

融合多智能体与超图的复杂动态系统 建模方法探索

王鹏飞¹, 陶体伟², 焦 点¹, 申彦明¹, 周东生³, 张强¹

(1. 大连理工大学计算机科学与技术学院, 辽宁 大连 116024;
2. 泰山学院信息科学技术学院, 山东 泰安 271000;
3. 大连大学软件学院, 辽宁 大连 116622)

摘 要: 在自然界以及人类社会中, 绝大多数系统本质上都可以抽象表示为复杂系统, 针对当前复杂系统复杂性不断增加这一难题, 亟需完善且成熟的复杂系统理论与方法进行建模研究与处理。当前基于图的复杂系统建模方法难以描绘节点间极其复杂的连接以及节点间的高阶关系, 同时也难以对复杂系统的智能化感知、决策和控制等行为进行有效刻画。基于此, 提出一种融合多智能体与超图的复杂动态系统建模方法, 模型从几种不同的演化角度进行动态演化, 对复杂动态系统进行了具体的描绘。此模型通过赋予复杂系统中个体智能化特征, 进行感知、决策和控制, 同时也能够更好地描绘智能体节点间的高阶关系, 为复杂系统的智能理论研究提供新思路和新方法。

关 键 词: 多智能体; 超图; 复杂系统; 建模; 复杂网络; 超网络

中图分类号: TP 391

DOI: 10.11996/JGj.2095-302X.2023030599

文献标识码: A

文章编号: 2095-302X(2023)03-0599-10

Exploration on the modeling method of complex dynamic system integrating multi-agent and hypergraph

WANG Peng-fei¹, TAO Ti-wei², JIAO Dian¹, SHEN Yan-ming¹, ZHOU Dong-sheng³, ZHANG Qiang¹

(1. School of Computer Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024, China;
2. School of Information Science and Technology, TaiShan University, Tai'an Shandong 271000, China;
3. School of Software, Dalian University, Dalian Liaoning 116622, China)

Abstract: Most systems can be abstracted as complex systems in nature and human society. Given the increasing complexity of today's complex systems, there is an urgent need for advanced and mature complex system theories and methods for modeling research and processing. However, the current graph-based modeling methods used in complex systems encounter difficulties in depicting the extremely complex connections between nodes and the higher-order relationships between them. Additionally, these methods face challenges in effectively portraying the intelligent

收稿日期: 2022-08-26; 定稿日期: 2022-12-16

Received: 26 August, 2022; Finalized: 16 December, 2022

基金项目: 科技创新2030—“新一代人工智能”重大项目(2021ZD0112400); 国家自然科学基金委-辽宁联合基金项目(U1908214); 中央高校基本科研基金项目(DUT21TD107, DUT20RC(3)039); 辽宁省兴辽人才计划项目(XLYC2008017); CCF-腾讯犀牛鸟基金项目(IAGR20210116)

Foundation items: National Key Research and Development Program of China (2021ZD0112400); NSFC-Liaoning Province United Foundation (U1908214); Fundamental Research Funds for the Central Universities (DUT21TD107, DUT20RC(3)039); Liaoning Revitalization Talents Program (XLYC2008017); CCF-Tencent Open Fund (IAGR20210116)

第一作者: 王鹏飞(1990-), 男, 副教授, 博士。主要研究方向为复杂系统、多模态智能计算。E-mail: wangpf@dlut.edu.cn

First author: WANG Peng-fei (1990-), associate professor, Ph.D. His main research interests cover complex systems, multimodal intelligent computing. E-mail: wangpf@dlut.edu.cn

通信作者: 张强(1971-), 男, 教授, 博士。主要研究方向为复杂系统。E-mail: zhangq@dlut.edu.cn

Corresponding author: ZHANG Qiang (1971-), professor, Ph.D. His main research interest covers complex systems. E-mail: zhangq@dlut.edu.cn

perception, decision-making, and control of complex systems. A modeling method for complex dynamic systems integrating multi-agents and hypergraphs was proposed to address these issues. This model dynamically evolved from several different evolutionary angles to specifically describe complex dynamic systems. This model enabled perception, decision-making, and control by conferring agent nodes with intelligent features in complex systems and better describing the higher-order relationships between agent nodes. As a result, this modeling approach provided novel ideas and methods for the study of the intelligence theory of complex systems.

Keywords: multi-agents; hypergraphs; complex systems; modeling; complex networks; hypernetworks

复杂系统存在于自然界的各个角落之中。随着智能科学的飞速发展,复杂系统在当今社会的国防安全、经济运作、人际交互、工程和信息技术等领域发挥着越来越重要的作用。但近些年来,学者们遇到的现实问题愈发庞大和复杂,对应的复杂系统规模巨大,系统中的个体相互作用关系复杂,因此,一些学者将基于图论的复杂网络思想引入到复杂系统研究中。然而,基于复杂网络的研究方法仍然无法较好地对复杂系统的智能化感知、决策和控制等进行有效建模,更难以建立具备环境感知、知识学习及经验反馈等特点的复杂系统智能化模型。

因此,本文引入多智能体系统对复杂系统的静态特征和动态特征进行有效刻画,再引入超图理论来更好地描述复杂系统中多智能体间的高阶关系,提出了一种融合多智能体与超图的建模方法对复杂动态系统进行研究。

1 融合多智能体与超图的复杂动态系统理论与建模方法

当前,多智能体系统凭借其高效、可靠等特点,被广泛应用于复杂动态系统中,使其拥有更好的感知、决策与控制能力。此外,相比于图结构,将超图结构应用在模型中的复杂动态系统可以更准确得到建模多元关系,提升模型对数据信息的非线性高阶关联的刻画和挖掘能力。本文提出的融合多智能体与超图的复杂动态系统建模方法能够将两者的优势相结合,并在交通复杂动态系统中进行应用,最后通过对于出租车辆轨迹进行可视化分析并描述模型的可行性。

1.1 基于多智能体的复杂动态系统

多智能体系统是指一系列自治或半自治的相互作用的智能体构成的大规模复杂系统,在系统内部各智能体间通过相互的通信、合作或竞争等,完成一系列复杂的工作。多智能体系统如图 1 所示。

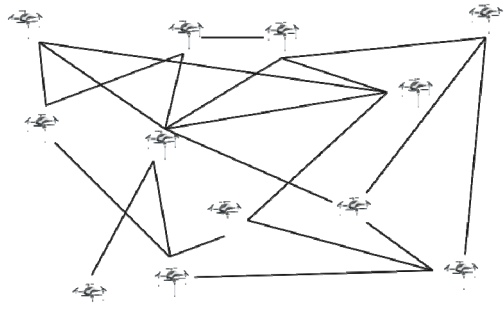


图 1 多智能体系统

Fig. 1 Multi-agent system

多智能体系统有如下特点^[1]:

(1) 协作性。系统中单个智能体具有一定的通讯、感知及判断决策能力,但这些能力都具有一定的局限性。但由智能体组成的多智能体系统就可以呈现出强大的配合能力以及智能处理能力。如在无人机工作中,使用单架无人机对地面进行勘察,只能获得局部的数据信息,但在无人机机群中,各个无人机获得的信息就可以进行一定的融合。因此,一组无人机得到的数据信息相对于单架无人机所获取的更为全面。

(2) 鲁棒性。多智能体系统中采用分布式控制方法,如果部分智能体出现故障,不会影响多智能体系统的运行,其他智能体会适应新的环境并继续执行任务。

(3) 拓展性。由于智能体具有高内聚、低耦合的特点,因此在多智能体系统中,可以进行智能体的拓展。

(4) 独立性。在系统内部,智能体会以最大化自身利益为目标,从而规划自身行动。在一些资源有限的环境下,智能体之间会进行一定的竞争。

除此之外,多智能体系统凭借其高效、可靠等特点,在无人机编队、制造业、交通控制、传感器网络等各种领域均有所应用。

在复杂动态系统中存在大量变化的个体,个体之间存在着众多复杂的联系以及规则。使用多智能体进行建模能够有效的对系统进行模拟,如

在城市交通的建模、交通路径规划、拥堵管理、信号灯管理等方面均有一定的应用,受到了众多研究者的关注。

首先,复杂动态系统中存在着大量的动态因素,系统中各个体需要能够观察到这些因素。其次,需要依据这些观察到的因素对行为进行决策,该行为同样会对系统中其他部分造成影响,并可能影响到自身。最后,需根据系统状态选取最优决策,控制自身行为。因此,在对复杂动态系统的建模过程中,需要考虑感知、决策与控制方面,同时,系统中各个体之间应不产生冲突,协作完成任务,使复杂动态系统模型尽可能符合真实情况。而多智能体系统中的个体能够良好的进行协作,满足以上的需求。

在智能化感知方面,多智能体系统中的每个智能体都是一个独立的个体,可对其进行一定的设计,使其具有一定的感知能力,满足该智能体在整个系统中的需求。同时,由于多智能体系统的协作性,各智能体进行感知获得的数据可以进行融合与共享,获取的信息更为全面,从而能够更好的进行决策与控制。例如,在使用多智能体系统构建交通动态系统模型时,交叉口与车辆需要作为2个最重要的个体类别,在定义该智能体类别中,交叉口智能体可以获取车辆运行信息,对车道情况进行感知。同时,交叉口智能体与车载智能体之间获取到的信息可以进行共享,从而获得更为全面的车辆运行信息。

在决策方面,传统的复杂系统中常用的决策方法是建立一组或多组的微积分方程,将各项数据建立为数学模型。这种模型简单易懂,能够清楚地表达系统中各个体的约束关系,通过改变某一个状态量即可看到其他的因素变化,根据输出数据进行决策。这种方法更加适用于确定的复杂系统,对于复杂动态系统,其数学模型难以刻画。但在多智能体系统中,各智能体之间的合作与竞争,可以更好的刻画复杂系统的动态性,从而进行更有效的方案决策。经过前期的感知,获取到一定的信息后,可以根据这些信息进行决策。如在上述交通动态系统中,车载智能体通过直接感知外界以及从交叉口智能体获得的信息,结合驾驶人操作属性以及车辆属性和车辆的行车计划,做出超车、变道等动作^[2]。

在控制方面,复杂动态系统中存在大量个体,在系统模型运行过程中,需要个体协调合作完成

任务而不产生冲突,因此需要一种协调控制方法。而在多智能体系统中,协调控制中的一致性控制能够良好的满足复杂动态系统这一需求。多智能体系统的一致性问题是指设计智能体之间的作用方式,使智能体能够接收到相邻智能体传递过来的信息,以此不断调整自己的行为,随着时间的推移,最终所有智能体达成一致性状态^[3]。

1.2 基于超图的复杂动态系统

图是一种常见的数据结构。对于图 $G=(V,E)$,其中, G 表示图, V 是图 G 中节点的集合, E 是图 G 中边的集合。在图 G 中,定义 $v_i \in V$ 表示任意节点, v_j 表示一个与其相连的节点,则 $e_{ij} \in E$ 表示其连边。每条边连接图上的2个节点,即

$$E \subseteq \{\{i,j\},(i,j) \in V^2\} \quad (1)$$

超图,作为一种普通图的推广变体,其可以更加准确的描述存在多元关联的对象之间的关系。在超图中,边被称为超边(Hyperedge),一个超边可以连接任意数量的节点。当超边最多只能连接2个节点时,其超边组成的超图便会退化,成为普通图,即普通图是超图的一种形态。

相对于普通图的二元组表示方法,超图一般采用三元组进行表示。给定一个超图 $G=\{V,E,W\}$, V 表示超图的节点集, E 表示超图的超边集, W 表示超图的权重集,对于任意一条超边 $e \in E$ 是顶点集 V 的一个子集。

传统图和超图如图2所示。

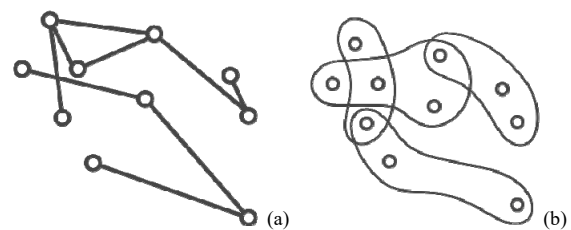


图2 传统图和超图((a)传统图;(b)超图)

Fig. 2 Traditional graph and hypergraph ((a) Traditional graph; (b) Hypergraph)

超图的引入可以更好地解释复杂系统中的高阶复杂关系,提升了复杂系统处理复杂关系型数据的能力。文献[4]提出了一种在开发新药领域的相似超图搜索方法,通过识别数据库中与查询子图相似的所有图,来寻找不仅限于精确匹配的化合物,为研制新药寻找更多的候选化合物。文献[5]提出了一个基于超图的公平多利益相关者新闻推荐系统,以处理多利益相关者的推荐任务。基于超图结构的模型可以对不同类型对象之间的高阶

关系进行建模,因此可以生成考虑到多个利益相关者的推荐结果。文献[6]提出了一种不确定超图的思想,将超图理论与不确定性理论相结合,为处理各种不确定复杂系统提供一个有用的工具,并创建一个新的跨学科研究领域。文献[7]提出了一种基于张量的动态超图表示和学习框架,可有效地描述超图中的高阶相关性。文献[8]提出了通过超图正则化的动态标签字典学习方法。该算法可为未标记的数据生成软标签矩阵,而超图正则化可以保持原始数据、转换数据和软标签之间的关系一致。文献[9]提出的基于超图的多语言系统元数据管理方法,克服了数据存储模型的异质性问题。文献[10]构建了一个公交系统的超图网络,通过分析其拓扑特性与鲁棒性提出合理的站点减压策略,提升网络的抗毁性。文献[11]探索了基于注意机制的动态超图卷积网络来进行时间序列预测,其有效地利用了动态超图中的时空关系,对当前超图卷积网络方法无法用于现实中动态的演化场景的弊端进行改善。文献[12]基于超图的航运网络模型,通过研究超图模型的动态演变机制为合理配置航线、提高航运网络效率等任务提供理论参考。

超图的引入还可以提升复杂系统感知和捕获复杂数据中高维信息的能力。文献[13]基于超图的服务系统模型,可以根据服务供应商和客户环境提供动态解决方案。得益于超图方法的多维性,该方法利用流程和结构化数据的视角建立了一个更具包容性和信息丰富度的服务系统模型,可以更好地在服务中找到成本和时间的平衡配置。文献[14]提出了一种基于超图的上下文感知智能产品服务系统配置方法。通过建立基于需求属性-产品-服务捆绑-使用场景(requirement attribute-product service bundles-usage scenario, RA-PSB-US)数据模型的超图模型,该方法得以借助较少的局部信息损失来表示异构信息。文献[15]提出了可编码超图的新概念,将其作为复杂超网络,并作为工具应用于无线传感器超网络、基于代码的图、无线传感器网络及其之间的双边关系。文献[16]提出了在一般超图网络中检测社团发现的新方法。该方法引入一个零顶点,将非均匀超图扩充为均匀多超图,并嵌入到一个低维向量空间中,使同一社团内的顶点彼此接近。文献[17]研究了基于超图信号处理的点云重采样,以更好地探索点云中不同点之间的潜在关系,并提取轮廓增强特征。

但基于超图的复杂系统仅能对超图的拓扑结构进行抽象分析,节点也仅能被动地从复杂网络中获取信息以实现信息交互,无法体现节点间在复杂关系中的相互作用,对动态系统的建模能力不足。

1.3 融合多智能体与超图的复杂动态系统建模方法

由上文可知,基于多智能体的复杂动态系统拥有更强的协同感知能力,以对复杂系统的动态性进行更好地刻画,同时多智能体系统具备的鲁棒性和拓展性使得基于此的复杂系统稳定性更强,可以良好地应对不同的突发状况,保证系统的正常运行。但传统的多智能体复杂动态系统因受到图结构的限制,其难以对系统中的高阶复杂关系进行表示及处理,因而无法对现实世界中复杂动态系统进行更为精确的建模。而超图的引入可以使得复杂系统模型具备对个体间高阶关系刻画的能力,同时借助超图丰富的拓扑指标对个体间复杂的交互关系进行捕获与挖掘。但基于超图的复杂系统不能很好地体现系统的动态性,且系统上的节点对外界因素的感知能力不足,因而无法对现实世界中复杂动态系统中的各种信息进行有效提取与处理。

基于此,本文综合考虑 2 种模型各自的优劣,尝试将两者进行结合,提出一种融合多智能体与超图的复杂动态系统建模方法,既可以借助超图理论对复杂系统中个体间高阶关系进行表示与分析,同时又能够利用多智能体的动态协同感知能力、鲁棒性和拓展性在复杂系统内高效获取数据信息。本文模型拓扑结构如图 3 所示。

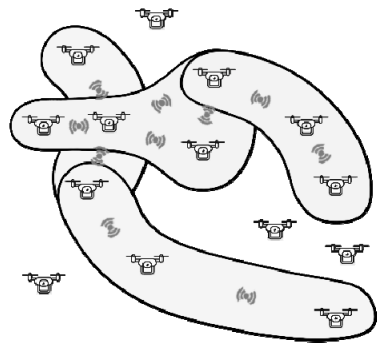


图 3 融合多智能体与超图的模型

Fig. 3 A model that integrating multi-agent and hypergraph

在融合了多智能体与超图模型的感知中,选取智能体作为节点,可以实现复杂系统对外界环境的智能感知。在此基础之上,将多智能体系统

以超图结构嵌入到复杂系统中,能够更好地对高阶信息进行建模,实现对现实中个体间相互关系更为精准地描述。同时,基于超图结构的系统模型还可以更好地捕获和挖掘个体间的深层交互关系,使得模型更加精确地刻画现实场景。

在决策中,融合多智能体与超图的模型可以将超图结构感知深层信息的特性与多智能体系统的动态协同决策能力相结合。在基于传统图的建模方法中,面对复杂的多元关系时,需要通过将感知的复杂信息融入到单个节点或边上的方式实现,使得单个节点或边上包含了复杂的信息,这种方式对模型进行复杂决策产生了较大的阻碍。而引入超图理论,可将难以用简单图拓扑结构表示的高维关系使用超图进行表示,在为系统进行复杂决策时,不仅保留最原始的数据信息,还可展现出个体间更复杂的交互关系;同时,以智能体为节点,可利用多智能体系统良好的协作性,及时地处理各节点感知到的数据信息,实现更加科学精准的复杂决策。

融合多智能体与超图的复杂动态系统建模方法,也是将多智能体系统与超图理论的优势进行融合,该方法借助超图实现对系统中个体间复杂高维关系的挖掘与刻画,并利用多智能体系统获得更强的数据信息感知与分析决策能力,从而为在复杂系统中实现更加精准的处理与预测提供一种新的思路。

1.4 基于多智能体超图的交通动态系统建模与分析

本文将现实世界中一座城市的交通路网进行抽象,并对其进行基于多智能体超图的交通动态系统进行建模与分析。开始前,首先对基于多智能体超图的交通动态系统基本组成元素和特征进行描述。

在模型中,智能体分为2类:①交叉口智能体;②车载智能体。前者通过感知车载智能体,获取多源数据,进行学习并决策,并为后者反馈处理过后的信息。同时,交叉口智能体间进行临近范围内的感知与交互,即交换路况信息。后者将通过每个交叉口智能体所能感知的范围内的自身信息发送出去,并根据每个交叉口智能体的反馈信息进行相应的决策,以提供给司机可选择的行驶方案。图4为本文交通模型模拟图。

在基于交通路网的多智能体超图模型中,节点为交叉口智能体,每条超边为车辆行驶路径轨

迹,即每条超边中包含一条车辆行驶路径轨迹所经过的所有节点。对于繁华的路段、商圈、标志性建筑、名胜古迹、交通枢纽等地段的交叉口智能体,因为其多为行驶路径的终点或途中经过点,故其节点超度相对于其他节点会更大,而节点超度越大,表明此节点越是关键节点,交通情况需要重视。若一个超边的度较小,说明其含有的交叉口智能体所在路段与其他路径交互较少;反之,说明此超边中含有的交叉口智能体所在路段之间交互较多。一条超边的度较小或超度较大,都在一定程度上反映了此超边中含有的交叉口智能体所在路段像一个“小世界网络”,其聚集系数也相对较大。

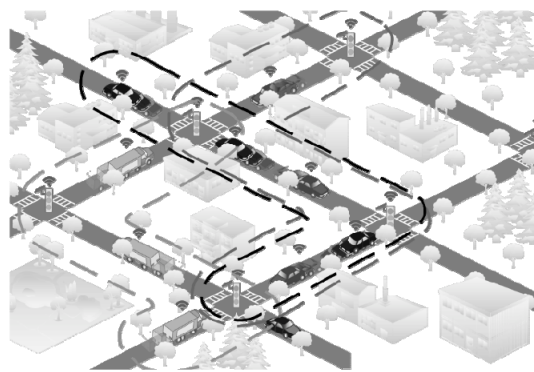


图4 融合多智能体与超图的交通模型

Fig. 4 A traffic model that integrating multi-agent and hypergraph

开始建模时,首先为模型提供初始状态与条件。假设刚开始时,超图中仅为一些随机选取的孤立节点,按照节点超度优先的原则选择出 m_0 个节点,并设定初始值为2,许多车辆从这些节点开始向自身的目的地行驶,途经交叉口智能体,车载智能体与其相互感知交互,进行信息交流,并逐渐将每辆车行驶路径上经过的交叉口智能体加入到此次行驶路径对应的超边中,同时借助新加入的交叉口智能体构建新超边,当每辆车对应车次的行驶到达目的地后,结束并完成该条超边的构建,模型演化由此展开。模型初始状态如图5所示。

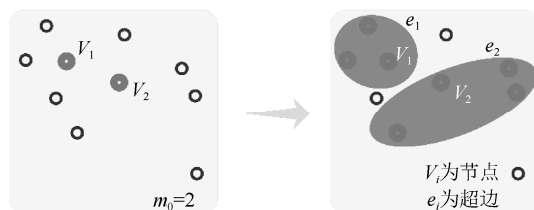


图5 模型初始状态

Fig. 5 The initial state of the model

每辆车在路上行驶到每个交叉口智能体所能感知的范围内时, 车载智能体都会与其相互感知交互。假设每个交叉口智能体都有“最优路径表”(即选用不同策略从此节点到其他节点的路径表), 交叉口智能体通过与相邻交叉口和不停经过其感知范围的车载智能体不断交流学习来更新“最优路径表”, 为车辆推荐最优路线。当然, 在路中每个智能体可同时拥有多种“最优路径表”, 针对司机不同的行驶需求, 向车载智能体提供不同的方案, 并进行方案信息处理, 为司机呈现可视化选择方案, 司机通过简单的操作选择最适合的行驶路线。同时, 车载智能体将此次路径选择结果反馈给交叉口智能体, 使其得到进一步学习并更新其“最优路径表”, 为下一辆车提供更完善、更全面、更个性化的路径选择方案。

基于多智能体超图的交通动态系统模型演化过程, 整体上来讲, 是对于模型的动态演化, 主要考虑 4 种过程: 新节点添加(开辟新路径), 旧节点删除(由于堵塞、车祸、修路等原因, 此节点无法通行, 故删除此节点), 新超边添加(开辟新路径, 或相对于旧路径, 新路径某种程度上更优), 旧超边删除(删除包含旧节点的超边, 或删除被新路径取代的旧路径)。

模型动态演化过程如下(图 6~9 皆从图 5 开始演化):

(1) 从现有超边的节点中按照节点超度优先的原则选择出 m_1 个节点, 并设定初始值为 2。车辆将这些节点作为起始点, 向自身的目的地出发, 将行驶路径上的节点纳入模型新节点, 并基于此构造新超边。这里将考虑一些情况: 若此行驶路径为旧超边所包含路径, 或旧超边所包含路径的简单延伸; 前者将此新超边纳入旧超边中, 后者将旧超边和新超边合并, 如图 6 所示。

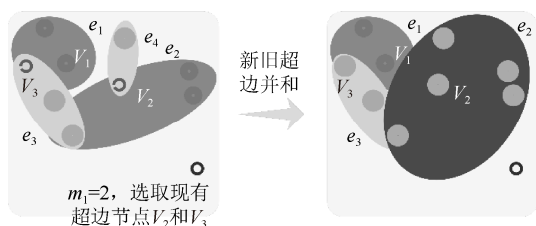


图 6 模型演化过程(1)

Fig. 6 The evolution process (1) of the model

(2) 若现有模型中某些节点暂时无法通行, 则将信息交互到临近交叉口智能体, 并将这些节点

和从所在超边的现有模型中删除, 如图 7 所示。



图 7 模型演化过程(2)

Fig. 7 The evolution process (2) of the model

(3) 选取现有模型中的未被纳入到任何超边中的孤立节点或按节点超度优先的原则添加新的节点(天然孤立节点)。车辆从这些节点向自身的目的地出发, 车辆行驶路径上的节点纳入模型新节点, 并基于此构造新超边, 如图 8 所示。

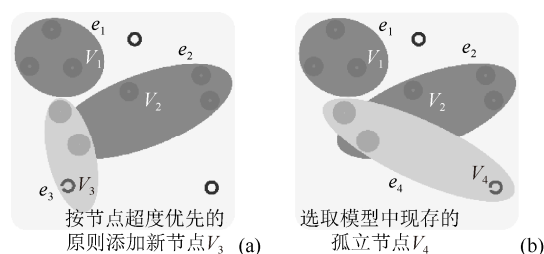


图 8 模型演化过程(3)((a)添加新节点; (b)选取孤立节点)

Fig. 8 The evolution process (3) of the model ((a) Add new node; (b) Pick orphaned node)

(4) 因为最优路径表的存在, 有些老化超边随着时间推移会因为各种最优选择策略被新超边取代, 即使用新超边替代旧超边, 如图 9 所示。

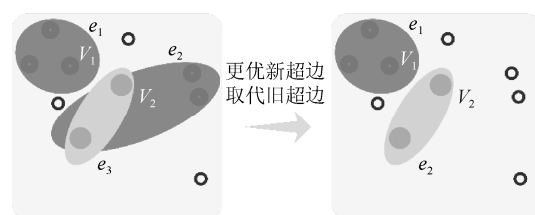


图 9 模型演化过程(4)

Fig. 9 The evolution process (4) of the model

在模型动态演化过程中, 通过对模型的可视化呈现和基于超图的拓扑特征描述, 可以得到并综合大量的有效信息, 其中最重要的一点, 便是根据节点超度来甄别关键节点以及次要节点, 借此对多智能体系统进行信息干预, 各个交叉口智能体再向车载智能体发布处理过后的交通诱导信息, 借此让部分车辆在高峰时段错开关键节点, 在保证关键节点附近的交通路况良好的同时, 也可以保证这部分车辆此次行驶过程的通畅。

1.5 真实出租车路网数据分析

以上海出租车交通路网为例,从整体角度对融合多智能体与超图的复杂动态系统模型进行实例分析与支持。

将多智能体超图模型与出租车载客轨迹数据结合,每一车次的路线作为一条独立的超边。对于超图节点,因为在模型中需要将交叉路口抽象为智能体节点,但从具有完备交叉路口智能体的系统中获取的相关轨迹数据集在当前现实世界中并不存在。因此,需改变思路,对出租车的 OD 数据集进行提取重构,并将其与卫星路网地图结合进行可视化,完成超图模型的现实映射。

数据集采用由香港科技大学收集的城市轨迹数据 Smart City Research Group,从中选取 111 次出租车载客单日 OD 数据,减少数据集过大导致的可视化轨迹重叠问题,提高可视化程度。111 次可视化出租车路径轨迹示例如图 10 所示。

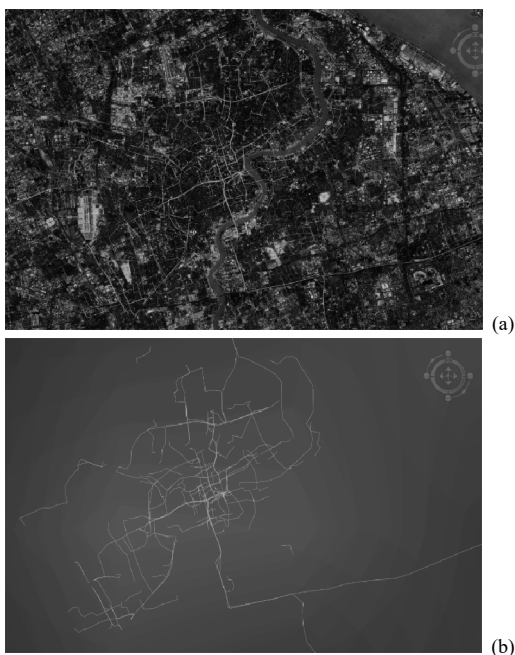


图 10 上海出租车路径轨迹((a)附带卫星地图;
(b)不附带卫星地图)

Fig. 10 Taxi paths in Shanghai ((a) With satellite map;
(b) Without satellite map)

根据 1.4 中提出的演化模型,一条出租车轨迹中,将所经过的所有交叉口智能体共同组成一条超边。由此类推,便可以得到一个通过数条出租车轨迹抽象而出的交通系统模型。当然,随时间推移将有更多的出租车轨迹加入,也会出现特殊原因导致现存的路径无法通行或不便于通行,以此构成模型动态演化的 4 种过程:新节点添加、

旧节点删除、新超边添加和旧超边删除,进而得到复杂交通系统的动态演化模型。

对于此模型,本文并未引入超图的三元组表示方法,而只考虑采用节点的邻接矩阵、节点和超边间非对称的关联矩阵 2 种结构对模型的数据进行存储与表示。当然,随着使用矩阵种类的增加,模型的计算复杂度也随之有所增加。但通过上述 2 种矩阵,并结合使用节点超度、超边度、节点强度、超边强度和超边基数等拓扑指标值^[18],可以更好地刻画基于超图的交通系统模型,借助拓扑指标反映出的模型特征,对多智能体系统发布诱导信息进行干预。

结合图 11 和图 12,将使用相关的拓扑指标对提取节点特征后面向出租车的超图交通模型进行刻画说明。

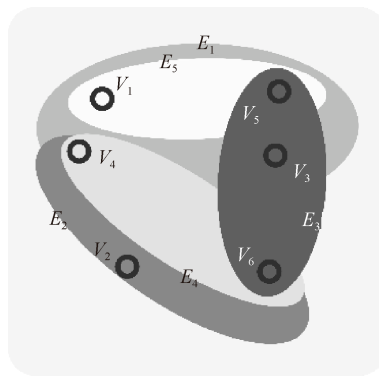


图 11 简化超图交通模型

Fig. 11 Simplified hypergraph traffic model

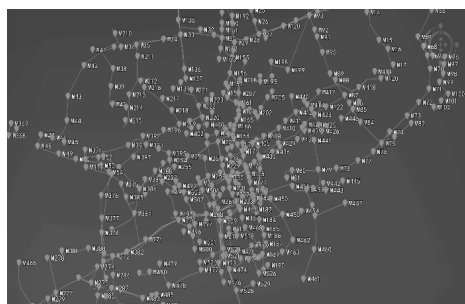


图 12 标志节点的超图交通模型(局部)

Fig. 12 A hypergraph traffic model with marked nodes (local)

在面向出租车的超图交通模型中,共提取出 111 条有效载客轨迹超边和 562 个有效交叉路口节点。

(1) 节点超度。节点 v_i 的节点超度 D_{H_i} 定义为包含此节点的超边数目。节点超度的值刻画可用于辨别关键节点及次要节点,通常来讲,一个节点的节点超度越大,就意味着该节点在整个超图

中的地位越重要。节点超度在现实网络对应的超图刻画中具有很好的实际意义,在出租车路网中,一个节点的超度反映了此节点对应的交叉口智能体所在地点,存在多少辆出租车载客,同时此节点可能是关键节点。对照现实,其可能是繁华商圈、名胜古迹、网红打卡地等,其相对车流量较大,交通路况可能较为拥堵。在面向出租车的超图交通模型中,各节点的节点超度分布如图 13 所示。从图中可以看到,绝大多数节点的超度处在较小水平范围,只有个别节点的超度较大,表明绝大多数交叉口是次要节点,相对来说出租车载客车流量较小,只有极个别的交叉口是关键节点。

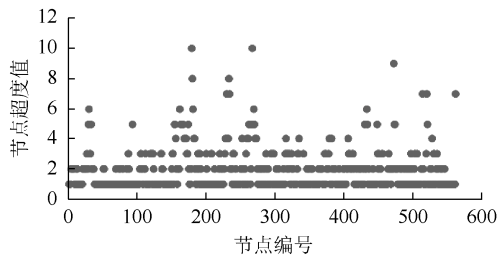


图 13 节点超度分布

Fig. 13 The distribution of node hyperdegree

(2) 超边度。超边 E_i 的超边度 D_{E_i} 定义为与超边 E_i 直接邻接的其他超边数目,即与此超边具有公共节点的超边个数。在出租车路网中,超边度的大小反映了与此条出租车路径具有共同交叉口的出租车路径数目,即超图的平均超边度大小反映了出租车交通路网的整体连通性,其值越大,出租车路网连通性越好,各地点互相之间的可达性也越好。在面向出租车的超图交通模型中,各超边的超边度分布如图 14 所示。从图中可以看到,大多数超边的超边度处在 0~15 的范围,说明大多数出租车载客轨迹超边关联紧密,相互连通,即出租车整体连通性较好。

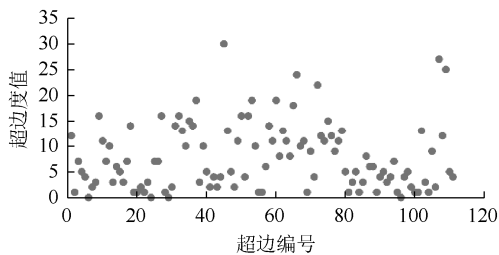


图 14 超边度分布

Fig. 14 The distribution of hyperedge degree

(3) 节点强度。将节点 v_i 和节点 v_j 的权值 $W_{v_i v_j}$ 定义为能够同时包含节点 v_i 和节点 v_j 的超边数目。

节点 v_i 的节点强度为

$$S_{v_i} = \sum_{j \in N_i} W_{v_i v_j} \quad (2)$$

其中, N_i 为节点 v_i 的邻接节点的集合。节点强度相对于邻接矩阵,更加形象和具体地反映出 2 个节点间的连接强度。在出租车路网中,2 个节点间的节点强度反映了 2 个交叉口智能体之间的关联程度。一般来说,越偏向于市中心、繁华商圈和旅游景点等地带,区域内节点间的节点强度越大。在面向出租车的超图交通模型中,各节点的节点强度分布如图 15 所示。从图中可以看到,大多数节点的节点强度处在 0~40 的范围,只有少数节点强度较大,说明大多数交叉口之间关联程度较高,从交叉口间的连通性表明出租车路网的连通性。

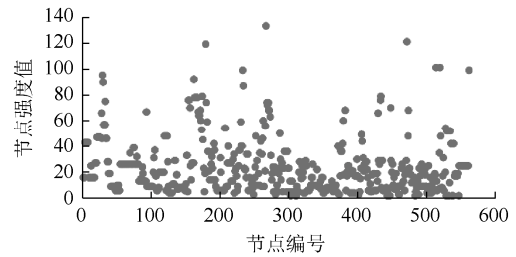


图 15 节点强度分布

Fig. 15 The distribution of node intensity

节点超度与节点强度的关系如图 16 所示。从图中可以看到,节点的超度与其强度之间呈正相关关系,即节点超度越大,其强度越大。节点超度只考虑包含此节点的超边数目,而节点强度还需考虑此节点临近节点的超边关系,因而,一个节点的强度往往远大于其超度。

(4) 超边强度。将超边 E_i 和超边 E_j 的权值 $W_{E_i E_j}$ 定义为能够同时包含在超边 E_i 和 E_j 中的节点数目。超边 E_i 的超边强度为

$$S_{E_i} = \sum_{j \in N_{E_i}} W_{E_i E_j} \quad (3)$$

其中, N_{E_i} 为超边 E_i 的邻接超边的集合。超边强度能够更加全面的反映出超边之间的关联程度。在出租车路网中,2 条超边之间的超边强度反映了 2 条出租车载客路径的总关联次数。若选取超边强度最大的若干条超边,可将其视为超图的中心超边,且对应的路段可视为出租车路网中的关键路段。在面向出租车的超图交通模型中,各超边的超边强度分布如图 17 所示。从图中可以看到,大多数超边的超边强度处在 0~10 的范围,但在 10~80 的范围也属均匀分布。说明相互之间关联紧密的

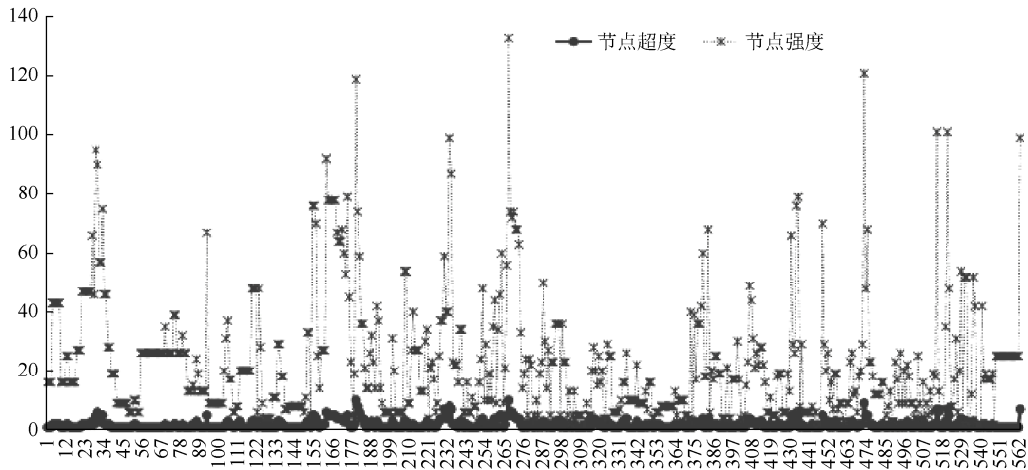


图 16 节点超度与节点强度的关系

Fig. 16 The relationship of node hyperdegree and node intensity

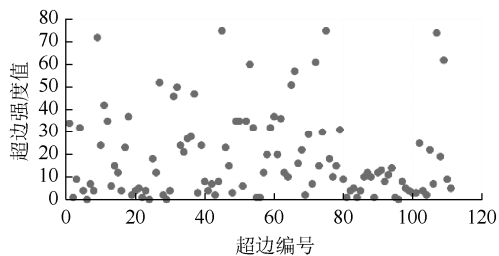


图 17 超边强度分布

Fig. 17 The distribution of hyperedge intensity

出租车载客轨迹超边占少数,且关联性不大,符合一个城市中出租车路网中关键路段数量远小于次要路段的客观规律。

超边度与超边强度的关系如图 18 所示。从图中可以看到,超边度与超边强度之间呈正相关关系,即超边度越大,其超边强度越大。超边度只考虑了与此超边直接邻接的超边数目,而超边超度还同时考虑了其邻接超边的强度,因而对于一条超边来说,超边强度远大于其超边度。

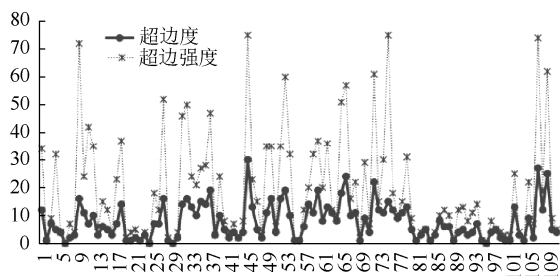


图 18 超边度与超边强度的关系

Fig. 18 The relationship between hyperedge degree and hyperedge intensity

(5) 超边基数。超边基数 H_{BE_i} 定义为任意一条超边 E_i 所包含的节点个数。在出租车路网中,超边基数的大小反映了出租车每次载客所经过路径

的交叉口个数。对于超图中所有超边,若超边基数较大的超边占大多数,则反映出该城区出租车乘客的出行更偏向于短程,或该城区较小等;反之,则反映出该城区出租车乘客的出行更偏向于长途,或该城区较大,人们的活动范围跨度较大等。在面向出租车的超图交通模型中,各超边的超边基数分布如图 19 所示。从图中可以看到,大多数超边的超边强度处在 3~15 的范围,说明出租车载客轨迹超边一般只包含较少数目的交叉口,即乘客一般是近程出行。

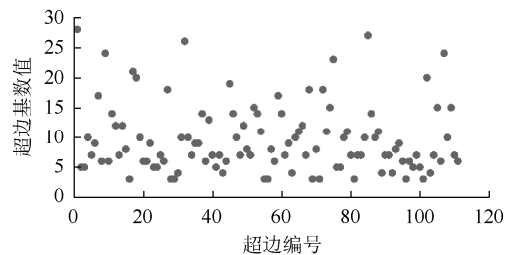


图 19 超边基数分布

Fig. 19 The distribution of hyperedge cardinality

2 结束语

本文在基于传统图的复杂系统研究工作基础上,提出了一种融合多智能体与超图的复杂动态系统建模方法,相对于传统复杂系统研究方式,引入超图理论与多智能体系统的优势有以下 3 点:①在传统图结构中,一条边仅能表示 2 个节点之间的关系,而在超图结构中,一条超边可以连接任意数量的节点,因而其对于描述存在多元关联的对象之间的关系具有天然优势;②相较于传统图结构,超图结构因其节点和超边之间存在复杂丰富的交互方式,可以派生出更多传统图

不具备的拓扑指标,并对超图元素的特征进行更深刻地刻画。本文以出租车交通路网为研究背景,选取载客轨迹为实证数据,并通过超图拓扑指标体系对其进行统计计算与分析,从不同维度阐明不同拓扑指标代表的实际含义。实现在宏观角度下观察不同微观个体之间的交互规律,对网络中不同节点间的关系进行更深入和更全面的研究,为复杂动态系统下研究节点间错综复杂的关系提供了一种新思路;③目前大多数复杂系统研究都是围绕演化模型进行,演化模型的可信度与选取的真实数据集紧密相关。引入多智能体系统,赋予系统中节点智能化特征,提高感知数据的可靠性,为模型的演化提供高质量的数据支持。

同时,本文方法也存在一些不足,在后续的建模优化中,将会引入超边权重、超边方向、超边基数动态调整等度量方式,对实际场景中节点间的复杂关系进行更加严谨贴切的衡量与分析,同时考虑复杂系统中异构节点间的高阶关系分析与处理,以及对不同域数据的模型迁移^[19-22]等。如上,本文提出的演化模型为研究复杂动态系统的感知、决策和控制的分析方法,建立复杂系统智能理论体系,探索系统的演化和调控规律,提供一种全新的思路以及方法。

参考文献 (References)

- [1] 李杨,徐峰,谢光强,等.多智能体技术发展及其应用综述[J].计算机工程与应用,2018,54(9):13-21.
LI Y, XU F, XIE G Q, et al. Survey of development and application of multi-agent technology[J]. Computer Engineering and Applications, 2018, 54(9): 13-21 (in Chinese).
- [2] 孙智诚.考虑驾驶行为演化的多智能体交通流模型研究[D].西安:长安大学,2020.
SUN Z C. Research on multi-agent traffic flow model considering driving behavior evolution[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020 (in Chinese).
- [3] 陈磊,李钟慎.多智能体系统一致性综述[J].自动化博览,2018,35(2):74-78.
CHEN L, LI Z S. Literature review on the consistency of multi-agent systems[J]. Automation Panorama, 2018, 35(2): 74-78 (in Chinese).
- [4] YAMADA M, INOKUCHI A. Similar supergraph search based on graph edit distance[J]. Algorithms, 2021, 14(8): 225.
- [5] GHARAHIGHI A. Fair multi-stakeholder news recommender system with hypergraph ranking[J]. Information Processing & Management, 2021, 58(5): 102663.
- [6] PENG J, ZHANG B, SUGENG K A. Uncertain hypergraphs: a conceptual framework and some topological characteristics indexes[J]. Symmetry, 2022, 14(2): 330.
- [7] GAO Y, ZHANG Z Z, LIN H J, et al. Hypergraph learning: methods and practices[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2022, 44(5): 2548-2566.
- [8] SHAO S, WANG M K, XU R, et al. DLDL: dynamic label dictionary learning via hypergraph regularization[J]. Neurocomputing, 2022, 475: 80-88.
- [9] HEWASINGHAGE M, VARGA J, ABELLÓ A, et al. Managing polyglot systems metadata with hypergraphs[M]//Conceptual Modeling. Cham: Springer International Publishing, 2018: 463-478.
- [10] 罗海秀,赵海兴,肖玉芝,等.基于超图的公交超网络拓扑特性及鲁棒性分析[J].西南大学学报:自然科学版,2021,43(10):181-191.
LUO H X, ZHAO H X, XIAO Y Z, et al. A hypergraph-based analysis of the topology and robustness of bus hypernetworks[J]. Journal of Southwest University: Natural Science Edition, 2021, 43(10): 181-191 (in Chinese).
- [11] YIN N, FENG F L, LUO Z G, et al. Dynamic hypergraph convolutional network[C]//2022 IEEE 38th International Conference on Data Engineering. New York: IEEE Press, 2022: 1621-1634.
- [12] YU P, WANG Z P, WANG P W, et al. Dynamic evolution of shipping network based on hypergraph[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2022, 598: 127247.
- [13] LI M H, PETERS C, LEIMEISTER J. Moving towards a non-dyadic view on service systems and its operationalization - applying the hypergraph-based service system model[C]//The 53rd Hawaii International Conference on System Sciences. Honolulu: University of Hawaii, 2020: 1600-1607.
- [14] WANG Z X. A hypergraph-based approach for context-aware smart product-service system configuration[J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 163: 107816.
- [15] HAMIDI M, SAEID A B. Secretd graphs to binary codes and applications[J]. Soft Computing, 2022, 26(11): 5025-5042.
- [16] ZHEN Y M, WANG J H. Community detection in general hypergraph via graph embedding[J]. Journal of the American Statistical Association, 2021: 1-10.
- [17] DENG Q W, ZHANG S Y, DING Z. An efficient hypergraph approach to robust point cloud resampling[J]. IEEE Transactions on Image Processing: a Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2022, 31: 1924-1937.
- [18] 索琪.超网络的结构、演化及传播动力学研究[D].上海:上海理工大学,2018.
SUO Q. The structure, evolving models, and spreading dynamics of hypernetworks[D]. Shanghai: University of Shanghai for Science & Technology, 2018 (in Chinese).
- [19] LUO Y W, ZHENG L, GUAN T, et al. Taking a closer look at domain shift: category-level adversaries for semantics consistent domain adaptation[C]//2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New York: IEEE Press, 2019: 2502-2511.
- [20] LUO Y W, LIU P, ZHENG L, et al. Category-level adversarial adaptation for semantic segmentation using purified features[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2022, 44(8): 3940-3956.
- [21] LUO Y W, LIU P, GUAN T, et al. Adversarial style mining for one-shot unsupervised domain adaptation[C]//The 34th International Conference on Neural Information Processing Systems. New York: ACM, 2020: 20612-20623.
- [22] LU Y L, LUO Y W, ZHANG L, et al. Bidirectional self-training with multiple anisotropic prototypes for domain adaptive semantic segmentation[EB/OL]. [2022-01-02]. <https://arxiv.org/abs/2204.07730>.