电 子 科 技 大 学

学术学位研究生学位论文开题报告表

攻读学位级别： □博士 🗹硕士

学科专业： 计算机科学与技术

学 院： 计算机科学与工程学院

学 号： 202221080735

姓 名： 汪思敏

论文题目： 面向结构优化的复杂网络链路

推荐算法研究

指导教师： 董强

填表日期： 2023 年 12 月 28 日

电子科技大学研究生院

1. 学位论文研究内容

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 课题类型 | | □基础研究 □应用基础研究 □应用研究 |
| 课题来源 | | □纵向 □横向 自拟 |
| 学  位  论  文  研  究  内  容 | 学位论文的研究目标、研究内容及拟解决的关键性问题（可续页）   1. **研究目标：**   复杂网络是一种用于描述和研究具有复杂拓扑结构的网络系统的数学和计算模型。复杂网络的研究领域主要包括网络科学、图论、统计物理学和计算机科学等多个学科。复杂网络由大量的节点和连接这些节点的边组成。节点可以代表各种实体，如人、物体、网站或者分子等，而边则表示节点之间的关系或连接。这些关系可以是直接的物理连接，也可以是抽象的信息传递、交互或影响等。  链路预测是复杂网络分析中的一项重要任务，旨在预测网络中未来可能形成的新连接或缺失的连接。它基于已知的网络拓扑结构和节点属性信息，通过学习网络的模式和规律，尝试预测网络中尚未观察到的连接。预测的依据可以是网络中节点之间的结构特征、节点的属性信息、节点间的相似性等。而当前链路预测算法的研究主要以优化预测准确率为目标，很少关注网络其他的性能指标，本文将注意力转向关注网络全局结构性能指标，并以此为优化目标。  本学位论文旨在针对复杂网络的链路预测问题，提出一种以优化全局结构性能指标为目标的新型加边策略。具体而言，研究目标包括以下几个方面：   1. 理论分析与建模：深入研究复杂网络的拓扑特性、节点属性对链路预测的影响机制，并在此基础上构建一个能够反映网络全局性能的评估体系。 2. 链路预测方法创新：设计和开发一种新的链路预测模型，该模型不仅关注提高预测准确率，而且将网络全局结构性能指标（例如群聚系数、路径长度、网络直径等）作为优化目标之一。 3. 加边策略探究：探索并实现基于启发式算法的加边策略，在保证预测准确性的同时，通过向复杂网络中添加预判的连接关系来改善整体网络的结构性能，如提升网络的连通性、均衡性和效率。 4. 网络鲁棒性提升：在考虑加边策略的过程中，兼顾网络遭受攻击时的鲁棒性，通过合理的加边操作增强网络抵抗节点攻击或级联失效的能力，从而在遭受破坏后仍能保持较高的结构性能水平 5. **研究内容** 6. **链路预测技术的研究与改进**   在复杂网络中，通过分析已有的网络拓扑结构和节点属性信息，研究如何准确预测网络中未来可能形成的新连接或缺失的连接。本论文将探索不同的链路预测方法，包括基于网络结构特征、节点属性信息和节点相似性等的预测模型。全面梳理现有链路预测方法及其优缺点，结合复杂网络特性和实际应用场景，对现有预测模型进行改进和创新，使之更适应于优化全局结构性能的需求。   1. **面向网络全局性能优化的加边策略研发**   设计并实现一套全新的加边策略算法，通过对复杂网络潜在连接关系的精准预测，选择性地增加边，以达到优化网络全局结构性能的目的。通过考虑网络的连通性、聚类系数、平均最短路径长度等指标，设计合理的加边策略，以提升网络的整体性能。   1. **网络结构性能分析**   本论文还将对复杂网络的结构性能进行深入分析。通过研究网络的攻击鲁棒性等指标，探索网络的稳定性和功能性能。通过实验和数学建模，解析网络结构对其性能的影响，并提出相应的改进方法。运用定量和定性的方法分析在网络加边前后结构性能的变化，验证提出的加边策略的有效性及对网络鲁棒性的影响，并与其他传统策略进行对比分析。   1. **拟解决的关键性问题** 2. **全局结构性能指标与预测准确性的权衡**   如何有效地将网络全局结构性能指标融入链路预测模型，设计出既能保证预测准确率又能优化网络整体结构性能的目标函数和算法框架。   1. **控制加边策略成本**   在实际应用中，向复杂网络系统实施加边策略时，我们不能忽视成本因素的影响。每增加一条连接关系，往往意味着相应资源的投入与消耗，如人力、物力、财力以及时间成本等。因此，在设计加边策略时，需要在控制加边数量的前提下，尽可能的优化网络结构。   1. **模型鲁棒性**   针对不同的复杂网络类型（如无标度网络、小世界网络等）以及不同领域的应用背景，验证所提方法的普适性，为模型的实际应用提供指导。 | |

1. 学位论文研究依据

|  |
| --- |
| 学位论文的选题依据和研究意义，国内外研究现状和发展态势，主要参考文献，以及已有的工作积累和研究成果。（2000字）  **1.选题依据和研究**意义  21世纪初，网络科学的诞生为人们认识周边事物带来了新思路[1-4]，其描述语言是以节点和连边（又称链接、链路、边等）构成的网络。真实网络的形成机理、拓扑呈现具有高度的复杂性，因而网络科学所研究的网络又被称为复杂网络。以复杂网络的视角分析问题，越来越多的行为、事件被解释，越来越多的实际应用问题也能得到有效地解决或改善。例如，对于社会网络[5-6]（包括，朋友关系网，科学家合著网，科学引文网等）的研究，可以进行进一步的挖掘社会中人们之间的关联性，用于对信息传播的控制，对恐怖袭击的预测等。对于电力网络[7]，交通网络[8]的研究，可以优化他们的拓扑结构，发现潜在的缺陷。对流行病等网络[9]的研究可以有效防控病毒的传播。而学者们对复杂网络的研究也是多角度的，比如，对复杂网络模型[10]的研究，对复杂网络上的动力学[11]的研究，对复杂网络同步性[12]的研究。  链路预测为网络生成机制及演化规律研究提供了一个可量化且更公平的验证平台。除此理论意义以外，链路预测在实际应用中也发挥着重大价值，这主要体现在两方面：一是将实际应用问题建模为网络中缺失边的预测问题直接产生价值；二是通过补全网络或获取节点之间的连边可能性作为其他相关研究问题的输入间接创造价值。  网络的加边策略通常指的是在一个已有的网络结构上，通过添加新的边来改变网络的拓扑结构。链路预测可以为加边策略提供参考和指导，通过对网络中已有的拓扑结构进行分析和预测，可以揭示出潜在的连接模式和节点之间的关联规律，从而为加边策略的制定提供依据。网络的加边扩容问题是复杂网络研究的热点问题，有着重要的应用意义，现实生活中的很多系统都可以抽象成为网络系统，为网络进行链路推荐可以优化网络的结构，为网络带来更好的性能。如何控制增加的边才能使得新的网络性能更优，如何最大可能的预测即将增加的不同人之的关联关系，网络拓扑中的微小变化（通过添加一些边）如何减轻其社区结构，从而产生更有效的信息传播过程，如何通过添加一些边使得网络拓扑中的微小变化可能增加图的导电性，并显著提高由更快的随机游动驱动的基于图采样的模拟的性能等，这些都吸引了大量学者的关注。综上，以此为选题依据，展开相应的研究工作。  **2. 国内外研究现状和发展**态势  链路预测作为网络科学研究中一个重要且有趣的问题，本质上是从网络链路的微观层面解释网络结构生成的原因，进而帮助我们更好地理解网络所对应的复杂系统的结构生成和演化规律。Sarukkai R R等人[13]应用马尔科夫链进行网络的链路预测和路径分析。之后，Zhu J等人 [14]将基于马尔科夫链的预测方法扩展到自适应性网站的预测中。物以类聚，人以群分。两个节点的属性越相似，就越可能产生联系。Lin D等人[15]基于节点的属性定义了节点间的相似性，可以直接用于进行链路预测。虽然应用节点属性等外部信息的确可以得到很好的预测效果，但是很多情况下，信息的获得是非常困难的，甚至是不可能的。所以，学者们将眼光转向了基于网络结构相似性的链路预测。基于局部信息的最简单的相似性指标是优先连接。应用优先连接的方法可以产生无标度网络结构。在该网络中，一条即将加入的新边连接到节点x 的概率正比于节点x的度[16]，因此，新边连接节点x 和y 的概率正比于两节点度的乘积。另一个基于局部信息的相似性指标是共同邻居，即两个节点如果有更多的共同邻居，则它们更倾向于连边。在共同邻居的基础上考虑两端节点度的影响，从不同的角度又产生6 种相似性指标[17-18]，这一类指标统称为“基于共同邻居的相似性指标”。在共同邻居指标的基础上，一些改进算法可以进一步提高预测精度。例如，局部朴素贝叶斯模型可以区分共同邻居对于两个节点之间产生连边的作用是正的（促进连接）还是负的（抑制连接）[19]。除此之外，Holme和Newman提出了基于全局信息的LHN-II 指标，假设两个节点的邻居节点之间相似（不要求是同一个节点），则这两个节点也相似。基于似然分析的思想也被应用于链路预测之中，层次结构模型[20]假设真实的网络都存在某种层次性，网络的连接则可看作是这种内在层次结构的反映。文献[21]假设观察到的网络是一个随机分块模型的一次实现，在该模型中节点被分为若干集合，两个节点间连接的概率只与相应的集合有关。  现有的链路预测算法的优化目标都集中在预测精准度的提升上，而很少关注网络的其他指标。有不少学者开始研究网络的加边策略，以提升网络的其他性能指标。其中，Cao等[22]设计了一种低极性加边策略LPS，通过加边来提高网络度分布均匀性，进而改善网络鲁棒性。在此基础上，Ji等[23]根据相依节点层间度差异，将子网络内度数差较小的节点进行连接，提出了基于低度度差的加边策略和基于随机度度差的加边策略，探讨了通过增加相连边来增强相互依存网络的鲁棒性的可行性。此外，Cui等人[24]充分考虑了加边过程中的成本，提出了一种同时增加相连边与依赖边的优化方法。作者探讨了在有限成本约束下，如何通过两种加边数量的合理组合以实现最佳的相依网络鲁棒性。另外，平均最短路径是刻画网络小世界属性的一个指标，研究如何向网络中添加一些边使得网络的平均最短路径长度最小的问题，可以进一步理解动态网络的小世界演化进程。向网络中添加适当的边，还可以提高网络的高同步性[25-26]，有助于节点在较短的时间内达成一致性，从而提高网络的持久寿命。同样，加边策略的选择也有助于提高网络的鲁棒性[27-29]和结构可控性[30]，社交网络中的社团发现问题也可以通过加边策略和思路来解决[31-32]。实际生活中许多网络都会面临加边扩容的问题，因此需要人们研究如何加边才能使得网络性能更好，比如交通网络[33]，航班网络[34]，无线传感器网络[35]等网络，需要考虑添加能够最大可能增加传输容量，提高传输效率的边。对于社交网络，可以考虑向网络中添加一些边，进而优化其连通性并提高其进行社会化过程的能力[36]。还可以通过添加边来最大程度减小网络中点对点的信息传递的延迟[37-38]。因此，针对不同的优化目标指标，设计有效的加边策略，提高网络的性能是当今十分热门的话题。  **参考文献**   1. A.-L. Barabási. Network science[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical,   Physical and Engineering Sciences, 2013, 371(1987): 20120375   1. K. Börner, S. Sanyal, A. Vespignani. Network science[J]. Annual Review of Information Science   and Technology, 2007, 41(1): 537-607   1. M. E. J. Newman. Networks[M]. Oxford UK: Oxford University Press, 2018 2. 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 网络科学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012 3. Callahan D., Shakarian P., Nielsen J., et al., Shaping operations to attack robust terror networks[C]. In International Conference on Social Informatics, 2012, 13–18 4. West B.J., Geneston E.L., Grigolini P., Maximizing information exchange between complex networks[J]. Physics Reports, 2008, 468 (1): 1–99 5. Chen Z., Wu J., Xia Y., et al., Robustness of interdependent power grids and communication networks: A complex network perspective[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II Express Briefs, 2017, (99): 1–1 6. Wu J., Zeng J., Chen Z., et al., Effects of traffic generation patterns on the robustness of complex networks[J]. Physica A Statistical Mechanics and Its Applications, 2018, 492: 871–877 7. Lin Y., Lui J.C.S., Jung K., et al., Modelling multi-state diffusion process in complex networks: theory and applications[J]. Journal of Complex Networks, 2018, 2 (4): 431–459 8. Barabasi A.L., Albert R., Emergence of scaling in random networks[J]. Science (New York, N.Y.), 1999, 286: 509–12 9. Manzano M., Calle E., Ripoll J., et al., Epidemic and cascading survivability of complex networks[C]. In International Workshop on Reliable Networks Design and Modeling, 2015 10. Jalili M., Yu X., Enhancement of synchronizability in networks with community structure through adding efficient inter-community links[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2017, 3 (2): 106–116 11. SARUKKAI R R. Link prediction and path analysis using markov chains[J]. Computer Networks, 2000, 33(1-6): 377-386. 12. ZHU J, HONG J, HUGHES J G. Using markov chains for link prediction in adaptive web sites[J]. Lect Notes Comput Sci, 2002, 2311:60-73. 13. LIN D. An information-theoretic definition of similarity[C]//Proceedings of the 15th Intl Conf Mach. Learn.. San Francisco, Morgan Kaufman Publishers, 1998: 296-304. 14. Barabási A L and Albert R. Emergence of scaling in random networks. Science, 286(5439):509~512, 1999. 15. Lü L and Zhou T. Link prediction in complex networks: A survey. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 390(6):1150~1170, 2011. 16. 吕琳媛, 周涛. 链路预测. 北京: 高等教育出版社, 2013. 17. Liu Z, Zhang Q-M, Lü L, and Zhou T. Link prediction in complex networks: a local naïve Bayes model. EPL (Europhysics Letters), 96(4):48007, 2011. 18. Clauset A, Moore C, and Newman M J. Hierarchical structure and the prediction of missing links in networks. Nature, 453(7191):98~101, 2008. 19. GUIMERA R, SALES-PARDO M. Missing and spurious interactions and the reconstruction of complex networks[J]. Proc Natl Sci Acad USA, 2009, 106(52): 22073-22078. 20. Cao X B, Hong C, Du W B et al, Improving the network robustness against cascading failures by adding links J . Chaos Solitons Fractals, 2013, 57 (4):35- 40. 21. Ji X, Wang B, Liu D, et al, Improving interdependent networks robustness by adding connectivity links[J]. Physica A, 2016.444(1): 9-19 22. Cui P S，Zhu P D，Wang K, et al. Enhancing links J7. Physica A，2018，497(1): 185197. robustness of interdependent network by adding connectivity and dependence 23. Jalili M., Yu X., Enhancement of synchronizability in networks with community structure through adding efficient inter-community links[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2017, 3 (2): 106–116 24. Yang L.X., Jiang J., Impacts of link addition and removal on synchronization of an elementary power network[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2017, 479: 99–107 25. Cui P., Zhu P., Wang K., et al., Enhancing robustness of interdependent network by adding connectivity and dependence links[J]. Physica A Statistical Mechanics and Its Applications, 2018, 497: 185–197 26. Kazawa Y., Tsugawa S., On the effectiveness of link addition for improving robustness of multiplex networks against layer node-based attack[C]. In Computer Software and Applications Conference, 2017 27. Wang X., Cao J., Rui L., et al., A preferential attachment strategy for connectivity link addition strategy in improving the robustness of interdependent networks[J]. Physica A Statistical Mechanics and Its Applications, 2017, 483: 412–422 28. Chen X., Pequito S., Pappas G.J., et al., Minimal edge addition for network controllability[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2018, (99): 1–1 29. Ghiasifard S., Khadivi S., Asadpour M., et al., Improving the quality of overlapping community detection through link addition based on topic similarity[C]. In International Symposium on Artificial Intelligence and Signal Processing, 2015 30. Hua J., Deng G., Ma Z., et al., A new community detection algorithm based on adding and deleting links[C]. In IEEE 2nd International Conference on Big Data Analysis, 2017, 412–422 31. Huang W., Chow T.W., Effective strategy of adding nodes and links for maximizing the traffic capacity of scale-free network[J]. Chaos, 2010, 20 (3): 033123 32. Wei P., Chen L., Sun D., Algebraic connectivity maximization of an air transportation network: The flight routes’addition/deletion problem[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 61 (2): 13–27 33. Qiu T., Zhao A., Xia F., et al., Rose: Robustness strategy for scale-free wireless sensor networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2017, 25: 2944–2959 34. Papagelis M., Refining social graph connectivity via shortcut edge addition[J]. Acm Transactions on Knowledge Discovery from Data, 2015, 10 (2): 1–35 35. Gozzard A., Ward M., Datta A., Converting a network into a small-world network: Fast algorithms for minimizing average path length through link addition[J]. Information Sciences, 2018, 422 36. Gaur N., Chakraborty A., Manoj B.S., Delay optimized small-world networks[J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18 (11): 1939–1942 |

1. 学位论文研究计划及预期目标

|  |
| --- |
| 1.拟采取的主要理论、研究方法、技术路线和实施方案（可续页）  **1. 主要理论与研究方法**   1. **复杂网络构建**   网络系统的结构可以用一个图*G*表示：，这里是网络中*N*个节点或系统成员的集合；代表了网络中节点间*M*条互动连接或边。网络中的成员连接情况可以用一个邻接矩阵来表示，对于一个无权无向图来说，即该网络的成员连接之间没有方向性和权重，*A*是一个对称的0-1矩阵，当节点*i*与*j*之间存在连接时，为1，反之为0，同时满足。对于有权图来说，的值是对应的连接权重来代表其重要程度，这时*A*不仅代表了对应网络的连通性信息，也包含了网络中边的重要性信息。对于有向图来说，*A*是非对称的矩阵，代表着成员间互动关系的指向，这也使*A*具有了该网络的连接方向性信息。对于符号网络来说，代表了属性信息，可正值或负值，分别代表节点间的支持或合作以及反对或竞争关系，这样的网络反映了系统成员间潜在的利益冲突情况。   1. **网络全局结构性能指标** 2. **平均路径长度：**   平均路径长度是网络拓扑中的一个概念，定义为所有可能的网络节点对沿最短路径的平均步数。它是衡量网络上信息或大众运输效率的一种手段。平均路径长度定义如下：  其中𝑑𝑖𝑗表示从顶点𝑖 到顶点𝑗 的最短路径长度，𝑛 表示网络中节点的个数。   1. **聚类系数：**   聚类系数可以衡量节点之间的聚集程度，反映了网络中形成社区结构的能力，定义如下：   1. **网络直径：**   网络直径表示网络中任意两个节点之间的最长路径长度，反映了网络的全局尺度，定义如下：  其中是节点 *i* 和节点 *j* 之间的最短路径长度。   1. **节点度分布：**   节点度分布描述网络中节点的度数分布情况，反映了网络的复杂性和异质性，定义如下：  其中 N 是网络节点数。   1. **网络效率：**   网络效率被用来衡量信息传输的有效性，定义如下：   1. **网络鲁棒性**   复杂网络的鲁棒性描述的是网络的节点和边在出现故障或者被攻击的情况下，网络能够维持其功能完整性、保持结构完整性的能力。在复杂网络中，如果少数节点被移除后剩下的节点仍然能够连通，则称该网络对移除的节点具有鲁棒性。  Schheider提出了经典的衡量网络鲁棒性的指标。当网络受到随机或者恶意的节点攻击时，首先是网络中的连接慢慢断开，其次网络会分裂成为几个互不连接的联通子图，直到网络中不存在连接时，攻击停止。考虑在这整个过程中网络的最大连通子图大小，用以描述被攻击时的功能完整性。  在复杂网络中，级联失效是指初始的局部故障或攻击引发的一系列连续、扩散性的系统性失效。当一个节点或边失效后，可能会导致与之相连的其他节点承受更大的负载或失去某些功能，进而引发更多的节点失效，形成一种链式反应。网络攻击鲁棒性在这种情况下指的是网络抵抗这种级联失效的能力，即使遭受了有意或无意的攻击（如关键节点删除、边失效等），网络仍然能够保持其基本的连通性、功能性和稳定性，可以从攻击后剩余网络的最大连通分量等其他角度进行分析。  **2. 技术路线与实施方案**   1. **研究现有链路预测算法的改进方法**  * 研究现有链路预测算法的优缺点和局限性，分析其在优化复杂网络全局结构性能指标方面的不足之处。 * 提出改进方法，例如引入网络拓扑特征、节点属性信息、动态演化模型等，以提高链路预测准确率和优化复杂网络的全局性能指标。 * 设计实验，利用真实网络数据集进行验证和比较，评估改进算法在链路预测准确率和全局性能指标上的改善效果。  1. **研究复杂网络中的链路推荐策略**  * 分析复杂网络的全局性能指标，例如网络直径、平均最短路径等，以确定通信效率的改进目标。 * 提出链路推荐策略，例如基于节点相似性、社区结构、节点重要性等的推荐方法，以增加网络中的连接并改善通信效率指标。 * 使用合适的评估指标和实验数据集，验证提出的链路推荐策略对网络全局性能指标的影响，并与其他方法进行比较分析。  1. **基于鲁棒性的加边策略应对级联失效问题**  * 设计节点攻击模型，分析节点攻击对网络拓扑结构和性能的影响。 * 构建一个衡量网络抵抗级联失效能力的鲁棒性指标体系，包括但不限于剩余连通分量大小、失效传播范围、恢复时间等因素。 * 提出基于鲁棒性的加边策略，例如基于节点重要性、社区结构保护等的加边方法，以提高网络的鲁棒性和抵抗节点攻击的能力。  1. **定义网络社区结构鲁棒性指标并提出改进策略**  * 首先，定义量化网络社区结构鲁棒性的指标，可以是社区内节点损失后的连接强度、社区间互连稳定性、社区核心节点的健壮性等。 * 利用社区检测算法Louvain算法识别网络中的社区结构，并模拟节点攻击对社区结构的影响。 * 根据定义的鲁棒性指标，结合社区结构的特点，设计针对性的加边或重连策略，例如基于社区内部和社区间的连接保护、节点重连等方法，以改进受损网络社区结构的鲁棒性。 * 对比实施策略前后网络社区结构鲁棒性指标的变化，通过实验数据验证策略的有效性。 |
| 2.研究计划可行性，研究条件落实情况，可能存在的问题及解决办法（可续页）  **研究计划可行性，研究条件落实情况：**  研究计划具有可行性，研究条件已经落实  **可能存在的问题及解决办法：**  **问题1：**只关注通信效率指标可能会导致网络过度连通，增加冗余边，甚至引发其他非预期的副作用（如节点度中心化、增加攻击面等）。  **解决办法：**在推荐加边策略时，结合多种网络结构特性，比如保持网络的小世界属性和无标度特性，并引入适当的约束条件以避免过度连接。同时，可利用启发式搜索或贪心算法来逐步优化网络结构。  **问题2：**当网络遭受攻击或破坏时，结构损毁也会破坏网络中社区的结构，影响到系统的正常运转。  **解决方法：**在设计加边策略时，优先考虑保护已知的社区结构。这可以通过限制新加边的跨社区连接数量或将加边策略限定在社区内部进行实现。通过避免跨社区连接或限制社区边界上的加边，可以最大程度地减少社区结构的破坏。 |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **3.研究计划及预期成果** | | |
| 研  究  计  划 | 起止年月 | 完成内容 |
| 2024.01-2024.03 | 研究现有的链路预测算法，并提出改进 |
| 2024.04-2024.06 | 设计加边算法，提升网络全局结构性能指标 |
| 2024.07-2024.10 | 设计加边算法，提升网络的攻击鲁棒性 |
| 2024.11-2024.12 | 验证算法的鲁棒性 |
| 2025.1-2025.3 | 学位论文撰写 |
| 2025.4-2025.5 | 学位论文完善及答辩 |
| 预  期  创  新  点  及  成  果  形  式 | **预计创新点：**   1. 研究现有链路预测算法的改进方法，在以链路预测准确率为优化目标的同时，考虑优化复杂网络全局结构性能指标。 2. 不考虑链路预测准确率的情况下，研究复杂网络中链路推荐策略，以提升网络直径、平均最短路径等通信效率指标。 3. 对网络进行节点攻击，以级联失效后剩余网络的性能作为鲁棒性的判断依据，设计加边策略，使得网络结构提升，优化网络的攻击鲁棒性 4. 当网络遭受攻击或破坏时，结构损毁也会破坏网络中社区的结构，影响到系统的正常运转。定义一个网络社区结构的鲁棒性指标，以评估受损后网络社区结构的完整性。针对定义的指标，推荐加边策略（或者重连），以改进网络社区结构的鲁棒性   **成果形式：**  学术论文1篇 | |

1. 开题报告审查意见

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 1.导师对学位论文选题和论文计划可行性意见，是否同意开题： | | | |
| 导师（组）签字： 年 月 日 | | | |
| **2.开题报告考评组意见** | | | |
| 开题日期 |  | 开题地点 |  |
| 考评专家 |  | | |
| 考评成绩 | 合格 票 基本合格 票 不合格 票 | | |
| 结 论 | □通过 □原则通过 □不通过  **通过：**表决票均为合格  **原则通过：**表决票中有1票为基本合格或不合格，其余为合格和基本合格  **不通过：**表决票中有2票及以上为不合格 | | |
| 考评组对学位论文的选题、研究计划及方案实施的可行性的意见和建议： | | | |
| 考评组签名：  年 月 日 | | | |
| **3.学院意见：** | | | |
| 负责人签名： 年 月 日 | | | |