

基于模糊系统的定性与定量知识的综合集成

陈德旺^{1,2}, 刘俐俐^{1,2}, 赵文迪^{1,2}, 欧纪祥^{1,2}, 孙艳焱^{1,2}, 郑楠³

(1. 福建理工大学交通运输学院, 福建 福州 350118;

2. 福建省北斗导航与智慧交通协同创新中心, 福建 福州 350118;

3. 中国科学院自动化研究所多模态人工智能系统全国重点实验室, 北京 100190)

摘要: 综合集成法已被广泛应用于处理复杂系统相关问题, 其核心是人机结合、从定性到定量的迭代求解, 然而如何描述定性与定量知识, 如何有效融合定性与定量知识仍是亟须解决的问题。模糊系统模拟了人脑推理过程, 既可以利用专家的定性知识, 也能够从数据中学习模糊规则, 使用规则映射的方式实现对不确定性问题的系统决策。将模糊系统引入定性与定量知识的描述理解与融合过程, 提出了一种基于模糊系统的可解释性综合集成法。该方法从定性和定量两个角度分别获取知识, 再将两种知识综合集成, 形成模糊规则库, 完成模糊系统建模。该方法可以有效地将专家经验和数据学习相结合, 增强模型的可解释性, 提高复杂系统决策过程的鲁棒性和科学性, 有望成为未来综合集成法研究的一种实现途径, 更好地解决现实世界复杂系统的相关问题。

关键词: 模糊系统; 综合集成法; 复杂系统问题; 可解释性

中图分类号: TP273

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.202447

Qualitative and quantitative knowledge of metasynthesis based on fuzzy system

CHEN Dewang^{1,2}, LIU Lili^{1,2}, ZHAO Wendi^{1,2}, OU Jixiang^{1,2}, SUN Yanyan^{1,2}, ZHENG Nan³

1. School of Transportation, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China

2. Fujian Beidou Navigation and Intelligent Transportation Collaborative Innovation Center, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China

3. State Key Laboratory of Multimodal Artificial Intelligence Systems, Institute of Automation Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: The metasynthesis has been widely used to solve complex system problems, and its core is the combination of human and machine, from qualitative to quantitative iterative solving. But how to describe and integrate qualitative and quantitative knowledge effectively is still the urgent problem to be solved. The fuzzy system simulates the reasoning process of human brain. It can not only use the qualitative knowledge of experts, but also learn fuzzy rules from the data, and use the way of rule mapping to realize the system decision of uncertain problems. By introducing the fuzzy system into the process of description, comprehension and fusion of qualitative and quantitative knowledge, the interpretable metasynthesis based on fuzzy system was proposed. Knowledge was obtained from quantitative and qualitative perspectives, and then the two kinds of knowledge were integrated to form a fuzzy rule base and completed the fuzzy system modeling. This method effectively combines expert experience with data learning, enhances the interpretability of the model, and improves the robustness and scientificity of the decision-making process of complex systems. This method is expected to be

收稿日期: 2024-03-08; 修回日期: 2024-06-20

通信作者: 郑楠, nan.zheng@ia.ac.cn

基金项目: 国家重点研发计划 (No.2023YFC3304104); 福建省第三批创新之星人才计划 (NO.GY-Z23068); 福建理工大学科研基金 (No.GY-Z22071)

Foundation Items: National Key Research and Development Program of China (No.YFC3304104), The Innovation Star Talent Program of the Third Batch in Fujian Province (No.GY-Z23068), The Scientific Research Foundation of Fujian University of Technology (No.GY-Z22071)

a realization method for the research of integrated method in the future, so as to better solve the problem of system complexity in the real world.

Key words: fuzzy system, metasynthesis, complex system problem, interpretability

0 引言

复杂系统科学是多学科的交叉融合, 复杂系统由多个相互关联和相互作用的组件构成, 由于组件之间存在多种交互方式, 复杂系统难以建模。复杂系统问题难以使用传统简单方法和单一学科知识进行有效的处理, 且往往涉及多个相互关联和相互作用的因素, 呈现出非线性、动态性、不确定性和反馈性等复杂关系。同时, 复杂系统通过多个组件之间交互, 表现出智能性和自适应性, 当系统与环境之间发生物质、能量和信息的交换时, 系统可以调整自身的结构、功能和行为, 以积极形成自我学习和自适应的能力。因此, 复杂系统的理论、方法和技术在管理和控制现实世界中的复杂系统方面具有深远影响, 如对生命、航空航天、地球系统、社会组织、经济、军事和复杂工程系统的管理和控制。

我国对复杂系统的研究可追溯到20世纪80年代, 科学家将复杂性与系统概念相结合, 从方法论角度区分复杂性和简单性问题。钱学森院士明确指出: “凡现在不能用还原论方法处理的, 或不宜用还原论方法处理的问题, 而要用或宜用新的科学方法处理的问题, 都是复杂性问题, 复杂系统就是这类问题。”这一观点从系统学的角度为复杂性问题提供了清晰而具体的描述^[1]。

随着研究的深入, 1990年年初, 钱学森^[2]首次将处理开放的复杂巨系统的方法命名为从定性到定量的综合集成法。综合集成法是一种从整体角度考虑并解决问题的方法论, 它强调整体性和综合性, 突破了传统还原论方法的局限性, 是现代科学认知方法论的一次飞跃。其核心思想是把专家体系、数据、信息以及计算机有机结合, 形成人机结合的高智能体系。这意味着在处理复杂系统问题时, 除了利用计算机和数据, 还能充分利用专家的知识 and 经验, 从而实现从定性分析到定量分析的转变。综合集成法用于处理复杂系统任务时, 其表现结果在一定程度上取决于定性与定量知识的表达方式、定性与定量知识的融合。综合集成法需要处理的知识有多种, 既包含定性描述的语言数据等, 也包含定量描述的统计数据等。现有的知识表达方法包括知识

图谱、规则库等。但是, 以深度神经网络为代表的机器学习模型依赖于大数据的训练, 缺乏可解释性和可理解性。

复杂系统问题往往依赖于人的高层次抽象思维, 但人类的认知和决策性能因受各种因素影响, 有很大差异, 大多数时候, 它们并非完全可控。所以借助机器学习模型能够在有足够训练样本、标记数据、明确数值和语义计算目标的情况下解决计算问题, 如分类、推理和决策。对于复杂系统的高度抽象, 如系统操作目标、组件交互、分析模式、任务流程等, 当前机器学习模型所能提供的解决方案与所需解决方案之间仍存在很大差距。这个问题需要通过专家经验和机器学习模型的融合来解决。模糊系统作为一种具有独特优势的技术手段, 逐渐展现出优势。它能够有效处理以自然语言形式表述的专家经验, 并模拟人类推理的思维模式, 用数学逻辑公式对专家经验进行重构, 从而将复杂问题转化为清晰可解释的形式, 使决策过程更加直观和容易被理解, 具有较高的可解释性。同时, 模糊系统还能够利用大数据技术从海量数据中提取知识, 分析总结数据的内在逻辑关系, 使其在处理复杂问题, 尤其是非线性问题时具有显著优势^[3], 为解决复杂系统问题提供了新的思路和方法。

结合综合集成法和模糊系统的特点和优势, 本文创新性地将模糊系统善于处理模糊性和不确定性问题能力与综合集成法深度结合, 提出一种基于模糊系统的定性与定量知识的综合集成法。这一方法旨在充分发挥两者的长处, 克服现有方法的不足, 为复杂系统问题的解决提供更为有效的途径。

1 从定性到定量的综合集成法

1990年, 钱学森提出处理开放的复杂巨系统的方法论, 即“以人为主, 人机结合, 从定性到定量的综合集成法”, 在工程实践中逐步演化为综合集成研讨厅体系和大成智慧工程, 以解决现实生活中的复杂问题^[4-5]。该方法本质上是建立一个结合专家体系、机器体系和知识体系的高智能人机结合系统。图1展示了综合集成法原理框架。

钱学森进一步阐述了关于“定性与定量相结合

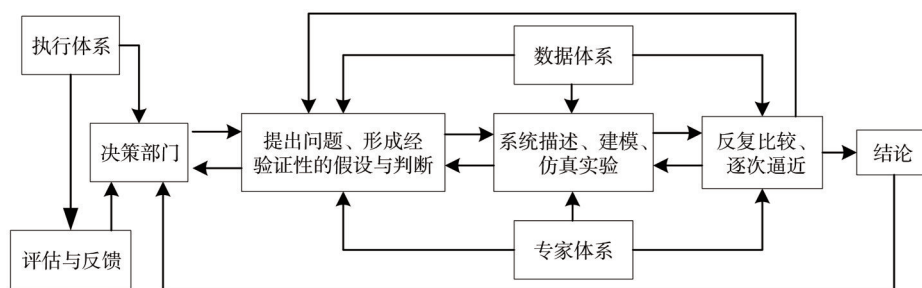


图1 综合集成法原理框架

的综合集成法”的深刻见解，该方法的关键在于实现从感性认识到理性认识的升华。在工作中把专家们从实践中总结出的定性认识、点点滴滴、不一定全面的东西，用系统模型试算，逐步搞清搞准，上升为定量认识。定性是点点滴滴、不全面的感性认识；定量是全面的、深化了的理性认识。

综合集成法作为思维科学的一项应用技术，是建立在实践理论基础之上的。它以实践论为基础，通过人机结合的智能系统，实现了从定性到定量的知识综合集成。在这个人机结合的系统中，以人为主，机器体系不能代替人，只是协助人，专家定性的知识有助于复杂系统的量化分析，从而形成定量的知识，量化的知识则有助于专家对复杂系统有更深入定性认识，从而达到定性知识与定量知识的相互补充和相互促进^[5]。在处理复杂系统问题时，该方法通过构建从定性到定量的综合集成研讨厅体系，充分发挥人类创造性和计算机高效性，利用信息技术收集整理数据，模拟人类思维过程，智能构造模型，以科学化和民主化的方式实现决策，确保理论与实践的一致性。

“定性”与“定量”是人们还原对复杂世界的本质认识的两种方法论。定量方法论的理论基础是实证主义，其途径包括以下步骤：①收集数据；②对数据进行分析、总结、概括；③建立假设；④检验假设；⑤构建结论、解释问题。定量方法论的途径如图2所示。相对而言，定性方法论的理论基础是现象学，其途径是通过观察对研究对象的过程和整体进行详细描述，并在描述的基础上进行想象和移情，从而发现问题并寻求解决方案。定性方法论的途径如图3所示。

综合集成概念与现代信息技术的成就相结合，形成了综合集成法。这种方法代表了形象思维和逻辑思维的有机结合，有利于创造性思维的产生。专家的群体感受和体验是形象思维的结晶，而计算机

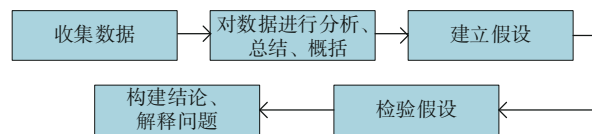


图2 定量方法论的途径

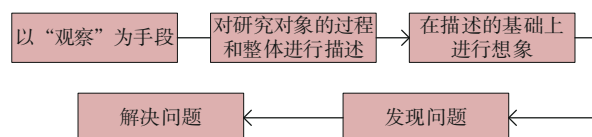


图3 定性方法论的途径

可以有效地模拟逻辑思维与现实各种算法，并利用各种信息而产生创造性。以人为主，人机结合，从定性到定量的综合集成法为研究复杂系统问题提供了方法理论，但在具体实践中仍然存在以下亟须解决的问题：①定性与定量的知识如何表达，使其能够用于知识的推理；②定性与定量的知识如何综合，使系统整体的推理水平能够得到有效提升。

搭建综合集成法的模型框架如图4所示。对开放的复杂巨系统进行的研究，一方面，基于已有的数据、信息、情报以及知识开展推理工作，并实现知识的更新迭代，确保对系统的认知能与时俱进；另一方面，运用模型仿真或者神经计算手段，依据已有的数据得出相应的分析计算成果，为后续决策提供数据支撑。专家通过科学理论、经验知识，结合仿真、计算以及知识推理结果，进行深度研讨，提出解决方案并进行群体方案一致性分析求解，进而得到阶段性结论，该结论可以进行反馈，并通过多次迭代，最终给出人机群体研讨决策的结果，实现对复杂问题的综合集成求解。

综合集成法在解决实际问题中有很多实践，如戴汝为^[5]构建了宏观经济决策综合集成研讨原型系统，利用互联网和高性能计算等信息技术，解决专家群体交互、信息协作推荐、人机结合研讨组织等关键问题，构建含宏观经济数据、知识、模型和建

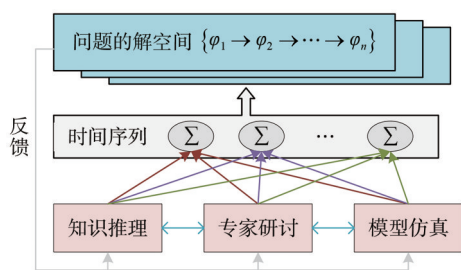


图4 综合集成法的模型框架

模方法的综合集成研讨厅系统，为复杂社会系统的宏观经济决策提供可操作平台^[6]。

当前人工智能领域的研究已经承认人类与智能机器的互补优势和各自的独特性，虽然“深度学习+大数据”的机器学习方法在特定的智能任务方面取得显著的成果，但是以深度学习为代表的机器学习方法和人类智能相比，在鲁棒性、可解释性等多个方面存在明显的不足。因此，人工智能大力倡导将构建人机融合的智能系统作为未来的发展方向。

2 模糊系统的发展

模糊系统自诞生以来已有50多年的历史，经历了三起三落^[7]，过程跌宕起伏。图5为模糊系统发展变化时间轴。

2.1 第一阶段（1965—1980年）

1965年，美国控制论专家、加利福尼亚大学教授Zadeh^[8]首次提出了模糊集合的概念，并发表

了模糊理论开创性论文。模糊系统作为一种在模糊集合上定义输入、输出和状态变量的系统，是对确定性系统的一种推广。模糊集合的引入扩展了传统数学理论中的集合概念，能够更好地处理模糊性问题。随后，Zadeh进一步提出了模糊逻辑的理论，并积极倡导将模糊理论应用于人工智能领域的发展。

模糊系统刚起步，不够成熟的理论知识框架、难以解决的维数灾难问题和精度问题导致了模糊系统的第一次寒冬。随着理论框架的完善，尤其是Mamdani教授将模糊数学理论应用于对复杂系统的控制，开创了模糊控制领域的先河^[9]。在这之后的一段时期，模糊系统的理论解决了很多应用问题，人们推出多种模糊控制系统^[10]，为自动化控制领域带来巨大贡献，学术界涌现出了大量学者研究模糊系统，由此将模糊系统推向了第一次高峰。

2.2 第二阶段（1981—2000年）

早期出现的纯模糊逻辑系统由于只包含了模糊规则库和模糊推理机，其输入和输出均为模糊集合，而实际问题的输入和输出一般为精确值，所以纯模糊逻辑系统往往不能解决实际问题。随后，许多学者因无法找到模糊系统的新突破方向而转向其他领域，对模糊系统的研究陷入了停滞期。

直到1992年，Wang等^[11]利用Stone-Weierstrass定理证明了模糊系统的线性组合能以任意精度一直逼近集合上的任意真实连续函数，并提出了一种基

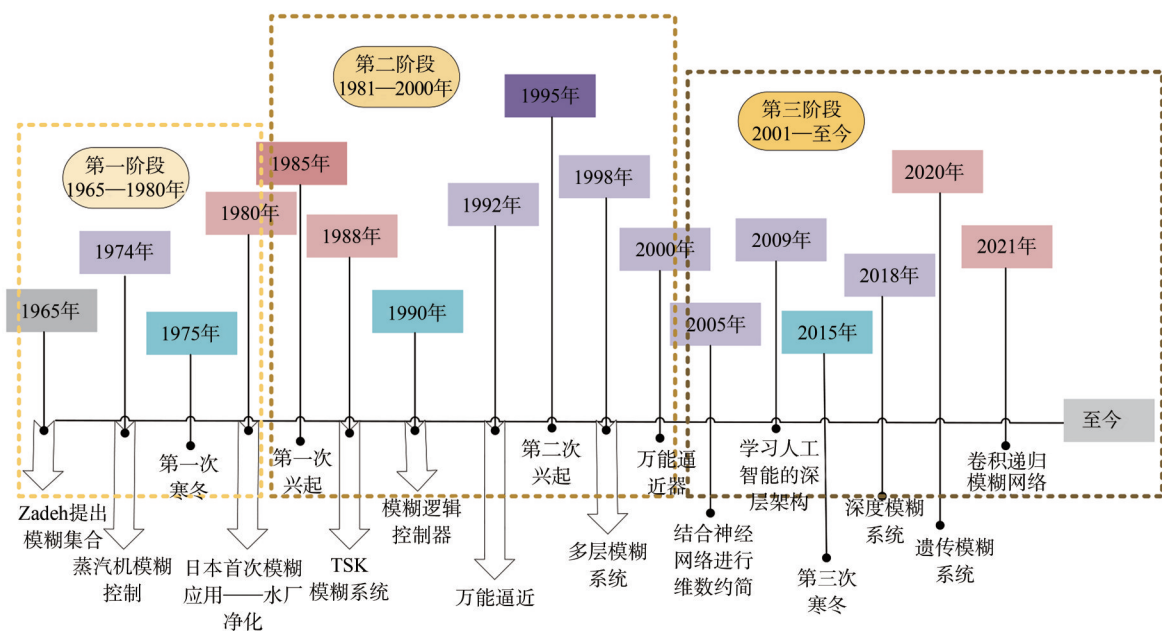


图5 模糊系统发展变化时间轴

于给定输入输出对模糊系统设计的正交最小二乘学习算法。同时,他们还使模糊系统具有了从数据中学习模糊规则的能力,并创立了WM(wang-mendel)方法^[12-13]。1993年,Jang^[14]提出了基于自适应神经网络的模糊推理系统,实现了在自适应网络框架下的模糊推理系统。此后,模糊系统的发展越来越快,许多学者朝着模糊系统的方向不断前进。1994年,Kosko^[15]证明了模糊系统能够以任意精度逼近定义域上的任何真实连续函数。1999年,为了更好地描述和处理不确定性问题,Karnik等^[16]提出了二型模糊逻辑系统(type-2 fuzzy logic system),它能够处理规则的不确定性,提高了模糊系统解决复杂系统问题的能力。自此模糊系统逐渐拥有了自适应学习的能力,并在各领域取得了很大的进步,模糊系统第二次达到了发展的高峰。

2.3 第三阶段(2001年一至今)

尽管模糊系统具有模拟人类的知识推理能力,但处理高维复杂问题时存在的维数灾难问题使其无法解决一些特别复杂的问题,模糊系统迎来了它的第三次寒冬。

随着人工智能技术的不断发展,学者们认为模糊系统存在的一些问题或许可以借鉴人工智能领域的知识解决。

近些年,大数据技术从海量信息中提取了大量富有价值的知识,而这些知识的有效利用则进一步依赖于知识是如何进行表达的。为此,众多学者开始研究可用于模糊系统的知识表达方法。Jin等^[17]提出将传统的模糊推理技术和模糊插值方法相结合可以提高推理结论的准确性,并证明了该方法的潜力和有效性。Wu等^[18]分析了大数据及其相关的隐私保护,对大数据的隐私保护进行了概述,并进一步提出了隐私保护模型,并给出了基于模糊集的保护算法,有助于实现大数据的隐私保护。模糊系统具有模拟人类的知识推理能力,但处理高维复杂问题时存在维数灾难的问题。而深度学习具有模拟人类的学习能力,学者们提出将模糊系统与深度学习融合,深入研究深度模糊系统,使模糊系统既拥有自学习能力和知识推理能力,又可以解决高维大数据问题。通过将复杂问题拆解成多个子问题来解决,在一定程度上克服处理高维复杂问题会遇到的“规则爆炸”的难题,更适合解决大规模数据问题^[19-21]。2020年,Wang^[22]结合深度结构提出一种快速学习的深度卷积模糊系统,显著提升了模糊系

统处理数据的效率。随后,以文献[23]为基础提出的深度补丁学习^[24],再次提升了模糊系统在处理高维复杂问题的能力。相比于单独的深度神经网络,深度神经模糊系统(deep neuro fuzzy system, DNFS)提升了可解释性和准确性^[25]。

模糊系统作为强大的工具,在模拟人的思维处理不确定性和复杂性信息方面有广泛的应用。Garibaldi等^[26]讨论了模糊系统作为决策支持系统处理不确定性信息的能力,并提出了不可区分性的概念框架,将其作为评估计算机决策支持系统的关键部分。张恒艳^[27]探讨了T-S(takagi-sugeno)模糊系统在跟踪控制中的应用,包括鲁棒模糊跟踪控制器设计和仿真实例。付银环等^[28]聚焦水资源系统的调控,运用模糊逻辑制定调控政策,以解决水资源供需不确定性及多目标冲突问题。

综上所述,模糊系统在不同领域有解决复杂问题的能力,能够有效模拟人的思维处理不确定性和复杂性信息,从控制系统到决策支持系统,模糊系统都显示出了其独特的优势和效果。

3 基于模糊系统的定性定量知识融合

近年来,大数据、物联网等信息处理技术的研究成果不断涌现,为解决复杂系统各类问题提供了有效的处理方法。但是面向复杂系统的决策并不能只靠技术,需要遵循“综合集成”的思想,即将人的思维、知识等和计算机的智能有机结合。

模糊系统可以有效利用以语言形式呈现的专家经验,模拟推理人的思维模式,解决复杂问题。同时,模糊系统与深度学习相结合能够有效处理高维数据的问题。这种能对复杂事件进行模糊推理的方法,在处理复杂系统问题中具有显著优势^[29]。模糊系统与聚类算法相结合,在处理高维数据时表现出一定的优势,但容易受到初始值和噪声的影响。而模糊系统与优化算法相结合,虽然全局搜索能力强,但容易陷入局部最优解,导致计算量爆炸。

因此,本文提出使用模糊系统实现“综合集成”,借助模糊系统,将专家经验和海量大数据进行模糊处理并进行有机结合,以更好地处理复杂系统的各类问题。

3.1 基于模糊系统的定性知识库构建

各领域专家通常使用语言等方式来表述他们的知识,但是专家们的窍门和启发式的知识等缺乏明确的逻辑。自Zadeh教授提出模糊逻辑的概念并创

立了模糊数学用来解决这种模糊性的问题, 专家的知识 and 经验可以被更好地理解和应用。

如何获取准确、完整和可靠的领域专家知识至关重要。尽管有多种专家知识获取途径, 如面对面专访、专家讨论、文献研究等, 但是各领域专家以自然语言为载体的知识表述通常具有模糊性。因此, 不仅要借助数据挖掘技术和自然语言处理技术自动化地分析和处理大规模文本数据, 从而提取专家知识信息, 还要通过模糊系统将专家知识转化为数学形式的表达逻辑^[26]。同时, 综合不同的数据来源和获取途径, 以工程领域为例, 融合专家现场经验、会议讨论成果和文献研究资料, 能确保专家知识全面客观, 为后续定性知识模糊规则库建立提供基础。

图6所示为基于模糊系统的定性知识获取和处理。首先是专家知识获取, 通过专家讨论会、面对面专访、问卷调查等方法收集专家知识。为确保信息的准确性和可靠性^[30], 获取的专家知识需要经过模糊化处理, 即采用适当的隶属函数进行表达, 以结构化的方式存储在模糊知识库中, 以便模糊系统进一步理解和利用。

根据专家知识构建模糊规则库, 此过程需要对规则进行合并和冲突消除, 不同的专家知识可能存在冲突和相似, 通过合并相似的规则, 处理冲突的规则, 以确保规则的一致性、准确性, 以及系统的稳定性、有效性。最终, 经过模糊系统处理的定性知识模糊规则库将为系统提供丰富的知识基础, 使其能够智能地处理定性信息, 为实际应用提供支持和指导。这一过程需要不断完善和优化, 以适应不断变化的需求和环境, 为模糊系统的应用提供可靠的支持^[31]。

3.2 基于模糊系统的定量知识库构建

目前, 大数据及其应用已经成为一个热门话题, 从海量信息中提取有价值的信息仍是亟须解决的问题。在众多处理大数据的方法中, 基于模糊系统的模型具有突出的应用。图7所示为基于模糊系统的定量知识获取和处理。首先, 借助数据分析、自然语言处理等多种机器学习方法从海量数据中提取出具有代表性和可信度的知识, 并将其存储在模糊知识库中。模糊知识库的建立不仅需要考虑知识的丰富性和多样性, 还需要根据知识的来源和可靠度进行适当的加权处理, 以确保知识的质量和可信度。

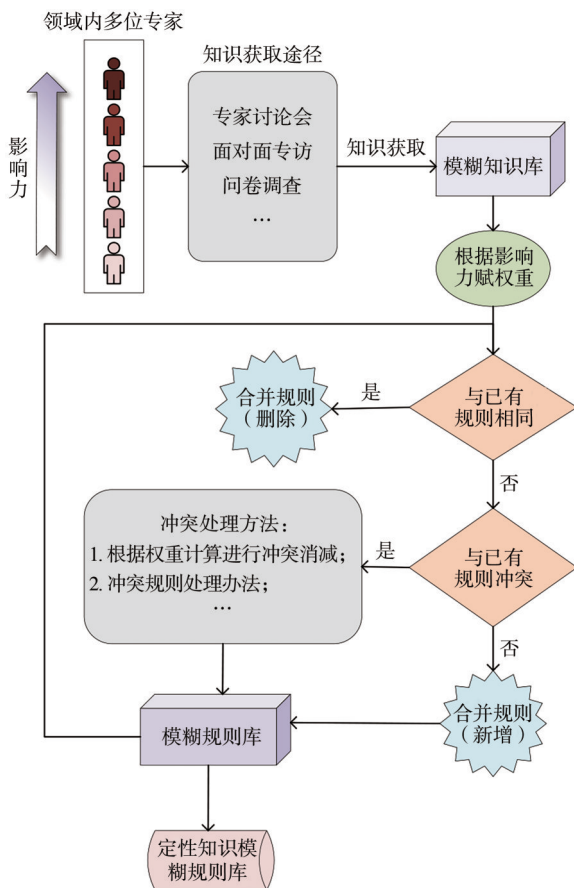


图6 基于模糊系统的定性知识获取和处理

接着对从数据中获取的知识进行处理和整合, 构建定量知识模糊规则库。这一过程包括规则的提取、合并和冲突消除等环节。在规则的提取阶段, 需要对数据知识进行分析和抽取, 将其转化为适合模糊系统处理的形式, 如模糊规则或模糊集合。再遍历分析规则库, 合并相似规则、去除冗余规则, 并妥善处理冲突。冲突源于数据子集或算法差异, 需基于优先级等因素调整, 保证规则库完整一致, 使模糊系统决策准确合理。

基于模糊系统的定量知识处理将大数据知识与应用相连, 把复杂信息转化为实用规则和模型, 在企业决策、科学研究和社会管理等多个领域发挥关键作用。

3.3 基于模糊系统的定性与定量知识融合

基于模糊系统的定性与定量知识融合的核心在于借助模糊系统巧妙地将定性知识和定量知识整合在一起。本文提出了一种新的综合集成法的实现方式, 图8所示为基于模糊系统的定性与定量知识融合框架。

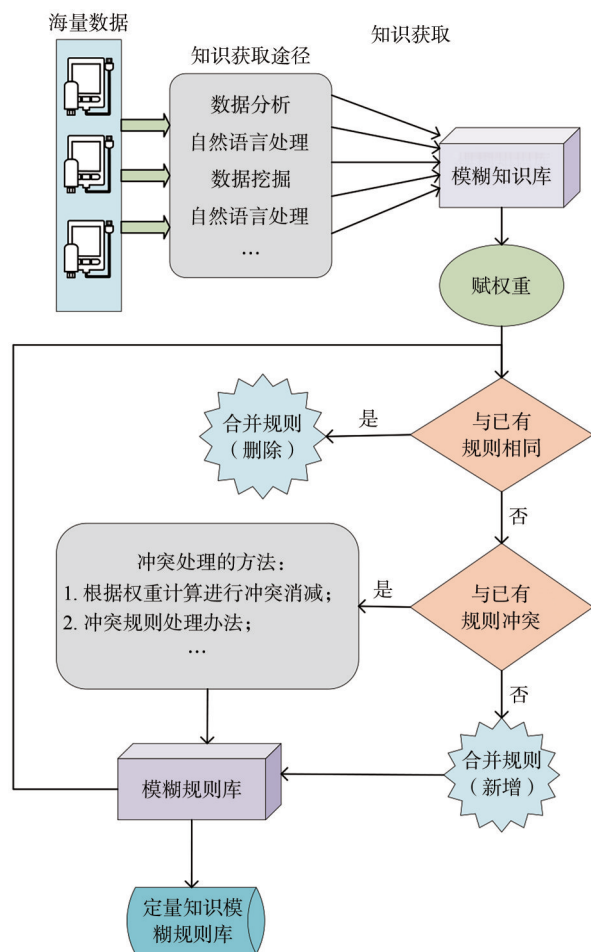


图7 基于模糊系统的定量知识获取和处理

这一融合目标的过程存在诸多关键步骤和挑战。其中，最关键的步骤是模糊规则和隶属度函数的融合。在实际情况中，不同信息源或分析方法常常会导致定量信息和定性信息之间产生冲突。这种冲突会直接导致模糊系统的输出变得不稳定或不确定，进而影响决策的准确性和可靠性。

为应对这一挑战，本文针对定性知识模糊规则库和定量知识模糊规则库，分别赋予其合理的权重。这些权重并非随意设定，而是充分考虑了不同类型知识在特定问题背景下的相对重要性和贡献程度。在完成权重分配后，展开规则的合并与冲突消除。具体而言，对两个模糊规则库中的规则进行遍历，将相同的规则进行合并操作，消除多余的部分，以确保规则库的简洁性和有效性。在此基础上，进一步检查是否存在规则冲突。一旦发现冲突，可依据多种先进的冲突处理方法进行有效化解。经过冲突处理后的规则被系统地整合到模糊规则库中，对于不冲突的规则以及经过冲突处理后的

规则，再次进行规则合并处理，以不断丰富和完善规则库的内容。

引入交互模型，通过模糊推理机实现定性与定量知识的交互。在处理交通拥堵问题时，定量数据（如车流量、车速等）可提供实时交通状况信息，定性知识（如交警对路况的经验判断）可补充特殊情况的处理策略，两者通过交互模型相互影响和补充。同时根据实际应用反馈给系统运行情况，动态调整权重、规则等，以适应不断变化的环境和需求，持续保障融合后知识库的有效性和准确性。例如随着城市交通设施的新建或改造，交通流量规律会发生变化，并及时调整知识库内容。

基于模糊系统的定性与定量的综合集成法为处理复杂问题提供了一种极具潜力和有效性的解决方案。它成功地整合了专家经验和大数据知识两种资源，通过模糊推理机实现了知识的高效整合与深度交互^[32]。这不仅增强了模型的可解释性，使决策过程和结果更加直观、易于被理解，同时还极大地提高了复杂系统决策过程的鲁棒性和科学性。在未来的研究与实践中，此方法能更好地解决现实世界中广泛存在的复杂性问题，在诸如环境科学、工程技术、社会经济等众多领域发挥更重要的作用，推动相关领域的持续发展和进步^[33]。

4 结束语

4.1 结论

本文通过对模糊系统和综合集成法的探讨，论证了基于模糊系统的定性与定量知识综合集成法的实现是解决复杂问题的一种有效方法。该方法通过模糊系统的处理，将定性和定量知识转化为模糊规则库，实现了定性和定量知识的有效整合和交互；通过赋权、合并和冲突处理等步骤，将两种类型的知识融合在一起，为系统提供了更全面和准确的信息基础，为复杂问题的解决提供了可靠的决策支持。

定性知识和定量知识相结合，充分利用了领域专家的知识经验和，使模糊系统具有更强的适应性和鲁棒性。综合集成的模糊系统可以处理多变量、多因素和不确定性等复杂问题，从而更好地解决实际中的复杂问题。将定性和定量知识相融合，可以得到更准确的模糊规则和隶属度函数，提高模糊系统的预测和推理能力，从而更好地进行现实问题的建模和分析。

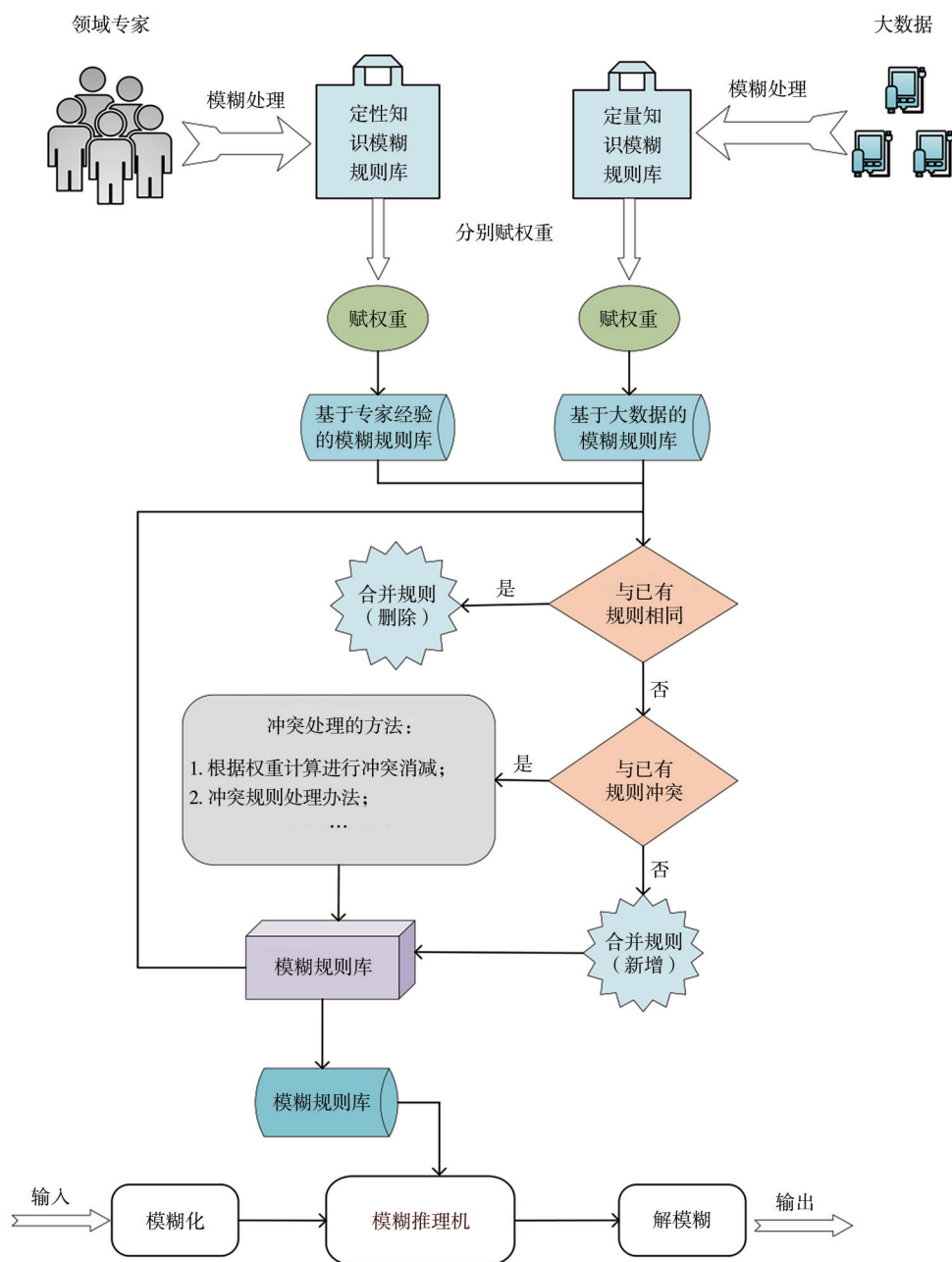


图8 基于模糊系统的定性与定量知识融合框架

4.2 展望

虽然基于模糊系统的定性与定量知识综合集成法有望解决实际问题，但在处理知识的不确定性与模糊性、提升系统智能化水平和应用效果，以及适应动态变化的环境和需求方面，仍然存在很多问题。

针对这些问题，未来的研究可以从以下几个方面进行深入研究。

（1）深化时变论域下的模糊系统研究

时变论域下的模糊系统理论对于提升模糊推理

精度与计算效率意义重大^[34]。现实中，众多复杂系统具有时变特性，如交通流随时间波动、工业过程参数动态变化等。传统模糊系统处理此类问题时，精度与效率常受制约。因此，需深入探究其理论，优化模糊规则与隶属度函数的动态调整机制。例如，设计自适应隶属度函数更新算法，根据系统状态与时间变化实时优化，更精准表征不确定性；改进模糊推理算法，降低计算复杂度，满足实时性要求高的场景需求，如智能交通管控与工业实时监控等领域，以增强系统对时变问题的

处理能力。

(2) 融合语言动力学理论描述系统演化

语言动力学理论有助于刻画系统质变与量变的交互作用, 对于理解复杂系统演化进程至关重要^[35]。未来应将语言动力学理论与基于模糊系统的综合集成法有机融合, 构建精确数学模型, 描绘量变到质变的过程。通过语言值描述系统变量、设定动态规则, 模拟系统迭代中的螺旋式上升动态, 深化对系统演化规律的认识, 为预测模型、控制策略与优化理论提供有力支撑, 助力揭示复杂系统深层次的运行机制。

(3) 推动跨领域融合与大数据处理技术发展

与人工智能、机器学习等领域交叉融合是提升综合集成法性能的关键。大数据时代, 数据规模、多样性与复杂性剧增, 数据处理成为挑战。模糊系统在处理不确定性方面有优势, 但需要提升数据处理能力。未来应深度融合模糊系统与深度学习等技术, 发挥各自长处。例如, 利用深度学习提取特征, 为模糊系统提供精准输入, 通过模糊系统可解释性增强深度学习的透明度。同时, 加强大数据处理技术研究, 开发高效存储、检索与处理算法, 提升模型实时处理大规模数据的能力, 使其快速适应环境与数据变化, 在智能医疗、金融风险预测、智慧城市管理等领域实现更精准的决策, 推动该方法在多领域广泛应用并取得更优效果。

随着对模糊系统和综合集成法的深入研究以及模糊系统和综合集成法的实际应用, 将定性和定量知识相结合, 有望推动其在解决实际问题中的应用范围和深度, 为未来研究和实践开拓更多的可能性和机遇。

参考文献:

- [1] 钱学森, 于景元, 戴汝为. 一个科学新领域: 开放的复杂巨系统及其方法论[J]. 自然杂志, 1990, 12(1): 3-10, 64.
QIAN X S, YU J Y, DAI R W. A new field of science—open complex giant system and its methodology[J]. Nature Magazine, 1990, 12(1): 3-10, 64.
- [2] 钱学森. 一个科学新领域: 开放的复杂巨系统及其方法论[J]. 上海理工大学学报, 2011, 33(6): 526-532.
QIAN X S. A new field of science—open complex giant system and its methodology[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2011, 33(6): 526-532.
- [3] 王雅娣, 曹长修, 任江洪, 等. 模糊RBF神经网络在专家系统知识库建立中的应用[J]. 计算机工程, 2005, 31(3): 175-177.
WANG Y D, CAO C X, REN J H, et al. Application of fuzzy RBF network in constructing knowledge base of expert system[J]. Computer Engineering, 2005, 31(3): 175-177.
- [4] 王丹力, 郑楠, 刘成林. 综合集成研讨厅体系起源、发展现状与趋势[J]. 自动化学报, 2021, 47(8): 1822-1839.
WANG D L, ZHENG N, LIU C L. Hall for workshop of metasynthetic engineering: the origin, development status and future[J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(8): 1822-1839.
- [5] 戴汝为. “再谈开放的复杂巨系统”一文的影响[J]. 模式识别与人工智能, 2001, 14(2): 129-134.
DAI R W. The influence of Qian's talk on “open complex giant systems”[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2001, 14(2): 129-134.
- [6] 田园, 翟凡, 冯珊. 宏观经济智能决策支持系统MEIDSS[J]. 系统工程理论与实践, 1997(3): 2-8.
TIAN Y, ZHAI F, FENG S. Macroeconomic intelligent decision support system (MEIDSS)[J]. Systems Engineering Theory and Practice, 1997(3): 2-8.
- [7] 陈德旺, 蔡际杰, 黄允浒. 面向可解释性人工智能与大数据的模糊系统发展展望[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(4): 327-334.
CHEN D W, CAI J J, HUANG Y H. Development prospect of fuzzy system oriented to interpretable artificial intelligence and big data[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(4): 327-334.
- [8] ZADEH L A. Fuzzy sets[J]. Information and Control, 1965, 8(3): 338-53.
- [9] 钟飞, 钟毓宁. Mamdani与Sugeno型模糊推理的应用研究[J]. 湖北工业大学学报, 2005, 20(2): 28-30.
ZHONG F, ZHONG Y N. The application research of Mamdani and Sugeno style fuzzy inference[J]. Journal of Hubei Polytechnic University, 2005, 20(2): 28-30.
- [10] TAKAGI T, SUGENO M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1985, SMC-15(1): 116-132.
- [11] WANG L X, MENDEL J M. Fuzzy basis functions, universal approximation, and orthogonal least-squares learning[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1992, 3(5): 807-814.
- [12] WANG L X, MENDEL J M. Generating fuzzy rules by learning from examples[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1992, 22(6): 1414-1427.
- [13] WANG L X, MENDEL J M. Back-propagation fuzzy system as non-linear dynamic system identifiers[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems. Piscataway: IEEE Press, 2002: 1409-1418.
- [14] JANG J S R. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1993, 23(3): 665-685.
- [15] KOSKO B. Fuzzy systems as universal approximators[J]. IEEE Transactions on Computers, 1994, 43(11): 1329-1333.
- [16] KARNIK N N, MENDEL J M, LIANG Q. Type-2 fuzzy logic systems[J]. IEEE transactions on Fuzzy Systems, 1999, 7(6): 643-58.
- [17] JIN S Z, PENG J, XIE D. Towards MapReduce approach with dynamic fuzzy inference/interpolation for big data classification problems[C]//Proceedings of the 2017 IEEE 16th International Conference on Cognitive Informatics & Cognitive Computing. Piscataway: IEEE Press, 2017: 407-413.
- [18] WU J, WANG C. Privacy preserving for big data based on fuzzy set[C]//Proceedings of the Cloud Computing and Security: 4th International Conference. Haikou: Springer, 2018: 651-659.
- [19] SHARMA D, SINGH AUJLA G, BAJAJ R. Deep neuro-fuzzy approach

- for risk and severity prediction using recommendation systems in connected health care[J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2021, 32(7): e4159.
- [20] USMAN M, CARIE A, MARAPELLI B, et al. A human-in-the-loop probabilistic CNN-fuzzy logic framework for accident prediction in vehicular networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(14): 15496-15503.
- [21] ZHAO W D, CHEN D W, ZHENG X Y, et al. Serial fuzzy system algorithm for predicting biological activity of anti-breast cancer compounds[J]. Applied Intelligence, 2023, 53(11): 13801-13814.
- [22] WANG L X. Fast training algorithms for deep convolutional fuzzy systems with application to stock index prediction[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2020, 28(7): 1301-1314.
- [23] WU D, Mendel J M. Patch learning[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2019, 28(9): 1996-2008.
- [24] HUANG Y H, CHEN D W, ZHAO W D, et al. Deep patch learning algorithms with high interpretability for regression problems[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2022, 37(11): 8239-8276.
- [25] TALPUR N, ABDULKADIR S J, ALHUSSIAN H, et al. Deep neuro-fuzzy system application trends, challenges, and future perspectives: a systematic survey[J]. Artificial Intelligence Review, 2023, 56(2): 865-913.
- [26] GARIBALDI J M, 陈虹宇, 李小双. 差异与学习: 模糊系统与模糊推理[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(4): 319-326.
- GARIBALDI J M, CHEN H Y, LI X S. Variation and learning: fuzzy system and fuzzy inference[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(4): 319-326.
- [27] 张恒艳, 高中文, 李文龙, 等. 不确定 T-S 模糊系统的跟踪控制器设计[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(2): 15-19.
- ZHANG H Y, GAO Z W, LI W L, et al. Design of tracking controller for Uncertain T-S Fuzzy System[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering and Technology Edition), 2016, 37(2): 15-19.
- [28] 付银环, 李新旺, 徐宝同, 等. 不确定性多目标模糊规划在水资源优化配置中的应用[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(3): 470-479.
- FU Y H, LI X W, XU B T, et al. Multi-objective fuzzy uncertainty planning in the application of the optimized allocation of water resources[J]. Journal of the south-north water diversion and water conservancy science and technology (both in English and Chinese), 2023, 21(3): 470-479.
- [29] 陈德旺, 欧纪祥. 平行模糊控制: 虚实互动、相互增强的自学习控制方法[J]. 智能科学与技术学报, 2023, 5(2): 267-273.
- CHEN D W, OU J X. Parallel fuzzy control: a self-learning control method with virtual-real interaction and mutual enhancement[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2023, 5(2): 267-273.
- [30] 杜宏庆, 陈德旺, 黄允许, 等. 基于改进遗传算法与支持度的模糊系统优化建模方法[J]. 智能科学与技术学报, 2020, 2(2): 179-185.
- DU H Q, CHEN D W, HUANG Y H, et al. A fuzzy system optimization modeling method based on improved genetic algorithm and support degree[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2020, 2(2): 179-185.
- [31] 司景萍, 马继昌, 牛家骅, 等. 基于模糊神经网络的智能故障诊断专家系统[J]. 振动与冲击, 2017, 36(4): 164-171.
- SI J P, MA J C, NIU J H, et al. An intelligent fault diagnosis expert system based on fuzzy neural network[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(4): 164-171.
- [32] 倪清桦, 郭超, 王飞跃. 平行戏剧: 新时代戏剧的人机协同创作与智能管理[J]. 智能科学与技术学报, 2023, 5(4): 436-445.
- NI Q H, GUO C, WANG F Y. Parallel theaters: human-machine collaborative creation and intelligent management for theatrical art[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2023, 5(4): 436-445.
- [33] 张俊, 许沛东, 陈思远, 等. 物理-数据-知识混合驱动的人机混合增强智能系统管控方法[J]. 智能科学与技术学报, 2022, 4(4): 571-583.
- ZHANG J, XU P D, CHEN S Y, et al. A hybrid physics-data-knowledge driven approach for human-machine hybrid-augmented intelligence-based system management and control[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2022, 4(4): 571-583.
- [34] 莫红. 时变论域下的语言动力学轨迹[J]. 自动化学报, 2012, 38(10): 1585-1594.
- MO H. Linguistic dynamic orbits in the time varying universe of discourse[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(10): 1585-1594.
- [35] 莫红, 郝学新. 时变论域下红绿灯配时的语言动力学分析[J]. 自动化学报, 2017, 43(12): 2202-2212.
- MO H, HAO X X. Linguistic dynamic analysis of traffic light timing design within the time-varying universe[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(12): 2202-2212.

[作者简介]



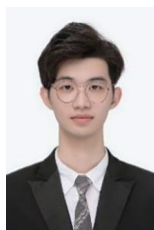
陈德旺 (1976-), 男, 博士, 福建理工大学交通运输学院闽江学者特聘教授, 俄罗斯自然科学院外籍院士, 欧洲自然科学院院士。主要研究方向为人工智能、模糊系统、智能交通系统。曾在20多个国际会议的项目委员会任职。自2015年以来, 一直担任IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS的副编辑。发表论文200余篇, 出版专著7部, 获得科研奖励和人才奖励20余项。



刘俐俐 (1999-), 女, 福建理工大学交通运输学院硕士生, 主要研究方向为模糊系统、自动驾驶。



赵文迪 (1996-), 男, 福建理工大学交通运输学院硕士生, 主要研究方向为智能交通、模糊系统。



欧纪祥 (2001-), 男, 福建理工大学交通运输学院硕士生, 主要研究方向为模糊系统、可解释人工智能。



孙艳焱（1999-），女，福建理工大学交通运输学院硕士生，主要研究方向为模糊系统、线路规划。



郑楠（1984-），中国科学院自动化研究所多模态人工智能系统全国重点实验室副研究员，主要研究方向为复杂系统、系统集成、数据挖掘。