何利用数学关系描述城市设计三维形态,最终构建出可用参数控制的生成式设计算法模型。

本文通过大量的案例学习和业务分析,

总结城市空间典型形态类型,抽取建筑主要参数,形成业务规则库,最终构建出高效准确、参数可控、目标限定的城市设计自动生成算法模型和工作流程。

3 功能体系

基于理论基础和主要方法,遵循规划师、设计师和建筑师进行方案创作的原则,本文初步构建了一套功能体系,寻求城市物质空间形态的人工演进如何与各专业系统的运转规律相互协同与匹配,辅助城市空间形态及其相关社会经济环境属性关系的生成,推动精细化的城市设计与控规协同。

如图5所示,该体系分为4个模块,分别为控规方案制定、三维形体生成、多维量化评估和人机交互调整,其中包括空间行为形态网络分析、用地功能与公共服务设施网络分析、三维形态生成、专业协同评估、人机互动调整等功能。各模块彼此联动,形成控制性详细规划

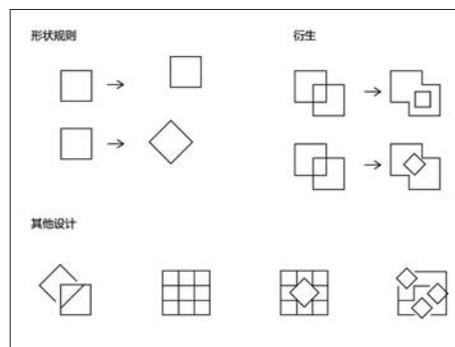


图4 形状语法基于旋转规则生成形状的示意图
Fig.4 A shape grammar demonstrates rotation by 45 AE
资料来源:参考文献[23]。

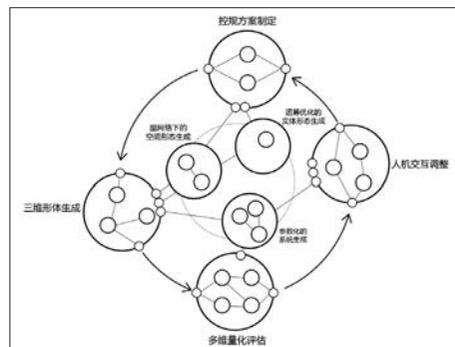


图5 功能体系
Fig.5 The functional system

资料来源:笔者自绘。

与城市设计的协同机制。

每一个闭环开始于控规方案制定,来自用户提供或系统推荐。控规方案提供了二维用地数据和参数,经过形体生成模块实现信息升维;多维量化评估模块使用上一模块提供的三维几何载体,进行多专业量化分析模拟;分析结果可辅助设计师对方案进行研判,并选择优化方向和策略,以人机交互的模式,对控规方案进行修改;修改后的方案再次进入模块一,开始新一轮循环。

3.1 空间与行为形态网络分析

世界上多种多样的建成环境形态源于人类活动的多样性。人们从城市形态中所获得的信息会影响到人们与其周围环境交互的方式,继而影响到身处其中的人们行为特征^{[33][233]}。为了让环境变得有意义且使人们使用起来感到舒适,城市形态与功能之间关系的研究便变得十分重要^{[33][233]}。

在空间形态方面,系统初步对路网的空间结构进行描述,这是由于路网结构是城市发展的骨架。路网的形式、密度及周边用地性质与开发强度等将会影响人们的行为规律和资源的流动,进而作为重要因素决定城市是否能可持续发展。常用的指标来源于空间句法理论,包括标准化全局整合度、标准化全局选择度等^[34]。

在个体行为形态方面,当个体行为共同构成大规模规律时,人群的集体行为又会影响到城市社会经济等层面的具体问题。由于大众数据源的出现很好地补充了官方数据源,适合于对人的行为活动进行补充描述,并用于研究城市形态和人的行为活动之间的关系^[35]。系统依托规划设计经验、总结城市空间与行为之间的规律,综合考虑“自上而下”与“自下而上”的发展路径,建构起空间与行为形态的动态网络分析模块^[36]。

3.2 用地功能与公共服务设施网络分析

在规划设计中,地块性质、开发强度、公共服务设施是重点考虑要素,特别是近年来不断强调生活圈的概念,期望通过5分钟、

10分钟、15分钟等不同覆盖范围的生活圈,合理分配用地和公共资源。然而,生活圈的规模和划定又与各地块的用地性质、人口、开发强度等密切相关,需要采用均衡或最优解的算法来应对。系统除了采用诸如《居住区规划设计标准》^[37]《城市道路公共交通站、场、厂工程设计规范》^[38]《城市公共设施规划规范》^[39]等规范,还考虑受投资收益、城市密度分区、城市视线通廊等因素的影响。

在模型上,选择空间句法算法和基于运筹学优化算法的结合。空间句法理论提出“前景网络”与“背景网络”理论^[40],与“生活圈”概念具有一定的相似性。“前景网络”为“城市各类中心彼此联系而构成的空间网络,常常与主干道有一定的重合性”;“背景网络”为“城市中非中心性的、以居区为主的“空间网络”。其中,不同的尺度中,前景或背景网络具有不一样的空间影响范围。根据此理论,可确定不同用地与各类各等级公共服务设施的选址。

同时,系统还结合重力模型,考虑离散和连续优化在内的运筹学算法^[41]。其算法的目标是,在一系列的限制下,依据设施使用者的需求布置设施的位置,以使代价函数最小化^[42]。

3.3 三维形态生成

在实践中,规划师需要面对不同类型用地,推敲相关指标的设定,并优化地块所对应的具象三维城市形态及其对应的人口、经济、环境性能等。该过程必然包含从抽象用地指标到具象三维形态的生成工作^[43]。然而,如果设计范围较大,基于控规指标对所有地块进行手动建模所投入的人员与时间成本则较高^{[44][8]}。

面向规划实践的城市三维模型自动生成方法采用如下算法。一方面,针对用地功能组合形式及建筑形式的风格选择问题,通过大规模数据的学习,抽取实践设计中较为常见的组合形式及建筑形态,并建立相对独立的原型,以便复用。另一方面,基于实践经验,提取设计师常用的设计指标,例如用地性质、地块容积率、地块建筑密度等参数^[45];同时,结

合相关规范作为输入约束,通过运筹学求最优解的方法,将上述输入参数、规范限定与自动生成问题转化为带约束的线性规划数学模型^[46],求最优解,找出地块内符合该指标的建筑物形态。

3.4 专业协同评估

多专业协同评估是一种点与中心的信息交流模式,各参与方之间的信息交流具有唯一性与连续性^[47]。该信息沟通模式将来自不同专业的数据整合在一个平台上,实现了专业内、专业间的数据交流和信息最大化共享,从而保证了城市设计的高效率、高质量和可持续性^[48]。

在系统中,规划方案、能源方案、交通方案、固废处理方案,以及碳排放计算模型等需在规划设计的前期就进行详细的整合。此处的“整合”并不是将不同方案统一坐标然后叠加在一起,而是各系统联动、数据互通的深度整合。例如,建设时是否采用绿色建筑的标准会直接影响城市的总体能源消耗;规划方案的用地性质和强度会直接影响交通方案^[49];交通强度与人口分布、用地性质的分配有强相关联系^[50]。因此,只有综合考虑各专项方案并加以整合,才能得到方案在环境、经济、社会层面的影响,辅助做出正确的决策。

3.5 人机互动调整

人机交互模块是面向用户的系统研发中的重要内容。通过交互式平台,可以将规划师或设计师的设计意图以普适、直观的方法进行表达。同时,也能帮助专业/非专业人员在短时间内了解规划设计意图,加深对方案的认识并提出对应需求^{[44][16]}。此模块可以从4个方面开展:输入规则模块、自主生成模块、辅助决策模块和方案评估模块(见图6)。

用户可以交互式地调节系统中现有的城市相关规则,并将其作为基础资料和设计参考用于三维形态生成。在自主生成模块中,通过参数化增强设计使得方案与数据无缝联动^[51],提高城市设计工作的效率和准确度,生成基于

上位指标的城市设计草模。设计师可再根据自己的想法进行设计。此外,系统依托于方案精细化评估功能,可辅助进行快速的方案修改、方案比选、方案优化等工作。因此,通过人机互动调整的系统构建,能够将效益分析与规划设计优化一体化,大大提高设计的效率^[52]。

4 实践案例

上述的理论与方法需要经过实际案例的检验,以推动该系统在实践中不断完善。该系统的科学性和可行性有幸在深圳前海妈湾片区的规划编制工作和两个教学工作营活动中得到初步验证。

4.1 妈湾片区

深港国际服务城位于深圳前海妈湾片区。其总用地面积为3.574 km²,总建设量为600万m²,规划就业人口和居住人口均为10万人。该规划在编制的过程中强调“强交通、重生活”的理念,提出TOD (Transit-Oriented Development) 的发展方式。为实现该目标,该片区的规划采用了前文提出的方法论,按照“指标确定—模型生成—多维评估”的流程编制规划方案。

在“指标确定”阶段,系统基于已有路网与地块数据,计算不同出行半径(包括全局、1 200 m、500 m和300 m)下道路与地块的

可达性(见图7)。“可达性”同时考虑基于路网结构的可达性,以及妈湾片区规划的TOD中心对可达性的影响(见图8,表1)。

然后,系统基于不同生活圈大小,包括15分钟(对应1 200 m步行半径)、10分钟(对应500 m步行半径)和5分钟(对应300 m步行半径),对妈湾片区地块进行聚类,自动划分组团,形成不同等级生活圈(见图9)。接着,系统基于生活圈划分结果、已有的用地平衡表(见表2)、各类用地重要性排序(见表2),以及前文计算得到的地块复合可达性,把用地性质分配到各地块上(见图10)。最后,在计算结果中各地块的土地性质和复合可达性的基础上,依据容积率和可达性的关系,以及已有的各类功能的开发建设量(见表3),系统把各类功能的总建设量分配到各个地块上,完成容积率的分配(见图11)。

各个地块的土地性质和容积率等控规指标确定后,系统即可自动生成符合控规指标要求的城市设计方案的三维模型。利用前述的控规指标和生成的三维模型,系统即可对城市设计方案进行多维度的分析(见图12)。基于三维模型及各建筑的建筑功能,可对该方案可承载的人口数、耗能量、耗水量和固废产生量进行估算(见表4)。进一步,基于耗能量与固废产生量,系统计算出能源碳排放量与处理相应的固废垃圾所产生的碳排放量,以辅助评估妈湾片区实现可持续发展目标的程度。

4.2 工作营

该系统作为开放性工具,用于辅助城市设计教学。在深圳大学王浩锋教授与朱文健老师组织的“律动城市·数字生行”工作营,以及清华大学黄蔚欣副教授与北京交通大学盛强副教授组织的中国建筑学会计算性设计学术委员会年会工作营“城市形态分析与生成”中,基于深圳北站案例,该系统得到了验证。

在工作营期间,学生们尝试基于该系统进行城市设计:结合路网结构和用地平衡表等数据,生成各地块的控规指标,自动生成城市设计草模;结合相关参数对城市设计方案从建设成本、视线、碳排放等多个维度进行量化评估;根

表1 地块复合可达性权重表
Tab.1 Weights of different factors for the composite accessibility of sites

考虑因素	权重
与TOD距离	0.3
与海岸线距离	0.3
空间句法	0.4

资料来源:笔者自制。

表2 用地平衡表
Tab.2 Composition of urban development land

用地性质	用地面积百分比/%
商业服务业设施用地	41.6
公共管理与公共服务设施用地	7.8
居住用地	35.6
物流仓储用地	10.2
绿地与广场用地	4.8
工业用地	0.0

注:表内用地性质顺序代表用地优先次序。

资料来源:笔者自制。



图6 人机交互式设计流程
Fig.6 Human-machine interactive design workflow

资料来源:笔者自绘。

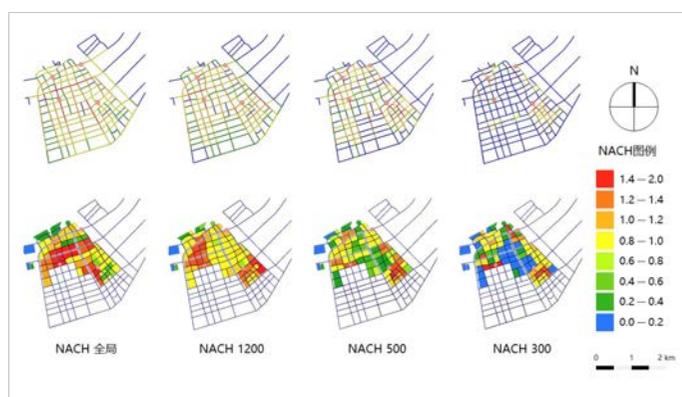


图7 基于空间句法的路网及地块可达性分析
Fig.7 Accessibility analysis of roads network and planning sites based on space syntax model

资料来源:笔者自绘。

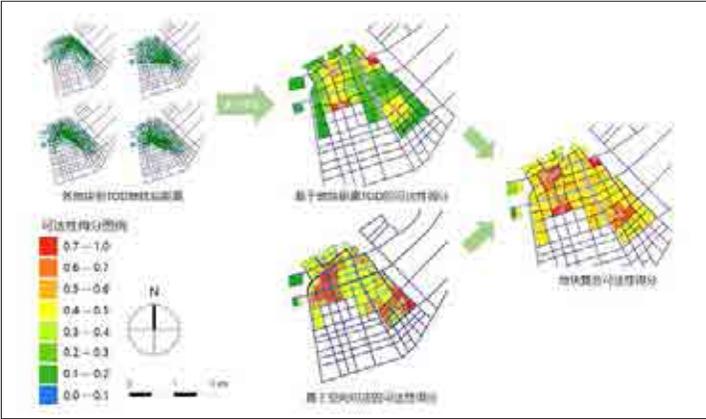


图8 地块复合可达性计算
Fig.8 Planning sites comprehensive accessibility analysis

资料来源:笔者自绘。

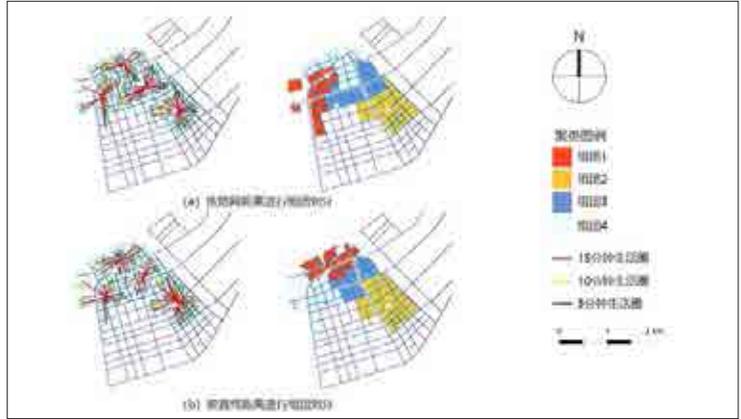


图9 基于层次聚类的组团划分
Fig.9 Forming living neighborhood based on hierarchical clustering

资料来源:笔者自绘。

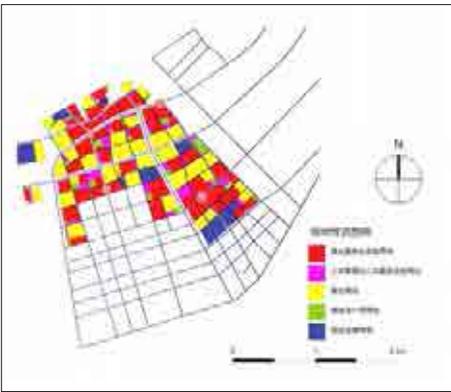


图10 用地性质分配
Fig.10 Land use allocation

资料来源:笔者自绘。

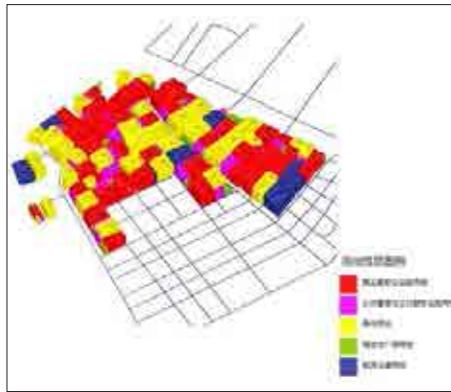


图11 容积率分配
Fig.11 FAR allocation

资料来源:笔者自绘。

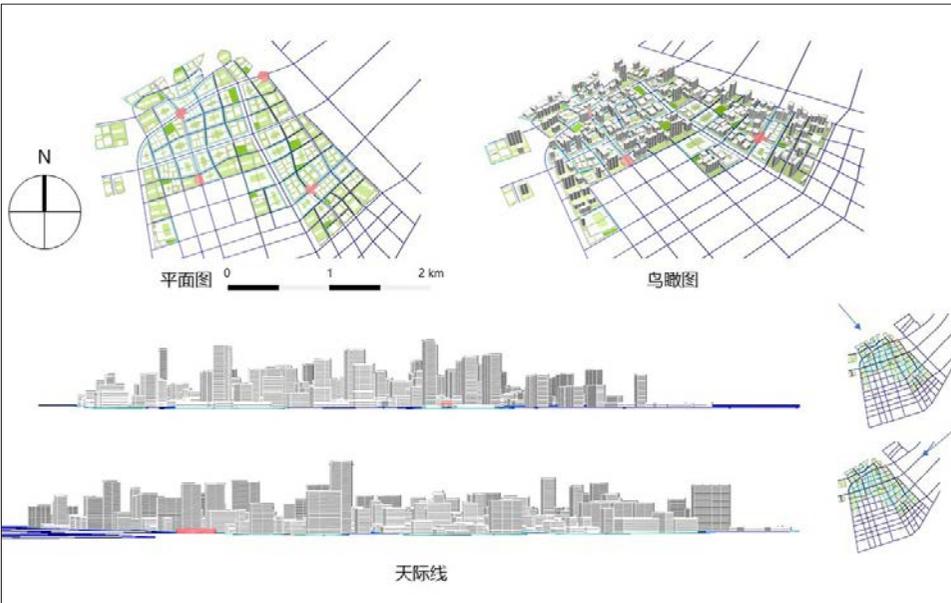


图12 建筑体块自动生成结果
Fig.12 The automatically generated building volume model

资料来源:笔者自绘。

据评估结果的反馈对原方案进行相应的修改。

学生们展现出大量精彩纷呈的方案(见图13)。有些方案强调公共服务设施配套的经济性,以“功能混合”“15分钟生活圈”等概念考虑整体空间布局;有些从TOD的概念入手,综合考虑地铁站点、开发强度、视线通廊、绿道、商业等联动,打造活力地段;有些以绿色生态为重点,在对阴影、立面太阳能利用潜力、热岛效应、风环境等分析的基础上,力图塑造一个绿岛。

总体而言,该系统的操作界面较为清晰,便于学生快速上手,有助于学生理解城市设计的要素、规则和造型之间的关系,充分发挥其专业能力进行各种探索,促进科学思维与艺术畅想的结合,最终提升教学质量。

5 结语

面向未来更为复杂的城市系统规划设计,本文提出的系统只是初步的尝试。该系统试图定量揭示城市的形态美与社会经济环境等多方面要素的协同规律,并寻找城市发展的价值动力。然而,这种协同规律的挖掘涉及不同尺度的涌现与坍塌、个体行为与集体现象互动、动态自适应等多方面的机制,涉及人的主观目的与选择等心理因素,还涉及城市空间形态自我生成的内在成因等。因此,借助数字孪生^①技术的元城市系统人工演进过程,在城市空间形态的涌现过程中如何平衡科学理性与艺术

注释: ①数字孪生是一组虚拟信息,从微观原子角度到宏观几何角度,全面描述真实或潜在的物质世界,通过仿真模拟、实时响应等,与物质实体进行交互,反映物质世界的全生命周期过程。

表3 各类用地的开发建设量

Tab.3 Floor area of construction within sites of different land use

功能类型	建筑面积百分比 /%	建筑面积 / 万 m ²
商业服务业设施用地	45.4	267.45
公共管理与公共服务设施用地	7.3	43.00
居住用地	38.7	227.98
物流仓储用地	8.6	50.66
绿地与广场用地	0.0	0.00
工业用地	0.0	0.00
总计	100.0	589.09

资料来源: 笔者自制。

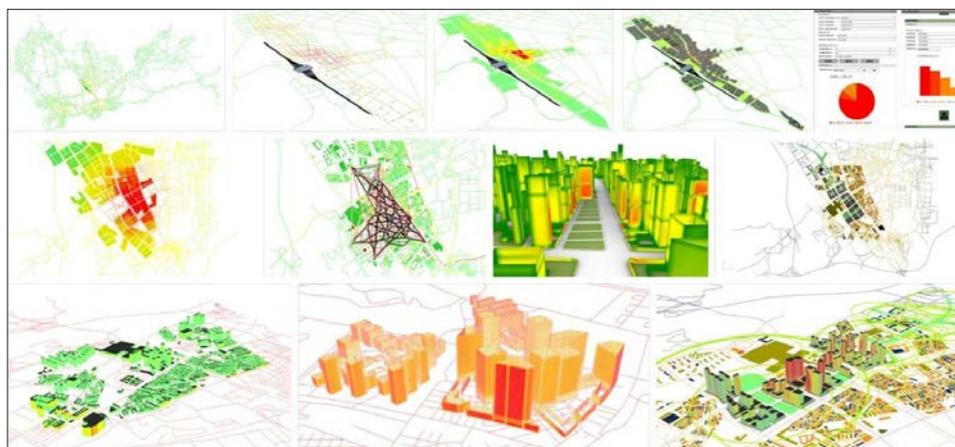


图13 工作坊部分成果

Fig. 13 Collection of workshop achievement

资料来源: 深圳大学工作坊学生成果。

表4 生成方案多维评估

Tab.4 Multidimensional assessment for generated plan

相关指标	指标值
总用地面积	3.574 km ²
总建设量	592 万 m ²
居住人口	8.27 万人
工作人口	9.86 万人
耗电量	2.14 亿 kW · h/y
耗水量	214.84 t/y
固废垃圾产生量	1.24 万 t/y
碳排放 (用能)	16.11 万 t/y
碳排放 (垃圾处理)	1.21 万 t/y

资料来源: 笔者自制。

感性, 以及这些规律如何在规划设计中实践应用, 仍将是未来探索的方向。■

参考文献 References

[1] MARTIN L, MARCH L. Urban space and structures[M]. London: Cambridge University Press, 1972.

[2] DUBITZKY W, WOLKENHAUER O, CHO K H, et al. Encyclopedia of systems biology[M]. New York: Springer, 2013.

[3] 李飏. 建筑设计——基于复杂系统的建筑设计计算机生成方法研究[M]. 南京: 东南大学出版社, 2012.

LI Biao. Generative architectural design, a research on the methodology of computer-aided generative architecture design based on complex systems[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2012.

[4] 高翔, 李煜, 徐跃家, 等. 应对高密度城市采光问题的生成式城市设计方法研究——以KPFui伦敦理想街区为例[J/OL]. 国际城市规划: 1-13 (2022-04-13) [2022-05-13]. DOI:10.19830/j.upi.2021.224.

GAO Xu, LI Yu, XU Yuejia, et al. Research on design strategies of daylight in high-density cities based on generative urban design: taking KPFui London ideal block as an example[J/OL]. Urban Planning International: 1-13(2022-04-13)[2022-05-13]. DOI:10.19830/j.upi.2021.224.

[5] 何宛余, 杨小荻. 人工智能设计, 从研究到实践[J]. 时代建筑, 2018 (1): 38-43.

HE Wanyu, YANG Xiaodi. Artificial intelligence design, from research to practice[J]. Time+Architecture, 2018(1): 38-43.

[6] SIDEWALK LABS Q. Optimizing unit yield while balancing quality of life for Wembley Park[EB/OL]. (2021-07-26)[2022-05-13]. <https://www.sidewalklabs.com/products/delve/quintain-case-study>.

[7] KPFui. XIM skyline design tool[DB/OL]. (2016-02-02)[2021-11-27]. <https://ui.kpf.com/blog/2016/2/2/skylinedesign-tool>.

[8] DORAISWAMY H, FERREIRA N, LAGE M, et al. Topology-based catalogue exploration framework for identifying view-enhanced tower designs[J]. ACM Transactions on Graphics, 2015, 34(6): 1-13.

[9] MUMFORD L. Utopia, the city and the machine[J]. Daedalus, 1965, 94(2): 271-292.

[10] SCHNORE L. The city as a social organism[J]. Urban Affairs Quarterly, 1966, 1(3): 58-69.

[11] LADYMAN J, LAMBERT J, WIESNER K. What is a complex system?[J]. European Journal for Philosophy of Science, 2013(3): 33-67.

[12] SHI W, GOODCHILD M, BATTY M, et al. Urban informatics[M]. Singapore: Springer, 2021.

[13] POLLALIS S. Planning sustainable cities: an infrastructure-based approach[M]. London: Routledge, 2016.

[14] BARABASI A. Network science[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2016.

[15] GRANDJEAN M. La connaissance est un reseau. Perspective sur l'organisation archivistique et encyclopédique[J]. Cachan: Les Cahiers du numérique, 2014(10): 37-54.

[16] HILLIER B, HANSON J. The social logic of space[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.

[17] HILLIER B. Space is the machine[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

[18] HILLIER B. Spatial sustainability in cities: organic patterns and sustainable forms[C]//KOCH D, MARCUS L, STEEN J. Proceedings of the 7th International Space Syntax Symposium. Stockholm: TRITA-ARK-Forskningspublikation, 2009(1): 1-20.

[19] STINY G, GIPS J. Shape grammars and the generative specification of painting and sculpture[C]//IFIP Congress, 1971(2): 125-135.

[20] STINY G. Introduction to shape and shape grammars[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 1980, 7(3): 343-351.

[21] MITCHELL W. The logic of architecture: design, computation, and cognition[M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1990.

[22] HALATSCH J, KUNZE A, SCHMITT G. Using shape grammars for master planning[C]//GERO J S, GOEL A K. Design computing and cognition. Dordrecht: Springer, 2008(8): 655-673.

[23] CHAU H. Preserving brand identity in engineering design using a grammatical approach[D]. Leeds: University of Leeds, 2002.

[24] HILLIER B, TURNER A, YANG T, et al. Metric and topo-geometric properties of urban street networks: some convergences, divergences and new results[J]. The Journal of Space Syntax, 2010(1): 258-279.

- [25] YANG T, HILLIER B. The impact of spatial parameters on spatial structuring[C]//GREENE M, REYES J, CASTRO A. Proceedings: Eighth International Space Syntax Symposium. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile, 2012: 1-23.
- [26] HILLIER B, PENN A, HANSON J, et al. Natural movement: or, configuration and attraction in urban pedestrian movement[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1993, 20(1): 29-66.
- [27] 杨滔. 基于大数据的北京空间构成与功能区位研究[J]. *城市规划*, 2018, 42 (9) :28-38.
YANG Tao. A study of spatial structure and functional location based on big data[J]. *City Planning Review*, 2018, 42(9): 28-38.
- [28] NIELSEN J. Finding usability problems through heuristic evaluation[C]//Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 1992: 373-380.
- [29] NEIL L, YUAN F. Scripting the future[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2012.
- [30] 李媛. 大跨建筑表皮参数化设计方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
LI Yuan. Research on parametric design method of long-span architectures surface[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [31] ALEXANDER C, ISHIKAWA S, SILVERSTEIN M, et al. A pattern language: towns, buildings, construction[M]. New York: Oxford University Press, 1977.
- [32] SANDY S, DUANY A, WRIGHT W. SmartCode: Version 9.2[M]. Scotts Valley: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2012.
- [33] STEINITZ C. Meaning and the congruence of urban form and activity[J]. *Journal of the American Institute of Planners*, 1968(4): 233-248.
- [34] HILLER B, YANG T, TURNER A. Normalising least angle choice in Depthmap - and how it opens up new perspectives on the global and local analysis of city space[J]. *Journal of Space Syntax*, 2012, 3(2): 155-193.
- [35] CROOKS A, PFOSE D, JENKINS A, et al. Crowdsourcing urban form and function[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2015(29): 720-741.
- [36] 龙瀛, 沈尧. 数据增强设计——新数据环境下的规划设计回应与改变[J]. *上海城市规划*, 2015 (2) : 81-87.
LONG Ying, SHEN Yao. Data augmented design - planning and design response and change in the new data environment[J]. *Shanghai Urban Planning Review*, 2015(2): 81-87.
- [37] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 城市居住区规划设计标准:GB 50180-2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for urban residential area planning and design: GB 50180-2018[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [38] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市道路公共交通站、场、厂工程设计规范: CJJ/T 15-2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of urban roads, public transportation stops, terminus and depot engineering: CJJ/T 15-2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [39] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 城市公共设施规划规范: GB 50442-2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for urban public facilities planning: GB 50442-2008[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [40] 杨滔. 基于空间句法的多尺度城市空间网络形态研究[D]. 北京: 清华大学, 2017.
YANG Tao. A syntactic study on the forms of multi-scaled urban spatial network[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.
- [41] REVELLE C S, EISELT H A. Location analysis: a synthesis and survey[J]. *European Journal of Operational Research*, 2005, 165(1): 1-19.
- [42] HALE T S, MOBERG C R. Location science research: a review[J]. *Annals of Operations Research*, 2003, 123(1): 21-35.
- [43] 杨俊宴, 刘志远, 王桥, 等. 城市设计数字化平台关键技术研究与应用[J]. *建设科技*, 2021 (13) :4.
YANG Junyan, LIU Zhiyuan, WANG Qiao, et al. Research and application of key technologies of urban design digital platform[J]. *Construction Science and Technology*, 2021(13): 4.
- [44] 杨俊宴. 全数字化城市设计的理论范式探索[J]. *国际城市规划*, 2018, 33 (1) : 15.
YANG Junyan. Exploration on theoretical paradigm of all-digital urban design[J]. *Urban Planning International*, 2018, 33(1): 15.
- [45] 杨滔, 罗维祯, 林旭辉, 等. 城市空间设计的数字化创新方法探讨[J]. *城市设计*, 2021 (4) :18-23.
YANG Tao, LUO Weizhen, LIN Xuhui, et al. A discussion on new digitized methods for designing urban space[J]. *Urban Design*, 2021(4): 18-23.
- [46] HOOKER N. Operations research methods in constraint programming[M]//ROSSI F, VAN BEEK P, WALSH T. Foundations of artificial intelligence. London: Elsevier, 2006(2): 527-570 (2008-02-25)[2022-05-13]. [https://doi.org/10.1016/S1574-6526\(06\)80019-2](https://doi.org/10.1016/S1574-6526(06)80019-2).
- [47] 王磊, 余深海. 基于Revit的BIM协同设计模式探讨[C]//全国现代结构工程学术研讨会. 2014.
WANG Lei, YU Shenhai. Discussion on BIM collaborative design pattern based on Revit[C]// National Symposium on Modern Structural Engineering. 2014.
- [48] 王巧雯, 张加万, 牛志斌. 基于建筑信息模型的建筑多专业协同设计流程分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2018, 46 (8) :1155-1160.
WANG Qiaowen, ZHANG Jiawan, NIU Zhibin. Architecture multi-disciplinary collaborative design process based on building information model[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2018, 46(8): 1155-1160.
- [49] WILSON A G. Land-use/transport interaction models: past and future[J]. *Journal of Transport Economics and Policy*, 1998, 32(1): 3-26.
- [50] 钱寒峰, 杨涛, 杨明. 城市交通规划与土地利用规划的互动[J]. *城市问题*, 2010 (11) :5.
QIAN Hanfeng, YANG Tao, YANG Ming. Urban transportation planning and land-use planning[J]. *Urban Problems*, 2010(11): 5.
- [51] 徐卫国. 参数化设计与算法生形[J]. *城市环境设计*, 2012 (1) :4.
XU Weigu. Parametric design and algorithm generating[J]. *Urban Environment Design*, 2012(1): 4.
- [52] 杨俊宴, 朱晓. 人工智能城市设计在街区尺度的逐级交互式设计模式探索[J]. *国际城市规划*, 2021, 36 (2) :9.
YANG Junyan, ZHU Xiao. Exploration of the step-by-step interactive design mode of artificial intelligence urban design at the block scale[J]. *Urban Planning International*, 2021, 36(2): 9.