

От статического сопряжения к динамическому взаимодействию: интеллектуальный метод городского дизайна мезомасштаба

ХУАН Юэюэ, ЯН Цзюньян, СУНЬ Хаочэн, ЯН Цинсинь, ЦУЙ Ао

Аннотация. Городской дизайн мезомасштаба является ключевым связующим звеном между макроуровнем города и микроуровнем квартала и одновременно координирует двумерный функциональный порядок и трехмерный морфологический порядок. Однако в условиях быстро меняющихся городских потребностей традиционные методы ограничены статичной и одновариантной моделью сопряжения «функция—морфология» и сравнительно низкой скоростью корректировки. На основе алгоритма обучения с подкреплением в исследовании разработан интеллектуальный маршрут городского дизайна мезомасштаба, включающий модуль сетевого управления, модуль итерационной генерации решений и модуль сравнительной оптимизации. С учетом пространственных характеристик элементов сопряжения функции и формы выделены несколько режимов взаимодействия: высокий уровень сопряжения, концентрация вокруг ядра, развитие вдоль оси, функциональное доминирование и морфологическое доминирование. Эти режимы проверены в проектном эксперименте на тестовом участке. Результаты показывают, что интеллектуальный метод существенно повышает разнообразие решений и эффективность проектирования, усиливает адаптивность проектов и создает действенный путь к динамическому взаимодействию в будущем городском дизайне.

Ключевые слова: интеллектуальный городской дизайн; мезомасштаб; динамическое взаимодействие; функциональная планировка; пространственная морфология.

Классификационный индекс китайских библиотек: TU984. Код документа: А. DOI: 10.16361/j.urpf.202503004. Номер статьи: 1000-3363 (2025) 03-0025-09.

* Крупный проект Национального фонда естественных наук Китая «Разработка прототипов углеродно-нейтральных строительных технологий для высокоплотной городской среды» (№ 52394224); Национальная ключевая программа исследований и разработок «Ключевые технологии интеллектуального городского дизайна для пространственной оптимизации застроенной среды» (№ 2024YFC3807900).

«Правила управления городским дизайном» определяют городской дизайн как действенный инструмент реализации градостроительных решений, ориентации архитектурного проектирования и формирования самобытного облика города [1]. В условиях сложных экономических, социальных и экологических запросов городской дизайн различными средствами «создает трехмерные пространственные формы в городской среде» [2], стремясь к оптимальному состоянию комплексной городской среды [3]. На среднем и позднем этапах новой урбанизации Китая он приобретает особое значение для повышения качества городского пространства и обеспечения устойчивого развития.

Многоуровневый характер сложной городской мегасистемы обуславливает различия в содержании и приоритетах проектирования на разных масштабах. Городской дизайн мезомасштаба ориентирован преимущественно на функционально относительно самостоятельные и пространственно целостные городские территории [4] и охватывает несколько уровней — «городской район—сообщество—улица—здание» [5]. Занимая промежуточное положение между общегородским дизайном макромасштаба и детальным проектированием квартала микромасштаба, он выполняет две взаимосвязанные задачи [6]: во-первых, формирует рациональную функциональную структуру, переводя общую пространственную организацию верхнего уровня в планировочные решения участка; во-вторых, координирует интенсивность освоения, высотность и другие морфологические параметры, задавая ориентиры для последующего проектирования кварталов. Именно совместное управление

функцией и формой делает мезомасштабный городской дизайн ключевым звеном воплощения проектного замысла.

По мере изменения общественных потребностей возрастает спрос на гибкое проектирование, обеспечивающее динамическое взаимодействие городской функции и морфологии. Однако существующие методы все еще недостаточны с точки зрения разнообразия и эффективности. С одной стороны, традиционное проектирование часто опирается на субъективный опыт и развивает единственную статическую модель функционально-морфологического сопряжения [7], поэтому с трудом охватывает разнообразные сценарии взаимодействия. Интеллектуальные методы, основанные лишь на переносе стиля из базы прецедентов, также недостаточно адаптивны при работе со сложной конкретной средой [8]. С другой стороны, для каждого нового участка традиционный процесс нередко требует заново выстраивать базовую проектную логику [9]. Это занимает много времени и труда, а отсутствие эффективной обратной связи в реальном времени [10] затрудняет своевременную корректировку и оптимизацию, ограничивая масштабное практическое применение.

Исходя из этого, исследование опирается на особенности сопряжения функции и морфологии на мезомасштабе и использует самообучающиеся методы искусственного интеллекта для решения проблем разнообразия и эффективности. Цель состоит в том, чтобы реализовать динамическое взаимодействие двух систем и выйти за пределы подходов, зависящих от субъективного опыта или переноса знаний из массивных библиотек примеров. В соответствии с различными пространственными режимами сопряжения выполняются дифференцированные итерации и оптимизация решений, что дополнительно повышает их адаптивность и результативность. Эксперимент показывает, что предложенный метод способен моделировать процесс взаимного влияния, сотрудничества и конкурентного взаимодействия функциональной и морфологической систем и в короткие сроки генерировать несколько вариантов, предоставляя полезную основу для городского дизайна будущего.

1 Осмысление городского дизайна мезомасштаба

1.1 Ключевая задача: двумерная функциональная планировка и трехмерное пространственно-морфологическое проектирование

Будучи «видимым проявлением глубинной структуры и закономерностей развития городского пространства» [11], функция и морфология неизменно составляют ядро городского дизайна. С одной стороны, двумерная функциональная планировка непосредственно определяет направления будущего развития, эффективность использования пространства и качество жизни населения. На мезомасштабе она одновременно воплощает заданное на макроуровне функциональное позиционирование территории и служит основой организации функций зданий на микроуровне. Поэтому на базе крупных категорий землепользования необходимо формировать более детальную структуру участков. Рационально-функциональный подход, интегрирующий элементы территории с позиции эффективности использования, позволяет обеспечить точное планирование и интенсивное развитие земли.

С другой стороны, трехмерная пространственная морфология является внешним выражением городского дизайна и напрямую отражает культурную идентичность и эстетическую ценность города. Проектирование формы на мезомасштабе продолжает общую морфологическую структуру, заданную на макроуровне, но подробнее организует формы отдельных кварталов и передает их на нижний уровень в виде трехмерных требований. Основное внимание уделяется высоте зданий, плотности застройки, интенсивности освоения и другим параметрам. Такой подход компенсирует как излишнюю обобщенность макромасштабного морфологического регулирования, так и фрагментарность проектирования на микроуровне.

Следовательно, ключевая задача мезомасштабного городского дизайна состоит в том, чтобы, исходя из целей вышестоящего планирования, совместно организовать двумерную функциональную планировку и трехмерную пространственную форму территории, направить проектирование кварталов следующего уровня и достичь двустороннего равновесия между функцией и морфологией.

1.2 Проблема: несоответствие функции и формы порождает пространственный беспорядок

Функция и морфология являются центральными составляющими городской пространственной системы мезомасштаба и взаимно влияют друг на друга, образуя вложенные пространственные отношения. Считается, что эффективное динамическое сопряжение двух систем позволяет при ограниченных земельных ресурсах максимально раскрыть их потенциал и сформировать положительное взаимное усиление. Это важный путь повышения эффективности городского функционирования и обеспечения устойчивого развития [12].

Однако вследствие стремительного роста городов существующие условия становятся сложнее, а круг участников проектирования расширяется. Все отчетливее проявляется дисбаланс между разнообразными и изменчивыми функциями и единственной фиксированной пространственной формой, особенно несоответствие между функциями с низкой плотностью и слабой активностью и высокоинтенсивной застройкой. Для жителей нерациональное размещение производственных и жилых пространств усиливает транспортные заторы, способствует тепловым островам и загрязнению воздуха и снижает качество жизни. Для городского управления дисбаланс функции и формы означает несоответствие спроса и предложения пространственных ресурсов, одновременно подавляет жизненность и ведет к неоправданному расходованию ресурсов, что в конечном счете вызывает пространственный беспорядок и нарушение отношений между человеком и территорией.

1.3 Трудность: динамическое взаимодействие функции и морфологии на мезомасштабе

Для проектировщика реализация динамического взаимодействия функции и морфологии на мезомасштабе связана с несколькими вызовами. Во-первых, трудно раскрыть механизм взаимодействия. Город представляет собой непрерывно меняющуюся систему: потребности населения и социальная структура эволюционируют, а отношения функции и пространства колеблются под совместным влиянием внешних факторов — планировочной политики и транспортных сетей — и внутренних факторов — природных условий, экономики и населения (рис. 1). Корректировка одной функциональной зоны может изменить общую морфологию, а изменение формы, в свою очередь, влияет на функциональную планировку. Эта «неразделимость» и «неполная предсказуемость» [13] затрудняют точный анализ и прогнозирование пространственного развития.

Во-вторых, динамическая обратная связь запаздывает. Решения и реализация проекта зависят от множества заинтересованных сторон и сложной застроенной среды. Проектировщик вынужден многократно корректировать и проверять варианты в соответствии с результатами каждого этапа. При отсутствии эффективных инструментов весь процесс обратной связи протекает медленно, что снижает результативность решений.

Для преодоления этих трудностей необходимо выйти за рамки традиционных методов. На основе понимания механизмов взаимодействия функции и формы требуется интеллектуальный метод с быстрым процессом, широкой применимостью и низким порогом участия [14], который обеспечит их динамическое сопряженное развитие.

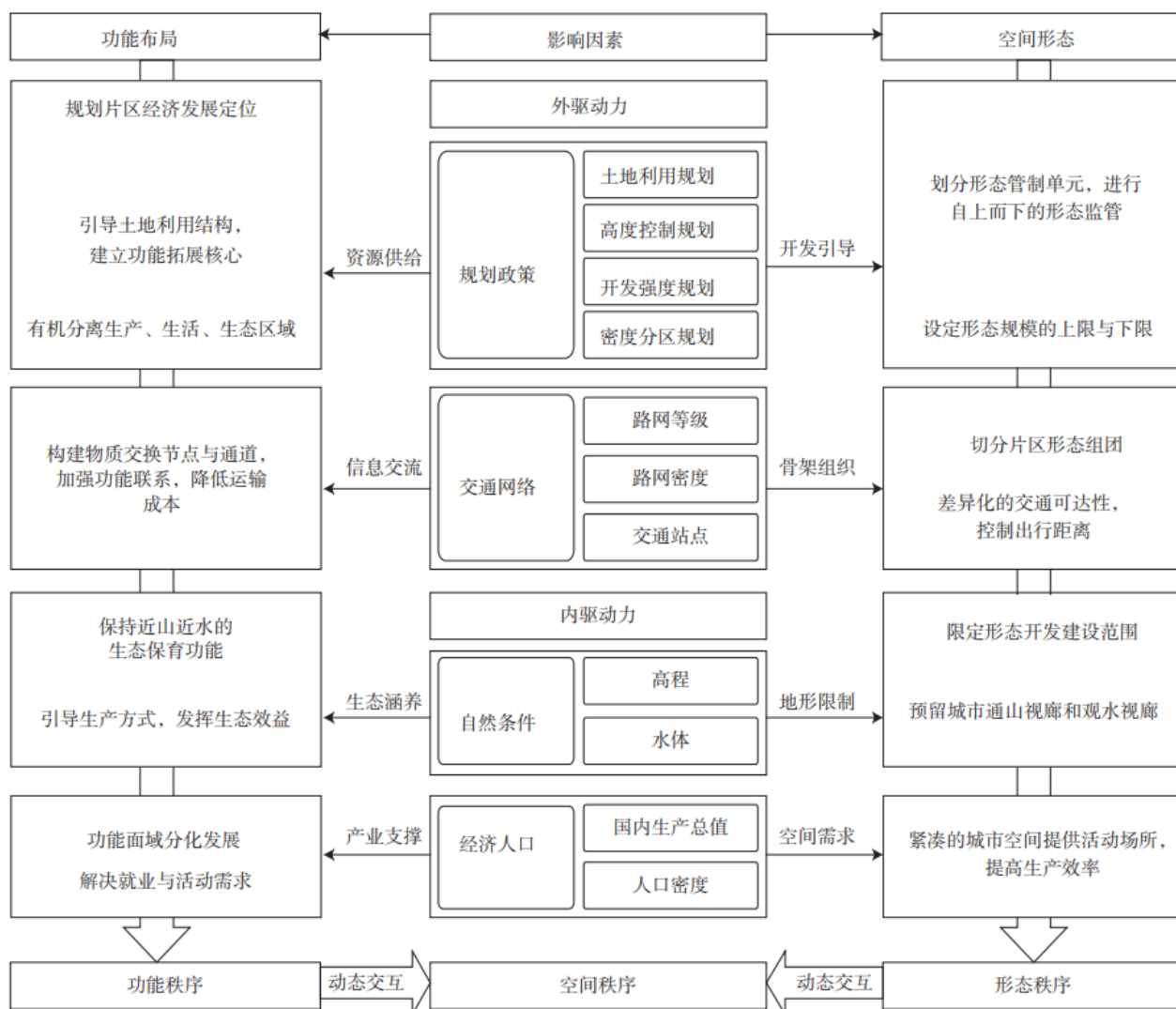


Рисунок 1. Механизм влияния множества факторов на динамическое взаимодействие функции и морфологии

2 Формирование интеллектуального маршрута городского дизайна мезомасштаба

2.1 Методологическая основа

2.1.1 Элементы сопряжения функции и морфологии

Координация пространственных систем не означает их полного наложения или полной независимости, а предполагает гармоничное единство элементов на структурном уровне. Согласно пространственно-структурным положениям классической теории размещения, «узлы, сети и поверхности» являются тремя базовыми элементами пространственного развития [15]. Элементы сопряжения функции и морфологии также могут быть абстрагированы как «точки, линии и поверхности» [16].

В функциональной системе точки представляют центры общественных функций и ключевые пространства производственной и повседневной деятельности. Линии обозначают каналы связи между крупными функциональными центрами; как правило, это полосы общественных функций вдоль магистралей, водных систем или зеленых пространств, формирующие экономические коридоры. Поверхности соответствуют территориям функциональных зон, например деловым, жилым или административным группам. Функциональные ядра, экономические коридоры и базовые функциональные поверхности совместно образуют структуру, направляющую развитие территории.

В морфологической системе точки обычно представлены крупными комплексами общественных зданий или группами высотной деловой застройки, выполняющими роль главных ориентиров и реперов [17]. Линии формируются непрерывными высотными зданиями либо полосами малоэтажной застройки и создают визуальные коридоры. Поверхности являются базовой тканью городской формы и складываются из заполнения кварталов зданиями. Группы ориентиров, визуальные коридоры и застроенные поверхности образуют распознаваемый структурный каркас мезомасштаба.

Функциональные и морфологические элементы совместно формируют целостную пространственную структуру через взаимную обратную связь сопряжения и симбиоза. С одной стороны, функциональные элементы направляют формирование формы. В классическом процессе сначала определяются функциональные ядра и направления экономических коридоров в соответствии с целями развития и ресурсами территории, после чего разрабатывается морфология. Ее планировочные характеристики в значительной степени зависят от рациональности функциональной структуры [18], которая предоставляет внутренний опорный каркас. С другой стороны, морфологические элементы воздействуют на функцию. Физическое пространство создает материальную среду для возникновения деятельности и способствует совершенствованию функциональной планировки. Компактная и разнообразная форма привлекает больше пользователей и усиливает активность территории. Связанные человеческой деятельностью и регулируемые рынком, государством и другими субъектами, две системы непрерывно оптимизируются по результатам использования пространства [19] и в динамическом взаимодействии формируют относительно устойчивую структуру.

2.1.2 Техническая схема на основе обучения с подкреплением

Обучение с подкреплением^① представляет собой один из методов машинного самообучения, управляемых характеристиками среды. В отличие от обучения с учителем, оно не требует предварительной подготовки на огромных массивах образцов, а выбирает последующие действия на основе сигналов вознаграждения и накопленного опыта. Алгоритм способен адаптироваться к множеству возможных состояний среды и принимать решения в условиях изменений, что делает его эффективным инструментом для проектирования динамического городского пространства [20].

Принимая динамическое взаимодействие функциональных и морфологических элементов за теоретическую основу, квартальные единицы рассматриваются как пространственные агенты, а генерация проекта — как процесс сотрудничества, взаимодействия и игры нескольких агентов. Стратегическая сеть задает исполнимые функциональные и морфологические действия; оценочная сеть использует степень сопряженной координации двух систем в качестве функции выигрыша. Марковский процесс принятия решений обеспечивает итерацию вариантов, а человеко-машинное взаимодействие — их сравнение и оптимизацию. Общая логика объединяет три модуля: сетевое управление, итерацию решений и сравнительную оптимизацию (рис. 2).

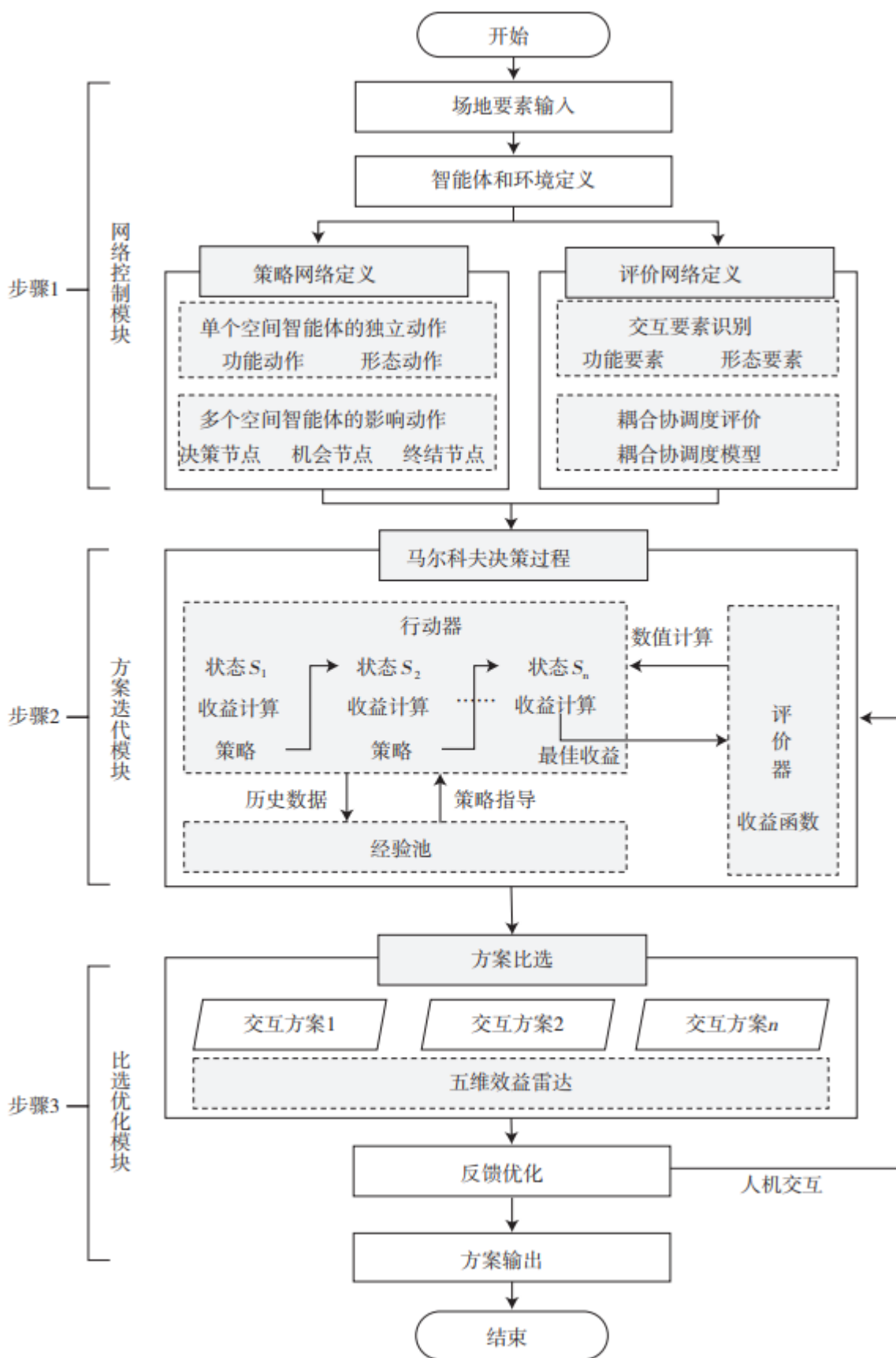


Рисунок 2. Техническая схема интеллектуального проектирования взаимодействия «функция—морфология» на мезомасштабе

2.2 Модуль сетевого управления интеллектуальным городским дизайном

2.2.1 Формирование стратегической сети на основе функциональных и морфологических действий

Стратегическая сеть определяет функциональные и морфологические действия отдельного квартального агента, а также взаимодействие между несколькими агентами.

(1) Стратегическая сеть отдельного пространственного агента

Для независимых действий одного квартала пространства действий задаются как $A = [a_1, a_2, \dots, a_n]^T$ и $B = [b_1, b_2, \dots, b_n]^T$. Под воздействием обратной связи от оценочной сети агент выполняет функциональное действие a_t и морфологическое действие b_t .

К типичным новым категориям землепользования на мезомасштабе относятся категории В, А, G и R. Поскольку В1 и В2 существенно различаются по пространственной морфологии, они рассматриваются как самостоятельные функциональные действия. В совокупности действия соответствуют функциям обслуживания повседневной жизни, производственным услугам, общественным услугам, парковым зеленым территориям и жилью.

Для морфологических действий выделены девять показателей, объединенных в три группы: масштаб, репрезентативность и разнообразие (табл. 1). Диапазоны их генерации устанавливаются в соответствии с требованиями вышестоящего планирования.

Таблица 1. Морфологические показатели городского дизайна мезомасштаба

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 ³	$V_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^n V_i$	V_i 为街坊内第 <i>i</i> 个建筑单体体积
	总基底面积/m ²	$S_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^n S_i$	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_{max}	/
	最大基底面积/m ²	S_{max}	/
多样性	高度错落度	$D_h = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (H_i - H_{\text{avg}})^2}}{n}$	H_i 为街坊内第 <i>i</i> 个建筑单体高度
	基底面积错落度	$D_s = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - S_{\text{avg}})^2}}{n}$	S_{avg} 为街坊内的平均基底面积

(2) Стратегическая сеть нескольких пространственных агентов

Городские кварталы не являются полностью независимыми единицами, разрезанными дорожной сетью; они образуют сложную пространственную сеть, связанную как эффектами агломерации, так и ограничивающим воздействием равновесия [21]. В пределах определенного радиуса изменение функциональных или морфологических свойств одного квартала может вызвать изменение свойств других кварталов. Поэтому необходимо определить пространство действий и пространство состояний, описывающие влияние между агентами.

Пространство действий означает территориальный диапазон, в котором изменение действия одного квартала вызывает изменения у других. В исследовании применяется алгоритм К ближайших соседей: в область влияния включаются девять кварталов, расположенных ближе всего к целевому. Пространство состояний охватывает весь проектируемый сектор, то есть изменение любого агента потенциально влияет на общее состояние территории.

После того как периферийный квартал изменяет действие под влиянием целевого, он сам становится следующим агентом и воздействует на соседей. Неограниченная итерация могла бы сформировать бесконечное число состояний. С учетом вычислительных ограничений и необходимости сохранять различия между вариантами число итераций ограничивается тремя типами узлов, заимствованными из логики решающих деревьев. Узел решения — агент, который первым меняет действие; узел возможности — агент, впервые изменившийся под влиянием узла решения; конечный узел — агент, изменившийся во второй раз вследствие этого влияния. Кварталы за пределами конечного узла сохраняют исходное состояние.

Далее в пространстве действий задаются правила взаимного функционального и морфологического влияния. Алгоритм CART (classification and regression tree) последовательно выполняет бинарное разбиение непрерывных или дискретных данных и автоматически выбирает комбинацию с минимальным коэффициентом Джини:

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

где A — узел, p_i — вероятность принадлежности к категории i , C — число категорий.

2.2.2 Формирование оценочной сети на основе степени сопряжения «функция—морфология»

Исследование направлено на генерацию мезомасштабных решений, в которых функциональная и морфологическая системы согласованы; следовательно, главным критерием оценки является степень их сопряженной координации. Традиционные модели, основанные на коэффициенте сопряжения и индексе координации, широко применяются для оценки отношений между двумя системами [22-23], особенно если они могут быть выражены количественными показателями.

Однако функциональная и морфологическая системы обладают ярко выраженными пространственными свойствами. Единственный числовой показатель не отражает пространственные различия сопряжения, а ручное выставление баллов не только субъективно, но и требует обработки большого числа состояний. Поэтому предложенная оценочная сеть адаптирует модель координации к пространственным особенностям элементов и включает четыре этапа: перевод решений в градации серого, распознавание сопрягаемых элементов, оценку кварталов и расчет степени координации.

① **Перевод решений в градации серого.** Функциональные и морфологические варианты преобразуются в серые изображения. В функциональной системе категории ранжируются по структурной значимости ($B2 > A > B1 > G > R$); в морфологической системе значения показателей делятся на пять уровней методом естественных разрывов.

② **Распознавание сопрягаемых элементов.** По правилам идентификации точек, линий и поверхностей результаты автоматически преобразуются в пространственные элементы. Для точек вычисляется среднее значение серого ближайших кварталов у каждого дорожного пересечения; после сравнения потенциалов N наиболее высоких значений принимаются за функциональные или морфологические точки. Для линий отбираются кварталы по обе стороны главных и второстепенных магистралей, относящиеся к верхним 50 % функциональных или морфологических значений; N осей с максимальным числом таких единиц определяются как линейные элементы. Для поверхностей отбираются кварталы, входящие в верхние 75 % значений по территории.

③ **Оценка квартальных единиц.** Чтобы преобразовать пространственные различия в числовое поле, каждому кварталу присваивается балл в зависимости от его роли в формировании элементов. Точечные элементы — функциональные ядра или группы ориентиров — оказывают наиболее сильный эффект излучения и идентификации; линейные элементы — экономические и визуальные коридоры

— имеют промежуточную значимость; базовые поверхности обладают наиболее слабой маркирующей функцией. Если квартал участвует в нескольких элементах, баллы суммируются.

④ Расчет сопряженной координации. Модель вычисляет степень координации функции и формы для каждого квартала в конкретном состоянии. Общая степень координации проектируемой территории равна сумме значений всех кварталов.

2.3 Модуль итерации проектных решений

Режим сопряжения является выражением состояния взаимодействия [24] и отражает направление развития систем после их динамического взаимного воздействия. Поэтому в интеллектуальном городском дизайне различные режимы соответствуют различным траекториям итерации.

Сопоставление пространственного положения функциональных и морфологических элементов — при преимущественном учете точек и линий, поскольку поверхности обладают меньшей идентифицирующей силой — выявляет несколько основных ситуаций. Если обе системы полны, то есть в каждой можно распознать точечные и линейные элементы, возможны почти полное наложение, преимущественное совпадение точек, преимущественное совпадение линий, локальное совпадение точек и линий либо почти полное отсутствие наложения. Если полна только одна система, формируется функционально или морфологически доминирующий режим. Если обе системы неполны, наблюдается дисперсное распределение.

В соответствии с распространенной классификацией по степени координации значения 80-100 % рассматриваются как хорошая согласованность, а значения ниже 20 % — как несогласованное развитие [25-26]. В настоящем исследовании пороги 80 % и 20 % используются для выделения восьми режимов: высокий уровень сопряжения, концентрация вокруг ядра, развитие вдоль оси, умеренное сопряжение, несогласованное развитие, функциональное доминирование, морфологическое доминирование и дисперсное распределение (табл. 2).

Таблица 2. Восемь режимов сопряжения функции и морфологии

Режим сопряжения	Полнота функциональных элементов	Полнота морфологических элементов	Сопряжение точек	Сопряжение линий
Высокое сопряжение	Полные	Полные	$\geq 80 \%$	$\geq 80 \%$
Концентрация вокруг ядра	Полные	Полные	$\geq 80 \%$	$< 80 \%$
Развитие вдоль оси	Полные	Полные	$< 80 \%$	$\geq 80 \%$
Умеренное сопряжение	Полные	Полные	20-80 %	20-80 %
Несогласованное развитие	Полные	Полные	$\leq 20 \%$ или $< 80 \%$	$< 80 \%$ или $\leq 20 \%$
Функциональное доминирование	Полные	Неполные	—	—
Морфологическое доминирование	Неполные	Полные	—	—
Дисперсное распределение	Неполные	Неполные	—	—

Из восьми режимов исключаются три варианта с низкой степенью согласованности: несогласованное развитие, дисперсное распределение и умеренное сопряжение. Оставшиеся пять — высокое сопряжение, концентрация вокруг ядра, развитие вдоль оси, функциональное и морфологическое доминирование — демонстрируют более рациональное динамическое сочетание

элементов, представляют разные направления пространственного развития и предоставляют проектировщику разнообразные варианты итерации (рис. 3).

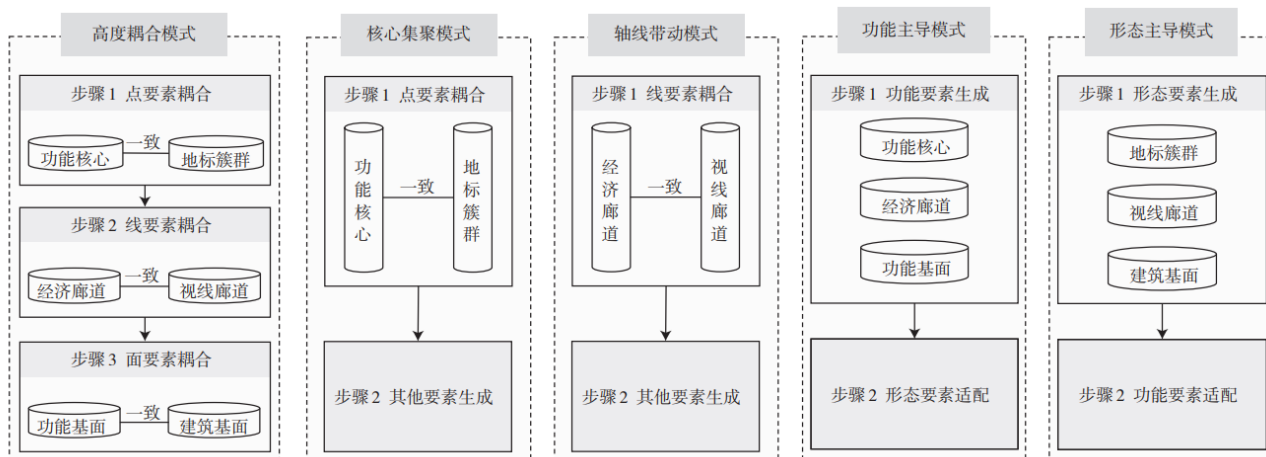


Рисунок 3. Схема этапов генерации, направляемой различными режимами сопряжения

2.4 Модуль сравнения и оптимизации

Поскольку часть проектных требований трудно непосредственно преобразовать в управляющие параметры, к автоматически сгенерированным вариантам добавляется модуль человеко-машинного сравнения и оптимизации, позволяющий получить решения, пригодные для практического применения.

Сначала строится пятифакторная радарная система сравнения, ориентированная на интегральную ценность: экономическую, экологическую, социальную, ландшафтную и транспортно-сервисную эффективность. Экономическая эффективность выражается площадью земель B1 и B2 и объемом застройки; экологическая — долей земель G и E; социальная — долей объектов категории A; ландшафтная — видимостью зеленых насаждений и водных поверхностей из кварталов по результатам кругового моделирования 360°; удобство — средней кратчайшей дистанцией от жилых единиц до ближайших территорий общественного обслуживания.

На основе этих критериев компьютер автоматически рассчитывает и маркирует многомерные показатели большого числа начальных вариантов. Затем проектировщик отбирает по результатам радарного сравнения решения для углубления и оптимизирует их в человеко-машинном взаимодействии с учетом интересов различных сторон. На завершающем этапе формируются векторная модель и проектные чертежи мезомасштабного городского дизайна.

3 Эмпирическая проверка: интеллектуальный городской дизайн тестового участка

3.1 Типичный пример «относительно свободной территории»

В качестве экспериментального образца выбран участок в городе Чучжоу. Он представляет обширную группу слабо освоенных городских окраин, которые в современных политических условиях становятся приоритетными территориями для разгрузки функций старого города и расширения новой застройки. На таких участках немного существующих объектов, обязательных к сохранению, и сравнительно мало ограничений, связанных со сложной структурой собственности или охраной наследия. Поэтому здесь можно в наибольшей степени реализовать пространственный замысел и провести эксперимент интеллектуального проектирования.

Исследование «относительно свободной территории» сначала позволяет выстроить базовый процесс интеллектуального динамического взаимодействия функции и морфологии. На этой основе в дальнейшем могут проводиться эксперименты в условиях большего числа существующих ограничений, чтобы постепенно сформировать зрелый метод, применимый в инженерной практике.

В настоящее время территория занята главным образом сельскохозяйственными, лесными и сельскими землями. В соответствии с планами вышестоящих органов ее предполагается преобразовать в земли городской застройки. До начала интеллектуального проектирования создается цифровая основа, оценивается ресурсный потенциал и сохраняются водные системы, зеленые пространства высокой экологической ценности, а также жилые и культурные объекты с удовлетворительным качеством зданий.

Геометрический центр каждого квартала принимается за координату, в результате чего создаются 155 пространственных агентов. Для агентов, функциональные или морфологические характеристики которых требуется сохранить, задается one-hot-кодирование [27], исключающее выполнение действий над ними в процессе итерации (рис. 4).

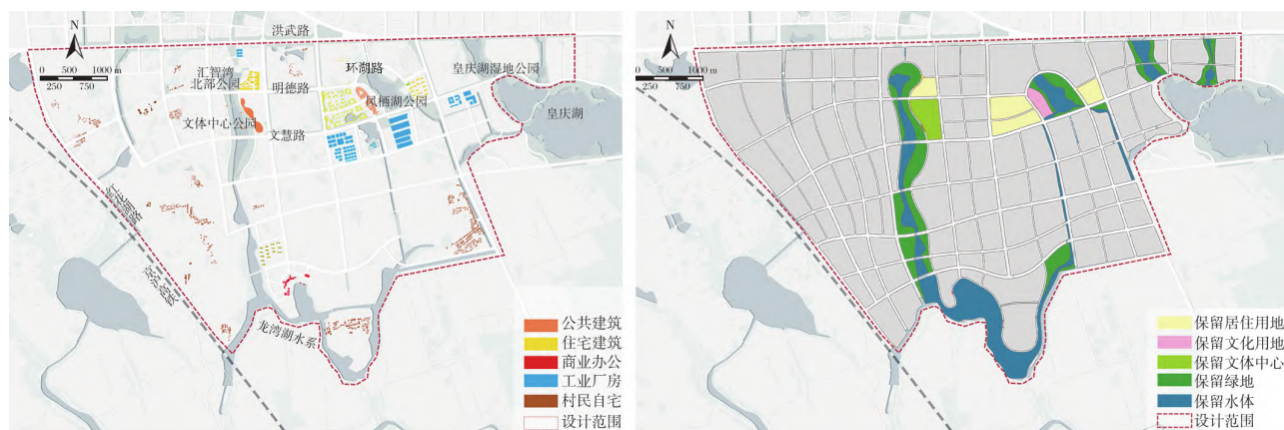


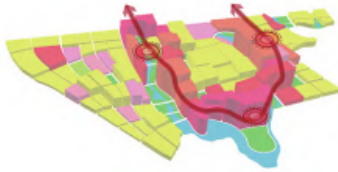
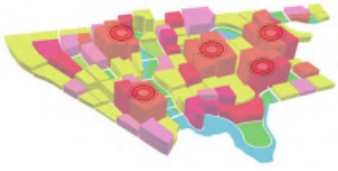
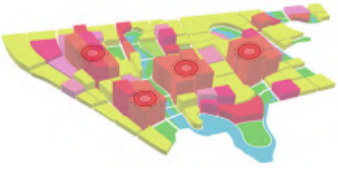
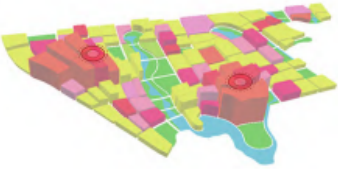
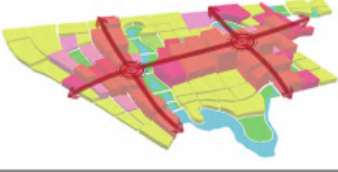
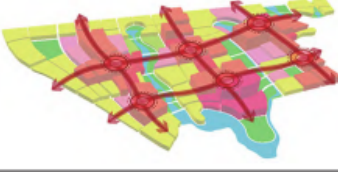
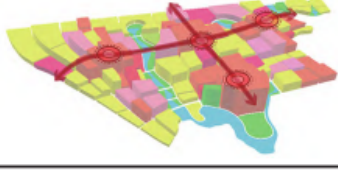
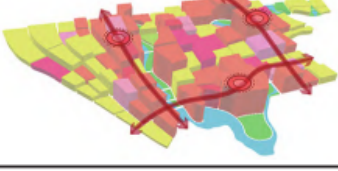
Рисунок 4. Существующие условия и цифровая основа тестового участка

3.2 Результаты интеллектуального городского дизайна на основе динамического взаимодействия «функция—морфология»

На основе разработанного маршрута для тестового участка автоматически создано пятнадцать проектных вариантов в рамках пяти режимов сопряжения (табл. 3).

Таблица 3. Варианты интеллектуального городского дизайна тестового участка

Режим сопряжения	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Высокое сопряжение	A-1	A-2	A-3
Концентрация вокруг ядра	B-1	B-2	B-3
Развитие вдоль оси	C-1	C-2	C-3
Функциональное доминирование	D-1	D-2	D-3
Морфологическое доминирование	E-1	E-2	E-3

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

3.2.1 Генерация решений в режиме высокого сопряжения

Итерационный процесс включает работу с точечными и линейными элементами. Пять дорожных пересечений, занимающих первые места по среднему значению серого соседних агентов, отбираются как сопряженные точки, а три главные и второстепенные магистрали с наивысшими значениями — как сопряженные линии.

По мере роста числа итераций степень пространственного совпадения повышается. Точечные элементы достигают наилучшего выигрыша примерно после 1 200 итераций, линейные — после более чем 500. Затем формируются различные случайные парные комбинации. Для получения более системного решения выбираются три комбинации с наименьшей суммой перпендикулярных расстояний от точек до ближайших линий — варианты A-1, A-2 и A-3.

3.2.2 Генерация решений в режиме концентрации вокруг ядра

В этом режиме высокая пространственная концентрация факторов производства формирует центральные узлы. Ранее развивающиеся ядра за счет перетока капитала, труда и других ресурсов

стимулируют развитие остальных кварталов. Функциональные центры и группы пространственных ориентиров в значительной степени совпадают, что максимизирует агломерационный эффект.

Итерация точечных элементов аналогична режиму высокого сопряжения и стабилизируется после более чем 1 200 циклов. Из результатов отбираются три варианта с высоким выигрышем и различным числом сопряженных узлов — В-1, В-2 и В-3. Различия в числе узлов приводят к заметно различающимся пространственным схемам; с увеличением количества узлов общая целостность структуры ослабевает.

3.2.3 Генерация решений в режиме развития вдоль оси

Осевая модель использует транспортную сеть для размещения кварталов с более общественными функциями и более выразительной морфологией. Она формирует линейную структуру, в которой ось стимулирует развитие всей территории.

После более чем 500 итераций линейные элементы постепенно образуют варианты с высокой степенью сопряжения. Для вывода выбираются три решения с максимальной функцией выигрыша — С-1, С-2 и С-3. Наиболее результативные варианты преимущественно имеют форму крестообразной оси или ее модификации; при прохождении оси через центральную часть ее эффект распространения и стимулирования оказывается выше.

3.2.4 Генерация решений в режиме функционального доминирования

В режиме функционального доминирования пространственная морфология формируется как адаптация к функциональной планировке, поэтому решающее значение имеет рациональность функциональной структуры. Чтобы использовать неопределенность машинной генерации как источник проектного вдохновения, на начальном этапе жесткое функциональное зонирование не задается, а алгоритм обучения с подкреплением самостоятельно исследует возможные комбинации.

На ранних итерациях землепользование распределено дисперсно, а хорошо различимая система функциональных элементов отсутствует. Примерно после 1 000 итераций структура становится отчетливее: формируются деловое ядро, центр общественного обслуживания и экономические коридоры. Затем пространственный решатель сопоставляет с ними соответствующие морфологические показатели и выводит три решения с максимальным выигрышем — D-1, D-2 и D-3.

В целом, если число функциональных линейных элементов превышает три, генерируемая морфология становится более однородной. Хотя она хорошо согласована с функциями, ее пространственная выразительность и идентичность снижаются.

3.2.5 Генерация решений в режиме морфологического доминирования

Под управлением стратегической сети в этом режиме сначала генерируется морфологическая схема, а затем на основе накопленных корреляций интеллектуально назначаются функциональные типы. В отличие от плавной общей структуры и локальных высотных акцентов, характерных для функционально доминирующих вариантов, здесь возрастает число высотных кварталов-ориентиров. Диапазон высот расширяется до 0-250 м, формируя более разнообразную ступенчатую композицию.

Примерно после 900 итераций закономерности колебаний формы становятся устойчивыми: выявляются группы высотных ориентиров и непрерывные полосы высотной застройки. После автоматического назначения функций выводятся три варианта с наибольшим морфологическим выигрышем — E-1, E-2 и E-3. Они характеризуются высокой функциональной смешанностью и не демонстрируют четкого зонирования, свойственного функционально доминирующим решениям.

На основе всех сгенерированных вариантов пятифакторная радарная система сравнивает эффективность отдельных решений и режимов сопряжения (рис. 5). В качестве исходного выбирается вариант E-3 морфологического доминирования, обладающий наилучшим интегральным результатом. После нескольких циклов обратной связи и человеко-машинной оптимизации формируется схема, в которой U-образная водная система служит пространственным каркасом; вдоль нее размещаются

общественные функции и здания-ориентиры, а от основного каркаса расходятся несколько ветвей развития.

Пример подтверждает осуществимость и возможность распространения интеллектуального метода на мезомасштабе. Особенно в сложной и многообразной городской среде он способен за короткое время предложить более богатые и научно обоснованные пространственные решения. Важно также, что варианты разных режимов не являются изолированными статическими состояниями: за счет корректировки параметров они могут динамически переходить друг в друга, повышая адаптивность и гибкость проектирования и лучше отвечая на меняющиеся городские потребности.

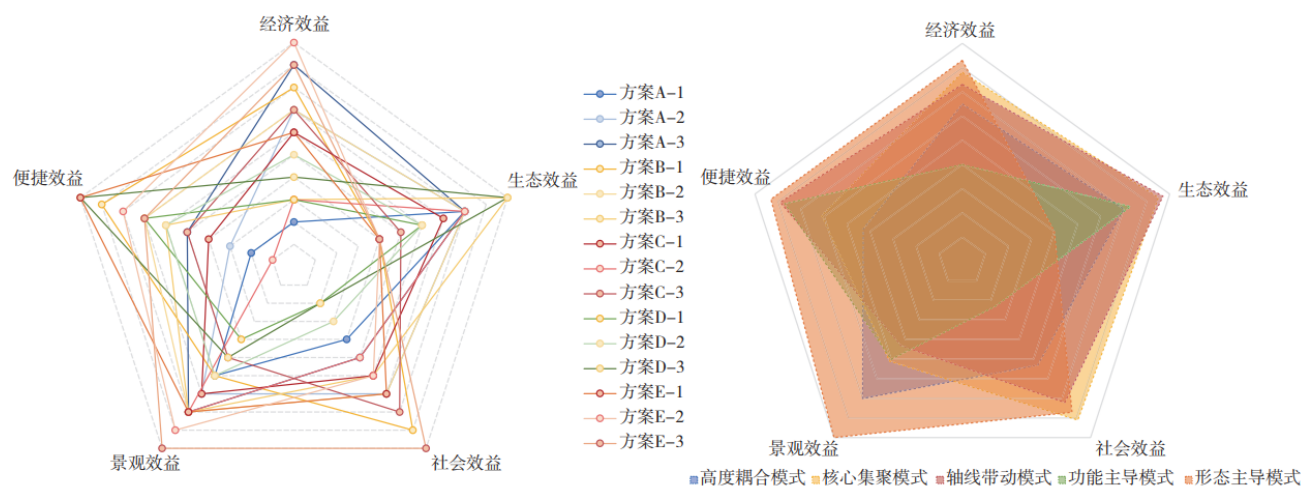


Рисунок 5. Радарные диаграммы оценки различных вариантов и режимов сопряжения

4 Заключение

По мере эволюции сложной городской пространственной системы взаимодействие функции и морфологии на мезомасштабе становится все более сложным. Исходя из концепции динамического взаимодействия «функция—морфология», исследование формирует универсальный интеллектуальный метод городского дизайна с применением алгоритмов искусственного интеллекта. Во взаимодействии проектировщика и интеллектуальной системы пространство переходит от беспорядка к порядку и от динамического состояния к относительно устойчивому. Тем самым моделируется процесс совместной игры, взаимного приспособления и эволюции функциональной и морфологической систем, отражающий развивающуюся природу городского пространства.

В условиях непрерывного технологического обновления цифровой городской дизайн, основанный на интеллектуальных технологиях, быстро развивается. С учетом того, как изменение способов производства и жизни перестраивает будущее городское пространство, необходимо глубже осознавать ключевую роль интеллектуальных инструментов. Творческое объединение человеческого знания и вычислительной мощности для проектирования качественной городской среды в разных масштабах, измерениях и сценариях, вероятно, еще долго будет оставаться важной научной задачей. Путь к ориентированному на будущее интеллектуальному городскому дизайну только начинается.

Примечание

① Обучение с подкреплением (reinforcement learning, RL) — метод машинного обучения, при котором агент в процессе взаимодействия со средой путем проб и ошибок получает «вознаграждение». Его основными компонентами являются стратегическая сеть (policy network), оценочная или критическая сеть (critic network) и марковский процесс принятия решений (Markov decision process, MDP). Разные действия агента приводят к различным сигналам вознаграждения, которые направляют его последующее поведение с целью получения более высокого выигрыша. На основе обучения одного агента развилось многоагентное обучение с подкреплением, в котором

несколько агентов сотрудничают для решения задач оптимизации в сложных высокоразмерных и динамических пространствах.

Список литературы

- [1] МИНИСТЕРСТВО ЖИЛИЩНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО И СЕЛЬСКОГО РАЗВИТИЯ КНР. Правила управления городским дизайном [S]. 2017. [на китайском языке]
- [2] TRANCIK R., GOODEY B., JIN Guangjun. Понятие и содержание городского дизайна [J]. *New Architecture*, 1990(4): 76-77. [на китайском языке]
- [3] WANG Jianguo. Четыре поколения парадигм развития городского дизайна с позиции рационального планирования [J]. *City Planning Review*, 2018, 42(1): 9-19. [на китайском языке]
- [4] BIAN Hongqin, CHEN Nan. Сорок лет руководящих принципов городского дизайна мезомасштаба: ретроспектива, осмысление и перспективы [J]. *Planners*, 2020, 36(15): 55-60. [на китайском языке]
- [5] SUN Yimin. Научная организация крупных городских проектов мезомасштаба: размышления о системе главного проектировщика [J]. *Contemporary Architecture*, 2022(5): 19-23. [на китайском языке]
- [6] YANG Junyan, LU Xiaobo. Промежуточный масштаб морфологии городского дизайна: проектное исследование «Девять путей Тунцзинь» в Наньтуне [J]. *City Planning Review*, 2019, 43(12): 106-116. [на китайском языке]
- [7] ZHANG Li, DENG Huishu, MEI Xiaohan, et al. Городская инженерия человеческих факторов: наука о проектировании качества пространственного опыта человека [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67(16): 1744-1756. [на китайском языке]
- [8] WU Zhiqiang, HUANG Xiaochun, LI Dong, et al. Академическая дискуссия «Влияние искусственного интеллекта на городское планирование» [J]. *Urban Planning Forum*, 2018(5): 1-10. [на китайском языке]
- [9] YANG Chao. Принципы городского дизайна новых городов в логике «инфраструктурализма»: структурная интеграция внешней и самоорганизации [J]. *Urban Planning Forum*, 2023(5): 45-53. [на китайском языке]
- [10] YANG Junyan, ZHANG Zhonghu, SHI Yi. Цифровая платформа общественного участия в городском дизайне для обновления: пример района Юэцзянлоу в Нанкине [J]. *Urban Planning Forum*, 2024(3): 74-81. [на китайском языке]
- [11] SHAO Dian, YANG Junyan. Анализ наложения многоосевой системы городской пространственной морфологии [J]. *Chinese Famous Cities*, 2023, 37(1): 71-78. [на китайском языке]
- [12] WANG Lin, TIAN Jian, XU Xiaonan, et al. Пространственная дифференциация и сопряжение сельских поселений уездного уровня с позиции «морфология—функция»: пример уезда Шань на юго-западе Шаньдун [J]. *Progress in Geography*, 2024, 43(9): 1730-1743. [на китайском языке]
- [13] YANG Tao, TIAN Ying, XU Yanjie. Интерактивное генеративное планирование и управление с применением цифровых двойников [J]. *Shanghai Urban Planning Review*, 2023(5): 4-10. [на китайском языке]
- [14] GAN Wei, WU Zhiqiang, WANG Yuankai, et al. Формирование теоретической модели городского дизайна с поддержкой AIGC [J]. *Urban Planning Forum*, 2023(2): 12-18. [на китайском языке]
- [15] ZHENG Degao, ZHU Wenjuan, LIN Chenhui, et al. Приоритетные и потенциальные территории Шанхая с позиции оптимизации функциональной структуры [J]. *Urban Planning Forum*, 2020(6): 65-71. [на китайском языке]
- [16] YANG Chao, LI Qiang. Структурированная формальная логика городского дизайна: развитие теории проектного анализа [J]. *Urban Development Studies*, 2024, 31(1): 31-41. [на китайском языке]

- [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] HU Xinyu. Количественное исследование пространства и видов деятельности в центральных районах азиатских мегаполисов с осево-ядерной структурой [D]. Юго-Восточный университет, 2016. [на китайском языке]
- [19] HE Yong, CHEN Yufan, ZHAO Jing. Функциональная трансформация и морфологическая эволюция пригородных сельских поселений в экономически развитых регионах Китая [J]. Journal of Human Settlements in West China, 2023, 38(5): 17-23. [на китайском языке]
- [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] SHAO Dian, YANG Junyan, SHI Beixiang, et al. От проектной схемы к системе регулирования: метод точной трансляции городского дизайна на уровне квартала [J]. City Planning Review, 2022, 46(10): 56-71. [на китайском языке]
- [22] ZHANG Xuchen, ZHAO Min. Истоки «исследований сопряжения» в городском планировании и анализ типичных ошибок [J]. City Planning Review, 2022, 46(6): 37-47. [на китайском языке]
- [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] ZHANG Yang, HE Yi. От раздельности к интеграции: логика формирования системы диагностики исторических районов на основе теории системного сопряжения [J]. Urban Planning Forum, 2024(3): 82-90. [на китайском языке]
- [25] XING Zhong, ZHU Jiayi. Оценка справедливости зеленых пространств на основе теории сопряженного координированного развития [J]. City Planning Review, 2017, 41(11): 89-96. [на китайском языке]
- [26] ZHAO Xuechun, JU Chunyan. Сопряженная координация парковых зеленых территорий и функционального пространства города и факторы влияния: пример Урумчи [J]. Arid Land Geography, 2024, 47(5): 898-908. [на китайском языке]
- [27] YAO Jiawei, HUANG Chenyu, FU Bin, et al. Исследование и практика проектирования, управляемого характеристиками ветровой среды, с поддержкой глубокого обучения с подкреплением [J]. Architectural Journal, 2022(S1): 31-38. [на китайском языке]

Получено после доработки: январь 2025 г.

Перевод при содействии ИИ