

基于最小支撑树模型的燃气管网规划布局研究—以武威市凉州区为例



刘坤, 冯德鸿*

三峡大学数理学院数学系, 湖北宜昌 443002

摘要: 在“乡村振兴”时代背景下, 针对市辖乡镇级规划地下燃气管网铺设路线存在的问题, 如何节省使用管道原材料消耗、避免不必要的浪费等优化问题, 应用运筹学图论最小支撑树理论模型与 Kruskal 最优化算法, 即加边算法或避圈算法, 结合天地图 GIS 测量技术和计算机网络优化 lingo 编程技术, 研究了甘肃省武威市凉州区的地下燃气管网的规划总布局, 建立了 0-1 整数网络规划模型, 应用 GIS 测量数据进行了优化计算, 并结合实际上市区已基本覆盖天然气等现实情况, 对原模型进行了修正, 修改了原 lingo 程序, 重新进行了优化计算, 计算结果符合实际, 规划布局方案正确可行, 为当地城乡建设局、城乡规划局、自然资源规划局和地下燃气管网施工单位等部门提供了科学且可靠的总体实施方案, 具有很重要的参考价值; 应用图论建立的最小支撑树理论模型与 Kruskal 最优化算法, 以及优化计算程序具有普遍通用性。

关键词: 最小支撑树; 0-1 整数规划模型; Kruskal 算法; 乡镇级地下燃气管网; 规划布局

DOI: [10.57237/j.cst.2025.01.001](https://doi.org/10.57237/j.cst.2025.01.001)

Research on Gas Pipeline Network Planning and Layout Based on Minimum Support Tree Model: A Case Study of Liangzhou District, Wuwei City

Liu Kun, Feng De-hong*

Department of Mathematics, School of Mathematics and Physics, Three Gorges University, Yichang 443002, China

Abstract: In the context of the "rural revitalization" era, in response to the problems existing in the planning of underground gas pipeline laying routes at the township level in the city, how to save the consumption of pipeline raw materials and avoid unnecessary waste, and other optimization problems, the minimum support tree theory model of operations research graph theory and Kruskal optimization algorithm, namely edge algorithm or circle avoidance algorithm, combined with sky map GIS measurement technology and computer network optimization lingo programming technology, studied the overall layout of the underground gas pipeline network in Liangzhou District, Weiwu City, Gansu Province, established a 0-1 integer network planning model, applied GIS measurement data for optimization calculation, and combined with the reality that natural gas is basically covered in the urban area, the original model was modified, the original lingo program was modified, and a new one was carried out. Optimize the calculation and ensure that the results are in line with reality, The correct and feasible planning layout scheme provides a

*通信作者: 冯德鸿, ctguf@sina.com, 476943572@qq.com

scientific and reliable overall implementation plan for local urban and rural construction bureaus, urban and rural planning bureaus, natural resource planning bureaus, and underground gas pipeline construction units, and has important reference value; The minimum support tree theory model established by graph theory, Kruskal optimization algorithm, and optimization calculation program have universal applicability.

Keywords: Minimum Support Tree; 0-1 Integer Programming Model; Kruskal Algorithm; Township Level Underground Gas Pipeline Network; Planning Layout

1 引言

凉州区地理位置与地下燃气管网铺设现状：甘肃省武威市凉州区位于河西走廊，是西气东输工程的必经之地，对天然气管道的建设具有得天独厚的优势，因地处西北河西走廊腹地，人口稀疏且分布广，对于天然气管道的铺设有更高的要求。凉州区政府城乡规划部门因地制宜制定政策，积极推进天然气基础设施建设，充分利用天然气管道、液化天然气等多种形式推动实施城市天然气管网向农村延伸工程，加快城乡燃气管网和储气设施互联互通，有序扩大农村天然气实施范围，加快推进西气东输四线管道、黄羊镇天然气供气工程等项目建设[1]。

目前凉州区有 9 个街道办事处（东关街、东大街、

地质新村街、宣武街、火车站街、荣华街、西关街、西大街、黄羊河街），37 个镇（下双、中坝、丰乐、九墩、五和、双城、发放、古城、吴家井、和平、四坝、大柳、康宁、张义、怀安、新华、松树、柏树、武南、永丰、永昌、河东、洪祥、清水、清源、羊下坝、西营、谢河、金塔、金山、金沙、金河、金羊、长城、韩佐、高坝、黄羊），还有 2 个指挥部（九墩滩生态建设指挥部、邓马营湖生态建设指挥部）。从地图来看，凉州区城镇分布以中部市区街道办事处为主，南部黄羊镇距市区较远，而且人口密集，西部沙漠仅有邓马营湖生态指挥部，东部山区和西部沙漠其余地区无人居住[2]。

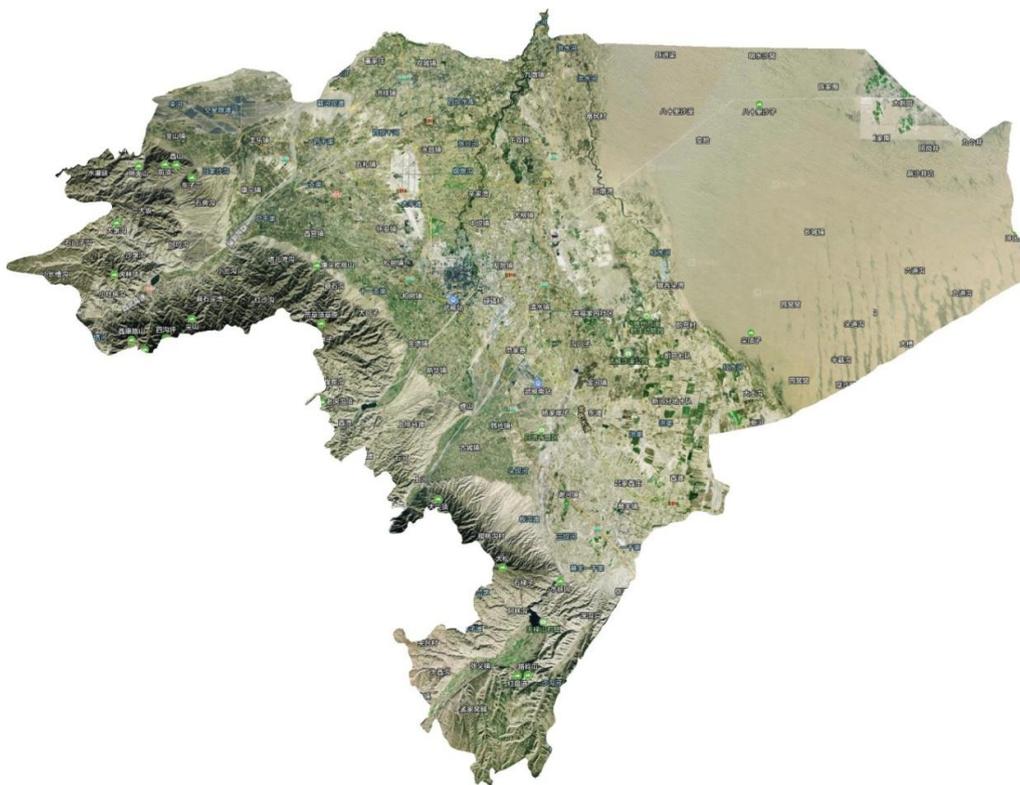


图 1 凉州区 37 镇、9 个街道办事处与 2 个指挥部地理位置

2 最小支撑树模型建模

2.1 问题描述

凉州区要沿 37 镇、9 个街道办事处与 2 个指挥部布局规划地下燃气管网，依照沿公路网形成的各乡镇居民点分布图，完成地下燃气管网的规划布局，要求提供解决地下燃气管网路线优化方案，使得燃气管网地下铺设总路径最短。

2.2 最小支撑树建模

设无向图 $G = (V, E, W)$ 为凉州区各乡镇形成的无向赋权图，权值 w_{ij} 表示两乡镇 i 与 j 之间的距离。根据无向赋权图构造邻接矩阵 $D_{48 \times 48}$ （对称矩阵），48 是乡镇的数目，一个乡镇就是一个节点。对无向图 $G = (V, E, W), V = \{V_1, V_2, \dots, V_{48}\}$ 表示顶点集合， E 表示边的集合， $W = (w_{ij})_{48 \times 48}$ 。

求解无向图 G 从顶点 1 开始的最小支撑树，其数学规划模型建模如下：

$$\text{设 } x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{当从 } V_i \text{ 到 } V_j \text{ 的边在树中} \\ 0, & \text{当从 } V_i \text{ 到 } V_j \text{ 的边不在树中} \end{cases}$$

目标函数为

$$\min Z = \sum_{i=1}^{48} \sum_{j=1}^{48} w_{ij} * x_{ij}$$

(1) 对于起始点 1，至少有一条出去的路，约束为

$$\sum_{i=1}^{48} x_{1i} \geq 1$$

(2) 对于其他节点，恰有一条路进入，约束为

$$\sum_{k=1}^{48} x_{ki} = 1 \quad i = 2, 3, \dots, 48$$

(3) 对于无向图 G 不形成圈，约束为

$$u_i - u_j + nx_{ij} \leq n - 1, 1 < i \neq j < n, (n = 48)$$

所以最小支撑树问题的 0-1 整数规划模型为[3]

$$\min Z = \sum_{i=1}^{48} \sum_{j=1}^{48} w_{ij} * x_{ij}$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{48} x_{1i} \geq 1 \\ \sum_{k=1}^{48} x_{ki} = 1 \quad i = 2, 3, \dots, 48 \\ u_i - u_j + nx_{ij} \leq n - 1, 1 < i \neq j < n, (n = 48) \end{cases}$$

2.3 凉州区乡镇空间地理数据的搜集

为方便图论网络规划模型的计算，先对凉州区各个乡镇标号[4]，编号如下表 1。

表 1 凉州区各乡镇编号

| 序号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----|-----|-----|------|-----|------------|-------------|
| 名称 | 东大街 | 西大街 | 东关街 | 西关街 | 地质新村街 | 火车站街 |
| 序号 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 名称 | 荣华街 | 宣武街 | 黄羊河街 | 黄羊 | 武南 | 清源 |
| 序号 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| 名称 | 永昌 | 双城 | 丰乐 | 金羊 | 张义 | 谢河 |
| 序号 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| 名称 | 古城 | 发放 | 西营 | 洪祥 | 永丰 | 羊下坝 |
| 序号 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
| 名称 | 中坝 | 四坝 | 高坝 | 和平 | 松树 | 怀安 |
| 序号 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 名称 | 金沙 | 下双 | 河东 | 清水 | 长城 | 五和 |
| 序号 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 |
| 名称 | 金河 | 吴家井 | 新华 | 金塔 | 大柳 | 康宁 |
| 序号 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 |
| 名称 | 九墩 | 柏树 | 韩佐 | 金山 | 九墩滩生态建设指挥部 | 邓马营湖生态建设指挥部 |

统一以各乡镇政府 WGS-84 坐标系下的坐标位置为基点，在天地图 GIS 平台上沿道路测量得到凉州区各乡镇距离，构成邻接矩阵[5, 6]，如下表 2（限于篇幅只标明了有限的第 1 到 16 列、第 33 到 48 列）。

表 2 凉州区各乡镇距离构成的邻接矩阵表（第 1 到 16 列），单位：km

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|-----|-----|------|-----|------|-----|------|------|------|----|------|----|----|-----|
| 0 | 0.96 | 1.8 | 2.5 | 1.5 | 2.9 | 3.4 | 4.7 | 47 | 39 | 17 | 22 | 16 | 26 | 41 | 2.2 |
| 0.96 | 0 | 2.9 | 1.9 | 0.64 | 2.8 | 4.2 | 3.8 | 43 | 38 | 16.7 | 22 | 14.9 | 26 | 30 | 2.6 |
| 1.8 | 2.9 | 0 | 3.5 | 3.2 | 3.9 | 1.8 | 6.1 | 41 | 36 | 15 | 20 | 18 | 28 | 32 | 3.8 |
| 2.5 | 1.9 | 3.5 | 0 | 1.8 | 1.9 | 5.1 | 2.6 | 44 | 39 | 18 | 23 | 16 | 27 | 28 | 4.2 |
| 1.5 | 0.64 | 3.2 | 1.8 | 0 | 2.6 | 4.8 | 3.3 | 44 | 39 | 18 | 23 | 15 | 26 | 29 | 2.7 |
| 2.9 | 2.8 | 3.9 | 1.9 | 2.6 | 0 | 4.1 | 4.5 | 42 | 37 | 16 | 22 | 18 | 28 | 30 | 5 |
| 3.4 | 4.2 | 1.8 | 5.1 | 4.8 | 4.1 | 0 | 7.8 | 39 | 34 | 12.7 | 18 | 19 | 30 | 34 | 4.3 |
| 4.7 | 3.8 | 6.1 | 2.6 | 3.3 | 4.5 | 7.8 | 0 | 46 | 41 | 20 | 26 | 16 | 27 | 27 | 5 |
| 47 | 43 | 41 | 44 | 44 | 42 | 39 | 46 | 0 | 11.2 | 29 | 26 | 58 | 68 | 72 | 43 |
| 39 | 38 | 36 | 39 | 39 | 37 | 34 | 41 | 11.2 | 0 | 23 | 26 | 53 | 64 | 66 | 38 |
| 17 | 16.7 | 15 | 18 | 18 | 16 | 12.7 | 20 | 29 | 23 | 0 | 17 | 32 | 43 | 45 | 17 |
| 22 | 22 | 20 | 23 | 23 | 22 | 18 | 26 | 26 | 26 | 17 | 0 | 37 | 47 | 64 | 22 |
| 16 | 14.9 | 18 | 16 | 15 | 18 | 19 | 16 | 58 | 53 | 32 | 37 | 0 | 11 | 29 | 15 |
| 26 | 26 | 28 | 27 | 26 | 28 | 30 | 27 | 68 | 64 | 43 | 47 | 11 | 0 | 25 | 27 |
| 41 | 30 | 32 | 28 | 29 | 30 | 34 | 27 | 72 | 66 | 45 | 64 | 29 | 25 | 0 | 36 |
| 2.2 | 2.6 | 3.8 | 4.2 | 2.7 | 5 | 4.3 | 5 | 43 | 38 | 17 | 22 | 15 | 27 | 36 | 0 |

... 第 33 到 48 列

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|----|----|----|-----|----|-----|-----|----|----|-----|----|----|----|-----|----|
| 0 | 21 | 26 | 52 | 8.9 | 33 | 27 | 31 | 31 | 61 | 52 | 30 | 13 | 66 | 52 | 72 |
| 21 | 0 | 18 | 32 | 15 | 29 | 21 | 22 | 13 | 50 | 34 | 17 | 20 | 56 | 34 | 60 |
| 26 | 18 | 0 | 50 | 18 | 16 | 39 | 40 | 31 | 58 | 42 | 35 | 38 | 80 | 46 | 50 |
| 52 | 32 | 50 | 0 | 43 | 61 | 33 | 30 | 27 | 22 | 37 | 20 | 42 | 24 | 37 | 74 |
| 8.9 | 15 | 18 | 43 | 0 | 21 | 30 | 30 | 25 | 54 | 46 | 30 | 18 | 67 | 46 | 65 |
| 33 | 29 | 16 | 61 | 21 | 0 | 30 | 30 | 25 | 54 | 46 | 30 | 18 | 67 | 46 | 65 |
| 27 | 21 | 39 | 33 | 30 | 30 | 0 | 4.9 | 30 | 34 | 41 | 14 | 14 | 46 | 41 | 83 |
| 31 | 22 | 40 | 30 | 30 | 30 | 4.9 | 0 | 30 | 31 | 41 | 11 | 18 | 43 | 41 | 84 |
| 31 | 13 | 31 | 27 | 25 | 25 | 30 | 30 | 0 | 31 | 41 | 11 | 18 | 42 | 41 | 73 |
| 61 | 50 | 58 | 22 | 54 | 54 | 34 | 31 | 31 | 0 | 56 | 26 | 47 | 12 | 57 | 94 |
| 52 | 34 | 42 | 37 | 46 | 46 | 41 | 41 | 41 | 56 | 0 | 39 | 53 | 60 | 4.6 | 63 |
| 30 | 17 | 35 | 20 | 30 | 30 | 14 | 11 | 11 | 26 | 39 | 0 | 24 | 38 | 39 | 83 |
| 13 | 20 | 38 | 42 | 18 | 18 | 14 | 18 | 18 | 47 | 53 | 24 | 0 | 57 | 50 | 74 |
| 66 | 56 | 80 | 24 | 67 | 67 | 46 | 43 | 42 | 12 | 60 | 38 | 57 | 0 | 63 | 99 |
| 52 | 34 | 46 | 37 | 46 | 46 | 41 | 41 | 41 | 57 | 4.6 | 39 | 50 | 63 | 0 | 67 |
| 72 | 60 | 50 | 74 | 65 | 65 | 83 | 84 | 73 | 94 | 63 | 83 | 74 | 99 | 67 | 0 |

3 模型分析与计算

求解最小支撑树的算法有很多种，如 Kruskal 算法 [3, 4]、Prim 算法 [5]，考虑到上述模型为 0-1 整数规划

模型，应用 Kruskal 算法，也称加边法或避圈法 [6, 7]，在 LINGO 环境下编程计算得出无向图 G 的最小支撑树 [8, 9]，计算结果如下图 2。

结果具有很重要的参考价值，不影响总体规划布局结果。

参考文献

- [1] 朱兴珊, 陈蕊, 潘继平, 樊慧, 朱博骐, 段天宇. 天然气在清洁能源体系中的关键支撑作用及发展建议 [J]. 国际石油经济, 2021, 29(2): 23-29, 105.
- [2] 王秋蕊. 新形势下中国天然气行业发展与改革思考 [J]. 中国市场, 2022(17): 64-66.
- [3] 韩中庚. 数学建模方法及应用 [M]. (第三版). 高等教育出版社, 2017年12月.
- [4] 张淑萍. 最小生成树算法及其在天然气管道网中的应用研究 [J]. 电脑知识, 2020, 16(17): 214-216.
- [5] 唐玲. 运筹学 [M]. 北京大学出版社, 2018年9月.
- [6] 徐家旺, 刘彬. 实用管理运筹学 [M]. (第二版). 清华大学出版社, 2014年8月.
- [7] 涂鹏等. 基于权矩阵的通风网络最小生成树算法研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(9): 2285-2292.
- [8] 司守奎等. LINGO 软件及应用 [M]. 国防工业出版社, 2017年5月.
- [9] 司守奎等. 数学建模算法与应用 [M]. 国防工业出版社, 2024年4月.
- [10] 吕代军, 姜志强. GIS 技术在市政地下管网施工管理中的应用 [J]. 城市建设理论研究 (电子版). <https://doi.org/10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202410064>
- [11] 于雷, 曲岩. 城市地下燃气管线测量实践与研究 [J]. 2021 第五届燃气安全交流研讨会论文集 (上册). 2023-03-16: 273-277.
- [12] On the shortest path problem of uncertain random digraphs. Li, Hao, Zhang, Kun Source: Soft Computing, v 26, n 18, p 9069-9081, September 2022.
- [13] 凉州区人民政府办公室. 凉州区人民政府办公室关于印发《凉州区石油天然气管道生产安全事故应急预案》的通知 [EB]. http://www.gsliangzhou.gov.cn/art/2023/9/13/art_2887_1156637.html, 2023年9月13.
- [14] Innovative method to solve the minimum spanning tree problem: The Dhoub-Matrix-MSTP (DM-MSTP) [J]. Dhoubi Souhail; Source: Results in Control and Optimization, v 14, p 100359, 2024.
- [15] 文应等. 街巷地下管网更新改造施工技术研究 [J]. 建筑机械. 2004, 08(582): 249-253.
- [16] 陈斌等. 城镇燃气管网智能巡护技术的安全实践及研究 [J]. 2022 年第五届燃气安全交流研讨会论文集 (上册). 2023-03-16.

作者简介

刘坤

2002年生, 男(汉族), 信息与计算专业, 本科学士, 主要研究方向运筹规划、图论与GIS应用。

E-mail: 3170828798@qq.com

冯德鸿

1969年生, 男(汉族), 副教授, 湖北宜昌人, 主要从事遥感影像分析、GIS应用开发、生产计划与调度系统建模与优化计算、仿真等研究。

E-mail: 476943572@qq.com, ctguf@sina.com