

分析、布局、优化——图论在建筑策划研究中的应用前景

Analysis, Configuration, and Optimisation: Prospects of Graph Theory Applied in Architectural Programming

郭淞, 庄惟敏*

GUO Song, ZHUANG Weimin*

郭淞

B.1997, 清华大学博士研究生

麻省理工学院可感知城市实验室访问

博士生

GUO Song

B.1997, PHD. Candidate, Tsinghua

University

Visiting PHD. Researcher, SENSEable

City Lab, Massachusetts Institute of

Technology

庄惟敏* (通讯作者)

B.1962, 清华大学博士

中国工程院院士

清华大学建筑学院教授

清华大学建筑设计研究院首席总建筑师

ZHUANG Weimin* (Corresponding

Author)

B.1962, PHD., Tsinghua University

Academician, Chinese Academy of

Engineering

Professor, School of Architecture,

Tsinghua University

Chief Principle Architect, the

Architectural Design and Research

Institute of Tsinghua University

zhuangwm@tsinghua.edu.cn.

国家重点研发计划

项目编号: 2022YFC3801300

本文图表除注明外均由郭淞绘制

定稿日期: 2024-02-02

设计科学

摘要: 建筑策划是根据总体规划对建筑本身的规模、性质、容量、性格等影响设计和使用的诸因素做深入的调查、研究、归纳分析,从而得出定性定量的结论和数据的过程,能够有效提升设计成果的合理性。但此前由于技术应用的局限,建筑策划依据进行推理的数据往往只能凭经验整合,成果的系统性有待提升。功能气泡图能够简明地用于空间布局的推敲和表达,一直是建筑策划的重要成果形式。基于图论的智能技术的发展带来了策划所用多源数据建立可解释关联的可能性,从而可以全流程地提升策划的科学水平。本文基于相关领域的前沿研究,梳理了当前可用以表示建筑策划所用多种信息的28种图表示类型,以及可在建筑策划分析、布局、优化不同环节融合图论方法提升策划效果的14个切入点。最后,对融合图论建立智能策划理论体系的优势和局限进行了述评,对融合图论的智能建筑策划框架进行展望。

Abstract: Architectural programming involves an in-depth investigation, research, and analytical synthesis of various factors influencing the design and usage of a building, such as its scale, type, capacity, and character. This process aims to derive both qualitative and quantitative conclusions and data, significantly enhancing the rationality of design outcomes. However, due to technological limitations in the past, the data used for reasoning in architectural programming was often integrated based on experience, and the systematic nature of the outcomes needs improvement. The functional bubble diagram, which succinctly facilitate the scrutiny and expression of spatial layouts, has always been a crucial form of outcome in architectural programming. The development of graph theory-based intelligent technologies now allows for the establishment of interpretable connections with multisource data used in programming, thereby scientifically enhancing the programming process throughout all stages. This paper reviews 28 types of graph representations currently available for depicting various information used in architectural programming, and 14 steps that can combine graph theory methods to enhance programming in analysis, configuration, and optimisation stages. Finally, it discusses the advantages and limitations of integrating graph theory and provides an outlook on the framework of intelligent architectural programming.

关键词: 建筑策划, 图论, 图神经网络, 复杂性科学

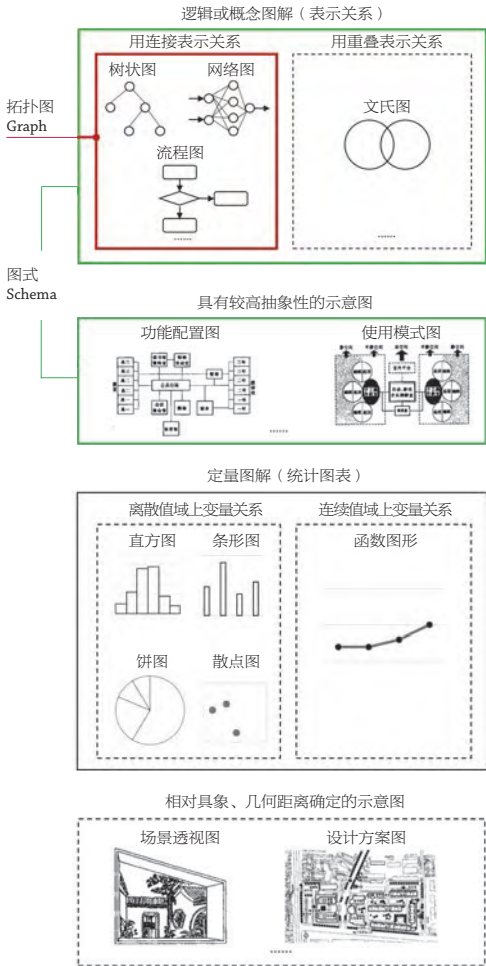
Keywords: architectural programming, graph theory, GNN (Graph Neural Network), complexity science

1 建筑策划研究中的图解、图式与图

建筑策划是根据总体规划对建筑本身的规模、性质、容量、性格等影响设计和使用的诸因素做深入的调查、研究、归纳分析,从而得出定性定量的结论和数据的过程,能够有效提升设计成果的科学性^[1]。建筑策划的主要成果包括对合理空间关系的设想、对完整设计流程的限定等,可以用“气泡图”、流程图等方式传达。而“气泡图”、流程图这些用连接来表达关系的逻辑图解根植于图论,它们将环境的特性、使用者的行动顺序等内容抽象出来,并图示为概念模型^[1-10],对于设计前期的条件分析和目标确定有很大的价值,是建筑师职业实践中常用的工具。

1 图解、图式、图的用法示例，具体示例引自参考文献[1][13]

图解 Diagram: 通过可视化方法, 用符号表示信息的图形的统称



建筑策划过程中涉及的图示概念包括“图解”“图式”和“拓扑图”^[1-2]。仅就成果形式而言, 图解、图式、拓扑图是逐渐缩小的概念(图1)。一般认为¹⁾表示信息的图示均可称为图解^[11-13], 包括逻辑图解、定量图解、示意图等^[13]。建筑策划研究中提到的“图式”, 一般是对心理图式即心理模型、认知结构的可视化, 具有一定的抽象性, 但并不一定是纯粹的逻辑图解。拓扑图则精确表达为点(node)和线(edge)之间通过连接关系构成的结构, 一般而言, 拓扑图上的线并不表示实际长度, 而仅表示邻接关系。

就应用场景而言, 图解除用于分析外, 还可在设计实践中用各种图形和文字达成以“解”沟通的过程和目的^[14]。图式则实为认知心理学、社会学等学科概念, 拉普卜特(Amos Rapoport)等学者对聚居空间中的文化心理图式进行了可视化^[15-16]。拓扑图则用以关联结构的表示、优化和基于关联结构的推理。

本文中的“图”, 即指拓扑图。图论以点和线之间的二元关系为研究对象, 提供了强有力的数学工具, 当现实世界的对象被表示为点, 对象间的关系表示为线, 对现实世界复杂问题的描述和求解也就转化为图上的计算问题, 从而可以利用图性质和算法得以解决^[17](图2)。空间句法^[18-19]就是一种基于图论对现实世界进行分析的方法。

此前由于技术发展的局限, 建筑策划结论得出所需依据的诸多信息往往只能依赖建筑师积累, 缺乏提炼与转化方法; 得到的规模、性质、空间关系等各方面结论也难以整合起来, 不同的图示之间可能存在冲突^[1], 不利于直接高效地辅助设计决策。

随着人工智能的发展, 图论与机器学习相结合后, 提升了智能分析数据间相关性的能力, 并在生成问题上有良好的表现能力^[17,20-21], 带来了策划多源数据建立可解释关联的可能性, 可能解决策划信息难以综合分析、成果表达难以整合一致的问题, 从而全流程地提升策划的科学水平。

因此, 有必要对基于图论的新技术应用于建成环境研究的新进展进行梳理, 并根据标准建筑策划框架和流程, 讨论当前可为策划研究所采用的图表示类型和方法, 并指出其应用的优势、局限和重要前景, 以为智能策划理论和技术体系的建立寻找可供借鉴的研究路径^[22]。

2 建筑策划研究相关的图表示类型

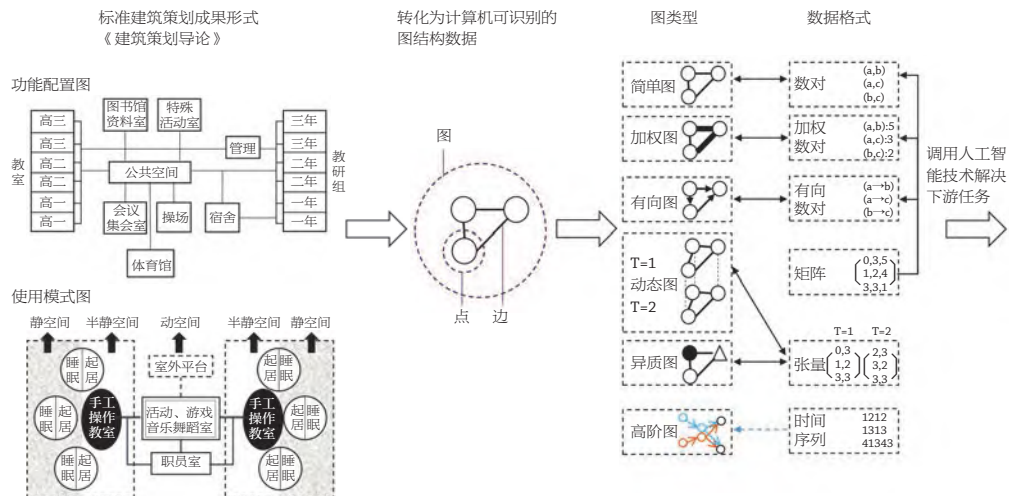
在建筑策划中, 对建筑所处的地域环境等外部条件、使用者的行为和特征等内部条件的调查和把握, 是建设目标和设计条件确定的客观依据, 内外部条件的综合协调也是做好建筑策划的关键^[1]。

设计项目相关的内外部条件复杂, 且条件间存在制约关系, 通过将不同的条件表示为拓扑图, 有可能实现条件间的综合, 为策划成果提供参考, 例如选择与使用者轨迹序列相吻合的空间序列, 可能提升建筑的利用效率。

根据图表示对象的不同, 可将策划信息的表示分为空间的图表示和行为的图表示两类(表1)。空间的图表示往往对空间实体进行抽象, 而行为的图表示则可能包括物理量、心理量相关性的分析呈现。前者有客观实体, 后者则侧重于呈现序列或逻辑关系。

空间的图表示对象主要包括设计项目所在的城市环境和建筑项目案例两种尺度。项目所在的城市环境表示为拓扑图后, 可以为项目的目标确定提供必要的背景信息, 如城市路网的密度

2 标准建筑策划成果形式和拓扑图的对应关系, 具体示例引自参考文献[1][67]



3 二维平面的图表示方法，改自参考文献[23]-[44]，“建筑”“组团”中底图引自参考文献[37][42]



表 1 图在环境行为研究中的表示类型

类别		尺度	图表示内容	节点表示内容	连边表示内容	参考文献
空间	二维	房间	房间形态	形式元素（房间边界、中心）	元素（墙、对角线）	[23]
		建筑	平面关系	房间	邻接（门、窗、墙、走道）	[24-35]
		建筑	功能关系	房间、组团	功能关系（共用设施等）	[36]
		建筑	楼层流线	建筑分区	连接（路径）	[37]
		组团	—	建筑单体	相似（空间场景）	[38]
		组团	聚落结构	户外公共空间、房间	邻接（路径）	[39-41]
		组团	聚落结构	户外公共空间、道路交叉口和转折处	邻接（路径）	[42]
		城市	城市服务设施网络	服务设施	距离	[43]
		城市	城市用地形态	地块、道路和土地利用边界、路口	邻接	[44]
		城市	城市路网	道路交叉口	元素（道路）	[45-46]
		城市	城市形态特征	道路	元素（道路的拓扑连接关系）	[45-46]
		城市	城市形态特征	城市路网图中的面	元素（道路）	[45]
	三维	建筑	三维体量	形式元素（顶点、边、面）	邻接（共点、共边）	[47]
		建筑内部	空间渗透关系	空间中的位置（可达点、可视点）	邻接（视线）	[48]
		建筑	建筑三维构成	三维空间单元	几何关系（邻接、穿插、嵌套）	[49]
建筑		建筑三维体量	三维空间单元	邻接关系和距离	[50]	
建筑		建筑三维体量	三维体素单元（voxel）	邻接	[51]	
建筑		建筑三维体量	三维胞体单元（cell）	邻接	[52-54]	
行为	肢体行动	人际	社交关系	人物个体	邻接（协作/互动）	[55]
		认知决策	个人	操作流程	操作命令	顺序
	社会心理	人际	社交关系	人物个体	邻接（协作/互动）	[57-58]
		—	风格关联	艺术家作品	相似（作品风格）	[59]
			知识图谱	概念实体	逻辑关系	[60-61]
			句子结构	词	共现关系	[62]
行为—空间关联	人一物	建模过程	操作命令、物体	逻辑关系（因果）	[56]	
		行为记录	人物个体、家具	使用（人一物）、路线（物—物）	[63]	
	轨迹—空间	人群轨迹	人群轨迹转折点	路线	[64]	
		出行模式	出行起/终点	出行（抽象）	[65]	

可以辅助项目选址和人口布局等；建筑案例的图表示则可以为项目提供直接参考，即使是不同规模的建筑，也可能遵循相似的全局或局部空间拓扑关系。

行为的图表示对象包括使用者间的互动关系和社会结构，也包括物理量、心理量间的关联。使用者的互动关系和社会结构被表示为图后，可以作为以促进使用者交流为导向的空间类型的评价依据。物理量、心理量间的关联则有助于揭示各类空间的构成机制和认知结构，对于空间的理解和设计具有重要的意义。

2.1 空间的图表示

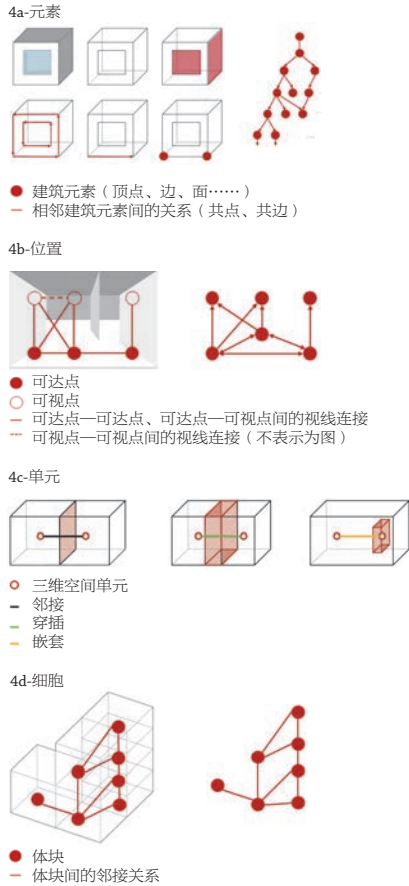
(1) 二维平面：房间、建筑、组团、城市

二维与三维空间均已有的图表示方法。对于二维平面而言，以整图代表的对象尺度进行分类，当前较为常见的有房间 [23]、建筑 [24-37]、组团 [38-42]、城市 [43-46] 4 个尺度（图 3）。

在房间尺度上，形状语法（Shape Grammar）以拓扑图的节点代表房间的角部或墙的端点，连边代表墙体，具有具象的形态意义。特别的是，房间本身被表示为中心节点，中心节点与房间角部的连接也被表示为虚线，同时表达了“实接”与“虚接”关系，严格来说属于类图表示 [23]。

在建筑尺度上，最常见的是以节点表示房间、连边表示房间邻接的户型表示 [24-35]，常用于住宅建筑的平面分析和生成 [24-28,30-35]。图数据结构的点、边还可承载空间的多维特征，使同一拓扑图上的点、边可能分为不同的类型。如点表达不同功能的房间，边表达门、窗、墙等不同类型的房间关系 [24-27]，使得空间的特征和属性可以更好地在图上表示。对于大型公共建筑而言，空间布局则通常依赖于分区间的功能关系或流线关系，因此这一尺度建筑中的图通常表示使用节点和功能组团，连边或在功能意义上表示组团间的逻辑关系 [36]，或表达流线疏散关系 [37]。

在组团尺度上，以节点代表聚落中的关键空间（公共空间、道路交叉口等） [39-42]、连边代



表路径的方法，能够有效揭示聚落结构^[39-42]。

在城市尺度上，城市路网所承载的城市形态是常见的图表示对象。尽管以节点表示道路交叉口、连边表示道路的路网结构图^[45-46]更容易理解，但该路网结构图的对偶图（dual graph）²⁾，即以节点表示道路、连边表示道路间的拓扑连接关系则被认为能够更显性地呈现城市形态特征^[45]。城市邻接图（urban contiguity graph，简称 UCG）可以表达城市空间布局要素之间的拓扑关系，地块（空地、已规划用地）、路段（道路、土地利用边界）和路口均被表示为节点，连边则表示要素间的邻接关系，便于相对具体地呈现城市空间布局，进行动态规划^[44]。

总体而言，当前已有的空间图表示方法在房间、建筑、组团、城市不同尺度上对空间邻接关系进行了表达，并探索了空间形态和空间结构特征的有效呈现方式，但仍主要集中于住宅、城市地块等对象中较为显性的几何关系，对于流动空间、非线性空间等复杂空间关系的平面表示尚有待研究。

（2）三维空间：元素、位置、单元、细胞

不同于二维平面，三维空间存在更为复杂的嵌套关系，元素的层次和数量较二维平面也往往有所提升，寻找巧妙的建图逻辑成为表示的关键。相较于二维平面可以图表示对象的尺度区分，三维空间的图表示中节点表示的对象更能够反映建图逻辑，主要可分为元素、位置、单元、细胞 4 类（图 4）。

以节点表示几何元素（顶点、边、面等）的层次化体量表示^[47]更符合计算机图形学的逻辑，能够有效表达三维几何体量及其细部形态。

以节点表示空间位置，陆毅等提出了一种目标可视性图论分析方法，即将人在空间中可见和可达的位置表示成点，空间位置间的视线和流线联系表示为连边，将空间场景表示为拓扑图，更适合用于研究博物馆等场景中特定空间元素的可视性对人的行为的影响^[48]。

以节点表示空间单元，谢晓晔、丁沃沃以生成能够提供丰富感知体验的建筑空间为目标，提出了建筑流动空间的图表示方法。考虑到建筑空间丰富体验中的渗透关系，将空间划分为彼此嵌套、穿插和邻接的三维单元用节点进行表示，更有效地转译了动态空间体验的构成机制^[49]。

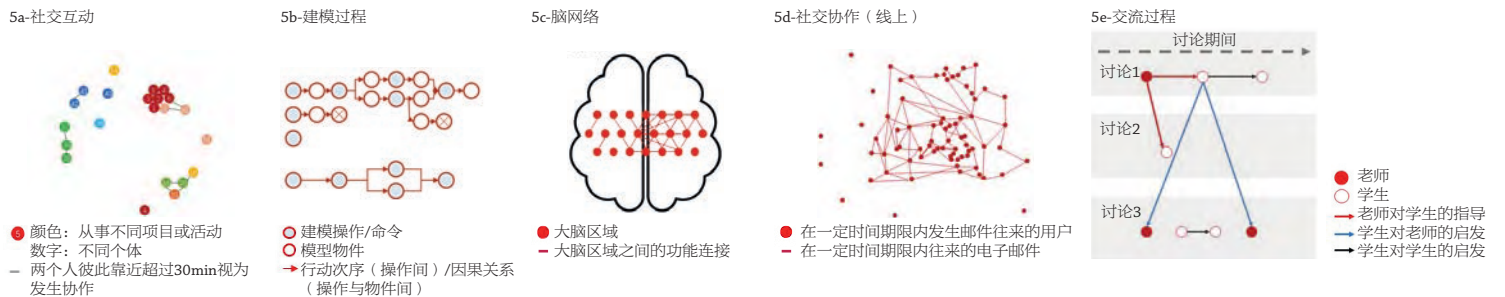
以节点表示三维胞体（cell），瓦希姆·扎比（Wassim Jabi）等基于非流形拓扑（non-manifold）³⁾表示三维体量，将三维体量理解为胞体的邻接组合，节点则表示一个胞体单元^[52]，适合三维体量关系的分析^[53]。

2.2 行为的图表示

可作为策划参照的行为信息既包括外显的肢体行动，也包括内在的心理体验和经验^[1-2]。外显的行动包括空间使用、社交互动、移动出行等，心理体验和经验则包括认知决策、经验记忆、文化心理等（图 5）。

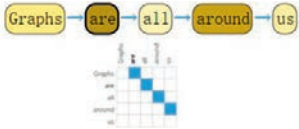
其中，外显肢体行动如空间使用、社交互动、移动出行能够直接反映于个人或人群的动作和位移。如将通过靠近和停留识别的人群协作表示为图，使用节点代表从事不同项目或活动的个体，连边则表示发生协作（识别两个人彼此靠近超过 30min）^[55]。

除外显肢体行动外，个人决策和人群间的协作、沟通过程等也属于行为的范畴，其图表示对于设计决策研究也有一定意义。如将人使用软件的建模过程表示为图，将操作命令表示为节点、操作次序表示为连边，从而可以对设计行为序列进行研究^[56]；麻省理工学院可感知城市实验室（SENSEable City Lab）在研究中将邮件用户表示为节点，描述了用户间邮件往来反映的合作网络，从而进一步分析线下共同办公的影响^[57]。Hadas Sopher 等则将设计教学中的师生表示为节点，将师生间在教学过程中的互相启发表示为有向连边，解析了传统意义上难以言传的设计教学过程^[58]。

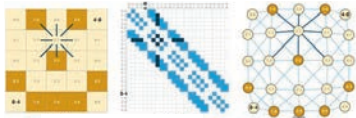


- 6 文字、图像、分子、社交网络表示为拓扑图（邻接矩阵）的方式，引自参考文献[66]

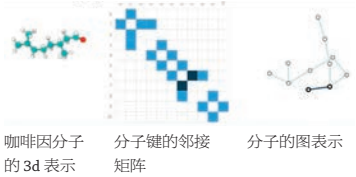
6a-文字表示为图



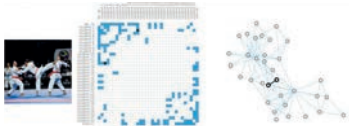
6b-图像表示为图



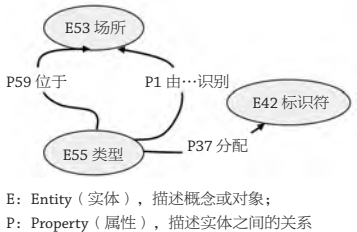
6c-分子表示为图



6d-社交网络表示为图

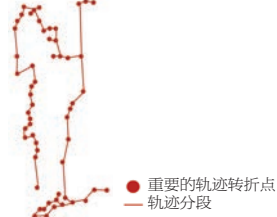


- 7 知识图谱的表示方式，改自参考文献[60]



- 8 行为—空间关联的图表示方法，改自参考文献[63-64]

8a-时空轨迹



8b-人境交互



- 9 图表示类型和计算任务有潜力解决的建筑问题，改自参考文献[17] [67]，并提出可表示的建筑信息和可解决的建筑问题，高阶图图示引自参考文献[67]

实际上，除确定人物主体的行为外，文化、知识、艺术风格^[59]等社会心理也已有一定数量的图表示方式。文本可通过以词为节点^[62]，词语间的共现关系或语法逻辑作为连边被转化为拓扑图，图像可通过以像素或图像中的实体为节点被转化为拓扑图（图6），从而为对设计规范文本、案例图像风格进行分析并转化为设计约束条件提供了可能。知识图谱（Knowledge graphs，简称KGs）则将知识库（Knowledge bases，简称KBs）表示为知识实体之间关联的有向图^[60]（图7），可以用来表示建成环境空间要素间的层次关系^[61]，从而可以为建成环境功能信息和复杂模型的表现提供基础。

以外显肢体行动、认知决策过程和社会文化心理为代表的环境行为研究相关行为类型的图表示化，可能为空间条件、设计原理和约束的得出提供参考，尚需探索与空间建立有效联系的方式。

2.3 行为与空间耦合的图表示

空间与行为均可表示为图，使得将空间与行为两种异质化的元素表示为同一张图上的节点，直接呈现空间使用模式成为可能（图8）。

在使用者尺度上，行为与空间的耦合作用可以通过人与空间要素的交互关系^[63]或移动轨迹的拓扑化^[64]加以表达。

在人与空间要素交互的层面，在将人与物表示为同一张拓扑图上的节点时，操作指令与物体产生的因果关系^[56]、人物对家具等要素的靠近和使用^[63]便可被呈现出来，可能进一步为空间要素配置提供参考。

在移动轨迹拓扑化的层面，时空轨迹图通常以轨迹起止点、转折点作为图上节点^[64]，拓扑图呈现出了在一定程度上受到既存空间影响的移动模式，其模式挖掘对空间布局和流线设计有一定借鉴意义。

在社会尺度上，当空间拓扑图与事故风险、道路时空特征等属性信息进行共同编码^[65]时，就可能利用图结构来捕捉地理空间和时间维度信息，服务于交通风险预测等社会行为研究。

在技术层面，图数据结构^[17,67]在环境行为研究的对象表示中具有很大潜力。动态图（dynamic graph）可表达时序变化信息，可能用以表示使用者行为序列，高阶图（higher-order graph）则有可能建立多种使用者、多重时序等丰富信息的关联表示。

在建立表示后，既可以对整个拓扑图进行分类，用以挖掘使用者行为模式、归类案例空间结构；也可以预测节点间的连接关系、分析节点类别，用以预测房间功能及连接关系等（图9）。

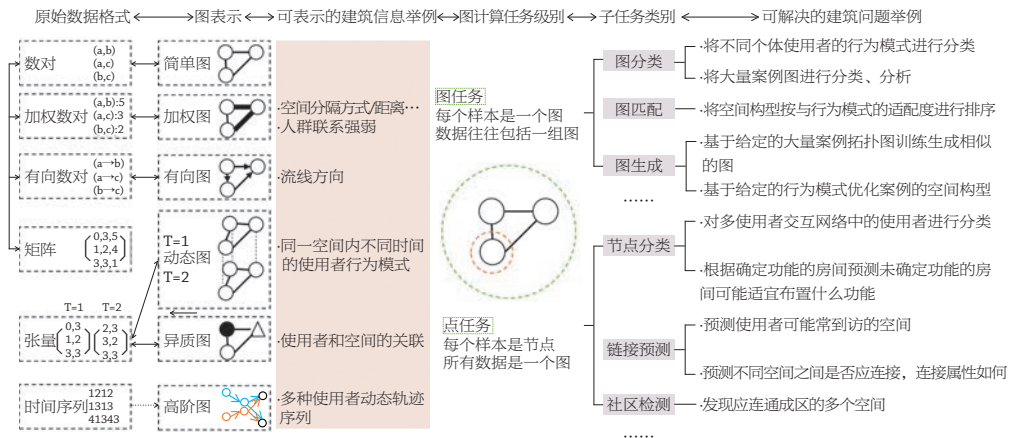
行为机制与空间构型借助图论达成深度匹配和耦合，是极具潜力的议题。

3 可融合图论的建筑策划环节

建筑策划的主要环节包括建筑目标的设定、建筑项目外部条件的把握、建筑项目内部条件的把握、空间构想、技术构想、经济策划、报告拟定^[1]。其中，建筑目标的设定、内外部条件的把握属于对信息的综合分析，空间构想、技术构想则属于对主要空间关系和属性的布局，经济策划和报告拟定则基于对初步方案的评价和优化，由此又可概括为分析、布局、优化3个主要环节。

当前，建筑策划的分析、布局、优化环节中即有一些未被技术实现的空白点：分析环节中，外部城市环境信息难以向建筑设计有效传导，即有同类案例经验难以结合使用模式被充分解析有效复用；布局环节中，环境限制和约束等功能需求难以直接反映于方案布局，方案布局的可控性和建筑师经验的参与度尚难以寻找到相平衡的方法；优化环节中，方案的迭代优化往往基

9



于单一指标,难以充分考虑实际项目的多指标评价因素和使用者的偏好。

图论表示多维信息的能力有助于建筑策划的多维分析,丰富的图算法则可以辅助条件限制下方案的求解,图深度学习则有助于在考虑信息间相关性的前提下实现方案的预测和优化。

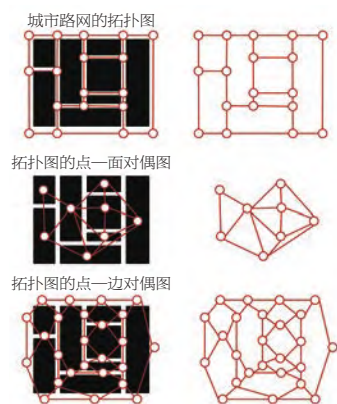
因此,本文从建筑策划分析、布局、优化的主要环节出发,从使用图论原理及方法的建成环境学科研究中归纳出 14 个可提升策划智能化水平的研究要点,希望通过融合图论,增强建筑策划全流程的效能。

这部分研究可概括为基于认知的空间分析、基于需求的空间布局、基于偏好的空间优化 3 类较为突出的主题(表 2),认知、需求、偏好等行为信息作为理解空间的背景、布局空间的条件和优化空间的反馈,拓扑图则使得关联可以被建立。

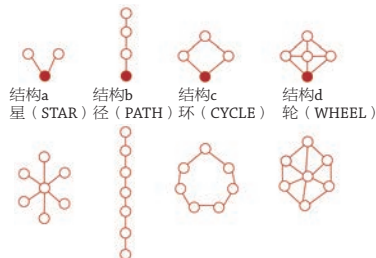
表 2 可融合图论的建筑策划研究环节

研究类型	主题	研究内容	参考文献
基于认知的空间分析	城市环境分析	城市形态分析	[45-46] [68]
		城市资源配置分析	[43]
		城市社会经济特征分析	[65] [69]
	案例机制解析	建筑平面特征分析	[28-29]
		建筑三维体量分析	[54]
基于需求的空间配置	空间内容确定	组团特征分析	[38-41]
		公共设施选点	[70]
	空间布局求解	设施属性确定	[70]
		住宅平面求解	[33-35]
		最短路径求解	[71-72]
基于偏好的空间优化	评分选优组合	三维体量布局求解	[36] [49-51]
		逐步概率预测	[24-26]
	布局迭代细化	评分子图组合	[32]
		用地布局生成	[44]

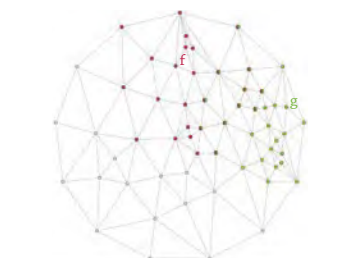
10 城市形态的不同图表示方式,改自参考文献[45]



11 比尔·希利尔 (Bill Hillier) 推导出的 4 种基本图结构单元和其组合,改自参考文献[68]



12 15min城市视角下公共设施网络内对设施可达性的分析,引自参考文献[43]



注:绿、红点代表能够在15min内到达服务设施g、f的节点,半绿半红点则代表能够到达两处设施都少于15min的节点

3.1 基于认知的空间分析

使用拓扑图作为表示与分析工具,可以更直观地呈现城市形态结构或建筑空间关系,并可基于中心性 (centrality)、度 (degree) 等图性质计算进一步反映对象的复杂性、连通性等特征水平^[46],从而解析空间规律。

(1) 城市环境分析

城市环境是建筑项目存在的背景,其形态结构、资源配置和社会经济特征直接影响着公共建筑项目的规模、性质、容量。对城市环境进行图表示和分析有助于其空间结构的揭示,并为与经济学等领域结合进一步分析社会经济等现实因素^[46]提供了基础。

影响建筑项目定位的城市环境属性主要包括城市形态、城市资源配置和城市社会经济特征。城市形态影响了建筑基本形态特征和流线结构的布局,资源配置和社会经济特征则影响了建筑定位、规模、性质的确定。

对于城市形态分析而言,城市路网的拓扑图表示和点面对偶图、点边对偶图等多种对偶图表示使得对城市形态结构的分析更为直观^[45-46](图 10)。可反映多尺度对象整体结构和整合度 (integration) 等特性的空间句法^[18-19]也可视为基于图论的方法。比尔·希利尔 (Bill Hillier) 近年对如何突破空间句法便于揭示和分析结构,而不便于评估结构差异对城市经济或社会绩效影响的潜在局限也进行了讨论,推导出 4 种可描述的图结构单元(图 11),基本单元及进一步组合的图结构类型具有更鲜明的属性特点,因此更便于评估和预测^[68]。

对于城市资源配置分析而言,将城市公共设施表示为节点,设施间的距离表示为连边,能够服务于城市资源便利性和可及性的分析^[43](图 12)。

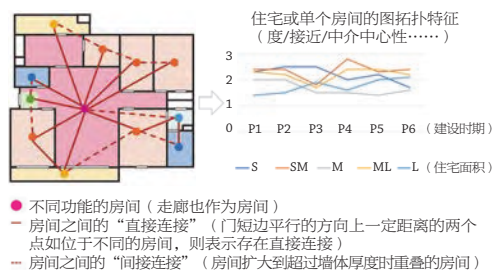
对于城市社会经济特征分析而言,对城市出行模式、地理邻域和功能属性^[65]的建图和多图耦合则可以帮助政策制定者、城市规划师和学者进行城市多维因素相互作用的深入剖析,提升决策和规划的科学性水平。在行为科学的视角下,图神经网络已经被用于行为的预测,如交通风险预测^[69]、行动序列预测等,这部分对于行为的推理研究结论、对于设计具有有益的参照意义。

(2) 案例机制解析

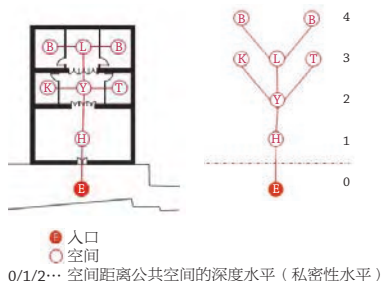
对同类建筑项目经验的深入解析是建筑策划的重要参照来源,这包括对案例空间布局的结构揭示,也包括与使用者评价、认知结构等行为信息关联起来进行深入的机制剖析以增强对案例构成规律和评价导向的理解。

对于建筑案例而言,图已应用于二维平面和三维体量的表示与分析。建筑平面分析多见于住宅等具有明确分隔的空间类型^[28-29],多通过平面图识别将房间表示为节点,房间之间的

13 图方法用于住宅平面特征分析, 改自参考文献[28]



14 合理平面 (Justified Plan Graph) 表示住宅空间的私密等级, 改自参考文献[40]



直接或间接连通关系表示为连边, 进一步计算度中心性、介数中心性、接近中心性 (degree centrality, betweenness centrality, closeness centrality) 等特征值分析构型特点^[28] (图 13), 或对拓扑图进行聚类, 在得到模式的同时还可反映案例的类内和类间差异^[29], 与时间、文化等因素综合考虑服务于社会文化心理的解析。

其中, 合理平面图 (justified plan graph) 将拓扑图的不同深度呈行列式展开 (图 14), 能够直观地识别空间节点的深度水平, 常用来体现和分析空间的私密程度^[39-41]。在聚落结构分析中, 也可以直观体现公共空间向私密空间的过渡, 从而描述和分析聚落结构特征和时序演变^[39]。

拓扑图还可以表示建筑组团在视觉认知上的结构。通过将场景间的相似性可视化为地图上的空间连线, 相似度反映为连边的粗细水平, 可以从视觉感受到的空间特征和空间丰富度对组团特征进行分析和揭示^[38]。

在建筑三维体量分析中, 基于非流形拓扑表示和无监督图级表示学习 (unsupervised graph-level representation learning), 可以将建筑体量表示为三维胞体间的关联, 从而清晰地揭示建筑的三维空间关系如建筑与地面的关系, 实现体量的图表示和聚类分析^[54] (图 15)。

3.2 基于需求的配置

图作为对象属性和布局的求解工具, 可上溯到 1960-1970 年代甚至更早^[33-34]。图论中的经典数学问题和算法可以辅助于在考虑限制条件和几何约束下对节点内容、性质和布局进行确定^[70,73], 结合多代理模拟等技术, 进一步地将空间之间的作用关系作为条件纳入求解过程, 服务于空间布局的得出。

(1) 空间内容确定

城市规划中的优化问题主要包括城市交通、资源分配和基础设施布局等。

寻路 (Pathfinding) 等图算法可辅助于寻找两节点间最短路径、给定节点与图中其他所有节点间的最短路径等^[70,73], 图染色问题等经典算法有助于避免相邻节点的属性重复 (图 16), 寻找图中心的算法可以在根据交通可达性确定公共服务设施位置时发挥作用。

图作为优化求解工具, 相对更适宜解决给定数理条件下的规划布局问题, 需要把设计限制转化表达为数学条件, 因此目前相对多用于管网、地下路径等限制条件的层次关系相对比较简单的问题, 对于建筑设计问题复杂约束条件的建模相对简单。

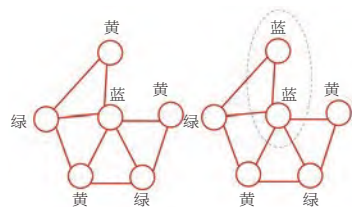
(2) 空间布局求解

日本建筑计画研究将图论与遗传算法结合, 在住宅平面的优化布置上进行了持续的探索^[33-34]。这类研究又大致有启发式方法、目录型列举法、搜索型列举法^[34]等, 共通思路是先枚举一定范围 (如给定节点数量上限) 内的可能连接结构, 加入方位等限制条件后, 在给定的时间范围内搜索并记录可接受的平面形式^[33-35] (图 17), 具有求解和相对择优的特点。

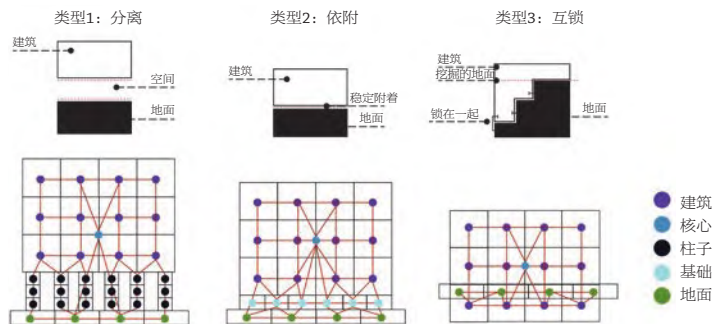
在三维体量和空间的生成上, Cemre Cubukcuoglu 等分析了医院功能单元之间的邻接性关系, 并使用关系图进行表示 (图 18), 将医院布局问题理解为房间布局和走廊生成两个主要问题的组合进行求解^[36]。钟喜明等提供了一种基于模拟迭代地优化空间三维体量布局的方法, 将体量单元间相邻需求的程度、体量单元和环境因素之间的关系表示为空间中的连边并进行模拟, 通过迭代使单元彼此达到更为紧凑的状态作为最终的体量布局^[50]。在相对较少考虑环境制约和功能关系的语境下, 使用图神经网络表示三维体素⁴⁾单元之间的约束关系, 可以实现在输入部分体素情况下对完整符合逻辑的体量的自动补全。这辅助解决了建筑设计中往往只有部分体量受到明确的项目限制条件约束, 其他体量往往基于几何合理性或常规操作进行补全, 建筑师建模过程中存在大量精力浪费的问题^[51]。

在考虑到空间丰富嵌套关系的维度上, 谢晓烨、丁沃沃等基于对建筑流动空间的图表示,

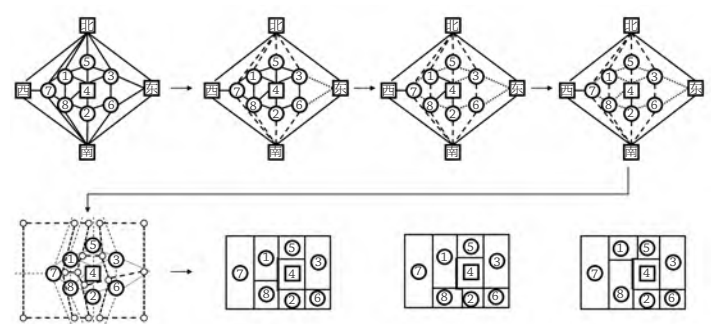
16 借助图论分析节点属性, 使相邻节点的属性不同, 改自参考文献[70]



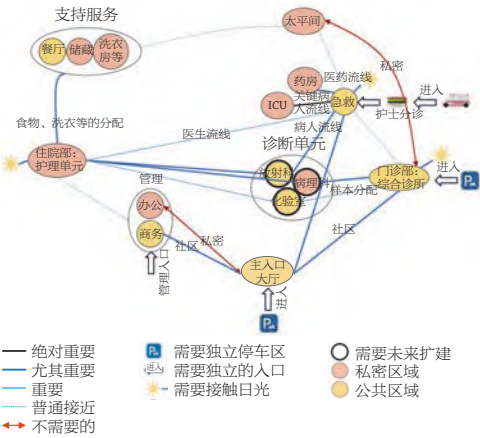
15 图方法用于建筑和地面的三维关系分析, 改自参考文献[54]



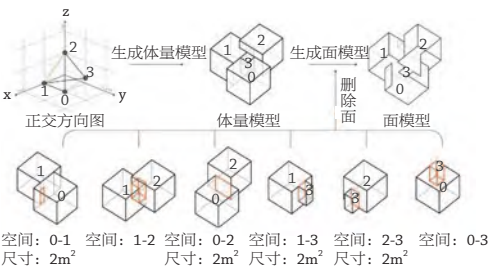
17 图方法用于限定条件下的住宅布局求解, 改自参考文献[34]



18 医院建筑功能单元的属性和相互关系拓补图, 改自参考文献[36]



19 基于正交有向图生成嵌套空间体量的过程, 引自参考文献[49]



提出了一种以生成提供丰富感知体验的三维空间为目标的方法 (图 19), 将住宅空间理解为空间单元的邻接、穿插和嵌套关系, 基于正交有向图 (orthogonal orientation digraph), 生成体量和面模型^[49]。

3.3 基于偏好的空间优化

当前建筑策划任务书风险评价、案例聚类^[74-76]等技术已能够为决策风险提供预警, 但尚难以给出经验范畴之外的更优方案, 策划的需求和目标逐渐提升为追求更符合决策目标的更优解。

结合神经网络, 有可能将平面布局的“条件—求解”过程转化为“学习—生成”过程, 通过对案例的学习, 基于更隐式的特征而非人工给定的有限条件进行生成, 且可以在一定程度上考虑融合使用者偏好, 从而定向地得到更优的空间布局方案。

(1) 评分择优组合

在平面布局的生成上, 当前结合图论和神经网络进行的建筑平面生成研究主要集中在数据相对充足、空间分隔比较明确的住宅空间^[24-26], 存在多种研究路径, 并不都以拓补图为输入对象^[77], 但多利用了图的邻接关系。如使用基于像素图的方法, 但以一定的次序在给定边界内逐个确定房间类型和位置^[30]等。

研究在利用案例的方式上大致可分为两类, 一类基于案例与当前方案的相似性比较^[24-26], 一类则基于案例的评分提取与特定评分最相关的子图 (subgraph)^[32]。

相似性比较的方法 (图 20) 如 Viktor Eisenstadt 等持续研究的“FLEA” (find-learn-explain-adapt) 工作流, 基于找到与当前正在设计的房间拓补结构最相似的案例进行学习, 对当前设计的下一步 (添加、删除、修改房间类型或房间形态) 提供建议^[24-26]。

子图组合的方法 (图 21) 如 Imdat As 等先将案例的宜居性等属性进行评分, 利用神经网络发现其中潜在的与特定评分属性更相关的局部组团, 将高分组团组合为新方案, 以实现给定目标下的理想方案生成^[32]。

(2) 布局迭代细化

尽管城市空间的要素数量较建筑空间更多, 但其评价指标和抽象模型相对更为简明。清华大学电子系、规划系基于 15 分钟城市圈的背景视角, 提出了一个结合图神经网络和强化学习技术的框架, 用以辅助城市规划师完成城市空间布局的设计^[44]。

这一研究将城市空间布局描述为一个动态图上的序列决策过程, 使用由服务设施可达性、公园可达性和路网效率 3 个指标相关的奖励函数对当前步骤的布局进行评估, 指导空间布局的优化^[44] (图 22)。

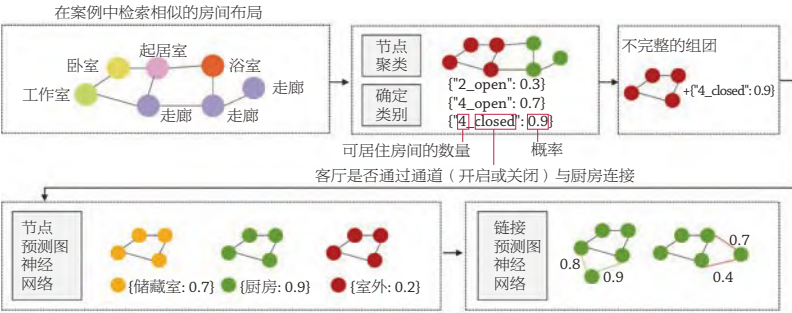
尽管基于图论的生成方法更能够将设计中的限制条件纳入考虑, 但仍面临可用数据集的问题^[77], 且建筑设计问题常常具有更复杂的流程, 如何将单一任务的解决有效组合起来^[77], 真正提升设计过程的效能, 仍是尚待研究的问题。

4 融合图论的智能策划框架与前景

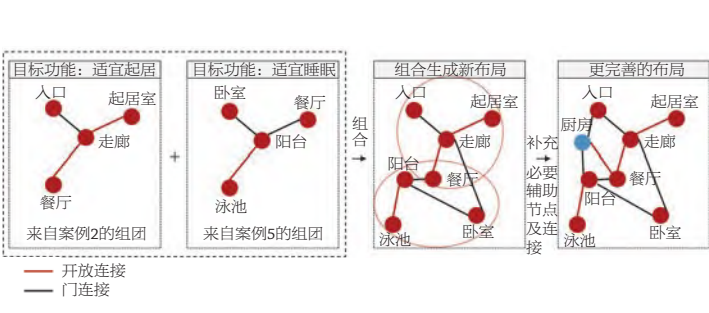
拓补图以抽象获取强大的表示能力, 能高效地分析复杂结构的基本属性, 并在空间性中纳入了社会性和物理距离上的灵活性^[78], 使得从交通工程、社会研究和经济学等使用网络模型来研究现实的众多学科中汲取知识成为可能^[46], 这在解析行动顺序、认知机制、社会关系以探索其与空间的关联上具有很大的潜力。

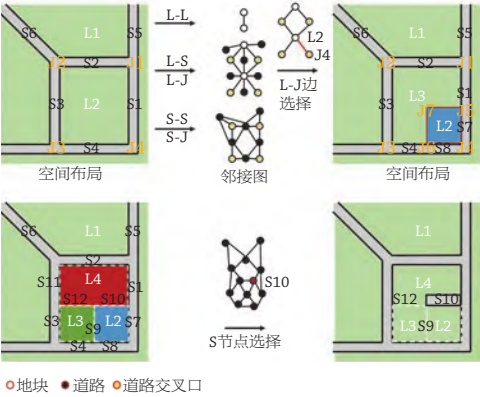
而在应用于建筑设计项目的决策时, 图方法常常使设计问题的条件和关联得以表达出来, 也有利用图性质辅助求解的能力, 加之基于图论的智能技术逐渐增强设计生成的“学习”能力, 可能具有从追求设计形式保真转变为追求设计意图保真^[79]的过程。

20 基于案例拓补图相似性比较的住宅平面生成方法, 改自参考文献[26]



21 基于高评分子图组合的住宅平面生成方法, 改自参考文献[32]





这正与建筑策划对科学合理的设计意图、设计前提的推导相吻合, 因此, 融合图论提升建筑策划的智能化水平, 建立智能策划的理论框架和技术路径是很有必要的。

4.1 融合图论的智能策划框架

标准建筑策划中自目标设定至报告拟定的流程, 在融合图论后可能具有更好的信息传递性, 策划框架中的各类信息可以被以拓扑图的方式整合分析, 技术属性、经济属性等指标也可成为附着在图上的特征信息被整合评价和呈现。由此, 建筑策划环节间的关系可能发生变化, 由“环节”转为更综合的“模块”, 策划成果的预评价将与策划过程产生更直接的反馈。多源数据整合分析、综合因素智能生成、动态评估前馈调整将成为智能策划的主要特点(图23)。

在具体实例上, 融合图论的智能策划路径根据标准建筑策划流程中的关键点, 由内外部信息的图结构转化、策划成果的智能生成与比选、决策过程的动态调整和优化3部分核心内容组成(图24)。

其中, 内外部信息的图结构转化意在将可作为设计素材的既有案例和规范等“硬性”要求, 和使用者行为模式与模糊偏好等“软性”条件进行智能图表示, 从而可以实现条件合理性的自检验, 并综合得到项目需求条件图拓扑关系。

策划成果的智能生成与比选基于项目需求条件的图拓扑关系, 对既有案例的图拓扑结构进行筛选, 得到满足需求的既有构型, 并优化得到更符合需求的相对理想构型。

决策过程的动态调整和优化则面向空间构想成果的可行性和可调性, 综合经济可行性、技术可行性、利益相关者评价等因素对上一步得到的理想构型集进行排序, 并基于评价结果与构想条件之间的关联挖掘, 实现方案的评分预测和动态调整。

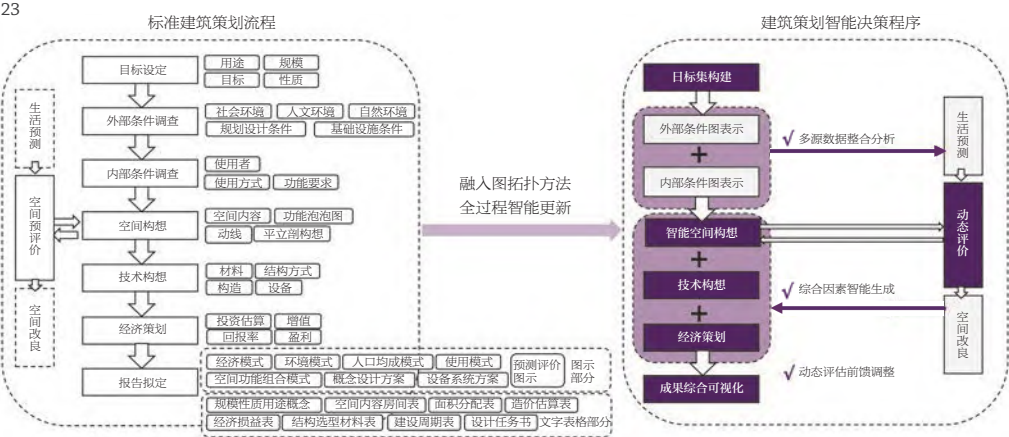
4.2 难点

尽管图论已在分析、布局、生成等不同环节中有所应用, 但其真正融合于建筑策划仍存在一定的难点。这与拓扑图的固有特点相关, 也受到基于图论的智能技术发展情况的影响。

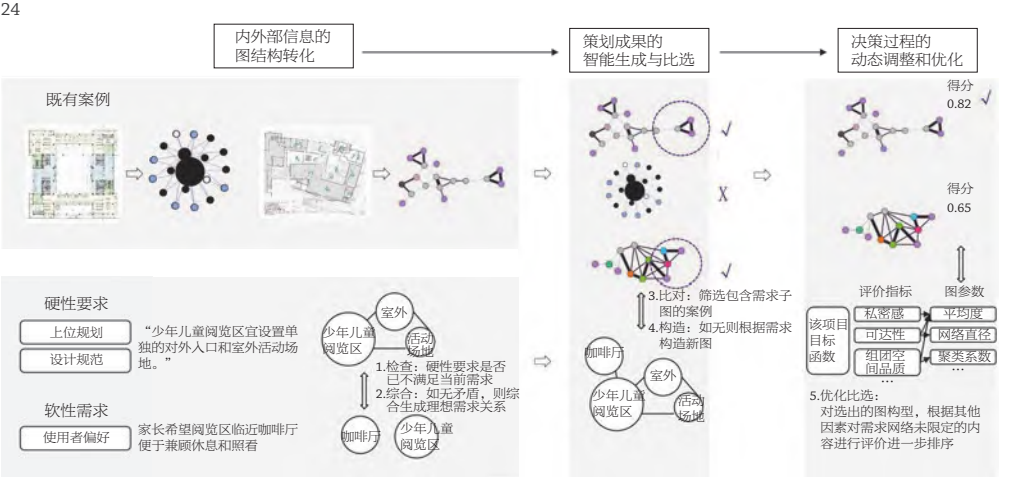
拓扑图难以反映缺失的要素和连接, 在可视化大型数据时可读性也将大幅下降。拓扑学相较于欧式距离更关心连续性的特点也使得基于图方法得到的空间关系向具体空间形态转换时面临难度。图神经网络等基于图论的人工智能技术当前也有网络深度、可扩展性等尚在研究的问题^[17,20-21]。

尤其是图方法和相关智能技术的使用, 还需要与建筑学理论和问题分析相配合。拓扑图的

23 基于标准建筑策划流程的图拓扑智能建筑策划流程, 标准建筑策划流程引自参考文献[1]
24 融合图论的智能策划路径



- 注释
- 1) Peter Eisenman对图解有更复杂的界定。他在《Diagram Diaries》中提出, “它(图解)是一种表意符号, 但不一定需要抽象。图解应该是事物的再现而不是事物自身。……同时图解也不是结构或结构的抽象。虽然它解释某个建筑客体中的关系, 但却不与该客体同构。”
 - 2) 对偶图(Dual Graph)是图论中的一个概念, 对于一个给定的图, 对偶图的每个顶点对应原图的每个面(边包围的区域和外部区域), 然后连接与原图中的面关联的顶点。
 - 3) 非流形拓扑(Non-Manifold Topology)是一个计算机图形学和计算几何学领域的概念, 用于描述那些不符合流形(manifold)属性的几何结构。在数学中, 流形是一种具有平滑、连续、无缝连接的拓扑空间, 而非流形拓扑用于处理那些不满足这些条件的复杂几何形状。这些结构在计算机图形学和计算几何学中常常出现, 如多面体网格、复杂曲面、物体表面上的孔洞等。
 - 4) 体素(Voxel)是三维体积元素的缩写, 类似于二维空间中的像素(Pixel), 每个体素代表了三维空间中的一个微小单元。



节点和连边更容易表示较为明确的对象，这对于规则分隔下的单层住宅空间相对易于实现，而用于分隔灵活、空间形态非规则的大型公共建筑空间时，则需要对复杂空间进行界定，决定适宜用节点和连边表示的复杂空间对象和特征。在进行表示和图上推理后，得到的结果如何再升维成具有高度复杂性和流动性的公共建筑空间，而非仅仅是平面轮廓的垂直推拉，也同样需要建筑学领域知识的介入。

当前利用图论的空间生成和优化中，所纳入考虑的设计限制条件往往也是相对有限的，如对环境因素通常只考虑基本的朝向限制^[49]等，优化和生成的工作流与结果距离解决实际设计项目中的问题尚有差距。

更重要的是，建筑数据常常因类型的细化、项目条件的不同而具有小样本特点，而且缺少标注良好的开源数据，研究开展需要对建筑的高维特征进行大量的人工标注，因此当前可用的图结构建筑数据集尚不充足。利用图方法的建筑分析、布局与生成仍是开放的议题。

4.3 前景

当前，建筑策划研究中还存在许多未被解决但有潜力借助图方法进一步探索的问题。利用图方法作为空间分析、布局和生成工具的研究已具有一定数量，但也面临着成果难以评估^[27]等问题。满足人的行为需要和感知偏好始终是建筑策划与设计的核心目标，也是其成果评价的重要参照。而当前行为与空间的关联在图论融合于策划相关研究中的介入还并不充分。仅囿于空间或行为仍然难以发挥图的最大潜力，难以辅助实现建筑设计人与空间共轭的目标。

因此，此类研究未来除解决具体空间形态、三维体量的表示与生成等技术问题外，在应用场景上还应对应行为的图表示与解析、行为与空间的关联投以更多的目光：（1）考虑认知机制和决策过程的设计影响因素解析：除具象肢体活动与轨迹外，如何抽取语言、神经认知、学习、创造等抽象行为的结构和内在机制，进一步分析其与空间的关系，及向建筑语言的转化；（2）结合行为预测的智能空间构想：如何建立案例与人感知和评价间的关联，从而实现特定导向或需求下的设计生成，更接近带有目标的“设计”而非学习和复用，并考虑到可能的使用者行为变化，及行为与方案间的互相影响；（3）动态融合的预评价与前馈：技术构想、材料构想、经济策划等专项结论如何动态融合，并实时前馈于空间构想，而非仅作为方案完成后的检验工具；（4）成果的交互综合呈现：策划的结论如何脱离孤立的文字表格、框图，能够整合交互化呈现，并具有与建筑语言较好的衔接性。

图方法带来机制解析上的强大潜力，也带给了我们重新理解形式、空间和功能关系的可能性，技术引发了对经典命题的再思考，但很难一劳永逸地解决或改写问题。抽象关系与丰富而具体的世界之间尚存在差距，技术有效解决的专门性任务仍然需要领域知识构建框架和编制流程，从而更有效地回应学科命题。图将世界置于关联的语境之中，也包括建成环境的学科知识与发展迅猛的技术智能。□

参考文献

- [1] 庄惟敏.建筑策划导论[M].北京:中国水利水电出版社,2001.
- [2] 李道增.环境行为学概论[M].北京:清华大学出版社,1999.
- [3] 胡正凡.环境心理学与环境—行为研究[J].世界建筑,1983(03):61-66.
- [4] 朱敬业.略论环境、行为与行为建筑学[J].建筑学报,1985(11):18-21.
- [5] 朱冰.环境——行为学的发生和发展[J].新建筑,1987(01):43-46.
- [6] 朱兵.环境行为学在建筑设计中的应用问题[J].世界建筑,1989(06):17-20.
- [7] 罗玲玲.MERA'97“面向21世纪的环境—行为研究国际会议”回顾[J].建筑学报,1998(12):57-58.
- [8] 李斌.环境行为学的环境行为理论及其拓展[J].建筑学报,2008,474(02):30-33.
- [9] 李斌.环境行为理论与设计方法论[J].西部人居环境学刊,2017,32(03):1-6.
- [10] 仇静,刘恺希.“图示与图析”社会调查方法的遗址环境公共空间使用情况研究中的应用——以西安钟鼓楼广场为例[J].中国园林,2018,34(S1):39-41.
- [11] EDDY M.Diagrams[M]//GRAFTON A,BLAIR A,GOEING AS,Eds.A Companion to the History of Information. Princeton:Princeton University Press,2021:397-401.
- [12] EDDY MD.How to See a Diagram:A Visual Anthropology of Chemical Affinity[J].Osiris,2014,29(1):178-196.
- [13] 维基百科.图解[Z/OL].(2023-03-05)[2023-10-21].<https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%9B%B%E8%A7%A3&oldid=76226344>.
- [14] 周忠凯,赵继龙,孙继开.作为图形的建筑图解——信息传达视角的研究[J].华中建筑,2021,39(02):10-15.
- [15] 拉普卜特.宅形与文化[M].北京:中国建筑工业出版社,2007.
- [16] 拉普卜特.文化特性与建筑设计[M].常青,译.北京:中国建筑工业出版社,2004.
- [17] 马耀,汤继良.图深度学习[J].王怡琦,金卫,译.北京:电子工业出版社,2021.
- [18] HILLIER B,HANSON J.The Social Logic of Space[M]. Cambridge:Cambridge University Press,1989.
- [19] HILLIER B.Space is the Machine[M].Cambridge: Cambridge University Press,1999.
- [20] 徐冰冰,岑科廷,黄俊杰,等.图卷积神经网络综述[J].计算机学报,2020,43(05):755-780.
- [21] 吴博,梁循,张树森,等.图神经网络前沿进展与应用[J].计算机学报,2022,45(01):35-68.
- [22] PETERS MDJ,GODFREY CM,KHALIL H,et al.Guidance for conducting systematic scoping reviews[J].International Journal of Evidence-Based Healthcare,2015,13(3):141-146.
- [23] YUE K,KRISHNAMURTI R.A Paradigm for Interpreting Tractable Shape Grammars[J].Environment and Planning B: Planning and Design,2014,41:110-137.
- [24] EISENSTADT V,BIELSKI J,LANGENHAN C,et al. Autocompletion of Design Data in Semantic Building Models using Link Prediction and Graph Neural Networks [C]//Proceedings of the 40th International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe.Ghent,Belgium:eCAADe,2022:Volume 1.
- [25] EISENSTADT V,LANGENHAN C,ALTHOFF KD.Generation of Floor Plan Variations with Convolutional Neural Networks and Case-based Reasoning—An Approach for Unsupervised Adaptation of Room Configurations within a Framework for Support of Early Conceptual Design[C]. Porto:Blucher Design Proceedings,2019.
- [26] EISENSTADT V,BIELSKI J,METE B,et al.Autocompletion of Floor Plans for the Early Design Phase in Architecture: Foundations,Existing Methods,and Research Outlook[C]. Sydney:CAADRIA proceedings,2022.

- [27] ARORA H,BIELSKI J,EISENSTADT V,et al.Consistency Checker:An automatic constraint-based evaluator for housing spatial configurations[C]//Proceedings of the 39th International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe.Novi Sad:eCAADe,2021.
- [28] MAENG H,HYUN KH.Data-Driven Analysis of Spatial Patterns through Large-Scale Datasets of Building Floor Plan[C]//GLOBE A,AMEIJDE VAN J,FINGRUT A,KIM N,T.T.S.Lo(eds.).PROJECTIONS-Proceedings of the 26th CAADRIA Conference-Volume 1.Hong Kong:The Chinese University of Hong Kong and Online,2021,301-310.
- [29] FERRANDO C,DALMASSO JMDCLN.Architectural Distant Reading Using Machine Learning to Identify Typological Traits Across Multiple Buildings[C]// Daejeon,South Korea:Proceedings of the 18th international conference CAAD futures,2019.
- [30] WU W,FU XM,TANG R,et al.Data-Driven Interior Plan Generation for Residential Buildings[J].ACM Trans. Graph.,2019,38(6).
- [31] HU R,HUANG Z,TANG Y,et al.Graph2Plan:Learning Floorplan Generation from Layout Graphs[J].ACM Transactions on Graphics,2020,39(4).
- [32] AS I,PAL S,BASU P.Artificial intelligence in architecture: Generating conceptual design via deep learning[J]. International Journal of Architectural Computing, 2018,16(4):306-327.
- [33] GILLEARD J.Layout-A Hierarchical Computer Model for the Production of Architectural Floor Plans[J]. Environment and Planning B:Planning and Design, 1978,5(2):233-241.
- [34] 辻正矩,川窪広明.计划と条件に適合する长方形分割图の创建方法について:グラフ理论のアプローチによる平面计划の方法 その1[J].日本建筑学会計画系论文集,1997,62(494):129-136.
- [35] 浅野寛治,加藤直树,吉村茂久.Sequence-Pairに基づく室・通路・出入口配置优化手法:数理计划法と遗传的アルゴリズムの融合による优良解探索[J].日本建筑学会計画系论文集,2003,68(572):209-216.
- [36] CUBUKCUOGLU C,NOURIAN P,SARIYILDIZ IS,et al. Optimal Design of new Hospitals:A Computational Workflow for Stacking,Zoning,and Routing[J]. Automation in Construction,2022,134:104102.
- [37] 季燕福.地下空间步行交通组织的图论算法应用[C]// 中国城市规划学会,重庆市人民政府.活力城乡 美好人居——2019中国城市规划年会论文集(06城市交通规划).南京:中设设计集团股份有限公司,2019:9.
- [38] ZHANG F,MILIORIS D,LIN H,et al.Indoor Space Recognition using Deep Convolutional Neural Network: A Case Study at MIT Campus[J].ArXiv,2016,abs/1610.02414.
- [39] XIAO X,LIU Z.Quantifying Urban Network Transitions with Evolution Degree[J].Nexus Network Journal, 2023,25(SUPPL 1):471-480.
- [40] DONG Y,TRISCIUOGLIO M,HAN D.A graphical method of presenting property rights,building types,and residential behaviors:A case study of Xiaoxihu historic area,Nanjing[J].Frontiers of Architectural Research,2022,11(6):1077-1091.
- [41] LEE JH,OSTWALD MJ,DAWES MJ.Examining Visitor-Inhabitant Relations in Palladian Villas[J].Nexus Network Journal,2022,24(2):315-332.
- [42] 焦胜,罗似莹,韩宗伟,等.基于图论的旅游型传统村落公共空间结构演变研究——以三个侗族旅游型传统村落为例[J].新建筑,2021(2):88-92.
- [43] BARBIERI L,D'AUTILIA R,MARRONE P,et al.Graph Representation of the 15-Minute City:A Comparison between Rome,London,and Paris[J].Sustainability, 2023,15(4):3772.
- [44] ZHENG Y,LIN Y,ZHAO L,et al.Spatial planning of urban communities via deep reinforcement learning[J]. Nature Computational Science,2023,3(9):748-762.
- [45] AGRYZKOV T,OLIVER JL,TORTOSA L,et al.DIFFERENT TYPES OF GRAPHS TO MODEL A CITY[C]//Proceedings of the 2017 CMEM Conference.Alicante,Spain:WIT Press,2017:71-82.
- [46] PEZZICA C,CUTINI V,BLEIL DE SOUZA C,et al.Adapting Analysis Workflows to Humanitarian Needs:Different Road Network Models and Tools[C]//Eloy S,Leite Viana D,Morais F,et al.Formal Methods in Architecture. Cham:Springer International Publishing,2021:157-170.
- [47] CHEN H,LI Z,WANG X,et al.A graph- and feature-based building space recognition algorithm for performance simulation in the early design stage[J].Building Simulation, 2018,11(2):281-292.
- [48] 陆毅,徐蜀辰.基于图论的三维可视性分析及其应用[J]. 时代建筑,2017(5):44-49.
- [49] XIE X,DING W.An interactive approach for generating spatial architecture layout based on graph theory[J]. Frontiers of Architectural Research,2023,12(4):630-650.
- [50] ZHONG X,YU F,XU B.A Human-Machine Collaborative Building Spatial Layout Workflow Based on Spatial Adjacency Simulation[M]// YUAN PF,CHAI H,YAN C,et al. Hybrid Intelligence.Singapore:Springer Nature Singapore, 2023:14-24.
- [51] ZHONG X,KOH I,FRICKER P.Building-GNN:Exploring a co-design framework for generating controllable 3D building prototypes by graph and recurrent neural networks[C]//Digital Design Reconsidered:Proceedings of the 41st Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe. Austria:eCAADe,2023:431-440.
- [52] JABI W,SOE S,THEOBALD P,et al.Enhancing parametric design through non-manifold topology[J]. Design Studies,2017,52:96-114.
- [53] JABI W,ALYMANI A.Graph machine learning using 3D topological models[C]//Proceedings of the 11th Annual Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design.San Diego,CA,USA:Society for Computer Simulation International,2020:1-8.
- [54] ALYMANI A,MUJICA A,JABI W,et al.Classifying Building and Ground Relationships Using Unsupervised Graph-Level Representation Learning[C]//Gero JS.Design Computing and Cognition'22.Cham:Springer International Publishing,2023:305-320.
- [55] WILLIAMS M,BURRY J,RAO A.Graph mining indoor tracking data for social interaction analysis[C]//2015 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communication Workshops (PerCom Workshops), St.Louis,MO,USA,2015:2-7.
- [56] GAO W,ZHANG X,HUANG W,et al.Command2Vec: Feature Learning of 3D Modeling Behavior Sequence— A Case Study on "Spiral-stair"[C]// YUAN PF,CHAI H,YAN C,et al.Proceedings of the 2021 DigitalFUTURES. Singapore:Springer,2022:45-54.
- [57] CARMODY D,MAZZARELLO M,SANTI P,et al.The effect of co-location on human communication networks[J]. Nature Computational Science,2022,2(8):494-503.
- [58] SOPHER H,DORTA T.Collaborative-Knowledge Construction Activity Method to Analyse Design-Learning in VR Co-design Crits[C]//Gero JS.Design Computing and Cognition'22.Cham:Springer International Publishing,2023:423-440.
- [59] NARAG MJG,SORIANO M.Discovering artistic influences of painters from expressionism,impressionism, and surrealism art movements using convolutional neural network[J].Journal of Cultural Heritage,2021,51:182-193.
- [60] FAN T,WANG H,HODEL T.Multimodal knowledge graph construction of Chinese traditional operas and sentiment and genre recognition[J].Journal of Cultural Heritage,2023,62:32-44.
- [61] ZHANG F,ZHANG D,LIU Y,et al.Representing place locales using scene elements[J].Computers,Environment and Urban Systems,2018,71:153-164.
- [62] LIU X,TANG T,DING N.Social network sentiment classification method combined Chinese text syntax with graph convolutional neural network[J].Egyptian Informatics Journal,2022,23(1):1-12.
- [63] JORGENSEN J,TAMKE M,POULSGAARD KS.Occupancy-informed:Introducing a method for flexible behavioural mapping in architecture using machine vision[C]// Werner LC,Koering D.eCAADe 2020:Anthropologic-Architecture and Fabrication in the Cognitive Age,VOL 2. Brussels:Ecaade-Education & Research Computer Aided Architectural Design Europe,2020:251-258.
- [64] HUANG W,WANG L.Towards big data behavioral analysis: rethinking GPS trajectory mining approaches from geographic,semantic,and quantitative perspectives[J]. Architectural Intelligence,2022,1(1):7.
- [65] LUO Y,CHUNG F,CHEN K.Urban Region Profiling via Multi-Graph Representation Learning[C]//Proceedings of the 31st ACM International Conference on Information & Knowledge Management(CIKM '22).New York,NY,USA: Association for Computing Machinery,2022:4294-4298.
- [66] SANCHEZ-LENGELING B,REIF E,PEARCE A,et al.A Gentle Introduction to Graph Neural Networks[EB/OL]. [2023-10-21].<https://distill.pub/2021/gnn-intro/>.
- [67] XU J.Representing Big Data as Networks:New Methods and Insights[J].ArXiv,2017:abs/1712.09648.
- [68] HILLIER W.Structure or:Does Space Syntax Need to Radically Extend Its Theory of Spatial Configuration?[C]//Proceedings of the 12th International Space Syntax Symposium. Beijing:Beijing JiaoTong University,2019.
- [69] ZHUANG D,WANG S,Koutsopoulos H,et al.Uncertainty Quantification of Sparse Travel Demand Prediction with Spatial-Temporal Graph Neural Networks[C].In Proceedings of the 28th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining(KDD '22).New York:Association for Computing Machinery,2022:4639-4647.
- [70] ALNASSAR I.Applications of Graph Theory for Controlling City Infrastructure[D].Ar-Riyad:Saudi Digital Library,2019.
- [71] ARFAT Y,SUMA S,MEHMOOD R,Albeshri A.Parallel Shortest Path Big Data Graph Computations of US Road Network Using Apache Spark:Survey,Architecture, and Evaluation[M]//Mehmood R,See S,Katib I, Chlamtac I,eds.Smart Infrastructure and Applications. Cham:Springer,2020:137-152.
- [72] JAMES D,TERESCO A.Dijkstra's algorithm shortest path assignment using the Google Maps API:poster session[J]. Journal of Computer Science College,2010,25(6):253-255.
- [73] FABIEN M.Graph algorithms[EB/OL].(2019-03-17) [2023-03-12].https://maelfabien.github.io/machinelearning/graph_3/.
- [74] 刘佳凝.基于样本库的建筑设计任务书面积表格数据挖掘与分析[J].住区,2019(4):7.
- [75] 刘佳凝.建筑设计项目任务书的评价指标提取方法研究[J].世界建筑,2020(4):5.
- [76] 党雨田,庄惟敏.乡村建设中基于色彩分析的建筑策划方法[J].建筑技艺,2020(4):5.
- [77] DEPREZ L,VERSTRAETEN R,PAUWELS P.Data-Based Generation of Residential Floorplans Using Neural Networks[C].In:Gero JS,ed.Design Computing and Cognition'22.Cham:Springer,2023.
- [78] BRUGHMANS T.Carl Knappett.An archaeology of interaction:Network perspectives on material culture and society[J].Antiquity,2012,86(332):577-578.
- [79] JABI W,CHATZIVASILEIADI A.Topologic:Exploring Spatial Reasoning Through Geometry,Topology,and Semantics[M].Cham:Springer,2021.