

基于通信光缆线路辅助规划的路由算法研究

王鑫岩¹, 贺艳琴¹, 周地洪², 邓宇航¹

¹西京学院计算机学院, 陕西 西安

²西京学院机械工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2024年11月25日; 录用日期: 2024年12月23日; 发布日期: 2024年12月30日

摘要

通信光缆光路路由设计是基于光缆的通信网络和基于地理信息建立光缆线路GIS系统进行的算法分析设计。光路路由设计是一种在光纤通信网络中规划光路的过程, 其目的是确定如何在网络中建立端到端的光路, 以实现两点之间的通信。本文主要研究在陕西省各城市复杂多变的地形地貌下, 如何在通信站点之间选择最优的光缆线路, 找到既能满足通信需求, 又能最小化建设和维护成本的路由方案, 以及在通信光缆光路路由规划中, 基于最小跳接数、纤芯富余度、最短路径的组合算法分析设计和软件功能开发。

关键词

路径长度, 纤芯富余度, 最小跳接数, 路由算法

Research on Routing Algorithm Based on Communication Optical Cable Line Assisted Planning

Xinyan Wang¹, Yanqin He¹, Dihong Zhou², Yuhang Deng¹

¹School of Computer Science, Xijing University, Xi'an Shaanxi

²School of Mechanical Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Nov. 25th, 2024; accepted: Dec. 23rd, 2024; published: Dec. 30th, 2024

Abstract

The routing design of communication optical cable is an algorithm analysis and design based on the communication network of optical cable and the GIS system of optical cable based on geographic information. Optical routing design is the process of planning optical paths in an optical fiber communication network, the purpose of which is to determine how to establish an end-to-end optical

文章引用: 王鑫岩, 贺艳琴, 周地洪, 邓宇航. 基于通信光缆线路辅助规划的路由算法研究[J]. 计算机科学与应用, 2024, 14(12): 253-264. DOI: 10.12677/csa.2024.1412260

path in the network to achieve communication between two points. This paper mainly studies how to select the optimal optical cable line among communication stations under the complex and varied topography of cities in Shaanxi Province, find a routing scheme that can meet the communication needs and minimize the construction and maintenance costs, and in the planning of optical routes of communication optical cables, analysis and design of combinative algorithm based on minimum jump number, core surplus and shortest path and software function development.

Keywords

Path Length, Core Excess, Minimum Number of Hops, Routing Algorithm

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 研究现状与发展动态

1.1. 研究现状

通信光缆光路路由设计作为通信网络规划与优化的关键环节，一直是研究热点和重点。随着通信网络的不断扩展和复杂化，传统的路由算法已经无法满足现代通信网络的需求。因此，需要研究更加高效、智能和自适应的路由算法。这些算法综合考虑了网络拓扑、流量模式、时延、可靠性等多个因素，以实现网络资源的最优配置和通信性能的提升。例如，基于人工智能、机器学习和大数据分析的路由算法，能够自适应地调整路由策略，以适应网络变化和用户需求[1]-[3]。

随着网络流量的不断增加，负载均衡和流量工程成为光路路由设计中的重要问题。研究如何通过合理的路由设计，实现网络流量的均衡分布，避免拥塞和性能瓶颈。这包括设计高效的流量调度算法、优化路由路径选择等[4]。另外，网络安全和可靠性一直是光路路由设计中的关键考虑因素。随着网络攻击和故障的频发，需要提高通信光缆光路的安全性，防止潜在的网络安全威胁。这包括设计更加健壮的路由协议、加强网络监控和故障恢复机制等[5]。

随着人工智能、大数据等技术的发展，通信光缆光路路由设计也开始向智能化和自动化方向发展。研究探索如何将人工智能和机器学习技术应用于路由设计中，实现自动化路由优化和故障恢复。这将大大提高路由设计的效率和准确性，降低人工干预和错误率。为了促进通信光缆光路路由设计的标准性和互操作性，国际和国内的相关组织正在制定一系列标准和规范。这些标准和规范有助于不同厂商和设备的兼容性和互操作性，降低网络建设和维护的成本和复杂度[6]。

通信光缆光路路由设计是基于光缆的通信网络和基于地理信息建立光缆线路 GIS 系统进行的算法分析设计。随着城市的发展和变迁，在电网系统的庞大数据中，如何快速寻找两站点之间的最优路径并开通光路，显得尤为重要。传统的最短路径算法往往只关注路径的长度或权重，而在实际应用中，可能还需要考虑其他因素，如时间、成本、可靠性等。因此，未来的最短路径算法将需要更加注重多目标优化，以综合考虑多个因素，提供更加全面和优化的路径规划和选择[7]。目前最优路径中经典的最短路径算法主要包括 Dijkstra 算法、Bellman-Ford 算法、KSP 算法、Floyd 算法和 SPFA 算法等。这些算法各有特点，适用于不同的场景和需求。例如，Dijkstra 算法适用于赋权有向图或无向图的单源最短路径问题，Bellman-Ford 算法则可以处理具有负权重的边的情况，KSP 算法是一种在给定源节点和目标节点的情况下，找到 k 条从源节点到目标节点的最短路径算法[8] [9]。此外，随着人工智能和机器学习技术的快速发展，这些

技术也开始被应用于最短路径算法中，以实现更加智能和高效的路径规划和优化。

通信光缆光路路由设计目前的相关研究现状呈现出算法优化与创新、拓扑结构与灵活性、安全与可靠性研究、智能化与自动化趋势以及标准化与互操作性等特点。这些研究现状为通信网络的升级和发展提供了有力支撑，同时也为未来的通信技术创新和发展奠定了基础。

1.2. 发展动态

随着技术的不断进步，通信光缆光路路由设计项目将更加注重技术创新和融合。例如，5G、物联网、云计算等新技术的快速发展，为光路路由设计提供了新的机遇和挑战。未来的光路路由设计将需要综合考虑这些新技术的特点，实现与它们的无缝融合，以提供更高效、可靠和智能的通信服务。

智能化和自动化是通信光缆光路路由设计项目的重要发展方向。通过引入人工智能、机器学习等智能技术，可以实现光路路由的自动化优化和决策，提高路由效率和性能。同时，智能化技术还可以帮助解决复杂多变的网络环境和用户需求，提高网络的适应性和灵活性。

随着全球环境保护意识的增强，绿色和可持续发展成为通信光缆光路路由设计项目的重要考虑因素。未来的光路路由设计将需要注重降低能耗、减少排放，实现通信网络的绿色化。这包括采用更高效的路由算法、优化网络设备配置、推广可再生能源等措施。同时网络安全和可靠性一直是通信光缆光路路由设计项目的关键考虑因素[10]。随着网络攻击和故障的频发，未来的光路路由设计将更加注重网络安全和可靠性。这包括设计更加健壮的路由协议、加强网络监控和故障恢复机制、提高网络的抗攻击能力等。为了促进通信光缆光路路由设计的标准化和互操作性，相关组织和企业将加强合作，制定一系列标准和规范。这些标准和规范将有助于不同厂商和设备的兼容性和互操作性，降低网络建设和维护的成本和复杂度。同时，标准化也将促进光路路由设计技术的普及和推广[11]。

通信光缆光路路由设计中，通信站点之间的最短路径算法呈现出智能化与自适应性、大规模网络处理能力、多目标优化以及安全性与隐私保护等趋势。这些趋势将为最短路径算法的应用和发展提供更加广阔前景和机遇[12]。随着人工智能技术的不断进步，最短路径算法将更加注重智能化和自适应性。通过引入机器学习、深度学习等技术，算法可以根据实时的网络状态、用户需求和历史数据等信息，自适应地调整路径规划和优化策略，以提供更加准确、高效和个性化的服务。最短路径算法需要处理的数据量和计算复杂度也在不断增加。因此，未来的最短路径算法将需要更加注重大规模网络的处理能力。通过采用分布式计算、云计算等技术，可以实现更加高效和可扩展的路径计算和优化。随着网络安全和隐私保护问题的日益突出，最短路径算法也需要考虑这些问题。未来的最短路径算法将需要更加注重数据的安全性和隐私保护，采用加密、脱敏等技术，确保用户数据的安全和隐私[13] [14]。

通信光缆光路路由设计项目的发展动态将呈现出技术创新与融合、智能化与自动化、绿色与可持续发展、网络安全与可靠性以及标准化与互操作性等趋势和方向。这些发展动态将为通信网络的升级和发展提供有力支撑，推动通信技术的不断进步。

2. 研究目的及意义

2.1. 研究目的

2.1.1. 提升陕西省通信网络的整体性能

通过优化陕西省内的光缆光路路由设计，可以提升网络的整体传输性能和稳定性，以满足日益增长的数据传输需求。

2.1.2. 促进区域经济发展

陕西省作为中国西部重要的经济区域，优化通信光缆光路路由有助于提升该地区的通信基础设施水

平，为区域内的企业、政府机构和居民提供更好的通信服务，进而促进经济和社会发展。

2.1.3. 增强网络安全和应急响应能力

在光路路由设计中考虑网络安全和应急通信需求，可以确保在自然灾害、突发事件等紧急情况下，通信网络能够快速恢复并提供必要的通信支持。

2.1.4. 支持新技术和新业务的推广

随着5G、云计算、大数据等新技术的快速发展，优化光路路由设计可以为新技术和新业务的推广提供坚实的网络基础，推动陕西省内通信技术的创新发展。

2.2. 研究意义

2.2.1. 推动区域通信基础设施升级

随着信息技术的快速发展，通信光缆作为高速、大容量数据传输的主要手段，在区域通信基础设施中的地位日益凸显。陕西省通信光缆光路路由设计项目的研究和实施，有助于推动该省通信基础设施的升级和改造，满足日益增长的通信需求。

2.2.2. 推动区域经济社会发展

通信技术的进步对于经济社会发展具有重要的推动作用。优化通信光缆光路路由设计，提升通信网络的性能和可靠性，有助于促进陕西省内的企业信息化、电子商务、远程医疗、在线教育等领域的快速发展，进而推动区域经济社会的全面进步。

2.2.3. 增强区域通信安全保障能力

在网络安全日益受到重视的背景下，优化通信光缆光路路由设计，可以提高通信网络的抗攻击能力和应急响应能力，有效保障区域内通信网络安全和数据安全。

2.2.4. 推动通信行业技术创新

陕西省通信光缆光路路由设计项目的研究和实施，需要不断探索新的路由算法、拓扑结构、负载均衡策略等，有助于推动通信行业技术创新和发展，提高陕西省乃至全国在通信领域的竞争力。

3. 研究内容

光路路由设计是一种在光纤通信网络中规划光路的过程，其目的是确定如何在网络中建立端到端的光路，以实现两点之间的通信。电网企业为了确保电网的安全运行，自建了基于光缆的通信网络，基于地理信息建立光缆线路GIS系统，主要描述通信站点位置、光缆线路走径、光配信息等。在光纤通信网络的日常运维中，经常需要在两个通信站点开通光路，实现两个站点之间的通信。因此需要设计路由算法计算从一个通信站到目标站点的最优光路，路由算法可以根据不同的因素来确定最优光路，例如光路路径长度、纤芯富余度、最小跳接数等。研究内容主要包括：

- 1) 研究通信光缆光路路由最短路径规划算法，完成算法分析设计，开发基于最短路径的光路路由辅助规划软件功能。
- 2) 研究基于最小跳接数的通信光缆光路路由规划算法，完成算法分析设计，开发基于最小跳接数的光路路由辅助规划软件功能。
- 3) 研究基于纤芯富余度的通信光缆光路路由规划算法，完成算法分析设计，开发基于纤芯富余度的光路路由辅助规划软件功能。
- 4) 研究基于最小跳接数 + 纤芯富余度 + 最短路径的通信光缆光路路由规划组合算法，完成算法分析设计，开发基于最小跳接数 + 纤芯富余度 + 最短路径的光路路由辅助规划软件功能。

5) 研究通信光缆线路铺设规划算法, 完成算法分析设计, 开发通信光缆线路铺设规划软件功能。

4. 创新点及特色

4.1. 创新点

1) 智能化规划与设计: 利用先进的地理信息系统(GIS)和大数据分析技术, 对陕西省的通信需求和通信站点位置进行智能化分析和预测。通过构建数学模型和算法, 实现光缆线路的智能规划和设计, 提高规划效率和准确性。

2) 灵活性与可扩展性: 在通信光缆线路辅助规划过程中, 考虑未来通信技术的发展趋势和业务需求的变化, 设计具有灵活性和可扩展性的光缆线路方案。通过模块化设计和预留扩展接口, 方便后续升级和扩展。

4.2. 特色

本文针对陕西省电网通信光缆线路辅助规划, 在项目实施过程中考虑未来通信过程中技术的发展趋势, 坚持可持续发展理念, 设计具有可扩展性和灵活性的光缆线路路由方案, 为陕西省电网通信事业的长期发展奠定基础。

5. 算法设计

最优路径算法主要包括 Dijkstra 算法和 KSP 算法。Dijkstra 算法是赋权有向图或无向图的单源最短路径问题, KSP 算法是在给定源节点和目标节点的情况下, 找到 k 条从源节点到目标节点的最短路径算法。

5.1. 迪杰斯特拉(Dijkstra)算法设计

迪杰斯特拉(Dijkstra)算法是典型最短路径算法, 用于计算一个节点到其他节点的最短路径。它的主要特点是以起始点为中心向外层层扩展(广度优先遍历思想), 直到扩展到终点为止。Dijkstra 算法适用于有权图(即图中的边有权重), 但不能处理负权重边。

5.1.1. 基本思想

Dijkstra 算法的基本思想是以广度优先搜索为基础, 逐步扩展已找到最短路径的节点, 直到搜索完所有节点。算法的主要步骤如下:

Step1: 创建一个集合, 用于存储已找到最短路径的节点(即顶点 s)。

Step2: 初始化与源节点 s 相邻的节点的距离为 0, 其他节点的距离为无穷大。

Step3: 每次从未确定最短路径的相邻节点中选择距离最小的节点进行扩展, 将其加入已找到最短路径的节点集合, 并更新与该节点相邻的节点的距离。

Step4: 重复 Step3, 直到所有节点都被加入最短路径集合, 或者达到预设的迭代次数。

Dijkstra 算法可以用于解决单源最短路径问题, 即找到从源节点到其他所有节点的最短路径。

5.1.2. 迪杰斯特拉(Dijkstra)算法图解

以下图 1 各节点路径图为例, 利用迪杰斯特拉进行算法来演示顶点 D 到其他各节点的最短路径对过程如下:

Step 1: 选取顶点 D

$S = \{D(0)\}$;

$U = \{A(\infty), B(\infty), C(3), E(4), F(\infty), G(\infty)\}$.

其中: S 是已计算出最短路径得定点得集合, U 是未计算出最短路径得定点的集合, C(3)表示顶点 C 到

起点 D 的最短距离是 3。

Step 2: 选取顶点 C

$S = \{D(0), C(3)\};$

$U = \{A(\infty), B(13), E(4), F(9), G(\infty)\}.$

Step 3: 选取顶点 E

$S = \{D(0), C(3), E(4)\};$

$U = \{A(\infty), B(13), F(6), G(12)\}.$

Step 4: 选取顶点 F

$S = \{D(0), C(3), E(4), F(6)\};$

$U = \{A(22), B(13), G(12)\}.$

Step 5: 选取顶点 G

$S = \{D(0), C(3), E(4), F(6), G(12)\};$

$U = \{A(22), B(13)\}.$

Step 6: 选取顶点 B

$S = \{D(0), C(3), E(4), F(6), G(12), B(13)\};$

$U = \{A(22)\}.$

Step 7: 选取顶点 A

$S = \{D(0), C(3), E(4), F(6), G(12), B(13), A(22)\}.$

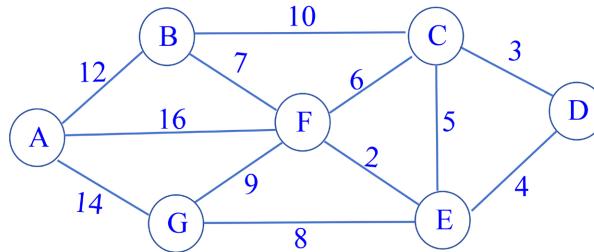


Figure 1. Path diagram of each node
图 1. 各节点路径图

5.2. K 条最短路径算法(Yen's Algorithm)设计

K 最短路径问题是最短路径问题的扩展和变形。k 最短路径问题包括两类：有限制的 k 最短路问题和无限制的 K 最短路问题。前者要求最短路径集合不含有回路，而后者对所求得的最短路径集合无限制。KSP (K-Shortest Paths) 算法是一种在图中寻找 k 条最短路径的算法。它可以在给定源节点和目标节点的情况下，找到 k 条从源节点到目标节点的最短路径。Yen's 算法是 Yen 在 1971 年提出的以其名字命名的 KSP 算法。

5.2.1. 基本思想

Yen's 算法采用了递推法中的偏离路径算法思想，适用于非负权边的有向无环图结构。KSP 算法的基本思想是利用 Dijkstra 算法求解单源最短路径，然后对最短路径进行排序，并根据需求选取前 k 条最短路径。KSP 算法的基本步骤为：

Step 1: 初始化，设置源节点到其他所有节点的最短路径长度为无穷大。

Step: 迭代，对于 K 次迭代，执行以下操作：

a) 从源节点开始, 使用 Dijkstra 算法或其他最短路径算法, 计算到其他所有节点的最短路径。

b) 将找到的最短路径与之前的路径进行合并, 如果新路径长度更短, 则更新路径信息。

Step 3: 重复 Step 2, 直到找到 K 条最短路径。

需要注意的是, Yen 的 K 条最短路径算法在计算最短路径时, 可能会产生过多的候选路径, 从而导致计算量过大。因此, 在实际应用中, 需要根据具体情况选择合适的参数和方法。

5.2.2. K 条最短路径算法图解

算法可分为两部分, 算出第 1 条最短路径 $P(1)$, 然后在此基础上依次算出其他的 $K - 1$ 条最短路径。在求 $P(i + 1)$ 时, 将 $P(i)$ 上除了终止节点外的所有节点都视为偏离节点, 并计算每个偏离节点到终止节点的最短路径, 再与之前的 $P(i)$ 上起始节点到偏离节点的路径拼接, 构成候选路径, 进而求得最短偏离路径。

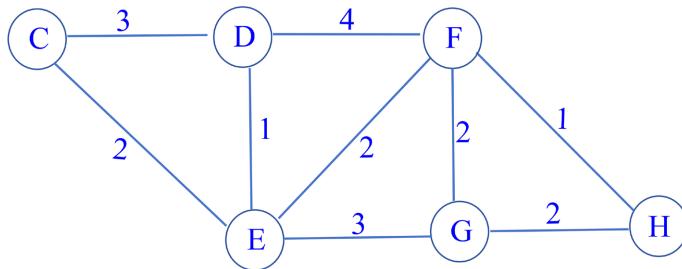


Figure 2. Path diagram of each node

图 2. 各节点路径图

以上图 2 各节点路径图为例, 利用 Yen's Algorithm 进行算法演示, 调用从节点 C 到节点 H 的 3 条最短路径, B 为偏离路径集合。

[1]通过 Dijkstra 算法计算得到最短路径 A^1 : C-E-F-H, 其中, 花费为 5, $A[1] = C-E-F-H$;

[2]将 $A[1]$ 作为迭代路径, 进行第一次迭代:

a) 以部分迭代路径(即 $A[1]$) C 路径中, C 点为起点, 将 C-E 路径之间的权值设为无穷大, 进行一次 Dijkstra, 得到路径 A^{2-1} : C-D-F-H, 花费为 8, 将 A^{2-1} 路径加入 B;

b) 以部分迭代路径(即 $A[1]$) C-E 路径中, E 为起点, 将 E-F 路径之间的权值设为无穷大, 进行一次 Dijkstra, 得到路径 A^{2-2} : C-E-G-H, 花费为 7, 将 A^{2-2} 路径加入 B;

c) 以部分迭代路径(即 $A[1]$) C-E-F 路径中, F 为起点, 将 F-H 路径之间的权值设为无穷大, 进行一次 Dijkstra, 得到路径 A^{2-3} : C-E-F-G-H, 花费为 8, 将 A^{2-3} 路径加入 B;

迭代完成, B 集合中有三条路径: C-D-F-H, C-E-G-H, C-E-F-G-H; 选出花费最小的偏离路径 C-E-G-H, $A[2] = C-E-G-H$, 移出 B 集合。

[3]将 $A[2]$ 作为迭代路径, 进行第二次迭代:

a) 以部分迭代路径(即 $A[2]$) C 路径中, C 点为起点, 将 C-E 路径之间的权值设为无穷大, 进行一次 Dijkstra, 得到路径 A^{3-1} : C-D-F-H, 但 B 集合已存在该路径, 故不存在偏移路径;

b) 以部分迭代路径(即 $A[2]$) C-E 路径中, E 点为起点, 将 E-G、E-F 路径之间的权值设为无穷大(注意, 这里设置两条路径的权值原因是这两条路径分别存在于 $A[1]$ 和 $A[2]$ 中), 进行一次 Dijkstra, 得到路径 A^{3-2} : C-E-D-F-H, 花费为 8, 将 A^{3-2} 加入 B;

c) 以部分迭代路径(即 $A[2]$) C-E-G 路径中, G 点为起点, 将 C-H 路径之间的权值设为无穷大, 不存在偏移路径。

迭代完成, B 集合中有三条路径: C-D-F-H, C-E-F-G-H, C-E-D-F-H; 由于三条路径花费均为 8, 则根据最小节点数进行判断, 选出偏离路径 C-D-F-H, A [3] = C-D-F-H。

此时, 选出了三条最短路径, 分别是: A [1] = C-E-F-H A [2] = C-E-G-H A [3] = C-D-F-H。

6. 软件实现

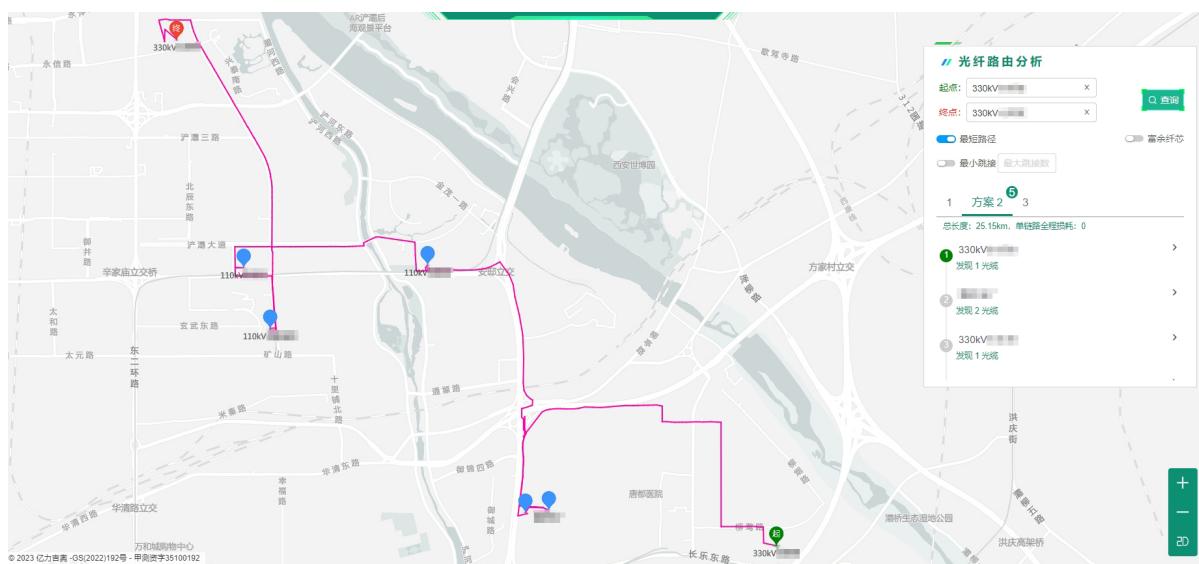
针对通信光缆光路路由规划、线路铺设规划问题, 基于最短路径、路径查找和图搜索等算法进行算法研究和分析设计, 采用基于 Java 语言的 Spring Boot 框架, 和轻量级、高效、易于使用的 Vue 框架, 开发通信光缆路由规划软件, 实现通信光缆路由设计功能: 基于光路路径长度、纤芯富余度、最小跳接数开通了从一个通信站到目标站点的最优光路。

1. 软件功能界面(如图 3 通信光缆路由规划软件功能主界面)



Figure 3. Main interface of communication optical cable routing planning software functions
图 3. 通信光缆路由规划软件功能主界面

2. 通信光缆基于最短路径的光路路由辅助规划软件功能(如图 4 基于最短路径的光路路由规划软件功能界面)



(a)



Figure 4. Function interface of optical path routing planning software based on shortest path
图4. 基于最短路径的光路路由规划软件功能界面

3. 通信光缆基于最小跳接数的光路路由辅助规划软件功能(如图 5 基于最小跳接数的光路路由规划软件功能界面)

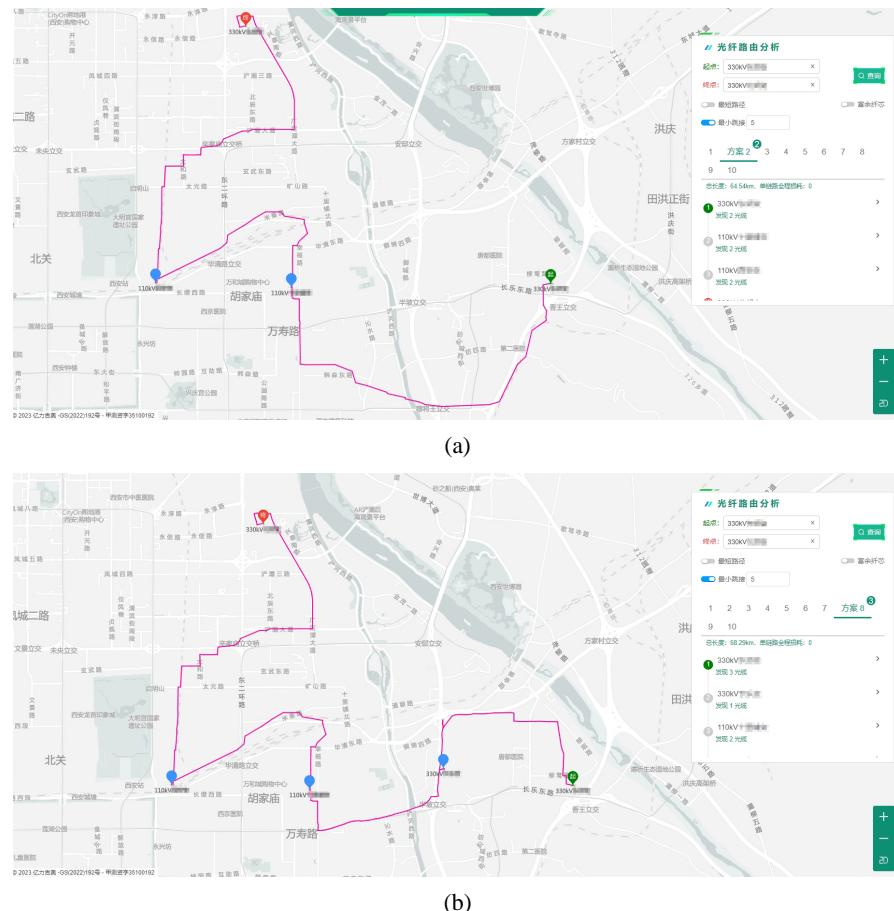


Figure 5. Function interface of optical path routing planning software based on minimum hop count
图5. 基于最小跳接数的光路路由规划软件功能界面

4. 通信光缆基于纤芯富余度的光路路由辅助规划软件功能(如图 6 基于纤芯富余度的光路路由规划软件功能界面)

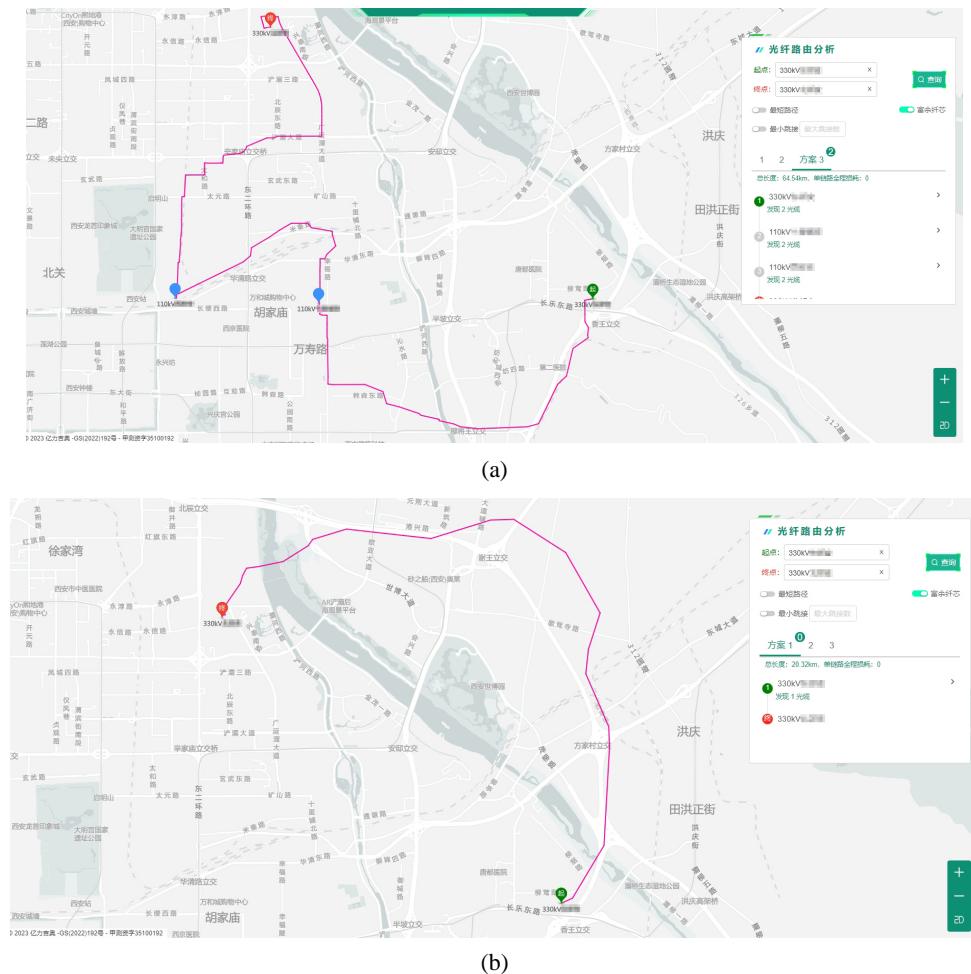


Figure 6. Function interface of optical path routing planning software based on fiber core redundancy
图 6. 基于纤芯富余度的光路路由规划软件功能界面

5. 通信光缆基于最短路径 + 最小跳接数 + 纤芯富余度的光路路由组合辅助规划软件功能(如图 7 组合光路路由规划软件功能界面)



Figure 7. Function interface of the combined optical path routing planning software
图 7. 组合光路路由规划软件功能界面

若最短路径: 纤芯富余度 = 7:3, 最小跳接数 = 5, 那么基于最短路径 + 最小跳接数 + 纤芯富余度的光路路由组合辅助规划软件功能界面如图 8 所示。

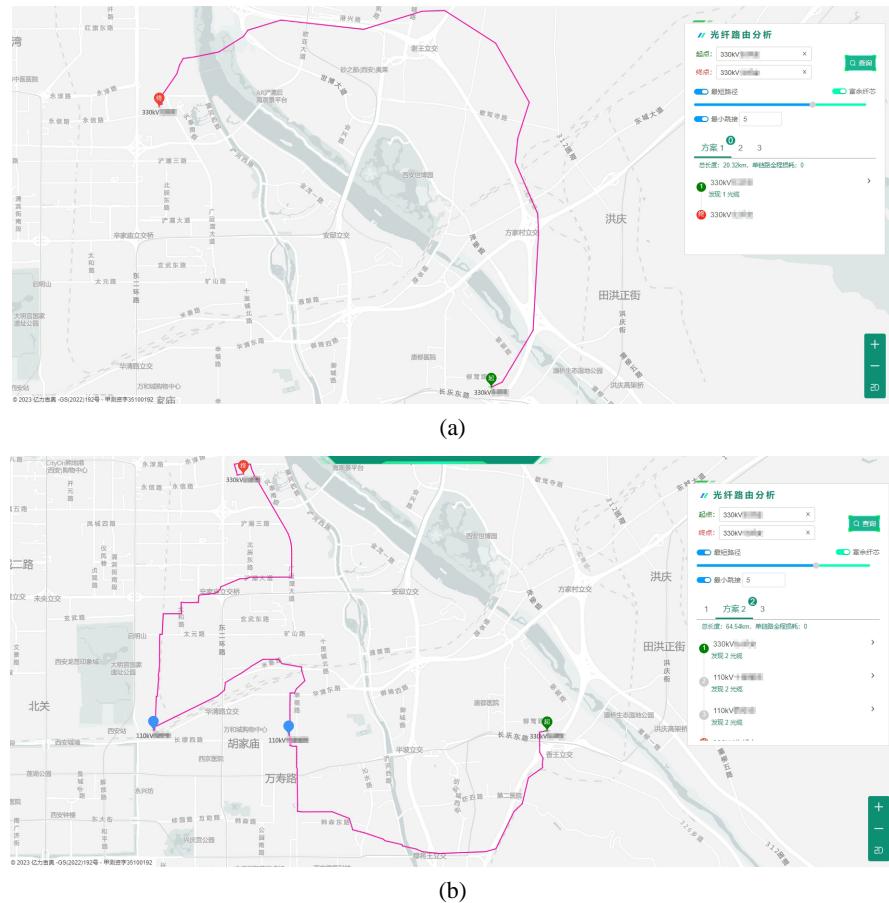


Figure 8. Function interface of optical path routing planning software with a fiber core redundancy of 7:3 and a minimum hop count of 5

图 8. 纤芯富余度为 7:3, 最小跳接数为 5 的光路路由规划软件功能界面

7. 结论与展望

利用先进的地理信息系统(GIS)和大数据分析技术, 对陕西省的通信需求和通信站点位置进行智能化分析和预测。通过构建数学模型和算法, 实现光缆线路的智能规划和设计, 提高规划效率和准确性。在通信光缆线路辅助规划过程中, 考虑未来通信技术的发展趋势和业务需求的变化, 坚持可持续发展理念, 设计具有可扩展性和灵活性的光缆线路路由方案, 通过模块化设计和预留扩展接口, 方便后续升级和扩展, 为陕西省电网通信事业的长期发展奠定基础。

基金项目

2024 年大学生创新创业训练计划项目(S202412715066): 陕西省通信光缆线路辅助规划算法分析与研究; 西京学院横向课题: 数据统计分析图表工具软件开发。

参考文献

- [1] 于润泉. 光缆通信线路设计要点探究[J]. 通讯世界, 2017(4): 51-52.

- [2] 李楠. 网络优化技术在光缆路由自动设计中的应用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2012.
- [3] 杨帆. 基于智能优化算法的通信光缆网络线路规划设计[J]. 信息系统工程, 2023(11): 74-77.
- [4] 陆怡菲, 顾君佳, 沈昊骢, 等. 基于 KSP 与 Dueling DQN 的电力通信光缆光路智能迂回方法[J]. 浙江电力, 2022, 41(12): 114-122.
- [5] 赵锦辉, 何涛, 王茜, 等. 基于 GIS 的通信光缆故障检修系统分析[J]. 电子技术, 2022, 51(8): 308-309.
- [6] 沈经. 绿色第 4 次工业革命-工业 4.0-互联网工业-人工智能及其共同物理层全球数字通信光缆网络[J]. 仪器仪表标准化与计量, 2016(2): 7-12.
- [7] 舒皓. 基于蚁群算法的通信光缆线路优化规划研究[J]. 通讯世界, 2016(1): 29-30.
- [8] 田园, 马文, 原野, 等. 基于改进 Bellman-Ford 的电网数据采集路由算法[J]. 计算机应用与软件, 2023, 40(7): 319-325.
- [9] 凌志勇, 张翼, 李圣清, 等. 基于改进迪杰斯特拉算法的变电站二次电缆路径优化设计[J]. 湖南电力, 2021, 41(4): 34-37.
- [10] 陈韻璘, 王宇超. 电网基础设施建设绿色减碳发展路径研究和探索[J]. 建筑科技, 2024, 8(1): 19-22.
- [11] 周鸿喜, 刘军, 姜辉, 等. 通信光缆资源管理系统研究与开发[J]. 电力系统通信, 2011, 32(6): 24-28.
- [12] 王丹. 坚强电网助推经济高质量发展[J]. 河南电力, 2024(1): 18-19.
- [13] 王旋. 基于 GIS 的光接安全入网主干光缆路由优化模型和算法研究[J]. 网络安全技术与应用, 2017(1): 42-43.
- [14] 苏辉, 陆镇虹, 吴立新, 等. 基于 GIS 的光接入网主干光缆路由优化模型和算法研究[J]. 北京邮电大学学报, 2002(2): 83-87.