

# 从静态耦合到动态交互：中观尺度城市设计的智能化方法\*

From Static Coupling to Dynamic Interaction: An Intelligent Approach to Mesoscale Urban Design

黄雨悦 杨俊宴 孙昊成 杨清心 崔 澳

HUANG Yuyue, YANG Junyan, SUN Haocheng, YANG Qingxin, CUI Ao

**关键词** 智能城市设计；中观尺度；动态交互；功能布局；空间形态

**Keywords:** intelligent urban design; mesoscale; dynamic interaction; functional layout; space morphology

中图分类号 TU984 文献标志码 A  
DOI 10.16361/j.upf.202503004  
文章编号 1000-3363(2025)03-0025-09

## 作者简介

黄雨悦，东南大学建筑学院博士研究生，huan  
gyy0628@163.com

杨俊宴，东南大学首席教授，长江学者特聘教授，  
y jy-2@163.com

孙昊成，东南大学建筑学院博士研究生  
杨清心，东南大学建筑学院博士研究生  
崔 澳，东南大学建筑学院硕士研究生

**提 要** 中观尺度城市设计作为衔接宏观城市尺度与微观街坊尺度的关键环节，兼具统筹二维功能秩序与三维形态秩序的双重职责。面对动态变化的城市需求，传统中观尺度城市设计方法具有“功能—形态”耦合模式静态单一、调整效率相对低下等局限，研究基于强化学习算法构建了一套“网络控制模块—方案生成模块—优化输出模块”的中观尺度智能城市设计路径。又针对“功能—形态”耦合要素的空间布局特征总结出高度耦合、核心集聚、轴线带动、功能主导、形态主导等多种耦合交互模式，并在样本实证中开展不同耦合交互模式的智能城市设计实践。结果表明，智能城市设计方法能够显著提高方案多样性和设计效率，增强设计方案的适应性，为未来城市设计的动态交互提供有效解决途径。

**Abstract:** As a pivotal link between the macro urban scale and the micro neighborhood scale, mesoscale urban design plays a dual role in integrating 2D functional order and 3D morphological order. However, as urban needs evolve, the traditional mesoscale urban design method, which relies on static function-morphology coupling, becomes ill adapted to urban changes. Drawing on reinforcement learning algorithm, this study proposes a set of mesoscale intelligent urban design pathways structured around a system of "network control module—program generation module—optimization output module". Focusing on the spatial characteristics of function-morphology coupling elements, the study summarizes various coupling interaction modes, including highly coupled, core clustering, axis-driven, function-led, and morphology-led types. These modes are then applied in intelligent urban design practices in a sample area. The results demonstrate that the intelligent urban design approach can significantly enhance design diversity, efficiency, and adaptability, providing an effective solution for achieving dynamic interaction of future urban design.

\* 国家自然科学基金重大项目“高密度城市环境碳中和建筑技术原型构建”（项目编号：52394224）；国家重点研发计划“面向建成环境空间优化的智能化城市设计关键技术”（项目编号：2024YFC3807900）

《城市设计管理办法》指出,城市设计是落实城市规划、指导建筑设计、塑造城市特色风貌的有效手段<sup>[1]</sup>。面对城市经济、社会及生态等领域的复杂发展需求,城市设计通过多种途径“在城市环境中创造三维的空间形式”<sup>[2]</sup>,以实现城市综合环境最优<sup>[3]</sup>。在我国新型城镇化建设中后期,城市设计更是对提升城市空间品质、实现可持续发展具有重要意义。

基于城市复杂巨系统的多尺度空间特征,城市设计对应形成差异化的设计内容与侧重点。其中,中观尺度城市设计主要针对功能相对独立、环境相对整体的城市片区<sup>[4]</sup>,涉及“城区—社区—街道—建筑”等多个层次<sup>[5]</sup>。作为衔接宏观总体城市设计与微观街坊城市设计的中间层级,中观尺度城市设计承担着统筹二维功能秩序和三维形态秩序的双重职责<sup>[6]</sup>:①在二维功能布局层面,要在承接宏观尺度整体结构性把控的基础上构建布局合理的功能空间;②在三维空间形态层面,需要对片区开发强度、建设高度等要素统筹安排,从而引导微观街坊尺度的空间设计。基于功能与形态的综合把控,中观尺度城市设计成为落实城市设计意图的关键环节。

随着社会需求的不断变化,对城市功能与形态动态交互的灵活设计提出新的要求,然而当前的中观尺度城市设计方法在多样性和效率性上仍有待提高。一方面,传统设计方法往往基于主观经验判断,针对某种静态、单一的功能与形态耦合模式展开设计<sup>[7]</sup>,较难覆盖功能与形态的多种互动需求,而仅依靠案例风格迁移的智能设计方法在应对具体的复杂环境时,仍然缺乏适应性与灵活性<sup>[8]</sup>。另一方面,传统设计流程面对不同设计场地可能需要重构一套新的底层设计逻辑<sup>[9]</sup>,整个周期耗时费力,并且缺乏有效的实时反馈机制<sup>[10]</sup>,难以对设计方案进行及时调整和优化,加大了在实际城市设计工作中大规模推广的难度。

基于此,本研究在中观尺度功能与形态耦合特征的基础上,针对多样性与效率性的设计难题,采用自主学习的人工智能方法实现功能与形态的动态耦合交互,进而突破依赖主观设计经验、海量案例库迁移学习等设计方法的局限。

同时,根据功能与形态在空间要素层面的多种耦合交互模式进行差异化方案迭代与优化,进一步提高设计方案的适应性与有效性。通过样本实证表明,提出的智能城市设计方法能够模拟中观尺度功能与形态之间彼此影响、协同博弈的动态交互过程,在短时间内智能生成多种设计方案,为面向未来的城市设计提供有益参考。

## 1 中观尺度城市设计的思考

### 1.1 关键:二维功能布局与三维空间形态设计

作为“城市空间深层结构和发展规律的显相特征”<sup>[11]</sup>,功能与形态始终是城市设计的核心内容。一方面,二维功能布局直接决定城市未来发展方向、空间利用效率以及居民生活质量。在中观尺度既是落实宏观层面对片区发展定位的体现,又是引导微观层面建筑功能组织的主要依据,需要在大类用地规划的基础上形成更为精细的土地利用布局。通过理性功能主义驱动的功能布局设计,从使用效率出发对片区内部的功能要素进行整合,能够实现土地利用的精准规划与集约发展。另一方面,三维空间形态作为城市设计的外在表现,直接反映城市文化特色与审美价值。中观尺度的空间形态设计在延续宏观尺度对城市形态结构总体把控的基础上,进一步组织片区内各街坊地块的空间形态,并将其细化为针对街坊单元的三维形态指标要求进行传导,重点关注建筑高度、建筑密度与开发强度等形态内容,可以有效弥补宏观尺度形态导控不够细、微观尺度形态设计碎片化等问题。

综上所述,中观尺度城市设计的关键就是基于上位规划目标,统筹片区的二维功能布局和三维空间形态,引导下一层级的街坊设计,实现“功能布局与空间形态的双向平衡”。

### 1.2 问题:功能与形态错配引发空间失序

功能与形态作为中观尺度城市空间系统的核心组成部分,在空间上相互影响、交互嵌套。普遍认为通过功能与形态的有效动态耦合,能够在有限的土地

资源约束下最大限度挖掘各个系统潜力,形成相互促进的积极发展局面,是提升城市运转效率、保障城市可持续发展的重要途径<sup>[12]</sup>。

然而,随着城市的飞速发展,在当今中观尺度城市设计项目中,由于现状条件日趋复杂、参与主体日益多元,多元变化的功能业态与单一固定的空间形态之间的失调现象日渐凸显,尤其体现在低密度功能活力与高强度建筑形态之间的偏差。对于居民而言,生产和生活空间不合理配置加剧交通拥堵,导致热岛效应与空气污染等问题频发,降低生活质量;对于城市运行管理而言,功能与形态失调导致空间资源供需错配,既抑制了空间活力的释放,又造成了资源的无谓消耗,最终引发空间失序和人地关系失衡的系列危机。

### 1.3 困境:中观尺度功能与形态的动态交互难题

对于设计师而言,在中观尺度城市设计层面实现功能与形态的动态交互设计,面临诸多挑战:①交互机制难以剖析。城市作为一个动态变化系统,人群需求和社会结构随时间演进而变化,导致功能与空间的关系在规划政策、交通网络等外驱动力因素,与自然条件、经济人口等内驱动力因素的共同作用下持续波动(图1)。在设计过程中,不同功能区域的调整可能引发整体空间形态的变动,空间形态的演变亦会对功能布局产生反馈作用。这种“不可分割性”与“不完全预见性”<sup>[13]</sup>使得设计师较难在设计过程中准确剖析与预测城市空间的发展变化。②动态反馈存在延时。城市设计方案的决策与实施受到多方利益群体和复杂建成环境的影响,设计师需要根据各个环节的效果反馈反复进行方案调整与验证,由于缺乏高效的方法和工具支撑,整个动态反馈过程滞后,影响了设计方案的有效性。

因此,应对中观尺度功能与形态的动态交互设计难题,亟须突破传统设计方法局限,在把握功能与形态之间动态互动机制的基础上,实现一种设计流程快、应用场景广、参与门槛低的智能城市设计方法<sup>[14]</sup>,实现功能与形态的动态耦合发展。

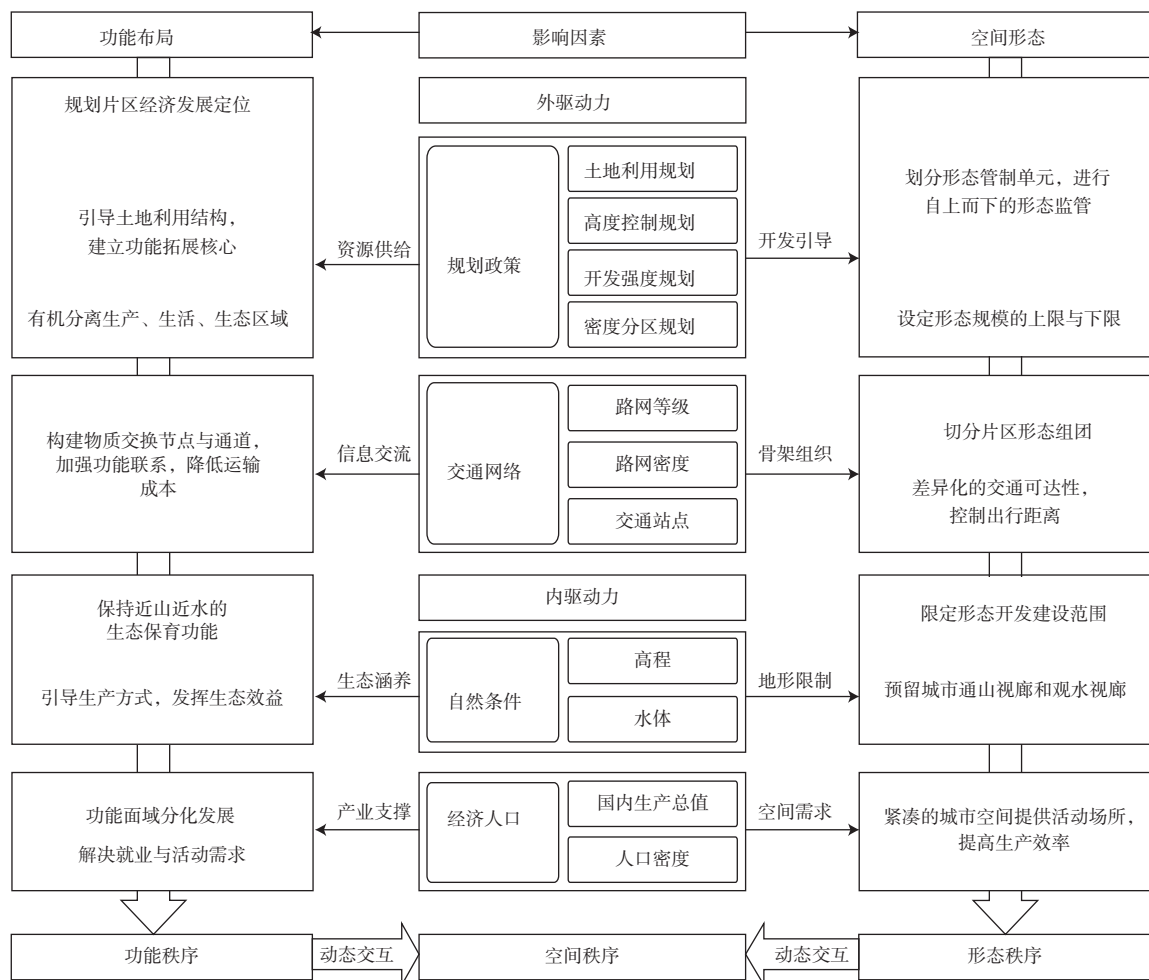


图1 多种因素对“功能—形态”动态交互的影响机制

Fig.1 The influencing mechanism of multiple factors on dynamic function-morphology interaction

## 2 中观尺度的智能城市设计路径构建

### 2.1 方法基础

#### 2.1.1 功能与形态的耦合要素

空间系统的耦合协调并不意味着系统之间完全重叠或独立的空间关系,而是系统要素在结构层面的和谐统一。基于古典区位论的空间结构理论,将“节点、网络、面域”视为空间发展的三个基础要素<sup>[15]</sup>,功能与形态的耦合要素也可抽象为“点、线、面”的基本构成<sup>[16]</sup>。其中:功能要素的“点”代表各种公共功能的中心,是人们进行生产生活的核心空间;“线”指代各大功能中心之间的联系通道,通常以交通干道、城市水系或绿地两侧的公共功能带作为片区的经济廊道;“面”则指功能分区形成的面域

范围,例如商务组团、居住组团和政务组团等。通过功能核心、经济廊道和功能基面,形成引导中观尺度发展的功能结构。形态要素中的“点”要素一般表现为大型公共建筑群或高层商务建筑群,作为核心地标与定位点<sup>[17]</sup>;“线”要素通过连续高层建筑或低密度建筑带形成视线通廊;“面”要素则是城市空间形态的基本面,由各个街坊单元内的建筑填充形成。通过地标簇群、视线廊道和建筑基面的共同作用,塑造出中观尺度可识别的结构性形态骨架。

功能与形态要素通过耦合共生的互反馈循环共同构建整体空间格局。一方面,功能要素驱动形态要素的形成。在城市设计的经典流程中,通常首先依据发展目标及自身资源条件初步确定功能核心和经济廊道走向后,再开展空间形态的

设计。可以说,空间形态的布局特征很大程度上依赖功能布局的合理性<sup>[18]</sup>,功能布局为空间形态提供了内在支撑框架。另一方面,形态要素对功能要素具有反馈作用。城市实体空间为功能孵化提供物质环境,反馈功能布局的不断完善,紧凑、丰富的空间形态也能够吸引更多人群参与到空间活动中,进而不断提升片区的功能活力。基于此,功能与形态以人类活动为纽带,在市场、政府等多方调控下根据空间使用情况不断优化<sup>[19]</sup>,动态交互形成相对稳定的城市空间结构。

#### 2.1.2 基于强化学习算法的技术框架

作为环境性能驱动的机器自学习范式之一,强化学习<sup>①</sup>无须像监督学习等算法依赖海量样本数据进行前期训练,而是通过反馈的奖励信号和历史经验自主采取下一步行动。该算法能够在面对多

种可能的环境状态时适应变化作出决策,从而有效应对动态城市空间的设计问题<sup>[20]</sup>。

以中观尺度功能与形态要素动态交互为理论基础,借助强化学习算法,将片区街坊单元视为多个空间智能体,城市设计方案的生成过程则可被视为多个智能体的合作、交互与博弈过程。在此期间,以可执行的功能与形态动作设定策略网络,以功能与形态要素之间的耦合协调程度为收益函数定义评价网络,利用马尔科夫决策过程进行方案迭代,同时通过人机交互进行方案比选与优化,最终实现功能与形态动态交互的智能城市设计。将上述生成逻辑概括为网络控制模块、方案迭代模块和比选优化模块。见图2。

## 2.2 智能城市设计的网络控制模块

### 2.2.1 基于功能与形态动作的策略网络建构

策略网络定义的是中观尺度单个街坊智能体的功能动作和形态动作,以及多个街坊智能体之间的相互作用。

#### (1) 单个空间智能体的策略网络

对于单个街坊单元的独立动作,将动作空间定义为 $A = [a_1, a_2, \dots, a_n]^T$ 与 $B = [b_1, b_2, \dots, b_n]^T$ ,在评价网络反馈下采取功能动作 $a_i$ 和形态动作 $b_i$ 。功能动作方面,中观尺度城市设计新增用地类型通常包括B类、A类、G类和R类,鉴于 $B_1$ 和 $B_2$ 在空间形态上差异显著,因此被视为两种独立的功能动作,从而与功能类型中的生活型服务功能、生产型服务功能、公益型服务功能、公园绿地和居住功能一一对应。形态动作方面,根据常用形态指标设置规模性、标志性和多样性等3类9项形态指标(表1),并基于上位规划要求确定目标片区形态指标的生成区间。

#### (2) 多个空间智能体的策略网络

城市街坊并非被路网切分的完全独立单元,而是在集聚效应吸引与均衡效应制约下形成的彼此关联的复杂空间网络<sup>[21]</sup>。在一定辐射范围内,某街坊单元的功能或形态属性变化,可能会使得其他街坊单元原有功能和形态属性也产生变化。因此,需要明确动作空间与状态空间,以定义多个空间智能体的影响动

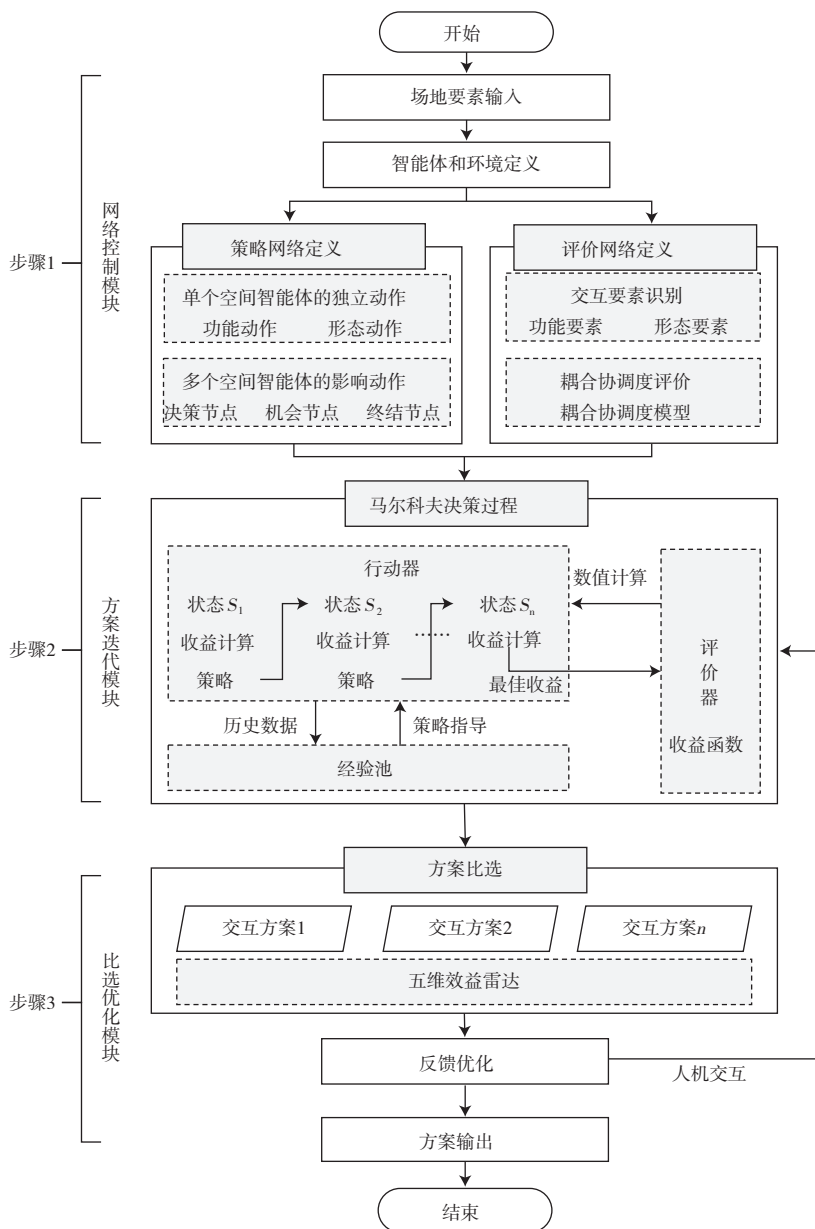


图2 中观尺度“功能—形态”智能交互设计的技术路线  
Fig.2 The technical route of mesoscale intelligent function-morphology interaction design

作。动作空间指一个街坊的动作变化会引起其他街坊动作变化的范围,研究采用 $K$ 邻近算法将距离目标街坊最近的9个街坊单元视为影响范围;而状态空间则指中观尺度的整个目标片区,即每个街坊单元动作的变化均会影响片区的整体状态。

值得注意的是,由于外围街坊在受到目标街坊动作影响产生新的动作后,又作为下一个空间智能体继续影响其邻近街坊,如此循环迭代可能导致整个片区产生无穷尽的环境状态。考虑到算力

限制和方案差异性需求,借鉴决策器中的三类节点属性来限制迭代次数:决策节点为首次改变动作的智能体,机会节点为首次受到决策节点影响进而改变自身状态的智能体,终结节点则为第二次因决策节点影响改变自身状态的智能体,终结节点之外的街坊单元则保持自身状态不被改变。

在此基础上设定动作空间内的功能与形态影响规则,通过CART分类树(classification and regression tree)算法将连续数据或离散数据不断进行二分离散,

表1 中观尺度城市设计的形态指标

Tab.1 Morphological indicators of mesoscale urban design

| 空间形态属性 | 指标名称                  | 计算方式                                                           | 指标释义                            |
|--------|-----------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| 规模性    | 总体积/m <sup>3</sup>    | $V_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^n V_i$                            | $V_i$ 为街坊内第 <i>i</i> 个建筑单体体积    |
|        | 总基底面积/m <sup>2</sup>  | $S_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^n S_i$                            | $S_i$ 为街坊内第 <i>i</i> 个建筑单体的基底面积 |
|        | 建筑密度                  | $B = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{S}$                               | $S$ 为街坊面积                       |
|        | 容积率                   | $P = \frac{V_{\text{sum}}}{S}$                                 | /                               |
|        | 平均高度/m                | $H_{\text{avg}} = \frac{V_{\text{sum}}}{S_{\text{sum}}}$       | /                               |
| 标志性    | 最高高度/m                | $H_{\text{max}}$                                               | /                               |
|        | 最大基底面积/m <sup>2</sup> | $S_{\text{max}}$                                               | /                               |
| 多样性    | 高度错落度                 | $D_h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - H_{\text{avg}})^2}{n}}$ | $H_i$ 为街坊内第 <i>i</i> 个建筑单体高度    |
|        | 基底面积错落度               | $D_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - S_{\text{avg}})^2}{n}}$ | $S_{\text{avg}}$ 为街坊内的平均基底面积    |

自动匹配基尼系数最小的组合方案，计算公式如下：

$$\text{Gini}(A) = 1 - \sum_{i=1}^c p_i^2$$

式中， $A$ 为节点， $p_i$ 为属于*i*的概率， $C$ 为分类的数目。

### 2.2.2 基于“功能—形态”耦合程度的评价网络建构

研究旨在生成功能与形态耦合协调的中观尺度城市设计方案，因此核心评价标准即为二者的耦合协调程度。基于耦合度、协调指数等计算公式的传统耦合协调度模型常被用来评价两个系统之间的耦合协调程度<sup>[22-23]</sup>，尤其应用在可量化表示的数值型系统当中。然而功能和形态系统具有明显的空间属性，一方面难以仅通过单一数值指标反映二者在空间上的耦合差异，另一方面人为打分方式具有明显主观性的同时，还需要人工对大量的状态数据进行判断，难以在中观尺度城市设计中有效推广。因此，本次评价网络在耦合协调度模型的基础上，针对功能与形态的要素耦合特征，设定由“方案灰度处理—耦合要素识别—街坊单元评分—耦合协调度计算”构成的智能化评价流程。

①方案灰度处理。对功能方案和形态方案进行灰度处理，功能系统由不同

功能类型的结构重要程度划分（ $B_2 > A > B_1 > G > R$ ），形态系统由自然间断法将形态指标数值分为5级。②耦合要素识别。基于点、线、面要素的识别规则，自动将灰度结果转化为耦合要素的识别结果。点要素通过识别各个道路交叉点的就近街坊单元并计算街坊单元的平均灰度，将其作为交叉点的潜力值，在比较所有潜力值大小后筛选出前*N*个节点作为对应功能或形态点要素；线要素筛选邻近主次干路两侧、功能灰度或形态灰度数值在前50%的街坊单元，将单元数最高的*N*条作为功能或形态的线要素；面要素则筛选出功能灰度值与形态灰度值在目标片区内前75%的街坊单元。③街坊单元评分。为了将具有空间分布差异性的耦合要素属性转化为可量化评价的数值字段，针对每个街坊单元在功能或形态耦合要素构成中的作用进行评分。其中：点要素作为功能核心节点或形态地标簇群，在片区中起到促进经济增长、塑造片区形象、提升空间活力的关键作用，辐射效应最强，标识作用最高；线要素作为片区的经济走廊与视线廊道，标识作用次之；而面要素作为功能和形态构成的基本单元，标识作用最弱。同时，若街坊单元参与多个耦合要素构成，则评分叠加。④耦合协调度计算。利用耦

合协调度模型对某一状态下所有街坊单元的耦合协调度进行计算，目标片区的整体耦合协调度则为所有街坊单元的耦合协调度之和。

### 2.3 智能城市设计的方案迭代模块

耦合模式是交互状态的表征<sup>[24]</sup>，能够反映不同系统动态交互之后的发展方向，在智能城市设计中不同耦合模式也对应着差异化的交互迭代路径。通过功能要素与形态要素的空间位置关系映照（由于面要素的标识程度较弱，方案迭代时主要考虑点要素与线要素的耦合关系），发现主要存在以下几种耦合情形：①当功能和形态要素相对完整时（即能够分别识别出功能与形态的点、线要素），会出现要素高度重叠、点要素基本重叠、线要素基本重叠、局部点线要素重叠或基本不重叠的耦合可能；②当功能要素或形态要素只有一类完整时，体现为功能主导或形态主导特征；③当功能与形态要素均不完整时，体现为离散分布的特征。此外，借鉴相关学者依据耦合程度对耦合状态的划分方式，耦合协调度介于80%至100%视为良好协调，耦合协调度介于20%以下视为失调发展<sup>[25-26]</sup>，本研究也以80%与20%为界线进行耦合模式的划分。最终推演出8种功能与形态的耦合模式，包括高度耦合、核心集聚、轴线带动、中度耦合、失调发展、功能主导、形态主导与离散分布模式。见表2。

在功能与形态的8种耦合模式当中，剔除耦合程度较低的失调发展、离散分布和中度耦合模式，剩余5种模式（高度耦合、核心集聚、轴线带动、功能主导与形态主导）展示了功能与形态要素较为合理的动态耦合，代表不同空间发展导向，为设计师提供多样化的方案迭代选择。见图3。

### 2.4 智能城市设计的比选优化模块

考虑到存在某些设计需求难以直接转化为控制参数，在智能生成方案的基础上置入人机交互的比选优化模块，从而产出可应用于实践的设计方案。

首先，基于经济性、生态性、社会性、景观性和便捷性等五个维度，建构以综合价值效益为优的五维方案比选雷

表2 “功能—形态”的八种耦合模式

Tab.2 Eight coupling modes of function-morphology

| 属性特征      |      | 高度耦合 | 核心集聚 | 轴线带动 | 中度耦合  | 失调发展 |     | 功能主导 | 形态主导 | 离散分布 |
|-----------|------|------|------|------|-------|------|-----|------|------|------|
| 要素完整性     | 功能   | 完整   | 完整   | 完整   | 完整    | 完整   | 完整  | 完整   | 不完整  | 不完整  |
|           | 形态   | 完整   | 完整   | 完整   | 完整    | 完整   | 完整  | 不完整  | 完整   | 不完整  |
| 点要素耦合程度/% |      | ≥80  | ≥80  | <80  | 20—80 | ≤20  | <80 | /    | /    | /    |
| 线要素耦合程度/% |      | ≥80  | <80  | ≥80  | 20—80 | <80  | ≤20 | /    | /    | /    |
| 耦合图示      | 功能要素 |      |      |      |       |      |     |      |      |      |
|           | 形态要素 |      |      |      |       |      |     |      |      |      |

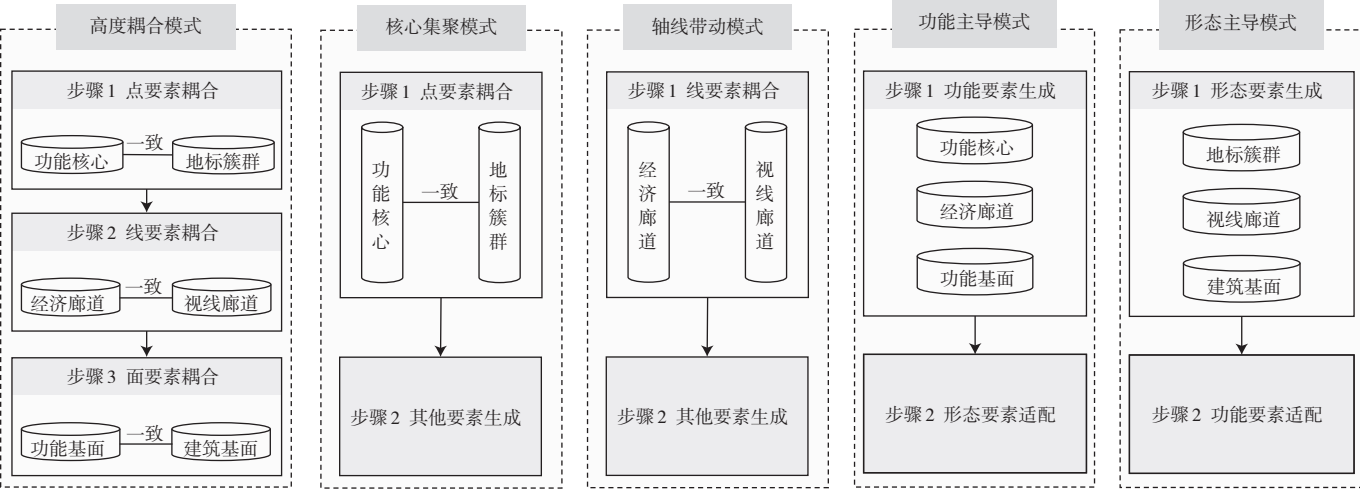


图3 不同耦合模式引导的生成步骤示意

Fig.3 Schematic illustration of generation processes for different coupling modes

达。经济效益通过 $B_1$ 、 $B_2$ 类用地面积和建设体积体现；生态效益通过G类和E类用地的面积占比反映；社会效益利用A类用地的建设量占比衡量；景观效益通过360°环视模拟分析街坊单元的绿地与水体可视率；便捷效益通过测算居住单元到邻近公共服务设施用地的平均最短距离进行比较。基于上述比选标准，计算机自动计算海量初始方案的多维效益指标并标记。其次，设计师根据比选雷达结果筛选可深化方案，并结合多方诉求进行人机交互优化。最后，输出矢量的中观尺度城市设计模型与图纸。

### 3 样本实证：某片区智能城市设计实践

#### 3.1 “相对白地”的典型代表

以滁州市某片区作为实证样本进行实践。该片区代表了大量开发程度相对较低的城市边缘地带，并在时代政策下成为疏解老城功能、拓展新城版图的重点开发区域。此类片区内部需要保留的现状条件少，较少涉及复杂的产权主体和历史保护等诸多限制因素，能够最大程度实现城市设计的空间蓝图，便于开展智能城市设计实验。通过这种“相对

白地”探索，首先实现“功能—形态”智能动态交互设计的基本流程，在此基础上进行更多现状条件限制的方案生成实验，最终形成一套成熟的、可以应用于工程实践的中观尺度智能城市设计方法。

片区现状用地以农林和村庄用地为主，根据上级政府规划，将其调整为城镇建设用地进行城市设计。在开展智能城市设计之前，首先构建数字化底盘，评估现状资源本底并保留生态价值较高的水系、绿地，以及建筑质量较好的居住与文化设施用地。然后以每个街坊的

几何中心为坐标，形成155个空间智能体，并对需要保留功能和形态特征的智能体设置独热编码（one-hot code）<sup>[27]</sup>，确保在方案迭代过程中不对其执行任何动作。见图4。

3.2 “功能—形态”动态交互的智能城市设计结果

基于建构的中观尺度智能城市设计路径，在样本片区自动生成出5种“功能—形态”耦合模式下的15个设计方案。见表3。

3.2.1 高度耦合模式方案生成

高度耦合模式的方案迭代包括点要素迭代与线要素迭代过程。筛选邻近智能体平均灰度值排名前五的道路交叉点作为耦合点要素、排名前三的主次干路作为耦合线要素。可以发现空间重合度随着迭代次数的不断增加而提升，点要素在约1200次迭代后处于最佳收益，线要素在500余次迭代后处于最佳收益。通过两两随机组合形成多种空间方案，为了获得更加系统性的设计效果，输出点要素到邻近线要素的垂线距离之和更短的前3种组合形式，作为高度耦合模式下的智能城市设计方案（表3中方案A-1、A-2和A-3）。

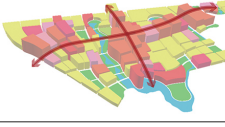
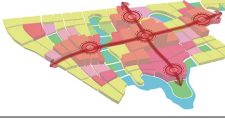
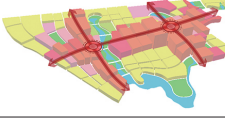
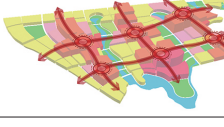
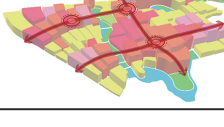
3.2.2 核心集聚模式方案生成

核心集聚模式通过生产要素在空间上高度集聚形成核心节点，先行发展的核心节点依托资本、劳动等要素的溢出引领片区内其他街坊单元的发展。在此模式下，功能核心与地标簇群的空间布

局高度重合，最大化发挥要素集聚效应。样本片区核心集聚模式点要素的迭代过程与高度耦合模式类似，迭代1200余次后趋于稳定，从中选取耦合收益较高且

耦合节点数目不同的3种方案输出（表3中方案B-1、B-2和B-3）。可以发现，节点数目的不同会生成截然不同的空间方案，且空间结构的整体性会随节点的

表3 样本片区的智能城市设计方案  
Tab.3 Multiple options for intelligent urban design in the sample area

| 耦合模式   | 智能城市设计方案                                                                             |                                                                                       |                                                                                       |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 高度耦合模式 | A-1                                                                                  | A-2                                                                                   | A-3                                                                                   |
|        |    |    |    |
|        | B-1                                                                                  | B-2                                                                                   | B-3                                                                                   |
| 核心集聚模式 |    |    |    |
|        | C-1                                                                                  | C-2                                                                                   | C-3                                                                                   |
|        |   |   |   |
| 轴线带动模式 | D-1                                                                                  | D-2                                                                                   | D-3                                                                                   |
|        |  |  |  |
|        | E-1                                                                                  | E-2                                                                                   | E-3                                                                                   |
| 功能主导模式 |  |  |  |
|        |                                                                                      |                                                                                       |                                                                                       |
|        |                                                                                      |                                                                                       |                                                                                       |

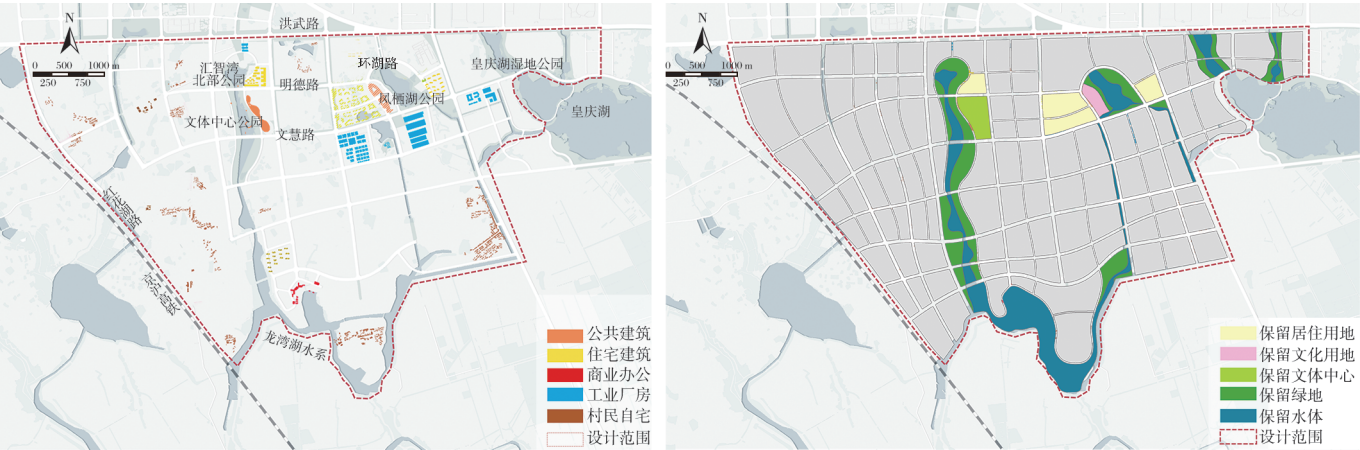


图4 样本片区现状条件与数字化底盘  
Fig.4 Current conditions and digitized chassis in the sample area

增多而削弱。

### 3.2.3 轴线带动模式方案生成

轴线带动模式依托交通网络布局功能更具公共性、形态更具标识性的街坊空间单元，形成带状发展格局，通过轴线带动片区整体发展。样本片区的线要素在500余次迭代后逐渐形成高耦合度的空间方案，选取收益函数最高的3种方案进行输出（表3中方案C-1、C-2和C-3）。结果显示，轴线带动模式耦合收益更高的方案基本都是十字轴模式或其变形，且当轴线位于片区中央区域时，辐射带动作用更佳。

### 3.2.4 功能主导模式方案生成

在功能主导模式下，空间形态作为功能布局的适配性内容出现，合理的功能结构起到关键作用。为了充分发挥机器生成的不确定性来激发设计灵感，前期未对功能分区做硬性规定，而由强化学习算法自主探索功能要素组合可能。发现前期迭代过程中的用地布局较为分散，未形成高辨识度的功能要素体系，在迭代约1000次后功能布局特征逐渐凸显，形成了较为直观的商务核心、公共服务核心以及经济廊道等要素。随后通过空间决策器匹配各项形态指标，输出3种收益函数最高的方案（表3中方案D-1、D-2和D-3）。总体看来，功能线要素大于3条后，对应生成的形态特征趋于均质，虽然与功能耦合良好，但空间形态的标识性欠佳。

### 3.2.5 形态主导模式方案生成

形态主导模式在策略网络的指导下首先生成形态方案，再通过相关性经验智能匹配功能类型。与功能主导模式方案的整体平缓、局部高起的空间形态特征不同，形态主导模式生成的方案地标性高层街坊增多，高度变化区间拓展至0—250 m，形成更为丰富的高层错落关系。在迭代约900次后，空间形态的波动规律逐渐清晰，能够识别出高层地标簇群和连续高层建设带，然后自动匹配功能布局，输出3种收益函数最高的方案（表3中方案E-1、E-2和E-3）。结果显示，形态主导模式下的方案呈现高度混合的功能布局状态，未出现功能主导模式方案中的明显功能分区现象。

基于多组智能城市设计方案，通过五维效益比选雷达对本次生成方案以及不同耦合模式进行效益比选（图5）。选取综合效益最佳的形态主导模式方案E-3作为初始方案，输入后续反馈与优化流程，经历人机交互迭代最终形成以“U”字形水系为空间骨架，布局公共服务功能与地标建筑，并发散多条发展支脉的空间方案。

本案例反映出智能设计方法在中观尺度城市设计的可行性与可推广性，尤其是在面向多元复杂的城市环境时，能够在短时间内提供更丰富、更科学的空间组织方案。另外值得注意的是，不同耦合模式下的设计方案并非独立的静止

状态，而是可以通过相关参数调整实现动态转换，从而增强设计的适应性和灵活性，更好地响应不断变化的城市需求。

## 4 结语

随着城市空间巨系统的不断演化，中观尺度功能与形态的互动关系也愈发复杂，本研究基于“功能—形态”动态交互视角，利用人工智能算法构建一套具有普适性的中观尺度智能城市设计方法。通过设计师与智能算法的交互，空间由无序向有序过渡、由动态向稳态过渡，模拟了中观尺度功能系统与形态系统之间协同博弈的动态演进过程，体现城市空间的生长性本质。

在新兴技术不断变革的浪潮下，基于数字智能技术的数字化城市设计方兴未艾。面对生产和生活方式重塑对未来城市空间的影响，应进一步意识到智能技术在城市设计领域发挥的关键作用，如何巧妙融合人类智慧与机器算力，从多尺度、多维度、多场景设计出高质量的城市空间，相信在相当长的时间都将是值得探索的科学议题，面向未来的智能城市设计之路才刚刚开始。

## 注释

- ① 强化学习（reinforcement learning, RL）是一种通过智能体（agent）与环境

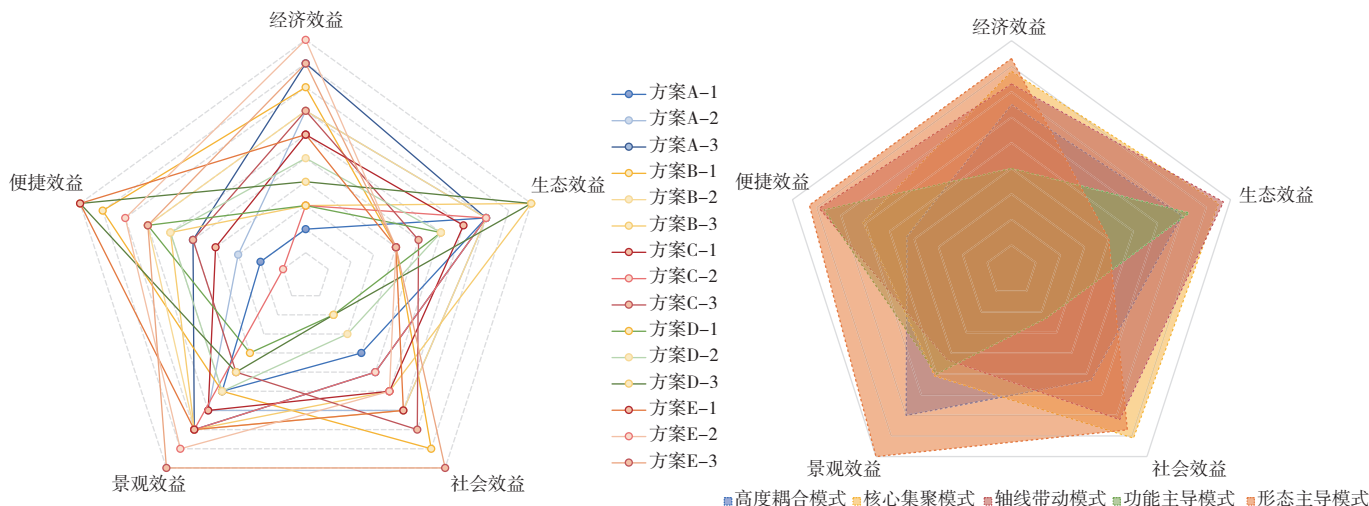


图5 不同方案及耦合模式的评价雷达图

Fig.5 Evaluation radar chart for different programs and coupling models

(environment) 交互过程中的不断“试错”获取“奖励”的机器学习方法,其核心包括策略网络(policy network)、评价网络(critic network)和马尔科夫决策过程(Markov decision process, MDP)。智能体执行不同动作带来差异化的奖励反馈,通过奖励信号指导智能体的下一个动作,旨在获取更高收益。在单智能体强化学习基础上,还衍生出由多个智能体协同合作的多智能体强化学习,从而实现高维复杂空间和动态空间内的设计优化任务。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市设计管理办法[S]. 2017.
- [2] TRANCIK R, GOODEY B, 金广君. 城市设计的概念与内涵[J]. 新建筑, 1990(4): 76-77.
- [3] 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, 42(1): 9-19.
- [4] 边泓濤, 陈楠. 中观层面城市设计导则40年: 回眸、反思与展望[J]. 规划师, 2020, 36(15): 55-60.
- [5] 孙一民. 中观尺度的城市大型工程项目的科学营建: 关于总设计师制度的思考[J]. 当代建筑, 2022(5): 19-23.
- [6] 杨俊宴, 陆小波. 城市设计的中间尺度形态: 南通“通津九脉”设计探索[J]. 城市规划, 2019, 43(12): 106-116.
- [7] 张利, 邓慧妹, 梅笑寒, 等. 城市人因工程学: 一种关于人的空间体验质量的设计科学[J]. 科学通报, 2022, 67(16): 1744-1756.
- [8] 吴志强, 黄晓春, 李栋, 等. “人工智能对城市规划的影响”学术笔谈会[J]. 城市规划学刊, 2018(5): 1-10.
- [9] 杨超. “基础设施主义”的新城城市设计原理: 基于他组织与自组织的结构融合[J]. 城市规划学刊, 2023(5): 45-53.
- [10] 杨俊宴, 张钟虎, 史宜. 面向城市更新的城市设计公众参与数字平台探索: 以南京阅江楼片区为例[J]. 城市规划学刊, 2024(3): 74-81.
- [11] 邵典, 杨俊宴. 城市空间形态的多骨架体系叠合解析[J]. 中国名城, 2023, 37(1): 71-78.
- [12] 王林, 田健, 徐晓楠, 等. 形态: 功能视角下县城村镇聚落空间分异及耦合分析: 以鲁西南单县为例[J]. 地理科学进展, 2024, 43(9): 1730-1743.
- [13] 杨滔, 田颖, 徐艳杰. 数字孪生赋能下的互动生成式规划与治理[J]. 上海城市规划, 2023(5): 4-10.
- [14] 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.
- [15] 郑德高, 朱雯娟, 林辰辉, 等. 功能结构优化视角下的上海重点地区与潜力地区研究[J]. 城市规划学刊, 2020(6): 65-71.
- [16] 杨超, 李强. 城市设计的结构化形式逻辑研究: 设计分析理论的延伸[J]. 城市发展研究, 2024, 31(1): 31-41.
- [17] GUO Y, HU X, TANG J. Structural landmark salience computation in compact urban districts with 3D node-landmark grid analysis model: a case study on two sample districts in Changsha, China[J]. Buildings, 2023, 13(4): 1024.
- [18] 胡昕宇. 亚洲特大城市轴核结构中心区空间与业态定量研究[D]. 东南大学, 2016.
- [19] 贺勇, 陈钰凡, 赵静. 中国经济发达地区城郊乡村聚落的功能转型与形态演化[J]. 西部人居环境学刊, 2023, 38(5): 17-23.
- [20] LI J W, ZHOU T. Multiagent deep meta reinforcement learning for sea computing-based energy management of interconnected grids considering renewable energy sources in sustainable cities[J]. Sustainable Cities and Society, 2023, 99: 104917.
- [21] 邵典, 杨俊宴, 史北祥, 等. 从设计蓝图到管控谱系: 一种街坊尺度城市设计的精细转译方法研究[J]. 城市规划, 2022, 46(10): 56-71.
- [22] 张栩晨, 赵民. 城市规划中的“耦合研究”溯源及误区辨析[J]. 城市规划, 2022, 46(6): 37-47.
- [23] ZHANG L, WU M, BAI W, et al. Measuring coupling coordination between urban economic development and air quality based on the fuzzy BWM and improved CCD model[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 75: 103283.
- [24] 张杨, 何依. 由分立走向集成: 历史城区体检评估制度的建构理路: 基于系统耦合理论[J]. 城市规划学刊, 2024(3): 82-90.
- [25] 邢忠, 朱嘉伊. 基于耦合协调发展理论的绿地公平绩效评估[J]. 城市规划, 2017, 41(11): 89-96.
- [26] 赵雪纯, 菊春燕. 公园绿地与城市功能空间耦合协调关系及影响因素分析: 以乌鲁木齐市为例[J]. 干旱区地理, 2024, 47(5): 898-908.
- [27] 姚佳伟, 黄辰宇, 付斌, 等. 深度强化学习支持下环境性能驱动的设计研究与实践[J]. 建筑学报, 2022(S1): 31-38.

修回: 2025-01