

自然科学奖公示信息

一、项目名称

复杂系统智能建模、认知与调控理论与方法

二、提名者及提名意见

提名者：陕西省教育厅

提名意见：

我单位认真审阅了该项目提名书及附件材料，确认全部材料真实有效，并按照要求对该项目的基本情况进行了公示，公示期间无异议。

本项目从人工智能角度对复杂网络进行了从“建模”到“认知”到“调控”的全链条、多维度研究。在复杂系统智能建模方面，提出了数据驱动的多场景大规模复杂系统建模方法。从数据类型到复杂系统类型，系统地设计了一系列面向多场景的复杂系统建模方法，完备了复杂系统智能建模体系。同时，突破了数据驱动的超大规模系统建模的维度禁锢，可有效地处理千万级变量。在复杂系统智能认知方面，建立了多场景复杂系统认知新理论。对多种形态网络上的社团检测、鲁棒性分析等问题，克服了系统认知优化问题的黑盒和非凸性，健全了复杂系统社团、鲁棒性认知体系。在复杂系统智能调控方面，建立了系统认知驱动的复杂系统调控机制，能够根据需求对复杂系统进行优化与调控，提高了复杂系统在开放、动态、复杂环境下的灵活性、鲁棒性和自适应性。项目形成了覆盖“建模-认知-调控”的一体化新型复杂系统理论与方法，丰富了人工智能的理论与工具，拓广了人工智能的研究领域。

项目研究取得了一系列重要的研究成果，发表学术论文 100 余篇，其中包含中科院 SCI I 区期刊论文 40 余篇。项目成果主要完成人入选国家级青年人才、国家级人才等多项奖励。部分研究成果已应用于面向新高考的智能分班排课系统和某某力量体系建模与智能优选系统，取得了良好的社会经济效益。

根据《陕西省科学技术厅关于 2025 年度省科学技术奖提名工作的通知》，参照自然科学奖评定条件和评定标准，提名该项目参评陕西省自然科学奖二等奖。

三、项目简介

本项目属于人工智能与复杂系统两个领域的交叉基础研究。

信息技术与人工智能的迅速发展推动着世界进入万物互联的时代，万物互联构成了各种类型的复杂系统，影响、控制着人类生活的方方面面。复杂系统中无

形的相互作用关系往往导致对系统“牵一发而动全身”的作用，急需能够对复杂系统进行刻画、分析、认知的方法，以使得我们能够按照需求控制、调整、优化复杂系统。复杂网络是刻画复杂系统各部分间运作关系的有力工具，2021年Science杂志发布的“全世界最前沿的125个科学问题”中多项课题与系统高阶复杂关联的研究紧密相关。然而，由于复杂系统的高维性和高复杂性等特点，导致传统方案难以胜任建模、认知和调控开放环境下的大规模多场景复杂系统，急需能够高效解决这些问题的系统性工作。

在对进化优化和复杂系统领域长期深入、系统研究的基础上，在国家自然科学基金优秀青年科学基金项目、面上项目、科技部重点研发计划课题的支持下，本项目聚焦复杂系统上的全链条基础优化问题，发挥进化计算的优势，沿着自下而上从“复杂系统智能建模”到“复杂系统智能认知”到“复杂系统智能调控”的思路，致力于研究面向复杂系统上全链条基础优化问题的解决方法，取得了一系列高水平的研究成果，得到了国内外同行地广泛认可。

针对复杂系统的研究，一方面期望能够准确刻画出系统内部以及系统各部分间的相互作用关系，另一方面则期望了解系统的特性，从而能够调节、控制、提升系统性能。因此，复杂系统智能建模是后续系统认知与调控的基础。在构建精准网络模型后，在不改变网络本身的拓扑结构下对复杂系统的特性进行认知。面对任务需求，构建符合系统迭代更新规律和演化规则约束的网络结构，达到对复杂系统从“建模”到“认知”再到“调控”的目的。本项目具体科学发现如下：

（1）在复杂系统智能建模方面，提出了数据驱动的多场景大规模复杂系统建模方法。利用模糊认知图和复杂网络作为描述复杂系统的网络建模工具，将复杂系统建模问题转化为根据系统各部分的状态随时间变化的数据学习系统各部分间相互作用关系的问题，从而研究复杂系统拓扑特性与演化规则，探索单层、异构多层、高阶的组织架构对复杂系统涌现、任务求解效能的影响。从数据类型到复杂系统类型，系统地设计了一系列面向多场景的复杂系统建模方法，完备了复杂系统智能建模体系。同时，采用分而治之的思想，突破了数据驱动的超大规模系统建模的维度禁锢，可有效地处理千万级变量。

（2）在复杂系统智能认知方面，建立了多场景复杂系统认知新理论。对多种形态网络上的社团检测、鲁棒性分析等问题，克服了系统认知优化问题的黑盒和非凸性，首次设计了支持符号网络、带属性网络的社团检测方案，健全了复杂系统社团认知体系。从网络鲁棒性的理论分析，到鲁棒性指标的全面评测，再到网络间连接方式与耦合关系对超网络鲁棒性的影响等，首次系统地设计了复杂系统鲁棒性认知体系，达到了全方位认知复杂系统的目的，为调控复杂系统提供了有力依据与指导。

(3) 在复杂系统智能调控方面，建立了系统认知驱动的复杂系统调控机制。通过利用进化计算等智能优化技术构建符合系统迭代更新规律和演化规则约束的拓扑结构，如网络鲁棒性、社团结构和影响力最大化等，并以此能够根据需求对复杂系统进行优化与调控，提高了复杂系统在开放、动态、复杂环境下的灵活性、鲁棒性和自适应性，从而形成面向任务需求的复杂系统调控机制。

本项目是对人工智能和复杂系统两个领域的深度交叉研究。不仅对复杂系统的各个层面，包括建模、认知、调控进行了研究，而且对各种形态的复杂系统进行了研究，还对复杂系统的各种特性进行了研究，克服了一系列新的网络研究问题，在复杂系统方面取得了一系列系统性的研究成果。另一方面，面向复杂系统中问题的特点，对群体智能优化、学习方法进行了深入研究，发展了一系列新的智能优化、学习模型与算法，丰富了人工智能的理论与工具，拓广了人工智能的研究领域，推动了人工智能在复杂系统方面研究的进展，为解决复杂系统上的问题提供了新的智能工具。

本项目的研究成果产生了广泛的国际学术影响。五篇代表性论文均发表在中科院 I 区国际顶级期刊上，并在 Spring 出版英文专著 1 部——本书对进化计算和复杂网络两个领域进行了双向研究，一方面探讨了如何用复杂网络对进化搜索空间进行理论分析；另一方面，初步探索了用进化计算解决复杂网络上的社团检测、鲁棒性等问题，是第一本介绍进化计算与复杂网络两个领域交叉研究的专著，为深入地研究复杂系统建模、认知、调控奠定了基础。基于上述研究，本项目从军用、民用两方面对某某力量体系建模与智能优选技术、面向新高考的智能分班排课优化技术展开了实际落地研究，开发了高效的某某力量体系建模及打击效果定量评估技术、走班制智能分班排课算法，为充分发挥某某力量体系效能提供了智能决策支持，为在新高考需求下充分利用学校资源提供了智能调度方案。2017 年至今获国家发明专利授权 26 项，已成功转化 1 项。第三完成人入选国家级青年人才、国家级人才等多项奖励。第二完成人获得陕西省科学技术协会青年人才托举计划项目资助、陕西省优秀博士学位论文。

四、客观评价

IEEE、IET Fellow、英国埃塞克斯大学计算智能中心主任 Hani Hagras 教授和 IEEE TFS 前主编、IEEE Fellow、澳大利亚悉尼理工大学人工智能中心 Chin-Teng Lin 教授合作发表的代表性引文[1]中对本项目的系列工作进行了大段评述，指出代表性论文[1]为大规模稀疏模糊认知图学习问题提供了有效的解决方案，同时也指出代表性论文[2]为非静态时间序列的处理提供了有力的工具。（具体评价如下：A hybrid technique for FCMs learning for predicting nonstationary time series is proposed by Yang and Liu [24]（代表性论文[2]）. They presented the use of wavelet

transform with higher order FCMs for predicting nonstationary time series. The application of wavelet transform converts original time series into multivariate time series, which are then employed by higher order FCMs to model and predict the original nonstationary time series... The works by Wu and Liu [26] (代表性论文[1]), [27] offer two different approaches for large-scale and sparse FCMs learning, one using compressed sensing and the second using least absolute shrinkage and selection operator.)。

Capgemini Engineering 首席数据科学家、Pablo de Olavide 大学数据科学实验主任 Jose L. Salmeron 教授等人发表的代表性引文[2]指出代表性论文[1]和[2]为大规模多阶数的模糊认知图学习问题提供了有效的解决方案。(具体评价如下: In the FCM context, several construction approaches exist. For example, Wu and Liu [16] (代表性论文[1]) developed a method based on convex optimization to learn large-scale sparse FCMs, while Yang and Liu [17] (代表性论文[2]) introduced a time-series prediction model based on the hybrid combination of high-order FCMs with the redundant wavelet transform to handle large-scale nonstationary time series.)。

波兰科学院院士、加拿大皇家学会会士、IEEE Life Fellow、Information Sciences 主编、加拿大阿尔伯塔大学 Witold Pedrycz 教授等人发表的代表性引文[3]中指出代表性论文[2]是一种高性能的时间序列预测方法。(具体评价如下: Then Yang and Liu [9] (代表性论文[2]) used wavelet transform and Liu and Liu [10] used empirical mode decomposition to extract features and forecast time series by high-order FCMs. These existing FCM-based forecasting models achieve good performance, ...)。

IEEE Fellow、香港浸会大学 Jiming Liu 教授等人发表的代表性引文[4]中指出代表性论文[5]提出一种多目标进化算法来增强网络的鲁棒性。(具体评价如下: For example, the authors in [37] (代表性论文[5]), [38] take the advantage of multiobjective optimization to explore the optimal network structures that are robust to perturbations.)。此外, Jiming Liu 教授等人也指出代表性论文[3]中将社团检测问题建模成多目标问题能够减轻甚至避免分辨率限制。(具体评价如下: Another merit is that, if one models the network clustering task as a multiobjective optimization problem [28] (代表性论文[3]), [36], it could mitigate or even avoid the resolution limit because each single run of a multiobjective optimization based network clustering algorithm will yield a set of network partitions with different clusters.)。

IEEE Fellow、张军教授等人发表发表的代表性引文[5]中指出代表性论文[3]提出了一种多目标进化算法来对无标度网络进行社团检测。该代表中所提出的基于间接节点的表示方法可以用于重叠社区检测。（具体评价如下：For the indirect node Based approach [27]（代表性论文[3]），each gene of an individual is a random integer within the number of nodes of the network and thus a decoder is needed to transform them to the corresponding community information. In the decoding process, each node is allowed to belong to multiple communities, such that this representation approach can be used for overlapping community detection.）。

中国科学院院士、西安交通大学徐宗本院士和IEEE Fellow、香港城市大学张青富教授合作发表的代表性引文[6]以及IEEE Fellow、新加坡科技局首席人工智能科学家、南洋理工大学计算机科学与工程学院校长讲席教授Yew-Soon Ong发表的代表性引文[7]中指出代表性论文[4]是一种非常有前途的重叠社区检测算法。（在代表性引文[6]中具体评价如下：To the best of our knowledge, only three promising MOEAs, that is: 1) MOEA-SA; 2) MOGA-@Net; and 3) CE-MOEA, were reported recently, but without considering the overlapping problem. Only one peer-reviewed work, called MOEA-SAOV[36]（代表性论文[4]），was proposed for the overlapping community detection in attribute networks. 在代表性引文[7]中具体评价如下：More recently, multiobjective genetic algorithms for the attributed graph [23], [31], [39]（代表性论文[4]）are proposed to uncover network clusters, which perform the task by maximizing the connectivity and similarity of vertex features in clusters.）。

欧洲科学院院士、APS Fellow、Fellow of Fraunhofer Society 德国洪堡大学Jürgen Kurths 教授等人发表的代表性引文[8]中指出代表性论文[5]提出了一种基于多目标进化算法来增强不同攻击下网络的鲁棒性。（具体评价如下：Thus, node degree as the most important and easily obtained property naturally becomes the touchstone for the evaluation of network status, Zhou and Liu [59]（代表性论文[5]）tried to find the Pareto front of different attack methods when enhancing the network robustness.）。

代表性论文专著被他人引用的情况

序号	被引代表性论文专著序号	引文名称/作者	引文刊名	引文发表时间 (年 月 日)
----	-------------	---------	------	-------------------

1	1,2	Effective Brain Connectivity for fNIRS With Fuzzy Cognitive Maps in Neuroergonomics/ Mehrin Kiani, Javier Andreu-Perez, Hani Hagraas, Elpiniki I. Papageorgiou, Mukesh Prasad, Chin-Teng Lin	IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems	2019 年 12 月 9 日
2	1,2	Construction and Supervised Learning of Long-Term Grey Cognitive Networks/Gonzalo Nápoles, Jose L. Salmeron, Koen Vanhoof	IEEE Transactions on Cybernetics	2019 年 5 月 20 日
3	2	The Trend-Fuzzy-Granulation-Based Adaptive Fuzzy Cognitive Map for Long-Term Time Series Forecasting/ Yihan Wang, Fusheng Yu, Wladyslaw Homenda, Witold Pedrycz, Yuqing Tang, Agnieszka Jastrzebska, Fang Li	IEEE Transactions on Fuzzy Systems	2022 年 4 月 26 日
4	3,5	Hierarchical Clustering of Bipartite Networks Based on Multiobjective Optimization/ Qing Cai, Jiming Liu	IEEE Transactions on Network Science and Engineering	2018 年 5 月 2 日
5	3	A Maximal Clique Based Multiobjective Evolutionary Algorithm for Overlapping Community Detection/Xuyun Wen, Wei-Neng Chen, Ying Lin, Tianlong Gu, Huaxiang Zhang, Yun Li, Yilong Yin, and Jun Zhang	IEEE Transactions on Evolutionary Computation	2016 年 9 月 1 日
6	4	Continuous Encoding for Overlapping Community Detection in Attributed Network/Wei Zheng, Jianyong Sun, Qingfu Zhang, Zongben Xu	IEEE Transactions on Cybernetics	2022 年 3 月 14 日
7	4	Vicinal Vertex Allocation for Matrix Factorization in Networks/ Tiantian He, Lu Bai, Yew-Soon Ong	IEEE Transactions on Cybernetics	2022 年 8 月 10 日
8	5	Framework of Evolutionary Algorithm for Investigation of Influential Nodes in Complex Networks/Yang Liu, Xi Wang, Jürgen Kurths	IEEE Transactions on Evolutionary Computation	2019 年 2 月 22 日

五、代表性论文专著目录

序号	论文专著名称	刊名	作者	年卷页码 (xx 年 xx 卷 xx 页)	发表时间 (年月日)	通讯作者 (含共同)	第一作者 (含共同)	国内作者	检索数据库	知识产权是否归国内所有
1	Learning large-scale fuzzy cognitive maps based on compressed sensing and application in reconstructing gene regulatory networks	IEEE Transactions on Fuzzy Systems	Kai Wu, Jing Liu	2017 年 25 卷 1546-1560 页	2017 年 12 月	Jing Liu	Kai Wu	吴凯, 刘静	SC I-Expanded	是
2	Time series forecasting based on high-order fuzzy cognitive maps and wavelet transform	IEEE Transactions on Fuzzy Systems	Shanchao Yang, Jing Liu	2018 年 26 卷 3391-3402 页	2018 年 12 月	Jing Liu	Shanchao Yang	杨善超, 刘静	SC I-Expanded	是
3	A multiobjective evolutionary algorithm based on similarity for community detection from signed social networks	IEEE Transactions on Cybernetics	Chenlong Liu, Jing Liu, Zhongzhou Jiang	2014 年 44 卷 2274-2287 页	2014 年 12 月	Jing Liu	Chenlong Liu	刘辰龙, 刘静, 江中舟,	SC I-Expanded	是

4	Overlapping community detection in directed and undirected attributed networks using a multiobjective evolutionary algorithm	IEEE Transactions on Cybernetics	Xiangyi Teng, Jing Liu, Mingming Li	2021 年 51 卷 138-150 页	2021 年 1 月	Jing Liu	Xiangyi Teng	滕祥意, 刘静, 栗明明	SCI-Expanded	是
5	A two-phase multi-objective evolutionary algorithm for enhancing the robustness of scale-free networks against multiple malicious attacks	IEEE Transactions on Cybernetics	Mingxing Zhou, Jing Liu	2017 年 47 卷 539-552 页	2017 年 2 月	Jing Liu	Mingxing Zhou	周明星, 刘静	SCI-Expanded	是
6	Evolutionary Computation and Complex Networks	Springer	Jing Liu, Hussein A. Abbass, Kay Chen Tan		2019 年	Jing Liu	Jing Liu	刘静	EV Compendex (EI)	是
合 计										

六、主要完成人情况

姓名	排名	行政职务	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目贡献
吴凯	1	无	副教授	西安电子科技大学	西安电子科技大学	是复杂网络智能建模与学习方面发现的主要完成人之一，致力于研究基于模糊认知图的复杂网络智能建模、学习方法，提出了能够处理百万级变量建模优化问题的智能方法。

						是代表性论文专著 1 的第一作者。
滕祥意	2	无	讲师	西安电子科技大学	西安电子科技大学	是复杂网络智能认知与学习方面发现的主要完成人之一，致力于研究基于进化计算的复杂网络智能特性学习与优化方法，提出了一系列面向各形态网络的智能计算社团检测方法。是代表性论文专著 4 的第一作者。
刘静	3	西安电子科技大学广州研究院副院长	教授	西安电子科技大学	西安电子科技大学	是项目的总负责人，负责整个项目的规划与实施，制定了从“复杂网络智能建模”到“复杂网络智能学习”到“复杂网络智能优化”的研究思路，设计了项目的研究内容和研究目标。对项目简介中所列三个发现都做出了创造性贡献。是代表性论文专著 1-5 的通讯作者，代表性论文专著 6 的第一作者。

七、主要完成单位情况

西安电子科技大学是该项目的唯一完成单位，全面负责项目的总体规划、设计、实施与组织，为本项目提供了大力支持和充分保障，确保了项目的顺利进行。

八、完成人合作关系说明

刘静教授为项目第三完成人和团队负责人，负责项目总体方案的设计及项目管理。第一完成人吴凯为刘静教授的博士生，获得博士学位后进入刘静教授科研团队工作，聘为“华山菁英副教授”，为团队优秀青年教师。第二完成人滕祥意为刘静教授的博士生，获得博士学位后进入刘静教授科研团队工作，聘为“华山准聘副教授”，为团队优秀青年教师。