

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210286

基于最小路径选择度的电力通信网络路由优化策略研究

张磊¹, 纪春华¹, 王旭蕊¹, 陈宗傲², 蔡振江², 鲁小田²

(1. 国网河北省电力有限公司信息通信分公司, 河北 石家庄 050000;

2. 广州广哈通信股份有限公司, 广东 广州 510663)

摘要: 针对电力通信业务对服务质量和可靠性的要求越来越高, 在软件定义网络的基础上提出了一种基于最小路径选择度的电力通信网络路由优化策略。将基于图形卷积网络的链路带宽占用率预测模型的预测结果与三角模算子相结合得到路径选择度, 作为电力业务传输路径选择的依据, 实现了电力通信网链路资源的动态分配。通过仿真与传统的路由优化策略进行丢包率、传输时延和链路带宽占用率等对比分析, 验证该策略的优越性。仿真结果表明, 该策略可以满足电力传输的要求, 链路负载分配更加均匀, 在丢包率、传输时延和链路带宽占用率方面均优于传统的路由优化策略。

关键词: 电力通信网; 路由优化策略; 软件定义网络; 图形卷积网络; 最小路径选择度

A routing optimization strategy for an electric power communication network based on the minimum path selectivity degree

ZHANG Lei¹, JI Chunhua¹, WANG Xurui¹, CHEN Zong'ao², CAI Zhenjiang², LU Xiaotian²

(1. Information & Telecommunication Branch, State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China;

2. GHT Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: The requirements for service quality and reliability of the electric power communication business are increasingly high. Based on software-defined network, a power communication network routing optimization strategy using the minimum path selection degree is proposed. The path selection degree is obtained by combining the prediction results of the link bandwidth occupancy rate prediction model based on the graph convolutional network with the triangular modulus operator. This is then used as the basis for the selection of the power service transmission path, and the dynamic allocation of the link resources of the power communication network is realized. Through simulation and traditional routing optimization strategy, the packet loss rate, transmission delay and link bandwidth occupancy rate are compared and analyzed to verify the superiority of the proposed strategy. Simulation results show that this strategy not only can meet the requirements of power transmission, but also link load distribution is more even, and it is better than traditional routing optimization strategies in terms of packet loss rate, transmission delay and link utilization.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Hebei Province (No. F2015502047).

Key words: electric power communication network; routing optimization strategy; software-defined network; graph convolutional network; minimum path selection degree

0 引言

近年来, 电力通信业务的种类越来越多样化, 业务量呈现爆炸性的增长趋势。电力通信网络作为电力系统的稳定运行和通信业务发展的有力保障, 仅靠静态路由算法很难保证电力通信业务的传输可靠、安全^[1]。为了优化网络资源控制的灵活性, 软

件定义网络(Software Defined Network, SDN)具有多种优势, 成为电力通信网的研究热点^[2]。因此, 研究基于 SDN 的电信网络路由优化策略具有重要的现实意义。

目前, 国内外学者对电力通信网络的路由优化策略进行了大量研究, 并取得了一些研究成果。文献[3]提出了一种将风险感知用于路由优化的方法, 针对电信网络的业务特点, 建立多目标的优化模型, 使用 NSGAII 算法进行求解, 并进行了仿真分析。文献[4]提出了一种基于 SDN 的调度方法, 该方法

基金项目: 河北省自然科学基金项目资助(F2015502047)

使用最大和最小公平分配算法进行带宽分配, 可以显著提高吞吐量和服务质量。文献[5]提出一种结合量子进化算法和最小生成树算法特点的多播路由方法用于电力通信网的路由优化, 通过对旋转角度进行动态调整更新单个信息素。文献[6]提出了一种通过改进遗传算法优化的可变等效多径路由优化方法, 通过优化三个基因算子, 提高了算法的效率, 并通过仿真进行了验证。但是, 上述路由优化方法在节点数较大时, 网络路由开销较大, 需要进一步提高适应性。

基于此, 提出了一种具有最小路径选择度的路由优化策略, 该策略可以对电力通信网链路资源进行动态分配。将基于图卷积网络的链路带宽占用率预测模型的预测结果与三角模算子相结合, 并通过仿真进行分析。

1 SDN 网络架构

基于 SDN 的智能电力通信网络由控制层和数据传输层组成^[7]。SDN 控制器具有全局网络视图, 可根据业务传输要求实时分配相应的资源, 以提高网络资源的利用率。使用多个控制器相互协调。通过发送流表向数据传输层提供传输策略。架构如图 1 所示。

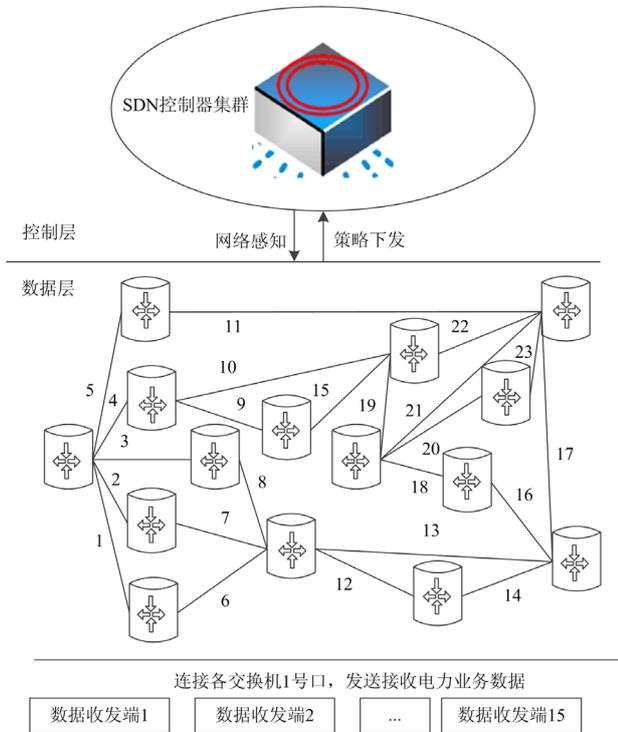


图 1 SDN 电力通信网架构

Fig. 1 SDN power network architecture

在图 1 中, SDN 控制器制定业务路由策略。交换机主要进行状态采集和数据转发, 交换机仅对连接端口的电力业务进行发送和接收, 各数据收发端作为电力业务数据收发终端。

2 路由策略

电力通信网的流量是动态变化的, 通过对网络流量的有效预测, 可以动态分配链路带宽资源。在 SDN 电力通信网的基础上, 文中提出了一种最小路径选择度的路由优化策略, 将基于图形卷积网络 (Graph Convolutional Network, GCN) 的链路带宽占用预测模型的预测结果与三角模算子相结合^[8]。

2.1 目标函数

在路由控制策略中, 采用三角模算子融合带宽占用率、带宽占用率等级和传输时延建立目标函数^[9]。 t 时刻路径 R_n 的带宽占用率 CB_n 如式(1)所示。

$$CB_n = \max[\mu_j(t)] \quad (1)$$

式中, $\mu_j(t)$ 为 t 时刻链路 l_j 的带宽占用, l_j 为路径 R_n 经过的链路。

$t+T$ 时刻路径 R_n 带宽占用率等级 PS_n 如式(2)所示^[10]。

$$PS_n = \max[s_j(t+T)] \quad (2)$$

式中, $s_j(t+T)$ 为 $t+T$ 时刻链路 l_j 的带宽占用率。

业务经过路径 R_n 的传输时延 T_n , 如式(3)所示^[11]。

$$T_n = \sum_{j=1}^{m-1} d_j / v_{data} + mT_{switch} + T_{jitter} \quad (3)$$

式中: d_j 为链路 l_j 长度; v_{data} 为信息传播速度; T_{switch} 为节点切换时延; m 为路径 R_n 中的交换机总数; T_{jitter} 为随机抖动时延。

将多目标向单目标进行转化, 三角模算子如式(4)所示^[12]。

$$Y(x_1, x_2) = \frac{x_1 \cdot x_2}{1 - x_1 - x_2 + 2(x_1 + x_2)} \quad (4)$$

式中: $Y(x_1, x_2)$ 为三角模算子; x_1 、 x_2 为融合中涉及的两个参数, 介于 0—1 之间。

为了统一度量标准, 将三个参数进行标准化, 转化为 [0.5, 1] 之间, 结合三角模算子, 路径选择度 Q 如式(5)所示^[13]。

$$Q = \min \{Y[CB_n^*, Y(PS_n^*, T_n^*)]\} \quad (5)$$

使用式(5)计算源节点与目标节点之间的多个传输路径的选择度 Q 。 Q 最小值有多个, 选择路径中交换机最少的路径, 当交换机数也相同时, 则优先使用较低频率的路径。

2.2 预测模型

为了进行卷积(链路节点信息和特征信息)操作,将链路带宽占用预测问题转化为基于 GCN 的实时链路节点分类问题^[14]。模型输入如下。

(1) 特征向量矩阵 $\mathbf{E} = \mathbf{R}^{J \times C}$ 。链接数为 J (即行数)。其中的每行表示电网中链接 l_j 的特征向量, C 为向量的维数。链路 l_j 特征向量由连接的交换机参数确定。链路 l_j 连接交换机 v_a 的 q 端口和交换机 v_b 的 g 端口。特征向量矩阵 \mathbf{E} 如式(6)所示^[15]。

$$\begin{cases} \mathbf{e}(j) = [P_{a,q}(t), P_{b,q}(t), F_a(t), F_b(t)] \\ \mathbf{E} = [\mathbf{e}(1), \mathbf{e}(2), \dots, \mathbf{e}(j)]^T \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P_{a,q}(t)$ 和 $P_{b,q}(t)$ 分别为 t 时刻交换机 v_a 的 q 端口和 v_b 的 q 端口状态参数; $F_a(t)$ 和 $F_b(t)$ 分别为 t 时刻交换机 v_a 和 v_b 的流表参数; a 、 b 分别为交换机的编号; q 为交换机端口号。

(2) 邻接矩阵 $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{J \times J}$, \mathbf{A} 为电力通信网络中链路 l_j 之间的连接关系。为了避免在图形卷积过程中特征向量的尺度完全改变,对 \mathbf{A} 进行了标准化,如式(7)所示^[16]。

$$\mathbf{A}^{\sim} = \mathbf{D}^{-1/2} (\mathbf{D} - \mathbf{A}) \mathbf{D}^{-1/2} \quad (7)$$

式中: \mathbf{D} 为电力通信网中链路的度矩阵,它是对角矩阵,对角元素依次是链路 l_1 到链路 l_j 的度。

GCN 链路带宽占用预测模型的输入是电信网络的链路邻接矩阵 \mathbf{A} 和网络状态参数特征矩阵 \mathbf{E} ^[17]。通过 ReLU 激活函数对第一层添加 Dropout 中间层高,如式(8)所示^[18]。

$$H_1 \mathbf{A} = \text{ReLU}[\mathbf{A}^{\sim} (\xi \mathbf{E}) \mathbf{W}_0] \quad (8)$$

式中: H_1 为第一个神经网络层; ReLU 为 H_1 的激活函数, $\text{ReLU}(x) = \max(0, x)$; ξ 为 Bernoulli(x) 伯努利分布; $\mathbf{W}_0 \in \mathbf{R}^{C \times M}$ 为第一层网络的权重矩阵,可以通过训练来调整, M 是该层的特征向量维度。

在神经网络的第二层中,使用 softmax 激活函数,该层的神经网络如式(9)所示^[19]。

$$H_2 = \text{soft max}(\mathbf{A}^{\sim} H_1 \mathbf{W}_1) \quad (9)$$

式中: H_2 为第 2 层的神经网络层; softmax 是 H_2 激活函数; $\mathbf{W}_1 \in \mathbf{R}^{J \times M}$ 为第 2 层网络的权重矩阵, γ 为模型类别的数量。

在训练预测模型时, Max Pooling 池操作后使用 softmax 激活函数来获得随机矩阵 $\mathbf{Z} \in \mathbf{R}^{J \times \gamma}$ 。

最后,模型的图形输出级如式(10)和式(11)所示^[20]。

$$\mathbf{Z} = \text{soft max}(\mathbf{A}^{\sim} \text{ReLU}[\mathbf{A}^{\sim} (\xi \mathbf{E}) \mathbf{W}_0] \mathbf{W}_1) \quad (10)$$

$$\mathbf{Z} = [z_j(s_j(t+T)=1), z_j(s_j(t+T)=2), \dots, z_j(s_j(t+T)=5)] \quad (11)$$

式中, $z_j(s_j(t+T)=1)$ 为 $t+T$ 时刻链路带宽占用等级为 1 的概率。最终的预测结果是与最大概率 $\max[z_j(s_j(t+T)=1), z_j(s_j(t+T)=2), \dots, z_j(s_j(t+T)=5)]$ 相对应的 $s_j(t+T)$ 值。1、2、3、4、5 分别代表链路无拥塞、正常负荷、可能拥塞、一般拥塞、严重拥塞。

在对网络链路带宽占用率进行识别训练的过程中,采用交叉熵函数作为损耗函数,如式(12)所示^[21]。

$$\text{Loss}(y, y^{\sim}) = -y \ln(y^{\sim}) - (1-y) \ln(1-y^{\sim}) \quad (12)$$

式中: y 为样本标签,即链接 l_j 的历史带宽占用率等级; y^{\sim} 为预测值,即 $t+T$ 时刻链路带宽占用率等级 $s_j(t+T)$ 。

2.3 路由策略

为了满足通信网络的实时性和传输可靠性的要求,需要选择一条低传输时延和高链路带宽资源的路径进行传输^[22]。提出了一种最小路径选择度的路由优化策略,步骤如下:

步骤 1) SDN 集中控制器对交换设备参数进行实时采集。计算时,根据端口转发的流量对各链路的带宽占用率进行计算^[23]。

步骤 2) SDN 预测模块根据历史数据对链路带宽占用率进行预测。

步骤 3) 对节点间的路径集进行遍历寻找^[24]。

步骤 4) 根据当前和下一时刻的网络链路带宽占用率以及下一时刻传输时延。综合评估和计算不同传输路径的选择度^[25]。

步骤 5) 路径选择度最低的路径是实时传输路径,次小路径用作备用路径。最大限度提高各种电力业务的传输要求^[26]。

路由策略流程如图 2 所示。

3 仿真结果与分析

3.1 预测模型仿真分析

为了验证预测模型计算链路带宽占用率等级的有效性,在 Mininet 平台上进行仿真,在不同 SDN 网络负载下,可以细分电力通信网络链路的平均带宽占用率^[27]。单位时间内业务最小并发数 $CR_{\min} = 25$, 最大并发数 $CR_{\max} = 35$; 业务请求时间 $RT_{\min} = 10 \text{ s}$, $RT_{\max} = 20 \text{ s}$; 最小带宽为 $RB_{\min} = 0.0625 \text{ Mbit/s}$, 同时预测模型的适宜训练参数为 $h_{\text{node}} = 32$, 迭代次

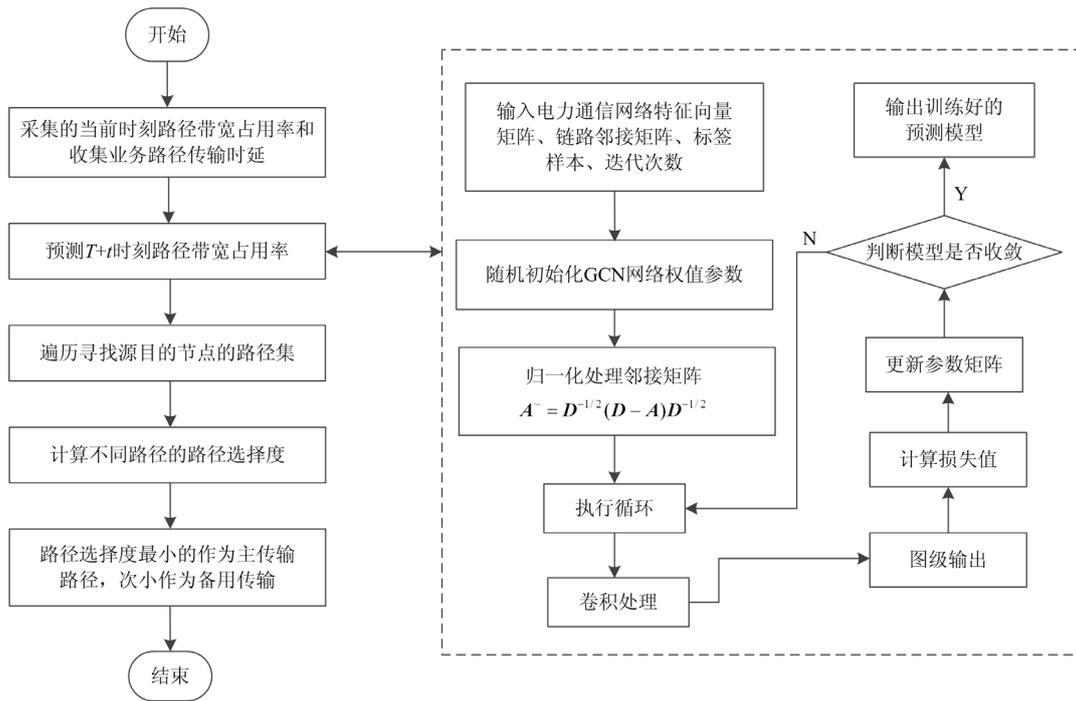


图 2 路由策略

Fig. 2 Routing strategy

数为 epoch = 150，学习率为 $\eta = 0.005$ ，参数 $W_0 = 0$ ， $W_1 = 1$ ，系数为 Dropout = 0.400 0。文中分析了平均链路带宽占用率等级的预测值和实际值的变化趋势，并比较了各种 SDN 网络负载条件下平均链路带宽占用率等级，如图 3 和图 4 所示。

从图 3 和图 4 可以看出，由于受整个网络业务的平均请求带宽和业务最大请求带宽的影响，网络的平均链路带宽占用率等级在 1~3 范围内变化。随着业务请求带宽最大值由 30 Mbit/s 提高到 40 Mbit/s，业务请求带宽平均值由 20 Mbit/s 提高到 30 Mbit/s，平均链路带宽占用率等级由最小值 1.30 提高到 2.05，从而提高了链路带宽占用率。

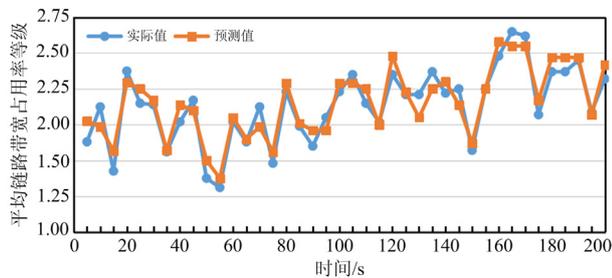


图 3 业务请求带宽最大值 30 Mbit/s、平均值 20 Mbit/s
Fig. 3 Service request bandwidth maximum 30 Mbit/s and average 20 Mbit/s

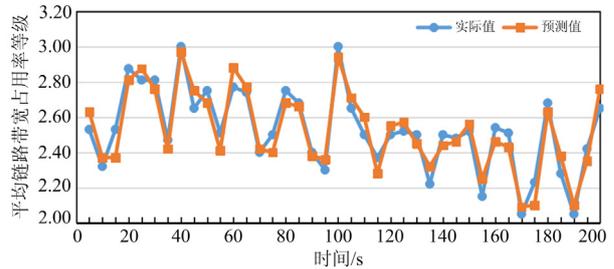


图 4 业务请求带宽最大值 40 Mbit/s、平均值 30 Mbit/s
Fig. 4 Service request bandwidth maximum 40 Mbit/s and average 30 Mbit/s

结果表明，预测值与实际值较为接近，预测效果较好，可作为传输路径预测管理和控制的依据。

3.2 路由策略仿真分析

在 Mininet 平台上构建如图 1 所示结构，Ryu 控制器用带宽和 iperf 测试工具^[28]。链路带宽最大值 100 Mbit/s。设置连接距离参数 $v_{data} = 2 \times 10^8$ m/s、 $T_{switch} = 0.1$ ms、 $T_{jitter} = 0.1$ ms。在模拟电力业务进行传输时，网络中电力业务的请求带宽值的变化遵循正态分布，而不同重要性的电力业务出现的概率遵循泊松分布。在仿真中，通过调整发送数据的最小并发数和最大并发数等网络参数来改变电力业务在网络中的分布状态。

为了客观地评估所提出的路由策略各方面的性能, 与文献[29]中提出的拥塞缓解路由策略(Hybrid Contention Alleviation Routing Strategy, HCARS)进行对比分析, 设置 $CR_{\min} = 25$ 、 $CR_{\max} = 35$ 、 $RB_{\max} = 40$ Mbit/s、 $RB_{\min} = 0.0625$ Mbit/s、 $RT_{\max} = 20$ s、 $RT_{\min} = 10$ s。通过更改网络电力业务的平均请求带宽来增加网络负载。分析了两种路由策略在不同网络负载下的丢包率, 结果如图5所示。

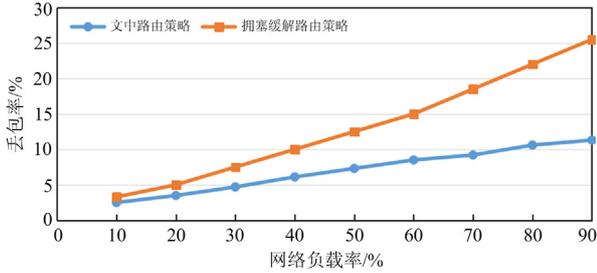


图5 两种路由策略丢包率对比

Fig. 5 Comparison of packet loss rate between two routing strategies

从图5可以看出, 随着网络负载的增加, 文中策略的丢包率与HCARS逐渐拉大。虽然HCARS是一种动态路由策略, 但其未考虑优先级和未来带宽占用值。文中的路由策略克服了HCARS的缺点, 并预测了未来连接带宽的使用情况。图5说明了路由策略的优越性。

网络中电力业务的平均传输时延 $T(K)^{\sim}$, 如式(13)所示。

$$T_{\text{delay}} = \sum_{K=1}^{13} \frac{T(K)^{\sim}}{T_{\max}(K)} / 13 \quad (13)$$

式中: 13 代表电力业务个数; $T_{\max}(K)$ 为可以承受的最大传输时延。

根据等式(13), 计算网络中所有业务的平均传输时延, 并比较不同的网络负载。文中策略和HCARS平均传输时延对比如图6所示。

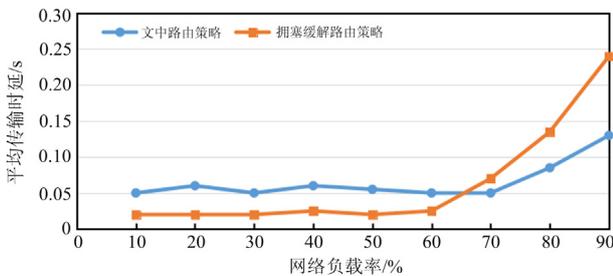


图6 两种路由策略平均时延对比

Fig. 6 Comparison of average delay between two routing strategies

从图6可以看出, 当负载率低于60%时, 两种路由策略的平均传输时延波动很小, HCARS的平均传输时延低于文中的策略。随着网络负荷的增加, 文中策略变化最小。这是由于HCARS考虑了链路的实时状态, 但是该策略受相邻节点占用的带宽影响, 无法适应网络负载的变化。文中策略考虑了网络中的负载均衡问题, 在初始时值相对较高。这是因为最短路线不一定是最佳选择, 导致时延略有增加, 由于网络的平均时延较为稳定, 因此优于HCARS。

为了比较不同路由策略中的链路平均带宽占有率, 在测试过程中逐渐增加平均请求带宽, 图7所示为文中路由策略和HCARS下链路的平均带宽占有率比较结果。

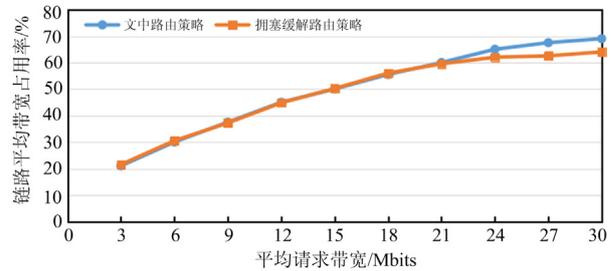


图7 两种路由策略带宽占用率对比

Fig. 7 Comparison of link average bandwidth utilization between two routing strategies

从图7中可以看出, 如果平均请求带宽很小, 小于21 Mbits, 两种策略的链路带宽占用率几乎重合。当带宽大于21 Mbits, 文中策略的平均带宽占用率高于HCARS。这是因为文中策略进行拥塞预测, 提前进行控制, 所以它优于HCARS。

4 结论

针对电力通信网络链路资源的动态分配问题, 提出了最小路径选择度的路由优化策略。将链接带宽占有率预测模型的预测结果与三角模算子相结合。仿真结果表明, 该策略在分组丢失率、传输时延和链路带宽占用率方面都优于传统的路由优化策略, 在一定程度上提高了网络链路的利用效率。但也存在一些问题和不足, 如预测模型需要大量的实际数据, 后续预测模型会不断完善, 并结合一些启发式算法来提高预测模型的预测效率和预测精度。

参考文献

- [1] 余翔, 陈国洪, 李霆, 等. 基于孤立森林算法的用电数据异常检测研究[J]. 信息技术, 2018(12): 88-98.
YU Xiang, CHEN Guohong, LI Ting, et al. Research on

- anomaly detection of power consumption data based on isolated forest algorithm[J]. *Information Technology*, 2018(12): 88-98.
- [2] 谢黎, 周华良, 于同伟, 等. 一种智能变电站新型双网冗余设备及实现[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(11): 151-156.
XIE Li, ZHOU Hualiang, YU Tongwei, et al. A new dual network redundant equipment and its implementation for intelligent substation[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(11): 151-156.
- [3] 王川丰, 施加轮, 姚文杰, 等. 基于风险感知的电力通信网跨层路由优化算法[J]. *电子设计工程*, 2020, 28(20): 142-148.
WANG Chuanfeng, SHI Shilun, YAO Wenjie, et al. Cross layer routing optimization algorithm for power communication network based on risk perception[J]. *Electronic Design Engineering*, 2020, 28(20): 142-148.
- [4] 杨阳, 汪玉成, 吕玉祥, 等. 基于软件定义的电力通信网络业务感知流量调度机制研究[J]. *自动化与仪器仪表*, 2017(8): 146-149.
YANG Yang, WANG Yucheng, LÜ Yuxiang, et al. Research on service-aware traffic dispatch mechanism of power communication network based on software definition[J]. *Automation and Instrumentation*, 2017(8): 146-149.
- [5] 李敏. 基于策略多播路由的电力通信网路由优化研究[J]. *研究与设计*, 2019, 35(4): 76-80, 89.
LI Min. Research on power communication network routing optimization based on policy multicast routing[J]. *Research and Design*, 2019, 35(4): 76-80, 89.
- [6] 李俊松, 王雷, 张靳予, 等. 基于改进 VECMP 的电力通信网路由优化算法研究[J]. *电测与仪表*, 2021, 58(7): 136-142.
LI Junsong, WANG Lei, ZHANG Jinyu, et al. Research on routing optimization algorithm of power communication network based on improved VECMP[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2021, 58(7): 136-142.
- [7] 刘俊毅, 黄红兵, 章毅, 等. 基于非一致性业务均衡的电力通信网路由分配方法[J]. *电力信息与通信技术*, 2017, 15(10): 103-108.
LIU Junyi, HUANG Hongbing, ZHANG Yi, et al. Power distribution network routing allocation method based on non-uniform service equalization[J]. *Electric Power Information and Communication Technology*, 2017, 15(10): 103-108.
- [8] 卫瑞东, 喻鹏, 高嵩, 等. 基于多蚁群算法的电力通信网路由配置机制[J]. *北京邮电大学学报*, 2017, 40(增刊1): 89-92.
WEI Ruidong, YU Peng, GAO Song, et al. Multi-ant colony algorithm based routing configuration mechanism for power communication networks[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2017, 40(S1): 89-92.
- [9] 孙方楠, 梁后健, 张课, 等. 基于改进遗传算法的电力通信网路由优化研究[J]. *自动化与仪器仪表*, 2018, 12(6): 25-28.
SUN Fangnan, LIANG Houjian, ZHANG Ke, et al. Research on route optimization of power communication network based on improved genetic algorithm[J]. *Automation & Instrumentation*, 2018, 12(6): 25-28.
- [10] NAHMAN J, SALAMON D. Mutual interference of neighboring grounding systems and approximate formulation[J]. *Electric Power Systems Research*, 2017, 41(12): 151-156.
- [11] MOSES V, HATHERLEY R, BISHOP Ö T. Bioinformatic characterization of type-specific sequence and structural features in auxiliary activity family 9 proteins[J]. *Biotechnology for Biofuels*, 2016, 9(1): 88-94.
- [12] HOU Kaiyuan, SHAO Guanghui, WANG Haiming, et al. Research on practical power system stability analysis algorithm based on modified SVM[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2018, 3(2): 119-125.
- [13] PATEL G K, DABHI V K, PRAJAPATI H B. Clustering using a combination of particle swarm optimization and K-means[J]. *Journal of Intelligent Systems*, 2017, 12(3): 457-469.
- [14] GAUTAM J V, PRAJAPATI H B, DABHI V K, et al. Empirical study of job scheduling algorithms in Hadoop MapReduce[J]. *Cybernetics and Information Technologies*, 2017, 21(1): 146-163.
- [15] CAETANO C E F, LIMA A B, PAULINO J O S, et al. A conductor arrangement that overcomes the effective length issue in transmission line grounding[J]. *Electric Power Systems Research*, 2018, 46(5): 159-162.
- [16] HU Jianjiang, FICHTNER M, BARICCO M. Preparation of Li-Mg-N-H hydrogen storage materials for an auxiliary power unit[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(27): 17144-17148.
- [17] JIA Zhiwei, WANG Lijun, ZHANG Jinchuan, et al. High efficiency, low power-consumption DFB quantum cascade lasers without lateral regrowth[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2017, 12(1): 88-95.

- [18] 张婕, 曾国辉, 赵晋斌, 等. 基于改进冒泡排序的模块化多电平换流器电容电压均衡策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 92-99.
ZHANG Jie, ZENG Guohui, ZHAO Jinbin, et al. Capacitor voltage equalization strategy for modular multilevel converter based on improved bubble sorting[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 92-99.
- [19] 戴志辉, 黄敏, 苏怀波. 基于 MMC 的环状直流配网在不同接地方式下的故障特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 1-10.
DAI Zhihui, HUANG Min, SU Huaibo. Fault characteristics analysis of circular DC distribution network under different grounding modes based on MMC[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 1-10.
- [20] 王利平, 庞晓艳, 朱雨, 等. 基于物联网和移动互联的二次设备运维技术研究与应用[J]. 中国电力, 2019, 52(3): 177-184.
WANG Liping, PANG Xiaoyan, ZHU Yu, et al. Research and application of secondary equipment operation and maintenance technology based on internet of things and mobile interconnection[J]. Electric Power, 2019, 52(3): 177-184.
- [21] 唐耀华, 郭为民, 崔杨. 水-火发电机组频率控制策略研究[J]. 中国电力, 2020, 53(6): 153-161.
TANG Yaohua, GUO Weimin, CUI Yang. Study on frequency control strategy of water thermal power unit[J]. Electric Power, 2020, 53(6): 153-161.
- [22] 顾志祥, 孙思宇, 孔飞, 等. 燃气冷热电分布式能源系统设计优化综述[J]. 华电技术, 2019, 41(3): 8-13, 42.
GU Zhixiang, SUN Siyu, KONG Fei, et al. Design optimization of gas cooling, heating and power distributed energy system[J]. Huadian Technology, 2019, 41(3): 8-13, 42.
- [23] 孙立明, 杨博. 蓄电池/超导混合储能系统非线性鲁棒分数阶控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 76-83.
SUN Liming, YANG Bo. Nonlinear robust fractional order control for battery / superconducting hybrid energy storage systems[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 76-83.
- [24] 方顺利, 姚伟, 姚皓, 等. 基于实时入炉煤质数据的在线掺烧优化系统在火电厂的应用[J]. 热力发电, 2021, 12(2): 138-143.
FANG Shunli, YAO Wei, YAO Hao, et al. Application of online blending optimization system based on real-time coal quality data in thermal power plants[J]. Thermal Power Generation, 2021, 12(2): 138-143.
- [25] 张彼德, 陈颖倩, 李孟洁, 等. 含热泵和相变储能的多能互补微能源网运行优化方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 106-114.
ZHANG Bide, CHEN Yingqian, LI Mengjie, et al. Study on operation optimization method of multi energy complementary micro energy network with heat pump and phase change energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 106-114.
- [26] 陈皓勇, 李志豪, 陈永波, 等. 基于 5G 的泛在电力物联网[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 1-8.
CHEN Haoyong, LI Zhihao, CHEN Yongbo, et al. 5G based ubiquitous power internet of things[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 1-8.
- [27] 沈翔宇, 陈思捷, 严正, 等. 区块链在能源领域的价值、应用场景与适用性分析[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(5): 18-29.
SHEN Xiangyu, CHEN Sijie, YAN Zheng, et al. Value, application scenario and applicability analysis of blockchain in energy field[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(5): 18-29.
- [28] 武昕, 于金莹, 彭林, 等. 基于用户边缘侧事件解析的工业电力负荷非侵入式感知辨识[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(4): 29-37.
WU Xin, YU Jinying, PENG Lin, et al. Non invasive perceptual identification of industrial power load based on user edge event analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(4): 29-37.
- [29] AL-KASHOASH H A A, AMER H M, MIHAYLOVA L, et al. Optimization-based hybrid congestion alleviation for 6LoWPAN networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2017, 4(6): 2070-2081.

收稿日期: 2021-03-18; 修回日期: 2021-05-26

作者简介:

张磊(1985—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为网络、安全、语音交换; E-mail: zhanglei198500@163.com

纪春华(1987—), 男, 工程师, 主要研究方向为无线公网、通信管理;

王旭蕊(1987—), 女, 工程师, 主要研究方向为通信传输、视频会议、语音交换。

(编辑 张爱琴)