

文章编号: 2095-4980(2025)07-0677-08

## 基于数字孪生的电力通信网通道迂回路由自动重构技术

王 林, 孟兆娜, 王 伟, 李 尚, 尹喜阳

(国网天津市电力公司 信息通信公司, 天津 300143)

**摘 要:** 近年来, 基于数字孪生的研究逐步在电力通信领域展开, 其中部分工作着重于数字孪生模型的构建和虚实映射能力, 另有研究探索了多路径路由优化技术, 但在动态故障恢复中的应用仍较为有限。为此, 本文提出一种基于数字孪生的迂回路由重构方法, 通过构建电力通信网的数字孪生体, 对链路运行参数和通信设备进行建模分析。该方法通过实时监测网络状态, 能够自动判断故障节点。同时, 在路由重构规划中, 引入改进遗传算法(IGA), 充分考虑链路时延、带宽和电力业务的优先级, 确保了迂回路径选择的精准性与高效性。实验结果表明, 数字孪生和改进遗传算法的引入显著缩短了故障恢复时间, 提升了通信质量与网络自适应性, 为电网的安全运行提供了可靠的技术保障。

**关键词:** 数字孪生; 电力通信网; 改进遗传算法(IGA); 迂回路由自动重构

中图分类号: TN915

文献标志码: A

DOI: 10.11805/TKYDA2024575

## Automatic reconfiguration of detour routes in power communication network channels based on digital twin

WANG Lin, MENG Zhaona, WANG Wei, LI Shang, YIN Xiyang

(State Grid Tianjin Electric Power Information & Communication Company, Tianjin 300143, China)

**Abstract:** In recent years, research on digital twin technology has gradually expanded into the field of power communication, with some studies focusing on digital twin model construction and virtual-real mapping capabilities, while others explore multi-path routing optimization techniques. However, their application in dynamic fault recovery remains limited. A detour routing reconfiguration method based on digital twin is proposed. By constructing a digital twin model of the power communication network, the link parameters and communication devices are analyzed. The proposed method enables real-time network monitoring and automatic fault detection. Additionally, an Improved Genetic Algorithm(IGA) is employed in the rerouting planning process, fully considering link delay, bandwidth, and power service priorities, ensuring the accuracy and efficiency of detour path selection. Experimental results demonstrate that the integration of digital twin technology and the improved genetic algorithm significantly reduces fault recovery time, improves communication quality, and enhances network adaptability, providing reliable technical support for the safe operation of power grids.

**Keywords:** digital twin; power communication network; Improved Genetic Algorithm(IGA); automatic reconfiguration of detour routes

随着智能电网的快速发展以及分布式新能源的大规模接入, 电力通信网变得越来越复杂<sup>[1]</sup>。现有的静态路由

收稿日期: 2024-10-30; 修回日期: 2024-12-06

基金项目: 国网天津市电力公司科技项目资助(信通-研发2024-01)

引用格式: 王林, 孟兆娜, 王伟, 等. 基于数字孪生的电力通信网通道迂回路由自动重构技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025, 23(7): 677-684, DOI: 10.11805/TKYDA2024575.

**Citation format:** WANG Lin, MENG Zhaona, WANG Wei, et al. Automatic reconfiguration of detour routes in power communication network channels based on digital twin[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025, 23(7): 677-684, DOI: 10.11805/TKYDA 2024575.

选择机制无法满足动态、多变的电力通信需求，特别是在网络故障或资源紧张的情况下，静态路由策略表现出资源利用效率低，故障恢复速度慢等问题。面对这些挑战，电力通信网需具备更高的灵活性与自适应能力。近年来，数字孪生技术作为一种融合物理和虚拟世界的创新技术，逐渐用于电力通信领域。通过数字孪生体，可实时监控和优化物理网络的状态<sup>[2]</sup>，提供虚拟环境下的模拟与预测能力，为解决动态路由问题提供新的技术思路。

基于此，本文提出一种结合数字孪生技术与改进遗传算法(IGA)的电力通信网迂回路由优化方法。首先，构建电力通信网的数字孪生模型，将网络的实际状态映射至虚拟孪生空间，通过对网络拓扑结构、链路状态和关键节点的精确建模，实现对网络故障的实时监控与分析<sup>[3-4]</sup>。数字孪生体的虚实映射特性为网络路由优化提供了动态数据支持；其次，利用一种 IGA 进行路由优化，IGA 引入了更优化的交叉和变异操作，使算法能够在动态的网络环境中更快速、准确地搜索到最优路径，提升电力通信网的自适应性与故障恢复能力。在路由规划过程中，不仅考虑了传统的链路时延、带宽等因素，还加入了业务优先级和链路健壮性等参数，确保路由选择的全面性和精确性。通过实验验证，所提方法显著提高了故障恢复速度，降低了网络拥塞，提升了通信质量和网络负载均衡性。

## 1 数字孪生模型的构建

将电力通信网的数字孪生模型架构细分为 4 个层次：物理层、感知层、边缘层以及主站层<sup>[5]</sup>，如图 1 所示。物理层涵盖了电力通信网中的核心运行模型，包括路由、交换机和链路模型等。感知层则由布置在物理层的多种数据采集终端构成，这些终端负责收集设备运行状态(如设备的时延、丢包、带宽等)和网络环境信息(传输所产生的的信道噪声及电磁干扰等)，并将这些信息封装成样本数据上传至边缘层，支持数字孪生局部模型的训练。在边缘层配置搭载边缘服务器的小基站，这些基站负责接收来自端侧的状态信息，并进行局部模型的训练。根据计算资源的不同，将边缘服务器划分为需求服务器和资源服务器两种类型。需求服务器负责接收来自感知层的数据采集终端上传的样本数据，并进行数字孪生局部模型的训练；而资源服务器则提供额外的计算资源，辅助需求服务器完成参数训练任务。这种分层架构的设计旨在优化电力通信网的数字孪生模型，提高其训练效率和准确性。

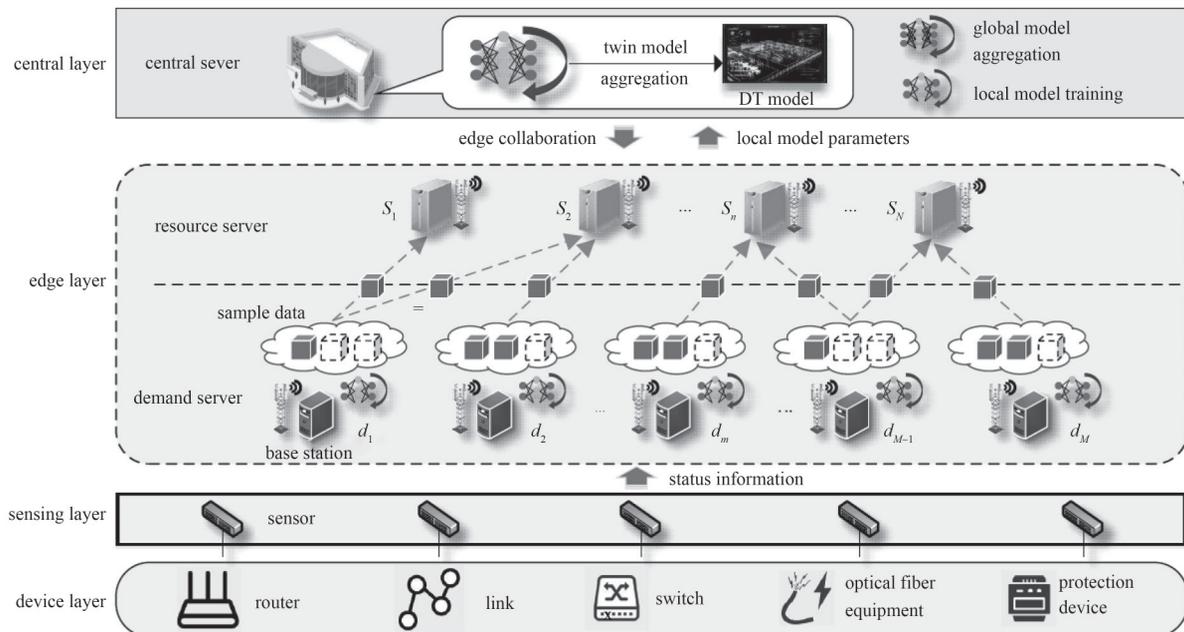


Fig.1 Framework for constructing the DT model of power communication network based on edge collaboration

图 1 基于边缘协作的电力通信网 DT 模型构建框架

1) 在边缘层，需求服务器和资源服务器之间会产生协作，故定义边缘协作决策变量为： $X_{m,n}(t) \in \{0, 1\}$ ，其中  $X_{m,n}(t)=1$  表示需求服务器  $d_m$  选择资源服务器  $s_n$  进行模型训练协作；否则， $X_{m,n}(t)=0$ 。为避免模型聚合复杂度过高使孪生模型同步效率降低，需求服务器  $d_m$  至多同时选择  $X_{m,\max}$  个资源服务器进行边缘协作。此外，受限于自身的数据并行接收与处理能力，资源服务器  $s_n$  在同一时隙至多为  $X_{n,\max}$  个需求服务器提供协作训练服务，即

$$\sum_{n=1}^N X_{m,n}(t) \leq X_{m,\max} \quad (1)$$

$$\sum_{m=1}^M X_{m,n}(t) \leq X_{n,\max} \quad (2)$$

2) 利用动态资源优化方法对数字孪生模型进行训练,此方法的特征在于联合需求服务器 $d_m$ 和资源服务器 $s_n$ 一起对模型进行优化。因此,在时隙 $t$ 内,需求服务器 $d_m$ 和资源服务器 $s_n$ 之间的数据传输速率为:

$$R_{m,n}(t) = B_{m,n}(t) \log_2 \left[ 1 + \frac{P_m G_{m,n}(t)}{N_0 + \delta_{m,n}(t)} \right] \quad (3)$$

式中: $B_{m,n}(t)$ 、 $P_m$ 、 $G_{m,n}(t)$ 分别为 $d_m$ 和 $s_n$ 之间的传输带宽、传输功率和信道增益; $N_0$ 为加性高斯白噪声; $\delta_{m,n}(t)$ 为通信网中设备工作产生的电磁干扰。则 $d_m$ 选择 $s_n$ 进行协作训练的样本数据最大传输量为:

$$U_{m,n}^{\text{trans}}(t) = \tau_2 R_{m,n}(t) \quad (4)$$

式中 $\tau_2$ 为预留需求服务器进行样本数据传输的时长。

在间隙 $t$ 内, $d_m$ 选择 $s_n$ 进行协作训练的样本数据最大处理量为:

$$U_{m,n}^{\text{com}}(t) = \frac{f_{m,n}(t)}{\lambda_m} \tau_3 \quad (5)$$

式中: $f_{m,n}(t)$ 为时隙 $t$ 内 $s_n$ 能够为 $d_m$ 提供的计算资源; $\tau_3$ 为预留资源服务器进行样本数据协作训练的时长。

3) 为对模型更好地进行训练,引入局部模型训练损失函数:

$$L_m[\zeta_m(t), t] = \frac{1}{I_m(t)} \sum_{\alpha_i, \beta_i \in \mathcal{I}_m(t)} L[\zeta_m(t), \alpha_i, \beta_i] \quad (6)$$

式中: $L(\bullet)$ 为单个样本数据的损失函数; $\alpha_i$ 、 $\beta_i$ 分别为对应第 $i$ 个样本数据的输入和输出。损失函数直接反映电力通信网数字孪生模型的精确度,并指导模型参数更新,即

$$\zeta_m(t) = \zeta_m(t-1) - \lambda \nabla L_m[\zeta_m(t-1), t] \quad (7)$$

式中: $\lambda$ 为模型的更新步长; $\nabla L_m[\zeta_m(t-1), t]$ 为损失函数 $L_m[\zeta_m(t), t]$ 的梯度。

数字孪生技术作为一种数据驱动方法,其模型的训练效率依赖于每个时间间隔内能够完成的训练样本数量。训练数据量越大,数字孪生模型与实际物理环境的一致性就越高<sup>[6-7]</sup>。数字孪生模型与物理实体之间的同步率不仅在瞬间或短时间内显现,而且具有显著的长期特性。因此,本文引入模型长时同步率的概念,用整体优化时间内的平均样本数据处理量表征,即

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left[ U_m(t) + \sum_{n=1}^N X_{m,n}(t) U_{m,n}(t) \right] \geq \bar{U}_m \quad (8)$$

式中: $T$ 为整个时间周期内的时隙总数; $U_m(t)$ 为时隙 $t$ 内需求服务器 $d_m$ 的本地训练的样本数据量; $\bar{U}_m$ 为模型同步率的阈值。

## 2 通信通道多约束迂回路由自动判断优选重构技术研究

本文在现有通信设备运行数据的基础上,将数字孪生技术引入至电力通信实体网络中。利用数字孪生技术在虚实映射和可扩展性方面的优势,进行电网数字化的实践探索。研究的重点在于攻克电力通信网中元孪生体的封装建模难题,并通过自动重构迂回路由的关键技术,解决电力通信网在运维和管控中的紧急响应效率低下和业务恢复速度缓慢的问题。

电力关键业务的服务质量(Quality of Service, QoS)路由需求主要包括:低传输延迟、低丢包率、大传输容量、小延迟抖动、高资源利用率和高安全性等。以典型的电力通信网拓扑结构为例,该结构通过节点间的多重连接提供多个备用路径,在网络链路或节点发生故障时,信息可迅速转移至备用路径,确保业务的持续运行。传统的双环网通常采用深度优先搜索(Depth-First-Search, DFS)算法进行多约束迂回路由规划,但这种方法容易陷入局部最优解,因为它只考虑当前路径的深度,忽视了全局最优解的可能性,导致了非最优路径的选择<sup>[8]</sup>。因

此, 本文在分析典型电力通信网的通信设备、链路运行参数及双环网拓扑连接对保护业务通道的影响后, 基于等成本多路径路由(Equal-Cost Multi-Path Routing, ECMP)模型, 进行电力通信网的多约束迂回路由重构。

ECMP路由技术能够在源节点与目的节点之间存在多条最短路径时, 同时利用这些路径, 并在它们之间合理分配网络负载。ECMP路由协议能够同时利用多条链路, 不仅增加了实际的有效传输带宽, 还能在发生故障时快速切换路由。但仅在网络中的节点配置ECMP功能并不能保证网络负载的最优分担。因此, 本文在传统ECMP模型的基础上, 结合电力通信网的小世界特性和业务流量特点, 提出了面向电力通信业务的可变等价多路径(Variable Equal Cost Multi-Path Routing, VECMP)模型。这一模型旨在更有效地分担网络负载, 提高电力通信网的路由性能。

模型描述如下:

问题描述: 针对某一网络拓扑 $G(N, E)$ , 其中 $E$ 为物理链路集, 链路为有向链路;  $N$ 为网络节点集合, 业务矩阵 $D$ 和带宽矩阵 $C$ 已给定, 通过算法确定某一最佳的链路权重配置方案, 使网络中链路的最大利用率最小化。

$$\text{优化目标函数: } \min z = \max_{(s,t) \in E} \left( \frac{h_{st}}{c_e} \right)$$

约束条件:

$$\begin{cases} \sum_{\{e|j(e)=t\}} x_{et} = \sum_{s \neq t} h_{st} \\ \sum_{\{e|i(e)=v\}} x_{et} - \sum_{\{e|j(e)=v\}} x_{et} = h_{vt}, v \neq t \\ \sum_t x_{et}/c_{et} \leq z \\ 0 \leq y_{i(e)t} - x_{et} \leq (1 - u_{et}) \sum_v h_{vt} \\ x_{et} \leq u_{et} \sum_v h_{vt} \\ r_{j(e)t} + w_e - r_{i(e)t} \leq (1 - u_{et})M \\ 1 - u_{et} \leq r_{j(e)t} + w_e - r_{i(e)t} \\ \sum_{\{e|i(e)=k\}} u_{et} S_k \leq 1 \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $z$ 为所有链路利用率的最大值;  $h_{st}$ 为源、目的节点对 $(s,t)$ 间的业务量;  $c_e$ 为链路 $e$ 的容量;  $h_{vt}$ 为网络中的某一节点对 $(v,t)$ 间的业务量,  $v \in N, t \in N$ ;  $e$ 为网络拓扑 $G(N,E)$ 中的单向链路,  $e \in E$ ;  $i(e)$ 为链路 $e$ 的起点;  $j(e)$ 为链路 $e$ 的终点;  $M$ 为一个上界常参数, 用于保证约束条件的合理性和网络优化过程中变量调整的稳定性;  $u_{et}$ 为二进制变量,  $u_{et}=1$ , 表示链路 $e$ 被用于目的节点为 $t$ 的业务; 反之, 为0;  $x_{et}$ 为目的节点为 $t$ 的一切业务在链路 $e$ 上的流量总和; 若源、目的节点之间有多条最短路径时,  $y_{st}$ 为所有等价最短路径出口链路上的平均负载;  $r_{st}$ 为源、目的节点对 $(s,t)$ 间的距离;  $w_e$ 为链路 $e$ 的权重;  $S_k$ 为链路状态控制因子。

通过 $S_k$ 可以灵活地调整网络的ECMP配置策略, 从而对网络的流量分担进行全局优化, 最终实现最大链路利用率最小化的优化目标<sup>[9]</sup>。

实施过程中, 具体配置策略分为静态配置策略和动态选择策略。静态配置方法基于一个假设, 即所有节点最初都未启用ECMP功能, 在此假设下计算每个节点的配置优先级 $\delta_n$ , 给定网络中配置ECMP的节点比例为 $k(0 < k \leq 1)$ , 并根据这个优先级进行一次性排序, 选择 $kN$ 个节点启用ECMP功能。这种方法的优点在于只需进行一次优先级计算, 减少了重复计算带来的开销, 使计算复杂度降低。但这种方法的缺点在于它仅基于网络的初始状态进行节点选择, 没有考虑到随着部分节点启用ECMP功能后网络状态的变化。相比之下, 动态选择策略在每次选择时只启用优先级最高的单个节点的ECMP功能, 随后更新网络状态, 并重新评估所有未启用ECMP功能节点的优先级, 以此循环, 直至选出 $kN$ 个节点。这种策略是一种启发式方法, 能够考虑网络的实时变化并根据当前网络负载动态选择节点, 实现最佳的负载均衡效果。

在VECMP模型框架内, 一旦确定了网络链路的权重配置、业务流量矩阵以及节点的配置比例, 便能够计算出相应的适应度函数值, 具体求解过程见图2。在动态选择策略中, 适应度函数的求解涉及几个关键步骤:

#### 1) 解码

IGA-VECMP算法将一套完整的权值设置方案作为1个染色体, 并采用二进制编码。在求解适应度函数时, 首先需将给定的染色体由二进制编码转换为各条链路的权值。

#### 2) 初始化

定义变量 $K$ 为网络中配置ECMP节点的个数, 则有 $0 \leq K \leq kN$ , 计算过程中将 $K$ 初始化为0。同时设定初始状态

为各个节点均未开通 ECMP 功能, 即节点状态向量  $S_i$  为全 1 序列。

### 3) 计算网络等价最短多路径集

按照可变等价多路径求解算法, 计算网络中任意 2 点间存在的多条等价最短路径。

### 4) 计算链路利用率和节点配置优先级

依据等价最短多路径集合, 将业务流量矩阵纳入计算, 可确定每条链路所承载的业务量, 由此可计算出每条链路的使用率。进一步地, 根据节点配置优先级的定义, 将链路的使用率与节点的度(即连接到该节点的边数)相乘, 从而得到每个节点的配置优先级。

### 5) 按照动态选择策略选取配置 ECMP 的节点

配置 ECMP 节点的选择按照提出的动态选择策略进行。首先计算初始状态(即所有节点均未开通 ECMP 功能)下各个节点的配置优先级, 选择优先级最高的节点作为第一个节点, 将节点状态向量中对应的位置设置为 0。对网络状态进行更新, 计算新状态下网络中非 ECMP 节点的配置优先级。选择优先级最高的非 ECMP 节点作为下一个开通 ECMP 功能节点。重复  $K$  次后即可得到所有需要开通 ECMP 功能的节点。

### 6) 输出适应度函数值

当按照节点配置比例将网络中节点开通 ECMP 功能后, 即已完成对网络的优化工作, 此时网络中的最大链路利用率即为对应该染色体的适应度函数值。

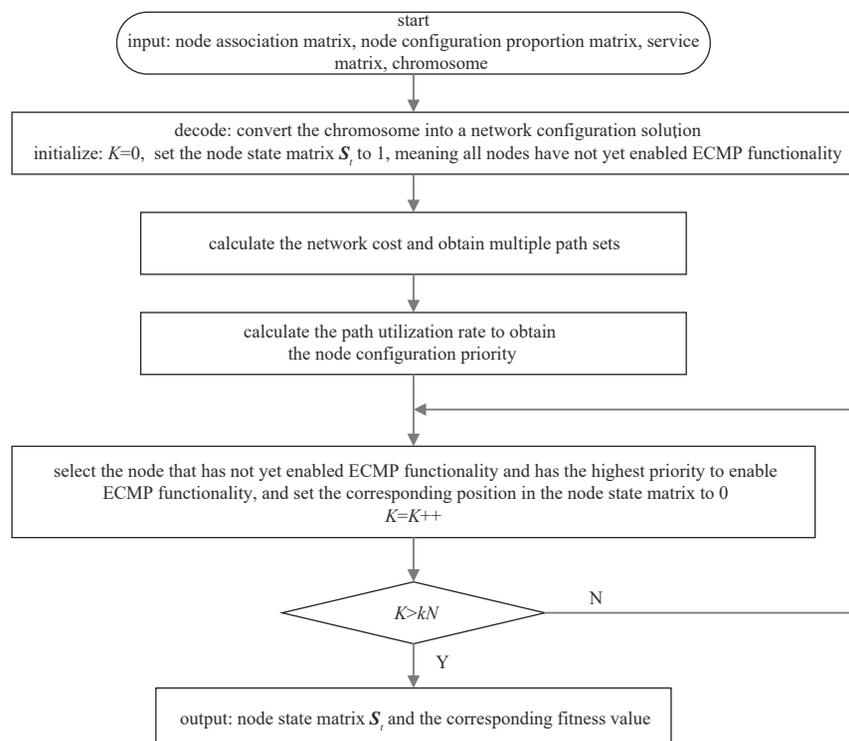


Fig.2 The solution process of fitness function under dynamic selection strategy

图2 动态选择策略下适应度函数求解流程

## 3 网络仿真及对比分析

在传统的 ECMP 模型中, 多条路径被用于同时传输数据, 不仅提升了实际的有效传输带宽, 还能在出现故障时快速切换路由, 减少网络中断, 从而提高网络的可用性。但在实际的网络环境, 尤其是电力通信网中, 通常默认关闭 ECMP 功能, 因为全面启用会增加网络的控制信息开销。因此, 本文在 ECMP 模型的基础上引入了链路状态控制因子  $S_k$ , 通过  $S_k$  控制节点是否启用 ECMP 功能。

在业务部署时, 路径计算支持多种约束条件的组合。IGA-VECMP 求解算法利用多路径作为基因, 对电力通信网的 VECMP 模型进行求解。以某地区电力通信核心网络拓扑  $G^*$  为例, 如图 3 所示, 通过比较优化前后网络中最大链路利用率和整体带宽利用率的变化, 分析 VECMP 算法的有效性。

实验参数设定如下: a) 链路权值: 链路权值为正整数, 取值范围 1~8, 每条链路的容量  $C=2$  Gbps; 按照上述二进制编码方式, 每个染色体对应的编码由 3 位二进制数组成, 即从 000~111, 其中编码“000”对应的链路权值

为 1，编码“111”对应的链路权值为 8；b) 业务矩阵：实验在 2 种业务模式下进行，分别为全业务矩阵和实际业务矩阵。全业务矩阵假设网络中任意两点间存在等量的业务流量，每条业务的数据量设定为 12 Mbps，整个网络的业务总量为 14.28 Gbps；实际业务矩阵则基于网络实际运行的业务数据，其业务总量与全业务矩阵相同；c) IGA-VECMP 参数：根据网络  $G^*$  的拓扑规模，通过反复的实验验证，设种群数目为 100，终止进化代数为 300，交叉率为 0.86，变异率为 0.046。

1) 节点配置比例影响分析

在全业务矩阵和实际业务矩阵模式下，对不同节点配置比例下网络中最大链路利用率的变化趋势进行分析，结果如图 4 所示。

由图 4 可知，在全业务矩阵模式中，初始时，少数节点启用 ECMP 功能，最大链路利用率小幅下降。这是因为初期启用的节点数量有限，仅对局部链路负载产生了有限优化效果。随着更多节点启用，负载分布逐渐均衡，利用率先升后降。当 69% 的节点(24 个)启用时，利用率最低，为 17.24%，比初始状态低 4.59 个百分点。进一步增加启用比例至全节点时，由于非核心路径的资源利用效率较低，利用率未达最低。在实际业务矩阵模式下，由于业务集中于核心节点和链路，初始阶段的最大链路利用率显著高于全业务模式，但随着节点配置比例增加，优化效果更为明显。当 86% 的节点(30 个)启用时，利用率最低，为 21.68%，比初始状态降低 6.15 个百分点。进一步增加节点启用比例，对利用率的优化效果趋于平缓。这表明，合理的节点配置比例能够显著降低核心链路负载，而过多或不足的启用比例都会影响资源分配效率。在全业务模式下的最优配置比例为 69%，实际业务模式下最优配置比例提高至 86%，反映了实际业务中高流量集中对优化算法适应性的需求更高。

2) 不同优化策略对比分析

在全业务矩阵和实际业务矩阵模式下，随着网络承载业务量的增加，优化前(全部节点均未开通 ECMP 功能)、静态策略优化后、动态策略优化后网络中最大链路利用率的变化趋势仿真结果如图 5 所示。

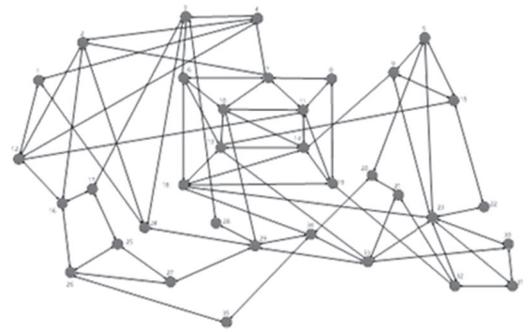


Fig.3 Core network topology  $G^*$  of electric power communication in a certain area  
图 3 典型电力通信网结构拓扑  $G^*$

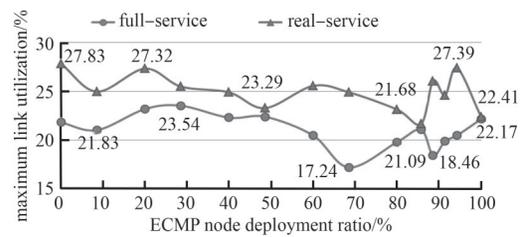


Fig.4 Trend of maximum link utilization under different node allocation ratios  
图 4 不同节点配置比例下最大链路利用率变化趋势

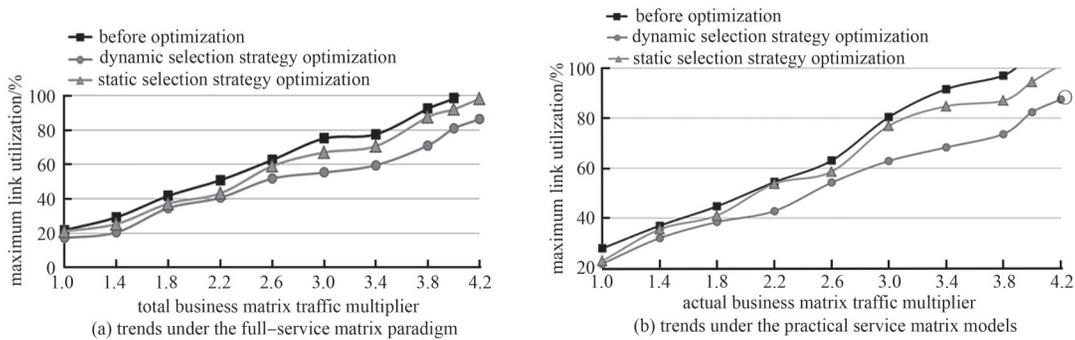


Fig.5 The trends of maximum link utilization under different optimization strategies  
图 5 不同优化策略下最大链路利用率变化趋势

由图 5 可知，全业务矩阵模式标准业务下，动态策略的最大链路利用率为 17.24%，比优化前低 4.59 个百分点，比静态策略低 3.90 个百分点；3.4 倍业务下，动态策略的利用率为 59.52%，比优化前低 17.92 个百分点，比静态策略低 11.09 个百分点，动态策略随业务量增长优化效果更明显。可变等价多路径路由算法优化后，网络承载能力提升，优化前可承载 4 倍业务量(57.12 G)，资源效率为 37.59%；优化后可承载 4.9 倍业务量(69.97 G)，资源利用率为 46.04%，提高了 8.45 个百分点。实际业务模式下，动态策略优化后，最大链路利用率为 21.68%，比优化前低 6.15 个百分点，比静态策略低 1.12 个百分点；3.4 倍业务下，动态策略优化后利用率为 68.26%，比优化

前低 23.34 个百分点。业务量增长, 动态策略优化效果更显著。在优化之前, 网络能够支持的最大业务量是标准业务量的 3.8 倍, 网络资源的利用效率为 35.70%。优化后, 网络能够支持的最大业务量增加到标准业务量的 4.8 倍, 网络资源的利用率提升至 45.10%, 与优化前相比, 提高了 9.40 个百分点。这一结果表明, 本文所提出的优化算法在实际业务模式下具有显著的优化效果。

### 3) 链路利用率的均衡性分析

在全业务和实际业务标准矩阵模式下, 对比优化前(全部节点均未开通 ECMP 功能)、优化后(动态选择策略)网络中各条链路利用率的变化趋势, 分析网络负载分布的均衡性, 仿真结果如图 6 所示。

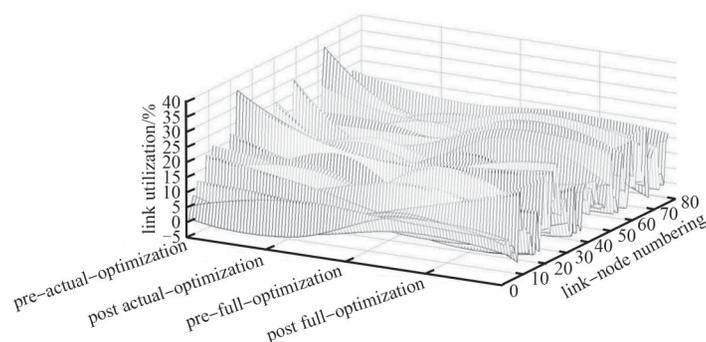


Fig.6 Change trends of utilization rate of each link under different service modes before and after optimization

图 6 优化前后不同业务模式下每条链路利用率变化趋势

图 6 为 4 种不同模式下链路利用率的分布情况, 从图中可观察到, 在未优化的实际业务模式中, 网络的负载均衡性表现不佳, 链路间的利用率差异较大, 其方差达到了 0.735%。经过优化后, 实际业务模式下的网络负载均衡性显著提升, 方差降至 0.40%, 减少了 0.330 个百分点。相比之下, 在全业务模式下, 优化效果不如实际业务模式显著, 优化后的方差为 0.547%, 相较于优化前仅降低了 0.152 个百分点。

## 4 结论和展望

随着电力通信网规模和复杂性的不断提升, 路由重构已成为确保网络稳定性和高效性的关键问题。特别是在电力通信业务中, 网络负载分布不均衡以及局部链路的过载现象显著增加了路由重构的复杂性, 进而影响了网络的整体性能<sup>[10]</sup>。本文通过仿真实验提出了一种优化路由重构的策略, 旨在提升网络的负载均衡和资源利用效率。实验结果表明, 节点配置比例的确定需根据具体应用场景动态调整, 特别是在电力通信业务负载不均衡的情况下, 部分链路承载过多业务会形成网络瓶颈。通过动态选择策略在关键节点启用 ECMP 功能, 能够有效平衡网络负载, 显著提升路由重构的效率和性能, 为电力通信网在复杂业务场景下的高效运行提供可靠的技术支持。

未来研究中, 可进一步探索以下几个方向: a) 基于数字孪生技术的多维仿真能力, 构建精确度更高的仿真动态模型, 支持对多业务场景下路由优化策略的实时评估与调整; b) 针对电力通信网与其他关键基础设施的耦合关系, 研究跨领域的协同优化策略, 提升整体系统的抗故障能力; c) 开发更加智能化的网络管理与控制平台, 通过结合机器学习和自动化技术实现故障预测和路由重构的自主决策; d) 扩展优化算法的潜在应用领域, 如在智慧城市或能源互联网中的复杂通信场景下, 验证算法的适用性与通用性。

### 参考文献:

- [1] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京:中国电力出版社, 2015. (LIU Zhenya. Global energy internet[M]. Beijing:China Electric Power Press, 2015.)
- [2] 陈国炎,张泽荣,洪雪梅,等. 基于 IEC 61968 的配电终端数字孪生体建模方法[J]. 电网技术, 2024,48(9):3863-3871. (CHEN Guoyan,ZHANG Zerong,HONG Xuemei,et al. Modeling method for digital twin of distribution automation terminal based on IEC 61968[J]. Power System Technology, 2024,48(9):3863-3871.) DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2023.2148.
- [3] 杨挺,许哲铭,赵英杰,等. 数字化新型电力系统攻击与防御方法研究综述[J]. 电力系统自动化, 2024,48(6):112-126. (YANG Ting,XU Zheming,ZHAO Yingjie,et al. Review on research of attack and defense methods for digitalized new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024,48(6):112-126.) DOI:10.7500/AEPS20230716002.
- [4] 李成云,杨东升,周博文,等. 基于数字孪生技术的新型电力系统数字化[J]. 综合智慧能源, 2024,46(2):1-11. (LI Chengyun,

- YANG Dongsheng, ZHOU Bowen, et al. Digitization of new-type electric power systems based on digital twin technology[J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2024,46(2):1-11.) DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2024.02.001.
- [5] 沈沉,曹仟妮,贾孟硕,等. 电力系统数字孪生的概念、特点及应用展望[J]. *中国电机工程学报*, 2022,42(2):487-499. (SHEN Chen, CAO Qianni, JIA Mengshuo, et al. Concepts, characteristics, and applications of digital twins in power systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022,42(2):487-499.) DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.211594.
- [6] 刘斯琦,林长星,刘娟,等. 太赫兹近场通信信道特性研究综述[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2024,22(6):647-657. (LIU Siqi, LIN Changxing, LIU Juan, et al. A review on the characteristics of terahertz near field communication channels[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2024,22(6):647-657.) DOI:10.11805/TKYDA2023387.
- [7] 向敏,饶华阳,张进进,等. 基于图卷积神经网络的软件定义电力通信网络路由控制策略[J]. *电子与信息学报*, 2021,43(2):388-395. (XIANG Min, RAO Huayang, ZHANG Jinjin, et al. Software-defined power communication network routing control strategy based on graph convolution network[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2021,43(2):388-395.) DOI:10.11999/JEIT190971.
- [8] 陈实,郭正伟,周步祥,等. 考虑5G基站储能可调度容量的有源配电网协同优化调度方法[J]. *电网技术*, 2023,47(12):5225-5237. (CHEN Shi, GUO Zhengwei, ZHOU Buxiang, et al. Coordinated optimization scheduling for active distribution networks considering schedulable capacity of energy storage for 5G base stations[J]. *Power System Technology*, 2023,47(12):5225-5237.) DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1753.
- [9] 杨挺,耿毅男,郭经红,等. 人工智能在新型电力系统智能传感、通信与数据处理领域应用[J]. *高电压技术*, 2024,50(1):19-29. (YANG Ting, GENG Yinan, GUO Jinghong, et al. Applications of artificial intelligence in sensing, communication, and data processing in the new power system[J]. *High Voltage Engineering*, 2024,50(1):19-29.) DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.20232144.
- [10] 罗云,高艳宏,王志强. 基于大数据的电力通信网络风险辨识与评估方法研究[J]. *电力大数据*, 2019,22(11):64-69. (LUO Yun, GAO Yanhong, WANG Zhiqiang. Research on risk identification and assessment method of electric power communication network based on big data[J]. *Power Systems and Big Data*, 2019,22(11):64-69.) DOI:10.19317/j.cnki.1008-083x.2019.11.010.

#### 作者简介:

王 林(1991-), 男, 学士, 工程师, 主要研究方向为电力信息通信系统 .email:826878377@qq.com.

孟兆娜(1989-), 女, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为电力通信系统.

王 伟(1983-), 男, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为电力通信系统.

李 尚(1992-), 男, 学士, 工程师, 主要研究方向为电力信息通信系统.

尹喜阳(1978-), 男, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为电力通信系统运行规划.