文章编号：1673-9493（2026）01-0015-08　中图分类号：TU984　文献标识码：A　DOI：10.19830/j.upi.2024.740

面向数字孪生技术的高密度城市形态研究

A Study on High-density Urban Form Oriented by Digital Twin Technologies

吴屹豪　李振华
WU Yihao, LI Zhenhua

摘要：随着中国城市区域人口的日益集聚，高密度的形态策略成为应对城市问题的重要发展路径。本文聚焦作为数值概念的密度和作为空间概念的形态，采用未来学“浪潮前锋”方法分析了现代城市形态演进历程中的四次密度范型迭代，揭示其复杂维度辩证式上升的规律；并以数字孪生技术作为建设未来高密度人居环境的智慧引擎，阐述了密度与形态之间的量形范畴及其耦合机制。研究提出“形态—数字孪生体”的概念模型，据此解析其密度、人本、空间和性能四维数字纽带和采样、评估、寻优三项机制模块，这对未来高密度城市形态管控和设计有着积极的探索意义。

Abstract: As populations in Chinese urban regions become increasingly concentrated, adopting high-density morphological strategies has emerged as a critical path to addressing urban challenges. This paper focuses on density as a quantitative concept and form as a spatial concept. Employing a futurist “wavefront” methodology, it examines the four iterative density paradigms throughout the evolution of modern urban forms, thereby revealing the dialectical, multi-dimensional progression toward complexity. By considering digital twin technology as the intelligent engine for building future high-density human habitats, this paper elucidates the quantitative and formal categories of density and form, as well as their coupling mechanisms. It proposes the conceptual model of a “Form-Digital Twin” (FDT). Based on this model, the research analyzes the four-dimensional digital linkages of density, human-scale, space, and performance, along with three mechanism modules of sampling, evaluation, and optimization. These findings hold promising implications for the management and design of future high-density urban forms.

关键词：高密度；城市形态；数字孪生；量形结合；未来学

Keywords: high density; urban form; digital twin; integration of quantity and form; futurism

作者：吴屹豪，哈佛大学城市规划与设计系博士研究生，美国规划学会（APA）会员。hzwuyihao@163.com
李振华（通信作者），香港城市大学建筑学及土木工程学系博士研究生。zhenhuali4-c@my.cityu.edu.hk

在当今中国城市发展的背景下，土地资源日益紧张与公众对高品质城市空间的诉求同步提升。随着都市圈建设与区域协同战略的推进，高人口密度、高强度开发的模式正从核心城区向更广泛的城镇体系延伸，高密度集约化发展逐步成为大城市空间演化的主要方向。高密度城市形态错综复杂，呈现出竖向立体化与动态变化的时空特征[1]，传统的规划设计方法难以有效应对，导致交通拥堵、环境退化、韧性不足等一系列城市问题。作为城市密度配置和物质空间落位的关键机制，城市形态反映了城市的土地开发、交通组织、基础设施和功能布局等特征，如何建立高密度条件下的形态设计与导控策略势必成为未来密集化人居状况下建成环境学科面临的前瞻性议题。

在新一轮数字革命浪潮推动下，数字孪生（digital twin）技术有望为高密度城市形态的精细化设计与动态管控带来新机遇[2]，并重塑人们对城市空间形态与密度属性的认知。2021 年 3 月国家颁布的“十四五”规划纲要明确提出“探索建设数字孪生城市”——作为创新型智慧城市建设的引领技术，数字孪生技术能够创建与实体物质空间相并行的城市数字空间，通过全域全要素时空数据的多元融合，系统化辨识高密度城市多层级的形态特征。未来的城市形态研究和设计将从以往侧重强度与审美的狭义视角，拓展至涵盖人、社会与自然系统的多维融合视角，并由经验判断转向基于大数据的智能决策，以应对日益复杂的高密度人居环境问题。作为基础性质的理论初探，本文聚焦于作为数值概念的密度和作为空间概念的形态，从范型迭代、协同机理以及技术框架三个层面，探讨数字孪生驱动下城市形态的量形结合路径，为高密度城市形态的数字化表达、设计与评估提供思路。

1 密度与城市：浪潮迭代与未来图景

美国社会学家阿尔温·托夫勒（Alvin Toffler）在《第三次浪潮》（*The Third Wave*）中提出“浪潮前锋”分析（wave-front analysis），强调关注历史变革的断裂点，以预测未来趋势[3]。沿此思路，城市的演进可视作不断推进的浪潮，对未来城市的探索需建立在对过往结构的透视之上。密度在现代城市变革中扮演着关键角色，由密度促动引发的范式转变可归纳为四次迭代的浪潮。

（1）第一次浪潮：密度—健康

18 世纪末，工业资本的集中催生高密度城市[4]。统计学家威廉·法尔（William Farr）分析 1848—1849 年伦敦霍乱疫情数据，揭示高人口密度与公共卫生问题的关联[5]，促使密度成为城市转型的重要依据。规划师雷蒙·恩温（Raymond Unwin）在题为《过度拥挤将一无所获》（Nothing Gained by Overcrowding）的城市宣言中主张限制住宅密度，以改善居住环境[6]。田园城市（Garden City）理念正是这一时期应对高密度挑战的产物。

（2）第二次浪潮：密度—分区

现代主义时期，高层建筑兴起，重塑了 20 世纪城市形态[7]。勒·柯布西耶（Le Corbusier）等建筑师提出“靠秩序带来自由”[8]，将密度从限制问题转变为最大化提高和配置问题。在光辉城市（La Ville Radieuse）构想中，城市按功能分区并配置不同密度，居住区密度最高，外围依次递减[9]。这种以密度配置为核心的现代主义城市规划在 20 世纪影响深远，并得到经济地理学科计量模型支持[10]，促进了社会资源的有效配置。

（3）第三次浪潮：密度—生态

1962 年，雷切尔·卡森（Rachel Carson）的著作《寂静的春天》（*Silent Spring*）出版，引发环境保护主义和可持续发展思潮[11]。城市的高密度集聚加剧了局域气候复杂反应和碳排放等问题，生态可持续性成为引领城市规划和设计范式变革的第三次浪潮。生态学理论被引入城市研究，该理论将城市视为多尺度斑块动态系统，强调生态系统对人类福祉的影响[12]。此外，研究者开始探索城市微气候与形态结构的耦合关系，以优化城市环境[13]。

（4）第四次浪潮：密度—数字

21 世纪初城市化进程持续加速，全球城市人口年均增长超 2%[14]。联合国人居署《2020 年世界城市报告》指出高密度城市需转型，以应对疫情冲击和全球经济复苏挑战[15]。当今城市面对的密度及其带来的空间治理的复杂程度都是前所未有的，数字世界的出现为未来城市的智能化变革提供了契机。

总体而言，四次变革浪潮并非线性递进，而是建立在批判性吸纳基础上的迭代过程。每一次变革提出的议题在后续发展中被辩证吸纳，推动城市形态复杂度不断提升（图 1）。当高密度城市的信息数据呈几何级增长，数字孪生技术应运而生，以优化物理城市的功能配置、治理效率和可持续性，推动城市人居环境向智能化、生态化方向演进。

2 密度与形态：量形范畴与耦合机制

“数字孪生”由密歇根大学迈克尔·格里夫斯（Michael Grieves）提出，指通过数字化手段构建物理实体的虚拟表示，实现对实体的了解、分析和优化[16]。本文将其引入城市建筑学领域，发现密度与城市形态存在关键孪生关系：密度作为数值概念，是土地利用的预测与控制工具；形态作为实体概念，是城市功能配置的形式策略。传统观念中二者被割裂看待，但数字孪生启示我们，城市形态与密度背后复杂的数字关系是多维立体的。密度不只是单一量值，而是支撑城市形态的多重概念域，其核心问题不在于寻找最优密度，而在于揭示密度（量）与形态（质）之间的动态联动关系。

2.1 密度：从统计人口到建筑空间

密度（density）指某类实体在固定空间量内的量度，表面上是客观、定量的概念，实则因其内在复杂性引发诸多歧义。密度的讨论需结合城市环境中的多种问题，并取决于其类型（如城市、住宅、人口）及定义和度量方式[17]。美国环境行为学家阿莫斯·拉普卜特（Amos Rapoport）将密度划分为形体密度（physical density）、感知密度（perceived density）和拥挤（crowding）[18]（图 2）。形体密度是地理单元内人口或建筑物的定量描述，以客观数据衡量，如人口密度（每平方公里的人口数量）、建筑密度（容积率、覆盖率），属于中性指标，不涉及对人的心理或行为的影响；感知密度

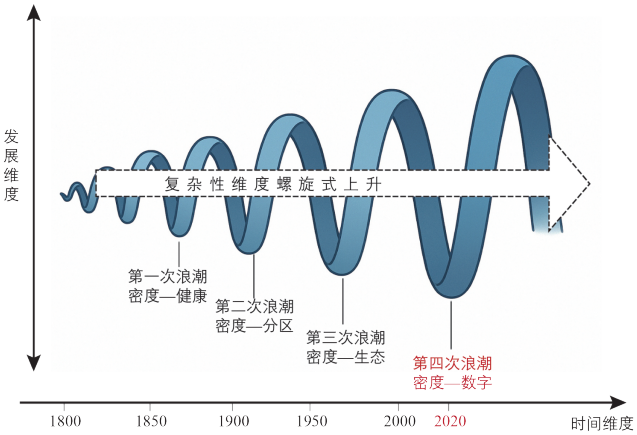

图 1 现代城市形态演进的四次“浪潮前锋”

则是个体对空间内人数、可用空间及其组织的主观感知和估计[18]，反映了个体对空间密度水平的主观评价，与形体密度、社会文化和个人认知等因素密切相关[19]。

在城市与建筑设计中，建筑密度是环境容量控制的核心概念，反映了建设用地能够承载的建筑要素总量。城市规划管理通常采用容积率（FAR: Floor Area Ratio）、覆盖率（Coverage）和开敞空间率（OSR: Open Space Ratio）[20]等指标来度量或设定城市空间的建设容量、开发利益和权属。与人口密度不同，建筑密度具有鲜明的调控属性，政府通过其配置资源和优化城市形态。基于人口、建筑、空地三类要素及其复杂作用机理，本文构建了密度指标协同体系（图3），以揭示单个要素之间以及单要素与多要素整体的关联法则，为城市规划和建筑设计提供更精准的理论支持。

2.2 形态：从图谱分析到量化解析

形态学源于希腊语 Morphe（形）和 Logos（逻辑），指形式的构成逻辑[21]。城市形态学是形态学的重要分支，19世纪中叶由德国学者格奥尔格·科尔（J. G. Kohl）引入，旨在研究人类聚居地的构成、流变及其生长演化机制[22]。传统城市形态学以平面图谱分析为主，适用于低密度市镇或聚落，但在高密度中心城区因二维局限性而难以适用。为此，部分学者引入定量分析手段，形成了两种解析范式以应对高密度城市的复杂性。

2.2.1 类型化范式

类型化范式源于莱斯利·马丁（Leslie Martin）和莱昂内尔·马奇（Lionel March）于1970年代初在剑桥大学开展的关于密度与建筑形式关系的研究。他们分析了塔式（pavilion）、街道式（street）、庭院式（court）三种建筑类型及其随密度变化的分布状态[23]。研究发现，街道式和庭院式建筑的密度随层高增加而上升趋于最大值，而塔式建筑在特定高度达到密度峰值后反而下降，即高度过高时密度降低[24]（图4）。这一研究揭示了建筑类型在不同密度环境下的动态变化，为城市设计提供了科学支撑。尽管受限于当时的计算条件，研究采用了简化模型，仅考虑遮光角，但其开创了类型化视角下密度与形态关联的研究范式，为后续量形驱动的城市形态研究奠定了基础。

2.2.2 多变量范式

荷兰代尔夫特大学的波尔·豪普特（Per Haupt）与伯格豪瑟·庞特（Meta Berghauser Pont）于2010年提出了“空间矩阵”（spacematrix）方法。该方法通过函数将密度、建

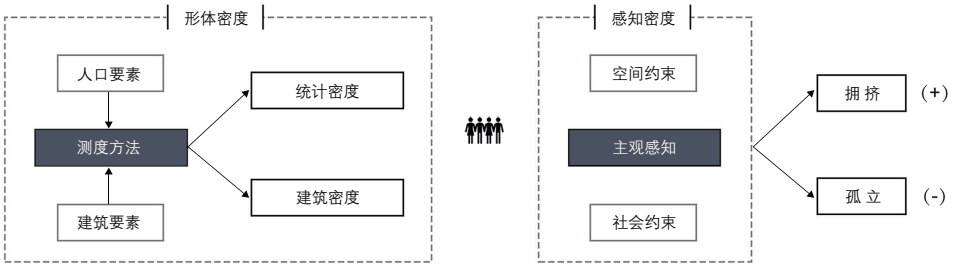

图2 密度概念域的三种范畴组成

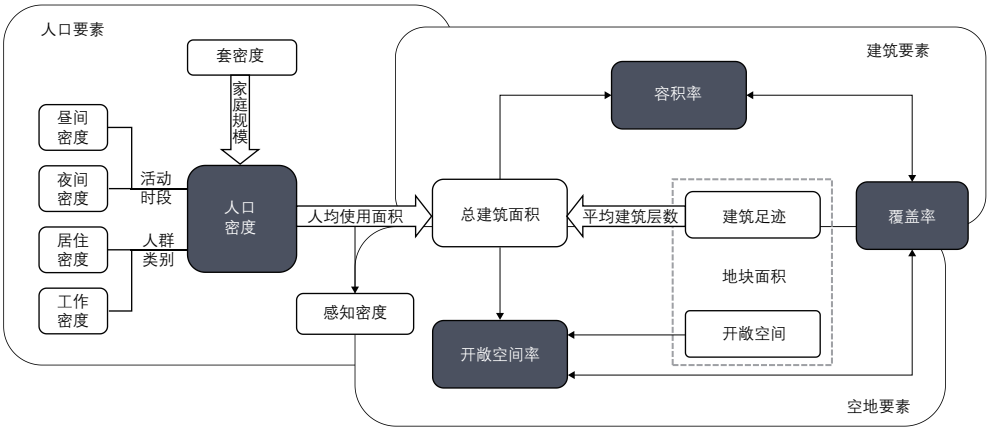

图3 密度指标协同体系构建与圈层关系

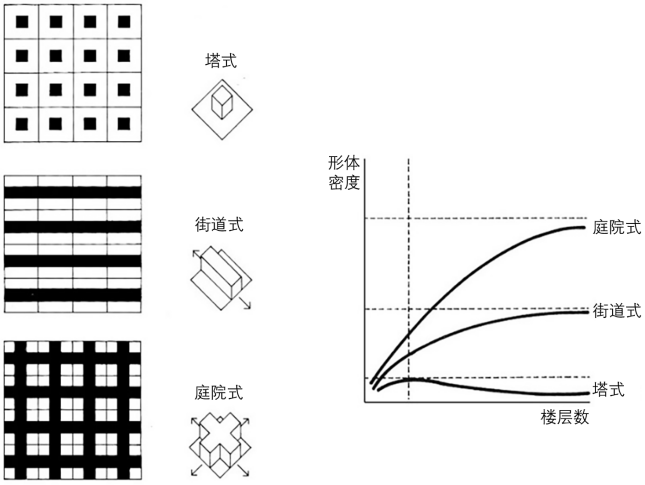

图 4 三种建筑形态类型与密度变化表征
资料来源：作者译自参考文献 [24]

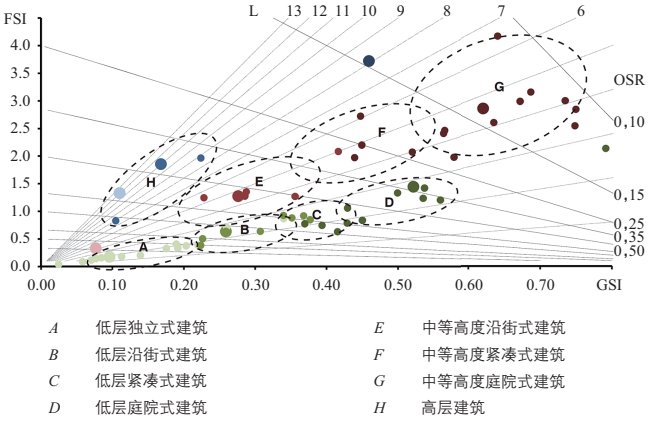

图 5 空间矩阵的列线图分析
资料来源：作者译自参考文献 [25]

筑高度、地面覆盖率和开敞空间率联系在一起，形成一种列线图（nomograms）：x 轴代表覆盖率，y 轴代表容积率，楼层数相同的曲线沿风车状分布，开敞空间率相同的曲线呈离心状分布 [25]（图 5）。经实证研究，他们发现较高的独立式塔楼多分布在地面覆盖率较低的高密度区域；独立式和半独立式房屋多分布在低密度区域；庭院式建筑则集中在中高密度且地面覆盖率较高的区域。该方法建立了空间、形式与密度的量化联系，为城市形态研究提供了直观的分析工具，并启发了密度指标在能耗分析、空间句法、住房研究等领域的应用 [26-27]，进一步拓展了城市形态学的研究范畴。

3 形态—数字孪生体：四维纽带与运作体系

3.1 城市形态研究的数字转型逻辑

随着以大数据（BD）、人工智能（AI）和机器学习（ML）为代表的数字技术日益融入城市治理，城市研究范式正逐步从静态描述走向动态模拟，从形态表征走向机制建构。在这一背景下，高密度城市形态的研究也将迎来新的发展路径，逐渐迈向以“形态—数字孪生体”（FDT: Form-Digital Twin）为核心的新模式。FDT 旨在通过集成多源数据与算法模型，将物理城市形态与虚拟数字模型实现双向映射，为复杂城市空间的识别、诊断与预测提供技术支撑 [28]。当前，数字孪生技术已广泛应用于智慧城市、建筑信息建模（BIM）以及城市系统仿真等领域，其核心目标在于构建物理城市与虚拟模型之间的联动机制，并借助数据驱动优化城市管理与规划 [28-29]。然而，现有数字孪生实践主要聚焦于基础设施管理（如交通、能源）和灾害应急 [29]，在街道界面、空间秩序、建筑布局等城市形态学关键维度上的应用仍显不足。

FDT 的发展将至少从以下两方面赋能城市形态学研究。首先，FDT 有助于解决传统城市形态学研究的部分局限性。传统城市形态学研究主要依赖静态数据（如历史地图、调研问卷）和定性分析，难以动态捕捉高密度城市的复杂空间变化。数字孪生技术通过实时感知、精准映射和模拟仿真，整合多源数据（如物联网传感器、卫星遥感、社交媒体），构建动态三维模型，从而支持对城市密度、空间布局、人流车流等要素的实时监测与预测。例如：基于数字孪生的模拟，可分析交通拥堵或热岛效应，从而优化高密度城市的空间结构 [30]。其次，FDT 有助于支持多维度决策，促进可持续发展。高密度城市面临资源紧张、生态压力等挑战，需要在密度、能耗、美学等多重目标之间寻求平衡。数字孪生技术通过“分析洞察”与“智能干预”能力，将数据驱动算法（如 AI 优化能耗模型）与城市规划决策结合，实现从“经验驱动”向“数据驱动”的转变 [29]。

总体而言，FDT 既拓展了数字孪生城市的内涵，使其从“功能导向”延伸至综合优化，顺应智慧城市从“效率优先”向“宜居可持续”转型的趋势，也借助 BD、AI、ML 等技术集成，构建城市形态学的动态分析工具，为高密度城市提供从微观（建筑单体）到宏观（城市系统）的跨尺度研究路径。三者之间的对比如表 1 所示。

3.2 形态—数字孪生体结构：四维数字纽带框架

数字纽带（digital thread）是数字孪生技术的核心支撑，作为一种可配置、可扩展的数字分析框架，在整个孪生体生命周期内提供数据访问、整合与转换能力，使分散的数据转化为可操作的信息 [31]。针对高密度城市形态的数字孪生体，本文以提升城市的可持续性、宜居性和空间秩序为总体目标，

提出了一套涵盖密度、人本、空间与性能四个维度的数字纽带框架。该框架在表述上结合数值指标、可视化图表及图示语言，在确保科学性和客观性的同时，提升高密度城市形态研究与设计的可操作性（表 2）。

（1）密度维度

在高密度城市中，密度是城市形态数字孪生体的关键维度，主要包括人口密度和形体密度。人口密度可分为静态和动态两类，前者基于政府统计数据，置信度较高；后者通过昼夜人流数据反映人群流动特征，存在一定浮动。形体密度则由总建筑面积、毛容积率、开敞空间率（OSR）和平均建筑层数四项指标衡量。通过选取该地段典型高密度街坊样本，在街坊尺度计算形体密度并合并至空间矩阵列线图，可揭示形态聚类的规律特征。

（2）人本维度

城市形态数字孪生体的人本维度聚焦于城市空间中人的感知与互动机制，通过以下三方面指标实现量化分析。首先，街道品质是人眼平视角度动态体验城市空间的重要线索，是城市设计控制中的主导内容。研究将选取该地段内主要街道，

表 1 形态—数字孪生体（FDT）与传统形态学方法、数字孪生技术的比较

对比维度	FDT	传统形态学方法	现有数字孪生技术
研究对象	高密度城市形态	城市形态	智慧城市、基础设施管理
方法论	形态学 + DT + AI/ML 等	形态分析、空间句法等	物联网、大数据监测
时间维度	共时 + 历时	主要是静态形态分析	主要是共时性分析
动态模拟能力	可预测、诊断城市形态演变	无预测能力	有一定模拟能力，但偏向基础设施层面
可操作性	规划决策支持，智能优化	形态学分析，但缺乏数据驱动	以管理为主，规划指导较弱

表 2 形态—数字孪生体的四维数字纽带

维度	一级接口	二级接口		访问类型	信息单位
密度维度	人口密度	静态人口密度		数值	人 / hm^2
		动态人口密度	昼间峰值	数值	人 / hm^2
			夜间谷值	数值	人 / hm^2
	形体密度	总建筑面积		数值	m^2
		毛容积率		数值	比率
		开敞空间率		数值	比率
		平均建筑层数		数值	层
人本维度	街道品质	街道界面示意		图示	轴测图
		街道界面连续度		数值	比率
		绿化率		数值	比率
	竖向形态	垂直空间密度		图表	曲线图
		城市天际线		图表	分布图
	行为与活力	归属感		图表	指数
		社区活动参与度		图表	指数
		公共空间使用效率		图表	分布图
空间维度	站点引力	引力分布图		图示	分布图
		全局引力指数		数值	指数
	街网组构	轴线图分析		图示	分布图
		全局整合度		数值	指数
	可达性	就业可达性		图示	分布图
		公共设施可达性		图示	分布图
		公交站点可达性		图示	分布图
性能维度	光环境模拟	日照小时数分布图		图示	分布图
	风环境模拟	1.5 m 高程风速等值线图		图示	分布图
	热环境模拟	地表温度		图示	分布图

展示其界面关系，并计算街道界面连续度和绿化率。其次，竖向形态描述立体视角下空间错落与变化特征，反映了建筑总体空间容量在不同高度的分布情况，可通过垂直空间密度与城市天际线加以量化。最后，行为与活力指标衡量城市中居民行为和活动的分布特征。该指标可依托归属感调查地方认同，利用问卷调查或时空行为大数据（如手机信令、社交媒体互动数据）量化社区活动参与度，分析人群活动特征（如公共空间使用频率）等[32]。

（3）空间维度

城市形态的空间维度探讨城市结构的空间关系与组构逻辑，基于空间网络分析评估人车流、轨道站点、空间配置等因素对城市形态的影响，主要包括站点引力、街网组构和可达性。站点引力通过引力分析计算，以高密度城市地段内的建筑物为目的地，轨交站点出入口为始发地，通过城市空间网络计算赋予每个建筑物引力指数（gravity），衡量轨交站点对空间节点的吸引力，反映公共交通的可达水平。街网组构利用轴线图分析，以交叉直线（通常为道路）覆盖城市空间网络，刻画人流和车流运动体系。计算后，每条轴线获得整合度（integration）数值，表示其在区域路网体系中的集聚或离散程度。可达性衡量公共服务设施的空间配置均衡性，基于 GIS 分析 15 分钟生活圈内就业、医院、学校、公园等设施及公交站点的可达性，以刻画空间布局的合理性[33]。

（4）性能维度

城市形态的性能维度从城市室外空间的局部微气候环境来分析和评判城市物质形态，尤其在高密度城市环境下，物理性能在很大程度上影响了城市的可持续性和宜居性。大量研究表明，城市形态和微气候的关联主要体现在临界面的气温和风速，包括城市地面的辐射平衡状况、日照小时数、城市上空气流等，城市形态的风、热、光性能评估可以为中微观尺度下的城市设计策略提供支持。城市光、热环境地模拟基于 grasshopper 下的 ladybug 插件平台，它可以在标准的 Energy Plus 气象数据下进行详细模拟分析，以生成定制的、交互式的 2D 和 3D 可视化图像以及相应的数据。风环境模拟基于流体力学的 CFD 平台，用 ANASYS 软件进行网格划分，再导入 STAR-CCM 中进行 1.5 m 高程风环境的风速和气流模拟。

3.3 四维数字纽带的耦合机制和量化方法

FDT 四维数字纽带之间并非简单线性关系，而是相互交织、协同作用的复杂系统，需要通过系统建模与动态关联分析实现耦合。首先，在交互机理上，四维关系呈现动态反馈特征。正向反馈如：高密度城市布局可通过优化交通站点覆盖提升空间可达性，进而激发公共空间活力，促进街道品质升级。反向约束则表现为：过度密集的建筑布局可能导致通风受阻、建筑间距不足，从而降低户外空间使用率。此外，不同城市区域的耦合路径存在差异，例如 CBD 更关注美学与性能平衡（如天际线形态与能耗效率），而居住区则需协调密度与空间质量之间的矛盾。在量化方法上，应构建跨维度的指标关联网络，实现四维度的动态量化。例如：可利用结构方程模型测算密度（如容积率）与性能（如风速）之间的弹性系数[34]，借助机器学习模型捕捉非线性关系（如绿地率对热岛效应的非线性衰减）[35]。通过量化各维度间的关联强度及各指标对系统耦合的贡献度，构建可计算的多指标融合体系。在协同效应评估方面，可引入综合评估模型，结合“阈值效应”调节不同维度的权重[36]。此外，还应关注系统性短板，识别相对于当前发展目标的薄弱维度，作为优化重点，并通过动态调整提升整体系统效能。

3.4 形态—数字孪生体的智能运作体系与多尺度应用路径

四维数字纽带的建立可无缝加速高密度城市形态从数据—信息—实体系统之间的协同运作，并允许在场地调研、详细规划、城市设计、建筑设计以及评估监测各阶段提供决策支持。FDT 将提供一个包含城市形态全生命周期下的集成视图和通信框架，可供数字纽带形成的数据流在其间自由地流通。在人工智能、数据增强设计技术的支撑下，本文初步构建了 FDT 的智能运作体系，具体可以分解为三个相互联系的模块（图 6）。

（1）采样／建模模块

高密度城市作为容纳上百万乃至上千万人口的复杂系统，尽管包含众多元素和子系统，但其关系模式相对固定，如人口密度分布、交通断面模式及土地使用配置。因此，无需对整个城市区域的所有实体要素进行数字映射，而应基于人口密度和形态结构模式，筛选具代表性的高密度形态样本，并据此进行三维数字化建模。具体而言，通过多源数据融合构建高精度城市数字孪生体，整合物联网传感器（如人流计数器、空气质量监测仪）、遥感数据（如 LiDAR 点云、卫星影像）、社会数据（如手机信令、社交签到）和规划数据（如 BIM、GIS），利用时空对齐技术（如ICP配准）统一数据基准，并通过知识图谱关联建筑实体与人口行为[37]。例如：在宁波市城市风貌智慧化管控应用中，其基于实景三维数字孪生底座，集成了地理实体、调查监测、国土空间规划、行业专题等多模态数据，打造了集地上地下、室内室外、动静结合于一体的二三维时空基底[30]。

（2）评估／监测模块

城市样本的三维模型将会被赋予四维的数字纽带，实时整合在动态的数字化平台上，数字纽带在不同时间收集样本

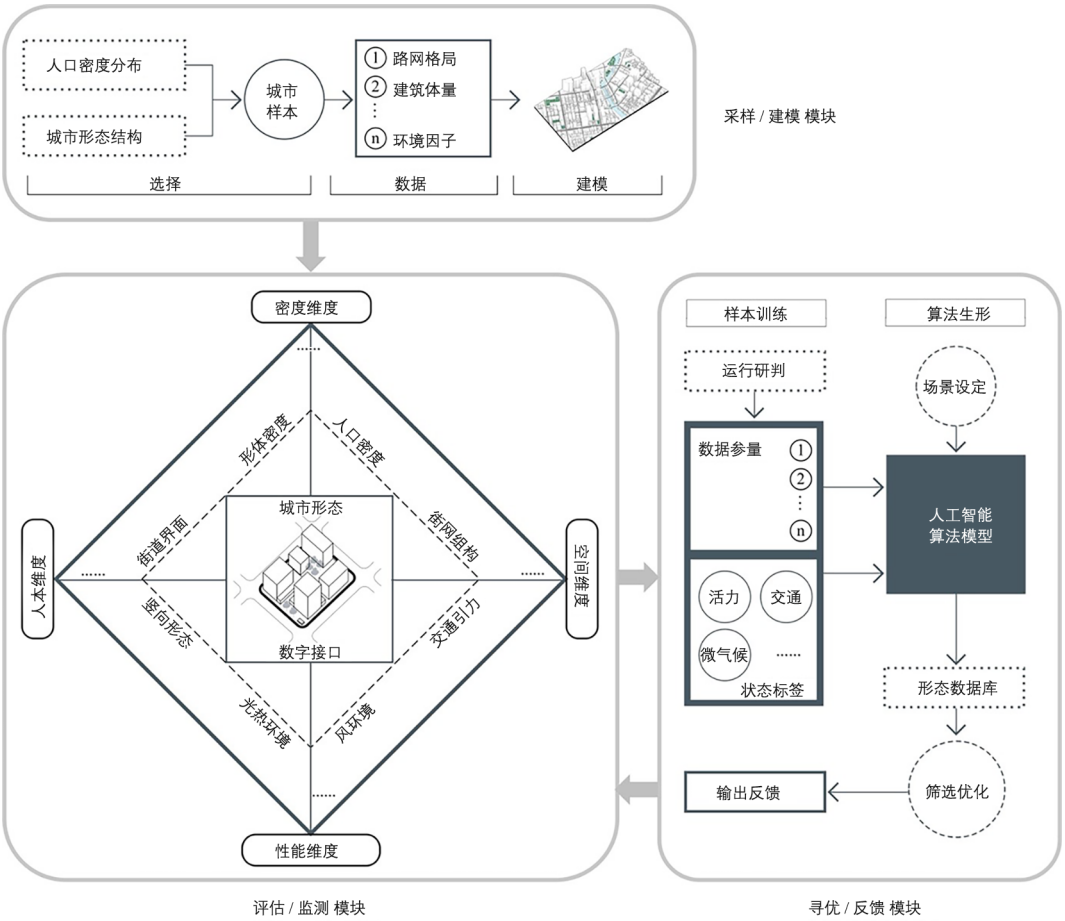

图 6 形态—数字孪生体的智能运作体系

所在区域内的城市信息，将其传传递给形态孪生体形成可扩展的数字接口，经由计算机可视化技术进行展示。城市规划或管理人员可调用接口，利用仿真模型与 AI 分析工具多维评估城市形态（如空间效率、生态影响、社会效益），诊断已经发生的或潜在的问题和风险，继而决定空间干预的策略。例如：在广州“穗智管”的白云湖大道的城市更新项目中，借助数字孪生技术复原白云区三维场景，实现了对白云湖大道沿线任意指定区域的土地权属、房屋栋数、占地面积、建筑面积、拆迁量的查询和统计，并构建拆迁成本核算模型，为规划者提供精准的空间布局与经济评估支持 [30]。

（3）寻优 / 反馈模块

经过数据纽带缠绕的城市样本将会带来海量的城市形态数据集，此时需借助人工智能进行统计分析、学习预测和算法生形。这不仅有助于揭示高密度城市中隐含的形态规律，还可基于陌生场景和多目标设定实时生成优化方案，提升城市设计效率。整体流程分为样本训练和算法生形两个阶段。首先，对形态数据进行特征预处理和统计分析，并结合实际运行情况标注样本；然后，通过特定算法的学习器进行反复测试训练，最终形成具备强泛化能力的模型。具体而言，在多目标优化阶段，可利用 Grasshopper 参数化工具设定变量（如建筑高度、绿地率），采用遗传算法平衡密度、生态与公平性等冲突目标，生成帕累托最优解集 [38]；虚拟验证环节则可在数字孪生环境中模拟方案效果。最终，优化方案反馈至物理空间，形成“虚拟推演—现实干预—效果反馈”闭环。例如：杭州城市大脑项目通过数字孪生技术优化交通网络形态，实时调整信号灯配时，显著缓解了城市拥堵问题。

FDT 的三大模块将形成“感知实时化—分析智能化—决策精准化”的完整链条。这一体系不仅有助于推动城市形态研究从静态描述转向动态推演，更通过人本数据与机器学习的深度融合，为高密度城市的可持续发展提供科学、包容的技术底座。尽管 FDT 框架具有巨大潜力，但仍存在局限性。数据方面，其高度依赖多源数据，若数据不可靠或更新滞后，数字孪生体的准确性将受影响。技术上，数字孪生的构建与分析需强大计算能力，资源消耗较高。社会与伦理层面，FDT 在收集居民数据时涉及隐私保护，若处理不当，可能引发关于数据安全的担忧 [30]。

4 结语

我国正处于全面深化和发展空间治理体系建设的阶段，密集化的空间开发建设触及的是城市发展的战略性问题，未来的城市设计需要优化密集化人居状况下的建成环境。本文探讨了在复杂性维度急剧膨胀的第四次“密度—数字”浪潮前锋下，高密度城市形态研究通过数据赋能获致新的发展路径。数字孪生技术的涌现为未来城市提供了量形结合的技术支撑，使城市形态不仅停留在传统二维图谱的解析，还能够使其与背后隐匿的复杂数字之间建立起多维立体的关联。

作为开拓性的尝试，本文将数字孪生技术引入传统的城市形态学研究领域，结合对密度概念域的体系完善，提出“形态—数字孪生体”的基础理论框架。在此基础上搭建了其四维数字化纽带，涵盖密度维度、空间维度、人本维度和性能维度；同时形成了 FDT 的智能运作体系，包括采样／建模、评估／监测和寻优／反馈三个模块。相较于传统形态学方法和现有数字孪生技术，该框架在城市形态分析、动态预测、AI 赋能规划决策等方面具有独特价值，可实现城市形态从静态规划到动态治理的跨越。未来，随着行业大模型与数字孪生的深度融合，技术将向“感知泛在化、模型智能化”发展，进一步推动城市形态研究的科学化与民主化。UPI

注：文中未注明资料来源的图表均为作者绘制。

参考文献

[1] 吴屹豪，刘阳．紧凑高密度环境下的城市形态研究进展：源流演进、主流范畴与应对策略 [J]. 新建筑，2023(5): 139-145.

[2] 陶飞，刘蔚然，张萌，等．数字孪生五维模型及十大领域应用 [J]. 计算机集成制造系统，2019, 25(1): 1-18.

[3] TOFFLER A. The third wave[M]. New York: Bantam Books, 1980.

[4] 卡尔·马克思．资本论（纪念版）第一卷 [M]. 中共中央马克思恩格斯列宁斯大林著作编译局，译．北京：人民出版社，2018: 757.

[5] EYLER J M. William Farr on the cholera: the sanitarian's disease theory and the statistician's method[J]. Journal of the history of medicine and allied sciences, 1973, 28(2): 79-100.

[6] UNWIN R. Nothing gained by overcrowding! How the garden city type of development may benefit both owner and occupier[M]. London: P.S. King & son, 1912.

[7] ALI M M, AL-KODMANY K. Tall buildings and urban habitat of the 21st Century: a global perspective[J]. Buildings, 2012, 2(4): 384-423.

[8] 戴维·哈维．后现代的状况：对文化变迁之缘起的探究后现代的状况 [M]. 阎嘉，译．北京：商务印书馆，2003: 46.

[9] 勒·柯布西耶．光辉城市 [M]. 金秋野，王又佳，译．北京：中国建筑工业出版社，2011: 102-106.

[10] CICCONE A, HALL R E. Productivity and the density of economic activity[J]. American economic review, 1996, 86(1): 54-70.

[11] TYLER S, MOENCH M. A framework for urban climate resilience[J]. Climate and development, 2012, 4(4): 311-326.

[12] PICKETT S T, CADENASSO M L, MCGRATH B. Resilience in ecology and urban design: linking theory and practice for sustainable cities[M]. Dordrecht: Springer Science & Business Media, 2013.

[13] 丁沃沃，胡友培，窦平平．城市形态与城市微气候的关联性研究 [J]. 建筑学报，2012(7): 16-21.

[14] ANGEL S, PARENT J, CIVCO D L, et al. The dimensions of global urban expansion: estimates and projections for all countries, 2000-2050[J]. Progress in planning, 2011,75(2): 53-107.

[15] UN-Habitat. World Cities Report 2020: the value of sustainable urbanization[R]. Nairobi, Kenya, 2020.

[16] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[M] // Transdisciplinary perspectives on complex systems: new findings and approaches. Cham: Springer International Publishing, 2016: 85-113.

[17] CHURCHMAN A. Disentangling the concept of density[J]. Journal of planning literature, 1999,13(4): 389-411.

[18] RAPOPORT A. Toward a redefinition of density[J]. Environment and behavior, 1975, 7(2): 133-158.

[19] 吴夏安，徐磊青．城市高密度背景下的感知密度：内涵、价值与重要研究问题 [J]. 国际城市规划，2024, 39(6): 62-70.

[20] 陈璐，周剑云，黎淑翎，等．Open Space Ratio 的译名、概念辨析与适用价值 [J]. 城市规划，2020, 44(8): 98-106.

[21] RUSSELL E S. Form and function: a contribution to the history of animal morphology[M]. London: J. Murray, 1916.

[22] 段进，邱国潮．国外城市形态学概论 [M]. 南京：东南大学出版社，2009: 4-32.

[23] 季惠敏，丁沃沃．基于量化的城市街廓空间形态分类研究 [J]. 新建筑，2019(6): 4-8.

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

[25] PONT M B, HAUPT P. Spacematrix: space, density and urban form-revised edition[M]. Delft: TU Delft OPEN Books, 2023.

[26] YE Y, LI D, LIU X. How block density and typology affect urban vitality: an exploratory analysis in Shenzhen, China[J]. Urban geography, 2018, 39(4): 631-652.

[27] GODOY-SHIMIZU D, STEADMAN P, EVANS S. Density and morphology: from the building scale to the city scale[J]. Buildings & cities, 2021, 2(1): 92-113.

[28] 周瑜，刘春成．雄安新区建设数字孪生城市的逻辑与创新 [J]. 城市发展研究，2018, 25(10): 60-67.

[29] 顾建祥，杨必胜，董震，等．面向数字孪生城市的智能化全息测绘 [J]. 测绘通报，2020(6): 134-140.

[30] 仇保兴，陈蒙．数字孪生城市及其应用 [J]. 城市发展研究，2022, 29(11): 1-9.

[31] SINGH V, WILLCOX K E. Engineering design with digital thread[J]. AIAA journal, 2018, 56(11): 4515-4528.

[32] 龙瀛，张恩嘉．数据增强设计框架下的智慧规划研究展望 [J]. 城市规划，2019, 43(8): 34-40, 52.

[33] 马文军，李亮，顾娟，等．上海市 15 分钟生活圈基础保障类公共服务设施空间布局及可达性研究 [J]. 规划师，2020, 36(20): 11-19.

[34] 郭飞，祝培生，王时原．高密度城市形态与风环境的关联性：大连案例研究 [J]. 建筑学报，2017 (S1): 14-17.

[35] FEYISA G L, DONS K, MEILBY H. Efficiency of parks in mitigating urban heat island effect: an example from Addis Ababa[J]. Landscape and urban planning, 2014, 123: 87-95.

[36] 席广亮，甄峰．基于大数据的城市规划评估思路与方法探讨 [J]. 城市规划学刊，2017(1): 56-62.

[37] 鲍巧玲，杨滔，黄奇晴，等．数字孪生城市导向下的智慧规建管规则体系构建：以雄安新区规划建设 BIM 管理平台为例 [J]. 城市发展研究，2021, 28(8): 50-55, 106.

[38] 肖晓伟，肖迪，林锦国，等．多目标优化问题的研究概述 [J]. 计算机应用研究，2011, 28(3): 805-808, 827.

（本文编辑：许玫）