

## 基于图注意力网络的电力通信网络动态路由优化算法

柳 茜<sup>1</sup>

LIU Qian

## 摘 要

在对电力通信网络进行动态路由优化时,使用单头注意力机制难以准确计算网络节点的权重值,导致优化效果不佳。对此,文章提出一种基于图注意力网络的电力通信网络动态路由优化算法。从电力通信网络数据中提取节点特征和边特征,并构建通信网络特征向量。将特征向量作为输入变量输入到图注意力网络中,计算网络节点相对于邻近节点的注意力系数。在多头注意力机制的作用下,计算注意力系数的平均值,并据此分配节点的权重。在优化网络动态路由时,优先选择权重值最高的路由节点作为下一节点,生成网络路由方案,并对其进行评估。选择评估值最高的方案作为最优路由方案输出。实验结果表明,应用设计的优化方法后,网络动态路由的吞吐量达到 5 225.26 bit/s,带宽利用率为 93.52%,显示出较高的优化效果。

## 关键词

图注意力网络;电力通信网络;网络路由;动态路由;路由优化

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.10.035

## 0 引言

电力通信网络作为支撑电网安全稳定运行的基础,其对于推进新型电力系统建设具有重要意义。由于风电、光伏等新能源具有不确定性,其会导致电力通信网络的拓扑结构呈现较高的波动性,进而引发一系列的网络问题。现有的网络

动态路由无法适应通信网络的动态变化,且容易受到链路故障的影响,出现较长时间的网络波动,影响方法的应用效果。

在该研究背景下,不少研究学者针对路由优化展开了研究,并给出了自己的观点。赵星珠等人<sup>[1]</sup>根据计算机网络路由运行特性,设定最小化平均网络时延作为优化目标,设定路由唯一性等多个约束条件,根据人工鱼群算法,设定初始参数,根据鱼群特点,设计人工鱼的行为规则,引入公告牌机制,记录全局最优解,通过多次迭代优化,输出最优的路

1. 甘肃中网通讯技术有限公司 甘肃兰州 730000

## 参考文献:

- [1] 孟祥璞,李硕,苑明哲,等.基于人体骨架的动作识别:综述与展望[J].信息与控制,2025,54(1):1-27.
- [2] DUBEY S, DIXIT M. A comprehensive survey on human pose estimation approaches[J]. Multimedia systems, 2023, 29: 167-195.
- [3] KHEMANI B, PATIL S, KOTTECHA K, et al. A review of graph neural networks: concepts, architectures, techniques, challenges, datasets, applications, and future directions[J]. Journal of big data, 2024, 11: 18.
- [4] VASWANI A, SHAZEER N, PARMAR N, et al. Attention is all you need[C]//NIPS'17: Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing System. New York: ACM, 2017: 6000-6010.
- [5] 刘宝龙,周森,董建锋,等.基于骨架的人体动作识别技术研究进展[J].计算机辅助设计与图形学学报,2023,35(9): 1299-1322.

- [6] 赵晨,彭舰,黄军豪.基于时空关节映射的骨架动作识别方法[J/OL].计算机科学,1-14[2025-05-26].<https://link.cnki.net/urlid/50.1075.tp.20241209.1518.010>.
- [7] 游浩,丁苍峰,马乐荣,等.Graph Transformer 技术与研究进展:从基础理论到前沿应用[J].计算机应用研究,2025,42(4): 975-986.
- [8] DE LA TORRE F, HODGINS J K, BARGTEIL A W, et al. Guide to the carnegie mellon university multimodal activity (CMU-MMAC) database[EB/OL].(2008-08-22)[2025-06-12].<https://www.ri.cmu.edu/publications/guide-to-the-carnegie-mellon-university-multimodal-activity-cmu-mmact-database/>.

## 【作者简介】

刘瑞(1997—),男,硕士研究生,四川成都人,研究方向:复杂网络、虚拟现实技术, email: 836287308@qq.com。

(收稿日期: 2025-05-28 修回日期: 2025-10-15)

由优化方案。该方法应用的人工鱼群算法会受到搜索机制的限制, 使得其陷入局部最优解中, 导致方法的优化效果不佳。李忠等人<sup>[2]</sup>将最小化网络总能耗作为优化目标, 设定链路质量、链路延迟等多个约束条件, 在改进蚁群算法的作用下, 对信息素浓度进行初始化, 设定启发式函数, 通过轮盘赌选择合适的路径, 在多次迭代后得到最优的路径, 再将其作为路由优化方案输出。该方法在设计时对网络的动态适应性不足, 进而导致路由优化效果不佳。强大壮<sup>[3]</sup>根据电力通信网络路由特点, 将其转换成多属性决策问题, 进而构建决策矩阵, 对决策矩阵中的不同指标进行标准化和权重分配, 在改进 TOPSIS 算法的作用下, 确定决策矩阵的正负理想解, 通过计算正负理想解之间的相对贴近度, 实现对电力通信网络路由的优化。该方法在分配决策指标权重值会受到主观性的影响, 导致方法的优化效果不佳。

本文设计了基于图注意力网络的电力通信网络动态路由优化算法。本研究能够捕捉到电力通信网络的时序特性, 实现对网络状态的实时预测, 进而提高网络路由的可靠性。同时, 本研究能够降低因通信故障引发的电网问题, 减少电网损失, 确保了电力通信网络在运行过程中的安全性。

## 1 电力通信网络动态路由优化算法设计

### 1.1 电力通信网络路由特征挖掘

根据电力通信网络运行特点, 将网络中的发电站、变电站等抽象成节点, 不同设备之间的通信链路抽象成边, 构建电力通信网络拓扑结构图, 用  $G = (V, E)$  表示, 其中:  $V$  表示节点集合;  $E$  表示网络边集合。根据通信网络的节点特性, 从中提取节点特征和边特征。其中, 节点特征包含剩余能量、节点处理能力等<sup>[4]</sup>。其具体计算公式为:

$$J_a = \frac{E_i - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}} \quad (1)$$

$$J_b = \frac{C_b}{C_z} \quad (2)$$

式中:  $J_a$  表示电力通信网络节点的剩余能量;  $E_i$  表示第  $i$  个节点当前的剩余能量值;  $E_{\min}$  表示网络节点剩余能量的最小值;  $E_{\max}$  表示网络节点剩余能量的最大值;  $J_b$  表示电力通信网络节点的处理能力;  $C_b$  表示节点的实时处理能力;  $C_z$  表示节点的最大处理能力。

根据提取的特征, 构建的节点特征用  $J = (J_a, J_b)$  表示。再提取电力通信网络的边特征, 其包括链路时延、实时链路利用率等<sup>[5]</sup>。其具体计算公式为:

$$L_a = \frac{e}{s} \varphi + \phi m + \Delta t \quad (3)$$

$$L_b = \sum_{q=1}^Q \frac{\varphi C_q}{R} \quad (4)$$

式中:  $L_a$  表示电力通信网络的链路时延;  $e$  表示传输路径长度;  $s$  表示数据传输速率;  $\varphi$  表示链路节点流经判断函数;  $\phi$  表示节点交换延时;  $m$  表示常数系数;  $\Delta t$  表示延迟抖动值;  $L_b$  表示电力通信网络的链路利用率;  $C_q$  表示第  $q$  条边的实时流量值;  $R$  表示第  $q$  条边的最大容量值;  $Q$  表示链路数量。

根据上述公式, 挖掘出电力通信网络的边特征, 用  $L = (L_a, L_b)$  表示。将提取的边特征与节点特征结合在一起, 得到电力通信网络的综合特征向量。其特征向量为:

$$T = \alpha_j J + \alpha_l L \quad (5)$$

式中:  $T$  表示电力通信网络特征向量;  $\alpha_j$ 、 $\alpha_l$  分别表示不同特征对应的权重值。

### 1.2 基于图注意力网络的电力通信网络路由节点权重值分配

根据确定的电力通信网络特征向量, 在图注意力网络的作用下, 为每个节点分配对应的权重值。将计算的电力通信网络特征向量作为输入变量, 输入到图注意力网络中<sup>[6]</sup>。应用网络中的注意力机制, 计算节点相对于邻近节点的注意力系数, 其具体计算过程为:

$$\kappa_{ab} = \text{soft max} \left( \sigma \left( \beta_k |Wg_a| \times |Wg_b| \times T \right) \right) \quad (6)$$

式中:  $\kappa_{ab}$  表示电力通信网络第  $a$  个节点相对于邻近节点  $b$  的注意力系数;  $\sigma()$  表示注意力网络的激活函数;  $\beta_k$  表示注意力向量;  $W$  表示注意力权重矩阵;  $g_a$  表示节点  $a$  的嵌入函数;  $g_b$  表示节点  $b$  的嵌入函数。

根据计算的节点注意力系数, 引入多个注意力头, 依次计算节点的注意力系数, 再计算其平均值, 由此, 实现对节点注意力权重值的分配<sup>[7]</sup>。其具体计算过程为:

$$\delta_{ab} = \frac{1}{M} \sum_{y=1}^M k_{ab} \alpha_y p_y \quad (7)$$

$$w_a = \sum_{a=1}^A \delta_{ab} \times L(h_a) \quad (8)$$

式中:  $\delta_{ab}$  表示电力通信网络在多头注意力机制下的平均注意力系数;  $M$  表示引入的注意力头数;  $\alpha_y$  表示第  $y$  个注意力对节点的影响程度;  $p_y$  表示节点波动参数;  $w_a$  表示网络节点分配的权值;  $L()$  表示图注意力网络的权重分配函数;  $h_a$  表示对应节点的特征类型;  $A$  表示电力通信网络节点数量。

将电力通信网络的节点按照权重值的大小进行排序, 选择权重值较高的节点作为路由的首选, 便于后续实现对网络动态路由的优化。

### 1.3 电力通信网络动态路由优化

在对电力通信网络动态路由进行优化时, 先确定源节点, 基于源节点, 对电力通信网络动态路由节点进行遍历, 选择权重值较高的节点作为下一节点, 由此生成网络动态路由<sup>[8]</sup>。

针对生成的网络动态路由，计算路由评估值：

$$S_p = \sum_{a=1}^A \xi_1 w_a + \xi_2 (1-d) + \xi_3 (1-e) + \xi_4 (1-f) \quad (9)$$

式中： $S_p$ 表示网络动态路由评估值； $d$ 表示路由链路时延， $e$ 表示路由丢包率； $f$ 表示路由带宽利用率； $\xi_1$ 、 $\xi_2$ 、 $\xi_3$ 、 $\xi_4$ 分别表示对指标的评估权重值。

根据路由路径的评估值，对路由路径进行剪枝，去除多余的节点，由此得到最优的路由集合。判断目标节点是否处于最优路由中，若处于，则选择评分最高的路由作为优化结果输出。若没有，则在选择路径节点时，选择节点第二高的节点作为下一节点，由此得到新的路由路径，直到输出的路由路径满足迭代条件为止。至此，基于图注意力神经网络的电力通信网络动态路由由优化算法的设计完成。

## 2 算例分析

### 2.1 电力通信网络概况

实验选择的电力通信网络覆盖范围极广，为供电所、变电站等城市的多个关键点提供网络连接服务。在该通信网络中，链路时延在 50~100 ms 之间，链路丢包率在 0.2%~5% 之间，链路带宽为 150 Mbit/s，动态波动周期为 12 s。该电力通信网络的具体拓扑结构如图 1 所示。

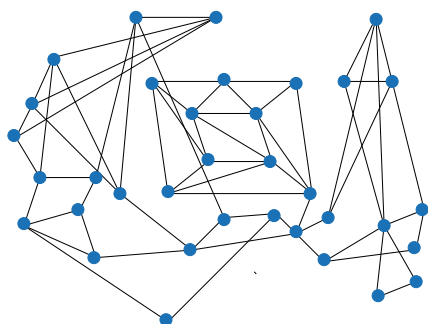


图 1 电力通信网络拓扑结构

图 1 清晰地展示了网络拓扑结构中总共包含 35 个关键节点和 98 条连接边，这些节点与边共同构成了复杂且高效的通信网络骨架。在该网络系统中，数据的传输速率高达 100 Gbit/s，确保了信息传递的快速与高效。此外，光纤一旦发生故障，其修复时间被严格控制在 16.5 h 以内，以尽量减少网络中断带来的影响。载波频率设置为 95 kHz，这一频率的选择有助于信号的稳定传输。信号电平高达 134 dBuV，有效提升了信号在传输过程中的抗干扰能力。频谱带宽达到 20 dB，为信号提供了充足的传输空间，减少了相互间的干扰。信号带宽则为 5 kHz，保证了信号传输的高清晰度和准确性。

在进行该通信网络的实验测试时，必须设立一个参照组，以便通过将本文提出的优化方法与参照组的方法进行对比分析，从而验证本文方法的实际优化效果。参照组具体由两种不同的路由优化方法构成：一是基于人工鱼群算法的计算机

网络路由优化方法研究（称为参照组 1），该方法通过模拟自然界中鱼群的行为模式来优化网络路由；二是基于改进 TOPSIS 算法的电力通信网络路由优化方法（称为参照组 2），该方法在传统 TOPSIS 算法的基础上进行了适应性改进，使其更适合电力通信网络的环境。通过这样的对比实验，我们能够更加客观、全面地评估本文所提出方法的优化性能，进而验证其在实际应用场景中的有效性和优越性。

### 2.2 优化过程

应用本文方法对图 1 所示的电力通信网络进行优化时，采用 PyTorch+Deep Graph Library 作为深度学习框架，OMNeT 作为网络仿真工具，构建实验环境。同时，需设定本文方法的优化参数，参数设定如下：

常数系数  $m=5.00$ ，节点特征权重值  $\alpha_j=0.65$ ，边特征权重值  $\alpha_l=0.35$ ，评估权重值  $\xi_1=0.25$ 、 $\xi_2=0.30$ 、 $\xi_3=0.20$ 、 $\xi_4=0.25$ 。

根据设定的参数，收集图 1 所示电力通信网络数据，将其通信网络中的重要设备抽象成节点，设备之间的通信链路抽象为边，构建电力通信网络的图结构。从图结构中，挖掘节点特征和边特征，构建电力通信网络的特征向量。将该特征向量作为输入变量，输入到图注意力神经网络中。应用的图注意力网络具体参数如表 1 所示。

表 1 图注意力网络参数

| 序号 | 网络参数   | 参数数值    | 序号 | 网络参数      | 参数数值  |
|----|--------|---------|----|-----------|-------|
| 1  | 输入特征维度 | 64      | 6  | 负斜率       | 0.2   |
| 2  | 输出特征维度 | 32      | 7  | Dropout 率 | 0.6   |
| 3  | 注意力头数  | 8       | 8  | 学习率       | 0.005 |
| 4  | 训练轮次   | 200     | 9  | 批量大小      | 64    |
| 5  | 正则化参数  | 0.000 5 | 10 | 权重矩阵的维度   | 64    |

如表 1 所示，根据上述设定的参数，对输入的特征向量进行处理，在注意力机制的作用下，通过确定节点的注意力系数，进而计算节点的权重值，由此，为电力通信网络的节点分配对应的权重值。

根据分配的节点权重值，确定源节点和目标节点。在选择源节点下一节点时，选择权重值最高的节点作为下一节点，由此遍历所有节点，得到多组路由方案。通过对路由方案进行评估，选择包含目标节点且评估值最高的路由方案作为优化结果。由此，实现对电力通信网络动态路由的优化。

### 2.3 结果与分析

应用三种方法对图 1 所示电力通信网络的动态路由进行优化，统计三种方法优化后动态路由的吞吐量，其数值越高，说明三种方法的优化效果越好。三种方法的优化结果如图 2 所示。

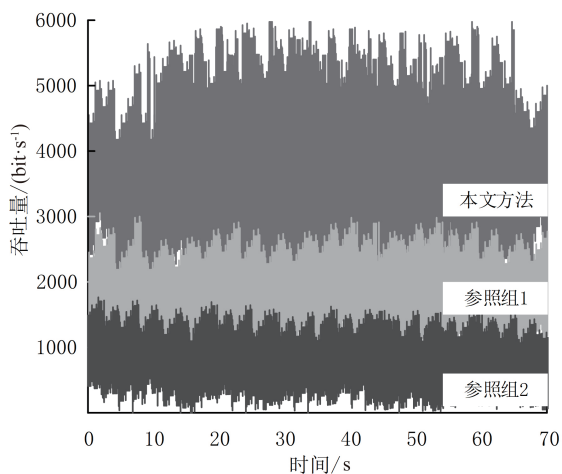


图2 三种方法优化后的吞吐量

如图2所示，通过应用本文提出的方法进行优化，网络路由的吞吐量得到了显著提升。具体来说，优化后的吞吐量数值达到了5 225.26 bit/s，相比之下，参照组1的吞吐量仅为2 623.45 bit/s，而参照组2的吞吐量更是只有1 365.47 bit/s。由此可见，本文方法在提升网络路由吞吐量方面表现出色，其较高的吞吐量数值充分证明了其在实际应用中的优化效果更为显著。这一结果表明，本文提出的方法能够有效地提高网络路由的性能，从而在实际网络环境中展现出更好的应用前景。

在进一步验证本文方法的性能时，以优化后方法的带宽利用率为评价指标，其数值越高，说明方法的优化效果越好。三种方法的带宽利用率如图3所示。

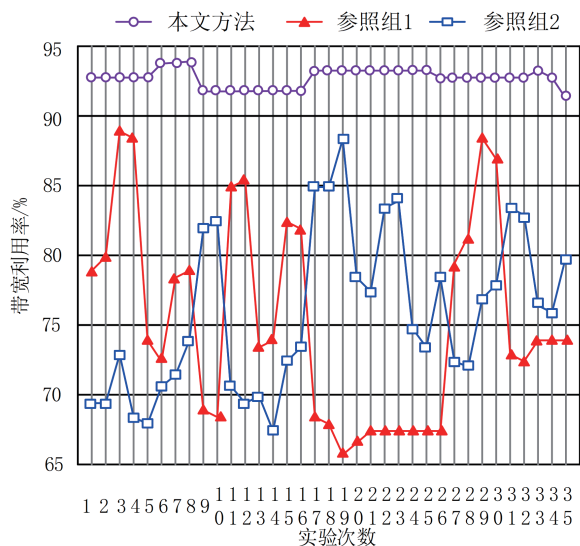


图3 三种方法的带宽利用率

如图3所示，通过多次实验，应用本文方法优化后电力通信网络动态路由的带宽利用率数值90%以上，均值为93.52%。参照组1的带宽利用率数值为82.45%，参照组2的带宽利用率数值为76.33%，其数值均低于本文方法。这

是因为本文方法在设计时，引入了图注意力网络，对通信网络节点分配权重值，进而得到最优的路由方案。因此，本文方法在实际应用中的优化效果较好。

### 3 结语

综上所述，本研究将电力通信网络抽象化为图结构模型，通过细致捕捉各个节点及其连接边的特性，精心构建出电力通信网络的特征向量。在此基础上，引入了先进的图注意力网络技术，为各个节点合理分配权重值，从而精准制定出最优的网络动态路由策略。在实际应用场景中，本研究能够实时动态地调整路由节点，优化路由选择方案，显著降低网络传输过程中的丢包率，大幅提升电力通信网络的吞吐能力，确保网络通信的实时响应性和高度可靠性。同时，本研究有效提升了带宽资源的利用率，减少了不必要的资源浪费，有力推动了电力行业向智能化方向的转型发展，进而全面提升整个电力系统的运行效率和管理水平。借助这一方法，电力通信网络能够更加灵活自如地应对多样化且复杂的网络环境，有力保障电力系统的稳定运行，为电力用户提供更为可靠且高效的通信服务。

### 参考文献:

- [1] 赵星珠,樊蒙蒙.基于人工鱼群算法的计算机网络路由优化方法研究[J].长江信息通信,2025,38(3):89-90.
- [2] 李忠,严莉,倪建军,等.基于改进蚁群算法的无线传感网络路由优化方法[J].计算机与网络,2025,51(1):67-75.
- [3] 强大壮.基于改进TOPSIS算法的电力通信网络路由优化[J].辽宁师专学报(自然科学版),2024,26(2):88-94.
- [4] 刘磊,朱允祥,朱国朋,等.基于图神经网络的电力通信网络路由优化算法[J].中国电子科学研究院学报,2024,19(1):21-29.
- [5] 刘松.基于超限快速决策树的无线多媒体传感器网络路由优化方法[J].青岛大学学报(自然科学版),2022,35(3):33-38.
- [6] 张晓莉,汤颖琪,宋婉莹.基于图神经网络的SDN路由算法优化[J].电讯技术,2025,65(1):18-24.
- [7] 赵振宇,郭珍珍.基于量子粒子群算法的计算机通信网络路由选择优化方法[J].长江信息通信,2024,37(10):188-189.
- [8] 王健,朱晓娟.软件定义物联网中基于深度强化学习的路由优化算法[J].现代信息科技,2022,6(8):158-161.

### 【作者简介】

柳茜(1983—),女,甘肃兰州人,本科,中级工程师,研究方向:电子工程, email: chenj197009@163.com。

(收稿日期:2025-06-16 修回日期:2025-10-15)