

基于最小沟道的电网通信业务路由优化及应用



秦亚梅^{1*}, 汪 辉², 李振伟², 张 闻²

(1. 电子科技大学数学科学学院 成都 611731; 2. 国网安徽省电力有限公司信息通信分公司 合肥 230022)

【摘要】城域光缆存在共沟道现象, 早期网络运维人员使用最短路径算法对电网业务主备路由进行配置。而随着城市基础设施建设的推进, 部分沟道不可避免地会遭到破坏, 导致电网通信业务中断次数增多。针对该问题, 提出基于最小沟道的电网通信业务路由优化算法。首先, 对城域光路拓扑进行建模, 以业务主备路由共沟道最小化为目标输出函数; 然后, 采用融合排序的深度优先搜索算法 (DFS) 选出业务所有主路由; 再删除暂定的主路由对应的路径并再次使用融合排序的 DFS 算法求出所有备用路由; 随后, 迭代计算出主备路由共沟道最少的一组作为最终的业务主备路由。通过计算机仿真和安徽城域网的应用实例验证了该算法的有效性和实用性。

关键词 共沟道; 电网通信业务; 深度优先搜索算法; 城域光路拓扑; 主备路由
中图分类号 TN914 **文献标志码** A **doi**:10.12178/1001-0548.2022263

A Routing Optimization and Application for Power Grid Communication Service Based on Minimized Trenches

QIN Yamei^{1*}, WANG Hui², LI Zhenwei², and ZHANG Wen²

(1. School of Mathematical Sciences, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731;
2. Information & Telecommunication Branch State Grid Anhui Electric Power CO., Ltd. Hefei 230022)

Abstract There is a frequent phenomenon that optical cables pass through identical trenches in metro cable topologies. Early operations engineers used the shortest path algorithm to configure the work and protected routes of power services. With the advancement of urban infrastructure, some trenches will inevitably be damaged, leading to an increase in power grid communication service interruption numbers. This paper proposes a route optimization algorithm for power grid communication services based on minimized trenches. First, the urban optical path topology is modeled, and the output function is aimed at minimizing common trenches' work-protect route. Then, the deep first search (DFS) fusion sorting algorithm selects all the service's working routes. Next, the corresponding route of the work route is deleted, and all protected routes are found by using the fusion-sorted DFS algorithm again. Subsequently, the groups with the least common trench between the work and protected route are calculated and used as the final primary and secondary routes for the service. Finally, the effectiveness and practicability of the algorithm are verified by computer simulation and application examples from the Anhui metropolitan area network, respectively.

Key words common trenches; power grid communication service; the deep first search; the urban optical path topology; the work and protected route

电力通信网络主要由 SDH (synchronous digital hierarchy) 光传输系统和 OTN (optical transport network) 光传输系统组成, 其与电力系统的生产、调度、运行、管理、沟通、协调等有着密切的联系^[1]。因此电力通信系统对其使用的业务路由规划有严格的风险管控要求^[2]。目前安徽电网业务路由的调整及新增, 基本上都是基于业务路由由最短路径原则^[3]

进行决策, 缺乏有效的评估工具和仿真测试条件。上述处理原则给城域光网络业务的稳定性带来较大隐患 (业务主用路由和备用路由共沟道)。同时, 国家相关法律明文规定: 公共区域不得随意破土施工, 也导致城区光缆在敷设时存在共沟道 (井) 现象, 因此亟需研究适合城域光网络 SDH 传输系统的业务路由优化算法及仿真测试工具, 为电力网络

收稿日期: 2022-07-29; 修回日期: 2023-02-14

作者简介: 秦亚梅 (1991-), 女, 主要从事数学规划、凸优化、数值计算等方面的研究。

*通信作者: 秦亚梅, E-mail: qinyamei1991@sina.com

建设与业务运行方式优化提供理论参考和数据支撑。

目前电力通信业务通信方式主要是采用点对点的通信模式,为了使业务可靠稳定地传输,通常需要对业务路由(通道)使用相应的保护策略。保护策略主要分为通道保护和复用段保护。业务通道保护配置一般要求其主备路由满足共享风险链路组(shared risk link groups, SRLG)分离原则^[4-6]。SRLG 物理含义为共享相同传输设备、光缆、管道(沟道井)等物理资源的一组链路。本文主要研究城域光网络中业务的主备路由在无法严格满足 SRLR 分离原则时,如何最小化其共沟道数量问题。

近年来,电力通信网络的业务路由规划及优化问题引起了国内外学者广泛地关注。文献[7]提出基于强化学习的多条件约束的业务路由优化算法。虽然考虑了链路风险权值、节点风险权值、网络带宽状态,但该模型不能解决物理光路共沟道情况下的业务路由规划问题。文献[8]设计出了光网络规划及仿真软件,但该软件偏向光传输的物理特性仿真分析以及网络建设成本控制。文献[9]提出了一种基于混合整数线性规划的多播路由与保护联合优化算法,在满足共享风险链路组条件约束下,提高了业务通信信道资源利用率,但并不适用于解决本文提出的工程问题。文献[10]提出了一种高斯-塞德尔迭代(Gauss-Seidel method)算法来解决路由规划问题,但该算法主要适用于基于 TCP/IP 传输协议的路由规划,无法应用于电接口的业务路由规划。文献[11]对电力通信 SDH 传输系统的自愈技术进行了深入研究,设计出一款基于 B/S 架构的 SDH 传输系统的自愈模型仿真系统,但它主要关注于 SDH 传输系统功能的软件实现。文献[12]提出了多重不相交路径算法(multiple disjoint path algorithm, MDPAlg),该算法相比于迪杰斯特拉算法(Dijkstra)具有更高的运算速度,适合于大型网络拓扑应用,但是并没有对电力实际的业务场景进行验证,只是从理论上证明了其计算复杂度与可行性,并不适用于电接口的业务路由规划。文献[13]提出 SDH 网络拓扑单元概念,并从网络风险值和网络均衡值等方面来衡量 SDH 网络风险与可靠性,但未给出具体的业务路由优化实施算法。文献[14]提出了基于 K 条最短路径(K-shortest pathes, KSP)的风险均衡的业务路由分配算法,在实施的过程中会使用 Dijkstra 算法选择 K 条备选路由,但算法选择的主备路由可能存在共节点或共链路风险。文献[15]提出了基于共享链路组与风险均衡

的路由优化算法,其算法效果易受业务重要度指标的影响,对于城域光网络该指标项不易获取。

综上所述,开展适合城域光网络的电网业务路由优化技术研究是非常必要的。目前安徽电力通信网络的日常运维和业务配置较为简单,主要基于最短路径的原则进行业务路由安排,而此原则会导致业务的主备路由经过许多相同的光缆沟道井。同时城市的基础建设也很容易破坏电缆沟道井,如修建地铁、修建高架桥、修建道路、修建下水道、修建燃气沟道、自来水沟道改造、市政绿化施工等,给城域电力通信光缆及其承载的业务带来了诸多隐患。因此本文提出了基于最小光缆沟道的电网通信业务路由优化算法,算法使用融合排序的 DFS 方法,在业务路由无法严格满足 SRLG 分离原则时,最小化业务主备路由共沟道的数量。基于 SRLG 的深度优先搜索算法(DFS-SRLG)能避免主备路由共链路和共节点风险,降低业务中断次数,对城域光拓扑调整及业务故障定位也具有重要的参考价值。同时,业务路由优化方法有利于提高业务管理人员的办事效率,提升调控运维人员事故处理能力,降低人工安排业务出错概率。最后,本算法在安徽电网的行政电话业务进行了应用,相对于默认的 KSP 算法,显著降低了电话业务中断次数,提高了业务稳定性,对电网系统的稳定、安全、可靠运行具有重要的理论指导意义和实际应用价值。

1 业务路由优化算法

1.1 优化算法建模

1738 年,数学家欧拉解决了柯尼斯堡问题并创立图论。随着计算机的快速发展,图论已成为一门应用十分广泛的重要学科。人们也逐渐开始使用图论理论解决生活中遇到的实际生产问题。本文使用图论模型来解决基于最小沟道的电力通信业务主备路由优化问题。由于市政限制,城市内不能随意开挖沟道敷设光缆,导致部分光缆同沟道敷设。伴随着国家经济的快速发展,城市基础建设也在加快步伐。城市建设的过程中难免会破坏部分光缆,导致部分电力业务中断,因此如何尽可能降低业务中断次数、合理调整光网络拓扑、科学规划业务主备路由等问题急需解决。以安徽省内某市城域光网络传输拓扑为例进行说明,如图 1 所示。为了保留拓扑连接关系和计算方便,图中简化了实际光缆铺设走向以及沟道位置坐标情况。图中,任意两个顶点之间代表一条完整的光路信息,忽略了两段光缆纤

芯中间跳接情况, 通信站代表光传输设备及光路传输方向。

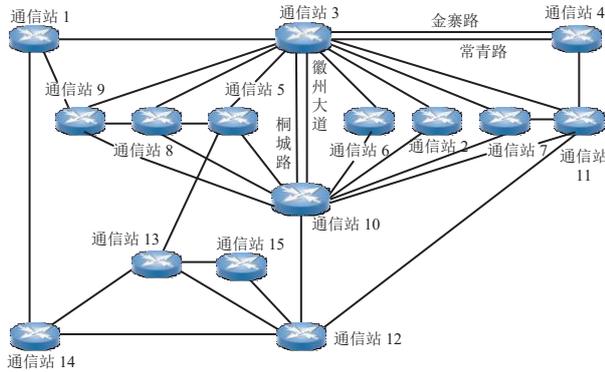


图 1 城域光路拓扑图

本文使用无向图对城域光路拓扑图进行建模。为了解决多重边问题即区分通信站 3 至通信站 10 两条光路信息、通信站 3 至通信站 4 两条光路信息, 任选其中一个光路中插入新的顶点信息, 即引入虚拟节点方法解决无向图的多重边问题, 最终简化后的拓扑模型如图 2 所示。

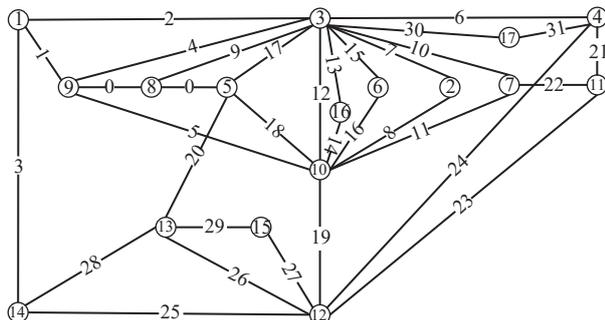


图 2 光路拓扑图无向图模型

假设光网络拓扑图使用一个赋权无向图连通图 $G=(V,E,W)$ 描述, 其中, V 表示 G 中所有的顶点集合: $V(G)=\{v_1,v_2,\dots,v_{17}\}$ 。 $|V|=17$, $|E|=32$ 分别表示图 G 的顶点和边数。无向图 $G=(V,E,W)$ 边的集合可以描述成 $E(G)=\{v_1v_3,v_1v_9,v_1v_{14},\dots,v_{13}v_{15}\}$, $v_iv_j=v_jv_i,i,j\in V$, W 是 G 所有边对应权值的集合, 其权值大小表示对应光路编号 $W=\{\omega_{1,3},\omega_{1,4},\omega_{1,9},\dots,\omega_{13,14},\omega_{13,15}\}$, 如 $\omega_{1,3}=2$ 表示节点 1 至节点 3 对应的光路编号是 2, 权值为 0 表示该段光路使用尾纤直接连接, 因为两个通信机房距离彼此靠近。每条光路对应的沟道井号是 $c_a, \forall a\in E$, 具体数据格式请参照 1.2 节。

在图论中, 顶点 v_i 的度是与 v_i 直接关联的边的数目, 记为: $TD(v_i)$ 。从顶点 v_i 到顶点 v_j 的路径是一个顶点序列, 路径 (路由) 的长度等于从一个顶

点 v_i 到另一个顶点 v_j 所经过边的数量。第一个顶点到最后一个顶点相同的路径称为回路或环。序列中顶点不重复出现的路径称为简单路径。除了第一个顶点和最后一个顶点之外, 其余顶点不重复出现的回路, 称为简单回路或简单环。本文研究的问题是: 当新开通的业务主备路由无法严格满足 SRLR 分离原则时, 如何使业务主备路由经过相同编号的沟道井数量最少, 其数学表达模型^[16]为:

$$\min Z = \left| \left(\bigcup_{a\in E} c_a x_a^1 \right) \cap \left(\bigcup_{a\in E} c_a x_a^2 \right) \right| \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \sum_{k\in K} \sum_{a\in\delta^-(i)} x_a^k = 1 \quad \forall i\in N \quad (2)$$

$$\sum_{a\in\delta^+(i)} x_a^k = \sum_{a\in\delta^-(i)} x_a^k \quad \forall i\in N, \forall k\in K \quad (3)$$

$$\sum_{a\in\delta^+(o)} x_a^k = 1 \quad \forall k\in K \quad (4)$$

$$\sum_{a\in\delta^-(d)} x_a^k = 1 \quad \forall k\in K \quad (5)$$

$$\sum_{a\in\delta^+(S)} x_a^k \leq |S|-1 \quad 2 \leq |S| \leq 15, S \subset V, \forall k\in K \quad (6)$$

$$x_a^k \in \{0, 1\} \quad \forall k\in K, \forall a\in E \quad (7)$$

$$TD(v_i) \geq 2 \quad \forall i\in N \quad (8)$$

式中, $|S|$ 表示求集合中元素数量。业务主备路由标签集 $K=\{1,2\}$, 表示由主用路由和备用路由组成的集合。当 $k=1$ 时, 默认是主用路由编号; $k=2$ 时, 则是备用路由编号。 $\delta^+(i)$ 代表是所有从点出发的边 (弧)。由于顶点 $\{16,17\}$ 是插入的虚拟顶点, 所以图中物理真实节点 $N=\{1,2,3,\dots,15\}$, N 表示图 1 中通信机房组成的集合。 $\delta^-(i)$ 代表所有进入顶点 v_i 的边。 x_a^k 是决策变量: 路由 k 经过边 a , 则为 1, 否则为 0。 o 表示新开通业务的起始站点, d 表示业务终止站点 $d\in N, o\neq d\neq i, \delta^+(S)=\{(i,j)|(i,j)\in E,i\in S,j\in S,i\neq j\}$ (是点集合)。式 (2) 表示主备路由不能同时经过相同的边, 即每个边只能遍历一次; 式 (3) 表示如果顶点 v_i 既不是起始点又不是终止点, 那么进入该顶点流与出去流相等; 式 (4) 和式 (5) 表示主备路由必须从顶点 o 出发, 回到顶点 d , 不能停留在某个顶点 (节点); 式 (6) 表示消除子回路, 避免主用路由或者备用路由形成环路。式 (7) 表示整数约束。式 (8) 表示 G 中任意顶点至少有两个直接关联的边。

定理 1 若一个无向连通图 $G = (V, E)$ 存在一个最大简单环，且除最大简单环上的其他顶点均与最大环相交，则在图 $G = (V, E)$ 中任意两个顶点至少存在两条路径。

证明： 除去最大简单环包括的顶点，其余顶点的边与最大环上的顶点可以组成新的环并与最大简单环相交或者相切，由于环上任意两点一定存在顺时针和逆时针的两条路径，所以图 $G = (V, E)$ 中任意两个顶点至少存在两条路径。

为了方便讨论式 (1) 解的存在性，现对图 2 进行简单处理，结果如图 3 所示，其中粗线是最大简单环。下面对式 (1) 解的存在性进行讨论。

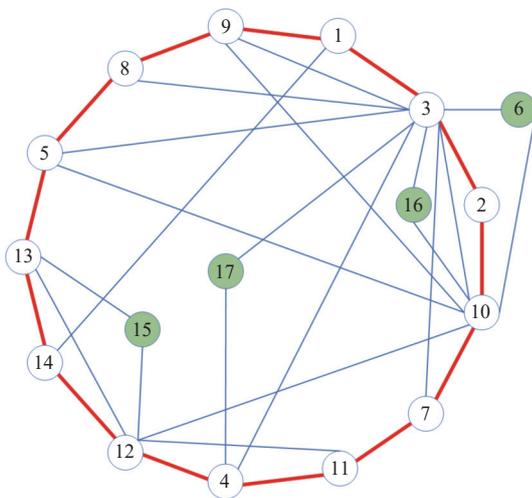


图 3 包含最大环的光路拓扑图

1) 唯一解：如果无向连通图 $G = (V, E)$ 存在哈密顿圈^[17]，且图的顶点数量等于边的数量 $|V| = |E|$ ，

则式 (1) 只存在唯一解。

2) 无解：如果无向连通图 $G = (V, E)$ 存在 $|V| > |E|$ ，则式 (1) 无解。

3) 非唯一解：如果无向连通图 $G = (V, E)$ 存在最大简单环，且经过除最大环上的顶点的环与最大环相交或者相切，则式 (1) 的解可能不唯一。当式 (1) 存在非唯一解时，由于主用路由和备用路由都是按照路径长度进行升序排列的（默认情况下图 $G = (V, E)$ 中所有边对应的长度是 1），所以式 (1) 的解是基于主用路由和备用路由的路径长度之和最小原则，选择出合适的解。

1.2 数据预处理

由于网络拓扑中光路以及光路对应光缆走向的电缆沟道井的数据都是使用文字进行描述，不利于算法数据处理，所以需要建立一种专用的数据映射（全局编码，使用 Excel 的 IFERROR(VLOOKUP(A2,IF({1,0},A\$1:A1,E\$1:E1),2,0),MAX(E\$1:E1)+1) 函数嵌套进行处理，其功能是第一次出现的名称按顺序编号，非第一次出现的名称使用第一次出现时所编的编号），即相同的数据（光路、沟道井）使用相同的编号。每段光路对应的沟道井编号最终映射成集合 $c_a, \forall a \in E$ 。拓扑之间的关联信息使用邻接矩阵 M_{nb} 进行表示。数据的存储使用矩阵格式，光路与沟道位置具体的映射关系如图 4 所示。

$$M_{nb}[i, j] = \begin{cases} 1 & v_i v_j \in E(G) \\ 0 & v_i v_j \notin E(G) \end{cases} \quad (9)$$

光路	光缆	井道	井道编号(c)	光路编号(w)
通信站1-通信站9	通信站13-通信站1(黄山路)24芯普通光缆	黄山路#01	1	1
通信站1-通信站9	通信站13-通信站1(黄山路)24芯普通光缆	黄山路#03	2	1
通信站1-通信站9	通信站13-通信站1(黄山路)24芯普通光缆	黄山路#04	3	1
通信站1-通信站9	通信站13-通信站1(黄山路)24芯普通光缆	黄山路#03	2	1
通信站1-通信站9	通信站13-通信站1(黄山路)24芯普通光缆	黄山路#06	4	1
通信站1-通信站9	通信站13-通信站1(黄山路)24芯普通光缆	黄山路#01	1	1
通信站1-通信站9	通信站13-通信站1(黄山路)24芯普通光缆	黄山路#10	5	1
通信站1-通信站9	通信站13-通信站1(黄山路)24芯普通光缆	黄山路#100	6	1
通信站1-通信站9	通信站13-通信站1(黄山路)24芯普通光缆	黄山路#101	7	1
通信站1-通信站9	通信站13-通信站1(黄山路)24芯普通光缆	黄山路#103	8	1

图 4 数据预处理图

1.3 算法描述

本文提出的 DFS-SRLG 算法主要思想是：业务的主用路由和备用路由，在无法严格满足 SRLG 分离原则时，最小化主备路由共沟道的数量。即使用 DFS-SRLG 算法选出业务从起始点（通信站）到终止点（通信站）的所有路径（路由），然后基

于共沟道井数量最小化原则，选择 2 条路由分别作为业务的主用路由和备用路由。此算法不仅适用于电力通信城域网的业务路由规划，也适用于光路网络布局合理性的验证，并以此作为优化的理论依据。DFS-SRLG 算法具体流程图如图 5 所示。

DFS-SRLG 算法能在从起始点到终止点的所有

路径中, 选择出光路共沟道数量最少的 2 条路由, 并把第一条路径作为主用路由, 第二条路径作为备用路由, 同时展示出主备路由承载的光缆信息和经过的沟道井信息。此算法不仅极大地降低了整体业务中断风险, 还避免了工作路由优先^[18] (active path first, APF) 算法的缺陷, 提升了网络稳定性。

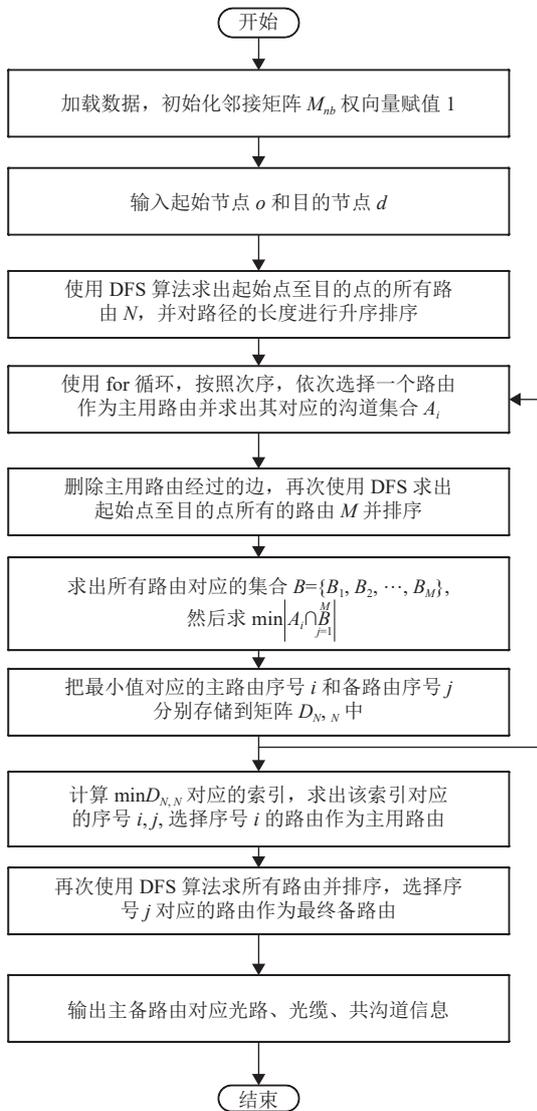


图 5 DFS-SRLG 算法流程图

2 算法分析

2.1 算法仿真参数分析

本文基于安徽某个城市的城域电力网络进行仿真实验, 具体光路拓扑图如图 1 所示, 其对应的图模型如图 2 所示。该网络包含 15 个实际存在的中心站节点和 30 条真实存在的光缆链路, 并且每个节点的度大于等于 2, 所以从起始点至终止点肯定存在两条路由。仿真分两种情况进行讨论: 一是主备路径最短优化 (KSP 算法, 网管运维人员默认使

用的算法); 二是尽量满足 SRLG 分离原则, 使主备路由所共沟道井数量最小化算法 (DFS-SRLG)。选择起始点通信站 1 至终止点通信站 3 的行政电话业务进行理论仿真分析, 其主备路由信息的仿真结果如图 6 和图 7 所示。

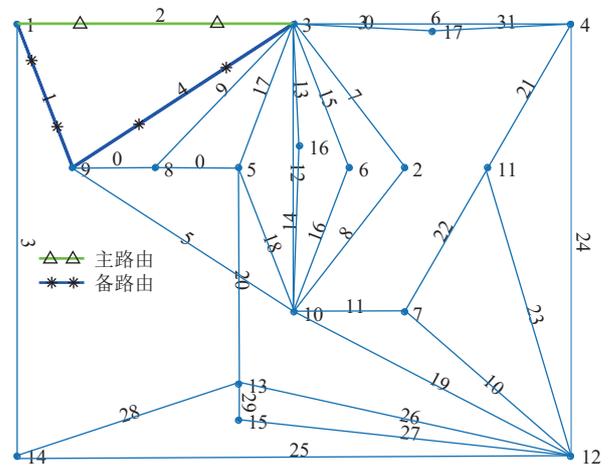


图 6 KSP 算法求解主备路由图

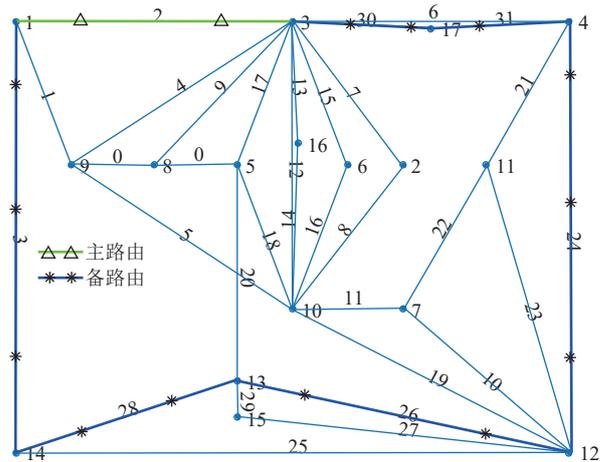


图 7 DFS-SRLG 算法求解主备路由图

使用 KSP 算法主备路由由共井数量为 11 个, 而使用 DFS-SRLG 算法主备路由共井数量为 1 个, 业务主备路由对应的光缆信息如图 8 所示。从仿真结果可以看出使用 DFS-SRLG 算法可以显著降低主备路由共沟道数量, 降低业务中断风险。同时该结果也对光路拓扑进行合理规划具有一定的指导意义, 可根据业务主备路由共沟道井情况, 结合检修计划调整共沟道井光路。

由图 3 可知: 基于行政电话业务优化可能存在多解。当存在非唯一解时, 本文基于主备路由所对应的路径长度之和最小原则, 选择出一组解作为行政电话业务的主备路由。同时, 基于所有业务重要度相同的原則下进行研讨, 虽然未考虑业务重要度

的差异性,但本文在求解最小值时,保留了所有主备路由共沟道数量 $D_{N,N}$,也可通过求解次小值来简单处理不同重要度业务的路由安排,下一步将对于业务重要度有差异进行深入研究。

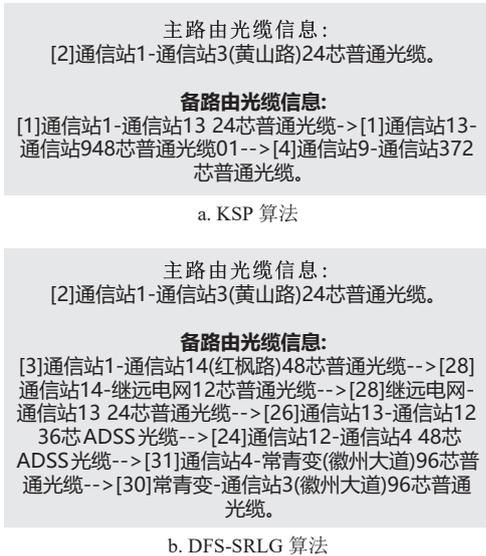


图 8 主备路由对应的光缆信息

2.2 算法应用分析

本文算法是为了解决实际问题而提出的,下面需要对算法实际应用效果进行分析。由于 2019 年新型冠状病毒暴发后,行政电话及视频会议对办公人员起到了很大的作用,于是把算法首先应用到行政电话业务上,表 1 是现场运维人员对 2020 年至 2022 年行政电话业务中断次数进行统计的结果。2022 年 1 月使用 DFS-SRLG 算法对行政电话业务进行了优化改造,截至 2022 年 7 月行政电话业务中断只发生了 4 次。

表 1 行政电话业务中断次数统计表

业务起始站—终止站	KSP算法		DFS-SRLG算法
	2020年	2021年	2022年
通信站1—通信站3	1	0	0
通信站2—通信站3	0	1	0
通信站4—通信站3	0	0	0
通信站5—通信站3	1	1	0
通信站6—通信站3	0	1	0
通信站7—通信站3	2	1	1
通信站8—通信站3	1	2	0
通信站9—通信站3	2	3	1
通信站10—通信站3	0	0	0
通信站11—通信站3	1	2	0
通信站12—通信站3	2	4	1
通信站13—通信站3	2	1	0
通信站14—通信站3	2	0	0
通信站15—通信站3	1	2	1
总计	15	18	4

从表 1 统计的结果可以看出:行政电话业务在使用 DFS-SRLG 算法后能显著降低其中断次数,说明 DFS-SRLG 能有效地降低整体业务中断风险,解决了实际生产问题。

2.3 算法复杂度分析

DFS-SRLG 算法使用邻接矩阵 (Adjacency Matrix) 存储顶点之间的相邻关系。算法的复杂度主要由 5 个部分组成。1) 使用 DFS 求解起始点 (通信站) 到终止点 (通信站) 的所有路径 N ,并按照路径长度 L_s 进行升序排序,此过程对应的算法复杂度是 $O(|V|^2)$ 。2) 在所有路由中依次选择路径作为主用路由 i ,求解出路由 i 对应的沟道并集合,并在图 $G=(V,E)$ 中删除主用路由经过的边,此过程对应的算法复杂度是 $O(2L_s)$ 。3) 返回到第一步,并求解出排序后所有路由 M 对应的沟道集合,此过程的算法复杂度是 $O(|V|^2 + \sum_{i=1}^M L_i)$ 。4) 主用路由 i 对应的沟道集合 A_i 与第三步求出的所有路径 M 对应的沟道集合依次求集合交集,并计算交集元素数量,然后存储到对应的矩阵 $D_{i,j}$,此过程的算法复杂度

是 $O(|A_i| + \sum_{j=1}^M B_j)$ 。5) 查找矩阵 $D_{i,j}$ 中的最小值,并记录其第一次出现时的下标索引 i,j (当出现非唯一解时,以主备路由的路径长度之和最小为原则进行选择),在图 $G=(V,E)$ 中删除第 i 条主用路由经过的边,再次返回到第一步,选择第 j 条路径作为备用路由,此过程对应的算法复杂度是 $O(|V|^2 + NM)$,因此,DFS-SRLG 算法复杂度是 $O(2(N+1)|V|^2 + Q)$,

其中 $Q = N \left(2L_s + M + \sum_{i=1}^M L_i + |A_i| + \sum_{j=1}^M B_j \right)$,然后去掉低阶量和常量,其时间复杂度是 $O(2(N+1)|V|^2)$ 。虽然 KSP 算法时间复杂度^[19]是 $O(|V|^2)$,但本算法已经不适合于安徽城域网络的业务路由配置。因为基于 KSP 算法的电网通信业务保护方案,随着城市基础建设的推进,导致整体业务中断次数增加,所以本文提出了基于最小沟道的电网通信业务路由优化方法,为安徽电网稳定性提供了强有力的支撑。

3 结束语

本文提出的业务路由规划算法可以实现业务路由的动态规划,在一定程度上简化网络业务管理,降低运营成本,提高整体业务的安全性。DFS-SRLG 算法不仅可以降低平均整体业务中断风险,

提高网络的稳定性,还为光缆拓扑调整和业务故障定位提供了理论指导。

参 考 文 献

- [1] FAN B, ZHENG C X, TANG L R, et al. Critical nodes identification for vulnerability analysis of power communication networks[J]. *IET Communications*, 2020, 14(4): 703-713.
- [2] WU Y J, CHEN J F, RU Y T, et al. Research on power communication network planning based on information transmission reachability against cyber-attacks[J]. *IEEE Systems Journal*, 2021, 15(2): 2883-2894.
- [3] CANDRA A, BUDIMAN M A, HARTANTO K. Dijkstra's and a-star in finding the shortest path: a tutorial[C]//2020 International Conference on Data Science, Artificial Intelligence, and Business Analytics. Medan, IEEE, 2020: 28-32.
- [4] TAPOLCAI J, RÓNYAI L, VASS B, et al. Fast enumeration of regional link failures caused by disasters with limited size[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2020, 28(6): 2421-2434.
- [5] LI G, WANG D, GALLIVAN T, et al. Enumerating maximal shared risk link groups of circular disk failures hitting k nodes[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2021, 29(4): 1648-1661.
- [6] 祁兵, 刘思放, 李彬, 等. 基于业务优先级和 SRLG 的电力需求响应业务调度优化算法[J]. *电网技术*, 2019, 43(7): 2393-2402.
- QI B, LIU S F, LI B, et al. Optimized scheduling algorithm for power demand response service based on multi-priority services and SRLG[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(7): 2393-2402.
- [7] 吴越. 电力通信 SDH 光传输网络业务路由规划与仿真关键技术研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2021.
- WU Y. Research on the key technologies of service route planning and simulation for power communication SDH optical transmission network[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2021.
- [8] KRETSIS A, KOKKINOS P, PANAGIOTIS K, et al. Mantis: Cloud-based optical network planning and operation tool[J]. *Computer Networks*, 2015, 77: 153-168.
- [9] LIN L, BIN L, BING Q, et al. Optimization of communication capacity for load control considering shared risk link group in source-grid-load system[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2020, DOI: 10.1016/j.ijepes.2020.106166.
- [10] KONG P Y. Routing in communication networks with interdependent power grid[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2020, 28(4): 1899-1911.
- [11] 朱文甫. 电力 SDH 通信网的自愈模型构建及仿真实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2013.
- ZHU W F. Construction and simulation for self-healing model in SDH communication network of power grid[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013.
- [12] LOPEZ-PAJARES D, ROJAS E, CARRAL J A, et al. The disjoint multipath challenge: multiple disjoint paths guaranteeing scalability[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 74422-74436.
- [13] 邓博仁, 唐良瑞, 郝建红, 等. 电力 SDH 传输网的风险评价[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(20): 133-139.
- DENG B R, TANG L R, HAO J H, et al. Risk assessment on electric power SDH transmission network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(20): 133-139.
- [14] 曾庆涛, 邱雪松, 郭少勇, 等. 基于风险均衡的电力通信业务的路由分配机制[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(6): 1318-1324.
- ZENG Q T, QIU X S, GUO S Y, et al. Risk balancing based routing mechanism for power communications service[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(6): 1318-1324.
- [15] 祁兵, 刘思放, 李彬, 等. 共享风险链路组与风险均衡的电力通信网路由优化策略[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(8): 168-175.
- QI B, LIU S F, LI B, et al. Routing optimization strategy for power communication network with shared risk link group and risk balance[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(8): 168-175.
- [16] MILLER C E, ZEMLIN R A, TUCKER A. Integer programming formulation of traveling salesman problems[J]. *Journal of the ACM*, 1960, 7(4): 326-329.
- [17] CHIBA S Y, FURUYA M C, TUCKER A. A characterization of 2-connected $\{K_1, 3, N_3, 1, 1\}$ -free non-Hamiltonian graphs[J]. *Journal of the ACM*, 2021, 344(5): 112321.
- [18] XU D H, XIONG Y Z, QIAO C M, et al. Failure protection in layered networks with shared risk link groups[J]. *IEEE Network*, 2004, 18(3): 36-41.
- [19] 徐涛, 丁晓璐, 李建伏. K 最短路径算法综述[J]. *计算机工程与设计*, 2013, 34(11): 8.
- XU T, DING X L, LI J F. Review on K shortest paths algorithms[J]. *Computer engineering and design*, 2013, 34(11): 8.

编辑 税红