

复杂适应系统视角下城市交通基础设施与公共空间整合设计的方法及模拟工具*

杨 柳

提 要 城市设计在关注空间和形态的同时需从复杂适应系统(CAS)的角度认知、改造和评估城市系统,以此做出科学的决策,在此方面,常规设计方法存在一定的局限性。针对城市交通基础设施和公共空间的整合设计议题,引入CAS研究方法重新审视城市设计工作内容,指出在数字化城市设计范式引导下可借助计算机模拟技术进行量化分析和评估。在此基础上,完善和建构一种“设计—模拟”整合设计方法框架,运用模拟工具支持量化分析和方案评价。提出针对交通系统与空间系统具体的认知和评估方法,搭建交通与空间系统静态模型、动态行为模型、环境影响模型等系列计算机模拟工具。在设计实践与教学中部分应用该方法,探索复杂系统理论与模拟技术在城市设计中的结合路径。**关键词** 城市设计;复杂适应系统;交通基础设施;公共空间;整合;计算机模拟

Approaches and Simulation Tools for Integrated Design of Urban Transport Infrastructure and Public Space Systems: The Perspective of Complex Adaptive System Theory

YANG Liu

Abstract: While urban design has a focus on space and form, it also needs to consider, transform, and evaluate urban systems from the perspective of complex adaptive systems, which is critical for making scientifically grounded decisions. In this regard, conventional approaches to design have certain limitations. Aiming at integrated design of urban transportation infrastructure and public spaces, this paper reexamines urban design by introducing a research method for comprehending complex adaptive systems. It points out that in the digital urban design paradigm, computer simulation technology can enable sophisticated quantitative analysis and evaluation. Building upon this foundation, the paper introduces the "design-modeling" digital urban design framework as a simulation tool to facilitate quantitative analysis and evaluation. It proposes specific methodologies for understanding and evaluating transport and space systems and runs a series of computer simulations including transport-space static models, dynamic behavioral models, and environmental impact models. Finally, through partial application of the method in design practice and teaching, the paper further explores the significance of complex adaptive system theory and simulation technology in the field of urban design.

Keywords: urban design; complex adaptive system; transport infrastructure; public space; integration; computer modeling

中图分类号 TU984 文献标志码 A
DOI 10.16361/j.upf.202304008
文章编号 1000-3363(2023)04-0061-08

现代城市设计^①概念起源于1956年,兼具自上而下管控价值和自下而上的原创价值取向,需要综合考虑不同尺度的规划与设计并提出解决策略^①。有学者指出城市设计需要从设计要素的分离走向整合设计^②,引入系统论有助于更好地理解城市的复杂性并制定更有效的整合设计方案^{③-⑥}。随着第三代系统论的出现,复杂适应系统(complex adaptive system, CAS)理论为城市设计带来革新^{⑥-⑦}。该理论认为系统中每个主体对外界干扰做出自适应反应,不同类型的自适应主体之间相互作用并影响系统的演化路径和结构。为了进一步认知这种多规则的系统组织形式,计算机模拟^⑧技术逐渐被采用^⑧。

21世纪以来,随着新数据环境、智能化、移动互联网的出现,城市设计迎来数字化时代^{⑨-⑩},数据增强设计^⑪、城市信息模型^⑫等辅助设计方法逐步得到应用。但现有

作者简介

杨 柳,东南大学建筑学院至善博士后、助理研究员, yangliu2020@seu.edu.cn

* 国家自然科学基金青年项目“城市设计视角下交通基础设施与公共空间系统整合的绩效评估及预测模型研究”(项目编号:5210081743);江苏省自然科学基金青年项目“城市交通基础设施与公共空间系统整合的量化城市设计方法研究——以南京市为例”(项目编号:BK20210260)

辅助设计方法多侧重于城市设计的现状评价,在方案评估方面进展缓慢^[13],在对CAS的认知方面仍有待深入,城市规划与设计需要多标量的绩效评估与决策支持工具^[14]。为此,需要基于主体的建模(agent-based modeling, ABM)等前沿计算机模拟技术来认知CAS并进行定量评价^[15]。

在众多城市系统中,交通基础设施系统是支撑城市正常运转和经济发展的保障,是城市设计中组织结构和形态的基本要素,也是促进城市内部及外部联系与流动的动力系统。在城市发展过程中,交通基础设施在建设初期嵌入城市空间并对其构成限定作用,在提供服务的同时也占用了一部分城市公共空间。随着城市化进程加速,大规模以机动交通为导向的基础设施建设为了实现自身的高效能,在规划设计中往往缺乏对周边公共空间的统筹考虑,进而对沿线空间产生消极影响。为解决这一问题,各领域专家学者提出了交通基础设施城市化^[16]、土地利用与交通整合规划^[17]、TOD等议题,从城市、街区、建筑等多个尺度入手提出解决策略。

然而,交通基础设施与城市空间的组成要素类型多样,子系统之间存在着复杂的信息能量交换,外部干预手段会引起系统多层次的反应,需要从CAS的角度重新审视设计的对象,用计算机模拟等新技术手段分析、评估与决策^[18]。例如,ABM技术可以实现对城市复杂系统从微观到宏观的多尺度模拟,通过在微观上模拟个体的路线选择等行为预测宏观的交通需求等涌现现象。

本文针对城市交通基础设施系统(特指路面交通部分,以下简称“交通系统”)与城市空间系统(特指室外公共空间,以下简称“空间系统”)展开研究,探究如何借助复杂系统研究方法及其模拟工具进行交通基础设施与公共空间的整合设计,为现状分析和方案评价等环节提供定性与定量的决策支持。

1 城市设计与复杂系统研究方法

1.1 城市设计操作方法

早期城市规划学者帕特里克·盖迪斯^[19](Patrick Geddes)将城市规划的内

容概括为调研、分析、规划的静态过程;与传统城市设计方法相比,当代城市设计体现为连续决策的过程,在设计之初设立拟定目标、通过增加反馈环节不断调整目标^[20],并将现状分析、方案评估的结果动态纳入城市设计中。陆容立等^[21]指出应当对基地的核心价值和关键冲突进行解析,以提出有针对性的设计策略。

针对城市交通与空间系统,从宏观城市尺度入手,夏海山等^[22]研究了轨道交通与空间系统之间的内在影响要素及耦合作用机理。从微观地块尺度入手,褚冬竹等^[23]提出城市交通节点综合增效设计的“效益—空间”关联方法,形成一种“综合效益—效益子项—具体标准—评价指标—空间要素”的思维模式。钱才云等^[24]则对复合型城市公共空间与城市交通一体化的设计方法进行了分类研究。

1.2 复杂适应系统研究方法

复杂系统是从1970—1980年代发展起来的新的跨学科研究领域,杰伊·弗雷斯特^[25](Jay Forrester)指出城市是由相互关联的部分组成的复杂的社会—技术系统,具有非线性、涌现行为等特征。1990年代,约翰·霍兰(John Holland)等^[26]在复杂系统的基础上进一步提出CAS理论,指出现代城市具有复杂、动态、异质、自适应等特性,人、机构、基础设施等主体会对彼此之间及外界环境作出复杂的反应,影响系统总体的演变。CAS理论强调任何系统的演进都是主体对外部环境的主动认知及“学习”的结果,这一观点有助于理解存在于城市系统内的“隐秩序”^[7]。

钱学森等^[26]提出了“开放复杂巨系统”概念,为我国CAS的研究奠定了基础,在方法论层面提出“从定性到定量的综合集成系统方法论”,即“将群体、数据和各种信息与计算机技术有机结合起来,把各种学科的科学理论和人的经验知识结合起来……发挥这个系统的整体优势和综合优势”。从定性到定量综合集成方法体现了从感性认识上升到理性认识的辩证思维,是整体论与还原论的辩证统一。整体论所用的思维形态主要是形象思维,强调从宏观、整体上以经

验为基础的直觉,所得出的结论多属于定性结论;还原论所用的主要是逻辑思维、抽象思维,从构成成分、因素及其结构等不同角度揭示了事物的内在本质与规律,所得到的结论往往是精确化、量化的。这一方法论可以为城市设计提供新的洞见。

复杂系统研究可概括为认识系统、改造系统、评估系统等3个方面^[27],改造系统的目标是系统整合。首先,对系统进行“分解”,分析各组成要素、子系统以及环境的互依关系和矛盾冲突;其次,改变和调整各级组成部分的关系,实现协同合作,并使系统主动适应环境,找到短期或长期的协调策略;最后,评估系统整合的绩效,与目标进行校准,并提出反馈建议^[28]。在城市交通系统中,复杂系统研究常应用于解决交通配流、交通拥堵、瓶颈等问题^[29]。针对城市空间系统,高见等^[30]构建了“三位一体”的系统性城市更新模型,探讨了渐进式空间织补、整体系统功能提升等城市更新策略。

1.3 计算机模拟在城市设计与复杂系统研究中的应用

帕斯卡·佩雷斯(Pascal Perez)等^[31]指出在城市规划朝着更加自下而上的方向发展中,城市模型是在不断变化的复杂环境中进行知识构建和共享的重要中介。构建城市模型是理解城市系统内在机制的常用方法^[32-33],其中计算机模型有利于处理系统中的复杂关系。

计算机模拟为面向CAS的城市设计提供的支持主要体现在认知与评估系统等两个方面,仿真模型通过遵循逻辑或数学规则对CAS进行建模,并通过大规模计算进行定量分析,实现解释、理论阐述等多重目的^[34]。模型还有助于测试系统的不同配置,通过评估和预测多个情景支持决策过程^[35]。城市设计的决策过程是复杂的认知构建过程,取决于决策者对现实情况的认识和主观偏好。计算机仿真模型帮助决策者认知真实情况,揭示现状系统的真实状态和设计系统的未来变化,以扩展决策者的视野。

在传统的模拟方法中(如系统动力学),系统被视为由同质实体组成的整体。最新的基于个体的模拟方法强调系

统的可分解性和主体的异质性，其中，ABM等前沿模拟方法由众多异质的主体组成，主体具有自主的、反应性行为，其活动遵循一套行为规则。与其他方法不同的是，ABM强调主体的重要性，主体拥有学习和作出决策的能力，系统层面的行为是由单个主体行动后涌现的，因此是模拟CAS的理想方法。

2 一种面向城市交通与空间复杂系统的“设计—模拟”数字化城市设计方法

2.1 “设计—模拟”方法框架

城市设计必须进行城市现象的分析、抽象和解读，引入CAS理论有助于理解城市微观个体行为与宏观系统结构功能的关系，认识城市系统的开放性和层次性、正视不确定性，并制定因势利导的反馈与干预。对城市系统运行机制的科学地分析与抽象离不开定量研究，科学研究中通常采取“定性判断与假设一定量分析与验证一定性归纳与总结”的方法。因此，本研究借鉴“从定性到定量的综合集成系统方法论”的思想，概括出面向CAS的城市设计方法要点（表1），并针对城市设计的分析、设计、评价、决策等4个环节提出具体的优化建议。

在所开展的一项城市设计师访谈和问卷调查^③中，95%的受访者认为城市规划设计中需要进一步使用量化工具，尤其是在分析和评估环节。

基于以上内容，本文在前期研究^[36]的基础上，完善、建构一种面向CAS的“设计—模拟”数字化城市设计方法框架（图1），利用计算机模拟在认知与评估系统方面的优势，支持城市设计的量化分析与评价，实现系统整合目标。通过采用ABM技术模拟CAS中主体的行为，并揭示宏观层面的涌现现象。

在现状分析阶段，城市设计工作包括目标制定、现状调研、分析问题等内容，需要综合使用定性与定量分析方法。考虑到交通、空间系统的开放性，在制定目标时不但要实现二者物理空间的整合，更需要与人类社会以及自然、经济、文化条件实现良性互馈，实现绿色可持续的城市设计^[37]。因此，目标系统应包括交通与空间子系统及人类要素和外部

环境。在分析问题时，应结合传统城市设计定性分析方法与CAS认知方法，从城市设计要素（“主体”）的角度分析宏观系统问题，着重分析要素之间、要素与环境之间的互动耦合关系，形成描述系统的“理论模型”。进一步地，采用计算机模拟技术将理论模型转译为“计算机模型”，可实现要素关系的定量分析。此阶段的模型往往较为初级，是根据理论模型和场地基础数据构建的“原型模型”。

方案设计阶段需要专业设计人员和非专业人士的协同、形象思维和逻辑思

维并用、艺术与科学的融合，以及从宏观到微观的把控。设计方案应基于定性与定量分析结果，考虑人工干预对个体行为带来的改变以及城市的不确定性，因材施教，制定明确的规则和行动协调各要素、各子系统之间的关系，解决矛盾冲突，让系统发挥自适应能力，实现系统整合。其中，计算机模拟可提供实时反馈、促进多专业协同、激发设计灵感，ABM技术等自下而上的模拟工具还可揭示复杂系统中的涌现现象，设计师可以借此观察微观尺度的设计在宏观尺度的影响，进而提出多尺度城市设计

表1 面向CAS的城市设计方法要点

Tab.1 Key points of the urban design method based on meta-synthesis methodology

	传统城市设计方法	面向CAS的城市设计方法
参与主体	专家(设计师、规划师)	多学科交叉、协同设计
操作方法	设计人员主导	人一机结合以人为主
思维方式	形象思维	形象思维+逻辑思维
哲学思想	整体论	整体论+还原论
学科门类	艺术	艺术+科学
理论基础	经验知识	经验知识+科学理论
分析方法	定性	定性+定量(性智+量智)
研究层次	限定在微观或宏观层面	从微观到宏观,理解微观个体行为与宏观系统结构功能的涌现关系
要素	静态	动态、具有主动适应性
要素之间关系	线性关系	受关联耦合机制影响,存在信息能量的复杂交换
规划设计目标	认为城市处于平衡态,规划目标为寻找最优配置	承认城市的“不确定性”,规划制定明确的规则和行动调动系统内部的隐秩序,让系统发挥自适应能力

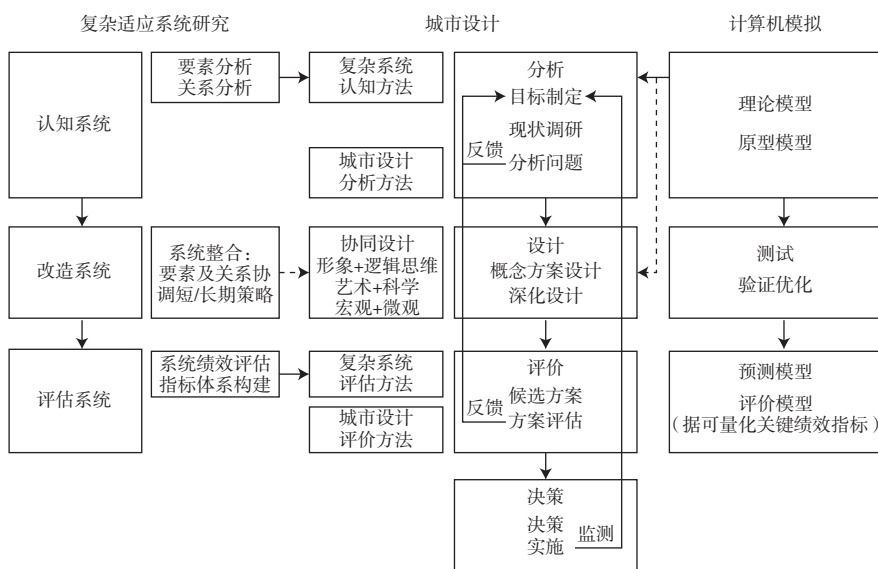


图1 一种“设计—模拟”数字化城市设计方法框架

Fig.1 A "Design—Modeling" framework for digital urban design

方案。

方案评价阶段应综合考虑项目理想目标与具体目标的达成，首先基于设计人员的经验和美学进行价值判断^[38]，其次从CAS评估的角度，基于理论模型形成系统绩效评估指标体系，进行多标量、多维度、多要素的评估，观察城市系统中受控部分（设计干预）的改变对可预测和随机部分的影响。为此，利用计算机仿真模型预测系统演化趋势，采用自下而上的建模方式揭示系统的涌现行为，并对可能结果进行评估。计算机模型不但可以实现对设计方案空间形态的量化分析，还可以对个体的行为、自然环境的影响等因素进行综合评价。

在决策过程中，利益相关者在一定的城市形态质性变化阈值范围内，科学地对比不同方案，对标项目任务书和规划设计方案的总目标，选择相对最优方案并付诸实施。方案实施后，可使用计算机模型进行实时监测和使用后评价。

2.2 现状分析

由于交通与空间系统所具有的复杂性，在分析阶段应采用还原论将系统拆解为可被理解的要素，并解读要素间的关系，再通过系统仿真揭示内在规律。

2.2.1 复杂适应系统认知方法

针对交通与空间系统的认知依次从内部要素、要素间关系、子系统间关系、子系统与环境间互依关系和矛盾冲突分析等几个维度展开。见图2。

要素提炼是将交通与空间系统进行分解的过程，根据其能动性将组成系统要素分为静态和动态两类^[39]。交通系统的静态要素包括基础设施线网及站点，动态要素包括交通工具与出行。空间系统的静态要素包括物理空间、公共设施、自然空间（蓝绿空间），动态要素包括公共空间的使用者及其行为活动。此外，还可以对要素进行细分，例如交通基础设施线网可分为道路、轨道交通、高速公路。图3展示了描述交通与空间系统的理论模型。

系统之间的互依关系主要有联合式、系列式、交互式互依等三种^[40]。联合式互依体现为子系统为母系统提供服务并获得支持，但子系统之间没有相互依赖；系列式互依是一个子系统的输出成为另

一个子系统的输入，或一个子系统的产生和扩张引发另一个子系统的产生；交互式互依体现为子系统之间互为对方的输入或输出，具有较强的依赖关系。

在城市发展的不同阶段，交通与空间系统的互依关系不断演化^[41]。在城市发展初期，交通基础设施引领城市开发，交通与空间的快速发展共同为城市提供服务，两者存在联合式互依和系列式互依。随着城市进入快速发展期，主要公共空间已基本形成，快速交通基础设施的建设嵌入原有城市肌理中，产生了与公共领域的空间争夺，两者之间转变为交互式互依。城市步入稳定期后，交通与空间系统呈现交互式互依，但需要完

善两者之间的良性互馈反应机制，即重构为耦合的“交通—空间”系统。分析表明，交通与空间系统之间的矛盾冲突涉及空间争夺、服务对象、设计尺度和机制、路权和用地权属、开发时序等五个方面。

2.2.2 计算机模型构想

本研究根据组成系统要素的类型将复杂系统模型分为静态模型和动态模型。静态模型侧重于城市建成环境的空间形态分析，而动态模型聚焦于建成环境对内部使用者的行为以及外部环境的动态影响。因此，可分别构建交通与空间系统的静态模型、动态行为模型和环境影响模型。设计师访谈和调查的结果显示



图2 认知城市交通与空间复杂系统的方法

Fig.2 The method of understanding complex transport and space systems

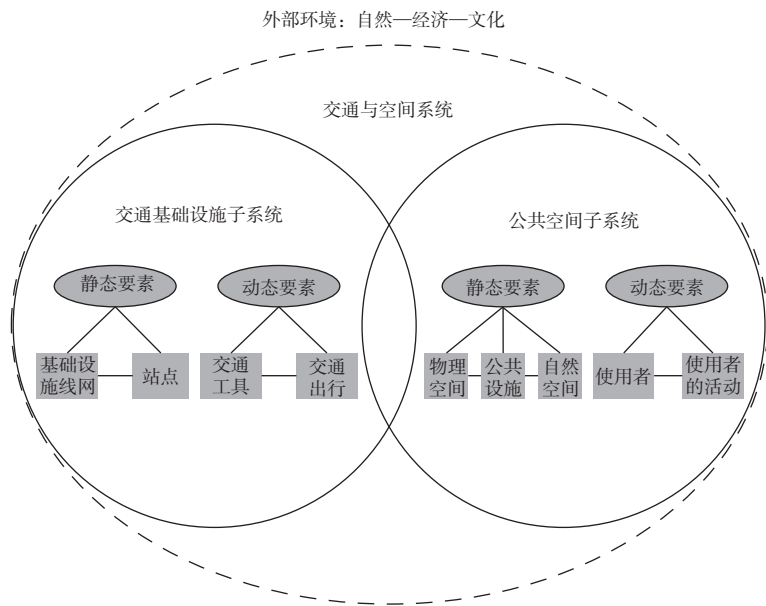


图3 城市交通与空间复杂适应系统理论模型

Fig.3 Theoretical model of complex transport and space systems

(图4),在分析环节,GIS技术因其具有对城市空间形态多指标分析的能力,宜作为主要的静态模型搭建平台;同时,专业模型和软件也受到关注,可用于动态模型的构建。

2.3 方案评价

在评价阶段,考虑到交通与空间系统的复杂性和不确定性,除了采用基于整体论的直观判断,还可通过构建评估指标体系对系统进行客观综合的评价,并通过建立基于个体的仿真模型预测宏观涌现行为,实现对系统的真实表征与评价。

2.3.1 复杂适应系统评估方法

在此阶段,基于前期分析构建的理论模型,从交通系统、空间系统以及相关的自然、社会、经济等外部环境中选取关键要素的评价指标。具体选取方法包括系统文献综述、关键字分析、主题要素提取、综合分析及指标提炼,最终形成综合评价指标体系(图5)。在工程实践中,可采用专家访谈、问卷等方法制定具体的权重方案。

2.3.2 计算机模型搭建

评价指标体系包括定性与定量两类指标,主要定量指标可通过交通与空间静态模型、动态行为模型以及动态环境影响模型进行评价(本研究不涉及经济与社会影响模拟),通过集成这三个模型,可以实现对交通与空间设计方案的定量评价(图6)。在模型集成中,采用过程集成的方式,即在考虑短期系统耦合关联机制时,静态空间模型作为背景输入动态使用者模型,使用者模型的结果(如机动车在城市中的行动轨迹)导入环境模型进行环境影响评估(如机动车产生的空气污染分布)。在考虑子系统间的长期耦合作用时,环境影响模拟的结果也反过来影响动态模型,个体会适应环境,而个体行为的变化也可能影响静态模型。

(1) 交通与空间系统静态模型构建

静态模型使用矢量数据在GIS中进行,其中交通系统包括机动交通网络、非机动车网络、轨道交通网络,空间系统包括公共空间系统、公共服务设施、蓝绿空间。该静态模型聚焦于中微观街

区、地块尺度,宏观城市尺度的交通网络和土地利用作为背景纳入考虑范畴。为此,笔者开发了基于GIS网页端的城市交通设施及周边空间整合度评价工具,用于评估交通网络可达性、公共空间可达性、社区隔离程度、活动支持、蓝绿空间供给等指标,见图7。

(2) 交通与空间系统动态行为模型构建

笔者采用ABM技术开发了一套“城市交通—空间—人复杂系统”(TSH-system)仿真软件,以模拟主体(使用

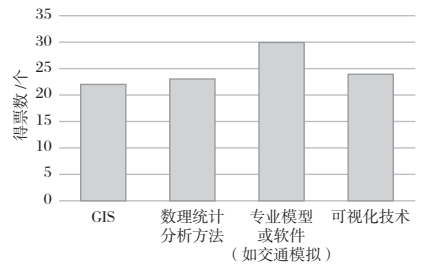


图4 在现状分析环节应该更多被使用的基于计算机的定量方法和工具

Fig.4 Computer-based quantitative methods and tools that should be used more extensively to analyze existing conditions

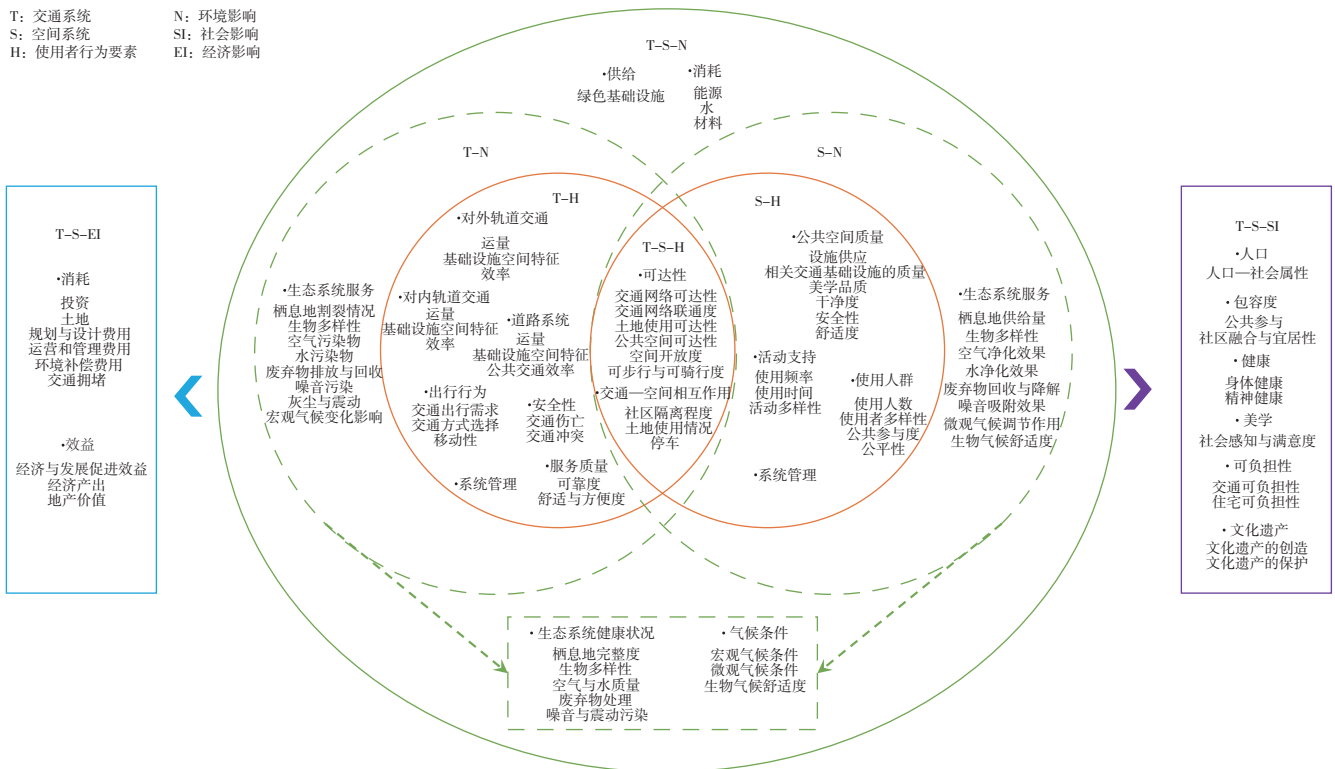


图5 交通与空间系统综合评价指标体系

Fig.5 An indicator system for evaluating the complex transport and space systems

资料来源: 改绘自参考文献[42]

者)在环境中的行为,主体细分为行人和机动车两种,环境包括机动车和非机动车道、土地利用、建筑。该模型自底向上构建,分为三个层次:第一层模拟单一主体的行为和属性;第二层构建主体活动环境,并设计主体与环境之间的接口;第三层在以上模块基础上生成多主体,并为每个主体分配活动时间表和息,同时控制总体模拟流程和记录时间。这一仿真软件可模拟小汽车和行人在交通网络和城市空间中的通勤、驻留等行为,帮助设计师了解交通—空间系统多尺度设计方案对个体及人群活动的影响。它能够量化评估不同的建筑排布方案、土地—交通规划方案,预测空间的使用人群、活动支持情况、机动交通与非机动交通需求、交通方式选择等指标,提供多方案比选及决策支持。

(3) 交通与空间系统动态环境影响模型构建

环境影响模拟可采用基于计算流体力学的商业软件(如Ecotect、ENVI-met),以搭建交通与空间系统的微观气候环境,计算空气温度、湿度、风环境、空气污染物浓度等数值,进一步获得系统中人体的舒适度和污染暴露程度等情况,并综合评估规划设计方案的环境影响。

3 应用案例

本研究的“设计—模拟”方法及其静态和动态模型在不同城市设计项目中得到了应用,包括在宁德市主城区总体城市设计项目——交通专题(2022—2023年)、南京市白水桥地铁站及周边空间的城设计课题(2020—2021年)^[43]、上海西站及周边空间的TOD设计项目(2021—2023年)。在上海西站TOD项目中,笔者结合东南大学建筑学院的研究生设计课,部分应用了“设计—模拟”方法进行城市设计实践及教学工作。项目位于上海西站X101-01、X102-02地块,它不仅是上海西站的所在地,也是多条地铁线的换乘站。

在设计初期的分析环节,采用了复杂系统认知和问卷调查方法,对交通系统与公共空间系统的组成要素和系统间的矛盾冲突进行定性分析(收回有效问

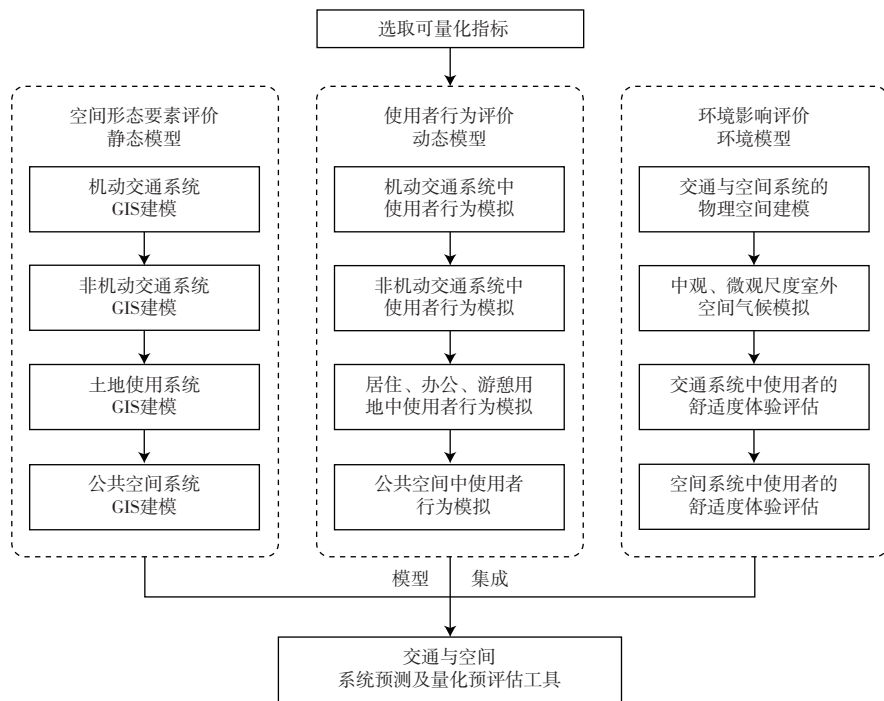


图6 城市交通与空间复杂系统模型构建方法
Fig.6 The method of modeling complex transport and space systems



图7 交通与空间系统静态评估模型: 基于GIS网页端的城市交通设施及周边空间的整合度评价工具
Fig.7 A static model for evaluating the complex transport and space systems

卷49份)。研究发现,现状交通—空间系统的静态要素包括铁路线、轨道交通站点、步行网络、机动车网络,以及站前广场、街道空间、基地内的公共空间;动态要素包括行人、机动车等。交通与空间系统之间存在着交互式互依关系,而矛盾冲突主要表现为高铁线路割裂南北两侧公共空间,需要引入小型商业、购物中心等功能,同时改善街道及广场

中行人空间感受。

在对现状系统的定量评价方面,使用了2.3节所构建的系列计算机模型。考虑到学生在量化城市设计方面的知识有限,笔者进行了GIS的教学,并介绍了复杂系统模拟方法以及相关模拟软件。学生们通过构建宏观和微观GIS模型,客观地测量了现状系统的步行可达性、活动支持等指标。TSH-system模型则向

学生展示了“隐藏”的上海西站，即人群在这个区域的活动。图8（左）显示了TSH-system模型对现状系统中观尺度（基地周边1.5 km范围）的步行交通流量、公共空间及公共建筑使用情况的模拟。分析表明，铁路北侧地块使用率过低，基地周边街道人流量小且与南侧地块的步行网络连通性较弱，基地内的公共空间使用率也较低。

在此基础上，同学们从不同的角度出发，将轨道交通站点及周边公共空间、建筑等子系统以及人的行为活动和自然环境进行一体化设计，发展中微观尺度设计方案。为解决交通与空间系统的矛盾冲突、促进良性互馈反应，他们提出了高铁线、站点与公共空间一体化设计的概念，将步行网络、街道空间跨越铁路线，提升站点北侧的可达性，提高站域空间的步行导向性；通过在基地中布局共享办公来提升使用率。在微观尺度上，通过改变室外微气候来提升公共空间品质。

在方案评估阶段，指导教师先对各组方案进行定性评价和给出修改建议，随后，同学们基于各自方案的特色，从图5所示指标体系中选取2—3个可量化指标进行方案评价。最终，根据定性和定量评价的结果，同学们进行了方案比选和优化，并对优选方案进行深化设计。

例如，有一组同学的设计主题是“TOD周边空间的共享模式探索”，方案提高了邻近站点地块的开发强度，调整不同用地类型的比例、增加地块的功能混合度、调整南侧地块高层建筑的位置

及分布，以提高基地内部及站前广场的步行网络密度和联通度。图8（右）是TSH-system模型对改造后系统中观尺度的步行人流分布、公共空间与公共建筑使用频率的量化评估结果（模拟10%人口）。评估结果显示，基地周边道路的步行流量从现状的1人/h提高到了7人/h，基地内部的公共空间使用人数从0—3人/h提升到了24—27人/h。

4 结语

本文围绕城市交通基础设施与公共空间的整合设计议题，引入了复杂适应系统（CAS）的认知、改造、评估方法，建构了一套“设计—模拟”数字化城市设计方法框架，以实现城市空间形成和形态演变机制的理解，解决矛盾冲突，客观评价规划设计方案的影响。通过使用前沿复杂系统模拟工具，为现状分析和方案评价提供了量化数据和决策支持。在具体的交通系统与空间系统认知和评估中，搭建了交通与空间系统静态模型、动态行为模型、环境影响模型等系列计算机模拟工具，为整合设计提供了决策支持。同时，在城市设计实践项目与教学中部分应用了该方法，探索了复杂系统模拟技术与城市设计方法的结合。

本研究所提出的将CAS引入城市设计理论研究及工程实践的方法和支持工具可应用于城市中其他系统的规划设计。它为城市规划、建筑设计领域的从业人员及学生提供了客观、科学的决策支持，并为解决城市中的复杂问题提供了解决

途径。在未来的研究中，可以进一步将所提出的方法及工具与大数据分析、人工智能技术相结合，共同为研究CAS提供技术支持。

感谢合作导师王建国院士的悉心指导，并多次提出宝贵的建设性意见；感谢在本文初稿的构思过程中张路峰教授给予的帮助；还要感谢朱渊老师的支持以及东南大学建筑学院研究生设计课《都市圈市郊站点TOD站域空间创新模式研究》（2020—2023年）同学们的参与，谢谢上海天华建筑设计有限公司的叶如丹、杨铭杰等人在项目和课程中给予的支持，以及参与问卷调查和访谈的各位学者、工程师的支持。感谢论文匿名评审专家给出的建设性意见。

注释

- ① 西方城市设计理论的发展大致经历了3个阶段。大部分学者将1920年代之前视为“传统城市设计”，以物质形态决定论为理论基础。1920—1970年代被视为“现代城市设计”，遵循经济和技术理性，在此阶段后期开始关注人文和社会等因素。从1970年代往后通常被称作“当代城市设计”，可持续、绿色城市设计、公众参与等议题日益受到关注。在此基础上，王建国^[1]指出从2010年以来城市设计进入了第四代范式，即“数字化城市设计”，定量研究是此阶段最显著的特点之一。
- ② 计算机模拟或计算机仿真（computer simulation/modeling）是指用来模拟特定系统之抽象模型的计算机程序。计算机仿

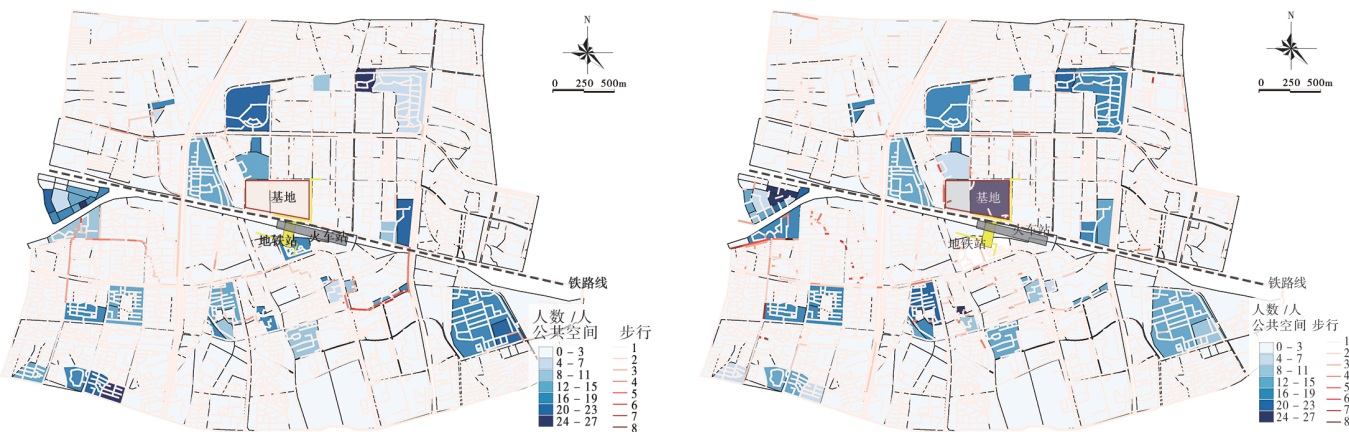


图8 TSH-system模型对中观尺度步行交通、公共空间及公共建筑的使用情况模拟（模拟10%人口）：左图为现状系统，右图为设计后系统

Fig.8 Simulation of pedestrian traffic and public space/building usage at the macro scale (simulating 10% of the population): left side is the baseline scenario, right side is the planned scenario

真是根据所要处理的客观系统的问题,以及模型构建人所要了解的信息层次所进行的逼近真实的模拟,可以在认识复杂城市现象和预测城市发展演变等方面提供决策支持。

③ 2022年6月笔者开展了一项针对城市设计从业人员的访谈及问卷调查,受访人员来自北京、上海、南京等8个省会城市及直辖市的规划设计院及建筑设计院,均具有3年以上城市设计工作经验、年龄跨度在20—50岁。共收回44份,其中有效问卷36份。

参考文献

- [1] YANG P P J. Complexity question in urban systems design[J]. Journal of architectural engineering technology, 2012: 1(2), 187-189.
- [2] 卢济威. 论城市设计整合机制[J]. 建筑学报, 2004(1): 24-27.
- [3] 朱文一, 毕波. 朱文一教授谈“城市·设计与城市设计”[J]. 城市设计, 2015(1): 108-112.
- [4] CHADWICK G. A systems view of planning: towards a theory of the urban and regional planning process[M]. Ann Arbor: Kent Elsevier Science, 2016.
- [5] YANG P P, YAMAGATA Y. Urban systems design: from “science for design” to “design in science” [J]. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, 2019, 46(8): 1381-1386.
- [6] 仇保兴. 基于复杂适应系统理论的韧性城市设计方法及原则[J]. 城市发展研究, 2018, 25(10): 1-3.
- [7] 刘春成. 城市隐秩序: 复杂适应系统理论的城市应用[M]. 社会科学文献出版社, 2017.
- [8] HOLLAND J. Complex adaptive systems [J]. A New Era in Computation, 1992, 121(1): 17-30.
- [9] 王建国. 从理性规划的视角看城市设计发展的四代范型[J]. 城市规划, 2018(1): 9-19.
- [10] 杨俊宴, 朱晓, 邵典. 回眸历史: 基于知识图谱的百年城市设计技术演进脉络与趋势展望[J]. 城市规划学刊, 2021(6): 20-27.
- [11] 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.
- [12] 甘惟, 吴志强, 王元楷, 等. AIGC辅助城市设计的理论模型建构[J]. 城市规划学刊, 2023(2): 12-18.
- [13] 龙瀛, 张恩嘉. 基于数据增强设计方法论的教学实践[C]//全国高等学校城乡规划学科专业指导委员会. 中国高等学校城市规划教育年会, 2018.
- [14] 龙瀛, 黄晓春, 张永平, 等. 规划支持系统框架及其应用[J]. 国际城市规划, 2016(1): 65-70.
- [15] 杨天人, 吴志强, 潘起胜, 等. 城市发展的模拟与预测: 研究进展、发展挑战与未来展望[J]. 国际城市规划, 2022, 37(6): 1-8.
- [16] HAUCK T, KELLER R, KLEINEKORT V. Infrastructural urbanism: addressing the in-between[M]. DOM Publishers, 2011.
- [17] 黄建中, 胡刚钰, 赵民, 等. 大城市“空间结构—交通模式”的耦合关系研究: 对厦门市的多情景模拟分析和讨论[J]. 城市规划学刊, 2017(6): 33-42.
- [18] 杨柳. 城市设计视角下交通基础设施空间整合理论及方法[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
- [19] GEDDES S P. Cities in evolution: an introduction to the town planning movement and to the study of civics[M]. London: Williams & Norgate London, 1915.
- [20] MOUGHTIN C. Urban design: street and square[M]. London: Routledge, 2003.
- [21] 陆容立, 康弥, 何倩倩, 等. 核心价值引领下的中观层次城市设计方法: 以杭州云城城市设计为例[J]. 城市规划学刊, 2022(S2): 148-154.
- [22] 夏海山, 万博, 刘晓彤. 基于数字技术的轨道交通与城市空间网络化理论研究[J]. 华中建筑, 2021, 39(3): 74-78.
- [23] 褚冬竹, 黎柔含. 城市交通节点空间综合增效设计思路与方法[J]. 建筑师, 2021(6): 19-30.
- [24] 钱才云, 周扬. 对复合型的城市公共空间与城市交通一体化设计方法的探讨[J]. 建筑学报, 2009(S2): 135-140.
- [25] FORRESTER J. W. Urban dynamics[M]. Cambridge: MIT Press, 1969.
- [26] 钱学森, 于景元, 戴汝为. 一个科学新领域: 开放复杂巨系统及其方法论[J]. 自然杂志, 1990, 13(1): 3-10.
- [27] 钱学森. 创建系统学[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2007.
- [28] SAIDI S, KATTAN L, JAYASINGHE P, et al. Integrated infrastructure systems: a review[J]. Sustainable Cities and Society, 2018, 36: 1-11.
- [29] 刘铭, 闫亚美, 黄炎. 复杂系统在城市交通网络中的应用[J]. 科技导报, 2017, 35(14): 27-33.
- [30] 高见, 郭晓霞, 张琰. 系统性城市更新与实施路径研究: 基于复杂适应系统理论[J]. 城市发展研究, 2020, 27(2): 62-68.
- [31] PEREZ P, BANOS A, PETTIT C. Agent-based modelling for urban planning current limitations and future trends [M]//NAMAZI-RAD M, PADGHAM L, PEREZ P, et al. Agent based modelling of urban systems. ABMUS 2016. Springer, Cham, 2017.
- [32] BATTY M. Urban modelling: algorithms, calibrations, predictions[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- [33] LAW A M, KELTON W D. Simulation modeling and analysis[M]. New York: McGraw-Hill, 1991.
- [34] EDMONDS B. Five modelling purposes [M]// EDMONDS B, MEYER R. Simulating social complexity: a handbook. 2nd ed. UK: Springer, 2017.
- [35] 匡晓明, 陈君, 徐进, 等. 碳中和导向下的城市设计实践: 以中新天津生态城临海新城生态岛为例[J]. 城市规划学刊, 2022(6): 110-118.
- [36] YANG L, VAN DAM K H, ANVARI B, et al. Evaluating the impact of an integrated urban design of transport infrastructure and public space on human behavior and environmental quality: a case study in Beijing [M]//Social simulation for a digital society: applications and innovations in computational social science. Springer, 2019.
- [37] 王建国. 中国绿色城市设计的概念缘起、策略建构和实践探索[J]. 城市规划学刊, 2023(1): 11-19.
- [38] 王建国. 城市设计 [M]. 4版. 南京: 东南大学出版社, 2022.
- [39] WALDROP M M. Complexity: the emerging science at the edge of order and chaos [M]. New York: Simon and Schuster, 1993.
- [40] THOMPSON J D. Organizations in action: social science bases of administrative theory[M]. Routledge, 2017.
- [41] 杨柳, 张路峰. 从冲突到共生: 伦敦博罗市场与城市交通基础设施的整合设计[J]. 世界建筑, 2020, 4: 100-103.
- [42] YANG L, VAN DAM K H, ZHANG L. Developing goals and indicators for the design of sustainable and integrated transport infrastructure and urban spaces[J]. Sustainability, 2020, 12(22): 9677.
- [43] 朱渊, 黄向明, 叶如丹, 等. 市郊站点: 轨道交通站点综合体空间模式创新研究[M]. 南京: 东南大学出版社, 2022.

修回: 2023-07