

基于复杂网络的双模通信同步能力建模与优化研究

吴振英, 罗楠, 刘勇

(苏州工业职业技术学院 集成电路与通信学院, 江苏 苏州 215104)

摘要: 双模通信打破通信介质壁垒实现了网络资源的优势互补,在台区全量曲线数据采集方面展现出显著优势,已成为智能电网的关键组成部分,但现有研究主要聚焦于节点随机链路、节点组网等微观层面。基于复杂网络理论,提出双模通信网络的同步能力分析,推导双模通信的超拉普拉斯矩阵及其特征值与层内、层间耦合强度的数学关联。理论分析表明双模通信网络同步能力由其超拉普拉斯矩阵的最小非零特征值决定。仿真结果表明层间耦合的提升受限于层内连接强度,建议优先提升层内耦合强度至临界值,再增加层间耦合强度直至同步能力趋于饱和。若资源充足,通过增加代理协调器(proxy coordinator, PCO)节点将优化方式从参数优化转向拓扑优化。实验结果证实网络规模扩大同步能力下降但趋势一致,关键节点失效导致同步能力骤降,因此关键节点保护对维持同步稳定性至关重要。

关键词: 双模通信; 复杂网络; 同步能力; 超拉普拉斯矩阵

DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2026.10.015

中图分类号: TM711

文献标识码: A

文章编号: 1001-1390(2026)10-0162-08

Research on modeling and optimization of dual-mode communication synchronization capability based on complex network

Wu Zhenying, Luo Nan, Liu Yong

(School of Integrated Circuit and Communication, Suzhou Institute of Industrial Technology, Suzhou 215104, Jiangsu, China)

Abstract: Dual-mode communication breaks down communication medium barriers and achieves complementary advantages of network resources. It has shown significant advantages in the collection of total curve data in the substation area and has become a key component of the smart grid. However, existing research mainly focuses on micro level aspects such as node random links and node networking. This paper proposes a synchronization capability analysis method for dual-mode communication network based on complex network theory, and derives the mathematical correlation between the hyper Laplacian matrix and its eigenvalues of dual-mode communication and the coupling strength within and between layers. Theoretical analysis shows that the synchronization capability of dual-mode communication networks is determined by the minimum non-zero eigenvalue of their Laplacian matrix. The simulation results indicate that the improvement of interlayer coupling is limited by the strength of intra layer connections. It is recommended to prioritize increasing the intra layer coupling strength to a critical value, and then increasing the inter layer coupling strength until the synchronization capability approaches saturation. If resources are sufficient, the optimization method will shift from parameter optimization to topology optimization by increasing proxy coordinator(PCO) nodes. The experimental results confirm that the synchronization ability decreases with the expansion of network scale, but the trend is consistent. The failure of key nodes leads to a sharp drop in synchronization ability. Therefore, key node protection is crucial for maintaining synchronization stability.

Keywords: dual-mode communication, complex network, synchronization capability, supra-Laplacian matrix

0 引言

电力系统双模通信的网络同步能力是提升配

电网智能化水平的核心技术挑战,其网络特性表现为任意两个节点之间的平均路径长度较短,节点间通信时仅需经过少数几个节点即可相互到达^[1]。目前,高速电力线载波(high speed power line com-

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(22136001)

munication, HPLC) 或者高频射频 (high-frequency radio frequency, HRF) 仅能满足日冻结时间尺度下电费核算的基本要求, 不仅面临动态电价缺乏实时用电数据支撑, 还要面对配网突发故障难以快速定位等诸多问题, 因此配电侧数据采集频次引发的技术瓶颈, 在很大程度上阻碍了快速数据分析在精细化管理应用场景中的拓展, 已成为制约电力增值服务规模化发展的关键因素, 是当前亟待解决的核心技术问题。

双模通信^[2]打破通信介质壁垒实现了资源的优势互补, 将 HPLC 和 HRF 两种单模网络通过节点“一对一”耦合成为路由的混合自组网络^[3], 使不存在值得信任节点的无中心网络^[4]在能够充分保持各自显著优势的同时还能够具备良好的综合性能。双模通信网络结构如图 1 所示, 上、下层分别为 HRF 和 HPLC 网络, 中间虚拟层仅用于说明层间节点的耦合关系。

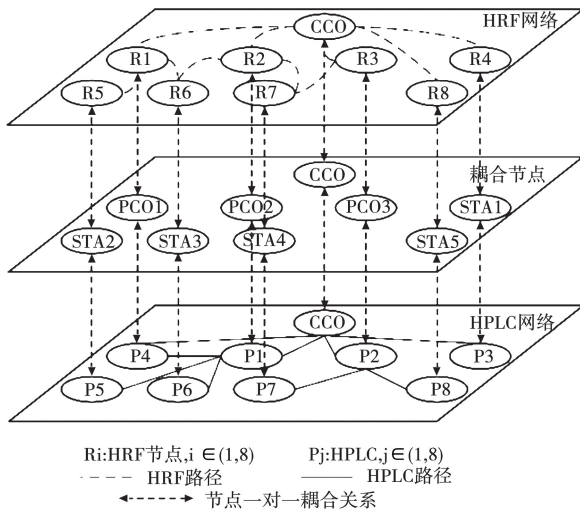


图 1 双模通信网络分层耦合拓扑图

Fig. 1 Layered coupling topology diagram of dual-mode communication network

文献[5]通过构建双层网络的层内-层间协同控制与状态耦合机制, 在理论上证实了双层网络信道同步控制的可行性及同步稳定性判据, 为电力系统双模通信网络的同步奠定了理论基础与方法参考。与双层网络信道同步类似, 双模通信网络同步也分为层内同步和层间同步。层内节点依据各自路由特性构建连接, 层间通过动态涌现的交互机制形成跨层依赖关系^[6]。

具有中继代理功能的代理协调器 (proxy coordinator, PCO) 和能够向 PCO 功能转化的末端站点 (station, STA)^[7]间的通信链路受诸多外部环境影

响会动态涌现, 增加的中继级数导致最短路径存在变长的趋势^[8]。相较于单模层内同步, 双模通信方式促使报文穿透 HPLC 和 HRF 的跨层传输方式^[9]变相收缩了网络规模, 有效压缩两种非直通链路节点之间的最短路径损耗。因此, 两种存在显著差异的变化趋势增加了双模通信建模、台区电力网络同步的复杂程度。

文献[10]面向多层网络超拉普拉斯矩阵的特征值谱及其同步能力的研究表明, 多层网络同步能力与网络节点数、层间和层内耦合强度呈现显著相关性, 通过优化可增强网络的同步能力。文献[11]指出双层网络的层间同步比层内同步更为复杂。文献[12]分析了叶子节点向中心节点耦合的多层星形网络, 当层内耦合强度较弱时, 层内耦合强度的增大会使同步能力增强。

双模通信网络作为电力系统智能化升级的核心基础设施, 现有研究主要聚焦于两个单模网络之间 PCO、STA 等节点建立随机链路、节点优化与改进组网算法等微观层面^[13], 尚未从复杂网络视角揭示双模通信网络中信息扩散与拓扑结构的内在关联研究。对此, 文章基于复杂网络模型, 重点探究双模通信拓扑结构对同步性能的影响, 提出了双模通信网络中信息扩散机制, 为电力通信系统的运行优化提供理论支撑。

1 双模通信网络模型

1.1 单模通信网络模型

双模通信是由两层节点数目相同、层间节点一一对应连接的异构拓扑构成的双层自组网络, 其动态特性主要表现为同步机制的形成与演化, 最终涌现出全局一致的稳态同步现象。与普通双层网络最大不同在于单模通信的自组网采集方式及层间耦合的随机特性。

单模 HPLC 通信网络拓扑模型^[14]可抽象为连通图 $G_p = (V, E)$ 。邻接矩阵 $A(G_p)$ 描述 HPLC 层内各节点之间的链路连接情况。度矩阵 $D(G_p) = \text{diag}(d(v_1), d(v_2), \dots, d(v_N))$ 为对角阵, 其对角线上的元素 $d(v_i)$ 为节点的度。实对称矩阵 $L(G_p) = D(G_p) - A(G_p)$ 为图 G_p 的 Laplace 矩阵。特征多项式 $\varphi_{G_p}(\lambda) = \det(\lambda I - L(G_p))$ 的全部根 $\lambda_i(G_p)$ 为 Laplace 矩阵特征值, 其中最小非零特征值 $\lambda_2(G_p)$ 称为图 G_p 的连通度。进一步, 双模通信是由 HPLC 和 HRF 两个单模网络构建的双层网络 G , 其拓扑模型为:

$$\begin{cases} G = [G_p, G_R] \\ C^{\text{PR}} = \{c_i^{\text{PR}}, (i, j \in V)\} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $c_i^{\text{PR}} = 1$ 表示协议帧能够通过节点 i 进行跨层通信。

首先定义模型的预置参数:

定义1: 单层网络 G_p 是节点数为 N 的连通网络, 且不包含自环;

定义2: 双模通信层间耦合方式为双模通信物理连接, 即 G_R 的第 i 个节点与 G_p 的第 i 个节点连接, 与其他节点不连接;

定义3: 定义 $m \in [0, 1]$ 为层间连边的生成概率阈值。对于第 i 个节点对, 生成服从均匀分布的随机数 $p_i^{[15]}$, 若 $m > p_i$ 则在对应节点对之间建立跨层连接, 层间耦合强度为^[16]:

$$d = \sum_{i=1}^N p_i \quad (2)$$

1.2 双模通信网络同步能力建模与分析

双模通信的特征在于双模通信的介质组成以及层间交互导致的单模网络彼此关联又相互影响。在不考虑节点动力学影响的情况下, 复杂网络的同步能力受到拓扑结构、网络规模、层内/层间耦合强度和层间连接方式影响^[17]。

因此, 定义 (a, d) 为层内、层间的耦合强度。正定矩阵 $\mathbf{W}^K = (\omega_{ij}^K)$ 为单模通信层内耦合矩阵^[18], 若第 K 层内节点 i 与 j 连接则 $\omega_{ij}^K = 1$, 否则为零。层间耦合矩阵 $\mathbf{D}^{\text{RP}} = (d_{ii}^{\text{RP}})$ 为 N 阶对角阵^[19], 对角元素 $d_{ii}^{\text{RP}} = 1$ 表示层间仅相同索引节点对相连。其中 $(i, j) \in (1, N), (i \neq j), K \in (\text{HRF}, \text{HPLC})$ 。

根据复杂网络的相关原理构造双模通信的 Supra-Laplace 矩阵, 定义 $\mathbf{L}, \mathbf{L}^1, \mathbf{L}^L$ 为双模通信网络、层间、层内的 Supra-Laplace 矩阵:

$$\mathbf{L} = \mathbf{L}^1 + \mathbf{L}^L \quad (3)$$

$$\mathbf{L}^1 = \mathbf{L}^1 \otimes \mathbf{I} \quad (4)$$

$$\mathbf{L}^L = \begin{bmatrix} \mathbf{L}(G_R) & 0 \\ 0 & \mathbf{L}(G_p) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $\otimes$ 为 Kronecker 乘积; $\mathbf{I}$ 为单位矩阵; $\mathbf{L}(G_p)$ 、 $\mathbf{L}(G_R)$ 分别为 HPLC、HRF 层的 Laplace 矩阵。结合式(5)进一步推导双模通信 $G(G_R, G_p)$ 的超拉普拉斯矩阵为:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}(G_R) + d\mathbf{I}_N & -d\mathbf{I}_N \\ -d\mathbf{I}_N & \mathbf{L}(G_p) + d\mathbf{I}_N \end{bmatrix} \quad (6)$$

求解超拉普拉斯矩阵 $\mathbf{L}$ 的特征值, 令:

$$\det(\mathbf{L} - \lambda \mathbf{I}_{2N}) = 0 \quad (7)$$

式中: $\mathbf{I}_N, \mathbf{I}_{2N}$ 分别为 N 阶, $2N$ 阶单位阵。将式(3) ~ 式(5)带入式(7)得:

$$\det \begin{pmatrix} \mathbf{L}(G_R) + (d - \lambda)\mathbf{I}_N & -d\mathbf{I}_N \\ -d\mathbf{I}_N & \mathbf{L}(G_p) + (d - \lambda)\mathbf{I}_N \end{pmatrix} = 0 \quad (8)$$

设 $\mathbf{L}(G_R)$ 和 $\mathbf{L}(G_p)$ 其特征值分别为 $\lambda_i(G_R)$ 和 $\lambda_i(G_p)$, 则分块矩阵的特征方程退化为 N 个独立方程:

$$\det \begin{pmatrix} \lambda_i(G_R) + d - \lambda & -d \\ -d & \lambda_i(G_p) + d - \lambda \end{pmatrix} = 0 \quad (9)$$

式中: d 为层间耦合强度。

展开特征方程得:

$$(\lambda_i(G_R) + d - \lambda)(\lambda_i(G_p) + d - \lambda) - d^2 = 0 \quad (10)$$

化简得二次方程:

$$\lambda^2 - (\lambda_i(G_R) + \lambda_i(G_p) + 2d)\lambda + (\lambda_i(G_R)\lambda_i(G_p) + d\lambda_i(G_R) + d\lambda_i(G_p)) = 0 \quad (11)$$

解得特征值:

$$\lambda = (1/2) [(\lambda_i(G_R) + \lambda_i(G_p) + 2d) \pm \sqrt{(\lambda_i(G_R) - \lambda_i(G_p))^2 + 4d^2}] \quad (12)$$

可得 $G(G_R, G_p)$ 同步能力依赖于两个单层网络拉普拉斯矩阵的最小非零特征值及层间耦合强度。若双层网络的 $\lambda_2(G_R)$ 和 $\lambda_2(G_p)$ 均较大, 且耦合强度 d 适当, Supra-Laplace 矩阵的 λ_2 会显著提升。根据复杂网络同步稳定性准则^[20], 在同步域无界情况下, 双模网络 $G(G_R, G_p)$ 同步能力仅由其 Supra-Laplace 矩阵的最小非零特征值 λ_2 决定, λ_2 越大同步能力越强。

2 双模通信同步能力分析

设双模通信模式为路由主动方式, 以文献[21]方法定义 a 为层内相邻节点之间的耦合强度。以图1中双模通信网络的拓扑结构为例, G_R 的邻接矩阵为:

$$\mathbf{A}(G_R) = \begin{bmatrix} 0 & a & a & a & a & 0 & 0 & 0 & a \\ a & 0 & 0 & 0 & 0 & a & a & 0 & 0 \\ a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a & a & 0 \\ a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a & 0 \\ a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a & a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a & a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

G_R 度矩阵为: $\mathbf{D}(G_R) = \text{diag}(5, 3, 3, 2, 1, 1, 2, 2, 1)$, 则 G_R 的拉普拉斯矩阵为:

$$L(G_R) = \begin{bmatrix} 5a & -a & -a & -a & -a & 0 & 0 & 0 & -a \\ -a & 3a & 0 & 0 & 0 & -a & -a & 0 & 0 \\ -a & 0 & 3a & 0 & 0 & 0 & -a & -a & 0 \\ -a & 0 & 0 & 2a & 0 & 0 & 0 & -a & 0 \\ -a & 0 & 0 & 0 & a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -a & 0 & 0 & 0 & a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -a & -a & 0 & 0 & 0 & 2a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -a & -a & 0 & 0 & 0 & 2a & 0 \\ -a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a \end{bmatrix} \quad (14)$$

计算可得 $\lambda_2(L(G_R)) = 0.563a$ 。同理可得 G_P 的邻接矩阵为:

$$A(G_P) = \begin{bmatrix} 0 & a & a & a & a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a & 0 & 0 & 0 & a & a & a & 0 & 0 \\ a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a & a \\ a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a & a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

G_P 度矩阵为: $D(G_P) = \text{diag}(4, 4, 3, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1)$, 则 G_P 的拉普拉斯矩阵为:

$$L(G_P) = \begin{bmatrix} 4a & -a & -a & -a & -a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -a & 4a & 0 & 0 & -a & -a & -a & 0 & 0 \\ -a & 0 & 3a & 0 & 0 & 0 & 0 & -a & -a \\ -a & 0 & 0 & a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -a & 0 & 0 & 0 & 2a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -a & 0 & 0 & 0 & a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -a & 0 & 0 & 0 & 0 & a & 0 & 0 \\ 0 & -a & -a & 0 & 0 & 0 & 0 & a & 0 \\ 0 & 0 & -a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

计算可得 $\lambda_2(L(G_P)) = 0.296a$ 。则双模通信 $G(G_R, G_P)$ 的邻接矩阵为:

$$A = \begin{bmatrix} A(G_R) & L^1 \\ L^1 & A(G_P) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & a & a & \cdots & d & 0 & \cdots \\ a & 0 & 0 & \cdots & 0 & d & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots \\ d & 0 & 0 & \cdots & 0 & a & \cdots \\ 0 & d & 0 & \cdots & a & 0 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (17)$$

推导可得双模通信 $G(G_R, G_P)$ 的度矩阵为:

$$D = \text{diag}[k_{(G_R, i)} + d, k_{(G_P, i)} + d] = \text{diag}[k_{(G_R, 1)} + d, k_{(G_R, 2)} + d, \cdots, k_{(G_R, 9)} + d, k_{(G_P, 1)} + d, k_{(G_P, 2)} + d, \cdots, k_{(G_P, 9)} + d] = \begin{bmatrix} 5a + d & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & 3a + d & \cdots & 0 & 0 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots \\ 0 & 0 & \cdots & 4a + d & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 4a & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (18)$$

则 $G(G_R, G_P)$ 的 Supra-Laplace 矩阵:

$$L = \begin{bmatrix} 5a + d & -a & -a & \cdots & -d & 0 & \cdots \\ -a & 3a + d & 0 & \cdots & 0 & -d & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots \\ -d & 0 & 0 & \cdots & 4a + d & -a & \cdots \\ 0 & -d & 0 & \cdots & -a & 4a & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中: $(k_{(G_R, i)}, k_{(G_P, i)})$ 分别为 $G(G_R, G_P)$ 中节点 i 的度。对于高阶符号矩阵的特征方程求解, 一般情况下不能直接采用解析方法得到符号化的 Supra-Laplace 矩阵 L 的特征值。因此采用数值方法分析图 1 中双模通信网络的同步能力。

图 4 ~ 图 6 中细曲线展示了 $G(G_R, G_P)$ 的 Supra-Laplace 最小非零特征值 $\lambda_2(L^1)$ 随层内耦合强度 a 和层间耦合强度 d 的变化趋势。

从图 4 中可见, $a = 0$ 时层内无连接, 同步能力为零。当 $a \in (0, 2.5)$ 区间时, 三条细曲线均呈现递增趋势, 表明同步能力随 a 增大显著增强, 当 $a > 2.5$ 时, $d = 0.5$ 曲线趋近于定值, 说明跨层连接数量降低限制了网络同步; 当 $(a > 5, d \geq 5)$ 时曲线斜率随 d 值快速增长, 说明相同 a 值条件下, d 值越大同步能力越强。

从图 5 可知: 随着 d 值增大三条细曲线均存在拐点, 当越过拐点后 $\lambda_2(L^1)$ 值增速变缓, 且 a 值越小曲线越接近直线, 此时同步能力趋近于饱和, 可知增加层内或层间耦合强度均能提升双模网络的同步能力。

图 6 可见 (a, d) 协同变化对同步能力的影响。图中细实线所示, 两个参数同方向变化 (a, d) 时同步能力随 (a, d) 增加线性上升。在两个参数呈现反方向变化即随着 a 的增加, d 逐渐减少情况下, 细虚线呈现非线性关系。当 a 较小, d 较大时, 层间耦合

强度对同步能力的提升作用显著。当 a 较大, d 较小时, 层间耦合强度的作用减弱, 导致同步能力下降。

综上, 图 1 中所示的双模通信网络 $G(G_R, G_P)$, 其层内连接是同步能力的核心因素。层间耦合的提升受限于层内连接强度, 同步能力上限可能由拓扑结构决定。因此在进行双模通信网络优化时, 建议优先提升 a 至临界值, 再通过增加 d 进一步优化, 直至同步能力趋于饱和。若资源充足, 可适当增加 PCO 节点后再重新优化层内、层间连接分布, 将优化方式从参数优化转向拓扑优化。

3 实验结果与分析

文章在电力线载波和无线网络技术^[22]基础上构建的双模混合网络, 为验证文中方法的有效性, 选取总数有 52 只电能表的电力台区开展双模通信现场验证, 拓扑结构如图 2、图 3 所示。

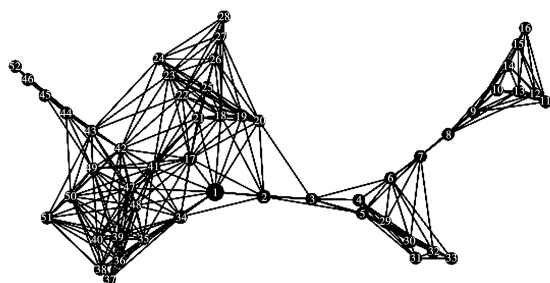


图 2 高频射频通信网络拓扑图
Fig. 2 Topology diagram of HRF communication network

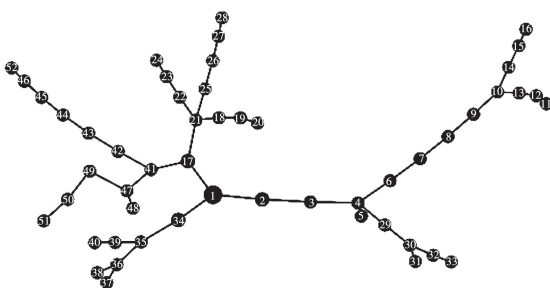


图 3 高速电力线载波网络拓扑图
Fig. 3 HPLC network topology diagram

3.1 同步能力分析

将实验台区双模通信拓扑结构中的邻接矩阵及度矩阵, 按照上节方法代入式 (13) ~ 式 (17) 分别计算超拉普拉斯矩阵 L 及最小非零特征值 $\lambda_2(L^L)$ 。由于各矩阵的维数较高, 计算过程相似且篇幅较大, 文章直接给出同步能力趋势对比分析结果, 如图 4 ~ 图 6 中粗曲线所示。

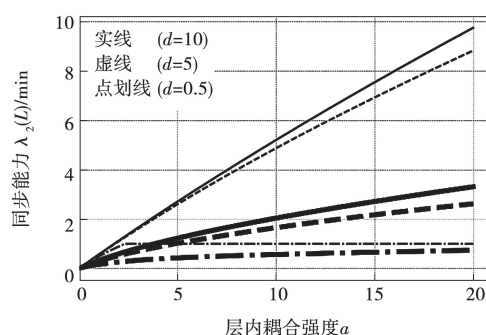


图 4 同步能力 - 层内耦合强度趋势对比图
Fig. 4 Comparison chart of synchronization capability-intra layer coupling strength trend

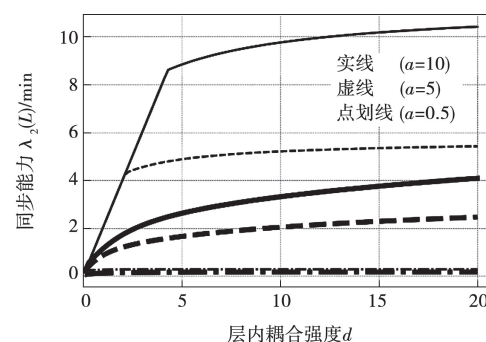


图 5 同步能力 - 层间耦合强度趋势对比图
Fig. 5 Comparison chart of synchronization capability-interlayer coupling strength trend

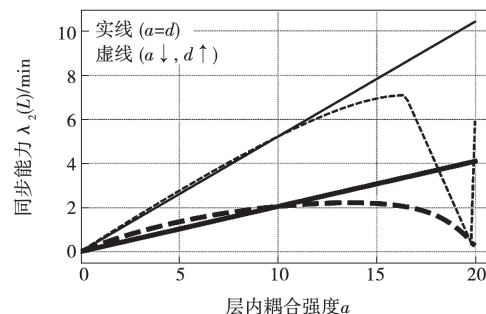


图 6 参数协同调控对网络同步能力的影响
Fig. 6 Impact of parameter collaborative regulation on network synchronization capability

从图 4 ~ 图 6 中可见, 当节点数量增加时, 代表 9 节点的细曲线与代表 52 节点的粗曲线在形态上保持高度相似性, 但其幅值随层内、层间耦合强度组合的调整呈现递减趋势, 说明网络规模差异主要影响了同步能力的绝对数值。

下面结合双模通信网络模型说明层内、层间耦合强度与同步能力的关系: 层内耦合强度 a 为式 (13)、式 (15) 所示邻接矩阵中的非零元素, 其物理

意义为 HRF、HPLC 的信号强度。根据式(12)及式(14)、式(16)的计算结果 $\lambda_2(L(G_R)) = 0.563a$ 、 $\lambda_2(L(G_P)) = 0.296a$, 增大 a 会提升层内 Supra-Laplace 矩阵的同步能力。图 4 中三种趋势对比的仿真和实验结果初步验证了复杂网络同步理论中层内耦合强度与网络连通性的直接关联。

对于层间耦合强度 d 对同步能力的影响, 当 $4d^2 \ll (\lambda_2(G_R) - \lambda_2(G_P))^2$ 时式(12)中根号项整理为:

$$\pm \sqrt{(\lambda_2(G_R) - \lambda_2(G_P))^2 + 4d^2} = |\lambda_2(G_R) - \lambda_2(G_P)| \times \sqrt{1 + (4d^2 / (\lambda_2(G_R) - \lambda_2(G_P))^2)} \approx |\lambda_2(G_R) - \lambda_2(G_P)| \approx \pm (\lambda_2(G_R) - \lambda_2(G_P)) \quad (20)$$

将式(20)带入式(12)得:

$$\lambda \approx (1/2) \times [(\lambda_2(G_R) + \lambda_2(G_P) + 2d) \pm (\lambda_2(G_R) - \lambda_2(G_P))] \quad (21)$$

由于 HPLC 只能在已有电力线路中传送信号, 电力线路即为 HPLC 网络的全连通拓扑图, 而 HRF 可通过空间建立链路连接。所以在双模通信节点数量相同条件下, 假设 HRF 的连通度要大于 HPLC 的连通度, 即 $\lambda_2(G_R) > \lambda_2(G_P)$ 。当式(20)中取正号时 $\lambda_+ \approx \lambda_2(G_R) + d$; 取负号时 $\lambda_- \approx \lambda_2(G_P) + d$, 由于 $d \ll (1/2) |\lambda_2(G_R) - \lambda_2(G_P)|$, 此时双模通信的同步能力由单层网络的 $\lambda_2(G_R)$ 和 $\lambda_2(G_P)$ 主导, 上述公式进一步说明当层间耦合较少时, 层内连接是同步能力的核心因素。

当 $4d^2 \gg (\lambda_2(G_R) - \lambda_2(G_P))^2$ 时, 式(12)中根号项由 $4d^2$ 主导, 式(20)只能取正号: $\lambda_+ \approx 3d$ 。此时层间耦合强度决定双模通信的同步能力。

拐点的区间范围为 $(|\lambda_2(G_R) - \lambda_2(G_P)|, 3d)$, 将 $\lambda_2(L(G_R))$ 、 $\lambda_2(L(G_P))$ 带入可得拐点区间范围为: $(0.296a, 3d)$ 或 $(3d, 0.296a)$ 。图 5 中曲线验证了在 d 较小并快速上升时, 式(12)由根号项主导, 同步能力受单层网络和 d 共同影响, 而超过拐点后增速放缓, 根号项退化为 $3d$, 同步能力由 d 线性主导。

结合上面的分析可得以下共性规律: 当双模通信节点规模变化或网络拓扑结构存在差异时, 同步能力与层内耦合强度呈现显著正相关特性, 较高的层间耦合强度能够优化层内耦合的资源利用率, 从而更高效地提升同步性能。

3.2 链路移除对同步能力的影响

针对双模异构通信网络缺乏可信节点、通信链路易受环境干扰产生动态涌现的特性, 引入文献

[23] 提出的多节点移除方法构建链路失效场景下的网络同步能力分析。将失效类型定义为关键节点连边失效、边缘节点连边失效和节点间连边随机失效^[24]三类场景。表 1 为按照节点度从大到小(关键节点)、从小到大(边缘节点)、随机移除三种方式揭示双模通信的同步能力。

表 1 移除过程关键数据对比

Tab. 1 Comparison of key data during the removal process

移除比例/%	关键节点失效	边缘节点失效	随机失效	性能差异/%
20	1.792 0	1.457 6	1.680 2	18.43
50	0.669 8	0.507 0	0.927 9	38.72
90	0.124 3	0.204 3	0.122 3	66.67

表 1 中性能差异^[25] = (最高值 - 最低值)/初始值, (初始值为 0% 移除时的 2.04)。

从表 1 中可见, 移除比例 20% 时同步能力从初始值 2.04 骤降至 1.79, 经计算得连接密集的关键节点(如 41、42、47)移除边占比达 60%, 网络平均度从 5.2 降至 3.8。其中, 节点 41 共移除了 21 条边, 涉及节点(1、17-25、34-36 等), 直接导致网络直径增大。低度节点(如 46、52、33)移除时, 同步能力下降平缓(20% 时为 1.46), 这些节点多为末端节点, 对整体连通性影响有限。随机失效(20% 时为 1.68), 推测网络中存在隐藏关键边, (如边: 47 ~ 51), 这些边虽未连接关键节点, 但承担跨区域数据传输的功能。

图 7 为链路移除对双模网络同步能力的影响曲线。

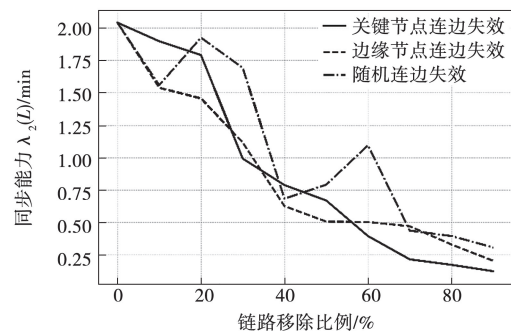


图 7 链路移除对双模网络同步能力的影响

Fig. 7 Impact of link removal on the synchronization capability of dual-mode network

从图 7 中可见, 随着链路移除比例增加, 三类

连边失效模式下的网络同步能力均呈现显著衰减特征。初始阶段(0% ~ 20%),关键节点失效对同步能力影响最大;中高移除比例(30% ~ 90%),随机失效的影响逐渐显著。

其中关键节点连边失效曲线衰减程度较大,在移除比例达40%时同步能力从2.04下降至0.79,为初始状态的62%,表明了网络对核心节点的高度敏感。边缘节点失效近似线性衰减特征;每20%的链路移除约导致40%的同步能力降幅。值得注意的是,随机连边失效场景下的同步能力曲线始终居于三者高位,特别是在移除比例60%区间之前仍维持平均1.10的较高水平,体现双模通信连接的随机冗余^[26]特性。

4 结论

文章研究双模通信网络的结构特性与同步机制,基于复杂网络理论将双模通信网络抽象为多层网络的图模型。在此基础上提出一种双模通信网络同步能力的分析方法。通过量化分析发现,节点数量、度分布、层内和层间耦合强度等参数共同对网络同步性能产生影响。其中关键节点失效将引发同步能力骤降,而随机连边失效可维持相对稳定的同步水平。

值得说明的是,文章讨论范围主要针对静态网络,未能充分刻画网络的动态事件,下一步引入时效网络概念,从网络连接拓扑结构变化角度重新审视双模通信网络的同步问题。

参 考 文 献

- [1] 刘毅,姚彦良,孙晶晶. 基于HPLC双模通信在台区组网的技术应用研究[J]. 电工技术, 2024(12): 125-127.
Liu Yi, Yao Yanliang, Sun Jingjing. Research on the Application of Networking Technology Based on HPLC Dual-mode Communication[J]. Electric Engineering, 2024(12): 125-127.
- [2] 贺云隆,黄璐涵,宋晓林,等. 低压居民用户停电事件实时上报方法研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(21): 147-152.
He Yunlong, Huang Luhan, Song Xiaolin, et al. Research on real-time reporting method for power outages of low-voltage residential users[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(21): 147-152.
- [3] 贺云隆,宋晓林,白宇峰,等. 基于HPLC的智能电能表通信模块状态监测技术研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(10): 191-200.
He Yunlong, Song Xiaolin, Bai Yufeng, et al. Research on condition monitoring technology of smart electricity meter communication module based on HPLC[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(10): 191-200.
- [4] 吴呈邑,熊焰,黄文超,等. 移动自组网中基于动态第三方的可信公平非抵赖协议[J]. 电子学报, 2013, 41(2): 227-232.
Wu Chengyi, Xiong Yan, Huang Wenchao, et al. A trusted fair non-repudiation protocol based on dynamic third party in mobile ad hoc networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(2): 227-232.
- [5] 段朝霞,戴君,邵振,等. 间歇通信下具有双层拓扑结构的多智能体系统一致性研究[J]. 动力学与控制学报, 2024, 22(7): 13-18.
Duan Zhaoxia, Dai Jun, Shao Zhen, et al. Research on consensus of multi-agent systems with two-layer hierarchical topology under intermittent communication[J]. Journal of Dynamics and Control, 2024, 22(7): 13-18.
- [6] 朱晓霞,胡小雪. 多层社交网络中节点影响力的识别[J]. 情报理论与实践, 2019, 42(1): 105-111.
Zhu Xiaoxia, Hu Xiaoxue. Identification of node influence in multi-layer social networks[J]. Information Science: Theory & Application, 2019, 42(1): 105-111.
- [7] 常素华,田乐. 基于HPLC双模通信的多方式一致性测试系统[J]. 电测与仪表, 2021, 58(3): 92-97, 104.
Chang Suhua, Tian Le. Multi-mode conformity test system based on HPLC dual-mode communication[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(3): 92-97, 104.
- [8] 刘志峰,张雪,栗苹,等. 基于D2D通信和虚拟MIMO的飞行器集群网络传输方案设计[J]. 兵工学报, 2024, 45(4): 1141-1147.
Liu Zhifeng, Zhang Xue, Li Ping, et al. Research on the transmission scheme of multi-aircraft network based on D2D communication and virtual MIMO[J]. Acta Armamentarii, 2024, 45(4): 1141-1147.
- [9] 薛激光,王珺,张笑怡,等. 一种低压台区本地HPLC+RF双模自组织通信网络身份认证方法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(1): 219-224.
Xue Jiguang, Wang Jun, Zhang Xiaoyi, et al. A local HPLC + RF dual-mode communication Adhoc network identity authentication method in low-voltage station area [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(1): 219-224.
- [10] 徐明明,陆君安,周进. 两层星形网络的特征值谱及同步能力[J]. 物理学报, 2016, 65(2): 387-399.
Xu Mingming, Lu Junan, Zhou Jin. Synchronizability and eigenvalues of two-layer star networks[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(2): 387-399.
- [11] 卢佳华,宾红华. 两层时滞网络的混合控制同步策略[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2024, 29(2): 179-187.
Lu Jiahua, Bin Honghua. Hybrid control synchronization strategies for two-layer time-delay networks[J]. Journal of Jimei University (Natural Science), 2024, 29(2): 179-187.
- [12] 孙娟,李晓霞,张金浩,等. 多层单向耦合星形网络的特征值谱及同步能力分析[J]. 物理学报, 2017, 66(18):

- 329-342.
Sun Juan, Li Xiaoxia, Zhang Jinhao, et al. Synchronizability and eigenvalues of multilayer star networks through unidirectionally coupling[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(18): 329-342.
- [13] 陈光胜. 异构双模通信技术的分析与展望[J]. *电子技术*, 2024, 53(1): 100-103.
Chen Guangsheng. Analysis and prospect of heterogeneous dual-mode communication technology[J]. *Electronic Technology*, 2024, 53(1): 100-103.
- [14] 黄瑞, 刘超, 刘谋海, 等. 基于 HPLC 与 RF 自适应通信的配用电异构场域网[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2022, 34(1): 76-83.
Huang Rui, Liu Chao, Liu Mouhai, et al. Heterogeneous field network for power distribution grid based on HPLC and RF adaptive communication[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2022, 34(1): 76-83.
- [15] 苟玲, 肖玉芝, 李政辉. 两层复杂网络的特性及其抗毁性分析[J]. *计算机应用与软件*, 2021, 38(11): 114-120, 209.
Gou Ling, Xiao Yuzhi, Li Zhenghui. Characteristics and invulnerability analysis of two-layer complex networks[J]. *Computer Applications and Software*, 2021, 38(11): 114-120, 209.
- [16] 胡亚琴, 唐明. 层间耦合关联对多层网络交通传输的影响[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2021(3): 105-113.
Hu Yaqin, Tang Ming. The impact of coupling patterns on transport in multilayer networks[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2021(3): 105-113.
- [17] 魏娟. 两层复杂网络的同步与超扩散[D]. 武汉: 武汉大学, 2019.
Wei Juan. Synchronization and Superdiffusion on duplex networks[D]. Wuhan: Wuhan University, 2019.
- [18] 朱剑, 李显勇, 高海平. K 层层间单向耦合星形网络的同步能力分析[J]. *西华大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(1): 59-66.
Zhu Jian, Li Xianyong, Gao Haiping. Analysis of synchronization ability of K unidirectional coupled star networks[J]. *Journal of Xihua University (Natural Science Edition)*, 2022, 41(1): 59-66.
- [19] 刘志勇, 李文帅, 李思奇, 等. 基于层间关联性的复合公共交通网络布局优化策略[J]. *北京交通大学学报*, 2024, 48(3): 83-91.
Liu Zhiyong, Li Wenshuai, Li Siqi, et al. Composite public transport network layout optimization strategy based on interlayer correlation[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2024, 48(3): 83-91.
- [20] 裴萍, 卞继承, 朱剑, 等. 二部组合加权网络的同步能力分析[J]. *数学的实践与认识*, 2023, 53(4): 194-202.
Pei Ping, Bian Jicheng, Zhu Jian, et al. Synchronizability of the bipartite combined weighted networks[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2023, 53(4): 194-202.
- [21] 吴晓群, 孟涵怡, 陆君安, 等. 两条层间连边下的双层链状网络同步能力分析[J]. *中国科学: 信息科学*, 2021, 51(11): 1931-1945.
Wu Xiaqun, Meng Hanyi, Lu Jun'an, et al. Analysis of the synchronizability of two-layer chain networks with two inter-layer edges[J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2021, 51(11): 1931-1945.
- [22] 吴振英, 邵利群. 基于 nRF24L01 无线传输的汽车自动识别红绿灯设计[J]. *办公自动化*, 2014(12): 44-46.
Wu Zhenying, Shao Liqun. Design of automatic identification system of traffic lights based on Zigbee transmission technology[J]. *Office Automation*, 2014(12): 44-46.
- [23] 唐亮, 何杰, 靖可. 关联供应链网络级联失效机理及鲁棒性研究[J]. *管理科学学报*, 2016, 19(11): 33-44, 62.
Tang Liang, He Jie, Jing Ke. Cascading failure mechanism and robustness of interdependent supply chain networks[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2016, 19(11): 33-44, 62.
- [24] Dui H, Meng X, Xiao H, et al. Analysis of the cascading failure for scale-free networks based on a multi-strategy evolutionary game[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2020, 199: 106919.
- [25] Savitha K N, Pinto L, Gopalan S, et al. Equivalence class and modified Gaussian methods for normalization of time series data on AI models[J]. *Expert Systems with Applications*, 2025, 277: 127166.
- [26] 雷帮春, 孟坤, 宋登科, 等. 基于交易采样子图的以太坊钓鱼检测方法[J]. *计算机工程与设计*, 2025, 46(3): 690-697.
Lei Bangchun, Meng Kun, Song Dengke, et al. Ethereum phishing detection method based on transaction sampling subgraph network[J]. *Computer Engineering and Design*, 2025, 46(3): 690-697.

收稿日期: 2025-04-14; 修回日期: 2025-07-16

作者简介:

吴振英(1979—),女,通信作者,硕士,副教授,研究方向为嵌入式及智能产品开发与应用。

E-mail:840196713@qq.com

罗楠(1983—),男,博士,讲师,研究方向为通信技术。

E-mail:00826@siit.edu.cn

刘勇(1978—),男,硕士,副教授,研究方向为通信技术。

(编辑 王克祥)