

# 多层拓扑结构下网络模型的控制

鲁晓艺<sup>1</sup>, 杨学海<sup>2</sup>, 魏鑫彤<sup>3</sup>, 胡中明<sup>4</sup>, 朱 剑<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>新疆工程学院信息工程学院, 新疆 乌鲁木齐

<sup>2</sup>新疆工程学院机电工程学院, 新疆 乌鲁木齐

<sup>3</sup>新疆工程学院控制工程学院, 新疆 乌鲁木齐

<sup>4</sup>新疆工程学院能源工程学院, 新疆 乌鲁木齐

<sup>5</sup>新疆工程学院数理学院, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2024年8月13日; 录用日期: 2024年9月12日; 发布日期: 2024年9月20日

## 摘 要

与单层网络相比, 多层拓扑结构下网络模型可以反映不同类型的连接模式和动态过程。本文基于多层拓扑结构下网络模型的控制的现状, 展示基于多层拓扑结构下网络模型的控制的最新理论成果, 包括多层网络控制的优化、多层网络控制优化等方面。此外, 介绍了多层网络关键节点识别方法、多层拓扑结构下网络模型的内外同步、有限固定时间同步、具有噪声干扰的网络同步。最后提出了多层网络控制领域亟待解决的关键问题, 以期推动该领域的持续发展与突破。

## 关键词

多层网络, 拓扑结构, 控制, 关键节点, 研究进展

# Control of Network Models under Multi-Layer Topology

Xiaoyi Lu<sup>1</sup>, Xuehai Yang<sup>2</sup>, Xintong Wei<sup>3</sup>, Zhongming Hu<sup>4</sup>, Jian Zhu<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>School of Information Engineering, Xinjiang Engineering College, Urumqi Xinjiang

<sup>2</sup>School of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Engineering College, Urumqi Xinjiang

<sup>3</sup>School of Control Engineering, Xinjiang Engineering College, Urumqi Xinjiang

<sup>4</sup>School of Energy Engineering, Xinjiang Engineering College, Urumqi Xinjiang

<sup>5</sup>School of Mathematics and Physics, Xinjiang Engineering College, Urumqi Xinjiang

Received: Aug. 13<sup>th</sup>, 2024; accepted: Sep. 12<sup>th</sup>, 2024; published: Sep. 20<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

Compared with single-layer networks, network models under multi-layer topology can reflect dif-

\*通讯作者。

文章引用: 鲁晓艺, 杨学海, 魏鑫彤, 胡中明, 朱剑. 多层拓扑结构下网络模型的控制[J]. 仪器与设备, 2024, 12(3): 433-437. DOI: 10.12677/iae.2024.123055

ferent types of connection patterns and dynamic processes. Based on the current status of control of network models under multi-layer topology, this paper presents the latest theoretical results of control based on network models under multi-layer topology, including optimization of multi-layer network control and optimization of multi-layer network control. In addition, the identification method of key nodes in multi-layer networks, internal and external synchronization of network models under multi-layer topology, limited fixed time synchronization, and network synchronization with noise interference are introduced. Finally, the key issues that need to be solved in the field of multi-layer network control are proposed in order to promote continuous development and breakthroughs in this field.

## Keywords

Multi-Layer Network, Topology, Control, Key Nodes, Research Progress

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着信息技术与人工智能的快速发展，网络科学正在成为研究热点，在通信技术，电力传输，智能控制，人工智能等方面有广泛的应用[1]-[4]。现实世界中复杂系统通常具有不同的连接模式和动态过程，网络模型可以很好地反映这些特征。然而，在大多数系统以复杂的模式相互作用，这些模式可以包括多种类型的关系、时间变化和其他类型的复杂性。因此系统包括多个子系统和连接层，为了考虑到这种“多层”特征，以提高我们对复杂系统的理解，需要通过开发工具来全面研究多层系统，从而推广之前的网络理论。单层网络只反映一种系统的依赖关系，存在巨大的缺陷。在这样的情况下，多层拓扑结构下网络模型被引入解决这一缺陷，它不仅可以反映不同类型的连接模式和动态过程，而且可以支持数学建模、分析和控制。使我们能够从综合角度分析各种复杂系统。与丰富的单层网络模型的研究成果相比，多层拓扑结构下网络模型的研究相对较少。下面分别从多层网络控制的优化、多层网络控制优化等方面的现状进行介绍。

## 2. 多层网络结构的优化

随着研究的持续，学者首先关注网络中的关键节点识别问题。研究方法可分为基于节点近邻、特征向量、节点移除收缩和路径等。例如基于节点近邻的研究方法有度中心性。认为网络节点的排名与其相邻节点数量有直接关系，相邻节点数量越多，说明节点的重要性越高。然而，对于动态的大规模网络来说，这种方法耗时长，计算复杂度高。文献[5]揭示了一种新的排序算法，该算法利用节点的局部结构改进了接近中心度，旨在降低计算复杂度。首先应用一种社区检测算法来提取网络的社区结构。然后，在忽略群落间关系的情况下，根据任意中心度量，为每个群落提取一个最佳节点作为局部临界节点。接着，考虑到社群之间的相互联系，找到另一个最佳节点作为网关节点。所提出的方法能检测到最多的传播节点，且扩散能力强、时间复杂度低，因此适用于大规模网络。在常见扩散模型下的合成网络和真实世界的连接网络上进行的实验证明，与其他方法相比，所提出的方法非常有效。文献[6]扩展了 VoteRank 方法，提出了一种基于扩展邻域概念的改进型 WVoteRank 方法，它在投票过程中考虑了 1 跳邻域和 2 跳邻域，以决定加权网络中具有影响力的节点。同时将提出的方法扩展到了非加权网络，在多个具有不同规

模和属性的真实数据集和合成数据集上, 将所提出的改进 WVoteRank 方法与流行的中心性度量方法(加权重度、加权接近度、加权间度、加权 h 指数和加权 VoteRank)进行了性能比较。

在基于路径的方法中, 文献[7]构造了用于识别有影响力节点的全局结构模型(GSM), 该模型既考虑了节点的自我影响力, 又强调了节点在网络中的全局影响力。进一步应用了 GSM, 并利用“易感感染恢复”模型来评估其效率。此外采用了 Profit Leader、H-Index、Hyperlink Induced Topic Search、Improved K-shell Hybrid、Density Centrality、Extended Cluster Coefficient Ranking Measure 等多种标准算法作为基准, 以评估 GSM 的性能。最后使用了七个真实世界和两个合成的多类型复杂网络以及不同的知名数据集进行实验。发现在识别有影响力的节点方面, GSM 的性能优于基线算法。文献[8]设计了一种基于局部路径的关键节点识别方法, 考虑了传播概率对节点影响力评估的影响, 此方法只要计算目标节点两步之内的拓扑结构, 最后通过实验模拟结果的有效性。

基于特征向量的方法认为节点的重要程度由其邻居节点的信息决定。文献[9]应用复杂网络的自然特征, 提出了一种新的半局部和自由参数中心性度量方法。所提出的中心度可以为网络中较好的传播者结构洞分配较高的等级。它利用二级邻居聚类系数的正效应和节点聚类系数的负效应来定义节点的重要性。因此, 建议的中心度避免了选择彼此过于接近的传播者。在人工网络和真实世界网络上, 将所提出的方法与基于易感-感染-恢复(SIR)和易感-感染(SI)模型的不同中心度测量方法进行了比较。通过实验发现提出的方法与其他方法相比具有很大优势。文献[10]考虑影响节点重要性的因素, 如节点的局部信息和节点在网络中的整体位置等, 提出了新的关键节点识别方法 HC (Heat conduction)方法, 通过比较每个节点在热传导过程中所经过的总热量大小来对节点进行排序, 进而找出关键节点。

基于节点移除和收缩的方法通过去衡量移除和收缩节点后网络的结构和功能的变化来识别关键节点。网络邻接矩阵的最大特征值是决定复杂网络若干重要动态过程的关键量。文献[11]根据网络节点和链接对最大特征值的影响, 提出了网络节点和链接动态重要性的客观量化特征, 展示了我们对节点动态重要性的描述如何受到度数相关性和网络群体结构的影响。文献[12]基于邻域和最近邻域结构信息的最近邻域信任页面排名(NTPR), 提出了根据节点间的相似性、度比、邻居和最近邻居的信任值的度量方法。进一步利用所提出的中心度量在各种现实网络中进行了测试, 以找出有影响力的节点。

### 3. 多层网络控制优化

多层网络控制包含网络同步, 系统蜂拥, 多智能体网络一致等。因为这些状态在许多自然现象中起着至关重要的作用, 例如在正常和异常的大脑功能中出现连贯的全局行为, 在生态学中的食物网动态。多层网络同步分为多个不同混沌系统的同步、系统的内部与外部同步、噪声干扰的网络的同步、有限固定时间网络同步等。

混沌同步就是对混沌系统施加控制, 使该系统的轨道与另一混沌系统的轨道渐近地趋向一致。混沌同步在物理、信息技术、人工智能、通信等领域有着重要的应用。文献[13]解决了两个不同混沌系统的主从同步问题。每个系统的数学模型都包含未知的恒定参数。主系统只有一个输出, 从系统只有一个控制输入。所提出的新方法基于主系统自适应观测器和从系统自适应控制器的积极合作。这一研究不仅展示了自适应技术在混沌同步中的有效性, 还提示了未来研究应继续探索更高效的参数调整策略。文献[14]提出了一种新的混沌同步控制器。它由一个状态反馈控制器和一个使用 Legendre 多项式补偿不确定性的鲁棒控制项组成。根据正交函数定理, Legendre 多项式能以任意小的近似误差近似非线性函数。因此, 它们可以取代模糊系统和神经网络来估计和补偿控制系统中的不确定性。这一成果不仅丰富了混沌同步的控制手段, 还启发了研究者对于非线性函数近似方法的深入思考。

系统的内部同步研究指一个多层网络所有节点的同步行为, 两个或两个以上的系统之间节点也可以

实现同步叫做外部同步。例如生态群体中的捕食者网络与被扑食者网络间的动态平衡,果蝇大脑中的两组神经元之间的同步等。文献[15]研究的是通过非均质介质间接耦合的  $N$  个振荡器的同步问题。该系统由多层网络构成,其中顶层由断开的振荡器组成,底层是介质模型,由根据给定拓扑结构耦合的振荡器组成。介质和顶层的不同动态是通过它们之间的频率失配来解释的。同时展示了一种新的同步机制,为理解复杂网络中的同步现象提供了新视角。文献[16]展示了双层多路复用近似分析处理的方法,引入了一个额外的惯性项来反映结构差异。对预测结果的数值验证凸显了提出方法的实用性,尤其是在层内耦合存在微小或中等拓扑差异的情况下。这一研究不仅推动了层间同步理论的发展,还为实际网络设计提供了有价值的参考。

噪声干扰的网络的同步指多层网络受到高斯白噪声影响所有节点实现同步行为。噪声干扰是作用于从属系统的布朗运动,解耦后所有参数都存在常界不确定性。噪声扰动通常可以反映出更真实的动力学行为。文献[17]研究了具有结构性扰动的噪声干扰下的系统的鲁棒自适应指数同步问题。通过结合使用李雅普诺夫函数法、鲁棒性分析方法、随机分析技术和自适应控制法则,得出了几个充分条件确保耦合混沌系统在所有可接受参数的不确定性下都能在均方上实现稳健的指数同步。该研究不仅展示了鲁棒性分析方法在复杂网络同步中的应用潜力,还强调了同步控制策略在实际应用中的重要性。文献[18]关注具有时变耦合延迟的非线性奇异扰动复杂网络的同步问题,提出了事件触发控制策略来实现同步标准。通过开发 Lyapunov-Krasovskii 函数,以线性矩阵不等式的形式获得了一些确保渐近同步的充分条件。该研究不仅丰富了非线性网络同步的控制手段,还为处理网络中的延迟和不确定性提供了新思路。

有限固定时间网络同步指多层网络所有节点实现同步行为的时间可以根据实际需要而设定的过程。文献[19]主要研究一类具有多比例延迟的惯性神经网络的有限时间和固定时间同步问题。首先构建适当的变量替换,可以将原来的多比例延迟惯性神经网络改写为一阶微分系统。其次,通过构建 Lyapunov 函数和使用分析技术,并结合新型控制算法,建立了一些新的有效准则,以实现寻址系统主/从的有限时间和固定时间同步。文献[20]研究了具有时变延迟的克利福德值递归神经网络的有限/固定时间同步问题。将所考虑的克利福德值驱动和响应系统模型分解为实值驱动和响应系统模型,以克服克利福德数乘法的非交换性难题。这一研究不仅丰富了网络同步理论的内容,还为处理复杂数值系统的同步问题提供了新方法。

## 4. 结语

从多层拓扑结构下网络模型的控制的研究现状看,拓扑结构、关键节点、控制参数等与多层网络同步有密切联系。研究多层拓扑结构下网络模型的控制对系统模型优化具有重要意义。展望未来,多层网络科学的研究将继续深入,面临着诸多挑战与机遇。一方面,随着大数据和人工智能技术的不断发展,我们有望获得更多关于复杂系统的详细信息,从而构建更加精确的多层网络模型。另一方面,多层网络中的动态过程、交互机制以及控制策略等问题仍需进一步探索。未来的研究可以关注以下几个方面:一是加强跨学科合作,结合物理学、生物学、计算机科学等多个领域的知识,共同推动多层网络科学的发展;二是深入研究多层网络中的非线性动力学行为,揭示其背后的物理机制和数学规律;三是开发更加高效、鲁棒的控制算法,以应对复杂多变的网络环境;四是探索多层网络在实际应用中的潜力,如智能交通系统、智能电网、社交网络等领域,推动科技进步和社会发展。

## 基金项目

新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目(2023D01A78);新疆维吾尔自治区高校基本科研业务费科研项目 XJEDU2022P129;国家级大学生创新创业训练项目:202310994015;自治区级大学生创新创业训练项目:S202310994033。

## 参考文献

- [1] 胡钢, 卢志宇, 王乐萌, 等. 基于复杂网络多阶邻域贡献度的节点重要性序结构辨识[J]. 电子学报, 2023, 51(7): 1956-1963.
- [2] 王淑良, 陈辰, 张建华, 等. 基于复杂网络的关联公共交通系统韧性分析[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2022, 19(4): 47-54.
- [3] 张思超, 梁炜, 苑旭东. 面向工业无线网络的时间同步攻击检测[J]. 物联网学报, 2023, 7(2): 88-97.
- [4] 吕峥, 孙群, 马京振, 等. 复杂网络视角下的居民地选取方法[J]. 测绘学报, 2023, 52(5): 852-862.
- [5] Salavati, C., Abdollahpouri, A. and Manbari, Z. (2019) Ranking Nodes in Complex Networks Based on Local Structure and Improving Closeness Centrality. *Neurocomputing*, **336**, 36-45. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2018.04.086>
- [6] Kumar, S. and Panda, A. (2021) Identifying Influential Nodes in Weighted Complex Networks Using an Improved Wvoterank Approach. *Applied Intelligence*, **52**, 1838-1852. <https://doi.org/10.1007/s10489-021-02403-5>
- [7] Ullah, A., Wang, B., Sheng, J., Long, J., Khan, N. and Sun, Z. (2021) Identification of Nodes Influence Based on Global Structure Model in Complex Networks. *Scientific Reports*, **11**, Article No. 6173. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84684-x>
- [8] 何欣怡, 马茜, 杨丹丹, 等. 一种基于局部传播路径的复杂网络关键节点识别方法[J]. 现代信息技术, 2023, 7(2): 8-11.
- [9] Berahmand, K., Bouyer, A. and Samadi, N. (2018) A New Centrality Measure Based on the Negative and Positive Effects of Clustering Coefficient for Identifying Influential Spreaders in Complex Networks. *Chaos, Solitons & Fractals*, **110**, 41-54. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2018.03.014>
- [10] 唐邵阳. 复杂网络中关键节点识别方法研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2023.
- [11] Restrepo, J.G., Ott, E. and Hunt, B.R. (2006) Characterizing the Dynamical Importance of Network Nodes and Links. *Physical Review Letters*, **97**, Article 094102. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.97.094102>
- [12] Hajarathaiyah, K., Enduri, M.K. and Anamalamudi, S. (2022) Finding Influential Nodes in Complex Networks Using Nearest Neighborhood Trust Value. In: Benito, R.M., Cherifi, C., Cherifi, H., Moro, E., Rocha, L.M. and Sales-Pardo, M., Eds., *Complex Networks & Their Applications X*, Springer, 253-264. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-93413-2\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-030-93413-2_22)
- [13] Kabziński, J. and Mosiołek, P. (2022) Adaptive, Observer-Based Synchronization of Different Chaotic Systems. *Applied Sciences*, **12**, Article 3394. <https://doi.org/10.3390/app12073394>
- [14] Khorashadizadeh, S. and Majidi, M. (2018) Synchronization of Two Different Chaotic Systems Using Legendre Polynomials with Applications in Secure Communications. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, **19**, 1180-1190. <https://doi.org/10.1631/fitee.1601814>
- [15] Gambuzza, L.V., Frasca, M. and Gómez-Gardeñes, J. (2015) Intra-layer Synchronization in Multiplex Networks. *EPL (Europhysics Letters)*, **110**, Article 20010. <https://doi.org/10.1209/0295-5075/110/20010>
- [16] Leyva, I., Sevilla-Escoboza, R., Sendiña-Nadal, I., Gutiérrez, R., Buldú, J.M. and Boccaletti, S. (2017) Inter-layer Synchronization in Non-Identical Multi-Layer Networks. *Scientific Reports*, **7**, Article No. 45475. <https://doi.org/10.1038/srep45475>
- [17] Kammogne, A.S.T. and Fotsin, H.B. (2015) Robust Adaptive Exponential Synchronization of Two Different Stochastic Perturbed Chaotic Systems with Structural Perturbations. *International Journal of Engineering Mathematics*, **2015**, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2015/535317>
- [18] Sivaranjani, K., Rakkiyappan, R., Cao, J. and Alsaedi, A. (2017) Synchronization of Nonlinear Singularly Perturbed Complex Networks with Uncertain Inner Coupling via Event Triggered Control. *Applied Mathematics and Computation*, **311**, 283-299. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2017.05.007>
- [19] Alimi, A.M., Aouiti, C. and Assali, E.A. (2019) Finite-time and Fixed-Time Synchronization of a Class of Inertial Neural Networks with Multi-Proportional Delays and Its Application to Secure Communication. *Neurocomputing*, **332**, 29-43. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2018.11.020>
- [20] Boonsatit, N., Rajchakit, G., Sriraman, R., Lim, C.P. and Agarwal, P. (2021) Finite-/Fixed-Time Synchronization of Delayed Clifford-Valued Recurrent Neural Networks. *Advances in Difference Equations*, **2021**, Article No. 276. <https://doi.org/10.1186/s13662-021-03438-1>